

“十一五”国家重点图书出版规划项目

AI 中国有色金属丛书 中国有色金属工业协会组织编写 铝电解 生产技术

刘风琴 主编

王 玉 副主编

Nonferrous Metals



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



“十一五”国家重点图书出版规划项目



铝电解生产技术

中国有色金属工业协会组织编写

刘风琴 主 编

王 玉 副主编



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

铝电解生产技术/刘风琴主编. —长沙:中南大学出版社,2010.12
ISBN 978-7-5487-0222-1

I. 铝... II. 刘... III. 氧化铝电解 IV. TF821.032.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 038235 号

-
- 责任编辑 史海燕
 责任印制 文桂武
 出版发行 中南大学出版社
社址:长沙市麓山南路 邮编:410083
发行科电话:0731-88876770 传真:0731-88710482
 印 装 国防科技大学印刷厂
-

- 开 本 787×1092 1/16 印张 11.25 字数 276 千字
 版 次 2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷
 书 号 ISBN 978-7-5487-0222-1
 定 价 45.00 元
-

中国有色金属丛书
CNMS 编委会

主任：

康 义 中国有色金属工业协会

常务副主任：

黄伯云 中南大学

副主任：

熊维平	中国铝业公司
罗 涛	中国有色矿业集团有限公司
李福利	中国五矿集团公司
李贻煌	江西铜业集团公司
杨志强	金川集团有限公司
韦江宏	铜陵有色金属集团控股有限公司
何仁春	湖南有色金属控股集团有限公司
董 英	云南冶金集团总公司
孙永贵	西部矿业股份有限公司
余德辉	中国电力投资集团公司
屠海令	北京有色金属研究总院
张水鉴	中金岭南有色金属股份有限公司
张学信	信发集团有限公司
宋作文	南山集团有限公司
雷 毅	云南锡业集团有限公司
黄晓平	陕西有色金属控股集团有限公司
王京彬	有色金属矿产地质调查中心
尚福山	中国有色金属工业协会
文献军	中国有色金属工业协会

委员(以姓氏笔划排序)：

马世光	中国有色金属工业协会加工工业分会
马宝平	中国有色金属工业协会铝业分会
王再云	中铝山东分公司
王吉位	中国有色金属工业协会再生金属分会
王华俊	中国有色金属工业协会
王向东	中国有色金属工业协会钛锆铪分会
王树琪	中条山有色金属集团有限公司

王海东
乐维宁
许健
刘同高
刘良先
刘柏禄
刘继军
李宁
李凤轶
李阳通
李沛兴
李旺兴
杨超
杨文浩
杨安国
杨龄益
吴跃武
吴锈铭
邱冠周
冷正旭
汪汉臣
宋玉芳
张麟
张创奇
张洪国
张洪恩
张培良
陆志方
陈成秀
武建强
周江
赵波
赵翠青
胡长平
钟卫佳
钟晓云
段玉贤
胥力
黄河
黄粮成
蒋开喜
傅少武
瞿向东

中南大学出版社
中铝国际沈阳铝镁设计研究院
中冶葫芦岛有色金属集团有限公司
厦门钨业集团有限公司
中国钨业协会
赣州有色冶金研究所
荏平华信铝业有限公司
兰州铝业股份有限公司
西南铝业(集团)有限责任公司
柳州华锡集团有限责任公司
白银有色金属股份有限公司
中铝郑州研究院
云南铜业(集团)有限公司
甘肃稀土集团有限责任公司
河南豫光金铅集团有限责任公司
锡矿山闪星锑业有限责任公司
洛阳有色金属加工设计研究院
中国有色金属工业协会镁业分会
中南大学
中铝山西分公司
宝钛集团有限公司
江西钨业集团有限公司
大冶有色金属有限公司
宁夏东方有色金属集团有限公司
中国有色金属工业协会
河南中孚实业股份有限公司
山东丛林集团有限公司
中国有色工程有限公司
厦门厦顺铝箔有限公司
中铝广西分公司
东北轻合金有限责任公司
中国有色金属工业协会
中国有色金属工业协会
中国有色金属工业协会
中铝洛阳铜业有限公司
江西稀有稀土金属钨业集团公司
洛阳栾川钼业集团有限责任公司
遵义钛厂
中电投宁夏青铜峡能源铝业集团有限公司
中铝国际贵阳铝镁设计研究院
北京矿冶研究总院
株洲冶炼集团有限责任公司
中铝广西分公司



中国有色金属丛书

NMS

学术委员会

主任：

王淀佐 院士 北京有色金属研究总院

常务副主任：

黄伯云 院士 中南大学

副主任(按姓氏笔划排序)：

于润沧	院士	中国有色工程有限公司
古德生	院士	中南大学
左铁镞	院士	北京工业大学
刘业翔	院士	中南大学
孙传尧	院士	北京矿冶研究院
李东英	院士	北京有色金属研究总院
邱定蕃	院士	北京矿冶研究院
何季麟	院士	宁夏东方有色金属集团有限公司
何继善	院士	中南大学
汪旭光	院士	北京矿冶研究院
张文海	院士	南昌有色冶金设计研究院
张国成	院士	北京有色金属研究总院
陈景	院士	昆明贵金属研究所
金展鹏	院士	中南大学
周廉	院士	西北有色金属研究院
钟掘	院士	中南大学
黄培云	院士	中南大学
曾苏民	院士	西南铝加工厂
戴永年	院士	昆明理工大学

委员(按姓氏笔划排序)：

卜长海	厦门厦顺铝箔有限公司
于家华	遵义钛厂
马保平	金堆城钼业集团有限公司
王辉	株洲冶炼集团有限责任公司
王斌	洛阳栾川钼业集团有限责任公司

王林生	赣州有色冶金研究所
尹晓辉	西南铝业(集团)有限责任公司
邓吉牛	西部矿业股份有限公司
吕新宇	东北轻合金有限责任公司
任必军	伊川电力集团
刘江浩	江西铜业集团公司
刘劲波	洛阳有色金属加工设计研究院
刘昌俊	中铝山东分公司
刘侦德	中金岭南有色金属股份有限公司
刘保伟	中铝广西分公司
刘海石	山东南山集团有限公司
刘祥民	中铝股份有限公司
许新强	中条山有色金属集团有限公司
苏家宏	柳州华锡集团有限责任公司
李宏磊	中铝洛阳铜业有限公司
李尚勇	金川集团有限公司
李金鹏	中铝国际沈阳铝镁设计研究院
李桂生	江西稀有稀土金属钨业集团公司
吴连成	青铜峡铝业集团有限公司
沈南山	云南铜业(集团)公司
张一宪	湖南有色金属控股集团有限公司
张占明	中铝山西分公司
张晓国	河南豫光金铅集团有限责任公司
邵武	铜陵有色金属(集团)公司
苗广礼	甘肃稀土集团有限责任公司
周基校	江西钨业集团有限公司
郑萧	中铝国际贵阳铝镁设计研究院
赵庆云	中铝郑州研究院
战凯	北京矿冶研究总院
钟景明	宁夏东方有色金属集团有限公司
俞德庆	云南冶金集团总公司
钱文连	厦门钨业集团有限公司
高顺	宝钛集团有限公司
高文翔	云南锡业集团有限责任公司
郭天立	中冶葫芦岛有色金属集团有限公司
梁学民	河南中孚实业股份有限公司
廖明	白银有色金属股份有限公司
翟保金	大冶有色金属有限公司
熊柏青	北京有色金属研究总院
颜学柏	陕西有色金属控股集团有限责任公司
戴云俊	锡矿山闪星锑业有限责任公司
黎云	中铝贵州分公司

总序



有色金属是重要的基础原材料，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，在保障国民经济建设和社会发展等方面发挥了不可或缺的作用。

改革开放以来，特别是新世纪以来，我国有色金属工业持续快速发展，已成为世界最大的有色金属生产国和消费国，产业整体实力显著增强，在国际同行业中的影响力日益提高。主要表现在：总产量和消费量持续快速增长，2008年，十种有色金属总产量2 520万吨，连续七年居世界第一，其中铜产量和消费量分别占世界的20%和24%；电解铝、铅、锌产量和消费量均占世界总量的30%以上。经济效益大幅提高，2008年，规模以上企业实现销售收入预计2.1万亿以上，实现利润预计800亿元以上。产业结构优化升级步伐加快，2005年已全部淘汰了落后的自焙铝电解槽；目前，铜、铅、锌先进冶炼技术产能占总产能的85%以上；铜、铝加工能力有较大改善。自主创新能力显著增强，自主研发的具有自主知识产权的350 kA、400 kA大型预焙电解槽技术处于世界铝工业先进水平，并已输出到国外；高精度内螺纹铜管、高档铝合金建筑型材及时速350 km高速列车用铝材不仅满足了国内需求，已大量出口到发达国家和地区。国内矿山新一轮找矿和境外矿产资源开发取得了突破性进展，现有9大矿区的边部和深部找矿成效显著，一批有实力的大型企业集团在海外资源开发和收购重组境外矿山企业方面迈出了实质性步伐，有效增强了矿产资源的保障能力。

2008年9月份以来，我国有色金属工业受到了国际金融危机的严重冲击，产品价格暴跌，市场需求萎缩，生产增幅大幅回落，企业利润急剧下降，部分行业

已出现亏损。纵观整体形势，我国有色金属工业仍处在重要机遇期，挑战和机遇并存，长期发展向好的趋势没有改变。今后一个时期，我国有色金属工业发展以控制总量、淘汰落后、技术改造、企业重组、充分利用境内外两种资源，提高资源保障能力为重点，推动产业结构调整和优化升级，促进有色金属工业可持续发展。

实现有色金属工业持续发展，必须依靠科技进步，关键在人才。为了提高劳动者素质，培养一大批高水平的科技创新人才和高技能的技术工人，由中国有色金属工业协会牵头，组织中南大学出版社及有关企业、科研院校数百名有经验的专家学者、工程技术人员，编写了《中国有色金属丛书》。《丛书》内容丰富，专业齐全，科学系统，实用性强，是一套好教材，也可作为企业管理人员和相关专业大学生的参考书。经过编写、编辑、出版人员的艰辛努力，《丛书》即将陆续与广大读者见面。相信它一定会为培养我国有色金属行业高素质人才，提高科技水平，实现产业振兴发挥积极作用。

康莉

2009年3月

前 言

2010年我国原铝总产量1620万t,是全球第一原铝生产大国。铝电解工业的快速发展,极大地促进了我国铝电解的技术进步。20世纪90年代,由郑州轻金属研究院、贵阳铝镁设计研究院和沈阳铝镁设计研究院共同研发成功的280kA大型预焙槽,树立了我国铝电解工业现代大型预焙电解槽技术新的里程碑。1996年至今,我国铝电解行业在不断淘汰落后产能,新建和改扩建的电解铝工程全部采用200kA、300kA、350kA、400kA等现代化大型预焙阳极铝电解槽成套技术与装备。

大型预焙铝电解槽的生产管理、操作技术与小型预焙铝电解槽有很大不同,多项新技术、新工艺、新材料的应用要求生产技术管理人员、车间操作人员要了解、掌握大型预焙电解槽生产运行的特征。只有培养一大批高素质的技术骨干,才能提升我国铝电解工业的技术水平。按照丛书的编写要求,本书较全面系统地介绍了现代铝电解生产技术,主要内容包括:铝电解基础知识;铝电解槽的预热和启动;铝电解槽的生产技术;铝电解的电流效率和电能效率;原铝铸造;铝电解生产中的常规测量等。本书尽可能追踪铝电解技术的最新发展趋势,总结了我国铝电解工业近十年的重大技术成果,特别是近几年的铝电解节能技术,力求理论与实践紧密结合,叙述深入浅出,通俗易懂。

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。

本书由中铝郑州研究院刘凤琴主编,王玉副主编。中铝郑州研究院的姜治安、赵无畏、侯光辉、罗丽芬、张艳丽、焦庆国、杨宏杰,贵阳铝镁设计研究院的代国才、易小兵同志参加了编写工作。所有编者都利用自己的业余时间,完成了文稿的编写工作,在此,表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,错漏之处敬请读者给予批评指正。

编 者

目 录



第 1 章 铝电解生产概述	1
1.1 铝的性质及用途	1
1.2 铝工业发展简史	2
1.3 铝电解生产工艺流程	3
1.4 铝电解原材料及要求	4
1.5 世界铝电解工业技术现状	7
第 2 章 铝电解的基本理论	10
2.1 电解质熔体结构	10
2.2 电解质的组成及性质	13
2.3 电解质的添加剂	25
2.4 铝电解过程的两极反应	26
2.5 铝电解槽的槽电压组成	32
第 3 章 铝电解槽	38
3.1 铝电解槽槽型的发展	38
3.2 铝电解车间概况及主要设备	39
3.3 预焙阳极电解槽结构	40
第 4 章 铝电解槽的预热和启动	47
4.1 铝电解槽预热方法概述	47
4.2 铝电解槽的启动	51
4.3 非正常期的生产管理	52
4.4 铝电解槽的二次预热启动	56
第 5 章 铝电解槽的生产技术	58
5.1 正常生产的技术参数	58
5.2 电解槽的主要操作	63

5.3	正常生产管理	69
5.4	病槽及防治	77
5.5	阴极内衬破损及维护	83
5.6	电解槽生产运行的改进	89
第6章	铝电解的电流效率	93
6.1	电流效率的基本概念	93
6.2	电流效率降低的原因	95
6.3	提高电流效率的途径	97
6.4	电流效率的测定	100
第7章	铝电解的电效率	104
7.1	电效率的基本概念	104
7.2	铝电解槽的电压分配和能量平衡	106
7.3	降低电能消耗的途径	111
第8章	原铝铸造	116
8.1	概述	116
8.2	原铝铸造的工艺流程	116
8.3	原铝的净化	117
8.4	原铝配料	117
8.5	铸造车间主要设备	117
8.6	铸造车间安全操作规程	124
第9章	铝电解生产中的常规测量	126
9.1	阳、阴极电流分布测量	126
9.2	铝液、电解质高度的测量	128
9.3	电解质温度、初晶温度和过热度的测量	128
9.4	炉底压降的测量	129
9.5	残极形状的测量	129
9.6	炉底隆起的测量	130
9.7	槽膛形状的测量	131
9.8	极上保温料的测量	132
9.9	极距测定	132

第 10 章 氧化铝输送和烟气净化系统	134
10.1 氧化铝输送	134
10.2 烟气净化	141
10.3 电解车间空气质量的测定	150
第 11 章 铝电解工业技术的发展方向	151
11.1 新型导流结构电解槽节能技术	151
11.2 铝电解槽的大型化	153
11.3 惰性阳极技术	156
11.4 新型铝电解电极材料应用技术	157
11.5 铝电解槽控制技术	159
11.6 新法炼铝技术	160
附录 300 kA 预焙槽的物料平衡和能量平衡计算	162
参考文献	165

第1章 铝电解生产概述

1.1 铝的性质及用途

1.1.1 铝的性质

铝是一种银白色的轻金属，位列元素周期表第三周期ⅢA族，原子序数13，原子量26.9814，其主要特性如下：

(1) 熔点低。铝的熔点与纯度有密切关系，纯度99.996%的铝熔点为660℃。

(2) 沸点高。液态铝的蒸气压不高，沸点为2467℃。

(3) 密度小。铝的密度只有钢的1/3，常温下工业纯铝的密度为2.70~2.71 g/cm³，随温度升高，铝的密度随之降低，在950℃时铝液的密度为2.303 g/cm³。

(4) 电阻率小。纯度为99%~99.5%的铝电阻率为 $(2.80 \sim 2.85) \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ，在常用金属中铝的导电性仅次于银和铜居第三位。铝中添加其他元素，都会增大铝的电阻率。固体和液体铝的电阻率均随温度降低而减小，靠近0 K时，铝的电阻率接近零。

(5) 铝具有良好的导热能力。铝的导热性能差不多是不锈钢的十倍，在20℃时，铝的热导率为2.1 W/(cm·℃)。

(6) 铝具有良好的反光性能，特别是对于波长为0.2~12 μm的光线。

(7) 铝没有磁性，不产生附加的磁场，所以在精密仪器中不会起干扰作用。

(8) 铝易于加工，可用一般的方法把铝切割、焊接或黏接，铝易于压延和拉丝。铝的再生利用率高，易与多种金属构成合金。

(9) 铝具有良好的防腐蚀性，铝表面在空气中和氧易结合成一层牢固的氧化铝薄膜，这层氧化铝薄膜是连续的、无孔的，阻止了铝的进一步氧化，提高了铝的抗氧化和抗腐蚀能力。

(10) 铝没有毒性，可以用作食品包装。

(11) 铝再生循环利用率高，是一种节能储能绿色环保型金属。

1.1.2 铝的用途

由于铝具有质轻、良好的导热性和导电性、可加工性以及构成高强度、耐腐蚀性的合金和可再生循环利用等优良的性能，因而铝成为有色金属中应用最广泛的金属，是仅次于钢铁的第二大金属。铝工业现在是世界上最大的电化学冶金工业，铝的产量在金属中仅次于钢铁，居有色金属之首。它的应用主要表现在下面几个方面。

(1) 轻型结构材料

因铝及其合金质轻，机械性能好，易加工，所以已成为当今制造各种交通运输工具的不可缺少的结构材料。近年来汽车工业用材料要求向体形小、质量轻的方向发展，所以用铝量

不断增加。每千克铝材可代替 2.2 kg 钢材，这样就大大减轻了车体的质量，这对节约燃料是非常有利的。另外，火车车厢、轮船船体等也都采用大量的铝材。此外，国防工业、宇宙航空航天工业的用铝量也在日益增长。

(2) 建筑工业材料

铝材已在建筑方面得到广泛的应用。它的应用主要是用铝合金型材制作房屋的结构架和门窗柜橱一类的设施，以此代木，经久耐用，美观大方。

(3) 电气工业材料

因铝质轻、导电又好，所以铝在电力输配、器件制造等方面已成为制造电线、电缆、电容器、整流器、母线以及无线电器材的主要材料。

(4) 耐腐蚀材料

由于铝表面有一层很坚硬、致密的氧化铝薄膜，所以它有很好的耐腐蚀性。在化学工业上常用铝及其合金制造各种反应器、储槽和管道等。

(5) 食品包装材料

因铝是无毒性的金属材料，所以在食品包装方面也得到了广泛应用。目前以大型的仓库储槽、容缸到小型的食品罐头盒子及零用包装铝箔都有铝的应用。同时，它还是人们日常生活中常用炊具和一些装饰品的主要原材料。

1.2 铝工业发展简史

铝在地壳中的含量高达 8%，几乎占地壳中全部金属总量的三分之一。金属铝最初用化学法制取。1825 年，丹麦化学家奥斯特 (H. C. Oersted) 用钾汞齐还原无水氯化铝，得到一种灰色的金属粉末，在研磨时呈现金属光泽，这是人类首次得到金属铝。

1854 年，法国德维尔 (Deville) 用钠代替钾还原 $\text{NaCl} - \text{AlCl}_3$ 配合盐，制取金属铝。1855 年，在巴黎附近建成了世界上第一座炼铝厂。1865 年，俄国别开托夫 (Бекетов) 提议用镁还原冰晶石来生产铝。这一方案后来在德国 Gmelingen 铝镁工厂里被采用。

在采用化学法炼铝期间，1854 年德国本生 (Bunsen) 和法国德维尔 (Deville) 继英国戴维 (Davy) 之后研究电解法炼铝，试验了各种以冰晶石为基础的混合熔盐与氧化铝的电解法。但那时的试验是用蓄电池作为电源，不能获得较大的电流，而且价格很贵，因此电解法不能做工业性的试验。直到 1867 年发明了发电机，并在 1880 年加以改进之后，实现了三相交流输电，这才给实现工业性的电解法炼铝提供了前提条件。

1883 年，美国 Bradley 提出利用氧化铝可溶于熔融冰晶石的特性来电解冰晶石 - 氧化铝熔盐的方案，但未获得专利。1886 年美国霍尔 (Hall) 和法国埃鲁 (Heroult) 通过实验不约而同地申请了冰晶石 - 氧化铝熔盐电解法炼铝的专利，获得批准。这就是历来所称的 Hall - Heroult (霍尔 - 埃鲁) 法，简称 H - H 法。电解法原理就是将氧化铝溶解在熔融的冰晶石电解质中，通入直流电，进行电化学反应得到金属铝。

1888 年，美国匹兹堡电解厂开始用冰晶石 - 氧化铝熔盐电解法炼铝。瑞士冶炼公司也在同时采用该法炼铝。与化学法相比，电解法成本比较低，而且产品质量好，故沿用至今。电解法早期采用小型预焙电解槽，1923 年侧插阳极棒自焙阳极电解槽发明后，电解槽的电解容量增大，生产指标随之好转，促进了铝工业的发展，1952 年上插阳极棒连续自焙阳极电解槽

系列投产并取得良好的生产指标。1954年我国抚顺铝厂投产,采用当时前苏联设计的60 kA侧插阳极棒自焙阳极电解槽,年产铝2.5万t。

现代铝电解槽正向大型化发展,电解槽由20世纪70年代的10万A发展到现在的35~50万A,随着计算机技术在电解槽上的应用,各项经济技术指标大大提高。目前,法国有6台电流强度达500 kA的电解槽在进行工业应用试验。我国第一个500 kA系列的288台电解槽于2011年在甘肃连城建成、投产。

除此法外,世界各国科学家也一直在研究许多的炼铝新方法,如:电热法炼铝、氯化铝电解法、矿石直接炼铝法、高炉炼铝法、锰还原法、惰性阳极和可湿润阴极电解槽等。这些新工艺新方法有待进一步的研究完善和工业性的试验。

1.3 铝电解生产工艺流程

现代铝电解生产流程如图1-1所示。铝电解生产主要采取冰晶石-氧化铝熔盐电解法,采用炭素阳极和炭素阴极。直流电通入电解槽,在阴极和阳极上起电化学反应。电解产物在阴极上是铝液,阳极上是 CO_2 和CO气体。铝液用真空抬包抽出,经过净化和澄清之后,浇铸成商品铝锭,其质量达到99.5%~99.8% Al。阳极气体中含有70%~80% CO_2 和20%~30% CO,还含有少量氟化物和 SO_2 等气固混合物,经过净化之后,废气排放入大气,收回的固体氟化物返回电解槽。现代铝电解槽系列配置如图1-2所示。

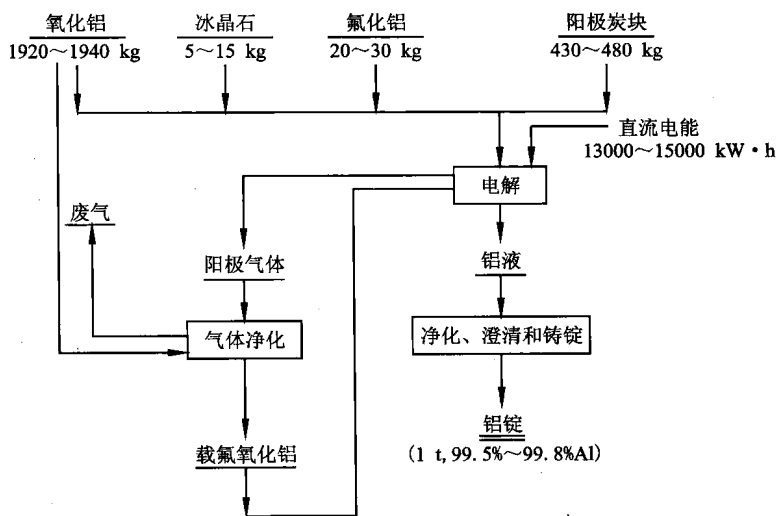


图1-1 铝电解生产流程简图

为了减少铝工业温室气体的排放,全球铝工业也致力于研制惰性阳极和惰性阴极等铝电解新工艺,一旦成功,将在节能减排上取得新进展。

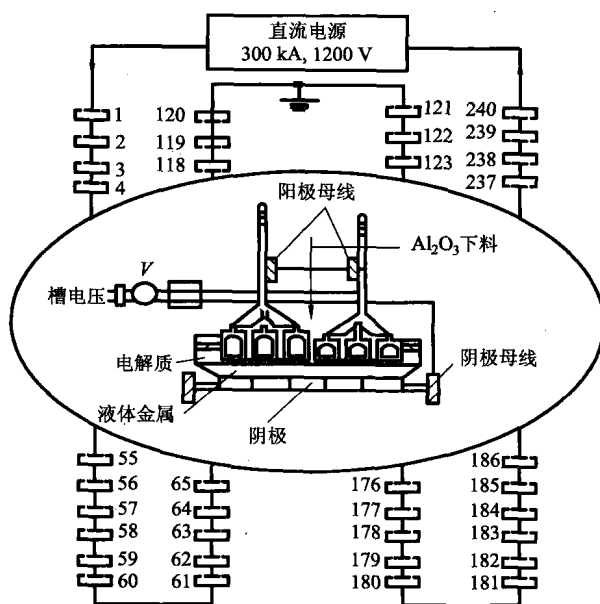


图 1-2 铝电解槽系列配置图

1.4 铝电解原材料及要求

铝电解生产所需用的原材料大致分三类：原料——氧化铝；熔剂——氟化盐（包括冰晶石、氟化铝、氟化钠、氟化镁、氟化钙和氟化锂等）；预焙阳极炭块或炭糊。

1.4.1 原料——氧化铝

氧化铝是当前冰晶石-氧化铝熔盐电解法的唯一原料，是由矿石中提炼出来的有一定粒度要求的白色粉料，流动性很好，不溶于水，能溶解在熔融的冰晶石中，熔点 2050°C ，真密度 $3.5 \sim 3.6 \text{ g/cm}^3$ ，体积密度 1.0 g/cm^3 。氧化铝有 7 种晶型，最常见的是 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ，又称刚玉型氧化铝。它主要是不断的补充电解质中的铝氧氟配合离子，使其保持一定范围的浓度，以保证电解的持续进行。为了取得良好的生产指标，对氧化铝的要求是非常严格的，主要体现在化学纯度和物理性能上。

(1) 化学纯度

工业氧化铝通常含有 98.5% 的氧化铝以及二氧化硅、三氧化二铁、二氧化钛、氧化钠、氧化钙和水等少量杂质。在电解过程中，那些电位比铝正的元素的氧化物杂质，如二氧化硅、三氧化二铁都会优先还原，还原出来的 Si 和 Fe 等杂质进入铝内，从而使铝的品位降低，且降低电流效率；而那些电位比铝负的元素氧化物杂质，如氧化钠、氧化钙会分解冰晶石，使电解质组成发生改变并增加氟盐消耗量。水分会分解冰晶石，不仅产生氟化氢气体，还会增加铝液中的氢含量。 P_2O_5 等高价氧化物杂质则会降低电流效率。所以铝工业对于氧化铝的纯度提出了严格的要求。