

铝电解和铝合金铸造 生产与安全

杜科选 柴永成 张维民 任必军 谷文明 编著



LÜDIANJIE HE
LÜHEJIN ZHUZAO
SHENGCHAN YU ANQUAN



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

铝电解和铝合金铸造 生产与安全

杜科选 柴永成 张维民 任必军 谷文明 编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2012

内 容 简 介

本书介绍了铝电解的相关知识、铝电解车间的各类操作、铝及铝合金铸造基本知识和铸造操作等,内容包括铝电解概述、铝电解生产安全、铝电解生产、电解铝及铝合金铸造、铝电解及铝合金铸造的发展与新技术。

本书可供现代大型预焙铝电解与铝合金铸坯生产企业的基层管理人员、技术人员参考,也可作为在职技工的培训、投产前职工的培训以及职业学校学生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

铝电解和铝合金铸造生产与安全/杜科选等编著.

—北京:冶金工业出版社,2012.5

ISBN 978-7-5024-5907-9

I. ①铝… II. ①杜… III. ①氧化铝电解—生产技术—安全技术 ②铝合金—铸造—生产技术—安全技术 IV. ①TF821.032.7 ②TG292

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 078180 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcs@cnmip.com.cn

责任编辑 王雪涛 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-5907-9

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销

2012 年 5 月第 1 版,2012 年 5 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16;17.75 印张;428 千字;272 页

55.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

2010 年我国电解铝产量为 1695 万吨, 连续 10 年居世界第一位, 2008 年我国电解铝消费 1260 万吨, 人均铝消费 9.7kg, 连续 5 年居世界第一。目前, 我国大型预焙槽技术已非常成熟, 相继有 300kA、350kA、400kA、500kA 等系列槽型投产, 并且有多家铝厂 400kA 电解系列投产。400kA 预焙铝电解系列具有设计紧凑、高产、高效、投资省、能耗低、劳动生产率高等优点, 同时配套建设先进成熟的干法烟气净化系统, 环保排放指标完全符合国家规定, 综合技术指标接近世界先进水平, 综合交流电耗从原来 60kA 系列的 $17200\text{kW}\cdot\text{h}$ 降至 $15300\text{kW}\cdot\text{h}$, 并逐步下降到 200kA 系列的 $14500\text{kW}\cdot\text{h}$, 目前 400kA 系列槽型已降到 $13680\text{kW}\cdot\text{h}$ 以下。随着“节能减排”政策的贯彻执行, 小型铝电解槽将尽快被淘汰改造, 新改造的项目将采用技术已成熟的 400kA 预焙阳极铝电解系列。近年来, 大型预焙铝电解槽相继投产, 职工的技术培训需要比较实用的操作培训教材, 为此, 笔者以 400kA 预焙铝电解和铸造生产实践为基础, 编写本书, 以满足铝电解生产企业职工培训的需要。

本书介绍了电解铝发展简史, 新中国成立后我国电解铝产量和生产技术指标、电解铝生产工艺、原材料及生产设备, 电解车间的日常操作, 铝电解槽的焙烧启动与停槽、出铝、换极、提升阳极母线、取样、熄灭效应、捞炭渣、日常巡视与维护以及两水平测量、温度测量、电流分布测量、阳极和阴极电压降测量等实际操作。书中还介绍了铝合金熔炼、铝合金熔体精炼净化、铝及铝合金普通块锭铸造、铝合金带材连铸连轧、铝合金扁铸锭和圆铸锭铸造、铝圆杆连铸连轧、铝合金铸坯常见缺陷的预防等基本操作。

本书图文并茂, 易学易懂, 易于现场培训, 可操作性强; 每项操作包括目的、潜在安全危害、使用的工器具和材料、操作程序和操作要领、异常情况的处理措施等。每项操作的描述清晰明了并采用了大量的现代大型铝电解生产操作和铸造作业真实照片以及绘制的示意图, 将内容表述得更直观。

本书可供现代大型预焙铝电解与铝合金铸坯生产企业的基层管理人员、技术人员参考,也可作为在职技工的培训、投产前职工的培训以及职业学校学生的教材。通过对本书的学习,新职工可以尽快熟悉铝电解与铝合金铸造生产的相关岗位(电解操作工、铸造工等),提高操作水平,确保操作标准化、规范化,从而减少人身和设备的安全隐患,提高工作效率。

编写过程中,承蒙业内同仁柴永成、张维民、任必军、谷文明、杨青、邱金山、刘小虎、马靖晖、陈新群、牛伟伟等鼎力相助,在此表示衷心的感谢。

杜科选

2011年10月8日于兰州

目 录

1 铝电解概述	1
1.1 铝及铝合金的特点及应用	1
1.1.1 铝的性质	1
1.1.2 铝的用途	2
1.2 铝电解发展简史	3
1.2.1 铝冶金的历史	3
1.2.2 铝电解的发展	4
1.2.3 我国铝电解的发展	4
1.2.4 铝电解生产指标	5
1.3 铝电解生产工艺简述	8
1.4 铝电解生产用原材料	9
1.4.1 氧化铝	10
1.4.2 冰晶石	11
1.4.3 氟化铝	11
1.4.4 阳极炭块	11
1.5 铝电解槽生产主要设备及参数	13
1.5.1 现代铝电解槽	13
1.5.2 400kA 预焙阳极电解槽	15
1.5.3 200kA 及 300kA 铝电解槽	16
2 铝电解生产安全	17
2.1 铝电解生产潜在的危险	17
2.1.1 铝电解厂的职业危害	17
2.1.2 主要的危险伤害	19
2.2 铝电解生产安全通则	21
2.2.1 劳动保护用品	21
2.2.2 行车安全通则	21
2.2.3 冶炼工操作安全	21
2.3 铝电解生产安全事故案例	23
2.3.1 山东某铝厂“8.19”铝液外溢爆炸重大事故	23
2.3.2 中国西北某铝厂铝液外泄爆炸事故	25
2.3.3 铝电解厂的两起伤亡事故	26

2.3.4 铝电解生产作业中的典型事故案例	26
3 铝电解生产	29
3.1 铝电解生产工艺技术	29
3.1.1 400kA 铝电解工艺技术	29
3.1.2 200kA 铝电解工艺技术	30
3.2 铝电解生产的启动与停槽	31
3.2.1 铝电解槽焙烧启动	31
3.2.2 预焙阳极铝电解槽停槽	46
3.2.3 临时停槽	49
3.3 铝电解生产的日常作业	50
3.3.1 出铝	50
3.3.2 换极	55
3.3.3 提升阳极母线	61
3.3.4 氧化铝浓度及分子比控制	64
3.3.5 熄灭阳极效应	65
3.3.6 捞炭渣	67
3.3.7 日常巡视作业	68
3.3.8 铝电解生产中的取样	69
3.4 电流分布测量	70
3.4.1 阳极电流分布测量	70
3.4.2 阴极电流分布测量	72
3.5 温度测量	73
3.5.1 电解质温度测定	73
3.5.2 阴极钢棒及槽壳温度测量	74
3.6 铝电解两水平和极距测量	75
3.6.1 两水平测量	75
3.6.2 极距测量	77
3.7 电压降测量	78
3.7.1 铝电解槽电压降	78
3.7.2 阳极压降测量	79
3.7.3 炉底压降测量	81
3.7.4 母线电压降测量	82
3.7.5 炉底隆起情况测量	83
3.8 铝电解槽破损、漏炉的检测、维护和处理	84
3.8.1 电解槽破损的检测	84
3.8.2 电解槽破损的确定	84
3.8.3 电解槽破损的维护	85
3.8.4 电解槽漏炉的处理	86

3.9 铝电解生产主要设备的维护保养·····	87
3.9.1 铝电解槽机械设备的维护保养·····	87
3.9.2 铝电解 12t 真空抬包的维护保养·····	89
3.9.3 400kA 铝电解槽阳极母线提升机的维护保养·····	90
3.9.4 铝电解槽阳极提升装置维护保养·····	91
3.10 智能槽控机的使用·····	92
3.10.1 智能槽控机基本功能·····	92
3.10.2 智能槽控机的自动控制·····	93
3.10.3 逻辑箱面板信息·····	96
3.10.4 动力箱按键操作·····	99
3.10.5 逻辑箱按键操作·····	100
3.10.6 智能槽控机使用注意事项·····	102
3.11 铝电解技术经济指标计算·····	102
3.11.1 铝电解产品产量·····	103
3.11.2 基础指标——生产槽日、生产槽、槽日产量、平均电流强度·····	104
3.11.3 效率指标——铝液电流效率、整流效率、电解工实物劳动生产率·····	105
3.11.4 生产工艺技术参数——槽电压、铝水平、电解质水平、效应系数等·····	107
3.11.5 主要原材料单耗——氧化铝、氟化盐、阳极块单耗·····	108
3.11.6 电耗——铝液直流电及交流电单耗、铝锭综合交流电单耗·····	110
3.11.7 质量指标及槽寿命·····	112
3.11.8 开、停槽和在产铝的规定·····	113
4 电解铝及铝合金铸造·····	115
4.1 铝及铝合金简介·····	115
4.1.1 概述·····	115
4.1.2 铝及铝合金的分类·····	115
4.1.3 铝及铝合金生产工艺流程·····	120
4.1.4 常用铸造铝合金主要特性及用途·····	120
4.1.5 常用变形铝合金主要特性及用途·····	123
4.2 金属的凝固与铸坯·····	124
4.2.1 金属的凝固过程·····	124
4.2.2 金属晶粒度的影响因素·····	124
4.2.3 铸件的凝固方式·····	125
4.2.4 金属的铸锭组织·····	126
4.2.5 铝及铝合金铸坯的基本要求·····	127
4.3 铝及铝合金熔炼·····	127
4.3.1 原辅材料的使用与管理·····	127
4.3.2 中间合金和添加剂·····	136
4.3.3 配料计算·····	138

4.3.4	成分调整	141
4.3.5	熔炼工艺	142
4.4	铝及铝合金熔体的精炼净化	146
4.4.1	金属的氧化	146
4.4.2	夹渣和除渣精炼	148
4.4.3	影响氧化烧损的因素及降低氧化烧损的方法	152
4.4.4	金属液的吸气和除气精炼	153
4.4.5	炉外联合在线精炼	158
4.4.6	铝合金熔体净化新方法的研究	163
4.5	重熔用铝锭铸造	164
4.5.1	重熔用铝锭的技术要求	164
4.5.2	普通铝锭铸造	165
4.5.3	40t 混合炉使用与维护	177
4.5.4	影响重熔用铝锭质量的因素及处理方法	180
4.5.5	铸造过程中液体铝金属损耗的预防	181
4.6	重熔用铸造铝合金锭生产	182
4.6.1	铸造铝合金锭的质量要求	182
4.6.2	铸造铝合金锭生产工艺	182
4.6.3	铸造工艺控制	184
4.7	铝合金扁铸锭和圆锭生产	186
4.7.1	铝合金扁、圆铸锭生产方法	186
4.7.2	铝合金扁、圆铸锭质量要求	189
4.7.3	铝合金扁、圆铸锭工艺生产	191
4.8	铝合金铸轧带生产	204
4.8.1	铝合金铸轧铝板生产方法	204
4.8.2	铝及铝合金铸轧带材质量要求	208
4.8.3	铝合金铸轧带材生产工艺	211
4.9	铝圆杆生产	224
4.9.1	铝圆杆生产方法	224
4.9.2	铝圆杆质量要求	226
4.9.3	生产工艺控制	228
4.10	铝及铝合金铸锭常见缺陷及其防止办法	230
4.10.1	偏析	230
4.10.2	疏松 (显微疏松)	230
4.10.3	气孔	231
4.10.4	夹杂	231
4.10.5	针孔	232
4.10.6	裂纹	233
4.10.7	晶粒粗大	233

4.10.8 冷隔	234
4.10.9 缩孔	234
4.10.10 过烧	234
4.11 熔炼设备	235
4.11.1 火焰反射炉	235
4.11.2 电阻反射炉	236
4.11.3 感应电炉	238
5 铝电解及铝合金铸造的发展与新技术	242
5.1 铝电解技术改进与发展	242
5.1.1 大型化、规模化	242
5.1.2 高槽寿命	243
5.1.3 低电压、低效应、低 PFC 排放	243
5.1.4 新型节能阴极技术	244
5.1.5 过热度的控制	246
5.1.6 预焙铝电解槽阳极自焙保护环优化技术	247
5.1.7 低温电解展望	248
5.1.8 PFC 排放控制和铝电解固体废弃物无害化	249
5.1.9 铝电解强化电流技术	250
5.2 铝合金铸造的新工艺新材料	255
5.2.1 低温熔炼铝硅合金	255
5.2.2 采用 PET 索带包装铝锭	257
5.2.3 电解铝大块锭的生产	261
附录	264
附录 1 铸造铝合金锭化学成分 (GB/T 8733—2007)	264
附录 2 铸造铝合金国内外牌号对照表	267
附录 3 铝中间合金锭化学成分 (YS/T 282—2000 (2009)—2009 年复审继续有效)	270
附录 4 常用扁铸锭牌号化学成分	271
参考文献	272

1 铝电解概述

1.1 铝及铝合金的特点及应用

1.1.1 铝的性质

1.1.1.1 纯铝的有关特性

纯铝的有关特性见表 1-1。

表 1-1 纯铝的特性

性 能		高纯铝 (Al: 99.996%)	工业纯铝 (Al: 99.5%)
密度 $/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	固态 (20℃)	2.698	2.710
	液态 (700℃)	2.371	2.373
熔点/℃		660.24	约 650
沸点/℃		2060	—
熔化潜热 (熔解热) $/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$		396	389
比热容 (100℃) $/\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$		935	965
导热系数 (25℃) $/\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$		235	223 (软状态)
线膨胀系数 $/\mu\text{m} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	20 ~ 100℃	24.58	23.5
	100 ~ 300℃	24.6	25.6
电阻率 (20℃, 软状态) $/\mu\Omega \cdot \text{cm}$		2.67	2.92
抗拉强度/MPa		88.2 ~ 117.6	90 ~ 120 (铸态)
屈服强度/MPa		19.6 ~ 88.2	—
伸长率/%		11 ~ 25	11 ~ 25 (铸态)
布氏硬度 HBS		24 ~ 32	24 ~ 32 (铸态)

1.1.1.2 铝的化学性质

铝是一种银白色的轻金属,在自然界中分布极广,地壳中铝的含量约为 8%,仅次于氧和硅,居第三位,但在金属元素中,铝居首位。铝的化学性质十分活泼,故自然界中极少发现元素状态的铝。含铝的矿物总计有 250 多种,其中主要的是铝土矿、高岭土、明矾石等。铝的主要化学性质如下:

(1) 铝与空气接触时很容易氧化,并且在其表面形成一层致密而坚实的氧化膜,此膜有保护内部铝不被继续氧化的作用,因而铝在大气中耐腐蚀;在海水、油类、浓硝酸中有优异的抗蚀性,但对碱、卤化物的耐蚀性较差,所以常被用来制造化学反应器、医疗器械、冷冻装置、石油和天然气管道等。铝还用做炼钢过程中的脱氧剂。

(2) 铝在氧气中燃烧能放出大量的热和耀眼的光,常用于制造爆炸混合物,如铵铝炸药(由硝酸铵、木炭粉、铝粉、烟黑及其他可燃性有机物混合而成)、燃烧混合物(如用铝热剂做的炸弹和炮弹可用来攻击难以着火的目标或坦克、大炮等)和照明混合物

(如含硝酸钡 68%、铝粉 28%、虫胶 4%)，铝热剂常用来熔炼难熔金属和焊接钢轨等。

(3) 铝粉和石墨、二氧化钛(或其他高熔点金属的氧化物)按一定比率均匀混合后，涂在金属上，经高温煅烧制成的耐高温的金属陶瓷，在火箭及导弹技术上有重要应用。

(4) 铝粉具有银白色光泽(一般金属在粉末状时的颜色多为黑色)，常用来做涂料、颜料，俗称银粉、银漆，以保护铁制品不被腐蚀，而且美观。铝粉和水性铝膏还可用作混凝土发泡剂。

1.1.1.3 铝的物理性能

(1) 铝的密度很小，仅为 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ ，虽然它比较软，但可制成各种铝合金，如硬铝、超硬铝；防锈铝、铸铝等，这些铝合金广泛应用于飞机、汽车、火车、船舶等制造业。此外，火箭、航天飞机、人造卫星上也使用大量的铝及其合金。例如，一架超声速飞机约由 70% 的铝及铝合金构成。船舶建造中也大量使用铝，一艘大型客船的用铝量常达数千吨。

(2) 铝的导电性仅次于银、铜，虽然它的电导率只有铜的 $2/3$ ，但密度只是铜的 $1/3$ ，所以输送相同的电量，铝线的用量只有铜线的一半。铝表面的氧化膜不仅有耐腐蚀的能力，而且有一定的绝缘性，所以铝在电器制造工业、电线电缆工业和无线电工业中有广泛的用途。

(3) 铝是热的良导体，它的导热能力比铁大 3 倍，工业上可用铝制造各种热交换器、散热材料和炊具等。

(4) 铝板对光的反射性能很好，铝越纯，其反射能力越好，因此常用来制造高质量的反射镜，如太阳灶反射镜等。

(5) 铝具有吸音性能，音响效果也较好，所以广播室、现代化大型建筑室内的天花板等也常用铝及铝合金材料制造。

1.1.1.4 工艺性能

(1) 铸造性能。在浇注温度为 $700 \sim 730^\circ\text{C}$ 时，纯铝液的流动性较差、充型能力差、易产生热裂孔隙等铸造缺陷。但是，铸造铝合金的铸造性能远优于工业纯铝，在汽车制造、机械、船舶等行业得到广泛应用。

(2) 压延性能。铝有较好的延展性，它的延展性仅次于金和银，纯铝的塑性高达 25%，可采用锻造、辊轧、挤压等加工方法，将其制成各种管材、板材、线材以及厚度仅为 0.06mm 箔材和 $\phi 0.05\text{mm}$ 左右的铝丝。

(3) 冶金性能。纯铝的铸造性能差、力学性能低，具有良好的冶金性能，通过冶炼可制成各种型号的铝合金，从而提高了铝合金的强度、硬度、铸造性能等机械指标，以满足铝加工和铸造的要求。目前，我国发布的铝合金技术标准有：《变形铝及铝合金化学成分》(GB/T 3190—2008)，铝合金品种有 254 个；《铸造铝合金》(GB/T 8733—2007)，铝合金品种 69 个。

1.1.2 铝的用途

铝具有多种优良性能，容易铸造和回收再利用，不但抗腐蚀性能好，而且外观漂亮。早期铝只用于制造首饰。随着铝合金产品的开发，铝基材料的抗氧化性能、力学性能、加工性能不断得到优化，使铝在机械、电子、汽车、火车、航空、建筑、包装等领域得到了

广泛应用，已成为国防建设和工业生产中不可缺少的重要材料。铝已经成为仅次于钢铁的第二大金属材料，在国民经济和日常生活中发挥着日益重要的作用。

从 1854 年开始，法国化学家德维尔把铝矾土、木炭、食盐混合，通入氯气后加热得到 $\text{NaCl} \cdot \text{AlCl}_3$ 复盐，再将此复盐与过量的钠熔融，得到了金属铝。在近一个世纪的历史进程中，铝的产量急剧上升，到了 20 世纪 60 年代，铝在全世界有色金属产量上超过了铜而位居首位。近 50 年来，铝已成为世界上应用最为广泛的金属之一，它的用途涉及许多领域，如国防、航天、电力、电子、通讯、建筑、火车、汽车、集装箱运输、日常用品、家用电器、机械设备、包装等。它的化合物用途也非常广泛，不同的含铝化合物在医药、有机合成、石油精炼等方面发挥着重要的作用。

2008 年，全球原铝消费达到 3810 万吨，人均原铝消费 5.9kg，如果再加上回收的废铝，人均铝消费量可达 7.8kg 左右。我国电解铝消费 1260 万吨，人均铝消费 9.7kg，连续 5 年居世界第一。2010 年我国铝消费结构如图 1-1 所示。

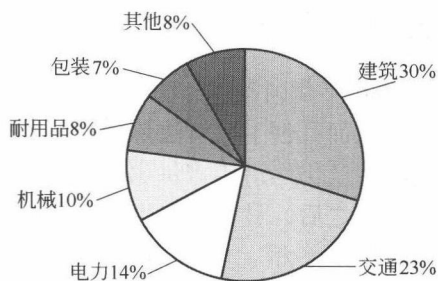


图 1-1 2010 年我国铝消费结构

1.2 铝电解发展简史

1.2.1 铝冶金的历史

我国采用铝矿有悠久的历史，很早就开始从明矾石中提取明矾（古称矾石）以供医药及工业应用。公元前一世纪，汉代《本草经》一书中记载了 16 种矿物药物，其中就包括矾石、铅丹、石灰、朴硝、磁石。明代宋应星所著《天工开物》（公元 1637 年）一书中记载了矾石的制造和用途。

Aluminium 一词从明矾衍生而来，古罗马人称明矾为 $\text{Alu} - \text{men}$ 。1746 年 Pott 从明矾中制取一种金属氧化物。Marggraf 认为黏土和明矾中含有同一种金属氧化物。1876 年 Morveau 称此种氧化物为氧化铝 Alumine（英文为 Alumina）。1807 年英国 Davy 试图用电解法从氧化铝中分离出金属，未成功。1808 年他称呼此种拟想中的金属为 Aluminium，以后沿用此名。金属铝最初用化学法制取。1825 年丹麦 Oersted 用钾汞还原无水氯化铝，得到一种灰色的金属粉末，在研磨时呈现金属光泽，但当时未能加以鉴定。1827 年德国 Wohler 用钾还原无水氯化铝，得到少量细微的金属颗粒。1845 年他把氯化铝气体通过熔融的金属钾表面，得到金属铝珠，每颗铝珠的质量为 10 ~ 15mg，于是铝的一些物理和化学性质得到初步的测定。1854 年法国 Deville 用钠代替钾还原 $\text{NaCl} \cdot \text{AlCl}_3$ 配合盐，制取金属铝。钠和钾同为一价碱金属，但钠的相对原子质量比钾小，制取 1kg 铝所需的钠量为 3.0 ~ 3.4kg，而用钾大约需要 5.5kg，故用钠比较经济。当时称铝为“泥土中的银子”。1855 年 Deville 在巴黎世界博览会上展出了 12 块小铝锭，总质量约为 1kg。

1854 年在巴黎附近建成了世界上第一座炼铝厂。1865 年，俄国 Бекетов 提议用镁还原冰晶石来生产铝。这一方案后来在德国 Gmelingen 铝镁工厂里得到采用。

自从 1887 ~ 1888 年间电解法炼铝工厂开始投入生产之后，化学法便渐渐被弃用了。

在此之前的 30 多年内采用化学法总共生产了约 200t 铝。在采用化学法炼铝期间,德国 Bunsen 和法国 Deville 继英国 Davy 之后研究电解法。1854 年 Bunsen 发表了试验总结报告,声称通过电解 NaCl-AlCl_3 配合盐,得到金属铝。他在电解时采用炭阳极和炭阴极。Deville 除了电解 NaCl-AlCl_3 配合盐之外,还电解此配合盐和冰晶石的混合物,都得到了金属铝。Deville 也许是认识到氧化铝可溶于熔融氟盐的第一个人。那时候,用蓄电池作为电源不能获得较大的电流,而且价格很贵,因此电解法不能在工业上进行生产。只有在 1867 年发明了发电机,并在 1880 年加以改进之后,才使电解法可以用于工业生产。

1.2.2 铝电解的发展

1886 年美国霍尔和法国埃鲁特不约而同地申请了利用冰晶石-氧化铝熔盐电解法炼铝专利,从而开创了电解法炼铝新阶段——霍尔-埃鲁特法炼铝技术,直到现在,大型铝电解槽的生产仍然沿用霍尔-埃鲁特法炼铝原理。自从 1887 ~ 1888 年间电解法炼铝工厂开始投入生产之后,最初是采用小型预焙阳极铝电解槽,20 世纪初出现了小型侧部导电的自焙阳极铝电解槽,电解槽的电流强度从 $2\text{kA} \rightarrow 20\text{kA} \rightarrow 60\text{kA} \rightarrow 75\text{kA} \rightarrow 135\text{kA} \rightarrow 160\text{kA} \rightarrow 180\text{kA} \rightarrow 200\text{kA} \rightarrow 240\text{kA} \rightarrow 280\text{kA} \rightarrow 300\text{kA} \rightarrow 350\text{kA} \rightarrow 400\text{kA} \rightarrow 500\text{kA}$, 逐渐增大,实验电解槽已达到 600kA ,槽膛底面积也在随之增大。铝电解槽型最先为小型预焙阳极,后为中性自焙阳极,现在全部为大型预焙阳极电解槽。

1.2.3 我国铝电解的发展

新中国成立之前,伪满时期抚顺市有一个很小的电解铝厂,据留下的资料记载,年产量最高仅 8000t。1947 年国民党政府接收了这个小铝厂,但根本没有能力恢复生产。据在伪满时期工作过的老工人说,当时电解系列的电流强度只有 2700A,电解槽的构造非常简陋,生产效率很低。1951 年 7 月,新中国第一座电解铝厂——抚顺铝厂开始设计和生产准备工作。当时我国对铝的生产技术可以说是一无所知。工作中遇到许多困难,为了配合苏联专家工作,工厂成立了设计科。为了生产前的准备,还成立了生产准备科,并采取以下的几项措施:(1)成立技校进行技工培训;(2)招收中、高级技术人员;(3)派遣实习小组到苏联铝厂培训;(4)在苏联专家指导下建设培养“小型铝电解生产装置”的制作工人;(5)召回伪满时期的老技工;(6)派遣技工参加本厂大工程的施工。

早期的抚顺铝厂是由苏联专家设计的电流强度为 5 万安培铝电解槽。第一期工程 1952 年开始施工,1954 年投产。第一期工程投产时是由苏联专家手把手干的,到了第二期工程投产时,我们就逐渐掌握了技术,而到了第三期工程投产时,我们就能独立做了。第二、三期电解铝工程分别在 1957 年 7 月、1958 年 7 月投产。第四期电解铝工程是我国自行设计的,于 1959 年 5 月投产。到了 1965 年,全厂电解铝产能已达到 10 万吨/年。六十年来,抚顺铝厂累计产铝 282 万吨,实现工业总产值 300 多亿元,并形成年产 10 万吨铝的产能,为新中国铝工业培养了大批专业技术和管理人才,先后向全国各地输送 5400 人,为中国铝工业的发展壮大立下了汗马功劳。这以后,全国铝工业有了很大的发展,在宁夏的青铜峡、甘肃的兰州、河南的伊川、贵州的贵阳等地都建成了 10 万吨级的电解铝厂。除此以外,在沈阳铝镁设计研究院成立以后,又成立了贵阳铝镁设计研究院,设计研究的实力大大增强了。

我国先后经历了 6kA 上部导电自焙阳极砖砌圆形铝电解槽, 55kA 的砖砌自焙阳极铝电解槽, 60kA、75kA 侧插自焙阳极铝电解槽, 75kA→135kA→160kA→180kA→200kA→240kA→280kA→300kA→350kA→400kA 预焙阳极铝电解槽的不同发展阶段。

2000 年以前我国电解铝工业的基本特点: 一是企业多、规模小, 至 2000 年底铝厂已达到 126 家, 国际上电解铝厂的平均规模在 20 万吨/年左右, 而我国平均仅 2.64 万吨/年。二是电解铝厂与电厂、铝加工厂分离, 缺少电冶加一体化的大型铝企业, 因此生产成本较高, 很难与国外大型铝企业竞争。三是技术装备水平低, 至 2000 年底, 电解铝厂有 126 家, 产能 334 万吨, 污染严重、产能低、消耗高的自焙铝电解槽仍占总产能的 58.8%, 总产量的 66%。

目前, 我国大型预焙槽技术已非常成熟, 相继有 300kA、350kA、400kA 等系列大型槽投产, 已有多家铝厂 400kA 电解系列投产。随着中国电解铝工业的不断发展, 自主创新的技术装备水平进一步提升, 据相关部门统计, 截止到 2009 年, 中国大型预焙槽的电流强度 160kA 及以上的占到 89%; 200kA 及以上的占 82.56%; 300kA 及以上的占 42.74%; 400kA 及以上的占 12.06%。300kA 及以上的大型预焙槽已成为主流装备。另外, 500kA 的电解槽已经投产, 600kA 的电解槽技术目前也已成熟。400kA 预焙铝电解系列具有设计紧凑、高产、高效、投资省、能耗低、劳动生产率高等优点, 同时配套建设先进、成熟的干法烟气净化系统, 环保排放指标完全符合国家规定, 综合技术已达到世界先进水平, 使电解铝厂吨铝综合交流电耗从 1960 年的约 20000kW·h 逐步下降到 14107kW·h, 目前 400kA 系列槽型已降到 13678kW·h 以下。2010 年全国电解铝产量为 1695 万吨, 连续 10 年居世界第一位, 产能约为 2100 万吨。2011 年 3 月 29 日中国铝业连城分公司原甘肃连城铝厂 500kA 铝电解系列一期一区的 96 台槽通电投产。

1.2.4 铝电解生产指标

1.2.4.1 我国电解铝产量

我国在新中国成立初期没有电解铝生产, 1954 年第一座铝电解厂投产, 从 1954 年开始直到 80 年代初电解铝生产发展比较缓慢, 到 1983 年原铝产量仅有 45 万吨。改革开放后, 特别是近十年电解铝发展迅速, 2010 年产量达到 1695 万吨, 是 1990 年的 6 倍。我国电解铝产量统计见表 1-2。

表 1-2 我国电解铝产量统计

(万吨)

年份	产量	年份	产量	年份	产量	年份	产量	年份	产量	年份	产量
1951		1961	6.30	1971	28.37	1981	39.05	1991	95.52	2001	337.14
1952		1962	7.41	1972	28.30	1982	39.64	1992	109.06	2002	432.13
1953	0.04	1963	8.70	1973	28.27	1983	44.98	1993	124.19	2003	554.69
1954	0.19	1964	10.35	1974	21.15	1984	47.20	1994	146.22	2004	668.88
1955	2.07	1965	12.81	1975	21.75	1985	52.25	1995	167.61	2005	780.60
1956	2.15	1966	16.64	1976	21.31	1986	55.54	1996	177.09	2006	935.84
1957	2.89	1967	18.70	1977	21.12	1987	60.87	1997	203.50	2007	1258.83
1958	4.77	1968	12.01	1978	29.61	1988	71.21	1998	233.57	2008	1317.82
1959	6.84	1969	18.09	1979	36.23	1989	75.13	1999	259.84	2009	1357.52
1960	11.41	1970	23.21	1980	39.60	1990	84.71	2000	279.41	2010	1695.25

1.2.4.2 铝电解生产技术指标

我国铝电解在近几年发展得比较快,可以说从装备到技术及生产技术指标属于世界领先水平。表1-3~表1-7所示的不同时期具有代表性的铝电解生产技术指标反映了我国铝工业技术的发展水平。

表 1-3 甲厂 60kA 自焙阳极电解槽生产技术指标

年 份	平均槽电压 /V	电流效率 /%	吨铝原铝直流 电耗/kW·h	吨铝铝锭综合 电耗/kW·h	吨铝氧化铝 单耗/kg	吨铝阳极糊 单耗/kg	吨铝氟化盐 单耗/kg
1959	—	66.20	30720	—			
1960	—	69.10	29361	—			
1967	4.91	86.10	16787	—	1921	542	81.56
1968	4.69	84.12	16334	—	1923	583	62.24
1969	4.82	87.54	16330	—	2035	579	76.90
1970	4.67	87.54	15913	—	1953	573	54.88
1971	4.71	87.92	15929	—	1950	576	51.83
1972	4.62	87.11	15827	—	1974	567	53.46
1973	4.71	86.09	16268	—	2029	563	72.58
1974	4.68	87.41	15947	—	1985	530	65.28
1975	4.67	85.72	16223	—	1958	589	59.63
1976	4.72	85.14	16504	18880	1927	601	94.77
1977	4.78	85.82	16566	20297	1962	600	88.24
1978	4.79	85.81	16642	17946	2004	611	57.14
1979	4.60	86.80	15798	17141	1945	623	54.50
1980	4.45	85.73	15469	17020	1946	546	48.90
1981	4.50	84.25	16020	17631	1937	586	64.00
1982	4.48	85.33	15645	17404	1941	516	53.16
1983	4.40	86.59	15141	16961	1942	551	44.18
1984	4.32	88.49	14558	16097	1956	548	42.12
1985	4.28	87.75	14521	16090	1955	544	41.97
1986	4.27	87.81	14534	16069	1945	544	47.83
1987	4.31	88.88	14476	15792	1945	538	49.70
1988	4.27	88.72	14352	15868	1939	539	45.00
1989	4.30	88.79	14377	15849	1938	523	51.36
1990	4.31	88.50	14507	16183	1941	529	47.20
1991	4.30	88.33	14512	15916	1934	527	47.80
1992	4.30	88.83	14425	15821	1934	530	48.30
1993	4.31	89.28	14365	15958	1937	534	49.90
1994	4.30	88.95	14403	15849	1937	535	49.73
1995	4.15	89.24	14334	15883	1937	534	47.14

续表 1-3

年 份	平均槽电压 /V	电流效率 /%	吨铝原铝直流 电耗/kW·h	吨铝铝锭综合 电耗/kW·h	吨铝氧化铝 单耗/kg	吨铝阳极糊 单耗/kg	吨铝氟化盐 单耗/kg
1996	4.28	89.10	14292	16093	1937	531	44.26
1997	4.29	88.94	14379	15670	1936	532	44.44
1998	4.29	88.82	14381	15643	1935	521	42.65
1999	4.28	89.26	14238	15507	1933	486	30.96
2000	4.24	89.04	14174	15445	1933	481	26.03
2001	4.24	89.17	14143	15433	1933	503	27.90
2002	4.20	88.93	14173	15475	1937	491	29.90
2003	4.20	89.13	14095	15348	1937	476	28.12
2004	4.27	89.25	14260	15263	1935	478	25.80

注：1961~1966年停产，60kA自焙槽于2004年2月全部停产待改造。

表 1-4 乙厂 135kA 预焙阳极电解槽生产技术指标

年 份	电流效率 /%	吨铝原铝直流 电耗/kW·h	吨铝铝锭综合 电耗/kW·h	吨铝氧化铝 单耗/kg	吨铝炭阳极 单耗/kg	吨铝氟化盐 单耗/kg
1991	90.34	14264	15593	1934	616	46.8
1992	90.12	14335	15989	1941	618	49.0
1993	90.07	14334	15983	1941	618	49.2
1994	89.4	14558	16198	1942	618	49.6
1995	89.31	14498	16095	1942	640	49.7

表 1-5 丙厂 160kA 预焙阳极电解槽生产技术指标

年 份	电流效率 /%	吨铝原铝直流 电耗/kW·h	吨铝铝锭综合 电耗/kW·h	吨铝氧化铝 单耗/kg	吨铝炭阳极 单耗/kg	吨铝氟化盐 单耗/kg
1990	86.31	14378	15884		632	40.0
1991	86.91	14310	15592		632	34.9
1992	86.93	14235	15501		633	39.2
1993	88.47	13889	15261		614	36.6
1994	88.26	13987	15321		623	54.4
1995	90.01	13887	15151		613	64.4
1996	90.57	13890	15203		608	61.1

表 1-6 丁厂 200kA 预焙阳极电解槽生产技术指标

年 份	平均槽电压 /V	电流效率 /%	吨铝原铝直流 电耗/kW·h	吨铝铝锭综合 电耗/kW·h	吨铝氧化铝 单耗/kg	吨铝炭阳极 单耗/kg	吨铝氟化盐 单耗/kg
2001	4.55	83.61	16194	26973	1930	585	32.43
2002	4.23	90.37	13954	15443	1930	547	31.70