



人力资源和社会保障部职业能力建设司推荐
有色金属行业职业教育培训规划教材

铝电解生产技术

LVDIANJIE SHENGCHAN JISHU

杨昇 杨冠群 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

人力资源和社会保障部职业能力建设司推荐
有色金属行业职业教育培训规划教材

铝电解生产技术

杨 昇 杨冠群 编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2010

内 容 提 要

本书是有色金属行业职业教育培训规划教材之一,是根据有色金属企业生产实际、岗位技能要求以及职业学校教学需要编写的,并经人力资源和社会保障部职业培训教材工作委员会办公室组织专家评审通过。

本书全面系统且深入浅出地向读者介绍了现代铝电解生产过程的各主要环节,尽可能追踪铝电解技术发展前沿和铝电解生产的最新控制理念、操作管理方法及手段。其基本内容包括:铝电解的基础知识,铝电解原材料及能源,现代预焙铝电解槽的结构,预焙铝电解槽的焙烧、启动与管理,铝电解槽的常规操作和测量,铝电解槽的计算机控制,预焙铝电解槽的病槽及阴极破损槽,铝电解的电流效率、电能消耗和能量平衡,铝电解的原料输送、烟气净化及环境保护,铝电解产品质量控制及检测,铝及铝合金的精炼和铸锭,铝电解生产成本、指标及发展方向。

本书可作为铝电解厂技工、技师及现场生产管理人员的技术培训教材和自学参考书,也可作为职业专科学校相关专业推荐教材及高等院校相关专业师生下厂实习的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

铝电解生产技术/杨昇,杨冠群编著. —北京:冶金工业出版社,2010.1

有色金属行业职业教育培训规划教材

ISBN 978-7-5024-5104-2

I. ①铝… II. ①杨… ②杨… III. ①氧化铝电解—技术培训—教材 IV. ①TF821.032.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 216422 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 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 张熙莹 美术编辑 张媛媛 版式设计 葛新霞

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5104-2

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2010 年 1 月第 1 版,2010 年 1 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16;16.5 印张;434 千字;245 页;1-2500 册

39.00 元

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(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

序

有色金属是重要的基础原材料，产品种类多，关联度广，是现代高新技术产业发展的关键支撑材料，广泛应用于电力、交通、建筑、机械、电子信息、航空航天和国防军工等领域，在保障国民经济和社会发展等方面发挥着重要作用。

改革开放以来，我国有色金属工业持续快速发展，十种常用有色金属总产量已连续7年居世界第一，产业结构调整和技术进步加快，在国际同行业中的地位明显提高，市场竞争力显著增强。我国有色金属工业的发展已经站在一个新的历史起点上，成为拉动世界有色金属工业增长的主导因素，成为推进世界有色金属科技进步的重要力量，将对世界有色金属工业的发展发挥越来越重要的作用。

当前，我国有色金属工业正处在调整产业结构，转变发展方式，依靠科技进步推动行业发展的关键时期。随着我国城镇化、工业化、信息化进程加快，对有色金属的需求潜力巨大，产业发展具有良好的前景。今后一个时期，我国有色金属工业发展的指导思想是：以邓小平理论和“三个代表”重要思想为指导，深入落实科学发展观，按照保增长、扩内需、调结构的总体要求，以控制总量、淘汰落后、加快技术改造、推进企业重组为重点，推动产业结构调整和优化升级；充分利用境内外两种资源，提高资源保障能力，建设资源节约型、环境友好型和科技创新型产业，促进我国有色金属工业可持续发展。

为了实现我国有色金属工业强国的宏伟目标，关键在人才，需

要培养造就一大批高素质的职工队伍，既要有高级经营管理者、各类工程技术人才，更要有高素质、高技能、创新型的生产一线人才。因此，大力发展职业教育和职工培训是实施技能型人才培养的主要途径，是提高企业整体素质，增强企业核心竞争力的重要举措，是实现有色金属工业科学发展的迫切需要。

冶金工业出版社和洛阳有色金属工业学校为了适应有色金属工业中等职业学校教学和企业生产的实际需求，组织编写了这套培训教材。教材既有系统的理论知识，又有生产现场的实际经验，同时还吸纳了一些国内外的先进生产工艺技术，是一套行业教学和职工培训较为实用的中级教材。

加强中等职业教育和职工培训教材的建设，是增强职业教育和培训工作实效的重要途径。要坚持少而精、管用的原则，精心组织、精心编写，使教材做到理论与实际相结合，体现创新理念、时代特色，在建设高素质、高技能有色金属工业职工队伍中发挥积极作用。

中国有色金属工业协会会长



2009年6月

前 言

本书是按照人力资源和社会保障部的规划，参照行业职业技能标准和职业技能鉴定规范，根据有色金属企业生产实际、岗位技能要求以及职业学校教学需要编写的。书稿经人力资源和社会保障部职业培训教材工作委员会办公室组织专家评审通过，由人力资源和社会保障部职业能力建设司推荐作为有色金属行业职业教育培训规划教材。

本书尽可能追踪铝电解技术发展前沿，较全面系统地介绍了现代铝电解生产技术，其基本内容包括：铝电解的基础知识；铝电解原材料及能源；现代预焙铝电解槽的结构；预焙铝电解槽的焙烧、启动与管理；铝电解槽的常规操作和测量；铝电解槽的计算机控制；预焙铝电解槽的病槽及阴极破损槽；铝电解的电流效率、电能消耗和能量平衡；铝电解的原料输送、烟气净化及环境保护；铝电解产品质量控制及检测；铝及铝合金的精炼和铸锭；铝电解生产成本、指标及发展方向。

本书在反映铝电解生产的新理论、新工艺和新流程的前提下，力求理论与实践最紧密地结合，叙述尽可能深入浅出，通俗易懂。

本书主要作为铝电解厂技工、技师及现场生产管理人员的技术培训教材和自学参考书，同时也可作为职业专科学校相关专业推荐教材及高等院校相关专业师生下厂实习的参考资料。

由于编者水平有限，错漏之处敬请读者给予批评指正。

作 者

2009年6月28日

目 录

1 铝电解的基础知识	1
1.1 铝的性质和用途	1
1.2 炼铝方法的发展历程	3
1.2.1 化学法炼铝阶段	3
1.2.2 电解法炼铝阶段	4
1.2.3 电解法生产铝基合金及其他炼铝方法	5
1.3 现代铝电解的基本原理	7
1.3.1 阴极过程	7
1.3.2 阳极过程	9
1.4 阳极效应	10
1.4.1 阳极效应的宏观表现	10
1.4.2 阳极效应对生产过程的影响	11
1.4.3 发生阳极效应的机理	12
1.5 铝电解的电解质及其性质	13
1.5.1 冰晶石及 NaF-AlF ₃ 系相图	13
1.5.2 电解质的酸碱度	14
1.5.3 电解质的初晶温度	15
1.5.4 电解质的表面性质	16
1.5.5 电解质的密度	18
1.5.6 电解质的电导率	19
1.5.7 电解质的黏度	21
1.5.8 电解质的挥发性	22
1.6 铝电解的基本流程	22
复习思考题	23
2 铝电解原材料及能源	24
2.1 氧化铝	24
2.1.1 氧化铝的获得	24
2.1.2 氧化铝的物理性质	26
2.1.3 氧化铝的化学纯度	27
2.2 氟化盐	28
2.2.1 铝电解用氟化盐种类及其性质	28
2.2.2 铝用氟化盐的生产方法	31

2.2.3	铝用氟化盐的质量标准	33
2.3	预焙阳极	35
2.3.1	预焙阳极的几何形状及外观质量	35
2.3.2	预焙阳极炭块的原料选择	36
2.3.3	预焙阳极炭块的生产工艺	39
2.3.4	预焙阳极炭块的性质和质量	43
2.3.5	预焙阳极炭块的理化指标	44
2.3.6	阳极炭块组的组装	45
2.4	直流电源	46
2.4.1	铝电解厂对电源条件的要求	46
2.4.2	铝电解所需直流电源的获得	47
	复习思考题	48
3	现代预焙铝电解槽的结构	49
3.1	大型预焙槽的阴极结构	49
3.1.1	大型预焙槽的槽壳	49
3.1.2	大型预焙槽的底部内衬	51
3.1.3	大型预焙槽的侧部内衬	53
3.1.4	大型预焙槽的阴极炭块组	55
3.1.5	大型预焙槽的阴极扎糊	57
3.2	大型预焙槽的上部结构	58
3.2.1	门形支架及大梁	58
3.2.2	阳极提升机构	58
3.2.3	打壳下料系统	59
3.2.4	集气和排烟装置	60
3.3	大型预焙槽的母线结构	60
3.4	铝电解车间及预焙铝电解槽的电气绝缘	61
	复习思考题	62
4	预焙铝电解槽的焙烧、启动与管理	63
4.1	预焙铝电解槽的预热焙烧	63
4.1.1	预热焙烧前的准备	63
4.1.2	预焙槽的铝液焙烧	65
4.1.3	预焙槽的焦粒焙烧	66
4.1.4	预焙槽的石墨粉焙烧	72
4.1.5	预焙槽的燃料焙烧	72
4.2	预焙槽的启动	73
4.2.1	预焙槽的干法启动	73
4.2.2	预焙槽的湿法启动	74

4.2.3	铝电解槽的二次启动	75
4.2.4	启动过程注意事项	75
4.2.5	焙烧启动过程中的故障及处理	77
4.3	铝电解槽非正常生产期的管理	78
4.3.1	铝电解槽启动初期的管理	78
4.3.2	铝电解槽启动后期的管理	80
4.3.3	大型预焙铝电解槽槽膛的建立	85
4.4	铝电解槽正常生产期的管理	87
4.4.1	槽电压管理	88
4.4.2	加料管理	90
4.4.3	电解质水平和成分的管理	92
4.4.4	铝液高度的管理	96
4.4.5	阳极效应管理	99
4.4.6	极上保温料管理	100
	复习思考题	100
5	铝电解槽的常规操作和测量	102
5.1	铝电解槽的常规操作	102
5.1.1	阳极更换	102
5.1.2	熄灭阳极效应	107
5.1.3	出铝	108
5.1.4	调整异常电压	110
5.1.5	抬母线	110
5.1.6	捞炭渣	112
5.1.7	短路口作业	113
5.1.8	停槽作业	114
5.2	铝电解生产中的常规测量	114
5.2.1	铝液和电解质高度测量	114
5.2.2	阳极和阴极电流分布测量	115
5.2.3	电解质温度及其他部位温度的测量	117
5.2.4	极距测量	118
5.2.5	槽底隆起的探测	119
5.2.6	电解槽槽膛形状的测量	120
5.2.7	电解槽槽底压降及其他压接部位电压降的测量	121
5.2.8	电解槽电压平衡的测量	122
5.2.9	电解槽磁场测量	123
5.2.10	残阳极形状及极上保温料厚度测量	124
5.2.11	槽壳变形情况测量	124
	复习思考题	125

6 铝电解槽的计算机控制	126
6.1 铝电解槽计算机控制系统的配置	126
6.1.1 计算机控制系统	126
6.1.2 槽控机的组成及操作	127
6.1.3 现场操作与计算机的联系	128
6.2 铝电解槽的计算机控制	129
6.2.1 槽电压的计算机控制	129
6.2.2 电解槽加料的计算机控制	131
6.2.3 其他操作过程的计算机控制	133
6.3 计算机报表的分析和利用	134
复习思考题	135
7 预焙铝电解槽的病槽及阴极破损槽	136
7.1 病槽的类型及处理	136
7.1.1 针振	136
7.1.2 电解槽的冷行程	138
7.1.3 电解槽的热行程	139
7.1.4 电解槽下料异常	141
7.1.5 电解质含炭	142
7.1.6 异常效应	143
7.1.7 阳极长包	144
7.1.8 阳极多组脱落	145
7.1.9 滚铝	146
7.1.10 漏炉	148
7.1.11 病槽的预防	149
7.2 常见的阴极内衬破损现象	150
7.2.1 槽底隆起	150
7.2.2 阴极炭块断裂	150
7.2.3 阴极炭块的冲蚀坑及层状剥离	150
7.2.4 阴极扎糊及侧部炭块的破损	151
7.3 引起内衬破损的原因	152
7.3.1 材料的性质和质量对槽寿命的影响	152
7.3.2 钠和钠离子的破坏	152
7.3.3 电解质和铝液的渗透	153
7.3.4 电化学和化学腐蚀	153
7.3.5 内衬砌筑质量与槽寿命的关系	154
7.3.6 电解槽预热焙烧及操作管理与槽寿命的关系	154
7.4 破损槽的识别、修理和维护	155
7.4.1 破损槽的识别	155

7.4.2	破损槽的修补	155
7.4.3	破损槽的维护	156
7.5	设备和操作事故的预防和处理	156
7.5.1	意外停电、停风的处理	156
7.5.2	设备事故的预防和处理	157
7.5.3	避免操作和管理事故	158
7.6	老龄槽的管理及延长电解槽寿命的措施	158
7.6.1	老龄槽的维护管理	159
7.6.2	延长阴极内衬使用寿命	159
7.7	电解槽大修	161
7.7.1	铝电解槽就地大修	161
7.7.2	铝电解槽易地大修	162
	复习思考题	163
8	铝电解的电流效率、电能消耗和能量平衡	164
8.1	法拉第电解定律	164
8.1.1	法拉第第一和第二电解定律	164
8.1.2	电化当量	165
8.2	铝电解的电流效率	165
8.2.1	电流效率的实际测定	166
8.2.2	影响电流效率的因素	169
8.3	电能效率	178
8.3.1	铝电解的理论电耗率	178
8.3.2	铝电解的实际电耗率	181
8.3.3	铝电解的电能效率	182
8.4	铝电解的能量平衡	183
8.4.1	铝电解槽能量平衡方程	184
8.4.2	电解槽能量平衡的测定	186
8.5	降低铝电解电能消耗的途径	187
8.5.1	铝电解槽的散热方式	187
8.5.2	降低能耗的途径	187
	复习思考题	189
9	铝电解的原料输送、烟气净化及环境保护	190
9.1	铝电解的原料输送	190
9.1.1	粉状物料输送技术概述	190
9.1.2	氧化铝的稀相输送	191
9.1.3	氧化铝的浓相输送	191
9.1.4	氧化铝超浓相输送	192

9.2	铝电解的烟气净化	193
9.2.1	铝电解烟气中的有害物质	193
9.2.2	铝电解烟气湿法净化	195
9.2.3	铝电解烟气干法净化	196
9.3	铝电解的环境保护	199
9.3.1	铝电解污染物排放标准	199
9.3.2	铝电解厂大气污染的防治	202
9.3.3	铝电解厂废渣的治理	204
9.3.4	铝电解厂的废水处理	205
9.3.5	铝电解厂的消防设施及其他安全措施	206
9.3.6	铝电解厂的卫生安全	208
	复习思考题	209
10	铝电解产品质量控制及检测	211
10.1	铝电解产品的质量控制	211
10.1.1	原铝质量标准	211
10.1.2	原铝中的杂质	211
10.1.3	原铝质量保障	213
10.2	铝电解原料和产品分析	214
10.2.1	原料中杂质含量分析	214
10.2.2	原铝中杂质含量分析	214
	复习思考题	216
11	铝及铝合金的精炼和铸锭	217
11.1	配料	217
11.1.1	纯铝的配料	218
11.1.2	合金配料	219
11.2	熔炼	221
11.2.1	熔炼设备	221
11.2.2	熔炼过程	222
11.2.3	熔体中的杂质	224
11.2.4	熔体净化方法简介	225
11.3	中间分析	227
11.4	铸造	227
11.4.1	块式铁模铸锭	228
11.4.2	竖式半连续铸造	229
11.4.3	水平铸造	230
11.4.4	连铸连轧	232
11.5	铸锭产品质量	232

11.5.1 晶粒细化	232
11.5.2 铸锭的表面质量	233
11.5.3 铸锭的内部质量	235
复习思考题	235
12 铝电解生产成本、指标及发展方向	236
12.1 生产成本及成本构成	236
12.1.1 制造成本	236
12.1.2 管理费用	237
12.1.3 营业费用	237
12.1.4 财务费用	237
12.1.5 总成本费用	237
12.2 主要技术经济指标	238
12.2.1 物耗指标	238
12.2.2 能耗指标	238
12.2.3 维修指标	239
12.2.4 劳动生产率指标	239
12.3 铝电解技术发展方向	240
复习思考题	243
参考文献	244

1 铝电解的基础知识

1.1 铝的性质和用途

铝 (Al) 在门捷列夫元素周期表中的原子序数为 13, 处于第三周期第三主族。铝原子核有 13 个质子和 14 个中子, 相对原子质量为 26.981538。原子核外有 13 个电子, 分 3 层排列, 第一层 2 个电子; 第二层共 8 个电子, 分两个亚层, 第一亚层 2 个电子, 第二亚层 6 个电子; 第三层共 3 个电子, 也分两个亚层, 第一亚层 2 个电子, 第二亚层 1 个电子。铝原子的电子层结构可以表示为 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$ 。铝原子容易失去最外层的 3 个电子而成为正三价的离子, 有时也能失去 $3p$ 上的 1 个电子而形成正一价的离子。因此铝属于金属元素。

金属元素根据其自然光泽可分为黑色金属和有色金属, 铝是一种具有银白色光泽的有色金属。有色金属可按其密度分为重金属和轻金属, 密度大于 5.0g/cm^3 的称为重金属, 密度小于 5.0g/cm^3 的称为轻金属。铝在 20°C 时的密度为 2.69g/cm^3 , 属于轻金属。除铝以外, 还有锂 (Li)、钠 (Na)、钾 (K)、铷 (Rb)、铯 (Cs)、铍 (Be)、镁 (Mg)、钙 (Ca)、锶 (Sr)、钡 (Ba)、钛 (Ti) 等十几种金属属于轻金属。硅 (Si) 是一种半导体, 或称半金属, 就其密度而言 (室温下为 2.34g/cm^3), 也属于轻金属的范畴。

铝在地壳内的含量非常丰富, 占地壳质量的 8.7%, 蕴藏量仅次于氧和硅, 是铁的 1 倍多, 超过其他有色金属蕴藏量的总和。但铝在自然界的存在状态都为化合物, 主要是氧化物, 几乎没有发现过自然铝的存在。

铝的主要物理参数见表 1-1。

表 1-1 铝的主要物理参数

参数名称		数值	参数名称		数值
原子序数		13	热导率 $/\text{W} \cdot (\text{cm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	20°C 固态时	2.08
相对原子质量		26.981538		200°C 固态时	2.18
常见原子价		+3	20°C 固态时的电导率/ $\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$		$3.6 \times 10^4 \sim 3.7 \times 10^4$
密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	20°C 固态时	2.699	固态变为液态时的体积增长率/%		6.5
	660°C 液态时	2.30	20 ~ 100°C 的平均线膨胀系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$		24×10^{-6}
20°C 固态时的比热容/ $\text{J} \cdot (\text{g} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$		0.90	650 ~ 20°C 的线收缩系数/%		1.7 ~ 1.8
熔点/ $^\circ\text{C}$		659	电化当量	$\text{g}/(\text{A} \cdot \text{h})$	0.3356
沸点/ $^\circ\text{C}$		2469		$\text{A} \cdot \text{h}/\text{g}$	2.980
熔化热/ $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$		386.6			

铝具有很多优良特性, 正是因为这些特性, 使它成为被广泛应用的、非常重要的金属材料。

铝具有明亮的银白色光泽。在自然环境中或通过人工方法, 铝的表面很容易被氧化, 形成白色致密的氧化铝保护膜。氧化铝膜具有很好的着色功能, 可以根据人们的意愿使铝的表面形成多种美妙的颜色。许多以铝为基的合金材料也具有这种表面性能, 其外表美观而清洁。因

此，铝及其合金被广泛用于装饰、建筑、门窗、家具和日常用品。

铝的氧化膜不仅美观，而且耐腐蚀，在大气中具有较强的抗腐蚀能力。尤其是纯度为99.9%以上的高纯度铝，具有更好的耐蚀性能。耐蚀铝合金可以抵抗海洋气候环境的腐蚀，因此，铝及铝合金被用于船舶工业以及建筑外墙的装饰。

铝轻，室温下铝的密度为 $2.69\text{g}/\text{cm}^3$ ，是铜的三分之一。铝能与许多元素形成合金，铝基合金也很轻，而且强度很好，大部分铝基合金的比强度超过钢铁，具有很好的耐冲击性能。正因为如此，铝在飞机、船舶、车辆、建筑、机械制造等领域得到了广泛应用。特别是汽车业，为了减少燃油消费量及尾气排放量，汽车轻量化引起了人们的高度重视。据报道，汽车车身质量每减少10%，油耗约节省8%。每应用1kg铝材代替钢材，在车辆使用年限内，用油量节省约8.5L， CO_2 排放量减少约20kg。特别是作为高速运动部件的车轮，每减轻1kg，其节能减排效果相当于车身质量减少4kg。采用铝合金轮毂，与钢铁轮毂相比，不仅使节能减排有明显效果，还有如下优点：体积稳定性好，热变形小，有利于减震和提速；气密性好，可以省去车轮内胎；导热性好，有利于高速行驶时胶轮与路面摩擦产生的热量的散失，从而延长胶轮使用寿命，减少爆带，提高安全系数；抗蚀性好，美观，且减少维护保养费用。为了加速汽车轻量化进程，上述因素促使汽车行业大量采用铝合金。

铝及其合金具有良好的导热性。铝在 0°C 时的热导率为 $238\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ，是铜的60%，黄铜的2.25倍，钢铁的2.85倍。因此被用于各种热交换器、散热器、仪器仪表的导热装置以及锅、盆、壶、勺等厨房用具。

铝在 20°C 时的电导率为 $3.6\times 10^4\sim 3.7\times 10^4\text{S}/\text{cm}$ ，其导电性能约为铜的60%，电导率仅次于铜、银、金，比其他金属都好。但由于铝轻，按质量比计算（同样长度、同样质量的导体），铝的导电性能是铜的1.8倍。因此，铝被大量用于电缆、电线及其他电气材料。

铝的机械加工性能和延展性好，而且无毒。因此，铝被加工成板材、棒材、管材、型材、线材、箔材，广泛用于机械制造、食品和医药卫生用品的容器及各种包装材料。

某些铝合金具有良好的超塑性，铝-锂系和铝-镁-钛系合金因为这种性能而成为理想的航空航天材料。

铝及铝合金铸造性能良好，可以铸造成形状复杂的各种零部件，使它在有色金属铸造行业独领风骚。

铝对光具有良好的反射率，铝的纯度越高反射率越高，纯度为99.8%以上的铝，其反射率可达90%以上。因此它被用于照明设备、太阳能设备、地热交换和红外线干燥等各个领域。

铝无磁性，特别是制成泡沫材料之后，具有极强的隔磁、隔音、隔热性能，在无线电广播、航海、潜艇、鱼雷及其他军用设施中，有着几乎不可取代的作用。

铝在低温条件下无脆性，适于作低温结构材料，用于制冷和冷冻设备。在南北极探险和宇宙开发领域所用材料中，铝也占着重要地位。

铝及其合金的热中子吸收截面小，被应用于热中子原子能反应堆上。

铝锡合金具有良好的轴承合金性能而被用于轴承合金。铝优良的亲水性、感光性、印刷性而被用作印版材料。

铝对氧有很强的亲和能力，能从许多其他元素的氧化物中夺取氧，与氧结合时放出大量能量。因此，铝被用作燃烧剂、发热剂、脱氧剂和还原剂。

铝的电极电位很负，可以制成牺牲阳极作为某些电极电位比它正的金属制品的保护材料。

由于铝的熔点不很高，只有 659°C ，加之铝及铝材因保护膜作用而很难被氧化腐蚀。因此，铝废料具有很高的回收价值，每回收1t废铝只需消耗生产1t原铝5%的能量。所以说，铝不仅

是一种再生资源，也是一种再生能源。

铝的氧化物和氢氧化物具有酸、碱两性，它与强碱反应生成铝酸盐而呈酸性，与强酸反应生成铝盐而呈碱性。氢氧化铝用作胃舒平、牙膏等医药日化原料，也正是利用了它酸碱两性的特点。

铝的性质和用途还有很多，在此不一一详述。以2006年我国和世界铝的消费为例，铝的主要应用领域及大致分配见表1-2。

表 1-2 我国及全球铝产品消费分配比例 (%)

用途	交通运输	建筑	电子电器	机器制造	包装	铝箔	耐用品	其他
全球	30	19	11	10	10	8	6	6
中国	19	22	17	11	2	8	9	12

铝虽然有很多优良性质而使它的应用几乎普及每个领域，但铝仍有一些性质使它的应用受到限制。纯铝的硬度较低，它的杨氏弹性模量为 7.03×10^{10} Pa，是铜的 54.2%，是钢铁的 33.8%；纯铝的强度也较低，它的拉伸极限强度为 $0.9 \times 10^8 \sim 1.5 \times 10^8$ Pa，是铜的 38% ~ 45%，是钢铁的 12% ~ 14%；铝的熔点相对较低，耐热能力较差，从 200℃ 开始随温度升高而变软。铝的这些弱点限制了它的应用，在某些领域，还不可能取代铁、铜、不锈钢等材料。

铝的电极电位较负，当与电极电位比它正的金属接触时，往往形成原电池而作为阳极被腐蚀，这是铝作为牺牲阳极保护材料的原理，同时也限制了铝自身的用途。当铝与其他电极电位更正的金属（如铜）共同使用时，必须注意它的电化学腐蚀。

铝在大气中的耐蚀性很好，但受大气的温度、湿度、含盐及不纯物等条件影响很大，铝在普通田园中腐蚀率约为 0.01mm/a，在工业区约为 0.08mm/a，而在海上为 0.11mm/a。铝在碳酸盐、铬酸盐、醋酸盐、硫化物等的中性水溶液中具有较好的耐蚀性能，但在氯化物水溶液中易被腐蚀。铝在浓硝酸（80% 以上）中因形成致密氧化膜而耐腐蚀，但在盐酸、硫酸、稀硝酸中易被腐蚀。铝在氨水中不发生腐蚀，但在其他碱性溶液中因氧化膜被破坏而容易被腐蚀。因此，铝的应用要注意环境条件，在某些环境中其应用受到限制。

1.2 炼铝方法的发展历程

炼铝方法的发展历程可以划分为化学法炼铝和电解法炼铝两个阶段。

1.2.1 化学法炼铝阶段

1746 年波特 (J. H. Pott) 从明矾中制取了纯的氧化铝。1807 年，英国的达维 (H. Davy) 试图用电解法从氧化铝中分离出金属铝，未获成功。1825 年，丹麦的奥尔斯德 (H. C. Oersted) 用化学法制取金属铝，他将 $AlCl_3$ 与钾汞齐反应，获得了铝汞齐，铝汞齐在真空条件下蒸馏分离，制得了金属铝。1827 年，德国的沃勒 (F. Wöhler) 通过加热钾和无水氯化铝的混合物得到了少量的灰色金属铝粉末；1845 年，他把氯化铝气体通过熔融的金属钾表面，得到了金属铝珠，并初步测定了铝的一些物理和化学性能。

1854 年，法国人戴维尔 (S. C. Deville) 采用钠代替比钠更为昂贵的钾作为还原剂，还原 $AlCl_3$ ，并于 1855 年实现商业化。戴维尔在改进该方法的过程中，在 $NaAlCl_4$ 熔剂里加入了氟化钙 (CaF_2) 和冰晶石 (Na_3AlF_6)，首次发现冰晶石能溶解金属铝表面的氧化膜。这一偶然的重大发现催生了后来的冰晶石-氧化铝熔盐电解生产铝的方法。美国的卡斯特纳 (Castner) 改进了金属钠还原 $NaAlCl_4$ 的生产方法，使化学法生产成本有所降低。到 1889 年，在英国伯明翰

附近的一家化学法生产金属铝的工厂里，产量规模达到了每天 500lb（约 226.8kg）。

以上这段时期为炼铝史的第一个阶段，即化学法炼铝阶段。化学法炼铝阶段共为人类贡献了约 200t 铝。

1.2.2 电解法炼铝阶段

最早开始采用电解法炼铝的是德国人本生（Bunsen）和法国人戴维尔，他们各自于 1854 年通过电解四氯铝钠熔盐（ NaAlCl_4 ）得到金属铝。但由于当时采用的蓄电池直流电源价格昂贵且无法获得大电流，而不能进行工业性电解实验。直到 1867 年，初始的工业铝电解法才得以实现，但成本仍很昂贵。

1878 年，大型直流发电机的发明为铝电解带来了新的曙光。

现代铝电解法的创立者，法国的埃鲁（L. T. Héroult）和美国的霍尔（C. M. Hall）于 1886 年各自独立申请并注册了在冰晶石熔体中电解氧化铝炼铝的专利，从此迎来了大规模的电解法——霍尔-埃鲁法（H-H 电解法）炼铝的新阶段。

拜耳（Bayer）法生产氧化铝方法的诞生以及水力发电技术的发展，为铝电解生产提供了较廉价的丰富的原料和能源，因而霍尔-埃鲁法如虎添翼。从此，拜耳法生产氧化铝和霍尔-埃鲁法生产铝雄霸世界铝工业 120 多年，至今没有任何可以取代它们的新工艺诞生。

120 多年来，霍尔-埃鲁法经历了不同发展阶段，主要体现在铝电解槽的不断改进和发展。

初期，采用小型预焙阳极电解槽，电流小、产量低、能耗高。

20 世纪 20 年代，受铁合金电炉上电极形式的启发，在铝电解槽上装备了连续自焙阳极，采取侧插棒导电方式。这种侧插自焙阳极电解槽很快在世界范围内得到了推广应用。40 年代，为了简化阳极操作和提高机械化程度，又发展了上插棒式自焙阳极电解槽。

与早期的小型预焙阳极电解槽相比，自焙阳极电解槽扩大了槽型规模，大大增加了单台设备产能，提高了电流效率，降低了能耗。但自焙槽仍有其固有弱点，首先是阳极自焙过程散发出的有害烟气，严重恶化劳动条件，污染环境；其次是阳极结构形成较高的阳极电压降，并限制了单台电解槽继续扩大产能。

20 世纪 50 年代中期，成功制造出高质量的大型预焙炭块，使早期的小型预焙槽得以大型化和现代化，铝电解从自焙槽又转向预焙槽，开启了预焙槽的新阶段（自焙槽容量一般都在 100kA 以下。为了区别于自焙槽以前的小型预焙槽以及在自焙槽基础上改造的容量小于 100kA 的预焙槽，在本书中将继自焙槽之后发展起来的容量在 100kA 以上的预焙槽称作大型预焙槽）。

近二十多年来，大容量中间点式下料预焙阳极电解槽的普及和不断改进，计算机技术在电解槽的电、热、磁、物流和应力等物理场模拟、设计和控制上的成功运用，熔盐物理化学及电化学理论的深入研究，多种新材料在电解槽上的成功采用，使铝电解在提高产能和劳动生产率、降低原材物料消耗、改善产品质量、减少能耗以及保护环境等诸多方面得到了飞速发展，迎来了现代大型预焙槽的新纪元。

随着槽型的发展和技术的进步，世界铝产量飞速增长。表 1-3 列举了世界铝产量逐年增长的情况。

表 1-3 世界铝产量逐年增长情况

年份	1890	1910	1930	1950	1970	1990	2000	2005	2006	2007	2008
产量/ $\text{kt} \cdot \text{a}^{-1}$	0.18	44.0	269.7	1506.9	10257	19000	24422	31895	33219	37400	38831