铝镁百科

目录

1. 铝 9
1.1 基础知识 9
1.1.1 铝是什么 9
1.1.2 铝的身世 11
1.1.3 铝的性质 12
1.1.4 铝的腐蚀形态 14
1.1.5 话说铝的物理性能 17
1.1.6 铝土矿的品质 20
1.1.7 中国铝土矿资源及分布 23
1.1.8 世界铝土矿资源与分布 25
1.1.9 氧化铝的提取 27
1.1.10 氧化铝的性能 30
1.1.11 拜耳法：提取氧化铝的主要工艺 33
1.1.12 生产铝用炭素的原料 36
1.1.13 铝用氟化盐 39
1.1.14 铝用阴极材料 42
1.1.15 聊聊铝用炭素材料 45
1.1.16 铝用炭素材料的性能 47
1.1.17 高石墨质阴极炭块 50
1.1.18 电解铝生产概况 53
1.1.19 预焙阳极生产工艺 56
1.1.20 铝电解槽的前世今生 59
1.1.21 说说新法炼铝 62
1.1.22 话说化学品氧化铝 64
1.1.23 说说化学品氧化铝 67
1.1.24 化学品氧化铝的用途 71
1.1.25 化学品氧化铝的分类与性质 76
1.1.26 精铝与高纯铝 79
1.1.27 变形铝合金四位数字牌号的来龙去脉 83
1.1.28 硬铝的诞生和分类 86
1.1.29 话说硬铝的时效结构变化 89
1.1.30 耐热硬铝方方面面（一） 92
1.1.31 耐热硬铝方方面面（二） 95
1.1.32 铝绿色金属当之无愧 99
1.1.33 规范技术术语 提高行业素质 106
1.1.34 铝——推动世界美好前行的力量 114
1.2 合金材料 122
1.2.1 铝合金是怎样分类的 122
1.2.2 缕述铝合金家族谱系 125
1.2.3 铝合金发展的里程碑（一） 128
1.2.4 铝合金发展的里程碑（二） 131

1.2.5 数说全球铝合金板材预拉伸机 134
1.2.6 铝合金工模具材料后起之秀 147
1.2.7 对我国铝合金锻件发展的思考 153
1.2.8 代铜与节铜的电工铝合金 159
1.2.9 宝刀不老的常规电工铝合金 163
1.2.10 铝合金的合金化元素（一） 167
1.2.11 铝合金的合金化元素（二） 170
1.2.12 铝合金的合金化元素（三） 174
1.2.13 铝合金的合金化元素（四） 177
1.2.14 铝合金的合金化元素（五） 181
1.2.15 铝合金的合金化元素（六） 184
1.2.16 铝合金的合金化元素（七） 187
1.2.17 铝合金的合金化元素（八） 190
1.2.18 铝-锂合金的基本特性 193
1.2.19 也说铝-锂合金特性与用途 197
1.2.20 铝-锂合金及铝-铜-锂合金 199
1.2.21 铝－锂合金工业是具有战略意义的待补短板 203
1.2.22 谈谈镁铝合金的性能和应用 214
1.2.23 铝-铜-锰系耐热硬铝 219
1.2.24 说说 1xxx 系合金的那些事 222
1.2.25 细述 1xxx 系合金 226
1.2.26 2xxx 系的铝-锂合金 229
1.2.27 2XXX 系铆钉铝合金 2A01（一） 232
1.2.28 2xxx 系铆钉铝合金（二） 235
1.2.29 2090 及 2091 铝-锂合金(一) 237
1.2.30 2090 及 2091 铝-锂合金(二) 239
1.2.31 说说硬铝的时效现象 241
1.2.32 硬铝的合金化和相组成 244
1.2.33 硬铝的时效强化 247
1.2.34 硬铝是怎样变硬的 251
1.2.35 建筑铝型材产业稳步发展跻身强国行列 254
1.3 技术 276
1.3.1 联合法处理中等品位矿石的工艺 276
1.3.2 浅析中国氧化铝工业技术发展方向 280
1.3.3 铝的力学与工艺性能 283
1.3.4 氧化铝是怎样跑到电解槽的 286
1.3.5 烧结法氧化铝生产 289
1.3.6 艾伯纳铝带气垫式热处理炉 292
1.3.7 电解槽的启动 294
1.3.8 电解槽的操作 297
1.3.9 电解槽的焙烧 300
1.3.10 电解槽的正常生产管理（一） 303
1.3.11 电解槽的正常生产管理（二） 306
1.3.12 简说正常生产电解槽的技术参数 310

1.3.13 电流效率——铝电解的生命工艺参数（一） 314
1.3.14 电流效率——铝电解的生命工艺参数（二） 317
1.3.15 重熔用铝锭与细晶用铝锭 320
1.3.16 石油焦煅烧 324
1.3.17 炭素阳极组装 325
1.3.18 混捏和成形 327
1.3.19 剥落腐蚀与缝隙腐蚀 331
1.3.20 锻造硬铝性能 335
1.3.21 铆钉虽小作用大 一些短板亟待补（上） 339
1.3.22 铆钉虽小作用大 一些短板亟待补（下） 346
1.3.23 高强度硬铝的发展 355
1.3.24 说说接触腐蚀 358
1.3.25 话说霍尔-埃鲁铝电解法 362
1.3.26 细说铝材状态（一） 365
1.3.27 细说铝材状态（二） 368
1.3.28 细说铝材状态（三） 370
1.3.29 细说铝材状态（四） 372
1.3.30 细说铝材状态(五) 375
1.3.31 细说铝材状态（六） 377
1.3.32 精铝与高纯铝应用天地广阔 379
1.3.33 铜辊套铸轧机产铝带坯向高品质迈进 385
1.3.34 铝带冷轧产能居世界首位 389
1.3.35 铝挤压业面面观：技术自主是关键 409
1.3.36 铝合金的应力腐蚀开裂（一） 417
1.3.37 铝合金的应力腐蚀开裂（二） 421
1.3.38 研发第二代抑爆铝箔 建设专业生产项目（上） 426
1.3.39 研发第二代抑爆铝箔 建设专业生产项目（下） 433
1.3.40 蓄热燃烧技术废铝重熔高效绿色工艺 440
1.3.41 国家领导力推核电 高精铝材应用现新亮点 444
1.3.42 用发展眼光看待铝加工富余产能 456
1.4 交通 464
1.4.1 中国首辆全铝汽车亮相啦！ 464
1.4.2 全铝乘用小汽车族谱 467
1.4.3 ABS 生产工艺的昨天、今天和明天 476
1.4.4 ABS 项目建设风起云涌 全铝汽车时代真的来啦 488
1.4.5 产学研结合，开发性能更好的 ABS 铝合金 500
1.4.6 第二代 ABS 铝合金及生产工艺来敲门啦 512
1.4.7 全球 ABS 项目一览（中国） 521
1.4.8 全球 ABS 项目一览（国外） 531
1.4.9 铝商用车——推广铝应用的“牛鼻子” 542
1.4.10 补特色汽车铝合金与冲挤件短板（上） 552
1.4.11 补特色汽车铝合金与冲挤件短板（下） 560
1.4.12 电动汽车用铝潜力巨大 564
1.4.13 提高厢式与专用运输车铝化率 568

1.4.14 加大科技研发 发展汽车铝板 578
1.4.15 全球汽车车身板项目建设浪潮迭起 583
1.4.16 谁主汽车铝材沉浮组建中心迫在眉睫 597
1.4.17 进一步拓宽汽车用铝 力争 2020 年用量翻两番 605
1.4.18 铝加工业面临新的机遇与挑战全球掀起汽车铝板扩建浪潮 618
1.4.19 飞驰之“铝” 629
1.4.20 城际高铁铝材内需新亮点 639
1.4.21 轨道交通用铝步入又一黄金需求期（上） 643
1.4.22 轨道交通用铝步入又一黄金需求期（下） 650
1.4.23 客运轨道车辆车体铝型材的深加工（一） 662
1.4.24 客运轨道车辆车体铝型材的深加工（二） 669
1.4.25 客运轨道车辆车体铝型材的深加工（三） 677
1.4.26 客运轨道车辆车体铝型材的深加工（四） 684
1.4.27 中低速磁悬浮列车开启铝材应用新亮点 690
1.4.28 总理“推销”高铁：车辆铝材前景灿烂 695
1.4.29 管道高铁 2021 年可投入营运 铝材将成应用新亮点 705
1.4.30 高铁与动车全面降速交通用铝材需求降温大挤压机建设悠着点 708
1.5 电力 713
1.5.1 话说电工铝线 713
1.5.2 铝：性价比最高的输配电材料 718
1.5.3 铝线：综合性最佳的导电材料 722
1.5.4 兴旺发达的电工铝家族（一） 724
1.5.5 兴旺发达的电工铝家族（二） 729
1.5.6 开发新型架空铝电线 降低电网损耗 733
1.6 航空航天 741
1.6.1 铝助“莱特飞行器一号”上天 741
1.6.2 铝：推动航天高新技术向前冲 744
1.6.3 中日喷气民机制造隔海唱戏 751
1.6.4 大飞机项目全面推进 铝厚板项目建设风起云涌 757
1.6.5 大飞机批量制造将促进民机铝材需求快速增长（一） 766
1.6.6 大飞机批量制造将促进民机铝材需求快速增长（二） 771
1.6.7 大飞机批量制造将促进民机铝材需求快速增长（三） 776
1.6.8 中国航空铝材 盛宴即将开筵 786
1.6.9 铝-锂合金支撑航空航天发展 799
1.6.10 铝制火星探测器 808
1.6.11 铝—锂合金打造卫星资源舱 810
1.6.12 ARJ 支线客机用了哪些铝合金 810
1.6.13 功勋千秋的 2xxx 系航空铝合金 817
1.6.14 航空航天铝合金发展的里程碑（一） 820
1.6.15 航空航天铝合金发展的里程碑（二） 825
1.6.16 航空航天铝合金发展的里程碑(三) 830
1.7 舰船及海洋 833
1.7.1 舰船铝合金特性 833

1.7.2 舰船用铝合金船配件产品一览 836
1.7.3 海洋钻探平台与钻探管 838
1.7.4 舰船与海洋工程铝合金 843
1.7.5 话说海洋铸造铝合金 ZL104 848
1.7.6 舰船铸造铝合金 ZL101 852
1.7.7 舰船用量最多的铸造铝合金 ZL101A 859
1.7.8 舰船铝合金列传（一） 863
1.7.9 舰船铝合金列传（二） 867
1.7.10 聊聊海洋气氛对铝的腐蚀 869
1.7.11 铝合金舰船与海洋设施腐蚀（一） 872
1.7.12 铝合金舰船与海洋设施腐蚀（二） 875
1.7.13 铝合金舰船与海洋设施腐蚀控制 878
1.7.14 最耐海水腐蚀的铸造铝合金 ZL303 883
1.7.15 说说铝合金舰船腐蚀 886
1.7.16 潜艇与深潜器 889
1.7.17 话说铝在舰船中应用 890
1.7.18 聊聊中国造的铝合金舰船 896
1.7.19 铝合金在日本民用船舶上的应用 900
1.7.20 铝驱驶水面艇飞起来 902
1.7.21 铝在大型水面舰中的应用 910
1.7.22 再说中国造的铝合金舰船 915
1.7.23 日本的铝渔船与化气船 921
1.7.24 铝材打造的水上漂浮农场 926
1.8 包装及再生 931
1.8.1 包装铝箔从弱到强成就辉煌 931
1.8.2 再生铝产业面面观 938
1.8.3 中国铝加工亟待补上废罐优化循环短板（上） 952
1.8.4 中国铝加工亟待补上废罐优化循环短板（中） 962
1.8.5 中国铝加工亟待补上废罐优化循环短板（下） 968
1.8.6 中国成为罐体料净出口国 980
1.8.7 中国罐料：东西双雄初显 984
1.8.8 世界最大废旧铝罐回收厂在德投产 991
1.8.9 手机机身铝合金新说（上） 993
1.8.10 手机机身铝合金新说（下） 1001
1.8.11 中国铝焊条（丝）工业亟待加强 1010
1.9 历史回顾 1021
1.9.1 回首 2010 我国铝加工业成就斐然（一） 1021
1.9.2 回首 2010 我国铝加工业成就斐然(二) 1027
1.9.3 回首 2010 我国铝加工业成就斐然(三) 1033
1.9.4 回首 2010 我国铝加工业成就斐然(四) 1038
1.9.5 2011 年铝加工在世界经济严寒中继续挺进之一 1048
1.9.6 2011 年铝加工在世界经济严寒中继续挺进之二 1053
1.9.7 2011 年铝加工在世界经济严寒中继续挺进之三 1061
1.9.8 2011 年铝加工在世界经济严寒中继续挺进之四 1073

1.9.9 2011 年铝加工在世界经济严寒中继续挺进之五 1079
1.9.10 2011 年铝加工在世界经济严寒中继续挺进之六 1087
1.9.11 电解铝“西进”祸福难料 1095
1.9.12 合作与摩擦并存 铝业蹒跚前行 1101
1.9.13 2013 年 7 月至 2014 年 6 月世界再生铝工业风云（上） 1110
1.9.14 2013 年 7 月至 2014 年 6 月世界再生铝工业风云(下) 1117
1.9.15 2014 中国铝工业风云回眸 1125
1.9.16 铝加工业风云回眸之政策 1136
1.9.17 2013 年铝加工业风云回眸之装备 1139
1.9.18 铝加工业风云回眸之平轧铝 1157
1.9.19 铝加工业风云回眸 1166
1.9.20 2015，中国铝工业新常态的头一年 1180
1.9.21 说古道今聊铝史 1197
1.9.22 中国铝工业发展历程 1199
1.9.23 中国氧化铝工业发展进程 1203
1.9.24 中国氧化铝工业技术进展 1206
1.9.25 中国铝电解业现状 1209
1.9.26 中国圆了原铝产业大国梦 1212
1.9.27 铸锭热轧：圆了产业大国梦 1216
1.9.28 欧洲铝工业回眸与借鉴 1239
1.9.29 中国成为铝锻压初级强国 1250
1.9.30 中国电解铝工业面临的挑战(一) 1259
1.9.31 中国电解铝工业面临的挑战（二） 1261
1.9.32 向世界电解铝工业强国迈进 1264
1.10 铝事 1269
1.10.1 铝工业准备好应对工业 4.0 么 1269
1.10.2 铝的产业化过程：历史的“巧合” 1274
1.10.3 说说铝摄入那些事 1276
1.10.4 昆山铝粉大爆炸本不应发生 1287
1.10.5 铝：为光伏发电提供支架 1292
1.10.6 中国向印刷铝基板强国迈进 1295
1.10.7 铝工业是可持续发展的储能节能产业 1301
1.11 企业 1305
1.11.1 布局“加减乘除” 中铝实现逆势突围 1305
1.11.2 这是一个怎样的魏桥创业 1317
1.11.3 另眼看魏桥：不一样的“铝市”春秋 1327
1.11.4 走进忠旺集团的铝加工王国 1342
1.11.5 访上海天重集团总经理刘礼林 1365
1.11.6 登榜“中国质量奖提名奖”的坚美故事 1376
1.11.7 山东裕航：做超大高端铝型材领跑者 1405
1.11.8 访索通发展股份有限公司董事长郎光辉 1416
1.11.9 记吉林利源精制公司的精深加工之路 1424
1.11.10 晟通铝箔公司：世界双零箔黑马 1431
1.11.11 日本联合铝业的昨天和今天 1437

1.11.12 神户钢铁集团的铝铜业务(一)....1444
1.11.13 神户钢铁集团的铝铜业务(二)....1448
1.11.14 神户钢铁集团的铝铜业务（三）....1452
1.11.15 神户钢铁集团的铝铜业务（四）....1455
1.11.16 神户钢铁集团的铝铜业务(五)....1457
1.11.17 神户钢铁集团的铝铜业务（六）....1461
2. 镁....1465
2.1 1、说说镁的身世....1465
2.2 2、镁在哪儿....1468
2.3 3、镁的物理化学性能....1471
2.4 4、说说镁的晶体结构....1473
2.5 5、简说原镁提取工艺路线图....1475
2.6 6、无水氯化镁的制取....1478
2.7 7、说说镁电解那些事（一）....1481
2.8 8、说说镁电解那些事（二）....1484
2.9 9、中国的镁电解工业....1487
2.10 10、中国的菱镁矿资源....1490
2.11 12、皮江外热炼镁法是主流....1492
2.12 14、皮江法的技术经济指标....1495
2.13 15、聊聊镁的合金元素与杂质（1）....1498
2.14 16、聊聊镁的合金元素与杂质（2）....1501
2.15 17、话说镁合金的分类....1504
2.16 18、您认识镁合金吗？....1507
2.17 19、用途最广的镁-铝系合金....1509
2.18 20、有时效强化能力的镁-锌系合金....1512
2.19 21、极为丰富的白云石矿资源....1515
2.20 21、抗腐蚀的镁-锰系合金....1517
2.21 22、组织细密的镁-锌-锆系合金....1520
2.22 23、博尔扎诺法与马内塞姆法....1522
2.23 23、最轻的结构合金：镁-锂合金....1525
2.24 24、奔向太空的镁-钍合金....1528
2.25 25、神奇的稀土镁合金....1530
2.26 26、革命性的生物医用镁合金....1533
2.27 27、优秀的航天器镁合金 G04....1536
2.28 28、ＪＤＭ系列高性能镁合金....1539
2.29 29、重庆大学等研发的镁合金....1541
2.30 30、特色鲜明的镁合金....1544
2.31 31、镁合金是怎样变强的....1546
2.32 32、话说镁及镁合金的生命周期....1550
2.33 33、熔炼镁合金用的原材料....1553
2.34 34、镁合金熔炼前要做哪些准备工作....1556
2.35 35、镁合金怎样炼出来的....1558
2.36 36、话说镁熔体净化处理....1561
2.37 37、镁合金的晶粒细化与变质处理....1564

2.38 38、变形镁合金的熔炼 1567
2.39 39、怎样制备中间合金和熔盐 1570
2.40 40、镁合金熔炼炉及废料复化 1572
2.41 41、变形镁合金的铸造方法 1576
2.42 42、铸造镁合金的净化处理 1578
2.43 43、说说变形镁合金铸造工艺 1580
2.44 44、镁合金铸造结晶器与电磁搅拌 1583
2.45 45、镁合金浇注时的熔体保护 1585
2.46 46、话说变形镁合金铸锭裂纹 1587
2.47 47、变形镁合金铸锭缺陷及预防 1591
2.48 48、镁合金锭坯的机械加工 1594
2.49 49、镁的塑性为什么不如铝的？ 1596
2.50 50、话说镁合金的塑性加工工艺 1599
2.51 51、镁合金板带材生产（一） 1602
2.52 52、镁合金板带材生产（二） 1604
2.53 53、镁合金板带材生产（三） 1606
2.54 54、镁合金板带材生产（四） 1610
2.55 55、镁合金板带材生产（五） 1612
2.56 56、说说镁合金的二次成形 1615
2.57 57、镁材挤压述说 1617
2.58 58、镁合金挤压工艺 1620
2.59 59、镁合金的锻造 1623
2.60 60、镁合金的锻造变形度与精整 1626
2.61 61、镁合金的等温成形 1628
2.62 62、聊聊镁合金的超塑性成形 1631
2.63 63、细晶超塑性镁合金材料的制备 1634
2.64 64、简说镁合金的挤压（一） 1637
2.65 65、简说镁合金的挤压（二） 1640
2.66 66、简说镁合金的挤压（三） 1641
3. 中国有色金属报社简介 1645
3.1 中国有色金属报社 1645

II. 办报宗旨及版面设置 1645

III. 新媒体建设 1647

IV. 报社的机构设置及人员情况 1647

V. 现任领导班子 1648

VI. 报社发展规划 1648

VII. 地址、电话 1648

1. 铝

1.1 基础知识

1.1.1 铝是什么

铝是一种金属化学元素，符号 AL，原子序数 13，原子量 26.98415（在计算时可用 27），在元素周期表中属IIIA 族。铝的英文名称为 Aluminium，但在北美洲用 Aluminum，为什么会这样呢？还真有一个小故事。据传美国铝业公司（Aloca）在上世纪初举行一次庆祝活动时，在活动名称横幅中将“Aluminium”误写为“Aluminum”，由于它是美国首家铝业公司，也是当时全世界最大的铝业公司，所以自此以后就将错就错，在美国就把铝称为“Aluminum”，但在世界其他国家和地区（不含加拿大和墨西哥）还是沿用“Aluminium”。

铝是地球和月球表面最丰富的金属元素，多以化合物的形式存在，在自然界中从未发现过游离状态的铝，当然也可能在某些地点存在小块游离铝的可能性。铝占地球固体部分的 7.3%~8.1%，即占地壳质量的 7.7%，而地壳占地球总质量的 0.8%，地球总质量为 5.976×1021 吨，由此可见，地壳中存在着 3.68×1018 吨铝，这可是个特大的天文数字。2012

年，全世界生产的铝为 45000 千吨，照此推算，地壳中的铝可开采 82×109 年，即够 82 亿年之用。不过不能这样简单计算，这只是想说明铝是人类可利用的最丰富的金属元素，足够人类使用成百上千年，即使这样也要珍惜使用，因为可开采的资源总是有限的。

海水的平均铝含量为 0.5PPM，任何植物都含有铝，特别是在湿地和酸性土壤生长的植物。几乎所有的岩石特别是火成岩均含有硅酸铝矿物形成的铝。铝存在于 250 种左右的矿物组成中，其中最主要的矿物组成为硅酸盐化合物，其风化产物为粘土，它是一种铁铝氧石。

铁铝氧石主要矿物中可提取的氧化铝含量分为三水铁铝氧石和一水铁铝氧石。通常，中国及欧洲的铁铝氧石是一水型的，从地质上讲，它的形成年代比南半球国家的早的多，在哪里一般是以三水型存在的。然而，这不是一个绝对的规律，在中国与欧洲除了一水软铝石和一水硬铝石之外，还含有三水铝矿，而加勒比地区的铁铝氧石除了三水型矿外还含有少量至中等量的一水软铝矿，所以用于生产铝的典型铝土矿——铁铝氧石含 40%~60%氧化铝（Al2O3）、1%~15%二氧化硅（SiO2）、7%~30%氧化铁（Fe2O3）、1%~5%二氧化钛（TiO2）、12%~13%结合水（H2O）。此外，含氧化铝多的矿石还有霞石，含 32.3%~36%氧化铝、38%~42%二氧化硅、19.6%~21%R2O；长

石，含 18.4%~19.3%氧化铝、65.5%~69.3%二氧化硅、11%~11.2%R2O；高岭石，含 39.5%氧化铝、46.4%二氧化硅等等。

中国内蒙古一些发电厂的粉煤灰含 14.49%~40.12%氧化铝、34.3%~55.8%二氧化硅、51.1%~4.1%R2O，也是提取氧化铝的原料。2010 年 8 月 30 日，中国大唐国际内蒙古再生资源开发有限公司一条生产能力 200kt/a 从粉煤灰提取氧化铝的项目正式投产，这是全世界首条这类生产线，中国拥有全部自主知识产权。两年的生产实践证明，这条生产线的技术是可行的，设备也是过硬的，但产品的生产成本还较高，要生产有市场竞争力的氧化铝还需时日。

中国是一个铝土矿储量并不富裕、品质也不尽如人意的国家，宜尽量到国外去开采铝土矿与提取氧化铝，再把氧化铝运回来。

1.1.2 铝的身世

铝是地球上最丰富的金属元素，但在自然界未发现过较多的游离状态的铝，有人曾发现过小块的，可能是在极端地质条件下形成的；最近（2011 年）澳大利亚、美国及日本的科学家声称发现一种超密铝,其密度比常规的铝大 40%左右，可在模拟地球中心的极端高温高压条件下形成。铝占地球表

面固地部分的 8%以上。海水平均仅含 0.5ppm 铝。此元素广泛地分布于植物中，在那里可能以相当高的浓度存在，特别是在湿地和酸性土壤植物中。

自然界含铝矿物约有 260 种，其主要铝矿物与含铝矿物的含铝量如下：

1746 年德国科学家波特(J.h.pott)用明矾制得氧化铝，1807 年英国化学家戴维（H.davy）试图电解熔融氧化铝制备金属铝未获成功,第二年将预想的这个金属命名为 Alumium，后改为 Aluminium。1824 年丹表科学家奥斯特(H.c.oersted)用钾汞齐还原无水氯化铝制得含杂质较多的几毫克铝。1827 年德国科学家沃勒（F.wohler）离析得较纯的铝，并描述了它的很多性质。然而这个金属一直不过是实验室中的一种古董，到 1854 年德维尔（S.C.Deville）用钠作还原剂，还原 NaAlcl4 才制得可以用克计的较纯的铝，当时的价格比黄金还贵，拿破伦孙子的一只拨浪鼓与奖给门捷列夫的奖杯就是用铝制的。

1.1.3 铝的性质

铝是一种金属化学元素，符号 Al，原子序数 13，原子量 26.98154，通常计算时可认为是 27，在周期表上属ⅡA 族。铝总含有或多或少的其他元素——杂质，通常可按其杂质含量或铝的含量多少将铝分为不同的等级，不过这种等级划分

并不是全世界统一的标准。

铝的纯度也可用“N”与数字组合法表示，如 99.50%Al 可表示为“2N5”、99.960%Al 可表达为“4N6”，现在可以提取“7N 或 8N 的超极纯铝。纯铝是软的，强度不大，硬度不高，但可与其他元素形成合金来提高强度，并赋予它一些有实用价值的性能，如物理、化学、力学性能等，2011 年在美国铝业协会公司注册的变形铝合金（压力加工的）已达 670 个，加上铸造铝合金与一些公司推出的非标准合金，目前在用的铝合金估计有 1800 种左右。

顺便在这里讲一下铝的两种外文写法：Aluminium 与 Aluminum，后者少一个字母“i”，前者是除美、日等国以外国际上通用的金属元素拉丁文名称，而后者是北美与日本的名称。上世纪初美国铝业公司（Alcoa）在一次举行的公司成立周年庆祝会时不经心地将横幅中的“Aluminium”写成“Aluminum”，自此以后将错就错，将铝写成“Aluminum”，那时北美洲只有美国铝业公司一家企业生产铝。后来北美洲的加拿大在与墨西哥也照此办理。日本原来将铝的名称写成“Aluminium”，第二次大战以后日本与美国逐渐成为“铁哥们”，所以现在也改用“Aluminum”，致于何时改的不详。实际上 Aluminium 一词是从古罗马语 Alumen（明矾）衍生而而来的。

铝已成为仅次于钢铁的国民经济的第二大金属材料，

2011 年世界原铝产量 43000kt，其中中国原铝产量 19650kt，占世界总产量的 45.7%；再生铝的总产量约 16000kt，所以全钜界铝的总消费量约 59000kt。

1.1.4 铝的腐蚀形态

铝及其合金除了在少数介质中呈现全面腐蚀，如碱溶液和磷酸溶液外，一般都发生局部腐蚀。常见的腐蚀形态：点腐蚀、电偶腐蚀、晶间腐蚀、缝隙腐蚀、丝状腐蚀、层状腐蚀、应力腐蚀形裂与腐蚀疲劳等，这些腐蚀形态在船舶舰艇与海洋设施中都可能发生。

铝合金的应力腐蚀形裂与腐蚀疲劳是在应力（拉应力或交变应力）与腐蚀联合作用下发生的破坏，比较多见于高强度铝合金。由于破坏发生比较突然，大多发生在受力的结构中，具有极大的瞬间破坏危险，引起学术界和工程界的广泛兴趣并进行了比较细致深入的研究，形成了从实验研究到机里探讨等大量著作。

点腐蚀

点蚀又称孔蚀，是在金属中产生针状、点状、小孔状的一种极为局部的腐蚀形态，它是阳极反应的一种独特形式。点蚀最早是由局部电池引起的，随着时间延长，点蚀速度逐渐放慢。工业纯铝即 1XXX 系合金对点蚀有很高的抵抗能力，

含有少量 Cu 的 3003 合金也有良好的抗蚀性。工业纯铝的点蚀速度随其纯度的提高而下降，特别是当其 Fe、Cu 含量低时；Al-Mg 系的 5XXX 合金也有良好的抗点蚀性能，它们的舰船与海洋设施中用得较多，故可称为海洋变形铝合金。Al-Mg-Si 系 6XXX 合金既有点蚀倾向又有晶间腐蚀倾向。硬铝和超硬铝薄板应包覆铝与 Al-Zn-Mg 合金，以防点蚀。

铝及铝合金的点蚀程度随介质不同而异，田园大气比工业大气和海洋大气中的轻，水中产生的点蚀比大气中的严重，材料表面状态不同点蚀程度也不同，有包铝层的合金的点蚀比未包铝合金的轻得多。

在大气、淡水、海水以及中性水溶液中都会发生点腐蚀，严重的点蚀可导致穿孔。幸运的是腐蚀孔达到一定深度会停止发展。铝的抗蚀性比钢及镀锌钢的高得多，钢会一直腐蚀下去，而镀锌钢在镀锌层破坏后会加速剧烈地腐蚀。点蚀程度还与介质及合金有关。实验证明，铝合金点腐蚀介质中还必须存在破坏局部钝态的阴离子，如氯离子、氟离子等。从铝合金系来看，高纯铝不易发生点腐蚀，含铜的铝合金对点腐蚀最敏感、而 3XXX 系及 5XXX 系合金有相当强的耐点蚀性能。

晶间腐蚀

晶间腐蚀是沿着金属晶粒边界发生的选择性腐蚀。晶界

是金属晶粒间的错接区，是高能区，有更强的化学活性，因而晶界大都比晶粒腐蚀得快，若晶界明显地活泼得多，就会发生晶间腐蚀。

2XXX 系合金如 2024 在人工时效时，晶间有 CuAl2 沉淀，在晶粒边界形成贫 Cu 区域，该区电位最负，于是腐蚀沿着晶界贫 Cu 区进行，形成晶间腐蚀。7XXX 系合金固溶处理后为均匀的固溶体，在经过具有晶间腐蚀倾向的人工时效处理后，晶间会沉淀电位为-0.86V 的 MgZn2，在晶粒边界形成电位为-0.57V 的合金元素（Mg 和 Zn）区，而晶粒本身为固溶体，其电位为-0.68V。显然，由于 MgZn2 的电位最负，于是腐蚀沿着晶间进行。

由于晶间腐蚀发生在金属内部，往往不易发现而会突然引起结构破坏，甚至造成重大事故。1981 年 8 月，中国台湾省有一架波音 737 货运飞机在一次高空飞行中因晶间腐蚀而失事，事后检查发现，该机因常用于运输活鱼和海产品，使机身铝结构发生了严重的晶间腐蚀。

工业纯铝在大气、淡水及中性溶液中发生点蚀，不产生晶间腐蚀；3XXX 系合金和形成 Mg2Si 外无过剩 Si 的 6XXX 系合金无晶间腐蚀倾向，因为 MnAl6 相和 Mg2Si 相各与其固溶体的电位相近，若有过剩 Si 存在则有晶间腐蚀敏感性。

Al-Cu、Al-Cu-Mg、Al-Zn-Mg、Al-Zn-Mg-Cu、Mg 含量＞3%的 Al-Mg 系合金有晶间腐蚀倾向。热处理不当时，在晶界

上有 CuAl2、AlxCuxMg、MgZn2、Al2ZnxMg、Mg2Al3 等相沉淀，它们的电位与晶粒本身及晶界电位相差较大，形成微电池，引起晶间腐蚀。在含 Cu 的合金中，Al2Cu 为阴极，晶界附近贫 Cu 区为阳极，发生溶解。

可以通过材料的加工工艺、热处理参数的合理搭配与选择，以及控制引起晶间腐蚀的合金元素含量，能有效地控制晶间敏性程度或甚至消除。例如 2A12 合金板材的最佳人工时效规范为 190℃/（6h~12h)；型材的为 190℃/（6h~12h)；2A16 合金板材的为 190℃/18h 或 210℃/12h；2A10 合金线材的为 75℃/24h；2A16 合金线材的为 190℃/18h。

2A12-T4 合金经 190℃/12h 人工时效后，再在 125℃~170℃长时间稳定化处理或在 200℃以上稳定化处理，可以消除晶间腐蚀；2A16 合金经 190℃/18h 人工时效和稳定化处理可以消除晶间腐蚀敏感性；2A06-T4 合金材料经 200℃、250℃或 300℃稳定化处理后无晶间腐蚀倾向。

1.1.5 话说铝的物理性能

铝合金强化的主要措施是：对热处理不可强化合金采用弥散强化、固溶强化和冷作硬化；对热处理可强化的合金则通过固溶处理（淬火）与随后的时效。元素在铝中的固溶度有大有小，有的大一些，有的则几乎不固溶，在常见的40个元素中，固溶度≥1%质量的有11个，其中Ag、Ga、Hf、Ti的

价格甚贵，不能作为主要的工业合金元素，其他的6个元素Zn、Mg、Cu、Mn、Si和Li成了主要铝合金的基础合金化元素。所有热处理可强化的铝合金都含有在高温下溶解度大而低温下溶解小并有强烈时效硬化作用的元素。绝大多数铸造铝合金都含有Si，因为含Si量≥4%的合金在液态时都含有较多的共晶体，在铸造时有良好的流动性和对热裂缝不敏感。热处理不可强化的1xxx系、3xxx系、5xxx系、大部分8xxx系合金主要通过加工硬化提高强度，但是Mn与Al可形成细小的、弥散的Al6Mn，也有一定的弥散强化作用。在5xxx系合金中，大部分Mg固溶于铝中，有相当大的固溶强化作用，尤其是在冷加工后。

Mn、Cr、Zr、Ti、Sc等在铝中的固溶度虽不大，但却随着温度的降低而骤然减小，能以直径小于1靶的弥散质点从固溶体中沉淀出来；在热加工及退火时由于温度不够高，不能固溶，能钉扎晶界及亚晶界，提高再结晶温度及强度，改善断裂韧性和抗应力腐蚀开裂性能。

铝及铝合金的主要特点之一是密度小。在常用的合金中，Mg、Li、Si使其密度下降，尤其是Li，每添加1%Li可使其密度下降3%。Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Ti、Zn、Zr等则使铝的密度增大。轧制能提高密度；冷加工使位错增加，降低密度；若随即退火，位错消失，密度升高；不过这时的变化量都很

小，仅约0.1%。

大多数的铝的合金化元素如Cu、Fe、Ni、Si、Al2O3、Cr、Mn、Ti、V、Zr都使其线膨胀系数下降，只有Mg及Zn才提高其线膨胀系数，时效状态材料（T4、T5、T6）的线膨胀系数均比退火状态的高0.015×10-6/℃。

合金成分对铝的热导率及电导率的影响相同，在0℃~400℃之间，退火铝材的热导率可根据电导率计算，同时除硅外，与合金的成分无多大关系。

任何元素都会使铝的电导率下降，固溶元素的有害作用比不固的更大。电工铝中的主要杂质是Cu、Fe、Si、Ti、V、Mn、Cr等。Ti与V含量之和每增加0.01个百分点，其电导率下降0.8%。B的含量为（Ti+V）/2时，将形成TiB2和VB2，它们既不固溶于铝又不溶解于溶态铝，其中大部分可在精炼静置时沉于熔池底部，剩下的小部分对铝电导率的影响很小。

铝合金磁导率决定于添加元素的磁性和添加量。Fe在铝中以Al3Fe的形式存在，它是顺磁性物质，与铝的磁性相同。因此，少量Fe对铝的磁性无影响。V使铝的磁导率下降，而Mn、Cr则提高它的磁导率。磁导率对淬火很敏感，淬火状态的Al-Cu合金的磁导率比退火状态的低得多，磁导率对加工硬化不敏感。

抛光铝材上的阳级氧化膜对可见光的反射率与裸铝的相同，但对抛光的铝来说，其反射则随氧化膜的增厚而急剧下降。固溶的Mg不但能提高铝的强度，也对铝反射性能的影响很小，铁的影响则很大，当其含量超过0.008%时，铝的反射率随Fe含量的增加而呈比例下降。Mn含量如不超过0.30%，对反射性能的影响很小，大于此值则有相当大的危害。在6063合金中，若Mg2Si呈精块状，则对反射性能不利；挤压后进行适当的空冷淬火和低温时效，可使Mg2Si呈均匀细小的弥散状态，而保持良好的反射性能。

Bi、Ga、Li、Mg、Pb、Sb等元素降低铝（99.99%，700℃~740℃）的表面张力，而Ag、Cu、Fe、Ge、Mn、Si、Zn等对铝的表面张力几乎无影响，而Mg与Si降低铝的黏度。在任何情况下，铝及铝合金的黏度均承受温度升高而下降。

Li、Mn、Co、Be、Ni、Si等增大铝的弹性模量，尤其是Li，每添加1%Li，铝的弹性模量上升约6%。

1.1.6 铝土矿的品质

铝土矿的品质主要取决于其中氧化铝存在的矿物形态和有害杂质含量，不同类型的铝土矿其拜耳法溶出性能差别很大。

拜耳法（Bayer）不能译为拜尔法或者贝尔法，这是个习惯问题，拜耳法是奥地利化学工作者拜耳（K.J.Bayer）1988

年发明的，随后在美国匹兹堡冶金公司（美国铝业公司的前身）形成工业化生产。上世纪 20 年代，铝传入中国后，拜耳的译名也开始出现在中国的化学和医药书籍中，知道德国拜耳大药房的中国人更多。Bayer 是德国与奥地利人的一个大的姓氏，由于已有拜耳大药房的译名及“尔”的繁体写法复杂，遂将氧化铝的 Bayer Process 译为拜耳法。另外，拜耳是奥地利人，后加入美国国籍，不是澳大利亚人，中国有书上把他写成澳大利亚人是不对的。

衡量铝土矿的品质的一般标准为：

第一，矿石中的铝硅比。铝硅比是指矿石中 Al2O3 含量与 SiO2 含量的质量比，以 A/S 表示（A 是指 Aluminium，S 是指 Silicon 的质量）。氧化硅是碱法，特别是拜耳法生产氧化铝工艺中最有害的杂质，所以在矿石供应允许的情况下，A/S 比越大越好。

第二，氧化铝含量。氧化铝含量越高，氧化铝生产过程中的矿石消耗就越低，生产成本也就越低。

第三，矿物类型。矿物类型对铝土矿的拜耳法溶出性能影响很大。其中，三水铝石型铝土矿的氧化铝是最容易被苛性钠溶液溶出的，一水软铝石次之，而一水硬铝石中的则不易溶出。另外，铝土矿类型与氧化铝生产的技术经济指标密切相关。

在实际生产中，评价铝土矿品质的指标，就三水铝石型铝土矿而言，主要是其有效氧化铝和活性氧化硅含量。有效氧化铝是指在一定的溶出条件下，能够从矿石中溶出到溶液中的氧化铝的量。活性硅是指在生产过程中，能与碱反应而造成 Al2O3 与 Na2O3 损失的氧化硅。在工业化生产中，有效氧化铝和活性氧化硅的含量与矿石中的氧化铝总含量与氧化硅的总含量是不同的。例如，一水硬铝石在三水硬铝石铝土矿的溶出条件下与碱溶液反应，是无法溶出的，即使它的含量高，也不能计入有效氧化铝的含量。同样，矿石中以石英形态存在的氧化硅，也不能计入活性氧化硅内。对一水硬铝石型铝土矿而言，通常是以其中 Al2O3 含量与铝硅比来判别铝土矿的品质。因为在一水硬铝石型铝土矿的溶出条件下，铝土矿中的 Al2O3 可看成全部是有效的 Al2O3，氧化硅可看成全部是活性的。

一般，氧化铁对拜耳法生产影响很小，但会使赤泥的量增加。不过红土型三水铝石及一水软铝石型铝土矿中有一部分铁矿物是以针铁矿和铝针铁矿形态存在，对溶出率、赤泥沉降性能、碱耗都有不利影响。

铝土矿中其他有害物质，如硫、碳酸盐及有机物等，当然是含量越低越好。

1.1.7 中国铝土矿资源及分布

截至 2012 年底，中国保有资源储量的矿区约 373 处，主要分布于 7 个省、市、区。山西、河南、广西、贵州、云南、重庆、山东占全国总储量的 92%左右；四川海南等 15 省市也有一定的资源储量，但仅约占全国总储量的 8%。中国保有资源储量约 30 亿吨，其中，基础储量约 8.7 亿吨，占 29%，资源量约 21.3 亿吨，占 71%。中国铝土矿的基础储量和储量在世界上分别排第 7 位和第 9 位。

中国铝土矿以沉积型一水硬铝石型为主，铝硅比（A/S）相对较低。在 2012 年，中国约 30 亿吨的铝土矿资源当中，A/S 为 5~7 的矿量占总量的 40%以上。

中国铝土矿的外观和物理化学性能随着矿物组成和化学成分的不同而有很大变化。有的铝土矿很坚硬，有的则松软如土，一捏就碎；结构分别呈现土状、密致状的。颜色在白色到赭色之间变化，含铁多的呈红色，含铁少的呈灰白色或浅黄色。

我国教授级高级工程师李旺兴等对国产一水硬铝石型铝土矿的工艺矿物学研究表明：铝土矿中主要矿物为一水硬铝石、高岭石、伊利石、赤铁矿、锐钛矿、金红石等。其中，一水硬铝石占矿物总量的 60%~70%，多以隐晶集合体的形式存在，与硅矿物、氧化铁矿物等脉石矿物紧密镶嵌，嵌布粒度小，要使矿物实现较完全与单体解密必须细磨。

含硅矿物的硬度、密度、晶格常数、形状因子等与一水硬铝石有着明显的差异。因此它们的可碎性也有很大差别，含硅脉石在细磨过程中会有部分泥化。含硅脉石为铝硅酸盐，其表面活性点与含铝有用矿物的相同。

中国铝土矿资源具有的特点为：资源分布很集中，主要分布在山西、广西、贵州、河南等 4 省区。主要有两种类型，沉积型一水硬铝石型矿床和堆积型一水硬铝石型矿床。同时以前者为主，约占资源总储量的 82%，后者占 17%。中国铝土矿矿床总体规模不大，截至 2011 年底，中国铝土矿资源储量大于 20000kt 的大型矿床还不足 40 个，中国的大型矿床规模仅相当于国外的小型的或中型偏小的。

中国的铝土矿以难溶的一水硬铝石型铝土矿为主，占全国总资源量的 99%以上，三水铝石型的铝土矿还不到 1%，且品位低、规模小。但其共（伴）生成分（镓、钒、锂、钛等）多，可综合开发利用。

国内铝土矿铝硅比偏低，大多数为高铝（Al2O3 大于 60%）、高硅（SiO2 在 5%~15%之间）、低铁（Fe2O3 小于 10%），且矿体薄，品位波动大。因此，适合经济开采和利用的铝土矿资源少。适合露天开采的铝土矿比例偏低，仅占总量的 38%。

从 2006 年起，中国氧化铝生产能力的年均增长量达 7000kt，2012 年氧化铝生产能力 57200kt，产量 42130kt。即使考虑远景储量，乐观估计，国内铝土矿资源的服务年限

也不会超过 13 年。中国铝土矿资源保障程度低，因此必须高度关注及高度重视中国氧化铝工业的绿色发展、低碳发展和可持续发展问题。

1.1.8 世界铝土矿资源与分布

世界铝土矿资源总量极为丰富，据美国地质调查局的统计，2010 年，世界铝土矿储量约为 310 亿吨，基础储量约 395 亿吨，资源量 670 亿~900 亿吨。基础储量的静态保障年限约 205 年。

世界铝土矿地理分布集中程度很高，储量分布极为不均，除中国、巴尔干半岛和俄罗斯有较小的矿带外，大型铝土矿都位于热带及亚热带地区。工业发达国家和铝消费大国，如中国、美国、德国、日本、法国、意大利、英国、加拿大等的铝土矿储量都不多。

按照铝土矿储量排位，前 5 名的国家依次是：几内亚、澳大利亚、牙买加、巴西和印度，其储量分别为 78 亿吨、60 亿吨、23 亿吨、21 亿吨和 9 亿吨，其储量分别占世界总储量的 26.2%、19.4%、7.4%、6.8%、2.9%，它们的储量占世界总量的 62.7%，而几内亚和澳大利亚的储量则占世界总储量的 45.6%。南美洲的巴西、牙买加、圭亚那、苏里南的铝土矿储

量约占世界总储量的 25%。此外，近些年越南发现了一些大型铝土矿，其储量（2011 年）超过 52 亿吨。

按照 2010 年的储量，各大洲铝土矿的储量比例为：南美洲 34%，非洲 28%，亚洲 18%，大洋洲 14%，其他地区 6%。

根据铝土矿下伏基岩的性质大体可分为三大类：储存于硅酸盐岩石上的新生代红土型矿床，储存于碳酸盐岩石上的古生岩溶型矿床，储存于硅原岩上的古生代或中生代齐赫文型沉积矿床，以前两种为主，分别占 86%及 12%，后者仅占 2%。

红土型铝土矿矿床产于红土型风化壳中，是由酸性、中性、碱性含铝硅酸岩石在热带、亚热带气候条件下经深度化学风化形成的。红土型矿床以三水铝石型矿石为主，其次为三水铝石与一水软铝石型混合型铝土矿，矿体呈层状、帽状，其上常被土壤或富铁红土层覆盖，其下常为富含高岭石、埃洛石的黏土层及半风化基岩。此类铝土矿易探、易勘、易加工，是铝土矿矿床中最重要的类型。红土型铝土矿主要分布于大洋洲、拉丁美洲、非洲和东南亚等地区的热带及亚热带低纬度地区，一般在南、北纬 0 度~30 度地区的国家，如澳大利亚、几内亚、巴西、牙买加等。红土型矿床的矿石品质优良，以高铁、低硅、高铝硅比为特点，是氧化铝工业的优良原料。

岩溶型铝土矿以一水硬铝石型铝土矿为主，其次是一水软铝石型铝土矿，它的特点是高铝、高硅、中低铝硅比，主要分布于中国、南欧、加勒比地区。中国的大部分铝土矿属于这一类，约占中国铝土矿总储量的 85%以上。

国外的铝土矿矿床特别是红土型铝土矿矿床以大型特大型矿床为主，如澳大利亚的韦帕矿、达令矿、戈弗矿的储量都超过数亿吨。同时，其矿层厚、表层土壤薄，易于机械化露天开采。通常矿层采完后，可用原表土壤覆盖，恢复植被。

1.1.9 氧化铝的提取

拜耳法

铝的提取包括由铝土矿生产氧化铝，再由氧化铝电解制取原铝的两大部分。生产氧化铝的主要工艺有：拜耳法、碱石灰烧结法、拜耳-烧结联合法等。拜耳法一直是生产氧化铝的主流，在 2012 年，全世界提取的氧化铝总量中，92%以上是用拜耳法提取的。

2012 年，全世界氧化铝产量约 95200kt，其中，冶金级氧化铝约 86850kt，化工品级氧化铝 8350kt；中国氧化铝产量 42140kt，进口 4980kt，其中，冶金级氧化铝 43000kt，化工品级氧化铝 4120kt。

拜耳法是奥地利化学家拜耳于 1888~1992 年发明的一种从铝土矿中提取氧化铝的方法。120 多年来，在工艺方面作

出了许多改进，但基本原理并没有发生变化，是用苛性钠（NaOH）溶液加温浸出铝土矿中的氧化铝，得到铝酸钠溶液与残渣（赤泥）的混合物。分离赤泥后，降低温度，加入氢氧化铝作晶种，经长时间搅拌，铝酸的分解析出氢氧化铝。氢氧化铝经过洗涤，在 950~1200 摄氏度煅烧，除去水，便得到氧化铝成品。析出氢氧化铝后的溶液称为母液，经蒸发浓缩后返回配料循环使用。

拜耳法生产氧化铝的经济效益决定于铝土矿的品质，主要是矿石中的 SiO2 含量，通常以矿石中的铝硅比（A/S），即铝土矿中的 Al2O3 与 SiO2 的质量含量表示。因为在拜耳法的溶出过程中，SiO2 转变成方钠石型的水合铝硅酸钠（Na2O·Al2O3·1.7SiO2·nH2O）。随同赤泥排出，所以铝土矿中每千克 SiO2 大约会造成 1 千克 Al2O3 与 0.8 千克 NaOH 的损失。铝土矿的铝硅比越低，拜耳法的经济效益就越低。直到 20 世纪 70 年代后期，拜耳法所处理的铝土矿的铝硅比均大于 7。由于高品位三水铝石型铝土矿资源逐渐减少，如何利用其它类型的低品位铝矿资源和节能新工艺等问题，已经成为研究开发的重要方向。

现代铝电解工业对氧化铝的品质要求越来越严格，要求使用颗粒粗、熔解速度快、吸附 HF 等有害气体性能好的美洲型氧化铝，即砂状氧化铝。砂状氧化铝是上世纪 70 年代中期美国铝业公司研发的工艺生产的，它的成功使用使电解铝厂

排放的含氟气体集气和净化效率达 99%以上，氟的排放量降低每生产一吨铝排放到 0.55kg 氟，消除了电解铝工业严重的环境污染问题。

烧结法与联合法

1858 年，有人提出了在高温下，烧结纯碱（苏打）和铝土矿组成的炉料，得到固体铝酸钠 Na2O •Al2O3 的烧结产物，以制取氧化铝，以后又出现了碱石灰烧结法等。目前，在工业上得到实际应用的只有碱石灰烧结法，它所处理的原料有铝土矿、霞石和拜耳法赤泥等，且适合于处理高硅的铝土矿。该法是将铝土矿、碳酸钠、石英按一定比例混合成炉料，在回转窑内，烧结成由铝酸钠（Na2O • Al2O3）、铁酸钠（Na2O •Fe2O3）、原硅酸钙（2CaO •SiO2）和钛酸钙（CaO •TiO2）组成的熟料。

然后用稀碱溶液浸出熟料中的铝酸钠，同时铁酸钠水解产生的 NaOH 也进入溶液，如果溶出条件控制适当，熟料中的原硅酸钙就不会大量地与铝酸钠溶液发生反应，而与钛酸钙、Fe2O3 • H2O 等组成赤泥排出。溶出熟料得到的铝酸钠溶液经过专门的脱硅过程，SiO2 形成水合铝硅酸钠或水合石榴石 3CaO • Al2O3 • XSiO2 • （6－2X）H2O 沉淀（其中 X ≈0.1），而提纯溶液。把 CO2 气体通入精制铝酸钠溶液，和加入的晶种搅拌，得到氢氧化铝沉淀物和主要成分为碳酸钠的母液。

煅烧氢氧化铝便可得到氧化铝成品。水化石榴石的 Al2O3 可以再用含 Na2CO3 母液提取回收。

中国在碱石灰烧结法生产氧化铝技术方面取得了不少成就：熟料烧成时，采取低碱比配方，在熟料溶出工艺中，采用二段磨料和低分子比溶液。Al2O3 的总回收率约 92.5%，Na2CO3 的消耗量约 93kg/（tAl2O3），居世界领先水平。

碱石灰烧结法的优点：可以处理 SiO2 含量较高的低品位矿石，以及粉煤灰、霞石等；产品白度高，有利于生产高白度化学品氧化铝；若矿石中 Fe2O3 含量不高，可以利用赤泥生产高标号水泥。此法与拜耳法相比，其缺点为：流程复杂，基建投资大，生产能耗与成本高，产品品质较差。

联合法可充分利用拜耳法与烧结法的优点，取长补短，可以利用铝硅比较低的铝土矿，取得较高的经济效益。此法虽有多种形式，但以拜耳法为主，而辅以烧结法。按联合法的目的和流程连接方式的不同，可分为串联法、并联法、混联法。

1.1.10 氧化铝的性能

根据用途不同，氧化铝被分为两大类：第一类被称为冶金级氧化铝，用作电解法提取铝的原料，占氧化铝总产量的 90%以上；另一类是化学品氧化铝，是指除冶金级氧化铝以外的所有氧化铝、氢氧化铝和含铝化合物的总称，在国际上称

为非冶金级氧化铝，而在中国则称为特种氧化铝，它是一个大家族。2012 年，工业发达国家可生产 410 多种，而中国可生产的还不到 150 种，由此可见，特种氧化铝品种的多少与品质的高低也是衡量一个国家工业化程度高低与科学技术水平的标志之一。特种氧化铝的用途非常广泛，可以说每一种都有其最合适的用武之地，主要用于陶瓷、化工、制药等领域。

目前,在氧化铝总产量中,特种氧化铝的产量还不到 10%，但其应用领域在不断地扩大，新的品种也逐年有所增加，因此，所占的比例也在缓慢的上升。

在工业上，氧化铝大多都是从铝土矿中提取的，纯净的氧化铝都是白色无定形粉末或小颗粒状，真密度 3.5~3.6g/cm3，容重 1g/cm3，熔点 2050 摄氏度，沸点 2980 摄氏度，不溶于水，但可以溶于无机酸与碱性溶液，由于其结晶形式不同，溶解于酸、碱溶液中的溶解条件、溶解速度及溶解度也是不同的。氧化铝有多种同素异构体，常见的结构稳定的氧化铝有α 型和γ 型的。

在α -A1203 的晶格中氧离子呈密集六方堆积，A13+对称地分布于氧离子围城的八面体配位中心，晶格能很大，故有很高的熔点与沸点。

γ -A1203 是氢氧化铝在 140~150 摄氏度的低温环境下脱水制得，也被称为活性氧化铝或者铝胶。其结构中的氧离子

近似面心立方紧密堆积，Al3+不规则地分布于由氧离子围成的八面体和四面体的空隙中。γ 型氧化铝不溶于水，但溶于强酸或者强碱溶液，加热至 1200 摄氏度转化为α -Al2O3。

氢氧化铝在流态化焙烧时的温度为 1000~1050 摄氏度，焙烧产品就是冶金级氧化铝。

冶金级氧化铝总含有少量的杂质，如 SiO2、Fe2O3、TiO2、Na2O、CaO 等。在电解过程中，那些电位正于铝的氧化物杂质（SiO2、Fe2O3 等）被铝还原出来进入原铝中，如 Si 与 Fe，降低铝的纯度。而那些电位负于铝的氧化物杂质（Na2O、CaO 等）则会分解冰晶石，改变电解质成分，增加氟化盐消耗。所以电解铝工业对氧化铝的品质有着严格的要求：Na2O＜0.3%，TiO2＜0.002%，ZnO＜0.001%，SiO2＜0.02%，V2O5＜0.0005%，CaO＜0.005%，F2O3＜0.03%，P2O5＜0.003%。

冶金级氧化铝的物理性能对保证过程正常进行和提高气体净化效率起着关键性作用。要求它能又快又多地熔于冰晶石，且在烟气净化系统里能有效地吸收 HF。

冶金级氧化铝的物理性能决定于其晶型、粒度与形状。砂状氧化铝颗粒较粗，安息角小，30~35 度，γ -Al2O3 含量高，化学活性也较大，适于在烟气干法净化中用于吸收 HF，在当代铝电解工业中得到广泛应用。面粉状氧化铝呈片状和羽毛状，颗粒细小，安息角小，大于 40 度，γ -Al2O3 含量

高，化学活性差。中间状氧化铝的物理化学性能介于它们之间。

1.1.11 拜耳法：提取氧化铝的主要工艺

拜耳法是奥地利化学家拜耳（K.J.Bayer）于 1889 年~1892 年发明的一种从铝土矿中提取氧化铝的工艺。120 多年来，业界对此法做出了不少工艺方面的改进，但基本原理上依然如故，没有发生根本性的变化，依然是目前全球生产氧化铝最主要的方法，目前，全球 78%以上的氧化铝是用该方法生产的。

19 世纪 90 年代，拜耳带着他的两个专利，远涉重洋，到了美国，进入匹兹堡冶金公司（美国铝业公司的前身），将专利卖给了该公司。该公司在拜耳的指导下，很快产业化生产出了优质铝，并且，使铝的生产成本进一步降低，铝的市场进一步扩大，匹兹堡冶金公司也因此快速扩大了业务范围，营业额急剧增加。

拜耳法包括两个主要过程，也就是拜耳申请的两个发明专利。1889 年第一个专利诞生，他的核心是采用氢氧化铝作晶种，使铝酸钠溶液分解，即种子分解法。拜耳发现，在常温下，Na20k 与 A1203 的分子比为 1.8 的铝酸钠溶液，只要

加入氢氧化铝作为晶种，不断搅拌，溶液中的 A1203 便以 A1（OH）3（三水铝石）的形式析出，直到溶液中的 Na20k 与 A1203 的分子比上升到约 6 为止。

1892 年，拜耳提出的第二个专利系统阐述了可以用氢氧化钠溶液溶出铝土矿中的氧化铝，制成铝酸钠溶液的原理，即铝土矿的拜耳溶出法。他发现，已经析出大部分氢氧化铝的铝酸钠溶液，在加热时又可以溶出铝土矿中的氧化铝水合物，即用循环母液可以溶出铝土矿，溶出和分解两个过程的交替进行，就能不断地处理铝土矿，得到氢氧化铝产品，构成所谓的拜耳法循环。

拜耳法循环就是用苛性碱溶液溶出铝土矿中的氧化铝，溶出料浆通过赤泥的沉降分离，制成低分子比的铝酸钠溶液，铝酸钠溶液通过降温、加氢氧化铝晶种从中分解析出氢氧化铝，将分解后的母液（主要成分为 NaOH）经浓缩后用于溶出下一批铝土矿。焙烧氢氧化铝就可获得氧化铝产品。

拜耳法用于处理高铝硅比（氧化铝与氧化硅的质量比）的铝土矿时，流程简单，能耗低，产品品质好；用于处理易溶出的三水铝石型铝土矿时，优点更为突出。在拜耳法流程中，铝土矿经破碎后，和石灰、循环母液一起进入湿磨，制

成符合要求的原矿浆，经过脱硅与预热后，进行溶出。溶出后的矿浆在经过自蒸发降温后，进入稀释及赤泥沉降分离工序。自蒸发过程产生的二次蒸汽用于预热矿浆。赤泥沉降分离后，底流经洗涤进入赤泥堆场，而沉降分离的溢流送往叶滤，经过叶滤脱除浮游物的溶液称为精液，精液进入分解工序，经晶种分解，得到氢氧化铝。分解出的氢氧化铝经过分级和分离洗涤后，一部分作为晶种返回晶种分解工序，另一部分经过焙烧得到氧化铝产品。晶种分解后，分离出的分解母液经蒸发浓缩后，返回溶出工序，用于溶出下一批矿石，从而形成拜耳法的闭路循环。

根据拜耳法生产的基本工艺流程，可把整个生产过程分为如下主要工序：原矿浆制备，高压溶出，溶出矿浆稀释，赤泥分离和洗涤，晶种分解，氢氧化铝分级与洗涤，氢氧化铝焙烧，母液蒸发及苏打苛比等。

尽管拜耳法工艺自诞生以来，在原理基本保持不变，但工艺流程本身却有了很大发展。当今主要的工艺路线有 3 种，分别是：美洲拜耳法、欧洲拜耳法和中国拜耳法。

美洲拜耳法：用于处理低铁三水铝石矿，溶出条件较为简单：温度在 140 摄氏度到 150 摄氏度之间，Na2 Ok 为 100~150g/l，溶出时间短，所生产的 A1203 为粒度均匀、强度高的砂状。

欧洲拜耳法：溶出难溶的欧洲型的一水软铝石和一水矿硬铝石混合矿的条件是：温度不低于 260 摄氏度，Na2Ok 浓度大于 200g/l，时间长。砂状氧化铝，但硬度比美洲拜耳法氧化铝的低。

中国拜耳法：以一水硬铝石型铝土矿为原料，溶出条件为:温度在 260 摄氏度到 280 摄氏度之间,时间在 30~60min，苛性碱浓度为 230g/l，通常采用改进的一段法或两段法分解工艺，分解产出率较高，氢氧化铝焙烧后为砂状氧化铝。

1.1.12 生产铝用炭素的原料

铝电解采用炭阳极和阴极炭块、侧部炭块、阴极糊等作为阳极和内衬，制造它们的原料有两部分：一部分是固体炭素原料，另一部分是作为粘结剂的煤沥青、煤焦油等。固体炭素原料包括石油焦、沥青焦、冶金焦、石墨碎和无烟煤等。石油焦和沥青焦用于制造炭阳极和全石墨化阴极。无烟煤、石墨碎和冶金焦是制造阴极炭块的主要固态原料。煤沥青是生产阴极炭糊的主要粘结剂，还要用煤焦油、蒽油、树脂等作辅助粘结剂，以调节粘结剂的软化点。

（1）石油焦

石油焦是用炼制石油的残余物——渣油焦化而成的。因此，石油焦的性质决定于渣油种类。按渣油种类的不同可将

石油焦分为两大类：裂化焦和热解焦，裂化焦是用裂化工艺焦化的，而热解焦则是用热解工艺制取的。石油焦是生产各种炭素的基本材料，占 80%以上，所含的灰分相当少，一般都低于 1%，是一类易石墨化的焦，在高温下，易转变为石墨。石油焦的特性对炭素材料的性能有很大影响。

石油焦的品质可用灰分、硫分、挥发分和在 1300℃煅烧后的真密度等指标衡量。按 SH/T0527 标准，一级品石油焦的真密度为 2.08~2.13g/cm3，杂质含量不高于/w%：0.5S，挥发分 12，0.3 灰分，3 水分，25 粉焦量，0.08Si，0.015V，0.08Fe。

灰分是石油焦的一项重要品质指标，生产一般炭素材料用的石油焦的含灰量应不高于 0.5%，而生产高纯石墨用的石油焦的含灰量应不高于 0.15%。硫是一种有害的杂质，含量大时会使炭石墨材料在石墨化的过程中产生种种缺陷，如产品开裂、电阻率上升，加大产品使用中的消耗。石油焦的挥发分含量标志其焦化程度，对煅烧工艺有一定的影响，石油焦石墨化的难易程度可用真密度衡量，通常在 1300℃煅烧的石油焦的真密度较大，易石墨化，电阻率也较低，线膨胀系数较小。

（2）沥青焦

沥青焦也是生产预焙阳极的主要原料，它的硫、灰分含

量低，是一类优质焦炭。生产沥青焦的原料有高温、中温沥青，高温沥青是中温沥青在氧化釜内用热空气氧化而成的。高温沥青的粘度大，挥发分含量小，有利于装炉操作。沥青焦的质量指标（≤w%）：灰分 0.5，硫 0.5，挥发分 1，水 5，块度小于 25mm，粉焦量 4。由于沥青焦成焦温度高（1300~1350℃），不经煅烧就可以直接使用。但是沥青焦从炼焦炉中推出后以水熄火，水含量大，所以在生产中，它与石油焦一同按比例混合后煅烧。

（3）无烟煤

无烟煤是变质较深的一类煤，含碳量在 90%以上，结构致密，强度也较高，是生产铝用炭素、电极糊、阴极糊等的主要原料。在炭素生产中，普通阴极骨料为 100%无烟煤，半石墨质阴极炭块骨料约含 90%无烟煤，高石墨质阴极炭块的无烟煤含量为 15%~70%。无烟煤品质指标、热处理特性对阴极炭块的使用情况的影响很大，制造炭素的无烟煤应具备：相当高的力学强度，既有一定的抗磨性、抗碎性、抗压性，并应达到一定的块度；另外，水分与硫含量应低，热稳定性好。具体质量指标为：灰分≤10%，硫≤2%，水≤3%，块度≤50mm，抗磨试验（＞40mm 残留量）≥35%。

（4）煤沥青

煤沥青是生产铝用阳极与阴极材料的粘结剂，它能很好地润滑和渗透到各种焦炭及无烟煤的表面上与孔隙中，使各种配入的颗粒相互粘结形成有良好塑性的糊料，经成型后，成为生阳极炭块或阴极炭块，焙烧时，煤沥青逐渐分解与炭化，把周围的骨料牢牢地连接在一起。煤沥青是炼焦副产品，是炼焦油经高温分馏后的残油，是多种高分子碳氢化合物的混合体。一般用软化点、粘度、密度及结焦残炭量、加热后的气体析出曲线等衡量煤焦油的性能。煤沥青不仅是阳极炭块的重要组成部分，而且其浸润性、流动性、可塑性、渗透性、结焦性、稳定性、化学元素组成及适宜的使用条件等对炭素材料的质量都有相当大的影响。当前，高软化点的改质沥青具有一系列的优质特性越来越受到重视。

1.1.13 铝用氟化盐

铝是用电解法提取的，提取过程在电解槽中进行，电解槽由阳极、阴极、槽壳、耐火材料等组成，槽内盛有电解质与电解产物——液态铝，电解质主要成分是冰晶石（Na3Al）与氧化铝组成的熔融混合物。除此之外，还使用一些氟化盐，如 AlF3、LiF、CaF2 和 MgF2 作为添加剂，它们会改变电解质

的熔点（初晶温度）、密度、电导率、粘度等物理化学性能。由此可见，没有氟化盐也就没有铝电解。

中国氟化盐生产始于20世纪30年代中期，1956年至1984年，中国铝用氟化盐基本由湖南湘铝有限责任公司（原名湘乡铝厂）、甘肃白银氟化盐有限责任公司（原名白银氟化盐厂）、辽宁中铝抚顺铝业有限责任公司氟化盐分厂生产供应。截至2013年，中国约有大大小小的氟化盐生产企业65家，总生产能力约1350kt/a，当年产量约820kt，除了满足国内各产业的需求外，还有部分出口。湖南湘铝有限责任公司、河南焦作多氟多股份有限公司、甘肃白银氟化盐有限责任公司是当前中国最大的三家氟化盐企业，它们的生产能力分别为125kt/a、100kt/a、85kt/a，约占全国总生产能力的23%。

铝电解质是铝电解的核心，上连阳极，下接阴极，是含约80%冰晶石、9%~13%的氟化铝、1.5%~3.5%的氧化铝以及5%~7%添加剂（氟化钙、氟化镁和氟化锂）组成的混合物高温熔体。提取1吨原铝，氟化盐的消耗约55千克或更低。

冰晶石（Na3AlF6）

冰晶石有天然的，也有人造的。天然的为稀有矿物，世

界上仅在乌拉尔、塞林特、尼日利亚、格陵兰及巴西的彼丁坦地区发现有储量不多的天然冰晶石存在，所以工业上用的冰晶石都是人造的。冰晶石的分子式为 Na3AlF6，它也是一种复盐，其分子式也可以写成 3NaF·AlF3，其中 NaF 和 AlF 的摩尔数之比为 3，摩尔数也常称为摩尔比或分子比。

1990 年以前，中国生产的冰晶石的分子比一般为 2，而工业发达国家铝电解多用高分子比冰晶石。因为冰晶石结晶水含量随分子比降低而增加，特别当分子比小于 1.3 时，冰晶石的结晶水含量更多。含有结晶水的冰晶石加入电解槽后会使氟化铝发生水解，放出 HF 气体，加大氟化物损耗，污染环境。因此，冰晶石的分子对氟的损失率影响很大，特别是其分子比小于 1.5 时，这种影响尤为严重。

自 20 世纪 90 年代以来，中国开始生产和应用高分子比的冰晶石，时下，氟化盐生产企业可根据用户需求供应分子比为 1.5~2.9 的不同粒度的冰晶石。不过，冰晶石中的 SO42-含量仍偏高，有待改进。

国际先进的铝企业由于采用含钠量高的氧化铝，除启动槽外，正常生产铝时很少添加冰晶石，仅加氟化铝。中国生产的冰晶石多为分子比为 2.0 左右的，高分子比的在品质和成本方面尚不具备有力的国际市场竞争力，另外，如硅、铁、硫酸根等杂质的含量也偏高。

氟化铝（AlF3）

氟化铝主要用作铝电解质的调整剂，是用量最大的氟化盐，生产氟化铝可用干法也可以用湿法。干法有瑞士的布斯双层流化床法、德国鲁奇的循环流化床法、法国的普基内（外）热炉产生 HF 单层流化床氟化铝法、美国联合公司的三层流化床法、铝电解含氟烟气净化回收氟化铝等。湿法工艺因原料不同分为氢氟酸法、氟硅酸法、铵冰渣法等，其中氟硅酸法又有多种工艺，如奥地利的林茨工艺、法国的 AP 工艺、美国的 Alcoa 工艺、瑞士的布斯工艺，林茨工艺最具有代表性。中国生产氟化铝主要用布斯干法与氢氟酸湿法。布斯工艺用的主要原料是萤石（CaF2），中国的萤石基础储量世界第一，超过 1.3 亿吨，主要集中在内蒙古、浙江、湖南等地，这三省区的萤石储量超过 1 亿吨，占全国总储量的 72%以上。

中国萤石在国际上占有重要地位，产量和出口量均居世界第一，除了冰晶石与氟化铝大宗产品外，作为电解质调整剂的还有氟化镁（MgF2），用量为槽内电解质的 7%~8%，生产工艺主要有碳酸镁法、硫酸镁法。

1.1.14 铝用阴极材料

在铝电解生产中，阴极材料用作电解槽的内衬，用于盛装原铝与电解质，并把电流导出槽外。阴极材料可分为两大

类：阴极炭块与阴极糊。

铝用阴极炭素材料是以煅烧无烟煤、冶金焦、石墨等为骨料，煤沥青等为粘结剂制成的，主要用于制作电解槽内衬的块类及糊类炭素制品，经加工后用于砌筑电解槽槽底，除了盛装铝电解反应所需的电解质和所产生的原铝外，并将电流通过镶入阴极中的铸钢棒导出槽外。

在铝电解过程中，阴极上发生的主要反应是溶于冰晶石中（Na3AlF6）的 Al3+被还原成液态铝，沉积于炭质槽底部，液态铝与炭质槽底共同作为电解槽的导电阴极。由于熔融电解质中含有各种氧化物与杂质，其中的钠离子在电场驱使下被炭阴极选择性地吸附，铝与碳发生副反应生成碳化铝（Al4C3）等产物，而且熔盐对阴极炭块发生侵蚀和冲刷等作用，加上热应力作用，使阴极材料发生变形、隆起、断裂，从而引起阴极破损。

铝用炭素阴极应具备的性能是：耐高温，抗冲刷，耐熔盐与液态铝侵蚀，较高的电导率，一定的纯度，足够的力学强度，以确保电解槽有相当长的使用期限和有利于降低提取铝的电耗，并使原铝不受污染。炭素阴极材质、安装质量及工作状况对铝提取的电流效率、电耗和电解槽使用期限都有

相当大的影响，阴极电压降又称为炉底电压降，通常占电解槽总电压降的 10%~15%，这就是说，铝电解电能消耗的 10%~15%被阴极“吃掉了”。

2013 年，中国有约 40 家铝用阴极炭块厂，生产能力约 480kt/a，产量 390kt 左右，主要分布于山西、宁夏、河南、贵州等省区，其中大多数企业还生产侧部炭块与阳极糊。当下，中国的炭阴极产品不但可以满足国内新建和大修电解槽的需求，还有部分企业的产品出口到世界各地。

国外铝用阴极炭块及糊类生产都集中在几个大的跨国公司：德国的 SGL 公司，产量约 27kt/a 阴极炭块，全石墨化阴极炭块是其主导产品。法国的萨瓦公司（SAVOIE），阴极炭块产量近 40kt/a，其中石墨化阴极占其产量的 1/3，该公司还可以生产石墨含量不同的石墨阴极炭块和全石墨阴极炭块，挪威的埃凯姆（Elkem）公司，它是全球最大的电煅无烟煤和电极糊生产企业，产量约 310kt/a，高强全石墨阴极炭块是其主导产品，该公司掌握了以电煅炉生产高强石墨碎的核心技术。

当今大型预焙槽技术发展趋势之一就是采用高石墨质和全石墨化阴极炭块，提高炭块的抗磨性能和抗蚀性能是铝用炭素工业关注的重点。

1.1.15 聊聊铝用炭素材料

怎么会在此说炭素材料呢？不是侃铝吗？怎么又侃起炭素材料了呢？但铝行业者会觉着很正常。这是因为不用炭阳极就电解不出来铝，炭素是提取铝的四要素之一，另外三大要素是氧化铝、氟化盐（主要是冰晶石）、电力。原铝是这四要素通过电化学反应“转化”而成的，也就是说，在当今的技术条件下，不用炭素，就不能工业化生产铝。

铝用炭素材料主要包括铝电解生产必不可少的阳极炭块，阴极炭块及阴极糊料等。原铝生产所需要的炭素材料是炭素材料产业产量和消耗量最大的一类，约占世界总量的 70%以上，是铝电解产业链中最重要的一个组成部分。2013 年，中国有铝用炭素生产企业 110 家左右，产量约 14820kt，其中，阳极炭块消耗约 13600kt，阴极炭块及阴极糊料的消耗量约 850kt，出口 370kt。中国铝用炭素生产始于 1955 年，吉林化学工业公司炭素厂（当时代号 201 厂）在苏联的技术与经济援助下建成并投产，生产能力 55kt/a，是为抚顺铝厂（当时代号 301 厂，1953 年投产）提供炭素材料建设的，从此该厂成为中国铝用炭素工业的“摇篮”，为新中国铝用炭素材料产业的发展作出了巨大贡献。

在这里顺便谈一下“碳”与“炭”的区别，碳是化学元

素周期表中第二周期、第四主族元素，元素符号 C，相对原子量 12.01，原子序数 6，原子核外有 6 个电子，电子分布状态为 1S2 2S2 2P2。碳元素在自然界分布很广，在地壳元素总量中的丰度为 0.08%，在地壳元素含量排序中，位居第 13 位。碳的资源以两种形式存在，一种是循环型资源，碳被视为组成一切动、植物体的基本元素，如动、植物体中的脂肪、蛋白质、淀粉和纤维素等，这种由植物和动物所代表的生碳和大气、海洋中的 CO2 不断地进行着迁移和循环，形成生物循环圈。另一种循环速度极慢极慢的是数量极大的堆积物，它们都是化合物，如碳酸盐矿物和有机堆积物等，因为碳是地球上形成化合物最多的元素，而天然的近于纯碳的物质（天然金刚石和石墨）数量稀少。无烟煤是最接近纯碳的物质。此外，碳含量高的原始物质还有煤、石油等，它们都是与铝用炭素生产原料密不可分的物质。因此，凡是指化合物中的碳都用“碳”，而木炭等或像炭的东西，如山查炭则用“炭”。

在自然界，单质碳有三种变体：金刚石、石墨和无定形碳，另外还有富勒烯和碳纳米管人造单质碳。金刚石和石墨的结构属于结晶形体，无定形碳是非结晶形体，它们都是碳的同素异构体。

金刚石是典型的共价晶体，其中每个碳原子通过 SP3 杂化轨道与 4 个碳原子形成键，键长 1.5445×10-10m，键间夹

角 109° 28′，面心立方晶体，无色透明，通常因所含杂质元素的不同而呈现淡黄色、天蓝色、蓝色或红色，有强烈的光泽。金刚石在所有物质中是最硬的，由于其碳原子的价电子彼此共享，无自由电子，所以几乎不导电，导热性也很差。现在金刚石可以人工制造，但多为 0.1~1mm 的小颗粒。

石墨的晶体结构与性能和金刚石的完全不同，石墨有天然的也有人造的，天然石墨约含 90%C，而人造石墨的含碳量可达 99%以上，有良好的导电导热性，有极强的耐蚀性，可耐 3500℃以上的高温。

煤炭和焦炭是无定形碳。焦炭是烟煤（炼焦煤）或某些含碳量高的物质（石油、沥青、渣油、煤沥青等）在高温下基本隔绝空气，加热使之焦化的产物。无烟煤、石油焦、沥青焦和冶金焦是生产各种炭素制品的主要原料。冶金焦是煤的焦化产物。

炭素材料是一类古老的材料，又是一类新型材料，是一类无机非金属材料，具有诸多独特的物理、化学性质，还具有集其他固体材料（金属、陶瓷、有机高分子物）性能于一身的特点，也就是说，它兼有这三种固体材料的共同特性。

1.1.16 铝用炭素材料的性能

铝电解过程使用的炭阳极与用电解槽内衬的炭素产品统称为炭素材料，或简称炭素，包括4类：1.炭质电极类：预备

阳极炭块；2.炭块类：普通阴极炭块、半石墨或高墨质阴极炭块、侧部炭块；3.炭糊类：阴极糊（炭间糊、钢棒糊、周围糊、炭胶泥）阳极糊；4.石墨类：全石墨化阴极炭块。

（1） 表观性能

炭素材料为大分散体系（非均质体）的多孔隙物质，其表观性能通常用真密度、体积密度、气孔率和气体渗透率表征。真密度是不含气孔和裂隙在内的单位体积的物质量，能说明材料基本质点的致密程度及排列规则化程度。通常，普通煅烧无烟煤的真密度为1.75~1.85g/cm3，煅烧无烟煤的真密度为1.85~1.9g/cm3， 1300℃煅烧石油焦的真密度为2.04~2.08g/cm3，预焙阳极真密度为2.03~2.05g/cm3，阴极炭块真密度为1.85~1.95g/cm3，石墨制品真密度为2.19~2.24g/cm3。

体积密度是含孔隙的单位体积炭素材料的质量，也称为视密度或表观密度，它表示材料或制品宏观组织结构的密实程度。预焙阳极的体积密度通常为1.6~1.7g/cm3。

气孔率是指试样中的气孔体积占试样总体积的百分比。碳素阳极中的气孔有3种形式：封闭气孔、开口气孔、连通气孔。

气体渗透率只与炭素材料中的连通气孔的大小与形状相关，因此，气体渗透率与材料的气孔率没有数值上的比例关

系。通常应用达尔绥定律测定气体渗透率。

（2）力学性能

炭素材料的力学性能通常用抗压强度、抗折强度与弹性模量表示。大直径石墨电极的抗压强度为15.5~23.5N/mm2，抗折强度3.5~14.8N/mm2，普通炭素材料的弹性模量为4.5~10GN/mm2。不过，需指出的是，炭素材料的强度性能随着温度的升高而上升，而其他材料的强度则正好相反，随着温度的升高而下降。

（3）热学性能

表征材料热学性能的参数有热导率、线膨胀系数与抗热震性，它们的数值大小说明这些性能的变化与温度的关系。炭素材料的热导率有着明显的各向异性；另一特性是，与石墨化程度的关系极为密切，石墨化越高，热导率也就越大。石墨是热的良导体，它的热导率可与一些材料的媲美，但是多孔炭、炭布、炭毡等炭素材料则是良好的绝热材料，特别是在高温下。

炭素材料的线膨胀系数具有明显的各向异性，同时比金属材料的小得多，而且石墨化率越高，线膨胀系数越小。

炭和石墨制品在高温下使用时能经受温度的剧烈变化而不破坏的性能称为抗热震性，也被称为耐急冷急热或热稳定

性。石墨有较高的抗热震性能。电解铝用的炭阳极或阴极炭块，因为换极工艺、焙烧启动过程等热过程的影响，也应有一定的抗热震性，以确保使用过程中不断裂、破损。

（4）电学与磁学性能

炭素阳极作为铝电解的导电材料需有良好的导电性、较低的电阻率，以减少阳极电耗，提高电流效率。石墨电极的电阻率为6~15熨穖，石墨阳极的电阻率为6~9熨穖，阴极块的电阻率为30~60熨穖，阳极块的电阻率为40~50熨穖，电极糊的电阻率为70~90熨穖，阳极糊的电阻率为50~80熨穖。炭素材料为一类抗磁物质，其磁化率为负值。

（5）化学性能

炭素阳极在低温下是极惰性的，但随着温度的升高其化学活性急剧增大，大约从350℃开始氧化，微量杂质Na、K、Mg、Ca、Fe、Cu、V、Al、Ti、Mn、Ni等的存在明显加速氧化反应。在高温下，碳溶解于Fe、Al、Mo、Cr、Ni、V、Ti等金属和B、Si等非金属中生成碳化物，当然溶解速度极慢。

1.1.17 高石墨质阴极炭块

随着铝电解技术的发展和炭材料制造工艺的进步，普通阴极炭块在大型预焙槽建设中已经被淘汰出局，再也没有用

武之地了，取而代之的是高石墨质阴极炭块、全石墨化阴极炭块、可湿性阴极炭块。当然，这个替代过程是逐步进行的，并不是一蹴而就的。

随着电解槽容量的加大、阴极电流密度的上升以及槽龄延长的需要，大型铝电解槽对阴极材料的品质提出了越来越高的要求。国外在建设 AP30 型以上的大型电解槽的过程中，有近 80%的电解槽用上了高石墨质阴极炭块，它的石墨含量为 30%~80%，石墨含量不足 20%的称为半石墨质阴极炭块。前者的性能大多优于后者的性能，如抗蚀性强、电阻低、生产工艺简单、成本较低，抗热震性好，并有相当高的力学强度，因此得到广泛的应用。

通常根据石墨质阴极炭块的不同，配入 30%、50%、80%和 100%石墨，分别用 GS-3、GS-5、GS-8 和 GS-10 表示（GS 是 Gao shimo 的缩写）。GS-10 阴极炭块又称为全石墨质阴极炭块。

高石墨质阴极炭块生产所用原料主要有无烟煤、人造石墨、煤沥青。无烟煤具有晶格指数小、结构致密、抗钠侵蚀性能好与抗磨性强等特点。人造石墨的石墨化率应大于 80%，它的电阻率较低，有利于提高炭块的导电性能，且结构致密，杂质少，有更强的抗钠侵蚀性能。

生产高石墨质炭块以改质沥青作为粘结剂，它应有较高的粘结性能和结焦率，且硫含量不高，因此应选用高软化点的改质沥青，它含有较高的β 树脂和甲苯不溶物，可提高炭块的致密度、假密度和抗压强度，同时对提高炭块的电导率和成品率有一定的作用。

高石墨质阴极炭块在大型预焙槽上获得了成功的应用，由于其电阻率和纳膨胀率低，可降低炉底电压、改善槽底状况、延长槽寿命，同时为提升和强化电流创造了有利条件。

早在上世纪 80 年代初期，普基铝业公司开始在 AP18 型铝电解槽上使用石墨含量 30%以上的阴极炭块。中国使用高石墨质阴极炭块始于中铝贵州分公司，它们对高石墨质阴极炭块生产和应用做了大量的富有开拓性的工作。

中铝贵州分公司电解厂 2000 年 10 月在 230kA 电解槽上进行的对比试验表明（8 个月的生产数据）：高石墨质阴极炭块槽的平均炉底压降为 325.4mV，比半石墨质阴极炭块的低 37.7mV，平均为 363.1mV；高石墨质阴极炭块槽的阴极电流分布比半石墨质阴极炭块槽的更均匀，前者的电解温度计炉底温度波动小，这些都有利于保持电解槽状态平稳，提高

电解槽寿命。高石墨质阴极炭块槽炉底平整，吸纳膨胀变形很小，而半石墨质阴极炭块槽的则正好相反，炉底不平整，且有一定的膨胀变形。

中国石墨化阴极生产技术的开发起步虽然比较晚，但在中国铝业郑州研究院与一些铝厂的努力下，已经能够批量生产石墨化阴极炭块，可满足铝工业发展的需要。

1.1.18 电解铝生产概况

从 1888 年铝实现工业化生产以来，至 2013 年全世界生产的原铝已经超过 12 亿吨。2013 年，全球的原铝即从电解槽抽吸出的液态铝产量 50570kt，中国的产量约占世界总产量的 47.46%。它们都是用霍尔-埃鲁电解法生产的，也就是电解冰晶石-氧化铝熔体生产的，生产工艺流程比较单一。

氧化铝是提取铝的唯一原料，冰晶石（Na3AlF6）是铝电解质的主要成分，在电解温度（950℃~970℃）下，它呈现熔融状态，氧化铝溶解于其中形成熔融电解质，为了改善电解质性质，还往往向其中添加一些 AlF3（氟化铝）、LiF（氟化锂）、CaF2（氟化钙）、MgF2（氟化镁），这些氟盐统称为添加剂，它们会改变电解质熔点（初晶温度）、密度、电导率、粘度等物理化学性能，因此，电解质是一种成分复杂的混合物熔体。它们也被称为铝电解溶剂。

熔融电解质被装于电解槽的槽膛内，预焙炭阳极部分沉浸于电解质中，阳极底掌与炭素阴极上面的一层铝熔体（铝液）保持一定的距离，生产时，铝液便成为实际的阴极。阳极导入的直流电经过电解层由阴极导出，进行电解。在电解过程中，氧化铝被分解，铝源源不断地从阴极析出，而阳极上不断地有阳极气体排出，主要是二氧化碳。

冰晶石是溶剂的主要成分，分子式 Na3AlF6，也可以写成 3NaF·AlF3，天然冰晶石是无色或者雪白色的，密度为 2950kg/m3，熔点为 1009.2℃；人造冰晶石为灰白色粉末或细砂粒状，不溶于水，熔点为 1012±2 摄氏度。氟化钠与氟化铝的摩尔比称之为冰晶石的分子比，分子比为 3 的称为中性的冰晶石，大于 3 的称为碱性的，小于 3 的称为酸性的，人造冰晶石的分子比通常为 1.6~2.2。

冰晶石是目前铝电解生产中最理想的一种溶剂，它与氧化铝形成的熔体可在 950℃~970℃进行电解，比其熔点低得多。这种熔体的密度比液态铝的约低 10%，故电解提取的液态铝沉积于电解槽底上部，溶有氧化铝的冰晶石有着良好的导电性。

理论上冰晶石在电解过程中是不损耗的，但实际上每提取 1 吨原铝需要消耗 5~9.5kg 冰晶石，因为其中的氟化铝被

带进电解质中的水分分解，自身也会挥发一些，电解槽内衬也会被吸收一些，操作时也会造成少量的机械损失等等。

氟化铝也是电解质的添加剂，白色粉末，但粒径比氧化铝的稍大，而流动性却不如氧化铝。添加它，一方面可以弥补电解质中氧化铝的损失，另一方面可以调整电解质的分子比，稳定电解进程，其消耗为 20~28kg/t 铝。它的沸点 183℃，易挥发与飞扬，宜小心翼翼地向电解槽内添加。

氟化钠（NaF）也是一种电解质添加剂，白色粉末，易溶于水，也可以用碳酸钠取代，以降低生产成本。通常多在电解槽预热期和启动初期添加，因为新电解槽炭内衬对氟化钠有选择性吸收，使电解质分子比骤然下降，同时新电解槽装的冰晶石的分子比较低，而电解工艺又要求用分子比高的，以提高电解槽温度。

氟化钙（CaF2）为面心立方晶体，熔点 1423℃，也是一种常用的电解质添加剂。往往在新电解槽启动时添加氟化钙，其作用是使电解槽槽帮更加坚实些，降低电解质初晶温度，从而降低电解温度，节约能源。虽然氟化钙在电解过程中，随电解质的损失而有所减小，但不需要添加，因为氧化铝中含有少量的氧化钙，氧化钙与氧化铝反应可生成氟化钙，也就是它有自补充能力。

氟化镁是一种更好的电解质添加剂，其作用与氟化钙的

大体相当，是电解槽槽帮的有效矿化剂，在降低电解质初晶温度、改善电解质性能、分离炭渣、提高电流效率、加强电解质电导率等方面的作用比氟化钙的更为明显。

氟化锂（LiF）或者碳酸锂（Li2CO3）有一定的降低电解温度和提高电解质电导率的作用，对电流效率的提高和电耗的降低也有一定效果，可以适量添加。

预焙阳极在电解过程中不会散发沥青烟和其他有害气体，同时使与预焙阴极后槽电压降低，有利于电解槽大型化和自动化。当前预焙阳极净耗 400~450kg/t 铝，毛耗（含残极）500~550kg/t 铝。预焙阳极中含的杂质在电解过程中被还原以后，以 Si、Fe、Ti、B 等杂质进入原铝中，故应严格控制预焙阳极的杂质含量，灰分宜低，而比电阻及气孔率应小。

1.1.19 预焙阳极生产工艺

以石油焦、沥青为骨料，煤沥青为粘结剂，经混捏、成形、焙烧生产的炭块，用作预焙槽的阳极材料称为阳极炭块。这种经过焙烧的炭块具有稳定的几何形状，所以也称作预备阳极炭块，也常被称作铝电解用炭阳极。以预焙阳极炭块作为电极的铝电解槽称为预焙烧阳极电解槽，简称预焙槽，这是当代提取铝的一种先进技术，在 2013 年全世界生产的约 47000kt 原铝中，有 44000kt 即约 93.62%的原铝是用此法生

产的。

阳极炭块一般为长方体，在其导电方向的上表面有 2~4 个直径 160~180mm，深 80~110mm 的圆槽，这种圆槽常被称为炭碗，在阳极组装时，它们用于安放阳极爪头，然后往空隙处浇灌磷生铁，使阳极导杆与阳极炭块连成一体，形成阳极炭块组。阳极炭块尺寸决定于电解槽的电流大小与工艺，但其通过的电流密度通常为 0.68~0.82A/cm2，使用周期 26~32 天。当今，凡电流大于 200kA 的电解槽均用预焙阳极。

以阳极炭块为本体构成的预焙阳极操作比较简单，阳极电压降比自焙阳极的低，易于实现机械化与自动化；消除了电解过程中产生的沥青烟气，有利于电解槽的大型化。因此，当下全世界新建的大铝厂都采用预焙阳极。

2013 年，全球预焙阳极的总生产能力约 25000kt/a，中国的预焙阳极生产能力约 14800kt/a，占世界总产能的 59.2%。

中国的预焙阳极生产企业可分为：

（1）大型电解铝企业（原铝生产能力大于 100kt/a）配套建设的预焙阳极厂。其中部分厂的关键设备从国外引进，装备水平达到国际先进水平，如普遍采用自动配料、连续混捏、焙烧炉燃烧自动控制等。特别是自 1997 年以来，新建的电解铝厂配套的大型炭素厂都具有自动化程度高、生产能力大、劳动生产率高、环境友好的特点，如山西华泽铝业有限

公司炭素厂，生产能力 160kt/a，主体设备 85%以上采用国际先进技术或直接进口，原料煅烧用的是自动监控的Φ3.43×67.1m 的超大型回转窑、BUSS 公司的 k600-CP-100 型卧式连续混捏机，德国 KHD 公司的双工位振动成形机，火焰系统自控燃烧式焙烧炉。另外，天车、清理机、抛丸机、组装机等均是国内一流的。

（2）中小电解铝厂配套的预焙阳极车间大都采用了国产的有特色的罐式煅烧炉、间断式混捏锅、单工位振动成形机，技术装备属国内先进水平，可满足本厂电解生产对预焙阳极的需求。

（3）独立的预焙阳极企业。它们的生产与技术与第二类企业的大体相当，但用的原料无残极炭块，因而所生产的预焙阳极中的 Na、Ca、Fe 等微量杂质的含量较低，产品反应性等指标优良，整体品质相当稳定。近十几年来，有一些这类企业在结构调整中从事出口业务，2010 年以后，每年出口到世界各国与地区的预焙阳极产品已超过 350kt。

中国不但已成为预焙阳极生产大国，而且已成为一个初级强国，但要成为世界预焙阳极的顶尖强国还有一段较长的路要走，但不太远了。

1.1.20 铝电解槽的前世今生

自 1886 年美国霍尔与法国埃鲁发明冰晶石-氧化铝熔盐电解生产铝的工艺（H-H 法）以来，已有 127 年历史，虽然工艺参数电解槽的结构及大小有了很大变化，但提取铝的原理至今未变，截至 2013 年底，全世界生产的约 11.8 亿吨原铝都是用此法生产的。H-H 法原理就是将氧化铝溶解于熔融的冰晶石中，形成电解质，通入直流电，进行电化学反应得到原铝。

由于 H-H 法电耗高、投资大、环境污染较为严重，近 100 余年来，冶金工作者一直不遗余力地寻找节能与环保的新的炼铝工艺，虽然提出了并试验了或正在实验着一批新工艺，但是由于存在技术及经济方面的原因，尚无一个有商业生产价值的炼铝工艺问世。

127 年来,电解炼铝的主体设备——霍尔-埃鲁电解槽(可简称为 H-H 槽）的结构发生了很大变化，电解槽的电流容量由最初的几 kA 增加到现在的 600kA，铝电解生产的直流电耗由最初（1889 年埃鲁槽）的 40000kWh/t 铝（电流效率 75%）和 31000kWh/t 铝（1892 年霍尔槽，电流效率 80%）降到了 2011 年的 12850kWh/t 铝（中国），电流效率 96%以上。

初期电解槽的特点是：电流小、电压高、阳极电流密度大、电耗高、电流效率低、阳极是预制的。如果按阳极特性划分，电解槽可分为：预焙阳极，旁插自焙阳极，上插自焙阳极，预焙阳极四种。也可以分为：旁插自焙阳极槽、上插式自焙阳极槽、不连续预焙阳极槽、连续式预焙阳极槽。

还可以按电流强度将电解槽分为：小于 85kA 的小型槽，大于 85kA 小于 160kA 的中型槽，大于 160kA 小于 400kA 的大型槽，大于 400kA 小于等于 600kA 的超大型槽。

由于中国已淘汰了自焙槽，国外的自焙槽也不占主导地位，同时新建的铝厂都用的是大型或超大型预焙槽，所以对自焙槽的结构及特性不再赘述，在全球 2013 年生产的约 45000kt 原铝中，85%以上出自预焙槽。

自焙阳极电解槽本身存在着较多的缺点：阳极糊在电解槽上焙烧时产生大量的沥青烟气，恶化劳动条件，污染环境；阳极操作复杂，不易实现机械化与自动化；在生产过程中，也会排放大量沥青烟气与氟化氢气体，严重污染环境。

大型边部加工预焙阳极槽

在自焙槽发展的同时，炭素工业也得到快速发展，可以商业化生产高品质的大型预焙阳极快，在上世纪 50~70 年代，建成了 100kA 左右的大型边部加工预焙阳极电解槽，电耗（直

流)达到 13500~15500kWh/t 铝。在此期间,中国建成了 80kA、100kA、135kA 等边部加工预焙阳极电解系列。与自焙阳极槽相比，这种预焙槽的阳极消耗低，电极电压小，没有沥青烟气排放，对环境污染轻，不过这种槽的集气效率低，不能满足环保法规要求，中国已经将这种电解槽改造为中间点式加料预焙阳极电解槽。

中间点式加料预焙阳极电解槽

自上世纪 80 年代以来，在电解槽物理场研究方面取得了很大进展，其磁场、热场、力场的相互关系得到了很好的解决，高效大功率硅整流器在铝电解厂得到了应用，中间点式加料预焙槽的容量提升到了 300kA 以上。进电方式也由双端发展到了大面多点进电方式，及优化的母线设计，2011 年，国外已有 500kA 级电解槽,中国更是有了 600kA 级的电解槽，直流电耗达到 12500kWh/t~13500kWh/t 铝。

中间点式加料预焙槽的点式加料器数量一般有 2~6 个，决定于槽容量。打壳下料装置定时定量向电解质中加料，氧化铝容器的容量为 0.8 升、1 升、1.2 升、1.8 升、4.5 升等。这种加料方式的优点是可以保持电解质中氧化量的浓度稳定，使槽的工艺条件稳定，是一种具有较高电流效率、低能耗、产量高的槽型,同时电解的集气效率高,便于采用干法净化。

1.1.21 说说新法炼铝

自 1888 年至今，全世界工业化生产的铝全是用霍尔-埃鲁熔盐电解法提取的，该法对人类文明社会的发展作出了巨大贡献，但也存在着诸多无法回避的缺点，所以人们一直都在寻求新的炼铝法。

霍尔-埃鲁熔盐电解法的主要缺点是：新厂建设投资大，占地多，能耗高（约 13000~14500kWh/(t 铝)，并且消耗大量的炭阳极，排放大量的温室气体 CO2（生产 1 千克铝约需排放 1.22 千克的 CO2),同时还会排放一些有毒的含氟气体(CF4、C2F6）等；对氧化铝原铝的需求量大，提取氧化铝不但工艺复杂流程长，而且对铝土矿资源与能源依赖性大。

碳热还原法

美国铝业公司与力拓-加铝公司致力于碳热还原炼铝法，已经取得可喜的成就，前景灿烂，但距工业化生产还有相当长的路要走。该法的原理是：采用碳热法生产低价卤化物，如氟化物、氯化物、溴化物，以及低价 A12S，再分解生产铝，这是一种一步提取铝的方法。

铝土矿、高岭土、粘土等含铝资源的物质均可作为此法炼铝的原料，其基本原理是：

1. 以 A1203 为原料，A1Cl 作为载体，其反应式为：

Al2O3+AlCl3（气）+1.5C　　3AlCl3（气）+1.5CO2（气）

3AlCl（气）　　2Al+ AlCl3（固）

2. 以铝合金为原料，则按以下反应提取纯铝：

2Al4AlCl3（气）　　3AlCl3（气）

3AlCl3（气）　　2Al+ AlCl3（固）

按以上反应在高温生产稳定的低价的卤化物中间产品（AlCl、AlF、Al2S）等，它们在低温下回发生歧化反应，得到铝及正常价态铝的卤化物（AlCl3、AlF3、Al2SO3 等），铝的正常价态卤化物可以循环使用。

若是在真空炉内进行，则炼铝机理的第一步是一个气体体积膨胀的反应：

Al2O3+AlCl3(气)+1.5C　　3AlCl3(气)+1.5CO2(气)

碳热还原法可用含铝原料一步直接还原提取铝，不必经过电解生产铝的这种高能耗、高污染的过程，提高了生产效率，降低了能耗，减轻了污染，扩大了资源来源。该法一旦实现工业化生产，就会彻底改变传统的生产铝的工艺，是提取铝工艺的一次革命，铝的价格可下降 50%左右，铝的应用会大大拓宽，人类的生活品质也会有所改观。

20 世纪 60 年代，中国郑州轻金属研究院作过铝土矿直接炼铝（低价硫化铝法）的半工业试验，积累了一定的经验，为今后的研发奠定了基础。

离子液电解法

离子液体是由特定阳、阴离子构成的在室温（15℃~30℃）呈液态的熔盐体系，又称之为室温溶盐，简称离子液体。

离子液体是一种新型的绿色溶剂，其特点是结构自由组合多变，电导率高，电化学窗口宽，无挥发性，无可燃性，可循环使用等等。这些特性为在室温提取铝提供了一种新的有可能性的工艺。目前，已发现一百多种离子液体，其中一些是金属化合物溶于有机溶剂的溶液——离子液体。

离子液体是一种理想的室温液体电解质，不含任何水分，也不存在水化、水解、析氢等过程，对溶有铝、镁、锂、钛、钨、钼等化合物的离子液体进行电解可以获得纯的金属。

采用离子液体电解铝，不仅可以在室温进行，而且不会排放 CO2 和氟化物气体，而且电流效率大幅度提高、能耗显著降低，设备腐蚀减轻，对环境友好，是一种绿色的铝冶金工艺，使铝提取工艺发生革命性的变化。不过，此法仍具有浓厚的科幻色彩，尚未进入研究阶段。

1.1.22 话说化学品氧化铝

化学品氧化铝是指除冶金用氧化铝之外的所有氧化铝、氢氧化铝和铝化合物的总称，在国外统称为非冶金级氧化铝，而在中国称它们为多品种氧化铝或化学品氧化铝。

化学品氧化铝种类繁多，国外生产的品种多达 460 种，中国可生产的仅约 150 多种。在有色金属行业标准 YS/T619-2007 中，按成分将化学品氧化铝分为 5 类：氢氧化铝系列、特种氧化铝系列、拟薄水铝石系列、沸石系列和铝酸钙水泥系列。随着产业的发展，聚合氯化铝、含水铝硅酸钠、氟化盐等铝盐、铝酸钠、镓及其化合物、部分氧化铝陶瓷和刚玉耐火材料等也被纳入化学品氧化铝范畴。

在氧化铝工业问世 24 年后的 1910 年，美国铝业公司率先向市场推出世界第一批煅烧氧化铝，用作生产白刚玉磨料的原料，拉开了化学品氧化铝工业的序幕。与冶金级氧化铝相比，化学品氧化铝的特点是：品种多，价格相对稳定，产量也相对稳定，附加值高，当然生产技术门槛也较高。化学品氧化铝经过 100 余年的发展，出现了许多新工艺，新设备和新产品，其中重要的产品有：活性氧化铝、煅烧氧化铝、铝酸钙水泥、高纯氧化氯、β -A1203 等。在每年全世界生产的氧化铝中,化学品氧化铝的产量占氧化铝总量的 7.5%~9.5%。

美国铝业公司曾是世界最大的化学品氧化铝生产商，其下属 20 多个生产厂。美国铝业公司在中国青岛也有一个工厂，该公司生产的品种有 200 多种，年产量在 2100kt 以上，其中

耐火材料、陶瓷约占 28%、塑料填料占 15%、化学品铝盐占 40%、石油化工类产品（催化剂及载体）占 17%左右，2008 年，美国铝业公司将化学品氧化铝业务与生产企业一揽子全部卖给荷兰安迈公司。

日本虽然 1 吨冶金级氧化铝也不生产，但却是全球主要的化学品氧化铝生产国之一，其已经实现了规模化、系列化生产，年产量在 900kt 以上，主要生产公司有住友化学工业公司、昭和电工公司和日本轻金属公司。

2012 年统计数据显示，全世界生产的化学品氧化铝约 8000kt/a，不仅在冶金、化工、建材、机械、电子、医药、环保等行业大量应用，而且在航空航天、信息技术、国防兵器等高精尖领域也得到广泛应用。

中国化学品氧化铝工业起步较晚，上世纪 60 年代初，为了解决电子工业原料匮乏的局面，山东铝厂（现中铝山东铝业分公司）研制成功低纳的α -A1203，开创了中国生产化学品氧化铝的先河。20 世纪 70 年代，为了满足石油、化工、耐火材料、陶瓷、制药、环保、航空航天、兵器军工等部门对化学品氧化铝的需求，中铝山东铝业分公司、郑州轻金属研究院又先后研制成功了活性氧化铝、除砷除氟剂氧化铝、低铁氢氧化铝、高纯氧化铝、陶瓷用α －A1203、喷涂用氧化铝等 30 余种市场急需的产品。

20 世纪 80 年代，化学品氧化铝研制硕果累累，新产品层出不穷；20 世纪 90 年代以来，中国在非冶金级氧化铝的研制与生产方面进入了快速发展时期，以郑州轻金属研究院、中铝山东铝业分公司、中国长城铝业公司为代表的一些企业建成了 40 多条特种氧化铝生产线，还有一些民营企业也加入了化学品氧化铝生产行列，它们以较低的成本生产各种化学品氧化铝，如超细超白氢氧化铝、各种填充阻燃材料、活性氧化铝、吸附氧化铝、催化剂及载体、各种型号的煅烧氧化铝、白刚玉、铝酸钙水泥及镁铝尖晶石等。

中国化学品氧化铝的品质与国外先进水平相比还有较大差距，主要表现为：产品化学纯度、晶型、粒度分布、颗粒形貌、孔结构、比表面积、收缩率等不能有效控制，不能很好地满足用户要求，产品品种也只有国外的 35%左右。

1.1.23 说说化学品氧化铝

化学品氧化铝是除冶金级氧化铝之外的各种氧化铝、氢氧化铝和含铝化合物的总称，在国际上统称非冶金级氧化铝，在中国又俗称多品种氧化铝，其中经过特殊加工过程在性能上与冶金级氧化铝有一定差别的又常称为特种氧化铝。

化学品氧化铝种类繁多，根据有色金属行业标准 YS/吨 619-2007《化学品氧化铝种类及牌号命名》，按化学成分将

化学品氧化铝分为5类：氢氧化铝系列、特种氧化铝系列、拟薄水铝石系列、沸石系列和铝酸钙水泥系列。现在，聚合氯化铝、含水铝硅酸钠、氟化盐等铝盐、铝酸钠、镓及镓的化合物、部分氧化铝陶瓷和刚玉耐火材料等也被纳入了化学品氧化铝的范畴。

1910年，美国铝业公司（Alcoa）生产销售了世界上第一批煅烧氧化铝，作为生产白刚玉磨料的原料，开世界化学品氧化铝工业的先河，距氧化铝工业问世已24年。化学品氧化铝的特点是品种多，附加值高，技术含量高，应用领域广且不断扩大，价格相对稳定，对环境友好，因此，已成为铝产业的一个非常重要的分支。世界各国纷纷投巨资发展化学品氧化铝产业，美国铝业公司曾是世界最大的化学品氧化铝生产商，其拥有24个生产企业，遍布世界各主要国家地区，生产的品种有220多个，产量超过1000k吨/a。后于2007年将化学品氧化铝板块转让给荷兰安迈公司。

日本也是世界化学品氧化铝生产消费大国，2012年其产量约1000k吨，而且在持续地缓缓上升，品种也是全球最多的，日本不生产冶金级氧化铝，但在化学品氧化铝生产方面却实现了规模化、系列化、高科技化、环保化与成本合理化，产品除满足国内需求以外，出口量达到25%左右。日本化学

品氧化铝产量的 85%以上为住友化学工业公司、昭和电工公司、日本轻金属公司所生产。

1940 年前后，美国、日本及欧洲对化学品氧化铝进行了大规模的研究，到 20 世纪 70 年代，在国外的一些工业发达国家得到巨大发展。据国际铝业协会的统计，1975 年，西方国家氧化铝总产量约 20344k 吨，化学品氧化铝产量 1699k 吨，占总产量的 8.3%；2000 年，全球氧化铝总产量约 51200k 吨，而化学品氧化铝的产量为 4800k 吨，占总产量的 9.4%；2008 年，全球冶金级氧化铝产量 60496k 吨，化学品氧化铝产量 4638k 吨，占总产量的 7.12%；2012 年，世界氧化铝总产量 95705k 吨，化学品氧化铝产量 8580k 吨，占总产量的 9%。2008 年~2012 年，世界化学品氧化铝的年平均增长率为 16.6%，比原铝的年平均增长率约高 11 个百分点。

中国化学品氧化铝工业起步较晚，1961 年前后，为了解决电子工业原料匮乏的局面，山东铝厂（现名山东铝业股份有限公司）首先研制成功低纳α 型氧化铝，自此开始了中国化学品氧化铝的研发和生产。上世纪 70 年代，为了满足石油、化工、耐火材料、陶瓷、制药、环保、兵器、航空航天等产业对化学品氧化铝的需求，山东铝厂、郑州轻金属研究院等又先后研发和生产了活性氧化铝、除砷除氟剂氧化铝、低铁氢氧化铝、高纯氧化铝、陶瓷用α -A1203、喷涂用氧化铝等

24 种新产品；上世纪 80 年代，中国的化学品氧化铝生产进入高速发展时期，新产品不断涌现，以郑州轻金属研究院、山东铝业股份有限公司、中国长城铝业公司为代表，建成了约 60 条特种氧化铝生产线。在一些大型氧化铝企业周边地区先后建成了一批批生产化学品氧化铝的民营企业，它们利用国产的或进口的原料生产各种化学品氧化铝。

中国是氧化铝生产大国，采用的生产工艺比任何一个国家的都多，易于实现工艺流程中嫁接生产化学品氧化铝的支线，尤其是烧结法生产的氢氧化铝，其具有高的自然白度。中国的化学品氧化铝产业经过 50 多年的发展，在国内外市场上具有相当大的影响力，氢氧化铝填料等产品还享誉国际市场。

不过，与美国、德国、日本相比，中国化学品氧化铝无论产品品质、品种、生产规模均存在着较大差距，其根本原因是在生产技术与装备相对落后，对生产与应用方面的基础理论研究不够，创新能力弱，市场开发力度不够。

中国化学品氧化铝品质与国外先进水平相比的差距主要表现为：化学纯度、晶型、粒度分布、颗粒形貌、孔结构、比表面积、收缩率等物理化学指标不能有效稳定地控制，不能很好地满足用户的需求，特别是不能满足那些高科技产业的要求。

1.1.24 化学品氧化铝的用途

2012 年，全世界生产的化学品氧化铝约 430 种，中国可商业化生产的已经超过 150 种。2012 年，中国氧化铝产量 42140kt，进口量 4980kt，冶金级氧化铝需求量 43040kt，化工品氧化铝需求量 1800kt，总需求量 44840kt，在表观消费的氧化铝中，化学品氧化铝仅占总量的 4%，比国外工业发达国家的 9.5%，相差 5.5 个百分点，这说明中国的工业化程度比发达国家的还有相当大的差距，特别是高技术产业方面的差距更大，因为有很多化学品氧化铝主要应用于高技术产业。

荷兰安迈公司 2012 年生产了约 1150kt 化学品氧化铝，品种约 220 种，其中耐火材料、陶瓷用化学品氧化铝占其总量的 28%，塑料填料占 15%，化学品铝盐占 42%，石油化工类产品（催化剂及载体）占 15%。

（1）氢氧化铝

氢氧化铝是制备铝盐及其他精细化工产品的重要原料，主要用于制造人造石材、阻燃剂、铝盐、造纸填料、催化剂、光学玻璃等。无定型氢氧化铝有良好胶粘性，可使纤维获得良好的防静电、防尘抗污性能，并大大改善其表面品质；耐高温和良好的表面光洁度使其在高级陶瓷和电瓷制品中有着广泛的应用，可取代钛白粉，作为高级画报纸填料。在医药

行业可作为胃酸抑制剂和胃溃疡粘膜覆盖剂，疗效好，也是多种胃药的主要原料。

（2）沸石系列与铝盐

沸石是一类多孔结构的物质，在 A 型沸石系类中，根据孔径大小分为 3A、4A 和 5A 的，也可以根据环四面体数和褶皱程度将沸石分为 X 型及 Y 型的。沸石主要用作分子筛、洗衣粉助剂，还可用作吸附剂与干燥剂，以及催化剂载体原料。1992 年，山东铝业公司建成中国首条生产能力达 20kt/a 的 4A 型沸石生产线，以后经不断扩建，2012 年其生产能力达到 320kt/a，目前国内总生产能力已达到 450kt/a。

硫酸铝、铝酸钠等铝盐用于水净化处理，聚合氯化铝广泛用于生活饮用水、工业用水和工业废水处理，另外，纯聚合氯化铝可用作现代精细化工粘结剂的原料、中性造纸施胶剂、现代制药和化妆品添加剂、化工生产偶联剂和催化剂。

（3）拟薄水铝石和活性氧化铝

拟薄水铝石又称假一水软铝石，其分子式 A1203·nH2O 中的 n 为 1.25~2。它具有孔容和比表面积大、粘结性强、胶溶性好及触变性凝胶的特点，是生产催化剂载体——活性氧化铝的主要原料，在催化剂行业占有重要地位，在催化剂生

产中占原料总用量的 20%以上，在造纸和建材等行业也有一定量的应用。2012 年，中国生产拟薄水铝石的企业有近 40 家，总生产能力约 80kt/a，美国、日本和西欧是其主要的生产者。

活性氧化铝是氢氧化铝变体热解产物χ 、ρ 、γ 、η 、κ -A1203 的总称，具有较大的比表面积、多种孔隙结构及孔径分布、丰富的表面性能，因此在吸附剂、催化剂和催化剂载体领域有着广泛的应用，例如用作汽车尾气催化剂时，可使排出的污染物在较低的温度下（低于 200℃）把 CO 和碳氢化合物 HC 转化成 CO2 和 H2O，NOx 气体转化成 N2，从而提高燃油效率与降低温室气体排放。

中国生产活性氧化铝的主要企业为中国铝业山东分公司、郑州轻金属研究院、中铝山西分公司等，全国的总生产能力约 35kt/a。

（4）超细氢氧化铝

超细氢氧化铝是一种应用广泛的化工产品，化学稳定性好、无毒、无味，是电工、电子、地毯、塑料、橡胶等行业的必不可少的环保型阻燃剂。在造纸工业用作表层涂料、填料和生产不燃纸。在牙膏生产中可取代白垩和磷酸二钙，制成高级牙膏。是制备精密仪器陶瓷、生物陶瓷、医药的原料。中国可生产超细氢氧化铝粉的企业有中铝贵州分公司、中铝

中州分公司、中铝山东分公司等 8 家企业，总生产能力约 22kt/a。

国外主要生产企业是美国的雅宝公司和邱博公司，日本的昭和电工公司、住友化学公司、日本轻金属公司，以及德国的那巴尔特克公司等。

（5）高纯氧化铝

高纯氧化铝为无毒无味的白色粉末，具有流动性，熔点高（2050℃）、电阻大、硬度高、力学性能强、耐磨、耐腐蚀、耐热、绝缘性好等特点，是一种高技术材料，在光学、化工及特种陶瓷等领域获得广泛应用，用以制造透光性氧化铝烧结体、高密度微粒烧结体、宝石单晶、人工晶体、电子元件、刀具、研磨材料、发光材料、特殊玻璃用添加剂、塑料及橡胶填料等。

通常将纯度大于 3N（99.9%）的 A1203 称为高纯氧化铝，国外生产高纯氧化铝有着悠久的历史，中国的研发始于上世纪后期，1985 年开始工业化生产。2012 年中国可生产高纯氧化铝的企业约有 15 家，如山东淄博恒基天力工贸有限公司、贵州宇光特种陶瓷材料有限公司、大连路明科技集团有限公司等。全国的总生产能力约 2800t/a，可满足国内需求的 75%，但一些高端产品仍需进口。

（6）高温氧化铝（α - A1203）

高温氧化铝又称煅烧氧化铝，是高温焙烧氢氧化铝的产品，为白色粉末或细砂状，应用于陶瓷、耐火材料、研磨抛光、化工、光学、电子等领域，是一种用途广泛、性能优异、市场前景广阔的无机高技术材料，市场在不断拓宽。

根据生产方式或处理温度的不同，高温氧化铝主要分为熔融氧化铝、烧结氧化铝、煅烧氧化铝。高温α - A1203 属三方晶系，简单六方点阵，熔点 2050℃，莫氏硬度 9，力学性能高，抗弯强度 250N/mm2。用高纯α - A1203 制备的高级耐火材料可以使温度达到 1700℃，电阻率高，电绝缘性能强，常温电阻率为 1015Ω •cm，是优良的绝缘材料，热传导率高，化学稳定性强，比热较大。

（7）纳米氧化铝

纳米氧化铝为白色粉末，无味，不溶于水，球形，粒度均匀，易烧结，是功能陶瓷、结构陶瓷、光学陶瓷等的重要原料。纳米氧化铝是当今纳米技术与材料研究的热点之一。由于其所具有的体积、表面界面、量子尺寸以及宏观隧道等效应，使其在力学、热学、光学、电学、磁学、催化等方面显示着独特的性能，因而应用领域在日益扩大。

当前，中国在纳米氧化铝生产技术方面尚未达到产业化

水平，虽然有些企业自称具备纳米α - A1203 生产能力，但实际产品多为具有纳米结构的亚微米级颗粒，且主要是γ - 纳米 A1203，我国纳米α -A1203 几乎全部依赖进口。

2012 年，中国虽有 10 余家如大连路明纳米材料有限公司、上海高纳粉体技术有限公司等可生产纳米氧化铝，但实际产量还不到 100t，而且大都是纳米α -A1203。

（8）片状氧化铝

片状氧化铝粒径范围大，覆盖度高，取向性良好。用片状氧化铝制备的产品、浇注糊等有良好的抗热震性，可用作密封炉内衬、钢水包衬里、钢水铁水流槽、电绝缘体、陶瓷制品。也可以用片状氧化铝制造催化剂基体或载体、环氧树脂和聚醋树脂填料、耐火涂料、燃烧器喷嘴以及化妆品颜料。

2001 年，江苏省江都市新昌辉特种耐火材料有限公司开始生产片状氧化铝，2012 年，我国可生产片状或板状氧化铝的企业有 5 家。

1.1.25 化学品氧化铝的分类与性质

按照晶型、性质和用途的不同，通常把化学品氧化铝分为：特种氢氧化铝（三水及无定型），活性氧化铝（中间相），高温氧化铝（α 相），氧化铝高技术陶瓷，含铝耐火材料，铝盐，镓及其化合物等。

氧化铝及其水合物由于结构不同，因而各有各的物理化学性质。常见的氧化铝及其水合物的硬度、密度、折光率按如下排序递增：三水铝石-一水软铝石-一水硬铝石-刚玉。

不同形态的氧化铝及其水合物在酸及碱性溶液的溶解度及其溶解速率是不同的。三水铝石和拜耳石的化学活性最高，也最易溶解，一水软铝石的次之，一水硬铝石最不易溶解。氢氧化铝可溶于酸，也可以溶于碱溶液，在 pH4.5~8.5 溶液中的溶解性很低，在 pH6 的溶液中的室温溶解度为 7~10mol/L；在 pH 低于 4 及大于 9 的溶液中的溶解性显著上升。在不同形态的氧化铝中，γ -Al2O3 的化学活性较大，而刚玉（α -Al2O3）则具有极强的化学稳定性，即使在强酸或者强碱溶液中的反应速率也极慢。

（1）拜耳石

拜耳石由 AB-AB 形式堆积式的八面体层状 Al（OH）3 晶体，接近于六面体紧密堆积形，层间以氢氧键连接。

（2）三水铝石

三水铝石的晶格结构是由双层氢氧离子与铝离子形成的八面体配合物，属单斜晶系，莫氏硬度 2.5，具有一定耐磨性，易加工，化学稳定性好，无毒无味，不挥发，加热至 250 摄氏度左右脱水，并吸收大量热能，消烟阻燃性好，是两性化合物，可溶于酸，也可以溶于碱液。

（3）诺耳石

1956 年被发现，是一种三羟基化合物，与拜耳石的结构类似。

（4）一水硬铝石

一水硬铝石（Al（OH）3）属于斜方晶系，结构基元是AlOOH 双链，它们组成了一个六边形的圆环。晶胞中有 2 个分子，密度 3.44g/cm3，是中生代和较古老的沉积型矿物的主要组成部分，在一些富含铝的腐值质岩石和高粘土中也大量存在。

（5）一水软铝石

构成一水软铝石的基元也是 AlOOH 双链，它们形成双层，并排列成立方堆积，斜方晶系，经常可以得到菱形的晶体，根据制备晶体条件不同，也出现针状等晶形。晶胞中有 2 个分子，密度 3.01g/cm3，莫氏硬度 3.5~4。

（6）刚玉（α -Al203）

刚玉是热力热学上唯一稳定的氧化铝形态，它的相对分子量是 101.96，熔点 2050 摄氏度，沸点 2980 摄氏度，线膨胀系数 8.6×10-8/k，热导率 0.2888W/（cm •k），六方晶系，晶胞中有 2 个分子，密度 3.98g/cm3，莫氏硬度 9，只有钻石和其他人工合成具有钻石结构的化合物的硬度才比它的大，珍珠金刚石光泽。

（7）煅烧氧化铝

工业氢氧化铝或氧化铝在 1200~1700 摄氏度焙烧，既得 α -Al2O3，其化学纯度高，熔点约 2050 摄氏度，高温煅烧的氧化铝的硬度可达莫氏硬度 9，吸水率不高于 2.5%，具有良好的化学稳定性、耐高温，买磨损，是上好的磨料。

（8）板状氧化铝

在 1800 摄氏度以上焙烧碱含量低的工业氢氧化铝再结晶后制得的大粒板状的 Al2O3，它的晶粒比煅烧氧化铝的粗大，其特点是热容量大、热导率高、密度大（3.65~3.8g/cm3），并有稳定的高温性能，高的化学纯度，强的抗腐蚀性与抗震性。

（9）活性氧化铝

活性氧化铝（γ -Al2O3）是一种过渡形态的氧化铝，为粉状、微球状或柱状灰白色固体无序的晶体，多孔的高度分散的固态物料，具有表面积大、吸附性强、表面酸性良好等特点。

1.1.26 精铝与高纯铝

通常，按照铝的纯度不同，中国及大多数国家将其分为三类：原铝、精铝、高纯铝；美国也有这么分的，但也有美国科学家采用如下分法，没有精铝（refined aluminium）这一项，却有工业纯（commercial purity）铝、高纯（high purity）铝、超纯（super purity）铝、特纯（extreme purity）铝、

极纯（ultra purity）铝之分：

铝，%	名称
99.50~99.79	工业纯铝
99.80~99.949	高纯铝
99.950~99.9959	超纯铝
99.9960~99.9990	特纯铝
＞99.9990	极纯铝

高纯铝的表示方法有两种：一种是用纯度百分数，如９９．９９９％；另一种用“Ａl”与“Ｎ”表示，如Ａl－５Ｎ（９９．９９９％Ａl）、Ａl－５Ｎ５（９９．９９９５％），“Ｎ”是英文ｎｉｎｅ （九）的缩写。这两种方法都是国际通用的。

原铝纯度一般为９９．５％～９９．８５％Ａl，工业电解槽生产的９８．５％以上的原铝，都是这个纯度，如加强管理，精心选择原料与操作，也可能用工业电解槽直接生产９９．８５％～９９．９６％Ａl的高等级原铝，中铝包头铝业有限责任公司有若干台电解槽专门用于生产这类高等原铝。

原铝中的杂质主要来自氧化铝、冰晶石、氟化铝、炭阳极等，也有一些来自电解槽结构材料与工器具。铁、钛、磷、锌、镓主要来自氧化铝，硅和钒则主要由溶剂提供。

精铝是纯度＞９９．９９％～≤９９．９９９％Ａｌ的铝，是以原铝为原料采用三层液电解法、偏析法、区域熔炼法或三层液法、偏析法生产的，笔者将后一工艺称之为联合法，利用有机化合物电解法与区域熔炼相结合的工艺或者用凝固提纯法也可以提取精铝。

三层液电解法。此法是美国铝业公司霍普斯（Ｗ．Ｈｏｐｅｓ）发明的，１９９２年开始工业化生产，电解槽内有三层液体，各层密度不一，下层为６７％原铝加３３％铜的合金（密度３ｇ／ｃｍ３），用作阳极，其中铜为加重剂；中层是１７％ＮａＦ、２３％ＡｌＦ３、６０％ＢａCl２的电解质（密度２．７／ｃｍ３），上层是电解产物精铝（密度２．３％／ｃｍ３），用作阴极。电解温度７２０～８００°Ｃ。电解槽壁用绝缘材料－镁砖筑砌。

精炼电解时，铝离子从阳极合金中转移阴极，而原铝中的杂质元素都留在阳极合金中，使铝得到精炼。此法的阴极电流效率为９７％～９９％，三层电解液法的主要缺点是电耗高，达１４５００kＷｈ／ｔ精铝。目前，全世界可生产精铝的国家有中国、日本、挪威、俄罗斯、美国、德国和法国，２０１３年的生产能力约１８５ｋｔ／ａ，产量约１２６ｋｔ，产能利用率仅 68%，中国的生产能力约 88kt/a，占全球总产能的 48%。

中国用三层电解液法生产精铝的企业有：新疆众和股份有限公司，中铝贵州分公司、宜都铝业有限公司、神火铝业有限公司、红鹭铝业有限公司、关铝铝业有限公司等 8 家。众和股份有限公司不但是中国最大的也是全世界最大的精铝生产者，生产能力约 34kt/a，既用三层电解液法生产，也有偏析法，还用联合工艺生产，该公司 2003 年向日本出口 310t 精铝，开中国精铝走向国际市场的先河。

甘肃鸿泰铝业有限公司百万吨/年铝合金产业链项目于 2013 年在白银高新区刘川工业园开工奠基，其中含 100kt/a 高纯铝子项目，主要为精铝。

中国精铝生产始于 1958 年，是当年抚顺铝厂（代号三 0 一厂，现名中铝抚顺铝业有限公司）建成了中国首条三层电解液法精铝生产线，生产能力 2kt/a，因电耗太高，于 2000 年永久性关闭。1976 年贵州铝厂（现名中铝贵州分公司）建成一条有 12kA14 台槽的三层液法生产线，产能 350t/a，2003 年从日本引进一条生产能力 5kt/a 的三层液电解法精铝生产线。因市场不景气，这些生产线于 2010 年停产。

1.1.27 变形铝合金四位数字牌号的来龙去脉

在未谈 1xxx 系合金前，先聊聊变形铝合金四位数字牌号的编制。这种牌号最先从 1954 年起在美国启用，随后英国、联邦德国、日本等国也相继采用，中国从 2001 年起将此牌号系统纳入国家标准，可与国家标准编制牌号系统在国内通用。现在，4 数字牌号系统已在全世界流行，国际标准化组织（ISO）也已将此套系统纳入其标准内。

由于四位数字牌号从 1954 年起开始实行，因此凡是此前美国已有的变形铝形合金均以 1954 年作为注册年度。在美国，截至 1953 年年底，变形铝合金的牌号为二位阿拉伯数字加“S”，如现在的 2024 合金当时的牌号为 24S，为了新旧牌号有一定的相关性，新牌号为 2024，24S 合金是美国铝业公司研发的，1934 年定型，是一个非常有用的高强度铝合金，在航空航天器制造中获得了极为广泛的应用，至今仍是用量最多的结构材料之一；过去的 75S 合金改用 7075 表示，它是一种铝－锌－镁－铜系合金，也是美国铝业公司最先推向市场，1944 年率先用于制造飞机结构件，约一年后苏联与日本也研制成功这类合金，苏联的牌号为 B95，是其航空工业部第 95 号铝加工厂首次生产板材成功，故得此牌号，日本当时采用的牌号为 ESD。

四位数字牌号的编制，按合金的主成分将其分为 9 个系列，即 1xxx 系、2xxx 系、3xxx 系、4xxx 系、5xxx 系、6xxx 系、7xxx 系、8xxx 系、9xxx 系合金，1xxx 系合金为工业纯铝，除铝外，其他元素皆为杂质，同时铝的含量应>99.00%且应≤99.99%；2xxx 系合金的主要合金元素为铜或铜+镁，3xxx 系合金的主要合金元素为 Mn 或 Mn+Mg，4xxx 系合金的主要合金元素为 Si，5xxx 系合金的主要合金元素为 Mg；6xxx 系合金的主要合金元素为 Mg+Si，7xxx 系合金的主要合金元素为 Zn+Mg 或 Zn+Mg+Cu，8xxx 系合金的主要合金元素为其他元素如 Si、Fe、Li 等，9xxx 系为备用系，尚未启用。

美国铝业协会公司（The Aluminum Association，Inc.，AA）技术处设有专门管理 4 位数字牌号合金注册审批及其他有关事宜的人员。截止 2015 年 1 月 31 日，注册的常用变形铝合金（active wrought aluminum and wrought aluminum alloys）528 个，其中：1xxx 系的 40 个，2xxx 系 92 个，3xxx 系的 42 个，4xxx 系的 34 个，5xxx 系 100 个，6xxx 系的 100 个，7xxx 系的 82 个，8xxx 系的 38 个；非常用的合金 154 个，其中：1xxx 系的 24，2xxx 系的 9 个，3xxx 系的 7 个，4xxx 系的 10 个，5xxx 系的 40 个，6xxx 系的 22 个，7xxx 系的 26 个，8xxx 系的 16 个。在这 682 个合金中，5xxx 系合金 140

个，占总数的 20.5%;6xxx 系系合金 122 个，占总数的 17.9%，居第二，4xxx 系合金 44 个，最少，占总数的 6.5%。

4 位数字牌号前有“X”的表示试验合金，一旦通过试验即去掉。在当前的 528 个常用合金中，美国注册的 278 个，占总数的 52.7%，中国仅有 3 个，占总数的 0.6%，这除了中国的研发力量与基础研究不够外，更主要的是历史原因造成的，美国是世界铝工业发详地之一，已有 127 年的历史，而中国的铝工业只不过发展了 58 年的短暂时间。

参加美国铝业协会公司变形铝合金注册组织的国家、组织与团体有:美国铝业协会公司(AA)，法国铝业协会(AFA)，全俄航空材料研究院（All-Russian VIAM），罗马尼亚铝业协会（Alro S.A），加拿大铝业协会（AAC），比利时铝业中心(ACB)，英国铝业协会公司国家金属成形中心(AFLNMC)，南非铝业协会（AFSA），瑞士铝业协会（AVS），巴西铝业协会（ABAL），荷兰冶金工业协会（ADMI），意大利有色金属工业协会（Assomet），澳大利亚有色金属协会（ANFMFe），西班牙国家冶金研究中心（CENIM），中国有色金属技术经济研究院（CNMTERI），欧洲铝业协会（EAA），欧洲航天标准化组织（EOAS），德国铝工业协会（GDA）,波兰有色金属协会轻金属分会（INMLMD），墨西哥铝业协会（IMA），阿根廷标准化院(IRAM),日本铝业协会(JAA),瑞典铝业协会(SAA)。

在写或打印变形铝合金的化学成分时宜按以下次序：Si、Fe、Cu、Mn、Mg、Cr、Ni、Zn、Ti、Ag、B、Bi、Ga、Li、Pb、Sn、V、Zr、其他。在 1954 年以前，变形铝合金的牌号乱成一团，不但各国有各自的牌号系统，而且各个公司也有其独特的表示方式与牌号，为了扭转这混乱局面，美国铝业协会与美国材料试验学会（ASTM）标准化委员会于上世纪 50 年代初就着手探讨统一的牌号,1953 年出台了四位数字牌号方案，征求意见与修改后，于 1954 年正式颁布执行。

在四位数字牌号中，最后两个数字没有什么特别意义，仅表示合金的序号或美国 1954 年前已有合金牌号“S”后的两位数字；第二位数字的“0”表示原型合金，而为其他数字则表示改型的合金，最后的大写英文字母也表示合金的改型。不过在 1xxx 系合金中，第二位数字表示须特意控制的杂质个数，例如 1350 合金用于生产电线电缆，须对电导率有大影响的 V、Ti 等三个元素的含量加以严格控制，最后两位数表示铝的纯度小数点后的两个数字。

1.1.28 硬铝的诞生和分类

自1886年铝的电解法诞生以来，铝的生产就进入了商业化，所提取的原铝不纯，一般都含有约2%的铁、硅、钾、钠等，其中铁、硅占90%以上，因此，用原铝铸造的重熔铝锭实际上是一种Al-Fe-Si合金。稍后，冶金工作者往铝中添加铜、

锰、镁等制得了含铜的合金，所以铝-铜-锰合金实际上诞生于19世纪末，1903年赖特兄弟就用匹兹堡冶金公司（美国铝业公司的前身）生产的铝-铜合金铸造发动机的缸体（engine block），这是铝合金首次应用于飞行器，自此以后全世界生产的任何一种飞行器都有铝的零部件，真是到了无铝不成飞行器。

含铜或含铜、锰的铝合金硬度与强度都比纯铝的高，所以在当时把这类合金叫作硬铝（dural、duralium），“dur”在法文里就是“硬”的意义。在此以后把所有含铜作为主要合金元素的合金都称硬铝，由于硬铝的成分不同，性能也不同，2017合金含0.20%Si~0.8%Si、3.5%Cu~4.5%Cu、0.40%Mn~1.0%Mn、0.40%Mg~0.80%Mg称为标准硬铝，它于19世纪末就已基本成型；强度比2017合金高的2024合金被称为高强度硬铝。它的成分（质量%）：3.8Cu~4.9Cu、0.30Mn~0.9Mn，1.2Mg~1.8Mg。2017合金及2024合金都是美国铝业公司研发的，前者于1917年定型，当时的牌号为17S；2024合金于1934年定型，当时的牌号为24S；1954年分别改为2017及2024合金。

截至2015年1月31日，在美国铝业协会注册的2xxx系合金共101个，其中常用的（active alloy）92个，非常用的9个（inactive alloy）。在常用的92个合金中，美国注册的52个，占总数的56.5%，同时以原创性的合金为主，笔者在此所指的原创性合金，就是在4位数字牌号中第二位数为0的合金。

在常用的合金中有美国原创性合金27个，占总数52个的52%，4位数字牌号后附有大写英文字母的合金也不能算原创合金。

2xxx系合金是以Cu为第一合金元素的变形铝合金，可按其成分的不同分为若干组：Al-Cu系合金，含5.5%Cu~6.5%Cu，0.30%Zr~0.50%Zr；Al-Cu-Mg组合金是2xxx系合金的主骨干，2024合金是其典型代表，主导产品为板带材与挤压材，仅板带材产量就占全系合金总产量的70%以上，第二次世界大战期间生产了30多万架飞机，它们的机身与机翼蒙皮大多是用2024合金制造的，真正的Al-Cu-Mg合金不多，大多数还含有0.4%Mn~0.8%Mn；Al-Cu-Mn系合金；Al-Cu-Si-Fe-Ni组合金，如2031、2032、2618、2618A合金，多用于生产锻件；含有Bi、Pb、Sn等的合金，如2011、2028合金，它们有良好的可切削性能，多用其棒材高速切削加工零件；含有0.8%Li~1.8%Li的Al-Cu-Li、Al-Cu-Li-Mn-Mg、Al-Cu-Li-Mn、Al-Cu-Li-Mg合金，还含有0.05%Zr~0.18%Zr的Al-Cu-Li合金，它们是上世纪80年代以来研发的，截至2015年1月，共有含Li的2xxx系合金22个，其中14个是新世纪注册的，占63.6%；含Ag的合金有17个，其中12个属含Li的2xxx系合金。

还可以按用途将2xxx合金分为铆钉硬铝（又称低合金化硬铝），Cu、Mg含量低，并对Mn、Fe、Si等杂质含量加了限制，故有较高的塑性，适于铆接，在T4状态下应用；中等强

度的2017合金，又称标准硬铝，它是一个Al-Cu-Mn-Mg-Si系合金，与德国科学家维尔姆（A·Wilm）在1906年发现时效现象时使用的合金成分基本相同，故得此名，是最早出现的2xxx系合金，因合金化程度特别是Mg含量稍高一些，但比2024合金的低，由于它具有中等强度，塑性相当高，多以板、棒、型材应用于各个工业领域，但在航空工业主要锻造螺旋桨叶；2024合金是高强硬铝，可在T4及T6状态下应用；2018合金为耐热锻造合金，化学成分及相组成极其复杂，它的Ni含量较高，导热性好，热膨胀系数较小，适于生产内燃机活塞，工作温度可达300℃，在T6状态下应用，是锻造各种耐热零件的良好材料。

硬铝的主要缺点是其抗蚀性比纯铝及3xxx系合金的低，因为它的Cu含量高，含Cu的铝固溶体与CuAl2的电极电位比晶界的高，容易发生局部腐蚀。为了防止它们的腐蚀对板材可包覆一层纯度>99.5%的纯铝，它的电极电位比硬铝的低，在大气中起阳极作用，并能形成Al2O3膜，故在包铝层破坏前，硬铝本身能得到电化学和机械的保护。

1.1.29 话说硬铝的时效结构变化

在未讲铝合金时效过程中的结构变化前先说说铝合金过饱和固溶体的缺陷结构。在淬火的α —Al 固溶体中存在大量

的结构缺陷，对溶质原子是过饱和的，对空位、二次缺陷和位错也是过饱和的。淬火的高纯铝就是空位溶解于 Al 中的过饱和固溶体，但因淬火冻结下来的过剩空位瞬间即浓成大的空位集团或空洞，再进而形成位错环和位错。因此，空位、位错环和位错等是淬火α －Al 固溶体中的结构缺陷，对 GP 区和脱溶（沉淀）相的形核和长大过程起着重要作用，也是研究铝合金组织和性能时必须考虑的重要因素。淬火的α 固溶体也可以称为α ’固溶体。

GP 区的结构

GP 区是碟状（圆片状）的 Cu 原子偏聚区（富集区），也曾称为 GP（I）区，是盖尼尔与普莱斯顿在研究 Al-4Cu 单晶体时在其{100}面上观察到的。GP 区没有独立的晶格结构，溶质 Cu 原子连续地分布在铝的面心立方晶格结点上。GP 区尺寸取决于时效温度，室温时的直径 d<5.0nm，厚约几个原子，而于 130℃时效 d 可大到 9.0nm，厚可达 0.4nm~0.6nm，密度为 1017~1018 个原子/cm3。

GP 区的形状各种各样，有球状的、也有盘状与针状的，决定于溶质原子与铝原子半径差△R 即错配度的大小。

Al-4Cu 合金在 150℃~175℃时效会形成θ ’’相，也是一种 GP 区，为了区别于 GP Ⅰ，将其命名为 GP（Ⅱ）区后，后改称θ ’’相，它是 Cu 原子在 GP 区有序化后的产物，是有独

立晶体结构的中间深沉相 Al5Cu2，以（100）Al 与母相完全共格。Al-Cu 合金在 150℃时效 24h，θ’’相的直径可达 10nm~40nm,厚 1nm~nm,它是正方晶格,a＝4.04nm,c＝0.78nm，a、b 二轴的晶格常数与铝的相等，但 C 轴的却为铝的 2 倍稍小些。因此，随着θ 相的长大，沿 C 轴方向产生强大的共格应变场，是 Al-Cu 合金有显著人工时效效果的原因。

θ’相的结构

θ’相也是一种过渡相，化学组成与 Al2Cu 的相当，正方晶格，a=0.571nm，c=0.580nm，以（100）面与母相部分共格。在 200℃时效后，θ’相片的直径可达 100nm，厚 10nm~30nm。θ’是高温时效产物，它的出现拉响了合金强度开始下降警钟，故又称“过时效”产物或过时效相。θ’的形成可以 GP 区为核心，也可以独立形核。

平衡相θ 的结构

θ 相（Al2Cu）是一种平衡相，是退火产物，正方晶格，a=0.6054nm，c=0.4874nm，与 Al 的晶格结构相差很大，与母相无共格关系，也无固定的取向关系，它可以在 200℃以上长时间加热时形成，是在 300℃~350℃退 Al-Cu 合金的主要脱溶相。

需指出的是，过饱和α －Al 固溶体的分解虽然可以分为几个阶段，却不是彼此截然分开的。因时效温度和时间不同，几个分解阶段可以交错进行，只能说在一定温度和时间内以某一阶段或结构为主。例如 Al-4Cu 合金在 130℃以下时效以形成 GP 区为主，在 150℃~175℃以θ ’’为主，在 225℃~250℃以θ ’相为主，高于 300℃以θ 相为主。在同一温度时效不同时间也可以形成不同组织，例如 Al-4Cu 合金在 130℃时效时间不长于 5d，主要形成 GP 区，时效 10d 以生成θ ’’相为主，还有少部分θ ’，若长于 100d，则完全是θ ’相。

1.1.30 耐热硬铝方方面面（一）

耐热硬铝合金用于制造锻件，在 2007 年以前将其称为锻造铝合金，这个名称是从苏联来的，从 2008 年起，中国国际 GB/T 3190 不再使用锻造铝合金这一名称，将它们归于 2xxx 系合金。这类合金的特点是化学成分和相组成极其复杂，除了含 Cu 与 Mg 外，还添加了 Fe 和 Ni，有的还含有 Si，如 2A50、2D70、2A80、2A90 等。在 2007 年以前，这类合金的牌号由汉语接音字母“LD”（锻造铝）和其后的阿拉伯数组成如 LD5、LD10 等，划归 2xxx 系合金后，为了保持连续性起见，仍保留有旧牌号的痕迹，如新牌号 2A50 合金即原来的 LD5 合金。

这类复杂合金化的合金不仅高温性能好，还有高的锻压

性能，适于锻造在高温下（180℃~300℃）下工作的零件，也可以在 350℃短时间工作。

该系合金基本上是在 Al-Cu-Mg 系合金上发展起来的，2A90 合金最早面世，在美国称 18S，在英国称 RR56，是英国罗尔斯-罗伊斯公司（Rolls-Royce）为制造发动机零件研发的），在苏联称为 AK2（A、K 分别为俄文铝与锻造的第一个字母），它们是在 2017 年硬铝的基础上加入了 Fe、Ni、Si，除了形成相 S 与 Mg2Si 外，Fe 和 Ni 还接 1:1 的比例形成 Al9FeNi 化合物，多余的 Ni 与 Cu 形成 AlCuNi 或 Al3（CuNi）2 化合物。这些化合物均不溶于α -Al 固溶体，故无时效硬化作用，但在高温下有弥散强化作用，对耐热性有利。它们可以进行热处理，固溶处理温度 510℃~540℃，人工时效制度（150℃~180℃）/（6h~16h）。该类（2A90）硬铝特点是 Ni 含量较高、导热性好、热膨胀系数小，适于制造内燃机合塞；缺点是脆性相 Al9FeNi 和 AlCuNi 含量高，热塑性和耐热性比 2A70 及 2A80 合金的低一些。

2A70 合金的 Ni 含量降到与 Fe 的相等，全部形成 Al9FeNi 化合物，既无多余 Ni 形成 AlCuNi 化合物，也无多余的 Fe 形成 Al7Cu2Fe 化合物，不仅克服了 2A90 合金的缺点，降低了合金的 Cu 含量，由于减少含 Cu 相，合金的耐热性还得到提高；另外，消耗 Cu 的 Fe、Ni 量降低，有更多的 Cu 溶入α -Al

固溶体,并增加了形成 S 相的 Mg,耐热性能得到进一步提高。2A70 合金的 Si 含量<0.25%，是杂质，主要相组成是α+S+Al9FeNi,但是也可能由于 Fe 或 Ni 偏离了 1:1 的含量比，而出现少量 Al7Cu2Fe 或 AlCuNi 化合物、英国的 RR58 合金、美国的 2618 合金相当。

2A80 合金是在 2A70 合金的基础上提高了 Si 含量，形成较多的 Mg2Si，并有促进 GPB 区的形成和 S 相的均匀分布，不仅提高了 120℃~125℃的蠕变强度，室温强度也比 2A70 合金的高。但 Si 含量提高后，高温强度却比 2A70 合金的低，2A80 合金与俄罗斯的 AK4 和英国的 RR59 合金的相当，主要相组成与 2A70 合金的完全相同。

2A70 和 2A80 合金没有自然时效能力，只能在人工时效状态下 T6 下应用,它们的固溶处理温度相同为 525℃~540℃，但人工时效制度各异，2A70 合金的为（165℃~180℃）/（10h~16h)，2A80 合金的为（185℃~195℃）/（8h~12h)。

2A70 合金的耐热性和热塑性比 2A80 和 2A90 合金的高，主要用于制造压气机和鼓风机涡轮叶片和其它耐热零件，2A80 合金则主要用于锻造航空发动机活塞。2A70 合金相当于

美国 2618 合金，也可用于轧制超声速喷气飞机的蒙皮板材，可在 120℃长期工作（50000h）。2A70 合金及 2A80 合金的持久强度：200℃时 200N/mm2，

250℃时 70N/mm2，300℃时 50N/mm2，

350℃时 35N/mm2。

1.1.31 耐热硬铝方方面面（二）

合金	Cu	Mn	Mg	Ti	Zr
2A16	6-7	0.4-0.8	-	0.1-0.2	-
2A17	6-7	0.4-0.8	0.25-0.45	0.1-0.2	-
2219	5.8-6.8	0.2-0.4	0.02	0.02-0.1	0.1-0.25
2021	5.8-6.8	0.2-0.4	0.02	0.02-0.1	0.1-0.25

合金	材料状态	抗拉强度 Rm N/mm	屈服强度 R N/mm	伸长率 A/%
2A16	挤压棒材，T6	400	250	12.0
2A17	锻模件，T6	420	290	8.0
2219	T62	435	295	10.0
	T83	485	405	10.0
2021	T81	515	445	9.0

Al-Cu-Mn 系是又一个系的耐热铝合金，是硬铝 2xxx 系的一个子系，该系合金的室温强度比 2017 合金及 2A14 合金

的低，但在 250℃~300℃的高温强度比 2024 合金和 2A70 合金的高。Al-Cu-Mn 系耐热硬铝的化学成分见下表（质量%）。由 Al-Cu-Mn 系三元相图可知，含 6%Cu~7%Cu、0.2%Mn~1.0%Mn 的合金的主要相组成物是α +θ （Al2Cu）+T（Al12CuMn2），只有当含量很低时才会出现 Al6Mn。

该系合金的 Cu 含量较高(6.5%),已超过极限溶解度 5.7%，过剩的 Al2Cu 质点是提高耐热性的重要组成物，此外，合金的共晶组织较多，流动性好，还具有优秀的可焊性。

Mn 能提高原子激活性,降低扩散系数和固溶体分解速度，是提高耐热性的主要元素。沉淀相下（Al12CuMn2）在时效过程中的形核和长大过程也极缓慢，所以即使在高温下长期加热，其组织和性能也很稳定，对耐热性有利，但 Mn 含量以 0.6%~0.8%为宜，否则对耐热性（2A16、2A17）不利。

过渡族元素 Ti、Zr、V 等与 Mn 一样，也能提高再结晶温度，细化晶粒，增加α 固溶体的稳定性，降低 Cu 原子的扩散系数，对合金的耐热同样有利，其中以 Zr 的作用最明显，并能改善可焊性和焊缝的塑性。

微量的 Sn、In、Cd（0.005%~0.15%）对 Al-Cu 合金的时

效过程有明显影响，抑制低温时效过程（GP 区形成阶段），但又能促进θ’的形成过程（120℃~200℃的高温时效阶段）。因为它们能起θ’的沉淀核心作用，提高θ’相的弥散度与强度。但是，不能向含有这类元素的合金添加镁，因为 Mg 形成 Mg2Sn 或 Mg2In 化合物能抵消它们的形核作用。

Fe 与 Si 是对耐热性有害的杂质,Si 会降低再结晶温度，加速固溶体分解，Fe 能形成不溶解的化合物 Al6（FeMn），消弱 Mn 对耐热性的影响。因此，Fe 和 Si 的含量应<0.3%。

中国的 Al-Cu-Mn 系合金有 2A16 和 2A17，它们的主要合金元素含量完全相等,只有 2A17 合金含有 0.25%Mg~0.45%Mg，以提高室温及高温（150℃~250℃）强度。只有当工作温度≤270℃，2A17 合金的持久强度才比 2A16 和 2A70 合金的高，工作温度≥300℃后，以 2A16 合金的强度最高。耐热硬铝的力学性能见下表。

美国合金的合金化特点略有不同，2219 合金在稍微降低主要合金化元素 Cu、Mn 的条件下，同时加入 Ti、Zr 和 V，充分发挥微量元素的合金化作用，得到了更高的力学性能，是综合性能最好的一种合金，成型于上世纪 50 年代初，不仅有更高的室温力学性能和良好的抗蠕变性能，在液氧和液氢

的超低温条件下还有高的韧性，并有良好的可焊性，可用其厚板焊接航天器推进剂贮箱。这种合金在人工时效前进行适量的冷加工（T83）再人工时效的屈服强度 Rpo.2 可比 T62 状态板材的高 35%左右。

2021 合金是 2219 合金的改型，它含有 0.15%Cd 和 0.05%Sn，既提高了板材的力学性能，又对可焊性与低温韧性无影响，是全面利用微合金化效应的一个典型范例，不过 Cd 对人体有害，对环境不利，因此必须在严格控制条件下进行熔炼与焊接，所以这种优秀合金的应用一直受到限制。

2A16 合金有高的工艺性能，易焊接、锻造、轧制和挤压，主要以其板材、挤压材与锻件制造在高温下工作的航空航天器零部件。今有微量 Mg 的 2A17 合金虽有更高的室温强度，但其可焊性能不如 2A16 合金。

Al-Cu-Mn 硬铝的缺点是 Cu 含量高，抗蚀性比 2014、2017、2024 合金的低，必须对焊缝进行阳极氧化或涂漆保护。

这组合金在人工时效状态下应用。2A16 合金的固溶处理温度 520℃~530℃，人工时效制度：（165℃~175℃/（10h~16h）；2A17 合金的分别为：515℃~525℃，180℃~190℃/16h。

1.1.32 铝绿色金属当之无愧

现在人们都把铝称为绿色的金属、节能减排的金属、循环性最好的金属，贮能的金属、质轻的金属、取之不尽用之不竭的金属，它为什么会享有这么多的美誉呢？因为它具有一系列的优秀的性能，在此仅简略地谈一谈，在以后的一些文章中将较详细地介绍。

密度小，有时不规范地说它质量轻，简称质轻。根据晶体结构计算，单晶体铝的理论密度为 2698.72kt/m3，比单晶体的高 0.34%，约为钢及铜密度的 1/3。这一点非常重要，没有这一点，就没有今天这样兴旺发达的航空航天事业，虽然不能说没有铝就不会有今天的航空航天产业，但没有铝，航空航天就不会这样兴旺发达、蓬蓬勃勃；没有低密度的铝及铝合金哪有今天疾驶如飞的高速铁路列车，比直升机的速度还快呢！

适中的力学性能。铝的纯度越大，其力学性能也越低，现在可以制成抗拉强度达 750N/mm2 的工程合金，当然这是个别的，大多数铝合金的抗拉强度都在 500N/mm2 以下。几种不同纯度铝的力学性能如下：

同其他任何金属及合金一样，铝及铝合金的力学性能也随着温度的升高而下降，即使最耐热的高温铝合金，其长期工作温度也不宜超过250℃。不过，其他金属及合金的一大缺点是，各项力学性能均随着温度的下降，其强度升高，而伸长率及韧性则下降，也就是说发脆了。可是铝及铝合金则不然，它们的各项力学性能均随着温度下降，而全面升高，这使它们成为一种非常好的制造低温装备的绝妙材料，如液化低温天然气船（LNG）的诺大容器、制氧机部件、火箭燃料（液氧、液氢）贮罐等。

良好的导电导热性能。铝有良好的导热与导电性能，如0~27℃时完全退火的高纯铝的热导率为2.367W/（CM·K）；20℃时超纯铝（99.990%）的电阻率为2.6548×10-8 Ω·m即为64.94%IACS（国际退火铜标准，International Annealed Copper Standard）。铝的良好导电性能与低密度相结合，使它成为一种良好的远距离输电导体。没有铝，就不会这样经济而有效地将内蒙的电输送到北京、输送到华北，将西部的电顺利运送到华东的工厂与千家万户，将三峡的电输送到珠江三角洲；没有铝，跨越长江上空的特高压超长特大输电工程将成为空想而望江兴叹。

在笔记本电脑与诸多电子设备中都有一些铝制元件，它

们各自起着不可或缺的作用，其中的散热元件就是利用了铝的良好导热性能与低的密度。

超强的抗腐蚀性能。铝及铝合金表面有一层比蝉翼还薄得无法比拟的氧化铝膜，这是一层与空气中的氧形成的天然氧化膜，在室温下形成的这层膜的极限厚度为 2.5~3.0nm（25~30A）。这层膜不但薄得出奇，而且极密实，不能渗透氧，与铝接合得牢牢的，使铝不再遭受腐蚀，也就是不会再氧化，使铝及铝合金在使用期限到了后，经过处理与重熔后可得 95%以上的再生铝。

集清洁卫生美观与隔绝性于一体。铝及铝合金为一种银白的金属，在普通的大气条件下，能永葆熠熠生辉、洁白无瑕的色彩，且无毒无味。虽然曾有报道，如果人脑海马神经中积存的铝过量可能会致人痴呆，但后来世界卫生组织称，现在还没有足够证据证明人类的痴呆与铝有关。铝的洁净卫生使它成为一种优秀的食品、饮料、药品与酒类等的包装材料，它还有非常好的可印刷性能，可印上各种图案、色彩与花纹。

包装食品、药品等用的是铝箔，铝箔是厚度小于 0.2mm 的平轧产品。在此需指出是，当质量相等时，箔材越薄，面

积就越大，可以包装更多的东西，因此，人们总希望包装用箔的厚度小一些。不过研究显示，在当前的生产技术条件下，包装食品、药品的铝箔厚度不得小于 0.006㎜，否则就会失去隔绝性能，氧分子会通过箔上的针孔进入内部与被包装物发生氧化作用，使其变质。

节能及可回收性最强。由于铝及铝合金有很强的抗腐蚀性能，在通常的大气条件下也不用维护保养，即使使用几十年甚至上百年仍完好如初不会腐蚀，如门窗、桥梁等，报废再生处理与熔炼后可获得 95%以上的再生铝，比任何其他工程材料都高，即使不锈钢也自叹不如，因为不锈钢在使用过程中虽不发生腐蚀，但废不锈钢在熔炼再生过程中的烧损比铝大得多。

废铝在再生处理与熔炼过程中的能耗（含预处理的）约 900kWh/t，仅相当于原铝提取总能耗约 18000kWh/t（含铝土矿开采、氧化铝提取、原铝电解）的 5%，而废钢、废铜的再生能耗几乎与原生钢、铜的冶炼能耗相等。废铝再生能耗的降低，也意味着温室气体与固液废弃物的相应减少。

防爆防火，消防安全性强。铝是一种防火、防爆与消防安全材料，它的良好成型性、低温性能与低密度性相结合，

使之成为一种轻便的家用与车载消防瓶的好材料。铝的熔点不高，仅约 660℃，但有高的热容量为 0.90J（g·k）与高的熔化潜热为 397kj/kg，因此，用铝合金制的安全防火门，可在失火时吸收更多的热量，降低燃烧温度，延迟火势漫延。有人认为铝的熔点低，不宜用作防火材料，甚至认为不宜制造地铁车辆，这是一种误解。同时，铝箔还是油品、液化天然气等运输槽罐内的有效防火防爆材料。将一定数量用铝箔窄条搓成的小球装填于易燃易爆流体的槽、罐、瓶内能及时消除静电，避免火花，即使发生火花，铝箔球会吸收热量，降低温度，不会引发火灾与爆炸。

良好的表面处理性能。铝及大多数铝合金有良好的表面处理性能，经过阳极氧化处理后可印刷各种各样的颜色，拓宽了它们的应用领域，提高了它们的装饰效果，延长其使用期限，因而表面处理对铝及铝合金来说是不可缺少的，特别是建筑铝材与航空器用的铝合金零部件。工业规模的铝及铝合金的表面处理工艺有：阳极氧化处理、化学转化处理（有些文献直接使用日语“化成”处理，最好不这样，还是用化学转化处理确切）、电镀与化学镀处理、表面有机物涂装（喷粉、喷漆、电泳涂漆）等。铝及铝合金表面处理目的就是为了解决或提高其防护性、装蚀性和功能性等方面的要求，例

如建筑铝材的表面处理主要是为了提高装饰效果，防护性能的提高次之。

可形成多种合金。铝可与铜、锰、镁、硅、锌、锂、镍、铁、银等形成有不同独特性能的合金，满足不同工程与零部件的需求。当前常用的（active alloys）及非常用的（inactive alloys）在美国铝业协会公司注册的变形铝合金有 670 种，形成 8 个系列，从工业纯铝 1XXX 系列到 8XXX 系列。许多铝合金的强度性能可以通过热处理得到进一步的提高。现在有些铝合金的比强度（强度/密度比值）可以与优质合金钢相当。

光反射性强。抛光铝的表面对波长 0.9~12.0μ m 的光的反射率大于 90%，对波长小于 0.2μ m 的光的反射率低于 70%。铝对无线电波、可见光波的反射率随着表面粗糙度的提高而急剧下降。由于铝对可见光有很强的反射性，所以在探照灯、日用灯具等方面获得广泛应用。

耐核辐照性。铝的热中子吸收截面小，约为 0.23×105pa，在核反应堆中用作核燃料工艺管（铝-镁-硅合金），特别适合于热中子核反应堆使用。

吸收冲击能的性能。铝及铝合金有相当强的吸收震动与冲击能的特性，是制造轿车保险杠系统的良好材料。

非磁性。铝及铝合金是非磁性的，对生产某些特殊用途的产品是极为难能可贵的材料，可作为电器及电子设备的屏蔽材料。例如，可在铝合金厚板构建的房间内制造 LED（液晶显示）与组装其元器件。

可焊性好。铝及铝合金的可焊性能虽然不如钢的那么好，但其有良好的氩弧焊接性能，钎焊性能也不错，气焊、点焊与接触焊都可以，还有良好的粘接性能。特别适合于摩擦搅拌焊（FSW），这是焊接新技术，在国外焊接设备及工艺都已成熟，国内已引进了 5 套 FSW 焊接线，尚处于起步阶段。

资源丰富。铝是地球与月球表层最丰富的金属元素，虽然中国当前可供开采的铝土矿并不充裕，品质也不尽人意，但就全世界而言是取之不尽用之不竭，不象铁那样，也不象铜那样，面临着资源日益枯竭的严竣挑战。

当然，尽管铝具有上述的一系列优点，但也有一些本身固有的缺点与不足之处，不过可以合金化与工艺处理得到改进与弥补。**主要缺点有：**

硬度与强度较低，耐磨性也较差。

凝固时的体积收缩率比较大，约为 6.6%，铸造时必须注意。

线膨胀系数比较大，20℃时的为 23×10-6/k。

铝的熔点较低，为 660.37℃，合金的熔点当然更低，因此铝及铝合金应用领域受到一定限制。

铝的弹性模量比较低，20℃时退火状态的 1050 工业纯铝的正弹性模量 70GN/mm2，切变模量 26GN/mm2，泊松比 0.31，它们分别为钢的相应值的 1/3。

铝有很强的负电性。铝的电极电位负电性很强，因此当铝及铝合金与异种金属接触时，往往作为阳极而产生严重的电偶腐蚀。

1.1.33 规范技术术语 提高行业素质

正确、规范地使用名词术语能够正确地传递信息，更好地进行交流和传播，但在实际生活中，往往会出现一些不规范的名词与术语，甚至会出现一些错误的术语。现将铝工业

特别是铝加工业一些不规范的术语与用法罗列如下，如认为笔者言之有理，希望予以采纳。

原铝

原铝的英文称呼为 Primary aluminium，也可以称原生铝，它的定义是：从铝电解槽中虹吸到抬包（浇包）中的液态铝。然后经秤重浇入混入混合炉，净化处理后铸成小锭块，这种小锭的质量通常为 20kg±2kg 或 15kg±2kg 或大的 T 形锭（T－bar），也可以在混合炉内熔炼成压力加工用的合金。用净化处理的原铝铸造的锭块称为重熔用铝锭，按 GB/T1196-2008，重熔用铝锭共有 8 种。每包原铝都必须过磅计量，填入生产卡，这些工作或自动进行，或人工完成。因此原铝产量应是精准的，除非人为刻意造假，修改数据，另外，还可以根据理论公式计算产量，计算产量应很靠近实际产量。

在工厂往往将原铝称为铝水或铝熔体，这不妥，因为铝水、铝熔体是一个广泛的术语，泛指各种液态铝，而原铝是一个特定的术语，当然，原铝也是一种铝水。

铝与铝金属或金属铝

铝的英文有两种写法：aluminium 与 aluminum，前者是

英式的，后者是美式的。美国、加拿大、墨西哥、日本用的是美式的，而其他国家与地区则用的是英式的，中国宜统一用英式的。我们在说话、写文章时不要说金属铝、金属镁的，更不应书写成金属铝、金属镁，这是外国人的说法，因为由aluminium看不出来它是金属还是非金属，也看不出它在室温下的形态，是固态、液态，还是气态，所以写成铝金属（aluminium metal），而汉字真伟大，一看元素名称，就知道它的属性与形态，例如一说铝，我们就知道它是一种金属，在室温下呈固态，用不着说金属铝或铝金属，在书面材料中更应注意这一点。

轧制与压延

当前在中国铝加工业仍有少部分人、个别工厂、甚至个别权威大机构将轧制（rolling或milling）说成压延，铝工业有一个上世纪七八十年代建成的大铝加工厂将其板带车间称为压延车间后改为压延厂，但在标准中、教科书与辞书中都没有称压延的，钢铁工业都称轧制，没有称压延的。在新华字典中查不到“压延”辞条，而对轧制的解释为“应用两个反向旋转的轧辊间的压力改变金属材料形状和性能的加工过程。”在GB/T8005.1－2008（铝及铝合金术语第一部分：产品及加工处理工艺）中也对“压延”作解释，但对轧制的（milling）解释是“加工过程中，金属在轧机的上、下辊之

间进行辗压，从而生产出单板或带状板材的过程。”因此，不要再用压延这一名词，而统用轧制这一术语，钢铁工业就是这样。

厚板、薄板与中厚板

在 2002 年以前，中国铝加工业没有说中厚板的，是某年中国有一个国有综合性大型铝加工企业拟建一条现代化的厚板生产线项目，在国家有关部门打的立项报告中提出了建中厚板项目的申请，自此以后“中厚板”这个技术名词在中国铝工业界广泛为流传，至今不衰。实际上，无论在世界铝工业还是在中国铝加工业领域都未曾有“中厚板”这一名词，在 GB/T8005.1－2008（铝及铝合金术语第 1 部分：产品及加工处理工艺）中仅列有薄板（sheet）与厚板（plate）辞条。薄板定义：厚度大于 0.20mm 且大于 6mm 的板材；厚板定义：厚度大于 6mm 的板材。除北美洲外，其他国家与地区都是这么定义的，北美洲将厚板定义为：厚度大于 0.25 英寸（6.35mm）的板材。不过，在钢铁工业还真有“中板”这个术语，它们的定义：厚度≤3.0mm 的为薄板，厚度>3.0mm~≤20.0mm 的板材为中板，厚度>20.0mm~≤40.0mm 的板材为厚板，厚度大于 40.0mm 的板材为特厚板。

建议取消“中厚板”这个术语，以便与国际惯例接轨，

不为标准制订添乱，大家也不要再用这个术语，如果认为有必要添加这个术语，则应在标准中给出明确解释与定义。

车轮与轮毂

大约在2010年以前中国将汽车铝车轮称为轮毂(hub)，是对的，从2010年起改称车轮（wheel），也是对的，国际上都这么叫，将轮毂改称车轮是为与国际接轨，更便于国际交往与进行国际贸易。中国是世界上最大的汽车铝车轮与摩托车铝车轮生产和出口大国，2014年中国汽车铝车轮生产能力超过2亿件/年，产量约1.6亿件，出口量约占51.5%，生产这么多车轮约消费1600kt铝合金，出口厂商约1300家。中国应出口更多的铝车轮，目标应是出口量占产量的80%左右。据中国汽车工业协会的数据，2014年中国铝摩托车轮的生产能力约1亿件/a,产量约68000k件,出口量占55%左右。

摩擦搅拌焊与搅拌摩擦焊（FSW）

摩擦搅拌焊（FSW,Frickion stir welding）是英国焊接研究所（TWI）于上世纪90年代初发明的，1999年挪威萨帕铝业公司首次进行了商业化焊接，现在此法已成为铝及铝合金最先进的焊接工艺，中国已完全掌握了此种技术及其设备制造技术。在当前中国对FSW有两种译法，一种为摩擦搅拌

焊，另一种为搅拌摩擦焊，前者是对的，后者是错的，无论从英语语法与习惯还是此法的工作原理来说都是不对的，在任何场合都应用摩擦搅拌焊，希望予以纠正，正式出版物不要再用“搅拌摩擦焊”这一术语。

与目前铝合金其他的焊接工艺相比，摩擦搅拌焊的主要优点有：焊接温度未达到铝及铝合金的熔点，通常不高于510℃，不会熔化，但大大软化，因而可随着指针“流动”，焊缝有比母材更细化的再结晶组织，焊缝几乎与母材在同一平面上，它们的力学性能几乎相等；焊缝可呈直线形也可以为其他形状，对于裂纹敏感的合金也不必采取特殊的措施就可以施焊；无需填充金属和保护气体，成本比传统工艺的低一些；不必开口和焊前处理；焊接速度高于熔化极惰性气体保护电弧焊（MIG）；焊接变形小，仅为MIG法的十二分之一；可以焊接所有的变形铝合金和铸造铝合金，可焊接异种如铜与铝；热影响的性能比熔化焊的高；与传统的熔焊法相比，此法焊接温度低，变形小，没有凝固裂纹，是焊接铝合金的现代化的最佳工艺，可以顺利地焊接那些难熔焊的易产生裂纹的超硬度铝合金和铝－锂合金等;可以单面焊接厚达75mm、双面焊接150mm的工件，是一种环保型的焊接工艺，无燥气体、无弧光、不散发气体；焊后不需要矫正；检验成本低；自动化程度高；可重复生产；几乎不需要预焊。中国应在可能的范围内尽量推广摩擦搅拌焊的应用。

挤压圆铸锭与铸棒（billet）

billet 应译为圆铸锭、挤压圆铸锭，可简称圆锭，但不可以译为圆棒或铸棒，因为棒的英文为 bar 或 rod。棒是一种半成品，而锭是加工棒的原始坯料。挤压用的圆锭说成棒或写成棒，易使人误认为是棒材，是半成品的一种，早些年中国有一家企业将仅简易加工的圆锭写成棒，将棒材出口到国际市场当重熔用锭，骗取出口退税，在国际市场上造成不良影响。

凡是称为“棒”的铝产品不管外表如何，其加工变形率必须≥70%，否则不能消除铸造组织，不能认为是“棒”，即使变形率达到 50%仍应视为锭，不是棒。在中国把铸造圆锭说成棒起源于上世纪 80 年中期广东省建筑铝型材厂的建设与生产，以后风靡全行业。现在要求在出版物中不用“铸棒”这一术语都不易，很难避免。

关于外国铝业公司的名称

关于外国铝加工企业的译名问题应遵守的原则是：凡是已在中国有关工商部门进行了注册的，以注册商标名称为准，如 Novelis 铝业公司的注册名称为诺贝丽斯铝业公司，Alcoa 的注册名称为美国铝业公司。不过笔者也有不同意见的，如日本联合铝业公司（UACJ），在中国的注册名称为“株式会

社日铝全综”，这是日文，如果用这个名称，那么很多人可能会不知道这是个什么公司，所以我们宜用日本联合铝业公司；Hazellet 公司，按英语标准读音应译为“黑兹莱特”公司，但他们觉得“黑”字在汉语里有点不吉利，所以注册为“哈兹雷特公司”。如果还没有注册，则译名既要接近读音又要图个吉利与寓意深远，如 Aleris 公司译为“爱励铝业公司”。尊重历史，如 Ford Motor Com.，按读音可译为福德汽车公司，但它是进入中国第一个汽车公司，那时就称为福特汽车公司，沿用至今。

“株式会社”是日文，中文为股份公司，实际上“公司”是“会社”的音译，是我们向日文学习的结果，有了公司这一人人皆知的名词，就用不着再引进“株式会社”这一洋名了。

此外，在日常交流与文章、报道中不要用“噪音”这一术语，而应用“噪声”，这是国家标准规定的。挤压机的“挤压筒（Container）”不要译为“盛锭桶”。

1.1.34 铝——推动世界美好前行的力量

工人向目标靶室内装填“人造太阳”的核心装置。

铝：高速轨道车辆与磁悬浮车辆不可或缺的材料

当今世界，几乎所有的高速（≥200km/h）车辆、磁悬浮车辆的车体全是用铝材制的，没有铝它们就不会跑得这么快，对环境就不会这么友好，能耗也不会这么低，乘座舒适性也会差一些。其他轨道车辆如地铁、高架路车辆、中低速磁悬浮列车等也有30%左右是全铝的，即铝化率达100%，没有铝就没有这么便捷、舒适、环保的轨道车辆系统。截至2014年全世界的全铝轨道车辆约6.5万辆，耗用各种铝材约700kt。

1888年铝的工业化提取工艺问世，8年后即1896年法国北部铁路开始用铝材试验性地制造车厢窗框；1905年在英国兰

克夏和约克夏铁路电气化时期，为了架设接通市区的高架线，必须减轻车体质量，为此，车体外蒙皮和车内装修用了一部分铝材代替钢材。现在所指的全铝轨道车辆就是说车体构架、蒙皮全是铝的，内部装修也有一部分是铝的。1923年美国在伊利路易丝斯州的中部和路易丝的西部铁路车体的外板和顶板开始用铝板取代钢板；1952年伦敦地铁车辆开始用铝合金制造，开全铝轨道车辆的先河；1962年日本川崎重工业公司为山阳电气化铁路制造全铝2000系列全铝车辆，日本建设高速铁路及制造全铝车辆的技术是向德国学习的；中国从2006年起从法国、德国、日本引进高进高铁技术，2008年首列动车开始在京津城际铁路上奔驰。截至2014年年底，中国投入营运的高速铁路已超过1万千米，居世界首位。中国的高铁技术不但可以满足国内经济发展的需求，而且居世界领先水平，已出口到世界多个地区与国家，是中国当前惟一的一项可整体打包出口的交钥匙项目，可承包从设计、道路修建、车辆制造、调试等所有工作，在国际市场上很有竞争力。

日本之前对3辆编组的不锈钢车与铝合金车作过试运转，前者的质量14.46t，后者的质量为9.77t，轻量化率32%，长期运转表明，铝合金车的动力消耗与制动的摩损也几乎低32%。铝合金车辆的抗腐蚀性能也与不锈钢的相近，日本的2000系列铝合金车辆至2014年已营运53年仍完整如新，不需要作防腐表面处理。虽然中国在高铁的整体技术方面居世界领先水

平，但不是每一子项技术都跻身世界顶尖，如自动化控制设备须全球采购，与西门子、美国通用电气公司（GE）、日本东芝公司相比仍有一些差距，在输电铜线的技术特性方面还有待改进，摩擦搅拌焊接（FSW）装备制造还有较大差距，焊接技术有待进一步提高。

中国在研发高寒地区高速铁路领域也有一些独创性的技术。在思考高速车辆时，如不涉及到铝就无从谈起，在高速车辆时，为了轻量化，在用到板时应降低其厚度，而有些部位需要高强度的材料，这就出现了异种材料问题；在全不锈钢车中，也会用一些铝材，也存在异种材料问题，如何把它们可靠地焊接起来亟待解决。

中国地铁与城市轨道车辆的铝化率只有30%左右，还有较大的发展潜力，东京地铁自1962年引进5000系列7辆编组共计3组铝合金车辆以来至2013年末已保有2700辆，全是铝合金的，值得我们借鉴。东京地铁线路中，急转弯部分较多，因此列车运行时反复循环加减速度机率多。在这种运行条件下，车辆轻量化显得特别重要，可取得显著的节能效果，另外铝合金具有优越的抗腐蚀性能，因此不需要涂装，节省了涂装设备投资与涂料费用，提高了车辆维修保养性；可回收性强，回收价值高，几乎与建设铝材的回收率相当；铝材的加工成形性优越，不但可降低加工制造成本，而且可提高设计造型

美感。

捕捉宇宙电波的超大铝天线望远镜

为了探测宇宙间究竟有什么，揭开宇宙起因之密，天文学家依靠伽利略望远镜对天体遥远的彼方观测了400多年，获得了不少有价值的数据，但是要进行更深入的研究，捕捉宇宙传来的微弱电波，伽利略望远镜显然力不从心，必须建造有巨大天线的毫米电波望远镜。为此，在有最佳观测条件的智利、美国、日本建设了有世界天文学家参与的观测站，他们利用超大铝天线望远镜探究深邃的宇宙，没有铝，就没有这种精密无比又超大的望远镜，它们从2011年起开始启用。

现在已有多处用巨大铝天线望远镜建造的观测宇宙的天文网站，如：日本国立天文台野边山宇宙电波观测所，1982年完工，除有最大直径45m的毫米波望远镜外，还有毫米波干涉仪、电波日照计等，是日本电波观测的主要根据地；日本

国立天文台阿尔玛（ALMA）东亚地区中心；美国国家天文台；智利阿尔玛望远镜智利镜山山麓观测站与山顶观测站，智利北部安德士山脉高地观测站，有66台铝天线装置，分布于直径18.5km的范围内，可以自由移动，这是世界最大的天文观测站，拥有最多的天线群，由日本、美国、欧洲企业竞争制造，日本建造直径12m的4台、直径7m的12台，2011年10月在现场安装就绪，在技术方面受到严峻挑战，天线境面全部采用铝合金板制造，实乃“造物精华”。

大型天线的主反镜将捕捉到的宇宙电波聚焦到天线中心的副反射镜上，再传送到信号接受机的超导元件，超导元件为其上有真空镀铝膜的铌，铝膜厚1nm（纳米），是在超净室内镀的。在天线下部设有杜瓦（Dewar）真空瓶，置于接收机中的10个编码键筒上，其高度为54cm，直径15cm。聚焦后的电波从编码键筒的喇叭口进入底部的超导变频器，变频器内部装有直径≤3mm的超导元件。喇叭编码键筒支架材料为6061铝合金，是用电火花工艺加工的。

加工天线表面极具挑战性，因为其表面越光洁才能接收到越短的电波，因此必须用强度高韧性大的铝合金加工，其表面粗糙度应小于25nm，同时在高原的20℃~20℃的环境中仍保持这个厚度精度。

直径12m的天线是用205块1m×1m的铝板铺设成的，原材料厚度30mm，以nm为单位以进行史无前例的一层一层地切削

加工的，每一块都有极其精准的抛物面，为了组成抛物面，采用7种不同形状的铝板。

为了制造直径45m、最大高度50m的天线，遇到的最大问题是如何减轻其自重，因为它的抛物面面积1590m2、重700t。为了轻量化，天线表层（镜面体）采用夹层的碳纤维增强塑料蜂窝铝板。为了避免骨架因太阳光直射变形起见，在天线背面装有隔热铝板。经过这种苦心设计，使这种毫米波望远镜在世界这类装备中鹤立鸡群，居世界顶尖水平，镜面精度保持在170靶左右。铝材在这些超级天线中扮演了无可替代的作用。

铝：制造高技术试验弹的良好材料

据2008年1月31日美国《防务周刊》报道，美国海军于31日上午使用最强大的电磁轨道进行试射时，创下了最新的世界纪录。这门电磁炮以1068×104 J的能量发射了一枚铝弹。试射前首先充电约4min，之后发射，铝弹以7Ma（马赫），即2500m/s的速度飞出轨道，直奔目标。

电磁炮的动力来自电而不是火药，炮弹以7Ma的速度飞出电磁轨道，在大气层内飞行1min，然后在大气层外飞行4min，最后在1min内以5Ma左右的速度落向地球击中目标。电磁炮能为舰船设计提供更多变化，因为它的质量轻，与传统火炮相比所需要的空间也更小，也不需要传统的火力保护与弹药装

填，改变了海上炮战的传统思维。美国陆军也在研发小型的电磁轨道砲。电磁轨道炮目前仍处于研发阶段，还需要一些时日才能进入实战阶段。

中国在发展高速铁路装备时，也曾用铝弹试射机车头部的防护挡风玻璃，考验其坚固性。铝最适合制造试验弹，因为它的密度不大也不太小，硬度不高也不低。

美国“人造太阳”目标靶室用铝合金厚板造

据《新京报》2010年11月21日报道，11月2日被誉为“人造太阳”的美国国家点火装置（NIF）完成了首次点火实验--192束激光系统发射的能量打造出6×106 ° F高温，这相当于恒星或大行星核心温度。NIF从1997年开始建造，至2010年已耗资35.5亿美元。

这个“人造太阳”实验室位于加利福尼亚洲利弗莫尔国家实验室，仍在建造，点火装置高达30余米，相当于10层楼高，面积相当于一个足球场大。这个点火装置是全球最大的激光科学建设项目，因而成为全世界“人造太阳”试验中心，承载人类利用新能源的梦想。装置内部有一个质量130t的目标靶室，是“人造太阳”最核心的部分，由厚达100㎜的铝合金厚板制成（原文没有说明用的是什么合金，笔者估计为5083合金）。靶室里的中心孔洞直径10m，用300㎜厚的混凝土掩埋，旁边有192个激光器向其中发射中子，以点燃反应堆，促使包含氘

和氚的玻璃物球体产生极大的高温和高压，引起这个只花生米粒大小的球核聚变反应，产生6×106 ° F的高温和高达1×109 N/m2的压力。

据国家点火装置的官员估计，使用核聚变反应堆的发电站将于2020年开始运行，到2050年将有25%的美国民用能源泉由核聚变提供。海水中有的是氘，1gal（加仑）海水可提供相当于300gal汽油产生的能量，50gal海水所产生的能量相当于2t煤的。核聚变很环保，大规模应用后，可以少使用化石燃料，从而大大降低温室气体排放。一旦我们掌握了核聚变发电技术，我们的子孙后代将享受到科技发展带来的飞跃，能源短缺的时代将一去不复返，铝在迎接这个时代的未来发挥重要的作用。

“人造太阳”中的核反应堆目标物是氘和氚，海水中有的是氘，同时可利用并不复杂的技术从海水里萃取；氚主要存在于锂中，锂是一个并不稀缺的元素，土壤里有锂，盐湖里有锂，中国是世界上盐湖最多的国家之一，大小盐湖共有1500多个，其中青海柴达木盆地的盐湖又多又大，湖中含有2670×108 t钾、钠、镁、锂、锶等盐类，锂的储量极为丰富。所以氘和氚在现实中的开采和利用，相比核裂变要使用的铀或钚简单易行得多。

铝合金厚板在建造超净室时也是不可或缺的，在制造某些电子元器件时必须在超净的工作室内进行，这种趋净室不

但应绝对干净，不得有任何尘埃，而且不允许“天外来客”（宇宙射线）侵入，因此必须用厚达70㎜的5083铝合金厚板严严实实密封屏蔽。

深海潜水服铝合金造

2014年加拿大一家公司用铝合金设计制造了一套深海潜水服装，这套深海潜水装采用铝合金制成，质量240.4kg，装有18个与关节相连的旋转接头，潜水员的手脚及头部能如在地面一样灵巧地活动，抗衡巨大的水压。这套潜水装的商品名称为Exosuit，它的内部有一套气压管理系统，提供足够50小时的氧，装有4台推进器，可以节省体力消耗，通讯设备齐全，通过高清视讯显示于地面大屏幕上，既能保持与地面通讯联络，地面人员又可以清晰地看到水下情况。

1.2 合金材料

1.2.1 铝合金是怎样分类的

改型合金与原始合金相比，化学成分的变化，仅限于下列情况之一或几种：

合金元素为一个元素或几个元素时，极限含量算术平均值的变化量符合下表的规定。

原始合金中极限含量算术平均值范围,%	极限含量算术平均值变化量不大于,百分点
≤1.0	0.15
>1.0~2.0	0.20
>2.0~3.0	0.25
>3.0~4.0	0.30
>4.0~5.0	0.35
>5.0~6.0	0.40
>6.0	0.50

增加或删除了极限含量算术平均值不超过 0.30%的一个合金元素，增加或删除了极限含量算术平均值不超过 0.40%的一组组合元素形式的合金元素。

为了同一目的，用一个合金元素代替了另一个合金元素。

改变了杂质的极限含量。

晶粒细化剂含量变化了。

国际变形铝合金的四位数字牌号

变形铝合金的四位数字牌号体系是美国铝业协会编制的，1954 年 7 月 1 日正式启用，中国变形铝合金的四位数字牌号体系是以国际牌号体系为模版制订的。因此，它们几乎完全相同，仅稍有差别，可等同使用。

1xxx 组表示纯铝（铝含量≥99.00%），其最后两位数字表示最低铝百分含量中小数点后的两位。

牌号的第 2 位数字表示合金元素或杂质极限含量的控制情况，如果第 2 位为 0，则表示对其杂质极限含量无特殊要求，若为 1~9 则表示对一个或一个以上的杂质或合金元素极限含量应予控制。

2xxx~8xxx 牌号中的最后两位数字没有特殊意义，仅用以识别同一组中的不同合金，不过若是 1954 年 7 月 1 日以前已有的 XXS 合金，则为了有一定的衔接关系，此最后两位数即为“S”前的数字，如 7075 合金即以前的 75S 合金。四位数字中的第二位表示合金的改型情况，如果为 0，则表示为原始合金，如果是 1~9，则表示为改型合金。当前，改型最多的是 6060、6061 及 6063 合金，它们各有 5 个改型的合金，如 6063A、6463、6463A、6763、6963。原始合金四位数字牌号之后还可以添加字母 A、B、C 等表示改型合金，I、O、Q 不能用，但是这种改型合金是由不同国家或组织的企业注册的，而以数字表示的改型合金，则改型合金与原始合金的注册国相同。

牌号前的大写 X 表示该合金为试验性合金，如果通过试用合格成为正式注册合金则删除 X。

铸造铝合金的牌号及代号

铸造铝合金没有统一的国际牌号，各国有各自的牌号及代号。按 GB8063 规定，铸造铝合金牌号用化学元素符号及数字表示，数字表示该元素的平均含量，牌号前以“Z”表示铸造，平均含量小于 1%的不标出，例如 ZAlSi7Mg 表示 Al－Si－Mg 系铸造铝合金，平均硅含量（质量分数）7%，Mg 的平均含量不到 1%。铸造铝合金（ZL）的代号由 ZL 及其后的三位数字组成，第一个数字表示合金系列：1——铝－硅系合金，2——铝－铜系合金，3——铝－镁系合金，4——铝－锌系合金，第二、三个数字表示合金的顺序号，代号最后字母“A”表示优质合金，“Y”表示压（ya）铸合金，如 ZL112Y 为铝－硅－铜系压力铸造铝合金。此外，还有铝－稀土金属为基的铸造铝合金，但是未形成独立合金系，如 ZL207RE，它含 4.4%~5.0%混合稀土，3.0%~3.4%Cu，1.6%~2.0%Si，0.9%~1.2%Mn，0.2%~0.3%Ni，0.15%~0.25%Mg，0.15%~0.25%Zr，其余为 Al。

1.2.2 缕述铝合金家族谱系

1824 年奥尔斯特德（H.C.Oeisted）用钾汞齐还原氯化铝首次制得少量的铝，这是人们首次发现了铝；1827 年沃勒（F.Wohler）第一个离析出较纯的铝，并描述了它的性质；1854 年法国德维尔（Henri Saint,Claire Deville）改进了以前的制备方法，用钠作为还原剂成功地制得更多与更纯的

铝；同年，德维尔和德国化学家本生（R.Bunsen）分别在实验室电解熔融氯化铝钠第一次制得铝；1886 年美国大学生霍尔（C.M.Hall）和同岁的法国大学生埃鲁（Paul-Louis Heroult）彼此独立地在实验室用工业电解法提取了较多的铝。

不过这些 19 世纪制得的铝，不管是奥尔斯特德、沃勒、德维尔在实验室用化学法制得的小粒块铝，还是德维尔和本生用电解法制得的少量铝或霍尔、埃鲁用工业电解法生产的较多与较大的铝块都不是纯铝，而是含有较多杂质的铝合金。纯铝可简称铝即 1xxx 系金属，是指它的质量分数不小于 99.00%的铝，在这里需指出，在“铝”字之前不要加“金属”二字，因为汉字“铝”的偏旁为“金”，就表明它是一种金属，这是汉字高明之处，而英文“aluminium”以字形看不能说明这种物质的形态，也不能说明它是金属还是非金属，所以在 aluminium 之前加 metal。

合金（alloy）是由基体金属元素（质量分数最大的）、合金元素及杂质所组成的一种金属物质。铝合金的基体金属元素为铝。在现行的铝合金中，变形铝合金含合金元素最多的是英国于 1999 年注册的 4019 合金，它的合金元素总量为 24.9%~29.1%（18.5%~21.5%Si、4.6%~5.4%Fe、1.8%~2.2%Ni，杂质总量 0.15%，其余为铝），常用铸造铝合金含合金元素最多的是 ZL109 合金，它的合金元素总含量为 13.1%~17.3%

（11.0%~13.0%Si、0.5%~1.5%Cu、0.8%~0.15%Ni、杂质总量1.2%、其余为铝）。

合金元素知多少

铝的工业化生产始于美国匹兹堡冶金公司（Pittsburgh Reduction Company）的投产，总投资＄20000，1907 年改名为美国铝业公司（Aluminum Company of America），1999 年正式启用简称与产品商标 Alcoa，所以可以认为铝合金的工业化生产也始于 1888 年，距今 126 年。纯铝的铝含量≥99.00%~99.99%，即包括 1050 合金至 1199 合金的 1xxx 系合金，至 2013 年在美国铝业协会公司注册的 1xxx 系常用合金及非常用合金共有 69 个，Fe 及 Si 是其主要杂质，除对 Si、Fe 的含量分别加以控制外,还往往对它们的总含量加以限制，对个别合金如 1100、1100A、1120、1435、1275 合金还添加少量的 Cu（0.05%~0.20%）。

纯铝虽具有一系列的优良性能，但力学性能低，不能满足工程结构要求，所以常向铝中添加一些化学元素，形成许许多多合金,显著地提高了铝的性能,扩大了它的应用范围，使铝及铝合金在人类应用的金属材料中量仅次于钢铁，成为第二大金属材料，铝能与诸多元素形成有实用价值的合金，也是铝的优点之一。2013 年全世界铝合金材料的消费总量约 58000kt,其中中国的消费量约 31500kt，占全球总量的 54.3%。

铝的合金元素约有 25 个,形成有实用价值的合金约 1250 个，这些合金元素是：硅、铁、铜、锰、镁、铬、镍、锌、钛、银、铍、铋、钙、锂、铅、锡、钒、锆、钪、氧、镉、钴等，应注意的是，在列铝合金的成分表时，合金元素的排序一定要按上述次序排列，这是国际惯例。

在铝合金用的合金元素中,用得最多的是硅,其次是镁、铜、锰、锌，它们的用量占总用量的 96.5%左右，而硅的用量又占总用量的 75%以上，硅是 4xxx 系、6xxx 系变形铝合金与 ZL1xx 系铸造铝合金的基本合金元素，镁在 2xxx 系、3xxx 系、6xxx 系、7xxx 系变形铝合金与 ZL3xx 系合金中均有着广泛的应用。

1.2.3 铝合金发展的里程碑（一）

截至 2013 年年底,在美国铝业协会公司技术处注册的常用变形铝合金有 534 个，其中 1954 年注册的 54 个，都是美国注册的，这是为什么呢？

变形铝合金 4 位数字牌号表示法完成于 1954 年,是美国铝业协会提出的。因此，1954 年成为注册元年，凡是过去市场上已有的合金皆注册。

自铝的商业化生产以来，一直到 1954 年的近 70 年，美国垄断着世界铝工业，原铝及铝材的产量几乎占世界的一半以上，特别是第二次世界大战期间，由于战争的需要，铝工

业尤其是加工工业取得了长足的发展，美国生产的铝材制造了近 14 万架飞机，发明了一批新合金，为二战的胜利做出了永载史册的贡献。一些公司如美国铝业公司、加拿大铝业公司、雷诺兹金属公司（Reynolds Metal Com.,2006 年被美国铝业公司兼并）、凯撒铝及化学公司都发明了一些商业化合金。

美国铝业公司非常致力于创新，视发明为公司的生命，美国这个国家与民族就是一个创新与发明的国家与民族。在这里要特别指出铝的工业化电解工艺发明者与美国铝业公司创始人霍尔，他是一个创新狂与实验狂，为了创新，他整天关在实验室，终身未娶，为了搞发明，他也很少顾及公司的日常经营与管理，交给他的伙伴打理。美国铝业公司 126 年经久不衰，总是迄立于风口浪尖上，都得益于霍尔打下的良好基础。

有全球最大、历史悠久与实力雄厚的技术研究中心——匹兹堡技术中心,该中心有 5 个研究所,研究人员约 1300 名，新世纪以来每年的研究费用都超过 1.2 亿美元，每年取得的专利约 80 个，笔者粗略地统计了一下，该中心真正从事科技研发的人员与每年取得的专利数都分别比中国整个国家铝行业（不含专业研究院所与高等院校）的还多一些。

铝合金进展的里程碑

1906 年硬铝定型，它是一种 Al-Cu-Mg 系合金，即当今的 2xxx 系合金,因为它的硬度与强度比铝及 Al-Mn 合金的高。实际上这个合金的雏形成分是法国一家铝业公司提出的并投入商业化生产，注册商品为“Duraluminium”，“Dur”是法文，就是硬的意思，“Duraluminium”就是硬铝，在早期的文献中，还把它译为杜拉铝，最初的成分还含有较多的猛，它是最早的可时效硬化的铝合金之一。现在，硬铝是应用广泛的航空航天器结构铝合金之一，它是第二次世界大战飞机结构材料的脊梁，没有它战争也许还要延续一些时日，往日本投掷原子弹 B52 轰炸机用的铝材中约有 80%为硬铝型合金。

1917 年 2017 合金问世,它当时的牌号为 17S,1954-07-01 改为 2017,它是一种硬铝,它的成分(质量%):0.20~0.80Si、0.7Fe、3.5~4.5Cu、0.40~1.0Mn、0.40~0.8Mg、0.1Cr、0.25Zn、0.10Ti，其他杂质单个 0.05，总计 0.15，其余为 Al，现在应用的常用合金还有 2017A、211A 合金。此合金主要用于制造锻件。

1921 年铸造铝合金 195.0 合金诞生，是一种 Al-Cu 系铸造铝合金，相当于中国现在的 ZL101 合金，其主要成为分 6.5%~7.5%Si、0.25%~0.45Mg，其余为 Al 与杂质，这是一种有良好铸造性能的合金。

1934 年 2024 及 6061 合金定型，是美国铝业公司技术中心发明的，当时的牌号为 24S 及 61S，1954-07-01 注册为目

前的四位数字牌号，这是两个非常典型的合金，至今仍宝刀不老，在工业中获得了广泛的应用。2024 合金为自然时效合金，6061 合金必须进行人工时效才能获得最佳的综合性能。

1.2.4 铝合金发展的里程碑（二）

1945 年 6063 及 7075 合金正式进入市场，是由美国铝业公司技术中心研发的，当时的牌号分别为 63S 及 75S，1954 年 7 月 1 日注册为四位数字牌号 6063 及 7075 合金。这是两个有划时代意义的合金，在国民经济中获得了极为广泛的应用，6063 合金是全球产量最大的变形铝合金，85%以上的建筑及结构铝材是用它挤压的。7075 合金是最主要的航空航天器铝合金，它几乎同时在日本、美国、苏联诞生，苏联的牌号为 B95，日本的牌号为 ESD。当时它名为超硬铝，因为其硬度与强度比 2024 合金的还高。

1955 年铸造铝合金 A356 合金定型，在铸造铝合金发展史上具有里程碑意义。它是一种含有 0.25%~0.45%Mg 的铝－硅系合金，与中国的 ZL101A 合金相当，是用量最大的铸造铝合金，2013 年全球生产的约 2 亿只汽车车轮都是用此合金低压铸造的，消费铝约 1500kt。

1966 年 5182 合金研制成功，这是一种含 0.2%~0.5%Mn 与 4%~5%Mg 的 Al-Mg 系合金，1967 年 11 月 10 日在美国铝业协会注册，用于轧制全铝易拉罐罐盖带材。

1971 年美国铝业公司对外宣称研制成功有良好综合性能的高纯度 7150 合金，Si 与 Fe 的含量都很低，合金的断裂韧性有较大提高。

1991 年 7055 合金在美国诞生，1991 年 2 月 13 日注册，是一种杂质含量低而锌含量高（7.8%~8.4%）的 7xxx 系航空航天合金。它的成分（质量%）：0.10Si、0.15Fe、2.0~2.6Cu、0.05Mn、1.8~2.3Mg，0.04Cr，7.8~8.4Zn、0.06Ti、0.08~0.25Zr，其他杂质 0.05，合计 0.15，其余为铝。这是一种很干净的合金，杂质硅、铁、锰、铬、钛等的含量都很低，熔炼配料时必须用 A199.90 的重熔用铝锭，不用废料，或用少量的本合金废料。由于其杂质含量很低，所以杂质相少，断裂韧性、损伤容限性能、抗腐蚀性能等都得到较大提高。

虽然早在上世纪 20 年代含 Li 的铝合金（铸造铝合金没有含锂的）已在德国出现，并在飞机制造中得到少量的应用，但是率先在美国铝业协会注册的是 1984 年 7 月 16 日欧洲铝业协会（EAA）的 8090 合金与 1984 年 8 月 6 日美国的 2090 合金，它们的注册时间前后仅相差 20 天。

含锂的铝合金只有 2xxx 系合金与 8xxx 系合金。锂在 2xxx 系合金的 17 合金中不是主要合金元素，其含量均比铜的低，但又大于镁的，是第二大合金化元素，含量最多的是 2090 合金，为 1.9%~2.6%。8xxx 系合金中的锂是最主要的合金化元

素，8024 合金是一种铝－锂二元合金，含 3.4%~4.2%Li，在注册的合金中，它含有最多的锂。8090、8091、8093 合金是 Al-Li-Cu-Mg 四元合金，还含有微量的锆。除这些注册的合金外，各大铝业公司还有一批各自的含锂合金，如美国雷诺兹金属公司（2001 年被美国铝业公司兼并）与马丁·马里特公司研发的 Weldalite 合金，肯联铝业公司的 Aware 合金，法国的 CP276 合金、俄罗斯的 BAD23 合金，中国的 141 合金等。铝－锂系合金已在航空航天器制造中获得广泛应用，中国 C919 大飞机验证机等直段结构是用从美国铝业公司进口的铝－锂合金制造的，全世界有 8 个铝加工厂可以生产含锂的铝材，中国仅西南铝业公司能够生产含锂的铝合金。

含钪的铝合金。钪是一种稀土元素，密度 2898kg/m3，熔点 1539℃。它在铝合金中的作用为：铸造铝合金的有效变质剂，变形铝合金的良好晶粒细化剂。在过渡族元素中，对铝合金组织晶粒细化效果最好的是 Sc，其次才是 Ti、Zr、V。从固溶体中析出的 Al3Sc 呈弥散的细小质点分布，显著提高合金的强度性能及再结晶温度，例如含 0.3%~0.4%Sc 的铝合金的再结晶温度高达 575℃，因而大大提高了合金的固溶处理温度与热强性，合金在淬火后仍保持着完全的未再结晶组织。俄罗斯在含钪量一般不大于 0.4%，注册的合金是含 0.01%~0.06%Sc 的 2023 合金，2004 年注册。

1.2.5 数说全球铝合金板材预拉伸机

铝合金板材（厚度＞3㎜）在热轧、剪切、退火、淬火过程中，因温度、压下辊形变化、工艺冷却控制不当，总会产生或大或小的纵向弯曲、横向弯曲、边部波浪和内应力，为了消除缺陷与使内应力降低到尽可能低的水平，必须在退火之前或时效前进行矫直。根据设备配置情况及应用范围有三种矫直方式：辊式矫直、压平矫直和钳式拉伸矫直。前两种不但设备较简单，工艺技术也不高，是一种相当古老的工艺，但是现在仍广为应用，在此不再赘述。后一种是 20 世纪 40 年代中期以来，在工业发达国家发展起来的，中国 1956 年开始引进此设备与技术。当前，铝合金板拉伸矫直装备水平与技术高低已经成为衡量一个国家铝加工业是否强大的主要标志之一，能否为航空航天工业提高所需的关键铝材的重要标志。

铝合金板材在淬火过程中，由于板材表面层和中心层存在相当大的温度差，从而产生很大的内部残余应力，表层为压应力，中心部为拉应力，如果在机械加工之前预先把这种残余应力消除 85%以上，那么在以后用数控加工中心制造零部件时，板材就不会发生不允许的变形，以致无法继续加工而成为废品。因此，必须在机械加工之前，对淬火板材进行预拉伸矫直，以消除残余应力，一般拉伸永久变形率小于 35%，太小达不到消除波浪和残余应力的效果；太大可能产生滑移

线，还可能出现新的内应力分布不均。因为是在零部件机械加工之前进行的拉伸，也就是说这种拉伸是为顺利进行机械加工提供材料，故称之为预拉伸，所生产的板材称为预拉伸厚板（prestretched aluminium alloy plate）。

2013 年，全世界有中国、美国、德国、俄罗斯、法国、日本等 13 个国家可以生产铝合金预拉伸板，总生产能力约 500kt/a。美国和中国的拉伸机数居前，中国最多，共有 12 台；美国第二，有 11 台。到 2016 年，中国可能有 24 台，大大超过美国，届时，中国将成为世界的预拉伸机王国。

国外共有 30 台预拉伸机 最大的 132MN

截至 2013 年，国外共有 30 台铝合金厚板预拉伸机，在 2025 年以前不会新建预拉伸项目，拥有拉伸机情况见表 1。

达文波特轧制厂是当前全球最大的铝合金厚板生产企业，在中国天津忠旺铝业有限公司与银河铝业特种铝合金预拉伸项目（见 2014 年 5 月 22 日《中国有色金属报》第 5 版）未建成前将一直保持着这种龙头老大的地位。它有 5 台预拉伸机，有 1 台拉伸变形率可达 12%，这也是独一无二的。

凯撒铝业公司特雷特伍德轧制厂与肯联铝业有限公司雷文斯伍德轧制厂各有 1 台 124MN（136ustf）的拉伸机，其基本技术见表 2。

德国科布伦茨轧制厂属爱励铝业国际，有 3 台拉伸机，32MN、38MN、80MN 的各 1 台，可拉伸厚板的最大截面尺寸为

220mm×1600mm，最大长度 24.4mm；最值得一提的是，对于超出拉伸机能力的厚板，该厂有 1 台 300MN 的压平机，可通过压缩减小板材中的残余应力。

奥地利有色金属公司（AMAG）拉舍芬（Ranshofen）铝加工公司有 2 台拉伸机，都是西马克集团梅尔（Meer）公司设计制造的：1 台 131.5MN 的，可拉厚板最大宽度 1520mm，2000 年投产；另 1 台的拉力是 90MN，可拉板的最大宽度 150mm，2006 年投产。

肯联铝业公司法国苏瓦尔轧制厂有 2 台拉伸机，一台 61MN 的，1980 年投产；另一台是 50MN 的，2001 年投产，可拉厚板规格为（6~250）mm×（700~3200）mm×（4000~15000）mm。前者可拉 36m 长的，这是 A380 型客机制造机翼所需的最长厚板。

南非共和国休内特铝业公司有 1 台拉伸力（25MN）并不大的拉伸机，可拉伸薄到 0.9mm 的薄板，这也是有其特色的，这台拉伸机可拉伸板材的规格为：

意大利富西纳铝业公司是美国铝业公司的子公司，有 1 台 12MN 的，MDH 公司提供，是全球小拉伸机之一；另一台 30MN 的，是由意大利达涅利公司设计制造的。

俄罗斯卡缅斯克-乌拉尔斯基铝加工材有 1 台 10MN 的预拉伸机，乌拉尔重型机器制造厂制造，可拉板材的尺寸如下：

日本福井轧制厂，原属古河铝业公司，从 2014 年 4 月份

起隶属日本联合铝业公司，有 1 台日本三井公司生产的 56MN 的厚板预拉伸机，是日本拉力最大者。

厚度（mm）	0.9~38
宽度（mm）	500~1900
长度（m）	1.9~10

厚度（mm）	4~16
最大宽度（mm）	2500
长度（m）	3.5~8

中国共有 12 台预拉伸机 最大的 120MN

截止到 2013 年，中国拥有拉伸机的铝合金厚板生产企业 8 家，共有拉伸机 12 台，最大的为 120MN，与其他国家最大拉伸机的拉力大体相当，可以满足当代航空工业所需最大预拉伸板的需求。目前在建与拟建的预拉伸板项目如果在 2018 年全部建成的话，中国将拥有预拉伸机 50 台，占世界总数的 62.5%，所生产的预拉伸板足可以满足全世界那时的需求。

中国铝合金板预拉伸板生产始于 1956 年 11 月 6 日，当日，哈尔滨铝加工厂（现在的东北轻合金有限责任公司）建成投产，该厂是在前苏联的帮助下建设的，一切装备都从前

苏联引进，板带车间有 2 条硬合金板材精整生产线，生产线上各有 1 台 6MN 板材拉伸矫直机，由于这种拉伸机是苏联设计、制造的，技术不成熟，生产中故障不断，在使用不到 1 年后便拆除作废钢处理了。

改革开放后，1984 年东北轻合金有限责任公司从美国加拿大铝业公司（Alcan）奥斯威戈轧制厂（Oswego works）购买了 1 台 45MN 的停用厚板预拉伸机，开中国可生产预拉伸铝厚板之先河，可拉伸厚板的最大尺寸为：厚度 60mm，宽度 1760mm，长度 2000~8000mm。

直到西南铝业（集团）有限责任公司的国产 60MN 预拉伸机于 2005 年投产前，中国一直仅有此 45MN 的拉伸机。2005 年，东北轻合金有限责任公司投资近 30 亿元建设了一个 3950mm 厚板专业生产项目，热轧线已于 2011 年 7 月投产，有 1 台 85MN 的厚板预拉伸机，可于 2015 年投产，可拉伸板材最大尺寸为：长 24m，厚 250mm，宽 3700mm，是从意大利达涅利公司引进的。

西南铝加工厂于 1970 年 7 月建成投产，现名中铝西南铝业（集团）有限责任公司，有 2800mm（1+1）式热粗-精轧生产线 1 条；2000mm（1+4）式热连轧生产线 1 条；4300mm 厚板专业生产线 1 条，2011 年全面建成投产。1970 年投产的那台 60MN 拉伸机是中国第一重型机器集团公司设计制造的，投产后一直闲着，直到 2005 年才重新启用。与 4300mm 热轧机

项目配套的有1台120MN的预拉伸机，由洛阳中信重工制造，中国重型机械研究院总成，是亚洲最大者（全世界共有4台120MN级的拉伸机）。可拉板最大尺寸为：厚度250mm，宽度4150mm，长度36m。

爱励铝业（镇江）有限公司是爱励国际的全资子公司，2012年12月21日，第一块热轧厚板下线，2013年末全面投产，有2台拉伸机，60MN及120MN的各1台，前者已投产，后者可能于2015年投产，都是从德国西马克集团梅尔公司（Meer）引进的。

南南铝加工有限公司厚板项目热轧线于2013年8月13日顺利轧出首块热轧厚板。该公司热轧车间共有5跨，长660m，宽196.8m，占地面积12×104m2，是中国最大的铝板带热轧车间，有1条4100mm与3100mm（1+1）式热粗-精轧线。有2台拉伸机，1台100MN的，1台30MN的，位于拉伸跨内，都是从西马克集团梅尔公司引进的。100MN拉伸机可拉伸板最大尺寸为：厚度260mm，宽度3800mm，长度38000mm。

银海铝业有限公司位于广西壮族自治区柳州市，有1（3300mm）+4（2850mm）热连轧线1条，2013年12月全线投产，可生产1XXX系、3XXX系、5XXX系、6XXX系、部分8XXX系合金宽500~3100mm、厚0.2~150mm的板、带材。有1台35MN的拉伸机。所有主体设备都是中冶东方自主集成，工艺设备、自动化控制系统全部实现国产化，是目前国内最宽幅铝板带

（1+4）式热连轧生产线。拉伸机可处理厚板尺寸为：厚度8~80mm，宽度1000~3100mm，长度2000~15000mm。

河南万基控股集团有限公司1000kt/a热轧板带（其中中厚板100kt/a）、700kt/a高精冷轧板、带已分期建成投产，厚板车间有2台引进的预拉伸机。

大连汇程铝业有限公司位于大连市金州，平轧产品总生产能力200kt/a，厚板系统有1台从意大利达涅利公司引进的60MN预拉伸机。

齐星铝板带有限公司位于山东省邹平市,有24000mm(1+1)式热粗-精轧生产线，1台45MN预拉伸机，2013年12投产。

在建预拉伸机项目5个 拉伸机12台

2014年，中国在建的预拉伸机的厚板项目有5个，共有拉伸机12台，它们的概况如下：

南山200kt/a厚板项目。一期有1条1(5600mm)+1(4100mm)+5（3000mm）式热连轧生产线，生产能力可超过1000kt/a，是参照美国铝业公司达文波特轧制厂的模式建设的，一期厚板生产能力80kt/a,估计应有3台拉伸机,35MN的1台,80MN的1台，120MN的1台。达文波特轧制厂有5台厚板预拉伸机。

天津忠旺铝业有限公司3000kt/a铝平轧产品项目。一期800kt/a，2015年末建成，二期2018年全部建成，达到目标生产能力。一期有2条(1+5)式软合金生产线;1条(1+1+3)

式硬合金生产线，按厚板生产能力 200kt/a 匡算，至少需要 6 台预拉伸机，25MN、40MN、60MN、80MN、100MN、120MN 的各 1 台，其中，60MN 及 120MN 是典型的，必不可少的，用于拉伸 2XXX 系、5XXX 系、6XXX 系、7XXX 系、部分 8XXX 系合金板材。60MN 及 120MN 拉伸机可拉伸 2XXX 系、5XXX 系、6XXX 系、7XXX 系合金板。项目技术参数见表 3。

义煤集团河南同人铝业有限公司位于三门峡市，有 2600mm（1+4）式热连轧线 1 条，1（4500mm）+1（3300mm）热粗-精轧线 1 条。后者正在建设，可于 2015 年末或 2016 年上半年投产，主要用于生产硬合金板材，其中厚板生产能力 50kt/a，应有 2 台拉伸机，先建设 1 台 120MN 的，从国外引进，其基本技术参数见表 4。

顺虎铝业有限公司位于浙江省永康经济开发区，2012 年，从韩国引进 1 条 7075 合金厚板生产线，生产能力 10kt/a，现正在扩建，将生产能力扩大到 50kt/a，可能有 1 台 40MN 级的拉伸机。

万航铝业有限公司 15kt/a 铝厚板项目。该公司位于江苏省吴江市同里镇，即将竣工，是一个专业铝厚板项目，同时生产通用工程与机械用铝合金厚板，产品主要为 5052、5083、6061-T6 合金，有 1 台 35MN 拉伸机。

中国已投产（截至 2013 年底）及在建的铝厚板拉伸机见表 5。

拟建预拉伸板项目至少 10 个拉伸机估计超过 35 台

综合国内媒体报道，截止到 2014 年 6 月，中国拟建的有预拉伸机的项目至少在 10 个以上，估计拉伸机总数超过 35 台。当然这些项目不会都如期建成，但是如有一半如期建成投产，也是实在令人匪夷所思的，主要项目如下，其中有一些已经开始建设或奠基。

山东创新集团计划投资 200 亿元在内蒙古霍林郭勒市建一个生产能力 800kt/a 的硬合金板带项目，分两期建设，一期 2015 年 12 月建成。

陕西大唐澄城煤电铝一体化项目，铝板带生产能力 200kt/a，由大唐陕西发电有限公司控股，澄城县金元铝业有限公司和陕西三秦能源群生发电有限公司参股。

锦联铝材有限公司霍林郭勒项目，为煤-电-铝-铝材一体化项目，分期建设，氧化铝项目在尼日利亚。

宁夏佳盛远达铝镁铝材料有限公司铝平轧产品项目位于中宁县，生产能力 500kt/a，总投资 117 亿元。

内蒙古鸿鑫中厚板项目位于霍林郭勒市，生产能力 150kt/a。

世捷铝业有限公司位于吉林省辽源市，平轧铝产品生产能力 200kt/a，其中，厚板及蒙皮板生产能力 80kt/a，北京维宝世捷投资公司投资。

陕西榆林市千亿元铝、镁产业基地，计划 2020 年以前陆

续建成，其中铝平轧产品生产能力500kt/a。

山西信发综合循环项目位于孝义市装备制造园区，是一个集煤-电-铝-铝材-化工产品于一体的基地，2016年底全部投产，届时产值可超过1000亿元。

据《中国有色金属报》2014年5月22日第5版报道，银河铝业有限公司将建特种铝合金板预拉伸项目，年产量可达60万吨……

2013年，中国有8个企业可生产预拉伸板，有12台拉伸机，占全世界总台数的28.6%，到2015年，中国可有13家企业生产预拉伸板，拥有24台拉伸机，占世界总台数的46.2%，2020年，中国可生产预拉伸板的企业可能会增至20家或更多一些，拉伸机台数可达50台，分别占世界总台数的56%及62.5%。

其次，一个生产能力600kt/a的预拉伸板项目实在是太大了，大的有点吓人，所生产的预拉伸厚板足可以满足全世界的市场需求了。

建设多大规模，什么时候建设等都是投资者的事儿，不过下列几点，还是宜考虑一下。

1. 一个这么大的项目必须进行充分的全球市场调查，到国内外相关企业走走。

2. 4m~6m宽的特大板会占5%左右，同时它们是供造船工业用的，产品运输与建厂地点不可不考虑。

3. 在厚板生产企业中并不是所有的厚板都必须经过预拉伸，大约有 40%可通过辊矫与施压消除残余应力与整平，一个预拉伸厚板产能 600kt/a 的企业，应按厚板总产能 900kt/a 来配套装备与其他设施。

4. 为降低投资风险，不宜一次性建成，可否分期分批？

5. 600kt/a 预拉伸板的企业按保守匡算，需要结构合理的：拉伸机 15~20 台，辊矫机 5 台，固溶处理生产线 12~15 条，超声波探伤线 5 条，时效退火炉 50 台。

6. 生产 900kt/a 厚板，需要生产约 1300kt/a 扁锭。

7. 需要很强的技术力量，高素质的工人与管理人员，宜及早储备人才。

笔者是一个从事铝加工产品生产 60 多年的技术人员，总觉得建设这样一个史无前例的超级项目风险很大，不宜贸然上马，前期调研与论证工作非常重要，但愿这是杞人忧天。

国家	企业名称	总台数	拉伸力及台数 MN×台数	投产
美国	美国铝业公司达文波特轧制厂	5	33×1,75×2,100×1,120×1	1963
	凯撒铝业公司特雷特伍德轧制厂	3	45×1，80×1，124×1	1957
	肯联铝业公司雷文斯伍德轧制厂	3	35×1，95×1，124×1	1964
德国	爱励国际科布伦布铝业公司	3	32×1，38×1，80×1	1964、19
奥地利	奥地利有色金属公司拉舍芬轧制厂	2	131.5×1，90×1	2000、
法国	肯联铝业公司伊苏瓦尔轧制厂	2	61×1，50×1	1980、
南非	体内特铝业有限公司	1	25×1	20
意大利	美国铝业公司富西纳轧制厂	2	12×1，35×1	—
俄罗斯	卡缅斯克-乌拉尔斯基铝加工厂	1	10×1	—
	伯利亚卡利特娃铝业公司	1	35×1	—
日本	福井轧制厂	1	56×1	19
	日本轻金属名古屋轧制厂	1	45×1	—
英国	美国铝业公司基茨格林轧制厂	1	30×1	—
比利时	爱丽国际杜菲尔轧制厂	2	25×1，40×1	—
印度	印度铝业公司	1	25×1	—
罗马尼亚	——	1	——	—
总台数	30			

最大拉伸力 MN（ustf）		124(136)
可拉板材尺寸	最大宽度 （mm）	3810
	最大厚度 （mm）	228.6
	最大长度 （m）	19.8
	最短长度 （m）	5.2
夹口长度 （mm）		457
夹钳开口度 （mm）		228.6×4064
最大移动速度 （m/min）		6.1
最大拉伸行程 （m）		1.22
最大操作行程 （m）		5.76
液压系统最大压力 （N/mm²）		41.4
液压泵传动电机功率 （kW）		368

参数	60MN 拉伸机	120MN 拉
最大厚度 （mm）	120	250
最大宽度 （mm）	4300	4300
最大长度 （mm）	38000	2700
变形率 （%）	≤3.5	≤3.
最大拉力 （MN）	60	120

结构型式	卧式，梁柱结构
最大拉伸力（MN）	120
永久伸长率（%）	≤4
伸长率控制精度（%）	≤0.3
拉伸速度（mm/s）	≥6，在 0~6 内可无级调速
板材拉伸后平直度（mm/m）	＜1（对角方向）
可拉合金系	1XXX~8XXX
可拉板材厚度（mm）	6~250
可拉板材宽度（mm）	1000~4350
可拉板材长度（m）	6~37
单片板材最大质量（t）	20.0
可拉板材最大截面积（cm^2）	4800
可拉板材屈服强度（N/mm^2）	30~350
可拉板材抗拉强度（N/mm^2）	80~450

是否投产	企业	台数	拉伸力（MN）×台数	制造者	投产年
已投产	东北轻合金有限责任公司	2	45×1 85×1	美国二手 意大利达涅利	1984 2015
	西南铝业（集团）有限责任公司	2	60×1 120×1	国产 国产	2005 2011
	爱励铝业（镇江）有限公司	1	60×1	德国西马克	2013
	南南铝加工有限公司	2	30×1 100×1	德国西马克	2013
	银海铝业有限公司	1	35×1	国产	2013
	河南万基控股集团有限公司	2	——	德国西马克	2013
	大连汇程铝业有限公司	1	60×1	意大利达涅利	2012
	齐星铝板带有限公司	1	45×1	国产	2013
全国总台数		12			
在建设的	南山 200kt/a 铝厚板项目	3（估计）	35×1 80×1 120×1	引进	2015
	天津忠旺铝业有限公司	6（估计）	25×1；40×1 60×1；80×1 100×1；120×1	引进	2016
	艾煤集团河南同人铝业有限公司	1	120×1	德国西马克	2016
	顺虎铝业有限公司	1	40×1	国产	2015
	江苏万航铝业有限公司	1	35×1	国产	2014
全国总台数		12			

1.2.6 铝合金工模具材料后起之秀

铝合金以其资源丰富、价格合理、密度小、对环境友好、力学性能适中、可回收性强、热导率与电导率高、抗腐蚀性强、可切削性好、可焊性也不错等一系列优秀性能，不但在国民经济的各个部门特别是交通运输装备制造业、建筑与结构工业、电力工业与国防军工领域获得广泛应用，成为一类不可或缺的基础材料，而且在近三十年来，在工模具制造方

面也获得了日益广泛的应用，可以说，铝合金是工模具材料领域的后起之秀。

铝制塑料模具很有竞争力

塑料已成为用量最大的国民经济非金属材料，它不但是制造业的主要用材，而且与人们的日常生活密不可分，塑料制品比比皆是，是国民经济产业的基础材料。不管是日用塑料制品还是工业塑料零部件都是通过模具制造的，因此，铝塑料工模具在整个模具制造产业中占有相当大的比重，笔者预计，2012 年，其产值占工模具总产值的 27%左右，到 2035 年，铝塑料工模具的产值就可与其他材料塑料模具的合计产值平分秋色。为了评估铝塑料工模具的发展前景与推广应用，欧洲经济共同体进行了一项相当大的研究，其名为“ALUMOPLA”（塑料工业铝模具，Aluminum Moulds for plastic processing Industry），已于 2005 年完成，参与研究的单位有研究院所、大学、工厂、公司及政府机构等，研究内容为铝合金模的成本及其应用，以及与钢模相比的优势。

实施此项研究的背景是工模具制造业在大批量生产所面临的降低生产成本与缩短推向市场的时间（time-to-market）严峻挑战。近年来，铝合金模具已成功地进入塑料制品吹胀成型与热成型工业，不过由于其力学性能较低，除了原型模与批量试生产之外，铝合金模尚未在塑料注射模或树脂连续

生产线模（resin transfer moulding）方面获得应用。

欧盟的研究结果表明，铝合金模的切削加工时间至少比钢模省 30%;由于铝合金的热导率约为工具钢热导率的 4 倍，因此生产效率至少比钢模高 30%；用铝合金模铸造塑料零件时，由于其冷却比钢模均匀，因此零件品质有很大提高；虽然因铝强度比钢低，大型铝合金模具的质量不能相应地成比例下降，但铝合金密度相当于钢密度的 1/3 左右，因此，铝合金模具至少比钢模具轻 50%，因而便于搬运及装卸，运输能耗也可以低一些，温室气体排放也能少一些。

实际上，目前，铝合金在塑料工业中已经树立了牢固地位，不仅在大型模与试批量生产模方面如此，而且在汽车工业、摩托车工业、通用设备、运动器材与家电设备等中等批量生产和中等大小塑料零件生产模方面也是这样。欧盟科学家认为铝合金塑料模的经济效益显著。

铝合金塑料模成本优势凸显

总成本分析，欧盟科学家对塑料零件成本运用三要素进行分析：计划生产的零件数的模具成本；注射机每小时的运转成本，包含材料费与压注零件成本；流动资金。

一般模具的成本由四项组成：原材料，模具元件（装配用件、模座、加热元件、热腔等），流动资金，切削加工费（工装、润滑、机器与模具组装等）。现对它们做一分析：

原材料成本。铝与钢的密度比为 1:3，由于铝的力学性能比钢的低，因而铝模具的厚度应大一些，所以用铝模取代钢模在质量方面仅可节约 1/2。如果在某些情况下，在受力条件因素影响下，不能采用全铝合金模，需要采用钢-铝复合模。在原材料成本方面，铝合金模的成本约比钢模低 15%以上。

模具元件成本。一套完整的生产模具由模本身、模座、加热元件、紧固件组成，标准钢元件与铝元件连结在一起，大多数铝模具中都有一些钢元件。因此，铝模具与钢模具元件成本相当。

流动资金。铝模制造时间比钢模的短得多，因此占用资金的时间少，优势明显。

切削加工成本。铝模的切削加工成本可比钢模的低 35%，对铝模完全可用如下的工艺加工：补焊（修补与矫正焊接）、表面硬化处理（阳极氧化、化学镀与镀镍等）钢模的铣削时间比铝模长 5~10 倍、钻孔时间长 5 倍、电火花加工时间长 4 倍、抛光时间长 3~4 倍，切削工具寿命比切削钢模的长 4 倍。

如果用铝合金 Hokotol(一种铝-锌-镁-铜系合金)合金制造塑料洗衣机前指示盘模（生产指示盘 30 万件）与 1.2311 钢模相比，成本降低 33%，制造周期缩短 21 天；生产 4 万件摩托车塑料零件时，铝合金模的成本比钢模低 25%，生产周期缩短 14 天；生产 10 万件小轿车车门零件时，铝合金模的

制造成本比钢模低 24%，生产周期缩短 14 天。

同样，与全钢模相比，铝-钢复合模也有十分显著的优点，例如用于制造塑料花架时，复合模的质量比全钢模轻 42%，复合模的原材料价格比全钢模低 47%；复合模的切削加工成本比全钢模低 33%，复合模的产量比全钢模高 35%，用复合模生产的花架单件价格比全钢模生产的低 33%。

铝模零件生产周期比钢模短得多

这里所说的生产周期是指将塑料熔体注射到铝模或钢模内经保压与冷却后到零件出模所需的时间。周期长短取决于三个因素：压力、比体积（specific volume）和温度。

在生产半晶态塑料或其他塑料零件时，生产周期的缩短主要取决于冷却时间，而冷却时间取决于模材的热导率。

由于铝合金的热导率是钢的 4 倍，所以用铝合金模生产塑料零件时，可使生产周期缩短 50%。

生产塑料零件各阶段时间比例为：冷却时间占 70%，注射时间占 5%，保压时间占 10%，零件退出时间占 15%。

采用铝合金模生产的塑料件与制品具有更高的品质。铝合金模可以更合理地控制模内的温度，从而降低残余应力，减少次废品，这对压铸非晶态塑料（聚丙乙烯、丙烯腈-丁苯乙烯三元共聚物、聚碳酸酯、PO 聚笨撑氧、PMMA 聚甲基丙烯酸甲酯）零件尤为重要。模具模内温度有差异或冷却速度不

一致就会导致零件变形扭曲，特别是在压铸半晶态件时，而使用铝合金模可使模内温度均匀，冷却速度趋于一致，并且，铝合金模具能够根据塑料零件类型及零件形状（厚度）使冷却达到最优化。

总之，铝合金塑料模既有质量轻、可切削性好、生产周期短的优点，而且还具有待货期短、压铸机寿命长、易搬运、回收率高等优点。铝合金塑料模的应用大大提高了零件品质，有内应力、变形、扭曲、气孔疏松、尺寸偏差引起的废品大为减少。

原则上说，铝合金模具都是用铝合金厚板（厚度不小于200㎜）加工的，而厚板则是用变形铝合金锭热轧的，如果需用更厚的材料制造，则只能用铸造锭加工，不过这种厚锭是用变形铝合金铸造的，而不是用铸造铝合金生产的，现在可用变形铝合金铸造厚达 1200㎜ 的加工汽车零件模用的特大锭。

加工模具用的铝合金可分为两大类：常规变形铝合金，即在美国铝业协会公司注册的 2XXX 系、5XXX 系、6XXX 系及 7XXX 系合金；非常规变形铝合金或者说非标准厚板铝合金，它们是企业各自研发的，并采用各自注册的商品牌号，不过它们都是在标准铝合金基础上对成分稍加调整或添加一些微量元素发展而成，以满足某些特殊性能要求。

65%左右的铝合金模是用非标准合金生产的，制模工业是

一个很重要的产业，是一个很有活力的持续快速发展的行业。中国已成为世界制造业大国，随着制造业的发展，对模具需求也将相应地上升。

1.2.7 对我国铝合金锻件发展的思考

作者：王祝堂

在应用的四大类压力加工产品中锻件（自由锻件与锻件总称）占的量并不大，仅占 30%左右。2011 年全世界铝的总消费量约 57400kt,其中铸造产品(压铸件与铸件,前者占 80%左右）约 16600kt，占 29%；压力加工产品 40800kt（平轧产品,即板、带、箔约 21000kt，占 52%;挤压与拉伸材 18000kt，占 44%;锻件 1224kt，占 3%;粉、膏、其他约 410kt，占 1%），占 71%。在上述的铝消费总量中,原铝占 71%,再生铝 16600kt，占 29%。这是对全世界而言，对不同的国家与地区各种产品的产量与消费量则不尽相同，甚至对个别国家与地区会有相当大的差异，但对主要经济大国上述的比例还是相适应的。

日本神户钢铁公司扩建苏州汽车铝锻件厂

在铝制零部件中锻件的量虽不大，但很重要，都是受力大的承载件，例如 2011 年日本 4~9 月份（2011 年财政年度上半年）铝产品总用量 682.601kt，其中：轧制及挤压产品

120.038kt，占 17.6%；压铸件及铸件 547.906kt，占 80.27%，锻件 14.657kt，占 2.2%弱，但锻件都是诸如悬架系统零件与轮毂之类的重载承力结构件，对保证汽车的安全平稳行驶起着至关重要的作用。

日本神户钢铁公司（kobe steel.Ltd.）原投资 10 亿日元在苏州正在建一个汽车铝产品厂，名为神户汽车铝产品（中国）公司（Kobe Aluminum Automotive Products（China）Co.,Kapp China），现正在调拭与准备试生产，可于 8 月份进行商业化批量生产。该公司属全资日资企业，神户钢铁公司占 60%股份、三井公司（Mitsui&Co.）占 25%、丰田贸易公司（Toyota Tsusho Corp.）占 15%，于 2010 年 12 月开始建设，专门生产汽车悬架系统锻件，有一台 63MN 的机械传动压力机（Mechanical Press），锻件生产能力 12 万件/年。

在神户苏州铝锻压厂尚在建设之际，鉴于中国汽车工业、轨道车辆及其他交通运输工业的高速发展，环保压力大增，运输装备亟待减轻自身质量，对铝合金锻件的需求必会相应地上升，神户钢铁公司于 2011 年 12 月 15 日对外称，将对苏州铝锻压厂追加 45 亿日元投资，再增建 1 台 63MN 的机械压力机，使锻件生产能力翻一番，达到 25 万件/年。此台新增锻压机可于 2013 年投产。

神户钢铁公司生产汽车悬挂零件的铝合金锻压厂还有一二个，一个在国内的三重县（Mie Prefecture）的大安市

（Daian），另一个在美国肯塔基州（Kentucky）。它们各有4台压力机，生产能力各360万件/年，都在进行满负荷生产。

中国在建世界巨无霸800MN锻压机 中小锻件仍有发展空间

2011年全球共有各种规格的各种类型式的锻压机约480台，其中100MN以上（含100MN的）25台左右，而锻压力≥300MN的重型锻压机分布于：俄罗斯4台，其中750MN的2台；美国6台，其中500MN级的4台，多为美国铝业公司所有；法国有1台650MN的；德国有30MN与450MN的各1台；中国有1台30MN的，上世纪1973年9月有负荷试车成功，1974年6月生产出首批“轰六”H81框架锻件，第二重型机械公司制造的450MN锻压机2011年安装完毕，这是近30年来全世界新制造的惟一这么大的锻压机。

中国正在建世界上最大的800MN的多向模锻机，由第二重型机械集团公司设计制造，其单件质量超过250t级的就有7件。此机主要用于锻造航空航器的铝合金及钛合金大型锻件，估计可于2016年投产。2007年8月立项后，二重采取“产、学、研、用”相结合的方式，联合西安中国机械科学院、中南大学、清华大学等多家单位共同研发，整合优势资源，形成科研合力，解决了设计与制造中的一个又一个难题。

800MN 锻压机的建设与投产，将使我国大型航空航天锻件生产水平发生质的飞跃提升，并将改变世界航空航天大型轻合金锻件生产格局，800MN 锻压机主要零部件无论是质量还是体积都是超量级的。

美国是当前铝合金锻件生产大国，也是生产技术水平与研发力量最强的国家之一，其美国铝业公司（Alcoa）的拉斐特（Lafayette）锻造厂是全世界最大的也最有代表性的铝合金锻造企业，拥有以 7MN-450MN 的各类锻压机与机械压力机 18 台，6MN-150MN 的锻锤 8 台，锻件生产能力约 80kt/a，约为西南铝业（集团）有限责任公司的 5 倍以上。此外，美国铝业公司还有克利夫兰锻压公司，2010 年笔者在参观该公司时仅看到 2 台 72MN 的与 1 台 45MN 的锻压机。

日本 2011 年财政年度上半年（4 月~9 月）生产了 568.3 万辆汽车，消费铝合金锻件 14.657kt，平均每辆车的锻件用量 2.6kg。2011 年中国汽车产量 1741.9 万辆，如果每辆车的锻件用量与日本的相当则需要铝合金锻件量当超过 78kt。需指出的是，由于今后汽车铝化率的提高与中高档车比率也会有所上升，中国汽车 2015 年的平均锻件用量可能达到 3kt/辆，如此，2015 年汽车对铝锻件的需求有可能达到 90kt。目前，一些外资企业如美资的上海通过汽车公司、日本的丰田汽车公司、德国的奔驰汽车公司等所用的铝合金锻件都分别从美、日、德国进口，这就是为什么日本神户钢铁公司在苏

州建一个中型汽车专业铝合锻件厂的原因。

在航空航天器制造中铝合金锻件的用量较多，约占铝的总用量的 15%。军用飞机用的锻件与发射航天器用的大锻环等都是西南铝业（集团）有限责任公司与东北轻合金有限责任公司生产的，它们的锻件生产能力远未得到充分发挥，同时 450MN 的大型锻压机已制造完毕，世界锻压机之五——800MN 锻压机正在制造中。不过当前制造支线客机 ARJ21 与大飞机 C919 所用铝合金锻件则全是进口的，主要供应商是美国铝业公司的拉斐特厂。但是这种进口局面不会持续太长时间，根据中国商用飞机公司的规划，2018 年制造大飞机的铝材国产化率为 30%，而锻件的国产化率可能会更大一些，因为西南铝业（集团）有限责任公司十多年前就已成为波音飞机公司提供铝合金锻坯，用它们生产的锻坯加工的零件装备了成千上万架波音飞机。由此可见，2022 年以后除个别新合金锻件以外，凡是可用中国能够生产的铝合金锻压的各种航空航天锻件中国都能生产，至少占此领域所需铝合金锻件总量的 95%以上，因为已形成完整的航空航天锻件生产体系与拥有 53 年的生产经验与技术储备。

轨道车辆、磁悬浮列车、船舶舰艇、其他部门等都需要一些铝合金锻件，高铁车辆用的锻件目前主要从德国进口。据估算，2011 年中国这些部门对铝合金锻件的总需求量约 80kt，全国所有行业对铝合金锻件的需求不会超过 200kt，其

中约有 50%是进口的。铝合金锻件产业仍存在较大的发展空间。

关于铝合金锻压产业的发展与项目建设

如前所述，中国铝合金锻件 2011 年的总需求量约 200kt，国内供应量约 100kt，进口约 100kt，国内总生产能力约 150kt/a，生产能力利用率约 67%，2015 年中国对铝合金锻件的总需求量约 250kt/a，2020 年的约 320kt/a。为了满足市场需求，需要建设一些铝合金锻压项目，但必须稳中求进，对市场作深入的调查，不可冒进，也不应过于保守。锻压项目具有如下特点：

项目可大可小，可只有 1 台锻压机，也可以有二三十台锻压机，前者的专业性很强，而后者可以生产诸多产品，为各行各业提供所需要的种类繁多的锻件，甚至多种类型锻件如铝合金的、镁合金的，可以建一个像拉斐特锻压公司那样特大型综性企业，也可以建一个像神户钢铁公司苏州锻压公司那样的小型专业性强的企业。这两种类型企业中国都需要建设，尤其需要建四五个专业性的中小型项目。项目大小与如何建设由投资者决定。

800MN 级的特大锻压机中国在 2030 年以前有 1 台就够了，500MN 级的在到 2030 年为止的这段时间内还可以建三四台，但要根据市场情况分期建设。

300MN 级以上的锻压机的建设周期长，开工率一般都不超过 60%，锻压产品的附加值高，进入的门坎也高，模具制造与设计的技术含量也高，需要一个强大的技术队伍。

汽车轮毂锻压项目暂不需要建，既有生产能力远未得到发挥。

1.2.8 代铜与节铜的电工铝合金

制造电线用的铝及铝合金除必须满足电导率及力学性能方面的要求外，还必须有足够的抗蚀性、与绝缘漆有良好的配伍性、热学性能、抗蠕变性能、震动疲劳强度与切口敏感性等。

抗蚀性。抗蚀性是铝的主要化学性能之一，铝表面有一层薄薄的致密的自热氧化膜——AL2O3，膜层厚度约 2nm,使铝导体在各种大气中都有很高的抗蚀性。另一方面铝上的氧化膜却妨碍导体良好的接触的形成，在连接前应彻底清除、铝对硫化物有相当强的抗蚀性，铜则不然，这也是铝导体的一大优点，因为大部分绝缘体都含有硫化物。因此，可免去绝缘前的镀锡工序，铜则必须镀锡。铝导体在上绝缘漆的工程中不会与绝缘材料中的优质形成硬脂酸盐，与绝缘漆有良好的配伍性。

良好的散热性能。当铝与铜的电导率相等时，铝的质量只有铜的二分之一，铝的热导率【231W/(m·k)】比铜的

【436W/(m •k)】低，而且由于铝导体的表面积比铜的大得多，所以铝件散发电流热的能力比铜的大得多，因为铝散热件在电子、电器设备中获得了广泛的应用，成为不可或缺的器件。

抗蠕变性能不尽人意。架空铝线在长期使用过程中有时会无缘无故地突然断裂，按它的抗拉强度来说，离断裂还远着呢！其原因是蠕变使截面不断变小造成的。因此，计算导线在运行中所有到的负载时，不应以抗拉强度为唯一计算依据，还应考虑蠕变强度。铝硬线（H 状态）的蠕变强度为 120N/mm2，AL-0.51%mg-0.49%si 合金硬线的蠕变强度 260N/mm2，是制造大跨度输电线的良好材料。

振动疲劳强度较低。风总在不停地刮着，不是狂风暴雨，也会是微风习习，架空导线总处于振动状态，使导线承受着拉应力、弯曲应力等等交变的复杂应力作用。在这些应力的长期作用下，有缺陷部位或应力集中处如固定连接件内、线夹处或线夹附近等会因疲劳儿折断。硬的（H 状态）铝线的室温疲劳强度为 50N/mm2，不但比其抗拉强度低，而且还比其屈服强度低。当温度升高到 150° C 疲劳强度会大幅度下降。

切口敏感性高。铝的切口敏感性比铜的高得多，这是铝的又一缺点，因为在切口处易形成应力集中，成为裂缝源。因此，在安装铝线时，特别是装设绝缘电缆与电线是应格外小心。

导电用铝既要求有高的电导率，又要求有足够高的力学

性能，这往往是一对矛盾，如何使他们处于恰到好处的平衡点，是发展电工铝合金面临的挑战。国际电工委员会（IEC）规定导电纯铝的最低铝含量 99.5%（1050A），其他杂质含量不大于（质量%）：

0.1Si,0.4Fe,0.05Cu,0.01Mg,0.01Cr,0.05Zn,0.05B,0.02(V+Ti),其他杂质总量 0.10，而每个的为 0.03，其余为 AL。

铝的纯度。

铝的电导率首先决定于其纯度，也就是说：所含杂质的种类，含量多少，存在状态。存在电工铝（1050A、1350A）中的杂质元素可达 30 多种。

加到铝中的合金元素如溶于固溶体中，即铝中，使铝的电阻的增加比不溶于铝时的大。当合金元素从固熔体中析出时，析出的体积分数越大，也就是析出的量越多，电导率的下降越少。

根据元素对铝的电导率影响的大小，可将他们分为三类：第一类为对电导率影响小的，如 Bi、Cd、Sn、As、Fe、Ni、Co、Au、Ga、Zn、Ni、B 等，它们在铝中的含量本来就不多，对铝电导率的影响可忽略不计;第二类是影响较大的,如 Cu、Ag、Mg、Ge 等，它们也是铝中不可避免的杂质，只要他们的含量在标准规定范围内，对铝电导率的影响也不明显；而对

铝电导率影响最大的是过度族元素（Zr、Cr、V、Mn、Ti）及Li,它们既是铝中的常存杂质又是对铝电导率影响最坏的元素，对它们的含量应严加控制，决不许越雷池一步。1350A电工合金中牌号中的“3”就是指对Zr、Cr、V等三个元素含量应予严控。在铝厂生产1050A电工铝锭时，往往加B，使原铝中的Ti和B结合，变为TiB2而加以除去。

冷加工率

退火电工铝的抗拉强度不高，为60~100N/mm2，不适宜作架空线，因此，常用有一定冷加工率的硬（H状态）铝线。冷加工对铝的电导率影响不大，当冷加率达到95%~98%时，电导率的下降也只有1%IACS左右。1350-O与1350-H16的电导率仅相差0.5个百分点IACS,而后者的抗拉强度却比前者的几乎高一倍，特硬状态的1350-H19或H29线的抗拉强度可大160N/mm2，因此，冷加工是提高电工铝线强度性能最有效的措施。

绞线在绞拧过程中也会发生少量的变形，其电阻的增加百分率K可按下式计算，虽有上升，其量甚小：K=100（m-1）。M为绞据系数。

绞线得到广泛应用，因为它的柔软性比同界面单线的好，组成绞线的单线越细越多，绞制越松，绞线也越柔软。另外，

节径比小的绞线也有更好的柔软性。

退火温度。通常，退火温度高于 100° C 时，1050 型电工铝合金的抗拉强度开始下降，在 300° C 左右，再结晶结束，强度达到最低，材料完全软化，电导率最高，为 61.8%，有很好的柔软性，可以满足绕制线圈的要求。

1.2.9 宝刀不老的常规电工铝合金

过渡族元素及锂等是不能作为电工铝合金的合金化元素的，因为它们会使铝的电阻率显著上升，当然在个别情况下也有例外，此时就要权衡利弊，综合考虑，虽失掉一些电导率，但整体上合算就行。现在已开发成功一批电工铝合金，它们有各自的特点，用于不同的场所，各得其所，如常用电工铝合金 6101、6102、3003 及 5005 合金等，稀土及耐热架空导线铝合金，Al-Fe、Al-Mg-Cu、Al-Mg-Si-Fe 系软皮导线铝合金等。

6101 合金。该合金是 Al-Mg-Si 系合金，是一种历史悠久、用途最广的电工铝合金，它的成分(质量%)是：0.35~0.8Mg，0.3~0.7Si，0.5Fe，0.1Cu，0.03Mn，0.03Cr，0.1Zn，0.06B，其他杂质每个 0.03，总计 0.1，其余为 Al，于 1955 年在美国铝业公司注册。至 2005 年已发展了 6101A、6101B、6201、6201A、6401、6501 等 6 个合金。6201 合金于 1960 年问世，

也是美国研制的，其成分（质量%）为：0.5~0.9Si，0.5Fe，0.1Cu，0.03Mn，0.6~0.9Mg，0.03Cr，0.1Zn，0.06B，其他杂质每个0.03，总计0.1，其余为Al。6201合金的Si、Mg含量比6101合金高，但它们的杂质含量相等。6101合金主要用于制造母线，而6201合金则用于加工各种导体。由于它们中的Mg2Si在铝中的固溶度随着温度的上升而增加，故可通过固溶热处理与人工时效提高合金的强度，同时仍具有良好的导电性能，因为导体在人工时效后，Mg2Si质点均匀地弥散地分布于基体中。

工业纯铝中总含有一定量的硅，铁与硅会形成化合物Al6Fe2Si3。为了保证镁能全部形成Mg2Si，在实际生产中，加硅量应比标准规定的稍多一些，笔者认为可按偏上含量配料。

6101合金的抗拉强度比1050A合金高一倍，在电导率相等时，它的抗拉强度是铜线的1.5倍，而其质量仅是铜线的二分之一，因而可显著加宽架空线宽度，减少塔数，便于施工，节约投资。由于6101型合金的硬度高，在安装时导线受损几率下降。没有钢芯，导线连接也简便得多，短路电流对6101型合金性能的影响比纯铝的小得多，它的振动疲劳强度比1050A合金高50%，对短路电流的稳定性仅次于铜。

我国生产的6101-T5合金挤压带材在宽度不大于100mm时，其平面弯曲应不大于2.5mm/m，侧向弯曲不大于1.5mm/m。

宽 40~80mm 的带材，全长总扭拧度应不大于 2 度，而长度大于 8m 的带材的全长总扭拧度应不大于 3 度。带材长度偏差为+10mm，平面间隙（凹凸度）不得超过带材宽度的 0.5%。应指出的是，中国目前电力工业已很少使用 6101 型合金了，但国外仍在使用。

5005 合金。该合金属 Al-Mg 系合金，是美国铝业公司于上世纪 30 年代中期发明的，它的成分（质量%）是：0.3Si，0.7Fe，0.2Cu，0.2Mn，0.5~1.1Mg，0.1Cr，0.25Zn，其他杂质每个 0.05，总计 0.15，其余为 Al。该合金现在已发展到 5005A、5205、5305、5505、5605 等，在美国得到了广泛应用，在欧洲应用较少，中国从上世纪中期开始生产应用，已完全掌握生产技术。在特硬（H19）状态下用作架空线，其最低抗拉强度（决定于直径）为 230~174N/mm2，最低电导率 31m/(Ω·mm2)，抗拉强度介于 1050 与 6101 合金之间，而其电导率则与 6101、6201 合金的差不多，是一类性能优秀的电工合金。

3003 合金。这是一种相当老的合金，诞生于上世纪初，在国民经济的各个部门都得到了应用，具有很好的综合性能，在热处理不可强化的铝合金中是一个永远站立着的“不倒翁”，

它的成分（质量%）是：0.6Si，0.7Fe，0.05~02Cu，1~1.5Mn，0.1Zn，其他杂质每个 0.05，总计 0.15，其余为 Al，到 2002 年已发展到 3103、3103A、3103B、3203、3403 等 6 个合金。

锰能显著提高铝的再结晶温度，降低它的电导率。如果以 1050A 合金的电导率作为 100%的话，则 3003 合金的仅为 1050A 合金的 71%，即为 40%TACSA。

3003 合金以管材形式用作高压配电设施的母线。铝管母线高压配电系统具有占地面积小、结构简单、节省钢材和基础工程量、布置清晰、维护方便、母线电晕对无线电干扰小、临界电晕电压高、载流容量大等一系列优点，而其造价和同规模软母线配电装置大致相等，因此，3003 合金母线管在高压配电装置系统中得到广泛应用。

自 1973 年以来，中国自行设计建造的 220kV3003 铝合金管母线配电装置在京津唐电网及其他电网的一批变电所投产以来，一直运转正常，从未因铝合金管母线品质问题引发事故。所用 3003 合金圆管尺寸（外径/内径）/mm 为：60/54、70/64、，100/90、110/116，跨度（m）为：10~13。

6061 及 6063 型合金。它们是热处理可强化的变形铝合金，用于制造输配电管母线，都在 T6 状态下应用。6063-T6 合金的电导率比 6061-T6 合金的高，但其抗拉强度比后者的小一些。因此，6063-T 合金管用于制作穿越功率大的母线，

而 6061-T6 合金管用于制作穿越功率小的母线。

6061 合金属 Al-Mg-Si-Cu 系合金，它的成分（质量%）为：0.4~0.8Si，0.7Fe，0.15~0.4Cu，0.15Mn，0.8~1.2Mg，0.04~0.35Cr，0.25Zn，0.15Ti，其他杂质每个 0.05，总计 0.15，其余为 Al。6063 合金属 Al-Mg-Si 系合金，其成分质量%）为：0.2~0.6Si，0.35Fe，0.10Cu，0.15Mn，0.6~0.9Mg，0.1Cr，0.1Zn，0.1Ti，其他杂质每个 0.05，总计 0.15，其余为 Al。

法国主要用 6061-T6 合金制造输配电母线管,它的 400kV 配电装置母线全部采用 6061-T6 型合金管，已实现标准化与系列化，标准化母线管尺寸（外径/内径）/mm 为：89/78、102/89、，114/102、141/129、168/156，载流量（环境温度 40 摄氏度）1895~3725A。合金的抗拉强度 260N/mm2 屈服强度 3.733MΩ·cm。

1.2.10 铝合金的合金化元素（一）

铝合金用的合金化元素及受控制的杂质元素约 45 个。另外，Mg+Si、Zn+Mg、Zn+Mg+Cu、Mg+Mn 等，在某些合金中往往是同时添加的，所以也可以把它们作为一个单一的合金元素看待。

1.Ag（银）

Ag 在固态铝中的溶解度高达 55%，由于价格关系，二元

Al-Ag 合金没有工业应用价值。Al-Ag 合金有时效硬化能力，向 Al-Zn-Mg 合金添加 0.1%~0.5%Ag 可提高合金的强度和抗应力腐蚀能力，而向 Al-Cu 系合金添加 0.5%~2%Ag 可提高力学性能。截止 2013 年，注册的含 Ag 的变形铝合金仅 7009 合金一个，1974 年德国注册，成分（质量%）：0.20Si、0.20Fe、0.6~1.3Cu、0.10Mn、2.1~2.9Mg、0.10~0.25Cr、5.5~6.5Zn、0.20Ti、0.25~0.40Ag，其他杂质单个 0.05、合计 0.15，其余为铝。

2.As（砷）

As 可与氧化合形成有剧毒的 As2O3，因此，凡是与食品、饮料接触的铝材，应严格控制其 As 含量，例如食品、医药包装箔的 As 应≤0.01%，由供方工艺保证。

3.B（硼）

B 是铝及铝合金的有效晶粒细化剂，能消除 V、Ti、Cr、Mo 对铝电导率的有害影响，因为 B 能与它们形成可沉淀的化合物，在熔炼保温时沉于熔池底部。单独以 B 作为晶粒细化剂时，其加入量为 0.005%~0.1%，若与 Ti 一同加入，则细化效果更佳。细化剂中 Ti 与 B 的最佳比为 5：1。B 的中子俘获截面高，因此，含 B 的铝合金在原子能工业中得到应用。但

是，在反应堆区应用的铝合金的硼含量应尽量低，因为它们不需要这种性能。

4.Be（铍）

向 5xxx 系合金添加 5~10ppm 铍，可降低熔炼时 Mg 的氧化速度，也能防止铸造时与湿砂型反应。B 不与铝形成化合物，彼此固溶也非常小。向铸造铝合金添加 0.10%~0.05%Be 可提高其流动性，提升铸造性能。Be 能保持 Na 对 Al-Si 合金的变质效果。向钢材镀铝液中添加≤0.1%Be，可以提高铝与钢的结合力和防止有害的 Al-Fe 化合物的形成。Be 对 Al 及铝合金的抗腐蚀性能无影响。铝合金焊条中的 Be 应≤8ppm 以免焊接时形成有毒的氧化铍烟。与食品及饮料、药品接触的铝及铝合金中的铍应低。

5.Bi（铋）

Bi 的熔点低（269℃），在铝中溶解解度低，其最大的固溶度还不到 0.2%，又不与铝形成化合物，在铝内以软而熔点低的相存在，促进切屑断裂与润滑刀具。Bi 凝固时体积增大，膨胀率 3.3%，而 Pb 则收缩，它的熔点也低，只有 327.4℃，同时向 Al-Cu 或 Al-Mg2Si 合金以 1:1 的比例加入 Bi 与 Pb，既可以提高合金的可切削性能又能抵消它们的体积变化，向

含镁量高的（≥4.0%)Al-Mg 合金添加 20~200ppm 的 Bi 可以消除 Na 引起的钠脆性，避免热轧时的开裂。废料内混入 Bi 增大熔炼烧损。2028 型合金、2041、2044、2045、6026、6028、6033、6040、6041、6042、6043、6262、6262A、6064、6064A、6065 等都含有 Bia 或 Bi+Pb、Bi+Sn 等，其中含 Bi 最多的是 6026、6065 合金，高达 1.5%。

6.C（碳）

C 是铝合金的一种杂质，多以 Al4C3 化合物存在，也可能与 Ti 等形成化合物，C 在液态与固态铝中的溶解度都非常小。在有水与水气存在时，Al4C3 会分解，引起铝点腐蚀。原铝是被 C 饱和的，其含有几 ppm。向合金中添加少量的碳促进钛及锆的晶粒细化效果，因此，Al-Ti-C 中间合金是铝及铝合金的有效晶粒细化剂。清华大学的李建国及山东大学的刘相如对 Al-Ti-C 中间合金的晶粒细化机理及其制备做了许多卓有成效的工作。美国铝业公司（Alcoa）在生产航空航天器铝材时已用 Al-Ti-C 中间合金细化组织。

1.2.11 铝合金的合金化元素（二）

7. Ca（钙）

Al-Ca 系中有两种化合物 Al2Ca 和 Al4Ca，Al2Ca 在 1079℃固溶同成分熔化，Al4Ca 在 700℃按包晶反应生成：L+Al2Ca

→Al4Ca。提取 Ti 时以 Al-Ca 合金作为氧化钛的还原剂。在区域提纯铝时，Ca 有助于去除 Sn 与 Pb，向低纯度铝中添加 Ca，可形成 Ca2Si，以除去不溶解 Si 和提高电导率，Ca 可消除 Al-Cu 及 Al-Mg-Si 合金的时效硬化作用，Ca 可作为 Al-Si 合金的晶粒细化剂，同时作用持久，不过细化效果比 Na 的低得多。Ca 显著降低铝的表面张力和铝的强度。

含 5%Ca 和 5%Zn 的铝合金有超塑性，Ca 略提高工业纯铝的电导率，因它可与 Si 形成几乎不固溶的化合物 CaSi2，Al-Mg 合金焊条中当有少到 10ppm 的 Ca 即可使电弧不稳定钎焊薄板包覆层中若有极少量（10ppm）Ca 也会给真空钎焊造成困难。少量 Ca（0.2%）能改变 3003 合金的再结晶特性，微量 Ca（10ppm）增大熔融铝的吸氢倾向。

8.Cd（镉）

Al-Cd 系中有一包晶转变（649℃）和一共晶反应（320.43℃）。向 Al-Cu 合金添加≤0.3%Ca，可加速时效速度，提高强度和抗蚀性。0.005%~0.5%Cd 可缩短 Al-Zn-Mg 系合金时效时间。Cd 降低纯铝的抗蚀性。镉的熔点低，321℃向某些铝合金特别是 Al-Zn-Mg 合金加入不量 Cd 可使它们具有良好的可切削性能，其效果优于 Pb 及 Bi，Cd 是制造轴承铝合金、特别易熔铝合金、耐磨铝合金的合金化元素。含 Cd 的气体有毒，特别是氧化镉烟雾中的极限值为 100μ g/m3，

Cd 的化合物对口腔有强刺并有毒，在熔炼含 Cd 铝合金时应加强通风。镉具有较大热中子俘获截面，因此原子能工业铝材的含镉量应尽量低。注册的含 Cd 铝合金有 2022（0.05%~0.20%Cd）合金，而 4043 合金的 Cd 含量应≤0.05%。

9.Ce（铈）与稀土金属

混合稀土金属含 5%~60%Ce，向铸造铝合金添加少量稀土金属，可以提高其流动性和减少压铸黏模现象。微量稀土元素（约 0.1%）能显著改善电线用 Al-Mg-Si 合金的铸造、加工和热处理工艺性能，人工时效（165℃/4h）能提高强度约 15N/mm2，降低电阻率 2%。向 6063 合金加少量稀土金属可以改善建筑型材阳极氧化的表面品质。向含 Fe 量>0.7%的铝合金添加稀土金属，则针状 Al3Fe 变为非针状的。美国 1990 年注册 8019 合金含 3.5%~4.5%Ce，还含 7.3%~9.3%Fe 与 0.05%~0.50%O。

10.Co（钴）

铝与钴可形成五种化合物，如 Al9Co2、Al12Co4 等，在 Al-Co 系的 Al 端有一共晶反应，在温度为 655℃和 0.68%Co 原子百分数。向含铁的 Al-Mg 铸造铝合金添加少量 Co，可使针状的β 铝－硅－铁相变为较圆的 Al-Co 相，从而合金的强

度与伸长率都有所提高。Al-Zn-Mg-Cu 系粉末冶金合金含 0.2%~1.9%Co。变形铝合金混入少量 Co 可形成降低断裂韧性的中间金属化合物。注册的含 Co 变形铝合金有：7064 合金，它含 0.10%~0.40%Co、1.8%~2.4%Cu、1.9%~2.9%Mg、0.06%~0.25%Cr、6.8%~8.0%Zn、0.10%~0.50%Zr、0.05%~0.30%O，其余为不可避免的杂质与 Al。

11.Cr（铬）

把铬加到铝合金中，一方面可以中和铁的有害作用，另方面可使阳极氧化膜呈黄色。铬对 Al-Zn-Mg 系合金 GP 区的形成有明显影响，尤其是对晶界区 GP 区的形成。在 Al-Cr 相图铝端有一包晶反应：在 661.4℃,Al7Cr 与含 0.35%Cr 的液相的包晶反应形成 0.8%Cr 的固深体。

Cr 是工业纯铝的一种微量杂质，为 5~50ppm，显著降低铝的电导率。常向 Al-Mg 系合金、Al-Mg-Si 系合金和 Al-Mg-Zn 系合金添加≤0.35Cr，以抑制前者在热加工与热处理时的晶粒长大，阻止后两类合金的再结晶，使它们形成降低应力腐蚀开裂敏感性和/或提高断裂韧性的纤维状组织。如 Cr 含量大于 0.35%，则能与其他杂质 Mn、Fe、Ti 等形成对各种性能皆不利的粗大化合物。铸造铝合金中的铬含量较大时，可形成含铬的沉淀物。固溶的铬及以弥散状态存在的铬化物，能略提高合金的强度。加入少量的 Cr 能降低铝合金退火时的恢

复速度、提高再结晶温度、细化晶粒。Cr 在热处理可强化铝合金中的主要缺点是提高淬火敏感性，因为强化相可在未固溶的含 Cr 相质点上形核。

在注册的常用铝合金中有约 90 个含铬，其最大含量为 0.40%,5xxx 系合金铬的最多有约 30 个,占全系合金的 29.4%。

1.2.12 铝合金的合金化元素（三）

12.Cu（铜）

铜是铝合金中应用最早、最广泛、最有效的合金化元素之一，铜作为杂质在原铝中的含量通常小于0.05%，铜作为合金化元素在铝合金中的含量没有超过10%的。1892年含铜的铝合金在美国匹兹堡冶金公司诞生，并进入商业化生产，1906年威尔姆（Film）制成2A11合金，目前仍用于加工飞机的螺旋桨。Al-Cu系的铝端有一共晶反应（547℃、33.2%Cu），Cu在Al中的固溶度最大时5.7%，Cu可与Al形成化合物Al2Cu，是通过共晶反应形成的：L→Al+Al2Cu。

含Cu的铝合金是热处理可强化，含4%~6%Cu与其他元素的合金具有最大的强化效果，是1945年以前航空工业使用的唯一高强度的骨干结构铝材。少量Cu混入作为包铝层的7A01合金会改变其阳极电位，使其失去应有的保护作用。因此，7A01合金的Cu含量应≤0.015%。二元Al-Cu合金没有工业使用价值，往往还必须添加一个或几个其他合金化元素，用的多的其他

元素是Mg、Mn、Li、Zr等。

Co、Cr、Mo对Al-Cu－Mg系合金的作用与Mn的相似，但并不比Mn优越。Ag显著加强Al-Cu－Mg系合金的热处理效果。Ni提高Al-Cu－Mg系的高温强度性能与硬度。含Cu量比2A11合金的低的Al-Cu－Mg合金如2036、2037合金等有良好的可焊性能、成形性和抗蚀性，成形时表面也不会产生吕德线（Luder's Line），是冲制ABS钣金件的良好材料。

含少量Mn、Ti、V或Zr的Al-Cu系合金有良好的高温性能、铸造性能、可焊性能和加工性能。

13.Fe（铁）

Fe是铝和铝合金的常规杂质，是原铝中不可避免的杂质，是与生俱来的，因铝土矿总含有Fe2O3，在熔炼与铸造时也使用钢与铸铁工具，也会带来一些铁。铁在熔融铝中易溶解，而在固态铝中的固溶度却很低，仅约0.04%。因此，当铝的含Fe量大于此数时，便与铝及其他元素形成二次中间相，如与Si形成Al8FeSi（幔┗虯l5FeSi（猓┳隡n形成Al6（FeMn），它们降低硬铝、超硬铝的断裂性能与疲劳性能。由于Fe在铝中的溶解度有限，向导电铝中添加少量Fe，能稍稍提高其强度和改善在较高温度下的蠕变性能。向Al-Cu-Ni合金加Fe能提高高温强度。含少量Fe的Al-Mg导电合金在室温和高温时会有更好的综合性能。除少数几个Al-Li-Cu-Mg系合金和其他合

金外，其余的33个合金实质上都是Al-Fe合金，占全系合金总数94%以上，美国1991年注册的8022合金含6.2%~6.8%Fe、1.2%~1.4%Si、0.40%~0.8%V、0.05%~0.20%O，是铁含量最大的变形铝合金。

Fe/Si值对工业纯铝工艺性能的影响甚大，只有当此值≥2~3时，才能生产出细晶粒的冲压性能良好的薄板带材与印刷版基材。

14.Ga（镓）

铝含有0.001%~0.02%Ga，对铝的力学性能几乎无影响。Ga是原铝中的一种不可避免的杂质，是由铝土矿带来的，重熔用铝锭的最大含量为0.05%（A199.00）。铝材Ga含量达0.2%时加速铝的腐蚀，并使一些合金的表面变得不光亮。液态Ga能渗入铝的晶界，使晶粒彼此分离。含0.01%~0.1%Ga的牺牲阳极铝合金在海水中不会钝化。

15.H（氢）

铝及铝合金的H含量为其气体总含量的70%~90%。水气是氢的主要来源，水气与铝反应形成氧化物，放出新生氢。氢的其他来源是燃料燃烧下完全时的碳氢化合物及润滑油中的碳氢化合物。氢在660℃固态铝中的溶解度为0.036cm3100g铝（压力0.1N/mm2），可是在液态铝中的却高达0.69cm3/100g

铝，然后随着温度的升高而飙升。铝及铝合金中的气泡不管是铸锭中的一次气泡还是铝材中的二次气泡，都可以认为是氢在作孽，含镁量高的Al-Mg系合金，以及2xxx系、7xxx系合金的应力腐蚀开裂的元凶也很可能是氢脆。氧化物形成元素增大铝熔体的吸氢，而Be、Cu、Sn、Ti等元素则降低其吸氢。尽量降低铝熔体中的氢是铝合金熔炼铸造工作者的首要任务之一。

1.2.13 铝合金的合金化元素（四）

16.Hg（汞）

保护钢结构的牺牲阳极铝合金约含 0.05%Hg。所谓牺牲阳极就是在发生腐蚀系统中，钢结构为阴极，得到保护，不发生腐蚀，而铝合金则为阳极，发生腐蚀，“牺牲”了自己。在-38.9℃（汞的熔点）~660℃（铝的熔点），铝与汞几乎不互溶，也不形成化合物。含微量汞的铝合金也可作为铜结构的牺牲阳极。

17.In（铟）

铟与铝仅可在液态下部分互溶，形成分层，也不形成化合物，在温度为 639℃和 5%原子 In 时发生偏晶反应，少量 In(0.05%~0.2%)能降低 Al-Cu 合金特别是 Cu 含量较低(2%~3%)合金的自然时效速度，而加速其人工时效速度，添加 Mg 可以

缓解其影响。向 Al-Ca 轴承合金添加 0.03%~0.05%In 是有益的。

18.Li（锂）

Al-Li 相图的铝端有一共晶反应：600℃，25.8%（原子），L→α +Al3Li（β ）。Li 在铝中的固溶度为 4.2%。含 Li 的铝合金既有低的密度，又有高的弹性模量，在中等应力强度时，还有高的疲劳裂缝增长抗力。合金中加入微量 Li 能加大铝熔体的氧化速度和改变加工材料的氧化性能。铝中杂质 Li 含量为几 ppm，但是即使其含量小于 5ppm，也能使铝箔在潮湿环境中变色，发生蓝腐蚀。Al-Mg 合金焊条即使 Li 含量小于 10ppm，也可以使焊弧不稳定；钎焊铝的包覆材料若含有不到 10ppm Li，就可以使真空钎焊难以进行。现在，Al-Li 合金 8093、8091、8093 与含 Li 的 2xxx 系合金已成为一类重要的航空航天器结构，中国验证 C919 大飞机等直段是从美国铝业公司进口的 Al-Li 合金制造的。

19.Mg（镁）

Mg 在变形铝合金中获得了极为广泛的应用，是用量最大的一系合金，几乎占合金化元素总用量的一半左右。在全世界 2014 年生产的约 4700kt 二片全铝拉罐罐料（罐身 3104 合

金、罐盖 5182 合金、拉环 5052 合金）就用了约 140kt 镁，在生产约 16000kt 建筑铝材(6063、6082 合金)消费了约 110kt 镁。在美国铝业协会公司注册的变形铝合金中含镁的合金占 72%。镁与铝形成化合物 Al8Mg5。

20.Mg+Mn（镁+锰）

Al-Mg-Mn 合金也得到了相当广泛的应用，如罐身料就是一种 Al-Mg-Mn 系的牌号为 3104 的合金。向铸造 Al-Mg 合金添加≤0.75%Mn 可提高其硬度，但是降低塑性，而对抗蚀性无影响。变形 Al-Mg-Mn 合金在加工硬化状态有高的强度、抗蚀性与良好的可焊性能。提高 Mg 及 Mn 的含量会使加工困难。Mn 的主要作用是使含 Mg 相的分布均匀和获得一定的强度。添加 Mn 可降低 Mg 含量，这样既不降低合金的强度又能使其组织稳定。向铝中每添加 1%Mg，合金的抗拉强度提高约 34N/mm2，而 Mn 的作用则比 Mg 的大一倍。

21.Mn（锰）

Al-Mn 相图的铝端有一共晶反应：L→α （Al）+Al6Mn，658℃，1.9%Mn。Mn 在铝中的最大固溶度为 1.8%，然后随着温度的下降而减少，但 Al-Mn 合金没有时效硬化作用。锰在变形铝合金中得到了广泛的应用，在 3xxx 系合金中它是一个

提高强度性能的元素，而在 Al-Cu、Al-Mg、Al-Mg-Si、Al-Zn-Mg 系合金中，它是中和铁的有害作用的元素。相反，Mn 很少用于铸造铝合金。

Mn 是原铝中的常规杂质，其含量为 5-50ppm，GB/T1196-2008 规定 A199.7E 的 Mn 的最大含量为 0.005%，A199.6E 的为 0.007%，因为 Mn 降低铝的电导率。不管是固溶的 Mn，还是以细小中间金属相沉淀的都提高铝的强度。Mn 是变形铝合金常用的少量的合金化元素，既能提高强度，又可以提高再结晶温度，阻碍晶粒长大。在注册的常用变形铝合金中，含 Mn 的超过 50%。Mn 在铝中的固溶量很小，但铸造冷却速度大时会形成过饱和固溶体，造成较严重的晶内偏析。含 Mn 的沉淀相提高热处理可强化合金的淬火敏感性。Mn 对铝的抗蚀性无影响。

Mn 可使铝合金的针状或片状含铁化合物变得稍圆一些，并降低其脆性。应严格限制合金的 Mn、Fe、Cr 和其他过渡族元素的总量，否则，铸造时会从熔体中结晶出粗大的中间金属化合物一次晶体。3003 合金及 3004 合金的 Mn+Fe 应分别<2.0%及 1.7%，以免产生 Al6（Fe、Mn）一次晶体。硬铝、超硬铝等中的 Mn 可与其他元素形成降低可塑性、强度与断裂韧性的中间金属化合物。

1.2.14 铝合金的合金化元素（五）

22.Mo（钼）

Al-Mo 相图的铝端有一包晶反应：L+Al12Mo→α（Al），660.5℃、0.25%Mo。铝中杂质 Mo 的含量极低，为 0.1~1.0ppm，向铝中添加 0.3%Mo 能细化晶粒和中和 Fe 的有害作用，但其细化效果比 Ti、Zr 等小得多，因此生产中不用它作为组织细化剂。

23.Na（钠）

Na 可作为 Al-Si 工业铸造铝合金的变质剂，铝熔体与 Na 的互溶度极低，在 Al-Na 相图的铝端有一偏晶点：659℃，约 0.15%Na。在偏晶温度时，Na 在铝中的固溶度为 0.002%~0.003%。铝熔体中的 Na 会迅速蒸发。含 Mg 量高的 Al-Mg 合金（≥4%Mg）中 Na 的含量即使低到 0.01%也会有严重的热脆性与使抗蚀性下降。铝中的正常 Na 含量为 0.001%~0.003%，对铝的性能没有明显影响。

24.Nb（铌）

Al-Nb 相图的 Al 端有一包晶反应：663℃，熔体成分 0.1%~0.15%Nb。向铝中添加 0.1%或更多些铌，能细化晶粒，但效果不显著。

25.Ni（镍）

在Al-Ni系统中,与Al平衡的化合物是Al3Ni,Al－Al3Ni共晶反应发生在约6%Ni、640℃处。在640℃时，Ni的固溶度为0.05%。Ni可以提高高纯铝的强度，降低其塑性，改善Al-Cu，Al-Si合金的高温强度，降低它们的线膨胀系数，促进工业纯铝的点腐蚀。应控制原子能反应堆铝合金的Ni含量，因为它有高的中子吸收率。但是原子工业的其他领域用的铝合金却含有Ni与Fe，它们能提高铝合金对高压蒸汽的抗蚀性。含Ni的变形铝合金主要是2xxx系与4xxx系合金，如2018型合金、2031、2032、4007、4019、4032合金等。在铸造铝合金中含Ni的只有纳入GB/T1173的ZL109，含0.8%~1.5%。

26.O（氧）

氧在液态及固态铝中的溶解度只有几ppm，含O量低的只有几ppm，平均为0.01%~0.1%，在特殊情况下最多可达0.3%~0.9%，但是大部分氧以氧化物夹杂形式存在。氧化物夹杂对铝合金性能的影响直接决定于其尺寸、分布形态及来源。含氧的注册变形铝合金有：6113（0.05%~0.50%O）、6091（0.05%~0.50%O）、6092（0.05%~0.50%O）、7064（0.05%~0.50%O）、7090（0.05%~0.50%O）、7093

（0.05%~0.50%O）、8019（0.05%~0.50%O）、8022（0.05%~0.20%O）。

27.P（磷）

P 在铝中的固溶度只有几 ppm，与 Al 平衡的相为 AIP。P 含量达 0.1%时，对 Al 及 Al-Ag 合金的性能仍无明显影响，但对 Al-Cu 合金的性能略有好处，因为 P 有脱氧作用，P 含量大到 0.7%时使性能下降。区域提纯铝时加入少量 P，有助于除铁与除硅。P 是过共晶 Al-Si 合金的变质剂，能改善合金的可切削性能。但是，微量 P 能削弱 Na 对过共晶合金的变质作用。对采用 P 变质的 Al－Si 合金铸件进行切削加工时应有通风设施，以免铝－磷化合物与水气反应生成的 PH3 危害人体健康。

28.Pb（铅）

Pb 是工业纯铝及某些铝合金的微量元素，如 2011 和 6262 合金含有等量的 Pb 及 Bi（约 0.5%）具有很好的可切削性能。Al-Cu-Mg 系合金混入微量 Pb 可在铸造时发生偏析，可引起铸锭热轧时产生热脆。Pb 的化合物有毒，应限制与食品或饮料接触的铝材中的 Pb 含量，例如食品、医药包装铝箔的 W（Pb）≤0.01%、W（Cd）≤0.01%、W（As）≤0.01%。为了保护人体

健康最好不用含 Pb 的铝合金加工零件。Al-P 相图有一偏晶反应，偏晶点：1.5%Pb，658.5℃。铅降低铝的抗蚀性，但对铝在酸中的抗蚀性几乎无影响。

1.2.15 铝合金的合金化元素（六）

29. S（硫）

S 是铝中的一种微量杂质，它来自电解槽的电极及熔炼时的燃料，在铝中的常规含量为几 ppm，对铝及铝合金的性能没有明显影响。但对 Fe、Ni、Mn 等的铝合金，若 S 的含量较大，则会聚集于化合物中，并使它们对快速腐蚀很敏感。在 Al-S 相图铝端有一共晶反应：659℃，0.05%~0.06%S。在共晶温度下，S 在铝中固溶度<1ppm。硫化物夹杂是严重点腐蚀根源。工业纯铝的杂质 S 含量为 0.2~20ppm，S 对亚共晶及过共晶 Al-Si 合金有一定的变质作用。

30. Sb（锑）

Al-Sb 相图铝端为共晶反应：637℃，1%Sb。在共晶温度时,Sb 在铝中的固溶度<0.10%。轴承 Al-Mg 合金可含 4%~6%Sb。向 Mg 含量高的 Al-Mg 合金添加 Sb 能消除 Na 的不利影响，但可形成氯氧化锑膜，加速合金的盐水腐蚀。

31. Si（硅）

Si 是纯铝中的一个常规杂质，也是铝合金主要合金化元素之一，它是 6xxx 系合金与 ZL1xx 系合金的主合金元素，约 20%的 2xxx 系合金、100%的 4xxx 系合金及 6xxx 系合金都含有 Si，100%的 ZL1xx 系合金含有大量的 Si。

Si 提高铝合金铸造及焊接时的流动，Si 和 Mg 可形成 Mg2Si，使合金有人工时效能力，从而形成了应用极广的 6xxx 系合金，该系合金的总消费量约占全球变形铝合金总消费量的 42%。Al-Si 相图属简单的共晶系，Al 及 Si 为平衡的两个相，共晶点：577℃，12.5%Si。共晶温度时的固溶度为 1.65%。向 Al-Cu-Mg 铸造铝合金添加 Si（0.5%~4.0%）可降低裂缝形成倾向。含 7.5%Si 和 12%Si 的合金（4A13 和 4A17）可用作钎焊铝的包覆层。含 5%左右 Si 的铝合金阳极氧化后呈黑色，可用于制造装饰品。硬铝及超硬铝中的杂质 Si 及 Fe 含量较高时会形成不利于断裂韧性的不溶解的夹杂物相，此时应严格控制它们的含量。

32. Mg2Si（硅化镁）

Al 可与 Mg2Si 形成人为二元系，铝端有一共晶反晶反应：595℃，13%Mg2Si。Mg2Si 在共晶温度时在铝中的固溶度为 1.85%，在人工时效时形成 GP 区和细小的沉淀物质点，有相

当大的强化效果，但其效果不及 2xxx 系合金中 S 相的，更不如 Al-Zn-Mg-Cu 系即 7xxx 系中的强化相的。

Al-Mg-Si 系合金可分为三类：第一类的典型代表为 6063 合金，它的 Mg 与 Si 之和≤1.5，Mg/Si 的比值等于 1.73，正好相当于全部形成 Mg2Si 或 Si 略有过剩。6063 合金是一种建筑型材合金，是产量最大的一种铝合金，约含 1.1%Mg2Si，它的固溶处理温度略高于 500℃，淬火敏感性低。可在挤压出模后在挤压机上进行在线风冷淬火，人工时效后具有适度的强度性能、良好的塑性与优良的抗蚀性。

第二类 Al-Mg2Si 合金的（Mg+Si）含量>1.5%，并含有约 0.3%Cu，以提高人工时效状态材料的强度，还添加了少量的 Cr、Mn、Zr 等元素，以控制晶粒尺寸。6061 合金是这类合金的代表，它的抗拉强度比 6063 型合金约高 70N/mm2，它的固溶处理温度 515℃~550℃，淬火敏感性大，需进行离线固溶处理与淬火，但是有些产品也可以在线处理。

第三类合金的 Mg2Si 含量与前两类的相等，但约有 0.2%Si 过剩。过剩 Si 既能细化 Mg2Si 质点，又因 Si 质点存在而使合金强度得到进一步提高。不过，过剩 Si 易沿晶界析出，可抵消过剩 Si 的不良影响。6A02 属于这类合金。向含 7%Si 的铸造 Al-Si 合金加入约 0.3%的少量 Mg，既使它具有热处理效果而又不降低其抗腐蚀性能。

1.2.16 铝合金的合金化元素（七）

33.Sn（锡）

Sn是铝合金的一种微量元素，是轴承铝合金的一种主要合金元素，在变形铝合金中的含量为0.03%~20%，在铸造铝合金中的含量可达25%。Al-Sn相图铝端有一共晶反应：228.3℃，99.5%Sn。共晶温度时的固溶度为0.05%~0.07%Sn，627℃时Sn在铝中的固溶度也只不过约0.10%。向Al-Cu合金添加0.05%Sn，既能显著增大其人工时效强化效果，又能提高抗蚀性。但是Sn含量不宜多，以免增大热烈纹倾向。如果Al-Cu合金中有少量Mg，则人工时效效果大幅度下降，因为Mg与Sn形成不共格的第二相。向Al-Cu、Al-Cu-Si、Al-Zn铸造铝合金添加小于1%Sn可以改善合金的可切削性能。Al-Sn轴承铝合金得到广泛应用。工业纯铝中有少至0.01%Sn时不但使退火材料表面变暗，而且腐蚀敏感性上升，因为Sn会向表面迁移，添加0.2%Cu可消除此现象。牺牲阳极Al-Zn合金含有少量的Sn。少量Sn混入含镁量高的Al-Mg合金可引发热脆性。

34.Sr（锶）

在工业纯铝中，杂质Sr的含量为0.01ppm~0.1ppm。Sr在铝合金中的唯一用途是用作Al-Si合金的组织细化剂，不但可以单独加入Al-Si合金中，也可与Na同时加入。Al-Sr相图铝端有一包晶反应：L→Al+Al4Sr，654℃，<1%Sr。Sr在铝中的

固溶度非常小，Sr对铝的力学性能没有多大影响，向铝中每添加1%Sr，铝的弹性模量下降约1400N/mm2。

35.Th（钍）

天然Th只有一种同位素232Th有放射性，但制造集成电路配线用的超高纯铝的Th应小于50ppm。Al-Th相图铝端有一共晶反应：L→Al+Al3Th，627℃。共晶温度时，Th在铝中的固溶度只不过0.75%左右。

36.Ti（钛）

Ti是铝的一种杂质，因为铝土矿含有百分之几的TiO2，也常常把它加到铝及铝合金中，因为它是一种极有效的晶粒细化剂。在Al-Ti相图有一包晶反应:L+Al3Ti→幔丶1),665℃液态铝含0.12%~0.15%Ti，铝固溶体含1.2%~1.4%Ti，527℃时钛的固溶度下降到0.2%~0.3%。Al3Ti的存在范围从36.5%到37.5%Ti。

工业纯铝含10ppm~100ppm Ti，Ti显著降低铝的电导率，加入B可形成不溶解的TiB2粒子，而中和Ti的有害作用。Ti虽是铝及铝合金的有效晶粒细化剂，但其效果却随着保温时间延长而下降，重熔甚至会失效。若同时添加B，晶粒细化效果大大增加。向焊条铝合金中添加Ti可改善焊缝组织和防止裂缝的产生。Ti能减少或甚至消除连续铸造铸锭的双晶，钛

提高铝的再结晶温度，细化再结晶晶粒。

37.Tl（铊）

Al-Tl系形成偏晶相图，铝端偏晶点：657℃，3%Tl。铊对铝的表面张力或流动性没有多大影响，对Al-Cu合金的时效硬化过程的影响也不大。铊对人体有害，吸入或接触铊及其化合物粉尘可引起中毒，食用受铊污染的食物或饮水也会中毒，因此凡是与食物或饮品接触的铝材或铝制品应严格限制其铊含量，空气中可溶性铊化合物的允许浓度为0.1mg/m3。

38.U（铀）

Al-U相图铝端有一共晶反应：L→幔＼l）+Al4U，647℃，13%U~14%U。共晶温度时，U在铝中的固溶度为0.06%。Al-U合金及铝与U3O8化合物的混合物是核反应堆燃料。因为U是一种放射性金属，应严格限制作为集成电路配线用的超高纯铝中的U含量，应≤50ppm。

39.V（钒）

Al-V相图铝端有一包晶反应：L+Al10V→幔＼l），660.8℃，0.10%V。在包晶反应温度时，铝中可固溶3%V。工业纯铝一般含10ppmV~200ppmV。V提高铝的再结晶温度，Al10V可作为异质晶核，有晶粒细化作用，但其效果不如Ti及Zr的，更不如

Sc的。V显著降低铝的电导率，每添加0.1%V，铝的电阻率约增加0.45×10-10俜m。V提高铝的再结晶温度。

1.2.17 铝合金的合金化元素（八）

40.Zn（锌）

Al-Zn 相图的铝端有包晶反应:L+α（Al)→AlZn,443℃，约 70%Zn;还有一共晶反应:L→α（Al)+AlZn,382℃,94.9%Zn。铸造 Al-Zn 合金是第一批发展起来的铝合金，但是自 Al-Cu 合金特别是 Al-Si 合金发展起来以后，它的地位就一落千丈。20 世纪 20 年代发展了 Al-Zn-Mg 合金，60 年代又研制成高 Zn 超塑铝合金。二元 Al－Zn 合金没有使用价值。Zn 提高铝的溶解电位，因此作为 7xxx 系合金包铝层的 7A01 合金和作为牺牲阳极的铝合金都含有 Zn。加有其他元素的 Al-Zn 合金有良好的综合性能，它们是超硬铝 7xxx 系合金。Zn 增大铝的熔炼烧损。6063 合金的 Zn 含量>0.02%时，其挤压材料在碱洗时会出现变化无常的“闪烁”斑痕。

Al-Zn 合金除了有时效硬化效应外，在固态下还有两种反应：包析反应和偏析反应。铝的电阻率随锌含量的增加呈直线上升，Zn 使铝的电极电位迅速下降，纯铝的为-0.8V~-0.85V,而含 2%Zn 的铝合金的电位为-1V。再增加 Zn，合金的电位缓缓地下降。

41.Zn+Mg（锌+镁）

向铝中同时添加 Zn+Mg，可制成很有实用价值的变形铝合金及铸造铝合金，前者如 7003、7004、7005、7008、7017、7018、7020、7046 合金等，后者如 ZL304、ZL401、ZL402 合金等。

Al-Zn-Mg 合金的铸造性能虽不如 Al-Si 合金的，但有高的强度，合金中的 Zn 含量为 3%~7.5%。合金中的 Zn 含量大都比 Mg 含量的大。Zn 与 Mg 可形成热处理效果相当大的 MgZn2，合金的强化效果随 MgZn2 含量的增加而上升，合金还会有 Al8Mg5 相与 Al2Mg3Zn3 相。Al-Zn-Mg 合金可分为四组：Al8Mg5 占优势的合金，其 Mg:Zn 为 6:1 或更高，实际上这组合金归为 Al-Mg 系合金；第二组为 Al2Mg3Zn3 相占优势的合金，这组合金的成分区很宽，由 Mg:Zn 为 6:1 到 3:7；第三组为至少在较低温度下沉淀相为 MgZn2 的合金。这组合金的成分范围不甚严格，但是 Mg:Zn 为 2：5 到 1：7 的合金都属这一组。Mg：Zn 值更高的合金在高温下可能的沉淀相是三元化合物；第四组为 Mg：Zn<1：10 的合金，它们的沉淀相应是 Mg2Zn11。多数工业合金都属第二、三组。

增加 Al-Zn-Mg 合金的 Mg、Zn 含量，合金的各种抗腐蚀性能会全面下降。因此，应对合金的显微组织、热处理工艺、成分等进行严格控制，以便合金具有良好的抗应力腐蚀开裂

和剥落腐蚀抗力，例如：添加 Mn、Cr、Zr 等，提高铸锭品质（晶粒细小均匀、防止粗大一次晶、降低杂质 Si、Fe 等含量），不在高温或低温均匀化，低温低速挤压，降低（Zn+Mg）含量并使其接近 3：1 的比例，减小淬火速度，过时效处理，添加 Cu、Ag 等。7003、7N01 合金有良好的可焊性、抗蚀性与相当高的强度，其挤压材在轨道车辆制造中获得了广泛的应用，并被称为中强可焊合金。

42.Zn+Mg+Cu（锌+镁+铜）

Al-Zn-Mg 合金的主要不足之处是对应力腐蚀敏感，强度也有待提高,但要提高强度必须增加 Zn 和 Mg 的含量,但 Zn+Mg 总含量≥8%后，合金的强度虽然可以上升到 600N/mm2 以上，可是塑性和抗应力腐蚀性能却强烈下降，失去了使用价值。后来发现 Cu 能显著改善高成分 Al-Zn-Mg 合金塑性和抗蚀性，特别是 Cr 能强烈提高抗应力腐蚀性能以后，才制成了在航空航天器制造中得到广泛应用的 7075、7050、7055、7049 等合金，它们被称为超硬铝。Cu 的主要作用是改善抗应力腐蚀性能，但也有提高强度和塑性的作用。超硬铝的主要相组成物为α +η （MgZn2）+T（Al2Mg3Zn3）+S(Al2CuMg)。

43.Zr（锆）

Al-Zr 相图铝端有一包晶反应：L+Al3Zr→α（Al），0.11%Zr，660.5℃。Zr 是 7xxx 系合金的一种微量合金化元素，降低该系合金的应力腐蚀敏感性，因为它能控制晶粒伸长与再结晶。Zr 也是铝合金的一种晶粒细化剂，但其效果不如 Ti 的，同时加入了 B，不能提高它的效果，因此，工业上不用它作为细化剂，它也降低 Al-Ti-B 晶粒细化剂的细化效果，故对含 Zr 的铝合金应加些 Ti 或 Ti+B。超塑性铝合金的 Zr 含量较高些，可以抑制高温成形时的晶粒长大。

1.2.18 铝-锂合金的基本特性

降低合金密度最简捷的措施是向其中添加低原子量元素。在铝合金中，Li 和 Be 是降低合金密度最有效的元素，Li 在铝中的最大固溶度为 4.2%，向铝中每添加 1%Li，可使其密度下降约 3%，而其正弹模量则上升约 5%。含少量 Li 的铝合金在时效过程中沉淀均匀的共格强化相δ’。Li 可与铝形成化合物 Al3Li，使合金强化，而 Be 则几乎没有沉淀强化作用。因此，Li 成为制造低密度铝合金的首选合金化元素。

同其他热处理可强化的变形铝合金一样，Al-Li 合金的强化也是通过固溶热处理与随后的时效获得的。沉淀相的结构取决于一系列工艺参数，主要是淬火温度、人工时效前的冷加工量、时效温度与时间。微量合金元素能改变沉淀相界面能、提高空穴浓度或提高均匀沉淀的临界温度，因而它们

对时效过程有很大影响。Sn、Sd、In 等是这类微量元素，In 对 2090 合金的时效硬化有良好影响，而 Sn 的影响则不利。Al-Li 合金中除有均匀的沉淀相外，在界面上与晶界上还有不均匀的沉淀相，降低合金的断裂韧性。沉淀相的尺寸与体积分数既与所加的元素有关，也与合金的成分及时效温度有关。

二元 Al-Li 合金的时效过程为：过饱和固溶体→中间δ相（Al3Li）→平衡相δ （Al3Li）。δ’相起强化作用，与母相完全共格，呈球状，晶体结构为 Cu3Au 型，Li 原子位于八个角上，而 Al 原子则占着六角面的中心。δ’相的晶格与铝固溶体面心立方晶格在几何上是相似的，它们的晶格参数极为匹配，提高合金的强度。由此可知，Al-Li 合金的强化机理是由于沉淀相δ’与母相的共格作用，因而其变形与断裂也相当特殊，也是其断裂韧性不高的根源：δ’相可被位错切割，一旦位错通过，该部分的截面积便减少，以后的位错易沿此面通过，滑移也易集中于此。位错在此滑移面与晶界交叉处堆积，引起应力集中，形成裂纹源，造成裂纹。此裂纹沿着滑移带或晶界发展。此外，变形易集中在软的无沉淀区内，在 3 条晶界交点及晶界沉淀物δ 的界面产生裂纹，它们沿着晶界扩展，造成破坏。

Al-Li 合金韧性低的原因还有：合金的氢含量高和有微

量 Na 存在，既使 Na 的含量小到 10×10-6mg/g，也会使晶界脆化。向二元 Al-Li 合金加入 Cu、Mg 等可形成共格或不共格的化合物，诸如θ’（Al2Cu）、T1（Al2CuLi）或 S（Al2LiMg）相；加入 Mn、Zr 等可形成弥散的化合物，使滑移均匀化，从而提高 Al-Li 合金的塑性与韧性。

目前，为了改善 Al-Li 合金的塑性与断裂韧性采取的措施有：

防止局部优先变形

使不易为位错切割的沉淀物粒子细化，并使其均匀分布；或时效前进行预变形，使θ’、δ’相细化与均匀分布；或施以形变热处理；或添加 Zr 之类的元素，细化晶粒；或使 Al3Zr 之类化合物形成细小均匀分布的沉淀物。

防止晶界应力集中

进行欠时效，减小无沉淀区宽度；或时效前进行预变形，以减小无沉淀区宽度，抑制晶界沉淀；或施以形变热处理。

防止晶界脆化

加强精炼和净化处理，严格限制钠含量和降低氢含量。钠含量较多时，可添加微量 Bi 等中和其有害影响。

减少晶粒内的应力集中源

降低非金属夹杂物含量；减少不溶解的结晶物并使其微细化，以提高合金纯净度；使可溶解的结晶相（一次晶体）

溶于固溶体中。

在 Al-Li 合金中，Mg 与 Cu 通过固溶强化与沉淀强化提高合金的强度，并可减少晶界附近的无沉淀区。Zr 可形成共格的立方体结构的 Al3Zr 弥散体，稳定亚晶粒组织，抑制再结晶。Al-Li-X 合金的刚度比传统高强度铝合金的高 7%~12%，通常有优越的抗疲劳裂纹发展能力，低温韧性也相当好，不过，它们的 S-T 向（高向）断裂韧性相当低，而且显微疲劳裂纹增长速度很快；Mg 的作用仅在于降低 Li 在 Al 中的固溶度。人工时效初期，Al-Mg-Li 合金的显微组织与 Al-Li 合金的相似。Al-Cu-Li 系的沉淀过程与沉淀物结构不但比 Al-Li 系合金的复杂，而且也比 Al-Mg-Li 系合金的复杂。

Al-Li 合金的强化主要来自强化相的沉淀，但是通过形变热处理对其显微组织进行严格控制，可进一步提高其强度。对于进行变热处理的含 Li 合金，通常添加少量的 Mn、Zr、Cr 等作为次要的合金化元素，其主要作用是控制显微组织。不过 Zr 有双重作用，既可以提高 Al-Li 系合金的强度又能改善其断裂韧性。与 Al-Zn-Mg 系合金不同，Al-Li 合金强度与韧性的提高得益于人工时效前的冷、热变形。冶金工作者利用这种独特的现象，开发出了种种形变热处理工艺，可使含锂的铝合金在人工时效后具有良好的综合性能。

1.2.19 也说铝-锂合金特性与用途

在铝合金中，锂与铍是降低其密度最有效的合金化元素。锂在铝中的最大溶解度为 4.2%，向铝中每添中 1%Li，可使其密度下降约 3%，而其正弹性模量则上升约 5%。含少量锂的铝合金在时效过程中会沉淀均匀的共格化合物δ’。

1990 年，美国雷诺兹金属公司与马丁·马里特公司合作研制的 2094 及 2095 合金在美国铝业协会注册，它们的强度高，可超过 700N/mm2，跻身强度最高的铝合金之列。1992 年，雷诺兹金属公司又开发出 2195 及 2196 合金，它们既有低的密度，又有高的比强度与韧性。该公司在研制高强度 Al-Li 合金 Weldalite 的同时，又与通用动力公司合作（GD Co.）研发成功厚板低密度、高韧性 Al-Li 合金 2197，并于 1993 年在美国铝业协会注册，这是一种不属 Wedalite 型的合金，其强度与刚度比 2124 合金的高，而其密度则低得多。2197 合金于 1996 年进行工业化生产，用于制造 F-16 歼击机。

同其他热处理可强化的变形铝合金一样，Al-Li 合金的强度也是通过固溶热处理与随后的人工时效获得的。沉淀相的结构取决于一系列的工艺参数，主要是淬火速度、人工时效前的冷加工率、时效温度与时间。

Al-Li 合金的主要不足之处是塑性与断裂韧性不足，为

此，可采取如下措施：

1. 防止局部优先变形。使不易为位错切割的沉淀物粒子细化，并均匀地分布；或时效前进行预变形，使θ’、S’相细化与均匀分布；或使 Al3Zr 之类化合物形成细小均匀分布的沉淀物。

2. 防止晶界应力集中。进行欠时效，减少无沉淀区宽度；或时效前进行预变形，以减少无沉淀区宽度，抑制晶界沉淀；或施工加形变热处理；或添加锆之类的元素，细化晶粒。

3. 防止晶界脆化。加强精炼净化处理，严格限制钠含量，减少氢含量。钠含量较多时，可添加微量铋以中和其有害影响。

4. 减少晶粒内的应力集中源。降低非金属夹杂物含量；减少不溶解的结果晶物并使其微细化，以提高合金纯净度；使可溶解的结晶相（一次晶体）溶于固溶体中。

Al-Li 合金的 90%以上都用于航天航空器制造，当前世界各国情况都如此，中国“天宫一号”于 2011 年 9 月 29 日发射，是中国第一个低轨道、长寿命大型载人航天器，设计寿命 2 年。整个飞行器质量 8.6t，分为前后舱，前舱为全密封环境实验舱，对接完成后航天员进舱工作、训练，一些必要的生活活动、睡眠等也都在这里进行。后舱则是资源舱，内置动力系统、推进系统和能源，其主要任务为“天宫一号”

的飞行提供能源保障，并控制飞行姿态。资源舱加满燃料后重约 1.4t。

“天宫一号”在轨运行 2 年，燃料必须加足，它在天上一直与资源舱“不离不弃”，减重势在必行，于是资源舱的舱段结构用 Al-Li 合金代替传统铝合金材料，为舱段成功减重 10%以上。所用 Al-Li 合金材料的各项力学性能不但比传统的高强度铝合金（2024 型）与超强度硬铝 7xxx 型合金的相当或更高一些，而它的密度又比传统铝合金的低 8.5%~9.5%，因而具有很大的减重效果，满足了“天宫一号”结构设计要求。

中国 C919 大飞机造航机前舱等直段是用 Al-Li 合金制造的，不过所用材料是从美国进口的，以后正式生产时会逐步增加国产材料用量，2018 年国产铝材用量可占铝材总用量的 40%以上。

1.2.20 铝-锂合金及铝-铜-锂合金

截至 2015 年 1 月,在美国铝业协会注册的常用的含锂的铝合金有 25 个，非常用合金 5 个。注册常用含锂的铝合金可分为两类：硬铝型的，Cu 为第一合金元素，锂为第二合金元素，Cu 含量最低为 1.8%~2.5%（2091 合金），Li 的最大含量为 1.9%~2.6%，牌号为 2xxx；另一类划归 8xxx 系，或是二元 Al-Li 合金(8024 合金,1999 年英国注册,Li 含量 3.4%~4.2%，

还含 0.08%Zr~0.25%Zr），或是 Al-Li-Cu-Zr 合金，如 8090、8091、8093 合金。

铝-锂合金是一类“古老”的合金，又是一类新型的当代合金与正在发展的未来的航空航天合金，说它“古老”是早在 20 世纪 20 年代初德国便研制含锂的铝合金，名为“Scleron，典型成分（质量%）：12Zn，3Cu，0.1Li。1942 年，美国铝业公司（Alcoa）的 Lebron 申请了 X2020 合金（Al-4.5Cu-1.0Li-0.8Mn-0.5Cd）的专利。该合金于固溶处理并在 160℃时效后的性能为：抗拉强度 Rm-567N/mm2，屈服强度 Rpo.2=533N/mm2，伸长率 A=7.8%，其板材于 1957 年首先在美国海军的 A3J 侦察机上得到应用；1960 年代初在超声速度轰炸机 B-58 和歼击机 F-111 上也得到少量应用。2020 合金的断裂韧性低，尤其是缺口敏感性比 7075-T6 合金的大。2020 合金于 1974 年 11 月 1 日划归非常用合金，看来由于新型铝-锂合金的出现，再过几年它会烟消云散。

1955 年，英国哈迪（Hardy）与西尔科克（Silcock）对于 Al-Li 及 Al-Cu-Li 合金的时效沉淀过程做了研究，西尔科克发现了有序的δ’（Al3Li）相，日本中村正久等证实有 L12 结构的δ’相存在。上世纪 60 年代苏联制成 01420 合金，其成分（质量%）：（4~7）Mg，（1.5~2.6）Li，（0.2~1.0）Mn 或（0.05~0.3）Zr，（0.05~0.15）Ti，（0.05~0.3）Cr，其余为

Al,后又制成 BAA23 合金。01420 合金的性能为:Rm=(448~483) N/mm2，Rpo.2=（310~345）N/mm2，A=8%~10%，正弹性模量 E=73.8GN/mm2。

1971 年，英国富尔默研究所制成了新的 Al-Mg-Li-Zr 合金，特别是 1973 年世界石油危急以后，全球再次兴起了研究 Al-Li 合金的热潮，在解决合金的低韧性与晶界脆性方面取得了突破性的成就。1980 年代中期，8090 合金（1984 年欧洲铝业协会注册)、2090 合金（1984 年美国铝业公司注册)、2091 合金（1985 年法国普基铝业公司注册）进入商业化生产阶段，稍后普基铝业公司又研制成 CP276 合金和美国雷诺兹金属公司（Reynolds Metal Com.,2006 年为美国铝业公司兼并）Weldalite 系列合金。它们的典型成分（质量%)：

Weldalite 049 合金：5.4Cu，1.3Li，0.4Ag，0.4Mg，0.14Zr;

2090 合金：2.7Cu，2.2Li，0.12Zr;

2091 合金：2.1Cu，2.0Li，0.10Zr;

8090 合金：2.45Li，0.12Zr，1.3Cu，0.95Mg;

CP276 合金：2.7Cu，2.2Li，0.5Mg，0.12Zr。

以上的 Al-Li 合金可认为是第二代铝-锂合金，而空客 A380 飞机用的 Airware 合金与中国 C919 大飞机机身等直段用的铝-锂合金是第三代。Airware 是加拿大铝业公司(Alcan)

与以后的肯联铝业公司（Constallium）研发的（加拿大铝业于 1997 年为力拓公司并购，改名为力拓加铝公司，从此加拿大铝业公司消失，2000 年力拓加铝公司将航空板带部分卖给肯联铝业公司），中国制造大飞机用的 Al-Li 合金板材与挤压材都是从美国铝业公司进口的，板材来自达文波特轧制厂（Davenport Works），而挤压材则来自拉斐特加工厂（Lafayette Wors）与韩国长光铝业公司（美国铝业公司独资子公司）。

中国于 20 世纪 60 年代初制成 Al-Cu-Li 系合金 S141，90 年代中期西南铝业（集团）有限责任公司从俄罗斯引进 1 台 10t 真空熔炼炉，稍后北京航空材料研究院也有了真空炉，使中国铝-锂合金进入一个新阶段，成为继美国、俄罗斯、英国、法国之后可生产 Al-Li 合金的第五个国家。全球可生产 Al-Li 合金的企业：中国西南铝业（集团）有限责任公司与航空材料研究院，美国铝业公司达文波特轧制厂、拉斐特加工厂，麦库克轧制厂，英国基茨格林（Kitts Green）铝业公司，法国纽布里萨克轧制厂（Neu Brisack），俄罗斯卡缅斯克（Kamensk）冶金厂等。

1.2.21 铝－锂合金工业是具有战略意义的待补短板

铝－锂合金。

Al-Li 合金是一类含有合金元素锂的铝合金，主要是变形铝合金，含 Li 的铸造铝合金寥寥无几，同时在大多数变形铝合金中，Li 并不是第一个主要合金化元素，而是第二甚至第三合金化元素。在当下凡是含有 Li 的铝合金都被称为铝合金都被称为铝-锂合金，截至 2015 年 1 月，在美国铝业协会公司(AA)注册的 Al-Li 合金有 26 个，其中 2XXX 系的 22 个，占 84.6%，8XXX 系的 4 个，占 15.4%，有趣的是，美国和欧洲诸国集中研发 2XXX 系和 8XXX 系 Al-Li 合金，前苏联及俄

罗斯则主要发展 5XXX 系的 Al-Li 合金，中国则既研发 2XXX 系含 Li 的合金，又研发 5XXX 系和 8XXX 系的 Al-Li 合金，列入 GB/T3190 的 Al-Li 合金仅 3 个：2A97、5A90、8090.在现行注册的 26 个铝-锂合金中，只有 8024 合金是一个真正的高纯二元 Al-Li 合金，含 3.4%Li~4.2%Li、0.08%Zr~0.25%Zr，其他元素皆为杂质，英国 1999 年在美国铝业协会公司注册。

Al-Li 合金是一种既古老又年轻的铝合金，说它古老是早在 80 多年前就已诞生，20 世纪 20 年代初德国研制成一种含 Li 的铝合金，商品名称“Scleron”，典型成分（质量）：12Zn，3Cu，0.1Li，其余为其他杂质及 Al。1942 年美国铝业公司(Alcoa)的Lebron 合金申请了专利,1954 年注册为 X2020 合金，其成分（质量%）：4.5Cu，1.0Li，0.8Mn，0.5Cd，其他杂质及 Al；固溶处理及时效后的性能；抗拉强度 Rm=567N/mm2，屈服强度 Rp0.2=533N/mm2，伸长率 A=7.8%；1957 年此合金板材在美国海军 A31J 侦察机上得到应用。20 世纪 60 年代初，在超声速轰炸机 B-58 和歼击机 F-111 上也得到少量应用。X2020 合金的断韧性低，尤其是缺口敏感性比 7075-T6 合金的大。

研究低密度高强度航空航天铝合金对降低结构质量有着特殊重要的意义，Li 是唯一的可降低现行铝合金密度的合金化元素，用 Al-Li 合金取代常规 2219、2024、7075 型等可使零部件与结构质量减轻 10%~20%，刚度提高 15%~20%。

国外铝-锂合金的发展

英美国家的发展

除了上述的情况外，1955 年英国冶金学家哈迪（Hardy）与希尔科克（Silcock）对 Al-Li 及 Al-Cu-Li 合金的时效沉淀过程作了研究，发现了有序的δ’（Al3Li），日本中村正久也证实δ’相的存在。1971 年英国富尔默（Fulmer）研究所制成了新的 Al-Mg-Li-Zr 合金,特别是 1973 年石油危机以后，国外再次掀起了研究 Al-Li 合金的热潮，在解决合金的低韧性方面与晶界脆性方面取得突破性的成就。20 世纪 80 年代中期，8090、2090 和 2091 合金进入商业化生产阶段，稍后又研制成 CP276 和 Weldalite 合金。2000 年以来，加拿大铝业公司与肯联铝业公司（Constellium）为制造 A380 飞机研制成功注册商标为 AirwareTM 的铝-锂合金家族及其材料生产工艺，研究工作在法国沃雷普研究所（Verop）与加拿大蒙特利尔技术中心进行，材料生产由伊苏瓦尔轧制厂负责，有 1 条（1+3）式热连轧生产线，以轧制硬合金为主，供航空航天工业、汽车工业部门用，欧洲航空航天工业用的铝合金板带材的 40%左右是由该厂生产的，而铝-锂合金的 70%以上由该厂供应,A380 飞机用的 Al-Li 合金材料全是该企业生产的。

为了满足未来航空航天工业对 Al-Li 合金的需求，美国铝业公司除了加强研发工作外，对在全世纪的铝-锂合金生产

线进行大规模的改扩建，使生产能力翻了一番：它们是美国铝业公司的达文波特轧制厂（Davenport）、拉斐特（Lafayette）锻造挤压厂、郎维铝业公司（Longview，原属雷诺兹金属公司，2003 年美国铝业公司兼并了它）、英国基茨格林铝业公司（Kitts Green）、意大利的富西纳铝业公司。特别是对拉斐特厂的改扩建更为宏伟，对匹兹堡技术中心生产线也做了现代化改造，到 2017 年总投资将达 1 亿美元。

拉斐特 Al-Li 合金铸造车间紧靠着挤压车间，铸锭生产能力 20kt/a，是世界上最大的铸造车间。拉斐特厂是全球最大的 Al-Li 合金挤压材与锻件生产企业，达文波特轧制厂有世界最大的 5588mm 四辊可逆式热粗轧机，是世界最大的铝合金厚板企业，全球最大的 Al-Li 合金板材生产厂。拉斐特铝业公司是世界第一大的 Al-Li 合金圆锭与扁锭铸造厂、铝材挤压厂、锻件生产厂。它们也是世界最大 Al-Li 合金材料供应商，是空客（Aribus）A380 与 A350、波音 787、湾流 G650 飞机 Al-Li 合金挤压材的独家供应者，如单件（Single-Piece）机翼蒙皮（Wing Skin）、机翼桁条、地板梁、座位调节滑轨，以及其他零件，为 Pratt&Whitney's Pure-Power 航空发动机提供了世界首批 Al-Li 合金前风扇叶片。

拉斐特铝业公司可铸造世界上最大的 Al-Li 合金锭，其直径可比任何其他企业的大 50%以上，可生产任何飞机所需要的整体材料，因而为制造更轻、更强与成本更低的零件创

造了有利的条件，因为可以减少大量连接工作与紧固件。

俄罗斯及前苏联的铝-锂合金工业

前苏联与俄罗斯在铝-锂合金研发与生产方面毫不比英美国家逊色，是全球第二大生产与应用大国，而且自成体系，特别是在 Al-Mg-Li 合金研发与生产方面独树一帜，其中最典型的代表性合金是 1420，1965 年定型，可以生产板带材、挤压材与锻件等。1971 年，1420 合金就已成为轻型直升机的主要结构材料，1980 年以后，它在 MIG-29、SU-27、SU-35 等超声速歼击机上得到应用，至今 1420 合金仍是俄罗斯航空航天器的主要 Al-Li 合金材料。

前苏联和俄罗斯在大力发展 Al-Mg-Li 合金的同时，也在不遗余力地研发 Al-Cu-Li 系合金，所开发的 1450 合金成分与美国的 2090 合金相似，但其材料热处理工艺更加着重其综合性能的发挥，因而具有更强的市场竞争力。上世纪 80 年代前苏联又推出性能更加优秀的 Al-Cu-Li 系合金 1460，它的强度更高一些，可焊性也更好一些，韧性也更好一些，难能可贵的是，它有优越的低温性能，特别适合于焊接火箭燃料液氧与液氢贮箱，它的其他性能与美国的 2095、2195 等合金的相当。1996 年俄罗斯在液氢贮箱，它的其他性能与美国的 2095、2195 等合金的相当。1996 年俄罗斯在实施更为全面与系统的发展 Al-Li 合金的规划。苏联和俄罗斯的 Al-Li 合金

研发工作主要的轻金属研究院，而材料生产则主要在乌拉尔卡缅斯克（Kamensk）铝业公司。

前苏联的 1421、1423、1460 合金还含有微量的 Sc（0.05%~0.21%），也是他们的 Al-Li 合金的一个特点，美国的 Al-Li 合金就不含这个稀土元素。前苏联及俄罗斯在发展 Al-Sc 合金方面居世界之首。

中国的铝-锂合金工业

中国对铝-锂合金的研究始于上世纪 60 年代初期，中期制成 Al-Cu-Li 系 S141 合金，但未进行工业化生产，也没有获得应用，20 世纪 90 年代初期西南铝业（集团）有限责任公司从俄罗斯引进 1 台 6t 的 Al-Li 合金真空熔炼炉及铸造装备，并自制了 1 台 1t 的真空熔炼炉，使中国 Al-Li 合金进入了一个阶段。西南铝业（集团）有限责任公司对 Al-Li 合金的研制与生产开展了较大规模的工作，先后试制成功多种有商业价值的 Al-Li 合金，而在承担的“新型轻质高性能铝－锂合金工业化制备”项目攻关中，取得了一个又一个阶段性成就，在成分优化、熔炼工艺控制、大规格锭铸造工艺参数精准化、形变热处理运用、材料性能与显微组织关系等方面都取得了好的成绩，各项工作都达到了预期的目标。

在发展中国铝－锂合金方面，特别是在研发领域中，航天工业航材院铝合金研究所的铝－锂合金及工艺专业组是中

国唯一的一个从事铝－锂合金研究和应用研究的专业组，处于中国领先地位，成功地仿制和研制出 8090、2090、5A90、2A97、2A66 第二代和第三代高强高模高韧铝－锂合金、中强高韧铝－锂合金，并拥自主知识产权，为中国铝－锂合金的发展作出了突出贡献。

与国外差距是块待补的有战略意义的短板

在铝－锂合金研发、材料生产与应用方面，中国与工业发达国家相比，至少有三四十年的差距，虽然早在上世纪 60 年代中国已开始铝－锂合金研究，也有一些自主创新，但是总体上仍属于跟踪型，没有形成有中国特色的铝－锂合金体系，生产大飞机用的铝－锂合金材料全是从美国进口的。铝－锂合金是航空航天器的明星材料，在航空航天器用的铝材中，它是性价比最高的材料。我们究竟还存在哪些差距与哪些短板呢？

补认识短板

铝工业与相关部门人员需提高对发展铝－锂合金材料的认识，它是航空航天工业一种有一定战略性的轻金属材料，是替代 2024 型、7075 型合金的材料，在航空航天用的轻金属材料中，它具有最高的性价比，是全世界重点发展的轻金属材料之一。

成立专门的研究组

虽然中航工业航材院铝合金研究所有一个铝－锂合金研发和应用研究组，西南铝业（集团）有限责任公司也有专门从事铝－锂合金研究的科技人员，但与美国铝业公司技术中心、全俄轻金属研究院、肯联铝业公司蒙特利尔技术中心与法国沃雷普研究所的铝－锂合金研究部门相比，无论在规模、人员与装备配备方面都有较大差距，可以以北京航空材料研究院的铝－锂合金研究组为中心成立全国性的研发中心。加大投入，扩大装备与人员。

改扩建现有生产装备

截至 2015 年，全世界可生产铝－锂合金材料的企业有：美国铝业公司旗下的位于美国的达尔波特轧制厂、麦库克轧制厂、拉斐特铝业公司（挤压材与锻件），英国的基茨格林轧制厂，意大利的富西拉铝业公司；肯联铝业公司旗下的美国特雷特伍德轧制铝业公司、法国伊苏瓦尔轧制厂；俄罗斯联合铝业公司乌拉尔卡缅斯克冶金厂。它们的总生产能约 35kt/a，在这里需说一下铝－锂合金材料（半成品）生产能力匡算方法，由于铝－锂合金的熔铸特点与压力加工塑性较低特点，综合成品率按 45%匡算，比传统 7075 型材料的 60%综合成品率约低 15 个百分点或更多一些，另外对一个生产铝－锂合金半成品的铝加工厂来说，生产能力并不取决于加工装备而取决于熔炼炉生产能力，例如有 1 台 10t 真空熔炼炉的熔铸车间，可生产铸锭约 6500t/a，加工成材率按 55%计算，

半成品产量只不过 3000t/a 左右。2015 年中国铝－锂合金材料的生产能力也仅 2500t/a，仅相当于国外总生产能力的 7.1%，显然，从中长期的国内外市场来看是有缺口的，需要进行改扩建，适当扩大生产能力。

那么，怎么改扩建呢？一是对现有的生产线进行较大规模的改扩建，以全部替代进口满足国内需求为目标，使板材、挤压材、锻件的总生产能力达到 10kt/a；二是建一个一期生产能力为 10kt/a 的板带项目，建这样的项目最好与研发部门合作，如能与国外企业合资建设也是不错的。

加强合金研发

在铝－锂合金研发方面仍是我们一块较大的短板，苏联及俄罗斯在这方面做了许多工作既开发了 Al-Cu-Li 系合金，又开发了 Al-Mg-Li 系合金，还广泛研究了 Sc、Ag、Zr 等微量元素的作用，研究深度和广度与美国相比有过之而无不及，因此对苏联与俄罗斯的工作以及美国的工作者应全面地多多了解，创造出有中国特色的 Al-Li 合金体系。

薄带材卷－卷轧制

铝－锂合金的平轧工艺塑性远不如 2024 及 7075 型合金的，因此卷－卷冷轧厚度≤3mm 薄带相当困难，中国还不能进行有效的工业化生产，但俄罗斯在这方面已取得了突破性的成就，成功地实现了 1441、1450 合金的带卷冷轧。他们发

现，Al-Li 合金冷轧塑性低的主要原因是带卷中间退火慢速冷却时造成的，于是通过适当的中间退火显著改善了合金的冷轧塑性。

俄罗斯卡缅斯克冶金厂对 1420 铝－锂合金薄带包铝板带轧制工艺作了深入研究，他们开发的包铝合金为 Al-1%Zn-0.1%Zr，不但改善了铸锭的工艺塑性，而且可对薄板带进行电化学保护。该厂采用包铝技术并结合适当的中间退火，轧出了厚 1.2mm 的带材，而且冷轧道次由未包铝的 6 道减少到包铝的 3 道，简化了轧制了工艺，降低了生产成本。

俄罗斯科学家还发现，将包铝板置于锭坯上一起均匀化退化，不仅可以显著提高锭坯的热加工塑性，几乎与 7075 型合金的相当，而且冷加工性能也大为改善，中间退火次数可大为减少，减至一二次，甚至可不进行，生产效率大为提高，成本有所降低。

热处理规范研究宜全面深入

铝－锂合金是一类热处理可强化的变形铝合金，热处理是保证加工的顺利进行与材料最终性能和使用性能的工艺措施。晶界是 1450 合金含 Cu 沉淀相 T1 和 Y1 的最优场所，因此在〉140℃的较高温度时效时很难避免晶界不析出这两种化合物，不过含 Cu 化合物在晶体内与晶界上的析出是有竞争性的。俄罗斯轻金属研究院利用这一特点研究成功 1450 合金的

双级时效工艺取得了很好的效果，在 120℃进行第一级时效时，δ’相和θ’相可在α —（Al）基体内均匀析出，避免了晶界析出 T1 相，承受后在 140℃进行第二级时效进可保证强化相的全面充分析出，晶界析出 T1 相被抑止。这种析出的弱化全面改善了合金的综合力学性能，不但保证了高的强度性能，而且厚板厚度方向伸长率也有较大提高。

与此同时，俄罗斯轻金属研究院对 1430、1441、1451 合金的形变热处理进行了系统研究，制订出了切实可行的低温形变热处理规范。

亟待回收与再生处理的铝－锂合金废料

随着铝－锂合金材料产量的上升与用量的增长，新旧废料也随着相应地增加，在材料加工过程中产生的工艺废料（新废料）高达 45%~55%，如何回收与再生成高附加值的金属是摆在全世界冶金工作者面前的一个严峻的棘手问题，直到如今也未找到圆满的有效工艺进行良好的循环。

1.2.22 谈谈镁铝合金的性能和应用

表 1 Mg-Li 合金的务学性能

合金	抗拉强度 N/mm²	屈服强度 N/mm²
Mg-11%~15%Li-1.0%~1.5%Al(LA141)	145 122	125 85
mG-8.7%Li	132	93
Mg-8.8Li-6.4%Al	239	184
Mg-8.2%Li-6.8%Al-1.2%Si-2.7%Ce-1.8%La	260	200
Mg-10.6%Li-1.57%Al	117	100

表 2 LA141A 及 LS141A 合金的室温性能

性能	LA141A	LS141A
正弹性模量 E,GN/mm²	42	41
抗拉强度 Rm,N/mm²	144	136
拉伸屈服强度,R,N/mm²	123	110
伸长率 A5,%	23	23
硬度,HRE	55~65	–
密度 p,Kg/m³	1350	1330
热膨胀系数,μm/(m·K)	21.8	–
比热容,KJ/(Kg·K)	1.449	–
热导率,W/(m·K)	80	–
电阻率,(nΩ·m)	152	–

表 3 温度对 LA141A

温度，	线膨胀系
-130~24	2
-24~100	2
100~200	2

镁-锂合金的热处理

Mg-Li 合金可以时效硬化，但在较高的温度下会发生过时效。工业用 Mg-Li 合金通常采用 T7 处理，固溶处理 288℃，稳定化处理 177℃。稳定化处理可以消除 Mg-Li 合金的应力腐蚀开裂敏感性。然而 Mg-Li 合金在焊接后必须立即对焊件进行消除应力处理，以除应力腐蚀开裂。

Mg-Li-Zn 合金有时效硬化效应，但是硬化效应大小决定合金成分。Li 含量少时，合金由α 相组成，由于从α 基体中析出稳定θ 相（MgLiZn）而产生强化。

再增加 Li 含量，合金组织为α +β ，而 Zn 主要溶于β 相中，α 相基本无时效强化作用。β 相的时效强化是由于亚稳定相θ ’（MgLi2Zn）的析出，而过时效是由于从β 相中析出α 相及稳定的θ 相。

进一步增加 Li 含量，合金全部由β 相组成，由于可以从β 相中析出θ ’和α 粒子而产生时效硬化，时效温度上升，则析出稳定相θ 而发生过时软化。β 相的时效析出过程及析出

相的作用：

研究表明，Mg-Li-Zn 合金时效温度越高，达到峰值硬度时间就越短，同时峰值硬度也越低，β 相中的 Zn 含量越低，θ 相析出时间虽有所延迟，但硬化效果却更高一些。

Mg-Li-Al 合金经固溶处理（350℃×1h）于 50℃时效时由于 Spinodal 分解，将出现时效硬化及过时效软化过程。

Zr 是镁合金常用的一个微量合金化元素，添加 Zr 可细化晶粒，提高塑性加工能力，α +β 合金的冷轧变形率可达 90%，如不含 Zr 则只有全β 相合金加工率方可达 90%。同时，Zr 可抑制合金的再结晶过程，提高再结晶温度，变形孪晶及滑移带是再结晶晶粒形核点。

稀土元素对 Mg-Li 合金有一定的强化作用，含稀土的镁-锂-稀土化合物是热稳定性的，可提高合金在较高温度下的力学性能。一些较成熟的 Mg-Li 合金的力学性能见(表 1)。

含 Li 多的 Mg 合金时效时发生β →MgLi2X→MgLiX（X 代表第三合金组元）转变，由于 MgLi2X 为又硬又强的化合物，而 MgLiX 较软，故过时效时析出 MgLiX 使合金强度降低，Li 含量越高，软化速度越快。因此，双相组织（α +β ）的 Mg-Li 合金成为研发重点。

工业用 Mg-Li 合金

二元 Mg-Li 合金力学性能不高，加入其他元素可以显著提高它们的强度性能。常规镁合金在各个产业获得了广泛的应用，但是 Mg-Li 合金目前的应用领域有限，美国研发的和 LS141A 是获得应用的合金，它们的 Li 含量为 13%~15%，前者还含 0.75%~1.75%Al，后者还含 0.5%~0.8%Si。LA141A 合金是上世纪 60 年代美国航空航天局（NASA）研制的，它们的物理性能见(表 2)及(表 3)。

这两个合金用于制造美国土星-V 工程计算机外壳、盖米尼(Gemini)计算机项目电路模块盖、民兵式导弹(Minuteman Missile)加速器外壳和导弹发射器(Tow)瞄准装置零件等。这些零部件之所以用 LA141A 与 LS141 合金制造是看中了它们有着难以替代的优点：超低的密度（1350kt/m3)；超高的抗弯刚度，当工件的质量相等时，LA141A 合金的抗弯刚度为普通镁合金的 2 倍多，为铝合金的 5 倍多；单相β 组织，有很好的加工成形性能，可在室温下成形。

LA141A、LS141A 合金的 Li 含量均大于 11%，组织为单一的体心立方晶格的β 固溶体，有良好的塑性，可以在室温下成形，进行冷加工，在β 相基体中还弥散地分布着面心立方晶格的 LiAl 相和亚稳定的 Li2MgAl 相粒子。它们有一定的加工硬化效果。LA141A 合金一般在 T7 处理（固溶处理、淬火和 177℃稳定化）后应用，稳定化处理可以消除此合金的应

力腐蚀敏感性。LA141A 和 LS141A 合金同其他镁合金一样都可以进行焊接，但由于 Mg-Li 合金的化学性质比其他镁合金的更高，因此焊后应立即进行应力释放处理，以防腐蚀开裂。

除了 LA141A、LS141A 合金外，在航空航天器制造中获得实际应用的还有 LA91、LAZ933 合金，它们的 Li 含量为 9%~14%，密度为 1250~1350kg/m3。

中国航天 Mi-Li 合金

关于中国航天镁-锂合金的成分尚未见到公开报道，不过从下面三点我们可以推定它的成分为：Li13%~15%，Al0.9%~1.5%，与美国的 LA141A 合金相当。

它必须是单一的β 相合金，才有良好的加工塑性和成形性能，为此其 Li 含量应大于 11%；

现在国外获得工业应用的 Mg-Li 合金的 Li 含量为 9%~16%；

根据新闻报道，中国“浦江一号”卫星用的 Mg-Li 合金材料“与铝合金比能够减重 40%~50%，与一般镁合金比能够减重 20%-30%”。如果按密度比一般镁合金轻 25%计算，那么它的密度正好与美国的 LA141A Mi-Li 合金相当。

Mg-Li 合金的化学活性极高，易与空气中的氧、氢、氮化合生成稳定化合物，遇明火会发生猛烈的燃烧，遇水会发生势不挡的爆炸，因此应在惰性气体保护下熔炼铸造或在真空炉内熔炼。

这批 Mg-Li 合金是西安四方超轻材料有限公司提供的，它于 2010 年建成中国首条 Mg-Li 合金生产线，现有生产能力 100t/a。他们在研发 Mg-Li 合金过程中得到航天八院与西安交通大学柴东朗教授的大力支持与帮助。

结束语

MI-Li 虽是一种最好的结构合金，使用它制造结构零部件，可降低结构质量，但是它的力学性能较低，价格也不菲，因此不可能获得较大规模应用，只有在航天器这样的部门才能有所应用。现在已有企业在生产，欲再建这类企业的投资者宜慎之。

1.2.23 铝-铜-锰系耐热硬铝

表 2 Al-Cu-Mn系合金的室温力学性能

合金	抗拉强度 Rm N/mm²	屈服强度 $R_{p0.2}$ N/mm²	伸长率 A_5 %
2A16-T6 挤压棒材	400	240	12
2A17-T6 模锻件	420	290	8
2219-T62	435	295	10
-T83	485	405	10
2021-T81	515	445	9

Al-Cu-Mn 系硬铝是一类耐热铝合金，是硬铝的一个分支，去掉了合金元素 Mg，但提高了 Cu 含量，Ti 与 Zr 也是合金元

素，它们的室温强度虽不如 2A14、2A17 合金的，但在 250℃~300℃的高强度却超过 2024 与 2018 合金的。由 Al-Cu-Mn 系三元相图可知，含 6%~7%Cu、0.2%~1%Mn 合金的主要相组成是α ＋Al12Cu（θ ）+T（Al12Mn2Cu），只有当 Cu 含量很低时才出现 Al6Mn。

这类合金的 Cu 含量相当高，平均达 6.5%，已超过极限溶解度（6.5%），过剩的θ 相弥散质点是提高耐热性的决定相组成物。此外，合金中存在较多的共晶组织（θ +α ），流动性好，有良好的铸造性能，还有优秀的可焊性能与低温性能。

Mn 能提高原子的激活能，降低扩散系数和固溶体分解速度，是提高合金耐热性的主要元素。沉淀相 T（Al12Mn2Cu）在时效过程中的形核和长大速度也极缓慢，所以合金在高温下长时间加热，组织与性能很稳定，对耐热性有利，但是，Mn 含量以 0.6%~0.8%为宜，过多或过少都对耐热性不利。

工业用 Al-Cu-Mn 系耐热硬铝的化学成分。过渡族元素 Ti、Zr、V 等同 Mn 一样，也能提高再结晶温度，细化晶粒，增强α 固溶体稳定性，降低 Cu 原子的扩散系数。对合金耐热性也是很有利的，其中以 Zr 的作用最强，并对合金的可焊性和焊缝的塑性大有裨益。

少量的 Sn、In、Cd（0.005%~0.15%）对 2xxx 系合金的时效行为有明显影响，它们对 GP 区的形成也就是对低温时效

过程有较强的抑制作用，但是又能促进θ’的形成（120℃~200℃的高温时效阶段）。因为这些元素可能成为θ’相的沉淀核心，提高θ 相的弥散度与强度。不过，含有这类元素的合金不能加入 Mg，因为它可与 Sn、In 形成 Mg2Sn、Mg2In，抵消它们的作用。

Fe 和 Si 是对合金耐热性有害杂质，Si 降低合金的再结晶温度，加速固溶体分解；Fe 会形成不溶解的化合物（FeMn）Al6，降低 Mn 对耐热性的有益影响。因此，Fe 及 Si 的含量应分别<0.3%或甚致<0.2%。

中国生产的 Al-Cu-Mn 合金的有 2A16 和 2A17，它们的主要合金元素含量完全相同，唯一的区别是 2A17 合金还含有 0.25%~0.45%Mg，以提高合金在 250℃以下的强度性能。Al-Cu-Mn 系合金的室温力学性能见表 2。

美国 Al-Cu-Mn 系合金的合金化特点是，2219 合金在略微减少主要合金元素 Cu 和 Mn 的前提下，同时加入了微量 Ti、Zr 和 V，使它们各自的优势相得益彰，得到了更高的力学性能，成为综合性能最佳的一种 2xxx 合金，不仅有高的室温力学性能和良好的抗蠕变性能，还能高的超低温（液氧、液氢）韧性，并有优异的可焊性，可用其厚板焊接航天器运载火箭液态燃料贮箱。在这种合金人工时效前若进行适量的冷拉伸（T83），其抗拉屈服强度 Rpo.2 可比 T62 状态材料的高约 35%。

2021 合金是 2219 合金的改型，又添加了 0.15%Cd 和 0.05%Sn，成为微量合金化元素品种最多的一种变形铝合金，是全面利用微量元素效应的一个范例，板材力学性能既得到了提高，又未牺牲可焊性和低温韧性。不过，Cd 对人体有害，对环境不友好，在熔炼操作时必须在严格控制条件下进行，对推广这种合金的应用不利。

2A16 合金有高的工艺性能，可用各种塑性加工工艺生产各种半成品，且易焊接，是制造航空航天器高温零部件的良好材料。含少量 Mg 的 2A17 合金虽更高的强度性能，但是其可焊性能不如 2A16 合金。

2A16 及 2A17 合金的 Cu 含量都高，它们的抗蚀性比 2014、2024 合金的低，因此焊缝必须进行阳极氧化处理或涂漆保护。

Al-Cu-Mn 合金都在人工时效状态下应用，2A16 合金的固溶处理温度 520℃~530℃，人工时效规范：（165~175）℃/（10~16）h；2A17 合金的固溶处理温度 515℃~525℃，人工时效规范：（180~190）℃/16h。

1.2.24 说说 1xxx 系合金的那些事

1xxx 系合金是指在工业中获得实际应用的纯铝，故又称工业纯铝，截至 2015 年 1 月 31 日在美国铝业协会公司（AA）注册的工业纯铝共 40 个，铝含量最低的为 99%，最高的为 99.99%，这就是说，1xxx 系合金是铝含量为 99%~99.99%的纯

铝。在这 40 个合金中，有 13 个是 1954 年成型的，在 1954 年以前就在工业中获得应用，其他 27 个是 1955 年至 2005 年注册的，最新的也就是 2005 年注册的，都是日本铝业协会（JAA）申请注册的，它们是 1100A、1230A、1290，前两种是非原创性合金，而后一种为原创性合金，不过它们仅在日本获得了应用。

除 40 个常用的 1xxx 系合金外，还有 24 个非常用合金，它们的用途不广，但仍有使用价值。1xxx 系合金的主要杂质是 Fe 与 Si，它们是在冶炼过程中由矿中遗传下来的，铝土矿都含有硅与铁的氧化物，铁也有从冶炼工具等带入的，所以 Fe、Si 是任何铝合金生来固有的化学元素，是不可避免的。

在 64 个 1xxx 系合金中，有 5 个合金是含 Cu 的，也就是说 Cu 是它们合金化元素：1100、1100A 合金含 0.05%Cu~0.20%Cu，1120 合金含 0.05%Cu~0.35%Cu，1150 合金含 0.05%Cu~0.20%Cu，1275 合金含 0.05%Cu~0.10%Cu，1300 合金含 0.20%Zn~0.50%Zn，1435 合金含 0.30%Fe~0.50%Fe，1450 合金含 0.10%Ti~0.20%Ti。室温时 Cu 在 Al 中的溶解度为 0.5%，因此当 1xxx 系合金的含 Cu 量小于 0.5%时，Cu 都固溶于铝中，不会形成化合物 Al2Cu，铜起小量的固溶强化作用，但对铝的抗腐蚀性能还略有好处，可使铝的腐蚀由点状变为全面的，可延长工件的使用期限。

Fe 在纯 Al 中的溶解度极小，在共晶温度（655℃）只有 0.052%,在室温时的溶解度还不到 0.002%,所以在高纯铝中，Fe 与 Al 形成二元化合物 Al3Fe。锌在铝中的溶解度很高，在共析温度 275℃为 31.6%，200℃时为 12.6%，室温时的大于 2%，因此 1300 合金所含的 0.20%Zn~0.50%Zn 全部固溶于 Al 中，有一定的固溶强化作用。钛全部不固溶于铝，1450 合金所含的 0.10%Ti~0.20%Ti 全部形成 Al3Ti,起晶粒细化作用，也稍有化合物弥散强化作用。

纯铝的强度很低，不适于作结构材料。退火的 Al 板抗拉强度 Rm=80N/mm2~100N/mm2，屈服强度 Rpo.2=30N/mm2~50N/mm2，伸长率 A=35%~40%，布氏硬度 HB=25~30，对纯铝施加 60%冷变形~80%冷变形，抗拉强度虽可以提高到 150N/mm2~180N/mm2，但伸长率却骤降至 1%~1.5%，变脆了，不便成形加工。

在 1xxx 系合金中，杂质 Fe 与 Al 形成化合物 Al3Fe，是又硬又脆的化合物，不希望它存在。Si 在铝中的溶解度比 Fe 的大，在共晶温度 577℃的极限溶解度为 1.65%，但在室温下只能溶解 0.05%；硅同铝不形成化合物，除溶解微量外，过剩的杂质 Si 均虽游离状态存在。不过，Fe 与 Si 就象一对孪生兄弟，总是同时存在于铝中，因此，我们应把 1xxx 系合金

看成为 Al-Fe-Si 三元合金，除了 Al3Fe 与 Si 以外，还能形成两种三元化合物α 的β ，即当 Fe 含量大于 Si 时形成富含 Fe 化合物α 相（Al12Fe3Si），Si>Fe 时形成富 Si 相β（Al9Si2Fe），也可以把它们表示为 Al8Fe2Si 与 Al5FeSi。二者都是脆性化合物，但α 相呈骨架状或团块状，β 相呈粗大的针状，故后者对塑性的危害更大些。Fe 和 Si 在工业纯铝中大都成三元化合物存在，几乎不出现 Al3Fe 或游离 Si。

Fe 和 Si 的含量比对 1xxx 系合金的铸造性能、工艺塑性等明显影响，只有当 Fe/Si≥（2~3）时才能铸出大的锭坯与生产出有良好冲压性能的晶粒细小的板材，所以在生产中一定要注意合金的 Fe/Si，例如印刷版（PS 及 CTP）基用铝板带是用 1050、1052、1060、1070 合金轧制的，状态为 H16 或 H18，根据笔者的工作经验，其 Fe/Si 最好>3。

列入 GB/T3190-2008 的 1xxx 系合金共 29 个，其中 1185、1285、1385 合金因其纯度高多用于化学工业，因有高的抗蚀性，1185、1190、1198、1199 合金也主要用于化学工业及其他特殊用途。在 2014 年全世界生产的 43000kt 铝材中，除 6xxx 系合金的产量最大外，其次就是 1xxx 系合金，约 12000kt，因为约 60%铝箔、100%的印铝版基、60%左右的电导体、50%的热传输材料、铝塑复合板等等都是用 1xxx 系加工的，同时平轧产品占 75%以上。

在此还需提出的是，当铝的纯度达 99.99%或更高一些时，它的再结晶温度即降到 16℃左右，在冷轧或室温存放过程中即能完全再结晶；铝的纯度提高到 5N~5N2 时，再结晶降低到-35℃~-60℃，而工业纯铝的再结晶温度则高达 200℃（N 表示 9）。高纯铝的这个特点能引起晶粒的极端粗大化，给铸锭、轧制、退火或成型加工带来许多困难，而且极易被杂质污染，在生产中应特别注意。

1.2.25 细述 1xxx 系合金

1xxx 系合金属工业纯铝(wrought unalloyed aluminium)，用于加工各种各样的半成品，截止 2015 年 1 月 31 日在美国铝业协会公司注册的 1xxx 系合金共 29 个，铝的含量为 99.00%~99.99%，所以可将工业纯铝定义为纯度≥99.00%而≤99.99%的铝，而纯度≥99.999%的铝（Al-5N,YS/T275-2008）称为高纯铝，在美国将 99.50%Al~99.79%Al 称为工业纯铝，99.80%Al~99.949%Al 的称为高纯铝。在 GB/T3190-2008 中列有 29 个 1xxx 系合金，几乎采纳了在美国铝业协会公司注册的全部合金。

在这 29 个合金中，除 1100、1100A、1120、1150、1275 合金的微量铜(0.05%~0.35%)、1300 合金的 0.20%Zn~0.50%Zn、1450 合金的 0.10%Ti~0.20%Ti 外，其他合金均不含特意添加的合金化元素。1xxx 系合金的主要杂质是铁与硅，它们都是

“天生”的，是从矿石提取原铝过程中无法清除的，因此，工业纯铝实际上可看为 Al-Fe-Si 三元合金。

由 Al-Fe-Si 三元相图可知，在此系中有两种三元化合物即 Al-Fe-Si 相，被命名为α 相与β 相。前者具有明显的汉字形，后者则呈长针状或盘片状。β 相的脆性比α 相的更大一些，对塑性加工的危害也更大一些。α 相中 Si 含量较低，Fe/Si（质量）值为 2.25~2.75；β 相中的 Si 含量较高，Fe/Si（质量）值为 2.25~1.6。因此，为了合金更好的塑性加工性能，应控制合金的α 相尽量多，β 相宜少或没有，为此，1xxx 系合金的 Fe/Si 值宜大于 1.5,而对某一些合金如 1050、1060、1070 型合金某些产品的比值应大于 3。另外，对铸造 1xxx 系合金工业来说，当其品位较高时，应控制 W(Fe)>W（Si），以降低铸锭的热裂纹敏感性，因为此时合金的有效凝固区间比 W（Si）>W(Fe)时的缩小 34℃，合金的热脆性大大下降，因而铸锭的热裂倾也显著下降。

生产 1035 品位以下的铸坯时可不控制铁、硅含量，因为它们在合金中的含量较多，不平衡共晶量上升，提高了合金在脆性区的塑性，铸锭的开裂倾性下降。若 1070、1060 合金的 W（Si）>W(Fe)，调整 W(Fe)>W（Si）需要加较多的铁，会造成纯铝品位降级，也可以不调铁/硅值，而向合金中添加晶粒细化剂 Al-Ti-B，细化组织，提高铸锭抗开裂能力。

目前,α 相的化学计量式(分子式)通常表达为 Al8Fe2Si、Al12Fe3Si2、Al20Fe5Si2,成分组成(质量)为 30%Fe~33%Fe、6%Si~12%Fe;β 相的表达式为 Al9Fe2Si2、Al5FeSi,成分组成(质量)为 25%Fe~30%Fe、12%Si~15%Si。在平衡态的 Al-Fe-Si 系中,α 相为六方晶格结构,但是在实际铸造的快冷条件下,往往形成立方晶格结构的α 相。多数研究者认为 β 相有两种晶型:一种属单斜晶系,另一种为正方晶系。

1xxx 系工业纯铝主要轧制箔材与拉制线材,在 2014 年全世界消费的 54000kt 原铝中,约有 8500kt 用于生产这两种产品,即占全球原铝消费量的 15.7%,中国的这个比例达到 18.5%,因为中国处于电力高速发展期,线缆占的比例大。2014 年中国铝箔、铝电线电缆的表观消费量超过 5000kt。

1xxx 系合金的强度性能低,但有高的塑性与导电、导热性,因而很少用作结构材料,90%以上用作功能材料,可加工成板、带、箔、管、棒、型、线、锻件、粉材等,锻件的量甚少,仅 1100 合金用于锻造少数零件,化工设备零部件对抗腐蚀性能有要求,因而如 1060、1070A、1035、1200 合金获得了较为广泛的应用。家用电器也是 1xxx 系合金广为应用的领域。

1xxx 系合金属于热处理不可强化的,退火是生产半成品的惟一热处理方式,生产中的热处理主要是中间退火与完工

退火，生产铝箔的冷轧带坯在粗轧之前往往需要一次预退火，也可以不进行，主要决定于铝箔的品种及其性能。退火在铝箔生产中是一道关键工序，退火温度为340℃~420℃，保温1h~3h，在铝箔生产成本中占有相当大的份量。完工退火对铝箔的性能及表面状态有着重要影响，有时还必须在保护气氛炉内退火。

1.2.26 2xxx 系的铝-锂合金

在 2xxx 系变形铝合金中，含锂的合金已有 22 个在美国铝业协会公司（The Aluminum Association,Inc.）技术处注册。在这些合金中，锂并不是第一主要合金化元素，而是第二合金化元素，坐第一把交椅的仍是铜。它们在航空航天器中获得了应用，含锂最多的是 2090 合金，为 1.9%~2.6%，除含 Cu、Li 外，还含有少量的 Mn 及 Mg，以及微量的 Zr，每个合金都含有 Zr，这是 2xxx 系 Al-Li 合金的一大特点。

这 22 个含锂的 2xxx 系合金只有 2090、2091、2094、2095、2195、2097、2197、2297 合金是上世纪 90 年代注册的，占 36.4%，其余的 14 个合金即 63.6%的 2xxx 系铝-锂合金是新世纪注册的。这就是说，在 2xxx 系合金中，含锂的合金是一类新型的合金，同时美国发明的 17 个，占 77.3%；法国发明的 5 个，占 22.7%，同时法国发明的这 5 个合金是加拿大铝业公司（该公司 2008 年并入力拓公司）、普基铝业公司（2007

年被加拿大铝业公司并购)、肯联铝业公司（2010 年从加拿大铝业公司分离出来）为制造 A380 飞机研制的。

近几年来，肯联铝业公司法国技术中心为了制造新型民用大客机研发成功名为 AirwareR 的铝-锂合金，它们都是 2xxx 系合金，包括 2050、2195、2X98、2196、2297 等，AirwareR 不但包括合金的成分，而且包含半成品材料的生产工艺。

合金中主要合金化元素的作用：

Li 是最主要的合金化元素，每添加 1%Li，可使合金密度下降约 3%，弹性模量上升约 6%。含 Li 的铝合金在时效过程中沉淀出均匀分布的球形共格相δ’（Al3Li），提高合金的强度和弹性模量。

Cu：可以有效地改善合金的各项性能，提高强度而不降低塑性。

Mg：有固溶强化作用，提高无沉淀区的强度，减少它的危害性，降低 Li 在 Al 中的固溶度，从而增加δ’相的体积分数，使合金进一步强化。在含 Cu、Mg 的 Al-Li 合金中，Mg 可与 Al、Cu 形成 S 相（Al2CuMg）。δ’和 S 相的沉淀有助于抑制合金变形时的平面滑移，改善合金的韧性和塑性。

Zr：在 Al-Li 合金中添加 Zr 的作用，一是细化铸态晶粒；

二是在铸锭均匀化处理时形成均匀弥散的 Al3Zr，抑制变形 Al-Li 合金的再结晶，控制晶粒大小和形状。Al3Zr 弥散粒子有助于减弱 Al-Li 合金变形时平面滑移所引起的局部滑移集中。

Ag 或 Sc：向 Al-Li 合金中添加少量 Ag 或 Sc，以取代δ’相中的一部分 Al 或 Li,可以改变δ’相的晶格常数及α（Al）-δ’之间的界面能，促进位错交叉滑移或绕过沉淀相，而切割沉淀相，从而减少平面滑移。在 Al-Li-Cu 合金中添加少量 Ag 有助于 T1 相沉淀，提高强度。Sc 可与 Al 形成 Al3Sc 化合物，它的晶格在尺寸和结构上与 Al 的很相似，能细化晶粒。

1.2.27 2XXX 系铆钉铝合金 2A01（一）

表 1　不同直径线材的拉伸抗拉强度 R_m（N/mm²）

试样状态	线材直径，mm	抗拉强度 R_m，N/mm²		
		min	max	平均 $\bar{X}$
T4	1.6	191.0	229.0	209.5
	2.0	190	—	211.0
	2.5	207.0	211.0	208.3
	2.6	—	—	210.0
	3.0	209.0	220.0	214.0
	3.5	195 218.0	221.0	220.4
	4.0	208.0	208.0	210.8
	5.0	203.0	203.0	207.1
	6.0	—	—	205.0
T6	2.5	110 214.0	219.0	216.5
	3.0	—	—	218.0

表 2　2A01 合金线材的拉伸性能与温度的关系

试样状态	直径 d mm	温度 ℃	抗拉强度 R_m N/mm²	屈服强度 $R_{p0.2}$ N/mm²	伸长率 $A_{11.3}$ %	断面收缩率 %
T4	8	20	294	167	24	50
		100	255	—	24	63
		150	226	120 —	22	66
		200	186	—	26	69

从飞机诞生那天起，2XXX 系合金就与航空器结下了不解之缘，1903 年 12 月 17 日美国人赖特兄弟研制、安装一台自制的功率 8.8kW 的内燃机作驱动的“飞行者”1 号飞机试飞成功，虽然仅飞行了 260m，停空时间也仅 59s，却是人类第一次飞行。这个飞行器内燃机机壳是用美国铝业公司生产的 Al-Cu-Mg-Mn 合金制造的，这是一种硬铝型合金，是今天的 2XXX 系合金的“祖宗”，距 1888 年铝的工业化提取仅过去了

15 年。自此以后，硬铝就在飞行器中获得了广泛的应用，可以这么说，凡是人类制造的飞行器，不管是过去的，现在的，乃至 2050 年（更远的时间就很难说了）以前生产的，没有一件不含铝，多的适航飞机的铝制零部件质量占其净质量的 80%，少的也约占 45%以上。

截至 2015 年 1 月，在美国铝业协会公司技术处注册的 2XXX 系铝合金共有 92 个，其中约有 38 个在飞行器制造中获得了应用，而最主要的是 2A01、2A10、2B16、2A02、2A16、2A70、2618A、2A11、2017A、2214、2A14、2A50、2B50、2014 等约 20 个，其中用得最多的是 2024 型合金。我们可根据这些合金的性能与用途将它们分为：铆钉合金 2A01、2A10、2B16（2219）；锻造合金 2A50、2B50、2014（2214）；耐热合金：2A02、2A16（2219）、2A70（2618）、2618A（2618）；结构合金：2A11（2017）、2A123（2024）、2017A（2017）、2A14（2014）、2214。

铆钉合金

铆接是航空航天器零部件最主要的连接工艺，因此铆钉成为最主要的与用量最多的紧固件，虽然每个的质量不大，以克计，但是数量之多，令人叹为观止，一架中等偏小民机的铆钉用量近 60 万个，一架大民机铝合金铆钉用量超过 100 万个。

2A01 合金

它的化学成分（质量%）：0.50Si，0.50Fe，2.2Cu~3.0Cu，0.20Mn，0.10Zn，0.15Ti，其他杂质单个 0.05、合计 0.15，其余 Al。它是 Al-Cu-Mg 系硬铝，可热处理强化，在固溶处理与自然时效后使用，用于制造中等强度和工作温度不超过 100℃的结构铆钉，室温下有良好的塑性，可在室温下的任何时间内铆接，不受停放时间限制。2A01 合金的抗蚀性较差，铆接前须进行硫酸阳极氧化，用重铬酸钾封孔。阳极氧化时将铆钉装于筐内，一筐一筐地氧化。

2A01 合金的固溶处理温度 495℃~505℃，保温 20min~80min，在室温水中淬火，自然时效 96h。退火温度 350℃~410℃，保温 1h~3h，以不大于 30℃/h 的降温速度随炉冷至 260℃后出炉空冷。

铆钉线材直径 1.6mm~10mm，在拉线后的硬状态下成捆供应。在 T4 状态的抗剪强度 Rτ ≥185N/mm2（GB/T3196），或 Rτ ≥186N/mm2（GJB2055）。T4 线材硬度 HBS70，O 状态线材硬度 HBS38。

2A01 合金线材的典型力学性能见表 1 及表 2。

2A01 合金的室温抗剪强度 Rτ =196N/mm2，正弹性模量 E=70GN/mm2，切变模量 G=27GN/mm2，泊松比μ =0.31，退火状态线材由α -Al、Al2Cu、Mg2Si、AlFeSi 相组成，主要强

化相为 AL2Cu 和 Mg2Si。2A01 合金在热态下塑性高，在室温下也有良好的塑性，可镦成各种形式的铆钉，经固溶处理与自然时效后具有良好的可铆性能。

2A01 合金的点焊性良好，以同种合金焊料气焊和氩弧焊时，有形成凝固裂缝倾向。铆钉宜在硝盐槽内进行固溶热处理，装于钢丝筐内，层厚不得超过 20mm，转移时间宜在 15s 以内，否则对抗蚀性与抗剪强度不利，处理温度宜大于或等于 495℃，但也不得高于 505℃。2A01-T4 合金的切削加工性能良好。

2A01 合金的抗剪强度不高,现在大中型飞机已不用它了，但小型飞行器零部件连接仍在大量使用。还要强调的是，在航空器制造中铆钉起着重要的作用,没有铆钉,就没有飞机，就没有航空器，是铆钉将世界连接起来如同一个村。

1.2.28 2xxx 系铆钉铝合金（二）

2A01 铝合金是一种专用铝-铜-镁系硬铝型铆钉合金，在固溶处理与人工时效状态或自然时效后应用，不受时效后的停放时间限制，它的强度比 2A01 合金的高，用于铆接中等强度的航空航天器结构，但是工作温度不宜超过 100℃，否则有晶间腐蚀倾向，铆钉须经过硫酸液阳极氧化与重铬酸钾封孔处理。铆钉宜在硝盐槽内固溶处理，温度 515℃~520℃，保温 30min~50min，装于钢丝筐内，层厚≤20mm；室温水中

淬火，转移≤15s，否则对抗蚀性与抗剪强度不利；人工时效制度：75℃±5℃，保温 24h，空冷；自然时效，室温保持时间≥96h。退火制度：（350℃~410℃）/（1~3h），以≤30℃/h 的冷却速度降至 260℃后出炉空冷。

2A10 合金的化学成分（质量%）：0.20Fe，0.25Si，3.9Cu~4.5Cu，0.30Mn~0.50Mn，0.15Mg~0.30Mg，0.10Zn，0.15Ti，其他杂质单个 0.05、合计 0.10，其余 Al。线材直径 d1.6mm~10mm，在冷拉状态成捆供应。合金的熔炼温度 700℃~750℃，铸造温度 690℃~730℃。

物理化学性能

2A10 合金的密度 2800kg/m3，电阻率 50.4nΩ·m，有良好的抗氧化性能，在 T4、T6 状态下无晶间腐蚀倾向，但加热温度≥100℃则有晶间腐蚀倾向。合金的热导率及比热容见表 1。

力学性能

按 GB/T3196，直径≤8mm 的 2A10-T4、T6 合金线材的抗剪强度 R_T 应不小于 245N/mm2，而按 GJB2055，直径>8.0mm 的 2A10-T4、T6 合金线材的抗剪强度 R_T 应不小于 235N/mm2。2A10-T6 合金线材的室温力学性能：抗拉强度 Rm=390N/mm2，伸长率 A10=20%；2A10-T6 合金直径 8mm 线材的力学性能与温度的关系见表 2；2A10 合金的室温抗剪强度见表 3。

2A10 合金的正常弹性模量 E=69GN/mm2，切变模量

G=27GN/mm2，泊松比μ =0.31。

2A10 合金在室温下有良好的塑性，可在冷镦机上制成各种形式的铆钉。在退火状态下的组织由α -Al、Al2Cu、Mg2Si、AlMnSiFe 相组成，主要强化相为 Al2Cu。在固溶处理与时效后有良好可切削性能。点焊性能良好，在气焊与氩弧焊时焊缝有形成凝固裂纹倾向。（王祝堂）

1.2.29 2090 及 2091 铝-锂合金(一)

2090 及 2091 合金是两个典型的铝-锂合金，在航空航天领域获得了较多的应用，前者是美国合金，1984 年注册,后者是一个法国合金,1985 年注册。2090 合金的成分(质量%)：0.10Si,0.12Fe,2.4~3.0Cu,0.05Mn,0.25Mg,0.05Cr,0.10Zn,0.15Ti，1.9~2.6Li，0.08~0.15Zr，其他杂质单个 0.05%、总计 0.15%，其余为 Al；2091 合金的成分（质量%）：0.20Si，0.30Fe，1.8~2.5Cu，0.10Mn，1.1~1.9Mg，0.10Cr，0.25Zn，0.10Ti，1.7~2.3Li，0.04~0.16Zr，其他杂质单个 0.05、总计 0.15，其余为 Al。由全金的成分可知，2090 合金是一个杂质含量很低的干净合金，Mg 在合金中也是一个杂质，是一个 Al-Cu-Li 三元合金。2091 合金对杂质含量控制较为宽松，各种杂质含量均比 2090 合金的高一些，同时 Mg 是一个合金化元素，是一个 Al-Cu-Li-Mg 四元合金。

2090 及 2091 合金是第一代铝-锂合金，它们的沉淀物为 Al3Li 中间相，在塑性变形时移动的位错很容易切割它们，随后而来的位错可轻易地通过，因此，变形仅在一些滑移面上发生，导致不均匀变形，使晶界成为位错塞积和应力集中处，产生微裂纹，进而导致宏观破裂。

不过向 Al-Li 合金中添加一些合金元素与微量元素后可提高合金的塑性与韧性，全面提高合金的性能，例如 2091 合金是 Al-Cu-Li-Mg-Zr 合金，不但有共格的 Al3Li 相，而且有杆状的部分共格的沉淀物 Al2CuMg，位错不能切割它们，因而使位错的横向滑移增加。

2090 合金

2090 合金是为取代航空工业广泛应用的 7075-T6 而研发的，目标是：抗拉强度 Rm 与 7075-T6 合金的相当，而其密度应低 8%，弹性模量应高 10%。2090 合金用于生产高强度与中等强度的板材与挤压材，它有优良的可焊性与低温性能，有比 7075 合金高得多的低温断裂韧性；拉伸性能的各向异性相当强；峰值时效状态（T68、T81、T83）材料在高温下有良好的稳定性，但是欠时效状态材料（T84）则会发生相当强的附加时效硬化作用；有很强的抗疲劳裂纹增长能力，但这一优点在高过载荷或在以压缩应力为主时就会减弱;与 2219、2024 合金相似，人工时效前应对其施加一定的冷加工率才能达到

性能最优化；挤压材料有很高的强度性能，但有明显的方向性。

2090 合金薄板与厚板，以及 2090-T86 挤压材料对海洋性气候的抗剥落应力腐蚀比 7075-T76 合金的高；人工时效对合金抗应力腐蚀开裂（SCC）的能力有很大影响；欠时效状态（T84）材料对 SCC 的敏感性比 T83、T81、T86 状态材料的大得多；2090 合金的点腐蚀比 7075 合金的稍大一些，铝合金含 2%~2.5%Li 时，对电化学性能的影响很小；2090 合金疲劳裂纹增长速度比 7075 合金的低，但裂纹尺寸对增长速度有相当大的影响;在拉伸一弯曲试验时,成形性能最好的是 2024-O 薄板,其他材料的成形性按下列次序递减,2024-T3、2090-O、2090-T31、7075-T6、2090-T83；2090-T31、T83 材料的蚀铣性能与 2024-T3、7075-T6 材料的相当；2090 合金的阳极氧化性能介于 2024 及 7075 合金的之间，其氧化膜的抗蚀性比 2024-T3、7075-T6 合金的高一些；2090 合金的机械加工性能比 2024-T351、7075-T654 合金的好，加工时应有充分的冷却液；有良好的熔化极气体保护焊、钨极气体保护电弧焊和子束焊性能，摩擦搅拌焊性能优秀。

1.2.30 2090 及 2091 铝-锂合金(二)

2091 合金

总的来说，2091 合金的密度比 2024 合金的低 8%，弹性

模量则高 7%，而其他性能与 2xxx 系及 7xxx 系合金的相当。2091 合金的显微组织决定于材料厚度与生产工艺。通常，厚度>3.5mm 的材料具有非再结晶的显微组织，而厚度<3.5mm 的薄板则为沿轧制方向伸得长长的再结晶晶粒组织。欠时效的 T8 状态的 2091 合金的平面断裂韧性为 130~140(N/mm2)·m，而其压缩弹性模量为（76~80）GN/m2。

2091 合金在 125℃以下的力学性能相当稳定，T84 材料的剥落腐蚀性能与 2024－T3 合金的相当，这主要取决于材料的显微组织与淬火速度。非再结晶程度越大，剥落腐蚀越均匀。2091 合金薄板抗应力腐蚀开裂能力与显微组织的关系则与上述的关系相反，纤维状组织越多，应力腐蚀开裂阀值就越高。当材料具有较粗的非再结晶组织和较细的伸长的再结晶组织时，其应力腐蚀开裂阀值可达 240N/mm2。薄板材料的应力腐蚀开裂阀值决定于材料厚度与生产工艺或者说决定于生产企业，低的为屈服强度的 50%~60%，而高的则可达 75%。

2091-T84 合金的疲劳性能的疲劳性能至少不会比 2024 合金的低，尽管一些研究者的测试结果有很大出入。淬火状态 Al-Li 合金有良好的成形性能，退火状态薄板的可成形性比 2024 合金的高，例如前者的 n 和 r 系数分别为 0.33 与 1.0，而后者的依次为 0.22 与 0.70，这对航空航天器零部件的成形非常重要。2091 合金的自然时效速度比 2024 合金的慢一

些，这对零件的现场加工也是有益的。当 2091 合金的晶粒粗大时，其加工硬化应变值为 5%~13%，而 2024 合金薄板的为 6%。

大体上，2091 合金的化学铣削及表面处理（阳极氧化、化学转化与除膜）性能与 2024、7075 合金的相当，但盐雾试验表明，2091 合金氧化膜的保护性能比传统合金即 2024 型及 7075 型合金的更强一些，它们的阳极氧化处理可以在同一槽液中进行。

2091 合金板材的状态及产品见表 1，2090 及 2091 的典型物理性能见表 2。

1.2.31 说说硬铝的时效现象

Al 合金的强化是以 Al 与合金元素间形成的金属间化合物在α -Al 固溶体中的溶解度变化为基础的。因此，Al 虽能同许多金属形成合金，但有高的溶解度和能起显著强化的元素却只有 Zn、Mg、Cu、Si、Li，Ag、Ge 的极限溶解度虽大，但由于它们的稀贵金属，不宜作为 Al 的主要合金化元素而大量加入。这 5 种主要合金元素与铝组成的二元化合物（Al2Cu、Mg2Si、MgZn2、Al3Li）和三元化合物（Al2CuMg、Al2Mg2Zn3、Al2CuLi）在铝中的溶解度随温度的降低而强烈地减少，故可通过热处理提高合金的强度。能形成这种化合物或强化相的

合金有 Al-Cu、Al-Cu-Mg、Al-Cu-Li、Al-Mg-Si、Al-Zn-Mg、Al-Zn-Mg-Cu 系等，可称之为热处理强化型 Al 合金或热处理强化合金。另外，有些合金如 Al-Mg、Al-Si 和 Al-Mn 等，加入的合金元素虽然也有明显的溶解度变化，但热处理强化效果不大，只能在退火状态（O）或冷加工状态（H）下应用，故称为非热处理强化型或热处理不可强化 Al 合金。

关于金属间化合物的写法国内外都没有规定，所以有各种各样的写法，如 Al2Cu 也有写成 CuAl2 的，Al2CuMg 也可以写成 CuMgAl2 或 Al2Cu 或 MgCuAl2，为了统一起见，建立按元素符号字母顺序写，如 Al2Cu、Al2CuMg，以免产生不必要的误会。

值得说明的是，有些合金元素如 Cr、Mn、Zr 等在 Al 中的溶解度虽然很小，但对合金强度和抗蚀性的改善作用却很明显。因此这些过渡族元素能明显地抑制再结晶和细化晶粒，故有再结晶抑制剂、晶粒细化剂之称。还有一些元素，它们的极限溶解度虽很低，但加入极微量（0.005%~0.15%）也能显著改变 Al 合金的形核和沉淀过程，因而可显著提高时效强化效应。这些元素的作用主要表现在：核和沉淀过程，因而可显著提高时效强化效应。这些元素的作用主要表现在：

（1）优生与空位发生交互作用，改变 GP 区的形核速度；

（2）提高 GP 区的溶解极限温度 Tc，改变或提高沉淀相

稳定存在温度范围；

（3）降低沉淀区与基体间的界面能，改善沉淀相的形核过程；

（4）促进某些沉淀相的形核过程。

向 Al-Cu 合金加入微量的 Cd、Sn、In 就有（1）和（3）项的作用；向 Al-Zn-Mg 和 Al-Cu-Mg 合金加入微量 Ag 即可起（2）和（4）项的作用。在气体夹杂（N2、O2、H2）中只有 H2 在液态和固态 Al 中有较大的溶解度，可能引起氢脆或加重应力腐蚀开裂（SCC）过程。

我们知道，Cu 在室温铝中的溶解度只有 0.5%，但在共晶温度 548℃的溶解度为 5.65%。Cu 含量位于 0.5%~5.65%的合金于 500℃的α -Al 相区固溶处理与淬火后，可获得均匀的过饱和的α -Al 固溶体。这是一种热力学不稳定的固溶体，在某一温度加热时则会发生分解和析出 Al2Cu（θ 相），从而引起强度的明显升高，这种情况叫做进效硬化现象或时效强化，如发生在室温则称之为自然时效，如发生在 120℃以上较高温度（<225℃）则称之为人工时效。

Al-4Cu 合金退火状态的强度很低，抗拉强度 Rm 只不过约 200N/mm2，刚淬火后的也不高，约为 250N/mm2，但自然时

效 7d 则可达到 400N/mm2。

铝合金的时效强化能力与α 固溶体的浓度和时效温度有关。通常，α 固溶体的合金元素浓度愈高，时效效果也愈高，以接近极限溶解度的合金的强化效果最大，反之愈低。硬铝在 20℃时效 4d 即达到最大强度，提高时效温度虽能显著提高强化速度和缩短时效时间，但峰值强度却显著降低。降低温度时效速度减慢，在-50℃则几乎失去了时效强化能力，时效过程被“冻结”。

1.2.32 硬铝的合金化和相组成

Cu 是硬铝必需的主成分，为了获得高的强度，Cu 含量通常为 4%~4.8%，当然也有低的，如美国 1987 年注册的 2008 合金，仅含 0.7%~1.1%Cu，也有含铜更高的，如 2219、2319、2419 合金，含 5.8%Cu~6.8%Cu，Cu 的主要作用是形成 Al2Cu，提高强度性能。Mg 的主要作用是形成 S 相（Al2CuMg），进一步提高合金的强度。此外，微量 Mg（0.1%左右）还能消除 Fe 对 Al-Cu 合金自然时效能力的不利影响，提高时效速度和强化量；加入 0.5%Mg 还能改善 Al2Cu、α -Al 固溶体和晶界间的电级电位关系，因而能部分地改善硬铝的抗晶界腐蚀性能。

Mn 也是硬铝的主要成分，所以有时用 Al-Cu-Mg-Mn 系代表硬铝，在硬铝中只有 2002、2011 合金等 27 合金不含 Mn，

占 29.4%，Mn 的最大含量为 1.2%。Mn 的主要作用是消除 Fe 对硬铝抗蚀性的不利影响，但 Mn 还能抑制挤压和固溶处理时的再结晶过程，产生挤压效应，即挤压材的纵向强度比轧制材及锻件相应性能高的现象。Mn 能溶于固溶体，产生固溶强化作用，但沉淀倾向小，无时效强化效应，并降低硬铝的塑性，故加入硬铝中的 Mn 一般不超过 1%，否则会形成粗大的脆性化合物 Al6（MnFe），降低压力加工性能，对断裂韧性的不利影响则更大，不过 Mn 有稳定人工时效组织的作用，对高温性能的提高与稳定有利。

微量 Be 主要是为了提高氧化膜的致密性，MgO+BeO 膜的致密性比 MgO 膜的高得多，能减轻或防止 Mg 在熔炼时的烧损。

Ti 是铝及铝合金铸造组织的有效细化剂，能大大降低铸锭和焊缝的热裂纹倾向性，但是 Ti 的这种细化晶粒作用会因熔炼或铝熔体保温时间过长，或因重熔而失效，如果同 B 一起加入，由于形成 TiB2 化合物，即使铝熔体保温时间长或反复熔炼，TiB2 的晶粒细化作用仍能保持不变，所以微量 Ti（0.01%）和 B（0.005%~0.01%）成为一种很有效的晶粒细化剂。

Zr 同 Ti 一样，也是铝合金的有效晶粒细化剂。由于它能细化铸造组织，可以减轻铸造和焊接裂纹，显著提高铸锭和焊缝塑性。Zr 与 Mn 相似能提高铝和铝合金的再结晶温度，可获得未再结晶的纤维状组织和高强度的挤压材料。但不同的是，Zr 能提高铝合金组织的稳定性，改善大型半成品的淬透性。因此，有不少含 Zr 的硬铝，2004（0.30%Zr~0.50%Zr）、2016（0.10%Zr~0.25%Zr）、2219、2056 等 37 个，占硬铝总数的 40.2%。

硬铝中的杂质 Fe、Si 等对其组织和性能也有明显影响。徽量 Si 在硬铝中是杂质，但当硬铝的 Mg 量<1%，Si 量>0.5%时反而有好的影响，可提高人工时效速度和强度，而又不影响自然时效能力。此时 Si 与 Mg 形成 Mg2Si，有利人工时效强化。若 Mg 量增加到 1.5%时，应尽量减少 Si 含量，以免影响时效后的强度。此外，Si 还能增加硬铝（2A06、2024）铸造和焊接时的裂纹倾向性，损害铆钉的塑性。这些合金的 Si 含量>0.10%~0.15%，就会产生消极影响。

Fe 是硬铝的有害杂质，可与 Cu、Si、Mn 等形成不溶解的夹杂物，损害时效能力、强度和韧性。当 Fe 含量不高（0.2%~0.25%）并有 Si 存在时，对力学性能的影响不大，而且能显著降低铸锭和焊接裂缝倾向。因此，为了中和 Si 对铸锭和焊接的不利影响，Fe 含量必须大于 Si 含量的 1.1~1.5

倍。

如果 Fe 含量增加，在不含 Mn 的合金中能形成不溶解的 Al7Cu2Fe 或 Al7（CuFe）化合物，在含 Mn 的合金中能形成 AlCuFeMn 或 AlCuFeMnSi 化合物。这类夹杂相不仅本身很脆，构成了断裂的裂纹源，而且吸收了可起强化作用的 Cu，因而降低了硬铝的硬度、强度和韧性。

2024 合金的主要夹杂相是含 Fe 相和淬火残留相θ（Al2Cu）和 S 相，对塑性和韧性均不利。纯度提高后（2124 合金），含 Fe 夹杂相的体积百分数虽然降低了，但仍有相当数量的淬火残留相和 Al20Cu2（FeMn）或 Al2（FeMn）3，因此，纯度更高的 2048 合金不仅进一步降低了 Fe、Si 杂质，而且同时减少了 Cu 和 Mn 的含量。因而进一步减少了脆性相，不仅强度未降低，还可以使断裂韧性 KIc 进一步提升，特别是 Fe 的影响尤为明显，Fe 由 0.25%降低到 0.15%，KIc 约提高 20%~40%。

1.2.33 硬铝的时效强化

铝合金的时效强化能力与α 固溶体的浓度和时效温度有关。在理论上，α 固溶体的浓度愈高，时效效果也愈显著，接近极限溶解度的合金具有最大的强化效果，反之愈低。时效温度对合金强化效果的影响也极为明显，硬铝于室温 20℃时效 4d 即达到强度最大值，提高时效温度虽能显著提高强化

速度，也就是说大大缩短时效时间，例如在 150℃时效 30h 即达到峰值强度，但峰值强度的降低也是明显的，温度愈低，时效速度愈慢，时效效果也明显下降，在－50℃则几乎被“冻结”，失去时效强化能力。

有趣的是，淬火后合金不会立即发生时效，而是要一段积蓄“力量”的时间，这段蓄势待发的时间叫“孕育期”，孕育时间虽不长，但却很有实际意义，因为此时材料没有强化，塑性很高，可以顺利地进行铆接、弯曲成型或矫直操作等，合金的合金化元素含量越低，则孕育期也越长一些。

铝合金的时效强化效应是可逆的，把自然时效后的合金迅速加热到 230℃~250℃，短时间（几十秒至几分钟）保温后淬火到室温即变软，又恢复到新淬火状态。这种可逆效应叫做回归，回归后的合金又能再时效，这种回归－再时效循环可重复多次。不过应注意是，每循环一次都会发生一部分不可逆的分解，使再时效能力下降。回归现象在生产中很有实用价值，自然时效的铆钉塑性降低，无法铆接，回归处理后塑性恢复，又可以铆接。

时效强化现象是德国科学家维尔姆（A.Film）在 1906 年于一次偶然的机会发现的，那是一个夏天的星期六，他急不可耐地要下班，第二天要和家人去郊游，便把尚未做完的约含 4%Cu 与少量 Mn 的合金试样放到架上，星期一上班后发现试样硬度

明显上升了，铝合金的时效强化现象就这样悄悄地降临人间，被科学家无意地逮着了。

铝合金的时效强化现象虽然被发现，但当时并不知其原因，直到 1919 年才弄清楚是由α —Al 过饱和固溶体的分解引起的，1935 年又发现在θ 相（Al2Cu）析出之前还有过渡相θ’。1938 年德国科学家盖尼尔（A.Guinier）和英国科学家普莱斯顿（G.D.Preston）各自独立地发现 Al-Cu 合金单晶体经自然时效后在劳厄照片上出现异常衍射条纹。他们认为，这是在基体α 固溶体晶体的{100}面上偏聚的铜原子区引起的，这种富铜的区呈碟形薄片（约含 99%Cu），其厚度为 0.3nm~0.6nm（纳米），直径 4nm~8nm。为纪念这两位发现者，把 Al-Cu 合金中这种“二维”溶质原子偏聚区称 GP 区(zone)。

在此应注意两点：现在 GP 区已用来称呼所有合金中预脱溶（析出）的原子偏聚区，或者更确切地说，GP 区是合金中能用 X 射线衍射法测定出的原子偏聚区；GP 区的写法最好写成“GP”或“G.P.”区，切不可写成“G.P”区，因为“G.P”仅表示一个人。

GP 区的发现使人们完全弄清楚了过饱α 固溶体的脱溶(分解)程序：

α 固溶体→偏聚区（GP 区）{预脱溶期}→过渡相（亚稳相）→平衡相{后两个为脱溶期}

Al-Cu 合金的分解（脱溶）程序：

α →GP 区→θ ''→θ '→θ （Al2Cu）

脱溶时不直接析出平衡相的原因，是由于平衡相一般与基体形成新的非共格界面，界面能大，而亚稳定的脱溶产物往往与基体完全或部分共格，界面能小。在相变初期界面能起决定性作用，界面能小的相形核功小容易形成，所以首先形成形核功最小的过渡结构，再演变成平衡稳定相。

但是，脱溶过程极其复杂，并非所有合金的脱溶均按同一顺序进行，脱溶程序的复杂性表现在下列几方面：

1. 各个合金系脱溶程序不一定相同，有些合金不一定出现 GP 区或过渡相；

2. 同系不同成分合金在同一温度时效可能有不同脱溶程序，过饱和度大的合金会出现 GP 区或过渡相；

3. 同一合金在不同温度时效有不同的脱溶程序。通常，时效温度高，预脱溶阶段或过渡相可能不出现或出现的过渡结构较少，而时效温度低，则可能只停留在偏聚区或过渡相阶段；

4. 在一定温度时效时，由于多晶体合金各部分的能量条件不同，在同一时期可能出现不同的产物，例如在晶内广泛出现 GP 区或过渡相，而在晶界有可能出现平衡相，也就是说，可在同一合金内的不同地区同时有偏聚区、过渡相及平衡相。

1.2.34 硬铝是怎样变硬的

硬铝的强度性能比纯铝、铝－锰合金、铝－镁合金、铝－镁－硅合金高得多，这是怎么回事呢？硬铝属热处理可强化铝合金，它们强化的基本原理为铝与合金元素间形成的金属间化合物（Al2Cu、Al2CuMg 等）或正常价化合物（Mg2Si），在α 固溶体中的溶解度随温度升降而变化为基础的。因此，铝虽能同许多元素形成合金，但有高的溶解度和能起显著强化作用的元素却只有 Zn、Mg、Cu、Si、Li，Ag、Ge 的极限溶解度虽很大，但由于是稀贵金属，作为铝合金的主要合金化元素而大量加入会提高材料的生产成本，不会取得好的经济效益。这五种主要合金元素与铝形成的二元化合金（Al2Cu、Mg2Si、MgZn2、Al3Li）和三元化合物（Al2CuMg、Al2Mg3Zn3、Al2CuLi），在铝中的溶解度可随温度降低而强烈地下降，故可通过固溶－淬火处理即热处理来提高强度。能形成这种化合物或强化相的合金有 Al-Cu、Al-Cu-Mg、Al-Cu-Li、Al-Mg-Si、Al-Zn-Mg 和 Al-Zn-Mg-Cu 系合金，可称为可热处理强化的铝合金或热处理强化型铝合金。还有些合金如 Al-Mg、Al-Si 和 Al-Mn 系合金等，加入的合金元素虽然也有明显的溶解度变化，但热处理强化效果不大，只能在退火或冷加工状态下应用，冷加工是其主要的强化工艺，故被称为非热处强化型或不可热处理强化的铝合金。

有些合合元素如 Cr、Mn、Zr 等在铝中的溶解度或固溶度

虽很小，但却能明显地改善合金的力学性能与抗蚀性，因为这些过渡族元素能强烈地抑制合金的再结晶过程和细化晶粒，有时把它们称为再结晶抑制剂或晶粒细化剂。还有一些元素，它们的极限溶解度虽很低，但加入极微量（0.005%~0.15%）也能显著改变铝合金的形核和沉淀（析出）过程，因而能大幅度地提高时效硬化效应。

这些元素的作用主要表现在：

优先与空位发生交互作用，改变 GP 区的形核速度；

提高 GP 区的溶解极限温度 Tc，改变或提高沉淀相稳定存在的温度范围；

降低沉淀相与基体间的界面能，改善沉淀相的形核过程；

对某些沉淀相的形成过程可能有利。

向 Al-Cu 系合金添加微量的 Cd、Sn、In 就有第一、三项的作用；向 Al-Zn-Mg 和 Al-Cu-Mg 系合金添加微量 Ag，即可起第二、四项作用。在气体杂质（N2、O2、H2）中共有 H2 在液态与固态铝中有较大的溶解度，如果净化处理不彻底，不但可引起与气体有关的各项缺陷如气孔、气泡、疏松等，而且可能引起氢脆或加重应力腐蚀开裂（SCC）进程，严重时可产生灾难性的后果。

硬铝在强化也就是说对其强度性能提高贡献最大的是时效强化，占 85%以上，其他强化机制如固溶强化、弥散质点强化等占的份量还不到 15%。由二元相图铝端的共晶型相图可见，室温时，Cu 在固态铝中的溶解度只有 0.5%，但在共晶温度(548℃)时的溶解度却高达 5.65%。Cu 含量为 0.5%~5.65%的 Al-Cu 合金于 500℃的α 相区进行固溶处理和淬火，即可获得均匀的过饱和固溶体。固溶处理和淬火从时间上看是先后两道工序，实质上是一道工序。固溶处理后必须立即淬火，淬火之前必须进行固溶处理，它们是密不可分的，所以说淬火就包含固溶处理，说固溶处理也就含淬火。

过饱和固溶体在热力学上是不稳定的，则远低于淬火温度的某一温度加热，则会发生分解和析出 Al2Cu（θ 相），而引起材料强度性能的显著升高，这种现象就叫做时效强（硬）化。此现象如发生在室温则称之为自然时效，如发生在较高温度（>120℃~<230℃）则称之为人工时效。

退火状态（O）的 Al-4Cu 合金的强度 Rm 很低，只有 200N/mm2，刚淬火状态合金的抗拉强度 Rm 也不高，仅约有 250N/mm2，但是自然时效 7d 后，Rm 可升高到 400N/mm2，提高了 60%，所以时效或热处理使硬铝的强度性能升高，同时其他的性能也相应地得到全面提升。固溶处理、淬火、时效都属热处理范畴，因此可以说，硬铝变硬功在热处理。

1.2.35 建筑铝型材产业稳步发展跻身强国行列

作者：王祝堂

在改革开放30年内,经过25年,中国已跨过挤压铝材强国的门槛。但由于自主创新的研发力量还不强,基础理论研究还相当薄弱等原因,我国在模具材料、设计与制造方面要赶上美、德、日等国还有一段较长的路要走。在改革开放中起步中国建筑铝型材产业始于1980年3月,广州市第二轻工业局铝制品工业公司和香港中国铝业公司合资兴建的铝型材企业在广州东郊圆村铝制品六厂建成投产,从台湾省馨杰公司引进15MN油压机1台,立式半连续油压铸造机1台,熔炼炉与阳极氧化处理生产线自行设计制造,但氧化生产线的冷冻机从台湾引进。建厂初期,铸锭与模具也都从香港采购。因此,当时生产的型材作为补偿贸易全部返销香港。随后香港万宝铝业有限公司与吉林柴油机厂所属的深圳西林实业有限公司合资建设的铝型材厂于1980年7月建成投产,有2台台湾新泳公司的6MN油压机,1台燃油坩埚熔铝炉,初期生产小型工业型材,后来才生产建筑型材。

1980年,营口铝材厂与天津市铝合金厂分别从日本引进1台16.3MN油压机生产建筑型材,供应国内市场。由此可见,中国建筑铝型材生产在大江南北几乎是同时起步的。

上世纪80年代中期是中国挤压铝型材工业大发展时期,在1984年~1986年间,生产企业由69个增加到175个,年平均增长率61%;挤压机台数由96台增加到305台,年平均增长率81.3%;生产能力由90kt/a,增加到380kt/a,年平均增长率106.1%;产量由16.993kt上升到28.746kt,年平均增长率33.7%。

1989年~1990年国家限制铝材在建筑上应用,使铝材产量一度下降,但自1991年以后中国又掀起一股铝型材企业建设高潮,而且这次高潮比80年代中期的那次更大,波及的范围更广,遍及大江南北与长城内外。

改革开放以来,过去由冶金系统与轻工业部门控制的铝挤压企业变成了各行各业都建铝型材挤压厂,特别是广东省的南海几乎所有的挤压企业都是个体、集体与乡镇办的,原来的国有原铝厂如抚顺铝厂、山东铝厂、包头铝厂、青铜峡铝厂、长城铝业公司等都建设铝挤压厂;一批军工企业也参与铝材生产,如哈尔滨飞机制造公司、龙江电工厂、沈阳飞机制造公司、黎明发动机公司、西安飞机制造公司等都加入建筑铝材挤压生产行列。

这次建设浪潮于1996年达到顶点,铝材挤压企业达到约1100家,保有的挤压机超过4000台,运算生产能力超过

5000kt/a,大大超过市场需求。

进入20世纪90年代,塑料与塑钢门窗材料在中国异军突起,对铝建筑型材生产与应用造成严峻挑战,铝型材挤压工业面临巨大压力。于是从1997年起中国铝型材工业结束了数量型高速发展期,进入了以效益为中心的结构调整期,由于生产能力大量过剩,又面临塑料型材的步步紧逼,铝型材工业展开了前所未有的价格大战,行业利润率大幅度下降,一些竞争力弱的小的挤压企业纷纷退出市场,停产或转产工业型材,而一些竞争力强的大企业则通过资产重组与优化产品结构、扩大生产能力得到了更大的发展。如亚洲铝业集团的组件并于2000年10月与美国鹰都铝业公司联姻后相继收购、控股了周边的4家铝型材生产企业,使集团公司的生产能力超过100kt/a,成为中国建筑铝型材工业的龙头老大。兴发集团公司、凤铝铝厂有限公司、坚美铝厂等通过优化产品结构与扩大生产能力,使企业更加壮大与更具竞争力。

2002年中国有色金属工业协会对建筑铝型材挤压企业实行许可证制度,领到许可证的并经过验收合格的方可生产,这对规范建筑铝型材工业与市场、抑制假冒伪劣产品与提高产品品质起了很大的作用,但值得关注的主要问题是,假冒伪劣产品在建筑铝材市场仍占有一定比例。有个别企业虽有生产许可证,但仍以不合格的废料作为主要原料,生产成分不合格

的产品,有个别厂家铝型材阳极氧化膜厚度偏薄,“一锅炖”与“涮羊肉”现象仍然存在,品质技术监督工作任重道远。不过,这些现象是市场经济发育不完善的必然产物,不足为怪。

截至2002年12月底,中国有建筑铝型材厂和/或工业铝型材厂600多家,其中获得建筑挤压铝型材生产许可证的企业453家,还有约70多家小挤压厂虽生产建筑铝型材,但未申请许可证。工业挤压材专业厂约80家。

从2006年起中国有色金属工业协会生产许可证办公室对原来领有许可证的企业的生产情况与产品品质进行复核,合格的许可证继续有效,过去未申请的还可申请。截至2008年底,领到生产许可证的建筑铝型材生产企业有545家,所以在产的建筑铝型材挤压企业不会超过580家。

进入全球强国行列

经过近30年的发展,中国建筑铝型材挤压工业从无到荣居世界第一,从净进口国到净出口国,并已进入全球强国行列。

到2008年底,领到生产许可证的有545家建筑铝型材挤压企业。除西藏自治区与海南省外,其他的省市区都有铝型材挤压企业。中国的铝型材挤压企业大都集中在珠江三角洲、长江三角洲与环渤海湾地区。这三个地区有345个企业占全国总厂数的63.3%,占总生产能力的64.2%。

广东省是中国挤压铝型材发祥地之一,现有生产建筑铝型材挤压企业181家,占全国总厂数的33.2%,合计生产能力2400kt/a,占全国总生产能力的41.14%。2008年广东省公布了《铝工业发展路线图》,这是中国地方制订的第一个指导本地区铝工业今后发展的很有实际知道意义的规划,对广东省铝加工业的发展将起有效的推动作用。

领到生产许可证的545家企业的建筑挤压材的生产能力为5838kt/a,是按笔者提出的匡数系数匡算的。所谓匡算系数就是对某挤压机的挤压力乘以该系数便等于该机的生产能力。

挤压机分布结构

按地区分布:各省、市、区拥有的在产的挤压机(全部为当前所用的油压机,下同)台数,最多的是广东省有828台占全国总台数的39.1%;其次是山东省,186台,占全国总台数的8.76%;第三是辽宁省,182台,占全国总台数的8.57%;第四是江苏省,162台,占总数的7.7%;第五是河南省,122台,占全国总台数的5.8%。这5省共有挤压机1480台,占全国挤压机总数69.9%。

按企业分布:在产的2120台挤压机分布于545个企业,平均每个3.89台。拥有挤压机数量多的也就是挤压材匡算生产能力前10名的企业是山东南山实业股份有限公司、忠旺集团铝型材有限公司、广东凤铝铝业有限公司、金桥铝型材厂有

限公司、兴发铝业股份有限公司、澳美铝业有限公司、坚美铝业有限公司、环宇铝业有限公司、亚洲铝业肇庆亚洲铝业工业城、山东华健铝业有限公司。其中忠旺集团铝型材有限公司是当今全球最大的铝材挤压企业,有62条挤压生产线,匡算生产能力130kt/a,中国第二大建筑铝型材生产企业,既生产建筑铝材又生产工业铝材,新建的拥有125MN、75MN、55MN、31.5MN的挤压车间为特种铝型材项目即工业铝型材生产车间不包括在匡算生产能力内。亚洲铝业肇庆亚洲铝业工业城是中国第一大建筑铝型材生产企业有40台挤压机,匡算生产能力150kt/a,是广东省铝型材行业惟一入选100强的企业。广东凤铝铝业有限公司有2个厂,一个在南海,有27台挤压机,另一个在三水,有18台挤压机,南海厂的装备将搬迁到三水。这45台挤压机的匡算生产能力为115.8kt/a。凤铝铝业有限公司研发的6043合金2006年10月19日在美国铝业协会公司注册,开中国变形铝合金注册的先河。

拥有挤压机数量多的也就是挤压材匡算生产能力前10名的企业,建筑铝型材产量占主导地位,工业铝型材占的份量不大,一般不超过30%。

按挤压力大小分布:中国建筑铝材挤压行业挤压机按其挤压力大小分布,14MN(15.5ustf.)以下的挤压机台数超过90%,这类小挤压机在工业发达国家占的比例还不到7%,比中国的低得多。工业发达国家占主导地位的是挤压力为

14MN~330MN的挤压机。中国小挤压机台数约占全球小挤压机总数的60%。

中国建筑铝材挤压机的70%左右是引进的,也就是说在2120台挤压机种约有1480台是引进的,其中的70%左右是从台湾省引进的,来自日本的约占24%,其余的6%来自意大利、美国与西班牙等国。

建筑铝材的表面处理

建筑铝材是一类装饰性的结构材料,为了提高其装饰效果,增强抗腐蚀性能与延长使用期限,除个别情况外,都要经过表面处理。因此,表面处理成了生产建筑铝型材的一道必不可少的极为重要的工序。表面处理的方法很多,可根据材料的不同用途采用相应的表面处理方法。常用的商业化表面处理方法有:阳极氧化着色法,静电粉末喷涂法,氟碳喷涂法,电泳涂漆法,化学着色法,水纹处理法等。

中国建筑铝型材挤压企业除少数几个厂外都有自己的表面处理生产线,中国有8家专业化的铝型材表面处理企业,都在广东省。

熔炼与圆锭铸造

熔炼与铸造在建筑铝型材生产过程中是一道关键性的工序,对型材的力学性能与表面性能起着决定性的作用。因此,

各个企业对合金化、熔化、净化与均匀化处理都极为重视。

目前,中国约有70%建筑铝型材是用同水平热顶铸造系统生产的锭挤压的,有引进的世界先进的美国铸造机17台,其中南平铝厂的为全自动化的,兴发铝型材厂有限公司于1989年率先引进这类设备。中国现在已基本上掌握了这类设备的制造技术与圆锭的铸造工艺。2008年中国约有155台国产化的同水平热顶铸造机。

中国还引进了5台英国黑格慕林公司的内导式液压铸造机。全国圆锭铸造机的总生产能力达6000kt/a,有约1200套熔炼静置炉组。

中国建筑铝型材挤压企业有熔炼静置炉蓄热式的并不多,约占38%,其余的不能回收余热,前者的热效率高,可达55%,后者的较低,有的还不到30%。因此,行业的平均热效率近45%,比工业发达国家的65%以上低得多,但比国内整体能源33%又高不少。

中国大多数挤压厂有熔炼车间,全国约有85%以上的圆锭是挤压厂自己生产的,而工业发达的国家有70%以上的圆锭由铝电解厂或专业熔铸厂生产。国内这种局面必需加以改善。大部分挤压圆锭有铝电解厂生产能提高行业经济效益,节约能源与原材料,对环境保护也是大有裨益的。目前,中国有一批大型铝厂已建成或正在建设高技术的圆锭铸造车间。

模具

模具是挤压铝型材最关键的设备之一,价格约占铝材制造成本的8%。延长模具寿命对降低生产成本有重要意义。中国的大中型建筑铝型材挤压厂大多自己有模具制造车间,但一些中型企业与几乎所有的小企业的模具是外购的或包给专业模具制造企业制造。中国有275家建筑铝型材企业不生产模具,占企业总数的49.11%。

中国在模具的材料、设计、制造、表面处理、修模技术与尺寸检测技术、寿命等方面与工业发达国家的还有较大差距,CAD/CAM技术用得还不普遍,模具平均寿命只有6、7吨,与工业发达国家的20t以上相差甚远。影响模具寿命的因素很多,诸如刚才成分与制造方法、设计、表面处理、修模技术等都有或大或小的关系。因此,提高模具寿命是一项复杂的系统工程,需要作较长时间的开发。

断热冷桥节能窗铝合金型材

近几年来,在中国建筑市场上节能的塑钢门窗得到迅速发展,已占到市场份额的35%以上。由于门窗框面积约占整个门窗面积的30%,所以,为达到有效的节能保湿目的,门窗框材料的选用显得十分重要。早在20多年钱欧美诸国就开发出了很有成效的节能铝门窗料:断热冷桥铝门窗框型材,其节能性能毫不逊于塑钢。

自20世纪90年代初以来,中国已引进了隔热铝型材生产线,生产能力约420kt/a。生产这种型材的工艺有:滚压法与灌注法。前者占主导地位。滚压法的隔(断)热条是带强化玻璃纤维的聚酰胺尼龙66,其强度与铝合金6063的相当,不仅有高的隔热性能,而且可以用于固定螺钉;注胶法用的胶为非聚合物。

建筑铝型材与工业铝型材之比

挤压铝型材一般按用途分为两大类:一是建筑与结构铝型材,二是工业铝型材。“建筑”主要是指门、窗、护栏、幕墙等类用途的型材;而“结构”则是指体育馆、机场候机厅、机库、仓库等房顶的受力构架、活动房、桥梁、街道与高速公路等的有关设施框架。工业型材则是指除建筑与结构用途以外的其他一切用途用的铝型材。

据调查显示,中国工业铝型材占的比例为28%。随着中国工业的高速发展,工业铝型材占的比例会越来越大,预计2012年可能占到45%或更高一些。不过,至少在可预见的时期内没有达到70%的可能性。

按国际惯例,挤压铝型材的工业用途分为:交通运输,耐用消费品,电子设备,机器及装备,容器及包装等。在中国将挤压铝型材分为建筑材及工业材是合理的。

时效处理

建筑铝型材是用AL-Mg-Si系合金挤压的,都要经过人工时效处理。全国建筑铝型材生产企业约有1350台时效炉,总处理能力约4500kt/a。中国处理6063型合金型材的制度多为200℃保温1.5h~2h,而不是采用175℃保温8h的最佳制度,虽然力学性能可以达到标准要求,但合金的性能潜力并未得到充分发挥。另外在挤压机淬火时的冷却速度也普遍不够,即型材离开最后一台风机时的温度大多在300℃以上。

挤压铝型材产量

1979年~2008年,这30年间中国挤压铝型材及建筑铝型材的产量年平均增长率为38.28%,真正保持了持续、稳定高速发展的态势,在世界铝挤压工业发展史上是绝无仅有的。

改革开放30年,中国挤压铝型材的总产量为39.544.385kt,其中建筑挤压型材的总产量28475.135kt,工业挤压型材产量11069.25kt,建筑挤压性材产量占挤压型材产量的72.0%,其他各种工业挤压型材占总型材总量的28%。如果将挤压管材也计算在内,则工业挤压材占的比例会大一些。

挤压铝型材进出口量及表观消费量

1984年~2008年中国挤压铝型材的表观消费量总体呈上涨趋势,截止到2008年中国挤压铝型材的产量为7553.472kt、

进口量为62.035kt、出口量为262.730kt、净进口量为-200.695kt、表观消费量为7352.777kt。由于受世界金融危机影响,2008年的净出口量同比下降。

中国曾于上世纪80年代后期及90年代初出现过净出口国现象,但从2001年起中国成为铝型材持续性净出口国,而且随着中国加入WTO与中国铝型材市场竞争力的提高以及对外贸易力量的加强,型材净出口量会逐年增加。

2008年中国出口铝型材的平均价格为2921.09美元/t,进口铝型材的平均价格为3289.52美元/t,进口铝型材的平均价格比出口的高12.7%,可见进口的都是附加值较高的或国内目前还不能生产的高技术精密铝合金工业铝材。不过进出口铝型材价格差别不大,表明中国铝型材品质在全面赶上世界先进水平。

从上世纪90年代中期以来中国一直是铝门窗及其框架、门槛与铝结构件的净出口国,而且净出口量逐年增加,1998年的净出口量41.064kt,2008年的为553.928kt,10年间增长了12.5倍,年平均增长了31.52%。

1999年进出口铝门窗等的单价差为3559美元/t,而2008年的此值为3999美元/t;可是,1999年进口铝门窗等的单价比出口门等的单价高172.8%,而2008年的比值缩小到107.8%。由此可得出,进口铝门窗的附加值远高于出口产品的,但此附加值在迅速下降,说明中国产品的品质在大幅度提高。

蜂窝板、装饰板与箔材

实际上蜂窝板、铝塑板、单板都是装饰板,都可以用作建筑物的内外装饰材料,都可以作幕墙板。

蜂窝板

铝合金蜂窝建筑板由三层组成:表层为厚1.0㎜~1.2㎜的1XXX系合金、3XXX系合金或5052合金板,底板为0.8㎜厚的1XXX、3XXX或5052合金板,中间层为铝箔或玻璃钢蜂窝,但多为铝箔蜂窝。这3层涂胶(粘接剂)后经热压粘合而成。铝合金板为不燃性材料,具有更高的抗风压变形性能,能在更长的时间内保持建筑物原外形的平整及轮廓清晰,它的平整性能比其他材料(铝塑复合板、铝合金单板)的都好,也就是在风压试验后的列余变形量最小。

铝合金蜂窝板的面板漆膜应满足业务试验、耐水试验、耐化学物试验、附着力试验、耐倏性试验(500h人工老化)的各项指标。

蜂窝板的残余变形量明显小于其交两种板材的,价格高于铝塑复合板的而低于铝合金单板,但由于蜂窝板通常按设计定尺生产,无现场加工,易安装,所以它的综合价格几乎与铝塑板相当。铝合金蜂窝板的性价比比其他两种板的都高,有取代铝塑板地趋势。中国已成为铝合金蜂窝板生产与消费

大国,也是一个净出口大国,有一批国际市场竞争力很强的铝合金蜂窝板生产企业,不但出口到东南亚与海湾地区市场,而且进入西欧与北美市场。

铝箔

建筑工业的铝箔有:彩涂塑复合板用的装饰箔、百叶窗厚箔、绝热用的箔及包装管道用的,以及制造排油烟柔性管的铝箔等等。中国是全球生产这类铝箔的大国,关于它的消费量、产量及进出口量无统计数据可查,但据笔者的调查与匡算,2008年的产量约200kt,净出口约16kt,国内表观消费量约184kt。中国建设了一些世界级彩涂装饰箔生产企业,其中生产线条数在10条以上的就有4家,还有30多家较小的彩涂装饰箔生产企业,总生产能力达到120kt/a以上。

装饰铝箔厚度一般为0.03mm~0.08mm,为了降低成本在向厚度更薄的方向发展,成品宽度有1040mm、1240mm,合金主要为1145、1100、8011等。铝塑复合板是一种装饰材料,以美观、耐用为基础,对铝箔的表面品质、组织、性能与板形等有严格要求,其中板形好坏更是关键指标,板型好、表面平整的铝箔与塑料复合时,粘合力大,复合均匀,反之,粘合力小,甚致有些地方粘合不上。作为表层(面板)的铝箔,表面色度应均匀,组织应致密,表面不得带油,因此应严格控制成品道次轧制的铝箔表面带油量,表面不得有条纹缺陷等。

不同厚度铝箔都在建筑中获得应用,厚箔除前述的应用外,还用于制造百叶窗帘,铝合金窗帘的各项性能比竹帘及塑料帘的优越得多,在高档房间、别墅与住宅中的用量会越来越多些。

据估测,2008年中国窗帘、隔热、排烟排气柔性管、管道包裹等用的各种铝箔的用量为60kt,不过今后10多年内的年平均增长率可达14%,同时铝合金窗帘有较大的出口潜力。

我国铝建筑幕墙行业持续稳定发展

中国的建筑幕墙产业是在改革开放后发展成长起来的,自上世纪80年代初开始生产建筑铝型材以来,中国铝门窗、建筑铝幕墙产业经过27年的发展,1983年北京长城饭店玻璃铝幕墙的兴建开中国幕墙的先河,拉开了中国建筑应用技术的序幕,至2008年底,生产建筑铝挤压材的企业已达约580个,而生产铝门窗和铝幕墙的企业达1.2万家左右,此外还有约2500多家配件生产企业,2006年铝幕墙总产值为687.8亿元人民币。

经过多年的发展,中国的建筑幕墙行业培养了一大批具有实践经验的技术人员,设计研发能力居全球领先地位;积累了丰富的实践经验,施工能力居世界前列。中国铝幕墙行业已迈进持续、科学、稳定发展阶段,并大步地走向世界,为美化世界城市建筑做出了应有的贡献。

2007年中国铝门窗与幕墙行业拥有一级幕墙施工资质企

业291家,二级资质企业845家;由国外特大型幕墙和门窗系统跨国公司组成的建筑幕墙设计、施工专项技术队伍也成为主要骨干企业。目前,年产值过亿元的铝幕墙企业在150家以上,它们的产值占全行业总产值的60%。沈阳远大企业集团是行业大型优秀企业之一,其2007年的总产值高达120亿元人民币,2008年奥运会的“水立方”、“鸟巢”,以及新保利大厦等的铝幕墙都出自该集团公司。

此外,深圳金粤幕墙装饰工程公司设计与施工了广州电视塔铝幕墙,该塔的高度是世界之最,比名满天下多年的加拿大多伦多市电视塔还高,施工难度大;北京江河幕墙股份有限公司设计与施工的北京中央电视台大楼幕墙工程的技术要求高,不仅要求达到最佳的保温、节能和隔声效果,而且必须具备相当强的防爆与防火功能,这在中国铝幕墙工程中尚属首次。北京首都机场三期工程都属顶级的铝幕墙。

新保利大厦的幕墙采用了全球最奇特的索结构玻璃幕墙,不仅在设计方面有诸多突破创新,而且挑战了多项世界纪录,在施工技术方面也开创了国内之先河。中央电视台的幕墙工程全部采用铝合金高级隔热型材,四片中空夹胶玻璃,具有高效的保温隔热性能,且隔声性能超过40db以上,能确保室内声音与视频采集工作的特殊要求。北京南站主体屋顶使用了4186块太阳能光电板与高性能铝合金型材,整体面积6700m2,约占屋顶总采光面积的50%,总发电量可达320kw。玻璃采光屋

顶可以有效地增加白天的有效采光面积,节电量大,而且太阳能光电板可以发电,是一种名副其实的真正意义的节能环保产品。

2007年中国的建筑幕墙出口金额达350亿元人民币,在英国、德国、俄罗斯、沙特阿拉伯、科威特、美国等50多个国家与地区的一些高楼大厦都有中国的幕墙公司的杰作,构筑了美妙绝伦的现代化的都市风采。中国的幕墙行业已迈入持续稳定的辉煌发展时期,改革开放将中国幕墙产业推向世界。

幕墙不仅采用挤压型材,还越来越多地采用铝板

铝材及其他新型建筑材料的使用,既提高了建筑幕墙的节能指标,又扩大了建筑幕墙的使用范围,不但大量使用各种规格的高档挤压型材与管材,而且铝单板、复塑合铝板、蜂窝铝板等的用量越来越多。

单板:幕墙上用的多是单板,单板可是预涂的也可是后涂的,预涂在加工厂以带卷形式进行表面涂层处理,而后涂处理则是单板形式在专门彩板厂进行。中国幕墙铝板生产始于上世纪90年代初期的西南铝加工厂,它有引进的涂层生产线一条,可以生产铝板幕墙基材产品与辊涂氟碳铝合金幕墙板,2000年产量达到3.5kt,出口量1kt多,1997~2008年累计彩涂铝板产量超过80kt,2008年的产量超过15kt。

西南铝业(集团)有限责任公司生产1.5㎜~2㎜厚的

5052-H44、5754-H44、5050合金辊涂氟碳单板。标准板尺寸1.6mm×1240mm×3000mm,板的最大宽度1500mm、最大长度4000mm,表面涂有含PVDF(聚偏二氟乙烯)70%以上的含氟碳树脂涂料,经连续式辊涂生产线四涂四烘而成,涂膜总厚度往往超过40靛,背面通常涂4靛~7靛的保护漆,为了保护板材表面的氟碳涂层在施工中不被破环,其表面有一层保护膜。幕墙板的生产工艺:熔铸—铣面—加热(均匀化处理)—热轧—冷轧—轿直—清洗—化学转化—涂底漆—涂面漆—涂保护膜—剪切—包装。

中国从1993年开始生产幕墙铝合金板,生产伊始就是按照美国ASTMB209标准控制各项指标,可生产的合金有1XXX系、3XXX系及5XXX系合金的1100、1060、3003、3004、5052、5754等,板材厚度1.5mm~5.0mm,但厚度为2.0mm~3.4mm的占70%左右,宽度914mm~2200mm,长度1500mm~8000mm,西南铝业(集团)有限责任公司可提供5.0mm×2400mm×6000mm的3003-H24合金幕墙板。南山轻合金有限公司及亚洲铝业集团铝板带有限公司在涂层机组生产线投产后可批量生产预涂幕墙板。

幕墙铝板对尺寸偏差要求比一般的民用板带严格得多,同时在普通铝板带标准中对其垂直度未作要求,而对幕墙铝板有严格要求,板材宽度允许偏差+3~0,长度允许偏差+6~0。

工业发达国家的幕墙铝板多为5754及5052合金,对它们的力学性能要求:允许负载强度≥99N/m㎡,抗拉强度

Rm220N/mm²~260N/mm²,屈服强度Rpo.2≥N/mm²,弹性模量E≥7000N/mm²。美国铝业公司、诺威力铝业公司、日本大洋股份有限公司等都是世界久负盛誉的幕墙铝板供应企业,中国的幕墙铝板可完全与它们的媲美,具有很强的国际市场竞争力。由于高层建筑的年增长率大于普通建筑物的增长率,因此幕墙铝材今后的产量增长率会大于普通铝材的增长率。对幕墙板材表面品质要求也很严格,不允许有辊印、压痕、划伤等。

单板幕墙的主要优点与特点:质量轻,强度大,刚度高,抗腐蚀性强,无光污染,无废气产生,防火性强(非助燃产品),使用寿命长,色调丰富亮丽,装饰效果佳,耐侯性强,涂层可防水份渗入,易加工成形,可使建筑物外观有完美的几何观感。

2007年8月24日中国铝单板行业17家骨干企业联合发布自律公约,以共同维护和促进铝单板行业的健康发展。《铝单板行业自律公约》的发布,对进一步规范行业的市场行为,对稳定产品品质、保护用户利益、维护市场秩序、保证企业合理利润、构建和谐社会都有积极的意义和起到很好的作用。

2008年中国幕墙铝合金板的表观消费量约85kt,在到2015年为止的这段时间内的年平均增长率约18.5%。

过去建的铝单板企业都集中在经济发达地区,这是符合市场规律的,目前中西部也在建一些铝单板项目。

铝门窗及其进出口量

据铝门窗幕墙委员会黄圻主任的总结:中国铝门窗行业是国有企业、军工企业带头,外资及合资企业注入新鲜血液,目前是民营企业撑天下。随着中国建筑企业蓬勃发展,铝门窗产量不断上升,据门窗幕墙委员会统计,2003年~2006年中国铝门窗的产量呈上涨趋势,到2008,据笔者估算产量为5.85×108㎡。中国不但是铝门窗生产大国,也是净出口大国,从1999年~2008年净出口量总计为712.422kt,整体呈上涨趋势,到2008年的净出口量已达到212.880kt。但从产品品质和自主创新方面看还不是强国,比较突出的不足之处是:品质不稳定,制作不精,自主研发的门窗系列产品不多,五金配件研发滞后。

铝塑复合材料

建筑铝塑复合材料有板材与管材两大类,它们是净铝材与塑料的优点事二为一的一类优秀新型建筑材料。

铝塑复合板:铝塑复合板是一种良好建筑装饰材料,中国的发展始于上世纪90年代,到2008年底全国约有55条生产线,总生产能力约23×106㎡。中国铝塑复合板的品质指标以ASTMD638标准为准,铝板合金为1XXX系、3XXX系及5XXX系合金,铝板材厚度为0.5mm。

中国首家铝塑复合板企业是1992年在郑州建成投产的郑丰泰装饰材料有限公司,设计生产能力9×105㎡/a即3×105片/a,可生产各种色彩铝及不锈钢复合板、镜面板与雕花板。

该公司是郑州铝厂与台湾泓泰工业有限公司合资兴建的,是当时中国最大的这类企业之一。1998年中外合资浙江墙煌建材有限公司投产,投资1.3亿元人民币建成了当时最大与最先进的铝塑复合板生产线,生产能力3×106㎡/a,引进日本三菱公司全套生产线,深加工设备从德国引进。

铝塑复合板按用途大体可分为室内、外两种,也可分为防火型与普通型。室外板厚度4mm~6mm,两侧铝板厚度各为0.5mm,中间夹层为PE(聚乙烯)或PVC(聚氯乙烯),其厚度为3mm~5mm。防火型铝塑复合板中间夹层为FR(fire-resisting)塑胶。室内铝塑板厚度3mm~4mm,两侧铝板厚度0.2mm~0.5mm,夹层厚度2.5mm~3.0mm;室外板的最薄厚度为4mm。标准铝塑复合板尺寸为:宽1220mm×2440mm(长),或宽1250mm~1500mm。

生产铝塑复合板工艺有连续式与块片式,以前者为主,其工艺流程分两步,首先:铝带放卷—清洗—化学转化处理—涂底层—烘烤—冷却—涂氟碳涂料KRNAR500或HYLAR500—烘烤—冷却—卷取;然后在第二条生产线上进行粘合:放卷—上胶—贴合与粘结—冷却—粘贴保护膜—整形—剪切—包装。

铝塑复合板的特点:板面平整,颜色均匀,质量轻,强度与刚度适中,抗腐蚀与耐候性强,耐紫外线辐照,但普通铝塑板不具备防火性,如遇火灾,PE、PVC中间夹层均会燃烧,释放有毒气体。

铝塑复合板不能用作高层建筑幕墙,因为不易更换,且夹

层是电的不良导体,不防雷击,但仍有广泛的用途,例如室内装饰、室内包柱、室内隔断等,以及低层幕墙的不透光部分可以减少隐框玻璃大面积的镜面效果,在室内装修中可以代替马赛克和瓷砖等。铝天花板属于高级装饰材料,具有防火、防潮、吸声、隔热等功能,特别适合于潮湿、油污严重的环境,可广泛应用于商场、车站、候机厅,以及高档次的民居、别墅等。

铝塑复合管:我国铝塑复合管企业起步于上世纪中期,广东日韦管业有限公司率先进入此领域并很快形成一定规模。建设部要求1977年以后新建住宅限制使用镀锌管并推荐使用铝塑复合管等新型管材,因此铝塑复合管市场一下活跃起来,成为一个新的投资热点,至2000年底,装备制造厂约24家,铝塑管生产厂约345家,生产线近570条,30多家配套管件生产厂。

经过以后几年的市场竞争和几轮整合结构调整之后,中国铝塑复合管产业已进入平稳发展阶段,保持着稳定的发展态势。

尽管中国经济受到世界金融危机猛烈冲击,2009年的住宅建筑会受一定影响,但严寒会很快过去,2009年铝塑复合管的市场占有率可达75%以上,到2015年为止的这段时间内,市场占有率的年平均增长率可达到1.5个百分点。从2005年起,城乡建设部已将铝塑复合管和交联铝塑复合管列为建筑给水塑料管中的优选产品,同时交联铝塑复合管也列为建筑供暖

铝塑管的优选产品。

经过近30年的高速持续发展,中国已成为世界建筑铝材的生产、消费与出口大国。但还需要更多的努力,例如自主创新与开发力量有待加强,研发经费需要有较多增加;有必要组建全国性的铝材挤压研发中心;节能减排工作需常抓不懈,向70%左右的锭坯由原铝厂与以废料为主的熔铸企业提供的目标前进;大力加强模具设计、制造方面的工作,开发新的工模具材料;加强节能、防爆、防火幕墙的研发;开发新的复合建筑铝板带;可在确实具备条件的地区建设自动的挤压生产线。

1.3 技术

1.3.1 联合法处理中等品位矿石的工艺

碱法是生产氧化铝的基本工艺，拜耳法与烧结法都是碱法，它们各有优缺点与适用性。根据铝土矿化学成分、矿物组成及其他条件的不同，将拜耳法与烧结法联为一体的工艺流程称为联合法。此法又可分为并联法、串联法与混联法。究竟采用哪种工艺生产氧化铝，主要决定于铝土矿品位（矿石的铝硅比 A/S）以及技术经济指标。从一般的技术经济观点看，低品位矿石（A/S 为 3~4）通常选用烧结法处理，中等

品位的矿石（A/S 为 4~7）通常选用联合法处理，高品位矿石（A/S 大于 8）则用拜耳法。

联合法为处理高硅铝土矿开创了一条新途径，两种工艺的有机结合不仅可以扬长避短，而且这种联合为流程中两个系统工艺和设备最佳化提供了新的可能。最近，在联合法基础上又出现了一些新的联合法工艺，如中国的选矿-拜耳法，国外的霞石拜耳水合法等。

并联法生产氧化铝。此法由拜耳法和烧结法两个并行的生产线组成，以拜耳法处理低硅优质铝土矿为主，烧结法处理高硅铝土矿为辅，以补充拜耳法系统损失的苛性碱。因此，烧结熟料溶出的铝酸钠溶液脱硅后转入拜耳法系统处理，将两个系统的铝酸钠溶液混合进行种子搅拌分解，分离洗涤氢氧化铝，最后焙烧得到氧化铝产品。

并联法优点：可以合理利用铝土矿资源，可以同时处理低硅和高硅铝土矿，得到相对较好的技术经济效果；生产过程中的碱耗可用碳酸钠补充，降低了生产成本；种分母液蒸发时析出的结晶碱（碳酸钠和硫酸钠复盐）可直接送烧结法配料，取消了拜耳法的碳酸钠苛化工序；烧结法系统中，低苛性化系数的铝酸钠溶液可降低拜耳法系统中溶液的苛性比，可提高种子分解速度，利于砂状氧化铝生产。

并联法缺点：拜耳法系统苛性碱的损失用烧结法系统的

铝酸钠溶液补充，由于烧结法系统的铝酸钠溶液中含有较高碳酸钠，使拜耳法系统各工序循环碱量增加，降低了经济效益；工艺流程也较为复杂。

串联法氧化铝生产。先以较为简单的拜耳法处理矿石，提取其中大部分的氧化铝，然后再用烧结法回收拜耳法赤泥中的 A1203 和碱，烧结法系统生产的铝酸钠溶液补入拜耳法系统。用串联法处理低品位铝土矿生产氧化铝可以获得更好的技术经济指标。对于中等品位的铝土矿（A/S 为 5~7 的一水矿石）或品位更低但较为易溶的三水铝石矿，采用串联法往往比烧结法好。哈萨克斯坦的帕夫洛达尔氧化铝厂，中国山西晋北氧化铝厂（用 A/S 为 5.6 的一水硬铝石铝土矿）和重庆市南川氧化铝厂都采用串联法生产氧化铝。

串联法优点是：矿石中大部分氧化铝由加工费用及投资比较低的拜耳法提取，仅少量由烧结法得到，减少了回转窑数与燃料消耗，降低了生产成本；由于矿石中的氧化铝经过拜耳法与烧结法提取，总回收率高，碱耗低；由于全部氧化铝由晶种分解法得到，品质高。

串联法的缺点是：拜耳法赤泥炉料的烧结往往较为困难，若矿石的 Fe203 含量低，在烧结法系统需要添加矿石才能解决补碱的问题，若 Fe203 含量过高，则赤泥炉料的烧结特性变差，整个生产的平衡稳定受两个系统相互影响程度比并联

法的大，给生产控制带来一定的困难，赤泥熟料含 A1203 低，熟料折合比（生产 1 吨氧化铝所需熟料量）高。

混联法氧化铝生产。该法已成为中国独特的氧化铝生产工艺，在串联法的烧结法系统不仅处理拜耳法赤泥，还配入部分较低品位的铝土矿，拜耳法系统生产的赤泥进入烧结法系统继续处理，烧结法系统产出的一部分铝酸钠溶液又加入到拜耳法系统，以补偿其苛性碱的损失，从而把两部分串联起来。因为它们同时具有串联法和并联法的工艺特点，而烧结法又有独立的循环系统，故把此法称为混联法，混联法为中国氧化铝工业的发展作出了重要贡献。

混联法的创造性亮点在于其在工业上实现了拜耳法赤泥与低品位铝土矿一起烧结，是稳定拜耳法赤泥熟料烧结作业的好工艺。生产实践证明，混联法是处理国内高硅低铁铝土矿的有效工艺，氧化铝总回收率高，品质好，还解决了串联法中拜耳法与烧结法两个系统的相互制约、难以掌握生产平衡的问题，使整个生产更具灵活性，有利于最大限度发挥装备的生产能力。

混联法的缺点是：烧结法系统的产能比例比串联法的大，单位产品的投资、能耗和成本也随着上升，产品品质也受到影响；流程长，设备庞大复杂，控制难。

1.3.2 浅析中国氧化铝工业技术发展方向

李旺兴、罗建川、尹中林等认为，中国氧化铝工业技术的主要发展方向是：中低品位铝土矿资源的综合利用技术，铝土矿替代资源的综合利用技术，进口低品位混合型铝土矿资源生产氧化铝技术。

首先，在当前的资源与技术条件下，串联法是中低品位铝土矿高效利用生产氧化铝的方向。所谓拜耳-烧结串联法就是采用传统的拜耳法附加碱石灰烧结工序，回收拜耳法赤泥中的 A1203 和 Na20。此法对铝土矿品位的适应性强，可以高效经济地处理低品位铝土矿，是处理高硅铝土矿生产氧化铝相当理想的工艺，是利用中低品位铝土矿生产氧化铝的方向。

进一步优化串联法生产氧化铝工艺技术经济指标的主攻方向是开发利用生料浆窑外分解及烧成强化技术。

在一定条件下，选矿拜耳法是生产成本最具竞争力的工艺技术，为了进一步优化此技术的经济指标，除了继续开展高效选矿药剂、工艺和装备的研发优化之外，当前及今后的研究重点还应该包括高硫铝土矿的选矿脱硫技术研究。中国一水硬铝石型铝土矿储量超过 1.6×108 吨，因此，研究脱硫技术对我国氧化铝工业的持续稳定发展有着十分重大的现实

意义和战略意义。

为了氧化铝工业能实现绿色、循环、低碳与可持续发展的产业规划，必须解决选矿拜耳法尾矿的综合利用。铝土矿选尾矿主要含有三氧化二铝及二氧化硅等，可以考虑对选尾矿进行除铁、除钛处理后，作为生产耐火度较高的耐火材料的原料，也可以考虑对铝土矿选尾矿作适当处理后，作为建筑材料的原料。

第二，铝土矿替代资源的综合利用技术研发刻不容缓。从国家资源安全战略考虑，中国铝工业应长期保持最低战略年产量，不能完全依赖进口，但由于铝资源有限，又必须逐年加大铝资源进口量。因此，寻找有经济效益的铝土矿替代资源及对铝土矿资源的综合利用技术的研究就成了当务之急。

可以作为铝土矿替代资源生产氧化铝的资源有粉煤灰、粘土矿、霞石和明矾石等，但在通常情况下，从替代资源中提取氧化铝的经济性较差，当今只有俄罗斯等国家从霞石和明矾石中提取氧化铝实现了产业化生产。

根据中国的国情，从粉煤灰中提取氧化铝最具有现实意义。它含 14.5%~43%的三氧化二铝，且储量大。2012 年，中国储有的粉煤灰已经超过 80 亿吨，如此大数量的粉煤灰，不仅占用了宝贵的土地资源，而且也对环境产生了不利影响，综合利用粉煤灰也是电力工业需要迫切解决的环保问题。

从粉煤灰中提取氧化铝研究得较多，又成熟的主要工艺是：石灰石烧结法、碱石灰烧结饭和酸浸法。前两种工艺属于碱法。不过还应通过进一步的研究，完善技术上和经济上的不足，形成更可行的提取氧化铝并综合利用提取氧化铝后固相残渣的工艺方案，对发展循环经济、确保铝工业的可持续发展，具有十分重要的意义。

从长远看，以储量极其丰富的粘土矿为原料，研究开发环境友好的利用生物技术提取氧化铝的新技术和新工艺，也是扩大氧化铝生产所需资源量的有效途径。

第三，国外低品位混合型铝土矿资源的综合利用。中国已经成为世界第一的铝业大国，而铝土矿储量还不到世界总储量的 2.3%。根据国土资源部的可供性分析，国内铝土矿资源保障年限已经不足 10 年。因此，必须加快研究和利用国外铝土矿资源生产氧化铝的步伐。中国 2012 年有 6、7 家企业利用进口铝土矿提取氧化铝。国外铝土矿主要是三水铝石型铝土矿，且多数还含有一定量的一水软铝石，还会不可避免地遇到利用低品位三水铝石型铝土矿，特别是低品位的三水铝石与一水软铝石混合型铝土矿的问题，应加强对它们的研究。

中国铝土矿资源不足，供矿品位在持续下降，开采难度也在加深，以及由此带来的生产技术经济指标的波动，这些

都是氧化铝工业在新形势下，面临的尖锐且严峻的挑战，但只要全面坚持和贯彻党的科学发展观，就一定能够在不久的将来圆中国氧化铝工业强国梦。

1.3.3 铝的力学与工艺性能

力学性能

所有合金元素都提高铝的抗拉强度Rm、屈服强度Rp0.2和硬度，而不同程度降低其可塑性，也就是说都有一定的固溶强化作用。Cu、Zn、Mg、Si、Li等元素配合加入，由于热处理过程中从固溶体沉淀出有强化作用的相，而使合金具有很强的热处理效果。当单独加入Mg或Mn时，既有固溶强化作用，又由于形成Al8Mg5或Al6Mn质点而有一定的弥散强化作用。

当代航空航天工业不但要求铝材有高的强度，而且有高的断裂韧性、耐损伤容限与疲劳强度，而提高这些性能的主要措施是降低硬铝与超硬铝中的杂质Fe与Si的含量，并严格控制合金元素Cu和Mn的含量，使之不形成对这些性能有害的脆性相，如Al7Cu2Fe、Al2Cu、Al3Fe等。

除控制成分外，严格掌握加工工艺参数，也是提高韧性的有力措施。Fe是硬铝的有害杂质，可与Fe、Si、Mn等形成不容解的夹杂相即组织组成物质点，从而降低合金的时效能力、强度和韧性。这类夹杂相有Al7Cu2Fe、AlCuFeMn、AlCuFeMnSi等。Fe含量由0.25%降低到0.15%，可使硬铝的断

裂韧性提高20%。为了获得更高的韧性，还应控制第二类质点的量，即弥散质点Al3Zr、Al12CrMg2的量，它们的尺寸为0.01靶~0.5靶，因此，Zr及Cr的量也不能多，应保持在能获得最佳晶粒组织、力学性能和应力腐蚀开裂抗力的最低限度。

通常，提高铝合金抗拉强度的合金化、加工工艺的热处理，也能相应地改善其疲劳性能。但是，提高韧性的措施对疲劳性能的改善并不是等效的。例如，降低Fe含量并不能有效地提高硬铝的疲劳强度，增加超硬铝的Cu含量，可以提高其在高湿环境中的疲劳强度。

工艺性能

工艺性能主要指成形性能、加工性能与可切削性能等。

向铝中同时添加Cu和Mg，会使低应变时的加工硬化上升，而高应变时的加工硬化下降。Zn对低合金化铝合金的加工硬化或缩颈的形成无影响。可形成二次相质点的Fe、Si、Mn等元素对加工硬化或应变硬化速率的影响极小。一次相是指铝熔体凝固时所形成的相，而二次相则是从固溶体中沉淀出来的（析出）的相。

加工性能。工化纯铝、高纯铝的和一些低合金化铝合金（6063、3003等）有很高的可压力加工性，可在很宽的温度范围内加工成半成品和形状复杂的模锻件。低合金化的铝合金是指合金化元素总量≤2.0%的合金，大部分8xxx系合金（除

Al-Li合金外）都属于这一类。合金化程度高的合金不但变形抗力随着合金元素含量的增加而上升，而且由于一些不连续相的形成，使金属流动不均匀和产生裂缝。Cu、Mg、Si、Zn、Li等元素使固溶体的强度显著提高。Cr、Mn、Ti、V、Zr、Sc等元素与铝形成不溶解的相，并提升高温强度，但提高效果不如固溶度大的那些元素的。如果Cr、Mn等元素的含量过大，会形成大量的一次相而使加工性能显著下降。

低合金化的直接水冷铸锭（DC）可在铸态压力加工，高合金化的铸锭在加工之前应经过均匀化退火。中国当前仍有约45%的6063合金圆锭未经均匀化处理，是不应该的。个别变形困难的合金在模锻之前最好进行预锻或采用轧制、挤压坯料。

可切削性能

铝的可切削性能不佳，易黏刀和形成长长的切屑。铝合金的可切削性尚可。Pb和Bi以不溶解的细小球状质点存在于铝中，可以大大提高铝的可切削性能，Al2Cu和Al3Fe的存在也有利于可切削性能的提高，但Pb在切削摩擦热的作用会挥发变成气体，对健康不利，对环境有害，不宜采用。可是极硬的化合物质点如含硅的或含Cr、Mn的复杂化合物质点虽有利于碎屑，但缩短刀具寿命。过共晶Al-Si铸造合金中的一次晶硅对刀具寿命极为不利，可是能促进短屑形成、减少黏刀

和获得光洁表面。Na、Si、Sb、P等能改善铸造Al-Si系合金的可切削性能。冷加工、增加合金元素含量进行提高硬度的热处理都可以改善铝合金的可切削性能。

1.3.4 氧化铝是怎样跑到电解槽的

铝电解厂将购进的氧化铝储存于料仓，通过管道将其输送到电解车间的电解槽。将氧化铝输送到电解槽的方式有三种：稀相输送，浓相输送，超浓相输送。也就是说，氧化铝以空气为载体，在外力作用下，从管道“跑到”电解槽里。

稀相输送

稀相输送时，固气体比很低，即质量比一般为5~10。目前，中国一些小铝厂仍有用此法输送氧化铝的。此法输送系统主要由压力泵和输送管道组成，输送距离约为400m，采用0.6~0.8N/mm2的压缩空气作为动力源，通过仓式泵直接从储存仓将氧化铝压送到下一个系统的高位储仓内，气流速度往往大于30m/s。

稀相输送能耗高，固气比很低，管道磨损严重，氧化铝粉化厉害，对电解生产极为不利，将逐渐被浓相和超浓相输送所取代。稀相输送又称悬浮输送。

浓相输送

此法是一种较新的氧化铝输送方式，它克服了稀相输送的缺点，仍以压缩空气作为动力源，系统由压力容器、控制系统和管网组成，具有输送配置灵活、自动化程度高，耗气量小，氧化铝流动速度低和破碎小等特点。

通常,浓相输送又称为流态化输送,气流速度小于 15m/s，固气比大于 20，此时物料（氧化铝）在管道中已不再均匀分布，而是呈现密集状态，但也不堵塞管道。该方法仍然是依靠空气动能输送的。

在浓相输送中，栓流式输送获得广泛应用。该输送系统主要由压力容器装置、控制管网、带有内管及调节部件的输送管道、带除湿系统的压缩空气系统、卸料及除尘系统、各种阀门、检测仪器仪表、PLC 控制设备、过程控制软件等组成。

中国研发的栓流式浓相输送技术已经跻身国际先进水平，有诸多新亮点：压力容器物料计量系统，管道物料快速成栓新技术、压力容器无磨损内排气技术，压力/时间参数控制料位技术，新型内管调节机构和相应配套的过程控制软、硬件系统、计算软件等。单套设备氧化铝输送能力大于 36t/h，动力指数 0.0102kWh/(t·m)。输送线具有工艺新颖、技术先进、自动化程度高、计量方法准确、运转稳定、输送能力大、

氧化铝物料磨损小、能耗低、投资省、环保友好等特点，已经在一些大型新建和改扩建项目中获得有效地应用。

超浓相输送

超浓相输送是相对浓相输送而言的，该方法采用低压风机供风和风动流槽输送，仅适宜长距离水平输送氧化铝，且应是粉状的。该技术的特点是：氧化铝在风动流槽中呈流态化向前运动，固气比大于 100，运动速度低，物料不易破碎，系统全密封，所需风压低、风量小，自动化程度高等，是一种先进的氧化铝粉输送技术，被大多数电解铝厂采用，用于贮仓对各电解槽输送净化返回的载氟的氧化铝。

超浓相输送不需要压缩空气作为输送动力，只需要较低压力的空气使氧化铝浮动，固气比值高达 500，空气压力仅需 0.005N/mm2 左右，采用一般的离心风机即可满足要求。

超浓相输送系统的主要装备为风动溜槽和离心风机，前者不含运动机械零部件，维修工作量小；输送速度低，管件磨损小，气体对物料粒子的破损小；输送压力低，使用普通风机即可，完全可实现自动化操作；控制元件少，控制操作过程也相当简单，但与浓相输送相比，在配置方面有较大的制约，灵活性差一些。超浓相输送系统特别适合于沿电解厂房两侧的日耗仓对各电解槽返回的载氟氧化铝的输送。

输送方式的选择

当代大型电解铝厂大都采用大型预焙槽，横向配置，采用如下的氧化铝输送模式是一种投资少、自动化程度高、维修量小、能耗低、无污染的最佳方式，即从贮仓或仓库至日耗仓采用管道式浓相输送，从日耗仓至电解槽采用风动溜槽超浓相输送，集中了两种输送方式的优点。

1.3.5 烧结法氧化铝生产

烧结法是提取氧化铝的第二种工艺，早在 1858 年就有人提出了在高温下烧结纯碱（苏打）和铝土矿组成的炉料，得到固体铝酸钠 Na20·A1203 的烧结产物（熟料或烧结块），然后再用 C02 气体分解烧结块溶出所得到的的铝酸钠溶液以制取氢氧化铝的所谓苏打烧结法。

碱石灰烧结法。1880 年又有人提出在纯碱和铝土矿炉料中再添加石灰石或石灰，把苏打烧结法改造成碱石灰烧结法，这一改造具有十分重要的意义，添加石灰石使得烧结过程中的 Na20 和 A1203 的损失大大减少，因而可以有效地处理高硅铝土矿以及储量极其丰富的各种含铝的非铝矿资源。

石灰石烧结法。单纯用石灰石与矿石烧结，适合于处理粘土类原料，特别是那些含有一定可燃成分的煤矸石、页岩

等，此时原料中的 A1203 烧结成铝酸钙，经碳酸钠溶液浸出后，可得到铝酸钠溶液。

当前在工业上得到实际应用的只有碱石灰烧结法，所处理的原料有铝土矿、霞石和拜耳法赤泥等，分别被称为铝土矿炉料、霞石炉料和赤泥炉料。

中国用烧结法生产氧化铝实际上始于 1932 年，当时黄海化学工业研究社进行了碱石灰烧结法的研究，从山东博山地区铝土矿（A/S 为 2.36）中提取氧化铝。1937 年，日本在抚顺建厂，用铝酸钙炉渣法生产氧化铝。新中国成立后，1950 年开始建设山东铝厂，用碱石灰烧结法生产氧化铝，于 1954 年 7 月 1 日投产，从此山东铝厂成为了中国氧化铝工业的发源地。

碱石灰烧结法的基本工艺流程：生料浆制备，熟料烧制，熟料溶出，赤泥沉降分离，铝酸钠溶液（粗液）脱硅，铝酸钠溶液（精液）的碳酸化分解，碳酸化分解母液的蒸发过程等。

生料浆制备。烧结法氧化铝生产的主要原料是铝土矿、石灰（石）、和纯碱（Na2CO3）。生料浆是由这 3 种原料和返回的蒸发碳酸分解母液与硅渣配制而成的。

熟料烧制。该过程是烧结法生产氧化铝的关键工序，它与熟料的品质、能耗和产量密切相关。用泵将生料浆经喷射

器喷入回转窑内，用热气流烘干，成为细粒状生料，生料在向窑前移动逐渐被加热并在 1200 摄氏度到 1300 摄氏度之间烧结成黑色的块状熟料，主要组成为铝酸钠 Na2O·Al2O3、原硅酸钙 2CaO·SiO2、铁酸钠 Na2O·Fe2O3 等。

熟料溶出。熟料经破碎后用稀碱液进行溶出，Na2O·Al2O3 溶于碱液中，而 Na2O·Fe2O3 则发生水解，2CaO·SiO2 不溶于稀碱液。CaO·SiO2 和 Fe2O3·H2O 就是不溶于稀碱液的，成为残渣——赤泥，经沉降分离后排出。

与赤泥分离后的铝酸钠溶液称为粗液，经脱硅后成为精液，通入 CO2 气体进行碳酸化分解。分解后的溶液主要含 Na2CO3，称为碳酸化分解母液，分解沉淀物为氢氧化铝。氢氧化铝经分离洗涤后，送焙烧窑焙烧后，可获得产品——氧化铝。早先采用回转窑焙烧，目前已经全部改用沸腾炉。

碱石灰烧结法具有诸多优点：可以处理含 SiO2 量较高的低品位矿石与粉煤灰、霞石等含铝的非铝土矿原料；产品白度高，适于生产高白度化学品氧化铝；若矿石中 Fe2O3 含量不高，可以利用赤泥生产高标号水泥。

当然，碱石灰烧结法也有一些不足之处，同时这些缺点还是相当大的，与拜耳法相比：流程长，而且复杂，生产和基建投资大，生产能耗和废弃物排放多；产品品质较差。

1.3.6 艾伯纳铝带气垫式热处理炉

奥地利艾伯纳工业炉公司（Ebner Industrieofenbau Gmbh）是世界著名金属材料热处理炉设计与制造者之一，在中国也设有分公司。该公司所生产的铝合金厚板辊底式 Hicon 固溶处理炉及燃气 Hicon 带材浮动式热处理炉在中国的铝加工行业获得了有效应用。从 2003 年东北轻合金有限公司引进第一台辊底式固溶处理炉开始，至 2015 年止，中国将至少引进 15 台此类型高技术固溶淬火炉。它们分别为东北轻合金有限责任公司、西南铝业（集团）有限责任公司、爱励（镇江）铝业有限公司、南南铝加工有限公司、南山轻合金有限公司、忠旺集团铝板带项目等企业所拥有，这些设备为我国航空航天铝板的升级发挥了重要作用。

艾伯纳公司 Hicon 浮动铝合金热处理炉，是为生产汽车 ABS（Auto Bodu Sheet）和航空航天器铝合金薄板带而设计制造的。经过这种气垫式热处理炉处理的带材，不但有更高的力学性能，且性能的均一性与稳定性也可得到进一步的提高。这种连续热处理炉可处理带材的厚度为 0.3mm~0.635mm，最大宽度为 2400mm。加热速度 1mm（厚度）/min，最高加热温度 560 摄氏度，炉内温度偏差为 0 摄氏度到-3 摄氏度，可用电加热，也可用燃气加热。

汽车工业使用的铝板带多是 5XXX 系及 6XXX 系合金，而航空航天工业使用的主要是 2XXX 系及 7XXX 系合金。艾伯纳公司经过近十年的研发，才设计制造出这种高技术连续式铝带气垫热处理炉。

2011 年，我国引进的首条 Hicon 气垫铝合金带材连续热处理炉在西南铝业（集团）有限责任公司投产。该设备可处理厚 0.5mm~6mm、宽 900mm~2400mm 的带材。因为是在现有的车间内安装这条生产线，受到场地的限制，艾伯纳公司不得不“量体裁衣”专门设计，建成一条独具特色的生产线。中国制造业尚未有此类生产线的设计与制造技术,2015 年以前，我国可能再引进三、四条这类生产线。

除此之外，奥地利有色金属加工公司（Amag）拉舍芬铝板带轧制厂也拥有一条典型的 Hicon 气垫生产线，主要用以生产 ABS 带材及航空器铝合金带材。该生产线已运转十余年，运转情况一切正常。所处理的带材品质很高，各方面都能够满足用户的要求。该生产线由 4 个直接燃气加热区、1 个水淬火区和干燥区组成；比利时杜菲尔（Duffel）轧制厂的气垫热处理线全长 93 米，生产线的加热保温段由 5 个加热区与 9 个保温区构成，另有气/水淬火段与 4 个附加的气冷段。此生产线已经运转 8 年，工作状态依然良好。

在气垫内的带材，从加热伊始至冷却终了的整个过程中，

不与任何零部件发生接触，因此表面不会受到任何损伤。同时，设备加热与冷却速度始终在所需的最佳范围内。且温度保持均匀，全部工艺参数的监控与调整都由电脑掌管。

1.3.7 电解槽的启动

电解槽焙烧后就进入启动阶段，此时阳极中缝处的阴极表面温度应为 800℃~900℃，用肉眼观察时非常红亮。电解槽启动可采用干法，也可采用湿法，前者只适用于新建厂头几台电解槽的启动，因为这时铝厂尚无原铝可用。干法启动的目的是为后续电解槽的启动提供足够容量的液态电解质，启动要点是：首先用炭粒电阻焙烧技术进行预热焙烧，经过 72 小时或更长时间焙烧后，电解槽的阴极炭块底下温度达到约 880℃，拆掉软连线，使各组阳极导杆紧固于阳极母线上，缓缓地提高电解槽电压和电功率，使阳极四周的电解质逐渐熔化，当电解质的熔化量足够多时，捞出炭渣，启动完毕。

湿法启动又称常规启动。用此法启动时，电解质熔体不是由电解槽自身熔化的，而是从其他电解槽中抽取的，在启动电解槽前应对阳极母线升降装置、电路绝缘、多功能天车运行状况、阳极导杆夹具、打壳下料系统、添加剂加料系统等进行精心检查，确认一切完好并运行正常。

启动时应认真对待与处理下列事项：注入电解槽内的电

解质及初晶温度应尽可能高一些，以免电解质熔体在槽底产生沉淀；应注入足够量的电解质，以避免因其收缩和内衬大量吸收而造成电解质不足；切忌从其他电解槽中抽取电解质时将原铝也抽出一部分并注入启动槽内，否则，电解槽电压会不稳定，两极电流分布也不会均匀；在注入电解质的同时应提高极距，以便电解质及时填实于电解槽的各个部位，但也不要提高得过快，以防电极间断路，对电解槽的上部结构产生震动，宜小心；电解槽电压在刚启动时应不低于 6V，以后再缓慢下降；根据普基铝业公司的经验，启动时使用碱性电解质，NaF 相对冰晶石组成过量 2%，以 Na2CO3 形式加入，可延长电解槽寿命；在注入液态电解质后，开始用锹一点一点地加入 A12O3，加入量凭经验确定，以电解槽启动 2 小时候正好出现第一个阳极效应为宜；第 8 步是清洁电解质，捞出炭渣，阳极效应发生后，向每块阳极下面插入新砍伐的湿木杆，借助木杆炭化时产生的大量水蒸气、氢气和碳氢化合物气体清除电解槽地步炭料和阳极底掌粘附的炭渣，使其浮于电解质表面，并聚于电解槽边部和端部，然后用漏铲捞出；最后向电解槽内注入液态铝，宜在启动后 24 小时，而对于大型预焙槽应于 32 小时后灌注，可根据电解槽的工艺技术条件确定注入铝熔体的量，通常注入量可为正常生产时，电解槽中原铝量的 1/2。

过渡期的工艺与操作

过渡期就是电解槽开动起来后过渡到正常生产的这段时间，通常为 30 天左右。在过渡期对电解槽应精心管理与操作，其工作质量对以后正常生产有着相当大的影响。在此时期工艺参数的调整是一个渐进的过程，不允许大起大落。主要工艺参数调整为电解槽电压、电解质分子比、铝水平、电解质水平。

电解槽槽帮结壳和电解槽槽堂是在过渡期形成的，刚开通电解时，它的温度很高，调整工艺参数时，不要使电解槽温度过早地下降，以免过早地形成电解槽槽帮结壳伸腿，这种伸腿较长，很难在后期调整回来。

铝水平高度。在过渡期逐步提升铝水平，达到预定的抽吸水平后，及时出铝，当铝水平低于目标时，停止抽吸。

电解质水平。在电解开启后约 30 天内，由于电解槽槽帮结壳与电解质渗入阴极内衬，应及时补充冰晶石与液态电解质。大约 30 天后，电解槽才会达到完全的热平衡，此时应把电解质水平调整到目标值。

电解质成分。在过渡期内，电解质的酸性会慢慢上升，应及时根据电解质的成分改变调整其分子比，以免电解质成分过快从碱性过渡到酸性。

电解槽电压。刚启动时，电解槽电压可设定比 6.0V 高一

些，2 天后，可降低到比设定的正常电解槽电压高 10%左右，然后在 15~21 天内，缓缓地降到生产正常值 4.15V。

加氧化铝。按时添加冰晶石对电解质表面结壳有利。用锹从边部把氧化铝加到电解槽中，开槽的第三天可以启动计算机控制氧化铝的加入，大约启动 7 天后，计算机控制系统就能使电解槽达到设定的氧化铝加料速度。

1.3.8 电解槽的操作

铝电解槽的主要操作包括槽电压调整（RC）、定时给料（NB）、阳极更换（AC）、熄灭效应（AEB）、出铝（TAP）、提升阳极母线（RR）等。当代的大型预焙电解槽都有计算机控制系统，槽电压调整、定式下料、出铝的降电压动作由过程控制计算机、打壳下料装置和阳极提升装置自动完成；阳极更换、熄灭阳极效应、出铝、提升阳极母线等作业由工人配合多功能天车完成。

阳极更换

阳极炭块是在阳极工厂按规定尺寸成型、焙烧与组装的，每个阳极组使用一定时间后的残极需要更换，换上一组新的阳极，此过程为阳极更换。阳极更换周期决定于阳极有效高度与其消耗速度，而阳极消耗速度与阳极电流密度、电流效率和炭块密度有关。

一台 200kA 的电解槽一般用的阳极高度为 560mm、残极高度为 160mm，使用周期可达 26 天。若增大阳极电流密度，提高电流效率，则会增大阳极消耗率，缩短阳极使用周期。

安装新阳极时，应特别注意其安装精度，因为它与阳极电流分布是否均匀有关。安装精度可按多功能天车上的阳极定位装置调整，如无此装置则可采用自制卡尺定位。

新阳极上槽后，会在冷阳极表面迅速形成一层电解质冷凝层，1~2 小时后，该电解质冷凝层开始熔化，阳极开始熔化，随着炭块温度的上升，通过的电流逐渐不断地增大，约 16 小时后，导电量可达到正常值的 70%，24 小时左右达到正常值，此时新电极的底掌应与其他电极的底掌齐平。

为了减少换极对电解槽运转的干扰，每台电解槽每天的最多换极数为 2，而且必须相隔 8 小时；换新阳极不能集中在阳极母线一侧或同一小区，同时 24 小时内，阳极安装高度修正组数也不得多于 2 组，而且要分给两个班组执行。

原铝抽吸

电解槽产的原铝积贮于电解槽槽膛底部，需要定期抽吸出来，抽吸量原则上等于周期内所生产的原铝量。出铝前准备好抬包，确保密封好，不漏气，在 5~8min 内完成抽吸，并达到一定的精度（+40kg~-20kg），精度为实出量与指示量之差。在抽吸下管前打好出口、捞净炭渣、推开沉淀，以防堵

管；抽吸后，添加电解质，一般不多于 5kg。管口必须下到原铝层内，否则会吸出过多的电解质，破坏电解槽的技术条件，但也不能太深，不然会吸上沉淀，堵住吸管。出铝后及时趁热粗清抬包，填好作业记录，及时报送计算机室。

熄灭阳极效应

阳极效应（AE）是霍尔-埃鲁法电解过程中发生在阳极上的特殊现象，是氧化铝浓度下降造成的。中心定时下料预焙槽可通过此效应及其等待时间来消除积料和预示氧化铝浓度，以及时校正 A1203 浓度参数。

一旦发生阳极效应现场工人应立即赶赴电解槽边，着手下列作业：取来新湿棒→赶到槽箱前，观察 AE 电压是否正常，AE 处于何种状态→确认电解槽控制箱是否处于正常状态→确认下料阀门是否打开→回到出铝端，取下槽罩→打孔→等待打壳下料→观察每个下料点是否打壳下料→下料完毕立即插入木棒→回到电解槽控制箱旁观察 AE 熄灭情况→槽电压恢复正常后拔出木棒→打捞炭渣→收拾清扫出铝端→盖上槽罩→确认电压是否正常。

目前，大型预焙槽的效应系数已经降至 0.1~0.05，为了保护环境，需要开发新的熄灭 AE 措施。

母线的抬升

阳极导杆固定在电解槽阳极大母线上，随着阳极不断消耗，母线位置也不断下降，当母线接近上部密封顶时，就需要进行抬母线。两次作业之间的时间称为抬母线周期，周期长短决定于阳极消耗速度和母线有效行程，例如 300kA 的预焙槽的母线总行程 400mm，有效行程 270mm，阳极消耗速度 15mm/d，按有关公式计算抬母线周期为 18d。实际上，由于电解槽槽膛大小有别，阳极母线下降速度也会出现差异，每槽周期不可能固定为 18d。（

1.3.9 电解槽的焙烧

铝电解槽的焙烧与启动是一件很重要的事情，它对原材料消耗、电解槽寿命、启动后的生产管理与状况都有影响。因此，必须十分重视并掌握它的规律。电解槽的焙烧与启动有两种情况：一是用于新建电解槽系列，工作相当复杂；另一方面是对大修后的电解槽，一般是在个别电解槽上进行，因此，工作就相对简单一些。

焙烧的目的是排除槽内衬材料中的水分；使阴极炭块之间和阴极炭块与侧部内衬之间的捣固糊烧结和炭化，与槽内衬形成牢固的一个整体；使电解槽具有高的温度，以便启动

前加入槽内的熔融电解质不会凝固，也不致于在阴极炭块表面形成一层凝固的电解质。

焙烧工艺有铝熔体法，外电阻加热与铝熔体联合法，炭粒法，铝锭、铝屑和铝粒加热法，火焰法等。

铝熔体法最简单，多用于大修槽的焙烧，其原理和工艺是将从其他在产电解槽中抽出的原铝注入待焙烧的电解槽的阳极与阴极空间中，然后打开电解槽的短路口，通入系列电流，在电流通过阳极、阳极与阴极间的铝熔体、阴极时会产生电阻热，对电解槽进行焙烧。此法简单，阴极母线与导杆之间不需要软连接，直接用系列电流进行全电流焙烧，电流较均匀地分布于阳极、铝熔体与阴极中，是其优点。不过在将温度高达 900℃的原铝瞬间注入冷槽时，巨大的温差会产生强大的热冲击，使阴极炭块内产生强大的内应力，易产生裂纹、槽底产生孔缝、孔洞等，则是此法的固有缺点。

外电阻加热与铝熔体联合焙烧法克服了熔体焙烧法的缺点，它的原理是在注入原铝焙烧前，先用一个低电压、大电流的电热体对电解槽内衬焙烤预热，待内衬炭块表面温度达到 600℃~800℃，而炭阴极表面一定深度内的扎缝糊烧结后，再注入原铝，然后按第一种方法加热与焙烧。可用一台三相盐浴炉式干式调压变压器向电阻发热体供电。也可以全程用

电热元件进行外电阻加热，但为减少热损失和空气进入，可加强阳极上部保温，覆盖保温材料。

炭粒焙烧法以填加于阳极与阴极之间的炭粒层作为电阻发热体。为了各组阳极能以相同的重力对炭层施压，以获得均衡的电阻，阳极导杆与阳极母线为软连接，所有阳极都是新的，以便有尽可能一致的品质。炭粒焙烧是阳极、阴极、炭粒电阻产生的热焙烧槽。由于炭粒层的电阻远大于铝熔体的，如果采用全流程焙烧，那么电解槽在初期的焙烧升温速度就很快，因此宜采用分流技术。采用此技术就是为了避免焙烧初期电流过大，升温过快而分出一部分系列电流，使这部分较小的电流从阳极旁路流入阴极。

采用如下措施，可提高炭粒焙烧质量：粒层厚度应≤2cm；配料中不应混入细粉，粒度均匀；配料中可含电阻较小的人造石墨颗粒；炭粒层厚度应尽可能均匀一致；阴极面平整；全部新阴极。

铝锭、铝块、铝屑焙烧法由阳极、阴极和阴极-阴极间铝锭（铝块）的电阻热焙烧。阳极炭块靠其自身质量压在铝锭和/或铝块上，在铝锭和/或铝块未完全熔化前，阳极导杆与阳极横母线之间实施软连接。铝锭和/或铝块之间、炭阴极表面与铝锭（块）之间、铝锭（块）与阳极之间都塞填一些铝

屑。焙烧电流既可以采用系列全电流，也可以采用分流技术，不过电流应从小到大一步步地提高。

火焰焙烧法采用重油、天然气或煤气燃烧火焰对电解槽进行预热焙烧。此法具有温度较均匀；可以较好地控制温度和升温速度；可以由外向里焙烧内衬中的底糊，可提高其焙烧品质；与炭粒焙烧法相比，不用打捞炭渣等优点，其缺点是工艺和设备较复杂，阳极和内衬会有一些氧化。

当前，国内外多采用炭粒焙烧或火焰焙烧，如美国铝业公司、挪威埃肯铝业公司、南非铝业公司采用火焰焙烧法；海德鲁铝业公司、普基铝业公司（现已并入力拓-加铝公司）、迪拜铝业公司、凯撒铝业公司等采用炭粒焙烧技术；俄罗斯采用铝熔体焙烧法，中国也仍有用此法焙烧的，不过自 20 世纪 90 年代以来，焦炭粒电阻焙烧技术在国内得到推广，并成为主流焙烧技术。

1.3.10 电解槽的正常生产管理（一）

铝电解槽启动后，经过一段时间的调整与磨合，形成了规整的槽膛，各项技术参数达到既定范围，进入正常生产阶段。此阶段的工作是维护电解槽槽膛规整，保持合理稳定的技术状态，保证电解槽的高产、优质、低耗。因此，必须加强电解槽管理。正常生产期间，大型预焙槽的管理主要集中

在电压、加料间隔、阳极效应、电解质成分、原铝水平与抽出、极上氧化铝的管理等方面。

槽电压管理（RC）

电解槽维持正常运转的最低电压称为槽电压，由阳极压降、阴极压降、槽周母线压降、分解与极化压降、电解质压降组成。由于槽型、设计配置、材料等不同，各部分压降也不同，所以每个槽的电压并不绝对一致，需要管理人员根据实际的电解槽情况人为设定，现场管理主要集中于阴极压降、电解质压降和效应分摊压降的控制方面。电解槽电压表的读数是除效应分摊电压外的其他压降的总和，国内现有大型预焙槽的电压为 4.0V~4.2V。

现代的电解槽技术参数都由计算机控制，它以人为设定的电压值为目标监视、维持、调整电解槽电压。它对电压的控制为闭环式，不但发出指令，而且检查控制效果。因此，只要不进行使电解槽电阻变化的操作、不出现异常，整个电解不需要人为干预。在电流强度一定时，电解槽电压是调节能量平衡最重要、最易实现的因素。因此，电解槽电压管理的实质是电解槽能量平衡的主要管理。

在生产过程中，应根据电解槽的运转确定设定电压的上升或下降。设定电压变更频率以 3d 为周期，无特殊情况不得变更，升降幅度 10mV/次，最大 20mV/次。

加料间隔管理（NB）

电解槽加料就是指氧化铝的添加。理论上每生产 1 吨原铝需要氧化铝 1889kg，可由（2Al2O3+3C=4Al+3CO2↑）电解式计算得出。

但在实际生产中，工业氧化铝的纯度约为 98.5%，而且在加料过程中，会有飞扬损失，捞碳渣、换阳极时会有机械损失，所以在大型预焙槽上每生产 1 吨铝，需要 1930~1950kg 氧化铝。按一定或不同的加料时间间隔将氧化铝加入电解槽内，使其溶解于熔融电解质中。

大型预焙槽有中心加料也有边部加料的，边部加料需打开电解槽边部壳面，往往采取较长的加料间隔，通常为 2h 或更长一些。边部加料有两个作用，一是补充氧化铝，二是修补电解槽槽帮。中心加料电解槽下料的作用仅仅是补充氧化铝，加入的料应在短时间内完全溶解，不允许沉于电解槽槽底，因此，一是应选用性能好的氧化铝，二是将氧化铝浓度控制在较小的范围内，三是选择电解质运动最激烈处作为下料点，四是确定适宜的加料间隔。

操作工必须随时检查下料机械动作是否正常，管路是否畅通，各种阀门是否打开，动力压缩空气是否有足够的压力，料箱内是否有料，加料时，从出铝端处检查打壳下料效果。

电解质成分管理（CR）

电解质的各种成分在电解过程中都在变化着，对电解过程和生产效果都有直接影响，为获得好的技术经济指标，必须适时调整电解质成分，使其保持在设定的范围内。在正常的生产过程中，电解质成分管理及时调整电解质分子比和氟化钙含量，后者是装料时一次性加入的，在生产过程中，一般保持在规定范围内不需要添加，而电解质分子比却始终在变化着。因此，在争产生产过程中，为了电解质分子比保持在工艺操作规程要求的范围内，必须每隔三五天分析一次电解质成分，按分析结果及时补充 AlF3。但在新电解槽非正常生产期间，大都通过添加碳酸钠来提高电解质分子比。碳酸钠加入电解质发生如下反应：

3Na2CO3+2Na3AlF6=Al2O3+12NaF+3CO2

上式表明，加入 Na2CO3 即生成 NaF，并消耗冰晶石中的 AlF3，可更有效地提高分子比，而且 Na2CO3 的价格比 NaF 的低。（

1.3.11 电解槽的正常生产管理（二）

效应管理（AEB）

当代采用模糊控制下料的预焙槽，虽然能有效地限制突发阳极效应的发生，提高了效应受控率，但对电解槽槽温、

电解质成分与原铝水平等变化引发的突发效应和滞后效应却无能为力，仍需通过日常的生产管理使电解槽槽温稳定、铝水平恒定、电解质成分等控制在设定范围内。在生产中也可以根据效应状态判断电解槽槽况与采取相应的措施。

突发阳极效应很难避免，其主要原因是：

1.电压偏低，发热量不足，或铝水平偏高，散热量大，电解槽处于冷行程。发生阳极效应时电压往往大于 40V，应立即调高设定电压或降低水平，使电解槽恢复正常运转。

2.电解槽槽打壳加料系统发生故障，加料量不足，此种情况并不鲜见，应经常观察打壳加料系统的运转情况，及时排除故障，确保正常运转。

推迟发生或不发生阳极效应时，电解槽趋于热行程，其原因也有两种，一是阳极本身出现故障，如阳极脱落、底掌有炭渣、长包等，可采取有针对性的措施排除；二是电压偏高或原铝水平偏低，也会使电解槽趋于热行程，恢复正常运行的措施是调低设定电压或提高原铝水平。

阳极效应管理的根本在于提高操作技术与阳极品质，保持技术条件稳定，就可以取得满意的阳极效应管理。

原铝水平及抽铝量管理

电解槽内应总保持一定高度的原铝，以保护电解槽槽底阴极炭块、减少碳化铝生成，调节电解槽散热量和消弱电磁力，稳定铝熔体。原铝厚度通常称为铝水平或铝液水平高度，其主要作用是保证电解槽的正常运转和有高的技术经济指标。

铝水平偏高时，电解槽槽温较低，电流效率会高一些，若长期保持偏高水平，则会使电解槽槽底沉淀硬化，状况恶化，电阻增大，电解槽槽底返热，通过点电流下降，一部分电流从电解槽槽帮上口通过，降低电流效率，应及时调整，否则会继续恶化，甚至使电解槽进入冷行程。

当铝水平偏低时，阴极侧部散热量少，电解槽槽温会上升，槽底结壳会逐步变软，可在铝液运动挟带下回到电解质中，电解槽槽底过量沉淀也会消失，槽底得以清洁，电解槽槽膛也得以规整。然而电解槽槽底过热，会熔化槽帮，扩大槽膛，铝的损失上升，从而使电流效率下降。在电解槽槽膛严重畸形的电解槽上，若铝水平过低，在铝液中的电流密度集中处，过大的水平电流在磁场的作用下，会使原铝加速向上翻滚，电解槽会出现针振，甚至滚铝现象。

由以上分析可知，铝水平偏高或偏低都对电解过程不利，尤其长期在高铝水平运转会使电解槽出现大量沉淀和结壳。若产生此情况，在短时间内，很难使电解槽转入正常运行。因此，必须保持适宜的原铝水平，严防偏高偏低。为此，首先应采用正确、可靠的铝水平测量法，取得准确的铝水平数

据。常用铝水平测量法有一点测定法与三点测定法。目前在大型预焙槽上，铝水平的管理测量多采用一点法。

出铝量的管理是指怎样确定各个电解槽每次出多少铝，也就是如何确定指示量，应当满足出产多少铝就尽量出多少，以接近实际电流效率的产量为宜；日指示量之间的差尽量小；对失调的电解槽槽膛和技术条件有调整作用。实际工作证明，在其他技术条件稳定的情况下，当电解槽槽温呈上升趋势时，依据一点法测定的铝水平值适当将指示量调小一点，当电解槽槽温呈下降趋势时，则将根据一点法测定的铝水平值调大一些，这样可以使电解槽的运转正常稳定。

极上氧化铝厚度管理

极上氧化铝厚度是维持电解槽热平衡因素之一，是调节电解槽散热所采取的措施之一。通常，为了维持电解槽的热平衡，首先可变动铝水平，如不见效，可再调整电解槽电压。若技术条件保持稳定而外部条件（季节）有所变化，为了维持电解槽的热平衡，调整散热量，则可通过增减极上氧化铝厚度来实现。冬季宜加厚氧化铝厚度，对大型预焙槽以 18cm 为宜，而夏季要减薄极上氧化铝的厚度，以 16cm 为宜。

1.3.12 简说正常生产电解槽的技术参数

铝电解槽在经过启动与过渡期后，便进入正常生产阶段，它的各项技术参数均达到设定值，建立了稳定的电、热平衡制度。正常生产阶段可以延续 80~100 个月。电解槽在此期间在设计的电流制度下生产原铝，各项技术参数在计算机控制下稳定地运转，有良好的技术经济指标，其主要特征是：

1.从火眼中喷出强劲有力的火苗，火苗呈蔚蓝色或淡紫蓝色，或稍带黄色。电解质厚度 20~22cm，原铝层厚度 18~20cm。

2.槽电压稳定地保持在设定范围内。

3.电解质温度稳定在 935~965℃。

4.阳极周边电解质均匀地“沸腾”。

5.炭渣分离良好。

6.电解槽槽面结壳完整，电解质分子比在规定值内。电解槽侧壁的电解质、氧化铝结壳牢固，构成了良好的炉膛内形。

7.用铁钎插入电解槽内，数秒后取出，电解质与原铝界线分明。

电解槽正常生产监控的技术参数有：电解槽电流、电解槽电压、极距、电解温度、电解质成分、电解质及原铝的水

平、阴极电压降、阳极效应系数等。

电解槽电流。现代铝工业采用强大的直流电提取原铝。每一个电解槽系列都有额定的电流，因而就有额定的原铝产量。额定电流不是一成不变的，可根据电力供应情况与铝的销售情况调整电流。当前，强化电流生产已成为电解铝技术的一种发展趋势。不过，设计电流一旦确定就要尽可能地稳定，波动越小越好。

电解槽电压。电解槽电压是阳极母线至阴极母线之间的电压降，是由阳极压降、电解质压降、阴极压降、极化电压和母线电压降组成的，由与电解槽并联的直流电压表显示。电解槽电压对电解温度有明显影响，不能过高，也不能过低，否则会给电解槽的运转带来不利影响。

极距。阳极与阴极之间的距离称为极距，一般以阳极底掌到铝液镜面之间的垂直距离作为极距。极距范围之内既是电解中电化学反应区域，又是维持电解温度的热源中心，对电流效率和电解温度影响甚大。增大极距可减少铝的损失，提高电流效率；缩短极距，可降低电解槽电压，节省电能，但不能过渡缩短，否则铝的损失会增加，电流效率会降低。工业预焙槽一般保持 4~5cm 的极距。先进的法国 AP 系列电解槽的技术路线是：高电流密度、高电压、高电解温度、高电流效率，使电耗达到 13000kWh/(tAl)。因为电能效率η E＝η V（电压效率）×η i（电流效率）。因此，采用大一些的

极距，虽然电压有些损失，但却提高了电流效率。

电解温度、初晶温度和过热度。电解温度 Tb 就是指电解质温度，大型预焙槽的一般电解质温度为 935℃~965℃，比电解质初晶点高 5℃~20℃，初晶温度 TL 取决于电解质成分和电磁场影响。Tb 与 TL 之差成为过热度 Tsh，它与加料方式关系很大。边部下料槽每次加料多，吸收的热量也多，应保持较高的 Tsh，通常为 15~20℃；中部自动点式下料槽每次加入的氧化铝少，吸收的热也少，故 Tsh 较低，一般为 5~10℃。

电解质成分。电解质主要由熔融冰晶石和溶于其中的氧化铝组成，还含有少量的氟化钙、氟化镁、氟化锂等添加物。电解质的成分决定了其性质，而以冰晶石为主体的分子比对电解质物理性能影响特别大。分子比即是电解质的氟化钠与氟化铝的分子数量的比值，分子比等于 3 为中性，大于 3 的为碱性，小于 3 的为酸性，目前，多用低分子比的酸性电解质，人造冰晶石的分子比为 1.9~2.2。酸性电解质具有如下优点：初晶温度低，可降低电解温度；钠离子（Na+）在阴极上放电的可能性小；电解质的密度与粘度有所下降，流动性好，并有利于铝从电解质中析出；增大电解质-炭素和铝液界面上的表面张力，有助于炭粒分离和降低铝在电解质中的溶解度。

电解质和铝液水平。电解质水平和铝液水平是指它们在槽内的高度，它们对槽内热场和磁场平衡有一定影响，对电

解槽的平稳运转作用很大，其高低决定于电解槽槽型、母线配置、阳极电流密度、下料方式和操作制度、工作人员技术水平等。铝液水平过高或过低对电解热平衡都有影响：过高，散热量大，槽底会发冷，不易控制电解质水平，易产生沉淀和槽底结壳，伸腿过高过宽会给正常作业带来诸多困难，更不便于机械化和自动化操作；过低，阳极浸入电解质中太深，使阳极底下和周边温差加大，加大电解质循环，增加铝的损失，出现热槽，阴极铝液稳定性差，降低电流效率。

阴极电压降。阴极电压降是电解槽电压的组成部分，属于有功电压损失，由原铝（铝液）-炭块组间压降、炭块压降、炭块-钢棒间压降、钢棒压降五部分组成。阴极电压降高低不但说明电解操作所致的阴极恶化与良好程度，而且也是考虑电压能否保持最低限度的因素之一。工业电解的阴极电压降一般为0.3V~0.4V。由于阴极老化，阴极电压降会逐年有所上升，这是客观规律。

阳极效应系数。阳极效应是电解铝生产中，发生在阳极上的一种特殊的火花放电现象，此时，电解槽电压升高到约30V，信号灯明亮。它的发生通常与电解质缺氧化铝有关，加入氧化铝后，信号灯就会熄灭。因此，可以利用阳极效应判断电解槽的运转状态。每日分摊到每个电解槽的阳极效应次数称为阳极效应次数。发生阳极效应时会增加电能与物料消耗，若重叠发生，系列电流会下降，引起原铝减产，所以应

适当防止阳极效应的发生，当前对自动化程度高的预焙槽通常取阳极效应系数低于 0.1 次/(槽·日)。

电解铝工艺的技术参数从不同层面对电解过程产生影响，它们之间既互相联系又相互制约，协调好它们是一个环环相扣的系统工程，使各项参数统一在正常电解温度的前提下，发挥综合作用，电解槽才能平稳地运转，取得良好的经济效益与生产指标。

1.3.13 电流效率——铝电解的生命工艺参数（一）

电流效率是铝电解的一个最重要的生产指标，与铝的产量及电耗紧密相连，直接关系到铝的生产成本。因此，提高电流效率与降低电耗始终是铝行业工作者孜孜不倦研究和追求的课题与目标。

原铝理论产量

法拉第电解定律决定了电解铝的理论产量，任何电解的产量均不能越过这条底线。根据此定律，电解析出 1 摩尔当量的任何物质所消耗的电量均相等，为 96485C，这个电量称为 1F，又称法拉第常数。1C 电量等于 1A·S 的电量。析出物

质的多少与通入的电量成正比，即与通过的电流强度和通电时间成正比，工业中常用 A·h 表示。也就是说，1 法拉第电量相当于：1F=96485C=96485A·S=（96485/3600）A·h=26.8014A·h。

为计算方便，通常用电化量表示，即安培小时的电量理论上析出的物质量。铝的电化当量在工业上就是表示在电解槽通过 1A 电流经过 1h 电解，理论上所析出的铝质量。按法拉第第二电解定律，两极上析出物质量与该物质化学当量成正比，即与该物质的原子量与离子价数之比成正比。

铝的摩尔当量为 26.98154/3=8.9338（g）。

铝的电化当量为 k=8.9338/26.8014=0.3356[g/(A·h)]。

按法拉第定律，可以方便地计算出在一定时间内通入一定电流强度理论上析出的物质量，即理论产量为：M 理=kIt。公式中，M 理为理论产量，单位为克（g）；k 为电化当量，单位是 g/(A·h)；I 为电流强度，单位 A；t 为通电时间，单位 h。

例如，一台电流强度 300kA 的铝电解槽，24h 的理论产铝量为：M 理=0.3356×300000×24=2416320g=2416.32kg。

电流效率

电流效率是电解铝生产的重要技术经济指标之一，它表示通过电解的直流电有多少用于提取原铝，表明直流电流的

利用情况。从定义上讲，电流效率是指阴极析出金属的阴极电流效率，即有效析出物质的电流与供给的总电流之比。其计算公式为：电流效率=有效析出物质的电流/实际供给的电流×100%。

实际应用中，通常定义为输入一定的电量后，阴极产物的实际产量与理论产量之比。即：电流效率η =实际产量（M实）/理论产量（M理）×100%。

在生产管理中，通常通过电解槽消耗氧化铝的多少计算电解槽的电流效率，称为氧化铝消耗电流效率。这种电流效率虽不精确，但可用于电解槽的物料平衡管理和判断电解槽运转状况。

计算实例:1台300kA电解槽,30d共生产66680kg原铝，月平均电流强度298526A,可计算此电解槽当月的电流效率：η =66680/(0.3356×298256×30×24×10-3)×100%=92.52%。

在计算电流效率η 时，通常取4位有效数学。

当前，铝工业的电解槽电流效率为92%~96%，即有4%~8%的电流损失，损失的电量是一个惊人的数字，由此可见，提高铝电解生产过程中的电流效率是节能降耗的一条非常重要的途径。

2013年，中国的原铝产量约25500kt（笔者的统计，国家统计局的统计为22046kt）如果平均电耗按13500kWh/(t

铝)，电流效率按 93.5%计算，则损失的电量高达 240×108 kWh，约相当于一座 300×104 kWh 电厂一年发的电全部付之东流，白白浪费了。

1.3.14 电流效率——铝电解的生命工艺参数（二）

对设计定型的电解槽来说，两大因素影响电流效率：工艺参数和管理。前一因素指生产中的各项技术，如电解温度、电解质成分、电解质水平和铝水平等；操作管理因素指各项操作的质量、实现和维持良好技术条件的能力等。要想获得较高的电流效率，必须在这些因素上面下狠功夫，做好细致的工作。但是就算工作做得再好，也不能超越极限电流效率（99.6%）。

良好的技术参数

必须根据电解槽槽型容量、物理场设计、加料方式和控制水平确定电解槽的技术参数，以确保电解槽的稳定运转，获得高的电流效率。

电解质成分

电解质成分对电流效率的影响很大，其演变历程促进了

电流效率步步高升。20 世纪初至 30 年代，电解质分子比多采用弱碱性电解，即η（NaF）/η(AlF3)大于 3。这时期的电流效率大都在 80%；20 世纪 40 年代至 50 年代，电解质分子比改用弱酸性电解质，并开始用氟化钙作为添加剂，电流效率提高到 85%；20 世纪 60 年代，采用氟化钙、氟化镁及氟化锂添加剂，使电流效率有明显提高，达到 88%~90%。

20 世纪 70 年代至今,随着中间下料大型预焙槽的应用，并使用了分子比在 2.5 以下的强酸性电解质，以及计算机控制技术的普遍应用，加料时间间隔的缩短，加料误差的下降与效应的发生等都得到了有效控制，干法净化新技术得到推广，电解质分子比降至 2.1~2.3，电流效率提升到 93%，最高已经超过 96%，当然这仅仅是个别的。

添加剂的选用。可根据下料与加料方式选择与确定电解质成分，对于边部下料或周期较长的中间下料预焙槽，每次下料量较大，易在电解槽槽底形成沉淀，对电解槽的正常运转有较大的影响，因而把分子比降得过低，否则电解槽槽温太低。可将分子比控制在 2.5~2.8，添加剂总量（CaF2、MgF2 或 LiF）为 5%~8%，也可以取得较高的电流效率。

氧化铝浓度。通常，氧化铝含量增加时，铝损失减少，电流效率上升。但是，若 A1203 浓度高，电解液的粘度大，炭渣不易分离，电导率低，易产生沉淀。在生产中，氧化铝

浓度很难保持稳定,大型预焙槽的浓度可控制在 1.5%~3.5%，主要决定于加料方法和操作制度。

电解温度

电解质温度和过热度对电解槽的运转有着决定性的影响。温度升高，铝的溶解损失增加，电流效率下降。实践表明，温度每升高 10℃，电流效率降低 1%~2%。因此，电解槽易保持低温运转，半连续中间点式下料大型预焙槽电解槽温度宜控制比初晶温度高 5℃~10℃，在正常生产时，电流效率可达 94%~96%；中、小型电解槽一般正常的电解温度高于初晶温度 15℃~20℃。

铝水平与电解质水平

通常，电流效率随着铝水平的提高而上升，铝水平是调节热平衡的有效措施，200kA 大型预焙槽的铝水平出铝后保持在 18~20cm，可获得较高的电流效率，保持电解槽的平稳运转才能有高的电流效率。

在铝的电解过程中，电解质起着溶解氧化铝、导电和保持热量的作用，非常重要。当前，大型预焙槽的电解质水平宜保持在 200~220cm,过高或过低都对电流效率的提高不利。

加强管理 精心操作

在生产中，务必要加强管理，及时排除各种干扰因素，使电解槽保持在最佳的技术条件下平稳地运转，才能在长期内建立起稳定的热平衡和物料平衡，才能获得较高的电流效率。

对各项作业操作如换极、出铝等必须严格按照标准执行，确保操作质量，保证电解槽平稳运转。电流效率是铝电解的重要指标，考核员工管理和技术水平高低的标志，在生产中，必须针对具体生产条件和设别状况，探索出切合实际的管理方法与操作经验，严格管理、精心操作，使电解槽始终处于最佳运转状态，方可获得最佳的电流效率和技术经济指标。

1.3.15 重熔用铝锭与细晶用铝锭

牌号	稀土总量，%	杂质总和（不大于），%	Al，%
Al-RE-1	0.05~0.12	0.3	其余
Al-RE-2	0.13~0.2	0.3	其余
Al-RE-3	0.21~0.3	0.3	其余

牌分	Ti，%	Al，%
XAl99.7A-1	0.01~0.05	铝的质量分数为100%与Ti的质量及等
XAl99.7A-2	>0.05~0.1	
XAl99.7A-3	>0.1~0.15	大于0.1%的所有杂质质量分数总和的差
XAl99.7A-4	>0.15~0.2	

重熔用铝锭是指用氧化铝-冰晶石熔盐电解法生产的原铝经净化处理后铸造而成的锭块（ingot），供配制挤压圆锭（billet）与轧制平轧产品用的扁锭（slab）以及供其他用途用。不过需要指出的是，原铝是指从电解槽中抽吸出来的液态铝。细晶用铝锭是在电解铝生产设施和生产工艺不变的条件下，通过电解质中添加一定比例的氧化钛，利用铝-钛共析原理生产的钛的质量不大于 0.2 的晶粒细化用的铝锭。在标准 YS/T489-2005 中，将这种锭成为细晶铝锭，笔者认为最好称为“细晶用铝锭（grain-refining aluminium ingot）”，因为细晶铝锭还可以体会为“晶粒细小的锭（grain-refined aluminium ingot）”，同时还可以与“重熔用铝锭”一词一致。

电解铝厂可以用原铝直接生产重熔用铝锭与细晶用铝锭，也可以向混合炉内添加合金化元素，配制成合金熔体铸造挤压用的圆锭与轧制用的扁锭，可省去重熔，节能减排效果显著。

重熔用铝锭

按 GB/T1196-2008，中国生产的重熔用铝锭按化学成分为 8 个牌号：A199.90、A199.85、A199.70、A199.60、A199.50、A199.00、A199.7E、A199.6E。Al 后面的数字代表铝的最低的质量百分数字含量，“E”表示电工用的，用于配制电工合金。GB/T1196-2008 规定：每块铝锭质量为 20kg±2kg 或 15kg±2kg，但对锭型未作统一规定，国外生产的重熔用铝锭还有几十千克与几百千克的，这种大锭呈 T 形（T bar）。

在中国铝市场上在交易一种牌号为 A00 的锭，它的成分相当于 A199.70，这是苏联时期用的牌号，建议不要再用了，A199.70 不但是 GB 规定的牌号，而且与 ISO 的牌号、伦敦金属交易所（LME）的牌号、除俄罗斯及中国以外其他各国的重熔用铝锭的牌号相当。

重熔用铝-稀土合金锭

中国一些铝电解厂还生产一类名为重熔用铝-稀土合金锭，按 YS/T309-1998 的规定，它是用氧化铝-稀土化合物-冰晶石熔盐电解共析法生产的，共有 3 个牌号，它们的混合稀土含量见表 1。

铝-稀土合金锭是中国铝电解厂生产的有特色的重熔用锭。

细晶用铝锭

通过电解质中添加氧化钛，采用电解法生产的用于细化晶粒的重熔用铝锭，其中钛的质量分数不大于 0.2%，并且经晶粒细化能力试验，晶粒平均直径≤350μ m。晶粒细化铝锭按化学成分有 4 个牌分：XA199.7A-1、XA199.7A-2、A199.7A-3、A199.7A-4。它们的含钛量及色标见表 2。

用电解法生产的细晶用铝锭工艺简单，成本较低，对合金晶粒有较强的细化能力，用其配制的 6063 合金锭的低倍组织晶粒尺寸小于 2 级；可挤压性能高；挤压材有良好的表面处理性能，力学性能不低于用 Al-5Ti-1B 中间合金细化材料的力学性能；与添加 Al-5Ti-1B 熔炼的 6063 合金相比，其有更好的时效特性，达到高强度的时间短，有可较长时间保持高硬度，不宜过时效，便于组织生产；细晶用铝锭与 Al-10RE 中间合金联合，或细晶铝锭、Al-10RE 与 Al-5B 中间合金联合细化熔炼的 6063 合金抗拉强度 Rm 与添加 Al-5Ti-1B 的相当，而伸长率却高 20%，并具有更优异的表面性能。

用细晶用铝锭熔炼的 ZL101、ZL101A（A356）合金的铸态抗拉强度 Rm 为 200N/mm2、伸长率达到 7%，均高于用常规工艺生产的 A356 合金铸件的性能。细晶用铝锭熔体即使在 740℃保温 12 小时，晶粒也未明显粗化；有良好的遗传性，

经过 4 次重熔后，晶粒平均尺寸没有明显变化；钛的实收率高，细晶用铝锭在熔炼过程中，钛的实收率可达 80%~90%。

1.3.16 石油焦煅烧

在炭素制品生产中，煅烧是一道关键工序。石油焦和无烟煤的煅烧质量对焙烧成品率与最终炭素制品的性能指标的影响很大，煅烧是将各种固态炭质原料——生石油焦或无烟煤在隔绝空气条件下进行高温热处理的过程，煅烧在炉内进行。采用什么型式的煅烧炉决定于原料类型、工艺要求、生产规模等因素。煅烧温度是决定产品品质最主要的因素。一般，石油焦的煅烧温度必须高于 1200℃，无烟煤的应不低于 1350℃。

（1） 煅烧目的

煅烧的目的是排除原料中的挥发分与水分，提高原料的密度、强度、抗氧化性和电导率等。石油焦与无烟煤含有 7%~18%的挥发分、3%~10%的水分。原料煅烧越充分，对产品质量越有利，密度可以显著提高，电阻率能够大大降低，强度明显上升，同时也提高了石油焦的化学稳定性和抗氧化性。石油焦煅烧前后的性能对比见表 1。

（2） 煅烧设备

炭素原料煅烧炉窑有：罐式炉、回转窑、电炉、回转床炉。对石油焦的煅烧过程，中国都是在炭素厂进行，而国外85%以上的石油焦是在炼油厂进行煅烧的。回转窑是用的最多的，同时与其他工业用的在结构上相似，但通常配备二次、三次送风装置，以使石油焦中的可挥发分充分燃烧，并可调节窑温。回转窑结构简单，产能较大。回转窑容量可大可小，截至 2013 年，中国最大的回转窑是山西华泽铝电有限公司的回转窑，该回转窑内径 3.43m，长 67m，2005 年投产，其他窑的长度为 36~55m，内径 1.7~2.85m。国内外煅烧炉技术对比见表 2，由表 2 所列数据可见，与国外先进水平相比，中国回转窑还是存在一些差距的。

煅烧后的石油焦通过直接喷淋雾化水冷却，使高温煅烧后石油焦迅速冷却下来，既保证了冷却效果，又降低了烧损和节约了用水量。然后进行破碎、筛分和储存于各配料仓。

1.3.17 炭素阳极组装

铝用阳极是由焙烧炭块、钢爪和导电铝杆组成的，通过浇注磷生铁与爆炸焊将它们连结成有一定力学强度、较小比电阻的整体，成为铝电解的阳极或称之为预焙阳极。预焙阳极大小决定于铝电解的生产工艺技术条件等。

导杆组架与阳极炭块的连接由磷生铁完成，这种磷生铁由硅铁、锰铁、磷铁、铸铁、返回铁环等按不同比例配料后熔化而成，其熔体有良好的流动性，而凝固后的冷态磷又有较大的脆性，同时有相当大的热膨胀性、低的电阻率。在熔炼时，应严格控制磷铁的化学成分，碳是影响磷铸铁凝固过程、组织和力学性能的重要元素，熔体内碳的饱和度越低，则炭块中的碳向生铁内扩散也就越快越多，即吸碳速度越快，硅和磷对铁熔体吸碳有阻滞作用，但锰则可以促进吸碳；硅可以提高铁熔体的稳定性，对铸铁组织与性能改善都有益，若含硅量大于 3%，则基体组织为稳定的铁素体，同时会在铸铁表面形成含有硅酸铁的薄而致密的氧化膜，延缓铸铁在高温下的氧化速度，缺点是略使磷生铁的强度下降；锰使珠光体稳定，阻碍石墨化进程，强化基体组织；磷使铸铁的共晶点左移，其影响程度与硅的大体相当。

应严格控制组装阳极用的磷生铁的碳、硅、锰、磷、硫的含量，以确保炭块与导杆组架的连接体有良好的导电性与较高的力学性能，以及熔体有良好的流动性，而且凝固后在室温下又有相当高的脆性。磷生铁的化学成分如下：

组装是生产铝用预焙阳极的最后一道工序，其主要任务是根据预焙槽导电设计及工艺要求，把焙烧后的合格阳极炭块、钢爪和铝导电杆用磷铁熔体及爆炸焊连成为具有一定力

学强度、较小电阻率的整体。虽然由于电解槽的容量不同，预焙阳极的形状与规格也各异，但组装工艺却相同。

在生产中，电解后的残极导杆和钢爪经校正后可循环使用。电解返回的残极在组装工序进行极上电解质清理、残极压脱、铁环压脱等，对残极电解质进行破碎与筛分。此外，还需破碎成形与焙烧的废品，返回作为配料原料。

在组装新导杆（含铝杆与钢爪）和焙烧炭块时，在导杆钢爪头部涂以石墨后浇注 1400℃~1500℃的磷生铁熔体，使它们连成一体，组装宣告结束。

涂石墨也是一道重要的工序，石墨液的配制是保证涂石墨质量的关键，由于它对电解时导杆与炭块之间的电压降、钢爪的使用寿命、铁环压脱等的影响，因此应做好石墨液配制，其浓度为 30%~40%，以废机油与液压油混合油作为溶剂，也可以用煤油作为溶剂。

1.3.18 混捏和成形

生阳极的典型制备工艺：储存于各配料仓中的石油焦粒料和粉料、残极粒料，经各自的连续配料秤按配方比例连续定量送入四轴预热螺旋预热至指定温度，然后送至设备中进行搅拌，使之达到均匀。这种使骨料的各种组分，各种粒度及粘结剂达到均匀混合，以获得可塑性糊料的工艺过程称为混捏。

从混捏机出来的合格糊料进入糊料冷却机，待冷却后被送至振动成形机成形。成形后的生阳极经测高、计算体积密度、打印记号后进入悬挂式输送机，送至冷却水槽，冷却后经链板式输送机送至炭块转运站储存。废块经辊道输送机、叉车送至返回料处理工序，用铲斗车将废糊送到返回料处理工序。

（1）目的

混捏目的之一是使各种不同粒度的骨粒均匀混合，使中小颗粒填充于大颗粒空隙内，中小颗粒之间的空隙则由更小的颗粒和粉粒填充，以提高糊料的密实度。目的之二是使干料和粘结剂混合均匀，使粘结剂均匀地覆盖在骨料颗粒表面，并部分渗透到颗粒孔隙内，形成具有塑性的糊料，以利于成形。

混捏方法可分为冷、热混捏两类。目前，热混捏得到更多的应用。

（2）影响混捏品质的因素

影响混捏品质的首要因素是温度。温度过低时，沥青对骨料粒子的润湿性差，会造成混捏不匀，甚至出现夹生料，增加电极负荷。一般用中温沥青时的混捏温度为 145±5℃，

用高温沥青时的温度为180±5℃。目前，90%以上的大规格阳极生产厂都采用改质沥青作粘结剂。

影响混捏品质的其他因素有：混捏时间，骨料表面特性，粘结剂粘度及用量，煤沥青的改质及表面活性剂的使用，混捏机类型及结构，装料量。使用高软化点的改质沥青作为粘结剂已成为铝用炭素行业的发展方向之一，而中国大多数炭素企业仍在使用中低压蒸汽，已难以满足这类沥青的熔化与加热要求。在这些因素中，搅拌时间最重要，对混捏料品质有显著影响。

（3）设备

生产铝用炭素制品常用的混捏设备是双轴搅拌混捏锅和单轴搅拌连续混捏机。生产阴极底块、侧块及筑炉糊采用前者，而生产预焙阳极则采用后者或者强力间歇式混捏机。

为了得到一定形状、尺寸、密度和力学性能的炭素制品，必须将混捏好的糊料成形。成形是通过一定的压形方式获得有规定形状尺寸和性能生坯的过程。成形工艺很多，诸如模压法、挤压法、振动法和等静压法等。预焙阳极生坯多用振动法制造，而阴极炭块生坯则多是挤压的，也可以用振动法成形。

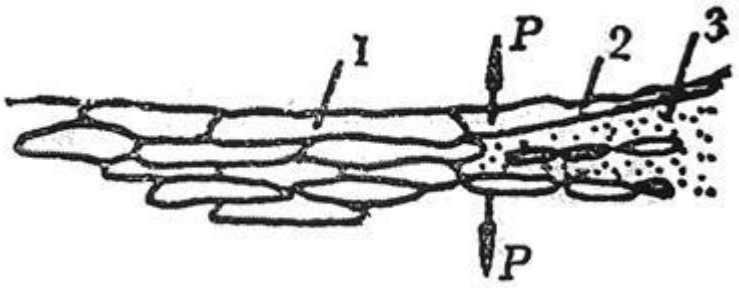
铝电解用的大规格阳极生坯用挤压法生产需要用大型挤压机，投资大，不经济，同时不能挤制异形块，只能用振动

成形法生产，这种先进的成形工艺是上世纪 60 年代后期开发的。

振动成形时，成形模固定在振动台上，糊料加入模内，重锤向糊面施加压力，开动振动台，使糊料收到振幅小而频率高的振动，在强烈振动下，糊料颗粒间和糊料与模壁间的摩擦力减小，颗粒移动并合理排布，成为体积密度和性能上都可与模压或挤压件的相当的大尺寸产品。当前，可用此法生产最大尺寸为 1570×750×580mm 的阳极炭块。振动台的振动频率可达 1400~2000 次/min，重锤施压的压力为 0.1~0.25N/mm2。

另一种成形工艺为挤压法：糊料在压力作用下，通一定形状的模孔发生塑性变形而被压实，成为具有规定断面与一定长度的生坯，是一种高效的成形工艺，挤压成形炭块的轴向密度既均匀又稳定，适合于生产长条形的棒材与管材，铝用阴极炭块多是用此法生产的。挤压成形的工艺过程可分为凉料、装料、预压、挤压、冷却五道工序。挤压成形机有油压的与水压的，当前多采用油压的，通常有一台 30MN 的立捣卧压成形机就足够了。

1.3.19 剥落腐蚀与缝隙腐蚀



1——被拉长的晶粒；P——腐蚀产物引起的拉应力；2——腐蚀产物上或之间的成层金属；3——疏松的腐蚀产物。

图 1　铝合金剥落腐蚀示意图

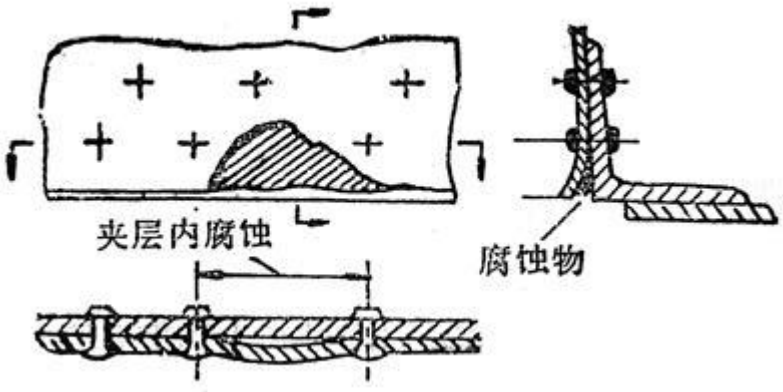


图 2　铆缝腐蚀示意图

剥落（层状）腐蚀

剥落（层状）腐蚀是晶间腐蚀的一种特殊形式，它沿着晶界发展，一层一层地腐蚀下去（图 1），故又称成层腐蚀或片层腐蚀。具有晶间腐蚀的铝合金经过压力加工后，晶粒呈宽而长的扁平状，在一定的条件下发生晶间腐蚀时，腐蚀沿

着平行于材料表面的平面呈阳极性的晶间或晶界发展，破坏了晶粒间结合，又由于腐蚀产物体积大于被腐蚀金属体积，于是形成拉应力，使腐蚀产物上的金属一层一层地向上翘起。在个别情况下，1.3mm 厚的板材发生剥落腐蚀时的胀大厚度可达 25mm。

1XXX 系合金、3XXX 系合金材料在任何状态下即使在海水中也不产生剥落腐蚀。高度冷变形的 5XXX 系合金厚板、冷加工量的 2XXX 系合金薄板与 7XXX 系合金薄板都会发生剥落腐蚀，在海洋环境中尤甚，可是方向性不强的厚度≥50mm 的厚板则无剥落腐蚀。过时效处理能有效地控制 7XXX 系超硬铝材料的剥落腐蚀。

防止或减缓剥落腐蚀（晶间腐蚀）的措施：

选用抗晶间腐蚀强或无的铝合金；

确定最佳的加工工艺；

选择合适的热处理与人工时效规范，如过时效处理；

在确定焊接、胶接与铣削工艺时，不在容易产生晶间腐蚀和剥落腐蚀的温度下处理等。

Al-Cu-Mg(2XXX 系)合金发生剥落腐蚀的情况最多,Al-Mg（5XXX 系）合金、Al-Mg-Si（6XXX 系）合金和 Al-Zn-Mg（7XXX 系）合金也时有发生。

缝隙腐蚀

缝隙腐蚀是发生在两个金属表面之间或金属与非金属表面或沉积物之间的缝隙内的一种强烈的局部腐蚀，船舶舰艇与海洋设施最易发生这种腐蚀。产生缝隙腐蚀的缝隙必须宽到液体能流入，但又必须窄到能维持少量静滞溶液。缝隙腐蚀进行时，缝外金属很少腐蚀，甚至不发生腐蚀。缝隙在纵深处形成与发展，破坏性特大。缝隙宽度＞25μ m 时，腐蚀速度显著下降。1XXX 系合金、3XXX 系合金、5XXX 系合金的缝隙腐蚀比 2XXX 系合金、7XXX 系合金的轻得多。

图 2 是海水浸入铝板工件接缝，造成缝隙腐蚀，使铆钉脱落，结构破坏。中国有一艘铝合金艇，由于海水溅入舱内，流入外板与骨架缝隙内而产生严重的缝隙腐蚀，腐蚀产生氢氧化铝的膨胀力使外板鼓起，形似蚌壳（图 3）。

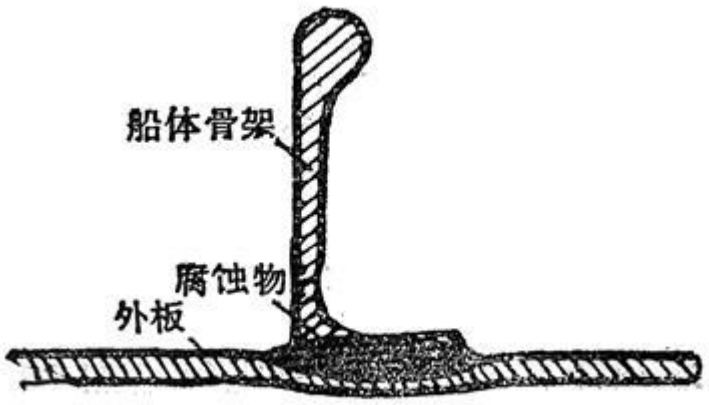


图 3　船体骨架与外板间的缝隙腐蚀

水翼艇辅助水翼钢支架复板贴合在铝合金外板上，如贴合面不严密，铝板特易腐蚀。高速铝合金艇艉轴架支承处呈凹状，轴架顶板嵌于其中，接蚀往往不其严密，经常观察到凹坑边缘有严重腐蚀。

在铝件上涂覆防腐层或镀一层锡、银、金或进行磷化处理后，往往在铝表面上观察到丝状腐蚀，这是一种特殊的缝隙腐蚀。丝状腐蚀是一种特殊的腐蚀类型，在透明漆膜下面，腐蚀产物印迹呈网络状。在裱纸铝箔表面也发现丝状腐蚀，影响这种腐蚀最重要的因素是大气相对湿度，长期停放于潮湿洞中的飞机蒙皮漆膜下也常常发生丝状腐蚀，尽管这种腐蚀对结构强度无影响，但是有损外观。利用低透水率涂层可防丝状腐蚀。

防止或减缓缝隙措施如下：

以胶接或对焊代替铆接、螺接；

不用吸湿性的垫片或填料；

设计时力避窄缝结构和滞流区，使水分或污染物排泄顺畅；

采用带有缓蚀剂的材料密封缝隙或采用湿装配；

采用连续焊，并且保证完全焊透，最好采用自动摩擦搅拌焊（FSW）。

1.3.20 锻造硬铝性能

表 1 典型锻造硬铝的合金元素含量（W%）

合金	Cu	Mg	Fe	
2A70	1.9~2.5	1.4~1.8	1~1.5	
2A80	1~2.5	1.4~1.8	1.1~1.6	
2A90(2018)	3.5~4.5	0.4~0.8	0.5~1	1

温度，℃	抗拉强度 R_m N/mm²	屈服强度 $R_{p0.2}$ N/mm²
-196	500	412
-70	420	353
20	387	343
125	363	333
150	363	323
175	323	294
200	304	255
250	235	186

1934 年 2024 合金的成分在美国铝业公司匹兹堡技术中心被正式确认，并取得专利公诸于世，定名 24S 合金，1954 年四位数字变形铝合金牌号开始启用，改称 2024 合金，成分未变,2014 年 2824 合金注册。2024 合金的主要合金元素(Cu、

Mn、Mg）总含量为 5.3%~7.6%，而 2824 合金的 5.3%~6.8%，它们的含量下限相等，而 2824 合金上限含量却稍低一些，因而它们的常规力学性能（抗拉强度 Rm、屈服强度 Rpo.2、伸长率 A）相等，而由于 2824 合金的杂质（Si、Fe、Cr、Zn、Ti）的最大总含量为 0.64%，仅相当于 2024 合金的最大总含量 1.5%的 42.7%，因而 2824 合金杂质相的含量少，有更高的断裂韧性、抗裂纹扩展能力、疲劳强度、耐损伤能力，成为一种应用广泛的民机结构材料。

后来在 Al-Cu-Mg 基础上发展出来的，是含有 Fe 与 Ni 的耐热铝合金，也可以称为高温硬铝，多用于锻压在高温下工作的锻件，故又称为耐热锻铝，纳入标准 GB/T 3190-2008 的合金有 2A70（相当 2618 合金）、2A80、2A90 合金。它们的化学成分和相组成极其复杂，合金元素含量见表 1。

在这类硬铝中，最早面世的是 2018 合金，与俄罗斯的 AK2 合金、英国的 RR56 合金和美国的 2018 合金相当，成型于上世纪三十年代初，是在 2017 合金基础上发展起来的，加入了 Fe、Ni 和 Si，除了形成强化相 S 和 Mg2Si 外，Fe 和 Ni 还按 1∶1 的比例形成 FeNiAl9 化合物，多余的 Ni 和 Cu 形成 AlCuNi 或 Al3（CuNi）2 化合物。这些化合物均不溶于α 固溶体，无时效强化作用，但是有高温弥散强化作用，有利于耐热性提高。它可以进行热处理，固溶处理温度 510~540℃，

时效规范（150~180）℃/（6~16）h。该合金特点是 Ni 含量高，热导率高，热膨胀系数较小，适于制造内燃机活塞。它的不足之处是，FeNiAl9 和 AlCuNi 等的含量多，热塑性与热强性比其他两种合金的低。

2A70 合金的 Ni 含量降低了，与 Fe 的含量相等，恰好全部形成 FeNiAl9 化合物，没有多余的 Ni 形成 AlCuNi 化合物，也无多余的 Fe 形成 Al7Cu2Fe，不仅克服了 2A90 合金的缺点，而且降低了合金的 Cu 含量，减少了含 Cu 相，合金的耐热性因而得到提高。另外，降低了消耗 Cu 的 Fe 和 Ni，会有更多的 Cu 溶入α 固溶体，又增加了形成 S 相的 Mg 含量，因而耐热性得到进一步提高。

2A70 合金的 Si 含量≤0.25%，是杂质，主要相组成为α+S+FeNiAl9，不过可能由于 Fe 或 Ni 偏离 1∶1 的含量比，而出现少量 Al7Cu2Fe 或 AlCuNi 化合物。向合金中加入 Ti 是为了细化晶粒和提高塑性。该合金耐热性的提高是由于 S 相的时效强化和 FeNiAl9 相。2A70 合金与美国的 2618 合金、英国的 RR58、俄国的 AK4-1 合金相当。

提高 2A70 合金的 Si 含量便形成 2A80 合金，于是它含有更多的 Mg2Si，Si 还能促进 GBⅡ区的形成和 S 相的均匀分布，

不仅提高了在 120~125℃的蠕变极限，而且其室温强度也比 2A70 合金的高，不过 Si 含量提高后，合金的高温强度却比 2A70 合金的低。2A80 合金与英国的 RR59 合金、俄国的 AK4 合金相当，其主要相组成与 2A70 合金的相同。

2A70 与 2A80 合金没有自然时效能力，只能进行人工时效，它们的固溶处理温度相同，为 525~540℃，但 2A70 合金的人工时效规范为（165~180）℃/（10~16）h，2A80 合金的为（185~195）℃/（8~12）h。

2A70 合金的热强性及热塑性比 2A80 及 2A90 合金的高，用于锻压压气机和鼓风机涡轮叶片和其他耐热零件，2A80 合金则主要用于锻压航空发动机活塞。

随着超声速飞机的发展，迫切需要能在 120℃工作 50000h 的蒙皮材料，但是 2024 合金满足不了这一要求，而 2618 这一合金板材可基本满足这一要求。2618-T6 合金厚 1.5~2mm 板材在不同温度的力学性能见下表。

1.3.21 铆钉虽小作用大 一些短板亟待补（上）

表 1 铆钉线尺寸及偏差(GB/T3197)

直径，mm	允 普通级
1.60	−0.04
2.00，2.27，2.30，2.58，2.60，2.90，3.00，3.41，3.45，3.48，3.50，3.84，3.98	−0.05
4.00，4.10，4.35，4.40，4.45，4.50，4.75，4.84，5.00，5.10，5.23，5.27，5.50，5.75，5.84，6.00	−0.08
6.50，7.00，7.10，7.50，7.76，7.80，8.00，8.50，8.94，9.00，9.50，9.76，9.94，10.00	−0.01

表 2 热处理不可强化铝合金铆钉线材的抗剪强度(GB/T3

合金	状态	抗剪强度
1035	HX8	≥
5A02	HX8	≥1
5A06	HX8	≥1
5B05	HX8	≥1
3A21	HX8	≥

表 3 热处理可强化铝合金铆钉线材的最低抗剪强度(GB/T3

合金	状态	直径，mm	抗剪强度 R
2A01	T4	所有	190
2A04	T4	≤6.0	280
		>6.0	270
2B11	T4	所有	240
2B12	T4	所有	270
2A10	T4	≤8.0	250
		>8.0	240
7A03	T4	所有	290

注：因为 2B11、2B12 合金铆钉在铆接时会发生塑性变形，对时
响，其设计抗剪强度 R，为：2B11 合金的 220N/mm²，2B12 合金的 250

在焊接工艺未面世前，所有工件的连接都是铆接的，它是一种非常古老的工件连接工艺，虽然它有四五千年的历史，但至今仍是主要的连接工艺之一，不可或缺。特别是在航空航天器制造中，铆接工作量非常大，据称 C919 大飞机的铆钉用量以百万个计，支线客机 ARJ21 的铆钉用量也多达五六十万个。

航空器的主要结构材料为铝合金，商用飞机的铝制结构与零部件净质量占飞机总净质量的 60%~80%。连接铝结构与零件的铆钉必须用电极电位差最小的铝合金制造，当然最好是用同种合金的铆钉，如果不能用同种合金铆钉，也应用电极电位尽量相近合金，以防异种金属和/或合金之间的接触腐蚀。

铆钉是用线材制的，为了制造航空器及其他铝制装备，

铝工业及其他部门研发与加工制造了一系列铆钉线专用铝合金。铝结构用的铝合金材料有两类：热处理不可强化铝合金及热处理可强化铝合金。这些专用铆钉铝合金大都已纳入国家标准 GB/T3197。

铝及铝合金铆钉线材尺寸

中国铝合金铆钉线材生产始于 1956 年 11 月东北轻合金有限责任公司（当时名为哈尔滨铝加工厂，代号一零一厂）的建成投产，铆钉线材生产能力 1000t/a；1968 年 9 月又建成了中国铝业西北铝加工分公司（当时厂名西北铝加工厂，代号一一三厂），生产能力 300t/a，但是航空航天器柳钉线材仍主要由于上述两厂生产，有些铆钉及线材是进口的或外商在华独资企业提供的，如铝－锂合金铆钉等。铝及铝合金铆线材尺寸及其尺寸偏差见表 1（GB/T3197）。

抗剪强度

铆钉在工作中受到的载荷主要为剪应力，因此，铆钉线材必须具有一定的抗剪强度。热处理不可强化的工业纯铝及铝合金铆钉线材的标定（GB/T3196）抗剪强度见表 2，而经固溶处理及时效的铝合金铆钉线材的抗剪强度见表 3。

热处理不可强化铝合金铆钉线材

1035 工业纯铝

1035 工业纯铝铆钉用于铆接工业纯铝制造的构件，在航空器中用于连接通风系统零部件、电线保护导管件、垫片等。在铝制化工设备中有较多的应用。1035 工业纯铝是一种应用广泛的纯铝，它的成分（质量%）：Cu0.05、Mn0.05、Mg0.05、Zn0.10、Ti0.06、V0.05、(Si+Fe)0.65，其他杂质单个 0.03、Al99.35，高压输电线都是用此种铝拉制的。

3A21 合金

3A21 合金是一种 Al-Mn 系不可热处理强化的变形铝合金，应用广泛，半成品种类齐全，板、带、箔、管、棒、型、线、锻件都有，GB/T3196 与 GJB2055 对铆钉线材性能、成分等作了规定，它的合金元素含量为 1.0%Mn~1.6%Mn，线材直径 1.6mm~10.0mm，在 HX8 状态成捆供应，抗剪强度 Rc≥69N/mm2。合金的强度低，但比工业纯铝的高，冷变形可以提高其强度，有很高的抗蚀性，与工业纯铝的相当。在不平衡条件下的凝固组织为α －Al、Al12Mn、Al6Mn、Al4Mn，在退火时 Al4Mn 转变为 Al6Mn。Al12Mn 是亚稳定的，温度≥550℃时完全消失。另外，含 Mn 的过饱和固溶体分解时，初期形成的 Al12Mn 转变为稳定的 Al6Mn。合金中的杂质 Fe 可形成不溶解的 Al6（FeMn）相，Si 可能产生 Al10Mn3Si（T）相。在航空器中用

于制造油箱、汽油滑油导管、冷冲压件、受力小的零件，在民品、通用设备与建筑中有着大量应用。

5A02 合金

5A02 合金是一种热处理不可强化的 Al-Mg 系合金，相当于国际上的 5052 合金，强度低，塑性高，冷变形可以提高其强度，但降低塑性，抗蚀性高，可焊性好，适宜在海洋环境中工作，冷作硬化对合金抗蚀性及可焊性无影响，材料退火温度 350℃~410℃，GB/T3196、GJB2055 对 5A02 合金铆钉线材的有关事项作了规定，线材直径 1.6mm~10.0mm，HX8 状态成捆供应。退火状态 5A02 合金组织由α －Al、β 相（Al3Mg2）组成，杂质铁和硅可形成 Al3Fe 和 Mg2Si，还可能有 AlMg2Mn 和 AlFeSi。线材抗剪强度 Rc≥1180N/mm2。

5A05 合金

5A05 合金：一种含 Mg 量较高（4.80%~5.50%）与含有 Mn 的（0.30%~0.60%）不可热处理强化的变形铝合金，冷变形可提高强度，降低塑性，退火状态材料的塑性高，半冷作硬化状态材料的塑性中等，抗蚀性高，按 GJB2055 铆钉线材在 HX8 状态成捆交货，直径 1.6mm~10.0mm，抗剪强度 Rc≥166N/mm2。该合金通常用于制造要求有高的工艺塑性和耐腐蚀的承受中

等载荷的焊接管道、液体容器等，铆钉用于紧固零部件。5A05合金的抗蚀性与第二相β （Al3Mg2）的分布形态密切相关，当β 相连续分布于晶界，合金就有相当大的晶界腐蚀和应力腐蚀开裂敏感性，但是经适当的退火使β 相呈弥散状态均匀地分布于晶界和晶粒，就可以显著提高合金的抗蚀性，甚至消除对这两种腐蚀的敏感性；冷作硬化、焊接、使用中的长期加热会降低合金的抗蚀性，甚至会引起剥落腐蚀。5A05 合金的常温组织为α －Al+β 相，Mn、Fe、Si 可形成 AlMg2Mn、AlFeSi 和 Mg2Si，在 310℃~335℃退火可以避免β 相沿晶界连续性分布。5A05 合金相当于美国的 5056 合金，合金的熔化温度范围 638℃~568℃。

5B05 合金

5B05 合金：一种含 Mg 量高的（4.70%~5.70%）Al-Mg 系专业铆钉合金，不可热处理强化，其铆钉用于铆接铝结构与镁结构，铆钉在退火状态下铆接，因为此状态铆钉具有最佳的塑性，它的平均含镁量 5.2%，比 5A05 合金的 5.15%略高一点点，实际上这两个合金的合金化元素（Mg、Mn）含量相等，但是在杂质含量方面则有一些差别，5B05 合金的 Si、Fe 含量分别应≤0.40%，而 5A05 合金的为 0.5%，而在 5B05 合金中，（Si+Fe）之和应≤0.6%，可是对 5A05 的（Si+Fe）含量未作规定。5B05 合金铆钉线材直径 1.6mm~10.0mm，在 HX8 状

态成捆交货，按 GB/T3196 和 GJB2055 的规定，合金的抗剪强度应≥157N/mm2。铆钉在阳极氧化与重铬酸钾封孔后需退火再铆接，如在盐浴槽内退火，须将铆钉装入一头封孔的壁薄的钢管内（管径<50mm、壁厚<1.5mm），保温时间与空气炉内退火相当，即 40min。5B05 合金线材的退火制度：（350℃~410℃），按材料直径确定，不宜过长。该合金铆钉用于铆接在－196℃~200℃工作的退火状态的铝合金及镁合金结构件。5B05 合金的组织结构与 5A05 合金的相当，它的抗蚀性与第二相（β 相－Al3Mg2）的分布形态密切相关，若连续分布于晶界，则有晶界腐蚀与应力腐蚀开裂敏感性，进行适当的退火可使β 相呈细小的质点均匀地分布于晶界与晶内，显著提高抗蚀性。冷作硬化与使用过程中长时间加热都会降低合金的抗蚀性，甚至引发剥落腐蚀。

1.3.22 铆钉虽小作用大 一些短板亟待补（下）

表 4 2B16 合金铆钉的热处理制度

热处理	加热炉	处理温度℃	处理时间，min	
			直径 4mm	直径 6mm
固溶处理 人工时效	盐浴槽 空气炉	525±3 165±3	10-20 12h	20-40 12h
固溶处理 人工时效	盐浴槽 空气炉	535±3 175±3	35-45 18h	35-45 18h
固溶处理 人工时效	盐浴槽 空气炉	535±3 190±3	35-45 10h	35-45 10h

5A06 合金

在热处理不可强化的 5XXX 系变形铝合金中，5A06 合金的 Mg 含量高，强度中等，退火状态塑性尚可，抗蚀性良好，冷作硬化可提高强度，但使抗应力腐蚀开裂能力下降，合金的成分（质量%）：Si0.40，Fe0.40，Cu0.10，Mn0.50~0.80，Mg5.8~6.8，Zn0.20，Be0.0001~0.005，Ti0.02~0.10，其他杂质单个 0.05、合计 0.10，其余 Al。该合金半成品种类主要为板、带、管、棒、型材与锻件，铆钉线材产量小，仅占 2%左右，按 GB/T3196 与 GJB2055，线材直径 16mm~10.0mm，在 HX8 状态供应，抗剪强度 Rc≥167N/mm2，在退火状态下铆

接。按 HB/Z5126，合金的完全退火制度 310℃~335℃，线材直径≤6mm 时热透后空冷或水冷，直径>6mm 时 30min 后空冷或水冷。按 GJB1694，完全退火温度 350℃~410℃，按线材直径确定保温时间，应准确控制保温时间，以晶粒度满足要求为准，然后以不大于 30℃/h 的冷却速度冷至 260℃以下出炉空冷。

5A06 合金的熔炼温度 700℃~750℃，铸造温度 690℃~730℃，加 Be 是为了提高熔体的抗氧化能力，为了避免钠脆，不得使用含钠熔剂。5A06－0 合金有良好的抗蚀性，冷作硬化可导致剥落腐蚀，合金的抗蚀性与退火制度和生产使用过程中的加热条件影响较大，最佳退火温度 310℃~335℃。5A06 合金的室温组织为α －Al+β 相（Al3Mg2），Mn、Fe、Si 可形成不同杂质相 AlMg2Zn、AlFeSi、Mg2Si，在 310℃~335℃退火，可以避免β 相沿晶界连续性分布，而在晶界和晶内均匀地析出。

热处理可强化铆钉铝合金

2A01 合金

2A01 合金：一种含 2.2%Cu~3%Cu、0.20%Mg~0.30%Mg 的 Al-Cu-Mg 系的热处理可强化的专业铆钉线材合金，是一种古老的合金，于上世纪 20 年代初期定型，用于制造中等强度和工作温度不大于 100℃的结构铆钉，室温下塑性高，在固溶

处理和时效后使用，不受热处理后停放时间限制。合金的抗蚀性差，加热超过 100℃后有晶间腐蚀倾向，铆接前应进行阳极氧化处理并用重铬酸钾封孔。铆钉固溶处理时装于专用铁丝筐内，摊厚不得超过 20mm，在盐浴槽内加热，温度 495℃~505℃，保温 20min~80min，在室温水中淬火，转移时间不得长于 15S，以免降低抗蚀性和抗剪强度，淬火加热温度低于 495℃，会产生粗大晶粒组织。2A01 合金在退火状态下组织由α -Al、Al2Cu、Mg2Si、AlFeSi 相组成，Al2Cu 和 Mg2Si 是强化相，合金的塑性高，可在室温下镦成各种形式的铆钉，自然时效后仍有良好可铆性能。2A01 合金是一种苏联特有的合金，中国的合金是从苏联引进的，因此它成为俄罗斯独特铆钉铝合金，欧美国家不用此合金。目前在新机种上已很少用此合金铆接，但是在小型航空器上与通用装备上仍在使用。

2A10 合金

2A10 合金：一种含 3.9%Cu~4.5%Cu、0.30%Mn~0.50%Mn、0.15%Mg~0.30%Mg 的 Al-Cu-Mg 系热处理可强化的专业铆钉线材合金，可自然时效强化也可以人工时效强化，是一种苏联合金，没有与之相当的欧美合金，中国的这个合金是从苏联引进的，苏联及俄罗斯的牌号为 B65，它铜含量比 2A01 合金的高，并含有 Mn，因此它的抗剪强度比 2A01 合金的高 32%以上，可用它制造更高抗剪强度的铆钉，铆钉在热处理强化

后铆接，铆接不受热处理后停放时间的影响。2A10 合金在 100℃以上加热以后有产生晶间腐蚀倾向，故其铆钉工作温度不宜超过 100℃，铆钉应经过阳极氧化处理，并用重铬酸钾封孔。2A10 合金的退火制度：350℃~410℃，保温 1h~3h 后，以不大于 30℃/h 的降温速度随炉冷至 260℃后出炉空冷；固溶处理宜采用硝盐槽加热，温度 515℃~520℃，保温 30min~50min，室温水中淬火，人工时效（75℃±5℃）/24h，空冷，自然时效室温保持 4d。2A10 合金在退火状态下的组织由α -Al、Al2Cu、Mg2Si、AlMnFeSi，Al2Cu 是主要强化相，在室温下具有良好的塑性，可用冷镦机制成各种形式的铆钉，铆钉的固溶热处理可参照 2A01 的进行。

2B16 合金

2B16 合金是一个 Al-Cu-Mn 系硬铝型专业铆钉合金，可热处理强化，有三种热处理制度，可以获得不同综合性能的铆钉，它的室温、高温抗剪强度比 2A10 合金的高，可在 200℃或更高温度下长期使用，在热处理强化后有良好的可铆性能，它的合金化元素含量（质量%）：Si0.25,Fe0.30,Cu5.8~6.8,Mn0.20~0.40,Mg0.05,V0.05~0.15,Ti0.08~0.20,Zr0.10~0.25。铆钉的热处理制度见表，固溶处理转移时间≤15S，其他事项可参阅 2A10 合金铆钉的。2B16 合金线以冷作硬化状态成捆供应，直径 6mm~10mm，其铆钉用

于紧固航空航天器高温结构，如大型导弹及运载火箭，有良好的抗氧化性能。线材经 165℃/12h 人工时效后有晶间腐蚀倾向；但固溶处理后经 1%~3%冷变形，再在 175℃/18h 人工时效仅有轻微晶间腐蚀；铆钉铆接前都应硫酸阳极氧化并用重铬酸钾封孔。2B16 合金的组织为α -Al、Al2Cu、T（Al12Mn2Cu)、Al3Ti、Al3Zr、Al3V 和 AlFeMnSi 等，当 Si 含量较多而 Fe 含量较少时，可能形成 Al10Mn2Si，Al2Cu 是主要强化相。2B16 合金线材有良好的室温可塑性，用冷镦机可制成种种形式的铆钉，在热处理后有很好的可铆性，不受时效后停放时间影响，可在 200℃左右长期工作，可替代 2A10 合金。2B16 合金与美国的 2219 合金相当，俄罗斯的 D20 合金相当，中国的合金是从苏联引进的，此合金含 Zr，在熔炼时可用 Al-Zr 中间合金加 Zr，也可用采用氟锆酸钾加锆，在后一情况下，待其他炉料全部熔化后将熔体温度升至 800℃以上再加 K2ZrF6，熔化后降温至 730℃~750℃，铸造温度控制在 720℃~730℃，铸造直径 162mm 锭的速度为 75mm/min~80mm/min。

7050 合金

7050 合金是 7XXX 系的 Al-Zn-Mg-Cu 系可热处理强化的超硬铝型高强度变形铝合金，主导产品为厚板（通常厚度≥15mm)、型材、锻件与铆钉线（一般直径≥3mm)，但线材产量

甚少，仅约 1%。它的化学成分（GB/T3190，质量%）：Si0.12,Fe0.15,Cu2.0~2.6,Mn0.10,Mg1.9~2.6,Cr0.04,Zn5.7~6.7,Ti0.06,Zr0.08~0.15,其他杂质 0.05、合计 0.15，其余 Al。与 7075 合金相比，该合金增加了锌、铜含量，提高了 Zn/Mg，并用 Zr 取代铬作为晶粒细化剂，而且大大减少了 Si、Fe 杂质含量，并在过时效状态下应用，因而既有高的强度性能，又有高的韧性、疲劳强度与抗应力腐蚀性能，还有良好的淬透性，是综合性能优秀的航空航天合金，用于制造飞机主承力构件如机身框、隔板、机翼壁板、翼梁、翼助、起落架支撑零件、铆钉等，温度升高合金的强度下降，长期工作温度不得超过 125℃，是其缺点。该合金材料的不同状态分别适用于不同使用条件的受力构件：T76 材料一般用于要求抗剥落腐蚀的高强度结构件；T74 状态适用于高强度、抗应力腐蚀的结构件，特别是厚大截面的；T73 状态主要用于高强度、抗腐蚀的铆钉。T73 是一种过时效处理，即固溶处理后再进行过人工时效处理，强度在时效曲线上越过高峰值而具有高的抗应力腐蚀性能，专用于处理 7050 合金铆钉。

7050 合金的基本相组成为α -Al 和 MgZn2，还有 Al3Zr、Al2Cu2Fe、Mg2Si 和 Al13CuMg4 等。弥散相 Al3Zr 呈球形，一般以亚稳定形式存在，只有在长时间高温退火后才能形成稳态的密排六方结构。T73 是一种双级时效，先低温后高温，利用 GP 区的形核作用，则可获得弥散度高的η’或 n 相

（MgZn2），此时材料的强度性能虽比 T6 状态的低 15%左右，但抗应力腐蚀开裂（SCR）能力却大为提高。这种双级时效工艺是美国铝业公司 1961 年研发的，它使晶界析出相η’和η相聚集，破坏了它们的连续性，改善了组织，减少了应力腐蚀和剥落腐蚀敏感性，也提高了断裂韧性，与此同时晶内η’和η 相质点粗化，因此在提抗蚀性的同时，却以牺牲 15%左右的强度为代价，但是很值得。7050 合金的双级时效制度：一级（110±5）℃/（6~8）h，二级（177±5）℃/（8~12）h，工厂可根据实情作适当改变。直径 4mm 的 7050-T73 合金铆钉线材的力学性能：抗拉强度 Rm>490N/mm2，屈服强度 Rp0.2>415N/mm2，伸长率 A>11%，抗剪强度>290N/mm2。

中国虽然对 7050-T73 铆钉线材做了一些研发，但是尚未形成批量生产能力，下述生产工艺可供参考：圆锭Φ162mm×470mm，挤压筒直径 170mm，挤压系数 65.6，模孔数 4，挤压残料厚度 60mm，挤压温度 350℃~430℃，挤压速度 0.6m/min~3m/min。线材拉伸前应退火（370~390）℃/（1.0~1.5）h，随炉冷却到 250℃出炉空冷。拉伸道次变形率 10%~40%；对 H13 线材最后道次加工率为 21%~36%，直径 4mm 线材尺寸精度-0.02mm~-0.04mm，T73 线材的最终道次加工率 21%~24%。

铆钉虽小作用大

也有短板需要补

在航空航天器制造中没有铝合金铆钉飞机就不能上天，航天器也不能升空遨游太空，许多机械装备与器械也成不了器。中国经过 60 年的发展已成为世界上最大的铝合金铆钉线材生产大国与最大的民用铝合金铆钉使用大国，但与美、法等国相比还有较大差距，成为强国任重道远。那么究竟还有哪些差距与短板需要补呢？有些线材中国还不能生产，有些虽能生产不是量不足就是质量达不到要求。

铝-锂合金、7050、7055 合金铆钉线材不能生产

铝-锂合金是一类较为成熟的航空航天先进材料，用量在逐年快速上升，中国 C919 大飞机前机身等直段、A380 飞机都是用此类合金制造的，中国用的 Al-Li 合金板材、挤压型材与连接用的铆钉全来自美国，A380 飞机用的这类材料则是法国肯联铝业公司生产的，美国航空航天局（NASA）发射的奥利安（Orion）飞般乘务员舱（crew module）是用 Al-Li 合金厚板焊接的，A380 飞机用的 AirwareTM 铝-锂合金零部件更是数不胜数，用的 Al-Li 合金铆钉数以十万个计。

7050、7055 合金是一类新型的先进的 Al-Zn-Mg-Cu 系航空铝合金，中国虽已试制成功，但是尚未形成批量商业化生产，还是一类靠进口的主要材料，同时国产材料的价格比进口的还贵。所以我们面临的，一是要补短板，建设生产这类铆钉的项目，可建设独立的新项目，也可以建在原来的线材

生产厂；二是大搞创新，想方设法降低生产成本，创新是降低成本的主要措施，也可以说是唯一的有效出路。

完善高强度铆钉合金线材生产工艺，降低成本

有些铆钉线材合金如 2B16、5A05、5A06 合金线材生产工艺比较复杂，为了确保质量、提高成材率、降低生产成本，提高产品市场竞争力，应严格管控生产工艺。

建设专业紧固件厂

紧固件品种很多，最常见的有螺钉、螺栓、螺帽、铆钉等，用的材料更是多种多样，有碳钢、合金钢、不锈钢、高温合金钢、铝及铝合金、钛及钛合金、锆合金、铜及铜合金等等。当前，全世界的高档紧固件特别是航空航天器用的紧固件几乎为美国铝业公司垄断，在全世界各地有五六个独资生产厂，仅在中国江苏省苏州市有就有两个。这个状况极不正常，中国宜建专业紧固件厂，打破垄断，建立完整的铝工业体系。

1.3.23 高强度硬铝的发展

表 1 2024 型合金的分学成分(W%)

合金	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
2024	0.5	0.5	3.8~4.9	0.3~0.9	1.2~1.8	0.1	—	0.25	0.15
2424A	0.15	0.2	3.7~4.9	0.15~0.8	1.2~1.5	0.1	—	0.25	0.15
2124	0.2	0.3	3.8~4.9	0.3~0.9	1.2~1.8	0.1	—	0.25	0.15
2224	0.12	0.15	3.8~4.4	0.3~0.9	1.2~1.8	0.1	—	0.25	0.15
2224A	0.1	0.15	3.8~4.5	0.4~0.8	1.2~1.6	—	0.05	0.1	0.01~0.07
2324	0.1	0.12	3.8~4.4	0.3~0.9	1.2~1.8	0.1	—	0.25	0.15
2424	0.1	0.12	3.8~4.4	0.3~0.8	1.2~1.6	—	—	0.2	0.1
2524	0.06	0.12	4.0~4.5	0.45~0.7	1.2~1.6	0.05	—	0.15	0.1
2624	0.08	0.08	3.8~4.3	0.45~0.7	1.2~1.6	0.05	—	0.15	0.1
2724	0.15	0.2	3.8~4.9	0.3~0.9	1.2~1.8	—	—	0.25	0.06
2824	0.08	0.11	3.7~4.3	0.3~0.9	1.2~1.6	0.05	—	0.25	0.15

美国奥伯林学院（Oberlin College）化学系学生霍尔（C.M.Hall）与法国巴黎师范大学学生埃鲁（P.L.He'roult）于 1886 年在大洋彼岸分别发明了铝的熔盐电解提取法，他俩的年龄都是 22 岁。至今仍称提取铝的工艺为霍尔-埃鲁法，其原理一成未变。1888 年霍尔与其他 4 人集资 2 万美元组建了匹兹堡冶金公司，从事铝的工业化生产，这是世界上第一个铝厂。公司成立了，霍尔将经营管理等事宜全盘交给合伙人之一掌管，而他一头扎进实验室，有时一连几天吃宿在内，不出实验楼，他就这样，终身未娶。1907 年，匹兹堡冶金公司改名为美国铝业公司（Aluminum Company of America）。

1928 年，美国铝业公司一分为二，成立了加拿大铝业公司，美国以外的铝企业划归加拿大铝业公司，美国本土的铝企业仍归美国铝业公司。据媒体报道，从 2016 年下半年起，美国铝业公司又将一分为二，成为两家独立运营的公司：一家上游公司，涵盖铝土矿、氧化铝、原铝、铸造铝合金与可持续产品项目；另一家为高精铝材公司，分管业务为轧制产品、高性能复合材料生产及解决方案、工程产品、交通建筑产品。有人将 Value-Add Company 译为增值业务公司，并没有错，但笔者认为，译为“高精铝材公司”更贴近中美文化的表达方式。这两个企业仍分别是世界 500 强，仍分别是世界铝工业领军者。

自 1903 年莱特兄弟在全世界首架飞行器上用匹兹堡冶金公司的铝铸造了一些零件以来，铝就与航空航天事业结下了不解之缘，没有铝就没有今天这样兴旺发达的航空事业，也不会有如此畅游太空的航天业绩。

1917 年美国铝业公司发明了 2017 合金，1934 年又推出 2024 合金，从此硬铝成了航空器结构的主要材料，这两个合金也就成为经典的航空铝合金，至今宝刀不老，仍是航空器的主要结构材料。截至 2015 年 1 月在美国铝业协会公司注册

的常用 2017 型合金有 3 个（2017、2017A、2117），2024 型合金有 11 个，已形成一个最大的变形铝合金家族（见表 1）。

由上表的数据可见，2024 合金的发展是沿着高纯化道路前进的，它们的主要合金化元素含量（Cu、Mg、Mn）仅有小小的微波荡漾，而 Fe、Si、Cr 等杂质含量却在大幅度下降，例如 2524 合金的杂质 Si 含量仅为原型合金 2024 的 12%，杂质 Fe 的含量也只有原型合金的 24%，Cr 的含量为原型合金的 50%，因而它的杂质相（化合物）显著减少，合金的常规力学性能虽然仅略有提高，然而其断裂韧性、抗疲劳裂纹扩展能力、抗应力腐蚀开裂能力却得到显著提高，因而用其制造的零部件更加经久耐用，安全性提高了，更加可靠了，维修期更长了，故在新的民机制造中获得大量应用，成为民机骨架的关键材料。

在中国有自主知识产权的 ARJ21-700 支线客机选材中，铝合金零部件净质量约占飞机总净质量的 75%，结构钢和不锈钢占 10%，复合材料占 8%，钛材占 2%，其他材料占 5%。ARJ21 飞机用的铝合金大体上与波音 B777 飞机的相同，选用综合性能优秀的第四代高强度与耐损伤铝合金制造主体结构件，其中用得最多的是 2xxx 系合金，几乎占铝材总用量的 65%以上，而 2524 合金又占了绝大的份量：以 2524-T3 合金制造的零部件有机翼前缘、机身蒙皮、机翼蒙皮、侧翼蒙皮、调整片、

方向舵蒙皮与调整片、平舵蒙皮、升降舵蒙皮与调整片、垂尾蒙皮、襟翼蒙皮及子翼，机翼梁腹板用的材料为 2324-T39。除了 2xxx 系合金外，7xxx 系合金也用了一些，但铝-锂系合金没有用。

1.3.24 说说接触腐蚀

铝合金	自腐蚀速度，$mg/(dm^2 \cdot d)$
2219—T87	4.62
2024—T851	5.52
6061—T651	0.56
1100—0	0.24
7075—T6	0.95

表 1 阳极氧化膜对电偶电流密度 i_g 的影响

电偶	电流密度 i_g, μA/cm²	
	无阳极氧化膜	有黄色阳极氧化
2A12-T4-TC4	3.83	0.14
2A12-T6-TC4	4.14	0.21
2A10-T6-TC4	2.60	0.28

表 2 化学氧化膜对电偶电流密度的影响

电偶	电流密度 ig, μA/cm²	
	无化学转化膜	有化学转化膜
7075-Ti6A14V(钛合金)	10.4	4.5
7075-ss304(不锈钢)	47	10.3
6061-Ti6A14V(钛合金)	7.8	0.79~1.5
6061-ss304(不锈钢)	35	23~31

不同金属的接触腐蚀，又称电偶腐蚀，它是指两种或两种以上的电位不同的金属接触时发生的腐蚀。接触时电位低的金属为阳极，腐蚀得快；电位较高的即抗蚀性较高的金属为阴极，受到保护，腐蚀得慢，甚至不腐蚀。

发生接触腐蚀必须具备 3 个条件，即有电解液、有电位更正的金属非金属（碳纤维复合材料及石墨制品）存在、有电连接。接触腐蚀主要发生于两种不同金属的边线附近。

影响接触腐蚀的因素有：电位、极化、电解液种类及性质、腐蚀产物及接蚀触电阻。接触腐蚀速度 ig 可用下式表示，ig 为腐蚀电流密度，ig 越大，腐蚀的越快：

ig=△E-ne-naR+Rs

式中——电位差（Ec-Ea）。Ec 为阴极电位，Ea 为阳极电位；

na——阳极过电位；

nc——阴极过电位；

R——接触电阻；

Rs——溶液电阻。

相对其他金属来说，除了镁合金、锌镀层与镉镀层（对部分铝合金而言）外，铝及铝合金都是阳极性材料，即它与其他金属连接时会加速腐蚀。

不同金属的影响

铝合金在 3.5%NaCl 溶液中的自腐蚀速度如下表所列，海水是一种含有一定量 NaCl 的水：

材料的腐蚀电位只用来判断方向，而对接触程度，只是一个粗略的指标。铝合金的含 Cu 量对其一般接触腐蚀的影响是不同的。通常，含 Cu 量高的铝合金的电位较高，抗蚀性较差，但抗接触腐蚀的能力却有所提高。含 Zn、Mg 量较多的 7XXX 系合金的电位较低，抗蚀性好一些，但抗接触腐蚀性能却差一些。

介质的影响

在不同介质中，铝合金加速腐蚀程度不同，这与溶液中是否有 Cl-有关，其顺序为：3.5%NaCl＞自来水＞蒸馏水

涂层和氧化膜的作用

不管是阳极氧化膜还是化学氧化膜，既能降低铝合金的一般腐蚀速度，又能大大增加接触电阻，降低电偶效应，尤其是阳极氧化膜，可使铝合金的电偶电流下降约 1 个数量级。铝合金在 35℃±1℃的 3.5%NaCl 溶液中，阳极氧化膜对电偶电流密度 ig 的影响，见表 1、2。

在与铝合金工件接触的阳极性金属工件上涂（镀）以电位与铝的电位相近的涂层，如 Cd、Cd-Ti 合金、Al、无机铝盐涂层，可以降低铝工件的接触腐蚀。

阴阳极面积比

一般说来，阴阳极面积比每增加 10 倍，电偶电流密度也相应地增大 10 倍左右。在实际中应考虑这种效应，如可用不锈钢紧固件紧固铝合金工件，反之则不允许。

接触腐蚀的控制

控制接触腐蚀的措施有：

相互连接的工件尽量选择同种金属或电位差小的金属（含镀层）制造；

对异种金属间进行电绝缘；

隔断电解液；

增大电极的极化；

增大溶液电阻及接触电阻；

减少阴极面积或增大阳极面积；

加牺牲阳极，镁及镁合金是上乘的这种阳极材料。

1.3.25 话说霍尔-埃鲁铝电解法

在 1954 年以前，不管是德维尔提取铝的工艺，还是德维尔-卡斯特纳法提取铝，其提取工艺都是利用纯化学法。1954 年秋，铝生产又跨过了一块有历史意义的里程碑，德维尔和德国化学家本生（Bunsen）在实验室里各自独立地使用炭电极在陶瓷容器内用电解 NaAlC14 的方法生产出了少量的铝，其所生产的铝的纯度比用纯化学反应法生产的铝要高得多。不过这时直流电机尚未问世，他们以蓄电池作为电源，不能获得较大的电流，而且价格昂贵，所产的铝也比化学法生产的铝的成本高得多，因此商业价值不大，不过，还是有很大的科学价值的，这毕竟开辟了生产铝的新途径。

1867 年，发电机得以问世，并于 1880 年得到改进，此后，电力能源产业实现了三相交流输电，这为实现工业化生产电解铝提供了前提条件。1878 年，爱迪生（Edisson）及

其公司制成了较大的直流电机，为以后霍尔-埃鲁熔盐铝电解法的工业化生产奠定了坚实的基础。

1883 年，美国布雷德利（Bradley）提出利用氧化铝可溶于冰晶石的特性电解冰晶石-氧化铝熔盐的方案，非常可惜与遗憾的是，他既没有申请专利，也没有继续往下研究使之成为商业化生产的项目，痛失铝熔盐电解法发明者的桂冠与可能成为企业家的机会。

1886 年，美国俄亥俄州（Ohio）奥柏林学院（Oberlin College）化学系三年级学生霍尔（Charles Martin Hall）与法国埃科尔矿业学院（Ecole des Mines）三年级学生埃鲁几乎同时在大洋彼岸各自独立地发明了用电解法电解在冰晶石熔体中的三氧化二铝（Al2O3）生产铝的方法，即现在霍尔-埃鲁法，简称 H-H 法。

霍尔的发明在 1886 年 2 月 23 日面世，埃鲁的发明稍后一些，约晚两个月。他们不约而同地在美国与法国申请并获得了专利。在以后的不到 3 年时间里两个专利都获得了应用。1888 年，霍尔在美国当时的钢铁中心——匹兹堡（Pittsburgh）建成了世界上第一个铝电解厂，名为匹兹堡冶金公司

（The Pittsburgh Reduction Company）投资 2 万美元，霍尔是股东之一，并出任总经理。1907 年，改为美国铝业公司（Aluminun Company of America），1999 年用简名 Alcoa。自成立之日起的 125 年来，Alcoa 就是全球最大最强的铝工业企业。匹兹堡冶金公司在 1888 年 11 月生产出第一包原铝。大约在同一时间，在瑞士纽豪森（Neuhausen）的瑞士冶炼公司（Swiss Reduction Company）首次用埃鲁的专利技术生产出原铝，可是埃鲁的运气没有霍尔的那样好，它不是纽豪森铝厂的股东。

在此，还要介绍一些有关铝及霍尔与埃鲁的小故事，也是很有趣的。1855 年，在巴黎展览会（Paris Exhibition）上，一根筷子大小的小铝棍与皇冠上的珠宝在一个展柜内展出，可见那是铝与稀世珠宝同样贵重。

霍尔在奥柏林学院上学时，1886 年化学教授弗兰克·朱厄特（Frank Jewett）在上课时对他的学生说：“不管谁，要是发明了铝的商业化生产，就是对人类的一大贡献，对个人也是会财运亨通的。”霍尔发誓要找到这种神奇金属的工业化提取工艺，功夫不负有心人，不久后，霍尔与埃鲁在互不通气的条件下，独自发明铝的熔盐电解法，他们年纪相同，生于 1845 年，据称他们都于 54 岁逝世。

因专利权之争，他们上法庭，唇枪舌战，打得不可开交。

后来，法庭经过认真审理，判决两人的专利同时有效。从此，两个人有来有往，交往甚密，竟成莫逆之交。不过霍尔成了亿万富翁，埃鲁也不穷，两个人都过着闲情逸致的中产阶级生活。霍尔为了铝的事业，整天泡在实验室、车间与办公室里，无暇顾及“人间烟火”，为了铝工业的发展终身未娶，积劳成疾，英年早逝，值得全世界铝业界缅怀。

1.3.26 细说铝材状态（一）

铝材供应状态（temper）多少既标志着热处理技术水平的高低，又说明材料性能的利用程度，可做到物尽其用。美国可以生产最多状态的铝材。随着技术的不断发展与进步，还会出现一些新的状态，不过新状态的出现实属稀罕。当前，铝材的基本状态有5种，由这些基本状态派生出了很多“子”状态与“孙”状态，例如H状态派生的状态有21种，T7派生的有7种。目前，铝材的状态有两种体系：国际标准组织体系ISO，国际统一状态体系，即美国铝业协会体系AA。

ISO状态代号

按国际标准规定，铝材状态代号由大写拉丁字母与数字组成，标于合金牌号后，用连字号把它们分开。

（1）基本状态代号。加工铝材的基本状态如下：

M--制造状态，表示热成型如热轧、热挤、热锻等加工的

材料或工件，对其力学性能有一定的要求。

F--加工状态，表示不控制力学性能的热加工材料所处的状态。

O--完全退火的，表示处于最低强度性能的完全退火的压力加工产品所处的状态。

H--加工硬化的（仅用于压力加工产品），表示退火后或热成型的材料再加以冷加工所处的状态，以使材料达到所要求的力学性能；或是冷加工后经部分退火或稳定化退火后所处的状态。通常在字母“H”之后加一数字，在数字后再加一字母，以表示材料的最终加工硬化程度。

T--一种完全不同于M、F、O与H的热处理状态，用于通过固溶热处理可使其强度性能增加的材料或产品。在字母之后还附有第二个字母，以表示不同的热处理状态。材料在热处理之后，可以进行一定量的冷加工，也可以不进行冷加工。

（2）基本状态代号的细目

加工硬化状态（H）的细目如下：

H1--加工硬化的；

H2--加工硬化后经部分退火的；

H3--加工硬化后经稳定化处理的。

在数字之后，还应加字母，以表示材料的最终加工硬化程度（字母x表示上述的1、2、3）：

HxH--充分硬化状态；

HxD--材料的抗拉强度大致界于O状态的与HxH状态之间；

HxB--材料的抗拉强度大致界于O状态的与HxD状态的之间；

HxF--材料的抗拉强度大致界于HxD状态的与HxH状态的之间；

HxJ--材料的抗拉强度比HXH状态的大10N/mm2以上的状态。

热处理状态（T）的细目是在字母T之后再加另一大写字母，以表示不同的热处理状态。

TA--从热工冷却到室温与自然时效后的状态，适用于热加工如热挤压后以一定的速度冷却到室温，并自然时效到稳定状态的产品。

TB--固溶处理与自然时效状态，适用于淬火后不进行冷加工的材料，但冷矫平与冷矫直则例外。处于这种状态的某些合金材料的性能是不稳定的。

TC--热加工后冷却到室温，再冷加工与自然时效后的状态，适用于从热加工（锻造或挤压）温度以一定的降温速度冷却到室温，再冷加工一定的量以提高其强度的产品。处于这种状态的某些合金的性能是不稳定的。

TD--固溶处理、冷加工与自然时效后的状态。适用于淬

火后进行一定量的冷加工，以提高其强度或降低其内应力的产品。处于这种状态的某些合金材料的性能是不稳定的。

TE--从热加工温度冷却到室温再人工时效的状态，适用于热挤压产品。

TF--固溶处理与人工时效后的状态，适用于淬火后不进行冷加工的材料，但可以进行必要的矫直与平整。

TG--从热加工温度冷却到室温，再冷加工与人工时效后的状态。适用于少量冷加工可提高其强度的材料。

TL--固溶处理、人工时效与冷加工的状态。适用于这些处理可提高其强度的材料。

TM--固溶处理与稳定化处理后的材料状态。适用于这些处理可使材料强度越过曲线上峰值而具有某些特殊性能的材料。

ISO2107还规定：如果必要，在状态代号细目之后再附加一位或二位数字，一个或二个字母，以表示材料状态的精细变化。

不过，ISO的铝材状态系统没有获得较为广泛的实际应用。

1.3.27 细说铝材状态（二）

除了上期介绍的 ISO 铝材状态系统外，现在来聊聊另一种铝材状态系统，即美国铝业协会公司（AA）系统，它在全世界获得了广泛应用，并被各国和有关组织推荐使用，中国标准

GB/T16475－1996 已全盘采纳，可无条件采用。这套系统，层层推进，设计合理，同时留有余地，可充分满足当前和长远需求。

基本状态及基本状态代号的意义

（1）加工硬化状态 H 细目

H1——单纯加工硬化状态。适于不需要退火仅通过加工硬化就可获得所需强度的材料，H1 后的数字表示加工硬化程度。

H2n——冷加工后进行不完全退火的状态。适于加工硬化量过大，然后通过不完全退火使强度降到所需值的材料。对于室温时效软化合金，H2 状态具有与相应 H3 状态相同的最低抗拉强度，但 H2 材料的伸长率略高一些。H2 后的数字表示材料经不完全退火后保留的加工硬化程度。

H3n——加工硬化后再稳定化处理的材料状态。适用于冷加工后经低温退火、使强度略为降低、伸长率稍有升高而力学性能稳定的材料。H3 仅适用于室温时效软化的合金，即 3xxx 及 5xxx 系合金，如其 H16、H18 材料在室温长期放置，屈服强度会有所下降（Rpo.2），而伸长率 A 却有所升高。为防止这种变化，可在冷加工后于 130℃~170℃进行稳定化退火。

n：	n＝2	n＝4	n＝6	n＝8	n＝9
	1/4 硬	1/2 硬	3/4 硬	全硬	超硬

数字 8 表示材料的抗拉强度与完全退火后受到约 75%冷加工量（加工温度不超过 50℃）获得的强度相当的状态。极限抗拉强度约为 0 和 8 状态中间值的材料状态，以数字 4 表示；约为 0 与 4 状态中间值的，以数字 2 表示；约为 4 与 8 状态中间值的，以数字 6 表示。数字 9 表示材料的最低抗拉强度比状态 8 的强度还大 10N/mm2 以上的状态。对于第二位数字为奇数的二位数字 H 状态，其标定抗拉强度是第二数字为偶数相邻的两位数字 H 状态材料的标定值的算术平均值。

1.3.28 细说铝材状态（三）

H后有三位数字的状态材料的最低抗拉强度与相应两位数字材料的差不多，具体内容如下：

H111--加工硬化程度比H11的稍小的状态。

H112--一种对加工硬化程度或退火程度未加调整的加工状态，但对材料的力学性能有要求，须测定其性能。

H116--Al-Mg系合金材料的一种专门的加工硬化状态。此状态的Al-Mg合金材料有高的抗应力腐蚀开裂能力。

H191--加工硬化程度比H19的稍低而比H18的又略高的状态。

下列四种状态适用于镁含量大于4%的加工材料。

H311--加工硬化程度比H31的稍小的状态。

H321--热加工或冷加工的硬化程度比H32的稍小的状态。

H323、H343--特殊的加工状态，对于这类状态的高镁含量合金有相当好的抗应力腐蚀开裂的能力。

T状态细目

T1--铝材从高温热加工冷却后，经自然时效所处的充分稳定状态。适用于热挤压后不进行冷加工的材料，或矫直等冷加工对标定力学性能无影响的材料。

T2--铝材从热加工冷却后再受到冷加工与自然时效的状态。如为了强度对热挤压产品进行冷加工，再通过自然时效可达到充分稳定的材料，也适用矫直加工对其标定力学性能有影响的产品。

T3--固溶处理后进行冷加工，然后自然时效所达到的一种状态。适用于淬火后通过冷加工可提高其自然时效状态强度性能的产品，或矫直可能影响其标定力学性能的材料。

T31--固溶处理（淬火）后冷加工，加工率约1%。

T351--固溶处理(淬火)－可控的拉伸率(薄板的0.5%~3%，厚板的1.5%~3%，棒材的冷精整率1%~3%，手锻件、环锻件、轧制环的1%~5%）消除内应力－自然时效。拉伸后不矫直。

T3510--固溶处理（淬火）－以可控的拉伸率消除挤压材的内应力（挤压管、棒、型材的1%~3%，位伸管的0.5%~3%）－自然时效。拉伸后不矫直。

T3511--同T3510状态，但是拉伸后作了镜面矫直，以满足标准规定的尺寸偏差精度。

T352--固溶处理（淬火）－压缩1%~5%以消除内应力－自然时效。

T354--固溶处理（淬火）－在精整模内冷整形以消除内应力－自然时效。适用于模锻件。

T36--固溶处理（淬火）－冷加工约6%－自然时效。

T37--固溶处理（淬火）－冷加工约7%－自然时效。

T39--固溶处理（淬火）－适量的冷加工以满足既定的力学性能要求，冷加工可在自然时效前进行也可以在其后进行。

T4--固溶处理（淬火）与自然时效。

T41--在热水中淬火后的状态，以防变形与产生大的内应力。此状态仅适用于锻件。

T42--固溶处理（淬火）－自然时效。适用于自退火状态或F状态固溶处理的试验材料，也适用于用户将任何状态的材料或工件固溶处理与自然时效。

1.3.29 细说铝材状态（四）

T451——固溶处理（淬火）－一定量的拉伸变形以消除内应力（薄板的永久变形率 0.5%~3%，厚板的 1%~3%，棒材的 1%~3%或冷精整相等的变形率，手锻件、轧制环和锻环的 1%~5%）－自然时效。拉伸后不矫直。

T4510——固溶处理（淬火）－一定量的拉伸变形以消除内应力（挤压管、棒、型材的永久变形率 1%~3%，拉拔管的

0.5%~3%）－自然时效。拉伸后不矫直。

T4511——同 4510 状态，但伸拉后作了镜直矫直，以确保达到标准规定的尺寸偏差精度。

T452——固溶处理（淬火）－压缩 1%~5%以消除内应力－自然时效。

T454——固溶处理（淬火）－在精锻模内冷整形以消除内应力－自然时效。适于模锻件。

T5——从热加工温度冷却后再人工时效。

T51——从热加工温度冷却后进行欠人工时效，以改善成形性能。

T56——从热工温度冷却后进行人工时效，但其力学性能比 T5 状态材料的高一些，是通过对加工工艺的特殊控制达到的。适用于 6xxx 系合金。

T6——固溶处理（淬火）－人工时效。

T61——固溶处理（淬火）－欠人工时效，以提高成形性能。

T6151——固溶处理（淬火）－一定量的拉伸变形以消除内应力（薄板的 0.5%~3%，厚板的 1.5%~3%）－欠人工时效，以提高成形性能。拉伸后不再矫直。

T62——固溶处理（淬火）与人工时效。适宜于自退火状态或 F 状态固溶处理试验料，或用户将任何状态材料进行热处理。

T64——固溶处理（淬火）－欠人工时效，以提高成形性能，此状态材料的性能介于 T6 与 T61 材料的之间。

T651——固溶处理（淬火）－拉伸一定量以消除内应力（薄板的 0.5%~3%，厚板的 1.5%~3%，轧制或冷精整棒材的 1%~3%，手锻件、锻环及轧制环的 1%~5%）－人工时效。拉伸后不矫直。

T6510——固溶处理（淬火）－拉伸一定量以消除内应力（挤压管、棒、型材的 1%~3%，冷拔管的 0.5%~3%－人工时效。拉伸后不矫直。

T6511——同 T6510 状态，但拉伸后作了镜面精整，以确保尺寸偏差的精密。

T652——固溶处理（淬火）－施压产生 1%~5%永久变形以消除内应力－人工时效。

T654——固溶处理（淬火）－于精整模内冷整形以消除内应力－人工时效。适用于模锻件。

T66——固溶处理（淬火）－人工时效，通过对工艺参数的特殊控制，以使其力学性能比 T6 状态的高 10N/mm2 左右，具体大小由供需双方商定。适用于 6xxx 系合金。

T7——固溶处理（淬火）－人工时效。

T73——固溶处理（淬火）－过人工时效到材料具有最佳的抗应力腐蚀的能力。

T732——固溶处理（淬火）－过人工时效到材料具有最

佳的抗应力腐蚀的能力。适宜于自退火状态或 F 状态固溶处理的试验材料，也适宜于用户将任何状态的材料进行热处理。

1.3.30 细说铝材状态(五)

T7351——固溶处理（淬火）－拉伸一定量以消除内应力（薄板的 0.5%~3%，厚板的 1.5%~3%，轧制或冷精整棒材的 1%~3%，手段件、锻环及轧制环的 1%~5%）－过人工时效到材料具有最佳的抗应力腐蚀开裂的能力。拉伸后不矫直。

T73510——固溶处理（淬火）－拉伸一定量以消除内应力（挤压管、棒、型材的 1%~3%，拉拔管材的 0.5%~3%）－过人工时效到材料具有最佳的抗应力腐蚀开裂的能力。拉伸后不矫直。

T73511——同 73510 的，但拉伸后作了镜面精整矫直，以满足标准尺寸偏差精度。

T7352——固溶处理（淬火）－施压使产生 1%~5%永久变形以消除残余内应力－过人工时效到材料具有最佳的抗应力腐蚀开裂能力。

T7354——固溶处理（淬火）－在精锻模内冷整形，以消除残余内应力－过人工时效到产品具有最强的应力腐蚀抗力。

T74——固溶处理（淬火）－过人工时效到材料的性能介于 T73 与 T76 性能之间。

T7451——固溶处理（淬火）－拉伸一定量（薄板的

0.5%~3%，厚板的 1.5%~3%，轧制或冷精整棒材的 1%~5%，手锻件、锻环、轧制环的 1%~5%）以消除残余内应力－过人工时效到材料的性能介于 T73 与 T76 材料的之间。

T74510——固溶处理（淬火）－拉伸一定量（挤压管、棒、型材的 1%~3%，冷反管的 0.5%~3%）以消除残余内应力－过人工时效到材料的性能介于 T73 与 T76 材料性能之间。拉伸后不矫直。

T74511——同 T74510 状态，但是拉伸后作了镜面精整，使尺寸偏差达到高精级。

T7452——固溶处理（淬火）－压缩变形一定量，1%~5%－过人工时效使材料性能介于 T73 与 T76 材料的之间。

T7454——固溶处理（淬火）－在精锻模内冷精整以消除残余内应力－过人工时效到材料性能介于 T73 与 T76 材料性能之间。适用于模锻件。

T76——固溶处理（淬火）－过人工时效到材料有良好的抗剥落腐蚀的能力。

T761——固溶处理（淬火）－过人工时效材料到良好抗剥落腐蚀的能力，适于 7475 合金板带材。

T762——固溶处理（淬火）－过人工时效材料到有良好抗剥落腐蚀的能力。适宜于自退火状态或 F 状态热处理的试验材料，也指用户将任何状态的材料再热处理的材料状态。

T7651——固溶处理（淬火）－拉伸一定量（薄板的

0.5%~3%，厚板的 1.5%~3%，轧制或冷精整棒材的 1%~3%，手锻件、锻环与轧制环的 1%~5%）以消除残余内应力－过人工时效到材料有良好抗剥落腐蚀能力。拉伸后不矫直。

T76510——固溶处理（淬火）－拉伸一定量（管、棒、型材的 1%~3%，拉拔管的 0.5%~3%）以消除残余内应力－过人工时效到材料有强的抗剥落腐蚀能力。拉伸后不矫直。

T76511——同 T76510 状态，但是拉伸后作了镜面精整矫直，使尺寸偏差达到高精级。

1.3.31 细说铝材状态（六）

T7652——固溶处理（淬火）－压缩变形 1%~5%－过人工时效到材料有良好抗剥落腐蚀能力。

T7654——固溶处理（淬火）－在精锻模内冷整形以消除残余内应力－过人工时效以达到锻件具有强的抗剥落腐蚀性能。

T79——固溶处理（淬火）－轻微过人工时效。

T79510——固溶处理（淬火）－拉伸一定量（挤压、管、棒、型材的 1%~3%，拉拔管 0.5%~3%）消除残余内应力－轻微过人工时效。拉伸后不矫直。

T79511——同 79510，但是拉伸后作了矫直镜面精整，以保证高精级尺寸偏差。

T8——固溶处理（淬火）－冷加工－人工时效。

T81——固溶处理（淬火）－冷加工，变形率约 1%－人工时效。

T82——用户进行固溶处理（淬火）－拉伸矫直率≥2%－人工时效，适用于 8090 合金。

T832——固溶处理（淬火）－冷加工－特定的永久变形率－人工时效。适用于拉拔 6063 管。

T841——固溶处理（淬火）－冷加工－欠人工时效。适用于 2091、8090 合金薄板、带。

T84151——固溶处理（淬火）－拉伸 1.5%~3%以消除残余内应力－欠人工时效。适用于 8090 及 2091 合金厚板。

T851——固溶处理(淬火)－拉伸一定量(薄板的 0.5%~3%，厚板的 1.5%~3%，轧制或冷精整棒材的 1%~3%，手锻件、锻环、轧制环的 1%~5%）以消除残余内应力－人工时效。延伸后不矫直。

T8510——固溶处理（淬火）－拉伸一定量（挤压、管、棒、型材的 1%~3%，拉拔管的 0.5%~3%）以消除残余内应力－人工时效。拉伸后不矫直。

T8511——与 T8510 状态的相同，但拉伸后作了镜面矫直精整，以获得高精尺寸偏差产品。

T854——固溶处理（淬火）－压缩 1%~5%－人工时效。

T86——固溶处理（淬火）－冷加工约 6%－人工时效。

T87——固溶处理（淬火）－冷加工约 7%－人工时效。

T9——固溶处理（淬火）－人工时效－冷加工。适于冷加工可提高其强度性能的材料。

T10——高温成形冷却后冷加工－人工时效。适于冷加工或拉伸、矫直可提高其强度的材料。

（3）0 状态细分

0——铝材在成形加工处于完全退火状态的代号。这种材料处于完全软化状态。

01——加工后的材料在大约与固溶热处理相同的温度保温相等时间然后缓慢冷却到室所处的一种状态，过去的代号为 T41.

02——材料于形变热处理所处的一种状态。这种处理是为了提高材料的成形性能，以便超塑加工（SRF）。

03——均匀化退火后的状态。

1.3.32 精铝与高纯铝应用天地广阔

美国最新下水的“福特号”航母上的电磁轨道炮的零部件是用铝制造的。同时，美国航空航天局（NASA）正在研发的计划 2020 年在飞行器上使用的核聚变推进火箭（FDR）、美国研发的被誉为“人造太阳”的美国国家的持续核聚变反应堆及其点火装置（NIF）等一些零部件也是用精铝与高纯铝制造的。这仅仅是一些精铝与高纯铝的典型应用实例，精铝和高纯铝的应用范围很广，不胜枚举。而且精铝与高纯铝对

尖端武器与顶尖技术、科学实验的发展也有着独特的功能。

通常，按照铝的纯度不同，中国及大多数国家将其分为三类：原铝（primary Al）、精铝（refined Al）、高纯铝（high purity Al）。当前，全世界生产的原铝都是用霍尔-埃鲁熔盐电解法从氧化铝中提取的，自 1888 年铝的工业化生产以来，至 2013 年全世界生产的原铝已超过 12.8 亿吨，原铝的纯度一般为 99%~99.85%，精铝的纯度为 99.9%~99.999%，是以原铝为原料用三层液电解法和（或）偏析法生产的。高纯铝是指纯度在 99.999%以上的铝，是以 99.99%的铝为原料，采用凝固提纯法（偏析法）或有机溶液电解法生产的，当今的技术可在实验室提取 8N 的极纯铝。以上是中国及大多数国家对铝的分类，在美国还有另外一种分类法，是按照铝的纯度分为五级：工业纯铝（commercial purity）高纯铝（high purity)、超纯铝(super purity)、特纯铝(extreme purity)、极纯铝（ultra purity）。他们指的工业纯铝就是我们说的原铝，用于铸造重熔用铝锭。

精铝及高纯铝的表示方法有两种，一种是用纯度百分数，如 99.999%，这种表示方式繁琐。另一种用“Al”与“N”表示，如 Al-5N（99.999% Al）、Al-5N5 即表示 99.9995%的高纯铝，“N”是英文 nine（九）的缩写，这种表达方式简洁明晰，获得广泛应用。中国已将此种表达方式纳入标准

YS/T275-2008。按该标准，高纯铝是以 99.99%铝为原料，采用凝固提纯法生产的，纳入 YS/T275 标准的有 Al-5N、Al-5N5 两个牌号。

精铝及高纯铝是一类高技术产品，也应用于高技术领域，但用量不大，2013 年，全世界的消费总量仅约 250kt，但却是不可或缺的，其用途也在日益拓宽，中国是全球最大的生产国与消费国，其次是日本，美国第三。

4N 精铝的价格约为 A199.70 重熔用铝锭价格的 1.7 倍，5N 精铝的价格约为 A199.70 重熔用铝锭的 5.3 倍。

3N~4N 精铝的典型应用

这种级别的精铝的主要用途是轧制电解电容器铝箔，简称电子箔，占其总产量的 75%以上。电容器箔有阳极箔与阴极箔之分，阳极箔采用 3N5~4N9 的精铝轧制，电压高的用的纯度也高一些，而阴极箔则采用 2N7~3N 的原铝与纯度较低的精铝轧制，也可用含有少量 Cu、Mn 等的低合金化的合金生产。

当代电容器的发展趋势是体积更小、质量更轻、适应性更强、品质与效率更高。因此，这就对精铝的杂质含量及其加工技术提出了更高的要求。电解电容器主要应用于轨道车辆控制系统、演播室脉冲测量仪（studio surge measuring instruments）、荧光灯与汽车电灯、电控制与驱动齿轮频率转换器、摩托车电子设备、影视设备等。

照明灯及反射镜。精铝在照明灯具中有这重要用途，办公楼及写字楼天花棚灯，商业大厦的各种照明，以及图像显示聚光灯到大面积广场的照明灯具，诸如足球场、机场、工业厂房、调车场、车站、街道的投射灯都要用精铝材料，它们的反射镜是用精铝薄板制成的，哪里有现代化的照明灯具，哪里就有精铝产品。高镜面抛光铝板带是用精铝轧制的，它们对可见光有很强的反射性，其反射率超过 90%。

火箭发动机超级合金的必需元素。精铝是一种环保性能很强的材料，同时在制造超级耐热合金方面是一种经济的合金元素。当今，制造火箭推进器与燃气透平的超级合金都含有铝，而且用的都是精铝。目前，新一代的透平机叶片是一种高技术产品，是用超级合金制造的，甚至是用其单晶制造的。单晶超级合金叶片的主要优点是其不但有很高的室温强度，而且还有相当高的高温强度与很强的抗高温氧化能力，因而大大提高了透平（燃气发电机与水力涡轮发电机）的工作性能与效率。

超导体稳定化材料。精铝产品在支撑着高能物理研究，在探测物质基本粒子方面起了不可估量的作用。例如欧洲核研究中心（European centre for Nuclear Resarch）探测器的超导结构与电缆就用了相当数量的海德鲁（Hydro）铝业公司生产的精铝。这种超导体安装于高频高速器内，后者用于分析质子碰撞时产生的粒子。超导电缆由精铝与 Nb-Ti 超导

线组成，超导线埋于精铝中，精铝起热与电的调节作用，一旦通过的电流超过额定值，多余的电就会流入超导线之外的精铝中，使 Nb-Ti 超导线始终处于稳定的超导状态。有些磁悬浮列车路线也是用超导电缆输送电力的。

整流器线材。整流器是一种用途极为广泛的电气设备，是铝电解厂整流站的关键设备，没有它就不能把外面的交流电变为电解所需要的直流电。精铝虽有高的电导率，但强度低，不适宜用作架空线，不过精铝线材在整流器线圈制造中大有用武之地，一般是用 4N+精铝线材，其直径应大于 50μ m，5N+线材的直径应大于 100μ m，否则由于其强度小，很难拉制。此外，由 4N+精铝加 1%Si 的合金线材也在电器装备中获得应用，这种线材有着相当强的耐湿性。4N+表示精铝纯度大于 99.991%~99.9985%。

高纯铝的应用

高纯铝主要应用于半导体工业，约占 95%。铝的最低纯度为 99.999%，每种杂质的最大含量 0.4ppb。

阴极溅镀靶。在工业生产中，尤其是芯片制造时，阴极溅镀是一种必不可少的工艺，是一项纯高精技术。计算机储存硬盘通常是用高纯铝或高纯铝合金制造的。日本生产的硬盘占世界市场的 70%。

阴极溅射镀是一种特殊工艺，蒸发的铝呈现等离子体状

态，沉积于阴极靶面，即在硅片（silicon wafer）上形成一层薄而均匀的铝膜，随后于其上涂一层感光树脂，经暴光后，除去无用的树脂，也就是把这些部位的树脂去掉（腐蚀掉），而保留的极窄铝条，便是所需要的导电体。阴极溅射镀用的高纯铝的纯度越高，其导电性能也就越强。

集成电路配线。当前，可用个人计算机进行大量计算，即可在全世界于几毫秒内进行 10 亿次计的计算。这种高速运算之所以成为现实，完全得益于芯片。制造芯片需要先进的诀窍（know-how）技术、高超的制造工艺、高纯度的材料。铝企业向溅射靶企业（sputtering target）提供超纯铝或特纯铝，由他们加工成溅射镀膜转卖给芯片制造公司，微处理机制造公司用芯片制造微处理机集成电路。铝的纯度至关重要，因为材料可信度越高就越好控制，即使材料中存在痕量杂质，特别是铀与钍之类的放射性元素的危害更大，它们会使微处理机集成电路出现故障，使程序紊乱。这种紊乱与失误是铀与钍在时时释放α 粒子的结果，这种铀与钍是从铝土矿中带来的，它们的含量虽是 ppb 级，但危害很大，应严格控制，从源头抓起，生产这种超（特）纯铝用的铝土矿-氧化铝-原铝-精铝-超纯铝的提取工艺与装备应一成不变，以保持成分的高度稳定。

光电子存储媒体。光电子存储媒体需用 5N+超纯铝制造 CD、CD-ROM、CD-RW、数据盘或微型盘、DVD 银盘。银盘的光

反射层为 5N+超纯铝溅射膜。现代激光器具有处理样本的精确点数字信息传呼能力（sample point-accurate digital information calls），但需要高精密装备与用 5N+超纯铝制造的存储媒体。

1.3.33 铜辊套铸轧机产铝带坯向高品质迈进

当前,生产铝板带冷轧用的坯料有 3 种工艺:铸锭热轧法,双辊式连续铸轧法,黑兹列特双带式连铸连轧法。截止到 2010 年底,全世界生产铝板带的 74%是以第一种生产工艺带坯冷轧的,所有的厚板(大于 6mm 厚)全是用铸锭热轧法生产的;用第二种生产工艺的约占 25%;第三种生产工艺生产的占的比例还不到 1%,中国首条铝带坯连铸连轧生产线可于 2010 年 12 月调试完毕,预计正常商业化生产可能要到 2011 年 6 月份左右,所以中国目前用的供冷轧用带坯都是用前两种工艺生产的,铸锭热轧的占 36%左右,其余的是铸轧的。不过随着大批铸锭热轧项目的相继投产,这种状况将会有所改变。不过在中国不宜大力发展铸锭热轧法,毕竟中国 80%左右的板带箔可用铸轧法生产,笔者认为,前两种工艺生产的产品以各种 50%为宜,热轧法提供的坯料最好不超过 40%。

双辊式铸轧工艺亟待改进

1982 年,中国首台双辊式铸轧机在华北铝加工厂(现名华北铝业有限公司)通过冶金部组织的专家鉴定会鉴定后。到2010 年底中国保有的双辊式在产铸轧机(不含已淘汰的、拆除的、永久封存的)约 510 台,这是笔者综合各种方式调查得到的结果,准确率在 96%以上。中国生产双辊式铸轧机的途径有 3 种:从国外引进的;专业公司设计制造的,如涿神公司、洛阳有色金属加工设计研究院、上海捷如重工机电设备有限公司、上海天重重型设备有限公司、洛阳正扬设备公司、涿州诚达设备有限公司、镇江宏业设备有限公司等 12 家企业设计制造的;企业自制的。如果每台的生产能力按 9kt/a 计算,中国现有铸轧机带坯的总生产能力约 4590kt/a,2009 年铸轧带坯的总产量约为 3500kt,设备利用率为 76%。

2009 年全世界约有 950 台双辊式铝带铸轧机,除了中国式的 492 台外,其他的是法塔亨特式(FATAHunter)约 235台,NovelistPAE 式(原来法国普基公司的 3C 式)的 223 台左右,它们的生产能力约为 12.5kt/a,总计 5725kt/a。全世界的生产能力约 10315kt/a。中国双辊式铸轧机是在亨特式与 3C式铸轧机的基础上发展起来的,因此其形式与原理与它们的大体相同。中国铸轧机的台数为全球的 52%,而生产能力相当于世界总产能的 45%。

引进铜辊套提高带坯产量与质量

中国虽拥有世界上最多的双辊式铝带铸轧机与最大的生产能力,但单台铸轧机的平均生产能力(9.0kt/a)比国外的(12.5kt/a)低 28%,这一方面因为中国的中小型铸轧机(小于1600mm)占总数的 80%以上,另一方面是整体的装机水平仍有待大大提高,为此,应提高铸轧速度与带坯品质,只要将速度提高 30%,产量就可以增加 1/3,同时产品品质也可得到显著改善。

提高铸轧速度最有效的途径或者说惟一途径就是提高铝熔体的凝固速度,而采用热导率高的辊套材料是实现这一目标的有效途径之一。众所周知,在常用的金属材料中,铜和铝的热导率是最高的,铝的熔点低,强度也不高,根本不可用作辊套材料,那么惟一可替代钢用作辊套材料的就只有铜合金了。

全世界的冶金工作者包括中国的科学家在内都对铜合金辊套做了较多的研究,终因性价比不尽人意而都付诸东流,只有德国克梅公司(KME-KMEuropaMetalAG)在不懈地坚持研发,终于攻克了这道难关,作为世界上最大的铜材和铜产品跨国企业的德国克梅公司于 2006 年研制成功了一种名为“ELBODURB95”的 Cu-Co-Be 合金,具有良好的性价比,已在巴西、希腊、韩国、卢森堡、西班牙、挪威、匈牙利、意大利、

俄罗斯、土耳其等国的一些铸轧机上获得了应用,效果良好,经济效益显著,截止到 2009 年底在使用的铜辊套已经超过 100 套。

克梅公司于 1998 年开始投入大量的物力及人力研发铜合金辊套,定性的辊套合金 ELBODURB95 是一种性能良好的沉淀硬化性合金,是对 Cu-Co-Be 合金成分做了较大改进的性能良好的高温合金。它的主要优点是:高的硬度和强度,高的热导率,高的蠕变强度与疲劳强度;使用铜辊套可提高铸轧速度 0.5~1.0 倍,生产能力可提高 65%~95%;带坯品质明显改善,晶粒细小均匀,如铸轧 1050 合金时,用钢辊套的晶粒度为 2.8(ASTM,下同),而用铜辊套时,晶粒度为 3.9;铸轧 8011 合金时,用钢辊套晶粒度为 2.1,而用铜辊套晶粒度为 4.3;对 883/1003×1900m 铸轧辊套来说,在一个运转周期内,钢辊套的利润约 513.3 万元(钢辊套采用 32Cr3Mo1V),铜辊套利润约为 809.9 万元,后者比前者高 296.6 万元,即约高 60%;由于铜辊套的生产效率提高一倍左右,对于新建的铸轧线,在相同的产能条件下可节省 50%的投资;采用铜辊套不需要对现行的铸轧机做任何改造。

鉴于铜辊套的这些优点,笔者认为,中国的铝带坯生产企业应该在适当的时间,在市场适当的情况下,引进铜辊套铸轧机。因为其一,铜辊套铸轧机对企业来说,投资小、产品品质高、利润高;其二,铜辊套铸轧机生产效率高,在同等的生产条

件下,铜辊套铸轧机要相比其他铸轧机节约能源,这符合当今社会可持续发展的需要。

1.3.34 铝带冷轧产能居世界首位

经过60年的发展特别是改革开放以来30年的高速持续大发展,中国铝带冷轧工业取得了举世瞩目的辉煌成就,截至2008年底,中国铝带的生产能力达到6230kt/a,比美国的测算最大生产能力6100kt/a高2.2%,成为全世界最大生产者。中国的铝带冷轧工业创造了几个世界之最,拥有最多的高技术大容量现代化冷轧机,最多的CVC轧机,最多的1400㎜级四辊不可逆式冷轧机(2010年底可有约83台),最多的1300㎜以下的小型铝带冷轧机。河南省是全球最大的中低档铝板带基地,集中于郑州至洛阳的狭长地带内。至2009年底中国可有3条铝带冷连轧生产线,1条自制的,2条引进的。

2008年底中国约有131个大中型铝板带轧制企业,50个小企业,共计180多家。中国的铝板带轧制工业虽然始于1919年9月,上海益泰信记铝器厂用二辊小轧机轧制小铝片,开创了中国铝加工工业的先河,然而完整的铝板带轧制工业是在新中国成立以后发展起来的。1956年11月6日中国第一家大型综合性铝材生产企业---东北轻合金有限责任公司(当时工厂代号为101厂)经国家验收正式交付生产,从此中国有了现代化的铝轧制工业。截至到2008年底有引进的大容量高技术(生产能

力≥50kt/a、支承辊辊面宽度≥1800mm)单机架冷轧机18台,普通的单机架冷轧机27台,共计45台,总生能力2118kt/a;双机架冷连轧线1条,5机架冷连轧线1条,合计生产能力570kt/a;引进轧机(含2008年底已签约的但尚未投产的)总生产能力2688kt/a。至2008年底有支承辊辊面宽度≥1400mm的中国自行设计与制造的四辊(含六辊)不可逆式冷轧机约165台(含2008年底已签约但尚未投产的),它们的总生产能力约4800kt/a。中国2009年拥有现代化铝带冷轧机(笔者给的定义是支承辊面宽度≥1400mm级的四辊不可逆式)的企业约108个。

中国铝带冷轧的简单回顾解放前的铝带冷轧机:虽然中国1919年开始轧制小铝片,比美国和法国约晚30年,但铝带冷轧却到1932年才开始。那时,加拿大铝业公司、瑞士铝业公司、英国铝业公司利用瑞士铝业公司一家铝箔厂淘汰的二手设备投资100万美元合资在上海创办了中国首家铝箔厂---华铝钢精厂,即后来的上海华瑞铝业合作公司(2007年又重组,厂房拆除,设备搬走,工厂不再存在) 。华铝钢精厂有3台425mmX800mm可逆式二辊铝带冷轧机,带卷的最大重量只不过40kg,宽仅420mm。有16个铁模,铸锭尺寸80mm×(300~430)mm×760mm,650mmX1500mm二辊可逆式铝板冷轧机2台。一直到东北轻合金有限责任公司建成前,这些设备都是中国最大最好的铝板带加工设备。在1943年~1945年太平洋战争期间,华铝钢精厂被日本人接管,转产飞机修理用铝合金板。抗日战争胜

利后华铝钢精厂交还给瑞士商人,1946年与加拿大铝业公司共同制订了扩建计划。后来,由于解放战争的节节胜利,扩建计划停止执行。全国解放后,新中国对私营企业采取利用、限制、改造的方针,华铝钢精厂的铝箔产量维持在560t/a左右。

1960年,该厂作为中国大陆最后一家外商企业由国家赎买接管。东北轻合金有限责任公司的建设:在新中国国民经济恢复期间,铝加工业虽有所恢复,但其生产技术仍处于20世纪20年代的水平,为了满足国防建设与国民经济发展的需要,必须建立完整的铝加工工业。从1952年开始对建设中国第一个现代化的综合的大型铝加工厂作前期准备,包括人员的国内外培训等。

在国民经济建设第一个五年计划的第一年(1953年)开始建设现在的东北轻合金有限责任公司,它是在苏联的全盘援助下建设的,分两期进行,1954年~1956年建设第一期工程,1958~1960年建设第二期工程,厂区占地面积189×104m2。一期工程的主要项目有:熔炼铸造车间,板带材轧制车间,管棒型线材挤压车间,中心试验室。1956年11月6日经国家验收正式投产。轧制车间有?700mm/1250mmX2000mm可逆式四辊热轧机1台,?500mm/1250mm?1700mm可逆式四辊冷轧机2台,冷轧带材的生产能力20kt/a。所生产的板带材对中国的经济建设与国防建设发挥了极为重要的作用。

1988年,中国第一重型机械集团公司与意大利米诺公司

(MINO)合作对铝带冷轧机作了现代化技术改造,使单机生产能力达到20kt/a。西南铝业(集团)有限责任公司的建设:1958年~1977年是中国自力更生发展国民经济时期,为了改善铝板带材轧制工业的布局,除了建成了西南铝业(集团)有限责任公司这样的大型铝加工厂,如沈阳方圆铝业有限公司、石家庄有色金属加工厂、天津海伦铝业有限公司(原铝制品总厂)、北京伟豪铝业有限公司(原铝制品总厂)、重庆铝制品加工厂等30余家。1961年东北轻合金有限责任公司的铝箔车间建成投产,是按照华铝钢精厂的设备与工艺设计的,其800mm冷轧机可生产卷重四五十千克的小卷带材。西南铝业公司的筹建工作始于20世纪50年代末,是为了生产能满足制造苏式大型飞机所需的铝、镁、钛材而建的。1965年7月1日动工兴建,1970年7月板带车间投产,有1台中国第一重型机械集团公司设计制造的?750mm/1400mmX2800mm可逆式四辊热轧机及1台650mm/1400mmX2800mm可逆式四辊冷轧机,后者当时设计生产能力为20kt/a。1985年这台冷轧机改造为(1+1)式热轧生产线的热精轧机。第一重型机械集团公司后来又为西南铝业有限责任公司制造的一台。650mm/1400mmX2800mm四辊可逆式冷轧机,1983年投产。该轧机在技术上达到了上世纪70年代的国际水平,轧制速度360m/min,有液压自动厚控系统(AGC)、轧辊轴承油雾润滑、工业辊液压正负弯辊、开卷机随动对中、可控硅供电、轧辊分段冷却、轧制液精密过滤等。

铝带冷轧的振兴与大发展时期

1978~1998年是中国铝带冷轧工业的大振兴、大发展时期,是中国铝带冷轧工业由计划经济向社会主义市场经济转变的过渡时期,大型铝板带轧制厂产品转为以民用为主。党的十一届三中全会以来,特别自1980年实行对外开放,以及在以后的一段时间内执行的“优先发展铝”的方针指引下,中国铝带冷轧工业的发展进入了前所未有的黄金时期。板带材的产量由1978年的62.27kt增加到1998年的267.19kt,年平均增长率为7.55%。在这个时期,一方面对原有的大型铝加工厂诸如东北轻合金有限责任公司、西南铝业(集团)有限责任公司的板带轧制系统作了大规模的扩建,并建了一批新的板带加工厂,如铁岭有色金属加工厂、渤海铝业有限公司、华北铝业有限公司、郑州铝业股份有限公司、华东铝加工厂、瑞闽铝板带有限公司、华益铝厂有限公司、广州铝加工厂、云南铝业股份有限公司铝加工厂、西北铝加工厂板带分厂、太原铝材厂、秦川机械厂铝加工厂、海伦铝业有限公司、通用铝业有限公司、马头铝业集团板带厂、平阴铝厂板带厂、江苏铝厂板带厂等;另一方面,中国第一重型机械集团公司、洛阳有色金属加工设计研究院、涿神公司、陕西压延设备厂、昆明重型机械制造厂等在设计制造了30多台现代化的2800mm、1600mm、1400mm、800mm级四辊铝带冷轧机的同时,还引进了30余台四

辊铝带冷轧机,其中一些冷轧机如西南铝业(集团)有限责任公司的?440mm/1250mm?1850mmCVC四辊不可逆冷轧机、450mm/1270mmX1850mm四辊不可逆冷轧机、瑞闽铝板带有限公司的1850mm六辊不可逆CVC铝带冷轧机、渤海铝业有限公司的510mm/1350mmX2300mm四辊不可逆铝带冷轧机都具有当时的世界先进水平。这些中国自行设计制造的与引进的四辊铝带冷轧机的总生产能力约为1400kt/a,为此时期(1978年~2000年)以前的东北轻合金有限责任公司与西南铝业(集团)有限责任公司的3台四辊铝带冷轧机生产能力之和(60kt/a)的23倍多。从1999年开始,中国的现代铝带轧制工业进入一个以调整装备结构、技术结构、产品结构等为主的更高一级的发展时期,这个结构调整时期可于2010年结束。

中国现代铝带冷轧工业的现状

中国到2002年底拥有的现代化四辊铝带冷轧机将超过76台,生产能力近1398kt/a,仅次于美国、日本、德国,居世界第四位。到2005年很可能超过日本和德国而跃升到全球第二位。中国自行设计与制造的四辊铝带冷轧机中国第一重型机械集团公司从1961年开发始为西南铝业(集团)有限责任公司设计制造了1台?750mm/1400mmX2800mm四辊可逆式铝热轧机和1台?650mm/1400mmX2800mm四辊可逆式铝带冷轧机。它们于1969年投产,产品不但满足了国内市场需求,而且有一批进入

国际市场,其产品于1979年获国家银质奖。1983年,第一重型机械集团公司又为西南铝业(集团)有限责任公司设计制造了1台?650mm/1400mmX2800mm四辊可逆式铝带冷轧机,而将第一台2800mm冷轧机改为热轧机。同时,该集团公司还为西南铝业(集团)有限责任公司设计制造了中国首台360mm/1000mmX1400mm不可逆式四辊冷轧机,轧制速度可达600m/min,产品最薄厚度为0.2mm,板厚偏差为±0.005mm。具有液压AGC系统、X射线测厚仪、轧制油板式精密过滤、可控硅供电、开卷机自动对中、快速换辊、自动灭火系统等。其技术水平基本与20世纪70年代中期的国际水平相当。该机于1986年10月正式投产。与此同时,洛阳有色金属加工设计研究院吸收了引进的四辊不可逆铝带冷轧机的技术,于1984年独立自主地为洛阳铜加工集团有限责任公司设计了一台?360mm/1000mm?1400mm四辊不可逆铝带冷轧机,由洛阳矿山机械集团公司制造,1988年投产,最高轧制速度360m/min,产品最薄厚度0.2mm,厚度偏差±0.005mm。整体装机水平与20世纪70年代中期的国际水平相当。截至到2010年底中国有自行设计制造的辊面宽度≥1400mm的四辊不可逆式冷轧机165台左右(含4台6辊的,它们的总生产能力约4800kt/a。)800mm级四辊铝带冷轧机:第一重型机械集团公司设计制造的首批四辊800mm铝带冷轧机于1985年在东北轻合金有限责任公司等工厂投产。后来洛阳有色金属加工设计研究院、西安重型

机械研究所等在研制开发这类轧机方面做了许多工作,所提供的十多台这类轧机在薄带材与厚铝箔生产中发挥了很好的作用。一般都把这类轧机设计成可以轧制≥0.05mm的带材。西安重型机械研究所高林林等在为众和铝业股份有限公司设计的800mm思机上采用了一定凸度的展平辊,对减少带材的横向应力取得了很好的效果。薄带材或厚箔材在张力的作用下有横向收缩倾向,易导致横向弯曲变形,采用凸度展平辊对纠正这种弯曲变形是有效的。从2003年起几乎没有建过以800mm级冷轧机为主导装备的平轧铝产品企业,这在中国铝板带轧制工业发展历程中也是很有意义的。1400mm级四辊不可逆铝带冷轧机:中国是全球(至2010年)拥有1400mm级四辊铝带冷轧机最多的国家,共共约83台,其中有自行设计制造的74台,引进的9台,总生产能力约1800kt/a。值得指出的是,目前工业发达国家几乎不再建1400mm级的四辊不可逆铝带冷轧机。近些年来世界上一流的轧机设计制造企业如西马克公司、奥地利钢铁联合工业公司(VAI)、法塔亨特公司(FATAHunter)、日本石川岛播磨重工业公司(IHI)等也未见提供这类轧机。这一点应引起我们的关注。当然,由于中国的国情不同,是一个经济发展不平衡的发展中国家,今后还会发展些这类轧机。中国有色科技股份有限公司、上海捷如重工机电设备有限公司、涿神有色金属加工专用设备有限公司、上海天重重型设备有限公司、诚达机械设备有限公司、正扬设备制造有限公司、

圣实冶金机械有限公司等等,在设计开发1400mm级四辊铝带不可逆冷轧机方面作了大量工作,成就突出。有些轧机的水平已达到当今的国际水平。它们通常都具有如下的功能与装机水平。中国设计的1400mm级四辊不可逆冷轧机一般能生产宽660mm~1260mm、厚0.1mm~3.00mm的纯铝及大部分软合金带材。目前的产品最薄厚度为0.05mm。冷轧机生产线主要由上郑车、纠偏装置、开卷机、轧机、偏导辊、圆盘剪、碎边机、助卷器、卷取机、卸卷车等组成。带卷开卷后经入口夹送偏导辊、五辊展平装置、光亮辊送至主机轧制,高硬度的四辊辊长江及展平光亮辊可保证轧制的带材平直光亮;轧辊倾斜、正负弯辊、轧辊分段冷却的采用,可改善板形;为了保证表面洁净,设有支承辊清辊器及空气清辊器;高强度与高刚性的牌坊及升降灵敏的压上缸,在AGC系统的控制下,可获得高精度的带材;轧制线可保持恒定,并在操纵台屏幕上以数字显示;排烟系统能及时吸抽、净化、排放轧制烟雾,保持良好的工作环境,排放的气体符合环保要求。轧机的传动系统由大功率直流电机、高精度联合齿轮减速箱、万向联轴节组成,传动既稳定又可靠;采用快速换辊装置、万向接轴支架及快换接头,能显著缩短换辊停机时间;出口侧设有X射线测厚仪,可确保带材的精确轧制厚度;圆盘剪可在线剪切带材边部,经碎边机切断后由皮带运输机送至碎边箱;带材端部由液压剪切齐;尾部导向装置可将带材导入卷取机的卷筒。卷取机由卷筒、活动支撑、减速

箱、推料板、涨缩缸与传动部分组成。采用串联直流电机驱动、牙嵌式电磁离合器与机械变档,能可靠地为不同厚度的带材提供所需的张力。当带材厚度被轧到4mm以后,皮带助卷器可使带材快速、方便地卷取。两侧的运卷升降小车都是自动控制的,带卷储运系统能方便、快速运输,大大提高了轧机的自动化程度。入口侧及出口侧的套筒导出装置及导入装置可各存放4个套筒,缩短了天车的使用时间。轧制液喷横梁安装于入口侧,可向轧辊喷射高效的冷却液,通过喷嘴流量调节系统可实现轧辊分段冷部,有效地控制辊形。轧制液通过精密板式过滤器过滤。液压系统包括压上、弯辊及一般操作系统。设有压上泵站,可为压上缸及正负弯辊缸提供强大可靠的压力,压上系统在厚控系统的控制下可快速灵敏地使压上缸升降,从而精确地调控带材的厚度。弯辊系统可通过手动单独调节流量控制阀调控板形,也可以采用板形仪自动控制板形,多数1400mm级轧机都装有引进的板形仪。一般操作系统由一个泵站及3个阀站组成,控制轧机一般运动件的油缸、油马达,以保证轧机达到高度的整体自动化。润滑系统包括稀油、干油及油雾润滑系统。稀油润滑系统向开卷机、卷取机及主传动齿轮减速箱提供循环流动并经过滤的齿轮润滑油;干油润滑系统向轧机各处的滑动面及转动面强制压送干油,以保证雾部件运动的灵活性与降低磨损;油雾润滑系统向轧辊轴承及导辊轴承喷射雾化润滑油,对保证轧机的高速转动起着至

关重要的作用。气动系统由压缩空气干燥机和气动阀站构成，向轧机的空气吹扫器及各种气缸提供所需的压缩空气。

大型不可逆式铝带冷轧：这里所指的大型铝带冷轧机是其支承辊辊面宽度≥1800mm的。近几年来中国自行设计制造了一批大型铝带冷轧机，它们在生产中发挥了很好的作用，但与先进的国外同类轧机相比还有较大差距。首台这类轧机是1971年投产的?650mm/1400mm?2800mm可逆式四辊冷轧机，15年后它被改造为2800mm（1+1）式热粗-精轧生产线的热精轧机，同时第一重型机械集团公司又为西南铝业（集团）公司制造了一同规格的冷轧机，装机水平也有了一些提高。

首台1900mm四辊不可逆式冷轧机--进入新世纪以来中国设计制造了约40台大型铝带不可逆式冷轧机（截至到2010年），其中有4台六辊的，这些轧机的装机水平高低不一，高的达到了当时的一般国际水平，装有AGC与AFC，轧制速度达到1200m/min或更高，带卷质量大于15t；低的只达到了国内的一般水平，它们多是企业按弄来的图纸自行制造或委托多家企业制造的，装机水平自然会打折扣。

在这些大轧机中晟通科技有限公司的?420mm/1020mm?1900mm四辊不可逆冷轧机是姣姣者，是上海捷如重工机电设备有限公司在意大利法塔亨特公司（FATA Hunter）的技术支持下设计制造的，2007年8月投产，运转状

态良好，达到了设计目标，共2台。

首台2050mm6辊不可逆冷轧机--中铝河南铝业有限公司的中色万基铝业有限公司是中色科技股份有限公司设计的，2004年4月5日开始有负荷试车，6月投产，是中国自行设计制造的首台6辊不可逆式铝带冷轧机，该机的卷取机采用3台直流电机（618KW）串联传动，在高速档仅靠近卷取机的一号电机驱动，即单电机驱动，且后边串联的2台电机不脱开。

与华北铝业有限公司从日本日立公司（Hitach）引进的那台平辊6辊轧机相比，它的最大轧制速度低40%，主电机功率低25%，产品最薄厚度却大一倍，最大轧制力也高25%。

冷轧机的结构：截至到2010年，在笔者统计的247台国产四辊铝带冷轧机中，辊面宽度（支承辊）小于1300mm的74台，占30%；辊面宽度≥1300mm~＜1500mm的即1400mm级的71台，占28.7%；辊面宽度≥1500mm~＜1700mm的即1600mm级的46台，占18.6%；辊面宽度≥1700mm~＜1900mm的即1800mm级的42台，占17%；辊面宽度≥1900mm的14台，占5.7%。

辊面宽度1400mm级及以下的占主导地位共145台，为总台数的58.7%，这是中国铝板带轧制工业主要特点之一，小轧机仍是主流，但与改革开放前的98%以上形成鲜明的对照。

在笔者统计的1400mm（含1400mm）以上的国产的四辊铝带冷轧机169台中，按地区的分布结构为：河南省50台，占31.4%；江苏省26台，占16.3%；浙江省18台，占11.4%；山东

省18台，占11.4%；广东省8台，占5%；福建省6台，占3.7%；重庆市6台，占3.7%；上海市5台，占3.2%；湖南、山西、河北各4台，分别占2.6%；其他7省市11台，占7%；河南、江苏、浙江、山东有110台，占总数的69.4%。河南省是全球中档平轧铝产品基地。

吉林、辽宁、内蒙、新疆、贵州、江西、湖北、安徽、陕西没有国产的支承辊辊面宽度≥1400㎜的铝带冷轧机，而湖南与西藏就是别的铝板带冷轧机也没有。

现代化冷轧机的引进

1956年东北轻合金有限责任公司从苏联引进2台1700㎜四辊可逆冷轧机。改革开放以来，又是东北轻合金有限责任公司率先引进1台米诺公司的?260㎜/625㎜?900㎜的四辊可逆式铝带冷轧机，于1979年投产。截至到2010年底，中国引进的四辊铝带冷轧机达45台，总生产能力2118kt/a。

中国引进的四辊铝带冷轧机既有全新的又有二手的，既有不可逆的又有可逆式的，既有当时世界先进水平的又有一般国际水平的。

从2002年开始，中国再也没有引进一般国际水平的普通铝板带冷轧机了，所引进的全是高技术大容量铝带冷轧机，这既表明中国铝带轧制工业进入一个新的阶段，也表明现代铝带轧机的设计与制造水平又登了一级新台阶，4辊铝带冷轧

机不但可基本满足本国中小厂建设的需要，而且开始出口到发展中国家。

引进的首台DSR冷轧机：中铝河南铝业有限公司郑州冷轧厂有3台现代化大容量冷轧机,其中1台是中色科技股份有限公司的2050mm六辊的，已于2007年初投产，运转情况良好；另一台是从西门子集团奥钢联金属技术公司（VAI）英国分部引进的，装备有动态板形辊（DSR,Dynamic Shape Roller），是中国首台这类高技术冷轧机，可于2009年秋投产。另1台将安于中铝瑞闽铝板带有限公司，原计划于2010年投产，由于受世界金融危机冲击，投产日期会往后拖延一段时日。它是河南省惟一的1台铝带冷轧机。另1台将安在中铝西南铝冷轧机板带有限公司，于2010年投产。

中国是世界CVC冷轧机王国：中国引进的CVC铝带冷轧机既有4辊的又有6辊的，6辊的有12台占85.8%，辊面宽度有1850mm，最宽的为2550mm，最近10来年引进的都是宽的，不小于2000mm。亚洲铝业集团肇庆铝工业城的2550mm轧机，不但是中国引进的CVC轧机中最大者，也是全球这类轧机之王。

亚洲铝业集团CVC6冷轧机集当今多项世界先进水平于一体，装机水平一流，其主要特点如下：

环保：配置有最先进的空气洗涤系统，即可保证排除的空气纯度达到最高排放标准，又可有效地分离、净化和回收利用生产过程中产生的油雾，并成功地实现回收轧制油的直

接利用。

VC连续可变凸度控制系统与热边喷射系统的应用：CVC控制独特的S型中间辊（连续可凸度）设计，即拓宽了轧机的可轧产品宽度范围，又可确保生产出板形与表面质量优良的铝板带材。该系统的应用有可确保铝带材平直度最佳化，从而保证向市场源源不断地提供品质优良的铝板带产品；热边喷射系统则可有效补偿对宽幅带材的板形控制，同时可减轻带材高速轧制时的断带风险。

设计观念独特，投资及维护成本低：应用在液压、配管、阀座、控制电缆系统中的镶嵌式模块设计，显著地降低了配管数量，缩短了现场安装周期，提高了使用可靠性，节约了投资，减轻了维护成本与强度。

产品规格范围宽、轧机能力“充沛”。

生产控制灵活、效率高：可根据市场需求，灵活组织生产不同合金、状态及规格的产品。

这台中国最大的CVC6铝带冷轧机2008年7月投产，但由于受世界金融危机的冲击及诸多其他因素的影响，投产后一直未能正常生产，并从2009年4月起处于停产状态，何时启动，尚难预言。

铝带冷连轧

至2009年底中国可建成3条铝带冷连轧生产线，1条中国

自行制造的，2条引进的，其中1条新的，另1条是从美国凯撒铝及化学公司购来的停产的二手的1727mm5冷连轧生产线。此前全世界有36条冷连轧生产线，加上中国新建的这条生产线，所以截至到2009年底，全世界的铝带冷连轧线共38条，总生产能力约9500kt/a。

引进的冷连轧线：截至到2009年末中国引进的2条铝带冷连轧线都具备生产条件，中铝西南铝冷连轧板带有限公司的那一条生产线于2009年5月26日一次性有负荷试车成功，标志着该工程的建设取得了实质性的阶段性成果，大致可于8月份投产，从此中国有了自己的铝带冷连轧线。

中国首条铝带冷连轧线:中铝西南铝冷连轧板带有限公司的2000mmCVC6冷连轧生产线是西马克集团公司提供的,是上世纪90年代中期以来全世界建的首条双机架全新的这类生产线,集中了一切先进的技术,在同类生产线中居领先水平,是亚洲铝工业第3条铝带冷连轧线。日本神户钢铁公司真冈(Moka)轧制厂的2400mm双机架冷连轧线于1993年投产,是上世纪90年代建的一条先进的连轧线。

除了日本的那条的可轧材料宽度可达2300mm以外,它们的其他参数大体相同,例如它们的主电机功率相等,都是8000kw,最大轧制力相当,同为20000kn,这在一定程度上说明,西南铝的那条具有更大的“劲”,可轧制一道,将材料轧到所需厚度,每个机架的最大轧制率可达65%或甚致70%。

西南铝的这条双机架冷连轧项目自2006年12月25日签约以来,西南铝与各施工单位和设备制造者密切配合,周密计划,精心组织,科学管理,保证了项目设计、设备制造和厂房土建工程的顺利完成,2008年7月18日完成了牌坊呆装,从而进入了设备安装阶段。由于西南铝克服了自2008年第四季世界金融危急带来的重重困难与前所未有的巨大压力,于2009年4月9日全部完成了轧机本身及辅助设备的安装,从而进入了无负荷调试阶段,经过现场专家、施工单位的共同努力,仅经过40天的工作,完成无负荷调试工作,速度之快,质量之高,令外国专家啧啧称赞。

中国及亚洲第一条五机架冷连生产线:亚洲铝业集团肇庆铝工业城铝板带项目有一条1727㎜冷连轧生产线,是从美国凯撒铝及公学公司买来的二手设备,但经过西马克公司与通过电气公司(GE)的适度技术改造,但并不是全盘的升级改造,原计划2006年底或2007年早些时候投产,可是由于种种原因,安装与调试时间数度推延,2008年下半年起又由于受世界金融危机影响,对该工程来说,更是雪上加霜,现在看来,投产日期实难卜定,真是一个时运不济的工程。

这个项目即使能在明后年建成投产,也几乎不可能在投产后的四五年取得较好的经济效益,在可预见的时期内工业发达国家很可能不会建这样的多机架冷连轧生产线,因为大功率双机架冷连轧生产线的机架压下率可高达70%,一道次就

可能生产H19的特硬材料。

这条5机架冷连轧线的最大特点是采用水基润滑冷却剂,世界上以水(反渗透水)作为润滑冷却剂的只有3个企业:美国铝业公司田纳西州轧制厂,诺威力铝业公司(Novelis)的奥斯威戈(Oswego)轧制厂,凯撒铝及化学公司的这个厂。亚洲铝业集团在购买凯撒铝及化学公司特伦特伍德轧制厂(Trentwood)的这套二手设备时就购买了此项技术的相关诀窍。采用反渗透水(RO)作为水基润油冷却剂的基础液可轧出表面品质光亮的高品质的铝带,同时也更环保,不过技术门槛更高些,也需要更为严格的管理。

自制的双机架冷连轧生产线:中国正在自制2条双机架铝带冷连轧生产线,一是萨帕铝热传输材料有限公司的1700mm的连轧线;另一条是巨科铝业有限公司的1850mm的双机架冷连轧机列,从宝山钢铁公司购买一套二手的钢带生产线,自己组织一班人马进行设计与外委加工一些零部件,2009年6月上旬牌坊吊装到位,9月可调试完毕进入试生产阶段,这是中国自行设计与制造的首条铝带冷连轧生产线,在中国铝加工发展史上具有重要意义。

萨帕铝热传输材料有限公司的三期工程的主体设备有1台1750mm的单机架双卷取热轧机,一条1700mm的双机架铝带冷连轧生产线,这是中国自行设计制造的全新的生产线,由中色科技股份有限公司设计。

经过60年的建设,中国铝带冷轧工业取得举世瞩目的辉煌成就,2008年的生产能力约6230kt/a,比美国的最大测算生产能力6100kt/a高2.2%,成为全世界最大者,可庆可贺。这一方面是好事,另一方面也值得回味,这么大的生产能力怎么能发挥呢?效益在哪?

中国拥有世界最多的大容量高技术不可逆式最先进的现代化铝带冷轧机,共18台,总生产能力1631kt,占2010年铝带总生产能力的(8115kt/a)20.1%,从这个角度来看,中国铝板带装备已跻身世界先进水平。

中国首条有完全自主知识产权的1850mm双机架冷连轧生产线可于今秋在巨科铝业公司投产,在中国铝轧制行业是一件大事,具有里程碑意义,尽管这条连轧线在生产罐身带材方面目前还存在不少困难,甚至可以说在最近几年内还不可能,但在生产普通软合金带材方面应该不存在问题。还有企业规划自行设计制造三机架、四机架铝带冷连轧生产线,这种自力更生精神诚可贵,但建设时机值得考虑,一条三机架冷连轧线适合于大批量生产,软合金带材的生产能力可达250kt/a~300kt/a,最好有一种合金的生产能力能达到120kt/a,否则很难发挥设备的能力,取得预期的经济效益,这样的项目最好少建或不建,或看准时机再建。

有一家特大型企业自2005年以来已建成与在建5条热轧

生产线,生产能力1230kt/a;双机架冷连轧线1条,单机架不可逆式冷连轧机15台,总生产能力约1000kt/a,这一下子形成这么大的生产能力怎么发挥呢?企业的发展不是简单的“1+1=2”的问题,今天并购一厂,明天又收购一个厂,后天又把分散在不同地点的几个厂生了身体,伤了原气,只是做大了却未做强(仅指铝板带箔轧制板块),到头来在此领域还是一个“泥足巨人”,铝板带箔轧制企业,当然要做大,但大到一定程度后,要在做强方面多下功夫,要在真正的高精技术产品方面做大做强,不宜在普通产品方面追求生产能力一再扩大,不宜东西南北中都在扩大,追求地域方面的平衡与老大。

在市场经济条件下或在建设市场经济过程中,生产能力过剩是个很危险的状态与局面,一方面现有的生产能力不能得到发挥,另方面意味投资者很难找到投资机会,这是一种极为尴尬的局面。中国近些年铝带冷轧生产能力不是一般的过剩而是大为过剩,而且过剩量在今后三五年内会越来越大些,应引起有关方面与企业家的注意。生产能力应有适当的过剩,但以不超过15%为宜,日本在这方面做得最好,生产能力仅比需求高6%左右,是全球效益最好的国家之一。

大中型(支承辊辊面宽度≥1300mm)现代化铝带冷轧机(轧制速度≥500m/min)宜是不可逆的,而小型铝带冷轧机还以可逆式的为佳。

冷轧用带坯有3种:铸锭热轧的,连续铸轧的,连铸连轧的

(也可将其列为铸锭热轧的)。在中国当前情况下可用连续铸轧带坯生产的冷轧平轧产品占82%以上,因此宜着重发展连续铸轧工艺,毕竟它具有投资小、见效快、更环保、成本低、能耗低等优点,在中国如果热轧的生产能力大于铸轧的,将产生相当不利的负面作用。

1.3.35 铝挤压业面面观：技术自主是关键

表 1　中国铝挤压企业结构

生产能力,kt/a	个数	占总数比率,%
≥300	6	0.73
≥150~<300	20	2.44
≥100~<150	40	4.88
≥50~<100	90	11.00
≥10~≤50	160	19.51
<10	>500	61.44
总数	820	100.00

表 2　中国铝挤压机挤压力大小结构

挤压力,MN	台数,台	占总数比率,%
≥90	52	0.90
≥45~<90	80	1.38
<45~≥30	780	13.47
<30~≥15	1500	25.94
≥10~<15	2100	36.26
<10	1280	22.05
总台数	5792	100.00

中国现代铝挤压工业始于 1956 年投产的哈尔滨铝加工厂（代号 101 厂，现名东北轻合金有限责任公司），有从苏

联引进的水压机 9 台：50MN 的 1 台、35MN 的 1 台、20MN 的 1 台、12MN 的 2 台、7.5MN 的 2 台、6MN 的 2 台。形成生产能力:管材 900t/a、型材 3000t/a、棒材 1100t/a、线材 1000t/a。1970 年西南铝加工厂（代号 112 厂，现名西南铝业（集团）有限责任公司）投产，锻压车间有 1 台第一重型机器制造厂提供的 125MN 水压机，主要生产锻造坯料与大的挤压材，生产能力：管、棒、型材 2000t/a、锻压坯料 7000t/a；1984 年中小型材挤压车间投产，有国产水（油）压机 10 台：35MN 管材水压机 1 台，25MN 管材油压机 1 台、6.5MN 管材挤压机 2 台，型棒线水压机 5 台：20MN 的 3 台、12.5MN 的 2 台，7.5MN 油压机 1 台，1984 年年底投产，生产能力 4kt/a。西北铝加工厂（代号 113 厂，现名中铝西北铝加工分公司），1965 年动工兴建，1968 年陆续投产，可生产除锻件以外的各种半成品，总生产能力 7200t/a。华北铝加工厂于 1978 年动工兴建，1985 年全面建成，生产能力 12kt/a，其中平轧产品 10kt/a，挤压产品 2kt/a。

除了上述 4 个大中型国有铝加工企业外，在 1956 年~1984 年中国还建设了约 95 个可生产挤压铝材的企业，它们生产的挤压材（管材、棒材、型材、线坯）约 820kt，共拥有约 185 台挤压机，总生产能力约 250kt/a，除有 7 台油压机是从日本宇部兴产公司引进的外，其他的是：水压机 27 台，最大的 125MN 的 1 台，50MN 的 2 台（从苏联引进），从苏联引进和

国产的水压机 27 台。其他的 149 台都是从中国台湾购进的中小型油压机。

1985 年~2015 年是中国铝加工业飞速发展的 30 年，现有挤压材生产能力（2015 年）预计可达 18000kt/a，年平均增长率为 15.1%。这 30 年又可分为三个阶段：1985 年~1999 年为飞速发展阶段，2000 年~2009 年为向工业材转变阶段，2010 年起向深加工全面延伸阶段。

挤压企业及挤压机结构

改革开放以来，1985 年~2015 年中国挤压企业按生产能力大小分的结构如表 1 所列，挤压机按压力大小分的构成见表 2。

挤压企业结构

在中国引进的挤压机中有德国西马克美尔公司 SMS Meer 的 22 台，日本宇部兴产（Ube）公司的 110 台，意大利达涅利公司的 10 台，中国台湾的约 4200 台，其他国家的 28 台，国内制造的 1430 台，引进的占 75.35%，国内制造的占 24.65%。

在中国的铝材挤压机中，单动正挤压后装料的占 96%以上，前装料的是近些年引进的与国内制造的。有反向挤压机 45 台，其中 25 台是引进的，主要在金桥铝厂有限公司、南

山轻合金总厂、中铝西北铝加工分公司等，昆山捷安特科技有限公司有最多的国产反向挤压机，共 7 台，用于挤压自行车管材。中国虽拥有各式各样的大小不等的铝材挤压机，但还没有 HybrEx 型挤压机，2013 年在德国面世，日本于 2014 年引进了 1 台。

挤压机结构

到今年年底，中国拥有的铝挤压机总数可达约 5800 台（表 2），占世界总台数的 85%以上，在挤压机中有两个显著的特点：一是挤压力<15MN 的特别多，占世界台数的 96%以上，达 2880 台；二是现代化的挤压力≥150MN 挤压机多，有 6 台，而全世界仅 7 台，占全球总数的 86%。

HybrEx 挤压机

2014 年，德国西马克美尔公司推出一款新型的铝材挤压机，名为 HybrEx 挤压机，让人大开眼界，在铝挤压机发展史上具有里程碑意义，与常规挤压机相比，能源节约 55%以上，生产效率提高 20%。

当前，全球有三大挤压机制造公司：德国西马克集团的美尔公司，日本的宇部兴产公司（Ube），中国的太原重工股份有限公司。对于 HybrEx 型挤压机连日本企业也甘拜下风。

2014年12月日本大阪(Osaka)野洲多金属公司(Yasuda Metal Industries)向美尔公司订购了一台HybrEx14型铝材挤压机，可于今年年底或2016年首季投产，这可能是世界上首台商业化生产的这类挤压机，它的挤压力14.5MN，用于生产建筑铝材，可挤锭坯的最大长度800mm，生产能力5000t/a。由于采用HybrEx 14驱动技术，可节能55%。这是近40年来德国首次向日本出口挤压机。日本引进这类挤压机后，通过消化吸收，可在二三年内制造在技术方面更先进一些的铝挤压机。

在HybrEx挤压机中，美尔公司利用其研发的有创造性的机构产生的成形力挤压长的铝材，仅利用动态电伺服驱动力使挤压机作各种辅助运动，因此与常规挤压机驱动系统相比，挤压速度可提高一倍以上，达到1000mm/s，非生产时间可缩短到仅1s，这就是说提高产量100t/a。

由于HybrEx挤压机采用独特的液压驱动系统，生产成本大大下降，其他的关键技术还有：液压缸带有预注室(prefill chamber)与气密槽(air-tighttank)，后者还有除气装置。这种挤压机采用了新型“OxiStop”技术，因而液压油中的空气含量由10%下降到1%。这种下降对泵、阀和其他磨损件寿命延长极为有利。与常规挤压机的油槽相比，HybrEx挤压机的油槽容积减小90%。

新一代HybrEx挤压机对挤压批量大的铝型材极为有利，有条件的企业也可考虑这种挤压机的引进，对挤压机设计与

制造的企业来说，如果对这种挤压机感兴趣，不妨对其技术做一些研究，并跟踪其发展。

现在美尔公司制造的 HybrEx 挤压机已形成系列，从 14MN 至 38MN 共 5 种：HybrEx14 的锭坯直径 152mm，HybrEx19 的锭坯直径 178mm，HybrEx25 的锭坯直径 203mm，HybrEx32 的锭坯直径 230mm，HybrEx38 的锭坯直径 254mm。

生产能力匡算

挤压型材生产能力的匡算是按笔者提出的匡算系数计算（表 3）的，计算结果虽不精确，但对于比较企业的生产能力与宏观了解情况还是很有用的。

计算实例，例如一台 20MN 或 2000tf 的挤压机生产各种挤压材的匡算生产能力为 2000×2.3＝4600（t/a）。此匡算系数只适应于中国当前的挤压生产线，即每条生产线有五、六个工人操作，如果生产线的自动化程度高，由一名工人或甚至无人操作，则 1 台 20MN 的挤压机的产量可达 10kt/a 或 12kt/a。大挤压机匡算系数之所以小是出于对市场的考虑，如日本轻金属挤压公司（KOK）有 1 台 97MN 的挤压机，按笔者提出的系数计算，其产量只不过 7kt/a 左右，可是由于挤压机的状态好，工人的操作技术高，订单充足，生产管理好与产品结构安排合理，有些年度的最高产量达到 10.5kt/a。日本全国仅有 1 台 100MN 级的挤压机，轨道交通车辆车体用

的大型材及其他产业需要 100MN 级挤压机生产的大型材全由此机挤压。

表面处理与模具生产

铝合金有良好的可表面处理性能。可进行阳极氧化、电泳涂漆、氟碳喷涂、木纹处理等，建筑铝挤压材都要经过表面处理，主要是为了装饰，其次是为了提高抗腐蚀性能，工业铝材也有一部分需进行表面处理如反应堆用的工艺管的内外都要进行阳极氧化处理，有些铝材为了提高耐磨性还需进行硬质阳极氧化处理。

哈尔滨铝加工厂与西北铝加工厂的建设是为了满足国防军工对铝材的需求，挤压车间都没有建阳极氧化生产线，1965 年哈尔滨铝加工厂工艺管车间交付生产，有一条阳极氧化生产线，这是中国首条。上世纪 80 年代初期天津铝材厂与营口铝材厂建成，各有一条从日本引进的阳极氧化生产线，从此中国有了完整的建筑铝材表面处理线。

截至 2014 年年底，中国拥有的表面处理线如下，其中 40%左右是引进的，通常，一个建筑铝材企业表面处理生产能力应比铝材生产能力大 5%左右：

阳极氧化线　25000 条

电泳氧化线　110 条

粉末喷涂线　200 条

氟碳喷涂线　65 条

木纹处理线　20 条

挤压生产需要强大的模具生产能力支撑，大致 10kt/a 挤压铝材生产能力需配备 1500 套/a 的制模能力，2014 年中国铝挤压产业的模具生产能力约 280 万套/a（含独立模具制造企业的）。

结束语

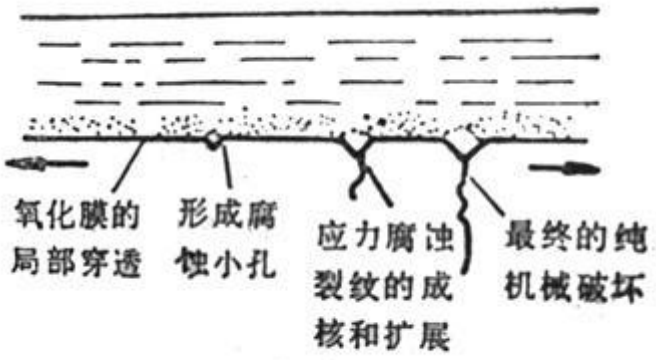
中国是世界超级挤压大国，拥有世界上最多的铝挤压材生产装备，有全球最先进的挤压机，有最多的现代化大挤压机，然而遗憾的是它们大多是新世纪以来从国外引进的，总体上我们与工业先进国家的挤压工业还有一定的差距，特别是装备制造方面差距更大一些，可能还要三四十年才能与那时世界领先水平的国家并驾齐驱。

在此介绍了 HybrEx 型挤压机，希望国内能引进 1 台作为样机，通过解剖与消化吸收，造出更先进的挤压机。日本在这方面的经验值得我们借鉴。20 世纪初日本从美国萨顿公司（Saton）引进 1 台挤压机，没过几年就由宇部公司大批量生产出更好的挤压机，从而满足了当时日本铝工业的需求。几年以后，宇部公司的技术与规模就超过萨顿公司，成为全球的龙头老大，当然在技术与创新方面与美尔公司相比还略逊一筹。

HybrEx 型挤压机于 2014 年一推向市场，日本立刻引进 1 台，很可能 2017 年它会制造出性能更好的变型的 HybrEx 挤压机，或者以更新的面孔出现。

1.3.36 铝合金的应力腐蚀开裂（一）

应力腐蚀开裂过程示意图



变形铝合金的应力腐蚀开裂等级

合金	强化工艺	抗拉强度，N/mm
1XXX 系合金	冷加工	69~172
3XXX 系合金	冷加工	138~310
含 1%~2.5%Mg 的 5XXX 系合金	冷加工	138~300
含 3%~6%Mg 的 5XXX 系合金	冷加工	290~365
含 3%~6%Cu 的 2XXX 系合金	热处理	380~520
6XXX 系合金	热处理	150~380
Al-Zn-Mg 系 7XXX 合金	热处理	380~510
Al-Zn-Mg 系 7XXX 合金	热处理	520~630

应力腐蚀开裂是金属和合金在腐蚀介质和拉应力的共同

作用下发生延迟破坏过程。应力腐蚀常常在腐蚀微弱的环境中在与远低于材料屈服强度的应力下发生，该应力可为屈服强度的 5%~10%。应力腐蚀裂纹，会深深地伸入工件内，断裂前无塑性变形或其他明显征兆，因此，应力腐蚀是一种极危险的破坏形式。

1XXX 系合金、3XXX 系合金及 Mg 含量<3%的 5XXX 系合金不会发生应力腐蚀；6XXX 系合金间或有这种腐蚀；2XXX 系合金、7XXX 系合金及 Mg 含量≥3%的 5XXX 系合金属应力腐蚀敏感性合金。变形铝合金的应力腐蚀开裂等级见表。1 级合金在使用中与实验时都未发未应力腐蚀开裂；二级合金中的某些成分与状态在使用中会发生应力腐蚀开裂，不过调整成分与热处理参数，以及精心设计与合理装配，可避免这种腐蚀。

应力腐蚀开裂的基本特点

1. 产生应力腐蚀开裂必须同时具备 3 个条件：敏感性材料，一定的拉应力（含残余应力），特定的腐蚀环境。

2. 腐蚀环境是特定的。引起应力腐蚀的腐蚀剂在整个溶液中往往是微量组分或特定离子，如氯化物或其他加速铝合金腐蚀开裂的卤化物离子。

3. 应力腐蚀开裂过程可分为裂纹形核、扩展和最终断裂等过程。如果铝合金工件表面原来没有裂纹或其他缺陷，则其应力腐蚀开裂过程如图所示：最初，表面氧化膜因机械或

腐蚀介质作用开裂，形成小孔，造成应力集中；在应力与腐蚀介质共同作用下形成裂纹，这一过程的连续时间称为孕育期；此过程的发展是裂纹扩展，直至最终断裂。

4. 从宏观上讲，应力腐蚀断裂是脆性的，即使是塑性很高的材料也是如此。铝合金的腐蚀断裂形式大都是沿晶的。

5. 另一个显著特点是与承受应力的方向关系极大，以短横向方向即材料高向最敏感。

应力腐蚀开裂机理

金属材料的应力腐蚀开裂是一种与冶金、环境、力学三因素有关的破坏形式，每一因素又包含着许多变量，因此它是一个相杂的问题，迄今尚未彻底弄清其机理。科学家根据大量试验研究提出了许多理论，主要可归纳为：电化学理论、氢脆理论、吸附理论，但是没有一种能圆满地解释各种铝合金的应力腐蚀开裂。

上世纪 70 年代以前，人们认为铝合金的应力腐蚀开裂是电化学的结果。电化学理论又称活性溶解通道理论，认为铝合金中有敏感性通道，相对周围组织来说，它是阳极，优先溶解而形成微裂纹，在腐蚀介质与应力共同作用下裂纹不断扩展。活性通道有两种来源：一是合金中原来存在成分、组织的不均匀区，例如晶界偏析或沉淀物，使晶界成为阳极溶解通道，或者由于阴极相在晶界沉淀而使其毗邻的某元素贫

乏区成阳极通道，如 Al-Cu 合金中 Al2Cu 在晶界的沉淀；二是应变产物活性通道，或滑移-溶解产生的通道。金属在应力作用下变形时，滑移使表面破裂，在滑移台阶处露出新鲜金属，相对于周围被膜覆盖的部分而言是阳极，优生溶解而成为活性通道。

20 世纪 60 年代发现了高强度钢与钛合金的氢脆。后来又观察到铝能吸收氢原子，氢使某些变形铝合金发脆，在 Al-Zn-Mg-Cu 系 7XXX 合金中的应力腐蚀开裂，氢起着决定性的作用；同时，Al-Mg 系合金暴露于超市大气中，其上有 MgH2 形成。因此，现在比较一致地看法，Al-Cu 记 Al-Cu-Mg 合金及 2XXX 系合金的应力腐蚀开裂主要是电化学性质的，而 Al-Mg 及系 Al-Zn-Mg-Cu 系在应力腐蚀时，裂缝尖端有氢聚集，氢脆理论可以满地届时其应力腐蚀开裂。

特性参数

表征应力腐蚀开裂的常用特性参数有：

1. 断裂时间。试样承受载荷（75%Rpo.2 或 67%Rm 等）时的断裂时间；

2. 临界应力б th。在规定时间内，试样承受的载荷在低于此应力时不发生应力腐蚀开裂；

3. 临界应力强度 KIscc。它的全称为 I 型裂纹平面应力腐蚀临界应力强度，或应力腐蚀应力强度临界值。它的意义

是，在低于该应力强度时，在规定时间内不会发生应力腐蚀开裂。应力强度的单位为 MN/m3/2；

4. 应力腐蚀裂纹扩展速率 da/dt。

1.3.37 铝合金的应力腐蚀开裂（二）

表 1 使硬铝产生应力腐蚀开裂的应力

应力种类	比例,%
残余应力(来自热处理与加工制造)	40
装配应力	25
使用应力	25
其他	10

表 3 5054 合金喷丸前后的应力腐蚀临界应力(N/mm)

表面状态	表面残余应力	临界应力	表面状态	表面残余应力	临界应力
未喷	+4.7~-4.7	350	喷丸	-213	343
喷丸	-78.5	412	未喷	-93~-144	199
未喷	-76~-118	233	喷丸	-199	322

表-2 变形铝合金在水溶液的应力腐蚀开裂性能

很高	1000 与 3000 系列合金	全部
	5050、5052、5154、5454、6063	全部
	5086	O、H32、H34
	6061、6262	O、T6
	包铝的 2014、2219、6061、7075、2024	全部
相当高	2219	T6、T8
	5086	H36
	5083、5456	控制状态
	6061	T4
	6161、5351	全部
	6066、6070、6071	T6
	2021	T8
	7049、7050、7075	T73
中等	2024、2124	T8
	7050、7175	T736
	7049、7075、7178	T6
低	2024、2219	T3、T4
低	2014、7075、7079、7178	T6
	5083、5086、5454	敏化处理
	7005、7039	T5、T6

影响铝合金应力腐蚀开裂性能的因素

应力

应力的腐蚀开裂产生于应力集中部位，硬铝产生应力腐蚀开裂的部位大致为：设计引起的应力升高、衬套干涉配合孔、腐蚀坑、疲劳裂纹、磨损、晶间腐蚀、剥落腐蚀等。使硬铝产生应力腐蚀开裂的应力如表 1 所列，残余应力是指淬火、焊接、扭转、冲压、深拉、铆接、螺接、过尺寸和不同金属衬套压入工件等引起的应力。应力腐蚀裂纹一旦发生，

腐蚀产物体积增大会使裂纹尖端保持很高的应力，这也是一种很值得注意的应力。

工件发生应力腐蚀开裂时所承受的应力都超过临界应力和临界应力强度，对铝合金来说，临界应力比临界应力强度更重要。

冶金因素

Al-Ag、Al-Cu、Al-Mg(≥3%)、Al-Cu-Mg、Al-Zn、Al-Zn-Mg、Al-Zn-Mg-Cu 合金在溶液中都会发生应力腐蚀开裂。形成过饱和固溶体的合金元素含量越多，应力腐蚀开裂敏感性也越大。在三元及更多元合金中，其应力腐蚀敏感性不仅受合金元素总含量的影响，而且与其含量比有关。例如，超硬铝的应力腐蚀开裂敏感性既与 Zn+Mg 含量有关，又与 Zn/Mg 值大小有关。向合金中添加少量（一般≤3%）的 Cr、Zr、Mn、Ti、V、Bi、Ag 能提高抵抗应力腐蚀开裂的能力，特别是 Mn、Cr、Zr，它们能保证加工材料形成强裂的方向性组织与控制再结晶组织，使穿晶断裂极难发生。Zn/Mg 比值大于 3 时有损于合金的应力腐蚀开裂性能。

热处理可强化铝合金在时效硬化达峰值强度之前具有最大的应力腐力开裂敏感性，因此过时效处理是唯一能提高超硬铝抗应力腐蚀能力的热处理。此外，铸锭在 450℃均匀退化和在 450℃完全退火，以及进行阶段退火，均能改善硬铝

与超硬铝的应力腐蚀开裂性能。

环境因素

铝合金的应力腐蚀开裂属于以腐蚀为主的类型，因此裂纹的成核与扩展与环境的关系极为密切。水气、水溶液是强有力的应力腐蚀开裂腐蚀剂。

铝合金在大气中的应力腐蚀开裂规律是：在相对湿度＜0.01%的干燥大气中，不但不产生腐蚀裂纹，就是原来的裂纹也不扩展；在湿大气中，裂纹通道是晶间的；在相对温度 100%大气中，裂纹的扩展速率大都为 10-8m/s~10-9m/s。

水和水溶液可使对应力腐蚀开裂敏感的合金产生这种腐蚀。卤素离子既能使铝合金产生应力腐蚀开裂，又能加速裂纹扩展。超硬铝在 NaCl 水溶液中的裂纹扩展速率比在淡水中的高得多。溶液的碱性增加时，产生应生应力腐蚀开裂的可能性大为减小。海水是一种含 NaCl 较高的碱性溶液，船舶舰艇的硬铝及超硬铝结构件易发生应力腐蚀开裂。飞机、舰船和压力容器在热带地区使用时，应力腐蚀开裂问题比在两极使用时严重得多。温度升高时，铝合金发生应力腐蚀开裂时间明显缩短。

应力腐蚀开裂的控制

产生应力腐蚀开裂的主力原因是残余拉应力和装配拉应力作用于 2XXX 系及 7XXX 系合金材料的高向（短横向），因此设计时应使负载作用于材料的纵向和横向（长横向）。在设计中遵循以下准则，可使铝合金工件的应力腐蚀开裂减至最低限度。

1.选用抗应力腐蚀开裂的合金与状态。评价铝合金抗应力腐蚀开裂的能力是根据 Rth/Rp0.2 或 KIscc/KIc。根据这两个比值的大小将变形铝合金抵抗应力开裂的能力分为四类：很高的，相当高的、中等的、低的（表 2）。

2.对工件进行应力消除处理。

3.剧烈成形工件采用退火状态材料，成形后再进行时效或其他热处理。

4.在新淬火状态进行成形与矫直平整作业。

5.在热处理前进行外表面切削加工。因为淬火可使表面产生残余压应力。

6.内表面的切削加工在淬火后进行，因为热处理可以消除部分的内应力。

7.严格控制尺寸偏差，以免产生装配应力。

8.如果无法避免表面拉应力，则可对表面进行喷丸处理、表面轧制或进行阶段时效，以消除应力。喷丸对 5754 合金应力腐蚀临界应力的影响见表 3。

9.对焊缝进行热处理。

此外，防止氢进入金属中，消除环境中的卤素离子，加入缓蚀剂，进行表面处理等都有助于应力腐蚀开裂的减弱或消除。

1.3.38 研发第二代抑爆铝箔 建设专业生产项目（上）

表 1　3003–H18 合金箔在不同油内浸泡后力学性能变化

试样编号	试样处理方法	拉抗强度 R_m, N/mm²	伸长率 A,%
0	空白样	151	1.6
1	浸泡于 90# 汽油,储存	149	0.4
2	浸泡于 10# 军用柴油,储存	123	0.25
3	浸泡于 3# 喷气机燃油,储存	115	0.1

表 2　在不同油品中浸泡及行车实验后 3003–H18 合金防爆箔力学性能

试样编号	试样处理方法	拉抗强度 R_m, N/mm²	伸长率 A,%
0	空白样	176	0.12
1	浸泡于 90# 汽油,储存	137	0.88
2	浸泡于 93# 汽油,行车	175	0.16
3	浸泡于 10# 军用柴油,储存	174	0.40
4	浸泡于 10# 军用柴油,行车	153	0.16

对于我国铝工业提到最多的词莫过于产能过剩，但孰不知有些产品我们还存在严重产能不足或是空白，尤其是高端产品，也正是由于我们存在太多这样的短板，才造成了目前部份初级材料低价出口，深加工产品高价进口的被动局面。那么我们如何突破困局？唯有补短板。在中央召开的经济会议上也提出了“补短板”将是今年经济工作的五大任务之一。

对于中国铝工业来说，补短板已是迫在眉睫。为此本版推出“补短板 大家谈”专栏，好好说一说我国铝工业究竟还有哪些短板需要尽快补一补。

随着工业的发展，油料及其他易燃易爆液态及气态危险化学产品的运输和储存量越来越大，发生爆炸及火灾事故也会多一些，影响大，危害广，给人们生活和企业生产带来很大影响。因此，抑制油品、液化天然气和危险化工产品的爆炸和火灾就愈来愈引起人民的关注。据美国的粗略估计，1979年度由于爆炸而造成的损失超过 1.5 百亿美元。中国由易燃易爆危险品引起的爆炸损失也相当惊人，1992 年秦皇岛油库爆炸事件；后来深圳市危险品仓库又发生大火；2014 年 8 月江苏昆山市中荣金属制品有限公司车轮抛光车间大爆炸，造成 162 人遇难。98 人受伤；2015 年天津市发生了震惊世界的大爆炸等等，给我们敲响警钟。自 20 世纪 70 年代中期中国居民家庭开始使用罐装液化气以来，至 2015 年，全国保有约 3000 万个液化气罐，先后发生的着火与爆炸事件上千次，造成生命财产的重大损失。由此可见，易燃易爆气体、液体储罐、槽、箱的安全防爆是一个刻不容缓而又不容忽视的重大问题。

铝合金抑爆材料

为了防止容器内易燃易爆液体、气体或粉尘的爆炸，可

向容器内放置一种抑爆材料或抑爆装置，在发生意外事故时，可防止容器爆炸。抑爆装置由检测初始爆炸传感器和压力式灭火罐组成，它在接受动态信号后，可在毫秒级时间内使灭火剂罐开启，立即喷出灭火剂，但它的结构复杂，价格也不菲，维护工作量也大，使用时还受到灭火粉剂几十米每秒扩展速度的限制，当可燃物质的爆炸强度高时，抑爆剂无法对爆炸进行有效控制，而只能起到限制爆炸范围的作用。因此，必须研发新的抑爆材料。

20 世纪 60 年代，西班牙科学家率先研制泡沫状聚氨脂抑爆材料，将其装填于容器中，其中的孔洞起阻燃与抑爆作用，又不妨碍流体在其中自由流动。但在湿热环境，浸泡于燃油中的聚氨脂泡沫会水解破碎，使用期仅 2a~5a。上世纪 80 年代加拿大、奥地利等国开发出新型的金属抑爆材料，克服了聚氨脂抑爆材料的缺点，在军事、工业、交通运输业和日常生活中得到了应用。他们试验过 Cu、Ni、Al 等泡沫金属与丝状编织物，但是由于制造工艺复杂，成本高原因而没有在实际中应用。目前国外应用的金属抑爆材料是 3003 合金箔，用其制成蜂窝形网状或球形抑爆产品。由于球的直径较小，可以从油箱加油孔直接加入，使用方便，缺点是单位体积（m3）加入量和所占的体积较网状抑爆材料的大。

金属抑爆材料是一种用金属制造的蜂窝状结构，将它装入易燃易爆容器内，在发生意外事故时，可以抑制或防止熔

器内可燃气体或蒸汽的爆炸，避免容器破坏。从抑爆效果和使用性能考虑，抑爆产品原材料应具有良好的导热性、高的热容量、低的密度、一定的力学强度、资源丰富、价格合理，可回收性好等，铝可以满足这些性能，是综合性能上乘的抑爆材料。

中国兵器工业总公司第五二研究所率先在中国研发抑爆材料，其性能已达到国际水平。他们的铝合金网状与球状抑爆材料为 3003 合金或 3A21 合金箔材。这是第一代铝合金抑爆材料，不但有较高的强度与良好的工艺性能，而且有一定的抗蚀性，在一定时间内不会影响燃料的性能，不需要特殊的维护。加入熔器内的抑爆产品仅占容积的 1.1%，加入量约为 32kg/m3 容积。该产品有足够的力学强度，即使在盛装燃料容器发生激烈晃动时也不会破损或变形。他们曾将网状抑爆产品装入 600mm×340mm×350mm 容器内。，再注水至容器高度的 2/3 处,水平晃动容器频率 40 次/min,移动距离 200mm。经过 40h 晃动后，抑爆产品无任何可见变形或破损迹象。抑爆产品可以明显地减小容器内液体的晃动程度，使波动冲击力降低一个微量级。油箱充填铝合金抑爆产品后还可以防止静电产生和积累。

浅说抑爆原理

装有易燃易爆流体容器中的可燃气体或蒸汽与空气的混

合物在爆炸极限范围时，如遇到一定能量的点火源就会发生爆炸。常规可燃气体最大爆炸压力 0.7N/mm2~0.8N/mm2，乙炔的约为 1.0N/mm2。可燃气体最大爆炸压力实际上与容器容积无关。容器容积大小仅影响可燃气体最大压力的上升速度，容积小最大压力上长速度快。

抑爆产品的抑爆原理与灭火器工作原理相似。油箱爆炸通常是由于油的挥发气体快速燃烧，放出大量热，油箱内压力急剧增高，超过油箱本身允许承受压力。爆炸时封闭容器内产生的最大压力取决于初始压力气体摩尔数变化和温度变化。

油箱内放置铝合金抑爆产品后，由于抑爆产品叠层中的网眼组成蜂窝状结构，把油箱内腔分成许多很小的“小室”，它们遏制火焰传播。同时这种蜂窝结构在单位容积内具有很高的表面效能，有极强的吸热能力，可以迅速吸纳绝大部分燃烧热，使燃烧后的温度大大下降，反应气体的膨胀程度大为缩小，容器内压力上升不多，容器内压力增高小，从而抑制了爆炸的发生。

抑爆产品的性能

现代化的抑爆产品是用 3003 或 3A21 合金箔制造的，3003 合金是一种美国合金，而 3A21 合金是一种中国和俄罗斯合金，它们在成分方面的差别仅在于前者含 0.05%Cu~0.20%Cu，其

他成分（质量%）完全相同：0.6Si，0.7Fe，1.0Mn~1.5Mn，0.10Zn，其他杂质单个 0.05、合计 0.15,其余 Al。加 Cu 是为了消除合金的点腐蚀，这就是说 3003 合金仅发生全面腐蚀，而 3A21 合金既会发生全面腐蚀又会产生点腐蚀。抑爆铝箔一般厚 0.05mm、宽 250mm，H18 或 H24 状态，将其制成网状（蜂窝状）或球状，中国目前用手工揉成团，团的直径决于容器填装口直径。它们的性能稳定，环境温度、容器材料和容积对其功能均无影响，因而可以应用于装有任何可燃气体或液体的容器中。

网状抑爆产品不仅能延缓罐体过热，而且能减少液体的气化速率，从而防止储罐爆炸，其防爆机理在于多孔、导热、导焰强化了对流换热，流动阻力越小，导热效果越好，防爆效果也就越好。

抑爆性能极佳

此性能是网状铝合金箔防火抑爆材料最重要的作用。瑞士埃克塞斯（exess）公司曾委托中国台湾工业技术研究学会进行了抑爆性能测试，比较了容器内填充和未填充铝箔网状防火抑爆产品的安全情况，点燃了油气-空气混合体随时间的变化，发现混合气体燃烧产生的热几乎全部为铝箔状体吸收，可安全地对装有可燃易爆危险品的容器进行维修定点焊接，而且用子弹射击也未爆炸，显示了铝箔网状防爆产品有极佳

的防火抑爆效果。

阻燃性能特强

埃克塞斯公司是世界最大的专业研究和生产防火抑爆材料的公司，他们的试验证明，铝合金箔防火抑爆产品能有效地控制容器内油品蒸发，阻碍火势的进一步发展，具有极强的阻燃性能。

抗冲击性提升

奥地利格拉茨技术大学机械学院斯特范（Steffan）教授对埃克塞斯公司网状铝箔防火抑爆产品的抗冲击性能作了试验：能有效地降低外来冲击力 20%~50%。这就是说，铝箔防火抑爆产品填充于油品容器内相当于提高了容器的力学性能，无疑是目前频频发生的易燃易爆危险化工产品交通事故的克星。

防静电性能优秀

静电是易燃易爆液体发生燃烧爆炸的重要原因，特别是它们在运输、注灌等动态过程中，由于摩擦产生的静电具有很大的危害性，极易造成火灾爆炸事故，因此，易燃易爆液体的静电防护非常重要。网状铝箔防火易爆产品具有良好的

导电性和网状结构连续性，可以屏蔽静电与缓和静电作用，是防止静电着火与爆炸的优秀产品。

抗蚀性尚可

3003 合金网状抑爆产品呈蜂窝状，孔隙率高，是用铝箔拉网后制成的，以一定的填充比例将其装于易燃易爆流体储运或使用的箱、槽、罐中，可以有效地防止因明火、枪击、意外撞击等的着火爆炸事故，但至今尚未得到普遍有效的推广应用，主要原因是抑爆铝箔网与球在油品中浸泡 1a 左右后抑爆产品与油的性能及品质都随时间的推移而下降，因为铝箔在油中发生了晶间腐蚀。3003-H18 合金防爆箔在油中浸泡与行车实验后的力学性能变化见表 1 及表 2。由表中的数据可见，3003-H18 铝箔在油中浸泡后力学性能有所下降，伸长率下降幅度更大些，这是发生了腐蚀的典型表现，油的品质指标如胶质值明显上升、氧化安定性下降，也是铝箔腐蚀造成的。

1.3.39 研发第二代抑爆铝箔 建设专业生产项目（下）

影响抑爆材料的因素

影响抑爆材料的因素有：原材料性能、结构尺寸设计、安装与设计等。

原材料

和铜、镍、不锈钢相比，铝的密度小、热传导性好、比热容大、价格较低、可回收性强，因此铝成为首选材料。不过，由于铝合金会被油品腐蚀，阻碍了它们的推广应用，例如运、储航空汽油、煤油的槽、罐就不敢采用 3003-H18 箔抑爆材料，也就是说不可用第一代防火抑爆材料，因此研发新的防爆材料，即第二代防火抑爆箔成了当务之急，中国有关单位科学家在这方面取得了可喜的成就，研制成功性能优秀的第二代防火抑爆铝合金箔，居国际领先水平。

结构尺寸设计

网状铝合金防火抑爆产品的抑爆性能与其比表面积、密度、单位体积网眼数及其尺寸有关。在生产制造过程中，拉伸比越小，抑爆产品的密度越大，比表面积就越大，网眼数量就越多，网眼尺寸也越小。当箔条尺寸一定时，抑爆产品拉伸比非常显著地影响火焰传播速度，而且拉伸比约为 2.5 时，火焰传播速度最小。因此，在抑爆产品制造过程中可以通过控制拉伸比来控制产品抑爆效果。此外，铝箔厚度也对产品抑爆性能有一定影响：在同等拉伸比下，铝箔越厚，抑爆性能越好一些。在设计中应综合考虑上述因素的影响和材料品质。目前国际上用的铝箔厚度约为 0.05㎜，有采用更薄一些的趋势，特别是在球形抑爆产品中。

结构尺寸

国内外试验表明，抑爆产品方向性对其抑爆性能无影响；抑爆压力随容器留空率的增大而上升，随网状铝合金抑爆材料密度增大而下降，而且对每一种留空率都有一个相对较佳的抑爆材料密度值。

运转因素

在网状铝合金抑爆产品工作过程中，可能会发生压缩变形，产生空腔，进而影响其抑爆性能。试验表明，垂直方向变形最小，产生的弹性变形均小于 5%，而能承受的载荷却远大于使用时的承载力；其他两个方向的材料在长时间或是受力的情况下可能产生永久变形，但在正常的工作载荷条件下，变形不会超过 5%。

成形加工和飞行振动对抑爆铝箔力学性能的影响

新世纪以来，网状抑爆铝箔在飞机油箱中获得了应用，科学家的模拟飞行振动实验对抑爆铝箔的断裂特性没有影响。振动试样与原始试样的抗拉强度 Rm＝58.8N/mm2~205.8Nmm2，分散厉害，这是因为防爆网在成形加工时被冲击、切削、拉弯成网状，各部位受力变形程度不均匀，造成厚度不均匀，

从而使其力学性能不均匀。同时加工过程铝箔发生了不同的冷作硬化，使平均抗拉强度显著增加，这说明加工硬化对防爆铝箔的抗拉强度有显著影响，但是模拟振动实验没有降低铝箔网材料的力学性能。

抑爆铝箔应用

将抑爆 3003 合金箔制的网或球装填于储存易燃易爆气体、液体容器中，可以有效地防止着火爆炸，即使在发生火灾的情况下，也可以抑制爆炸，将损失降到最低，为救火势赢得宝贵时间。当油箱发出破损时，无需放空油，即可带油、气电焊、气焊直接修补。

这种铝箔抑爆产品在国外工商业汽油容器已得到广泛应用，公共汽车、卡车、防弹高级轿车、运油车、特种警车、消防车、运钞车等的油箱和直升机的外油箱中都装有铝箔抑爆网或球。抑爆材料可应用于汽油、酒精、稀料、丙酮、乙醚、煤气、乙炔、液化石油气、液化天然气等易燃易爆产品的储存容器，以防意外事故时发生爆炸。国内军用车辆油箱正在试用。随着人们对安全问题的日益重视，抑爆产品将在油料、易燃易爆化工产品的储运容器中得到广泛应用。

海湾战争期间美国直升机和战车的油箱内均装有 3003 合金箔抑爆网。2005 年 4 月，国家安监局批准了《汽车加油（气）站、轻质燃油和液化石油气汽车罐车用阻隔抑爆储罐

技术要求（AQ3001-2005）》为强制性安全生产行业标准，将进一步推动阻隔抑爆技术的发展和抑爆材料的研发。

飞机和直升机油箱中装填抑爆材料后，即使遭到射击也不会发生爆炸。铝合金抑爆材料在水面舰艇上也得到应用，美国拉莫公司（RAMO）生产的轻型攻击型巡逻舰 462L 油箱中装有铝箔抑爆产品后，遭受 300 发电光弹与穿甲燃烧弹的射击试验没有发生爆炸。

加拿大防务研究委员会（Defence Research Board）在对比实验中，采用 6 个按 1/5 比例缩小的液化石油气罐，罐由 6mm 钢板制成，容积 947L，其中 4 个装有网状铝箔抑爆产品，罐中装有 85%液化石油气，周围用 Jp-4 煤油烧，达到 1094℃，2 个没有装抑爆产品的罐在 8min 内爆炸，而另 4 个装有抑爆铝箔的罐直至里面的液化石油气干了也没有爆炸。

英国布尔维克斯公司（Blvex）在抑爆铝箔表面涂了一种特别的起泡涂料，当加热到 120℃以上时，该涂料可形成高效的碳基隔热层，将这种称为“隔火墙”的材料包在被保护容器外面，可以直接限制进入容器热量。英国健康安全署（Health and Safety Executive）用 400L 的液化石油气罐做了试验：将罐暴露在输出热量为 4.5MW 的丙烷火焰柜中，保持 25min 后，用“隔火墙”包覆的容器内的最大压力为 900N/mm2，液体的最高温度仅 17℃，而没有涂“隔火墙”涂料的容器在加热 3min 后容器内部压力就高达 2758N/mm2。

市场潜力大

宜建设第二代抑爆箔项目

铝合金防火抑爆箔是一种市场广泛潜力巨大的材料，在油品与其他易燃易爆危险品的运输、储存、使用过程中的容器内填装这种材料可以有效地预防与抑制燃烧、爆炸，在国外已普遍采用，也在某些特殊部门有所应用，对保护生命财产安全起了很大作用。装填量占 1%容器容积至 2%容器容积。这种抑爆产品有网状的也有球形的，网状产品可以在中、小容器制造时预先装入，对于大型容器例如使用中的油罐可以随时装入。

中国是一个能源生产与消费大国，易燃易爆危险品的运输、储存、使用量很大，如果每种容器都装入抑爆产品，按 2015 年消费的油品、石油液化气及保有的运输车辆、储罐及液化气瓶估算（装填量按 1.5%容器容积）需要抑爆产品约 900kt。当前，抑爆产品是用 0.05㎜ 厚的 3003-H18 或-H28 合金箔制造的，这是常规的箔，生产工艺复杂，加工费用不高，但遗憾的是，用这种第一代抑爆铝箔制造的抑爆产品在油、液化气之类易燃易爆危险品中浸泡 1a 左右就会由于腐蚀不能再用，必须更换。因此，研发与生产使用寿命长不受油品、液化气等腐蚀的第二代防火抑爆材料是当务之急，是中国铝工业的短板，有待补上。

中国研发出有知识产权的第二代防火抑爆铝合金

通过前面的介绍我们知道，第一代防火抑爆产品是用3003-H18合金箔制造的，国内外的研究与使用证明，它的力学性能可以满足要求，但是使用寿命仅1a，远远不能满足需求，因此应寻求一种抗蚀性更高的铝合金。从常识和理论分析可知，防火抑爆铝合金必须有较高的力学性能与强的抗油品腐蚀性能，3xxx系合金对油品的抗蚀性既不足，那么1xxx、4xxx、8xxx系合金在油品与液化气中的使用期限也长不了多少，况且它们的力学强度更不足以抗衡汽车颠簸与航空器振动，2xxx及7xxx系合金虽有高的强度性能，但抗蚀性很低，因此第二代防火抑爆铝合金只能到5xxx系及6xxx合金中去找。通过多年的研发，中国某知名大学材料系的教授已研发出有全部知识产权的防火抑爆铝箔合金，实验室试验与道路实验证明它的使用期限远长于3003-H18合金箔的，属世界首创。虽然当前尚未公布其成分，但是它不是一种5xxx系合金，就是一种6xxx系合金，对广为应用的民用合金成分迟早会广为人知。

当务之急是建一个生产能力 50kt/a 的第二代防火抑爆铝箔专业厂

有了第二代防火抑箔铝合金后，下一步工作是应建一个

工业化生产的铝箔厂，专业生产防火抑爆箔，可与拥有此种箔知识产权的大学合作，建一个合资企业，学校出技术出人才，投资者出资金，负责工厂管理等。建设一个生产能力50kt/a 的专业生产厚 0.05mm，采用专业箔材轧机轧 3 道就可以由 0.28mm 毛坯带材达到 0.05mm 的箔材。主要设备（不含熔铸车间的）：1 台 1650mm4 辊可逆式热轧机，2 台 1500mm5 辊不可逆式冷轧机，6 台 1500mm4 辊不可逆式大轧制力箔轧机，30 台退火炉，纵剪机列 3 条，其他辅助设备等，一些自动化工艺参数控制一起还需进口，但数量不多，费用不大，据匡算，设备等固定资产投资约 2.8 亿元。

还应研发瓶罐外表面隔热涂料

将这种涂料涂于装有易燃易爆物质瓶罐表面应有很强的绝热性能，可以防止外部热量传入瓶罐内，使其内部压力不升高或升高的不多，不会爆炸。这种外部隔热涂料与内部抑爆产品相结合就能确保安全，万无一失。

1.3.40 蓄热燃烧技术废铝重熔高效绿色工艺

铝，是一种回收性和可再使用性最强的结构和功能有色金属。铝结构和功能制品在使用期满报废后，95%以上的材料都可以得到回收，经过处理、熔化和加工成铝材，再次投入

使用。如此循环 N 次后，铝才会全部消耗，每循环一次损失约 5%。如果铝窗框的使用期限为 30 年，那么 1000kg 窗框的铝在使用 420 年、循环 14 次后还有约 490kg。从这个可循环使用的意义上来说，铝可谓是“永不消逝的金属”。

铝废料总是或多或少地含有各种各样的其他杂物，如异种金属，纸、塑料、非金属固态物等。它们可在一般的预处理时被剔除，但有些污染物如润滑剂、涂层等在常规预处理时不可能彻底一扫而光。这种污染越严重，废料的级别越低，价格比干净的高等废料也低得多。污染废料在重熔时，有机物杂质发生热解，但不一定完全氧化（燃烧），会散发种种异味。对于这种气味有三种解决方案：一是不去管它，只要符合环保法规于条例就行；二是不回收此类废料；三是建设高技术的负责的能耗高的投资大的预处理线。

常规环保系统：干吸收

所谓干吸收，就是在现行行之有效的袋式过滤系统中，去除熔炼烟气中的污染环境的粉尘和各种无机物，以使排入大气的气体达到环保法规与条例规定的所有污染物排放标准要求。废铝在溶化过程中排放的污染物可分为三类——颗粒物：金属或矿产品细质点、碎末、粉尘等；无机物：各种酸性物质、二恶英；有机物：没有燃烧的碳氢化合物和一氧化碳。

前两种污染物可在布袋收尘系统中清除干净，现在几乎所有大型废铝再生企业都有这类环保设施。但是，发展中国家的中小型再生铝厂拥有这类环保系统的却寥若晨星。颗粒物可通过物理法去除，而无机物的去除则可向排气道中通入碱性物质（如氢氧化钠、碳酸氢钠），使它们与酸性无机物反应生成盐粒（氟化钙、氯化钙、硫酸钙或氟化钠、化钠、硫酸钠)而被布袋滤除。消除二恶英除了添加碱性反应剂外，喷入碳粉也较为有效。虽然经布袋尘系统处理的废铝熔炼烟气，可完全符合环保法规与条例要求，但依旧残存着散发异味的碳氢化合物如酚、甲醛等，甚至还可能残留着微量的有害物质。通常它们的含量都低于总有机碳排放极限，气味也不浓烈，但对现场及工厂附近的对气味较为敏感的人来说，却是很难容忍的，时间长了，可引起轻度鼻炎。这些散发异味的有机物只有通过燃烧才能去除。

RTO 蓄热燃烧技术：消除废铝熔炼异味的新工艺

为了消除废铝再生熔炼时散发的气味，北欧主要再生铝企业瑞典斯特纳铝业公司（Stena）和奥地利科特普空气污染控制公司（CTP）研发了一种蓄热燃烧技术，是一种无气味的铝回收工艺。这套系统于 2012 年 6 月在斯特钠铝业公司投产。通过几个月来的运转，RTO 蓄热燃烧技术被证明是有效的，能够消除烟气的异味。

传统的二次燃烧器有时安装在熔炼炉燃烧器空气出口处，除了能耗较高外，另一大缺点是，只有在熔炼炉门关闭和正在熔炼进行时才能吸入烟气，而放流炉门的开启，会造成烟气外泄，产生烟气气味。

PTO 蓄热燃烧技术不但能回收高温烟气的大量余味，还能将烟气中的残余碳氧化合物和一氧化碳燃烧，消除了产生气味的酚与甲醛之类的有机化合物。在 RTO 系统中，熔炼炉排放的烟气分成两股，一股进入“热管线”，另一股进入“冷线管”。不管进入哪一管线，烟气中的未在炉内燃烧的残留有机物都会燃烧。“热管线”中烟气流量为 14×104Nm3h，进入热干吸收系统和蓄热燃烧装备，“冷管线”中的流量为 5×104Nm3，进入冷除尘过滤系统。为了进一步使斯特钠铝业公司的这套系统更加经济，在蓄热燃烧装置下游还安装了一套余热回收系统，可生产 4MW 热水供附近住户使用，相当于 1200 户居民的热水与采暖所用。

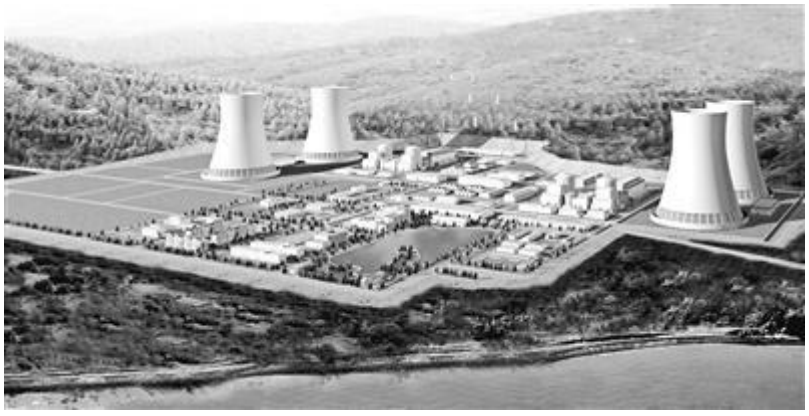
蓄热装置是一个由氧化铝片或氧化铝球组成的换热器，当燃烧后的高温烟气通过时将氧化铝片（球）加热，气流换向时，烟气进入另一个换热器，而助燃的冷空气则流经加热后的换热器而被加热，如此一开一闭循环不已。有了这套系统，可节约能源 20%左右。

再生铝产量与效益双双提高

斯特钠铝业公司自 RTO 系统投产后取得了预期的效果，不但再生铝产量有所提高，且车间内与附近居民区再也闻不到酚、甲醛之类有机物的气味了，各方反应良好。该公司准备今后逐步提升低等级的废料配料量，以提高经济效益，而仍保持着较高的产品品质。

克特普空气污染控制公司在向铝再生系统提供第一套 RTO 燃烧技术装置取得良好效果的基础上，准备将此技术推广到铝行业的各个环节，如氧化铝提取、铝电解、碳素产品制备、铸造生产与铝材表面处理等，也拟推广到铜、铅生产中。

1.3.41 国家领导力推核电 高精铝材应用现新亮点



利用核燃料(铀235、钚256、铀233)或可聚变核素(氘、氚）裂变反应或核聚变反应产生热能转为动力的装备称为核装备，发出的核电，是当今三大电之一，与火电、水电并列。核动力装备包括核反应堆、产生动力的系统和设备，以及为保证设备正常运行、人员健康和安全所需要的系统和设备等三个主要部分。核电站反应堆型主要有沸水堆、压水堆、气冷堆和快中子堆四种。核动力装备主要应用于发电、舰艇和空间技术。核裂变技术已成熟，而可控的核聚变技术尚处于研发阶段，首个实用核聚变反应装备可能还需要七八年才能面世。

核裂变是一种物理现象，简称裂变，一个重原子核分裂成两个中等质量的核叫裂变。一个铀235(质量数是235的轴）核裂变释放的能量约200MeV。平均每个核子释放0.85MeV。1kg铀235核完全裂变放出8.36×1013J的能量，相当于2×104t

梯恩梯（TNT）爆炸，1tTNT爆炸产生4.18×109 J的能量。易裂变的核有铀235、钚239、铀233。铀弹一般装15kg~25kg铀，钚弹一般装5kg~10kg钚。核电站（原子能发电站）是利用人为控制的缓慢裂变反应释放的能量发电。一座100万kW的核电站每年只需30t浓缩铀，而同等功率的火电站每年需耗2.5×106（2.5百万）t煤，同时放出大量的CO2与含硫的有害气体，以及固体废弃物。

核聚变也是一种物理现象，是轻原子核聚合成较重原子核的核反应。一个2H（氘）核和一个3H（氚）聚合成一个4He（氦）核，放出一个1n（中子），同时释放17.58MeV的能量，平均每个核子释放3.84MeV，是裂变反应平均每个核子释放能量的4.5倍。4个1H（氢）聚变合成一个4He核，释放24.7MeV＝3.95×1012J能量。太阳辐射的能量为1.28×1044J，就来源氢聚合成氦的聚变反应。实现核聚变反应需达到108K左右的高温，目前只有原子爆炸才能达到如此高的温度。氢弹就是利用原子弹爆炸时的高温引起氢原子核聚变瞬间释放巨大能量起杀伤破坏作用的。

含有易裂变核素如铀235、钚259、铀233或可聚变核素如氘和氚在反应堆中可以发生自持的核反应并连续释放能量的材料称为核燃料，1kg铀235完全裂变发生的热量约为2.2×107 kWh，并产生裂变产物。共产生的热量为1kg标准煤燃烧

产生的热量大280万倍多，1kg氘裂变所释放的能量比1kg铀235的约大3倍。氢有3种同位素：氢1（氢）、氢2（氘）、氢3（氚），海水中有的是铀和氢，以每1000t海水含3g铀计算，全球海洋中铀的蕴藏量可超过40亿t，海水中的氘和氚也是取之不尽，用之不竭。核燃料有的是，一旦核裂变装置投入商业营运，世界能源问题就彻底解决了，我们的子孙万代就享清福了。氘（dao）也叫重氢，氢的同位素之一，符号为D或2H，质量数2，主要存在于重水中，用于热核反应。氚（chuan）也叫超重氢，氢的同位素之一，符号T或3H，质量数3，有放射性，用于热核反应。

主席和总理频推核电

装备与技术出海指日可待

2014年，随着中国领导人外交活动的加强，与高铁类似，核电也屡屡成为国家领导人出访与外交活动推介的响当当的“中国制造”金字国家名片。在2014年，中国核电企业（中广核、中核集团、中电投）与法国、阿根廷、意大利、西班牙、加拿大、捷克、哈萨克斯坦等国签署了有关核电合作的文件。由中核和中广核联手打造的“华龙一号”与国家核电公司研发的CAP1400为骨干的核电装备或将成为出海的头批产品。

2015年1月15日，习近平主席指出，核工业作为最高科技战略产业，是国家安全的重要基石；要坚持安全发展、创新

发展，坚持和平利用核能，全面提升核工业的核心竞争力。无疑，习主席的指示是国家发展核工业的指路明灯。

2015年2月5日，习主席在人民大会堂同阿根廷总统克里斯蒂娜举行会谈，表示后期将核电作为双方合作的重点。同日，阿根廷总统随即对外宣称，阿根廷与中国签署了核电合作协议，利用中国“华龙一号”建设两座核电站，总投资超过128亿美元。“华龙一号”核电技术的成套出口，在一定程度上体现了国际市场对中国自主开发的独立自主知识产权的第三代核电技术的认可，它承载着中国人闯荡天下的重要一步，但这仅是中国核电技术出海的开始。

2015年1月28日，李克强总理主持召开国务院常务会议，部署加快铁路、核电、建材等中国装备“走出去”，推进国际合作，提升合作层次。会议确定，大力开拓铁路、核电等重大装备国际市场，整合行业资源，创新对外合作模式。

在工业发达国家，核电站的建设已有60多年的历史，是一个成熟的产业，截至2013年，美国的装机容量已超过10000万kW，世界第一，其他依次递减次序为法国、日本、德国、俄罗斯、英国、韩国、加拿大、瑞典、西班牙（730万kW）。

2011年3月日本福岛核电事故发生之后，中国国内的核电建设曾一度暂停，2013年12月以前中国只有17台核电机组运行，但在所有发电量中的占比也只有不到2%，与国外有些国

家的百分五六十相差甚远，据中国核能行业协会的统计，2014年共有5台核电机组投入商业运行，因此至2014年年底中国投入商业运行的核电机组共22台，累计发电量1305.80亿kWh，约占全国总发电量的2.39%。台湾省的核电装机容量约占全岛总发电装机容量的60%。

中国《核电中长期发展规划（2011~2020）》要求，在2015年以前，中国在运行的核电装机达到4000万kW，在建1800万kW；到2020年，中国营运核电装机应达到5800万kW，在建3000万kW，为此，在到2020年为止的这段时间内，核电装机容量的复合增长率应达到18%，核工业的直接用铝量的复合增长率也应达到18%。

不管是国内核电项目的建设速度，还是核电装备走出去的步伐都在快速提升，而且不是短期的，复合增长率有可能达20%，铝材的增长潜力很大。据《新京报》（2015年2月10日）报道，在国务院直接指示下，国家发改委正在牵头制定《关于加快装备走出的指导意见》，目前初稿已完成，而工信部、商务部也将配合意见出台政策。所支持的产业包括铁路、核电、建材生产线、钢铁、有色、建材、轻纺等。

据国际原子能机构预测，到2030年全球的核电装机容量至少增加40%。未来10年，除中国外，全球约有60台至70台100万kW级核电机组建设，海外核电市场空间将达1万亿元，据笔者预测，同期中国国内建设的核电机组数量及装机总容量大

致与国外的相等，但市场空间约为国外的75%，即约低25%。

核装备越洋过海

高精铝材全程护航

中国核工业已近60年，已经设计与建造了生产堆、研究堆和核潜艇动力堆等。各工业发达国家为解决人类未来能源正在对核聚变反应堆的开发进行大量的研究工作。

在核工业中铝及铝合金主要用作低、中温水堆（石墨水生产堆、实验研究水堆及某些重水实验堆）燃料元件的包壳、工艺管、辅助管道及其他结构材料等。工业纯铝在温度为100℃~130℃的水冷反应堆中得到广泛的应用。

反应堆铝材应具备的特性

铝材之所以在反应堆中得到广泛应用，除了它具有众所周知的优良性能外，在核工程性能方面还有一些特异的性能：对热中子的吸收截面小，为0.22×10-24cm2，仅比铍、镁、锆的大一些，而比其他金属的小得多，因此，铝是性价比优秀的上等材料；辐照感应放射能衰减快，高纯铝在停止辐照后一周内，放射能就急剧下降；反应堆壁溅蚀小，在175℃以下耐辐照，辐照损失小，空穴率低。

在反应堆中，作为热交换介质的水所引起的腐蚀比常规热电站中的严重得多。一般说来，铝材在50℃以下的水中发

生点蚀，在50℃~250℃水中以均匀腐蚀为主，在300℃以上水中则发生晶间腐蚀。

实践证明：选用耐点蚀的铝合金；提高铝合金纯度，以免产生阳级性的夹杂物；提高堆用水纯度，严格控制水中有害离子含量都是提高铝材耐点蚀的有效措施。此外，对铝材进行阳极氧化处理也能提高其对点蚀的抵抗能力，不过水的温度不能高于100℃，否则效果不佳。

作为元件包壳或工艺管的铝材，在加工、运输与安装过程中，其表面都不可避免地会产生种种避部损伤，如划痕、碰伤、氧化膜缺陷等，它们加速阴极去极化反应，也易使电位比铝的更正的重金属在此处沉积，从而加速铝阴极的离子溶解作用，加速腐蚀。但只要损伤深度不超过一定值（低温水堆用的铝材的容许安全值为0.15㎜~0.30㎜），不会引起异常的加速腐蚀，在低温水堆的特定条件下，可安全使用。

1965年以前中国所需的工艺管全部从苏联引进，1958年哈尔滨铝加工厂（现在的东北轻合金有限责任公司）开始二期项目建设，其中有工艺管车间，有成磁疗的轧管、精整、阳极氧化设备，原为苏联缓建项目，后由于苏联中止援助，中途一度停建，尔后自力更生建设，1965年才建成投产，设计生产能力50t/a。1966年生产工艺管4934根，33t，管的外径43㎜，内径41㎜，当时的合金牌号为LT24。后来又在西北铝加工厂建了一个工艺管车间，所以现在中国可生产工艺管

的企业有2个。

在中温水中，铝主要发生均匀腐蚀。因此，水中的离子对其腐蚀的影响不像低温时那样显著与敏感，而合金成分、晶粒大小与组织状态却起着较大的作用。在6xxx系合金中，最好不存在过剩的Si相。向合金中同时加入Fe及Ni（0.3%~0.4%），并使其质量比为1，以形成氢超电压较低的Al9FeNi相，可提高合金的抗腐蚀性。因为有Al9FeNi相存在时，氢可以从其质点处逸出，铝基地不会产生阴极反应。

在高于130℃的动水中，阳极化膜易剥落，不耐腐蚀，但预生氧化膜（材料使用前，将其置于一定温度的高纯静水中一定的时间所形成氧化膜）可提高合金的抗中、高温动水腐蚀的能力。

对堆用铝材危害最大的是晶间腐蚀，是由晶界区和晶粒基体之间的电位差引起的。因此，凡能降低这种电位差的措施都能提高合金抗晶间腐蚀的能力。

防止铝材晶间腐蚀极有效的措施是向铝中添加一定量的Fe与Ni，使之形成氢超电压较低的阴极相Al3Fe、Al3Ni与Al9FeNi等。这就是中、高温堆用铝材大都含有一定量的Ni与Fe的缘故。向Al-Mg-Si合金添加一定量的Cu也能提高合金抗晶间腐蚀的能力。

合金的晶粒越细，抗晶间腐蚀的能力也相应地提高一些，

热处理条件也对合金晶间腐蚀有明显影响。高温退火往往使呈阴极的第二相沿晶界沉淀与使晶粒长大，增加合金的晶间腐蚀敏感性。

大家知道，金属材料的晶粒越细，组织越均匀，抗蚀性也越高，所以往往向铝合金中添加微量的晶粒细化元素。但是对反应堆铝合金来说，应考虑数量元素的热中子吸收截面，例如天然硼的热中子吸收截面为755×10-24cm2，而B10的却高达3800×10-24cm2，含硼的合金及纯硼是很好的屏蔽材料与控制材料，但对非屏弊材料来说，却是一个有害元素，应严加控制。美国铝业协会及材料试验学会（ASTM）规定8001合金的B含量不得大于0.001%。

锆的热中子吸收截面相当小，只有0.18×10-24cm2，钛的为5.6×10-24cm2，铬的为2.9×10-24cm2，可作为反应堆铝材的微量添加元素。

反应堆铝材

反应堆铝材可分为两种：温度在130℃以下的低温堆用元件包壳及结构材料，主要是工业纯铝1100与6063合金；使用温度不超过400℃的中温堆用材料，如Al-Ni-Fe系、Al-Si-Ni系合金，其中典型的是美国的8001合金。

在美国广泛采用工业纯铝1100（质量%：0.05~0.20Cu、0.05Mn、0.10Zn、0.95Si+Fe，其他杂质单个0.05、总计0.15，

99.00Al），苏联及俄罗斯采用Al-Mg-Si系合金CAB-1（0.45%~0.90%Mg、0.7%~1.2%Si，其余为Al与不可避免杂质）作为压水型反应堆MP、BBP-M等的结构材料及工艺管材料。但这些材料的最高工作温度为130℃，如温度更高，则需用其他铝材。

工作温度为130℃~400℃的铝合金有：中国的306合金（约含7%Si与0.65%Ni，其余为Al及不可避免杂质），它的热中子吸收截面小，对中、高温水有高的抗蚀性，有相当好的室温及同温力学性能，加工成形性优秀，可作管状元件及板状元件的包壳材料。

国外采用铝－硅－镍合金作为元件的包壳材料，在高温水中有良好的抗蚀性。后一个合金在260℃~300℃水中的抗蚀性比8001合金的高。

在某些情况下，如果作为屏蔽材料的混凝土的质量与体积不能满足要求，或不便使用时，则除水以外，还可以用一种名为“波拉尔（Boral）”的铝板作为屏蔽，它是一种含有碳化硼（B4C）的复合铝合金，因为它有良好的中子吸收性能，在其表面包覆一层1100工艺纯铝。

核聚变铝材

当前，一些国家为了解决人类未来能源问题，还在开发核聚变反应堆，其中美国的成就最突出，2010年11月20日被

誉为“人造太阳”(核聚变试验堆)的美国国家点火装置(NIF)开始点火运转，产生6×106 ° F的高温，相当于恒星或大行星核心温度，达到了核聚变所需的温度。

核聚变反应堆是将氘（D）和氚(T)产生的高温等离子体封闭起来，进行核聚变反应，反应堆应该用放射能衰减快的、停堆后短时间人可以接近的、残余放射能小的材料的制成。铝合金是一种低感应放射能材料，是一种较为理想的热核反应堆材料。

热核反应堆材料除要求感应方式能小外，在120℃还应有相当高的强度。由于磁场作用会产生涡流，铝合金的电阻应大一些，还应有良好的成形性能、加工性能、真空性能与导热性。

研究表明，残余感应放射能低的材料是C、SiC与纯铝，但C及SiC的加工成形性能差，不易加工大的构件，现在日本的R计划、国际原子能机构的INTOR项目和美国的STARFIRE核聚变反应堆的研究都把铝合金作为研发的首要材料。

在元素周期中，对14.1MeV中子引起的感应放射能低的元素只有Li、Be、C、Mg、Al等。因此，核聚变反应堆铝材的研究开发对象无疑当是以高纯铝为基础的Al-Mg-Si系、Al-Mg系、Al-Si系、Al-V系、Al-V-Si系、Al-Mg-V系、Al-Mg-Li系合金及烧结铝合金（SAP）。在这类材料中，应严格控制铝合金的常用合金元素Fe、Cu、Cr等的含量。

据美国国家点火装置的官员估计，使用核聚变反应堆的发电站将于2020年开始运行，到2050年将有25%的美国民用能源由核聚变提供。海水中有的是氘，1gal海水可提供相当于300gal汽油产生的能量，50gal海水所产生的能量相当于2t煤的。核聚变很环保，大规模应用后，可以少使用化石燃料，从而大大降低温室气体排放。一旦我们掌握了核聚变发电技术，我们的子孙后代将享受到科技发展带来的飞跃，能源短缺的时代将一去不复返，铝在迎接这个时代的到来将发挥重要的作用。

在中国发电装机容量中，核电装备占的比例甚低，在今后二十年内，核电装备用铝量的年平均增长率可达20%或更大一些，成为高精铝材应用方面的又一新亮点。核电装备所需的铝材中国都能生产，但是生产工艺管的企业只有东北轻合金有限公司和中铝西北铝，在研发核电站用铝材方面与工业发达国家的相比还有较大差距，亟待加强与加大投入。

1.3.42 用发展眼光看待铝加工富余产能

虽然某些铝加工材的产能大得离谱，但新项目照样可以建设，不过在建同类产品项目时，应对市场有充分的了解，能在同类产品中战胜 60%以上其他企业的产品，否则不能轻易进入。

当下铝产业内的企业家、专家们都在谈论铝的设计生产能力大的问题，先是讨论电解铝的过剩，现在又在议论铝加工材的产能大，趁此机会，笔者也来说说铝加工材的产能大的问题，不管是原铝的设计生产能力，还是铝加工材和铸造产品的设计生产能力都存在不同程度的富余，这是事实，毋庸讳言。生产能力可分为设计生产能力（名义生产能力）与实际生产能力，通常一个项目投产后，特别是大项目，总要经过一段时间，实际生产能力才能与设计生产能力相等。本文所说的生产能力就是指设计生产能力。笔者认为，最好不用“过剩”，过剩意味着无出路的长时间的大之又大，“剩”表示多余，略含贬义，过剩产能可以理解为无用产能。

铝加工业的产能现状

产品	匡算产能 kt/a	产量 kt/a	富余系数 产能/产量
冷轧板带	12500	8800（含铝箔带坯）	1.42
热轧厚板	340	95	3.6
PS 版基	400	200	2.0
CTP 版基	350	150	2.3
罐盖与拉环带材	600	180	3.3
罐体带材	450	320	1.4
铝箔	4200	2600	1.6
建筑型材	15000	9500	1.6
普通工业型材	8000	4500	1.8
大工业挤压材	700	200	3.5
管材	750	320	2.3
线材	4000	2800	1.4
锻件	200	180	1.1
粉材	400	100	4.0

铝加工业的产品种类比电解铝行业的多得多，虽然电解铝行业从广义方面讲还包括铝土矿开采、氧化铝与原铝提取、炭素制品与氟化盐制备，但在谈及铝的产能富余时，在当前的铝产业仅仅是指原铝即电解铝的产能过剩。而铝加工材的产品种类比原铝多得多，从大的方面讲可分为：板、带、箔、管、棒、型、线、锻件、粉膏。它们都处于平等的地位，不像原铝工业那样较为单一，因为铝土矿开采、氧化铝提取、炭素制品与氟化盐制备都是为原铝生产服务的，所以在讲铝的产能大时，就仅仅是指原铝的产能过剩，而在讨论铝加工的产能时，则必须指明产品的种类。

截至 2013 年底，中国铝加工材产能富余的产品有航空航天与普通厚板、PS 版基、易拉罐板带、铝箔、大挤压工业型材、建筑型材、管材、线材、锻件等。厚板的生产能力是指

拉伸机的通过能力，不是指热轧机的。大挤压型材是指需用挤压力≥45MN 的挤压机生产的产品，因为工业上通常将挤压力≥5000tF 的挤压机成为大挤压机，但挤压力有公吨与美吨（短吨）之分，美国、日本、中国台湾地区生产的挤压机以美吨表示挤压力，而俄罗斯的挤压机生产企业、中国太原重工股份有限公司、德国梅尔（Meer）公司生产的挤压机则以公吨作为挤压力单位，意大利与西班牙生产的挤压机多以短吨表示挤压力，为统一起见，宜以 MN 作为挤压力单位。

大部分铝加工材的产能的确富裕不少，例如大挤压机生产的大挤压材（型材、棒材、管材）可以满足全世界的需求还绰绰有余，国外大挤压机的总和还不到 60 台，而中国 2013 年底投产的大挤压机就有近 90 台，中国 95%以上大挤压机是近几年建设的，装机水平很高，有 2 台 150MN 级新式卧式挤压机，而国外，只有美国有 1 台 145MN 的卧式挤压机。中国还在制造 2 台 225MN 的挤压机。日本仅有 7 台大挤压机，最大的 1 台是 97MN 的，但是他们生产的大挤压材不但能满足日本国内的需求，而且还有出口。

虽然某些铝加工材的产能大得离谱，但新项目照样可以建设，因为我们是在搞市场经济，市场经济是一个竞争经济，是一个充满活力的经济，不过在建雷同产品项目时，应对市场有充分的了解，对产品的性能、装备水平、生产工艺及自己的人力、财力、技术能力等有十分的把握，以确保如期建

成，如期达产，产品有很强的竞争力，能在同类产品中如鹤立鸡群，能战胜 60%以上其他企业的产品，否则不能轻易进入，不但要了解国内情况，而且要掌握国外态势。

铝加工产能富余情况如下表所列，板带生产能力是指冷轧机的产能，时间截至 2013 年 12 月。

表中的富余系数是笔者在此首次提出，可供项目投资者参考：此系数大于等于 1.3 时，该产品不宜立即进入，可考虑 3 年以后进入；该系数大于等于 1.5 的项目，宜 5 年以后进入。今后欲进入铝加工产品的投资者宜选择可满足下列 3 点的产品，第一，市场容量大；第二，今后 10 年内，复合增长率≥12%；第三，技术门槛高。

产生富余产能的原因浅析

由以上介绍的情况可见，中国铝加工材生产能力已暂时（5 年左右）处于富余状态，有个别产品如厚板、大挤压型材即使再过 10 年恐怕还很难喘过气来，当然个别企业也许例外，会过得轻松些，有些微利。

产生大面积产能富余的原因可能有：首先，中国经济正处于高速转型阶段，一些产业产品生产能力大一些是正常的。其次，投资者还不成熟，对市场经济还不十分了解，更谈不上有经验，因此建设项目有很大的趋同性，例如 20 世纪 80~90 年代，广东大沥镇建设的一批铝型材挤压企业，河南巩义市回郭镇的一些平轧铝产品企业都是这样建设起来的，在一个村里有人建了一个挤压铝材厂或者板带轧制厂，致富了，便群起仿效，这些企业在 2005 年以前对中国经济的发展，对中国成为世界第二大经济大国起到了积极的作用，功不可没。但自 2005 年以后，有些企业没有与时俱进，逐渐沦为富余产能之列，如不及时升级，在今后的竞争中有可能被市场淘汰。

第三，各级地方政府对大范围产能上升起了强力的催化剂作用，为了大幅提高当地 GDP 增速，为了政绩，为了尽快致富，为了地方的一时利益，出台各种优惠政策，招商引资，为产能持续扩大起了推波助澜的作用。

第四，有关部门与媒体没有及时发出有效的预测与预见性的言论，任其发展，在当前中国市场经济还不完善的条件

下，还有必要采取一些有效的强制性措施。媒体可在这方面发挥很大的作用。

如何解决富余产能

大部分铝加工产品如果按质量计算，则 95%以上都存在不同程度的富余，仅个别大宗产品如 ABS（汽车车身薄板）与一些量小的高技术产品或不能生产或产量不足，如钻探管、宽度大于 4150mm 的造船板、高压阳极电子箔、特种焊条等，这种现象是正常的，在某一段时间内，任何一个国家都可能有些产品不能生产或产量不足。当前，铝加工产品产能富余成定局，那么如何化解呢？可否采取如下措施：

富余系数大于 1.3 的产品最好不要新建项目，如要建设新项目，宜谨慎。

加速产品结构调整，向富余系数小的产品转移，开发技术含量高、附加值高的产品，开发新的产品，向深加工进军，向用户提供的不再是半成品而是成品零部件，如挤压企业向汽车厂提供成品保险杠、向轨道车辆厂提供焊接好的箱体与模块等，这个领域还是大有可为的。据笔者调查，铝加工产品的半深加工率与深加工率还不到 40%，挤压企业做得好一些，板、带、箔轧制企业做得不尽人意。

扩大铝的应用。中国有色金属工业协会在扩大铝的应用

方面做了很多工作，取得了相当大的成就，但是，与国外的铝业协会相比还是有一定差距，可与大的铝加工企业联合起来开拓铝的应用新领域，不断推出新产品，举行各种推介会议，出版各种宣传资料。推广铝的应用是一个永恒的话题，不但在化解电解铝产能过剩时期应该做，平时也应该做，这样才能保持铝在国民经济中的支撑作用，保护铝行业的整体利益，维护铝材的竞争地位。

扩大铝材出口。在当今全球经济一体化的情况下，由于各地经济发展的不平衡性，任何档次的产品都有其市场。

加强管理，提高技术，降低产品各项成本，提高产品市场竞争力，提高效益。

充分发挥市场这只无形的手的作用，充分发挥优胜劣汰的作用，淘汰那些没有竞争力的企业，不要去“救”它，生生死死都是自然规律。

创新，创新，再创新。只有创新的企业才有活力，美国铝业公司就是靠创新发展了 126 年，而且，凭借其创新能力还会继续充满活力的走下去。

1.4 交通

1.4.1 中国首辆全铝汽车亮相啦！

在北京车展亮相的奇瑞捷豹 XFL 长轴距版全铝车身。

所谓全铝汽车，就是在当前的技术条件下，凡是可用铝合金取代其他材料制造的零部件都用上了铝合金，而且这种取代带来了一系列的优点与好处：车的净质量大幅度下降，燃油效率提高了，安全性更高了，乘座更舒服了，更加环保了，驾驶起来更轻巧了，服役期限更长了，报废后材料回收价值更高了，外观质感赏心悦目，售价合理可以接受，如美国福特汽车公司的F150 型皮卡全铝车仅比钢车的贵 150 美元。

中国奇瑞汽车公司常熟工厂生产的全新捷豹 XFL 长轴距

版就是这样一款全铝车，是中国制造的首辆全铝车，也是在2016年5月在北京车展上亮相的有完全自主知识产权首辆车，与第一代捷豹XF车相比，它的刚度提高了28%。XFL全铝车的铝化率高达 75%，跻身国际先进行列，它的车身板是常州诺贝丽斯（中国）铝制品有限公司提供的，车身架构为铝合金挤压型材，以压铸件、铸件作为节点连接件，从而使车身净质量下降到只有 297kg；发动机系统的许多零件及车轮等是用铝合金压铸的。在制造全铝捷豹路虎车身时采用航空器的铆接胶合技术，这种自冲铆接与车身结构黏合剂的组合，使车身连接强度大大上升,比单纯铆接件的增加1倍至2倍。

由于全铝车净质量的下降，因而拥有极好的操控性与动力表现，加速更快捷，操控更精准，制动距离更短，燃油经济性更好，温室气体排放更少。这款全新捷豹XF长轴距版的推出在中国汽车用材发展史上具有一定的里程碑意义，可于2016年10月以后正式上市,可以满足消费者对新车的渴求。未来还将有更多更优节能、环保车在奇瑞捷豹路虎常熟工厂源源下线，驶向华夏大地，奔驰在世界各地。

全铝全新捷豹路虎XF长轴距版XFL是奇瑞捷豹路虎全铝车身车间生产的首款产品，是中国建成投产的首个全铝车身车间，填补了中国汽车车身制造的一项空白，补上了全铝车身制造的一块短板，笔者希望在 2020 年以前中国能建成 10

个或更多一些这样的车间，万事开头难，有了第一个，自会涌现一个又一个，一批又一批的后来者。这个全铝车身车间占地面积 48384m2，拥有世界一流的航空级的先进的铆接胶合技术和设备，自动化率高达 100%。

国产捷豹路虎 XFL 车身用的 ABS（auto-body-sheet）是诺贝丽斯（中国）铝制品有限公司提供的，它位于常州高新技术产业开发区，一期总投资 1 亿美元，2014 年 10 月 21 日投产，占地面积 650000m2，是中国首家 ABS 生产厂，生产能力 120kt/a，诺贝丽斯铝业公司（Novelis）的独资企业。诺贝丽斯铝业公司是全球最大的平轧铝产品企业，它的总部在美国纽约，是印度一公司的子公司。诺贝丽斯（中国）铝制品有限公司仅进行汽车车身板带卷的热处理与精整处理，冷轧带卷由诺贝丽斯大韩铝业公司（Novelis Korea Limited）提供。二期将建熔铸、冷、热轧项目。

另外，奇瑞汽车公司年产 6 万辆铝合金骨架车身纯电动乘用车项目 2016 年 2 月 23 日在安徽省芜湖市启动，一期工程预计今年 9 月投产，生产能力 10k 辆/a 小型纯电动 SUV 车（sport utility vehicle，多用途跑车），二期 2017 年投产，生产能力达到 60k 辆/a 纯电动乘用车制造基地，占地 23×104m2，总投资 15.6 亿元。根据该公司规划，2020 年新能源铝合金汽车销量 20×104 辆。

1.4.2 全铝乘用小汽车族谱

由挤压铝型材和真空压铸连接件组成的奥迪 A8 车身骨架。

全球首款铝密集型捷豹 XE 系列轿跑。

全铝英菲尼迪 Q60 概念车。

近些年来，关于实现汽车轻量化的技术不断涌现。所谓

汽车轻量化就是在保证车的强度和安全性的前提下，尽可能地减轻汽车的自身质量，进而提高车的动力特性，减少汽车行驶过程中的阻力，降低能耗，从而达到节能减排目的。

美国能源部和欧共体的研究显示，汽车自身质量降低10%，燃油效率可提高6%~8%；汽车质量每减少100kg，油耗可降低0.3L/100km~0.6L/100km。这里所说的汽车是指乘人小车。日本科学家曾做过试验，在城市标准公路上行驶时，84%左右能耗消耗于车的自身质量。因此汽车轻量化已成为当前世界汽车发展的潮流。

2013年中国汽车的平均能耗为7.5L/100km，国家规划定下的节能减排目标为：2015年新车的能耗要下降到5.9L/100km，2020年达到4.5L/100km，比美国的标准还低一些。要实现这个标准，惟一的主要措施就是降低车的自身质量，采用轻量材料如铝、镁、钛、复合材料代替钢、铸铁制造零部件。欧洲汽车制造企业也正在推行“超轻型汽车工程”，其目标是在现有价格基础上将车的质量降低30%。

铝是最早成为钢材替代品的汽车制造材料，早在1899年欧洲汽车企业就采用了铝铸造变速器壳体，距铝的工业化生产法发明1886年仅13年，距铝的工业化生产1888年仅11年。在现行的技术条件下铝是性价比最好的可代替钢与铸铁使汽车轻量化的材料，可使汽车自重减轻30%~40%。铝现在已经成为汽车制造中用量仅次于钢与铸铁的材料，在全铝汽车中已

跃居第二位。未来汽车行业铝深加产品的应用，将占应用领域中最大比例，因此，乘人小车铝的应用是推广铝在汽车应用的牛鼻子，它的单车用铝量虽比重型卡车的低得多，但车的产量大，几乎占全球汽车总产量的60%弱，欲推广铝在汽车中的应用，必须紧紧牵住这个牛鼻子。

2014年全球汽车用铝量：北美不但是总用量最多的，也是单车用量最大的，150kg/辆；欧洲第二，单车用铝量145kg/辆；日本第三，单车用铝量140kg/辆；中国虽是全球最大的汽车生产国，却是单车用铝最少的，仅110kg/辆。

全铝乘用车

1. 全铝乘用车家族的长子--Audi（奥迪）A8

虽然早在1899年铝就用于制造汽车发动机系统的零件，但全铝汽车直到1994年才诞生，它是全铝乘用车家族的长子，名为Audi A8。所谓全铝车笔者给的定义是，在现有的技术条件下，凡是可用铝合金制造的零部件全变成了铝的。

Audi A8乘用车1997年进入美国，它的构架是奥迪公司与美国铝业公司10年的研发结果，板材、型材用了7种航空铝合金，连接件是真空压铸的。与钢车相比，Audi A8的质量下降40%，安全性、操作性、乘坐舒适性、燃油经济性、刚性等都有相当大的提高，被誉为“21世纪的首款豪华轿车”，将引领21世纪轿车发展潮流。

Audi A8该车的挤压铝材骨架，根据奥迪空间构架（ASF,Audi Space Frame）理念设计的。该车铝合金型材构架由真空压铸件连接，挤压材是用高强度航空铝合金生产的。

2. 家族中的运动健将Ferrari 360 Modena

1992年~1994年英国制造的美洲虎（杰戈娃）XJ 220型汽车是铝密集型车，但还不是全铝车。之后，设计组接到非常明确的新任务，设计质量更轻、刚度更大、操作更方便、内容空间更大，而价格又上升不多，这就是法拉利Ferrari 360 Modena，铝在这款车上起了至关重要的作用，总用量为562.5kg，而车的总质量为1406.2kg，车的铝化率40%。另一款铝密集型轿车是克莱斯勒汽车公司（Chrysler）与美国铝业公司联手研发的“普利茅斯徘徊者（Plymouth Prowler）”，不但采用了一些新的铝材，而且还开发了一些新的工艺。

美洲虎XJ220型车1994年的售价 $706000，底盘为粘结蜂窝结构，车身为全铝，还用了不少其他铝合金零部件，从而车的刚度大为提高，质量显著下降。

3. 全球首款轿车XE及奥迪TT

全球首款轿车型跑车XE是英车捷豹旗下运动型轿车系列的最新成员--全新XE不但于2014年接受欧、美消费者的预定，而且于2015年初向中国消费者提供了三款车型，搭载2.0L涡

轮增压发动机的XE R－Sport（低功率及高功率）以及搭载3.0L V6机械增压发动机的XE S，售价分别为478000元、528000元和688000元。

XE轿跑车身75%以上采用铝材，以铝制之身，铸不摧之韧，是同级别车型中唯一使用高密度铝材单体壳式车身结构的车型，也是有史以来最具燃油经济性的捷豹车型。在动力方面，XE型轿跑由2.0L涡轮增压发动机（低功率及高功率）以及3.0L V6机械增压发动机分别149kW、179kW、254kW的最大功率。XE系列车除了在英国生产外，还将在中国的常熟工厂生产。

新款奥迪“TT”轿跑继“奥迪A3（Audi A3）”、“大众高尔夫（Volkswagen Golf）”等之后采用了大众集团的新一代平台“MQB”，采用铝合金后，车身大幅减轻。

车身结构与上代车型一样，继续采用铝合金及钢板的“ASF”（Audi Space Frame，奥迪空间框架），门槛梁及车顶纵梁使用铝合金冲压，前盖、车门及后备箱盖也是用铝合金冲制的。

在TT轿跑中，乘客的保护结构仍是钢质的，对需要保护强度的构件是用低合金化高强度钢板冲制的，因而质量下降了。配备2.0L直喷涡轮发动机。与上一代的2.0TFSI轿跑相比，新一代轿跑由于采用了铝合金使质量减轻了50kg。

4. 全铝车身凯迪拉克CT6

通用汽车公司的凯迪拉克全新旗舰车型CT6采用全铝车身。它的自身质量与CTS其他车型接近，但车身比后者的大，其名字CT6来自于“Cadillac Tourer6”（凯迪拉克旅行者6）。据称，在CT6之后，还将生产CT9，它的定位将高于奔驰S级车。

5. 捷豹F-TYPE Coupe智能全铝架构车

英国捷豹公司新近推出的F-TYPE Coupe型车，是一款智能型的高性能双座硬顶跑车，全铝架构，具有相当高的灵活性，实现模块化设计，是一类全新的中型豪华运动轿车，它的亮点是：高度智能化，全铝车身打造和轻量化架构。

6. 劳斯莱斯新款铝合金SUV

英国劳斯莱斯汽车公司的新款SUV车型（sport utility vehicle，运动型多用途车）是基于一个全新的铝合金平台打造的类似于幻影所采用的铝合金空间构架，是这一车型领域的全球旗舰车型，它的车身长度与幻影型车的几乎相等，并且具备非常现代化的前脸造型，售价242万元~270万元，顶配车型的价格却高达485万元左右。此款新SUV车的主发动机为幻影所采用的6.8LV12的发展版。

7. 用铝量最多的F-150型皮卡

美国福特汽车公司生产皮卡车（Pickup）是世界上产量

最大的一款汽车。皮卡（pickup,PU）是一种客货两用车，采用轿车驾驶室，货箱系敞篷式，后档板可放下，操作及车身长度与轿车相仿，装载质量不大于0.75t。

福特汽车公司2015款F-150 pickup车型的车身材料的97%为铝材，较前一版本的钢制车身的减重320kg，燃油效率提升30%。F-150一直是福特旗下的经典皮卡，多年高居美国十大畅销车榜首，2013年的销量超过76.3万辆，占美国皮卡市场份额的40%。全铝F－150皮卡不仅外观亮丽、轻盈，而且仅比钢车价格高150美元。全铝F-150 pickup的推出，是铝材首次用于制造全尺寸皮卡的绝大部分零部件。高盛公司认为，福特新款F-150 pickup车身采用铝材只是行业大量用铝的序幕，仅是汽车制造业用材变化的“冰山一角”。至2014年年底，F-150 pickup的预计量已超过40万辆，2015年进入常态生产后，铝的消费量可达600kt/a，成为全球用铝最多的一款汽车。F-150 pickup的铝车身质量约317kg。

在推出F-150 pickup的同时，福特内部人士透露，福特内部人士透露，福特Explorer（探险者）和Expedition（远征）两款车型将追随2015款福特F-150 pickup的脚步，采用全铝车身，福特新车所有的计划都是朝着全铝车身的规划前进，下一代福特Explorer将于2019年或2020年投产。福特公司一直在孜孜不倦地寻找提高燃油效率减少二氧化碳排放的措施与途径，这意味着新车型将采用更符合空气动力学的造

型和更有效的发动机与变速器。

F-150 pickup在2015年底特律车展上一亮相，在美国市场的最大竞争对手通用汽车公司（GM Auto）就红了眼，立马宣布将在下一代的雪佛莱Silverado与GMC Sierra车上尽可能多地采用铝合金材料，以求在燃油使用效率和车身刚性上寻找最佳的平衡点。F-150 pickup由于铝合金的大量采用，在油耗、刹车、加速和承载能力达到了有史以来表现最为平衡的车型，成为汽车工业的最佳典范。

早些时候通用汽车公司与美国铝业公司、诺贝丽斯铝业公司签订了合作协议。以期望在今后的新车换代研发上能够立足于轻量化和环保的设计理念。

参展2015北美国际汽车展的铝合金密集车

2015北美国际汽车展于2015年2月在美国底特律举行，现将有代表性的铝密集汽车与全铝汽车简介于下。

1. Infiniti Q60概念车

英菲尼迪（Infiniti）汽车公司总部在中国香港特区，组建于1989年，在日本、美国、中国都建有汽车制造厂，在英国的厂于2015年投产，在墨西哥的可于2017年建成，在全世界50多个国家与地区设有销售网点。在展会上亮相的Infiniti Q60概念车的车身是用铝材与碳纤维打造的，是一款坚韧的强有力的新型双门单排座轿车（coupe），内部装设

豪华，装有双涡轮V6发动机，7档自动变速，最大功率336kW。

喷涂以特殊颜色的Infiniti运动车名为“阿克蒂克铝”，似用一整块铝车削成的，前后灯光均为LED，银光熠熠，高贵华丽。Infiniti Q60车可于2016年批量生产。看来，Infiniti Q60概念车在性能、造型、外观等等方面已比德国车胜出一筹。

2. 奥迪全新2016 Q7--最轻的7座SUV

在车展上首次亮相的奥迪全新2016 Q7是一款运动车是利用大众集团新MLB Evo平台打造的，极具SUV色彩，既保留奥迪公司的优秀传统，又比上版本车轻了许多，其底盘脊骨是用超高强度钢冲压成形的，铝合金零部件占了相当大的比例。前、后部与悬挂系统的许多零件都是用铝合金铸件、挤压型材与壁板加工的，门、前保险杠、发动机盖、天窗等全是铝合金的。

2016 Q7车装有3.0L丰田直接点火装置（TDI）发动机，由于铝合金材料的大量应用，使车的质量减轻了325kg，达到了1995kg，是高级7座位多用途跑车（SUV）中最轻的。

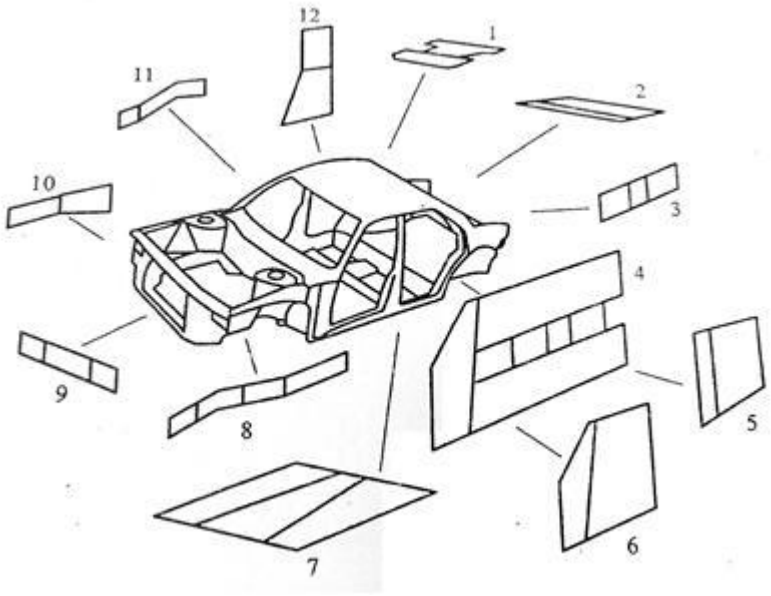
3. 杰戈娃（美洲虎）F－Pace

在2015底特律车展上展示的Jaguar（杰弋娃）F－Pace多用途跑车是杰戈娃汽车公司的首款全新的铝密集型车，将于2016年批量生产。新版Jaguar F－Pace是原型概念车

Jaguar C—X17的改进型，2013年在法兰克福车展上展出。

Jaguar F—Pace是一种介于多用途跑车（SUV）与高级轿车（Saloon）之间的车，许多零部件都是用平轧铝材、挤压材、锻件、铸件与压铸件制造的，有些零部件还经过阳极氧化处理，呈完美的黑色色调，看起来十分优雅柔和。

1.4.3 ABS 生产工艺的昨天、今天和明天



1-车顶加强件；2-后行李箱盖；3-挡泥板；4-车体侧架；5-后门内板；6-前门内板；7-浅盘形地板；8-车架纵梁；9-保险杠；10-发动机室轨；11-前柱加强件；12-中柱。

图 1　可焊接的车体板件示意图

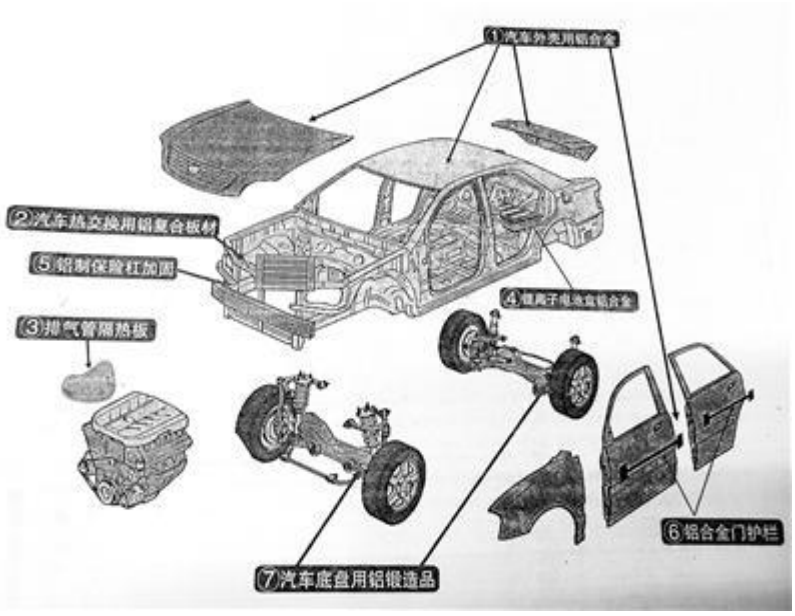
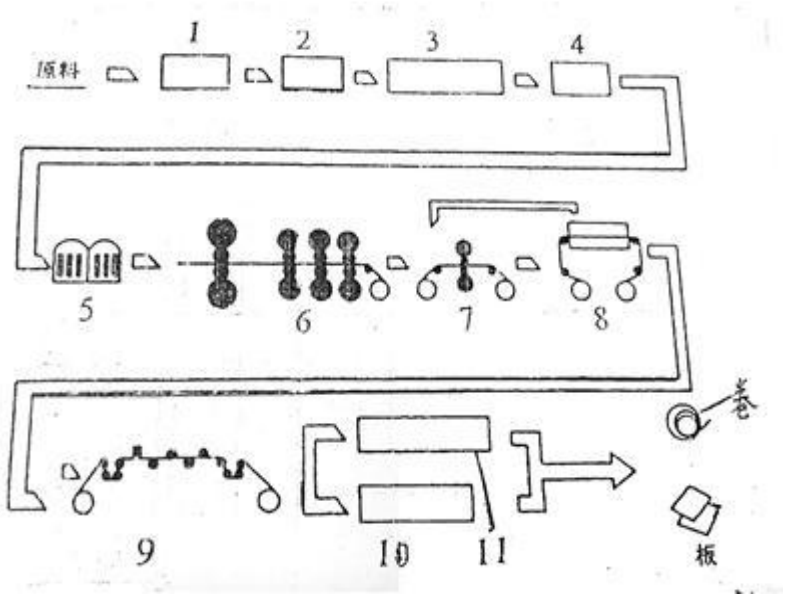


图 2　汽车用铝部位及零部件示意图



1-熔炼；2-铸造；3-锯切；4-铣面；5-均匀化退火与加热；6-热轧；7-冷轧；8-热处理；9-拉弯矫直；10-表面处理；11-素面带材。

图 3　ABS 板、带材的典型生产工艺示意图

一辆全铝车身的乘人小轿车有20余块钣金件（图1，2），它们是用多种铝合金冲制和/或弯边加工成形的，有5xxx系合金、2xxx系合金与7xxx系合金等。在2025年以前，ABS将是汽车工业用铝增长最快与最大的板块，如以2013年全球用量300kt为准，据预测2025年的可达2680kt，年平均增长率约为20%，而全世界2016年的生产能力为2500kt/a，所以在2022年以后还需适当建一些项目。

在这期间，不仅对ABS的需求大，而且商务车对铝板的需求也不可低估，如运输谷物的翻斗卡车、各种半挂车与拖车，以及运输散装商品的装备与工具。交通运输工业对铝板、带需求增幅大的是北美与中国。

ABS生产工艺的昨天

ABS是由平轧铝产品（FRPs）厂生产的，由十几道主要工艺组成：配料、熔炼、铸造、锯切、铣面、加热、热轧、冷轧、热处理、矫直、表面处理、涂润滑剂、深加工、包装入库等。通常，将熔炼、铸造、轧制称为上游工序，热处理、矫直、表面处理等称为下游工序。

我们可按ABS生产工艺的发展进程将其分为昨天的工艺、今天的工艺、明天的工艺；也可以把昨天的工艺称为第一代，今天的工艺称为第二代，明天的为第三代。昨天的工艺与今天的工艺在上游工序方面几乎相同，而在下游工序方面则有

很大差异；可是今天工艺与明天工艺的主要差异在上游工序，而在下游工序方面无太大差异。这是笔者一家之言，不是国际上通用的，因为国际上还没有人提出过，也有没约定俗成的分法。

铝加工厂生产ABS带材的工艺如图3所示，这是一种典型的工艺，与生产通用铝板带材的工艺相当，虽然在此将其称之为昨天的工艺，并不是说当今在生产ABS时不用了，只是在北美洲与西欧不用了，在其他地区如日本等仍在采用。

在熔炼-铸造中，对熔体应进行精密净化与添加晶粒细化剂，最好能按航空材料标准控制熔体的氢与杂质含量以及铸锭组织。6xxx系合金ABS扁锭在铸造时有形成热裂纹倾向，但不严重，只要严格控制化学成分与冷却速度，控制好晶粒细化剂添加量，可不会产生裂纹，我们在铸造500mm厚的扁锭时，熔体浇注温度约700℃，铸造速度40mm/min~60mm/min。

均匀化退化与热轧前可合并进行，也可以分开实施，均匀化的目的为：使铸锭组织均匀，消除晶内偏析，去除内应力，提高锭坯热轧性能，改善材料的性能。含有少量Mn及Cu的合金在完工退火（O状态）时易产生粗大晶粒，均匀化退火可避免此现象。不过，过渡族元素含量少时，均匀化处理的晶粒细化效果不明显。可是，Mg及Si的含量较高时，均匀化处理对Mg2Si及Si的金属间化合物质点的均匀分布还是很有效的，均匀化退火是生产ABS不可或缺的工序之一，同时，处

理温度越高合金在BH（bake heating）处理后的力学性能也越高。

在生产6xxx系合金ABS时，为保证板、带材的BH性能，必须保证Mg、Si完全溶于固溶体中，均匀化温度宜高，保温时间也宜长一些。因为冷轧带材在连续式气垫炉或感应炉内固溶处理时通过时间短，有些Mg、Si可能来不及完全固溶，为了保持生产线效率，不允许带材在炉内停留长的时间。为此，合理地安排加热制度可以弥补这一缺点。

现代化的热轧机列多是将厚500mm~600mm的锭坯热粗轧到20mm~30mm，再热精轧到3mm~5mm带材。热粗轧开始温度通常为505℃左右，热精轧终了温度为250℃~350℃。在这么高的温度下卷成卷再慢慢地冷却下来，会有一部分Mg及Si析出来，它们在以后的快速固溶处理时不可能全部固溶，会使BH性能下降一些。中国南南铝加工有限公司的3100mm+2800mm的（1+1）式热粗-精轧线粗轧机的开口度为800mm，是世界上仅有的2台开口度最大的热轧机之一。

在生产ABS带材过程中，在热轧后与冷轧前进行一次预退火也是必要的，一些研究指出，预退火可以改善带材的卷取性能，而且可以改善热轧组织的不均匀性对材料表面性能的不利影响，还可以控制合金固溶处理后的显微组织，可以在一定程度上提高板材的成形性能即提高r值，易于卷边。不过进行预退火，生产成本有所上升。

6xxx系ABS都在T4或T4P状态下交货与应用（P表示预时效处理pre-aged），而外车身钣金件是在人工时效后成形的。固溶处理都在连续气垫炉进行。开卷后带材进入加热区受到向上下表面喷射的高温热风加热，在短时间内被加热到固溶处理温度后进入保温区，保温短时间后或不保温立即进入淬火区，进行水淬或强风淬火，因为Al-Mg-Si合金的淬火敏感性低。

为了提高合金的烘烤性能，希望合金中的Mg、Si能尽量多的固溶，为此可提高固溶处理温度，但不能过高，以免过烧，通常为530℃~560℃；同时，提高固溶处理温度，残留的第二相质点也越少，材料的弯曲性能也更好。

对于6xxx系合金带材，只要冷加工率能达到50%，在成形后就不产生表面粗糙现象。为了获得良好的综合性能与组织结构，冷轧变形率不宜低于75%。至于冷轧带材表面状态可以是冷轧的也可以是经过加工的，如放电钝化处理或激光钝化处理。例如，日本与美国采用轧制状态表面，可以节约成本，而欧洲则采用EDT或EBT处理表面，在日本还进行暗光泽表面处理。这些处理都是为了冲压成形时不产生组织的各向异性，以及涂装后的方向性与鲜艳性。

ABS生产工艺的今天

当前的先进ABS生产线称之为“今天的生产线”。采用全先

进的工艺，是2010年以后新建或改、扩建的当今高水平的生产线。与昨天的生产线即上一代的生产线相比，其特点是：把所有的ABS生产的下游装备全部整合在一条自动化线上，双层布置长度在300m左右，集开卷、矫直、切头、缝合、切边、预清洗、热处理、拉弯短直、清洗预处理、表面检测、预时效、表面处理、静电涂油、出口剪切、卷取等于一体；无铬表面转化处理；全线电脑控制与自动化，品质更高了，性能更均一了，成品率更高了，生产成本也保持在合理水平上；对6xxx系合金进行预时效。

1. 入口段工艺布置

带材在进入气垫炉之前要进行一次清洗，去除油污，碱洗溶温度50℃~75℃，洗涤约3s，然后再漂洗2次，第一次用室温去离子水，第二次用50℃~75℃去离子水，烘干后即可进入炉内。

带材在前进的不同阶段必须受到不同的张力，以防松动、擦伤、划伤和偏离中心线，各段张力(N/mm2)如下：开卷6~15，卷取10~20，活套7~15，炉区1~2。炉内张力应尽可能地小，同时应尽可能地稳定。

活套有立式的也有卧式的，各有优缺点，也可以混合使用，如为了缩短生产线长度，入口可用立式的，出口采用卧式的。这两种活套中国都有，西南铝业（集团）有限责任公司第二条气垫炉生产线即为卧式的。活套储带长度决定于带

材工艺速度：当工艺速度为60m/min时，长度约需160m；速度上升到100m/min时，长度应为260m左右。

2. 工艺段工艺布置

气垫炉和冷却系统安于钢结构平台上，分两层。一般采用天然气加热，热空气经喷嘴吹向带材上下表面，带材以正弦形状通过炉区。可根据生产能力大小将炉内分为若干小区，若产能为80kt/a，可分成10区~12区，每个区的上下各有1台循环风机。炉气温度300℃~580℃，最高600℃，保温精度±1.5℃。生产6016合金带材的温度540℃~570℃，保60s后进入空冷区。冷却区有7个分区，1号为水淬区，用于2xxx系及7xxx系合金带材的淬火，带材的冷却速度可达500℃/S，用的是去离子水。6xxx系合金在2~7区空淬，将带材冷却到≤65℃。

在入口段与工艺段有拉弯矫直机，其技术性能与通用带材用的相当。工艺段入口张紧装置可为带材出炉后增加带材张力，并为矫机提供反张力，拉矫机最大张力可达500N/mm2，可以生产2xxx系和7xxx系硬合金带材。拉弯矫系统还带有喷洗设施。

在工艺段还有清洗预处理区，预清洗时首先向带材上下表面喷射60℃~70℃的碱液约6s，进行2次漂洗，第一次用室温去离子水，第二次用40℃~60℃去离子水，漂洗水循环使用；之后酸洗6s，再漂洗2次。如果带材表面洁净，可免除碱洗，但酸洗是必需的。

3. 出口段工艺布置

清洗预处理后进入出口段，经表面检查再进行预时效，以提高带材的成形与烘烤硬化性能，向带材两面吹喷高速热风，速度约40m/min，温度约110℃。然后进行化学转化钝化处理，铝材表面与氧化性钝化剂发生反应，生成与铝基体附着力强的不溶性的转化膜，可根据用户要求对带材进行浸涂、喷涂或辊涂。

浸涂后用50℃的去离子水漂洗2次，用蒸气加热的风烘干后进入出口活套；喷涂多是利用静电法向带材表面喷射含Ti或Ti/Zr化合物的涂料，会很快与铝发生化学反应，可以在烘干前完成80%左右的反应；辊涂由辊涂机完成，带材通过两辊间的缝隙即完成涂覆，然后进入红外线烘干炉，烘干后进入出口活套。

最后一道关键工序是喷涂加热溶化的固体润滑油，带材通过高压（约100kV）雾化室时，即吸附一层薄薄的润滑油，雾化油液带负电，带材的一面可涂上油，也可以两面同时涂上。静电涂油机有立式的，也有卧式的，前者的单面涂油量为2mg/m2~25mg/m2，后者的为500mg/m2~3500mg/m2。

ABS生产工艺的明天

在ABS带材生产工艺方面，明天的工艺和今天的工艺的下游工序完全相同，不同的仅在上游，即铸造、热轧，而熔体

制备仍相同，冷轧也可能相同，也可能在轧制率方面有些差异。现在在美国有三种不同的冷轧带坯制备工艺：特殊合金公司的小型轧机轧制法（mini mill），美国铝业公司的微型轧机轧制法（micro mill），哈兹雷特（Hazelett）连续连轧法。

1. 小型轧机轧制法

该法是美国特殊合金公司开发的，据称该公司在建的生产能力600kt/a的ABS项目将用小型轧机轧制法生产热轧带卷，未见有关此种工艺的报道。有人称，特殊合金公司原是一个生产特殊钢材的企业。

2. 美国铝业公司的微型轧制法

这种工艺的注册名称为San Antonio MicromillTM，尚未见报道，但笔者2013年5月访问美国铝业公司匹兹堡技术中心时有人向笔者介绍了此法的工艺流程：熔体流入2辊铸造机，铸成厚2.3mm~5.1mm、宽1727mm、温度565℃的带坯，铸造速度61m/min~27m/min，风冷，双机架四辊轧机连轧，剪切头尾，风冷，成为厚0.46mm~3.81mm、宽1550mm~1700mm的带材，卷取。显然，所产带材宽度还未覆盖ABS的全部材料。此法已发展到哪一步尚不知道，但可以肯定的2020年以前不可能向市场提供产品。也未见美国铝业公司在改、扩建与新建的ABS项目中有采用此法的报道。

3. 哈兹雷特连铸连轧法

哈兹雷特连铸连轧工艺是目前世界上唯一有真正实际意义的成熟的并有商业生产价值的连铸连轧法，在铸造机之后可接1台~3台热(温)轧机，也可以不接，铸造带坯厚15mm~50mm，截至2014年全球在产的连铸连轧线13条，总生产能力约1750kt/a。它们用于生产通用板带材、铝箔坯料与冲挤坯料，还没有生产ABS带坯的，但生产5xxx系、6xxx系ABS合金带坯应该是不成问题的。

连铸连轧法是一种先进的1xxx系、3xxx系、5xxx系及6xxx系合金带坯生产工艺，在节约能源与资源、投资成本、生产成本方面优于铸锭热轧法，在产品品质方面却接近铸锭热轧法的而优于连续铸轧法的。中国首条1950mm哈兹雷特连铸连轧线2011年在河南伊川电力集团投产，是全世界最大者，还有两三条这类生产线在建设中。

4. 西南铝的大规格带材的连续气垫热处理生产线

西南铝业（集团）有限责任公司有2条气垫炉生产线，一条1986年从美国表面公司引进（Surface Co.），1700mm；另一条2500mm的，2010年投产，是中国最大的铝合金带材气垫炉连续固溶热处理机组，也是全球最大的这类生产线之一，是为生产航空航天铝合金带材固溶处理设计的，也是全球最大的这类生产线之一，是为生产航空航天铝合金带材固溶处理设计的，也可以生产ABS带材；该线是中外合作制造的，进口段、出口段设备由中冶赛迪工程技术公司（CISDI）设计、

成套供货并负责机组在工厂内的设计工作，该机组的建成不但可满足我国对高精铝合金板带的需求，对航空航天工业技术发展有着重大意义，同时机组的建成有效地提高了我国铝合金带材连续固溶热处生产线的设计水平，将国内铝合金带材热处理技术及装备提高到一个新的高度。

气垫炉有加热段和冷却段。加热段有加热分区5个，热风从炉顶和炉底垂直吹向带材表面，快速加热带材，用径向流动风机循环吹送热风，最高温度600℃，紧接着的是冷却区，分为两个封闭的小区，有3种冷却方式：空冷，气-水混合冷却加干燥，水冷加干燥。

气垫炉上盖可通过液压系统打开，如果炉内发生断带事故，打开盖后炉内温度可在2小时内降到规定温度。

结束语

截至到2015年，中国已建成和在建的ABS的企业有9家10条生产线（按气垫炉计算），可于2016年全部建成投产，总生产能力914kt/a（还有一二家在作立项前的准备工作），其中诺贝丽斯（常州）铝业有限公司、神钢天津铝业有限公司、爱励国际（镇江）铝业有限公司为外商独资企业，它们的生产能力340kt/a，占全国总产能的37.2%。西南铝业（集团）有限责任公司与南南铝加工有限公司的生产线不是ABS的专业线，其主导产品除ABS带材外，还有航空航天2xxx系及7xxx

系合金带材。现有的生产能足可以满足汽车制造业2025年以前对ABS的需求，欲新建ABS项目的，宜对市场态势有充分的了解，对生产ABS的新技术发展趋势也需要有前瞻性。

中国生产ABS的技术比汽车制造技术更落后，才刚刚起步，对这一点应有足够的认识。

1.4.4 ABS 项目建设风起云涌 全铝汽车时代真的来啦

所谓全铝汽车，就是在现有的技术条件下，凡是可用铝合金制造的零配件都用了其性能可满足设计要求的铝合金，同时车的价格合理，有好的销售市场。如果汽车车身钣金件全是铝的，也可以认为是全铝汽车。自新世纪开始，汽车工业受环保法规与全球气候变暖的倒逼，急欲减轻车的自身质量。当下，降低车的自身质量最有效措施是用尽量多的铝制造零配件，而车身的全铝化是做到这一点的捷径。从2008年开始，工业发达国家掀起了改扩建与新建ABS项目的浪潮，截至2015年，全世界已建成与在建的项目共30个，其中中国8个，总生产能力4405kt/a，中国的1425kt/a，美国的为1810kt/a，占全球的41.1%。

汽车车身薄板简称ABS，是冲制乘用车车身覆盖件的高精铝合金薄板，厚0.8mm~1.8mm，宽≤2200mm，在4种高精平轧铝产品（FRPs）中它的技术门坎最高，另三种产品为航空航

天铝合金板、PS与CTP基板、全铝易拉罐罐身带材。汽车用铝板可分为两类：ABS是专门的一类；另一类是通用板，指除ABS以外的其他所有板带材，有薄板也有厚板，对其性能要求比ABS的低一些。

严格的环保法规倒逼汽车轻量化

地球上的温室气体越积越多，人类生存环境受到严峻挑战，环境恶化的主要制造者之一是汽车排放的尾气。为保护环境，自上世纪末以来，各国政府与一些组织频频出招，欧盟要求2020年在其成员国销售的汽车应达到90g CO2/km，2016年的油耗不得超过4.5L/（100km），乘用车在城市标准马路上行驶时，车的自身质量消耗84%左右燃油，乘坐人员及后备箱内装的物品消耗的燃油仅约占15%。被称为“车轮上的国家”美国新制定的联邦法规定：2016年小轿车的油耗须达到7.6L/（100km），2025年应降到4.5L/（100km）。日本规定2015年小轿车的油耗应≤5.5L/（100km），2015年CO2排放量须比2010年的下降29%。当前，中国85%的汽油被各种汽车消耗掉，大城市75%的有害气体是汽车排放的，中国石油的对外依存度2011年就已超过56.5%，中国面临着极为严峻的资源形势。

由此可见，汽车轻量化在节能减排中起着多么重要的作用。汽车轻量化的措施有设计方面的，有加工制造方面的，

有用材方面的，但在当今的条件下，前两方面的“油水”已不大，用密度低的轻质材料取代钢铁是最现实的选择，可用轻质材料有铝、镁、钛、塑料、复合材料，但在眼下与今后一段相当长的时间内，用铝材取代钢铁是最可取的，具有最高的性价比。

国外ABS项目建设风起云涌

全世界这一轮ABS项目改建、扩建与新建热潮预计2018年基本结束，形成总生产能力约4400kt/a，可以满足汽车制造业2030年以前的需求。其中美国的生产能力最大，1810kt/a生产企业8个；德国的次之，410kt/a，生产企业4个；日本第三，200kt/a，生产企业4个；其他6个的总生产能力560kt/a，分别是：韩国120kt/a，沙特阿拉伯120kt/a，瑞士80kt/a，法国120kt/a，比利时80kt/a，奥地利60kt/a（见表1）。

美国铝业公司于2011年投资3亿美元扩建艾奥瓦州（Iowa）达文波特轧制厂（Davenport Works）的ABS生产线，已于2013年12月竣工，生产能力200kt/a。

2013年初，美国铝业公司投资2.75亿美元对田纳西州（Tennessee）的美铝镇田纳西轧制厂的ABS生产线进行改扩建，将原来的一条生产罐身料的生产线改建为ABS带材生产线，2015年完工，生产能力150kt/a。

奥斯威戈轧制厂（Oswego Works）位于纽约州（NY），

属诺贝丽斯铝业公司对工厂原有的ABS生产线进行改扩建，使能力达240kt/a，有2条生产线，每条的产能120kt/a，已于2013年8月投产。该厂原来的主导产品为罐身料。

刘易斯波特轧制厂位于肯塔基州，属诺贝丽斯铝业公司。公司于2014年决定投资3.5亿元，新建2条宽幅ABS连续退火生产线，1台新的宽幅冷轧机、1个研发中心，总生产能力220kt/a，2017年2月投产，是全球可生产宽2300mm ABS的唯一企业。

美国在建全球最大的ABS厂。美国特种合金公司（American Specialty Alloys）计划在美国东南部建一个全世界最大的汽车铝板带厂，总投资120亿美元，汽车级铝板生产能力600kt/a，这可是史无前例的。分期建设，首期2016年末建成，2017年6月满负荷生产。该厂最大的看点为：不但是全球最大的，而且采用小型轧机生产。

肯联铝业公司是总部设在法国巴黎的专业生产高精铝板带的企业，是由百年铝业巨头普基铝业公司（法国）、瑞士铝业公司和加拿大铝业公司变迁而来的跨国行业翘楚，由阿波罗全球管理公司、力拓矿业集团和法国战略投资基金公司投资成立。肯联铝业公司于2014年11月就收购位于阿拉巴马州（AL）马斯克尔谢尔斯（Muscle Shoals）板带轧制厂达成协议。收购完成后，将在2022年前投资7.5亿美元对工厂进行改建与扩建，使热轧生产线的生产能力从目前的450kt/a上升到700kt/a，并生产200kt/a ABS。

日本丰田商贸公司与神户钢铁公司决定在美国东南部建一个ABS生产厂，生产能力100kt/a，用于制造丰田汽车公司的骆驼牌轿车，它在美国畅销。项目可于2017年秋建成，2018年初开始满负荷生产。

日本联合铝业公司（UACJ）与肯联铝业公司合作，投资1.5亿美元在美国肯塔基州波宁格林县（Bowling Green）建一个ABS厂，生产能力100kt/a，2015年12月第一卷带材下线。该厂没有熔铸、热轧、冷轧生产能力，冷轧带卷由各自的其他平轧产品厂提供。

德国是这次ABS改、扩建工作的起始国，最先进行此项工作的是诺贝丽斯铝业公司，随后比利时、奥地利、法国、瑞士等的有关企业都进行了相应的工作，并已于2012年结束。截至2014年年底，德国有4个企业可生产ABS，总生产能力410kt/a。

纳切斯特德铝业公司属诺贝丽斯铝业公司，位于德国纳切斯特德市，1997年开始生产ABS，2009年扩建后，生产能力达到120kt/a。该厂有两大特点：冷轧带材坯料卷由阿卢诺夫铝业公司提供；2002年激光裁切线投产，有4台裁切机，年生产能力100万片可直接冲制汽车板金件的尺寸精准坯料，可优化材料物流，可以减少周转和运输工艺废料费用。

格雷文布洛伊铝业公司属海德鲁铝业公司，位于德国格雷文布洛伊市，有2条ABS生产线：AL1及AL2，2003年投产，

经过改扩后总生产能力200kt/a。AL2生产线专门用于生产表面质量高的6xxx系ABS。

哥廷根轧制厂属诺贝丽斯铝业公司，正在扩建ABS生产线，2015年秋完工；生产能力40kt/a。

德国辛根轧制厂位于德国辛根市，属肯联铝业公司汽车事业部，ABS生产能力50kt/a。

奥地利有色金属加工厂是该国唯一的铝材与铜材轧制厂，位于兰绍芬市（Ranshofen）。车身板生产始于2006年，有1条现代化气垫炉与精整生产线，ABS生产能力60kt/a。

爱励铝业公司设在比利时的杜菲尔铝板带有限公司新增1台宽幅铝带冷轧机（2400mm级），以满足汽车公司对宽幅铝薄板的需求。杜菲尔铝板带有限公司经这轮扩建后，可以生产欧洲最宽的ABS，同时生产能力也大幅提升。此冷轧机已于2013年上半年投产。公司的ABS生产能力80kt/a，最大宽度2300mm。

瑞士谢尔轧制厂现属诺贝丽斯铝业公司，2000年开始生产ABS，经过改扩建现有生产有力80kt/a。

法国纽布里萨克铝业公司属美国肯联铝业公司，上世纪90年代中期起开始生产ABS，2004年投资2000万欧元对生产线进行了改扩建，使其ABS的生产能力达到100kt/a，用独创的各有特色的5种铝合金制造不同的钣金件：FormalexTM系合金，StrongalexTM系合金，SecuralexTM系合金，SurfalexTM系合

金，UltralexTM系合金。

沙特－美铝铝业公司（Ma'aden Alcoa）为沙特阿拉伯矿业公司的英文简称。沙特－美铝铝业公司是国外近40多年来新建的产业链最完整的现代化大型综合性铝企业，位于沙特阿拉伯东部的港口小镇--阿尔哈尔角，将是全世界生产成本最低的各种铝锭与铝材供应企业。在原来的设计中并没有ABS项目，由于看好ABS的市场前景，2013年突然决定增建一条ABS生产线，产能120kt/a。在该公司美国铝业公司占30%股份，但由它负责建设与投产后的经营管理。

诺贝丽斯－大韩铝业公司位于韩国首尔市，工厂在蔚山与荣州，2010年平轧产品生产能力600kt/a，经过大规模改扩建，2014年生产能力达到1000kt/a，其中ABS的生产能力120kt/a，双双成为亚洲最大的单一铝企业。

截至2013年，日本ABS的生产能力估计为200kt，分布于神户钢铁公司真冈轧制厂、日本联合铝业公司的福井轧制厂和大阪轧制厂、住友轻金属公司的名古屋轧制厂。真冈轧制厂的产量约占日本总产量的50%，研发的5xxx系及6xxx系ABS合金已形成系列，如KS5J30合金与KS5H32合金在日本汽车制造业获得了广泛的应用。

至2015年国外已投产与在建的ABS生产能力近3000kt/a，以美国的最多，占总产能的60%，其次是德国，占总量的13.8%，其他7国占26.2%。可批量生产ABS的国外国家共9个。

诺贝丽斯铝业公司既是全球最大的平轧铝产品生产者，也是最大的高端ABS生产者，在全世界5个国家共7个厂（含中国的一个），总生产能力940kt/a，约占世界总产能的21.3%。

国内ABS项目建设急起直追

截至2015年中国已建成投产的ABS项目2个，在建的6个，生产能力总计1425kt/a，占世界总生产能力4405kt的32.35%，其中外商独资企业3家，合计生产能力320kt/a，占国内总产能的22.5%（表2）。

2009年12月21日有媒体报道，西南铝业（集团）有限责任公司的ABS顺利下线，开中国批量ABS的先河。该公司有2条气垫炉生产线，1条于上世纪80年代中期从美国引进，另1条是国产的，但至今尚未见向德国、日本、美国、韩国主要汽车制造公司批量提供ABS的公开报道。估计生产能力约为35kt/a。

诺贝丽斯（中国）铝制品有限公司位于江苏省常州市国家高新技术开发区，占地432万m2，投资1亿美元，ABS生产能力120kt/a，2014年10月21日建成投产。该公司仅是ABS的下游工艺，坯料带卷从韩国运来，将视市场情况建二期与补建上游轧制及熔铸项目。该公司是诺贝丽斯铝业公司的独资企业，2015年可向汽车制造业批量供应ABS。

在建的神钢汽车铝材（天津）有限公司位于天津市西青

经济技术开发区，为神户钢铁公司独资企业，注册资金4.75亿元，带坯卷从日本真冈（Moka）轧制厂运来，总投资11.5亿元，ABS生产能力100kt/a，2016年上半年投产，满负荷生产员工140名。

南山铝业在建200kt/a高精铝板带项目分期建设，设备总投资80亿元，一期有一条1（5600mm）+1（4100mm）+5（3000mm）热连轧线，2800mm CVC 6Plus单机架不可逆式冷轧机1台及其他配套齐全精整设备。产品结构：厚板80kt/a，薄板带120kt/a。ABS项目分三期建设：一期120kt/a，二期180kt/a，三期300kt/a。最终形成600kt/a，成为亚洲最大的生产者，与美国特种合金公司并驾齐驱，但二、三期只可算拟建项目。

天津忠旺铝业有限公司位于天津市武清区汽车零部件工业园，占地面积550万m2，总投资446亿元，板、带、箔总生产能力3000kt/a，从2015年下半年起陆续投产，2018年全部建成，其中ABS的生产能力300kt/a，这是世界铝工业史上空前绝后的大项目，员工总数可达1万名。

同人铝业有限公司位于河南省三门峡市，是义煤集团的子公司，现在建1条1（4500mm）+1（3300mm）式热粗一精轧生产线，主要生产厚板，还有可生产薄板带的冷轧及精整设备，但ABS占的比例不大，仅20kt/a。

中孚实业股份有限公司是一家中外合作企业，位于河南省伊川市，有2500mm（1+4）式热连轧线1条，2500mm CVC 6plus、

1850mm CVC 6plus单机架不可逆式冷轧机各1台，2300mm双机架冷连轧线1条，总投资45亿元，已于2014年4月投产，板、带总生产能力600kt/a，其中ABS120kt/a，有GATV气垫退火炉。

爱励国际（镇江）铝业有限公司位于镇江市京口区，是爱励国际的全资子公司，一期投资3亿美元，建设1台4064mm热轧机及配套的厚板设备，已于2014年4月21日投产，生产能力50kt/a。现正在建设二期，投资2亿美元，ABS生产能力100kt/a，2016年末或2017年初期投产。

铝加工业与汽车业加强合作提高汽车铝化率

据称美国福特汽车公司即将推向市场的2015F-150型全铝皮卡车的售价仅比2014版车(version)的价格高395美元，即比钢车身车的高约2400元人民币，而在运行期间所节约的油费就为此数的几十倍，还未计算减排带来的社会效益，非常合算，2015F－150皮卡车的问世为推广ABS的应用树立了极好的榜样，为制造这一款车每年就需要铝合金ABS 350kt，难怪美国铝行业大建ABS项目。

当前，如果汽车车身钣金件全是铝的，也可以认为是全铝汽车。中国汽车在铝化方面才刚刚起步，与发达国家还有相当大的差距，必须奋力追赶。中国乘人车的平均用铝量还不到120kg/辆，而发达国家的已接近150kg/辆，而欧洲汽车2014年的用量为150kg/辆，2020年的用量为180kg/辆，是增

长最快的产业。如果2020年中国汽车的平均铝含量能达到170kg/辆，比欧美国家的低6%的话，则2020年乘人车的用铝量（产量按1960千万辆计算）可达3330kt。由此可见，铝在汽车中用量的增长潜力甚大。

还有一个非常值得关注的问题是，美国特种合金公司在建的600kt/a ABS项目用的是微型轧机－冷轧工艺，但还不知道这种微型轧机工艺是美国铝业公司的MicromillTM－冷轧工艺，还是Hazelett－冷轧工艺或其他工艺，若这种ABS生产线可以商业化的话，则ABS的生产成本会有相当大的下降，对汽车铝化率的提高极为有利。用微型铸造－热轧工艺生产冷轧带坯不但建设周期比常规铸造－热轧工艺的短，而且设备与基建投资会有较大下降。

推广ABS的应用离不开铝加工业的汽车制造业的通力合作，Ford F-150皮卡车的问世就是美国铝业公司与福特汽车公司合作的结晶。与2014版皮卡相比，除车身全是铝合金的外，在悬架系统、车门、发动机罩、保险杠等也全是铝合金的，故减重340kg，燃油经济性提升20%。

中国大型铝加工业与汽车制造业已充分注意到了合作的重要性，除中国铝业公司与一汽集团达成合作协议外，南山铝业也于3月下旬与北汽股份达成为期五年的战略合作协议，在如何实现铝合金板材大量使用和完善铝制汽车零部件等方面开展研究。研究工作与加大研发投是ABS大量与加速应用的

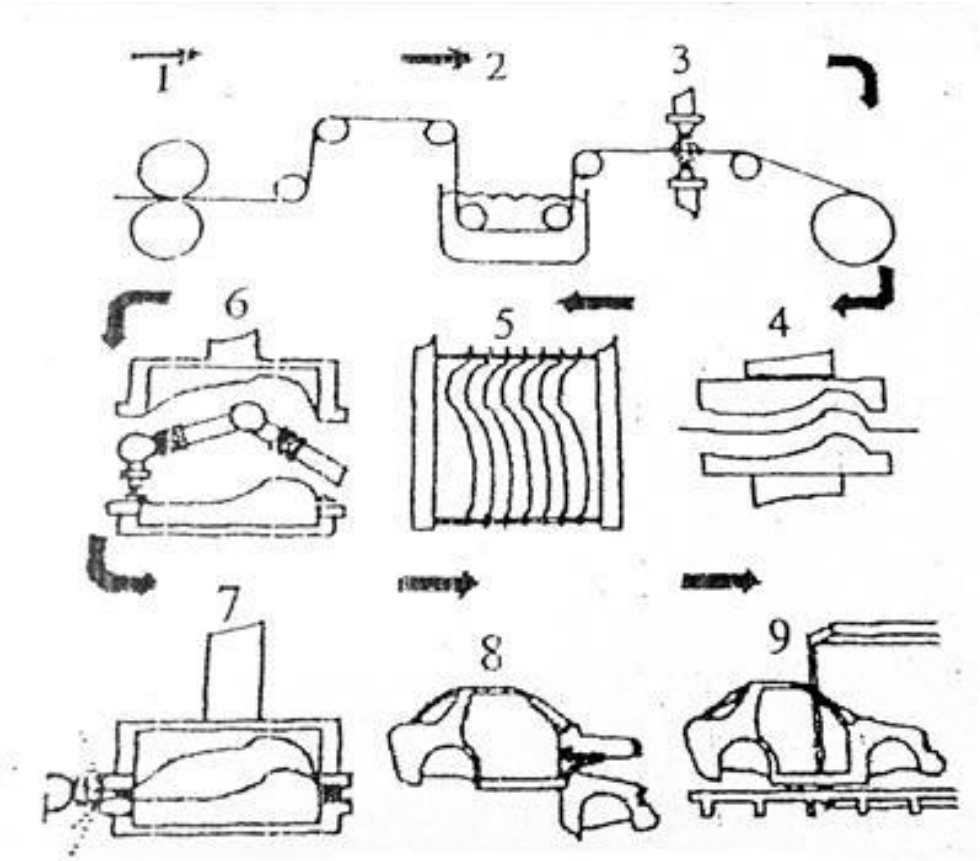
强大引擎，只有研发才有创新。

ABS大量应用时代来了，抓住良机，切勿放过，中国已经慢了一拍。ABS即将成为四大民用铝板带主角之一（另三个是铝箔坯料、罐料、印刷版基材），市场前景好。

2020年前，中国ABS市场将为外商独资企业（诺贝丽斯（中国）铝产品有限公司、神钢汽车铝材（天津）有限公司、爱励国际（镇江）铝业有限公司）一统天下，国有及民营企业的市场竞争压力甚大。

建设ABS项目应达到一定的规模，最佳经济效益的生产能力为80kt/a~150kt/a，不能小打小闹。项目投资额为1.2亿元/万吨或2.5亿元/万吨，前者无上游设备与产品，后者则从头建起。

1.4.5 产学研结合，开发性能更好的ABS铝合金



汽车厂用ABS制造乘人车车身工艺流程示意图

1-开卷；2-表面处理；3-喷涂润滑剂；4-截切与冲压；5-贮存；6-粘接；7-焊接；8-组装；9-粗加工。

当前，铸造铝合金及变形铝合金都在汽车制造中获得了应用，但仍以前者为主。从发展态势来看，到2020年或稍晚一些，变形铝合金平轧产品、挤压材、锻件等的用量有可能

超过压铸件与铸件，或平分秋色，其中增长速度与幅度最大的当数ABS。

ABS应具备的性能

在当下生产四项大宗民用平轧铝产品（PS与CTP版基板、铝箔带坯、全铝易拉罐身料、ABS）中，ABS的生产难度及技术门槛最高，装备与建设投资也是最多的。ABS除有满足标准与规范的力学性能、抗腐蚀性能、尺寸偏差与表面品质外，还应具备如下的特性，所以生产难度并不亚于和航空航天器铝板带的。

1. 良好的成形性能与翻边延性

车身及覆盖钣金件的成形加工是从航空制造业移置过来的，通过冲压成形，铝合金薄板应该有良好的成形性，即具有低的屈强比（屈服强度Rpo.2与抗拉强度极限Rm之比）与高的成形极限，在各种不同的冲压变形应力状态下具有相当高的成形空间。在钣金件生产中，冲压成形是一道很重要的工序（图1中的工序4），有些钣金件还要承受弯折。车身板有内、外板之分，对外板性能的要求比对内板的更高。

铝板的成形性能除用Rpo.2/Rm比表征外，还可用90°弯折半径、突杯值、n值、r值等表示。有些车身钣金件尺寸大、形状复杂，主要通过冲制和鼓胀两种复合成形方式生产，并以后者为主。钣金件的连接采用焊接和/或黏结，也间或有用

紧固件连接的。2xxx系及6xxx系合金用于外板等注重强度和刚度的部位。6xxx-T4P板材的抗拉强度Rm和屈服强度Rpo.2几乎与冷轧钢板的相等，而其n值却≥冷轧钢板的。ABS的90%以上的厚度0.9mm~1.3mm。

有些钣金件如发动机盖板的内外板合成等均采用翻边工艺，因此要求铝合金板在冲压翻边时有高的抗开裂性即有良好的翻边延性，它不但与材料的总伸长率有关，也与内部组织有关，实际上主要决定于组织，均匀细小的晶粒组织决定板材有高的翻边延性。

2. 表面平整性强

ABS铝合金薄板必须有良好的翻边延性和成形以后表面色调均一，即成形的钣金件表面不出现罗平线（roping line）又称滑移线，它是由晶粒不均或者是夹杂物不均而造成的板材表面变形不均，从而使表面在涂油漆后出现光彩不一致的现象。

3. 良好的可焊性

良好的可焊性能可以满足汽车构件在成形后直接焊接要求。板材应具有抗时效稳定性，以确保板材从出厂到冲压时这段时间内不发生时效，防止冲压时材料的屈服点升高，诱发吕德带（Lude's zone)而产生的表面变形不均匀和起皱，从而影响汽车钣金件外板的表面品质。

4. 优秀的烘烤硬化性

汽车轻量化还要求板材具有高的烘烤硬化性，即在冲压变形和涂漆烘烤之后板材的屈服强度有明显升高，从而保证成品钣金件有高的抗凹性与抗压性，铝合金板材的油漆烘烤工艺应与目前钢板冲压件的烘烤工艺相容，因为现在汽车企业的油漆烘烤工艺都是为钢板的。

5.抗时效稳定性强

铝合金板材在室温存放时不发生时效或几乎不发生时效的特性被称为抗时效稳定性，因为一旦发生时效，屈服点会有所伸长，也有一点点升高，拉伸时会产生吕德带，造成冲压时变形不均和起皱，对冲压件外观影响极大。通常板带材从铝加工厂到汽车构件冲制厂冲压成形往往要经过长时间的运输和贮存，要求材料有很强的抗时效性，在6个月内不发生时效。预计时效处理是提高ABS抗时效稳定性的有效措施，6xxx系合金在预时效后有良好的抗时效稳定性。

6. 坚强的抗凹性

板材和钣金件抵抗外力和外来物件压入而不发生凹陷或永久变形的能力被称为抗凹性，用Pt表示，与材料的流变应力醢及厚度有关，可用下式表达；当然，抗凹性也与零件刚度及结构有关。

7. 良好的Zr/Ti盐化学转化处理性能

ABS在涂覆润滑剂之前都要经过表面钝化处理，形成一层Zr/Ti盐体系转化膜，为吸附润滑剂创造良好的基底。这种处

理液应是环保型的，不含铬，主要由含钛、锆的金属盐、氟化物、硝酸盐和有机添加剂组成，通过浸渍、喷淋方式在ABS上形成转化膜。膜层主要为锆/钛盐、铝的氧化物，铝的氟化物及锆钛的结合物等组成。其优点在于工艺操作简单，所获得的膜层与有机聚合物有很强的结合力。当下典型的无铬化学转化处理工艺是阿洛丁法，在德国已有成熟的生产线，还可以在含氟离子的专用磷化液中进行表面化学转化膜处理。

以上的这些性能如抗时效稳定性、成形性、烘烤硬化性、翻边延性、油漆鲜艳性、表面处理特性、抗凹性等是ABS外板应具备的，不过有些特殊是相互矛盾的，应尽可能使它们达到合理的匹配，达到优化组合，同时应有合理的性价比。

6xxx系ABS的性能

ABS可分为外板与内板，外板的生产难度大，所要求的性能高，所以现在所说的ABS一般都是指车身外覆盖板。关于ABS在2004年以前，国外有研究5xxx系合金的，也有研究2xxx系及6xxx系合金的，但自2005年起各国材料科学家的意见比较统一，大都集中于6xxx系合金的研究与开发，认为它的综合性能比5xxx系及2xxx系合金的好一些。

6xxx系合金ABS的生产工艺之一是铝加工企业供应T4P状态板材，汽车制造厂进行冲压成形与之前的表面处理及喷涂润滑剂，涂漆后在烘烤过程中强度得到进一步的提高。表中

列出了Si含量对Al-Mg-Si系合金力学性能与成形性能的影响，ABS 6xxx系合金都是Si含量过剩的合金，因为过剩Si的存在不但可以提高BH性能，而且可以提高抗压痕性。表中的力学性能为三个方向试样平均值。

6xxx系合金的成形性能比5xxx系合金的差一些。研究工作者为此作过种种努力，发现只要有一定量的Si便可提高合金的抻长率与成形性能，但不能过多，否则会降低弯曲性能，对成形性不利。

车身钣金件都是冲制的，要求材料有良好的冲制性能，材料的此性能手可用n值、r值、杯突值、屈强比、成形极限、断面缩颈率评估，有相关人士认为：在评估汽车铝合金钣的成形性能时，使用X6值为评价指标最为准确；在简单的单向拉伸性能参数中，可以使用Z值或n值进行评价，而不宜用r值。X6值为平面应变拉伸强度Rb-p与单向拉伸试验抗拉强度Rb-u之比，即X6=Rb-p/Rb-u

一些公司研发的ABS合金

除了上面介绍的标准的ABS铝合金外，一些大的铝业公司研发出一批有特色的合金，它们的特点是：以标准合金为基础，对成分做了稍微的改变，或是对主成分略加调整，或是添加了一两个微量元素，或对某些杂质作更严格的限制；第二对生产工艺作精细调整，提高产品品质或降低制造成本，

使产品具有更好的性价比，汽车制造厂更乐于使用。

1. 诺贝丽斯公司Advanz 7000系高强度汽车铝板

诺贝丽斯铝业公司是全球最大的平轧铝产品企业，新近推出一种名为Advanz7000系的铝合金，其板材用于制造汽车安全装置，该合金的强度比现行保险杠合金的高一倍。与高强钢材相比，该合金在减轻车身质量的同时能最大程度地确保乘客安全。目前，全球多家汽车制造企业正在对该产品进行性能测试与评估。

2. 日本神户钢铁公司的ABS合金

日本神户钢铁公司（Kobe Steel Co.,Ltd.）是日本ABS的最大生产者，其产量占日本总产量的50%以上，它研发的KS6K21合金与KS5J30合金的综合性能比标准5182合金的好得多，是一种Al-Mg-Si系合金，由于前期强度低，因此易卷边，有良好的弯曲加工性与成形性，烘烤（烤漆）温度低，淬透性高，抗腐蚀性强，可焊性良好。KS5J30合金是一种Al-Mg-Cu系合金，其抗拉强度高，仅比SPCC钢板的低13%，伸长率高达30%，成形性良好；冲压后强度有所上升，而烤漆后并不下降；抗腐蚀性强，可焊性良好。

3. 肯联铝业公司的5种ABS合金

总部位于法国巴黎的肯联铝业公司（Constellium）的纽布利萨克轧制厂（Neuf-Brisach）从20世纪90年代开始生产汽车白车身铝合金板，内板为5754，外板为6016合金，主要

用户为雷诺汽车公司，用于制造标致与雪铁龙汽车车身，为激光截切板坯，而为德国宝马5GT、捷豹XJ、奔驰、奥迪A8等供应的为带卷，该公司ABS生产能力约100kt/a。

4. 诺贝丽斯公司的AC-600 PX高强度合金

2011年8月诺贝丽斯铝业公司被确定为全新埃沃奎系列越野车ABS独家供应商。这一系列埃沃奎系列越野车具有最高的燃油效率，比过去生产的任何一款埃沃奎越野车都省油，这都得益于铝合金ABS的采用。为此，埃沃奎汽车公司在利物浦建设了首条专业铝钣金件加工线。新款埃沃奎越野车的盖、车顶和结构件都是用诺贝丽斯公司的ABS加工的，车顶设计极为领先，首次采用公司的新型高强度铝合金板Anticorodal-600 PX（AC-600 PX）制造，它既有高的强度性能又有良好的成形性，是一种优秀的车身钣金件合金，其抗拉强度Rm比典型ABS合金的约高20%，而其成形性能比任何其他高强度铝合金的都好，由于合金强度高，ABS的厚度可减薄15%以上，使其成为一种制造车身盖板、翼子板、顶板、门板等之类的钣金件的理想铝合金。还有一种牌号是Anticorodal-120的Al-Mg-Si系合金。

5. 日本住友铝业公司的系列ABS合金

GV15VJ合金，这是一种2xxx系合金，其成分（质量%）：Si0.30~0.6，Fe0.40，Cu1.2~1.7，Mn0.10，Mg0.40~0.8，Cr0.10,Zn0.25,T0.10,V0.01~0.10，其余Al；

GV10J合金，为一种Al-Mg-Si系合金，其成分（质量%）：Si0.35~0.7,Fe0.50,Cu0.45~0.8,Mn0.05~0.20,Mg0.8~1.2，Cr0.10，Zn0.25，Ti0.10，其余Al。特点：成形性，强度适中。

GZ42J合金，是一种7xxx系合金，其分析成分（质量%）：Si0.09，Fe0.18，Cu0.38，Mg4.5，Zn1.46。抗拉强度Rm=300N/mm2，伸长率A5=30%。它是强度高与成形性也不错的合金，是杂质含量低的高纯度合金。

住友铝业公司于2013年与斯凯-古河铝业公司合并，组建日本联合铝业公司（UACJ），从此之前三家铝业公司都不复存在。

6. 海德鲁铝业公司的L63/44合金

L63/44合金原是德国联合铝业公司（VAW）格雷文布罗伊（Grevenbroich）轧制厂的注册合金， 2006年海德鲁铝业公司(Hydro)收购了VAW铝业公司,从此VAW铝业公司不再存在，但L63/44合金仍在市场销售，它是一种5xxx系合金，成分为（W%）：Si0.40，Fe0.50，Cu0.10，Mn0.10~0.6，Mg4.5~5.3,Cr0.20,Zn0.20,Ti0.20,其余为Al。

中国着重发展6xxx系合金

国外在发展ABS合金方面经过几十年的工作已形成一个庞大的家族，有标准的合金，也有非标准的合金，约有四五

十种，分属于2xxx系、5xxx系、6xxx系、7xxx系，各有各的性能，用于制造车身的不同钣金件。不同的国家在用合金方面各有侧重，日本汽车工业用5xxx系合金的多一些。美国则多用2xxx系合金，欧洲对6xxx系合金更感兴趣。中国在《新材料产业“十二五”发展规划》明确提出发展ABS的合金为6xxx系的6016、6022、6111，这既与世界ABS发展态势一致，也与中国铝加工业及汽车制造业的实际情况吻合。这三个合金的成分见下表，它们与建筑工业及其他工业广泛应用的6063合金、6082合金、6061合金同属Al-Mg-Si系，对于废料回收与发展循环经济非常有利，也就是说，在废料回收过程中，即使发生少量的混料也是允许的。

结束语

批量稳定地生产ABS的难度大，技术门坎高，是一项复杂的系统工程，应严格控制各道工序的工艺参数，才能制得各项性能搭配恰到好处的ABS。我们说ABS的上游工艺与生产其他大宗高精板带的工艺相当，是从大的工序来说的，如熔炼、铸造、热轧、冷轧，实际上具体工艺参数是有差别的。

首先应精心设计合金成分，制订内部标准，按内部标准配料使铸锭成分符合内标要求，熔炼温度不宜过高，最好控制在规程中限偏下，炉料与熔剂都要符合规程要求，精心精炼、除气、除渣。铸造前晶粒细化剂添加量应恰如其份，应

选择优质细化剂，也可以Al-Ti-C细化剂的应用。铸造时应保持稳定的熔体流量，控制好液面高度、铸造速度，冷却水温度、压力、流量，铸出枝晶网格致密均匀，晶粒细小一致的铸锭。熔炼铸造这道工序非常重要，有了优质的铸锭，才能轧得品质优异的带材。生产实践表明，板带材生产中出现的缺陷有70%左右都或多或少与熔炼铸造有关。

热轧带坯有良好的组织才能保证冷轧带材有精密细致的晶体组织，才能保证ABS有良好的成形性与翻边塑性，达到强度与塑性的最佳匹配。铸锭的均匀化退火也是一道关键工序，温度宜高些，保温时间宜长些，既要保证完全消除晶内偏，又要保证可固溶的相全部固溶，对冷却速度也要适当控制。制订特有的热轧压下率系统，始轧温度在500℃左右，7xxx系合金的为475℃左右，最初一二道压下率宜小、中间道次压下率宜大些，最后道次的居中，总压下率必须大于75%必须完全消除铸造组织。终轧温度为350℃±10℃。

冷轧之前应进行一次预退火，使带材的热轧组织完全转变为再结晶组织，建立一套完善的冷轧道次与压下率控制系统，严格控制轧辊表面粗糙度，最好采用特殊设计的冷轧机，在轧最后一道时换上专用轧辊，可施加小的压下量轧出特有的表面状态，并确保表面涂漆品质的粗糙度。

对固溶处理技术、淬火技术、强化相形核过程技术、预时效工艺、停放时间等的控制应统一起来看，以使材料在成

表性、抗时效稳定性和烘烤硬化性达到最佳匹配和高度和谐统一。固溶处理时间既要足够确保强化相完全固溶又要保证炉具有最高的生产效率，淬火速度一应快二应相当均匀。

从熔炼铸造开始到精整涂油包装为止，如能对各道工序工艺参数严加控制，就可以生产出品质上乘的ABS，它的晶粒细小均匀，平行于轧制方向的平均晶粒度≤80靶。第二相不但本身细小，呈细棒状，长宽比2~5，而且平均长度≤10靶。有了这种组织的ABS，在翻边时与拉延涂装后不会出现罗平线，同时变形后也不出现吕德带。

由于我们在生产ABS方面才刚刚起步，与工业发达国家的差距甚大，不说一百年，少说也有五六十年，需要做的工作很多。首先生产企业、汽车企业、高等院校、研究院所应紧密联合起来，一方面希望南山轻合金公司、忠旺天津铝业有限公司、南南铝加工有限公司利用当下全球最先进的成套设备能尽快地向市场供应ABS，另一方面应展开研发工作，形成大众创业、万众创新的局面。

大力开发基础研究。中国的高等院校、科研院所、生产企业等在研发铝合金乘人车板材方面做了许多工作，成就斐然，但是恕笔者直言，大多数都是跟踪型的，创新型的不多，之所以如此，就是对基础研究投入少，要做到万众创新，首先要加强基础研究，这是创新根基。

研究新的合金，创造一个全新的ABS铝合金系当前看来几

乎是不可能的，只能在现有的6xxx系合金基础上优化合金的成分，创造综合性能比6016合金更加优秀的ABS外板合金，在现有5xxx系合金基础上，创造综合性能胜过5754的内板ABS合金，同时新合金应有更加胜出的性价比。

应加强应用研究，如冲压成形、连续技术（含铝-钢连接），铝合金钣金件与零件的检验方法、技术与仪器等。

加强表面处理的理论与实用技术研究，在这方面中国与国外的差距可能更大一些，起步更晚，包括轧制表面与转化处理研究。

1.4.6 第二代 ABS 铝合金及生产工艺来敲门啦

在全球都在呼吁节能减排的大背景下，汽车轻量化已成为各国的重点关注对象。近年来，关于实现汽车轻量化的技术与创新不断涌现。所谓轻量化就是在保证汽车强度和安全性能的前提下，尽可能地降低整车的净质量，进而提高汽车动力性能，降低汽车行驶过程中的“摩擦损失”，减少能耗，从而达到节能减排的目的。

科学工作者早已做过试验，若汽车整车净质量降低 10%，燃油效率可提高 6%~8%；汽车整车质量每减少 100kg，百公里油耗可降低 0.3L~0.6L。当今，节能减排是全球性的任务，而汽车又是现代生活中不可或缺的必需品，因此汽车轻量化

已成为当下世界汽车发展潮流。

目前，中国汽车的平均能耗为 7.5L/100km 左右，与发达国家的还有一定差距，国家规划的目标是，2020 年要达到 4.5L/100km，与欧洲的标准等同，并超过美国定下的标准。要实现这个目标，就必须加快汽车轻量化。欧洲汽车制造企业正在推进“超轻型汽车工程”，美国在汽车铝化方面取得了跨越式进展，他们的目标是在现有价格的基础上，将车的质量降低 30%。

铝是最早成为钢材替代品的汽车制造材料，1960 年美国乘用车（car）的平均用铝量 28.6kg，1999 年上升到 109kg，2015 年达到约 160kg，2025 年估计可达到 205kg 以上。1994 年德国奥迪汽车公司生产的 Audi A8（奥迪 A8）的车身内架（Audi Space Frame,ASF）与覆盖件全是用美国铝业公司（Alcoa）的挤压铝材与薄板材制造的，开全铝乘人轿车的先河。目前的数据显示，在汽车制造中以铝代钢，可使汽车质量下降 30%~40%，如果用第二代铝合金，则减重效果尤为卓著。铝现在已成为汽车制造中用量仅次于钢材和铸铁的材料，而在全铝乘人汽车中，铝的用量已上升到第二位。

2015 年全世界汽车制造业铝的消费量约 19500kt（含再生铝），其中 ABS（Auto-Body-Sheet，汽车车身薄板）的消费约 1850kt，而中国的用量只不过 32kt，而且 85%是进口与

外资企业生产的。据预测，2025 年全世界对 ABS 的需求量有可能达到 12000kt，其中中国的需求量约 3500kt。

第一代 ABS

笔者将到 2016 年为止的 ABS 分为两代，是按铝合金的性能及其生产工艺分的。第一代用的是常规变形铝合金，冷轧带坯是用铸锭-热轧法生产的，现在全球已建成与 2017 年上半年可建成的企业与车间共计 27 个，都属第一代；第二代用的合金是美国铝业公司新近发明的，冷轧用的带坯是用美国铝业公司创新的“圣安东尼奥小轧机法 TM”（San Antonio Micro MillTM Flow Path）生产的，这是一种崭新的工艺，合金的牌号与成分尚未见媒体报道，还有用哈兹雷特法生产的（Hazellet）与用特殊合金公司法（Special Alloy）生产的带坯也把其归为第二代，哈兹雷特法生产的合金为传统的变形铝合金，特殊合金公司法用的合金很可能也是常规的传统合金，因为创造一个性能大幅度改善的有里程碑意义的合金并非轻而易举。

ABS 分为两种：内板与外板。对外板的性能要求高，生产难度大。常规 ABS 合金的典型代表有：2002-T4，21187-T4，2036-T4，2037-T4，2038-T4，5182-O，6009-T4，6010-T4，6015-T4，6016，6111，5754 等。此外，还有一些公司开发的有一定特性的合金，如法国的 AlMg5、483 合金，日本神户

钢铁公司的 GC45、GZ45、GC150、GV10、X660，德国的 AMg3 等。

ABS 必须有良好的成形性、表面平整性强、良好的可焊性与优良的烘烤硬化性。生产 ABS 的技术复杂性与建设 ABS 项目的投资都是铝加工业最大的项目，比生产航空航天铝合金板带材的还大一些。

第二代 ABS

第二代 ABS 是用新合金和/或新工艺生产的。目前可生产第二代 ABS 的工艺有三种：哈兹雷特法，美国铝业公司的 Micro-MillTM 法与美国特殊合金公司的工艺，它们都于 2015 年诞生于美国。Micro-MillTM 法中试与商业化生产线建在美国铝业公司得克萨斯州圣安东尼奥轧制厂内，生产的 ABS 已经过汽车制造厂的试用与认证，可以说已登堂入室。

1. Micro-MillTM 法

2013 年 5 月笔者随同河南省访美代表团访问了美国铝业公司匹兹堡技术中心，该中心向代表团介绍了 Micro-MillTM 法的工艺流程的概况，对笔者提出的一些问题，如铸造辊尺寸与材质、辊套厚度与材质、辊套使用寿命、铸带坯进入双机架热连轧线温度等等都避而不答。生产线可铸带坯宽度 1727.2mm（68 英寸）、带坯厚度 2.3mm~5.1mm（0.09 英寸~0.20 英寸）、铸造速度 61m/min~27.4m/min（200ft/min~90ft/min）、

铸坯温度 567℃（1050°F），热轧带经剪边后宽度 1549.4mm~1701.8mm(61 英寸~67 英寸)、厚度 0.457mm~3.81mm（0.018 英寸~0.150 英寸)。以上是笔者在美国铝业公司匹兹堡技术中心获得的技术数据。

汽车材料跨入铝材时代

据《铝时代（Aluminium Times,Feb 2015,p.12;October/November2015p.8)》报道：美国铝业公司的小型轧机（MicromillR）可以生产第二代汽车铝板带，所生产的汽车合金的成形性比现行铝合金的高 40%以上，而强度性能则大 30%，并且表面品质优秀，可满足汽车工业的苛刻要求。用所产板带材制造的零部件的成形性比高强度低合金钢的大一倍，而其质量却比钢的轻 30%。半成品的加工时间大为缩短，因为与常规热轧工艺相比省掉 5 道工序：铸锭锯切头尾、均匀化退火（这是一道长时间的工序)、铣面、热轧前加热、热轧。因此，从铝合金熔体备好后到热轧成供冷轧用的带卷由 20d 缩短到 20min。

美国铝业公司小型轧机生产的 ABS 从内部显微组织到表面品质都胜出传统铸锭热轧工艺生产的，特别是显微组织得到了极大的改善，晶粗细小，强化相弥散均匀分布，因而成形性能可与低合金软钢（mild steel）试比高，更可喜的是可用与钢板通用的模具顺利地成形汽车的内外覆盖件。由于 Micro-MillR 板材力学性的全面提升，使覆盖件的抗凹性能

得到相应的提高，同时汽车零部件的加工制造也变得轻易不少，成品率也有所上升，汽车厂也受益非浅。

小型轧机的占地面积(footprint)比传统轧机的小得多，仅相当于后者的 1/4，因而其能耗也只有后者的 1/2。Alcoa（美国铝业公司）MicromillR 技术在全世界不同国家与地区申请了 130 个专利，生产线的连续铸造机可随时更换合金，不必停机，因而具有高度的灵活与生产效率。

福特汽车公司批量使用 MicromillR ABS

2015 年 9 月 14 日，福特汽车公司（Ford Motor Co.）与美国铝业公司签署了共同研发与推广 MicromillR 技术生产 ABS 及其在汽车的应用协议，福特公司计划在 F-150 型皮卡车上使用更多的铝材。福特公司的实验表明，采用 MicromillR 技术 ABS 制造的汽车在保持相同的防撞水平上，其零部件比钢制的轻 30%。

福特汽车公司产品开发部主管拉杰·耐尔（Raj Nair）认为，新型铝合金材料为设计新款式汽车提供了更多的灵活选择，而且极大地缩短了设计与制造时间。基于新型铝材的优秀性能，过去用传统的 ABS 不能制造的零部件，现在却轻而易举了。

美国铝业公司与达涅利集团联姻推广 MicromillR 技术与装备

据《铝时报，2015 年 10/11 期 P.8》报道，美国铝业公

司与意大利达涅利集团（Danieli Group）于 2015 年 10 月签订了一份合作协议，在全球推广 MicromillR 技术、合金、生产专利。初期重点工作是在欧洲、南美洲、东南亚地区。达涅利集团是第二大冶金装备生产与研发企业，已获得美国铝业公司的授权，可在全球销售、安装、调试有关 MicromillR 装备的一切事宜，美国铝业公司将提供材料的全部生产工艺与技术，以及相关专利技术。

2. 哈兹雷特法

哈兹雷特（Hazrlett）连铸连轧工艺的商业化生产已有 50 多年的历史，中国已引进 2 条 1950mm 生产线，一条在河南伊川电力集团，2011 年投产，已进入达产阶段；另一条在内蒙霍林郭勒锦联材料有限公司，2015 年投产。它们的主导产品都为铝箔轧制带坯与通用 1XXX 系、3XXX 系合金板带材带坯。此法所能生产的合金及产品已有不少介绍，关于铸造机的结构也有一些报道，在此不再赘言，在此需指出的是：它不是一种万能的工艺，有一些合金如高合金化的 2XXX 系合金、7XXX 系合金、含 Mg 含量大于 6%的 5XXX 系合金、铝-锂合金、铝-钪合金等还不能生产更不能批量生产，并不像有文章（《中国铝业》2016 年第 2 期第 10 页）说的“亦可生产 2000 和 7000 系合金”，不能批量生产 2024 型及 7075 型航空航天板带材坯材，就不能说生产 2XXX 系及 7XXX 系合金。该法也

不能生产厚度大于 15mm 的板材，因为它可铸带坯的最大厚度 50mm，而通常铸造带坯的厚度≤20mm；据哈兹雷特公司高级技术人员，用此法可以铸造冷轧 ABS 用的带坯，但尚未见哪个汽车制造厂用其板带材批量生产覆盖件的报道，也为读到世界上哪个轧制厂用此法生产的带材在批量供应 ABS 的报道。

3. 特殊合金公司

美国特殊合金公司据称从 2013 年开始策划建设一个 ABS 生产能力达 600kt/a 的企业，采用特殊的工艺与特殊的装备，建设用地都已征妥，但是 2015 年 9 月又突然宣称不建了。笔者有美国朋友称，原来是一些从事钢铁生产的退休人员发起建设此项目，后来发现建设此项目的难度很大，决定退出。他们采用的工艺与装备都未见报道。

汽车材料将进入铝时代

随着美国铝业公司的 Alcoa MicromillR 的登堂入室，第二代 ABS 不但进入了批量生产，而且批量用于制造福特汽车公司的新版本 F-150 型皮卡车，其成形性能比传统 ABS 合金的大 40%，强度性能比传统材料的高 30%，零部件质量比钢制的轻 30%，各项性能均全面优于低碳汽车钢板的一些。这种第二代铝 ABS 的诞生有着里程碑意义，宣布汽车材料进入铝时代，铝将成为第二大汽车材料，在某些车型上，甚至有可能成为第一大材料，有着非凡的经济效益与社会效益。在这

种严峻形势下，中国铝工业与汽车制造业宜联合起来采取相应的对策，使中国这个头号的汽车生产大国，成为世界汽车铝材研发、生产与使用第一大国与强国。还需要做那些工作呢？不外乎：

●铝工业的管理人员与科技工作者宜关注 MicromillR 技术的内涵与发展，有较深入的了解，如对汽车轻量化与节能减排的作用，对推动汽车制造业发展的效应；

●MicromillR 技术集新材料与高端机器制造业于一体，体现了当今铝材料与装备的制高点，具有技术高度密集、研究与开发投入高时间长、影响面大，对国民经济发挥有一定拉动作用、生产与市场国际性强等特点，需要国家层面与有关部门出面，组织相关单位的人力与物力联合研发。我们的家底不厚，对第一代 ABS 材料的研究尚不够，更谈不上第二代材料，在这方面与美国的差距可能有四五十年。第二代 ABS 铝合金与第一代的相比应该有相当大的改进与改变，仅仅对传统合金作简单的改性，不可能制造出性能有这么大全面跃升的优秀材料；

●笔者觉得 MicromillR 技术关键在合金与铸造机。美国铝业公司有很强的研发能力，128 年来它创作的占在美国铝业协会公司注册的 528 个常用变形合金（截至 2015 年 1 月）的 41%；MicromillR 技术的推出，双辊式连续铸造机应该起了大局攸关的作用，而铸造辊尺寸、材料与内部冷却介质通

道又是关键的关键，它必须有强大的冷却能力，能在设定时间内使铝熔体凝固；

●企业家有考虑引进此项技术的必要，正在作建设 ABS 项目前期工作的企业宜采用此新技术与工艺，关键是连续铸造机，熔炼设备与热轧机可以国内制造，后部热处理与精整生产线可国内外合作设计与制造。

第二代铝合金 ABS 在美国上市了，汽车材料铝时代萌芽了，中国铝工业、汽车制造业宜联合起来，奋起直追，勿失战机。

1.4.7 全球 ABS 项目一览（中国）

ABS 薄板是汽车车身薄板（Auto Body Sheet）的英文缩写，可简称 ABS，专用于冲制乘人轿车的钣金件，是当今生产技术门槛最高的且产量大的板、带材，厚度为 0.8mm~1.8mm，宽度通常为 800mm~2200mm。在此还介绍“沙特板”或“沙铝合金产品（Shate Products）”一词，也可以译为“汽车板”，是 2012 年开始在欧洲流行的一个字，在现行的英汉字典里尚查不到这个字，这是由“sheet（薄板）”的前两个字母与“plate（厚板）”的后 3 个字母组成的，所以“shate=sheetand plate”，这种板的厚度为 3mm~12mm，实际上它不含 ABS。ABS 还有另一种缩写“BIW”或“BWI（汽车白车身板，Body-in-White）”。

汽车用的铝合金板材可分为两类：通用（general sheet and plate），供各种汽车用，用于制造各种各样的零部件；车身板即 ABS 板（auto body sheet），专供乘人轿车冲制外覆盖钣金件。ABS 在汽车中的应用还有很大的潜力，它的铝化率还很低，2011 年全世界薄钢板在汽车中的应用约 20000kt，匡算成铝板的用量应达到 9000kt，当然不可能全部为铝合金板取代，如果有 90%可为 ABS 铝合金板替代，则铝板的用量应达到约 8000kt，可是这一年全世界 ABS 铝板的消费量只不过 500kt，铝化铝仅 6.25%。当然，汽车 ABS 板的铝化率能达到 60%也是一个漫长的过程，或者几乎不可能，但厢式货车与大部分专用车用的薄钢板以铝取代则是完全可能的，达到 90%铝化率的国家如美国、加拿大、日本、德国等早些年已实现，但中国还刚刚开始，它们用的都是通用板。车身板还可分为内板与外板，也可把内板分为通用板。

用铝合金板制造乘人车钣金件始于上世纪 40 年代中期，一直进展不大，直到新世纪到来才取得较大进展，而从 2012 年开始欧盟的 ABS 消费量进入高速增长期，2000 年的消费量约 60kt，2012 年的达到 182kt，2016 年预计可达 780kt。

2000 年，全世界 ABS 的生产能力只不过 120kt/a，2008 年上升到 420kt/a，2016 年可飙升到 2550kt/a。这轮 ABS 项目建设浪潮始于 2006 年欧洲，这轮 ABS 项目改扩建来势之猛，波及范围之广，在铝板带加工史上是前所未有的，比上世纪

60 年中期的罐料（can stock）项目建设还大。

全世界这一轮 ABS 项目改建、扩建与新建项目工程可于 2016 年基本结束，形成总生产能力 3375kt/a，可以满足汽车制造业 2025 年以前对 ABS 的需求。其中美国的生产能力最大，是 1290kt/a，生产企业 5 个；其次是中国的，915kt/a，生产企业 9 个；第三是德国的，410kt/a,生产企业 4 个；第四是日本,200kt/a,生产企业 4 个;其他 6 国的总生产能力 560kt/a，它们是：韩国 120kt/a、沙特阿拉伯 120kt/a、瑞士 80kt/a、法国 100kt/a、比利时 80kt/a、奥地利 60kt/a。

通常，铝加工厂在 ABS 生产线建成后需要经过一段较长时间的认证，才能向汽车制造企业批量提供产品，认证时间短则几个月，长则一二年。

中国的 ABS 项目

中国已建成与在建的项目 9 个，它们是：

1.西南铝业（集团）有限责任公司

2009 年 12 月 21 日西南铝业(集团)有限责任公司的 ABS 顺利下线，开中国批量生产 ABS 的先河，该公司有两条气垫炉生产线，第一条是 1986 年从美国表面公司（Surface）引进的。这条 1700mm 气垫炉生产线是国内首条，炉前设备有：1 号及 2 号开卷机、1 号及 2 号带材端头矫直辊、1 号及 2 号端头剪、3 号及 4 号入口夹送辊、圆盘剪、5 号夹送辊、双位

缝合机、清洗烘干装置、1 号张紧辊、1 号活套塔、2 号张紧辊、冷气垫。

气垫炉本体，共分 18 区，每区长 6m，所以炉长 108m，前 10 区为加热区，后 8 区为保温区。加热区内有动气垫与静气垫各 8 组，保温区内每区有 8 组静气垫。

炉后设备有：淬火区、3 号张紧辊、纯拉伸矫直机、4 号张紧辊、2 号活套塔（出口活套塔），5 号张紧辊、端头剪、卷取机。

第二条气垫炉生产线 2014 年投产，是中外企业合作设计制造的，气垫炉是艾布纳工业炉（太仓）公司提供的，但关键零部件从奥地利引进。由于这两条生产线不是 ABS 铝合金带材专业生产线，它的主导产品为航空航天铝合金带材，因此它的 ABS 带材产量较低。

2.诺贝丽斯（中国）铝制品有限公司

诺贝丽斯（Novelis）铝业公司的母公司在印度，在中国江苏省常州市国家高新技术开发区建设的诺贝丽斯（中国）铝制品有限公司是其独资子公司，专业生产 ABS，2014 投产，投资 1 亿美元，建下游生产线，占地 432×10 4m2，从韩国进口坯料带卷。ABS 生产能力 120kt/a，这是一期。今后将视市场情况建二期，补建上游生产线。诺贝丽斯铝业有限公司是世界铝板、带企业之王，主导产品为罐料、PS/CTP 铝板基、

ABS，以及回收铝罐。诺贝丽斯（中国）铝制品有限公司 2015 年可向韩系汽车制造企业提供 ABS，因为它有制造这种产品的成套技术与丰富经验，可将认证期缩至最短。

3.神钢汽车铝材（天津）有限公司

在建的神钢汽车铝材（天津）有限公司（Kobelco Automotive Aluminum Rolled Products（China）Co.）位于天津市西青经济技术开发区，为日本神户钢铁公司（Kobe Steel Co.）独资企业，注册资金 475M（百万）元人民币，约合 75 亿日元，带坯卷从日本真冈（Moka）轧制厂运来，总投资 11.5 亿元人民币（约合 190 亿日元），ABS 生产能力 100kt/a，2016 年上半年投产，满负荷生产时员工约 140 名。神户钢铁公司于上世纪 80 年代中期开始生产汽车铝合金板，现在它是日本这类产品的最大生产者，占日本市场份额的 50%以上，目前中国市场进口的 ABS 主要是该公司的产品。

4.南山铝业新建项目，ABS 120kt/a

南山铝业新建铝板、带项目分两期建设，设备总投 80 亿元，一期有一条 1（5600mm）+1（4100mm）+5（3000mm）热连轧线，2800mm CVC 冷轧机 1 台及其他配套齐全的冷轧机与精整设备，设备投资 50 亿元，产品结构：厚板 80kt/a，薄

板带 120kt/a；二期设备投资 30 亿元，薄板带生产能力 150kt/a。ABS 的最低生产能力 120kt/a。项目可于 2016 年或稍晚一些全在建成投产，成为全球最大的铝板带单一轧制厂之一。

据南山轻合金公司的规划，ABS 的设计生产能力分三期建成，总计 600kt/a：一期 100kt/a，二期新建 200kt/a，三期增建 300kt/a。二、三期项目的建设时间将视市场情况而定。

5.天津忠旺铝业有限公司

该公司位于天津市武清区汽车零部件工业园，占地面积 550×10 4m2，总投资 446 亿元，2018 年全面建成投产，平轧铝产品总生产能力 3000kt/a，分两期建成，从 2014 年下半年起陆续投产。一期铝平轧产品生产能力 1800kt/a，二期主要建设平轧产品深加工项目和铝型材系列产品生产线，总生产能力提升到 3000kt/a，其中 ABS 产能 300kt/a。这是铝加工业空前绝后的大项目，只有华夏大地上才能出现这么宏伟辉煌“中国级”项目，员工总数可达 10000 名。

不过，由于该项目实在太大和建设条件复杂多变，项目内容、建设与投产时间或多或少会有些变化，在所难免。

6.同人铝业有限公司

同人铝业有限公司位于河南省三门峡市，是义煤集团子公司，总投资100亿元，有1（4500mm）+1（3300mm）式热粗－精轧线与2600mm（1+4）式热连轧线各1条，以及配套的冷轧机与精整设备，板、带生产能力300kt/a，其中ABS生产能力20kt/a，项目分期建设，首期已于2013年2月27日正式开工。主要装备全部引进。

7.河南中孚实业股份有限公司

该公司是一个中外合资企业，有2300mm（1+4）热连轧线1条，2500mm CVC 6、1850mm CVC 6单机架冷轧机各1台，2300mm双机架CVC冷连轧线一条，总投资45亿元，已于2014年4月投产，板、带总生产能力600kt/a，ABS生产能力150kt/a，GATV气垫炉。

8.爱励国际（镇江）铝业有限公司

爱励铝业公司（Aleris）是一家美国公司，爱励国际（镇江）铝业有限公司是爱励国际的全资子公司，位于镇江市京口区，一期投资3亿美元，建一个生产能力50kt/a航空级铝合金厚板项目，第一块厚板已于2012年12月12日下线，2014

年下半年可向空中客车公司提供飞机制造铝合金厚板。二期投资 2 亿美元，建设 ABS 生产线，生产能力 100kt/a，已于 2014 年 12 月开工，2017 年投产。

9.南南铝加工有限公司

南南铝业有限公司是中国华南地区最先进的平轧铝产品项目，有（1+1）式（4100mm+3100mm）热粗-精轧线 1 条，2013 年 8 月投产，CVC6+冷轧机（2850mm）1 台，2014 年 8 月投产，艾布纳气垫炉及其他精整生产线 2015 年 9 月生产，带材生产能力 100kt/a，其中 ABS 的 60kt/a，其他的为航空航天等产业高精铝板带。

中国 ABS 项目总产能共计约 915kt/a，约占全世界的 27.1%。此外，山东魏桥铝电新材料有限公司的 760kt/a 一期高精铝板带项目已于 2013 年 12 月 28 日投产，目前正在调研是否建 ABS 生产线，一旦决定建设，那么生产能力有可能 120kt/a，2018 年投产。

二期可于今后适当时候择期建设，建成后平轧铝产品生产能力可达 2000kt/a。

魏桥铝电新材料有限公司熔铸、热轧、冷轧、精整等厂，所有设备都是引进的一流的，居世界领先水平。熔铸车间有 4 组从美国布里克蒙特公司（Bricmont Inc）引进的熔炼一静置炉，共 8 台，第一组于 2012 年 12 月 17 日投产，第四组

2013 年 8 月投产，扁锭生产能力 800kt/a。扁锭宽 2200mm、厚 620mm，经铣面锯掉头，尾后的最大长度 8650mm。

热轧车间有 4 台艾布纳工业炉有限公司（Ebner Industrieofenbau GmbH）的推进式均匀化处理-加热炉，每台炉可装 25 块 32t 的锭,最大装炉量 800t,加热效率 83t/h。炉内温度最大差 6K，采用艾布纳公司开发的 Hicon 技术与计算机控制加热过程的各项工艺参数，即使锭的出入炉受到干扰，也能确保加热的正常进行与工艺参数在设定范围内。

2100mm(1+4)式热连轧生产线由西马克公司设计，所有关键设备、电气电子装备（ABB 公司配套）与自动化控制设备皆由西马克公司提供，国内配套一部分机械装备。热轧线由立辊轧机，4 辊可逆式热轧机、重型剪、轻型剪、切边机、4 机架热连轧机列、辊道、卷取机、离线检查台等组成。

立轧可保证轧件宽度不变，边部平整，减少切边量，立轧机轧制力 8MN，由 2 台各 700KW 的电机拖动。

粗轧机为 4 辊可逆式，支撑辊辊面宽度 2400mm，由 2 台各 500KW 的电机驱动。重型剪用于剪切板材的头、尾，最大剪切力 12000KN，轻型剪用于剪切板材头部，以便精轧机咬入，它的剪切力 4500KN，热轧带材的最大宽度 2150mm。

工作辊采用 CVC 技术，加上正弯工艺，可轧得板形极佳的板材，采用圆盘剪对带材进行边部剪切，剪刃可进行垂直方向与水平方向调节，切变后的带材送入卷取机卷成带卷，

带卷最大直径 2.8m，最大质量 30t。

热轧带卷通过由西马克集团 Logistiksysteme 公司提供的 ACTS 自动运输系统运至高架仓库，冷轧时可自动取卷。仓库内设有冷却系统，可及时对热轧卷进行有效的冷却，高架仓库长 290m，可贮存 30t 的卷 1400 卷。带卷运输与高架仓库管理全由计算机自动监管，但有些较简单的机械设备由中国配套。

魏桥铝电新材料有限公司的主导产品为罐料（罐身料、罐盖料、拉环料）、PS 与 CTP 铝基板、铝箔坯料，为此引进了 2 台 CVC plus6 单机架冷轧机与 1 条 CVC plus6 三机架冷连轧生产，它们都是西马克公司 2300mm 轧机，可生产带材的最大宽度 2150mm，已于 2013 年 12 月 28 日投产，由中国中冶所属中国十九冶集团有限公司承建。No.1 单机架冷轧机可轧来料带材的最大厚度为 10mm，产品带材的最薄厚度为 0.2mm。No.2 单机架冷轧机及冷轧机列的来料厚度为 0.3~3.5mm，No.2 冷轧机可生产带材的最薄厚度为 0.1mm。连轧机产品的厚度为 0.15~1.6mm。

按魏桥铝电新材料有限公司的设计，虽有世界领先的装备，但是可生产板、带材的最大宽度为 2150mm，不能为个别车型提供宽度达 2200mm 的制造前盖的板材，或生产的难度大。不过 90%以上的 ABS 是可以生产的，为此笔者认为新建一个

ABS 项目在技术上是可行的，与国内的其他 ABS 项目相比，在经济上也是有效益的。

1.4.8 全球 ABS 项目一览（国外）

表：国外 ABS 生产企业的概况

国家	企业	地址	投产年度	生产能力 kt/a	隶属公司
美国	达文波特轧制厂	艾奥瓦州	2013*	200	美国铝业公司
	田纳西轧制厂	田纳西州美铝镇	2015*	150	美国铝业公司
	奥斯威戈轧制厂	纽约州	2013*	240	诺贝丽斯铝业公司
	特殊合金公司	乔治亚州	2017	600	特殊合金公司
	神钢-肯联铝业公司	–	2017	100	神钢-肯联铝业公司
	总计			1290	
德国	纳切斯特德铝业公司	纳切斯特德市	2009*	120	诺贝丽斯铝业公司
	格雷文布洛伊轧制厂	格雷文布洛伊	2012*	200	海德鲁铝业公司
	哥廷根轧制厂	哥廷根市	2015*	40	诺贝丽斯铝业公司
	辛根铝业公司	辛根	2012*	50	肯联铝业公司
	总计			410	
奥地利	有色金属加工有限公司	兰绍芬市	2010*	60	有色金属加工公司
比利时	杜菲尔轧制厂	杜菲尔市	2009*	80	爱励铝业公司
法国	纽布利萨克铝业公司	纽布利萨克市	2012*	100	肯联铝业公司
瑞士	谢尔轧制厂	谢尔市	2011*	80	诺贝丽斯铝业公司
沙特	沙特-美铝铝业公司	阿尔哈尔角	2016	120	沙特矿业公司、美国铝业公司
韩国	诺贝丽斯-大韩铝业公司	蔚山	2012	120	诺贝丽斯铝业公司
日本	神户钢铁公司铜铝部	真冈	1998	100	神户钢铁公司
	原古河-斯凯铝业公司	福井	2000	50	日本联合铝业公司
	原住友轻金属公司	名古屋	1999	30	日本联合铝业公司
	日本轻金属公司	–	2001	20	日本轻金属公司
	总计			200	
国外产能总计				2460	

注：* 指最近的改扩建项目完工年度。

国外 ABS 生产企业概况见表，共 19 个厂，总生产能力 2460kt/a，占全球总产能的 72.9%。

1. 美国

美国改、扩建与新建 ABS 项目可于 2015 年完成，届时可生产 ABS 的企业 5 个，总生产能力 1290kt/a，占世界总产能的 38.2%，居第一位。

达文波特轧制厂扩建

美国铝业公司（Alcoa）于 2011 年投资 3 亿美元改扩建艾奥瓦州（Iowa）达文波特轧制厂（Davenport Works）的 ABS 生产线，已于 2013 年末竣工，生产能力 200kt/a。达文波特轧制厂建于 1972 年，是全世界首条用计算机控制的铝板带热连轧生产线，全长约 610m，为 1(5588mm)+2(1 台 4064mm、1 台 3658mm）+5（2540mm）式，是全球最大的铝厚板生产企业与 ABS 生产企业之一。

美国铝业公司田纳西轧制厂

田纳西轧制厂位于田纳西州美铝镇，有南北两个轧制厂，自上世纪 70 年代以来，产品的 85%以上为易拉罐罐身料。2013 年初公司决定投资 2.75 亿美元对田纳西州美铝轧制厂 ABS 生产线进行改扩建，一方面扩建一些新设备，另一方面对原来生产罐料的生产线做适当改造，使其可以生产 ABS，已于 2015 年中期完成，该厂成为美国一个主要的包装材料与汽车铝板带生产企业。同时这次改扩建还着眼未来，使 ABS 的生产能力达到 150kt/a，可以满足汽车工业 2025 年对 ABS 的需求。

奥斯威戈轧制厂

美国纽约州奥斯威戈（Oswego,NY）轧制厂属诺贝丽斯铝

业公司，投资 2.05 亿美元的 ABS 生产线扩建项目已于 2013 年 8 月投产，使 ABS 生产能力提高 3 倍，达到 240kt/a，成为时下生产能力最大的 ABS 生产企业。增建 2 条 ABS 新生产线，每条产能 120kt/a。

特殊合金公司

特殊合金公司（Special Alloy Co.）正在乔治亚州的一个镇上建一个极有特色 ABS 生产企业，一是生产能力大，600kt/a,如果气垫炉-其他精整设备每条生产能力为 150kt/a，那么这样的生产线也需要 4 条，这可是史无前例；二是采用微型轧机连续铸造-热轧带坯，可使带坯直接生产成本下降约 1800 元/t。如果生产的 ABS 能获得汽车制造公司的认证，那将是 ABS 生产史上的新里程碑。

神钢-肯联铝业公司项目

日本神户钢铁公司北美公司与美国肯联公司（Constallium）在美国组建一个生产 ABS 的合资企业，分别占 49%和 51%股份，已于 2015 年 7 月开工建设，可于 2017 年晚些时候投产。该公司没有铸造、热轧、冷轧等上游装备，所需的带坯由各自平轧产品企业提供。这不但可以缩短建设周期，而且可减少投资 50%以上。

2. 德国

德国是这次 ABS 改、扩建工作的起始国，最先进行此项

工作的是诺贝丽斯铝业公司。随后比利时、奥地利、法国、瑞士等国的有关企业都进行了相应的改、扩建，欧洲的此番ABS 项目改、扩建工作已于 2012 年全部结束。

截至 2013 年，德国可生产 ABS 的企业有 4 个，生产能力 410kt/a，占世界总产能的 12.2%，居第三位。

纳切斯特德铝业公司

纳切斯特德铝业公司属诺贝丽斯铝业公司，1997 年开始生产ABS,有 1 条热处理与精整连续生产线,max 速度 150m/min，生产能力 100kt/a，2009 年经过扩建，生产能力扩大到 120kt/a。冷轧带坯卷由阿卢诺夫铝业公司（AluNorf GmbH）提供。纳切斯特德铝业公司于 2002 年安装了一条激光裁切生产线，有 4 台激光切割机。1mm 厚板材的切割速度可以达到 15m/min，每年为德国的原车设备制造厂，和捷豹车制造公司提供超过 100 万张板片。直接供应切割成型板片优势在于在后续工厂切割，这样就可优化材料物流，且可以减少周转和运输工艺废料的费用。

格雷文布洛伊铝业公司（Grevenbroich）

该公司属海德鲁铝业公司，位于德国格雷文布洛伊，该厂于 1922 年开始生产铝箔，经过 90 多年的不断改扩建现有 24 台单机架箔轧机、1 条双机架箔材连轧线，2 台单机架冷轧机，带坯卷由数英里之外的阿卢诺夫铝业公司提供，是全世界最大的铝箔厂。

ABS 涂层线 AL1 于 2003 年投产，配有切边机（通常切边量 30mm~150mm）、辊式和张力矫直机，具体工艺根据用户的特定要求而定。除 6016 合金外，还可以生产 6960、5754、5182 和 6130 合金，6130 合金含 3.5%Mg，与 5xxx 系合金的性能相当，一种白车身板，强度相对较高，但无晶间腐蚀倾向。这条生产线能力为 30kt/a~40kt/a，但由于没有气垫炉热处理设备，所以全部用于生产 5xxx 系合金。

AL2 为一条有连续热处理功能的气垫炉与矫直、清洗、涂润滑剂等处理的功能完善的生产线，号称是最现代化生产线，专门用于生产表面品质要求非常高的 6xxx 系合金 ABS 带材。

这 2 条生产线都设在与主厂房相邻的单独厂房内。AL2 线配有倍威格公司（BWG）公司提供的 2 个卧式活套设备，双层分布。带材从上方的活套进入温度 580℃的连续气垫热处理炉内，悬浮于清洁的气垫上，前进速度 10m/min~20m/min。AL2 下面一层有 2 台卷取机，上面进口端有带材头尾缝合机，可在 1min~2min 内把前一卷的尾端与后一卷的前端缝合。出口端在带材卷取之前设有检查系统，通过 X 射线和其他可视检查装置对带材表面品质进行实时监控。AL2 的生产能力 30kt/a。如果加长气垫炉长度可增加生产能力。

哥廷根轧制厂

哥廷根轧制厂 ABS 生产线改扩建工程已于 2015 年 6 月完

工，生产能力提升到 40kt/a，该厂属诺贝丽斯铝业公司。

辛根铝业公司

辛根铝业公司隶属于肯联铝业公司汽车事业部，ABS 生产能力 50kt/a。

3. 奥地利

奥地利仅有一个平轧铝产品，即奥地利有色金属加工有限公司，1950 年建成投产，位于奥地利兰绍芬市。

1985 年该公司更名为奥地利金属有限公司，主要生产非标准特殊铝加工产品如光亮板、花纹板、汽车板和航空航天板，复合材料生产势力也很强。其轧制产品的 20%用于交通运输业，其中的 5%~10%用于航空航天工业。高强度、高表面品质及光亮产品为公司的优势产品。

该公司在兰绍芬市有一个铸造厂和一个轧制厂，可生产 1xxx~8xxx 系全部铝合金，但 Al-Li 合金除外。该厂的一个特点是铸造厂的废料用量大，占配料总量的 90%以上，不过铸造扁锭（Slab）的废料用量为 75%~80%，在全球也是废料比率最高的之一。

车身板的生产始于 2006 年，当年安装了一条气垫连续热处理线，这条线包括连续固溶处理、淬火、拉弯矫直、脱指、涂层、涂油、卷取和打包。产量取决于产品结构，宽 1600mm ABS 带产量 20kt/a，产品直接面向 ABS 和航空航天工业。2011

年这条线又增加了钝化、脱指、张力矫和涂油工艺，可以生产钝化处理的 ABS。

该厂还生产一种具有超塑性和自然时效能力的 5083 合金厚板，在约 500℃具有超塑性，可在模具内发生均匀的超塑变形。根据温度不同，整个工序可在 30S 左右使材料伸长率达到 70%~90%。该工艺主要用于卡迪拉克车顶板和梅赛德斯 SLS 车门板的成形。

该公司正在安装 1 台新的热轧机与扩建铸造车间，使扁锭生产能力达到 230kt/a。主要产品定位于航空航天工业和汽车产业的高强度板带材，ABS 生产能力 60kt/a。

4. 比利时

杜菲尔轧制厂位于比利时，属爱励铝业公司，2003 年对汽车板生产线进行了大规范技术改造，使 ABS 生产能力达到 80kt/a。该厂有完整的 ABS 带材生产系统，从熔炼铸造、热轧、冷轧、气垫连续热处理-精整生产线，有 1 条（1+3）式热连轧生产，粗轧机辊面宽度 3760mm，精连轧线的辊面宽度 2490mm。2013 年投资 700 万美元的 4 辊不可逆式冷轧机，从意大利达涅利公司引进，可生产宽度 2200mm 的带材。

连续热处理-精整线是一条连续的自动化生产线，包括开卷、气垫炉、张力矫直、清洗、钝化、干式润滑剂涂覆、固化、卷取等系统。

5. 法国

法国只有纽布利萨克轧制厂一家生产 ABS，属总部位于巴黎的肯联（Constellium）铝业公司，该厂于 20 世纪 90 年代开始生产白车身汽车板，内面板采用 AA5754 合金，外板用 AA6016，主要为法国雷诺汽车公司的标致、雪铁龙汽车用。近年来 5xxx 系合金内车门板一般不进行精整处理。

2004 年肯联铝业有限公司 2000 万欧元对原有的连续热处理生产线进行改扩建，增加了化学转化处理和表面处理设备，可生产 6xxx 系合金 ABS 带材，2007 年产量超过 70kt。产品范围大大拓宽，可以满足奥迪、戴姆勒、保时捷、宝马等各型汽车对 ABS 的需求。特定产品供给雪铁龙 C4、标致 308、宝马 5GT 和捷豹 XJ。此外，还为奔驰 CL 级顶棚、奔驰 SLS 翼门板、奥迪 A8 内车身部件和奔驰 C 级外车身板（1800mm 宽）供货。

精整线有 1 台分切机和 1 台 BWG 公司的连续式热处理线（含入口活套塔），热处理段含奥托·容克公司的气垫式连续热处理炉（工作温度 500℃~580℃）、水淬区、空气淬火区。随后带材被送入化学转化处理（钝化）段，经烘干、光学表面品质检验后送入另一条生产线，根据不同用户要求在其表面涂干式或湿式润滑剂，50%德国用户要求涂干的，而大部分法国用户则要求湿涂。之后部分带材直接卷成卷打包入

库。另一部分送至横剪线和激光剪切线处理。2014 年纽布利萨克铝业公司 ABS 带材生产能力达到 100kt/a。

6. 瑞士

瑞士谢尔（Sierre）轧制厂原属瑞士铝业公司，2000 年 10 月被加拿大铝业公司兼并，2005 年 1 月加拿大铝业公司一分为二，将通用板带材部分分离出来，成立诺贝丽斯铝业公司（Novelis），谢尔轧制厂划归诺贝丽斯铝业公司。2000 年开始生产 ABS 带材，后又扩建了一条连续气垫炉热处理生产线，使生产能力达到 80kt/a。从而使诺贝丽斯铝业公司在欧洲的 ABS 生产能力达到 240kt/a。

7. 沙特-美铝铝业公司

沙特-美铝铝业公司，是一个正在建设的大型铝业公司，原设计中没有 ABS 项目，为抓住当前全球大力发展 ABS 这个难得的机遇，沙特-美铝铝业公司临时决定增建 ABS 生产线。该公司位于沙特阿拉伯的阿尔哈尔角，是一个港口小镇。沙特-美铝铝业公司是一个全新的产业链最为完整的一次性建成的大型单一铝企业，有铝土矿（离此地约 800km，有新建的铁路专线）、氧化铝、原铝、炭素、铝加工、自备电厂、海水淡化厂、铁路、港口等。ABS 生产能力 120kt/a，2016

年投产。

铝加工板块项目：熔铸车间、热轧车间、冷轧车间、通用板带精整车间、ABS 车间。热轧车间有一条 2350mm（1+4）式热连轧线，西马克公司提供，以及其他配套的设备；冷轧车间的主导设备为西马克公司 CVC-6 plus 型 2300mm4 机架连轧线 1 条。虽然世界上还有 1 条 20 世纪 70 年代建设的 4 连轧线，但这条生产线是 40 多年来新建的首条，生产能力 400kt/a，主体产品为罐身料与 ABS，带卷最大质量 30t，可轧带材最大宽度 2100mm，不能轧制 2200mmABS 带材，因为按原来设计不生产 ABS；还有一条涂层生产线，可处理 5xxx 及 6xxx 系合金厚 0.8mm~3.5mm 带材，生产能力 50kt/a，气垫炉（GATV）是此生产线的核心设备，设有强大的气冷及水冷系统，可确保处理后带材在宽、长方向上的晶粒尺寸细小均匀，各项力学性能均匀一致与非常稳定，在此生产线中还有拉伸矫平机列与清洗，无铬化学转化处理系统。

沙特-美铝铝业公司板、带的生产成本是世界上最低的，得益于低的原铝价格、特低的能源价格与完善的产业链。板带材的 90%以上出口到欧洲与北美洲。该公司的经营管理由美国铝业公司负责。

8. 韩国

韩国高精铝板、带生产几乎全部为诺贝丽斯-大韩铝业公

司（Novelis-Dahan）控制，2010 年该公司的板、带生产能力 600kt/a，为满足市场需求，自 2010 年起公司投巨资进行大规模改扩建，使生产能力提高到 1000kt/a，其中新建的 ABS 生产能力 120kt/a。

9. 日本

截至 2013 年，日本 ABS 的生产能力估计约为 200kt/a，包括神户钢铁公司真冈轧制厂、日本联合铝业公司福井轧制厂及名古屋轧制厂、日本轻金属公司。真冈轧制厂的 ABS 产量占全日本产量的 50%强。它们的生产能力：神户钢铁公司 100kt/a，日本联合铝业公司 80kt/a，日本轻金属公司 20kt/a。神户钢铁公司铜铝事业部不但是 ABS 主导生产者，也是世界主要生产与研发者之一。它研发的 5xxx 系及 6xxx 系 ABS 合金已形成系列，例如 KS5J30 合金属 Al-Mg-Cu 锡合金，其抗拉强度 Rm=300NCmm2，伸长率 A=30%，与低碳钢的相应性能相当，日本汽车工业已广泛用此合金制造身钣金件；KS5H32 是一种 Al-Mg 合金，合约 5%Mg，既有高的强度性能，又有良好的成形性能，同时可在现行的钢板成形线上加工轿车发动机罩外板，这是非常难能可贵的。

国外工业发达国家这轮 ABS 项目建设可于 2017 年或 2018 年上半年全部结束，可以满足汽车工业 2027 年以前对 ABS 的需求，所以 2025 年以前不会建新的项目，但俄罗斯及巴西则

可能各建一个，在俄罗斯可能是由美国铝业公司投资兴建，在巴西可能由诺贝丽斯铝业公司投资。

1.4.9 铝商用车——推广铝应用的“牛鼻子”

山东丛林集团生产的 14.6m 的全铝甩挂运输车。

房车是一个哪里都能去的大玩具。

中国首辆全铝八轮电动客车。

商用车是指出于商业用途载人或载货的各种汽车，它由两大类组成：一类是专门拉人用的车，即除乘用轿车以外的各种客车；另一类为专门运输货物的汽车，种类繁多，不胜枚举，如半挂车、厢式货车、种种专用货物运输车如冷藏车、邮政车、运油车、运钞车、快递车、矿物与沙石车等等。

2015 年 1 月~5 月，中国乘用车产销 874.05 万辆和 858.32 万辆，同比增长 7.79%和 6.36%，商用车产销 150.38 万辆和 146.31 万辆，同比下降 17.35%和 17.27%。在生产的汽车中，按辆数来说，乘用车占 85.32%，商用车占 14.68%。虽然乘用车在数量上占绝对优势，但商用车因其潜在的经济效益和社会效益，市场前景可观，是推广铝材应用的重头戏。

从它们所用的铝材生产技术难度来看，乘用车材料的技术门槛高得多，而商用车所用铝材不管是平轧材还是挤压材

都是通用工业材，生产技术含量要低得多。例如厢式货车车厢骨架用的挤压型材与覆盖板材都是普通的工业用的材料，矿石与煤炭运输车的斗厢、油罐车的罐都是用一般的 5xxx 系合金厚板焊接的，制造公共汽车的铝材也是通用的，不需要专门的生产线加工，不要用专用的合金，可是乘用车的 ABS（汽车车身薄板）必须用专用的合金、专用的生产技术与专用技术生产线，才能满足自动化与智能化的汽车生产线要求。

兴旺的货车

专门运输货物的汽车与挂车的 85%以上的结构件与零部件都可以用铝合金制造，成为铝密集型的或全铝的运输装备，工业发达国家货车的铝化已基本完成，有的已达 85%以上，有的已超过 80%，低的也已达 70%，中国在这方面才刚刚起步，但已取得可喜的成就。

自卸车

自卸车挂车用于运输块状、颗粒状、粉状等货物，它的车斗可用 5AD3、5A05、5083 等合金制造，以 5183 合金焊条焊接，最好是用摩擦搅拌法（FSW）焊，既不用焊条，焊缝品质又高。车斗用 3mm~6mm 厚的板焊接，为提高其耐磨性往往用钢板做内衬。前苏联曾生产过一种 37t 的自卸车，由于采

用铝合金，其自身质量比钢制车的轻 50%，车斗侧板厚 9mm~10mm，底板厚 12mm~18mm。

中国有色金属工业协会在推广铝在半挂车中的应用做了许多有效的工作。2009 年 12 月中国拥有自主知识产权的全铝自动装卸车在青岛重汽集团专用汽车公司成功下线，技术创新达到国内领先水平。为解决节能减排降耗目标，该公司首次在专用车辆上规模性使用铝合金材料，成功地解决了 5xxx 系铝合金板材在折弯、焊接制造过程中的工艺难题。由于车箱全部采用铝合金制造，极大地降低了自身质量，在节能、减排和性能等方面有着明显优势，是一款能满足煤炭、粮食、砂石、矿产品等散装货物运输需求的高档自卸车。

高性价比的半挂车

采用铝材制造半挂车与房车有很大的经济效益与社会效益，房车也是一种挂车，是供旅行出游用的，减轻车的自身质量是铝材被选作制造基本材料的主要原因，房车在中国才处于起步阶段，但市场潜力很大。美国半挂车的车身侧板与内板为厚 4mm~5mm 的 5052 合金，加拿大铝业公司（2008 年为力奥挺托公司兼并，称为力托加铝公司，但仍以加拿大铝业公司的名义在世界各地进行市场活动）开发的半挂车车身为铝合金板与挤压铝型材构成，铝型材作为主柱，中部较厚并带有凸缘，凸缘厚度等于板材厚度，铝合金板对接地点位

于加强筋处，而铝合金板的上下边支撑在铝型材上下梁的凸缘上，如美国通用的牲畜半挂车，用铝合金制造这类车是由于铝的密度小与对牲蓄粪便有很强的腐蚀性能。

湖南晟通科技集团有限公司研发的全铝半挂车于 2010 年形成商业化生产能力。2013 年 10 月晟通科技集团汽车公司研制的“铝行者”亮相第八届中国（深圳）国际物流与交通运输博览会。银光熠熠的外观、整洁时尚的“铝行者”半挂车，“铝行者”托盘，在大物流模式下，给参展商和观众带来一次全新体验。

晟通科技集团有限公司“铝合金厢式运输半挂车开发关键技术研究”于 2012 年 12 月通过科技成果鉴定，专家认为：研究项目获得了多项成果，总体技术居国内领先水平。“铝行者”在保证其卓越性能的情况下，车体成功减重 3.4t，可在生命周期内节油 45kL，减少 CO2 排放 110t。2014 年中国保有重型半挂车 115 万辆，若其中 80%采用全铝车，按行驶 15 万 km 计算则可节油 5320kt/a，按 80 万 km 使用期计算，可节油约 28400kt，同时可减少 CO2 排放约 90000kt，相当于 25 万公顷阔叶林一年吸收的 CO2。“铝行者”为顶开厢式全铝半挂车，操作方便灵活，从卸货、打开、关闭顶蓬时间仅需 5 分钟，一次装货仅需 24 分钟。2015 年 5 月 13 日晟通集团天力汽车公司为广州志鸿物流有限公司生产的 10 辆全铝全厢式半挂车在长沙交付，随后又为京东公司生产了同样的

一批半挂车。2015 年晟通集团铝合金轻量化汽车生产车间每天都有 5 辆轻量化汽车下线，预计全年的产量可突破 3000 台，其中有 60%出口，其余的奔驰在大江南北主要快递和零担运输干线上。

晟通科技有限公司正投资数十亿元建一个全铝厢式货车和 12m 半承载铝合狰狞各车的项目，生产能力 10×104 辆/a，建成后晟通集团将成为全球最大的领先水平的这类全铝车的生产与研发基地。

山东丛林集团有限公司与东风汽车有限公司合作于 2009 年研制成功有自主知识产权的首辆全铝半挂车，型号为金霸 E33-621，它的质量 252kg，比钢制车轻 178kg，减重率高达 41.4%，节油率大于 6%，已于 2010 年形成生产能力 5000 辆/a 全铝半挂车。

2012 年 11 月丛林集团继生产的全铝烟草运输车交付客户后，又在武汉国际卡车展上亮出了美观精美与经济环保的长 14.6m 的全铝甩挂运输车，自身质量仅 6.8t，比钢制车的轻 2t~3t，是目前国内市场上最轻的甩挂车，可承载 30t 货物，运输能力、匹配货物也完全可以与钢车相媲美。据运输企业的统计，采用全铝甩挂运输车平均单位运输成本可比钢车的低 30%以上。甩挂运输车的节能减挂优势突出，是提高道路货运和物流效益的重要手段，在发达国家已成为主流运输方式，虽然在中国才起步，但会很快赶上。

半挂车引休闲车的框架是用挤压铝型材制造的，挤压材的连接由铝合金铸压件承接，外面覆以薄铝板，内表面用装饰材料装修，内有厨房、卫生间与卧室，在一地休闲旅游完成后，用轿车托着上路，非常便捷。

房车

房车可是全铝化的，因为它要求自身质量轻一些与漂亮一些。房车有两大类，自行式和拖挂式。对那些退休后希望进行长期旅行的人来说，可能更想拥有自行式的房车，但拖挂式房车拖曳在皮卡、家庭轿车或 SUV 后，停车后可以与牵引车辆分离，牵引车可以正常使用，而且这种房车的价格比自行式的低很多。

对孩子来说，假期一家人开着房车去旅行，一起在野外看日出日落，是再快乐不过的一件事了，这也是一种良好的家庭教育方式。不是只有在学校里才能学习，孩子们穿越不同的地域，见识不同文化其实也是一种学习。人们可以把房车当做日常居所和移动办公室，开着房车到户外饕餮别有风趣。房车是一个很棒的户外办公室，离城市不远，离自然很近。如果下雪的时候，开着房车去到野外看雪，雪就会静静落在你家窗外。夏天天气好的时候，带着户外投影仪，在野外看电影，你会觉得整个黑色闪亮的天空都是你的幕布。还有一种帐篷房车，它的支架可用铝管制造，收起来就像个大

行李箱，将车体完全展开就是房车。车内设施非常简单，主要有床铺、简单炉具、洗浴、桌椅等小型折叠可移动生活用品。

2014 年年底，中国保有房车约五千五百余辆，估计真正当房车玩起来的大约 10%，大多数都用来作商务接待了。所以，房车在中国有很大的发展潜力，当下房车价格高低不一，低的每辆只有三四万元，高的每辆超过一百万元。铝企业可在这方面多做些工作。

客车铝化潜力巨大

客车几乎可全部铝化，制成全铝型的，不过当下即使在美国、日本、西欧、港澳、北欧等发达国家和地区，它们的铝化率也没有超过 40%，中国全铝客车制造业仍处于萌生期。实际上，客车是应该全铝化的，相当一部分客车约 60%，是在城市区域与城市之间运行，最需要节能减排；第二，全铝客车的减重效果显著，例如晟通集团汽车有限公司的 12m 半承载铝合金车身减重 60%，相当于 1.8t，三是所用的铝材与铸件等全是通用铝合金材料，生产技术门槛不是高不可及，比乘用车 ABS 的低一些。大中型客车的铝化率还很低，需要我们去开拓和推广。

中国首辆全铝大客车亮相 2008 广州铝工业展览会

中国郑州宇通有限公司与美国铝业公司共同研制的新一代节能环保全铝大客车于 2008 年 5 月 28 日在广州铝工业展览会上展出了车模铝框架结构，不仅美观时尚，而且全车采用的铝合金结构清晰可见，体现了材料、设计、工艺的完美结合，更重要的是，铝制环保客车的使用将进一步推动交通运输业节能减排与低碳社会的进程，提高燃油经济性，有关研究表明：在车辆运行生命周期内，自身质量下降 1000kg，可以减少燃料消耗 4800L。降低温室气体排放 11.2t。该车的铝合金车门质量仅 10.2kg，而传统钢车门的却高达 22.7kg，即下降 55.1%。

晟通科技集团的地毯绿色 12m 半承载全铝客车

2011 年晟通科技集团有限公司推出的 12m 半承载全铝客车具有设计新颖、结构先进、工艺独特、自身质量轻（铝合金车身减重 60%，相当于 1.8t）、节能减排显著等特点，跻身国际国内先进水平行列，进入了低碳绿色汽车家族。

国内第一辆全铝八轮电动客车在重庆下线

2014 年 7 月，重庆市汽车产业升级转型科技重大专项在

客车研发方面取得突破性进展，国内第一辆八轮轻量化低地板全电动客车整车样车装调下线。

该客车是中国第一辆独立悬架轮边电机分散驱动低地板城市客车，采用独立前桥及后桥驱动模块，结构紧凑、体积小、质量轻、传动链短、效率高、噪声低。采取整车低地板布置，车内通道宽 1200mm，车内空间可 100%全部利用。铝合金车身比传统钢结构车身的轻 40%。此外，该样车比传统集中驱动电动车底盘质量轻 30%，行驶能耗低，可对行驶中 4 轮转速进行控制，转向时可进行电子差速控制。

走向国际市场的铝合金 Volvo BIOM 豪华旅游大客车

西安飞机制造有限公司与瑞典沃尔沃客车公司共同组建的西安西沃客车公司是国内首家生产豪华旅游客车及高级长途旅游客车的合资企业，主导产品为 Volvo BIOM 豪华旅游大客车，其地盘及 2000 系统模块技术制造的地盘与 2000 系统模块制造的车身是全铝合金的，以 2A12 合金板材与型材制作车身，用量约 1t/辆，大梁为 2A12 合金挤压型材，用量 240kg/辆,顶棚是用厚 1.5mm、2.0mm、3.0mm、6.0mm 的 5A02-H24 合金板材制造的，用量约 5m2/辆，即约 40kg/辆。

2010 年 3 月 28 日，中国吉利控股集团有限公司斥资 18 亿美元就收购沃尔沃公司与福特汽车公司在瑞典哥德堡签约，吉利公司获得沃尔沃轿车公司 100%股权以及包括知识产权在

内的相关资产，并首次确认将在中国建设新厂生产沃尔沃轿车，既买到沃尔沃的核心技术、专利等知识产权和制造设施，还获得了沃尔沃公司在全球的经销渠道，为中国汽车产业走出去提供了现成的通道，迅速提高中国汽车及其零部件在欧、美、日市场的比例，解决中国汽车产业自主创新面临的知识产权问题，实现在后工业化国家汽车市场你中有我零的突破，从根本上改变中国汽车产业的国际形象。2014 年西沃客车公司铝材用量约 40kt，但都是通用铝材。

推广铝在货车与客车中的应用，除铝工业有关部门与企业加强宣传与营销工作外，政府的政策支持是必不可少的，若对客车、厢式货车、半挂车等的油耗做出规定并严格执行，会对促进铝的应用、扩大铝的消费大有帮助。

1.4.10 补特色汽车铝合金与冲挤件短板（上）

就全世界来说，汽车工业是用铝最多的部门，2015 年国外汽车工业原铝与再生铝的用量约 7500kt，约占铝总消费量的 25.7%，可是中国用铝最多的是建筑与结构工业，汽车工业的用量仅约 3200kt，还不到铝消费总量 34000kt 的 10%，这说明中国汽车用铝潜力还很大，是推广铝应用的最大对象。

为了推广铝在汽车中的跨越式应用，除尽快使已建成 ABS（汽车车身薄板，Auto Body Sheet）项目达标达产，在建项

目按计划尽快建成外，还有一些短板亟宜补上，如大的 ABS 生产企业宜建立专业研究所，研发有工厂特色的 ABS 合金，这类合金的成分与标准合金的略有不同，但工艺性能更适应的生产情况，其使用与制造性能可以更好地满足汽车制造厂的要求，每个大的 ABS 生产厂都应有适合自己的合金；挤压汽车铝材也有几项需补上，如可在汽车产品基地建一些专业铝材挤压厂及铝材深加工项目，向汽车厂提供可直接组装白车的零配件；建设铝合金汽车零件冲挤厂，中国至今尚无这类企业，冲挤件性能优于铸件的，而又接近锻件的，而且制造成本又比锻件的低，值得推广。

补特色 ABS 合金短板

铸造铝合金及变形铝合金都在汽车制造中获得了应用，但目前仍以前者为主，2020 年以后，压力加工铝材（平轧产品、挤压材、锻件等）用量有可能超过压铸件及铸件。在汽车制造中用的加工铝材中，乘人小车车身薄板（ABS，auto body sheet）的生产难度及技术门槛最高，装备与建设投资也是最多的。ABS 铝合金除有满足标准与规范的力学性能、化学性能、尺寸偏差与表面品质外，还应具备如下的特性：良好的成形性能与翻边延性，表面平整性强，良好的可焊性，优秀的烘烤硬化性，抗时效稳定性强，很好的抗凹性，良好的 Zr/Ti 盐化学转化处理性能。

ABS 铝合金板可分为外板与内板，外板生产难度大，所要求的性能高，现在所说的汽车板一般都是指车身外覆盖板。它们又可分为标准合金与非标准合金，前者指在美国铝业协会公司（AA）注册的与有关国家标准纳入的，如 6009、6010、6111、6016、6022 等合金，还有一些 2xxx 系及 5xxx 系合金。中国在《新材料产业“十二五”发展规划》明确提出发展的合金为 6016、6022、6111，这既与世界 ABS 铝合金发展态势一致，也与国内铝加工业及汽车制造业的实际情况吻合。

中国乘人轿车产业经过 30 多年的发展取得了巨大成就，已连续 4 年产销量稳居世界首位，但是 85%以上的小轿车都是中外合资企业生产的，由国内企业与有完全自主知识产权生产的还不到 15%，所以离完全摆脱外人的控制向发达大国汽车工业那样还有较大差距，还需要经过一段时间才能赶上与超过。与此相适应，中国在 ABS 铝合金板生产领域虽有着 30 多年的研发，但都是追踪型的，都是在零打碎敲，既没有专业化的生产企业与生产线，也没有专门的规模较大的研究院所，也没有一批高水平的稳定的研究队伍。因此，在此领域有两方面的需要补的或快补的板块，快补的是指在建的 ABS 项目如天津忠旺铝业有限公司、神钢汽车铝材（天津）有限公司、爱励（镇江）铝业有限公司、同人铝业有限公司的汽车板工程尽快按预定计划建成投产，已建成的如诺贝丽斯（中

国）铝制品有限公司、南南铝加工有限公司、西南铝业（集团）有限责任公司的 ABS 生产线争取向全球大的汽车制造企业批量提供板带材。

另两方面的“补”不是马上可补好的，需要较长的时间，一是搞深加工，二是搞创新性研发，这是一项长期任务，进无止境的任务。ABS 生产企业不但要向汽车制造厂提供优质的价格合理制造白车覆盖件的板带材，而且应向汽车制造厂提供尽量多的可立马用于组装白车的深加工钣金件，这是高附加工值的产品，是一类双赢的产品，加工厂可量体裁衣，根据钣金尺寸精准地激光下料，分毫不差，将材料利用率做到极致，据笔者估算，材料利用率可提高 5%左右，材料采购费可以相应地下降一些；在加工厂进行深加工，边角废料和各种材料的切屑可得到精准的回收与再生利用，不会发生混料，可显著提高废料的使用价格，降低钣金覆盖件生产成本。

创新性研发是我们当下的主短板，必须补上，但又是一项长期工作，搞研发就是在不断地创新，主要是研发新的合金，这不是指创造一种全新的性能大为改观的合金，而是指对既有的合金成分进行修修补补，使其性能得到改善，更适合材料厂的加工与汽车制造厂的使用，国外的铝加工厂在这方面做出了很好的榜样，它们的经验值得借鉴，研制成功了一批有特色的合金，其特点是：以标准合金为平台，对成分

作了一些调整，或是对主成分略加精细变动，或是添加了一两个微量元素，或对某些杂质作了更严格的限制；第二对生产工艺作精细调整，提高产品品质或降低制造成本，使产品具有更好的性价比，汽车制造厂也更乐于使用。现介绍几个公司在这方面的业绩。

诺贝丽斯铝业公司的 Advanz 7xxx 系合金

诺贝丽斯铝业公司是全球最大的平轧铝产品企业，每年的研发费用达到 2.2%销售收入，在全球铝业公司中也位居前列，新近推出一种商品名称为 Advanz 7xxx 系的铝合金，其板材用于制造汽车安全装置，它的强度性能比现行保险杠铝合金的高一倍；与高强度钢材相比，该合金在减轻汽车净质量的同时能最大程度地确保乘人安全。目前，全世界有多家汽车公司正在对该合金安全系统进行试用、测试与评估。

神户钢铁公司的 ABS 铝合金

日本神户钢铁公司是日本 ABS 铝合金的最大生产者，其产量占全国总产量的 50%以上，它研发的 KS6K21 与 KS5J30 铝合金的综合性能比标准 5182 铝合金的高得多，前者是一类 Al-Mg-Si 系合金，而后者为一种 Al-Mg-Cu 系合金。KS6K21 合金的前期强度低，抗腐蚀性强，可焊性良好。KS5J30 合金

的抗拉强度高，为 275N/mm2，仅比 SPCC 钢板的低 13%，伸长率高达 30%，比 SPCC 钢的低 29%，成形性良好；冲压后强度有所上升，而烘烤后并不下降；抗腐蚀性强，可焊性良好。KS6K21 合金的母合金是 6016 铝合金，KS5J30 合金是 5052 合金的发展。它们还取得了中国发明专利。

肯联铝业公司的 5 种 ABS 铝合金

总部位于法国巴黎的肯联铝业公司（Constellium）的纽布利萨克（Neuf-Brisach）从 20 世纪 90 年代开始生产汽车白车身铝合金板，内板为 5754 铝合金，外板为 6016 铝合金，主要用户是雷诺汽车公司，用于制造标致与雪铁龙汽车车身钣金件，为激光裁切板坯，而向德国宝马 5GT、捷豹 XJ、奔驰、奥迪 A8 等供应的为带卷，该公司 ABS 生产能力约 100kt/a。肯联铝业公司谢尔研究中心研发的有特色的 5 种 ABS 铝合金：

FormatexTM 合金，有高的成形性能，是一种 6xxx 系铝合金，用于制造乘人车顶部钣金件；

StrongalexTM 合金，其抗拉强度比标准合金的高不少，用于制造高强度钣金件。

SecuralexTM 合金，是一种保护行人安全性高的 ABS 铝合金，它有良好的表面可处理性能，表面处理后色调均匀柔后，用于制造乘人车外部钣金件；

UltralexTM 合金，是 7021 铝合金（1.2%Mg~1.87%Mg、

5%Zn~6%Zn、0.08%Zr~0.18%Zr）的发展与改型，有很高的强度性能，抗拉强度 Rm=400N/mm2，几乎与钢板的相等。

诺贝丽斯铝业公司的 AC-600PX 高强度合金

2011 年 8 月诺贝丽斯铝业公司被确定为全新埃沃奎系列越野车（all-new Range Rover Evoque）ABS 铝合金独家供应商。这一系列埃沃奎越野车具有最高的燃油效率，比过去的任何一款埃沃奎越野车都省油，这都得益于 ABS 铝合金的采用。为此，埃沃奎汽车公司在利物浦建设了首条专业铝钣金件生产线。新款越野车的盖、车顶和结构件都是用诺贝丽斯铝业公司的 ABS 加工的。车顶设计极为领先，首次用公司的新型铝合金 Anticorodal-600PX(AC-PX)板制造，它既有高的强度性能又有良好的成形性，是一种优秀的车身钣金件合金，其抗拉强度 Rm 比典型 ABS 铝合金的约高 20%，而其成形性能比任何其他高强度铝合金的都好，由于合金强度高，铝合金 ABS 的厚度可减薄 15%以上，使其成为一种制造车身盖板、翼子板、顶板、门板等之类的优秀铝合金。还有一种牌号 Anticorodal-120 的 Al-Mg-Si 系合金，它有高的抗腐蚀性能。Anticorodal-600 PX 合金的成分虽未公开，但是种种迹象表明，这是一种 Al-Mg-Si 系合金。

日本联合铝业公司住友公司的系列 ABS 合金

日本原住友铝业公司于 2013 年与斯凯铝业公司（Sky）、古河铝业公司组成日本联合铝业公司（UACJ），但在许多场合仍以住友铝业公司名义进行业务活动。它研发的三种 ABS 合金：

GB15VJ 合金，是一种 2xxx 系合金，其成分（质量%）：Si0.30~0.6,Fe0.40,Cu1.2~1.7,Mn0.10,Mg0.40~0.8,Cr0.10,Zn0.25,Ti0.10,V0.01~0.10,其余 Al；

GV10J 合金，是一种 Al-Mg-Si 系合金，其成分（质量%）：Si0.35~0.7,Fe0.50,Cu0.45~0.8,Mn0.05~0.20,Mg0.8~1.2,Cr0.10,Zn0.25,Ti0.10,其余 Al。该合金的成形性和强度性能适中；

GZ42J 合金，是一种 7xxx 系铝合金，其分析成分（质量%）：Si0.09,Fe0.10,Cu0.38,Mg4.5,Z1.46，其余为 Al。抗拉强度 Rm=300N/mm2，伸长率 A5=30%。它是强度高、成形性好、杂质含量低的高纯度合金。

海德鲁铝业公司的 L63/44 合金

L63/44 铝合金原是德国联合铝业公司（VAW）格雷文布罗伊（Grevenbroich）轧制厂的注册合金，商品牌号 VAW L63/44，2006 年海德鲁（Hydro）收购了 VAW 铝业公司，从此 VAW 铝业公司不复存在，但是 L63/44 合金仍在市场销售，

它是一种 5xxx 系合金，成分（质量%）为：Si0.40,Fe0.50,Cu0.10,Mn0.10~0.6,Mg4.5~5.3,Zn0.20,Ti0.20,其余 Al。

1.4.11 补特色汽车铝合金与冲挤件短板（下）

补挤压铝材短板

在提高汽车铝化率与制造全铝汽车时，不但需要大量的板材，而且需要大量的挤压材（型材与管材）和压铸连接件，型材用于制造车的骨架与加强框架与杆等。所谓全铝车是指在当前的技术条件下，凡是可用铝材取代其他材料制造的零部件都是用铝材生产的。

从中国铝加工产业当下的装备看，可以生产各种汽车所需要的全部挤压材，需要补的短板是：对现有的生产挤压材的企业作适当的调整，组建一些专业化的汽车铝材厂；其次在一些新的汽车铝产业园或基地建少量汽车挤压铝材企业，专业化生产汽车挤压铝材并进行深加工，如保险杆生产线，装饰条线,气动元件,ABS 制动系(防抱死制动系动,anti-lock brake systen）零件等等。建设这样的生产线，必须建深加工生产线，向汽车厂提供可组装白车的保险杠系统；装饰条型材应是成品，经过电镀与弯折，通常呈白色，如黑色奥迪车两侧的装饰条，需要建电镀槽与有成型机；生产气动元件

与 ABS 制动系零件需要数控机床等机械加工设备。

生产全铝汽车型材也应是经过深加工的，汽车厂拿去后即可进行白车组装。为了组装全铝车骨架需要相当数量的连接件，它们大都是压铸的，因此应建一定数量的压铸厂与压铸件深加工生产线。

辽宁营口市正在建新型铝材质专用车生产基地，2017 年 10 月一期的一些项目投产，投资 30 亿元，二期投资也是 30 亿元，园区规划面积 35km2 以上，其中 20km2 用于建铝材加工及深加工项目，其中包括汽车专用铝挤压材的生产与深加工。一期全铝专用车生产能力 5 万辆/a,每辆按 20 万元计算，销售收入可达 100 亿元，主要生产罐车（油、液化气罐车）消防车、邮件车、快递车、环保车、汽车运输车等十几二十种。营口专用车基地建成后，将是国内最大的各种铝专用车生产基地,2015 年中国约有 12 个铝专用车生产企业或园区。

补冲挤件短板

在经济发达国家如美国、日本、欧洲国家等用冲挤法生产的汽车配件有空气干燥器、安全锁紧器、排档件、燃料供应系统、空调系统和转向制动系动的各种零件，冲挤汽车零配件有高的性价比，但是中国尚无这样的专业化项目，因此可对这块短板补补。

生产冲挤件坯料有两种：常规坯料和哈兹雷特带坯，常

规坯料是用传统铸造-热轧法生产的，不再赘言。第二种坯料如加拿大托尔汽车公司（Tower Automotive）1963 年建成的 660mm 生产线，产量约 25kt/a，坯料主要供本公司冲挤汽车零件，合金品种 3XXX、5XXX、6XXX 系合金；美国爱励铝业公司（Aleris）1979 年建成的 711mm 生产线，产量约 40kt/a，合金品种多，为本公司深加工零件提供坯料；美国朱必特铝业公司（Jubiter）1985 年建成的 760mm 生产线，生产能力约 100kt/a，生产的合金主要为 3XXX 及 5XXX 系的，冲挤产品供汽车、建筑、炊具制造等行业用。

连铸连轧生产线由 1 台哈兹雷特连铸机与其后的热轧机列（单机架至 3 机架）组成。生产冲坯料的连铸连轧线如下表所列：

诺文（Noven）公司公司总部在奥地利，生产的坯料除自用外还对外销售，在中国广东江门市也有一条生产线，仅生产坯料，销往欧洲。冲挤件生产流程：哈兹雷特连铸机→切定尺板→下冲挤料→退火→粗化处理→冲挤→热处理→包装入库。

冲挤坯料规格依产品品种及合金种类而异，如 1XXX 系合金坯料厚度 10mm~35mm，直径 12.5mm~115mm；3XXX 系合金坯料厚度 12.5mm~26mm，直径 38mm~108mm；6xxx 系合金坯料厚度 12.5mm~32mm，直径 38mm~115mm。形状除圆的外，也可以是其他形状。坯料在退火状态冲挤，冲挤前须进行表面粗化

处理，以扩大吸储润滑油表面积，便于冲挤。粗化处理可在滚筒机内进行，也可以喷丸撞击。

美国艾莱门特公司埃尔格罗夫村（ELK Grove Village）冲挤厂的概况：2005 年投产，1 台二手的 20 型哈兹雷特连铸机，带坯宽 508mm，1 列戴维公司（Davg Co,Limited）的二手双机架热轧机，都经过现代化技术改造；有 1 台 6MN 下料机，还有 1 台加拿大产的全新 3MN 下料机，2 台氮气保护退火炉。铸造车间面积 9300m2，有 1 台 73t 蓄热式熔炼炉，2 台 27t 倾动式静置炉，1 套 pgrotek SNIF 除气-过滤净化系统；生产的合金主要为 1070、6061，也有少量的 3003；熔炼 6061 合金以废料为主，而熔炼 1070 合金的主要原料为重熔用锭 P1020，铸造带坯尺寸为 38.1mm×457mm，生产能力 35kt/a；3MN 下料机（冲床）用的原料为带卷，而厚的板坯则在 6MN 下料机上下料，冲挤坯料有圆饼式的与中间带孔圆圈式的，厚 2.54mm~38.1mm，尺寸偏差 1%~3%，直径（12.7mm~127mm）±0.127mm。实际上，坯料除圆形的外，还可以根据需要下成其他形状的，如正方形、矩形、椭圆形，中间也可以带孔。

中国是世界最大的汽车产销国，但是没有专业生产汽车铝合金零件冲挤件的企业，冲挤件的性能虽比锻件的略逊一筹，但比铸件的高得多，而价格又比锻件的低不少，具有相当高的性价比，因此，有必要补上这块短板。

建议国内建二三个铝合金冲挤件企业，每个项目的规模以 40kt/a 为宜。可以参照美国埃尔格罗夫村冲挤厂的情况建设，建设这个项目的投资应当不会超过 2 亿元（含深加工车间的建设），投资效益好。

1.4.12 电动汽车用铝潜力巨大

大家知道，与传统小轿车相比，电动汽车的能耗及排放的污染物要小得多。不论那种车，轻量化都是最重要的节能措施之一，轻量化既可以降低能耗，又可以相应地减少污染物排放。德国亚琛汽车工程技术有限公司的研究表明，在 C-segment 电动轿车中可大量使用铝材代替钢材，可用的铝材有板材、挤压材与铸件（表 1）。

表 1 用铝材制造的汽车零部件

铝材品种	零部件名称	材料屈服强度 $R_{po\cdot 2}/N\cdot mm^{-2}$
5Xxx 板	结构板	150
6xxx 板	外板	250
6xxx 板	结构板	200
6xxx 板	结构板	250
7xxx 板	结构板	400
6xxx 板挤压材	大梁	280
6xxx 板挤压材	大梁	320
6xxx 板挤压材	防撞杆	200
6xxx 板挤压材	防撞杆	280
ALSILOMg 铸件	防撞杆	140

表 2 两种电动车的质量对比

	钢结构电动车	铝结构电动车	铝结构车质量减轻	
			kg	%
汽车质量(不含电池)/kg	1096	933	163	14.9
其中车身质量/kg	375	213	162	43.2
电池系统质量/kg	232	207	25	10.8
汽车总质量/kg	1328	1140	188	14.2

表 3 铝结构车的质量减轻效果

名称	钢结构电动车/kg	铝结构电动车/kg	减轻效果/%
白车身指令	272	151	44
门的质量	30.2	19.2	36
挡泥板质量	2.40	1.28	47
电枢质量	12.5	7.53	40
车门开闭件质量	24.8	14.0	43
车身总质量	375	213	43

表 4 两种电动车的温室气体排放量

温室气体排放量(CO_2)/Kg	钢结构电动车	铝结构电动车	铝结构与钢结构车CO_2排放量只差
汽车生产过程中的排放量	735	1105	370
运行中的排放量	14086	12901	−1185
电动车使用期内的减排量	−300	−980	−680
合计	14521	13026	−1495

为减少设计的复杂性，汽车外壳尽量以板材制造，而顶层及底板采用了新的设计和结构，对零部件厚度作了适当调整以适应强度要求，而车的底座由挤压型材纵梁和横梁搭建而成，有更强的抗侧冲能力，在这种设计中，车前端纵梁距

轿车中心更近，能更效地吸收碰撞能。对挡板等零部没有作结构性变化，但由于用铝材替代钢材，质量减轻 40%以上。两种电动车的质量对比见表 2。

铝结构车与钢结构车相比质量的减轻效果见表 3

实验中按照行驶里程 15×104km 对两种结构电动汽车在服务周期内的温室气体排放量作了测试，见表 4。

由表 4 的数据可见，在电动车结构中以铝代钢，既可以节约成本又可以减少约 1.5t 的温室气体 CO2 排放。除了节约制造成本外，轻型轿车在服务期间有更加可观的节能效果。按每辆车的行驶距离 15×104km 计算,若车的质量减轻 188kg，则可节约电能 2100kWh，如果电价为 0.19 欧元/kWh，一辆电动车在服务期间可节约 400 欧元。在中国则可以节约 1230 元人民币。

他们的研究结果表明，虽然铝结构电动车的制造成本比钢结构的高 1050 欧元，但铝车的质量比钢车的轻 163kg，在同样的行驶里程与条件下，节约的电能相当可观。若采用更低一些容量的电池，则电池质量可进一步下降 25kg，电池采购成本可减少 1650 欧元。

中国已把发展电动车作为节能减排的重要措施之一，为了进一步取得更大的效果，希望车的制造者尽量多采用一些铝，将钢结构件全部改为铝合金的，所需的铝材中国全部能

制造，电池在电动车中占的质量并不小，为了进一步减轻车的质量，希望研究一下采用低容量电池组的可行性。

1.4.13 提高厢式与专用运输车铝化率

表 1 3003 合金抑爆箔的主要技术性能

品种	装填密度,kg/m³	爆燃压力,N/mm²	占容积比例,%
网状抑爆料	32	0.045	1±0.2
球状抑爆料	53	0.08	4±1
未装填	0	0.01	0

表 2 网状防爆材料装填量

油罐大小	容积,L	装填量,kg
5t 油罐车	6348	203
解放 8t 油罐车	5078	165
交通 8t 油罐车	10156	330
五十铃 10t 油罐车	12696	406
20L 油桶	20	0.49
15kg 家用液化气罐	约 18	1%

专用汽车可分为通用厢式车（厢式货车）、专门运输车、冷藏车、土建车、环保车和不同用途的服务车等六大类。不同国家的分类方法也不尽相同，车的铝化率也不同，欧洲、北美与日本的铝化率高，中国专用车的铝化率总体来看甚低，北美厢式车的铝化率达 92%以上，冷藏车的铝化率几乎达到

了 100%，中国专用车的铝化仍处于起步阶段，但潜力很大。

专用车的分类并不是完全独立的，而是同一技术可以应用在不同类型的车上，如升降装置广泛应用于各类车辆上，很多翼形厢式车的后门都带有升降装置，环保车也有这类装置。专用车的铝化蕴藏着巨大的节能减排潜力。专用车的厢体多是可以用通用铝板与挤压铝材制造，其中板材的用量占75%以上；传动系统与发动机系统的许多零部件可用铸件与压铸件制造，悬挂系统还需一些锻件。

通用厢式车的铝化率应达到 80%

通用厢式车通常有 8 类：翼形的，侧开门的，带起重设备的，升降式后开门的，带自动进货装置的，自卸式的，车身可脱离式的和平板式的。翼形厢式车是厢式货车的代表，占主导地位，它的两侧门打开时形如翅膀，故得此名。翼形厢式车打开车门的方式有：手动式、液压式与电动式。两侧车门可以同时打开，也可以分别开启。有的车门打开后两侧车门超过车顶，有的车门打开后几乎与车顶平齐。叉车一般可直接开入厢式车上作业。有的厢式车内部又分为两层或更多层的，其隔板有升降式的，也有拆卸式的。美国铝业公司与约翰斯敦公司制造的长 27m 的双层乘人小轿运输车具有更长、更轻、更安全、装载量更多的特点，因为它的骨架结构完全是用高强度铝合金挤压材搭构的，用铝合金压铸件连接。

中国也有这种多层汽车运输车，但是是钢结构的，亟宜全铝化，所需的铝材中国全部可以生产。

有的翼形厢式车不仅可向上开启车门，还可以向下开启两侧车门，既能让叉车开上去作业，又能用吊车吊取货物，这种车被称为 W 翼形厢式车。虽然大部分翼形厢式车都用铝和塑制造，也有只用一些铝合金挤压型、管材杆支撑外置蓬布的，但可以像普通翼外厢式车一样，方便地将两侧车门即支架和蓬布一起向上全部打开，不需要卸下蓬布和支架，不影响装卸，不影响效率。

侧开门厢式车是一种相当普遍的车型，两侧车门通常是滑道式的，整个一侧由两块或三块门组成，可左右滑动，适合在低矮仓库和路边装卸货物。三块门开口较大，适合于装卸大的货物。在中国这种侧车门厢式车约占厢式货车总数的 65%，是城市特别是大城市市区货物运输的主要车型，理应全部铝化，可是现在还看不到全铝化的这种车。

美国克莱斯勒汽车公司经过 2 年半的潜心研发，采用 A356 合金铸造微型厢式车的前支撑横梁，比钢件的质量下降 42%，并降低了车的噪声及震动。

亟待提高铝化率的专用运输车

专用运输车是专门运输某类物资的车辆，大致可分为七类：集装箱运输车、液体运输车、散装粉粒物质运输车（自

卸车）、乘用轿车运输车、工程机械运输车、大件运输车和其他专用车。后一类车由于运输货物不同种类繁多，如：家具运输车、家畜运输车、软料运输车、运钞车、美术品运输车、精密仪器运输车、防弹装甲车等。有些车厢采用了隔热材料，装有冷暖空调器，适合于运输贵重美术品、精密仪器、花卉等。有的运钞车外观同普通的旅行车一样，它们大多是卡车改装的，但与军队用的装甲运兵车有所不同。集装箱运输车实际上是一种平板大件运输车，它的铝化较为简单，只要把承载集装箱的钢底板换成铝合金的就行，就像高铁车厢的铝合金底板，可用厚 6mm~8mm 的 5083 合金挤压型材焊成。

1. 液体运输车

实际上，液体运输车就是罐式车，通常根据运输的物资不同，确定罐的形状、构成和材料，但是最关键的是材料与装的液体不发生化学反应，不腐蚀铝。通常选用不锈钢、纯铝或铝合金，有的罐内表面需经过镀钛、涂氟化树脂等处理。

罐式车种类繁多，形状各异。有的罐容积非常大，如运输液化天然气（LNG）船上的贮罐容积达 28000L，有的罐是真空的。在确定条件下底盘质量是确定的，罐体质量就成为影响罐车质量的决定因素。为此，只要铝及铝合金对所运输物资品质无影响，就要用铝或铝合金板材焊制，以降低车的质量，达到节能减排、降耗环保的目的。

油罐车

运输航空汽油与喷气机煤油的油罐必须用铝合金焊接，因为即使用不锈钢罐，也会有极微量铁进入油内，这是不允许的。筒体截面为圆弧矩形，这是基于降低车的重心和在车辆外形尺寸范围内加大截面积的考虑，根据 GB 18564，采用 5083 合金焊接，板厚 5mm~6mm。日本三菱汽车公司开发的 16t 油罐车，除罐是用铝合金板焊接的之外，其车架（11210mm ×940mm×300mm)是用铝合金型材制造的，比钢架的轻 320kg，整车减轻 1.5t。有限元分析与试验测试表明，全铝合金油罐车有足够的刚度与强度。

防浪板、封头材料与罐体的相同，也为 5083 合金。封头壁厚等于或大于罐体板的，防浪板及加强板厚度比罐体的薄 1mm，罐体底部左右支座板厚 6mm~8mm，材料为 5A06。罐顶有护栏和走台，走台采用花纹铝板或网板，护栏由铝管制成，其高度不小于罐顶功能装置的最大高度。为了减少罐体外侧面附件，改善外观整体性，顶部油气回收管、控制气管、导线及漏水管均从贯穿罐体上下壁的管道中通过。罐体两侧下部有一根铝管，过去用的是低碳钢管，因其内壁漆层易脱落与生锈，维护工作量大且不方便，改用钢管后，这些不足之处都得以消除，同时也有一些减重效果，也不能用 PV 塑料管，因内壁易划伤、不耐磨、刚度低。铝管可用有缝焊接管，它

可与罐体内的铝合金鞍座焊成一体。油罐车所需的铝材中国都能批量生产。

中国在铝合金油罐汽车领域处于世界领先水平，2009 年 8 月中集车辆（山东）有限公司与美国铝业公司（以下简称美铝）签署了建立战略合作伙伴关系协议，为亚洲商业运输市场设计制造一款新型节能环保的铝合金油罐车。此车的自身质量比传统不锈钢车轻 30%,从而可大幅度增加有效载荷、提高燃油经济性和减少排放,在其生命周期可和 CO2 排放 90t，节能全铝油罐车项目的投资可在一年内回收。

生产这种全铝油罐车的板材由美国铝业公司渤海铝业有限公司提供，Hack 牌紧固件由美铝紧固件系统（苏州）有限公司生产，而锻造铝合金车轮为 DuraBright 牌的，来自美铝设在匈牙利的克菲姆（Kfem）锻压厂。这实际上是一辆全铝油罐车，2009 年 10 月首台原型样车在济面和北京进行了路试，取得了圆满结果，达到了设计目标。这种轻量化的、环境友好型的高档油罐车不但在中国而且在亚洲都有着相当大的市场潜力。

还必须指出的是，油品、液化天然气、其他易燃易爆液态化学品在贮存和运输过程中易发生燃烧与爆炸，影响大，危害广，给人们生活和企业生产带来很大影响。

上世纪 80 年代以来，国外在研发金属抑爆材料方面取得了巨大成就，往油品、液态化工产品等的贮存、运输罐等中加一

定量的由 3003 铝合金箔制成的呈蜂窝形的网状或球状抑爆材料，可以防止它们的燃烧与爆炸。这种抑爆网或球是用厚 0.05mm、宽 250mm 的 3003-18（或 24）合金箔制成的。3003 合金抑爆箔的主要技术性能见表 1，网状防爆材料装填量见表 2。

3003 铝箔网与球虽能有效预防罐内油品与液化气的燃烧与爆炸，在海湾战争期间美国直升机与战车油箱中都装填了防爆铝箔网，即使被枪弹击中也未起火，美国拉莫公司生产的轻型攻击型巡逻舰的 462L 油箱中装填了抑爆材料后，经受了 300 发电光弹与穿甲燃烧弹的射击实验没有发生爆炸，不过它的主要不足之处是，在油品中浸泡 1 天或更长一些时间会发生腐蚀，不但腐蚀产物对油的品质有影响，而且箔的伸长率急剧下降，在外力如震动作用下会发生断裂失去抑爆效能，因此研发新的抑爆铝材成为当务之急。可庆幸的是，清华大学材料系李建国教授在这方面做了许多工作，取得了可喜的成果，研发出性能优秀的 6xxx 系合金箔抑爆材料，遗憾的是，至今未形成批量生产能力，实乃匪夷所思。

化工产品

按照石油化工产品及其他常用物质对 1xxx 系及 5xxx 系合金的腐蚀情况，可将它们分为三类：第一类是与铝不起化学作用的物质，即与铝接触时不发生腐蚀，可以用两系合金

制造贮存容器；第二类是指那些轻微腐蚀铝的物质，如果对铝采取有效的防护措施，铝与它们接触是安全的；第三类是铝与它们接触时会发生严重的腐蚀。

介质浓度、温度、压力与运动状态对铝的腐蚀有很大影响。浓度影响说不准确，一般随浓度增加腐蚀速度加快，不过例外太多，因此，关于铝的腐蚀与介质的关系应针对具体情况讨论。腐蚀速度总是随着温度和压力的升高与升高。

大部分无水的无机盐、石油与石油产品、有机化合物不腐蚀铝、但其水溶液或含有少量水时腐蚀铝。也有的物质如乙二酸一烷基醚无水时腐蚀铝，有少量水时反而不腐蚀铝。

铝在浓硝酸和醋酸中具有良好的化学稳定性，但 100%的醋酸及沸腾的 0.25%~95%醋酸腐蚀铝。铝在稀硫酸和发烟硫酸中稳定，在中等和高浓度的硫酸中则不稳定，铝在硫酸溶液中稳定。

铝材在受力时或经弯曲、冲压及焊接后，都会在工件内产生一定的内应力，会加速铝的腐蚀，因此应采取消除残余应力的措施，铝材表面状态对其腐蚀也有影响。如表面上存在划痕、裂纹、孔穴等缺陷，易形成浓差电池，加速腐蚀。可用高纯铝制造浓硝酸（98%）、醋酸、福尔马林贮藏与罐车，工业纯铝制造浓硝酸、冰醋酸、醋酸、尿液贮罐与罐车，可用 552 合金制造乙二醇贮罐与罐车。

2. 冷藏车与液化气运输车

铝与钢在性能与温度关系方面的最大不同点在于钢有低温脆性，而铝及铝合金则没有，当温度降低时，铝及铝合金在强度性能增加的同时，塑性与韧性也随着温度的降低而上升，因此铝合金成为制造低温装备与设施的良好材料。运输液化天然气的罐车与贮存液化天然气的大罐可铝合金 5083-0 板材焊接。

考格尔公司生产的半冷藏车在使用了铝合金后，车的自身质量下降 480kg。用铝合金板材、型材及其他材料制造冷藏运输车的另一优点是，铝是一种洁净、对人体无害、对环境友好的金属，易清洗，不吸收和散发气体。冷藏车的四壁为三层复合材料，上下层为铝合金薄板、中间为保温材料，具有很强的绝热保温性能。

铸造铝合金

毫无疑问，在可预见的时期内，铝在汽车中的用量会逐年有所上升。减轻车的自身质量当然扩大铝应用主要目的之一，为了大幅度减轻车的质量，人们正急于研究将车体质量中所占比例较大的车身（约 30%）、发动机（约 18%）、转动系统（约 15%）、行走系统（约 16%）、车轮（约 5%）等钢铁零件用铝合金材料替代。车轮的铝化已基本完成，发动机的铝化也差不多了。

在汽车用的铝合金中，压轴及其他铸造合金约占 80%，

加工铝材仅占 20%多，随着车身铝板带用量的上升，铝材占的比例会逐年有所上升，但上升幅度不会很大。在汽车铝铸造产品用的合金中，压铸件的产量约占 70%，所以压铸铝合金在汽车用铝中占到 55%，当然在各国用的铝中此比例也不会一样，但都在 54%~70%。

在全世界当前消费的再生铝合金约 80%，用于生产各种压铸件及铸件，主要用于生产汽车、摩托车零件，它们要求合金具有良好的铸造性能，所以再生铝及铝合金多用于生产 YL1XX 系及 ZLXXX 合金（Ai-Si 系合金）。

压铸铝合金用的最多的是 YL101、YL102、YL104、YL112、YL113、YL117 与 YL302 合金；在铸造铝合金中，汽车工业用的多为：ZL101、ZL101A、ZL104、ZL105、ZL105A、ZL106、ZL107、ZL108、ZL109、ZL110、ZL111、ZL114A、ZL115、ZL116 合金等。

基础研究是关键

推广全铝汽车与加大铝在汽车应用，铝加工企业与汽车制造企业宜加大合作共同努力做好这项工作外，还必须加大科技投入，加强基础研究。我们都已看到跨国汽车公司的产品更多，科技含量也更高，产品谱系也更健全。其实这仅是它们作为跨国巨头的显性特征，而它们在基础研究领域持续大额的投入是支撑其显性特征的根基。基础研究往往是最基

层、最核心、同时也是最花成本的，并且短期内无法看到效益的行为。但这是形成核心竞争力的基础，我们必须这么做，这一步是必须迈出的。

1.4.14 加大科技研发 发展汽车铝板

车型	挤压型材/%	板材/%	压铸件及铸
奥迪A2	18	60	22
本田NSX	12	88	8
本田Insight	30	57	13

合金	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
6111	0.6-1.2	1	0.50-0.9	0.10-0.45	0.50-1.0
6016	1.0-1.5	0.5	0.2	0.2	0.25-0.6
6022	0.8-1.5	0.05-0.20	0.01-0.11	0.02-0.10	0.45-0.7

在工信部组织制订的《新材料产业“十二五”发展规划》中提出到 2015 年，关键新合金品种要取得重大突破，形成高端铝合金材料 300kt，基本满足大飞机、轨道交通、节能与新能源汽车等的需求。其主要内容是：组织开发汽车用 6XXX 系铝合金板材，实现厚度 0.7~2.0mm，宽幅 1600~2300mm 汽车铝合金板的产业化，即实现 6016、6022、6011 合金汽车板的产业化生产与精深加工。

汽车铝化率会逐年提升

中国载人车用铝比国外低 20kg/辆

1888 年，铝开始商业化生产，以其密度小、资源丰裕、色泽洁白、对环境友好、对人体无害、可回收性高、抗腐蚀性强、传导性能好、无磁性、易加工与成形等诸多优点在国民经济的各个部门获得了广泛的应用，特别是在交通运输装备方面的应用，2011 年全世界的原铝产量已突破 43000kt，成为仅次于钢铁的第二大金属，其中的 34%即约 14620kt 用于交通运输装备制造。

1899 年首款铝合金板金车身小型跑车在柏林国际车展亮相，开铝合金板材在汽车中应用的先河；1910 年首台铝制公共汽车在巴黎开始营运，自此以后铝板在乘用车中的应用越来越多。20 世纪 50 年代油罐车与拖车、房车等开始用铝板制造，今天北美厢式货车铝化率已超过 92%，欧洲大部分罐车、拖车等已采用铝合金制造，每辆车平均减车 800kg，全铝的轿车与公共汽车（Audi A8、TT 跑车与美洲虎 XJ 等）也早已面世。

在可预见的时期内（2030 年），铝是提高运输效率、降低运输成本、节约能源、减少温室气体排放、发展循环经济、维护道路安全最可靠的金属结构材料。铝能以各种形式如板、箔、管、棒、型、线、锻件、粉、铸件、压铸件等应用于车

辆制造。全铝载人车车身是由挤压材框架与蒙以铝板的壳体组成。几种轿车车身的铝材用量见下表，小轿车用板材较多，而公共汽车的型材用量较多。

汽车板材技术门槛高

与领先水平或许相差 20 年

在当今使用的铝及铝合金板材中可作为高端或高精产品的有：航空航天板、汽车板、CTP 基板、罐体板。至 1012 年，中国生产的 CTP 基板与罐体板已跻身世界先进行列，不但可满足国内需求，而且有出口，参与国际市场角逐；但前两种产品还与世界领先水平有较差距，航空航天板可能相差 30 年，而汽车板或许是 20 年。因此，工信部在《新材料产业“十二五”发展规划》中将这两种材料板材列为关键产品，并提出要产业化生产精深加工产品。所谓精深加工产品是，铝加工企业向用户提供不再是初级的平轧产品（板、带、箔），而是符合用户要求的经过精细加工的可上装配线的或稍作处理后即上装配线的产品。

2011 年全球汽车铝合金国营企业人车车身板(不含货车、拖车、半挂车、厢式车、特种车等用的）的需求量约 250kt，中国还不能生产，其中 70%左右为诺威力（Nolis）公司、美国铝业公司（Alcoa）、海德鲁（Hydro）铝业公司生产，其余的为日本的一些公司及其他公司生产。可生产的国家为美

国、德国、日本、法国、韩国等。

中国东北轻合金加工厂在上世纪 80 年代中期就开始研发载人车的车门板生产；西南铝业（集团）有限责任公司在生产车身板方面作了许多开拓性的工作，并于 2009 年 12 月投产了国内首条车身板生产线；徐洲财铝热传输有限公司会同重庆汽车研究院、中国矿业大学等在研发汽车 6XXX 系覆盖件板材方面也取得了长足进展。但是这些成就仅是第一步，生产的板材是素材，距精细加工的钣金件的产业化生产，与进而拥有一批有中国特色的有自主知识产权的汽车板合金还有一段相当长的路要走。

中国汽车车身板之所以还不能产业化生产，有装备方面的原因，也有技术与管理方面的原因，但更主要的是研发资金投入不够、研发力量不够、技术水平有待提高、研发力量还不够集中，等等。如今，生产汽车平轧产品的装备已解决，拥有全球先进的铸锭热轧装备与精整设备，但还缺乏或不够的装备有：精密裁切线，冲制、弯折、摩擦搅拌焊接、数控加工、特种检测手段等，无法向用户提供精深加工钣金件。

汽车板材合金性能要求多与品种少两难舍

乘人车车身铝合金板经过几十年的发展已形成一个庞大的家族，有标准的合金，也有非标准的合金，大约有 50 种，分属于 2XXX、5XXX、6XXX、7XXX 系，各有各的性能，用于制

造不同的钣金件。不同的国家在用合金方面各有侧重，例如日本的汽车工业用 5XXX 系的多一些，美国则多用 2XXX 系及 7XXX 系合金，欧洲对 6XXX 系合金更感兴趣。中国当前仅是一些外资企业的个别车型用了铝合金薄板制造车身钣金件，所用的板材全是进口的，一些非外资企业也用了一些铝板，但量少，没有规模，都是在仿照外国的合金。在《新材料产业“十二五”发展规划》中明确提出汽车铝板为 2XXX 系的 6016、6062、6111 合金，为中国汽车铝板发展指明了方向，可以集中力量研发这类合金，最后形成有中国特色的汽车合金体系。它们的化学成分如下（主要合金元素的%质量）：

以 6XXX 系合金作为汽车板的主流无疑是正确的，它们与应用最大的建筑铝材合金同属一个系，对于废料回收与发展循环经济非常有利。国外也在研发所谓的单一合金，试图用一二个合金取代现用的十几二十个合金，但有一定的难度，或甚至可认为难度极大，成功的可能性不大。

中国除研发上述的 3 个合金,还应研究 6009 合金与 6010 合金，可用它们冲制内外层壁板，国外在二十多年前就用它们制造钣金件，效果不错，虽然它们的强度比 5182-0 及 2036-74 合金差一些，但有很好的成形性能。

汽车铝合金板的厚度一般为 0.8~1.6㎜，最大宽度 2300㎜。对其性能要求是：良好的成形性，有低的屈强比和高的成形极限，表面平整性强，成形钣金件表面不出现罗平

线（Roping Line）即滑移线；良好的可焊性；优良的烘烤硬化性。

汽车铝板的发展趋势：尽可能地减少合金种类；研发新的合金与复合板材；向汽车企业提供精深加工的钣金件；铝合金企业的工程师参与汽车设计，帮助他们选用铝材；必须考虑汽车报废后铝的回收率。

1.4.15 全球汽车车身板项目建设浪潮迭起

在铝板带生产中,ABS 是技术门槛最高的大宗高精产品，是继铝箔、罐体料之后第三种单品种产量上规模的铝平轧产品，预计到 2026 年全世界的产量有望超过 570 万吨。2014 年全世界有 19 家企业可以生产 ABS，其中中国 3 家，总产能 30.5 万吨/年；国外 16 家，总产能 164 万吨/年。预测中国 2016 年的产能可达 85 万吨/年,大大超过美国(41 万吨/年)，跃居世界第一。2020 年全世界生产 ABS 的企业有可能达到 27 家，总生产能力 270 万吨/年，其中中国 8 家，总产能约 95 万吨/年；国外 17 家，总产能 176 万吨/年。汽车在全社会的节能减排进程中肩负重任，大力推进铝质 ABS，是汽车制造业提高节能减排效益的最优选择之一。中国的汽车零件，特别是乘用车车身覆盖件的铝化率还相当低，与工业发达国家的相比，差距巨大。

1994 年的世界首款全铝 Audi A8 轿车
(奥迪公司与美国铝业公司联手打造)

汽车车身薄板(auto body sheet, ABS)可简称 ABS，是冲制乘用车车身覆盖件的高端铝合金薄板。汽车用板可分为两类：ABS 板是专门的一类；另一类是通用板，指 ABS 之外的其它用于汽车内部或外部的板带材，有薄板也有厚板，对其性能要求比 ABS 低一些。

一直以来，钢板都是汽车制造业最主要的原材料，2013 年全世界汽车制造业钢板带消费量达到 2050 万吨。铝合金与钢相比具有很多优点，诸如比强度高、抗蚀性强、可回收率高、资源丰富，但是价格相对较高。上世纪 40 年代中期，铝合金板就开始用于生产乘用车车身覆盖件，但之后一直进展不大，直到新世纪到来才取得较大进展。2012 年开始，欧盟的 ABS 消费量进入高增长期,2000 年的消费量只有约 6 万吨，2012 年便跃升至 18.2 万吨，2016 年预计可达 78 万吨。

2000 年全世界 ABS 的生产能力只不过 12 万吨/年，2008

年上升到 42 万吨/年，2016 年可飙升到近 255 万吨/年。这轮 ABS 项目建设浪潮始于 2008 年的欧洲，来势之猛，波及范围之广，在铝板带加工史上是前所未有的，超过了上世纪 60 年代中期的罐料项目。

2013 年中国还未批量为世界 12 个大汽车制造公司提供 ABS，但现在正在建设一批世界级的 ABS 生产企业，有民营的、有外商独资的、有国有的，2016 年的总生产能力可超过 94.5 万吨，成为全球最大的 ABS 生产国。

严格的环保法规倒逼汽车轻量化

地球上的温室气体越积越多，大气层的温度在缓慢地爬升，地球的生存环境受到严峻挑战。造成环境恶化的因素固然很多，但是汽车尾气排放却是其主要因素之一。为此，自 20 世纪末以后，随着全球变暖现象日益突出，各国政府与组织频频出招，欧盟汽车油耗标准和 CO2 排放标准要求越来越严格，要求在 2020 年在欧盟成员国销售的乘用车应达到 90g CO2/km，2030 年则应进一步降到 60g CO2/km，2016 年的油耗不得超过 4.5L/(100km)。乘用车在城市标准马路上行驶时，车的自身质量消耗燃油占 84%左右，乘坐人员消耗的燃油仅约占 15%。

被称为“车轮上的国家”美国已经制定了联邦法案，规定到 2016 年，美国小轿车油耗标准须达到 7.6L/(100km)，

到 2025 年进一步降到 4.5L/(100km)；日本规定到 2015 年法规油耗标准达到 5.5L/(100km)，从 2010 年到 2015 年车辆 CO2 排放量须减少 29%。

乘用车每减重 100kg，油耗可下降 0.3~0.7L/(100km)。

据有关资料称，2005~2010 年美国石油消费总量减少了 1.1×105kt，日本石油消费总量几乎没有变化，而中国的石油消费总量同期增加了 1×105kt，全国约 4 秒钟就消耗 300 桶石油。当然，这种比较对比不完全合理，因为它们是发达国家，后工业化国家，而我们是发展中国家，正在进行工业化与城镇化，能耗强度必然较大。当前，中国 85%的汽油被各种汽车消耗掉，75%的城市有害气体是汽车排放的。2011 年中国石油对外依存度已升到 56.5%，中国面临的资源形势异常严峻。

由此可见，汽车的轻量化在节能减排中占有多么重要的地位。汽车轻量化的措施很多，有设计方面的，有制造加工方面的，有用材方面的。用密度低的轻质材料取代钢铁是最现实的选择，可用轻质材料有铝、镁、钛、塑料、复合材料，但在当前与今后一段相当长的时间内，无论哪方面来看，铝及铝基复合材料都是最可取的。

推广铝在汽车中的应用，提高汽车零部件的铝化率，除了加大宣传、提高认识、改变设计理念外，还必须有强制性的措施加以推动，如立法，还要有强硬的执法与监督机构，

以免流于形式。

全世界这一轮 ABS 项目改建、扩建与新建热潮可于 2016 年基本结束，形成总生产能力 250 万吨/年左右，可以满足汽车制造业 2025 年以前对 ABS 的需求。其中，中国的生产能力最大，为 94.5 万吨/年，生产企业 8 家（见表 1）；第二是美国，59 万吨/年，生产企业 3 家；第三是德国，41 万吨/年，生产企业 4 家；第四是日本，20 万吨/年，生产企业 4 家；其他 6 国的总生产能力 56 万吨/年，分别是：韩国 12 万吨/年、沙特阿拉伯 12 万吨/年、瑞士 8 万吨/年、法国 10 万吨/年、比利时 8 万吨/年、奥地利 6 万吨/年（见表 2）。

通常，铝加工厂 ABS 生产线建成后需要经过一段较长时间的认证，才能向汽车制造企业批量提供产品。认证时间短则 1~2 年，长则 3~4 年，与关键航空航天材料的认证时间基本相当。

表 1　中国 ABS 项目的概况　　产能单位：万吨

企业	地址	投产年度	生产能力	
西南铝业(集团)有限责任公司	重庆市西彭	2009	3.5	国有
诺贝丽斯(中国)铝市品有限公司	江苏省常州市	2014	12	外商
神钢汽车铝材(天津)有限公司	天津市	2016	10	外商
南山集团	山东省龙口市	2016	12	民营
天津忠旺铝业有限公司	天津市	2016	30	民营
同人铝业有公司	河南省三门峡市	2015	2	国有
中孚实业股份有限公司	河南省伊川市	2014	15	中外
爱励国际(镇江)铝业有限公司	江苏省镇江市	2018	10	外商
生产能力总计			94.5	

表 2 国外 ABS 生产企业的概况 产能单位：万吨/年

国家	企业	地址	投产年度	生产能力	隶属公司
美国	达文波特轧制厂	艾奥瓦州	2013	20	美国铝业公司
	田纳西轧制厂	田纳西州美铝镇	2015	15	美国铝业公司
	奥斯威戈轧制厂	纽约州	2013	24	诺贝丽斯铝业公司
	总计			59	
德国	纳切斯特德铝业公司	纳切斯特德市	2009	12	诺贝丽斯铝业公司
	格雷文布洛伊轧制厂	格雷文布洛伊市	2012	20	海德鲁铝业公司
	哥廷根轧制厂	哥廷根市	2015	4	诺贝丽斯铝业公司
	辛根铝业公司	辛根市	2012	5	肯联铝业公司
	总计			41	
奥地利	有色金属加工有限公司	兰绍芬市	2010	6	有色金属加工公司
比利时	杜菲尔轧制厂	杜菲尔市	2009	8	爱励铝业公司
法国	纽布利萨克铝业公司	纽布利萨克市	2012	10	肯联铝业公司
瑞士	谢尔轧制厂	谢尔市	2011	8	诺贝丽斯铝业公司
沙特	沙特-美铝铝业公司	阿尔哈尔角	2016	12	沙特矿业公司、美国铝业公司
韩国	诺贝丽斯-大韩铝业公司	蔚山	2012	12	诺贝丽斯铝业公司
日本	神户钢铁公司铸锻部	真冈	1998	10	神户钢铁公司
	古河-斯凯铝业公司	福井	2000	5	古河铝业公司
	住友轻金属公司	名古屋	1999	3	住友集团
	日本轻金属公司	-	2001	2	日本轻金属公司
	总计			20	
国外产能总计				176	

注：-指最近的改扩建项目完工年度

ABS 市场预测

全球汽车制造业在减缓地球温室效应与节能减排呼声及

法规的倒逼之下，纷纷提高车身的铝化率，而在当前的技术条件下，更多采用铝合金 ABS 是制造全铝车的最可取的有效措施。为了满足汽车制造业对 ABS 的需求，全世界铝加工业掀起了前所未有的改、扩、新建 ABS 项目的浪潮：工业发达国家全部为改、扩建，而中国全部为新建项目。这些建设是根据市场需求作出的，当然现有的生产能力看来可以满足 2025 年以前的市场需求，这是由于 ABS 生产技术决定的，因为它是一种性能要求极高的顶尖产品，必须大规模自动化生产，一条生产线的设计生产能力应≥5 万吨/年，不能建小的生产线。

2011 年全球 ABS 的总消费量约 40 万吨，其中欧洲约 20 万吨，美国约 10 万吨，日本约 5 万吨，中国约 2.8 万吨(全部进口)，其它国家 2.2 万吨左右。

诺贝丽斯铝业公司预测

欧洲 2016 年的需求量可达 78 万吨，4 年内几乎翻了 1 番；全世界的需求量将从 2011 年的 40 万吨上升到 2016 年的 120 万吨，2020 年的 180 万吨，2025 年的 500 万吨，为 2016 年产能力的 1.85 倍，年复合增长率近 20%。

美国铝业公司预测

美国铝业公司全球汽车营销总监斯克普斯(R.Scheps)认为，2015 年该公司从汽车铝板(主要用于制造汽车车身)获得的营业收入预计将从 2012 年的 1.6 亿美元飙升至 5.8 亿美元。

美铝公司预计，到2015年的北美地区用于汽车车身的铝材料消耗量预计将达到42万吨，在目前水平的基础上翻两番，而用于汽车其它部件的铝材消耗量预计也将增长15%，达到266万吨。铝已经成功地渗透进了汽车市场，在发动机、热交换器、变速箱与车轮等零部件中都得到了广泛应用，但在车门、发动机罩及后备箱盖中的应用仍然较少，只有奥迪、捷豹路虎等少数高档汽车制造商采用了铝作为汽车车门材料。

美国铝业公司还称，据汽车制造商提供的消息，到2025年汽车用铝需求将翻倍，铝已经成为当今汽车制造中的第二大材料。2015年北美地区生产的汽车车身铝板含量预计将翻3倍，与2012年相比到2025年将翻9倍。

欧洲铝业协会分析

根据欧洲铝业协会(EAA)的数据，1990年欧洲小型轿车的用铝量仅50kg/辆，2012年达到140kg/辆，2020年可达到180kg/辆，因为它们的轻量化进程在有力地向前推进。为了满足日益严格的环保指标要求，乘用车轻量化零件的比例必须由目前的30%上升到2030年的70%，同时这种潜力主要来自钣金件与锻件的增加。

日本铝联合铝业公司预测

日本铝联合铝业公司(UACJ，United Aluminum Co. of Japan)于2014年1月23日称将与肯联铝业(欧洲)公司组建一个ABS生产与销售公司，公司设在美国，肯联公司占51%

股份，日本联合铝业占 49%，精整-热处理-表面处理连续生产线的生产能力即 ABS 生产能力 10 万吨/年，投资 1.5 亿美元。美国三箭铝业公司(Tri-Arrows Aluminum Inc.,日本联合铝业公司设在美国的全资子公司)将参与此项目的有关工作。据日本联合铝业公司的预测，2020 年美国市场对 ABS 的需求可达 100 万吨，而 2012 年的消费量不到 10 万吨。

力拓加铝预测

2014 年 2 月，力拓加铝(Rio Tinto Alcan)与加拿大国家研究委员会(National Research Council of Canada,NRC)签署了 5 年的合作协议，共同探索铝在轻型车辆及火车上的应用。Rio Tinto Alcan 发言人 C.加诺(Claudine Gagnon)称，预计未来几年汽车行业对铝的需求会大有增长，因此公司正在努力探索新方法生产铝产品，以帮助交通行业制造更轻的车辆。双方将合作铝挤压研究项目以提高铝材盈利能力，扩大生产力满足行业需求。近年来，轻型货车及客车扩大了对轻量级材料的应用，主要原因是汽车生产商希望提高燃油功率。即将出台的更为严格的车辆尾气排放法规促使大型汽车生产商倾向于选择铝材以降低车身质量从而减少温室气体排放。加诺表示，过去几年也有不少汽车生产商在生产过程中增加了铝的用量。可以看出这是一个可持续选择，为此他们也鼓励汽车生产商使用更多的铝材。

2013 年，全世界用于制造乘用车车身的薄钢板约 2050

万吨，如果 2025 年的铝化率能达到 80%，约需 500 万吨铝合金 ABS，而到 2016 年全球 ABS 生产能力为 270 万吨，生产能力肯定有富余，这是正常的，一是因为生产能力应跑在市场需求前面；二是因为 ABS 项目建设必须具有一定规模。但是与 2025 年预测需求量相比又显得不足，到时还需扩大规模。

ABS 合金的发展

乘用车车身铝合金板经过几十年的发展已经形成一个庞大的家族，有标准的合金，也有非标准的合金，大约有 50 种，分属于 2×××、5×××、6×××、7×××系，各有各的性能，用于制造不同的钣金件。不同的国家在用材方面各有侧重，例如日本的汽车工业用 5×××系的多一些，美国则多用 2×××系及 7×××系合金，欧洲对 6×××系合金更感兴趣。中国当前仅有一家外资企业的个别车型用了铝合金薄板制造车钣金件，所用的板材全是进口的，一些非外资企业也用了一些铝板，但量少，没有规模，都是在仿照外国的合金。在《新材料产业“十二五”发展规划》中明确提出汽车铝板为 6×××系的 6016、6022、6111 合金，为中国汽车铝板发展指明了方向，可以集中力量研发这类合金，最后形成中国特色的汽车铝合金体系。

汽车板 6×××系铝合金与应用最广的建筑铝材合金同属一个系，对于废料回收与发展循环经济非常有利。国外也

在研发所谓的单一合金，但试图用一两个合金取代现用的十几、二十个合金难度很大。

中国除研发上述的 3 个铝合金外，还应研究 6009、6010 铝合金，可用它们冲击内外层壁板，国外在 20 多年前就用它们制造钣金件，效果较好，虽然它们的强度比 5182-O 及 2036-T4 合金低一些，但有很好的成形性能。

汽车铝合金板的厚度一般为 0.8㎜~1.6㎜，最大宽度 2300㎜。对其性能要求是：良好的成形性，有低的屈强比和高的成形极限；表面平整性好，成形钣金件表面不出现罗平线(Roping Line)即滑移线；良好的可焊性；优良的烘烤硬化性。

汽车铝板的发展趋势：尽可能地减少合金种类；研发新的合金与复合板材；向汽车企业提供精深加工的钣金件；铝加工企业的材料工程师参与汽车设计，帮助他们选用铝材；必须考虑汽车报废后铝的回收率。

一辆全铝车身的小轿车有 20 余块钣金件，它们是用多种合金冲制成形的，有 5×××系合金、2×××系合金与 7×××系合金等，由于合金品种多，给报废汽车废铝的回收与再生带来了不少麻烦，降低了废料经济效益，因此尽量减少合金品种或甚至用一种合金制造汽车的各种钣金件成为人们的梦想，这就是所谓的单一合金(mono-alloy)。单一合金是

不太可能在 2020 年以前研制出来的，只能采取循序渐进方式，逐步减少合金数量。

ABS 产业设想

● 汽车工业是国民经济的支柱产业，中国是世界汽车产销大国，在 2020 年以前中国汽车产销量的年平均增长率不会低于 8.5%，2020 年的产销量可分别突破 3500 万辆，汽车用铝量的年平均增长率可达 10.5%左右。除建筑工业外，汽车产业将是中国用铝量最大的部门。

● 汽车铝板带市场容量大，增长速度快，在未来 30 年内还不可能会出现一种结构与功能性能兼备的材料对铝材构成威胁，取代铝在汽车中的地位。在 2025 年以前，全世界 ABS 需求的复合增长率可达 25%，迄今还有没有一种铝材的需求能如此持续高速增长。

● 生产 ABS 的技术难度大，必须有：高的力学性能，良好的可成形性，高的抗蚀性，良好的可焊性，特别是应能长期保持性能的稳定性。

● 中国在 ABS 铝合金研发与生产技术方面与工业发达国家的相比存在着较大差距，必须奋起直追，否则差距会越来越大。

● 中国现有 7 个在建的 ABS 项目，总生产能力 94.5 万吨/年，是世界最大的。需指出的是，我们没有专业 ABS 建设

生产与管理经验，不论是设计还是生产经营都如此。生产 ABS 的主要设备及工艺与生产其他高精板带(航空航天、罐料、PS/CTP 版基)相同，如熔炼、铸造、热轧、冷轧等完全等同，且 ABS 最大宽度为 2200mm，同时 95%以上 ABS 的宽度小于 2000mm，所以，有 2400mm 或 2450mm 的热、冷轧机就足够；但精整与热处理设备及工艺则有很大差异，投资也大，需要有：精密裁剪线、气垫炉热处理生产线、批量式控制气氛或真空热处理炉或感应加热自动热处理生产线、表面处理生产线、润滑剂涂覆线、拉弯或纯拉伸矫直线等。如果按《新材料产业“十二五”发展规划》中提出的到 2015 年能产业化生产与精深加工汽车车身钣金件，则需要一些精深加工的数控设备。建一个生产能力 12 万~20 万吨/年的汽车薄板企业，投资需要 30 亿~40 亿元(含上游产品的)，如仅建下游设施，也需要 12 亿~18 亿元。

● 中国 ABS 铝板带批量产业化生产才刚开始，应加大科技投入，注重研发与创新，争取早日成为有本国特色的 ABS 合金体系与工艺系统。

● 建立汽车铝材专业研发机构，为汽车铝材发展提供强大技术支撑。

● 铝加工企业进入了向汽车制造厂提供精深加工铝钣金件的时代，而且供应量会逐年有所增加。

● 铝加工企业的材料工程师应参与汽车厂铝制零部件

设计与加工工艺的制订，这有利于铝材的推广应用，宜大力倡导与积极参与。

● 在项目建设之前，除对市场作深入的调研外，最好到欧洲有关企业调研学习。

● 神户钢铁公司铜铝事业部、诺贝丽斯铝业公司、爱励铝业国际等国外企业正在中国建独资 ABS 项目，将有助于中国早日成为 ABS 生产大国与强国。

● ABS 生产能力必须有相当大的富余，富余系数(设计生产能力/实际产量)可达 1.5 或更大一些。中国从 2015 年起 ABS 生产能力富余系数就将年年攀升，2014 年为 3.00， 2016 年为 9.60，此后下降，2018 年为 6.4， 2000 年为 3.8， 2025 年下降到 1.02。国内消费量是按 30%的复合增长率预测的，比国外对欧美消费量的预测增长率高 5 个百分点左右，如果把出口量也匡算在内，则富余系数会有所下降。投资者可在 2020 年考虑增、新建 ABS 项目。

1.4.16 谁主汽车铝材沉浮组建中心迫在眉睫

作者：王祝堂

商业化生产于汽车的诞生在同一年,从此,它们就结下了不解之缘,难舍难分,互相促进,汽车工业的发展促进了铝工业的发展,反之亦然,1886 年美国大学生霍尔

(charlesMartinHall)与法国大学生埃罗(Paul-LouisHeroalt)几乎同时在大洋彼岸独立发明铝的熔盐电解法提取工艺,至今全球生产的铝都是按他们的原理制备的。1886 年,卡尔·本茨发明世界第一辆不用马拉的三轮车,拉开了当今文明世界的序幕;1889 年世界博览会展出德国奔驰公司制造的世界首辆汽油发动的汽车,宣告汽车时代的到来。

1897 年克拉克(Clark)三轮车和 1898 年问世的德·丁昂·布顿(DeDionBoutou)汽车的曲柄箱是用铝制的,开始了铝在汽车中应用的先河。1901 年第二届纽约汽车展上出现了一批铝制汽车零配件,有的汽车的车身也用铝代替了木材。1903 年戈登·贝内思·纳皮尔(GordonBenethNapier)汽车采用铝汽车柱。1904 年问世的兰彻斯特车(Lancheester)的后轴架由铝合金铸造。

1923 年英国著名的汽车设计师波美罗(L.H.Pormeroy)设计的一款汽车用了相当多的铝合金零部件,其自身质量仅相当于标准汽车的 2/3。上世纪 30 年代由于钢材价格比铝低得多,能源充裕,铝在汽车中的应用进程放缓,第二次世界大战期间,铝是一种军需战略物资,铝在民用方面的应用受到了限制,同时由于飞机制造及其他军工产品需求的增加,铝工业得到迅猛发展,特别是美国铝工业的发展尤为突出,这时铝的 80%以上都用于制造飞机及其他军工产品。二战后,铝在汽车

中的应用又开始受到重视,同时铝由买方市场走上了卖方市场,铝业公司开始寻求铝的应用新领域,极力扩大铝的应用范围,铝在汽车中的应用领域越来越广。20 世纪 70 年代汽车开始使用铝保险杠、进气管、发动机头、发动机缸体、散热器、传动系统零件、轮毂等。

20 世纪 60 年代每辆汽车的平均用铝量为 27.2kg,到 90 年代中期的平均含量上升到 113kg,约占汽车自身质量的 8%。2005 年美国轿车每使用 0.454kg 铝制零件,车自身质量可下降 1.021kg,目前美国汽车工业的用铝量已占全部铝消费的 11.5%以上。21 世纪初,德国大众推出全铝的奥迪 A8 汽车,它是铝含量达 550kg/辆;美国福特汽车公司的 AIV 车的车身也是全铝的。所谓全铝轿车是指在目前的设计、制造技术条件下,可用铝合金制造的零部件全部铝化,而汽车的价格是合理的,可以承受的,可进行商业化批量生产,各项性能全面提升。由于真空钎焊技术的发展,1986 年美国生产的轿车有一半装上了铝散热器,2008 年的铝化率已超过 80%,因为铝的价格比铜低,而散热器的质量又比铜轻 50%。汽车轻量化是发展方向尽量多用铝是最佳措施

汽车、轨道车辆、飞机、船舶是当代社会人类赖以生产和发展的四大交通运输工具,它们一方面为人类文明与社会

进步做出了巨大贡献,另一方面又排放了大量温室气体,制造污染、破坏环境。因此汽车工业的发展面临着三大问题,即节约能源、保护环境与提高安全、舒适、美观性。这些性能的改善除了在设计方面加以改进外,最主要的是采用轻质的新材料取代钢材、铸铁、重有色金属制造零部件,加速汽车轻量化进程,因为在设计方面的减重潜力已不居首位,而可用的新材料有铝、镁、钛、高强度钢、复合材料等。

实践证明,尽量多地采用铝是解决汽车轻量化最有效的最佳途径,铝有明显的减重效果,显著的节能效果,大幅度减少温室气体与其他有害气体的排放,能提高车的平衡性、乘坐舒适性和安全性。采用镁制零部件的节能减排效果虽然比铝的大,但铝的综合性能与性价比仍比镁优越,所以在汽车制造中镁在可预见的时期内还不能较多的替代铝。

美国曾一次又一次的颁布汽车的能效指标,2010 年初美国能源部制订了小轿车新的能效标准,要求其燃油效率达到 6.9L/100km(在标准公路上行驶)。小轿车在标准公路上行驶时,车自身质量消耗能源占 85%左右,这充分说明汽车轻量化的重要性与迫切性,也说明铝在汽车制造中有着巨大的市场潜力。(

汽车产量持续高速攀升组建铝材中心迫在眉睫

铝在北美生产的轿车与卡车中的应用以前所未有的速度

增加,2009 年汽车的轻金属用量占其自身质量的 8.6%,2020 年轿车与轻型卡车的轻金属用量占其自身质量或能达到 11%。2009 年轻型汽车的平均自身质量为 1448kg,其中铝合金占 7.8%,到 2020 年全世界汽车的平均用铝量可达 136kg/辆。

全世界的轻型汽车的铝含量在不断地攀升,特别是欧洲与日本,据杜克公司(Duker)估计,有 67 款汽车(欧洲 49 款、日本 18 款)的轻合金含量为 182kg/辆,中国汽车的用铝量也在快速上升,杜克公司预计 2020 年中国汽车工业的用铝量将超过日本。2008 年日本汽车工业用铝量约 1700kt,2009 年约为 1760kt。据笔者预测,2015 年日本汽车的铝消费量可达 1900kt,同年中国汽车工业的用铝量约在 2500kt 左右(含出口铝合金零部件),远超过日本。

通常,汽车工业用铝的结构因国家不同而不同,铸件及压铸件占 80%,其中压铸件占 71.5%;轧制材占 9.7%;挤压材占 9.2%;锻件占 1.1%。也就是说,铸造产品占 80%,也用加工铝材制造的零部件只不过约占 20%。不过随着用铝量的增加,加工材的用量的增长速度会稍大于铸造合金。

汽车工业是中国的支柱产业之一,正在高速持续发展,2000 年汽车总产量 207 万辆,2009 年约 1371.9 万辆,这 9 年的年平均增长率为 24%,成为世界产销第一大国,自此以后,第一大国的局面是不可逆转的,2010 年的产量可达 1600 万

辆,2015 年可达 3300 万辆。汽车用铝量中国尚无权威机构作过统计,据笔者估计,2009 年的用铝量约为 1600kt。含出口零部件的用铝量,如轮毂等,2009 年仅轮毂的用铝量约为 600kt,其中出口约 310kt;今后一段相当长的时间内,中国汽车用铝量的年平均增长率将大于汽车本身的增长率 1.5 个百分点,因为单台车铝合金含量增长率更快一些,2010 年汽车铝含量会超过 4500kt,这是指汽车的净用铝量,如果按采购铝材及生产的铸件、压铸件的毛料计算,用铝量将超过 5300kt。

在中国汽车 2009 年消费的 1600kt 铝中,加工铝材的用量约 320kt;2015 年加工汽车铝材用铝约 970kt,其中平板带材约 495.6kt、挤压材 463.2kt、锻件 11.2kt,不但量大,而且是高品质的高技术的,属铝材中的“精英”,既要求有良好的冶金组织与优秀的综合性能,又必须达到极为严格的尺寸偏差,适合于高速自动化线的生产和组装。

我们知道,凡是世界上大的铝业公司不管是跨国的非跨国的,只要本国的汽车产量大,都会把汽车铝材视为高技术高附加值产品,成立了汽车铝材部或组建了汽车铝材中心,如美国铝业公司、加拿大铝业公司、诺威力铝业公司、海德鲁铝业公司、萨帕铝业公司,以及日本的神户钢铁公司、古河铝业公司与日本轻金属公司等。负责汽车加工铝材的研究、开发、生产与技术服务。

中国已凌世界汽车产销量绝顶,很快也会成为全球汽车铝材用量大国,可是中国至今尚未有跻身世界先进水平专业汽车板带生产线,虽然西南铝(集团)有限责任公司于 2010 年 5 月建成了一条汽车板带生产线,但与美铝萨马拉冶金厂(AlcoaSMA)2009 年建成的 2300mm 的 BWG 的涂漆、退火、纯拉伸矫直、剪切等生产线,海德鲁铝业公司格雷文布罗伊轧制厂的精整线相比还是有相当大的差距的。汽车铝加工材在中国的消费量当比美国、日本及德国的量都会大一些。因为中国不但乘人车的铝材用量在增加,而且厢式车厢体的铝化率甚低,尚未进入起步阶段,而北美、欧洲、日本的铝化率都在92%以上,提高厢式车的铝化率对节能减排与建设低碳经济有着重要意义。

无论是从长远还是就近期来看,组建汽车铝材中心都是必要的,成立这样的中心首先要有一批高素质的人才,其次是要有必要的设备。在设备方面,主机(热轧机与冷轧机)在数量与装机水平方面都不缺,都是世界一流的,缺的是精整设备,需要有集纯拉伸矫直、退火、脱脂、清洗、切边、纵剪、横剪、喷漆、涂层等于一体的生产线,应有激光精密剪裁设备。

汽车对铝板带表面状态有严格的各种各样的要求:原轧制状态的,即用普通研磨辊轧制的,表面有沿轧制方向分布的

磨轧线痕迹;有明显 EDT 辊轧制织构痕的(电火花加工辊轧制的);不锈钢色调的;TAF(薄阳极氧化膜处理的),不但提高了材料的抗腐蚀性能,而且扩大了材料的表面积,增大了结合面积,因而粘接强度有所提高。

向汽车制造厂提供可供组装的铝制零部件,如轮毂、保险杠等,或经过精密裁切得可直接上冲制线的板材是向汽车厂供应铝制零部件与加工材的发展方向,有些铝业公司现在就是这么干的。铝业公司向汽车厂派出工程师参与铝制零部件的设计也是行之有效的发展趋势之一。

汽车铝材中心的主要任务是:研发汽车新型铝合金,开发汽车铝制零部件新加工工艺,推广铝在汽车中的应用。希望有关部门制订强有力的汽车轻量化措施,特别是厢式车的轻量化,促进低碳经济与低碳社会的进程。规划是必要的,仅有规划是不够的。谁主宰汽车铝材生产市场领域,谁就会成为铝加工业的旗舰。

1.4.17 进一步拓宽汽车用铝 力争2020年用量翻两番

2013年，中国乘人小轿车的油耗标准为7.5L/100km，按照国家节能减排的规划目标：2015年新车油耗标准应降到5.9L/100km，2020年下降到4.5L/100km。这些目标均超过美国，也不是轻轻松松就能达到的，但完全可以通过提高汽车铝化率来实现。美国联邦法案规定，2016年小轿车油耗标准

须达到 7.6L/100km；2025 年应进一步降到 4.5L/100km。日本规定 2015 年小轿车油耗标准应≤5.5L/100km，从 2010 年至 2015 年，车辆 CO2 排放量须减少 29%。乘人小轿车在城市标准马路上行驶时，车的自身质量消耗的燃油占 84%左右，乘坐人员消耗的燃油量仅仅约占 15%。乘用车每减重 100kg，油耗可下降 0.3~0.7L/100km。当下，中国 85%左右汽油被各种汽车“吃”了，约 75%的城市有害气体是汽车排放的。2011 年中国石油对外依存度已升到 56.5%，还有进一步上升的趋势，中国面临的能源形势异常严峻。

由此可见，汽车的轻量化在节能减排方面起着非常重要的作用，汽车轻量化的措施很多，有设计方面的，有加工制造方面的，有用材方面的。前两方面虽然不是没有潜力可挖，但在目前的技术条件下，已经“油水”不多了。用低密度的轻质材料取代钢铁是最现实的选择，可用的轻质材料有铝、镁、钛、塑料、复合材料。但是在当前与今后一段相当长的时间内，无论是从哪方面来看，铝及铝基复合材料都是最可取的，都是性价比最高的汽车轻量化材料与循环经济最好的环保绿色材料。

扫描全球纷至沓来的全铝车

为了减轻汽车的自重，各国的汽车制造商都是想尽一切办法，凡是可以用铝替换钢铁而又不大幅度提高价格的零部

件大致都已经铝化，如全世界乘人小轿车的车轮铝化率已经超过 80%，底盘一些锻件的铝化率也已经达到 50%。对比可知，车轮的用量大，对减轻车身的重量起到了至关重要的作用，而锻件的用量本来就很少，还不到车身自重的 1.5%，对减重起不了多大的作用。目前，可减重的最大的板块是车身板块，如果车身钣金件都用铝及铝合金，那么车身自重就会下降 18%以上，当前的技术可完全实现车身的全铝化，早在上世纪 90 年代，英国和德国的汽车制造商就已经推出全铝轿车，所谓全铝车，就是在现有的技术条件下，凡是可以用铝制造的零部件都用铝及铝合金来制造。

英国制造的 JAGUAR XJ220 型全铝车于 1993 年问世，开全铝车之先河。它的底盘是粘结蜂窝铝结构，车身是全铝钣金件与铝型材骨架，还用了不少铝合金其他零部件，从而使车的刚度大为提高，质量却有显著的下降。

奥迪（Audi）A8 是全铝车的典范。奥迪 A8 车是 1995 年下线的，1997 年进入美国。它的构架是德国奥迪汽车公司与美国铝业公司 10 年的研发结晶，板材与型材用了 7 种航空铝合金，连接件是真空压铸的，它的质量比钢结构的要轻 40%，而其安全性、可操控性、乘坐舒适性、燃油经济性、刚性等都有较大提升，被誉为“21 世纪的首款豪华轿车”，将引领 21 世纪轿车发展潮流。

Ferrari 360 Modena 型车车身总质量仅仅 1406.2kg。它

的质量比 JAGUAR XJ220 型车车身质量更加轻，且刚性更高，可控性更强，内部空间更大，而且性价比很高。铝在这款车的制造过程中，起到了至关重要的作用。相关数据显示，铝在 Ferrari 360 Modena 中的总用量为 562.5kg，零部件铝化率达到 40%。

铝密集型的“普利茅斯徘徊者（Plymouth prowler）”型车于 2009 年开始销售，它是美国克莱斯勒汽车公司（Chrysler）与美国铝业公司联手开发的，在该款车上除用了尽可能多的铝以外，还用了一些新的铝合金，并开发了一些新工艺。

奥迪“TT”新车型比上一代“TT”车型总车质量减轻 50kg。2014 年 3 月 6~16 日，在日内瓦车展上，奥迪汽车公司展出了新款“TT”跑车，其车身结构为铝合金及钢板组合的“ASF”奥迪空间框架，门槛梁及车顶纵梁是用铝合金冲压而成的，前盖、车门及后备箱盖也全部都是用铝板制造的。

第七代雪佛兰汽车在 2013 年 1 月的底特律车展上出尽风头，底特律车展上，第七代雪佛兰“魔鬼鱼”跑车以其独特的外形，优秀的结构成为最吸引观众眼球的新车，该车采用了铝合金框架车身，比上一代钢体车身的“魔鬼鱼”总车质量减轻了 41kg，而刚性却提高了 57%，因为其安全性及可控性都大为改观。

2013 款奔驰 SL 系列整车“瘦身”140kg。德国奔驰汽车

公司推出的2013款系列车型又有了新的发展，该系列车型不但采用了全铝车身，而且还容纳了尽量多的铝合金零部件，这些举措使车身一下子就减轻了140kg。

美国福特汽车公司推出的F-150型车的全铝车身质量仅仅317kg，其较上一代该车型减重不少，且油耗下降了20%以上。另外，福特探险者（Explorer）和远征（Expedition）两款车型将追随F-150的足迹采用全铝车身，据称，福特公司所有的计划新车都在朝着全铝车身的规划奔跑，下一代福特Explorer将于2019年或2020年投产。

令人叹为观止的全新中型全铝豪华运动汽车JAGUAR XE不久将面世。在2014年北京车展上，JAGUAR 正式宣布F-TYPE Coupe双座高性能硬顶跑车在中国上市。展台上的C-X17概念车则昭示着JAGUAR的未来：进军SUV（多用途车，sport utility vehicle）以及车身结构轻量化。C-X17 SUV概念车首次将职能全铝构架纳入该车的设计，使其具有更高的灵活性与实现模块化，打造智能全铝车身。

首款全铝电动车特斯拉（Tesla）S款汽车已于2012年6月交付，这是特斯拉汽车公司（Tesla Motors）的S型电动轿跑车采用的是全铝车身，所有的钣金件都是用ABS板冲制的。ABS带卷重9吨，诺贝丽斯铝业公司提供。全铝S型电动轿跑车由0提速到95kg/h仅需5.6秒。2012年该车已交付5000辆，但接受的订单已经超过12000辆。

英国全新的埃沃奎系列全铝越野车比以往任何埃沃奎西系列车型都省油（all-new Range Rover Evoque）。它的钣金件是用诺贝丽斯铝业公司的 ABS 冲制的，而且用的是高强度铝合金 Anticorodal-600PX（AC-600PX），它是一种抗腐蚀的 Al-Mg-Si 系铝合金，既有高的强度性能又有良好的成形性，是一种优秀的钣金件合金，其抗拉强度比典型汽车铝合金薄板的约高 20%，而其成形性能比任何其他高强度铝合金的都好。由于合金强度的提高，板的厚度可减少 15%以上。

通用下一代皮卡车将采用铝合金车体。美国通用汽车公司（GM Auto）于 2013 年末与美国铝业公司及加拿大诺贝丽斯铝业公司签署协议，根据协议，美国通用汽车公司将于美国铝业公司及加拿大诺贝丽斯铝业公司共同研发应用于下一代全铝皮卡车的铝合金，以达到在下一代 Silverado 与 GMC Sierra 车上采用更多的铝的目的，这样该两种车型将找到提高燃油效率与刚性上升的最佳平衡点。

日本丰田汽车公司将普及全铝车身。走大众市场的日本汽车工业也紧跟世界汽车铝化率提升的大趋势，丰田汽车公司计划在汽车制造中尽量多的使用铝。丰田汽车公司将于神户钢铁公司、日本联合铝业公司共同合作研发铝材在汽车中的应用，以普及全铝车身。

借新能源汽车推广东风 进一步加大汽车用铝

就全球而言，汽车制造是用铝最多的领域，2013 年的用量约占铝表观消费量的 26.5%，中国的用量低一些，仅占 22%左右。中国用铝最多的部门是建筑部门。工业发达国家乘人小轿车用量已达 148kg/辆，中国的用铝量没有确切的统计数据，估计不会超过 115kt/辆，仅相当于发达国家的 77.7%，所以推广铝在汽车中的应用潜力很大。

7 月 13 日，国家机关事务管理局、财政部、科技部、工业和信息化部、国家发展改革委联合公布了《政府机关及公共机构买新源车实施方案》明确了政府机关和公共机构公务用车“新能源化”的时间表和路线图：未来 3 年新公车 30%须为新能源。7 月 20 日，国务院办公厅印发《关于加快新能源汽车推广力度，拓宽铝在汽车的应用。

中国有色金属工业协会在推广铝在汽车半挂车中的应用做了许多工作，成就巨大，但推广面还应大些，例如：新能源汽车尽量全铝化，以节约更多的能源，虽然它没有直接减少温室气体排放，但少用电，也就降低了发电时的温室气体排放；现在全世界都在推进 ABS 的应用，我们更应该走在这种大趋势的前头，站在这个浪潮的顶尖上，否则在这次竞赛中又会落后，与工业发达国家的差距会拉得更大。

中国房车市场正处起步阶段，这将是一个增长速度快容量又大的市场，该市场要求车的自身质量尽量轻些，所以它们的铝化率很高，美国的房车不管是拖挂式（价格 1.8 万美

元/辆）的，还是名为“The Heat”的豪华房车（价格 400 余万美元，挂车长 16.15m、高 4.14m，居住面积 102m2，正因为这样的大家伙能给人以家般的舒适和私密，即便价格不菲，它还是受到了众多明星的追捧）都是全铝的。中国从当下起就应注意房车的铝化率，就高不就低，买得起房车的人是不会计较价格的。

除了继续推广铝在汽车半挂车中的应用外，应注意推广铝在厢式货车、封闭货车、面包车、邮政车、快递车、运钞车、搬家车、工程车、清扫车、冷藏车、警车、巡逻车等车型中的应用。这些特种车不是以装重物为重点，易于铝化，同时它们的数量大，单车的用铝量大，不但要用板材，而且要用相当多的挤压型材作为支撑骨架，同时它们多在城市行驶，铝化后可以取得明显的节能减排效果，在欧、美与日本等这类车的铝化率都在 90%以上，可在中国除冷藏车外，其他的几乎全是钢铁打造的。

特种汽车用的铝材全是普通工程铝材。虽然用铝材制造车，车的价格会有相当大的提高，但由于车的质量减轻，油耗大幅度下降，如快递车、邮政车、运钞车等在营运 4 年后就可以收回购车多付的费用；在此还未计算温室气体的减排所创造的社会价值；汽车报废后，90%以上铝制零部件都可以得到回收，其价值相当于等质量原铝锭的 75%，远比废钢高得多。不过，大规模推广铝在特种与专用车、厢式车中的应

用也并非易事，因为铝的价格比钢材高，设计与维修、制造人员对铝材的特性并不娴熟，甚至有些技术人员认为铝合金车安全性较差，这显然是一个不小的误区，实际上铝材具有很强的吸能性，单位质量铝在碰撞时吸收能量是钢的 2 倍，在碰撞过程中，铝合金的变形可以吸收更多能量，因此铝材的应用不仅可以降低车的自身质量，而且能够提高汽车的安全性能，更能保护乘驾人员安全。

为了推广铝在汽车中的应用，除了加强宣传，提高相关人员对铝材的全面认识外，铝加工业应加强创新，提高现有合金的性能，不断推出性能更加优秀的汽车铝合金，并派优秀的工程师赴汽车制造厂参与汽车制造厂铝制零部件的设计、制造与加工，而更重要的是，有关部门应出台鼓励汽车制造厂尽量多用铝的强制性措施与政策，如对全铝车减免税、出售的厢式货车与面包车的最大油耗(L/100km)与 CO2 排放量，超过此标准的不让出厂与上路，等等。

目前，推广铝材在汽车中应用的最大难题是其价格高，特别是对经济型车来说。浙江吉利汽车研究院环保性能开发部轻量化技术科项目经理杨兴炎先生认为，车重降低 1kg 的成本如能控制在 20 元以内就好办了，然而目前采用铝材制造汽车零部件的成本远大于此数。

大幅度推广铝在汽车特别是经济型车中的应用是一件任

重道远的事，只要我们坚持工作一定能达到目的，全世界的所有铝业大国都在这么做，我们应比他们做得更快与更好。

世界主要铝加工企业 都在 ABS 线上狂奔

汽车的节能减排对提高大城市的空气质量，减小 PM2.5 的浓度起着至关重要的作用，而降低汽车自身质量是达到节能减排的唯一途径，在当前的技术条件下，提高汽车铝化率最有效的措施就是车身钣金件全部用铝合金薄板制造，也就是用 ABS（Auto Body Sheet）制造。值得注意的是，在 ABS 之后不要加“板”字，因为“S”就是薄板（sheet）的英文缩写。在全世界，2013 年乘人小轿车车体的铝化率还不到 4%，也就是说全铝乘人小轿车的数量仅仅占其产量的 4%。

2013 年，全球汽车工业的钢板用量约 20500kt，2030 年的用量将达到约 40000kt（按 4%的复合增长率匡算），若全部用铝合金代替，则铝合金板的用量分别为 12300kt 和 24000kt，这当然是不可能的。2013 年全世界 ABS 的消费量约 400kt，如果到 2030 年的复合增长率按 22%计算，则 2030 年的需求量可达 11750kt，这当然是一块香气四溢的非常诱人的“大蛋糕”，难怪全世界铝平轧产品公司的 CEO（总经理，chief executive officer）都在 ABS 这条百米线上奔跑呢。

欧洲是当前 ABS 用量最大的地区，2011 年欧洲 ABS 的用量约 200kt，2016 年的用量将达到 780kt。2012 年美国 ABS 的需求量约 45kt，2014 年的用量约 60kt，2020 年的用量将达到 850kt，2025 年其用量有可能达到 1300kt。2011 年日本的 ABS 的需求量约 50kt，2020 年日本 ABS 的需求量有可能达到 120kt。中国 2011 年 ABS 的消费量约 30kt（全部进口），即使以 30%的复合增长率增长，2020 年中国的 ABS 消费量也只能达到约 320kt。不过加上普通铝板的用量，达到此数是完全可能的。

当前，全世界已建成与在建的 ABS 项目有 19 个，总生产能力为 1945kt/a，2020 年的总生产能力可达 2705kt/a，可生产的企业有 27 家。这一轮 ABS 项目建设浪潮起源于欧洲，迅速波及到北美洲，将终于亚洲，全世界所有大的铝业公司都卷入这场争夺 ABS 蛋糕的混战当中，因为已建成与在建的 ABS 项目生产能力可以满足 2025 年以前的市场需求，所以在此期间不是所有企业都能获得预期的收益的。

诺贝丽斯铝业公司是世界最大的平轧铝产品企业，也是最大的 ABS 生产商，在美国、德国、瑞士、韩国、中国都有生产 ABS 的工厂，总生产能力为 700kt/a，其最大的企业是美国的奥斯威戈轧制厂，生产能力 240kt/a，有 2 条新建的生产线，是世界最大的 ABS 生产厂。

美国铝业公司是世界第二大 ABS 生产企业，在美国和沙

特阿拉伯有 3 个生产 ABS 的工厂，生产能力 470kt/a。

天津忠旺铝业有限公司规划在建 300kt/a 的 ABS 生产线，不过此项目属于在建工程，是否能如期建成，最终生产能力究竟多大，还是难以确定，但是全球第三大 ABS 生产企业应该是没有疑问的。

肯联铝业公司是第四大 ABS 企业（Constellium），在德国、法国、美国各有 1 厂，总生产能力 210kt/a。

海德鲁铝业公司（Hydro）是第五大 ABS 公司，其在德国的格雷文布洛伊(Grevenbroich)轧制厂有 2 条 ABS 生产线，总产能 200kt/a。

第六大 ABS 企业是爱励铝业公司（Aleris），在比利时与中国各 1 个工厂，合计生产能力 150kt/a。不过建在中国的爱励国际（镇江）铝业有限公司的 ABS 生产线尚未开始建设，能否如期建成还很难说。

其他的 ABS 生产企业的生产能力依次是中国中孚实业股份有限公司（150kt/a），诺贝丽斯（中国）铝制品有限公司（120kt/a），中国南山轻合金有限公司（120kt/a），沙特-美铝铝业有限公司（120kt/a），中国神钢汽车铝材（天津）有限公司（100kt/a），日本联合铝业有限公司（100kt/a），日本神户（Kobe）钢铁公司（100kt/a），奥地利有色金属加工有限公司（AMAG，60kt/a），等等。

2020 年中国汽车工业的用铝量为 2013 年的 4 倍的这个目标一定能达到。

加快 ABS 项目建设抢占汽车用铝制高点

中国已有与在建的 ABS 企业可分为三类：国有的如西南铝业（集团）有限责任公司、河南义煤集团同人铝业有限公司；民营的如南山轻合金有限公司、天津忠旺铝业有限公司，2016 年投产；外商独资的如诺贝丽斯（中国）铝制品有限公司（2014 年投产）、神钢汽车铝材（天津）有限公司（2016 年投产）、爱励国际（镇江）铝业有限公司（2018 年投产）；中外合资的如河南中孚实业股份有限公司。它们的总生产能力约 945kt/a，如果每辆全铝车的 ABS 用量按 200kg 匡算，可以制造近 500 万辆乘人小轿车。即使到 2025 年中国制造的小轿车恐怕也很难达到此数。

由于生产能力过大，总会有一些企业的生产能力得不到发挥，这是正常的，由于种种众所周知的原因，国有企业会首当其冲，难以取得好的经济效益。民营企业虽有好的机制与体制，但是初次进入 ABS 生产行业，对这种高精产品的生产工艺还不熟悉，需要一个摸索过程，设备全是引进的也需要一个磨合过程，销售渠道是全新的，也需要一个沟通过程，所以很难在 2020 年以前取得预期效益。

外商独资企业会旗开得胜，诺贝丽斯-大韩铝业有限公司与神户钢铁公司铜铝事业部的铝产品早已进入中国，对中国铝市场是轻车熟路，中国早些时候及当前用的 ABS 的 80%以上就是从这两家公司进口的，它们已有近 20 年生产 ABS 的经验与技术积累，它们有着雄厚的技术力量与丰富的管理经验、成熟的管理模式，它们在中国建的 ABS 项目投资甚低，财务负担轻，因为没有上游产品（铸锭-热轧-冷轧）生产，所需带卷从韩国与日本运来。因此中国的日系汽车制造厂会理所当然地向神钢汽车铝材（天津）有限公司采购 ABS，欧美、韩系汽车企业会向诺贝丽斯（中国）铝制品有限公司购买铝材。

中国的 ABS 生产企业在 2018 年以前应完成引进设备与技术的消化吸收工作，尽快进入创新阶段，早日生产出品质可与进口产品媲美，而价格又比进口的低 15%以上的产品，首先向民族汽车公司推销。笔者认为，2025 年时或更早些时间中国的 ABS 特别是大型民营企业的产品不但会为中国的汽车制造企业广泛采用，用于制造高档全铝车，而且 Made in China 的 ABS 会畅销全球。

1.4.18 铝加工业面临新的机遇与挑战全球掀起汽车铝板扩建浪潮

作者：王祝堂

当前，世界汽车工业面临着两大严峻的挑战：油价不断飙升，环保要求日益严格，也就是说汽车应一年比一年有更高的燃油效率，更低的温室气体排放，更高的安全性与更好的乘座舒服性。要达到这些目标，在当前的条件下最可取的措施无非是：大力发展新能源的清洁环保车；在保证安全与乘座舒适前提下，大力改进设计与采用铝材以降低车的自身质量。这两条道路应齐头并进，不管走哪条发展道路，铝材在今后长期的汽车发展进程中都将起着至关重要的作用，在可预见的时期内，还不可能有一种材料会取代铝而成为占统治地位的汽车材料。

铝及铝合金打造现代汽车的新潮流

轻量化是现代轿车的追求，尽量多的采用铝制零部件是实现轻量化最可取的措施。时下，铝（用作导线）及铝合金是当前及未来汽车的理想材料。在制造厂追求轻量化、政府倡导节能减排与消费者追求高性能的作用下，铝合金材料在汽车领域的应用获得了长足进展。自上世纪 90 年代以来，铝合金材料使用量在轿车上翻了一番，在轻卡上增加了 2 倍。目前，铝已成为汽车工业第三大类最常用的材料，仅次于钢及铸铁。轮毂就是一个最明显的实例。上世纪 80 年代，大部分轿车就用上了锻铝轮毂，大多数轿车用的是低压铸造的铝

合金轮毂，其显著优点是：1、舒适。铝合金轮毂真圆度好，滚动阻力减少，与一般的钢轮毂相比，具有更强的吸收震动及弹力功能，所以乘座舒适性得以提高；2、亮丽。铝合金的抗蚀性强，经久耐用，不会生锈，可长期保持熠熠生辉的亮丽光泽，使汽车的整体美得到更为完美的体现；3、节能减排。轮毂质量每减轻 1kg，1L 汽油可多行驶 800m，而每少用 1L 汽油，可减少 CO2 排放 1270L，使用铝合金轮毂的经济效益与社会效益十分明显；4、安全。铝合金的热导率高，能有效地防止轮胎磨损异常而导致爆胎现象的产生。

近 20 年来，轿车技术的最明显的变化之一是大量使用了轻质材料，出现了许多用铝与塑料制的零部件，其中铝及铝合金的用量最多，集中在车身构件、发动机、空调器、保险杠、车轮、装饰件、车座等方面。今后 10 年或 20 年内，除了继续提高这些方面的铝化率外，提升铝钣金件的量是其重点。2011 年，日本轿车用的铝及铝合金中，铸造铝合金占 82%、加工材及锻件占 18%；美国轿车的分别为 70%及 30%；德国轿车的分别为 78%及 22%左右。而在加工材及锻件用量中，挤压材约占 30%、板及箔约占 68.5%、锻件仅占 1.5%左右。提升车身的铝化率，也就是说增加铝板在汽车中的应用是今后汽车用材的发展趋势，铝板在汽车中的应用大有潜力。

国外总投资约 12 亿美元 掀起扩大汽车铝薄板产能浪潮

从 2010 年下半年开始，国外平轧铝产品产业掀兴了一股改扩建汽车铝薄板带项目的浪潮，这是铝轧制工业一次前所未有的为了生产一种产品所进行的大规模改扩建工程，总投资超过 12 亿美元，对 5 大洲 8 国 4 家跨国铝业公司（不含中国的）的 13 个工厂的汽车薄板带生产线进行顶尖的技术改扩建，大致可于 2013 年全部完成，新增生产能力约 600kt/a。

诺威力铝业公司（Novelis）投资 2 亿美元对其位于纽约州的工厂改扩建，以适应市场对这种板材高速持续增长的需求。扩建工作完成后，汽车铝合金薄板的生产能力可达 200kt/a，为诺威力公司北美地区这类产品现行总产能的 5 倍。新建的 2 条汽车板专业生产线 2013 年投产，2014 年达产。

投资约 4 亿美元对在亚洲的 3 个工厂进行改扩建，使韩国的 2 个厂（诺威力-大韩铝业公司）与马来西亚的 1 个厂的生产能力增加 400kt/a，由 2011 年的 600kt/a 上升到 2013 年的 1000kt/a。当然这 400kt/a 产能不全是汽车板，还含罐料、PS 板基、铝箔带坯等。

投资约 6 千万美元以扩大巴西平达铝业公司汽车板、罐料带卷的生产能力。

美国铝业投资 3 亿美元对艾奥瓦州（Iowa）达文波特轧制厂（Davenport）进行的改扩建，对一个工厂投资这么多进

行改扩建在世界铝平轧企业发展史上尚无先例，扩建工作计划于 2013 年完成。改扩建目标是为了向世界汽车工业提供更多更优质的铝合金板带材。

另外，Alcoa951 专利技术也可以于今后在铝工业行业获得推广，这是一种车辆组装连接技术的新工艺，它的要点是在连接组装前对铝合金薄板、挤压材、铸件进行表面处理，汽车厂的生产试验与试用证明，它们的连接强度比汽车工业应用的钛锆（titanium Zirconium）连接强度高 3~8 倍。

达文波特轧制厂是世界最大的铝板带轧制厂之一，拥有世界独一无二的 5588mm 的热粗轧机，生产的厚板、薄板与带材在航空航天、兵器、国防、乘人车、商用车、轨道车辆及其他工业部门都获得了广泛的应用。这次改扩建得到政府的大力支持，并在税收、金融、研究与发展信贷等方面给予了诸多优惠。

达文波特轧制厂原是一个以生产厚板为主的企业，投产于 1972 年，期间经过几次改扩建，而这次改扩建是最大的，增加了汽车薄板专业生产系统，自此以后它将成为全球最大的生产交通运输装备所需的各种铝及铝合金板材的顶尖企业，厚度从＞0.2mm~≤280mm、而宽度≤5400mm 板材，不但可生产矩形截面的，而且可以生产世上最大的制造 LNG（液

化天然气）巨大贮罐的变截面板材，其厚端最大厚度为 170mm 或更大些。该厂的这次改扩建为中国在建的与即将建设的这类企业提供了一个很好的样板。

诺威力铝业公司（Novelis）被确定为全新埃沃奎系列越野车（all-new Range Rover Evoque）铝薄板独家供应商。这一系列埃沃奎越野车都省油。2011 年 7 月上旬埃沃奎汽车公司在利物浦(Liverpool)建成了首条专业铝板金件加工线。

埃沃奎越野车的特点是，盖（hood）、车顶（roof）和结构件都是用诺威力公司的汽车铝合金薄板，车顶的设计极为领先，首次应用诺威力公司的新型高强度铝合金 Anticorodal-600px（Ac-600PX）制造，它既有高的强度性能又有良好的成形性，是一种优秀的车体钣金件合金，其抗拉强度比典型汽车铝合金薄板的约高 20%，而其成形性能比任一其他高强度合金的都好，由于合金强度的提高，汽车板的厚度可减薄 15%以上，因而使其成为一种制造盖板件、车身翼子板（Fender）、顶板、门板等之类钣金件的理想合金。

诺威力铝业公司为杰戈娃（美洲虎，Jaguar）兰德·罗孚（陆虎，Land Rover）汽车（含美洲虎 XJ.XF.XK 型），以及兰德·罗孚保卫者汽车（Land Rover Defender）、发现者汽车（Discovery）、系列罗孚（Range Rover）汽车，以及系列罗孚运动车（Range Rover Sport）提供铝合金板已有

20 余年，为它们自身质量的下降做出了很大贡献。

爱励国际（Aleris International）在欧洲有两个平轧铝产品企业：德国的科布伦茨轧制厂（Koblenz），比利时的杜菲尔轧制厂（Duffel）。前者的主导产品为厚板，后者的则为铝合金薄板带。为了提升杜菲尔轧制厂的生产能力，爱励国际决定增建冷轧铝带机 1 台，扩建工作已于 2011 年启动，将于 2013 年末竣工投产。杜菲尔轧制厂的主导产品为各工业部门用的薄板带，包括航空航天工业、汽车、交通运输与国防兵器工业用的。新的冷轧机用于生产汽车车身薄带材。

日本神户钢铁公司真冈轧制厂、古河斯凯铝业公司福井轧制厂与日本轻合金公司都生产汽车铝合金薄板，在这次全球性的汽车板材生产项目改扩中尚未见有较大的动作，但神户钢铁公司将在中国建以汽车薄板为主导产品的控股合资企业，而当前一些日资在华合资汽车公司所需的并不多的铝合金薄板全部从日本进口。

跨国公司争抢汽车板市场 中国企业不应等闲视之

在今后一二十年内，汽车板无疑会是铝合金薄板市场增长最快的亮点之一，也将会成为板带材市场容量较大的品种之一。2011 年全球汽车铝合金车身板（不含货车、拖车、半

挂车、厢式车、特种车等用的）的需求量约 250kt，中国还不能生产，其中 70%左右为诺威力（Nolis）公司、美国铝业公司（Alcoa）、海德鲁（Hydro）铝业公司生产，其余的为日本的一些公司及其他公司生产。可生产的国家为美国、德国、日本、法国、韩国等。

中国生产汽车铝薄板的技术总体上与发达国家的相差约 20 年，现在是追赶他们的千载难逢的大好时机，如果能很好地利用这次机会，适度稳妥地发展汽车铝薄板，就会大大缩短与发达国家的差距，否则这个差距会越来越大。我们在发展这类高精铝板带方面也做了一些工作，但与国外的大张旗鼓的建设相比，还有一定的差距，汽车铝板项目建设在中国还有相当大的发展空间。目前已建成与在建的项目有：

爱励国际（Aleris International）于 2011 年 1 月初与江苏镇江市达成合作协议，拟在该市增加投资 2 亿美元建设汽车铝板带项目，以满足中国市场对高端交通用铝合金材料的需求。这是爱励国际去年在该市合作投资 3 亿美元建设高强度大的规格航空航天铝厚板项目后的又一战略发展举措。

日本神户钢铁公司（Kobe Steel,Ltd,）已与中国江苏常铝铝业股份有限公司（ALCHA Aluminum,China）签订了合作协议，在中国内蒙古自治区包头市建一个生产高精铝板带的企业，公司可于 2013 年 1 月正式挂牌成立，注册资金 20 亿

元人民币，或者是 240 亿日元，建设总投资约 400 亿日元，神户钢铁公司占 80%，江苏常铝铝业股份有限公司占 20%，主导产品为汽车薄板与罐体料带坯。生产这些产品的技术门坎高，中国的一些铝平轧产品企业还没有完全掌握，神户钢铁公司称它们的生产能力有限，这就是为什么他们在中国投资这类合资企业的原因。

该合资公司的高档铝板带生产能力 200kt/a，设有熔铸、热轧、冷轧等车间，设备由神户钢铁公司提供，2015 年投产，2013 年正式动工建设。神户钢铁公司在生产高端铝平轧产品方面有着丰富的经验。

西南铝业（集团）有限责任公司于 2009 年 12 月投产了中国首条汽车铝薄板专业生产线，但要成为有国际市场竞争力的项目，能批量向通用汽车公司、福特汽车公司、奔驰汽车公司、丰田汽车公司等提供车身铝合金板带还需要一个过程，还需要一些时日，不过毕竟是开先河的第一条线，在中国汽车铝板发展历程的长河中有着里程碑的意义。

决不可低估与小看汽车铝薄板生产的难度，在 4 种量大高端铝板带生产技术中（航空航天铝板、汽车车身铝板带、PS/CTP 铝板基、罐体带卷），虽然各有各的性能要求，各有各的技术难点，但总体来看，前两种材料具有最大的生产难度，最高的技术门坎。

汽车铝板带市场容量大 中国企业应加速研发建设

为了更好地发展汽车铝板带产业，笔者有一些看法与设想，与对此感兴趣的业内人士及投资人共同商讨：

汽车工业是国民经济的支柱产业。中国是世界汽车产销大国，在2020年以前，中国汽车产销量的年平均增长率不会低于8.5%，2020年的产销量可分别突破3500万辆，汽车用铝量的年平均增长率可达 10.5%左右。除建筑工业外，汽车产业将是中国用铝量最大的部门。

汽车铝板带市场容量大，增长速度快，在未来20年内还不可能会出现一种结构与功能性兼备的材料对铝材形成威胁性的挑战，取代铝在汽车中的地位。

生产汽车铝板带的技术难度大，必须有良好的力学性能、良好的成形性、良好的抗蚀性、良好的可焊性，特别是应能长期保持性能的稳定性。

在汽车铝合金研发与板带生产技术方面，中国与工业发达国家存在着较大的明显差距，可能相差20年以上，必须奋起直追，否则差距会越来越大。目前我们仍处于跟踪模仿期，离自主创新期还有一段距离要走。

中国现有 2 个在建的铝板带项目，看来还不够，还有一定的发展空间，因为底子薄，如同一张白纸，还可以建 2 个项目，也就是说在 2020 年以前建成 4 个项目，总生产能力

500~800kt/a。需指出的是，我们没有专业汽车板建设生产与管理的经验，不论是设计还是生产经营都如此。生产汽车板带用的主要设备与工艺与生产其他高精板带（航空航天、罐料、PS/CTP 板基）的相同，如熔炼-铸造、热轧、冷轧的几乎完全等同，但精整与热处理设备及工艺则有较大差异，因此投资也大一些，需要有精密裁剪线、气垫炉热处理生产线、批量式控制气氛或真空热处理或感应加热自动热处理生产线、表面抛光生线、拉弯或纯拉伸矫直线等，如果按《新材料产业“十二五”发展规划》中提出的到 2015 年能产业化生产与精深加工汽车车身钣金件，则需要一些精深加工的数控设备。建一个生产能力 150~200kt/a 的汽车薄板企业投资大约需要 35 亿元。

怎么建，有如下设想：

可单独建，即建成独立的装备齐全的专业汽车板带企业，便于经营管理，便于研发创新，但投资较大；在建的项目中如山东与天津都在建世界级的超大铝板带生产航母，可修改一下产品结构，增建专业汽车板生产线，利用公有设施，不用再建熔铸、热轧、冷轧车间，可节省投资与缩短建设周期；对现已建成的一条生产线作较大的适当的填平补齐，以便尽快拿出产品，进行产业化生产，但还不够，还必须建新的项目。

中国铝加工业已到了万事创新为先的阶段，对汽车铝板带批量产业化生产才刚刚开始，更应加大科技投入，注重研发与创新，争取早日成为有中国特色的汽车薄板合金体系与工艺系统，这可不是一蹴而就的，需要全行业的长期积累。

建立汽车铝材专业研发机构，为汽车铝材发展提供强大技术支撑。

铝加工企业进入了向汽车制造厂提供精深加工铝钣金件的时代，而且提供的量会逐年有所增加。

铝加工业的工程师参与汽车厂铝制零部件的设计与加工工艺的制订有利于铝材的推广应用，宜大力倡导与积极参与。

1.4.19 飞驰之“铝”

铁路，世界各国经济发展的大动脉，而提高列车速度是铁路赖以生存和适应社会发展的有效措施，在特大城市与大城市建设轨道交通网络是解决市中心人口集中度大与交通拥堵的最佳途径之一，更不用说建设高速铁路网可拉动相关产业的发展。

轨道车辆包括城市间铁路客货运车辆、城市地铁与高架铁路车辆、磁悬浮车辆。根据国际铁路联盟的定义，在既有路线上运营速度大于 200km/h 的列车，在新建路线上运行速度大于 250km/h 的列车的相应线路被称为高速铁路，车辆被称为高速列车车辆或高铁车辆。在现有的技术条件下，高铁

车辆车身都是用铝制造的。城市轨道车辆的 34%是用铝制造的，磁悬浮车辆不论速度高低都必须用铝制造，铁路运煤及矿石的车辆也可以用铝制造。

城铁篇

城市轨道交通除磁悬浮列车外，还有地铁与高架线路（轻轨）。截至 2011 年底，中国城市轨道交通运营里程近 850km，预计 2020 年可达 8000km。目前，已有北京、上海等 10 个城市的 32 条轨道交通线路投入运营，有 14 个城市共 50 条轨道线路正在建设，总里程 1200km 以上，而自 2003 年以来，共有 19 个城市轨道交通建设规划得到国家批准。在此基础上中国作为全球最大的城市轨道交通建设市场，受到全世界关注，到 2020 年全国地铁总里程可达 6100km。

地铁、轻轨、磁悬浮列车的最大特点是启停频繁，要求车辆质量尽可能轻些，以减少惯力，便于快速启停与降低电

力消耗。当前，除磁悬浮车辆必须用铝制造外，轻轨与地铁车辆的铝化率为 28%~36%,其余的是用碳钢或不锈钢制造的，大致各占 50%。2010 年中国城市轨道车辆的用铝量约 18kt，2015 年的可达 25kt,2020 年可增至 50kt。除地铁车辆可用铝合金制造外，地铁导电轨也是用铝合金制造的。在轻轨线路与台站建设中也需用一些铝材。城轨车辆的铝材采购质量可按 11t/辆估算。

高铁篇

1964 年 10 月 1 日，日本建成了世界上第一条高速铁路——东海道新干线，其后相继建成了山阳、东北、上越、北陆、山形、秋田等新干线，形成了 2325km 的高速铁路网。日本从 1962 年开始研发高铁铝制车辆，1963 年批量生产，是研制与生产高铁铝制车辆的先驱，自此以后全世界的高铁车辆全部都用铝制造。高铁所具有一系列的优点，是与铝车辆

的采用密不可分，可以说没有铝就没有今天在华夏大地风驰电掣的高速列车。

能耗仅为飞机的 18%

中国铁路能耗占全国交通运输行业的 9%，铁路运输量占全行业的 32%，高铁的节能优势明显。目前，我国速度在 350km/h 以上高铁的能耗不到 6kWh/(100km)，是大客车的 50%，飞机的 18%，在陆路运输中是最节能的。其中，高速铁路，使用全铝车体，降低了列车自身质量，是高铁实现低耗的关键因素之一。

铁路运输占地为公路的 10%

在土地占用面积方面，铁路完成单位运输量所占的土地面积仅为公路的 1/10。在中国高速铁路建设中，还大量采用“以桥代路”，铁路桥梁工程占地与路基工程相比，每 km 节约土地 44 亩。例如京沪高铁全长 1318km，桥梁总长度占全线的 80%，节约用地 3000 公顷。

高铁运力是普通铁路的四五倍

铁道部预计，到 2015 年，全社会客流量将超过 500 亿人次；到 2020 年，中国的城镇化率将由 46.6%提高到 60%，将带动全社会客流量的大幅度上升。2010 年我国主要客运通道平均单向客流密度为 2200 人/km，而高铁单向运输能力可达到 8000 万人以上，是普通铁路的四五倍，优势巨大。

舒适安全

即使在最高速度行驶时，高铁车厢内仍保持平稳，小桌板上放置的水杯仍稳稳地站立着，仅仅在列车起动的瞬间，杯中的水轻微地晃动一下，这主要得益于铝制车辆先进的气密性，与日本等其他国家的高铁相比，中国高铁的气密强度已领先 10 年。在 2010 年 12 月 3 日京沪高铁的试验冲刺中，列车速度达到 486.1km/h,乘客都不会出现明显不适的耳鸣、头晕等现象。在此应特别指出，自 1964 年至今的 48 年中，全球的高铁发生的事故上千次，可就是没有一次是因为铝材本身问题引发的。铝材的优秀性能对保证高铁的安全运营起了至关重要的作用。高铁车辆的铝材采购量可按 10.5t/辆估算。

货运列车篇

2004 年 3 月，中国齐齐哈尔车辆有限责任公司、北京二七机车车辆厂、株洲电力机车车辆有限公司等生产的首批 210

辆 C80 型运煤车交付大秦线营运，到 2011 年营运的此型号铝合金运煤车已超过 25000 辆。

C80 型铝合金运煤车为双浴盆式，车箱长 13m、高 2m、宽 2.5m，用 6~8mm 的 5083 铝合金板与加固型材铆接而成。每辆车约用板材 1.8t，型材 1.6t，与 C63A 型、C62B 型钢运煤车相比可分别多装煤 20t、21t，铝合金车的自重 18.3t，而钢车分别为 22.5t 及 22.3t。铝合金运煤车具有很多优势。

运输效率大大提高

铝有更高的比强度（强度/密度）、与中国现有的高强度耐候钢相比，铝合金车厢更容易实现轻量化，从而增加载重，提高运输效率。按照美国制造的铝合金运煤车的统计，在同等强度条件下，铝合金车自重约比钢车轻 20%，而中国 C80 铝合金运煤车比 C63A 型钢车轻 4.2t，比 C62B 型钢车轻 4t。在车辆总重不变的情况下，可显著提高车辆的有效载重，同时可减少机车与车辆保有量。

可实现减员和降耗增效

采用 C80 型铝合金运煤敞车可减少列车开行对数，从而可减少机车车辆的维护人员、机车司乘人员、机车能源、车辆维护费、线路损耗等，从而达到减员增效与降耗增效。

可大大减少车辆维护费

铝合金煤车比钢制的具有更强的抗腐蚀性能，可减少对其维护与修整，尤其是在运输硫含量高的煤炭时，这个优点

尤为突出；同时铝的表面光滑，有助于卸车。因此，铝材成为设计煤车与其他矿产品运输车辆的一种有竞争力的材料。

C80 运煤车在我国铁路货车上首次采用了铝合金，减轻了车辆自身质量，降低了车辆重心，载重达到 80t，具有显著的经济效益与社会效益，是中国铁路货运发展的一次飞跃。该车投入使用后，对实现大秦线开行 2 万吨重载列车，运输量达到 2 亿吨/年的要求起了决定的作用，大大缓解了西煤东运的紧张局面，对国民经济的持续稳中求进发展提供了有力保证。同时，该车的研制成功，填补了中国铁路货车的一项空白，达到国际先进水平，还带动了铁路货车研究、设计、制造、运用、检修等工作全面迈上了一个新台阶。

我国是一个产煤大国，2011 年的产量 32.4 亿吨，占全球总产量的 48.3%，2015 年的产量无疑将超过 40 亿吨，西煤东运、北煤南运的紧张态势会更加紧张，适度发展铝合金运煤车专列是缓解运输紧张的有效措施。2006~2012 年美国铝合金运煤车的产量 14000 辆/年，如果中国能达到美国的水平，则需要铝合金车辆 5 万辆/年，每辆车的铝材采购量约 4t，年需求量约 200kt，当然在 2020 年以前不可能达到美国当前的水平。不过，铝合金运煤车在中国的应用潜力还远未得到发挥。美国从 1993 年起已停止生产钢制运煤车而全部改用铝合金运煤车。

磁悬浮列车篇

磁悬浮列车是利用电磁力将车浮起来，然后再用电磁力作为牵引力，驱动列车。磁悬浮列车不与钢轨接触，不会产生摩擦噪声。高速磁悬浮列车的速度大于 100km/h，中低速的小于 100km/h，不管是哪一种，它们的车辆都必须是全铝的。所谓全铝的，就是凡是可用铝合金制造的一切零部件与构件都是铝质的，也就是说全部铝化了。一辆磁悬浮车辆的铝材采购量约 11.5t，其中 80%左右为铝合金挤压型材，其余的 20%左右为板材、箔材、线材与锻件等。2010 年 2 月，中国具有完全自主知识产权的高速磁悬浮样车在中航工业成都飞机工业（集团）有限公司下线，标志着中国具备了磁悬浮铝合金车辆国产化设计、制造、整车集成能力。

目前中国已经建成的高速磁悬浮铁路只有上海浦东机场线，长 31km，全部技术与装备从德国引进，在今后一定时期内中国还没有建设高速磁悬浮铁路的规划，但一些城市出台了建设中低速磁悬铁路的规划。

中低速磁悬浮轨道列车是一种新近发展起来的轨道交通装备，性能卓越，适用于大中城市市内、近距离城市间、旅游景区的交通连接，市场前景广阔。与普通轮轨列车相比，中低速磁悬浮列车具有噪声低、震动小、线路铺设条件宽松、易于实施、易于维护等优点，而且由于其牵引力不受轮轨间粘着系数影响，使其爬坡能力强，转弯半径小，是最舒适、安全、快捷、环保的绿色轨道交通工具，在各种交通方式中具有独特的优势。

此外，它还有造价远低于地铁与可穿行于建筑物密集区的优点。和目前的地铁、城铁相比，磁悬浮轨道造价较低，只需几千万元/km，跟高达 7 亿元/km 以上的地铁相比，可大大节约建设资金。与地铁相比，磁悬浮不挖地道，能节省大笔费用；和城铁轻轨相比，转弯能力强、噪声小、爬坡能力强，可在房屋稠密的社区穿行。另外，对于一些因土壤地质构造原因，无法挖地道的地方，如昆明、济南等城市，使用磁悬浮列车作为轨道交通，则要实际得多。

当前世界上有 3 种类型磁悬浮：德国的常导电式，日本的超导电式，它们都是用电力来产生磁浮动力；中国的永磁式，利用特殊的高技术永磁材料，不需要任何其他动力支持。前两种磁悬浮列车在不通电时，车体与槽轨道接触在一起，而中国利用永磁悬浮技术制造的列车在任何情况下，车体和轨道之间都不接触，是独立于德国、日本磁悬浮技术之外的

独创技术，其优点为：悬浮力强大，经济效益好，节能性强，安全性好，平衡性好。

北京轨道交通建设管理有限公司正在建设中国首条中低速磁悬浮线——S1 线，全长 19.985km，其中高架线 19.420km，地下线 0.455km。分两期建设，首期建西段，长 10.165km，2012 年底通车试运营；东段工程为二期，长 9.704km，计划 2013 年 11 月开工，2017 年 2 月试运营。

2009 年 6 月 15 日，中国首列具有完全自主知识产权的实用型中低速磁悬浮列车在中国北车集团唐山轨道客车有限公司下线后完成列车调试，开始进行线路运行试验，取得了预期的效果，这标志着中国已具备中低速悬浮列车产业化生产能力。这种永磁式中低速磁悬浮列车将在中国得到稳健的发展，而且必将走向全世界，为世界大中城市的交通带来巨大变化，也为交通运输铝材的应用开辟了另一个亮点。

另外，中国磁悬浮列车是靠列车底部永磁体产生的强磁场而悬浮驱动，这种永磁体用强磁材料——钕铁硼（Nd-Fe-B）合金制造。钕是一种稀土金属，中国是稀土金属之乡，占世界总储量的 23%，为发展钕-铁-硼合金提供了强大的资源支撑，为中国中低速磁悬浮列车的发展创造了条件。

1.4.20 城际高铁铝材内需新亮点

在轨道车辆中，用铝最多的是高铁、磁悬浮列车、中低速磁悬浮列车、地铁、城市高架列车、煤炭与矿石专用运输车，前三者是全铝合金的，即凡是可用铝合金制造的零部件都已全部铝化。2012 年中国地铁与城市高架轨道车辆的铝化率约 31.5%，煤炭与矿石运输轨道车辆的铝化率还不到 0.5%，与美国的 28.5%相比差距甚大，铝在这方面还有很大的发展潜力。

首列城际车组下线 每节用铝约 11 吨

中国首列速度 200km/h 的和谐号 CRH6 型城际动车组在中国南车集团四方机车车辆股份有限公司下线，该车为全铝合金结构，标志着中国铝合金轨道车辆家族又添新丁，每辆车的铝材（板、管、棒、型、线、锻件等）及铝制品（铸件、压铸件、空调系统零部件等）的采购质量约 11t，其中大铝型材约占 52%。

城际轨道交通是指在经济发达、人口稠密的城市群区域中短途城市之间或由中心城市、卫星城镇之间及在都市经济圈市域内修建的便捷、快速、运力大的客运轨道交通系统。它是一种新型运输工具，该车的成功研发填补了我国轨道交通客运装备领域的空白，且有相当强的国际市场竞争力。

铝合金车辆优点多 节能减排显著

型城际动车组的最高运营速度为200km/h，最高试验速度达到220km/h，可以快速高质量地完成中短途城际和城市群内部大量旅客的运输任务，既可实现高速持续运营，满足中短途点对点的运营模式，也可实现短时运营、适应多站停靠的运营模式。

型列车在节能环保方面具有突出的性能，不仅车体、车向架及动力设备和车体附件等严格采用轻量化设计，凡是可用铝合金制造的都用上了铝，而且再生制动效率高，再生制动能量回馈电网，人均百公里能耗比同速度等级在线运营动车组的低44%，这都得益于铝的采用与精湛的设计。

采用大载客量的铝合金车体，列车坐席定员557人，总定员1488人，约为干线同速度等级，同编组形式动车组的2倍多。在每节车厢两端都设有站立区、翻叠坐椅和扶手、大件行李架。坐椅不分等级，该车没有设餐车。

列车为8节编组，采用大开度侧门、宽大通道设计，使乘客人均占有空间达到在线运营地铁列车的2倍。大轴重转向架的承载能力达170kn。设计思路快速停运，与干线相同速度等级高速动车组相比，加速时间和距离分别缩短25%及20%，紧急制动时间及距离分别降低17%和22%。

型城际动车组设有被动式保护装置，避免旅客过隧道时

耳鸣现象，车内噪声可小于 72 分贝。据称，3 对门结构形式的速度 200km/h 城际动车组已竣工,速度 160km/h 及 140km/h 等级城际动车组也将陆续下线。

型城际动车组的车头阻力比 380A 高铁动车组车头的大，这是由于速度不同定位的。城际动车组的速度分为三个等组：高速的为 220~250km/h，适于站距 15km 以上，开行速度 200km/h;中速的开行速度为 160km/h,车站间距离为 5~15km;低速的为开行速度 140km/h 的动车组，车站间在 5km 以下。在这种速度运营时，气动阻力已不是核心问题，为了能载尽量多的乘客，故把车头设计成目前这种式样。

未来 30 年城际轨道车辆 需要铝材 55 万吨

笔者预测，未来 30 年中国需城际轨道铝合金车辆 45000~50000 辆，约需各种铝材 55 万吨（含车站及道路建设所需的建筑与结构用的），平均 18kt/a。党的“十八大”确定中国未来几十年的发展任务之一是工业化与城镇化，城镇化将成为最大的发展潜力。

中国正在进行规模空间的城镇化进程，可按城市人口多少将城镇规模分为：特大城市（mega city）多于 1000 万，北京（1470 万）与上海（1710 万）已于 2007 年跻身此行列，2025 年有可能分别超过 2800 万与 2600 万;大城市(Big city)，500 万~1000 万，2007 年进入大城市的有天津市、深圳市、

武汉市、重庆市、成都市、广州市，它们在 2015 年至 2025 年会相继成为特大城市，而在此期间，哈尔滨、沈阳、大连、石家庄、郑州、西安、南京、长沙（含株洲、湘潭）、福州、西安等 10 个无疑会成为大城市；中等城市（mid city 或 midsized city）的人口为 150 万~500 万；50 万~150 万人的为小城市（Small city）；人口少于 50 万的称为大镇（big town）。13 亿人的现代化和近 10 亿人的城镇化在人类历史上是没有的，是中国今后经济的重要增长推动力。凡是特大城市都宜建城际轨道线路网，有一部分大城市也具备建这种交通路网的条上。

城际动车是轨道路网三驾马车之一。根据中国轨道客运路网的规划，此路网由高速列车、城际列车和城轨地铁三种组成。通过城际列车实现高速列车和城市轨道交通（地铁、磁悬浮、中低速磁悬浮、高架轨道列车）的融合。高速列车适合远途运输，城轨地铁适合城市内部通勤，而城际列车正好介于两者之间，运营里程为 100km~200km，与高铁及地铁等成为三足鼎立之势。这次下线的首列城际动车组是为广州市设计制造的，广州市开中国城际轨道列车网建设的先河，城际轨道铝合金车辆将成为拉动铝材内需增长的又一亮点，成为驱动经济上升的又一台小引擎，同时，城际轨道铝合金车辆还有一定的出口潜力。

1.4.21 轨道交通用铝步入又一黄金需求期（上）

表 1 铝合金运煤车与钢车的技术参数

参数	C80 铝合金车	C63A 型钢车	C62B 型
装煤量(t)	81	61	60
自身质量(t)	18.3	22.5	22.3
轴重(t)	26	21	21
容积(m³)	76.05	70.7	71.6
每延米质量(t)	8.33	7.0	7.1
构造速度(km/h)	100	100	100
轨距(mm)	1435	1435	1435
长度(m)	12	11.986	13.43

我们可把 2008 年中国首条高铁路线京津线投入运营至 2015 年为止这段时间定为轨道交通用铝第一个黄金发展期，其特点是线路建设与对铝合金车辆需求以国内为主；第二个黄金需求期为“十三五”与“十四五”规划期即 2016 年~2025 年，线路建设与对铝合金需求国内外并重；2026 年起将进入第三黄金需求期，其特点可能是以国外为主。

从大的层面看，轨道车辆可分为货运用的与客运用的两大类。在当前可用铝合金制造的货运车辆不多，还不到车辆总数的 2%，发达国家的多一些，用于运输矿产品与农产品，中国的很少，仅约 3 万辆，主要是 C80 运煤车，用于大秦线与神黄线运煤。用铝合金制的轨道车辆是一个庞大的家族：

高速铁路，中、低速磁悬浮线，地铁，高架城轨，市域快轨，地际高速，市区单轨，磁悬浮车辆等。磁悬浮车辆不管速度高低都必须是全铝的，所谓全铝的就是在当前的技术条件下凡是可用铝合金制的零部件都用上了铝。单轨车辆有两种：悬挂式与骑跨式。

市域快轨交通是指大城市市域范围内的客运轨道交通与郊区（如北京地铁平谷线，长 67.6m）、中心城市与卫星城、重点城镇间等，服务范围一般不超过 100km，在广义上它属城市轨道交通范围，但是它的站距比一般市内地铁的长得多，通常为 2km~5km，而一般市内地铁的仅 1km 左右。地铁可以满足出行半径不大于 50km 的乘客要求，城际和高铁的服务半径则大于 100km，而 50km~100km 的客运则由市域快轨承担，它的最高速度可达 160km/h，既可以在高铁线路上跑，又能在地铁轨道上跑，被誉为“全能”市域快轨车。首列这种快轨车于 2015 年在中国中车长春轨道客车股份有限公司下线，进行了试跑，它的车身是用碳纤维复合材料与铝材制造的，是中国首次用复合材料制造轨道客车车身，取得了更好的减重效果，不过复合材料价格比铝合金的高不少，零部件制造工艺与车辆维修也比铝合金的困难，报废零部件与车辆的回收几乎无法进行，而铝合金废件的回收率可达 95%以上，是一类永不消失可循环利用的金属。

市域快轨交通车辆的铝化率为 30%~40%，全铝车辆的发展还有相当大的潜力，仍是推广铝应用的重点领域。

根据国际铁路联盟的定义，在既有线路上运营速度大于 200km/h 的列车，在新建线路上运行速度大于 250km/h 的，相应的线路被称为高速铁路，车辆被称为高速列车车辆或高铁车辆。在当今的技术条件下，高铁车辆车体都是用铝材制造的，其中 85%以上为挤压型材，其余的 15%为平轧铝产品、铸件与锻件。另外，车辆内部设施如行李架、卫生设施、贮柜等还要用一些铝，空调通风系统、照明与通讯系统、车站与其他设施的建设也都需要一些铝材。

“十三五”期间国内客运轨道车辆铝材需求 253kt

据原国家铁路局发布的《铁路“十三五”发展规划征求意见稿》（下称《征求意见稿》）称：全国铁路网要基本覆盖 20 万人口以上的城市，80%的县级行政中心。要基本实现国家、高速铁路网基本覆盖 50 万人口以上的城市、区域中心城市 1h~8h 高速通达圈；相邻大城市 1h~4h 快速交通圈；城市群内 0.5h~2h 通勤圈。

国内高速铁路

中国自 2004 年起开始建设高铁，2007 年 12 月首条城际高铁——京津高速铁路开通，至 2013 年高速铁路已突破 1 万

km，占世界总里程的近 50%，2015 年中国高铁运营里程已达 1.9 万 km，占世界总里程的 65.5%。

《征求意见稿》称：“十三五”期间铁路固定资产投资规模将达 3.5 万亿~3.8 万亿元。笔者认为，规划的投资规模趋于保守，最终决算规模有可能突破 4.2 万亿~4.5 万亿元。

《征求意见稿》称：“十三五”期间，高速铁路网要在“四纵四横”骨架基础上，继续实施一批条件成熟的高铁项目共计 20 多个，其中重点建设项目包括北京至沈阳、北京至张家口至呼和浩特、大同至张家口等 23 个高速铁路项目；同时建设郑州至万州、太原至郑州、贵阳至南宁等 21 个高速铁路。至 2020 年末，中国高速铁路里程可达到 3 万 km。

这 3 万 km 高铁通车里程有 1.1 万 km 是在“十三五”期间通车运营的，按 1km 配备 1 辆铝合金车辆匡算（含机车），需 1.1 万辆，这是保守的匡算，乐观的匡算则需要 1.3 万辆，平均 2200 辆/a~2600 辆/a。每辆车采购铝材消费量约 12t（含外购产品如空调系统的用铝量），其中挤压材（含管材）10.6t，平轧材 0.8t，铸件 0.4t，锻件 0.2t。“十三五”期间国内高铁车辆对铝材的总需求为：132kt~156kt，平均为 26.4kt/a~31.2kt/a；另外，在车站、厂房、其他设施建设方面还要用一些铝材，如果每 km 按 1t 采购量匡算，则采购量为 11kt。由此可见，需要采购的铝材总量为 143kt~167kt。

城际铁路

城际铁路的服务半径大于 100km。在城际铁路布局上,《征求意见稿》提出:城际铁路规划新开工建设 5000km 左右,2020 年城际铁路规模达到 5000km。重点建设京津冀地区、长三角地区、珠三角地区等 8 个城市群城际铁路，其中最大的是京津冀城际，由 27 条城际铁路线组成，总规模 3796km，京唐城际、京滨城际、廊涿城际、首都机场到北京新机场联络线计划 2016 年开工。如果按 1.5 辆/km 配备动车辆，则需要车辆 5694 辆，若其中 40%是用铝合金制造的，则需购置铝合金车辆 2278 辆；若“十三五”期间有 50%线路投入运营，则投入运营的铝合金动车有 1140 辆，需采购铝材 1140 辆×9t/辆=10.26kt。这就是说，铝加工业在“十三五”期间应向客车车辆制造企业提供 10.26kt 铝材。当然这些铝材有小部分是从 2014 年起提供的，因为有些车辆需提前制造，制造周期 1a~1.5a。

市域轨道线路

市域轨道交通是一个大家族，包括磁悬浮、中低速磁悬浮、地铁、高架城轨、市域快轨、市区单轨等，中国当前有 38 个城市的轨道交通线路获得国家发改委审批通过，约有 50 个城市在继续建设与准备建设这类交通线路。但是“十三五”期间究竟有多少里程开始运营没有确切的统计资料可供利用，所以很难作出靠谱的对铝材需求量。制造这类客运轨道车辆车体用的主要材料有:低合金化高强度碳钢、不锈钢、铝材、

复合材料。用铝材制造的车辆约占总数的 35%，估计“十三五”期间市域轨道线路铝合金车辆总制造量约 8000 辆，每辆铝材采购量按 9t 计算，铝加工厂的供应量约 72kt，平均每年供应 14.4kt;线路、车站等建设的铝材用量按 1kt/a 计算，则铝材的供给量为 15.4kt/a。

“十三五”期间运煤车需要铝材 85kt

1996 年齐齐哈尔车辆公司与美国有关企业合作研制了两辆铝合金运煤车，2004 年 3 月齐齐哈尔车辆公司、二七机车车辆公司、株洲电力机车车辆公司等生产首批 210 辆交付大秦线使用,2010 年运营的 C80 型运煤车已超过 11000 辆,2015 年神黄线购买了 8000 辆 C80 车。至此，中国投入运营的 C80 运煤车约 25000 辆。《征求意见稿》称，“十三五”期间将建设成都至兰州、拉萨至林芝、蒙西至华中铁路通道，预计需要 C80 型运煤车 25000 辆。神黄运煤专线全长 860km，运输能力 1 亿 t/a,侯月等运煤专线的总运量也在 1 亿 t/a 以上。

C80 型运煤车为双浴盆式，车厢长 13m、高 2m、宽 2.5m，用 6mm~8mm 的 5083-H32 合金板与加固型材铆接而成。每辆车约用板材 1.8t，型材 1.6t，共用铝材 3.4t/辆，“十三五”期间制造 C80 运煤车需要铝材 85kt。中国制的双浴盆式铝合金运煤车与 C63A 型、C62B 型钢运煤车的技术参数比较见表 1。

由表中的数据可见，与钢煤车相比，铝合金车的优越性

显而易见，它的经济效益与社会效益巨大，与 C63 型钢车相比，每辆提高载重 19t，提高运输能力 31.1%，因此每辆车平均收益提高 22.92 万元，在车辆使用期内每辆收益提高 572.90 万元，同时可减少车辆保有量，按大秦线目标运量 2 亿 t 计算，可减少车辆购置 3763 辆、减少机车购置 165 台。

铝合金煤车的抗腐蚀性能比钢车的强得多，可大大减少车的维修费用，在运输含硫高的煤炭时，这个优点尤为突出，同时由于铝合金的表面光滑，有利于卸煤。

中国是全世界产煤最多的国家，2015 年的产量 37.5 亿 t，为美国的（8.9 亿 t）的 4.21 倍，可是美国的运煤车有 14 万辆，为中国运煤车的 5.6 倍，美国从 1993 年起停止生产钢运煤车，可见中国铝合金煤车的发展潜力还很大，运煤车的铝化率还很低。制造运煤车用的铝材属常规工业铝材，中国通通能制造。

1.4.22 轨道交通用铝步入又一黄金需求期（下）

图 1：中国首列出口欧洲动车组 2015 年 7 月在株洲电力机车公司下线。

图 2：2014 年，中国为马来西亚生产的世界运营速度最高的米轨动车组在南车株洲电力机车有限公司下线。

“十三五”期间“一带一路”轨道车辆对铝材需求 300kt

《征求意见稿》称，为落实“一带一路”战略规划，要加快实施与周边国家的互联互通，建成、建设并扩能改造 14 个铁路工程和 10 个铁路口岸。因此，关于建设与“一带一路”线路有关项目所需铝材分为国内外两部分阐述。

国内配套项目对铝材需求 120kt

“一带一路”对内的发展作用巨大：一是京沈、京昆高

铁贯通后可将西部经济与东北经济板块联为一体，使得我国的开发战略从沿海地区转向内地，是继沿海、沿江、京广之后的又一个重要成长地带；二是这两条高铁沿线分布着北京和 7 个省会城市，并包括一批老工业基地，在未来培育强国支柱型产业如军工企业、大型装备制造业、精密仪器和自动化装备业以及战略性新兴产业方面均具有很突出的优势；三是通过新泛亚高铁与现有的“四纵四横”高铁网联通；交汇地区中心城市沈阳、太原、西安、成都、昆明可发挥更大的区域辐射影响力；可以进一步提升哈尔滨、昆明等边境地区中心城市的综合枢纽地位和国产辐射影响力。这些高铁项目的建设将拉动铝需求的较大幅度上升，在“十三五”期间的总需求量可达 120kt。

“一带一路”境外项目的实施对铝材需求 180kt

驱动轨道用铝持续高速上升的动力来自两台引擎:“一带一路”战略的实施与推进；国内高速铁路网进入运营期与新建线路的推进，以及城市轨道交通大建设期到来的拉动。

在“一带一路”国家战略引领下，轨道线路特别是高铁线路建设是走出去的先锋。“一带一路”战略构想将东亚、东南亚、南亚、欧洲、非洲东部与南部的 65 个国家联系在一起。该地区人口超过 44 亿，2013 年的经济总量超过 21.3 万亿美元，分别占全球的 63%和近 30%，是世界跨度最大、覆盖面积

最广的新兴工业地带。相应的有 3 条高铁：一条为欧亚高铁，另一条为中亚高铁，第三条为（新）泛亚高速铁路。

中亚高铁与古老传奇的陆上“丝绸之路”重合，沿着它的痕迹前行，从新疆出境，取道吉尔吉斯坦、乌兹别克斯坦等中亚国，经过伊朗，再到土耳其，横穿欧洲，最后抵达德国。此高铁的修建是为了快速运油。

欧亚高铁从伦敦出发，经巴黎、柏林、华沙、基辅，经过莫斯科后分成两支，一支进入哈萨克斯坦，另一支穿越西伯利亚，直奔哈巴罗夫斯克，而后进入中国的满洲里。

（新）泛亚高铁是覆盖东南亚地区的高铁网络，从昆明出发，途经越南、缅甸、柬埔寨、泰国、马来西亚等国，最后抵达新加坡，而向西的那条则直指印度。泰国已通过 2 条铁路建设规划，计划投资 7414 亿泰铢，约合人民币 1430 亿元，可于 2015 年开工建设，将通过老挝与中国连接。泛亚高铁有三个方案都要经过泰国，目前经过老挝的中线由中国投资兴建，已于 2014 年破土兴建，可通过京哈、哈牡绥高铁到达俄罗斯。

中国对这些中亚、泛亚高铁丝路都进行了勘探与规划，现正在一个国家一个国家地谈，由中方出资金与技术，用修高铁来置换当地资源，比如中亚的石油、天然气、矿产品等。这三条国际大通道的建设对外和对内都有着重大的经济发展意义。

它的对外意义：第一，通过高铁直接与印度洋沿岸的吉大港、加尔各答等相连，以更便捷、安全方式将各种资源运回来，成本也更低些；第二，强化北京、西安、成都、昆明等城市与东南亚、南亚各大城市的经贸活动与文华、科技交流；第三，通过东北高铁网与俄罗斯远东地区互联互通，进一步与日本海经济圈的经贸交流与合作；第四，通过泛亚高铁网建设，输出高铁技术参与邻国重大交通技术投资建设，并带动铁路沿线地区的开发与投资。

中国高铁在走出去方面捷报频传：土耳其安伊高铁全线贯通

2014 年 7 月 25 日，由中国企业参与建设的，连接土耳其首都安卡拉与其最大城市伊斯坦布尔的高速铁路二期工程全线贯通，土耳其总理埃尔多安搭乘首趟驶向伊斯坦布尔的高速列车并出席了通车典礼。这是中国整体高铁技术在海外“零”的突破。

中国-印尼合作建设雅-万高速铁路

2015 年 10 月中国相关企业与印尼国企联合体正式签署协议，双方将合作建设印尼首都雅加达至万隆的高速铁路，全长约 150km，总经费约 55 亿美元，由中国低息贷款，计划

2019 年通车，需要采购 19 列 500 辆全铝车厢，需要各种铝材 6000t（含车站等设施建设用的各种铝材）。中国还将与印尼合资在印尼建生产轨道交通车辆的工厂。雅加达与万隆相距 120km。雅-万高铁的设计最高速度 350km/h。

南车与 GE 建合资公司，剑指美高铁项目

2010 年 12 约中国南车股份有限公司（已于 2015 年与中国北车股份有限公司合并成为中国车辆股份有限公司）与美国通用电气公司(GE)出资约 5000 万美元在美建立合资公司，将中国的高速铁路，城市轨道及其他轨道交通技术在美推广。

中国首列出口欧洲动车组下线，将交付马其顿

2015 年 7 月中国首列出口欧洲的动车组在中国旗下株洲电力机车有限公司下线，已于 2016 年 2 月交付马其顿，时速 160km，这是中国出口到欧洲的第一个动车组项目，也是中国动车组产品复合欧洲 TSI 标准（欧洲铁路系统互联互通技术规范）的第一单。该项目列车外观按照马其顿国企颜色的红色，黄色主基调设计，效果如同流动的马其顿名片（图 1）。

中国首次出口马来西亚世界最高速米轨动车组

2014 年 11 月，中国南车公司出口米轨动车组有 10 列，

共 98 列，运行速度 160km/h，刷新世界纪录（图 2），这些米轨列车车头采用了“子弹头”模式设计，是中国首次的最高速度的米轨动车组，中车株洲电力机车有限公司目前在马来西亚有两个子公司，实现了由产品输出向产品加技术加服务加投资的转变，株机公司将进一步提供优质的轨道交通系统解决方案。

俄罗斯莫斯科-喀山高铁项目

俄罗斯莫斯科-喀山高速铁路已于 2015 年开始建设，全长 770km，造价约 1 万亿卢布，设计最高速度 400km/h，全部由中国建设和采用中国的高铁技术与装备，将大大拓展中国高科技产品的出口市场。

委内瑞拉迪纳科-阿纳科准高铁

此条准高铁已于 2015 年破土动工，全长 471.5km，设计高速 220km/h，合同金额 75 亿美元，全部由中国有关企业总承包。

此外，中国与印度正在积极探讨在印度建高铁线路与原有铁路现代化改造，如德里至钦奈高铁，全长 1754km、最高速度 300km/h，预计建造成本 2 万亿卢比，已就可行性研究达成合作意向；在美国建合作公司，合资建设美国西部拉斯

维加斯至洛杉矶的快速高铁，全长 370km，初始投资 1 亿美元，预计工程于 2016 年 9 月底开工建设，工期 3 年左右；美国加州高铁项目，全长 1287km，最高速度 354km/h，投资约 680 亿美元，中方参加招标。

中秘巴将建两洋高铁

2014 年 7 月 16 日，国家主席习近平在会见秘鲁总统时表示，中国、秘鲁、巴西三国就开展连接大西洋和太平洋的两洋铁路合作共同发表声明。建议三国组成工作组，开展包括规划、设计、建设、运营在内的整体合作。中方愿就此与秘鲁、巴西方面保持沟通。

泰国通过两铁路项目，未来直通中国

泰国军政府于 2014 年 8 月通过了两条连接中国和泰国的铁路项目，线路全长 845km，总成本约合人民币 1430 亿元。这两条新建铁路将使中国通过泰国和东南亚国家相连，会帮助中国在东南亚地区发挥更大的经济影响力。中国若能获得这两条铁路建设合同，将会为中国铁路外交打开新局面，2015 年 12 月 19 日举行了开工奠基仪式。

中国要在非洲建立高铁研发中心

李克强总理于 2014 年 5 月 5 日访问埃塞俄比亚时称，中

国要在非洲建立高铁研发中心，中方将积极参与非洲公路、铁路、电信、电力等项目建设。

中英要大力推进核电、高铁等领域合作

2014 年 8 月李克强总理访问英国期间指出，中英要大力推进核电、高铁等领域合作。双方还讨论了中国参与英国连接伦敦于英格兰北部的 2 号高铁项目投资的可能性。

中方积极探讨在印建高铁

在 2014 年 9 月，习近平主席访问印度期间双方签署了铁路合作备忘录和行动计划，包括以下几点：一是双方将合作确认金奈一班加罗尔-迈索尔路段既有线提速所需的技术投入；二是中方将为印 100 名铁路技术官员提供重载运输方面的培训；三是双方将在车站再开发、在印建立铁路大学等领域开展合作；四是印方愿积极考虑与中方合作建设一条高速铁路。

中信证券一研究报告显示，2016 年至 2030 年海外新建高铁里程将达到 8 万千米，投资总额将达 16.8 万亿元。如果车辆需求量按 1.3 辆/km，铝材采购量按 12t/辆匡算，则需要铝材 1248kt，平均 83.2kt/a，可见市场空间还是很可观的。

中国车辆铝材产能巨大 货源充裕

制造客运轨道车辆不但需要大型材，而且还要用一些板材、箔材、管材、锻件等，还要用一些中小型材制造门窗、装饰件、贮柜、推车等等。建设车站与其他设施如厂房与宿舍要用一些建筑铝材，在匡算铝材用量时，采购的铝材量可按 12t/辆计算，而车辆数可按高铁里程匡算：高铁车辆的为 1.3 辆/km；城区轨道辆为 3.5 辆/km 或更多一些。

轨道车辆制造所需要的各种铝材从最上面的受电弓铝管到下面车厢地板大型材与上车门处的花纹防滑铝板，中国全都能制造，而且装备生产能力远大于市场需求的六七倍。笔者在此提供一个令人惊诧的数字，日本全国只有一台 100MN 级的大挤压机，最高产量达 10.5kt/a，能满足全国高铁车辆所需的大挤压型材，而 2016 年中国保有的 100MN 级大挤压 52 台，这是一个天大的数字，实乃匪夷所思！中国有一个企业有≥90MN 的挤压机十多台，都能一年四季在那里不停地满负荷生产吗？回答是肯定的，不能！再欲建大挤压机的企业宜慎之又慎。

生产大挤压型材的企业如有条件宜对型材进行深加工，就是将大型材制成车体模块或“白车”甚至可上线路的车辆或编组列车。对车体铝型材进行深加工是中国铝加工业的一大特点，日本、美国和德国都没有这么干。对车辆铝型材进行深加工有诸多有点，如：可以提高铝材的附加值，提升企

业的经济效益；可加速废铝循环，提高废料品质，降低废料运输成本，减少污染物排放；降低车辆制造成本；推广铝材应用。在这方面宜与中车公司的机车、车辆制造厂密切合作，得到他们的支持与帮助，组成合作共赢联合体。

截至 2015 年 12 月，中国可制造铝合金轨道车辆整车和/或模块的企业，除中国中车有限公司的长春客车股份有限公司、唐山车辆有限公司、株洲电力机车车辆有限公司、浦镇铝业有限公司等外，还有一些铝型材生产企业也加入了此行列：吉林麦达斯铝业有限公司、利源精制股份有限公司、忠旺股份有限公司、南南铝加工有限公司、明泰铝业有限公司、中铝-萨帕特种铝型材（重庆）有限公司、丛林集团铝业公司等。

中国在生产车辆大型材方面还有哪些差距

与国际先进水平相比，中国在生产轨道车辆材料方面的主要差距有：现在国际上用于生产车厢型材的注册变形铝合金有十来种，但是没有一种是中国有知识产权的，这是短板，宜补上；二是挤压的又大又长（28m~30m）的车体中空薄壁型材应有严格的稳定的符合用户要求的尺寸偏差，特别是侧弯偏差，拼接缝隙应又窄又稳定一致；过大与不一致是主要差距，这是一个很复杂的问题，几乎所有的工艺参数都对其有或大或小的影响；三是对摩擦搅拌焊（FSW）应用还不普遍，

掌握的还不精准，现在还有许多文献采用“搅拌摩擦焊”这一术语，不确切，有纠正的必要。

现在是中国企业走出去的大好时机，应借“一带一路”这股千载难逢的强劲东风，加大走出去的力度，把高端装备、高端加工材料——半成品、各种各样的可以出口的产品输出去，而把国内需要的能源与资源换回来，合作互利。可以到国外去办车辆制造厂、铝型材挤压厂。办挤压铝材厂最好是把国内多余的挤压机及其他装备搬一些去，这对于去产能有帮助。

高铁车辆与磁悬浮车辆都是用铝制造的，用不着去做工作，去推广铝的应用，但是城市轨道车辆与城际轨道车辆、C80 运煤车等的铝化率还不高，特别是 C80 的占有率很低，推广铝在这些车辆中的用量还大有作为，笔者希望 2025 年这些车辆的铝化率能达到 60%。

胶轮系统的跨座式与吊挂式的单轨列车也是很值得推广的，可全用铝材制造，它们的噪声很低、适应性强、转弯半径小、爬坡能力极高，可穿越高楼大厦的底层，可在不宜建地铁的区域建设，速度可达 60km/h。重庆市已建成 2 条这样的城轨，运行情况良好；北京正在建一条，可于今年通车，起于石景山福寿岭，止于丰台花乡，全长近 25km，21 站，俨然一条空中游览线路。

现在轨道车辆用铝合金有 5xxx 系的、6xxx 系的，还有

7xxx 系的，因为后者含锑，其废料与前两系合金的不相容，因此研制其综合性能与性价比超过 7N01 铝合金的 5xxx 系合金或 6xxx 系合金是铝工业面临的严峻挑战。7N01 合金是日本为制造轨道车辆研发的,牌号中的“N”代表日本(Nippon)。它的抗拉强度＞325N/mm2、屈服强度＞245N/mm，分别比 5083-H112 合金型材的大 18%及 25%。淘汰 7xxx 系合金并创造一个 5xxx 系或 6xxx 系新合金，这是车辆铝合金战略研究的第一步，第二步是研发一个单一车厢铝合金取代目前的多个合金，当然这种任务不是短期行为，而是一项长期任务。

1.4.23 客运轨道车辆车体铝型材的深加工（一）

长客公司制造的中国首列市域快轨车在公司测试轨道上试跑。

编者按：在“一带一路”战略理念和中国城镇化高速发

展的推动下，中国轨道车辆制造业进入了前所未有的持续高速发展期，2030年前的复合年均增长率可达30%。对车体铝型材进行深加工是中国铝加工业的一大特点和优势，可推广铝材应用，给企业带来可观的经济效益。本文聚焦客运轨道车辆车体铝型材的深加工，对我国能够进行车体铝型材深加工的企业进行了详细的盘点和介绍，讲解了进行铝合金轨道车辆制造时的难关和注意事项，总结了国内外可挤压轨道车辆车体大型材的挤压机情况，并对全铝打造的中低速磁悬浮列车的前景以及我国2016年底将要建成的首条中低速磁悬浮S1线进行了深入的分析。以为企业及业内人士提供一定的参考和借鉴。

日本是世界上首个建成商业化高速铁路的国家，1964年10月1日，东海道新干线正式通车运营，速度210km/h，车体是用5083和6061合金制造的。用铝合金制造轨道车辆车体是日本开的先河，1962年日本山阳电气化铁路为了减轻车辆质量第一次采用5083及6061铝合金代替碳钢制造车体。2008年中国第一条高速铁路--京津高铁线投入运营，车辆及车头是全铝的。所谓全铝的就是在现有技术条件下凡是可用铝合金代替其他材料制造的零部件都是铝的，同时在经济上是有利的。至2015年，中国的高速铁路通车里程15000km，成为世界上最长的，而且在成套装备制造、道路修建、经营管理等技

术与经验方面均居世界顶尖水平。

现在，凡是速度大于200km/h的高铁车辆与磁悬浮车辆都已全部铝化，其他轨道车辆厢体的铝化率也已超过40%，但日本的要高一些已达50%。轨道车辆是一个庞大的家族，包括：高速铁路，中、低速磁悬浮线，地铁、高架城轨、市域快轨、城际高速、市区单轨、磁悬浮车辆等。磁悬浮车辆不管速度高低都必须是铝的；单轨车辆有两种：悬挂式与骑距式。

市域快轨交通是指大城市市域范围内的客运轨道交通线路，服务于城市与郊区（如北京城铁平谷线，长67.6km）、中心城市与卫星城、重点城镇间等，服务范围一般不超过100km，在广义上它属城市轨道交通范畴，但是它的站距比一般市内地铁的长得多，通常为2km~5km，而一般市内地铁的仅1km左右。地铁可以满足出行半径≤50km的乘客要求，城际和高铁的服务则大于100km至几千km，而50km~100km的运输则由市域快轨承担，被誉为“全能”市域快轨车。首列这种快轨车于2015年在中国北车长春客车生产基地进行了试跑（见图），它的车身是用碳纤维复合材料与铝合金制造的，是中国首次用复合材料制造轨道车辆车身，取得了更好的减重效果，不过复合材料的价格比铝合金高，零部件的制造加工工艺和维护检修也比铝合金的困难，报废零部件与整车身的回收几乎无法进行，而铝合金废件的回收率可达95%以上。

客运轨道交通用铝进入持续高速增长阶段

自2014年起中国经济发展进入新常态时期，也就是说在速度上迈进中高速时代。但是对轨道交通行业来说仍处于高速阶段，并至少要持续到2030年，在此期间，随着轨道交通的发展，其装备制造用铝材的复合年均增长率（CAGR）应当在22%以上，这种增长可分为两阶段，2014年至2022年的为25%，2023年至2030年的为18%。驱动轨道交通用铝持续高速发展的动力来自两台引擎：“一带一路”战略的实施与推进；国内高速铁路网进入运营期与新建线路的推进，以及城市轨道交通大建设期到来的拉动。

“十三五”期间中国高铁仍处于高峰建设阶段，同时以区域大城市为中心的城际铁路建设也已进入高速阶段。过去的10年是中国高速轨道交通快速发展的10年，“四纵四横”高速铁路干线已成型，根据铁路“十三五”规划：到2020年，全国铁路营运里程将达到14万km~15万km，其中高速铁路5万km~6万km，预计“十三五”期间高速铁路总竣工里程将达3.3万km，比“十二五”末的1.6万km翻1.0625番，基本建成高速铁路网骨架。但国内高铁的建设还在紧锣密鼓地进行。例如长5700km的沿海大高铁正在作开工前的准备工作，它从大连出发，进入世界最长的渤海湾大隧道，在烟台爬出来，沿着黄海、东海、南海以350km/h的高速滑行，达到广东海安又进入琼州海峡水下隧道，爬上地面后沿着海南岛东侧南下，直

指终点站三亚，一路经过11个省市区。

目前，国内累计有38个城市的轨道交通线路获得国家发改委审批通过，截至2014年年底，中国22个城市已建成投运城市轨道交通线路101条，运营线路长度3155km。根据全国各省市城际轨道线路规划，到2030年预计建成运营线路约2万km。国内轨道交通的高速发展，为车用铝材的发展提供了广阔的发展空间，2014年国内轨道交通领域铝挤压材消费量为160kt左右，2016年可达220kt，2020年有可能超过330kt。同时建设重点在中西部，80%的投资投向中西部高铁线路，重要的有成堰铁路鼓州支线、兰新第二双线、贵广铁路、成绵乐客专、长昆客专贵阳以东段。西部地区庞大的轨道交通建设投资将为车辆铝材与沿线铁路设施建设用铝材提供了极具潜力的消费市场。

在“一带一路”的国家战略引领下，轨道线路特别是高铁线路建设是“走出去”的先锋。“一带一路”战略构想将把东亚、东南亚、南亚、欧洲、非洲东部与南部的65个国家联系在一起。该地区总人口超过44亿，2013年的经济总量大于21.3万亿美元，分别占全球的63%和近30%，是世界跨度最大、覆盖面积最广的新兴经济带。相应的有3条高铁：一条为欧亚高铁，另一条为中亚高铁，第三条为（新）泛亚高铁。

中亚高铁与古老传奇的陆上“丝绸之路”重合，沿着它

的痕迹前行，从新疆出境，取道吉尔吉斯坦、乌兹别克斯坦等中亚国家，经过伊朗，再到土耳其，最后抵达德国。此高铁的修建是为了快速运油。

欧亚高铁从伦敦出发，经巴黎、柏林、华沙、基辅，经过莫斯科后分成两支，一支进入哈萨克斯坦，另一支穿越广褒的西伯利亚，直奔哈巴罗夫斯克，而后进入中国的满洲里。

（新）泛亚高铁是覆盖东南地区的高铁网络，从昆明出发，途经越南、缅甸、柬埔寨、泰国、马来西亚等国，最后抵达新加坡，而向西的那条则直指印度。泰国已通过2条铁路建设，计划投资7414亿泰铢，约合人民币1430亿元，可于今年开工建设，将通过老挝与中国连接。泛亚高铁有了3条方案都要经过泰国，目前经过老挝的中线由中国投资兴建，已于2014年破土动工，可通过京哈－哈牡绥高铁到达俄罗斯。

中国对这些中亚、泛亚高铁线路都进行了勘探与规划，现在正一个国家一个国家谈，由中方出资金和技术，用修高铁来置换当地资源，比如中亚的石油与天然气、矿产品等。这三条国际大通道的建设有重大的对外战略意义和对内经济发展意义。

它的对外战略意义：一可缓解南海争端下的马六甲海峡水运安全威胁，通过高铁直接与印度洋沿岸的吉大港、加尔各答等相连，以更便捷、安全的方式将各种资源运回来，成

本也更低；第二，强化北京、西安、成都、昆明等城市与东南亚、南亚各大城市的经贸活动与文化、科技交流；第三，通过东北高铁网与俄罗斯远东地区互联互通，进一步加强与日本海经济圈的经贸交流与合作；第四，实现国家向外战略投资，通过泛亚高铁网建设，输出高铁技术参与邻国重大交通基础投资建设，并带动铁路沿线地区的开发与投资。

对内的发展作用巨大：一是京昆、京沈高铁贯通后可将西部经济与东北经济板块联为一体，使得我国的开发战略从沿海地区转向内地，是继沿海、沿江、京广之后的又一个重要成长地带；第二，这两条高铁沿线分布着北京和7个省会城市，并包括一些老工业基地，在未来培育国支柱型产业如军工产业、大型装备制造业、精密仪器和自动化装备业、以及战略性新兴产业方面均具有很突出的优势；三是通过新泛亚高铁与现有的“四纵四横”高铁网联通；并汇地区中心城市沈阳、太原、西安、成都、昆明可发挥更大的区域辐射影响力；可以进一步提升哈尔滨、昆明等边境地区中心城市的综合枢纽地位和门户辐射影响力。这些高铁项目的建设将拉动铝需求的较大幅度上升，在2025年前的总需求量可达2000kt以上。

现在是中国企业“走出去”的大好时机，应借“一带一路”这股千载难逢的强劲东风，加大走出去力度，把高端装

备、高端加工材料--半成品、各种各样的可以出口的产品输出去，而把我们需要的能源与资源换回来，合作互利。现在也是已在国内做大做强的企业走向世界最佳时机。进入新世纪以来，中国有色金属产业如中国五矿集团公司、中国有色集团公司、中国铝业公司、金川集团公司、恩菲公司、南山铝业公司、魏桥铝电有限公司、忠旺集团等在走出“国门”方面做了许多工作，取得相当大的成就，希望他们继续前行，取得更大的成就，成为跨国大公司强公司的时间指日可待。

1.4.24 客运轨道车辆车体铝型材的深加工（二）

全球可挤压车体大型材的挤压机

这里所指的可挤压轨道车辆车体大铝型材挤压机是挤压力≥90MN 的，或者说是指挤压力≥100MN 级挤压机。截至 2014 年 12 月全世界投产的这类大挤压机 68 台，中国还有 1 台 250MN 的挤压机在建。

中国对客运轨道车辆车体铝型材的深加工

对轨道车辆车体铝型材进行深加工就是将其制成车体模块或白车或甚至可上路的车辆或编组列车，对车体铝型材进行深加工是中国铝加工业的一大特点，日本、美国和德国都没有这么干的。对车辆铝型材进行深加工有很多优点，如：

可以大大提高铝材的附加值，提升铝加工企业的经济效益；可加速废铝循环，提高废料品质，降低废料运输成本；降低车辆制造成本；推广铝材应用。

制造客运轨道车辆不但需要应用大型材，而且还要用一些板材、箔材、管材、锻件等，还要用一些中小型材制造门窗、行李架、装饰件、贮柜、推车等等。每辆车这类材料的采购质量约 2.5t。

截至 2015 年，中国可制造铝合金轨道车辆整车和/或模块的企业除中国中车有限公司的长春客车股份有限公司、唐山车辆有限公司、四方车辆股份有限公司、浦镇车辆有限公司、株洲电力机车车辆有限公司等外，还有一批铝型材生产企业也加入此行列：吉林麦达斯铝业有限公司、利源精制股份有限公司、忠旺控股有限公司、南南铝加工有限公司、明泰铝业有限公司、中铝－萨帕特种铝型材（重庆）有限公司等。

2015 年中国中车有限公司铝合金机车与车辆匡算生产能力可达 8000 辆/a，铝加工企业这两类产品产品 2017 年匡算生产能力也可能达到此数。因此，2017 年全国客运轨道车辆铝合金车辆的生产能力不会低于 15000 辆/a，如果全部达产（这是不可能的）需要大型材（每辆按 4t 计算）60kt，而中国≥90MN 挤压机的生产能力近 590.5kt，几乎为车辆匡算需求量的 8 倍多，实乃匪夷所思，不过有挤压力≥90MN 的挤压

机 52 台，每台匡算生产能力为 10kt/a 却是铁的事实。所以再建拥有这类大挤压机项目的投资者慎之又慎，但是在市场经济条件下，即使生产能力大量过剩，只要产品有无可争辩的市场竞争力，有稳定的销售渠道，可获得合理的利润，那就可以建。

辽宁忠旺集团铝合金车体制造厂

辽宁忠旺集团有限公司创建于 1993 年 1 月，经过 22 年的专业化发展，现已成为全球最大的单一铝材挤压企业，2015 年拥有 93 条挤压生产线、22 条熔铸线、36 条表面处理生产线、模具设计制造能力 10 万套/a。从 2011 年起，忠旺集团在原有工业铝挤压产品业务基础上延伸至深加工板块，深加工中心已于 2013 年投产，主导产品为交通运输工具，可分为两类：汽车类如全铝消防车、半挂车、油罐车等，另一类为轨道车辆车体。

忠旺深加工是当前世界最大的，已投产的生产线有：车体（厢）总成线，底架生产线，托盘生产线、特种汽车生产线等。各生产线零部件生产、组装与管理都已基本智能化与环保化，机械加工设备、组装焊接设备与大型工装从奥地利、德国、意大利、法国等国家引进。2014 年 11 月车体制造厂又引进 3 台综合加工中心机床，以满足不断增加的生产加工需要，它们由操作系统、控制系统、加工系统等组成，有高

效的综合加工能力。操作系统由控制面板和机械操作面板组成。操作者可通过人机界面，根据生产需要调整工艺参数，快速准确地执行程序，顺利完成加工任务。此外，它们还具有先进的主轴旋转、调速等加工功能，对一些特种工件也能实现高精加工。

机器人托盘自动焊接生产线于 2014 年全面贯通投产，由 10 组机器人组成，每组由 2 个机械焊接手臂和 1 个搬运手臂组成，焊接效率高，焊缝品质优秀。焊接过程产生的烟尘由抽吸系统吸走送入净化处理系统，净化后再排入大气。整个生产过程均由机械人完成，达到了自动化与智能化，仅需几个工作人员对生产过程进行监督巡视。

辽宁忠旺集团深加工中心 2013 年在公司本部所在地投产的精深加工车间成功地开发出了一批交通运输轻量化新产品如铝合金消防车、垃圾车、高寒高铁车厢厢体、半挂车等后，其铝合金精深加工有限公司又于 2014 年 7 月与辽阳市人民政府就在河东新城投资建设铝合金精深加工项目合作事宜举行了签约仪式。忠旺铝合金精深加工有限公司是忠旺集团新组建的一个分公司。铝材的精深加工代表着铝加工产业未来发展的方向，也是忠旺集团正在大力发展的产业。

目前铝材精深加工产业尚受到规模化程度不高等因素的制约，因此扩大产能、开展新的项目合作就显得非常必要。辽阳市政府非常重视铝加工业的发展，在河东新城建有铝材

精深加工区。此次铝材精深加工项目的成功签约，可给双方带来更为密切的合作关系，促使双方在铝材精深加工方面向新的方向发展。

忠旺集团天津项目二期主要内容为精深加工，可以肯定它将是全球最大与最先进的铝加工企业的铝材精深加工厂。

郑州中车轨道交通装备有限公司

该公司是明泰铝业有限公司与原南车四方车辆厂、郑州控股有限公司、荥阳城投有限公司共同出资 6 亿元成立的合资企业，铝合金轨道车辆生产能力 500 节/a。公司有 55MN、75MN、110MN 的 3 条挤压生产线（太原重工股份有限公司设计制造）的挤压车间与一个生产与组装车厢的车间，后者的部件加工中心和多功能工业机器人全部引进。明泰铝业公司 2013 年 11 月与南车集团四方机车车辆厂签订了战略合作协议，后者向明泰公司提供高速动车组车体铝型材焊接、加工技术，将明泰铝业公司培育成为合格的有竞争力的车体铝型材供应商，并有车厢总成能力。中车轨道交通装备有限公司挤压材生产能力 20kt/a，其中车体大型材的为 5kt/a，厂址在郑州市荥阳市，由明泰铝业公司经营管理。

车体制造车间采用引进的高速龙门加工中心和多功能工业机器人焊接装备，加工中心配置五轴联动高级数控系统，可以对复杂的空间曲面进行高精度加工。

利源精制股份有限公司的机车车辆制造基地

吉林利源精制股份有限公司位于辽源市，为了生产轨道铝合金机车与车辆从德国梅尔公司引进 5 台挤压机：160MN、100MN、60MN、45MN、36MN 的各 1 台。建设了一个铝合金机车与车辆制造车间与一个电子产品深加工车间，为了加工这些高精复杂的零件引进了约 300 台套装备，轨道车辆制造组装车间引进 30 多台套大型 5 轴 CNC 龙门加工中心、数控焊机与高度自动化的摩擦搅拌焊生产线。

利源精制有限公司建了两个各 200m 长的挤压车间，一个安 160MN 的，另一个安 100MN 的，车间内装有空调系统，可以满足高速轨道车辆大挤压型材生产的各种条件，型材的最大长度 28m，型材的各项性能与尺寸偏差指标全面满足欧洲的 ICE、TGV 型车辆，日本的新干线（Shinkansen）车辆，中国 CHR 和谐号车辆车体大型材的要求。利源精制有限公司制造的铝合金高速机车及车辆用的铝型材长达 28m，质量可达 2.5t。

利源精制股份有限公司为了进一步提升材料深加工水平，增强盈利能力，更有利于提高公司的自主创新能力，进一步提升公司的综合实力与国内、国际市场的竞争力,将投资 42.3 亿元，与日本三井物产金属公司建设天津利源轨道车辆制造有限公司，位于滨海高新区未来科技城的天津利源厂区。利

源精制公司负责所需土地、装备方面的投资，而三井物产金属公司提供日本轨道车辆制造技术人员，以及轨道车辆制造的完整技术、设计、自动化系统等资料与技术信息，同时负责整车在国内外市场上的销售与推广宣传。

这个项目建成后，可形成的生产能力：动车组 400 辆/a，铝合金城轨地铁 400 辆/a，不锈钢城轨地铁 200 辆/a，同时新增铝型材深加工产品 50kt/a，如材料利用率按 85%匡算，可消化铝挤压材近 60kt/a。

2015 年 4 月 28 日利源精制股份有限公司与沈阳市沈北新区签约，将投资 50 亿元在沈北新区建设铝合金车辆制造及铝型材深加工项目，将重点建设铝合金高铁、地铁、城铁、磁悬浮、城际轨道客车，铝合金火车及铝型材深加工产品等。年产轨道铝合金车辆 1500 辆，铝型材深加工成品 10kt。项目计划 2015 年开工，2018 年竣工，全部达产后，预计销售收入 250 亿元/a，纳税约 50 亿元/a。

这些项目全部建成后，利源精制股份有限公司可成为全世界铝加工产业最大的轨道车辆制造者，可与中国中车股份邮箱公司的长春客车公司、株洲机车车辆公司试比高。

南车铝材精密加工项目 2014 年 9 月 30 日投产

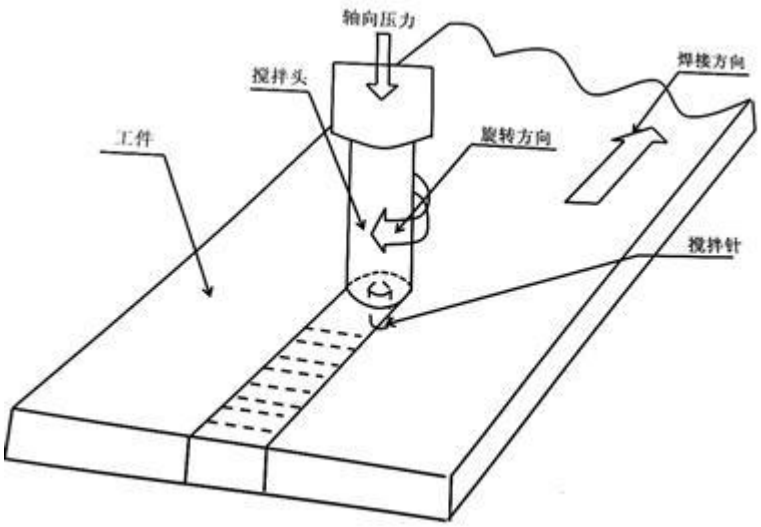
由南车集团株洲机车车辆有限公司与南南铝加工有限公司合资的南宁南车铝材精密加工有限公司一期工程已于 2014

年 9 月 30 日竣工，生产轨道车辆铝合金部件（模块），产量可满足 120 辆车/a 的需求。产品已在深圳地铁 1 号线扩编项目、南车长江公司 C80 铁路货车项目、南宁地铁 1 号线项目车辆制造中获得应用，南南铝加工有限公司生产的轨道车辆铝型材正在快速融入中国中车公司的产品配套链，南宁已成为中车公司打造优势产业、吸纳优势资源、布局广西搭上“一带一路”顺路车，可在东盟、东南亚轨道线路建设与车辆制造中发挥着不可或缺的作用。

中铝萨帕特种铝材（重庆）有限公司一期竣工

该公司位于重庆市九龙坡区西彭，占地面积 71342m2，总建筑面 33825m2,是中国铝业公司与瑞典格朗吉斯(Granges，原名萨帕铝业公司）公司的合资企业，一期利用西南铝业（集团）有限责任公司 82MN 挤压机，生产轨道车辆大型材与航空航天铝挤压材。二期与三期项目将根据市场情况于今后适当时候建设，公司的经营管理由格朗吉斯公司负责。

1.4.25 客运轨道车辆车体铝型材的深加工（三）



摩擦搅拌焊原理示意图。

铝合金轨道车辆制造有三关

在生产轨道车辆大型材与用其制造车体时需过三关：一是合金关，应有满足各项性能、挤压、工艺与焊接工艺的合金；二是挤压的又大又长（28m~30m）的车体中空薄壁型材应有严格的稳定的符合标准要求的尺寸偏差，特别是侧弯偏差，拼接缝隙应又窄又稳定，便于焊接；三是便于摩擦搅拌焊接（FSW）。

轨道车辆铝合金

车体由底板（由几块大挤压型材焊成）、侧墙、顶板、

端墙组成，车厢内装有座椅、空调系统、门窗、卫生设施、照明系统、电视、行李架、隔声隔热材料等。车体和台车带有制动器和连接器。车辆质量就是这些系统零部件质量的总和。车体、座椅架、行李架、门窗、空调系统等等都是用铝合金制造的。几乎所有的铝材都用了，其中挤压材约占74%，平轧材约23%，压铸件、铸件与锻件的量还不到3%。在所用的挤压铝材中，需用≥90MN挤压机挤压的约占45%，其余的55%可用挤压力小于90MN的挤压机生产。

在所用的合金中，5005、5052、5083、6061、6063都属常规合金，6N01与7N01合金是日本为制造交通运输装备研发的，牌号中的“N”代表日本（Nippon）。5005、5052合金是常用的综合性能良好的板带合金，有优秀的加工成形性能，阳极氧化性能上乘，是制造车辆内部装饰件的良好材料，多以薄板形式应用；5083合金也是一种常规的通用5xxx合金，多以厚板形式用于制造运输装备，如高铁轨车钣金件与船舶、车辆、压力容器、油管、低温容器等。6061、6063合金是应用最广的“古老”合金，当前的产量占全球铝材总产量的30%以上，它们都是美国铝业公司发明的，前者于上世纪30年代定型，后者于1945年诞生，当时的牌号分别为61S及63S。

中国在用7N01合金生产轨道车辆挤压型材方面取得了可喜的成就：2013年中国铝业公司研制的高速列车结构件用铝合金材料填补了国内空白，整体技术达到国际先进水平，该

成果形成了具有自主知识产权高速列车结构用可焊7N01合金材料工业化生产技术，并实现稳定化批量生产，成功用于制造高速列车车体底架减震器座，枕梁与牵引梁连接件等，改变了中国轨道交通7N01合金材料仍需进口的状况。7N01合金是一个典型的A1-Zn-Mg系中强可焊合金，挤压性能好，焊接系数高，主要用于制造CRH2及其衍生车型的主要车体承力零部件，不过该合金有一定程度的应力腐蚀敏感性，此外，由于高铁运行环境特殊，对铝材的疲劳性能、断裂韧性、焊缝力学性能都有更高一些的要求。

南南铝加工有限公司经过较长时间的研发批量生产出各项性能均优于从日本进口材料的7N01合金车体大型材，他们采用先进的铝合金熔铸生产线，使7N01合金熔体品质优于航空航天标准，利用公司现有的多级控温均匀化处理炉与航空级A1-Zn-Mg-Cu合金T7751状态材料专用的积分时效炉，结合第二相形核自由能的计算结果，制订了有自助知识产权的热处理工艺与形成7N01合金型材稳定化生产的品质管理体系，生产出高性优秀的7N01合金型材，经多方权威机构的严格检测分析，所生产的7N01-T5合金体中空大型材的力学性能、疲劳强度、焊接接头抗腐蚀性能与日本材料的相当，其抗应力腐蚀开裂性能、抗剥落腐蚀性能以及断裂韧性优于进口材料。

西南铝业（集团）有限责任公司在研发声屏障板和铝合金轴箱体模锻件等高铁专用高技术含量方面成就斐然，2008

年成功地锻出第一种铝合金轴箱体模锻件，2010年又与高校合作制成性能更好的新规格模锻件，它们分别用于速度300km/h和350Km/h的高速铁路车辆箱体中。西南铝业（集团）有限责任公司生产的铝合金声屏障板在京沪高铁建设中获得广泛应用。

我们可以根据轨道列车的运营速度将车辆车体铝合金分为三代：第一代为常规合金6061、6063与5083合金，列车速度＜200km/h，用于制造城市轨道车辆的车厢体；第二代合金是用于制造速度200km/h~350km/h高铁车辆厢体的，如6N01、7N01、5005、6005A、7003、7005合金等；第三代合金是正在改进和研发的合金，如含钪（Sc）的合金，用于制造速度350km/h~450 km/h列车的车辆车体，钪是优化铝合金性能最为有效的合金化元素。毫不夸张地说，制造高铁车辆所需要的铝材，从顶部受电引用的无缝管材到底架用的锻件材料中国都能提供，所用的种种零部件中国都能制造。

在设计轨道车辆时，必须考虑车辆报废后的回收和利用情况，铝在结构用的金属材料中具有最高的可回收率。轨道车辆铝合金以5xxx系、6xxx系、7xxx系合金为主，前两系合金废料具有一定的相容性，而与后者不相容。因此，为了提高废料品质和经济效益，在设计车辆时，所有零部件最好用同一系合金制造，中策是用前两系合金，下策是三者全用。可是实际情并没有这么简单与理想。日本曾在20世纪末发起

了一场“一类合金运动（monoalloy movement），”旨在轨道车辆制造中仅用6xxx系合金，不用7N01合金。然而研究结果表明，该情况仅适用于速度≤120km/h的市域轨道车辆，对速度更快的特别是高速列车车体不适用，虽然它的绝大多数零部件可以用6xxx系合金制造，但是低架大型材必须用中强可焊的7N01合金制造，方能胜任特有的载重和高速行车状态。研发力学性能与7N01合金的相当或高一些的6xxx系合金或5xxx系合金乃当务之急，而其制造成本应是可以接受的。

轨道车辆挤压材的力学性能与尺寸偏差

只要严格遵守操作规程生产与精心操作，所生产的轨道车辆挤压铝材的各项性能与尺寸偏差完全可以满足欧盟标准EN755-2、EN755-3、EN755-4、EN755-5、EN603-3等与国际GB/T3191、GB/T4436、GB/T4437、GB/T4437.2、GB/T6892等的要求。但中国的大型材的侧弯偏差还较大，仍须努力。

车体部件的摩擦搅拌焊（FSW）

铝合金车体制造关键技术主要有机械加工、冲压成型、焊接组装等。机械加工主要包括小件加工、长大铝型材加工、侧墙等大部件组焊后整体加工。小件加工和大铝型材加工主要焊接坡口及孔眼（缺口）的加工，侧墙组焊后整体加工主要是窗口加工。在此仅介绍摩擦搅拌焊的一些简要情况。

随着现代焊接技术的不断发展和应用，新的焊接法在车辆制造中获得了广泛的应用，如激光焊（Laser welding）与摩擦搅拌焊（FSW），特别是后者已成为国外车体零件链接的主要工艺，但在国内尚未成为主流，不过可喜的是，中铝萨帕特种铝材(重庆)有限公司的车体模块制造已全部采用FSW，并将原在上海的超长大型摩擦搅拌焊生产线搬迁到重庆工厂。

摩擦搅拌焊是英国焊接研究所（TWI）于上世纪90年代初首次提出的理念并取得专利，1993年提出进行实验研究计划，萨帕铝业公司积极参与此项工作，1994年进行了第一次试验，取得了良好效果。1999年有2台生产性摩擦搅拌焊接生产线投产，2003年欧洲一些企业安装了若干台此类焊机，稍后美国航空航天局与日本日立公司也先后从瑞典引进此装备与技术；2005年上海萨帕铝业公司首台摩擦搅拌焊机投产，2007年又投产了一台，2010年一台超长的此类焊机投产，此后军工部门引进了2台用于试验与生产，至2015年中国投产的摩擦搅拌焊机已有约5台。值得提一下的是，至今有一些技术期刊、图书与作者屡屡把摩擦搅拌焊写为或说成“搅拌摩擦焊”，无论从英语的语法与习惯还是从此法的工作原理来说都是不对的，在任何场合都应用摩擦搅拌焊。

用耐热合金制成的搅拌棒（针、特形指棒）插入被焊的两块铝材连接缝中，在高速旋转下与铝基体接触产生剧烈摩擦，摩擦热足以使铝基体达到半熔状态。当搅拌棒在焊缝中

向前行走时，两边受摩擦加热已达到半熔状态的铝在搅拌的继续作用下，因变形抗力显著降低而沿着旋转的搅拌棒产生塑性流动，随着搅拌棒的移动，棒后的流动铝因热量失散被急冷而形成焊缝，严似细细的波纹。

中国的原北车、南车集团下属的客车厂、机车车辆公司都从国外引进了摩擦搅拌焊技术生产线，吉林麦达斯铝业有限公司2011年向上海航天设备制造总厂订购了1台大型摩擦搅拌焊机，利源精制股份有限公司从国外引进了此类焊机。上海航天设备制造总厂已完全掌握了此焊接技术及生产设备制造技术。另外，还得着重指出北京赛福斯特技术有限公司在推广此技术方面的突出贡献，它成立于2002年，是中国首家专业化的英国焊接研究所的摩擦搅拌焊接技术授权公司，已成功开发出约70套此种设备，在国内的各个工业领域获得了成功的应用。

与其他焊接工艺相比，摩擦搅拌焊具有一系列的优点：焊接温度未达到铝合金的熔点，通常不高于580°C，不会熔化，但大大软化，因而焊缝有比母材更细化的再结晶组织，焊缝几乎与母材在同一平面上，它们的力学性能几乎相等；焊缝既可呈直线形也可以为其他形状，对于裂纹敏感的铝合金，也不必采取特别的措施就可以施焊；无需填充金属和保护气体，成本比传统方法的低一些；不必开口和焊前处理；焊接速度高于溶化极惰性气体保护电弧焊（MIG）的；焊接变

形量小，仅为MIG法的十二分之一；可以焊接所有的变形铝或铸造铝合金，能焊接异种金属，如铜与铝；热影响区（HAZ）性能比溶化焊的高；与传统的熔焊法相比，摩擦搅拌焊温度低，变形小，没有凝固裂纹，是焊接铝合金的现代化的最佳工艺，可以顺利地焊接那些难熔焊的易产生焊接裂纹的超强铝合金和铝-锂合金等。不过焊接量少的单位不宜采用摩擦搅拌焊，因为它的设备投资量较大；现在可用此法焊接厚达75mm的工件，良好的形状和尺寸偏差，自动化程度高，可重复生产，几乎无需预焊，检查成本低；环保、无有害气体、无弧光、无噪声；焊接后无需矫正。摩擦搅拌焊在各国的高技术部门都已得到应用，1996年美国麦道公司用此法生产德尔塔火箭燃料贮箱，波音飞机公司1998年引进摩擦搅拌焊机，用于焊接航天器部件。中国轨道客车车体和模块制造、铝型材的深加工都可以广泛采用摩擦搅拌焊连接。

1.4.26 客运轨道车辆车体铝型材的深加工（四）

全铝打造的中低速磁悬浮列车

1924 年磁悬浮列车理念被提出后，近百余年来人类曾致力于借助磁悬浮解决列车高速运行问题。近些年来，具有静声、零排放、较大载客量、低造价的中低速磁悬浮列车研发异军突起。目前，世界上只有极少数国家掌握这一技术，而

中国在这一领域世界领先水平。世界上首条商业磁悬浮线2013年在上海投入运营，从德国引进，往返于龙阳路-浦东机场。第一条中低速速磁悬浮S1线2016年年底将在北京建成投产。

上海浦东机场-龙阳路线的建设技术与机车、列车车辆全是从德国引进的，而北京首条磁悬浮S1线的一切技术、材料与装备全是国产的与自主知识产权的。

磁悬浮列车的研发已经历了三代，目前的中低速磁悬列车是第四代,这种最新的磁悬浮列车设计速度最大为100km/h。由于磁悬浮列车是靠底下的磁装备系统发出的磁力克服车的重力（重量）将车托起，始终离轨面10㎜，在空中“飞”着向前，要求车的重量越小越好，越轻越易“飞”起来，所以必须用密度小的轻质材料制造车辆，在当前的技术条件下，可入选的材料只有铝和复合材料，虽然复合材料的密度比铝的小,但铝的综合经济效益还是比复合材料的高一些。为此，铝合金成了制造磁悬浮车辆的最佳材料。

中低速磁悬浮列车将成为最具发展潜力城市轨道交通、城域轨道交通甚至城际轨道交通的工具。因为它的优点多多：没有轮、轨接触，运行起来非常宁静，如轻风拂面；能开进居民小区，无烟尘排放；载客量大，一辆6节车厢的列车的载客量可超过600人；2016年年底将在S1线上跑的中低速磁悬浮列车的直流磁场强度小于正常看电视时对人体的影响，

交通磁场强度小于使用电剃须刀时对人体的影响；使用的车厢宽度 3m，比一般地铁列车宽一些，短一些，因为列车是浮着跑，不会有明显的震动，可以满足站立需要了；中低速磁悬浮列车的最高速度可达 160km/h，但出于安全考虑，真正的形式速度为 40km/h~60km/h，站间距 1.5km~2km；它的造价比铁路的低 1/3，比轻轨的低 1/4，比地铁的则低得多；它的最小转弯半径只有 50m，爬坡力强，能够绕着建筑物或者山体灵活运行，能够开进城市居民小区。

株洲电力机车有限公司与西南交通大学、株洲电力机车研究所合作研制的首列中低速三节编组的列车自 2012 年 1 月 20 日下线以来在试运转中一直正常，达到了设计的预期目标，完全具备投入实际运营能力。这列“磁悬浮”圆润的车体装饰着“中国红”腰线，车内装备者软座席、落地窗、暗花不锈钢扶手，暖色调大贯通车厢内的气氛如同大型民航客机机舱。

中低速磁悬浮列车兼顾了环保、经济、安全和舒适性，在人口密集的城市对环保要求很高的风景名胜地区有着广阔的用武之地，中国首条北京磁浮 S1 线于 2015 年 4 月 13 日全面开工，从门头沟到苹果园全长 10236m，只需 10min，有高架车站 8 座。

2012 年以来，北京控股集团下设的北控磁浮公司在研发生产第四代中低速磁悬浮列车，瞄准这个轨道交通的“红海”

大力抢战市场，借助北京市轨道 S1 线建设契机，在京郊建设北京轨道交通车辆生产厂,争取到 2015 年形成年建设线 20km，造成 200 辆的产业化能力，暂不涉及高铁、轻轨等项目，以避免与南车、北车的传统业务直接展开竞争。

结束语

铝材加工企业大规模生产轨道车辆车体模块或车体甚至车厢及机车是中国铝加工产业一大特点，有利于提高企业效益和加速废料循环。今后 15 年至 25 年在“一带一路”战略理念和中国城镇化高速发展的推动下，中国轨道车辆制造业进入了前所未有持续高速发展期，2030 年前的复合年均增长率可达 30%，2015 对挤压材的需求量可达 130kt，对板材需求量 30kt（采购量）。这个采购量包含中国为国内及出口用的轨道车辆与机车用的各种铝材，以及为修建铁路建设的车站及其他设施所需要的种种铝材，预计 2025 年对挤压材的需求量约 1800kt，平轧产品的需求量约 480kt。

在轨道车辆制造用的挤压材料中，约有 45%需用≥90MN 挤压机生产，约 55%的可用挤压力≤85MN 的挤压机生产。

在中国制造铝合金轨道车辆时，当下 95%以上的连接件是用 MIG 法（金属极惰性气体保护法）焊的，用 FSW 法焊的

还不到 5%，实际上 FSW 法的优点远比 MIG 法的多，是当前最先进的铝及铝合金焊接工艺，为什么中国还未推广 FSW 法呢？主要原因是：该工艺和 MIG 法在设计焊口时不兼容，按摩擦搅拌焊工艺设计的焊口不适合 MIG 焊，反之亦然，因此在 FSW 技术方面受到很大制约；其次，中国生产的大型材的侧弯偏大，比日本及德国生产的大得多，难以满足 FSW 工艺要求，不过这种状况已发生了根本性的改变，FSW 定会在中国轨道车辆制造中全面的推广应面。只要 FSW 技术领域上达到格朗吉斯铝业公司的水平，我们在铝合金轨道车辆制造方面与发达国家的差距就完全消除了，全面超过了日本日立公司的水平与德国相关企业的水平。

推广铝在非高速交运轨道车辆重点应用仍然任重道远，铝在磁悬浮车辆与速度大于 200km/h 的高速车辆制造中的应用不用去推广，为了减小车辆的净质量。它们会最大地提高铝化率，但在非高速车辆制造方面的情况就不尽量，2014 年中国这类车辆的铝化率在 41%以上，其余车辆的用材有低合金化碳素钢、不锈钢、复合材料，中国首例“全能”市域快轨车辆于 2015 年 4 月在长春轨道客车股份有限公司下线，在制造材料上首次采用了碳纤维、铝-镁合金等。所谓“全能”市域快轨车是指在高铁、地铁轨道上都能跑，最高速度 160km/h，车内无卫生间与给水设备。市域快轨交通指的是大城市市域范围内的客运轨道交通线路，服务于城市与郊区、

中心城市与卫星城、重点城镇间，服务范围一般在 100km 内，市域快轨交通属于广义城市轨道交通范围。它的线路长度比一般市内地铁的长度长一些，目前世界最长地铁线路是北京地铁 10 号线，全长 57km，一般市内地铁线路长度仅 10km~20km。市域快轨线路的平均站距比一般市内地铁的长得多，为 2km~5km，而一般市内地铁的仅 1km 左右。

跨座式单轨列车有“空中小火车”的美称，有跨座式与吊挂式的。它们都是通过单根轨道来支撑、稳定和导向，是车体骑跨或吊挂在轨道梁上运行的铁路，但不同于轻轨的钢轨钢轮系统，而属于胶轮系统，噪声很低，适应性强，转弯半径小，爬坡能力强，可穿越高楼大厦的底层，可在不宜建地铁的区域建设，速度可达 60km/h，重庆市已建成 2 条这样的城轨，北京正准备建一条，今年开工，2016 年建成通车，起于石景山福寿岭，止于丰台花乡，全长近 25km，21 站，俨然一条空中游览线路。

现在轨道车辆用铝合金有 5xxx 系的，6xxx 系、还有 7xxx 系的，因为后者含锌，其废料与前两系合金不相容，因此研制其综合性能与性价比超过 7N01 合金的 5xxx 系合金或 6xxx 系合金是铝工业面临的严峻挑战，高等院校、研究院所与有条件的大型铝加工企业宜在这方面多做些工作。

1.4.27 中低速磁悬浮列车开启铝材应用新亮点

磁悬浮列车是轨道客运车辆皇冠上的明珠，按运行速度划分可分为两种，高速的与中低速的，前者的速度≥400km/h，后者的速度≤160km/h。北京的首条中低速磁悬浮 S1 线 2016 年年末开始运营；中国首条中低速磁悬浮列车已于 2015 年 11 月 23 日在湖南长沙下线，开始调式，预计 2016 年上半年投产运营。这条磁悬列车线是长沙磁浮工程的一部分，西起长沙高铁南站，东至黄花机场，均为高架线，全长约 18.5km，已于 2015 年 6 月开工建设，年末竣工通车。

中低速磁悬浮列车优点多多

磁悬浮列车理念于上世纪 20 年代被提出来后，近百年来科学家曾致力于借助磁悬浮解决列车高速运行问题，而近些年来，具有静音、零污染、较大载客量、低造价等一系列优点的中低速磁悬浮列车研发受到追捧，异军突起。目前，全球只有极少数国家如中国、德国、日本等掌握这一技术。中国国防科学大学、中国株洲电力机车有限公司磁浮交通系统中心、西南交通大学、中铁二院等在研发中低速磁悬浮列车领域做了许多开拓性的工作，使中国在这方面的总体技术水平居世界领先。

无噪声、无明显震动

因为磁悬浮列车与轨道不接触，是浮着的，在离轨道 10㎜的“空中”飞行，无摩擦，因此不会有明显的震动，平平稳稳，可以满足站立的需要，没有噪声，不会扰民，就像鸟儿飞过一样，轻风拂面。

无电磁辐射污染，对人体无害

磁悬浮列车的运行原理是利用电磁力抵消地球引力，通过自动控制系统使车体与轨道之间始终保持着约 10㎜ 的距离。磁力集中于这 10㎜ 的空间内，一旦离开此空间，磁力便恢复到与地磁场大体相等的水平，不会对乘客以及对周边居民造成任何损害。中国科学院电工研究所对北京磁悬浮列车的电磁辐射进行了六批、十几轮的第三方测试，检测结果表明：直流磁场强度小于正常看电视时对人体的影响，交流磁场强度小于使用电剃须刀时对人体的影响。

中国磁悬浮技术首席科学家、国防科技大学常文森教授于 2011 年 2 月说：“北京 S1 磁悬浮线建成运行后，车厢里将安装可视化的电磁辐射测量设备，乘客可以直观地‘看到’磁场强度。因此，人们对磁悬浮列车的安全性尽管放心。”

造价比地铁低，能够开进居民小区

中低速磁悬浮列车造价不但比地铁的低得多，而且比轻轨的还低，能够开进居民小区，可绕着大楼转，可从高楼大厦底层或中间穿过，运行起来又无烟尘排放，没有轮、轨摩

擦，跑起来非常宁静。同时采用特殊的“抱轨”设计，能确保列车不脱轨，不侧翻。综合造价比铁路和中运量轻轨分别低 1/3 和 1/4。最小转弯半径只有 50m，爬坡力很强，能够绕着建筑物或山体灵活自如运行。

应用前景广阔

中低速磁悬浮列车兼顾了环保、经济和安全性，在人口密集的城市对环保要求很高的风景名胜地有着广阔的应用前景。中国现在有多家企业可以制造中低速磁悬列车，有两个城市在建设中低速磁悬浮列车线。

株洲电力机车有限公司磁悬浮交通系统中心制造的中国首列磁悬浮列车于 2012 年 1 月 20 日静悄悄地驶下了生产线，三节编组，车体圆润，装饰着“中国红”腰线，车内装备着软座席、落地窗、暗色不锈钢扶手。暖色调大贯通车厢内的氛围，如同大型民航干线客机机舱。这种中低速磁悬浮列车的最高设计速度 100km/h，最大载客量约 600 名。2015 年 11 月 23 日一条中低速磁悬浮列车在长沙亮相，并开始调试，计划 2016 年上半年在长沙磁悬浮线上投产运营，这将是中国正式运营的第一条线。

北京北控集团早在 2012 年就已确定以旗下北控磁浮公司研发的第四代中低速磁悬浮列车为主导产品，进军未来全国的城市轨道交通市场。北京 S1 中低速磁悬浮线可于 2016 年后期投产运营，6 节车厢一编组。北京中低速磁悬浮列车

的最高速度为160km/h，但出于安全考虑，真正行驶速度控制在40km/h~60km/h，每节车厢容纳乘客约100人，站间相距1.5km~2km。

中低速磁悬浮列车

铝材应用新兴市场

2016年中国北京与长沙各有一条中低速磁悬浮列车客运线投产，北京S1线一期长10.236km，长沙线约18.5km，共计需要车厢约200节，每节车厢铝材采购质量10t匡算，共耗用铝材2000t左右。S1线车厢宽度3m，长15m，比一般地铁列车的宽一些，短一些。由于中低速磁悬浮列车具有一系列优点，是投资效益最高的环保极优的城市轨道交通建设最佳的方案，因此在长沙线与北京S1线投产运营后，中国在今后15年内可能在全国大中城市掀起建设中低速磁悬浮客运线浪潮，从而成为铝材应用新亮点。中国完全掌握了中低速磁悬浮列车方方面面的设计、制造与管理等的技术。高铁已成为中国在国际市场上的金名片，中低速磁悬浮将会紧随其后成为中国纵横国际市场的第二张金名片。

中低速磁悬浮列车车厢结构可以用铝合金、钢、不锈钢或复合材料制造，但是，用挤压铝型材摩擦搅拌焊制造具有最高的性价比与投资效益，所用的大挤压型材与高铁车厢车体的相同，中国有十几个企业都能批量生产，用的板材合金

为 5005、5052、5083、6061，型材合金为 5083、6061、6N01、6063、6082、7N01、7003 等；铸造铝合金的用量，每辆车厢的用量还不到 500kg，主要是 ZL101 与 EN-Al10Si8 合金等。

中国 2003 年引进德国装备及技术的高速磁悬浮列车于上海浦东开始运营，不但安全运行至今，而且完全掌握、消化、吸收了所引进的技术，并创新地拥有了安全自主知识产权的高速、中低速磁悬浮列车的生产与控制技术。

中国磁悬浮列车是靠其底部永磁体产生的强磁场与悬浮驱动，这种永磁体用强磁材料钕-铁-硼（Nd-Fe-B）合金制造，钕是一种稀土金属，中国是稀土之乡，占世界总储量的 80%以上，为发展 Nd-Fe-B 合金提供了强大的资源支撑。

目前世界上有三种磁浮：德国的常导电式，日本的超导电式，中国的永磁式，前两种都需要用电力来产生磁悬浮动力。中国的永磁悬浮，是利用特殊的永磁材料，不需要任何其他动力支持，在任何情况下，车体与轨道之间都不接触，而德国与日本的技术在不通电的情况下，车体与槽轨道接触在一起。不过，无论磁悬浮采用何种技术，都离不开永磁体，只是数量多寡而已，铁轨有多长，永磁体就有多长。

现在，在国内有叫磁悬浮列车的，也有叫磁浮的，笔者认为还是叫磁浮列车与磁浮技术为好，更为简明。

1.4.28 总理“推销”高铁：车辆铝材前景灿烂

改革开放30多年来，中国铁路通车里程保持9%以上的复合年增长率，截至2013年，铁路总里程突破了10×104 km，“四纵四横”高铁网基本绘就。中国自2004年起开始建设高铁，2007年12月首条城际高铁--京津高速铁路开通，至2013年，高速铁路已突破1×104 km，占世界总里程的近50%，在建规模1.2×104 km，中国已成为全世界高速铁路运营里程最长、在建规模最大的国家，2015年中国高铁运营里程可达1.9×104 km，占世界总里程的65.5%。至此，国内高速铁路网基本建成了，走向全世界、走向发达国家的号角吹响了。

总理当“超级推销员”

高铁起跑奔向世界

不但在中国，就全球而言，传统的物流工具都进入了瓶颈期：成本最低的水运，速度最慢；成本最高的空运，平均客流量多年以来两位数增长，但空域管理的滞后与成本的高昂，使航空不可能成为中国与发展中国家最大的运输载体与客运载体，这为高铁的发展提供了很大的潜力与千载难逢的机会。

新一届政府上任以来，李克强总理在出访时不失时机地“推销”高铁。他说，“推销”中国高铁特别有底气。中国高铁安

全可靠，技术有保证；中国高铁性价比高，比其他一些拥有高铁技术的国家的便宜；而且中国高铁和铁路的速度多样，可以满足不同国家的需求；中国的高铁网络巨大，其他国家多是短途的；中国的桥梁隧道建设技术水平世界领先，速度快，价格合理，具有明显的优势。

2013年10月，李克强总理在访问泰国期间，两国总理就加强铁路建设合作举行了会谈，并出席了在曼谷举行的中国高速铁路展开幕式。

2013年10月，李克强在北京会见澳大利亚总督布赖斯时，提出澳大利亚已就建澳首条高速铁路进行研究。中国高铁有诸多优势，希望双方就此探讨开展合作。

中东欧建造高铁很有潜力。2013年11月，李克强总理访问罗马尼亚时，特邀中东欧16国领导人参观中国铁路等基础设施及装备制造展览会。总理在展会上向中东欧国家领导人“推销”中国高铁。

非洲是未来铁路建设与装备大市场。总理访问埃塞俄比亚时，不忘“推销”中国高铁，称要在非洲建立高铁研究与发展中心。李克强指出，中方会积极参与非洲公路、铁路、电信、电力等项目建设。中国承建的安哥拉本格拉铁路于2014年8月12日全线竣工，将于年内正式通车运营，为新中国新世纪承建的海上最长铁路，设计速度90km/h，比原来速度提高两倍。

英国有建2号高铁的可能性。李克强2014年6月访问期间指出，中英要大力推进核电、高铁等领域合作。双方还讨论了中国参与英国连接伦敦北部的2号高铁项目投资的可能性。在中英联合声明中“高铁”出现了两次，卡梅伦表示，英方愿与中方深化高铁领域合作。

美国交通基础设施升级换代。李克强总理在2014年8月会见美国议员代表团时表示，将推动高铁等先进技术装备走出去。李克强指出，中国愿积极参与美国交通基础设施升级换代项目。

土耳其安伊高铁全线贯通。2014年7月25日，由中国企业参与建设的、连接土耳其都安卡拉和土耳其最大城市伊斯坦布尔的高速铁路二期工程全线贯通，土耳其总理埃尔多安塔乘坐首趟驶向伊斯坦布尔的高速列车并出席了通车典礼，这是中国高铁在海外“零”的突破。

2014年9月11日，国家主席习近平在塔吉克斯坦首都杜尚别会见俄罗斯总统普京时，积极探讨了高铁合作。

2014年9月18日，国家主席习近平访问印度，双方签署了铁路合作备忘录和行动计划，其中包括：合作确认金奈-班加罗尔-迈索尔路段既有线提速所需的技术投入，考虑合作建设一条高速铁路。东南亚国家的高铁总里程可达10000km左右。

正和二三十个国家谈高铁

布局遍布世界五大洲

据《新京报》发文称，中国正在和世界上二三十个国家谈判与讨论有关高速铁路建设合作事宜，这些高铁有的在一个国家，有的是跨国的，有的甚至是跨洲跨海的洲际超级大铁路，这是史无前例的全世界高铁大建设。早在2009年，中国已确定周边3条高铁规划战略，其中有2条越过千山万水、蜿蜒五六千公里到达欧洲：一条为欧亚高铁，另一条为中亚高铁，还有一条为泛亚高铁。

中亚高铁与古老传奇的“丝绸之路”重合，沿着它的痕迹前行，从新疆出境，取道吉尔吉斯坦、乌兹别克斯坦等中亚国家，经过伊朗，再到土耳其，最后抵达德国。这条铁路的修建目的是为快速运油。

计划中的欧亚高铁从伦敦出发，经巴黎、柏林、华沙、基辅，经过莫斯科后分成两支，一支入哈萨克斯坦，另一支穿越广袤的西伯利亚，遥指哈巴罗夫斯克，而后进入中国的满洲里。

泛亚铁路是覆盖东南亚地区的高铁网络，从昆明出发，途径越南、缅甸、柬埔寨、泰国、马来西亚等国，最后抵达新加坡。泰国已通过两条铁路项目建设，计划投资7414亿泰铢，约合人民币1430亿元，计划2015年开工建设，将通过老挝与中国连接，未来将采用高铁技术，成为泛亚高铁的一部分。泛亚铁路有3条方案都要经过泰国，目前经过老挝的中线

由中国投资兴建，并已破土动工。

中国工程院院士王梦恕曾表示，中国对上述高铁线路都进行了勘察和规划，现在需要一个国家一个国家的谈，由中方出资金与技术，用修建高铁来置换当地资源，比如中亚的天然气。

据王梦恕透露，中国另外一条“半世纪之路”、“神奇之路”是中美洲际高速铁路，从中国东北北上，经过俄罗斯西伯利亚东端，穿越白令海峡隧道，到达美国的阿拉斯加，经过加拿大西部，然后到达美国西海岸，全程约8000km，几乎相当于6.5条京沪高铁的长度，站间距离的长度也是旷世无双的。如果这条高铁的运营速度为400kt/a，从中国哈尔滨出发到达美国西雅图仅短短的22小时，加上沿途停靠时间，总时长恐怕也不会超过24小时。虽然早在70年前就有人提出过修建白令海峡隧道把亚美两大洲连接起来的设想，但一个梦想的实现重任不是只有中国独自担当，它离不开沿途各国的参与和支持来共同圆人类的这一伟大梦想。

除了对这些国际大高铁作开工前的准备工作外，国内高铁的建设也还在紧锣密鼓地进行当中，虽然运营的高铁已达1×104 km，但是在建的里程还有1.2×104 km，2015年高铁运营里程将达1.9×104 km，2016年以后还需建3000km。已投入或即将投入运营的是2014年全线贯通的沪昆高铁，是中国“四纵四横”铁路客运网主骨架之一，全长2264km，设计最高速度

350km/h，实际运营速度300km/h。

另一条最值得关注的规划高铁路线是通过渤海湾海峡和琼州海峡水下隧道的沿海大通道，从东北大连进入世界最长海底隧道，从烟台爬出来，沿着黄海、东海、南海高速滑行，达到广东的海安又进入琼洲海峡水下隧道，然后沿着南海岛东侧南下，直指三亚，一路经过11个省市区，全场5700km。这条大动脉的贯通，将改变中国沿海地区的能源运输，同时也是保卫国家增强国防力量的主要大干线，也是世界上首条最长的高铁路线。从陕西宝鸡至新疆乌鲁木齐的高铁是一条正在修建的路线。

中国大挤压车辆铝材产能超900kt/a 约占世界总产能的87%

中国从2004年起开始搞高铁，2006年开始小批量生产铝合金车辆，2008年京津城际高铁开通，驰骋着中国拥有全部自主知识产权的铝合金列车。至2014年年底，中国通车运营的高铁里程突破1×104 km。通常，铝合金车辆数可按3.7辆/km，而每辆车的铝材采购约10t，其中挤压型材约8t，其他（板材、箔材、管材、线材、锻件等）约2t，则采购了约370kt铝材。

在此期间，还制造了约31000辆城市轨道车辆（地铁、城轨、磁悬浮列车等）这些车辆的体积虽然比高铁小，但地铁的导电轨是用6063合金挤压的，建设车站也需要一些铝材，

所以每辆车的铝材采购质量也可以按10t匡算。截至2014年，中国生产的城市轨道车辆约31000辆（含出口的），其中铝合金的占1/3左右，采购铝材约103kt。

2002年10月，中国首台100MN级铝型材挤压机在丛林铝业有限公司投产以来，中国制造轨道车辆所需的大挤压材在逐年增多，至2008年全部自给有余，2014年全国可挤压大工业型材（有≥45MN挤压机）的企业约有43家，有大挤压机108台左右，总挤压力约6900MN，生产能力（按100MN生产15kt/a匡算），约占世界总生产能力的70%，其中生产能力大的前19家如表所列。2014年在产的最大挤压机是兖矿轻合金公司2012年12月10日投产的从德国西马克集团梅尔（Meer）公司引进的150MN双动正向卧室挤压机，可生产宽度达1100mm的型材，最大外径700mm有缝管，最大内径580mm无缝管材，最大直径450mm棒材。2015年160MN的从梅尔公司引进的挤压机可在利源铝业有限公司投产，2016年由太原重工股份有限公司制造的2台225MN挤压机可在忠旺铝业有限公司投入运转，可能在今后20年内也难有挤压力更大的挤压机问世。

2014年有重型铝材挤压机（≥75MN）的企业19家，它们都可以生产高铁车辆车体大挤压铝型材，但93%以上的这种型材是麦达斯铝业有限公司、利源铝业有限公司、晟通科技有限公司、南南铝加工有限公司、兖矿轻合金有限公司、中铝萨帕特种铝型材（重庆）有限公司等提供的。

车辆积压铝材需求持续增长

生产能力可满足四十年后需求

据报道，京沪高铁列车总采购量为300列，共4800辆，平均3.632辆/km，京沪高铁是中国最繁忙的高速线路之一。由此可推算到2020年中国在建的1.2×104 km高铁约需采购44000辆高铁车辆，平均约6300辆，加上车站等设施建设所需铝材，平均每年70kt铝材用量也就足够了。

2020年以前，中国城市轨道车辆需求量约1500辆/a，其中铝合金车辆约500辆/a，对铝材需求量约5kt/a。因此，国内轨道车辆建造在到2020年为止的这段时间对铝材的需求平均为75kt/a。21世纪30年代对铝材需求量的年平均量可达120kt/a，40年代的年平均量有可能达到150kt。

国际高铁何时能建成还很难说，但最先建成的可能是泛亚高铁与中亚高铁。泛亚高铁会一个国家一个国家的建，最后联成网，客运与货运并举，中亚高铁可能以能源运输为主，运输石油与液化天然气，运输罐车首选制造材料是铝，铝不但密度小，可降低罐体质量，多运货物，而且没有低温脆性，运输液化天然气的罐车必须用铝制造。在石油、原油、液化天然气罐内还应装填一些防爆抑爆材料，它们是用铝箔制的。这些高铁线路的建成，会有大批量车辆出口，将拉动铝材销量的大幅度上升，在国内高铁建设速度趋于平缓之际，出口

量的持续上升，正好会拉高增速曲线。不过，目前国内的铝材生产能力，不管是制造车辆车体的大挤压材，还是焊接油罐或液化气罐的厚板都能满足2045年国内外高铁与城市轨道线路建设的需求。

亚美大铁路虽然技术层面无问题，技术上是可行的，但是从前期准备工作开始到最后建成投入运营不是一二十年可完成的，很可能是一条“半世纪之路”，很可能要到中国成为头号强国时才能圆此世人之梦。

最值得一提的是，中国制造的铝合金高铁车辆、机车及其他轨道车辆自2006年投入运营以来，虽然发生过一些事故与故障，这是难免的，但是没有一起是由于铝材及其他材料品质问题引发的，这是金属材料供应者可引以为傲的。

日本是中国高铁走向世界的主要竞争对手

日本首条高铁于1964年10月开通，至今已整整50年，现在境内共有8条新干线路线，运营里程约2400km，仅相当于中国的四分之一弱，日本高铁的常规运行速度270~300km/h，而中国的为300km/h；日本的高铁车型约40个系列，其中有20个系列出口海外，中国高铁有6大系列，10余种车型；2007年1月台湾省全长345km的新干线通车，全从日本引进，是日本向海外输出的唯一新干线。中国向海外输出的首条高铁线路，是土耳其安卡拉-伊斯坦布尔高速铁路二期工程，2014

年7月开始运营，全长158km。

自上世纪60年代至2012年，日本新干线铁路一直是世界高铁技术中的佼佼者，但是近些年来，中国正以速度最快、安全性最好、价格最为合理、建设期短等优势，逐步在世界高速铁路版图内树立自己的一席之地，也和日本在高铁领域形成强有力的竞争。高铁的输出，意味着全产业链条的输出，包括工程建筑、设置制造、机车车辆、后续维护等各项产业，都将得到大幅提升，这对承建国的经济而言，无疑是一件极大的好事。

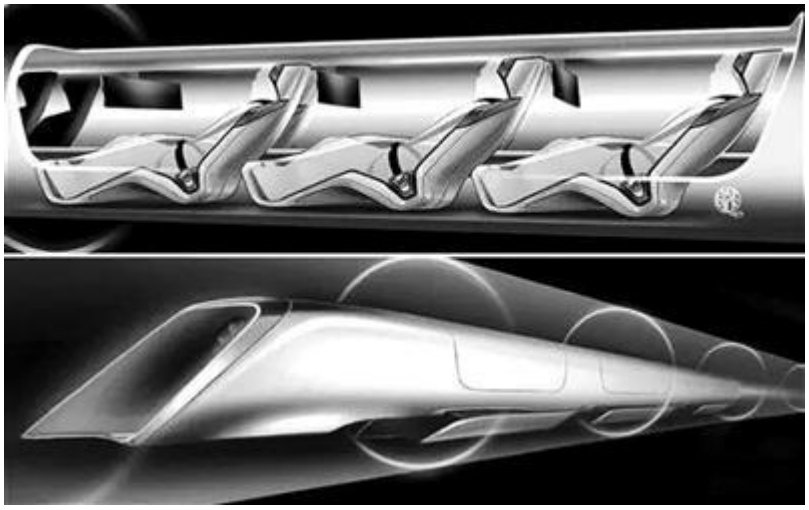
如果包括印度和泰国等正在规划中的高铁计划，东南亚国家的高铁总里程将达1000km左右，这意味着与中国自2007年至2014年7月投入运营的里程相等，约需要3.4×104 辆铝合金机车与车辆，制造它们需要340kt铝材、建筑车站及站台等需要65kt建筑铝材，还需要约80kt导电铜线及铜铝复合导线，这当然是一块巨大的蛋糕，不论对哪个国家与哪些企业来说都有着很大的诱惑力，日本显然不会袖手旁观。据有关媒体报道，曾有日本专家建议：“即使零元中标，也应拿下高铁订单。”有分析认为，如果中国抢得新、马、泰等国家的高铁订单，将会加强中国与东南亚的联系，进一步提升中国的影响力，同时中国也会获得更多的自然资源与经济利益。这显然是作为资源进口大国的日本难以承受的。

不过，在中国专家看来，中日两国的高铁竞争，并非像

外界想象那样的剑拔弩张。产业经济学家白益民曾对媒体表示：“中国主要是承包海外高铁的建设，日本的强项是出口机车，所以中日的竞争并不完全是一个层面的竞争。”

中国高铁企业参与国际市场竞争是一件大好事，可以提升企业的经营能力，提高材料开发的技术水平和创新能力。中国高铁走向全世界是伟大中国梦的一部分。

1.4.29 管道高铁 2021 年可投入营运 铝材将成应用新亮点



“管道高铁”也可以称“超级高铁”可能于 2021 年投入营运，将是继汽车、火车、轮船、飞机之后的第五种交通运输模式。它的运输系统如同现在的磁浮列车，不过它不在大气中奔驰，而是在真空管道（隧道）中穿行，由于没有空气摩擦，也不存在轨轮摩擦，运输舱行进速度可达 1120km/h，相当于目前某些民航客机的最高飞行速度。届时，从北京到

上海约 1h（1280km，现有高铁里程），到广州 1.8h（2100km），到乌鲁木齐约 3h（3500km），到昆明 2.5h（2800km），从美国旧金山到洛杉矶 600km 只需要 30 多分钟。实际上，以后运行的管道客车运行时间会比现在匡算的还要少，因为新建的管道铁路比现行的高铁线路里程肯定会短不少。

管道高铁构想是美国科技“狂人”埃隆·巴斯克提出的，名为“超回路”运输系统。根据他的最初方案，这一超高速系统由双向管道和运输舱组成，运输舱的穿行速度 1120km/h，相当于 311m/s，很接近 0℃时空气中的声速 331m/s，所以可把那个速度称为近声速或亚声速。根据他们的初步设计，运载舱悬浮着在真空管道中依靠电力驱动穿行，它形似装药物或其他物品的胶囊。现有媒体没有报道运载舱是用什么材料制成的，不过笔者认为，在现行的技术条件下，铝材是制造这种运载舱性价比最高的材料，时速 500 多 km 的磁悬浮车辆是用铝材制的，在近声速民航机的结构材料中铝材零件净质量占飞机总净质量的 70%~80%，另外，因为这种舱在真空中穿梭，而舱内必须保持大气压 22℃人感着最舒适的环境，舱室必须是密封的，不能开窗户，也有必要开窗户，乘客在舱内座的时间短，没有必要开观光窗。制造舱用的铝材中国完全能供给，用的是普通铝材，不是什么高精材料，因为这种运载舱的结构不外乎两种：一种仿民航机的，一种仿高铁的，同时它的结构可比机舱的简单得多，如果真的不开窗户的话，

那么不但结构更简单，用材也省，制造成本下降，制造工艺相对简单，结构强度也有所提高，使用到期后材料回收与循环价值也有所上升。

为了这项技术早日实用化，在美国洛杉矶创办了一家名为“超回路 1 号”的公司，有近 300 名投资人与合作者。该公司制造了一台“超回路推进系统”于当地时间 5 月 11 日上午在美国西部内华达州荒漠中进行了首次公开试验，200 多名投资者、合作方和媒体记者参观和见证了这次测试，新华社也有记者参与。测试地点为拉斯韦加斯以北约 50km 的沙漠，新华社记者称，一个金属测试装置沿铁轨加速疾驰，约 3S 后凭借沙堆减速。尔后，“超回路 1 号”公司高级副总裁吉格尔接受新华社记者采访时说，这个推进系统从 0 加速到 60 英里/h（96km/h）仅耗时 1s。该公司首席执行官劳埃德对新华社记者说：“今天我们测试的是全尺寸推进系统，这是预计今年年底建成的完整系统的一部分。”当天的试验结果完全达到预期目标，一切工作都很顺利。

不过，还有两点需指出：提出“超回路”运输系统梦想的埃隆·马斯克还是一个企业家，他是美国太空探索技术公司（SpaceX）和特斯拉（Tesla）汽车公司的创始人；劳埃德认为，“超回路 1 号”公司有望 2021 年左右迎来首批乘客。不过，笔者认为不要过于乐观，这毕竟是一项新技术，有许

多意想不到的问题有待解决，真空管道线路的建设也不是一蹴而就的，另外，这种运输方式不适宜短途和城市圈内运输，对长途运输的经济性尚待验证与精准评估，但在管道修建与车辆制造技术层面不存在壁垒。我们应密切关注此种运输方式的发展，但尚未到动手时刻。

1.4.30 高铁与动车全面降速交通用铝材需求降温大挤压机建设悠着点

随着中国高铁时代的来临，大型工业铝材在列车高速行驶的过程中扮演了重要的角色，大挤压机建设也持续升温。但是在“7·23”甬温线特大铁路交通事故之后，产能本已过剩的高铁及轨道交通用铝材的需求迅速降温。

根据国际铁路联盟的定义，在既有路线上运营速度大于250km/h 的列车，在新建路线上运行速度大于 250km/h，相应的线路被称为高速铁路，车辆被称为高速列车车辆或高铁车辆，在现有的技术条件下，高铁车辆车体都是用铝合金制造的，其中 85%以上为挤压铝型材。在车辆制造，还要用些小的型材与板材、铸件与锻件，其量不多，还不到 15%。

截至 2010 年，中国高速铁路的营运里程已达 7531km，2011 年营运里程可达 8810km，占世界高铁总里程的 1/3 以上。2015 年全高铁的通车里程将达 1.6 万 km，几乎与那时国外高铁的总里程相等。

高铁与动车全面降速

高速铁路建设也可能放缓

不久前，为贯彻落实国务院常务会议精神，铁道部编制了新的列车运行图，不但调整了列车开行方案，而且适当降低了新建高铁运营初期速度，于 2011 年 8 月起实施。新运行图调低了三类线路的运行时速：一是将目前京津城际、沪杭城际、京沪高铁的时速由 350km 调整到 300km；二是将合宁、合武、石太、昌九、海南东环、杭深线宁波至厦门段、长吉、奉沈等诸多高铁的时速由 250km 调整到 200km；三是将客货混跑的既有线路动车组列车时速由 200km 调整到 160km。这就是说，除了少数高铁仍保持 300km/h 的速度外，大多数铁路均回到了 2007 年铁路第六次大提速前的状态。

高铁与动车全面降速是正确的，及时的。大家知道，日本是世界高铁发祥地，从 1964 年 210km/h 提高到目前的 300km/h 用了 47 年，德国也花了 20 年的时间，可我们从时速 160km 提高到 300km 只用了短短的 4 年，当然由于我们引进了日本、德国、法国、加拿大的技术，吸取了它们的经验教训，时间会短一些，但也不致于短到这种程度，快到这种速度，显然带有“大跃进”的痕迹。有人打了一个非常形象的比喻，把高铁形容为一匹“烈马”，在骑手对马性并不够了解的情况下迅速上马，加鞭狂奔，十有八九会被摔下来。

应当慢慢牵着多遛会儿，培养好感情，再骑上慢跑一会儿，然后抽鞭奋进就不会被摔。

在全面降速的同时，新线的建设也会作一些调整，但“四纵四横”的宏伟蓝图看来是不会变的，对铝合金车辆的总需求也是不会变的，不过需求会拖长一些。

大型材产能形成过于集中

项目建设该悠着点

2001 年,西南铝业（集团）有限责任公司 1 台由 80MN 的水压机改造而成的 9 5 / 8 0 MN 现代化油压机投产，并开始生产轨道车辆大型材，开了生产挤压交通运输装备中空薄壁大型材的先河。此前爱励铝业（天津）有限公司（当时名为柯鲁斯铝业有限公司）于 1996 年投产 1 台从意大利达涅利布莱德公司引进的 5 0 MN 的正向单动挤压机，生产通用机械工业型材，也挤压一部分交通型材。

据目前在建和拟建的大挤压机项目匡算，到 2012 年为，中国将有 2 4 家企业拥有大挤压机（挤压力≥45MN），保有的大挤压机 62 台。其中 45MN～60MN 的 25 台，占 40.32%；60MN～85MN 的 18 台，占 29.03%；90MN～125MN 的（称 100MN 级）的 17 台，27.42%；150MN 以上的 2 台，占 3.23%。忠旺控股有限公司正在建设的 2 台 225MN 与 1 台 300MN 的超级重型铝挤压机，由中国重型机械研究院与上海重型机器有限责

任公司设计制造，但要 2013 年以后才能投产。

这 62 台大挤压机占全球总数的 50%强，它们中的 92%以上都是在 2001 年以后建设的，其中有 23 台即 37.1%是引进的。它们的总挤压力约 5000MN，按笔者提出的挤压机生产能力匡算系数计算，大型材生产能力当在 500kt/a 以上，如果实际产量达不到 300kt/a，全行业就会处于亏损状态，除少数企数有盈利外，大多数企业的大挤压生产线极有可能无利可图。

现在还有十几个企业在建大挤压机项目，到 2015 年还有 18 台大挤压机投产，到那时全国将拥有 80 台大挤压机，占全球总数的 53%。大型材生产能力可达 700kt/a，在 15 年的时间内形成这么大的生产能力，实在过于集中，平均每年达 47kt/a，到哪儿去找市场呢？

到 2020 年，中国可拥有 1.86 万 km 高速铁路，约比 2011 年的增加 10000km，平均每年增加约 1110km。京沪高铁 1318km，目标拥有 CRH380A 动车组 100 列，平均每列 12 辆铝合金车，共计 1200 辆，平均 0.91 辆/km，照此推算每年需增加约 1000 辆铝合金车，按每辆铝材采购量 10t 计算，每年需要的铝材量只不过 10kt，其中 85%为挤压型材，15%为其他铝材，如板材、箔材、管材、线材、锻件、铸压件、铸件等。

另外，全国还有 37 个城市在建地铁、高架城轨线、中低速磁悬浮线，除后者用的是全铝合金车辆外，其他用的车辆

中，铝合金的只占 1/3 左右，全国城轨线路需要的铝合金车辆约 250 辆/年，需要铝材约 8t/辆，每年约需铝材 2kt。由以上的分析可见，轨道车辆铝材需求量仅 12kt/a，如果再增加 25%的不可预见量，总的需求也不会超过 15kt/a。而大挤压机的生产能力却高达 500kt/a，为实际需求量的 30 多倍。当然，这些大挤压机不会全用于挤压轨道车辆型材，还会生产其他工业型材与少量建筑型材、结构型材，但轨道车辆型材是其主导产品。

在此还必须提出的是：生产轨道车辆型材只需要 100MN 的挤压机就是够了，不需要 125MN、150MN 的，更不需要 200MN 与 300MN 的，它们可为超级锻压机提供坯料与生产某些量不大却很重要的产品。高铁及城市轨道线路建设是周期性的，到 2020 年前这段时间为建设高潮期，过了这段时间对铝合金车辆的需求就会大大减少，铝合金车辆的使用期限长达 30 年。日本 1964 年在全世界率先开始高铁营运，1962 年开始制造高铁铝合金车辆，至 2011 年 3 月为止，49 年内共制造高铁车辆 18580 辆，平均每年 379.2 辆，其中 2010 年财政年度（2010 年 4 月至 2011 年 4 月）制造 907 辆，2009 财政年度生产 926 辆，是最高产的一年，可是全国仅有 1 台 97MN 的大挤压机，在日本四会市的轻合金挤压开发公司（KOK），欧洲经济共同体只有 3 台 100MN 级的挤压机，都在德国，其中 100MN

的 1 台，90MN 的 2 台。

由此看来，随着高铁与动车的全面降速，大挤机项目的建设是否该悠着点呢？

1.5 电力

1.5.1 话说电工铝线

王祝堂 熊慧

线材。线又称为丝，是细而长必须盘绕起来的材料。国家标准 GB/TB005.1-2008 的定义为，成卷供应的、拉制的实心制品。用铝（1XXX）合金拉制的线材，称为铝。用其它系铝合金拉制的称为铝合金线，通称铝线。通常线材的截面为圆形，称为圆线，也有非圆截面的，如为矩形截面的则称为扁线，还有异形截面的，如拉链线等。

一般线材的整个截面为一种金属，但也不乏由两种或多种金属组成的，如铝-钢复合线，铜-铝（铜包铝）线，钢-铝-铝合金复合接触线（俗称电车线）等。

线材直径通常不大于 6mm，但也不尽然，如电车线的宽×高就达 18mm×18mm。因为需要盘绕，线材截面越粗大就越不易盘绕，盘或捆的直径也须增大。因为需要搬运、储存和处理，所以单盘或单捆线材的长度有限。在长度不够时，可将前后两捆（盘）线的头尾对接焊起来或压接在一起。

在大多数情况下，线材是一种中间产品，即半成品，还需继续加工才成为有使用价值的产品。

铝线生产工艺。由铝制成铝线可分为 3 步：制成线锭坯，轧成或挤压成线杆，拉拔成线材。锭坯可由重熔用锭重熔后的铝熔体铸造而成，也可由电解厂的原铝经净化处理后铸造而成，这是一种节能减排的工艺。2012 年，中国铝电解厂生产的铝盘条约 1850kt，节约铝锭重熔能耗相当于 130kt 零号柴油，同时相应地减少了大量的温室气体排放；电线电缆行业生产的铝盘条约 1050kt，约占全国盘条产量的 36.2%。应争取尽量多的盘条由铝厂生产，铝厂生产的比例最好能达到 75%。2012 年，铝厂电工铝盘条的生产能力超过 3000kt/a，产能利用率仅 62%。

锭坯可以立铸，也可以平铸，截面可以呈方形，也可以是圆形。常见轧制法或挤压法将锭坯制成线坯，电工线坯几乎全是轧制的，因为轧制法的效率高，成本低一些。从上世纪 80 年代中期开始，中国引进了相当数量铝线坯连铸连轧生产线。

铝盘条直径多为 9.5mm，一般尺寸为 8~10mm，可轻松地盘绕。盘条直径尺寸为成品线材留有足够的变形量，以便线材的力学性能与冶金组织达到标定值。减小线坯直径虽可以减少拉线工作量，但是成品线的表面品质及显微组织有时得

不到保证，故不能追求过细的线坯。对于制线而言，总希望线坯越长越好，因此常把线坯连接起来。

制线。90%以上的电工铝线都是拉制的，不过截面积大的非硬状态的非圆形的线材也可用挤压法得到，扁导线还可以用轧制法生产。

线材粗细的表示。线材粗细有 3 种表示方法：直径表示法、质量表示法、线号表示法。中国用直径表示法，以公制的毫米（mm）为计量单位，这种表示法既简单又直观。

质量表示法用于线径很细而螺旋测微尺的精度又无能为力时，通常以长度为 200mm 线段的质量（mg）为计量单位，线粗，质量就大。

英国、美国、加拿大、澳大利亚、墨西哥、新西兰、南非等使用线号表示法，又称线规（wire gauge）法。因为此法在国外用的很普遍，为便于交往和阅读外国书籍及文献，必须对线规法有一个全面概括的了解。

在线规法中，按 0、1、2、3.....数码顺序表示，数码越大，线材越细。18 世纪初，轧制法与挤压法尚未问世，线坯都是自由锻造的，当时检测工具也很简陋，英国在这种情况下，以拉制次数作为线材粗细的标志。每拉一次增加一号，线坯为 0 号。因为生产线材的作坊很多，各有各的生产工艺，于是出现了各种各样的线规，给贸易和交流造成了种种不便，

但又没有统一度量。经过 300 年来的淘汰进化、兼并和变迁，有的国家已改为直径计量，但在英国和美国，线规表示法仍沿用至今。当前使用的有 3 种：美国线规（AWG）、伯明翰线规（BWG）和大英帝国标准线规（SWG）。现在英美等国的论文和标准中见到是线号与直径（以英寸表示）并列，即使这样，仍然极不方便，但积重难返，要改成直径和公制表示，恐怕难度很大。

2012 年，中国铝线材的总产量约 2200kt，其中 90%以上即约 2000kt 为电工铝线。据统计，发电量每增容 10000kW，需要铝线 230~300t。中国工业处于持续稳定发展时期，又处于城乡电网改造阶段，在到 2020 年为止的这段时间内，电工用铝线的年平均增长率可达 10%,2015 年的需求量为 2660kt，2020 年的为 4300kt。2012 年中国电工铝线产量约占世界总产量的 62%。

2000kt 电工铝线是这样一个概念：假设全部换算成直径 3mm 的线材（单位质量为 19kg/km，单位长度为 52.4km/t），则长达 10480×104km，而地球直径约 3.3×104km，故可绕地球 1000 多圈。

在这里还需顺便谈几个问题：当温度升高时，材料的电阻及电阻率都会升高，对铝来说，温度每升高 1 摄氏度，电阻增加 0.004 倍，即增加约 4‰，称此值为电阻温度系数。中国大部分地区冬夏温差可达四五十摄氏度，高压输电线路

电阻可升高 15%，这可不是一个小数，这将增大线路输电损耗，加大夏季供电短缺局面。为此，规定用 20 摄氏度的电阻率进行考核对比。另外，交流电在导线内传输时有集肤效应，这如同缩小了导线的截面积，故同长同截面的导线在输送交流电时的电阻率大于输送直流电时的电阻率，且频率越高越严重，故统一用直流电阻率进行考核与对比。

电阻的倒数为电导，单位称西门子（siemens），来源于德国西门子公司，他是一个跨国电器与自动化控制设备企业，符号为 S。故电阻率的倒数为电导率，单位用 S/m 表示。然而使用更广泛的是相对电导率之比，其符号为 IACS，又称国际退火铜标准的电导率，是相对值，无单位，用%表示。国际电工委员会（IEC）规定退火状态，铜 20℃的电阻率为 0.028264Ω·mm2/m=28.264nΩ·m，故铝的相对电导率为 IACS=17.241/28.264=0.61 或 61%，往往表达为 61%IACS。

铝的纯度越高，电导率越高，即输电线路上的电阻损耗越少。冷加工变形可使铝的电阻率升高，例如 1350 电工铝，退火后的电阻率 P 20 为 27.9nΩ·m，冷变形后的是 28.2 nΩ·m，上升 1.07%。电阻率上升就意味着电导率降低，由 61.8%IACS 降低到 61%IACS。

纯铝的抗拉强度较低 1350-0 的只不过 70N/mm2，而铜的则为 230 N/mm2 。虽然冷加工可使铝的强度提高一些，但也只能提高到 150 N/mm2 左右；加入少量合金化元素也是提高

强度的措施之一，由此研发一些电工铝合金。不过这些措施虽然使铝的强度有所提高，但铝的电导率、塑性、韧性与抗腐蚀性却有所下降，所以在实际生产中常采取折中办法，有舍有得，使材料达到最佳的综合使用性能。

1.5.2 铝：性价比最高的输配电材料

当今世界精彩而亮丽：火车在大地飞驰，汽车在大街小巷穿梭，飞机在天空翱翔，船舶舰艇在浩瀚的海洋游弋，工厂的机器轰鸣着转动，晚上大街小巷明亮如昼，五颜六色的霓虹灯闪烁着。电视在播放精彩的节目，各种家用电器在细和蚊声般地嗡嗡运转……可您知道，这是谁的功劳呢？您会毫不犹豫地回答：电。是的，是电的功劳，是电这只无形的“手”在推动着，在指挥着，没有电，就没有当今的文明世界，一切都会停止不动，世界会死一般地沉寂。可您知道，电是怎么传送的吗？您也会脱口而出，是通过电线传送的。没有电线，电是不会自己“跑”来的，也就是说，不会像水那样源源不断地流来。输送电的线缆导电体导电性的大小用电导率衡量，单就电导率来说，银最高，金第二，铜第三，铝第四，但金与银是贵金属，价格高昂，在工业与国民经济的其他部门不会用它们作为导体材料，除某些特殊情况下使用金银外，常用的导电材料只有铜与铝。软状态铝、铜的电阻率分别为 27.8 及 17.24 nΩ·m，硬状态铝、铜的电阻率

分别为 28.3 及 17.77 nΩ·m，也就是说，铝的电阻率约比铜的大 61.3%，或者说，如以铜的电导率作为 1，即 100%IACS（国际退火铜标准），则铝的电导率约为 61.5%IACS。

不过，铝的密度只有 2700kt/m3，而铜的大到 8890kg/m3，铝密度只有铜的 30.37%，也就是说，铜的密度为铝的 3.29 倍。换句话说，单位质量的电导率是铜的 200%，当电导率相同时，铝导体或铝线的质量只有铜的二分之一，这既便于高压输电线路的架设，又有利于搬运，可显著增加架线距离。如果不用铝线而用铜线，架设横跨长江上空的超大直流输电线路的难度至少大 3 倍，需要在长江中建 2 座高达 180m 铁塔，才能把三峡发出的强大电流输送到大江南北的千千万万个工厂、矿山与家庭。如果不用铝线而用铜线输送高压电，那么架线距离不是现在的 100~250m，而必须缩短到 30~50m，不但架设线路费用大大提高，而且占用的土地也会增加 2~3 倍。

铝的价格比铜的低得多，2012 年 6 月上海期货交易所的价格约 15700 元/吨，而 1#铜的价格约 54500 元/吨，铜价为铝价的 3.43 倍；铜是一种资源较为稀缺的金属，全世界铜的储量只不过 3.65 亿吨，而铝是地球和月球上最丰富的金属元素，占地球表面固体部分的 8%以上，海水中也含有 0.5ppm 铝，是取之不尽用之不竭的。

铝对硫化物有相当高的抗蚀性，而铜则不然，这也是铝可作为导体的另一优点。因为大部分绝缘材料都含有硫化物。

因此，可省去绝缘处理前的镀锡工序，而铜则必需镀锡。铝导线在上绝缘漆的过程中不会与绝缘材料中的油形成硬脂酸盐，与绝缘漆有良好的匹配性能。

铝散热能力比铜大得多。当铝、铜导体的电导率相等时，前者的质量只有后者的二分之一，同时铝的热导率（231w/mn·k）比铜的（436W/m·k）低，且铝导体的表面积比铜的大得多，所以铝导线有更强的散热能力。

当今的高压输电线都是钢芯铝绞线，钢芯线可以大大提高绞线的强度，使它成为不可代替的高压输配线，另外它还具有表面电位梯度小与电晕特性小等优点。

作为电工材料的铝虽具有以上一系列优点，也有一些不足之处，诸如：蠕变强度较低，架空铝线在使用中有时会无缘无故地突然断裂，原因是蠕变使断面不断变小造成的。因此，计算导线在运行中所受到的负载（含附加负载，例如凝结的冰）时，不应以抗拉强度为惟一计算依据，还应考虑蠕变强度。硬的铝线的蠕变强度为 120N/mm2，含 0.51%Mg 及 0.49%Si 的铝-镁-硅合金线的蠕变强度为 260N/mm2.

由于空气流动使架空线总处于振动状态，导线承受着报应力、变曲应力等交变的复杂应力作用。在这些应力的长期作用下，有缺陷部位或应力集中处（如固定加接件内、线夹处或线夹附近等）会因疲劳而折断。硬铝线的室温疲劳强度为 70N/mm2，比其屈服强度低。当温度升高到 150℃时，疲劳

强度会大幅度下降。铝的线膨胀系数也比铜的大 35.5%。这些都是铝作为电工材料的缺点。

由以上的分析可清晰看出，铝是性价比最高的电工材料，是当今用量最大的电工金属，2011 年全世界电线电缆用铝量即作导电体铝的消费量为原铝（导电体很少用再生铝或者说几乎不用）消费总量的 16.5%左右，即约 6860kt，发达国家的消费比例低一些，而发展中国家占的比例大一些，因为它们的电力建设处于高速发展期。

铝主要以线材、管材、汇流排条、导电轨道、箔材的形式用于电力、电讯、交通运输、铝电解槽等部门。铝被用作导体始于 1876 年，那年英国人柯利（W.L.E.Curley）在博尔顿架设了世界上第一根铝架空导线。1910 年美国铝业公司（Alcoa）技师胡普斯（W.hoopes）发明了钢芯铝绞线，架设于尼加拉大瀑布上空。此后，架空高压输电线逐步为钢芯铝绞线全部取代，美国、英国、德国等从 1910 年起试图用铝作配电线，但较大规模的使用是在 1955 年以后。

自 1960 年以来，全世界的电力导体几乎全是铝的，但室内铝导线的用量仍不多，以铜线为主。全球电线铝化率（铝化率=[2Al/(Cu+2Al)]最高的是美国，2011 年已达到 36.6%。

1.5.3 铝线：综合性最佳的导电材料

铝有良好的导电性能，在纯金属中仅次于银、金及铜。例如银的电阻率（20° C）为 1.63μ Ω ·cm，铜的（20° C）为 1.694μ Ω ·cm，金的（20° C）为 2.20μ Ω ·cm，铝（20° C）的为 2.67μ Ω ·cm，若以国际退火铜标准（IACS）作为导电率衡量标准，则退火铜的为 100%IACS，而 99.99%铝为 62%IACS，这就是说在退火状态下，纯铝的电导性能比纯铜的低 38 个百分点 IACS，铝的电阻率比铜的大 0.976μ Ω ·cm。作为导电材料来说，这是铝不如铜的第一点；铝的热导率为 231W/(m·k)，而铜的 436W/(m·k)，比铜的低 205W/(m·k)，即比铜的低 47%，这是铝的第二个弱点；铝的线膨胀系数为 23×10-6/k，而铜的只有 17×10-6/k，即铝的线膨胀系数比铜的大 35.3%，这是铝的第三个不足之处；另外，退火纯铝的抗拉强度比纯铜的低 60%，这也是铝不尽人意的地方；铝线的反复弯折性能在铜线面前也是小巫见大巫。

铝的最大优点是：第一，资源丰富。铝在地壳中的平均含量为 7.47%，仅次于氧及硅居第三位，即使以亿吨为单位，也无法用数字表达，是天文数字的天文数字，是取之不尽用之不竭的，虽然中国目前可供开采的铝土矿并不富足，但就全世界而言却是一个“万岁”矿产资源，而全世界铜储量约为 3.5 亿吨，中国的储量还不到 7000 万吨，再过二三十年，铜就可能被列入稀有金属;第二,密度小。铝的密度 2700kg/m3，

而铜的密度为 8890kg/m3，为铝密度的 3.29 倍，以质量电阻为单位，铝的优势就显示出来了，例如长 1 米、质量 1g 的纯铜 20° C 的质量电阻为 0.14983Ω，以质量作基准时，铝的电导率就远大于铜的，如把铝的相对值定作 100，则铜的为 50，银的为 44，没有钢芯铝绞线，输送强大的高压线就跨不过长江黄河，就无法翻山越岭，将电流送到工厂矿山与千家万户。第三，铝是一种绿色的金属，虽然提取铝的能耗与温室气体排放量比提取铜的高，但铝导体在经过三五十年的使用期后，几乎可全部回收，而且回收再生的能源消耗与 CO2 等排放量仅分别相当原铝提取的 5%，可是废铜再生的能耗与温室气体的排放量与铜冶炼时的相当。铝在循环使用期间的节能减排效果比任何其他金属的都大。总体上，铝是综合性能最佳的电工金属材料。

铝主要以线材、管材、汇流排条、箔材形式应用于电气、电子工业、也用少量的板材制造各种电器外壳，标牌与罩等。

铝用作电导体始于 1896 年，英国人柯利（W.L.E.Curley）在博尔顿架设了世界上第一根架空铝导线，1897 年，美国斯诺夸尔米霍尔公司（Snowqualmine Hall Power Co.）架设了一条 51km 的输电线路，1898 年，美国标准电力公司（Standard Electric Co.）建成一条 75km 长的架空输电线路。1908 年，美国铝业公司（Alcoa）技师胡普斯（W.Hoopes）发明钢芯铝绞线，第二年架设于尼亚加拉大瀑布上空的高压线就是美国

铝业公司生产的钢芯铝绞线。自此以后，全世界的高压架空输电线路无一例外都是用钢芯铝绞线架设的。胡普斯的发明为铝在输电中的应用开辟出了一条康庄大道。

1910 年以后，欧美国家开始试用铝作配电线，但大规模应用铝配电线是 1955 年以后，现在铝配电线的应用已成熟。当前，电力导体几乎全是铝的，铜导体已退出历史舞台，但室内导线，铜仍是主角，特别是在中国表现尤为突出。世界范围内，电线铝化率最高的是美国，达到 50%左右，中国还不到 25%，加强以铝代铜大有作为。

用铝线代替铜线有诸多优点：质量轻、导电性比较好，热传导性好、蓄热少，因流过相等电流时，铝线截面积是铜线的 1.6 倍，可加工性能好，抗腐蚀性强，资源丰富，供应稳定，价格合理。另外，钢芯铝绞线的优点是：质量轻、强度大，便于架设和搬运，表面电位梯度小，电晕特性好。

1.5.4 兴旺发达的电工铝家族（一）

导电用铝，既要求有高的电导率，又要求有相当高的综合力学性能。任何一种金属总是纯度越大电导率越高，这就是说铝中的任何一种杂质的含量加大都会使铝的电导率下降，加入铝中的任何一种合金元素也都会使铝的电导率减少，但元素不同，电导率的下降不同。国际电工委员会规定导电纯铝的最低铝含量 99.5%%（相当于 1050A），杂质含量不得大

于（%）：0.10Si，0.40Fe，0.05Cu，0.01Mg，0.01Cr，0.05Zn，0.05B,0.02(V+Ti),其他杂质总量 0.010,而单个的为 0.03。

加入铝中的合金元素，如溶入固溶体中，使铝的电阻的增加比不溶于铝中的大。当合金元素从固溶体中析出时，析出的体积分数越大，电导率的下降越少。

根据元素对铝电导率影响的大小可将它们分为三类：第一类的影响较小，如 Bi、Cd、Sn、Sb、As、Fe、Ni、Co、Au、Ga、Zn、Be、Ni 等；第二类是影响较大的，如 Cu、Ag、Mg、Ge 等；而影响最大的是过渡族元素（Zr、Cr、V、Mn、Ti）及 Li，对它们的含量应严加限制。在生产电工材时不能用 Al-Ti 或 Al-Ti-B 中间合金作为晶粒细化剂。

冷加工率对电工铝电导率影响不大，却使导线的抗拉强度显著上升，所以架空线用的是冷作硬化的铝，例如 1350-O 与 1350-H 导线的电导率仅相差 0.5%IACS，而后者的抗拉强度却比前者的高一倍。虽然退火状态的软导线不能用作架空线，但可以用于绕制电机及变压器等的线圈。

电工铝合金可分为常规合金及新型的合金。常用的电工合金有 6101、6201、3003 及 5005 等；新型的电工铝合金是指稀土及耐热的架空导线铝合金，以及通讯、线圈、汽车电线等。

6101 合金。6101 合金是一种 Al-Mg-Si 系合金，历史悠

久，用途最广，其成分（%）：0.3~0.5Mg、0.4~0.7Si；其后发展的 6201 合金含 0.6~0.9%Mg 及 0.50%~0.9%Si。6101 合金主要用于制造母线，中国电解铝厂用的铝母线就是用此合金或 1050 合金挤压的，建设一个 200kt/a 的原铝项目仅母线用量就达 900t，近 5 年来中国投产的原铝生产能力超过 2000kt/a，每年消耗的铝母线在 90kt 以上。

6201 合金可加工成各种导体。由于这两种合金中 Mg2Si 在α -Al 固溶体中的溶解度随着温度的上升而增加，可通过固溶处理与人工时效提高其强度，同时仍保有良好的导电性能。铝中总含有铁与硅，它们会形成化合物 Al6Fe2Si3。为了保证镁能全部形成 Mg2Si，在生产实际中，加的硅量比标准规定的大 0.3 个百分点。6101 合金的固溶处理温度 510~550℃，人工时效温度 140~180℃。

6101 合金的抗拉强度比 1050A 合金的一倍，在电导率相同时，它的强度是铜电线的 1.5 倍，而其质量仅是铜线的二分之一，架空线的跨度可显著加大，由于 6101 合金的强度大、硬度高，在安装时导线受损的几率大大下降，受损程度也会大大减轻。没有钢芯、导线的连接也简单与方便得多，短路电流对 6101 合金的影响比纯铝小得多，它的振动疲劳强度比 1050A 合金的高 50%，对短路电流的稳定性仅次于铜。我国生产的 6101-T5 合金导电挤压带材（Q/Q602-82）的宽度 40~160mm。

5005 合金。该合金属 Al-Mg 系，含 0.50%~1.1%Mg，在美国得到了广泛的应用，在欧洲的应用不多，中国在 1980 年以后开始生产应用。在特硬状态下（H19）用作架空线，其最低抗拉强度（决定于直径）230~274N/mm2，最低电导率为 31.0m/Ω·mm2。5005 合金的抗拉强度介于 1050A 与 6101 合金的之间，而其电导率则与 6101、6201 合金的差不多。

2008 年 7 月 1 日，中国在美国铝业协会公司（The Aluminum Association）注册了首个变形铝合金，牌号 5154C，主要用于制造同轴电缆屏蔽编织带线材，是一种 Al-Mg-Si 系的电工铝合金，是广东凤铝铝业有限公司研发的，开中国变形铝合金注册之先河，在中国变形铝合金发展史上具有里程碑意义。5154C 合金的成分（%）：0.20Si，0.30Fe，0.10Cu，0.05~0.25Mn，3.2~3.7Mg，0.01Cr，0.01Zn，0.01Ti，其他杂质单个 0.05，合计 0.15，其余为 Al。合金的密度 2660kt/m3。

3003 合金。3003 合金是一种 Al-Mn 系合金，锰明显地提高铝的再结晶温度，降低它的电导率。如果以 1050A 合金的电导率为 100%，则 3003 合金的仅为 1050A 合金的 71%，即为 40%IACS。3003 合金以管材形式用作高压配电设施的母线。

铝管母线高压配电系统具有占地面积少、结构简单、节省钢材和基础工程量小、布置简明、维护方便、母线电晕对无线电干扰小、临界电晕电压高、载流容量大等一系列优点，

而其造价和同规模的软母线配电系统的大致相等。因此，在高压配电设施中获得广泛应用。

1973 年，我国设计成功第一个 220kV 铝合金管母线配电装置，用于京津唐电网的一些变电所，已运转 30 多年，情况良好，达到了预期的设计目标，所用管材外径 60~130mm，壁厚 6~14mm。

6061 及 6063 合金。这两个合金是工业上用得最多的挤压铝材合金之一。可用 6063-T6 合金管作穿越功率大的母线。6063-T6 合金的电导率比 6061-T6 合金的高，但强度较低，因此，6061-T6 合金管主要用作穿越功率较小的母线。法国的 400kV 配电装置母线采用可热处理强化的铝-镁-硅-铜合金管，它的成分为(%)：0.6~0.8Si、0.4~0.7Mg、0.1~0.3Cu。性能良好，20℃时的电阻率 3.733MΩ·CM。

为了提高输配电效率，降低损耗，提高安全，必须提高导线的强度与耐热性，以适应不断发展的输配电要求，各国先后开发了一批各具特色的新型电工铝合金，它们的电导率虽比 1050A 合金的低，但其抗拉强度，蠕变强度及耐热性能等却比 1050A 合金的高得多。

稀土电工合金。中国研发的稀土电工合金独具特色，已形成系列。向铝中添加微量的稀土元素或混合稀土几乎对其电导率无影响，而其力学性能及加工性能却得到明显改善，

一批铝厂都先后开发出了含稀土的电工铝合金，如云南铝业有限责任公司生产的含 0.3%~0.5%混合稀土的高纯铝导线的电阻率为 2.7654×10-7Ω •m，低于现行国家标准的规定值，比国际电工委员会标准规定的电导率高 1.4 个百分点；上海电缆研究所与武汉电缆电线有限公司研制的含 0.05%~0.1%混合稀土的 Al•Mg-Si 系合金导线的电导率达到 45%IACS，比国际电工委员会标准规定的值高 1.4 百分点，它的电导率达到 54.6%IACS。

1.5.5 兴旺发达的电工铝家族（二）

耐热电工铝合金。向铝中添加“锆”可以提高铝再结晶温度、蠕变强度及耐热性能力，含锆量低时，主要靠锆的固溶效应，如日本的 60TAl 合金仅含 0.04%锆；而含锆量高时，是 Al3Zr 的沉淀效应起作用，如日本的 XTAl 合金含 0.3%Zr。XTAl 合金需进行长达 100h 的高温时效处理，以使 Al3Zr 细小粒子呈弥散状态分布，以获得高的导电性与耐热性。

含锆的导线铝合金是日本研发的，已形成系列。截止到 2010 年，日本的主干高压输电架空线的 65%，是用 60TAI 合金加工的，它的抗拉强度 159N/mm2，电导率大于 60%IACS，长期工作温度 150℃，短时工作温度 180℃。

上海电缆研究所与武汉电线电缆有限公司生产的含 0.01%~0.4%Zr 与＜0.5%混合稀土导线很具特色，它的性能比

国外同类产品略胜一筹，它的长期使用温度可达 150℃，为硬铝绞线的 1.7 倍；电导率为 58%~60%IACS，居国际领先水平；截流量为硬铝绞线的 1.5 倍以上，适用于 500kV 超高压输变电线路及变电所母线，也可用于城区线路改造与农网架空导线等。国外还开发出一些含铁、钴、镍的合金，如日本的超耐热铝合金，其线材的长期工作温度 200℃，短时工作温度 230℃；特别耐热导线合金 XTAI 的电导率为 58%IACS，长期工作温度 230℃，短时工作温度 330℃。

在通讯、线圈、汽车电线等主要用的是软铜线，也用一部分软质铝线及铝合金线。软质合金线除用电工纯铝（1050A）外，还有 Al-Fe-Si、Al-Fe-Mg-Al-Cu-Mg，Al-Fe-Cu、Al-Fe-Mg-Cu、Al-Fe-Co、Al-Ni-Co 系合金。

铝-铁系合金。铁在铝中以细小的 Al3Fe 形式存在，美国的 CK74 合金是其代表，含 0.76%Fe。1969 年投放市场，还有一种商品名称为 Triple-E 的美国 Al-Fe 系合金，含 0.55%Fe。Al-Fe 合金的最低电导率为 61%IACS，它们的蠕变速度比 1050A 合金的小，承受高温作用的能力比 1050A 合金的强，在退火状态下的抗拉强义勇比 1050A 合金的高 40%，而伸长率为 33%。

CK76 合金也是一种美国软线合金，除含 0.85%Fe 外，还约含 0.15%Mg，它的电导率为 60%IACS，Mg 显著改善 Al-Fe-Si 合金的蠕变性能，CK76 合金的蠕变速度比 1050A 合金的低 40%，

比 CK74 合金低 60%。CK76 合金的抗拉强度 230~260N/MM2，电导率为 59%~61%IACS，还有良好的抗蚀性与弯曲性能。

Alrnhoflex 合金是一个意大利软线铝合金，含 0.3%~1.0%Fe 与 0.2%~0.5%Si，在硬状态下的电导率不高为 42.6%IACS，可是在退火状态下则上升到 61%IACS，它的伸长率比 1050A 合金的高得多，在硬状态下几乎是后者的 3 倍。

日本神户钢铁公司(Kobe Steel Co.)开发的 Al-Fe-Cu-Be 系合金既可作硬线文可作软线，既可作为通讯导线、绕线，又可用作室内配线。它的成分(%)：0.26-0.8Fe，0.03-0.3Cu，0.001-0.1Be；它在硬状态下的强度与 5005 合金的相当，电导率较高，Al-Fe-Cu-Be 合金的抗拉强度为 230-260N/mm2，电导率为 59%~61%IACS，还有良好的抗蚀性与弯曲性能，这对制造绕组极为有利。

铝-镁-铜系合金。导电用铝-镁-铜合金的铜-镁含量都相当低，如美国的 CM71 合金，仅含 0.40%Cu 与 0.14%Mg，它的抗拉强度与电导率与 Al-Fe 系电工合金的差不多，而其蠕变性能则好得多。CM71 合金的蠕变强度比 1050A 合金的高 80%，比 CK74 合金的高 84%，比 CK76 合金的高 60%。在接触电阻方面，CM71 合金是可与铜媲美的惟一电工铝合金。

早先的瑞士铝业公司（2002 年被加拿大铝业公司并购）推出的一种铝-铜-镁电工合金，牌号为 Ductlex，它的硅、铁含量较低分别为 0.05%与 0.15%。该合金的各项性能与

5005-H19 合金的相当，特硬的（H19）Ductlex 合金的抗拉强度（235-265N/mm2）与电导率（最低为 59%IACS）甚至比 5005-H19 合金的还高一些。

铝-镁-硅-铁系合金。这类合金是苏联研发的，俄罗斯现在还广泛应用，用于制造输配电线与塑料绝缘线，主要的合金有 3 种：AE1、AE2、ABE。它们含 0.15%~0.65%Mg、0.25%~0.65%Si、0.15%~0.65%Fe。AEI 合金的合金化程度低，而 ABE 合金的合金化程度高（0.45%-0.65%Mg、0.45~0.65%Si、0.45%~0.65%Fe）。

此系合金是低温形变热处理以后使用，既能提高其力学性能又能改善其导电性能。处理工艺为：经坯在 525~565℃固溶热处理，水中淬火，在自然时效过程中拉伸，变形度大于 85%，在 140~180℃人工时效 12~21h，固溶处理与人工时效之间的时间不得长于 4h，否则会形成粗大的 Mg2Si 相，降低材料的强度。

当前急需开发在 250℃仍有良好蠕变性能，电导率能达到 61%IACS，可制造各种线圈用的半硬电工铝合金。现有室内铝线与通讯铝线的电接触性能也不尽人意，亟待改进。现行的电工铝合金都是十几年前面世的。

1.5.6 开发新型架空铝电线 降低电网损耗

表 2 AT2 及 AT4 合金的性能(IEC 62004)

参数	AT2 合金线材	AT4 合金线
抗拉强度，N/mm²	225~248	159~169
20℃时的电阻率，nΩm	31.347	29.726
恒质量电阻温度系数，10^{-4} 1/℃	0.0036	0.0038
允许连续工作温度，℃	150	230

表 3 均一 AL7、AL59 合金的性能(EN 50183、SS 424 0813)

参数	AL7	AL59
抗拉强度，N/mm²	255~300	230~250
20℃时的电阻率，nΩm	30	29.05
恒质量电阻温度系数，10^{-4} 1/℃	0.0036	0.0036
允许连续工作温度，℃	80	80

表 4 高电导率 AL1-HC 合金线材的性能

参数	AL(EN60889)	AL1-H
抗拉强度，N/mm²	160~200	16
20℃时的电阻率，nΩm	28.264	
恒质量电阻温度系数，10^{-4} 1/℃	0.004	0
允许连续工作温度，℃	80	

表 5 对比研究用的导线的力学性能

参数	ACSR	ACSR	ACSR	AAAC (AL7)
ST6C 钢线的性能				
钢线的抗拉强度，N/mm²	1700	1700	1700	-
永久变形 1%时强度，N/mm²	1340	1340	1340	-
钢线直径，mm	3.51	3.51	3.51	-
钢芯线数，根	7	7	7	-
钢芯横截面积，mm²	67.73	67.73	67.73	-
额定试验负载，kN	90.76	90.76	90.76	-
铝及铝合金线的性能				
铝线的抗拉强度，N/mm²	160	160	162	265
线的电阻率，nΩm	28.264	27.8	29.726	30
铝线直径，mm	3.51	3.51	3.51	3.51
铝线数，根	54	54	54	61
铝线横截面积，mm²	522.50	522.50	522.50	590.23

铝有良好的导电性能与低的密度，因此广泛用作导电体，主要以线材、管材、汇流排条、箔材形式应用于电力、电讯部门。铝用作导体始于 1896 年，那年英国人柯利（W.L.E.Curley）在博尔顿架设了世界上第一条架空铝导线，距原铝的工业化提取仅 8 年，至今已约 120 年。

导电线的发展可分为五个阶段（里程碑）：1882 年德国架设了一条 60km 长、功率 2kW 的输电线路，是用铜与铜合金制造的，开架空输电线路的先河，可将此举认为是架空线路

史上第一块里程碑；第二块里程碑是 1898 年美国工程师用全铝线（AAC,all-aluminum conductor）取代铜线架设加利福尼亚州蓝湖-斯托克顿之间的输电线；1909 年用钢芯铝绞线（ACSR）架设 33kV 的高压线路可认为是第三块里程碑，4 年之后用钢芯铝绞线成功地建造了一条 150kV 的输电线路，钢芯铝绞线是美国铝业公司（Alcoa）技师胡普斯发明的；第四块里程碑是 1930 年问世的全铝合金导电体（AAAC,all-aluminum alloy conductors），这种电工铝合金的商品名称为 Aldrey 或 Almelec；上世纪 60 年代从日本开始的高温低挠度电工铝合金研究，与常规输配电铝合金相比，HTLS 合金线路可显著提高输电容量，这次研究可认为是输配电铝线发展路线图上的第五块里程碑，现在已在高压输配电电路中获得应用的高温铝合金电线的商品名称有：ACSS、ACCR、ACCC、TACSR、GZTACSR 与 ZTACSR 等，它们是不同公司的产品，各有其特点，或在结构方面有不同之处，或在钢芯线或铝线型式方面有特异之处。

电力铝合金

在电力线中以铝代铜有如下优点：质量轻、电导率高，单位质量铝的电导率是铜的 208%，当电导率相等时，铝导体的质量只有铜的 50%，即便于架设，又有利于搬运，可显著加宽架线间距；导热性好、蓄热少，流过相同电流时，铝线

的截面积比铜线的大 60%，所以散发电流热的能力比铜的好得多；铝在大气中有很强的抗蚀性，对硫化物的抗蚀性比铜强得多；加工成形性好，资源丰富，供应稳定等。另外，钢芯铝绞线的强度大，表面电位梯度小、电晕特性好也是铝的优点。废铝导体的可回收性比铜的好得多，其回收再生能耗仅相当于原铝提取的 5%，而废铜导体的回收再生能耗几乎与原生铜的相等。

当然与铜相比，铝也有一些不足之处，如铝的力学性能比铜低，铝的切口敏感性比铜大，因此在安装铝线时应格外小心，另外，铝的线膨胀系数比铜大 35%，也是其缺点。

常规电力线铝合金

经过一百余年的发展，电力线铝合金已形成 3 组，它们有着不同的用途：

工业纯铝

在电线电缆制造中用得最多的工业纯铝是 1350 与 1370，过去往往将 1350 称为电工纯铝（EC）。1350 合金是一个美国合金,1975 年在美国铝业协会注册,它的成分(质量%):Si0.10、Fe0.40、Cu0.05、Mn0.01、Cr0.01、Zn0.05、B0.05、Ga0.03、（V+Ti）0.02，其他杂质单个 0.03、总计 0.10，Al99.50；1370 合金是一个法国合金，1976 年在美国铝业协会注册，它的成分（质量%）；Si0.10、Fe0.25、Cu0.02、Mn0.01、Mg0.02、

Cr0.01、Zn0.04、B0.02、Ga0.03、（V+Ti）0.02。其他杂质单个 0.02、总计 0.10，Al99.50。1370 合金的纯度比 1350 合金的更大一些，因此它的电导率也大一些，不过其价格也略高一点点。欧洲倾向于使用 1370 合金，而此美洲则多使用 1350 合金。

1350 及 1370 合金的导电率：H19 线材的 34.4MS/m，O 线材的 35.4MS/m。H19 线材的抗拉强度约 180N/mm2，最高使用温度 80℃，而工作温度高的 HTLS 线材则在 O 状态下应用，不过它们的抗拉强度则下降到 60N/mm2~90N/mm2，电导率上升到 35.9MS/m，工作温度可达 230℃。

6xxx 系合金

上世纪 30 年代由于电力的高速发展出现了 6xxx 系的电工合金，典型合金为 6101、6063 及 6061 合金，其商品名称为 AL2、AL3、AL4、AL5 等，都含有一定量的 Mg 及 Si，电导率 32.7MS/m~30.0MS/m，抗拉强度 280N/mm2~320N/mm2，在人工时效 T6 状态下应用，工作温度不得超过 80℃。它们的化学成分（质量%）。

耐热铝合金

耐热电工铝合金是用于制造可在>80℃下长期工作的电导体，用作架空线时具有低的挠度，即 HTLS 架空线。这些合金的抗拉强度为 170N/mm2~240N/mm2，比退火的 HTLS-ACSS 合金、HTLS 合金的高，而比 AT1~AT4 耐热合金的低；另一个

特点是,这类耐热铝合金的是其电导率比退火线的低 3%~11%。

AL59 合金

此类合金线材的抗拉强度比 1xxx 系合金的高，而电导率又比 6xxx 系的好，因而是制造兼有这两类合金优点导线的铝合金。

由以上分析可知，研发新的电力线铝合金可从以下几方面着手工作：第一，开发 6xxx 系合金，制造均一的高架线，虽有高的强度，但电导率较低，同时还必须研究 AL59 与 AT2 合金；第二个研究领域是开发高温铝合金，它的力学性能与 6xxx 系合金的相当,但是工作温度可高 1~2 倍;第三个领域，是开发退火线有高电导率的新合金，尽管它的抗拉强度有所下降。由此可见，研发目标非常明确，就是研发一类电导率可与 1370 合金媲美或更高的导线合金，而其强度又与其相当。

波兰导线铝合金的发展

波兰斯卡维纳市波里济现代铝产品公司自 1954 年电解铝系列投产至今已逾 60 年，用普罗帕齐（Properzi）连铸机连续铸造线杆，由于经济与环保方面原因，电解铝厂关闭，2 条线杆连铸线仍在生产，但用外购的重熔用锭，公司名称已改为 NPA。在这种形势下，公司被迫研发新的电工铝合金与生产电线的新工艺。

从 1990 年起，公司对现有的线杆连铸机进行了现代化技

术改造，可以铸造 6xxx 系合金线杆，2013 年公司成功地铸出了 AT1 及 AT3 耐热合金线杆，6xxx 系合金 AL2 及 AL7 线杆，还生产了汽车工业用的 8xxx 系合金线材。由于生产发展和不断地推出新产品，公司得到扩大，以汽车电缆为基础成立了现代线缆部。为了进一步扩大与不断地创新，NPA 公司与波兰克拉科夫 AGH 科技大学有色金属系列进行了紧密的合作，研发新产品，同时将生产方向集中于两类产品：大量生产 1xxx 系合金线杆与先进铝合金线杆，后者用于拉制室内（in-house）线路用的线材。

当前，NPA 公司的研发集中于：拉制 AT2 及 AT4 合金线的耐热铝合金线杆，改进铝合金线杆和 AL59 合金线材的生产工艺。确定生产优质性能导线的工艺路线与工艺参数，以及性能指标。AT2 耐热合金的工作温度为 150℃，而 AT4 合金的应达到 230℃，它们的力学性能及其他性能见欧洲标准及表 2。耐热线缆铝合金都含有一定量的锆与稀土元素。

AL59 也是一种重要的电力线合金，瑞典标准 SS4240813 对其性能有详细规定，其均一线材的性能见表 3。

NPA 公司在 AL1 合金基础上研制出电导率最大化的而力学性能又与其相当的 AL1-HC 合金线材，AL1 是一种 1xxx 系合金，HC 是高电导率（high conductivity）的缩写，它的性能见表 4。

新铝合金导线

以实际应用为例对新研制的铝合金导线的性能作研究，导线直径为 3.51mm，导体结构为钢芯铝绞线与全铝合金导体（线），即 AAAC，它实际上是一种裸铝合金线。这些输电线在波兰与欧洲 220kV 与 400kV 输电网中获得广泛应用。为了比较，钢芯铝绞线芯线采用标准的 ST6A 钢丝，而铝线用的是 AL1、AL1-HC 工业纯铝线编织带与耐热铝合金 AT4 线编织带；为了比较 AAAC 输电线的性能，采用高力学性能的 AL7、AL59 铝合金线与 AT2 耐热铝合金线。有关计算用的参数都引自欧洲标准 EN 50182 与国际电工标准 IEC 61597。钢线及铝线的性能见表 5。

对比研究显示，绞线中采用强度更高一些钢丝可使钢芯铝绞线的屈服强度上升约 8%，绞线中的标准铝线以 AL1-HC 合金取代可使电阻下降 1.6%。从长远来看，采用典型相导线，在电力系统中可节约大量的电。如使用 AT4 铝合金线，电阻可增加约 5%，但优点是，工作温度可提高到 230℃，AT4 合金线输送的电流可比 AL-1 纯铝线的大 50%，大大提高了电钢安全运行能力。

分析用的 AAAC 导线的断裂强度低一些，最大下降 11%，不过当质量小的导线比较时，不会对线路设计有大的影响，对全铝导线来说，最有意义的参数是其电阻，在所研究的事例中约下降 10%。采用 AT2 合金线，可提高相线负载约 25%，

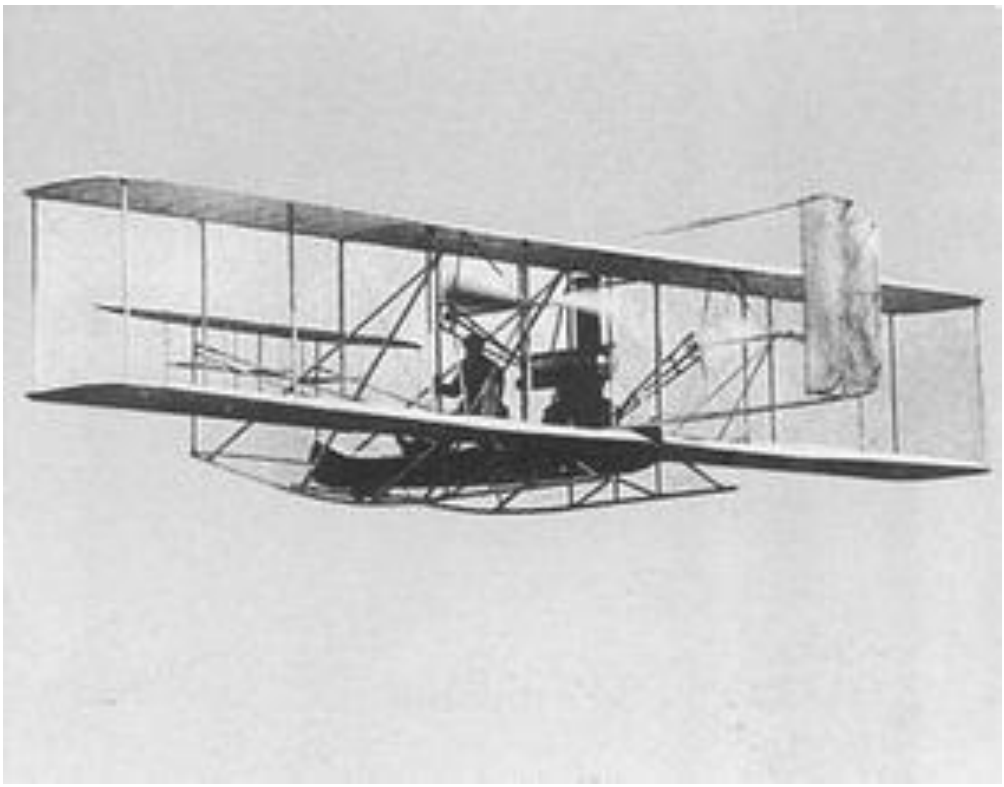
不过此时线路的工作温度可上升到 150℃。

值得指出的是，ACSR 与 AAAC 导线的主要区别是弹性模量与热膨胀系灵敏，它们决定高压输电线架设的高度，ACSR 线的这两个参数值为 67.1GN/mm2 与 19.5×10-6/℃，AAAC 线的分别为 58.3GN/mm2 与 23×10-6/℃。

1.6 航空航天

1.6.1 铝助“莱特飞行器一号”上天

铝在航空器上应用已渡过 111 个春秋，铝对航空航天工业的发展作出了永载史册的功绩，并在继续发挥着不可替代的作用。是铝使人类实现了飞天梦想。1903 年 12 月 17 日美国人莱特（Wright）兄弟发明与制造的“莱特飞行器一号”（Wright Flyer 1）在美国俄亥俄州滨海小城戴顿（Daton）腾空而起，尽管只飞行了短暂的 59s，还不到 1min，飞行距离也仅 36.58m，却有着划时代的历史意义，是由人（弟弟奥维尔·莱特）驾驶的与由动力装置驱动的人造飞行器，标志着人类飞翔的开启与探索宇宙时代的来临，戴顿市也成了现代航空工业发祥地。



“莱特飞行器一号”的发动机缸体（engine block）是用匹兹堡冶金公司（Pittsburgh Reduction Company,1907年改名为美国铝业公司，Aluminum Compang of America）生产的含92%Al及8%Cu的硬铝合金（hard aluminum alloy）铸造的，这是铝在飞行器上首次应用。自此以后，铝就与飞行器及航天器结下了不解之缘，可以毫不夸张地说，没有铝就没有今天这样兴旺发达的航空航天事业，就很难实现“嫦娥”奔月。从“莱特飞行器一号”到计划于2025年投入运营的波音飞机公司研发的概念飞机，从中国自主研发的ARJ21“翔凤”支线客机到欧洲空客公司生产的当下的空中巨无霸客机A380，从燃油飞机到太阳能飞机，从中国2008年9月25日发射的“神州”七号载人宇宙飞船火箭到美国国家航空

航天管理局预计于2020年运送宇航员重返月球的战神一号载人运载火箭都离不开铝，都有铝合金的丰功伟绩。

在此还得向大家讲一个有关飞机发明之急的小故事，巴西人认为飞行器是巴西杜蒙特发明的：1906年11月12日他驾驶一架他设计制造的名叫“Blis 14”的飞行器在法国巴黎郊区进行了一次公开试飞，飞行高度6m，飞行距离220m。圣杜蒙特的这次试飞虽然比美国莱特兄弟的首次飞行晚了3年，但在当时的欧洲却被视为世界上第一次成功的动力飞行。

巴西知名物理学家、里约热内卢天文馆馆长巴若斯经过长期研究调查后认为，莱特兄弟当时所发明的飞行器并不是依靠自身动力推动起飞的，他们的飞行没有达到真正意义上“飞”的飞行。他们利用了一个斜坡来使其“飞机”起飞，在起飞时，哥哥威尔伯还跟着飞行器狂奔，托举它的翅膀，直到飞起来，而且它们是在“偷偷摸摸”进行的，旁边没有专业人员监督，就像比赛场上没有裁判，因此他们的成绩不能算数，而圣杜蒙特的飞行则真正依靠飞行器的自身引擎推动，没有借助任何其他工具，而且它的飞行是在众多专业人员的监督下进行的，众目睽睽，飞行高度和距离远远超过莱特兄弟首次试飞，相比来说，他们的那次所谓“历史性飞行”不过是一次“长时间长距离跳跃”。

1.6.2 铝：推动航天高新技术向前冲

铝是一种高新技术结构材料或功能材料，许多高新技术的问世与发展都有铝或铝合金的参与。航空航天工业是名副其实的高新技术大产业，是发展速度最快的产业之一，一般的换代时间为七八年或三四年。自 1903 年 12 月 17 日美国莱特兄弟自制的功率为 8.8kW 的内燃机驱动的“飞行者 1 号”飞机试飞 36.58m 以来，飞行器的发展就与铝结下了不解之缘，其内燃机的缸体是用匹兹堡冶金公司（美国铝业公司的前身）生产的含有 8%铜与锰的铝合金铸造的。从那时候起铝就在飞行器制造中得到了广泛的应用，即使现行的民用飞机中，铝合金的用量仍占其净质量的 70%以上；在先进的军用机中，铝材的应用尽管受到钛合金与复合材料的严峻挑战，但铝制零部件的用量仍占飞机净质量的 48%以上。二十世纪五六十年代，人类对飞机的追求是速度；当今，人类需要的最“傻瓜式”飞机——一切交给电脑这种未来飞机的结构材料恐怕也离不开先进的新一代铝材。

铝是航空器的主要结构材料

中国目前在制造自主研发的 ARJ21“翔凤”支线客机与 C919 全新大型客机原型样机用的铝材全是美国铝业公司提供的，没有用中国的铝材。这并不是因为这些铝材我们不能制

造，而是为了认证，为了顺利地取得适航证。不过，也应如实地承认，我们的铝材生产企业还不能提供制造大飞机所需的全部铝材，但是可以提供65%左右，2018年可以提供80%以上，2020年以后可以满足全部需求，这是笔者较为保守的预估。

ARJ21支线客机的中文名字为“翔凤”，2008年11月28日首飞成功，它的英文名称“Advanced Regional Jet For the 21st Century”（先进的21世纪喷气支线客机）承载着中国民用客机制造业的希望，从英文的字面意思可以看出，它寄托着国内民用客机制造者的历史使命，是中国梦这棵参天大树上的一叶。支线客机是指100座以下的小型客机。ARJ21支线客机材料铝化率达75%，96%以上的零部件都是用热处理可强化的2xxx系及7xxx系合金制造的，仅有个别零件是用5052合金制造的。

中国C919大飞机的命名更是寓意深刻，“C”是China（中国）的首个字母，也是中国商用飞机有限责任公司英文缩写COMAC的头一个字母，同时还寓意该公司欲与欧洲Airbus（空中客车公司）、美国波音飞机公司（Boeing）在国际大型客机市场上试比高低，形成ABC三足鼎立之势。第一个“9”寓意天长地久，“19”代表中国首款大型客机最大载客量为190座，以后的型号可能命名为“C929”，其中“29”代表这一机型的最大载客量为290座。

铝材助航天器奔向太空

从任何发射航天器的火箭到航天器本身都用了铝，铝合金零部件都是不可或缺的。从 1970 年 4 月 24 日长征一号运载火箭成功地将“东方红一号”卫星送上预定轨道以来，已发展到长征二号、长征三号、长征四号等多种类型与型号。它们的结构多为金属板材和加强件组成的硬壳、半硬壳结构，材料多为比强度比刚度高的 2xxx 系及 7xxx 系铝合金，也采用了一部分不锈钢、钛合金和非金属材料，但铝合金占结构材料总质量的 70%以上。

航天器结构用的铝材大体上与飞机用的铝材相同，载人飞行器的骨架和操纵杆的大多数主要零部件都是用高强度铝合金 7075-T73 切削加工的，又细又轻又有足够的强度，其他部分如托架、压板折叠装置、防护板、门和蒙皮板、推进器氮气缸等是用成形性能良好的中等强度合金 6061-T6 制造的。卫星外罩可用 2014 合金或 7075 合金制造，如果燃料为液氧与液氢，则其贮槽可用 2219 合金制造，它们都是常规合金，可用其板材焊接这些零部件，它们的尺寸不很大，制造工艺也不复杂。在航天器发射装置中，最大与最难加工的是火箭燃料槽的连接环，是用数控碾环成形技术加工的，它的外径为 3m~9m。这类大锻环中国都能加工，中国是继美国、俄罗斯之后世界上第三个能够生产直径超过 5m 的铝合金锻环的

国家。

2013 年 6 月 11 日 17 时 38 分，神舟十号载人飞船在酒泉卫星发射中心成功发射，它的运载火箭一、二级推进舱的连接环是西南铝业（集团）有限责任公司生产的。从“神一”到“神十”，东北轻合金有限责任公司与西南铝业（集团）有限责任公司为运载火箭与航天器提供了大量的超强、超韧、耐腐蚀、抗高温以及超塑性铝合金材料及锻件。

中国成功突破了巨形铝合金锻环的成型难关，一飞惊天，中国于 2014 年 12 月末制成了外径 8.7m、内径 8.32m、高 0.35m 的顶尖的超级 2219 铝合金锻环，用作火箭推进舱的连接环，大型锻环除用作推进舱的连接环外，还在风力发电装置、石油化工设备、矿山机械、电站装备、核电装备中有着广泛的应用。这个特大锻环是无锡市民营企业派克重型铸锻有限公司研发的，它成立于 2006 年，通过了 ISO9001：2008 质量管理体系、国家压力管道资质认证，并取得包含 DNV、IR、CCS、ABS 在内的 9 家航级社认证。

2006 年 8 月 4 日西南铝业（集团）有限责任公司生产出被誉为“亚洲第一环”的 5m 级大锻环，2008 年国庆前夕又生产出 6m 级大锻环，填补了国内空白，对提升中国航天工业配套水平具有重要意义，当下我们可以自豪地说，航天工业所需的连接锻环，不管多大，我们都能顺利生产，并能满足出口，派克重型铸锻有限公司已是西门子公司的认证供应商。

继西南铝业（集团）有限责任公司 2006 年 8 月 4 日生产出 5m 连接环后，同年 12 月 30 日从东北轻合金有限责任公司又传来喜讯，它们用自行设计制造具有完全自主知识产权的环轧生产线，生产出了当时国内最大的火箭推进舱连接锻环。该环直径 5150mm、厚 100mm。2004 年以前中国只能生产直径 3m 以下的锻环，为了满足国防军工及国民经济建设对直径≥5m 铝合金锻环的需求，东北轻合金有限责任公司决定自主研发环轧生产线，2005 年 6 月开始设备安装工作，2006 年 3 月环轧生产线安装工作全部结束，2006 年 6 月中国航天局一院的有关领导与研制“嫦蛾工程”所需的超大直径铝合金锻环进展情况到该公司调研，对该公司的环轧生产线给予高度评价与肯定。生产线于 9 月 12 日一次试车成功，轧得直径 4m 的环件。不仅证明生产线各机台的运转情况良好，达到了设计要求，而且固溶处理炉的最大温度偏差只有±2℃，完全可以满足 2xxx 系、7xxx 系合金对淬火温度的要求。

天宫一号资源舱铝－锂合金建造 减重 10%以上

2011 年 9 月 29 日 21 时 25 分，中国自主研制的载人飞行器——天宫一号顺利地进入预定轨道，发射圆满成功。天宫一号目标飞行器总长 10.4m，重约 8.5t，舱体结构最大直径 3.35m。它的运行高度约 370km，在轨道上的运行时间 2 年，可以与载人飞船进行几次对接。天宫一号为两舱结构，一个

是试验舱，另一个为资源舱。前者为密封的，是航天员驻留生活和工作的地方，分为密封段和非密封段。密封段是航天员活动区，而所有的科学试验设备都装于非密封段。

天宫一号这个中国的第一个低轨道、长寿命大型载人航天器的设计寿命为 2 年，总重量 8.6t。在资源舱也就是天宫一号的后舱内装有动力系统（含超强电力的大型太阳能电池板）、推进系统和能源。它的主要任务是为天宫一号的飞行提供能源保障，并控制飞行姿态。资源舱加足燃料后的重量约 1.4t。

天宫一号电源分系统的全部设备（太阳能电池翼）都在资源舱内，再加上舱内储备的燃料都为飞行器提供运行能量。舱内还有一个极为关键的零件——控制力矩陀螺，用来控制天宫一号的飞行姿态，重约 50kg，是用有色金属制的。

天宫一号将在轨运行两年，资源舱内不但有太阳能电池、动力系统和推进系统，以及控制力矩陀螺，还必须加装足够的燃料。因此，必须减轻舱段结构部分重量。由于常规的高强度 2xxx 系合金及超高强度 7xxx 系合金早已成功应用，所以设计人员想用各项性能与常规结构铝合金的相当，而密度又比它们的小一些的航天铝合金——铝－锂合金，它的一个重要特点是其密度低与弹性模量高。在铝合金中，锂与铍是降低其密度最有效的合金元素，锂在铝中的最大溶解度为 4.2%，向铝中每添加 1%锂，可使其密度下降约 3%，而其弹性

模量则上升约 5%。

当前世界上可以生产铝－锂合金的国家与企业是：中国的西南铝业（集团）有限责任公司，美国的美国铝业公司的达文波特厂、力拓－加铝集团的雷文斯伍德铝业公司及法国的伊苏尔铝业公司，英国的基茨格林铝业公司，俄国联合铝业公司的卡缅斯克铝加工厂。中国于上世纪 60 年代初研制成铝－铜－锂系合金 S141，90 年代中期西南铝业（集团）有限责任公司从俄罗斯引进铝－锂合金真空熔炼炉及铸造设备，从此中国可批量生产铝－锂合金板材、型材与锻件等。

锂是一个化学活性很大的金属元素，因此铝－锂合金必须在真空炉内熔炼，熔体也必须在有保护气氛条件下铸造，熔铸是生产铝－锂合金最为关键的技术。

中国大飞机 C919 型客机机身等直段部段也是用铝－锂合金制造的，由中航工业洪都公司制造，已于 2010 年 12 月上旬顺利下线，所用的铝－锂合金板材由美国铝业公司提供，来自达文波特厂。等直段位于大客机机身前部，是宽度相等的筒状结构部段，全长 7.45m、宽 4.2m、高 4.2m。是中国国内民用飞机上首次采用铝－锂合金制造的部段。

美国航空航天局（NASA）也于 2008 年选定美国铝业公司为其战神一号载人运载火箭生产铝－锂合金板材，其中仅薄板的订货量就达 453.6t，全部用 2195 铝－锂合金轧制。该合金于 1992 年定型并在美国铝业协会（AA）注册，是美国铝

业公司研发的。由美国铝业公司匹兹堡技术中心生产铸锭，达文波特厂轧制薄板。

2012 年 1 月初，西南铝业（集团）有限责任公司试制成功了用于大飞机项目专用的第三代新型铝－锂合金。在填补国内该产品生产空白的同时，也为大飞机加速实现国产化奠定了坚实的材料基地。

2010 年 12 月 2 日，国产 C919 大型客机铝－锂合金机身等直段部件在中航工业洪都公司大飞机部安装厂房顺利下线。等直段位于大客机机前部，是宽度相等的筒状结构部段，长 7.45m，宽 4.2m，高 4.2m。该部段采用铝－锂合金制造在国内民机生产中尚属首次。

1.6.3 中日喷气民机制造隔海唱戏

当今，全世界的有关人士都在关心与议论中国研发与制造 C919 大飞机与 ARJ21-700 型支线客机，首架 C919 客机 2015 年 11 月 2 日在上海中国商飞公司下线，今年首飞；首架 ARJ21 客机 2007 年 12 月 21 日在商飞公司总装车间下线，2008 年 11 月 28 日首飞成功，2015 年 11 月 29 日一架新支线 ARJ21 客机从上海飞往成都，交付给成都航空公司后，再经过 100h 的运行合格审定，方可投入运营，预计三月上旬投入市场，初期投入北京、上海、广州、深圳、武汉、西安、昆明等 7

条航线。

中国 arj21 新支线飞机成功首飞

日本民机市场 mrj 首飞

中日支线喷气客机是“同胞兄弟”

中国 ARJ21 客机与日本的 MRJ 三菱支线客机在一些技术

指标上几乎相同，因为它们都是喷气式的，都主要是为各自的国内航线服务，都是在新世纪初期正式研发的，座位数为70 位~90 位，基本型为单通道机舱，每排 5 座，一侧 3 排座位，另一侧 2 排座位，ARJ21 客机 2007 年 12 月总装下线，2008 年 11 月首飞，日本的 MRJ 支线民机 2015 年 10 月下旬首飞成功，它们的最大航程约 3200km，它们用的主要结构材料都是铝材,铝制零部件净质量占飞机总净质量的 75%左右。

它们的英文名称也很有趣，大体相同，中国客机的英文缩写“ARJ”是“Advanced Regional Jet for the 21st Century（先进的 21 世纪喷气支线客机）”的简称，日本客机的英文缩写“MRJ”是“Mitsubshi Regional Jet（三菱喷气支线客机）”的简称，因为它是日本三菱重工业公司（Mitsubshi Heavy Industries,Ltd.）设计、制造与组装的，所以冠以“Mitsubshi”（三菱）的头一个字母“M”。

三菱重工业公司是日本重工业装备设计、制造骨干企业之一，有 150 多年的历史，涉及主要业务为飞机、舰船、汽车、工程机械、冶金、化工等方面装备制造。除 MRJ 支线客机发动机由日本石川岛播磨重工业公司（IHI）制造外，其他各部段、机翼、升降陀、起落架等都由三菱重工业公司制造与负责总组装。

支线飞机在 2030 年以前的全球市场占有相当大的比重，特别是美国市场，中国将是世界第二大航空器市场，甚至有

成为第一大市场的潜力。据波音公司预测，在今年 20 年内，全世界对这类支线客机的需求量可望超过 5000 架，平均每年需求 250 架，这是一个相当了不起市场。MRJ 支线客机的订单已达到 400 多架（截至 2015 年 8 月），而截至 2015 年 11 月，中国商用飞机公司已拿到 278 架 ARJ21-700 支线客机的订单。

以上聊了一些 ARJ21 客机与日本 MRJ 客机一些相似之外，它们都属于同一代的支线喷气客机，但它们也有一些差异，首先，MRJ 是完全按国际民用航空器标准设计的，而中国的 ARJ21 客机的设计则拥有安全的自主知识产权，因此在某些方面作了一些改进，例如座位比 B737 型飞机的宽 12.7mm，是当今支线飞机中客舱最宽敞诉之一，提高了乘客舒适程度；其次，ARJ21 飞机发动机是引进的，美国通用电气公司（GE）和法国赛峰集团合作制造，有着优异的使用民生能，而日本 MRJ 的发动机是日本企业制造的，在喷气客机发动机的设计、制造与材料方面与国际先进水平相比还有一定的差距，整体上也不如日本，例如钛合金材料材料的性能还未赶上与超过东邦钛业公司（Toho）的，尽管中国早已是海锦钛生产大国，有些高温合金材料或是不能生产，或是在性能方面还有较大差距；第三，日本制造 MRJ 支线客机全部用的是它国内生产的铝材，主要是神户钢铁公司真冈轧制厂与日本联合铝业公

司福井（Fukui）轧制厂生产的，而中国制造的认证 ARJ21 客机所用的铝材全部由美国铝业公司提供，当然，今后生产的 ARJ21 机在所用的材料中，国产铝材占的比例会逐年有所上升，如果 2025 年的铝化率能达到 100%，那就是很大的成就。在这里需指出的还有：我们生产航空铝的时间也不算短了，已有 60 年，但制造喷气民机用的一些铝材还不能生产，就是有无问题尚未完全解决；个别产品生产工艺装备尚未齐全，有待研发；产品价格尚无国际市场竞争力，有些产品价格甚至比国外的贵一倍多，产量少是影响价格因素之一，但主要是由于我们的技术水平较低、管理较差导致产品成品率低。

中国 C919 大客机下线，日本大量生产 B777X

2015 年中国自主设计制造的首架 C919 大客机于 11 月 2 日在上海中国商飞公司总装车间下线，无独有偶，2015 年 7 月日本川崎重工业公司与波音公司签订了制造 B777X 飞机的分包合同，同时川崎公司于 12 月 24 日宣布，正在名古屋工厂之旁建一座新的制造与组装 B777X 客机机身前段、中段、主起落架齿轮围板、后压围板（bulkhead）、货舱门等的车间，可于 2016 年 12 月完工，交付使用。B777 飞机属第三代大型民机，与 A340 型客机相当，中国的 C919 也可以认为属第三代。

过去，波音公司对中国严格实行技术封锁，但是随着大

飞机制造水平的不断提高，同时为了更好地与空客公司在中国市场上的竞争，于 2015 年 9 月习主席访美期间中美签署了“737 完成及交付中心”迁往中国的协议，B737 属第一代大喷气客机，日本制的 B777X 的有关部件、部段却是第三代，而且迁往中国的“737 完成及交付中心”只负责“绿色飞机（green)”的内部装修与外部喷漆，然后交付客户，不涉及制造与组装核心技术，仅是飞机制造中的最后一环。

所谓“绿色飞机”仅是一种半成品飞机，是指一种总装好的可安全飞行，但未完成内装和外部喷漆的“空壳”绿色飞机，因为它被喷上了防腐的绿色底漆而得名，中国与飞机结构制造及组装等技术无关，不过即使如此，与过去相比也是一大进步，也可以学到一些外围技术。当然，波音公司在中国设立绿飞机交付中心的目的是为了保住中国这个市场，“绿色飞机”一旦变成适航飞机色调与完成内外装修，就可以交付中国或其他国家的用户。

虽然在今后几年内中国制造大飞机与 ARJ21 飞机发动机是成套引进的，但在自主研发发动机材料与发动机设计制造方面也已取得不少突破性成就。据称，中国自主生产的发动机试验数据已接近国际领先水平。世界著名的德国航空发动机公司——莫图公司(MTU)于 2015 年在上海设立了代表处，并与中航工业商用飞机有限责任公司签订了谅解备忘录，在中国自主研发航空发动机领域将密切合作，中国大飞机与支

线客机装上中国有完全自主知识产权发动机的时日即将到来，可于 2025 年前后圆梦。

1.6.4 大飞机项目全面推进 铝厚板项目建设风起云涌

作者：王祝堂

大飞机项目 2007 年立项 2014 年首飞 2016 年交付用户

大飞机是指起飞总质量超过 100t 的运输类飞机或载客量百人以上的干线飞机，当今只有美国、欧洲四国（德、法、比、英）和俄罗斯有制造大飞机的能力。中国 1980 年曾研制出大飞机“运 10”，试验性能良好，但因种种原因最后落马。2007 年经国务院批准，中国大飞机再次立项，大飞机股份公司——中国商用飞机有限责任公司于 2008 年 5 月 11 日在上海成立，公司注册资本为 190 亿元。国务院总理温家宝在大型飞机重大专项研制工作有关会议上指出，让中国的大飞机飞上蓝天，既是国家的意志，也是全国人民的意志。

大型客机是指载客百人以上的干线飞机，中国是世界上发展最快、潜力最大的民用航空市场。中国商飞公司的成立，开启了中国自主研发大型客机的新篇章。中国首架大飞机起名为 C919，寓意深刻：C 是 China 的首字母，也是中国商用飞机有限责任公司英文的缩写 COMAC 的首字母，同时还有一个寓意，就是我们立志要跻身国际大型客机市场，要与 Airbus

（欧洲空中客车公司）和 Boeing（美国波音飞机公司）一道在国际大型客机制造业中形成 ABC 并立的格局。第一“9”的寓意是天长地久，“19”代表的是我国首架大型客机最大载客量为 190 座,“C919”之后未来的型号也可能命名为“C929”，其中“29”代表这一机型的最大载客量为 290 座。

当前中国把支线客机 ARJ21-700 的研发与制造与大型客机 C919 的研制绑捆在一起。C919 大型客机的研制从 2008 年起已全面铺开，测算总投资 500~600 亿元，2014 年首飞，2016 年交付用户。2009 年大型客机的研发中心、总装制造中心和客户服务中心开始在上海组建，建成后生产能力可达到年产大飞机 150 架、支线客机 50 架。目前三大中心都在进行人员扩容，研发中心和客户中心可分别招募 2000 人，总装制造中心由当时的 2000 人扩至 2 万人。

铝材在大飞机制造中仍唱主角 铝化率约 68%

1903 年 12 月 17 日美国人赖特（Wright）兄弟发明与制造的“赖特飞行器一号”（Wright Flyer 1）由弟弟驾驶在俄亥俄州戴顿市（Daton）腾空而起，尽管只飞行了短暂的时间（59S），飞行距离也仅 36.68m，却有着划时代的历史意义，是由人驾驶的与动力装置驱动的人造飞行器，标志着人类飞翔与探索宇宙时代的来临，戴顿市也成了现代航空工业

发祥地。“赖特飞行器一号”发动机的汽缸体（engine block）是用匹兹堡冶金公司（pittsburgh reduction Compang,1907年改名为美国铝业公司 Aluminam Company of Anierica）生产的含 92%Al 及约 8%Cu 的硬铝合金（Hard Aluminum Alloy）铸造的，开创铝在飞行器上应用的先河。自此以后，铝就与飞行器与航天器结下了不懈之缘，可以毫不夸张地说，没有铝就没有今天这样兴旺发达的航空航天事业，就很难实现“嫦娥”奔月。

从“赖特飞行器一号”到计划于 2025 年投入运营的波音飞机公司研发的概念飞机，从中国自主研发的 ARJ21“翔凤”支线客机，大型客机 C919 到欧洲空客公司生产的当下的客机巨无霸 A380，从中国 2008 年 9 月 25 日发射“神舟”七号载人宇宙飞船火箭到美国国家航空航天管理局预计到 2020 年运送宇航员重返月球的战神一号载人运载火箭都离不开铝，都有铝合金的丰功伟绩。

飞机性能的改进有 2/3 靠材料。因此，材料的先进性与稳定性在相当程度上决定了飞机性能。大飞机项目对材料与铝材提出了更高的要求，目前，国外大型飞机制造材料用量的总体趋势是采用整体成型，复合材料、钛合金、碳纤维塑料用量不断增多，但至少在 2020 年以前的铝合金在大型客机的用材中仍唱主角，在 ARJ21-700 支线客机与 C919 大型干线客机的用材中，铝合金零部件的质量占飞机净总质量的 68%

左右，也就是说零部件的铝化率约达 68%，仅 C919 的机舱就用了约 1500 块铝合金钣金件与约 5 万颗铝合金铆钉和螺钉。

在初期生产的 ARJ21-700 支线客机与大型客机 C919 的材料中，铝材及铝合金锻件都是从美国铝业公司进口或是由其设在中国的独资企业提供的，例如板材来自美国达文波特（Davenport）轧制厂，锻件与一部分挤压材是拉斐特（Lafayette）挤压厂生产的，还有一部分挤压材由美国铝业公司设在韩国的春元铝业公司（Changwon）提供，紧固件（螺钉与铆钉）是美国铝业公司设在中国苏州的独资紧固件公司生产。美国铝业公司的一批工程技术人员参与了 ARJ21-700 支线客机与大型客机 C919 有关铝制零部件研发与制造的全过程。

铝厚板项目风起云涌　生产能力足可满足世界需求

在大飞机项目的驱动下，中国铝加工产业在华夏大地上掀起了一股建设航空级铝合金厚板的浪潮，如风起云涌。国际上通常将厚度大于 6mm 的板材称为厚板，在美国厚板是指厚度大于 3.35mm（0.25 英寸）的铝板，在中国标准 GB/T8005.1-2008 中将厚度大于 6mm 的板材称为厚板，而将厚度大于 0.2mm 且不大于 6mm 的板材称为薄板。在当前中国有一些企业还引入了“中厚板”这一概念，“中厚板”无疑

是中板与厚板的总称，笔者认为，没有必要引入这一概念，既不符合国际惯例，也不符合中国标准规定，还是与国际接轨为好，既便于统计，又便于比较，没有标新立异，便于对外交流。

到 2015 年，中国建成投产的铝厚板项目约有 12 项，名义设计生产能力约 600kt/a，如果全部达产可以满足全球各行各业对铝合金厚板的需求，铝合金厚板必须用铸锭热轧法生产（含黑兹莱特连铸连轧法），厚板生产能力不是指热轧机的生产能力，而是后部精整设备（固溶处理炉、时效炉、预拉伸机、超声探生产线等）的生产能力。

航空航天工业用的铝合金厚板到 90%以上是用热处理可强化的铝合金（2XXX、6XXX、7XXX、少量 8XXX 系合金）生产的，而其他行业用的铝合金厚板的 85%左右是用热处理不可强化铝合金（1XXX、3XXX、5XXX、一部分 8XXX 系合金）生产的。在航空航天用的铝合金厚板中，厚度≤75mm 的占 95%左右，宽度不大于 3600mm，长度都不超过 32.5m。

西南铝业（集团）有限责任公司的 4300mm 厚板专用生产线，热轧机为中国第二重型机械股份有限公司设计制造，最大开口度 800mm，最大轧制力 50MN，规格Φ1050/1800×4300mm，主电机 5000×2kw，可生产长度≤40m。最大质量 20t 的厚板。该公司还有一条（1+1）式 2800mm 热粗-精轧生产线与一条（1+4）式 2000mm 热连轧生产线，必要时也

可以生产一些铝合金厚板。4300mm 生产线有 2 台固溶处理炉，都从德国奥托容克公司（Otto Junker）引进，120MN 拉伸机由中国重型机械研究院有限公司设计、洛阳中信重工业公司制造，该设备是全球最大者之一。西南铝业（集团）有限责任公司的近期厚板生产能力 100kt/a，远期的可达 150kt/a。4300mm 厚板专用生产线 2011 年投产。

东北轻合金有限责任公司的 3950mm 厚板专用生产线，从德国西马克公司（SMS）引进，主电机功率 4500kw×2，第一重型机械集团公司生产配套的机械设备，2011 年投产，但配套的后部设备尚未订货。东北轻合金有限责任公司还有一条 2100mm（1+1）式热粗-精轧生产线与 1 台 2000mm 单机架双卷取热轧机，该公司近期的厚板生产能力 50kt/a，稍远期的可达 150kt/a。

爱励-鼎胜铝业（镇江）有限公司 4064mm 专业厚板项目，这是中国首个生产航空航天铝合金材料的中外合资企业，爱励铝业国际（Aleris International）占 70%股份，中方鼎胜铝业公司占 30%。一期生产能力 50kt/a，远期 150kt/a，可生产厚板规格：最大长度 32m（目前 25m），厚 5~280mm，最大宽度 3800mm，可于 2012 年晚些时候出第一块板。爱励-鼎胜铝业有限公司是爱励国际科布伦茨铝业有限公司的拷贝，后者是空客公司的主要供应商，它的热粗轧 为异步的，可进行异步轧制（Snake rorling),是全球首台这类铝厚板轧机，中国引

进后是中国首台，全世界第二台。

该公司轧机从西马克公司引进，铣床由西马克梅尔公司（SMS Mear）设计制造。热轧机的其他特点是：主电机 5000kw×2，各驱动一根工作辊，最大开口度 800mm，牌坊为组合式的。2 台辊底固溶处理，先建 1 台，宽 4200mm，长 120mm，窄板可 2 片同时通过，110t 时效炉 2 台，这两种炉均从埃布纳（Ebner）公司引进。有 2 台预拉伸机，均是梅尔公司生产的，一期先建 1 台 60MN 的，可以满足 ARJ21-700 支线客机与大型客机 C919 生产对铝合金厚板的需求。最后公司或建成（1+1）式热粗-精轧生产线与建 2 台高技术大容量冷轧机。

爱励-鼎胜铝业（镇江）有限公司的建设对中国大飞机项目的全面推进有着重要意义，根据中国商用飞机有限责任公司的计划安排，2018 年大飞机制造用的铝材有 30%为国产的，而现在这一时间可提前 3 年或更多一些。

南南铝加工有限公司位于广西南宁市，还在建设生产能力 200kt/a 的铝板带项目，航空级铝合金厚板是其主导产品之一，是仿照科布伦茨铝业公司的模式建设的，并从该公司聘请了一批有经验的退体的优秀员工。热轧线为（1+1）式，粗轧机 4100mm，精轧机 3100mm，粗轧机的最大开口度 800mm，是中国最大的这类生产线，从西马克公司引进。有 2 台梅尔公司的预拉伸机，1 台 100MN 的，另一台为 30MN 的。总投资 45.4 亿元，广西自治区为投资主体，2010 年 2 月 4 日开工

建设，2013 年投产，建设期 38 个月，厚板生产能力 50kt/a。

山东南山集团已筹集足够资金，将投资 61.9 亿元，建设一个厚板生产能力 200kt/a 的超大规格高性能特种铝合金板材项目，所有装备（熔铸、热轧、热处理、预拉伸机、检测设备等）都将从世界顶尖的公司引进，2014 年建成投产后将是中国最大的、技术装备最先进的世界级航空航天铝合金厚板生产企业。南山集团是世界上产业链最为完整的与各生产板块相距最短的铝企业，产品竞争力是不言而喻的。

辽宁忠旺集团决定在大庆高新区建设 300kt/a 特大高精铝及铝合金加工材项目，总投资 450 亿元，分期分地分项建设。一期投资约 250 亿元，于 2011~2014 年分 4 次用于购买轧制中厚板、带材、箔材的轧制设备与精整设备，计划从 2013 年开始陆续到货，2014 年起分期投产，所有设备与技术均从德国、美国等引进；随即开始二期建设，2017 年全部建成，形成 300kt/a 的生产能力。看来铝合金厚板的生产能力不会低于 200kt/a。

除以上的建成的与在建的厚板项目，还有一些有生产厚板能力的轧制项目在建设中：内蒙古霍林郭勒市鸿鑫中厚板项目，云南铝业公司润鑫铝业有限公司、吉林辽源市世捷铝业有限公司（航空板 80kt/a），百色新山铝产业示范园区，等等。这些项目有的可能下马，有的可能不会如期建成。

在产的厚板生产企业

当前在产的厚板生产企业主要的是：精美铝业有限公司，一阳铝业有限公司，明泰铝业有限公司，万达铝业有限公司，中铝河南铝加工分公司，中铝洛阳铜加工有限责任公司等。除精美铝业公司外，其他企业生产的都是非航空级的通用铝合金厚板。精美铝业公司有一条 3200mm 厚板专业热轧生产线，有固溶处理处炉等全套精整设备。

综上所述，中国的铝合金厚板的装备是世界上最先进的，到 2015 年厚板生产能力可达 600~800kt/a，与其他所有国家的总生产能力相当，如生产能力得到发挥，足可以满足全球需求，但在研发力量、生产技术、管理水平、成品率、产品性能稳定性等方面与美国铝业公司、力拓加铝公司、爱励铝业公司、凯撒铝及化学公司的相比还有一定的差距，可能要到 2025 年才能全面赶上，那时航空航天器用的铝材将全是国产的。

关于更大轧机如 6000mm 级热轧机的建设由投资者决定，建不建，建多大，建在什么地方、何时建等都是投资者的事，不过应考虑：宽度≥3600mm 的板材航空航天工业不需要，宽度≥4000mm 板材市场极为有限，还不到 1%；还需要考虑宽度≥4000mm 厚板的运输问题，这与项目建设地址有关。

大飞机需要多少宽长铝合金厚板。这种板材用于制造机翼，C919 的翼展 33m，上机翼的中间蒙皮是用一块整板制造

的，其最大长度为 15m，也就是说每架飞机顶多用 4 块这么长的板，采购板材长度可按 16m 计算。

1.6.5 大飞机批量制造将促进民机铝材需求快速增长（一）

表 1 铝合金制造的 C919 零部件

部段	零部件	合金
前机身	蒙皮	2198-T8, Al-Li-S4-T8
	长桁	钣弯7075-T62, 挤压材2196-T8511/2099-T83
	普通框	2024-T42
	旅客观察窗框	7075-T73锻件
	客舱地板梁与支柱	2196-T8511/2099-T83
	货舱地板梁与支柱	2196-T8511/2099-T83
	货舱门框	7050-T7451
	铰链	铝合金锻件
中机身	蒙皮	2198-T8, Al-Li-S4-T8
	长桁	钣弯7075-T62, 挤压材2196-T8511/2099-T83
	普通框	2024-T42
	前、后梁加强框	7085-T7452
	加强框	7050-T7451
	旅客观察窗框	7075-T73锻件
	龙骨梁缘条	7450-T77511
	龙骨梁腹板	7075-T6薄板
	地板梁、支柱，座椅滑轨	2196-T8511/2099-T83
	气密地板	2024-T3，包铝的板材
	地板转折梁	7075-T73511
中后机身	蒙皮	2198-T8, Al-Li-S4-T8
	长桁	钣弯7075-T62, 挤压材2196-T8511/2099-T83
	普通框	2024-T42
	旅客观察窗框	7075-T73锻件
	货舱门框	7075-T73511，2024-T42

部段	零部件	合金
	地板梁与支柱	2099-T83，2196-T8511
机头	蒙皮	Al-Li合金，2524-T3
	长桁	7075-T62，2196-T8511/2099-T83
	普通框	2024-T42
	前压力框：腹板	2024-T3
	缘条	7075-T73511
	加强件	7150-T77511，2024-T3511
	天窗窗框	铝合金或钛合金锻件
	前起落架舱：壁板	7050-T7451
	加强件	2024-T42
	舱门框：门框	7075-T7351
	铰链	铝合金锻件
	垫板	2024-T42
前起落架	外筒	7050-T7452
	上撑杆	7050-T7452
	防扭臂、锁连杆	7050-T7452
主起落架	外锁链杆	7050-T7452
	侧撑杆	7050-T7452
机翼	上蒙皮	7055-T7751
	上长桁	7055-T76511
	下蒙皮	2024HDT-T351
	下长桁	2026-T3511
	机翼前后梁	7050-T7451
	机翼后梁内段	7085-T7651
	主起支撑接头	7085-T7452

通常，我们把拥有完全自主知识产权的新支线民航客机ARJ21-700与C919干线客机称为国产“大飞机”。ARJ21-700于2007年12月21日在上海飞机制造厂下线，命名“翔凤”，其基本型为单通道机舱，每排5座，一侧为3排座，另一则两排座，其舒适程度比一般支线飞机的高很多，因为座位比B737飞机的宽12.7mm，是当今支线飞机中客舱最宽敞的之一。2008年11月28日首飞成功，它的英文名称“Advanced

Regional Jet For 21st Century”（先进的21世纪喷气支线客机），承载着中国民用客机制造业的希望，从英文的字面意思可以看出，它寄托着国内民用客机制造者的历史使命，是中国梦这颗参天大树上的一叶。支线客机是指100座以下的小型客机。而更严格地说，只有C919才算得上大飞机，同时它还是大飞机家族中的小兄弟。

中国C919大飞机的命名更是寓意深刻，“C”是China（中国）的首个字母，也是中国商用飞机有限责任公司英文缩写COMAC的头一个字母，同时还寓意该公司欲与欧洲Airbus（空中客车公司）、美国波音飞机公司（Boeing）在国际大型客机市场上试比高，形成ABC三足鼎立之势。第一个“9”寓意天长地久，“19”代表中国首款大型客机最大载客量为190座，以后的型号可能命名为“C929”，其中“29”代表这一机型的最大载客量为290座。2014年年底ARJ21-700通过中国民航局适航审定，航空公司投入支线航线商业运营。

中国自主研制的C919大型客机2015年11月2日在上海中国商飞公司下线，2008年开始研制，历时7年，计划2016年首飞。它的主要技术参数：基本型混合级布局158座，总长38.9m，高11.95m，翼展35.8m，标准航程4075km，可从北京直飞新加坡，胜任国内所有城市往返。与波音B737飞机相比，具有更安全、更轻巧、更大功率、更快、更舒适的优

点。

C919 的机头、前机身、中央翼、中后机身等九大部段都由中航工业集团等国内航空工业企业制造。飞行控制系统、机轮刹车系统、辅力动力装置和导航系统等由霍尼韦尔公司提供。

大飞机发动机由美国通用电气公司（GE）和法国赛峰集团合作研制，比现役空客 A320 及波音 B737 飞机的发动机都要大，更有劲，而油耗却比它们的大大降低，使用成本比它们约低 10%，碳排放量降低 50%。

C919 采用中国自主研发的超临界机翼，提速省油，其声阻比、导航特性、失速特性等几项重要指标均优于国外同类机型的，速度也比它们的快。大飞机客舱增设了减震系统，可以缓冲颠簸，客舱内壁设有单独通风口，能更好地调解机舱内的气压变化；舱内的中间位置坐椅比国际航空标准椅宽 12.7mm（0.5 英寸），因而乘客感觉更舒适。

铝材在大飞机上的应用

1. ARJ21-700 支线客机的选材

ARJ21 飞机的选材以铝合金为主，铝制零部件的质量占飞机净质量的 75%，结构钢和不锈钢的占 10%，复合材料的占 8%，钛合金的占 2%，其他材料的占 5%。ARJ21 飞机用的铝合金大体上波音与 B777 飞机的相同，选用综合性能优秀的第四

代高强耐损伤铝合金制造主体结构件；机翼下壁板选用高损伤容限型的 2524-T3 铝合金板与 2324-T39 合金板；上翼上壁板用的是 7150-T7751、7055-T7751 合金预拉伸厚板，它们有高的强度和抗蚀性；机翼梁、机身桁条、机身框架、隔框、机翼上桁条、翼肋和翼梁等是用 7150 合金挤压材等制造的；7075、7050、2024 等合金材料也有所应用，但用量不多。

96%以上的铝合金零部件都是用热处理可强化的 2xxx 及 7xxx 系合金制造的，仅有个别零件是用 5052 合金制造的。铝-锂合金在 ARJ21-700 飞机制造中没有获得应用。

2. C919 大客机的选材

在选用铝材上，既选用了大量的传统铝合金，如 7075-T62、7075-T73、7050-T7451、7050-T73511、7050-T77511、7050-T7351、7050-T7452、7150-T77511、7075-T6、7055-T7751、7055-T76511、7085-T7651、7085-T7452，2024-T42、2524-T3、2024-T3511、2054HDT-T351、2026-T3511 等；还选用了一定数量的第三代铝-锂合金：2198-T8、Al-Li-S4-T8、2096-T8511、2099-T83 等，但是 7xxx 系合金用得最多。

C919 的前机身、中机身、中后机身、机头与机翼的结构件则几乎全是用铝材制造的，而发动机吊挂、垂尾、平尾、后机身前段、后压力框、后机身后段、中央翼等则是用复合材料或钛合金锻件制造的。用铝合金制造的 C919 零部件（见

表 1）。

除上述部段的主要零部件是用当今的高性能的传统 2xxx 系与 7xxx 系合金制造的，一些重要的结构是用第三代铝-锂合金制造的外，一些次要的零部件与功能零件则是用其他铝合金制造的，如空调系统、油路管道、行李架、食品架、卫生间设施等等。因此，C919 的铝制工作总质量占飞机总净质量的 65%。

1.6.6 大飞机批量制造将促进民机铝材需求快速增长（二）

表 3　一些典型干线客机的用材情况(W%)

代数	机型	铝合金	钢	钛合金	复合材料
第一代	B737、B747	81	13	4	1
第一代	A300	76	13	4	5
第二代	B757	78	12	6	3
第二代	B767	80	14	2	3
第二代	A320	76.5	13.5	4.5	5.5
第三代	A340	75	8	6	8
第三代	B777	70	11	7	11

铝-锂合金首次亮相中国民航机

1. C919用了哪些铝-锂合金？

C919前机身蒙皮、机头蒙皮、中机身蒙皮、中后机身蒙皮是用2198-T8铝-锂合金厚板与Al-Li-S4-T8铝-锂合金厚板

制造，这里所说的厚板是指厚度>6mm的板材；前机身长桁、机头长桁、中机身长桁与地板梁、支柱、座椅导轨是用2196-T8511/2099-T83铝-锂合金挤压材等制造的；中后机身的长桁用的是2196-T8511/2099-T83铝-锂合金挤压材，它的地板梁与支柱的用材料为2099-T83、2196-T8511铝-锂合金挤压材。由此可见，C919用的常用铝-锂合金有3种：2196、2198、2099，它们都已在美国铝业协会公司（AA）注册，注册年度依次为2000年、2005年、2003年，都是美国合金，还用了一种牌号为Al-Li-S4-T8的铝-锂合金，但其成分未见报道。

2099合金是一个很纯的合金，它的杂质铁、硅含量很低，必须用高纯原铝锭配制，同时它的锂含量也高，因此其材料的价值比其他两种合金的都高。2196和2198合金还含有少量的银，银能显著加速Al-Li合金的时效强化过程，总的来说，含Ag的铝-锂合金的综合性能优于不含银的铝-锂合金，银不但能细化合金的晶粒，而且加速合金的时效析出过程，使时效后合金的塑性有较大的下降。

2099合金还含有0.40%~1.0%Zn，锌可与Mg形成n'（MgZn2）相并促进?'和S'相的析出，从而提高其力学性能，时效前的预应变可促使Al-LI-Cu-Mg-Zn-Zr合金在190℃时效后的抗拉强度提高约20N/mm2。

2. C919用的铝-锂合金从哪里来？

C919机身蒙皮用的板材，长桁、地板梁、支柱等用的挤压材，座椅导轨等铝-锂合金材料与机身等直段用的所有铝-锂铝合金材料是美国铝业公司（Alcoa）提供的，而且其他一切铝材也是从美国铝业公司进口的，板材产于达文波特厂（Davenport Works），挤压材与锻件是拉斐特厂（Lafayette Works）加工的。除铝-锂合金挤压材外，其他挤压铝材有一部分是美国铝业公司设在韩国的一个挤压厂生产的。

C919是由一百多万个零部件连接组装而成，铝合金零件的连接与其他零件的连接如发动机与机翼的连接，在飞机制造中起着非常重要的作用，所有的连接紧固件是美国铝业公司设在中国江苏省苏州市的两个工厂生产的，也可能有一些是进口的。古老的铆接法仍是飞机零件的主要连接工艺，C919的机身由一千六七百块钣金件组装而成，仅铆钉就用了六万多个，有的为2xxx系合金，有的为含锂的2xxx系合金。

早在2009年年中，中国商用飞机有限责任公司就与美国铝业公司接触，谈判有关大飞机项目所用铝材供应的有关事项，谈判甚为顺利，美国铝业公司答应提供所需的一切高端铝材，而且价格比中国自己生产的还便宜一些，交货期也得到保证，美国铝业公司还派了材料专家深入中国商飞公司有关部门，帮助铝材选用与介绍铝材性能，为了双方合作得更好，该公司亚太地区总部特意从北京搬迁到上海。

3. 铝-锂合金为何博得C919青睐？

大家知道，航空航天工业对零件质量是锱珠必较的，用现在的话说，就是在计算零件质量时必须精准到“克”。锂的密度为540kg/m3，是最轻的金属元素，是铝密度的20%，向铝中每添1%Li，合金的密度均下降约3%，正弹性模量上升约5%。因而含锂的铝-锂合金具有低的密度，高的比强度、比刚度、比弹性模量等优点而成为优秀的航空航天器用铝材，有报道称：如果采用铝-锂合金制造波音飞机结构，其质量可以下降14.6%，燃料节省5.4%，飞机成本将下降2.1%，每架飞机每年的飞行费用降低2.2%。这就是飞机制造企业为什么对铝-锂合金情有独钟的原因。

2011年9月11日中国研制的载人飞行器--天宫一号发射成功，顺利进入预定轨道。它的资源舱是用铝-锂合金制造的，比用2xxx系及7xxxx系常规合金制造减重10%左右，舱内装有太阳能电池、动力系统、推进系统、控制力矩陀螺，加足燃料后总质量约1.4t。

4. 铝-锂合金的发展历程

世界第一个含锂的铝-锂合金诞生于上世纪二十年代初的德国，商品名称Scleron，但没有获得工业应用。1942年美国铝业公司的利巴朗（Lebaron）发明的X2020合金（Al-4.5Cu-1.0Li-0.8Mn-0.6Cd）获得专利，1957年其板材

在美国海军的A3J侦察机上获得应用；1960年代初在超声速轰炸机B-58和歼击机上获得少量应用，但是此合金的断裂韧性低，尤其是缺口敏感性比7075-T6合金的大。

1955年，英国科学家哈代(Hardy)与西尔科克(Silcock)对AL-Li及AL-Cu-Li合金的时效过程作了研究，发现了有序的?'Al3Li相。1960年苏联研制成D1420合金，其成分（W%）：4~7Mg，1.5~2.6Li，0.2~1.0Mn或0.05~0.3Zr，0.015~0.15Ti，0.05~0.3Cu，其余为AL。1971年英国富尔默（Fylmer）研究所研制出新的AL-Mg-Li-Zr合金，特别是1973年的石油危机以后，再次掀起了研究铝-锂合金的浪潮，在解决其低韧性与晶界脆性方面取得了突破性的成就，诞生了第三代铝-锂合金，如肯联铝业公司的AirwareTM合金及其生产工艺，在A380宽机体大飞机上获得了大量应用，现在飞机上应用的铝合金都是第三代（表3）。

现在，不管什么变形铝合金，只要是含有合金元素锂的都被称为铝-锂合金。截至2015年1月，在美国铝业协会公司注册的铝-锂合金共25个，其中属2XXX系的22个，Li的最大含量为2.6%（2090合金）；属8XXX系3个，含Li最多为8091合金，含2.4%~2.8%，在当前常用的（active）的铝-锂合金中的锂含量都不超过2.8%。

在全球发展铝-锂合金历程中可以明显地看出，苏联-俄罗斯着重发展以Al-Mg系合金为基的含锂合金，而美国与法国

则发展以2XXX系合金为基础的含锂合金，由于意识形态的关系，苏联研发的变形铝合金不到美国铝业协会公司注册，直到苏联于1991年解体后，1997年俄罗斯才注册了一个非原型合金2224A。笔者所指原型合金是第二位数字为“0”合金。

现在有独立铝-锂合金工业的国家只有美国、俄国、法国和中国，它们建立了从熔炼-铸造-加工的完整体系，熔炼-铸造是生产铝-锂合金材料的关键工序。可生产铝-锂合金材料的企业有美国铝业公司的达文波特轧制厂、拉斐特挤压-锻造厂、英国的基茨格林轧制厂（kitts Green Works）、俄罗斯的萨马拉冶金公司(Samara)、意大利的富西拉(Fusina)轧制厂；肯联铝业公司的法国伊苏尔（Issoire）轧制厂；俄罗斯联合铝业公司的卡缅斯克冶金公司；中国的西南铝业(集团）有限责任公司。全世界2015年铝-锂合金材料生产能力约200kt/a，其中美国铝业公司占50%以上。

1.6.7 大飞机批量制造将促进民机铝材需求快速增长（三）

中国宜规划民机铝材发展路线图

当前制造ARJ21-700支线客机与C919干线大飞机所需的全部铝材都是向国外采购的，原因固然很多，然而即使尽量由国内优先供应，恐怕可供应的比例也不会大于10%。航空工业是一个基础工业，一个强国必须有强大的航空工业，一代

材料，一代飞机，强大的航空工业应有强大的材料产业，必须确保材料自给有余。

中国当前中铝公司的西南铝业（集团）有限责任公司、东北轻合金有限责任公司、西北铝加工分公司，山东南山集团，忠旺集团，南南铝加工有限公司，兖矿轻合金有限公司，齐星铝业有限公司，利源精制有限公司，爱励铝业（镇江）有限公司等的装备都是世界一流的，总体上甚至在美国之上，为生产高品质的民机铝材奠定了雄厚的物质基础与技术平台。

1. 中国航空航天铝材面临的问题

在笔者看来，中国航空航天铝材产业面临的主要问题：

创新力量不够，研发投入有待增加，研发人才有待增强，水平有待提高，距“万众创新”的目标相差甚远，才是万里长征的起步阶段。例如在航空用的铝合金中没有一个中国创造与注册的合金，但在通用工业用的合金中注册了3个：5154C、6043、6027。笔者盼望早日结束模仿跟迹阶段，走上创新坦途。

还有一定数量的航空铝材不能生产，还有一些虽能生产但量不足，需要进口，或因品质有问题不能也不敢使用。

紧固件如螺钉、螺帽、铆钉、螺栓等，不但品种多而且数量大，有铝合金的、碳钢的、不锈钢的、高温合金的、钛合金的，仅铝合金铆钉在C919上就用了十几二十万个，可是

中国还没有一个专业航空铆钉厂，东北轻合金有限责任公司与中铝西北铝加工分公司虽能生产一些铆钉线材，但品种不全，数量也不足，品质也有待提高，中国航空器用的紧固件全部为美国铝业公司垄断，它在中国苏州市建有两个独资的紧固件厂。

有些合金板材还不能生产，如7055合金有些规格的大扁锭不能有效地铸造，裂纹废品率大得惊人，到了不能生产的程度，7055是一种较为新型地航空铝合金，是美国铝业公司研发的，1991年在美国铝业协会公司注册，是一种高纯（≤0.10%Si、≤0.15%Fe）的而合金元素（Cu、Mg、Zn、Zr）含量又最高（11.46%~13.55%）的，铸造难度相当大。C919上机翼蒙皮是用7055-T7751合金厚板铣削的，中国还不能生产符合用户要求的高品质板材，但是机翼上长桁为7055-T76511合金挤压材中国可以生产，但生产成本高，以致产品无市场竞争力。

7050合金是一种Al-Zn-Mg-Cu-Zr合金，是一种高纯度（≤0.12%Si、0.15%Fe）的合金化元素总含量也高（9.68%~12.25%）的超强硬铝，是C919用的最多的结构合金之一，如前机身货舱门框，机头前压力框加强件，前起落架舱壁板，中机身加强框、龙骨梁缘条、机翼前后梁，主起落架外锁链杆和侧撑杆，前起落架外筒和上撑杆、防扭臂、锁连杆等等，都是用7050合金制造的，这种合金材料虽然能加工，但是成品率约

比美国铝业公司相应材料的低约20个百分点，品质也有待全面提高。

2024合金也是用得多的合金，我们对这种合金的生产技术都已掌握，早在1956年东北轻合金有限责任公司（当时名为哈尔滨铝加工，代号101厂）在苏联专家帮助下就能生产2024-T4合金各种半成品，基本上满足了1970年以前国防军工对这种合金材料的需求。

C919机头前压力框的加强件、中机身龙骨梁缘头是用7150-T77511合金材料制造的，机翼上蒙皮用材为7055-T7751合金。T77状态为一种三级时效状态，简称RRT处理（retrogression and reageing treatment）。T77处理于1989年注册，经T77工艺处理的7XXX系合金既有高的强度又有优秀的抗应力腐蚀开裂性能，达到了综合性能的完美结合，可是中国对其装备与工业化生产技术还没有完全掌握，仍为美国铝业公司垄断。

生产成本过高，缺乏市场竞争力

民用客机对铝材的要求是：使用期限长，高的可靠性，综合性能好，成本合理。当前，中国生产的2XXX系合金和大部分7XXX系合金材料虽然在性能方面可以赶上美国的，但性能的稳定性远不如国外，对飞机的安全造成了一定的隐患。

飞机用材的价格及零部件的加工费用占其总造价的20%~30%，因此，材料的经济性是飞机制造公司采购材料的重

要原则之一。据有关媒体报道，中国当前生产的民机铝材的价格比美国及德国的贵一倍，复合材料价格为国外材料的4倍，钛材比日本及其他国家的贵40%。按国际惯例，大的制造飞机企业用的材料多实行全球招标采购，在同等品质与其他条件相同条件下，你的价格高，哪能中标呢？

材料性能稳定性、可控性

中国生产的2XXX系及7XXX系民机合金材料的性能稳定性、可控性远不如国外的，更谈不上可追朔性了。为了推动国产材料的应用，中国商飞公司对铝材生产企业有如下要求：可识别出材料生产过程中全部控制点，并能确定其控制措施；可验证工艺参数“窗口”上下限地合理性；对重要原材料实施延伸的过程控制；生产过程必须有完整的记录；生产记录必须真实可靠。

2. 规划2025年以前铝材全部自给发展路线图和时间表

2015年10月上旬工信部在上海召开了推动航空铝材完全自主供应的会议，这个会开得好，开得及时，工信部表示，将制定《国产航空铝材研发推广计划》，并实施有利于扩大国产民机铝材应用的支持政策，推动国产民机铝材进入全球供应链。为能在此项工作中尽一点微薄的力量，特提出几点不成熟的建议：

尽快出台可操作性强的民机铝材生产供应路线图与时间

表

在航空铝材生产方面我们有近60年的历史与经验，已成为世界最大铝材生产与消费大国，有世界一流的装备，在大众创业、万众创新的方针指引下，有工信部的统一领导与有关单位，大专院校、科研院所、相关企业的参与下，一定能在2025年以前解决民机制造所需的全部铝材，但是必先规划一个路线图与时间表，各单位与企业在路线图的指引下，各司其职，按期完成所担当的任务。

先解决有无而后全力以赴降低材料生产成本，提高市场竞争力

中国当前民机制造所需铝材的70%以上都可以制造，但还有30%不能生产，还有60%左右产量不足或品质不能满足需求。不能生产的有：一部分铝-锂合金、大部分7055合金板材、T77状态7XXX系合金板材与挤压材、紧固件、一部分铆钉线材。宜优先解决这些材料的生产问题。

南山集团可以建成全球最优秀与最大的单一民机铝材生产基地

山东南山集团的企业全部分布在400km2的范围内，已形成电力-氧化铝生产-原铝提取-铝材加工的完整产业链，为降低制造成本与品质控制创造了有利的条件，这在世界上也是独一无二的，可以生产平轧、挤压与锻压产品，所有装备是全新的、顶尖的。如果再增建一些项目，那就完美了，成为

一个一纸订单解决所有航空铝材的企业了，一个铆钉线材生产项目，一个紧固件厂。以后在适当时候再建一个飞机零部件深加工，一个航空废铝回收再生厂。一个这样的航空铝材生产综合性企业，只要管理得当，就是一颗长青的摇钱树，只要善于“摇”（管理与经营），就会总有钱掉下来。

当下，中国只有东北轻合金有限责任公司与中铝西北铝加工分公司可以生产航空器铆钉线材，单个铆钉的质量很轻、以克计，但一架飞机的用量却不少，有二三十万个或更多，所以再建一个铆钉线材特别铝-锂合金线材企业还是不多的。

航空航天器紧固件生产企业中国虽有两个，那是外商独资企业，是人家的，一个大国必须有完整的航空材料体系，因此必须建紧固件厂，打破国外垄断，但是可以和美国铝业公司合资，不过我们应当控股与经营管理。

在今后适当时候可建一个飞机零部件深加工项目与航空材料加工废料回收再生项目，建设这样的项目有着重要的经济效益与社会效益，对建设循环经济与节约资源有着重要意义，建设这样的项目宜与飞机制造厂或零部件生产加工企业合作。飞机零部件的切削加工废料甚大，大得惊人，有的材料利用率只有百分之三四，中国有航空器制造企业为波音公司切削加工过零部件。南山有条件成为世界第二大与效益最佳航空航天铝材生产企业，世界最大单一厂。

加大研发投入

航空航天材料生产是一个技术密集型产业，一代材料一代飞机，同事一代新材料的研发需要三五年的时间或更长时间。对研发费要舍得投入，大型综合性企业每年的科技投入最好能达到销售收入的3.5%或更多一些，同时应长期如此。国家与高等院校应多承担基础性研究，研究院所除承担企业委托的项目外，也应做些基础理论研究，企业的研发项目当然以解决生产中出现的工艺问题为主，但应有中长期的新产品研发项目，有适当数量的技术储备。

再建常规航空材料项目宜谨慎

当前，常规航空材料生产能力已大大过剩，例如厚板（厚度＞6㎜）的生产能力足以满足全世界飞机制造业的需求，挤压材与锻件的生产能力更是如此，因此再建企业与项目宜谨慎。截至到2015年年底中国投产的可以航空级板材企业有：东北轻合金有限责任公司，南山轻合金公司，齐星铝业有限公司，南南铝加工有限公司，西南铝业（集团）有限责任公司，它们都有锟底式固溶处理炉、预拉伸机、时效炉、水浸式超声探伤线等；可生产航空级挤压材的主要企业有：东北轻合金有限公司，忠旺集团，南山集团、利源精制有限，兖矿轻合金有限公司，南南铝加工有限公司，中铝西北铝加工分公司等。

争取尽快成为飞机制造公司的铝材供应商

现有的航空铝材生产企业应尽快获得有关组织的认证书，成为中国商用飞机有限责任公司、波音飞机公司、空中客车公司、庞巴迪公司、巴西飞机公司的供应商。

对T77处理装备和工艺可联合攻关

直到现在我们还没有有效的掌握工业化生产某些C919铝材的工艺与装备，例如7055合金某些规格扁锭的DC铸造、裂纹废品率特高，圆锭铸造不是问题，因为熔体凝固时锭中的应力对称均匀，不易产生裂纹；T77状态（7055-T7751、7150-T77511）材料的商业化生产尚未过关，有工艺方面问题，也有装备方面的问题。如果各个单位都各自进行，可能时间会长一些，资源消耗可能会多些，如果在有关单位或组织协调下联合攻关，肯定会取得更好的效果。

建立牢固的可追朔性

可追朔性的建立除满足上述的一些要求外，最好是铝土矿采自固定的矿床，由不变的生产线提取氧化铝，再由固定的电解槽系列生产原铝，再用同一保温炉与铸造线供应的重溶用原铝锭。这样不会混入难以预料的微量杂质元素。高纯2XXX系及7XXX系航空航天铝合金的断裂韧性、疲劳性能与抗应力腐蚀开裂能力对某些杂质含量变动相当敏感。

C919下线拉动民机铝材持续高速增长

C919大飞机经过近7年的研发，首架机即适航取证机于

2015年11月2日下线，这是中国航空工业发展史上具有里程碑意义的大事，截止到2015年10月底已订出了517架，其中有十余架“外销”。中外用户21家，在中国民航市场打破了波音公司和空客公司的垄断，今后除宽体大飞机外，中国民机市场的单通道干线客机与支线客机将逐渐由C919与ARJ21唱主角，这将拉动中国航空铝材需求的持续上升，据笔者测算，2016年~2020年的复合增长率可达25%，比其他任何产业的铝材需求复合增长率都大。

另外，据波音飞机公司预测，2014年~2033年全球航空客运量的复合增长率可达4.7%，需新增客货运输机19000架；约有12400架燃油效率低的客货运输机将要退役，由新飞机取代；全球新增客货运输机需求约9300架，按飞机数量计算，占同期新飞机总数的30%，也就是说，此期间全世界需新增客货运输机31000架，其中亚洲的新增量10850架，占35%。

中国航空工业第一集团公司预测，到2025年国内航空运输飞机拥有量将有3000架，其中大型客机2000架，从而中国成为全世界第二大民机市场，目前中国通用航空发展正处于一个重要布局期和准备期。还有人预测，未来10年中国通用航空市场复合增长率约30%，即有超1万亿元市场，不过，笔者在此需指出的是，由于基数太低与ARJ21、C919所用铝材的国产化率2018年也不过30%，同时国产化率是一个暂进的过程，即便爱励铝业（镇江）有限公司有一些出口，但在2022年进

口量还可能大于出口量。由于这些原因，笔者的匡算数据是，2018年中国民机制造对铝材的需求采购(buy)总量25kt，2022年的45kt，2025年的100kt，加上出口的，恐怕也不会超过130kt。但愿笔者的预测过于保守。即便如此，中国铝加业究竟能“抢”到多少订单还是一个未知数，因为大型民机制造业对所需求材料实行的是全球招标采购，同时中国当前航空铝材特别是铝-锂合金材料的价格比国外公司的高得多。

中国大飞机C919下线了，被拖到了商飞公司机场，将进行地面与滑动试验、检测，2016年首飞，随后进入批量生产阶段，也许到2018年去哈尔滨消暑，去海南岛“猫冬”，去云南旅游，去上海与乌鲁木齐出差坐的就是中国制造的干线大飞机。2030年就可以乘坐完全用国产材料制造的双层双通道宽体大飞机翱翔祖国上空与周游世界，那时你下机时就会深深感觉到作为一个中国人多么自豪，祖国真伟大。

1.6.8 中国航空铝材 盛宴即将开筵

2013 年~2030 年，中国须新增通用航空器约 6000 架，如果每架的铝材用量按 2.5 吨计算，需要投入航空级铝材 15000 吨，其中 2013 年投入 328 吨，2015 年投入 400 吨，2020 年投入 640 吨，2025 年投入 1033 吨，2030 年投入 1663 吨。

中国将成为全球第三大民航客机市场

铝及铝合金因其密度小、强度适中、易加工成形、抗蚀性强，资源丰富、可回收性强等优点，从人类首次实现升空的“飞行者 1 号”（Wright Flyer1）起就与航空航天器结下了不懈之缘，真是到了无铝不成航空航天器的地步，从 1903 年起至今至可预见的将来，凡是升空上天的飞行器没有一个不用铝的。

时至今日，全球经济一体化及各国国内城镇化的高速发展，都对民用空中交通运输起到了巨大的推动作用。各种民航客机及民用航空器的发展又为铝材的需求市场提供了发展空间。

据媒体报道与波音飞机公司市场部的预测,2009 年~2028 年，中国需要新增民航客机 3770 架，使客机总数达到 4610 架。在新增的飞机中，特大飞机 75 架，占 2%，从波音飞机公司与空客公司引进；双通道的大客机 792 架，占 21%，也是从波音公司与空客公司引进;单通道客机 2639 架,占 70%，主要负责国内市场运营，除仍向国外购买少量外，主要是中

国商用飞机有限责任公司生产的C-919与ARJ-21单通道飞机，但要到2017年后才能批量生产。同时，可能要到2023年，铝材的国产化率才能达到100%;支线客机264架,如新舟-60，占7%，全部国内制造。

2009年~2028年，平均每年需新增民航客机近190架，其中，2013年拟购买超过350架新飞机。由于2020年中国要建成小康社会；从2012年起，中国国民经济增长进入平稳阶段，但仍达到8%的高增长率，远比世界其他国家及地区高得多，中国的工业化进程远未结束；中国的城镇化正在高速发展，将形成一批特大城市（mega city,人口大于1000万，如北京、上海）、大城市（big city，人口在500万到1000万之间）、中等城市（midsized city，人口在150万到500万之间）、小城市（small city,人口在50万到150万之间）、大镇（big town，人口在50万以下）；中国正在新建或将要新建一批大中小机场，到2025年，可达到275个，其中最大的是首都第二机场，2012年初已进入立项阶段，计划2018年竣工，设计最大吞吐量1亿人次/年。以上这些因素都在推动着中国国内民航事业的高速持续大发展，使中国对大中型民航客机的需求仅次于北美洲的民航需求（约7700架）与欧洲的民航需求（约7400架）。

中国需要的座位大于100个的大飞机中，除了对外购买一些以外，在2017年~2030年期间，国内制造约2500架，

平均近 180 架/年，其中 C919-300 型（198 座）约 450 架左右，约占 18%；C919-200 型（168 座）约 1300 架左右，约占 52%；C919-100 型（138 座）约 750 架左右，约占 30%。它们的铝材（含锻件及铸件）使用量按运-8 飞机等同计算，共需投入铝材 182.5 千吨，平均约 13 千吨/年。

C919 客机

C919 飞机由中国商用飞机有限责任公司（Comac）负责总装，计划 2015 年首飞，2016 年投入营运。它的发动机为 CFM LEAP-X，除一些核心技术及关键零件外，其余大部分零部件由中国制造。C919 飞机的头部（nose）由中国飞机公司（CAC)制造，机身中段(center fuselage)、翼盒(wing box)及机翼（wing）由西安飞机公司（XAC）制造，上海飞机制造公司（SAMF）负责水平稳定面（horizontal stabilizer）制造及最后总装，垂直稳定面(vertical stabilizer)及尾部（empennage)由陕西飞机公司(SAC)制造，机身前端(forward fuselage)及后段(after fuselage)由洪都飞机公司(Hongdu)制造。

ARJ-21 客机

2007 年 12 月 21 日，中国首架具有完全自主知识产权的

大型新支线客机 ARJ-700 在上海飞机制造厂总装下线，2008 年 11 月 28 日，首次试飞成功。2015 年制造 ARJ，2016 年起，可进行批量生产，到 2030 年年底，总产量预计达到 600 架，全部在上海飞机制造厂的 3000 余平方米的厂房内组装，建设总目标为 50 架/年，一期建设目标 30 架/年。所用铝材在 2020 年以后的国产率有望达到 100%，目前，制造认证机用的铝材全部是进口的。如果铝材投放率按 45 吨/年匡算，总计需投入 27000 吨，2015 年后的平均投入量约 1800 吨/年。

新舟-60 型支线客机

此机是西安飞机制造公司自主研发的定型客机，是在运-7 短/中运输机的基础上研制生产的 50~60 座级双涡轮螺旋桨发动机支线飞机，大量采用集成了国产技术部件。

按照计划，中国将形成由新舟-60、新舟-600、新舟-700 构成的高、中、低端合理搭配的系列化涡桨支线客机产品。新舟-700 飞机将于 2014 年投放市场。根据西飞国际的规划，到 2018 年新舟系列飞机将占全球涡桨支线客机市场份额的 40%，西安飞机制造公司将成为世界最大涡桨支线客机制造商。

新舟-60 飞机获得中国民航局的适航认证，2006 年 5 月 10 日，取得了印度尼西亚颁发的适航认证，是当时中国运输类飞机首获国外型号合格证，但直到今天，尚未获得美国联邦航空管理局（FAA）及其他国家的适航认证。新舟-60 的第

一个国际用户是津巴布韦，采购了 3 架，2006 年 6 月 7 日，西安飞机制造公司与印度尼西亚鸽航有限公司签订了出口 15 架新舟-60 的合同，这是当时中国民机外销史上一次性购销两最大的合同。

在 2013~2030 年期间，中国可能制造 385 架新舟系列支线客机，其结构件几乎全部是铝合金的，铝化率可按 80%匡算，每架飞机的铝材投入量如按 25 吨计算，则需要铝材约 10000 吨，平均 556 吨/年。

其他航空器将迎来大发展

在民用航空器方面，除了提及的几种主要的以外还有很多种，随着中国对外开放的加深与加强，对空中管理的逐步放宽，通用航空器与私人飞机等会逐年增多，中国正处于大发展时期的前夕。

通用航空是指除军事、警务、海关缉私飞行和公共航空运输飞行以外的航空活动，包括从事工业、农业、林业、渔业、矿业、建筑业的作业飞行和医疗卫生、抢险救灾、气象探测、海洋监测、科学实验、遥感测绘、教育训练、文化体育、旅游观光等方面的飞行活动。用于这些活动的飞机称为通用飞机。

就全世界而言，通用飞机是全部飞机类型中，数量最多、型号也最多的机种，包括了小型飞机、大型涡轮和螺旋桨飞

机及直升机等。截至 2012 年年底，全世界约有 32 万架，占民用飞机总数的 90%。2011 年 10 月，北京汽车集团有限公司与北京航空航天大学组建了北京通用航空(集团)有限公司，生产、研发、销售通用飞机，拉开了中国向通用飞机领域大进军的序幕，并且，“十二五”规划已把通用航空工业列为战略性新兴产业。

中奥合资生产的钻石 DA40 型飞机于 2006 年 11 月 8 日在山东省沾化县大高通用航空城实现批量生产，填补了中国通用航空在 2~4 座固定翼飞行器的空白。首批 DA40 型钻石飞机由滨奥飞机制造有限公司生产，它的一期工程的生产能力为 500 架/年，二期的生产能力为 1000 架/年，生产各型号轻型飞机。

2011 年 11 月，中航通用飞机有限责任公司研制的 5 座单发涡桨领航 150 公务机试飞成功，采用碳纤维复合材料机身结构，配置前 3 点可收放式起落架。

直升机

2010 年 9 月 8 日，由中国航空工业集团自主研制的轻型多用途直升机 AC311 在中航工业直升机天津分公司完成总装下线，并于当日上午首飞成功。这标志着以天津为核心的中国直升机产业布局已初步形成。据中航工业公司介绍，AC311 直升机是一种具有国际先进水平的 2 吨级轻型多用途直升机，

可应用于飞行训练、人员运输、公务执法等。

另外，中航工业直升机公司的4吨级中型民用直升机AC312和13吨级大型民用直升机AC313也已试飞成功。AC311直升机已于2012年取得中国民航型号合格证，并投入市场运营。预计该机型在未来10年内的市场需求可达到500架。

天津总装线采取边建设边生产方式，2012年向用户交付了2架，2013年进入小批量生产阶段，2015年有望达到设计规模生产。AC313型大型民用直升机由江西景德镇洪都飞机公司生产，它的整机性能达到国际第三代直升机水平。

无人直升机

2011年5月15日，山东潍坊天翔航空工业有限公司改装的中国当前最大的无人直升机V750在潍坊试飞成功。该机是用从美国进口的有人驾驶的直升机改装的，所以发动机和少数零部件并不是国产的，但是它的试飞成功在中国发展无人直升机的进程中具有里程碑的意义。它的改装历时2年，并已进入批量生产阶段，所有零部件与飞控计算机系统等都已全部国产，发动机已于2011年10月起，在北京亦庄（大兴区）的一个工厂实现批量生产。

无人直升机主要用于港口巡逻与导航、森林防火与灭火、警务巡逻等领域，以及山区电网巡查，福建省国家电网从2013年起用该机携带摄像设备等沿着高压输电线路巡查，拍摄电

线损坏情况与运行状态。

2012 年起，中国在北京市平谷县开建通用航空器基地与建中俄直升机产业园，生产俄罗斯的 13 吨以上的重型直升机零部件及组装整机。

水陆两栖飞机

2010 年 11 月 10 日，由中国航空工业集团研制国内首款具有自主知识产权的轻型两栖飞机——海鸥-300 在石家庄首飞成功，次年获得型号合格证。该机具有独立的船体机身，浮筒和可收放起落架，可以在陆地机场和简易跑道起降，也可以在江河湖泊起降，并可在海拔 3500 米以下的高原起降。

海鸥-300 两栖飞机装有高性能大功率发动机，配置综合显示仪、雷达和大气数据计算机等先进航空电子设备，基本型号可载 4~6 人，可广泛应用于公务飞行、客货运输、医疗救护、航空探测、旅游观光等。

中国大型救援飞机（用于灭火或水上救援）为单船身 4 发涡轮螺旋桨式，可以在陆地二级机场或长 1500 米、宽 200 米、深 2.5 米的水域起降。该飞机的最大起飞质量为 49 吨；最大平飞速度 560 千米/小时；最大航程 5150 千米；最大载水量 12 吨；投水命中率大于 98%。

小鹰-500 私人飞机

2012 年 11 月，在珠海第四届中国航展上展出了由西安飞机设计研究所设计的一种单发螺旋桨驱动的轻型多用途飞机——小鹰-500 飞机，其基本型为 4 座（含驾驶员），经济型为 5 座。主要用于为运输类飞机飞行员初级教练机，也可作为公务机、旅游机使用。该机机身长度为 7.753 米，机身高度 3.035 米，最大燃油质量 235 千克。

2013 年~2030 年航空级铝材需约 1.5 万吨

截至 2012 年年底，中国民航系统共有飞机 3238 架，其中运输飞机 1922 架，通用航空飞机 1316 架，通用航空企业 194 家（截至 2012 年 11 月底），仅 2012 年批准筹建的就有 114 家，全国建成的通用机场有 70 个。中国民航局局长李家祥表示，2013 年，将出台支持通用航空发展的政策，包括通过政策补贴、加大通航基础设施投入等。由于市场的巨大需求与政策的强劲推力，中国通用航空器的数量在 2013 年~2030 年期间的年平均增长率可达 10%，即从 2012 年年末的 1316 架上升到 2030 年年底的 7318 架，新增加 6002 架，甚至有可能新增 8000~10000 架。

由于通用航空器大小不一，质量轻重相差悬殊，重的达

十几吨，轻的只有 300、400 千克，这就给铝材的投入量预测带来了很大困难，同时，有的通用航空器用的主要结构材料是复合材料，因此，在匡算期间（2013 年~2030 年）制造的 6000 架航空器时，若铝材（含锻件与铸件）投入量按 2.5 吨/架估算，共需投入铝材 15000 吨。

中国已进入航空器制造高速持续发展时期，2030 年，航空器的产值将接近或超过欧洲，成为仅次于美国的全球第二大航空器生产大国，除了乘坐人数在 500 人以上的特大飞机处于研发阶段外，其他的航空器都能稳定地批量生产。

据预测，从 2012 年至 2030 年，中国需要新添加大中型客机约 5000 架，其中，座位数在 200 个以上的须全部对外购买，座位数在 60 个到 200 个之间的须部分对外购买，国内可生产的大中型客机（C919、ARJ-21、新舟-60 等）约 2500 架，其中，C919 与 ARJ-21 约 2115 架，新舟系列约 385 架，它们对铝材的需求分别为：95.15kt、91.25kt、9.63kt。

2013 年~2030 年，中国须新增通用航空器约 6000 架，如果铝材投入量按 2.5 吨/架计算，需投入 15000 吨，其中 2013 年投入 328 吨，2015 年投入 400 吨，2020 年投入 640 吨，2025 年投入 1033 吨，2030 年投入 1663 吨。

中国可适当建设铝材锻件及航空紧固件项目

在当前条件下，对航空器铝材消费量或投入量做出准确的预测是不可能的，因为这项工作必须有准确的参数，包括每种航空器每年的生产数量与计划生产数量，每种航空器的净质量，每个零部件的铝材投入量与净质量之比（buy-to-fly),即材料利用率或零件材料投入量/产出量(净质量）之比，航空器的铝化率，即铝制零部件总质量/航空器净质量之比。这些数据越准确、越全面，作出来的预测也就

越准确。

目前，这些数据都不是很全面。但是，笔者之所以对中国 2013 年~2030 年航空工业的铝材（含锻件与铸件）的消费量作了粗略匡算，是因为中国航空工业有了很大发展，并马上将跻身全球第三大国，航空工业的持续高速发展，使得航空铝材市场需求大大增加，中国铝工业可为也应该为航空工业的发展提供所需的一切铝材。

目前，中国航空级铝材的主要竞争对手是美国铝业公司（Alcoa）、肯联铝业公司（Constellium）、爱励铝业公司（Aleris）、凯撒铝及化学公司（Kaiser）。我们与它们的差距还很大，特别是在合金研发与基础理论研究方面的差距更大，但在硬件生产装置方面，我们的比它们的要好一些，因为中国的一些航空铝材专业生产线与项目是在近几年投产的，还有一些在建或拟建项目，这些项目都在加大科技投入，并把创新与研究发展提高到了一个新水平，这样有条件的企业不可等闲视之。

铝材锻件在航空器中的用量虽不太多，仅占百分之几，却很重要，因为它们都是受力构件。当前生产航空器锻件的专业企业只有东北轻合金有限责任公司（模锻件的设计生产能力 3500 吨/年，自由锻件的 800 吨/年）与西南铝业（集团）有限责任公司（1973 年 300MN 模锻机投产，生产能力 2500 吨/年），2012 年，第二重型机器建成了 1 台 400MN 的锻压

机，并在建设全球最大的 800MN 的锻压机，有条件的投资者还可以建设锻压项目，但最大锻压机不宜超过 500MN。

航空紧固件也是航空器制造中必不可少的重要受力件，中国还没有属于本国投资者建设的这类企业，虽然在江苏有一个专业紧固件厂，但其是美国铝业公司的独资企业，它们除生产铝合金紧固件外，还生产钛合金、镍合金与钢紧固件。投资者也可考虑这方面的项目建设。

1.6.9 铝-锂合金支撑航空航天发展

铝-锂合金是一种较老又年轻的铝合金。说它“老”是因为在上世纪的 20 年代初就已问世，并有少量应用；说它“年轻”是因为在近二三十年来才在航空航天器上获得较多应用，且很有发展潜力，必将成为新一代的航空航天器与其他运输装备的关键性材料。锂是既能降低铝的密度又能提其弹性模量的惟一合金化元素。向铝中每添加 1%锂，合金的密度约下降 3%，而其弹性模量则上升约 6%。

1924 年，德国研制成一种含锂的铝合金，商品名称为“斯克隆（Scleron）”，它的力学性能比硬铝的还高一些，其成分（质量%）：12Zn，3Cu，1Li，其他为铝及不可避免的杂质。含锂的铝合金从此诞生。

1942 年美国铝业公司的列巴隆（Lebaron）申请了 X2020 合金（Al-4.5Cu-1.0Li-0.8Mn-0.5Cd）的专利，其板材于 1957 年首次在美国海军的 A3J 侦察机上得到应用；1962 年在超音速轰炸机 B-58 和战斗机 F-111 上也有所应用，终因断裂韧性低，特别是其疲劳裂纹缺口敏感性比 7075-T6 合金的大得多，没有得到推广。

上世纪 60 年代，苏联制成 01420 铝-锂合金，其成分（质量%）：4~7Mg，1.5~2.6Li，0.2~1.0Mn 或 0.05~0.3Zr，0.05~0.15Ti，0.05~0.3Cr，其余为 Al。它的性能为：抗拉强度 448-483N/mm2，屈服强度 310~345N/mm2，伸长率 8%~10%，正弹性模量 7380N/mm2。

1983 年，美国铝业公司与加拿大铝业公司（英国）在巴黎航空展览会上宣布制成了一种革命性的铝-锂合金，不但有高的力学性能，而且断裂韧度也比 7075 合金的高，疲劳裂纹扩展速率比 7075 合金的小，在现行的飞机制造中，采用这种新合金材料可使零部件的质量下降 10%左右，而在新型飞机设计中，采用这种新合金可使零部件的质量轻 15%~30%。也就是说，在上世纪 70 年代材料科学家在解决铝-锂合金的低

韧性与晶界脆性方面取得了突破性的成就，为这种材料的发展及在航空航天器等其它方面的应用开辟出了一条康庄大道。当前，美国铝业公司正在研制第三代铝-锂合金，如 Al-Li-Tp-2 与 Al-Li-Tp-1，其性能全面超过现行 2XXX 系及 7XXX 常规合金的，将用于制造 2012~2025 年的航空航天器的一些零部件。

中国在铝-锂合金发展方面：成就不小，差距仍大中国在上世纪 60 年代开始对铝-锂合金进行跟踪性研究，从“七五”以后的各个五年规划，“863”、“973”研究计划、有关攻关项目等都纳入了铝-锂合金的研发，中国科学院沈阳研究所、北京有色金属研究总院、有关航空材料研究院所、东北大学、中南大学、哈尔滨工业大学、西北工业大学、西南铝业（集团）有限责任公司、东北轻合金有限责任公司等从各方面对铝-锂合金进行了较为全面的研究，成就不小。但是，必须指出的是，这些研究大都是跟踪型的，几乎没有值得可称道的创新。在铝-锂合金理论研究与材料生产实践方面，与俄罗斯、美国的差距可能有二三十年。造成这种差距的原因当然是多方面的，但研究过于分散，有限的资金不够集中可能是主要原因之一。

国内仿制的铝-锂合金主要有两种：一是 8090 合金，是一种铝-锂-铜-镁-锆合金，含的合金元素量（质量%）：0.20Si、

0.30Fe、1.0~1.6Cu、0.10Mn、 0.6~1.3Mg、0.10Cr、0.25Zn、0.10Ti、2.2~2.7Li、0.04~0.16Zr，其余为 Al。这是一种欧洲铝业协会（EAA）发明的合金，1984 年定型注册。另一种是 2091 型的铝-铜-锂-镁-锆合金，合金元素含量（质量%）：0.20Si、0.30Fe、1.8~2.5Cu、0.10Mn、1.1~1.9Mg、0.10Cr、0.25Zn、0.10Ti、1.7~2.3Li、0.04~0.16Ti，其余为 Al。它是一种法国合金，1985 年定型注册。中国仿制的这两种铝-锂合金材料的各项性能基本达到了国外材料的水平。

2000 年，西南铝业（集团）有限责任公司从俄罗斯莫斯科轻金属研究院引进铝-锂合金 10t 级的熔炼、静置炉装备与技术，采用真空感应熔炼，铸造采用氩气保护熔体。经过十余年的生产实践，中国已完全掌握了铝-锂合金的熔炼技术，大扁锭与圆锭的铸造技术，可生产近 10t 的大扁锭，可为航空航天工业提供各种各样的半成品。由于铝-锂合金材料价格高昂，除用手航空航天工业外，在其他产业尚未获得应用。

美国铝业公司掀铝-锂合金扩建高潮目前，全世界可以生产铝-锂合金材料的只有 5 个国家的 7 个厂能生产轧制材、11 个厂能供应挤压材，9 个可锻制自由锻件与模锻件。它们是美国铝业公司的达文波特轧制厂（Davenport Works）、拉斐特（Lafayette）挤压锻造厂、马塞纳轧制厂（Massena，原属雷诺兹金属公司）、设在英国伯明翰的基茨格林（Kitts

Green）厂，康斯特利姆（Constellium）公司的雷文斯伍德（Ravenswood)铝业公司(美国与伊苏百尔铝业公司(Issoire,法国)，俄国联合铝业公司的卡缅斯克(Kamensk)铝加工厂，中国的西南铝业（集团）有限责任公司。生产铝-锂合金最关键技术是熔炼与铸造，只要跨过了这条鸿沟，在其他方面如热轧、冷轧、挤压、锻造、精整与热处理等都是通用技术，并无独特之外。

美国铝业公司自上世纪 80 年代以来对铝-锂合金的研发下了大力气，投入了巨额资金与人力，第三代高性能合金如 Al-Li-Tp-1 与 Al-Li-Tp-2 已基本定型，将用于制造 2015-2025 年的飞机。它们的强度-韧度特性（Strength-toughnessperformance）都大幅度超过现在的任意变形铝合金的，同时还有很高的抗腐蚀性能。Al-Li-Tp-1 及 Al-Li-Tp-2 合金用于轧制 25~100mm 的厚板。

在上述的铝锂合金牌号中的“TP”可能是“较厚的厚板（thick plate）”的缩写，如果笔者的推测正确，则“Al-li-TP-1”可译为“结构厚板铝－锂合金 1 号”，在美国铝业协会公司注册后就可以正式定型了，会公布成分，并给予 4 位数字牌号。

美国铝业公司现在在对达文波特轧制厂与基茨格林铝业公司的铝－锂合金板带生产线进行较大的改扩建，可于今年晚些时候或明年上半年完成，届时铝－锂合金厚板及薄板的

生产能力可比现在的提高 1 倍，美国铝业公司是当今铝－锂合金半成品生产能力与产量的最大者，约占全世界的 55%，俄罗斯联合铝业公司约占 25%，其他企业约占 20%。在创新能力方面，美国铝业公司也独占鳌头。美国铝业公司在本土虽有几个企业能生产铝－锂合金半成品，但铸锭生产很可能都集中在匹兹堡技术中心。

美国铝业公司除对达文波特轧制厂的加工设备与技术中心的熔铸生产线进行扩建外，还对印度安纳州拉斐特挤压－锻造厂的铝－锂合金生产线进行扩建，主要是熔铸生产线，可能产扁锭与圆锭。扩建资金除公司自筹的外，还有一些来自印第安纳州经济发展公司和大拉斐特商务部的奖励基金。扩建工程于 2013 年完成后，拉斐特厂铝－锂合金半成品的生产能力将超过 20kt/a。

中国须科学地发展铝－锂合金材料在铝－锂合金材料生产方面与美国、俄罗斯的相比，中国仍有不小差距，主要表现在两方面：创新力量与技术开发能力薄弱；其次从中期来看，生产能力还不够。关于前者，必须引起足够的重视，加大投入，集中力量，尽快摆脱跟踪型状态，进入自主创新阶段。中国当前只有西南铝业（集团）有限责任公司能生产铝－锂合金，有约 10t 的熔炼－静置炉一组。笔者认为，在 2020 年以前中国还有必要建 2 项铝－锂项目，使熔铸生产能力扩

大 2 倍，当然也可扩大西南铝业(集团)有限责任公司的能力，但还是另建新项目为好，有利于市场经济发展。中国当前在环渤海湾地区建设 100 万至 200 万吨级/年生产能力铝平轧产品的世界级特大工程，但是尚未见产品结构中有铝-锂合金半成品，最好考虑一下增减问题。

中国大飞机 C919 型客机机身等直段部段是用铝-锂合金制造的，由中航工业洪都公司生产，已于 2010 年 12 月上旬顺利下线，所用的铝-锂合金板由美国铝业公司提供，来自达文波特轧制厂。等直段位于大客机机身前部，是宽度相等的筒状结构部段，全长 7.45m、宽 4.2m、高 4.2m，是中国国内民用飞机首次采用铝-锂合金制造的部段。

2011 年 9 月 29 日发射的“天宫一号”为两舱结构，一个实验舱，一个资源舱。前者是航天员驻留生活和工作的地方。资源舱内装有动力系统（含超强电力的大型天阳能电池板），推进系统和能源。它的主要任务是为天宫一号的飞行提供能源障碍，并控制飞行姿态。资源舱在加足燃料后的质量约 1.4t。减轻资源舱结构质量就意味着可以多装些资源，因此，减轻其质量是一项重要的任务。由于常规 2xxx 系合金及 7xxx 系等高强度铝合金早已在航天器上获得广泛应用，于是设计师决定采用质量比常规结构铝合金的轻而其他性能又与它们的相当或高一些的铝-锂合金。用铝-锂合金制的资源舱比用其他铝-锂合金制的轻约 10%。铝-锂合金为天宫一号

遨游太空立下了汗马功劳。

美国航空航天局（NASA）于 2008 年选定美国铝业公司为其战神载入运载火箭生产铝-锂合金板材,其中仅薄板的订货量就达 453.6t，全部是用 2195 铝-锂合金轧制的，铝-锂合金在航空航天器上的应用将越来越广泛。

客机大发展，强劲拉动铝-锂合金材料市场，建设铝-锂合金半成品项目正当时。波音飞机公司 2012 年 7 月发布《2010 年当前市场展望》报告称：预计未来 20 年，全球机队规模将实现翻番，市场将需要 3.4 万架新飞机，价值 4.5 万亿美元；航空公司运输量的年平均增长率可达到 5%，货运量的年平均增长率可达 5.2%;中国新增飞机 5260 架,价值 6700 亿美元。20 年后中国国内航空客运周转量将超过美国，成为全球最大国内航空客运市场。

加入适量锂的第三代铝锂合金材料制造

到 2013 年末，美国铝-锂合金生产能力约 100kt/a，其中美国铝业公司的生产能力约 55kt/a，中国 2018 年铝-锂合金半成品的生产能力宜达到 80kt/a 或更大一些超过美国。

中国新建的铝-锂合金项目最好建在渤海之滨的某厂，因为它将是一个特大型的世界级的综合性的铝加工厂，只需增建专门的熔炼铸造生产线与某些精整设备，加工主机可全部共用。

生产铝-锂合金工艺有许多特点，不是谁都能干的，需要强大的技术支撑。虽然它的附加值高，价格昂贵，但生产工艺复杂，成品率低，安全环保问题多，废料处理与回收利用

不易。因此，一般企业如想建设此项目，生产这类材料宜多考虑，认真对待。另外，目前铝-锂合金的应用仅限于航空航天器与某些特殊场合，市场有限。当然，如果生产成本能大幅度下降，市场便会大大扩大。这些情况都值得业界关注。

1.6.10 铝制火星探测器

2012 年 8 月 5 日，美国航空航天局（NASA）的火星探测器在离地球飞行了 566.4×106 公里后，成功着陆火星。该火星探测器重 854 公斤，拥有 6 个车轮，车体的大部分零部件是用铝合金制造的，不但质量轻，且结构更牢固，速度也更

快。火星探测车由美国铝业公司加利福尼亚紧固系统公司（Alcoa Fastening Systems in California）生产的高强度精密航空紧固件组装，共用 718 个酶-铬-铁合金（inconel）螺钉与标准六角螺帽。酶-铬-铁合金有高的强度，使用温度可达 650 摄氏度，是航空航天器火箭发动机与涡轮发动机常用紧固件材料，由美国铝业公司设在心贝利公园（Newbury Park）和托兰斯（Torrance）的工厂生产。

据美国铝业公司介绍,美国生产的航天器所用铝材的 90%以上都是由该公司提供的。从第一个载人飞船，第一个登月轮到宇宙飞船（Space Shuttle）、国际空间站计划（Internatinal Space Station programmes）都用了该公司为其研发的铝材。上世纪 60 年代，美国阿波罗空间计划的登月舱（tiny lunar module Eagle）几乎全是用铝合金建造的，使其质量能够得到精确地控制。20 年后，哥伦比亚号宇宙飞船做首次航行时，发射火箭所用的燃料则是美国铝业公司的铝粉，主发动机液氢汞的铝零件也是使用美国铝业公司的铝材制造的。

2010 年，美国航空航天局首次用摩擦搅拌焊，焊接高 61 米、直径 8382 毫米大型液氢推进剂槽。其端盖（tank dome）是美国铝业公司用铝-锂合金厚板旋压成形的，美国铝业公司的工程师参与了此项设计，帮助航天器的设计者选择材料。由于选择了密度小的铝-锂合金，不但使端盖的零件数减少了，

制造工序也简化了很多。这充分显示了新一代铝合金的优越性，也证明了铝-锂合金在航空航天器制造中相当强的生命力。因此，美国铝业公司于 2011 年宣布，在其所属的世界三个工厂，同时扩建铝-锂合金的生产能力，以满足市场对这类有最佳强度密度比（strength-to-weight），又有高刚性及抗蚀性的新一代合金的需求。

1.6.11 铝—锂合金打造卫星资源舱

1.6.12 ARJ 支线客机用了哪些铝合金

2015 年 11 月 29 日，由成都航空公司技术过硬、经验丰富的拥有 ARJ21 飞行资质飞行员驾驶着第 106 架机，从上海中国商飞公司机场直飞成都双流机场，交付成都航空公司，预计于 2016 年 3 月份投放市场,初期投放成都至北京、上海、广州、深圳、武汉、西安等 7 条航线。这是中国继 11 月 2 日 C919 大飞机总装下线后，民机航空工业的又一件大事，在现代喷气式支线客机自主设计、试制、试验、试飞、取证、生产、交付等全过程方面又一重大突破。从 2016 年 3 月起中国国内航线首次拥有全部自主知识产权的 Made in China 的喷气式支线客机。

根据民用航空部门的规定，新款客机在交付后，必须通过运行合格审定，进行 100h 飞行验证，对补充文件进行严格审查，证明完全符合民航局的相关标准后方可投放使用，这

就是 ARJ21 为什么要到明年 3 月才能投入营运的原因。

ARJ21 涡扇支线客机于 2002 年 4 月正式立项由中国商用飞机公司研制，2006 年 9 月首架前机身部段在中国第一航空工业集团西安飞机工业公司交付，2007 年 12 月首架机在上海飞机公司总装下线，ARJ21-700 飞机 2008 年 11 月在上海首飞成功，2015 年 3 月 ARJ21-700 飞机完成首次航线演示飞行。ARJ21-700 支线客机从正式立项至 2016 年投入营运历时 14 年。

ARJ21 客机用了哪些铝合金

ARJ21 支线客机基本上是用铝合金打造的，铝制零部件的质量超过飞机净质量的 75%，常用的铝合金几乎全用了，不管是变形铝合金，还是铸造铝合金的，几乎所有系的合金

都用了，大的有四五十千克的蒙皮板，小的是以克计的铆钉，ARJ21 客机的零件总数上百万件，但是以紧固件最多，而在紧固件中坐第一把交椅的是古老的铆钉。铆钉问世可能有几千年了，在飞机上的应用也有 112 年了。

在 ARJ21 支线客机主结构铝材中用的最多的是 2xxx 系及 7xxx 系合金，而且都是最新一代的合金，全是美国铝业公司提供的，万里迢迢从美国西海岸越过大洋来到中国，板材来自艾奥瓦州（Iowa）达文波特轧制厂（Davenport Works），挤压材与锻件是拉斐特厂（Lafayette Works）生产的，也有一些挤压材来自韩国的长光铝业公司，它是美国铝业公司在韩国的一个独资铝材挤压企业。2xxx 系及 7xxx 系合金在 ARJ21 主结构铝材用量中占总用量的 98%。接下来聊聊哪些零部件是用铝合金制，用的是什么合金与何种状态的材料。

蒙皮全用 2524-T3 合金

2524-T3 合金真是一个很牛的 2xxx 系合金，ARJ21-700 支线客机的所有蒙皮它都全包了，全是用其预拉伸板制造的，包括：机身蒙皮，后机身蒙皮，翼下机身蒙皮，与机翼对接的机身部位蒙皮，襟翼蒙皮，襟翼子翼蒙皮，垂尾蒙皮，升降舵蒙皮，平尾蒙皮，扰流板蒙皮，方向舵蒙皮与调整片，副翼蒙皮与调整片，缝翼蒙皮，升降舵调整片。2524 合金 1995 年诞生，同年在美国铝业协会注册，而它“爷爷”的“爷爷”

2024 合金却是 1934 年诞生的。2524 合金是 2024 合金家族的第六代，在主成分（Cu、Mg、Mn）方面它们的含量大体相等，例如 2024 合金含 3.8%~4.9%Cu，而 2524 合金的为 4.0%~4.5%；2024 合金的镁含量为 1.2%~1.8%，而 2524 合金含 1.2%~1.6%；2024 合金含 0.3%~0.9%Mn，而 2524 合金的含量为 0.45%~0.7%Mn，由此可见，2024 合金的主合金元素含量范围比 2524 合金的宽松一些，因而 2524 合金的生产难度稍大一些。

可是 2524 合金的杂质含量比 2024 合金的少得多，是一个很干净的合金，它的杂质 Si、Fe、Cr 含量为 0.06%、0.12%、0.05%，分别只有 2024 合金的 12%、24%、50%，其他杂质的含量也相应地大幅度下降，因而其杂质相数量少得多，合金的常规力学性能与 2024 合金的相当，但是其断裂韧性与抗应力腐蚀开裂能力、抗疲劳裂纹扩展能力比 2024 合金强，也更耐损伤容限，所以它的综合性能比 2024 合金的更好。用它制造的零部件更加经久耐用，维修期长了，维护费用下降了，飞机的安全性更高了。

T3 表示板材固溶处理后经过拉伸，然后再时效处理（自然时效）与发给用户，用户用于加工零件，因为拉伸在用户加工零件之前，故被称为预拉伸，拉伸永久变形量为 1.5%~3%。淬火后的板材内存在着巨大的内应力，表层为压应力，内部为拉应力，如不消除它们，用户用其加工零件时会产生变形，

变为废品，预拉伸就是消除这种淬火残余应力，便于机械加工工件的顺利进行。经过预拉伸的铝合金板被称为预拉伸板，多用于制造航空器蒙皮，是一类高技术产品。预拉伸在拉伸机上进行，中国目前可生产预拉伸板的企业有东北轻合金有限责任公司、西南铝业（集团）有限责任公司、南山轻合金公司、爱励国际（镇江）有限公司等 7 家。

用 2024 型合金制造的 ARJ21 飞机零件还有：用 2524-3511 合金加工的机翼下壁板，用 2324-T39 合金加工的机翼梁腹板。用 2026-T3511 合金制造的机翼梁下缘头，2026 合金是 1999 年在美国铝业协会公司注册的一个美国 Al-Cu-Mg 系合金，它的 Cu、Mg、Mn 含量比 2524 合金的低一些，但相差不太大，大的区别还在于它含有 0.05%~0.25%Zr 与杂质 Si、Fe、Cr、Zn、Ti 的含量全面低于 2524 合金的，因而它的综合性能比 2524 合金的更胜一筹，T3511 表示固溶处理后经过拉伸的挤压材料，拉伸永久变形量 1%~3%。

7xxx 系合金

在 ARJ21 支线客机结构制造中，用得最多的是 2xxx 系的 2524 合金，在铝合金总量中它占 60%；其次是 7xxx 系合金占 35%左右，主要用了三种合金：7050、7150、7055，都是美国铝业公司研发的新型超强度铝合金。这 3 种 7xxx 系铝合金撑起 ARJ21 客机半边天，实际上可以说是两种合金，因为 7050

合金与 7150 合金的主要成分相同。

7050 合金是一种高纯的超硬铝，不但杂质 Fe、Si 的含量低，而且 Mn 的含量也很低，组织中脆性夹杂相大幅度减少，在主成分中增大了锌镁比，并用 Zr 取代 Cr 作为晶粒细化剂。由于这些成分的改进以及过人工时效处理，使 7050 合金在保持更高强度下，具有断裂韧性高、疲劳强度高、耐损伤容限性能好、抗应力腐蚀性能好等优良综合性能。另一个突出优点是有高的淬透性，特别适合于制造厚板与锻件、厚截面零件。在飞机上主要用 7050 合金制造要求高强度、高应力腐蚀和剥落腐蚀抗力及良好断裂韧性的主承力结构，如机身框、隔板、机翼壁板、翼梁、翼肋、起落架支撑零件和铆钉等。升高温时 7050 合金的强度下降，长期使用温度不得超过 125℃。

ARJ21 客机由 7050 合金 T7452 材料的零件有后机身框、机身框、机身机翼上方机身框、旅客观察窗框等。

7150 合金是 7050 合金的发展，Zn 的含量更高一点，Mg 含量略有变动，Zn/Mg 比有所提高，Cu 含量稍有下降，因而性能进一步改善了，用其 T77 状态材料制造的结构承力件有：机翼肋缘条、翼肋腹条，襟翼肋、襟翼梁缘头、襟翼梁腹板、垂尾梁缘头、垂尾腹板、垂尾肋、升降舵肋与梁、平尾肋、梁腹与梁缘头，方向舵肋、梁复板与梁缘头，副翼肋与梁，缝翼与梁，前缘肋，机身地板梁下增压区剪切角片。用 T7751

状态材料制造的承力结构件有：机翼上下翼面上桁条、机翼梁上缘头、垂尾长桁，与机翼对接的机身部位长桁、机身桁、地板梁下增压区桁。

用 7055 合金制造的零件虽不多，但都是受力大的与关键性的，如用 7055-T77511 合金制造机翼上壁板，起落架接头是用 7055-T77 合金锻造。在 7xxx 系合金中，7055 合金是合金化元素平均总含量最高的之一，为 12.35%，铁与硅的平均总含又最低，仅 0.125%，因而大扁锭的铸造难度大，冷裂纹倾向大，有些规格的大扁锭我们至今不能有经济效益地铸造。

铆钉用量近 40 万个 一个也不能少

自飞机问世 120 多年来，零部件的铆接就是一种必不可少的连接工艺，至今仍如此，大型战略运输机与 A380 型特大客机每架的铆钉用量上百万个。在今后一段相当长的时间内，铆接仍将是零部件连接的主要工艺，只不过随着时间的推移，设计的改进与焊接技术的进步，铆接工作量会有所减少，但是减少速度缓慢。例如一架大小与 ARJ21 客机相当民机三四十年前每架的铆钉用量约 60 万个，而现在仍要用 40 多万个。

ARJ21 支线客机用的铆钉合金有 2014、2219、3003、5052、5056、7050 合金，2219 合金铆钉用于铆接高强度的内外结构，7050-T73 合金铆钉用于铆接高强度抗腐蚀的结构。铆钉在铆接前都要经过硫酸液阳极氧化处理与重铬酸盐封孔。

铸造铝合金

在 ARJ21 支线客机制造中也用了一些铸造铝合金，虽然用量比变形铝合金少得多，但也是不可或缺的，如用 356 及 A356 合金铸造形状结构复杂、壁厚较薄与要求气密性的承受中等载荷的结构零件、仪器仪表附件、发动机零件、燃油泵壳体，它们是铝-硅-镁系合金，相当于中国的 ZL101，它含 6.5%~7.5%Si、0.25%~0.45%Mg；A356 合金是 356 的改进型，不过它的杂质含量低与添加了微量晶粒细化元素，因而具有更高的力学性能。

ARJ21 客机用的铸造铝合金还有:413.0,360,355,A357, Tens-50，380，A380 合金等。

1.6.13 功勋千秋的 2xxx 系航空铝合金

在变形铝合金中,2xxx 系合金指主要合金元素的 Cu、Cu+Mg、Cu+Mn。Cu+Mg+Mn、Cu+Li、Cu+Mg+Fe+Ni 的合金。广义上，它们都可以称为硬铝,狭义上,只可以将 Al-Cu-Mg、Al-Cu-Mn、Al-Cu-Mg、Mn 系合金称为硬铝，为什么把它们称为硬铝呢？因为它们的强度与硬度比当时（上世纪 20 年代前）制成的其他合金的都高，当时及以后也把硬铝称为“杜拉铝”，中国在改革开放前也有称“杜拉铝”的，但现在没有这么称呼的了。“杜拉铝”来自法文“dural”或“duralium”，“dur”

就是“硬的”之意。

自 1888 年铝的工业化生产以来，铝与铜就已联姻成一对，铜成为铝的最早的与早有效的合金化元素，也是用得最多的合金化元素，至今仍无后来居上者。截止 2015 年 1 月 31 日在美国铝业协会公司（AA）注册的常用 2xxx 系合金共计 92 个，占总合金数 528 个的 17.4%，以美国的最多，有 52 个，占 56.5%。

在现有常用注册合金中，如上所述，可将 2xxx 系合金分为六组：铝－铜合金组，铝－铜－镁合金组，铝－铜－锰合金组，铝－铜－镁－锰合金组，铝－铜－锂合金组，铝－铜－镁－铁－镍合金组，还可以分出一个含铅的可高速切削的铝－铜合金组。第一组合金的铜含量高，往往高达 6.0%或 6.5%，我们把含 Pb 的可高速切削的合金也归为这一组，由于 Pb 对环境不利，应尽量少用或不用，这组合金共有 9 个，当前西欧和北欧国家已不用含 Pb 的 2005、2011、2011A 合金了，但一些发展中国家仍在用。

第二组合金是 2xxx 系合金的骨干，它实际上还包括铝－铜－镁－锰合金，共计 53 个，占总数的 57.6%，它们的用途非常广泛，是航空器和航天器的极为重要的结构材料，几乎占铝材总用量的 30%以上，其中用得最多的是 2024 合金的改型合金，原型合金 2024 已用的不那么多了，因为它的综合性能特别是其断裂韧性远不如改型的 2524 合金的。

第三组为铝－铜－锰系合金不多，仅有 2219、2319、2419、2519、2021 合金等少数几个，它们还含有少量的钛、钒、锆等。

铝－铜－镁－铁－镍系合金可算第四组，数量虽不多，仅 2018、2218、2618、2618A 等 4 个，却很重要，用于锻造高温锻件，不过现在它们的应用领域有所缩小，因为研制成功了性能更好的锻造用 7xxx 系铝合金。2618、2618A 合金还含有少量的硅。

第五组为铝－铜－锂系合金，是一类新开发的合金，至 2015 年 1 月 31 日在美国铝业协会公司注册的铝－铜－锂合金共计 22 个，第一个含锂的 2xxx 系合金于 1984 年注册，为 2090 合金，2013 年注册 2295 合金，31 年注册 22 个合金，平均 0.71 个/年，是在变形铝合金发展史上较为希罕。

Al-Cu-Li 合金是以 Al-Cu-Mg 合金为基础发展起来的，Cu 和 Mn 的含量保持不变，以 Li 取代镁，1974 年 11 月 1 日已划入非常用铝合金的 2020 合金是其典型代表。不过，Li 的良好作用必须有 Sn、In、Cd 的存在才能发挥出来，所以此类合金与 Al-Cu-Mn 系合金一样，必须添加这类元素以改善时效强化性能与提高其效果。因为 Sn 与 In 易与 Mg 形成 Mg2Sn 或 Mg2In 化合物，其形核作用易受镁影响，但 Cd 的不形成 Mg2Cd 化合物。这些合金都含有少量的 Zr，0.05%~0.15%，有些还含有少量的 Ag。这类合金中的 Li 形成与 S 相相似的 Al2CuLi 化

合物，起重要的强化作用，另外还有 Al12Mn2Cu、Al3Ti 和θ相等。

Al-Cu-Li 合金的主要特点是其室温强度 Rm 比超硬铝的还高，达到 620N/mm2~640N/mm2，屈服强度 Rpo.2=580N/mm2~590N/mm2；在 225℃以下的高温强度比其他耐热铝合金的还高；并且因为 Li 是超轻的金属元素，其密度比其他元素的低，仅为 540kg/m3，所以每向合金中添加 1%Li，其密度下降约 6%；对周期性静载荷的敏感性比 7075 型合金的小，而正弹性模量 E 却高 5%左右，是生产超声速飞机蒙皮的良好材料，中国大飞机 C919 的前机身等直段就是用进口的铝－锂合金制造的。所谓铝－锂合金就是其主要合金元素中有锂，并不是指二元铝－锂合金。在当下注册的铝－锂合金中，只有 8024 合金一个可以说是二元铝－锂合金，含 3.4%Li~4.2%Li 与 0.05%Zr~0.25%Zr。

此外，还有用于制造汽车车身钣金件的硬铝，如 2002、2036、2037 等，它们的特点是铜、镁含量较低，有高的成形性能；用于制造铆钉线材的 2A01、2A10 合金，有高的塑性。

1.6.14 航空航天铝合金发展的里程碑（一）

铝及铝合金因其密度小、强度适中、易加工成形、耐腐蚀性强，资源丰富、可回收性强等优点，从人类首次实现升

空的“飞行者 1 号”（Wright Flyer1）起就与航空航天器结下了不懈之缘，几乎是“无铝不成航空航天器”，从 1903 年起至今及可预见的将来，凡是升空上天的飞行器没有一个不用铝的。

铝工业及铝合金的发展是与航空航天事业的发展相辅相成的，相互促进的。航空航天工业的发展不断地要求铝工业提供一代又一代的综合性能更加优秀的铝合金，反之新一代航空铝合金的诞生，又促进了新一代飞机的问世，换代周期约 10 年或更长一些。例如从苏联的第一代喷气式战机米格-15 至第五代米格-29 大约经过了 65 年；在民用大飞机的发展方面也如此，上世纪 50 年代与 B707 相适应的是高强度变形铝合金，而与目前的 A380 及 B777 型飞机相对的则是新型的艾华合金（Airware alloys）。

2017 合金

2017 合金是 1946 年美国铝业公司发明的（当时牌号为 17S，1954 年改称 2017 合金）。它的化学成分（质量%）：0.20~0.8Si、0.7Fe、3.5-4.5Cu、0.40-1.0Mn、0.40-1.0Mg、0.10Cr、0.25Zn、（Ti+Zr）0.25，其他杂质单个 0.05，合计 0.15，其余为铝。当时它被称为硬铝，因为它的硬度与强度比那时其他铝合金的都大，又被称为 dural（duralium）——杜拉铝，在拉丁文中“dur”（杜）就是硬的意思，有“飞

机合金”的美称。在 1934 年 2024 合金诞生前，它是制造飞机的基本铝材，几乎所有的受力结构件都是用 2017 合金制造的。它具有良好的成形性能，可以轧制成不同厚度的板带材，挤制成各种各样的截面形状复杂的壁厚不等的管、棒、型材，拉制成种种铆接飞机结构的铆钉线材（那时一架飞机用的铆钉多达 50 来万个），锻造不同形状的自由锻件与模锻件。

2017 合金在固溶处理与自然时效后应用，T4 状态的 2017 合金棒材的典型力学性能：抗拉强度 486Nmm2，屈服强度 341Nmm2，伸长率 16.2%。在新淬火状态与热状态（＞350℃）有良好的工艺塑性，在自然时效状态的塑性较低。

该合金的板带材的表面需包覆一层纯铝，以提高其抗腐蚀性能，不包铝的管、棒、型材的抗蚀性较差，有应力腐蚀开裂、晶间腐蚀和剥落腐蚀倾向，在使用时应进行防腐蚀处理。

2017 合金仍是宝刀不老，至今仍未退出航空工业的历史舞台，目前仍用其棒材与管材制造在常温下工作的飞机结构件、纵操系统拉杆与其他中等强度的受力构件。

2024 合金

2024 合金于 1934 年定型，可商业化生产各种半成品：板、带、管、棒、型、线材、锻件、模锻件等，诞生于美国铝业公司技术中心，当时定名为 24S 合金，1954 年定牌号为

2024 合金。1935 年，苏联、德国、日本等相继推出成分相当的合金。那时铝工业界将 24S 合金称为高强度硬铝，它的研制成功对航空航天工业的发展有着重大的里程碑意义，它的各项性能（不含抗腐蚀性能）均全面优于 2017 合金的，满足了新一代飞机制造的需求。此合金是第二次世界大战飞机的主要铝合金，不管是同盟国的飞机，还是轴心国的飞机，其蒙皮都是用 2024 合金板材制造的，机翼纵梁也全是用 2024 合金挤压型材加工，起落架锻件是用此合金锻制的；隔框、翼肋、骨架零件等也是此合金的主要用场。即使当前，2024 型合金仍是航空器应用最多的铝合金之一。

2024 合金是可热处理强化在 T4 状态（固溶处理与自然时效）应用的铝-铜-镁系合金，也可在人工时效状态（T6）应用，用于制造在高温下工作的航空航天器构件，它还有良好的塑性成形性能与可切削性能，可加工成各种各样的半成品与零部件，不过它的抗腐蚀性能较差，对应力腐蚀开裂、晶间腐蚀和剥落腐蚀都比较敏感。因此，在腐蚀环境中应用时应采用包铝的板材或进行必要的防腐蚀处理，如阳极氧化与涂漆，以提高制品的抗腐蚀性能；它的抗腐蚀性能还与热处理条件关系密切，低的淬火速度会出现晶间腐蚀和降低抗应力腐蚀开裂能力；此外，其抗应力腐蚀开裂能力还与零件的受力方向有着密切的关系，短横向应力会导致最大的敏感性。

1956 年 11 月 6 日，东北轻合金有限责任公司（当时代号为一〇一厂）投产时，就能批量生产 2024 合金的各种半成品，为航空航天工业特别是军用飞机制造提供了大量铝材，一〇一厂的建设就是要为米格-15、17 战机的制造提供所需的一切铝材。

在此顺便简介一下中国铝工业企业代号的由来。新中国 1953 年开始执行国民经济建设第一个五年计划，有 3 个铝企业与 1 个配套的炭素厂列入计划，并由苏联设计与提供一切设备及技术。在苏联，铝工业特别是铝加工业属军工范围，为航空工业部管辖。因此中国也把铝工业列入为军工服务的工业，应给以代号，以达到一定的保密目的。于是从北向南给有关企业编一个代号：最北端的哈尔滨铝加工厂代号为“一〇一”，在吉林市的炭素厂为“二〇一”，在抚顺的铝电解厂为“三〇一”，在葫芦岛的锌厂为“四〇一”，在山东淄博的氧化铝厂为“五〇一”，在湖南株洲的硬质合金厂为“六〇一”，等等。以后建的西南铝加工厂为“一一二”，西北铝加工厂为“一一三”。实际上，哈尔滨铝加工厂、西南铝加工厂、西北铝加工厂的建设都是为了发展新中国的航空工业。

随着航空工业的发展，2024 合金制品种类及规格也在不断增加。为适应新机种的需要，合金种类也在不断变化，新合金一代接一代出现，2524 合金已于 1995 年问世，现在已

形成一个 2024 型合金家族，“族长”是 2024 合金，其繁衍的下代有 2024A、2124、2224、2224A、2324、2424、2524。合金的性能一代胜过一代的，优秀性能的要求严格控制主要合金元素铜、锰、镁的含量；大幅度降低杂质硅、铁特别是硅的含量，因而不固溶的杂质相的含量显著减少；调整生产工艺参数。通过这些措施，使新一代的 2024 合金既保持了原有的高强度，又具有上一代合金不具有的高韧度、高的疲劳裂缝扩展抗力，高的耐损伤容限能力，这就是涌现出了一批常说的高强高韧铝合金，特厚板合金，高抗腐蚀合金，先进的可切削合金，它们满足了上世纪 60 年至新世纪初期民用与军用飞机制造的需求，即满足了协和号飞机、B747、A300、A310、A320、B757、B767、B777、A330、A340 飞机制造对铝材的需求。中国的 ARJ21-700 支线客机的升降舵蒙皮、方向舵蒙皮与调整片、副翼蒙皮、机翼下壁板、襟翼蒙皮与子翼等都是用 2524 合金制造的。

1.6.15 航空航天铝合金发展的里程碑（二）

7075 型合金

7075 合金是美国铝业公司于 1944 年研制成功的，当时的牌号为 75S，1954 年改为 7075，苏联与日本也几乎同年研制出此合金，但其商业化生产与批量装机应用比美国晚 1、2

年。它是一种可热处理强化的在人工时效状态下应用的 Al-Zn-Mg-Cu 系合金，目前仍广为应用的有 7075、7175、7475 合金，它们的化学成分（质量%）见下表。

合金	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
7075	0.40	0.50	1.2～2.0	0.30	2.1～2.9	0.18～0.28	5.1～6.
7175	0.15	0.15	1.2～2.0	0.10	2.1～2.9	0.18～0.28	5.1～6.
7475	0.10	0.10	1.2～1.9	0.06	1.9～2.6	0.18～0.25	5.2～6.

当今用的最多的是 7475 合金，它是第三代。由表中所列的成分变化可知，该合金是向高纯化的方向发展，例如 7475 合金的主要元素（铜、锰、镁、锌）含量与 7075 合金并没有什么区别，可是它们在杂质元素含量多少方面却相差悬殊，前者的硅含量比后者的低 75%，铁含量仅为前者的 20%，就是钛含量也有前者的 30%。因此，7475 合金中的不可溶解的杂质极少，同时少量的杂质以小质点存在，弥散地分布于固溶体基体中，对合金的塑性、韧性的危害大大下降，形成疲劳裂缝源的几率也大为减少。因而 7475 合金在保持超高强度的同时，具有更高的断裂韧度，损伤容限性能也更优秀，并有更强的抗疲劳裂缝能力。因而此合金在当代航空航天器制造中得到了广泛应用，7075 型合金的用量仅次于 2024 型合金，同时都为受力大的关键性零部件。

7075-T6 合金棒材（直径 22mm）的抗拉强度（为 630N/mm2）

比 2024-T4 同规格棒材的（520N/mm2）高 21.15%，7075 合金各种材料的力学性能（不含伸长率）均比 2024 合金的高，故被称为超硬铝或超高强度铝合金。而且抗应力腐蚀开裂的能力也比后者强，故采用 7075 合金可以减轻飞机的质量，提高飞机的安全性，但其疲劳强度并不呈比例上升，因此在设计主要承受疲劳负载的零部件时，对这一点应于以充分考虑。

在 T6 状态下，7075 合金具有让人满意的断裂韧度，在 T73 过时效状态的强度性能均较 T6 状态材料低，但有优异的抗应力腐蚀开裂能力，还有更高些的断裂韧度。

7475 合金的强度和腐蚀性能与 7075 合金相同状态的性能相当，而其断裂韧度却远高于强度与相之相等的现有任一铝合金，它具有断裂韧度与强度的最佳匹配。7475 合金主要用于制造要求高强度、中等疲劳强度与高断裂韧度的结构件，如机身蒙皮、机翼蒙皮、隔框等，使用 7475 合金可以提高飞机的安全性和服役期限，由于 7475 合金是室温高强度铝合金，随着使用温度的提高，合金的强度下降，其长时间使用温度不得超过 125℃，这是 7475 合金的不足之处。该合金具有良好的工艺塑性和超塑性，薄板在退火和固溶热处理状态具有良好的成形性能。

7475-T76 包铝薄板已于上世纪末与新世纪初开始在国产飞机上试用，0 状态包铝薄板成形后再淬火过时效成 T76 状

态已试用于飞机机身加强板，7475-T7351 合金厚板已用于试制飞机接头和飞机机身梁等。

7050 型合金

7050 合金属铝-锌-镁-铜系，是一个可热处理强化的超高强度变形铝合金，可生产的半成品有厚板、型材、线材、锻件与模锻件等,1970 年由美国铝业公司技术中心研制定型，1971 年 2 月 1 日在美国铝业协会公司注册。7050 型已形成一个家族，4 个合金：7050、7050A、7150、7250，除 7050 工为法国合金外，其他的均为美国合金。它们的化学成分（质量%）如下：

合金	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni
7050	0.12	0.15	2.0～2.6	0.10	1.9～2.6	0.04	-
7050A	0.12	0.15	1.7～2.4	0.04	1.7～2.6	0.04	0.03
7150	0.12	0.15	1.9～2.5	0.10	2.0～2.7	0.04	-
7250	0.08	0.10	2.0～2.4	0.10	1.9～2.3	0.04	-

由上表所列的成分可看出，相对于 7075 合金来说，锌、铜含量提高了，锌镁比值增大了，并用锆取代铬作为晶粒细化剂来抑制再结晶晶粒长大，而且大大降低了铁、硅杂质含量。由于合金成分的改变以及采用过时效处理，使 7075 合金具有良好的综合性能，既有高的强度，又有良好的韧性、抗

应力腐蚀开裂能力与高的疲劳强度，还有一个独特的优点，即淬透性好，特别适合于制造厚截面零件、锻件与模锻件。温度升高时合金的强度下降，长期使用的工作温度不宜超过125℃。

7050 型合金材料的不同状态分别适用于不同使用条件的受力工作，T76 状态的用于要求抗剥落腐蚀、高强度的结构件；T74 状态的适用于高强度、抗应力腐蚀开裂的结构件，特别是厚截面结构件，如锻件与模锻件；T73 状态的主要用于高强度、抗腐蚀的材料。

7050 型合金锻件及模锻件的固溶热处理温度 468~474℃，在 54~66℃的温水中淬火；厚板在固溶热处理温度 471~482℃，在室温水中淬火，转移时间不得长于 15 秒。为了消除材料中淬火时造成的内应力，厚板固溶处理与人工时效之间需进行预拉伸，永久变形量 1%~3%；自由锻件在固溶处理应进行压缩变形，压缩永久变形率 1%~5%。7050 型合金的成形性大体与 7075 合金的相当，但开锻温度不宜超过 420℃，否则易产生热脆，终锻温度不得低于 280℃。对该合金不得进行熔焊，但可进行电阻焊与摩擦搅拌焊，合金的可切削加工性能与磨削性能良好，为防止锻件切削温度过高引起变形，切削区温度一般不应超过 100℃，切削速度宜＜550r/min。

7050 型合金用于制造飞机的主受力结构件如机身框架、隔板、机翼壁板、翼梁、翼肋、起落架支撑零件、铆钉等。

在中国有完全自主知识产权的 ARJ21-700 支线客机受力结构制造中 7150 合金是用得最多的，上翼面长桁、下翼面下桁，梁上缘条、地板梁下增压区桁、垂尾长衍、与机翼对接的机身部件长衍材料为 7150-T77511；机翼翼肋缘条、翼肋腹板、前缘条、梁腹板，方向舵的肋、梁腹板、梁缘条，副翼的肋与梁，缝翼的肋与梁，与机翼对接的机身部位的梯形板等的材料为 7150-T77；机身框、地板梁下增压区框、后机身框、与机翼对接的机身部件的翼下机身框的用材为 7050-T7452 合金。制造适航支线客机用的 7050 型合金。制造适航支线客机用的 7050 型合金材料中国当前还不能批量生产，全部从美国铝业公司进口，这是非常值得深思的。

7150-T77 材料中国还不能生产，虽然在试验室取得了一些研究成果，但产品商业化生产技术与装备尚未突破。其他状态材料虽能生产，但其性能与尺寸偏差尚不能满足造航天大飞机（ARJ21 与 C919）制造的需要。何时能完全提供大飞机制造所需的全部铝材，中国铝加工业尚须奋斗一些时日，任重道远。

1.6.16 航空航天铝合金发展的里程碑(三)

7055 合金

7055 合金是铝-锌-镁-铜系超高强度的可热处理强化的

航空航天铝合金，在人工时效状态下应用。在 7XXX 系合金中，它的主要合金元素（铜、镁、锌）总含量是变形铝合金中最高者之一，因此生产难度大，特别是在铸造方面，中国直到目前尚未掌握某些大规格扁锭的批量铸造技术，其中有装备方面的问题，也有技术参数探索与掌握方面的问题。

7055 合金是一种美国合金，1990 年定型，1991 年 2 月 1 日在美国铝业协会公司注册，其成分（质量%）：0.10Si、0.15Fe、2.0-2.6Cu、0.05Mn、1.8-2.3Mg、0.04Cr、7.6-8.4Zn、0.06Ti、0.08-0.25Zr，其他杂质单个 0.05、合计 0.15，其余为 Al。成分特点是锌、镁含量高，杂质含量很低。

7055-T77 合金是目前强度最高的变形铝合金，其板材的抗拉强度比 7150-T6 合金高 10%、比 7075-T6 合金高 30%，而且断裂韧变相当高，抗疲劳裂纹护展能力强，其所以如此，主要是因为锌/镁比值，铜/镁比值大与合理的时效制度，它的显微组织不利于位错运动，对应力腐蚀开裂与晶间腐蚀有相当强的抵抗力。在飞机制造中用于制造受力大的构件，如 B777 飞机上蒙皮、水平尾翼、导轨等等。中国 ARJ21 支线客机的机翼上壁板用 7055-T775511 制造，机身长桁用的是 7055-T76511 合金。

艾华合金（Airware）

艾华合金并不是一个合金，而是若干性能得到全面改进

的合金与用先进工艺生产的铝材的总称，或者说艾华是当前航空器先进铝制零件的全面解决方案的总称，包括合金成分与材料生产工艺的最佳化，以及零部件的设计与加工。艾华合金用于2005-2015年下线的A380E喷气机(E-Jets)及A350C系列（A350 C Series）飞机，是力拓-加铝（Rio Tint-Alcan）公司下属的康斯特利姆全球航空交通运输工业公司（Constellium Global All（Aerospace,Transportation and Industry)推出的，合金及其生产工艺研究由设在法国沃雷普（Voreppe）与瑞士洛桑（lausanne)的技术中心完成，板材由法国伊苏尔轧制厂（Issoire）与美国的雷文斯伍德（Ravenswood)轧制厂生产,而挤压材则由法国的努兹·圣·乔治型材厂（Nuits-Saint-Georges）与圣弗洛伦汀（Saint Florentin）铝材挤压厂生产。

铝-锂合金

美国铝业公司新推出的航空7085铝合金于2002年在美国铝业协会公司注册，用于生产航空器厚板，这是一种前所未有的超纯7XXX系合金，其化学成分（质量%）：0.06Si、0.08Fe、1.3-2.0Cu、0.04Mn、1.2-1.8Mg、0.04Cr、7.0-8.0Zn、0.06Ti、0.08-0.015Zr，其他杂质0.05，合计0.15，其余为Al。它的比屈服强度（7085-T76）约700Ksi·in3/1b，比7050-T74合金的(600ksi·in3/1b)高17%(102-178mm厚板)。

此合金已进入商业化生产，并已纳入美国 2009 年航天材料标准（AMS）。

C85T 也是一种 7XXX 系合金，其成分尚未见报道，C85T-7X5I 合金（T7651/T7451)25-150mm 厚板正在进行商业化生产，计划于 2012 纳入 AMS 标准。C85T-T76 合金厚板的比屈服强度为 730ksi·in3/1b，比 7050-T74 合金的（600ksi·in3/1b）高 22%。

第三代铝-锂合金即美国铝业公司的 Al-Li-Lp-I（25-100mm 厚板）和 Al-Li-Tp-2（25-100mm）合金正在研发中，用于制造 2015~2025 年的飞机，它们的比屈服强度比 C85T-T76 合金的还高 5%左右，并有非常高抗腐蚀性能。第三代铝-锂合金正在研发与试生产中。

1.7 舰船及海洋

1.7.1 舰船铝合金特性

在舰船与海洋设施中几乎应用了所有的铝及铝合金材料，但用得最多的是：5052、5154、5454、5083、5086、5056、6063、6061、6N01、6082、6025A、1050、1200、3003、3203 等变形铝合金和 AC4A、AC4C、AC4CH、AC7A、AC8A 等铸造铝合金。主要的铝材品种有：厚板、薄板、带材、箔材、管材、棒材、型材、整体挤压、壁板、铸件、压铸件、模锻件等。

材料的主要姿态有：O、H14、H112、H34、H32、H116、H117、H111、T1、T5、T6、T61、F 等。随着船体的大型化和铝材挤压技术的进步，大型材的应用越来越广泛。

船体结构的型式可分为三种：横骨架式、纵骨架式和混合骨架式。铝合金小型渔船、内河船和大型船的首尾端结构常为横骨架式结构；油船和军舰常采用纵骨架式结构。船壳上应用的铝材多为板材、型材和宽幅整体挤压壁板。中国在制造一艘长 60.8m、1160t 石油运输船时，船壳使用的铝材情况如下：纵向密封舱壁采用厚 9mm 的波纹板，横向舱壁用 7mm 厚的板，形成 5 个独立货舱；船舷用 9mm 的铝合金制造，甲板厚 12mm，盖板厚 15mm。船体构架由挤压型材构成，尾柱是用 Al-12%Si 合金铸造的。铝材总用量 92t。

近期，日本又新研制出铝合金船壳半铸造船，其船头、船尾和船身用约 5.4mm 的板材制造的，再以这三段焊成船壳。船宽 2.4m，深 0.58m，船壳质量约 2t，总质量 3.8t，与同型的 FRP（玻璃钢，Fiberglass reinforced plastic）船相比，船壳质量减轻 25%~30%。

目前，各种类型舰船的上层建筑和上部装置（桅杆、烟囱、舰桥、炮座、起吊装置等）都越来越倾向于使用铝合金材料，而上层结构中使用最多和最理想的铝材是大型宽幅挤压壁板。不过，在 1984 年英国-阿根廷马岛战争中，英国的谢菲德马驱逐舰被对方的飞鱼导弹击中，燃起通天大火，铝

合金舰桥等被火烧软，随即垮塌，从而引起人们对用铝合金制造战舰上层建筑的思考。

苏联在造长 101.5m、排水量 2960t、载员 326 人和速度 30km/h 的吉尔吉尔斯坦号远洋客轮时，用铝合金建造上层结构，如驾驶舱、桅杆、烟囱、支索、天遮装置和水密门等。使用的铝材有 5.6mm 和 8mm 厚的 5A05 合金板，10mm 和 14mm 厚的 5A06 合金板，5A06 合金圆头扁材，以及一些铝合金铸件。上层结构由 5A05 合金铆钉铆于甲板上，并采取了预防接触腐蚀措施。上层结构用了 100t 铝材，比钢制的轻 50%，用了 175t 铝材，船的总质量减轻 12%，定倾重心提高 15cm，明显地改善了船的稳定性。

浙江巨科铝业有限公司生产的 5XXX 系船用铝合金板材的规格见表 1，其性能见表 2。由于该公司的轧机为 1850mm 系的，因此板材的最大宽度为 1700mm，所生产的板材分别于 2012 年 6 月及 9 月通过挪威船级社(DNV)和中国船级社(CCS)认证。

1.7.2 舰船用铝合金船配件产品一览

图 1　船艇铝合金跳板

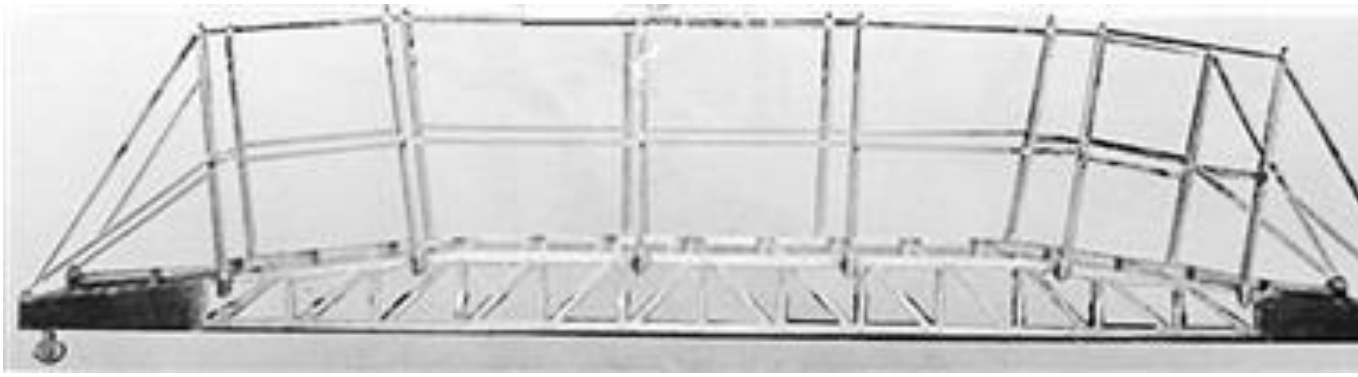
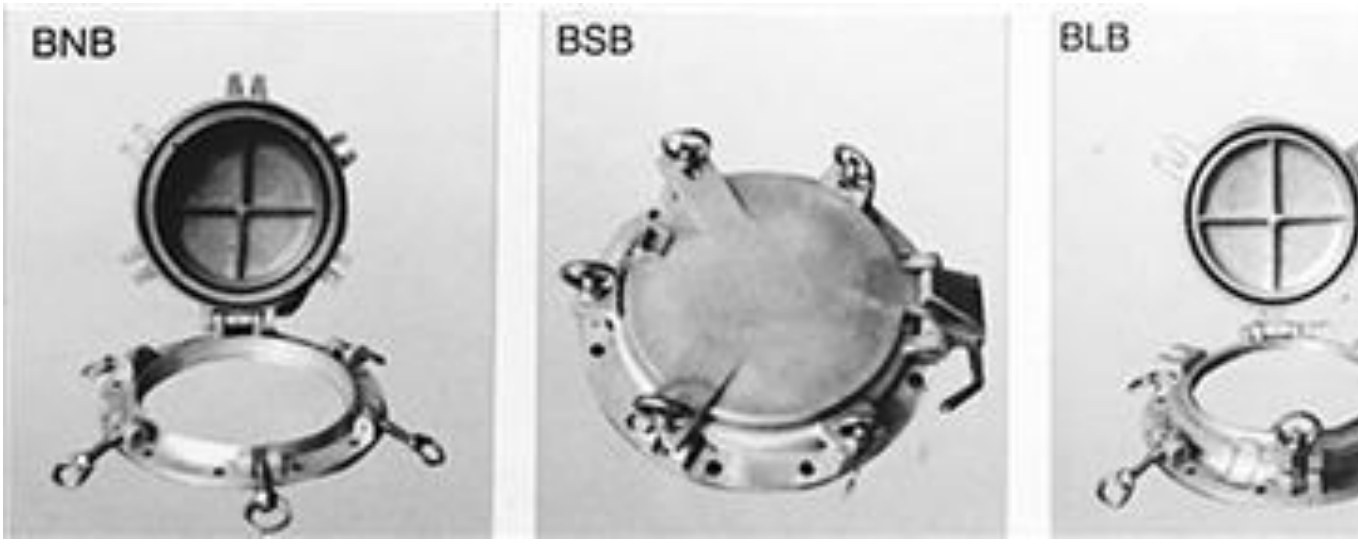


图 2　舷窗



船舶舰艇用的铝合金配件种类繁多，主要的有：普通矩形窗、舷窗（图 1）、小型快艇窗、天窗、百页窗、提窗、舱口盖，移动门、风雨密门、舱室空复门，跳板（图 2），座椅、沙发、梯等等。广东省番禺市桥联铝窗厂的部分产品如图 1、图 2 所示，它是中国主要的船舶配件企业之一，制

造这些产品用的合金有 6061、6N01、6063、6082、1200 与 3003 合金等，它们不但有较高的力学性能，而且有相当强的抗腐蚀性能与有良好的成形加工性能和表面阳极氧化处理性能，铝-硅系铸造铝合金也有一些应用。

3003 合金是一种 Al-Mn 系合金，是一种常用的通用工程合金，它含 1%Mn~1.5%Mn，0.05%Cu~0.2%Cu，其他的成分为杂质，材料的主要状态为 O、H12、H14、H16、H18。O 状态材料的典型力学性能：抗拉强度 110N/mm2、屈服强度 40N/mm2，伸长率 30%，布氏硬度 28，抗剪强度 75N/mm2，疲劳强度 50N/mm2，正弹性模量 70KN/mm2，剪切弹性模量 25KN/mm，泊松比 0.33。3003 合金是一种热处理不可强化的抗蚀性高的合金。

6063 合金是一种产量大广泛应用的合金，在制造舰船铝合金配件方面有着广泛的应用，它是一种 Al-Mg-Si 系合金，含 0.20Si%~0.6Si%,0.45Mg%~0.9%,有非常好的可挤压性能，可挤压断面复杂的中空大型材，多在 O、T5、T6 状态下应用。6065-T5 挤压材的典型力学性能：抗拉强度 165N/mm2，屈服强度 145N/mm2,伸长率 12%,布氏硬度 60,抗剪强度 115N/mm2，

疲劳强度 70N/mm2，正弹性模量 68.3Kn/mm2，剪切弹性模量 25.8KN/mm2，泊松比 0.33。

6N01 合金也是一种常用舰船配件合金,可以热处理强化，它的强度性能比 6063 合金的大，是一种热处理可强化的日本合金，牌号中的 N 就代表日本（Nippon），虽然是一种日本合金，但在世界各国都获得了应用。主要应用状态为 T5 及 T6，但 T6 状态材料用的更多。6N61-T6 合金挤压材的典型室温力学性能： 抗拉强度 290N/mm2，屈服强度 260N/mm2，伸长率 12%，正弹性模量 68.9Kn/mm2，剪切模量 25.8KN/mm2，泊松比 0.33。

6N01 合金的化学成分(质量%)：0.40Si~0.9Si，0.35Fe，0.35Cu，0.50Mn，0.40Mg~0.8Mg，0.30Cr，0.25Zn，0.01Ti，其他杂质总和 0.15，其余为 Al。

1.7.3 海洋钻探平台与钻探管

中国有着辽阔的海洋，有着丰富的海洋资源与矿产资源，与开发陆地资源相比，开发海洋资源难度要大得多，特别是深海资源，例如海洋中蕴藏着丰富的石油与天然气，为了开采它们，首先要进行勘探，摸清情况，于是首先要建造一座平台，这个平台实际上就是建在海洋上的一个勘探钻井站，上有钻井设备与工作人员所需的一切工作与生活用品，以及

房舍与直升机停机台等，其中许多装备、用品与设施都可以用铝及铝合金制造，因为铝是最佳的海洋工程材料之一，对海水及海洋气候有相当强的适应性。当然有些性能它远不如钛及钛合金，但是铝的价格较低，密度也只有钛的 60%，因此在建造平台甲板、直升机停机坪、上层建筑设施等时，铝材的性价比远比钛及其他结构材料的高，所以铝材成为一种建造海洋钻探平台不可或缺的材料。

海洋钻探管完全可用铝合金制造，美国早在上世纪 60 年代中期就开始采用 2014 和 7075 合金厚壁管钻探石油与天然气。2014 合金是一个古老的合金，上世纪 20 年代中期成型，是美国铝业公司匹兹堡技术中心研发的，当时的牌号为 14S，1954 年改为现在的四位数字牌号，它的标定化学成分（质量%）如下，是一种 Al-Cu-Mg-Si-Mn 系合金：0.50Si~1.2Si，0.7Fe，3.9Cu~5.0Cu，0.40Mn~1.2Mn，0.2Mg~0.8Mg，0.10Cr，0.25Zn，0.15Ti，其他杂质单个 0.05，总计 0.15，其余为 Al，它是一种热处理可强化合金，既可以在自然时效状态（T4）下应用，也可以在人工时效状态（T6）下应用。

2014 合金的含铜量较高，它的强度性能实际上与 2024 合金的相当，但它的工艺性能却比 2024 合金的高得多，同时它含有较多的铜和锰，所以有相当高的热强性，可用于制造在高温下工作的零件。它在退火状态下的组织除α 相外，还

有 S 相(Al2CuMg)、Al2Cu、Mg2Si 及 AlFeMnSi 或 Al10Mn2Si，由于它的硅含量较高，所以合金中共晶体含量比 2024 合金的多一些，故有较好的铸造性能。2014 合金的固溶处理温度 503℃，它虽可以在自然时效状态下应用，但是钻探管的工作环境温度较高，所以应在人工时效状态下应用，最佳人工时效规范：160℃/6h~8h，空气中冷却。2014 合金管的挤压温度 470℃~475℃，退火温度 350℃~400℃。

2014 合金有两种变型合金：2017A 与 2114 合金。这 3 个合金的力学性能相等，在生产钻探管时选用 2014 合金即可。

7075 合金是一种常规超强度铝-锌-镁-铜系合金，于 1944 年定型，首先研制成此合金的是美国铝业公司，当时的合金牌号为 75S，稍后不到一年，苏联与日本也研发成此合金,苏联合金的牌号为 B95,据称是第 95 号工厂试制生产的，故得此名；日本合金的商品名称为 ESD。

7075 型合金是一个大名鼎鼎的航空铝合金，在航空航天器用的结构铝合金中，它的用量仅次于 2024 型合金的。7075 型合金现在已形成一个家族，其化学成分见表 1，7475 合金 1969 年注册,是当今航空结构材料的骨干合金,它的杂质硅、铁含量很低，有高的断裂韧性、疲劳性能与损伤容限，生产海洋钻探管用 7075 合金，它的生产工艺与控制要点耳熟能详。

7075 型合金的化学成分很复杂，因而它的相组成复杂，

α 固溶体也很复杂，固溶的合金元素多。7075 型合金的最大特点是它有三种强化相：S（Al2CuMg），T（AlMgCuZn）、MgZn2，其中又以后两种对合金的强化影响最大，因为在固溶处理温度 475℃，它们在 Al 中的溶解度很大，而此时 S 相的溶解度却不大。随着温度的下降，T 相和 MgZn2 相的溶解度猛烈减小，因而可以采用相应的热处理来大大提高合金的强度性能，与 2XXX 系合金相比，7075 型合金最突出特点是它们在人工时效状态（T6）下的抗蚀性比在自然下的高得多。

7075 型合金的另一些特点是：对交变负载和尖锐缺口的敏感性很高，因此在设计零件的形状和载面时，以及在选择其制造工艺时应充分考虑合金的这些特性，在生产材料与对其加工制造时应小心，不得擦、划伤材料与工件表面，同时零件截面的过渡要缓和。

和许多其他铝合金一样，7075 合金材料横截面即长横向、短横向的强度比纵向的低一些，挤压材的截面愈大，这种差别也愈大。

以铝合金管代替钢管有以下优点：质量轻，用同样的设备可以提升更长的钻杆，提升燃料消耗可以减少 15%~20%，每台设备运送的总长度可增加 60%，钻机能力可以提高 50%~100%；可靠性高，不会发生火花，在有腐蚀性介质的钻井中，比传统钻探钢管的抗蚀性还高；钻探性能良好，钻井

深度可增加 30%；耐热性强，可钻到 8km，井底温度为 200℃时，仍运转良好；低温性能好，无低温脆性，铝合金的力学性能随着温度降低而全面有所上升；可回收性强，铝合金管报废后，回收再生率可达 95%以上，而钢管的回收率只不过 70%左右。

时下，阻碍铝合金管在钻探中大量应用的主要因素：对其应用与性能还不熟悉；价格约比钢管的贵 50%。不过长远来看，其综合经济效益还比钢的好一些或相差不大。从 2013 年起美国铝业公司为俄罗斯大石油公司 OJSC Rusnano 生产钻探铝合金管，在萨马拉冶金（美铝）厂生产，其上涂有一层美国铝业公司新近研发的纳米级涂料，可在极端严峻的腐蚀条件下工作，使用寿命比没有涂层管的长 30%~40%。

截至 2013 年，中国尚不能批量生产铝合金钻探管，但正在建设有关此产品的项目，如利源精制股份有限公司、忠旺集团铝业公司等，可于 2015 年或 2016 年投产，但纳米级防腐涂料还不能生产，有待研究开发。钻探管是一种高技术铝合金产品，但不是一种大宗产品，市场容易有限。

2013 年 12 月辽宁忠旺集团与墨西哥埃夫雅公司(EVYA)达成合作研发生产铝合金海上钻井平台、直升机停机台协议，对这些产品走出去将起积极的推动作用。

1.7.4 舰船与海洋工程铝合金

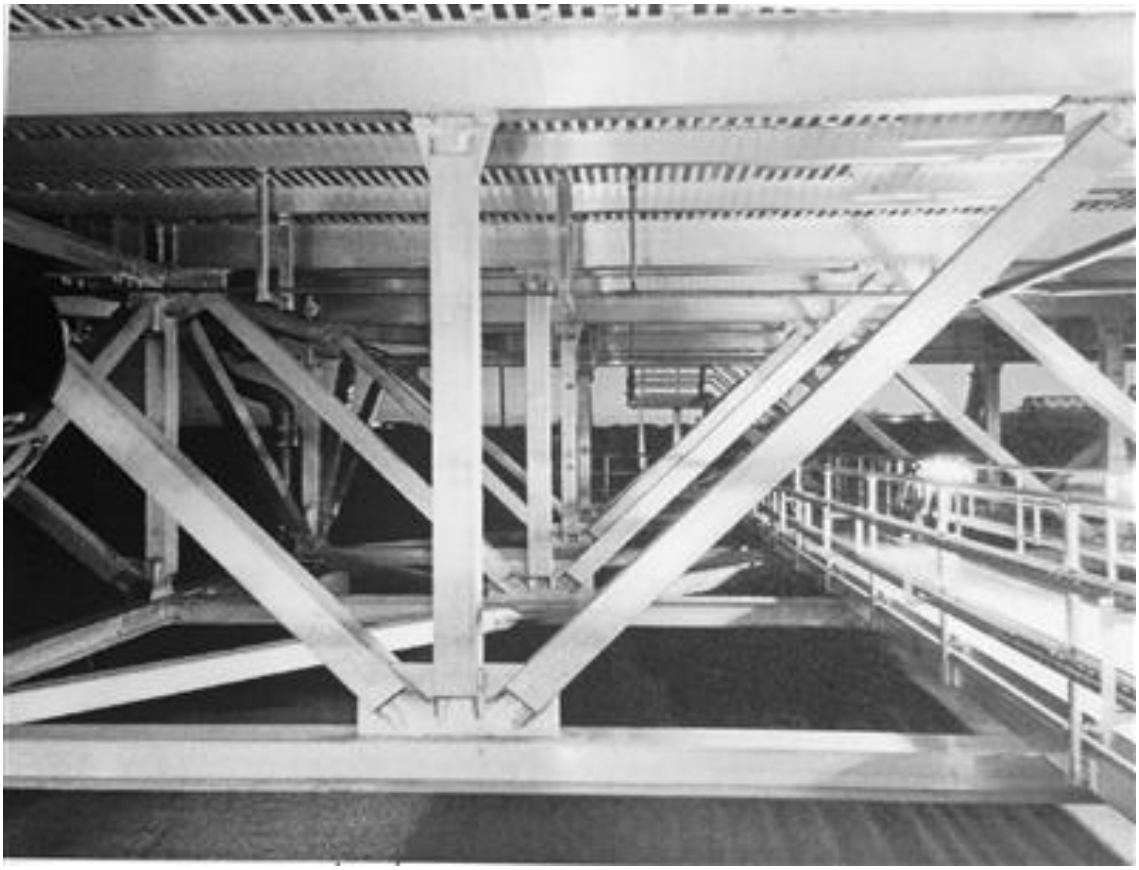


图 1　海滨设施铝结构。

铝合金可分成两类：一类为变形铝合金，用于加工板、带、箔、管、棒、型、线、粉、锻件等半成品；另一类为铸造铝合金，用于铸造各种铸件与压铸件。其中前者在海洋工程中用得最为广泛。由于铝合金具有比强度高、抗海水腐蚀性强、可焊接、易加工成形、回收性强、环保性好、无低温脆性、无磁性、磁撞时不产生火花等特性，在海洋工程中的应用可有效减轻舰船质量、提高稳定性、增大航速等。因此，当前铝合金在世界许多国家已成为舰船主要结构材料之一，

并广泛用于建造海岸、滨湖、滨江设施等。图 1 为滨海建筑物的铝结构，由于铝材的抗蚀性高，不需要涂油漆，不需要保维护保养，可使用 30 年。铝材在碰撞时不产生火花这一特性使它特别适合于制造与易燃物资及油品接触的舰船零配件及结构，可以大大降低着火的危险性。

铝合金在舰船上的用量

目前，铝在舰舶舰艇制造的用量不多，就全世界来说，2013 年的用量占其总消费量的 1.1%左右。2012 年日本国内轧制铝材消费量 974.4kt，其中交通运输消费量 159.0kt（汽车工业 139.0kt，占 87.42%，挤压铝材国内消费量 784.5kt，其中交通运输量 141.9kt（汽车工业 131.6kt，占 92.94%），这两种铝材在交通运输领域的用量占总消费量的 17.11%，而汽车工业的用量则占交通运输用材的 89.93，航空工业与海洋工程的用量还不到 10%，日本是一个航空航天工业不发达的国家，所以在交通运输用的铝材中，估计海洋工程的用量也不会超过 5%，日本的铝材消费量早已进入平稳阶段，自 2004 年以来海洋工程及舰船的用量一直 20kt/a 左右徘徊(图 2）。在所用的铝材中，厚板为主，约占 88%，挤压材为辅，但滨海设施用的多为挤压材。

厚板和挤压材在船舶中的用量

（财政年度　　单位：吨）

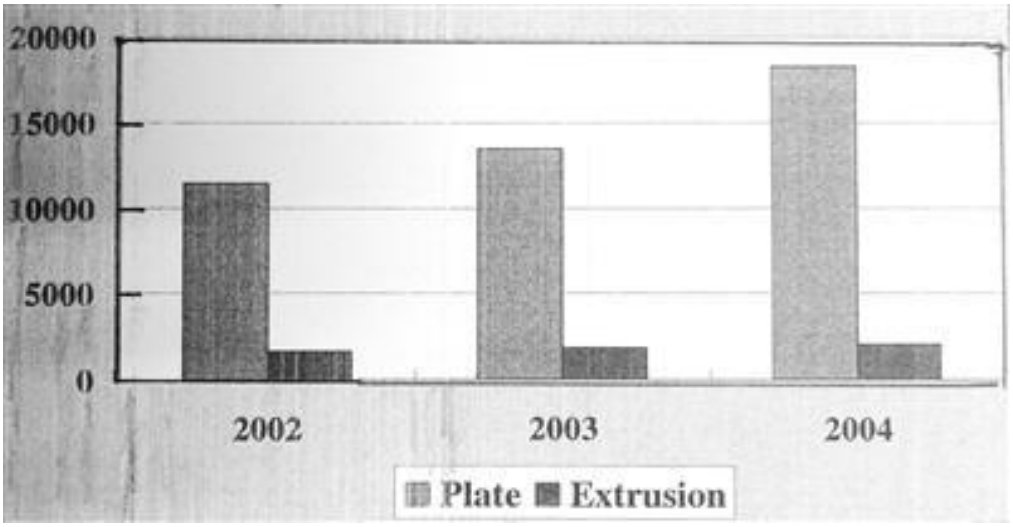


图 2　　2002 年~2004 年日本造船工业的铝材用量。

中国舰船用铝合金结构与日本有所不同，日本是 LNG（液化天然气）船制造大国，船上有 4 个巨大的用 5083 合金厚板焊接的 LNG 罐，厚板用量约 4kt/条船，中国造 LNG 船用的是元低温脆性的 Fe-Ni-Mn 钢，中国仅一些厚板制造中小型舰艇，据估计 2014 年中国造船工业用的铝材不到 230kt，还不到铝材总表观消费量的 1%。不过，随着中国向海洋大国前进脚步的加快与加大，铝在船舶舰艇与海洋工程中的用量会有较大增长，但 2025 年前的年平均增长率也不会超过 7.5%。

舰船铝合金的发展

铝的工业化生产始于全世界首个铝厂——美国匹兹堡冶金公司 1988 年的建成投产，1891 年造船业第一次应用该厂生产的铝制造船用零件，经过 120 多年的研究和发展，铝材在船舶舰艇上的应用与在海洋工程中的应用越来越广泛，并成为这些部门很有发展前途的材料之一。

最早用于造船的铝合金为含 Ni 的 Al-Cu 系合金，继而采用的为 2XXX 系合金，不过它们抗海水腐蚀性能不高，限制了它们在造船工业中的应用。

上世纪 30 年代开始采用 6061-T6 合金，并用铆接法构造船体。40 年代可焊耐腐蚀的 5XXX 系合金，50 年代开始采用 TIG（钨惰性气体）焊技术，这一时期铝合金在造船上的应用取得长足进展。60 年代，美国海军先后开发出 Al-Mg 系的 5086-H32 和 5456-H321 合金板材、5086-H111 和 5456-H111 合金挤压型材，由于采用了 H116 和 H117 状态，消除了沿晶沉淀的 A18Mg5 化合物网膜，解决了它们的剥落腐蚀和晶间腐蚀问题，这是 60 年代来舰船铝合金研发方面取得的具有里程碑意义的重大进步。随后，由于需要屈服强度更高的材料，于是在舰船制造中广泛应用了 6XXX 系合金，在较长的一段时间内，欧、美、日等国家主要在 5XXX 系合金和 6XXX 系合金中选择船体铝合金，而苏联则较多地选择 2XXX 系合金。中国舰船工业在改革开放前以跟踪苏联为主，1980 年以来又较多地跟踪欧、美、日等国的，2010 年以后自主创新逐步加强。

上世纪 70 年代以来，对中强可焊的 7XXX 系合金的研究日益增多，并取得一些进展，已在舰船制造中得到应用。

图 3　瑞典石油公司克里斯蒂港的铝合金材料建造的滨海设施。

上世纪 70 年代以后，舰船结构的合理化和轻量化越来越被重视，大型舰船的上层结构和舾装件大量使用铝合金。为此，这一时期开发出许多有关这些领域用的铝合金和材料，其中包括特种规格的挤压型材、大型宽幅挤压壁板和铸件等。

1.7.5 话说海洋铸造铝合金 ZL104

ZL104 合金也是热处理可强化 Ai-Si-Mg 系铸造铝合金，具有优良的铸造工艺性能和气密性,同时其强度高于 ZL101、ZL102 等合金的，但形成针孔的倾向较大，熔炼工艺较为复杂。

该合金适于砂型或金属型铸造各种复杂薄壁零件，也可以采用压铸工艺，适合于铸造承受中等载荷、工作温度不超过 180℃的舰船箱类和发动机零件等，是一种应用较为广泛的海洋工程和设施的铸造铝合金。相似的国外合金有美国的 360、日本的 AC4A、ISO 的 Al-Si10Mg，德国的 G-AlSi10Mg。铸造方法、铸件尺寸大小和复杂程度一般不受限制，主要为大型复杂砂型和金属型铸件。承力件均在固溶处理与人工时效状态下应用。

ZL104 合金的标定（GB/T 1173）化学成分如下（w%）：Si80~10.5，Mg0.17~0.35，Mn0.2~0.5，S 铸件的 Fe0.6，J 铸件的 Fe0.9，Cu0.1，Zn0.25，（Ti+Zr）0.15，Sn0.01，Pb0.05，杂质总和：S 铸件 1.1，J 铸件 1.4，其余为 Al。

熔炼-铸造

ZL104 合金的熔炼可在不同加热方式炉中进行，仔细清理溶化坩埚与工具，喷涂料应预热烤干。保持炉料表面清洁

（无锈蚀、油污）和溶化工具、精炼变质剂等干燥，是减少合金熔炼吸收氢气的重要措施，同时在空气湿度较大的条件下，可采用覆盖溶剂，并尽可能降低熔炼温度，缩短熔炼时间。

应进行精炼，以便有效地去除气体与夹杂，精炼剂为固体氯化物，如六氯乙烷等或含氯混合气体如氟利昂-氮混合气体等。合金的含硅量较高，应通过变质处理细化处理细化共晶组织，改善材料塑性，可采用钠变质剂，如5%NaCl+30%NaF+10%KCl+10%Na3AlF6，用量为炉料质量的2%~3%，变质温度710℃~750℃。也可以采用氯化锶或铝-锶中间合金作为变质剂。

为获得致密铸件，在浇注过程中应保持熔体平稳流动，防止从空气和铸型中吸收氢，对于重要的大型复杂铸件建议采用压力釜浇注，压力0.5~0.6N/mm2。

为保证铸件的力学性能，应严格控制合金的化学成分，硅含量在上限时，可提高合金强度和流动性，降低硅含量对减少集中缩孔的形成有益；镁是合金的主要强化元素，其含量为0.2~0.25%时可获得好的综合性能；铁是降低合金力学性能的主要杂质元素。

物理化学性能

ZL104合金的溶化温度577℃~600℃，熔炼温度不宜超过

750℃，浇铸温度 680℃~750℃，热导率及比热容见表 1。20℃~100℃的线膨胀系数 1.7×10-6/℃，20℃~200℃的 22.5×10-6/℃，20℃~300℃的 23.5×10-6/℃。100℃~200℃的 23.3×10-6/℃，200℃~300℃的 25.5×10-6℃。密度 2650kg/m3。20℃时电阻率 46.8nΩ·m，无磁性。

ZL104 合金表面易生成薄而致密的氧化膜，可防止进一步氧化，有高的抗腐蚀性能，即使在潮湿的大气中也有相当强的抗腐蚀性能，并无应力腐蚀开裂倾向，为提高合金的抗腐蚀能力，应严格控制杂质铁和铜的含量。

力学性能

ZL104 合金的标定（GB/T1173）单铸试样的最低力学性能见表 2。Tb 状态 SB 铸件的布氏硬度 HB=70，J 铸件 T6 状态的 HB=75。ZL104-T6 合金 SB 铸件的高温持久强度 R100：200℃时的 78N/mm2，250℃时的 49N/mm2，300℃时的 27N/mm2；砂型、变质 ZL104-T6 合金的高温蠕变强度 9.8N/mm2，ZL104 合金的正弹性模量 E=69GN/mm2，切变模量 G=27GN/mm2，泊松比μ=0.33。

热处理及工艺特性

ZL104 合金的相组成为α-（Al）+Mg2Si+Si，Mg2Si 是主

要强化相，固溶处理时溶入基体，而在时效时以介稳定相（GPI、GPⅡ或β’）弥散析出。共晶硅在变处理后细化，由片状转变为颗粒状。三元共晶熔点（α-Al+Mg2Si+Si）为550℃，二元共晶α-Al+Si 的熔点577。热处理过烧后，组织中出现Si相聚集变粗，共晶复溶特征。合金的杂质相有骨骼状的AlFeMnSi 和针状的β（Al9Fe2Si2）。

一版形状比较简单的铸件可在室温水中淬火，大型复杂零件则应在沸水、油或CL-1 有机淬火剂中淬火，以减少内应力和防止铸件变形。

ZL104 合金有有优良的铸造工艺性能，用浇铸砂型模棒状试样流动长度法测定700℃的流动性为359mm，无热裂倾向，线收缩率为1%，体收缩率为3.2%~3.4%。合金结晶间隔小，在消除针孔的条件下，可以达到很高的致密度和气密性。

ZL104 合金的壁厚敏感效应随铸件壁厚增加或冷却速度降低而上升，α-Al 枝晶和共晶组织都变粗，而力学性能则降低。

该合金有良好的可焊性，可采用氩弧焊、气焊等焊接或补焊。焊接接头热处理后的拉伸性能与基体的性能大体相同。补焊铸造缺陷通常采用相同成分的填充金属，已经热处理的铸件焊补后应进行重复热处理。

对ZL104 合金铸件可采用硫酸阳极氧化处理，用重铬酸钾封孔，但由于含硅量高，氧化表面外观效果不好，而对于

针孔度超过 3 级的铸件，则不允许阳极氧化处理，可采用涂漆保护。

ZL104 合金的含硅量高，可切削加工性能差，但热处理后基体硬度提高，切削加工性能有所提高。

1.7.6 舰船铸造铝合金 ZL101

表 1　ZL101 合金的热导率及比热容

温度,℃	-25	100	200	300	350	400
热导率,W/(m·℃)	151	155	163	168	-	168
比热容,J/(kg·℃)	-	880	922	1000	1050	-

表 2　ZL101 合金单铸试样的标定(GB/T9438)最低力学性能

铸造方法	状态	抗拉强度,N/mm²	伸长率 A_5,%	布氏硬度,HB
S,R,J,K	F	135	2	50
S,R,J,K	T2	135	2	45
JB	T4	185	4	50
S,R,K	T4	175	4	50
J,JB	T5	205	2	60
S,R,K	T5	195	2	60
SB,RB,KB	T5	195	2	60
SB,RB,KB	T6	225	1	70
SB,RB,KB	T7	195	2	60
SB,RB,KB	T8	155	3	55

表 3　ZL101 合金的热处理制度

状态	固溶处理				时效处理		
	温度℃	保温时间 h	冷却介质及温度,℃	最长转移时间,s	温度℃	保温时间 h	冷却介质
T2	–	–	–	–	290~310	2~4	空冷或随炉冷
T4	530~540	2~6	60~100 水	25	室温	≥24	–
T5	530~540	2~6	60~100 水	25	145~155	3~5	空气
T6	530~540	2~6	60~100 水	25	195~205	3~5	空气
T7	530~540	2~6	60~100 水	25	220~230	3~5	空气
T8	530~540	2~6	60~100 水	25	245~255	3~5	空气

舰船铝合金在海洋与江河湖泊环境中工作，要求有高的抗腐蚀性能，因此都是含镁的铸造铝合金，如 Al-Si-Mg 系的 ZL101（AC4C）、ZL101A（AC4CH）、ZL104（AC4CA），Al-Mg 系合金 AC7A、Al-Cu-Si-Ni-Mg 系合金 AC8A，美国的 356 及 A356 合金。

Al-Si-Mg 系合金具有良好的铸造性能与中等强度，适宜铸造比较复杂、致密性高的铸件，如柴油机汽缸体、减速箱壳体、高压阀件、泵、鱼雷壳、涡轮叶片及其他壳体等。代表性的合金如上所述。

含镁量低于 8%铝-镁合金具有良好的抗腐蚀性能，较低的强度和相当好的铸造性能，适于铸造在海洋环境中工作的铸件和压阀件等，代表性的合金有美国的 514、535 合金，日本的 AC7A 合金等。

含镁量为10%的固溶强化型合金的抗拉强度Rm达300N/mm2，抗腐蚀性能良好，用于铸造承受较大载荷零件，如弦窗、手柄、海水泵壳体、水泵导管及支柱等，典型的合金如美国的518、520、X250等。

日本的AC8A合金是一种成分复杂的Al-Si-Cu-Ni-Mg系合金，用金型铸造零件，不但有高的抗蚀性能，而且有良好的耐磨性、高的耐热性与低的线膨胀系数。活塞、轴承等可用此合金铸造。

ZL101合金与日本的AC4C合金相当，为可热处理强化的Al-Si-Mg系铸造铝合金，具有良好的铸造工艺性能，即有高的流动性、气密性和低的热裂倾向，还具有良好的抗腐蚀性能和可焊接性能，是一种应用广泛的铸造铝合金，适于砂型、金属型、熔模壳型和石膏型等铸造形状结构复杂、壁厚较薄或要求气密性的承受中等载荷的种种零件，如舰船结构零件、仪器仪表附件、发动机零件、燃油泵壳体等。

ZL101合金可在不同热处理状态下应用。铸造方法、铸件尺寸大小和复杂程度一般不受限制。

ZL101合金的标定（GB/T1173）化学成分（质量%）：Si6.5~7.5，Mg0.25~0.45，砂型及熔模壳型铸造Fe0.5，金型铸造Fe0.9，Mn0.35，Zn0.3，Cu0.2，Pb0.05，Sn0.01，

Be0.1，（Ti+Zr）0.25，砂型杂质总和 1.1，金型杂质总和 1.5，Al 其余。

Mg 是该合金的主要合金化元素，在熔炼过程中易烧损，应根据镁的实际烧损量和对合金力学性能要求，确定适当的配料加入量。ZL101 合金化学成分简单，铸造工艺性能好，适于各种铸造方法，但易出现针孔缺陷，应充分精炼除气、除渣、在浇注过程中保持熔体平稳流动，防止二次夹杂。

可在不同加热方式（电阻、重油、天然气和感应等）的炉内熔化。ZL101 合金在熔炼过程中易吸收氢气，使铸件形成针孔，因此应注意保持炉料洁净、干燥，工具和熔剂应充分烘烤除水。熔炼温度一般不超过 750℃，熔化后保持时间应尽可能短，浇注温度 680℃~750℃。

为除去合金熔体中的氢和夹杂物，应进行有效的精炼，常用的精炼剂有氯、氯-氮混合气、氮、氩、四氯化碳液体、六氯乙烷、六氯乙烷+氟硅酸钠、六氯乙烷+二氧化钛等。精炼剂用量根据炉料洁净程度和环境条件确定。六氯乙烷的通常用量为炉料质量的 0.5%~0.7%。氯是一种对环境与人体有毒的有害气体，应少用或不用。

为了改善合金的力学性能，可采用钠盐、磷盐、锑、及锶等进行变质处理，细化合金的共晶组织，用微量的钛、硼、锆等元素细化晶粒。常用的钠盐变质剂为

30%NaF+50%NaCl+10%KCl+10%Na3AlF6，用量为炉料质量 2%~3%，变质处理时熔体温度为 710℃~750℃；锶变质剂加入量为 0.04%~0.05%炉料质量。

物理化学性能

ZL101 合金的液相线温度 610℃，固相线温度 577℃，热导率及比热容见表 1。线膨胀系数（X10-6/℃）：20℃~100℃的 21.8，20℃~200℃的 22.7，20℃~300℃的 23.8，100℃~200℃的 23.6，200℃~300℃的 26.0。

ZL101 合金的密度 2660kg/m3，无磁性，20℃时电阻率 45.7nΩ·m；具有优良的耐大气腐蚀和抗应力腐蚀性能，可在海洋气候条件和工业气氛中使用，不需要表面保护，在大气条件下暴露 5 年后，抗拉强度仅下降 1%~3%。铜和铁是降低抗腐蚀性能的主要杂质元素。

力学性能

ZL101 合金的标定（GB/T9438）力学性能见表 2。铸造方法代号：S——砂型铸造，J——金型铸造，R-熔模铸造，K——壳型铸造，B——变质处理。状态代号：F——铸造状态，T1——人工时效，T2——退火，T4——固溶处理+加工人时效，T5——固溶处理+不完全人工时效，T6——固溶处理+完全人

工时效，T7——固溶处理+稳定化处理，T8——固溶处理+软化处理。

ZL101-15 合金砂型铸件的高温持久强度 R100:200℃时的 59N/mm2，250℃时的 44N/mm2，300℃时的 27N/mm2。合金的高温蠕变强度 R3000.2/100=12N/mm2。

ZL101 合金固溶处理后具有自然时效倾向，其硬度随着时效时间的延长而上升，但人工时效时，它的强度与硬度却随着时效时间的延长而下降，而伸长率则上升。合金的热处理制度见表 3。

对于形状简单的中小铸件，可在水温较低（＜45℃）的水中淬火，而形状复杂易变形的铸件应在沸水、热水或 CL-1 有机液中淬火，以降低内应力和防止铸件变形或产生裂纹。

对于长期工作且要求尺寸稳定的高精度铸件，经固溶处理后可采用冷热循环处理消除其中的内应力。ZL101 合金在非平衡状态结晶的组织由α -Al+Si+Mg2Si 组成。由于 Fe 的存在，有片状的β （Al9Fe2Si2）杂质相和骨骼状的 Al8FeMg3Si6 杂质相。共晶体中的 Si 相在变质后由片状或针状转变为颗粒状。固溶处理后 Mg2Si 相溶入α -Al 基体中，而在时效时有呈弥散状的介稳相（GPⅠ、GPⅡ或β ’）析出，是合金的主要强化相。三元共晶（α -Al+Mg2Si+Si）的熔点 550℃，二元共晶（α -Al+Si）的熔点 577℃。热处理过烧时 Si 相聚集变粗，出现圆形或三角形共晶复熔体。

工艺性能

ZL101 合金浇注温度 680℃~750℃，铸造工艺性能优良，用 700℃浇注砂型棒状试样测定的流动性为 350mm，环形试样元热裂倾向；合金的线收缩率 1.1%~1.2%，体收缩率 3.7%~4.1%；SB 试样有很高的气密性。

ZL101 合金组织和力学性能因浇注温度、冷却条件、铸件断面等因素的不同而有所差别：随试样直径增加其拉伸性能下降，T6 状态铸造试板拉伸性能均随与冷铁距离的增大而全面下降；在凝固过程中，由于补缩条件不好会形成海绵状疏松或分散疏松，随着这些缺陷严重程度的增加，合金的性能随之下降。

如果合金熔体中含有一定量的氢，在凝固补缩条件又不好的情况下而形成长型针孔时，对合金的拉伸性能有相当大的影响，通常长形针孔严重程度每升高一级，抗拉强度 Rm 下降约 6%，而伸长率下降约 11。ZL101 合金可焊性良好，通常采用氩弧焊，也可以采用气焊、碳弧焊、原子氢焊等，但不推荐钎焊。

在用焊接工艺修补铸件缺陷，宜采用相同成分的焊丝作为填充金属。用于修复或装配则宜用 Al-Si 合金 4A01 作为填充金属，可使裂纹敏感性降至最低。铸造缺陷经补焊修复后，如果不经重新热处理，则补焊处的力学性能明显下降，经重

新热处理后，其性能可与基体的一致。

在通常大气条件下 ZL101 合金具有足够的抗腐蚀性能，可不进行表面防护处理。为提高抗腐蚀性能和耐摩性可进行硫酸、铬酸、草酸阳极氧化处理，或硬质阳极氧化处理。为了满足特殊用途还可以进行电镀及搪瓷喷漆等表面处理。

1.7.7 舰船用量最多的铸造铝合金 ZL101A

表 1 ZL101A 合金的热导率及比热容

温度，℃	25	50	100	200	300
热导率，W/(m·℃)	151	—	155	163	168
比热容，J/(kg·℃)	—	849	889	945	984

表 2 ZL101A 合金的标定(GB/T1173)最低力学性能

铸造方法	状态	抗拉强度，N/mm²	伸长率 A_5,%	布氏
S，R，K	T4	195	5	
J，JB	T4	225	5	
S，R，K	T5	235	4	
SB，RB，KB	T5	235	4	
JB，J	T5	265	4	
SB，RB，KB	T6	275	2	
JB，J	T6	295	3	

表 3 ZL101A 合金的热处理制度

状态	固溶热处理				人工时效		
	温度，℃	时间，h	淬火转移时间，S	淬火介质及温度	温度，℃	时间 h	冷
T4	535±5	6~12	8~30	生产厂可根据零件结构自行确定	—	—	空
T5	535±5	6~12			室温+155±5	≥8 2~12	
T6	535±5	6~12			室温+180±5	≥8 3~5	

ZL101A是Al-Si-Mg系可热处理强化的铸造铝合金，是在船舶舰艇制造中获得广泛应用的铸造铝合金之一，它是ZL101合金的改型。通过采用高纯度原材料降低合金的各种杂质含量，添加微量晶粒细化元素和调整合金元素镁的含量，使合金具有更高更好综合性能。合金的铸造工艺、可焊性能、抗腐蚀性能等与ZL101合金的大致相同，适于砂型、金属型、熔模壳型及石膏型制造形状复杂、要求气密性的各种优质铸件。

ZL101A合金的化学成分(GB/T1173,W%)如下：Si6.5~7.5，Mg0.25~0.45，Ti0.08~0.20，Fe0.2（S、J），Cu0.1，Zn0.1，Mn0.10，Zr0.20，Sn0.01，Pb0.03，杂质总和（S、J）0.7，其余为Al。

ZL101A合金与日本的AC4CH、美国的A356合金相当，一般在T4、T5、T6状态使用。铸造方法、铸件尺寸和复杂程度不受限制，经T6工艺处理的铸件具有高的强度。为满足优质铸件高力学性能的要求，应严格控制合金元素含量。

该合金主要用于制造要求有高力学性能的金属型铸件，但在熔炼操作和铸造工艺上应注意精练除气和熔体的平稳流动，防止出现针孔缺陷和二次氧化夹杂物。

熔炼铸造工艺

合金铸造温度680℃~750℃，液相线温度610℃，固相线

温度577℃，有优良的铸造工艺性能，用700℃砂型浇注棒状试样测定的流动性为370mm；具有高的气密性，在5.0N/mm2的试验压力下，试样裂而不漏，在713℃浇热裂试样无裂纹，线收缩率1.1%~1.2%，体收缩率为3.7~3.9%。

ZL101A合金凝固时，因冷却速度不同，其拉伸性能也不同。冷却速度快性能高，否则性能低。

物理化学及力学性能

ZL101A合金的密度2690kg/m3，热导率及比热容见表1；20℃~100℃的线膨胀系数22.9×10-6/℃，20℃~200℃的23.6×10-6/℃，100℃~200℃的24.3×10-6/℃；20℃时的电阻率44.6nΩm；无磁性。

该合金表面极易形成致密的氧化膜，可防止在空气中进一步氧化。抗腐蚀性能良好，接近纯铝的，在没有表面防护的情况下，可以在沿海气候和工业气氛条件下使用，是铸造海洋设施零件的良好材料，并有较好的抗应力腐蚀能力，在实际使用和在实验室内用3.5%NaCl溶液交替浸蚀均没有出现应力腐蚀破坏现象；耐大气腐蚀性能良好，通常不需要表面防护处理，但为了提高抗腐蚀性和耐磨性，可以采用阳极氧化处理，如有特殊要求，还可以进行其他的防护处理，如电镀、珐琅涂层、喷漆等。

ZL101A合金的标定（GB/T1173）最低力学性能见表2，

ZL101A-T5合金室温S型铸件的抗压屈服强度为265N/mm2，T6状态J型铸件的为294N/mm2；S型单铸试样（T5）的抗剪强度186N/mm2，T6状态的为193N/mm2；ZL101A-T6合金J型铸造试板的平面应变断裂韧度KIC=24.8（N/mm2）。

热处理

ZL101A合金的显微组织与ZL101合金的基本相同，由于杂质的Fe的含量≤0.2%，不会形成大块的含Fe化合物，因而力学性能比ZL101合金的高一些。

该合金的热处理制度见表3，固溶处理保温时间在规定范围内时，除考虑铸件壁厚外，砂型的熔模铸件的应比金属型铸件的长。人工时效温度和时间的选择应考虑铸件验收标准对力学性能要求、采用的铸造方法及合金的实际化学成分等因素。

对长期工作，要求尺寸稳定的高精度零件，固溶处理后可进行冷热循环处理消除内应力。

工艺特性

ZL101A合金的熔炼和铸造工艺与ZL101合金的基本相同，主要差别在于杂质含量，为此，生产ZL101工合金时，应选用杂质低的原材料配料，尤其是铁的含量。为减少合金中铁含量，宜选用非铁坩埚和工具。

ZL101A合金可焊性能良好，通常采用氩弧焊，也可以采用其他焊接方法，如气焊等，但钎焊不宜。对于铸造缺陷的焊补修 复，最好采用成分相同的焊丝作为填充金属。铸造缺陷经补焊修复后，如果不进行重复热处理，则补焊处力学性能明显下降，重复热处理后，其力学性能可大致与基体的性能相当。

该合金有相当强的抗大气腐蚀性能，通常不需要防护处理，但为了提高抗蚀性，也可以进行阳极氧化处理，在特殊情况下，可进行电镀、上珐琅、喷漆处理。

ZL101A合金的切削加工性能良好，但由于合金的含硅量较高，对刀具有一定的磨损，宜采用硬质合金刀具，为保证钻孔、攻丝、磨削的加工光洁度，切削时应使用煤油或其他润滑剂进行冷却与润滑。

1.7.8 舰船铝合金列传（一）

铝合金可分为变形的和铸造的两大类，前者用于塑性变形加工各种半成品——板、带、箔、管、棒、型、线、锻件，后者用于铸造各种压铸与铸造产品，变形铝合金在舰船制造中的应用更为广泛。由于铝合金具有比强度高、抗海水腐蚀性强、可焊接、易加工成形、无低温脆性、无磁性等特点，在造船中的应用可有效减轻舰船质量、提高稳定性、增大航速等。因此，铝合金已成为当前舰船制造主要结构材料之一。

变形铝合金在各国造船中的应用，从大型水面舰船上层建筑，上千吨级的全铝海洋研究船、远洋商船和客船的建造，到水翼艇、气垫船、旅客渡船、双体客船、交通艇、登陆艇等各类高速客船和军用快艇上都使用了一些变形铝合金。

铸造铝合金主要用于泵、活塞、舾装件及鱼、水雷壳体等零部件，水雷（鱼雷）壳体最好用超强度硬铝 7xxx 系合金挤压无缝厚壁管制造，它们的发射管也可用铝合金管制造。

舰船铝合金用量

目前，铝在船舶舰艇制造中的用量不多，就全世界来说，其用量仅占 2013 年铝消费总量的 1.7%左右。2012 年，日本国内轧制铝材消费量 974.4kt，其中交通运输消费量 159.0kt（汽车工业 139.0kt，占 87.42%）；挤压铝材国内消费量 784.5kt，其中交通运输消费量 141.9kt（汽车工业 131.6kt，占 92.94%kt），这两种铝材在交通运输领域的用量占总消费

量的 17.11%，而汽车工业的用量则占交通运输用材的 89.93%，航空工业与船舶工业的用量仅占 10%，日本是一个航空航天工业不发达的国家，所以在交通运输用的铝材中，船舶工业的用量估计也仅占 6%左右。今后，铝在船舶舰艇中的用量会有较大增长，但 2025 年前的年平均增长率不会超过 7.5%。

日本工业标准(JIS)规定的船用铝合金化学成分(质量%)

类别	合金	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
船体用	5051	0.25	0.40	0.10	0.10	2.2~2.8	0.15~0.25	0.10	–
	5083	0.40	0.40	0.10	0.4~1.0	4.0~4.9	0.05~0.25	0.25	0.15
	5086	0.40	0.50	0.10	0.2~0.7	3.5~4.5	0.05~0.25	0.25	0.15
	5454	0.25	0.40	0.10	0.5~1.0	2.4~3.0	0.05~0.2	0.25	0.20
	5456	0.25	0.40	0.10	0.5~1.0	4.7~5.5	0.05~0.2	0.25	0.20
	6061	0.4~0.8	0.70	0.15~0.4	0.15	0.8~1.2	0.04~0.35	0.25	0.15
	6N01	0.4~0.9	0.35	0.35	0.25	0.4~0.8	0.30	0.25	0.10
	6082	0.7~1.3	0.50	0.10	0.4~1.0	0.6~1.2	0.25	0.20	0.10
舾装用	1050	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	–	0.05	0.03
	1200	(Si+Fe)	1.0	0.05	0.05	–	–	0.10	0.05
	3203	0.6	0.70	0.05	1.0~1.5	–	–	0.10	–
	6063	0.2~0.6	0.35	0.10	0.10	0.45~0.9	0.10	0.10	0.10
	AC4A	8.0~10.0	0.55	0.25	0.3~0.6	0.3~0.6	0.15	0.25	0.20
	AC4C	6.5~7.5	0.55	0.25	0.35	0.25~0.45	0.10	0.35	0.20
	AC4H	6.5~7.5	0.20	0.25	0.10	0.2~0.4	0.05	0.10	0.20
	AC7A	0.20	0.30	0.10	0.6	3.5~5.5	0.15	0.15	0.20
焊条	4043	4.5~6.0	0.80	0.30	0.05	0.05	–	0.10	0.20
	5356	0.25	0.40	0.10	0.05~0.2	4.5~5.5	0.05~0.2	0.10	0.05~0.20
	5183	0.40	0.40	0.10	0.5~1.0	4.3~5.2	0.05~0.2	0.25	0.15

注：1.AC4A 及 AC4C 合金的 Ni 和 Pb 应分别≤0.10%，Sn≤0.05%；AC4H 和 AC7A 合金的 Ni、Pb 和 Sn 应分别≤0.05%；2.舾装部合金还包括 5052。

舰船铝合金化学成分

铝合金材料从 1891 年在船、舶、舰、艇上应用以来，经过 120 多年的发展，其应用越来越广泛，并成为造船工业很有发展前途的材料之一。最早应用与舰船上的铝合金为 Ni 的铝-铜系合金，继而采用的为 Al-Cu-Mg 系合金，但它们的主

要缺点是抗腐蚀性能差，因而限制了其应用。

上世纪 30 年代，开始采用 6061-Tb 合金，并用铆接法制造船体；40 年代开发出了可焊接耐蚀的 5xxx 系合金，50 年代开始采用钨惰性气体（TIG）焊技术，这一时期铝合金在造船上的应用进展很快；60 年代，美国海军先后开发出属于 Al-Mg 系合金的 5086-H32 和 5456-H321 合金板材、5086-H111 和 5456-H111 合金挤压型材，由于采用了 H116 和 H117 状态，消除了沿晶沉淀网膜，解决了它们的剥落腐蚀和晶间腐蚀问题，这是在舰船铝合金开发方面取得的重大进展。随后，由于需要屈服强度更高的材料，于是在造船中又广泛应用了耐海水腐蚀性能良好的 6xxx 系合金，在相当长的一段时间内，船体铝合金主要在 5xxx 系合金和 6xxx 系合金中选择，而苏联则较多地选用 2xxx 系合金作为快艇壳体材料。近年来对中强可焊的 7xxx 系合金的研究日暂增多，并取得一些进展，已在造船中得到应用和发展。

70 年代以后，船舶结构的合理化和轻量化越来越被重视，大型舰船的上层建筑和舾装件开始大量使用铝合金。为此，这一时期开发出许多上层建筑和舾装用铝合金，其中包括特种规格的挤压型材、大型宽幅挤压壁板和铸件等。

在日本主要用 5083、5086 及 6N01 合金，而结构上使用的几乎全为 5083 合金，但应控制镁含量在 4.9%以下，以防应力腐蚀开裂（SCC），但美国也用 5456 合金，其镁含量比

5083 合金的高，不过应采取防止应力腐蚀的热处理措施。

舰船铝合金可分为船体结构合金、舾装合金和焊接填加合金，日本造船用的 JIS（日本工业标准）铝合金的化学成分见表。目前，在船壳结构上用的铝合金主要是 5083、5086 和 5456。

1.7.9 舰船铝合金列传（二）

Al-Zn-Mg 系舰船合金的化学成分(质量%)

合金	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	其他杂质	
										每个	总
7004	0.25	0.35	0.05	0.20~0.7	1.0~2.0	0.05	3.8~4.6	0.05	0.10~0.20	0.05	0.
7005	0.35	0.40	0.10	0.20~0.7	1.0~1.8	0.06~0.20	4.0~5.0	0.01~0.6	0.12~0.25	0.05	0.
7039	0.30	0.40	0.10	0.10~0.40	2.3~3.3	0.15~0.25	3.5~4.3	0.10	-	0.05	0.

Al-Mg-Si 系合金即 6XXX 系合金由于在海水中会发生晶间腐蚀，所以主要用于舰船的上层建筑，日本多用 6N01-T5 材料（牌号中的 N 代表日本，是 Nippon 的缩写），而美国及欧洲则主要用 6061-T6 合金大型薄壁型材，中国这两种合金都用。

在舾铝合金中，经阳极氧化处理的 6063-T5 合金挤压型材主要用于框架结构，欧洲造船业则多用 6082-T5 合金，这两种合金既有极好的可挤压性能，又有极佳的阳极氧化性能，

还可以在积压生产线上淬水，这对提高生产效率与降低生产成本大为有利。H14、H24 的工业纯铝及 3203 合金等板材主要用于舱室内壁等内装结构，铸造性能优良的 AC4A 和 AC4C 合金铸件主要用于舾装件。AC7A 合金具有很强的抗腐蚀性能，可推广在舰船中的应用，不过其缺点是，铸造性能不尽人意。锻件成本高，在舰船上的应用不多。

中强 Al-Zn-Mg 系合金热处理后的强度和工艺性能比 Al-Mg 系合金的优越，并且可焊性能好，还有相当强的抗腐蚀性，对造船业也有很大的吸引力。例如舰船的上层建筑可以用 7004 合金和 7005 合金制造（表 1），装甲板可用 7039 合金。此外该系合金可以用于制造涡轮、引导装置、容器顶板和侧板等。但是，无铜 Al-Zn-Mg 系合金的缺点是对应力腐蚀开裂相当敏感，而且焊缝的应力腐蚀开裂、剥落腐蚀和存放裂纹的敏感性也是相当大的。

这 3 个 7XXX 系合金都是美国原创的合金，分别于 1964 年及 1962 年（7005 及 7039）在美国铝业协会公司注册。7004 年合金于 2005 年派生出 7204 合金，是日本神户钢铁公司研发的，与原型合金不同的是，它的成分普遍高了一些，因而其力学性能也略高一些，其他的性能相同，它的成分（质量%）：Si0.30，Fe0.35，Cu0.20，Mn0.20~0.7，Mg1.0~2.0，Cr0.30，Zn4.0~5.0，Ti020，Zr0.25，其他杂志单个 0.05，总计 0.15，其余为 Al。

Al-Zn-Mg 系合金有良好的可焊接性能，用他们制造舰船结构域上层建筑时，最好采用摩擦搅拌焊（FSW）这是一种先进的非熔化焊接工艺，是一种绿色焊接法，既不排放室温气体，又无粉尘纷飞。它是英国焊接研究所（TWI）与 1992 年取得专利，1999 年挪威萨帕铝业公司（SAPA，2013 年改为格朗吉斯铝业公司 Granges）首次进行了商业生产，现在此法已成为铝及铝合金最先进的连接工艺，也可以焊接镁、铜、钢等金属，中国已完全掌握了此项技术及其成型套设备制造。在当前中国对 FSW 有两种译法，一种为摩擦搅拌焊，另一种为搅拌摩擦焊，前者是对的，后者是错的，无论从英语语法习惯来说，还是从其工作原理来说，译为“搅拌摩擦焊”都是错误的，遗憾的是中国当前在 90%以上的场合都用“搅拌摩擦焊”。希望今后能改过来，至少在正式出版物中不要再用“搅拌摩擦焊”这一错误的技术术语。

摩擦搅拌焊的焊缝组织为塑性流变形的，其性能与母材的几乎完全相当，可以焊接 150mm 厚的工件，不但可以进行直线焊，还可以在计算机的引导下进行智能焊接，焊缝无余高。

1.7.10 聊聊海洋气氛对铝的腐蚀

铝的海洋腐蚀是指铝及铝合金在海水，海洋气氛和工业-海洋大气中所发生的腐蚀行为。腐蚀是物质在环境作用和影

响下所发生的破损和变质。腐蚀给人类造成了严重的危害，腐蚀造成的直接损失为国民经济年生产总值的 1%~3.5%，在各种天灾人祸（火灾、地震、火灾等）中，腐蚀造成的损失不容忽视，居首位，而且这种损失较为隐蔽，不显山，不显水，不易引起人们重视。2015 年中国 GDP 为 676708 亿元，如果按 2.5%估算当年的直接腐蚀损失就达 16918 亿元，真是不算不知道，一算就会吓一跳，让人深感惊悸。

铝及大多数铝合金有相当高的抗蚀性，因为在空气中能极为迅速地在它们的表面上形成一层薄薄的致密的 A1203 膜，其厚度仅 5nm，颜色与铝相同。通常，氧化膜在 PH4.0~9.0 的溶液中是稳定的，而且在浓硝酸（PH=1）和浓氢氧化铵（PH=13）中也是稳定的，铝及工业纯铝表面被机械损伤后，会立即在受伤处表形成新的氧化膜，不会发生进一步的腐蚀。

铝的电位在很大程度上决定于氧化膜的绝缘性能，因此，凡是能改善氧化膜致密性、增加氧化膜厚度、提高氧化膜绝缘性能的因素，通通提高抗蚀性。反之，凡是降低氧化膜有效保护能力的因素，不管是机械的，还是化学的，都会使铝及铝合金的抗蚀性急剧下降。

铝合金的腐蚀比纯铝的严重，但是也有少数例外。铝及铝合金在空气、酸与自来水中的耐蚀性能按以下次序增减：Al，Al-Mn 合金（3XXX 系合金），Al-Mg 合金（5XXX 系合金），

Al-Mg-Si 合金（6XXX 系合金），Al-Si 合金（4XXX 系合金），Al-Zn-Mg 合金（7XXX 系合金），Al-Zn-Mg-Cu 合金（7XXX 系合金），Al-Cu-Mg（2XXX 系合金），Al-Cu 合金（2XXX 系合金）。在碱性溶液与海水中的递降次序是：Al-Mg 合金（5XXX 系合金），工业纯铝（1XXX 系合金），Al-Mn 合金（3XXX 系合金），Al-Mg-Si 合金（6XXX 系合金），Al-Zn-Mg 合金（7XXX 系合金），Al-Si 合金（4XXX 系合金），Al-Zn-Mg-Cu 合金（2XXX 系合金），Al-Cu-Mg 合金（2XXX 系合金），Al-Cu 合金（2XXX 系合金）。不过应注意的是，上述排列次序是大致的，同时，只有当剥落腐蚀、晶间腐蚀或应力腐蚀敏感的合金施加热处理，消除敏感性后，这种排列顺序才成立。

包铝材料（alclad）是指在合金板材的一个表面或两面轧制包覆了一层工业纯或 Al-Zn 合金，例如 2XXX 系合金外面包覆的是 1A50 合金，在 7XXX 合金表面包覆的是 7A01 合金，它是含 0.9%~1.3%Zn 的二元 Al-Zn 合金。包覆层合金的电位比芯层合金的更负，可对芯层合金起电化学保护作用。

海洋大气对铝的腐蚀

海洋大气的主要特点是含有大量盐分。由于海浪及大风将海水带入大气中，水分经过蒸发，并由季风或台风吹到陆地，使低空大气中的含盐量增加，并且与海边距离大小有很大关系。同一地点室内外盐雾含量也有很大差别，后者可比

前者大 4~6 倍。同一地区，离海较近的郊区室外与市区室内的可相差 10 倍左右。

氯及氯化物是海洋大气的主要杂质之一，它们的含量多少对铝的腐蚀有很大影响，例如 2024 及 7075 合金在洁净大气中是抗腐蚀的，可是大气的含氯量＞1.0%后，它们的腐蚀速度就急剧上升，特别是当相对湿度 RH（relative humidity）大于 65%后。

靠海越低，海雾的氯化物含量越高，在该环境中的铝结构腐蚀也越严重，氯化物加速铝及铝合金的点蚀、应力腐蚀、晶间腐蚀和缝隙腐蚀。人汗既含盐分又含尿素、乳酸，它们都是腐蚀铝及铝合金的介质，因此在搬运、加工、装配铝材及铝结构时应戴手套。

中国海南省榆林地区不同地点不同粒度盐雾含量见表 1，福州、舟山、青岛不同地点的大气盐雾含量见表 2。

1.7.11 铝合金舰船与海洋设施腐蚀（一）

纯铝的化学性质很活泼，因为其标准电位很负，为-1.67V，但是由于它能与空气中的氧生成致密的钝化三氧化二铝（Al2O3）薄膜，隔绝了空气与铝的接触，阻碍铝的继续氧化，所以纯铝具有良好的抗蚀性。不过，纯铝的强度太低，不可能用作船体材料，向纯铝中添加合金元素 Mg、Cu 等，形成

5XXX 系合金、2XXX 系合金，就可以作为造船合金了。但是，不论铝合金用于制造船体哪个部位的零部件都或多或少会与海水接触或受到海水飞沫的侵袭。

海水是一种导电性良好的电解液，其电导率 2.5×10-2/（Ω·cm）~3.0×10-2/（Ω·cm）。海水氯离子含量高，对大多数金属结构与设施都有腐蚀作用。同时海洋的掀波与自然对流产生不断的机械搅拌，使得表层海水度气与被氧饱和。因此，在海水中在金属-液体这两个相界上的腐蚀通常很强烈。虽然铝合金在空气中有自钝化能力，但是在海水中，氯离子能破坯铝表面上的 A1203 保护膜，使铝合金腐蚀。

2000 年以前，船体还有用 2024 型合金制造的，现在则几乎全用 5XXX 系的 5083 合金制造，上层建筑等则多用 5XXX、6XXX、3XXX 及 7XXX（不含 Cu）系合金制造。

在美国 1955 年开始用 5083 合金焊接拖轮（tug），首条长 16.8m，往返于海湾（Gulf Coast）-大西洋群岛（Atlantic inland），以后又焊制一批长 4.2~45m 的全铝工作艇、拖网渔船（Salmon gill netter）、军用与美国鹜卫队巡罗艇（U.S.Coast Guard）、以及为在墨西哥湾石油钻井平台服务的船、旅客渡船与游览船。

在直到 2005 年为止的 50 年内，这些铝合金船仅发生 2 起严重的腐蚀事件：一起发生于 1968 年，在越南内河服务的

一艘高速巡逻艇的艇体发生了严重的剥离腐蚀。美国铝业协会腐蚀技术委员会（The Aluminum Association rechnical Committee on corrosion）对这起腐蚀作了深入的研究，认为是由于 5083 合金厚板加工工艺与热处理不当造成的，形成了不好的显微组织，晶粒边界有连续的沉淀相 Mg2Al3，引起电池反应，造成晶界腐蚀（IG Corrosion）。他们认为，材料显微组织形貌也对这种腐蚀起了相当大的加速作用，厚板的晶粒沿轧制方向被拉得长长的，断面上也就是说整个厚板为非再结晶组织，是产生剥离腐蚀的温床，如果为等轴的再结晶组织则仅发生点腐蚀。有些厚板有二种显微组织，表层为再结晶组织，而中间层为晶粒沿轧制方向伸长的非再结晶组织，在实验室进行盐水喷洒试验时，中间层试样经 14d 试验后发生剥离腐蚀，而厚板表层发生晶间腐蚀。

1972~1990 年代，北美用 5086-H32 合金或 5086、5083、5456-H116 合金制造了一批批舰船再也没有发生这两种腐蚀。2000~2002 年，也就是说约 30 年后美国太平洋西北地区的造船企业用了大量成本较 5083-H116 合金板材低的 5083-H321 合金板材不适合制造海域舰船，但造船厂不顾这种提示，仍然制造了一批，几个月后对 400 艘舰船作了检查，发现有一些出现了应力腐蚀开裂，其原因仍是显微组织不合格，对应力腐蚀敏感。自此以后，美国铝业协会、欧洲和澳大利亚的

有关标准都规定，凡是用于制造船舶舰艇的 5083、5456、5086 等合金必须消除对晶间腐蚀、剥离腐蚀和应力腐蚀开裂敏感的显微组织，5083、5086、5383、5456 及 5059-H116、-H321 合金材料还必须通过 ASTM B928 试验。

新世纪以来，美国太平洋西北地区和中西部地区用符合 ASTM B928 标准的 5XXX 系合金制造了近 300 艘全合金舰艇，都完好无损，它们的长度为 15.3~53.4m，其中一艘用 5XXX 系合金厚板制造的处于完工工段游艇的艇头断面。

1.7.12 铝合金舰船与海洋设施腐蚀（二）

表 1 D16AT 合金去包铝层试样经 45d 腐蚀后力学

力学性能	全浸	值
抗拉强度 Rm 损失，%	7.9	
屈服强度 $R_{p0.2}$ 损失，%	62.0	3

表 2 铝合金及造船钢全浸于 3%NaCl 溶液中 9 个月后力学性能变化

合金	质量损失 g/(h·m²)	腐蚀前性能			腐蚀
		抗拉强度 N/mm²	屈服强度 N/mm²	伸长率 %	抗拉 N/m
Al-5Mg 合金，退火	0.0058	28.6	14.5	22.3	无
Al-7Mg 合金，退火	0.0051	24.6	14.9	7.0	25.8
不包铝的 2024 合金	0.0011	36.2	27.6	5.5	17.0
包铝的 2024 合金	0.0054	46.2	26.8	18.1	无
造船钢	0.024	45.8	24.1	24.0	2.0

上世纪 60 年代早中期船体大都是用 2024 型合金制造的，当下 90%左右舰船体大都是用 5XXX 系合金特别是 5083 合焊制的。

2XXX 系合金（硬铝）在海水中的腐蚀

硬铝的抗蚀性比较低，主要是因为含 Cu。有人在一艘硬铝壳艇上用挂片试验 16 天后，发生了十分严重的点腐蚀。苏联学者用 D16AT 合金去包铝层后试样试验 45 天后，其强度的损失见表 1，屈服强服 Rp0.2 的损失成为显著。

由表中数据可以看出，没有包铝层的 D16AT 合金板在海水中遭到严重腐蚀，然而有包铝层的腐蚀却轻得多。因为包铝层不但起着保护合金的作用，而且还起着电化学保护作用，对 2XXX 系合金来说，1XXX 系合金包铝层呈阳极，能确保 2XXX

系合金免于腐蚀破坏。有时即使局部包铝层脱落或遭受机械损伤，也不会引起合金腐蚀，因为其他部位的包铝层仍在起电化学保护作用。这就是说硬铝与超硬铝抗蚀性的先天不足，可以通过后天调理改善。

5XXX 系合金的海水中的腐蚀

在铝合金中最耐海水腐蚀的是 5XXX 系合金，在海水中的腐蚀速度十分缓慢，它们的抗腐蚀性能与含镁量有关。含 Mg 量≤5%的合金具有足够好的抗腐蚀性能；含 Mg 量＞5%的合金如热处理（退火）不当均有晶间腐蚀和应力腐蚀开裂倾向。

5XXX 系合金、2024 合金和造船钢全浸于 3%NaCl 溶液中 9 个月后力学性能变化见表 2，铝-镁合金的抗蚀性比硬铝 2024 合金及造船钢的强得多，不但质量损失很少，而且力学性能损失小，这说明以铝-镁合金制造船体有明显的优越性。

美国学者 C.W.西维奥的研究指出，把 5083 合金（含 4.0%~4.9%Mg，是一个美国合金，上世纪 30 年代后期定型）和 5086 合金（含 3.5%~4.5%Mg，也是一个美国合金，上世纪 40 年代初定型，当时的牌号为 86S）及一些其他合金沉浸于海水中，没有采取任何保护措施，6 年后 5086-H34 合金试样腐蚀坑的最大深度 0.86mm，但没有大的强度损失；另一项试验是将未焊接与焊接的 5086 和 5083 合金板材部分和全部浸入佛罗里达州对托那滨海水中 5 年和 7 年。5 年后，全浸的

未保护焊缝 5086 和 8083 试样的强度损失都可以忽略不计，几乎没有发现腐蚀坑，并且最大腐蚀坑深度也只有 0.38mm。在部分浸渍试样，3.2mm 厚未焊 5086 和 5.83 合金薄板，不管沉浸条件如何，其强度损失都可以忽略不计，这充分说明 5086 和 5083 合金保持着固有抗海水应力腐蚀能力。

1.7.13 铝合金舰船与海洋设施腐蚀控制

铝及铝合金的腐蚀类型及其防护措施前已述及，现在谈谈舰船与海洋设施铝构件、结构的防腐措施：合金及状态选择、设计、有机涂层、缓蚀剂、阴极保护、增厚表面氧化膜、改善环境等。

合金及状态选择

在选用合金时，首先考虑的是材料力学性能、可焊性能与资源，其次是抗腐蚀性能。在海洋环境中，5XXX 系合金的抗蚀性最高，其次是 1XXX 系合金，以下的次序是：3XXX 系合金，6XXX 系合金，2XXX 系及 7XXX 合金，在 8XXX 系合金中，除 AL-Li 合金外，其他合金与 1XXX 系合金的抗蚀性差不多。6XXX 系合金的抗蚀性比 3XXX 系合金的略差一些，在使用中可不进行防腐蚀处理，建筑材料的涂漆与阳极氧化主要是为了美观、装饰与卫生。

材料状态对晶间腐蚀与应力腐蚀开裂对海洋材料的重要性已如前述。包铝的 2XXX 系合金与 7XXX 系合金有很好的抗蚀性，包覆层电位至少比被包覆芯层的负 100mV，以便进行有效的阴极保护。有包覆层的 3004 合金屋面板在海洋大气中使用 30 年后，包覆层的腐蚀深层只不过 76μ m。

设计

设计考虑不周会造成严重的腐蚀，设计时应特别注意三点：正确选择材料的合金与状态；正确地确定与铝构件接蚀的其他金属或非金属材料；正确地选定填密材料。以下准则设计时宜充分考虑。

1.避免异种金属接触，避免铝件与吸水率＞20%木材接触。如果设计需要，则应采取严密的防腐蚀措施。据中国船舶部门统计，在艇体中修更换的外板中，属于结构不合理造成的腐蚀占 25%，异种金属接蚀造成的腐蚀占 15%，与木材接触引起的腐蚀占 15%，属于电化学腐蚀的 45%。显然，精心设计可减少工件腐蚀，延长舰船修理期限。

2.避免缝隙。对不可避免的缝隙严密密封，防止海水与潮气进入。

3.尽量采用连续焊，不用或少用点焊与铆接，最佳的焊接方法是摩擦搅拌焊（FSW）。

4.采用易排水、清洗方便结构。

5.裸铝表面不易吸水、吸潮材料接触，不可避免时，应采取有效防潮措施。

6.管路系统内尽量避免急转弯外。

7.避免热传递到热点。

8.避免流体直接撞击。

9.避免大的机械应力集中。

10.设备安于腐蚀最小处。

11.如果设备或设施要涂油漆，应消除尖锐的边缘。

为避免接触腐蚀，在设计上应做到：

1.异种金属电位应尽可能地与铝电位相近。

2.紧固不同金属工件时，紧固件对铝应呈阴极。例如可用不锈钢螺钉固定铝-钢件，不得使用铝螺钉，最好使用镀铝的不锈钢螺钉。

3.两种金属间须完全电绝缘时，采采用不导电的绝缘垫。同时两种金属间不得与外部电路相连。

4.如果须在两种金属接合面上刷涂油漆，应涂于阴极金属上，不得涂于铝上，否则会引起针孔腐蚀。

5.铝管与其他金属连接时，应采用可更换的厚壁铝接头或凸缘，不得采用螺拉。

6.尽可能将异种金属接头处远离腐蚀处。

7.向异种金属制的液体循环系统中添加缓蚀剂。

8.采用阴极保护。

9.在导电性环境中，阴-阳极面积比。例如在海水中，此比值至少应为1∶5。

避免沉积腐蚀准则：

1.不采用重金属零件。

2.在可引起腐蚀的金属件上涂油漆。

3.采用包铝的铝材。

4.添加缓蚀剂。

5.经常清洗铝构件上沉积的重金属与污物。

缝隙腐蚀的预防：首先在设计上尽量做到无缝隙，若不可避免，需用非硬化的弹性材料密封，以防液体与潮气进入。常用的密封材料有丁基橡胶、硅橡胶、环氧树脂。密封材料不得因老化而开裂。裸铝表面不得与吸潮材料（纸、布、木材、石棉等）接触。

有机涂层

在铝设备与构件上涂有机涂料大都是为了美观，如建筑门面与汽车车身，但在特殊情况下也有为了防腐的。不管为了哪种目的，在涂漆之前都应精心选择涂料和严格进行预处

料。涂层是铝表面与环境之间的物理性阻挡层。有些涂料含有铬酸盐之类的缓蚀剂。为了显露铝的本色可涂透明漆。在贮存与运输中，为了预防腐蚀，可涂易于清洗的涂料，对埋设于土壤与混凝土中的铝构件可涂煤焦油等。在严重腐蚀环境中应定期维护有机防腐涂层。

缓蚀剂

缓蚀剂有两种：阳极缓蚀剂，如铬酸盐，它能降低铝的阳极反应；阴极缓蚀剂，如聚磷酸盐，它能减缓阴极反应。阳极缓蚀剂的量不够时，反而会加速铝的点腐蚀，因此，阴极缓蚀剂更为安全与可靠，两种缓蚀剂同时使用效果会更好些。

铝及铝合金的缓蚀剂有磷酸盐、硅酸盐、氟化物、苯甲酸三乙醇胺、乳酸胶等，它们既可以单独使用，也可以混合使用。在闭环系统中，如有铜或铜合金零件存在，以钠硫醇笨并噻唑作缓蚀剂能预防铜腐蚀及随后铝的沉积腐蚀。向弱碱性溶液添加硅酸钠能抑制的铝的腐蚀。

阴极保护

铝构件的阴极保护所用的电流可由牺牲阳极供给，也可以由外部电源提供。牺牲阳极可用 Zn、Mg 和 Zn 合金，在海

水中也可以用某些铝合金。Zn 及 Zn 合金牺牲阳极很安全，能有效地保护铝构件。

1.7.14 最耐海水腐蚀的铸造铝合金 ZL303

ZL303 为不可热处理强化铸造铝合金，其主要特点是有优良的抗腐蚀性能，可切削加工性能超过其他铸造铝合金的，可焊性能与耐热性高于 Al-Si 系合金的，但其室温力学性能较低，是制造舰船非承力零件的良好轻量化材料。

该合金主要采用砂型铸造，也适用金属型铸造，用于生产在腐蚀强的环境中工作的零部件，如舰船舷窗、把手等。国外相近合金有日本的 AC7A，ISO 的 Al-Mg5Si。

化学成分与熔炼-铸造工艺

按 GB/T1173 化学成分（W%）：4.5~5.5Mg，0.8~1.3Si，0.1~0.4Mn，0.5Fe，0.5Zn，0.1Cu，其他杂质单个 0.05，总计 0.15，其余 Al。

Zl303 合金因镁含量高，在熔炼-铸造时具有较高的氧化与吸气倾向，宜在熔剂（光卤石等）覆盖下熔炼，并用精炼剂精炼，熔炼温度不得超过 750℃。烧铸时为减少铸件中的氧化夹杂，应用泡沫陶瓷片过滤熔体。

为防止熔体与砂型中水份发生反应，在型砂与芯砂中应

加入保护剂（硼酸、烷基磺酸钠等），也可向合金添加少量铍，以降低其氧化倾向。ZL303 合金熔炼工艺较复杂，铸造性能不如 Al-Si 系合金的，仅在对抗腐蚀性能有特殊要求的条件下（海洋环境或其他腐蚀介质）或工作温度较高（200℃左右）时才使用，如用于铸造舰船及水上飞机的一些承载不大的零件或装饰件，铸造温度 680℃~750℃。

ZL303 合金具有中等水平的铸造性能，用浇注棒状试样流动长度法测定的流动性为 322mm，环形试样热裂倾向性试验测定的第一条裂纹在宽度为 16mm 时形成，线收缩率为 1.25%~1.3%。该合金的气密性中等，厚度 4mm 的试样在试验压力为 9.8N/mm2 时破裂，而在此以前未出现渗漏，合金的结晶间隔约 100℃，有形成疏松倾向，宜按顺序凝固和充分补缩法设计浇注系统，最好在压力釜内浇注。

热处量及物理化学性能

ZL303 合金铸件一般不进行热处理，对于形状比较复杂的零件可进行退火，以消除内应力；为提高合金的塑性和抗腐蚀性能，也可以进行固溶热处理（表 1）。合金的相组成为α -Al+Mg2Si。Mg2Si 呈骨骼状分布于晶界，杂质相为 AlFeMnSi。

ZL303 合金的熔化温度范围 550℃~660℃；热导率及比较容见表 2；线收缩率 1.2%~1.3%；线膨胀系数（×10-6/℃）：

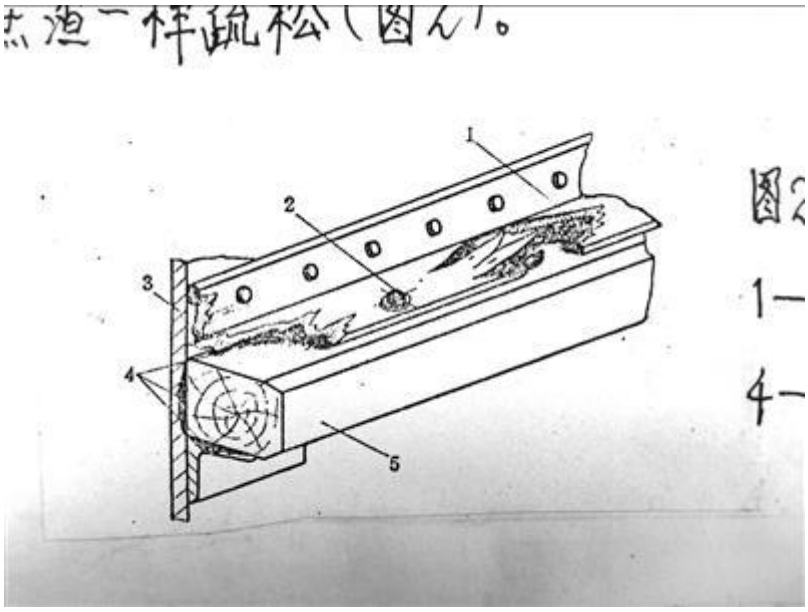
20℃~100℃时 20.0,20℃~200℃的 24.0,20℃~300℃的 27.0;密度 2600kg/m3，电阻率 64.3nΩ·m.

在该合金表面易形成薄而致密的氧化膜，可防止进一步氧化。ZL303 合金具有优良的抗腐蚀性能，在大气、海水和碱性溶液中的抗蚀性均优于其他铸造铝合金，不过若组织中存在较多的游离β（Al3Mg2）相或铁杂质相，则抗腐蚀性下降。

按 HB962，ZL303 合金的 S 或 J 铸件的抗拉强度 Rm 应大于或等于 150N/mm，伸率率 A5 应≥1%，布氏硬度应≥55HB。ZL303 合金的硬度及单铸试样的典型拉伸性能见表 3。S 型铸件经 250℃、300℃、350℃稳定化处理后的抗拉强度 Rm 分别为 98~108N/mm2、69~78N/mm2、49~59N/mm2（稳定化时间 100h），S 型铸件的扭转强度τ m=175N/mm2、τ p0.015=35N/mm2、τ p0.2=70N/mm2，抗剪强度 Rτ =145N/mm2，250 及 300℃时的持久强度分别为 44N/mm2 及 34mm2。ZL303 合金正弹性模量 E=66GN/mm2，切变模量 G=25GN/mm2，泊松比μ=0.33。

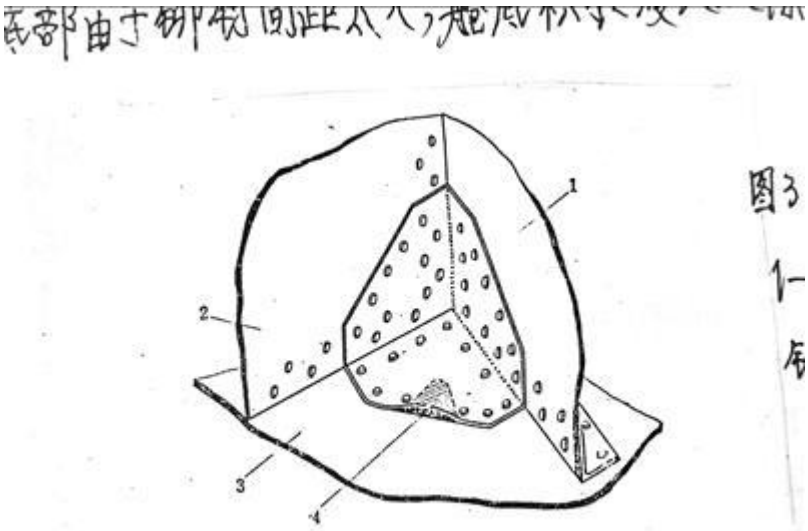
ZL303 合金的可焊性和补焊性能优良，阳极氧化性能优于其他铸造铝合金，通常采用硫酸阳极氧化，并用重铬酸钾封孔，可切削加工性能优良，可达到很小的粗糙度，同时易于抛光，能长期保持原有光泽。

1.7.15 说说铝合金舰船腐蚀



铝合金-木料接触腐蚀示意图

1——角铝的腐蚀；2——螺栓；3——外板；4——腐蚀产物；5——护舷木



铆钉排列不妥引起的缝隙腐蚀

1——纵舱壁；2——横舱壁；3——船底铝合金板；4——铆

钉间距过大引起的腐蚀

异种金属接触腐蚀

在舰船制造中需用到多种金属，因此异种金属接触是不可避免的。铝合金与紫铜、黄铜、青铜直接连接时，它的电化学腐蚀可比铝合金与钢、铅、镍连接时更强烈，而且浸泡在海水里的双金属（异种金属）接头中的铝合金电化学腐蚀比在其他介质中强烈的多。例如在铝合金船体上安装铜合金海底阀门罩壳处的腐蚀就特别严重，有的水密填料中含有铅、汞等腐蚀物或者接合面不密贴，也是造成腐蚀原因之一。有些异种金属虽然不浸于海水，但也会发生腐蚀，如果板舾装件的钢支架下的铝合金板往往腐蚀得十分严重。其原因是钢支架没有镀锌与采取其他必要的防护，同样的钢支架，如果镀了锌或在贴合间放以密封橡胶垫，那么铝合金的腐蚀就极缓慢了。

安装在舷部的非烟管出口的钢法兰与船体铝合金板接触处，由于异种金属接触半浸于海水中，同时排烟管温度比较高，所以该处铝合金船体板的腐蚀较为严重，开孔边缘经常因为腐蚀而裂边和穿孔。

铝合金与木料的接触腐蚀

在修理舰船时可经常见到铝合金-木料间的接触腐蚀，例

如与护舷木接触的铝合金角材由于木液直接侵袭产生十分严重的腐蚀，有的角铝烂断，外铝板穿孔，角铝腐蚀物像甘蔗渣一样疏松。

不合理结构腐蚀

铝合金船体结构不得有积水“死角”。例如，中国曾有一种铝合金水翼艇，安装于舷侧的水翼支承箱呈“皿”字形，外面盖以防护罩以后，两端就成“死角”。平时又不易保养，“死角”部分舷侧铝合金外板普遍严重腐蚀。如果改进结构消除死角，该外铝板就不会腐蚀。

铆钉孔排列不当也会引起腐蚀，如果铆钉孔间距太大，就会产生翘边而使海水侵入夹层内，从里面形始腐蚀。图 2 表示中国的一艘快艇舱壁水密填料函（俗称铁斗）底部由于铆钉间距太大，舱底积水浸入缝隙内而使船底铝合金板腐蚀。

散杂电流腐蚀

舰船停靠码头后，若借用钢缆和钢码头来导电，就会有部分杂散电流经水传导至钢码头，船体成为阳极而遭受严重腐蚀。防止措施：电焊机与被焊件间直接用导线连接。

在船体中修更换外板中，属于结构不合理造成腐蚀而更换的约占 25%；异种金属接触造成腐蚀破坏的约占 15%；因铝

与木材接触造成腐蚀破损而更换的约占 15%；属于电化学腐蚀而更换的约占 45%。这就是说，只要对薄弱环节采取有效的防护措施，可以明显减少腐蚀，中修船体铝合金板更换减少 50%，这就是对 2024 铝合金板说的，而对于 5XXX 系铝合金船体板的更换则几乎没有。

上层建筑的腐蚀

2000 年以前，舰船上层建筑、甲板室、轻型围壁等有用 2XXX 系合金制造的，虽然不像船体那样浸在海水中会发生电化学腐蚀，但是上层建筑受飞溅海水冲击与处于潮湿海洋气氛中，这种大气带有盐分，也会发生腐蚀破坏。

现在，舰船的上层建筑与游轮的设施都是用阳极氧化或电泳涂漆的抗腐蚀性强的 5XXX 系、6XXX 系、3XXX 系合金材料制的，几乎不会发生腐蚀，即使间或发生，也不会有破坏性的腐蚀。

1.7.16 潜艇与深潜器

铝材在潜艇与深潜器制造方面也有所应用，泡沫铝因有良好的隔声性能，可在潜水艇机房中获得应用，以降低发动机的声音，减少被敌方声纳发现的机率。1961 年美国海军建造了一艘调查用的深潜器，名为“阿鲁米纳特（Aluminaut）号”，长 15m，直径 2.4m，排水量 75t，下潜深度 4500m，艇

体为厚 165mm 的 7079-T6 合金锻件。7079 是一种强度最高的 Al-Zn-Mg-Cu 系合金，由于产量不多，美国铝业协会公司(AA)于 1989 年 3 月 22 日将其划为非常用变形铝合金（inactive alloy）。

7079 合金是美国研发的，它的成分（质量%）：0.30Si、0.40Fe、0.40Cu~0.8Cu、0.10Mn~0.30Mn、2.9Mg~3.7Mg、0.10Cr~0.25Cr、3.8Zn~4.8Zn、0.10Ti，其他杂质单个 0.05，其余为 Al。

2014 年加拿大一家公司用铝合金设计制造了一套深海潜水服装。这是全球首套全铝深海潜水装，质量 240.4kg，装有 18 个与关节相连的旋转接头，潜水员的手脚及头部能如在地面一样灵巧地活动自如，抗衡巨大的水压。这套潜水装的商品名称为 Exosuit（外装），它的内部有一套气压管理系统，提供足够 50h 的氧；装有 4 台推进器，可以节省活动体力消耗，通讯设备齐全，通过高清视讯显示于地面大屏幕上，既能保持与地面通讯联络，地面人员又可以清晰地看到水下情况。

1.7.17 话说铝在舰船中应用

1981 年，瑞士一家造船厂用铝板建造了世界首艘铝合金小船，此时，铝的工业化生产才刚刚 3 年，虽然铝的价格比 3 年前降了许多，但还是相当高昂，约为钢板的 18 倍。倏忽

125 年过去，铝已在造船产业获得了较多的应用，尽管在造船用材中，按质量比，铝的用量还不到总量的 1%。

由于铝的密度低，仅为钢的 1/3；资源丰富；价格适中；可成型与加工性能好；强度也不低；又无磁性；可焊性也不错，特别是有优秀的摩擦搅拌焊接（FSW）性能；抗蚀性强；无低温脆性，其强度与塑性（伸长率、压缩率、韧性）均随着温度的降低而均衡地上升，可在负 200℃以下或更低的温度下工作；高温性能尚可，但不能在 180℃以上长期工作；可回收性强，在现行应用的结构金属材料中是再生回收率最高的；等等。

一般军用、巡逻缉私、缉毒、稽查艇净质量约占总质量的 40%，要想减轻艇体质量，选择铝材是当前的最佳选择。在与钢材等强度时,铝合金结构的质量约为低碳钢的 35%~52%，在与钢等刚度时，铝结构的质量约为钢的 50%。由此可见，为减轻船的质量，铝材是制造船体、上层建筑及其他仓面器具的首选材料，尤其是制造滑行艇、水翼艇、气垫船、冲翼艇的最佳材料。因为它们的质量对航速尤为敏感，也就是说减轻船体质量对提高航速极为有效。

为了改善客船旅客居住条件，必须扩大居住面积，增加

上层建筑，由此船的稳定性可能下降。不过加宽船的宽度可以提高船的稳定性，但航速会下降，采用铝合金制造上层建筑能有效地化解此矛盾，即在保持足够的稳定性前提下，扩大上层建筑，达到改善居住条件的目的。

采用铝材制造货船的船体及上层建筑可以提高载货量或提高航速，从而降低运输成本。由于铝材的无磁性使它成为制造扫雷艇与特种用途船舰与装置的上乘材料。

由于铝材是一种良好的低温材料，使它成为制造液化天然气（LNG）船贮罐、极地作业考察船的良好材料。

铝材在船舰上的三类应用

一类结构

所谓一类结构是指以强度为主要因素的受力结构件，如船体、大型舰船甲板室、舰船舰桥、导弹发射筒、电磁炮轨道等。电磁炮已装上了美国于 2013 年 10 月下水的世界上最大航空母舰“福特舰”，其发射轨道为铝合金结构，试射炮也是用铝合金制的。铝弹在电磁炮中受到＞10680KJ 能量推动下以 7Ma（马赫）的速度飞出轨道，在全球卫星定位系统制导下击中 360km 以外陆上目标。

二类结构

这类结构是指非受力构件或受力较小的构件，如各种栖装件、油箱、水箱、储藏柜，铝质水密门、窗、盖（船用普

通矩形窗、船用弦窗、小快艇铝窗、铝天窗、铝百叶窗、各种舱口盖、矩形提窗、移动式铝门、船用风雨密单扇铝门、舱室空腹门、各类梯与跳板、乘客与驾驶座椅及沙发等），卫生设施、管道、通风、挡风板、支架、流线型罩壳和手把等。它们多是用 6063、6082、3003 等合金材料制造的。

三类结构

这类结构主要用的是功能材料，用于制造仓室内部装饰件与绝热、隔声材料。铝及铝合金有良好的阳极氧化着色性能，经此种处理后有亮丽的外观与相当强的抗腐蚀性能。除用各种热处理不可强化铝合金材料外，铝－塑（铝－聚乙稀，Al-PE）复合板与泡沫铝材也获得了较多的应用，泡沫铝板是潜艇发动机室的良好隔声材料。复合板的芯层为塑料层，两侧或单侧为薄的 1100 或 3003 合金，厚 0.1~0.3mm 的铝合金。铝板表面可进行防腐处理、轧花、涂装、印刷等深加工，其特点是质量轻，有适当的刚性，更好的减振隔声效果。日本海事协会及其他国家的造船部门等已批准作为船舶舰艇内部装饰板材，也可以作为门窗等材料。过去使用的玻璃钢和木材之类材料均可以改用这类材料。

铝合金在舰艇上已获得广泛的应用

从上世纪 20 年代起，铝合金在舰艇上获得了更加广泛的应用，在建造航空母舰、巡洋舰、护卫舰、导弹驱逐舰、潜

艇、快艇、炮艇、登陆艇等时应用铝合金的实例很多。

1926 年，美国开始在军舰上最大量应用铝合金，因为华盛顿海军条例对舰艇排水量作了严格限制。当时有 2 艘巡舰要改装成航空母舰，为了排水量不超过条例规定，决定多用些铝制造非结构件以减轻质量，例如通风系统、舱壁、飞行甲板栅栏、机坪等都是铝合金的。

航空母舰铝合金在应用

航母是个庞然大物，体积巨大，建造精良，是一个机动性很强的作战平台，对减轻结构质量等具有极其迫切的需要，因此控制航母结构的质量非常重要，其中包控制航母各种装置，特别是上层建筑的质量，对改善航母的战术性能至关重要。

凡排水量 50kt 以上航母铝合金材料用量为 500t~1000t。例如，美国“独立”号（CVA62）航母用了 1019t 铝材，“企业”号核动力航母（CVA65）用了 450t 铝材，法国“福熙”号（R99）及“克里蒙梭”号（R98）航母用了 1000 多 t 铝材。铝材在航母上的应用对减轻其结构质量，提高稳定性、适航性与其他性能等都具有重要意义。

中国首艘航母“辽宁”号于 2012 年 9 月 25 日正式交予中国人民解放军海军，主要用于科研研、实验及训练。

“辽宁舰”飞行甲板以下有 10 余层，3000 多个舱室，

进入到第三层，感觉像迷宫一般，到处都是通道、舱室，舰内通道总长度达数 10km。“辽宁”号航母是中国梦想之舰，承载着民族振兴梦想与成为海洋大国的梦想。美国在役的航母有 10 艘，中国在 2025 年以前拥有五六艘也不算多。

舰长，m　　304.5

吃水线长，m　　270

舷宽，m　　75

吃水深，m　　10.5

标准排水量，t　　55000

满载排水量，t　　67500

航速，km　　29

“辽宁”号航母的铝材用量估计约 650t，合金多为 5052 与 6063。美国早在 1933 年就用 5052 合金制造航母、驱逐舰、巡洋舰等的桥楼、甲板舱室、飞机发射架、升降舵、桅杆等。6063 合金 1945 年面世定型。

1.7.18 聊聊中国造的铝合金舰船

民用舰艇

中国从 1958 年开始建造小型铝合金水翼船与快艇等，首艘快艇名为“长江水翼客艇”1 号，是全铝合金的，所谓全铝合金船艇，是指在当时的技术条件下，凡是可用铝合金制造的零配件都已用其性能可满足设计要求的铝合金制造，同时铝合金船艇应具有良好的性价比。到 2015 年中国不但可以建造各种中小型铝船艇，而且可以建造大型 LNG 船与豪华旅游船。

“长江水翼客艇”1 号是用 2A12 合金板材制的船壳，该合金当时的牌号为 LY12，是一种含 3.8%Cu~4.9%Cu、0.30%Mu~0.9%Mn、1.2%Mg~1.8%Mg 的 2XXX 系合金，也是一种用途极为广泛的高强度硬铝型合金，特别是在航空器制造中，它是飞机结构的骨干材料。

1960 年中国造的“昆仑”号内河客轮首次采用铝合金作为上层建筑材料。该船总长 84m，最大宽度 16m，型深 5.8m，设计吃水 2.4m，排水量 1712t。该船上甲板以上各层甲板及围壁都用 3.5m~6mm 厚的 LY12 硬铝即现在的 2A12 合金制成，共用了 93t 铝合金。“昆仑”号客轮 1962 年出厂，1972 年改装，1979 年经过修理后，至 1985 年仍在营运中。中国在万吨级远洋货轮舾装及装饰件施工中也应用了铝合金，如水密门、舱口盖、油柜、水柜等。

2012 年广东中山市江龙船舶制造有限公司自行设计建造了国内首艘铝合金——玻璃钢双体高速客船，船体材料为 5083 铝合金板，上层建筑为玻璃钢，满载试航速度 25Kn（46.3km/h），具有良好的适航性、快速性和可操纵性，是海上客运的首选船型。

该船主体总长 27.6m，型宽 8.8m，水线长 25.6m，型深 3.1m，片体宽度 2.6m，乘客 199 人，沿海航区航速 25kn（46.3km/h）。双体客船主船体材料为 5083 铝合金，上层建筑结构用玻璃纤维增强塑料（玻璃钢）制造，采用双机双桨推进，主要航行香港、深圳、珠海水域。

丛林铝合金船舶公司生产的 16m 豪华商务游艇船型设计简洁流畅，外观新颖别致，船体为 5083-0 合金焊接结构，内部装修豪华。

丛林铝合金船舶公司制造的全铝休闲艇的设计航速高达

135.2km/h，可在近海海上风驰电掣航行，是海水浴场休闲游玩和垂钓的理想工具，可让人体验高速航行的速度感，也是近海域营救的完美工具。

全铝休闲船

丛林铝合金船舶公司生产的全铝休闲艇与游艇除满足国内的一部分需求外，2012 年向澳大利亚出口了 3.4m（质量 60kg）、3.9m（质量 110kg）的休闲艇 40 艘，从接到订单到发货仅用 1 个月；同年 10 月初公司又与菲律宾一客户签订 8 艘铝合金休闲、抢险船购销合同。

丛林船舶公司生产的铝合金近海域消防船能够灵活快速作出反应，设计航速 61.1km/h，可迅速到达事故海域，可在很短时间内把事故消灭在初发阶段。

拖船是内河运输、港口作业和救助作业必需的工作船，丛林铝合金船舶有限公司制造的全铝拖船具有推拖能力强、工作灵活等特点。

华澳船舶有限公司

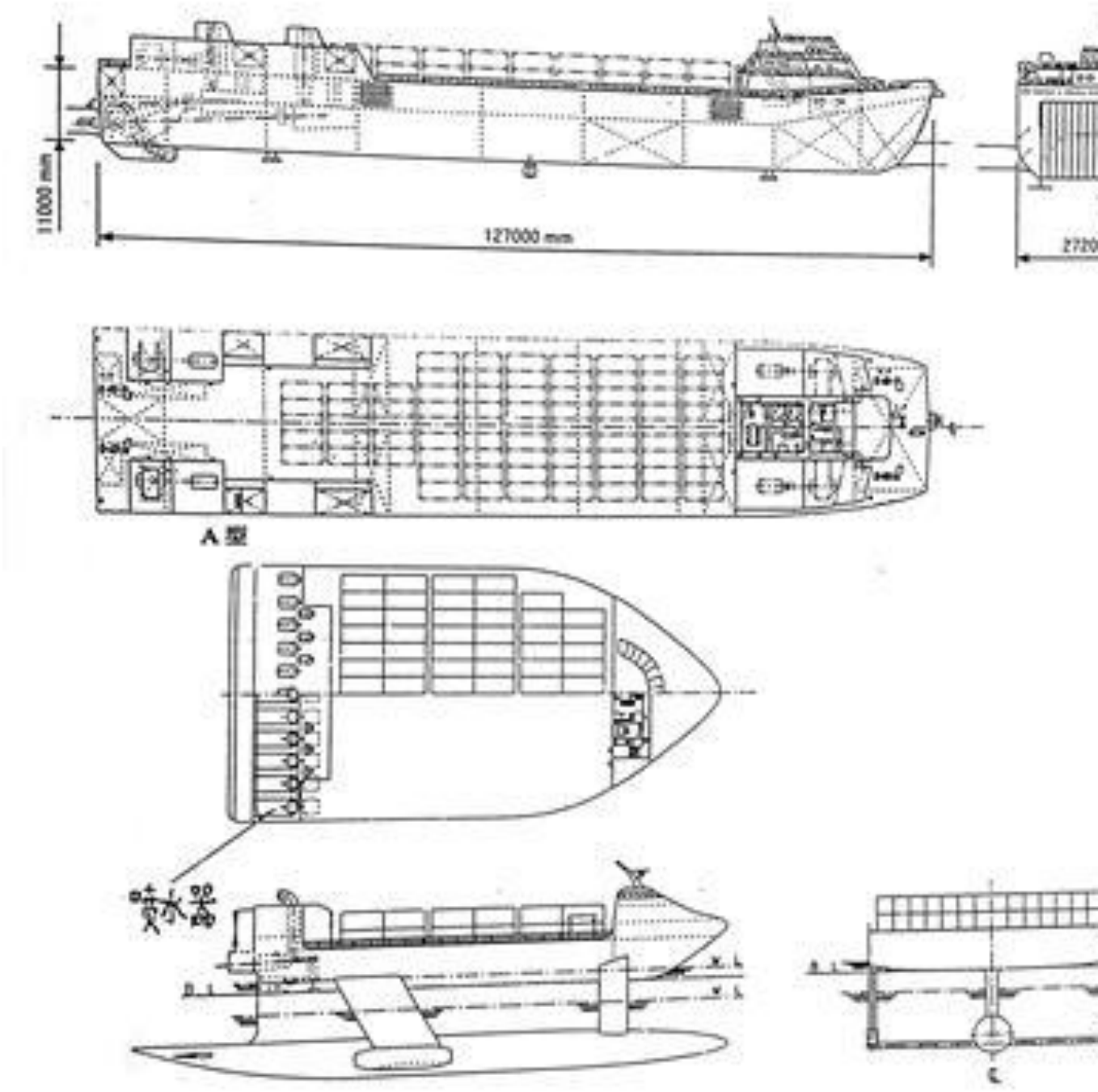
丛林公司早在 2006 年就为芬兰的一家海洋油污清理公司制造了一艘全铝工作艇。青岛华澳船舶有限公司研制的大型铝合金游艇“虎鲨号”于 2013 年 5 月 18 日在山东省青岛市奥帆中心首次起航，船体长 50m、宽约 10m、高 16m、734t，续航能力 11112km，可实现全球航行。

2015 年 3 月一艘由武汉长江船舶设计院设计、江龙船舶有限公司建造的全铝合金双体高速客船已下水。该船总长 35.60m，型宽 9m，吃水 1.5m，载客 263 人，常规螺旋桨驱动，设计航速 26kn（48km/h），实际试航速度达 27.1kn，具有质量轻、吃水浅、载客量大、性能优越等优点。

中国游艇制造业自 2005 年以来发展迅速，预计到 2020 年中国生产的游艇将占全球销量的 22%左右，中国的游艇产业经济规模将达到 1100 亿元，其中铝合金艇的约占 45%。

中国虽已是世界头号造船大国，但在建造铝合金船舶舰艇方面与美国、日本等相比还有一定的差距，特别是在研发舰船铝合金方面的差距则更大一些。

1.7.19 铝合金在日本民用船舶上的应用



日本民用铝船居世界前列

日本在民用船舶制造中用了较多的铝，其用铝居世界前

列。到 1945 年前日本在舰艇的舰桥与上层建筑上用了大量铝，主要是 2~4mm 的板材与挤压型材，第二次世界大战后，铝在民用船舶上的应用占主导地位，当然海上保安厅的巡逻艇与救生艇也多是用铝合金制造的，如 1954 年制造了 15 艘“狂风”巡逻艇。

客船

日本从 1950 年开始用铝合金制造民用船舶，从渔船、渡船、游船到大洋巨型游轮都有。

上世纪 60 年代是日本经济的高速持续发展时期，以濑户内海为中心的航运显得异常繁忙，为适应运输的需要，濑户内海与关西地区的造船厂制造了一批又一批的铝合金客船，这是日本制造铝合金客船的第一次高潮，稍后由于航空工业的快速发展，陆空交通网迅速高速化，水上交通受到影响，铝合金船的建造处于低谷，80 年代以来，由于建成经济大国的需要，一致呼吁海上交通高速化，迎来了建造铝合金船的第二次高潮，同时焊接技术也有长足发展，并出现了一些有良好可焊性与抗蚀性的铝合金。所谓全铝合金船是指船体是用铝合金板或挤压材制造的，并且上层建筑及内部设备用了尽量多的铝制零部件。1995 年下水的九四威普毕阿莎型大型高速渡轮“隼鸟”号是此时期建成的有代表性的铝合金客轮，具有里程碑意义。

日本新世界建造的高技术超级喷水铝合金如下图所示，分为上下两层：上部船体全长 72.0m，宽 37.0m；下部船体总长 85.0m；水轮翼推进时的吃水深度 9.6m，非喷水行驶时吃水深度 14.0m。此种客轮有两种：A 型（上图），全长 127m，宽 27.2m，为细长形设计；F 型（下图），扁宽形设计。这种高速超级班轮是全铝合金的。

铝合金高速客船是指速度大于 46km/h 的，铝合金船体的质量可比钢的轻 50%左右。在日本 2013 年的约 2100 艘普通旅游船中，铝合金的约占 32%，在约 350 艘高速旅游船中，铝合金船占 74%，即约 259 艘。游船的发展趋势是高速化与大型化。目前世上最大的邮轮是 220kt 级的海洋绿洲号，美国造。游船/邮轮的大型化为铝合金的应用开辟了一个新的亮点。

1.7.20 铝驱驶水面艇飞起来

铝合金是制造水面快艇不可或缺的材料，它的低密度、好的可焊性、强的抗蚀性、优秀的可回收性等等，使其成为天生的制造水翼艇、登陆艇、气垫船、双体船、地效翼船、无人水面艇等的上乘材料。没有铝，在同等装机功率条件下水面艇就不会跑得这么快，就不会这样疾驶如飞，有时会眼看着走私船逃跑而望海兴叹。

水翼艇

1965 年美国建造了“普冷维尤”（AGEH-1）号水翼艇，这是美国最大的反潜试验艇。采用钢制全浸式水翼，除水翼系统外，其他部分全为铝合金焊接结构，共用铝材 113.5t，其中大型挤压材 90.8t，占 80%。挤压材为 5456-H311 合金，厚板为 5456-H321。艇长 64.66m，宽 12.2m，吃水 1.83m，排水量 320t，航速 92.5km/h。

上世纪 70 年代美国海军建造的 5 艘导弹水翼巡逻艇，称为“帕加苏斯（Pegasus）”号的原型艇于 1974 年 11 月下水。在该艇的壳体内部舱壁和甲板的板材和防扰材中，金属惰气保护焊缝长度超过 3.3km。在建造时用一台牵引型的线焊机对焊铝板，制成大的平面分段，防扰材在定位焊后再进行手工焊。为了制造工序更有效，设计了一种由计算机控制的自动焊工作台。

美国“马克Ⅱ（MarkⅡ）”号水翼艇是 70t 的水翼巡逻

炮艇 PGH-1 的大型化和改进型。PGH-1 型艇于 1968 年下水，在美国海军和海岸警卫队服役，艇体材料为 5456 合金，因为它的焊接接头强度最高。板材状态为 H116 和 H117，挤压材状态为 H111，以 5356 合金作焊丝，因为它有高的抗裂性，采用的焊接工艺：金属极惰性气体保护脉冲电弧焊，射流电弧焊，钨极惰气保护焊。

波音公司建造了一批批航速为 80km/h 的 100t 级的水翼艇，它们是喷翼型的民用艇，是从美国海军水翼艇演变来的。壳体和上层结构为全铝焊接的，采用 5456-H116 或 H117 合金。对焊缝检验很严格，全部经过 X 射线探伤、超声波检验和着色检验，着色检测前应对检查部位作侵蚀处理，以除净氧化膜。

前苏联是世界上成批生产水翼艇的领先国家之一，俄罗斯继承了这一传统，至 2013 年已制造 200 多艘，还出口多艘。

中国用 5A01 合金板材、型材、锻件和焊丝建造“飞鱼”水翼艇，采用半自动熔化极脉冲氩弧焊和钢制回转胎架-拉马装备。5A01 合金的化学成分（质量%）：0.40（Si+Fe）、0.10Cu、0.30~0.7Mn、6.0~7.0Mg、0.10~0.20Cr、0.25Zn、0.15Ti、0.10~0.20Zr，其他杂质每个 0.05，总计 0.15，其余为 Al。

登陆艇

登陆艇在作战中起着极为重要的作用，美国的“LARC-15”

登陆艇是用铝合金建造的，艇长 13.7m、宽 3.66m、载重量 15t，水中航速 18.5km/h，陆上航速 55.5km/h，材料为 5086-H112 合金,焊接结构,还用了一些 5083-H112 和 6061-T6 合金。美国建造的“SKMR-1”反潜和登陆气垫船为全铝结构，船体主要材料为 5456 合金。

上世纪 60 年代初，中国开始批量制造水翼快艇，艇体用 2A12-T4 铝合金，还用此合金建造了一批导弹快艇的上层建筑、围壁、发射筒和发射架外罩、炮座等，用铝合金制造的结构还有：钢甲板中部的嵌补甲板，仓内壁、平台。炮艇、猎潜艇上层建筑以及中型舰艇的仓壁、仓面属具等也应用了铝合金，其中一部分为 5XXX 系合金焊接结构。

气垫船

气垫船多是用铝合金打造的，其中最值得一提的是 1976 年由罗尔（Rohr）工业公司承包的一项设计制造美国海军 3000t、148km/h 表面效应船“3KSES”的合同，该船为全铝焊接结构。在选材时，可能选用 5456-H116 或 H117，也有可能选用强度高的 Al-Cu-Mn 系 2219 合金制造焊接结构，而非焊件则选用超强度的 Al-Zn-Mg-Cu 系的 7075-T73 合金。这两种合金在航空航天器制造中是顶梁柱材料，但在海洋结构中却不是主要材料，因为其抗腐蚀性能尚有待考核，当时美国还应用了一种新研制的牌号为 CS19 的合金，其镁含量高达

8.7%，它的焊接接头的典型屈服强度为 230N/mm2，而常规的 5456 合金的只不过 150N/mm2~170N/mm2。

“3KSES”气垫船是当时吨位最大的军用全铝焊壳船，对选材极为慎重。5456-H116（117）合金终因力学性能、抗蚀性、可焊性及成本方面的综合优势而被评为最佳的主体壳体板材结构材料，而挤压材则选用 5456-112 合金，因其强度比 5086-H112 合金的大 19%，H112 状态合金组织中没有会使合金在海洋环境中出现剥落腐蚀敏感性的β 相晶界连续网络。

上世纪 80 年代后期西班牙海军建造的 36t 气垫船原型用于试验和鉴定，是用铆接方法建造的。前苏联于此期间用 5XXX 系合金建造了“火焰”号气垫船。

英国于上世纪 90 年代建造了全焊接结构的气垫船 AP1-88，是当时铝壳气垫船的最新发展，壳体采用 Al-4.5%Mg 的 N8 合金（5083 合金），型材采用 Al-1%Mg-1%Si 的 H30 合金（6082 合金）。为了避免横向焊缝和减少邻近焊缝的热影响，型材为深 I 型的，而且尽量宽一些与长一些。2004 年 3 月加拿大海岸警卫队向英国气垫船公司定购了一批 AP1-88 型气垫船。

前些年设计的气垫艇与早期的相比有很大变化，包括使用空冷柴油机取代燃气轮机和用焊接铝结构取代较复杂的玻璃钢结构，AP1-88 型和“虎”级气垫船就具有这些设计特征。“虎-40”于 1986 年 4 月开始设计，同年 12 月试航，总长

17.25m，宽 7.625m、高 5.375m，除用作客船外，还可以用作内河和海岸巡罗逻艇以及工作艇等。

上世纪七八十年代中国用 7A19 合金、5A30 合金等建造了全垫式气垫船和侧壁式气垫船，它们采用较薄的铝合金板材，厚 1~3mm，此外，还用了多种规格的型材。由于板材较薄，所以多数气垫船采用铆接连接，但是也有全焊接的。

双体船

英国麦克泰公司为英国海军设计建造了第一批装有升降舵的铝壳双体船，有许多引人注目的特点：宽绰而稳定的甲板，极低航速时良好的机动性，良好的航向稳定性，阻力小。

法国梅泰罗工业系统公司设计了一种军用多用途铝壳双体船，总长 25m，宽 10m，吃水 0.7~1m，空船净质量 45t，载重 18t，主机为 2 台 895kW 柴油机，喷水推进，最大航速 55.5km/h。

在挪威和瑞典用铝合金建造双体船很盛行，如挪威设计的 10 艘高速双体船全部采用对称船体，每艘载客 449 人，分别以 59.2km/h 和 44.4km/h 的航速横渡海峡。

日本用铝合金建造的“海梭”（Marine Shuttle）号小水线面双体船长 41m，航速 63km/h，是可载客 280 人的非对称型高速双体渡船。

中国国内航线使用的一些双体船有进口的，也有国内制造的。

地效翼船

地效翼船是介于舰船与飞机之间的利用类似的表面效应产生的气动升力，支撑艇重离开水面低飞，偶尔能浮水航行的高技术新型舰船。地效翼船航速快，最快的可达 555km/h，而且航行性好，具有良好的两栖性，能在水上、陆地起降，在波浪上方低空飞行，受干扰少，又比较安全，且能跨越沼泽、冰层、雷区、障碍物等，可广泛用于军事行动，是快速登陆的必备舰船，常与航母、两栖攻击舰配套，在登陆作战中极具突击性。此外，地效翼船的经济性好，油耗比常规飞机低 30%以上，而且比飞机安全得多，造价也相对便宜，在经济和军事方面都有大的效益。

地效翼船的艇体必须用铝材制造，才能在当前的技术条件下取得最佳的效益，并且采用焊接结构，俄罗斯的较大吨位地效翼船大都是用可焊铝合金制造的，而且要求材料的屈服强度大于 300N/mm2，抗拉强度大于 400N/mm2，同时要求材料有良成形工艺性能，相当强的耐腐蚀性能等。

美国的新型铝合金无人水面艇

拥有大量人口且对各国经济发展关系重大的近海地带是众多国家海军关注的焦点。近海水域靠近陆地，环境复杂，在此处作战面临更加多和多样的威胁，不仅要与对方的水面舰艇和潜艇交战，还要当心不知布放在何处的水雷，陆基航空兵和岸基导弹发射装置也是不可忽视的威胁。出于提高效率和减少伤亡等原因，无人水面艇受到越来越多国家的重视，成为有人平台的补充中替代品之一。美国近年来在近海作战无人水面艇的发展上取得了相当大的进展，居世界先进水平。

美国海军研发的全铝合金“海狐”无人水面舰艇，应用前景十分灿烂，可执行后勤保证和再补给等任务；可用于水文调查、侦察和欺骗任务；可配备导弹对目标进行精确打击，协助陆军在内陆湖泊作战；可进行浅海反潜、反水雷、兵力保护、海岸巡逻、打击海盗等任务。现在的无人水面舰艇的长度为 7~15m，负载 1~3t，用柴油机驱动和喷水推进，功率 70~600kW，航速有低的，也有高的，18.5~64.75km/h 等。

2009 年美国爱达公司（AIDA）建造的巡洋舰共有 12 块大甲板，其中最上层的 2 块是铝合金的，上层甲板之所以选用铝合金，是可以提高舰的稳定性，保持尽可能低的重心。这两块大铝甲板及所用的 22000 个铝合金螺栓是用林德气体公司（Linde AC）的专利保护气体 Varigon He 30S MIG 法焊接的。Varigon He 30S 气体是含有 30ppm 氧的氦气，氧的添加有助于稳定电弧和辅助设备点火，从而可获得更加狭窄的

热影响区，焊接边缘也更加整齐，这对焊接缺口脆性合金极为有利，对焊接厚工件可避免孔隙出现和焊合不足等缺陷。

2011~2014 年美国奥斯达尔公司（Austal）为美国海军建造了 10 条全铝双体船（Catamaran Fleet），还将建造其他高速舰与商用船只，所用铝板及其他铝材由美国铝业公司提供，除用于制造舰船外，还用于建造栈桥及其他设施。

2012 年该公司制造了一艘轻型滨海全铝舰（LCS，Lithoral Combat Ship），名为“称罗纳多号”（Coronado），长 127m，铝的用量约 460t，据称在全世界制造的这类舰艇中是用铝量最多的，其中用得最多的是 5083 合金，由美国铝业公司达文波特轧制厂（Bavenport Works）提供。

1.7.21 铝在大型水面舰中的应用

大型水面舰指巡洋舰与驱逐舰等。为了减轻上层建筑质量，以保持稳定性等而广泛采用铝合金结构。事实上在许多驱逐舰等大型水面舰中，主甲板上的全部结构都是铝合金制造的。据报道，美国海军不同级别的驱逐舰的甲板以上结构中所用的铝合金数量分别如下：护航驱逐舰（DE）铝材用量 251.33t，导弹驱逐领舰（DLG）用铝量 811.30t，弹道导弹驱逐舰(DDG)用铝量 515.88t,弹道导弹核动力驱逐领舰(DLGN)用铝 930.35t。这里所说的用铝量都是指铝制零部件的净质量，而铝材的采购量则可按材料利用率为 85%进行匡算。

美国海军第一艘导弹驱逐舰 USS“杜威号”（DLG14）比第二次世界大战期间最大的驱逐舰还长 15.24m，而排水量则几乎大两倍。在“杜威号的上层建筑中应用 811.30t 铝合金中大部分是 5456 合金厚板和 5086 合金薄板。铝构件代替了钢以后，节约了不必要的质量。在铝的总用量中，20%左右是 5456 和 5086 合金,5XXX 系合金对海水有更强的抗腐蚀性能。另外一些铝材用于制造甲板下面的所有的柜、家具、床铺及有关设备，所用的铝材以 6061 合金、5052 合金为主。

5052、5456 及 5086 合金都属 5XXX 系合金。5052 合金是一个相当老的合金，上世纪 30 年代成型，是美国铝业公司发明的，过去的牌号为 52S，1954 年改为 5052 合金，它的镁含量较低，强度也较低，但塑性高，易于加工成型，抗腐蚀性能也相当强，它的成分（质量%）：0.25Si、0.40Fe、0.10Cu、0.10Mn、2.2~2.8Mg、0.15~0.35Cr、0.10Zn，其他杂质单个 0.05、总计 0.15，其余为 Al。5052 合金不可热处理强化，在退火状态或冷加工状态下应用。

5456 合金于上世纪 30 年代末成型,也是一种美国合金，1954 年 7 月以前的牌号为 56S，1954 年 7 月起改为当今的牌号，经过 70 多年的发展，5056 型合金已形成一个兴旺发达的“家族”，共有成员 10 个，它们的特点是镁的含量高，为 5%左右，被称为高镁的铝合金，因此它们的强度高，塑性低。

在这类合金中，在舰船制造中用得最多的是 5456 合金，它与 5556、5556C 合金的镁含量最高，Mn 的含量也高一些，密度较低，可焊性较高。

5086 合金也是一种美国合金，它的镁含量中等，其化学成分如下（质量%）：0.40Si、0.50Fe、0.10Cu、0.20~0.7Mu、3.5~4.5Mg、0.05~0.25Cr、0.25Zn、0.15Ti，其他杂质每个 0.05、总计 0.15，其余为 Al。

实际上，在船舶舰艇制造中用得最多的 5XXX 系合金是 5083，多以厚板形式用于艇体，它的化学成分（质量%）：0.40Si、0.40Fe、0.10Cu、0.40~1.0Mn、4.0~4.9Mg、0.05~0.25Cr、0.25Zn、0.15Ti，其他杂质单个 0.05、总计 0.15，其余为 Al。（见表 2）

在理论上 5XXX 系合金应该有强烈的时效硬化效应，但因 β 相（Al8Mg5）的沿晶沉淀倾向和弥散度的限制，这种效应没有实用价值，为此这类合金多在退火（O）或（冷作）硬化状态（H）下使用。

工业用 Al-Mg 合金的 Mg 含量变化很大，可由 2.0%增加到 10%或更大一些，合金的强度性能虽随 Mg 含量的增加而上升，但其塑性和抗腐蚀性能却相应地大心幅度下降。特别是

当 Mg 含量大于 7%以后，工艺塑性的降低尤为强烈。不过国外用镁含量大于 10%的 5XXX 系合金厚壁管材制造水雷，威力强大。

Mn 或 Cr 在 5XXX 系合金中既有提高抗蚀性的作用，又有改善楞焊性的效果，还有微量的固溶，也有稍许的强化作用。Ti 和 V 是晶粒细化剂，Be 能防止熔铸和焊接时的氧化倾向，特别是对含镁量高的铝合金，为了防止含 Mg 量大于 4%或甚至大于 3.5%的 5XXX 系合金的钠脆性可添加微量 Sb 或 Bi，如果熔炼时不使用钠盐（NaCl、NaF 等）也不会出现钠脆，因为钠盐中的钠可被镁还原，形成游离钠，分布于晶界，它的熔点低，仅 97.8℃，在合金热轧时熔化，在晶界形成一层液膜，使热轧中的合金轧件开裂，成为废品，加入 0.004%Sb 或 0.02%Bi，可形成 BiNa2 或 Na2Sb，进入渣中，消除了游离钠，也就不存在钠脆了。

5XXX 系合金的另一不足之处是，冷变形后于室温会发生“时效软化”，即沉淀处理后的 5XXX 系合金进行轻度冷加工（＜20%）以提高强度时，如不进行低温（120℃~150℃）稳定化处理，在过剩空位的影响下，能发生自发的回复过程，经过一段时间后，强度性能下降。

6061 合金属 Al-Mg-Si 系合金，在大型水面舰制造中也获得了广泛的应用，它是一个在各个产业都有大量应用的通

用合金，是一个可热处理强化的变形铝合金，可用它加工各种各样的半成品，诸如板、带、管、棒、型、线材及锻件等。它的成分（质量%）：0.40Si~0.8Si、0.7Fe、0.15Cu~0.40Cu、0.15Mn、0.8Mg~1.2Mg、0.04Cr~0.35Cr、0.25Zn、0.15Ti，其他杂质单个 0.05、总计 0.15，其余为 Al。

实际上，美国早在 1928 年在建造万吨级重型巡洋舰“盐湖城”号时，就应用了 2017 合金（当时的牌号为 17S）制造上层建筑和甲板舱室结构。它是一个 Al-Cu-Mg-Mn-Si 系合金，是一个相当老的合金，现在已不用于制造舰船上层建筑构件，但在其他产业仍是一个常用的合金。

建造一艘驱逐舰约用钢 1900t，与钢壳驱逐舰等强度的铝壳舰相比，铝合金材料的用量约 980t，其质量减轻 920t，在同等主机功率下，铝舰的航行速度比钢舰的快得多。

在 10 多年前的阿（根廷）-英（国）马岛战争中，英国的谢菲尔德号驱逐舰（排水量 4000t）被阿根廷的飞鱼导弹击中，燃起大火，舰桥等在大火中很快倒塌，整条舰很快沉没。铝材不耐热，在 150℃以上会迅速变软，强度下降，在设计铝结构时应充分考虑。

1.7.22 再说中国造的铝合金舰船

功能船与商务游艇

山东丛林集团有限公司是中国工业 500 强之一，下辖的丛林铝合金船舶有限公司是集团公司骨干企业之一，是中国最大的中小型铝合金船艇制造企业，与芬兰劳模水上工程公司通过技术合作，引进德国先进的铝合金焊接、加工设备，研究开发铝合金特种工程船、游艇、冲锋舟等，主要用于江河湖海油田开采、港口管理、水上清污作业与旅游观光、休闲、抢险救灾、边防缉私、军队巡逻等领域。随着中国经济的快速发展、海洋经济战略的实施、涉海活动的增加，迫切需要能适应各种需求的功能型特种工作船艇，国内外市场前景广阔，潜力巨大。

丛林生产的功能船型号齐全，功能多样，高速便捷，安全舒适，外形美观，抗冲击，耐腐，自身质量轻，是传统木船、钢船、玻璃钢船的良好更新换代产品，是中国船舶制造业产品结构的重要补充和完善。铝合金零配件与结构拥有与钢相当的强度时，其质量是远低于钢的，因而铝制船艇即使在重载情况下，也比钢船更易提速、滑行，航行更加平稳、舒适，操作也更为灵活机动。传统玻璃材料可修复性差，还不易降解，不环保，一旦出现破损，修理起来需动大手术，而铝合金结构的可修复性则简易得多，使之有了很高的保值性，同时铝船报废后，有比其他任何材料都高的可回收性。

丛林船舶有限公司生产的功能船已形成系列。此种多功能船适于水面运输、冲滩抢险、水域清污、河道港口等领域，具有使用灵活方便、承载能力强等特点。

图 1　中华造船厂建造的“东方皇后号”豪华长江旅游船

图 2　长江三峡上的“五星级大酒店”——“总统旗舰号”游轮

上海中华造船厂为香港建造的“东方皇后号”豪华长江旅游船，上层结构及舱内设施用了约 650t 铝材（图 1），2011 年中国首款按五星级标准打造的“总统旗舰号”于 4 月份起航行三峡水库，是一艘万吨级涉外游轮（图 2），耗资 1 亿余元，引进公海邮轮服务标准，可以享受超五星级酒店的住宿环境和管家式服务，建造此游轮用铝材逾 550t。

中国内河分布广泛，游船游览成为夏季受人欢迎的消暑和休闲方式，游船制造业将成为造船产业的一个重要分支，铝材在这方面的应用有着较大的潜力。

近期中国在打造铝合金客船方面成就不小，同时高速铝合金艇受到用户的青睐。

江龙船舶设计制的铝合金-玻璃钢船的主船体具有良好的防撞性能，上层建筑具有造价低、易造型、表面光洁、易清洁与维护等优点，同时与钢-铝船型相比，船壳自身质量减轻 48.7%，排水量减少约 23%，在相同航速下，主机功率小 22.5%，所以柴油消耗、CO2 排放均相应地下降。这是该公司针对海岛客运旅游设计开发的新船型，既低碳环保，又降低了造船成本和营运成本，在国内乃至亚洲尚属首艘。

广州番禺英辉南方造船有限公司与荷兰达门公司于 2013

年建造了一条铝合金双体高速客船，总长 36.28m、型宽 9.7m，设计航速 50km/h（27kn），可载客 195 人。该公司成立于 1992 年，在设计与制造中小型铝合金客船方面居国内前列。

英辉南方造船有限公司与达门公司建造的 10 艘铝合金客渡船已全部出口到迪拜道路交通局（RTR），用于旅游观光，2010 年及 2011 年各交付 5 艘。

海南省儋州市海渔集团修造船厂在建的百吨级铝合金渔政船可于 2014 年秋建成下水，最高航速 30.93km/h（16.7kn），比一般渔船的速度快得多。该船设计总长 38m，型宽 6.6m，高 8m，航速 16.7kn（31km/h），总体造价 780 万元，是儋州市渔政执法中投资最大、动力最强、设备最先进的执法船。甲板为铝合金焊接结构，单底、单壳、双机、双桨都是铝合金的，具有良好的操纵性和回转性。

由于玻璃钢船艇建造及拆解过程中会产生大量的有害物质，因此铝化渔船得到了发展，1977 年日本建成第一艘全铝渔船“金昆丸”号，标志着铝合金渔船时代的来临。此后，铝合金在全世界获得广泛的应用。中国黄海造船厂以及沿海的一些造船厂都可以建造铝合金渔船。2012 年 10 月，中国千艘渔船开赴钓鱼岛作业，但由于我国渔船大多数还以百吨级的小型钢制的为主，只适应近海捕捞。远洋捕捞在中国还是弱项。因此开发远洋渔业和在南海岛礁及钓鱼岛水域进行常态化捕捞宣誓主权非常迫切，随着“一带一路”的快速推

进，中国成为海洋大国与远洋捕捞大国的时日即将来临，悬挂着五星红旗的渔船将在五大洋与公海上进行正常的作业。据统计，中国有近 10 万艘渔船需要更新换代，尽可能地多用铝合金制造是一个明智之举。

军用舰艇

中国建造的导弹快艇的上层结构、围壁、发射筒、发射架外罩与炮座等大都是用 2A12 铝合金建造的，材料状态 T4。钢甲板中部的嵌补甲板、舱壁、平台也多用铝合金制造。在炮艇、猎潜艇上层结构与中型舰艇的舱壁、舱面属具等也广泛采用铝合金制造，其中不少为 5083 合金焊接结构，扫雷艇则是全铝的。

现代航空母舰和驱逐舰要求具有更快的速度、更好的机动性、稳定性和适航性，为达到这些目标，不二的措施是，主甲板以上的结构都用铝合金制，尤其是驱逐舰使用铝合金具有相当大的潜力。不同级别的驱逐舰甲板以上结构使用铝材量为：

护航驱逐舰（DE）52t；

导弹驱逐领舰（DLG）167t；

弹道导弹驱逐舰（DDG）106t；

弹道导弹核动力驱逐领舰（DLGN）190t。

建造一艘驱逐舰大约需要钢材 1900 多 t，如果用与钢壳

驱逐舰等强度、等刚度设计的铝壳舰仅约用 980t 铝合金，质量减轻 48.42%，因而在同等主机功率下，铝壳舰的航行速度比钢壳舰的高得多。

不过，在此应指出的是，由于铝合金的熔点比钢的低得多，一旦舰上发生大火，上层建筑会迅速变软塌秧倒下，对这一点应予考虑。

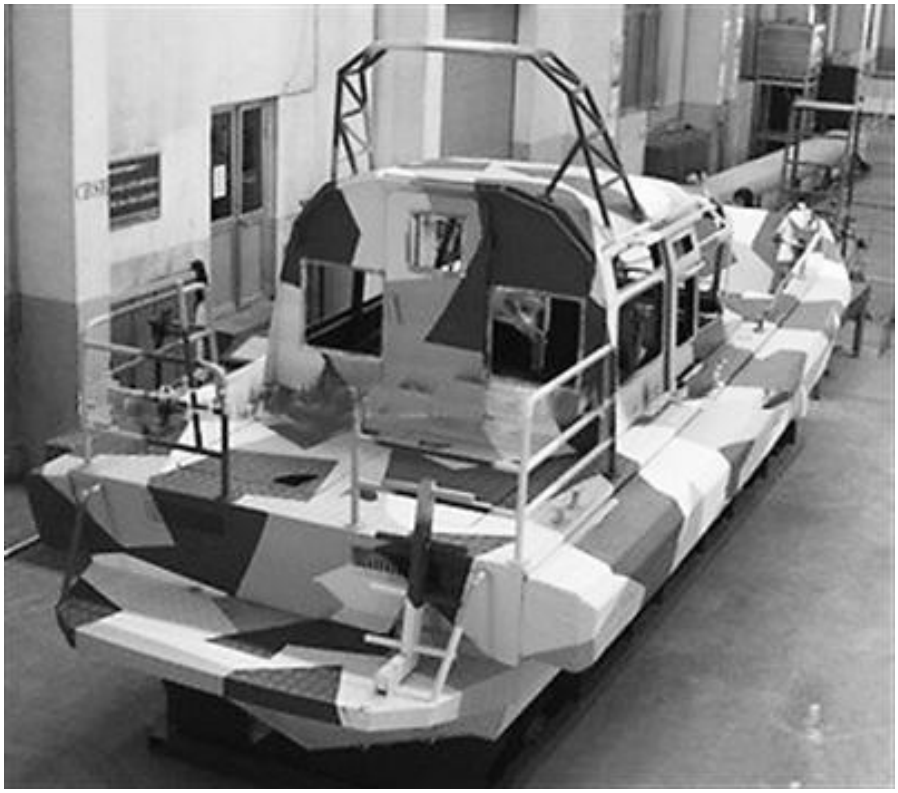


图 3　丛林船舶公司制造的铝合金军用艇

山东丛林铝合金船舶有限公司设计制造的军用全铝船具有灵活应变、快速打击敌人的能力，船身分隔为 3 个水密舱，有很高的抗倾覆与防沉能力，具有掉头灵活、操作性强、装备齐全等特点，配有内置双喷水发动机，设计最大航速 80km/h

（43kn），船身涂有水域迷彩，有相发强的抗侦察力（图 3）。军用全铝艇的基本技术参数如下：

总长，m　　8.6

型宽，m　　3.2

型深，m　　1.55

吃水，m　　0.7

设计最大航速，km/h　80（43kn）

发动机，kW　261×2

油箱容积，L　　240+350

定员，个　　6

1.7.23 日本的铝渔船与化气船

铝合金渔船

日本是全球铝合金渔船最多的国家，其小渔船材料的发展经历过木材-铝或铝/木混合-纤维增强塑料（FRP）-铝的路线。FRP渔船及游艇的鼎盛时期是上世纪的七八十年代，但由于高速化要求（铝更适于提高速度）与环保方面的严格要求，以及资源循环利用要求的日益提升，进入新世纪以来，FRP在小渔船与游船制造方面的用量逐年有所下降，铝船占的比例在较大幅度上升。FRP废料及废弃物既不易处理又不易回收，一方面对环境不友好，另一方面不利于资源循环利用，同时FRP渔船的强度与耐久性也逊于铝的。日本各县渔业监理船则

多为高速铝船。日本鹿儿岛县渔业指导监理船“第二制海”号长38m、总质量131.1t，最高速度67km/h，1992年9月竣工，日立造船公司制造。

尽管日本的铝合金渔船的技术与数量占世界第一，但在它的2013年60万条渔船中（登记的），铝合金的只不过2520条，仅占总数的0.42%，其中比较大的是49GT型拉网式渔轮。

大部分铝合金渔轮是小型的，占80%以上，多为惯性的，以V型为基本。船体结构以横骨式为主体，纵向有小肋骨作为加强小隔板，以防船体铝板变形。外板及甲板近似正方形，全部为较薄的厚板，之所以采用这种重型结构，是因为工作环境严竣，还要应对突发情况，减少质量、缩短建造时间，降低生产成本也予以考虑。渔轮可用板材也可以用挤压大型材建造。

由日本的渔轮结构可见，采用大挤压铝型材制造是今后的发展趋势，可用铝型材制造龙骨、舭角部纵材、防舷材兼舷缘材、牵引材及顶端材等，把这些材料巧妙地焊接连接起来可取得极佳的设计与使用效果。

2013年日本保有的渔船约60万条，其中铝合金的仅占0.42%。渔船的平均使用期限15a。由于渔船的数量以小型的为主，在日本铝合金渔船的平均铝材用量按4t计算。

液化天然气（LNG）运输船贮罐

1960年日本开始进口液化天然气（LNG,Liguified natural gas），均以LNG船运输。运输船上的LNG罐有摩司型（Moss）的，球形；隔板型、棱柱罐（SPB，为Self supporting prismatic自支持棱柱形中的SP与日本IMO规则B型组合而成）。球罐直径41m，可宽余地容纳一座10层楼房，质量900t，比一列16辆编组的高速列车还重约600t，是用5082合金变断面厚板焊接的，板的最薄处30mm，最厚处170mm。

天然气的主要分为甲烷，是一种绿色能源，燃烧时产生的CO2比石油的少得多，在-163℃液化，液化后的体积仅为气态时的1/600。每条船上有4个罐，球罐的容积31250m3，SPB型方罐的容积32000m3。罐的外表包以绝热性能很强的厚厚的保温层，每个球罐有6000块保温板，这是一种三层保温材料，中间为绝热板，表面为薄铝板，能确保罐内液化气的气化率不大于0.1%/d的世界最小等级。据称日本制造的最大LNG球罐的容积为44250m3，为标准球罐容积的1.42倍，直径44m，比标准球罐的大7.3%。这么大的熠熠生辉的银白色铝罐出现在海面着实蔚为壮观。日本LNG船是川崎造船股份有限公司出厂制造的。

液化天然气的运输

陆地贮罐有地上式的，也有地下式的。所用的低温材料有铝合金5083，含9%Ni的钢、不锈钢与铜等。液化天然气的

沸点（在1大气压）为-162℃，密度400kg/m3，发热量35700KJ/Nm。贮罐分内外两层，中间为保温层，地上式每个铝材用量1100t，地下式的用量为100t左右。

球罐的制造

香川县川崎造船股份有限公司坂出工厂于1981年首次在日本建造摩司型LNG船以来至2013年已造了28艘，所用铝材除本国生产大部分外，宽度大于4100㎜的厚板则从美国铝业公司进口。

球罐由三部分组成，下面的半球称为“南半球”，正中间的那部分称为“赤道环”，上面的半球称为“北半球”。赤道处板厚170㎜，此处与船体相连的“围裙”部件中装有支架，各种配管安于架内。

球罐制造犹如制造地球仪，由偶数瓜片型部件组成球形。首先将7叶瓜片瓜片型部件焊于一起，这种大部件称之为“花瓣”。在这个大“花瓣”上再焊上1叶瓜片形部件就成为8叶瓜片形的半球。焊2个这样的半球，一个南半球，一个北半球。最后将“南半球”、“北半球”、“赤道环”、“围裙”、配管支架组装焊接大罐。

赤道环是用170㎜厚的特厚板制造的。罐外表覆盖着复合隔热保温层，能防止外界的热传入，使内部的液化气保持着-163℃。复合保温层的外表为薄铝板，中间为两层塑料泡沫，

一层苯酚树脂的，另一层为硬质聚氨基甲酸乙酯泡沫，每个罐用了6000张这样的隔热板，用15000个螺钉紧固于罐体上。

制造完毕的LNG罐由2台各800t的起重机吊起移至船舱的规定位置。此种罐为完整的球形，各部件受力均匀，不存在应力集中源，不会产生裂纹。制造罐的瓜片尺寸各不相同，其大小决定于所处的位置，其代表性尺寸为60mm（厚）×1600mm（宽）×4000mm（长）。

罐体及配管支架用5083-0合金制造，“围裙”的一部分用强度高的5083-H321合金板材制造，1个大罐的铝材用量约750t，1艘船的用量约3000t。过去零部件的连接采用MIG（金属极惰气保护焊）法焊。为了安全地运输LNG，必须确保大罐的制造品质，特别是焊接品质。为此，对焊接部既要进行全部超声波探伤、染色浸透试验与抽样X射探伤等非破坏性检验二三遍，还要进行破坏性的力学性能检测，总之应加强制造中的管理，确保生产出安全而可靠性高的巨罐，做到万无一失。

1.7.24 铝材打造的水上漂浮农场

漂浮农场概念图。

用挤压铝材建造的牛舍内部结构。

据媒体报道，荷兰人彼得·范·温格登是一位大名鼎鼎的建筑师与建筑企业的老板，他领导与经营的贝拉顿公司

（Beladon）正在设计人间第一艘水上漂浮农场（Floating Farm），预计 2016 年 5 月在荷兰第一大港口鹿特丹市斯希丹港口下水，迎接那时在荷兰举行的世界奶业大会。

漂浮农场面面观

温格登说：“许多在城市长大的孩子都不知道我们喝的牛奶是哪里来的。在城市里，我们没有足够的空间养奶牛，至少在陆地上没有，但你可以在水上实现这个设想。”这就是他建设漂浮农场的初衷。

根据贝拉顿公司的设计，在这个漂浮着的流动农场，城市里居民既能看到现实中的奶牛也能看到如何挤牛，以及如何制造奶制品。正在制造的漂浮农场活像一个矩形鸟巢，长约 40m，宽约 30m，总面积约 1200m2，有上下两层，除上层顶部为装有太阳能光伏电池板外，其他房间的四面全部为透明玻璃墙，人们可以从外面清清楚楚地看到里面的场景。上层养牛，是牛生活的空间，绿树成荫，俨然一个小小的公园。可以容纳 600 条牛，每天可以生产 5000L 牛奶。下层有各种各样的生产与服务设施，如牧草区、牛奶生产区、牛排泄物收集与处理区、海水淡化区、能源供应室。

彼得·范·温格登的漂浮农场是完善的封闭循环系统，既是一个闭环，可以实现能源自给自足，可以自产牧草，淡化海水可保人蓄饮用和生活所需。牧草生产在下层的黑暗温

室内进行，无土栽培，采用 LED 照明灯，草的光照时间可以长达 20h/d，而且光照强度可以调节，因而草的生长速度大大提高。

浮动农场顶部的太阳能电池产生的清洁能源足可以满足人蓄生活与各种生产所需的电能。收集的牛排泄物用于生产沼气和制造肥料。产生的能源除自给外，还可以对外销售。

温格登的漂浮农场，是一个食品产业的 iPhone，它的吃水深度约 1.5m，不论是牛还是人在上面工作与生活，完全没有摇晃的感觉，如陆地上一样稳定。这种农场不但可以建在海上，也可以建在一切有水的江河湖泊上，只要水深超过 2m 就行。

漂浮农场的造价与普通陆地上农场的差不多，虽然其建筑材料费用高一些，因为用了不少铝材，但买水域的钱比买土地的钱少得多，结算下来，两者大体相差不多，根据他们的预算，首座漂浮农场总造价约 300 万欧元，出售牛奶、能源和奶制品的收入约 80 万欧元/a，加上劳务与维护费，预计 7a 可收回一切投资。

温格登的漂浮农场梦还没有做完：下一个目标是建筑漂浮的养鸡场，每个可养 8000 只，还打算将蔬菜温室也搬到海上，把花卉养殖大棚也建到水上，真正实现在沿海、滨湖城市进行农业生产的梦想。

铝材建造的漂浮农场

由于铝材的密度小、强度较高、易加工成形、抗海水腐蚀性强、价格适中、资源丰富、可回收性强（建筑这种农场用的铝材生命周期到期后，98%以上铝可以回收）等一系列优点。因此，铝在漂浮农场建造中在三方面得到大量应用。

建造上层建筑四面玻璃墙的框架，犹如现代建筑的贴地窗，挤压铝型材的用量约 7kg/m2，是用 6082 合金挤压的；

房顶上的太阳能电池板框架与支承架都是用 6063 合金或 6082 合金挤压型材制造的，用量约 10.5kg/m2。牛舍内部结构为全铝的。

LED 灯铝基板。农场用的大多数牧草是采用黑暗的温室和 LED 照明灯生产，无土栽培，荷兰大多数蔬菜和花卉农场都已实现这种技术。通过 LED 灯照明不但可以提高植物生长速度，而且可以延长光照时间，增加产量，以番茄生产为例，一株番茄苗在栽培约一个月后就可以开始结果。

在漂浮农场上，无论是生活办公照明，还是生产照明用的都是 LED 灯。如今 LED 照明已普及到国民经济的各个部门与人们生活的各个领域，铝基覆铜板是构成 LED 灯具核心部件之一。散热是 LED 首先必须解决的问题，否则它就无法工作。LED 的结点温度如果超过 85℃，芯片就会衰竭、荧光粉会氧化，进而引起光衰。

铝有良好的导热性，0~100℃的热导率为 238W/（m •K），因而热阻低，而且密度小，质量轻，并有很强的抗氧化性，是一种很好的热传输材料，使它成为首选的制造 LED 灯散热基板的材料。1969 年日本三洋公司发明了铝基板制造技术，1974 年开始应用于三洋技术公司（SDK）系列功率放大混合集成电路。中国铝基覆铜板研究始于 1988 年，1990 年首条生产线在原 704 厂建成投产。

LED 铝基覆铜板由三层组成：铝基板、中层的导热绝缘层、表面为铜箔电路层。器件运行时所产生的热量通过绝缘层快速传导到铝基板，然后由铝基板将热量散发出去，从而实现对器件的散热，使 LED 灯保持稳定的工作状态，工作温度始终不超过规定值。纯铝不但有高的热导率，而且比热容也大,99.996%高纯铝的为 934.92J/(kg •K)工业纯铝(99.5%）的为 964.74J/（kg • K），因此可用工业纯铝制造基板。

当今，美国的贝格斯公司（The Berquist），日本的理化工业公司（NRK）、电气化学工业公司（DENKA）、日东电工公司（NITTO DENKO）、日本住友电器工业公司（Sumitomo Electric）等代表了铝基板技术的先进水平。中国的铝基板产量虽大，但品质良莠不齐，缺乏核心技术支持，生产技术还未达到一般国际水平，与日本的相比还有相当大的差距。

在漂浮农场结构与 LED 灯具制造中，铝材起了关键作用，在水上建筑农场与房层无疑将是一种趋势，不但在像荷兰这

种缺地的沿海大国可大行其道，就是像中国这样的大国也大有发展前景。铝材除了上述三方面的应用外，漂浮农场的甲板、梯子、围栏、与陆地相连的桥梁等都可以用铝材建造。

1.8 包装及再生

1.8.1 包装铝箔从弱到强成就辉煌

改革开放以来,中国包装用铝箔产业得到了前所未有的快速发展,并已成为铝箔工业发展的重要推动力。同时,国内高档包装铝箔生产技术与供应能力不断提高,中国已成为国际铝箔市场不可忽视的重要组成部分。

目前我国能够经济批量生产的铝箔的最薄厚度为0.005mm。云南新美铝铝箔有限公司用铸轧带坯(宽1160mm)生产出了0.0055mm±0.0002mm的电力电容器箔,获得通用电气公司与ABB公司的认证,上海恩远实业有限公司贵州铝箔厂与皖北铝箔厂也批量生产0.0055mm的箔,这种箔的生产技术中国居世界领先水平。

包装铝箔多薄才算铝箔,不同的国家有不同的定义,中国把厚度小的平轧薄铝带称为铝箔。2005年欧洲经济共同体的一项规模宏大的研究显示,包装铝箔的厚度不能薄于0.006mm,否则不能保证应有的密封作用,会透过氧分子等。

改革开放前:我国包装铝箔产业处于襁褓时期

但在1950年~1978年这20年的铝箔产量年平均增长率为70.1%。虽然此期间总趋势是增长的,但不稳定,不是持续增长态势。改革开放前中国铝箔工业是一个弱小的产业。

中国首家铝箔轧制厂---华铝钢精厂的建设始于1932年,第二年采用进口原料生产了约1100t板箔材,但直到1938年才批量生产0.007㎜箔。该厂是外商独资企业,1960年由中国政府收买,成为中国国有企业。直到1962年中国仅此一个铝箔企业,其平均月产量为290t,其中箔材150t,板带材140t。

建厂初期,该厂有127名职工,1933年改为三班连续生产,月产量113t。1935年,熔炼、铸造、板带箔轧机及一些精整设备相继投产,产量最高达400t/mo,职工总数达400名。至此,华铝钢精厂已基本建成了一套完整的工业纯铝板的、带、箔生产体系。所用原铝锭是从加拿大、英国、挪威、瑞士等国进口的,产品销往国内市场。除烟箔外,还生产厚0.009㎜的裱纸的糖果包装箔,厚0.014㎜的裱牛皮纸的茶叶箔,厚0.006㎜~0.0075㎜的电子箔。

上海解放后,铝加工业困难重重,华铝钢精厂外商对企业经营失去信心,产量大幅度下降,产量由解放前的300t/mo~400t/mo下降到70t/mo~80t/mo,但生产未完全中断,直到1960年7月由中国政府有偿收归国有,更名为“地方国营上海铝制品厂”,后改称“上铝铝材厂”,隶属于上海市轻工

业局。该厂改为国营后生产发展极快,半年后生产发生了翻天覆地的变化。铝箔、铝板、铝带产量成倍地增长。同国营前相比,平均月产量增长414.4%,平均月产值增长385.4%,劳动生产率增长248.2%,1961年铝箔开始出口。

1961年,中国从德意志民主共和国引进一套生产能力为1100t/a的铝箔生产线,这条生产线于1970年在西北铝加工厂投产。此套铝箔设备是民主德国作为战争赔款为苏联制造的,苏联作为援华项目卖给中国。

1963年,东北轻合金有限责任公司参照华铝钢精厂的装备与生产工艺设计的铝箔车间投产,设计生产能力为1.5kt/a。上世纪六七十年代,全国各地仿照东北轻合金有限责任公司与西北铝加工厂铝箔车间的装备与生产工艺建设了一批小型铝箔厂,其中主要的有:北京延庆铝箔厂、常熟市铝箔厂、辽宁电子铝箔厂、四川江油西南金属制品厂、西安铝制品厂等。

改革开放后:我国包装铝箔产业与国际接轨,成为铝箔初级强国

改革开放以来是中国铝箔工业大发展、实现现代化、与国际市场开始接轨,以及与跨国铝业公司合资合作的时期。自1979年东北轻合金有限责任公司从德国阿申巴赫公司引进的万能铝箔轧机投产以来,截止1998年底,中国共有大小铝箔企业79家,总设计能力185kt/a,平均每个厂的生产能力为

2.34kt/a。拥有辊面宽度超过1000㎜的四辊铝箔轧机有45台,其中含中国第一重型机器制造集团公司设计制造的四辊不可逆式1350㎜万能轧机3台与洛阳有色金属加工设计研究院为常铝铝业股份有限公司设计的主要用于轧制铝箔的1350㎜冷轧机1台;引进的铝箔机40台,含二手轧机9台与华北铝业有限公司利用日本神户钢铁公司技术由涿神公司制造的5台1600㎜轧机。中国铝箔厂之多,平均规模之小,二辊机之多,均居全球之最。

1979年~2008年的30年是中国铝箔产业大发展的时期,前20年为铝箔产业的现代化奠定了持续稳定高速发展的基础,后阶段是成为世界铝箔大国与初级强国的时期,是赶超世界先进水平的10年。中国已成为一个初级铝箔产业的强国。

产量世界第一。2008年中国的铝箔产量达到1320kt,几乎为欧洲产量的1.5倍,美国产量的1.9倍,不过应指出的是,这种比较不是精确的,因为各国对铝箔的定义有差异,他们统计的全是素箔,而中国的统计却含有少量复合箔与深加工箔,但不管怎样,中国是铝箔第一生产国是毫无疑义的。在改革开放30年内,铝箔产量是平稳持续高速上升的,几乎没有大的波动。这30年的年平均增长率为34.3%,比1959年~1978年间的年平均增长率低35.7个百分点,这主要是因为前30年的基数过小。

产品具有国际市场竞争力,净出口量高。中国制造的包装

铝箔不但品质优良、价格合理、服务周到,而且品种齐,规格形成系列,可以满足世界各种包装生产线与设备的要求。从19世纪90年代初铝箔开始商业化生产以来,中国一直是进口铝箔的国家,自上世纪30年代初期中国开始生产铝箔直至2003年中国也一直是铝箔净出口国。在2000年是中国铝箔净出口最高年度,达到33.815kt,自此之后,净出口量逐年下降,直到2004年变成净出口国,这是中国铝箔产业发展史上具有里程碑意义的一年。在其后几年,净出口量一年比一年的大,年平均增长率达182.2%。但中国铝箔的净出口量仍不多,占产量比例仍小,例如2004年~2008年铝箔总产量4340.233kt,净出口量827.436kt后者/前者比值仅为19.1,即净出口量仅占产量的19.1%,即净出口量(355.365kt)最多的2008年,净出口量也仅占27%,比德国铝箔净出口量占产量的48%左右低得多。

而在可预见的时期内,中国成为铝箔净出口国的事实是不可动摇的,是中国材料制造业现代化程度提高的必然结果,是改革开放的丰收硕果。实际上,改革开放30年间,铝箔的出口总量大于进口量,例如1984年~2008年的出口总量1319.422kt,进口总量934.399kt,净出口总量385.073kt。

设备先进,生产技术跻身前列。截止到2008年底中国引进的以轧包装箔为主的现代化铝箔轧机84台,它们的生产能力约480kt,其中引进的2000mm级的箔轧机26台,从戴维公司引进的3台,从奥地利钢铁联合公司引进的3台。中国的这些大型

现代化铝箔轧机几乎占了全球总量的72%。

除了这些2000㎜级箔轧机外,还有引进的上世纪80年代初以来投产的≧1200~1750㎜的现代化的箔轧机40台。中国的一些装备设计制造企业在消化吸收引进技术的基础上创造性地制造了约18台2000㎜的箔轧机及其他大中型箔轧机70多台,它们在生产中发挥了很好的作用,尽管它们在装机总体水平上还与引进的同级别的装机水平有一些差距,但随着时间的推移这种差距在迅速缩短,大约在2018年,中国建设铝箔厂所需的机械设备都可以立足于国内,当然成套自动化控制设备与国际先进水平相比,还需要更长的时间才能赶上。但不管怎样,中国铝箔产业的装机水平与轧机数量等的在总体水平上都居世界先进水平。

从总体看,中国铝箔产业的生产技术水平已跻身世界先进水平,中国有多个企业均能批量生产0.005㎜箔,且用的是铸轧带坯;厦顺铝箔有限公司、中基复合材料有限公司、山东南山轻合金有限公司、上海神火铝业有限公司、昆山铝业有限公司都用2000㎜级铝箔轧机平稳地大批量生产1800㎜宽0.00635㎜的箔,同时它们生产的宽度大于1600㎜的箔占总产量的70%以上,产品品质的各项指标都已达到或超过国际标准与欧盟标准,这些轧机的产量都已超过设计目标。厦顺铝箔有限公司的产量不但大幅度超过设计值,而且出口量达到总产

量的40%以上,并呈逐年上升趋势;大亚集团丹阳铝加工厂以1台1500mm粗轧机、2台1480mm中精轧机年产约14kt0.00635mm箔,超过设计生产能力25%以上。中基复合材料有限公司既用进口的阿申巴赫轧机又用国产的2000mm轧机批量生产1800mm级的双零六包装箔。中国有一些企业如厦顺铝箔有限公司、大亚科技丹阳铝业分公司等的劳动生产率、成品率等指标都已达到世界先进水平。如厦顺铝箔有限公司用铸锭热轧的0.35mm带坯轧制0.00635mm箔的成品率达到86%以上;0.00635mm箔的厚度偏差小于±3%;针孔率小于50个/㎡;叠精轧平稳阶段的轧制速度达到600m/min。

江苏常铝铝业股份有限公司的空调箔在各项品质指标上全面可与日本多家企业生产品相媲美,不但得到在华日资空调器企业的认证,而且进入国际市场。

目前正在建设的大型铝箔项目有:山东鲁丰铝箔股份有限公司于2月26日举行了100kt/a铝板带竣工投产暨500kt/a铝板带箔科技园开工庆典仪式,项目总投资10亿元,2011年建成投产,可产板带箔500kt/a,成为中国最大的以铝箔为主导产品的平轧产品企业之一;中铝成都100kt/a铝箔项目正在进行紧张的前期工作;中铝西北铝加工分公司的50kt/a铝箔项目的建设已进入设备安装高潮;德诺铝业有限公司与德利铝业有限公司将建成中国新兴的大型铝箔企业之一。还有一些大型企业也正准备扩建。

中国铝箔工业尚处于高速持续发展阶段,大约要到2012年才能进入平稳的发展期,具有很大的发展潜力。

1.8.2 再生铝产业面面观

铝作为国民经济发展的第二大金属材料，可分为两大类：原铝与再生铝。原铝（Primary aluminium）是指采用霍尔-埃罗法(Hall-Heroult)即钠冰晶石(Na3AlF6)-氧化铝(Al2O3)熔盐电解法生产的，温度约950℃的液态铝是用虹吸法从电解槽中吸注到抬包内，过秤后注入混合炉。2011年全世界原铝产量43000kt，中国的产量19650kt，占全球总产量的45.7%；预计2012年全世界原铝产量约44720kt，中国的产量约21550kt，占全球总产量的48.2%，在2015年以前会继续保持这种态势。再生铝是指用75%以上的铝及铝合金废料（Scraps of aluminium and alminium alloys）经重熔与调整成分后供铸造用的铸块或熔体铝，再生铝（Secondary aluminium）又称二次铝，2011年全世界再生铝产量约14000kt。

废铝分类

废铝可分为两大类：工艺废料，工厂在生产与加工半成品铝材与加工件时各道工序产生的废料及废品，它们大都在工厂就地用于配制合金消费掉了，很少流入社会或卖给别的企业；废铝是指使用期满后报废的铝及铝合金零部件或整个

产品，收集与分类后卖给铝加工厂、铸造厂或再生铝厂，通常所说的废铝就是指的这一类。

按国家GB/T13586-2006，将废铝分为变形铝及铝合金废料、铸造铝合金废料、铝及铝合金屑、铝及铝合金碎片、铝灰渣。每一类又分为若干组，如变形铝及铝合金废料有8组：铝电线、铝电缆、铝导电板，包括光亮铝线、混合光亮铝线、旧铝线、旧混合铝线、废电线、新钢芯铝绞线、旧钢芯绞线、导电板；铝箔，包括新铝箔与旧铝箔；铝易拉罐，含新易拉罐、旧易拉罐、易拉罐压块、易拉罐碎片、打捆易拉罐；铝板含新PS基板、旧PS基板、涂漆铝板、飞机铝板、低铜铝板、同类铝板、混合新铝板、杂旧铝板；散热器片即铝散热器片；边角料指新边角料与混合边角料；器具即铝器具，指锅、盆、瓶等构成的废铝。

铸造铝合金废料有5组：铸锭，指杂铝铸锭，是以废铝熔铸成的锭或块；活塞包括无拉杆铝活塞（由不含拉杆的洁净铝活塞构成的废铝），带拉杆铝活塞以及夹铁铝活塞（由含铁铝活塞构成的废铝）；汽车铝铸件；飞机铝铸件；其他包括同类铝铸件（同种牌号的、新的、洁净的、无涂层的铝铸件、锻件和挤压件构成的废铝）与混合铝铸件，它包含各种洁净的铝铸件(可包括汽车或飞可铝铸件)混合构成的废铝。

第3类为铝及铝合金屑，有同类铝屑（同种牌号的、洁净的铝合金屑构成的废铝）与混合铝屑（多种牌号的、洁净的、

未腐蚀的铝合金混合构成的废铝）两组。

第4类为铝及铝碎片，有铝碎片与混合碎片两组，前者指含有铝及铝合金的干燥切片构成的废铝，后者是由铝、铜、铅、锌、不锈钢、镍、锡等有色金属（其中可能混带有石块、玻璃、橡胶、塑料和木料）构成的废铝。

第5类为铝灰渣，分为三组：熔渣（撇渣），是铝及铝合金在熔炼过程中产生的松散状或块状撇渣构成的废铝；炉底结块，是由铝及铝合金炉底结块构成的废铝；第三组为铝及铝合金熔铸过程中产生的铝灰。

废铝中不允许混有易燃、易爆、有毒、有腐蚀性或带有放谢性的物品，不允许混有医疗废物或密封容器。废铝表面的杂物应尽量清除。块状废铝单件的最大外形尺寸由供需双方商定。

废铝的进出口

中国是全球最大的废铝净进口国，与进口量相比，出口量可忽略不计。根据海关的历年年报，中国从1990年起进口量超过5kt（进口5.490kt）到2011年进口2685.733kt止，这22年共进口废铝21134.609kt，平均进口量960.66kt/a；出口140.016kt,平均出口6.364kt/a，净进口总量20994.593kt；平均净进口量954.3kt/a。这期间净进口量的年平均增长率为70.69%。

在1990~2011年期间废铝净进口量的年平均率这么大，说明中国对铝的需求旺盛，说明中国经济处于持续高速发展期。2011年废铝的净进口量呈负增长（-5.90%），这也是一个标志性的数字，至少说明两点：一是中国GDP上升速度开始放缓，二是中国可回收的废铝增加。

可回收的废铝知多少

铝及铝合金废料通称废铝。在国民经济建设用的金属中，铝的可回收性是最高的，这有四方面的意思，一是说铝有很强的抗腐蚀性能，在大气中几乎不发生腐蚀，仅在其表面形成一层薄若蝉翼的氧化铝膜，实际上这层氧化铝膜比蝉翼还薄，其厚度仅约5nm（纳米），其质量可忽略不计，同时它很致密，氧透不过，既能阻挡氧进入，也就是说一旦形成就会保护铝不再发生氧化反应，它的形成速度极快，“新鲜”的铝一暴露于大气中，就会立马与氧发生氧化反应，形成氧化膜。如果铝上的氧化膜被破坏，会在瞬间形成如故的新膜，这就是说铝及铝合金的表面氧化膜有很强的“自愈”能力；二是说废铝在复化的重熔过程中的能耗低，烧损少，废铝在重熔过程中的能耗相当于原铝提取总能耗（铝土矿开采、氧化铝提取、原铝生产能耗总和）的5%左右，即约870kWt（t再生铝）；排放的废弃物还不到原铝提取的1/25，社会效益十分显著，提取1t氧化铝需要2t铝土矿，产生固态废弃物--赤泥约1t，

赤泥虽不是有毒物质，却是有害的，是一种碱性物质，含碱物渗入农田进入水系，会造成危害，污染环境，同时存放它需要很大空间，需要筑坝围堵，一旦溃坝，后果不堪设想，同时需占有大片宝贵的农田资源，在氧化铝提取过程中需消耗大量的水，排出的水都受到不同程度的污染，电解铝时，生产1t原铝需消耗约450kg炭素，炭变成CO2与CO，以温室气体形式排入大气，电解生产铝时还会排放含氟气体，虽然这些氧化物大部分得到回收，但是还有不可忽视的量排入大气，会造成危害，因为氟化物有毒，而废铝以天然气或柴油重熔时仅放出CO2，若燃烧不完全还会释放少量的CO，但它们的量比电解时排放的少得多；四是用现代化技术与装备生产的再生铝品质可完全与原铝的品质相当，例如用废建筑铝材熔炼的6063合金锭完全可用于挤压新的6063合金建筑型材，用废旧电线熔炼的导电铝合金压各项指标方面与用A199.7E重熔用锭生产的无任何差别。

铝材投入使用后的服役期限长短不一，长的如建筑及结构的使用期限可长达五六十年或更长时间，短的如啤酒及饮料罐投入市场四五十天就可开始逐渐得到回收。如果中国的平均回收期按18年计算，同时可回收率按72%估算，则1t铝在使用500年后还剩约100g，可见铝是“生命周期最长的金属，是可回收最强的金属，是再生效益最大的金属，真不愧是“寿比南山的”最长寿的金属。

铝的可回收率为什么按72%计算呢？这是笔者长期工作得出的一个数字，虽不能很精确，但作为估算与作为宏观监控还是不离谱的。因为有些铝的投入使用后就烟消云散，再也收不回来了。那些铝无法收回呢？做鞭炮、燃料、油漆等的铝粉；制造药品、化工产品、净水剂等的铝；炼钢作为脱氧剂的铝；冶金中作为合金元素的铝，在制备镁合金、铝青铜、钛合金、高温钢、锌合金时都要消费相当多的铝；包装药物与食品、有些饮料（啤酒封等）、化妆品等用的双零铝箔等；制造炮弹、燃烧弹等用的铝；制造航天器用的一部分铝；三片罐的是拉盖与易撕盖；与钢铸铁及其他材料连接无法拆卸的小铝件；熔炼过程烧损的铝；铝材加工过程中损耗的铝，如平轧时磨下的铝粉，挤压煮模损失的铝，表面处理蚀洗的铝与转化、阳极氧化的铝，钢板、钢带镀铝或铝-锌合金消费的铝等等。笔者经过细致的处理与评估之后得出铝在一次使用周期可回收的铝为72%的可供参考与使用的数据。

这72%的废铝是指可以回收的并不是实际回收率，实际回收率比此数小得多，笔者认为全世界的实际回收率为60%。实际回收率依时间、地区、国家与地点而定，发达国家的回收率对某一种产品的可能高一些，而对另一种产品又可能低一些，总体来说，发展中国家较高。例如就全铝易拉罐的回收率来说，美国的只不过60%左右（2011年），巴西的80%以上，瑞典的92%，中国的则在99%左右。据笔者调查，在中国有四

五道回收关，家庭回收、小孩回收、拾荒者回收（拾荒者至少有三拨）。从理论上讲，易拉罐的可回收率应为98%以上，可是实际回收率不会超过75%，因为美国消费了全球50%以上的易拉罐，而它的实际回收率甚低。

建筑铝废料的实际回收率95%，汽车用铝的实际回收率90%，轨道车辆铝件的在95%以上，航空航天器报废与退役后铝的回收价值比其使用价值低得多，因为它们使用的是2XXX系及7XXX系合金，这两系合金的废料不相容，拆解时很难将其分开，混料的使用价值大大降低。美国将退役的飞机保存于干燥沙漠中，而不拆解，以后如何处理不知道，俄罗斯曾一度将报废的飞机卖给中国。

自1888年开始生产原铝以来，至2011年全球共生产了约8.6×105kt原铝，社会上积蓄的铝约6×105kt。

再生铝生产工艺

中国近期及今后相当长的时期内，生产再生铝及铝合金用的废铝来源有两方面，一是从国外进口的，这是主要方面，进口废铝就是进口资源与能源，就是在节能减排，就是在保护环境，何乐而不为呢！二是国内回收的废铝，由于社会上积蓄的铝还不多，铝制零部件的报废高潮期尚未到来，所以回收的废铝还远不能满足国内经济建设的需要。

由于废铝的成分复杂，还受到不同程度的污染，因此再

生铝的生产工艺与以重熔用铝锭为原料生产变形铝合金与铸造铝合金的工艺有很大不同，更要复杂些，生产流程也更长一些。

再生铝生产工艺流程的第一步就是分选归类又称预处理，分选得越细，归类得越准确，再生铝的化学成分就会越精确，经济效益也就越高，因此分选归类就成为再生铝生产极为重要的一道关键工序。分选归类的原则与目的是，去除废铝中混杂的其他金属与非金属；二是按成分或合金牌号分类，使废铝成分得到充分利用；三是将废料的油污、涂料、水分等清除干尽，使废铝完全符合入炉条件；四是使废铝中的铝得到最经济最合理的利用。

国外废铝的预处理已机械化、自动化，但国内的预处理技术还十分简单与落后，即使大型的再生铝厂与合资企业也没有比较先进的技术，几乎全部靠人工分选归类，分选人员占企业人员的50%以上，使用的工具是磁铁、钢锉，凭的是经验与眼力，效率低，质量也不尽如人意，成本虽然也有些优势，但已无进一步较大提高效率的潜力，因此，应采用先进的成熟的预处理技术。

先进的预处理技术就是在机械化自动化的生产线上对废铝进行分选，能高效地分出非金属物质与非铝的其他金属，能将废铝大体上按合金系甚至按合金牌号分类。目前先进的

废杂铝预处理技术主要有：

风选法。此法的主要功能是去除废纸、废塑料和尘土等，工艺简单，能够高效地分离密度小的轻质废料，但生产上应有强力的灰尘收集系统，避免扬灰污染环境，分离的废纸、废塑料等可作为燃料。

磁选法。用磁选设备分离废铝中有磁性的废钢铁等，铁是铝及铝合金中的最有害的杂质之一，应在预选工序最大限度地去掉。磁选设备形式多样，比较简单投资少的是传送带的十字交叉法。传送带上的废铝沿横向运动，当进入磁场之后废钢铁被吸起离开横向皮带，立即被纵向带吸起，运转的纵向带离开磁场后，废钢铁失去磁性而自动落入收集箱。此法处理的废铝料不宜过火，大块废料在破碎后方可进行磁选。

浮选法。大都以水为介质，可以分离其密度比水的低的轻质杂质如废塑料、木头、橡胶等轻物质，泥土可溶于水。主要设备是螺旋式推进器，废铝被其推出，污水进入沉淀池。

抛物选矿法。此法是利用各种体积基本相同的物体在受到相同力被抛出时落点不同的原理，从废铝中分选密度大的重有色金属如铜、铅、锌、锡等。用相同的力沿直线射出密度不同而体积大体相等的物体时，各种物体会沿抛物线方向运动，在落地时有不同的落点，从而分离不同的物体。此工艺在日本、美国等获得应用，但设备价格不菲，国内尚未采用。

涂层的干湿法处理。多数废旧包装容器如废易拉罐、牙膏皮、化妆品管等表面都有一层保护涂层与装潢印刷油漆，同时它们壁薄表面积大，一些企业往往不作任何处理而直接回炉，不但加大了铝的烧损，而且加重了铝中的杂质含量，熔体处理费用也有所上升，排放的烟气也增多。因此在预处理过程中必须去除废铝上的各种涂层，主要的先进除膜工艺有干法与湿法。干法又称火法，一般是在回转炉中焙烧，燃料可用回收废料上漆膜碳化释放的有机物气体，因而此法的热效率高。生产时，回转窑缓缓旋转，窑内废铝片、块相互碰撞与震动，最后碳化物从废铝上脱落。脱落的碳化物一部分在回转窑的一端收集，还有一部分在收尘器中回收。

废铝零件往往有一些镶嵌件，它们是以钢或铜合金为主的非铝件，在熔炼过程中不及时扒出，就会导致再生铝成分中增加一些不需要的成分如铁、铜等。因此，在再生铝熔炼初期，即在废杂铝（非均一的高等级洁净废铝）刚刚熔化不久就必须有一道扒镶嵌件的工序，俗称扒铁，把废杂铝中的尚未熔化的铁、铜块等扒出，扒得越及时越干净，于生铝的成分就越易于控制。扒铁时熔体温度不宜高，温度升高会有更多的铁、铜等熔解，虽然温度比它们的熔点低很多，扒铁也可以视为预处理的一部分。

经预处理后的废铝就可以装炉熔炼了，铝合金熔炼的基本任务就是把某种配比的炉料投入熔炼炉内，经过加热和熔

化得到熔体，对所得熔体成分进行调整，添加或降低某些元素的含量，得到合乎要求的合金熔体，并要严格控制熔体中的气体与氧化物夹杂等，使熔体的主要合金元素及杂质元素含量合乎要求，以确保铸件具有优良的品质。

铝及铝合金熔体有强烈吸氢倾向，使铸件产生气孔与疏松，也极易氧化，生产氧化物夹杂。因此，防止和去除熔体中的氢与氧化夹杂（AL203）便成为再生铝熔炼过程中最突出的关键问题。

再生铝的熔炼铸造过程如下：

装炉-熔化（加铜、锌、硅等合金元素）-扒渣-加镁、铍等（如必要）-搅拌-取样-调整成分-搅拌-精炼-扒渣-转炉-变质处理及静置-净化处理-铸造。

正确装炉对减少金属烧损及缩短熔炼时间起着重要作用。再生铝熔炼多用反射炉，装炉时先在炉底铺一层铝锭，放入易烧损料，再装废铝料，再压上铝锭，熔点较低的回炉料装于上层，使其最先熔化，流下将下面的易烧损料覆盖，从而减少烧损。

与发达国家的主要差距及展望

中国不但是原铝产业大国，而且已成为一个初级强国。但与世界原铝强国相比，在不少方面还存在着较大差距，而

再生铝产业与国外的差距则要大得多，无论废铝预处理方面还是在再生铝熔炼-铸造方面，以及研发技术与力量方面都存在着相当大的差距。

首先在预处理方面：中国几乎全是人工分选，而发达国家则实现了机械化与自动化，形成了电脑控制的连续生产线，风选生产线也相当普及。多数再生铝在配料方面还比较粗放，大多数企业没有采用先进的计算机管理系统，有待进一步精细化，在熔炼方面采用的炉型有侧井反射的、双室的、水平回转式的、倾斜回转式的、感应式的、常规反射式的、坩埚式，这些炉中国都有，但主要问题在热效率与环保方面，发达国家的熔炼炉平均热效率已达到68%，个别的可达80%，排放物都能达到当前当地严格的环保法规与条例要求，特别是欧洲的再生铝企业做得最好。中国中铝青岛铝业公司与南海铝业公司都引进了先进的侧井式反射炉，热效率可达65%，是中国当下最先进的熔炼炉之一，总体上中国再生铝行业的平均热效率还不到42%，而且环保方面还面临着一些亟待改进的严竣挑战。实际上我们与国外最大差距在创新与研发方面，虽然早在上世纪60年代就在徐州建立了全国性的再生资源在研究单位，但在有些方面还跟不上国民经济持续高速发展需要。国外一些企业生产的再生铝的品质可以赶上用重熔用铝锭配制的合金的，中国一些中小再生铝企业的产品品质还有很大的改进潜力，氢含量、金属杂质及非金属夹杂物含量普

遍偏高。

中国再生铝工业是朝阳产业，再生铝产量处于供不应求的态势，2012年，国内再生铝消费量将达5800kt，约为原铝消费量的28%，今后会逐年有所增大，2020年可增长到31%左右。在此需指出的是，对一个国家来说，讲原铝/再生铝产量比值没有实际意义，因为此数大小并不能说明工业化程度高低与资源利用情况。然而原铝表观消费量/再生铝表观消费量比值大小却有着一定的实际意义，比值越大表示工业化程度高，资源利用程度也越好，而产量比值大小却不能说明这些问题，因为某个国家或地区可根据资源、能源、地域情况确定是否发展原铝和/或再生铝产业，例如日本、韩国、中国台湾地区在上世纪70年代世界石油危机后决定停产原铝而发展再生铝工业，而发展再生铝工业也是有度的，以前满足需求为准，因为它毕竟不是高技术产品，附加值不高，还要消耗一定的能源，排放一定量的对环境不利的物质。

中国是一个废铝进出口大国。2011年进口2685.733kt，出口1.20kt，净进口2684.526kt，这种局面将继续延续下去，至少在2030年以前会如此。另外，由于拆解进口废旧机器获得了约600kt废铝，所以进口的废铝可以认为约为3300kt。如果按83%的实收率计算，可获得再生铝约2700kt。

国内回收的废铝尚未到高峰期，大致2015年将迎来高峰

期的第一年。2011年国内回收废铝约3600kt，折合再生铝约3000kt，所以当年中国再生铝的产量约5700kt。在今后10年内产量的年平均增长率可达12%,2020年的产量可超过15700kt。这是乐观的预测，由于国内回收的废铝逐年上升，进口的废铝会有较大下降，同时国民经济的发展处于稳中求进的平稳发展阶段，GDP的年平均增长率有可能在7.5%左右；因此，再生铝产量的年平均增长率有可能不大于10%，如果按10%估算，那么2020年的再生铝产量可能只有13400kt，也许这是更可靠些的预测。

中国到了建设生产能力100kt/a废全铝易拉罐项目的时候了。废易拉罐是一种回收价值高的品质好的废铝，回收后又可以制成轧制3104合金罐体薄带材的扁锭，2012年中国罐料（罐体料与罐盖料之和）的消费量已近300kt，如果能回收约30%，可获得约100kt优质罐料，在熔炼与调整成分时应加约20%重熔用铝锭等可得到约105kt3014合金扁锭，这类项目宜建在罐体料生产厂附近，凡3014合金带卷产量≥200kt/a的企业都具备了建设废旧易拉罐再生项目条件，可分两期建设，各期生产能力50kt/a。对一个年消费制罐料（罐体料与罐盖料之和）大于300kt/a的国家来说，回收60kt/a废罐应该完全可以做到。目前，中国的废罐回收率虽是世界上最高的，但是都用于再生别的合金，这不符合精细的循环经济理念，没有做到物尽其用，是对资源的一种浪费。

对再生铝产业，环保是一个很重要的问题，发达国家对再生铝行业不但制定了严格的环保法规，而且监督机制完善。按欧洲标准，排放的烟气的粉尘含量不得超过10mg/m3，废水污染含量不应超过10ppm/L，而中国再生铝行业特别是一些中小企业排放物还远达不到此标准，有待改进，应进一步加强对再生铝行业的管理，加大准入制度管理与建设，分期分批淘汰落后生产能力，加强环保措施等。

1.8.3 中国铝加工亟待补上废罐优化循环短板（上）

1997 年~2013 年美国铝易拉罐的消费与废旧罐回收数量

年度	回收的罐 kt	销售的罐 kt	回收率 %	罐数 个/kg	罐质量 g/个
1997	931	1400	66.5	71.80	13.93
1998	879	1400	62.9	72.84	13.73
1999	876	1400	62.9	72.97	13.70
2000	858	1381	62.1	73.02	13.70
2001	755	1362	55.4	73.63	13.58
2002	722	1353	53.4	74.49	13.42
2003	671	1341	50.0	74.34	13.45
2004	688	1344	51.2	74.78	13.37
2005	686	1319	52.0	74.98	13.34
2006	689	1334	51.7	75.42	13.26
2007	715	1336	53.5	75.33	13.27
2008	706	1304	54.1	75.35	13.27
2009	732	1276	57.4	75.73	13.21
2010	739	1272	58.1	75.68	13.21
2011	799	1229	65.0	76.21	13.12
2012	804	1199	67.1	76.65	13.05
2013	781	1171	66.7	77.05	12.98

在铝的循环经济中，废旧铝罐再生-加工-制罐-装罐-消费可形成一条永不消失的最优化产业循环链，不但经济效益巨大，而且社会效益更为巨大，节能减排效果十分显著。

2015 年全世界易拉罐罐身 3104 合金带材的产量达 3100kt，中国的产量约 400kt，占世界产量的 12.9%。国外罐身带材的再生废罐含量已达 54%，而中国的废料含量为零，美国诺贝丽斯铝业公司 2020 年生产的罐料的废罐料将达 90%，真正实现最优化循环，中国如果不尽快建设废旧罐回收再生

3104 合金扁锭项目，则到 2020 年时中国生产的罐身带材的废料含量仍将为零，与国外的差距越来越大。

自 2010 年以来，国外凡是可生产罐料的铝加工企业，几乎都建设有废罐回收与再生车间或中心，最大项目再生 3104 合金扁锭生产能力已达 400kt/a，中国的 6 个罐料生产厂却没有一个建此类项目的。为什么国外的企业在红红火火地建这类项目，而国内的建设却雅雀无声？国外已在研究单一制罐合金，并初见成效，推出了 Evercan TM（永久制罐）合金与 EvercleTM（全循环）合金，它们的循环废料含量都在 90%以上，然而中国罐料生产企业却对此无动于衷。

中国的废罐回收率是世界上最高的，大于 99%，可是回收的废罐都没有做到物尽其用，没有再生成 3104 合金，而是用于生产铸件，这是对资源的浪费。因此，希望有关部门出台有关政策与措施，对废罐的最优化循环加以引导和扶持。

中国铝工业亟待补上废罐优化循环利用这块短板。

美洲

美洲的再生废旧易拉罐产业除一个企业外，其他的都集中在美国。

美国

美国是全球最大的罐料生产者，是全铝易拉罐的发源地，也是最大的废罐回收国家，但是它的回收率不是最高的，2015

年的回收率近 70%。美国废罐 1972 年的回收率只不过 15%。罐的质量在逐年下降，1972 年约为 68g/罐，可是 2015 年的下降到了 12.8g/罐，43 年下降了 81.2%。

美国在铝易拉罐方面创造了诸多天下第一：罐料产量最多，2015 年的产量 1380kt，约占世界总产量的 45%；回收的量也是世界最多的，约占总回收量的 40%，2013 年美国的回收量 781kt，全世界的为 1950kt；所用罐料厚度是最薄的，最薄厚度已小于 0.25mm，罐的壁厚已小于 0.08mm，再减薄的潜力已不大了，除非在合金成分与制造工艺有较大突破；罐料配料中的废旧罐比例已达 75%；诺贝丽斯公司独创的“EvercanTM”合金具有里程碑意义，制造 12OZ（盎司）啤酒罐的 EvercanTM 合金含 70%回收罐，而罐身铝薄板带的回收罐料含量却高达 90%。

目前，美国红野兔（Red Hare）啤酒公司于 2014 年 4 月决定用“EvercanTM”合金罐。该公司是一家微型啤酒企业，是美国当下发展最快的这类企业之一。用新型“EvercanTM”合金制造啤酒罐的优点：可在保质期内确保酒的新鲜度，保质期也比其他材料的长；便于运输与携带；有助于环保、节能与发展循环经济等等。现在美国约有 400 个小型啤酒厂，生产 1300 多种不同品牌啤酒，都是“EvercanTM”合金罐的潜在用户。“EvercanTM”合金罐啤酒将会风靡北美洲、欧洲、南美洲与亚洲，而生产这种罐的将是跨国制罐公司 SCC。红

野兔公司是首家用“EvercanTM”合金罐的企业。

Element 13 回收厂

威斯合金公司 Element 13 回收厂是美国著名的从事废铝回收、铝材生产和装备制造的大型企业，总部位于阿拉巴马州马斯克尔肖尔斯市（Muscle Shoals,Ala.），下设 4 个全资子公司：从事废罐回收和罐料生产的威斯合金公司（Wise Alloys），从事废铝回收与再生的威斯回收公司（Wise Recycling），以及 2 家从事装备制造与维修的公司。威斯合金是美国第三大铝罐料生产商，占地 404700m2（100 英亩），下设两个厂：合金厂和 2012 年扩建完成的 Element 13 厂。

Element 13 厂专业从事废旧铝罐熔炼铸造，原是雷诺兹金属公司 1969 年建设，1999 年为威斯集团收购，2011 年威斯公司投资 2500 万美元对其进行改扩建，已于 2012 年 3 月完工，占地 300km2。威斯合金厂是一个铝板带轧制厂，利用 Element 13 厂生产的 3104 合金扁锭轧制罐料，此外还生产包装铝箔。目前，总产生能力 430kt/a，其中罐料 270kt/a。

Element 13 厂原有一条打包废罐破碎线、2 台脱漆窑、6 台熔炼保温炉。扩建项目增添的设备有：113t 的熔炼炉 1 台，1 条脱漆窑生产线，1 台生产能力 36t/h 的废罐破碎系统。整个工厂处理废罐的能力达到 146 亿个/a。经过这次改扩建不但提高了工厂的生产规模，而且在废料处理和熔炼-净化处理

方面也得到了提升，使工厂成为仅次于德国纳希特斯特回收再生中心的全世界第二大废旧易拉罐熔炼再生企业。

威斯集团通过威斯回收公司在美国建立了庞大的收购废铝与运输废料的网络，业务网点主要集中在阿拉巴马州、科罗拉多州、佛罗里达州、肯塔基州、北卡罗莱纳州、新墨西哥州、德克萨斯州、维吉尼亚州等。威斯回收公司（Wise Recycling）将收集到的废旧铝罐打成包运往 Element 13 厂熔炼铸造成扁锭，再运往合金厂轧成罐料带卷。威斯公司已形成完整的废旧罐回收-熔炼铸造-轧制-制罐-消费者-废罐回收的循环经济产业链。废罐收购车上装有打包机。

Element 13 厂的主要装备有：

锤式破碎机

锤式破碎机（hammer mill）位于预处理生产线的前部，用于破碎废罐，以缩减废料体积和便于以后处理。这台破碎机是废旧易拉罐行业最大者，是美国马格纳技术工程公司提供的，破碎能力 36.3t/h。

气刀与磁选机

气刀分离器（air knife separator）用于分离与“淘洗”废铝碎料中的种种杂质，如重金属、石头、塑料、纸屑等。废铝碎料由振动给料器运送穿过高速运转的气刀（气幕）。通过振动可使细小和较重的物质率先从筛条间隙落下，穿过气

幕，落至传送床底部，铝及其他较轻的物料被吹送到分离料斗，然后通过高速运转的悬挂式磁选机和带式磁选机将铝废料中的铁磁性杂质分离。这两种分离机都是亚当兄弟公司（Adams Brothers Inc.）生产的。

脱漆窑

废罐碎片表面有一层涂料及印刷油漆，还有水份，油漆、涂料的质量约占 2.5%，在进入熔炼炉之前必须将它们易除干净。为此，Element 13 厂采用托尔普技术公司（Thorpe Techonologies Inc.）的脱漆窑（delacquering kiln）。涂层包含各种有机污染物（油、油漆、涂层、墨水、塑料、橡胶等）。烘干脱漆温度在 538℃，但不宜超过 580℃。

熔炼炉

工厂有 1 台 113t 的双室熔炼炉，是菲弗斯北美建设服务公司提供的。该炉有一个侧室，将废料装于此室，与铝熔体泵的一端相连，熔炼室中有 2 台机械泵，将装入的冷废料与铝熔体混合，加速其熔化，铝熔体泵可加速铝循环，加速固态废铝与铝熔体间的热交换。此外，还需要向炉内添加一定量的精炼剂。

熔炼好的铝熔体通过流槽注入可装 18t 液态铝的大坩埚内，坩埚置于出铝坑内的凹槽上，随后运往威斯合金厂，铸成 14t 的扁锭，轧制罐料带材。

环保措施

威斯合金公司的 Element 13 厂有完善的环保设备，排放的气体与固体废充物可满足当前最严格的环保法规条例要求，厂内装有现代化空气污染控制系统，用以监控污物排放。破碎机、除漆窑、反射熔炼炉都有除尘装置。威斯金属已构建一个从废旧铝易拉罐回收、再生、生产罐料的闭环系统，使废旧易拉罐的使用价值与资源的循环效益得到了充分的体现与发挥。

美国铝业公司田纳西州轧制厂

美国铝业公司（Alcoa）于 2013 年 9 月组建了一个废铝回收与再生业务部（Alcoa Recycling），在总部的统一领导下，组织与协调公司内部成员企业废铝的回收与再生循环，形成高效的闭环循环系统，特别是废旧易拉罐与航空航天铝合金废料的回收处理，2012 年美国铝业公司回收的废旧易拉罐 635kt，2015 年的回收量估计为 650kt，它回收与利用这种废料的历史悠久，积累了相当丰富的经验，有一套行之有效的技术与工艺，其田纳西州轧制厂是其最大的轧制厂，也是其最大的罐料生产企业与回收废旧易拉罐最多的企业，它是全球最早生产罐料的企业之一，现在生产的罐料的平均废料含量约占废料总量的 90%。公司包装铝材已多年实现了从摇篮到摇篮（cradleto cradle）的生产过程，即闭路循环。

诺贝丽斯铝业公司

诺贝丽斯（Nobelis）铝业公司既是全球也是美国最大的平轧铝产品企业，更是废旧易拉罐的最大回收与再生利用公司，而在研发再生制罐铝合金方面更是领导世界潮流。2014年11月诺贝丽斯铝业公司发表公告称，至2017年年末公司所生产的罐身带材将全部是用高品质再生evercanTM合金生产的，这可是全世界首次，可使生产的12oz（盎司，1盎司=28.35g）标准啤酒罐的再生铝含量为70%，而其罐身铝带再生铝含量为90%，而当前全世界生产的制罐铝带的再生铝平均含量为50%。从2014财政年度末开始，美国一批制罐企业，诸如雷得哈啤酒公司、雷得布里克啤酒公司、南行啤酒公司、第二独立啤酒公司、希尔顿啤酒酿造总公司都承诺选用埃弗罐身合金（evercan）制造易拉罐罐身。选用埃弗罐身合金不仅有重大的环保意义，而且有相当大的经济效益，节能减排效果显著。诺贝丽斯公司不但在全世界率先研制成埃弗罐身合金，而且又于2015年向全球市场推出独树一帜的新研制的埃弗制盖合金（evercan end）。

2015年3月，诺贝丽斯铝业公司称：新近研制的evercycleTM合金是一种再生金属含量很高的合金，用于制造食品易拉罐，已得到制罐企业的认可，它由90%旧废料（从社会上回收的废旧罐）与10%新废料（罐料轧制厂与制罐厂

的工艺废料）熔炼而成。

合金资源公司马斯基根再生厂

2013 年 7 月合金资源公司（Alloy Resources Corp.）在密苏里州马斯基根市的一个铝、锌回收再生厂建成生产，处理炉渣、废建筑材料、汽车车轮、铝罐、挤压材、厨具、其他废料。该厂对所有锌、铝废料进行分类、检验、清洗、熔炼，拥有现代化的反射炉、除气系统与铸造装置，再生金属生产能力 41kt/a。

巴西

诺贝丽斯巴西公司是南美洲最大的易拉罐铝材生产者，同时还是最大的废旧罐回收与再生的企业，形成了一个最完整的循环经济产业链。

2014 年巴西易拉罐销售量增长率为 4%，同时加上巴西的经济率为 6%~9%，使巴西成为全球经济增长最快的国家之一。2013 年巴西全铝易拉罐销售量为 215 亿只，为了满足 2025 年以前对铝逐年增长的需求，诺贝丽斯公司决定投资 3.4 亿美元的计划已于 2014 年完成，薄带卷的生产能力已由 400kt/a 上升到 600kt/a，废旧易拉罐回收能力也有相应的提升，这是诺贝丽斯公司对南美洲最大的一次投资，回收能力

由 200kt/a 上升到 390kt/a。

尽管巴西国内政治形势压力大，早季干旱严峻，水电价格上升，但是 2014 年 11 月发表的一份报告中称，巴西废旧易拉罐回收率仍高达 98%，仅次于中国的大于 99%。水电价格于 2014 年 2 月达到峰值 350 美元/mWh,但以后下降到 165 美元/mWh，但仍然比全球平均价格高得多，同时劳动成本也在不断上升，税收也在上升，尽管如此，废旧易拉罐回收率仍是全世界最高的，同时铝的消费率以两位数字增长，挤压铝材消费也在上升。

1.8.4 中国铝加工亟待补上废罐优化循环短板（中）

欧洲全铝易拉罐回收再生厂或项目

国家	公司	再生 3104 合金生产能力,kt/a
德国	纳希特斯特轧制厂	400
德国	阿卢诺夫轧制厂	100
英国	拉特福德回收厂	220
意大利	米兰轧制厂回收车间	100
奥地利	阿马格公司废旧罐回收车间	76
法国	纽布利萨克轧制厂回收轧厂	100
总计		996

2012 年欧洲各国废旧铝易拉罐的回收率（%）

国家	回收率	国家	回收
芬兰	97	捷克	62
比利时+卢森堡	97	法国	57
德国	96	斯洛伐克	57
挪威	96	匈牙利	31
瑞士	92	爱尔兰	51
瑞典	92	保加利亚	50
冰岛	90	立陶苑	45
荷兰	86	马尔他	44
波兰	76	塞浦路斯	43
丹麦	71	斯洛文尼亚	42
奥地利	69	希腊	38
意大利	67	罗马尼亚	34
联合王国	65	葡萄牙	33
西班牙	65	拉脱维亚	30
爱沙尼亚	63	–	–

欧洲

欧洲是世界第二大铝罐料生产与消费地区，因而是第二大废旧易拉罐回收与再生地区。2015 年的回收率接近 74%，回收的罐数约 280 亿个。欧洲已有 6 个再生厂或项目，总生产能力 996kt/a,其中最大的诺贝丽斯铝业公司的纳西特斯特厂。

1991 年欧洲的废罐回收率只有 23%弱，2011 年的回收率达 68%，为 20 年前的 3 倍有余。欧洲回收的废罐除用于生产 3104 合金外，其余的再生成铸造摩托车发动机缸体合金得到了最有效的利用。

据欧洲铝业协会统计，2012 年欧洲 27 国（含土耳其）废旧易拉罐回收率达到创纪录水平的 69.5%，回收率最高的芬兰和比利时（含卢森堡）为 97%，其次是德国和挪威，都是 96%，最低的拉脱维亚仅 30%。2012 年欧洲从回收的 365kt 废旧易拉罐再生 3104 合金，少排放 3.12mt 温室气体，相当于 340000 个欧洲市民一年的温室气体排放。按欧洲铝业协会制定的回收目标，2020 年的回收率应达到 80%，2015 年的达到 75%。

纳西特斯特回收再生中心

该中心位于诺贝丽斯铝业公司德国的纳西特斯特轧制厂范围内，是诺贝丽斯公司的独资企业，再生 3104 合金锭生产能力 400kt/a，是世界最大的废旧易拉罐回收再生中心，所产锭的最大长度 10m，铸造完毕后随即运往轧制厂轧制 3104 合金带材。纳西特斯特再生中心 2014 年 6 月开始试生产，工作人员 200 名。回收再生中心 2013 年 3 月开始建设，6 月厂房封顶，11 月完成设备安装，从开工建设到铸出首块大锭仅用了 15 个月的时间。2015 年 10 月起满负荷生产，从试生产到达产的时间也仅仅 16 个月。据悉，诺贝丽斯公司计划在欧洲再建 2 个废旧罐再生项目，厂址与规模尚未确定。显然，每个项目的规模不会比纳西特斯特中心的更大。

该中心厂房为了能获得最大的经济效益，所有设备都是

量身定制的，都达到世界当今先进水平。回收的废料分为 18 种，回收量约 370kt/a，其中 90%从市场上收购，因为在配置再生合金成分时，需要约 20%从市场上收购，因为在配制再生合金成分时，需要约 20%的重熔用锭，所以从市场收购的废料不会超过 370kt/a。回收的废料经预处理后熔炼铸造成轧制罐料与汽车板带材的锭与压铸汽车零部件的铸造铝合金。

中心有 3 台生产能力各 25t/h 的破碎机和 1 台产能 5t/h 的廻转式破碎机,总生产能力 80t/h ,分别形成 3 条生产线：一条柔性综合处理线，一条废罐处理线，一条机械加工切屑处理线。生产能力 25t/h 的破碎机配置了 X 射线分选装置，是当前铝废料处理中最大与最新的系统。

有 3 台生产能力各为 20t/h 的回转窑，用于烘干破碎废罐片上的水分及其涂层的挥发，将碎片加热到 550℃，挥发有机涂料气体燃烧后烟气温度可达 850℃，可用于建筑物采暖或循环利用，用于加热废罐片，去除有机物涂料，而利用朗肯循环原理，可生产 19MV 的电能。废旧铝罐上有机物涂料质量占 2.5%左右。

该中心有 3 台各 130t 的侧室炉，用于熔炼经过预处理的废旧罐碎片，是诺贝丽斯铝业公司与麦舍塞热能公司工程技术人员设计的，由麦舍塞公司筑砌，有很高的热效率，融化速度快，且在低温下熔化，主室温度仅约 675℃，可大大降低炉料与熔体的氧化，炉渣量显著减少。

还有 3 台容量各 175t 双室熔炼-保温炉组，熔膛温度约 760℃，向 2 台瓦格斯塔夫半连续铸造机提供铝熔炼体，可铸造 10m×2.1m×0.6m 的铝合金扁锭，一块这样的扁锭轧制的 3104 合金带材可冲制 150 万个罐体。

海德鲁铝业公司扩建阿卢诺夫轧制厂回收再生生产线

海德鲁铝业公司于早些时候投资 45 百万欧元在德国阿卢诺夫铝板带轧制厂建一条废旧铝易拉罐回收再生生产线，生产能力 50kt/a，可于 2016 年投产，届时该厂再生 3104 合金生产能力将扩大一倍，达到 100kt/a。新生产线将用人 40 名。随着新生产线的投产，海德鲁铝业公司在格雷文布罗伊轧制厂-莱茵铝厂-阿卢诺夫铝板带厂的势力与业务得到进一步加强与提升，这 3 个厂已形成一条完整的产业链，莱茵铝厂铸造的扁锭供给阿卢诺夫轧制厂，轧成带卷，大部分供给格雷文布罗伊轧制厂生产铝箔与特薄带材。阿卢诺夫轧制厂是海德鲁铝业公司与诺贝丽斯铝业公司的合资企业,各占 50%股份，所以也有报道，将此项目列为诺贝丽斯铝业公司的。回收车间生产的再生 3104 合金锭可以满足公司对该合金锭 25%的需求。

英国拉特福德回收厂

拉特福德回收厂是诺贝丽斯铝业公司的全资子公司，位于英国沃灵顿郡的拉特福德镇。2013 年 11 月诺贝丽斯公司投资 600 万英镑兑该厂进行了改扩建，使其再生 3104 合金扁锭的生产能力上升到 220kt/a，成为欧洲第二大废旧易拉罐回收再生企业。该厂现有员工 165 名。

意大利米兰轧制厂回收车间

2013 年 5 月，诺贝丽斯铝业公司投资 1200 万欧元在意大利米兰市匹夫埃墨尔轧制厂内建了一个废旧易拉罐回收-熔铸生产线。该厂是一个完整的平轧铝产品企业，现有员工 400 名。至此，诺贝丽斯铝业公司在欧洲共有 4 个废旧易拉罐回收中心。该厂再生 3104 合金扁锭生产能力 100kt/a。

奥地利有色金属加工公司是该国唯一的有色金属轧制公司，可生产铝、铜等金属的各种半成品，但铝材产量最多，在铝加工厂内建的废旧全铝易拉罐车间已于 2015 年 7 月投产。

挪威霍尔麦斯特拉得回收厂

海德鲁铝业公司 2013 年 11 月称，为了建立更加环保友好的社会将加大回收挪威的废旧易拉罐，回收厂建在霍尔麦斯特拉得，采用法国的再生处理工艺。诺斯克·莱赛克公司将参与此项工程，负责废旧易拉罐的回收，它们的合作可缩

短废铝的运输路程，对环境保护有利，可提高回收率。莱赛克公司每年可回收 6200t 废罐，海德鲁公司将回收的废铝再生与铸造企业零件与轧制 PS 版铝基板板带材。

纽布里萨克轧制厂将采用氧燃烧技术熔化废铝

2015 年 6 月林德集团下的林德气体公司与肯联铝业公司签订一项合作研发协议，肯联铝业公司的废铝熔炼炉将采用林德公司的氧燃料技术，目标是：燃料消耗下降 50%，熔化速率提高 20%。这项研究工作一旦完成，肯联铝业公司法国纽布里萨克轧制厂熔炼车间熔炼炉都将用氧燃料技术。这项联合研究还有肯联铝业公司技术中心的参与。按计划，全部工作可于 2016 年 12 月完成，该厂废旧易拉罐回收生产能力约 100kt/a。

1.8.5 中国铝加工亟待补上废罐优化循环短板（下）

生产原铝及再生铝主要能耗及温室气体排放

	项目	电解铝	再生铝(预处理及
能耗	原煤,kg/t铝	4.75	2.47
	重油,kg/t铝	1.05	82.9
	天然气,m^3/t铝	1.72	22.4
	焦炭,kg/t铝	53.8	42.5
	煤气,m^3/t铝	8.72	3.41
	电力,kWh	14800	257
	总能耗,GJ	2.13	10.4
能耗温室气体排放	CO_2,kg/t铝	15400	702
	CH_4,kg/t铝	34	0.614
	CF_4,kg/t铝	0.129	0
	C_2F_6,kg/t铝	0.0156	0
	GWP,kg/t铝	17000	715

非洲

非洲仅有两个铝板带轧制厂，一个在埃及，另一个是南非休内特铝业公司（Hulamin），位于马得马里茨堡（Pictermaritzburg），是南非唯一的铝加工厂，平轧铝产品生产能力 250kt/a，还有一个铝挤压厂，有 15MN~38MN 的挤压机 5 台。2014 年公司投资 2600 万美元建了一个废旧铝易拉罐回收熔铸车间，有 1 台赫特威奇公司（Hertwich）的 Ecomelt PS-250 型双室炼炉，生产能力 80kt/a，可熔炼含 10%左右的有机杂质的废铝，它们产生的气体可回收燃烧用以预热废铝。该炉的能耗约为 600kWh/t，产量可达 250t/d，已于 2015 年 7 月投产。生产的再生 3104 合金锭供本公司轧制

罐料带材。

亚洲

1. 韩国荣州回收再生中心

荣州回收再生中心不但是韩国也是亚洲最大的废旧易拉罐回收再生中心，是诺贝丽斯一大韩铝业公司的独资企业。诺贝丽斯铝业公司是全球最大的平轧铝产品与罐料的生产者，诺贝丽斯一大韩铝业公司平轧铝产品的生产能力超过1000kt/a，居亚洲之冠，它的2400mm四辊不可逆式戴维冷轧机的实际产量达 165kt/a，是全球效率最高的冷轧机之一。荣州回收再生中心2012年10月投产，生产能力265kt/a。

2. 日本

日本在资源循环利用方面是世界上做得最好的国家之一，做到了物尽其用。日本废旧铝罐的回收与再生利用多集中在平轧铝产品厂如神户钢铁公司的真冈轧制厂、日本联合铝业公司（UACJ）的福井轧制厂、日本轻金属公司的名古屋轧制厂。2015年日本废旧易拉罐的回收率达93%，是世界上5个回收率>90%（中国、巴西、芬兰、瑞典、日本）的国家之一。

据日本铝罐回收协会（JACRA，Japan Aluminum Can Recycling Association）公司的数据，2014 年日本对铝罐需求约20.16亿只，同比增长4%，首次超过20亿只。日本国内对铝罐的需求19.37亿只，比去年同期的上升4%，其中

啤酒与啤酒饮料的需求 10.13 亿只，同比下降 1%，据估算，除啤酒以外，酒精类饮料对铝罐需求同比增加 5%达到 2.38 亿只；另方面，非酒精饮料铝罐的消费同比上升 12%，达到 68.6 亿只，需求增长主要原因是牛奶、咖啡等用铝罐代替钢罐的趋势在不断加强。

铝罐回收协会称，2015 年日本铝罐的消费量可达 27.17 亿只，同比增加 7.6%，其中国内的需求 21 亿只，同比上升 8.4%；非酒精饮料罐消费增加 24%至 8.50 亿只；啤酒和啤酒饮料行业的需求预计低于 10 亿只。

据日本经济贸易部的数据，由于需求增长促进咖啡包装以铝代钢的发展，2014 财政年度铝饮料产量与发货量分别上升 2.3%和 2.8%，达到 354.4kt 和 322.9kt，其中罐身的产量与发货量分别为 266.2kt 和 253.1kt，罐盖的分别为 88.2kt 和 69.7kt。罐身质量占总质量的 73%，罐盖质量占整个罐质量的 27%。当今，日本铝罐产量约 360kt/a。

3. 海湾铝轧制公司废旧罐回收再生车间

2015 年 3 月海湾铝轧制公司（Gulf Aluminium Rolling Mill,GARMCO）与海湾地区其他 5 个铝业公司合作决定建设一个废旧易拉罐回收再生项目，建在海湾铝轧制公司内，利用该公司的熔炼铸造设备，仅建一条分选和预处理生产线，采用当今先进的设备与工艺。再生 3104 合金扁锭生产能力 120kt/a，直接供轧制厂生产罐料带材。这是海湾地区唯一的

废旧铝罐回收与再生中心。在沙矿-美铝铝业公司（Ma'aden Alcoa）未全部投产前，海湾铝轧制公司是海湾地区最大的平轧铝产品生产企业。

4. 中国

广东肇庆市大正铝业有限公司 15kt/a 废铝易拉罐绿色保级产业化项目。该项目于 2015 年 5 月 22 日通过了中国有色金属工业协会组织召开的“废铝易拉罐绿色环保级再利用技术”科技成果评价会的鉴定，评价委员会一致认为该科技成果整体技术达到国际先进水平，其中铝回收率和节能指标达到世界领先。该项目于 2009 年启动，历时 6 年，先后获得国家支撑计划、广东省科技计划等支持，由北京科技大学、中北大学和肇庆市大正铝业有限公司完成。

该项目以余热烟气为热源，旋转动态隧道窑低氧脱漆法及装备，有效抑制了二恶英的产生，碎铝薄片无烧损，脱漆率 95%以上；开发了废铝易拉罐碎片蓄热式双室吸入式液下熔炼技术及装备，铝回收率 97%以上，节能效果显著；利用“烟气二次燃烧-快冷-布袋除尘-脱硫脱硝-活性炭吸附”综合环保技术，消除了粉尘、二氧化硫和氮氧化合物等污染物的产生；以废铝易拉罐为主原料生产的 3104 合金的成分及性能可以满足国家标准和用户的要求。目前，该成果已在大正铝业有限公司实际了 15kt/a 废铝易拉罐绿色环保级产业化应用，新增产值 3.3 亿元/a，利税总额 8900 万元/a，经济、

社会和环保效益显著。为此，北京科技大学、中北大学、大正铝业有限公司张深根等九人获得了 2015 年度中国有色金属工业科学技术进步二等奖。

中国全铝易拉罐生产始于1986年9月重庆长江电工厂易拉罐生产线的生产，至今已近 30 年。目前全国生产线约 32 条，生产能力400亿只/a，盖生产能力620亿片/a，2015年产量290亿只,罐身料用量400kt,罐盖及拉环料用量165kt，中国已成为罐料（罐身、罐盖、拉环料）产量≥400kt/a 的世界6大国（美国、德国、韩国、中国、巴西、日本）之一。中国的废罐回收率是世界最高的,达99.5%以上,居回收率>85%的12大国之首，2014年回收率高的10国是：中国>99%，巴西 98%，芬兰 98%,（比利时+卢森堡）97%，德国 96%，挪威96%，日本93%，瑞士92%，瑞典92%，冰岛90%，荷兰86%。

可是，非常遗憾的，中国虽是一个废旧罐回收大国，但是回收的废罐并没有得到最有效的循环利用，即没有把它们再生熔炼成3104合金，轧制罐身带材，而是另有它用或用于铸件生产。近几年以来，世界罐料产量≥100kt/a 的轧制厂都争先恐后地建设了为罐回收再生项目，大的不说，小的轧制厂如奥地利 AMAG（奥地利有色金属加工公司）、南非休内特铝业公司、海湾铝轧制公司都建有废罐再生熔炼车间，再生3104合金锭都分别大于100kt/a，诺贝丽斯铝业公司2014年罐料产量达2800kt，约占世界总产量4300kt 的65%，所属

的德国纳希特斯特轧制厂回收再生中心 3104 合金锭生，产能力高达 400kt/a。2013 年诺贝丽斯铝业在其生产的 3104 合金扁锭中，再生废料含量占 45%以上，公司规划 2020 年生产的罐料的 80%以上是用回收废料生产的，在 2014 财政年度结束之际，生产的罐料带材含 46%的废罐再生料，比 2007 年~2009 年的上升 16 个百分点，2015 年可达到 50%。

制罐合金

1. 常规合金

全铝易拉罐在最后组装时是由 2 个零件构成的，即由罐身（can body）和罐盖（can end）构成，所以常常称之为二片罐（two pieces can）。它们是用了 3 种铝合金制成的，罐身与罐底连成一体为 3104 合金，罐盖为 5182 合金，拉环为 5052 合金。3104 合金是一种铝-锰-镁合金，1978 年问世；5052 合金与 5182 合金为铝-镁系合金，都是美国铝业公司研发的，前者成型于上世纪 20 年代，后者于 1967 年在美国铝业公司匹兹堡技术中心诞生，并在美国铝业协会公司注册。

在废罐料中拉环质量小，在大规模生产中，拉环 5052 合金成分对 3104 合金的成分可不予考虑，现在需要计算的是盖料带来的镁，若坩埚内装了 100kg 废罐料，盖料按 35%计算，那么盖料即为 35kg，带来多余的镁 0.9kg，可用添加重熔用铝锭的方法来调整成分，可根据炉前成分分析结果来计算重

熔用铝锭添加量，通常添加量不会超过 20%。若要废罐料达90%则不是一件易事。

2. 下一代合金——单一合金与新型高废料合金

当前，几乎所有铝易拉罐是用 3 种合金制造的，若能用一种合金制造，则对罐料生产企业与制罐者都会受益匪浅，是它们梦寐以求的。自 2010 年以来，诺贝丽斯铝业公司就致力于这种合金的研发，并于 2014 年推出一种名为“EvercanTM”的合金，其罐身料的废罐含量高达 90%。2015 年红野兔公司已用这种罐装啤酒，酒的容量 12OZ（盎司，1 盎司=28.35g），不过这种单一合金成分尚未见报道，看来会与 3104 合金的差不多，因为只有这样才能最大限度地利用现有的废旧罐料，才能便于深拉罐身。

2015 年 3 月又研制一种牌号为 evercycleTM 的高废料含量，它是由 90%旧废料（从社会上收购的废易拉罐）和 10%新废料（生产罐料与制罐、盖产生的工艺废料）熔炼而成的。evercycleTM 是一个地地道道的全循环（evercycle）合合。

再生铝在资源、能源、环保方面有着十分明显的效益，大力发展废铝再生利用是实现节能减排的重要途径，特别是废旧易拉罐的回收效益更加显著，它是循环周期最短的铝产品，短则 40 天，长的也不超过 3 个月，一年可循环 9 次至 4 次，多么高的资源利用效益，没有一种合金有这么高的效益。1t 废铝回收再生利用后，CO2 排放量将由 15400kg 降至 702kg，

再生铝的能耗仅占原铝提取能耗的 4.86%（通常按 5%计算），温室气体排放量仅占 4.2%，并可基本实现废水零排放。

中国宜尽快建废旧铝易拉罐回收处理再生厂

前面介绍了全球废旧铝易拉罐回收、预处理与再生熔炼铸造概况，截至 2015 年年底，除大洋洲外，其他各洲的 13 个国家共建有 26 条生产线，再生 3104 合金扁锭生产能力约 3186kt/a。可生产 3104 合金再生扁锭的工厂有 20 个，其中最大的德国纳希特斯轧制厂生产能力 400Kt/a，其次是美国威斯合金公司的 Element13 回收厂，270kt/a，全厂再生铝合金总生产能力 430kt/a，可是中国仅有一个小得可怜的项目——大正铝业有限公司的废铝易拉罐绿色环保级利用技术生产线，生产能力 15kt/a，从规模来看，该项目实际上仅相当于一条中试生产线。

中国搞了 30 年的易拉罐生产，罐料带材的研发与生产也有 22 年的历史，废旧易拉罐回收率高居世界榜首；罐身带材产量 365kt、罐盖带材产量（2015 年）195kt，是世界产量前四国，仅次于美国、德国与韩国。可是自 2010 年以来，国外再生 3104 合金项目建设热火朝天，而国内的建设却冷冷清清，至今未建成一个生产能力达 100kt/a 上规模的产业化项目，不知为何？是废旧罐原料不足吗？显然不是的，自 2000 年以来中国废旧罐的回收量都超过 350kt/a，而建一个再生 3104

合金扁锭的厂只要约 85kt/a 废罐与约 20kt/a 重熔用铝锭；是没有技术吗？没有装备吗？显然也站不住脚，当然，我们没有成套自主研发的从回收-破碎-脱漆-熔炼到铸造的达到国际水平的技术与工艺装备，但可以引进，价格也不贵，也不是什么高精尖技术，人家会卖给你，建一个再生 3104 合金扁锭项目投资 3 亿元足矣。关键还在于我们对循环经济的重要性认识不足，对资源的珍惜认识不足，在体制与机制方面对资源再生产缺乏应用的激励。

没把废旧铝罐再生成 3104 合金是浪费

现在是中国铝罐料生产企业建废旧罐再生项目的最佳时机，“双创”已成为经济转型的主题曲。我们可以让火箭升空，将人送上太空，GDP 雄居全球第二，居然没有一条废旧铝罐回收再生产线，让我们这些退休的搞了几十年铝材生产的老一辈自惭心愧。将废金属通过再生处理复原成原生合金是一种最高价值的循环，可是我们现在却把回收的 50 多万吨废铝罐料全部用于生产铸件，没有再制成 3104 合金，不是一种最佳的循环经济，没有把废料的潜在价值充分发挥，对资源多少是一种浪费。

宜尽快建设再生 3104 合金扁锭生产线

当前中国经济进入了由中国制造向中国创造的跨越和转型阶段，供给侧改革即将进入实施阶段，工作重点是去产能、去库存、去杠杆、降成本、补短板。建设再生 3104 合金扁锭项目既是在补短板，有属于降成本，因此应借供给侧改革东风建设废旧铝易拉罐回收再生项目，以补这块短板，铝工业的短板还不少，但是这块短板是最大的，也是较易实现的，宜尽快补上。

废旧铝易拉罐再生 3104 合金项目应建在罐身带材生产厂，现在国外 19 个这样的项目都建在 3104 合金罐身带材轧制厂内。因为这样可以按轧制厂要求精准控制合金成分、铸锭规格，迅速生产轧制厂所需要的锭，可缩短锭的运输时间与路程，单独建这种项目或建在别的企业内都是不可取的。

发展再生铝工业利国利民惠及后代

再生铝产业在资源、能源、环境等方面的综合效益十分明显，但现在之所以还没有建成一个有一定规模的产业项目，投资者可能担心：废旧易拉罐不易回收，再生成本较高无利可图，技术装备不过关等等，为此建议对再生铝产业应给予扶持和鼓励，政府应该进行政策引导，同时提供环保、税收方面的支持，例如对利用再生 3104 合金板带材，减免税收；企业与相关部门要重视再生铝工业，加大资金，技术投入，要把再生铝工业的社会效益提高到应有的高度；通过高速公

路运输打包的废旧铝易拉罐方面给予减免过路费，以目前已形成的再生资源回收交易市场为基地，进行合理规划和布局，形成有效的回收、流通及利用网络体制。回收再生厂宜向美国、德国的相应企业学习，派出专业回收车定期到各回收网点拉回收购的废料。中国可在环渤湾地区、长江三角洲与珠江三角洲地区的罐料生产厂建设这样的废罐再生 3104 合金项目，项目规模以 80kt/a~100kt/a 为宜；严格按照国家产业政策和环保法规对建设项目的环境影响评价，强化监管，坚决防止产生新污染。

加强研发与合作，研发就是在创新

现在国外在研发第二代制罐合金——单一合金，并初见成效，可是中国还没有起步，对第一代制罐合金特性还有待更深入了解与探索，更谈不上对单一合金的研制了。铝轧制厂要进一步建立与相关院所、大专院校的产学研联盟，并积极与国内现有废旧罐资源拥有者共同合作，在此基础上进一步扩大资源渠道，增强双方抗风险能力，做到共利双赢。

1.8.6 中国成为罐体料净出口国

对中国铝加工工业来说，2013 年是一个好年景，是不平凡的一年。2013 年，中国有 ABS（小轿车车身铝薄板 Auto Body Sheet）在产企业 1 家，在建项目 7 个，2015 年将全部建成投产，投产后，中国 ABS 总生产能力可达 800kt/a，中国将成为世界最大的 ABS 生产国。目前，中国已经成为世界最大的 PS 和 CTP 版铝板基生产国，并已经成为净出口国。中国建成投产的航空级铝合金厚板生产企业有 5 家，在建的项目有 4 个，2013 年全部投产后，中国生产的厚板足可以满足全球铝厚板市场的需求。

中国迈入世界铝罐料净出口国行列

1986 年，中国首条易拉罐生产线在重庆市当时的长江电工厂投产，所用的罐体料（简称罐料 can stock）、罐盖料（end stock）与拉环料（tab stock）全部进口，自此以后，国内所需的罐料一直依赖进口。西南铝加工厂，现在的西南铝业（集团）有限责任公司自上世纪 80 年代中期起就孜孜不倦地致力研发，终因装备不尽人意，未能形成批量生产能力，不能为制罐企业提供有国际市场竞争力的性能稳定的罐料，但还是生产了一些罐料，这着实难能可贵。2005 年中铝西南铝板带有限公司 2000mm（1+4）式热连轧投产与 2011 年 6 月中铝西南铝冷连轧有限公司的 2000mm 双机架冷连轧机的投产，使该集团在生产罐料方面如虎添翼，产量逐年上升，2013 年该集团罐料的产量占全国总产量的 19.5%。

南山轻合金有限公司的 2350mm（1+4）式热连轧生产线与 2 台 2250mm CVC 6 单机架冷轧机于 2007 年的建成，以及 2300mm CVC 6 三机架冷连轧机列于 2012 年投产，使中国铝罐料生产进入了一个新阶段，迈上了一个新台阶。该公司已成为亚洲最大的罐料生产者，生产的罐料不但占中国市场的 51%，而且于 2012 年开始向美国出口，为中国成为罐料净出口国作出了巨大贡献。

2013 年，中国生产了约 260 亿只铝罐，消费了约 332.5kt 罐料，与 221.7kt 盖料，而生产的罐料为 361kt 左右，虽然还从诺贝丽斯-大韩铝业公司进口了约 15kt 罐料，但是出口

量却超过了 50kt，中国已成为罐料净出口国。中国早已是盖料生产大国，也是一个净出口国。2013 年中国盖料生产能力已超过 350kt，盖料需经过表面处理，因此所指的生产能力不是指冷轧机的生产能力，而是指表面处理生产线的生产能力。

中国已成为世界罐料产能大国

中国自上世纪 90 年代初期小批量生产罐料以来，经过 20 多年的建设至 2013 年，罐料生产能力已达 1600kt/a，这是保守的估算，乐观的估算可达 2000kt/a，无疑生产能力仅次于美国，居世界第二位。2013 年的产量为 361kt，世界第三，是美国产量的 17%左右，德国产量的 82%左右。2015 年，中国的产量定会超过德国，一方面由于国内年复合增长率为 8%，而出口的增长率会达到 10%或更大，2015 年，中国罐料的产量有可能超过 450kt。

在计算上述生产时仅指引进的高技术装备，如从西马克公司引进的热连轧、冷连轧生产线与单机架 CVC 6 冷轧机的混合结构产品的生产能力，如果把国产装备的生产能力与一些引进冷轧机专门轧制罐料，则这种产品的生产能力可以达到 5000kt/a，足可以满足全球罐料市场的需求，笔者不是在此危言耸听。诺贝丽斯-大韩铝业公司蔚山轧制厂 1 台奥钢联公司（VAI）的 2400mm 四辊不可逆式冷轧机（轧制速度 1800m/min）2012 年的罐料实际产量为 1700kt，这是目前的

“吉尼斯纪录”。中国南山轻合金有限公司等 8 家企业引进的 16 台 CVC 6 冷轧机如果专门轧制罐料，在一般条件下，平均产量是可以达到 150kt/a 的。

对 8 家企业罐料生产能力的估算见下表。

企业	估算产能 kt/a	装备概况
南山轻合金有限公司	400	2350mm（1+4）式热连轧生产线 1 条，2200mm CVC 6 单机架冷轧机 2 台，2300mm CVC 6 型三机架冷连轧线 1 条，并在建（1+1+5）式热连轧生产线及相应的冷轧与精整系统。按冷轧综合生产能力 650kt/a 的 62%估算。
魏桥铝电有限公司	400	西马克公司的（1+4）式 2400mm 热连轧线 1 条，2 台单机架 2300mm CVC 6 冷轧机，1 条 2300mm 三机架冷连轧线。按冷轧带材综合生产能力 700kt/a 的 57%估算。
中孚实业股份有限公司	300	西马克公司的（1+4）式 2300mm 热连轧线 1 条，2 台单机架 2300mm CVC 6 冷轧机，1 条 2300mm 双机架冷连轧生产线。按冷轧带材综合生产能力 600kt/a 的 50%估算。
中铝西南铝板带冷连轧有限公司	200	奥钢联（VAI）的（1+4）式 2000 热连轧线 1 条，1 台单机架 2000mm DSR 四辊不可逆式冷轧机，1 条 2000mm 双机架 CVC 6 冷连轧线，按冷轧带材综合生产能力 400kt/a 的 50%估算。
平安高精铝板带有限公司	160	西马克公司的（1+3）式 2400mm 热连轧线 1 条，2 台单机架 2400mm CVC 6 冷轧机，按冷轧带材综合生产能力 250kt/a 的 52%估算。
亚洲铝板带有限公司	200	2032mm（1+5）式热连轧线 1 条，粗轧机 2450mm，全新的西马克公司轧机，5 机架热连轧机列为二手设备，但经过适当改造。1626mm 5 机架冷连轧线 1 条，为经过改造的二手设备。2450mm CVC 6 单机架冷轧机 1 台。按冷轧带材综合生产能力 600kt/a 的 33%估算。
中铝瑞闽铝板带有限公司	170	2400mm（1+3）式奥钢联热连轧线 1 条，2300mm CVC 单机架冷轧机 1 台，1800mm 级单机架冷轧机 3 台，其中 2 台是西马克公司的。按冷轧带材综合生产能力 350kt/a 的约 50%估算。
美铝渤海铝业有限公司	100	1（3912mm）+3（2184mm）二手热连轧线 1 条，2 台 2300mm 奥钢联冷轧机，按生产能力的 40%估算。
其他 7 家企业	400	
总计	2330	

2013 年中国罐料产量 350kt

2013 年中国罐料产量大幅增长，达到 350kt 以上，成为世界第四大生产国与净出口国，而且净出口量会逐年上升，这是不可逆转的，2020 年的产量会达到 1000kt，成为仅次于美国罐料产量的世界第二大国。南山轻合金公司、魏桥铝电有限公司、忠旺铝板带有限公司、中孚实业有限公司等都将跻身于世界级铝罐料生产企业，可批量生产罐料的企业可达到 12 个或者更多一些，但是中国成为世界第一大罐料生产国还有一段相当长的距离要走，至少是 2025 年以后的事。

据笔者调查,2013 年,中国批量生产罐料的企业有 5 家，它们的产量分别是：180kt、72kt、58kt、30kt、21kt，共计 361kt，扣除 11kt 的误差，所以实际产量绝不会低于 350kt。国内罐料产量最大的占全国总产量的 51%以上。中国许多铝平轧产品企业的装备与该厂的装备几乎处于同一水平线上，该厂在投产 18 个月后就能达产达标，向市场提供具有国际市场竞争力的罐料，我深信其他企业通过努力也是完全可以做到的。

1.8.7 中国罐料：东西双雄初显

1963 年，一个阳光明媚的春天周末，雷诺兹金属公司（Reynolds Metal Com.2003 年被美国铝业公司兼并）的一位工程师携带家人去郊游，午餐时因忘记带起瓶器未饮上啤

酒，大为扫兴，发誓要发明一种易于开启的瓶盖。一年多以后，全铝二片易拉罐诞生了。当然，那时易拉罐没有今天这么精致，也没有这么易于拉开，然而终于不用启子与刀子了。

2010 年，全世界罐料总产量约 4200kt，其中美国 1963kt，比上年度下降 2.5%，占有世界总量的 46.73%，国内消费量 1716kt，占世界消费量 40.36%，人均消费量（按 3.07 亿人计算）5.6kg，为世界人均消费量（按 62 亿人计算）0.68kg 的 8.24 倍；日本罐料发货量 323.072kt，比上年度上升 1.9%（其中罐体料 234.469kt，罐盖料 88.601kt）占世界总产量的 13%，人均消费量（按 1.3 亿人计算）2.48kg，为世界人均消费量的 3.65 倍；中国罐料消费量约 385kt（其中罐料约 250kt，净进口约 65kt，产量约 155kt），人均消费量（13.3 亿人计算）0.29kt，仅为世界平均消费量 1/2.35，美国人均的 1/19.3，也就是美国的人均消费量几乎为中国人的 20 倍，日本的人均消费量为中国人的 8.6 倍，中国罐料市场还是很有潜力的。

中国罐料的东西顶梁柱

中国全铝二片罐的生产始于 1985 年 9 月重庆长江电工厂民品部制罐生产线的投产，自那时以后至 1992 年所需的罐料

几乎全部进口，从 1993 年起至 2010 年中国罐料产量虽然逐年有所增加，但仍以进口的为主。2010 年中国罐料产量约 155kt，从 1993 年的 1.971kt 至 2011 年的 155kt 的 18 年内的平均增长率为 27.4%。

东北轻合金有限责任公司与西南铝业（集团）有限责任公司在技术装备并不具备批量生产罐体料的条件下，对罐体料的生产作了认真的研发，从上世纪 90 年代中期起研发与生产全部由西南铝业（集团）有限责任公司承担。1993 年西南铝业（集团）有限责任公司生产了 1.971kt 罐体料供给国有漳州制罐厂，以后各年的生产量有很大波动，1995 年的产量超 11kt，达到创纪录的水平，由于性能不十分稳定，品质波动较大，2004 年的产量降到 2.3kt 左右，2005 年 2000mm（1+4）式热轧线投产，拥有生产罐体料的当今先进装备，罐体料产量节节上升，从 2005 年的约 6.5kt 上升到 2010 年的 45kt 有余。1993 年~2010 年的年平均增长率为 19.08%，而 2005 年~2010 年的年平均上升率 63.1%，值得注意的是，由于市场竞争激烈，从 2009 年起产量又略有下降。

非常值得庆幸的是，中铝西南铝冷连轧板带有限公司于 2006 年 4 月 23 日动工建以，2009 年 5 月一次性带料试车成功，6 月实现正式生产，6 月 28 日正式竣工投产，该生产线总投资 23 亿元人民币，设计罐料、CTP 带材、铝箔带坯等高端铝带生产能力 250kt/a。另外，还有 1 台高装机水平的铝

带不可逆式单机架冷轧机，生产能力 100kt/a。这条双机架冷连轧生产线是全世界 18 年来建成投产的这类先进的生产线，也是中国首条这类先进生产线，尽管此前中国已建成 2 条双机架铝带冷连轧机列，但其装机水平及生产能力远不如西南铝冷连轧生产线的。西南铝冷连轧线的建设投产对中国由罐料净进口国变成净出口国、西铝加工大国变为铝加工强国均具有里程碑意义。西南铝业（集团）有限责任公司已成为中国罐料行业脊梁的西端顶梁柱。

南山轻合金公司隶属于山东南山集团，位于山东省龙口市，2001 年 7 月开始筹建，2003 年 7 月破土，2006 年 12 月全部建成，2007 年投产，有一条 2350mm（1+4）式热连轧生产线,2 台 2500mmCVC6 不可逆式冷轧机,总生产能力 200kt/a。由于装机水平高，一次性建成，配套齐全，管理完善，研发力量强，市场开拓得力，投产不到 2 年就达产，达产之快，产品性能之高，尺寸偏差之严，售后服务之好，在中国高端铝板带行业实属罕见。所生产的罐料一经用户试用就受到用户的青睐,订单纷至沓来,2009 年罐体料交货量近 50kt,2010 年的接近 70kt，罐料总交货量约 110kt。南山轻合金有限公司在市场开拓方面未雨绸缪，积极开拓国际市场，2010 年向东南市场出口了少量罐料，是中国在罐料方面的首次出口，其量虽不大，却是一个非常令人鼓舞的信息，说明中国罐料

具有相当强的国际市场竞争力。南山轻合金有限公司不但是中国最大的罐料生产企业，也是中国罐料的首家出口者，中国罐料行业脊梁的东端顶梁柱。

南山轻合金有限公司正在紧锣密鼓地建设全球最先进的从西马克公司（SMS Biemag）引进的 CVC-6 型 3 机架冷连轧生产线，可于 2012 年上半年投产，主导产品为罐体料，生产能力 400kt/a，是近 18 年来全球建设的 3 条三机架铝带冷连轧生产线之一。1987 年美国铝业公司（Alcoa）田纳西洲（Tennessee）美铝镇轧制厂一条 2030mm3 机架铝带全连续冷连轧线投产，这是全球首条这类冷轧线，至今仍是全世界惟一的一条；第二条是美国诺威力铝业公司（Novelis）洛根（Logan）轧制厂 1994 年投产的 2250mm 半连续 3 机架铝带冷轧生产线。这 3 条三机架铝带冷连轧生产线都是西马克公司设计制造的。南山轻合金公司冷连轧生产线的技术参数与洛根轧制厂的基本相同，但前者的更先进些，设备的运转情况也会更平稳些，操作起来会更轻松些，自动化控制装备的可靠性也也会更高些。

国际市场潜力很大

自 1985 年中国生产全铝二片罐以来，中国就是一个铝罐料进口国，直到 2010 年南山轻合金有限公司才出口少量的罐料。随着中国罐料产量逐年上升，出口量也会年年上升，但

市场需要去开拓，虽然到 2012 年止中国可供出口的量还不多，但 2013 年可供出口量可达 50kt,或更多些，因此开拓国际市场必须提到日程上来，或者说已接近迫在眉睫。

2010 年全世界罐料总产量约 4200kt，国际市场贸易总量约 750kt,美国是最大的出口国,247kt;韩国随其后约 240kt;德国第三约 160kt；澳大利亚约 50kt；日本约 53kt。其他的国家与地区都是净出口者，亚太地区与南亚次大陆是最大的进口者。中国罐料潜在出口市场大。

2010 年全世界可生产罐料的国家有：美国、巴西、澳大利亚、日本、韩国、中国、德国、法国、俄罗斯，它们既能生产罐体料又能生产盖料，生产盖料必须有涂层生产线；南非与意大利可以生产盖料。沙特阿拉伯马登美铝联合铝业公司正在建设一个全球最大与最现代化的罐料项目，有一条独一无二的 2350mm4 机架 CVC6 冷连轧生产线，罐体料生产能力 400kt/a 以上，可于 2013 年初投产，技术与生产经营理由美国铝业公司负责。该项目的生产成本是世界上最低的，产品的 88%以上出口到除海湾地区以外的世界各地。

2013 年：可有制罐厂 44 个 生产线超过 60 条

据笔者的调查，2008 年中国还只有 21 个制罐企业，25 条制罐的生产能力约 150 亿只/a；可是到 2011 年底，企业增加到 27 个，生产线上升到 38 条，罐的生产能力达到约 220 亿只/a，大致相当于美国的 1/3 弱，居世界第二位。

如果我们按 1t 罐体料(body stock)生产 74000 只罐体，1t 盖料（end stock）生产 200000 片盖估算，需要 3104 合金罐体带材 466.22kt，需要 5052、5182 合金盖料（盖按 460 亿片估算，有些三片罐用的是易拉铝合金盖）带材 230kt。两项总计约 700kt,2015 年约需 800kt,2020 年约需 1100kt。

2011 年可生产罐料的企业：南山轻合金有限公司（生产能力 110kt/a,下同),西南铝业(集团)有限责任公司(150kt/a,含冷连轧公司),渤海铝业有限公司(50kt/a),共计 310kt/a。

2013 年可生产罐料的企业及生产能力：南山轻合金有限公司(250kt/a),西南铝业(集团)有限责任公司(300kt/a),渤海铝业有限公司（100kt/a），亚洲铝业控股集团肇庆铝板带有限公司（150kt/a），瑞闽铝板带有限公司（100kt/a），青海平安铝业有限公司（100kt/a),河南中孚实业有限公司（50kt/a），总计 1000kt/a。

2015 年，可生产罐料的企业及生产能力：南山轻合金有限公司（400kt/a），中铝西南铝冷连轧板带有限公司（350kt/a），渤海铝业有限公司（100kt/a），亚洲铝业控股集团肇庆铝板带有限公司（250kt/a），瑞闽铝板带有限公司（150kt/a），青海平安铝业有限公司（150kt/a），河南中孚实业有限公司（150kt/a），大庆忠旺特大高精铝加工项目(200kt/a),云南涌鑫及泽鑫铝板带有限公司(200kt/a),

其他企业（300kt/a），总计 2250kt/a,相当于 2010 年全世界罐料总消费量的 50%。

1.8.8 世界最大废旧铝罐回收厂在德投产

全球最大的铝平轧产品（FRPS）企业——诺贝丽斯铝业公司（Novelis）建在德国纳希特斯德（Nachterstedt）轧制厂的废旧全铝罐再生中心（recyling centre）已于 2014 年 10 月 1 日建成投产,在相关类企业中这是全世界最大的企业，每年可用从社会上回收的铝罐经预处理后熔炼成制罐用的 3104 合金 210kt，再生的 3104 合金的各项性能与用重熔用铝锭熔炼完全相同。诺贝丽斯铝业公司不但是世界最大的铝平轧产品企业，产品生产能力 4200kt/a，工厂遍布欧洲、北美洲、亚洲与南美洲，而且也是全球最大的废旧易拉罐回收再生企业，回收的易拉罐废料既有新的也有旧的，所谓新的废料就是制罐企业生产过程中产生的废料与废品，而旧废料则是消费者饮完饮料后抛弃的罐。

废旧易拉罐是一种附加值很高的再生循环利用的金属资源。诺贝丽斯铝业公司的理念是，一方面要把企业建成世界一流的铝平轧产品生产与供应者，另方面要立志成为全球铝废料回收与再生的领跑者，着力向环保、安全、健康（ESH）的绿色企业发展，成为优秀的循环经济企业。

诺贝丽斯铝业公司自 2011 年以来就积极关注再生铝板块，已投资约 500M 美元改扩建回收与再生铝，再生铝生产能力已翻了一番，达到 2010 年 2100kt/a，产品中的再生铝含量从 2011 年的 30%上升到 2014 年的 46%，公司的中期目标是 2020 年产品中再生铝的含量争取达到 80%，与提取原铝相比，生产再生铝的能耗及排放物可分别减少 95%。

诺贝丽斯铝业公司的这种发展战略不但有利于公司在汽车轻量化方面做出更出色的成就，而且可加速铝的循环利用，更重要的是产品中的“弹含量”（embedded Carbon）大大下降，显著减少能源消耗与碳对环境污染，这对铝材生产者与用户都是有利的。

新落成的纳希特斯德废铝回收再生中心的分类、脱漆、熔炼、铸造装备都是当今一流的，因而可以高效地处理各种废铝，成为有效的循环经济链，显著提升欧洲的废铝消费，减少出口，并且可录用新员工 200 名。

诺贝丽斯铝业公司为新的回收中心开发出的一系列的新技术、新工艺、新装备，使回收再生效率大大提升，再生锭品质大为上升，另外，排放物的各项指标能完全满足欧洲当前的环保法规条例要求。铸造的再生铝扁锭无论是化学成分还是外形尺寸都完全符合轧制优质罐体料要求。

纳西特斯特德废铝回收再生中心地处欧洲中心地带，交通便利，四通八达，有利于废铝回收与扁锭外运，所产扁锭

运往德国诺伊斯市诺夫（Aluminium Norf in Neuff/Germany）轧制厂与瑞士谢尔轧制（Sierre）厂，对诺夫轧制厂诺贝丽斯公司与海德鲁铝业公司各占 50%股份，谢尔轧制厂为诺贝丽斯铝业的独资企业，它们用这些再生扁锭轧制罐料与汽车板带材及通用带板材，但以前者为主，占 80%以上，诺夫轧制厂是当今最大的平轧铝产品企业，有两条热连轧线，生产能力 1200kt/a，（1+3）式热连轧线建于上世纪 70 年代，2014 年经过全面的现代化技术改造，该厂的冷轧铝带材实际产量 900kt/a，生产的合金达八九十种，主导产品为罐料、PS 及 CTP 板带、铝箔带坯、汽车板带等。中国忠旺（天津）铝板带有限公司于 2018 年全部建成投产后，总生产能力可达 2000kt/a，将取代诺夫轧制厂，可能成为世界最大的单一平轧铝产品厂。

1.8.9 手机机身铝合金新说（上）

表 1　7075 型合金的注册化学成分(质量%)

合金	注册年度	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	其他杂质		Al
									每个	合计	
7075	1954	0.40	0.50	1.2~2.0	0.30	2.1~2.9	5.1~6.1	0.20	0.05	0.15	其余
7175	1957	0.15	0.20	1.2~2.0	0.10	2.1~2.9	5.1~6.1	0.10	0.05	0.15	其余
7475	1969	0.10	0.12	1.2~1.9	0.06	1.9~2.6	5.2~6.2	0.06	0.05	0.15	其余

手机已成为人们特别是工作人员离不了的通讯工具，几乎人人有一部，有的人甚至有二三部或更多，可是它们的机

身是用什么材料制成的，不是每个人都一清二楚。在世界三大手机生产集团（美国苹果公司、韩国三星公司、中国华为公司）生产的智能手机中，有用铝制的，有用钛的，还有用镁的。钛机身亮丽，强度也大，但是价格较高，密度也较高，比铝的大 66.7%；镁的密度小，比铝的轻 36%，有着银光熠熠的色调，但是强度比铝的低，抗腐蚀性能也远不如铝，价格又比铝贵；因此，铝是当前综合性能最好，性价比最佳的智能手机机身材料，同时它的可回收性与可循环性能也优于钛和镁的。笔者在这里说的铝、镁、钛包含其各种合金。

我们知道，苹果手机尺寸——屏幕大小从 iphone 5 开始一再加大，给视觉带来空前的称心惬意，观看手机成了一种美好的享受，现在已加到 140mm（5.5 英寸）。可是初期大屏幕手机的机身用材并没有同步改进，同时机身厚度还在减薄，因而导致 iphone 手机机身一受到外力冲击就变形，甚至变得弯弯的，有时一不小心就将爱不释手的宝贝手机弄弯，在个别情况下，屏幕也可能摔打得粉身碎骨。这种情况一直到 iphone 6 plus 面世都未获得根本性的改变，苹果受到的市场压力越来越大，用户的怨声也日益增多。

7075 型合金横空出世

化解 iphone 6S 困境

为了解决上一代 iphone 6 plus 手机机身抗弯性能不高

问题，铝工业建议苹果公司采用航空航天工业用的超强度铝合金 7075 板材加工机身，全新的 iphone 6S 与 iphone 6S plus 都全部改用美国铝业公司生产的 7075 合金板材制造，取得了预期的良好效果，抗弯能力大大提高，摔一下就变弯的情况烟消云散了，变形的情况也没有发生了。

7075 型合金

7075 型合金是美国铝业公司为第二次世界大战飞机研制的，用于制造大型轰炸机与战斗机，1944 年定型，1954 年 7 月以前的牌号为 75S，1954 年 7 月在美国铝业协会注册，改为统一四位数字牌号 7075。在美国研究 75S 合金的同时，日本与苏联也同时在研究此类合金，于 1945 年及 1946 年分别研制成功有实用价值的此类铝合金，它们是 Al-Zn-Mg-Cu 系合金，由于它们的强度比 Al-Cu-Mg 系硬铝的还大，所以被称为超硬铝，直到当下它仍是强度性能最大的一类变形铝合金，并是用量最多的航空航天铝合金之一，与 2024 型合金并列为两大航空航天铝合金，例如 C919 飞机的前机身长桁、旅客观察窗框、中机身长桁、龙骨梁缘条、龙骨梁腹板、地板转折梁、中后机身长桁与货舱门框、机头长桁和缘条、舱门框等都是用不同 7075 合金材料制造的，可以说没有 7075 型铝合金的支撑就造不出如此高颜值与更轻巧、更舒适、速度快的大型客机。该机可于今年首飞。

7075 型合金的成分

经过 72 年的发展与壮大，至 2015 年 1 月在美国铝业协会公司（AA）注册的 7075 型合金已有 3 个常用合金（7075、7175、7475）；7275 合金被划为非常用合金，因为每个的销量甚少，而 7375 合金则被淘汰。常用合金的成分列于表 1，由表中所列数据可见，合金的成分在向着纯度高的方向发展，即合金的主成分（Zn、Cu、Mg、Cr）含量基本保持不变，而杂质（Si、Fe、Ti 等）含量越来越低，因而合金的常规性能在保持没有多大变化的情况下，合金的疲劳强度、断裂韧性、损伤容限性能等则随着杂质的下降而有所上升。

这三个合金都是美国铝业公司研发的，7175 与 7475 合金由于杂质含量低，因而原材料价格略高一点，熔炼与净化处理也复杂一些，所以价格也高一些。特造手机机身用原型合金 7075 就可以，完全能满足新型智能手机换代提升要求。iphone 6 采用的是 6xxx 系合金，对 iphone 6S 与 iphone 6S plus 来说，7075 合金是最好不过的搭挡了。

7075 型合金为热处理可强化的合金，起主要强化作用的元素为 Zn 与 Mg，Cu 也有一定的强化作用，但其主要任务是提高材料的抗应力腐蚀开裂能力。

Zn 和 Mg：主要强化元素，可形成 n（MgZn2）和 T 相（Al2Mg2Zn3），它们在 Al 中有相当大的固溶度，且随温度升

降而剧烈变化，MgZn2 在铝中的最大固溶度为 28%，在室温时降低到 4%~5%，有很强的时效强化效果，Zn、Mg 含量的增加可使强度、硬度大大升高，但会使塑性、抗应力腐蚀性能和断裂韧性下降。

Cu：当 Zn/Mg 比值>2.2，且 Cu 含量大于 Mg 含量时，Cu 可与 Al、Mg 形成强化相 S 而提高合金的强度，而当 Zn/Mg 比值<2.2，则几乎不形成 S 相。Cu 降低晶界与晶内电位差，还可以改变沉淀相结构和细化晶界沉淀相，可抑制沿晶开裂趋势，因而可改进合金抗应力腐蚀开裂能力。然而当 Cu 含量>3%后，合金抗应力腐蚀的能力反而下降。Cu 提高合金过饱和程度，加速合金在 100℃~200℃的人工时效过程，扩大 GP 区的稳定范围，提高抗拉强度、塑性和疲劳强度。

Mn 和 Cr：添加少量 Mn 和 Cr 等对 7075 型合金组织和性能有明显影响，它们可在铸锭均匀退火时产生弥散的化合物，阻止位错及晶界迁移，从而提高再结晶温度，有效地阻止晶粒长大，细化晶粒，在保证材料在热加工及热处理后处于非再结晶或部分再结晶状态，在提高强度的同时使材料具有更好的抗应力腐蚀能力。在提高抗应力腐蚀能力方面，Cr 的作用比 Mn 更胜一筹，加 0.45%Cr 时合金抗应力腐蚀开裂寿命比含同等 Mn 合金长几十倍至上百倍。

Zr：最近的发展趋势是用 Zr 取代 Mn 和 Cr，因为 Zr 可大大提高合金的再结晶温度，无论是热变形还是冷加工的材

料在热处理后均为非再结晶组织,Zr 还可提高合金的淬透性、可焊性、断裂韧性、抗应力腐蚀开裂能力等，是 Al-Zn-Mg-Cu 系合金中很有效的微量合金化元素。

Ti：细化合金铸态晶粒，提高合金再结晶温度

Fe 和 Si：在所有不含 Fe 和/或 Si 的合金中，它们都是不可避免的有害杂质，来自原材料以及熔炼、铸造过程中使用的工具和设备。这两个杂质主要以硬而脆的化合物 Al3Fe 和游离的 Si 形式存在，它们还可与 Mn、Cr 形成（FeMn）Al6、（FeMn）Si2Al5、Al（FeMnCr）等粗大化合物。Al3Fe 有细化晶粒作用，但对抗蚀性不利，随着不溶相量的增加，它们的体积百分数也在增加，这些不溶相在加工变形时被破碎并被拉长，出现带状组织，沿变形方向呈直线状排列，由短的互不相连的条状组成。由于杂质颗粒分布于晶粒内部与晶界上，塑性变形时会在部分颗粒一基体边界上产生孔隙，萌生微细裂纹，成为宏观裂纹的发源地，同时它也促使裂纹的过早发展。同时它对疲劳裂纹的成长速度也有较大影响，在破坏时具有一定的减少局部塑性变形能力。因为 Fe、Si 化合物在室温下很难溶解，起缺口作用，容易成为裂纹源而使材料断裂，对材料伸长率及断裂韧性非常不利。因此，在设计新型 7xxx 系合金时，对 Fe、Si 含量控制较严，除采用纯的原材料外，在熔炼铸造过程中应采取对应措施，严防它们混入合金熔体中。

7075 合金的相组成

7075 合金的组织由α （Al）固溶体及第二相质点组成；第二相质点有：熔体凝固过程中形成的金属间化合物，如 Al7FeCr、Al3Fe、Mg2Si 等，它们的尺寸较大，为 0.5μ m~10μ m，在压力加工时被破碎，不溶于固溶体，故热处理不能使其发生变化，由于它们的存在，降低合金的断裂韧性；含 Cr 的弥散质点 Al12Mg2Cr 和 Mg3Al18Cr2，是在均匀化处理、压力加工前的预热及固溶处理时从固溶体中析出的，尺寸 0.05μ m~0.5μ m，对再结晶和晶粒长大有明显的抑制和阻碍作用；时效强化质点，主要是 GP 区，在固溶处理时溶入固溶体中，时效时从固溶体中析出，其形状和尺寸随时效温度不同而有较大变化，是影响合金性能的重要因素，在 T6 状态时，强化质点主要是≤1nm 的 GP 区，在 T76 状态时，强化质点主要是 5nm~6nm 的η ’过渡相，在 T73 状态时，则是 8nm~12nm 的过渡相及 20nm~80nm 的平衡相η 质点。

7075 合金的物理化学性能

7075 合金是应用最广的 7xxx 系可热处理强化的超高强度变形铝合金，可加工成各种各样的半成品，它的热处理状态有：T6、T73 和 T76。T6 材料强度最高，断裂韧性偏低，对应力腐蚀开裂敏感，且因其韧性随温度降低而下降，故不宜在低温下应用；T73 材料强度最低，但具有相当高的断裂

韧性和优良的抗应力腐蚀开裂与抗剥落腐蚀性能；T76 材料的强度比 T73 材料的高具有良好的抗应力腐蚀性能。笔者建议采用 T6 材料制造手机机身，因为它的强度高、切削加工性能好、易加工、热处理工艺较简单。

该合金的静态强度比 2024 型合金的高，疲劳性能与之相当，在退火状态（O）、固溶处理状态（W）下具有良好的室温成形性能，不但在航空航天器、军工器械等领域有着广泛的应用，而且在民用产品特别是在电子产品制造领域也获得日益扩大的应用。不过，它的工作温度不宜高于 125℃。

7075 合金的深化温度 477℃~638℃。7075-T6 合金在 25℃、50℃、100℃、125℃、150℃、200℃时的热导率分别为（124、128、147、157、170）W/（m·℃），T73 材料 25℃时的热导率为 156W/（m·℃），比 T6 材料的高 25.8%；7075-T6 材料 25℃、50℃、100℃、125℃、150℃、200℃时的比热容分别为（796、879、921、963、994、1005）J/（kg·℃）；7075 合金在（25~100）℃、（25~125）℃、（25~150）℃、（25~200）℃时的平均线胀系数分别为(23.8、23.9、24.1、24.4)×10-6/℃；7075-T6 合金的室温电阻率 P=57.4nΩ·m，电导率为 17.7MS/m~20.6MS/m，T73、T76 材料的为 22.0MS/m~24.4MS/m。

7075 合金有良好的抗氧化性能，除应力腐蚀以外，其他的抗蚀性均与 2024 的相等。

1.8.10 手机机身铝合金新说（下）

7075合金材料的时效处理规范

时效前状态	半成品种类	时效处理规范		
		加热温度，℃	保温时间，h	时效后
W	各种	115~125	23~35	T6
W	挤压材	102~112	6~8	T73
		172~182	6~8	
W	挤压材	115~125	3~5	T76
		155~165	18~21	
W	板带材	115~125	3~5	T76
		155~165	15~18	
W510	挤压矩形棒材	102~113	6~8	T735
		171~182	6~8	

7075合金材料的典型力学性能

品种	状态	厚度，mm	取样方向	抗拉强度 Rm，N/mm²	屈服强度，$R_{p0.2}$，N/mm²	伸长率 *A，%
薄板	T6	1.4	L	538	472	13.8
			LT	551	478	13.5
		1.8	L	556	491	13.3
			LT	565	492	13.7
	T76	2	L	499	435	11.5
			LT	498	434	11.0
		1.6	L	502	430	11.0
			LT	504	436	11.9
		2	LT	506	445	10.8
厚板	T7351	25	L	515	434	10.7
			LT	509	434	11.5
挤压矩形棒	T73510	50×300	L	517	445	11.9

注：*L——纵向；LT——长横向，即横向；** 薄板的为A10，厚板及棒材的为A5。

7075合金的热处理

不完全退火规范：（290~320）℃/（2~4）h，空冷。完全

退火规范：（390~430）℃/（0.5~1.5）h，以不大于 30℃/h 的冷却速度炉冷至 200℃，然后出炉空冷。固溶热处理温度：板材的 460℃~490℃，挤压材的 460℃~471℃，其中包铝板材的处理温度应靠近下限，且重复热处理次数不得多于 2 次，以免合金元素扩散穿透包铝层，降低板带材的抗腐蚀性能。材料固溶处理后淬入室温水、温热水或其他适宜的冷却介质中，转移时间应不大于 15S。厚板和挤压型材固溶处理后时效处理前进行拉伸处理，变形量 1.5%~3%，以消除淬火内应力。7075 合金材料的时效规范见表。

7075 合金板材宜在辊底式炉内进行固溶处理，截至 2016 年 12 月全球可保有辊底式固溶处理生产线 50 条，中国有 17 条，占全世界总数的 34%，处理能力超过 250kt/a。

7075 合金的力学性能

7075-T6、-T76 薄板、-T7351 厚板、-T73510 矩形挤压棒材的典型力学性能见表。由表中的数据可见，7075 合金材料有足够高的力学性能，足可以满足智能手机机身所需强度性能要求。

7075 合金的工艺特性

7075 合金的熔炼温度 700℃~745℃，半连续铸造温度 690℃

~710℃，也可以将熔炼温度控制在 730℃~760℃，铸造温度控制在 700℃~730℃，冬季控制在中上限，夏季控制在中下限，熔体出炉温度可比实际铸造温度高 5℃~15℃。7075 合金的突出特点是合金元素总量高，其质量总数高达 9.78%~12.48%，是所有系列铝合金中合金化元素总含量高的合金之一；结晶温度范围广，达到 158℃，也是所有系列变形铝合金结晶范围最宽的；合金化程度高，组织复杂。由于 7075 合金的凝固范围宽、铸态组织塑性低等原因，铸锭具有很高的热裂及冷裂倾向，扁锭宽厚比越大，其裂纹倾向也越大。为使扁锭具有良好的铸造性能和冶金组织，应严格控制合金化学成分，加强熔体净化处理，优化熔炼铸造工艺参数，严格按操作规程铸造。Al-Ti-B 细化剂添加量 1.2kg/tAl~2.0kg/tAl。7075 合金有良好的压力加工性能，可顺利加工成各种各样的半成品。

7075 合金的成形性能不如 2024-0 材料的，但在 180℃~370℃却有良好的成形性能，在此温度的保温时间应大于 2h。该合金在固溶状态（W）的成形性能与 2024-W 合金的相当。在室温条件下，当淬火和成形之间的停放时间短于 30min 有最好的成形性能，但最大成形性能可在室温保持 4h。7075-T6 材料的室温成形性较差，但提高温度可以明显改善其成形能力，加热温度 150℃~220℃。

7075 合金的表面可处理性能不尽人意，抗腐蚀性能也不

如 6XXX 系合金的，于是苹果公司加强机身的阳极氧化处理，加大氧化膜厚度，增加了机身抗汗液能力，使得新 iphone 手机拥有始终如一的亮丽外观和质感。

7075 合金的硬度高，有很好地耐磨性，是制造手机机身的上乘材料，因而 iphone6s 与 iPhone 6sPlus 手机在使用中被刮花的可能性大大下降与减少了。不过它的强度与硬度是一把双刃剑，一方面有突出的优点，另方面也有着不可回避的缺点，加大了 CNC（计算机数字控制 computerized numerical control）加工的难度，提高了生产成本，好在苹果公司并没有因此提高手机售价，也算是精明的经营之道，对提高公司产品市场竞争力大有帮助。

7075 合金的电阻焊接性能尚可,摩擦搅拌焊接性能优秀，不宜熔焊。

7075 合金板带材生产工艺：熔炼→铸造→均匀化处理→锯切→铣面→加热→热轧→预退火→冷轧→中间退火→冷轧→精整及热处理。

7075 合金在手机行业应用

在世界手机机身用材中，新 iphone 也不是唯一采用这种超强材料的智能机型。韩国三星公司（Samsung）新推出的 Note5 及 S6 edge+的超薄机身都得益于 7075 合金的采用。由于 7075 合金的一系列优秀性能，使两款智能手机机身的稳定

性达到了一个前所未有的新高度，自此以后，再也未出现变弯了的情况，更未发生损坏的情况了。三星公司用于制造新型 Note5 及 S6 edge+机身的 7075 合金有很强的抗弯能力，与以前用的机身材料相比提高了约 3 倍。

用新 6xxx 系合金制造机身

手机更加轻薄化

三星公司在其生产的最新的亮丽 Galaxy S6 及 S6 手机中采用了美国铝业公司提供的高强度铝合金 6013Alcoa Power PlateTM 厚板制造，是用 CNC 工艺加工的。6013 合金是一种高强度航空航天级铝合金，1983 年定型，并在美国铝业协会公司注册，它的标定成分（质量%）：0.6Si~1.0Si，0.50Fe，0.6Cu~1.1Cu,0.20Mn~0.8Mn,0.8Mg~1.2Mg,0.10Cr,0.25Zn，0.10Ti，其他杂质单个 0.05、合计 0.15，其余 Al。它的强度比现行用的 6XXX 系合金的高 70%，为设计更薄、更轻、更时髦豪华手机创造了有利条件，提供了有力支撑。

6013 合金是一个 Al-Mg-Si-Cu-Mn 合金，而 6013 Alcoa Power PlateTM 是一种取得专利的有注册商标名称的厚板，是一种新型的手机机身合金，可热处理强化，在人工实效状态应用。Mg 和 Si 可形成强化相 Mg2Si 含量变化对退火状态的 Al-Mg-Si 合金抗拉强度 Rm 和伸长率的影响不明显。Al-Mg-Si 三元合金的最大强度性能位于α -（Al）-Mg2Si-Si

三相区内。6xxx 系合金无应力腐蚀开裂倾向。

Cu：Al-Mg-Si 中添加 Cu 后，Cu 在组织中的存在形式不仅取决于 Cu 含量，还受 Mg、Si 含量的影响。若 Cu 含量少，Mg/Si 为 1.73，则形成 Mg2Si 相，Cu 全部固溶于 Al；若 Cu 含量较多,而 Mg/Si 值＜1.08,则可能形成 W（Al4 Cu Mg5 Si4）相，而剩余的 Cu 形成 Al2Cu；若 Cu 含量多，而 Mg/Si 值＞1.73，可能形成 S（Al2CuMg）相和 Al2Cu 相。W 相和 S 相、Al2Cu 与 Mg2Si 相不同的是，在固态下只部分固溶于 Al 参与强化，其强化效果不如 Mg2Si 的。向 Al-Mg-Si 合金加 Cu，不仅显著改善合金的热加工塑性，而且加大热处理强化效果，抑制加压效应，降低合金因加 Mn 后所出现的各向异性。

Mn：向 Al-Mg-Si 合金中 Mn，可以提高强度性能，改善抗蚀性，冲击韧性和抗弯性能。在 AlMg0.7Si 1.0 合金中添加 Cu、Mn，当 Mn 含量＜0.2%时，随着 Mn 含量的增加，合金的强度发幅度提高。继续加大 Mn 含量,Mn 可与 Si 形成 AlMnSi，夺去了形成 Mg2Si 相所必须的一部分 Si，而 AlMnSi 的强化作用又比 Mg2Si 的小，使合金的强化效果下降，因而 Mn 含量不宜大于 0.9%。

向 Al-Mg-Si 合金同时加入 Cu 和 Mn，其强化效果不如单独加 Mn 的，但可使伸长率升高，并可细化退火材料的晶粒。

向合金中加 Mn 后，由于 Mn 在α （Al）固溶体中产生严重的晶内偏析，影响合金再结晶过程，使材料及制品在慢速

退火过程中产生粗大晶粒，恶化合金的性能。目前，防止含 Mn 的 3xxx 合金与 6xxx 系合金板材晶粒粗化的措施有：对铸锭进行均匀化处理，在 550℃保温 8h 以上，消除 Mn 的晶内偏析，使其形成均匀的细小的 A16Mn 质点；对板带材进行快速退火，例如在气垫内退火，在感应炉内或盐浴槽中退火。

Cr、Fe、Zn、Ti 在 6013 合金中都是杂质，应严格限制其含量，使其不超过标准规定值。Cr 与 Mn 有相似的作用，可抑制 Mg2Si 在晶界析出，延缓自然时效过程，提高人工时效后强度，细化晶粒，使再结晶后晶粒呈细长状，因而提高合金的抗蚀性，合金的事宜 Cr 含量为 0.15%~0.3%。在 6xxx 系合金中，除 2014 年注册的 6032 合金含 0.08%Ti 和 0.01%Cr~0.2%Cr 可以减少铸锭的柱状组织，改善合金的锻造性能，细化制品晶粒。

Fe 的含于＜0.4%对 6xxx 系合金力学性能无不利影响，还稍有细化晶粒作用，若＞0.7%则生成不固溶的 AlFeMnSi 相，降低合金的强度，塑性和抗蚀性，还可使材料阳极氧化膜彩色变坏。Zn 的含量宜≤0.3%，否则对合计强度性能不利。

我们知道，在 6xxx 合金中，6061 合金不但应用最广，也是力学性能高的合金之一，它的 Si、Cu、Mn、Mg 平均总含量为 2%,而 6013 合金这 4 个元素的平均总含量却高达 3.15%，比 6061 合金的多 57.5%，因而是 6xxx 系合金强度性能最高的合金之一，也是三星公司采用它制造 Galaxy S6 及 S6 新板

手机机身的主要原因之一，同时它的压力加工性能，成形性能、表面处理性能等均全面优于 7075 合金的，它的加工工艺也比 7075 合金的简单,因此其厚板价格比 7075 合金的便宜，进口厚板价格约 5 万元/t。

手机与电子产品

外壳铝材短板亟待全面补上

电子产品多种多样，用的铝材也是品种繁多，式样千差万别，单个产品的用量虽不多，但电子产品产量大，以百万、千万件计，有的甚至上亿件，而且换代极快，铝材在手机机身与电子产品外壳制造中得到广泛应用，现在几乎找不到不用铝材的电子产品。近期生产的苹果、三星智能手机，华为公司的一部分国产手机机身都是铝厚板 CNC 加工的，特别是用 7075 合金的，同时三星公司用的是美国铝业公司的 6013Alcoa power plateTM 厚板，中国有几个厂的装备与技术力量在生产此合金厚板方面经过努力应该是不成问题的，不过也不可掉以轻心，对中国铝加工业来说，这还是一种新合金，没有生产经验，但有生产 6061 合金的经验，因为它们同属 Al-Mg-Si-Cu-Mn 系合金。

在当前及未来，手机轻薄化趋势是不可阻挡的潮流，需要更强更好的机身材料来支撑，在未来一定会有更多的国产手机采用 7xxx 系合金厚板作为机身材料，但是现在用的板材

都是美国铝业公司生产的,进口价格高达 7 万元/t,约为 3xxx 系合金价格的 3.9 倍，除了 7075 合金的生产工艺比其他系合金的复杂得多外，国外公司也看到了中国目前还不能生产这类手机档次的铝合金厚板，奇货可居，因此，中国必须尽快摆脱这种困境，补上这块短板，中国的铝加工装备完全具备了生产这种铝板的条件，实际上早在 1957 年哈尔滨铝加工（代号一 0 一厂，即现在的东北轻合金有限责任公司）在苏联专家帮助下就试制成功航空级 B95（苏联牌号,相当于 7075）合金材料，笔者也曾参与了此项工程。当然，7xxx 合金手机机身合金板材的加工工艺，包括 CNC 切削、阳极氧化着色，都比 6xxx 系合金板材困难得多，能否顺利解决这些问题，将成为该合金板材能否在国产手机中推广应用的关键。

1.8.11 中国铝焊条（丝）工业亟待加强

基体合金	推荐的焊条合金			
	要求必要的强度	要求必要的塑性	要求阳极氧化处理后颜色一致	要求抗海水腐蚀
1100	4043	1100	1100	1100
2219	2319	2319	2319	2319
6061	5356	5356	5154	4043
6063	5356	5356	5356	4043
3003	5356	1100	1100	1100
5052	5356	5356	5356	4043
5086	5556	5356	5356	5183
5083	5183	5356	5356	5183
5454	5356	5554	5554	5554
5456	5556	5356	5556	5556
7039	5039	5356	5039	5039

近 40 多年来，随着铝在车辆、船舶、建筑、桥梁、化工设备、低温工程、航空航天工业等方面的广泛应用，其焊接技术也得到了飞跃的发展，特别是 1991 年摩擦搅拌焊（Friction stir welding,FSW）问世以后，铝的焊接进入了一个前所未有繁荣昌盛时期。

与钢铁的焊接相比，铝的焊接困难得多。铝的熔点低（660℃），焊接时合金元素易烧损，铝极易氧化并在表面形成难熔的氧化膜，产生氧化夹杂，降低接头的力学性能；铝的吸氢性强，焊接时易形成气孔，对接头性能不利；铝的线

胀系数大，若焊接工艺参数选择不当，焊件会产生较大变形，甚至因内应力大而产生焊接热烈纹；铝的热导率高又有大的比热容，焊接时须采用能量集中热源，因此铝的焊接已发展成为一门有特色的专业技术。

铝虽具有以上一些不利于焊接的不足之处，但是它的优点很多，同时由于焊接技术的发展，这些缺点也一一得到克服，使铝成为国民经济建设用量仅次于钢铁的第二大金属，它的主要优点可归纳为：密度既小而强度又较高，因而比强度大，可以获得质量轻而强度高的结构；具有良好的可加工成形性能，可以轧成极薄的箔，挤压成截面复杂的薄壁型材；抗腐蚀性能高，有些合金对海水与海洋气氛有很好的抗蚀性；良好的低温性能，强度与塑性均随着温度的降低而同时升高，对于制造焊接低温容器极为可贵；多数铝合金有良好的金属极惰气保护焊（MIG,Metal Inert Gas）、钨极惰气保护焊（TIG,Tungstem Inert Gas）、激光焊、摩擦搅拌焊等可焊性；铝器、铝结构、铝零件等使用到期报废后有很高的回收率，可达 95%以上，是可循环性最高的结构金属；资源丰富，是地壳中储量最多的金属，为地壳质量的 8.8%，取之不尽，用之不竭；价格适中；节能的环保材料，铝是通过熔盐电解法提取的，虽然从铝土矿到原铝提取耗费能源约 15000kWh，但铝制交通器械在使用期间节约的能源是此数的 3 倍至 4 倍，排放的温室气体也相应地减少。

焊接铝时注意事项

大家对钢铁焊接相当了解，焊接技术相当成熟，但与钢铁相比，铝具有不同的特点，因此习惯于钢铁焊接技术的人，开始会稍感生疏，认为焊接困难，但只要充分掌握铝的特性，就可以相当容易地进行焊接，焊接铝时应特别注意事项如下：

熔化温度低和热容量大

纯铝熔点 660℃，铝合金的 530℃~650℃，比钢和铜的熔点低得多，容易熔化，但是，它的比热容和熔化热却比其他大多数金属的高，热导率也高，单位散热率相当于钢的 5 倍，因此局部加热困难。为使铝熔化，必须迅速地集中地供给大量热。铝的电阻约为钢的 1/4，热导率又高，因此电阻焊时必须采用大功率电源设备。

和氧的亲和力强

铝极易与氧化合，即使在干燥大气中短时间存放也会在其表面形成致密的氧化膜。这种氧化膜（A1203）虽然很薄，只不过 5nm 左右，但却耐高温，超过 3000℃，焊接时它妨碍基体金属和填加金属的熔化，基体金属就是铝，填加金属指焊条与焊丝。消除基体金属和填加金属上的氧化膜有机械法和化学性。

在气焊和钎焊时，为了清除焊件表面上的和由于火焰氧化而生成的氧化膜，可采用熔剂，但焊后必须将熔剂清除干

净，以免腐蚀基体金属。惰气保护焊时采用阴极雾化作用很容易清除氧化膜，不会造成氧化物夹杂。

易吸收氢

铝熔体吸收氢的能力虽没有镍那么严重，但也比钢及铜的稍大一些或相当。溶解于焊接接头中的氢来自焊接火焰、电弧气氛、熔剂、基体金属和填加金属表面污染物与氧化膜同时存在的水分和大气中的潮气等。

焊接时溶解的氢是接头结晶过程中产生气孔的根源，降低接头强度性能和抗蚀性，因此必须严防气孔产生。

热胀冷缩比钢的大

铝的热胀冷缩率比钢的大一倍，纯铝凝固时的体积收缩率高达 7%，铝合金的平均收缩率虽然低一些，但也达 5%。因此，焊接铝工件会发生显著的变形，如果不保持适当的焊根间隙或不进行拘束，则会产生变形，而且，会在某些合金的接头（焊缝金属）内和热影响区内产生裂纹。实践证明，纯铝比铝合金难以产生裂纹，热处理可强化合金与不可热处理强化合金相比易产生裂纹。

焊接热对基体金属的影响

焊接可热处理强化铝合金时，由于焊接热的影响，会使基体金属某些部件的力学性能下降，焊接冷加工合金的情况也如此，并且焊接热输入量愈多，性能的降低也愈多，因此，电阻焊和金属极惰气保护焊的热影响区比钨极惰气保护焊、

气焊的小。

此外，由于焊接热影响，常常在晶界上发生成分偏析或析出杂质相，从而使该区的抗蚀性下降。过热程度愈大，抗蚀性能下降倾向也愈显著。在进行电阻焊时，若电极铜被基体铝吸收也会损害抗蚀性。

焊条与焊丝的选择

在当今的铝及铝合金焊接工艺中，有不用焊条（welding rod)与焊丝(welding wire)的，如激光焊与摩擦搅拌焊(FSW)，其他的焊接方法都要用焊条或焊丝。在此需说一下，现在国内大都将 FSW 译为“搅拌摩擦焊”，这是不妥的，无论从此法的工作原理方面看，还是从英语语法与习惯方面看，亦是从汉译英习惯方面看，都应译为“摩擦搅拌焊”。焊接铝工件的焊条及焊丝的性能及其应用简述于下。以下将焊条与焊丝通称焊条。

1070 焊条

适合于焊接纯度≥99.70%的精铝与高纯铝，尤其适合于要求焊缝与基体具有等同抗蚀性和塑性工件焊接。对接头抗拉强度要求比较宽松，但实际抗拉强度都在 55N/mm2 以上。

1100 及 1200 焊条

适合于焊接≥99.0%Al~<99.70%Al 的工业纯铝和 3xxx 系合金，它们都有良好的可焊性、抗蚀性、塑性和韧性，接头抗拉强度 Rm=75N/mm2~110N/mm2。

2319 合金焊条

是为焊接航天发射火箭燃料贮箱研制的焊条合金，平均成分（质量%）：Cu6.3，Mn0.3，V0.1，Zr1.5，其余为 Al 及不可避免杂质。用它焊接 2219 高耐热合金、2419 高强高韧合金及其他 2xxx 合金。用其焊接 2014 合金时，接头在焊接状态的抗拉强度 Rm=270N/mm2~300N/mm2，热处理后的 Rm=400N/mm2~450N/mm2。

4043 合金焊条

是一种应用广泛的焊条合金，平均 Si 含量 5%，用它焊接的焊缝金属有高的抗热裂能力，因此，可用其焊接易产生焊接热烈裂缝的 6xxx 系合金，铸造铝合金和对接头强度要求不高而可焊性又较差的铝合金等。但这种填加金属降低焊缝塑性韧性；另外阳极氧化时，会出现焊缝表面颜色与基体表面颜色有较大差异，是其缺点：而且用它焊接 5xxx 系合金时接头中可能析出 Mg2Si，也是其不足之处。用 4043 合金焊接的 6061-T6 合金接头的抗拉强度 Rm≥170N/mm2。

5652 合金焊条

它是一种含 2.5%Mg 与 0.25%Cr 的 5xxx 系合金，是为焊接化工设备（过氧化氢贮罐）研发的，焊接接头强度 Rm=180N/mm2。

5554 合金焊条

该合金是一种含 2.7%Mg、0.75%Mn 的 5xxx 系合金，它与

5252 合金同属镁含量低的 5xxx 系合金，具有良好的加工成形性能、阳极氧化性能和抗蚀性，多以挤压材形式应用于建筑、交通运输工具、船舶舰艇等结构的内外装饰、高级家用器具和使用温度高于 65℃的化工设备等。5554 合金最适合焊接低镁含量的 5xxx 系合金，焊接接头强度≥220N/mm2

5654 合金焊条

5654 合金的平均镁含量为 3.5%，其焊条适合于焊接中等强度的一般结构 Al-Mg 系合金，它们具有良好的可焊性和抗蚀性，接头强度 Rm=210N/mm2~270N/mm2。

5356 合金焊条

它的平均含 Mg 量为 5.0%，广泛用于焊接 5xxx 系（如 5083 合金等）和 6xxx 系合金（如 6061 等）。向 5356 合金中加入 Ti 可以细化晶粒和改善力学性能。它具有良好的可焊性，是一种最基本的焊料，但它的屈服强度和韧性比 5183 合金低一些，接头抗拉强度 Rm=270N/mm2~310N/mm2。

5556 合金焊条

它是一种 Al-Mg-Mn 系合金，合金化元素平均含量为 5%Mg 和 0.75%Mn，有优秀的可焊性和相当高的接头力学性能，凡要求接头有高的力学性能的 5xxx 系合金结构皆可用此种焊条焊接，但它的韧性和塑性比 5183 合金焊条的低一些。5556 合金焊条接头的抗拉强度 Rm=280N/mm2~320N/mm2。

5183 合金焊条

该合金的 Mg、Mn 合金化元素平均为 4.7%与 0.7%，有良好的可焊性，力学性能与抗蚀性也相当高，它和 5356 合金同为最基本的增加金属，可用来焊接 5xxx 系和 7xxx 系合金，如 7N01 合金等。它的强度性能虽比 5556 合金的低一些，但其塑性和韧性却较高,接头抗拉强度 Rm=280N/mm2~310N/mm2。

焊接时由于焊条中含有的元素氧化和挥发损耗以及受基体金属的稀释作用，焊缝成分会或多或少与焊条的有所差别。在这类元素中，Mg、Zn 比 Si、Cu 易损耗，但是损耗量与焊接方法、焊接热输入量和焊接速度等焊接参数有关，另外，基体金属与焊缝金属颜色除了组织方面的差异外，因合金成分不同自然也会不一样。因此，最好采用合金元素含量比基体金属略高的焊条，而且为了焊缝具有细晶粒组织，焊条合金最好含有微量的 Ti 和 B。通常，在与基体金属熔合而成的焊接接头组织中，如果生成过多的 Mg2Si、Al2Cu、AlFeSi 或 Al6Mn 之类化合物，接头不仅缺宪法韧性和变脆，而且疲劳强度也会降低，因此必须注意焊条的选择。

以上谈的是一些选择焊条的基本原则，是根据经验和实验结果得出的，另外，针对各种在体金属，为了获得特殊生能而推荐使用的焊条合金见下表。

焊接材料质量与管理

焊条与焊丝品质对焊件质量影响很大，因此应严格控制

它们的品质并加强管理，以确保处于良好状态。焊条品质主要是指尺寸、表面状态与硬度。

品质

早期焊条是从基体板材上剪切的细条，现在已全部改用圆杆状的，其直径尺寸应均匀，以确保焊道均匀与外形良好。若焊丝不均匀，会与 MIG 焊接设备的导电嘴或送丝管道内壁接触不良，而且会使送丝轮无法顺畅地输送焊丝，从而造成焊丝回烧，不但影响焊接质量，而且可造成事故。焊丝是成盘供应与使用的。

焊丝是经拉伸、除油与抛光（光化）处理制成的表面有光泽的线材，其表面状况与焊接时的输送情况休戚相关，并对焊接质量有重大影响，因此焊丝应光滑，不得有凹陷、擦伤、裂纹等。

焊丝应有均匀的硬度，以确保输送均匀，消除断弧现象。焊丝是用自动或半自动送丝机等输送的，因此焊丝硬度的选择既与送丝方式有关，又与导丝嘴出口尖端弯曲度密切相关。通常，推进式输送机采用硬状态（H）的焊丝，既略硬的拉拔状态的；而拉伸式输送机宜采用退火状态（O）的。

管理

焊条或焊丝管理对保证其品质起着重要作用，据我们的实践，约有 5%焊条与焊丝因保管不善而变质，这是一种不可忽视的损失。

焊条（含焊丝，下同）最好是装入厚而结实聚氯乙烯袋内抽成真空后装箱入库，以防其表面吸附水分变质，包装箱宜存放于干燥处，只要保管措施到位，开封后保存 3 个月~6 个月不会变质。焊丝表面积比坡口表面积大得多，因此焊丝表面污染对接头质量影响要比基体金属坡口的污染大得多。例如，当把 10mm 厚的基体金属加工成 60° 的 V 形坡口并焊接 1m 长时，坡口表面积可达 346.4cm2，而填平该坡口用直径 1.6mm 的焊丝时，其表面积竟高达 2165.1cm2，为基体金属的 6.3 倍。

在焊接中取放焊条时应戴清洁手套，不准用徒手或戴脏手套，对长期放置发生了变质的焊条应重新进行表面处理。

与工业发达国家的差距

在应用的铝制品与结构中，焊接量会越来越多一些，作用也日益突出。铝的焊接种类很多，大多数需用焊条与焊丝，当然也有不用的，如激光焊与摩擦搅拌焊，后两种是新的与较新的工艺，在国内的应用远未普及，应大力推广，它们是铝的绿色焊接法，节能环保，有些企业已采用它们焊接汽车部件、轨道车辆零部件、航天器发射燃料贮箱、航空器零部件等。

焊条与焊丝品种甚多，在生产中当前存在两方面的问题，即还存在两方面的短板：有些合金的还不能生产，如 AL-Li

合金、Al-Sc 合金、7050 合金、7055 合金的；二是大多数合金焊条虽能生产，但在品质上与法国等国家的相比还有较大差距,以至还不得不花大价钱约 10 万元/t 的高价进口焊条。

那么怎样补这些短板呢？靠创新，在研究院所与高等院校内组建焊条研究小组，联合焊条生产企业共同研发焊条合金及其生产工艺,不要小看焊条,它关系着高新技术的发展，关系着关键产品的可靠性与安全性。

据笔者和行业的实践，中国生产焊接线的工艺与国外的工艺不同，中国企业多为中小型，采用的工艺为：铸造圆锭→挤压线坯→拉拔焊条线→制造焊条；国外工艺：连续铸造线锭→三辊 Y 型连轧机 8 台~17 台轧得Φ9.6mm 的盘条→拉拔焊条线→制造焊条，盘条生产工艺用的最多的是意大利的普罗佩齐（Properzi）法和美国南方线材公司法（SCR）。由于中外线坯生产工艺不同，决定了线材的组织和性能不同，国外焊条显微组织晶粒细小均匀，化合物呈弥散状态。另外，在设计连轧机时，应通过实验确定连轧机台数和每台轧机的轧制率。中国有高等院校在这方面做了许多卓有成效的工作，有关企业可与他们合作建设用连铸连轧法生产优质铝焊条的工厂，从根本上提高铝焊条品质。

1.9 历史回顾

1.9.1 回首2010我国铝加工业成就斐然（一）

2010年对国外铝工业来说仍是一个不容乐观的年头,不过金融危机严冬已过,已感到经济开始苏复的春意,美国经济开始抬头,德国经济明显好转。而中国这边风景独好,GDP增长率高达10.3%。2010年国外的原铝产量2580kt、铝材产量2443.5kt,分别比上年度的增加6.86%与4.16%;而据中国有色金属工业协会的统计,2010年中国的原铝产量16194.5kt、铝材产量20280.5kt,分别比上年度的上升26.07%及22.76%,比国外的相应高19.1百分点、18.6百分点。

我们应注意到,在作不太精确的金属平衡时,原铝消费量+再生铝消费应等于铝材产量+铸造产品产量。尽管2010年成就斐然,但也遭遇到反倾销这样不愉快的情况。

认真贯彻国家政策落后产能淘汰成就斐然

淘汰落后产能是转变经济发展方式、提高经济增长质量和效益、有效应对国际金融危机的迫切要求,也是推进节能减排、积极应对全球气候变化的需要,特别自温家宝总理2010年1月20日主持召开国务院常务会议,研究部署加强淘汰落后

产能工作以后,铝加工业认真落实国家政策,在加速淘汰产能方面积极行动,取得了巨大成就,2010年的成绩胜过以往几年的。据笔者的调查,截至2010年年末,铝加工业“二人转”块片式热轧机及冷轧机已全部淘汰;燃煤加热炉也已全部关停,改为燃油炉或燃气炉;铝渣中铝的回收工艺也有很大改进。

不过,落后产能的淘汰还任重道远,铝加工业装备与工艺的全部现代化还有许多工作要做,例如还有约15%以上产品是用非现代化的装备与工艺生产的,也就是说是用较为落后的装备与工艺生产的。淘汰较为落后的生产工艺与装备必须采取更加有力的措施,综合运用法律、经济、技术和必要的行政手段;发挥市场作用,营造有利于落后产能退出的市场环境;充分发挥法律法规的约束作用和技术标准的门槛作用,依法淘汰落后产能等等。

2010年2月24日,国务院总理温家宝主持召开国务院常务会议,研究部署进一步贯彻落实重点产业调整和振兴规划。会议提出,面对国内外环境变化的新形势,必须牢牢抓住调整结构、转变发展方式这一点,进一步加大工作力度,充实完善政策措施,加快体制机制创新,全面贯彻实施好产业调整和振兴规划,力争在提高产业发展的质量和效益上取得新的突破性发展,再次提出加快淘汰落后产能与工艺装备的必要性与迫切性。

2010年2月6日国务院以“国发[20107号]文发出“国务院

关于进一步加强淘汰落后产能工作的通知”。要求各省、自治区、直辖市人民政府,国务院各部委、各直属机构:深刻认识淘汰落后产能的重要意义;明确总体要求和目标任务,分解落实目标责任,强化政策约束机制,完善政策激励机制,健全监督检查机制,切实加强组织领导。对淘汰落后产能将起重要作用。

汽车产销量双双飙升用铝量首次超过美国

2010年中国汽车产量1826.47万辆,比上年度的1379.10万辆增长32.44%,销售1806.19万辆,同比上升32.3%。国内汽车市场2010年产销双双超过1800万辆,蝉联全球第一大汽车生产国和最大新车销售市场,并创全球历史新高。在世界汽车发展史上,美国曾经创造了1700万辆的产销纪录,现在我们刷新了这一全球纪录。汽车市场爆发性增长的主要原因,一方面是国家宏观经济平稳发展与以旧换新、汽车下乡等政策的叠加效应,另一方面是消费者的购买力的上升。2009年中国人均GDP超过了4000美元,私人购车成了阻挡不住的潮流。

由于汽车产量的增加,中国汽车2010年的用铝量据笔者的调查与估算,单车的平均用量为127.5kg,总消费量为2328.75kt,比美国的约1850kt高25.88%,成为全球汽车用铝最多的国家。不过中国的单车用铝量仍比美国、日本、德国低,比美国145kt/辆低12%,比日本及德国约低13%。铝在中国

汽车中的用量还大有潜力可挖。

2010年中国汽车铝制零部件的用铝总量约2700kt,因为出口铝车轮就达360kt。中国汽车出口量尚未恢复到金融危机前水平,虽然国内汽车产销2010年刷新了历史纪录,但由于世界经济仍没有恢复到金融危机前,汽车出口也还没有回到危机前水平,全年仅出口54.49万辆。

增加汽车用铝量有巨大的经济效益与社会效益,加大单车用铝量是当前汽车轻量化最有效的措施,而汽车轻量化是实现节能减排与建设绿色汽车产业必由之路。中国厢式汽车与专用汽车的铝化率还很低,北美地区厢式车的铝化率已达92%,而中国的还不到5%。龙口丛林集团与东风汽车公司合作研制成功的金霸E33-621型轻量化铝合金车厢,中国重汽集团专用汽车有限公司研发的中国首辆铝合金自卸车均可于今年批量生产,为铝材在这方面的应用开辟出金光大道。2010年汽车用铝的78.2%为铸造铝合金,变形铝合金只不过占21.8%。

高铁与城轨建设大发展拉动高精铝材用量大升

高铁是高速铁路的简称,根据国际铁路联盟的定义,在既有路线上运营速度大于200km/h的列车,在新建线路上运行速度大于250km/h的列车,相应的线路被称为高速铁路,车辆与机车被称为高速机车车辆。在现有的技术条件下,高铁机车车辆车体都是用铝合金制造的。高铁的极限运行速度为550km/h。

2007年~2020年是中国高铁与城市轨道交通建设的黄金时期,而2010年是建设期内的鼎盛之年,2009年12月26日开通,试验时一度达到394km/h的郑西高速人路开始运营,全长505km;2010年7月28日沪宁高铁开通,长301km,速度350km/h;2010年9月南昌-武汉开通运营,速度250km/h,长365km;2010年9月23日沪杭线开通,速度350km/h,试验速度最高达416.6km/h,线路全长202km,中国CRH动车组铝合金长龙真的“飞”起来了,比直升机的速度还快;2010年7月世界标准最高、规模最大、一次性建成里程最长的京沪高铁正式进入铺轨阶段,计划2011年6月开通,速度380km/h,长1318km。这是全世界高铁建设史上投入运营最多的一年,总长度3760km,按3.5辆机车/km计算,需要13160辆,制造它们的厢体需采购铝材109.23kt(按8.3t/辆计算)。

城市轨道交通包括地铁,轻轨悬浮、中低速磁悬浮,制造这些车辆厢体需采购铝材6.23kt。在城市轨道交通车辆中,磁悬浮及中低速磁悬车辆的厢体必须用铝合金制造外,地铁及轻轨车辆的厢体可用碳钢、不锈钢及铝合金制造,其中铝合金的约占30%。

在轨道车辆铝合金厢体用的铝材中主要为挤压铝材,约占80%,其余的为板、箔、管、棒、线、锻件等。而在所用的挤压材中,大型材(≥80MN挤压机生产的)占的比例还不到20%,需用<35MN挤压机生产的为35%,其余的可用35MN~75MN的挤压

机生产。

制备制造水平迅速提升 多台宽幅铝带冷轧机投产

中国现代化铝带冷轧始于1956年东北轻合金有限责任公司(那时名为哈尔滨铝加工厂,代号101厂)的建成投产,有2台1700㎜四辊可逆式冷轧机,从苏联引进,上世纪70年代第一重型机器制造了一台2800㎜四辊可逆式冷轧机,安装于当时的西南铝加工厂,运转情况良好。改革开放以来中国引进了近40台铝带冷轧机,在此基础上通过消化吸收与创新设计制造了各种规格的四辊与六辊冷轧机320多台,在生产中发挥了很好的作用。2010年投产的宽幅冷轧机有(可把辊面宽度≥1800㎜的冷轧机定义为宽幅或大型铝带冷轧机):浙川铝业有限公司2010年有2台2300㎜四辊不可逆式冷轧机在建,上海天重重型机器有限公司设计制造,1台年底投产,另一台2011年投产,其中1900㎜的2台,2300㎜的1台;2010年7月下旬青岛润丰铝业有限公司1台1850㎜冷轧机带料试车成功;万达铝业有限公司的1台2400㎜不可逆式4辊冷机机8月份投产,是中国近25年来投产的最大国产冷轧机,北方重工业公司设计;其他的国产大型冷轧机8台。

1.9.2 回首2010我国铝加工业成就斐然(二)

自2003年以来中国铝加工业进入高速持续建设阶段的黄金时期,至今热度不减,2010年在建的大中型项目近100个,总投资逾2000亿元,生产能力约23000kt/a,当然这些项目不全是2010年开始建的,有些是过去延续下来的,有些项目也可能仅是纸上谈兵,能否如期建成,尚不得而知,生产能力也可能会发生很大变化,即使有50%的项目建成那也是非常了不起的。

在建的大中型铝平轧产品项目50多个,总投资约1100亿元,其中的大型项目有:

豫港龙泉高精度铝板带公司,中国建设的首条1950mm黑兹莱特连铸连轧生产线,生产能力250kt/a,总投资29.5亿元;

亚洲铝业铝板带公司,生产能力700kt/a,一期400kt/a,二期300kt/a,总投资约80亿元,有(1+5)式热轧线1条,五机架冷连轧线1条,CVC6冷轧机1台,一期2010年12月17日投产,二期在建,计划2015年投产;

平安高精铝板带有限公司,生产能力200kt/a,有(1+3)式2400mm热连轧线1条,CVC6冷轧机的2台,总投资28.6亿元,2011年中期投产;

东轻超大规格特种铝板带项目,200kt/a的生产能力(其

中厚板50kt/a),总投资48.7亿元,3950mm西马克单机架可逆式热轧机1台(2011年7月投产),2400mm(1+1)式热轧线1条(2012年7月投产);

西南铝厚板生产线,生产能力50kt/a,4300mm可逆式热轧机1台,2011年全面投产;

百色生态铝工业基地,在建“千亿铝产业”工程,其中高精铝板带箔、车轮、铝型材的生产能力1500kt/a;

中铝瑞闽铝板带有限公司,2400mm(1+3)热连轧线1条,2380mmCVC6冷轧机1台,2011年投产,总投资27.58亿元;

赣州铝业股份有限公司,生产能力200kt/a,投资10亿元,2011年投产;

宁夏锦宁巨科新材料股份有限公司,生产能力200kt/a,计划2012年1月底投产,1850mm(1+4)式投连轧线1条,2台单机架不可逆式冷轧机;

洛阳香江万基铝业有限公司,生产能力400kt/a,2010年5月完成土建工程;

南南铝加工有限公司,生产能力200kt/a,2010年2月4日开工,2013年投产,总投资45.5亿元;

龙鼎公司,600kt/a铝箔项目,分期建设,一期20台铸轧机,26台冷箔轧机,2010年10月起陆续投产,2014年全部建成,总投资50亿元;

鲁丰铝业有限公司,总生产能力450kt/a,总投资48亿元,

分三期建设:一期热轧,(1+4)式热连轧线1条,二期建冷轧生产线,三期建熔铸厂,一期2013年上半年投产;

世捷铝业有限公司,生产能力200kt/a(厚板及蒙皮板80kt/a、冷轧带材120kt/a,总投资20亿元,2010年4月开工,建设期26个月;

永杰铝业有限公司,生产能力300kt/a,总投资20亿元。一期1850mm(1+3)式热轧线1条,1850mm6辊冷轧机4台,2000mm箔轧机3台,2012年投产;

鲁丰鑫恒铝材有限公司,生产能力450kt/a,总投资30亿元,(1+4)式热连轧线1条,2010年10月30日一期开工,2013年投产;

鼎胜爱励国际铝业公司,厚板生产能力150kt/a,总投资3亿美元,一期生产能力50kt/a,建设期2年。爱励公司占81%股份;

中孚实业股份有限公司,生产能力300kt/a,总投资45亿元,一期2300mm(1+4)式热连轧线1条,2012年10月投产;

上海能源高精度铝板带有限公司,生产能力200kt/a,分一二期建设,一期投资17亿元,有单机架双卷取热轧机1台(2400mm),西马克公司的2300mmCVC6冷轧机1台,2012年初投产;

银海铝业铝板带项目,位于广西来宾迁江工业园,总生产能力500kt/a,总投资43亿元(含银海铝业有限公司250kt/a、

沃沃铝业有限公司150kt/a),分期已于2009年投产。

在上述的在建的铝板带箔项目中最值得关注的是鼎胜-爱励国际铝厚板项目,获悉该工程是按爱励铝业国际管辖的设在德国科布伦茨(Koblenz)的轧制厂模式设计的,如果真如此,可是中国铝厚板产业的一个福音。科布伦茨轧制厂是全世界有名的厚板生产企业之一,它有三点值得学习:有世界惟一的1台铝板异步热轧(Snakerolling)机,上下工作辊中心线不位于一个垂直面内,互相错开250mm,也是全世界开口度最大的(800mm)铝板热轧机;用中子衍射仪测定厚板中固溶淬火处理后的应力分布状态与大小通过计算处理与拉伸后, 可以准确无误地消除板内的残余应力,生产的厚板在后续的机械加工时不会发生对加工过程有影响的变形,中子衍射仪只有美国能生产,是一种高技术装置,不卖给中国;研发出一批有独特性能的与自主知识产权的专用厚板铝合金,如制造模具的、造船的等等。

在建的大中型铝型材挤压项目也有四五十个,大多数的产品为工业材,总投资约800多亿元,其中的主要项目有:

南山铝业轨道交通新型合金材料有限公司,生产能力220kt/a,总投资32.2亿元,2010年7月9日破土动工,仅从德国西马克梅尔(Meer)公司引进的就有8台,是中国从该公司一次性引进的设备最多的一笔采购合同,其中最大的165MN,可生

产断面宽1000mm的薄壁空心型材,是全球首台最大的现代化的卧式油压机。项目计划于2012年10月全面投产。

麦达斯铝业有限公司三期,投资10.6亿元,建一个110MN的太原重工股份有限公司的双动正向挤压生产线,计划2011年投产。

伊龙集团精密铝型材项目,投资17.69亿元,建一个高档精密铝合金型材、管材和棒材项目,引进1台75MN的双动正反向挤压机,计划2011年建成。

兴发铝业有限公司成都、宜春、焦作三项目,总投资23亿元,在成都双流、江西宜春、河南焦作同时各建一个挤压厂,总生产能力260kt/a,可于2011年投产。到2014年兴发集团将拥有4个全面投产的企业,共有挤压机131台,总生产能力430kt/a,其中广东三水厂有1台65MN的正向挤压机。

宁东能化投资有限公司挤压项目,生产能力150kt/a,其中大挤压机5台:200MN双动正反的1台,100MN单动正向的1台,55MN双动反向的1台,55MN单动正向的2台,建成后将是中国及全世界拥有最多大挤压机企业之一。

兖矿轻合金有限公司,生产能力135kt/a,总投资28.25亿元,有18条挤压生产线,2011年底或2012年初期全面投产。从德国梅尔公司引进150MN双动正向挤压机等4台设备,总价值5700万欧元,有55MN、80MN、100MN、150MN的大挤压机5台。从2010年10月开始陆续投产;

忠旺集团有限公司,该公司制订了逐步退出建筑铝型材生产而致力于工业铝型材的规划,已订购20多台90MN及以上的大挤压机,采购资金80多亿元,其中125MN的3台、225MN的2台、300MN的1台,按计划可于2015年年底以前全部投产。据称,届时挤压生产线总数可达86条,其中125MN及以下的56条,占台数的65.2%,成为全球最大的单一挤压厂。

豪美綦江铝业有限公司,广东豪美铝业有限公司在重庆市綦江建的一个铝型材项目,投资18亿元;

广亚铝业有限公司眉山项目,生产能力100kt/a,总投资5亿元,分期分批建设,2010年6月开工。

百色广银铝业有限公司,由广西投资集团有限公司与广东广亚铝业有限公司组建的一家企业,生产能力500kt/a的铝型材项目,总投资30亿元,分两期建设,一期200kt/a,二期300kt/a,工期5年。

新安车用铝型材有限公司,2010年11月10日奠基,由万基控股集团与麦达斯控股公司投资,总投资11.5亿元,规模100kt/a、50kt/a轨道车体型材与车体零部件,分三期:一期建二条大挤压生产线,生产轨道车辆型、棒、管材50kt/a;二期建1000辆高速列车及城市轨道车辆车体大零部项目;三期建5条中型挤压线,生产汽车型材30kt/a以上,形成20万辆/a电动汽车铝合金车体加工能力。

1.9.3 回首2010我国铝加工业成就斐然(三)

投资环境不断改善 国外投资高精项目增多

神户钢铁公司在中国建铝锻件厂，日本神户钢铁公司(Kobe Steel)2010年4月初宣称，将投资在中国苏州建一家铝合金汽车零件厂，投资20亿日元，日本独资，生产日系汽车在华所需的悬架锻件，计划2012年8月投产。

日本雅高压铸厂在苏州建厂，日本雅高集团公司（ALCONIX）在苏州建一个名为雅高压铸（苏州）有限公司（ALCONIX DIECAST SUZHOU CO.）的企业，专门生产汽车铝合金压铸件，为日商独资企业，产品供在华日资汽车企业。由于就地生产铝合金压铸件有明显的成本优势，因而越来越多的日本压铸企业将零部件生产转移到中国，以满足更下游日资企业的需要。目前，在华日资企业零部件生产的本地比率有了很大提高，原来他们倾向于从日本和亚洲其他国家进口铝合金压铸件。

萨帕铝业公司拟在中国建独资或控股铝挤压企业，自2009年后期以来，萨帕铝业公司在积极谋求在中国建一个中大型的独资或控股的以生产工业挤压材为主的挤压企业，正在作各种前期工作与调研工作，参观有关企业与拜访有关企业领导，包括与中铝公司的合作项目。2010年7月21日中国铝业股份有限公司宣布，计划与萨帕公司组建一家各持50%股份

的合资公司， 在中国生产铁路铝型材与零配件，并签订了组建合资公司的谅解备忘录，工厂地址定在中国南部地区。

中资源集团（香港）有限公司在江西建汽车铝合金零件项目，中资源集团（香港）有限公司与江西华广有限公司于2010年6月初正式签约，在泰和县建一个汽车铝合金零部件项目，投资10亿元，专业生产汽车发动机铝合金缸盖和车架，缸盖120×104件/a。

美国皇冠公司将在中国建3家铝罐制造厂，美国皇冠控股公司（Crown Holdings,Inc.）2010年9月25日宣布，将在中国建3个新的铝易拉罐企业，分别位于福建莆田、广东佛山、四川资阳，它们投产年度分别为2011年第四季度、2012年第三季度、2012年第一季度，它们一期工程的总设计生产能力21×108个/a，但留有相当大的增容扩建能力。它们生产250ml、330ml、500ml的饮料罐。皇冠公司是全球领先的铝罐制造企业，它们对中国的饮料市场持乐观态度。

港资鑫鑫铝业公司在北海市开建，2010年3月，由香港东京投资（集团）投资7.2亿元的鑫鑫铝业公司在广西北海市铁山港工业园区开工建设，铝型材生产能力65kt/a，占地面积300亩，建设期2年，主要装备引进，产品主要销往日本和东南亚地区。

日本阿雷斯提铝镁合金铸造公司在合肥动工建设，日本阿雷斯提公司在合肥投资的汽车铝、镁合金厂于2010年7月签

约，10月开工建设。该项目占地面积30×103m2，总投资约3000万美元，其中一期投资约2200万美元，2011年4月竣工，7月投产，2014年项目全部建成后，生产能力可达13kt/a。该公司主要开发、设计和生产汽车、摩托车精铸件、精锻毛坯和镁合金铸件等，以及铝、镁合金压铸件，有关压铸产品生产设备、模具、夹具和检具的批发、进出口业务和售后服务。阿雷斯提有限公司是日本第二大铝合金压铸件专业生产商，1943年11月2日成立。

鼎胜-爱励国际铝业公司在镇江开建，爱励国际公司（Aleris International,Inc.）与鼎胜铝业有限公司于2010年10月19日在镇江签约，共同投资3亿美元，打造国内最大的建设交通运输用高强度大规模铝合金板带生产基地，生产能力150kt/a，分两期建设，一期生产能力50kt/a。爱励国际公司占81%股份。据称，将按德国科布伦茨轧制厂（Koblenz）的模式设计与组织生产。科布伦茨轧制厂是爱励公司国际设在科布伦茨的铝平轧企业，设计生产能力200kt/a，主导产品为铝合金厚板与复合钎焊板带箔。它有一台可进行异步轧制（snake rolling）的4064mm热粗轧机，其开口度为800mm，是全球最大的。该公司还研发出一系列的有独特性能的厚板铝合金。爱励公司将把板带生产重心移到中国，并愿意将先进的技术和管理、生产经验带到中国。

麦达斯公司投资新安建轨道车辆铝型材厂，由新加坡麦

达斯控股有限公司与河南万基集团合作的轨道车辆体铝型材项目在新安县开工建设，总投资11.5亿元，分三期建设，生产能力：铝合金挤压圆锭100kt/a，车体铝型材及零部件50kt/a。麦达斯控股公司设有吉林省辽源市的车体铝型材产量是2010年产量最大的，该公司成立于2001年，2002年产量1.8kt，2006年的11.24kt，2010年的超过20kt。

标准化工作有发展　产品技术门槛抬升

建筑铝型材国家标准更全面更标准，国家质量监督检验检疫总局，国家标准化委员会于2010年2月1日发布了由广东省兴发铝业有限公司起草的GB5237.1-2008《铝合金建筑型材第一部分：基材》、GB5237.2-2008《铝合金建筑型第二部分：阳极氧化、着色型材》、GB5237.3-2008《铝合金建筑型材第三部分：电泳涂漆型材》、GB5237.4-200《铝合金建筑型第四部分：粉末喷涂型材》、GB5237.5-2008《铝合金建筑型材第五部分：氟碳漆喷涂型材》、GB5237.6-2008《铝合金建筑型材第六部分：隔热型材》。

铝合金建筑型材标准由最初的单一基材部分发展到目前的6部分，标志着铝合金建筑型材国家标准更全面、更规范，国家标准的完善意味着建筑铝型材企业的技术门槛将大为提高，对于规范行业发展和防范劣质产品的出现有着重要意义。

创新能力明显提高 新产品层出不穷 研发项目多于往年

“高强度导电热铝合金导线研制”工作启动，高强度导电热铝合金导线用于制造跨越线路架空线、严重覆冰地区导线、超高压架空线路地段，是一种具有高强度、高导电性、优良的耐热性和高抗蚀性的铝合金导线。其抗拉强度Rm≥225N/mm2、伸长率≥2.0%、电导率≥56%。IACS（直径4mm），可在150℃长期使用，在230℃加热1h或180℃加热400h后的室温抗拉强度降低不超过10%。湖南金龙国际铜业有限公司与湖南大学材料学院承担此项研发任务，各项工作已全面展开。研发经费200万元。

中铝西南铝板带有限公司轧出1790mm宽的3104合金热轧大卷，2010年3月12日，中铝西南铝板带有限公司一次性成功轧出了1790mm宽的3104合金罐体料热轧大卷，突破了2000mm（1+4）式热连轧线的极限，填补了国内空白。

1790mm宽的3104合金热轧大卷的下线，可为冷轧罐体料提供优势的带坯卷，满足用户对宽幅罐材料日益增长的需求，而且为进一步拓展罐料市场，提高经济效益奠定了坚实基础。随后该公司冷轧出宽度1700mm以上的3104合金罐体料，罐体料宽度的增大，不但提高了生产效率，而且满足了制罐企业对宽幅带材的需求。

中铝洛阳铜业有限公司批量生产1100-0合金深冲带材，洛阳铜业有限公司经过较长时间研发已完全掌握了深冲

1100-0合金带材生产工艺，并进行批量生产，一投放市场受到用户青睐。该产品广泛应用于航空、电力、电子、机械设备、印刷等领域。当前国内用的铝合金深冲带材多为1060、1050、1145合金带材，深冲件的制耳率大，表面发乌、产品尺寸精度和硬度难以控制，不能满足市场需求。

1.9.4 回首2010我国铝加工业成就斐然(四)

国鑫铝业公司制成2A12合金异形方管

青海国鑫铝业有限公司于2011年1月初首次试制成功2A12合金T4状态20×20×2.5mm的冷加工异形方管,生产工序多:熔铸、11MN挤压机挤压、退火、LG30轧管机冷轧、0.01MN拉拔机拉伸过渡成型、固溶处理与淬火、0.5MN张力矫机矫直、自然时效。

东轻公司成功铸造超高强与耐热镁合金圆锭

东北轻合金有限责任公司于2010年5月试铸成功Mg-Gd-Y-Zn超高强镁合金、Mg-Zn-Ca-Mn耐热镁合金圆锭,这在国内均属首次,它们的成功铸造标志着东轻公司在熔铸超高强与耐热镁合金熔铸方面达到国内先进水平,为国内超高强与耐热镁合金的研制与生产奠定了基础。这次铸造的Mg-Gd-Y-Zn超高强镁合金圆锭的规格分别为?275mm和?350mm,

长度分别为2.94m和2.05m;Mg-Zn-Ca-Mn耐热镁合金圆锭规格为?350mm、长度1.73m。

中铝西南铝板带有限公司“易拉罐罐体用铝合金铸锭的均匀化热处理方法”荣获国家专利优秀奖

中铝西南铝板带有限公司的发明专利“易拉罐罐体用铝合金铸锭的均匀化处理方法”荣获第十一届中国专利奖。本届奖项经各地知识产权局、国务院有关部门、中央企业以及两院院士推荐,由中国专利奖评审委员会评审、国家知识产权局和世界知识产权组织审核通过。

铝合金表面多层防护取得重大进展

中科院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室低维材料摩擦学课题组在铝合金表面多层梯度碳基复合薄膜构筑与防护研究方面取得了新进展。该研究工作得到科技部“863”项目和国家自然科学基金的支持。

研究组采用磁控溅射一多弧离子镀复合气相沉积技术在铝合金表面实现了梯度多层碳基纳米复合薄膜的成功制备,突破了其薄膜/基结合强度和抗磨与耐蚀一体化构筑等关键瓶颈,开发了相应的铝合金活塞、汽车空调叶片等关键零部件表面高性能薄膜技术。开发的铝合金表面梯度多层碳基复合薄膜在干摩擦、油润滑以及介质腐蚀等环境下表现出优异的自润滑和抗磨损特性,能够改善铝合金零部件在磨合初期、频

繁启停以及变工况下导致的磨损失效和腐蚀损伤。

南山轻合金罐体料获美国百威公司认可

南山集团轻合金有限公司生产的3104合金宽幅体料于2010年5月10~11日经美国百威制罐公司现场试制试验,各项指标(包装、表面状态、力学性能、工艺性能可完全满足制罐生产线的生产要求,试验在杰克森威工厂进行。南山的制罐料可满足当前速度最快(1900只/min)工位最多、带材最宽、产能最大生产线的要求。试验生产线的最高冲杯速度1900只/min,拉深速度400只/min。百威集团2010年向南山轻合金公司订了约4kt3104合金罐体料,2011年的采购计划30kt。

西北铝加工分公司“汽车用ABS阀体材料生产工艺”获发明专利

中铝西北铝加工分公司“汽车用ABS阀体材料生产工艺”于2010年4月通过了国家知识产权局的审查并获得了发明专利。高品质高精度汽车ABS阀体挤压铝材在抱闸系统中得到广泛应用,由于对各项技术指标要求很高,生产难度很大,世界上只有美国、日本、德国等少数国家能生产。为了满足汽车工业的需要,西北铝加工分公司克服各种困难,精心组织生产,终于试制成功市场急需的这种材料。

渤海铝业有银公司于2009年底开始生产罐体料,并发往用户试生产,2010年2月获得订可,随即进入批量生产阶段。该公司还生产罐盖料,但由于没有涂层生产线,冷轧的裸带卷由

另一配套企业涂覆。渤海铝业公司不生产拉环料。至此中国有3家企业生产罐体带材,另两家企业是南山轻合金有限公司与西南铝业(集团)有限责任公司,以南山轻合金公司的产量最大,2010年的产量近80kt。中铝西南铝板带冷连轧有限公司的设备正在有负荷调试,一旦投产,中铝公司的罐料产量会有较大上升,2012年中国可望不再进口这种铝材。

云鑫铝业有限公司的食品药品包装再获美国FDA认证

云鑫铝业有限公司(原名云南新美铝铝业有限公司)的食品药品包装箔再次通过美国FDA(foodandDrugAdministration,食品药品管理局)的认证。获得FDA签发的证书就等于拿到了包装铝箔通往世界各国与地区食品及医药市场的“签证”。云鑫铝业有限公司包装铝箔通过FDA认证,表明该公司的包装箔不仅可以行销北美市场,而且可以销往世界各国与地区。

晟通科技公司“防腐亲水涂料”获国家发明专利

湖南晟通科技集团有限公司的“防腐亲水涂料”获国家知识产权局授予发明专利权。这种防腐亲水涂料具有很好的耐腐蚀性、高亲水性、附着力强、成形性好、耐热性和抗弯性能优良,无臭味,且成本低,操作工艺简单,可涂装于铝材及铝制品表面,具有很大的产业应用价值。

丛林集团批量生产高速轨道车辆车低底边弧线型裙板型材

高铁车辆底边弧线裙板型材是一种高技术产品,世界上只有日本、德国、美国等少数几个国家能生产,中国过去所需这类型材全部依赖进口,丛林集团依靠自己的力量在火矩计划的支持下于2010年批量生产这种市场急需的型材,其抗拉强度245N/mm2、屈服强度205N/mm2,整体宽度582mm,各项性能、和外观品质完全符合高铁车辆要求,可以替代进口。

东轻公司获AS9100和PED认证

东北轻合金有限责任公司于2010年8月收到法国BV检验集团和英国劳埃德船级社的AS9100认证书和PED认证书。AS9100认证是在ISD9000质量管理体系认证的基础上增加了航空航天和国防组织的特殊要求,因而要求更高,难度更大,是东北轻合金有限责任公司的生产铝合金材料在民用航空领域应用必须通过的认证。PED认证是欧洲对压力设备材料的强制规定,是铝合金材料在高端压力设备上应用的通行证。

再生铝工业发展加快循环铝产业链初步形成

中铝南海再生铝项目一期投产

中铝南海再生铝项目一期工程于2010年2月1日建成投产,2008年4月动工建设,投资3.8亿元,6063型合金铸锭的生产能力110kt/a,主要原料为建筑铝型材废料,主要设备从国外引进,双室熔炼炉是德国制造的,耗资2300多万元,采用世

界燃烧热回收领域的顶尖技术---中央旋转式热交换器和二次燃烧技术,可有效避免二恶英的重新合成,热效率可达86%以上;烟气脱硫及净化除尘系统的投资达1200万元,可确保排放的气体的各项指标达到当前最严格的环保法规要求。该项目的建成投产,可以减少生产加工环节,减少废弃物排放,有极为明显的节能减排效果,经济效益与社会效益显著。

飞跃集团在天津建再生资源加工项目

浙江台州飞跃集团是全国知名的再生资源企业,在发展循环经济、带动产业转型方面具有良好的基础,在欧洲建有大规模、宽领域的废旧金属回收基地。2010年12月与天津市静海县政府签订了在子牙循环经济产业园投资成立天津钱塘飞跃再生资源公司的协议,占地约37.6×104m2,分两期建成,可于2011年8月完成一期建设,2015年形成回收600kt/a铝、铜的生产能力。

梧州30万吨再生铝加工项目启动

广西梧州300kt/a再生铝加工项目于2010年10月30日启动,占地26.7×104m2,生产能力280kt/a铸造铝合金锭,挤压圆锭30kt/a,总投资约94945.77万元,由广西有色金属集团有限公司投资,是该公司发展有色金属循环经济的主要项目之一。

再生铝厂加大国内废铝用量

国内再生铝厂长期以来都以国外废铝作为主要原

料,2010年由于国内废料价格低于国外,所以加大国内废料采购量,例如新格铝业公司过去国内废料的用量仅占15%左右,2010年的用量达到40%,其重庆厂将主要以国产废铝为原料。国内废铝的主要不足之处是品质不佳,成分波动范围大,国外废料的品质普遍高于国内的。

国际贸易摩擦加剧铝材出口屡遭反倾销

2010年中国遭遇贸易摩擦64起,其中有关铝材出口的3起,占5%。中国仍是贸易的重灾区,2010年遭遇的贸易摩擦来自美欧等发达经济体。

美国对中国铝挤压材征收反倾销税

2010年3月31日美国一些铝材挤压企业和钢铁工人联合会(UnitedSteelworkersUnion)向美国商务部和国际贸易委员会提交申请,要求对原产于中国的铝挤压材进行反倾销反补贴调查。

美国商务部4月31日宣布,决定对中国进口的铝型材发起反倾销和反补贴调查,根据美国贸易救助案的要求,美国国际贸易委员会可于5月份对此案作出初步裁决。美国商务部于2010年8月31日公布了对原产于中国的铝挤压反补贴初裁结果,裁定广亚铝业有限公司、肇庆新中亚铝业有限公司反补贴幅度分别为6.18%、10.37%,其他生产商或出口商的为137.65%。

由此,广东对美国的铝型材出口几乎“全军覆灭”。

澳大利亚最大的铝型材生产企业卡普拉尔(Copral)和格·詹姆斯(G-James)铝业公司2009年5月15日向澳海关提出书面申请,要求对原产于或出口自中国的铝挤压材进行反倾销反补贴合并调查,2010年11月作出终裁,判定对中国铝挤压企业征收6.1%的倾销幅度和6.4%补贴幅度。该案件涉及中国出口金额近3亿美元,主要涉案企业700多家,其中出口100万美元以上的31家,主要集中在广东省的佛山市。澳大利亚是承认中国市场经济地位的发达国家之一,却是对中国发起反补贴调查的首个这类国家。

欧盟对中国铝合金车轮等征收反倾销税

欧盟2010年10月28日宣布,对从中国进口的铝合金车轮和葡萄糖酸纳征收反倾销税,并对中国企业涉嫌绕道马来西亚向欧盟出口紧固件以逃避反倾销措施展开反规避调查,尔后作出决定,对中国铝合金车轮正式征收22.3%的反倾销税。欧盟的正式反倾销措施通常为期5年。中国商务部发言人多次强调,欧盟不应滥用贸易救济措施,助长保护主义风气。

欧盟反倾销税的裁定对中国有影响的企业可达46家,其中影响最大的是秦皇岛的中信戴卡轮毂制造有限公司与浙江的万中奥威铝车轮有限公司。戴卡轮毂制造有限公司是全球最大的汽车铝合金车轮企业,生产能力2000万只/a,其中的约75%出口到欧盟市场,供应奥迪、宝马、雷诺等汽车公司,该案

也会使占全球市场份额超过30%的中国铝合金车轮制造业的产品很难进入欧盟市场。

中国相关企业以高于国内市场价格出口铝合金车轮,并不存在倾销;另外,据海关统计,2008年7月至2009年5月中国对欧洲出口的铝合金车轮占欧盟市场的份额还不到8%,不会对欧产业造成影响,完全没有必要对华发起反倾销调查。

铝车轮项目建设浪潮又起产能过剩压力仍大

2010年底中国铝合金车轮生产企业约105家,生产能力约12000×104只/a,产量约9000×104只/a,产能过剩25%。可是,2010年华夏大地上又掀起了车轮项目的建设浪潮,如果这些项目如期建成投产,生产能力过剩量有可能达到38%,过剩压力不容忽视。

江西昂大投资发展公司建1000万件/a铝车轮项目

江西昂大投资发展有限公事计划建设的玉山工业园区铝车轮项目已获有关部门批准,生产能力1000×104只/a,总投资20亿元,建设铸造车间、热处理车间、机加车间、表面处理生产线等,形成的生产能力为:涂装车轮850×104件/a,电镀车轮150×104件/a。

凯旋威飞机与汽车车轮公司正式开建

凯旋威飞机与汽车车轮公司于2010年6月在西安阎良航

空产业基地正式开工建设,总投资8000万美元,由美国著名的汽车车轮制造商乔伊斯公司投资,生产能力200×104只/a。同时公司还将研制航空钛合金轮,最终形成以飞机、汽车轮产品为主的航空铝制零部件研发、制造、销售基地。产品主要销往欧美。

青岛在建亚洲最大铝车轮企业

韩国东和商协有限公司投资建设的青岛东和铸造有限公司一期工程已于2009年投产,投资4500万美元,车轮生产能力200×104只/a,投资3500万元的二期工程于2010年6月开工,建成后汽车车轮的生产能力可扩大一倍,总产能达到400×104/a。

洛阳安轮铝制品有限公司动工兴建

洛阳安轮铝制品有限公司落户新安产业园区是洛阳民营企业薪旺投资有限公司与台湾源恒工业有限公司投资建设,总投资超过5亿元,汽车铝车轮生产能力500×104只/a,分两期建成,一期投资2.6亿元,产能240×104只/a,二期投产后,产能可达500×104只/a,比东和铸造有限公司的产能还大。源恒公司生产汽车铝车轮有50多年的历史,是日本、美国一些汽车公司的长期供应商。安轮铝制品公司将充分利用万基集团的原铝,可实现减排降耗的多赢目标。

中铝-萨帕强强联姻提升中国挤压产业水平

中国铝业7月21日发布公告称:中国铝业与瑞典萨帕集团

在中国兴办合资工厂,共同开发轨道交通车体铝型材。萨帕集团是全球最大最强铝型材特别是工业铝型材挤压及其深加工企业,中国铝业是国内最大的铝业公司。它们的联姻属强强结合,如果合资成功,是中国铝挤压工业发展的新里程碑。

萨帕铝业公司既有轨道车辆车体型材挤压的精深技术,尤其是在模具设计与制造方面,又有锯切、弯曲、CNC(计算机数控)加工、液压成形、摩擦搅拌焊(FSW)、表面处理等方面的顶尖技术,而且萨帕公司已向车辆制造提供车体零部件,这是中国短期内无法做到的,萨帕挤压车辆型材的成品率可达80%,当然这是某些中小型材的成品率,406.2mm车顶型材(6Nois-T5合金)、498mm的底板型材等的成品率会低不小,总之,中国生产车体的成品率低得多。高师出名徒,向强者学习,会显著缩短自己成为强者的时间;另外,对中国铝业开拓国际车体铝挤压材市场,早日成为一流的国际矿业公司也极为有利。

1.9.5 2011 年铝加工在世界经济严寒中继续挺进之一

2011 年对中国铝加工业来说是不平凡的一年，是一个成就巨大之年，是一个值得骄傲之年，是“十二五”规划的一个良好开局。这一年全国的铝材产量有可能超过 23000kt，同比上升 24%余；铝材进口量（含铝制件但不含铝合金汽车

与摩托车车轮）可能超过 630kt，出口量可能超过 5000kt，中国已成为世界最大的铝材出口国，哪里需要铝材，哪里就有“Made in China”的铝材与铝制品；截止到时 2011 年年底，中国有铝材平轧产业约 425 家，冷轧板带生产能力约 6000kt/a，是铸锭热轧生产能力首次超过铸轧带坯生能力的一年，铝箔生产能力超过 3000kt/a；2011 年中国有铝材挤压企业近 750 家，总生产能力约 1700kt/a。

2011 年值得记录的大事有：第一条 4300mm 铝合金厚板生产线投产；首条 1950mm 黑兹莱特式连铸连轧生产线开始生产；首条引进的全新的 2000mm 双机架冷连轧线投产；首台 150MN 的世界最大与最先进的双动挤压机在兖矿轻合金有限公司开始安装；平轧产品生产能力最大的企业（近期生产能 1800kt/a，2017 年的生产能力可达 3000kt/a）——忠旺控股公司盘锦铝板带箔项目拉开建设序幕；国际贸易摩擦最多的一年，达 7 宗；中国是世界最大的铝材及铝制品净出口国，可能达到创纪录的 4370kt;是铝加工业接受外资最多的一年，近 10 亿美元;跨国铝业公司有实质行动的第一个研发中心落户中国之年（萨帕铝业公司研发中心）；全球最大的泡沫铝板企业——广元元泰达铝业公司一期 30×104m2/a 发泡法大规格泡沫铝板投产；中铝技术中心在北京昌平区开工建设，将是全世界第二大铝专业研发中心。

在过去的一年里，铝加工行业各企业与单位全面落实国

家的各项政策，在节能减排、行业结构重组与调整方面取得了显著成就，原铝行业在向下游产品发展方面的步伐大大加快，约 45%以上的原铝直接变成了深加工产品。

“2011 年关税实施方案”1 月 1 日起实施

国务院关税税则委员会 2010 年 12 月 2 日发布“关于 2011 年关税实施方案的通知”（税委会[2010]26 号）。通知称，《2011 年关税实施方案》已经国务院关税税则委员会第六次全体会议审议通过，并报国务院批准，自 2011 年 1 月 1 日起实施。《方案》中有关铝的商品编号为 7601-7616，共列有商品 66 种。在《方案》说明中称，凡从世贸组织成员国或与我国有双边互惠协议的国家或地区进口货物，即按进口暂定税率征税，从其他国家或地区进口的货物仍按规定的普通税率征税；在出口方面，该项商品实施出口商品暂定税率。

国家鼓励煤电铝跨行业重组

2011 年 1 月 18 日工信部表示，有色金属工业在“十二五”期间要促进产业改造提升，着力调整产业结构，加快转变发展方式；严格控制冶炼产能过快增长，加速淘汰落后产能，推进兼并重组，鼓励煤、电、铝跨行业重组。同时还要不断加强技术改造和技术创新，积极发展精深加工，加强再

生金属回收，促进节能减排和资源综合利用，鼓励在优势地区打造一批深加工产业基地，建设一批再生有色金属示范工程。

2011 年，中国铝加工业在淘汰落后产能方面与加强再生铝回收方面均取得了巨大成就：块片式铝板轧制装备与工艺已全部淘汰，热轧生产能力已达约 10500kt/a，铸轧带坯生产能力约 6000kt/a，前者占总生产能力的 64%。煤电铝跨行业联营成就斐然，组成了七八个大型煤-电-铝集团。

山西国际电力与阳煤重组兆丰铝业

2011 年 2 月 18 日，山西国际电力集团，阳煤集团煤电铝项目合作签字仪式在太原举行。根据协议，双方将对阳煤兆丰铝业进行重组，在煤矸石发电项目和煤炭整合上进行合作。此项合作对于消化山西省规模庞大的煤矸石和劣质煤资源，促进环境保护、土地节约、节能减排和产业升级、降低发电成本。探索资源型经济转变新路具有重要意义。

2011 年 4 月发改委公布《产业结构调整指导目录（2011 年本）》

在公布《目录 2011 年本）》时称，本目录自 2011 年 6 月 1 日起实施，《目录（2005 年本）》同时废止。《目录（2011

年本）》具有如下的鲜明特点：一是力求全面反映结构调整和产业升级的方向内容；二是更加注重战略性新兴产业发展和自主创新；三是更加注重对推动服务业大发展的支持；四是更加注重产能过剩行业的限制和引导；五是更加注重落实可持续发展的需求。

在《目录（2011 年本）》中列入的鼓励类的铝加工项目有：大规格高纯铝靶材；交通运输工具主承力结构用的新型高强、高韧、耐蚀铝合金材料及大尺寸制品（航空铝合金抗拉强度不低于 650N/mm2、高速列车用铝合金抗拉强度不低于 500N/mm2）。

10kt/a 以下的再生铝项目及 4t 以下的反射炉再生铝生产工艺及设备被列为淘汰类。没有铝加工项目被列入限制类。

发改委关于电网电价调整的通知

国家发改委网站 2011 年 11 月 29 日公布了电价调整的通知（发改价格[2011]2618-2623 号）。通知表示，为适当疏导电价矛盾，保障电力供应，支持可再生能源发展，促进节能减排，经商国家电监会、国家能源局，决定适当调整电价水平，自 2011 年 12 月 1 日起执行。

国家环境保护“十二五”规划发布

2011 年 12 月 20 日国务院下发了《国务院关于印发国家环境保护“十二五”规划的通知》，要求各省、自治区、直辖市人民政府、国务院各部委、各直属机构认真贯彻执行。《规划“十二五”确定了环境保护 7 大主要目标，提出了优先实施 8 项重点工程。

1.9.6 2011 年铝加工在世界经济严寒中继续挺进之二

贸易保护主义抬头

随着中国铝材出口量的大幅度逐年上升及贸易保护主义的抬头，国际贸易摩擦事件肯定会逐年有所增加，问题是我们应积极应对，设法保护自己的合法利益。

美商务部修改对华铝挤压材双反调查反倾销初裁结果

2011 年 1 月 10 日中国商务部发布提示，美国商务部公告，修改对华铝挤压材双反调查反倾销初裁结果：其中应诉企业与分别税率企业倾销幅度由 59.31%降至 32.04%，其他企业倾销幅度由 59.31%下调至 33.18%。

美终裁对中国铝型征收高额“双反”关税

美国商务部 3 月 29 日作出终裁，决定对中国的的铝型材

征收 8.02%~374.15%的反补贴税及 32.79%~33.28%的反倾销税。与 2010 年 8 月及 10 月的初裁相比，虽然终裁确定的反倾销税有所下降，但反补贴税却大幅度上升。中国目前是世界上最大的铝型材出口国。对美国铝型材生产商造成损失的并非是从中国进口的铝型材，而是美国自 2008 年以来一直疲软的经济，而且在案件调查中，部分参与“双反”申诉的美国公司为生产成品还从中国进口了铝型材。

美部分企业要求美国铝业协会对中国铝平轧产品提出反倾销调查

《美国金属市场报（AMM）》2011 年 4 月 12 日报道，美国铝业协会公司（AA）总裁斯梯夫·拉京（Steve Larkin）称：部分会员企业近日要求协会对中国铝平轧产品提起反倾销调查申请，但协会在短期不会回应；反倾销是一个普遍现象，并不仅仅在铝行业，但是每个行业都不会轻易作出决定，虽然行业内对这个问题的讨论日渐升温，但是我们不会立即对此采取任何行动；有很多分销商开始囤积从中国进口的廉价铝板带，这使美国国内的铝板带生产商感到有压力，因此开始向我们表示出反倾销的愿望，若要立案，还需要做更多调查，前提是对整个行业造成广泛影响，而不是对一二个企业有影响。

澳对华产铝芯电缆启动反倾销调查

澳大利亚海关和边境保护署 9 月 9 日发布的公告称，正式立案对进口中国的电缆产品启动反倾销调查。涉案产品为“单芯或多芯、裹有聚酯材料，用于电力安装，可承受 1KV 电压，适用于维持电力供应，并符合澳大利亚标准 AS/NZS 5000.1 或 AS/NZS 5000.2 的电缆”，相应澳大利亚海关税号 8544.49.20。我国出口到澳大利亚的电缆基本上为铝芯的。

加拿大边境服务署对中国铝型材发起双反再调查

2011 年 9 月 9 日，加拿大边境的服务署发布公告称，决定对原产于或来自中国的铝型材的正常价值、出口价格及补贴量进行重新计算。本次调查涉及我国铝型材行业的市场经济地位认定问题。按照惯例，中国应诉方如未能在规定时间内提交完整并且准确的证明材料，或不同意对所提交材料进行实地核查,将适用 101.0%的反倾销税和 15.84 元人民币/kg 的反补贴税。预计加拿大边境服务署将在 2012 年 2 月 20 日前裁决。

哥伦比亚对中国铝型材展开反倾销调查

2011 年 4 月，哥伦比亚铝业集团公司向该国贸易工业部

提出申请，要求对原产于中国和委内瑞拉的进口铝材实施反倾销措施。哥伦比亚贸易工业部已受理业界的反倾销申请，展开反倾销调查，但尚未公布是否会采取临时反倾销措施。

印度终止对从中国进口的铝平轧产品征收保障措施税

2011 年 10 月 13 日，印度财政部发布公告称，印度铝业协会与印度铝业有限公司已于 2011 年 10 月 11 日提交了撤回复审调查的申请，印度调查当局决定终止调查，对从中国进口的铝板带箔不再征收保障措施税。

成千上万架洲际客机装上中国零件

中国飞机制造企业已为波音飞机公司与空中客车公司制造了一批又一批的铝合金零部件，装备了成千上万架波音及空客飞机，说不定你出国坐的飞机上就有“Made in China”的铝制零部件，再过若干年，恐怕哪一架大客机上都会有中国制的或用中国生产的铝材制造的铝制零部件。不过截至 2011 年底中国生产的波音飞机与空客飞机铝制零部件大都是用进口的铝材或来料加工制造的，但这种情况会很快改变。

2011 年 3 月 9 日，空中客车公司及其母公司欧洲宇航防务集团与中国西南铝业（集团）有限责任公司签署了铝板及铝型材采购框架协议。后者将为欧洲宇航防务集团及空中客

车公司生产及供应所需的铝板、铝型材。

欧洲宇航及防务集团采取建立全球性供应链的采购策略有助于进一步降低生产成本，增强产品的市场竞争力。为促进这一商业模式的转变，欧洲宇航防务集团的全球采购网格支持空中客车公司努力在全球范围内寻找新的能够满足其品质标准的合作伙伴，并优化现有工业资产。西南铝业（集团）就是这次被优选的铝材供应商之一。

铝材在现有民用客机上仍占主要的用材地位，波音飞机及空客飞机的铝化率约占 70%。西南铝业（集团）有限责任公司的铝材将首先用于制造空客 A320 系列单通道飞机和 A330/A340 远程双通道飞机的零部件，如机身蒙皮、隔框、地板梁、机翼翼梁、翼肋等，将来还有可能进一步应用于其他空客飞机系列。

中国一直是空中客车公司的重要战略合作伙伴之一。目前多家中国飞机制造企业直接参与空客飞机零部件的制造，空客公司的所有商用机型均装有中国制造的零部件。西南铝业（集团）有限责任公司正式加入欧洲宇航防务集团、空中客车公司的全球采购网络之后，空客在中国的各项合作项目所需的铝材可以直接从西南铝业公司采购，而无需从欧洲进口，这无疑将提高空客公司在中国的各合作项目的效率，同时降低了生产成本，增强了市场竞争力。

空中客车公司当前在中国有 4 家合作企业：华欧航空培

训及支援中心、空客（北京）工程技术中心、空客 A320 系列飞机天津总装线、哈飞空客复合材料制造中心。中国的飞机制造公司还将参与空客最新机型 A350×WB 宽体飞机的生产，它们的机体 5%工作份额将在中国完成。2010 年，空中客车与中国的工作合作总价值超过 2 亿美元，估计 2011 年的合作金额可达 3 亿美元，预计 2015 年的合作总价值有可能在 5 亿美元以上。西南铝业（集团）公司生产的铝合金锻件装上了成千架的波音飞机。

大飞机项目平稳全面推进 铝加工企业厉兵秣马生产铝材

中国的大飞机项目是国家 16 个重大科技专项之一，于 2007 年正式立项，2008 年 5 月中国商用飞机公司在上海挂牌成立，2009 年 C919 已完成初步设计方案，2014 年上半年下线，年底首飞，2016 年取得适航证并交付用户。2011 年各项工作均按预定计划完成，研制工作取得巨大进展，初步设计已全部圆满结束，已进入第四阶段即详细设计与制造阶段，部分零部件已正式投入制造。C919 大飞机研制的五个阶段是：立项论证，可行性研究，详细设计和制造，试用与审批生产。2011 年初大飞机最关键的零部件已完成 9 个部段的制度，个个精湛。

大飞机的主要材料为铝合金，铝制零部件的净重占飞机

总净质量的 70%左右，整个机身的前端部分是用第三代铝-锂合金板材制造的，长 8m；中央翼，整个尾端、机翼后端使用复合材料，使舱的噪声降至 60dB；机翼上下蒙皮使用铝合金厚板，C919 大飞机的翼展 33m，机身 4.2m，需要采购的机翼最大板材长度不会超过 15.5m，机翼的最大净长只不过 14.5m 左右。在投产的 C919 用材中，复合材料用量占 15%，铝-锂合金占 15.5%，发动机和机载系统全部是国际最先进的，全部成套引进。机翼骨架的 20%为钛合金与复合材料。

在原材料使用方面，中国商飞公司提出的目标：初期试飞时主要原材料铝合金的国产化率达 30%，2014 年首飞的 C919 国产材料会占 10%~20%，以后逐步加大应用。国外的铝材主要来自美国铝业公司。

C919 大飞机用的国产铝材主要是西南铝业（集团）有限责任公司与东北轻合金有限责任公司。西南铝业（集团）有限责任公司于 2009 年 5 月为此成立了大飞机用先进铝合金材料领导小组和大飞机办公室，开始了大飞机项目关键特种铝合金材料的预研、试制工作。例如大飞机机身框架等超大型受力工作的加工技术一直以来属于国际封锁的尖端技术，他们在一无图纸二无工艺资料的极端困难条件下，大胆研制开发出复合强变形工艺，经过多次试验与调试，终于突破了现有配套设备加工变形能力不足、产品变形不深透的难题，成功地使产品厚度从 120mm 上升到 300mm,一举提升厚度 2.5 倍，

填补了国内不能生产 300㎜的超厚构件空白，满足了大飞机所需。在研制工作中，广大利研人员还攻克了多项技术难题，申请了多项专利，为大飞机材料通过试航奠定了技术基础。

循环经济加速形成 再生铝基地分布更趋合理

中国的循环经济加速成长，截止 2011 年年底全国已建成与在建的再生铝基地约有 14 个，如台州、宁波、汨罗、静海、大石桥、长葛、南海、重庆等。2011 年全国的再生铝产量有望超过 6000kt。进口废铝约 2600kt,比去年的下降约 9%。

丰城世界再生铝基地

截至 2011 年，江西省丰城市已投资约 34 亿元，建成了生产能力约 1650kt/a 再生铝基地，占江西再生铝生产能力的 70%左右，不但成为江西省最大的再生铝基地，而且是中国与全世界最大的再生铝基地。丰城市的规划是，还将加大投资，在今后 3~5 年内，打造产量达全国三分之一的再生铝基地。2011 年中国再生铝的产量约 6000kt，在“十二五”期间，再生铝的年平均增长率可达 15%,2015 年的产量可达 10000kt/a，如果丰城市的产量能达到 1/3，那么其产量应超过 3000kt。这可不是一个小数，生产这么多再生铝合金至少需要 3600kt 废铝，原料来源可是个大问题。

再生铝料直熔再生技术

上海环球研究所研发成功的一种再生铝料直熔再生技术

有望于 2012 年投入使用。该技术的关键是把铝合金废料按照牌号进行分拣，去除杂质，制成成分牌号单一的废铝颗粒（直径 5~8mm），便可直接供给压铸厂等下游用户使用。这一创新性的技术将使再生铝行业发生革命性的变化。

1.9.7 2011 年铝加工在世界经济严寒中继续挺进之三

作者：王祝堂

据悉，西南铝业（集团）有限责任公司共获得 100 多种规格、总质量约 700t 的大飞机铝合金配套材料生产订单。目前该公司正密切跟踪大飞机相关设计、设备制造单位的研发需求，不断细化大飞机项目所需特种铝合金板材、型材、锻件等材料的研发。该公司还顺利通过了法国国际检验局（BVC）的航空材料质量体系的监督审核，为进一步巩固民用航空铝材国内惟一获得认证的优势，在精密航空模锻件和锻坯生产通过波音飞机公司认证的基础上大力拓展板材、挤压材的延伸认证，这两种材料也已通过 BVC 的认证。

为了向航天工业提供宽大的高强度、高韧性、耐损伤的铝合金厚板，全国从南到北从东到西掀起了建设铝合金厚板

的浪潮，声势之大，生产能力之大，投资之多，装机水平之高，亘古未有，总投资超过 250 亿元，总生产能力大于 900kt/a，如果全部达产，所产厚板足可以满足全世界的需求还绰绰有余，2011 年国外铝合金厚板（76mm）的生产企业（有固溶处理设备）共有 12 家，总生产能力也仅约 500kt/a。而中国在建的厚板项目有：

西南铝业（集团）有限责任公司的 4300mm 厚板专业生产线，2011 年投产，生产能力 50kt/a。

东北轻合金有限责任公司的 3950mm 厚板专业生产线，2011 年投产，生产能力 80kt/a，由于精整及热处理设备不配套，生产能力不能充分发挥。

爱励鼎胜（镇江）铝业有限公司的 4064mm 厚板专业生产线，一期生产能力 50kt/a，二期扩大到 250kt/a，一期 2012 年年底建成。

南南铝加工有限责任公司 4100mm 热粗轧项目，厚板生产能力 50kt/a，2013 年投入运转。

南山 5600mm+4100mm+3000m 五机热连轧生产线，一期厚板生产能力 120kt/a，二期的 150kt/a，共计 270kt/a。

其他厚板项目的总生产能力 300kt/a。

吸引外资持续好转 铝加工业成为最具吸引力的产业之

一

2011 年对中国铝加工业投资建独资或合资的外资企业有 7 宗，累计投资超过 10 亿美元，同时这些外资企业都生产高端高技术产品，有的甚至是航空航天铝材。

爱励国际向爱励鼎胜铝业（镇江）有限公司注资 2.43 亿美元

该公司是为航空航天工业、石化工业与交通运输业提供大规格高强度厚板的专业企业，总投资 3 亿美元，爱励国际（Aleris International）占 81%股份，中方鼎胜铝业有限公司占 19%，投资 0.57 亿美元，主要以土地、公用设施、厂房建设等作价投入，是迄今为止外资在中国铝加工业最大投资之一，仅次于美国铝业对渤海铝业公司的投资。镇江厂是爱励国际科布伦茨轧制厂的翻板，它是空客公司的铝合金板材三大供应商之一。镇江厚板轧制厂建成后由爱励国际经营管理，带来了资金，带来了技术，带来了现代化的经营管理理念。

海德鲁铝业公司扩建苏州铝业有限公司

海德鲁（苏州）铝业有限公司是挪威海德鲁铝业公司（Norsls Hydro）在中国的独资企业，是一家小的专业生产热交换挤压小管材的企业。为了扩大生产 2011 年初决定投资 5400 万美元，增加 2 台较小的挤压机。

日资企业在苏州建锻压厂

日本神户钢铁公司、三井物产公司与丰田贸易集团共同投资 25 亿日元，在江苏建一个锻件生产能力在 10kt/a 以上的大型铝合金锻压厂，以满足中国汽车工业高速持续发展对高性能铝合金锻件不断增长的需求。以上三家公司在新建企业中分别占 60%、25%、15%股份，产品为汽车悬架系统零件，该项目计划于 2012 年 8 月建成投产。据称，这三家公司在美国也建有类似的企业取得了预期的经济效益。

中铝萨帕特种铝型材（重庆）有限公司开建

中国铝业股份有限公司与萨帕集团 2011 年 4 月 8 日在北京签约建设轨道交通特种铝型材项目，6 月 24 日正式在重庆市西彭成立。轨道交通专用铝型材及车辆车体模块 20kt/a，由萨帕集团经营管理，预计初期投资 6 亿元。集铝合金研发、型材挤压与车体模块加工于一体的实体企业,中外方各占 50%股份。一期工程有 1 台 100MN 级的双动正向挤压机及配套的辅助设备，目前从瑞典引进的摩擦搅拌焊接机已运抵重庆。

爱励（天津）铝业公司扩建

该公司是爱励国际公司（Alrelis International Inc.）旗下的独资子公司，它的前身是科鲁斯铝业有限公司（Corus Aluminium Co.），1998 年建成，有 1 台从意大利布雷德达涅利（Danieli）公司生产的单动正向挤压机，50MN（5500Ustf.），专业生产各种工业挤压型材。为了扩大生产，满足中国交通运输业对铝型材日益增长的需求，制定了扩大

生产能力的规划：2015 年的生产能力为现有的 3 倍，首先从公司的比利时杜菲尔（Duffel）挤压厂搬迁来 1 台 28MN 的挤压机。爱励（天津）铝业有限公司现行的生产能力约 7kt/a，主导产品为汽车、机械制造业等所需的工业型材。

日本三企业与东洋光铝业签订合作意向性协议

广东东洋光铝业有限公司继 2010 年成功引进日本三井物产公司与古河斯凯铝业有限公司作为战略投资者入股精箔有限公司后，2011 年 5 月又与日本铝箔有限公司、古河斯凯铝业公司、东洋铝业有限公司签订了合作意向性协议。

萨帕全球第二个技术中心落户上海

瑞典萨帕集团在上海嘉定的技术中心——萨帕技术中心（上海）2011 年 9 月 6 日揭牌，这意味着萨帕在全球的第二个技术中心正式成立。萨帕技术中心（上海）是由萨帕铝热传输(上海)有限公司的研发中心升级而成，后者创建于 2006 年，并投资数百万美元建设，致力于汽车热交换器用铝材的研发，为客户提供各种高性能、优质可靠、灵活及可持续发展的解决方案。研发中心升级为技术中心之后，在继续加强和提升热交换器铝材的研究外，还将向挤压铝材领域拓展，同时为萨帕铝型材和铝热传输部门提供全方位的技术支持和服务。

皇冠制罐集团大举扩建在中国的业务

美国皇冠控股公司（Crown Holdings,Inc.）是全世界最

大的制罐企业，2011 年 8 月 29 日对外宣称：将在中国建 2 个新的全铝易拉罐企业，在福建莆田制罐公司增建第二条制罐线。莆田新线投产后（2013 年），可生产 330ml 和 250ml 的二片罐，2013 年第三季度投产。

瑞典萨帕集团收购江阴海虹有色金属有限公司

瑞典萨帕铝业集团公司于 9 月 22 日与江阴海虹有色金属材料有限公司达成协议，全盘收购其铝业板块。海虹公司成立于 2006 年，2009 年投产，2010 年有员工 500 人，有 15 条挤压生产线，主要为太阳能等工业生产型材，2010 年的产量 20kt。萨帕公司全资拥有收购后的海虹公司，还将从北美搬迁来 1 台大型挤压机，以扩大生产能力。

比亚迪全铝电动大巴投入运营

美国铝业公司（Alcoa）与比亚迪汽车公司合作研发的全铝纯电动大巴 eBUS-12 于 2011 年 11 月在长沙下线，并将投入试运营，这款大巴比钢车身的大巴减重约 40%，即约 1t。除板材与型材由美国铝业公司提供的外，锻造铝车轮及哈克旋转（R）紧固件也是它的产品。eBUS-12 全铝电动大巴单次充电可行驶 300km，续航里程至少提高 10%。

俄铝联合公司收购北方投资公司 33%股份

俄罗斯联合铝业有限公司于 2011 年 11 月就收购中国北方工业公司下属的销售子公司深圳市北方投资有限公司 33%的股份达成协议。深圳北方投资有限公司有超过 15 年中国市

场销售原铝锭的经验，收购该公司股份将有效促进俄罗斯联合铝业公司的相关产品在中国市场的销售。

俄铝铝锭在上交所注册

俄罗斯铝业联合公司（UC Rusal）下属的伊尔库茨克（Irkutsk）和哈卡斯（Khakas）铝厂生产的“IRKAZ SUAL”和“RUSAL KH”铝锭已于2011年11月在上海期货交易所（SHFE）注册，能够按照SHFE铝标准合约中规定的各项要求进行交割。这次注册是俄铝联合公司进军亚洲特别是中国市场的重要举措。注册的两家铝厂均位于西伯利亚地区，俄罗斯铝业联合公司的80%原铝产量均在此地区，达3500kt/a。新建博古汉斯基（Boguchansky）铝厂和搭舍特（Taishet）铝厂投产后，它所拥有的生产能力可达480kt/a。

技术创新提升行业竞争力

2011年是中国铝加工业在技术创新方面最为活跃的一年，取得了多项成果，经济效益显著。

中铝研发中心在昌平开建

中国铝业股份有限公司的技术研发中心正式破土动工，初步于2014年建成后将是世界第二大的专业铝业研究中心，仅次于美国铝业公司技术中心。

原铝直接铸轧-冷轧电解电容器3003阴极电子箔

河南永登铝业铝加工有限公司与郑州大学材料科学与工程学院合作开发的“电解电容器 3003 阴极电子箔”获得了国家发明专利。该发明利用原铝直接铸轧生产的 3003 阴极电子箔，经用户试用产品质量稳定，比电容在 500UF/cm2 以上。利用此法生产阴极电子箔具有流程短、能耗低、节能减排、经济效益好等特点。此项研究成果拉长了铝加工产品产业链，提高了产品附加值，增强了产品市场竞争力。

丛林铝业批量生产高速列车底边弧线型裙板铝型材

2011 年初丛林铝业集团有限公司试制成功高铁车辆底边弧线型材，其各项指标均达到设计要求，其抗拉强度 Rm=245N/mm2，屈服强度 Rpo.2=205N/mm2，整体宽度 582mm，力学性能、尺寸及其偏差、外观品质均符合高速列车高强度、高速度、减震隔声等使用要求，达到国际水平与国内领先水平，可替代进口产品。丛林公司的“高速列车底边弧线型裙板型材项目”已被列入国家火炬计划（编号 2010GH031221）。

西南铝业（集团）公司热敏 CTP 铝基材通过鉴定

西南铝业（集团）有限责任公司生产的热敏 CTP 铝基材于 2011 年 2 月 23 日通过专家组的鉴定。专家们通过现场考察、审查产品资料、现场讨论，一致同意该公司热敏 CTP 铝基材通过鉴定验收，同意通过市级新产品鉴定。西南铝业（集团）有限责任公司在试制 CTP 基材过程中解决了多项技术难题，取得多项创新成果，取得了良好的经济效益与社会效益，

将给企业带来新的效益增长点，为企业开拓市场份额，提升市场竞争力具有积极作用。热敏 CTP 铝基材广泛应用于印刷版行业，已成为印刷业的主流用材。

中铝青海分公司铝扁锭规格达 60 余种

原铝厂生产加工企业用的锭坯，既有显著的经济效益又有巨大的节能减排效果，中铝青海分公司在这方面的工作很出色，他们认真总结现有各种规格 3104 铝合金扁锭熔炼铸造技术和经验，组织技术人员攻开技术难题，于 3 月份顺利铸出了规格为 520×1650×6000mm 和 520×1600×6300mm 两种大规格 3104 合金扁并实现了批量生产，使公司可生产的扁锭品种拓展到 5577、3104、5052、PS1015、8011 等多种牌号 60 余种规格。

另外中铝贵州分公司研发的新型高强度铸造铝合金成功地获得全国有色金属标准化技术委员会 211Z.1~211Z.5 五个注册牌号，它们是目前强度最高、综合力学性能最佳的铸造铝合金之一，强度、塑性、硬度的综合可协调性达到国际最高水平，其典型性能：抗拉强度 Rm=450N/mm2，伸长率 A=15%。

长客股份有限公司首次采用摩擦搅拌焊接动车组车体

虽然英国人发明铝合金摩察搅拌焊接技术有 35 年的历史，应用此技术于商业化生产也渡过 26 春秋，中国引进此技术与装备是长春客车车辆股份有限公司，并于 2011 年首次应于焊接长 25m、3m 宽的动车组车体，取得了良好的技术经济

效益，尽管 5 年前萨帕（上海）铝业有限公司从瑞典带来了此技术，但仅用于焊接小型散热零件。

与传统的熔化弧焊相比，摩擦搅拌焊的优点是生产效益提高了近 2 倍；焊缝强度高，缺陷率低；不用焊丝与保护气体，生产成本下降；作业环境友好，无飞溅、无烟尘、无弧光；生产环境不受温度与湿度影响；焊接变形小，焊后修整工作量减少 50%以上。现在，长客公司已用此技术焊接车辆底架、侧墙与车顶等。

西南铝业（集团）有限责任公司生产 4000mm 宽铝合金厚板

2011 年 4 月 11 日西南铝业（集团）有限责任公司在 4300mm 厚板生产线上成功地生产出中国、亚洲、欧洲第一块 4000mm 宽的铝合金厚板，填补了国内空白，为“大飞机”项目的推进提供了材料基础，但要批量生产大飞机用的宽大铝合金厚板可能还需要二三年的时间，决不是一件轻而易举的事。西南铝业（集团）有限责任公司成功地产出这一规格铝合金厚板，标志其保障航空航天急需的能力得到了进一步提升。

南山铝业科技项目获 1252 万资金支持

南山铝业股份有限公司承担的“铝液短流程合金化及塑性成型加工关键技术”项目被入 2011 年国家科技支撑计划，获得 1252 万元资金支持，这是迄今为止龙口市争取国家资金

支持数额最大的单体科技项目。参与该项目的单位有：河南神火集团有限公司、华北铝业有限公司、北京有色金属研究总院、东北大学。项目完成后，将建立年产 200kt 的电解铝液合金化成型加工示范生产线，实现节电 1150kwh/t，减少铝烧损约 1.5%，综合成品率提高 3%。

丛林铝业大断面铝型材项目获科技头奖

丛林集团“大断面复杂截面铝合金型材挤压工程化技术研究”项目获 2011 年山东省技术市场“科技金桥奖”一等奖。项目产品主要性能均达到国际先进水平，能满足我国高速列车、城市轨道车辆等领域的需要，经济效益和社会效益显著，对科技成果转化和市场开拓具有较强的示范作用。

晟通全铝半挂车

晟通科技集团有限公司自主研发的全铝厢式半挂车 11 月在长沙下线，车长 14.6m，自身质量 6.7t，厢体、大梁、底架、车轮等均由铝合金制造。一辆全铝半挂车的质量比钢车轻 3.4t，在寿命周期内可节油 4.5×104 L，减少 CO2 排放 110t。2010 年中国保有重型半挂车 110 万辆，若铝化率能达到 80%，按年行驶 15×104km 计算，则每年可节油 5310kt；按 80×104km 使用期计算，可年节油约 2835×104t，减少 CO2 排放约 9×107t。从用户方面来看，车体减轻的质量可全部转化为有效载重，若一辆车多载货 3.4t，按吨公里运费 0.5 元计算，年运营 20×104km，则每车每年可增加收入 34 万元。

丛林铝材两项目列入国家科技计划

山东丛林铝材有限公司的“电力用大直径铝合金热挤压”项目被列入国家火炬计划，“轻量化汽车承载用铝合金挤压工字梁”项目被列入国家重点新产品计划。前者的的规格大，可应用于能源电力、石油化工、航空军工等多行业领域，是国防建设与军事装备研制的重要材料。后者有良好的减重效果，填补了国内空白，整体技术达到国内先进水平，可广泛应用于汽车轻量化制造等领域，满足铝挂车对整体式铝合金大梁的需求，对实现国家节能减排目标、实现汽车轻量化具有重要意义。

华北铝首获发明专利授权

华北铝业有限公司申请的发明专利《PS 版基黑条检测方法》于 2011 年 12 月获得国家知识产权局授权证书，这是该公司自 2010 年开始自主知识产权保护并组织申报专利以来获得的第一项发明专利授权。专利内容：PS 版基样板依次经过碱洗、酸洗、水洗、二次碱洗、二次酸洗、二次水洗，能将 PS 版基表面的隐形的黑条缺陷展示出来，实现了对 PS 版基“黑条”缺陷检测和判断，可以大大提高版基黑条出厂前的检测判断率，显著降低因为黑条缺陷发生的退货和索赔损失。

东轻公司成功铸出 7804 合金大规格扁锭

7804 合金是一种含 5.0%~6.5%、1.8%~2.8%Mg、1.4%~2%Cu

的高合金化合金，裂纹倾向性大，铸造成型难度高，东北轻合金有限责任公司的工程技术人员克服重重困难于 2011 年 10 月铸出了该合金的 420×1120mm 的大规格遍锭，并制定了 3 种规格扁锭的铸造工艺参数。该合金大规格扁锭的铸造成功开创国内铝熔铸行业采用低液位铸造技术生产大规格超硬铝合金锭的先河，填补了国内的一项空白。

西南铝业（集团）有限责任公司于 2011 年 10 月成功地生产出了 5.0×2305×11500mm 的 5083-H116 合金造船板，这属于超长、超宽的超大规格板材，并对其抗蚀性有严格的要求，是一种技术含量与附加值高的产品，填补了国内生产空白。

北京有研总院研制成功超高强铝合金

北京有色金属研究总院研制的抗拉强度达 800N/mm2 的超高强铝合金于 2011 年 9 月成功地通过了小批量试生产挤压制品考核，并取得了国家发明专利授权，注册了国产铝合金新牌号。

1.9.8 2011 年铝加工在世界经济严寒中继续挺进之四

2011 年中国投产的铝平轧产品（板、带、箔）项目共计 30 多个，总生产能力 4700kt/a，占既有生产能力的 45%，投产项目之多，生产能力之大，均前所未有。

亚洲铝业（中国）有限公司首期投产

亚洲铝业（中国）有限公司位于广东肇庆铝工业城，隶属亚洲铝业控股集团，首期于 2010 年 12 月 17 日投产，板、带生产能力 400kt/a，是中国当今一次性建成的最大的铝板带单个项目。有一条 2540mm（1+5）热连轧生产线，粗轧机（Φ110/1500×2540mm）是全新的，从西马克公司（SMS）引进，5 机架热连轧生产是从美国引进的二手装备，但作了适度的技术改造，这可能是全世界建成的最后一条（1+5）式热连轧生产线，因为现代化的一条 2400mm 级（1+4）式热轧铝带生产能力在生产软合金时可达到 1000kt/a。另外有一条 1732mm 五机架冷连轧生产线与 1 台 2450mm 的 CVC-6 型冷轧机，前者是从美国引进的二手设备，后者是全新的，从德国引进。

亚洲铝业（中国）有限公司在装备方面的亮点：中国独一无二的 5 机架热、冷连轧线，世界最高最大的高架仓库，中国惟一的冷连轧水基润滑剂，即轧制时既喷经过处理的水又喷含有添加剂的油。一期主导产品：电脑、手机、音响器材等电子产品薄板，轨道车辆板，PS 及 CTP 基板、罐料带卷等。二期生产能力 200kt/a，主导产品：航空航天、船舶舰艇及兵器装备等铝合金厚板，粗轧机的辊面宽度有可能超过 5000mm，成为世界三大铝板热粗轧机之一，另两台是美国铝业公司达文波特（Davenport）轧制厂的 5588mm 的粗轧机，

中国南山集团的 5600mm 粗轧机。不过在此需指出的是，凡是建板材宽度大于 4000mm 的企业，必须考虑产品的运输问题，不是什么地方都适宜于建厂；全球对宽度大于 4000mm 的厚板的需求量还不到世界铝平轧产品需求量的 0.05%；航空航天工业在可预见的时期内还不需要宽度大于 3600mm 的板材。由此可见，对建辊面宽度大于 4300mm 的热粗轧项目宜慎之。

首条引进的铝带冷连轧生产线带料试车成功与投产

2011 年中铝西南铝公司引进的 2000mm 双机架冷连轧生产线于 3 月 25 日带料试车成功，并于 6 月 28 日投产，这是当前中国最先进的铝带冷连轧生产线，至此中国的铝带冷连轧生产线有 5 条，即国产的 1850mm 双机架连轧线 3 条，亚洲铝业控股公司的 1720mm 5 机架冷连轧线（从美国引进的二手设备）。西南铝冷连轧公司的双机架生产线将用于生产罐料与铝箔带坯，生产能力在 250kt/a 以上。

中铝瑞闽铝板带有限公司（1+3）式热轧生产带料试车成功与投产

中铝瑞闽铝板带有限公司的 2400mm（1+3）热连轧生产线于 2011 年 3 月 23 日一次带料试车成功并于 9 月 25 日带料试车成功，该项目总投资 35.2 亿元，占地 28.7×104m，生产能力（指公司的商品板带生产能力）250kt/a，公司的远期生产能力 500kt/a。生产线的装备从奥地利钢铁联合公司(VAI)

引进。

新疆众和股份公司新形成电子光箔生产能力 28kt/a

新疆众和股份有限公司新建的电子光箔车间已投产，新增生产能力 28kt/a，至此，该公司已形成或接近形成高纯铝生产能力 53kt/a、电子光箔产能 50kt/a、化成箔生产能力 2100×104m2，成为世界上三项指标均是全球最大的电子箔企业。新疆众和已形成一条最完整的煤-电-原铝-高纯铝-电子光箔（电解电容器光箔）-电极箔（化成箔）产业链，自备电厂的发电成本还不到 0.2 元/kwh。

伊川电力集团连铸连轧线投产

2011 年 4 月 22 日河南伊川电力集团预港龙泉铝业有限公司 1950mm 黑兹莱特连铸连轧生产线生产出第一卷带材，标志着该生产线正式进入试生产阶段。一期生产能力 250kt/a，总投资 29.5 亿元，有扩大到 500kt/a 的生产能力，是中国首条这类生产线，也是全世界最大的投产的这类生产线。该生产线由熔炼-熔体净化系统-1950mm 黑兹莱特铝带坯双带式连铸机-2300mm 3 机架热连轧线组成。热连轧机组是意大利米诺公司设计制造的。

龙马集团包头成功铝业公司陆续投产

龙马集团铝业公司是中国实力较为雄厚的民营铝加工企业，其设立在包头市的全资子公司——包头成功铝业有限公司的600kt/a铝加工项目从2011年6月13日起开始试生产。

项目主导产品为铝板、PS 版基、铝合金锭等。龙马铝业公司还与东方希望铝业公司签订了《铝水买卖协议》，就成功铝业有限公司就近使用原铝事宜达成合作共识。现有一些双辊式连续铸轧生产线，在规划中还有热连轧线。

东轻特板项目年底投产

东北轻合金有限责任公司的 2100mm（1+1）式热粗-粗轧生产线于 2011 年 6 月 8 日开始安装可于年底投产。粗轧机为奥地利钢铁联合公司投计制造，单机架双卷取热精轧机为中国设计制造。这条生产线的生产能力 250kt/a。

上海能源集团大屯铝业公司 2400mm 热轧机带料一次试车成功

江苏大屯铝业公司属上海能源集团，其国产的 2400mm 单机架双卷热轧机于 2011 年 6 月 15 日带料一次试车成功，从西马克公司引进的 2300mm CVC6 冷轧机可于 2012 年初试车。该项目分一、二期建设，各期板带生产能力 100kt/a，一期总投资 17 亿元。

世界最大泡沫铝板企业投产

四川广元远泰达泡沫铝项目一期 30×104m2 生产线 2011 年 8 月 9 日正式投产，弥补了中国在铝发泡研发技术方面大规格产品空白。本项目由元泰达有限公司与中南大学材料科学院、中国科学院过程研究所合作研发，采用缓释铸造发泡

法，实现了全自动、连续生产的泡沫铝坯锭，是目前世界上最大的泡沫铝生产企业，是日本神户钢铁线材公司、韩国梦材料有限公司与国内 7 家小型生产企业生产能力的总和，项目全部建成后生产能力可达 120×104m2/a，实现销售收入 5 亿元。

西南铝业（集团）有限责任公司 4300 厚板专业生产线投产

这是中国也是全世界首条这类专业生产线，2011 年 11 月 10 日投产，可生产宽 4000mm、厚≤250mm 的各种铝合金厚板，生产能力 50kt/a，有 120m 长的固溶处理与 120MN 的预拉伸机等顶尖设备，为中国航空航天工业的大发展创造了雄厚的材料保证，以 2015 年起中国所需要的铝合金厚板可能再也不需要进口了。

平安高精铝业有限公司项目投产

平安高精铝业有限公司有 2400mm（1+3）式热连轧线一条，2250mmCVC 6 单机架冷轧机 2 台，都从西马克公司引进，设计生产能力 200kt/a，2011 年投产，其他配套设备与熔铸设备都是世界一流的。

江苏常铝铝业股份有限公司扩建项目达产

江苏常铝铝业股份有限公司扩建板带箔 80kt/a，2011 年初投产，至 2011 年年底已形成 160kt/a 生产能力，产量 85kt，现有：1850mm 单机架双卷取热轧机 1 台、1300mm 冷轧机 1 台、

1400mm 冷轧机 1 台、1450mm 冷轧机 3 台、、1550mm 冷轧机 3 台、1850mm 冷轧机 1 台，各种规格铸轧机 6 台。

河南淅川铝业有限公司扩建项目投产

河南淅川铝业有限公司 2011 年扩建的 80kt/a 项目投产后的板带生产能力达到 200kt/a，全部采用铸轧带坯，现有主机：2300mm 冷轧机 1 台，2250mm 冷轧机 1 台，1850mm 冷轧机 2 台，1500mm 冷轧机 3 台，1250mm 冷轧机 1 台。

厦顺铝箔有限公司的三期工程投产

厦顺铝箔有限公司 2450mm（1+1）式热轧线及冷轧线于 2011 年投产后已形成 220kt/a 平轧产品生产能力（双零箔 80kt/a，CTP 版基 100kt/a），主机：2450mm 热粗-粗轧线 1 条，2250mm 冷轧机 1 台，1850mm 冷轧机 1 台，1700mm 箔轧机 3 台，2000mm 箔轧机 6 台。

其他 2011 年投产的项目共 15 项，总生产能力约 1800kt/a。

1.9.9 2011 年铝加工在世界经济严寒中继续挺进之五

2011 年在建铝板带箔项目热火朝天，长城内外，大江南北，大河上下到处都在建铝平轧产品项目，总数 60 多个，总生产能力 14000kt/a 以上，大致相当于国外 2010 年总生产能力之和，在四五年时间内形成这么大的生产能力，实在过于集中，匪夷所思。

丹阳大力神合金材料有限公司项目开工

大力神合金材料有限公司属江苏大力神集团，2010 年 12 月 18 日开工建设，复合散热板、带、箔生产能力 150kt/a，项目总投资 10.19 亿元，占地 33.4×104m。所有装备是从加拿大进口的二手设备，将加拿大的一个倒闭的轧制厂的所有设备全部买了过来，有 2800mm 的四辊可逆式热轧机 1 台，1730mm、1625mm、1727mm、1600mm 的四辊不可逆式冷轧机 4 台，1550mm 的四辊不可逆式箔轧机 2 台，以及其他配套齐全的精整与辅助设备，可于 2012 年全面投产。

南南铝加工有限公司 150kt/a 项目

南南铝加工有限公司于 2010 年 2 月 4 日开工建设的 200kt/a 项目由 150kt/a 板带子项目与 50kt/a 大工业型材子项目组成，计划于 2013 年全盘建成投产，建设期 38 个月。板带子项目产品结构：应用于航空航天工业与交通运办理业的厚板 70kt/a，深加工铝带卷 80kt/a。整个项目总投资 48.2 亿元，已被列为南宁市头号工业建设项目，广西重大项目工程。

该项目位于南宁市江南工业园区，有 1 条（1+1）式热粗-精轧生产线，粗轧机 4100mm、精轧机 3100mm，100MN 与 30MN 的预拉伸机各 1 台，全部从西马克公司引进，辊底固溶处理生产线 2 条、水浸式超声探伤线一条、辊矫机、精密锯床、

时效炉等都是成套引进的当今的顶尖设备。

爱励鼎胜铝业（镇江）有限公司“航空航天及交通运输用大规格高强度铝合金板项目”在镇江京口奠基

该项目总投资约 3 亿美元，是迄今为止外资在中国铝加工行业投资最大的单个项目之一，爱励国际占 81%，鼎胜铝业有限公司占 19%。产品主要为航空航天、交通运输、石油化工、机械模具工业等的铝合金厚板。整套设备从德国西马克公司引进，有 1 台 4064mm 的可进行异步轧制（Snake Rolling）的开口度达 800mm 的热轧机，轧制力 60MN，是当前轧制力最大的铝板热轧机；1 台 4000mm 的厚板预拉伸机；1 条长 120m 以上国溶处理炉，以及其他配套齐全的顶尖精整设备。该厂是德国科布伦茨（Koblenz）轧制厂的拷贝。项目设计生产能力 250kt/a，首期 50kt/a，计划 2012 年年底出产品，占地 28×104m2，先建 10×104m2 厂房。

主导产品为 7050-T7451、7475-T7351、7075-T7351、2024-T351、2124-T851、2524-T351、5XXX 系、6XXX 系、Hokotol 合金、Giantal 合金等厚板，最大厚度 280mm。该项目的建设对中国大飞机 C919 所需材料的国产化有着重要意义，原计划 2018 年的国产化率为 30%，现在可提前到 2015 年。

锦宁巨科新材料股份有限公司建（1+4）式热连轧生产线

宁夏锦宁巨科新材料股份有限公司于 2011 年开工建设，位于中宁县，是西北地区首条 1850mm（1+4）式热连轧生产

线，还有 2 台单机架四辊 1850mm 不可逆式冷轧机，均由中国第二重型机械集团有限责任公司提供。项目带、板生产能力 200kt/a，是中国拥有全部知识产权的第二条（1+4）式热连轧生产线，首条这类生产线是 2003 年明泰铝业有限公司投产的 2000mm（1+4）式生产线。锦宁巨科有限公司计划于 2012 年投产。

瑞丰铝业有限公司建热轧生产线

瑞丰铝业有限公司是鲁丰股份集团的全资子公司，位于博兴县，在建生产能力 450kt/a 的铝板、带、箔项目，冷轧带坯既双辊式连续铸轧的又有铸锭热轧的，现在建的是以（1+4）式热连轧生产线为核心的冷轧及各种配套的精整与辅助工艺装备。已于 2010 年 3 月 28 日举行了奠基仪式，总投资 48 亿元，占地 87×104m2，分三期建设，一期热轧、二期冷轧、三期熔铸。一期 2013 年上半年投产。主导产品：PS 版基、罐料、复合板带与双零箔等。

世捷铝业有限公司高精铝板带项目鸣锣开工

2011 年 4 月 23 日吉林辽源世捷铝业有限公司高精度大规格铝合金板带项目开工建设，总投资 30 亿元，生产能力 200kt/a，其中厚板与飞机蒙皮板 80kt/a，冷轧板带 120kt/a，由北京维宝世捷投资公司投资，建设期 26 个月，计划 2013 年投产。

中孚实业有限公司引进 2600mm（1+4）式热连轧生产线

河南省中孚实业有限公司从德国西马克公司（SMS Siemag）引进的2600mm（1+4）热连轧项目正在顺利向前推进，这是中国引进的最大的这类生产线，其热轧罐料带坯的生产能力为760kt/a,带坯最大宽度2400mm,最薄厚度1.8mm。热轧线之旁有7台加热炉，先建5台，每台可装34t的扁锭25块，共计860t，锭的最大厚度620mm。铸造车间有120t的熔炼-静置炉组2组；90t的熔炼炉2台，静置炉1台；瓦格斯塔夫（Wagstaff）铸造机3台，其中120t的1台，90t的2台。

隆林铝业公司100kt/a铝板带项目2012年投产

总投资10亿元的广西隆林100kt/a铝板带项目建设正在全力推进，可于2012年上半年投产。其电解铝项目2011年投产，生产能力180kt/a，共有116台电解槽，二个系列。

丹江铝业超宽幅铝带坯项目

丹江铝业有限公司投资约2亿元建设50kt/a超宽幅铝箔带坯工程，主要供应昆山铝业有限公司轧制双零箔。项目主要内容为5条双辊式连续铸轧生产线与1台单机架不可逆式冷轧机组成，建设期18个月，2012年年底竣工。丹江铝业有限公司现有原铝生产能力125kt/a、板带产能20kt/a、铝杆产能36kt/a，新项目投产后，基本上可将原铝转化为深加工产品，形成一条更加完整的产业链。

忠旺控股公司建3000kt/a板带项目

中国忠旺控股有限公司将于2011~2014年投资38亿美元分期在盘锦建板带项目，一期生产能力1800kt/a，2017年达到3000kt/a。这是目前国内“特特大”铝加工工程。属于特大项目的还有魏桥铝业的1500kt/a的两条（1+4）式热连轧生产线。

贵州万山特区银河铝业公司150kt/a平轧产品项目

万山特区铝板带箔项目由浙江省嵊州市银河铝业有限公司投资兴建，总投资8亿元，生产能力150kt/a，其中铝箔50kt/a，板带100kt/a，占地13.34×104m2。分两期建设，一期投资3亿元，二期投资5亿元，计划2013年全部建成投产。该项目位于铜玉高速公路万山老山口工业园区。建成后工业产值可达30亿元以上。

明泰铝业有限公司改扩建100kt/a工程

河南明泰铝业有限公司的100kt/a改扩建项目的各项工程在全面顺利向前推进，其中新增生产能力50kt/a，升级换代产品生产能力20kt/a，结构调整替代产品生产能力30kt/a。该公司2011年的各种板、带、箔的总产量可达280kt，仍是中国第二大产量的单一企业，仅次于西南铝业（集团）有限责任公司的。

银源铝合金有限责任公司的40kt/a双零铝箔项目

吉林省辽源市银源铝合金有限责任公司的40kt/a双零铝箔项目，由美国莱克森控股有限公司投资10亿元人民币建

设，占地 8×104m2，建设期 2 年，所有主要设备加熔炼铸造设备、铣面机、箔轧机等都是一流的，成套引进。

黔江 200kt/a 铝板带一体化项目

该项目含：200kt/a 铝板带、100kt/a 炭素产品、2×30×104kw 热电站。总投资 50 亿元，占地 667×10 3m2，位于重庆市黔江区正阳工业园区青江拓展区，由黔江区政府、北京嵩杰华荣投资控股有限公司、重庆乌江电力有限公司三方投资。分两期建设，一期 100kt/a 铝材、100kt/a 炭素、1×30×104kw 热电联产项目。

河南龙鼎铝业 600kt/a 铝箔项目建设如火如荼

该项目总投资 42 亿元，占地 100×104m2，平轧产品生产能力 600kt/a（单零箔 190kt/a、双零箔 100kt/a、PS 铝基板 60kt/a、幕墙板 100kt/a、汽车空调箔 100kt/a、其他产品 50kt/a），分三期建成。一期 250kt/a，已于 2011 年建成，二期正在建设，2012 年建成，随即进行三期建设。实际上自 2010 年 3 月开工建设以来，一、二、三期工程采用梯次推进、滚动发展的方法，土建工程、设备订购制造等环节交叉进行，快速高效推进。项目全部建成后将是全球五个最大的薄板、铝箔生产厂之一。

创新集团通辽 800kt/a 硬铝合金项目

山东创新集团计划投资 200 亿元在内蒙古通辽市霍林郭勒建 800kt/a 原煤井、400kt/a 炭素。创新集团是一家生产

高端变形、铸造铝合金、铝板、铝带、铝箔、汽车铝轮毂、炭素、铸钢、铸铁制品并涉足商贸、物流、金融、房地产等领域的大型现代化综合性企业。

六盘水双元铝业有限公司 200kt/a 项目

双元铝业有限公司位于贵州省水城县，由中国鑫仁铝业有限公司投资 126 亿元建设，项目内容为：100kt/a 板带、100kt/a 光箔（投资 30 亿），100kt/a 精铝、800kt/a 原铝（投资 88 亿）。

赣州铝业股份有限公司 200kt/a 板带

该公司位于江西省赣州市赣县工业园，由重庆科技公司投资，有一条 2300mm（1+1）式热轧生产线，中国第一重型机器公司生产。2009 年 10 月 29 日开工建设，总投资 10 亿元，占地面积 26.4×104m2，2012 年竣工投产。

洛阳鑫隆铝业有限公司项目

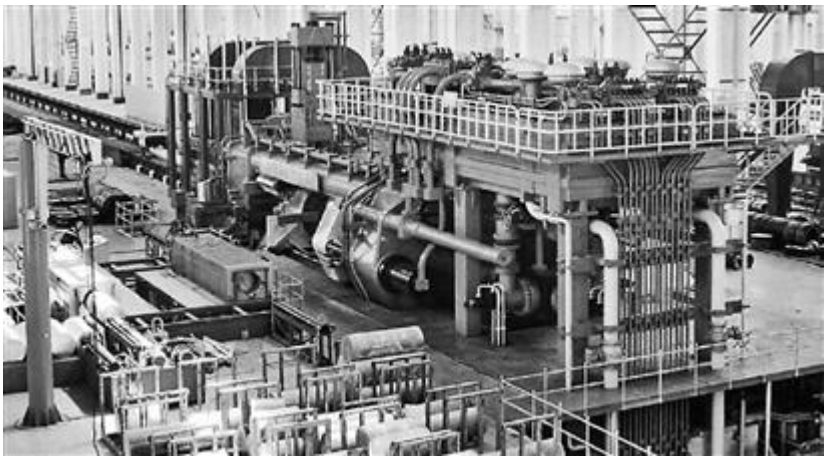
鑫隆铝业有限公司位于偃市，2010 年 4 月 15 日开工建设，总投资 12 亿元，生产能力 200kt/a，占地 21.34×104m2，2012 年竣工投产。

杭州永杰铝业有限公司项目将投产

1850mm（1+3）式热连轧线一条，1850mm 6 辊冷轧机 4 台，2000mm 箔轧机 3 台，投资 15 亿元，一期 200kt/a，2012 年初投产

其他项目 40 个左右，总生产能力约 6000kt/a，总投资约 700 亿元。

1.9.10 2011 年铝加工在世界经济严寒中继续挺进之六



投产铝挤压项目约 30 个

2011 年铝型材领域有约 30 个项目建成投产，新增铝挤压材生产能力约 1500kt/a，新投产的各种铝材挤压机约 200

台，其中最大的是裕矿轻合金公司从德国引进的150MN的双动正向挤压机，是迄今为止全球最大、装机水平最高的挤压机。

裕矿轻合金公司全面投产

山东裕矿轻合金有限公司是全球一次性建成产能最大、装机水平最高的以生产轨道车辆车体结构铝型材为主的专业铝挤压材企业，共有结构合理、档次搭配恰当的各类卧式挤压机18台，生产能力140kt/a，分布于4座巨大的现代化厂房内，仅从德国西马克集团梅尔公司（SMS Siemag Meer）引进的就有4台。除150MN挤压机正在安装调试外，其他的均已投产。在这18台挤压机中有55MN、80MN、100MN、150MN的大挤压机5台。150MN挤压机可生产的产品的最大尺寸为：型材宽1100mm，管材外径700mm，棒材外径450mm，无缝管材外径580。该公司有1台40m高的立式固溶处理炉，是当今世界最高的。项目总投资28.25亿元。

国鑫铝合金管棒型材股份有限公司投产完毕

国鑫铝业公司是中国2011年建成投产的大型专业铝挤压材企业之一，共有10台现代化挤压机，其中：10MN的2台，17MN的2台，19MN的1台，24MN的1台，28MN的1台，

36MN 的 1 台，55MN 的 1 台，100MN 的 1 台。该公司 2011 年生产的 2A12、5052、7075、7A04-H112 合金棒材已批量供给哈尔滨飞机制造公司的锻铸公司，用于锻压航空器零件。

鄂尔多斯万捷新型建材公司铝型材项目 2011 年年底建成投产

内蒙古鄂尔多斯市万捷新型建材有限责任公司于 2011 年底全面建成投产，是西北地区最大的建材生产基地，也是最大的铝挤压材生产企业之一。该公司成立于 2006 年，占地 30×104m2,总投资 13.4 亿元，分三期建设：一期投资 3.4 亿元，2008 年 12 月可年产 PVC-U、PE、PP-R 管材管件、PVC 等多种规格塑料建材 30kt 多；二期投资 4.3 亿元建设 PVC 高光塑钢型材、PVC 等特性、异性塑料建材 100kt/a，于 2011 年 7 月投入生产；三期投资 5.7 亿元，计划年生产断桥铝型材、工业铝型材 100kt。

麦达斯铝业公司 110MN 挤压机投产

麦达斯铝业有限公司的三期建设于 2009 年开始，其主要建设工程为 1 台太原重型机器股份有限公司设计制造的 110MN 的双动正向挤压机，可使该公司的大型工业型材的生产能力提升 10kt/a。

天成铝业公司建成投产

天成铝业有限公司于 2011 年 8 月初在湛江投产，属搬迁企业，生产能力为：建筑铝型材 12kt/a，工业铝型材 6kt/a，

铝合金门窗及幕墙 100×104m2/a，年均销售收入 5 亿元，是湛江市最大的铝材厂。

栋梁新材节能项目建成投产

浙江栋梁新材有限公司的 50kt/a 的节能铝合金型材项目在按预定计划顺利建设，于 2011 年年底全面投产。该项目的投产，将加大了该公司节能型铝合金建筑门窗型的市场推广力度，扩大公司高附加值产品的市场占有率。

湖南华康新材料有限公司项目投产

位于资兴县江北工业园区，连续挤压管、棒、型材，成立于 2009 年 9 月，一期 12 条挤压线，投资 3.14 亿元，占地 21×104m2，建筑面积 4.31×104m2，产能 12kt/a；二期 2012 年建成，形成总产能 60kt/a。

伊龙集团精密铝型材项目投产

该项目总投资 17.69 亿元,最大挤压机 75MN(双动正反)，引进总生产能力 150kt/a，2011 年投产。

2011 年投产的其他项目

2011 年投产的其他挤压铝材项目总计约 21 个，总生产能力约 850kt/a，总投资约 65 亿元。

大挤压机高烧退无期

当前在建的铝挤压材项目约 50 个，总生产能力约 3500kt/a，大挤压机约 32 台。中国大型铝型材项目建设与大

挤压机建设仍处于高潮期，可能还要持续 5、6 年。

云铝 100kt/a 铝合金项目破土动工

云铝润鑫铝业有限公司 100kt/a 铝型材项目于 2010 年 12 月 21 日在红河工业园开工建设，是云南冶金集团公司依托红河州区位优势和市场辐射优势，转方式、调结构、统筹铝冶炼和深加工产能，打造配套、合理、完整的产业链，加快技术升级和产业升级，增强可持续发展能力的具体行动布署。项目预计总投资 1.3 亿元，工期 10 个月。

豪美铝业公司在天津建 100kt/a 铝合金型材基地

2011 年 3 月 28 日广东豪美铝业集团有限公司与天津市滨海新区开发区签署高档铝合金型材生产基地项目合作协议，型材生产能力 100kt/a。豪美铝业公司是一家大型铝型材企业，集研发、设计、制造、销售于一体。

新振升集团建铝型材基地

湖南长沙新振升集团在汨罗工业园区建铝型材加工基地，分三期建设，总生产能力 80kt/a，其中一期投资 1.5 亿元，计划 2012 年 5 月建成投产。

白银广泰铝业公司于 2011 年 5 月在甘肃省白银市白银铝型材工业园区开工

此项目铝型材生产能 120kt/a，由佛山市南海雄信铝业有限公司投资兴建，总投资约 2 亿元，建成后年产值可达 40 亿元，利润总额约 550 万元，年税金 3000 万元，安置劳动力

1200 人。

雄鹰铝材公司二期工程快速推进

南昌雄鹰铝业有限公司二期工程是南昌市重大重点项目，总投资 4 亿元，挤压车间占地面积 46000m2，工程建设正在快速推进,工程完毕后,可使该公司的生产能力增加 180kt/a，使该公司的总生产能力达到 300kt/a，主导产品为高附加值的工业铝型材。雄鹰铝业有限公司占地总面积 30×104m2。

南山铝业公司一次引进 14 台挤压机陆续投产

山东南山铝业公司 2010 年一次性从德国西马克梅尔公司（Meer）订购 14 台先进的挤压机，将从 2011 年 12 月起陆续投产，这使该公司成为世界上拥有这类挤压机最多的企业也是装备最先进的挤压企业。这些挤压机的挤压力 11MN~150MN，有单动的也有双动的，有正向的也有反向的。一次性安装这么多先进的一流的挤压机，不但在中国铝加工业是第一次，也是全世界前所未有的。其中的 150MN 的是中国的第二台，是全世界的第三台，它们都是德国施罗迈公司（Schlomen）即现在的梅尔公司设计制造的，美国的那台 150MN 级挤压机是第二次世界大战期间制造的水压机，2006 年美国通用合金公司将其改造为现代化的油压机。

葫芦岛铝业公司开工

辽宁葫芦岛铝业有限公司于 2011 年 8 月 13 日在经济开发区动工建设,铝型材生产能力 300kt/a,总投资 81.2 亿元，

总建筑面积 292×104m2，建设期 3~4 年。

曲阜沃德虎标铝材有限公司开工建设

曲阜沃德虎标铝材有限公司位于曲阜经济开发区，各类铝型材的生产能力 150kt/a，2011 年已建成 1.8×104m2 的 1 车间及 4 车间，累计投入资金 1.9 亿元，1 号车间已投入使用。

云铝丽鑫铝业有限公司

云南冶金集团与云铝股份有限公司共同投资在丽江建设丽鑫铝业有限公司，总投资 30~42 亿元，项目生产能力为 150kt/a 交通铝型材及工业管棒材，建设期 3 年，2014 年投产。云南铝业股份有限公司占 60%股份，其余的股份为云南冶金集团所有。

东维集团光伏铝项目

安徽东维集团在合肥经济技术开发区建的光伏铝项目（太阳能组件边框）的总投资逾 4 亿元，占地 12×104m2，边框设计生产能力 3000×104 套，是中国当前最大的太阳能组件边框生产项目，计划 2012 年 3 月投产。

凤铝焦作铝型材公司

广东凤铝铝业有限公司计划在河南焦作建一个生产能力为 300kt/a 的挤压铝材项目，估算投资 50 亿元，已与焦作市政府签订了战略合作协议。凤铝铝业有限公司成立于 1990 年，目前铝型材生产能力 300kt/a。

中铝萨帕特种铝型材（重庆）有限公司

中国铝业股份有限公司萨帕集团2011年4月8日在北京签约建设轨道交通特种铝型材项目，年产轨道产通专用铝型材及车体模块20kt，由萨帕集团经营管理，预计初期投资大于6亿元。公司集铝合金研发、挤压与车体模块加工为一体的铝型材生产实体企业，初期建一条100MN级的挤压生产线与2条摩擦搅拌焊接线。该公司是典型的强强结合的产物。

罗普斯金扩建工程

江苏苏州市罗普斯金铝业有限公司是台商独资企业，2011年6月30日发布董事会决议，拟投资6.5亿元，扩大挤压材生产能力100kt/a，分两期建设，一期50kt/a，2012年投产。

兴发集团成都、宜春、焦作公司建设2014年全部投产

兴发集团建设的成都公司、江西宜春公司、河南焦作公司总投资23亿元，总生产能力260kt/a，各分两期，从2010年起陆续投产,2014年全部建成投产,届时全国共有4个厂，有挤压机131台，总生产能力430kt/a，成为中国拥有挤压机最多的企业，以建筑铝型材为主。

忠旺集团建设正酣

忠旺集团制订了逐步退出建筑铝型材而致力于工业铝型材的规划，据公司称：已订购20多台挤压力≥90MN的挤压机，仅采购资金就高达80多亿元，2015年以前全部投产，

有挤压生产线 86 条，总生产能力 1200kt/a。在大挤压机中，仅 75MN 的就有 11 台，全由太原重型机械股份有限公司生产。

其他在建项目约 35 项，总生产能力约 1050kt/a，总投资超过 120 亿元。当然，这些项目不一定会全部建成。

1.9.11 电解铝“西进”祸福难料

中国是一个铝土矿资源较为贫乏的国家，而且品质也不尽人意，大多数矿不适宜用拜耳法提取氧化铝，因而生产成本较高，也是一个能源相对不充裕的国家。提炼原铝需要消耗大量能源，2011 年中国电解铝的平均交流电耗为 14000kWh/t 铝，这在全世界是相当先进的指标了。因此中国不适合大规模发展原铝工业，但中国又是一个铝的消费大国，必须适度发展，国内的原铝以能满足国内需求 60%或更少一点为宜，到国外能源或资源充足的国家或地区去建厂，把铝运回来就是，进口能源，就是节能减排。日本、韩国、中国台湾地区一吨原铝也不产，所需的铝全部进口，一些后工业化国家如美国、德国、意大利、英国、法国等所需的铝也有一部分或大部分是进口的，他们正在逐年关闭一些国内的电解铝厂，进口的铝在逐年上升。他们发展电解铝工业的道路值得借鉴，可是我们还在一股劲地快速建设铝厂，值得冷静地思考一下。

2011 年中国原铝生产能力已超过 26000kt/a，在建与拟

建的生产能力在 20000kt/a 以上，如果 2015 年有 80%建成，则那时全国原铝生产能力可能达到 42000kt/a，将占年全球总生产能力的 64%。对中国铝工业来说，这可能是一场灾难，若生产能力达到 90%开工率，产量可达 41400kt，除国内消费约 26500kt 外，还必须出口约 14900kt，中国将成为世界最大的铝净出国。这决不是一件好事，出口的能源与资源，留在华夏大地与空中的是污染，同时全球也接受不了这么多铝。

电解铝“西进”祸福难料

2008 年以来，中国掀起了一股在西部地区（甘肃、青海、新疆）大建原铝企业的浪潮，在建与拟建项目的总生产能力超过 18000kt/a，仅新疆的就有约 14000kt/a，到 2015 年若有 80%建成，铝的产量可有将达 12960kt，这实在匪夷所思。在中国当前的技术条件下，生产这么些铝需要 24000kt 氧化铝，6480kt 氟化盐，其它物资 848kt，总运输量（含铝锭运出）44742kt/a，需要 50t 的铁路车辆 89480 辆，平均每天装卸 2450 辆，仅运出 12960kt 铝锭需要 50t 的车辆 25900 辆，平均每天装车 710 辆，到哪里去找这么多的车辆？当然从长远来看不成问题，但那是 2020 年以后的事。所以，笔者认为，这么蜂拥而上，向新疆与西部其他地区投资建设电解铝厂，这么集中，是市场经济发展不成熟的表现，离科学发展观还

有一定的距离，对中国铝工业来说是弊多利少，是“祸”而不是“福”。

铝加工“西进”宜慎之又慎

电解铝工业的大规模“西进”对铝加工业也产生了一定的影响，有些投资者也在考虑这个问题。但笔者认为，对铝加工投资者来说现在还没有到考虑这个问题的时候，至少在2020年以前不需要考虑它。

从铝工业的发展规律来看，电解铝企业宜建在资源或能源丰富的地区，因为它是资源与能源密集的产业。生产1t原铝需要消耗约1.95t氧化铝，而提取1t氧化铝需要约2t优质铝土矿，电解1t原铝的综合交流电耗约14000kWh，其他原辅材料的消耗也不小。铝锭是一种适合长途运输的物资，只要电力价格低到足以补偿长途运输带来的费用增长还绰绰有余，就是建设铝厂的“天堂”。比如冰岛有丰富的地热，海湾地区有的是石油与天然气，俄罗斯的叶尼塞河流域与加拿大的圣劳伦斯河谷水资源富足，澳大利亚蕴藏着充裕的铝土矿，它们都成为当今大批铝厂的集中建设地。

铝加工厂是生产铝半成品即铝材以及铝成品的企业，必须贴近市场，靠近用户，贴得越近，靠得越紧越好，效益越高。因此铝材加工厂应建在经济发达地区，不宜远离市场。笔者通过计算得出：平轧铝产品的最佳效益供应半径为

1200km，挤压铝材的 750km。铝材在运输特别是长途运输时，不可避免会或多或少地发生损耗，如擦伤、碰伤、静电灼伤等。

生产 1t 铝材的运输总量约 3.25t:铝锭及铝材运输约 2t，其它材料运输约 1.25t（熔炼材料、乳膏、轧制油、备品备件、工模具、包装材料、生产辅助消耗材料、钢材、设施维护维修材料、劳动保护用品，等等），只有贴近市场，才能最大限度地降低产品运输成本。

技术支撑力量如科研院所，高等院校大都集中在经济发达地区，铝加工是技术密集型产业，是高、精、尖装备集大成的产业，需要有长期的或临时性的技术支持驰援，将这样的工厂建在边远地区很难长期留住高技术人才，一旦发生临时性事故很难得到及时的快速修复，甚至要长距离运到外地维修。

中国当前经济发达地区是环渤海湾的辽宁、河北、山东、北京与天津，长江三角洲的江苏、浙江与上海，南部的福建以及珠江三角洲的广东。它们的铝材产量 13519.158kt，占全国总产量 23455.822kt（国家统计局的数据，由于我国的统计还不规范，存在着相当量的重复统计，例如有一部分铸轧带卷与冷轧带卷、冷轧带卷铝箔毛坯与铝箔等都存在着重复统计，在当前条件下这种重复统计几乎无法避免，据笔者统计 2011 年全国的铝材产量约 18000kt）的 57.64%，与国民

经济的发展水平相适应。而西部地区的内蒙、宁夏、甘肃、青海、云南的铝材产量 1095.116kt，占全国总产量的 4.67%。

西部地区的唯一优势就是电价较低，而铝加工并不是高电能消耗产业，并不像电解铝产业那样，电价占总成本的 45%左右，在铝材生产中能源消费还不到总成本的 18%，当然有的高一些，有的低一些，相差较大。

本文所指的中型企业是：生产能力≥100kt/a~＜200kt/a 的板带加工企业，生产能力≥50kt/a~＜100kt/a 的挤压企业，生产能力≥30kt/a＜50kt/a 的铝箔厂。大型企业是：生产能力≥200kt/a 的板带企业，生产能力≥100kt/a 的铝材挤压企业，生产能力≥50kt/a 的铝箔企业。

由以上的分析可知，至少在 2020 年以前，到远西部地区去建中大型铝加工厂不适宜，或者说应慎之又慎。

关于铝产业分布地区划分

对加工业来说，其布局地区与结构应与国民经济发展相适应，可大致分为三个地区：辽宁、河北、天津、北京、山东、江苏、福建、广东、广西等沿海地区；中西部地区，包括内蒙东部、山东、陕西、宁夏东南部、甘肃兰州以东、四川成都以东、重庆、云南昆明以东、贵州、湖北、湖南、江西、安徽；远西部地区，包括哈尔滨-通辽-包头-银川-兰州-西宁-成都-昆明线以西的广大地区。

2012 年中国铝加工材生产能力约 28000kt/a，其中平轧产品的 12000kt/a，占 43%；挤压材（型材、管材、棒材）的约 12850kt/a，约占 45.9%；线材（电线、电缆、其它线材）约 2600kt/a，占 9.3%；锻件、粉、膏约 500kt/a，占 1.8%。在这里所指的平轧产品是指冷轧带材（含铝箔带坯）与少量（约 4%）热轧板。

从地区分布来看,沿海地区铝加工材生产能力约占 61%，为 17080kt/a，中西部地区约占 38.5%，为 10780kt/a。远西部地区还不到 0.5%，少于 140.0kt/a，现在在此地区较大的铝加工厂仅有黑龙江省大庆市的同禹澳斯铝业有限公司（板带箔 40kt/a）；新疆众和股份有限公司的电子光箔生产能力 50kt/a，折合冷轧带坯 61kt/a。可根据中西部经济的发展，在此地区适当建设一些中大型铝加工厂。

铝加工材生产能力的这种地区分布结构是合理的，符合经济发展规律。以后随着新疆-中亚铁路、云南-缅甸铁路、云南-柬埔寨铁路的修通，对外交往的加强，出口量的上升，可根据市场情况，适当地分期分批在远西部地区建一些铝加工企业，但应避免生产能力形成过于集中，先期宜建一些中小型厂。总之，铝加工企业不宜紧随铝电解企业之后跟着“西进”。

当然，只要经过精密的准确的核算，能确保建在远西部地区企业产品运到沿海或出口有相当高的利润可图，就像美

国铝业公司在沙特阿拉伯建马登铝业公司,它的铝带卷的 95%左右都要万里迢迢销往欧洲与北美市场。

1.9.12 合作与摩擦并存 铝业蹒跚前行

中国是一个铝土矿资源与能源并不富足的国家，同时全国电力的 80%是火力发电，而原铝电解电耗占电力火电站发电量的 92%左右。为此，必须到国外去建氧化铝厂和原铝企业。2012 年，中国在这方面取得了可喜的成就。与此同时，中国国内的铝产品在出口贸易中，屡遭贸易壁垒“暗算”，2012 年，中国有关铝材及铝制品出口贸易摩擦共 6 起，比以往任何一年都要多。

从铝土矿到铝材 合作日益紧密

2012 年，信发集团与俄国联合铝业公司（UCRUSAL）签署了成立合资铝企业的谅解备忘录，包括成立以俄罗斯为基地的铝冶炼合资公司，以及氧化铝和铝土矿的合作项目，选址包括中俄以外的国家。

2012 年 8 月，中国铝业香港有限公司与印度尼西亚印多卢萨公司（INDDNUSA）公司西加里曼丹铝土矿项目合资协议在北京中铝大厦签字。双方将组建合资公司共同开发西加里

曼丹的铝土矿资源和建设氧化铝厂。矿区位于西加里曼丹省坤甸市附近，紧邻卡江和南中国海，交通运输条件好。投资11亿美元，初期产能1000kt/a。

博赛矿业对圭亚那铝业增加投资1亿美元。博赛矿业集团圭亚那公司2012年3月宣布启动近1亿美元的扩大投资，用于扩大矿区和建设第三个窑，首先投资600万美元，建设两套除尘系统。

兖矿成为拥有澳大利亚铝土矿资源最大的中国企业。截至2012年4月兖矿集团在西澳成功获得2.4×104km 2铝土矿资源7 0 %的矿权，初步探明铝土矿资源已超过1． 8亿吨，预计年底探明可增至2亿吨。兖矿集团已成为在澳大利亚进展最快、资源量最大的中国企业之一。向澳大利亚铝土矿资源进军的中国企业还有：信发集团，云南铝业股份有限公司、中国有色集团、中国电力投资有限公司等。兖矿已通过收购和投资达90%的股份在西澳大利亚购得两公司两大型铝土矿采矿权，矿石品位40%~50%，预计铝土矿含量超过10亿吨。兖矿获得国土资源部和国家财政部的大力支持，并得到5290万元的政府补贴专项资金资助。

中国电力投资集团和几内亚签署60亿美元铝土矿建设合同。中国电力投资集团于2012年和几内亚政府签署协议，投资60亿美元开发博法铝土矿和修建氧化铝厂。项目生产能力:铝土矿1200kt/a,氧化铝4000kt/a。修建250MW热电厂、

贝二亚（Bel Ail）深水港与铁路、员工宿舍等。如工作进展顺利，可于 2013 年开工建设，2017 年投产。

博赛矿业拟投资 10 亿美元在印尼建氧化铝厂，2012 年 7 月博赛矿业（集团）有限公司已与印度尼西亚达成协议，在其一座铝土矿资源极其丰富的小岛上建一个生产能力 2000kt/a 的氧化铝厂，以及配套的电厂与港口。

中铝力拓斟探有限责任公司开业。该公司的开业标志着中铝公司和力拓集团战略合作的进一步加强。在资源全球化背景下，双方寻求在合作中实现互惠互利，共同发展。该公司的开业将进一步实现双方优势互补。

锦江集团与印尼安塔穆公司（Antan）有限公司合资建氧化铝厂。杭州锦江集团与安塔姆公司合资在印度尼西亚加里曼丹曼帕瓦地区建一座氧化铝厂，投资 10 亿美元，生产能力 1200kt/a，2012 年年底完成可行性研究报告，2014 年动工建设。

铝土矿进口主要来自印度尼西亚，占 2006 年以来进口量的 80%以上，非常值得注意，过于集中不但在价格方面对我们不利，而且一有风吹草动可能后果严重。

山东南山集团在美国建铝材挤压厂，这是中国在国外建设的首个铝加工企业，名为南山铝业现代技术（美国）公司，位于印第安纳州西部拉斐特市（Lafagette），占地面积 2.24x104m2, 2011 年 12 月完成土建工程，2012 年 8 月，首

台挤压机（50MN，正向，意大利普雷赛齐公司生产）投产，用于生产管材。2013 年 1 月，90MN 的西马克集团梅尔公司（SMS Meer）正向挤压机投产。它们的生产能力约 30kt/a，然后视市场情况进行二期建设，最终挤压材生产能力达到 65kt/a。产品为高端建筑型材与交通运输装备挤压材。现任总经理为美籍华人杜利军，1995 年毕业于上海大学金属材料专业，2005 年赴美国普杜（Purdue）大学留学，获该技商业研究生学位，后又获锡拉丘兹大学马克斯韦尔公共管理学院公共事务研究学位。

爱励鼎胜铝业镇江有限公司 2012 年 12 月 21 日第一块航空级铝厚板正式下线，标志着中国生产的铝合金厚板将进入波音公司，空客公司与中国商用飞机公司的材料供应系统。爱励国际（Aleris Internation,Inc）是全球三大航空板材生产商之一，是经国际适航认证的民用航空材料指定供应商，爱励鼎胜铝业（镇江）有限公司是按德国科布伦茨轧制厂的一切建设的，并由爱励国际管理，因而所生产的铝合金板材可贴牌销往全球所有民用航空器制造企业。当天，爱励鼎胜铝业还与中国商飞公司举行了产品认证签约仪式。今后，爱励国际还将投资建汽车铝板带系统，使公司成为中国高端的最大的铝板带企业。

南方铝业中国公司热轧改造于 2012 年初期启动。公司原有 1 台 4500mm 单机架双卷取热轧机，决定投资 1.5 亿元将其

改为（1+2）式热连轧生产线，使热轧带卷生产能力从 45kt/a 上升到 85kt/a。南方铝业（中国）有限公司成立于 1992 年，是印度尼西亚金峰集团与日本神友贸易公司在福建省福清市融侨经济技术开发区共同投资兴建的铝板带企业。

萨帕铝型材(江阴)有限公司于 2012 年 2 月 15 日开业，拥有从 6MN~36MN 的挤压机 14 台，还将建设 1 台 68MN 的挤压机，可生产各种型材，但以工业铝型材为主。该公司是萨帕集团在中国投资建设的自家铝型材生产企业。萨帕集团在全世界拥有 147 台挤压机，铝型材的总生产能力约 1250kt/a。

爱励（天津）铝业有限公司进行扩建，于 2012 年 1 月动工，从比利时杜菲尔公司搬迁来 1 台 28MN 的挤压机，使生产能力达到 25kt/a，并继续扩大生产能力，到 2015 年，总生产能力将超过 50kt/a。该公司现有 1 台 50MN 的从意大利引进的挤压机，1995 年投产，是当时中国最大的现代化铝材油压挤压机。

诺威力（Novelis）铝业公司在中国建的汽车车身铝板带企业（ABS 板，Auto Body Sheet）位于常州市国家高新技术产业开发区，首期投资 1 亿美元，生产能力 120kt/a，带卷从韩国运来，在常州进行下游工序处理，计划 2014 年投产，是中国首条现代化的 ABS 板生产线。诺威力铝业公司是世界最大的铝平轧产品企业。

昭和电工铝业（南通）有限公司 2012 年 3 月 2 日奠基。

该公司是日本昭和电工有限公司的独资企业，在南通开发区，产品为电解电容器高纯铝箔。项目一期投资 30 亿日元，高纯铝箔生产能力 4800t/a，计划 2013 年初投产。

日本神户钢铁公司（Kobe Steel）扩建苏州神钢铝制品有限公司锻件生产能力，投资 45 亿日元，增建 1 台 67MN 的锻压机,生产锻件 200 万件/年,原有 1 台同等规模的锻压机。该公司成立于 2010 年 9 月，目前仍在建设期，计划 2013 年 8 月投产。

肯联铝业公司（Constalium）准备进军中国铝工业与航空航天器制造企业。该公司是全球第二大航空级铝材生产企业，所生产的埃瓦铝材（AIRWARETM）已用于新一代的飞机，如空客公司（Airbus）的 A350×WB 项目和庞巴迪公司（Bombardier)的 C Serie 项目以及太空探索技术公司(Space X）的猎鹰 9 号运载火箭。该公司表示非常乐意将在欧洲和美国的先进技术带到中国，与中国建立合资企业。

丛林集团与德国哈曼集团签署模具技术合资协议。2012 年 11 月，山东丛林集团与德国哈曼集团就“铝挤压模具技术”签署了合作协议。哈曼公司是世界知名的工模具制造企业，双方的合作将帮助丛林铝业公司在铝挤压模具技术方面登上一个台阶。

海德鲁铝业（苏州）有限公司二期项目 2012 年 11 月 21 日投产。该公司位于苏州工业园区，成立于 2004 年，一期有

1 台 35MN 的挤压机及其他附属设备与设施，总投资 3600 万美元，专业生产汽车及其他行业热交换系统用多孔挤压扁管（MPE）。2011 年初又投资 5300 美元进行扩建（二期工程），增加 35MN 及 28MN 的挤压机各 1 台，仍主要用于高精管材及其他工业铝型材的生产。海德鲁铝业公司是全球第三大铝产品供应商。

万丰奥威将在印度建摩托车车轮企业。万丰奥威集团控股的子公司——浙江万丰摩轮有限公司拟在印度投资成立全资子公司，总投资 3.0742 亿元，摩托车轮生产能力 300 万件/年。

东阳光铝业公司终止与日本东洋铝业公司合作。2012 年 4 月 12 日，东阳光铝业有限公司收到日本东洋铝业有限公司出具的关于与公司合作谈判的终止函。2011 年 4 月，他们签订了意向性协议，拟在中国境内成立合资公司，经营电子铝箔、包装铝箔的研发、生产、销售。

诺威力铝业公司（Novelis）2012 年 4 月发布公告称，将投资 1 亿美元在江苏常州建一个汽车铝板厂，独资拥有，生产能力 120kt/a，带卷从韩国运来，计划 2014 年建成 2011 年 11 月，爱励国际（Aleris International）称将对爱励-鼎胜铝业（镇江）有限公司追加投资 2 亿美元，在原来的投资 3 亿美元的航空厚板基础上增建汽车铝板项目，计划 2014 年投产，如果此合作项目能够实现，爱励国际将成为中国铝

工业投资最多的跨国铝业公司。爱励-鼎胜铝业（镇江）有限公司第一块厚板已于 2012 年 12 月 21 日下线，但批量供应 2XXX 系及 7XXX 系合金航空厚板可能还需要一些时日。

2011 年 12 月 21 日，江苏常铝铝业股份有限公司与日本神户钢铁公司签订了合作意向书，共同投资 22 亿元在包头建立合资企业，生产汽车与罐体铝板带，生产能力 200kt/a，计划 2013 年动工建设，2015 年投产，后因中日关系原因于 2012 年 12 月终止合作。

中铝萨帕特种铝型材（重庆）有限公司。中国铝业股份有限公司与萨帕集团于 2011 年 4 月 8 日在北京签约建设轨道交通特种铝型材项目，年产轨道交通专用铝型材及车体模块 20kt，由萨帕集团经营管理，初期投资 6 亿元以上，该公司是集铝合金研发、挤压与车体模块加工为一体的企业。

贸易摩擦不可避免

2012 年，有关铝材及铝制品出口贸易摩擦共 6 起，比以往都多。

2012 年 7 月 13 日，哥伦比亚颁布的第 0235 号决议作出决定，将结束对产于中国和委内瑞拉的铝挤压材的板材的反倾销调查，并不对这些产品征收最终反倾销税。

2012 年 7 月 5 日，澳大利亚对原产于中国的铝车轮作出了反倾销和反补贴终裁。2011 年 11 月澳大利亚对原产于中

国的铝车轮进行反倾销和反补贴立案调查。有 5 家企业应诉，整体取得较好的成效。其中浙江曙光实业有限公司被认为没有倾销和补贴，不予以税赋；其他 4 家企业也获得了一定的税赋下调成果；而不应诉的企业则被征收高达 58.8%的反补贴税和 84.3%的反倾销税。

2012 年 9 月 14 日，加拿大国际贸易委员会发布公告，由于无证据表明原产于中国的铝制单元式幕墙对加拿大国内产业造成损害或损害阻碍或损害威胁，因此决定终止对涉案产品反倾销和反补贴损害调查。

2012 年 10 月 23 日，欧盟委员会表示，欧盟委员会正在调查中国铝箔生产商是否逃避欧盟 2009 年实施的反倾销税。该会称，有证据显示中国通过向欧盟出口铝箔卷后转化为受关税影响的产品以避开欧盟 2009 年实施的反倾销税。

2012 年 11 月 1 日，在卢森堡举行的欧盟（EU）部长会议上，已经批准对出口到欧盟的中国压铸铝散热器征收高达 61.4%的最终反倾销税。2012 年，欧委会做出反倾销初裁，对中国铝散热器征收 12.6%~61.4%的临时反倾销税。此次终裁维持了初裁结果。

2012 年 10 月 26 日，中国机电产品进出口商会表示，印度铝制品协会代表印度铝合金车轮生产商，向印度商工部递交申请，拟对 2010 年 10 月至 2011 年 9 月期间，从中国（含台湾地区）、泰国、韩国进口的铝车轮发起反倾销调查，涉

案产品为直径 12~24 英寸的汽车铝合金车轮。

随着世界贸易量的增大，以及大多数国家还不认为中国是一个完全市场经济国家，贸易摩擦事件会逐年有所上升。一遇到反倾销反补贴调查，有关企业应积极针锋相对积极应对。

1.9.13 2013 年 7 月至 2014 年 6 月世界再生铝工业风云（上）

2013 年 7 月~2014 年 6 月期间，除中国外，世界其他国家的原铝产业几乎按兵不动，而废铝领域却风起云涌，浪潮迭起。一些原铝厂利用停产的生产能力转产再生铝，提高了经济效益。废旧易拉罐回收与再生业务经久不衰，而且更加兴旺。汽车轻量化进程日趋强劲，因此生产汽车压铸零件用的再生铝合金生意相当红火，用废铝再生的加工板带材用的扁锭业务也在兴起，一些原车设备厂（OEMs,original equipment manufacturer）也在积极筹备建设汽车铝材－废铝再生－铝材－汽车零车闭路循环系统事宜。不过，由于当前废铝价格低迷，原来的再生铝企业对加大投入建设新项目的积极性受到一定的冲击。

非洲

2014 年 2 月休内特铝业公司（Hulamin Limited）宣布，

计划投资 3 亿南非兰特（R300M）扩大废料分类等预处理与再生熔铸设备生产能力，提高废料价值与竞争力，同时提高彼得马里茨堡（Pietermaritzburg）铝板带轧制公司的生产能力，项目建设计划于 2015 年中期启动。

美洲

巴西

2013 年 10 月，巴西铝合金代理贸易公司（Alloys Representacoes Comercials）、诺斯克·海德鲁铝业巴西分公司（Alras）与帕拉州（Para）政府签订了协议，将投资帕拉州以建设完善的铝产业链。巴西合金公司将建设一个圆锭铸造项目、一个铝型材挤压厂、一个再生铝项目，而且所需的原铝由海德鲁巴西分公司提供。合金公司将今后三年内完成项目建设，同时还将利用废料生产炼钢铝粉、再生铝合金与其他铝粉。据估算，圆锭生产线与炼钢脱氧铝粉项目的建设投资约 1 亿美元。

2013 年 11 月，巴西铝业协会（ABAL）与巴西高回收罐制造者协会（ABRALATAS）宣称，2012 年巴西的废旧全铝易拉罐的回收率约 97.9%（消费量约 267.1kt），连续 11 年居世界回收率之首（但据笔者调查，中国每年的回收率>99%）。

为了比较起见，2012 年美国的回收率为 67%，日本的回收率为 92.5%。巴西回收率之所以高，一是因为宣传工作做

得好，人人都自觉自愿成为回收者，二是收集组织遍布城镇与乡村。2012 年人们仅因回收废罐就增加收入约 2.76 亿美元。回收最多的是诺贝丽斯铝业公司（Novelis），占巴西总回收量的 70%，相当于 139 亿个罐。该公司正在扩建圣保罗市（Sao Paulo）平达蒙汉加巴（Pindamonhangaba）轧制厂的回收生产能力，由当前的 200kt/a 上升到 2015 年的 390kt/a，项目投资 3500 万美元。

2014 年 6 月，巴西再生铝生产者拉塔萨公司（Latasa）宣布，将在帕拉纳（Parana）建一个新的再生铝厂，此项目得到州政府支持。该公司还将投资 1330 万美元扩大位于塞特纳里奥·多·索尔市（Centenario do Sul）铝厂再生铝的生产能力，使其达到 2000~3000t/月。拉塔萨公司在库里迪巴市（Curitiba）有废铝回收中心，在圣保罗州（Sao Paulo）有 3 个铸造厂，再生铝用量 200kt/a，该公司还在巴西的 11 个州设有 20 个废铝收集中心，在美国佛罗里达州（FI）迈阿密市（Miami）设有 1 个回收中心。

美国

根据美国铝业协会（Aluminum Association）、制罐企业协会（CMI）、废旧物资回收工业协会（ISRI）公布的数据，2012 年回收的废旧罐回收率击中 20 年来的最高点，回收了 620 亿只罐，相当产量 920 亿只罐的 67%。

2013 年 7 月，合金资源公司（Alloy Resources Corp.）在密苏里州（MI）马斯基根市（Muskegon）的一个铝、锌废料回收再生厂建成投产，处理炉渣、建筑材料、汽车车轮、铝罐、挤压材、厨具、其他废料。该厂对所有的锌、铝废料进行分类、检验、清洗与熔炼，拥有现代化的反射炉、除气系统与铸造装置，再生金属生产能力 41t/a。

吉姆波洛集团（Giampaolo Group）成员马塔尔科公司（Matalco Inc.）2013 年 8 月宣称，计划新建一个挤压圆锭铸造厂，生产能力 136kt/a，所需要的废铝及其他废旧有色金属由集团所属的企业提供，可以保证新建厂对废铝的需求。

2013 年 8 月，美国铝业公司对外宣布，将与波音飞机公司（Boeing）建立废铝闭路循环链，波音公司将加工制造航空航天器铝合金零部件产生的废料返回美国铝业公司，经再生处理再用于加工铝材。据测算，每年可回收约 3630t 高价值的 2xxx 系及 7xxx 系铝合金废料。除了回收波音公司直接产生的废料外，还将回收零部件协作制造公司的废料。

美国铝业公司于 2013 年 9 月宣布将组建一个废铝回收与再生业务部（Alcoa Recycling），这个新组织将在总部的领导下，统一组织与协调公司内部成员企业废铝的回收与再生循环，形成高效的闭环循环系统，特别是废旧易拉罐（UBC）与航空铝合金废料的回收处理。2012 年美国铝业公司回收的废旧拉罐达 635kt，它在回收与利用这种废料方面有着悠久

的历史，有一套行之有效的技术，积累了相当丰富的经验，例如，其田纳西轧制厂（Alcoa’s Tennessee）生产罐料带材（can stock）的平均废料含量约占废料总量的90%。公司包装铝材已多年实现了从摇篮到摇篮（Cradle to Cradle）的生产过程，即闭路循环。

2014年1月25日,加拿大运输公司(Trans Canada Corp.）马尼托巴镇（Manitoba）附近的天然气管道爆炸。此公司是美国最大的再生合金企业之一，生产各种铝合金铸件，如铁模铸件、熔模铸件等。

2014年2月,爱励国际铝业公司(Aleris International）收购尼科尔斯铝业公司（Nichols Aluminum,LLC），后者是夸内克斯建筑产品公司（Quanex Building Products Corp）的子公司，它用废铝生产建筑用涂漆的铝薄板，以及机械装备、耐用消费品、电器产品等用的板材。

2014年2月,位于印第安那州拉斐特市(Lafayette,IN）的南山美国先进铝技术有限公司(Nanshan America Advanced Aluminum Technoloies）铸造车间投产，生产能力136kt/a，所产圆锭直径203.2mm、254mm、304.8mm、355.6mm、457.2mm，最大长度7.62m，除自用外，还有一部分对美国市场销售，原料为重熔用铝锭与6063合金废料。这是中国在国外建设的首家铝加工企业，已于2013年投产了2台挤压机，将视市场情况在今后适当时候再投产45MN（5000Ustf）与85MN

（9200Ustf）的挤压机各 1 台。公司除生产标准型材与汽车工业、液压工业用无缝管外，还可按用户需求生产非标准尺寸与形状的挤压材。

诺斯克海德鲁铝业公司建在肯塔基州亨德森市（Henderson,KY）的挤压圆锭熔炼铸造厂也于 2014 年 2 月投产，生产能力 90kt/a，原料为重溶用铝锭与废铝。

2014 年 2 月末，凯撒铝业公司（Kaiser Aluminum）与波音飞机公司签订了一份铝材－废料闭环循环协议，波音公司将各企业加工飞机零部件产生的 2xxx 系及 7xxx 系合金废料返回华盛顿州凯撒铝业公司特雷特伍德轧制厂（Trentwood），再加工成航空铝合金材料。据测算，波音飞机公司系统在 2014~2015 年用凯撒公司铝材制造飞机零部件可产生 10kt 废料。

2014 年中国忠旺控股公司（China Zhongwang Holdings Ltd.）拟投资 15 亿美元在美国加利福尼亚州巴斯托市（Barstow,CA)建一个再生铝厂，这将是一个综合性的企业，由熔炼铸造厂、轧制厂、挤压厂等组成，占地面积 965 公顷，于 2013 年与有关单位、组织谈判，还将建设一个全球最大的再生铝厂，铝材总生产能力约 1000kt/a。忠旺控股公司是中国最大、世界第二大的铝挤压企业，世界最大铝挤压企业——格朗吉斯铝业公司(原名萨帕铝业公司)是一个跨国企业，在全世界 13 个国家有约 80 个工厂，而忠旺控股公司是一个

单一的挤压厂，93 台挤压机位于同一大院的几个车间内。

2014 年 4 月，诺贝丽斯铝业公司在于科罗拉多州丹佛市（Denver,CO）召开的手工啤酒酿造工艺讨论上披露（Craft Brewers Conference），它们开发的世界首次商业化生产的“evercanTM（永久罐 TM）”合金是他们独创的，是一种再生铝含量极高的啤酒罐铝合金。制造 1202（盎斯）啤酒罐的 Evercan 合金含 70%再生铝，而罐身铝薄板合金的再生铝含量却高达 90%，这在罐料发展史上具有里程碑意义，对铝的循环利用与节能减排意义重大。

目前，美国红野兔(Red Hare)啤酒公司已选定用 Evercan 合金制造啤酒罐。该公司是一家微型啤酒公司，是美国这类企业当下发展较快的一家。用 Evercan 铝合金罐装啤酒的优点是：可在保质期内保持酒的新鲜度，保质期也比其他材料罐（瓶）的长；便于运输与携带；有助于环保、节能减排、节约资源与发展循环经济等等。一种红野兔啤酒面市，会带动成百上千家手工酿造微型啤酒厂的兴起，美国各州现有约 400 家“个体”啤酒厂，约有 1300 多种不同品牌的啤酒，都是 Evercan 铝合金罐的潜在用户。诺贝丽斯铝业公司的 Evercan 铝合金啤酒罐将会风靡北美洲、欧洲、南美洲与亚洲啤酒市场，而制造罐的将是 SCS 公司，它的全球服务公司（Global Services）遍布世界各地。

赫特威希工程公司（Hertwich Engineering）制造的用

于熔炼废铝的紧凑式（小型）炉已于 2014 年 5 月初在佛吉尼亚州乔治王子城（Prince George,VA）的金属制品服务中心（Service Center Metals）投产。这种熔炼炉的投产对于用废金属生产五金件很适用，有利于废铝回收与再生利用。

爱列迈塔尔控股公司（ElementAl Holdings）是一家生产铝圆锭（Slug）与铝块的企业，主要原料为废铝，由于市场不景气，已于 2014 年 7 月停产。该公司位于田纳西州克逊城（Jackson,TN），所生产的合金锭供汽车零配件铸造厂用。

1.9.14 2013 年 7 月至 2014 年 6 月世界再生铝工业风云(下)

亚洲

中国

2014 年 6 月，中国铝业公司宣布将投资 570 亿元在山西建一个先进铝循环工业基地，计划 2020 年前建成。根据与山西省政府达成的框架协议，基地内建设的项目包括：1 个 2000kt/a 废铝回收再生中心,1 个 10000kt/a 煤矿与水洗厂，350 万 kW 低热值燃煤发电机组，1000kt/a 高精铝加材项目；在原有铝电解容量基础上，经过改扩建使原铝生产能力达到 2000kt/a。

韩国

2013 年 7 月，诺贝丽斯铝业公司首次在韩国进行小学生

绿色野营活动，宗旨是对小孩子进行绿色教育，使他们明白回收铝与环保的关系，珍惜资源，增强环保意识。在活动中大家还动手组装了一辆太阳能汽车，参观了诺贝丽斯荣州回收再生中心，这是亚洲最大的废铝回收再生厂。

中国台湾地区

台湾新格铝业公司是一家再生铝企业，是中国最大的再生铝公司。总部在台湾地区，在大陆、台湾地区与美国都有工厂，2014 年 3 月新建的浙江省嘉山经济技术开发区总投资 1.8 亿美元，再生铝合金生产能力 300kt/a。

欧洲

海德鲁铝业公司再生铝部总裁 R·斯萨尔夫一伯格曼在 2013 年 11 月于迪拜举行的第 21 届再生铝会议上说，至 2020 年，欧洲需增建 600kt/a 再生铝生产能力。由于关闭了一些原铝厂，原铝产量下降，因此应增加再生铝供应量，以满足市场对铝的需求。在欧洲有不少铝产品是用再生铝合金制造的。2020 年欧洲废铝的供应量可以上升 1000kt，而出口量将同步上升。中国生产的再生铝将为欧洲的 10 倍有余，而中国进口的再生铝将保持在现有水平。欧洲还将限制废铝出口，以保证地区需求，但为消化日益增加的废铝需要再建设一些再生铝项目。

2013 年 11 月欧盟宣布，拨款 1260 万美元作为支持三个

大的研究再生有色金属研究项目的基金：一个关于破碎回收报废汽车的，一个关于废铝的，一个关于回收电池的。在报废汽车的破碎料中约含 8%的有色金属。

奥地利

2014 年 2 月奥地利斯特纳奇集团订购了 1 台瓦格斯夫铝圆锭铸造机，安于斯希灵斯再生铝厂，斯特纳奇集团是欧洲最大的生产铝合金锭的私有企业。斯希灵斯铸造厂是欧洲最先进的铝合金锭企业，已投产 5 年，现仍在投资扩建，以提高能源效率与扩大产量。该集团在德国纳希罗特还有一个真空压铸厂。这 2 个厂铝合金圆锭及铸件的总生产能力 160kt/a。

法国

2013 年 7 月，肯联铝业公司追加 2300 万欧元改扩建纽布利萨克轧制厂的轧制系统与废料回收再生系统，提高轧制扁锭铸造、加热、均匀化处理工艺的现代化与自动化程度，提高能源效率，更加环保更加安全，产量也将得到提升。这两项工作已于 2014 年完成。

肯联铝业公司于 2014 年 3 月宣布，将投资 9500 万欧元对伊苏瓦尔轧制厂的 Airware 铝－锂合金铸造系统进行大规模的改造与新建，共三个项目：一是对旧的铸造车间进行现代化改造，二是建一个全新的扁锭铸造车间，这两个项目可于 2015~2016 年全部完成，届时扁锭生产能力将为原来产能的 3 倍；三是建一个新的铝－锂合金废料回收再生车间，这

可能是全球首个铝－锂合金专业化再生项目。Airware 合金及其生产工艺是新一代的航空航天结构材料，空客（Airbus’）A350 XWB 系列大飞机、Bombardier’s（庞巴迪）C 系列飞机等将大量采用这类合金制造各种结构。

德国

德国最大的再生铝合金铸造企业奥廷格公司的生产能力300kt/a，于 2013 年 6 月提出破产申请，但由于市场需要未果，现在尚未找到一个两全其美的解决办法。德国最大再生铝企业申请破产，说明废铝市场与再生铝企业经营状况面临严峻挑战。

阿卢诺夫铝业公司是世界最大的平轧铝产品企业，有两条热连轧生产线，热轧带生产能力 1200kt/a，冷轧板带生产能力近 950kt/a，可生产约 100 种铝合金，每年板带材的实际产量 850kt，罐料及铝箔带坯的产量占 60%左右。该公司是海德鲁铝业公司与诺贝丽铝业公司的合作企业，各占 50%股份，由海德鲁铝业公司经营管理。

阿卢诺夫铝业公司原有一条废旧易拉罐回收与再生生产线，生产能力 50kt/a，2014 年 4 月末，海德鲁铝业公司决定再建一条新的生产线，使再生罐料铝合金熔体生产能力超过100kt/a。再生罐料熔体供 3104 合金扁锭铸造车间用于生产新的 3104 合金扁锭。新生产线在废料分选时采用公司的波恩研究所研发的新传感器，可对废料进行精确分类，大大提高

废料品质与价值。总投资 4500 万欧元，2015 年 12 月末投产。

匈牙利

2014 年 6 月，阿鲁麦特铝业公司投资 3250 万欧元在匈牙利建一个企业，它是一家生产汽车铸造铝合金零部件的企业，新建厂第一条生产线计划 2016 年上半年投产，第二条生产线拟于 2018 年第四季度投产，原料以废料与再生铸造铝合金为主。

挪威

海德鲁铝业公司 2013 年 11 月对外宣称，为了建立更加环保友好的社会，将加大收购挪威的废旧饮料罐，回收厂采用法国的再生处理工艺。诺斯克·莱塞克公司将参与此项工程，负责废旧易拉罐的回收，它们的合作可缩短废铝的运输路程，提高废旧罐回收率。莱塞克公司每年可回收 6200t 废旧罐，海德鲁公司用这些废铝再生成铸造生产汽车零部件的铸造铝合金与轧制 PS 版铝基板。

2014 年 2 月初有媒体称，挪威有 30000 个小学生每年废弃铝茶杯约 8456254 个，约含铝 6t，足可以制造 1208 辆自行车的铝合金零件，海德鲁铝业公司已注意到此事，准备进行商业利用。

英国

诺贝丽斯铝业公司 2013 年 11 月对外宣布，位于英国西北部沃灵顿郡拉特奇福特市的再生铝扩建项目已建成投产，

成为欧洲最大的闭环运作的汽车板带系统，扩建工程投资1830万美元。工厂有员工135名，原有再生铝合金生产能力160kt/a，矿建项目投产后。生产能力上升到220kt/a，增加员工30名。增加产能的大部分用于生产汽车铝合金板带，供美洲虎汽车厂用。扩建项目主要装备有：1台废料熔炼炉，1条现代化的扁锭铸造生产线，1条预处理线，1套世界顶尖的环保控制系统。与用重熔用铝锭相比，用再生铝合金生产同等质量扁锭多排放的温室气体达530kt。近2年来，诺贝丽斯铝业公司建成多项再生铝工程，总投资约6.8亿欧元。

2014年6月，海德鲁铝业公司建在威尔斯郡迪赛得的一条圆锭锯切均匀化连续生产线顺利投产，原料主要为废旧建筑铝材与部分重熔用铝锭，新生产线锯切锭的能耗比常规锭的低100kWh/t，全年可节电6.3GWh，长锭的长度为7m，这是欧洲的标准产品。这条生产线在环保、安全与健康（ESH）方面做得很周到，只要按规程操作就不会发生事故，噪声也降到了尽可能低的程度，锯屑分箱存放，不会混料，主要供应英国挤压工业。

2014年6月24日，JBM国际公司斯塔福德再生铝厂由于7t镁铝合金废料着火而停产，但仅停产3天。无人员伤亡，除7t废料被烧掉外，其他原材料也完整无损，英国健康安全行政部门与环保署参与了调查，着火原因仍未查明。

中东

国际再生铝研讨会于 2013 年 11 月在迪拜举行。有报告称，中东地区由于 80%的到期报废的铝结构与铝产品都出口了，因此，再生铝下游工业的发展相对来说很薄弱。另外，此地区大部分熔化铝的工厂没有把废铝的潜在价值发挥出来，熔化铝的设备也不先进，处理炉渣技术也较为落后，但是在未来几年内这种状况将有所改观。2012 年中东地区产生炉渣 70kt 左右，其中铝得到有效回收的仅约 25kt。2018 年该地区的原铝产量可达 150kt 以上,得到有效回收处理的为 60kt，占总炉渣的 40%，利用再生铝制造产品的下游工艺也得到相应的发展。

当今使用寿命到后期的铝产品及铝结构即废铝越来越多，如废建筑与结构、报废汽车、电线电缆、电子产品、电器、废旧易拉罐等等。2013 年全球废旧物资回收市场估计超过 2000 亿美元，其中美国 750 亿美元，占市场的 37.5%。铝工业在中东经济中占有很重要的地位，它与本地区的命根子工业——能源工业休戚相关，它也是主要的出口物资之一，同时也保证了本地区对铝的需求。海湾合作委员会（GCC）成员国在 2010~2017 年间废铝市场可增长 10.6%，中东地区废铝总市场估计于 2015 年可达 500kt,其中的 72%即约 360kt 将出口到世界各地，以印度、韩国、巴基斯坦、中国、欧洲、北

美为主。

中东地区铝再生市场处于初始阶段，所以大部分废铝都出口了，再生铝工业及其下游产品工业有很大发展前景。与全球标准相比，中东的废铝回收率只有 20%。沙特阿拉伯王国是主要的废铝出口国，其次是阿拉伯联合酋长国。中东废铝市场与再生市场面临的主要挑战是各国的再生率很低，所以废铝的出口率甚高，达到 80%。

中东特别是海湾合作会议国家是世界铝市场发展最快的地区之一，随着新的原铝厂的投产与生产那能力的扩大，也会有一些再生铝厂出现与新产能的形成，许多利用再生铝的下游企业会以欧洲工厂为样版走高材料利用率、高能源效率与低碳排放的发展路线。

阿拉伯联合酋长国

位于阿布扎比的塔威拉铝挤压公司于 2014 年投产，铸造车间有 1 台新的赫特威奇工程公司的熔炼炉，圆锭生产能力 30kt/a~40kt/a，可生产 5 种直径的圆锭。熔炼炉为 Ecomelt PR-80 型，是环保友好型设备，且生产效率与能源效率高。

该厂分两期建成，一期除有 1 台 Ecomelt PR-80 型熔炼炉外，还有 1 台可倾斜的矩形保温炉，1 套溶体净化系统，1 台立式半连续圆锭铸造机，1 条连续均匀化退火线，1 台超声波探伤线，1 条锯切包装线；二期工程的主要装备增加 1 台保温炉，1 台批式均匀化退火炉。新铸造车间可生产挤压汽

车铝材用的圆锭，所用的原料有邻近的埃默拉特铝厂的原铝、工厂生产挤压材的工艺废料与旧废料。

塔威拉铝挤压公司是塞拉特公司与海湾挤压公司的合资企业，位于阿布扎比的哈立法工业区，一期工程计划 2015 年一季度投产。

*注：本文素材取自 Rudolf p •pawlek. World Secondary Aluminum Industry Annual Review.Light Metal Age,August 2014:6-17.

1.9.15 2014 中国铝工业风云回眸

表 1 2014 年中国投产的氧化铝生产能力

企业名称	地点	生产能力，kt/t
魏桥北海新材料有限公司	山东无棣	1000
森泽煤铝有限责任公司	山西柳林	600
东方希望晋中化工有限公司	山西灵石	1000
山西复晟氧化铝厂	山西平陆	800
同德铝业有限公司	山西德保	1000
肥美铝业有限公司	山西交口	600
信发孝义氧化铝有限公司	山西孝义	1600
重庆博赛矿业先锋氧化铝厂	重庆南川	300
总计		6900

表 2　前 10 名电解铝企业（集团）

序号	企业（集团）名称	生产能力，kt/a
1	魏桥铝电有限公司	4020
2	中国铝业公司	3800
3	信发集团	3480
4	中国电力投资公司（中电投）	3230
5	东兴铝业有限公司	1700
6	东方希望有限公司	1660
7	神火集团	1500
8	天山铝业有限公司	1400
9	云南铝业股份有限公司	1200
10	河南伊川电力控股有限公司	840

关键词

氧化铝 电解铝 铝加工

再生铝 环保与安全

2014年对于中国铝工业来说是不平凡的一年，也是有些艰难的一年。这一年我们承受着电解铝产能过剩、市场低迷的压力；克服着印尼原矿出口禁令带来的铝土矿供应短缺的困难；紧抓着一个又一个的市场机遇：努力扩大铝应用，促进铝消费，向铝材高、精、尖深加工迈进。在2015年到来之际，让我们一起来回顾过去一年铝行业经历的风风雨雨，总结一下过去的2014年我们取得了哪些成就，又面临着哪些问题，思考已经来临的2015年该向着什么样的方向继续前行，以助大家在新的一年里迈出行业发展坚实的第一步。

2014年是中国从铝业大国向铝业强国迈进的开局之年，

是行业转型升级关键之年，是微利润开始成为新常态之年，是增速下降、产能过剩、价格下行成为常态的第一年。是发起向最后一类高精大宗铝板带--汽车车身薄板（简称ABS）项目建设高潮与总进攻之年。新常态对中国铝工业来说，是压力，是挑战，也是机遇。

2014年中国氧化铝生产能力66900kt/a，产量超过53500kt，产能利用率80%；电解铝生产能力29850kt/a，产量23450kt，产能利用率78.6%；挤压材生产能力约17000kt/a，产量12000kt，产能利用率70.6%；铝平扎产品生产能力13800kt/a，产量9900kt，产能利用率72%；锻造产品生产能力124kt/a，产量仅约45kt，产能利用率仅36.3%；再生铝生产能力近10000kt/a，产量约7500kt，产能利用率75%。

2014年建筑与结构、电力与电子工业、交通运输业、耐用消费品仍是铝应用最多的四大产业，分别占34%、15%、14.5%、12%。交通运输业的用铝量比2013年的上升2个百分点，且前景可观。2015年交通运输业的用铝量可超过电力电子工业居第二位，2022年有望超过建筑用铝，成为我国铝应用量最大的产业。

2014年在ESH（环境·安全·健康，

environment·safety·health）方面发生了两起震惊世界铝工业界的大事故：一是昆山中荣金属制品有限公司车轮抛光车间铝粉尘大爆炸，二是湖南桃源创元铝业公司的长达数年的废渣污染问题。这都不应该发生，值得业界反省与深思。

氧化铝与电解铝篇

氧化铝：产能大幅度增加

2014年中国氧化铝的新增生产能力约6900kt/a，比2013年新增5700kt/a多1200kt/a，总生产能力可达66900kt/a，产量可超过53500kt，产能利用率80%（氧化铝的新增生产能力详见表1）。

电解铝：全行业亏损　山东成第一原铝大省

2014年全国停产电解铝生产能力约1070kt/a，新增生产能力超过4000kt/a；电解铝生产成本平均为13000元，全行业仍处于亏损状态；电解铝消费约25000kt，与2013年的相当。2014年1~9月，全国电解铝产量17589.855kt，估计全年的产量约23450kt，比上年度的22046.07kt上升6.4%；1~9月进口的电解铝锭及铝合金锭323.105kt，估计全年进口量430.8kt，出口量501.36kt，估计全年的出口量668.5kt，净出口量237.7kt。

全国现有铝电解企业31家，平均生产能力960kt/a，2014年电解铝生产能力生产能力按企业排行：最大的是魏桥集团，

4020kt/a（笔者匡算为6800kt/a）。全国约有82个单独的铝厂，平均生产能力460kt/a。前10名的产能集中度达到77%（见表2）。

生产能力按省、区、市排行：16个省、市、自治区中，山东第一，新疆第二，河南已退居第三。其中山东的生产能力6620kt/a（另有资料称为9100kt/a），共有10个生产企业；新疆的生产能力6250kt/a，共有7个生产企业；河南省的生产能力为3670kt/a，共有13个生产企业。后3名为重庆市、福建省、河北省，合计生产能力只有410kt/a。

2013年，全国电解铝的综合交流电耗13740kWh/t，2014年可进一步下降到13680kWh/t，居世界领先水平。

铝加工篇

平轧铝产业：向高精尖迈进　ABS技术待突破

2014年铝平轧产品生产能力约13800kt/a，比上年度的12500kt/a上升约10.4%。2014年中国铝平轧产品产量约10000kt，同比上升7.6%（不含铝箔产量，但含铝箔带坯），产能利用率约72%，约比工业发达国家低16个百分点。

2014年中国出口铝板带约1620kt，同比上升3.6%；据海关统计，1月~9月中国进口铝板带260.387kt，估算全年进口量约350kt，与上年度的持平；净出口铝板带1270kt，比上年度的上升4.6%，是全球最大的铝板带出口国；2014年中国出

口铝箔约860kt，进口铝箔约60kt，净出口铝箔800kt，同比上升13.8%，是世界最大铝箔净出口国。2014年中国净出口平轧铝产品2070kt，同比上升8%。

航空级铝合金厚板

2014年10月17日，“120MN航空级铝合金板材张力拉伸机装备”项目通过了科技成果鉴定，专家组认为该项目在钳口负载系数、断带缓冲保护技术方面达到国际领先水平。此台预拉伸机是中国第二重型机器制造有限公司制造的，设备自2011年投产以来运行平稳，生产的铝及铝合金板材已超过13000t。该设备成功研制标志着我国航空航天铝合金厚板预拉伸机性能指标跻身世界先进行列。为提高中国大飞机制造自主化率提供了可靠的原材料保障。

平版印刷铝基板

平版印刷铝基板分为PS版用的与CTP版用的，2014年中国可生产这两种高级铝板带的企业有13家，总生产能力880kt/a，在建的企业有10家，总生产能力570kt/a，2014年中国印刷版基用铝板带销售量约512kt，其中PS版用的约占45%，CTP版用的占55%左右。

对中国平版印刷铝基板产业来说，2014年是一个有标志意义的年份，从今年起CTP的用量超过PS板，到2020年，CTP的用量可占80%以上，与那时发达国家的用量比例大体相当。

中国是一个印刷业大国，在2025年前印刷版基铝板带的

消费量年平均增长率可达10%以上，2025年的产量有可能达到2000kt。

罐料

2014年全世界生产罐料约4400kt，其中美国约占47.7%，中国产量约360kt，2014年中国罐料的生产能力近900kt/a，在建的生产能力约3252kt/a。

自1986年10月首条制罐线投产以来，中国一直是罐料净进口国，直到2013年，中国罐料生产不但满足了国内需求，而且还向美国出口了约12kt。2014年中国可生产罐料的企业有南山轻合金有限公司、西南铝业（集团）有限责任公司、渤海铝业有限公司等。2015年起，中国可能将成为继美国、韩国、德国之后世界第四大罐料净出口国，并且生产罐料铝带卷的装备都是世界顶尖级的。

汽车车身薄板（ABS）

随着人们节能减排与环保意识的加强，汽车轻量化在步步跟进，ABS成了铝板带板块市场增长最具潜力的亮点，2014~2020年全世界的年平均增长率可望达到20%。

在4种大宗铝合金高精尖板带中（航空级铝合金厚板、平版印刷铝基板、罐料、汽车车身薄板），对中国来说，ABS是生产难度最大的。中国自2013年掀起了ABS生产线建设的浪潮，不但跨国铝业公司大举登陆中国，而且中国一些大的在建板带企业也都增建了专业ABS生产线。率先进入中国此领域

的是诺贝丽斯-大韩铝业公司，其次是日本神户钢铁公司。诺贝丽斯（中国）铝制品有限公司2012年4月落户江苏常州国家高新技术产业开发区，投资1亿美元建立一个ABS热处理与精加工项目，带卷从诺贝丽斯-大韩铝业公司运来，已于2014年10月21日投产。神钢汽车铝材（天津）有限公司位于天津西青经济技术开发区，投资11.5亿元建汽车铝板深加工项目，神户钢铁公司铜铝事业部独资，所需带卷从日本真冈轧制厂运来。ABS板生产能力为100kt，计划2015年投产。

到2015年，中国ABS企业将形成诺贝丽斯（中国）铝制品有限公司、神钢汽车铝材（天津）有限公司、国内企业三足鼎立之势，国内企业面临严峻的挑战。中国ABS能够批量被全球主流汽车企业采用之时就是中国成为世界铝工业强国之日。到2016年中国的ABS生产能力可达555kt/a。西南铝生产的ABS已于2013年为多家汽车企业试用，并于1月16日获得ISO/TS16949质量管理体系认证书，这意味着其可为世界各国汽车制造商提供铝材。

铝箔

中国已成为世界铝箔生产的头号大国与初级强国，也是净出口大国，国民经济各产业所需要的大多数铝箔都能自主生产。中国拥有世界上最多的先进的2000mm级箔轧机，约有35台，生产能力约400kt/a，比世界其他国家的总和还多约12

台。

2014年中国铝箔生产能力约3620kt/a，比上年度的3400kt/a增加6.5%，产量约3080kt/a，同比上升10%，产能利用率87.5%，比上年度的提高5.1个百分点。在中国铝箔消费结构中家用铝箔的消费量还相当低，比欧洲和北美洲少得多，这一方面是由于生活习惯有差异，另一方面是因为人民生活水平较低，铝箔价格比保鲜膜要高出不少。

冷轧板带

2014年中国冷轧铝板带的生产能力约13200kt/a，比上年度的11750kt/a上升12.34%。2014年中国投产的铝带冷轧项目有19个，总生产能力约1450kt/a。2014年中国投产的铝板带项目主要有：南南铝加工有限公司的114kt/a生产能力，有1台2800mmCVC plus6冷轧机，7月15日开始试生产，不但是中国投产的也是全球已投产的唯一一台最大的此类冷轧机，也是惟一的可轧硬合金的此类冷轧机。中孚实业股份有限公司特铝冷轧工程于2014年投产，2300mm（1+4）式热连轧线已于2012年12月成功轧出了宽1300m，厚6mm的热轧卷。

锻造产品

自由锻件及模锻件是一类重要的受力结构零件，中国已成为世界铝锻件生产初级强国，西南铝业（集团）有限责任

公司与东北轻合金有限责任公司生产的5m级大锻环不但满足了中国航天工业发展的需求，而且一批批的铝合金锻件装在波音公司成千上万架飞机上，件件合格，从未出过质量事故。

2014年中国铝锻件的生产能力约124kt（含车轮锻件）。中国汽车及轨道车辆制造还会有较大发展，生产这类装备的锻件还会有较大的发展潜力。

铝挤压产业：出口量有所下降

2014年中国挤压铝材生产能力约17000kt/a，同比上升9%，产量估计可达12000kt，同比上升8%，产能利用率70.6%，与上年度的持平。2014年1~9月中国进口的挤压材为48.2kt，估计全年进口量可达68kt；1~9月出口541kt，估计全年出口量可达730kt，净出口量662kt，比2013年的净出口量下降17%。

2014年投产的铝挤压项目约17个，总生产能力约1400kt/a；在建的项目7个，总生产能力约1366kt/a，可见生产能力的增长势头仍未减弱。2014年中国在建的主要铝挤压项目约6个，总生产能力超过1366kt/a。

再生铝篇

2014年中国再生铝工业又向前迈出了坚实的一步，产量上升到7500kt，比2013年上升9.5%，增长幅度大于电解铝。2014年中国进口废铝约2240kt，出口约1kt，比2013年的净进

口量2500kt少260kt。

2014年，湖北金洋冶金股份有限公司年产十万吨再生铝合金项目顺利通过省发改委组织的专家组验收，项目建设内容全部完成。

由南通曼特威金属材料有限公司和南通大学共同研发的“高品质再生铸造铝合金生产技术”科技成果于2014年6月通过了由中国有色金属工业协会主持的专家鉴定。利用该技术已建成一条60kt/a的高品质再生铸造铝合金产业化生产线，效果良好。

2014年6月中国铝业公司宣布，将投资570亿元人民币（92.5亿美元)在山西运城建一个先进铝循环工业基地，2020年前建成。在原有铝电解容量基础上经过改扩建使电解铝生产能力达到2000kt/a。

环境·安全·健康篇

环境、安全、健康（ESH）是一个永恒的话题，铝行业应时刻关注。2014年，中国发生了两起令世界铝工业界十分痛心和震惊的重大事故：昆山铝粉爆炸事件和创元铝业环境污染事件。在当今条件下，这样的事故只要稍加注意就完全可以避免，预防措施简单，费用也不高。

2014年8月2日7点30分，江苏省昆山市中荣金属制品有限公司铝车轮抛光车间发生铝粉尘爆炸，造成75人死亡。这起

大事故不但是中国铝工业从未有过的，也是1888年铝的工业化生产以来，世界铝工业史无前例的。

另外一件事是湖南桃源创元铝业有限公司违规处置上千吨含氟电解铝废料。历时8年，污染大气和水，危害人民健康，后果非常严重。而这又是一起完全可以避免的重大责任事故。铝电解槽一般在运行大约2000天后须进行大修，拆下筑槽用的阴极炭素材料与保温材料经预处理后就是废渣。废渣含氟，一旦与水接触就会生成含氟气体，污染环境与水，对人体以及一切动植物的生长都有害。铝电解厂必须对生产中排放的一切废弃物进行认真处理，以免污染环境，危害人体健康。

1.9.16 铝加工业风云回眸之政策

2013 年铝相关商品进口税率未作调整

由自 2013 年 1 月 1 日起实施的《2013 年关税实施方案》可以看出，2013 年铝相关商品的进出口税率没有变化，体现国家鼓励铝资源进口，限制铝初级产品出口，鼓励铝材等高附加值产品出口的总思路。在进口方面，仍是氧化铝、重熔用铝锭、废铝、一种规格铝板带等 4 种商品实行低于最惠国税率的暂定税率；在出口方面，有 25 种铝相关商品实行 0%（氧化铝、重熔用铝锭、废铝）或明显低于出口税率的暂定税率。

两部委联合下文 坚决遏制过剩行业新增产能

2013 年 5 月 10 日，国家发改委、工业和信息化部联合下发《关于坚决遏制产能严重过剩行业盲目扩张的通知》（发改产业[2013]892 号）。这里所指的过剩行业是指钢铁、水泥、电解铝、平板玻璃、船舶。《通知》要求，严禁核准产能过剩行业新增产能项目，坚决停建产能严重过剩违规在建项目，对未按通知要求停建的违规在建项目，要予以严肃查处，并依法追究相关责任人的责任。

两部委酝酿出台《海外投资法》

近 10 年来，中国企业的海外投资及海外并购活动快速发展，为规范和支持中国企业的国际化经营，商务部和国家发改委从 6 月份起酝酿出台《海外投资法》，主要内容是规范企业的海外投资行为，反对不正当竞争，并保护中国企业的对外投资权益。

工业和信息化部公告《铝行业规范条件》

2013 年 7 月 18 日，工业和信息化部以 2013 年第 36 号公告形式颁布《铝行业规范条件》以进一步加强铝行业管理，遏制铝行业重复建设，化解电解铝产能过剩矛盾，规范现有

铝企业生产经营秩序，引导废铝再生利用行业有序发展，提升资源综合利用率和节能环保水平，推动铝行业结构调整和产业升级，促进铝行业持续健康发展。

发改委要求加快淘汰电解铝等行业产能过剩

2013 年 8 月 27 日，国家发改委发布《关于加大工作力度确保实现 2013 年节能减排目标任务的通知》。《通知》要求淘汰铝产能 273kt/a，力争 2013 年 9 月底前全部关停，12 月底前全部彻底拆除，不得转移。

国务院下发关于化解产能严重过剩矛盾的指导意见

2013 年 10 月 6 日，国务院向各省、自治区、直辖市人民政府，国务院各部委、各直属机构下发了关于化解产能严重过矛盾的指导意见（国发[2013]41 号），中心意见是化解产能严重过剩矛盾是当前和今后一个时期推进产业结构调整的工作重点。

在 2015 年以前，国内还有 500kt/a 的电解铝产能必须陆续淘汰。

2014 年 1 月 1 日起对电解铝行业实施“阶梯电价”

2013 年 12 月 23 日，国家发改委与工信部决定自 2014

年 1 月 1 日起对电解铝行业实施分档式的“阶梯电价”政策，目的是运用电价杠杆加快淘汰落后电解铝产能。具体来说，原铝电解交流电耗不高于 13700kWh 的，执行正常电价；交流电耗在 13700~13800kWh 之间的，电价加价 0.02 元/kWh；一旦高于 13800kWh/t 的，电价将加价 0.08 元/kWh。

1.9.17 2013 年铝加工业风云回眸之装备

对中国铝加工产业来说，2013 年真是不平凡的一年，在党的“十八大”与十八届三中全会的路线与各项方针政策的指引下，铝加工业取得了巨大的成就。2012 年是中国成为世界初级铝加工强国开局之年，而 2013 年则是迈开大步向强国前进之年，是行业转型升级关键之年，仍是产能继续扩张之年，产量增长速度开始放缓的第一年，是发起向最后一个高精大宗铝板带——ABS 板（Auto Body Sheet）项目建设高潮与总进攻之年。

截至 2013 年年底，中国铝加工材（板、带、箔、管、棒、型、线、锻件、粉、膏）的总生产能力已达 33000kt/a，比上年度的 28500kt/a 上升 15.8%，其中铸锭的产能（含电解铝厂生产的锭坯与再生铝厂生产的锭的产能)约 46500kt/a；热轧板带的产能约 12500kt/a，挤压材的约 15600kt/a，铸轧

带坯约 7500kt/a，拉拔与锻造产品等约 3100kt/a，冷轧平轧产品约 12500kt/a，比上年上升 19.1%。

2013 年，中国铝加工材的总产量约 23000kt，这是笔者的估算，比 2012 年的增长约 12.2%，生产能力利用率仅 70%，同比下降 2 个百分点，这非常值得我们深思，生产能力利用率这么低，比发达国家的利用率至少低 18 个百分点以上，说明有 30%左右的企业处于亏损状态，而国有企业可能有 70%左右的企业处于亏损状态或处在亏损边缘。

据统计，今年前三个季度，中国铝材产量 28570kt，同比增长 25.1%，照此推算，全年的产量应该在 38100kt 以上，相当于全球总产量约 44000kt 的 86.6%，这是一个匪夷所思的数字，怎么可能呢？2013 年 1~9 月份，中国原铝产量 16214.029kt，估算全年的产量约 21620kt，净出口铝锭及铝合金锭 160kt，因此全年重熔用铝锭的表观消费量约 21460kt。2013 年中国再生铝消费量约 6500kt，所以全国投入的铝资源约 28000kt。而产出为铝材（铝+3%合金）、铸造产品（铝+5%合金元素）、其他产业用铝（冶金合金元素用、还原剂用、医药化工用、炼钢脱氧与钢板电镀用等等，可按重熔用铝锭表观消费量的 7%估算）。

据海关统计，2013 年 1~9 月，中国铝材进口量 361.63kt，出口量 2383.917kt，净出口 1922.287kt，估计全年的净出口

量约 2570kt，中国在今后可预见的时期内，无疑会一直是一个净出口国，而且净出口量总体上呈现上升趋势。不过，出口铝材的单价约比进口铝材的低 45%左右,这是符合情理的，因为进口的铝材是我们当前还不能生产的或者产量还不能满足需求的，但是这种情况会逐步得到改善，进口量会逐年有所下降。

2013 年铝平轧产品（FRPs）生产能力约 12500kt/a，比上年度的 10500 kt/a，上升约 19.1%。所谓铝平轧产品是指板、带、箔，但在说产量时为热轧厚板与冷轧板、带之和，对一个国家或地区来说，热轧厚板的产量可按板、带总产量的 3.5%计算，而在说生产能力时，仅指冷轧板、带的（含铝箔带坯卷）。在轧制铝带时，只能说轧制带，不能说在轧制板带，因为现在轧的都是带，没有冷轧块片的。

2013 年中国铝平轧产品产量约 9200kt，同比上升 12%，产能利用率约 73.6%，约比工业发达国家的 88%低 14.4 个百分点，比 2012 年度低 6 个百分点，多了 8.4 个百分点是因为新增生产能力大，而工业发达国家几乎没有新增生产能力。在产量中约含 150kt 厚板（厚度＞6mm），与 2012 年持平；铝箔带坯约 3600kt，同比上升 20%，其余的 5450kt 为冷轧板带。

2013 年，中国出口铝板带约 1564kt（根据前 9 个月出口 1172.762kt 估算），进口铝板带 350kt（根据前 9 个月进口

261.439kt 估算)净出口 1214kt，是全球最大的板带出口国；同年出口铝箔 760kt，进口 57kt，净出口 703kt，是世界最大的铝箔出口国；平轧产品的净出口量 1917kt，同比多出口 527kt，飙升 37.9%，是新世纪以来，同比增加率最大的一年。

铸锭热轧生产线

铸锭热轧是当前国外生产铝板带的主要工艺，占板带总生产能力的 78%左右，2013 年中国的这个比例为 62.5%，比国外低 15.5 个百分点。不过，在此需要指出的是，这个比例的大小，并不表示结构是否合理，一个国家可根据自身的特点与资源情况发展平轧产品的生产工艺。2013 年，中国铸锭热轧生产能力已达 12500kt/a，2016 年的生产能力有可能超过 16000kt/a，占那时全球总生产能力的 57%左右。这么大的生产能力如何发挥呢？地球上哪有这么大的市场？这种不顾市场需求，盲目发展扩大生产能力的浪潮符合经济发展规律吗？

单机架热轧机

2013 年底，中国有辊面宽度≥1000㎜的单机架单卷取及双卷取的热轧机 78 台，匡算生产能力 4500kt/a，还有约 80 台辊面宽度 650㎜~＜1000㎜的热轧机，它们的生产能力约

400kt/a。今后在中国这种热轧机不会再发展了，但有些大的单机架单卷取热轧机会改为双卷取的，小的热轧机会逐步被淘汰，但生产能力还会略有上升。

(1+1)式热粗-精轧生产线

2013 年底，我国在产的热粗-精轧生产线有 8 条，总生产能力为 1880kt/a，同比上升 41.35%。南南铝加工有限公司的（1+1）式热轧线不但是中国最大的这类生产线，也是世界最大的，粗轧机辊面宽度 4100mm，精轧机的宽 3100mm，粗轧机的最大开口度 800mm，是世界 3 大类粗轧机之一。2013 年 8 月 10 日,第一块热轧厚板下线,可生产板的最大厚度 260mm，最大宽度 3800mm，最大长度 38m，目前航空工业需要机翼厚板的最大长度为 36m。安装该生产线的厂房长 660m,宽 186.8m，占地达 12×104m2，是中国当前最大的铝板带热轧车间。

江苏丹阳大力神材料有限公司有 3300mm 粗轧机，2800 精轧线 1 条，除生产复合材料外，还可以生产其他热轧板、带。

（1+3）式热连轧生产线

截至 2013 年 12 月，中国有 4 条（1+3）式热轧线，总生产能力 1290kt/a。它们的主导产品都是软合金通用板带，当然也可以生产一些厚度≤15mm 的软合金板材，如渤海铝业有限公司每年都生产一些这类厚板。中国的 4 条这类生产线都是 2010 年以后建成投产的，在今后 4 年内很可能不会有新的

这类生产线投产了。

（1+4）式热连轧生产线

截止至 2013 年 12 月末，中国投产的（1+4）式热连轧生产线有 10 条，总生产能力 5450kt/a。（1+4）式热连轧生产线是世界铝带热轧的主流，在中国也已成为主流，占铸锭热轧总生产能力的 43.6%。这种生产线的优点是生产能力适中，各项工艺参数易于控制，产品品质高，特别适合于生产罐体料、PS 铝版基板、汽车车身薄板等高技术产品。

2013 年，中国投产的与联动有负荷试车的（1+4）式热连轧生产线有 5 条，总生产能力为 3100kt/a，在世界工业发展史上是绝无仅有的，在中国恐怕也仅此一年。

2013 年，中国在建的（1+4）式热连轧生产线可能有 6 条，总生产能力约 4050kt/a，它们分别是：力同铝业（河南）有限公司青海项目的 2400mm 生产线，已于 2011 年启动，可能于 2014 年建成。义煤集团河南同人铝业有限公司在建设 300kt/a 的铝深加工项目，于 2013 年 1 月 15 日获批，2013 年 2 月 27 日开工建设，计划建设 1（4500mm）+1（3300mm）热粗-精轧生产线 1 条，2600mm（1+4）式热连轧线 1 条，前者生产能力 250kt/a，后者生产能力 500kt/a，含 35%硬合金板带。河南万基 700kt/a 铝板带项目，冷轧板块与铝箔板块已投产一部分，在建（1+4）式 2400mm 热连轧线，计划 2014 年建成，热轧板带生产能力 700kt/a。

天津忠旺铝业有限公司的 4500mm（1+1+3）式硬合金板带项目。忠旺集团正在天津武清区建一个生产能力 3000kt/a 平轧铝产品项目，占地面积 550×104m2，总投资 450 亿元，分两期建设，一期为板、带、箔 1800kt/a，2014 年开始相继投产，2018 年全部建成。二期主要建设平轧产品深加工生产线和铝型材系列产品生产线。软合金热轧车间有（1+5）式生产线 2 条。(1+1+3)生产线由 1 台 4500mm 粗轧机、1 台 3600mm 中轧机与 3 台 3200mm 精轧机列组成，厚板精整车间有世界上最长的固熔处理炉，固熔处理区长度 50m，可处理长 48m 的板材，可用这种厚板制造翼展长达 106m 的机翼。热轧生产线硬合金板带生产能力 650kt/a。

万基控股集团 70 万吨铝板带项目总投资 120 亿元，设计热轧板、带生产能力 1000kt/a，其中高精冷轧板、带 700kt/a、厚板 100kt/a、铝箔 50kt/a，项目分两期实施，一期投资 26 亿元，形成 200kt/a 板、带、箔的生产能力，一部分生产能力已于 2012 年 5 月 28 日投产，其余工程正在按计划建设中。该项目至少有一条（1+4）式热连轧生产线，生产能力不会小于 700kt/a，计划 2014 年投产。

其他在建的（1+4）式热连轧生产线，至少还有 3 条，总生产能力约 200kt/a，它们可能不会如期建成，如果这些项目全部建成，2015 年可有 16 条（1+4）式生产线，总生产能力 9500kt/a，与国外的总和大体相当。

（1+5）式热连轧生产线

截至 2013 年底，中国仅有 1 条（1+5）式热连轧生产线，即亚洲铝业集团铝板带有限公司的 1（2400mm）+5（1700mm）式热轧线，因 5 机架热连轧机列是从美国芝加哥市麦库克铝业公司引进的二手设备，所以粗轧机与精轧机列的辊面宽度相差甚远，不能生产宽度大于 1500mm 的带材，不能生产工位多于 14 的罐料带材，生产的效益可能会不尽人意。生产能力 700kt/a。

在建的（1+5）式的有 1 条，即天津忠旺铝业有限公司 2400mm（1+5）式软合金热轧线，可能会于 2015 年上半年建成投产，热轧带卷生产能力可达 1200kt/a，是全世界最大的这类生产线，也可能是全球最后一条这类生产线。

连铸连轧生产线

连铸连轧生产线是由 1 台黑兹莱特双带式铸造机与其后的双机架或 3 机架热(温)轧机列组成。中国首条这类生产线于 2012 年初正式投产，规格 1950mm，实际上可铸带坯最大宽度 2032mm，这是世界上最大的这类生产线，按设备利用率 90%计算，生产能力可达 500kt/a，但由于受到市场等方面的制约，所以在计算技术经济指标时按 250kt/a 计算。在建设这类生产线时一般都利用一部分原铝，由于原铝含有少量的电解质与铸造流道较长等特点，熔体净化处理显得格外重要，尤其是在铸造 5053、5454、6061 等合金时，往往会出现由于

净化处理不到位或其他原因引发的表面缺陷，再建这类生产线时应注意这方面的问题。

现在内蒙古正在霍林郭勒建设另一个 1950mm 黑兹莱特连铸连轧项目（鼎盛轻合金材料有限公司），这两条生产线的 3 机架热连轧机列都用的是意大利米诺公司的装备与技术，后者的装备是根据米诺公司提供的资料，由中国的机械制造公司制造的。

大容量黑兹莱特连铸连轧生产线经济指标往往很难达到设计目标，首先可有效生产的合金有限，它不是一种万能的冷轧用带坯生产技术与工艺;它的生产效率很高,不适宜中、小批量产品生产，而中国当前及今后一段相当长的时期内，铝加工不是一个生产集中度高的行业，约 70%的产品是由中小企业提供的；熔炼-静置炉的容量大，不便于转换合金，往往会产生较多的废料。因此，今后拟建大容量（＞1400mm）连铸连轧项目的企业宜做好充分的市场调查与论证，作好产品定位。世界上目前还没有一条有高经济效益的大容量此类生产线，笔者不是在这里危言耸听，但愿这样的高效生产线能在中国出现。

中国还是有引进小黑兹莱特生产线（≤800mm）的必要，用于生产冲挤坯料与窄的板带材，中国还没有这类生产线，其优点是投资小，投资 1 亿元左右即可。产品市场容量大，冲挤件在汽车中有着广泛的应用，在容器制造方面也很有前

景。北美有 3 条这样的生产线，日本有 2 条，都取得了很不错的经济效益。

双辊式连续铸轧线

中国是一个铝带坯双辊式连续铸轧生产大国，也是一个强国，生产的铸轧机不但能满足国内建设的需求，而且出口到巴西、南非、印度、越南等国家。截至 2013 年底，中国拥有双辊式连续铸轧机约 740 台，带坯生产能力约 7200kt/a，比上年度的增加约 0.6%，铸轧机台数约占世界总台数的 75%，约占全球总生产能力的 66.5%。

2013 年投产的主要连续铸轧项目有内蒙古托克托工业园区华唐伟业再生资源有限公司的 3 台铸轧机，太原东铝铝材有限公司的 12 台铸轧机，常铝北方铝业有限责任公司的 18 条生产线（2000mm 的 14 条、1600mm 的 4 条），力同铝业青海项目的 10 台铸轧机(1900mm 的 4 台、1600mm 的 4 台、1500mm 的 2 台），贵州中铝铝业有限公司的 7 台铸轧机等。

热轧厚板生产线

凡是有铸锭热压机的企业都可以生产铝合金厚板（厚度＞6mm)，但是要生产航空级厚板则必须有辊底式固溶处理炉、预拉伸机、超声波探伤线、辊矫机、退火-时效炉、精密锯床等。铝合金厚板企业可分为专业与通用的，前者只生产厚板，后者则生产各种厚度的板带材。截止 2013 年 12 月，中国有

10 家厚板生产企业，总生产能力约 435kt/a。

西南铝业（集团）有限责任公司有 1 条 2800mm（1+1）式热粗-精轧生产线，可生产各种软、硬合金板带材；1 条 2000mm（1+4）式软合金带材生产线；1 条 4300mm 四辊单机架厚板生产线，这是全世界首条最大的厚板专业热轧机。东北轻合金有限责任公司也有 3 条热轧生产线：1 台 2000mm 单机架四辊双卷取热轧机，这是一台万能的热轧机，可生产各种铝合金板带机，它是中国铝产业的一台功勋热轧机，1956 年投产，在苏联帮助下建设的。在西南铝业（集团）有限责任公司的 2800mm 热轧机（1970-1-1 投产）投产前，它是中国唯一的一台现代化大型热轧机，中国国防军工所需的全部铝合金板材与约 70%的民用铝合金板材都出自该轧机；一条 2100mm（1+1）式热粗-精轧生产线，2012 年投产，从奥地利钢铁联合公司引进；1 条 3950mm 四辊热轧机，专业轧制铝合金厚板，2012 年投产，从德国西马克引进。

南南铝加工有限公司的 4100mm 与 3100 热粗-精轧生产线，2013 年投产，轧机开口度 800mm，全世界仅有 3 台粗轧机的开口度可达 800mm，比美国达文波特轧制厂的 5588mm 粗轧机的开口度（660mm）还大 21.2%。所有主导设备与关键零部件都是从西马克公司引进的,有 100MN 及 30MN 的拉伸机各 1 台。

爱励铝业（镇江）铝业有限公司的 4100mm 厚板专业生产线，是爱励国际的独资企业，2012 年 12 月 21 日生产出了第

一块铝合金厚板，分两期建设，一期厚板生产能力 50kt/a，投资 3 亿美元，是外商在中国单一铝业项目投资最多的。该厂是按照德国科布伦茨铝业公司的模式建设的。二期计划将生产能力扩大到 200kt/a，除生产航空航天铝合金板带外，还将生产 ABS 板，成为爱励国际最大的铝板带轧制厂。

生产航空航天铝合金厚板的技术门坎相当高，不是有了成套的先进设备就可以向世界知名的航空器制造企业批量提供板材的，必须经过认证与考核，通常从第一块厚板下线到批量提供材料需要经过 18~24 个月。目前，航空工业制造大飞机如 A380 型客机机翼厚板的最大长度为 36m，即使再过 20 年，恐怕也不会超过 40m，宽度不会大于 3.5m；中国 C919 大飞机需要的厚板最大长度为 16m。

航空航天厚板企业最关键的是技术创新与研发能力的强弱，必须有随着航空器的更新换代（一般为 7、8 年）提供一代又一代的新型合金材料。

2013 年，中国在建的铝厚板项目有 9 家，总生产能力约 700kt/a，其中最主要的是南山铝业的 200kt/a，其中厚板 80kt/a，薄板带 120kt/a，投资约 50 亿元，二期产能扩大到 300kt/a，投资约 30 亿元。这是一条 1（5600mm）+1（4100mm）+5（3000mm）式硬合金板带专业轧制线，一期建设 1（4100mm）+5（3000mm）生产线，是全球最大的硬合金专业热轧生产线。

天津忠旺铝业有限公司的 4500mm 热粗轧机+3200mm 热中

轧机+3200mm 三机架热精轧机列一条，是从德国西马克公司引进的。此外，该公司还有横切机组 1 台，切边锯 1 台，精密锯切机 4 台，板材时效-退火炉 8 台，板材时效炉 2 台，水浸式超声波探伤线 2 条，电导率仪 1 台，轧辊磨床 4 台，抛光机 2 台，卷材立体化智能管理系统 1 套。辊底式固溶处理-淬火线 4 条。预拉伸机 2 台，可拉 2XXX、5XXX、6XXX 及 7XXX 系合金厚板。

义煤集团河南同人铝业有限公司的厚板车间有 1(4500mm)热粗轧机+1(3300mm)热精轧生产线 1 条,生产能力 100kt/a，其中厚板 50kt/a，供冷轧用的带卷 50kt/a。

热粗轧机的最大开口度 850mm，是世界上开口度最大的热轧机，可轧锭的最大厚度 830mm，可生产厚板的最大尺寸为：250mm（厚）×4200mm（宽）×36m（长），变形率可达 70%。配备有 1 台辊底式厚板固溶处理炉,可处理厚 6~250mm、宽 1000~4350mm、长 6000~37000mm 的板材，宽度＞2100mm 的板单片通过，宽度≤2100mm 的可双片或 3 片并行通过。

此外，在建及拟建的项目：内蒙古霍林郭勒鸿鑫公司、百色新山铝产业示范园区、霍林郭勒锦联铝业有限公司、云南鹤庆铝板带项目、云南涌鑫及泽鑫铝板带公司、宁夏佳盛远达新材料有限公司、创新集团通辽硬质铝合金项目等都有厚板板块，它们的厚板生产能力可达 450kt/a。到 2015 年，如果这些厚板生产能力如期建成，那么中国铝合金厚板的总

生产能力将达到 1200kt/a，为世界总需求的 3 倍有余，这是匪夷所思的数字。

铸造厚板生产线

当前，生产铝合金厚板的工艺有两种：铸锭热轧与铸造。由于热轧厚板的最大厚度受热轧机开口度的限制，时下全球可生产的热轧板厚度一般不超过 250mm，中国可生产厚 250mm 的热轧板的轧机就有 2 台，全世界仅 3 台。2015 年，中国专业生产热轧铝合金板的生产能力可超过 80 万吨/年，是可以满足全世界的需求还绰绰有余，所以在建热轧项目宜慎之又慎。

厚度大于 250mm 的厚板只能用铸造法生产，而这种厚板在制造业中有着广泛的应用，是制造模具必不可少的材料，今后 20 年是中国制造业大发展时期，对厚度大于 250mm 的厚板需求量大，而目前尚无这样的专业生产企业，笔者认为在今后 5 年内应建设 2 个阿利马克斯公司这样的铝合金厚板铸造企业，这也是中国成为铝业强国标志之一。目前全世界可铸造的铝合金板的最大厚度为 1200mm，这种特厚板多用于制造汽车模具。

德国的阿利梅克斯公司位于威廉施市，是一家专门生产精密铝合金铸造厚板的企业，总部在德国，在美国、英国与荷兰设有分公司，在中国上海设有贸易办事处。公司成立于

1971 年，经过 40 多年的发展壮大，已成为全世界规模最大、技术力量雄厚的铝合金铸造厚板生产企业，在世界各地还有一些厚板经销处或代理销售网点。

冷轧板带生产线

2013 年，中国铝带的冷轧生产能力约 12500kt/a，比上年度上升约 19.1%，产量约 9200kt/a，同比上升 12%，产能利用率约 73.6%。出口铝板带约 1564kt，进口 350kt，净出口约 1214kt，是全世界最大的净出口国。

投产的主要项目

2013 年投产的主要冷轧带卷有 19 项，总生产能力约 2370kt/a，比上年度的约少 7.5%。

宁夏锦宁巨科新材料股份有限公司的 2 台 1850mm 四辊不可逆式冷轧机，中国第二重型机器集团有限公司制造，带卷生产能力 80kt/a。

广西柳州银海铝业股份有限公司位于阳和工业新区，占地 34×104 m2，总投资 43 亿元，板带生产能力 350kt/a，有中国二重提供 2300mm 及 2800mm 的四辊不可逆式铝带冷轧机各 2 台，已于 2013 年 12 月全部投产。

魏桥铝电有限公司轧制板带项目已全面投产，有 1 条 2400mm 热连轧生产线、1 条 2300mm 三机架冷连扎生产线、2 台 2300mm 单机架 CVCRplus 6 辊冷轧机，总生产能力 533kt/a，

甚至可达到650kt/a，所有关键设备从西马克公司引进，是迄今全世界投产的最先进的这类生产线。

海鑫新材料有限公司位于山东省威海市，是一家PS与CTP版铝基板带专业企业，由魏桥铝电有限公司提供热轧带卷，印刷带材生产能力150kt/a，有从德阿申巴赫引进的1850mm及2300mm四辊不可逆式冷轧机各1台，有从德国蓓威格公司引进的纯拉伸带材矫直拉平线，装机水平世界一流，是全球这类企业中最大的，港商独资。

太原东铝铝材有限公司，一期2012年已投产，形成50kt/a产能，2013年形成100kt/a生产能力。

银邦铝业公司扩建的150kt/a冷轧带卷产能，4000mm单机架双卷取热轧机及配套的冷轧设备，中国二重提供。

丹江铝业有限责任公司丹发铝材有限公司50kt/a铝箔带坯，有4条2200mm双辊式连续铸轧机生产线，1台2100mm6辊不可逆冷轧机。

贵州中铝铝业有限公司150kt/a铸坯项目，分3期建设，一期7条双辊式连续铸轧机生产线，1条6辊式冷轧机，专业生产铝箔带坯，最大宽度2600mm，是全世界最宽的。

南南铝加工有限公司的114kt/a生产能力，有1台2800mmCVCRplus 6冷轧机，不但是中国投产的也是全球已投产唯一的一台最大的这类冷轧机，也是唯一的可轧硬合金的这类冷轧机。

其他冷轧项目 11 个，总生产能力 850kt/a。

在建的铝带冷轧项目

2013 年，中国在建的铝合金板带冷轧项目有 18 个，其中仅生产能力 3000kt/a 就有 2 个，总生产能力在 12000kt/a 以上，可于 2018 年以前陆续投产，实令人咋舌不已。

在建的主要冷轧带材项目有：忠旺武清铝业有限公司，生产能力 3000kt/a，2018 年以前建成。硬合金板带车间有国产 3800mm 块片式冷轧机 1 台，最大轧制速度 80m/min。双机架 2300mm 冷连扎生产线 2 条，从西马克公司引进，可轧软合金。每个软合金车间有 4 台单机架冷轧机，都用于冷轧 1XXX、3XXX、5XXX 及部分 8XXX 系合金，可轧带材宽度为 950~2150mm，最大轧制速度 1500m/min，带卷最大质量 30.3 吨，其中有 1 台的来料最大厚度 10mm，出料最薄厚度 0.2mm，另 3 台可轧来料最大厚度 4mm，出料的最薄厚度 0.1mm。

同人铝业有限公司一期 300kt/a 板带项目已于 2013 年 2 月开工，硬合金生产线生产能力 100kt/a，软合金线生产能力 200kt/a（罐体料 70kt/a、罐盖料 40kt/a、CTP 版铝基带材 50kt/a、铝箔带坯 40kt/a）。有引进的 2 台不可逆式 2300mm 冷轧机，用于轧制宽 1000~2150mm 的带材（1XXX、3XXX、5XXX 及部分 8XXX 系合金），带卷内径（不带套筒）610mm，带套筒时 665mm，带卷最大外径 2750mm，带卷最大质量（不含套筒的）31 吨。

南山铝业一期200kt/a项目，其中厚板生产能力80kt/a，冷轧薄板生产能力120kt/a，二期将生产能力扩大到300kt/a，设备总投资80亿元，计划2014年建成投产。

中孚实业股份有限公司特铝冷轧工程于今年全面开工建设，2014年投产，有从西马克公司引进的CVCRplus 6单机架冷轧机2台，双机架冷连扎机列一条，2300mm（1+4）式热连轧线已于2012年12月成功地轧出了1300mm宽、厚6mm的热轧卷。此项目全部建成后，无疑处于国际先进水平之列，但在研发与管理方面还与国际先进水平有一些差距。

瑞丰铝板有限公司在建300kt/a板带项目，热轧项目已于2013年建成，现正在建设冷轧车间，有6辊不可逆式冷轧机1台，产品最小厚度0.2mm，双机架4辊冷连扎生产线1条，用于轧制软合金带材，总投资48亿元，2014年投产。

世捷铝业有限公司位于吉林辽源市，总投资30亿元，专业生产航空、航天器、船舶等铝板带，其中厚板及蒙皮板80kt/a、冷轧板带120kt/a，由北京维宝世捷投资公司投资。2011年4月23日开工建设。

河南永登铝业有限公司总投资8亿元，软合金板带设计生产能力200kt/a。

锦联铝材有限公司位于内蒙古霍林郭勒市，在建与拟建铝平扎产品生产能力可达3000kt/a，各项建设工作正在稳步向前推进。总投资超过1000亿元，除3000kt/a板、带、箔

项目外，还有 568×104kW 自备电厂、2000kt/a 铝精深加工项目以及 550kt/a 原铝厂、水务公司、炭素厂、专用铁路、海运码头等，计划到 2018 年全部建成。

1.9.18 铝加工业风云回眸之平轧铝

平版印刷铝基板

平版印刷铝基板有 PS 版用的与 CTP 版用的，2013 年中国可生产这两种高级铝板带的企业有 13 家，总生产能力 880kt/a，在建的企业有 10 家，总生产能力 570kt/a，2013 年中国印刷版基用铝板带销售量约 460kt，其中 PS 版用的约占 62%，CTP 版用的约占 38%。

根据中国标准 YST421-2007，印刷版基铝板带用的合金为 1050、1052、1060、1070，材料状态为 H16 或 H18，厚度 0.13~0.5mm，宽度 500~1600mm，长度 500~2000mm。普印铝板基还可以用再生的，印刷版的再生一般不能超过 2 次。

中国是一个印刷业大国，正在向现代化的有中国特色的文明国家前进，在 2025 年前，印刷品或者说印刷版基铝板带的消费量的年平均增长率可达 15%以上，2025 年的产量有可能达到 2500kt/a。

罐料

罐料是指制造易拉罐罐身用的 3104 合金薄带材，制造普

通的易拉饮料罐通常需用三种合金带材，除 3104 合金外，还有制造罐盖用的 5182 合金与拉环用的 5052 合金，生产后两种合金的难度不大，而生产各项性能极其稳定适合当代高速制罐线用的薄到 0.254mm 的 3104 合金带材却不是轻而易举的。因此，罐料被认为是当今 4 种大宗高精铝板带产品之一，另三种是航空航天板、PS 与 CTP 版基、汽车车身板。

2013 年，全世界共生产罐料约 4200kt，其中美国约占 50%，中国产量约 310kt。中国自 1986 年 10 月首条制罐线投产以来，一直是罐料净进口国。2013 年在中国罐料生产史上是具有里程碑意义的一年，不但满足了国内需求，而且还向美国出口了约 12kt。2013 年，中国可生产罐料的企业有南山轻合金有限公司、西南铝业（集团）有限责任公司、渤海铝业有限公司、亚洲铝业集团板带公司、瑞闵铝板带有限公司等，中孚实业股份有限公司、魏桥铝电板带有限公司因投产时间短，尚未形成生产力，2014 年 5 月以后即可向市场批量提供罐料带卷，中国从 2015 年起可称为继美国、韩国、德国之后，世界第四大罐料净出口国，成为罐料生产与出口大国的时日即将到来，中国生产罐料铝带卷的装备都是世界顶尖的。

2013 年，中国罐料的生产能力近 900kt/a，在建的生产能力约 3252kt/a。

汽车车身薄板（ABS）

ABS 铝合金薄板用于冲制乘人小汽车的车身钣金件，多用 6016 等热处理可强化的铝合金轧制，2013 年全世界的消费量约 350kt/a，其中中国的用量约 30kt，全部是进口的。2013 年全世界制造汽车车身钣金件用的薄钢板约 20000kt，如果在今后 15 年内有约 13 用铝合金代替，就需要铝合金薄板约 8500kt。

在 4 种大宗铝合金高精尖板带中，对中国来说，ABS 是最棘手的，生产难度最大，虽然 2009 年西南铝业（集团）有限责任公司建成了一条 ABS 生产线，但尚未见它的产品批量为宝马、奔驰、通用等汽车公司采用，用于冲制全铝乘人车钣金件的报道。

生产 ABS 的工艺可分为上游与下游两段，上游为熔铸、热轧与冷轧。下游为热处理与精整，上游工艺与生产装备与生产罐料、CTP、航空级薄板的基本相同，并无特别不同之处，可是下游工艺及装备则与它们大不相同，必须有气垫式热处理（固溶处理、水淬火、空气淬火、退火）线，与之相联（也可以是独立的）的是表面处理（碱洗、酸洗、钝化）、纯拉伸矫直、喷涂干润滑剂、剪切线等等。通常，下游装备与厂房设施的投资可达 5000~6000 元/吨。

ABS 合金除用 6016 外，还有 6960、6130、5754、5182

合金等，例如可用 5754 合金板制造内板。由于节能减排与环保意识的加强，汽车轻量化在步步跟进，ABS 成了铝板带板块市场增长最具潜力的亮点，2014~2020 年，全世界的年平均增长率有望达到 20%。

自 2008 年以后，大的跨国铝业公司特别是诺威力铝业公司、爱励铝业公司对现有的 ABS 生产线进行大规模的改扩建，已于 2013 年完成，使韩国、欧洲、北美洲及巴西的生产能力上升约 1000kt/a。

中国自 2013 年掀起了建设 ABS 生产线的浪潮，不但跨国铝业公司大举登陆中国，而且中国一些大的在建板带企业都增建专业 ABS 生产线。率先进入中国此领域的是诺威力-大韩铝业公司，其次是日本神户钢铁公司。诺贝里斯（中国）铝制品有限公司即诺威力铝业公司 2012 年 4 月落户江苏常州国家高新技术产业开发区，占地 432×104m2，投资 1 亿美元，建一个 ABS 热处理与精加工项目，生产能力 120kt/a，带卷从诺威力-大韩铝业公司运来，计划 2014 年中期投产。

神钢汽车铝材（天津）有限公司位于天津西青经济技术开发区，投资 11.5 亿元建汽车铝板深加工项目，神户钢铁公司铜铝事业部独资，所需带卷从日本真冈轧制厂运来。ABS 板生产能力 100kt/a，计划 2015 年投产。

南山铝业轻合金有限公司的 200kt/a 项目除 80kt/a 厚板外，其余的 120kt/a 为薄板，含 100kt/a 的 ABS 板。最值得

一提的是其采用了 2800mm CVCRplus 6 辊轧机生产 ABS 板，这台轧机不但是全世界最宽的这类轧机，而且在轧制 ABS 带材最后一道时，采用其表面经过放电织构处理的(EDT)轧辊，而且施加的力小，带材的变形率很小，形成非常适合于冲制车身钣金件的表面粗糙度。施加小的轧制力是通过 EBS 系统（扩展式弯辊系统）实现的。

到 2015 年，中国 ABS 企业将形成诺贝丽斯（中国）铝制品有限公司、神钢汽车铝材（天津）有限公司、国内企业三足鼎立之势，国内企业面临严峻的挑战，在中国的日资汽车企业无疑会倾向于选用神钢铝材(天津)有限公司的 ABS 板，韩系汽车企业会首选采用诺贝丽斯（中国）铝制品有限公司的产品，欧洲与美国的在华汽车企业采购诺贝丽斯的 ABS 板也具有很大的惯性。中国企业受到的压力着实不小。到 2016 年，中国的 ABS 生产能力可达 555kt/a。

2013 年，中国的 ABS 板的消费量只不过是 39kt，即使按 20%复合增长率估算，2015 年的需求量约 80kt，2020 年的需求量也只有约 2000kt。ABS 板是中国平轧产品产业有待攻克的最后一座大宗高精产品的堡垒，中国 ABS 板批量为全球主流汽车企业采用之时，就是中国成为世界铝工业强国之日。不过两家外资企业的产品不能算数，因为它们用的带卷全是境外生产的。西南铝生产的 ABS 板已于 2013 年为多家汽车企业试用，并于 1 月 16 日获得 ISOTS16949 质量管理体系认证

书，这意味着可为世界各国汽车制造商提供铝材。

1984 年以来，中国共引进了四辊与六辊单机架高技术冷轧机 37 台，其中仅西马克公司的 CVC 型冷轧机就有 21 台，占世界总台数的 75%。这 37 台单机架冷轧机的总生产能力约 3000kt/a。此外还引进了 4 条冷连轧生产线：1720mm 5 冷连轧线 1 条，2000mm 双冷连轧线 1 条，2300mm 级的 CVCRplus 6 型 3 机架冷连轧线 2 条；它们的总生产能力约 1200kt/a。这些引进的冷轧机的装机水平都达到国际先进水平，总生产能力约 4200kt/a，占全国总产能的 33.6%。

2013 年底，中国有约 250 台辊面宽度≥120mm 的单机架，4 辊国际一般水平的冷轧机约 230 台，它们的总生产能力约 6540kt/a，占总生产能力的 52.3%。其他小型（辊面宽度＜120mm）冷轧机的铝带生产能力约 1760kt/a，占总生产能力的 14.1%，结构相当合理。

铝箔

中国已成为世界铝箔初级强国与头号大国，净出口国，国民经济各产业所需要的种种铝箔都能生产，当然有个别产品的产量还不能满足需求，如高压阳极电子箔、锂离子电池箔等还需要进口一些，中国拥有世界上最多的先进的 2000mm 级箔轧机。

2013 年，中国铝箔生产能力约 3400kt/a，同比上升 6%，

产量约 2800kt，同比上升 11.6%产能利用率 82.4%，在当前的国际经济形势下这是很不错的，居世界前列。2013 年 1~10 月中国出口铝箔 521.194kt，估计全年的出口量为 630kt，比上年度的约 650kt 下降 3%；进口铝箔 34.068kt，估计全年的进口量约 41kt，比上年度的约 60kt 下降了 31.7%。这说明中国铝箔产业的实力又有所增强。

在中国铝箔消费结构中，家用铝箔的消费量还相当低，比欧洲与北美洲的小得多，这一方面是由于生活习惯有所差异，另一方面主要是由于生活水平低，铝箔价格比保鲜膜高不少。所以人们使用铝箔较少。

2013 年在中国生产的铝箔中，用双辊式连续铸轧带坯轧制的约占 85.5%，比上年度的提高约 1 个百分点，因为空调箔的产量有较大提升，中国以铸轧带坯生产铝箔的技术与工艺居世界领先水平。

投产的主要项目

2013 年投产的主要项目有 7 个，总生产能力约 600kt/a，主要建成的项目有：河南顺邦高科有限公司的 50kt/a 箔材项目，有 8 台直径 850mm×1750mm 铸轧机，4 台 1850mm 冷轧机，9 台 1850mm 箔轧机；银源铝合金有限责任公司的 40kt/a 双零箔项目，投资 10 亿元；常铝北方铝业有限责任公司一期 150kt/a 空调箔项目，2000mm 铸轧机 14 台、1600mm 铸轧机 4 台，箔轧机 6 台；龙鼎铝业公司的 100kt/a 项目；其他公司

的 240kt/a。

在建的主要项目

2013 年在建的铝箔项目 11 个，总产能 1200kt/a，主要的生产企业是：龙鼎铝业三期，生产能力 150kt/a；南山轻合金公司铝箔扩建项目 40kt/a，引进 4 台阿申巴赫公司 2000mm 轧机；宁夏佳盛远达铝镁新材料有限公司 120kt/a；万基控股集团有限公司 40kt/a；天津忠旺铝业有限公司 200kt/a；其他的 650kt/a。

中国铝箔企业十强

2013 年 9 月 30 日，中国有色金属加工工业协会公布了“中国铝箔企业十强”评选结果，入围企业有：厦门厦顺铝箔有限公司、江苏常铝铝业股份有限公司、镇江鼎胜铝业股份有限公司、华北铝业有限公司、烟台东海铝箔有限公司、山东鲁丰铝箔股份有限公司、云南浩鑫铝箔有限公司、河南明泰铝业股份有限公司、昆山铝业有限公司、大亚科技股份有限公司丹阳铝业分公司。

这是中国有色金属加工工业协会自 2005 年之后第二次评选中国铝箔企业十强。

中国铝板带材十强企业

2013 年 9 月 30 日，中国有色金属加工工业协会公布了“中国铝板带材 10 强企业”名单，入围的企业：西南铝业（集团）有限责任公司、龙口南山铝压延新材料有限公司，中铝瑞闵铝板带有限公司、河南明泰铝业股份有限公司、厦门厦顺铝箔有限公司、河南省淅川铝业（集团）有限公司、永杰新材料股份有限公司、华北铝业有限公司、山东鲁丰铝箔股份有限公司、亚洲铝业（中国）有限公司。这是中国有色金属加工工业协会自 2005 年之后第二次评选中国铝板带材 10 强企业。

中国铝合金首次走向国际航空器市场

2013 年 4 月 15 日，中国铝业公司旗下的西南铝业（集团）有限责任公司与法国赛峰集团签订了航空铝合金板材订单，获得了该集团航空铝合金板材生产授权许可证，成为国内首家供应该集团航空铝合金板材生产企业，实现了中国铝合金板材在国际航空市场上零的突破。既然已经迈出了第一步，那么迈出更大的第二步第三步的日子也就不远了，中国铝材进入波音公司与空客公司飞机制造厂的时日也就指日可待了。

赛峰集团是世界领先的跨国集团之一，世界 500 强集团之一，在干线喷气发动机、起落架、机轮及飞机布线领域的

研发与生产方面居世界领先地位。这次在中国采购的铝合金板材将用于制造直升机发动机外壳与飞机短舱。

1.9.19 铝加工业风云回眸

挤压材篇

2013 年，中国挤压材的生产能力约 14500kt/a，仅比上年度上升 3.6%，虽然新投产生产能力达到 700kt/a，但由于有些企业停产，所以净增生产能力仅 500kt/a。2013 年挤压材的产量估算约 11600kt，产能利用率 80%，前 10 个月挤压材的出口量 506.751kt（海关资料），进口量 50.73kt（海关统计），所以全年估算出、进口量分别为 620kt、63kt，净出口 557kt，比上年度的 798kt 下降了 30.2%。此外，还出口了相当数量的铝门窗、框架、门槛、结构体等，所以实际出口的挤压材比上述的数值要大。

投产的主要挤压项目

2013 年投产的铝挤压项目约 26 个，总生产能力约 700kt/a，主要有：铝王铝业有限公司位于重庆市西彭，生产能力 50kt/a，总投资 2.88 亿元，分三期建设，一期投资 1.8 亿元，5 条挤压线，产能 18kt/a，2013 年 10 月投产。

固美金属有限公司铝型材项目位于福建省南安市东田镇美洋村，铝型材生产能力 52kt/a，2013 年 7 月投产。

江苏振兴铝业有限公司的 40kt/a 微通道扁管项目于

2013 年 5 月投产，这是中国生产热交换扁管的专业厂，总投资 10 亿元，专业生产汽车及家用、商用空调热交换多孔扁管，还可以生产中小尺寸的高档工业铝型材。

河南驻马店中多铝业科技有限公司于 2013 年 6 月投产，有 12 条挤压线，总投资 10 亿元，专业生产高强高韧耐蚀特型工业铝型材，供航空、航天、军工等产业用，生产能力 60kt/a。

落户江西安义工业园区的实德铝业有限公司的 40kt/a 挤压材项目一期工程 2013 年 5 月 23 日投产，一期 4 条挤压线，投资 3 亿元。二期 8 条挤压线，投资 2 亿元。

洛阳麦达斯铝业有限公司位于洛阳市伊滨区，高档轨道车辆铝型材生产能力 50kt/a，总投资 24.62 亿元，分两期建设，一期投资 14.6 亿元，建设熔铸、挤压、模具车间，2013 年 10 月投产，有 75、55、25、16、8MN 挤压机各 1 台。

江苏佳铝实业有限公司位于海门汽车产业区，分三期建设，一、二期 2013 年投产。项目总投资 35 亿元，专业生产各种工业挤压材，有 21 台国产挤压机，总生产能力 150kt/a。

铝型材生产能力 300kt/a 的广银铝业公司位于山西省永济市，投资 15 亿元，2012 年开始建设，2013 年陆续投产，建成后是山西省最大的挤压铝型材企业。

格朗吉斯铝型材（江阴）有限公司于 2011 年收购了江阴海虹有色金属有限公司后，引进 1 台 62MN 的挤压机，2013 年 10 月投产，使公司生产能力提升了 67%，达到 95kt/a。

天津豪美铝业有限公司位于天津滨海区开发区，挤压铝材生产能力100kt/a，2012年初期开工建设，2013年中期以后相继投产。

河南凤铝铝业有限公司2012年4月开始建设，挤压材生产能力300kt/a，估算总投资30亿元，位于焦作市，建成后是河南省最大的铝挤压材企业，从2013年10月相继投产。

广东新合铝业新兴有限公司位于新兴县新成工业园，2012年3月开始建设，2013年11月投产，除100kt/a铝型材外，还有50kt/a板带材，总投资15亿元。

南山铝业工业铝型材有限公司全面建成投产，生产能力220kt/a，2010年7月开工建设，总投资32.2亿元，从德国西马克集团梅尔公司引进8台世界顶尖的挤压机，其中最大的160MN，可生产宽度达1000mm的大型材，是中国一次性从梅尔公司引进挤压机最多的企业。

振兴集团上海松江生产基地投产，专业生产汽车热交换系统微通道铝合金扁管，有3条挤压线，1条32.5MN的，2条16.3MN的，生产能力10kt/a，是全世界产能最大的这类企业。32.5MN是国产的，可一次挤压8支微通道扁管，全世界仅有3台，中国有2台，另1台在格朗吉斯（苏州）铝业有限公司，是从海德鲁铝业公司在美国的一家公司搬来的。第三台32.5MN扁管加压机在德国。

四川眉山市铝硅产业园区美裕铝业有限公司二期50kt/a

型材项目建成，一期 50kt/a 产能已于 2012 年投产。该公司于 2011 年 9 月开工建设。

广西亚龙铝业有限公司 4 条挤压生产线 9 月试生产。该公司位于广西百色新山铝产业示范园区，有 8 条挤压生产线和 1 个喷涂车间，已建成 4 条挤压线，投资 3000 多万元，计划总投资 2 亿元。

在建的主要挤压项目

2013 年中国在建的铝挤压项目 50 个，总生产能力超过 1350kt/a。主要生产企业是：福建奋安铝业集团有限公司正在河南省焦作市中站区建一个年产 180kt 的新型高端铝型材项目，投资 20 亿元，计划 2015 年投产。

江苏立普集成材料有限公司的盱眙经济开发区的铝挤压材项目，生产能力 35kt/a，投资 2.5 亿元。

河北力尔铝模板科技有限公司在邯郸市广平经济开发区建一个 20×104m2/a 的铝模板项目。

在浙江湖州市长兴县建设的奥博铝业有限公司挤压材生产能力 30kt/a，总投资 2 亿元，建 6 条挤压线，2 条立式喷涂线。

宏达联合实业集团铝型材项目位于四川省宣汉县柳池工业园区，挤压材生产能力 100kt/a，总投资 11 亿元。

山东临朐华建与伟盛项目，规划挤压材生产能力 300kt/a。

华建铝业公司将投资 12 亿元，伟盛铝业有限公司计划投资 10 亿元，生产特种高端工业铝型材，拟引进 3 台 100MN 以上的大挤压机。

伟盛铝业有限公司位于山东临朐县，在建 120kt/a 的船舶铝挤压材项目，总投资 10 亿元，计划建设 15 条挤压线，最大的 100MN，多数为引进的，2014 年起陆续投产。

山东省临沂罗庄区册山镇的瑞高铝业有限公司是一家在建的大型铝材挤压企业，计划 2014 年全部投产，产品以工业材为主，建筑材为辅。

沥鑫铝业有限公司铝型材项目，由沥鑫公司与云南冶金集团共同投资建设，注册资金 2 亿元，在云南省丽江市建设一个交通铝型材生产能力 150kt/a 的项目，总投资 30.42 亿元，建设期 3 年，计划 2014 年投产。

锻造产品

自由锻件及模锻件是一类重要的受力结构零件，中国已成为世界铝锻件生产初级强国，西南铝业（集团）有限责任公司与东北轻合金有限责任公司生产的 5m 级大锻环不但满足了中国航天工业发展的需求，而且有一批批的铝合金锻件装上了波音公司的成千上万架飞机，件件合格，从未出过质量事故。

截至 2013 年，中国拥有 30~400MN 的模锻机 21 台，其中 300MN 及 400MN 级的各 1 台，并正在设计与制造世界锻压机

之王——800MN 的，再过二三年就要投产了，可锻出全球最多最大的铝、镁、钛等合金锻件。2013 年，中国铝模锻件的生产能力约 30kt（含车轮锻件）。

南山铝业 14kt 大型精密模锻件项目议案通过了 2013 年 11 月 29 日举行的董事会审议，2014 年即可开始建设，2016 年投产，将是全世界第二大铝合金锻压厂，仅次于美国铝业公司的拉斐特锻压厂。项目总投资 15 亿元以上，主导产品为航空航天、交通运输、能源、动力机械、矿山设备等所需的铝合金锻造产品。铝合金锻件的附加值高，按 2013 年的价格计算，销售价约 9.5 万元/吨。2016 年，南山铝业就是世界上产业链最为完善的铝业企业，也是生产能力最大的单一铝业企业，所有的企业——氧化铝厂、铝电解厂、轧制厂、挤压厂、锻压厂、自备发电厂、深加工厂等全部合理地分布于一块 20km×20km 的“铝业”土地上。这块 400km2 的土地上集中了中国 2015 年约 60%的罐料，12%双零箔，25%硬合金板带，40%模锻件，4%大型高端工业挤压材生产能力。

国际化经营篇

2013 年，中国铝工业走出国门步伐加快，成就斐然。

几内亚政府批准中电投 60 亿美元氧化铝项目，几内亚政府 2012 年 12 月 22 日发表声明称，已经批准中国电力投资集团公司在距离该国首都约 120km 的博法省投资 60 亿美元开发铝土矿及建设氧化铝厂。该项目预计氧化铝及铝土矿的生产

能力 4000kt/a 及 12000kt/a，还包括一个深水港和一个发电厂。该项目于 2013 年 9 月 6 日签署正式开发协议。

铝合金车轮遭印度反倾销调查，印度商工部于 2012 年 12 月 10 日发布立案公告称，应印度铝业协会的申请，将对 2011 年 7 月至 2012 年 6 月期间从中国、泰国和韩国进口的铝车轮发起反倾销调查。涉案产品为直径 12~24 英寸的汽车用铝合金车轮。

日本伊藤忠公司减持常铝股份，江苏常铝铝业股份有限公司董事会发布公告称，伊藤忠（中国）集团有限公司和伊藤忠金属公司通过深交所集中交易系统出售所持常铝股份的 986 万股及 680 万股。本次权益变动完成后，伊藤忠（中国）集团有限公司仍持有常铝股份总股本的 1.1%，伊藤忠金属仍占常铝股份总股本的 7%。

宏桥投资 10 亿美元在印尼建氧化铝厂，中国宏桥集团有限公司将与印尼威宁投资公司等建立合营公司，并在印尼建设一个生产能力 2000t/a 的氧化铝厂，合营公司总投资额 10 亿美元，宏桥集团占 60%权益。

万丰奥威公司拟在印度建摩轮项目，浙江万丰摩轮有限公司拟在印度投资成立全资子公司并投资建设年产 300 万件摩托车铝合金车轮项目，项目总投资约 3.07 亿元。

美铝在苏州建大型锻造车轮厂，美国铝业公司车轮和运输产品部于 2013 年 1 月宣布将在中国苏州建一个专门锻造大

型车轮的工厂，主要提供卡车、半挂车、公共汽车用车轮产品。此举标志着美铝车轮产品的制品、配送、销售和服务网络将在中国大陆全面展开。美国铝业公司执世界锻造车轮牛耳，它在苏州还有 2 个紧固件厂。

中信资源控股有限公司斥资 29 亿元收购澳大利亚氧化铝公司 13%股份，占全部已发行股份的 5.17%。

日本企业在苏州建全资铝合金汽车锻件厂。日本神户钢铁公司、三井物产公司与丰田贸易公司投资 25 亿日元在苏州建设一个汽车悬架系统锻件厂，它们分别占 60%、25%和 15%的股份，锻件生产能力 10kt/a，计划 2014 年 8 月投产，实际竣工时期为 2013 年 11 月 6 日。

欧盟对中国铝箔做出反倾销终裁，欧委会于 3 月 12 日发表公告称，对中国输欧铝箔卷反倾销调查做出终裁，涉案海关税号为 ex76071111、ex76071910，税率为 14.2%~35.6%，至今，尚无任何一家企业获得市场经济地位。

哥伦比亚对中国铝材发起反倾销调查，2013 年 3 月 11 日，哥伦比亚贸易工商部外贸司照会中国驻哥大使馆，决定对产于中国和委内瑞拉的挤压材（涉案税号：7064.21.00.00,7064.29.10.00,7604.29.20.00,7608.20.00.00）进行反倾销调查，并请中方生产商和出口商填写相关调查问卷。

中铝和俄铝签署谅解备忘录，中国铝业股份有限公司与

俄罗斯联合铝业公司于2013年3月24日签署了谅解备忘录，双方就未来铝工业新技术研发、铝土矿资源开发和水电铝联营投资等方面达成合作意向。

南山铝业拟在新加坡设立合资投资控股公司，南山铝业的全资子公司——南山铝业新加坡有限公司拟与红石铝业国际有限公司共同出资 200 万美元设立环球铝业国际有限公司，南山铝业新加坡有限公司占79%股权。新成立的公司是一家投资控股公司，主要投资新加坡、印度尼西亚或其他国家与铝产品生产或市场营销相关的企业，以加快公司在东南亚市场的拓展。

澳大利亚铝土矿公司与信发集团达成铝土矿开发协议，2013年4月，澳大利亚铝土矿公司已就塔斯马尼亚铝土矿区和古尔本南铝土矿区的开发与山东信发集团达成一项初期协议。按协议，信发集团应为一项为期5个月的独家调查支付有关费用，调查完成后，将签订一份合作备忘录，并另投资200万澳元，购得5.8%的澳大利亚铝土矿公司股份。塔斯马尼亚项目可于2014年下半年出矿，信发集团有权获得该项目出产的至少50%的铝土矿。

闽发铝业应诉哥伦比亚反倾销调查，闽发铝业股份有限公司于2013年4月9日发表公告称，公司决定对哥伦比亚的铝挤压材的反倾销调查应诉，成立了应对反倾销工作小组，聘请了专业律师处理相关法律事务。

南山铝业向美国子公司再投资 3.5 亿元，山东南山铝业股份有限公司对其在美国的全资子公司——南山美国先进技术有限责任公司追加投资 5620 万美元，用于其建设高端铝合金型材厂二期工程项目。该公司是中国铝加工业在国外建设的首家企业，位于拉斐特市，成立于 2011 年。追加的投资用于扩大挤压用圆锭的生产能力。

德国 ALBA 公司和中国天奇合作扩展至再生金属，德国回收金属公司 ALBA 集团和江苏天奇物流系统工程公司于 2013 年 6 月初同意将业务合作关系扩展至回收领域。它们于 2012 年 8 月在安徽铜陵成立了汽车废铝回收工厂，在新的合作中，两公司业务范围将扩大到多种有色金属。

澳大利亚延期发布对华铝型材反倾销新出口商复审终裁，澳大利亚反倾销委员会 2013 年 10 月 31 日发布公告称，已完成对原产于中国的铝型材的反倾销新出口商复审调查，并于 2013 年 9 月 23 日将终裁报告和建议提交工业部长，但将延期发布对华铝型材反倾销新出口商复审终裁。2013 年 7 月 2 日，澳大利亚反倾销委员会应广东金协成铝业有限公司申请，对原产于中国的铝型材进行反倾销新出口商复审调查。

中国商飞公司与美铝签订紧固件战略合作协议，美国铝业公司与中国商用飞机有限责任公司于 2013 年 10 月就紧固件技术与商业活动方面签署战略合作协议。主要内容是美国铝业公司向中国商飞公司提供有关紧固件方面的工程技术、

设计与人员培训领域的软件，而中国商飞公司将向美国铝业公司采购制造大飞机用的大部分紧固件。

中国向 WTO 起诉美国铝挤压材反倾销措施，2013 年 12 月 3 日，中国商务部宣布，中国正式通过世界贸易组织争端解决机制起诉美国过去数年间对中国发起的包括铝挤压材产品在内的 13 起反倾销措施。美国在有关反倾销调查和复审中，存在不当适用目标倾销方法、拒绝给予企业单独税率、不当适用不利事实推定等一系列与世贸规则不符的做法，错误认定中国产品存在倾销，严重夸大中国产品倾销幅度。

哥伦比亚对中国铝挤压材征收最终反倾销税，哥伦比亚贸工部决定从 2013 年 11 月 13 日起对原产于中国的铝挤压材征收为期 3 年的最终反倾销税，但用于供水和供气网络建设的 PE-AL-PE 和 PEX-AL-PEX 铝塑管不在反倾销税征收范围之列。

萨帕更名格朗吉斯，2013 年 11 月 26 日，萨帕铝热传输（上海）有限公司宣布更名为格朗吉斯铝业（上海）有限公司，继续聚焦铝热传输业务。该公司 2013 年的生产能力已超过 120kt/a，2011 年该公司还在上海成立了技术中心。2013 年全球一半汽车都含有格朗吉斯的热传输铝材，在全球汽车热交换器轧制铝材市场中，格朗吉斯产品约占 20%。

中铝萨帕特种铝型材（重庆）有限公司投产，该公司于 2011 年 4 月 8 日在北京签约组建，经过近 2 年的建设，于 2013

年 11 月 28 日举行了投产启动仪式。该公司轨道交通特种铝型材及车体模块生产能力 20kt/a，是一家集铝合金研发、挤压和车体模块加工为一体的企业。该公司以全球领先的铝合金挤压、焊接、深加工技术、高端轨道交通车体材料生产及深加工解决方案，赢得了国内外知名企业和市场的认可，成为国家都市快轨示范项目的成员单位，被确定为重庆市都市快轨车辆铝合金材料和大部件的定点供应企业。

加铝电缆在天津设立全球研发中心，加拿大铝业电缆公司于 2013 年 8 月 6 日在天津滨海新区宣称，将在天津设立全球第二个研发中心，以借助天津的人才优势，与相关科研院所、各大院校展开合作，进而在铝合金产品制造和技术研发上取得更大的收获。

丛林铝船与挪威深蓝签订铝船项目合作协议，2013 年 7 月，丛林铝船有限公司与挪威深蓝船舶管理有限公司签订铝船合作协议，双方将开发挪威、冰岛、加拿大、苏格兰、智利等国家渔业养殖行业所需的高附加值铝合金工作船。项目初期以挪威市场所需的 15m 铝合金双体渔场服务船为主。

南山铝业计划在印尼建铝业综合项目。南山铝业股份有限公司于 2013 年 10 月决定，将投资 50 亿美元，在印尼建设一个综合铝项目，将在 3 年内建成，利用当地铝土矿提取氧化铝与原铝。项目包括一个生产能力为 2100kt/a 的氧化铝厂于一座 530kt/a 的电解铝厂，产品以出口为主。

萨帕管业科技（上海）有限公司开业。2013 年 10 月 28 日，位于上海市嘉定区的萨帕管业科技（上海）有限公司举行了开业仪式，公司产品为热交换铝管。

再生铝篇

泗阳 100kt/a 再生铝项目奠基

上海古山有色金属有限公司投资 3.6 亿元在江苏泗阳经济技术开发区建一个生产能力为 100kt/a 的项目于 2013 年 1 月 15 日举行了奠基仪式，名为江苏海光有色金属公司，计划年底投产。古山有色金属有限公司是中国知名的再生铝企业，在上海、浙江、福建、马来西亚都有分公司。

新格金属公司再生铝产量达 450kt/a

上海新格金属有限公司是台商独资企业，中国最大的再生铝企业，目前产量已达 450kt/a 以上，比上年度升高 18%，产量的上升是由于进行了较大规模的扩建，例如将现有的 6 台熔炼炉的容量从 55 吨扩大到 100 吨，另外，还增加了 1 台新的破碎机与 1 台新的液体分选机。

新应用篇

2013 年，中国铝加工产业在技术与推广铝应用方面取得了多项有重大意义的成就，其主要表现在：

晟通首批 10.5m 全铝半挂车上路。继丛林铝业公司生产的中国首批铝合金半挂车于 2011 年交付使用以来，推广铝在

半挂车的应用领域捷报频传。2013 年 5 月，晟通天力汽车有限公司首批 12 辆 10.5m 顶开轻量化铝合金厢式运输半挂车成功交付，标志着天力汽车有限公司在半挂车铝化方面又前进了一大步。这些半挂车的铝化率高、结构优、质量轻、寿命长，节能减排效果显着，同时货物装卸安全快捷。目前，天力汽车公司已推出铝化率高的厢式运输半挂车，仓栅式及栏板式运输半挂车、民爆车等。其中，铝合金厢式运输半挂车车体铝化率 90%，比同类钢制车的轻 30%，以上，节油超过 10%，且可选装移动顶棚，便于货物装卸。

首条绞合碳纤维芯铝绞线挂网运行。2013 年 7 月 3 日，220kV 海南福丰 1 线试送电成功，标志着中国首条绞合碳纤维芯铝绞线成功挂网运行。这种绞合碳纤维芯软型铝绞线首次用作架空线具有重要的科学价值。这是一种倍容量导线，采用绞合型碳纤维线芯（CFCC），与目前应用较多的棒形碳纤维芯（ACCC）相比，除具有碳纤维芯轻质、高强的共性外，还具有更好的柔软性，抗侧压性和结构安全性；其外层铝导线为电导率 63%IACS 的软型铝绞线，导线整体具有优越的弧垂性能和耐高温性能。

福禄好富公司交付全新全铝运烟车。山东丛林铝业集团福禄好富汽车有限公司生产的 19 辆新款全铝运烟车从 2013 年 10 月 10 日起陆续交付客户，这是去年与云南红云红河集团签约购买全铝运烟车之后的第二次合作。新款全铝运烟车

全长 14.6m，自身质量仅 8.25 吨，内部容积 110m3，标准载重量 29.8 吨。

铝合金海上钻井平台、直升机停机坪落户忠旺。2013 年 12 月，墨西哥埃夫雅公司（EVYA）与辽宁忠旺集团就制作海上钻进平台、直升机停机坪等领域用铝型材方面进行合作达成了初步合作意向。埃夫雅公司是一家墨西哥全资企业，成立于 1991 年，主要为土木、机械、电器、石油设备等提供设计、施工和建设服务，并先后完成了高速公路、海上钻井平台、直升机停机坪等多项工程。

1.9.20 2015，中国铝工业新常态的头一年

关键词:弹性生产 产能合作 氧化铝 电解铝 铝加工

2015 年是中国铝工业新常态的头一年，也是中国铝工业发展最艰难的一年，这一年在宏观经济增速放缓和产能过剩的双重压力下，中国铝工业经历了铝价 20 年新低的洗礼，遭遇了全行业亏损的困境，然而在困难面前，中国铝工业毅然前行，在能源瓶颈和技术工艺等方面攻坚克难，创造了一个又一个奇迹。站在 2016 年的起点，愿我们能借着“一带一路”的东风，披荆斩棘，勇于创新，走出一条铝工业的国际星光大道，早日迎来行业的春天！

中国铝加工工业始建于1919年9月，在上海创建益泰信记铝器厂，使用二辊小轧机轧制小铝片，成为中国第一家铝加工厂。新中国成立后特别自改革开放以来，中国铝工业取得了前所未有的成就。正如中国有色金属学会会长康义所说，中国铝工业经历了由小到大、由弱到强、由落后到先进的历史性跨越，实现了从计划经济体制到社会主义市场经济的转变；从封闭、半封闭经济到全方位改革开放改变；从产品短缺到产量、消费量全球第一的转变；从主要技术依赖进口到部分产品出口和电解铝技术输出国外的转变。

2015年中国氧化铝保有生产能力约70500kt/a，开工率约88%，全年产量约62040kt。据北京安泰科信息开发有限公司的数据，2015年1月~11月原铝产量28420kt，估计全年产量为30920kt，但是笔者认为，由于个别企业未能如实填报产量，所以2015年中国的实际原铝产量应当为32000kt。2015年中国保有的原铝生产能力当超过38500kt/a。

2015年中国铝加工材的实际产量约30000kt/a，产能约42000kt，产能利用率70%。

2015年，中国平轧铝产品产量10700kt，比上年度提高8.5%，生产能力约11600kt；挤压材产量19300kt（管、棒、型、线材），生产能力28400kt，产能利用率约68%；锻造产品产量约55000kt，生产能力约8000kt，产能利用率67%。

据安泰科信息公司信息，2015年氧化铝进口量5160kt，

电解铝进出口量很少，约 160kt,出口约 30kt；净进口铝合金 520kt；2015 年 6 月以来中国铝材出口步步回落，据海关统计，1 月~10 月铝材累计出口 3410kt，同比增长 20.7%，估计全年出口可达 4100kt，1 月~10 月铝材累计进口量 395kt，同比下降 4%，预计全年进口量可超过 480kt，中国是铝材出口大国，出口量几乎是进口量的 10 倍，而且这种趋势会越来越大，今天出口的是中低档产品，明天会出口更多的中、高档产品。

中国不但是一个原铝与氧化铝、铝材生产大国，而且在某些领域已成为一个初级强国，中国不但有 600kA 的特大电解槽，而且 200kA 以下的电解槽在华夏大地上也已销声匿迹，如果再在电流效率与环保方面等再上一层楼就是一个一流的强国了，不过也是指日可待了，赤泥处理方面还有一段较长的路要走。

原铝与氧化铝篇

2015 年，中国氧化铝生产能力约 66900kt/a，产能利用率 80%。中国原铝产量约 32000kt，保有生产能力超过 38500kt/a，产能利用率 83%，经过新世纪以来的高速发展，现已进入新常态、调结构、促升级，由量的快速的扩张到质的提升阶段，面临产能过剩、消费增长乏力、库存上升。截至 11 月 24 日上海期货交易所收盘三月期铝价格最低达 9620

元/t，为近 20 年来最低价，同期上海长江现货铝锭价最低位为 9710 元/t。11 月份中国原铝行业平均含税完全成本约 12000 元/t，平均含税现金成本约 10300 元/t，也就是说，在现有铝价条件，没有一家盈利的，并且大部分企业现金亏损，这在世界大国铝工业史上也是头一次，即使在上世纪三十年代初美国经济大萧条时铝电解业也没有惨到这种程度。

根据北京安泰科信息开发有限公司的数据，截至 2015 年 1 月~11 月底，停产与实行弹性生产原铝企业共 44 家，总生产能力 3540kt/a，按照目前的市场态势，预计到 2015 年底，关停的产能有可能达到 5000kt/a，约占全国总产能的 13%。没有市场竞争力的铝厂都应逐年停产一些，应逐步到外国建铝厂，更不宜大规模进口氧化铝与铝土矿，进口 4t 多铝土矿才能提取 1t 原铝，而提取 1t 原铝需消耗综合交流电 14500kWh，排放约 8.56tCO2。当然到国外去办铝厂并非易事，但再难也得办，为什么日本、韩国能做到呢？欧美有些国家也能做到呢？更多的原铝厂停产与弹性生产是好事并非坏事，亏损生产是浪费资源、能源与排放污染。

预计在未来一段时期，还有更多原铝企业实施弹性生产，与此同时，目前部分投产和新建投产项目也可能在未来一段时间内放慢前进步伐。

下面是 2015 年有关氧化铝和电解铝行业主要的信息动态：

宏桥－印尼氧化铝厂投产。中国山东宏桥-印尼氧化厂可于 2015 年第四季度投产，生产能力 3000kt/a，投产 10 亿美元，现在投产的是一期工程，全部由中国设计制造，这是迄今为止中国在境外拥有的最大铝工业项目。

工信部为电解铝等摘帽正名。在工业和信息化部 2015 上半年工业通信业发展情况的新闻发布上，提出为电解铝等行正名，过去像钢铁、水泥、电解铝等是高能耗、高污染的行业，但现在这些行业都转成了节能环保的行业，已经是优势产能。

2015 年停产与弹性停产的原铝产能约 5000kt/a。总生产能力约 42000kt/a。

贵州华锦铝业有限公司 1600kt/a 氧化铝项目一期投产，生产能力 800kt/a，于 2015 年 4 月 29 日投产，二期于 8 月份投产。该项目是杭州锦江集团与中国铝业公司的合资企业。

云铝昭通 700kt/a 电解铝项目总投产 60 亿元，计划 2015 年 10 月开工，2017 年 10 月投产。

2015 年 10 月 24 日有着近 80 年历史的抚顺铝厂全部停产。它是中国第一个原铝厂，被誉为中国铝、镁、钛地摇篮，为中国铝工业的发展作出了永载铝工业史册的贡献。

锦华高铝粉煤灰项目在加速推进。锦华集团利用高铝粉煤灰提取氧化铝项目已全面复工（贵州），1#焙烧炉于 2015 年 5 月 21 日一次投料成功，产出了合格的成品氧化质铝。

全球首条全系列 600kA 电解槽再魏桥铝电运行成功。于 2016 年 6 月 5 日通过专家组的现场评审，一致认为具有产能高、投产省、排放低、效率高等特点，主要技术经济指标达到了国际先进水平。

新疆其亚铝电 800kt/a 电解铝项目 2015 年投产。

中铝拟在崇左建 800kt/a 氧化铝厂，计划投资 26 亿元，建成后生产能力：铝土矿 2580kt/a，冶金级氧化铝 800kt/a，铁精矿 457kt/a，营业收入 18 亿元/a，利税总额 3.18 亿元/a。

平轧铝产品篇

2015 年中国的平轧铝项目主要有：

爱励铝业（镇江）公司二期 80kt/a ABS 项目按计划加紧建设。总投资 5 亿美元，是外商在中国投资最多的单一铝加工项目，可于 2016 年后期或 2017 年初投产。另外，爱励国际投资 8000 万美元在镇江建一个研发中心，已完成审批手续。

南山轻合金（1+5）式热连轧生产线可于近期投产。有一条 ABS（汽车车身薄板）生产线，由固溶处理线、T4P（预时效处理）处理线、清洗与钝化处理线、涂油/蜡线，2800mm 轧机配备有 EDT 功能，这是世界上独一无二的。一期 ABS 生产线生产能力 100kt/a 已于去年一季度投产，将视市场情况建设二期与三期，生产能力分别为 200kt/a 与 300kt/a，从

而成为世界最大的 ABS 生产企业。

镇江鼎胜 PS 铝基板生产能力 27kt/a，钎焊板生产能力 1.2kt/a。为了提高品质与生产能力，总技改投资 1.2 亿元，可于今年 4 月份投产，届时可成为中国主要 PS 版主铝板基生产技术上乘企业之一。

山西永济在建铝深加工产业园，包括所有的铝材与深加工产品。到 2020 年，将形成高纯铝生产能力 150kt/a，铝加工材生产能力 524.5kt/a，深加工产品产量 270kt/a，深加工比例达到 40%以上。

2015 年 1 月南山铝业公司与波音飞机公司签订了航空材料通用协议。根据协议，波音公司将协助南山铝业通过航空材料产品的适航认证，通过认证后公司将竞标波音航空材料供应，材料主要用于波音商用飞机制造。年内南山铝业还与中车集团达到协议，建立战略合作关系，展开深度合作。与北京汽车股份有限公司签订战略合作协议，就铝合金汽车板材的研发生产进行合作，该公司于 2015 年 10 月生产的 ABS 的屈服强度 115N/mm2~125N/mm2，抗拉强度 260N/mm2~270N/mm2，伸长率 A50>27%ABS，6016-T4P 的屈服强度 100N/mm2~110N/mm2，抗拉强度 210N/mm2~220N/mm2，5182-0 合金的 A50≥22%板，完全满足用户要求。

山西河津铝加工产业集群引进 14 个项目。其中有关铝加工的：投资 10 亿元的西般铝业山西分公司项目正在进行生产

线扩建；投资 7 亿元的华昌铝业一号车间已经建成生产，二号、三号车间正在安装调试；投资 3 亿元的盛鑫铝业 100kt 铝深加工项目开始试运转。

南宁开工建最大全铝车身新能源汽车。2015 年 2 月 28 日中国最大的全铝新能源汽车在南宁动工开建，计划总投资 48 亿元，设计生产能力全铝车身新能源客车、常规客车 2 万辆/a,纯电动功能型专用汽车 3 万辆/a,实现年产能 82 亿元。

2015 年晟通全铝汽车可超 3000 辆。晟通汽车已成为中国最大的全铝货车之一，2015 年前 2 月，铝合金轻量化厢式半挂车和运油罐车的订单量近 300 辆，预计全部产量可超 3000 辆，其中 60%出口。

南南铝业公司 3 月 18 日轧出 2950mm 宽厚 8mm 的 2xxx 系合金热轧带卷、板凸度 0.5%~0.8%，最大道次压下率 max28%，max 轧次速度 2.7m/s，是目前国内最宽的。该公司还于 2015 年 7 月 2800mm 气垫炉生产线投产，是中国最大的最宽的这类生产线之一，可以生产 2650mm 宽的板材。

大力神（1+1）式 3300mm+2800mm 热粗-精轧生产线试产成功。该生产线可生产 max 厚度 250mm 宽 3100mm 的厚板，生产能力可达 250kt/a。

明泰铝业有限公司（1+1）式 3300mm 热粗、精生产线于 2015 年 5 月 7 日投产。该生产线投产后，明泰铝业有限公司的生产能力可达 650kt/a，从而成为中国最大的七大单一平

轧铝产品企业之一。

天津忠旺铝业公司 4500mm 热粗机的两台 7000kW 于 8 月 15 日有负荷试车成功,全生产线可于年末进行热运转试生产。11 月 24 日第 2 台 CVC 6 plus 冷轧机试生产成功。

西南铝业（集团）有限责任公司于 2015 年 7 月成功生产出了超宽超厚预拉伸 7050 合金板，是制造 C919 大飞机主结构材料之一。另外该公司研究的 6016 合金 ABS 于 2015 年 8 月进行了批量生产，是中国首家企业首次生产批量 ABS。

东北轻合金有限责任公司从意大利丹涅利公司（Danieli）引进的 80MN 厚板预拉伸机已于 2015 年 7 月 31 日投产，可位伸 8mm~250mm、长 9m~25m 的 max 宽度 3700mm 的板材。

重庆黔江区正阴正业园区 200kt/a 平轧铝产品项目 2015 年 4 月投产，占地面积 47×104m2，总投资 31.5 亿元。

华东高精铝板带有限公司，在建 400kt/a 产能；丰拓（河南）轻合金公司，一期 10 亿个/a 易拉盖项目已投产，二期在建 100 亿个/a。

挤压篇

2015 中国铝挤压材企业约 850 个,生产能力约 25000kt/a，占世界总生产能的 76%，有大大小小的挤压机 5500 台，其中最大 250MN 正在制造,225MN 的正在安装,可于 2016 年投产，有≥45MN 的挤压机 115 台，其中≥80MN 的 62 台。

2015 年中国出口铝挤压材（型材、管材、棒材、线材等）约 1240kt 左右，进口约 120kt，进口量约只有出口量 1/10。另外还出口了 780kt 铝制门窗及其框架、门槛，其他铝制结构体、铝结构体用部件及加工铝材，而进口量仅 5.845kt，出口量为进口量为 134 倍。这 780kt 相当于 632kt 挤压机。

2015 年中国在建的铝挤压项目约 30 个，总生产能力超过 750kt/a，其主要有：

福建奋安铝业在河南省焦作市中站区，建一个年产 180kt 的新型高端铝型材项目，投资 20 亿元。

河北力尔铝模板科技有限公司新建一个 20×104m2/a 的铝模板项目。

奥博铝业有限公司新建挤压材生产能力 30kt/a，总投资 2 亿元，6 条挤压线，2 条立式喷涂线。

宏达联合实业集团铝型材项目位于湖北省宣汉县柳汇工业园区，挤压材生产能力 100kt/a，总投资 11 亿元。

山东临朐华建与伟盛项目，规划挤压材生产能力 300kt/a。华建铝业公司将投资 12 亿元，伟盛铝业有限公司计划投资 10 亿元，生产特种高端工业铝型材，拟引进 3 台 100MN 以上大挤压机。

伟盛铝业有限公司位于山东临驹县，在建 120kt/a 的船舶铝挤压材项目，总投资 10 亿元，占地 3.4×104m2，计划建 15 条挤压线，最大的 100MN，多数为引进的，2014 年陆续

投产。

山东省临沂瑞高铝业有限公司是一家在建的大型铝材挤压企业，占地 8×104m2，员工 1000 名以上，2015 年全部投产，产品以工业材为主，建筑材为辅。

宏基精密铝材料有限公司位于江苏省张家港，专业生产铝扁管，生产能力 5kt/a，有 6.3MN 的挤压机 2 台，8.5MN 挤压机 1 台，12.5MN 挤压机 1 台，2015 年投产。

友升铝业山东茌平公司,投资 12 亿元,生产能力 50kt/a，专业生产汽车铝挤压材如保险杠、车顶配件等。

振兴集团上海松江生产基地投产，专业生产汽车热交换系统微通道铝合金扁管，生产能力 10kt/a，是全世界产能最大的同类企业。

忠旺铝业第一台正在安装 225MN 挤压机可于 2016 年 5 月投产，第二台也可能于年末投产，都是中国独有的挤压机之王。

西沙金属材料有限公司，位于山西省永济市铝深加工产业园区，专业生产高端工业铝型材，2015 年 12 月投产，有 10 条挤压生产线，主导产品建筑模板、高铁挤压材、航空器型材、集装箱铝型材等。

华中铝业有限公司投资 23 亿元，有 150MN 双动正向挤压机 1 台、75MN1 台、25MN 双动正反挤压机 1 台，国内 max 时效炉 1 台、国内 max 拉伸矫直机 1 台，铸造车间面积 20km2，

深加工车间 7.9×104m2，挤压车间 7.5×10 4m2，25m 立式淬火炉 1 台，铸造机可铸Φ850mm 的锭。

明泰铝业高铁铝型材公司，生产能力 20kt/a，投资 7.5 亿元，可生产 400 套轨道车体大部件，2015 年建工，2016 年投产。

天津华瑞德铜材有限公司，建在霍林郭勒，既生产铜材又生产铝材，生产能力 300kt/a，投资 6.5 亿元。

江苏亚太轻合金科技股份有限公司，高性能挤压材，生产能力 80kt/a，2016 年投产。

核兴航材（天津）有限公司是由中航工业北京航空材料研究院与中核天津机械公司合资组建的，投资 5 亿元，2014 年 8 月开工建设，计划 2016 年竣工投产，是中国当前单位产品投资最大的挤压铝材企业。

铝箔篇

中国不但是世界铝箔大国，而且从 2012 年起已是全球铝箔初级强国，2015 年铝箔生产能力约 4100kt/a，比 2014 年的 3850kt/a 上升 6.5%，增速比过去有较大下降，这是新常态的正常表现,今后只要能保持 5%的年平均增长率就很不错，但是出口会有所上升。

中国拥有世界上最多的最大的从德国阿申巴赫公司（Anchenbach）引进的 2000mm 轧机，共 43 台，其中 2000mm

级的 35 台，生产能力约 420kt/a，比世界上其他国家的总和还多 18 台，全自制的 30 台。2015 年中国的铝箔产能利用率约 65%，产量约 2665kt，几乎与上年度的持平。

空调箔在中国铝箔生产中占有相当大的比重,约为 45%，0.00635mm 包装箔占 15%左右，在这里需指出的是，绝缘包装箔即不能透过氧的包装箔在现有技术条件下不能薄于 0.006mm，否则无绝缘作用。中国现在可用双辊式轧带坯生产 0.0045mm 箔，这是制电力电容器用，世界首创。中国 65%以上的铝箔用的带坯为双辊式铸轧的或哈兹雷特制造的，这是另一特点，而国外的仅 10%左右。

2015 年中国投产的铝箔项目 4 个，生产能力 80kt/a；在建项目 23 个，生产能力 2500kt/a：

晟通铝箔项目三期 150kt/a，0.006mm 箔，总生产能力 200kt/a，成为世界最大的双零箔企业。

霍林郭勒联晟轻合金股份有限公司，总投资 12 亿元，2300mm 轧机 2 台，1350mm 轧机 2 台， 2016 年投产。

霍林郭勒锦联铝材有限公司 3000kt/a 平轧铝产品项目，其中箔材生产能力 40kt/a。

天津忠旺铝业有限公司,有 2000mm 及 1850mm 两个项目，各 3 台轧机，生产能力 100kt/a 箔，2016 年投产。

宁夏佳盛远大铝镁新材料有限公司 120kt/a 铝箔项目，正在建设。

南平铝业公司厚箔立式纵剪线投产。这条生产线可立式纵剪厚 0.05mm~0.5mm 的带材，可同时剪切 30 条，最小条宽 12mm，带宽 1000mm。

常发制冷铝箔生产线满负荷生产，生产四大系列产品：冰箱热交换器，空调热交换器，无缝光亮铜管及内螺纹精密铜管，铝板带箔，生产能力 120kt/a。

华中天力铝业公司 100kt/a 平轧铝产品项目正在加紧进行，其中 20kt/a 可于 2016 年完成。

南通日资昭和电工高纯铝箔 7.2kt/a 扩建工程 2015 年 5 月投产，原有生产能力 4.8kt/a，现在生产能力 12kt/a。

重庆黔江区正阳正业园区 200kt/a 板带箔项目中的 20kt/a 铝箔项目 2015 年 3 月投产。

华东高精铝板带有限公司，总生产能力 400kt/a，其中铝箔 100kt/a，计划 2016 年投产。

霍林郭勒忠大铝业公司，平轧铝产品 200kt/a，其中铝箔 20kt，计划 2017 年 6 月投产。

瑞祥铝业有限公司，板带箔生产能力 120kt/a，其中箔材 10kt/a，2015 年中期投产。

南山铝压延新材料有限公司,高端双零箔 40kt/a,2000mm 箔材轧机 4 台，正在建设，计划 2017 年投产。

天津忠旺铝业有限公中 1800kt/a 平轧铝产品项目。其中铝箔 200kt/a，2016 年下半年建成投产。

明泰铝业有限公司将进军包装铝箔产业，在今后 10 年内中国铝箔的平均增长率可达 17%，目前在包装领域中国包装箔的占有率还不到 20%，而美国的已达 70%以上，所以还有很大的空间。

当然有些项目不会如期建成，有些可能是纸上谈兵，说说而已。不过，即使有一半成功，那也是很了不起的，哪有那么大的市场。

再生铝篇

2015 年中国回收了 6830kg 废铝，其中进口 3630kt，按 83%的再生回收率计算，共获得再生铝 5670kt，其中约有 1200kt 用于生产加工铝材，其他用于生产铸造铝合金，但在生产铸造铝合金时还要用相当数量的重熔用铝锭，我们可大致认为它们的用量相等。

2015 年末世界社会上积蓄的废铝超过 11.5 亿 t，仍有约 75%在为人类文明社会的进步服务，因此今后国内废铝的回收量会一年比一年多，再生铝的用量也会年年有所上升。在中国当前的情况下，重熔用铝锭中废铝约占 30%左右或更多一些。

再生铝的 75%以上用于压铸汽车、摩托车零件。除了压铸工业外，其他铸造工业的用量也不少，所以，汽车、摩托车再生铝合金的用量超过 82%。

2010 年中国废铝进口量达到峰值约 2500kt，自此以后逐年下降，看来这种趋势会逐年保持下去。

泗阳 100kt/a 再生铝项目奠基。上海古山有色金属有限公司投资 3.6 亿元在江苏泗阳经济技术开发区建一个生产能力为 100kt/a 的项目于 2013 年 1 月 15 日举行了奠基仪式，名为江苏海光有色金属公司，占地 13.34×104m2。古山有色金属有限公司是中国知名的再生铝企业，在上海、浙江、福建、马来西亚都有分公司。

新格金属公司再生铝产量达 450kt/a。上海新格金属有限公司（Shanghai Sigma Metals）是台商独资企业，中国最大的再生铝企业，目前产量已达 450kt/a 以上，比 2014 年度的升高 18%，产量的上升是由于进行了较大规模的扩建，例如将现有的 6 台熔炼炉的容量从 55t 扩大到 100t，另外，还增加了一台新的破碎机与一台新的重液体分选机（heavy liquid separator）。

梧州广西有色金属集团 300kt/a 再生铝加工工程进口再生资源，加工园区在加快建设，此项目投资总额约 14 亿元，属广西壮族自治区层面统筹推进的重大项目。整体工艺生产效率高，成本低，节能效果优异，达产后产品能耗仅 94.65kg 标准煤/（t 再生铝），约占新建电解铝企业重熔用铝锭单位产品能耗限额准入值的 5.12%。项目建设规模为铸造铝合金锭 280kt/a，挤压用圆锭 20kt/a。

浙江“利用再生铝生产铸造铝合金锭”项目列入国家级示范工程。这也是浙江省再生铝行业首例列入该工程的项目，由兰溪市博远金属有限公司承担，每吨再生铝生产可节约能耗约 10kg 标准煤/t 铝，指改造后与原生产线相比。

怡球有色金属公司（Ye Chiu Non Frrous）是中国最大的再生铝企业之一，正在全力推荐马来西亚再生铝合金锭的建设。生产能力 218.8kt/a，已于 2015 年 10 投产，同时计划在美国建一个产能为 240kt/a 废铝分选净化项目，将干净的废铝直接运往集团的再生铝企业。

总体来讲，中国铝加工业的装备并不比其他国家的差，甚至还略胜一筹，中国有世界上最多的西马克公司的铝板带热连轧生产线、最多的 CVC 6 plus 铝带冷轧机、最多的阿申巴赫公司（Achenbach）铝箔轧机、西马克集团梅尔公司（SMS Meer）挤压机、艾伯纳公司（Enbana）的辊底式固溶处理炉、瓦格斯塔夫半连续铸造机，摩擦搅拌焊接机、最多的大型及重型挤压机、有世界最大的 800MN 锻压机等等，这些装备为中国生产高大精尖铝材与跻身世界铝加工强国奠定了雄厚的物质基础。

不过不得不指出，虽然我们铝工业在短短的 60 年内走完了欧美 120 年的历程，有些已与它们并驾齐驱，但在有些方面还与它们相差五六十年，特别是在技术与合金研发方面和基础理论研发方面，例如，美国铝业公司上世纪 30 年代初期

发明 2024 合金、1944 年研发了 7075 合金，我们的材料成分与他们的并无差别，但在性能总稍有差异，又如 1995 年问世的 2524 合金、1969 年注册的 7475 合金在中国的 ARJ21 支线客机与 C919 干线客机上已获得大量应用，但都是从美国进口的，中国已能生产，但其性能特别是在稳定性方面与一些非常规性能方面还有一定的差距。

1.9.21 说古道今聊铝史

1746 年，波特（Pott）从明矾制取了纯的氧化铝，命名为 Alumina（氧化铝），之所以这样命名是由于它是从 Alum（明矾）中提取的，古罗马人称明矾为 Alum。从那时起，化学家认为氧化铝是一种从未见过的金属氧化物，并开始孜孜不倦地在实验室探求从氧化铝中分离金属铝。

1824 年，丹麦化学家奥尔斯特德（H.C.Orsted）将氯气（Cl2）通过被加热的氧化铝和炭的混合物，制得了无水氧化铝（AlCl3）。1925 年，他将 AlCl3 于钾汞齐反应，制得铝汞齐。最后，他将制得的铝汞齐在真空条件下蒸馏分离，制得了纯度不高的金属铝，遗憾的是，他将其论文发表在丹麦一家并不出名的杂志上，没有引起化学界的注意，以致以后人们经常将这个金属的发现归功于德国化学家沃勒（F.Wohler）。

1827 年，沃勒加热钾与无水氯化铝的混合物，制得了少

量灰色粉末铝，1845 年，沃勒用与奥尔斯特德相似的工艺将 AlCl3 蒸汽穿过熔融的钾，制得了较多的铝，其纯度也比奥尔斯特德制取的高一些，因此，他测定了铝的密度及其他的物理化学性能。然而，在此后的十年内，铝的提取与研究并没有取得多大进展，只不过是实验室中的一个古董。

1854 年，法国的一位名不见经传的小学教师德维尔（Henri Saint，Claire Deville）用低成本生产的钠取代钾还原无水氯化铝制取铝，其反应产物氯化钠（NaCl）可以与 AlCl3 生成低熔点 NaAlCl4 化合物，它的作用非常大，一方面它将起到熔剂作用，另一方面它可将生成的小铝珠汇聚起来，形成较大的铝粒。从此，德维尔一举成名，成为了化学家，成为永载铝工业史册与无机化学史册的功臣。

这一生产铝的工艺于 1854 年进入商业生产阶段，是年，在巴黎附近的杰维尔（Javel）建立了一个用此法生产铝的小厂，这是全球首个提取铝的商业化工厂，其可以生产成公斤的铝，月产量可达 10 多公斤。不过其生产的铝的纯度不高，都在 92%左右或更低一些，主要杂质为铁与硅。尽管纯度低，但这种银光褶褶的金属却引起法国以致欧洲的震动，它不但比金、银轻得多，而且还有相当高的可塑性，可以手动打制各种器皿、玩具、装饰品与工艺品，不过在当时它的价格比黄金价格还要高，当时法国皇帝拿破仑三世用这种新近问世的稀罕金属打造了一顶头盔，为他的小孙子打造了一个拨浪

鼓。这里还有一个那时铝比金贵的小故事，1857 年法国科学院准备奖给俄国化学家门捷列夫一个奖杯，以表彰他在发现元素的一些性质呈现周期性变化规律与基本完成元素周期表方面的突出贡献，在一次讨论会上，有人说奖一个金杯，有人说足球冠军都能得到一个金杯，门捷列夫的贡献可比足球冠军大得多，应当奖一个铝杯，最后科学院决定请工匠打造了世界第一个铝奖杯，奖给了科学家门捷列夫。

后来，德维尔又在工艺方面作了一些改进，他先后又将氟化钙（CaF2）和冰晶石加入 NaAlCl4 溶剂中，并第一次发现所加入的冰晶石具有溶解铝表面所形成的氧化膜功能。后来美国的卡斯特纳（Castner）又改进了钠和 NaAlCl4 的生产工艺，使它们的制造成本有较大下降。1889 年，在当时世界工业中心之一的英国伯明翰（Birminghan）郊区的一个小镇建设的一家用德维尔-卡斯特纳法提取铝的工厂投产，产量达到近 300kg/d，从此，铝的价格一落千丈，铝在日用品方面的应用得到迅速推广。1856 年,俄国科学家别开托夫(Beketof)提议用镁还原冰晶石生产铝，这一方案后来在德国格麦林根（Gmelingen）铝镁厂被采用。

1.9.22 中国铝工业发展历程

新中国成立伊始的 1949 年 12 月，当时的重工业部召开了“全国有色金属会议”，会议决定建设完善的中国铝工业，

于是在苏联的援助下，于 1950 年秋我国开始筹建新中国第一个电解铝厂，即抚顺铝厂（301 厂），厂址在抚顺望花区，是在原日本住友化学工业公司的满洲铝厂的基础上建设的。但当时的情况是满洲铝厂原有的设备已经几乎全部被苏联以战利品的名义拆走，后又遭国民党军队的破坏，基础十分薄弱。1952 年 4 月 30 日，抚顺铝厂一期工程破土动工，设计原铝生产能力 15kt/a，采用 45kA 侧插槽和水银整流器，全系列 144 台槽，配套建设的有生产能力 11kt/a 的阴极糊车间与 2.1kt/a 的氟化盐车间，1954 年 10 月 1 日建成投产，1954 年 10 月 19 日，新中国第一批重熔铝锭在抚顺铝厂铸造生产线下线，这标志着新中国从此有了自己的铝工业，当年该厂共生产了 19 吨重熔用铝锭。1955 年 8 月，抚顺铝厂二期铝电解工程开始基建施工，1957 年 7 月 28 日投产。1957 年重熔铝锭产量 29.2kt。60 年来，抚顺铝厂（现名抚顺铝业有限公司）为国民经济的发展生产了大量的铝，而且为中国铝工业的发展在生产技术、管理、人才培养方面积累了经验，成就巨大。

1958 年~1965 年，中国铝电解工业经历了“大跃进”和调整时期。1958 年 2 月 23 日，毛泽东主席视察了抚顺铝厂，这是他视察过的唯一的一家铝企业。1958 年 7 月 30 日，抚顺铝厂精铝车间 12 台 6kA 精铝槽投产，当年生产精铝 81 吨，

开中国高纯铝工业的先河。1959 年 5 月 1 日，中国自行设计的抚顺铝厂三期扩建工程投产，同年 12 月 5 日，包头铝厂第一批电解槽也生产出铝；1959 年 12 月，兰州铝厂、山东铝厂电解铝分厂投产,1960 年 3 月,郑州铝厂电解铝车间投产，1960 年 5 月，包头铝厂投产。同时在这期间，全国各地也相继建成了一些小型铝厂，如保定铝厂、石家庄铝厂、平阴铝厂、合肥铝厂、南平铝厂、广东铝厂、南宁铝厂、兰溪铝厂、佳木斯铝厂等 14 家，形成了以五大铝厂为骨干，各省区有小型铝厂为支撑的格局。1965 年中国的原铝产量 128.1kt。

1966 年~1978 年是中国“文化大革命”时期，这段时间经济建设虽然受到干扰，但还是取得了一些成就。1966 年 9 月和 12 月，贵州铝厂一期铝电解工程局部和兰州铝厂南厂房建成；1970 年 8 月，青铜峡铝厂电解一厂房 44 台槽投产；1974 年 12 月，连城铝厂一车间 90 台槽相继投产，至此形成了八大电解铝厂的生产格局,它们的总设计生产能力 244kt/a。其中连城铝厂最大，生产能力 60kt/a，336 台 75kA 侧插自焙槽。1975 年 4 月 10 日，由沈阳铝镁设计研究院设计的中国第一台 135kA 边部加料大型预焙槽在抚顺铝厂进行工业试验，开创中国铝工业即将进入预焙槽生产的新时代，1977 年 3 月 13 日，抚顺铝厂 20kA 精铝槽试验成功。1978 年中国原铝产量达到 296.1kt，这 12 年产量的复合增长率是 23.41%。

改革开放初期（1978 年~1992 年）建设成就更加辉煌。党的十一届三中全会以后，中国迎来了铝工业的春天。1983 年中国有色金属工业总公司成立以后，提出了“优先发展铝”的战略方针，使中国铝工业进入了一个前所未有的繁荣昌盛的时期，极大地促进了铝工业的发展。这一时期先后采用先进技术新建和改造了一批铝厂。在能源供应充裕地区建成了一批中小型铝电解企业。

1978 年 2 月 21 日，当时的国家计划委员会批准贵州铝厂从日本轻金属公司引进 80kt/a 铝电解工程设备，1979 年正式引进，同年 11 月，抚顺铝厂 23 台 135kA 预焙阳极电解槽系列一次性通电投产，标志着中国大型预焙铝电解技术新纪元的开始。1981 年 12 月，贵州铝厂引进的项目正式投产。1983 年 12 月 20 日，原国家计委批准青铜峡铝厂扩建工程（二期），从日本三菱轻金属公司直江津铝厂引进其关闭的 106kA 上插自焙槽系列及配套的阳极技术与烟气净化处理系统等。1985 年青海铝厂新建的 100kt/a 项目和贵州铝厂 80kt/a 扩建工程分别采用了拷贝引进的 160kA 槽型技术，白银铝厂 50kt/a 项目采用从日本千叶铝厂引进的其已经停产的 155kA 预焙槽，同年，包头铝厂兴建了 135kA 预焙槽系列。1992 年贵州铝厂与贵阳铝镁设计研究院开发的 186kA 大容量预焙槽顺利投产，成为中国铝工业自主创新的又一标志性工程，成

为中国进入世界铝业大国的丰碑。1992 年，中国的原铝产量首次突破 1000kt 大关，达到 1090.6kt，占世界总产量 19533kt 的 5.58%。

1.9.23 中国氧化铝工业发展进程

中国氧化铝工业经过 60 年的发展，经过几代人的艰苦奋斗从无到有，从弱到强，不但已跻身世界第一生产大国，而且已进入世界初级强国行列，已经形成了技术水平世界领先、工艺技术及装备体系完整的以一水硬铝土矿为原料的氧化铝工业体系，为中国铝工业的发展、国民经济建设及世界氧化铝工业的科技进步作出了永载史册的贡献。

新中国氧化铝工业生产技术由烧结法生产氧化铝起步。新中国第一个氧化铝厂——山东铝厂（代号 501 厂，现名中铝山东分公司）位于山东张店，1954 年 7 月 1 日投产，是在日本侵华期间的“华北轻金属公司张店工场”的废墟上建设起来的，它采用碱石灰烧结法。改革开放以来，中国在烧结法生产氧化铝工艺技术方面做了大量的富有开拓性的试验研究工作，取得了一批先进的科研成果。随着强化烧结技术、管道化间接加热连续脱硅和常压脱硅技术、连续碳分砂状氧化铝生产技术等在工业生产中的应用，烧结法生产氧化铝的技术指标有了进一步的改善，为中国氧化铝工业作出了很大的贡献。

中国第二个氧化铝厂——郑州铝厂（现在中铝河南分公司的前身），1965 年投产，首次采用混联法生产氧化铝。该法是中国的科技人员根据国内资源特点开发成功的一种氧化铝生产工艺，在世界上也仅中国采用此法生产氧化铝。混联法一诞生，就显示出了明显的优越性与强大的生命力，生产工艺稳定，指标先进，生产每吨氧化铝的碳酸钠消耗小于 70 千克，氧化铝总回收率在 90%以上，产品品质良好。生产实践证明，虽然烧结法所需物料流量大、投资大、能耗高、成本高、品质也比拜耳法的差一些，但是它的特点是混联烧结法可以处理 A/S 较低的矿石和所有含铝资源生产氧化铝最有效的工艺，同时由于烧结法赤泥碱含量相对较低，与拜耳法赤泥相比，更有利于赤泥的综合利用。

混联法是结合中国铝土矿资源具体情况开发成功的具有自主知识产权的氧化铝生产工艺，在 1987 年全国科学大会上荣获全国科学大会奖。1978 年投产的贵州铝厂（现名中铝贵州分公司）和 1987 年投产的山西铝厂（现名中铝山西分公司）都采用混联法生产氧化铝。

20 世纪 90 年代初，中国有色金属工业总公司为了提高氧化铝溶出技术装备水平，1991 年，郑州铝厂引进了德国联合铝业公司（VAW，现已不存在）的管道溶出技术和装备，通

过消化、吸收和改进，形成了处理一水硬铝石的低碱高温成套的管道化溶出技术装备体系。

山西铝厂在拜耳法系统中全面引进了法国的管道化预热-停留罐溶出技术和装备，在中国首次实现拜耳法间接加热强化溶出技术的产业化，为氧化铝工业的增产、节能、降耗起到了很大作用。

平果铝厂（现名中铝广西分公司）1995 年投产，是中国第一个拜耳法氧化铝厂，在中国氧化铝发展史上具有重要意义。中铝中州分公司生产能力 300kt/a 的选矿拜耳法生产线 2004 年建成，在世界上首次实现该法产业化生产，对中国氧化铝工业而言，有着里程碑意义。1993 年，山东铝厂利用从印度尼西亚进口的三水铝矿石采用拜耳法生产氧化铝，其生产能力 60kt/a（2012 年生产能力已达 630kt/a），首开中国利用国外资源生产氧化铝的先河，拉开了采用国外铝土矿资源在国内建厂生产氧化铝的序幕。

中国铝业郑州研究院（原郑州轻金属研究院）氧化铝试验厂有一条氢氧化铝生产线，其生产能力为 50kt/a。该生产线 1987 年 5 月建成，成为国际上唯一的工业化规模的氧化铝实验基地。建成以来，成功地进行了一水硬铝石型铝土矿拜耳法间接加热强化溶出技术、双流法溶出技术、浮选精矿拜耳法溶出技术、一水硬铝石型铝土矿串联法氧化铝生产技术、一水硬铝石型铝土矿砂状氧化铝生产技术等的半工业化和工

业研究都是在该所完成的，为中国一水硬铝石型铝土矿拜耳法间接加热强化溶出技术的产业化提供了成套的设计依据，为中国氧化铝工业的技术进步作出了重要贡献。

1.9.24 中国氧化铝工业技术进展

中国铝土矿资源的特点决定了氧化铝生产技术不能以传统的拜耳法技术为主，必须另辟蹊径，研究开发处理中低品位一水硬铝石型铝土矿的新流程、新工艺。这种新工艺主要有选矿拜耳法、石灰拜耳法和串联联合法。

选矿拜耳法。中国自 20 世纪 70 年代初，开始研究铝土矿浮选脱硅技术，1999 年首次在长城铝业公司完成浮选法脱硅工业试验和选精矿拜耳法生产氧化铝的工业试验。2004 年，中国铝业中州分公司顺利实现了选矿拜耳法的产业化生产。

在铝土矿品位等同时，与混联法相比，选矿拜耳法的建设投资约省 17%，生产成本下降约 10%，能耗减少约 50%，各项主要生产消耗指标大体与拜耳法生产企业的相当。选矿拜耳法的成功应用，为充分有效利用中低品位一水硬铝石型铝土矿找到了一条技术可靠、经济合理的新型工艺路线。

石灰拜耳法。此法的基本原理就是在拜耳法溶出过程中，添加较常规拜耳法适当过量的石灰，使溶出过程中的产物由含碱的水合硅酸钠（钠硅渣）大部分转化成不含碱的水合铝硅酸钙，以大幅度地降低化学碱耗，得到最佳的经济效益。

串联联合法。串联法中的烧结法只处理拜耳法赤泥。该技术可使联合法中的烧结法部分比例趋于最小，降低能耗。此法的主要优点是先以简单的拜耳法处理矿石，最大限度地提取矿石中的氧化铝，然后再用烧结法回收拜耳法赤泥中的A1203 和 Na20。因此，具有综合能耗低，A1203 的总回收率高，碱耗低与成本较低的特点。

从“七五”规划开始，中国氧化铝工业界和学术界对一水硬铝石型铝土矿的间接加热强化溶出技术，从基础理论到新技术开发和引进技术的消化吸收方面进行了系统研究，开发出了具有中国特色的多种局部强化节能新技术，如拜耳法间接加热强化溶出技术，强化烧结法技术，高浓度分解及砂状氧化铝生产技术，氢氧化铝悬浮焙烧技术。

拜耳法间接加热强化溶出技术，对铝土矿浆施加间接加热的预热方式是拜耳法氧化铝生产节能措施之一。目前共有3 种间接加热强化溶出技术在中国得到应用，它们分别是管道预热-停留罐溶出技术、管道化预加热-压煮器溶出技术和双流法溶出新技术。它们为中国氧化铝工业的节能降耗做出了突出贡献。

强化烧结法技术。杨重愚教授提出了两组分两段烧结法新工艺，突破了传统烧结法不能处理高铝硅比原料以及传统烧结法配料条件严格、生料浆调配工艺复杂的限制，为富矿

强化烧结法的形成奠定了基础。采用此技术可以大幅度提高烧结法产量，在一定程度上缓解了国内氧化铝短缺局面。

高浓度分解及砂状氧化铝生产工艺技术。为提高产量和降低成本，国内各个氧化铝厂均实现了高浓度种子分解工艺。某厂的混联法拜耳工艺精液浓度由 1993 年的 Nk＝141.7g/l，w(A1203)＝139.63g/l 提高到 2001 年的 Nk＝158.29g/l，w(A1203)＝161.05g/l。浓度提高后，分解过程的产出率得到提高，同时蒸发强度和能耗也相应减少。

中国氧化铝工业依靠自己的力量，成功地开发出一水硬铝石铝土矿砂状氧化铝生产技术，对我国氧化铝工业的可持续发展有着重要意义。

氢氧化铝悬浮焙烧技术。此法在中国氧化铝厂得到普遍应用，该法具有诸多优点，如热耗低、投资少、产品品质高、占地面积小、装备寿命长、对环境友好等。

降膜蒸发技术。中国开发的降膜蒸发技术具有气耗低、产量高、维修工作量小和检测控制水平高等优点，在中国，板式及管式降膜蒸发技术都得到广泛应用。

提高设备大型化、高效化和自动化水平是氧化铝工业进一步优化技术经济指标的必要手段，中国在这些方面处于世界先进水平。高效赤泥沉降装备及技术、大型液固过滤分离设备及技术、大型平底 MIG 搅拌分解槽、生产过程的自动化

控制技术等在中国氧化铝工业都得到广泛应用。中国已经成为初级氧化铝工业强国。

1.9.25 中国铝电解业现状

改革开放以来，特别是进入新世纪以来的快速发展，中国铝电解工业走过了发达国家近百年的发展历程，建立了与少数发达国家铝电解工业相当的独立完整的体系，实现了现代化，有力地支撑了我国现代化建设事业的发展，确保了国家战略安全的需要。

2001 年，中国电解铝产量达到 3575.8kt，超过了俄罗斯的 3302kt，跃居世界第一位。2008 年，中国电解铝产量 13176.6kt，占世界总产量的 32.7%；2013 年，中国电解铝产量 25500kt（笔者的统计），全国有 104 家电解铝厂，生产能力约 32800kt/a，产能利用率 77.75%，单厂生产能力 315.4kt/a，其中最大的电解铝厂的生产能力为 3150kt/a，是世界电解铝工业的“超级航母”，比国外最大铝厂——迪拜铝业公司的还大 2 倍多。2013 年，国外有 46 个国家（含沙特阿拉伯）生产原铝，总生产能力 32180kt/a，与中国的原铝生产能力大体相等。

中国铝电解工业在技术创新方面最突出是在原贵州铝厂引进的 160kA 大型预焙槽技术基础上，经过消化吸收和集成

创新，自主研发成功了 186kA、280kA、320kA、350kA、375kA、400kA、500kA、600kA 等具有自主知识产权的大型预焙槽生产工艺与技术装备，全面达到了当下世界先进水平。

600kA 特大预焙槽的正常运转是中国铝工业的骄傲。2014 年 1 月 17 日，国家科技部组织专家对中铝连城铝业公司“600kA 超大容量电解槽技术研发课题”进行了验收，验收专家一致认为，这种超级槽为世界首创，居世界领先水平，设计合理，运行平稳，电流效率为 92.77%，直流电耗 12136kWh/(t 铝)，阳极毛耗 476kg/(t 铝)。2012 年 7 月 28 日，首批 600kA 电解槽开始启动，2012 年 8 月 27 日，12 台实验槽全部启动成功，转入正常生产管理。

通过战略重组和结构调整，中国铝电解工业集中度不断得到提升，企业实力明显增强，中国铝业公司自 2001 年组建以来，一直把产业结构调整放在重要位置，2008 年，原铝生产能力即已超过 4000kt/a，成为全球最具影响力的铝业公司之一。2013 年底，中国单个原铝生产能力≥500kt/a 的企业有 20 家，2013 年，中国原铝生产的平均直流电耗为 12969kWh/(t 铝)，氧化铝平均消耗 1920kg/(t 铝)。

从 2002 年中国成为重熔用铝锭净出口国以来，一直保持着这项纪录。2002 年，中国重熔用铝锭净出口量 206.088kt，而 2013 年中国重熔用铝锭净出口量降到 91.055kt。笔者认

为，中国是一个铝土矿资源并不丰富的国家，也是能源较为短缺的国家，不适宜大规模发展原铝生产工业，净出口铝，就是在出口资源与能源，而留下的又是污染物与温室气体。而且，中国又是一个铝的消费大国，根本不能从国外进口这么多铝，所以又不得不发展，不过不能是重熔用铝锭净出口国，而应当是净进口国，而且净进口量应该一年比一年大。中国应当走出去，到资源和能源充裕的地方建设铝厂。中国应成为铝材与铝制品净出口国。可喜的是，近几年，中国一些企业在开拓国外业务方面取得了巨大成就。

近年来，中国形成了具有区域特色的产业群。中国西部、西南部、西北部如新疆、青海、宁夏、甘肃、内蒙、广西等地能源较为丰富，环境对污染物容量空间较大，已成为铝电解业的新集中地。

中国铝工业的国际地位明显提高。中国当前原铝生产能力、产量与消费量分别占世界总量的 50%左右，已成为全球最具影响力的国家，中国铝工业已登上一个新的起点，成为拉动世界铝工业增长的主导因素和推动世界铝工业科技进步的重要力量，是影响国际铝价重点地区之一，在世界铝工业发展中，将发挥越来越重要的作用。

自 2011 年第四季度以来，铝价持续下滑，铝电解企业大面积亏损。这既是全球经济增速下降及国内调结构转方式对

原材料需求增长放缓的影响，也是近 5、6 年来，铝电解业盲目投资、不遵守市场规律、产能过快过大膨胀的必然结果，产能利用率还不到 78%，加之电价较高，哪有不亏的呢？为此，必须千方百计地化解过剩产能，这是铝工业当前面临的严峻挑战。中共十八届三中全会及 2013 年 12 月中央经济工作会议等都把化解产能过剩作为 2014 年几项重点工作之一。

怎样化解产能过剩呢？可采取的措施无外乎是：按市场竞争规律办，淘汰落后的，淘汰没有竞争力的，该“死的”让它死掉，不要去“救”，千万别发“善心”；不管有何种理由，在 5 年内，不批新建铝电解项目，因为今后 5 年，电解铝产量的年平均增长率按 5%计算，现有生产能力也足可以满足需求，尽管不增建新的生产能力，但还必须加大创新力度，提高现有产能的效率，降低能耗；加大铝的应用，扩大内需；延伸产业链，形成煤-电-铝-铝材-铝产品发展模式；加大环保管控力度，坚决关停环保不达标的企业。

1.9.26 中国圆了原铝产业大国梦

1993 年以来，中国开始着力构建社会主义市场经济的基本框架，全面推进国有企业改革，民营经济开始迅速发展，铝工业进入了一个新发展阶段，铝工业的体制创新、制度创新跃上了新台阶，现代企业制度建设取得了重大进展。1998

年~2002 年，国家共计实施 17 个电解铝改造项目，总投资 115 亿元，通过这次大规模的技术改造，淘汰了大部分自焙槽，先进的大型预焙铝电解技术成为中国铝产业的主流，为中国铝工业实现下一步腾飞打下了坚实基础。

1996 年，“280kA 大容量中心下料预焙电解槽工业试验”取得成功，这不仅标志着中国铝电解工业已全面进入了自主创新时代，而且为铝工业开始向大规模化生产方向迈进与走出国门提供了强大的技术支撑。在此基础上，中国相继开发并产业化了 300kA、320kA 等一系列大型预焙槽成套技术与装备。

在此时期，中国铝电解工业的特点可归纳为：2001 年，中国成为世界第一大原铝国。发展速度亘古罕见，产量从 1992 年的 1090.6kt 上升到 2002 年的 4321.3kt，产量排名从 1991 年的世界第六位上升到 2001 年的世界第一产铝大国，一举扭转了从 19 世纪一直延续到 2000 年铝净进口的局面。

生产技术日趋先进，并跻身国际水平。新建和改扩建的铝厂普遍采用自主研发的 180kA 及以上的预焙技术，2000 年，由平果铝业公司与贵阳铝镁设计研究院开发的 320kA 大型高效能预焙槽、贵州铝厂与贵阳铝镁设计研究院完成的 230kA 预焙槽技术引起了国际铝业界的关注。同时，国内在干法净化技术、氧化铝点式下料技术、浓相和超浓相输送技术、自

适应和智能模糊控制技术等方面都取得了多项创新并获得了应用，创造了很好的经济效益与社会效益。

铝厂规模日益扩大。1995 年，全国铝电解企业 53 家，总产能 1970kt/a，平均生产能力 37.2kt/a；2002 年铝电解厂增至 138 家，总生产能力 5460kt/a，平均生产能力 39.6kt/a。2003 年，中国电解铝生产能力 5419kt/a，占世界总生产能力的 24.9%。

民营企业的崛起，投资渠道多元化。1996 年 2 月，新疆众合股份有限公司在上交所上市，成为中国证券市场上首家铝企业，也是中国上市的第一家有色金属企业。由于国家进一步放开投资市场，私人资本、外资、集体资本纷纷涌入电解铝产业，出现了一批民营的、中外合资的、乡镇的中小铝厂，2003 年底，全国大大小小的铝厂总数达到 147 家，占世界铝厂总数的半壁江山，分布于全国除北京、上海、天津、海南、西藏以外的 24 个省市区，而在陇海铁路沿线尤为集中，形成一条相当密集的铝工业带。

进入新世纪以来，随着有中国特色的社会主义市场经济体制的初步建立，中国加入世界贸易组织，中国经济和社会

发展进入完善社会主义市场经济体制的新阶段。2003 年~2005 年是中国铝工业发展最快、经济效益最好、技术进步最明显、综合实力增强最为明显的 3 年。

2002 年 4 月以后，国家有关部门相继出台了一系列宏观调控政策，使我国铝电解工业逐步走向了优化结构、节能减排、技改增效和实施海外战略的可持续健康发展之路，取得了令人惊羡的成就。

彻底淘汰了落后的自焙槽电解工艺。2005 年，国内自焙槽生产能力已从 2000 年占国内总产能的 85%锐减至 0.37%，仅存产能还不到 40kt/a。

技术装机水平进入国际先进行列。2005 年，中国≥160kA 预焙槽技术占电解铝总产能的 82%，小于 100kA 槽型产能只有不到 15%，生产企业减至 98 家，即自 2003 年以来，停产了 49 家企业，铝电解企业平均规模得以扩大，2005 年平均规模首次超过 100kt/a 的有 44 家，产量超过 100kt 的有 30 家，它们的总产量为 5358kt，总产能为 8540kt/a，分别占当年产量和产能总量的 68.6%和 79.4%。80%以上的铝电解企业（64 家）拥有电流强度超过 160kA 的现代化中间点式下料预焙槽，占全国总产能的 81.58%，有 4 家企业的规模超过 300kt/a。

整体技术与装备实现了出口，占领了国际市场。2005 年

1 月 7 日，贵阳铝镁设计研究院作为技术供应商率先走出国门，为印度巴尔科铝业公司（BALCO）250kt/a 铝电解项目设计建造的 288 台 320kA 大型预焙槽系列建成投产，标志着中国铝电解工艺装备技术成功地进入了国际技术竞争市场，打破了工业发达国家垄断铝电解技术市场的一贯格局，也吸引了众多发展中国家的广泛兴趣与关注。

1.9.27 铸锭热轧：圆了产业大国梦

作者：王祝堂

用铸锭热轧工艺生产铝板带是一种有120年的工艺,是在霍尔(c.m.Hall)-埃罗(Paul-LouisHer oult)1886年2、3月份发明氧化铝的熔盐电解法提取铝以后,或者更确切地说是在1888年10月1日美国匹兹堡冶金公司成立以后问世的轧制铝板带的一种方法。2008年全世界铝板带的产量约19000kt,其中约14000kt即约75%是用铸锭热轧法生产的板带中。就全世界而言在今后以热轧法生产的所占的比例会逐年有所下降,而在中国的发展态势则反之,会逐年有所上升。

铝板带铸锭热轧法是一种万能工艺,在2008年在美国铝业协会公司注册的526个常用的变形铝及变形铝合金中,只要市场需求都可以用此法生产出合格的产品,同时产品的综合性能或者说任一性能都比用其他工艺的好一些,不过此工艺也存在一些固有的不足之处,如基本建设投资大,工序多,生

产周期长,能耗高,排放的污染较多,产品成本高一些,因此凡是用其他工艺生产的平轧产品性能可以满足使用要求的,以尽量不用铸锭热轧法生产为宜。

中国铸锭热轧工艺的发展

经过几十年的发展,中国即将成为铸锭热轧铝板带大国。到2010年,中国热轧铝板带的生产能力将可达5400kt/a,从而超过美国,成为全球第一大国。美国从1973年可以生产宽5400mm、厚250mm的厚板(美国铝业公司达文波特轧制厂,Da-venportworks),德国科布伦茨(Koblenz)轧制厂可以生产厚300mm的热轧板,中国西南铝业集团有限责任公司2010年下半年可生产宽4000mm、厚250mm的热轧厚板。

1931年,上海益泰信记铝器厂扩建一个轧板车间,采用进口铝锭,开中国铸锭热轧板的先河;1932年华铝钢精厂投产,建厂总投资100万美元(加拿大铝业公司占50%股份、瑞士铝业公司占35%、英国铝业公司占15%),用进口坯料轧制小平张烟箔,当时是远东最大的一家铝箔企业,1935年进行了扩建,拥有16个80×300mm~430×760mm的铁模,可铸造锭的最大模断面积300mm×760mm,有1台φ550mm φ1300mm的二辊可逆式热轧机,热轧带卷的生产能力约12kt/a。

1938年,粤籍民族工商业者集资2万元,开办的永昌钢精厂在上海投产,有2台φ305mm φ380mm的二辊可逆式热轧机及

冷轧机,年产工业纯板约60t,用于制造日用器皿。1939年,日伪统治下的沈阳大信洋行有1台二辊热轧机与2台二辊冷轧机,生产0.33mm厚、宽400mm的板材(长1200mm),月产约3t,供百内洋行制造雪花膏瓶盖等。1947年上海的工商业者又建设了一个名为交通钢精厂的小铝板厂,采用二辊热轧机及冷轧机生产工业纯铝板。

新中国成立前,中国仅此1台1300mm的二辊的单机单卷取热轧机,生产能力只不过12kt/a,加上其他的4台小型热轧机的生产能力约3kt/a,总生产能力只不过15kt/a,这就是新中国成立初期在此产业拥有的全部家当。

解放前中国的铝板带热轧基本上都集中在上海,1949年3月27日上海解放前后,铝加工工业几乎停产,永昌钢精厂的资方去了香港,工厂处于瘫痪状态;益泰信记铝器厂生产萎缩,职工人数从150名锐减至90余名;华铝钢精厂外商对企业经营失去兴趣,产量大幅度下降,月产量由三四百吨下降到七八十吨。1951年,党及国家对私营工商业及时采取了“利用、限制和改造”的政策,促进了生产恢复及市场繁荣。这些铝器厂先后恢复生产,生产志愿军用的铝壶、饭盒及其他铝器皿,1953年益泰信记铝器厂增加了一台3辊块片热轧机:1952年,永昌钢精厂与交通钢精厂合并成立海通铝器制造厂,年产铝板85t~140t。这是1956年2月以前中国铝板加工业的基本状况。

1952年春,苏家屯有色金属加工厂利用大信洋行的2辊小

热轧机及小冷轧机生产了修理抗美援朝飞机用的合金抱闸267597片及其它合金板76.5t,为抗美援朝做出了一定贡献。

东北轻合金有限责任公司2000㎜热轧生产线的建设

哈尔滨101厂(现中铝东北轻合金有限责任公司)是在中国第一个五年计划期间(1953年~1957年)建设的第一个大型综合性铝加工厂,是前苏联援建的156项重点建设工程中的两项,分两期建设,1954年~1956年建设的为一期,1958年起建设的为二期工程,厂区占地面积189×104m2,一期工程厂房建筑面积24×104m2。一期工程建成的车间有:1956年1月1日投产的熔铸车间,1956年4月1日投产的板带车间,1956年7月1日投产的挤压车间,1956年11月1日一期工程全面俊工投产。

板带车间的板带生产能力为25kt/a,有1台苏联提供的2000㎜四辊可逆式单机架单卷取热轧机,当时是亚洲惟一的1台先进的热轧机,但仍比当时美国的先进热轧机的水平落后七八年。该热轧机的一些基本技术参数如下:

工作辊直径/mm	750
支承辊直径/mm	1250
工作辊辊面宽度/mm	2000
主电机功率/kw	3280
最大轧制力/KN	20000
最大力矩/KN-m	63

生产能力/kt·a-1 50

这台热轧机可轧制所有的变形铝合金,101厂是可为制造苏联当时的米格式飞机提供各种铝材建设的。在第一个五年计划期间还建设了一些小型铝板带厂,如宁波铝合金材料厂、南京铝制品厂、芜湖铝制品厂、石家庄有色金属加工厂、沈阳铝材厂、上海有色合金厂、广州锌片厂于1957年开始生产铝板。1957年全国铝板带铸锭热轧生产能力约65kt/a。

西南铝业(集团)有限责任公司2800mm热轧生产线的建设

西南铝业(集团)有限责任公司原名西南铝加工厂(代号为冶金部712厂),位于距重庆市区公路里程56km的西南面西彭镇,1965年7月破土动工,1970年7月1日一期工程的熔铸、轧制(当时名为压延,现仍沿用至今)、锻造3个分厂建成投产,这是中国自力更生建设的首家综合性大型铝加工厂。轧制分厂有2800mm4辊可逆式冷轧机及热轧机各1台,由第一重型机器制造厂制造。板带的轧机的一些技术参数:工作辊直径750mm,支承辊直径1400mm,支承辊辊面宽度2800mm,最大轧制力30000KN,最大力矩15.2MN.m,最大轧制速度180m/min。西南铝加工厂是为制造大型飞机所需的铝材而建设的。

地方铝板带热轧工业的建设

在第一个五年计划至改革开放前的这段时间(准确地说

应为1953年~1982年),中国各地建设了一批铝板带加工厂,它们全部采用铸锭热轧工艺生产供冷轧用的带坯,因为此时中国还没有双辊式铝带坯连续铸轧机,从1983年起华北铝加工厂(现名华北铝业有限公司)的∮650mm*1600mm,铸轧机才正式投产。

根据笔者的调查与查阅各种资料,从新中国成立起至1982年止这段时间内建设的铝板带企业约110家,其中有2家大型的;其余的都是小型的,用的都是小型的二辊热轧机。2台大型热轧机的生产能力150kt/a,小型二辊热轧机的生产能力约710kt/a(含解放前的),全国的总生产能力约860kt/a。至2008年底,这些小的企业约70%已停产,大概在产的只不过30多家,有些进行了改扩建,但在1983年至2008年期间又新建了一些小的采用二辊热轧机的企业。

截止到1982年末,中国生产的板带箔都是用热轧坯料生产的,1956年产量1815t(所有数据摘自《中国有色金属工业五十年历史资料汇编》,1982年的产量169.719kt,年平均增长率19.1%。在此需指出的是,《汇编》中未将小的企业的产量统计在内,也未将外资企业的统计在内,例如华铝钢精厂1960年才收归国有,所以此前的产量未进统计。

从1983年起,中国供冷轧用的坯料既有热轧的又有铸轧的,同时有些企业生产这两种带坯的工艺都有,如东北轻合金有限责任公司、西南铝业(集团)有限公司、明泰铝业有限公

司、巨科铝业有限公司、南方铝业(中国)有限公司、常铝铝业股份有限公司,万达铝业有限公司、中铝河南铝业有限公司等,给可靠的统计带来一定的困难。

改革开放以来:走上全面大振兴之路

党的十一届三中全会以后,中国铝加工业的铸锭热轧业开放走上全面大振兴之路,一部分老企业通过挖潜、革新、改造,生产有了较大发展,特别是在贯彻党的“对外开放、对内搞活”的方针过程中,从国外引进了一部分技术和大批工艺装备,生产技术水平得到迅速提高,有的企业已开始接近国际先进水平。铸锭热轧生产能力大幅度提高,至2008年底有单机双取卷热轧机23台,为全世界其他国家总和的2倍;有(1+1)式热粗-精轧生产线3条(含1条在建的);(1+2)式热连轧生产线1条;(1+3)式热连轧生产线3条,含2条在建的;(1+4)式的生产线3条;(1+5)式的生产线1条(在建),其他热轧机的生产能力约400kt/a。它们的总生产能力约5400kt/a。

东北轻合金加工厂2000㎜热轧机的改造

东北轻合金加工厂(现名中铝东北轻合金有限责任公司)的2000㎜的单机架单卷取可逆式四辊热轧机于1956年投产,当时的装机水平相当于美国上世纪40年代中期的水平,投产以后一直未进行过较大的技术改造,产品数量、品质与品种都满足不了现代化经济建设的要求,会很快在国内外竞争中失

去优势,必须进行全面的技术改造。

从1980年起就调查国外热轧机的情况,提出改造方案,确定改造方针。最后确定的方针是:

提高铸锭品质,加大铸锭质量,由2t加大到5t;

将原来的热下卷改为热上卷,提高热轧板带的品质和产量;

从意大利米诺公司(MINO)引进技术,由它帮助改造,由洛阳有色金属加工设计研究院负责设计,第一重型机器制造厂制造国内分交的设备;

作好充分准备,尽量缩短施工、安装与调试时间。

经过165d的充分准备,1984年经过120d的土建施工、设备安装与调试,15d的13kt的试生产后,正式投产,使公司板带的生产能力由原来的25kt/a上升到50kt/a,热轧板带的生产能力由原来的50kt/a提高到80kt/a;同时产品品质可与发达国家的同类产品的媲美,品种也有较大拓宽。25年的生产实践证明,这台热轧机的现代化技术改造取得了可喜的成功。

西南铝加工厂2800㎜热轧机的改造

在对东北轻合金加工厂2000㎜4辊可逆式热轧机成功的现代化技术改造基础上,上世纪90年代初期西南铝加工厂对原有的2800㎜四辊可逆式单卷取热轧机在日本石川岛播磨重工业公司(I鄞HI)的援助下进行了现代化技术改造,将其改为

(1+1)式的热粗-精轧生产线,热精轧机由原来的一台2800mm四辊可逆式冷轧机改的。这是中国的首条(1+1)式热粗-精轧生产线。

其他热轧机的改造

1987年重庆长江电工厂与重庆铝制品厂(现名)奥博铝业有限公司)分别从意大利和日本各引进一台∮700mm*1350mm及∮700mm*1500mm的二辊单机架单卷取热轧机,萨帕铝热传输有限公司的∮650mm*1500mm的二辊单卷取热轧机、宁波精业铝业有限公司(原宁波铝制品厂)等的二辊单卷取热轧机都先后由中色科技改为双卷取的,产量上升了,品质提高了。

自行设计与制造的热轧机

改革开放的前20年是中国铝加工业接触了解世界先进铝加工产业概况、改造老的铸锭热轧机的阶段，而后12年特别是进入新世纪以来则迈进了自行设计与制造各类热轧机的阶段。在到2008年为止的10年自行设计制造的各类热轧有：单机双卷取热轧生产线25条，（1+1）式热轧线1条，（1+2）式生产线1条,(1+4)式生产线1条。它们的总生产能力1900kt/a。

首条单机架四辊双卷取热轧生产线

中国美铝股份有限公司的?630mm/1100mm?1300mm板带热轧机是中国自行设计与制造的首台单机架四辊双卷取热轧机，2003年投产，由中色科技股份有限公司设计，陕西压延设备

公司制造，因为这是首台，不可避免地存在一些不尽人意的地方，但整体水平较高，几年的运转情况表明，各项性能都基本达到了预定的目标。

首条（1+1）式2400㎜热粗-精轧生产线

中铝河南铝业有限公司洛南热轧厂2004年投产的2400㎜（1+1）式热粗-精轧生产线2006年投产，是中国自行设计制造的首条这类生产线，虽然早在1991年西南铝业（集团）有限责任公司的2800㎜热粗-精轧机列就已投产，但那是在利用日本石川岛播重工业公司的技术支持下改造的。这条生产线的整体装机水平达到了当时的国际水平，当然由于是首条存在一些毛病是在意料之中。精轧机（?750㎜/1550㎜?2400㎜）还装有AGC。

首条（1+2）式2400㎜热连轧生产线

河南万达铝业有限公司的（1+2）式2400㎜热连轧生产线于2008年8月8日试车投产，这是一条极有特色的项目，采取不同寻常的建设方式，在一次投料成功后立即投入生产，取得相当好的效益。该项目的总投资4.2亿元人民币，从2007年2月7日开始平整场地至2008年8月8日投产，仅用了一年半的时间，建设期之短，实令人赞叹。同时，这条生产线拥有全部自主知识产权，也是中国铝平轧产业引以自豪的成就之一。

首条（1+4）式2000㎜热连轧生产线--马廷义式的成果

河南明泰铝业有限公司是1997年投产的一家民营企业，经过11年的发展与建设，现已成为中国第二大铝平轧产品产量企业，2008年的板带箔产量约200kt，产品不但在国内市场上很有竞争力，而且进入国际市场，它的发展与壮大,带有一定神奇色彩，而它建设的2000mm（1+4）式热连轧线则是一条十足的神奇生产线。

公司董事长马廷义1999年突发奇想，要建一条（1+4）式热连轧生产线，他征求了许多工程师与几个单位的意见，都持否定态度，但他还是下定决心要建，随着新世纪的降临，该项目的建设也正式热火朝天拉开了序幕，对一个刚闯铝世界的人来说，对一个才涉足铝加工行业三四年的马廷义来说，要建（1+4）式铝板带热连轧生产线，其担子之沉，压力之大，责任之重是可想而知的，一旦失败，成亿的资金就打了水漂。他一没有请设计院设计，二没有一个严密的设计、制造、施工、安装、调试队伍，领着几个既不是权威也不是大师的技术人员凭借着弄来的东北轻合金加工厂2000mm单机架四辊可逆式热轧机的安装图（苏联为它援建的设备提供的安装图），就这样一件一件地制造了上万个零部件，有些委托别的单位制造，有的就地在车间自己加工，牌坊的热处理采用匪夷所思的方式。笔者曾以各种方式对此项目的建设给予了力所能及的支持，从一开始就予以肯定说能成功，能生产中档产品，能生产高档偏低些的产品。经过不到二年的建设，以不可思

议的低投资，于2002年底建成，2003年1月23日正式投产。这是中国自己建设的首条（1+4）式铝板带生产线，所有机械设备都是在国内加工与采购的，自动化控制装备由天津自动化传动研究所设计与提供。

6年来的生产实践证明，这项工程的建设是成功的，达到了预期的目标，在生产软合金方面的生产能力可达到320kt/a。粗轧机的规格?850mm/1350mm?2000mm、最大轧制力20000KN、主电机功率5700KW，4连粗轧机列F4的轧制速度360m/min、每个机架的传动功率1250KW×2、轧制力20000KN，规格?535mm/1350mm?2000mm。

这个项目建设速度之快，投资之少，在世界铝板带轧制史上是前所未有的，在中国铝板带项目建设上具有里程碑式重大意义。马廷义的创业精神可贵，但在大项目的建设程度与方式上，这种建设方式不可取。

铸锭热轧生产线的引进

新中国成立后，中国引进的铸锭热轧机或生产线共有16台（条）：1956年东北轻合金加工厂的2000mm四辊可逆式热轧机1台；长江电工厂与重庆铝制品厂分别从意大利米诺公司引进1台二辊1350mm热轧机与从日本片木公司引进1台二辊1500mm热轧机，广州锌片厂引起了1台二辊1200mm热轧机，广州铝加工厂引进了1台1300mm二辊热轧机；萨帕铝热传输（上

海）有限公司、南方铝业（中国）有限公司、华益铝厂有限公司各引进一台二辊二手热轧机；渤海铝业有限公司引进1条（1+3）热连轧生产线，平安同精铝板带有限公司在建1条2500mm（1+3）式引进的热连轧生产线，中铝瑞闽铝板带有限公司引进1条2450mm（1+3）热轧线、在建设中，南山轻合金有限公司引进1条（1+4）式2400mm热连轧线，亚洲铝业肇庆铝工业城引进的1条(1+5)式热连轧生产线正在安装调试中；厦顺铝箔有限公司引进的1条（1+1）式2450mm热粗-精轧生产线正在建设中。

首条现代化引进的（1+4）式热连轧线--西南铝的2000mm热连轧线

中铝西南铝板带有限公司的2000mm（1+4）式热连轧生产线是中国引进的首条这类现代化生产线，于2005年6月28日正式投产，轧软合金的设计生产能力可以达到350kt/a，2008年实际产量约180kt，即达产50%，当然影响实际产量的因素很多，其中最主要的是市场。从现在的情况来看，只要有市场，该生产线的管理、设备状况、工人操作技术等完全具备了100%达产条件。

西南铝板带有限公司的厂房建筑面积48768m2（384m×127m），热轧线总长360m，轧制方向从右至左，前段长108m，后部长246m，粗轧机至重型剪50m，重型与轻型剪相距78m。

中铝西南铝板带有限公司的2000mm热连轧生产线是中国

引进的首条这类高水平生产线，在其生产的产品结构中罐身料（can stock）是其主导产品，14工位的罐身料的宽度应达到1760mm，2000mm的热轧机无法生产这么宽的带材，因此这条生产线在宽度决策方面有欠周之处，成为“长恨歌”一曲，当然你也可以说不是为了生产那么宽的料而建设的，如果是这样也无疑是正确的。

南山轻合金公司的3250mm四辊（1+4）式热连轧生产线

在中国现有的3条（1+4）式生产线中，相对来说南山轻合金有限公司的那条于2006年晚些时候投产，在某些技术参数与装备特性方面无疑更先进一些，例如，它可轧带材的宽度可达2150mm,支承辊的辊面宽度2350mm,覆盖了常用铝板带市场95%以上的产品；粗轧机轧制时的最大轧制力45000KN，比另一条引进的生产线粗轧机的大28.6%，主电机功率10000KW，比另一条引进生产线的大33.4%，可对轧件施加更大的道次加工率，材料的冶金组织也会更好一些，并可减少轧制道次，南山粗轧机的开口度约比另一条引进的大；精轧机列F4的最大轧制速度500m/min，比另一条引进线的快11.2%，轧制力比另一条引进线的略小一点（2.1%），传动电机功率相等；南山热轧线的总长度395m，比另一条线的360m长9.8%；南山热轧线可轧30t的大锭，比另一条的20.3t重47.8%；在装备特性方面，南山的粗轧机装有约对AGC、辊道有自清洁系统、F1与F2上支承辊装有TP辊、生产线有卷材品质检查站（旁边

有阳极氧化槽）、有由计算机管理的带卷智能仓库等，而另一第引进热轧生产线皆没有这些装备与功能；南山轻合金公司的F3及F4精轧机装有德国IMS公司的多通道板厚测厚仪（AGC），而另一条生产线的为日本东芝公司的扫描式AGC。

内导式液压铸造机。每次铸造质量90t；铸造长度5500mm~9150mm；铸造机总行程9650mm；铸造速度15mm/min~250mm/min；铸造机满负荷最大提升速度500mm/min；铸造机空载最大返回速度1550mm/min；每次铸造扁锭数量最多5块；扁锭厚度350mm~640mm,宽度950mm~2130mm，长度5500mm~9150mm；单块铸锭最大质量34t。

铸锭立推式加热炉。最高炉气温度680℃；铸锭加热温度350~550℃；铸锭均匀化退火温度400℃~620℃；铝锭出料最短周期5.0min；铸锭装炉25块，铸锭厚度340mm~610mm，铸锭宽度950mm~2100mm，铸锭长度5000mm~8650mm；铸锭紧大单块质量30t；燃料为天然气。

中国首条中外联合制造的热连轧生产线---中铝瑞闽铝板带有限公司的2400mm(1+3)式热连轧线

中铝瑞闽铝板带有限公司的2400mm(1+3)式热连轧生产线是中国首条这类设备,也是中国首条这类中外联合制造的生产线,粗轧机由中色科技股份有限公司设计与制造,而3连精轧机列则由奥地利钢铁联合公司设计制造,可于2010建成投产。熔铸车间有75t的熔炼炉与静置炉各1台,苏州新长光热

能有限公司设计制造,铸造机由美国瓦格斯塔夫公司(Wagstaff)提供,结晶器是可调的,每铸次最多可铸与块锭3台。加热炉由高奇公司(Gautschi)设计,新长光热能有限公司制造,每炉可装36块650mm×2200mm×8000mm的锭,以天燃气加热。

中国引进全球最先进与最大锭重的(1+1)式热粗-精轧生产线---厦顺铝箔有限公司的热轧生产线

厦顺铝箔有限公司引进的2450mm的(1+1)式热粗轧-热精轧生产线即将进入安装阶段,计划2010年6月投产,不但是全球最先进的也是全世界可轧锭的质量最大的这类生产线,生产线的设备由世界顶尖轧制重型装备制造企业德国西马克公司(SMS)设计制造。这条生产线及其配套设备创造了同类企业的多项世界纪录。熔铸车间所有设备由瓦格斯塔夫公司提供,圆形熔炼炉容量110t,静置炉容量也是110t,呈橄榄形,可倾动,这不但是中国铝加工业首台这种形式的静置炉,也是铝加工业这类炉之王;铸造机每次可铸的最多数为5块,总质量可达110t,若减少块数,单块扁锭的最大质量为36.6t,尺寸600mm×2150mm×10500mm,这也全世界迄今为止能够铸造的扁锭王;铸造井深约25m,是全球最深的扁锭半连续铸造井。熔铸车间按计划将于2010年9月投产。生产时将长锭一锯为二。热轧车间有2台埃布纳公司(Ebner)的加热炉,每台可装24块扁锭,装炉量约432t。热轧线总长382m,粗轧机与精轧机中心

间距280m。通常粗轧机将扁锭轧到27mm,然后精轧到所需厚度,轧3道次。在中国近几年引进的平轧铝产品中,厦顺铝箔公司板带项目的装备水平是最高的,所有装备都成套从世界顶尖的企业引进:热轧机是西马克公司的,熔炼-静置炉组来自高奇公司,铸造机由瓦格斯塔夫提供,2台冷轧机分别由西马克公司阿申巴赫公司(Achenbach)设计制造,纯拉伸矫直机组是德国BWG公司的产品,分切机组是德国坎普夫公司精心设计制造的精品。世界一流的平轧铝产品将从厦顺流遍全球。

中国首条(1+5)式热连轧线---亚洲铝业肇庆铝工业城热轧项目进入安装调试阶段

亚洲铝业控股肇庆铝工业城板带公司在建一条(1+1+5)式铸锭热轧生产线,中间热轧机目前不建,待今后适当时候增建,(1+5)式热轧线现已进入设备安装与单机调试阶段,可于今年投产。这既是中国首条这类生产线,很可能也是绝后的一条生产线,在世界范围内于可预见的时期内也不会再建这样的生产线,因为现代化的大容量(1+4)式热连轧线的产量与品质均可超过上世纪80年代或早些时候建设的(1+5)式生产线的。5连轧线为美国凯撒铝及化学公司停产的二手设备,但经过适当的改造,粗轧机是从西马克公司引进的全新设备。所有电气设备及工艺过程自控装备由美国通用电气公司(GE)提供。有4组各85t的熔炼-静置炉,2组各50t的熔炼-静置炉,共12台,

熔炼炉都是圆形的,静置炉皆为倾动式矩形,各种炉的热效率均大于55%。目前有3台加热炉,可装经铣面的锭坯(Slab)30块/炉,锭坯尺寸:厚400mm~590mm、宽960mm~2060mm、长3000mm~6500mm。熔铸车间可铸锭的尺寸:厚400mm~610mm、宽960mm~2060mm长2300mm~6500mm。

中国第一条全从西马克公司引进的(1+3)式热连轧线---青海平安高精铝板带有限公司

青海平安高精铝板带有限公司的(1+3)式2400mm热连轧生产线是成套从德国西马克公司引进的,开中国这类生产线引进的先河。除支承辊的辊面宽度为2400mm外,与其他的引进的热轧机相比,该生产线的轧制力、轧制速度、轧辊尺寸、机架断面尺寸、主电机功率大小等方面并无独特之处。平安高精铝板带有限公司的粗轧机支承辊辊面宽度虽然是中国引进的热连轧机中最宽的,但仅比山东南山轻合金有限公司的宽50mm,没有实际意义,对拓宽市场与操作技术都没有实质性影响。不过平安公司的粗、精轧机支承辊还要用CVC系统,可以更灵活地与更大些范围控制带材凸度,更有利于带材板形控制;平安公司在带材进入精轧机列之前装有AGC系统监测其厚度,作为粗轧机的后馈与精轧机的前馈,有利于更精确地控制入口带材的厚度。

中国引进的首条3912mm(1+3)式二手热连轧生产线---渤海铝业有限公司铝板带项目顺利投产

渤海铝业有限公司的(1+3)式热连轧生产线虽是一套二手装备,但经过全面的现代化技术改造,装机水平不亚于新设计与制造的,加上美国铝业公司有120余年的生产经验,可以调动其全球的技术力量,于2008年11月开始全面调试,12月便生产出合格产品,发往用户试用,受到好评。这套二手设备是从美国铝业公司斯科特奇波罗(Scotchboro)轧制厂搬来的。该公司有2台2300mm4辊VAI(奥地利钢铁联合工业公司)的不可逆式冷轧机。1台新的,另1台是1990年投产的,设计生产能力220kt/a(含70kt/a)PS版基,有PS版基专业生产线,其纯拉伸机从德国BWG公司引进。

中国首条连铸连轧生产线---豫港龙泉高精铝板带项目开建

全世界成熟的铝带连铸连轧工艺有黑兹列特铸造-轧制法,可在双带式连铸机之后接1-3机架热轧机,铸造带坯厚度可为12mm~50mm,经热轧后的最薄厚度可达1.5mm,但还是以不薄于2mm为宜。

2009年4月13日,中国引进的第一条黑兹列特连铸连轧生产线---伊川电力集团河南洛阳豫港龙泉高精度铝板带有限公司年产25万吨高精度铝板带项目正式动工建设,是国内第

一个采用原铝经净化、配合金后直接铸成铝板坯,经三机架热连轧生产铝板带的短流程加工项目。

该项目具有低能耗、低原材料消耗、低生产成本、高效环保、生产专业化、规模化、宽幅等特点,主要设备1950mm双带式连铸机从美国黑兹列特公司(Hazlett)引进,热连轧机列从意大利米诺公司(Mino)引进。

项目总投资29.5亿元,从2007年10月28日项目奠基至今,已完成征地、可行性研究、环评、勘测及场地“三通一平”、主设备的采购、初步设计、执行合同的设计联络等工作。计划2009年10月完成主厂房建设。2010年1月开始设备安装、4月进入安装高峰期、6月开始设备试运行、12月建成投产。

与常规扁锭热轧相比,由于黑兹列特法铸造坯料的冶金组织好,所以道次压下率依次下降,例如轧制5052合金时第一道次压下率可达66.6%,而最后一道次的只有45.5%,而常规热轧时最初的几道次的压下率都很低。

黑兹列特连铸连轧工艺优点很多,但也存在应注意之处:首先是产品品种宜单一些,越少越好,批量越大越好,否则,若更换频繁,不但废品率加大,消耗材料上升,效益会明显下降;产品最好有固定的大用户,有完善的优化产业链,若邻近有几个平轧产品企业,那就最好不过了;当前中国铝平轧产品市场的特点是品种多批量少,双辊式铸轧企业多,竞争特别激烈,因此再建大的连铸连轧产品企业应特别慎重;连铸连轧企业

最好建在原铝企业旁,但原铝产量最好大于连铸连轧生产能力的一倍,因为铝厂生产是均衡的,而轧制厂生产是非均衡的,否则很难保证原铝的充分供应;中国当前宜引进一条600㎜~800㎜的连铸连轧生产线,生产汽车冲挤件坯料与轧制窄的板带,窄板带也有较大的市场,中国无疑会很快成为世界汽车制造大国;小型连铸连轧生产线投资小,铸造机之后可有1台至3台热轧机;由于连铸连轧工艺连轧之后的温度往往低于材料的再结晶开始温度,更不用说高于320℃了,因此材料的组织总处于非再结构状态,尽管铸造组织已不复存在。

2010年铸锭热轧设计生产能力5100kt/a超过美国成为世界第一大国

2010年中国铸锭热轧铝板带的设计生产能力可达到约5400kt/a,从而超过美国的约5000kt/a,成为世界第一大国。2006~2010年是铸锭热轧生产能力增长最多的5年,从2004年的1480kt/a飙升到2010年的5400kt/a,绝对增长量3920kt/a,年平均784kt/a,年平均增长率29.8%,生产能力形成着实过于集中。此外,还应指出的是,在美国铝板带热轧生产中约85%都是多机架热连轧线生产的,而中国(1+2)式至(1+5)式生产线的能力只不过3400kt/a,即仅占总生产能力的63%,另外,中国还有约350kt/a的二辊块片式热轧机及小单机架单卷取热轧机的生产能力,这类轧机在美国已见不着踪影了;中国近期

建设的铝板带多机架轧制线的装机水平还比美国的略胜一筹,因为它们的生产线多是在上世纪80年代及以前建设的;现在美国本土铸锭热轧铝板带的生产能力不是在增加而是在减少,如凯撒铝及化学公司的一条(1+1+5)式生产线卖给中国亚洲铝业肇庆板带有限公司,但是美国铝业公司与诺威力铝业公司在境外的热轧铝板带的生产能力在上升。

2008年末,中国有支承辊辊面宽度≥2000㎜的铝锭热轧或热粗轧机(不含热精轧机)8台,到2010年底可达到16台,其中引进的9台(东北轻合金有限责任公司从苏联引进的1台、渤海铝业有限公司从美国引进的1台、南山轻合金有1台日本提供的、厦顺铝箔有限公司有1台西马克公司的、中铝瑞闽铝板带有限公司有1台奥钢联工艺公司与中色科技有限公司合作制造的、亚洲铝业肇庆铝板带有限公司与平安高精铝板带有限公司的各1台、中铝西南铝板带有限公司有1台从奥钢联工艺公司引进的、东北轻合金有限责任公司有1台西马克公司设计制造的厚板轧机);中国自行设计制造7台;大屯煤电集团有限公司的1台,西南铝业(集团)有限责任公司的2台,中铝河南铝业有限公司的2台,明泰铝业有限公司与万达铝业有限公司的各1台。

这些现代化大型铝板带粗热轧机(有些兼精轧机)分布于:黑龙江省2台,含1台在建,江苏省(在建)、广东省(在建)、青海省(在建)、河北省、山东省各1台,福建省2台(在建),重庆

市3台(1台在建),河南省4台。

结束语

中国已成为铝板带铸锭热轧生产能力大国,明年的生产能力即可超过美国而成为世界第一大国,按递减排序名次:中国、美国、日本、德国、法国、俄罗斯、巴西、韩国、意大利、西班牙等。中国虽已成为铸锭热轧大国,但要成为铝板带生产强国还有一段相当大的路要走,可能要到2025年或2030年才能赶上那时的美国水平。现在我们制造的ARJ21-700“翔凤”支线客机用的铝材均由美国铝业公司提供,计划2010年首航的首型大型C919客机也将采用进口的铝材与外国公司设在中国的全资公司制造的紧固件,这些飞机的铝制零部件占其自身质量的70%以上。

这几年铸锭热轧铝板带生产能力的形成过于集中,仅中铝公司就有6条生产线约1400kt/a的生产能力,市场在哪?难道不值得考虑吗?在2015年以前除个别企业外,大部分铸锭热轧板带企业很难取得预期的经济效益,能做到盈亏平衡或微亏就是很大的成绩。

除某些专业性的热轧企业外(如生产复合板带箔的企业),现以建成的中小型综合性热轧企业或某些大型企业可适当建几条双辊式带坯连续铸轧生产线,如常铝铝业股份有限公司、巨科铝业有限公司、明泰铝业有限公司、万达铝业有限公司

等那样,以降低一部分产品的成本。

近期内欲建铸锭热轧项目的企业请注意两点:2010年可建成的热轧生产线的生产能力足以满足到2018年或更长一些时间对以热轧带坯冷轧铝平轧产品的需求;毕竟大部分平轧铝产品(80%左右)可以用铸轧坯料生产。当然,如果所建的热轧项目确实能取得实实在在的效益,还是可以大干的,总之,应围着经济效益转,当然涉及到国家安全的企业则例外。

二辊块片热轧机无疑应尽快淘汰,但带卷式二辊热轧机的淘汰宜靠市场,不宜一刀切,不能笼统地提淘汰二辊轧机。

供冷轧用的带坯全球的总潮流是,铸轧的占的比例会越来越大些,中国铸锭热轧带坯的生产能力不宜大于铸轧的。近10年来工业发达国家几乎没有新建铸锭热轧线,美国还停产了三条生产线,其中二条远涉大洋来到中国。其他国家大都通过对原有生产线的改扩建来提高生产能力。这种大趋势是不以人们的意志为转移的。

1.9.28 欧洲铝工业回眸与借鉴

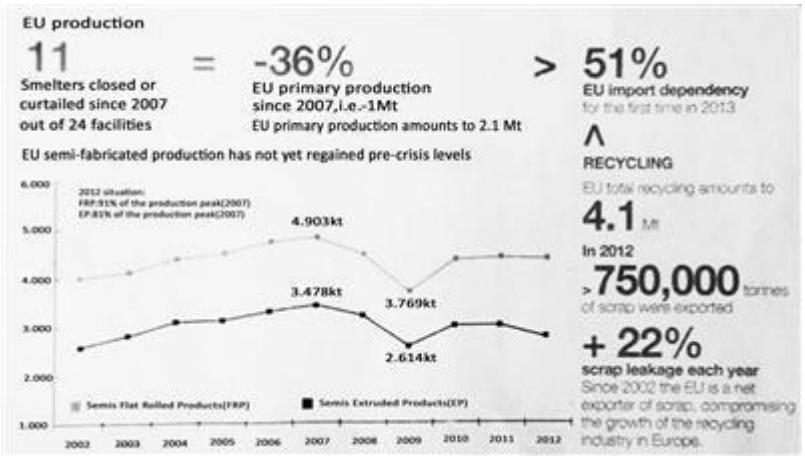


图 3 2002 年~2013 年欧洲各种铝产品产量（纵座标：kt）

曲线：上——平轧铝产品（FRP）；下——挤压铝材（EP）

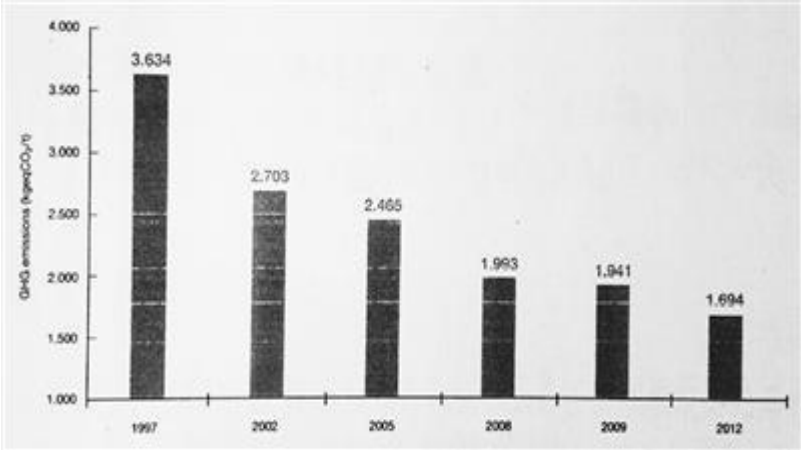


图 5 欧洲铝工业 1997 年~2012 年 GHG 排放量（kgCO2 当量/t 铝）

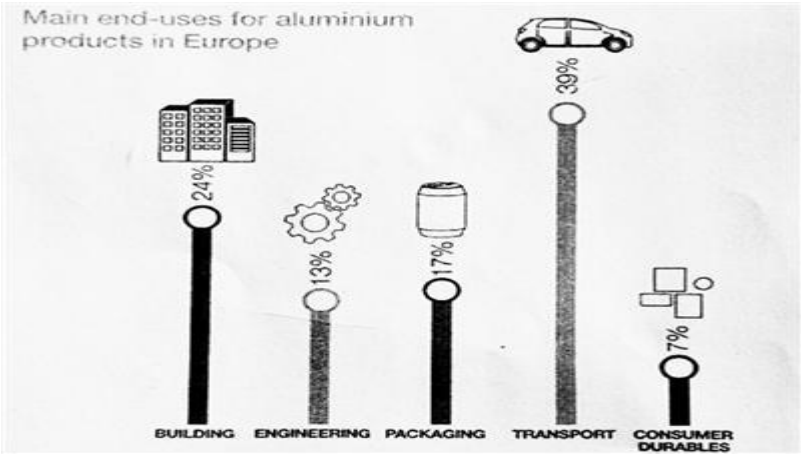


图 1 2012 年欧洲铝产品的主要最终消费结构

（从左至右：建筑与结构 24%，工程机械 13%，包装业 17%，交通运输产业 39%，耐用消费品 7%）

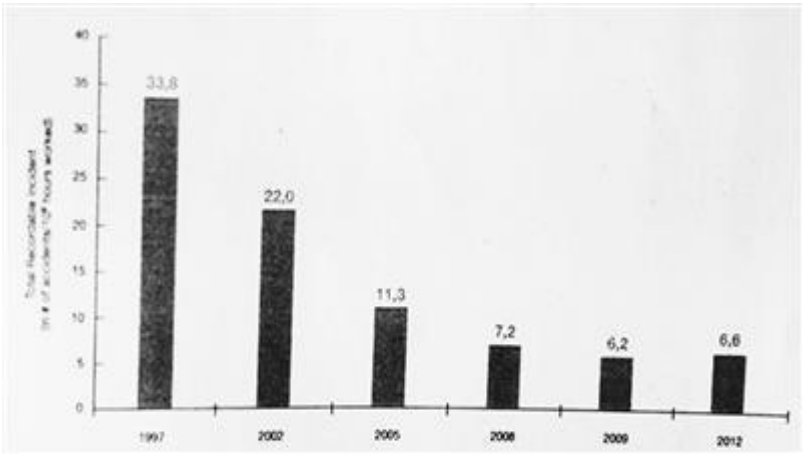


图 4 2007 年~2012 年欧洲铝业协会会员的 TRI 指数（纵座标为 TRI）

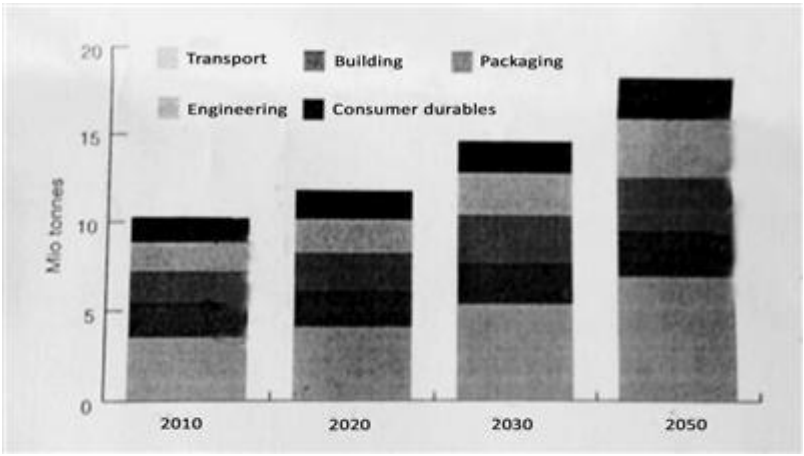


图 2 对欧洲市场铝需求预测（2010 年~2050 年）

摘要：根据欧洲铝业协会提供的资料，对欧洲铝工业的发展历程作了简要回顾，并对今后的消费量作了预测。欧洲铝工业的发展路线、对环保－健康－安全的重视、对铝循环工作的着力发展、对推广铝在汽车中的应用等，对我国铝产业发展都有一定的借鉴意义。特别是欧洲2013年交通运输业的用铝量已占铝消费总量40%，这一点值得我们学习。

一、原铝产业

多年以来，全世界（不含俄罗斯及东欧，下同）对铝的需求一直在持续上升，但是由于种种原因（含没有竞争性的能源价格、成本上升压力、以及潮水般的超过欧洲需求的进口产品）欧洲原铝产量却在大幅度下降。

2012年欧洲对铝的需求占世界铝产量的16%，价值368亿欧元，在欧洲消费的铝中有一半是再生铝。铝产品的消费与资源、财富拥有量及经济活动性有一定的关系，2012年欧洲城市人口的平均铝消费量为22kg。

1.铝的消费结构与需求预测

2012年欧洲铝产品的主要最终消费结构如图1所示，自左至右：建筑及结构工业24%，工程机械化工13%，包装领域17%，交通运输产业39%，耐用消费品7%。

铝的一系列优秀性能是驱动铝消费持续增加的动力，特别是丰富的资源与对其他材料的强大可替代性，以及低碳社会呼声的日益增强，使铝的应用前景非常看好。2010年~2050年欧洲各市场对铝的需求见图2。

由图2可见，对铝需求最大的市场是交通运输业，增长最快的也是此领域，2050年的消费量可比2010年翻一番多，其次是机械工程，也可以增加近一倍（图例：自下而上，交通运输业、建筑结构、包装业、工程机械、耐用消费品）

2.铝及铝材产量

自2007年至2013年期间，欧洲原铝、铝材、再生铝的产量示于图3。

由图可见，在2007年~2013年期间，欧洲有24个原铝厂关闭或减产，原铝产量下降36%，即减少了1Mt，2013年的仅约2.1Mt；原铝进口量大增，2013年的进口量比2007年的首次上升51%；回收的废铝达到4.1Mt；出口的废铝750kt（2012年）以上，每年损失的废铝超过22%。自2002年起欧洲一直是废铝净出口者，对欧洲再生铝工业的发展是一种损害。

二、社会效应

1.从业人员

铝工业（包括中、小型企业与综合性大型公司）无论对就业与地区经济发展都是至关重要的，对所有从业人员来说，如何保证他们在从事任何时候与任何动作时的人身安全是欧洲铝协日常工作的重要一环。

2013年，欧洲铝工业的直接（氧化铝生产、原铝提取、再生铝生产、半成品加工）从业人员80000人，间接从业人员（铸造、能源、室内如商贸与仓库等、粉膏及其他下游活动等）约255000人，如果把与沾边的工作人员都计算在内，则相关从业人员总数可达1百万人。

自2008年世界金融危机以来，铝工业的直接从业人员总

数下降了16%，其中：铝供应、生产部门的减少29%，半成品加工的下降11%，研发(R&D)人员减少14%。

铝工业应承担的一个社会责任是不断地保证人类发展，为此，特别应增加员工的培训时间，欧洲铝工业1997年员工的培训时间平均为16h，而2012年的为24h，即增加了50%。

2.目标死亡人数：零

在当今的人类社会活动中，应处处时时贯彻安全、健康、环保理念，欧洲铝业协会的目标是，每年不发生一次人员死亡事故。1997年~2012年欧洲铝业协会成员国总记录事故率TRI（Total Recordable Incident Rate）下降了79%，这是各单位、各工厂、各部门把安全放在第一的结果。总记录事故率TRI=(伤亡次数+事故损失时间+限制工作案件时间+医疗处理时间)/行业每百万总工时数，1997~2012年欧洲铝业协会成员的TRI指数见图4，由1997年的33.8下降到2012年的6.6，即减少近80%，同时，会员企业2012年没有发生人员死亡事故，而非会员企业却发生2起人员死亡事故。TRI指数的逐年下降，可见他们对安全工作的重视，TRI也是铝业强国标志之一，必须牢牢树立安全第一理念。

三、环境指标

铝在地壳中的含量仅次于氧及硅，是第三大元素，占地壳总质量的8%强。欧洲铝工业在保护环境、建设低碳社会与

资源高效利用方面起着重要的作用。在欧洲，当前开采铝土矿后每年复垦的面积大致与新采矿所占的面积相等，保持了耕地的平衡。

自上世纪90年代以来，提取原铝的CO2当量排放量下降了53%，铝电解过程排放的全氟碳化合物（Per Fluorocarbon,PFCs）减少了90%以上。在铝工业中温室气体（GHG,green house gases）的排放来源于工业过程的化学反应，例如电解提取原铝时阳极炭素消耗，或燃料燃烧，如氧化铝生产中的蒸汽锅炉，铝加工与再生铝生产中的熔炼炉、加热炉及热处理炉。

1997年~2012年欧洲原铝工业CO2的当量排放量（kgeq CO2/t铝）即GHG排放量见图5。铝加工业2012年GHG排放量比2002年的下降了7%，而整个铝工业的CO2（GHG）的排放量平均比1997年减少4%。今天，欧洲的铝电解槽都装有消除电解过程产生的氟化物的系统，在2002年~2012年期间，氟化物排放量下降了50%。原铝提取工业是一个电能密集型产业，在欧洲重熔铝锭的成本中电费占30%~40%。因此，铝工业花了很大力气来提高电流效率与降低电耗，实际上自1997年以来，欧洲原铝提取能耗已下降了约6%，实际上当前铝电解工艺已达到相当完善程度。铝材加工板块采用了不同来源与不同种类的能源，2013年的能耗比2002年下降5%。

四、再生铝工业

铝有很多优点，诸如质轻密度小、加工成形性能好、电导率与热导率高、相当高的强度、很强的抗腐蚀性能，特别是可回收性强，无限地循环使用，是一种不会消失的长期地存在的金属，成为一种为各种产业选用的很有价值的结构金属，过去生产的铝仍有75%参与经济循环，为人类社会服务。铝的循环链可用示意图6表示。

1.铝结构的可回收率

在结构材料， 铝及不锈钢在使用寿命终止后是可回收率最高的两种结构材料，当然钛产品的可回收率也是很高的。铝产品除有高的可回收率外，用废铝生产再生铝合金的能耗与提取原铝的相比可节约95%，这对于节能减排有着重大意义。

铝制品使用期满后可回收的量主要决定于其用途，也与国家及地区有关，例如：欧洲汽车与建筑铝产使用期满后的回收率在90%，而在中国的可回收率则至少高4个百分点；全铝易拉罐的回收率的差别则更大，欧洲的平均回收率为69%，而瑞典的回收率则高达96%，巴西的则高达98%，中国的则高达99%以上。欧洲所有包装铝材的总体回收率为60%。

2.汽车铝制品

在汽车中用铝替代钢铁制造零部件，可使它们的质量平均减轻50%，从而可相应地降低油耗与C02排放。目前欧洲汽车的实际用铝量已使每辆汽车平均每年节油65L。欧洲每辆汽

车（2012年生产）的用铝量已达140kg，为1990年用量的3倍（图7）。

3.建筑铝制品

建筑结构采用铝门窗、铝幕墙等可以大大提高建筑物的能效(energy-efficiency)、减轻结构质量与进行技术革新。采用智能铝幕墙系统可节能50%以上，现有建筑物装上这种智能系统，也可以显著改善能量运行特性，而CO2偿还期（Payback Periods）为1年~5年。

4.全铝拉罐回收率

铝在屏障空气与光线方面有着极强的能力。因此，用铝箔包装食物与饮料就可使它们不与空气、潮气接触，氧也不会进去，光线也照射不到，可以确保食品与饮料在保质期内不会变质，不过包装用铝箔的厚度不得小于6靶，否则当前技术生产的铝箔无法阻挡氧的渗入，因为其上的针孔虽然很小，但是也比氧分子的直径大一些。

装啤酒的铝罐是用0.26mm厚的3104合金带材深拉的，罐壁厚度0.08mm左右，能很好地保护所装饮料。废罐是一种价值很高的可再生原料，可较方便地再生熔炼成3104合金，2011年欧洲的废罐回收率达到68%，为20年前的3倍余，1991年~2011年欧洲的废罐回收率见图8。2011年欧洲的废罐量超过250亿个。

铝啤酒废罐是世界上最多的可回收的啤酒容器，因为易

于收集、分类与再生原来的合金或生产摩托车或发动机缸体用合金。

五、结束语

本文是根据欧洲铝业协会（EAA）提供的资料编译的，希望对中国铝工业的结构调整与转型升级工作有所裨益。笔者认为，有几点值得我们借鉴：

欧洲的原铝企业数与产量逐年下降而铝材生产企业则上升符合欧洲铝矿资源与能源情况，中国在这方面的情况与欧洲的相似却反其道而行之，很值得思考。中国应成为原铝净进口国，宜到国外去办氧化铝厂、去建原铝厂。

2014年欧洲交通运输业的用铝量将占铝的表观消费总量的40%，而中国的还不到31%，相差9个多百分点，所以铝在这方面的应用还有很大潜力，中国早已是汽车、摩托车、船舶舰艇、轨道车辆、人力车等的生产大国，但是铝在这些方面的应用范围及用量还与发达国家有相当的差距，中国有色金属工业协会在这方面做了许多工作。

EHS（Environmental-Health-Safety，环境－健康－安全）理念还远不如欧洲铝工业，欧洲铝业协会在这方面做了不少工作，他们把EHS作为日常主要工作来抓，成就斐然，2013年协会成员企业没有发生人员死亡事故。欧洲铝工业的TRI指数一路滑坡，2012年TRI比1997年下降了约80%，着实难能

可贵。

欧洲铝加工企业建成了5个废旧全铝易拉罐熔炼再生企业或项目，2011年回收了250亿个废罐占可回收量的68%。中国2013年生产了565kt罐料（罐身料+罐盖料+拉环料），生产了约320亿个罐，几乎全部得到回收，但没有得到很好的利用，没有把它再生成3104合金，全部用于生产别的合金，没有做到物尽其用，是对资源的一种浪费。

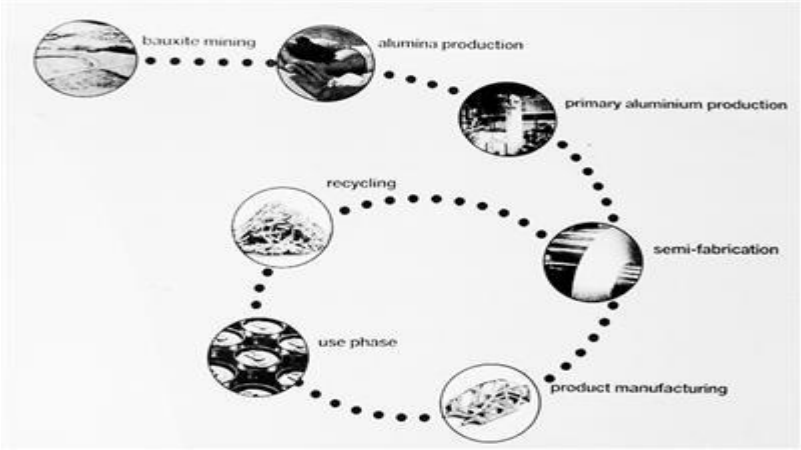


图 6 铝循环链示意图

1——铝土矿开采；2——氧化铝生产；3——原铝提取；4——铝材加工；5——铝产品制造；6——铝制品使用；7——废铝回收。

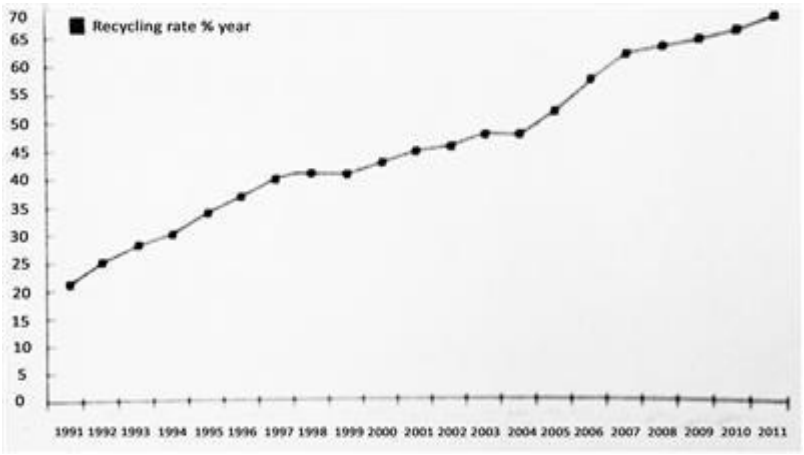


图 7 欧洲汽车 CO2 排放量的减少与汽车总用铝量的比例下——由于用铝 CO2 排放量下降，%；上——汽车总铝含量比例

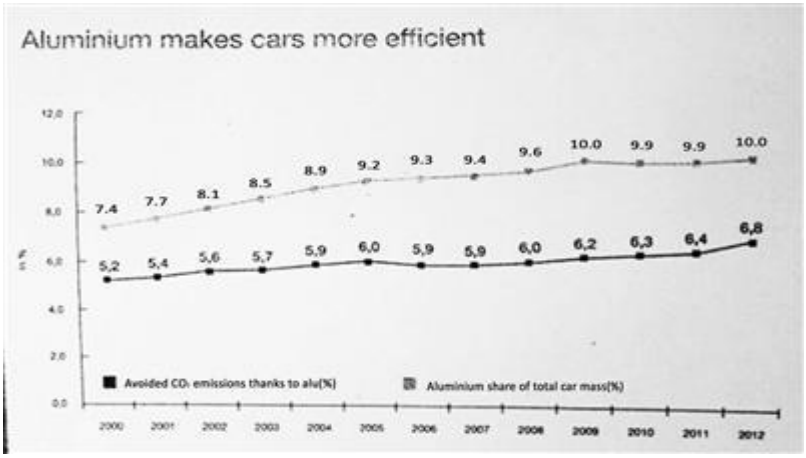


图 8 1991 年~2011 年欧洲废铝罐回收率

1.9.29 中国成为铝锻压初级强国

已投产及在建的铝合金锻压厂

名称	装备,MN	制造	种类	产能,kt/a	投产年度
东北轻合金有限责任公司	3、30、50、100的各1台	苏联	航空器用	4.5	1961
西南铝业(集团)有限责任公司	60、100、300的各1台	中国	航空器用	10	1971
戴卡股份有限公司等	4台(3台国产、1台引进)	–	汽车轮	32	1987
安阳锻压有限公司	2台	–	各种	5	–
哈尔滨中飞新技术股份有限公司	10的2台	中国	各种	1	2011
一机集团高成锻造有限公司	–	–	各种	4	–
江苏轻华利庆业有限公司	–	中国	汽车用	2	2014
神户制钢(苏州)铝业有限公司	2台80	日本	汽车用	8	2010-14
中国第二重型机器制造有限公司	1台400的,120及160各1台 1台800的	中国 中国	各种 各种	24 8	2011 2013
南山铝合金有限公司锻压厂	25、60、125、500的各1台	引进	各种	14	2015
忠旺铝业有限公司	–	中国	各种	4	2014
无锡悦克重型锻造有限公司	–	–	各种	10	2006
美铝(苏州)铝业有限公司	60的1台	–	车轮	10	2016
中冶二十二冶集团有限公司	120的1台,多向锻	中国	车轮等	12	2014
西安国家三角航空高技术产业基地	400的1台,单缸	中国	航空器用	12	2009-2012
昆山锻压有限公司	300的1台,单缸	中国	各种	12	2012
其他5个企业	–	中国	各种	20	
总计				194.5	

自由锻件及模锻件是一类重要的受力结构零件与高精技术产品，中国已成为世界铝锻件生产初级强国，西南铝业(集团)有限责任公司与东北轻合金有限责任公司生产的5m及9m级大锻环不但满足了中国航天工业发展的需求，而且有一批批的其他铝合金锻件装上了波音公司的成千上万架飞机，件件合格，从未出过质量事故。

截至2015年，中国拥有30MN~500MN的模锻机约40台，其中300MN的2台、400MN的3台，500MN的1台，自行设计与制造的世界锻压机之王--800MN的模锻机也已投产，将锻出全球最多最大的铝、镁、钛等合金锻件。2014年中国铝锻件的生产能力约194kt（含车轮锻件）。

2015年中国铝合金、镁合金锻压工业概况见下表，总产能194kt/a。

典型企业

1. 东北轻合金有限责任公司

东北轻合金有限责任公司（原名哈尔滨铝加工厂，代号一0一厂）锻造车间1961年建成投产，是中国首个铝、镁合金锻压项目，主要设备从苏联引进，有100MN模锻机1台，50MN模锻机1台，30MN模锻机一台，3MN自由锻造机1台，靠模铣床2台。设计锻件生产能力3.7kt/a，其中自由锻件0.8kt/a，模锻件2.9kt/a，产品的95%以上供航空航天器与军工用，改革开放以来，航空航天产品虽仍是主要的，但通用工业锻件有较大幅度增加。

2. 自力更生建设的首个锻压厂--西南铝加工厂模锻分厂

西南铝业（集团）有限责任公司（原名西南铝加工厂，代号一一二厂）模锻分厂是新中国自力更生建设的首个铝、镁合金锻件生产厂，1970年7月1日投产，有中国第一重型机器制造有限公司（当时名富拉尔基重型机器制造厂）设计制造的8柱立式300MN模锻水压机1台、60MN自由锻水压机1台，锻件生产能力24.5kt/a。还有1台125MN的卧式水压机，一方面为大型锻件挤压坯料，另一方面挤压一些工业大型材。

西南铝业（集团）有限公司锻压分厂正在制造1台100MN自由锻造机，2017年年底或2018年上半年投产。该分厂自1970年以来为中国航空航天工业的发展提供了十多万吨优质锻件，而且还向美国出口了为数可观的锻件，装备了成千上万架波音飞机。

3. 即将投产的中国最大的铝锻造厂--南山集团锻造公司

山东南山铝业股份有限公司所属的南山航空事业部锻造公司一期工程可于今年12月或明年初投产，就锻造力来说只有710MN，比第二重型机器制造有限公司1200MN的小得多，但就铝锻件数来说将是最多的。南山航空事业部锻造公司有4台锻压机，2台模锻机，125MN及500MN的各1台，从德国塞姆帕尔卡姆公司（Siempelkamp）引进。

2012年12月南山锻造公司向塞姆帕尔卡姆公订购1台500MN液压模锻机，这是迄今德国制造的最大的此类机器，底部尺寸4m×7m。另有2台自由锻造机，25MN与60MN的各1台，从德国威普科希德立克公司引进。

此锻件机可以生产铝合金锻件，也可以生产钛合金锻件。项目总投资15多亿元，主导产品为航空航天、交通运输、能源、动力机械、矿山设备等所需的铝合金锻造产品。铝合金锻件的附加值高，按2013年的价格计算，销售价约9.5万元/t。2016年南山铝业就是世界上产业链最为完善的铝业企业，也

是生产能力最大的单一铝业企业，所有的企业--氧化铝厂、铝电解厂、轧制厂、挤压厂、锻压厂、自备发电厂、深加工厂等全部合理地分布于一块20km×20km的“铝业”土地上。这块400km2的土地上集中了中国2015年约60%的罐料、12%双零箔、25%硬合金板带、40%模锻件、4%大型高端工业挤压材生产能力。

4. 西安三角航空锻压公司

西安三角航空锻压有限公司位于西安市闫阎区，是为西安飞机制造有限公司提供大型锻件建设的，有一台世界最大的单缸精密模锻液压机--400MN液压机，是清华大学颜永年教授任总设计师的团队设计的，中国二十二冶公司与清华大学联合制造，是当今世界最大的单缸钢线缠绕液压机，2012年投产，产品主要用于航空器如飞机起落架与发动机高温合金涡轮盘。其基本技术参数为：

总高，m　　20

地面上高，m　　14

地面下深，m　　6

总质量，t　　3200

工作压力，N/mm2　60

工作台尺寸，m　　3.5×4.5

最大速度，mm/s　　60

5. 美国铝业公司苏州大型车轮锻造厂

美国铝业公司车轮和运输产品部（AWTP）2013年1月宣布将在中国苏州建一个车轮专业锻造厂，供卡车、半挂车、公共汽车使用。此举标志美国铝业公司在中国大陆车轮产品的制造、配送、销售和服务网络将全面展开。美国铝业公司执世界铝合金车轮技术牛耳，特别是其表面处理技术，它在苏州还有两个紧固件厂。

6. 神户制钢（苏州）铝业有限公司

神户制钢（苏州）铝业有限公司是日本神户钢铁公司、三井物产公司与半田贸易集团公司投资25亿元建的一个汽车悬挂系统锻件厂，它们分别占60%、25%和15%股份，锻件生产能力10000件/a，已于2014年10月投产，这实际上是一个扩建项目，增加1台60MN锻压机。

7. 忠相铝业有限公司

忠相铝业有限公司位于辽宁省辽阳经济开发区，是一个锻造法兰轴承及车轮的企业，生产能力500万件/a，总投资18亿元，一期一台锻压机，2014年9月投产。

8. 中冶二十二冶集团有限公司

中冶二十二冶集团有限公司自主研发的120MN多向模锻机于2014年10月11日锻造出了直径630mm的质量65kg的超硬铝合金车轮，其质量比铸造车轮的轻20%，而其抗拉强度却为铸造车轮的3倍。这种车轮经过预锻和终锻两道工序锻制。

9. 中航重机股份有限公司

2015年6月中航重机股份有限公司的等温锻压生产线（一期）建设项目160MN等温锻造压力机在西安顺利实现热试车，是当前国内最大锻压力的等温锻造压力机，将极大促进航空航天器及其发动机锻件的研发与生产，对中国突破航空器及其发动机锻件发展瓶颈具有非常重要的意义。

160MN等温锻造压力机（见图）具有锻压速度和位移精确可控特点，可满足航空特种高温合金、钛合金及金属间化合物等难变形合金锻件的等温超塑成形。这台160MN等温锻造压力机的设计锻压力为160MN，实际最大锻压力可达200MN，可满足目前所有航空器结构钛合金精密锻件，以及发动机难变形合金盘、轴类锻件的等温精密模锻成形。根据超塑成形理论，在等温锻造工艺条件下，160MN压力机锻造能力相当800MN~1000MN普通锻压机的能力，同时锻件品质也有很大提高。

第二重--中国最大的锻造基地之一

截至2015年，中国第二重型机器制造有限公司有4台锻造机，自由锻2台，120MN与160MN各1台，400MN及800MN的模锻压机，从而成为世界最大的锻造基地之一。拥有世界最大的800MN模锻压机，被誉为“重装之王”，于2013年1月投产。由二重副总工程师陈晓慈任总设计师的团队设计，二重自主制造、自主安装的，总高约42m，地上27m，地下深15m，相当于13层楼高，总重约22kt，可在800MN压力以内任意无级调压锻

造，最大模锻力可达1000MN，同步精度高，抗偏载能力强，可实现无级调压调速。

从2003年800MN模锻压机申请立项到2013年4月进入试生产阶段，论证5年，建造5年，可谓10年磨一剑，先后一千余人参与建造，中国二重开始了10年的追梦历程，在吸收、消化、再创新基础上，二重突破超大、超长、超重零部件的极限制造，实现了最新技术与固有技术的结合，成功地研制成功800MN大型模锻压机，使中国成为拥有全球最高级别模锻装备的国家。目前，仅有美国、俄罗斯、法国有类似设备，其中最大的为俄罗斯的750MN模锻压机。

800MN模锻压机的投产，将彻底改变中国大型模锻件长期依赖进口、受制于人的被动局面，对实现大型模锻产品的自主保障具有重要的意义，为中国走向制造强国掀开了历史的新历程。从此，中国航空航天器、船舶舰艇、装甲兵器中最难制造的大件，动力发电、海洋工程、西气东输、深部开采等各行各类需要的性能最高的、尺寸最大的、结构最复杂的构件都可以通过800MN模锻压机悉数精密成形。

对中国锻压设备有重大贡献的颜永年教授

中国一重及二重对中国铝合金锻造工业的发展作出了重大贡献，先后于上世纪60年代后期完成300MN模锻压机的制造与2012年完成800MN模锻压机的制造、安装与调试。

清华大学教授与博士生导师颜永年从事材料成形研发45年，在漫长的学术和工程生涯中，开展先进制造技术的研发工作，形成了三个关联的方向：高压成形、快速成形和生物成形。提出了等剪应力缠绕、预应力剖分-坎合、离散-截积成形和类组织前体制造等理论和方法。1994年完成400MN钣式换热器液压机的制造与投产，2009年完成360MN和150MN世界最大的重大的重型厚壁钢管垂直液压机组的投产，2012年完成科技部“十一五”重大科技支撑计划项目400MN航空模锻单缸液压机和江苏省科技成果转化项目300MN单缸精密模锻液压机5台，它们都是具有世界先进水平的重型装备。

颜永年2007年退休，除任中国3D打印技术产业联盟首席顾问外，2012年以来先后创建了昆山永年先进制造技术有限公司、江苏永年激光成形技术有限公司、江苏永年重型机械有限公司，并任董事长。

由颜永年教授任总设计师的团队正在负责制造600MN超高压物理液压机、200MN分模垂直挤压液压机、1200MN超重型垂直挤压机，它们或是世界首台，或是世界最大者。总计已完成或正在制造的≥100MN的液压机有11台套。

1.9.30 中国电解铝工业面临的挑战(一)

新中国的电解铝工业经过60余年的发展，在方方面面都取得了巨大的成就，但也面临着诸多的挑战与问题，必须妥善解决，否则，对下一步的发展不利。

生产能力过剩

截止到2013年底，中国的原铝生产能力已经超过32000kt/a，这是一个颇为吓人的数字，必须刹住车，不能再发展了，在国内发展铝电解工业的这驾马车再也不能这样甩着响鞭，唱着大风歌一路狂奔乱跑了。要发展到国外去，到资源和能源相对丰富的地方去开采铝土矿，提取氧化铝和生产重熔用铝锭，去建设合资或独资企业，将获得的产品运回国内。争取到2020年出口的铝材与铝制品在数量上是用进口的重熔用铝锭加工的，而不是相当于用进口的铝资源（铝土矿、氧化铝、废铝）加工的。到2030年，争取国内表观消费的重熔用铝锭有50%左右是进口的。日本、韩国及中国台湾地区发展原铝电解工业的思路有值得我们借鉴之处，美国与欧洲一些国家的作法也有可学习之处。

走出去开发铝资源有风险，有些地方的风险还很大，可能需要“交一定量的学费”，交学费可能是不可避免的，争

取少交点。目前，日本等国全部关停了国内的原铝生产（日本还保留了一个生产能力为 15kt/a 的浦原铝厂，该厂利用富士山的一个小水电站的电力，电站是铝厂建设的，浦原铝厂将原铝随后用偏析法提取高纯铝，以减少对环境的污染），而且近 30 年来，工业发达国家如美国、德国等的原铝产量还有所减少，大的铝业公司的原铝产量在国内的有一些下降，而在国外的企业的产量却上升了 35%以上。

2013 年，全世界人均铝消费量（按 70 亿人，原铝消费量 51400kt 计算）7.34 千克/人，中国的人均铝消费量（按 13.5 亿人，原铝消费量 25500kt 计算）18.89 千克/人，已经远远超过世界平均消费量，是其 2.57 倍，并且接近工业发达国家的 21.4 千克/人。我们现在的主要任务是要提高原材料的消费质量，用尽可能少的原材料消耗办尽可能多的事。国内规模再也不要扩大了，可采取“东减西增、火减水增”的措施。

技术方面的挑战

虽然中国部分电解铝厂的槽容量已经赶上或超过世界领先水平，但同类槽型的技术经济指标与国外先进水平相比还相对落后。

目前，我国电解铝厂电解槽的阳极效应系数较高；吨铝电耗比欧洲领先水平的高；平均槽寿命普遍较短；国外领先

水平的电流效率已达 96%，而中国 75%以上的企业的电流效率只有 92.5%~93.5%，而且还有相当多的工厂的整流效率计算偏低；在同等电耗条件下，中国电解槽的阳极电流密度设计仅为 0.7~0.735A/cm2，这就意味着等同单位面积电解槽的产量低，因此，今后一段时间内，中国铝电解的一项主要任务就是最大限度地提高电解槽单位面积产量。

中国当下发展电解铝工业也有诸多优势，如电解铝厂单位产品投资低，约为工业发达国家的 1/3；劳动力成本低，是工业发达国家原铝成本中相应劳务费的 1/5~1/4；环保要求较低，因此环保设施投资也较低，这是不应该的，现在到了加大环保投资的时候了。千省万省，不能省环保，应提高环保标准，凡是不达标的，应关停，环保标准应成为高压线。

1.9.31 中国电解铝工业面临的挑战（二）

资源短缺

中国是一个铝土矿资源短缺的国家，为满足国内电解铝工业的需求，每年都要进口相当数量的铝土矿与氧化铝，据海关统计,2013 年,中国进口铝土矿 71531kt,同比增加 79.3%,可以提取约 17000kt 原铝，同时排放约 54500kt 有害的固体废弃物；进口氧化铝 3831kt，同比下降 23.7%，用它们可以提取约 1960kt 原铝,同时留下约 1870kt 废弃物,即污染物;

中国铝土矿资源赋存条件差，资源保障程度低；铝土矿品位低、难处理，造成氧化铝提取工艺复杂，能耗高；氧化铝的品质也与国外的有较大差别，亟待提高。

能源不充裕 水电少且分布不均匀

中国是一个能源不丰富的国家，虽有较多的煤炭资源，但石油与天然气的储量少，水力资源也不充沛，且分布不均匀，多集中于交通不便与不易开发的西南部边远地区，核电规模太小，不利于发展铝工业。

电解铝工业是耗能大户，而且用的是电，是二次能源。同时由于电解铝的耗电量大，因而在原铝生产成本中，电费占的比重比较大，在中国当前的情况下，电费占总成本的38%~46%，因此发展电解铝工业不仅要求有充足、稳定的电力，而且电力的价格应有较强的竞争力。

电解铝所需的电力资源最好是水电（俄罗斯、加拿大、巴西等）、核电（法国、德国等）、地热电（冰岛），其次是天然气电（海湾地区等）最差的是煤电（中国、澳大利亚等）。水电不但生产成本低，而且是清洁能源，对环境友好。若电解铝厂用的是煤电或自备燃煤电厂的电力，则生产 1 吨原铝就会向大气中排放温室气体（二氧化碳）达 16.96 吨，而采用水电排放的二氧化碳仅仅 4.16 吨，仅为前者的 24.53%。一个年产 400kt 原铝的铝厂，若用煤电比用水电多排放二氧

化碳 5120kt。这是一个令人毛骨悚然的数字。2013 年，中国生产的原铝约 25500kt，据估算其中 85%用的是煤电，与用水电相比，排入大气中的二氧化碳约 111×106kt，实在可怕。随着国家对环保要求日益重视，对大量采用煤电及天然气提取原铝的铝工业来说，无疑是一个非常严峻的挑战，甚至是一种威胁，在 2025 年以前，中国铝工业应将温室气体的排放量比 2013 年的减少 40%以上,不达标的自备火电厂应该关闭。

重视生态建设平衡、环境保护和消费者的权益保护，是当今世界经济发展的潮流。因此，中国电解铝工业必须走一条创新的、科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染轻的新型绿色工业化道路。

在电解铝的过程产生的大气污染物中，氟化物对环境危害最大，是主要污染物，污染负荷最重，其次是 SO2 与 CO2。根据 GB9078-1996，吨铝排氟量不得超过 9mg/Nm3。铝厂周围大气的含氟量应控制在 0.007mg/m3 以内，这些标准现在已经达到。

铝厂的生产废水虽未受到有害污染物污染，但有些厂也并未建立完善的水循环利用措施，全行业的废水循环利用率只有 90%左右，稍加改善，即可做到零排放。

中国大型预焙槽的平均寿命只有 1600 小时，比国外的 2300 小时短 30.4%，因此，预焙槽大修工作量大，生产大量的有害的固体废弃物——阴极炭块、废耐火材料、填充料等。

对于这些有害废气物，也并未做无害化处理，仍采用防渗漏的堆场掩埋，这种情况亟待改进，实现固体有害废气物的无害化处理，回收 HF，制成 AlF3 返回电解槽，可以达到循环利用。

1.9.32 向世界电解铝工业强国迈进

2002 年，中国原铝产量 4321kt，超过美国，成为世界第一。经过 11 年的持续高速发展，2013 年，中国原铝产量达到约 25500kt，生产能力超过 32500kt，分别超过世界相应总量的 50%以上。目前正向着世界电解铝工业强国迈进，但要成为强国还有一段较长的路要走，需要做的事着实还不少，大概还有 10 余年时间即到 2025 年后，中国即可跻身世界强国之林。

成为世界电解铝强国的标志是什么？做到以下几点，可以认为是一个世界级的强国：合理的结构，一流的装备，一流的技术，高的技术经济指标，强大的创新能力，一流的管理，友好的环保，高的经济效益，产品有相当强的国际市场竞争力，废弃物得到无害化处理与有用成分得到有效的回收等。

目前，电解铝工业仍以改进和提高霍尔-埃鲁法电解槽技术水平为主，着力节能减排，降低能耗、物耗和生产成本，

在从源头上减少气固物料污染的同时，加强废弃物的无害化处理，实现资源再生和循环利用。

研发 740kA 超大容量电解槽

中国的 12 台 600kA 超大容量铝电解槽 2012 年 7 月 28 日在中铝连城铝业分公司全部启动成功，转入正常生产管理，这标志着在研发超大容量铝电解槽方面，中国已进入世界先进行列，但与俄罗斯联合铝业公司开发的 600~740kA 超大容量电解槽技术相比，还有一些差距。

国外 300kA 以上大容量电解槽阳极电流密度大于 0.8A/cm2,有的已达 0.9A/cm2,比中国的 0.73A/cm2 高 23.3%。有较大差距，中国宜于 2020 年前后全面达到 0.8A/cm2，2025 年时有 50%的大容量电解槽阳极电流密度能达到 0.9A/cm2。法国原普基铝业公司（Pechney）AP50 型电解槽的一些主要设计参数和技术经济指标，是我们成为领先世界先进水平国家必须超越的指标：阳极数量 40，阳极尺寸 1.95m×0.78m，阳极覆盖料厚度 10cm;阳极炭块数 24,阳极炭块长度 4.17m，阳极炭块类型 HC10,边部炭块类型 SiC,边部炭块厚度 10cm，槽壳内壁尺寸 17.8m×4.85m；极距 4cm；Al3F 过量 13.5%，阳极压降 320mV，阴极压降 312mV，阳极间缝热损失 394kW，阴极底部热损失 238kV；电解温度 963.4，过热度 9.7℃，电解质中槽帮结壳厚度 4.44cm，原铝层槽帮结壳厚度 0.17cm；

电流效率 96%。内热 1019kW，直流电耗 13190kWh/(t 铝)，槽寿命超过 2000 小时。

国外的分子比、氧化铝和阳极效应系数低，说明其设计、操作和控制技术水平高。他们的铝电解槽的数字模型、传感器、控制和新材料等功能化技术水平高，采用的物理场数学模型精确有效，槽结构设计质量高，运行稳定性好，其广泛应用了半连续传感器实时在线检测控制温度、过热度、分子比、熔体高度和氧化铝浓度。

控制水平先进，控制效应系数向零目标前进。在高电流密度、高槽电压、高电解温度条件下，通过槽电压、分子比和过热度的软件程序控制技术，实现电解槽的能量平衡、物料平衡和液固相平衡，以达到电流效率高、炭耗低和电解槽寿命长。

结构优化调整稳步推进

中国铝电解工业正在进行着前所未有的结构调整，在调整完成后，可达到适合中国国情的优化结构，产生良好的经济效益和社会效益。小的落后的效益差的企业将被淘汰，企业数减少到 70 家左右，有生产能力超过 1000kt/a 的单个企业 5 家，生产能力 500kt/a 及以上的企业的合计产能占总产能的 75%以上，全行业加工用锭坯（盘条、挤压用圆锭、平轧用扁锭与铸轧带坯等）和原铝直供等占原铝总产量的 80%

左右，提取铝用电力约 50%为水电与核电，70%以上的电解铝企业位于电力供应充足的地区，出口的铝材在数量上全部是用进口重熔用锭加工的，高纯铝提取以偏析法为主。

先进环保指标是中国电解铝业最难跨越的门槛

虽然中国电解铝行业有一批企业已达到相对较高的排污指标，但是仍有一批企业甚至个别世界级的经济效益好的企业在排放大量温室气体与有害氟化物，自备电厂浓烟滚滚，直冲云霄。这个问题的存在，不仅仅是个经济问题，也是严重的社会问题，既是企业自身贪图经济利益，不愿意投入治理高污染、偷排偷放所致，也有政府部门监管不到位，甚至不愿让“钱袋子”旁落人手，对落后产能保护的原因。于是，落后产能成了“臭豆腐”，闻起来臭，吃起来香。如果中国电解铝工业不解决环保问题，中国是不能成为铝业强国的。不管怎么样，电解铝工业的高污染、高排放问题都是当前与今后一段时间内必须迫切解决的，环保也是化解产能过剩的“牛鼻子”，紧紧牵住它吧！

另外，中国欲成为电解铝工业强国还必须有高的劳动生产率，最好能达到原铝产量 500t/(人年)，2013 年，有些国有大厂的原铝产量还不到 100 t/(人年)。

必须有强大的研发与创新能力

创新与研发能力是成为电解铝工业的基础，没有强大的研发能力，许多重大的技术问题都无法解决，目前，中国电解铝工业必须进一步开发新型可湿润材料，开发异流式新型结构电解槽、开发新的惰性阳极材料及其制作新工艺、进行工业规模的新型结构电解槽和惰性阳极试验研究，研究炭热炼铝法等，加大科技投入和人才培养是当务之急，是成为铝工业强国的根本。

1.10 铝事

1.10.1 铝工业准备好应对工业 4.0 么

“工业 4.0”开始进入我们的视线了，我们已经面临着它的挑战。通俗地讲，“工业 4.0”就是第四次工业革命，是德国联邦教研部与联邦经济技术部在 2013 年汉诺威工业博览会上提出的。会议出版了一部带有浓厚文集色彩的书，名为《工业 4.0：即将面临的第四次工业革命》，由德国学者乌尔里希和森德勒教授主编，同时还有 6 位大型企业高管

与名牌大学教授参与撰写。他们认为，继前三次工业革命之后的第四次工业革命已悄然来临，其核心内容有三：一是智能化工厂，实现生产系统及过程的网络化；其次是智能生产，实现企业生产的物流管理，人机互动及 3D 技术的广泛智能化；三是物流智能化，通过互联网与物联网等整合物资源。

前三次工业革命是：1765 年英国发明家瓦特制成的具有实用价值的单用式蒸汽机，1776 年瓦特发明的蒸汽机投入运行，1781 年取得双作用式蒸汽机专利权，这就是 18 世纪的蒸汽机革命，也就是第一次工业革命；第二次工业革命是美国汽车大王福特在汽车装配中首次实现流水作业开始的，1913 年世界第一条流水装配线在福特汽车公司底特律的匹奎特汽车制造厂投产，拉开了第二次工业革命的序幕，第三次工业革命，就是当前还在进行的工业自动化与信息化阶段，即“工业 3.0”阶段。当前，总体上德国已处在从 3.0 到 4.0 的发展阶段，而中国的工业企业尚未完成 3.0 阶段的发展，仍处于 2.0~3.0 的发展阶段。

未来的 4.0 企业是一个什么样的景象呢？这样的工厂有点像科幻片描述的那样，只要在家里或办公室中用手机打一个电话、下一个订单，就可以订上所需要的货物，现在德国已有了这种雏形工厂，它融合了世界上一流的顶尖制造技术与 IT 系统，特别是基于萨帕云的订单管理和生产控制系统，

车间的同一条生产线可以生产任意订单，任何数量的产品，生产线不需要人控制，一切都在输入的预定指令运转，生产高品质的产品，不合格的产品会自动离线，同时还能灵活处理订单更改、产品组合及流程调整，生产好的合格产品再通过网络配送直接送到用户仓库或交付给消费者。

中国的工业化已进入中期阶段，正在向后期阶段过渡，已确立了信息化与工业化高度融合的发展战略，与“工业 4.0”的理念是一致的，这是有中国特色的“工业 4.0”发展之路。“工业 4.0”不但意味着生产技术的转变、生产工艺过程的转变，而且整个管理与组织结构要来一个更大的调整。据媒体报道，德国实现“工业 4.0”需要约 10 年的时间，和“中国制造 2025”规划大体在同一个时间，而且内容也大致相当，不过结果不会完全相同。因为两国的国情不同，基础也有较大差别，不在同一个起跑线上。所以中国政府提出力争通过三个 10 年计划于 2045 年成为世界初级 4.0 强国是完全可以实现的，虽然迈进 4.0 强国的时间稍晚一些，但是我们选择的发展路径是好的、稳妥的，是一条更好更快实现“工业 4.0”的道路。

“工业 4.0”正在德国迅速发展，作为世界制造业重要中心的中国必须不失时机地迎接挑战，抢抓新工业革命的战略机遇，借鉴德国“工业 4.0”的经验，各工业部门要顺应

新一轮科技革命和产业变革趋势，立足各自的发展实际，制订各自的“工业 4.0”发展线路图。

“工业 4.0”来了，铝工业该怎样应对呢？首先，应对它的内容有所了解，其实质是信息网络技术与制造业全方位高度融合为一体。中国铝工业无论在生产能力、产量、装机水平、技术水平等方面均位居世界前列，但在研究开发、管理与加工装备制造等方面与工业发达国家相比还有较大差距。在铝工业领域，铝电解板块总体上已跻身世界先进行列，有世界最大的 600kA 电解槽一个系列在魏桥铝电公司投产，原铝生产能力 330kt/a，已平稳安全运行一年多，电流电耗 12500kWh/t 铝，与迪拜铝业公司、力拓-加铝公司一些铝厂的＜12500kWh/t 铝的能耗相当。还有报道称，中南大学与其亚铝业公司在开发的 400kA 的槽型上取得 12200kWh/t 铝的好成绩，更有直流电耗低到 11500kWh/t 铝~11700kWh/t 铝的报道。笔者认为，中国原铝工业具备了率先进入“工业 4.0”时代的条件，成为中国铝工业“工业 4.0”的领头羊。另外，原铝产业产品单一，工艺条件稳定，易于进行信息网技术与产品、生产工艺层面的深度全方位融合。

其次，有关部门最好有人员收集“工业 4.0”的信息与资料，条件成熟时召集小型专家座谈会与会议，进而制订中国铝工业“工业 4.0”的发展路线，争取国家在政策层面与

资金方面的支持。

最后，要加强技术研发，加快转型升级。加强研发才能创新，创新才能发展，创新是基础，“工业 4.0”就是高度创新产物。目前，铝工业的创新主要在提高产品的精深加工比例，如果铝电解厂的初级深加工产品（平轧用扁锭、挤压用圆锭）的比例由目前的 50%左右提高到 60%以上，中级深加工产品（半成品——板、带、箔、管、棒、型、线、锻件等）的比例由 2014 年的 10%左右提高到 15%以上，高级深加工产品即精密加工的可供装配的零配件如车轮、电子产品零件、汽车的其他零配件、轨道车辆等等的比例能由目前的不到 4%提高到 8%左右，那么电解铝厂的产品结构就很合理了，经济效益也会变好。铝加工企业应该把更多的半成品转变为成品，由现在的不到 20%提高到 40%左右，建筑铝材生产厂在这方面做得较好，大中型生产企业已将相当一部分型材加工成门窗、幕墙与模板，但还有相当大的发展空间。中国这一轮现代化铝平轧项目波澜壮阔的建设自 2003 年期历经 15 年可于 2017 年结束，形成板带箔生产能力超过 15000kt/a，占世界总生产能力的 50%以上，为了迎接“工业 4.0”时代的到来，中国铝工业已做好了准备。铝平轧产品板块要做的主要工作有：提高设备制造特别是自动化设备与工艺控制系统的成套供应能力，精深加工零配件的供应能力；还应尽快建设 ABS（汽车车身薄板）项目，美国正在建单一企业 ABS 生产能力

600kt/a 的工厂，我们在建的 5 个项目的总生产能力还只不过 500kt/a，值得探讨；铝-锂合金板带项目也需要建设，才能满足未来航空航天工业发展需求。

1.10.2 铝的产业化过程：历史的“巧合”

1854 年，法国人德维尔发明了用钠与 NaAlc14 反应生产铝（3Na+Naalc14=Al+4NaCl)的方法。1889 年在英国伯明翰附近建一家用此法生产铝的工厂，产量达到 227kt/d。1854 年，德维尔和德国人本森（Bunsen）各自独立使用炭电极在陶瓷容器内以电解 NaAlC14 法生产出了少量的铝，但是此时直流电机尚未面世，因此直到 1867 年直流电机的出现，才为电解提铝法奠定了物质基础。

1886 年，美国奥伯宁大学化学系（Oberlin College in Ohio）学生霍尔（C.M.Hall）与法国埃科矿业学院（Ecole des Mines）学生埃罗（Paul L.Heroult），几乎同时各自发明了用电解方法电解溶解在冰晶石熔体中的 Al203 生产铝的工艺，在 950℃~970℃电解，在此温度冰晶石（Na3AlF6）可以溶解约 3.5%Al203。1886 年 2 月 23 日,霍尔用电解冰晶石中 Al203 的方法生产出了铝，并在美国获得了发明专利；埃罗也用相同的方法制得了铝，并在法国获得专利。在以后 3 年内，两个专利都得商业应用。1888 年霍尔与其伙伴集资 2 万美元创

办了匹兹堡冶金公司（Pittsburgh Reduction Company），同年 11 月生产出世界第一罐商业化铝，1907 年改名为美国铝业公司（Aluminum Company of America），1999 年缩写名称 Alcoa 正式启用。经过 126 年的发展，Alcoa 已成为世界最大、技术力量最雄厚、对铝产业贡献最大的铝业公司，2011 年销售收入 249.51 亿美元，总资产 401.2 亿美元。大约在 1886 年 4 月，在大洋彼岸瑞士的纽豪森（Neuhausen）也首次用埃罗的专利技术生产出了铝。所以现在把电解炼铝法称为霍尔-埃罗法，基本原理直今未变，不过槽形、槽容量和电耗、环保等却发生了很大变化。直流电耗由最初的 40000kWh/tAl 降到了 2011 年的约 13000kWh/tAl，即电流效率由 75%上升到 93%以上（中国中孚实业林丰铝电公司 400kA “静流式”低温低压电解槽的直流电耗低到 11819kWh/tAl，达到国际领先水平）；电解槽的容量（电流强度）由那时的几 kA 增加了现在的 500kA 或更大一些；电解槽的结构也发生了巨变。

无巧不成书，很有意思的是，霍尔与埃罗不但独立地相隔万里发明了铝的熔盐电解法，而且他们同为学化学的大学生，年龄也相同，都是 22 岁，后来竟又同年逝世，当然这都是历史的巧合。1987 年起，他们为了倒底谁是铝的熔盐电解提取法的发明者与专利方面的问题，发生了一场唇枪舌战，打得难分难舍，后又对簿公堂，足足闹了两年多，最后以两

个专利都有效收场。后来他们竟成了莫逆之交的好朋友。这也算铝工业发展史上的一则逸闻趣事。

1.10.3 说说铝摄入那些事

●铝不是人体必需的元素，但也不是对人体有毒的元素。

●铝从口入，要控制铝的摄入就得管住嘴，摄入的铝主要来自含铝的食品添加剂。

●铝摄入过量不是铝材及铝器使用多了，主要是含铝食品添加剂的泛用乱用。

●铝制器具不必少用，铝箔不但不能少用还应多用。

paris
Series
Series
SIGG
SIGG

PFANDFREI
Christinen
Carat
Natürliches
Mineralwasser
PFANDFREI
Christinen
Carat
Natürliches
Mineralwasser

德国铝包装一览。董春明 摄

据新华社电，5 月下旬，国家卫计委、工信部、质检总局、食品药品监管总局和粮食局 5 月 22 日联合发布公告，自 7 月 1 日起,膨化食品生产中不再允许使用含铝食品添加剂。

公告称，根据《食品安全法》和《食品添加剂新品种管理办法》的规定，经对《食品添加剂使用标准中含铝食品添加剂进行重新评估，决定撤销酸性磷酸铝钠、硅铝酸钠和辛烯基琥珀酸铝淀粉等含铝食品添加剂，禁止其用于食品添加剂生产、经营和使用，并调整硫酸铝钾（即明矾）和硫酸铝铵的使用范围。除油炸面制品、面糊、裹粉、煎炸粉外的小麦粉及其制品，在生产中均不得使用硫酸铝钾和硫酸铝铵。

那么，如何看待铝摄入食品中的问题？如何正确理解铝在生活中的应用？如何认识铝和人们的生活息息相关以及普遍应用？

无处不在的铝

铝在地壳中分布很广，其含量约为地壳质量的 7.3%，是仅次于氧和硅的第三大元素，而在金属元素中，铝居首位。

铝自 1888 年工业化生产以来，经过 126 年，已参透到国民经济的各个部门与人们生活的每一个方面。铝是一种绿色

结构材料，是节能减排最可观的金属，是赫赫有名的循环经济金属材料，是被誉为天上飞的金属、地上奔驰的金属、水面疾驶如飞的金属。没有铝就没有今天这样快捷便利的航空事业，地球也就不会如同一个“村”；没有铝也不会出现舒适的高速列车与磁浮列车；没有铝汽车也不会跑得这么快，外形也不会这么亮丽；没有铝就不会有如此之多的绚丽多彩的高楼大厦；是铝把强大的电流从遥远的电站万里迢迢输送城市与农村，输送到工厂与矿山，给机器带来动力，给黑夜带来光明；是铝使我们过上现代化的冬暖夏凉的舒适生活。再来看看我们的家里吧，有些家的门窗是铝的，而且会越来越多，洗衣机中有铝，电饭煲中有铝，面包机中有铝，空调器中有铝，冰箱中有铝……

铝已成为一种无处不在的金属。

铝摄入过多可能影响健康

既然铝是一种无处不在的金属，我们天天都在与铝打交道，眼睛一睁开就能见到铝，一出手就可能碰触到铝，吃的五谷杂粮、面包饼干、蔬菜水果，喝的水与饮料，不管是中国的还是外国的，也不管是古代的还是现代的都含有微量的铝，想要避开铝是不可能的。

既然避开铝不可能，人人每天都在摄入铝，那么铝对人体健康是有益还是有害呢？现代医学证明：铝报入量不超值

（2mg/周·kg）对人体健康无妨碍，多则可能影响骨骼和神经系统健康，可能会导致骨质疏松，损害人体中枢神经，出现记忆衰退现象。

在常用的金属元素中，铁、锌、钾、镁、铜、钙等对人体健康有益，不能或缺；铅、汞、镉、铊等则对人体健康有害，有的有很大毒性；可是象铝、锡、钛、镍、金、银等则是“中性”的，既不是必需的有益元素，也不是宜避而远之的有毒元素，但是对其态度是，少则无妨，多则不宜，甚致有造成危害的可能。

一般认为铝吃多了会得老年痴呆症，确实早在上世纪 70 年代就有研究发现它与老年痴呆有关，在患这种病的老人海马神经中铝的含量偏高，不过这一点还并未形成医学界的共识，甚致世界卫生组织也曾认为，现在还没有足够的证据证明铝与老年痴呆有直接的关联。目前医学界较一致的看法是，铝主要是影响骨骼和神经系统健康。笔者认为，有关人们健康的问题是大事，宁可信其有不可信其无。

医学专家陈君石先生表示，不是说铝摄入量超值了就会发生中毒，而是发生有害作用的可能性增加了，所以一般不宜超过，真正的危害要看超过多少，超过多长时间。只要不长期过量超值，就不必提心其危害。

国家卫生计生委等部门之所以下文对含铝食品添加剂大动杀戒，是因为中国人摄入的铝多了一些。铝是人体非必需

的微量元素，绝大多数天然食品虽多含铝，但其量微，不会影响人体健康，摄入的铝主要来自含铝的食品添加剂。

在中国，在面粉、馒头、面条、油条、油饼、麻花、炸糕、粉条、面包、海蜇、膨化食品和其他面制品中都含有一定量的食品添加剂，使用最多是硫酸铝钾（钾明矾）和硫酸铝铵（铵明矾），它们遇水在室温下会发生如下反应：

2KAl(SO4)2+6H2O=2Al(OH)3+3H2SO4+K2SO4

NH4Al(SO4)2+4H2O=NH4·H2O+Al(OH)3+2H2SO4

反应结果并未放出二氧化碳，不会使食品松松的，使食品松软的是添加的小苏打（碳酸氢钠 NaHCO3），它在稍高于室温的条件下不会放出二氧化碳，在面食中形成许多小气孔：

2NaHCO3=Na2CO3+CO2+H2O

钾明矾与铵明矾是使炸出的面食具有更加亮丽的与油汪汪的色泽，口感也更好与更有劲道。

联合国粮农组织/世界卫生组织食品添加剂联合专家委员会（JECFA）于 2011 年 6 月在其第 74 次大会上将铝的“暂定每周耐受摄入量（PTWI）”确定为每公斤体量 2mg，这相当于一个 60kg 的人每周摄入的铝不宜超过 120mg。通常，一个人如果每天吃 500g 蔬菜，300g 水果、100g 肉、一个鸡蛋、300g 粗细搭配与米面搭配的粮、350g~500g 半奶、偶尔吃点油条与麻花、一小把坚果，铝的摄入量不会超出此标准。

中国食品安全委员会等组织的科学家对铝的摄入作过严

格的风险评估，结果显示：膨化食品是儿童铝摄入的主要来源之一，而且年龄越小的孩子相对摄入量越多。因此，在膨化食品中禁止含铝添加剂的使用，对保护儿童的茁壮成长有着重要的意义，对成年人的身体健康也有帮助。

风险评估还显示，面食铝含量比米食的偏高一些，因而面粉、馒头、油条是我们最主要的铝摄入来源，这就是政府为什么决定大幅度削减明矾（硫酸铝钾与硫酸铝铵）在面制品中使用范围的初衷。

控铝摄入主要靠自己

铝从口入，要控制铝的摄入就得管住嘴，而管住嘴，主要靠自己。尽管政府已做出针对性的严格规定，但这仅是粗线条的，只能管住大中型的食品加工企业。而大量的小作坊、路边摊贩，甚至黑作坊，是管不胜管。监不胜监的，超量、超范围使用含铝食品添加剂特别是明矾的情况还会继续存在，这是当前的实际情况，只有建立了完善的社会主义市场经济体制与健全的法律体系才能完全或接近杜绝。

对寻常百姓来说，控制铝的摄入不超量就得靠自己管住嘴，管好嘴；

米面食与粗细食搭配吃。按照现代的平衡膳食理念吃，粗细搭配，晕素搭配，不用担心铝摄入会超标。北方人喜面食，南方人爱吃米饭，因此北方人摄入的铝比南方人的多一

些，不过只要少到外面吃，不经常到摊位吃，吃自己做的不添加明矾的面食，或者买大企业生产成品面食，回家做着吃，就不担心铝会超标。

尽量少吃油炸面。不宜天天或一次多吃油炸的面食，如油条，油饼、麻花等，特别小作坊、摊位上做的，即使是中、大企业生产的没有添加膨化剂的油炸食品也不宜多吃。当然偶尔吃吃也无妨。过于蓬松的馒头、包子、发糕、焙烤等也不买，更不要经常吃。

不要经常吃海蜇。海蜇是一种经过“三矾二水”工艺加工的食品，这就决定的它是一种铝含量高的海产品，当然很少有人天天去吃它，不过即使如此，在吃之前宜用醋多泡泡，会使铝的含量明显下降，这样铝摄入量就会下降。

自 2005 年以来，中国大、中型食品加工企业都按政府规定不再使用含铝添加剂。含铝添加剂，像硫酸铝钾、硫酸铝铵是膨松剂。生产膨化食品有三种工艺，油炸、不油炸、挤压。只有不油炸的才使用膨松剂，用另两种工艺生产时，可有膨松效果，没有必要添加膨松剂。另外，在超市买加工好的面食时，应仔细看看包装袋上的配料成分表，加有含铝化学物质的产品不要买或少买，偶尔尝尝也可以。

正确看待控铝

尽情分享绿色铝生活

铝不是一种人体必需的元素，但也不是一种对人体有毒的元素，只要严格执行政府的不往食品中添加禁用含铝的添加剂，按正常饮食习惯进餐，摄入的铝就不会超过 2mg（毫克）/（kg·周）。当前医学界的一致看法是，铝摄入多了，会影响骨骼和神经系统的健康。因此，我们既应积极控制每周每公斤体重铝的总摄入量不超过 2mg 的底线，但也不要谈铝色变，如铝制器具应少用了，铝箔的使用也应减少，有媒体称：“少用铝制器具。最后，减少铝制器具、铝箔的使用，避免盛装酸性食物，比如番茄、醋等。”

铝制器具不必少用，铝箔不但不能少用还应多用。我们知道，在常用的铝电饭煲上面有一层薄薄的对人体健康无害的涂料，只要这层不粘锅涂层完整无损，铝就不会溶于饭、菜、汤里去，不会摄入多的铝，可以大胆使用，绝对安全，如果掉了涂层或涂层坏了，就不要再用了。在盛装饮料、可口可乐、啤酒、凉茶、鱼、肉等的罐内部也有一层涂料，只要饮料、食品未过期就可以确保安全，万无一失，尽情地享用吧！用铝箔包装一切食品都是安全的，不管是鸡、鸭、鱼、肉，还是糖果、饼干，君不见素有环保、安全、健康为首要重任的西欧各国正在大力推广铝箔的应用，铝箔已进入家庭，用铝箔包装种种存放于冰箱中的食品，以防串味与保鲜，其他工业发达国家也都在这么做的。饭店用铝箔包着上的高档美味佳肴，民航机上，用铝箔盛装饭菜都能确保安全。全世

界都用铝箔药品，即使是瓶装药品它的盖也是铝的。用铝箔包装食品可确保其色、香、味，用铝箔包装药品能隔绝潮气进入，能避免阳光照射，延长保质期，避免变质，是绝好的药品包装材料，铝原子不会扩散到食品、药品中去，可放心、放心、再放心。

铝是一种两性金属，铝表面上的氧化铝（A1203）膜也是一种两性化合物，既可以与酸性物质反应，也可以与碱性物质应，不宜用无涂层的铝容器盛装酸性或碱性强的物质，但是暂时装装也无妨。

记住，即使对人体健康有益的元素摄入的量多了，也是有害的，何况不是人体必需的元素呢！铝摄入过量不是铝材及铝器使用多了，而主要是由于含铝食品添加剂的泛用乱用。

1.10.4 昆山铝粉大爆炸本不应发生

表 1：

粉尘种类	浮游粉尘的发火点/℃	最小点火能/MJ	爆炸下限/g·m⁻³	最大爆炸压力/GPa	压力上升速度/GPa	
					平均	最大
铝	645	20	35	6.2	151	399
镁	520	20	20	5.0	308	333
铝镁合金	535	80	50	4.3	158	210

注 α：表示在纯二氧化碳中能发火

铝粉爆炸的最低氧含量如下：

气体类型	CO_2/N_2	最低氧含量，%		
		细铝粉	涂料铝粉	
O_2-N_2	–	9	10	
天然气燃烧产物	0.002	9	10	
$O_2-N_2-CO_2$	0.50	7.5	9	
CO_2-N_2	2.3	7	7	
O_2-CO_2	–	8.5	6	

2014 年 8 月 2 日上午 7 点 30 分，江苏省昆山市中荣金属制品有限公司铝车轮抛光车间发生铝粉尘爆炸，当场 44 名员工遇难，截止到 8 月 4 日已有 75 人死亡，185 人受伤，烧伤之严重，令从事烧伤治疗长达 27 年的上海瑞金医院烧伤科主任医师张勤沉痛地说：从未看到如此严重致命的爆震伤。几乎所有伤者都是深度烧伤，一个约 7500m2 的车间倾刻化为灰烬。死伤人数之多，是中国铝工业从未有过的，实在令人痛心，这本来是一起完全可以避免的重大责任事故。

铝粉、镁粉、铝－镁合金粉属易燃易爆物质，在制粉和保存过程中可发生遇明火爆炸，也可以发生自燃，通常前者

占多数，同时现在是相对湿度大的季节，自燃可能性很小，因此昆山这一次爆炸显然是明火引发的。粉尘爆炸是悬浮在空气中的粉尘急剧氧化燃烧，产生大量的热和形成高压的现象。

中国自上世纪60年代以来，发生了40多次铝粉爆炸事故，东北轻合金有限责任公司1965年发生一次事故，但仅死亡一人；上世纪70年代济南一家铝粉厂发生爆炸也仅死亡几人；像昆山这次爆炸伤亡这么多人，在世界铝粉爆炸史上可是破纪录的；1952~1977年日本铝粉爆炸事件24起，死伤人数93名，其中死亡25人。

爆炸原因与条件

铝粉发生火灾与爆炸是由于铝与氧反应产生大量的热能：4Al+3O2=2Al2O3+3.3MJ。

铝粉与氧在有明火时所发生的反应极为迅速，可在几微秒内完成。产生的热能使用的空气温度与压力急剧上升，发生爆炸，形成冲击波，冲击波是造成厂房、设备破坏与人员伤亡的主要原因。

粉尘的燃烧热越大、粒子越小、氧化速度就快，也越容易爆炸。粉尘爆炸有三个条件：1. 粉尘浓度。不同物质的粉尘，其爆炸浓度也不同。铝粉的爆炸浓度为35~301g/m3，镁粉为20~825g/m3，铝－镁合金粉为32.5~563g/m3。2. 助燃

物质，即氧气的浓度。在磨合金粉时氮气中氧含量为 2%~6%，磨铝粉时氧含量为 2%~8%都不会爆炸。3. 温度，即有明火或火花使粉尘达到燃烧所需的最低温度。铝粉、镁粉和铝镁合金粉的爆炸特征如表 1 所示。

空气中悬浮的铝粉必须达到一定的浓度才会爆炸，爆炸的最高浓度叫上限浓度，最低浓度叫下限浓度。铝粉的爆炸极限浓度并不固定，取决于粉末粒度、粉上的氧化膜厚度、火源能量与起火温度。其上、下限浓度波动相当大，下限浓度为 1.25~50g/m3。日本用 30μ m 铝粉测得的上限浓度为 4320g/m3，中国用 24μ m 铝粉测得的上限浓度大于此数。

防爆措施要加强

防止铝粉、镁粉、铝－镁合金粉爆炸最根本的措施是不形成粉尘气氛，但在这些粉末生产中无法做到这一点。因此，要把主要预防措施着眼于爆炸引起的第二次性大破坏。预防爆炸的主要措施如下：

1. 严格控制空气中的铝粉浓度。

2. 设备中充以氮气，使气氛中的氧含量低于 8%(体积)。

3. 严禁明火与火花。

在生产铝粉的车间内以及有铝粉积聚与飞扬的地方不得出现明火与产生火花。为此，不得点灯、吸烟、气割与电焊；采用防爆电器开关与灯具；消除静电；一切设备都应接地；

在厂房区内设置避雷塔；工具用碰撞时不会火花的铜、铝合金制造；车间地平不得用绝缘材料制作；鞋上不得打钉子；采暖设施温度不得超过 150℃；易发生火花的设备，宜衬有色金属或用有色金属制造。

4. 采取强有力的消防措施，加强对职工的安全教育。

5. 经常清扫和整理工作场地。

6. 精心选择厂址，设备布局合理。

7.在设备上设置安全阀或防爆膜，厂房有泄压面。

8. 实行高度自动化的遥控生产。一旦发生事故，也可不伤亡或少伤亡人员。

吸取血的教训 严防粉尘爆炸

只要认真执行《GB 17269-1998：铝镁粉加工粉尘防爆安全规程一》，只要员工有牢固的安全防爆知识，只要安全环保部门严格执法，这次昆山中荣金属制品有限公司车轮抛光车间的铝粉大爆炸本来是完全可以避免的。这次全世界铝工业有史以来最严重的爆炸也给我们敲响了警钟，凡是可产生铝粉、镁粉、铝－镁合金粉的企业、场所等的人员再也不能麻木不仁了，监管部门应严格执行有关法规条例，认真管起来，一丝不苟地执法，企业应对员工进行全面的安全防爆教育与培训，金属粉尘爆炸是可以避免的，大的爆炸是可以杜绝的。

截至 2013 年末，中国铝粉、镁粉、铝－镁合金粉的生产能力约 300kt/a，产量近 100kt，生产企业约 120 家，铝车轮生产能力约 1.3 亿只/年，生产企业超 200 家（不是所有车轮都要经过抛光处理），加上其他产生铝粉的工作岗位，估计全国接触铝粉的人员超 100 万人。

安全防爆 16 字令：烟明存教 具尘扫道 吹窗盖密 易暖废爆

中国从事铝粉、镁粉、铝－镁合金粉的生产人员通过多年的实践，总结出 16 字令，对防爆有一定的参考价值，且简明易记，不妨让职工熟悉一下：

烟——生产厂房或车间内除指明特定场所外严禁抽烟与烟火。

明——需要在工作地点动用明火，必须办理动火证，并采取可靠的安全措施。

存——存放的防火器材保证有足够的数量。

教——新进人员必须经过三级安全防火教育。

具——不准使用钢铁类工具、若必须使用，必须涂以黄甘油。

尘——设备、地面和墙壁上不准积聚大量粉尘。

扫——按规定搞好卫生，对厂房和设备进行定期或班班长彻底清扫。

道——禁止堵塞通道和人员疏散出口。

吹——按规定，定期吹洗设备、电机和仪表内粉尘。

窗——盛有产品的容器必须距暖气片和窗户 1m 以外。

盖——产品桶必须盖上盖子。

密——一切设备和照明灯具必须是密封的或防爆的。

易——生产场所严禁存放其他易燃物品。

暖——采暖使用水暖，温度不得超过 110℃，蒸汽采暖温度不得超过 130℃。

废——所有废料必须存放在指定地点，定期妥善处理。

爆——所有员工不准做可以打出火花的工作。

1.10.5 铝：为光伏发电提供支架

电，人类社会文明发展的推动力，用电量多少是社会文明程度的标志；电，推动社会前进的能源与动力，可它是由别的能源如石化燃料（煤、石油、天然气等）燃烧发出的热能和太阳能、水能、风能、核能、地热能、潮汐能等转化来的，是它们释放的能量推动着发电机生产出来的。石化燃料燃烧时除释放热能外，还会排放大量的温室气体二氧化碳等，同时地球上存在的石化燃料是有限的，烧一吨少一吨。核能发电时虽不释放二氧化碳，但核燃料反应以后的固体废弃物还有很强的放射性，处理它们是一件非常繁琐且耗资巨大的工作，同时，核电站一旦发生不可控的安全事故，就是非常严峻的重大灾难。所以火力发电是非绿色的，非环保的，核电也不是完全环保的。而太阳能发电不但是真正绿色，也是

取之尽，用的不竭的；水能、风能、地热能、潮汐能等发电也是绿色的，也是可再生的能源。

目前，我国提出了大力发展新能源战略。风电产业比较成熟，1989 年新疆达坂建成中国首座风力发电场，至今已有 23 年，运行情况良好，并没有因风沙磨蚀而损坏。从 2009 年以来我国出现了大规模发展光伏发电系统的浪潮。2010 年 5 月 25 日，装机容量位列亚洲第一的云南昆明石林太阳能光伏并网实验示范电站一期投产发电，2015 年全部建成后发电量 1.88×108kWh/a，CO2 减排 17.5404×104t/a，即太阳能发电 1kWh 减排 CO2 0.933kg；2010 年 9 月 26 日，被国家列为“金太阳”示范项目的阿尔斯通太阳能发电项目的一期工程在天津空港经济区建成，并于 10 月 12 日并网运行。这套设备是阿尔斯通水电设备（中国）有限公司制造的，是一项屋顶太阳能发电项目，一期投资 1500 万人民币，共有 2000 块太阳能硅光电池板，发电量 50×104kWh/a，可减排 CO2 约 500t/a，该项目计划装机容量 200×104kW。这些项目的太阳能硅电池的框架、支架、拉杆等全是用 6061、6063、6082 等合金挤压材制造的，平均挤压材用量 60t/MW。

北京亦庄工业园的京东方第 8.5 代液晶显像管生产厂房

的太阳能项目于 2012 年 3 月开始发电，所有的太阳能光伏电池板铺设在 110000m2 的厂区屋顶，共有 21276 块，总装机容量 5000kW，发电量 600×104kWh，总投资 9000 万元，共用挤压铝材 300t（净重），铝材的采购质量约 360t。今年上半年仅北京市开工建设的有：八达岭太阳能 31×106W 地面大型光伏发电项目、昌平 12.8×106W 矿山修复治理太阳能光伏发电项目、密云 20×106W 地面光伏电站项目等一系列新能源高端利用项目，需要采购挤压铝材 4600t。

科技部 2012 年 5 月发布的太阳能发电规划称：目前全球太阳能热发电成本价格在 0.2 欧元/kWh，到 2020 年有望降低到 0.05 欧元/kWh；我国将把实现太阳能大规模利用、使其发电成本可与常规能源竞争作为“十二五”规划的总体目标；装机成本 1.2 万元~1.3 万元/kW，初步实现用户侧并网光伏系统平价上网，公用电网侧并网光伏系统上网电价低于 0.8 元/kWh。太阳能热光伏发电将在我国得到高速持续发展，年平均增长率可达 22%。

笔者估算，我国在“十二五”规划期间太阳能光伏发电机组的装机容量可达 15GW，如果将其他太阳能发电设备的用铝量也计算在内，则在“十二五”期间太阳能发电系统对铝

材的平均需求为 180kt/a。太阳能光伏发电装置的用铝中除 85%左右为挤压铝材外，还要用一些板材。

初期的太阳能发电装置的电池板框架、支撑杆、连杆、框架腿等是用钢材制的，现在几乎全世界都已改用铝材，因为铝的密度小，单位长度产品的质量比钢的轻 50%以上便于运输与组装；铝材的抗腐蚀性能强，在设计的 25 年服务期间不需要维护，而钢材的几乎年年需要维护；使用期满后，铝材几乎可全部回收循环利用，而钢材则会损耗 15%以上。

国际能源署在 2010 年 4 月发表的《太阳能光伏发电工艺路线图》中称：2020 年全球太阳能发电设备的装机容量可达 145GW、2030 年可达 337GW、2050 年将拥有 1089GW，而光伏发电机组的装机容量可分别达到 210GW、872GW 与 3155GW。2009 年太阳能发电站的挤压铝材用量为 54.432kt/MW，光伏发电站的挤压铝材用量 45.36kt/MW。

1.10.6 中国向印刷铝基板强国迈进

年度	胶印版产量/×10⁴m²	铝板基需求量/kt	其中CTP需求量/kt
2005	13200	117	4.5
2006	18000	159	17
2007	24155	214	31
2008	27873	246	55
2009	29955	265	80
2010	34600	306	115
2015	62200（预测）	560	336

印刷术是中国古代四大发明之一，1041~1048 年（北宋庆历年间）中国宋代的毕昇首先发明活字版印刷术，后来传

到欧洲，1438~1450 年间德国的 J.谷登堡首先使用 PB-SB-Sn 合金铸成铅活字用于印刷书报，此后这种印刷术传遍欧洲与世界各地，直到上世纪 90 年代中国的书刊、报纸的印刷仍以此种印刷术为主。当代的胶印于上世纪 80 年代进入中国，现在中国的印刷业几乎已全部胶印化了。胶印就是用 PS/CTP 版印刷书刊、报纸等纸质传媒。

PS 是 Pre-sensitive（预感光版）的缩写，CTP 是 Computer-to-plate（计算机直接制版）的简称。PS/CTP 版可统称为印刷版或胶印版，是在铝基板上涂有感光层的经制版后即可上机印刷的版。现代印刷版的基板都是铝板。根据 YS/T421-2007，PS 版铝板基分为三类：普通印刷 PS 版基，供报纸、书籍等普通纸张印刷用；彩色印刷 PS 版基，供图画、彩印文字及特种纸印刷用；CTP 印刷 PS 版基，供计算机直接制版用。

PS/CTP 铝板基产业 大国梦将圆

PS/CTP 版用于印刷时具有印刷品质高、耐印力强、对环境友好、洁净卫生、成本合理。分辨率高、字迹清晰、速度快、再现性强。铝板基为 1050、1060、1070、1052 合金，它们的铝含量分别≥99.50%、≥99.60%、≥99.70%、≥99.52%。铝板基具有密度小、强度较高、耐磨性适中、易加工、好成形、亲水性好、稳定性高、表面处理性好、可回收性强、易

再生、资源充裕、价格合理等优点而成为一种无可争辩的优质 PS/CTP 版基材。PS/CTP 版可统称为印刷胶版或印刷版。

2011 年中国 PS 与 CTP 版的消费量约 4.1×108m2，前者约占 50%，2.05×108m2；后者占 45%左右，1.85×108m2；再生 PS 版占 5%左右，0.2×108m2。在发达国家，胶版印版的 CTP 化率已达 90%，比中国的高 45 个百分点。其主要原因是，他们的印刷速度快，印刷品质高、印刷品一般都达到精美级水平，但今后中国 CTP 版的年平均增长率将比 PS 版约大 7 个百分点，可能到 2018 年 CTP 版的需求率可达约 80%。

2011 年中国在产的 PS/CTP 版生产企业在 85 家以上（含一些大的再生版企业），生产线约 150 条，生产能力约 5×108m2。根据中国印刷及设备器材工业协会印刷器材分会的统计，2005~2010 年中国 PS/CTP 胶印版的产量见下表，其中对铝板基的需求是笔者按胶印版的成品率为 84%计算的，2011~2015 年的产量及需求量是笔者估算与预测的。

2005~2011 年中国 PS/CTP 版产量的年平均增长率为 21.32%，由于在“十二五”规划中国采取稳中求进的发展战略与建设文化大国的策略，所以预测 2011~2015 年国内胶印版产量时按年平均增长率 11.2%计算。

经过近 30 年的发展，中国已成为胶印版铝板基生产大国，2012 年产量可完全满足市场需求，2013 年可成为净出口国，

不管是 PS 基板还是 CTP 基板。2013 年是中国 PS/CTP 铝基板产业迈开双腿奔向强国开局之年。

2013 年中国将不再进口 CTP 铝板基

在中国特色的 PS/CTP 铝板基产业中。率先开发 PS 铝板的企业是东北轻合金有限责任公司与西南铝业（集团）有限责任公司，它们用的是铸锭热轧带坯，后来华北铝业有限公司、瑞闽铝板带有限公司、明泰铝业有限公司等用连铸轧带坯生产 PS 铝板基。用连续铸轧带生产的 PS 铝板基是中国的一大特色，世界其他国家用的铝板基几乎全是用铸锭热轧带坯生产的，用铸轧生产有 PS 铝板基的品质可与用铸锭热轧带坯生产的相当，不过 CTP 铝板基还是用铸锭热轧带坯为好，不但品质好一些，而且成品率高，性能的稳定性也强一些。2011 年中国 PS/CTP 铝板基的生产能务已达 450kt/a，2015 年的生产能力可达 800kt/a，2020 年的生产能力可超过 1200kt/a，约占全球总生产能力的 65%。在生产 CTP 铝板基工艺中，纯拉伸矫直生产线是必不可少的。对产品平直度与性能的保证起着很大的作用，截止 2011 年中国引进的这种生产线有 3 条，分布于渤海铝业有限公司、中瑞瑞闽铝板带有限公司、厦顺铝箔有限公司，2018 年还可以引进 8 条，如南山轻合金有限公司、中孚实业股份有限公司、忠旺集团、魏桥创业集团有限公司、万基控股集团有限公司、中金铝业有

限公司等，这 11 条生产线的总生产能力可达 600kt/a。

2013 年中国将不再进口 CTP 铝板基。2011 年中国还进口了约 10ktCTP 铝板基，主要是厦门柯达胶片有限公司进口的，但是随着瑞闽铝板带有限公司与厦顺铝箔有限公司热轧线及纯拉伸矫直生产线的达产，产量会有较大上升，足以满足国内日益增长的需求。从 2013 年起，中国会成为 CTP 铝板基净出口国。2011 年中国 PS/CTP 铝板基产量最多的是明泰铝业有限公司、栋梁铝业有限公司、中铝瑞闽铝板带有限公司，它们的产量约占全国总产量的 46.5%。

成为 PS/CTP 铝板基强国的关键是科技创新。尽管中国已成为有特色的 PS/CTP 铝板基大国：有世界最多的领先装备；形成了系统的铸锭热轧与连续铸轧带坯生产体系，特别在以铸轧带坯生产 PS/CTP 方面积累了丰富的经验，但要成为强国还有许多工作要做，主要是成品率、性能稳定性与一致性、合金成分方面。中国生产 PS/CTP 铝板基的成品率约比海德鲁铝业公司阿卢诺夫铝厂、力拓·加铝集团纽布里萨克公司、诺威力一大韩铝业公司、美国铝业公司、日本神户钢铁公司的约低 4 个百分点，性能稳定性与一致性也与它们的有一定的差距，在耐印力方面也有一些不尽人意的地方。

至于合金的成分还要不少工作要做，虽然 PS/CTP 用的合金都属 1XXX 系工业纯铝，但从我们的工作经验与金属学原理来看，应把这类合金看成是 Al-Fe-Si 系合金，这涉及到 Fe/Si

值问题，必须达到一定的比值，才能生产出优质的产品，不仅是 Fe 含量大于 Si 含量就行，最好是（Fe/Si）值＞2.5，当然也不能过大，如≥3.5 又会出问题。不妨向 1060、1070 合金中试试加≤0.32%Mg，这样少量的 Mg 不会形成新的相，会完全固溶于铝中，可使合金的强度略有升高，对 PS/CTP 工作特性有益。

如有投资者感兴趣的话，也可以建生产能力为 150kt/a 的 PS/CTP 铝板基项目，有一条 1800mm 的（1+1）式热粗-精轧生产线、1 台高水平的 6 辊冷轧机与 1 台普通级的 1400mm 辊冷轧机、1 条 1800mm 的纯拉伸矫上线、1 条 1400mm 的拉弯矫直线、2 条纵、横剪生产线，投资 20 亿元人民币就可以。如果再投资 5 亿元还可以建深加工生产线，生 PS/CTP 版。若资金不够还可以建 1500mm 级的生产线，将生产能力降到 100kt/a。因为当前卷筒纸的宽度为 1575、1562、1400、1280、1092、1000、900、880、850、787mm 等，≤1280mm 的纸的印刷量占 80%以上。

根据联合国有关部门发表的数据，2005 年中国只有 5%人有读书习惯，而日本有 60%；法国层次中等的人每年平均读 12 本书，而层次高的人则平均读 17 本，而中国每人每年平均阅读仅 2.5 本。中国已将建设文化大国与强国的宏伟监图提上了日程，在今后几十年内印刷业将是持续高速发展的产业，PS/CTP 铝板基产业将会长期兴旺发达。

1.10.7 铝工业是可持续发展的储能节能产业

1987 年，挪威首相布伦特兰夫人在世界环境和发展委员会上发表了题为“我们共同的未来”的演讲，她在报告中将可持续发展定义为：“满足当代人的需要，而又不损害后代人满足需要的能力的发展。”这一经典定义至今仍是确切的，已为全世界接受，成为可持续发展的至理名言。

实现可持续发展的坚实基础

由于铝及铝合金具有诸多特性，铝工业注定是一种可持续发展的万古长青的产业。

铝是推动人类文明社会向前发展的一种不可替代的材料，120 多年以来,铝都是发展工业的基础材料。自 1983 年开始，铝就是人类文明社会应用的第二大金属，2013 年全球原铝产量达到 505700kt，从 1998 年的 22107kt 上升到 2013 年的 505700kt 的年平均增长率为 23.2%，超过任何一种常用结构材料。在可预计的时间内，铝制材料的复合增长率虽然会有一些下降，但它仍将使增长速度最快的。

铝资源极为丰富，铝是地壳中含量最丰富的金属元素，是仅次于氧、硅的第三元素，约占地壳质量的 8%（早些时候的数据为 7.47%）。据美国地质调查局的统计，2010 年世界

铝土矿储量约 310×10 8 吨，基础储量约 395×108 吨，资源量 670×108~900×108 吨，基础储量的静态保障年限约 205 年，真可谓是取之不尽，用之不竭。

在人类应用的所有的结构材料与大宗功能材料中，铝、铝合金、铝制品的可回收性是最高的，它们的可回收率可达 90%以上。当然也有一些铝是一次性的，得不到回收，如制造烟火、弹药、信号弹、涂层（涂料）、导弹发射固体燃料等用的粉膏；制造药物与化工产品用的；钢带镀层、镁合金、铝青铜、锌合金、钛合金、高温合金等用的；炼钢作为脱氧剂的；冶金作为还原剂用的。除此之外，其他的铝制品与结构在服务期（可按 15 年计算）满后可得到全部或不同程度的回收，包装药品、食品、饮料等的回收率是最低的，只有不到 5%左右，而包装啤酒、凉茶、可口可乐等全铝易拉罐在中国的回收率可达 97%以上，仅个别整罐与大部分封口片及拉环得不到回收，在美国易拉罐的回收率约 65%，循环一次的周期约为 40~60 小时，而在中国循环一次的周期为 40 小时到半年。在此应指出的是，铝的循环途径最好是从摇篮到摇篮，即废铝品原来是用什么合金制的经加工-使用-回收后再制成原来的合金，例如易拉罐身是用 0.27㎜ 厚的 3104-H19 合金深拉的，废罐回收后仍加工成这种带材，是最有效的最经济的循环途径。世界上一些大铝业公司早已做到了，可是中国还没有做到，2013 年，中国产了约 250×108 个易拉罐，虽

然 97%以上会得到回收，但是没有回收加工成 3104-H19 合金带材，二是作为普通的废杂铝回收利用了，这是对资源的一种浪费。2009 年~2013 年，中国进口废铝 13262.814kt，平均进口 2652.563kt/a，这是一件大好事，进口废铝就是进口资源与能源。

铝是一种环保型的绿色金属，使用过程中不会污染环境，对人体无害。不过一些医学科学家发现痴呆患者大脑海马神经中的铝含量比正常人的高，认为铝可能有引起痴呆之嫌，但是，世界卫生组织在一份报告中称：“现在还没有足够的证据证明痴呆与铝的吸取有关。”不过笔者认为，有关人们健康的事情是大事情，宁可信其有，不可信其无。但也不可谈虎色变，在用不粘锅炒菜煮饭时，只要涂层完好就是安全的，如果涂层掉了，最好就弃之不用了。

铝工业是储能产业 铝是上乘的节能材料

当前在原铝生产过程中（铝土矿开采-氧化铝提取-原铝电解）的吨铝综合交流电耗为 17000~18300kWh，而 85%左右消耗于铝电解，同时排放大量的污染物与温室气体，而用燃煤电厂的电，更会间接排放相当量的污染物与温室气体，所以人们往往把铝工业视为耗能产业，是电老虎，同时铝工业还包括下游的加工业与铸造业，它们的能耗不高，仅相当于原铝电解能耗的 10%~20%，所以把铝工业视为耗能工业是不

确切的。同时，从另一个视角来看，铝还是一种可贵的储能金属，铝工业也就成为了一种储能工业，早在 20 世纪 70 年到初，美国就把铝称为“储能银行”，这一理念，已逐渐为大家理解与接受。其主要表现为：铝的服务周期（生命周期）长达二三千年，废铝可循环再生几百次，笔者作了一次计算，1000kg 建筑铝材按一次服务周期 20 年与废铝每次再生烧损 5%计算，可获得令人惊叹不已的结果：使用 500 年后，可回收获得 277kg6063 合金（建筑铝材的 80%以上是用此合金挤压的），使用 1000 年后，还有 77kg6063 合金可为人类服务，1500 年是已循环使用 75 次，仍有 22kg 银光褶褶的铝在那儿，循环再生 90 次即 1800 年后，仍有 10kg 在地球上，及时循环 120 次，过了 2400 年，这 1000kg 铝业不会消失得无影无踪。铝是一种万古千秋的金属。而废钢的再生能耗几乎与矿石开采-炼铁-炼钢的能耗相等。

铝厂可建在能源富裕、交通便利却远离市场的地区，而将重熔用的铝锭运到能源相对短缺的经济发达地区，这比输送电力与煤炭更经济一些，如冰岛与澳大利亚等国家地区都是宜建铝厂的首选地址。

交通运输装备使用铝代替一部分钢铁降低其净质量，在降低能耗的同时可减少废气排放，经济效益与社会效益卓着。美国能源部曾对汽车的节能效果作过专门的研究与评估：在 20 世纪 80 年代，美国汽车工业由于多用铝，在汽车服务期

间，其所节约的能源比美国铝工业在同一期间所消耗的能源还多一些，这还没有计算减排的巨大社会效益。中国 C80 型铝合金运煤敞车载重较 C63A 型敞车提高载重 19 吨，提高运能 31.1%。

1.11 企业

1.11.1 布局“加减乘除” 中铝实现逆势突围

2015 年是我国有色金属行业备受考验的一年，铝、铜等主要产品价格单边大幅下挫，甚至出现断崖式下跌，在生产成本不断攀升的情况下售价创下了 20 多年来的最低点。

但作为我国有色金属工业龙头企业的中铝公司，却在艰难的逆境下经受住了严峻市场环境的挑战，自 2008 年以来首次完成了国资委考核指标，实现了扭亏脱困、升级发展的长足进步。

在严峻的外部条件下，中铝公司充分利用行业低潮期的调整时机，通过实施“加减乘除”等综合措施，调整发展方式和战略，积极引领有色行业的供给侧改革，为实现“十三五”的良好开局打下了坚实基础。

用“加减乘除”撬起扭亏脱困的杠杆

去年是“十二五”的收官之年，也是葛红林从成都空降中铝出任党组书记、董事长后带领这个拥有近 5000 亿元资产的超大型国企全力扭亏脱困的第一年。

然而外部市场并没有为这场本就艰苦的战役提供温室，反而是来了当头一棒。2015 年下半年以来，电解铝以及氧化铝的产品价格出现了大幅下跌，下跌幅度不仅超出了业内预期，铝价更是在年底击穿了 10000 元/吨的 25 年最低点，铝行业内成本售价倒挂，形势愈发严峻，企业亏损面不断扩大。包铝美铝在内的国际巨头也不得不关闭其冶炼产能以减少亏损，抵御寒冬。

“我们不消灭亏损，亏损就消灭我们。”葛红林到任后不久，就在内部会议上严肃指出了持续亏损的后果。

从 2014 年底开始，中铝公司就预估了将要到来的困难，提早做好了扭亏脱困与升级发展并行的打算，按照“处置一批、盘活一批、培育一批、发展一批”的思路，制定了公司、各个板块及每个企业的脱困方案，在内部对企业进行评级划等，给脱困倒排时间。在这个过程中，对技术相对落后、缺乏市场竞争力、扭亏无望的企业，实行了坚决的关停。

其实，这些年中铝公司的亏损，离不开一个核心要素——电。由于中铝公司的铝产品仍然占据着营收的大半壁江山，而电费又占到电解铝成本的 40%以上，因此电价几乎对铝企的盈亏业绩具有“一票否决权”。

由于建设自备电厂需要国家审批，因此中铝公司自备电比例远落后于行业内民营企业，仍然在以每千瓦时 5 角左右的价格从电网购电，而竞争对手的局域网自备电每千瓦时不到 2 角。这几角钱的差距，反映到电解铝成本上，每吨差价就是几千元。中铝的生产成本在起跑线上就输得一塌糊涂。

因此，过去几年，中铝的扭亏工作很大精力用在增加自身煤和电的业务权重，形成煤电铝一体化的发展模式，弥合在电价上的巨大劣势。

葛红林提出，在弥补短板的同时，要把眼光放长放宽，既要加快整合内外部资源，也要创造新的发展优势，使扭亏脱困和升级发展两条腿共同前进。

2015 年伊始，“加减乘除”的综合举措成为中铝公司实现战略的核心举措：做加法，谋划实施一批重大项目，完善产业链条，多元发展培育新的增长点；做减法，分企施策，解决“僵尸”企业，减少亏损面，消灭亏损点；做乘法，坚持创新发展，依靠创新驱动、科技进步打造发展新优势；做除法，强化资本运作，加快盘活处置低效无效资产。

要扭亏，首先是止损。必须做减法，解决“僵尸”企业。作为中央企业，中铝以往关停产能的难度很大，除了经济效益外，还必须衡量所担负的政治责任和社会责任，甚至用自身的亏损实现地方经济的平稳发展。而这种做法又进一步加剧了亏损，不仅没有实现经济和社会效益双赢，更是造就了

“僵尸”企业。

因此，葛红林提出，要按照党中央、国务院对于解决“僵尸”企业的要求，把中铝真正作为市场主体，按照市场规律办事，扭亏无望的产能就是弥补不了的短板，必须坚决砍掉，不能拖后腿，让国有资产不断损失。

2015 年 10 月 24 日，中铝公司旗下有“新中国第一铝”的抚顺铝业完成了对全部电解铝产能的关停。按照计划，除转型发展具有市场竞争力的碳素铝产品外，抚顺铝的产能将减量搬迁到电价更为低廉的地区。

除此以外，对于其他目前经营困难、亏损严重的企业，中铝公司也正在全力进行脱困解救，如果仍然无法具备在当下市场生存必须的竞争力，那么也将被关停。

对于做加法，葛红林给出了一个标准——干一件成一件，提出了四个方向——打好补短板的技改歼灭战，打好事关长远的项目建设攻坚战，增创多元发展的动能和贡献，增创国际化经营收益。

事实证明，科学的加法能让企业在寒冬中快速取暖回血。包头铝业几年前尚是中铝旗下亏损最为严重的电解铝企业之一，通过依托当地优质低价的煤炭资源，在地方政府的支持下建设自备电厂，形成煤电铝一体化产业链，不仅在扭亏路上打了个翻身仗，更是在 2015 年的市场下成了盈利大户。

按照这个思路，中铝正在山西吕梁与华润集团合作建设

从煤、电、氧化铝到电解铝乃至下游产品的全产业链集群式铝工业基地，在内蒙包头与政府合作依托当地富集优质的能源条件建设国内一流的铝工业基地，在河北黄骅港与河北省政府、神华集团合作发展 400 万吨氧化铝基地。这些项目在布局上颇具优势、在成本上精打细算。比如黄骅港项目，利用神华集团返程的空载煤车运送氧化铝，运费优惠一半，成本极具竞争力。

做加法还要善于利用大环境带来的机遇。中铝公司调研发现，“一带一路”沿线的国家中，有不少人均用铝量远低于国际平均水平，铝行业的市场发展空间十分广阔。因此中铝提出，要在资源能源丰富、市场需求旺盛的国家和地区，寻找投资建厂转移产能的机遇，逐步实现氧化铝、电解铝和铜、铝加工产能的全球化布局，并依此带动我国高端装备制造业走出国门。

做加法不是简单的堆积增量。“必须清醒地看到，中铝公司虽然大，但还不够强。大，在有钱的时候，可以靠投资、上规模来实现；而强，就必须靠科技创新”，葛红林的乘法思维就体现在这里。

中铝依靠科技创新来做乘法是有底气的，中国第一家氧化铝、电解铝、铝加工企业和都在中铝，从勘察院、设计院到研究院，还有多个国家级技术中心、国家冶炼工程研究中心、博士后工作站和研发技术中心等科技创新平台，全国已

授权的铝工业实用技术和发明专利,中铝公司占有 80%以上，一些技术还输出到国际上，为全球铝工业和的发展做出了贡献。

乘法带来的效益就是降本增效。仅就中铝氧化铝企业来说，今年依托优化工艺流程、降能降耗就降本 10 亿元，抵得上一个世界一流铝厂一年的利润。通过过硬的科技手段，中铝今年为世界最大单口径射电望远镜提供全部铝合金材，研制出了直接达 9 米的世界最大级航天用铝环，为国产打飞机 C919 的成功下线提供了坚实的材料保障，实现了经济效益和政治责任的双丰收。

谈到除法，这似乎是最让人头疼的话题。这么大的国有资产盘子，闲置起来就是极大的浪费，还要付出人力财力做好维护；而要在风险最低的情况下，通过运作整合实现保值增值，难度不小。不过，逆境逼着中铝把资产盘活做了起来，不仅尝到了甜头，更是趟出一条路子。

中铝首先推进的是物流资源的整合。物流在 2009 年就被国务院确定为十大战略新兴产业之一，被媒体称为“21 世纪最大的行业”。中铝公司凭借自己在多个省份的物流资源，希望推进大物流体系建设，首先成立了中铝物流集团，运营了中部国际陆港公司和西部陆港公司，陆续完成了企业内部物流业务的资产、人员整合，仅在 2015 年就实现增利 5000 万元。

紧接着，检修维护队伍被整合成立中铝工业服务公司，不仅完成内部的检修工作，更是依托所在的省份、城市开展增值工业服务。

思路一变天地宽，中铝工服今年的订单已经签到了土耳其的铝厂。而在以往，这些团队还需要为生计发愁。

土地是资产盘活中的大物件。中铝公司旗下许多企业，随着城市的规模扩大已经被包围于市区内部，既不便于城市规划，也不利于企业降本。围绕这些土地盘活，中铝公司提出了“退城入园”的策略，贵州分公司、甘肃华鹭等工厂搬迁进入专门的工业园区，原有土地进行盘活开发，获得可观的商业收入。

一个除法，开创了一片新天地。2015 年，围绕盘活固定资产，中铝将部门闲置加工产能整合成立了中铝铝箔公司，重组了铝箔产能。组建了中铝资本控股公司，整合了内部资源，获得融资租赁、保险经纪、期货、基金等四类资质牌照，形成了新的利润增长点。

以扩大高端需求推动产业转型升级

铝的产能过剩是这几年的热门话题。在很多人眼里，这是一个夕阳产业。而有十多年钢铁从业经验的葛红林，以一个材料学博士的角度提出了一个问题：钢铁行业风风火火发展了这么多年，身影无处不在。那么作为材料性能更加优异

的铝，为什么还没有发展就已经显出疲态？葛红林认为，铝行业虽然困难，但铝制品在终端市场的应用是一篇大文章。化解铝行业的产能过剩，不能仅仅靠做减法，更应该通过扩大铝的应用，创造高端需求来做好加法，推动供给侧改革。

的确如此，与钢铁等金属相比，铝合金在性能方面优势明显。铝及其合金加工材料具有密度小、比强度高、抗冲击性能好、耐腐蚀、良好的加工成型性，且 95%都可以回收再利用，回收再利用可实现节能 95%，是实现绿色环保发展的首选金属材料。2015 年，中铝特意组建了铝加工事业部，加强了铝加工企业战略管理，全面推进铝的应用推广。

扩大应用，中铝先从交通用材的轻量化入手。统计结果表明，汽车每减重 100 公斤，百公里油耗可降低 0.4 升、二氧化碳排放可减少 1 公斤，在运行周期内，可累计减少二氧化碳约 1500 公斤。目前我国的交通运输业轻量化的进程明显落后于国外发达国家。以汽车为例，国外发达国家平均每辆车用铝 150kg，而我国仅为 100kg。而车身用铝的比重还将快速的上升，市场前景非常广阔。此外，在火车车皮料、卡车车斗料、航空航天材料、远洋运输材料等领域，铝都大有可为。

2015 年年初，中铝公司成立了轻量化推进办公室，着手对汽车、船舶等交通运输业轻量化展开专项研究，对一汽集团、东风汽车、中集集团、中船重工等进行技术交流，深入

了解我国交通运输行业的现状及需求。

2015 年 8 月 28 日，中铝公司与武汉市签署战略合作协议，拟在武汉建设生产基地，并在有色金属新材料、环保节能建材、汽车及轨道交通零部件等领域与武汉开展全方位合作。东风汽车与中铝公司联合成立“东风—中铝汽车用铝合金联合实验室”，共同开展铝合金在汽车领域的应用研究和技术攻关。

2015 年 11 月 6 日，中铝公司又与一汽集团签署了战略协议，中铝公司将作为一汽的研发支撑基地，为中国一汽的科技发展提供必要支持，双方将在汽车用有色金属材料、功能材料及应用技术开发等领域为对方提供科研交流、试样制备、性能测试等便利条件。

目前，中铝公司正积极联合中国工程院、下游汽车公司等酝酿成立“汽车轻量化有色金属应用国家工程中心”，旨在提高中国轻量化零部件制造水平和国际影响力，推动中国轻量化和“以铝代钢”的跨越式发展。

此外，中铝公司正在筹建汽车零部件生产线，预计未来 2~3 年内可实现汽车铝制零部件的批量供应，完成由“材”到“器”供应模式的转变。

在积极推进汽车轻量化的同时，更大规模的运输材料轻量化工作已经取得了成效。2015 年，由中铝公司提供铝合金材料生产的 1.3 万节全铝运煤火车车皮亮相大秦铁路和神华

铁路线，这些铝制车皮在保持列车安全稳定性的同时，大大降低了车身自重和能耗，大幅度提升了运力水平。全铝运煤车每节车皮比不锈钢车皮自重降低约 2 吨，以一天往返 2 趟为计，每节车厢可多运送 4 吨货物，显著提高了载重。铝代钢后，车厢使用寿命也将提高约 20 年，大大减少了车辆维护费。

建筑用铝的推广，是中铝公司主攻的另一大方向。这源于葛红林坐飞机时，从舷窗向下看到的大片彩钢板房和木质结构建筑。木材循环使用次数非常有限，钢材尽管循环使用次数多，但易氧化损耗，最终都成为了建筑垃圾，污染环境。采用回收率高达 95%以上的铝合金材料替代木材和钢材制造建筑施工周转材料及工具，不仅解决回收循环利用问题，还能够减轻器械重量，降低劳动强度，并且非常节能环保。

发现这个广阔的市场后，中铝公司迅疾联合中国建筑成立了中建铝公司，积极推动建筑行业铝材料制品的应用，并积极研发生产包括复合材料、高分子材料在内的新型建筑材料 。

经过市场研究，中建铝实施以铝代钢、以铝代木计划的铝模架系列产品，仅在我国西南区域就可生产 200 万平米。与此同时，还要进一步开发铝合金脚手架、轻型铝合金爬模、爬架体系，铝合金箱式房、铝基轻型可循环使用的建筑材料，替代现有的临建设施及周转材料工具。开发推广节能新型铝

门窗等系列产品，实施老建筑的节能减排改造。用新型节能型门窗，解决现有建筑门窗能耗损失过高问题。

以优良的作风凝聚团队改革发展共识

改革和发展的关键因素在队伍，队伍能否干事的核心要素是风气。

2015 年,中央第十三巡视组对中铝公司进行了专项巡视，发现了不少问题，尖锐地指出了这个庞大国企在重大决策、党组织建设、选人用人等一些列问题上存在的积弊。中铝党组提出，不仅要配合中央巡视，积极做好整改，更要借力中央巡视，正风肃纪，凝聚人心，打造一支敢打硬仗、能打硬仗的“虎狼之师”。

在上下深入开展“三严三实”专题教育活动的过程中，中铝公司集中整治各级干部中普遍存在的“不严不实”问题，以及“习惯性麻木，出现亏损无所作为；习惯性回避，碰到困难绕道走；习惯性推脱，遇到问题推脱给客观；习惯性上交，出现问题依赖上级”四种坏习惯，培育新风正气，锻造过硬干部队伍，开展了“讲忠诚、讲尽责、讲拼搏、讲实效”大讨论。

葛红林提出：“领导干部如果不担责，心里不想事、手里不干事，关键时候不顶事，先下岗的不应该是群众，而应该是这样的领导干部”。要以三严三实活动和中央巡视、整改为

契机，“扭掉坏习惯，扭出新作风”，要把“把政治优势转化为实现公司扭亏脱困、转型升级的经济优势”。

“好习百日修，恶习一日染”。为了激发全员参与改革、贡献改革的热情，彻底改掉坏习惯，在葛红林的倡议下，中铝开始举行定期的创新论坛。去年，创新论坛分别围绕“中铝机遇之我见”、“精细化管理之我见”、“提高工作效率”、“如何改掉坏习惯”，公司上下精神面貌大变样，激活了扭亏脱困和升级发展最关键环节。

动员千遍不如问责一例。2015 年，中铝公司先后派出 28 个工作组开展线索核查和案件查办，给予 276 人党纪政纪处分，给予 292 人通报批评、诫勉谈话等，移送和正在移送司法机关 33 人，交流调整了 11 名在同一岗位任职 8 年以上的党组管理干部、53 名在关键岗位任职 5 年以上的干部。

从去年 7 月 16 日到 12 月 21 日，中铝公司连续召开 7 次警示教育会，通报典型案件，达到了查处一个警示一片的效果，让不收敛不收手的收敛收手，让心存侥幸的知耻知止。

作风的转化带来的是管理上的精细化转变，而给企业带来的好处立竿见影。每天早上七点半，中铝公司班子成员和运行部门的负责人，都会汇集到总调度室观察、分析、研究每个企业的生产运营情况。去年 12 月初的一天早上，葛红林发现山东一家企业的发电量波动明显，低于正常值。经过询问分析，由于当地正值下雪，采购的煤炭被打湿，导致燃烧

不充分影响发热发电，出现生产波动走低。原因找到了，这个企业立即找到供煤单位进行索赔，挽回了经济损失，更是对于所有发电单位，在类似问题上起到了有效的预警，实现了大工业的精细化管控。

尽管 2016 年中铝公司改革发展中将面临的困难依然不小，但是如果理清了思路，凝聚了人心，使足了干劲，那么其实最艰难的时刻就已经过去了。

1.11.2 这是一个怎样的魏桥创业

“在发展中提高，在提高中发展”

自 2012 年以来连续三年入选世界 500 强，三年提升了 161 个位次,2014 年实现销售收入 2807 亿元、利税 163 亿元、利润 118 亿元，上缴各级税金 61.66 亿元，这份亮眼的成绩单可让魏桥创业在 2015 年世界 500 强排名时冲击更高的排名。从 1981 年起家的小油棉加工厂，到今天成为一家拥有控股子公司——魏桥纺织和关联公司——中国宏桥两家香港上市公司，邹平、魏桥、滨州、惠民、阳信、沾化、北海、威海、印尼、几内亚 10 个生产基地、16 万名员工、1500 亿元总资产，集“纺织-染整-服装、家纺”及“热电-采矿-氧化铝-原铝-高精铝板带、新材料”产业链于一体的特大型企业，魏桥创业用 34 年的创新发展打造出世界上最大的棉纺和铝业帝国。

“既要量力而行，又要尽力而为；既要在发展中提高，又要在提高中发展。”魏桥创业集团董事长、中国宏桥集团主席张士平对企业今天的成就这样总结道。

他说，是多年发展过程中注重转型升级，自我提升，才成就了魏桥创业、中国宏桥现在的发展规模和装备水平。正是在这样的发展战略指引下，魏桥创业、中国宏桥形成了庞大的生产能力。

在魏桥铝业高精铝板带配套项目现场，记者看到，去年底刚刚投入运行的 600kA 超大容量原铝生产线，硕大的电解槽在清洁的厂房里静静地运行着，没有烟雾缭绕，听不到噪音轰鸣，也少见操作工的身影。这项目前世界上首条最大容量的特大型阳极预焙铝电解槽技术，具有容量最大、效率最高、液态铝质量最好、能耗最低、用工最少的优势，项目总投资 40 亿元，能够为制罐料、印刷铝版基材、铝箔坯料、机柜铝板、轨道交通和航空航天用铝材提供 60 万吨的优质原料。

更让人震撼的是魏桥铝电年产 76 万吨高精铝板带车间。全球一次性建成投产的最大规模的铝合金扁锭熔铸生产线，1+4 热连轧机、推进式加热炉、铣床、锯床、磨床，单机架冷轧机、三机架冷连轧机，智能高架仓库……俨然是装备总动员，令人目不暇接；而以德国西马克、瑞士 ABB 为代表的国际顶级装备制造商的 logo 也傲娇地带给你视觉冲击。70 余台套的世界一流进口设备足以彰显品质。他们生产出的高

档铝合金板带材等高端产品，目标就是替代进口。

规模“巨无霸”，装备 “高大上”，中国宏桥延伸到海外的触角，为其打造的产业链再加筹码。在印尼，规划了年产 200 万吨的氧化铝项目，同步建设电厂、码头等配套设施，实现热电、采矿、氧化铝一体化，今年年底一期 100 万吨将建成投产，二期 100 万吨计划于明年年底投产。该项目是印度尼西亚第一家大型的氧化铝生产企业，2013 年 10 月习近平主席和印尼时任总统苏西洛共同见证签约；在几内亚，合资设立矿业公司和河港公司，开采铝土矿，建设河港码头和海上过驳转运系统，打造一条自国外矿山到国内工厂、集多式联运为一体的完整产业链条。

国务院参事，中国有色金属工业协会会长陈全训指出，拉长产业链、集约发展、高效节能，中国宏桥的发展思路确实有独到之处。在经济进入新常态下，我们要继续坚持“稳增长、保增长，发展第一要务”这个理念不动摇，探索、创新，发挥人才引领作用，注重培育企业家、技术人员和技工队伍，不断扩大铝应用范围，推陈出新，激活产业生命力。

全球单块最重达 42 吨的高品质铝合金扁锭。

“魏桥创业走到现在，每一步都顶着巨大压力”

在魏桥创业、中国宏桥采访，一排排高标准厂房和林立的高层住宅区随着车窗的移动变换着色彩，而交错延伸的电网也会不时闯入视线，提醒你这里是魏桥创业、中国宏桥，大容量、高参数的发电机组为孤网闭环运行的局域电网提供保障，而充足、低廉、稳定的电力和蒸汽供应正是铝产业发

展的“命门”。

张士平说，魏桥创业走到今天，每一步都顶着巨大压力。早在 1999 年，魏桥创业建了 2 台小机组，投产 3 天就被迫与电力公司解列。逆境求生。为了保证生产，他们买了大马力的柴油机作为启动电源，并下决心配套上马自己的电网。有了安全的电力保证，魏桥创业发展开始步入快车道，“电多了，就上项目，项目多了，再发电。”张士平说，压力产生动力，逼着我们做得更好。

伴随着一个个厂房拔地而起、一条条生产线达产运行，魏桥创业的生产规模迅速扩张开来。从 1999 年进入热电领域开始，魏桥创业扩张的势头一发而不可收：2001 年进入铝业领域，2005 年进入氧化铝领域。中国宏桥 2011 年进入高精铝板带箔、新材料领域，2014 年进入采矿领域。经过十多年的打拼，“铝电网、上下游一体化” 的完整产业链令人刮目相看。

让张士平倍感欣慰的是，“局域电网”这个魏桥创业、中国宏桥独有的风景线，十几年来稳定运行，从魏桥到邹平，从黄河南岸到北岸，厂区建在哪里，架线供电就配套到那里。

一波三折，几番较量。从早已公布的《非公 36 条》中鼓励民营企业进入电力市场到今天电力体制改革的文件下发，放开售配电市场，魏桥创业、中国宏桥对铝电联营模式的探

索和改革精神，不但成就了魏桥创业、中国宏桥独有的电力模式，也成就了铝产业链中最具竞争优势的一环。

这里的电解铝为什么不过剩？

中国宏桥如此庞大的规模，却无过剩之忧，并且在全国电解铝产能过剩、行业亏损的情况下，盈利显著，这其中有何玄机？

规模优势催生集群效应。随着中国宏桥原铝产能的不断扩大，其优质铝水资源成为铝加工企业不断“集聚”的“磁场”。 围绕中国宏桥优质铝水资源的版块布局，伴生了一批深加工关联配套的企业，中国宏桥走到哪里，它就跟到那里。

中国宏桥的铝水何以成了“香饽饽”？首先是成本优势。铝水不落地，直接运到下游生产企业，大大缩短了生产流程，节约了铸造、仓储及再熔化成本，初步测算节约成本 900 元。这种集约型、节能型发展模式，使得集群内每一家涉铝企业

都能盈利；其二是产业聚集的优势。产业集约发展减少物流成本，以中国宏桥的优质铝水为纽带，通过集约发展带动了上下游的联动发展，其运行效益高于独立企业，提升了整个产业的竞争力。

以中国宏桥为龙头，目前整个滨州市规模以上的铝深加工企业到了 33 家，并已形成三大特色产业集群。 一是以邹平为核心、辐射魏桥的特色铝产业集群，这也是山东省首批战略性新兴产业基地；二是以滨州经济开发区为核心、辐射惠民、阳信的特色铝制品加工高端产业集群；三是以北海为核心，辐射沾化的循环经济产业集群。在这些产业集群中，都是从铝土矿到铝板带箔、汽车轮毂、汽车零部件等最终的制成品。

集聚区里不乏中信戴卡、渤海活塞这样的老牌上市企业，还有创新集团、三星公司等新贵和六丰机械等合资企业，北汽集团也计划投资 138 亿元，在滨州建厂。

中国宏桥的快速发展，带动了滨州市铝产业迅速崛起并成为滨州第一大支柱产业。 2014 年该市铝产业产值（主营业务收入）达到接近 1800 亿，占该市规模以上工业企业主营业务收入的 24%。未来，滨州市计划把铝产业规划成一个产值 5000 亿元的大盘子，将中国宏桥及相关联的企业打造成该市转型升级的样板。

“国家倡导的中国制造 2025,特别提出产业集聚化发展，

通过集聚化降低成本，达到产业共同提升的目的。魏桥创业、中国宏桥就是这么做的。“陈全训说。

算成本账，更算环境账

降本增效，是企业永恒主题。中国宏桥也会精打细算成本账。它每生产一吨铝水，上下游企业就能共享 900 元的成本优势。它以“集多式”联运方式运来的铝土矿，经过大中小三种船型联运，让运费每吨便宜了 30 元。“1000 万吨就是 3 个亿了。”作为企业家，张士平这笔账算得“门清”。而他算的另一笔账则关乎情怀与责任，充满正能量。赤泥综合利用，是世界难题。赤泥制砖是目前技术条件下的优选。但制砖成本高，是赔钱的买卖，没人愿意干。在魏桥创业，围绕赤泥综合利用，通过磁选提铁、有效滤水、回水利用、干法堆存、赤泥制砖等措施，实现了各类废弃物全部“吃干榨净”，变废为宝，做到了废水零排放。“现在我这个制砖稍微赔钱，但赔钱也得干，起码减少了赤泥堆放，节省占地面积，对环境也有益。”张士平眼前这笔亏空账，赢的却是长远。

装备大型化、高端化是节能减排、保护环境的基础，在这方面张士平舍得投资。近年来，魏桥创业、中国宏桥不断加大资金投入，加快技术改造力度，设备大型化、现代化和

自动化水平不断提高。热电生产采用超临界大型发电机组，还投资建设60万千瓦的超超临界发电机组，并致力于电网升级，未来将以60万千瓦的机组为主发电能力，可实现超低排放，达到天然气排放标准。原铝生产全部采用电流强度为500千安以上的大型阳极预焙电解槽，世界上第一条正式投产的600千安特大型阳极预焙电解槽也于2014年12月投入运行。集团铝液交流电耗12600度/吨铝，制造成本在全国同行业始终保持最低水平。

发展不忘责任。魏桥创业在自身快速发展的同时，注重发挥龙头带动作用。去年6月，魏桥创业集团和创新集团等企业牵头成立了滨州市铝行业协会，充分发挥协会在政府与企事业单位之间的桥梁纽带作用，加强国内外技术交流合作，团结带领全市铝加工企业转型发展、提升巩固全市铝加工产业的发展优势，向产业链高端延伸，提高发展质量和效益；围绕国家提倡的轻量化发展方向，加强关键技术攻关，扩大铝产品的广泛应用；大力推进节能降耗、减排治污、清洁生产、循环利用，构建资源节约、环境友好、本质安全型产业体系，推动滨州铝加工行业技术进步，转型升级，不断做大做强，使铝加工业成为滨州市最具国际竞争力的支柱产业和世界著名的铝产业基地。

“我想在3~5年内，世界最好的、竞争力最强的铝企业、最高端的产品一定是在中国。”张士平强调说，这个竞争力

最强，不仅仅是利润和规模，更重要的是产业的高端水平，国外能产的，我们国内一定能产，要不断提高国内铝产业在国际的影响力，去占领国际市场。他的声音铿锵有力，激励人心。

多年来，魏桥创业坚定“为国创业，为民造福”这一信念，始终把带动一方经济发展、构建和谐社会作为企业的发展动力和自觉追求。近几年来累计为国家上交税金近 500 亿元，为工业反哺农业、实现村村通自来水、柏油路、公交车、数字电视等民生事业发展做出了积极贡献。坚持以扩大农民就业推进城镇化建设；坚持推进“安居乐业工程”；坚持拉动区域产业经济和城镇化建设。积极扶持上下游配套中小企业，在各地形成了多个独具特色的产业集群，拉动从业人员 30 余万，特别使集团魏桥工业园驻地魏桥镇发展成了一个富强繁荣的全国重点城镇，并通过建设滨州、邹平和北海工业园，极大地带动了滨州、邹平、北海经济开发区的建设和发展，有力地支撑了地方经济的和谐稳定和快速发展。

“今后，魏桥创业将大力实施转型升级、科技兴企、资本运营、成本领先、人才强企、和谐发展‘六大战略’，着力转变发展方式，加快调整产业结构，持续推进‘铝电网材一体化’、‘上下游业务一体化’的产业模式，积极向铝精深加工、新材料领域拓展，力争 2015 年实现销售收入 3000 亿元以上。”张士平说。

中国宏桥电解铝生产线。　　魏桥铝电高精铝板带冷轧生产线。

1.11.3 另眼看魏桥：不一样的“铝市”春秋

魏桥高精铝板带冷轧生产线。

魏桥高精铝板带系列产品。

凛冽的寒风在铝行业的市场持续地刮。很多铝企业耐受不住冷空气被冻感冒了，但狂风刮得再狠，魏桥的世界却始终温暖如春。

今年上半年，山东魏桥创业集团有限公司铝产量大约 210

万吨，超越俄铝和力拓，成为全球最大的铝生产商；净利润27亿元人民币（4.23亿美元），高于上年同期的20亿元，增长大约三分之一。

而在过去连续四年时间里，魏桥在《财富》世界500强榜单上跃升了206个位次，营业收入翻了近一倍。

2012年，首次挤进世界500强，以营业收入24905.5百万美元排行第440位；

2013年，以营业收入29562.0百万美元排行第388位；

2014年，以营业收入39259.9百万美元排行第279位；

2015年，以营业收入45757.1百万美元排行第234位。

神秘帝国、铝业巨头、山东首富、低调富豪……媒体们炮制着各种各样引人眼球的词汇形容着魏桥和它的掌门人，有人佩服，有人汗颜，有人不忿。而数字意义的成就和外界热议的背后，铝行业的人们更为关注的是魏桥是如何“发家”的？以魏桥为龙头的整个山东滨州的铝工业模式是如何发展的？他们接下来的动作又将会对整个铝行业的发展和格局带来怎样的影响？

魏桥模式：走向全球一体化　凭的不止是“电”

一提“魏桥”俩字儿，很多人最先想到的是“电多电便宜”。铝电网一体化是魏桥模式的起点和“命门”。魏桥在整个滨州市形成了自己独立电网，孤网闭环独立运行，其自

建电网的电价比国家电网便宜 1/3，可以为电解铝的生产提供充足、稳定的电力和蒸汽供应，极大地降低用电、用热成本。早在 1999 年，魏桥建了 2 台小机组，投产 3 天就被迫与电力公司解列。为了保证生产，他们买了大马力的柴油机作为启动电源，并下决心配套上马自己的电网。有了安全的电力保证，魏桥发展开始步入快车道：电多了，就上项目，项目多了，再发电。2002 年，魏桥建成首个电解铝生产能力为 50kt/a 的铝电解厂；十几年后的今天，魏桥已拥有 1400 万吨的氧化铝产能、621 万吨的电解铝产能，成为全球最大的铝业生产企业。

在铝电网一体化模式的基础之上，魏桥一方面向上游电力、氧化铝延伸，另一方面向下游铝加工畅游，打造了上下游一体化模式。1999 年进入热电领域，2001 年进入铝业领域，2005 年进入氧化铝领域，2011 年进入高精铝板带箔、新材料领域，2014 年进入采矿领域，如今已经形成了“热电—采矿—氧化铝—原铝—高精铝板带、新材料”于一体、上下游业务配套平衡的完整产业链。

但魏桥的眼界和市场绝非仅局限于国内。如今魏桥提出了“全球一体化”模式，积极构筑起覆盖全球的产业格局。

魏桥的资源来源于全世界。其在海外市场获取铝矿资源的力度、规模和手段令国内同行望尘莫及。我们国家的铝土矿一直处于比较紧缺的状态，印度尼西亚国家政府禁止矿产

品出口政策实施后，包括魏桥在内的中国铝企业铝土矿供应都受到了影响，这就倒逼大家在全世界找资源。而魏桥早在两年前就开始在印尼投资建设氧化铝工厂，2013 年 10 月 3 日，国家主席习近平和印尼时任总统苏西洛共同见证了其在印尼投资项目的签约，该项目是印尼第一家大型氧化铝生产企业，第一条年产 100 万吨的生产线将于 2015 年年底建成投产，第二条生产线将在 2016 年年底投产。如此以来就符合了印尼在本土建厂可以获取矿石的要求。

魏桥也是中国率先在几内亚共和国拿到了铝土矿的企业。不但是获取了矿权，还实现了河运、海运相结合的集多式联运为一体的完整产业链条。9 月 25 日，魏桥的合作伙伴新加坡韦立国际集团首艘装载 17.6 万吨几内亚铝土矿的“Winning Confidence ”(韦立信心号)轮船正式启航，离开几内亚开往烟台港，并计划在 11、12 月份分别装运 50 万吨和 80 万吨铝土矿。

原材料来源问题解决了，运输问题解决了，这使魏桥完全摆脱铝土矿资源短缺对其发展的限制。

魏桥的产品卖向全世界。其在国外开采矿石，在国内各个产业集群进行铝产品深加工，然后将产品向国外出口。板带箔、型材、汽车轮毂、电子产品都已经有了大量的出口。

如今魏桥在电解铝环节从技术到成本到产量上都已经达到世界领先水平。铝电网一体化、上下游一体化、全球一体

化，三个一体化构成的“魏桥模式”优势愈加凸显，令国际上的一些老牌企业感受到了压力。个别国外铝企联合要求魏桥限产、对中国铝产品的出口要管制等等现象，或许已经说明“魏桥模式”对国际铝行业产生了影响。魏桥不仅在国内铝行业中独树一帜，并且已经在全球铝业舞台上占有了一席之地。

滨州模式：在这里没有一家涉铝企业是亏损的

在电解铝资源优势的基础上，魏桥吸引和带动了滨州周边众多铝加工企业形成了大规模的产业集群，还引来了中信戴卡、北汽集团两个世界 500 强企业，形成了独具一格的“滨州模式”。

在前段时间于滨州召开的中国铝加工产业技术创新交流大会的间隙，山东创新集团董事长崔立新和记者笑谈：“产业集群就像是多家饭店扎堆儿开起来的餐饮街，几家欢喜几家忧，有的老店干了几十年生意依然非常红火，有的店今天刚开张明天就倒闭了。但滨州这条以魏桥为龙头的著名‘餐饮街’，每一家店的生意都蒸蒸日上。滨州铝产业集群内没有一家涉铝企业是亏损的，全部都能盈利。”

“创新集团是在魏桥提供的铝水资源基础上应运而生的。”作为一家滨州地区从事高端铝材生产的下游铝加工企业，崔立新直言与魏桥的战略合作使得创新集团在产品生产上拥有

了很强的价格优势和规模优势。目前该公司核心加工能力为400多万吨，实际产量360万吨，产品广泛应用于航空、交通运输、电子产品等领域。

不仅仅是创新集团，在这里众多铝加工企业的发展都受惠于魏桥的铝水。这是一个超近距离的产业集群，企业与企业之间往往就隔着一条马路或者隔着一道墙，魏桥的铝水一出，就可以立刻到铝加工企业的手中。从铝土矿到铝板带箔、汽车轮毂、汽车零部件等最终的制成品，铝水不落地，直接运到下游生产企业。大大缩短了生产流程，节约了铸造、仓储及再熔化成本。初步测算，魏桥每生产一吨铝水，上下游企业就能共享900元的成本优势。

滨州市范围内目前已经形成三大特色产业集群：以邹平经济开发区为核心、辐射魏桥镇的特色铝产业集群；以滨州经济开发区为核心、辐射惠民、阳信的特色铝制品加工高端产业集群；以北海经济开发区为核心，辐射沾化的循环经济产业集群。集群内涵盖了全球最大的铝合金特色轮毂生产企业中信戴卡，亚洲最大的活塞生产企业渤海活塞，国内最大的铝合金材料生产企业山东创新集团、国内最大的铸造铝合金和功能母合金企业河北立中等铝材深加工企业。形成了创新、久盛、天阳、裕阳等企业组成的国内最大的铝棒生产基地；创辉、紫光、弘亚组成的国内最大的电工圆铝杆生产基地；中信戴卡、六丰集团、立中集团组成的国内外高档汽车

铝合金轮毂生产基地。

如今，滨州市共有涉铝重点企业 34 家，已形成电解铝产能 636 万吨、铝材加工 420 万吨的生产能力。2014 年，铝产业实现主营业务收入 1800 亿元，占规模以上工业主营业务收入的 24%，铝工业的“滨州模式”已成为引领滨州经济发展的重要增长极。

5000 亿级铝产业集群：魏桥的“舍得”与“海阔天空”

9 月份，滨州市政府宣布力争 5 年之内把滨州市打造成年产值 5000 亿元的世界著名铝产业基地的消息在行业内激起千层浪。他们计划依托魏桥优质铝水资源、短流程布局优势，加强全产业招商引资，引导铝产业向中高端、集群式发展。这意味着不久的将来，滨州市的铝产业年产值将比 2014 年的产值翻三倍，接近于 2014 年济南市全年生产总值。

从魏桥自身铝产业规模的不断扩大，到以其为龙头整个滨州地区铝工业集群化的发展，再到打造 5000 亿级的铝产业集群。外界所看到的可能只是规模上的急剧扩张和产值的快速攀升。但其实这种“大”的背后暗含着的或许是推动中国铝加工业突破当前发展瓶颈，影响中国铝加工业乃至世界铝加工业格局的一种全新发展思路。

“就目前的现状来看，中国铝加工中下游行业缺乏紧密性的集群效应。我国规模以上铝加工企业就有 1842 家，企业

多而分散，单个企业的实力和能力有限。可是如果我们单打独斗甚至出现内斗的话，十年也无法跟世界顶级铝企业抗衡。想跟国际顶级铝企业抗衡，我们必须抱团。怎样抱团？就是扩大我们的产业集群。”魏桥铝电有限公司董事长张波向记者吐露了打造 5000 亿级铝产业集群的初衷。“我知道铝加工业越往下游走科技含量会越来越大，成本因素会越来越低，可是对技术要求再高，最后还是要回归到成本这项呀。所以我们敞开胸怀，给更大的优惠政策，让利企业，尽最大限度吸引优秀的铝加工企业来到滨州，形成一个具有自己核心竞争力的大的产业集群，做到国外先进铝企业具备的东西我们也全都具备，但我们有的东西他们不一定有。用这个高质量的大集群去对标世界顶级铝企。”

产业集群目前已经成为倍受有关国际组织和各国政府重视的一种重要的产业发展组织形式。美籍奥地利经济学家约瑟夫·熊彼特说：“创新不是孤立事件，它们趋于群集。”在产业集群内部容易产生专业知识、生产技能、市场信息等方面的累积效应，同时集群内企业因时刻面临同行竞争的压力产生了不断创新的动力；而集群内技术设备发展的专业化、搜寻劳动力的相关成本的降低，也给各个企业带来更多的收益或节省更多的成本。产业集群发展的首要因素是具有行业领先的主导企业和相对完整的产业链，两者缺一不可。以魏桥为主导企业的滨州市铝产业集群已经形成了完整的产业链，

将会给其中的各个企业带来资源、成本和技术上的优势，以推动集群内企业生产出附加值更高、产量更大的高端铝材，进而使整个铝产业集群的技术研发水平和产品质量提升了一个层次。

“2008 年搬到新办公楼时，我的办公室里挂了一幅字画，叫‘稳操胜券’。曾经我觉得，做任何事情都要力图稳操胜券，所以魏桥在起步阶段、发展阶段一直稳扎稳打，打有把握的仗，这些年的发展非常成功。可是如今，在我们从技术到产能到规模都已经达到世界第一的时候，我又在稳操胜券旁边挂了一幅字：‘舍得’。我突然领悟到，做事业和做人一样，不是所有东西都要得到的，不能把一切都攥到自己的手里。最近我又请人写了一幅新字：‘海阔天空’。海阔天空，从一方面来讲是魏桥面临着更大的竞争和更广阔的世界，我们要勇往直前；而其另外一层含义是退一步才能海阔天空。”张波跟记者分享了伴随着魏桥的发展他这几年的心境变化。

“在打造 5000 亿级铝产业集群上，魏桥赚不赚钱不重要，我们让利不要紧，重要的是探索出一个好的方式、对的路子，带领出一个全新的铝深加工产业集群在全世界把名声打出去。能为中国民族工业出一份力是我的福气。”张波心里的“舍”，是在面对铝产业集群时舍去魏桥的个体利益，通过魏桥的让利和提供其他优惠政策，吸引更多的国内优质铝加工企业来到滨州。而他心里的“得”是通过魏桥自己退一步的“舍”，

形成一个高端的铝产业集群，进一步地扩大我国铝加工行业在整个世界的影响力。

这种“得”，不再是魏桥这个“尖子生”出头代表中国铝工业在世界上发声，而是使一个优秀的中国铝加工“大班级”立足于海阔天空的全球舞台。

从“魏桥强”到“铝业强”：中国铝工业该如何走向制造强国之路

9 月 29 日发布的《<中国制造 2025>重点领域技术路线图（2015 版）》提出新材料是十大重点领域之一。而这个路线图所指出的 23 个重点方向中包括了航天装备、先进轨道交通装备、节能汽车、海洋工程装备等都是与铝加工行业新的经济增长点密切相关的内容。

铝加工业要想加快技术创新以满足高端装备制造业发展的要求，高品质、大规模的铝产业集群是推动我们向高端发展的一种重要产业模式。但如果想充分利用好这种产业模式，使中国铝加工业成为实现制造强国的主力军，我们必须要正视当前中国铝加工业发展所遇到的瓶颈——为什么我们拥有全世界一流的硬件设备，却生产不出一流的产品？

拿汽车铝板为例，中国拥有全球一半以上的最先进的铝板带热连轧生产线，但至今还没有一条国内企业投资的成熟产业化生产线。近几年，汽车铝板在全球市场上已经从 2010

年的几万吨增长到现在的三、四十万吨，今后几年还有可能成倍增长。面对这个爆发式增长的市场，我们却始终处在被动跟踪状态。

我国是一个名副其实的铝业大国，铝加工业在产量、装机水平等方面均位居世界前列，但在技术研发、人才培养等方面与工业发达国家相比还有较大差距，离铝业强国还有一定的距离。一般的中、低端产品生产过剩,而科技含量高、附加值高的高端产品短缺，不能满足国防现代化和国民经济的高速持续发展，需要大量进口。2014 年中级深加工产品的比例占铝加工产品总量的 10%左右，高级深加工产品即精密加工的可供装配的零配件如车轮、电子产品零件、轨道车辆等所占比例不到 4%。虽然某些企业或某些单一技术达到或接近了国际先进水平,但整体水平参差不齐,技术支撑能力有限,缺乏具有自主知识产权的核心技术。

为什么中国铝工业的发展会出现如今这样的尴尬局面？或许最主要原因在于我们生产规模扩张了，但是人才没有扩张，发展思路没有扩张。东北轻合金有限责任公司技术中心主任王国军犀利地指出：“最深层次的原因是短视！”

王国军认为，造成中国铝加工业技术发展瓶颈的原因一方面是因为铝加工企业舍不得在技术研发和人才培养上进行资金投入，另一方面原因是绝大多数企业认为投资周期越短越好。“我们总是说缺乏人才，那我们为什么不入手把人才

培养起来？为什么没人去做这件事呢？因为没有有这种格局、胸怀、情怀的人才培养队伍存在。再者，技术创新的根源在于体制，制约企业创新的体制机制障碍仍然存在，当我们真正想培养人才时候可能会遇到各种各样不可抗的阻力。”王国军不无担忧地对记者说：“无论是从国家层面上还是从铝加工从业者层面上说都应该有一个忧患意识，我们不能只追求短期逐利，而是要追求一个良性的经济循环和正确的产品研发价值导向，这样才既能解决人才短缺和技术创新的问题，企业也得到了利润，国家经济也得到了发展。从当前我国铝加工业发展格局来看，这需要一个过程。”

如何更好地沿着路线图的指引，提升“中国制造”，破解人才瓶颈？从记者采访魏桥铝电有限公司销售总公司总经理赵前方的回答中我们能深切体会到企业正在为实现这个目标所做的努力：“魏桥年产 76 万吨高精铝板带生产线产品目标就是高端、一流，为保证产品高质、稳定，我们正在面向全国招聘相关专家和技术工人，同时配套一系列激励和培养机制，解决人才瓶颈。”

我们拥有世界上最先进的设备，更要有能用好设备、懂技术的人。在过去注重规模扩张的高速发展时期，铝加工业在人才培养方面有不少欠账。我们缺乏大量娴熟的产业技术工人，缺乏高端科技人才，这成为制约我们提升技术创新能力的最关键因素。要想在整体上提升中国铝加工业的产品层

次需要有大量工程师、高级技工和高素质职业人才支撑，必须先在人才质量上提高一个层次。一方面铝加工企业要认识到企业本身是职业教育最大的受益者，努力加强技能人才的培养，努力培养高水平的产品研发团队；另一方面高校和科研机构要转变观念，加强基础研究和应用技术研究，把研发成果和推广应用向铝加工企业延伸，重视技术、管理相结合的复合型科技人才培养。

不仅仅是在人才本身培养上的短视，当前我国许多铝加工企业发展思路局限，总是指望靠短期项目来盈利，缺乏长远的产品研发战略，没有精深钻研生产技术的耐心。内蒙古蒙东铝及新材料工业技术研究院院长刘海石说：“现在科研院所和高校做基础研究的基本没有，总是站在别人的肩膀之上开始搞研究，总是在模仿别人做出的东西。仿是一个过程，但我们不能无限地仿下去。”

创新动力的不足最后也将导致一个企业完全失去了自己的核心竞争力。在经济环境好的时候，低水平重复建设也许有利可图；在如今经济下行压力较大的情况下，这种没有竞争力的企业最容易在市场的重新洗牌中被淘汰出局。

银邦股份金属层状复合材料技术研究院院长周德敬跟记者聊到：“我一直欣赏德国的模式，公司不大，产能不大。虽然我一辈子可能就这么大的产能，但是我越做越好。任何产品都有它的不足，德国企业的做事方式是在自己一开始的

模式和水平基础上不断地完善和更新自己的产品。谁都不会睡一觉明天醒来就发明一样全新的东西。我们中国的铝加工企业也可以采用这种思路，在不断完善自己产品的过程中去解决问题。”

浙江海亮股份有限公司总经理助理严荣庆也有着类似的看法：“不管是加工行业还是冶炼行业，各家铝企业都要瞄准自己最强的那一当面去做，在开始做一件产品时，就要下决心把它做好，做专做精。”

加工环节是创造有色金属价值链的关键环节，加工水平是我国有色金属工业国际竞争力的集中体现。当铝加工业已发展到同质化竞争加剧、劳动力优势逐渐丧失的阶段，一些有能力的企业何不放长眼光借“中国制造 2025”之风尝试着换个活法？从广度聚焦到深度，不再图一时短利新增或扩大一般产品产能，根据自身的实际情况将目光专注于市场需求短缺的高端产品的研发和生产。这既有利于企业本身长远的生存和成长，又有利于提高精深加工产品占整个铝加工产品的比例，优化铝加工行业的产业结构。进而推动我们成为铝工业强国，迈入制造强国。

魏桥是已经冲到了世界铝工业舞台之上的“尖子生”，滨州 5000 亿级铝产业集群是正在冲向世界铝工业舞台的“优秀班集体”，他们给中国铝工业的前进带来了极强的示范作用和推动力。但如果我们想要真正以铝业强国的身份顶天立

地地站在世界舞台上，需要的是整个铝行业在产品技术研发水平的突破和产品结构的优化升级。

当我们能够用一流的硬件设备生产出一流的铝产品的时候，当我们拥有了自己的核心技术研发能力开始被别人跟踪模仿的时候，才是成为世界铝业强国之时，或许也是中国成为制造强国之时。期待到那个时候，无论经济形势遇到寒冬还是酷暑，我们的行业都将四季如春。

1.11.4 走进忠旺集团的铝加工王国

中国有色网　2015 年 5 月 16 日　来源:中国有色金属报

责编·作者：王祝堂

辽宁忠旺集团有限公司创建于 1993 年，经过 22 年的发展，现已发展成为全球最大的单一挤压铝材企业，并正在建设世界最大的平轧铝产品项目。该项目从 2015 年年底起陆续投产，生产能力 2000kt/a，这是一期，同时建设二期，主要是平轧产品精深加工件，2018 年全部建成投产，届时忠旺集团将成为世界四大铝业公司之一，另三个是：美国铝业公司、诺贝丽斯铝业公司、中国铝业公司。忠旺第一条厚板生产线将于 2015 年 12 月投产。

忠旺集团铝板块有三大部分：挤压铝材及其深加工产品，平轧产品及其精深加工产品，铝的上游产品，即正在建设与

拟建的铝土矿、氧化铝、铝电解项目。

忠旺集团于 2003 年通过了 ISO9001 质量体系认证和 ISO14001 环境体系认证，2006 年获得美国 AAMA（建筑铝材厂商协会）及欧共体工厂环境及产品质量认证，2007 年通过了挪威船级社国际认证，2009 年获得法国 Alstom 现场评审证书，2010 年顺利通过国家铁路 IRIS 体系认证及 EN15085 轨道车辆和车辆部件焊接体系认证，2011 年通过了 ISO3834-2 金属材料熔化焊认证、TSI6949 国际汽车行业认证和 AS9100 航空基础质量体系认证。公司获得的这些认证资质，为产品走向国际市场打下了良好的基础。截至 2013 年 12 月，公司有职工 6400 余人，其中工程技术人员近 1260 人，占员工总数的约 20%，银行信用等级 AAA。

挤压板块单厂规模世界最大

忠旺集团挤压铝材厂位于辽宁省辽阳市，自 1994 年以来一直是全球最大的单一挤压铝材生产企业，2011 年以前主要产品为建筑铝材，从 2011 年逐步转变为生产工业铝材，占 95%以上，并进行大量的精深加工，将尽量多的半成品挤压材升级为创新型升值产品，是在这方面做得最好的中国铝挤压企业之一，也是效益最佳的企业之一。

挤压机 93 台，世界上台数最多的单一企业之一

截至 2014 年 12 月公司共保有挤压机 93 台，当然，由于市场及产品结构方面的原因，在产的挤压机不一定有这么多，7.2MN、8MN 的挤压机有 33 台，很可能有一些永久性封存在那里。（挤压机的大致结构见表 1）。

由以上的挤压机结构可看出，按常规的设计理念说来，小挤压机似乎多了一些，因为原来是为生产建筑型材配置的，适合中国的市场情况，不过在大挤压机设置方面，从 125MN 的一步跨到 225MN，跨度过大，如果有 2 台 150MN 的，可能会更好些，需要 150MN 级挤压的材料用不着上 225MN 挤压机去生产。通常，100MN 的挤压机配置间隔以约 50MN 为宜，50MN~100MN 间的间隔以 30MN 为宜。当然，各厂有各自的实际情况与市场态势，不必遵守常规理念。

太原重工股份有限公司设计制造的 2 台 225MN 卧式铝材挤压机已进入制造的最后阶段，这是全世界从未有过的最大挤压机，其挤压筒直径近 3m，质量约 110t，它的加热系统及其温度测量系统是德国伊瑟隆市（Iserlohn）马尔克斯公司（Marx GmbH& Co.KG）设计制造的，它在制造挤压筒加热系统方面有几十年的经验，曾为 200MN、160MN、150MN 的铝材挤压机与 1 台 130MN 的多种材料（Ms）挤压机挤压筒提供过加热系统，其中 160MN、150MN 铝材挤压机是中国有关企业从西马克集团梅尔公司（Meer）引进的，已投产二三年，运转

良好。

配套齐全的精整处理装备

忠旺集团为挤压机配备了完整的精整装备，最主要的有：德国贝灵格公司的精密带锯、24MN 液压拉伸矫直机、干井立式淬火炉等，有这种干式淬火炉的挤压企业在世上极为罕见。

忠旺集团有完善的表面处理生产线（见表 2），有从西班牙奥特普公司引进的抛光机 2 台、磙砂机 2 台。复合穿条生产线 3 条，生产能力 21.6kt/a。

阵容强大的精深加系统

忠旺集团的铝合金高铁车厢总成车间及相应零部件生产车间在世界铝合金挤压材生产企业中是独特的，是中国特有的。忠旺车厢零部件生产能力 2000t/a。主要加工设备从奥地利、德国、意大利等国与地区引进，都是世界上顶尖的装备。

深加工产品除开发出轨道车辆铝合金厢体外，还成功研发一系列铝合金产品并已销往市场，如全铝消防车、垃圾车、半挂车、油罐车、其他特种车等。新引进的机器人托盘焊接生产线已于 2014 年 10 月投产，由 10 组机器人组成，每组包括 2 个机器焊接手臂和 1 个搬运手臂。机械焊接手臂可以提

高焊接效率和焊件品质。焊接过程产品的烟尘由净化系统自动处理，整个生产过程达到智能化，仅需少数工作人员进行监管。

2014 年前三季度忠旺集团深加工产品的销售额同比增长 22.7%至约 13.8 亿元。当下，忠旺深加工产品主要用于出口，带动以美国市场为主的海外收入显著增加 29.8%至约 17.0 亿元，这是机器人生产的高端产品的贡献。2015 年首季纯利润同比上升 15.9%至 5.8 亿余元。

除了焊接机器人外，铝合金车体制造厂于 2014 年第四季度又投产了 3 台新引进的智能机床，以进一步提升生产加工能力强化先进设备优势。

研发技术力量雄厚，试验装备尖端

忠旺集团建有省级技术中心、省级工程技术研究中心、国家级 CNAS 认可实验室、国家级企业技术中心等研发检测机构和省级博士后科研基地。实验仪器从德国、日本、美国、瑞士等国家引进，主要仪器装备有：直读光谱仪、X 射线荧光光谱仪、扫描电子显微镜、金相显微镜、万能材料试验机、色谱－质谱仪等精密仪器和设备约 250 台套。还引进了 Altair Hyperxtrude，SYSWELD 等有限元分析软件，对挤压、焊接工艺进行动态模拟，形成了强有力的研发软、硬件条件。

10 万套/年高精模具设计与制造能力

现代化的模具厂有 RPO-320 型龙门加工中心 24 台，VMC－1100S 型立式加工中心 7 台，数控电火花成型机 15 台，其他模具加工配套设备 253 台套；形成年产 10 万套高精模具设计与制造能力。

在建铝平轧产品项目 300 万吨/年

2011 年 8 月，忠旺集团决定在天津武清区建设铝平轧产品生产基地，位于武清区汽车零部件产业园，占地 1000 公顷，总投资 466 亿元，半成品板带箔生产能力 2000kt/a，是为一期，其中板材 1000kt/a、带材 800kt/a、箔材 200kt/a，可从 2015 年年底起分批投产；二期为平轧产品的深加工产品，生产能力 1000kt/a，2018 年全部建成投产，在二期精深加工产品中还含一些挤压型材的深加工产品。天津忠旺铝业有限公司达产生产后可安置员工约一万名，是全球第一大单一铝加工厂。

天津忠旺铝业有限公司是一个举世罕见的特大型平轧铝材及其精深深加工产品企业，该公司瞄准市场发展前沿，定位产品为航空航天级与轨道车辆板带材、罐料、印刷版基材、高端建筑及结构板带材、电子产品板带材、高精箔材等尖端

平轧成品，2018 年全部建成后将是全球规模最大、装机水平最高、产品品种齐全的铝及铝合金平轧产品生产基地。该公司的投产对提高中国铝加工产业集中度，优化资源配置，推动行业发展和技术进步将起积极的推动和示范作用。

熔铸厂：各种锭坯生产能力 2860kt/a（按半成品综合成品率 70%估算）

熔铸厂的进料、配料、装炉、熔化、净化处理、晶粒细化剂添加、成分分析、铸造等技术与装备等都已现代化，并达到当前的顶尖水平。按原设计有 3 条 1(4500mm)+1(3350mm)+3（3350mm）式热连轧线，生产硬合金厚板，≥12mm 的厚板在粗、中轧机上生产，＞6mm~＜12mm 厚板在 3 机架热连轧线上生产，硬合金薄板由冷轧厂（车间）完成，在实际建设中由于世界经济形势与国内经济状况的变化，很可能不会按原来规划的那样全部一次性建成，而只建 2 条或甚至 1 条生产线。一个软合金板带厂与一个铝箔厂（车间），有 1 条（1+5）式热连轧线与相应的冷轧、箔轧轧机与精整设备。3 条硬合金生产线、1 条软合金生产线和 1 条铝箔生产线实际上是 5 个独立的单位。

3 条硬合金生产线实际上是三个独立的厂，各有一个独自的熔铸车间，由于硬合金种类繁多，产品规格复杂，批量

小等特点，不宜设置大的熔炼炉与铸造机。因此，每个熔铸车间都可以生产 2xxx 系、3xxx 系、4xxx 系、5xxx 系、6xxx 系、7xxx 系合金扁锭，锭的规格：厚 400mm~700mm，宽 1050mm~2350mm，长 2350mm~6000mm，最大质量 20.8t。锭的成品率决定于许多因素，如合金种类、锭的尺寸、铸造工艺等等，但综合起来看，可按 81%成品率匡算铸锭产量，产量一确定，就可以确定熔炼－静置炉组容量大小与数量。据此，设计部门确定铸造车间的主要装备为：6 组 60t 熔炼炉－静置炉－铸造机组（2－2－1 式配置）、3 组 30t 熔炼炉－静置炉－铸造机组（2－2－1 式）、2 台 30t 洛伊（L01）双室炉，用于熔化废料、1 台铸锭锯切铣面联合机组、1 组均匀化处理炉。生产的主要合金为 2024、2524、5052、5182、5083、6061、6082、7039、7150、7055、7075、7175 合金，还有 3003、4004 合金等。在建设过程中很可能会有所改变。

按现行的技术状况，熔炼炉为圆形，顶装料；静置炉为矩形，倾动式，从瑞士高奇公司（Gautschi）引进；铸造机从美国瓦格斯塔夫公司（Wagstaff）引进。燃料全部为天然气。车间有 60t 及 30t 均匀化处理炉 12 台，处理温度 400℃~620℃，温度偏差≤±2.5℃。

铸锭锯切－铣面联合机组从梅尔公司引进，有些部件中外合作制造，锯切采用带锯。

还有从德国奥托容克公司（OTTO Junker）引进的 4 台 7.5t 中频减应废料熔化炉，工作温度 700℃~760℃，温度精度±5℃，烧损率≤1%，熔化速度 3t/h。熔炼炉、静置炉和双室废料熔化炉各一台。德国格拉马公司（Glama）提供的扒渣车和抬包车，扒渣车的臂长为 11m 和 9m，抬包车容量 5t。

旋转除气机为 SNIF 式，净化处理含镁量≥1%熔体时，除气率可达 55%~60%，若进口熔体含氢量为 0.3ml/Al，则出口处熔体的可为 0.1ml/100gAl；净化处理含镁量<1%的合金熔体时，除气率 60%~65%，可使含 0.3ml/100gAl 气体熔体中的含量下降到出口处的 0.12ml/100gAl。DBF 型深床过滤器从法国诺贝丽斯公司（Novelis PAE）引进，对尺寸>10μ m 的夹杂物的除去率可达 95%，泡沫陶瓷过滤板为 CFF 型的，也是诺贝斯公司的产品，对尺寸>20μ m 固态粒子的清除率为 70%左右。

30t、45t、65t、85t、120t 熔炼炉设有 ABB 公司的熔体搅拌装置，成分与温度能达到尽可能的均匀，炉内熔体温度偏差≤5℃；元素含量<1%的成分偏差≤6%，而对含量>1%的合金元素的成分偏差≤3%；炉料熔化时间缩短 12%以上，有利于节能减排；炉渣可减少 10%。

合金成分控制采用炉前直读光谱仪分析，光谱仪从奥地利谢林公司引进。为了存放铣面后的锭坯从德国沃尔特公司

（Vollert）引进一套平面库管理系统，可以存放 2100 块锭坯，用机械手装卸，最大速度 4m/s，卸锭频率 9 块/h，装锭频率 15.5 块/h，全自动管理、定位精准，系统可靠性高达 99.5%。为了保护环境，熔铸厂排放的烟气都经过净化处理，布袋净化系统从瑞典尼德曼公司（Nederman）引进，应按使用说明书定期清理净化系统。

软合金熔铸厂（车间）有熔炼－静置炉 12 组，容量各 120t。工业纯铝及软合金扁锭需要量约 1060kt/a，合金为 1xxx 系、3xxx 系、5xxx 系及大部分 8xxx 系的，铸锭规格(mm)：厚 420~680×宽 1050~2200×长 4500~8000，锭的最大质量 32.7t。

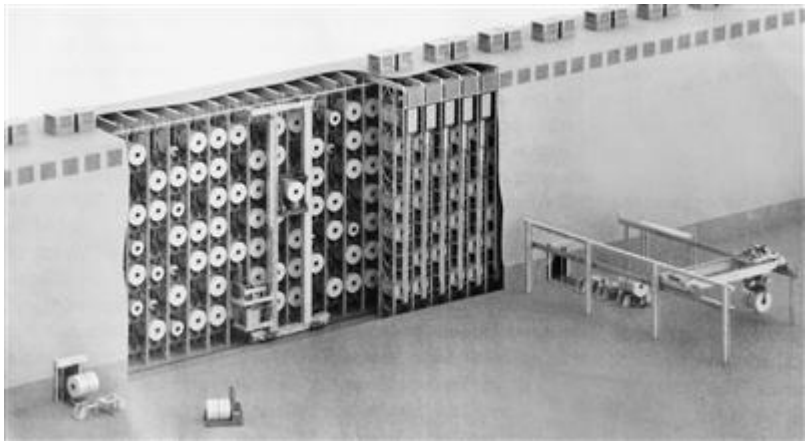


图 1　全自动化热轧带卷存放与冷却高架库

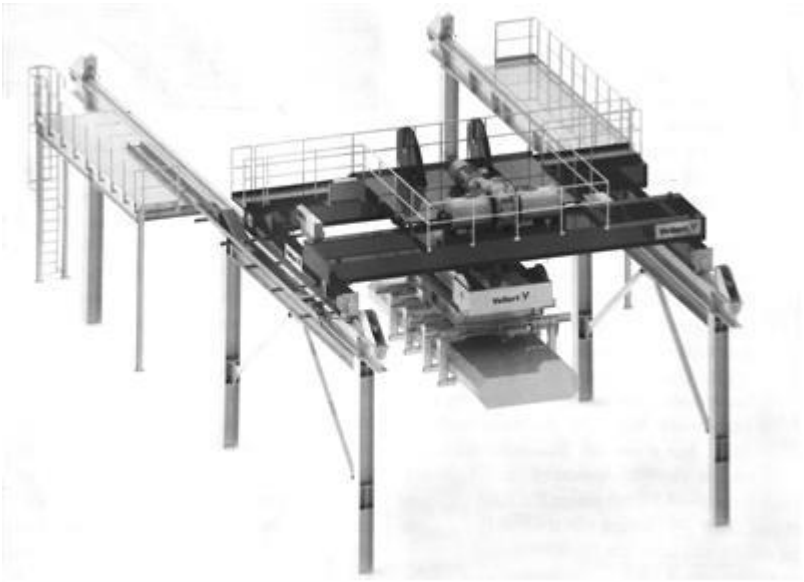


图 2　运输与自动装卸待加热锭坯的智能化运锭机，往返于高架库与加热炉间

轧制厂

天津忠旺铝业公司在建的2000kt/a平轧铝产品项目有3条（1+1+3）式硬合金生产线和1条（1+5）式软合金生产线。硬合金板带总生产能力1200kt/a，其中厚板600kt/a，薄板带600kt/a；软合金板带生产能力800kt/a（含铝箔带坯）。

硬合金生产线：硬合金板带400kt/a（厚板200kt/a，薄板带200kt/a）

No.1硬合金板带厂的总生产能力400kt/a，其中厚板的200kt/a，航空航天级薄板带的40kt/a，汽车带材的160kt/a。可生产的合金系为2xxx系至7xxx的各种合金。No.2及No.3硬质合金板带厂的产品结构与No.1厂的相同。

所有的热轧机及冷轧机共32台，都是从德国西马克公司引进的。燃气推进式加热炉2台，艾柏纳工业炉（太仓）有限公司制造，但关键零部件与自动化控制系统还是从奥地利公司总部运来的。炉的工艺技术参数：可加热锭坯厚390mm~650mm、宽1240mm~2700mm、长4500mm~8000mm，锭坯温度偏差±3℃，热效率≥72%，锭坯加热温度350℃~620℃，单块锭坯最大质量26.5t，可装锭坯最多块数25，最大装炉量662.5t，加热时间10h~22h。

热轧线由辊道、立轧机、粗轧机、重型剪、轻型剪、中轧机、3机架精轧机列等组成。

4500mm热粗轧机的技术参数如下：

辊面宽度，mm	4500
最大开口度，mm	700
轧制力，MN	80
开轧温度，℃	350~520

热精轧机列的技术参数：

辊面宽度，mm	3350
轧制力，MN	50
来料板坯厚度，mm	30~50
出口带材厚度，mm	2.2~12
厚度偏差，%	±1%
板凸度，%	0.2~0.5

终轧温度，℃　　250~360

温度差，℃　　≤10

最大轧制速度，m/min　360

带卷最大质量，t　　25

板片冷轧机，No.1硬合金厚板车间设有一台国产4辊可逆式块片冷轧机用于轧制2xxx系、5xxx系、6xxx系、7xxx系合金厚度≥3.5mm的冷轧板，来料热轧板坯最大厚度50mm、最大宽度3650mm、最大长度25m，最大轧制速度80m/min。

No.1厚板热轧车间有板坯精密锯2台、成品厚板精密锯4台。成品精密锯从奥地利斯开宁公司（Schelling）引进，可锯切厚4mm~260mm×宽1000mm~4300mm×长2000mm~2200mm的厚板，板的长度偏差±1mm，宽度偏差±0.5mm，对角线偏差±1mm，板的最大质量30t，锯屑吸收率99%。

板坯精密锯从法国塞马斯公司（Sermas）引进，可锯切板坯的尺寸厚4mm~260mm×宽1000mm~4300mm×长2000mm~2200mm，板坯长度偏差±1mm，宽度偏差±0.75mm，对角线偏差±1.5mm，板坯最大质量30t。

板材预拉伸机2台从德国西马克集团梅尔（Meer）公司引进，1台100MN，另1台40MN。

厚板带切机从德国乔治公司（Georg）引进，切后半成品厚板尺寸：厚2.0mm~12mm，宽1120mm~2800mm，长1000mm~2400mm。

固溶处理在硬合金板材生产中起着至关重要的作用，在当今凡是生产航空航天级铝合金厚板的企业都应拥有厚板辊底式固溶处理炉，东北轻合金有限责任公司2002年从奥地利艾伯纳公司（Ebner）引进1台，开中国有这种先进设备的先河，至2016年中国可有这种先进的铝板固溶处理炉22台，占全球总数的55%。这种热处理炉由装料辊道台、固溶处理炉、淬火及干燥系统、卸料辊道台组成，处理窄板时可2片同时通过。忠旺天津铝业公司每条硬合金生产线有3台辊底式处理炉，25m的2台，38m的1台。基本技术参数如下：

炉温设计精度，℃　　±1

炉气温度精度，℃　　±1.5

板材温度均匀性，℃　　±1.5

可处理板材尺寸，mm　厚4~260，宽1240~4300，长4000~43000

加热温度，℃　　最高550

淬火介质　　经处理的水

实际上，加热方式可用电也可用天然气，可处理板材也可以薄到2.2mm。

硬合金板的时效/退火炉及T77时效炉也是艾伯纳工业炉（太仓）有限公司提供的。时效/退火炉有7台，其中14m的4台，26m的3台，主要技术参数：炉温设定偏差±1℃，炉气温

度偏差±2℃，板材温度均匀性±1.5℃。

39m T77时效炉可是这类炉中的天骄，可对7055合金进行三级时效，为航空航天工业提供综合性能最佳的T7751铝厚板，现在全世界这种商业化生产炉也不超过3台，在中国可能是首台，它的主要技术参数：炉温设定偏差±1℃，炉气温度偏差±2℃，板材温度均匀性±1.5℃，单板的为±1℃，可处理板材尺寸：厚4mm~250mm、宽1000mm~4300mm、长2000mm~39000mm，单板最大质量25t。

电导率检测仪与水浸式超声波探伤线都从法国CMS公司引进，前者可测板材尺寸为：厚4mm~250mm、宽1200mm~3500mm，后者可探板材尺寸：厚6mm~160mm（AAA级）、6mm~250mm（AA级、A级），宽1200mm~4250mm，长4mm~39000mmm。

板材抛光覆膜生产线从瑞士德米斯公司引进，单片抛光，表面粗糙度Ra＝0.8靓~0.2靓，抛光后立即覆膜。可供抛光板尺寸：厚3~250mm，宽1000mm~2600mm，长2000mm~12000mm。

轧辊磨床从意大利波米尼（Pomini）公司引进，全自动CNC工作辊磨床，可磨轧辊最大直径2000mm、1500mm、700mm，4台，3台磨工作辊，1台磨支撑辊。

厚板存放库，德国沃尔利特公司（Vollert）设计，平面式，全自动化。铸锭焊接机1台，宝山钢铁公司研究院设计制造，焊合后锭的尺寸为：厚390mm~750mm，宽1240mm~2700mm，长2200mm~8000mm。

厚板自动包装线一条，从芬兰皮斯美尔公司（Psemel）引进，全自动。板垛尺寸：高30mm~590mm，宽1000mm~2800mm，长2000mm~24000mm。另外，还有1台从美国科内克斯公司（Cognex）引进的表面品质检测仪。

在未进入冷轧车间之前先参观3个智能化诺大无比的带卷高架库，其中1座正在建设，可于2016年初期投产，可贮放1500个带卷，另2个库即将开工建设，可存贮1200个及2100个卷，它们都是沃尔利特公司的杰作，容纳了多项专利技术与一批诀窍(know-how)。这3个高架库约500m长，可存放100kt带卷。即将完工的那个最大，长504m，150个通道（aisle），5层，可容纳1500个带卷。另2座高架库正在建设中，一个长275m、高31m，可贮存带卷约1200个；另一个长300m、高33m，可存放约2100个成品带卷，带卷质量15t~32t。

热轧带卷由自动化智能运输系统运入高架库，在强大风机气流冷却下可在50h以内由约350℃完全冷却到50℃以下，供进一步冷轧用（图1）。此库低层约500m长，用于存放待加热的锭坯，由自动吊车与机械手装卸与运输（图2）。

硬合金带材冷轧生产线：生产能力200kt/a

每条硬合金生产线冷轧带材生产能力200kt/a，各有2条从西马克公司（SMS）引进的CVC 6 plus冷轧机，1条2350mm的，另1条2800mm的。

硬合金薄带材切连线1条，从德国夫洛林公司（Froehling）引进，来料最大宽度2650mm，纵切后最窄带材宽度500mm，带材厚度0.3mm~3.0mm，切后成品带材宽度500mm~2600mm。

拉弯矫直生产线从德国安德里兹·松德威格公司（Andriz Sundwig's）引进，可处理带材宽度1200mm~2650mm，带材厚度0.15mm~3.5mm，成品带材宽度1100mm~2600mm，机组最大速度300m/min。

气垫炉-拉矫机-涂层线用于生产小轿车车身带材（ABS），从奥地利艾伯纳-特诺瓦公司（EBNER+TENOVA）引进，生产线总长309m，分上下两层。基本技术参数：带材厚度0.3mm~4mm，带材宽度1060mm~2650mm，带卷最大外径2600mm，带卷最大质量19.2t，机组最大速度40m/min，可处理合金2xxx系、6xxx系、7xxx系。

高速切边线从意大利达涅利·夫洛林公司（Danieli Frohling）引进，可提供宽度精准、边部外观良好、毛刺最小的带卷，其主要技术参数：带卷最大质量30t，最高切边速度1500m/min，可切合金2xxx系、5xxx系、6xxx系、7xxx系，带材厚度0.2mm~2.0mm，带材最大宽度2650mm。

薄板横切机组从德国乔治公司（Georg）引进，2条，基本技术参数：可切带材厚度0.2mm~4.0mm，带材宽度910mm~2650mm，板材长度800mm~12250mm，可切合金1xxx~8xxx，抗拉强度Rm80N/mm2~550N/mm2，屈服强度Rpo..2

30N/mm2~450N/mm2，下表面衬纸，上表面覆膜，机组最大速度120m/min。

带卷退火、时效炉群全是苏州新长光热能科技有限公司的产品，退火硬合金薄板带与0状态材料生产起着不可或缺的至关重要的作用，但从艾布纳工业炉（太仓）有限公司购买的1台40t的时效炉除外，它的时效温度80℃~250℃，炉气最高温度300℃，时效区内炉气温差≤±1.5℃，铝板温度偏差≤±2℃，保温阶段可达±1.5℃。有新长光热能科技有限公司的带卷氮保护炉16台（容量70t），60t带卷退火炉4台，60t带卷时效炉10台，40t薄板时效炉4台。

涂层线一条，可进行彩涂，从西马克公司引进，带材最大宽度2000mm，最大厚度0.5mm，生产线具有清洗、化学预处理、干燥、涂层、涂蜡、涂油和切边等功能、底部涂覆干膜厚度偏差≤±10%，且优于±0.5g/m2，彩涂线生产能力82kt/a。

自动化带卷包装线从芬兰帕斯美尔（Pesmel）公司引进，主要技术参数：带卷宽度800mm~2000mm，宽度≤500mm的带卷可实现立式包装，带材厚0.15mm~4.0mm，带卷最大质量15t，带卷内径405/505/610mm，外径1000mm~2000mm，包装效率22包/h。

轧机区上方有油雾回收及轧制油精馏系统，油雾净化效率（回收率）＞95%，排放烟气符合当前最严的欧盟环保标准。

NO·1硬合金板带厂（车间）总面积超过26x104m2，其中

热轧区长702m、宽117m，厚板区长702m、宽132m，冷轧区长192m、宽57m；带卷立体智能管理置区长168m、宽22m，精整区长360m、宽约190m。

软合金轧制厂（车间）

忠旺天津铝业有限公司软合金轧制厂（车间）平轧铝产品生产能力800kt/a，包括熔铸车间、（1+5）式热连轧线、冷轧车间和铝箔车间。熔铸车间应有生产约1100kt/a各种软合金扁锭的能力，合金为1xxx系、3xxx系、5xxx系和8xxx系大部分，锭的规格：厚420mm~680mm、宽1050mm~2200mm、长4500mm~8000mm，锭的最大质量32.7t。

锭的生产工艺：熔化炉熔炼--静置炉精炼与调整温度--在线添加晶粒细化剂与净化处理--铸造--锯切与铣面，以及成分分析与组织检验等。

主要装备：

120t熔炼-静置炉12组合12台，熔炼炉圆形，静置炉矩形可倾动，中外合作制造，燃烧天然气，铝熔体温度700℃~760℃，熔体温度控制精度≤±5，全部为固体时的溶化速度≥30t/h，燃料消耗（固体料）≤60Nm3/t-Al；静置炉熔体控制精度≤±3℃，升温速度≥30℃/h。

熔体处理系统6套，由晶粒细化剂丝装置、除气装置、陶

瓷过滤板装置、深床过滤器个1台组成。细化剂添加机可以同时送2根，送丝速度0m/min~5m/min，无级调速；除气装置为SNIF式，处理能力60t/h，当进口熔体氢含量≤0.3ml/100g-Al时，处理后氢含量≤0.12ml/100g-Al，若进口熔体氢含量＞0.3ml/100g-Al，处理效果可达≥60%，除碱金属效果为：若每种的含量＜10ppm，处理后每种（Na、Li、Ca）的含量可≤2ppm，陶瓷过滤板6台，处理能力60t/h，对粒度≥10um夹杂物的虑除效果≥95%，深床过滤器6套，过滤能力60t/h，对粒度≥6um夹杂物的虑除效果≥90%。

液压内导式半连续铸造机6台，从美国瓦格斯塔夫公司（Wagstaff）引进，每铸次的最大质量120t，可铸锭的尺寸：厚420mm~680mmX宽1050mm~2200mmx长8000mm，锭的最大长度8500mm，同时可铸造3块~5快。

扁锭锯切铣面机组1台，可铣锭规格：厚420mm~680mmx宽1050mm~2200mm，锯切机为带锯，锯前锭的最大长度8500mm。锯后锭的长度4500mm~8000mm，试样最小长度20mm，定尺精度±2mm,锯切截面垂直度偏差≤2mm。双面铣的无级铣筱速度3000m/min~4000m/min，铣削能力6块/h。

100t双室废料熔炼炉2台，固定式，矩形，燃料为天然气，熔体温度700%~760%，控制精度≤±5℃，溶化速度≥9t/h，出铝能力≥200t/d。

熔铸厂（车间）长540m，宽180余m，总面积9.7x104m2，

由原料跨（30m）、熔炼跨（30m）、铸造跨（36m）、存锭跨（30m）和加工跨（30m）组成。此外，还配备了引进的6台扒渣车与1条链式铸锭机，用于铸造复化废料锭。

热轧及冷轧车间。轧制车间生产1xxx系、3xxx系、5xxx系、8xxx系（大部分）合金板带材818kt/a（含铝箔带坯），主要为罐料（can stock、end stock）、PS版基带材、CTP版基带、铝箔带坯等，板带车间成品率按78%匡算。可轧锭尺寸：厚420mm~680mm、宽1050mm~2200mm，长4500mm~8000mm，锭的最大质量32.7t。热轧机为2400mm（1+5）式热轧线与2300mm冷轧机，由西马克公司（SMS）成套供应。

热粗轧机采用电动压下、液压微调，带有液压垫、工作辊弯辊、轧辊液压平衡、压力闭环、位置闭环。5机架热精轧机采用液压压下，装备正负弯辊，装备有完善的厚度自动控制系统AGF，包括X射线测厚仪、测厚仪监控、偏心补偿、合金补偿、过载保护等，装备有完善的凸度自动控制系统，包括凸度仪，其功能包括轧辊倾斜、正负弯辊、凸度仪监控、轧辊分段冷却等；配有张力辊，检测机架间张力，并参与轧制过程自动控制；还装备有：自动控制系统及相应的各种工艺控制数学模型，必要的联锁保护装置（含事故报警和显示），轧件检测和跟踪系统。粗轧机前有立辊轧机，以减小轧件宽展、改善轧件横向硬力不均匀性，减小边部开裂。

立推式铸锭加热炉8台，新长光热能科技有限公司设计制

造，主要参数：可加热1xxx系、3xxx系、5xxx系、8xxx系大部分合金锭，锭宽1040mm~2200mmx厚400mm~660mmx长4500~8000mm，锭的最大质量31.7t，锭的加热温度350℃~600℃，炉温均匀性±5℃，天然气加热，装炉量25块/炉，加热时间10h~22h。

2400mm（1+5）式热连轧线基本参数：带材出口最大厚度10.0mm，最小厚度1.8mm，最大宽度2150mm，带卷最大质量30.3t，F5最大轧制速度600m/min。

冷轧在制品多，为减少热轧带卷冷却与加速它们的周转设有智能高架库，可提高主机、辅机生产效率，减少带卷运输碰伤、擦伤，同时可提高厂房空间利用率。

冷轧车间有4台2300mmCVC6plus不可逆式单机架冷轧机与1条2300mmCVC6plus双机架冷连轧线。可轧合金1xxx系、3xxx系、5xxx与大部分8xxx系的，来料带材最大厚度4.0mm，成品厚度0.1mm，带材宽度950mm~2150mm，卷材质量最大30.3t，max轧制速度1500m/min。

软合金车间有4条引进的切边生产线，除一条可切带材厚度0.2mm~2.0mm、另三条的为0.1mm~0.8mm外，其他参数均相同：带材宽度950mm~2150mm，带卷最大质量30t，最大轧制速度1500m/min。

1条引进的纵切生产线，用于纵切各种软合金带材，其厚度0.1mm~2.0mm，宽度为950mm~2150mm，带卷最大质量30t，

最大剪切速度800m/min。

纯拉伸机组从德国BWG公司引进，用于拉伸矫直1xxx系及3xxx系合金厚0.1mm~0.5mm带材，带材宽度950mm~2150mm,带卷最大质量30t，最大拉伸速度400m/min。

引进的涂层生产线1条，可处理带材：软合金，厚度0.1mm~0.5mm，宽950mm~2150mm，带卷最大质量30t，最大速度180m/min。

4条拉弯矫直机组全部引进，用于矫直宽950mm~2150mm的最大带卷质量30t的1xxx系、3xxx系、5xxx系几8xxx系大部分合金带材，其中1条生产线可矫带材厚度为0.2mm~3.0mm，另3条的为0.1mm~1.0mm，生产线的最大拉弯矫直速度均为300m/min。

引进的横切生产线1条，可切的软合金带材规格：厚0.3~3.0mm，宽950mm~2150mm，带卷最大质量30t，切后成品板材长度1000mm~8000mm，最大剪切速度120m/min。

大带卷包装机全部引进4台，还有引进的小带卷包装机1台，前者的包装速度10卷/h~12卷/h，后者（≤3t）的为60卷/h。

退火炉21台，全部由新长光热能科技有限公司提供，其中30t试验退火炉1台，90t的16台，90t的氮气保护炉4台。

软合金轧制车间总面积超过21x104m2，其中热轧区长462m，宽132m；冷轧区长414m、宽57m；智能高架仓库1座，

长435m，宽20m；3个精整区，长312m，宽分别为132m、132m、129m。

铝箔厂（车间）

铝箔厂生产能力100kt/a，双零烟箔及包装箔，采用典型生产工艺：带坯-粗轧-中轧-中间退火-合卷-精轧-分切-退火-成品。以1850mm、2000mm系列轧机及其他装备，各6台轧机，全部从德国阿申巴赫公司（Achenbach Buschhutten GmbH St Co.KG）引进，它们的基本技术参数见表3。所有轧机都装备厚度自动控制系统和自动板形控制系统，可轧制合金1xxx系、3xxx系及大部分8xxx系合金。

车间有引进的铝箔合卷机4台，分卷机6台、厚箔剪切机4台，薄箔（0.005mm~0.03mm）剪切机2台（表4）。引进的支撑辊磨床1台可研磨最大直径1000mm、工作辊磨床3台（可研磨最大直径600mm），各种国产退货炉55台，其中：5t实验炉1台，40t常坯退火炉4台，20t成品退火炉50台。

1.11.5 访上海天重集团总经理刘礼林

铝加工装备制造业是铝加工体系的核心和基础,我国铝加工装备制造业的技术水平决定了整个铝产业工业化的整体

水平,因此,在探索我国铝工业的发展道路的进程中,装备制造业扮演着重要的角色,承担着新时期推进铝加工业技术改进的历史使命,同时也是推进我国铝加工技术改进的主战场和主力军。

当前我国铝加工装备业又是怎样一个现状呢?国际情况又是怎样的呢?当前肆虐全球的金融危机又对我国铝加工装备业影响几何呢?日前,记者采访了当前我国最大的铝加工装备企业之一---上海天重集团总经理刘礼林。

就目前我国铝加工装备发展情况来看,我国铝加工装备业经过了20多年的发展,可归纳为"起步较晚,发展较快,但较国际先进水平仍有一定差距",上海天重集团总经理刘礼林向记者介绍说。刘总凭借着他在铝加工行业多年的研究经验,无意中透露了天重装备将向国际水平看齐的奋斗目标。

成立于2001年的上海天重公司,起初只是以设计和服务为主的小公司,没有车间和加工厂,主要凭借租用车间和外包来完成客户的合同业务,经过了8年时间的奋斗,在董事长蔡振忠的领导下,在以刘礼林总经理为首的领导班子带领下,重管理、抓质量、拓市场、创品牌,企业知名度、加工能力、竞争力不断增强,企业规模快速发展,现在已发展成为拥有5家分公司的集设计、制造、服务于一体的大型装备集团公司,集团下属的上海天重重型机器设备有限公司主要承担铝加工

成套设备的设计和安装、调试及技术服务;上海天重重型机械有限公司主要承担冶金备件、贸易服务;上海天传电气有限公司主要承担电气设备的配套设计与制造;扬州天重冶金设备有限公司(原扬州冶金设备总厂)主要承担成套设备制造;以及上海天重西渡加工厂主要承担铸轧辊的专业制造和维修。凭借着这样一个强大生产制造体系、不断创新的设计能力和雄厚技术力量在同行业处于领先地位。

决策方向决定发展速度,战略决定战果。凭借公司多年的技术质量积淀、科学规范的管理和有色行业发展的大好形势,以董事长蔡振忠和刘礼林总经理的公司管理团队带领下,认真分析了国内外有色装备制造业的未来发展形势,意识到仅提高研发创新设计能力对于天重的公司的发展是远远不够的,扩大生产制造能力同样具有重要性。或许以收购的途径以扩大天重公司的生产制造能力更为上策,天重公司抓住了国有企业改制赐予的大好发展机遇,2004年在公司管理层领导下天重公司跨出了重要的一大步。

瞧准机遇,抓住机会。2004年,对于今天的天重集团来讲,是一个不平凡的一年,刘总向记者详细地介绍了公司以1亿元人民币成功收购和整合国有大型企业原冶金部直属企业---扬州冶金机械有限公司(下称“扬冶”)的经过。当时江苏省扬州市国有企业改制,扬冶因为没有核心产品和技术,企业生存举步维艰,天重公司凭借着之前租用扬冶两个车间的管理经

验和价格优势在公司领导班子和员工的一致努力下,一举成功完成了我国罕见的蛇吞象并购案,在行业内开创了民营企业收购国有大型企业的先河,在短时期内将其成功改制,成为上海天重重型机器设备有限公司的全资子公司。在随后的整合过程中,在以董事长蔡振忠和刘礼林总经理领导团队的精心安排下,原扬冶包括在职、离退休人员共计1700余员工得到了很好安排,现在的扬州天重冶金机械有限公司在集团公司的科学管理下,承担着天重集团公司重要的生产制造任务,由于公司的订单不断,公司员工的收入不断增加,现有的1200名在职员工干劲十足。扬冶的成功收购使“天重”一举成名为行业内的大型民营企业。因为天重对扬冶的成功收购和整合,曾一度引起了中央有关部门的高度关注和当地政府作为范本多次受到表扬。

一步走赢,步步为营。在和刘总交谈的过程中,发现他手中拿着一份铝加工设备业绩表,从2002年3月份至今年年初,天重集团共向我国铝行业提供了66台铝铸轧机、30台铝冷轧机、6台热轧机、8台拉弯矫直机、17台铝箔轧机、16台精整设备,7年间向我国铝行业共计提供了143余台成套设备。约占有全国总生产能力的30%,尤其是2004年收购扬州冶金机械厂之后,天重集团的生产制造能力更加强大,公司业绩大幅攀升。2004年至今,天重集团就为我国铝加工企业生产了80余台合格优质的铝加工成套设备。

其中,在2008年就有两项新技术填补了我国铝加工装备技术的两项空白。第一项是,2008年7月份,由天重公司成功为河南淅川铝业集团公司生产设计了宽幅Φ500×2300mm/Φ1350×2250mm铝冷轧机,该冷轧机可生产出宽度在2000mm的铝箔毛料,其轧制力参数为25000KN、轧制速度为1200m/min(MAX)、主电机功率为2×2240KW、工作辊和支撑辊分别为Φ500×2300mm和Φ1350×2250mm、最大卷重为15000Kg,该轧机配备有完善的测厚仪和AGC系统以及板型辊和AFC系统。各参数指标和技术性能均步入了世界先进行业,达到国内最先进水平。就目前国内市场而言,宽幅铝箔毛料市场缺口较大,生产技术要求较高。为填补市场空白,应市场所需,身为铝加工装备业骨干公司之一的上海天重公司积极与铝箔生产单位沟通,攻克技术难题,最终取得硕果。据刘总介绍该轧机于今年2月已投产,已为客户生产出合格产品,并赢得了市场的好评,引起了行业重大反响,日前,该技术的突破也象征着我国铝冷轧机最高水平。第二项是,2008年9月和2009年4月天重集团分别中标了中铝瑞闽铝板带有限公司和河南淅川铝业有限公司的两台Φ440×1850/Φ520×2050/Φ1250×1800六辊冷轧机,行业内称之为六辊CVC系统铝冷轧机,该轧机成功设计和制造,是我国铝轧机技术的又一大突破,刘总介绍说,第一台为中铝瑞闽制造的Φ440×1850/Φ520×2050/Φ1250×1800六辊冷轧机现已完工,预计在近期投入生

产,第二台正在安装过程之中,预计年内10月份投产。

天重公司的宽幅Φ500×2300mm/Φ1350×2250mm冷轧机和Φ440×1850/Φ520×2050/Φ1250×1800六辊冷轧机均刷新了我国铝轧机技术的纪录,同时填补了我国在大宽度铝箔和六辊CVC系统轧机的技术空白,天重轧机技术的不断创新,得到了同行兄弟企业的赞叹和称赞,天重设备不仅在国内赢得市场青睐,更是走俏国际市场,近年远销印度及印度尼西亚等国际市场,并得到了国外客户的高度评价。

提起天重的发展,尤其是2004年至今,发展速度尤为迅速,上述一系列的阿拉伯数字足以说明一切,那么又是什么使天重公司在短短的8年时间里,从一家小规模的工程设计服务商成长为拥有5家分公司的大型装备集团呢?当问及其中的宝典秘笈时,刘总毫无保密地告诉记者,天重有三个上帝---客户、员工、供应商。

保佑天重的三个上帝---客户、员工、供应商

天重集团规模由小到大,技术上不断进步,产品结构不断拓宽,业绩逐年增长,在行业内的影响逐渐深入,装备技术质量上取得了飞跃式发展,一举跃居同行业领先,成为中国铝加工装备制造业的佼佼者,取得了如此骄人的成绩,刘总总结为几个方面:

第一,公司的决策正确,天重集团的发展方向,人才战略、

产品战略以及资本运作等方面都做出了正确的决策,在国际国内经济繁荣,市场需求旺盛,民营资本大量涌入铝加工行业的外部环境下,管理层高瞻远瞩、有效管理、挑战机遇,带领公司全体员工勤于耕耘、不懈进取。天重瞧准机遇抓住机会,公司果断决策收购扬冶扩大生产制造能力,合并后,公司有明确的“五主五辅”经营方向:公司以轧机类产品为主,以钢铁类零部件为辅;以产品质量为主,以产品数量为辅;以技术服务、装配为主,以制造加工、外围协作为辅;以制造核心类零部件为主,以制造加工简单小型件为辅;以恪守信用、保质按期交货为荣,以讲究客观、随意拖延、粗制滥造为耻。此举极大地提高了公司的研发设计能力和生产制造能力,为公司的进一步发展奠定了更加坚实的基础。

第二,公司的独特战略方针。天重集团在追求技术的不断进步的同时,始终不忘技术与服务水平的完美结合。

“先进的技术,过硬的产品,产品没有新技术,就没有市场,企业没有新技术,就没有生命、没有竞争力。”这已是天重集团在市场竞争中的基本原则,也是天重集团不老的话题,其实真正使天重得以长足发展的秘密所在是技术进步和服务水平完美结合,关于天重的服务理念,刘总与我娓娓道来,“我们服务不是说说而言的,也不是平常所说的简单售后服务,天重的设备售于客户的最终目的是让铝厂能生产出合格的产品,能生产出市场欢迎的产品,我们的目的不是说我们能赚钱,而是

客户能赚钱，只有客户能赚钱我们才有钱赚”，所以天重把服务分为售前服务、售中服务、售后服后。拓展服务，渗透到客户的各个方面，刘总介绍说，假如一个电铝厂想延伸产业链或是一个原本不是做铝加工产业的客户，现在看好铝加工产业，天重公司会做全程的服务，包括工程设计、产品规划、人员培训等对客户需求的各个方面进行一条龙服务，天重的服务理念已不仅仅局限于卖掉设备，而是让客户赚钱，做到了真正为客户着想。

第三，公司拥有强大的团队凝聚力、建立了完善的企业文化。

刘总认为企业要走好走强，必须要有一个非常团结的团队，引用刘总的原话就是说，“我们天重集团有一个很好的团队，我们的合作意识非常强，从董事长到普通的员工都非常热爱公司，假如公司挣到一块钱，别看少也会想到全体的员工，不是说就管理层独享。”员工和企业发展是同步，不论是经济收入上，还是说员工的文化生活上，天重公司始终不忘记自己的员工，当然天重公司有很好的激励机制，正是这种合理科学的机制，才会激起全体员工的强大的凝聚力，有福同享，有难同当！

天重集团树立了“诚信、自强、奉献、感恩”为主线的企业文化，坚信，天道酬勤、地道酬善、商首酬信、业道酬精、人道酬诚的因果关系思想，坚信只要不懈地努力，千方百计地提

高自己的竞争实力,天重集团就会有一个更加美好的明天。

第四,保佑天重的三个上帝:客户、员工、供应商。刘总自认为天重公司跟其他公司不一样的地方就是说他有三个上帝庇护。刘总说道,假如真的有上帝的话,天重公司有三个,第一个上帝就是公认的客户,第二个上帝就是天重的员工,天重集团从董事长到管理层一致认为员工是他们的上帝,第三个上帝是天重的供应商,可能大多数企业会认为自己应该是供应商的上帝,然而天重却不同,刘总强调说,一个供应商的产品质量好坏完全影响我们整套装备的生产能力,同时在我们经济或是其它方面遇到困难的时候,供应商同样也会给我们提供很大支持。刘总认为,对员工有一个很好的激励机制,员工收入高了,员工才会努力工作,加之供应商的配件质量有保证我们对客户的装备质量和交货期以及服务才会有更高的保证,这样一来我们天重公司的三个上帝之间就会形成一个良性循环。有这三个上帝的存在,天重还有什么事情做不到的呢,得到了三个上帝的支持天重公司明天没有理由做不好。

向世界先进铝加工装备业看齐---技术要提高价格要降低天重集团凭借着自己先进技术优势和全方位的服务理念,从无到有,已经逐步发展成为市场占有率高达30%、年产值达10多亿元的铝加工设备制造行业的佼佼者。曾获得2005年上海实力企业、上海成长型企业500强;2005年上海普陀区创税百万元企业等多项荣誉。2006年产品经过不断的技术提升,

已进军国外市场,订单不断增多,填补了国内最宽铝冷轧机和六辊轧机等多项技术空白,开创了多种机型整机出口的国内先例。对于天重集团今天所取得的骄人业绩,刘总并不满足,每年的一个台阶增长速度,刘总认为只是限于装备,天重集团在思考新的业绩增长点。刘总分别向我分析了未来天重集团规划的三个新的业务增长点。首先,天重还将继续将装备做精做专,向国际先进装备水平看齐,公认的德国铝加工设备做得非常好,远远超过我国,天重将用3~5年的时间达到发达国家制造的水平。其次是,轧机配件国产化,我国轧机基础配件还存在一些不足,比如轧机里的液压元件、轴承、测厚仪等配件不得不依赖进口,别看这些小配件在轧机的售价比例上将达到30%左右。凭借着刘总对市场和技术的了解,比如我国的军工或许能达到国外这些生产技术水平。刘总透露,下一步天重集团愿与我国的科研院所或是一些军转民的军工工厂紧密合作,合力打造高精度配件,打破依赖进口,在最短的时间里,使我国轧机完全国产化。当然技术的提高,更会大大地降低了设备成本,从而大大增强我国铝加工业和铝加工装备业的国际竞争能力。最后,天重集团还会在装备自动化和轧制速度以及一些辅助性技术方面投入更大的精力,如一些清洁、环境、在轧制过程的产生的烟气等方面进行改善。刘总说,“在今后经过天重公司的不断努力,轧机的技术不仅要提高,而且轧机的价格还要降低,我们要以提供给客户性价比更高的装备为奋

斗目标。”

在确定上述三点新的业务增长点之外,天重公司还定位了10年内更为准确具体的奋斗目标:第一,3年内天重轧机的制造量占总制造量的50%,利用5~10年的时间完成产品结构的彻底转化,使天重集团成为世界一流的轧机供应商;第二,3年内产品质量达到国内领先水平,5年内达到国际二流水平,10年内达到国际一流水平;第三,技术上紧跟世界先进水平,2~3年争取与世界一流公司进行实质合作,装配水平完全满足设计水平,争取做到全试车后出厂;第四,优化制造结构,使一些关键零件和加工制造技术自己完成。当然,对于我国铝加工装备来讲,原始底子较薄、起步较晚、整体水平不高的背景下,实现上述目标,天重集团需要的不仅仅是攀登世界铝加工装备技术颠峰的勇气,更需要凝聚整个行业创造力,苦练内功,攻坚克难。

当前,面对肆虐全球的金融危机,我国铝行业受到前所未有的冲击,当然作为铝行业的关联紧密产业,铝加工装备业也不例外,刘总介绍说,很多铝加工项目处于停产或是半停产,甚至有的项目半路夭折。因此,今年以来新的订单明显减少,对于2008年已经订货的合同,个别合同推迟交货期限,也有个别合同退货,面对危机带来的现实天重集团并没有怨天尤人、坐以待毙,而是在积极思考如何转危机为契机?怎么转危机为新的生命力?天重集团选择了苦练内功。刘总介绍说,之前由

于业务量过于繁忙,没有更多的时间和精力在之前的装备上包括外形和内在技术上做更好的整合,危机正好给了天重一个喘息的机会,自从2008年6月份至今,天重集团始终有技术人员在客户生产现场进行设备跟踪,听取客户对设备应用情况的意见和建议,通过天重和用户的共同努力,来进一步完善和发挥设备生产能力,以备危机过后天重集团轻装上阵,再创佳绩。

相信在以董事长蔡振忠、刘礼林总经理的带领下,在以技术为先导,全体员工团结一致、不断创新、锐意进取下,天重集团会很快步入国际先进铝加工装备技术行列。我们期待着天重集团在进军国际一流装备水平的征程中取得更多辉煌的篇章!

1.11.6 登榜“中国质量奖提名奖”的坚美故事

办公楼

9000T 挤压机

2016 年 2 月 14 日，第二届中国质量奖获奖名单正式放榜，广东坚美铝型材厂（集团）有限公司荣登中国质量奖提名奖榜单，作为民营企业的佼佼者，坚美成为行业首个获得质量领域最高荣誉的品牌。

从 2013 年广东省政府质量奖到现在的国家级质量奖，在这 2 年的发展过程背后，呈现出的正是坚美“坚持追求完美”的核心价值观，也是坚美坚持“质量创新”的成果体现。

有一组数据惊艳亮眼：从 1993 年建厂到现在，产能从起步的 3000 吨实现了 100 倍的增长；纳税额由当时的 40 万元跃升了 275 倍；员工由当时仅有的 38 人，发展到如今的 5000 多人，且当时的 38 人中就有 24 人一直与坚美共成长至今。

有系列工程令人叹服：全球现有的 10 座 440m 以上著名超高层建筑中，5 座选用了坚美铝材，全国 67 座 300m 以上建筑 24 座采用坚美铝材。人民大会堂、钓鱼台国宾馆、军事

博物馆的铝门窗改造工程也采用了坚美铝材，国内外近 4000 多个大型重点建设工程项目，都可见坚美品牌。

探寻坚美摘取中国质量奖提名奖桂冠之谜，可以发现，导入卓有成效的“价值链嵌入全过程的‘三关两全’质量经营管理模式”；以质量提升为基础，以客户需求为导向，以创新作为企业发展的驱动力和提供“嵌入价值”的服务理念，成为坚美的制胜之道。

坚持追求完美

1993 年，坚美诞生时正赶上中国铝型材市场爆发式需求期，只要生产出产品就不愁卖。很多企业在产品中掺杂废铝，以降低生产成本，但坚美坚持使用符合标准的原材料，承诺不用一斤废铝，这一举动赢得了公众信任和市场的认可。

早在 1993 年企业创立之初，坚美创始人曹氏兄弟就提出了“要么不做，要做就做最好”。历经 22 年，坚美抵制住了各种诱惑，走高标准、高要求的质量创新发展之路，产品不仅仅只是满足客户的基本需求，而是从根本上站在客户的角度来思考、解决和转型创新，为客户提供高附加值的产品与服务享受。

市场变幻莫测，考验也无处不在。2011 年行业内发生的“薄料事件”，让“坚持追求完美”核心价值观和坚持走“质量创新”之路的坚美成为大赢家。

由于相关用户的潜在需求，有些客户需要购买型材厚度达不到标准要求的型材。不少企业做起了“薄料”买卖获利。但坚美不为所动，作出了“严格执行国家标准，不做薄料”的决定。最终，制造及销售“薄料”的企业，很快在国家相关部门的监管中受到严惩。不少企业停产整顿，不少地方铝材商店纷纷关门，客户订单一下子都涌到坚美来。

近年来，铝型材行业内流行一句话：“买好料，找坚美。超高层建筑项目投标不能没有坚美。”这充分印证了坚美产品质量的优越和品牌美誉度。可以说，坚美从一开始就意识到且践行了“供给侧改革”的思想高度。

质量的高起点让坚美赢得了市场，创新的管理模式是制胜法宝。在坚美董事长曹湛斌看来，“价值链嵌入全过程的‘三关两全’质量经营管理模式”是坚美成功的关键。自应用“三关两全”质量经营管理模式以来，坚美内部顾客及外部顾客的满意度得到大幅度的提升，工作效率及经济效益也得到提高。近 3 年企业销售收入实现平均两位数逐年递增，全员劳动生产效率提升了 18%，创新提出坚美特色的“时间轴订单管理模式”，解决了困扰行业及时交货的难题，最终实现服务改善、价值链传递、提升客户价值，形成坚美新的竞争优势。

那么，曹董事长提到的“三关两全”质量经营管理模式指的是什么呢？所谓“三关”，即关注顾客需求，关注研发

创新，关注两化制造；所谓“两全”，即以质量工具集成应用为支撑的全员质量改进，以数据为基础的全过程质量追溯。

实际上，这一管理模式，是坚美通过总结以往的经营管理经验，学习融合美国经济学家和日本质量大师的质量经营理论，深入挖掘自身优势和行业特点，智力引进，加以创新提炼而来。该模式以“顾客价值”为核心，实现了从传统质量管理到全面质量经营模式的跨越。

这个结合行业、企业自身特点和经验“量身定制”的管理模式，其背后的基础保障，是坚美建立的管理、标准化、计量和产品认证等四大体系，它们相辅相成，形成质量管理的闭路循环，为坚美产品质量保驾护航。

建立整合型管理体系。坚美敢为人先，在铝型材行业中率先通过和贯彻 ISO9001 国际质量管理体系，并在发展壮大过程中不断健全质量管理体系，先后引进了卓越绩效管理模式，并建立了完善的 ISO14001 环境管理体系、OHSAS18001 职业健康安全和 ISO50001 能源管理体系并通过认证。坚美基于过程方法和风险管控将质量、环境、职业健康三个管理体系相结合，探索并实行卓越绩效与三体系一体化管理体系，规范企业质量管理，提高工作质量和工作效率，提升企业质量和安全管理能力。

在这些管理体系中，坚美拥有自己独有特色的质量责任体系、质量活动和质量文化。如建立质量责任体系：实施“一

把手”责任制、质量“一票否决”制和全员责任预防制，明确规定企业每个人在质量工作上的责任、权限，确保产品及服务质量。又比如建立全过程关键工序质量控制点和工艺质量监视与测量机制：依托自主开发的信息管理系统，设定了100 多个关键质量控制点，实现全过程质量控制追溯。

坚美历来重视企业的标准体系建设。按照企业体系系列标准 GB/T15496、GB/T15497、GB/T15498、GB/T19273 的要求，建立了行业领先的 870 项高于国家标准的企业内控标准体系，其中，技术标准 375 项，管理标准 186 项，工作标准 309 项，覆盖了生产、经营、服务的各个环节和全公司所有员工的岗位责任要求。

决定产品的精密来自于计量器具的精度。为此，坚美建立了完善的计量管理制度。公司根据材料检测、经营管理、安全生产、环境保护、能源计量、产品检测等方面的需要确定计量检测点，配备符合使用要求的计量器具。其次编制计量器具管理台账，制定计量器具分类管理方法和周期检定计划。

为了提高检验检测技术能力，坚美公司先后投入了 1000 多万元，单独成立了检测铝型材全项性能的专业检测机构，并通过国家 CNAS 实验室认可。检测中心占地面积 1000 多平方米，拥有一批专业的检测人员，分别设有力学检测室、化学分析检测室、综合检测室、环境老化测试室以及样品室，

并先后从德国、美国、以色列、日本等引进国际先进水平的全套检测仪器与设备，总体装备规模和技术水平领先国内同行。为产品控制获得真实、准确的试验数据提供了良好的基础保障。

为实现坚美产品走向世界，坚美成立了产品认证体系工作小组，制定了《产品认证管理制度》，为公司研发创新战略及出口营销战略的制定提供基础依据。通过了开拓欧盟国际市场的铝型材产品 Qualicoat、Qualanod 产品认证；在环境保护形势日益严峻的今天，坚美主动承担企业社会责任，公司 6 类主导产品获得行业首批低碳产品认证。目前，根据公司研发的高性能铝型材、系统门窗等新产品，再结合公司的营销战略，拓宽产品销售范围，公司正在积极进行军工产品认证、CE 认证、澳洲门窗认证等。

管理体系、标准化体系、计量体系和产品认证体系四大高级体系的建立与有效运行，为坚美获得国家质量奖提供了坚实的基础保障。

起点不高，却孕育了创新基因

1993 年创业之初，坚美拥有了第一台挤压机，那是日本上世纪 80 年代淘汰的一台注塑机，要经过一系列技术改造才能使用。曹湛斌集众人智慧，找出注塑机同挤压机的差异，在机器架构的基础上调整改造动力系统和压力系统，经过无

数次试验，最终掌握了挤压机关键技术。改造后，机器压力达到 1000T，性能超强稳定。这让来参观的日本人感叹“能把注塑机改造成高产挤压机？简直不可思议！”

初创的起点虽不高，却孕育了创新的基因，成为日后坚美技高一筹的本钱。

“品质的提高，除了需要核心价值观的坚守，还需要不断创新，创新是企业发展的驱动力，没有持续创新能力的企业是无法持续发展的。”曹湛斌是这样说的，也是这样做的。

早在 1999 年，坚美在同行中先行一步，拆巨资从日本引进第一条立式全自动氧化电泳生产线，这一步之差，也迅速拉开了坚美与同行的差距，这套设备和技术的引进，标志着中国氧化电泳水平与世界先进水平的接轨。

如果说这条生产线是 100%引进的话，那接下来的 3 条自动氧化电泳生产线，就是坚美一系列技术创新的结晶。通过吸收转化和摸索实践，坚美不但掌握了核心技术，还凭借自己的力量，进行工艺改进、创新，使新生产线的自主化率达到 90%，生产效率和产品质量达到国际领先水平。

从技术引进到自主创新，坚美前行的脚步从未停歇。近 3 年，坚美自主研发铝型材智能控制自动化挤压系统，实现产品的一致性、稳定性、提高生产效率；自主研发出铝型材自动包装机，研发经历了从第一代半自动化到第三代的全自动化的创新过程，最终实现“不同断面、不同支数”铝型材

的自动化包装，提高包装效率和效果的同时，减少了破损率，适用范围远超国际同行，并获两项发明专利。

作为传统制造产业，企业要转型升级，就离不开材料与产品的创新，坚美通过供给侧改革，实现产品向高端及高附加值方向转变。如：在执行国家“十一五”和“十二五”发展规划中，制定了加快向新型材料、高附加值产品生产的转变，开发新型高比强比刚、可焊接性强、复杂大断面铝合金型材及其他具有高附加值的大型工业铝材、军工用铝材；开发坚美高端环境友好型门窗系统，进军深加工领域的转型创新战略目标，并成为了行业转型升级示范企业。

在新材料方面，坚美联合高等院校进行了铝基复合材料、弥散强化铝合金材料及中强高导铝合金材料的研发。联合研发生产的“武装直升机”旋翼系统夹板及坦克负重轮毂等样件，经交军方台架试验，性能指标达到国外同类进口产品的指标要求，在国家建设及轨道交通领域实现进口替代。

在新产品方面，形成了一系列特种工业材、新表面处理及系统门窗新产品。自主研发的“海上作业特种铝型材”、“象牙白彩色电泳涂漆铝合金型材”、“薄壁供暖铝合金容器型材”3 项产品达到国际先进水平；“铝合金遮阳百叶产品”、“消光复合有色电泳铝合金型材”、“轨道交通专用特种铝合金型材”和“遮阳型 60 系列外平开隔热铝合金窗”4 项处于国内领先水平；同时，自主研发了系统门窗新产品

近 30 个系列，部分系统门窗新产品创新运用了“雨幕等压原理”、“自动下压式装置”进行低能耗门窗设计，K 值达到 1.5，处于国内领先水平，并获国家专利 21 件，其中自主研发的高水密气密推拉窗获 3 件发明专利、自主研发的抗高温、高湿、高盐、强紫外线、高台风等岛礁建设用系统门窗获得国家重点新产品。

要成为环境友好型企业，追求的不仅是产品的环境友好，更是制造过程中的环境友好，坚美创新提出并实施“绿色制造、绿色产品”工程。近 10 年来，累计投入 5000 多万元，不断增加先进的废气、粉尘处理设备，并自主研发创新专用设备，改善环境，已实现废气零排放和除尘达 95%的目标，领行业之先。还投资 3000 多万元改造废水处理系统，用最先进的设备将工业中水处理成可回收用水，循环使用，并将逐步实现有效零排放目标，维护周边环境的清洁。今后 6 年，还计划累计投入近亿元，加大工业环境改造力度，坚美正朝着国际先进的环保目标冲刺，用实际行动推动环境友好型社会的发展。

信息化技术的应用是工业制造企业提高生产效率及产品品质的有力武器。作为“工业化和信息化融合试点示范企业”，坚美创始人在企业创立之初就已意识到这一点。铝加工行业首条日本全自动化立式氧化电泳生产线的引进，带来了生产能力、效率及产品质量的大幅提高，印证了工业化和信息化

结合的重要性。之后，曹湛斌董事长又独具慧眼，组建了公司自有的 IT 研发团队，因为他再一次超前的意识到“铝型材产品的品种及形状规格较其他行业产品，存在复杂化及多样化的特性，想要真正的持续提高效率，没有生产实践经验的程序开发员是很难开发出适合铝型材行业的生产管理及控制信息系统的”。

有一种举措叫前瞻，有一种决策叫果敢。坚美领行业之先，建立并完善两化融合管理体系，自主开发具有坚美及行业特色的 ERP 信息管理系统，并与自动化生产装备及仓储系统实现无缝对接，提高产品品质、管理及生产效率的同时，保证了所有数据的实时再现和全过程的可追溯性。

为保障技术创新的有效开展，坚美构建了国家企业技术中心、博士后工作站、国家认可实验室、省工程中心等强大的创新平台，与国内外高校、科研单位、企业合作建立了多个研发机构，有力地支撑了坚美的技术进步和研发创新能力；组建了行业首屈一指的科研人才队伍，智力引进多名欧洲与日本技术专家，组建国际化研发创新团队，并聘请了强大的行业内外部专家团队，为创新提供了人力资源保障；建设了国际先进水平的研发创新装备，如：高品质节能环保熔铸、600T—9000T 不同吨位的挤压、全自动化氧化电泳、粉末喷涂、氟碳喷漆等国际先进水平的科研生产线，配备国际先进的检测仪器设备 100 多台，原值达 1.2 亿元，可满足不同牌

号的合金材料、不同断面大小的铝型材及门窗系统新产品新技术的研发，为技术创新提供了扎实的基础设施保障；设立每年不低于销售收入 3%的科技创新专项资金，为技术创新提供资金保障；颁布了 24 个研发制度指导研发、颁布了创新项目六级评级激励机制激发研发人员的创新思维等，一系列的措施为技术创新提供了制度保障。

直至目前，坚美已承担了 20 余项国家、省、市的重大技术创新研发及产业化应用项目，累计获 350 多件国家专利、软件著作权 48 件；累计参与国际、国家及行业标准制修订达 91 项，其中，参与起草制定国际标准 1 项、主持制订修订国家标准 17 项。

从单一建筑型材到汽车、船舶、军工及轨道交通等领域应用的复杂大断面工业铝型材；从仅有一座熔铸炉、一台挤压机发展为目前拥有 21 座节能环保熔铸线、51 台节能高效挤压机、18 条国际先进水平的自动化表面处理生产线；从行业首批“中国名牌产品”到“全国有色金属工业卓越品牌”，22 年的积淀打拼，坚美已然习惯了创新的节奏，并在化茧成蝶的蜕变中，不断发现超越的路径。

掌握行业标准制定“话语权”

2012 年 10 月，一位 30 多岁的年轻人站上了德国柏林 DIN 总部召开的 ISO 标准会议的演讲台，解读他代表坚美公司起

草的一份名为《建筑和装饰用铝合金表面阳极氧化膜与有机聚合物涂层、性能、检测方法的选择指南》的技术报告，详尽准确的实验数据征服了各国与会代表，确保了《铝及铝合金阳极氧化复合膜》国际标准获得通过。

消息传来，行业为之振奋。这个标准的制定，标志着我国铝型材行业实现了国际标准零的突破，为我国铝合金建筑型材标准达到国际先进水平作出了重要贡献，促进了有色金属行业的发展。

殊不知，这是这个名叫戴悦星的坚美员工的第二次冲刺。早在 8 年前他就曾代表公司站在这里，将包含上万个试验数据的《铝及铝合金阳极氧化复合膜》国际标准草案提交到 ISO 国际标准化组织进行讨论。最终因欧洲部分国家由于对电泳型材了解不够而产生偏差，未获通过。面对质疑，戴悦星及同事们并未气馁，再次增加了标准化试验内容，也义无反顾地承担了差异化试验任务。

多次角逐，终偿所愿。现在已经是公司副总工程师的戴悦星说：“参与国家、国际标准制定不是最终目的，更重要的是在参与标准讨论的过程中，我们探索出新的检测方法、发现新的性能指标，标准吃透了，研究技术才能有的放矢，才能比别人更好把握产品的质量。”

早在 1998 年，坚美就成功参与 GB/T 5237.5《铝合金建筑型材——氟碳漆喷涂型材》的制订，开创了铝型材行业民

营企业参与国家标准制定的先河。此后，坚美又连续三次承担了 GB5237 的修订主起草任务。

最为国内铝型材行业参与国家标准制修定最早、最多的民营企业，坚美舍得投入，购置了盐雾试验箱，荧光紫外灯加速耐候仪、冲击仪、杯突仪、弯曲仪、色差仪、划格计等国际领先的检测设备。并自主研发了隔热型材横向拉伸试验夹具、隔热型材纵向剪切试验夹具、阳极氧化产品及电泳涂漆产品落砂试验仪、喷涂产品落砂试验仪、隔热型材力学性能测试用高低温试验箱和高温持久负荷试验箱等设备，使坚美检测中心成为我国铝合金建筑型材行业内检测设备最先进、最齐全的试验室之一，成为我国 GB5327《铝合金建筑型材》国家标准四个试验研制基地之一和广东省工程技术中心。

俗话说：“一流企业卖标准，二流企业卖品牌，三流企业卖产品。”坚美牢牢掌握了行业的标准制定“话语权”，成为了名副其实的国家标准起草“专业户”。目前，参与制定的国际、国家及行业标准多达 91 项。同时，坚美公司凭借着强劲的标准化建设能力成为了“GB5237《铝合金建筑型材》国家标准研制创新示范基地”和“ISO 28340：2013 国际标准研制创新示范基地”，为行业的技术进步作出了较大贡献。

最高的标准是用户标准

制定国家标准、引领国际标准，坚美孜孜以求。在坚美，

还有另一个标准，就是——用户标准。在曹湛斌董事长心目中，衡量产品质量的好坏不能光靠国标，最终最高的标准应当是用户标准。

2008 年初，坚美为深圳一客户生产一批铝合金型材，这批产品，经过严格检验完全达到国家标准的高精级要求，但由于客户土建发生变动，对这批型材的精度提出了更严于国家标准精度的要求。按理说，这批货可以不退，但是坚美对认为产品达到了国家标准只是合格的必要条件，真正的合格产品、质优产品还必须以用户需求为导向，以用户满意为标准。为此，公司不惜损失 5 万元，让原来的合格产品全部回炉。事后客户感动地说：“你们厂不仅是真真正正的出好产品，而且是出客户满意的产品。”不久该客户将订单全部转到坚美来生产，成为坚美稳定的大客户。

想客户之所想，急客户之所急，坚美将这一朴素的服务意识做到极致。

2009 年 3 月，深圳某公司的机场幕墙工程项目向多家大型铝型材企业寻求技术支持，但没有任何一家企业能解决。无奈之时，抱着试试看的心态，该公司找到了坚美。

这是一个安装跨度为 6 米且宽度 845 毫米的铝合金遮阳百叶的项目。项目的难度在于：当时的挤压机无法满足超大型材的生产，在挤压过程中也会产生型材精度（精度包括型材扭拧度、弯曲度及平面间隙等）和安装尺寸配合精度不良，

并且项目工期非常紧迫。

接，还是不接？万一没干好，极可能让坚美成为业界的笑柄。然而，坚美没有一丝犹豫。

在得知项目情况后，坚美快速组织了公司专业技术人员和日本专家召开专题会议，制定了解决方案：第一，提出分成 3 段拼接式生产的方式解决超大型材无法挤压的问题。第二，通过优化型材断面的方式，让 3 段型材顺利完成 6 米的安装长度且安装精度高。第三，设计科学的安装方式，预留合理的装配间隙，以消除拼接过程中产生的不良现象，缩短加工安装时间，杜绝不良返工的现象。

通过坚美方案的实施，深圳公司在规定的时间内，顺利地完成了超大遮阳百叶的安装，令机场工程顺利完工，让用户获得满意的结果。而坚美又在一项难题上面再度把同业抛在后面。

“客户就是上帝”已成为众多企业的经营宗旨，而坚美作为传统制造产业，赋予了“服务”更深的内涵。

在坚美，为“顾客”服务，服务的不仅仅是外部顾客，也包含了内部顾客，建立内外部大顾客的概念，就如其创新提炼出的“三关两全”质量经营管理模式中，将“关注顾客需求（内部顾客与外部顾客）”放在了首位，公司所有的一切活动均以“关注顾客需求”为出发点，且以最终实现“顾客价值”为中心和目标。

为保证在经营全过程中提升服务质量，坚美制定了保障内部顾客价值链和外部顾客价值链的制度，并设计出服务改善的关键点。企业经营内的每个部门人员都将下一工序或步骤相关方视为自己的顾客，“思他所思，想他所想”，并运用 PDCA 循环方法，进行不断持续的服务改善，实现从策划、设计、研发、生产到销售及售后等企业内部经营全过程的服务质量得到提高，使内部价值链的价值也得到提升；同理，外部顾客及相关方的价值链的价值也一并得到提升，最终实现了整体价值链的总价值提升。

如对于外部顾客来说，坚美结合自身的实际情况，用心钻研顾客潜在需求，以顾客需求为导向，建立了完善的服务和技术支持体系，并专门设立了市场管理及顾客服务部，拥有一批专业的服务技术人员，制定了《服务技术支持管理制度》，规定了主动与被动的服务工作流程及措施，提供体贴、周到、个性化的服务，确保顾客在售前、售中、售后为得到满意销售服务和技术支持，以优质的售后服务平台赢取广大用户对坚美公司的信赖与支持。

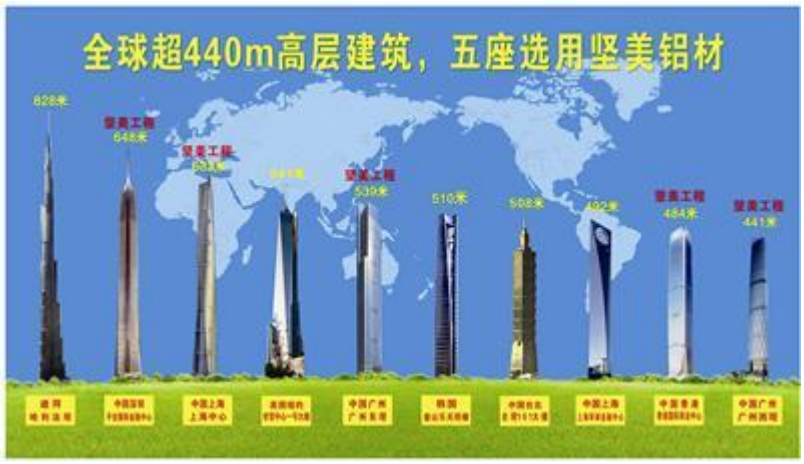
在创新中成长，在挑战中超越。一次次迎难而上，一次次出奇制胜，坚美在对品质的追求和顾客价值提升中，打造着金字招牌，演绎着坚美“神话”。在这个寻求超越的过程中，自己也被作为一种现象和样本，深刻影响着行业的未来。

“将品牌最强、质量最坚、标准最高、创新最快、发展

最好、环境最美、员工最幸福作为‘坚持追求完美’的具体目标。同时，注重企业社会责任，员工幸福指数，生产流程的不断优化。只有这样，我们才能支撑、巩固、发展第一品牌地位，打造百年坚美、世界品牌。”曹湛斌说。站在中国质量之巅，坚美依然将继续前行。

Mixed Use
HTTP://JANGHO.CN

中央电视台新台址工程



新加坡丹戎巴葛中心（第一高楼）。迪拜 Mixed Use Development。

“三关两全”质量管理模式大解密

何为“三关”？

关注顾客需求 关注研发创新 关注两化制造

关注顾客需求，是为顾客（包括价值链各环节的内外相对客户）创造价值，使质量经营管理目标更为清晰，价值链传递和服务改善的导向更加明确，是该模式的输入源泉；关注研发创新，是围绕为顾客创造价值所制定和实施的一系列产品研发、技术创新、管理创新、文化创新等举措。不仅是满足顾客需求，而且还保持企业的领先和竞争优势，是“三关两全”的重要驱动力；关注两化制造，即关注信息化和工业化（自动化）协同发展，聚焦为顾客创造价值，用两化融

合手段在营销、设计、生产、货运、服务等各环节实现价值链传递，是“三关两全”的重要支撑。

关注顾客需求方面，在经营全过程中将“为顾客创造价值”作为“三关两全”的核心，并建立内部及外部顾客的大顾客概念。首先对外部顾客，坚美公司结合自身技术优势，深入研究用户购买铝材产品的真实需要和潜在需求，在合作前期为顾客提供技术支持和服务，并对收集的顾客需求信息进行分析，将满足这些需求作为创造价值的过程，实现由销售产品到创造价值的转变。

同时，坚美还建立内部顾客概念，各经营环节的全体员工将本职工作的下一经营环节视为自身的内部顾客，将本职工作的输出不再单纯视为产品或服务，而要思考自身工作为下一经营环节即内部顾客所创造的价值，形成价值链的传递，也就是将价值链理念嵌入了经营管理全过程。使质量经营管理的目标更为清晰，导向更加明确，是“三关两全”质量经营管理模式的输入源泉。

研发创新方面，坚美建立了完善的研发创新体系和技术情报信息系统，颁布了具有吸引力的研发创新奖励制度，建成了一支由 600 多名技术人员组成的强大研发队伍，并且智力引进欧美、日本和台湾三大专家团队，每年研发投入占销售收入 3%以上，组建了国家企业技术中心、博士后工作站、国家认可实验室等国家级研发检测平台，围绕为顾客创造价

值，进行了一系列产品创新、技术创新、管理创新、文化创新等工作，成果显著。

通过关注研发创新，坚美不仅满足了顾客需求，而且还保持了企业的领先和竞争力优势，使价值链传递和服务改善的导向更加明确，是“三关两全”的重要驱动力。

两化制造方面，坚美通过建立两化融合管理体系，重点打造信息化环境下新型两化制造能力，在营销、设计、生产、货运、服务等方面实现价值链传递的信息化和工业化（自动化）。如与日本公司联合开发铝型材智能控制自动化挤压系统，实现在线自动采集工艺数据、设备运行数据等功能，提高生产工艺的一致性和再现性，保证产品质量稳定性；建设的成品自动存储仓库，与使用的 ERP 系统实现数据共享，减少人员 20%，提高空间利用率 30%以上，货物实现自动定位，加快存取节奏。使仓库的综合利用率得到成倍的提高。通过打造两化制造能力，不断提高运用“三关两全”高效运作水平，实现客户价值提升，形成坚美新的竞争优势。

何为“两全”？

全员质量改进+全过程质量追溯

“两全”即以质量工具集成应用为支撑的全员质量改进，以数据为基础的全过程质量追溯。其中，在以质量工具集成应用为支撑的全员质量改进方面，通过推动“三心”（认同

心、齐心、开心）文化工程和种子培育计划，开展 QC 小组、技术改善会和质量月等活动，组织形式多样的质量工具应用培训和推广应用，一方面，充分调动全员参与质量改进的积极性；另一方面，全面提高了员工素质，为集成应用质量工具，有效解决生产技术难题提供了有力的支撑。

从 1999 年起，坚美就持续开展 QC 小组活动，QC 活动氛围浓厚，每年定期组织 QC 成果发布活动并将优秀成果汇编成册，在公司范围内进行知识共享。2014 年共有 30 余项 QC 成果获得奖励。近 3 年员工技术改善合理化建议达 320 余条，为公司创收 2000 多万元。每年质量月活动组织质量演讲、工艺技术发表会、生产现场巡视等多项内容，为员工充分参与质量改进提供了很好的平台。坚美公司通过全员全过程的质量工具的集成使用，重视数据分析及知识管理，形成公司持续改进的文化。

在全过程质量追溯方面，坚美公司建立了以数据为基础的全过程质量追溯系统，在经营全程中各工序运用 ERP 操作将质量信息输入各工序系统的各模块中。每完成一个工序或一项工作，都记录其工艺数据及检验结果，如生产批次、生产班组、炉号、质量状态、操作者及检验人员的姓名、时间、产品规格型号数量及情况分析等信息，在产品的适当部位做出相应的质量状态标志，出现质量问题能及时调取质量信息查阅、分析及追溯。

为了更好地实现全过程质量追溯，坚美制定了《产品标识和可追溯性管理规定》，规定了从原材料进厂到产品出厂全程中人员的职责分工、产品的标识方式、检验和试验状态的分类、可追溯性控制的管理等内容，确保对产品质量的形成过程实现追溯。

目前，坚美公司共开发了上百个质量控制模块，其中有48项申请了软件著作权，通过ERP信息化质量追溯系统的应用，保证从顾客需求、产品设计研发、采购、生产制造、营销至消费者的各个环节，能实时掌握产品所在的位置和所处的状态，实现全程的质量追溯。为在生产质量过程控制改进提供可查询依据，使产品召回和内部返工的范围降到最小，快速满足顾客要求，有效地预防或减少由于质量问题带来的损失，提高企业抵御风险的能力以及赢得顾客的信任和青睐，有效提高企业的市场竞争力。

尤为值得一提的是，在应用“三关两全”过程中，通过“以数据为基础的全过程追溯”，不仅实现及时发现技术异常问题，而且为后续发生的异常问题提供准确追溯，从而为改进和完善公司质量经营管理提供强有力的支撑。

评审专家意见

“三关两全”PDCA 过程图

管理模式的推广价值

☆独特性

——集成应用美国经济学家迈克尔.波特的价值链理论和日本质量大师饭冢悦功全面质量经营理论，并结合本行业本企业自身特点和经验“量身定制”提炼的管理模式，具有权威的理论基础和丰富实践经验；

——该管理模式将“关注研发创新”融入其中，始终将创新贯穿管理模式的全过程,具有不断创新发展的理念；

——创新将管理模式用直观示意图描述出来，有直观明了、方便操作、指导性强等优点，并且“三关两全”质量管

理模式内容形成了 PDCA 闭环，具有不断自我修复和提升的功能。

☆先进性

——通过关注研发创新，建立了完善的企业创新体系，创造了浓郁的全员创新氛围，形成了超高层建筑幕墙铝材及门窗系统解决方案、新材料及大型、复杂断面铝材应用技术和绿色、节能生产技术研究与应用为重点的创新型企业；

——通过运用“三关两全”质量经营管理模式，在行业内率先提出了“提升顾客价值的门窗系统解决方案”，由输出好铝材向输出设计+标准+服务+解决方案的“门窗系统化运作”来为顾客和建筑增值，推动系统门窗产品的舒适化、绿色化发展，提升产业链的转型升级能力，引领现代制造服务业的转型创新发展；

——在“三关两全”质量管理模式的引导下，企业以“坚持追求完美”为核心价值观，构建了“创新、和谐、共赢”的企业文化，致力于为中国和世界高端建筑及重要装备提供高质量和人性化的专业铝材产品及服务。企业富有高度的民族工业使命感和责任感，强烈的质量优先和创新意识。通过推动“三心”（认同心、齐心、开心）文化工程，带动公司全员营造浓厚的质量文化氛围，精细化管理体系不断完善，达到企业经营全天候远程监控。持续促进创新改善，使产品质量、品牌价值处于国际行业先进水平。

☆推广性

——管理模式的提炼源于铝加工企业的实践，符合同行业和加工制造业的基础特性和管理发展规律，已在坚美公司全面应用，效果显著，可推广至铝加工行业和上下游产业链；

——管理模式的设计“简单明了，原理清晰”，指导性和操作性强，套用（应用）方便、实用，具有较强复制性和适应性；

——结合自身行业特点不断总结和完善的管理模式，适应了新时期、新常态的一系列经济发展新观念和理论，在区域和行业推广应用，带动产业升级、推动行业进步中起到积极作用。是实现“绿色制造、绿色产品”，成为传统制造业中小企业走质量效益型道路，转型升级的示范，具有很强的推广价值和示范意义。

【名词解释】企业最高荣誉——中国质量奖

近年来，通过提高设立国家质量奖来提升企业的管理水平已成为许多国家强化和提高产业竞争力的重要途径。目前，有 80 多个国家和地区设立了质量奖。其中，最具影响力和代表性的世界质量奖是美国波多里奇国家质量奖、日本戴明奖和欧洲质量奖。

为推进质量发展，建设质量强国，中央批准设立中国质量奖，项目周期为两年，下设质量奖和提名奖，质量奖名额

每次不超过10个组织和个人，提名奖名额每次不超过90个。

中国质量奖是政府奖励，是国家在质量领域的最高荣誉。按照中央部署，国家质检总局积极组织中国质量奖评选表彰工作。中国质量奖的评选表彰工作由国家质检总局负责组织实施。项目周期为两年，下设质量奖和提名奖。质量奖名额每次不超过10个组织和个人，提名奖每次不超过90个。中国质量奖的评选表彰工作将面向基层和工作一线。

1.11.7 山东裕航：做超大高端铝型材领跑者

——访山东裕航特种合金装备有限公司副总经理王呈刚

中国有色网　2015 年 7 月 28 日　来源:中国有色金属报

责编·作者：王慧

在“铝谷”山东邹平，除了魏桥创业外，还有数家铝企业在这里聚集，山东裕航特种合金装备有限公司就是其中的一员，与魏桥创业相同的是，裕航合金的母公司山东三星集团也是油棉起家，不同的是，山东裕航是从事铝材及深加工生产，想在铝工业深加工领域做出自己的拳头产品。

铝业新秀初露锋芒

成立于2011年的山东裕航特种合金装备有限公司，是山东三星集团有限公司的一家下属全资公司。所以要想了解裕航合金，就不得不知道三星集团的实力。山东三星集团始建于上世纪80年代初，拥有100多亿元总资产，旗下有山东三星玉米产业科技有限公司、山东裕航特种合金装备有限公司、山东三星机械制造有限公司等20多家子公司。其玉米油产业名列全国第一，“长寿花”食品也已在香港证券交易所上市，裕航合金在集团产业中排名第二。身为山东三星集团的少帅、山东裕航特种合金装备有限公司副总经理王呈刚接受记者采访时表示：“集团非常看好铝应用市场和铝深加工产业的未来，所以特别重视裕航合金公司的发展。”

“目前裕航公司总占地面积 268800 平方米，项目设计年生产加工铝合金工业型材10万吨，项目工程分两期建设，其中第一期工程年生产加工铝合金工业型材 5 万吨(包括年产 10 万吨的熔铸车间和 5 条挤压生产线)，其中熔铸生产线于 2012 年年底投产，挤压生产线于 2013 年 6 月生产，二期工程也已于今年3月动工，按计划7月底就能投产。”刚过而立之年的王呈刚对记者介绍起裕航公司的每一个发展节点时信心十足。他说，裕航公司成立时间虽短，但发展很快，裕航的目标就是要在铝行业深加工领域做出地位，像玉米油行业的“长寿花”一样，名列前茅。

的确，成立不足四年的山东裕航魄力十足，在 2015 年中国国际铝工业展览会上，山东裕航以大约 60 多平方米的特装展位高调亮相，展位上摆放着公司车体型材、导电轨、汇流排等轨道交通用工业材，机器人摇臂、轨道大梁、医疗器械型材、木工机械、大型散热器、气车缸体、大型电机外壳、轻量化运输车体材料、船舶型材以及现代化轿车零配件等各类铝合金工业型材产品，领先的工艺、精纯的品质引来了业内人士驻足交谈。尤其是展台上“超大高端铝型材领导者”字眼更让人刮目相看。

年富力强，敢想敢为。对于王呈刚和裕航合金来说，正是如此。刚刚从美国学成归来的集团少帅将如何打造裕航合金？或许思路早已清晰，且立足长远。言必行，王呈刚在展位忙碌之余，抽出时间到其他展位了解情况，第一是为公司马上要上的精深加工生产线物色一些优质的设备供应商；第二，了解一下兄弟企业的产品给自己一些启发。王呈刚说，在展会上有一家企业生产气体铝罐，现在这种产品在中国还不多见，但在美国几乎家家户户必备，该产品可以用于自制碳酸饮料，还可以制富氧水`，将来市场一定会很大，当然自己公司也不会去做这些产品，但是类似这样的新点子，对于扩大铝应用市场会有很大促进。作为铝行业的一员，想得显然不仅是企业的事儿，行业发展更是牵挂于心。王呈刚说，

目前我国铝产能过剩，供大于求这是公认的事实，但是潜在铝应用市场更大，需要我们铝行业同仁不断开发和推进，主动寻求市场空间。

王呈刚说，目前公司做得常规产品只是一个跳板，裕航的最终方向是要成为汽车轻量化铝材和航空航天以及军工用铝产品的供应商。

用质量和服务为企业保驾护航

山东裕航特种合金装备有限公司自成立以来，将品质视为裕航合金产品优势的精髓，以品质求发展，以发展壮实力，始终坚持高品质、尖端化的要求，其主导产品包括轨道车厢体型材、大型散热器、集装箱、重型载货车车厢、电力设备型材、建筑模板、气缸壳体以及交通运输和其他领域应用的大型复杂断面挤压型材和国内行业领先的产品类群，同时可以满足管材、棒材、槽型材等各类国家工业基材，生产装机水平跻身国内领先行列。

凭借质量在行业中立足，不是止于说说而已，在实际的市场竞争中优势已经显现。王呈刚说，目前裕航公司的导电轨产品已是全国市场第二大供应商，汇流排是全国市场第一

大供应商，因导电轨产品对材制要求特殊，要求材料韧性强，高导电率，低电阻，且必须将这三个特性平衡到一个最佳性能点上，所以对铸棒的均质程度、成分的调配、挤压温度的控制、淬火温度的控制等等各个环节的工艺要求都相当的严格，可以说要达到产品要求均能体现一个企业的技术实力，这些要求裕航不仅做到了，甚至还优于客户规定的要求，所以裕航产品才能与行业中大型企业同场竞技，且技高一筹，最终胜出。

为保证产品质量和生产技术的不断创新，裕航公司在研发投资方面也从不手软，公司组建成立了由 71 人组成的研发技术中心，其中，教授级技术顾问 1 人，硕士高工 5 人，副高 15 人，工程师 46 人，注册质量师 4 人，本科以上学历占 90%，拥有国际先进水平装备(仪器)的模具设计中心和国家级工程技术研究中心及产品质量检测中心，可实现自行设计、开发新产品。公司还布局了产学研路线，目前公司已与山东大学等院校展开产学研合作，致力于对一些特殊材料进行研究和突破。

王呈刚说，公司非常重视研发工作，每年会投资公司收入的 5%左右作为研发资金，针对新产品新技术进行攻关突破。

为保障产品质量，山东裕航还建立了完善的质量监察体

系，凭借先进的检验设备和检测技术，从铸锭检验，挤压首检、中断检、合金成品检验、产品整形检验到最后的包装检验，步步监察、层层把关。山东裕航特种合金装备有限公司把关各项技术指标，严格开展全产业链质量检验追溯，形成产品质量体系化、标准化检验流程。在日常生产的同时，山东裕航定期开展职业培训，提高员工技术、设备操作能力，增强质量监管意识和服务意识，提高员工综合素质，打造高素质生产、营销、服务团队。

山东裕航特种合金装备有限公司在生产铝合金方面独具匠心，生产的产品具有独特的优越性。山东裕航在可热处理强化型铝合金中，未发现应力腐蚀开裂现象，具有中等强度、优异的成形性和耐腐蚀性及较低的密度等优点。经测试，山东裕航特种合金装备有限公司生产的铝合金可经大型挤压机挤压出断面形状复杂的大型宽扁薄壁空心型材，能在挤压机上实现在线风冷或水雾冷淬火，不但力学性能较高，而且它的空气渗透性、雨水渗透性、风压变形性能及平面内变形性能都达到了国家标准规定的一级水平，不但满足了各种交通用铝的需求型材，还能保证顶级的质量安全。

如今，山东裕航特种合金装备有限公司的大型中空挤压型材的创新开发与生产均得到了社会各界的广泛关注。随着导电轨、汇流排、集装箱、保险杠、超高硬度合金铸棒等高

端铝型材的研发、上市、推广，山东裕航的生产链不断完善，企业实力和品牌知名度不断提升。

另外，裕航合金公司不仅视产品质量为企业生命，对用户的服务也要做到周到贴切。王呈刚说，比如客户需要技术交流，我们的技术人员会 24 小时之内到达客户现场，牢记企业责任，对客户负责到底。

作为业内新秀，山东裕航特种合金装备有限公司坚持用至专、至诚和追求高品质的理念，用品质诠释着品牌的力量。

凭借着企业实力的增强，业务不断扩展，王呈刚说：“公司刚刚成为某大型集装箱公司的第三大供应商，成功进入了集装箱市场。 ”

做超大高端铝材的领跑者

作为轻量化运输发展不可缺少的制造型材，超大高端铝材走上历史的舞台。山东裕航特种合金装备有限公司成立之初便专注于高端铝材深加工之路，依托与国际接轨的技术研发中心，国际前沿的先进设备，行业技术高端人才，各类轨道客车轻量化车体型材、轻量化专用车型材、集装箱等工业型材、医疗器械专用型材等相继研发成功，产品知名度和美

誉度有效增长，企业实力得到稳步提升。

然而，醉翁之意不在酒，山东裕航跨入铝行业的心思同样也不止于导电轨、汇流排、集装箱等这些常规产品上。

而眼下，铝加工产品价格竞争激烈，多数企业进入一个薄利竞争的运行现状，相比较而言山东裕航公司的情况要好很多，这其中的原因是由于公司直接采用魏桥的“铝水”，这其间省去一部分工序，也就是利润来自于节省下来的成本费用，但这并不是产品的增值，所以裕航公司领导班子正在计划打通铝加工产业链，进入铝精深加工领域，提高产品附加值，进攻高端用铝市场。

王呈刚坦言说：“目前为止市场不是问题，但是如何在饱有量市场方面提升产品的利润是我们正在思考的当务之急。轨道用铝和汽车轻量化用铝市场广阔，并且产品利润率也很高，随着裕航公司实力增强，交通用铝市场就是裕航主要的消费市场。”

“目前，随着新能源汽车的推广，汽车轻量势在必行。所以汽车用铝行业也是裕航未来发展的重点行业之一。”王呈刚透露说。

另一方面，航空用铝也是裕航的目标市场之一，王呈刚

说，原来公司定位时存在一些误区，以为航空用铝消费量很小，后来经过调研发现，航空用铝强行报废量很大，所以消费市场也很大，另外更重要的一个原因是，航空及军工用铝行业不仅产品利润可观，更关键的是标志着一个企业的实力和产品的品质，所以裕航合金的下一个目标就是做航空及军工用铝高端铝材产品。

“目前，公司已经顺利通过了国际铁路标准认证、国军标认证、船级社认证、航空航天认证等多项体系认证，且一些相关产品已经在试制。”王呈刚说。

作为高端铝合金型材行业的新兴企业，山东裕航特种合金装备有限公司精确分析市场需求，凭借其敏锐的洞察力及国际顶尖的科研实力，充分利用产学研结合优势和高新技术及信息化改造、提升传统产业，提高产品附加值和科技含量。经过不断地测试研发，并通过国家实验室认证，研发出了多种高品质的铝合金工业型材。目前，山东裕航申请国家专利已达 35 项，获授权有效专利 16 项。由于山东裕航产品具有高强度、重量轻、较好的耐腐蚀及耐磨性、良好的弹性、牢固性、安装简便等诸多优势的特点而广受好评，并赢得了市场的认可。

公司主要设备有世界先进的自动熔铸炉 4 组、挤压机生

产线 5 条(36MN、55MN、75MN、90MN、125MN)、以及与之配套的辅助设备等。

但是，作为一家新型的工业铝型材供应商，欲想进入军工航空用铝领域并不是一蹴而就的，所以山东裕航合金一方面在做一些常规产品，另一方面在加强实力向高端目标市场推进。

“万丈高楼平地起，想要做好高端产品必须基于在传统产品方面多下功夫，打好基础，要找到自己善长，别人还不好超越不好模仿的技术产品。”王呈刚说。

山东裕航不仅要做出品质，还要做出品牌。王呈刚回忆起当年父辈们把三星集团“长寿花”打造成为中国玉米油第一品牌的经历，他说，如果 10 年前三星集团不在玉米油行业做出“长寿花”品牌，随着市场的竞争，现在也许早就被淘汰了，所以，未来裕航公司也会在中国铝精深加工行业有一席之地，不仅做出高端优质的产品，更要做出裕航合金品牌。

做超大高端铝材的领跑者，是裕航公司的梦想和目标，裕航人会朝着这个目标努力和奋进，当然，现在对于王呈刚和裕航公司来说还仅仅是个开始！

记者印象

从金融到铝工业，从油棉到铝型材，风牛马不相及，但是对于一个刚刚涉足铝行业一年有余的年轻人来说，不论是在聊行业发展，谈企业未来，说生产技术，道客户要求，处处显得是个行家里手。在与刚过而立之年的王呈刚访谈后，让记者不禁感叹，这可能就是“裕航速度”背后的力量。

在与记者随谈中，王呈刚聊到了自己的感受，他说，刚从美国留学回来，本在上海的一家大型金融企业上班，每天早九晚五很是轻松，而现在，每天大脑里需要装着 700 多个家庭，让他备感责任重大。每天生产安全、企业运营状况、700 个职工的收入生活问题等等，都是一个企业的大事情，这些没有一个不是他的心事。在金钱概念充斥的时代里，作为一个年轻的企业负责人，心里装得最大的却是职工的安全和生活，不得不让同仁高看一眼。

作为行业的新人，说起同行企业来，总是谦虚地尊称为前辈。初入铝行业让王呈刚感觉铝行业大家庭很友好，让他感受最深的是，裕航团队想到丛林、南山、忠旺、麦达斯等一些大企业学习交流，不仅得到了对方公司高层领导的应允，而且非常热情。王呈刚说这跟他之前想象的不一样，他说：“常说同行是冤家，而铝行业不是这样的，大家虽是同行，

但都非常友好，所以，中国铝工业作为一个团队一定能把铝工业做强。”

有这样一位有朝气有理想，谦虚好学，更重要是心中有行业，心中有员工的企业高层管理者，企业何愁未来！裕航梦想，何愁不高飞！

1.11.8 访索通发展股份有限公司董事长郎光辉

这些天,索通发展股份有限公司董事长郎光辉获得第 145 届美国矿物、金属和材料协会（美国 TMS 协会）2016 年度最佳绿色实践奖的消息给了中国碳素行业一个大大的惊喜，他成了该奖项 1986 年设立以来的第 29 位获奖者，也是首位中国籍获奖者。

阳春三月，记者走进郎光辉位于北京的公司总部，分享他多年来致力于预培阳极的绿色生产与节能技术研发的成功经验。也正是因这份执着与专注，让有着 145 年悠久传承的世界级科学殿堂，留下了中国人的精彩时刻。

美国 TMS 协会最佳绿色实践奖迎来首位中国籍获奖者

美国 TMS 学会是全美矿物、金属和材料的顶级专业学会，是为数不多囊括了材料、工程、矿产加工、原铝生产、材料基础研究与高级应用的专业组织。该组织每年都会评选出在材料科学及工程领域有突出贡献的最佳个人或团体并给予奖励。最佳绿色实践奖旨在表彰在绿色、节能和技术生产领域的原创性科学研究，并将科研成果成功转化为商业实践，推动整个行业技术革新的领军者。获得这个顶级专业学会认可的必备条件之一是要有业内德高望重专家的举荐。郎光辉这次获奖，得到了三位行业资深专家为其撰写推荐信的殊荣，这种“待遇”在有着百年历史的 TMS 学会也不多见。

郎光辉就是用行动证明这一切的践行者。在他的颁奖词中有这样的表述：该奖项旨在表彰在以石油焦进行预焙阳极生产领域的环境治理，以及余热发电方面的原创性工作。

让我们看看郎光辉为此所做的努力吧。1998 年，索通发展创立，18 年的创业历程，就是一部探索和发现的奋斗史，他们坚持“绿色预焙阳极、节能预焙阳极和技术预焙阳极”

的理念，走“清洁生产，绿色碳素”之路。

预焙阳极属于证监会行业分类C6150的石墨及碳制品行业。从2010年开始，郎光辉牵头以索通发展作为科研项目的实践载体，从减少排放到对“三废”的综合利用，全程监测我国行业内预培阳极材料的生产过程。通过生产全流程完善的收尘系统和烟气净化系统，对石油焦煅烧过程中的高温、中温烟气进行回收综合利用，满足我国该领域工厂80%的用电需求,并大大提高了我国预培阳极材料的质量，降低了工艺综合能耗。

索通发展创新研发的余热发电项目，将煅烧炉排放的烟气余热转变成电能，2011年9月并网发电以来，设备运转正常。目前发电功率稳定在4000kWh，年可发电4.5MW，满足了全厂80%的动力用电。每天可发电9万kWh，每天可节省电费4万多元，直接产生经济效益2000多万元。同时，每年还可减排二氧化碳2万吨，节约标煤1万吨。

在预培阳极行业中探索的资源综合利用技术的理念与发展模式，对传统产业结构升级、技术创新及循环经济的商业化运营，意义重大。索通发展的不懈探索，得到了全球专业学界的高度认可。

“十三五”新材料产业规划推出在即实现索通内部的“万众创新”

2016 年，我国新材料产业“十三五”规划编制接近“尾声”，最快将在今年推出，石墨及碳素新材料，凭借其优异性能可广泛应用于新能源汽车、航空航天等多个领域，成为重点发展对象。

同时，今年以来高性能的结构钢、特种钢、铝合金等结构材料，碳纤维、光能纤维等高性能纤维材料，高压特种功能材料石墨烯等新材料均实现了快速增长，这些材料目前总量还比较小，但是新材料发展加快了原材料工业关键材料转型升级的步伐。

对此，郎光辉表示，一直以来，索通都会将每年收入的百分之三用于研发投入，并且逐年增加。索通发展研发中心是中国唯一的省级石油焦资源利用工程技术研究中心，拥有先进的碳材料实验室和检测分析中心，引进了世界最先进的碳材料试验设备，可以完成碳材料生产过程的实验室模拟，具有世界先进水平的碳材料元素分析和性能检测仪器和设备，为科研提供了强大的硬件保障和智力支持。索通先后主持和参与制定了国家及行业标准共计 21 项，拥有专利 23 项，研发能力处于国内领先水平。竭力研发支撑我国金属冶炼行业用碳材料技术，促进传统产业技术更新，研究石油焦在新型碳材料领域的运用，使不可再生的石油焦资源得到高效利用。

与此同时，配套完善的科研设施、专业合理的知识结构和富有创新精神、朝气蓬勃的研发团队组成了索通发展高效

的研发平台，铸就了具有世界先进水平的石油焦煅烧处理综合技术，高性能预焙阳极生产技术，推动了行业技术发展，也为企业的发展注入了源源不断的活力，使“索通”的品牌不断增辉。

此外，在索通的发展历程中，企业文化建设和一线职工的“万众创新”从未懈怠。郎光辉认为，索通之所以能够取得如今的成绩，得益于企业共同认可的企业文化与理念以及一线员工的实践创新与合理建议

员工对于企业文化的认可使得索通的绿色发展道路走得更加顺畅，其中，社会责任是索通企业文化的灵魂。据郎光辉介绍，几年前当他决定不顾较高的“守法成本”，坚持走绿色、环保道路之时，内部也有一些不理解的声音，然而正是由于对行业未来发展模式的分析以及强烈的社会责任感，使得他们弥合分歧，上下拧成一股绳，共同推进企业朝着科学发展的道路前行。

企业的绿色发展离不开普通职工。“一线员工是我们创新的主力军。”郎光辉说道。每年，来自一线职工的小改小革和合理化建议为索通带来至少上千万元的利润。“多规格阳极生产工艺技术”、“低渗透率预焙阳极技术”、“石油焦粉焦制备预焙阳极”等工艺改进属国内一流；“高电流密度预焙阳极开发”、“新型测温系统在煅烧炉测温中的应用”等原始创新项目达国际一流水平；“预焙阳极全寿命质量控

制技术体系的研发及应用”、“500KA 超大型电解槽预焙阳极技术开发及产业化”更是达到了国际领先水平。

这些改革和发明使得索通的环境更好、效率更高、排放更少。为此，该公司每年拿出节约成本的 5%奖励发明人，以激发职工更大的创新热情。

索通在行业内首先采用先进的余热发电技术，充分利用石油焦煅烧过程产生的余热，发电量不仅可以完全满足企业的生产用电需求，还可满足工厂取暖和职工沐浴用水的生活需求，经过处理的中水全部用于厂区和道路的绿化，这项新技术更是被誉为行业“典范”。

为预焙阳极行业正名革新碳素行业

荣誉面前，郎光辉表示，获奖的最大意义在于对索通“清洁生产、绿色碳素”理念的认可，多年来，索通一直致力于绿色技术的研究，最大化进行资源综合利用，强调节能、降低成本和减少污染，而这种理念能够帮助扭转人们对于碳素行业的刻板印象，摘掉其高能耗的帽子。

预焙阳极，即俗称的铝用碳素，用于预焙铝电解槽作阳极材料。随着电解铝行业的蓬勃发展，预焙阳极行业也迎来迅猛增长期，但长期以来，人们对于预焙阳极的印象是“又黑又脏”、“粉尘弥漫”，是实打实的高能耗行业，然而，据郎光辉介绍，这其实是一个误区，预焙阳极并非高能耗行

业。

预焙阳极的主要原材料是石油化工的副产品石油焦和煤化工的副产品煤沥青，郎光辉说：“原来的石油焦都是没人要的，正是因为铝工业的发展带来了预焙阳极的发展，现在石油焦 60%用于铝用碳素。”

在郎光辉看来，预焙阳极行业是实现资源综合利用的典型行业，它实现了石油焦的变废为宝，是循环经济产业链的一个重要组成部分。

以索通为例，通过多年的技术进步，该公司目前的预焙阳极生产电耗大约在 140 千瓦时/吨，而利用余热发电，可以产生 110 多千瓦时/吨，一加一减，电量还有需要 30 千瓦时/吨。据郎光辉介绍，预焙阳极不同于石墨电极，石墨电极要石墨化，需要大量耗电，而预焙阳极不用石墨化，因此也不需要大量耗电，所以并不是高能耗的产业。

在环保方面，郎光辉表示，预焙阳极的硫和氮的排放量非常低，比起钢厂、水泥厂、电厂小多了，我们山东的工厂这两项指标现在都达到 50ppm 以下，和欧美的一样，很先进。

既然是典型的资源综合利用行业，为什么预焙阳极会被认为是高能耗呢？

这就要从 2010 年 11 月发布、2012 年 3 月 1 日起实施的《铝电解用预焙阳极单位产品能源消耗限额》国家标准说起

了。在这份国家标准里，现有铝电解用预焙阳极企业单位产品工序综合能耗限额限定值规定，煅烧工序综合能耗应≤1230kgce/t，成型焙烧工序综合能耗≤180kgce/t，组装工序综合能耗≤13kgce/t。

“为什么过去人们认为预焙阳极是高能耗呢？”郎光辉说，“就是因为这个数据。”

在相当长的一段时间内，碳素行业生产按 1978 年制定或修订的若干产品标准和分析检测方法标准执行。随着管理结构的调整和铝用碳素行业的发展，旧标准已不能准确反映行业生产实际情况，难以适应生产发展的需要。因此，为了扭转由于不准确的数据造成的错误认知，在索通及其他单位的推动下，这份国家标准于 2014 年 12 月进行了修订，将这些“一看就是高能耗”的标准进行改正。

在新的国家标准中，现有铝电解用预焙阳极企业单位产品工序综合能耗限额限定值，煅烧工序单位产品综合能耗≤350kgce/t，成型工序单位产品综合能耗≤30kgce/t，焙烧工序单位产品综合能耗≤130kgce/t，组装工序单位产品综合能耗≤11kgce/t。

能耗标准的倍降，整体降低了全行业的能耗指标，推动了行业的节能发展，也从此让铝用碳素行业摘掉了高耗能的帽子。

看似简单的数据变化背后，是索通发展长期致力于绿色

实践的最好证明，这个行业蜕变的过程，也让索通发展尽显成本优势，技术领先成就其核心竞争力，让其在激烈的行业竞争中异军突起，成为行业翘楚。

资源的循环利用代表了人类产业文明发展的方向，也是索通研发的主要目标。坚持“绿色预焙阳极、节能预焙阳极和技术预焙阳极”的理念，走“清洁生产，绿色碳素”之路，在生产过程中，索通不断探索循环经济发展模式，开发铝用碳素资源综合利用新技术，推动行业绿色、环保、可持续发展。

“我们多年来一直致力于绿色技术的研究应用，最大化进行资源综合利用，强调节能、降低成本和减少污染。TMS 的最佳绿色实践奖是对我们工作的有力肯定,我们希望在 TMS 的支持下，能将我们的技术推广到整个行业。”郎光辉在颁奖礼上的获奖感言久久回荡……

1.11.9 记吉林利源精制公司的精深加工之路

利源精制股份有限公司位于吉林省辽源市，该公司不但是中国主要的铝加工企业之一，也是很有特色的世界级的主要铝加工企业，它的前身是利源铝业有限公司，成立于 2000 年，而利源精制公司于 2010 年在深圳交易所上市，为融资扩建创造了有利的条件，2011 年融资 18.9 亿元（240M 欧元），

用这笔资金从德国西马克梅尔公司引进了 5 台顶尖的挤压机与建成一个高铁车辆、其他轨道车辆制造项目，以及铝型材深加工项目。

公司占地 400000m2，2014 年有员工 1200 人，挤压机 24 台，其中从国外引进的有 5 台。挤压材主要为轨道车辆，深加工产品主要为终端成品，例如电子产品零件与外壳（苹果笔记本电脑外壳）等，以及门窗等等。为了加工这些高复杂的零件引进了约 300 台套装备，轨道车辆制造组装车间引进 30 多台套大型 5 轴 CNC 龙门加工中心、数控焊机与高度自动化的摩擦搅拌焊生产线，这就是利源铝业有限公司为什么改名为利源精制有限公司的原因。

5 台顶尖级铝材挤压机

吉林利源精制股份有限公司 2010 年以来向德国西马克集团梅尔公司订购了 5 台顶尖级铝材挤压机，有的已投产，有的正在安装与调试。160MN 前装料挤压机 1 台，于 2014 年 11 月开始安装，可于 2015 年中期投产；100MN 的正向前装料挤压机 1 台，已于 2014 年 3 月顺利投产，运转正常；1 台 36MN 正/反挤压机，2015 年秋投产，2014 年交货；1 台 45MN 正/反管材挤压机，2014 年 2 月投产；1 台 60MN 管材挤压机 2014 年 6 月投产。此外，利源精制股份有限公司还有 19 台中小型的国产挤压机，主要生产建筑型材与较小的工业型材，国产

挤压机的结构如下：4MN 的 1 台，5.4MN 的 1 台，7.2MN 的 6 台，9MN 的 2 台，16MN 的 3 台，22.5MN 的 2 台，32.5MN 的 1 台，50MN 的 1 台。全公司挤压材的总生产能力 105kt/a。

所有引进的 5 台高技术挤压机铸坯加热都采用德国 IAS 公司的感应炉，这种炉的操作极为灵活，可加热长锭，也可以加热短锭，锭坯通过量可在很大范围内变动，不但可以加热易挤压的软合金，而且可以加热种种难挤压的硬合金。感应加热炉的加热速度比常规加热炉的快得多，温度也更均匀，偏差也更小，铸坯内外温度差可降低至最小程度。可方便准确地进行正梯度（铸坯前端温度高后端温度低），而在反挤压管材时则可进行负梯度加热。

100MN 及 160MN 挤压机

利源精制公司的 100MN 挤压机和 160MN 挤压机是从梅尔公司引进的，160MN 挤压机是德国从未制造过的最大液压铝材挤压机，在生产轨道车辆车体大型材方面成为必备的装备，而且显得越来越重要，作用越来越大。通常，对一个轨道车辆铝挤压材厂来说，有 20MN、35MN、50MN、80MN、100MN 的挤压机各 1 台结构就是合理的，如果还有 1 台 150MN 的那就更好。利源公司的挤压机结构是合理的，若再有 1 台 75MN 的就更合理，因为约有 18%的车辆大型材可用 75MN 的挤压机生产，用不着再用 100MN 的，有利于降低产品成本。

利源精制有限公司建了两个各 200m 长的车间，一个安置 160MN 挤压机，另一个安置 100MN 的挤压机（图 1），车间内装有空调系统，可以满足高速轨道车辆大挤压型材生产的各种条件，型材的最大长度 28m，型材的各项性能与尺寸偏差指标全面满足欧洲的 ICE、TGV 型车辆，日本的新干线（Shinkansen）车辆，中国 CHR 和谐号车辆车体大型材的要求。公司车辆生产的高速机车参加了上海 2014 年铝展览会，受到各界人士的称赞（图 2）。这是中国铝加工企业也是全世界铝加工企业生产的首台铝合金高速铁路机车。利源精制有限公司制造的铝合金高速机车及车辆用的铝型材长达 28m（图 3）。

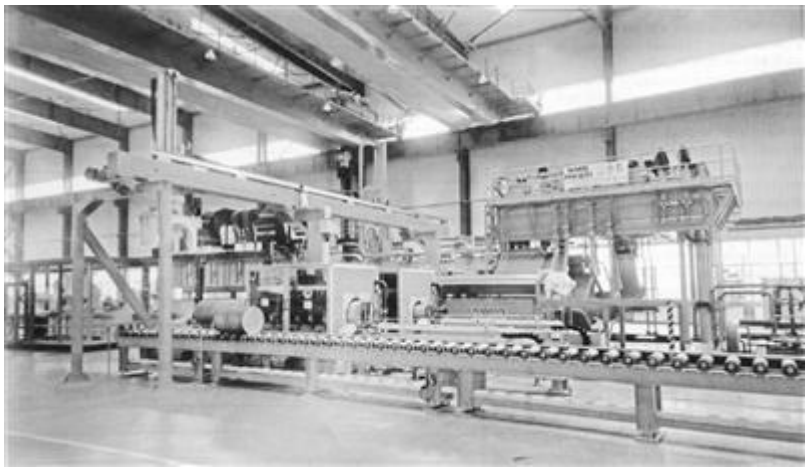


图 1　2014 年 3 月投产的利源精制有限公司从德国引进的 100MN 的前装料正向铝挤压机。

图 2　2014 年 7 月上海铝展览会上亮相的利源精制有限公司制造的 CHR 铝合金机车。

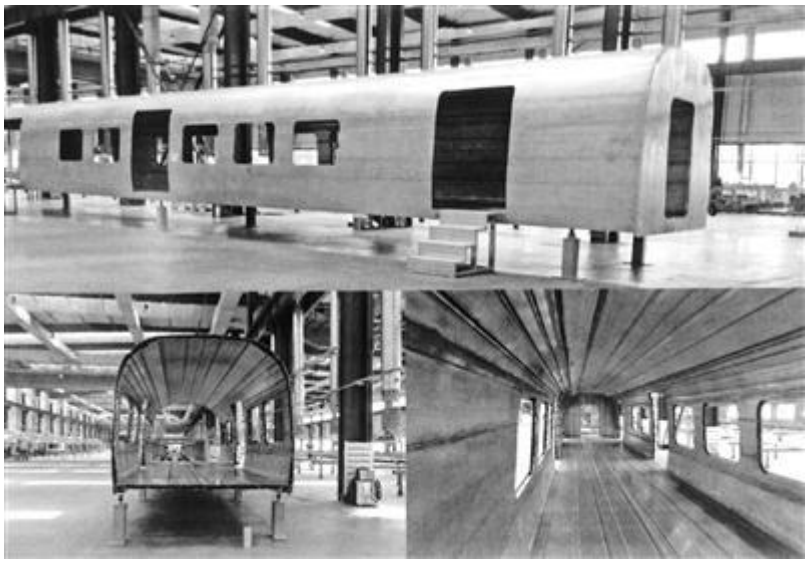


图 3　利源精制有限公司的高铁装备制造车间。

100MN 挤压于 2014 年 9 月投产，也用于生产轨道车辆大型材。现代化轨道车辆车体用的挤压型材约 40 种，目前，利源公司轨道车辆的型材生产能力足够制造 500 辆/年~600 辆/年的高铁车辆。

中国 2014 年高速铁路通车里程已达 13000km，2020 年的可超过 20000km/a，完全掌握了铁路建设与高速铁路机车及车辆制造技术，与德国西门子公司（Siemens）、法国阿尔斯通公司（Alston）、日本川崎重工业公司（Kawasaki）成为世界高铁技术与装备制造四雄，同时中国的铁路修建技术与各项装备制造成本独具特色与竞争力，随着利源精制公司独具特色的 160MN、100MN 大挤压机与机车、车辆制造项目的投产，更加增添了中国竞争力的筹码，中国高铁跑遍世界的时日到了。

全球屈指可数的大管材挤压机

利源精制股份有限公司引进的 60MN 的正向管材挤压机是世界最大者之一,同时其装机水平登临全球绝顶,已于 2014 年 6 月投产，可挤压最大外径为 450mm 的管材，生产能力 10kt/a，还有 1 台 45MN 的正/反向管材挤压机，是全世界仅有三四台这类大挤压机之一。该公司是中国生产这类又精又大的特种管材的唯一企业，特别是将石油钻探管作为主导产品之一，使其成为全世界屈指可数的 4 个企业之一，同时其装机水平比美国拉斐特（Lafayette）加工厂、俄罗斯的萨马拉（Samara）冶金公司（现属美国铝业公司）与卡缅斯克（Kamensk）铝加工厂的高得多，Made in China 的优质一流铝管材将源源不断地流向世界市场。

在延伸铝加工材产业链方面，山东丛林集团、吉林麦达斯铝业公司、辽宁忠旺集团、湖南晟通集团、广西南南铝加工有限责任公司已迈出了长足的一步，并取得了相当好的业绩。利源精制有限责任公司的轨道车辆制造及铝型材深加工项目的建设总投资为42.3亿元，是与日本三井物产金属公司的合资企业，名为天津利源轨道车辆制造有限公司，位于滨海高新区未来科技城的天津利源厂区，利源精制公司负责所需土地、装备方面的投资，而三井物产金属公司提供日本轨道车辆制造技术人员，以及轨道车辆制造的完整技术、设计、自动化系统等资料与技术信息，同时负责整车在国内外市场上的销售与推广宣传。

这个项目建成后，可形成的生产能力：动车组400辆/a，铝合金城轨地铁400辆/a，不锈钢城轨地铁200辆/a，同时新增铝型材深加工产品50kt/a，如材料利用率按85%匡算，可消化铝挤压材近60kt/a。

天津利源轨道车辆制造有限公司可于2016年建成投产，将延伸利源精制有限公司的产业链，进一步提升材料深加工水平，增强盈利能力，更有利于提高公司的自主创新能力，进一步提升公司的综合力与国内、国际市场的竞争力。

铝材的精密深加工实质上就是铝材生产企业向用户提供的不是半成品铝材，而是成品或可供安装与组装的成品，对铝材进行精密深加工，如将建筑铝型材加工成门窗、板材制

幕墙挂板、压铸与锻造车轮加工成可上装配线的轮子等等。对铝材进行精密深加工是一种创新，是实现产品、技术迈向中高端的重要一步。对铝材进行精深好处多多，可提高产品的附加值与企业的经济效益，可加速废料的循环利用，可提高企业的管理水平与增强市场竞争力等。

1.11.10 晟通铝箔公司：世界双零箔黑马

湖南晟通科技集团已经形成良好的铝产业链，是集水电-铝电解-铝材加工与深加工产品于一体的企业，不但是湖南省最大的铝企业，而且也是世界最大的铝企业之一，同时它还是世界最大的双零箔生产商。

2013 年，晟通集团蝉联湖南有色行业 50 强企业第二位，这次排序是按企业主营业务收入确定的。盛通集团在 2013 年克服了市场持续低迷，成本增加等不利因素的影响，坚持以市场为导向，持续开展科研创新和产品终端化战略，不断调整产品结构和优化其组成，加快产业转型升级，继续保持了平稳健康发展的良好态势，取得了如此可喜的成就。

晟通将成为全球最大的双零铝箔企业

晟通集团铝箔板块三期项目将在 2015 年一季度全部建成投产，投产后，晟通集团双零铝箔生产能力可达 200kt/a，

该公司从而将成为全球此类铝箔的最大的单一生产企业。直到2013年底，全世界最大的单一双零铝箔生产商是德国格雷文布洛伊轧制厂，它属海德鲁铝业公司（Hydro Aluminium），总生产能力320kt/a，其中，特薄板、带材（0.15~0.3mm）生产能力120kt/a，双零箔生产能力160kt/a，其他厚度箔材生产能力40kt/a，该公司从1963年开始生产铝箔起至2003年达到目前的这个规模，先后历时40年。

该厂共有5条铝箔轧制生产线，24台铝箔轧机：系列1（Series 1 line）有5台1850mm铝轧机，1台粗轧机，1台中轧机，3台精轧机，主导产品为0.00635mm的利乐包装箔，1971~1973年投产；组10（Group 10），有2台1676mm的4辊不可逆式阿申巴赫轧机，1台中轧机，1台精轧机，空调箔是其主导产品，最高产量为30kt/a；组7及组8（Group 7，Group 8）是该公司最老的生产线，组7有6台4辊不可逆式1600mm轧机，中轧机与粗轧机各1台，精轧机4台，都是美国布劳·诺克斯公司（Blaw Knox）设计制造的，1961年投产，带卷最大质量3吨，主导产品为0.008~0.015mm的深加工包装箔；组8的轧机与组7的完全相同，但以生产0.06~＜0.2mm的铝箔为主。

系列2（Series 2 line）生产线又名“铝箔2000（Foil 2000）轧制线”是当今生产能力最大、速度最快、劳动生产率最高的生产线，有4台2200mm的4辊不可逆式阿申巴赫公

司铝箔轧机，1987 年建成投产，产品厚度 0.00636~0.009mm，工人 80 名，产量早已达到 40kt/a，最大宽度 2080mm，80%产品宽度为 1840mm，中轧机的最大轧制速度为 2500m/min，最高卷取速度为 3250m/min。

德国格雷文布洛伊轧制厂“铝箔 2001”项目是在 2001 年正式上马的，对该厂“组 8”的 4 台箔轧机进行了彻底的技术改造，并新建了 1 条 1650mm 双机架铝箔材连轧线，箔材宽度 1450mm，生产能力 16kt/a，箔材厚度 2×0.006~2×0.11mm，轧制速度 0~900/1500m/min。

晟通集团铝箔板块是分三期建设的，一期项目有 2 台 1850mm 的 4 辊不可逆式箔轧机，捷如重工有限公司设计制造，2002 年投产。二期项目有 4 台 4 辊不可逆式的涿神有色金属加工专用设备有限公司的 2000mm 铝箔轧机，2014 年 3 月陆续交货，10 月将全部交付完毕，2015 年 3 月可安装完毕投入生产，届时将形成双零箔生产能力 200kt/a。至今，全球双零箔企业的这匹黑马将在天下奋蹄昂首纵横驰骋。

盛通集团在生产双零箔方面创造了多个世界第一，该集团拥有最多的 2000mm 级轧机。2014 年，晟通集团拥有 4 辊不可逆式 2000mm 铝箔轧机 14 台，占中国总台数（35 台）的 40%，全球总台数（43 台）的 32.6%。

晟通集团还是最大的双零箔生产企业。全世界以生产双零铝箔为主的工厂约有 38 家，中国约有 14 家，晟通的生产

能力 200kt/a，比德国格雷文布洛伊轧制厂的（160kt/a）大 25%，比中国夏顺铝箔有限公司的生产能力大 150%。

盛通集团是一次性建成的最大的双零铝箔生产厂。盛通集团虽然在 2002 年投产了 2 台 1850mm 的铝箔轧机，但是 14 台 2000mm 的铝箔轧机是在 2012~2015 年投产的，200kt/a 的生产能力是在 2012~2015 的 13 年内形成的，格雷文布洛伊轧制厂的 160kt/a 的生产能力的形成却历时 40 年（1963 年~2003 年）。

盛通集团的铝箔全部用铸轧带坯生产。生产双零铝箔用的带坯有铸锭热轧的，也有铸轧的。就全世界而言，铸锭热轧的约占 65%，但在中国，铸轧的却占 70%左右，晟通集团全部使用铸轧带坯生产。尽管用铸轧带坯生产双零铝箔的成材率比用热轧带坯的成材率要稍低一些，但总体上用铸轧带坯生产双零铝箔的加工成本至少低 1000 元/吨，同时它们的品质相当。不过不管用哪种带坯生产的包装铝箔，在当前的技术条件下，其厚度不得薄于 0.006mm，否则其针孔可大到足以透过氧气及其他气体，这就起不到所要求的隔离作用。10 多年来的生产证明，盛通集团铸轧公司生产的铸轧带坯品质名列全国顶级产品行列，同时用铸轧带坯生产的铝箔具有环保与节能减排等优势。

盛通集团的所有设备全部为国产轧机，盛通集团的 14 台 4 辊不可逆式 2000mm 铝箔轧机全部是涿神有色金属加工专用

设备有限公司设计、制造、总成的。为了评估轧机的性能，盛通集团先订购了 4 台，已于 2012 年投产，经过 1 年多的生产实践，证明该轧机的各项性能达到了预期的效果，于是盛通集团决定全部采用涿神公司的设备，这对中国高端冶金装备业的设计、制造能力是强有力的肯定。但是，分切机、轧辊磨床及轧制工艺过程参数、自动监控设备全部是引进的。

双零铝箔促销“惨烈” 竞争阶段或到来

晟通集团 200kt/a 双零铝箔项目的建成投产，不管在中国铝箔工业发展史上，还是在世界铝箔发展进程中都是史无前例的，具有里程碑的意义。2013 年，中国双零铝箔生产能力约 610kt/a，此厂的生产能力将占全国总产能的 24.7%。几乎占 1/4，如果生产与市场都比较顺利的话，此产能可于 2016 年以前全部释放出来，2014 年释放的产能有 60kt，2015 年释放 100kt，2016 年释放 40kt。这么多的产能在短短 3 年内投放市场哪能平平稳稳无声无息地消化接纳呢？无疑会引起双零铝箔产业的振动，甚至会重新洗牌，会出现“惨烈”的市场促销竞争，竞争压力过大，市场秩序会失衡，也就乱了，产品的利润空间会被压缩的低之又低，有些企业可能喘不过气来。不过，我们是在搞社会主义市场经济，它是一种法治经济，是一种有着激烈竞争的经济，只有竞争才能进步，才能加速优胜劣汰进程，全行业才能得到更稳健的更快的发展。

晟通集团这匹双零铝箔黑马参与竞争是一件大好事，我们应为之鼓，为之呼。

“惨烈”的促销竞争，促使企业励精图治，提高竞争与生存能力。中国双零铝箔企业都是20世纪80年代中期以来建设的，装机水平大体相当，提高竞争力的主要措施是加强管理、调整产品结构、加强创新、加大科技投入。2013年，中国铝加工业的总科研投入占销售收入的0.5%，但有个别企业已达到3%，全行业的总科研投入占销售收入的比值最好能在2020年达到1.5%，每个大的企业都应有自己的杀手锏产品，纵观全球铝加工行业，每隔6、7年就有一次洗牌，在每次洗牌的过程中，没有哪一家高技术企业会倒闭，如美国铝业公司、原加拿大铝业公司（2007年与力奥•廷托公司合并，组成力拓-加铝公司）、日本神户钢铁公司铜铝事业部，不管行业无序到什么程度，只要有核心竞争力与过硬的名牌产品，企业就有市场空间，就会很好地活下去。

对一个多台同型号同规格的铝箔轧机企业来说，如何把它们组合起来也是有学问的，首先轧机的最大轧制速度应该是不同的，粗、中、精轧机应各有其最佳的合适速度，这样才能获得最大的产出；另外，如何把它们组织起来也必须进行精心设计，是按粗、中精分组呢？还是把它们组成一个“大兵集”，分为粗、中、精轧车间呢？笔者认为，按后者组织可能效益更好一些。

1.11.11 日本联合铝业的昨天和今天

2013年10月1日,日本古河斯凯(Furukawa Sky Aluminum)铝业公司与住友（Sumitomo）轻金属工业公司合并，成立株式会社日铝全综（United Aluminum Company of Japan）。它的日文名称与中文名称为“株式会社日铝全综”，英文名称为“United Aluminum Company of Japan，UACJ”。日文“株式会社”可译为“股份有限公司”或“公司”，“株式会社”通常加在后面，如古河斯凯株式会社、住友轻金属工业株式会社，也有放在前面的，如株式会社日铝全综，不过这是极少数。

对中国人来说，株式会社日铝全综虽然用的都是汉字，但是日文中的汉字意义与中国汉字的意义不尽相同。 “全”在日文里有“最”之意，“日铝全综”在日文里就是要搞又强又大的日本铝业公司，可是中国人不一定完全理解，对中国人来说，译成“日本联合铝业公司”是最好不过的了，既好理解，读起来又顺口。因此，笔者建议，在中国科技文献和媒体报道中，最好不用或少用株式会社日铝全综这一名词，而用日本联合铝业公司（UACJ）这一名称。

不过，它在中国工商部门注册登记的企业，有用“日铝全综”的，也有用其他名称的，如：乳源东阳光精箔有限公司，占一定股份；日铝全综（天津）精密铝业有限公司，生产挤压铝材；日铝全综（广州）铜管有限公司；日铝全综（无

锡）铝材加工有限公司，生产深加工产品；日铝全综（上海）铝材销售有限公司等。

日本联合铝业公司的发展历程

株式会社日铝全综是当前日本最大的综合性铝业公司，是日系全球铝业巨擘集团，于 2013 年 10 月 1 日由古河斯凯铝业公司与住友轻金属工业公司合并综合组成的股份制公司。自 2005 年以来，世界铝平轧产品板块市场环境面临着前所未有的巨变，形势非常严峻，如不采取强有力的措施，改变经营方略，经营状况就会每况愈下，甚至有被淘汰出局的危险。株式会社日铝全综就是在这种严酷形势下出炉的。

在株式会社日铝全综未成立前，日本有 4 家大的以平轧铝产品为主的综合性铝加工企业：神户钢铁公司铜铝事业部、古河斯凯铝业公司、住友轻金属工业公司、日本轻金属公司。到 2013 年 10 月，大的铝业公司就只有三家了：株式会社日铝全综、神户钢铁公司铜铝事业部、日本轻金属公司。

1910 年日本古河电气公司成立，开始研究铝电线，1921 年开始研发与生产硬铝（Al-Cu-Mg 系合金），1933 年栃木县日光市轧制厂投产，1961 年栃木县小山市挤压厂投产，1964 年 12 月昭河电工公司、美国凯撒铝业公司、八幡钢铁公司（现名新日本钢铁公司）成立合资企业——斯凯铝业公司，1967 年 4 月崎玉县深谷轧制厂投产，1968 年 7 月滋贺县近江八幡

的专业挤压厂投产，1983 年福井轧制厂建成，1998 年古河电气工业公司与斯凯铝业公司开始铝材业务合作，2000 年 4 月古河电气工业公司与斯凯铝业公司的铝材销售部门合并，成立优尼福斯铝业公司，2003 年 10 月古河电气工业公司与斯凯铝业公司的铝材事业部门正式合并，成立古河斯凯铝业公司，2004 年 10 月 150MN 的锻压机投产，这是迄今为止日本最大的铝件模锻机，2005 年 5 月古河（天津）精密铝业有限公司成立，2008 年 8 月参股韩国朝日铝业有限公司（CHOIL Aluminum Co.,Ltd.），2009 年 3 月参股英国布里奇诺斯铝业公司（Bridgnorth Alumininum Co.,Ltd.），2010 年 1 月参股中国东阳光精箔有限公司，2010 年 2 月成立古河斯凯铝业（泰国）有限公司（Furukawa-Sky Aluminum (Thailand)Co.,Ltd.）,同年 8 月成立中国古河斯凯（上海）铝材有限公司，2011 年 8 月与住友轻金属工业公司等共同取得美国平轧铝产品生产销售公司——三箭铝业有限公司的股权，2011 年 11 月中国古河斯凯（无锡）铝加工有限公司正式挂牌成立，2012 年 3 月开始建设泰国铝板带轧制厂。

1897 年 4 月住友铸铜厂开业，次年该厂开始生产铝板，1935 年 9 月成立住友金属工业公司，1959 年 8 月成立住友轻金属工业公司，1979 年 5 月成立住轻铝箔公司，1979 年 8 月现代化的大型名古屋轧制厂投产，1995 年 11 月成立住轻（广州）金属制品有限公司，2000 年 8 月与日本轻金属公司成立

住轻日轻工程公司，2002 年 10 月组建住轻捷克有限公司，2009 年 10 月日本铝业集团成立，2011 年 10 月住轻铸铜集团诞生，2013 年 10 月 1 日古河斯凯铝业公司与住友轻金属工业公司合并经营组成日本联合铝业公司，2013 年 12 月控股的子公司——日铝全综制箔公司收购海德鲁铝业公司马来西亚公司（Hydro Aluminium Malaysia Sdn.Bhd.），成立日本联合铝业公司马来西亚铝箔公司(UACJ Foil Malaysia Sdn.Bhd.)。

日本联合铝业公司的今天

作为大型铝业公司之一的日本联合铝业公司是一个铝材生产及制造深加工产品的跨国铝业集团企业，它生产与经营的产业由五个板块组成：轧制（平轧产品）事业、挤压事业、制箔事业、铸锻事业、铜管事业、加工产品事业。

平轧产品事业

公司拥有完整的板、带、箔生产系统，拥有一个管理公司——UACJ Color 铝业公司（Aluminum Corporation），国内有 3 个公司：深谷服务公司、名古屋铝包装公司、Sansen 公司。在国外有 7 个公司与工厂：泰国公司（UACJ(Thailand)Co.,Ltd.），美国三箭铝业控股公司（Tri-Arrows Aluminum Holding Inc.），美国三箭铝业公司（Tri-Arrows Aluminum Inc.），英国布里奇诺斯铝业公

司，中国乳原东阳光精箔有限公司，希腊亚佛塞尔公司（AFSEL S.A.），韩国乌匹铝业公司（UPIA Co.,Ltd）。

日本联合铝业公司在日本国内有 4 个铝平轧产品厂，2013 年冷轧板带生产能力 11500kt/a，占日本总产能的 68%左右，是日本最大的生产者。名古屋铝材厂是一个综合性的铝加工厂，板带生产能力 350kt/a，有 1 条 1（3300mm）+4（2286mm）式热连轧生产线，除生产冷轧用的带坯外，还生产厚板，1898 年开始用二辊轧机生产铝板，开日本铝板带工业的先河，有 1 条 1620mm 双机架冷连轧生产线与 2 台 4 辊非可逆式单机架冷轧机；福井轧制厂是联合铝业公司最大的铝板带轧制厂，1983 年 1（4320mm）+4（2850mm）式热连轧线投产，在中国新建的大热轧机未投产前，它仍是全世界第二大热粗轧机，热轧板带生产能力 600kt/a，冷轧板带生产能力 400kt/a，有 3 台单机架冷轧机，2 台 4 辊的，1 台 6 辊的（辊面宽度 2250mm）;深谷轧制厂,有 1(3780mm)+4(1300mm)式热连轧线 1 条，2200mm6 辊不可逆式冷轧机 1 台，4 辊不可逆式冷轧机 1 台，1550mm 双机架冷连轧线 1 条；日光轧制厂有 1 条 1（1830mm）+3（1830mm）式热连轧生产线，不过粗轧机是二辊的（Φ795×1830mm），精轧机列为四辊的（Φ580/1305×1830mm），有 2 台冷轧机，4 辊及 6 辊的各 1 台，1750mm 双机架冷连轧线 1 条。

挤压产品事业

日本联合铝业公司有 6 个挤压材厂，管、棒、型、线材生产能力约 180kt/a，下辖 7 个公司：UACJ 挤压公司、小山挤压公司、名古屋挤压公司、Gunma 挤压公司、滋贺挤压公司、轻金属挤压开发公司（KOK）、日本冷却器公司。轻金属挤压开发公司拥有日本唯一的一台万吨级(97MN)铝挤压机，轨道车辆车体大型材都由该厂生产。

日本联合铝业公司在挤压铝材模具设计制造方面有许多独到之处，拥有一批业界顶尖人才，不断地推出适合汽车、工业装备、航空航天器、办公设备等的高精挤压材，如汽车热交换管材与配管材料、摩托车框架管材与型材、复印机感光鼓管材、其他高精工业型材等等。在境外有 4 个挤压企业：日本联合铝业公司（天津）精密铝业有限公司，古河印度尼西亚铝业公司（PT.Furukawa Indal Aluminum），日本联合铝业公司挤压（泰国）公司（UACJ Extrusion (Thailand)Co.,Ltd.），日本联合铝业公司捷克挤压公司（UACJ Extrusion Czech s.r.o.）。

铝箔事业

日本联合铝业公司铝箔事业部下辖 4 个公司：UACJ 铝箔公司（UACJ Foil Corporation），日光铝箔公司（Nikkin Co.,Ltd.），山阳铝箔公司(UACJ Foil Sangyo Corporation)，

铝箔服务公司，铝箔总生产能力155kt/a，除生产通用食品与医药等包装箔外，集中力量研发与生产尖端箔材如电解电容器箔、电池电极箔、燃料电池箔、锂离子二次电池集电箔等等。在境外有马来西亚铝箔公司。

铸锻事业

日本联合铝业公司铸锻事业部下辖两个公司：铸锻公司（UACJ Foundry＆Forging Corporation），东日本IANZO公司（Higashi Nihon TANZO Co.,Ltd.）。铸锻事业部拥有日本最大的150MN的铝件模锻机，是日本唯一的一台大型模锻机，全国所需的大型铝合金锻件都由该厂生产，在越南也有境外的一个铸锻企业：日本联合铝业公司越南铸造与锻压有限公司（UACJ Foundry＆Forging (Vietnam)Co.,Ltd.）。铸造部生产的涡轮增压器用压缩机轮产品在品质与数量方面均居世界之首。

铜管事业

铜管事业也是日本联合铝业公司主营生业之一，在国内有4个铜管企业：日本联合铝业公司铜管公司（UACJ Copper Tube Corporation），日本联合铝业公司铜管销售公司（UACJ Copper Tube Sales Corporation），东洋配件公司（Toyo Fitting Co.,Ltd.），日本联合铝业公司铜管包装公司（UACJ Copper Tube Packaging Corporation）。铜管事业部在境外有2个企业：日本联合铝业公司马来西亚铜管公司（UACJ

Copper Tube (Malaysia)Sdn.Bhd.），日铝全综（广州）铜管有限公司。公司还生产冷凝器钛管。

加工产品事业

加工产品是指用半成品铝材经机械加工和其他工艺处理后制得成品零件或净成品尺寸的零件，其附加值得到大幅度提高。日本联合铝业公司在国内有 7 个生产加工产品的企业，在泰国、美国等有 5 个加工产品生产工厂，在中国有一个——日铝全综（无锡）铝材加工有限公司。

在其他方面，日本联合铝业公司在国内设有 9 个贸易、咨询等公司，在国外设有 12 个这方面的公司，其中中国的最多，有 7 个，包括日铝全综（上海）铝材销售有限公司，日铝全综（上海）商务咨询有限公司，优艾希杰商（上海）贸易有限公司等。

1.11.12 神户钢铁集团的铝铜业务(一)

日本神户钢铁集团（Kobe Steel Group）是一家大型金属材料跨国公司，全名为“株式会社神户制钢所”，英文名称为“Kobe steel ltd.”。总部位于日本神户市，集团的标志及统一商标为“Kobelcor”。公司于 1905 年 9 月 1 日开始组建，1911 年 6 月 28 日正式挂牌成立，现任总经理兼首席执行官为佐藤广士先生。截至 2011 年 3 月 31 日，公司总资

产 155.5422 亿元人民币，即 2333.1325 亿日元，员工总数 34772 名。

集团公司下设 8 个公司（事业部）。钢铁公司：主管业务钢丝，钢条，铸钢，锻钢，钛，铁粉，发电供电设备；焊材公司：主管业务焊条，焊接系统与装备，试验、检测及其他高性能材料；铝铜公司：主管业务铝板带箔，铝挤压材，铝加工材，铝—镁合金铸锻件，铜板，铜管，铜线，铜箔；机械公司：主管业务工业机械，压缩机，化工，能源设备，核能设备，金属加工设备；环境解决方案公司：主管业务水处理设备，冷却塔，废弃物处理与再生利用设备，化工装备及食品机械，环境分析与咨询；综合商贸公司：主营业务钢铁材料，钢铁冶炼原辅材料，有色金属，机械与电子器材，焊接材料与设备。

铝材生产企业

神户钢铁公司的铝铜公司下属的铝业公司在日本国内有 3 个半成品加工厂：生产铝平轧产品（板、带、箔）的真冈轧制厂（真冈制造所），建于上世纪 50 年代后期，是日本装机与技术水平最高者之一，有一条（1+4）式热连轧生产线，一条从德国西马克公司（Sms biemag）引进的双机架铝带冷连轧生产线，两台单机架 4 辊铝带冷轧机。冷轧带材生产能力 400kt/a，除生产板带材外，还生产铝原片。生产铝挤压

材（管、棒、型材）与铜板的长府加工厂（长府制造所），有 14 台不同挤压力（12~45MN）的挤压机，全部是宇部兴产公司设计制造的，挤压铝材生产能力约 60kt/a。大安轻合锻铸厂（大安工厂），专门生产铝—镁合金锻件与铸件的企业。

日本关联公司

在日本国内有 7 个关联的公司：神钢材料与铜管公司（KOBELCO & Materials Copper Tube,LtD.），业务范围为空调器钢管，建筑及热水铜管的生产，研发与销售；新科北方公司（Shinko North co.,Ltd）从事各种铝加工产品的制造及销售；新科里德米克公司（Shinko leadmikk, Ltd.）负责电子零件，半导体，集成电路零件的制造与表面处理及销售，阳光铝业公司（Sun Aluminium Industrials, Ltd.），业务范围为铝箔产品与销售；新科技金属产品公司（Shinko Matal products Co.,ltd.），从事铜管产品的深加工，复合材料的产品、加工与销售；丰通有色金属中心有限公司（丰通非铁中心株式会社），主营业务为铝带材的纵剪，铝材压材及管材的锯切；新科铝线材公司（Shinko Aluminium Wire Co.,Ltd,），负责线、棒材的深加工与经营销售。

海外关联公司

海外关联公司有 8 个：美国神户汽车铝产品公司（Kobe Alumium Automotive products Llc），从事汽车减震铝锻件的生产与销售；神户铜管材料（泰国）有限公司（KOBELCO & Materials Copper Tube Co.,Ltd.），从事空调器铜管的生产、加工与经销；苏州神钢电子材料有限公司，位于中国江苏省苏州市工业园区，于 2005 年 5 月成立，业务范围为半导体，电子零件铜和铜合金材料的生产与销售；新加坡神钢压力容差电子技术有限公司（Singapore Kobe PTE LTD.）主要业务为铜带加工、引线框架制造与销售；神钢精密技术苏州有限公司，成立于 2010 年 12 月，生产与销售真空系统的精密铝合金零部件及液晶面板溅镀靶高纯铝材；神钢汽车铝部件（苏州）有限公司，位于苏州市高新区，业务范围为制造与销售汽车减震器铝合金锻件，一期工程 2012 年 8 月投产；苏州神商金属有限公司，铝带卷（带箔）的剪切加工与销售，原卷材来自日本；神钢铜管材（马来西亚）有限公司（KOBELCO & Materials Copper Tube SDN.BHD），业务范围为铜管及其深加工产品的生产与销售；神钢电子材料（泰国）有限公司（KOBE Electronice Material Co., LTD.）主营业务为铜板、带的剪切及销售。

中国铝铜业务

神户钢铁公司铝铜公司的海外业务主要集中在中国，仅

在苏州就有 4 个生产厂，在上海有投资公司 1 个、商贸公司 1 个，在成都有 4 个商贸公司，在平湖、杭州、佛山、唐山、无锡、鞍山等地设有商贸公司。

自 2011 年 10 月以来，中国常铝股份有限公司与神户钢铁公司就建设大型铝板带合资企业进行谈判，12 月 21 日双方签订了意向书：双方将共同出资在内蒙古自治区包头市设立合资企业，注册资本 20 亿元，中日方分别占 20%和 80%股份，合资项目设备投资 33 亿元，产品以汽车外覆盖板，罐体料为主的高精铝合金板带，生产能力 200Kt/a，2013 年可动工建设，2015 年下半年可建成投产，2012 年 12 月中旬尚未正式签约，如能建成将成为中日最大的铝业合资企业。

1.11.13 神户钢铁集团的铝铜业务(二)

铝材及其零部件在汽车、摩托车和其他机动车中的日益广泛应用，对于降低油耗、提高燃油经济性与减少温室气体排放有着特别重要的意义,因为铝材的密度只有钢铁的 32%，用铝材替代钢铁制造汽车零部件可使其质量降低 54%。乘用车在标准城市道路与高速公路上行驶时，约 84%的油耗都消耗于车的自身质量。

神户钢铁公司生产的铝平轧产品已用于制造乘用汽车的外覆盖钣金件如发动机罩、翼子板、车门板、后备箱、排气

隔热板、锂离子电池盒、热交换系统复合版带箔，锻件用于底盘与减震系统，挤压型材用于制造车门加固护栏、保险杠及其加固件。

汽车板材外覆盖版（ABS）

神户钢铁公司真冈轧制厂开发出两种有优秀性能的 ABS 板合金：KS6K21 及 KS5J30。KS6K21 合金是一种 Al-Mg-Si 系合金，在 T4 状态应用，在预时效状态（T4P）的强度低，成形性能良好，易卷边与弯曲，烤漆温度低，约 165℃；淬透性高；抗腐蚀性强；可焊性良好。KS5J30 和金属 Al-Mg-Cu 系，在 0 状态应用，抗拉强度高达 275N/mm2，与 5182-O 合金相当，与汽车钢板（SPCC）几乎相等，它的伸长率高达 30%，成形性能优良，压力加工可使强度提高，涂漆烘烤后强度性能不会下降，抗蚀性强，可焊性良好，它的成份与 AA5022 合金的基本相当。

热交换复合铝板

热交换复合铝板带是其真冈轧制厂主导产品之一，它开发出一些独具特色铝合金用于轧制汽车热交换器蒸发器焊接管材，这种管材及冷凝器管是用 0.4~0.6mm 的薄带焊接的，有 3 层的，也有 4 层的，3 层的组成为 Al-Si 合金、含少量

Mn-Cu-Mg 的 3003 合金、Al-Si/Al-Si-Mg 合金；4 层的组成为：Al-Si 合金、改型的 1000 合金、含少量 Mn-Cu-Mg 的 3003 合金、Al-Si-Mg 合金。它们钎焊后的抗拉强度为 140~160N/mm2。

水箱热交换管有两种，即用带材焊接的管与带材料钎焊的管，前者用带材厚度有 0.3mm 的，也有 0.2~0.25mm 厚的，后者用的是 0.2~0.25mm 厚的带材。0.3mm 厚带材的组成为 Al-Si 合金、Al-0.1Si-0.5Cu-1.1Mn-0.1Zr 合金、Al-0.1Mg-Zn 合金的 3 层复合材料。0.2~0.25mm 厚的 3 层复合带材的组成有两种，一种的组成：Al-Si 合金一含少量 Mn、Si、Cu 的 3003 合金、Al-2.5Mg-Zn 合金，另一种的组成：Al-Si 合金一含少量 Mn、Si、Cu 的 3003 合金、Al-Zn-(Mn、Si)合金，它们在钎焊后的抗拉强度为 130~190N/mm2。

波纹汽车铝工件 Nimbus GⅡ及 MB

波纹汽车铝工件 Nimbus GⅡ（corrugted aluminum）及 MB 是神户钢铁公司为乘用车研发的特种铝工件，是用薄板加工的，其上带有波纹与劲条，如汽车发动机排气歧管罩、通用发动机排气管隔热罩，它们有四大特性：

隔热性强：向热源方向反射辐照射，不向外部散发热能，能有效地降低表层温度，能很好地保护温度高达 600℃的发动机正常运转，排气管附近的零部件也会得到很好地保护，

可使发动机持久地保持震动系数在 150 以上，铝板的隔热性能比钢板的好得多。

加工成形性能优良：拉伸与压缩成形性能良好，适用于深度冲压加工和钣金加工。用的板材厚度为 1.5~4.5mm，具体厚度决定用途，如果需要还可以在板上开孔。

经久耐用：Nimbus GⅡ及 MB 板的隔热性能可谓“天长地久”经久不衰，据神户钢铁公司的试验，它们不会发生老化现象，不会随着使用时间的延长而下降，汽车行驶 10 万千米后其防热性能还如新的一样。

组装简易方便，功能多样：这两种隔热板不但有很强的防热性能，而且有一定的减震性能，MB 板可用螺旋固定，其上有螺孔，可装在发动机等需要控震防热的地方。Nimbus GⅡ板可扣于防热的导管与电线等之上，以免热损坏，用铜线将其捆绑在保护的工件上，下置槽钢之类的固定材料。

Nimbus GⅡ及 MB 防热板是用工业纯铝板加工制造的，在使用到期后可得到 100%的回收，有利于资源的综合利用与循环经济发展。

铝薄板锂离子电池盒

锂离子电池对 HV（混合动力汽车，hybrid vehicle）与 HE（高能汽车，high energg）来说是不可或缺的，可以说没有锂离子电池就没有现代化的环保型的电动车，混合动力汽

车与高能（效率）汽车等。锂（离子）电池装于盒内，它是用电池盒（battery case）合金 BC10（相当于 1050 合金）、BB30（相当于 3003 合金）、BC31（Al-Mn-Mg-Cu 系）、BC32(Al-Mn-Mg-Cu 系)合金薄板激光焊接的。BC 合金的激光焊接性能比常规通用合金好得多。

BC 系列合金是神户钢铁公司开发的锂电池盒合金，不但适合于车载锂电池，而且可用于制造手机，个人电脑的锂离子电池盒，它们实质上都是常规变形铝合金的改进型，在成分与性能方面作了适当改变工艺也有所改进。

1.11.14 神户钢铁集团的铝铜业务（三）

神户钢铁公司真冈轧制厂是日本最大的铝合金厚板生产企业，占全国总产量的 45%左右，以通用厚板为主，几乎不生产航空级的 2XXX 系及 7XXX 系合金板，以生产高精度（high precision）铝厚板著称。

精密切削高精度厚板

ALHIGHCE-III

及 ALJADE-II

这两种厚板在厚度和平直度偏差精度方面都达到了很高的水平，板厚偏差相当 JIS（日本工业标准）的 1/10，可谓顶尖水平，平直度小于 0.2mm/m，残余应力几乎全部消除，

可大大提升切削加工表面精度与成材率，所有板材都经过热处理与逐张严格的品质检验。但 ALJAE-Ⅱ厚板的平直度＜0.4mm/m。

这两种厚板的应用领域为：半导体制造装置，液晶制造设置，太阳能电池板制造系统，机器人，医疗器械，光学设备等。板的厚度 4~50mm，宽度×长度（mm）有 3 种：1000×2000，1250×2500,1525×3050。

ALHIGHCE-Ⅲ合金板的抗拉强度 200N/mm2，屈服强度 115N/mm2,伸长率 25%。它的成分与性能与 5052 合金的相当，在 H112 合金的相当，在 H112 状态应用。

高精高强度厚板

ALHIGHC-83

及 ALJADE-83

这两种厚板的特点是：抗拉强度高，为 5052 合金厚板的 1.5，在热处理不可强化的变形铝合金中是强度最高的，它们的化学成分与 5083 合金的相同，抗拉强度为 300N/mm2，屈服强度为 150N/mm2，伸长率 20%，在退火状态下应用；厚度偏差小，ALHIGHCE-83 板的为±（0.06~0.20）mm，ALJADE-83 板的为±（0.08~0.50）mm，仅相当于 JIS 标准规定值的 1/6~1/5；平直度优秀，ALHIGHCE-83 板的＜0.4mm/m，

ALJADE-83 板的有两种，4~20mm 厚的为＜0.8mm/m，板厚大于或等于 50mm 的为 1.2mm/m。

ALHIGHCE-83 板的尺寸：厚 4~30mm，宽×长（mm）：1000×2000,1250×2500,1525×3050；ALJADE-83 板的尺寸：厚 4~50mm，宽 1525mm，长 3050mm。

这两种厚板的内部残应力甚低，尺寸偏差小，平直度也低，表面品质高，切削加工的变形量很小，成材率高。它们是加工半导体装置、液晶设备、太阳能系统、机器人、医疗器械、光学仪器等零部件的良好材料。它们的力学性能及尺寸存在偏差。

特厚特宽 5052 合金板

神户钢铁公司真冈轧制厂可生产特宽及特厚的 5052-H112 合金板，其尺寸及其偏差如下：

厚度/mm 20~520

宽度/mm 1000~3620

长度/mm 1000~5000

它们的宽度允许偏差为+（2~5）mm，长度允许偏差为+（5~15）mm。此外还生产厚 20~100mm、宽 1530~2520mm、长 2000~3200mm 的普通 5052-H112 合金板材；以及高精级的厚 20~50mm、宽 1530~2520mm 长 2000~3020mm 的 5052-H112 合金板材。

1.11.15 神户钢铁集团的铝铜业务（四）

铝合金门扶手型材

挤压铝材在汽车制造中获得了较为广泛的应用，其用量次于压铸与铸造产品、平轧产品，全铝乘用车的车身构架就是用挤压材与压铸连接件组装成的。乘用车门在关闭时会受到相当强的冲击作用，这就要求各个零件用抗冲击破损的材料制造，有较高的能量吸收效率，同时又要易于弯曲成形加工。为此，神户钢铁公司研制成一种高强度的 Z6W 合金，可以挤压中空材料，它的抗拉强度为 480N/mm2，虽比 7075-T6 合金的≧540N/mm2 低，但比 6082-T6 合金的 310N/mm2 高得多。它的伸长率高达 14%（T5 状态），比 7075-T6 合金的 7%及 b082-T6 合金的 10%分别高 7 个及 4 个百分点。同时，这个新型的车门扶手（guard bar）合金有相当高的塑性，可以挤压断面形状复杂的中空型材，又可以很好地进行弯曲成形加工。它的成形能力不亚于 6082-T6 合金型材的，铝门质量比钢门的约轻 30%。

无铅易切削挤压 KE 系列合金型材

传统的易切削铝合金都含对环境不利的铅或低熔点元素锡与铋。神户钢铁公司新近推出的 KE 系列合金是一类环境友

好型合金，既不含铅也不含锡、铋，有很好的可切削性能，比传统的 6061 合金的还好。其型材与棒材在汽车防抱死制动系统（ABS）零部件制造中获得卓有成效的应用。

KE6-T6 合金的抗拉强度 350N/mm2 比 6061-T6340 合金的 340N/mm2、6262-T6（含铅）合金的 330N/mm2 都高，但其身长为 13%，比 6061-T6 合金的 15%及 6262—T6 合金的 14%略低一些。

KE6-T6 合金具有四大优点：

不含铅，对环境友好，具有优良的再循环利用性能，切屑也已处理；

在适当的切削条件下，具有与含铅的铝合金相同的断屑特性；

抗腐蚀性能和阳极氧化性比含铅合金的更高；

具有与传动铝合金相当或更高的力学功能。

汽车悬挂系统铝锻件

悬挂系统铝锻件是汽车很重要的受力结构件，对汽车的安全性及乘坐舒适性起着关键性的保障作用。神户钢铁公司共有 3 个汽车铝合金锻件厂，一个在日本大安市，称为大安锻造厂，生产能力 400 万件/a；第二个在美国，称为 KAAP-A 锻造有限公司（Kobe Aluminum Automotive Products Co.,Ltd.(America)），生产能力 400 万件/a；第三个在中国

江苏省苏州市高新区，2012 年 8 月投产，名为神钢汽车铝部件（苏州）有限公司（Kobe Automotive Products (China)，KAAp-C）。2013 年的生产能力 200 万件/a，最终生产能力可达 400 万件/a。该厂是日商独资企业，有神户钢铁公司、三井物产公司、丰田通商公司出资建设，资本金 10 亿日元，建筑面积 7000m2，员工约 50 名，一期有 1 台 63MN 的锻压机。

汽车铝合金锻件有明显的减重效果，神户钢铁公司自主开发出一些高强度铝合金并进行优化设计，用于锻造悬挂系统零件。

高强度钢-铝焊丝

钢-铝焊接极为困难，采用常规焊丝几乎是不可能的。为了解决它们的焊接问题，神户钢铁公司新研发的高强度焊丝可以圆满地实现铝与刚的高强度焊接结合。采用 MIG（金属极惰性气体保护焊）硬钎焊与激光硬钎焊焊接，焊缝的抗剪强度虽没有提高，但用新焊丝焊接后，焊缝的抛离强度却有极大的提高。

1.11.16 神户钢铁集团的铝铜业务(五)

神户钢铁集团为了生产易拉罐盖料（end stock）、空调系统散热翅片料（fin stocks for air-conditioning）、半

导体-液晶制造设备铝材等，设有现代化的各种表面处理成产线。

空调散热箔的表面处理

神户钢铁集团生产空调散热箔技术及其品质居世界领先水平，不但有专用的合金，而且有独树一帜的表面处理技术。表面经过化成转化处理与 3 次涂敷烘烤处理，因而铝材既有高的成形性能，龟裂率比传统材料低得多，又有多功能的表面特性，有抗菌防霉污染的，有除臭去味的和除霜型的。

涂敷生产线

涂敷生产线：开卷→压平矫直→脱脂清洗→化成转化膜处理→第一次涂敷与烘烤→第二次涂敷与烘烤→第三次涂敷与烘烤→卷取→包装入库。化学转化处理时，在铝的表面形成一层多孔的转化膜，有高的抗腐蚀性能，对其后涂敷的涂料有很强的吸附性能。经过“三涂三烘”后的铝带表面品质稳定，外观风貌美观柔和，功能多样。根据涂料的不同，形成 3 种功能不同空调箔，箔厚 0.08~0.095㎜，成形性高。

抗菌防霉、防污箔：是一种防污性强的亲水箔，对附着污物有自洁能力，能稳定地保持亲水性与抗菌性，能抑制细菌繁殖，减轻令人不愉快的异味。在化学转化膜上有 3 层涂

料，内层为可着色的抗菌耐腐蚀层，中间为防污、亲水层，表面为良好润滑性能的涂层。

除臭去味箔：是一种能去除异味的亲水箔，涂料中有除臭成分，可去除室内令人不愉悦的异味。在化学转化膜之外有两层涂料，中间的为亲水层，外层既有亲水性，又有除臭功能。

除霜箔：是一种除霜快结霜期较长的亲水箔，有强的除霜与高的亲水性，可实现短时除霜，除霜后能延缓在结霜时间，能有效地提高室外机送暖风效率，有很强的抗腐蚀性能，可在盐害地区长期使用。在化学转化膜之上有两层涂层，中间层为可着色的抗腐蚀性强的涂敷层，外层为快速除霜与缓慢结霜层。

高成形性预涂层 KS705

在散热用的铝带（片）上预涂一层高成形性的放热率强的涂膜后是一种良好的制造高技术电器盒，LED（发光二极管显示，Light-emittingdiode）、ECU（能量转换装置，Engergy Conservation Unit）零部件的良好材料。制造它们需要经过复杂的成形，要求铝板带有良好的成形能，放热性能（散热性能）及其他表面性能，神户钢铁公司推向市场的带有 KS705 预涂层铝板带可满足这些要求。所谓预涂层板带是指在铝板带加工厂出厂之前就经过必要的处理，涂上了性能特异的涂

料膜。

KS705 预涂膜铝板带上有两层膜，内层有很强的抗腐蚀性能，而外层膜有优秀的成形性能，可以着上各种色彩。KS705 铝板的热放射率为素铝板的 15~20 倍，等同于压铸铝件的。膜层色调不同，热放射率ε 也有所不同，素铝板的为 0.05，白色涂层板的大于 0.75，黑色涂层板的≥0.80，银白涂层板的≥0.60。

高硬度预涂层 KS744

铝及铝合金的表面硬度并不高，而有些用铝板带制造的产品如印刷电路板部件、光驱磁盘托盘、电唱机拾音罩等各种电子仪器外壳等要求高的表面硬度，神户钢铁公司开发的 KS744 涂层可以满足这些苛刻的要求，其特点如下：

一、膜层非常坚硬，可以大幅度减少表面瑕疵的出现；

二、成形性能比硬质阳极氧化膜的高得多，可弯曲 90 度不开裂；

三、铅笔硬度（按 JIS K5600-5-4）7H；

四、铜箔容易剥离，在压力为 300N/cm2 于其上叠压上铜箔，在 180 摄氏度加热 90 分钟后自然脱落；

五、耐热性好，于大气中 400 摄氏度保温 1 小时无异常；

六、摩察系数 0.4（鲍登法，荷重 2N）。

半导体级铝材的表面处理

半导体及液晶器件制造设备零部件需用经过阳极氧化处理的铝材制造，传统氧化处理的铝材不能满足这种需求。它要求阳极氧化膜兼备抗等离子腐蚀与抗气体腐蚀，用于制造等离子体 CVD（化学气相沉积，Chemical Vapor Deposition）设备、干式蚀刻设备、离子交换设备零部件。神户钢铁公司的 K.PRAS 法（KOBELCD Plasma Resistant Aluminum for Semiconductor Grade）可以满足这种要求。零件制造工艺为：材料→机械加工→K.PRAS 阳极氧化处理→精心清洗→包装发货。

1.11.17 神户钢铁集团的铝铜业务（六）

神户钢铁集团的铜材板块业务比铝材的规模小很多，但有三个显著的特点：所生产与经销的产品都是高附加值的高技术的，如汽车端子铜合金、镀锡汽车端子材料（tin plating automobie terminal）、高性能引线框架铜合金带（highperformance copper alloy strips for leadframe）等；自主创新（开发）的合金占 82%以上，常规通用合金占的比例还不到 18%；电子产品材料占 99%，通用材料及产品只不过 1%左右。这对我国调整铜产业结构不无启迪。

神户钢铁公司在中国并不生产铜材，所经销的板带线材从日本运来，由神钢商贸（上海）有限公司与苏州神钢电子材料有限公司负责销售，后者位于苏州工业园区，2005 年 5 月成立，注册资金 600 万美元，有分切机、卷取机、包装机等，可在接到订单后两周内供应。合金由该公司自主研发的 KLF 5、CAC 60、CAC 5、CAC 16、KFC 及 CDA194、C2600 等传统合金，盘式带卷(pancake coil)的带材厚度为 0.1~1.0mm，宽 6~720mm，生产能力 650t/M，横移转盘带卷（traverse wind coil)的窄条厚度 0.1~1.0mm，宽 6~60mm，成产能力 160t/M。

汽车端子铜合金

神户钢铁公司自主研发的汽车端子合金（Copper alloy for autombile terminal）有 8 种：KFC （Cu-Fe-p 系合金）CAC 19（Cu-Fe 系合金）、CAC 16（CU-Fe-P 系合金）、KLF -5（CU-Fe-P 系合金）、CAC -5（CU-Fe-P 系合金）、CAC60（CU-Ni-Si 系合金）、CAC 75（CU-Ni-Si 系合金）。前 4 个合金有高的电导率，依次为 90%、82%、63%、60%、IACS。但它们的抗拉强度较低，依次为 435、465、500、480N/mm2:；KLF -5 合金是一种通用端子合金，电导率 35%IACS，抗拉强度 35N/mm2，后三种合金用于制造小型及超小型端子，它们的电导率不高，依次为 34%、44%、40%IACS，但有较高的抗拉强度，CAC 75-H 合金的抗拉强度高达 770N/mm2。

神户钢铁集团这些合金的电导率比常规合金的高得多，例如通用端子合金 C5102、C5191、C5210 的电导率仅有 12%IACS 左右,C2600 合金的虽然高一些,但也不超过 27%IACS。

高性能引线框架铜合金带

神户钢铁公司推向市场的引进框架铜合金共有 6 种，均获得了广泛的应用，它们有着良好的物理性能和力学性能。它们的成分如下（质量%）：

KFC 合金（相当于 C19210）：0.1Fe、0.03P、其余 Cu。

SuPE1（超级）KFC ：0.3Fe、0.1P，其余为 Cu。

KLF 170（相当于 C19170）:0.7Ni、0.13P、0.1Zn，其余为 Cu。

KLF 194（相当于 19400）：2.2Fe、0.03P、0.15Zn，其余为 Cu。

CAC 5（相当于 C19040）：0.8Ni、0.07P、1.2Sn，其余 Cu。

CAC 92（相当于 C72500）：9Ni、2.3Sn，其余为 Cu。

中国铝加工业进入了稳中求进以结构调整为主线的新阶段。当然，大规模扩大生产能力的建设投资可能要到 2015 年才能结束。神户钢铁集团的铝、铜加工板块很有特色，特别是在自主创新发展高技术产品方面有一些独到元处，希望本文所介绍的情况对我国铝、铜加工业结构调整有所裨益。

2. 镁

2.1 1、说说镁的身世

镁是一种银白色的轻金属，元素符号 Mg，在元素周期表中属ⅡA 族，原子序数 12，原子量 24.305，化合价为+2，密集六方晶体，密度 1.74g/cm3，约为铝密度的 64.4%，铁密度的 22.1%。由于它的密度小，故把它列为有色轻金属。有色轻金属共有 7 种，按密度大小排列如下：钡(Ba)3.5g/cm3，铝（Al）2.7g/cm3，锶（Sr）2.6g/cm3，镁（Mg）1.74g/cm3，钙（Ca）1.54g/cm3，纳（Na）0.97g/cm3，钾（K）0.86g/cm3。此外，还有 4 种稀有轻金属：铯（Cs）1.87g/cm3，铍（Be）1.848g/cm3，铷（Rb）1.53g/cm3，锂（Li）0.534g/cm3。

由于镁的密度小，又可以与铝、锌、锰、锆、锂、钍、银、稀土等形成一系列的有工业使用价值的镁基合金，故镁又获得最轻的结构金属材料美誉，虽然还有一些金属的密度比镁的小，但它们不能形成有实用价值的结构材料或广为应用的功能性能。由于镁及镁合金密度小，用它们取代钢、铸铁、铝等制造交通运输装备零部件可大幅度减轻其自身质量，节能减排效果卓著，不过提取镁的能耗不比提取铝的低。镁还有 21 世纪绿色金属的美称，用途会越来越广，大有用武之地。

镁还有具有许许多多优秀的化学性能和冶炼性质，因此它在各种非结构应用中也有着广泛的使用，扮演着重要的角色。

镁是一种非常活泼的金属，尚未在自然界中发现有纯净的镁存在，但它是自然界分布很广的重要有色金属，属二价碱土金属，约占地壳总质量的 2.45%，可见镁资源的丰富，使它成为第八种丰富的化学元素和第六种丰富的金属元素。镁是地壳中储量多的第三种结构金属，仅次于铝和铁。

镁现身人间已有 206 个年头，1808 年英国化学家戴维（Humphry Davy）找到了镁，宣布镁的诞生。那一年，他确定一种白色的氧化物是一种从未发现的新的金属的化合物，那就是氟化镁。他在实验室使用钾蒸汽通过热的氧化镁，并用汞提取被还原的镁，获得镁汞齐，他还用汞作阴极电解了硫酸镁，也制得了一种汞齐形式的镁，这是人们首次制得金属镁，他所用的氧化镁产自希腊的 Mognesia（马格尼西亚）州，于是将这种新发现的命名为 Magnesia，以后根据元素的拉丁文统一命名法改为拉丁文 Magnesium，中国则根据 ma 的谐音给它取了个悦耳动听的名字“镁”。不过戴维制得的镁不是相当纯净的，肯定含有一定量的种种杂质。

20 年后的法国科学家比西（A.A.B.Bussy）于 1928 年用钾还原熔融氯化镁制得镁。1833 年，当时的英国大化学家法拉第（M.Faraday）又用电解熔融氯化镁法制得少量的镁，但

在当时镁仍是实验室的奇珍异宝，比黄金贵不知多少倍。1852年德国化学家本生（Robeet Bunsen）在世界上建立了第一座用于电解无水氯化镁的电解槽（池）。1886年德国格里诗姆-伊利可创公司（Griesheim Elektron）在斯塔斯福特（Stassfurt）建成了世界首家商业化生产的镁厂，采用由菲希尔（Fisher）和格利特奇尔（Greatzel）发明的本生电解槽，以从光卤石矿中提取钾时副产物氯化镁盐卤为原料。后来，该厂迁到德国的比特费德（Bitterfeid），其员工皮斯托（Pistor）和莫斯舍尔（Moschel）发明一种高效连续生产无水氯化镁的新工艺，镁的生产成本因而一路下滑。

1860年，英国人马瑟（Johnson Matthey）与曼彻斯特（Coin Mna-Chester)开始用用类似的工艺制取镁。1896年，英国切米斯克-法布里克格里舍-伊利可创（Chemische-Fabrik Griesheim-Elektron）公司和铝镁法布里克公司联合收购电解制镁工艺，直到1914~1915年，它仍是全球制取镁的最主要的生产企业。1916年美国道屋（DOW）化学公司建立起了自己的第一家电解氯化镁生产镁的世界最大工厂，从此道屋公司执世界镁生产牛耳。

在此需指出，许多人在镁之前冠以“金属”二字，笔者建议中国不要用金属镁一词，因为“镁”带有金字旁，就说明它是一种金属，这是汉字的绝妙之处。但在翻成英文时又应说成“Metal Magnesium”，这是他们的习惯，同时从

“Magnesium”也看不出来它是金属还是非金属，因而在前面加 metal 顺理成章。

2.2 2、镁在哪儿

镁是一种化学性能很活泼的金属，仅以化合物的形式存在。镁在哪儿呢？镁在矿石中，主要矿石有：白云石、菱镁矿、水镁石、光卤石、橄榄石、蛇纹石等五六十种矿石中；镁在地下卤水和海水、盐湖卤水中的含量也极为丰富，难以估算；盐矿中也有大量的镁。

含镁矿石

含镁的化合物种类繁多，主要有：碳酸盐类如菱镁矿MgCo3、白云石MgCo3·CaCo3，硅酸盐类如橄榄石(MgFe)2·SiO2、滑石3MgO·4SiO2·2H2O、蛇纹石3MgO·2SiO2·2H2O，硫酸盐类如硫酸镁石MgSo4·H2O，泻利盐MgSo4·7H2O、钾镁矾石MgSo4·KCl·6H2O、无水钾镁矾2MgSo4·K2So4，氯化物盐类如水氯镁石MgCl2·6H2O，光卤石MgCl2·KCl·6H2O等等。各种主要镁矿的镁含量及分布见下表。

矿物	分子式	含镁量	主要分布国家
硅酸镁			
蛇纹石	$3MgO·2SiO_2·2H_2O$	26.3	俄罗斯、加拿大
橄榄石	$(MgFe)_2·SiO_4$	34.6	意大利、挪威
白云石	$MgO·4SiO_2·2H_2O$	19.2	美国、西班牙
碳酸镁			
菱镁矿	$MgCo_3$	28.8	中国、印度、美国、奥地利、巴西
白云石	$MgCo_3·CaCo_3$	13.2	中国、俄罗斯、美国、日本
氯化镁			
水氯镁石	$MgCl_2·6H_2O$	12.0	中国、俄罗斯、美国
	$MgCl_2·KCl·6H_2O$	8.8	西班牙
硫酸镁			
硫酸镁石	$MgSo_4·H_2O$	17.6	
钾镁钒石	$MgSo_4·KCl·6H_2O$	9.8	俄罗斯、中国、美国
杂卤石	$MgSo_4·K_2So_4·2CaSo_4·2H_2O$	4.0	德国
无水钾镁钒	$2MgSo_4·K_2So_4$	11.7	
白的镁矿	$MgSo_4·Na_2So_4·4H_2O$	7.0	中国

截至2013年，中国主要的菱镁矿产地约28处，矿石储量约35亿吨，全国总量约90亿吨。其特点：集中度高，辽宁大石桥地区约占总量的52.5%，山东占10.6%左右；大型矿数量多，储量大，10个大型的储量占全国总量的92.7%；品质好、杂质少，MgO含量46%~47.26%，一级品（MgO>46%）以上的矿石量占全国总储量的13.8%左右。

中国民和镁厂曾用的白云石的成分及矿床结构：

氧化镁（MgO），W%　　≥19

二氧化硅（SiO2），W%　　≤3

氧化钠（Na2O）+氧化钾（K2O），W%　　≤0.3

可采厚度，m　　≥4

夹石剔除厚度，m　　≥2

剥离比　　＜1

菱镁矿（美国一矿床）的成分及结构：

氧化镁（MgO），W%　42~46

二氧化硅（SiO2），W%　≤1.8

轻烧镁，W%　86~88

氧化钙（CaO），W%　≤1.8

可采厚度，m　2~4

夹石剔除厚度，m　2

剥离比　＜1

二氧化硅、氧化钙、氧化钾都算有害杂质。

海水与盐湖卤水等中的镁

海水、盐湖卤水、地下卤水等中也含有大量镁，都是提取镁的上乘原料。海水是取之不尽，用之不竭的镁资源。海水约含0.13%Mg，我们可以粗略地计算一下，世界海洋的海水储量约13.7×108（亿）km3，其中含0.13%Mg，即约有镁18P(1015)t，如果以1×108t/a的速率从海水中提取镁，1百万年后，海水中镁的含量仅会降至0.12%，即减小0.01个百分点。

盐湖卤水中也含取之不尽的镁，如约旦与以色列、巴勒斯坦之间的死海，中国青海省柴达木盆地的盐湖群的面积5856km2，至2012年探明的MgCl2储量达48.8×108吨，硫酸镁16.5×108吨。

2.3 3、镁的物理化学性能

镁的化学性能活泼，固态镁在常温潮湿大气中很容易被氧化，熔融镁会在空气中强烈的燃烧，冒出浓浓白烟。300℃时，镁开始与氮反应，生成氮化镁（MgN2）。镁不溶于碱性溶液，却会溶于各种有机酸与无机酸，但说来也奇怪却不溶于氟氢酸与铬酸。

镁的一些常见物理化学性质如下：

原子序数　12

原子价　2

相对原子质量　24.3050

原子体积，cm3/mol　14.0

原子直径，A°　3.20

泊松比　0.33

室温密度，g/cm3　1.738

熔点密度，g/cm3　1.584

电阻温度系数（273K~373K）　3.9×10-3

电阻率，nΩ·m　47

热导率，W/（m·k）　153.6556

273K 时的电导率，×106/（Ω·m）　23

再结晶温度，K　423

熔点，K　923±1

单晶体的平均线膨胀系数（288~308K）：

沿 a 轴，×10-6/K　27.1

沿 c 轴，×10-6/K　24.3

熔化潜热，KJ/kg　360~377

954K 时的表面张力，N/m　0.563

沸点，K　1380±3

汽化潜热，KJ/kg　5150~5400

升华热，KJ/kg　6113~6238

燃烧热，KJ/kg　24900~25200

镁蒸气比热容，KJ/(kg·k)　0.8709

氧化镁(MgO)生成热，KJ/mol 0.6105

凝固时体积收缩率，% 3.97~4.2

磁化率，×10-3mks　6.27~6.32

固态镁的传声速度，m/s　4800

标准电极电位：

氢电极，V　-1.55

甘汞电极，V　-1.83

对光的反射率，%：

λ ＝0.500μ m　72

λ ＝1.000μ m　74

λ ＝3.000μ m　80

λ ＝9.000μ m　93

收缩率，%

固－液　4.2

熔点至室温　5

在常用的金属（银、铝、铜、铅、锌、锡、铁、镁、钛、金）中，镁条、镁片、镁块等在常温下一遇明火，就会猛烈燃烧，发出眩目的强烈白光，同时发出大量白烟，可是其他的常用金属都不会燃烧，即使把它们放到火里也燃烧。不过，金属粉末是会燃烧与爆炸的。

在日常生活与生产中一旦有镁着火，绝不可用常规的灭火设施与手段去熄灭。水、二氧化碳、泡沫、其他液体等都能与燃烧着的镁发生激烈的化学反应，不但不能灭火，还能助长火势，甚致引发爆炸。因为镁的还原性极强，能与沸水反应释放大量氢，镁燃烧时会发出耀眼眩目的白光，场面十分吓人。镁能与二氧化碳发生燃烧反应，可与氮反应，生成MgN2。因此，扑灭镁火只能用LD类灭火器、干燥的细砂或铁屑，以隔绝空气。前两种的灭火原理，是断绝空气，将火闷熄，铁屑的作用是能吸收大量的热，使温度降到镁的燃点以下。LD灭火器是利用氯化钠基粉末或经过钝化处理的石墨粉来隔绝空气，以熄灭燃烧着的火。

2.4 4、说说镁的晶体结构

金属材料的许多性能与其内部原子的排列方式即晶体结构息息相关。例如，面心立方晶格的铜、铝的塑性比体心立方晶格的铁、钨的高，而密排（集）

六方晶格的镁、铍的塑性却很差。同时，热处理过程中的相变和原子扩散也与晶体结构有关。因此，了解镁的晶体结构，对于掌握其性能变化的实质，对进一步改善和发展镁和镁合金材料都有重要意义。

在已发现的 106 种元素中，金属元素约占 4/5，镁是其中之一，而且它是常用金属元素之一，它的电子轨道分布 1S22S22P63S2，即其最外层电子轨道上有 2 个电子，它们和原子核的结合力较弱，很容易脱离原子核的束缚变成自由电子，因此镁在化学反应中易失去这 2 个电子，而变成正 2 价的离子。正是由于镁原子结构的这一特点，决定了镁原子在化学反应中的行为和原子间的结合方式。镁有三种同位数：78.99%24Mg，10.00%25Mg，11.01%26Mg。

当大量镁原子聚合在一起构成镁晶体时，绝大部分镁原子都失去其价电子而成为正离子，正离子按一定几何形式有规律地排列起来，且分别以一定平衡位置为中心作三维高频振动，而脱离镁原子核束缚的价电子，为整个镁离子所共有，在各离子之间自由运动，形成所谓“电子气”（“电子云”）。但大多数自由电子在其瞬间也可能如某些正离子结合成为中性原子。因此，在际的固态镁中，不是所有的镁原子都变成正离子，而是绝大多数处于正离子状态。

镁晶体就是依靠各正离子与“电子气”间的相互引力牢固地结合起来，而离子与离子之间及电子与电子间的斥力与这种引力相平衡，使镁处于稳定的平衡状态。这种金属原子依靠其正离子与电子气之间的相互作用而结合的方式称为金属键。镁的许多特性诸如良好的导电性及正的电阻温度系数、相当好的导热性、较好的热塑性、尚可的冷塑性等等，都可用金属键理论得到圆满的解释。

密排六方晶格决定镁的塑性较低

大家知道，自然界的固态物质，虽然外形各异，种类繁多，但都是由粒子（原子、离子、分子、原子基因）堆积而成的。根据内部粒子堆积情况可将固态物质分为晶体和非晶体。晶体就是内部粒子呈现则排列的物质，非晶体中粒子排列不规则。除少数固态物质如玻离、松香、硬橡胶等外，绝大多数固态无机物都是晶体。

由于晶体内部粒子呈规则排列，所以晶体一般有规则的外形，若晶体形成条件不具备，其外形也可能变得不规则；晶体具有各向异性，即在晶体的不同方向上具有不同的物理和化学性能；晶体有固定的熔点，如铁的熔点为 1538℃，铜的熔点为 1084.5℃，铝的熔点为 660.37℃，镁的熔点为 650℃。晶体与非晶体虽有这些根本区别，但在一定条件下是可以互相转化的，例如液态镁在极高的冷却速度下凝固可以成为非晶态的，具有很高的强度性能与韧性。

为了研究晶体结构，在结晶学上通常取晶胞角上某一结点作为原点，沿其三条棱边作为三个坐标轴 X、Y、Z，称为晶轴，而且规定在坐标原点的前、右、上方为轴的正方向，反之为负方向，并常以晶胞的棱边长度 a、b、c 和棱边夹角α 、β 、γ 等 6 个参数表示晶胞的几何形状。a、b、c 称为晶格常数，单位为 A°（1A°＝10－10m），而α 、β 、γ 称为晶轴夹间，单位为度。

金属中常见的晶体结构为体心立方、面心立方和密排六方。具有面心立方晶格的金属有γ －Fe、Al、Cu、Ag、Au、Pb、Ni 等，具有密排六方晶格的金属有 Mg、Zn、Cd、Be、α -Ti、α -Co 等。大家知道，单晶体的塑性变形方面只有滑移和孪生，它们都是剪切应变，即在剪应力作用下晶体的一部分相

对于另一部分沿着特定的晶面和晶向发生平移。

面心立方晶格金属有 4 个不同取向的原子密排面，每个面上有 3 个密排方向，因此有 12 个晶体学等价的滑移系统，塑性良好，工业纯铝及大多数变形铝合金的道次冷加工率可高达 50%以上。可是镁及镁合金为密排六方晶格，在 225℃以下，只有 3 个滑移系，故塑性差，冷轧总加工率只不过 20%，热轧时塑性可高得多，因为滑移系会增加，这就是镁及镁合金为什么应于在线加热状态下实现可塑轧制。镁的塑性低是“天生”的，决定于晶体结构。

2.5 5、简说原镁提取工艺路线图

1913 年或者说第一次世界大战（1914~1918 年）以前，全世界只有欧洲的英国、法国、德国等生产少量的镁，当时价格高得出奇，比铜及铝的高得多，约 11 美元/kg，2014 年 4 月份欧洲鹿特丹仓库平均价为 2.75 美元/kg。1920 年美国铝业公司（Alcoa）收购了美国制镁股份有限公司，并获得了用氧化镁电解槽法提取镁的工艺，但普遍采用的工艺仍是电解氯化镁熔体法，道屋公司炼镁厂于 1916 年投产，是美国全球最大的镁业公司，同时直到 1939 年都是美国惟一的制镁企业。

1930 年德国法本（I.G,Farben）公司发明竖炉制备无氯化镁新工艺。1939~1944 年，热轧镁技术取得长足进展：意大利阿马蒂（Amati）和拉维利（Raveli）发明了氧化镁碳热还原提镁法；1941 年加拿大科学家皮江（L.M.Pidgeon）等创造了以硅铁（Si>75%）粉在还原罐内提镁新工艺，称为皮江法，此法在炼镁工业史上有着里程碑意义，在各国炼镁产业都得到不同程度应用与推广，至今仍在应用。1947 年以后

汉斯吉格法被淘汰。20 世纪 50 年代初，法国普基（Pechney）电冶公司发明了一种新的热法提镁技术，以硅铁或铝作为还原剂，在大型内热炉中还原白云石半连续制取镁的新技术，该工艺被称为马内塞姆电热法（Magnetherm），实际上它与皮江法有许多相似之处。此法在此期间得到发展与不断完善，工业发达国家生产的原镁均有一半是该法的产物。自 1970 年初以后，马内塞姆炼镁法在法国、美国、前南斯拉夫和巴西等国得到应用与推广，它与皮江法不同之处是：产生的溶渣可在不破坏真空状态的条件下被抽出，炉的内部以电加热，并用氧化铝作熔剂以降低炉渣熔点，每批次炉料量可达 11t。

由于镁及镁合金具有一系列优点，以及技术的不断发展与创新，应用范围日益扩大，镁工业得到快速发展，产量在不断上升，全世界的原镁产量由 1910 年的约 10t 上升到 2013 年的 923kt，在 113 年中上升 92299 倍，复合增长率 2%。同其他有色金属产量的增长情况一样，镁产量的增长也不是一路平稳的，1915 年的产量上升到 350t，由于第一次世界大战军工需要增加，1917 年的产量上升到 3000t，随着大战于 1918 年结束，镁产业急剧衰退，1920 年的产量仅 330t。在第二次世界大战的强烈刺激下，1939 年全球产量 32kt，1943 年达到峰值 235kt，4 年的复合增长率 65%，停战后镁产量又大幅度下降，1946 年的总产量 25kt，美国的产量只不过 4834t。

进入新世纪后，随着镁在各个领域应用的推广，镁的产

量在平稳地上升，特别是中国产量的大幅度增加，拉动全球镁产量由2000年的488kt升到2013年的923kt，复合增长率5%。如果2025年以前，镁的应用特别是板材的应用不取得突破性进展的话，今后镁产量在10多年内的复合增长率估计不会超过6%。

中国原镁工业的发展

1957~1958年抚顺铝厂镁车间建成，1957年生产原镁2t，1958年产量达到2001t，一直到1969年中国仅辽宁省抚顺铝厂产镁，1970年福建开始产镁，1975年浙江加入产镁行列，1992年全国原镁产量首次突破10kt，达到10546t，可产镁的省区达12个，其中青海省的产量3241t，超过辽宁省的成为全国第一。

1995年的产量93593t，离100kt产量仅咫尺之遥，河南省产量29986t，占全国总产量的32%，跃居首位。由2003年的354kt到2013年的768.3kt的复合增长率为8.06%，这么长的时间内有如此大的复合增长率在世界镁工业发展史上是绝无仅有的。1998年中国镁产量123kt，超过美国的100.6kt，成国全球第一，这种态势恐怕仍会延续。

2004~2013年中国的原镁产量如下：

年度	产量，kt
2004	450.0
2005	467.0

2006	525.6
2007	624.7
2008	630.7
2009	501.8
2010	653.8
2011	660.6
2012	698.3
2013	768.3

2013 年中国镁产量 768.3kt，占世界总产量 923kt 的 82.34%。

2.6 6、无水氯化镁的制取

由于镁的资源不同，提取镁的工艺也有差别，目前用的方法大体可分为氯化熔盐电解法和热还原法。在 2013 年全球生产的 923kt 原镁中，国外生产 154.7kt，其中 80%左右是用电解法生产的，热还原法生产的占 20%左右；而在国内生产的 768.3kt 镁中，电解法生产的几乎为零，因为民和镁厂与抚顺铝业有限公司的电解生产线早已停产，而青海盐湖的 100kt/a 电解镁项目要到 2014 年末或 2015 年初期才能陆续投产，因此 2013 年全世界生产的镁中仅 3.35%是用电解法提取的。在今后一段相当长的时间内，电解镁的产量虽然会有所增加，但是所占的比例不会有较大变化。

生产镁的能耗

按理论计算，用不同的原料与工艺提取单位质量原镁的能耗比提炼其他金属的高，但是由于镁的密度小，所以生产单位体积原镁的能耗却比其他金属如铝与锌的低，用电解法提取镁全过程能耗为（8.3~11.2）×107J，热还原法的为（11.5~12.6）×107J。近 30 年来，炼镁技术取得长足发展，特别是中国在热还原法炼镁方面推出了一些重大成就，在以钾肥生产中排放的废液氯化镁为原料生产镁方面也取得了突破性的成就。

在镁电解槽结构和容量方面也有着非凡的发展，如无隔板电解槽的容量大大扩大了，能耗下降不菲。半连续真空硅热还原炉的容量有相当大的提升，并采用计算机控制冶炼过程与各项工艺参数，单台设备的产量一般都超过 8t/d，还有更大的。

由于炼镁技术的发展，镁产量的大幅度上升，尤其是中国成为世界镁业王国后，生产能力、产量和出口量都节节上升，2013 年热法炼镁生产能力 1540.5kt/a、产量 768.3kt、出口各种镁产品 411.1kt(其中原镁 212.1kt、镁合金 102.0kt、镁粉 85.4kt、其他 11.8kt），镁的价格也在年年下降，镁铝价格比（国内现货平均价）已从 2003 年的 1.8 下降 2013 年的 1.224（根据北京安泰科信息开发有限公司的数据）。在当前国内外经济状况下，镁的价格很难有大的起色。

氯化镁的制取

不管哪种电解制镁法，其原理都是电解熔融氯化镁制取镁与氯（MgCl2=Mg+Cl2），不同之处仅在于氯化镁的生产工艺有所区别。按使用原料不同氯化镁的生产方法当前主要有三种。

1.以菱镁矿或氧化镁（轻烧的菱镁矿或氢氧化镁）为原料，以碳为还原剂，经混合、制团、干燥或焦化后，加入电炉，通入氯，于900℃~1100℃反应：

MgCO3→MgO+CO2↑

3MgO+2C+3Cl2→3MgCl2+CO↑+CO2↑

由于氯化镁的氯化是放热反应，所以氯化时仅需补充不多的电能，便可以维持反应不停地进行。氯化产物为无水氯化镁熔体。

2.以海水、盐湖卤水或钾肥制造中排放废液为原料，经净化、浓缩、制粒（或直接利用卤水喷雾）、脱木制得无水氯化镁。用卤水制取氯化镁的最大难点是六水氯化镁在脱除最后两个结晶水的同时由于发生水解会生成MgO和Mg(OH)Cl，它们都是电解过程的有害杂质。

工业生产中用两步脱水法来去除它们：首先用约200℃的热气流使MgCl2·6H2O脱至MgCl2·H2O或MgCl2·2H2O；第二步是把经过脱水的低水氯化镁再在HCl气氛中彻底脱水，得到粒状无水氯化镁，也可以将低水氯化镁进行熔融氯化脱

水，使水解产生的 MgO 转化为 MgCl2 而获得氯化镁熔体。海水与煅烧白云反应生成氯化镁溶液，最后经热气流获得 MgCl2·1.25H2O 或 MgCl2·1.5H2O。

3.以光卤石（MgCl2·6H2O）为原料，先在沸腾炉或回转窑中于 400℃~550℃脱水，制得含 5%~8%水的光卤石，然后于电炉内熔化或在氯化器中熔融氯化，制成无水光卤石熔体。

2.7 7、说说镁电解那些事（一）

1883 年英国科学家法拉第（M.Faraday）首次通过还原氯化镁制得纯镁，1852 年德国化学家本生（R.Bunsen）在世界上建成第一台电解无水氯化镁的电解槽，1886 年德国格里舍姆－伊利可创公司（Griesheim-Elektron）在施塔斯富特（Stassfurt)建成世界首家商业镁厂,采用菲希尔(Fischer）和格里特泽尔（Greatzel）发明的本生电解槽（池），以从光卤石提取钾时的副产物卤水（氯化镁盐卤）为原料。后来，该厂迁到德国的比特菲尔德（Bitterfeid），其员工皮斯托（Pistor）和莫尔切尔（Moschel）发明了连续高效制造无水氯化镁新工艺。1860 年，马瑟（J.Mathey）和曼切斯特（C.Manchester）开始用类似的电解法生产镁。1886 年，切米斯奇－法布利克（Chemische-Fabrik）和格里舍姆－伊利可创公司与法布利克(Fabrik)公司联合收购电解制镁工艺，直到 1915 年，它仍是全世界主要的制镁企业之一。1916 年

美国道屋（DOW）化学公司的电解制镁厂投产，它是当时也是以后一段相当长的时间内全世界最大的电解镁厂。

自 1886 年熔盐电解法工业化生产镁以来，电解制镁技术得到不断发展。特别进入上世纪 70 年代后，无水氯化镁生产工艺取得了突破性成就，电解槽大型化在加速进行着，结构也在不断完善，有些已实现了密闭与计算机控制。电解槽电流强度已由最初的 300A，发展到 100~300kA，直流电耗也由初期的 35000~4000kWh/（t 镁），下降到当前 11900kWh/（t 镁）。

电解制镁基本原理

电解制镁采用的电解质为多组分氯盐，向氯化镁电解质中添其他组分是为了降低熔点和黏度，提高熔体电导率和降低氯化镁的挥发和水解。电解时两极发生的反应为：

阴极 $Mg^{2+}+2e \rightarrow Mg$

阳极 $2Cl \rightarrow Cl_2+2e$

镁在阴极生成，液态镁的密度比电解质的低，浮于表面，阳极产生的氯气则通过氯气罩排出。接近熔点 650℃时，固态镁的密度约 1650kg/m3，液态镁的约 1580kg/m3。电解法制镁的工艺不下七八种，基本原理都相同，最有代表性有 3 种，按槽型可分为：道屋型、埃奇法本型（I.G.Farben），无隔板型。后者又可分为加铝式（Alcan）、苏联式与挪威式等多种。

道屋电解法

这种镁电解槽或工艺是美国道屋化学工业公司于 1916 年发明的，并在密执安州（Michigan）米德兰市（Mialand）的工厂投产。采用海水与锻烧白云石制备 MgCl2 泥浆，然后与盐酸反应制成 MgCl2 溶液，再经浓缩与干燥处理制成 MgCl2·1.5H2O，可将它直接加入电解槽制镁，副产物氯可回收，循环使用。

1941 年道屋公司又在得克萨斯州海滨城市弗里波特（Freeport）市建成一个世界上最大的海水电解镁厂，最高产量达 120kt/a。海水由输水槽引来，滤过淤泥与杂物后流入沉淀池，与石灰混合，过滤后与 20%盐酸反应生成 MgCl2，经蒸发得到固态 MgCl2，再经干燥除水处理得到低水合的氯化镁（MgCl2·1.5H2O 或 MgCl2·1.25H2O），成为电解制镁的原料。电解槽为铸钢的，没有内衬，钢阴极与石墨阳极之间没有隔板，外部用天然气加热，典型电解质组成：60%NaCl、20%CaCl2、20%MgCl2，电解温度 700~720℃，液态镁从槽上部的集镁容器流出，生产 1t 镁约可获得约 2t 氯，电解后的废电解质含有相当多的碳酸钾，是生产钾肥的好原料。

挪威海德鲁公司（Norsk Hydro）是欧洲主要的镁生产者，通过在干燥的氯化氢气中加热 MgCl2·6H2O 实现脱水，苏联及俄罗斯则主要往电解池中加入无水光卤石脱水。澳大利亚镁业公司（AMC）开发的生产无水氯化镁的工艺为：向氯化镁

溶液中加入乙二醇（Gylcol，HOCH2CH2OH），蒸馏脱水，然后借氨喷雾生成六氨化氯化镁，其反应式如下。六氨化氯化镁焙烧后可得无水氯化镁，氨与溶剂可循环使用。

MgC12·6H2O+3（HOCH2CH2OH）→MgC12·3（HOCH2CH2OH）+6H2O

MgC12·3（HOCH2CH2OH）+6NH3→MgC12·6NH3+3（HOCH2CH2OH）

此种电解法称为 AMC 电解制镁法，简称 AMC 法。

2.8 8、说说镁电解那些事（二）

苏联的镁电解厂建在乌拉尔地区的索利卡姆斯克（Solikamsk），以光卤石为原料制取无水氯化镁，采用两阶段脱水法。电解质成分（W%）：50.0~51.5MgCl2、39.0~44.0Kcl、7.0NaCl、Mgo≤0.8、0.02FeO、0.02~0.035SiO2、0.001TiO2、C≤0.08、0.01~0.05H2O、0.02~0.05SO4。苏联式电解槽是一种无隔板型的。

埃奇电解槽

1925 年埃奇（I.G.）型电解槽及电解工艺是德国 I.G，法本工业公司设计与创建的，并率先进行商业生产，上世纪 30 年代挪威海德鲁公司（Norsk Hydro）也曾用此法生产镁。按该工艺，首行将氢氧化镁与焦炭混匀，置于竖炉内煅烧，然后进行氯化处理，制得无水氯化镁，再在电解槽内电解制镁。

埃奇电解槽由四五个石墨电极（阳极）均匀地排布于一个长方形的、以耐火材料为内衬的钢壳内，每个阳极以夹层式置于两片钢制阳极中间。耐火材料隔板浸入电解质内，将阳极产物 Cl2 和阴极产物一分为二，阻止它们间的反应。电解质的密度比镁的大。电解温度由电阻加热控制。埃奇电解槽的主要不足处是，由于电极间距离被耐火材料加大，使电流密度下降；耐火材料受到电解质侵蚀和热循环冲击，使其寿命缩短，因而埃奇槽的使用期限不长。

埃奇槽的电解质有两种，以无水氯化镁为原料时：35%~40%氯化钙，4%~7%氯化钾，40%~48%氯化钠，8%~15%氯化镁，电解温度 680~720℃。

埃奇槽的电解质有两种，以无水氯化镁为原料时：35%~40%氯化钙，4%~7%氯化钾，40%~48%氯化钠，8%~15%氯化镁，电解温度 680~720℃；以无水光卤石为原料时，9%~14%氯化镁，66%~72%氯化钾，18%~20%氯化钠，电解温度 690~720℃。

埃奇电解在大型化方面取得了跨越式的成就，早在上世纪 90 年代后期容量 250kA 的槽就已面世，电流效率有较大提高。

加铝型电解槽

20 世纪 60 年代以来，无隔板镁电解槽及电解工艺取得了较大进展。这类槽内的阴、阳极之间无隔板，但有隔墙把

槽膛分成两部分：电解室和集镁室。阴极析出的镁汇集于集镁室。这类电解槽具有诸多优点：单位槽底产量高，电耗低，密闭性好，氯的浓度高，易实现大型化与自动化控制，等等。因而得到了越发广泛的应用。这类槽型的典型代表有加铝式的、马格诺拉（Maghola）式、埃奇式的。

马格诺拉工艺采用浓盐酸浸泡石棉矿尾渣制备氯化镁溶液，通过调节 PH 和离子交换技术生产浓缩的超高纯氯化镁溶液，然后进行脱水和电解。加铝（Alcan）则利用石棉矿尾渣中的硅酸镁生产镁，首先用盐酸浸泡蛇纹石（MgO40%，SiO238%）获得 MgCl2 溶液，再与 KCl 反应合成光卤石（KCl·MgCl2·6H2O），经二次脱水后即成为光卤石熔体，装入 200kA 无隔板电解槽内进行电解，直流电耗 14000kWh/t 镁。

各种电解槽的工艺参数及电解质的组成见表 1 及表 2。

表 1

参数	道屋槽	埃奇槽	埃奇 无隔板槽	加铝槽	5 复极加铝槽
温度,℃	700	700	700	670	654
电流强度,KA	100	60	150	100	110
电压,V	6	6.5	5	5.5	17
极距,CM	3.8	8	6	5	1
电流效率,%	75~80	80~85	80~85	90	70~75
电耗,kWh/kg	17	17.5	13.5	13.5	10
月产量/t	25	16	40	29	130

表 2

槽型		组成,%				初晶温度 ℃	700℃时电导率 Ω⁻¹CM⁻¹	700℃时密度 g/cm³	800℃时分解电压 V
		$MgCl_2$	NaCl	KCl	$CaCl_2$				
隔板型无隔板型	道屋槽	25	45~60	0	15~25	650	2.23	1.66	2.70~2.75
	埃奇槽	8~16	35~45	0~10	30~40	575~600	2.00	1.78	
	加铝槽	5~25	50~60	0	25~42	620~640	2.22	1.75	
	埃奇槽	8~18	30~35	40~50	3~6	615~625	2.15	1.63	
	马格诺拉槽	13~20	50~60	0	20~30	620~640	2.22	1.75	
物理性能		100	–	–	–	712	1.00	1.69	2.51
		–	100	–	–	801	3.33	1.59	3.22
		–	–	100	–	776	1.98	1.57	3.39
		–	–	–	100	772	1.66	2.11	3.23

2.9 9、中国的镁电解工业

在前苏联的援助下，上世纪 1955 年，中国在辽宁抚顺铝厂建一个镁电解车间，1957 生产电解原镁 2t，开中国镁工业的先河，1958 年原镁产量 2001t，直到 1969 年中国仅此一个生产镁的企业。1980 年抚顺铝厂的镁产量达到峰值 3695t。1985 年中国在青海省东部民和县建一个镁电解厂——民和镁厂，1987 年投产，生产能力 4000t/a。改革开放以来，由于民营热还原法炼镁企业的大量涌现，其生产的原镁有很强的竞争力，国有电解镁企业产品逐渐丧失市场竞争力，败下阵来。1998 年 8 月抚顺铝厂镁车间宣布停产；民和镁厂在苦苦挣扎若干年后，实在支撑不下去了，不得不于 2003 年 3 月关门，员工挥泪告别电解生产线，从此中国大地上再也没有一个生产原镁的电解企业了。

日本在侵占中国东北期间在抚顺铝厂处建设了一个镁车间，日本投降后遭到彻底破坏，新中国建的第一个镁项目就是在此厂房内，用干团炉料氯化生产氯化镁熔体再电解生产镁。民和镁厂采用菱镁矿颗粒氯化-电解法。在 20 世纪 90 年代中国还有锦州镁厂、光华化学公司、贵州汞矿镁厂生产少量的电解镁，它们都在新世纪降临之前被市场淘汰，光华化学工业公司 1996 年 7 月转产。

虽然中国于 2003 年 4 月以前关闭了所有的镁电解生产线，但科技工作者仍在孜孜不倦地探讨镁电解工艺，在研发无水氯化镁的低成本生产工艺，并取了丰硕的成果。

无水氯化镁制取工艺

镁电解工业经济技术指标的高低决定于无水氯化镁的品质及其制造成本，只要有了低成本的优质无水氯化镁，电解制镁法就有灿烂的前程。当前中国在利用盐湖水氯镁石（MgCl2·6H2O）脱水制备无水氯化镁方面有两种工艺，将在青海盐湖 100kt/a 镁项目中获得不同程度应用，该项目可于 2014 年后期起分期试生产与投产。

1.中科院盐湖所工艺

中国科学院盐湖研究所以柴达木盐制的 MgCl2·6H2O 颗粒（直径 1~2mm）为原料，经烘干（95℃~117℃彻底脱水，获得水分极低的无水氯化镁颗料，粒径 1~2mm。

2.华东理工大学工艺

华东理工大学建了一条生产能力为 2000t/a 无水氯化镁中试生产线，原料为 MgCl2·6H2O，首先用乙二醇除水，其反应为

MgCl2·6H2O+3（HOCH2·CH2OH）=

MgCl2·3(HoCH2·CH2OH)+6H2O

向上述产物中通入 NH3，经反应生成 MgCl2·6NH3 晶粒与乙二醇水溶液，经离心分离可获得 MgCl2·6NH3，再经三段脱 NH3 处理，可得无水氯化镁，反应式如下：

MgCl2·6NH3 MgCl2·4NH3+2NH3↑

MgCl2·4NH3 MgCl2·2NH3+2NH3

MgCl2·2NH3 MgCl2·2NH3↑

上述两个单位生产的无水氯化镁的组成见下表：

上述两项研究的中试生产（MgCl2 生产线/500~2000t/a、电解槽 2000A）表明，取得了阶段性成果，华东理工大学的中试 MgCl2 的品质符合国家化工产品的要求，2007 年售价 7000 元/t，经济效益可观。研发工作仍在进行中。可在以下三种方案中获得应用：采用盐湖资源的综合利用方案，即利用盐湖水提取钾肥等排放的氯化镁卤水；利用卤水或菱镁矿电解工艺，氯化氢法脱水；镁钛联合方案，用氨光卤石法或氯化氢制取无水氯化镁。

工艺	无水氯化镁成分，w%					形态，粒径 mm	注
	$MgCl_2$	MgO	H_2O	SO_4^{2-}	B		
一次脱水，二次 HCl 混合彻底脱水	95~96	<0.2	0.6	0.05	0.007	粒状，1~2	中科院盐湖研究所
水氯镁石，乙二醇配合，$MgCl_2 \cdot 6NH_3$ 螯合结晶，NH_3 复盐制取 $MgCl_2$	99.4	0.2~0.3	0.3~0.4	-	-	细粉，0.174	华东理工大学

2.10 10、中国的菱镁矿资源

表(一)

国家	储量，$\times 10^8$t	占百分比，%
中国	36	26.7
朝鲜	33	24.4
独联体	28	20.7
新西兰	6	4.4
捷克	5	3.7

中国菱镁矿资源矿分布见下表

矿区	D 级以上储量，	资源总量，
辽宁	2800	3200
山东	290	350
新疆	36	38
河北	18	37
甘肃	31	34

中国主要菱镁矿的化学成分如下表所列(W%)

产地	MgO	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	灼减
辽宁海城特级矿	47.30	0.50	0.37	0.12	0.17	51.13
辽宁大石桥矿	45.80	1.14	0.50	0.47	1.90	48.87
	46.37	0.53	0.40	0.28	2.47	50.00
辽宁营口一级矿	47.14	0.33	0.33	0.11	1.13	50.97
甘肃西孚一级矿	46.43	0.42	0.55	0.18	0.88	51.24

菱镁矿、白云石是目前最有工业应用价值的热法炼镁资源，而水氯镁石（MgCl2 •6H2O）与光卤石（KCl •MgCl2 •6H2O）是含水的氯盐，必须完全脱水后成为无水 MgCl2 或无水光卤石（KCl • MgCl2）后才可用电解法提取镁，不在此介绍。此外，镁橄榄石与蛇纹石也都是提镁资源。

中国菱镁矿资源总量超 36 亿 t

菱镁矿是碳酸盐（MgCO3），按计算 Mgo 含量 47.82%，CO2 为 52.18%,矿物有结晶形的，也有无定形的，既可以作为热法提镁的矿物，也可以是电解法提镁的原料。结晶形菱镁矿为六方晶系，有玻璃光泽，而无定形矿则没有光泽，并有角质断口。菱镁矿外观色泽呈白色或浅黄色，电解用的菱镁矿品位应达到：45%~46%MgO，0.8%~1.0%CaO,0.5%~1.0%SiO2.晶形菱镁矿分布广，而无定形的隐晶菱镁矿的储量不大，SiO2 杂质含量偏高。菱镁矿密度 2.8~3.1g/cm3，硬度 3.4~4.5。

截止到 2011 年全世界探明的菱镁矿储量约 135 亿~108 亿吨，储量多的前 5 个国家为:（见表一）

其他有菱镁矿的国家：印度、奥地利、美国、加拿大、巴西、希腊、澳大利亚等。他们的总储量仅 27×108t，占总量的 20.1%。

截止 2011 年中国探明的菱镁矿资源总量约 36×108t，主要分布在辽宁、山东、新疆、河北、甘肃等省、区。中国菱镁矿相当集中，易开采，大多为露天开采，品位高，可用于炼镁的矿石成分（W%）应达到：MgO＞45，CaO＜1.5,R2O3＜1.5,H2O＜3。辽宁省海城与大石桥的菱镁矿是上乘的热法还原炼镁材料。提镁菱镁矿粒度 30~120mm。不管是中国还是在其他国家，主要用于烧制冶金业工用的耐火材料，其次

用于生产胶凝材料，第三大用途才是作为炼镁材料。2013 年，全世界用于生产电解镁的菱镁矿可能还不到 10kt，中国是用菱镁矿炼镁的主要国家，但其用量不多，估计约为 80kt，因为主要用白云石矿。

2.11 12、皮江外热炼镁法是主流

热还原法炼镁就是使氧化镁与还原剂在热条件下发生反应提取镁的过程：

MgO+X=Mg+XO

根据还原剂的不同，热还原法可分为硅热法、碳热法等等。直到目前，只有前者在工业上获得了广泛的应用。按所用装备及能源条件差别，硅热法又有三种不同的工艺：皮江（Pidgeon）外热法；波尔扎诺（Bolzano）法，采用电内加热；马内塞姆（Magnethem）熔渣导电半连续硅热法，简称马内塞姆法。硅热法又有内热法与外热法之分。

中国采用的全是外热皮江工艺，这是当今世界提镁工艺的主流，2013 年全世界生产的原镁有 85%是用此法提炼的，巴西是当今世界唯一采用电内热法生产原镁的国家。

基本原理与工艺

皮江法是 1941 年加拿大教授 L.M.皮江发明的一种硅热还原炼镁工艺，其还原反应为：

2（CaO·MgO）（固）+Si(Fe)（固）=2Mg（固）+2CaO·SiO2

固）+Fe(Si）固）

此法首先于 1941 年在加拿大哈雷镁厂（现名蒂明科公司，Timminco)获得应用，其工艺是：首先将煅烧白云石(20~30mm)、粒度小于 5mm 的硅铁粉、粒度小于 0.074mm 的萤石粉按一定比例装入混磨机，制成球团后装入还原罐。还原罐以单层或双层水平排列于还原炉内，罐外加热，罐内抽真空，以气体燃料，使还原炉内温度达到 1200℃，进行氧化镁还原反应，生成气态镁，进入外部冷凝系统，变成镁晶体即为粗镁，精炼后成为镁锭——商品镁。

还原炉内可装 20~40 只罐，虽然现在的还原时间可短至 8h，但仍须进行频繁的出渣操作，工作环境较差，不易实现机械化与自动化，但对能源要求宽松，可以使用多种气体燃料如天然气、焦炉煤气、发生炉煤气、半焦气，当然也可以使用电、煤、重油等。

主要装备简说

在皮江法工艺中，首先是煅烧白云石，煅烧的白云石可简称煅白，煅白品质不但对镁的产出率有影响，而且对粗镁的品质有影响，而煅白品质主要决定于煅烧设备。中国目前用的有回转窑和竖窑，回转窑生产能力大、机械化自动化程度高、维护操作简便，煅白合格率可达 100%、活度可达 30%以上，灼减小于 0.5%，品质稳定，不过基建投资比竖窑的大，操作与维护技术也有更高的要求。

硅铁与天然萤石用颚式破碎机粉碎，硅铁粒度应小于 25mm，萤石粉粒度小于 0.074mm。

硅铁或炉料细磨通常用Φ1.2m×4.5m 或Φ1.5m×3.6m 的球磨机。

在工业生产中炉料的制团多采用对辊立式压球机。还原罐在高温（1200~1250℃）、高真空（1~5N/m2）条件下工作，因此是用 ZG35Cr24Ni7SiNi 、HK-40 （25Cr • 20Ni ）、Hi（28Cr • 15-16Ni）等钢制造的，因为它们在 1250℃有高的抗氧化性、抗腐蚀性、有相当高的高温强度与综合力学性能、稳定的组织特性、良好的可焊性和加工成形性。

还原炉为矩形，用耐火材料砌筑，还原罐横向平放于炉内托罐砖上，还原炉可分为单侧单排、双排及双侧双排、单排等结构形式。以煤气为燃料的还原炉多为单侧双排罐，还原罐一般为Φ370mm 或Φ339mm，每台还原炉可装 19.20、27、30、35、42、54、61 或 63 只罐，燃气炉的优点：炉温易调，升温快，温差小，还原周期 8~10h（Φ339mm 罐），Φ370mm 罐的为 9~12h。

应精心选择抽真空系统，确保罐内真空度达到 1~5N/m2，早期都采用机械真空泵机组，现在除个别企业仍使用外，其他镁厂都已改用现代化的高效蒸汽喷射泵系统，这种泵主轴采用 5~6 级泵，预抽采用 4~5 级蒸汽喷射泵。这种真空系统不但有利于提高还原周期内的真空度，缩短还原周期，而且

可以提高设备利用率与镁产出率。中国多家镁企业采用 2SK-6 型水环泵作为预抽泵，除有能耗低与噪声小等优点外，还能在抽出一般性气体的同时抽出罐内的粉尘和水气。

提炼的粗镁总会有一些杂质的含量超出标准规定值，为了把它们的含量降到标准允许最大值以下，必须进行精炼。精炼在电加热的电阻炉中进行，它由炉壳、炉膛与坩埚组成。

精炼后的镁熔体由连铸机铸成锭块，连铸机有倾斜式的与水平式的，模数 60~136 个。

2.12 14、皮江法的技术经济指标

皮江法炼镁用的有白云石、硅铁、萤石。白云石为细晶体结构，其化学成分（W%）；19~21MgO、30~33CaO、＜0.5R2O3（Al2O3+Fe2O3）、＜0.5SiO2，＜0.05（K2O+Na2O），烧损率 46.5%~47.5%，CaO/MgO1.0~1.03（摩尔比），CaO/MgO=1.394（质量比）。还原剂为含 75%Si 的硅铁合金。添加剂为天然萤石粉或浮选的粉（0.074mm，即-200 目上），其 CaF2 含量为 94%~98%。

提炼镁时首先将白云石煅烧为煅白，破碎后与球磨硅铁粉、萤石粉按一定比例混合，装入球磨机磨成粉，然后经压球机制成球，装入还原炉内的还原罐中，在高温和真空条件下还原成镁蒸汽，在冷凝器结晶成粗镁，粗镁在精炼坩埚中与精炼熔剂混合精炼后，浇铸成锭，经表面处理与检验合格

后即成为商品镁锭。

皮江法的技术经济指标如下：

煅白

白云石在高温下煅烧产物称煅白，其品质（反应性）通常以白云石烧损率、煅白灼减量及水化活性度表示。白云石在煅烧过程中可以去除的物质（水、二氧化碳、有机物等）的质量分数称为烧损率，一般为 46.5%~47.5%。煅白的水化活性度称称活性度是指其中的 CaO 及 MgO 的吸水能力，通常为 28%~32%。灼减是指白云石的热分解程度，即煅白中残存的 CO2 和煅白吸收空气中 H2O 和 CO2 的量，一般＜0.5%。

煅烧炉的生产能力由其最大有效横截面面积决定，通常生产 1t 原镁需消耗 10.5~11.5t 白云石。

镁的还原

将煅白、硅铁、萤石粉按(%)比例(80~81)：(16.5~17.2)：(2~3) 混匀制球后装罐，混合粉粒度为-120 目≥85%。然后在高温和真空条件把煅白中的镁还原成结晶镁-粗镁，其原理为：

2MgO 固+Si 固+2CaO 固　　2Mg(气)+2CaO •SiO2 固

结晶镁的生产能力是指企业一年内能够生产的数量，它是由设计的配套设备能力和合理的运转率确定，可按下式计算：

结晶镁生产能力=还原炉数×2 班×320（t/d）

单罐日产量=（日产结晶镁/工作还原罐数）kg/只

通常，还原工序料镁比（消耗球团料与产出结晶镁之比）为（6.0~8.0）：1，是表征皮江炼镁法工艺水平的重要指标。

皮江法的真空度一般为 10N/m2 以下，温度 1200±10℃，周期 8~12h，吨镁硅铁消耗 1.04~1.1t。燃气消耗应说明所用能源种类（焦炉煤气、生产炉煤气、天然气、半焦煤气），单位为 m3/t。

镁的实收率是指实际获得的原镁含镁量与消耗白云石中含镁量的百分比，反映了白云石资源的利用程度。

生产的精镁（结晶镁）含有种种杂质，必须经过精炼才能达到符合国家标准的原生镁锭，按国家标准 GB/T3499-2011《原生镁锭》的规定所生产的原生镁锭共六个牌号：Mg9999、Mg9998、Mg9995A、Mg9995B、Mg9990、Mg9980，它们的化学成分见下表。

原生镁锭表面应平整清洁，不得有残留熔剂、夹渣、冷隔、飞边。氧化燃烧产物及其他影响使用的缺陷，但允许有修理痕迹。酸洗、水洗、干燥等防蚀处理，由供需方协商，不允许表面有残留酸，缩孔内不得有水。

原生镁锭在常温下化学性能稳定，可按常规方式运输，可用洁净集装箱或有防雨措施的车辆运输，装卸时防止产品淋湿，应贮存于干燥、清洁、通风、无腐蚀介质的仓库内。

2.13 15、聊聊镁的合金元素与杂质（1）

结构上应用的都是镁合金，因为纯镁的强度低。通过合金化，可使镁的强度性能得到很大提高，还可以改善工艺性能、化学性能等。根据合金化元素对二元镁合金力学性能的影响，通常把它们分为三类：可以同时提高强度和塑性的，Al、Zn、Ca、Ag、Ce、Ni、Cu、Th（提高由高到低），而改善塑性的顺序（由高至低）则为 Th、Ga、Zn、Ag、Ca、Al、Ni、Cu；提高塑性的作用大，但强化效果较小的元素有 Cd、Ti、Li；强化效果明显但使塑性下降的元素有 Sn、Pb、Bi、Sb。

铝 Al　可与镁形成的有限固溶体，是镁合金最常用的合金化元素，也是用量最大的，在镁合金用的合金化元素中，铝的用量几乎占 55%左右。在共晶温度时（710k），铝在镁中溶解度为 12.7%，在提高合金强度性能的同时，可拓宽合金的凝固区间，改善铸造性能。由于铝在镁中的固溶度随着温度的下降而显著减小，所以镁-铝合金可以进行热处理。镁合金中的最大铝含量一般为 10%，否则，合金的塑性会显著下降，应力腐蚀开裂倾向也加大。铝含量为 6%，强度与塑性可得到最佳的匹配。镁可与铝形成化合物 Al12Mg17。

银 Ag　在镁中的固溶度大，可达 15.5%。银与镁的原子

半径相差 11%，当 Ag 溶入 Mg 中后，形成间隙式固溶体使晶格发生大的畸变，有很强的固溶强化作用，银可以提高镁合金的高温强度和蠕变强度，但降低其抗腐蚀性能。含银的镁合金获得了商业应用。

铍 Be　镁及镁合金熔体易氧化，添加 0.001%Be~0.002%Be 能有效地降低镁合金熔体在熔炼铸造时的表面氧化，不过含量稍多时会使晶粒粗化，因此砂型铸件的铍含量应控制。

钙 Ca　向镁合金添加钙有不少优点：可以降低熔体和铸件热处理时的氧化；细化合金晶粒；提高合金蠕变强度；降低合金的微电池效应，从而可使阴极活性区缩小；少量钙（≤0.3%）可提高合金薄板的可轧制性能，若钙含量＞0.3%，则薄板在焊接时易开裂；含 2%Ca 的快速凝固 AZ91 合金的腐蚀速度只有 0.2mm/a，仅为不含钙合金的 1/4。不过含钙的镁合金也有一些不足之处：钙在水溶液中不稳定，在 PH 较高的溶液中会形成 Ca（OH）2；此外，含钙的镁合金在铸造时，铸件易粘模和热裂。

铜 Cu　铜是镁合金的一种杂质，变形镁合金的 Cu 含量应≤0.5%，铸造镁合金的 Cu 含量应≤0.20%或≤0.10%。铜对镁合金的抗蚀性有较大影响，若其含量＞0.5%，则抗蚀性显著下降，不过铜提高镁合金的高温强度。

铁 Fe　铁对镁及镁合金的抗蚀性有显著影响，是镁合

金应于控制的杂质元素，合金中的最大含量 0.005%。

锂 Li　锂是不常用的工业镁合金化元素，由于锂的密度小（0.534kg/t），所以 Mg-Li 合金的密度比纯镁的还低。锂可以显著提高镁合金的塑性变形能力，但却降低其强度性能与抗蚀性。锂在镁中的固溶度随着温度的下降而减少，有一定的固溶强化效果。锂增大镁熔体蒸发与燃烧的倾向，因此，宜在真空或保护密封条件下熔炼。

镍 Ni　镍是镁合金的一种有害杂质，它的作用与铁的相倾，少量镍会大大降低镁合金的抗蚀性，其含量应≤0.005%，个别镁合金如 MB1 及 MB8 的最大含量可达 0.01%。

锰 Mn　锰是镁合金的一种常用合金化元素，变形镁合金的含量一般＜3.0%，铸造镁合金的含量则≤0.5%。锰对镁合金的抗拉强度没有影响，但稍提高其屈服强度，锰细化镁合金的晶粒，对其可焊性也有利。锰在镁中的固溶度低。

锑 Sb　锑可与镁形成化合物 Mg3Sb2，它有高的热稳定性，能有效地提高 Mg-Al 合金的室温及高温强度。锑可以细化 Mg-Si 合金的晶粒，其效果优于钙的，并改变 Mg2Si 的形貌。锑与少量混合稀土一同加入 Mg-5Al-Zn-ISi 合金中，可以明显改善它的抗蚀性，制成室温力学性能优于 AZ91 合金的，而高温力学性能甚至比 AE42 合金的还高。

2.14 16、聊聊镁的合金元素与杂质（2）

稀土元素 RE　稀土元素是指对周期表IIIB 族中的钪、钇、镧系等 17 个元素的总称，常用 R 或 RE 表示。它们 名称及化学符号为：钪 Sc、钇 Y、镧 La、铈 Ce、镨 Pr、钕 Nd、钷 Pm、钐 Sm、铕 Eu、钆 Gd、铽 Tb、镝 Dy、钬 Ho、铒 Er、铥 Tu、镱 Yb、镥 Lu。通常把镧、铈、镨、钕、钷、钐、铕称为轻稀土或铈组稀土，钆铽、镝、钬、铒、铥、镱、镥、钇称为重稀土或钇稀土。

稀土这个名字的由来也有一个小故事，是一个历史遗留的名称，它们在 18 世纪末叶开始被陆续发现。当时化学界通常把不溶于水的固体氧化物称作土，例如把氧化铝叫铝土，把含氧化铝的矿物叫铝土矿，氧化镁叫苦土。稀土是以氧化状态分离同来，又称稀罕，因而得名稀土。

稀土是一类很重要的合金化元素，研发稀土高温镁合金是当前镁业界的热门课题，成为冶金科学家与化学界的热点研究。稀土元素在镁中的固溶度和时效强化效果随着它们原子序数的上升而增加，因此稀土元素对镁的力性能的影响大体上是按镧、铈、富铈混合稀土、镨、钕的顺序递升。加入镁合金中的混合稀土元素分为两类：含铈为主的混合稀土，另一类为不含铈的混合稀土，前者是一种天然的稀土混合物，由镧、

钕和铈组成，其中铈含量往往大于 50%，后者镨与钕的含量约为 85%。

稀土元素在镁中的扩散能力差，既可以提高镁合金的再结晶温度又可以延缓再结晶过程，还可以形成极为稳定的弥散均匀分布的化合物相质点，从而能大幅度提高镁合金的高温强度性能和蠕变抗力。镁合金中的稀土元素为两个或多于两个时，能降低彼此在镁中的固溶度，并相互影响其过饱和固溶体的沉淀杵出动力学，有附加强化作用。此外，稀土元素可使镁合金的凝固温度区间缩小，并且能降低焊缝开裂敏感性和提高铸件致密性。

锡 Sn　与铝一起向镁合金中添加锡是有益的。锡能提高镁合金的塑性，降低热加工时的开裂倾向，对锻造极为有利。

硅 Si　硅是工业镁合金中的一种杂质，通常变形镁合金的含量应≤0.15%，铸造镁合金中的应≤0.30%，不过也有个别铸造镁合金把硅作为合金元素，如俄罗斯的 МЛ 1 含 1.0%Si~1.5%Si。硅加入镁合金可提高熔体的流动性，若同时含有铁，会降低镁合金的抗蚀性。硅可与镁形成高熔点（1085℃）、低密度（1.9g/cm3）、高强性模量（120GN/mm2）和低热膨胀系数（7.5×10-6/℃的化合物 Mg2Si，是一种有效的强化相。若与稀土一同添加，可以形成稳定的化合物，对改善镁合金的高温强度和蠕变性能有利，却会降低合金的

抗蚀性。

钍 Th　向镁合金添加钍可以提高其在 370℃以上的蠕变强度。常规镁合金可以含 2%~3%钍，它能提高镁合金的可焊性能，也是提高镁合金高温强度和需变性能的有效元素，不过它是一种放射性元素，使用时应加强防护。

钇 Y　钇也是一种稀土元素,虽然常规镁合金不含钇，但现在制成了几种有商业价值的含钇高的镁合金 WE54、WE43，故单列聊聊，这两种镁合金含 4%~5%Y，它们在 250℃以上有良好的高温性能。二元 Mg-Y 合金的塑性由高向脆转变，含 8%Y 的合金就脆得元实用价值。Y 不但价格高，而且不易熔于镁熔体中，苏联在研发 Mg-Y 合金领域居世界前列。

锌 Zn　锌是镁合金的重要合金化元素之一，是除铝以外的第二大合金化元素，常用的镁合金几站都含锌，最大大含量为 6%，锌在镁中的最大固溶度为 6.2%，有固溶强化与时效强化作用。若镁合金的铝含量为 7%~10%，同时锌含量大于 1%，则其热脆性明显上升。锌也可以与锆、稀土或钍形成化合物，使镁合金有相当强的沉淀强化作用。含锌量高的镁合金的凝固温度间隔甚宽,熔体流动性差,铸造性能明显变环。此外，锌能中和铁、镍所引起的腐蚀作用。

锆 Zr　大多数铸造镁合金都含锆，锆的最大含量为 1.0%，锆不能添加到 Mg-Al-Zn 合金中，因为它可以与铝、锌形成稳定的化合物从固溶体中析出，不能细化晶粒，只有固

溶的那小部分锆有细化晶粒作用。锆在镁中的固溶度甚低，在包晶温度时仅 0.58%，有很强的晶粒细化作用，因α -Zr 的晶格常数（a=0.323mn、C=0.514nm）与镁的（a=0.321nm、C=0.521nm）非常接近，凝固时先形成的富锆质点是镁的优质晶核，细化晶粒，因此锆可以作为含锌、稀土、钍或这些元素的合金中，充当晶粒细化剂。当今，锆细化镁合金的机理尚无统一的看法，普遍认为锆可以作为镁合金的异质晶核。锆能有效地抑制镁合金的晶粒长大，因而含锆的镁合金在退火或热加工后保持着细小的晶粒与高的力学性能。此外，锆也能与镁合金熔体中的铁、硅、碳、氧和氢形成稳定的化合物。

2.15 17、话说镁合金的分类

通常按三种方式对镁合金分类：合金化学成分，半成品加工成形工艺，是否含锆或铝。

按化学成分就是按其主要合金化元素分类：Mg-Al、Mg-Mn、Mg-Zn、Mg-Si、Mg-RE、Mg-Zr、Mg-Th、Mg-Ag 与 Mg-Li 等二元系合金，以及 Mg-Al-Zn、Mg-Al-Mn、Mg-Mn-Ce、Mg-RE-Zr、Mg-Zn-Zr 等三元系合金，Mg-Zn-RE-Zr、Mg-Al-Mn-Zn、Mg-Zn-RE-Zr、Mg-Zn-Zr-Ag、Mg-Al-Mn-Zn 等四元合金及更复杂的多元合金，如 Mg-Ag-Th-RE-Zr 等五元合金，等等。

常规镁合金的品种虽远不如铝合金的多，也不如铜合金

那么丰富多彩，但新的合金系不断涌现，性能优秀的镁合金显露头角，一些含新合金元素的镁合金成为研究热点。

向现有的镁合金添加微量合金化元素如表面活性元素钙、锶、钡、锑、锡、铅、铋等，对合金成分进行重新设计，以获得有良好综合性能的或有某种特殊性能的新型镁合金；含（钍（Th）的新型航天镁合金已获得实际应用，如 Mg-Th-Zr、Mg-Th-Zn-Zr 和 Mg-Ag-Th-RE-Zr 合金以用于制造火箭和飞船的一些零件，取得了好的效果。不过 Th 是一种放射性元素，对人体健康与环境都有危害，被限制使用，有些国家如英国将含 Th 量大于 2%的合金列为放射性材料有关管理条例与规定，这不但很麻烦，而且加大了零件的制造难度与生产成本。稀土元素可赋于镁合金一系列的优秀性能，有望成为可以替代钍的理想的镁的合金化元素。看来，Mg-RE 合金有着灿烂的应用前程。

按成形工艺可将镁合金分为：铸造的和变形的两大类，前者占镁消费量的 85%以上，因为镁合金的加工成形性能差，生产工艺复杂，加工成本高，在很大程度上限制了它的广泛应用。这两类合金在成分与冶金组织性能方面有很大差异，铸造镁合金主要用于压铸交通运输装备、机器、电气电子产品等零配件，压铸镁合金工件具有铸造效率高、表面品质优良、铸造组织优秀、晶粒细小均匀、可产壁厚薄和形状复杂的工件。铝有相当高的强化效果，含铝的镁合金有良好的铸

造性能，但铝的含量不得低于 3%；锌也是镁合金的强化性合金元素，但合金中的含量高于 2%则有较强的热裂倾向；Mn 可与 Al、Fe 形成 AlFeMn 化合物，它的密度比镁合金熔体的大，会沉于炉底部，混入渣中，有害杂质 Fe 得以清除，Mn 还能细化组织；稀土元素对镁合金的铸造性能入一些其他性能都有益。

Ni、Fe、Cu 降低镁合金的抗蚀性，是极为有害的杂质，应严格控制其含量。为推广镁合在结构中的应用，宜加强对变形镁合金的研究，但由于镁为密集六方晶格，塑性变形能力比铝及铝合金的低得多，几乎不可能获得既有高的室温强度又有加工成形性能良好的镁合金，因此，早期的变形镁合金设计时要求其组织中不含或尽量少含金属间化合物，以使镁合金保持良好的塑性与高的力学性能，合金强度性能的提高主要靠合金元素的固溶强化和塑性变形引起的加工硬化。过去使用的含 1.5%Mn 的镁合金就是这样的合金。

目前，变形镁合金使用的主要合金化元素有铝、锰、稀土、钇、锆、锌，它们一方面可以提高镁合金的强度性能，另方面可改善镁合金的热变形能力，从而可以进行锻压和挤压，AZ31B、C、E 合金广泛用于挤压生产，具有高的强度性能与良好的塑性，它们属 Mg-Al-Mn-Zn 系合金，合金元素含量相等，但杂质含量则有别。AZ31 系列合金在轧制板、带材时的裂边倾向随铝含量的增大而上升，因此，AZ61 合金几乎

不同于轧制板、带材。

铝、锆是镁合金最主要的合金化元素，因此可根据其是否含铝、锆将其划分为含铝的或含锆的镁合金，以及不含铝或不含锆的镁合金。锆是镁合金的很有价值的合金化元素，具有极强的细化晶粒作用,然而不尽如人意的是,它可与 Mn、Al 形成稳定的密度较大的金属间化合物,沉于坩埚或炉底部，削弱或甚至消除了应起的作用，为此除 MBI5 合金含锆外，其他的变形镁合金都不含锆,铸造镁合金 ZM5、ZM10 也不含锆。

2.16 18、您认识镁合金吗？

前面谈了镁合金的分类,现在来说说镁合金牌号是怎样编制的，从而对它有一个初步的了解，也就是说对镁合金有一个粗略的认识。由于镁合金类型不同，用途各异，其牌号也不同。镁合金牌号的表示方法有多种，当下国际上尚无统一的表达方式，但都习惯于采用美国材料试验学会（ASTM）的系统。

中国镁及镁合金牌号与状态名系统

根据中国国际 GB/T5153-2003，

变形镁及镁合金牌号的命名规则为：

纯镁牌号以 Mg 加数字的形式表示，数字表示镁含量的最低质量分数，如 Mg99.95 为镁含量≥99.95%的纯镁。

镁合金的牌号以英文大写字母加数字再加大写英文字母

的形式表示，前面的英文字母是其最主要的合金元素代号（见下表），其后的数字表示最主要合金元素的平均含量。最后的英文字母为标识代号，用以识别各具体合金元素相异或其含量有微小差别的不同合金。

英文字母	元素符号	中国名称	英文字母	元素符号	中国名称	英文字母	元素符号	中国名称
A	Al	铝	H	Th	钍	R	Cr	铬
B	Bi	铋	K	Zr	锆	S	Si	硅
C	Cu	铜	L	Li	锂	T	Sn	锡
D	Cd	镉	M	Mn	锰	W	Y	钇
E	RE	混合稀土	N	Ni	镍	Y	Sb	锑
F	Fe	铁	P	Pb	铅	Z	Zn	锌
G	Ca	钙	Q	Ag	银			

中国镁合金牌号由两个汉语拼音字母和其后的阿拉伯数字组成，字母 M 代表镁（mei)合金，B 表示变（bian）形，Y 表示压(ya)铸，Z 表示铸(zhu)造。例如 ZMI 为一号铸镁合金，MB2 为二号变形镁合金，YM5 为五号压铸镁合金。

按国家标准 GB/T19078-2003（铸造镁合金锭）的产品牌号以英文字母加数字再加英文字母的形式表示，AZ91D 表示一种 Al 的平均含量为 9%，Zn 的含量小于 1%的镁-铝-锌系铸造镁合金；AM20A 是一种 Al 的平均含量为 2%，Mn 的含量小于 1%的镁-铝-锰系铸造镁合金。最后字母 D 表示第四种 AZ91 合金。所谓标识代号实际表示该合金成型的先后次序，“A”表示最先面世的第一种合金，或是最先登记的此种合金。在 ASTM 镁合金命名系统中还包括表示材料和铸件状态的代码。状态代号由字母和其后的数字组成，如 AZ91C-F 表示铸造状态的镁-

铝-锌系 AZ91C 合金，镁合金的状态代号见下面，是 ASTM 制订的，全世界通用。

类别	代号	状态说明
基本状态	F	铸造状态
	O	压力加工产品的完全退火状态
	H	压力加工硬化状态
	T	不同于 F、O、H 状态的稳定的热处理状态
	W	固溶处理状态，一种不稳定的状态
H 细分	H1 或 HIXX	仅加工硬化的状态
	H2 或 2XX	加工硬化后再进行部分退火的
	H3 或 3XX	加工硬化后再进行稳定化处理的
T 细分	T1	热工加冷却后自然时效的
	T2	铸件退火后的
	T3	固溶处理后再冷加工的
	T4	固溶处理状态
	T5	热加工冷却后再人工时效的
	T6	固溶处理和人工时效的
	T61	热水淬火和人工时效的
	T7	固溶处理后再稳定化处理的
	T8	固溶处理、冷加工和人工时效的
	T9	固溶处理、人再时效和冷加工的
	T10	热加工后冷却、人工时效后再冷加工的

2.17 19、用途最广的镁-铝系合金

铝是镁合金最主要的合金化元素，是当下牌号最多、应用最广的镁合金，常用的铸造镁-铝合金有 AZ81A、AZ81S、AZ91D、AZ91S、AZ63A、AM20S、AM50A、AM60B、AM100A、AS215、AS41B、AS41S 等。镁-铝合金通常还含有少量的 Zn、Mn、Si 等，在应用的镁合金中，镁-铝系合金占 65%左右，而在工业应用的铸造镁合金中，镁-铝系合金又占有 85%以上。常用的变形镁-铝合金有：AZ31B、AZ61A、AZ80A、AZ10A 等。

Mg-Al 系相图属共晶型，在共晶温度 437℃时，铝在镁中的溶解度为 12.7%，而在室温时仅约为 2%，铝含量大于 6%的

合金属热处理可强化的。在工业上应用的镁-铝合金中。铝含量一般不超过 10%，否则合金的各项性能会有不同程度的下降。铝可以提高镁的各项性能，含铝 6%左右的镁合金具有最高的强度和伸长率。含铝≥2%的铸含合金中会出现 Al12Mg17 或 Al3Mg4（β 相），若含铝量大于 8%，β 相以共晶形式沿晶界呈不连续的网状分布，它们在 430℃退火或固溶处理溶入固溶体中，淬火后成为过饱和的固溶体，在随后的进效过程中β 相可从固溶体中析出，但时效效果不大，因为它们不与母相共格或半共格。尽管如此，但是晶界上的β 相可以作为腐蚀障碍，可提高合金的抗蚀性。

Mg-Al 合金通常还含有少量的锌与锰，锌可以溶于固溶体，产生进一步的固溶强化，并能稍稍改善抗腐蚀性能。可是锌却使含 7%~10%铝的镁合金的热收缩率上升。加入的 Mn 可与铝形成针状或短棒状化合物。合金中的杂质铁在淬火时还可能析出 AlFe 化合物。

铸造镁-铝合金一般含 6%~10%Al，用于铸造大型薄壁复杂零件,常用的合金有 AZ63A、AZ81A、AZ91A-E、AZ92A、AM100A，还研发出有特殊用途的压铸合金,如高纯的低铝合金 AM60A、AM60B、AM50A、AM20 等，它们有高的断裂韧性，因为晶界上的 Al12Mg17 化合物质点大大减少，多用于铸造车轮、座椅框架、方向盘等汽车零件。变形镁-铝合金的铝含量一般≤8%，锌的含量≤1.5%，典型的合金为 AZ10A、A31B、AZ31C、AZ61A、

AZ80A 等，用于锻压零件与轧制板、带，以及挤压、棒、型、管材等，AZ80A 合金约含 8%Al，虽有高的强度与可进行固溶时效处理，但有相当严重的应力腐蚀倾向，已大量被有更好性能的 Mg-Zn-Zr 系合金取代。

Mg-Al 系合金虽有良好的力学性能、铸造性能和抗大气腐蚀性能，是目前室温下应用最广泛的镁合金，但是当温度高于 120℃后，AZ 系及 AM 系合金的强度性能会急剧下降，因为 Al12Mg17 的熔点为 460℃，在温度高于 120℃时成为软质相，不能有效地钉扎晶界，于是通过晶界滑移发生滑移。向 Mg-Al 合金添加 1%Ca 可以提高合金的蠕变强度，但是钙的含量不能＞1%，否则合金具有热裂倾向。降低铝含量而加入硅，也可以提高蠕变强度，从而开发出了如 AS41A、AS41B、Al21 等这样的 AS 系镁合金。因为降低铝含量可以减少 Al12Mg17 质点，而 Si 与 Mg 可形成细小的 Mg2Si 质点，阻碍晶界移动。AS21 合金的铝含量低，蠕变强充比 AS41A、AS41B 合金的高，但是铸造性能差。虽然 Mg-Al-Si 系合金有高的抗蠕变强度，但还是不如 A380 铝合金的。

向 Mg-Al 系合金添加 RE 元素，可以进一步提高合金的抗蠕变强度，如 AE42 合金的抗蠕变强度不但比 Mg-Al-Si 系合金的高，而且有更好的综合性能，不过稀土的价格昂贵。稀土元素对 Mg-Al 合金蠕变性能的影响机制至今仍元统一的看法。一般认为，抗蠕变强度的提高是由于晶界上形成了大量

的阻碍晶界滑移的 Mg12RE 质点，不过应注意的是，Mg-Al-RE 合金只适于压铸，因为压铸时的冷却速度快，可形成细小的 Mg12RE 质点，否则会形成粗大的 Mg12RE 化合物，使性能变坏。

以 AZ 合金为基础，提高锌含量降低铝含量开发的 ZA104 合金是一种蠕变强度较高且铸造性能较好成本也不高的合金。日本研发的 Mg-5Al-2Ca-2RE-0.3Mn 合金具有比 AE42 合金更高的抗蠕变强度，而且其耐热性与抗蚀性与 A384 铝合金的相当，还有良好的可铸造性能。

2.18 20、有时效强化能力的镁-锌系合金

铝是镁合金的第一大合金化元素，那么锌就是它的第二大合金化元素，锌在镁中的最大固溶度为 62%，且随着温度下降而减少，因此除有固溶强化作用外，还有一定的时效强化作用。锌可消弱合金中铁、镍等杂质对其抗腐蚀性能的不利影响，锌可与镁形成 Mg7Zn，在 340℃发生共晶反应，共晶点为 51.2%Zn，即

L→α -Mg+Mg7Zn

温度下降到 312℃时发生共析反应，即

Mg7Zn→α -Mg+MgZn

合金的室温平衡组织为α -Mg+MgZn，温度降低时可以α -Mg 固溶体中析出强化书自 MgZn。镁-锌系合金可形成连续的 GP 区和连续的中间析出相，因而不能通过过热或变质处理细化晶粒。二元 Mg-Zn 合金的凝固温度区间大，流动性差，易产生显微疏松，也不易细化晶粒。因此，几乎没有商业使用价值，镁-锌合金的时效过程非常复杂。

目前获得工业应用的铸造镁-锌系合金的锌含量为 4%~6%，含 5%Zn 的合金具有最高的强度性能，再增加锌含量，合金的力学性能全面下降。另外，锌会引起合金出现显微疏松和增大热裂倾向。

镁-锌合金有时效强化能力，Mg-5Zn 合金可在 204℃时效处理 5h~10h，温度低时，时效强化效果缓慢。工业 Mg-Zn 合金的锌含量不得大于 6%，向合金中添加少量的 Mn、Cu、RE 等可改善合金的性能，形成有优秀综合性能的新型镁-锌合金。

在 Mg-Zn 合金中加入 Cu 可以显著提高合金塑性和时效强化效果。Mg-Zn-Cu 合金铸件的力学性能与 AZ91 合金的相当，而且有更好的高温稳定性，如砂型铸造的 ZC63 合金。加入铜可以提高 Mg-Zn 合金的共晶温度，因而可在更高的温度下进行固溶处理，可以提高 Zn 及 Cu 在镁中的固溶量，同时共晶体中化合物的形貌也生了变化，Mg-Zn 化合物以离异共晶形式分布于晶界及枝晶间，大部分 Cu 以化合物形式存在于共晶相 Mg(Cu,Zn)2 中，因而减少了 Cu 对合金抗蚀性的不利影响。

Mg-Zn-Cu 合金用于铸造汽车零件，但还需提高合金的抗腐蚀性能。

向 Mg-Zn-Cu 合金中再添加 Mn，形成的四元合金 ZC71 也有时效硬化作用，用于生产挤压产品。

在含锌量小于 4%的镁合金中添加≥0.5%Ca，可形成 Mg2Ca 和 Mg5Ca2Zn5 化合物，可于 167℃以下从固溶体中析出，提高合金的抗蠕变强度，这些化合物在 167℃以上粗化，使合金的抗蠕变能下降，增加锌含量，合金的抗蠕变能力也会下降。含锌量较高的镁-锌-铝合金 ZA142、ZA144 的抗蠕变强度显著高于 AZ91 合金的。Sr 也可以提高镁-锌合金的抗蠕变强度，但 Sr 的效果比 Ca 的大。

Mg-Zn 合金通常含有＞0.5%锆，锆有明显的晶粒细化作用。Mg-Zn-Zr 合金的铸造组织为α -Mg 固溶体和块状 Mg-Zn 化合物与少量的 Zn3Zr2 金属化合物。典型的铸造 Mg-Zn-Zr 合金有 ZK51A、ZK61A，变形合金有 ZK21A、ZK31、ZK40A、ZK60A、Z616A。铸造合金的状态为 T1 或 T6，而挤压材料及锻件仅在 T6 状态下应用。

含锆量高的镁-锌合金不易加工与铸造，为了解决工艺上的固难，可降低锌含量或添加稀土与钍，从而研发出 Mg-Zn-RE-Zr 系合金与 Mg-Zn-Th-Zr 系合金，前一类合金如 ZE41A，人工时效后具有中等强度，已用于铸造直升机传动箱体；后一类合金有 ZH62A，不过此合金现在已几乎不用了。

RE 的添加不仅改变了镁-锌合金铸态组织中原有二元相的结构形态，而且生成了一种新的三元化合物 T 相，它的成分范围甚广；另外还改变了合金的时效硬化特性，阻碍β 相的析出，推迟过时效的发生。

2.19 21、极为丰富的白云石矿资源

中国有着极为丰富的白云石矿资源，遍布大江南北，黄河上下，长城内外，截至 2011 年，全国探明的储量在 45×108（亿）t 以上。白云石是碳酸镁与碳酸钙的复盐（MgCO3·CaCO3），理论上含 21.8%MgO、30.4%CaO、47.68%CO2。CaO 与 MgO 的质量比为 1.394，而大多数天然白云石的这种比为 1.4~1.7。

白云石有结晶形的也有无定形的，因含有不同的杂质而呈现种种色彩。白云石是热法还原炼镁的主要原料，但也可以先提取氧化镁，再成球氯化为氯化镁，然后电解制镁。

当前，中国用于提炼镁的白云石约 7500kt/a，白云石在农业、建筑材料、玻璃陶瓷、化学工业和耐火材料等产业也有所应用。

中国一些地区 2011 年的白云石工业储量大致如下（10kt）：辽宁 88900，河南 85000，山西 62000，江苏 8500，北京 6700，河北 5600，辽宁、河南、山西三省的工业储量约占全国总量的 52.4%。中国符合炼镁的白云石化学成分（W%）

见下表。

上世纪 90 年代初以来，中国的皮江法(Pidgeon Process）白云石炼镁工艺得到快速发展，规模之大，速度之快，在世界镁工业发展史上前所未有，在 2013 年中国的 1540kt/a 炼镁生产能力中，94%以上为以白云石为原料的皮江法。

实践证明，矿石品质及结构性能对炼镁技术经济指标有着直接影响，在目前技术条件下，白云石的化学成分（W%)：MgO≥20，CaO≥30，CaO/MgO 摩尔比=1~1.03，(Al2O3+Fe2O3）＜1，SiO2＜1，（Na2O+K2O）＜0.1，并要求煅烧后有一定的热强度与相当高的反应活性。

其他镁矿资源

除菱镁矿及白云石外，其他炼镁原料还有蛇纹石、石棉尾矿、水镁石、盐湖卤水和海水等也是炼镁的好原料，但直到 2013 年中国尚未用它们提取镁，从 2014 年末开始柴达木盐湖卤水可开始用于制镁。

蛇纹石含 43.6%氧化镁、26.3%镁，江苏省东海县行沟、江西省弋阳市樟树墩、河南省信阳市、陕西省宁强县等都有丰富的品质优良的蛇纹石，截止 2011 年已探明储量 32×108t 以上。蛇纹石具有耐热、抗腐蚀、耐磨、隔热、隔声、工艺性能好特点，应用前景广阔。

水镁石的化学分子式为 Mg（OH）2，自然界存量不多，理论化学组成为：63.1%MgO，30.88%H2O。其氧化镁含量比菱

镁矿的高 21.49 个百分点，比白云石的高 47.41 个百分点，比蛇纹石的高 25.65 个百分点。对作为炼镁原料来说，与菱镁矿相比，水镁石具有易分解、热强度高、纯度高等优点，有望成为颗粒氯化工艺中菱镁矿的良好替代原料。

此外，盐湖及沿海的水氯镁石（MgCl2·6H2O）、光卤石、卤水资源及海水等都是用之不竭的炼镁原料，青海柴达木盆地盐湖占地 5856km2，可供炼镁的氯化镁储量 32×108t，仅次于死海的，居世界第二。

产地	MgO	CaO	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3
南京	20.84	31.9	0.075	0.08	0.0057
宁夏青龙山	21.43	30.55	0.21	0.096	0.016
河南渑县	20.81	30.8	0.009	0.15	0.056
河北筏山煤矿	21.25	29.28	0.616	0.185	0.2
山西平定	20.25	31.71	0.48	0.7	0.17
山西五台山	21.51	30.39	0.16	0.18	0.018
陕西略阳	21.31	30.79	0.37	0.084	-
青海互助	20.71	29.12	0.36	0.38	0.078

2.20 21、抗腐蚀的镁-锰系合金

除 MB15 变形镁合金外，其他的变形镁合金都含有锰，含锰最多的是 MB1 及 MB8 合金，为 1.3%~2.5%；含锰的铸造镁合金不多，只有一二个，含量也不多，为 0.15%~0.5%；俄罗斯的铸造镁合金大都含有 0.1%~0.5%Mn，个别合金的含量甚至高达 1.0%~2.0%。

锰可以提高镁合金抗应力腐蚀开裂能力，对强度性能的影响不大，却降低合金的塑性。根据 Mg-Mn 二元相图，623℃时有一包晶反应：L+d-Mn→a-Mg。在此温度时 Mn 在镁中的最大固溶度为 2.2%，然后随着温度下降而减少，500℃时为 0.75%，400℃时为 0.25%。由于镁与锰不形成化合物，从过饱和固溶体中析出的不是化合物而是纯锰，强化作用很小。

镁-锰合金的铸造性能很差：凝固收缩大，热裂倾性大。合金的强度大，强度性能的提高主要来自加工硬化，因此，中国的镁-锰合金几乎全用于加工压力加工产品。镁-锰合金有很高的挤压效应，挤压材的强度性能高于轧制材的。合金中的锰可阻碍加热时晶粒的长大，故在热加工与退火后强度性能的下降很小。

向镁-锰合金添加 0.15%~0.35%Ce 可进一步细化其晶粒，提高合金的力学性能，Ce 在镁中的溶解度很低，593℃时的也只有 0.85%，温度降低溶解度也随之减少，生成有很高硬度与一定耐热性的 Mg12Ce，提高了合金的耐热性能。

在工业中获得实际应用的镁-锰合金有中国的 MB1 和 MB8，美国的 M1A，俄罗斯的 MA8。MB1 合金具有中等强度，优良的抗腐蚀性能，可以用氩弧焊或氧-乙炔焊焊接。MB8 是含有 0.15~0.35%Ce 的 MB1 合金，不但保留了 MB1 合金的抗蚀性和可焊接性能，而且因 Ce 的细化晶粒作用而具有更高手强度性能。

镁-锰系合金是主要的优点是既有高的抗腐蚀性能又有良好的可焊性，Mn 易与铁化合形成化合物，从而削弱了铁对合金抗腐蚀性的不利影响，使合金的腐蚀速度特别是海水中的腐蚀速度大大下降。Mg-Mn 系合金在中性介质中没有应力腐蚀开裂倾向，也不会发生晶间腐蚀。

变形镁-锰合金可加工成各种半成品（板、带、管、棒、型材与锻件），板材用于制造飞机、直升机蒙皮、壁板及内部构件，锻件用于制造受力工作，管材多用于汽油、润滑油等要求抗腐蚀性的管路系统。Mg-Mn 系合金材料的抗拉强度、屈服强度、疲劳性能没有明显影响，但是对伸长率、断裂韧性、冲击韧性却有一定的影响，并随锰含量的增加而加剧。含 1.5%Mn 的镁-锰合金具有最强的抗腐蚀性，再增加锰含量不但塑性下降，抗蚀性也随着下降。

钪在镁中的固溶度很大，并随温度降低而下降，因而有时效强化效应。在 Mg-Mn-Sc 三元合金中，可形成 Mg2Sc，Sc 提高镁固溶体的熔点，而且在镁基体中的扩散系数低，是提高镁合金高温性能的有效元素之一。Mg-Mn-Sc 合金在时效过程中可以固溶体中析出 Mg2Sc，它与α -Mg 基体共格，有相当高的时效强化能力，提高合金的抗蠕变强度与硬度。因此，开发出了有高抗蠕变强度的 Mg-Mn-Sc 合金，如 Mg-15Sc-1Mn 合金和 Mg-6Sc-1Mn 合金，它们在 350℃与 30N/mm2 的应力作用下的蠕变抗力比工业上早已应用著名的 WE43 的高约 100 倍。

这些含 SC 高的合金经 T5 热处理后在镁固溶体基体上有大量的细小的弥散的 Mg2Sc 质点，是时效时从过饱和固溶体中析出的。遗憾的事，由于 Sc 的价格高昂，Mg-Sc-Mn 合金不可能在工业上获得有规模的应用。为此，研发出了以 Gd、Y、Zr 等取代 Sc 的 Mg-Mn 系合金如 Mg-Mn-Sc-Gd、Mg-Mn-Sc-Y 和 Mg-Mn-Y-Sc 等四元合金，不过它们的价格也居高不下，应用前景也不会广。

2.21 22、组织细密的镁-锌-锆系合金

二元相图的镁端存在包晶型反应,在此反应温度下,锆在镁中的固溶度为 0.58%。包晶反应:L+α -Zr→α -Mg。α -Mg 为锆在镁中的固溶体,锆的熔点很高,1852℃,不与镁形成化合物,锆在熔融镁中的熔解度很小,在包晶反应温度 654℃时也只能熔解 0.6%。这一特点给含锆的镁合金的熔炼带来很大困难,容易出现成分偏析。在铸造镁-锆合金及镁-锌-锆合金组织中可观察到明显的枝晶偏区,区中心锆的浓度很高,甚致是纯α -Zr 质点,由中心向外锆的浓度逐渐下降。

铸造时冷却速度越快,晶粒核心中锆的浓度越高,与周围固溶体中锆的浓度差越大,这种晶内枝晶偏析可以通过锭的均匀化处理消除。锆在镁熔体中的溶解度很小,镁合金熔体凝

固时,Zr 首先以α -Zr 质点形式析出,α -Zr 与 Mg 均属于密集六方晶格,而且晶格常数相当接近,于是熔体中的α -Zr 成为良好的结晶核心,从而可获得晶粒细小均匀的组织。锆还能减缓合金的扩散速度,阻碍晶粒长大,含 0.6%Zr~0.8%Zr 镁合金具有最小的晶粒和高的力学性能,另外,Zr 还能提高镁合金的抗腐蚀性能与高温力学性能。二元镁-锆合金铸件的强度较低,中国标准没有纳入此类合金,只有美国 ASTM 标准中有一种含 0.7%Zr 的二元镁-锆合金 KIA-F,用于铸造砂型及永久型铸件,它有优秀的阻尼性能。

由于二元镁-锆合金的性能不能满足工业应用要求,而锆又是镁的一种极有效的晶粒细化剂,因此它成为其他镁合金的一种难得的辅助合金化元素,形成一类很有实用价值的含锆的镁合金如 Mg-Zn-Zr 系合金与 Mg-RE-Zr 系合金。Mg-Zn 系合金几乎个个都含有 0.3%Zr~1.0%Zr,Mg-Re、Mg-Th、Mg-Ag 系合金都含有这么多的锆。

镁-锌系合金的晶粒易长大,而锆具有细化晶粒与抑制晶粒长大功效,是铸态 Mg-Zn 合金极为有效的晶粒细化元素,于是 Mg-Zn-Zr 系合金应运而生,形成 ZK 系列镁合金。Mg-Zn-Zr 系合金可以热处理强化,Zn 是第一主要合金化元素,随着 Zn 含量的增加,合金的凝固温度区间变宽,热裂倾向增大,可焊性能变差,不可用于铸造形状复杂的铸件与制造焊接结构。

在 GB/T19078-2003 中,铸造镁-锌-锆合金有 ZK51A、

ZK61A 合金,变形镁合金有 ZK61M、ZK61S。按 ASTM 在关标准,Mg-Zn-Zr 系合金主要有 ZK21A、ZK31、ZK40A、ZK60A、ZK51A 和 ZK61 合金。

向 Mg-Zn-Zr 系合金添加稀土元素,合金在凝固过程中可在晶界形成含稀土的化合物,提高合金的铸造性能,改善铸件组织,但是它们很稳定,在固溶处理时不易溶解,虽对铸件力学性能元明显影响,却使其略有下降,在氢气氛中固溶处理后可使性能恢复,因为固溶处理时,氢可扩散到镁固溶体中,与化合物中的稀土元素反应生成弥散的稀土氢化物质点,化合物中的锌被释放出来,重新溶于α -Mg 基体中,强化合金。

锆和钙同时加入镁合金中如 Mg-Zn-Ca-Zr 合金,可使合金组织显著细化,因为钙促进 Zr 在固溶体中的溶解。当镁合金熔体中存在铝、硅、铁、氢等杂质时,锆可与它们形成密度较大的高熔点化合物,沉于坩埚底部而得以清除。

近四五十年来,稀土镁合金得到了很大发展,向 Mg-RE 合金中添加适量钙可以细化晶粒,进一步提升合金的强度。不过,应提出的是,只有熔体凝固时溶于其中的那部分 Zr 才具有晶粒细化作用,形成化合物的那部分锆没有晶粒细化作用。

2.22 23、博尔扎诺法与马内塞姆法

这两种工艺都是热还原炼镁法，国内没有用过这两种工艺，国外还有用的，不过由于皮江法技术的不断完善与技术

经济指标的日益提高，在建新的炼镁项目时，采用这两种工艺的前景不容乐观。

博尔扎诺炼镁法

博尔扎诺炼镁法又称电内热还原法，1942 年意大利镁业公司博尔扎诺（Bolzano）镁厂率先采用此工艺提取镁，因得此名，实际上它是皮江法的改型。它的原料与皮江法的相同，炉料配方也相同，只不过皮江法用的压团球状料，而它用的是块状料，摆放于电内热真空还原炉内，电力负荷 100kV •A，镁蒸气在冷凝器内冷凝成镁晶体，炉的产量不大，1.8~2t/d，该厂于 1993 年因经济效益不佳停产。

巴西镁业公司博尔乌瓦（Bocawva）镁厂（现名巴西利马镁厂）一直采用此法生产镁，生产能力 11kt/a。生产成本稍高于中国皮江法的。

马内塞姆热还原法

马内塞姆(Magnetherm)法又称熔渣导电半连续硅热法，1964 年在法国问世，实际上它是由“Magne”（镁）与“thermo”（热的）的词头组成的。法国普克公司（Puk）的电冶金公司的马利纳克（Marinac）镁厂采用此法生产镁。

该法以白云石为原料，还原剂为粒度 2~20mm 的硅铁，为了降低渣的熔点，以煅烧铝土矿为造渣剂。白云石粒度 5~30mm，铝土矿粒度 3~30mm，分别经回转窑煅烧后，送入密闭保温仓内，按配比自动下料，在真空度 4120~4655N/mm、1550℃~1600℃

的单相 4500kV·A 电炉内进行还原反应。反应生成的镁蒸气流入冷凝器，冷凝成液态镁，流入坩埚。还原周期 20h。向还原炉内充满氩，将渣放入水中淬冷后用于生产水泥。将粗镁熔体注入精炼炉，精炼后铸成镁锭。

马内塞姆工艺设备生产能力大，可半连续生产，而且不产生对环境不友好的温室气体，此乃其优点，1 台 4500kV·A 的还原炉的产量可达 7~9t/d，但生产成本比皮江法的高，产品的纯度也不如皮江法的。由此看来，其产品的竞争力在皮江法产品面前只能俯首称臣，此法的生命周期恐怕也是屈指可数了。

美国西北合金公司、日本化学工业公司和塞尔维亚拉斯乌拉镁公司都曾采用马内塞姆法生产镁。此法的还原反应为：

2（CaO·MgO）固+Si（Fe）固+0.3Al2O3 固=2Mg 气+2CaO·SiO2·0.3Al2O3 液+Fe（Si）液

此法可连续加料，但排渣与出镁是间歇性的，故是一种半连续工艺。

国外硅热还原炼镁法技术参数如下表所示。

参数	法国普克公司马利纳克镁厂半连续硅热法	意大利博卡瓦尔镁厂电内热还原法	加拿大科镁业公
生产时间	1964~2003 年	1942~1993 年	1941~20
炉内温度，℃	1550~1600	1200	120
真空度，N/m^2	4120~4655	<13	<1
还原周期/h	20	24	8
精镁收得率，%	73~77	>84	>8
精炼镁实收率，%	—	—	—
炉日粗镁产量，t/炉台	7.5~9	1.8~2	40 只罐（2.72t/ 20 只罐（1.36t
罐日粗镁产量，t	—	—	68

2.23 23、最轻的结构合金：镁-锂合金

锂的密度只有 530kg/m3，将它加入镁中形成的镁-锂合金是唯一的密度低于镁基体的镁合金，是当今密度最小、比强度最高的结构合金，镁-锂合金的另一特点是有良好的塑性加工成形性能，可进行冷加工。

根据二元镁-锂相图，在 589℃时发生共晶反应：

$L \rightarrow \alpha\text{-Mg} + \beta\text{-Li}$

在共晶温度时，锂在镁中的固溶度为5.5%Li，共晶点为7.5%Li，温度降低时，其溶解度几乎没有变化。β -Li为体心立方晶格固溶体，有良好的塑性，比α -Mg的还高一些。合金的锂含量大于5.5%时，组织中会出现强度很低而塑性高的β -Li，导致合金的强度性能下降而塑性上升。因此，镁-锂合金不能进行热处理强化，也不需要通过晶粒细化处理来提高塑性。

根据锂含时的不同和组织不同，镁-锂合金可分为三类：

含锂量低于5.5%的合金，其组织为Li溶于密集六方晶格镁中的α -Mg固溶体；

含＞5.5%Li~10.2%Li的合金，其组织为均一的β -Li固溶体晶粒。β -Li的晶格为体心立方，它的冷、热成形加工能力比α -Mg的高，允许变形量虽可达50%~60%，但仍比铝及铝合金的低得多。

Mg-Li合金的缺点是有很高的化学活性，锂易与空气中的氧、氢、氮反应，形成稳定的化合物。因此，Mg-Li系合金的熔炼铸造必须在惰性气体保护下进行或在真空条件下进行。镁-锂合金的抗蚀性不高，比一般常用镁合金的还低，还有相当严重的应力腐蚀开裂倾向。

二元镁-锂合金的力学性能不高，和Al、Zn、Si等元素一同加入镁中，虽可以显著提高强度性能，但是尚未获得广泛的应用，美国航空航天局（NASA）1960年研发的LA141A

是有代表性的 Mg-Li 合金，已用于制造人造卫星及航空器零件，此外还有 LA91、LAZ933 合金，它们含 9%~14%Li，其密度只有 1250 kg/m3~1350kg/m3，比弹性模量却很高。LA141A 和 LS141A 含金是用得较多的 Mg-Li 合金，它们含 13%Li~15%Li，前者还含 0.75%Al~1.75%Al，后者还含 0.5%Si~0.8%Si。Mg-Li 合金的比强度高，震动衰减性能强，可切削加工性优，是制造航空航天器的优秀结构材料。

LA141 合金的室温弹性模量为 42GN/mm2，与传统镁合金弹性模量的 45GN/mm2 相差不多，但它的密度为 1350kg/m3，比大多数常用镁合金的 1800kt/m3 左右的低得多。LA141 合金的挠曲刚度比同等质量传统镁合金的大一倍。LS141A 合金的弹性模量为 41GN/mm2，密度为 1330kt/m3，其挠曲刚度比 LA141 合金的大一些，为铝合金的 5 倍余。

LA141A 和 LS141A 合金的含锂量均＞11%，有较好的室温成形性能。LA91 合金的组织较复杂，为α +β ；LA141 合金的组织由体心立方晶格的固溶体和面心立方结构的 LiAl 及亚稳定的面心立方晶格的 AlLi2Mg 金属间化合物组成。镁-锂合金也可以产生一定的加工硬化作用。LA141 合金在 T7 状态应用（固溶处理-空淬-177℃稳定化处理）。稳定化处理可以削除镁-锂合金的应力腐蚀开裂敏感性。同其他镁合金一样可以进行焊接和热加工，但焊后必须对焊接部位进行应力消除处理，以防应力腐蚀开裂，总体来说，镁-锂合金的抗腐蚀性能

还不如常规镁合金的。

含量分别＜4%的 Mn、Zn、Cd 等可提高 Mg-Li 合金的抗蚀性，Mn 的效果最好；Si、Sb 显著降低合金的抗蚀性；Al、Sn 对合金抗蚀性的影响与其含量有关：含 0.6%~1.0%，合金的抗蚀性随含量增加而下降，＞1.0%后其抗蚀性随含量的增加而略有上升。向 Mg-Li 合金添加少量 Al 和 Ca 可在表面形成较稳定的 Mg(OH)2 基化合物保护层而提高合金的抗蚀性，还对合金的可成形性及抗蠕变强度有利。Mg-Li 系合金在潮湿中有强烈的应力腐蚀敏感性。

2.24 24、奔向太空的镁-钍合金

1928 年瑞典化学家贝采利乌斯（J.J.Berzelius）挪威黑色矿石中分离出钍，并按北欧神话中的战神 Thor 命名。钍长期暴露于大气中会失去光泽，钍粉在空气中可能自燃，纯钍有良好塑性加工性能，可加工成各种半成品，天然钍只有一种同位素 232Th 具有放射性。

根据二元 Mg-Th 相图，在 589℃，42%Th 时发生共晶反应，形成简单的二元共晶组织：L→α -Mg+Mg4Th。在共晶反应温度时，钍在镁中的固溶度为 max4.5%，并随着温度下降而减少，因而 Mg-Th 合金是可热处理强化的。由于合金凝固时偏析较为严重，所以含 Th 量 2%的铸造组织中即存在离异共晶体。Mg-Th 合金的组织为α -Mg 固溶体和分布于晶界的块状 Mg4Th

共晶化合物组成。

镁-钍合金是近 40 多年才发展起来的合金系，主要用于制造导弹和航天器零件，通常都无法回收，可以把它称为奔向太空的合金。在镁合金中，钍的作用和 RE 元素的相似。Th 可以提高镁合金在高达 370℃的高温下的抗蠕变强度，改善合金的铸造性能和含锆合金的可焊接性能。镁-钍合金的产钍含量通常为 2%~3%，二元镁-钍合金没有实用价值，一般还含有 Mg、Zr、Zn，鉴于环保方面的原因，宜尽量少用，可以采用性能相近的其他镁合金，或甚致铝合金。

以钍为主要合金元素的镁合金的耐热性能比 Mg-RE 合金的还强，目前在工业上获得实际应用的为 Mg-Th-Mn 系、Mg-Th-Zr 系、Mg-Zn-Th-Zr 系变形合金（见下表）。美国和俄罗斯在研发 Mg-Th 合金领域与推广其应用方面居世界领先水平，中国有这些方面的水平与它们还有相当大的差距。镁-钍合金的强化相为 Mg4Th，它有很高的热稳性，在 380℃以下不易软化，因而合金的耐热性得到显著提高。含 3%Th 的镁合金具有最佳的综合力学性能，强度和伸长率俱高，为此，合金的钍含量为 1.5%~4.0%。

将 Mn 加入 Mg-Th 合金，不形成三元的含 Mn 的化合物，不过只有当 Mn 含量较大（Th/Mn)≤5/1）才有含 Mn 相出现，合金的组织为α -Mg+Mg4Th+Mn。在常用 Mg-Th 系合金中只有当锰含量＞0.5%后才能出现含锰相。

少量 Zr(0.5%~1.0%)可显著细化 Mg-Th 合金的晶粒，提高合金的高、低温力学性能，若再添加 Zn，可进一步提高合金的晶粒，提高合金的高、低温力学性能，若再添加 Zn，可进一步提高合金的高温力学性能。Mg-Th 合金有时效强化能力，时效析出序列：

α -Mg→β ’’→β ’（Mg2Th）→β （Mg23Th6）

β ’’相可直接转变为平衡β 相，也可以先转变为中间过渡相β ’，再转变为平衡β 相。

通常，β ’’相对应于合金时效强化峰值。Mg-Th 合金中晶内细小弥散析出相和晶界钍化物的存在是这类合金这所以有高的抗蠕变强度。Mg-Th-Zr 合金的显微组织与 Mg-RE-Zr 合金的相倾，向前者加入锌可进一步提高其抗蠕变强度，可在晶界形成一种含锌的针状相。研究表明，Mg-Th-Zn-Zr 合金的 Th/Zn 之比约为 1.4 时具有最高的抗蠕变强度，锌对镁-钍合金时效过程的影响及相理尚未完全知晓。

2.25 25、神奇的稀土镁合金

稀土元素是元素周期表IIIB 族中的钪、钆、镧系等 17 元素的总称，常用 R 或 RE 表示。通常把镧 La、铈 Ce、镨 Pr、钕 Nd、钷 Pm、钐 Sm、铕 Eu 称为轻稀土或铈组稀土，钆 Gd、铽 Tb、镝 Dy、钬 Ho、铒 Er、铥 Tu、镱 Tb、镥 Lu、钇 Y 称为重稀土或钇稀土。稀土金属的化学活性很强，当和氧作用

时生成稳定性很高的 R2O3 型氧化物，中国稀土资源极其丰富，储量大、品种全、有价值元素含量高、分布广，按氧化物计算的工业储量为国外总储量的 2.2 倍。

稀土元素的性质极其相近，在镁中的固溶度较大，且固溶度随温度的降低而急剧减小，在 200℃时的仅为最大固溶度的 1/10。除钪以外的其他稀土元素与镁在 507℃~617℃内均存在共晶反应。富镁端共晶化合物类型随稀土素原子序数变化而改变。稀土在镁中的固溶度随其原子半径的增大而降低。Mg-RE 合金晶界上网状分布的低熔点共晶化合物可以抑制显微疏松的形成，因而合金有很好的流动性，良好的可铸造性能，铸态合金的组织由等轴α -Mg 固溶体晶粒和晶界网状化合物组成。时效时从α -Mg 中析出细小沉淀相，有相当大的强化作用，同时晶界上的网状化合物阻碍晶界移动，因而 Mg-RE 合金有高的抗蠕变强度，成为一群有特色的高温镁合金。

Mg-RE 合金有较大的时效强化作用，因为时效时从α -Mg 过饱和固溶体中沉淀与α -Mg 固溶体共格的 GP 区与β ’’相及β ’相，以 Mg-Nd 合金为例，其沉淀序列为：

α -Mg→GP 区→β ’’→β ’（Mg3Nd）→β （Mg12Nd）

GP 区呈盘状，与基体完全共格，过时效生成的平衡相为β （Mg12Nd），属体心四方晶系，与基体不共格。

Mg-RE 合金通常还含有锌和锆，Zr 可以显著细化合金铸

造组织，Zn 可以进一步提高合金的抗蠕变强度。镁-稀二元合金晶粒粗大，力学性能低，不能作为结构材料使用。加锆后，组织细化，才使铸造状态合金的力学性能上升到工程结构可以接受的水平，因此，Mg-RE 合金均含有一定量的锆，如 EK30A 合金（Mg-Th3%RE-0.7%Zr）是首个以稀土为主要合金元素的高温铸造镁合金，在 200℃以下有高的抗拉强度和抗蠕变强度，可以满足航空发动机一些零部件的工作环境要求。向 Mg-RE-Zr 系合金再加锌的四元合金具有更高的力学性能，EZ33A 合金是这类合金的典型代表，有取代 EK30A 合金之势。在 Mg-RE-Zr 合金中加银可获得抗拉性能大为改善的新型合金 EQ21A。

Mg-RE-Zn-Zr 合金的显微组织由α -Mg 固溶体和晶界上的块状化合物组成，锌的加入不但增加了晶界上化合物的数量，而且增强它们的连续性。在 EZ23A 合金中，稀土化合物为 Mg9RE。

近些年来，耐热 Mg-RE 合金成了热门的研究课题。钇在镁中的固溶度高达 12.5%，且随着温度的下降而减小，可形成有时效硬化能力的一系列合金。已开发出 Mg-Y-Zn-Zr 系合金、Mg-Y-Nd-Zn-Zr 系合金、Mg-Y-Nd-Zr 系合金。Mg-Y-Zn-Zr 系合金有良好的综合力学性能和可铸造性能，长期工作温度可达 300℃，若再添加 Nd，可进一步改善其热强性能。还有可与铝基铸造合金抗蚀性当的抗腐蚀性能。由于钇价高，且

不易与镁形成合金，可以用含 75%钇、钆、铒等重稀土元素的混合稀土取代钇。

在 Mg-Y-Nd 系合金中，Mg-6Y-2Nd 合金具有最高的抗拉强度和相当高的伸长率，WE54 是该系合金获得商业应用的头一个，有优秀的高温性能，已用于制造航空器与赛气汽缸，不过此合金在 150℃长期工作时，会有β ’’相的二次析出，使合金的塑性逐渐下降，以致不能再用。研究表明，适当减少钇含量，提升 Nd 含量，合金强度虽略有下降，但可以保持良好的塑性，WE43 就是这样的一个合金。

2.26 26、革命性的生物医用镁合金

所谓生物医用金属材料就是与生物体有良好的相容性，在体内有自动可降解性，并有可满足使用要求的力学性能的金属及合金，镁合金是可以全面满足这些要求的医用材料，过去医用金属材料为不锈钢，后来又出现了钛及钛合金，现在镁合金又呈现在医院手术台上，成为第三类医用金属材料，同时在医学应用领域它的性能比不锈钢、聚乳酸及钛的还略胜一筹，因此，医用镁合金的问世在生物医用金属材料发展征程上是有里程碑意义的，具有革命性的。

与其他常用金属生物医用材料相比，镁合金具有一系列的优点：

镁在一个 60kg 的人中正常含量为 25g,其中 50%存在于骨中，

是人体必需的主要元素之一。镁及镁合金的密度（1.74g/cm3~1.85g/cm3）远低于医用钛合金的（4.4g/cm3~4.5g/cm3）及不锈钢的（7.9g/cm3~8.2g/cm3），而与人骨的（1.8g/cm3~2.1g/cm3）相近。

镁是人体细胞内第二重要的阳离子，其含量仅次于钾的。镁能激活体内多种酶，抵制神经异常兴奋性，维持核酸结构的稳定性，参与体内蛋白质合成、肥肉收缩和体温调节。

镁及镁合金有高的比强度和比刚度，正弹性模量为41GN/mm2~45GN/mm2，比钛合金的（110GN/mm2~117GN/mm2）低得多，可有效地缓解应力遮挡效应。

镁的标准电极电位为-2.37V，甚低，在含有 Cl- 的人体生理环境中腐蚀降解的特点可将其发展成为可生物降解性金属材料。

可降解医用镁合金自进入新世纪以来就被誉为“革命性的金属生物材料”，而到医学界的材料工作者关注，已成为工业发展国家和中国在生物材料领域竞相发展的研究项目；德国 GKSS 轻金属研究所自 2007 年起每年获得 500 万欧元的经费支持，研究开发新型可降解镁合金，美国国家自然科学基金于 2008 年在北卡莱罗纳农业大学投资 1800 万美元建立革命性医用金属材料国家工程研究中心，主攻可降解镁合金为主的新型医用金属材料及植入器件；德国生物技术公司（Biotyonik）和 AAP 公司、美国的波士顿科学技术公司

（Boston Scientific）等医疗器械跨国企业均致力于可降解镁合金植入件的生产及临床应用研究；中国科学院金属研究所、重庆大学、上海交通大学、北京大学、郑州大学等也开展了可降解生物医用镁合金的研究，并取得了可喜的成果。

中国科学院沈阳金属研究所杨柯研究员等在研发 AZ31 镁合金心血管支架方面居国内先进水平，他们自行设计并采用激光切割技术加工支架，克服了镁合金自身塑性不足的缺点，通过表面改性处理实现了支架的分段可控降解，同时在支架外层制备上携带药物的可降解聚合物涂层。

上海交通大学研发出一种新型生物医用镁合金 JDBM，是一种镁-钕-锌-锆合金，具有较大的塑性，室温变形能力可达 30%，强度性能相当高，抗腐蚀性能优秀，能满足可降解镁合金心血管支架与骨科内植入材料(接骨板和骨钉)性能要求。该合金可用于制备外科植入材料与心血管支架等。

镁及镁合金具有比强度和比刚度较高、生物可降解吸收性特点，已引起国内外关注，有着相当大的应用潜力。

在心血管领域可作为血管支架，对血管壁起机械支撑作用，扩张管道，阻止血管弹性回缩，保持管腔血流畅通；可作为血管缝合线和血管夹；可用作血管吻合术用连接环。

在外科领域可用作骨板和骨钉、微型夹、血管瘤和大动脉瘤治疗的镁箭、多孔骨修复支架、骨折固定材料、牙种植材料、口腔修复材料、骨组织工程种植工程多孔支架材料；冠

状动脉植入支架材料；口腔植入材料和整形外科材料等。

目前镁合金在医用材料方面的应用开发主要集中于：研发高纯镁合金和新合金，可降解镁合金，材料表面改性等。

2.27 27、优秀的航天器镁合金 G04

中国科学院金属研究所是中国研发镁合金的主要基地之一,研究成功多种新型稀土变形镁合金,他们主攻 Mg-Gd-Y-Zr、Mg-Zn-Y-Zr、Mg-Y-Nd、Mg-Zn-Gd、Mg-Li-Zn-Y 系合金，其中的 Mg-10Gd-3Y-1Zn-0.5Zr 合金挤压材经热处理后有相当高的力学性能，Mg-Li-Zn-Y 系合金有最高的比强度，Mg-2Zn-1Gd 合金则有良好的韧性。他们研究成功一种高强韧 Mg-Zn-Y-Zr 变形镁合金（金属所内部牌号 G04 合金）是最有代表性的，在航天器获得了实际应用，取得了预期的减重效果。G04 合金锻件的物理和力学性能如下：

抗拉强度 Rm,N/mm2　　≥280

密度，kg/m3　　1840±0.02

热导率，W/(m·K)　　＞100

弹性模量 E，GN/mm2　　≥43

线膨胀系数α，X10-6/K　　＜25±1

热容量，KJ/(kg·K)　　0.966

锻件还有良好的可镀镍性能，镀层厚度应达到（20±5）μm，且均匀，表面无结瘤与漏镀，结合力方格和锉刀检验合

格，表面搭接电阻小于 5mΩ 。

在生产 G04 合金锻件时应严格工艺条件：

熔体净化处理是关键 镁合金易氧化，且其氧化物和精炼处理用的熔剂不易清除，因为它们的密度与镁熔体的相差不大，难以分离，不沉于炉底，上浮速度也慢。镁合金的纯净度对熔体铸造性能、合金的变形加工性能、半成品的力学性能与抗腐蚀性能都有很大的影响。金属研究所采用特殊的净化处理技术，使生产的 G04 合金锭坯在纯净上完全符合航天器零部件的要求。

严格控制热处理制度 在锻造之前必须对锭坯进行均匀化处理，以改善铸造组织，处理制度为：从室温加热到 320℃±10℃保温 4h、380℃±10℃保温 2h，420℃±10℃保温 8h，空冷。然后进行锻造，在 36MN 液压机上进行两镦两拔锻饼，锻造时必须精心控制锻造温度与锻造率，温度过高过低都会锻裂，变形率过大也会开裂，现在已成功制备达 100kg 的锻坯。

锻造工艺与人工时效制度对锻件组织与性能有明显影响 锻造压下量与方向对合金组织及性能影响甚大，应严格控制锻压率与锻压方向，以保持组织与性能的稳定性。锻件的最佳人工时效制度：（170℃±10℃）/24h。经此制度处理后，锻件的组织细密均匀，综合力学性能得到很好的优化。

锻件力学性能与其厚度关系密切 锻件尺寸特别是其最

终厚度对力学性能有着明显影响。当锻件厚度为 15mm 左右时，合鑫的力学性能明显上升，抗拉强度可达 300N/mm2~350N/mm2，厚度上升，力学性能下降。金属研究所全面掌握了锻件力学性能与其厚度的关系。

表面镀层　航天公司用金属研究所 G04 合金制造的神舟六号飞船电控箱及其他航天器用的一些零部件获得了成功的应用。制造电控箱壳体的最后一道工序是进行表面镀镍处理，以确保载荷在空间环境中使用时的导电性能和电磁屏蔽特性并赋予电控箱在地面环境长时间保存时的抗腐蚀性能。金属研究所为电控箱 G04 合金箱壳体开发出专业的化学镀镍工艺。镀层性能如下：镀层厚度 20μ m±5μ m，镀层厚度均匀，表面无结瘤、漏镀，结合力检验合格，表面任意两点的电阻小于 1mΩ，表面搭接电阻＜5mΩ，盐雾试验超过 1200h，在-40℃~80℃经 500 次冷热循环变化无剥落、起皮。

用 G04 合金制备的天宫 1 号、神舟 6 号飞船及其他几种型号航天器的一批批零部件实现了轻质材料物理性能（密度、导热、热膨胀系数、电磁屏蔽功能）、力学性能、规格尺寸（单件最大约 100kg）、加工成形性能、长期储存和航天环境下的抗腐蚀性能、冷热疲劳性能等要求的综合统一，解决了航天器相关系统的减重和镁合金在此类系统服役的安全可靠性问题，圆满地完成了各自承担的航天任务，为国家和人类的航天梦想做出了重要贡献。

2.28 28、ＪＤＭ系列高性能镁合金

JDM 系列高性能镁合金是上海交通大学轻合金精密成形国家工程研究中心与其他单位共同研发的高性能镁合金，牌号中的 JD 为“交通”（Jiaotong）的缩写，M 代表“镁”（magnesium）和汉字“镁”的拼音“mei”的缩写。他们对镁合金的组织、性能、加工成形技术作了系统的全面研究，所开发的高性能镁合金都含有稀土元素，代表性的合金有 JDM1、JDM2A、JDM3、JDM4 合金等，合金的成分是在系统研究了 Mg-Nd-Zn、Mg-Gd、Mg-Gd-Y、Mg-Gd-Zn、Mg-Gd-Ag、Mg-Y-Nd、Mg-Y-Sm、Mg-Dy-Gd-Nd、Mg-Y-Gd、Mg-Sm-Zn 系合金的基础上确定的。

研究人员针对镁合金强度较低和不易变形的问题，系统研究了 Gd、Y、Nd、Dy 等对组织和性能的影响，发现了稀土元素在镁中的固溶规律及合金的时效特性，在研究镁-重稀土体系的显微组织和精细结构基础上，找到了垂直于基面的时效析出相，探明了 Mg-Gd-Y 系合金的 4 阶段时效析出序列：

α -Mg→β ’’→β ’→β 1→β

首次发现了新的过渡相β 1，它是通过β ’相原位转变形核长大的，修正了日本学者对该体系时效序列的描述，研制成形有自主知识产权的 Mg-Gd-Y-Zr 系高性能镁合金，　　其 T6 铸件的抗拉强度＞400N/mm2，轧制板材的抗拉强度 Rm＞

500N/mm2，且有优良的抗拉 Rm 和抗蠕变强度。上海交通大学研制的典型稀土镁合金的基本特性如下：

JDM1 铸造合金　除主要合金元素 Nd 外，还含有少量的 Zn、Zr、Ca，室温抗拉强度 Rm=300N/mm2、屈服强度 Rp0.2=140N/mm2、伸长率 A=10%，工作温度可达 250℃。

JDM2A、JDM2B 铸造镁合金　以重稀土元素 Gd、Y 等为主要合金元素的高强度合金，室温力学性能：屈服强度 Rp0.2=240N/mm2~260N/mm2，抗拉强度 Rm=370N/mm2~400N/mm2，伸长率 A=3%~5%，铸造状态的显微组织由α -Mg 与离异共晶 Mg24（Cd,Y）相构成，工作温度可达 300℃，它的高、低温力学性能比传统的高强度耐热镁合金 WE54 的还高。

JDM2B 铸造镁合金　是 JDM2A 合金的发展，用于铸造高温零件，它的 Gd、Y 含量的比 JDM2 合金的低一些，它的室温力学性能：F 状态锻件的抗拉强度 Rm≥310N/mm2，T6 状态锻件的 Rm≥420N/mm2；F 状态锻件的屈服强度 Rp0.2≥215N/mm2，T6 状态的 Rp0.2≥335N/mm2；F 状态锻件伸长率 A≥9.0%，T6 状态的 A≥5.0%。

JDM3 高稀土铸造镁合金　主要合金元素为 Y、Gd、Zn，它的室温屈服强度 Rp0.2=260N/mm2，抗拉强度 Pm=290N/m2，伸长率 A=0.6%。JDM3 合金的显微组织由α -Mg 与晶界上的 Mg12ZnY 化合金组成，因此，塑性差，但有良好的高温性能。

JDM4 含 Ag 的与高稀土的镁合金　主要合金元素的重稀土 Gd、

Y，还含有少量的 Ag、Ca、Zr，铸件组织由α -Mg 和离异共晶 Mg5Gd 组成，固溶处理与时效后强度显著升高，伸长率明显下降。铸件室温力学性能：屈服强度 Rp0.2=300N/mm2，抗拉强度 Rm=410N/mm2，伸长率 2.3%。JDM4 合金是目前世界上屈服强度最高的铸造镁合金。

新型镁-稀合金的研制充分发挥了中国稀土和镁资源的优势，其性能达到领先水平，促进了中国镁及稀土产业的发展，受到国际材料领域的高度关注。

可热处理强化稀土压•铸镁合金　为了克服常规镁合金压铸件内在气孔率较高、可焊性差、伸长率和韧性低等不足之处，交通大学重点对 Mg-Sm-Zn、Mg-Nd 系可热处强化合金及其真空工艺进行全面深入研究，取得了可喜的成就，研究中心副主任曾小勤教授在 2011 年 7 月 21 日于德国吕内堡举行的国际轻金属大会上获阳 2011 年度镁合金大奖。

2.29 29、重庆大学等研发的镁合金

除了中国科学院金属研究所与上海交通大学对镁合金的基础研究与发展新型镁合金做了大量工作外，重庆大学、中南大学、山西闻喜银光镁业集团等在这方面也做出了突出的贡献。

重庆大学的成就

重庆大学成立了国家镁合金工程技术研究中心，对于新

型稀土镁合金的研究主要集中在 Mg-Ga-Y-Mn 系、Mg-Zn-Zr-RE 系、Mg-Zn-Mn-Re 系、Mg-Al-Zn-Sr 系和 Mg-Li 等合金上，先后研究的并已成型或初步成型的合金有：Mg-10Gd-5Y-0.6Mn-1.0Zr 合金，挤压材的抗拉强度 Rm=324N/mm2、屈服强度 Rp0.2=286N/mm2、伸长率 A=4.29N/mm2，T5 状态（225℃/18h）材料的室温力学性能：抗拉强度 Rm=411N/mm2，屈服强度 RP0.2=388N/mm2、伸长率 A=3.48%;Mg-10Gd-5Y-0.6Mn-0.4Sc 合金，其挤压材的室温力学性能：抗拉强度 Rm=314N/mm2、屈服强度 Rp0.2=282N/mm2、伸长率 A=4.68%，T5 状态（225℃/18h）材料的抗拉强度 Rm=406N/mm2、屈服强度 Rp0.2=406N/mm2、屈服强度 Rp0.2=385N/mm2、伸长率 A=3.41%；此外，研发的合金还有：Mg-10Gd-5Y-0.6Mn-0.3Ca，Mg-6Zn-0.55Zr-0.75Sc、Mg-2Zn-1Mn-0.1Ce,Mg-4Zn-0.5Zr-5Y，Mg-1.5Zn-0.5Zr-0.1Nd，Mg-7Y-0.5Zr,Mg-9Zn-0.6Zr-0.5Er,Mg-1.5Zn-0.6Zr-4Er，Mg-8Zn-0.6Zr-1Y 等。他们对 Mg-Zn-Mn 系合金挤压材进 T4+双级时效处理后的室温力学性能达到：抗拉强度 Rm=360N/mm2，屈服强度 Rp0.2=340N/mm2，伸长率 A=6%。

中南大学对稀土镁合金的研究

中南大学对新型变形镁合金的研究主要集中于 Mg-Zn-Y-Zr 系，Mg-Yb-Zr 系，Mg-Zn-Nd-Y-Zr 系、Mg-Gd-Y-Zr

（Mn）系合金，试验合金见下表，而北京有色金属研究总院、郑州大学、西安理工大学等。则主攻的合金系为Mg-Gd-Y-Zn-Zr 系、Mg-Gd-Y-Nd-Zr 系和 Mg-Y-Nd-Zr 系等。

山西闻喜银光镁业集团开发的新型镁合金

银光镁业公司是全球最大的综合性镁业公司之一，研发出了一系列的新型镁合金（见下表），在生产中获得广泛应用，已被一汽、军工企业所采用，并有出口。

合金	产品及状态	室温力学性能，N/mm²		
		Rm	Rp0.2	A,%
Mg-4.9Zn-0.9Y-0.7Zr	轧制(开轧温度 400℃)	365	305	4.0
Mg-5Y6-0.5Zr	铸造	189	106	7.5
	挤压	304	268	12.9
Mg-6Zn-2Nd-1Y-0.5Zr	挤压+轧制	359	238	13.0
	挤压+轧制+T5(150℃/22h)	350	281	13.0
Mg-9Gd-4Y-0.65Mn	挤压+T6(520℃/2h+150℃/24h)	336	310	11.2
	挤压+轧制+T5(225℃/24h)	360	320	5.0
Mg-9Gd-4Y-0.6Zr	挤压+T6(480℃/2h+150℃/24h)	320	298	4.5
	挤压+轧制+T5(225℃/24h)	370	350	3.5

分类及状态		牌号	抗拉强度，N/mm²	屈服强度，N/mm²	伸长率，%	应用
铸造合金		YGZ01	250	140	10	电动车车轮
		YGZ02	270	150	10	摩托车轮
		AZ91HPX	274	174	8	汽车耐热件
变形合金	挤压状态	YGB04	313	232	13	通用型材
		YGB04-1	280	178	17	通用型材
		YGB08	346	250	14	军工材
		YGB09	405	340	10	航空航天器材
		MG26	380	326	15	航空航天器材
	轧制状态	YGBD01	-	-	25	电池专用材

注：YG 代表银光(yinguang)，Z 代表铸造(zhuzao)，B 代表变形(bianxing)。

2.30 30、特色鲜明的镁合金

中国在发展镁合金方面特别是对镁-稀土合金的研发居世界领先地位，受到全球刮目相看，除了前面谈的一些成就，主要成就还有：

低成本非稀土镁合金

目前发展的新型镁合金的 85%以上都或多或少含有稀土，它们的价格昂贵，提高了合金的价格，使其身价倍增，但在性价比上却大打折扣，推广应用不易。因此，研发低成本非稀土型的高性能镁合金显得非常必要，中国在发展这类合金方面也取得了非凡的成就，硕果累累，如上海交通大学的 ASZ511Sb 合金、AT72 合金、AX51 合金。

ASZ511Sb（Mg-5Al-1Zn-1Si-0.6Sb）合金，它是一种金属型重力铸造合金，不含高价合金元素，其主要合金元素为铝、锌、硅，还含有少量的锑与微量的稀土，用于金型重力铸造，铸件的室温屈服强度 95N/mm2，抗拉强度 Rm=235N/mm2，伸长率 A=12%。合金的显微组织为α -Mg+共晶体，其晶体中的 Mg2Si 呈汉字状，Sb 的加入显著细化了 Mg2Si，使它成为均匀分布的颗粒。该合金在 200℃、50N/mm2 条件下的抗蠕变强度与稀土耐热镁合金 AE42(Mg-4Al-2RE-0.2Mn)合金的相当，因此可以在 100~150℃的温度下长期工作。该合金在 5%NaCl 盐雾试验时的腐蚀速率比 AZ91D 合金的低 10%。

AT72 铸造镁合金也是上海交通大学研发的，用于金属型重力铸造，以铝、锡为主要合金元素，还含有锌、锰、稀土等微量元素,金属型重力铸件的室温屈服强度 Rp0.2=90N/mm2，抗拉强度 Rm=225N/mm2，伸长率 A=7%。铸态合金的显微组织以α -Mg 固溶体为基体，其中分布着离异共晶 Mg17Al12 和少量的 Mg2Sn，固溶处理后，Mg17Al12 溶入基体，但仍有少量的 Mg2Sn 相。该合金的铝含量不多，有较好的压铸成形性能，与 AZ91D 合金的相当，但因铝的含量少，仅 7%，重力铸件的时效强化效果较弱。AT72-T5 合金压、铸件的室温力学性能：屈服强度 Rp0.2=125N/mm2，抗拉强度 Rm=225N/mm2，伸长率 A=4.5%。该合金的抗腐蚀性能与传统 AZ91D 合金的相当。

AX51 合金是一种压铸合金，以 Al、Sr 为主要合金元素，Ti 为次要合金元素，是上海交通大学研制的，重力铸件的典型组织为α -Mg+共晶体（α -Mg+Al4Sr），含钛的 Mg-5Al-1Sr 合金的显微组织发生了明显的变化，晶界上的共晶组织由粗大的层片状转变为球状与短棒状，因而力学性能有较大提高。AX51 合金压铸件的典型力学性能：屈服强度 Rp0.2=138N/mm2，抗拉强度 Rm=270N/mm2，伸长率 A=7%。Mg-5Al-1Sr-Ti 合金在 175℃/70N/mm2 的稳态拉伸蠕变速率比不含 Sr、Ti 合金的小 1 个数量级。

功能材料

镁合金的是一类前景广宽的功能材料，典型的功能材料

为：镁储氢材料、医用镁材、阻尼镁材、镁电池材料、镁阳极材料等。功能镁合金是一类新型的高技术材料，是镁产业的一个新领域，是世界材料工作者关注的重要焦点之一。镁合金是一类可降解新型医用材料，具有巨大的优势和潜力。在常压与约 250℃时镁与 H2 可形成 MgH2，而在低压与重高温度下又能释放氢，因而是一类有效的储氢材料，纯镁的储氢率高达 7.6%，即 10kg 镁中可以储存 0.76kg 氢，把氢储存在合金中，可以控制释放速度，保证使用安全性。

镁的电极电位低，具有非常优秀的电化学性能，可以作为一次电池与二次电池的电极，可用于制造各种高容量电池，镁与锂的物理化学性能相似，但镁电池无毒，对环境友好，安全性高、易操作，资源丰富，价格合理，作为电池材料具有极大的优势。目前商用镍氢电池的储氢材料为 LaNi5，储氢量仅约 1.4%，比容量约 330mAh/g，限制了镍氢电池的应用的推广。上海交通大学通过向 LaNi5 添加少量 Mg，大大提高了其电化学容量，其比容量达到 400mAh/g，并有良好的循环稳定性。

2.31 31、镁合金是怎样变强的

纯镁的强度低，即使是工业纯镁也如此，而且塑性与加工成形性能差，不能作为结构材料使用，必须想方设法改变它的这种不尽人意的本性，提高它的这些性能，使它能为人

类社会的进步与人们生活水平的提高作出更大的贡献。研究表明，通过常用的纯金属物理冶金措施，也可在很大程度上提高纯镁与改善它的物理、化学、力学与工艺性能，尽管效果并不如铝及铜的那么大，造成差别的主要原因，在于它们的本性不同，铝与铜为面心立方晶体结构，而镁的晶体结构为密集六方。金属及合金的常规强化方法有：合金化、压力加工、热处理、晶粒细化、添加增强材料等，这些方法可以单独运用，也可以组合运用，都可以大大提高纯金属的力学性能，或使某些性能得到改善。通常，镁及镁合金的强化措施：固溶强化，沉淀（析出）强化，弥散强化，细晶强化，形变强化，复合强化等。

固溶强化

固溶强化即是向镁中添加可固溶于镁的合金化元素如铝、锌等，由于合金元素和基体元素镁的原子半径和弹性模量的差异，镁的晶格会产生相当大的畸变，引发应力场，阻碍位错运动，从而使基体强化，提高材料的力学强度。由此可见，溶入的溶质原子越多，也就是说它的浓度越大；溶质与溶剂镁原子半径和弹性模量相差越大，合金的强度性能也越高。

沉淀（析出）强化

此种强化是提高镁合金强度性能特别是室温强度的主要机制。在合金中若合金元素如铝与锌的固溶度随着温度的下降而减少，便可以产生时效强化。将这类镁合金在高温下加

热一定时间即进行固溶处理，就可以获得含铝和/或锌过饱和的镁固溶体，然后在较低的温度（175℃~200℃）进行时效处理，可从固溶体内析出弥散的沉淀相，产生时效强化作用。时效强化效果大小决定于：析出相质点直径、形貌、硬度与基体间界面的性质等。较为理想的状态：析出质点细小，在基体中分布均匀，在晶体上与基体的共格，在温度升高时不会长大或不易粗化，如果能形成类似于可热处理强化的铝合金中的 GP 区的原子聚集团则更好。

弥散强化

在镁合金熔体凝固过程中形成的弥散相与从固溶中析出的沉淀相不同，它们有相当高的熔点，在镁基固溶体中的溶解度极低，因而在热力学上很稳定。在这种弥散强化的镁合金中，当合金发生塑性变形时，弥散质点阻碍位错运动，因而合金在较高的温度仍具有相当高的强度。

细晶强化

不管什么合金，晶粒细小材料的性能特别是力学性能总比粗大晶粒材料的高，因此，细化晶粒也是提高镁合金力学性能的有效措施。细化镁合金晶粒的主要方法：向熔体中加锆，增加异质晶核；采用快速凝固。细化铸造组织具有相当大的强化效果。镁及镁合金的晶粒细化剂除锆外，还有稀土 RE、钙 Ca、锶 Sr、硼 B、C2C16 等，用 C2C16 可以同时达到除气和细化晶粒的双重效果,向 AZ31 镁合金熔体加入 C2C16，

可形成作为异质晶核的 Al-C-O 化合物质点。AZ31 合金经 C2C16 变质处理后，晶粒尺寸由 280μ m 减少到 120μ m，抗拉强度明显提高。热加工等塑性变形也能细化镁合金晶粒。

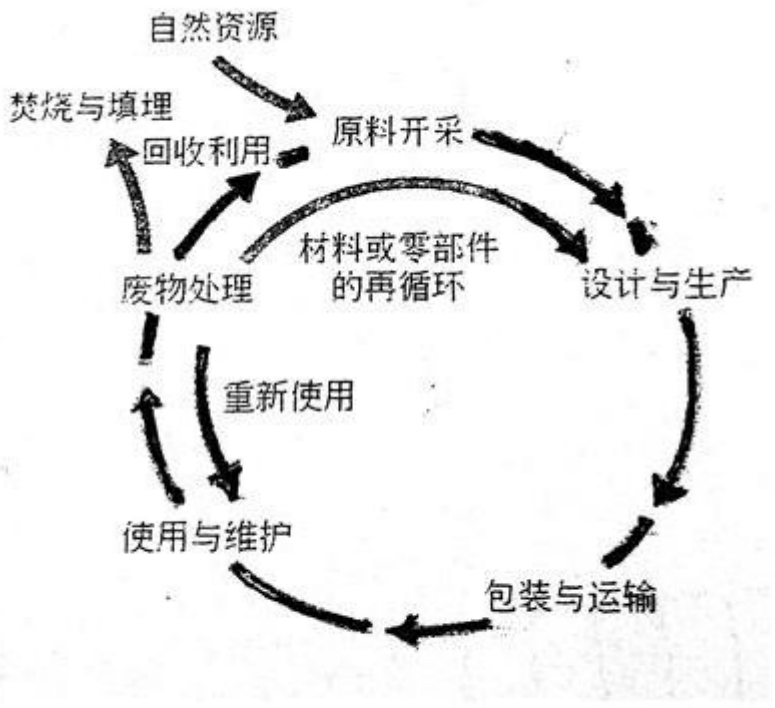
塑性变形强化

镁、镁-铝合金、镁-铝-锌合金、镁-锌-锆合金等都可以通过热塑性变形细化晶粒，它们在热挤压、轧制时会发生动态再结晶，可使晶粒得到细化；等角挤压可使镁合金得到细小的晶粒组织，AZ31 合金在 160℃~223℃等角挤压后的晶粒尺寸为 0.5μ m~3μ m。

复化强化

向镁及镁合金中添陶瓷颗粒、纤维或晶须等增强相可显著提高它们的强度、弹性模量，改善它们的耐磨性能和提高高温强度与抗蠕变性能等，镁基复合材料有着广泛的应用前景。

2.32 32、话说镁及镁合金的生命周期



材料/产品生命周期示意图

材料的生产、使用、废弃、循环再生与环境之间的关系既相互联系又相互影响与相互制约着，形成一个紧密的极为复杂的系统。因此，应全面系统地看待材料与自然环境的关系，材料与产品生命周期评价是实现这一目标不可缺少的方法，这里说的“产品”一般是指制造业的产品系统，也含服务业提供的服务系统。生命周期是指产品系统中前后衔接的一系列阶段，从原材料的获得或自然资源的生成，直至最终处置，见如下的示意图。

生命周期评价（Life Cycle Assessment，LCA）是对一个产

品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇集与评价。产品系统是通过物质和能量联系起来的，具有一种或多种特定功能的单元过程的集合。

LCA 评价通过考察产品、行业甚至产业链的整个生命周期，对决策过程中的环境因素作出评价。它可以是战略性的，也可以是具体运营和细节操作方面的，从而促使产业内部行为更符合可持续发展的原则。当今 LCA 方法已被广泛应用于产品开发、生产管理、采购与消费、资源与废弃物管理、区域规划乃至工业技术研发等各种与产品生产和消费有关的活动中，形成了诸如产品生态设计、清洁生产、环境标志与声明、绿色采购、产品环境政策、技术环境评价等各种研究和应用方向。

镁是最轻的结构材料，优点多，随着汽车对产品轻量化和节能减排等要求的提高，为镁的发展创造了大好机遇，成为世界一些国家开发与研究的热门课题，但是国际上对镁及镁合金产品生命周期的环境影响还缺乏全面系统的分析和评价，这也成为制约其大量使用的一个重要因素。目前，德国、澳大利亚和中国等的冶金科学家和材料界人士正致力于原镁提取工艺过程及其产品的 LCA 研究，取得了可喜的成果。2003 年澳大利亚科学家的研究表明，电解法提取原镁的温室气体排放为 20.4~26.4kgCO2 当量/kg •Mg，而中国皮江法炼镁（含生产硅铁的电耗）的为 37~47kgCO2 当量/kg • Mg，后者的约

为前者的 2 倍，这成了国际上对中国皮江法炼镁环境影响的负面评价。然而，北京工业大学材料环境协调性评价中心最新的研究结果表明，2009 年中国较先进的皮江炼镁法的温室气体排放强度为 25.6kgCO2 当量/kg·Mg，几乎与电解法的平均水平相当，而且还有进一步降低的空间。这得益于原镁提取过程中采取了综合的节能减排措施，例如全面改造炉窑，采用清洁能源、蓄热式高温空气燃烧技术及余热利用技术等。

与铝工业的 LCA 研究工作相比，对镁及其产品的 LCA 研究还处于初级阶段。铝、镁等轻质材料是减重的最佳材料，对于以汽车为代表的交通运输工具轻量化、节能减排具有十分重要的意义。国际铝业协会在一份报告中称，汽车质量每减轻 10%，油耗可降低 6%~8%，有研究指出，汽车多用 1kg 铝在服役期间排放的 CO2 就可以下降约 20kg；如果每辆汽车使用 70kg 镁合金，每年排放的的 CO2 可减少 30%以上。

最近的研究结果显示，采用镁材制造汽车零部件与铝材的相比，在全生命周期内排放的温空气体大体相等。不过，还有研究认为，尽管采用镁材料制造的汽车前端零部件比铝的更轻，但在 20 万 km 的行驶距离内并没有像铝件那样达到大幅度削减温室气体排放效果，另外，镁废料的回收再生效率也比铝的低一些。

2.33 33、熔炼镁合金用的原材料

制备镁合金零件的工艺可分四大类：铸造冶金法，快速凝固/粉末冶金法，喷射沉积法，半固态成形法。除这 4 种方法，还有用各种压力加工塑性成形工艺生产的镁及镁合金半成品（板、带、管、棒、型材与锻件）制造的零部件。但用半成品制造的零部件仅占总镁合金件的 15%左右，而在前 4 类零部件中，用铸造冶金法生产的又占 95%以上。因此，用铸造冶金法生产镁合金零件占总量的 80%强。而在铸造冶金法制造的镁合金件中，用压铸法生产的竟占 90%左右。

不管是制备压力加工的镁合金锭还是生产镁合金零件，熔炼是一道极为关键的工序，因为它对熔体品质进而对材料与铸件的性能有着决定性的影响。不管是原材料品质，还是熔剂、熔炼工艺和设备、工具等的品质都对熔体品质有影响，同时与其他常用金属相比，镁的化学性能活泼得多，其熔体极易与氧、氮、水等发生化学反应，发生燃烧与爆炸的机率也更大些，镁及镁合金的腐蚀性能对杂质元素如铁、镍、铜等非常敏感。因此，在熔炼镁合金时必须严格遵守操作规程、熟记安全规程、精心操作。

原材料

配制镁合金的金属原料有镁、锭、铝锭、锌锭与中间合金（镁-锰、镁-锆、镁-钕、铝-铍、铝-镁-铍、铝-镁-锰）、

混合稀土等，以及铍氟酸钠，回炉工艺废料。它们的品质、化学成分与级别应符合各自的标准。各种镁合金的回炉料与工艺废料都可以作为同牌号合金炉料的组成部分，不过同时使用一级和二级回炉料时，其用量之和不得大于炉料总质量的 80%，同时使用二级和三级回炉料时，其用量不得超过炉料总质量的 40%。

待装炉的各种炉料应洁净干燥，没有油、氧化物、沙土和明显的锈蚀，中国自上世纪 50 年代末生产镁合金以来，发生多起爆炸事故，还有人员死亡，大都是炉料中混有水份引起的。生产不同牌号铸件与铸锭时，应特别注意，不得混料，特别是含锆的镁合金不得与含铝的镁合金料混淆。

熔剂

由于镁及镁合金在熔炼过程中易氧化与烧损严重，需用熔剂保护，这种熔剂称为覆盖剂。熔融的覆盖剂在表面张力作用下，在镁熔体表面形成一层连续的有一定厚度的致密的覆盖层，隔绝空气和水气，防止镁的氧化，抑制镁的燃烧。

镁合金熔体中的氧化夹杂物、熔剂夹渣和气体溶解度比铝合金熔体的高得多。因此，为获得高品质的熔体，必须对其进行精炼净化，起净化作用的物质被称为精炼剂。它对镁熔体起精炼净化作用，对夹杂物应有良好的润湿、吸附能力，并利用熔剂与镁熔体的密度差，把金属夹杂物随同熔剂自熔体中排除。由此可见，熔剂应具有如下的性质：熔点低于镁

及镁合金的；有足够高的流动性和表面张力；有一定的粘滞性；润湿坩埚和炉体；有精炼净化能力；在 700℃~800℃的密度比镁合金的高；与镁合金及　　炉壁不发生化学反应。同时，还必须满足以下要求：

能够减少或防止镁熔体表面氧化与燃烧；

易与镁熔体分离，能有效地去除熔体中的氧化物、氮化物等；

不含对熔体有害的夹杂物与元素；

对环境友好，原料损耗低；

原料来源广，价格合理，不会明显提高产品的成品。

当前应用的镁合金熔剂大都是碱土金属氯化物和氟化物如 MgCl2、KCl、BaCl2、CAF2、MgO、CaCl2 的混合盐。一般来说，以 MgCl2 为主要成分的熔剂用于 Mg-Al-Zn、Mg-Mn 和 Mg-Zn-Zr 系合金的熔炼，而对于含有 Ca、La、Ce、Nd、Th 等元素的合金，应用不含 MgCl2 的专用熔剂。

在镁合金熔炼过程中还使用硫磺、硼酸 HBO3、氟化物（NH4BF4、NH4HF、NH4F）和烷基磺酸钠 RSONa 以防止镁熔体在浇铸和充型时的氧化和燃烧。硫与镁熔体接触时形成 SO2 保护气体，沸点为 444.6℃，另外镁可与硫生成 MgS 膜，减缓熔体氧化。硼酸受热脱水生成 B2O3，与 Mg 反应生成致密的 Mg3B2 保护膜。氟化物与镁接触后分解出 HF 和 NH3 等保护气体，不过这些气体有毒，且有强腐蚀性，因此现在多 RSONa，可与镁反应生成 SO2 和 CO2，并能与镁生成 MgS 致密保护膜。

2.34 34、镁合金熔炼前要做哪些准备工作

镁及镁合金的最大特点之一是易氧化与燃烧，同时还有较大的爆炸敏感性，因此对熔炼炉料、辅助材料、熔炼与铸造设备、工具等都有特殊要求，应精心准备。

配料

应根据国家标准、厂内标准与车间配料标准做好配料工作，为了减轻镁合金的氧化与防止其燃烧，可向配料中添加小于 0.002%Be，也可以添加微量 Ca，它们可在熔体表面形成致密氧化层，例如含 Ca 的 AZ91 合金的表面层由三层组成：最外层为 CaO，中间层为 CaO 与 MgO 的混合物，最内层主要为 A1203。它们能防止氧渗入。

Zr 是 Mg-Zn 系、Mg-Re 系、Mg-Th 系等合金的晶粒细化剂，在配料中不可或缺，常以中间合金形式加入，可按车间配料标准添加，新料添加 7%-10%中间合金，回炉料按 3.5%~5%中间合金。配制 ZM6 合金时，以 Mg-Nd 中间合金形式加入，Nd 含量为 25%~40%，Nd 是指其含量不小于 85%的混合稀土，其中 Pr+Nd 之和不小于 95%；配制 ZM5 合金炉料时，大型厚壁铸件的铝含量取下限值，对薄壁铸件取上限值。

炉料及辅助材料

炉料及辅助材料应洁净无水分，油封镁锭除油后，应进

行喷砂处理并预热至 150℃以上，回炉料也应作喷砂处理与预热到 150℃以上。熔剂可外购也可以自制，使用前都应于 120℃~150℃干燥 1h~2h。洗涤熔剂光卤石或 RJ-1 置于坩埚内加热至 750℃~780℃，其量不得少于坩埚容量的 80%，在使用过程中应经常打捞熔渣。若熔渣太多洗不净工具时，应换新的洗涤液。洗涤熔剂在连续熔炼 20 炉后应全部更新，也可用 43%NaCl+57%MgCl2 的熔剂作为洗涤液。

变质剂可用破碎的粒度为 10mm 的天然菱镁矿配制，配制后预热到 100℃~150℃，保温 2h，也可以用轻质碳配钙取代菱镁矿。使用六氯乙烷时需压成圆柱体，压实密度为 1.8g/cm3 左右。

配制防护剂时，按 1：1 比混匀硫磺粉与硼酸，碾碎过 70 目筛再结块，保存于有盖的干燥容器内。

熔炼炉与坩埚

熔炼镁合金大都采用间接加热式坩埚炉，其结构与熔炼铝合金的坩埚炉相似，但由于它们的物理化学性能有较大差异，因而坩埚材料与炉衬材料也大相径庭，而且对炉结构也应作适当修改。

熔炼炉的种类和规格主要取决于铸造规模，小型铸造车间通常采用升出式坩埚炉，大规模铸造车间则采用一系列坩埚炉，在坩埚内进行熔炼、处理、稳定化和存储，熔体从一个坩埚转注到另一个，然后从最后的坩埚直接浇注或手工浇

注于铸型中。熔体转注应平稳，防止湍流，以免氧化。当前，间接加热式坩埚熔烧法因热效率低，已很少采用，无芯感应电炉虽然初始成本较高，但运行成本较低，占有用空间也小。

熔炼镁合金的坩埚常用含碳量小于 0.12%的低碳钢焊制而成，钢中的杂质铜和镍严重降低镁合金抗蚀性，其含量应分别小于 0.10%。熔炼之前应精心准备坩埚。坩埚容量一般为 35kg~350kg，旧坩埚可继续使用，但其最小壁厚应不小于有关规程的规定。

应定期清除坩埚底部的残渣，因为它的热导率较低，可能产生过热，引发安全事故；还必须定期用水浸泡坩埚，清除结垢。

熔炼浇注工具

生产镁合金铸件用的工具除浇包外，还有撇渣勺、残渣盘、搅拌器、精炼勺、钟形罩、熔剂铲等，它们都是用与坩埚化学成分相同的钢制成的。准确控制镁合金熔体温度非常重要，可用铁-康铜或镍铬-镍铝型热电偶测量，采用低碳钢或无镍不锈钢管保护热电偶。

2.35 35、镁合金怎样炼出来的

镁及镁合金熔体易与氧、氮、水气等发生反应，镁与 1g 氧化合释放 598J 热，而铝释放的为 531J，比镁释放的低 11.2%。通常，氧化物生成热越大，分解压越低，则与氧的亲和力越

强。由氧化物生成热和分解压数值可知，镁与氧的亲和力比铝与氧的大，镁与氧的氧化膜 MgO 疏松，致密度系数α =0.79，比 A1203 的 1：28 小得多，没有保护作用。温度较低时，镁的氧化速率不大，高于 500℃时显著加快，超过 700℃则急剧上升，熔体一旦遇氧就会发生急剧氧化而燃烧，放出大量的热。反热生成的 MgO 绝热性能好，反应界面产生的热不能及时向外散发，从而提高界面温度，造成恶性循环加速镁的氧化，燃烧反应更加激烈。当界面反应温度高于镁的沸点 1107℃时，熔体大量气化，发生爆炸。

无论是固态镁还是液态镁均能与水发生反应，生成 MgO 并放出 H2，H2 又与 O2 化合生成水，水又受热急剧汽化，会导致猛烈的爆炸。因此，熔炼镁合金的炉料、工具、熔剂等均应干燥。

镁可与 N2 反应生成 Mg3N2，不过 Mg-N2 反应比 Mg-O2 反应缓慢得多。镁与氩、氦、氖等不发生化学反应，可防止镁熔体燃烧，但不能阻止镁的蒸发。因此，在熔炼镁合金时必须采取有效的措施防止其氧化、燃烧与爆炸，目前的措施有熔剂熔炼工艺与无熔剂熔炼工艺。然而熔剂形成的膜层隔绝空气的效果并不十分理想。

熔剂保护熔炼

熔剂保护熔炼就是在镁合金熔炼过程中，熔体表面存在一层致密的连续隔绝空气的保护层。每种镁合金都有各自的

专用熔剂，使用前务必阅读供应商的说明书，严格按说明书使用。如果熔炼中有氯排出，必须采用有效措施收集。浇注前，应仔细撇尽熔体表面浮渣，浇注后，在熔体表面撒一层硫粉，减轻凝固时氧化。熔剂成分及牌号见 HB/Z5123。

无熔剂保护熔炼

压铸镁合金时采用熔剂熔炼会带来操作上的诸多困难，特别是热室压铸尤为不便，同时熔剂夹杂更加突出，上世纪 70 年代开发的无熔剂熔炼工艺在镁合金熔炼发展史上有着里程碑意义。大量研究表明，CO2、SO2、SF6 等气体对镁及镁合金熔体有良好的保护作用，特别是 SF6 的效果尤为卓越。

气体保护机理

液态镁在干燥纯净的 CO2 中氧化速度慢，高温下可发生化学反应形成固态 MgO 与无定型碳，它可以填充于氧化膜间隙处，提高熔体表面氧化膜的致密性，同时还能强烈地抑制镁离子扩散到表面膜的表面，从而阻抑镁的氧化。

镁与 SO2 反应生成固态 MgO 与 MgS，在熔体表面形成一层致密的保护性强的 MgS-MgO 复合膜层。

SF6 是一种人工制造的无毒气体，它的密度为空气的 4 倍，在室温下很稳定，但 SF6 的混合气体发生化学反应时可能形成有刺激性的有毒气体。SF6 与镁反应可生成固态 MgF2 与 SO2F2.MgF2 的致密度高,可与 MgO 形成连续的致密氧化膜。值得注意的是，SF6 应是干燥的，否则水分会大大加剧镁的

氧化，还会生成有毒的 HF 气体。

SF6 保护气氛

SF6 是一种非常有效的保护气氛,能显著降低镁的烧损，得到普遍采用。实验表明，保护气氛中含有 0.01Vol.%SF6 就有高效的保护功能，但在实际操作中，为了补充 SF6 与熔体反应和泄漏损耗，SF6 的浓度应高些。SF6 保护气氛有两种：干燥空气与 SF6 的混合物，干燥空气、CO2、SF6 的混合物。

SF6 的价格高且有潜在温室产应，就尽量控制 SF6 的排放量。保护气氛中的 SF6 浓度不得超过 2Vol.%，否则会引起坩埚损耗。SF6 是影响镁合金生命周期（LCA）的主要因素，也是制约镁成为 21 世纪绿色材料的关键因素。2000 年国际镁业协会（LMA）呼吁行业开发新的保护气体以取代 SF6。

2.36 36、话说镁熔体净化处理

镁的化学性能活泼，在熔炼铸造过程中易受环境影响，进而影响熔体的品质与材料性能,导致铸件出现气孔、夹杂、夹渣和缩孔等缺陷，它们是由进入熔体中的气体与杂质造成的。因此，为获得高品质的铸件与材料，必须除尽熔体中的异类杂质，这种除去气体与杂质的过程称为熔体净化处理。通常，净化处理措施有：正确使用熔剂，加强熔体表面保护，弃分精炼。不过，当前实用的净化处理法也不能“斩尽杀绝”熔体内的异类物质，最高的净化率也只不过 65%左右。

除气

同铝合金熔体中的气体一样，镁合金熔体含的气体也主要是氢，来自于受潮的熔剂（熔剂具有相当强的吸湿性）、炉料与金属炉料腐蚀后带入的水气。工业生产常用的除气法有：

惰气法

向750℃~760℃熔体中通入占熔体质量0.5%氩或氖，可将熔体中的氢含量由150cm3/kg~190cm3/kg降至100cm3/kg，除气率47.4%~66.6%。通气速度以熔体不发生飞溅为准，通气时间30min，过长将导致晶粒粗化。

活气法

在750℃~760℃熔体中通入占小于熔体3VOL%氯，通气速度2.5L/min~3L/min。熔体温度750℃，生成的MgCl2悬浮于熔体表面，无法形成致密的覆盖层，无法防止镁的燃烧；若熔体温度高于760℃，则反应加速，形成大量MgCl2，形成夹杂；若向Cl2中混入适量CCl4、C2Cl6或SiC，则对Mg-Al系合金有明显晶粒细化的同时还有良好的除气效果，实践证明，通以占熔体质量（1~1.5）%Cl2+0.25%CCl4的混合气体（熔体温度690℃~710℃）可取得最佳的这种双重效果，不过Cl2对环境不利，不宜再用。

CCl4法

通入CCl4的熔体温度为750℃左右，通入量为熔体质量

的 0.1%。CCl4 在镁合金的熔炼中有着广泛的应用，既有除气作用，但效果不及 Cl2 的，又有晶粒细化效果，且优于 MgCO3 的。

联合法

先向熔体内通过 CO2，再吹送含 TiCl4 的 He，可使熔体中的氢下降到 60cm3/kg~80cm3/kg，而一般只能降至 130cm3/kg~160cm3/kg。除气效果与熔体温度及静置时间有关，670℃时的效果比 750℃时的大。

除夹杂物

镁合金中夹杂物主要有氧化物，通过夹杂物与熔体的密度差而得以清除，通常用熔剂来清除，熔剂被吸附在夹杂物表面，生成不溶于熔体的复合物沉于坩埚底部。精炼温度一般为 730℃~750℃并搅拌熔体。精炼时间决定于熔炼炉大小及炉料质量，精炼后静置 10min~15min，以使夹杂物沉淀。不过镁熔体密度与夹杂物的相差不太大，所以往往达不到完全彻底分离。精炼温度应恰如其分，高了镁的烧损加剧，低了熔体黏度上升，对夹杂物的沉降分离不利。

熔炼镁-铝-锌系合金时，熔剂用量为熔体质量的 1%~1.5%；而熔炼含锆的镁合金，熔剂用量为熔体质量的 6%~8%，有时宜高达 10%，其中的 1.5%~2.0%用于精炼。含锆的镁合金的熔炼不易，要求有熟炼的操作技术，若操作不当，则铸件内易出现高熔点含锆的化合物夹杂。

精炼处理工序为：首先将坩埚预热到暗红色；调整熔体温度，ZM5 和 Zm10 合金的为 710℃~1740℃，ZM1、ZM2、ZM3、ZM6 合金的为 750℃~760℃；将搅拌器插入熔体深度 2/3 处，由上而下强烈搅拌熔体 4min~8min，直到熔体表面亮如镜为止，同时在搅拌过程中向熔体表面均匀地撒精炼剂，熔剂量为炉料质量的 1.5%~2.5%；清除浇嘴、挡板、坩埚壁和熔体表面的熔剂，再撒一层覆盖熔剂；调整浇注温度，浇注完毕后，坩埚应留有 10%~20%熔体。

2.37 37、镁合金的晶粒细化与变质处理

在金属材料生产中人们总是希望它们具有细的晶粒组织，因为晶粒越细小，其力学性能与塑性加工性能也越好。在熔炼铸造镁合金过程中如晶粒细化处理得当，则可以降低铸件凝固过程中的热裂倾向；在熔铸变形镁合金时若锭坯具有细小均匀的晶粒组织，则不但有良好加工性能，而且材料的各项性能也更高。因此，细化处理在镁合金熔炼铸造中是一道极为重要的关键性工序，不可等闲视之。

在熔炼铸造镁合金时，现有的细化晶粒措施有两类：变质处理和强外场作用。变质处理就是向熔体内添加高熔点物质，形成大量的异质晶核，获得细小的晶粒组织。强外场细

化晶粒的机理就是向熔体施以电场、磁场、超声波、机械震动、搅拌等强场作用，促进熔体形核过程，并破坏已形成的枝晶，成为游离晶体，增加晶核数量，还可以强化物质传递，消除成分偏析。快速凝固也是有效的细化镁合金组织的措施，一方面可以提高熔体内的形核率，另方面可抑制晶核长大。目前，常用的镁合金变质剂有：含碳物质，C2C14 和高熔点金属 Zr、TiB、V 等。

含碳变质剂

碳虽不固熔于镁，但可与镁反应生成 Mg2C3 和 MgC2，成为异质晶核，细化晶粒。碳对 Mg-Al 系及 Mg-Zn 系合金有明显的晶粒细化作用，而对 Mg-Mn 系合金则几乎没有细化效果。C 进入 Mg-Al 系合金熔体后，与 Al 形成大量细小、弥散的 Al4C3 质点，其晶格类型和晶格常数与镁的相应值很接近，是镁合金的良好形核质点，使镁合金的晶粒显著细化。

生产中常用的含碳变质剂有菱镁矿 MgCO3、大理石 CaCO3、白垩、石煤、焦炭、CO2、炭黑、天然气等，其中用的最多的是 MgCO3 与 CaCO3。MgCO3 加入 Mg-Al 合金熔体后发生如下反应：

$MgCO_3=MgO+CO_3\uparrow$

$CO_2+2Mg=2MgO+C$

$3C+4Al=Al_4C_3$

MgCO3 的加入量一般为镁合金熔体质量的 0.5%~0.6%，熔

体温度 760℃~730℃，处理时间 5min~8min。

C2Cl6

C2Cl6 是镁合金的常用变质剂之一，既有除气作用又有晶粒细化效果。加入 C2Cl6 后熔体中可形成 Al-C-O 化合物质点，是镁合金的良好结晶核心。有研究显示，AZ31 合金经 C2Cl6 变质处理后，晶粒尺寸由 280um 下降到 120um，抗拉强度明显提高。C2Cl6 对 ZM5 合金的变质处理效果比 MgCO3 的高得多。用 C2Cl6 与其他变质剂组成的复合变质剂有更高的变质效果。C2Cl6 的用量为炉料质量的 5%~8%，熔体温度为 740℃~760℃。

其他变质剂

锆对 Mg-Zn 系、Mg-RE 系和 Mg-Ca 系镁合金有明显的晶粒细化作用，在镁合金生产中获得广泛应用，但其细化机理尚无统一认识。有人认为，镁-锆合金的晶粒细化效果主要来自固溶于镁中的那部分锆,而其余的锆的细化作用仅约占 30%。不同的镁合金虽含有等量的锆，但其晶粒细化效果却有着明显的差别。

含锆的镁合金在精炼后，杂质都沉于坩埚底部，为避免杂质混入铸件中，浇入铸型后坩埚仍应保留足够的熔体，一般不得少于炉料量的 15%，浇注时宜平稳，尽量避免熔体过分湍流和溢出，同时应静置足够的时间。

Mg-Al 合金在变质处理后需进行精炼，但以锆细化晶粒

的 ZM1、ZM2、ZM3、ZM4、ZM6 合金不需要精炼。向 Mg-Zn 系合金添加 0.5%Zr 可取得良好的变质效果；0.5%Sc+(0.3~0.5)% Sm 可明显细化 Mg-Mn 系合金的晶粒；0.2%La~0.8%La 对 Mg—Mn 系合金也有显著的晶粒细化作用。

2.38 38、变形镁合金的熔炼

前面聊了铸造镁合金的熔炼，现在来谈谈变形镁合金的熔炼。熔炼变形镁合金多用反射炉，其炉型与铝合金熔炼的相当。镁合金的熔炼过程为：烘炉、洗炉、配料、装炉、熔化、扒渣、加合金元素、转炉、精炼、静置。

烘炉

新筑砌炉和中修反射炉在熔炼前必须烘炉。严格按烘炉曲线进行烘炉，时间不短于 264h：由室温缓慢地在 109h 内升至 300℃，在 300℃保温 24h，然后均匀地在 25h 内升至 400℃，保温 48h，再在 58h 内升至 900℃完成烘炉。超过 240h 的停炉后也务必烘炉，时间不短于 72h。烘炉很重要，对炉的寿命有重要影响。

洗炉

新炉与中修后的反射炉在使用前都要进行一次洗炉，以防合金杂质含量升高与去除砖缝中的一部分非金属夹杂及气态夹杂物，在所熔炼合金转组时也应洗一次炉，例如由熔炼 Mg-Al-Zn-Mn 系合金转熔 Mg-Mn 系或 Mg-Zr 系合金，由 Mg-Mn

系合金转熔 Mg-Zr 系合金都要洗炉。洗炉用重熔用镁锭或熔剂，装炉量达炉容积的 1/2 处，升温至 760℃~800℃，充分搅拌两次，静置几分后放尽。

配料

按车间配料标准配料，所有原辅材料务必清洁干燥，无混料，复化料一般不大于 40%，所用的镁锭、铝锭、锌锭、混合铈稀土、锆氟酸钾、氯化锰等的品质与化学成分都应符合有关标准。

装炉、熔化及扒渣

装炉前与炉底均匀地铺一层粉状二号熔剂（质量%：38~46Mgcl2、32~40KCl、5~8BaCl2、3~5CaF2），然后装料，先装碎的，后装镁锭，最后装大块废料，装得尽可能密实平整，装完后撒一层薄的二号熔剂，升温熔化，炉内气氛应呈微还原性。

在熔炼过程中应严防镁的燃烧，一旦燃烧，立即用二号熔剂熄灭。炉料化平后，扒第一次渣，扒渣宜平稳，熔体温度升到 750℃~770℃时扒第二次渣，渣要把扒尽，但又尽可能地不带出或少带出溶融镁。扒完渣后彻底搅拌一次，静置几分钟后取样分析，取样温度(℃)：MB1、MB8 合金的 780~800，MB2、MB3、MB5、MB7 合金的 720~740，MB15 合金的 780~800。在熔炼过程中按有关规程加入合金化元素，但铝锭、锌锭可随同炉料一起装料，生产 MB15 合金时，可用纯锆盐，也可用

混合锆盐（K2ZrF6+CaF6+LiCl）或 Mg-Zr 中间合金加锆，加纯锆盐(K2ZrF6、K2ZrCl6、ZrCl4)时熔体温度 900℃~920℃，以后两种方式加锆的温度 800℃~920℃。

转炉

经炉前化学分析熔体成分合格温度为 750℃~780℃时即可进行转炉，装熔体转入静置炉进行精炼。转炉方法有：静压差法，适于两个炉膛不位于同一水平上，打开流口，熔体便可自动流出；虹吸法；离心泵法；电磁泵法。中国当前多用前一种方法。

精炼

镁合金熔体总或多或少地含有一些非金属夹杂物和气体（主要是氢），因此必须进行精炼，以去除这些异物，提高合金的各项性能。精炼温度 730℃~760℃，精炼熔剂用量为约 10kg 每吨镁合金熔体，精炼时间约 10min。

除 Mg-Li 合金外，其他合金均可以用五号熔剂(质量%)精炼：20~35MgCl2、16~29KCl、8~12BaCl2、14~23MgF2、0.5~8.0BaO3。精炼后向熔体表面撒一层精炼剂，静置 60min 后铸造。

含锆的镁合金不用含 Al 和 Mn 的氟化物的熔剂精炼，可用四号熔剂;不采用二号熔剂精炼 Mg-Mn 系和 Mg-RE 系合金，因为会有熔剂夹杂存在。应尽量缩短含锂和稀土合金的熔炼与精炼时间，以减少烧损，必要时还要补料。对熔炼炉与静置炉应及时清炉，熔炼炉转炉完了和静置炉铸造终了都要清

炉。用五号熔剂的精炼时间不短于 60min，它可用于精炼所有的变形镁合金。

2.39 39、怎样制备中间合金和熔盐

在熔炼镁合金时要用到一些合金元素，它们中的一些是以中间合金的形式或熔盐的形式加入，而铝则是以纯金属的形式加入，锌也是以纯金属的形式加入，这两个元素是镁合金最主要的合金化元素，占镁合金合金化元素总量的 94%以上，因此，仅少量合金化元素如 Mn、Zr 等以熔盐或中间合金形式加入。

锰盐熔剂制备

制备锰盐熔剂用的原料有工业氧化镁、氯化锰、氟化钙。氧化镁中的 MgO 含量应≥91%，MgCO3 的含量≤3%；MnCl2 的纯度≥92%、H2O≤0.5%、不熔杂质≤1.5%；CaF2 纯度≥90%，SiO2≤5.0%，H2O≤1.0%。

锰盐熔剂的配比（质量%）：76MnCl2，13CaF2，11MgO。

熔化工艺：先将氯化锰放化坩埚中熔化，熔体温度升至 750℃时加入 CaF2 和 MgO，边加边搅拌，在 720℃浇铸，凝固后放入球磨机研碎。

研好的熔剂粉还需重熔，将其放入坩埚中加温熔化。在 600℃~650℃保温脱水，不冒气泡了，表示脱水完毕，注入干燥铁箱内，置于保温炉内以待应用。

混合锆盐制备

加锆可用锆盐也可用 Mg-Zr 中间合金。混合锆盐成分（质量%）：66K2ZrF6，8CaF2，26LiCl。制备工艺：将这三种成分按配比装入炉内，升温至 800℃，保温后即可浇铸，然后用球磨机粉碎。

镁-锆中间合金制备

锆不但熔点高，而且高温时又极易氧化。因此，除了可用锆盐向镁中加锆外，以 Mg-Zr 中间合金形式加锆是最可取的。制造 Mg-Zr 中间合金的工艺有：

用镁还原光卤石和锆氟酸钾混合盐，制成渣质的 Mg-Zr 中间合金。光卤石的成分为 KMgCl3 •6H2O，含 8.7%Mg、14.1%K，还常含有微量溴、铷和铯，通常呈粒状或致密块状集合体，纯净者元色，有时因含 Fe2O3 等而呈红色或褐色，硬度 2~3，密度 1.60g/cm3，极易潮解，味苦咸。

用镁还原氟化锂、氟化钙和锆氟酸钾的混合盐，制成渣质的 Mg-Zr 中间合金。

用镁还原氟化钾和锆氟酸钾的混合盐，制成的 Mg-Zr 中间合金。

用镁还原氟化钾和锆氟酸钾的混合盐，制成的 Mg-Zr 中间合金呈金属形态，品质较好。

用锆粉制备呈金属形态的 Mg-Zr 中间合金，品质虽好，但生产成本高，因为锆粉价格高昂。

用混合盐制造 Mg-Zr 中间合金的成分配比（质量%）见下表，其总反应式为：

K2ZrF6+2Mg→←2KF+Zr+2MgF2

实践证明，用含 KCl 的混合盐生产的金属形态 Mg-Zr 中间品质高，更适合生产，其配料成分如上表所列，工艺流程如下：

熔化 KCl，停止沸腾后，将温度升至 880℃~900℃；

将预热的 K2ZrF6 加入 KCl 熔体中，边加边搅拌，加完后再慢慢搅 5min；

将熔体温度升至 880℃～900℃，加入预热的 Mg 锭，熔化后机械搅拌 10min~15min，吊出坩埚在室温下冷却；

完全冷却后，用水浸泡 1h~2h，取出 Mg-Zr 中间合金，如将它再重熔一次，中间合金品质可再提高一步，重熔温度 690℃~710℃，温度过高会增大烧损。

$K_2ZrF_6+2Mg \rightarrow 2KF+Zr+2MgF_2$

工艺	Mg	K_2ZrF_6	光卤石	LiCl	CaF_2	KCl
1	20	40	40	-	-	-
2	20	53.3	-	20	6.5	-
3	24	32.5	-	-	-	43.5

2.40 40、镁合金熔炼炉及废料复化

镁合金熔炼炉型有多种，但现在用得多的有反射炉、坩埚炉与无铁芯工频感应电炉，用后者熔炼可获得高品质熔体。

反射炉

反射炉在有色金属熔炼中获得了广泛应用，特别是在熔炼铝合金时。镁合金熔炼反射炉结构与铝合金的几乎完全相当。反射炉的热源有固体燃料（煤与焦炭）、流体燃料（液体和气体）与电。因环保问题与提高合金品质，固体燃料与液体燃料不宜用或尽量少用，应以发生炉煤气、炼焦煤气、天然气为主要燃料，电虽是一种清洁能源，但价格较高，不利于降低生产成本。

反射炉炉顶呈弧形，热量由炉顶和炉墙反射至炉料，因此炉料的加热是以传导和辐射方式由上向下传递的，同时使火焰及废气缓慢流过熔体表面，使炉料与热流直接接触。反射炉的燃烧速度快，适于大规模熔炼，现代化的由电脑控制燃烧参数与余热得到回收利用的，热效率可高达 70%，天然气消耗量可小于 60m3/t 镁。

反射炉顶用耐火材料整体浇注，炉底通常用镁砖、镁砂砌筑，也可用铸铁作炉底，而不使用含 SiO2 的耐火材料，因为镁及熔剂中的 MgCl2 易与 SiO2 发生反应，不但会破坏炉衬，而且会增加合金的杂质 Si 含量。

按用途的不同可将反射炉分为熔炼炉与静置炉。镁合金必须在熔剂的严密保护下熔炼，熔炼熔剂及精炼剂的种类与用量前面已作过介绍，在此不再赘述。

坩埚炉

坩埚炉在镁合金熔炼中也得到广泛应用。与反射炉相比，

坩埚炉的金属烧损可降低 3 个百分点，例如反射炉的金属烧损可达 5%或更大一些，而坩埚炉的烧损只不过 2%左右；劳动环境也大大改善。按加热方式可将坩埚炉分为电阻坩埚炉和燃气坩埚炉。

电阻炉的电阻发热体装于埚的四周炉壁上，发热电阻有丝状的，也有扁带状的。在电价低的地区，可用电阻坩埚炉。

最好用以天然气为燃料的坩埚炉，如有炼焦煤气为燃料那是最好的，因为可降低生产成本。用喷嘴将点燃的天然气火焰沿着炉壁切线方向，以确保最恰当的燃烧位置。　否则，若将火焰直接喷于埚壁上，易引起受热体-镁材料或熔体局部过热，甚至会烧坏坩埚。

无铁芯工频感应电炉

这种炉是熔炼镁合金的最佳炉型，生产环境好，产品质量高，化学成分精准，烧损低，但是不能采用熔沟式感应炉，因为密度大的熔剂及熔渣会沉积炉底，堵塞熔沟。感应电炉坩埚可用 10mm~25mm 的低碳钢板焊成，也可以用铸铁直接铸成壁厚 40mm~60mm 的坩埚，不过它的体积大，且内部可能存在种种铸造缺陷，所以还是宜用钢板焊的。

无铁芯工频感应电炉由炉架、炉体、密封炉盖、通风设施、液压系统、冷却系统、电路系统、电磁输送或低压转注系统等组成。

由多台感应电炉组成的坩埚群，不仅生产能力大，而且熔

炼时炉料不直接与火焰接触，既可以大大减少熔剂用量，又可以提高熔体品质与改善劳动环境。采用这种熔炼设备，加上可靠的净化处理与铸造时采用密封浇注系统可以铸得高品质的铸锭，对提高产品质量极为有利。

工艺废料的复化

在镁合金材料生产中产生的工艺废料比生产铜、铝材时的比例大得多，是一种重要的资源。通常把这类废料按其形状、尺寸和清洁程度的不同分为一级、二级和等外几种。一级废料可直接熔炼成品合金，二级或等外废料必须经过复化、精炼铸成锭，成分符合要求的可当一级废料。必须严格管控废料成分，特别是残屑应严格分类，切忌混料。

对残屑要求

镁合金碎屑必须按牌号收集保存，不得混入其他金属及异物。

镁合金碎屑必须保持干燥，避免水、油、乳液、化学品物质等等混入。

不得混入较多的镁及镁合金粉尘，以免熔炼时引发爆炸。

碎屑存放处应保持良好的通风，与火源保持一定距离。

复化工艺

在采用 5t 反射炉复化二级或等外废料时，先向炉内撒少许二号熔剂，装入总量 1/4 的大块料，升温熔化，当温度达到 720℃~740℃时，分批加入碎屑，边加边搅拌，而后升温

至 750℃~770℃，扒出浮渣和底渣，转炉，在 740℃~760℃精炼，静置 40min~100min 后铸造。

二级废料直接熔炼成品合金工艺

用二级废料直接熔炼镁合金的工艺为：清炉-熔化-扒渣后，取样分析，调整成分，合格后，在炉内进行第一次精炼，静置 60min，转炉，其后的工艺与用非废料熔炼的工艺相同。

2.41 41、变形镁合金的铸造方法

镁合金的熔炼铸造工艺与铸锭品质对镁材质量、成品率高低攸攸相关，实践统计证明，镁材缺陷的 75%以上都或多或少是由于铸锭带来的。镁合金锭的铸造的铸造工艺有：铁模铸造，水冷模铸造与半连续铸造。前两种工艺现在很少用了，所生产的锭坯还不到总数的 5%。半连续铸造法的优点可概括为：

凝固速度快，改善了铸锭组织，减少了成分偏析，提高了锭坯的力学性能。铸造工艺对 MB3 合金Φ280mm 铸锭力学性能的影响见表 1。

表 1　铸造方法对 MB3 合金 Φ280mm 铸锭力学性能的影响

取样方向	铸造方法	铸造温度和速度	抗拉强度,N/mm²		伸长率,%	
			边部	中心	边部	中心
纵向	水冷模	730℃	144	90	5.5	2.6
	半连续铸造	730℃,速度 50mm/min	143	146	7.2	6.3
	水冷模	690℃	133	72	6.5	2.6
	半连续铸造	690℃,速度 67mm/min	143	141	7.6	7.5
长横向	水冷模	730℃	174	105	6.2	4.0
	半连续铸造	730℃,速度 50mm/min	166	150	7.2	6.7
	水冷模	690℃,速度 50mm/min	174	147	5.2	3.3
	半连续铸造	690℃,速度 67mm/min	142	144	4.8	4.8

由于改善了熔铸系统，减少了氧化夹杂及其他非金属夹杂物，金属杂质含量也有所下降，合金纯净得到了很大提高。熔铸设备对 MA8 合金的纯净度也有一定的影响，见表 2。

表 2　铸造方法及工艺对 MA8 合金杂质含量的影响

工艺装备	杂质含量(质量%)		
	Fe	Cu	Ni
铸铁坩埚,铁模铸造	0.05	0.05	0.007
天然气反射炉,半连续铸造	0.025	0.05	0.002

合理的结晶顺序，铸锭的致密度得到提高，锭中心的疏松大幅度地下降。

锭的长度有很大提高，切头、切尾等几何废料的相对量有很大减小。

实现了机械化或甚至半自动化生产，劳动条件得到很大改善，劳动生产率显著提高，产品品质也有很大提高。

当然，尽管半连续铸造法的优点很多，不可避免地也会存在一些不足之处，诸如：

铸锭内部因凝固速度快，会产生很大的内应力，而合金的塑性又不大，因而裂纹倾向性大，废品率比铁模铸造时的大得多，铁模铸造几乎无一裂纹。

由于凝固速度快，有些合金元素如锰会产生较严重的晶内偏析，为了消除这种缺陷，须进行长时间的均匀化退火，因而生产成本上升，而且性能得不到充分的保证。

由于凝固速度大，液穴内的温度梯度也会相应地上升，虽不利于金属中间化合物颗料的过于长大，但却使它易于产生。

2.42 42、铸造镁合金的净化处理

镁是一种活泼的金属，因此镁及镁合金在熔炼过程的高温环境中极易受周围环境介质的影响，进而影响熔体品质，导致铸锭、铸件、压铸件产生气孔、夹杂、夹渣、缩孔、缩松、裂纹、晶粒粗大、偏析等。因此，必须对镁合金进行精心的净化处理。通常，净化处理有三：熔剂处理，加强熔体保护，净化处理。

除气

熔体的气体含量大会引发产品中出现种种缺陷，同铝合金一样，镁合金熔体含的气体主要是氢，占气体总量的 75%以上。氢的主要来源是受潮的熔剂、炉料以及金属炉料腐蚀产物带入的水气。工业上常用的方法有以下几种。

惰性气体法

用的惰性气体有氩 Ar、氖 Ne。向 750℃~760℃的镁合金熔体中通入占其质量 0.5%Ar，可将熔体的氢含量由（150cm3~190cm3）/kg 降至 100cm3/kg。通气速度应适中，

以免熔体飞溅，通气时间 30min，通气时间过长会导致铸锭、铸件晶粒粗化。

活性气体氯 Cl2 法

通入的氯应恰好其份，一般以 2.5L/min~3L/min 为宜，含碳的物质如 CCl4、C2Cl6、SiC 等对 Mg-Al 系合金有明显的晶粒细化作用。若采用占熔体质量（1~1.5）%Cl2+0.25%CCl4 的混合气体在 690℃~710℃除气，可以获得除气与变质的双重效果。氯对人体有害，对环境不利，此种处理法应尽量少用或不用。

C2Cl6 法

在 750℃左右向镁合金通入占熔体质量的 0.1%C2Cl6，既可以除气又有晶粒细化作用。C2Cl6 的晶粒细化效果优于 MgCO3 的，但除气效果不及 Cl2 的。

联合法

先向 670℃~710℃镁合金熔体通以 CO2，再以 He（氦）吹入 TiCl，可使熔体的气体含量下降到 60cm3~80cm3/kg。

净化处理

净化处理是去除镁合金熔体中各种金属及非金属夹杂物的工艺过程，又称精炼，一般在 730℃~750℃下向熔体加入精炼熔剂，边加边搅拌，熔剂吸附夹杂物，形成不溶于熔体的复合物沉于炉底。精炼时间与熔炼炉大小，炉料质量有关，精炼后静置 10min~15min，使夹杂物沉降分离。

净化处理工艺：首先调整熔体温度，ZM5 和 ZM10 合金为 710℃~740℃，ZM1、ZM2、ZM3、ZM6 合金的为 750℃~760℃；其次将搅拌器浸入熔体 2/3 处，搅拌熔体 4min~8min，一边搅拌熔体一边撒精炼剂，用量为炉料质量的 1.5%~2.5%，净化处理后往熔体表面撒一层覆盖剂。

ZM4 合金的精炼

将熔炼好的 ZM4 合金熔体温度降至 760℃~780℃,用 RJ-4 熔剂精炼不少于 5min,然后于 780℃~800℃静置 15min~20min，调整浇注温度。注意浇注后坩埚底部须残留 10%熔体。

ZM6 合金的精炼

熔炼的 ZM6 合金经断口组织检查合格后,在 780℃~810℃保温静置 10min~20min，使夹杂物充分沉于炉底，而后调整浇注温度。精炼剂为 RJ-6 熔剂，精炼温度为 730℃~740℃，时间 5min~10min，精炼后须在熔体表面撒一层覆盖撒剂 RJ-2。浇注后，坩埚底部应留有不少于配料质量 20%的合金熔体。从熔体开始静置至铸造完毕的时间不得长于 1h，否则应重新检查断口组织。如果断口组织不合格，允许重处理，但重新处理次数不得超过 3 次。

2.43 43、说说变形镁合金铸造工艺

变形镁合金锭的基本铸造工艺参数是速度、温度、冷却水压和结晶器高度，前三个的可调可控力度大，结晶器一旦制

造完毕，它的高度就定下来了。此外，还有一些未纳入制度的相对不太重要的参数，它们也对铸锭组织、裂纹敏感性、致密度、表面品质有一定的影响，例如结晶器锥度、内表面粗糙度、水孔大小、水的喷射角度，铸造漏斗直径、孔径、孔数、沉入熔体深度，等等。

在不同的铸造速度时，铸造速度越大，冷却强度也大，液穴深度随着变小。结晶器高度变小时，强却强度也随着变弱。

在铸造镁合金圆锭时，在一般情况下，采用高一些结晶器，可以避免通心裂纹。加高结晶器高度，如果调低铸造速度，则表面会产生发状淬火裂纹。对于热脆性较敏感的合金，若采用低结晶器，必须相应降低铸造速度，但此时锭表面的冷隔成层缺陷却会增多，同时还可能产生横向裂纹。因此，应合理确定结晶器高度与铸造速度，一旦结晶器高度确定了，也就可以选定铸造速度，铸得既无裂纹，表面品质又好的锭坯。

铸造速度一定时，结晶器越高液穴也越深，但当结晶器高度大于 200㎜ 后，提高结晶器高度，液穴的变化也不十分明显。

提高结晶器高度，也即相对降低了凝固速度，可延长金属中间化合物的生长时间。结晶器越高，对镁合金金属中间化合物尺寸的增大和数量的增多影响也越明显。在铸造 200㎜

×800mm 扁锭时，中间金属化合物的偏析与结晶器高度的关系见表 1。

综合各方面的因素，当铸造直径 350mm~690mm 锭时，结晶器高度以 145mm~250mm 为佳；铸造 200mm×800mm 扁锭的适宜结晶器高度为 250mm；铸造 260mm×960mm 的结晶器高度为 300mm。

MB15 合金的热裂纹敏感性较大，对水冷强度非常敏感，可采取推迟二次水冷方法，不但不会产生热裂纹，而且铸锭表面品质也有所提高。

表 1 结晶器高度对 MB3 合金 200mm×800mm 锭中间金属化合物的影响

结晶器高度,mm	铸造速度 m/h	铸造温度℃	熔体水平 mm	水压,kPa		中间金属化合物偏析情况		
				大面	小面	试片总数 个	合格试片数 个	试片合格率 %
300	2.5	720~735	50~70	30~45	10~20	49	22	44.9
250	2.5	720~735	50~70	30~45	7~15	120	101	84.1

表 2 变形铝合金锭的铸造工艺

合金	铸锭规格,mm	结晶器高度,mm	铸造温度,℃	铸造速度,m/h	水压,kPa	
MB1、MB8	Φ100,Φ200	130	730~750	4.5~6.0	30~60	
MB1、MB8	Φ350,Φ405	145	720~740	2.0~2.3	30~60	
MB1、MB8	Φ482	200	720~740	1.5~2.2	30~60	
MB2、MB3	Φ100,Φ200	145	720~745	4.5~6.0	30~60	
MB2、MB3	Φ350	145	710~730	2.0~2.2	30~60	
MB5、MB7	Φ482	200	710~725	1.5~2.2	30~60	
MB2、MB3	Φ550	200	700~720	1.5~2.2	50~80	
MB2、MB3	Φ690	250	700~720	1.3~1.8	50~100	
MB15	Φ100,Φ200	130	710~750	4.5~6.0	30~60	
MB15	Φ350,Φ405	145	700~730	2.2~2.4	30~60	
MB15	Φ485	200	690~725	1.5~2.2	30~80	
MB15	Φ690	250	690~710	1.3~1.6	50~100	
MB1~MB8	200×800	300	725~750	2.0~2.5	大面 20~40	小面 8~25
MB1	260×960	300	730~745	2.0~2.5	20~50	8~30
MB2~MB3	200~800	250	730~745	2.0~2.5	20~50	7~25
MB15	160~540	250	720~750	2.4~3.0	20~40	7~20

2.44 44、镁合金铸造结晶器与电磁搅拌

结晶器

结晶器是铸造变形镁合金锭的模具，不仅决定了铸锭的形状和尺寸，而且直接影响着锭的品质和裂纹敏感性。镁合金圆锭结晶器的结构形式与铝合金的相同，但高度高一些。结晶器的尺寸见表 1 及表 2。

铸造裂纹敏感性较大的大直径锭时，宜采用较高的结晶器，且喷水角应小些。不管是圆锭结晶器还是扁锭的，其内表面粗糙度应＜1.6μ m，且越小，锭的表面品质也相应地高一些。由于镁合金扁锭尺寸较小，且铸锭冷裂纹敏感性不大，因此没有必要采用端头小面带缺口的结晶器。因为这种结晶器操作不便，尤其是见水有爆炸危险性的镁合金更不宜采用。扁锭结晶器直接置于水箱上。水箱上有两排水孔，与铸锭分别呈 90° 及 45° 角，水孔直径 4mm~6mm，孔间距 10mm。

液穴镁合金熔体的电磁搅拌

在镁合金熔铸过程中，若仅用晶粒细化处理，往往不能获得满意的细晶粒组织，若铸造时对液穴中熔体进行电磁搅拌则能获得稳定的细晶粒组织。熔体的黏滞运动可显著细化凝固后的晶粒组织，因为电磁场造成的熔体运动可引起体积结晶，形成细晶组织，不过电磁搅拌也有一些负面作用，即有一些

中间金属化合物一次晶落进凝固着的锭中，成为一次晶缺陷，同时还会粗化枝晶，即使晶内结构粗化。

一般工频感应器产生的磁场使液穴中的熔体发生定向运动，由一台电压 380V、频率 50Hz 的降压变压器作为电源，搅拌功率的调控由变压器二次分接头承担，接头电压最大 24V，电流为几十 kA 至几千 kA。

铸造直径≥500mm 的圆锭将感应器放在液穴上方，而铸造小直径锭则宜将它置于结晶器外围。

铸造 MB1、MB8 合金 165mm×540mm 扁锭时，感应器功率为 20kW~100W，过小熔体运动不明显，≥100kW 时熔体运动又过于激烈，甚至可破坏氧化膜，将其卷入锭内。

电磁搅拌的作用可归纳为：

降低液穴内熔体温度与使温度均匀，结晶范围间窄的合金则降低的少，只可能低于液相线 2℃~3℃。

细化晶粒尺寸。实践证明，形核数与熔体运动速度成正比，因此熔体搅动强度大晶粒越细，如电磁搅拌器的电流为 0A 时，晶粒平均尺寸为 600mm2，电流强度 90A 时，晶粒平均尺寸为 200mm2，而电流强度上升到 150A，则晶粒细小到只有 10mm2，再提高搅拌强度对晶粒尺寸就没有影响了。

电磁搅拌明显粗化枝晶和增加中间金属化合物一次晶数。例如在铸造 MA8 合金时（含 1.8%Mn），没有电磁搅拌时，试片上中间金属化合物占的比例为 0.02%，而搅拌电流为 90A 时，

是间金属化合物在试片上的比例达到 0.2%，为没有搅拌的 10 倍。

用功率为 60kV·A 的感应器磁场搅拌可以完全消除 MB8 合金锭的柱状晶，而 MB3 合金只需要 40kA 感应器的磁场不但可以消除柱状晶组织，而且晶粒细化到原有晶粒尺寸的 1/100 左右。

若将 MB8 合金的 Mn 含量控制在 0.3%~0.55%，MB3 合金的控制在 0.4%~0.65%，则只要搅拌不管磁场大小都可以完全消除含 Mn 的一次晶化合物的聚焦。

由于电磁搅拌细化了晶粒，增大了结晶前沿压力，改善了固液区的裂纹自行修复条件，可以铸得热裂纹少甚至没有热裂纹的锭。

表 1　镁合金圆锭结晶器尺寸

结晶器直径,mm	100	200	350	405	482	550	690
结晶器高度,mm	130	130	145	145	200	200	250
向铸锭喷水角度	30°	30°	30°	30°	20°	20°	20°

表 2　镁合金扁锭结晶器尺寸

铸锭规格 mm	结晶器尺寸,mm				小面弧	
	宽	厚	高	锥度(上口比下口)	R_1	R_2
200×800	806	206	250	小 2~3	50	250
200×800	806	206	300	大 0~2	50	250

2.45 45、镁合金浇注时的熔体保护

镁合金熔体在空气中会发生激烈的氧化反应，形成的氧化膜也没有保护作用。因此，在熔炼时须用熔剂保护，而在铸造时则用 SO2 气体保护流槽与铸造系统内流动着的熔体。

SO2 的一般特性

镁合金铸造时用的 SO2 气体是由液态 SO2 气化的，而液态 SO2 是气体 SO2 经压缩冷冻制取的，液态 SO2 无色透明，有刺激酸臭味。液态 SO2 于-10.09℃沸腾，-72℃冻结。SO2 的密度与温度、饱和气压的关系见表 1。

表 1　液态 SO_2 的密度与温度、饱合气压的关系

温度,℃	饱和气压,KPa	密度,g/cm³	温度,℃	饱和气压,KPa	密度,g/cm³
-30	37.6	1.509	25	382.0	1.3695
-25	49.0	1.4968	30	449.8	1.3556
-20	62.9	1.4846	35	526.0	1.3413
-10	79.9	1.4601	45	709.0	1.3170
-5	124.6	1.4477	50	817.5	1.2957
0	152.6	1.4350	60	1073.0	1.2633
5	186.2	1.4123	70	1387.0	1.2293
10	225.6	1.4095	80	1768.0	1.1920
15	270.6	1.3960	90	2227.0	1.528
20	322.8	1.3831	100	2770.0	1.110

注：对液态 SO_2 的要求：纯度>99.8%

由表 1 所列数据可看出，饱和气压随着温度的升高而上升，当温度一定时，饱和气压与气体体积元关，液态 SO2 极易蒸发，蒸发吸收大量热，温度越高，蒸发速度越快，因而使周围介质及液态 SO2 本身温度下降。

SO2 的使用

在铸造镁合金锭时，一般用气化罐，其优点是可贮罐直接连接，便于使用，可减轻劳动强度，同时可显著减少 SO2 放空所造成的浪费与污染。

SO2 液体气化方法有两种：

低温气化法。将液态 SO2 在重力作用下输入气化罐，输入量不得超过罐容积的 1/2，然后关闭进液阀，即可使用。用

水加热，水温应≤30℃。

平衡气化法。首先打开进液阀，液态 SO2 自动流入气化罐，水温保持＞60℃，两罐 SO2 气体压力会自动平衡。气体罐中的液面一定要低于贮存罐中的高度，否则，水温低时 SO2 液体有回流危险，但水温下降可根据季节等具体情况而定。

使用平衡气体法，通常 SO2 贮罐位置应比气化罐高＞1m，当贮罐气压低时可用压缩空气加压。低温气化罐的壁厚可按技术条件选定。对液态 SO2 贮存罐和气化罐的有关规定见表 2。

表 2　液态 SO_2 贮罐及气化罐的技术参数

名称	用途	工作压力,KPa	罐制成后的试验压力,KPa	
			水压	气压
气化罐	充 SO_2 气	600	120	60
贮存罐	贮存液态 SO_2	600	120	60

贮存罐及气化罐使用须知：轻搬轻放；不要在日光曝晒；贮存罐温度不得超过 35℃，否则应采取降温措施。

2.46 46、话说变形镁合金铸锭裂纹

同铝合金一样，镁合金铸锭也常常显现裂纹，不过镁合金的裂纹敏感性比铝合金的轻得多，型式也有较大差别，也可以分为热裂纹与冷裂纹，不过镁合金的冷裂纹相当少见，仅在 MB5 和 MB7 合金锭中偶尔出现，因此镁合金的热裂纹废品量占 95%以上。

热裂纹

铸锭在有效结晶区间形成的裂纹称热裂纹。在结晶区间内收缩困难是产生热裂纹的主要原因。合金在给定条件下，凡是能缩小脆性区温度范围、减少脆性区内收缩困难的因素都可以减小热裂纹敏感性。

合金热裂纹敏感性高低可根据其脆性区内塑性 A 和线收缩ε 的大小判断，即根据温度-塑性图可判断合金敏感性。还 A 大于 0.5%的几乎不产生热裂纹。而当 A=0 时则称之为绝对脆性区，这时产生热裂纹的几率可以说是 100%了。合金脆性的上限≤固液区的上限，而其下限则≤固液区的下限。

对镁合金热裂纹敏感性有影响的主要因素：合金成分与工艺因素。

化学成分

实验证明，凡是能细化晶粒的因素都能降低合金脆性区的上限，也就是可以缩小脆性的温度范围。因为晶粒越细，则越有利于晶间变形，减少结晶时的收缩阻力，裂纹就不会产生了。例如向 Mg+4.5%Zn 合金添加 0.8%Zr，其固相线由 344℃提高到 550℃，脆性区缩小了 206℃，同时还降低了固液区内的线收缩和提高了固液区的塑性，这三者都有利于消除热裂纹。

另外，凡是增大共晶量的组元，都会提高合金的固液区内的塑性。因为增大共晶量，可增大晶界液膜厚度，从而有利于晶界变形，将大大改善补缩条件和裂纹“修复”条件，

不但热裂数量减少，而且程度也显著减轻。

共晶量和裂纹敏感性并不是呈线性关系，当共晶量小于其一极限值时，裂纹倾向性小，当增加到某一值后，敏感性骤升，再继续加大共晶量，则敏感性又下降，一直到零。

工艺因素

工艺因素主要指冷却速度、熔体温度、锭坯形状等等。

铸锭凝固时，随着冷却速度的加大，减小了脆性温度区间，提高了固液区的金属的塑性，有利于减少热裂纹。晶粒粗大的凝固着的锭的脆性温度也较大。过热合金熔体将使晶粒粗化，加大脆性温度范围，降低合金的塑性，从而加大脆性敏感性。

晶粒形状也对脆性区范围和固液区的塑性大小有影响，柱状晶的不但脆性区较大，且其固液区的塑性也较低，因而易形成热裂纹。

铸造速度、铸造温度、冷却强度、铸锭尺寸及形状都对铸锭凝固速度有着直接影响，因而直接影响铸锭的内应力、脆性区大和固液区的塑性。在铸造镁合金锭时，不能同时不适当地加大铸造速度与冷却强度，否则会加大热裂纹敏感性。镁合金有较大的热裂纹敏性，裂纹的分布形式主要与工艺条件有关，常见形式有表面裂纹和发状裂纹。

冷裂纹

铸锭中的冷裂纹是在凝固以后形成的，是当铸锭冷却到

低于不平衡固相线温度以下时，由于铸锭收缩困难造成的，即取决于当时铸锭的内应力大小和塑性高低。铸造应力可分为热应力、相变应力和收缩阻力。在连续铸造时，镁合金的相变应力可不考虑，主要是其余的两种应力，但是收缩力也不大，同时可调控，因此，热应力是最主要的，所以冷裂纹取决于在固态时铸锭内部热应力的大小和塑性高低。

热应力的产生是由于铸锭内外各层间的收缩不同步与收缩系数的相异，例如直径 530mm MB15 合金圆锭，在铸造速度为 33.6cm/min 时，中心部分的平均冷却速度为 48℃/min，而外表层的为 58℃/min,这种差别必然导致收缩系数不一样，另外各层的收缩时间也不同步，表皮先收缩，中心后收缩，这就会使铸锭内部产生巨大应力。一旦这种热应力超过铸锭的屈服 Rp0.2，就会形成冷裂纹。

热应力大小除与线膨胀系数α 及温差有关外，还与合金的正弹性模 E 有关，镁合金的 E 小，只有 45000N/mm2，热应力也会小一些。另外，在镁合金铸造过程中所允许的结晶速度较低，产生的热应力不大，故镁合金铸锭产生冷裂纹的几率不高。

2.47 47、变形镁合金铸锭缺陷及预防

在铸锭中总会存在一些程序不等的种种缺陷，变形镁合金常见的缺陷有裂纹、熔剂夹渣、金属中间化合物、气孔和冷隔（成层），等等。大多数缺陷是不允许存在的，无法挽救，使产品成为废品，降低成品率。也有个别的“废品”仍可以继续加工，如羽毛晶（扇形晶），可由宏观试片或打断口确定与显示，在轧制与自由锻造时可能使工件开裂。通常。羽毛晶不算废品缺陷。

裂纹

铸件中的裂纹有冷裂纹与热裂纹，但变形镁合金铸锭中很少出现冷裂纹，绝大多数为热裂纹，一旦出现有冷裂纹的铸锭就应报废，不能铣掉的即超过表层铣削量的发状热裂纹也应作废品处理。严格控制合金的化学成分与遵守工艺参数，精心操作，是减少裂纹的关键措施。

冷隔

冷隔是由于铸造速度慢、铸造温度低、熔体在结晶器中的液面控制不稳、铸造漏斗选择不当、结晶器锥度不合理和结晶器斜置等造成的。采用液面自动控制是减少冷隔的有效措施，并适当加大铸造速度和提高铸造温度，若这两条措施不凑效则可适当提高结晶器高度，通常可铸得既没有冷隔又

无裂纹的优质锭坯；加大结晶器锥度，可以降低铸锭表层导热，也可以在一定程度上防止冷隔。

带冷气孔

带状气孔由成片分散气孔组成，常见于 MB3 合金扁锭大面，有时与冷隔同时出现。此缺陷不易发现，铸锭铣面后在有带状气孔处呈现亮点，有经验者可立马发现。有带状缺陷的扁锭在轧制时，板材表面会出现成串的拉裂或孔洞。在这些地方不易氧化着色，不利于阳极氧化处理。

带状气孔是体积结晶造成的，搅动液穴内熔体或个别地带熔体补充不足，往往会形成此缺陷，通常只在细晶锭坯内出现，同时多产生于晶粒边界。它对铸锭力学性能不利，同时可因此引发裂纹。

氧化夹杂

氧化夹杂实际上就是 MgO 膜，其中混有 MgO·MgS 和金属中间化合物，在试片断口上呈球状。此缺陷是由于工艺不完善或操作不当引起的，如将表面 MgO 膜搅入熔体内，或熔剂用的不当，通常用五号熔剂就可以显著减少锭中的氧化夹杂。

熔剂夹渣

熔剂夹渣是镁合金锭中最常见的缺陷，也是危害非浅的缺陷。熔剂渣的密度与镁熔体密度相差不大，在熔炼时不易彻底除净，成为制品与工件裂纹的起源。熔剂夹渣废品占镁合金锭坯废品总量的 75%左右。这种缺陷是因熔炼、精炼工

艺不合理、熔剂选择不当、熔体过热等因素引起的，如果这些因素不存在,熔剂夹渣缺陷便会大大下降。减少到低于 5%。MB8 合金锭最易产生这类缺陷，MB15 合金的最少。熔剂夹渣与精炼剂的组成密切相关，用五号熔剂精炼 MB8 合金，几乎检验不到熔剂夹渣。

金属中间化合物

镁合金金属中间化合物的组成因合金不同而异，MB8 合金中主要是β （Mn）一次晶，其中可溶解总量为 2%的 Fe 和 Al，在金属中间化合物聚焦区的 Mn 含量比基体中的高 2.5 倍到 7 倍。影响 MB8 合金金属中间化合物一次晶多少的工艺因素有：铸造温度、冷却速度、成分，等等，在成分中以 Mn 的多少的影响最大，Mn 含量的最大值为 1.55%，Fe 和 Al 为杂质，应分别≤0.2%。

在 MB3 合金中，金属中间化合物的相组成较复杂，有η （MnAl）相、亚稳定相 MnAl）（τ 相）和β （Mn）相，其中溶有 Al。

Fe 在 MB3 合金中的基本存在形式是溶入含 Mn 的金属中间化合物，以固溶体形式存在。只有 Fe 的含量大于 0.02%时才出现个别分散的 FeAl3 相，若合金的 Fe 含量小于 0.05%，则不会出现含 Fe 的金属中间化合物。在 MB3 合金中，有金属中间化合物聚集的地方不易阳极氧化，使氧化后的产品色调不均匀，同时含有氧化铁时易发生腐蚀。

在 Mg-Zn-Zr 系合金中，化合物的主要成分为锆和锌，含有 0.01%Zr~0.19%Zr。当 Zr 含量大于 5%时才会形成化合物 ZnZr，但由于商业镁合金的 Zr 含量很小，所以在工业生产的镁合金中不会出现 Zn、Zr 化合物。

2.48 48、镁合金锭坯的机械加工

表 1　圆盘锯切镁合金锭的参数

铸锭规格,mm	锯盘转速 r/min	锯切速度 m/min	锯盘前进速度 mm/min
直径 350	13.5	60.6	280
直径 482	13.5	60.6	245
扁锭 200×800、260×960	408	1700~1830	1370~1840

铸造的镁合金锭必须经过机械加工才能进入压力加工工序，加工成半成品——镁材（板、带、棒、型材与锻件等）。首先必须锯掉锭的浇口和底部，然后锯切成对符合技术条件要求的坯料，并经车削或铣削坯料锭块表面，清除缺陷，经外观检查合格后转入下一道工序。

镁合金具有良好的可切削性能，特别是铸造状态材料的尤佳。锯切时锯齿上承受的压力为 250N/mm2~400N/mm2；镁合金有良好的导热性能，热导率 0.18J/(cm·S·℃)~1.50J/(cm·S·℃)，硬度适中，HB 为 45~75。因此，可进行高速切削，锯切铸锭时可不采用水或乳液冷却，通常以压缩空气冷却即可。

一般,锯切镁合金铸锭采用高速钢锯盘,锯齿或车刀前角 15°~30°，后角约 10°，锐角 60°~75°。铸锭锯切参数见表 1，

常用高速圆锯的主要技术特性见表 2，圆锭的车削参数见表 3。

表 2　常用高速圆盘锯的主要技术参数

项目	数值
锭厚，mm	170~260
锭宽，mm	600~1000
锯片最大直径，mm	1430
锯片重磨后最小直径，mm	1330
锯片厚度，mm	10.5
锯片转速，r/min	408
锯片圆周速度，m/min	1700~1830
主电机功率，kw	28
主电机转速，r/min	735
速比	1.8
最大工作行程，mm	1300
进给速度，mm/min	1370~1840
进给电机功率，kW	2.5/3/3.5
进给电机转速，r/min	710/950/1420

表 3　铝合金圆锭车削技术参数

铸锭直径，mm	350	405	482
车皮速度，m/min	688	830	916
每道次车削深度，mm	7.5	7.5	7.5

锭坯锯切最好用带锯，锯切时噪声低，对环境友好；锯口小，可提高成品率，减少废屑量。

镁合金锭坯在压力加工之前（轧制、挤压、锻造等）必须加热（预热）。镁合金的挤压温度为 300℃~450℃，可根据

合金成分、制品形状确定挤压温度，如 M1 为 420℃~440℃、AZ31 合金的为 370℃~400℃、AZ61 合金的为 370℃~400℃、AZ80 合金的为 360℃~400℃。镁合金扁锭的轧制开始温度（出炉温度）：M2M、ME20M 合金的为 450℃~510℃、ZA40M、AZ41M 合金的 440℃~510℃、ZK61M 合金的为 380℃~400℃。常用镁合金的锻造温度：AZ31B 合金的 290℃~345℃、AZ61A 合金的 315℃~375℃、AZ80A 合金的 290℃~400℃；MB2 合金的 275℃~400℃、MB3 合金的 250℃~450℃、MB8M 合金的 250℃~350℃、MB8Y2 合金的 230℃~250℃、MB15 合金的 320℃~400℃、MB22 合金的 350℃~450℃、MB25 合金的 320℃~390℃。

2.49 49、镁的塑性为什么不如铝的？

镁及镁合金的塑性成形与加工性能远不如铝的，虽然它们也可以在一定的温度进行轧制、挤压、拉拔、锻造等压力加工，但其道次加工率比铝的低得多，铝可以在室温下进行压力加工，总加工率可达 60%或更大一些，而镁则不能大于 20%，只能望洋兴叹。一般，镁及镁合金只能在热状态下加工，热加工温度宜≥250℃。这也是为什么变形镁合金的应用领域比铸造镁合金窄狭的原因之一，当前在结构制造中，变形镁合金材料的用量还不到 30%，压铸及铸造产品的用量则占 70%

以上，不过前者占的比例有逐年缓缓上升的趋势。

镁及绝大多数镁合金具有密排六方（hcp）晶体，对称性低，室温滑移系少。这就是它们塑性低的根本原因。温度低于 225℃时，多晶体镁的塑性变形仅限于通过基面｛0001｝与<1120>方向滑移和锥面｛1012｝和<1011>方向孪生来实现。当变形较大时，沿孪生区域或沿大晶粒基面｛000｝产生局部穿晶断裂，因而镁合金仅能发生低于 20%的冷变形，道次加工率最好不大于 12%。

温度＞225℃时，原子振动振幅增大，使得最密排面与次密排面的差别缩小，从而产生新的滑移面和滑移方向，塑性大大提高，有利于加工变形，同时由于发生回复及再生结晶，使材料软化，因而具有相当高的塑性，这就是镁合金的压力加工大都在高温下进行的原因。

提高镁及镁合金塑性的措施

镁及镁合金压力加工塑性低与成形性能差的根本原因是因为它们的晶体结构为密排六方，而铝的塑性为什么高，是因为它具有面心立方晶体结构，滑移系多，易变形，而镁及镁合金的滑移系少。所以提高镁及镁合金压力加工塑性和成形性的主要措施：

改变晶体结构

这是一种冶塑性变形能力低的治本措施，研究表明，向镁中添加锂、铟、银等合金元素可以降低镁合金晶体 c/a 值，

例如加入 8at（原子）%Li 后由纯镁的 1.623 下降到 1.618，晶格也由密排六方转变为体心立方，因而塑性大增。不过，Mg-Li 合金没有固溶强化效果，虽然其伸长率可由纯镁的约 5%上升到约 12%Li 质量合金的 60%左右，但抗拉强度却由纯镁的 220N/mm2 下降到 105N/mm2，同时合金的抗蚀性很低。因此，在常规工业结构中没有商业应用价值。但在航天器制造中得到了有限的应用。

晶粒细化

金属及合金的塑性及强度均随着晶粒的细化而上升，与铝合金相比，晶粒细化对镁合金强度和塑性的改善效果更明显，不仅能提高镁合金的强度和塑性，而且可导致高应变速率和低温超塑性。

AZ91 镁合金和 5083 镁合金屈服强度 Rp0.2 与晶粒尺寸 d 关系的对比研究表明；d≥2μ m 时，镁 Rp0.2 比铝的小，而当 d＜2μ m 时，镁的 Rp0.2 却比铝的大。通常认为较细晶粒是镁合金出现超塑性的前提条件。细晶有利于改善塑性和提高诱发超塑性的最佳应变速率。产生超塑性时，细晶镁合金的伸长率可大于 300%。另外，细晶粒可以抑制孪晶的形成，进而改善合金的塑性。在晶粒尺寸为 60μ m 时，纯镁的塑性-脆性较变温度（DBTT，Ductile-Brittle Transition Temperature）约为 248℃；当晶粒尺寸为 2μ m 时，其转变温度可降至室温。研究表明，当镁合金晶粒细化到 1μ m 以后，

能够激活新的变形机制，导致晶界滑移以及室温下新的流变过程，从而提高塑性，甚致产生超塑性。一般认为，晶粒细化引起合金韧化的主要机理是晶界滑移。

镁合金可以超塑成形是其重要特性之一，不但简化了成形工艺，而且可以生产出综合性能好、尺寸精度高、表面光洁的产品，是一种很有发展潜力的成形工艺，将在汽车制造与航空航天器零部件制造中获得有效的应用。

均匀化处理可以在一定程度上细化晶粒，对镁合金热加工性能提高有利。

2.50 50、话说镁合金的塑性加工工艺

变形镁合金的塑性加工工艺与变形铝合金的大体相同，但镁合金一般都在加热状态下进行，对锭坯加热可采用与铝合金相似的加热方式，但是锭坯绝不可与火焰直接接触，否则会发生燃烧，引发不易控制的灾难性的火灾，锭上的机械加工毛刺最好清除干净，以免引发火灾。

通常多采用箱式电阻炉加热，镁合金的热导率高，任何形状和尺寸的锭坯均可进炉直接加热，不必预热。由于镁合金加热温度远低于其熔点，加热时不必采用惰气或还原性气氛，但必须确保炉温均匀，不得出现大的温度梯度，严防锭坯局

部过热，最好采用强制循环气流，同时，应保证加热炉能精准地控制温度，并采取锭坯加热保护措施，以防过热或甚至燃烧。

塑性加工工艺

变形镁合金的加工工艺与变形铝合金的差不多，可分为整体成形工艺（轧制、挤压、锻造）与二次成形工艺。二次成形是指半成品（板材、挤压材等）的进一步加工如弯折、冲压、冲挤、精压、旋压、拉延、超塑成形等）。

轧制成形

在室温下镁合金的塑性很低，不适宜冷轧，因此板带都在一定温度下进行热轧与温轧，生产厚板、薄带板。适于生产板带材的镁合金有镁-锰系合金（M2M、ME20M 等），镁-铝-锌系合金（AZ31B 等），镁-锂系合金（LA141 等），以及纯镁等。镁及镁合金薄板是指厚度为 0.8~10mm 的板材，铝合金薄板为厚度≥0.2~≤6.0mm 的板材;镁合金厚板是指厚度＞10mm 的板材，铝合金厚板的定义为厚度＞6.0mm 的板材。

挤压成形

大部分镁材是用挤压工艺生产的，产品有管、棒、形材，挤压都是在一定温度下进行。镁合金挤压工艺和装备与生产铝合金挤压材的相当。所有的变形镁合金都可以用于生产挤压材：用于挤压管材的有 AZ31B、AZ61A、ZK10A 等；用于生产棒材的主要有 AZ31B、AZ61A、AZ80A、ZK10A、ZK30A、ZK60A

等；用于生产型材的主要是 AZ31B、AZ61A、AZ80A、ZK10A、ZK30A、ZK60A 等。

目前，热挤压是变形镁合金的首要塑性变形加工工艺，与变形铝合金的挤压一样，镁合金挤压材可以正向挤压，也可以反向挤压，可以用单动挤压机生产，也可以用双动挤压机生产，可以用卧式挤压，也可以用立式挤压机。总之，凡是用于挤压-铝合金半成品的装备皆可用于生产镁合金材料，只不过工艺参数不同，配套设备与精整设备有所差异。

在生产镁合金挤压材时主要采用正挤压法，反挤压法用的少。有时间或采用组合挤压法，即挤压初期用反挤压法，以消除正挤压时挤压筒与锭坯之间的摩擦，而后立即转为正挤压。不过这种组合工艺很少使用。

锻压成形

变形镁合金不能冷段，只能热锻，锻造温度 200℃~400℃，不能高于 400℃，否则会发生严重的氧化，而且晶粒会长大。镁合金的热导率大，约为 80W/(m·℃)，几乎比钢的大一倍，同时由于镁合金密度小，热容量也小，接触模具后会很快降温，变形抗力上升，充模能力下降，因此镁合金适宜于等温锻压。

超塑性成形

超塑性成形是采用板材在超塑性条件下加工零件的工艺。一些变形镁合金在一定条件下具有超塑性，可以一次制成形状

较复杂的零件。细晶粒的 AZ31、AZ61 及 ZK60 合金的都有超塑性。

二次成形

镁合金半成品的二次成形包括：超塑成形、变曲成形、深拉延、手工旋压、强力旋压、橡皮板成形、拉延成形、落锤成形，等等。有引起镁合金可以于室温成形，但绝大多数合金应加热到一定温度，高温成形对工模具与工艺都有特殊要求。

2.51 51、镁合金板带材生产（一）

常用镁合金的塑性差，远不如铝合金及铜合金那样易加工成形，因为它们的晶体结构为面心立方，道次加工率甚至可达 50%。不过，含 Li 量大于 10%的 Mg-Li 合金也具有体心立方晶格，既有良好的冷、热加工成形性能，还具有超塑性。加热到 370℃以上后，由于原子振动振幅增大，使原子最多面及次多面差别缩小，使滑移面增加，同时由于恢复及再结晶使合金软化，这些因素的叠加使镁及镁合金在一定温度下也有较大的塑性，若热轧温度≥370℃，M2M、AZ40M、AZ41M、ME20M 等镁合金的热轧总加工率可达 95%。

镁合金的冷轧成形性差，除 Mg-Li 合金，其他镁合金的道次加工率不宜大于 12%，否则会产生严重的裂边，甚至无法轧制。生产镁合金板材时，需进行一次或多次加热的多道次热轧。一般厚板为热轧的，而薄板应进行温轧与冷轧。

当前，生产镁合金板、带的主要工艺有：铸锭热轧法、双辊式连续铸轧法、挤压开坯换向轧制法、直接挤压法、哈兹雷特连铸连轧法等。直接挤压法一般只能生产较窄的镁板，同时很难生产薄板，当然用 150MN 的重型机可以生产 1000mm 级宽的厚板；用挤压坯生产镁板带仅在于坯料不同，其轧制工艺及精整工艺与铸锭热轧法的相同，但其轧制性能好一些，因此，不再赘述。

铸锭热轧法

采用铸锭热轧法生产镁厚板与供温/冷轧用的板、带坯料是一种古老的工艺，自有镁板产商业化应用以来，就是采用此种工艺生产的。日本铸锭热轧法生产板材的工艺流程见图 1，而欧美国家生产带卷的工艺流程则如图 2 所示。

图 1 镁合金板材生产工艺流程示意图

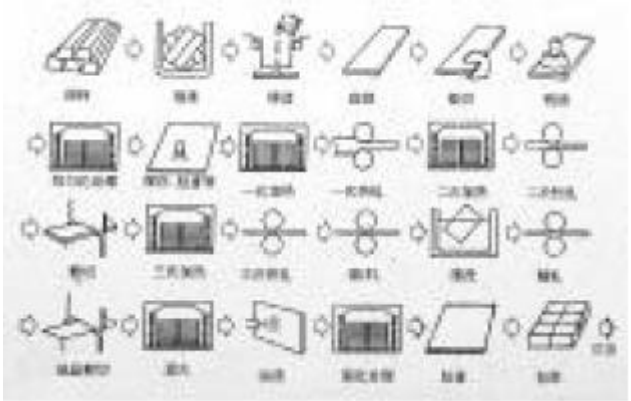
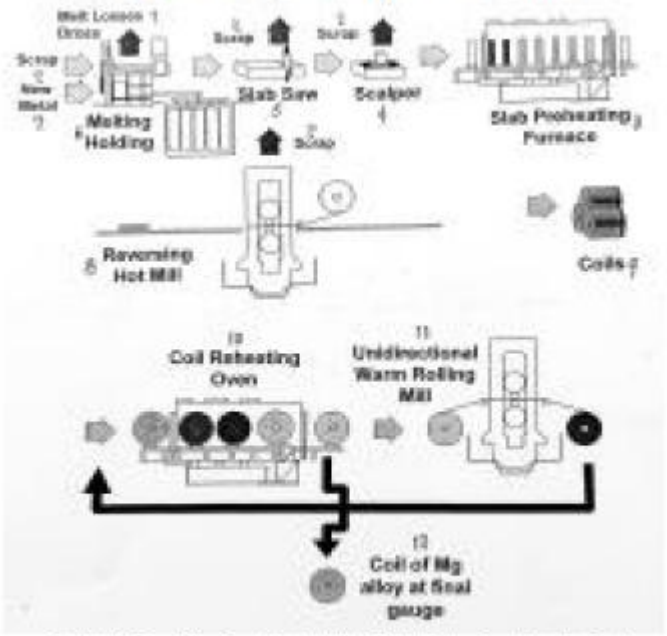


图 2 常规工艺生产镁带卷的工艺流程示意图



1-炉渣;2-废料;3-锭坯加热炉;4-铣面机;5-锭坯锯;6-熔炼/保温炉组;7-重熔用镁锭等;8-4 辊可逆式热轧机;9-带卷;11-4 辊不可逆式带卷温轧机;12-成品镁合金带卷。

2.52 52、镁合金板带材生产（二）

表 1 常用镁合金锭坯规格(mm)

合金	厚度	宽度	长度
M2M, ME20M	100~120	540	400~1200
	150~170	730	400~1200
	190~220	950	400~1200
AZ40M, AZ41M	100~120	540	600~1200
	140~170	730	510~1200
ZK61M	90~130	540	400~1000

表 2 镁合金铸锭均匀化处理规范

合金	铸锭尺寸 mm	铸锭温度,℃	保温时间,h	冷却条件
AZ40M	165×730	420±10	14~24	空冷
AZ41M	165×730	410±10	14~24	空冷
AZ61M	120×540	370±10	8~12	空冷

热轧前锭坯准备

热轧前锭坯准备包括：锯切头尾、铣面、均匀化处理与加

热等等工序。可用壁厚 60mm 的铁模、半连续法或连续法铸造扁锭。一般，锭的尺寸：厚 125~350mm，宽 410~1050mm，长 900~2050mm，宽度与厚度之比最好为 4：1，均匀化处理可在铣面前，也可以在铣面后，铣面厚度以能除去表面种种缺陷为准,通常为 18~20mm,个别情况可铣得更深些。A240M、AZ41M、Mg99.00 等合金锭的小面应铣成钝角，挤压锭可不车皮。常用锭坯规格如表 1 所列。均匀化退火温度等见表 2，均匀化处理可采用卧式空气循环电炉或辊底式炉。加热制度见表 3。

表 3 镁合金锭坯加热规范

合金	锭坯尺寸,mm	铸锭温度,℃	加热时间,h
M2M、Me20M	(140~170)×730×(400~1200)	480~510	6~8
	(32~85)×730×(400~1200)	450~490	3~5
	(12~30)×730×(400~1200)	440~480	2~4
AZ40M、AZ41M	(140~170)×730×(400~1200)	470~510	6~12
	(32~85)×730×(400~1200)	440~490	3~5
	(12~30)×730×(400~1200)	440~480	2~4
ZK61M	(90~130)×540×(400~1000)	380~400	4~6

铣面

镁合金锭的可切削性良好，刀具使用寿命长，硬质合金铣刀寿命可达 2000h;每次铣削深度 5~10mm;铣后表面光洁，可满足品质要求;镁合金的热导率高,铣削时可不用冷却剂。

均匀化处理

半连续铸造镁合金锭的冷却速度快，是在不平衡条件下凝固的，晶内偏析较为严重，还存在着较大的残余应力，为了消除这些缺陷与提高合金的塑性与改善合金的力学性能，应对铸锭进行均匀化退火处理。不过，M2M、ME20M 合金的塑性好，可不进行均匀化处理。均匀化退火一般采用卧式空气循

环电炉。

锭坯加热

锭坯加热可采用电阻炉、燃气炉，应保证空气循环速度≥40 次/min，炉内温度偏差不得大于±6℃。可用热电偶监测炉内热空气温度与锭坯温度，并应用安全系统，由位于加热炉顶部的热电偶和可以关闭的控制器组成，一旦炉内温度或锭坯温度超过设定值，系统就会及时切断热源。

锭坯加热时可能发生燃烧，所以加热前应清除锭上的毛刺与飞边，如在空气循环电炉内加热应避开风口区，在专用炉内加热一般不会发生燃烧。加热时还可以采用保护气氛，保护气体有 SF6、SO2、CO2。SO2 的浓度达 0.5%后即有良有的保护作用；CO2 的浓度达 3%就不会发生强烈的氧化。不过采用 SO2 作为保护气体会产生少量硫酸，对加热系统有腐蚀作用，应加强设备维护，及时更换受损零部件，应特别注意控制系统的检修。

2.53 53、镁合金板带材生产（三）

世界板带轧制工艺

镁合金板带生产工艺有四种：铸锭热轧法，双辊式连续铸轧法，哈兹雷特连铸连轧法，挤压坯温轧法。现在谈谈铸锭法生产镁合金的轧制工艺。

镁板锭坯轧制法，这是一种老的生产工艺，自有板材应

用以来就是用此法生产的，至今仍宝刀不老，大部分板带材都是用此法生产的。当前，中国、美国、德国、日本、韩国、英国、俄罗斯、土耳其、澳大利亚等所用镁板带都是用该法生产的，其他的工艺仍处于研发阶段，尚未获得商业应用，但双辊式连续铸轧板带在中国与韩国有小规模生产。

锭坯热轧工艺

此法是当前生产镁及镁合金板材的主流，早在 1930 年美国道屋（Dow）化学公司就用此法生产板材；1942 年德国利用二手轧机建成了一个生产能力 3kt/a 的镁板厂，这在当时是一个大的企业了，产品几乎全部用于制造航空器；英国伊利可创镁业公司和苏联将铸锭热轧开坯+温冷轧工艺块片式生产镁板技术有了很大发展，推到了一个新的里程碑。

锭坯热轧生产工艺：熔炼→铸锭→铣面→均匀化退火→加热→热轧→剪切下料→加热→温轧→表面清洗→剪切下料→中间退火→精轧→成品退火→精整→成品退火→包装→入库或发货。此法优点是可以生产宽幅厚板，组织性能优秀，可以生产所有的合金，产品覆盖面广。不足之处是：生产流程长，投资大，生产成本较高，薄规格冲压产品的各向异性较明显。

中国的锭坯热轧镁板生产工业

中国当前用锭坯热轧法生产镁板的主要企业约 10 家，总生产能力约 25kt。中国生产镁板始于 1959 年，当时的哈尔

滨铝加工厂（现名东北轻合金有限责任公司）在苏联专家的帮助下试制与生产了少量的镁板，供国防与军工需要，1962年镁板生产技术全部转移到洛阳铜加工厂（现名中铝洛阳铜业有限公司），但挤压镁材部分仍留在东北轻合金有限公司。自 1962 年起至 1989 年止的 27 年，中国仅中铝洛阳铜业有限公司一家可以生产镁板。现在可生产镁板的主要企业还有：西部钛业有限公司、营口银河镁业有限公司、洛铜宜阳产业园镁业有限责任公司、洛阳华凌/鑫友镁业有限公司、山东华盛镁业有限公司、重庆奥博铝镁科技有限公司，等等。

中铝洛阳铜业有限公司铝镁分厂镁板车间，镁板生产能力 500kt/a，至 2015 年 12 月，该公司已累计生产镁板约 12kt，有 1600mm 热轧机 1 台、800mm 冷轧机 1 台。生产工艺流程：铸锭铣面→均匀化退火→加热→1600mm 热轧机开坯→温整→板坯剪切下料→板坯加热→1600mm 轧机多次温轧→酸洗→加热→中轧→中断下料→加热→800mm 冷轧机精轧→退火→精整→氧化着色→涂油包装→入库或发货。

西部钛业有限公司。镁板生产能力 5kt/a，是中国也是全世界最大的镁板生产企业之一，有 2800mm 四辊热轧机 1 台，1780mm 六辊冷轧机 1 台，是全球可生产镁板宽度达 2600mm、长度 10m 的材料，不过这么宽的镁板何处觅用户呢？该公司的生产工艺为：铸锭铣面→均匀化退火→电阻炉加热→2800mm 轧机多次热轧→在线热矫直→剪切→表面修磨→电阻

炉在线加热→1780mm 热轧机多次温轧→除油→电租炉退火→余热矫直→冷矫直→酸洗/表面抛磨→砂光→包装→入库或发货。

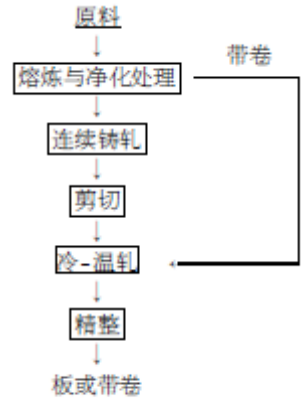
营口银河镁业有限公司。有 1725mm 四辊热轧机 1 台，1650mm 六辊冷轧机 1 台，可生产厚 10~100mm、宽 1500~1600mm 的厚板，厚 0.6~1.5mm、宽 1200~1500mm、卷重 500~1000kg 的薄板。

热轧与温轧镁合金时用猪油或含石墨的四氯化碳润滑。镁合金轧制时的发热量大，同时锭坯温度较高，如果头二、三道次的加工率过大，锭坯温度会上升到不允许范围，因此道次加工率不宜大，最好不超过 8.5%，轧制速度宜慢些，最好不大于 30m/min。在轧最后二、三道次时，由于带材厚度的减薄及温度的下降，压下量宜小些，而轧制速度则应高，可为 1~2.5m/s，以确保终轧温度在设定范围内（下表）。终轧温度过低板材伸长率会下降，如果温度过高，≥450℃，则材料的强度性能又可能达不到标定值。

合金	成品厚度,mm	终轧温度,℃
M2M,ME20M	22~44	380~410
	12~20	380~440
	6~11	370~400
AZ40M,AZ41M	22~40	360~370
	12~20	380~440
	6~11	370~400
ZK61M	22~40	350~380

2.54 54、镁合金板带材生产（四）

连续铸轧带坯



镁合金带坯铸轧工艺流程示意图

双辊式连续铸轧带坯在铝工业中的应用始于上世纪 60 年代初，是美国亨特（Hunter）公司研发的，现在已成为生产热处理不可强化铝合金带坯的成熟工艺,中国已拥有约 820 条生产线，占有全世界总生产能力的 86%以上。但首次采用此法生产镁合金带坯的是美国道氏化学公司（DOW）与亨特工程公司，始于上世纪 80 年代初，当今美国、德国、法国、澳大利亚、韩国、中国等在研发方面做了许多开拓性工作，特别是中国与韩国在铸轧法生产镁带坯方面已进入商业阶段，可以生产宽 600~2000mm 的带坯。中铝洛阳铜业有限责任公司与闻喜银光华盛集团公司在研发镁带坯双辊式连续铸轧技术方面做了许多工作。

铸轧工艺

在铸锭热轧法生产镁板带统治了近一个世纪后，终于在

新世纪迎来了以双辊连续铸轧带卷现卷-卷轧制镁带的工艺，就像轧制铝带那样，不过工艺复杂得多，设备既多又复杂。加热设备与方式是关键，包括对带材、轧辊、带卷、卷取/开卷机的加热，最好能确保在340℃~380℃进行轧制。

双辊式连续铸轧带坯见图。铸轧时熔体温度为 720℃~730℃,在全流程中需用N2+SF6气体保护熔体,带坯厚4~7mm，铸轧速度 0.5~2m/min。铸轧带卷必须温轧-冷轧才能达到所需的厚度与组织性能。

双辊式连续铸轧工艺将铸造与热轧工艺合二为一，直接将熔体加工成带坯，省略了铸造、切头尾、探伤、均匀化退火、铣面、加热、热轧、切边等工序，与传统的铸锭热轧工艺相比，综合成品率可提高30个百分点，即最终产品的综合成品率由约20%上升到约50%，制造成本可降低30%以上。镁合金铸轧带坯也存在着较为严重的成分偏析、硬度高、加工化显著等特点。此外镁合金的化学活性很高、易氧化甚至燃烧、热容小、冷却快。因此，铝合金的铸轧工艺不能全盘移置到镁合金带坯铸轧上，镁合金带坯铸轧比铝合金的大得多。

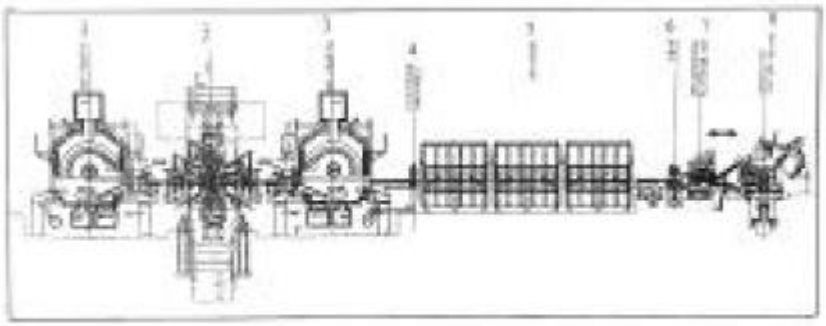
镁合金铸轧的关键技术有许多，铸嘴结构和材料是主要者，以确保布流均匀，需要从材料保温、热化学稳定性、热膨胀系数、抗热冲击性、寿命等多方面确保镁熔体形成厚度、流场、温度场、质量场高度一致的薄层流入铸轧辊缝。闻喜银光镁业有限公司在这方面做了许多开拓性工作，取得了可

喜成果，基本实现了初步工业化。但是仍然存在一些有待完善的技术难题，特别是在连续化、稳定化、规模化生产技术方面。

闻喜银光镁业有限公司常规铸轧技术生产的带坯厚度一般为 4mm~6mm，卷取和开卷困难，易产生裂纹，他们的实践证明，只有带坯厚度＜4mm，才能较顺利地卷取和开卷，不会产生裂纹等缺陷，可以满足后续加工的工艺要求。

2.55 55、镁合金板带材生产（五）

哈兹雷特带坯卷-卷轧制



镁带中试轧制线全貌示意图

1-1号热卷取/开卷机;2-4辊可逆式热轧机;3-2号热卷取/开卷机;4-出料侧喂料夹送辊;5-惰气冷却区;6-剪切机;7-导向辊与压平装置;8-开卷/卷取机组

利用哈兹雷特双带式连铸轧机生产的带坯进行卷-卷轧制薄镁带材在美国国家橡树岭实验室（Oak Ridge National Laboratory，ORNL）中试成功，获得美国 2012 年最优秀发明创新奖 100 项之一。这条生产线是美国法塔享特工程公司、北美伊利可创镁业公司（Magnesium Elektron North America），美国国家橡树岭实验室联合研发的。该中试生产

线可接受厚度≤12.7mm、宽度≤250mm 的带坯，可对轧制速度进行同步或非同步控制，进料辊道适用于块片轧制，也可很方便地改为带卷轧制。

下图示出了这条卷-卷轧制生产的全貌，它的基本组成单元：1 台 4 辊可逆式热轧机，也可以用 2 辊及 6 辊的；轧机两侧各有 1 台热卷取/开卷机（hot coil），并有加热设备，可将镁带卷加热与保持在既定的温度范围内；1 套轧辊驱动系统，可以在非对称轧制时独立驱动工作辊；带卷装卸工作台。

法塔享特中试生产生产线

法塔享特工程公司在像树岭国家实验室窄幅带坯卷-卷轧制中试生产线基础上与哈兹雷特公司合作，又进行了带坯更宽一些的卷-卷轧制试验。这条新中试卷-卷镁带轧制线的特点如下：

可实现可逆式多道次轧制，带材温度始终保持在200~450℃。

可进行中间退火处理，软化带材，保持组织稳定。

工作辊速度可以同步，也可以是异步的，在异步轧制时，可向轧带材导入更多机械功和热，从而可以减少镁的密集六方晶体结构的主面织构，因此所轧带材的可塑性及低温成形性能都得到改善。

在运转的任何时候可加快全程轧制速度，提升变形温度。

一作工作辊的辊径作了适当减小，以便在异步（非对称）轧制时能适应接触弧长最小的情况下，仍有足够的扭转刚度与强度去平衡轧制负载的上升

通过液压系统高速调控辊缝大小，因而调得又准又快，可得到厚度偏差一致的带材。

每道次压下率可达到恰如其分的最大值，使轧出的带材具有细小均匀的晶粒组织，各项力学性能得到全面提升。

工作辊弯曲系统强而有力，可轧得板形好的带材。

可进行片-片轧制，也可以进行卷-卷轧制，还可以进行片-卷轧制，是一条高技术水平的顶尖镁带连续热轧中试生产线，还可以生产部分商品镁板带。

从 2014 年开始，法塔享特工程公司与哈兹雷特公司大张旗鼓地向全世界推出 2000㎜ 镁带材卷-卷轧制技术与成套装备，可至今尚未见哪个国家与公司在建这类生产线的报道，因为它的生产能力委实太大。建设这么大的生产线可能市场不易开拓，投资也大，那么可以建规模小一些的，如 1800㎜、1500㎜ 的或甚至 1200㎜ 的，也可与平轧铝产品项目建在一起，即共用哈兹雷特带坯铸造线，而各有各的熔炼炉与后续加工精整生产线。

2.56 56、说说镁合金的二次成形

镁合金的二次成形是对其半成品（板材、型材、管材等）进行深加工，将其加工成种种零部件。有些镁合金可以在室温下进行成形加工，但绝大多数必须在一定温度下成形。镁合金的二次成形工艺和所用装备与其他金属的大致相同，但高温成形时对工具和工艺都有特殊要求。这里所说的高温是指 130℃~400℃，例如薄板的延展成形温度为 130℃~170℃，锻造、精压、压滚的温度为 280℃~400℃。

弯曲成形

镁合金的弯曲成形可以利用模具或冲床或专业弯板机上进行，也可以通过橡皮板成形。开始时作用于薄板上外力使其发生弹性变形，而后随着外力的增加发生塑性变形。外力去除后，发生变形的坯料不能恢复到原来的形状，而与模具的形状一致。工件从模具中取出后会发生弹性回弹，导致工件弯曲角及半径变化。回弹角大小取决材料的力学性能、圆角半径与坯料厚度比值、弯曲角度、弯曲工件宽度、弯曲温度，等等。

深拉延成形

镁合金薄板的深拉延成形可以在液压机上进行，因为它的速度缓慢均匀，变形程度不是很大的成形拉拔则可用机械压力机。AZ31B-O 镁合金薄板的冷拉极限为 20%，高温时则可

达 70%。工件形状对镁合合金的深拉延性也有一定的影响，拉延模具可用未淬火硬化的低碳钢或铸铁制造。

手工旋压

手工旋压是指将安装于旋压车床上的金属圆板进行旋压，同时用擀棒紧压其表面，一次又一次地擀压，使其一点一点地变形，最终成为所需的圆筒形或圆锥形工件。采用手工旋压可以生产各种圆锥状和半球状的镁合金零件。手工旋压工模具造价低，从而可以很经济地小批量生产各种零件，当压力成形工模具形状复杂时，也可以利用手工旋压大批量生产。

强力旋压

强力旋压是在普通旋压基础上发展起来的。普通旋压是利用尾顶块将毛坯料夹紧在芯模上，通过芯模旋转和旋轮逐次进给而将毛坯成形为零件，强力旋压则是用尾顶块将毛坯夹紧，通过芯模旋转和旋模的进给运动，使毛坯连续逐渐减薄并贴靠芯模而成形为所需的工件，其中旋轮的运动轨迹由靠模或导轨来完成。镁合金可以采用强力旋压中的锥形旋压和管式旋压来成形。强力旋压镁合金零件时可以不加热，但大多数是在加热状态下进行的。

橡皮板成形

一些航空器镁合金零件是采用成形模在液压机上通过橡皮板成形。可按橡皮板成形零件形状分为：按外凸曲线成形的零件，带有外凹轮廓的零件。通常，曲线的外部轮廓常常

按直线分开，直边零件利用橡皮板成形。橡皮板成形工艺还可用于制造加强肋和下陷（滚褶）等，以及增加或降低孔的刚度等。橡皮板成形所用工具简单，不用模具，只使用成形垫块。

拉延成形

镁合金的冷拉延塑性不好，因此只有在变形程度很小时才冷拉延成形零件。冷拉延时 MAI 合金的拉延系数应小于 1.20，MA8 合金的应＜1.25。所以镁合金的拉延成形都在一定的高温下进行，通常加热温度为 260℃~350℃，加热温度取决于合金种类、拉延系数、冲压种类及模具结构，例如 MAI 合金的为 320℃~350℃，MA8 合金的为 300℃~350℃。

落锤成形

在生产批量不大且要求回弹低的镁合金零件时，采用落锤成形可以生产深度小且形状不复杂的工件。除了需要加热外，镁合金落锤成形用的装备与其他合金用的相同。成形时宜选用退火状态板材，成形一个工件可能需要锻打 10 次左右，各次锻打之间应重新加热一次，厚度 1.3mm 板料的加热时间为 5min，厚度＞1.3mm~3.2mm 板料的加热时间为 9min。

2.57 57、镁材挤压述说

挤压镁材（型、棒、管材与线坯）的应用比平轧镁产品的应用广得多，因而挤压镁材的产量约占变形镁合金半成品总

产量的 80%。变形镁合金挤压设备与铝材挤压的相同，仅在工艺参数方面有较大差异，可采用正向挤压，也可以采用反向挤压；可用单动挤压机，也可以用双动挤压机；可用卧式挤压机，也可以用立式挤压机。产品有管、棒、型材与线坯。

挤压成形是对装于容器（挤压筒，在台湾省与香港特区称为盛锭桶）内的金属锭坯施加外力，使其从特定的模孔中流出，从而获得所需形状和尺寸材料的一种塑性加工方法，其基本原理见图 1。

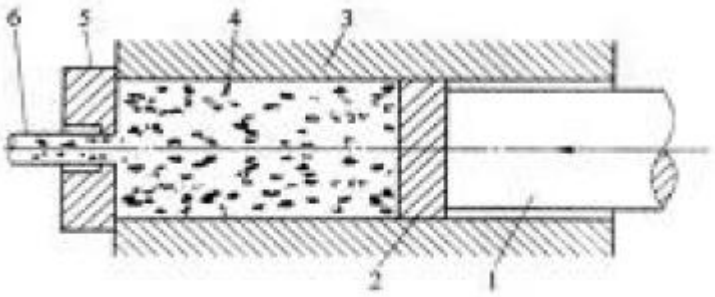


图 1　金属挤压原理示意图
1—挤压轴；2—挤压垫；3—挤压筒；4—锭坯；5—挤压模；6—产品。

根据挤压筒内金属的应力-应变状态、金属流动方向、润滑状态、挤压温度、挤压速度、挤压设备结构形式、工模具种类或结构、坯料形状或数目、制品形状或数目，可将挤压成形方法分为三四十种。其中用的最多的是正挤压法、反挤压法与管材的正、反挤压法（图 2）。

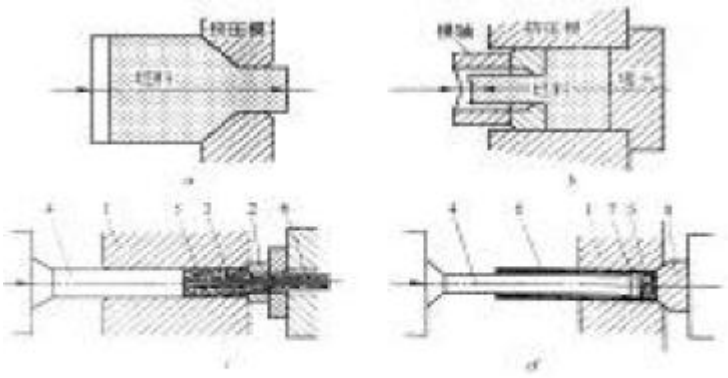


图2 挤压铝、镁合金常用的挤压工艺
a—型、棒材正挤压法；b—型、棒材反挤压法；c—管材正挤压法；d—管材反挤压法。
1—挤压筒；2—模；3—穿孔针；4—挤压轴；5—锭坯；6—管材；7—垫；8—堵头。

正向挤压

正向挤压可简称正挤压，其特点是挤压时制品的流出方向与挤压轴运动方向相同（图 2a、c），是生产镁挤压材最基本的工艺，具有技术成熟、操作简便、灵活性大、制品表面品质优秀等优点而被广泛采用。

此法最基本特点：挤压时锭坯与挤压筒之间有相对滑动，在它们之间存在很大的有害的外摩擦，使金属流动不均匀，从而使制品头部与尾部、表层与中心的组织和性能不均匀；使挤压能耗上升，通常这种外摩擦能耗占挤压总能耗的30%~40%；由于强烈摩擦的发热作用，制约了挤压速度的提高，加快了挤压模具的磨损。

反向挤压

反向挤压（反挤压）时制品流出方向与挤压轴运动方向相反（图 2b、d）。反挤压时，锭坯与挤压筒壁之间无相对滑动，所需挤压力小，挤压能耗较低，因而采用相等能力设备可以实现更大变形程度的挤压，可以挤压更大变形抗力的合

金。与正挤压不同，反挤压时金属流动主要集中在模孔附近，因而沿制品长度方向金属的变形均匀。不过反挤压操作较复杂，间隙时间也较长，制品表面品质难以控制，需要专业设备与工具等，因而反挤压法受到一定的限制。

2.58 58、镁合金挤压工艺

常用的挤压镁合金有 AZ31B、AZ61A、ZK10A、AZ80A、ZK30A、ZK60A 等，制品状态多为 H112，也有一部分 T5 的。

挤压工艺

镁合金的典型挤压工艺流程：加热锭坯→一次挤压→切中间坯料→加热→二次挤压→人工时效→拉伸矫直→切头尾与取试样→辊式矫直→人工矫直→检查→切成品与打印→氧化着色→成品检查→包装→入库。

工艺特点：镁合金只允许在空气电阻炉中加热；为防止燃烧，各种合金的最高加热温度为 470℃；最高挤压速度 20m/min，比硬铝合金的快一些，但只有软合金的 1/3 左右；镁合金挤压材的收缩率比铝合金的大，因而相应地加大模具尺寸；张力拉矫时材料应加热到 150℃~250℃，而铝合金材料则在室温矫直。

锭坯及工模具准备

当前镁合金圆锭都是用半连续法铸造的，挤压前通常都要进行均匀处理，可以改善制品性能与降低挤压力 20%~25%，

均匀化处理规范为350℃×12h。

锭坯挤压前都应车皮、镗孔（管坯），特别是反挤压管材和异形薄壁产品的锭坯尺寸应精准与均匀，以确保挤压材壁厚均匀，对于一些小规格和有特殊要求的产品可以用二次挤压坯料挤压。

锯切锭坯时应有良好的吸屑装置，锯屑当班清理干净，加热炉电租丝应埋于耐米砖内，锭坯上的毛刺一定应清理干净。为了安全，厂房内应配备干砂箱和D级灭火器材。

镁合金挤压设备及挤压筒、挤压轴、垫片和穿孔系统等应是专用的，不可与挤压、铝合金用的混用。纯镁的熔点比铝的低 10℃，密度低 35.6%，热导率低 30.2%，而线膨胀系数则高5.9%，因此在模具设计与确定锭坯加热时间都应加以考虑。特别是在设计模的工作带时，模孔加工尺寸的热胀冷缩余量应比铝的约大一倍。

挤压镁合金时不需要润滑垫片，因为压余易分离。镁合金的可焊性能不如铝合金的，因此，在平面分流模挤压管材和空心型材时，应精心设计分流孔及导流系统，以尽量降低流量阻力，增大焊合均匀性。用平面分流组合模挤压自行车三角架用 AZ31B 合金管材的参数为：铸锭均匀化处理 400℃/24h，挤压筒温度 250℃~350℃，模具预热到 300℃~380℃，挤压温度 320℃~380℃，挤压速度 0.5~1.5m/min，挤压比40~80。

挤压模用H13钢制造，淬火与回火后的硬度HRC为47~51，工模具预热温度一般比铸锭加热温度低 20℃~30℃。挤压时模具温度升高约 30℃。镁合金反向挤压温度 175℃~370℃，具体温度取决于合金种类和挤压速度。

ZK60、WE43、WE54 合金的热处理状态为 T5 和 T6，ZK 系列合金材经 T5、T6 处理后，力学性能都有所提高。热处理对 WE 系镁合金挤压材的室温力学性能影响不大，但是高温稳定性有所提高，但塑性却显著下降。挤压的 ZK 系列合金既有高的强度又有相当好的塑性，不必热处理强化。

镁合金挤压材在热加工成形、矫直和焊接后都要进行应力消除退火（表 1），对于铝含量＞1.5%的镁合金必须进行此种处理，不但可防止变形，更主要的是可消除应力腐蚀开裂。

镁合金的固溶处理及人工时效规范见表 2，淬火水温 65℃或其他冷却强度相当的冷却介质，其他镁合金材料固溶处理后可在静止空气中冷却。

淬火后应对镁合金挤压材进行精整矫直，可进行辊矫、压力矫和拉矫。挤压材的挤矫困难，但是辊矫效果好，对断面形状简单的制品（角材、槽材、工字槽、圆管）都可以顺利地进行辊矫。拉矫在热态下进行，温度 200℃~225℃，永久拉伸量≤3%。矫直截面≤10mm 的材料时，最好采用电接触法加热，加热数秒至 2min，而矫直截面厚度＞10mm 的材料最好利用挤压后余热即时矫直。

表 1　挤压镁合金的应力消除处理规范

合金及状态	温度℃	时间 min	合金及状态	温度℃	时间 min
AZ31B-F	260	15	ZC71A-T5	230	60
AZ61A-F	260	15	ZK21A-F	200	60
AZ80A-F	260	15	ZK60A-F	260	15
AZ80A-T5	200	60	ZK60A-T5	150	60

表 2　镁合金加工材的固溶及时效处理规范

合金	状态	时效处理		固溶处理		时效处理	
		温度,℃	时间,h	温度,℃	时间,h	温度,℃	时间,h
ZK60A	T5	150	24	-	-	-	-
AZ80A	T5	177	16~24	-	-	-	-
ZC71A	T5	180	16	-	-	-	-
ZC71A	T6	-	-	430	4~8	180	16

2.59 59、镁合金的锻造

镁合金锻件在各个领域都有应用，但是用得最多的是汽车工业，车轮是一种主要产品，锻件组织致密，性能远高于铸造产品。

锻造特点

镁合金的锻造技术与铝合金的大体相同，但也有一些明显的差异。

镁合金在高温下的表面摩擦系数较大、流动性差、黏附力大、充填较深垂直盲孔较为困难，因此镁合金锻件的内外圆角半径和肋厚等都比铝合金的大。

在大多数场合镁合金锻造坯料是挤压的，一般在挤压前都进行均匀化处理，减少了力学性能的各向异性。

锻造时，不但坯料应预热，锻模也应加热到一定的温度，否则高温锻坯与冷模接触由于急冷可产生龟裂。

镁合金对变形速率极为敏感，增大变形速度塑性显著下降，因此较复杂的锻件需经过多次（火）成形，同时锻坯温度应一次比一次的低,以免晶粒长大,每一次下调 15℃~20℃。

锻造镁合金及其锻造温度

常用锻造镁合金的锻坯温度及模具预热温度见表 1，锻坯既可以是挤压的也可以用直接铸造的，但以前者的居多，用铸锭直接锻造，简化了工艺，降低了能耗，不过前提是铸锭晶粒组织是否适合直接锻造，晶粒太粗不行。向 Mg-Zn-Zr 系合金添加稀土元素钕和钇进行变质处理细化晶粒，可以获得适合于直接锻造的晶粒组织。Mg-Al-Zn 系合金是一类获得广泛应用的可用于锻件的镁合金，不足的是，铸锭晶粒较粗大，不适于直接锻造，必须采用预挤压锭坯。大多数镁合金的锻造温度为 290℃~415℃，但高锌的 ZK60 合金除外。高温镁合金的锻造温度高，同时锭坯加热时间宜长些，使共晶相充分溶解。

表 1　常用镁合金的锻造温度及模具温度

合金	锻造温度,℃	模具温度,℃	合金	锻造温度,℃	模具温度,℃
AZ31B	290~345	260~315	MB2	-	-
AZ61A	315~370	290~345	MB3	-	-
AZ80A	290~400	205~290	MB8M	-	-
QE22A	345~385	315~370	MB8Y2	-	-
ZK21A	300~370	260~315	MB15	320~400	200~300
ZK60A	290~385	205~290	MB22	350~450	230~320
			MB25	320~390	200~300

表 2　镁合金锭的均匀化退火规范

合金	温度,℃	保温时间,h	合金	温度,℃	保温时间,h
MB1	410~425	12	MB7	390~405	10
MB2	390~410	10	MB8	410~425	12
MB3	380~420	6~8	MB15	360~390	10
MB5	390~405	10			

镁合金可以锻成不同尺寸的形状的锻件，锻件尺寸取决于设备能力和结构，锻造方法有自由锻和模锻，可以开式锻也可以闭式锻，可用液压机锻造也可以在机械压力机上锻造或锤锻。

自由锻在平砧或异形砧上进行，也可用辊轮进行环锻。锻造前模具应加热到一定温度，以确保终锻温度。铸锭应经过处理与挤压（表 2），因而可以使用较高的变形速度。通常采用锯切下料，而不采用剪切，以免切口处形成裂纹，锭坯锻造前应车皮，消除表面粗晶层及其他缺陷。锭坯加热时间可按（1.5~2）min/mm 计算，总时间不宜长于 6h。镁合金锭均匀化后在空气中冷却。

2.60 60、镁合金的锻造变形度与精整

镁合金的锻造速度决定于合金成分、铸锭是否均匀化、晶粒大小、模具与润滑条件等。由于镁合金的塑性较差，宜采用锻压速度较低的液压锻造机。在速度快的机械压力机和锻锤上锻造时应严防锻件开裂。

锻造变形程度取决于合金种类、锭坯品质、锻坯品质、锻造温度、速度和模具品质，其允许变形程度见表 1。

表 1　镁合金的锻造允许变形程度

合金	允许变形程度,%	
	锤锻	压力机
MB1	80~85	85~90
MB8	70	70~80
MB2	30	80
MB5	20~30	60
MB7	不宜锤锻	25~30
MB11	25~30	50~60
MB14	50~70	80
MB15	30~40	90

大家知道，镁合金的流动性差，适合于单型腔模锻，在锻造形状复杂与尺寸大的锻件如汽车车轮时宜先采用自由锻制坯，然后单型腔模锻，自由锻主要有拔长、镦粗、压扁、弯曲、冲孔、剪切、分垛等。由于镁合金锻造温度低，可用低合金热模钢制造锻模，但型腔表面品质应高，以提高镁合金的充型性能，并可防止锻件表面粗化与划伤。在压力机上锻造时，模的内外圆角半径可小到 1.5~5mm，筋板和腹板可

薄到 3.5mm，脱模斜度可为 3°或更小些。

模具润滑常用弥散于轻质油或煤油中的石墨，将其濆酒或涂于热模上，油剂燃烧后在模上留下一薄层石墨。通常用带锯切割锻件毛边，也可以铣削或用切边模热切，切边温度 200℃~300℃。为提高锻件的力学性能，获得所需要的精度，可在 230℃~300℃半热冷作硬化精压整形，变形程度 10%~15%。在清洗之前进行喷砂，以除去锻件上残留的润滑剂，然后浸入 8%HNO3+2%H2SO4 的混合酸中清洗，再用热水漂洗，最后视情况进行或不进行重铬酸盐溶液防腐蚀处理。镁合金的热处理如表所示，退火与时效处理后都进行空冷。

镁合金过饱和固溶体稳定，几乎不发生自然时效强化作用，除锻件要求有高的塑性外，一般都进行人工时效。MB1 和 MB8 属热处理不可强化镁合金，MB2 合金的热处理效果微弱，只有退火处理，目的是：消除内应力，提高尺寸稳定性，降低腐蚀倾向和对应力集中的敏感性，减少或消除各向异性。

MB8 合金锻件可进行固溶处理，必要时可进行固溶加人工时效处理。对 MB15 合金锻件可根据使用温度不同于锻后直接进行人工时效。镁合金在高温下有严重的晶粒长大倾向，降低力学性能及抗腐蚀性，故热处理温度不宜过高。

合金	退火		固溶处理			时效	
	温度，℃	保温时间,h	温度，℃	保温时间,h	冷却方式	温度，℃	保温时间,h
MB1	320~350	0.5	-	-	-	-	-
MB2	280~350	3~5	-	-	-	-	-
MB3	250~280	0.5	-	-	-	-	-
MB5	320~350	0.5~4	-	-	-	-	-
MB6	320~350	4~6	分级加热				
			330~340	2~3			
			375~385	4~10	热水	-	-
MB7	350~380	3~6	410~425	2~6	空冷或热水	175~200	8~16
			410~425	2~6	空冷或热水	-	-
						175~200	8~16
MB8	250~350	1	-	-	-	-	-
MB15	-	-	-	-	-	170~180	10~24
			505~515	24	空冷	160~170	24

2.61 61、镁合金的等温成形

镁合金的等温成形主要是指等温模锻与挤压，其特点是：坯料和模具温度相等，波动范围尽可能地保持在很小范围内变化；变形速率低，因而锭坯工艺塑性大为提高，可制造尺寸相当精密的复杂工件。

装备与模具

成温成形速度慢，所以通常使用液压机，并应具备以下功能：

1. 可灵活地调速，工作行程内的调速范围 0.1mm/s~0.001mm/s；

2.可保压，工作滑块可在工作压下保压 30min 以上；

3.有足够高的封闭高度与大的工作台面，可方便地安装模具、加热装置、冷却板、隔热板等；

4.有顶出装置与温度控制系统。

如果没有专业设备，也可采用工作行程速度较低的其他液压机。必要时可于油路中安装调速系统，以使滑块具有所需要的速度。

镁合金的等温成形模具可采用热作模具钢如4Cr5MoV1Si钢制造。在工作过程中，可用感应加热法或电加热器加热，使其保持在既定的温度。加热器的功率可按下式计算：

$$N=[G(T2-T1)c]/(0.21t\eta)$$

式中：N——加热功率，KW；G——被加热的金属质量，kg；C——被加热金属的比热容，J/(kg·k)，钢的比热容C=481.5J/(kg·k)；T1——加热前温度，℃；T2——加热目标温度，℃；t——所需加热时间，s；η——效率，为0.35~0.40。

在设计等温锻造模具时，模具的尺寸精度应高于普通模锻的。闲式等温模锻模多为模口导向，间隙0.10mm~0.12mm；开式等温锻模可用导柱导向，导柱高度与直径之比应≤1.5，导柱与导向孔的双面间隙取决于导柱直径，一般取0.08mm~0.25mm。

等温模锻无飞边冷却问题，因而飞边槽尺寸相同时，桥部阻力小于常规模锻的。因此可采用小飞边槽。

在等温状态下，锻件收缩值决定于模具与锻件材料的线膨胀系数，收缩量可按下式计算：

$$\triangle=(t2-t1)(\alpha_1-\alpha_2)L$$

式中，t2、t1 分别为室温与模锻温度，℃；α 1——锻坯线膨胀系数，α 2——模具线膨胀系数，1/℃；L——模具尺寸，mm；△——收缩量，mm。

等温模锻工艺与应用

镁合金等温模锻工艺制造的制订应考虑材料的流动应力低、塑性高、氧化少、模具材料承载能力等。MB3 及 MB8 镁合金的等温模锻工艺参数见下表。

现在以飞机上机匣为例说明等温模锻的应用。所用合金 MB15，锻件形状复杂，中部为轮毂，外周有 4 个不均匀分布的凸耳和 6 条径向分布的高筋。筋的最大高宽比为 9.2，凸耳受力大，流线应沿其几何形状分布，不允许流线紊乱、涡流及穿流存在，晶粒尺寸应细小均匀。该锻件的几何尺寸较大，水平投影面积 0.4m2。

上机匣锻件各部位体积的分布不均匀，模锻前应制坯。镁合金在一次大变形量锻压后，会出现大量新生表面，粘模现象特有发生，还可能产生折叠缺陷。因此，模锻后需进行酸洗、修伤、再进行第二次锻压，所以，上机匣的制造工序：制坯→模锻→精锻。模锻温度 360℃，精锻温度 350℃。

模具加热可在其内部设置电阻加热器实现。凹模为镶块式组合结构，在 4 个凸耳处设置镶块。由于上机匣尺寸较大，一般需用 120MN~150MN 锻压机，如采用局部施加压力法和分流法制造，有 50MN 挤压机就可以了。

合金	温度,℃	应变速率,s^{-1}	流动应力,N/mm^2
MB8	380~420	1×10^{-3}	20~30
MB3	400	6×10^{-3}	30

2.62 62、聊聊镁合金的超塑性成形

金属和合金在一定条件下的流变应力应变速率敏感性指数 m 大于 0.3，表现出特大伸长率（200%~3000%）的性能称为超塑性。一定条件是指金属材料的组织结构等的内部条件和变形温度、变形速度等外部条件。金属超塑性的宏观变形特点是大伸长、无缩颈、流动应力低及成形容易。上世纪 20 年代科学家就发现了金属的超塑性现象。1945 年，苏联金属学家波契瓦尔等在单向高温拉伸 Zn-Al 共析合金时获得了很大的伸长率，首先把这种现象称作“超塑性”。

镁合金的室温变形能力低，但是在超塑性状态下却有很高的塑性，可利用超塑性加工形状复杂的零件与模锻件，而且流变应力低，以气压为动力即可完成成形，即使航空航天的复杂蜂窝状结构件，也可直接用超塑性成形法与扩散焊接技术顺利地制成。近些年来，利用超塑成形技术生产了一批批形状复杂的 3C 产品。

超塑性加工镁合金工件的优点可归纳为：

1.成品率可达到 90%以上，产品表面缺陷少，感观好，可减少后续工序与生产成本。例如，日本用法生产镁合金笔记本电脑外壳，压铸法的最高成品率只有 70%，而超塑性成

形法的可达 91%。

2.产品厚度可比压铸件及半固态压铸件的薄很多，而且成品率与产品厚度几乎无关。例如用超塑冲压锻造生产的镁合金工件的最小厚度可达 0.4mm，而压铸件及半固态压铸件的则必须＞0.8mm。

3.形状复杂及变形量大的工件可一气呵成，并具有流动性高，填充性好、所需设备工作力小等特点。

4.成形时不变生弹性变形，因而成形后不会发生回弹，工件尺寸精准，表面粗糙度也小。

超塑性类型

按照获得超塑性的条件，可以将金属和合金的超塑性现象分为两大类：

细晶超塑性

细晶超塑性又称第一类超塑性，是指具有微细晶粒（晶粒直径＜10μ m，轴比＜1.4）组织的材料在 0.5Tm~0.9Tm（Tm-材料熔点，k）和一定的应变速率范围（10-4/s~10-1/s）内呈现的超塑性，又称组织超塑性、恒温超塑性或静态超塑性，已在生产中广为应用。影响这类材料伸长率的因素很多，除了晶料尺寸与形状、温度、应变速率外，还包括材料的组织在超塑拉伸时的热稳定性和对孔洞形成的敏感性。铝、镁合金多为这种超塑性。

相变超塑性

相变超塑性又称第二类超塑性、转变超塑性、动态超塑性，是指金属在一定相变温度范围内和戴荷作用下，经过多次循环相变或同素异构转变而获得的累积延伸大变形，不要求材料具有微细等轴晶组织，只要求材料发生相变，钢铁、钛合金、铜合金多为这种超塑性。

镁合金的超塑性

MB15 镁合金在一定的条件下有明显的超塑性，其热挤压棒材的室温伸长率仅 14.8%，300℃时的也只不过 62%，但是晶粒尺寸为 5μ m 的棒材在 290℃时，若就能变速率为 1.11×10-4/s（夹头移动速率 0.2mm/min），则伸长率可达 574%，应变速率敏感性指数 m=0.51；在温度为 270℃~310℃，应变速率（1.11~5.56）×10-4/s、晶粒尺寸＜5μ m 的条件下均有明显的超塑性。MB15 合金在超塑性条件下的变形抗力 10N/mm2~30N/mm2。

MB8 镁合金在晶粒尺寸约 7μ m、变形速度 0.2mm/min~5mm/min、温度 320℃~400℃时具有明显的超塑性，最大伸长率 304%。该合金在超塑性状态具有良好的吹塑成形能力，可一次成形形状复杂的零件，如仪表覆盖盒，吹塑压力 0.6N/mm2~0.9N/mm2，变形比可大于 1.5。

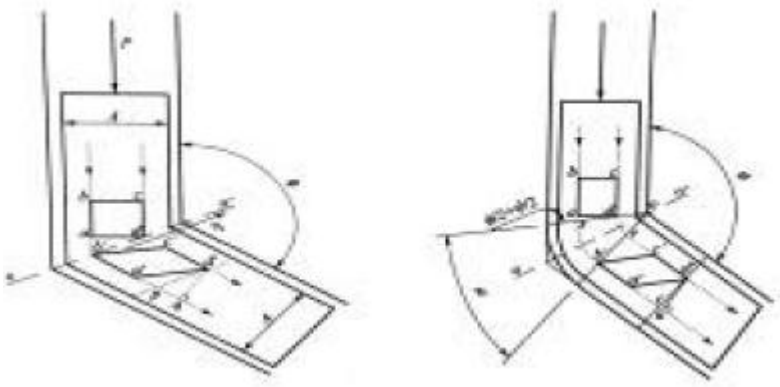
中国对镁合金超塑性研究作出了一系列的创新，如超轻 Mg-Li 合金在 300℃、应变速度 5×10-4/s 时具有明显的超塑性，伸长率 960%、应变速率敏感性指数 m=0.64；含稀土无

素的 MB26 合金在不经任何预处理热挤压棒材即拥有良好的超塑性，在 350℃~500℃、初始应变速率为 1.67×10-3~4.1×10-2/s 条件下进行超塑性拉伸时，伸长率都超过 520%，在最佳条件下，拉长率甚至可高达 1450%，流变应力为 8.7N/mm2，m 为 0.6。

一些常用镁合金的超塑性参数见下表。

合金	应变速率敏感性指数 m	伸长率 A %	温度℃	应变速率 ε S^{-1}	流动应力 R N/mm^2
Mg-Al 共晶体	0.82	2100	376~400	-	-
MB2	0.42	167	375	2.8×10^{-4}	-
MB22	-	360	400	-	31.4
MA15	0.60	500	450	-	-

2.63 63、细晶超塑性镁合金材料的制备



前面介绍过，镁合金晶粒尺寸小于 10μ m 时会呈现高的超塑性，那么怎样才能获得细晶粒组织呢？在生产实际中，常用的细化晶粒工艺有制备方面的，也有塑性变形方面的。前者的工艺为：添加晶粒细化剂、高速凝固法、粉末冶金法、

喷射沉积法、机械合金化法和非晶晶化法等，其中高速凝固法效果最佳，可以制得晶粒只有 0.5μ m~1μ m 的细晶粒镁合金锭坯。后者就是采用压力加工工艺制备晶粒粗细小的镁合金材料，例如采用大挤压比热挤压的镁合金棒材与用大锻造比生产的镁合金坯料晶粒均可小到 2μ m~5μ m；通过等径角挤压（ECAE，Equal Channel Angular Extrusion）或扭转应变大塑性变形后，镁合金晶粒尺雨可达到 0.5μ m~1μ m；对切屑进行挤压也能得到晶粒尺寸 1μ m~3μ m 的细晶粒镁合金棒材；温（冷）轧与静、动态再结晶相结合也可以显著细化镁合金晶粒。

扭转变形和等径角挤压都属于大塑性变形法，可以在低温下细化金属材料的组织，可以制备具有亚微米级甚至纳米级显微结构的材料。大塑性变形法通常有两种工艺：扭转法与等径角挤压法，但扭转工艺复杂且难以制备大尺寸材料，因而其应用受到很大限制；而等径角挤压法工艺较为简单，可以制得大体积的超细晶粒的镁合金材料，受到人们的广泛关注，它是前苏联科家塞加尔（Segal）1981 年提出的。

等径角挤压法的基本原理如下图所示，左边的无外侧圆弧的 ECAE 示意图，右边的为带外侧圆弧的 ECAE 示意图。由图可见，块状试样的外力 P 作用下，通过互成Φ 角且横截面形状、尺寸相同的两段通道而产生塑性变形，不过材料在通过两通道结合面 O-O'时会受到 Us 方向的剪切应力，发生

剪切变形。如果不考虑试样与模具之前的摩擦等处部因素的影响，那么可以将方形 abcd 变成四边形单元 a'b'c'd'。材料整体通过 O-O'后可以获得均匀的剪切变形，材料每通过一次挤压所获得的剪切应变γ =2cotΦ/2。式中γ 为剪切应变，Φ 为通道侧夹角。

由于 ECAE 挤压两通道的形状和横戴都相同，因此每次挤压前后材料形状和尺寸都保持不变，故可以实现多次重复挤压而积累大的应变，从而获得极细的晶粒组织。

影响 ECAE 过程的工艺参数很多，主要有挤压、次数、挤压温度、模具结构、应变速率、挤压路径等。其中影响最大的是挤压温度、模具结构与挤压、路径。

通常，挤压温度越低，挤压速度越快，则镁合金晶粒越细小，然而挤压温度过低或挤压速度过快，镁合金变形得不到充分发挥，易产生裂纹。因此，为获得细小均匀的组织，宜采取低温多道次的挤压工艺。

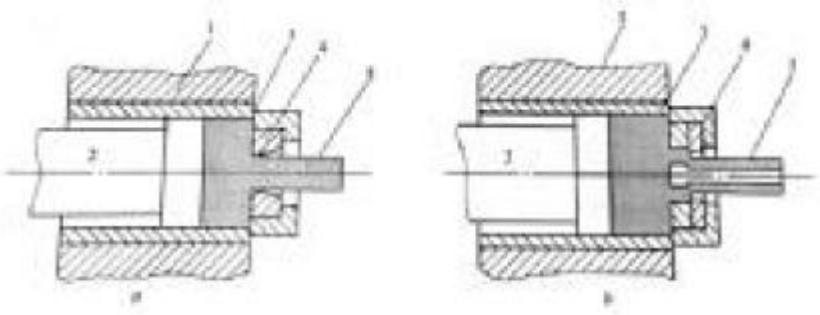
模具结构不仅决定每道次应变量的大小，而且对试样各部位的均匀性也有影响，模具结构含 3 个参数：两等截面通道夹角Φ，Φ 越小每道次获得的应变越大，Φ=90°时晶粒细化效果最佳。通道外侧圆弧半径是影响应变量的重要因素，较小 R 不仅能提高应变量而且可以提高应变均匀性，R 为 O 时能够产生最大的剪切应变。加大通道内侧圆弧半径 r 则降低应变量。因此，如果想要最大的应变量，夹角Φ 宜小；适

当减小通道外侧圆弧半径 R 可以提高应变均匀性；为了使试样挤压后仍保持相同的外形尺寸，可适当加大内侧圆弧半径 γ 。不同道次 ECAE 挤压后 AZ61 镁合金的晶粒尺寸及力学性能见下表。

由表中的数据可见，随着等径角挤压次数的增加，合金的晶粒尺寸一次比一次的减少，力学性能逐一改善，特别是伸长率的改善尤为明显。

道次编号	晶粒尺寸，μm	抗拉强度 Rm,N/mm²	屈服强度 $R_{p0.2}$, N/mm²	伸长率，%
0	24.4	322	215	32
1	15.8	300	191	35
2	12.5	320	204	38
4	10.6	318	190	45
8	8.4	313	161	55

2.64 64、简说镁合金的挤压（一）



正向挤压示意图

a——用平面模挤压实心型材与棒材；b——用平面分流模挤压空心型材与管材

1——挤压筒；2——挤压轴；3——锭坯；4——模；5——制品

镁合金的挤压成形都是在热状态下进行，挤压方法有正向挤压法，也可以采用反向挤压法，但绝大多数挤压镁材即约90%以上的镁合金挤压材是用正向挤压法生产的。镁合金管、

棒、型、线的生产可用单动挤压机，也可用双动挤压机，有用卧式挤压机的，也有用立式挤压机的，可以用正向挤压机，也可以用反向挤压机。通常，用于挤压铝材的挤压机都可以用于挤压镁材，但锭坯加热炉不可直接通用，需加以适当改造以防镁锭燃烧。铝、镁合金挤压参数也有很大差异。

正向挤压是制品流出方向与挤压轴移动方面一致的工艺（见图），挤压时将加热好的锭坯推入挤压筒，挤压轴在主柱塞作用下迫使挤压筒内的镁合金流出模孔，而锭坯则随着挤压过程的进行而缓慢地向前移动，锭坯表面与挤压筒内衬内壁发生激烈的摩擦。

正挤压法优点很多，灵活性大，可生产种种挤压制品，设备结构、工模具装备和生产操作也比其他挤压法的简单。但是，其主要缺点是在挤压过程中由于锭坯在挤压筒内移动而产生很大的摩擦力，使金属流动不均匀，几何废料多，而且在挤压条件相同时，正挤压法的挤压力比反挤压法的大30%~40%。镁及镁合金在挤压时易与工模具粘结，摩擦状态比铝及铝合金的差得多；镁合金锭坯加热时，温度也不易均匀，因此在挤压时，只有在确保温均匀和充分润滑条件下，才能获得均匀的流动。

镁及镁合金的挤压温度为 300℃~450℃，可根据合金成分、制品形状确定具体挤压温度，挤压比可 10∶1~100∶1，若采用预挤压坯料，则挤压比可更大一些。镁合金的焊合性

能远不如铝合金的，因此，生产管材时除个别情况外，宜采用穿孔针或空心锭坯挤压，常用镁合金的挤压工艺参数见表1。

表1 常用镁合金的挤压工艺参数

合金	锭坯温度,℃	挤压筒温度,℃	挤压速度,m/min
M1	420~440	380~390	6~30
AZ31	370~400	230~320	6.5~12
AZ61	370~400	230~290	2~6
AZ80	360~400	230~290	1.2~2

表2 锭锭均匀化退火对Mg-3%Al镁合金挤压力影响

是否均匀化退化	挤压温度,℃	加热时间,h	挤压力,N/mm²
无	340	1	320
	300	1	400
无	340	3	250
	300	3	300
无	340	6	200
	300	6	250
350℃,12h	340	1	190
	300	1	250
350℃,12h	340	3	170
	300	3	200
350℃,12h	340	6	150
	300	6	180

镁合金的挤压速度不宜快，例如 AZ31 合金的挤压速度应不得超过 6063 铝合金的 1/3。对于同一合金，中空型材的如管材的挤压速度可为实心型材的 1/3~1/5。锭坯若经过均匀处理则挤压力可显著下降，用直径 98mm、长 150mm 锭坯挤压 Mg-3%Al 合金直径 44mm、壁厚 1.5mm 管材时，均匀化退火对挤压力的影响见表 2。

2.65 65、简说镁合金的挤压（二）

表 1　挤压工艺参数与制品形状的关系

制品	合金	形状	断面积 mm²	挤压比	锭坯长 mm	锭坯温度 ℃	挤压速度 m/min
型材	AZ31	A	72	122	330	430	8.5
		B	163	54	330	370	10.0
		C	187	47	350	380	17.0
		D	795	22	360	305	8.0
		E	1283	14	420	230	8.0
扁材	AZ31	16×7	112	39	330	390	5.0
		40×3	120	73	330	410	3.5
		25×9	225	39	350	380	3.0
		125×2	250	70	330	380	2.0
管材	M1	Φ20×1.2	64	92	330	390	2.5
	M1	Φ20×2	113	78	330	390	2.0
	M1	Φ30×2	254	70	330	380	2.0
	AZ31	Φ30×3	254	70	330	380	1.5
棒材	99.8%Mg	Φ19	285	62	330	170	7.0
	M1	Φ19	285	62	330	280	6.0
	AZ31	Φ19	285	62	330	320	2.5

对镁合金的挤压速度与温度都应严格管控，温度如果超过固相线温度会产生热裂缝，表面品质严重下降，速度一旦超过规定上限值，会产生大量热，使温度上升。镁合金圆棒的力学性能与出模温度的关系见（表 2），温度过高，力量性能全面下降。挤压镁合金时，可用机油与鳞片石墨混合物润滑，润滑可降低挤压力，但是可能污染制品表面，甚至引发龟裂与气泡。

镁合金只可以在空气电阻炉内加热，镁合金的最高加热温度为 470℃，镁合金的最大挤压速度可达 20m/min，却只有铝合金的 1/4 左右，矫直镁材时需加热到 150℃~250℃。镁合金的典型挤压工艺流程：锭坯加热→第一次挤压→切中间坯

料→加热→第二次挤压→人工时效→拉伸矫直→切头尾与取试样→辊式矫直→手工矫直→检查→切成品与打印→氧化着色→成品检查→包装→入库。镁合金圆棒的力学性能与出模温度关系见（表 2）。

2.66 66、简说镁合金的挤压（三）

工模具的准备

镁合金挤压筒及镁合金直接接触的工具应是专用的。镁的熔点比铝的低 10℃，热导率低 30.2%，而线膨胀系数却比铝的大 5.9%。因此，在设计镁的挤压模具与锭坯加热时都应加以考虑，模具工作带、模孔加工尺寸的热胀冷缩余量应比铝的大一倍左右。

由于镁及镁合金的塑性低，不易变形，与钢的亲和力低等特点，挤压垫片与挤压筒内径的配合偏差可取+（0.2~0.3）mm。挤压后，残料（压余）与挤压垫易分离，故用不着润滑挤压垫。

镁合金的可焊性能不如铝合金的，在用平面分流组合模挤压管材与空心型材时，应精心设计分流孔与导流系统，以降低流动阻力，增大焊合均匀性。挤压 AZ31B 合金自行车三角架管材可用平面分流组合模，挤压前锭坯应进行均匀化处理，400℃/12h；挤压筒温度 250℃~350℃；挤压温度 320℃~380℃；挤压速度 0.5m/min~1.5m/min；挤压比 40~80。

镁合金挤压模具可用 H13 模具钢制造，淬回-回火后的 HRC 硬度 47~51。国产 H13 钢的品质与进口的相比还有一定差距。挤压前应预热工模具（见表 1），预热温度比锭坯加热温度低 20℃~30℃，加热时间以热透均匀为准。

表 1　挤压工模具的预热温度

合金	模具加热温度，℃		挤压筒温度 ℃	锭坯加热温度，℃
	平模	分流模		
AZ31B	360~370	370~390	360~370	290~400（1~4 区梯度加热）
AZ61A	320~340	340~360	340~350	290~370（1~4 区梯度加热）

表 3　镁合金反向挤压力大小与温度关系（材料断面收缩率 85%）

合金	不同温度下的反向挤压力，N/mm²						
	230℃	260℃	290℃	315℃	340℃	370℃	400℃
AZ31B	455	455	414	372	359	345	317
AZ61A	483	469	455	441	428	414	400
AZ80A	496	483	441	455	441	428	414
ZK80A	469	455	441	428	400	372	359

（未完）

镁合金热挤压的工艺参数有：产品尺寸、管材壁厚、合金、挤压筒尺寸、挤压温度、挤压速度、挤压比、单位挤压力等。镁合金的挤压温度与合金种类及产品形状有关，典型挤压温度 300℃~450℃。温度对镁合金塑性变形特性影响很大，因此，可调节挤压温度以适应不同挤压比。镁合金的挤压比为 10~100，而且对预挤压坯料可采用更大的挤压比。挤压镁合金时会产生大量的热，必须采取冷却措施散发热，否则，产品出模温度可能超过固相线温度，引发裂纹，造成废品。镁合金产品的典型挤压工艺（见表 2）。

表 2　镁合金产品的典型挤压工艺(工艺卡片)

产品	合金	断面积 mm²	孔数	挤压比	压余 mm	锭坯规格 mm	挤压速度 mm/s	挤出长度 m
Φ15mm 阳极模	AZ31B	176.6	1	58.78	20	Φ112×350	15~30	18.37
Φ20mm 阳极棒	AZ31B	314	1	33.06	20	Φ112×350	15~30	10.33
Φ20mm×2.5mm 管	AZ31B	137.4	1	75.55	20	Φ112×300	20~35	20.00
Φ25mm×2.5mm 管	AZ31B	176.6	1	58.78	20	Φ112×350	20~35	18.37
Φ19mm×2mm 管	AZ31B	106.8	1	97.2	20	Φ112×300	20~35	25.76
Φ20mm×2.5mm 管	AZ61A	137.36	1	75.6	20	Φ112×300	10~20	18.7

挤压后，首先从挤压筒内取出模具，从锭坯上剪切下后再取出残料，残料可循环使用。如果将锭坯新料旋转在挤压筒与余料焊合，那么就可以进行连续挤压，但是锭坯上应有纵向预留槽，以便新旧锭坯间卷入的气体散出，纵向槽可以铸造出，也可以机加工成或挤制出。

反向挤压

反向挤压是制品的流出方向与挤压轴的运动方向相反。镁合金反向挤压温度为 175℃~370℃，具体温度依合金成分及挤压速度而定。手工装料时速慢，锭坯和模具加热到 260℃；自动装料速度快，锭坯和模具温度可降低 175℃。挤压时模具温度可上升约 30℃。

反正挤压力主要取决于合金成分、挤压比和挤压速度，约为铝合金反向挤压力的 50%。四种镁合金在 230℃~400℃、断面收缩 85%时的反向挤压力（见表 3）。

表 2　圆棒力学性能与出模温度的关系

合金	出模温度，℃	抗拉强度 Rm N/mm	屈服强度 $R_{p0.2}$ N/mm²	伸长率 A %
纯 Mg	130	250	150	4.5
	170	245	150	4.0
	210	240	145	4.0
	280	240	145	4.0
	330	235	140	4.0
M1	250	280	190	7.0
	430	240	140	6.0
AZ31	380	305	235	21.0
	400	275	190	16.0
	430	250	155	14.0

铸锭是用半连续法铸造的，通常应经过均匀化处理，可降低挤压力 20%~25%。均匀化制度一般为 350℃×12h。铸锭挤压前都要车皮与镗孔，以确保制品壁厚的均匀性，小规格和有特殊要求的制品可以再二次挤压坯料。

在锯切镁及镁合金时，应配备良好的吸屑装备，锯屑应当班清理干净。加热炉电阻应置于耐火砖槽内，车间内应有灭火砂箱和 D 级灭火器材。

3. 中国有色金属报社简介

3.1 中国有色金属报社

1. 英文名称：China Nonferrous Metals News

2. 创刊日期：1985 年 7 月 4 日

3. 举办单位：国务院国有资产监督管理委员会

4. 主管单位：中国有色金属工业协会

5. **国内统一刊号：CN11—0115**

6. **邮发代号：1—101**

7. 目前刊期：周三刊、对开 8 版

II. 办报宗旨及版面设置

1. 《中国有色金属报》立足有色金属行业，面向全社会，全面报道有色金属工业领域信息，是中国有色金属行业唯一的覆盖全行业、最具权威性、报网一体的立体综合信息传媒。

2. 《中国有色金属报》积极宣传党中央、国务院关于发展我国有色金属工业的方针、政策和部署;坚持全心全意为发展我国有色金属工业服务、全心全意为读者服务的宗旨;努力反映有色金属行业改革开放和全面进入市场的新成就、新经验;迅捷传递国内外市场信息、产业焦点、行业热点、企业亮点;热情讴歌广大有色职工奋发进取和与时俱进的改革创新精神。

3. **一版：**为要闻版，突出新闻性、重要性、全局性、深度性、贴近性、时效性、典型性。

4. **二版：**集铜、镍、铅、锌及重有色金属于一体，全面报道重金属行业的资源、生产、投资等情况，以及分析国内外形式。透视重金属行业经济动态、引导良性发展为目的，即时有效地反映行业变化，跟踪报道重金属企业的动态与发展。

5. **三版：**为铝版，全面报道我国铝行业在新时期企业转型升级和改革创新民展过程中的重大新闻事件。

6. **四版：**为读者提供稀土稀有金属材料发展及应用的最新动态，其中包括稀土、锡、钼、钨、贵金属、锑、硅、锂、钴、铟、铋、锗、硬质合金、光伏等产业动态及应用技术创新。

7. **五版：**为读者提供有色金属期货、现货、市场价格预测及相关宏观经济内容，还包含有色金属类上市公司情况及国内外大宗商品类公司、机构运营情况。

8. **六版：**科技装备、再生金属、循环利用、节能降耗、新技术、新项目、科技人物等。

9. **七版：**镁业—报道镁行业动态，行业政策，镁业应用及市场分析。

   钛业—行业动态，钛市场分析，行业应用，深度报道等。

   新材料—国内外最新材料动态，前沿应用，智能化政策，海洋新材料专栏，军民融合专栏。

10. **八版：**地矿—报道国家及相关行业有关地矿工作的大政方针与地勘业的重大新闻，报道企业及地勘院所的最新动态和地质找矿成果。

建设—全面报道有色行业投资建设信息 ,对冶金建设行业全景扫描并进行深度报道。

文化—报道有色企业党的建设、文化建设、精神文明建设，包括党政工团、摄影文艺，为企业间信息交流和形象宣传服务。

III. 新媒体建设

中国有色网属于中央新闻网站，是国务院新闻办公室批准、中国有色金属工业协会主管、中国有色金属报社主办、北京中色报网络信息科技有限公司承办的中国有色金属行业综合门户网站。中国有色网拥有国务院新闻办公室批准的第一类新闻资质、国家广电总局批准信息网络传播视听节目许可权，是我国有色金属行业重要的信息窗口，也是世界了解中国有色金属工业发展的门户，同时它还是有色金属企业生产经营、相互沟通的信息平台。

中国有色网内容包括行业新闻，市场动态及行业内各金属的及时行情与动态等。发布方式包括网站发布和无线发布两种，为不同用户提供不同的传送方式。

中国有色网分为新闻、商务、网络电视及手机报四大平台，新闻平台主要发布行业内最新，最及时的新闻信息及市场动态等；商务平台主要发布行业内各金属的及时报价及市场分析等；中国有色网络电视主要以视频的形式发布行业内重要新闻及企业动态等；手机报主要以手机彩信的方式发送行业内当天发生的新闻信息及金属评论等。

IV. 报社的机构设置及人员情况

中国有色金属报社本部目前设有：新闻中心、周刊部、网站、经济部、通联发行部、综合部 6 个部门。驻各地记者站 26 个。

V. 现任领导班子

1. 报社实行社长负责制。现任领导班子成员共 4 人。
2. 社长：张湘斌
3. 总编辑兼副社长：张春甫
4. 副社长：安仲生
5. 副总编辑：封云聪

VI. 报社发展规划

集中力量建设中国有色网，建立市场化、专业化、国际化的信息网络，建立中国有色金属行业最权威的门户网站。在全国 26 个记者站的基础上，强化大区直管记者和国外信息站的建设，培养各类专业人才，建立一支适应市场经济和行业发展需要的原创信息队伍。进一步整合报纸版面资源，向有色金属行业的上、下游领域拓展，延伸产业链，强化报纸的指导性和有用性，为读者提供全面、专业、迅捷的服务。拓展有效发行渠道，扩大广告经营领域，壮大经济实力，力争用 3～5 年的时间，打造报网一体的信息资讯平台，为组建有色金属行业现代传媒集团奠定坚实的基础。

VII. 地址、电话

1. 社　　址：北京市复兴路乙 12 号
2. 邮　　编：100814
3. 传真电话：010-63941425
4. 网　　址：www.cnmn.com.cn
5. 电子信箱：ysb@263.net.cn

6. 新闻中心： 010-63971483 010-63963803（传真）

7. 周刊部： 010-63971575 010-63971583（传真）

8. 中国有色网：010-63941669 010-63971479（传真）

9. 通联发行部：010-63984385 010-63963803（传真）

10. 经济部： 010-63971473 010-63965226（传真）

11. 综合部： 010-63971476 010-63941425（传真）