

分类号

密级

UDC

编号

中南大學

CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

工程硕士学位论文

论文题目 230kA 电解槽焙烧启动与
生产工艺技术条件的优化

学科、专业 冶金工程

研究生姓名 华桂林

导师姓名及

专业技术职务 李 勘 教授

摘要

大型预焙铝电解槽节能降耗和焙烧启动技术一直是国内外铝电解生产管理和科技工作者关注的重点。作者通过多年铝电解理论和实践经验的积累，以 230kA 铝电解槽的焙烧启动和生产技术条件为研究对象，从众多角度对铝电解槽焙烧启动和铝电解生产过程的相关技术条件进行了优化研究，获得了如下研究成果。

1、通过对生产现场的铝电解槽原焙烧启动方案的剖析，发现了其存在的不足，并提出改进的被烧启动方法。生产实践证明，采用改进的焦粒焙烧启动新方法，可以使电解槽的阴阳极电流分布更加均匀，升温速度更加合理，槽温分布更均匀，从而避免了电解槽局部过热的现象；此外，采用新的焙烧启动方法可以使扎固糊焦化良好，从而有效延长电解槽的寿命，降低吨铝生产成本。

2、根据生产现场电解槽电流效率低的状况，从电解质温度、分子比、氧化铝浓度、阳极效应系数、极距、槽电压、电解质水平以及铝水平等方面对电解工艺技术条件进行了全面优化。生产统计结果表明，优化后的电解槽与对比槽相比，电流效率提高了 0.45%。系列电流效率达到了 92.75%。

3、改进的焙烧启动技术和优化工艺条件的实施，加上后期的科学管理，为系列电解槽平稳运行打下了良好的基础，一年的综合考核结果表明，技术改进后的电解槽不仅获得了高效低耗运行，同时也降低了工人的劳动强度，更有利延长电解槽的使用寿命。

关键词：铝电解槽 焙烧启动 工艺技术 优化

Abstract

Energy saving , consumption reducing and baking start-up technology in large-scale pre-baked aluminum electrolysis cell have been being come to attention by producing managers and academicians. In this article, according to many year's accumulation in aluminum electrolysis theory and practice, the author selected 230kA pre-baked cell as study object, baking start-up of electrolysis cell and producing-related technology in process of aluminum electrolysis were optimized, and some research results were as follow.

Firstly, after having analyzed primary baking start-up way in producing locale, some disadvantages were discovered, and improved way was put forward. The producing practice has proved, after improved coke-powder baking start-up technology was applied, the current distribution of cathode and temperature distribution of cell were more symmetrical, the temperature rising rate was more reasonable , and the part superheating of cell was avoided accordingly, moreover, the bottom paste could coke better after improved technology was applied, so the electrolysis cells' life was prolong, and the produce cost was reduced.

Secondly, according to the statue of low current efficiency, the electrolyte temperature, the molecule ratio, the concentration of alumina, the anode effect coefficient, the electrode distance, the cell pressure, the electrolyte and aluminum level were all optimized. The producing results showed, which comparing with contract cells, the current efficiency of optimized cells has enhanced 0.45 percent and arrived to 92.75 percent.

Thirdly, the improved baking start-up and technics conditions were put in practice for one year, as well as plus scientific manage, the composite examine results showed, since the optimized technology was

applied, high current efficiency was obtained, the worker' laboring intension was debased. Moreover, the cells' life was prolong.

Key words: aluminum electrolysis cell, baking start-up, producing technics, optimi.

目 录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
第一章 文献综述.....	1
1.1 铝电解发展历史	1
1.1.1 金属铝及其用途	1
1.1.2 熔盐电解铝技术的历史与发展	1
1.2 现代铝电解技术的基本原理	2
1.3 现代铝电解生产基本工艺流程.....	4
1.4 铝电解槽及电解槽系列.....	5
1.4.1 铝电解槽槽型结构剖析	5
1.4.2 现代铝电解槽结构发展趋势	7
1.5 现代铝电解槽焙烧启动技术.....	8
1.5.1 焙烧的目的和过程分析	8
1.5.2 电解槽启动技术	9
1.6 本课题研究的目的和意义.....	10
第二章 230KA 大型预焙槽焙烧启动优化技术实践研究	11
2.1 概述	11
2.2 230KA 预焙电解槽主要技术特点及工艺参数 ^[5]	11
2.3 原焙烧启动方法的剖析	12
2.3.1 原焙烧启动方法的选择	12
2.3.2 原焙烧启动方法的实施 ^[7, 8]	13
2.3.3 原焙烧启动方法存在的问题	14
2.4 焙烧启动技术方案的优化	15
2.4.1 230kA 预焙阳极电解槽焦粒焙烧启动技术要点分析.....	15
2.4.2 230kA 预焙阳极电解槽焦粒焙烧启动优化措施研究.....	19
2.5 焙烧启动优化技术实施效果评价	23
2.5.1 214#和 319#槽焙烧启动优化效果评价.....	23
2.5.2 412#槽焙烧启动优化效果评价	27
2.6 本章小结	31
第三章 230KA 预焙槽电解生产技术综合优化研究	32

3.1 概述	32
3.2 230kA 预焙槽原有的生产技术参数及问题剖析.....	32
3.3 230kA 预焙槽生产技术条件优化匹配研究.....	33
3.3.1 电解温度.....	33
3.3.2 分子比.....	34
3.3.3 氧化铝浓度	36
3.3.4 阳极效应系数	37
3.3.5 极距和槽工作电压	38
3.3.6 电解质水平	39
3.3.7 铝水平	39
3.3.8 其它条件的优化	40
3.4 本章小结	41
第四章 结论与展望.....	42
参考文献.....	43
致 谢.....	45

第一章 文献综述

1.1 铝电解发展历史

1.1.1 金属铝及其用途

铝在自然界中分布极广，其资源丰富，在地壳中的平均含量为 7.47%，仅次于氧与硅，居第三位。此外，铝是一种可回收性很高的金属，在工业用的结构金属材料中，铝废料的可回收性是最强的。建筑铝门窗、废旧汽车铝件等在使用几年或几十年后，几乎没有腐蚀损耗，经熔炼后金属实收率可达 92%~96%，在某种程度上可以说是一种“可再生的”资源，是一种“取之不尽”的资源^[1-2]。

宇宙飞船，飞机，船舶，火车及其它运输设备的制造、房屋、桥梁及构架建筑、电缆、电器、雷达各种轻、重型机械和精密仪表的制造，稀有金属冶炼等等，都需要使用铝或铝合金。铝用在电气工业上制造高压电线、导电板、电缆、电器及各种电工制品，可以显著地节约投资。铝的导热性能好，广泛用来制造散热器，冷气设备、热交换器，电热器具和饮具等。利用纯铝的耐腐蚀性良好这一性质，石油化工工业常用铝及铝合金制作各种耐腐蚀性的设备和储运用容器。铝还具有良好的光和热的反射能力，表面抛光后，能制作质量高的反光镜，又能作保温材料。铝在撞击情况下不产生火花，故在易燃、易爆的要害部门的某些重要机构和零件常用铝制造。铝粉的用途也很广，粗铝粉是炼钢的脱氧剂，也是铝热法的主要原料。可用它还原铬、锰、钨、钡、钙、锂等难还原的金属。细铝粉主要用作颜料、焰火及泡沫铝等。食品包装方面，广泛用铝作饮料罐、罐头盒子等。

在铝中加入相应的元素可制成各种铝合金。铝主要是以加工材料的形式进入消费市场的。目前，世界原铝总产量的 70% 左右被加工成加工材。由于铝材具有一系列优良的物理，化学性能和综合使用性能，除航空，航天等军事工业大量需要外，其应用范围已经渗透到几乎所有的工业部门和人们的日常生活用品中，成为国民经济，国防建设等领域的重要金属材料。

1.1.2 熔盐电解铝技术的历史与发展

有关铝的文字记录最早出现于公元一世纪罗马作家盖斯·普利纽斯（Gaius Plinius）的论文集。但是准确的说，铝的问世应是 1825 年。至今虽然为时不长，但铝冶金发展较快，它的发展过程大致可分为三个阶段^[3]：

最初是化学法炼铝阶段，1825 年德国人韦勒(F.wohler)先用钾汞齐，后来用

钾还原无水氯化铝制得金属铝，1845 年法国人戴维尔(H .S .Deville)用钠还原 $\text{NaCl} \cdot \text{AlCl}_3$ 混合盐也得到金属铝，并在法国进行小规模生产，随后罗西和别凯托夫分别用钠和镁还原冰晶石炼铝成功，用此方法建厂炼铝，应用化学法炼出的金属铝总共约 200 吨。

1886 年美国霍尔(Hall)和法国埃鲁特(Heroult)不约而同地提出了利用冰晶石-氧化铝熔盐电解法炼铝的专利，称为霍尔-埃鲁特法，开创了电解法炼铝阶段。霍尔-埃鲁特法沿用至今，已有一百多年的历史。1883 年美国匹兹堡建立了第一家电解铝厂，从此铝的生产进入一个新的阶段。以后世界各国相继采用冰晶石-氧化铝熔盐电解法炼铝。法国始于 1889 年，英国 1890 年，德国 1878 年，奥地利 1899 年，挪威 1906 年，意大利 1907 年，西班牙 1927 年，苏联 1931 年。

1888 年，美国匹兹堡电解厂开始采用冰晶石-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。以后其它各国相继采用该法炼铝。最初是采用小型预焙电解槽，本世纪初叶出现了小型侧部导电的自焙阳极电解槽，电解槽的容量（电流强度）也逐渐由最初的 2kA 发展到 50kA 或更高，本世纪四十年代出现了上部侧电的自焙阳极电解槽。

五十年代以后，大型预焙阳极电解槽的出现，使电解炼铝技术迈向了向大型化、现代化发展的新阶段，电解槽的容量已发展到 300kA 以上，电解槽的设计、安装、操作控制都建立在现代技术的基础上。电解炼铝虽然仍旧是建立在霍尔-埃鲁特冰晶石-氧化铝熔盐电解的基础上，但是无论是理论还是工艺上都取得了长足的进步，并且在继续向前发展。

由于近 20 年来现代科学技术的飞速发展，使人们对铝电解过程有了更深入的认识。特别是计算机技术的发展及在电解铝工艺上的应用，为电解槽建立起热、电、磁力和流动等物理场的各种数学模型，使槽型设计更科学化和生产过程控制更自动化，其主要表现在电解槽容量大型化、高效化、技术经济指标和劳动生产率提高，槽寿命延长和环保条件改善等方面。代表世界先进潮流的 300kA 以上的高效大型预焙槽，就是在上述科技进步的基础上开发研制的。

当前，世界各国正在竞相发展大型中间下料预焙阳极电解槽，此种预焙槽并不是简单的重复，而是向大型化、大电流、自动下料、自动处理阳极效应、电子计算机控制生产的具有当前先进科学技术水平的现代化新槽型方向发展。

1.2 现代铝电解技术的基本原理

轻金属通常是指比重小于 3.5(钡的比重)的金属，其中包括铝、镁铍和碱金属及碱土金属。它们除了比重小以外，与氧、卤族元素、硫和碳的化合物都非常稳

定，在电化次序表上，都是负电性很强的元素。

轻金属的这些性质使得用碳直接还原其氧化成金属的过程很困难。碳在高温下还原氧化铝，反应的一次产物是铝的碳氧化物，而不是金属铝或碳化铝，从而碳还原氧化铝是很难制得金属铝的。碳还原氧化镁在高温下虽然可以得到镁蒸气，但反应中镁的平衡蒸气压远低于该温度下镁的饱和蒸气压。只有将反应物迅速冷却，使镁的饱和蒸气压急剧降低到反应所得的镁蒸气压力之下；或者是在高温下立即将反应产出的 CO 与镁蒸气分离开来，才有可能使镁成为金属产出。前一种做法难度很大并且很不安全，后一种做法则是根本不可能的。碱金属和碱土金属也都与镁相似，不适于采用碳热还原方法制取，而只能以沸点更高的金属为还原剂，由金属热还原法来制取。

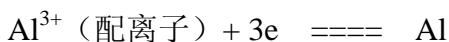
轻金属的负电性都很强，通过电解其盐类的水溶液的方法来制取金属是不能如愿以偿。因为这时阴极析出的是氢氧化物，阳极析出的则是氧。也就是电解的只是谁而已。所以只有用非水溶液电解质才能电解得到轻金属，这样的电解质主要是熔盐。轻金属的某些有机物也可以用作电解质。但熔盐电解实际上是生产各种轻金属的主要的，有时甚至是唯一的工业方法。

铝电解基本原理就是熔体中各种离子在阴、阳两极上的电化学行为。

(1) 阴极过程

$\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-Al}_2\text{O}_3$ 熔体中 Na^+ 是电流的主要传递者，所传输的电流达到总数的 99%。在单一熔盐电解过程中，传输电流的离子往往就是在电极上放电的离子。但是在复杂的熔盐体系中，如 $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-Al}_2\text{O}_3$ 熔体究竟是何种离子放电，则要根据它们的电极电位来确定。在其他条件相等时阳离子电位愈正，则在阴极上放电的可能性愈大，反之亦然。因此，在复杂的熔盐体系电解过程中，可能出现某种离子传递大部分电流，而在电极上放电的却是另外的离子的现象。

在冰晶石-氧化铝熔体中，已经证实在 1000℃左右，纯钠的平衡析出电位比纯铝的约负 250mV。同时根据研究表明，在阴极上离子放电时，并不存在很大的过电压（铝析出时的过电压约 10-100mV）。因此阴极上析出的金属主要是铝，即铝是一次阴极产物。阴极反应是：



$\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-Al}_2\text{O}_3$ 熔体中并不存在单独的 Al^{3+} ，铝是包含在铝氧氟配离子中。因此， Al^{3+} 的放电之前首先发生含铝配离子的解离，但也不排斥配离子直接放电的可能性。

然而， $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-Al}_2\text{O}_3$ 熔体中钠和铝析出电位的差值并非一成不变，而是随着电解质摩尔比的增大、温度的升高、 Al_2O_3 浓度的减少以及阴极电流密度的提高而缩小的。当两者电位差降低到接近于零时，钠离子就有可能同铝离子一同

放电，造成电流效率的损失。

为保证铝的一次反应充分进行，宜采用酸性电解质体系，在较低的温度下电解，并维持尽可能大的 Al_2O_3 浓度。此外槽内还必须具备良好的传质条件，防止 Na^+ 在阴极上大量积聚。

(2) 阳极过程

$\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-Al}_2\text{O}_3$ 熔体电解过程是比较复杂的。这是由于阳极与阴极不同，炭阳极本身也参与电化学反应。铝电解时的阳极过程是配位阴离子中的氧离子在炭阳极上放电析出 O_2 ，然后与炭阳极反应生成 CO_2 的。



因此，一次阳极产物应该是 CO_2 气体。金诗伯和弗里格在阳极室用隔板隔开的电解槽上的试验结果表明，除了电流密度很低 ($< 0.06\text{A/cm}^2$) 的情况外，阳极气体几乎都是纯 CO_2 。但是，工业槽上的阳极气体总是含有 20-30% 的 CO ，这是由于炭渣的存在，或 CO_2 气体渗入阳极孔隙中以及溶解在电解质中的铝再氧化反应所致。

1.3 现代铝电解生产基本工艺流程

现代铝电解工业生产铝，主要采用冰晶石-氧化铝熔盐电解法。其主体设备是电解槽，电解法原理为，直流电通入电解槽，在阳极和阴极上起电化学反应，电解产物在阴极上析出铝，阳极上是 CO_2 (约 75-80%) 和 CO (约 20-25%)。电解槽内，电解质通常由冰晶石、氧化铝和添加剂组成，电解温度为 $950\text{-}970^\circ\text{C}$ ，密度为 2.1g/cm^3 ，铝液密度为 2.3g/cm^3 ，二者因密度差别而分为上下层，铝液用真空抬包抽出，经过净化、澄清和配料之后，浇铸成商品铝锭。其纯度可达含铝量 99.5-99.8%。阳极气体中含有少量有害的氟化物和沥青烟气，经净化后，废气排入大气，收回的载氟氧化铝返回电解槽。铝电解的工艺流程如图 1-1。

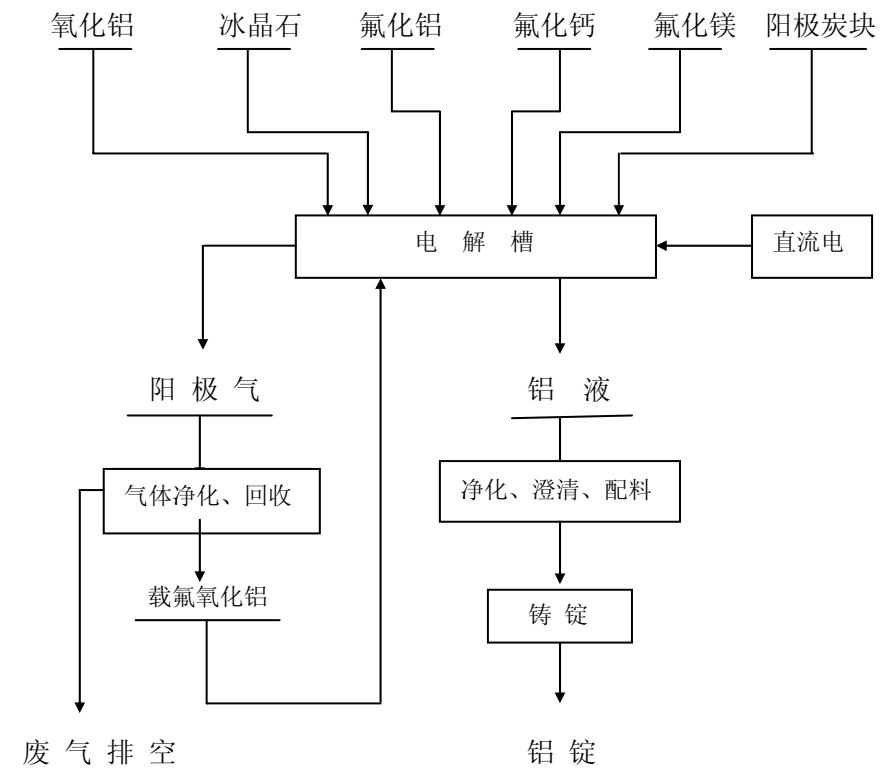


图 1-1 现代电解炼铝流程图

1.4 铝电解槽及电解槽系列

1.4.1 铝电解槽槽型结构剖析

在铝工业初期，曾采用 4000~8000A 小型电解槽^[4]，其每昼夜的铝产量不过 24~28kg，目前大型电解槽的电流强度已达到 28 万~40 万安，每昼夜的铝产量可达 2030~2900kg。铝电解的电流效率，在铝工业生产初期低于 80%，目前一般达到 90%，有的达到 94%。

电解槽电流强度的持续加大，显然与整流设备的更新、电极生产的改进、电解槽设计及采用计算机控制生产操作密切相关。铝工业初期，曾采用小型直流发电机，电流只有数千安培。后来，改用了水银整流器，现代普遍采用了大功率高效率的硅整流器组，系列电流强度因此增加到 30 万 A，整流效率达到 95%~98%。

此外，在铝工业生产初期，电解槽曾采用小型预焙阳极，这跟当时电极工业的生产状况相适应。后来，在本世纪初(1909 年)生产铁合金的电弧炉上出现了连续自焙阳极，铝工业从 20 年代开始也采用了这种电极作为阳极，这就是侧插棒

式自焙阳极。随后，为了扩大阳极尺寸和简化阳极操作，在 40 年代有发展了上插棒式自焙阳极。自焙阳极的采用，标志着铝电解槽结构形式发展的第二个阶段。但是，由于自焙阳极的电耗较高，并且因为电极工业的高度机械化可制造大型预焙炭块，所以从 50 年代中期开始有了两项重大的改进，这就是改造了小型预焙阳极电解槽，使之成为现代化的大型预焙阳极电解槽，与此同时还试验并采用了连续预焙阳极。预焙阳极电解槽的现代化是铝电解槽发展的第三个阶段。现代铝工业共有两类、共四种形式的电解槽。

自焙阳极电解槽：侧插棒式和上插棒式；预焙阳极电解槽：不连续式和连续式

下图 1-2, 1-3, 1-4, 1-5 分别为上述 4 种形式铝电解槽的示意图。

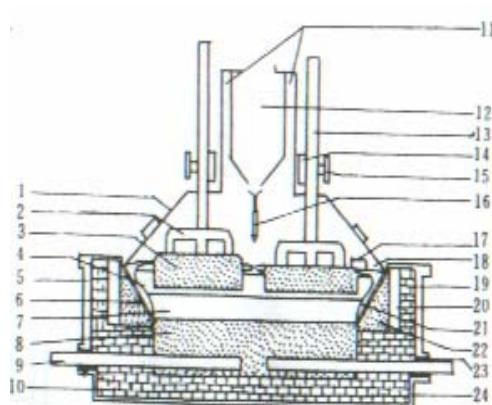


图 1-2 预焙阳极电解槽简图

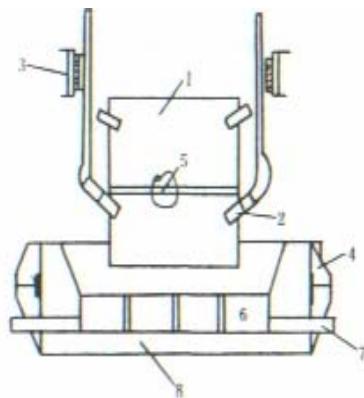


图 1-3 连续式预焙阳极电解槽简图

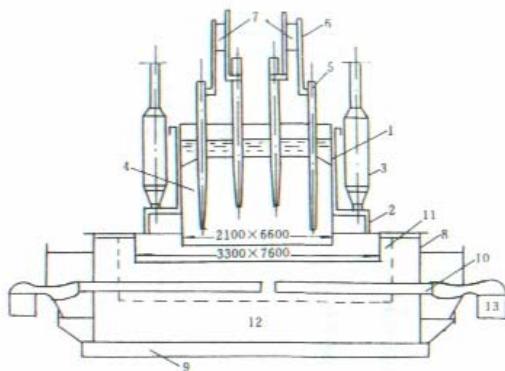


图 1-4 自焙阳极上插棒式电解槽简图

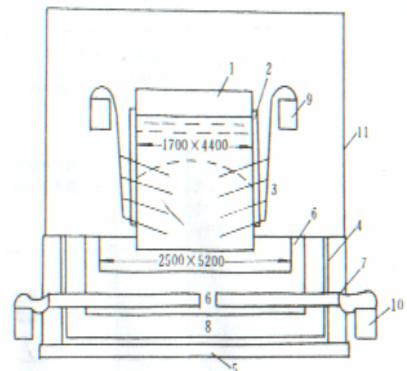


图 1-5 自焙阳极侧插棒式电解槽简图

上述几种电解槽，各有其优缺点：

在电解过程中，阳极大约以每小时 0.8~1.0mm 的速度连续消耗着。在自焙阳极电解槽上，需定时向铝箱内补充阳极糊，因而阳极可以连续使用。但是，在不连续预焙阳极电解槽上，阳极消耗到一定程度时就要更换，不能连续使用。所

以，自焙阳极的连续性正好适应了电解生产过程的连续性，不连续预焙阳极则不能适应。

但是，自焙阳极电解槽除了向外发散氟化物之外，还向外散发有害的沥青烟气，污染厂房内外的空气，这是很大的问题。这就要求采取密闭装置和排烟净化设施。预焙阳极已经在焙烧炉内焙烧过，它的沥青烟气正好在焙烧过程中用做燃料，不再在电解槽上散发出来。因此采用预焙阳极的电解厂房，烟害稍小些。

从阳极电压损失方面加以比较，预焙阳极的电压降只有 0.3V。而自焙阳极直接在电解槽上焙烧，焙烧并未完善，故阳极电压降较大。侧插棒阳极为 0.4V，上插棒阳极为 0.5V，因此，预焙阳极电解槽的电耗率，目前已经降低到每吨铝 13000~14000kwh，而自焙阳极电解槽的大约比它多 1000kwh。

从基建投资来看，预焙槽的上部金属结构和阳极结构比较简单，但是，采用预焙槽的工厂需要一整套阳极成型、焙烧和装配钢爪的设备，既需要额外一笔投资。唯有侧插棒槽厂投资最省，阳极费用也最低。

预焙阳极电解槽的另外一个主要优点是可以大型化，操作的机械化和自动化程度较高，电流效率较高，电耗率较低，烟害较小，所以新建的大型铝厂多采用这种形式的电解槽。

近年来，人们正在积极研制惰性阳极、惰性阴极、绝缘侧壁和多室槽。如能与低温电解(用 Al_2O_3 做原料，在 800~900℃下电解)配合成功，则铝电解生产将会发生重大的改革。这是铝冶金的未来发展方向。

1.4.2 现代铝电解槽结构发展趋势

冰晶石-氧化铝电解法发明 110 多年来，电解槽设计逐渐合理，容量大幅度增加，其科技含量、智能化程度越来越高，发展大型或超大型高效率、智能化的铝电解槽已经成为当今电解铝企业技术进步的标志和趋势，世界铝电解工业的技术及装备水平已经有了很大提高，在生产规模、电解槽容量、计算机应用、机械化和自动化程度以及烟气治理等方面都有了较大的进步变化。

近年来，计算机技术的应用，带动了电解过程物理场的深入研究和有关数学模型的建立，使电解槽的设计从经验向计算机辅助设计方向发展。由于电解槽设计渐趋合理，世界新建铝电解槽容量大幅度增加。采用大容量、高效能的智能化铝电解槽是 21 世纪电解铝技术发展的主流。这种电解槽电流强度大、单槽及系列槽的铝产量高、消耗低、电流效率高、使用寿命长、污染低。如法国彼施涅公司的 500kA 超大型铝电解槽；加拿大阿尔玛铝厂 300kA 的铝电解槽；委内瑞拉铝业公司 320kA 的铝电解槽。

电解铝工业未来技术发展方向是高产、优质、低耗、长寿和低污染，其涵义

是：高产——提高单槽及系列槽的铝产量；优质——提高铝产品质量；低耗——减少电解铝的电耗和氧化铝原料及辅助物料消耗；长寿——提高电解槽的寿命；低污染——减少烟气（氟化氢和二氧化硫）排放量，达到国家的环保标准。

西方国家先进电解铝技术的发展，体现在技术经济指标的先进性上：1) 槽型大，电流强度达到 300kA 以上；2) 电流效率高，一般达到 94%-95%，个别企业已经提高到 96%；3) 吨铝直流电耗低，一般为 13200-13400kWh，个别企业已经降低到 13000kWh。

电解铝新技术探索不断进行，一些国家特别是西方国家企业正在研究开发电解铝的最新技术，如为减少阳极消耗，美国滤液公司开发出的惰性阳极湿润性阴极电解技术正在进行工试验；法国彼施涅公司开发出的 500kA 特大型电解槽正在试验工业化生产；澳大利亚新建导流式电解槽；我国低温铝电解技术研究等。这些新技术的探索应用，将大幅度提高单槽和系列槽的产量，而且更加重视环保和节能，进一步降低电解铝成本。

1.5 现代铝电解槽焙烧启动技术

电解槽的焙烧在国内较为成熟的有铝液焙烧法和焦粒焙烧法。燃气焙烧法和其它方法有待进一步完善和推广。对于铝液焙烧由于其耗电量约为焦粒焙烧法的一倍，且存在高温铝液注入阳解槽时，对表层冷捣糊有较大的破坏，同时由于焙烧时，低凝固点的铝液进入电解槽阴极块产生的裂纹中，易形成向下渗漏的通道，破坏保护层，且易于使电解槽阴极炭块造成断层、电解槽阴隆起等一系列问题。但铝液焙烧有简便易行的优点。焦粒焙烧时间短，耗电省，焙烧时生成的高凝点电解质易于将电解槽阴极内在焙烧时生成的裂纹填充，但操作相对繁琐。对于大型预焙槽，国内趋向于采用焦粒焙烧法。启动方法国内多采用湿法启动，这样有利于避免电解槽短时间内产生大量热量。但对于新系列的首批电解槽，如果无电解质供应，可采用效应启动的方式进行。

1.5.1 焙烧的目的和过程分析

铝电解槽经过焙烧工序可以达到如下目的：

- a) 焙烧可使阴极结构按一定的温度梯度上升到一定温度。
- b) 排出电解槽内衬中的水份。
- c) 使电解槽内糊料按一定温度梯度上升，使糊料能够得到较好的焙烧，从而使整个电解槽阴极形成一个结实的整体。

d) 电解槽内形成一定量的电解质，便于电解槽电压得以调整，利于电解槽温的上升。

焙烧过程必须较好的达到焙烧目的。否则每个环节均可能出现问题。且电解槽衬内水份的排出和

在焙烧过程中，电解槽内的炭素制品需要经历以下几个主要阶段：

1) 低温预热阶段

当糊料加热到 200℃时，糊料剂开始软化，生制品呈现塑性状态，但还未发生明显得化学和生理变化，主要排出吸附水。这时，由于制品种体内的温差和压力差，粘结剂产生迁移。该阶段的升温速度便快些。

2) 粘结剂成阶段

该阶段糊料温度在 200—700℃，粘结剂开始分解，排出大量挥发分，同时，分解产物进行缩，形成半热。在进一步加热，半热转变成粘结热。该阶段必须均匀缓慢升温。过快，挥发份急剧排出，制品内外温差加大，引起热应力，会导致裂纹产生。

3) 高温烧结阶段

制品温度以 700℃以上，粘结剂焦化过程基本结束。化学过程逐渐减弱，内外收缩逐渐减小，升温速度可提高一些。

1.5.2 电解槽启动技术

预焙槽在通电 80—120h 后，电解槽内的平均温度达到 900℃以上，且有一定数量的液体电解质，此时具备启动条件，启动分为以下几个阶段：

1) 打开启动槽的出铝口，将温度在 970℃以上，分子比 2.7 以上的液体电解质吊运到槽前，并缓慢从出铝口灌入；

2) 随着电解质的灌入，开始抬电压到 5.5——6.5V，在这个过程中，由于电压在 4——4.5V 时，阳极底掌下面有部分阳极没有被电解质完全浸润，在强大的直流电作用下，缓慢抬极会造成部分阳极脱极，这就要求启动时必须有相当量的液体电解质灌入槽子，而且抬极速度要快，越过这个“峡谷区域”；

3) 将冰晶石与纯碱混合均匀后加入阳极中缝和槽四周加工面上“焙烧”至冰晶石完全熔化；

4) 随着固体物料的熔化，槽内电解质量逐步增加，此时电压会下降，应及时抬电压至 7.5—8.0V；

5) 待槽内大部分物料熔化后，电解质温度达到 980℃以上，四个角部及阳极底掌下无阻碍，此时电压自动回落至 7.0V 左右；

6) 分多次灌入液体铝，并维持一定的铝水平

7) 当槽子结壳后, 在壳面上加好保温料, 电解槽转入启动后期管理工作。

1.6 本课题研究的目的和意义

作者所在的江苏大屯铝业公司经过两年多的发展, 各项生产技术经济指标均取得了较好的成绩, 今年(2006年)上半年实际实现利润1780万元, 吨铝利润749元。各项单耗指标已位居国内同规模、同类型铝厂前列, 其中氧化铝单耗为1925公斤/吨, 在全国98家大型铝厂中列第15位; 原铝直流电耗为13538度/吨, 列第26位; 电流效率为93.2%, 阳极单耗为0.526吨/吨, 电解槽连续运行800多天, 没有出现一台病槽, 这些也在同行业名列前茅。作者就大屯铝业公司平稳高效的槽况进行了总结, 认为成果显著, 其意义对大屯铝业公司来说非常重大。作者认为成绩的取得离不开先进的生产技术管理, 其中最主要的就是焙烧启动方法及后期管理和正常生产技术条件的及时优化。本文第一部分就230kA电解槽的焙烧启动过程进行了跟踪分析, 从焙烧启动几个阶段的实践数据入手, 从两次焙烧启动过程和结果进行对比, 详细分析了焙烧启动的方案变化, 技术条件的变化对230kA电解槽焙烧启动带来的变化结果。第二部分则以提高大屯铝业公司230kA预焙电解槽电流效率为例, 从技术管理角度对影响其提高的主要因素进行论证, 并结合两年的生产实践情况进行了分析总结, 目的就是希望对我国230kA级预焙阳极电解槽后期的焙烧启动和生产管理带来帮助, 并以此进行总结来和同行交流。

第二章 230kA 大型预焙槽焙烧启动优化技术实践研究

2.1 概述

铝电解槽，无论是新建系列的还是大修的，在投入生产运行前，都必须进行焙烧，然后启动。对于电解生产来说，大型预焙铝电解槽的焙烧启动是一个极其重要的环节，它不仅关系到电解槽能否顺利投产，而且影响正常生产、技术经济指标及槽寿命，历来为国内外各厂家所重视。随着大型预焙铝电解槽的发展，其自身的工艺也随之研究开发，不断创新并加以应用。特别是大型槽的焙烧启动工艺，对于新系列的电解槽更为重要，也是铝行业不断研究的热点之一。目前，国外先进铝厂采用燃气焙烧、焦粒焙烧等技术电解槽寿命为 3000 天，而我国电解槽寿命一般仅为 1800 天。本章通过剖析生产现场焙烧启动技术，发现存在的问题，并在此基础上提出改进措施。

2.2 230kA 预焙电解槽主要技术特点及工艺参数^[5]

随着现代化电解工业的不断发展，大容量的、高效、节能型电解槽生产技术在国内外电解铝厂已得到广泛的推广应用，江苏大屯铝业有限公司从“一流的装备、一流的素质、一流的人员、一流的设计”，并使之迅速转化成生产力的角度出发，采用沈阳铝镁设计研究院的 230kA 预焙阳极电解槽，在铝电解槽设计中，沈阳铝镁设计研究院的设计人员采用了很多先进的铝电解技术。

1) 窄加工面。采用窄加工炉面是中间下料预焙槽发展的一种趋势，它不仅有利于提高槽单位面积产能，降低投资而且还可以缩小阴极镜面，减小水平电流的产生，提高电流效率。这一点无论在理论上还是生产中都已得到了验证。大屯铝业公司 230kA 预焙阳极电解槽为大面加工面 300 mm，小面加工面为 420 mm。

2) 采用干防渗材料。从近年来国外铝厂的应用来看采用干防渗材料可以有效地阻止电解质向阴极保温层内渗漏，从而达到延长槽寿命的目的。电解槽内衬，从下到上依次为一层石棉板，一层硅酸钙板，两层保温砖，一层干式防渗料，在其上安装阴极炭块组。阴极炭块组四周用底糊扎实。槽侧部为一层 125 mm 厚的侧部炭块。侧部炭块与阴极炭块组之间的边缝捣制坡型，形成人造伸腿，有利于形成槽帮。并有部分槽安装了碳氮化硅侧部碳块。

3) 三角板阳极提升系统。即阳极升降装置采用滚珠丝杠三角板升降机构，包括 7.5 kW 带电机减速机，左右各一套蜗杆、滚珠丝杆、三角板起重器，起重

器支架和阳极母线吊挂等。水平移动距离 561 mm, 升降行程 400 mm。升降速度 100 mm/min, 总起重量为 80 t。滚珠丝杠三角板升降机构的特点是结构简单, 机械加工件少, 易于制造和维修, 传动效率高, 造价低。

目前 230kA 大型预焙槽的主要工艺技术参数如表 2-1 所示。

表 2-1 230kA 大型预焙槽的主要工艺技术参数

序号	项目名称	单 位	参 数
1	电流强度	kA	230
2	母线进电方式	-	大面 4 点
3	阳极电流密度	A/cm ²	0.726
4	阳极碳块尺寸	mm	1500×660×550
5	阳极块数	个	32
6	阳极组数	组	16
7	阳极钢爪数	个	6
8	阴极碳块尺寸	mm	3280×515×450
9	阴极碳块组数	组	20
10	槽膛平面尺寸	mm	11760×3780
11	槽膛深度	mm	470/560
12	大面加工面尺寸	mm	300
13	小面加工面尺寸	mm	420
14	阳极升降速度	mm/min	100
15	电解槽下料点	点	4
16	氟盐下料点	点	1
17	电解槽电压	V	4.18
18	分子比	2.2-2.4	摩尔比
19	电解质温度	°C	930—950

2.3 原焙烧启动方法的剖析

2.3.1 原焙烧启动方法的选择

近几年来, 国内外对大型预焙阳极电解槽焙烧基本有四种方法, 分别是焦粒焙烧、燃气(油)焙烧、铝液焙烧、石墨粉焙烧等。其中铝液焙烧法因为倒入的高温铝液会使内衬材料受到较大的热冲击, 破坏槽内衬结构, 影响槽寿命, 已经面临被淘汰的境界。焦粒焙烧是一种成熟的、正在推广的技术, 燃气焙烧目前是一种值得广为提倡的方法, 但因为需要较为复杂的设备, 在技术上还需完善和发

展。而国内只有湖北丹江铝厂 114.5kA 采用石墨粉焙烧法。文献[6]对这四种方法作了详细的介绍，各种方法的优缺点列于表 2-2。

表 2-2 不同焙烧方法的比较

焙烧方法	优点	缺点
焦粒焙烧	焙烧时间短。使用分流片和软连接技术后可以控制预热速度并能避免阴极局部过热的现象。有利于预防槽底的早期破损。 温度分布更为均匀且加热速率可控。 不需电能且无阳极氧化问题。	安装和拆卸分流片及软连接器的操作过程繁琐。启动后电解质内炭渣多,捞取工作量大
燃气(油)焙烧		阴极和捣固糊表面易出现裂缝。加热时间长且启动时效应时间长。设备较复杂,对维修、安全、有毒气体的防护要求较高
铝液焙烧	焙烧过程简单平稳,最终温度分布较均匀。启动后电解质洁净。	焙烧时间较长。灌入铝液瞬间阴极、捣固糊受到强烈的热冲击,易早期破损,对电解槽寿命影响较大。
石墨粉焙烧	焙烧时温度及阳极电流分布更均匀。 其他同焦粒焙烧	焙烧终了时,温度不能再提高。在灌入电解质后,效应启动会不会使炉底升温过快还有待研究。

综观各种焙烧方法,焦粒焙烧不需要复杂设备,不需外加能源,即用炭粒连接电解槽的阳极和阴极,直流电流通过阳极—炭粒—阴极释放出焦耳热,使槽体得以焙烧,同时熔化电解质,为电解槽启动创造了条件。其特点是:电流分布较均匀,熔化的电解质可以充填内衬的裂缝,阻止铝液进入炭内衬裂缝,对提高槽寿命有利。本着稳妥可靠的原则,尽可能地提高槽的使用期限,而且焙烧时间短,电解槽焙烧均匀,质量较好,有利于启动和槽寿命的延长。参照国内外对大型预焙阳极电解槽焙烧启动经验,根据大屯铝业公司工艺要求及实际情况,原方案决定对 230kA 预焙阳极电解槽采用焦粒焙烧。

2.3.2 原焙烧启动方法的实施^[7, 8]

焙烧启动过程包括如下内容

1) 电解槽设备联动测试

主要项目:(1)打壳机构检查(2)加料机构检查(3)槽上气动管网检查(4)阳极提升装置检查(5)排烟管风量转换阀检查(6)短路口拆卸,安装检查(7)通道短路母线连接情况检查确认。槽控机联动动作检查确认。(8)效应灯,限位器检查确认(9)小盒夹具检查(10)槽膛尺寸,“人造伸腿”,炭缝糊帽等检查。

2) 外部条件确认

主要内容: (1)供电的电流、电压、送停电等事宜。(2)气源压力(3)多功能机组、绝缘天车其它运输车辆齐全到位(4)母线临时吊具测试(5)真空抬包,开口抬包预热(6)放铝流槽(7)操作工具齐全包括短路时用的搬手等(8)事故应急工具包括取炭块夹钳,压缩空气管等(9)原材料供应系统完备到位(10)铸造部具备投产条件(11)最少要制造四套软联接设备和分流设备(见附图)

3) 电解槽绝缘系统测试

测试点及要求:

各绝缘点要求大于 $1M\Omega$,

系列送全电流检测短路口压接情况(全电流时不得大于 $12mV$),

系列送 $1/2$ 电流“花插”供电,检测立柱母线接点压降,不得大于 $6 mV$,对压降高的压接点在正式送电前要修整好。

电解系统对地绝缘检测,绝缘电阻大于 1000Ω 。

4) 焙烧启动的原材料准备

焙烧启动的原材料质量,不得低于正常生产时的原材料质量,焦粒的质量要求:煅后焦,粒度 $1.5\sim2.5mm$ 混配均匀。表 2-3 为焙烧启动单槽原材料用量。

表 2-3 焙烧启动单槽原材料用量

项 目	单 位	焙烧装炉	启 动	合 计
阳极组	组	16		16
焦粒	t	0.5	----	0.5
冰晶石	t	14	26	40
Na_2CO_3	t	1	1	2
CaF_2	t	1	----	1
液体铝	t	----	12	12

根据车间的焙烧启动安排,焙烧所需原材料必须提前一天,运到槽前。

2.3.3 原焙烧启动方法存在的问题

作者所在生产现场采用原有的焙烧启动方法,第一批电解槽顺利焙烧启动完毕,原焙烧启动方案总体来说比较令人满意,启动过程中没有出现一台停槽的现象。但原方案的实行给焙烧启动过程和后期管理带来的一系列的弊端。主要存在的问题如下。

1) 不用软连接而采用模糊联接(或者说硬联接),导致电流分布不均匀现象较多,焙烧启动过程中多次出现阳极偏流现象。

2) 由于偏流现象增多,在处理阳极偏流过程中的方法很关键,但实践中处理

方法往往只是靠松紧卡具不是很有效。

3) 装炉时过多的使用了高分子比冰晶石, 导致后期管理分子比偏高不能按照规定来有步骤降低分子比。

4) 干法效应启动虽然在第一阶段焙烧启动应用比较成功, 但也出现了个别电解槽的在启动期间出现阴极渗漏现象。

5) 灌铝时间早虽然对槽况稳定有益, 但对炉底阴极炭块和电解槽槽寿命的影响却很大。

2.4 焙烧启动技术方案的优化

2.4.1 230kA 预焙阳极电解槽焦粒焙烧启动技术要点分析

230kA 预焙阳极电解槽焦粒焙烧启动技术的关键主要是选择粒度较好的焦粒, 尤其是焦粒铺设与挂阳极和装炉质量、软连接和分流器的应用与拆除效果等。

2.4.1.1 铺焦挂极方法的选择

铺焦挂极很重要, 因为它直接决定了焙烧的效果, 铺设焦垫的厚度和质量的好坏直接决定了焙烧使阳极电流分布的大小及槽内各部位温度是否均等、焙烧时阳极是否出现脱极现象。在铺设时首先要清扫阴极, 将栅栏框架平整的放在阳极正投影区域, 从电解槽一端向另一端按顺序连续铺挂。首先在第一块阳极投影区内铺焦粒, 然后将筛分好的煅后石油焦(粒度为 1-4 mm)倒入框内, 用板尺刮平, 确保焦垫无凹陷部位, 之后小心地取走栅栏框。铺焦厚度为 $20 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ 左右。主要铺设工具为格栅框架。选择合格的阳极进行挂极, 阳极应压实焦粒, 不允许有晃动。每铺好一块阳极的焦粒就挂一组阳极炭块, 挂极时如果阳极炭块与焦粒接触面积没达到要求, 就要调整阳极位置, 直到满意为止, 全槽阳极挂完后, 安装软连接器, 小盒夹具用手拧紧, 但不可太紧。

2.4.1.2 关于软联接安装

关于焦粒焙烧法是否应加装软联接问题, 原焙烧启动方案不加软联接器, 采用一种称为“模糊”联接的做法, 即: 挂极时要求铝导杆必须紧贴阳极母线, 夹具轻微压紧, 开动前压紧夹具。并且阳极导杆及阳极大母线接触各部位应当清扫、打磨干净, 以防止接触不良发生打火现象。对于是否加装软联接一直争论较多, 在后来的实践中证明了软联的使用要比没有的好, 其优点是明显电流分布更加均匀, 因此这也成为后来技术改造的一个点。

2.4.1.3 装炉

用废纸板或其它物品将阳极块间缝上面及侧面封堵。首先在槽膛四周紧贴阳极底掌边沿放 2~3cm 冰晶石,然后在“人造伸腿”上均匀铺上 1000kg 氟化钙,氟化钙以上装冰晶石~10cm,再其上装冰晶石和纯碱混合料 4 t(3 t 冰晶石混合 1 t 纯碱),其上全部加冰晶石至满槽(阳极组上表面以上 5~7 cm);两列阳极间的中缝,加满冰晶石,每台槽总共加冰晶石约 12 t,装料示意图见图 2-1。其中槽四周冰晶石为高分子比冰晶石,中缝添加为普通冰晶石。

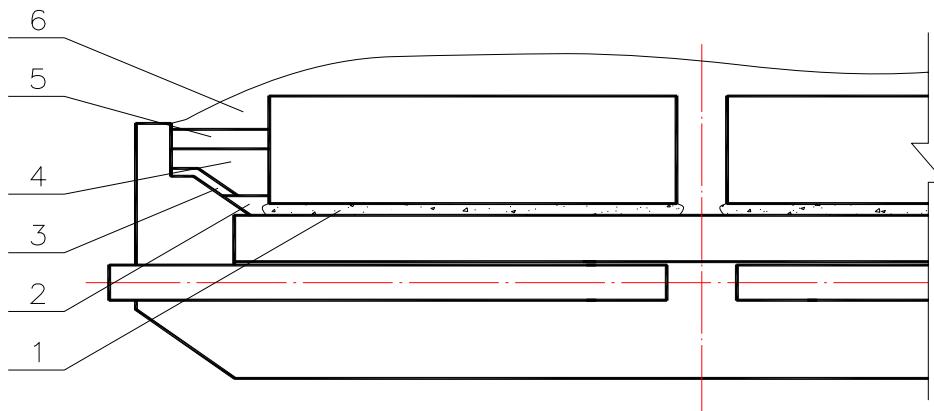


图 2-1 焦粒焙烧启动装料示意图

- 1—焦粒 2~2.5 cm(挂极前)
- 2—冰晶石 5 cm
- 3—氟化钙 1t
- 4—冰晶石 10cm
- 5—冰晶石纯碱混合料 4 t
- 6—冰晶石约 10 t

2.4.1.4 分流器的选择

选择分流片作为分流器,分流片为钢制从阳极钢梁焊接在对应的阴极钢棒头。关于分流器的分流率控制,文献{2}曾提出设计和生产针对不同容量槽型的分流器,且可以调节分流量,确是一个很好的办法。应当说明得是,分流器的分流量不是固定不变的,在通电初期槽电压较高,分流器本身温度低,电阻率低因而分流较多。随着焙烧的进行,槽温升高,槽体电阻下降分流器温度升高,其电阻率亦升高,此时焙烧槽的电流会自动提升。为了控制焙烧期的电解槽升温不要过快,焙烧初期不供给全电流,而是逐步达到全电流供电。因而需采取分流措施,用钢制分流器进行调整是可行的,根据钢导体的长度和断面可确定通过分流器的电流。因而调整了通过槽体的电流。根据某些铝厂焙烧过程槽电压记录可知:电解槽采用炭粒电阻焙烧法时焦粒粒度 1.5~2.5mm,厚度 2~2.5cm 的焦粒,电解槽全电流时的冲击电压不超过 5V(按 4.8V 计)。为了控制焙烧期的电解槽升温不要过快,焙烧初期不供给全电流,而是逐步达到全电流供电。因而需采取分流措施,

用钢制分流器进行调整是可行的,根据钢导体的长度和断面可确定通过分流器的电流。因而调整了通过槽体的电流。根据某些铝厂焙烧过程槽电压记录可知:电解槽采用炭粒电阻焙烧法时焦粒粒度 1.5~2.5mm,厚度 2~2.5cm 的焦粒,电解槽全电流时的冲击电压不超过 5V(按 4.8V 计)。而钢材的电阻率查得

$$\rho t = 0.143(1+0.00423t) \Omega \text{ mm}^2/\text{m}.$$

再根据采用的钢材长度和断面积既可算出通电初期分流器的分流量,分流器的分流量通常为 30~40%。应该说明的是分流器的分流量不是固定不变的。通电初期,槽电压较高,分流器本身温度低,电阻率低,因而分流较多。随着焙烧的进行,槽温升高,槽体电阻下降,分流器温度升高(高达 300℃),其电阻率升高。两方面因素的影响使分流器的分流量自动快速下降,不分段切除的情况下,焙烧槽的电流也会自动提升。

江苏大屯铝业有限公司分流片形状如图 2-2 所示,两头采用钢板,中间为软钢带。这样既能保证了分流片的强度,又是的分流量得到了保证。分流量的大小经过计算初期为 30%--40% 左右。

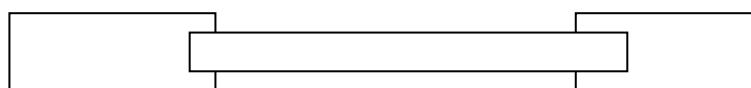


图 2-2 分流器 (分流片) 模拟图

2.4.1.5 热电偶的安置

通常在电解槽中心和两个端头的中心各放一个热电偶,以便掌握焙烧过程中温度上升情况,为测得槽子内各区域的温度上升梯度和掌握焙烧末期槽内各区域的温度是否达到启动要求,部分槽装炉前按图 2-3 所示位置予埋 9 根热电偶保护套管。热电偶保护套应斜放,下面的封口不得与阳极接触,套管放好后用冰晶石将其固定,上口用纸塞住。

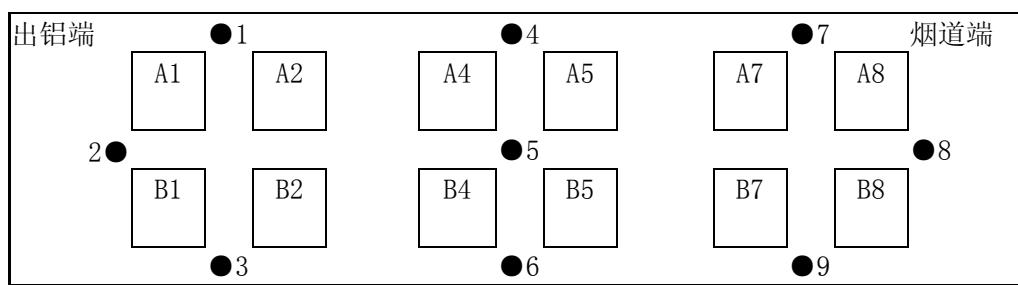


图 2-3 热电偶安置示意图

2.4.1.6 电解槽通电焙烧

电解槽铺设焦粒、挂阳极、装炉、安装软连接和分流器以后就可以进行送电

焙烧。不论采用那种形式的分流装置,最初投入的电解槽,均不加分流器,因为首批通电槽的电流提升速度可由整流所调控。

1.6.1.1 2.4.1.7 启动过程

电解槽的启动包含如下程序。

1) 干法无效应启动

开抬阳极,电压升高,效应发生,效应电压保持 8-10V 左右。随着电解质温度提高,将阳极上保温料全部推入槽内,同时不断向槽内添加冰晶石,待电解质水平达到 30cm 时,加氧化铝 150~200kg,待其熔化后,熄灭效应,电压控制在 6V 左右,接通槽控箱,电解槽进行正常打壳下料,分子比控制在 2.8~2.9,效应熄灭后 12~24 小时向槽内灌铝水 12t,铝水平 13~14cm, 灌铝后加保温料至满槽,电压保持 5V,两天后降至 4.3V。也可以少灌铝,依靠投产后逐渐积累提高铝液水平,达到正常技术条件。

2) 电解槽启动后期技术管理

(1)槽电压: 启动后 1 个月内槽电压 4.2~4.3V,后转入正常。

(2)效应系数: 15 天内 1.5 次/日,15~45 天内,1.0 次/日,45 天后按正常控制。

(3)分子比: 第一周 2.9,第二~四周 2.7,第五周~第七周 2.6。第八周以后,按正常值控制。

(4)灌铝后第三天,进行出铝作业。

电压保持和温度控制参考值 (见下表 2-4)

表 2-4 启动过程中不同时间内槽温与槽电压的对应关系

启 动 时 间	8h	16h	24h	36h	48h	72h	96h	120h	第 6 天	第 7 天	第 二 周	第 三 周	第 四 周	第 五 周
电 压 (V)	7.5	6.5	6.5	5.0	4.6	4.5	4.5	4.4	4.3	4.3	4.25	4.25	4.25	4.20
温 度 ℃	6.5	6.0	5.0	4.8	4.5			4.4						
				980			970—980				960—970			

3) 效应系数和 NB 间隔

效应系数: 启动后 5 天内 2 次/槽·天, 15 天内 1.0 次/槽·天, 15—30 天内 0.5—1.0 次/槽·天, 此后视电解槽运行情况可逐渐转入正常情况。

NB 间隔: 启动一周内 2.5—3 分钟, 一周后设定为 2—2.5 分钟。以后视情况转入正常。启动后分子比参考值见表 2-5。

表 2-5 电解槽启动后期分子比控制范围

时间	第 1 周	第 2 周	第 3 周	第 4 周	第 5 周	第 6 周	第 7、8 周	第 9、10 周
分子比	≥2.8	2.7—2.8	2.6—2.7	2.6—2.7	2.6	2.6	2.4—2.5	2.3—2.4

4) 换极

启动第二天即可进行换极作业，换极周期暂定为 25 天。生产转入正常后，是否另加阳极保护环，待经济核算后再决定。换极顺序如下：A1,休，B3、A6,休，B8、A2,休，B4、A7、B1,休，A3,休，B5、A8,休，B6,休，A4,休，B2,休，A5,B7

5) 铝水、电解质水平

启动后铝水和电解质水平暂按下列如下值：

铝水平：启动一个月内按 16—18cm 保持，一个月后按 18—20cm 保持。

电解质水平：启动一个月内按 22—25cm 保持，一个月后按 20—22cm 保持。

2.4.2 230kA 预焙阳极电解槽焦粒焙烧启动优化措施研究

2.4.2.1 软连接与模糊连接交错使用研究

在大型预焙槽焙烧启动过程中，采用软连接装置可以有效避免在焙烧过程中阳极大母线及与之相约束的阳极组在焙烧过程中因产生的热变形而影响阳极大母线的相对位置和焙烧的主体—焦料层与阳极炭块的相对位置进而加剧此种变化的趋势。是大型预焙槽焙烧中行之有效的一种方法。同时为了更加稳定和有效，作者采用了软连接与模糊连接相结合的方式来对电解槽进行焙烧，这样做可避免导杆与阳极大母线接触面压降增大、电流分布不均、焙烧温度不平衡等问题出现，起到改善焙烧状况的作用。下图 2-4 和图 2-5 分别为生产现场 104# 和 309# 整个焙烧期间的 AB 两面阳极平均电流分布示意图（没采用软连接）。图 2-6 为生产现场采用软连接时的电解槽阳极电流分布示意图。

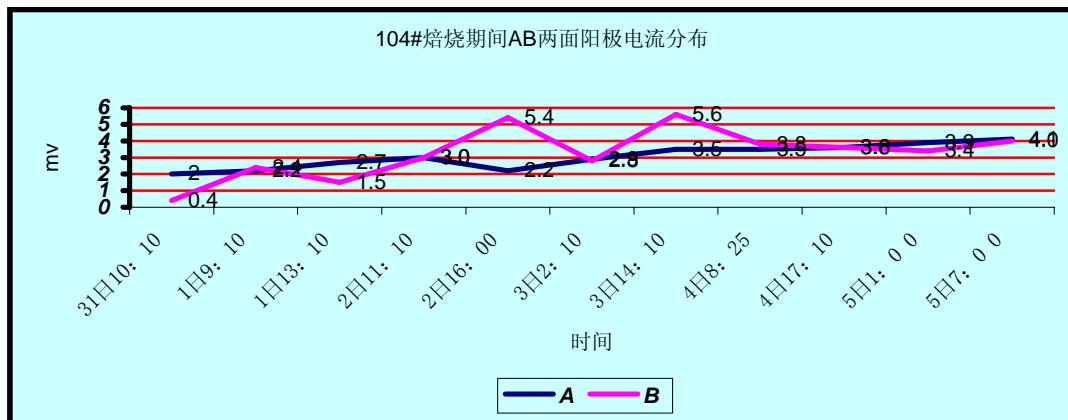


图 2-4 未采用软连接的 104 # 电解槽焙烧期间的 AB 两面阳极平均电流分布

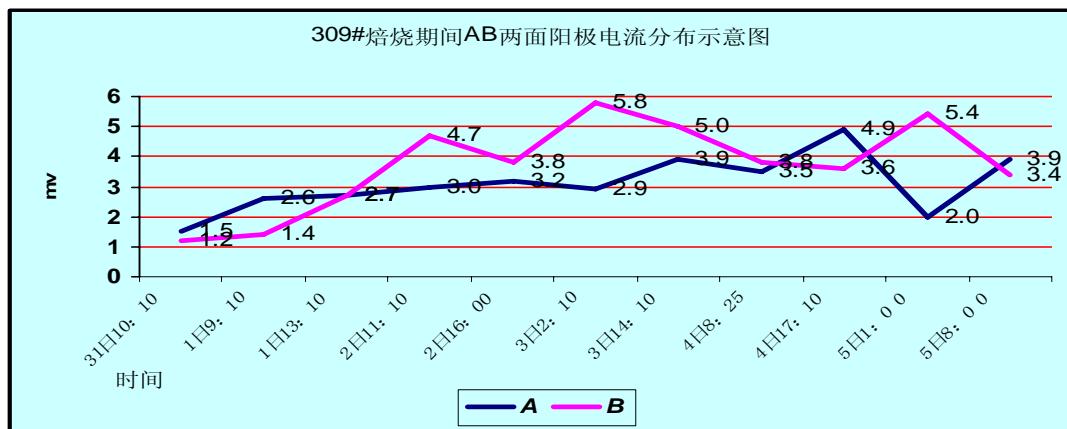
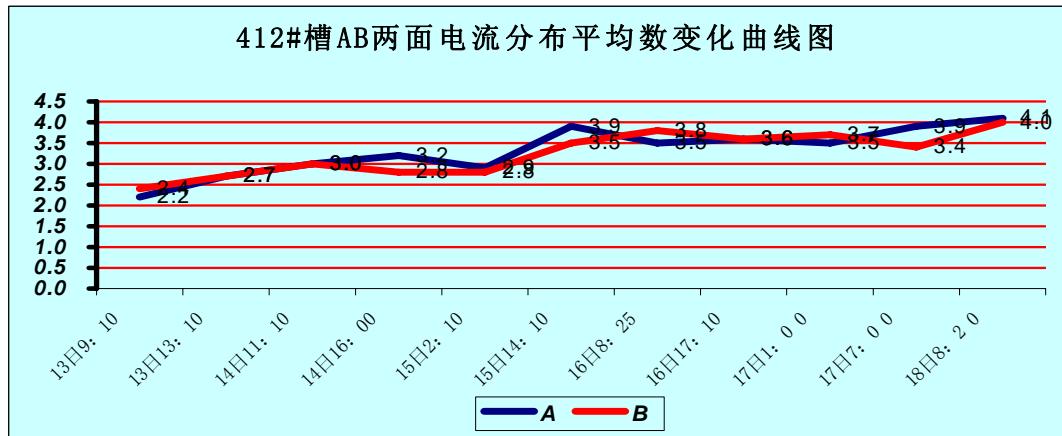


图 2-5 未采用软连接的 309 # 电解槽焙烧期间的 AB 两面阳极平均电流分布



为例（共 20 台），电流分布不均匀的共 11 台，占到启动总数的 55%，以具有代表性的 104# 和 309# 为例，从测量数据来同采用软连接的 412# 进行电流分布的比较。

104# 和 309# 两槽的曲线表明，不使用软连接带来的先天不足，再加上处理方法的不当，导致了两槽的电流分布偏留严重，在焙烧过程中 104# 槽两面最高最低分别为 (5.6mv, 3.5mv) (5.4 mv 2.2)，而 309# 槽在焙烧过程中的偏流现

象更是严重，整个 B 电流分布面明显偏大，说明了此槽的焙烧效果是很不好，或者说很不平稳。且焙烧实践表明，此槽在启动的前一天就有两组阳极电流分布过大导致脱极。两槽如图 2-5、图 2-6 所示。(图中数据均为每日测量数的平均值)。而以 412# 为代表的后续槽在焙烧启动采用了软连接和模糊连接，焙烧效果非常好，整个焙烧期间电流分布分厂均匀，几乎没有偏流现象。在后续启动的电解槽中 28 台中，电流分布不均匀的只有 1 台。电流分布的均匀不只是对阳极有利，更对对电解槽内阴极内衬均匀缓慢升温着明显的作用。若电流分布不均匀，温度变化不一样，如果局部过快，挥发份急剧排出，碳素内衬制品内外温差加大，引起热应力，会导致内衬裂纹产生，从而产生早期渗漏。

2.4.2.2 各种装炉物料的配比优化研究

从表 2-6 可以看出，第一批焙烧电解槽（仅取 103#、104#、307#、308#、309# 等槽为例）和第二批焙烧槽（以 123#、125#、135#、321#、319# 为例）的装炉情况除了焦粒和氟化钙的量基本没有发生变化外，其它的物料量均发生了改变。最主要的高冰和普冰用量的变化，的确高分子比冰晶石有着诸多优点，尤其是装在电解槽四周对形成坚固的炉邦有着很好的作用，但是由于首批电解槽在

表 2-6 两次电解槽装炉用量变化表

首批 槽号	装炉				焙烧		启动 t	启动后 分子比
	焦粒 (Kg)	氟化钙 t	高冰	普冰	普冰 t	纯碱		
103	420	1.8	10	2	9.45		1.6	3.9
104	440	1.6	12.1	1.5	10.8		0.8	3.7
307	440	1.8	10.15	2	13.3		1.6	4.01
308	440	1.6	10.2	3.5	9.05		1.4	3.8
309	440	1.8	7	4	11.9		1.2	3.8
后续 槽号	装炉				焙烧		启动 t	启动后 分子比
	焦粒 (Kg)	氟化钙 t	高冰	普冰	普冰 t	纯碱		
123	460	1.8	6	7	6.45		1.2	3.0
214	440	1.8	5.6	7.2	9.2		1.2	3.2
224	450	1.8	6.5	7.1	10.3		1.4	3.1
321	440	1.8	7	7	8.4		1.4	3.2
412	440	1.8	5.8	7.5	9.8		1.2	2.9

装炉时用大量的高分子比冰晶石，导致启动时冰晶石融化速度较慢，对启动时推料工作带来麻烦，而且阳极上的高冰结壳很厚，邻极之间结壳很硬。给生产实践操作主要是换极工作带来了很大的困难，在生产中曾多次发生换极时造成的拉断导杆事故。

这个问题在第二次焙烧启动时得到了解决，装炉量的变化很好的解决了这个难题。（见表 2-6）。

2.4.2.3 启动方法的变化

干法效应启动对于电解槽的危害相当大，尤其是对于刚开始启动的电解槽其伸腿和炉底扎糊缝还没有完全烧结成一个整体，此时电解槽炉底温度并不是很均匀，过高的冲击电压带来的温度变化会造成炉底和伸腿产生较大的裂缝，对于槽寿命影响较大，同时对以后的灌铝工作带来困难。作者公司曾出现两电解车间有 2 台槽在启动完后接着出现钢棒处漏电解质现象。

在后期的焙烧槽中，作者逐渐采用了干法无效应启动，启动时将电压抬到 9v 左右，阳极上升约 3—4cm 左右，采用焖料焙烧的方法，使侧部物料自然熔化，严禁将侧部物料推入槽内熔化，可将阳极上物料推入槽内熔化，并不停向槽内添加冰晶石，待物料充分熔化后，捞取炭渣，调整分子比在 2.9 左右，电压保持 7v 左右，此时可开通打壳下料，下料间隔一定要长，一般在 3—4 分钟，此时应当保持电解质水平高于 30cm，电解质温度超过 980℃，保持维持 6—7 小时，在 24 小时内电压逐步降至 5.0—5.5v。

如下两图所示，启动方法的变化导致的电压变化曲线图比较。

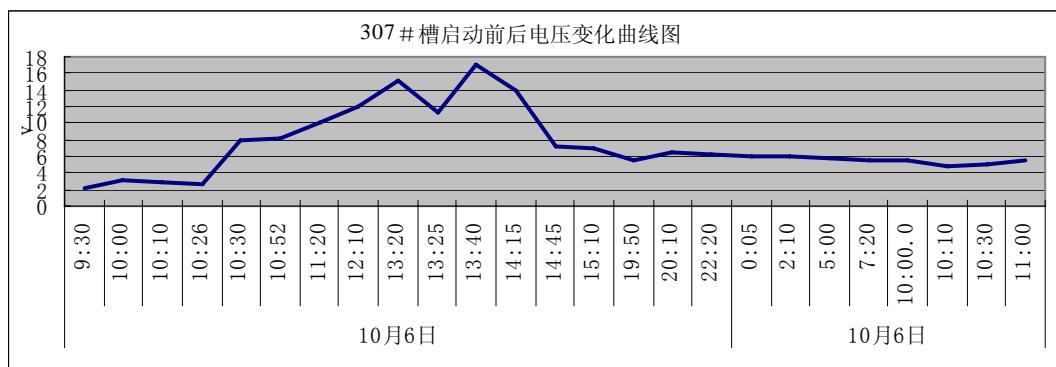


图 2-7: 以 307 # 为代表的首批槽启动前后电压变化图 (309 #、104 # 等)

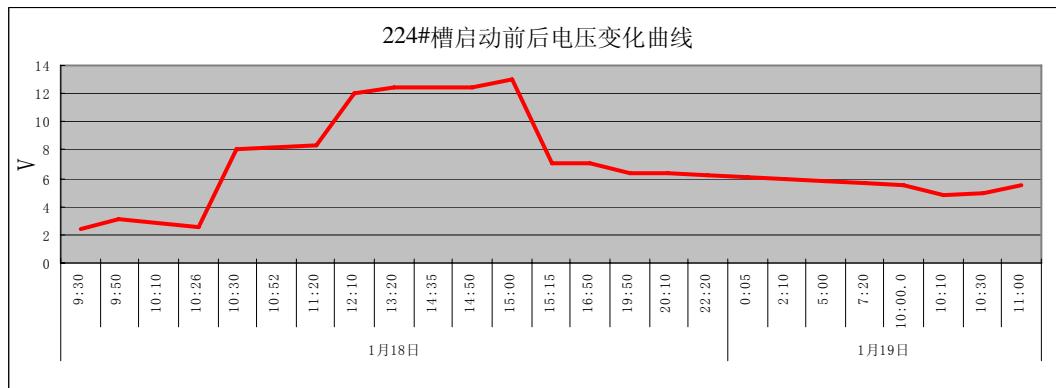


图 2-8: 以 224 # 为代表的后续槽启动前后电压变化图 (224 #、319 #、412 # 等)

从上两图可以看出，而以 214#、224#、319、412#等电解槽为代表的后续电解槽在启动前后电压的变化情况明显要比首批电解槽要平稳，曲线也更加平缓，尤其是在采取了干法无效应启动的启动过程中，电压波动不再明显，从另一方面也说明后续电解槽的启动过程更加稳定，从而也表明了干法无效应的启动过程效果要比干法效应启动效果好的多。

其实笔者更倾向于槽边部砌电解质块，中缝空腔装炉的方法，采用湿法无效应启动和使用高分子冰晶石。并且焦粒的粒度在 1—3mm，最好可以在其中添加一定定量的石墨碎，相信效果更好，过程更加稳定。

2.4.2.4 灌铝方式和灌铝量的变化

原焙烧启动方案规定了灌铝的时间，在启动后 6—12 小时内灌铝，作者认为灌铝太早。灌铝是焙烧启动环节的最后一道工序，灌铝水的时间和灌入的量直接关系到启动后期的效果，在这个问题上各个铝厂的做法也不尽一样。实际上人造伸腿和侧部炭块在启动前并未完全焦化烧结成一体，如灌铝水的时间过早反而失去了焦粒焙烧的优点，应当让熔融的电解质液充分渗透到内衬裂缝后再灌铝水，所以，对于 230kA 电解槽来说，我们认为启动后 24 小时是灌铝水的最佳时机，最好要分 2—3 次灌，24 小时以后。启动初期铝水平保持在 15-16cm 为益，且实践表明此时电压已降至 5 伏左右。

关于灌铝量作者认为对于不同的槽型灌铝量是不同的，对于 230kA 电解槽来说，启动后灌入 11 吨左右铝液是一个最好的选择，若灌入铝液量太大，则会引起新启动电解槽炉底发凉，导致效应频发，阳极消耗不均匀从而产生针振和摆动现象，严重的可以造成长期病槽。

2.5 焙烧启动优化技术实施效果评价

2.5.1 214#和 319#槽焙烧启动优化效果评价

1.通电情况

214#、319#于 2005 年 12 月 31 日 9 时 25 分通电焙烧，通电时间为 9: 25~9: 48，通电后电流上升平稳，214#槽冲击电压为 4.53V，319#槽冲击电压为 4.570V。本次所焙烧的二台电解槽冲击电压较高，均超过了 4.5V。

2.焙烧情况

(1) 分流片工作情况

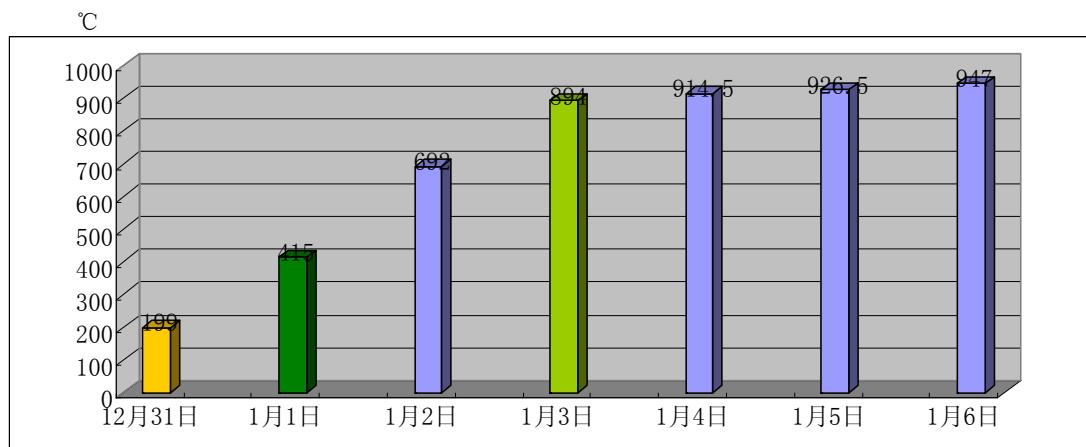
通电后，电流上升至 40kA 时，开始对所有分流片进行散热处理，至电流送至全电流时所有分流片工作基本正常。因电流上升至 40kA 后，就开始用风管对分流片进行散热处理，故无法对分流片进行温度测量。

(2) 焙烧期间的槽温变化情况

从焙烧开始以后就对槽温进行监控，在 A、B 两侧分别选定四个点对槽温进行测量，每天测量一次，其测量值和槽温变化情况分别见表 2—7、表 2—8、和图 2—9、图 2—10

表 2—7：214#槽焙烧温度与焙烧时间的关系表

时 间	出铝口	A 面中间	B 面中间	烟道端	平均 (°C)
12 月 31 日	130	285	263	108	197
1 月 1 日	376	504	469	297	412
1 月 2 日	482	624	573	421	525
1 月 3 日	816	902	917	835	868
1 月 4 日	906	915	928	909	914.5
1 月 5 日	910	933	942	920	926.5
1 月 6 日	928	951	960	949	947



2—7: 214#焙烧温度时间关系图

(3) 焙烧期间的电压情况

电流送全后，每半个小时记录一次槽电压。

3、启动过程

(1) 214#槽

该槽于 2006 年 1 月 5 日 9: 30 拆除软连接，拆除前电压为 2.22V，拆除后电压为 2.29V。因槽温较低，槽内冰晶石大部分尚未熔化，故未启动，推迟到 1 月 6 日 10: 00 启动，尔后槽电压保持在 10~12V，保持时间为 4.5 个小时。14: 40 启动完毕，15: 00~18: 00 电压保持为 7.5V 左右，1 月 6 日 19: 00 至 1 月 6 日 9: 00 电压保持在 6.0V 左右。1 月 7 日 9: 00 开始向槽内灌铝，总灌铝量为

11 吨，灌入后电压为 5.8V，尔后逐渐降至正常。整个过程结束后铝水平 15cm，电解质水平为 36cm。

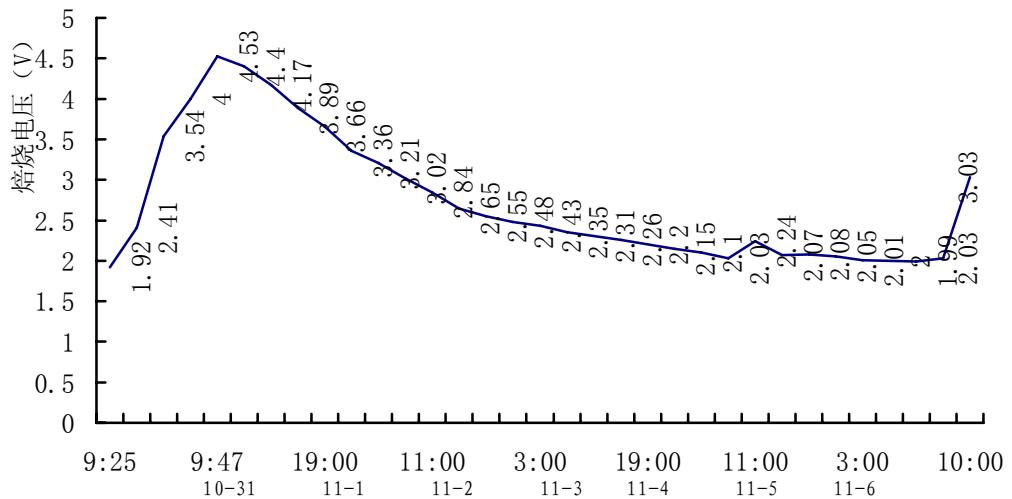


图 2-8 214# 槽焙烧电压与焙烧时间关系

表 2-8: 214# 槽焙烧电压与焙烧时间的关系表

时间	12 月 31 日					
	09: 25	11: 32	11: 36	11: 41	11: 47	13: 00
电压	3.0	4.0	4.78	5.62	6.15	4.82
时间			12 月 31 日			
电压	4.17	3.89	3.66	3.36		
时间			1 月 1 日			
电压	3.00	7: 00	11: 00	15: 00	19: 00	23: 00
时间	3.21	3.02	2.84	2.65	2.55	2.48
电压			1 月 2 日			
时间	3: 00	7: 00	11: 00	15: 00	19: 00	23: 00
电压	2.43	2.35	2.31	2.26	2.20	2.15
时间		1 月 3 日			1 月 4 日	
电压	3: 00	7: 00	11: 00	07: 00	11: 00	23: 00
时间	2.10	2.03	2.24	2.07	2.08	2.05
电压		1 月 5 日			1 月 6 日	
时间	3: 00	7: 00	22: 00	9: 00	10: 00	
电压	2.01	2.00	1.99	2.03		3.03

(2) 319#槽

该槽于 2006 年 1 月 5 日 9: 30 拆除软连接，拆除前电压为 2.05V，拆除后电压为 2.24V，上午 10: 00 启动。尔后槽电压保持在 10~15V，保持时间为 5 个小时。15: 00 启动完毕，15: 00~24: 00 电压保持为 7.2V 左右，1 月 6 日 0: 00 至 11 月 6 日 9: 00 电压保持在 6.4V 左右。1 月 6 日 9: 00 开始向槽内灌铝，总灌铝量为 11.5 吨，灌入后电压为 6.0V，尔后逐渐降至 正常。整个过程结束后

铝水平 15cm, 电解质水平为 34cm。其测量值和槽温变化情况分别见表 2—9、

时 间	出铝口	A 面中间	B 面中间	烟道端	平均 (°C)
12 月 31 日	89	72	92	180	108
1 月 1 日	534	564	721	459	570
1 月 2 日	780	510	500	620	603
1 月 3 日	910	529	568	931	735
1 月 4 日	819	900	920	963	901
1 月 5 日	828	922	937	962	921

表 2—10、和图 2—9、图 2—10、

表 2—9: 319#槽焙烧温度与焙烧时间的关系表

时间	10 月 31 日					
	11: 29	11: 32	11: 36	11: 41	11: 47	13: 00
电压	3.05	3.87	4.74	5.67	6.44	5.53
时间			10 月 31 日			
	14: 00	15: 00	19: 00	23: 00		
电压	4.45	4.16	3.77	3.52		
时间			11 月 1 日			
	3: 00	7: 00	11: 00	15: 00	19: 00	23: 00
电压	3.26	3.09	2.87	2.77	2.73	2.72
时间			11 月 2 日			
	3: 00	7: 00	11: 00	15: 00	19: 00	23: 00
电压	2.66	2.69	2.67	2.68	2.62	2.55
时间			11 月 3 日			
	3: 00	7: 00	11: 00	15: 00	19: 00	23: 00
电压	2.49	2.47	2.47	2.33	2.29	2.27
时间			11 月 4 日			
	3: 00	7: 00	11: 00			
电压	2.25	2.23	2.25			
时间			11 月 5 日			
	2: 00	7: 00	10: 00			
电压	2.20	2.18	2.17			

表 2—10: 319#槽焙烧电压与焙烧时间的关系表

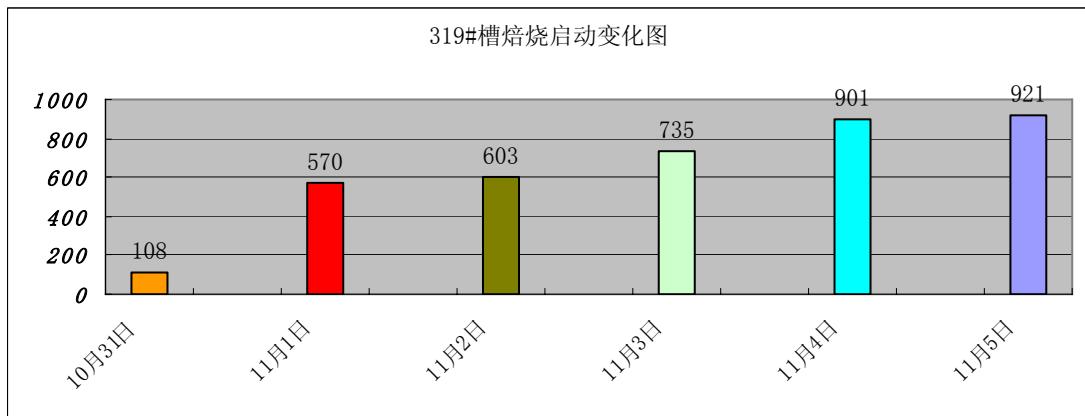


图 2-9: 319#焙烧温度时间关系图

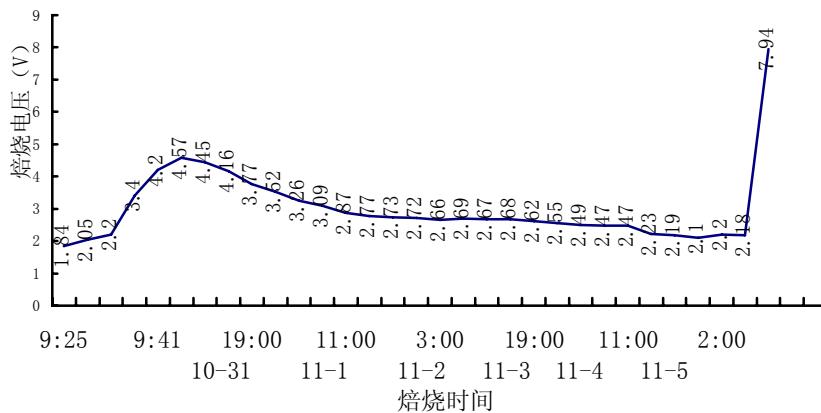


图 2-10: 319#槽焙烧电压与焙烧时间关系

通过以上对 214# 和 319# 槽焙烧期间电压、槽温的分析可知, 由于焙烧启动技术优化措施的应用, 电压走势良好, 没有大的波动; 槽温上升速度很稳定, 且全槽温度分布比较均匀。通电至全电流时, 冲击电压偏高, 因管理较好, 故未出现任何异常现象。启动后期, 这两台槽一切正常, 阴阳极极电流分布合理。且使焙烧时间缩短, 较好地发挥了焦粒焙烧的优点。

2.5.2 412#槽焙烧启动优化效果评价

1. 通电情况

该槽于 2005 年 1 月 13 日 8 时 55 分通电焙烧, 采用分流片为钢制从阳极钢梁焊接在对应的阴极钢棒头的分流技术。通电后电流上升平稳, 冲击电压为 4.83V。电流电压情况见表。

表 2-11 电流电压情况

时间	8:57	9:00	9:05	9:09	9:10
电流kA	99.7	120	160	200	230
电压v	1.39	2.43	3.51	4.54	4.83

2. 焙烧情况

表 2-12: 焙烧槽温与焙烧时间的关系表

时 间	温度 1	温度 2	温度 3	温度 4	温度 5	温度 6	平均温度
1月 13日 14:35	21	25	38	20	35	44	30.5
11:35	35	60	58	27	126	103	68.2
12:35	68	109	70	52	272	163	122.3
13:35	114	253	124	103	517	139	208.3
14:35	166	377	207	179	974	130	338.8
15:35	247	436	208	205	1020	170	381
18:00	450	501	201	260	1050	320	463.7
20:00	775	545	220	330	1120	450	573.3
22:00	854	520	280	380	1126	450	601.7
1月 14日 2:00	948	619	392	364	1163	369	642.5
6:00	1010	663	420	491	1121	389	682.3
10:00	1010	790	438	540	1100	398	712.7
14:00	1006	940	488	539	1040	462	745.8
18:00	1010	990	460	530	1110	550	775
22:00	1000	930	510	540	1030	540	758.3
1月 15日 2:00	990	970	680	652	1048	659	833.2
6:00	1060	935	720	736	982	723	859.3
10:00	986	960	735	742	950	761	855.7
14:00	1000	1000	764	752	980	776	878.7
18:00	970	1020	725	680	971	746	852
1月 16日 2:00	1010	994	826	785	952	821	898.00
4:00	986	995	857	823	946	897	917.33
6:00	967	967	896	872	953	880	922.50
8:00	979	984	922	904	948	893	938.33
1月 17日 6:00	995	994	799	905	944	893	921.67
14:00	1060	995	830	916	950	861	935.33
18:00	998	978	861	922	952	876	931.17
22:00	1000	984	918	924	940	879	940.83
1月 18日 2:00	988	996	916	934	955	889	946.33
4:00	1010	980	940	944	934	895	950.50
6:00	1003	1000	937	939	949	910	956.33
8:00	1004	995.6	954	940	951	923	961.27

(1) 分流片工作情况

通电后，电流上升至 40kA 时，开始对分流片进行检查和测量，至电流送至全电流时 AB 两面分流片工作基本正常。因电流上升至 40kA 后，就开始用风管对分流片进行散热处理，故无法对分流片进行温度测量。第二日上午 9:01 拆除分流片进行全电流焙烧，分流片拆除前槽电压为 3.70~3.75 伏，拆除后为 3.90--3.98V。

(2) 焙烧期间的槽温变化情况

从焙烧开始以后就对槽温进行监控，在 A、B 两侧分别选定三个点对槽温进行测量，在 10: 35 进行第一次槽温测量，至下午 15: 35 每一个小时测量一次，以后 每四个小时进行一次测量，其测量值和槽温变化情况见表 2-12 和图 2-11。

(3) 焙烧期间的电压情况

电流送全后，每半个小时记录一次槽电压。整个焙烧过程中电压变化情况分别见表 2-13 和图 2-13。

图 2-12: 412# 槽焙烧温度与焙烧时间关系曲线

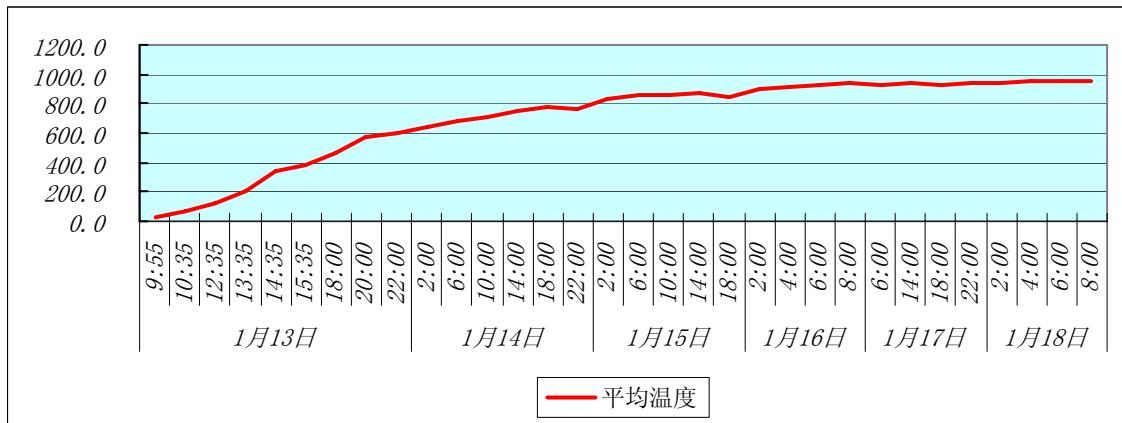


图 1 焙烧时间与平均温度曲线

表 2-13: 412# 槽焙烧电压与焙烧时间的关系表

时间	1月13日			
	8:55	09:0	9:05	9:10
电压	1.39	2.43	3.51	4.54
时间	1月14日			
	11:30	14:30	17:30	20:30
电压	4.26	3.94	3.76	3.54
时间	1月15日			
	2:30	6:30	10:30	14:30
电压	3.25	3.01	2.81	2.71
时间	1月16日			
	2:30	6:30	10:30	14:30
电压	2.46	2.45	2.42	2.38
时间	1月17日			
	2:30	6:30	9:30	4:30
电压	2.25	2.24	2.23	2.2
时间	1月18日			
	2:30	6:30	9:30	4:30
电压	2.25	2.24	2.23	2.2

(4) 焚烧期间电流分布变化情况

4. 焙烧期间电流分布情况

焙烧期间电流分布数据太多，故只抽取几天的电流分布测量数据来加以分析。

表 2-14: 412 # 槽焙烧电流分布数据

时间	大面	1	2	3	4	5	6	7	8	平均
13 日	A	2.4	2.3	2.1	2.3	2.0	2.0	2.3	2.5	2.2
9: 10	B	1.9	2.5	2.8	2.4	2.9	2.3	2.4	2.1	2.4
13 日	A	2.1	2.0	2.9	1.9	3.8	3.0	4.2	2.0	2.7
13: 10	B	2.3	3.5	3.2	2.2	2.9	2.6	2.7	2.3	2.7
14 日	A	1.8	3.5	2.8	3.8	4.2	3.2	2.6	1.7	3.0
11: 10	B	3.5	4.3	2.3	3.3	2.3	3.5	2.9	2.0	3.0
14 日	A	2.1	3.0	2.8	3.4	4.1	3.3	3.8	2.9	3.2
16: 00	B	3.6	1.4	2.7	3.9	1.5	3.8	3.0	2.7	2.8
15 日	A	1.8	3.0	2.6	3.5	3.8	3.6	3.2	1.8	2.9
2: 10	B	3.1	3.4	2.5	4.0	3.0	2.8	3.1	0.7	2.8
15 日	A	2.0	3.8	3.2	5.2	5.8	5.1	3.6	2.4	3.9
14: 10	B	4.3	6.8	3.8	5.2	1.9	2.7	2.8	0.5	3.5
16 日	A	1.5	5.0	3.2	4.8	2.8	5.2	3.5	1.8	3.5
8: 25	B	5.2	5.9	3.5	5.9	2.3	4.3	2.7	0.6	3.8
16 日	A	2.7	5.2	3.4	4.3	3.0	4.8	2.9	2.3	3.6
17: 10	B	3.6	5.0	3.3	5.7	2.5	3.7	3.0	2.0	3.6
17 日	A	2.9	4.7	3.0	4.0	3.8	3.2	3.3	3.4	3.5
1: 0 0	B	4.4	3.8	2.9.	4.5	2.7	3.8	3.0	4.3	3.7
17 日	A	4.9	4.7	3.2	4.5	3.8	3.9	3.8	2.7	3.9
7: 0 0	B	3.6	4.4	2.9	4.0	2.7	4.3	2.7	2.3	3.4
18 日	A	4.8	4.4	3.6	4.4	3.9	3.9	4.7	3.0	4.1
8: 2 0	B	3.9	4.5	3.7	4.6	3.4	4.2	4.6	2.8	4.0

3、启动过程

1月18日9: 30 拆除软连接，拆除前电压为 2.4V，拆除电压后为 3.1V。手动上抬电压,电压保持在 8.1--13V 之间，保持时间为 4.5 个小时。15: 00 启动完毕 15: 00--20: 00 电压保持为 6.4--7.1V 之间，1月18日20: 00 至 1月19日 10: 00，电压保持在 6.0V 左右。

1月19日10: 10 该槽灌入第一包铝，总量为 5.4t，灌入后电压为 5.2V。10: 30 灌入第二包铝，总量为 5.2t，灌入后电压为 5.5V。尔后逐渐降至 正常。整个过程结束后铝水平 15cm，电解质水平为 30cm。

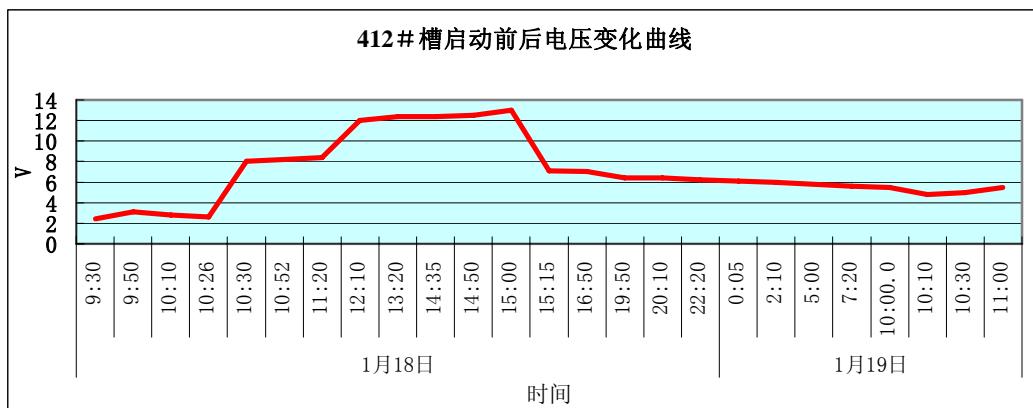


图 2-14: 412# 槽启动前后电压变化曲线

通过以上对该槽焙烧期间电压、槽温的分析可知，电压走势良好，没有大的波动；槽温上升迅速而均匀。通电至全电流时，冲击电压为 4.54V，没有出现任何异常现象。启动后期，该槽一切正常，阳极极电流分布合理。较好地发挥了焦粒焙烧启动技术优化的优点。

2.6 本章小结

通过对几次焙烧启动效果的对比，我们不难发现优化后的各种数据及焙烧启动效果明显好于优化前的焙烧启动效果；在实践上证明了 230 千安电解槽焙烧启动优化措施的可行性、科学性。总体说主要有一下几点：

- 1) 电解槽的焙烧启动工作是电解槽生产的开端，要以科学理论和技术为依据，在实践生产中与时俱进，以延长电解槽正常生产和电效高效期为目的，不断优化工艺。
- 2) 从电解槽焙烧启动操作工艺的各个角度看，它还是一项系统的管理工程，必须加强技术和管理方面的培训，以适应生产的需要。
- 3) 经过技术优化的焦粒焙烧启动方法，使电解槽的阴阳极电流分布更加均匀，升温速度更加合理，槽温分布均匀，避免了局部过热的现象，扎固糊焦化良好，可望获得较长的槽寿命，降低吨铝生产生本。
- 4) 采用焦粒焙烧启动技术，简便实用，成本低廉，易于操作。
- 5) 在电解槽启动后的一年中，后期管理非常重要，应严格避免技术条件的大起大落，有了这一年的平稳运行期后，电解槽的运行将会非常稳定，不仅高效低耗，减少劳动强度，也有利于延长电解槽寿命。

第三章 230kA 预焙槽电解生产技术综合优化研究

3.1 概述

电流效率对电解槽来说是一个最为重要的技术经济指标，它的高低直接决定了电解铝企业效益好坏，也是衡量电解槽状况的基本参数。以大屯铝业公司一期 84 台 230kA 预焙电解槽为例，若电流效率提高 0.1% 则全年增加经济效益近九百多万。但衡量计算其高低不能只在短期（比如一个月或两个月）分析，电解槽短期内电效较高这并不能说明电解槽运行处于平稳状态。本章以提高生产现场 230kA 预焙电解槽电流效率为研究目的，从技术管理角度分析了影响电流效率的主要因素，并在此基础上进行了生产技术条件的优化匹配研究。

3.2 230kA 预焙槽原有的生产技术参数及问题剖析

作者所在生产现场 230kA 系列预焙电解槽于 2004 年 10 月开始焙烧启动，至今部分槽龄已近一年多，其电流效率见图 1。可以看出，在生产初期相当低，且电流效率随着生产时间的延长而不断提高，这主要得益于工艺技术条件的逐步稳定以及管理操作质量不断提高。但电流效率仍没有达到设计值（93.0%）且变化较频繁，在我看来主要是因为没有及时将技术条件最优化，再有就是在操作质量和管理水平上还有待进一步提高。

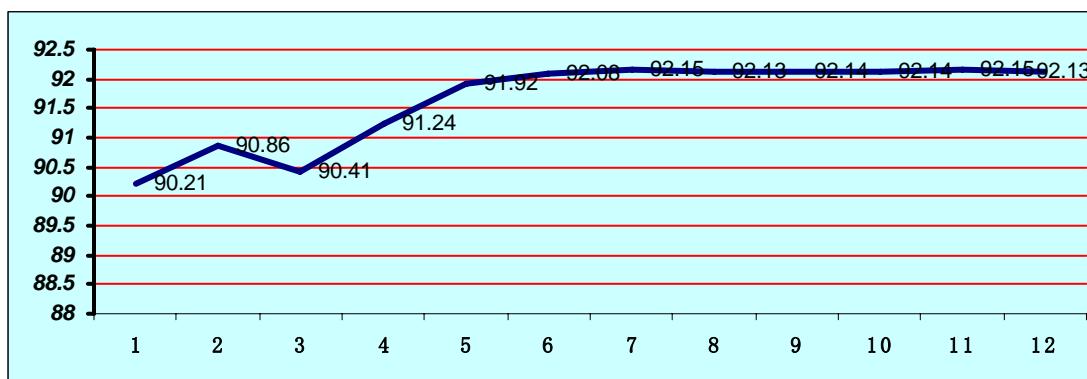


图 3-1: 230kA 预焙电解槽电流效率曲线图

从理论上讲，电解槽的工艺技术参数一定，电流效率就是一定（因为其产铝量是一定的），它不依人们意志为转移，电解槽不会因为我们主观上想出多少铝就会多产铝。相反，人为的破坏电解槽的工艺技术参数会带来不可弥补的损失。电解槽的工艺技术参数一旦破坏，恢复起来非常困难，这在生产中不止一次的得

到了验证。从一定程度上表明了以电解槽工艺技术参数的稳定为管理目标是非常符合电解铝自身的技术特点。为此我们可以在不影响电解槽稳定的基础上将技术参数加以优化，也就是在生产实践中淘汰掉不合适的，将诸多的技术条件（参数）合理匹配，从而使电解槽达到最佳状态，使电流效率能够达到新的水平。表 3-1 为生产现场电解槽设计指标。

表 3-1：230kA 电解槽原设计技术条件

参数	电解质 温度	分子比	氧化铝 浓度	阳极效 应系数	极距	槽工作电 压	电解质 水平	铝水 平
单位	℃		%	次/ 台·日	cm	V	cm	cm
数据	940–960	2.3–2.5	2–3	0.3	4–4.5	4.14–4.18	20–22	18–20

3.3 230kA 预焙槽生产技术条件优化匹配研究

3.3.1 电解温度

电解温度是指电解生产中电解质的温度。电解质温度=电解质初晶温度+过热度。它是电解生产一项极为重要最基本的技术条件。电解槽的温度是技术条件之间、技术条件和操作方法之间搭配优劣程度的综合反映，不能单独对其调节，应与其它技术条件与相应的操作方法相互配合来实现。电解质温度过高会增加金属铝的损失，降低电流效率，并能熔化炉膛，增加物料消耗，导致病槽。温度过低的电解质，其密度增大，粘度增大，铝液与电解质分离不开，阳极气体不易畅快排出，炉膛过小，伸腿伸长，电解质溶解氧化铝的能力降低，阳极效应系数增大，炉底沉淀增多，电解槽底部易长结壳，分子比下降，电解质急剧收缩，严重时造成滚铝，产生病槽，生产紊乱，使各项生产指标大幅度下降。因此，保证电解槽的正常电解温度，对于提高电流效率、降低消耗是大有益处的。正常电解温度的保持有赖于其它技术条件以及相适应的操作制度的配合。

正因为铝电解温度是由电解质初晶温度加过热度构成。在铝电解生产过程中，降低电解温度有两条基本途径：（1）降低电解温度与电解质初晶温度之差值，即电解质过热度；（2）降低电解质初晶温度。对于降低电解质过热度问题，因为过热度选择与控制加料技术有很大关系，随技术进步过热度已由原来认识的 30℃—

50℃下降到 20℃-30℃,目前已到认为 10℃-15℃的水平。在铝电解生产过程中,要取得好的技术经济指标和电解槽运行稳定,就必需降低电解质的过热度这只有通过控制好电解槽的热平衡和物料平衡才能实现,电解槽的热平衡是通过调整电解槽的极距、能量输入来实现的。而电解槽的物料平衡是通过对氧化铝和 AlF₃的合理加料制度来实现的。但是对铝电解槽来说,热平衡和物料平衡是相互关联,相互配合的。电解槽中添加 AlF₃ 对电解槽直接或间接的影响是使电解质的初晶温度降低,过热度升高。过热度增加又导致槽侧部的散热量增加,影响到热平衡,使槽帮结壳及伸腿熔化, AlF₃ 的浓度降低。如果极距增加, 输入到电解槽中的能量就会增加, 直接的影响就是使电解质的温度增加和过热度增加。电解质温度增加时, 也会使沉淀和槽帮结壳熔化, 电解质的初晶温度上升, 这反过来又使过热度降低和电解槽侧部热损失减小。

而电解质初晶温度一般由电解质成分决定,工业上经常选用的电解质成份组成为 Na₃AlF₆+Ca F₂+ AlF₃+Al₂O₃,并因个组分比例不同,初晶点随之变化。降低电解质初晶温度主要是通过降低电解质分子比(即添加 AlF₃)的方法来实现。

电解温度升高,会增大铝在电解质中的溶解度,使再氧化反应加剧,电子导电增加,电流效率降低。在电解其他参数不变时,电解温度每降低 10℃,可平均提高工业电解槽电流效率约 1.5%,因此,能保证电解过程中持续进行的低温电解一直是电解工作者的追求。但是过低的槽温会使电解槽的热平衡也不容易稳定控制,电解温度的稳定性控制难度也增大。并且过低的槽温影响了氧化铝的溶解速度,致使在炉底生成沉淀和结壳的趋势大大增加,同时过低的槽温亦会影响槽寿命。

江苏大屯铝业公司 230kA 预焙电解槽由于炉膛浅,阳极部位散热量较大,在接近 940℃生产时会时常发现有沉淀产生,严重时会在炉底长结壳,使炉底状况恶化致使电流效率更低。因此最初的设计 940℃已不能维持正常生产,为了便于电解温度和电解槽状况稳定控制,应在设计值基础上分别作了调整,使其稳定在 945℃--960℃。这样既最大可能维持电解槽寿命,又能保证较高电流效率的产生,这在生产实践中也得到了验证。

3.3.2 分子比

分子比对电流效率的影响主要是通过电解温度的作用来实现。低分子比可以有效降低电解质的初晶温度,同时低分子比下的过量氟化铝可以增加铝液和电解液间的表面张力,抑制铝的溶解,降低分子比可降低电解温度,即电解质初晶温度,同时密度和粘度有所降低,从而加快电解质的流动性,有利于金属铝从电解质中析出; 钠离子 (Na⁺) 在阴极上放电的可能性小, 电解质同碳素和铝液界面

上的表面张力增大，有利于碳粒从电解质中分离和减少铝的溶解度。并且过量的氟化铝还可以抑制钠的析出。

在研究电解质分子比与初晶温度关系的过程中，首先要确定电解质中溶液中 Al_2O_3 、 CaF_2 、 AlF_3 、 LiF 的含量。因此，现场取得了大量的电解质试样，经化验分析后 Al_2O_3 浓度为 2.0% 左右， CaF_2 浓度为 5.0%-5.5%，(这里的浓度均为质量百分比浓度)。对于 LiF 的浓度根据文献确定为 1.0%。由文献[9]给出的电解质温度的关系式(见公式 1)计算出分子比在 1.9-2.8 之间所对应的电解质初晶温度，见图 3-2。

公式 1 中括号内各种添加剂均为质量百分比， AlF_3 为过量百分比。

$$\begin{aligned} T(\text{°C}) = & 1010.6 - 0.177[\text{AlF}_3] + 20.0005[\text{AlF}_3] + 4 - 6.646[\text{Al}_2\text{O}_3] \\ & + 0.168[\text{Al}_2\text{O}_3] + 2 - 2.853[\text{CaF}_2] - 4.6[\text{MgF}_2] - 9.2[\text{LiF}] \end{aligned}$$

式中括号内各种添加剂均为质量百分比， AlF_3 为过量百分比，此公式适用范围是：0-12% CaF_2 、0-14% AlF_3 、0-6% LiF 。由于我公司没有采用 MgF_2 作为添加剂，因此其含量基本为零。

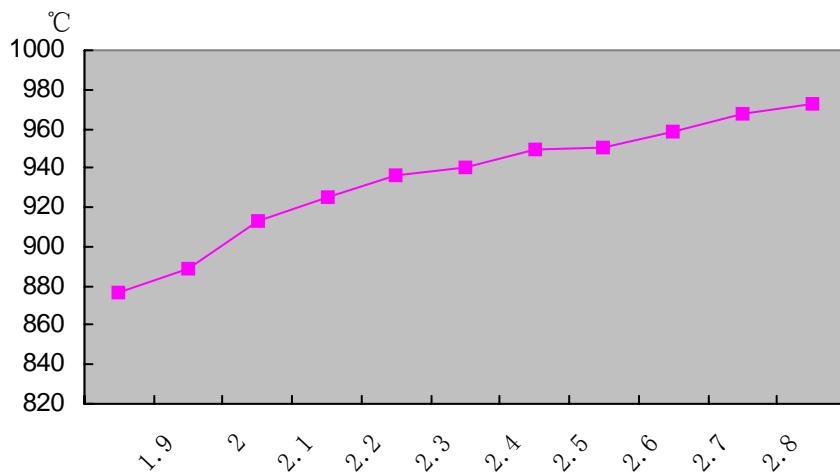


图 3-2：分子比与电解质初晶温度关系

我国铝工业界前辈邱竹贤教授等人研究指出，分子比每减少 0.1，大约是电流效率提高 0.5%。在我国电解铝厂中，一直习惯于用传统的低温、低分子比来提高电流效率的方式组织生产。这也不能说完全不对，实验研究表明，低温、低电解质分子比确实有降低铝在电解质熔体中的溶解度和溶解速度，减少铝的溶解损失，显著提高电流效率的作用。但低温、低电解质分子比的负面作用是，电解质成份的稳定性、热稳定性大大降低，由于电解质成份不稳定性增加，容易产生沉淀，而沉淀又不容易溶解，槽帮不结壳，伸腿过长、过大，造成水平电流大，槽电压不稳，铝水摆动大，效应系数多，电解质电阻大，反电动势高等缺点。而不容易使低温、低分子比操作达到理想的提高电流效率的目的。此外，由于电解槽的热稳定性降低，电解槽阴极内的电流分布不均，槽内衬应力不均匀，也容易降

低电解槽的寿命。因此总结来说过低的分子比也是不利的:一明显增加氟化铝的消耗,二槽电压必须相应提高,三影响氧化铝的溶解速度,四对电流效率继续贡献减弱,五是对电解槽使用寿命有着重大影响。因此必须综合进行经济性分析。国外工业槽分子比有低于 2.0 左右作业的。但对 230kA 电解槽进行的大量实践数据计算结果表明,分子比保持在 2.25-2.45 时比较理想, 在这一点上和初步设计不一致, 并且若要保持极距不变, 则分子比每降低 0.1, 设定工作电压应相应提高 20mv —30mv 左右, 以弥补低分子比带来的缺陷。实践生产中设定电压和分子比关系见表 3-2。

表 3-2: 230kA 电解槽电解质分子比与槽电压设定电压关系

分子比	2.7	2.5	2.4	2.3	2.2
槽设定电压 (V)	4.11	4.14	4.16	4.19	4.20

3.3.3 氧化铝浓度

过去的研究表明工业电解槽的电流效率随着氧化铝浓度增大而提高. 而其后的研究又表明, 当氧化铝浓度为 4% 时会出现电流效率的最低点。槽电压与氧化铝浓度的关系研究指出, 当氧化铝浓度为 3.5%-4.0% 时, 存在槽电压的最低值。工业槽的实践也证明, 勤加工、少下料是良好的作业标准。可以说对氧化铝浓度的高区 (>4%) 与低区 (<3.5%) 的选择, 就是对槽稳定性的选择。所以, 现代工业电解槽通常采用氧化铝浓度为 1.5%-3.5% 的低区要求。这不仅是因为现代电解槽的控制依据是槽电阻—氧化铝浓度曲线。而且此浓度取得电解质导电率较高, 氧化铝溶解性能较好, 既不易产生沉淀, 又不易发生阳极效应, 利于电流效率的提高。但这必须寻求控制和加料技术的支持。控制低氧化铝浓度也就是采用模糊控制, 氧化铝浓度正常控制在 1.5-3.5% 之间, 效应的临界状态氧化铝浓度为 1% 左右, 所以不能使氧化铝浓度低于 1.5%, 但氧化铝浓度不能过高, 过高, 易产生沉淀, 所以保持合适的氧化铝浓度, 使电阻曲线斜率较大, 也便于计算机监测和识别。

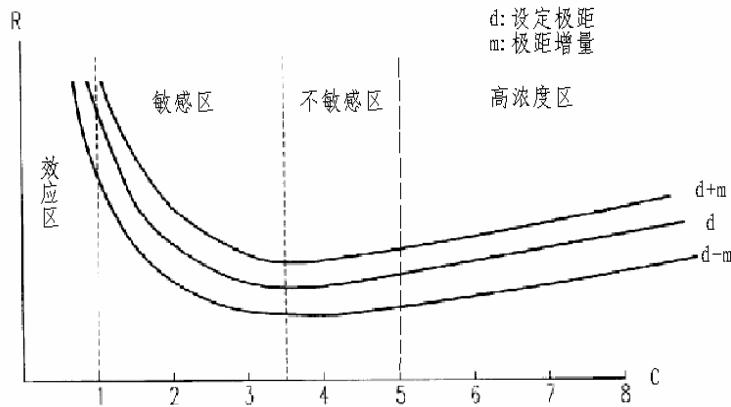


图 3-3: 氧化铝浓度曲线

有关氧化铝浓度影响电流效率机理的研究指出，当高氧化铝浓度电解时，电解质/铝液界面存在悬浮的氧化铝颗粒，可阻碍铝的再溶解过程；降低氧化铝浓度，则电解质的二氧化碳溶解度降低，电解质表面张力增大，气泡尺寸增大，排除扰动作用减少，再氧化几率降低，这都有利于提高电流效率，而且在对铝业公司新近的多研究均表明，随电解质氧化铝浓度降低，电流效率提高。而我公司 230kA 预焙电解槽采用模糊控制的思路是：采用氧化铝浓度较低一侧的电阻曲线为浓度的代用值，将 1.5-3.5% 的范围为控制目标，使用过量加料，正常加料和欠量加料不断转换的方法，保持浓度处于持续合理的波动中，利于槽电阻上升（或下降）斜率值的大小判定浓度处于何段范围，从而决定过量向欠量转换（见图 3-3 所示）。实际的氧化铝浓度 1.5%-3.5% 和设计指标 2%-3% 相比，基本一致，所存在的误差可能是由于取样化验不准确造成。

3.3.4 阳极效应系数

阳极效应期间会使电解质与铝液界面产生较大扰动，电解质局部温差增大，对流传热加剧，整体温度升高，故电流效率降低。而熄灭阳极效应的作业无论是采取何种方式，均会造成率的溶解损失和再氧化加速，进一步降低电流效率。

对阳极效应的新认识指出，所谓“效应”实际上就是电极上析出的气体时的一种特殊现象，只是发生在铝电解的阳极上而已。所以，可以认为阳极效应只是铝电解过程中的必然，而不是铝电解过程的必须。因此，追求更低的阳极效应系数是铝电解工作者的目标之一，也是提高电流效率的有效手段。控制合理的加料制度，电解质中的氧化铝浓度适宜，温度适宜，可避免槽子发生过多的阳极效应，可节约电耗。只要槽子正常，尽量不来效应。

目前国外已普遍采用阳极效应自动熄灭技术，不仅能很好的预防阳极效应的发生，而且能有效降低阳极效应损失。而国内仍旧沿用人工熄灭效应的作业，增加了太多的人为干扰因素。所以我们的目标是效应系数越低越好，即控制在 0.1 次/台·日。目前，我公司效应系数为 0.3 次/台·日，在这一技术上我们还存在不足，因为它要求更加准确的氧化铝加料和加工制度。

3.3.5 极距和槽工作电压

从趋势上讲，极距增大，阳极气体对铝液溶解的搅动程度减轻，铝损失减少相当于提高电流效率。反之，相当于降低电流效率，对电流效率的贡献会趋于稳定。因此，我们不必力求以提高极距的方法来寻求电流效率的改善。而另有研究指出在工业槽上极距每降低 1cm，则电流效率降低 4%，所以为安全起见，工业电解槽长控制极距为 4.5 cm 左右，并力图控制极距是铝电解槽一个经常不变的重要工作参数。

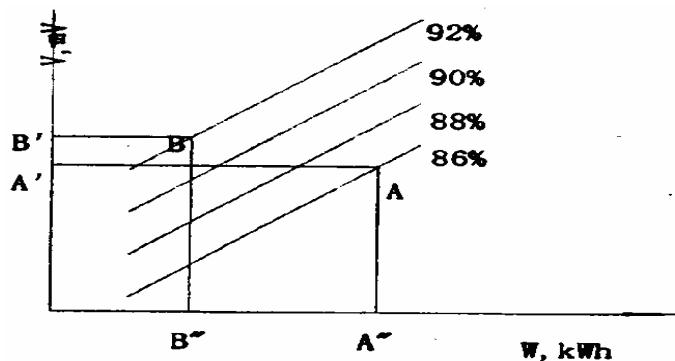


图 3-4: 电流效率、槽电压、电耗关系图

某种意义上讲，槽工作电压如人体血压一样，时刻表明着铝电解槽的工作状态，是电解槽进行自动控制的重要依据，槽工作电压与电流效率的关系不是直接的，一般表现为：减少压接压降、Fe-C 压降、阳极压降等无功压降，相当于提高电流效率；二所谓高电压高效率的过程是通过低分子比和低槽温的途径实现的。为保持铝电解的极距不变，要求槽电压设定以分子比每降低 0.1 则相应提高 30mv。230kA 电解槽将分子比降至 2.2-2.4 时，槽工作电压必须相应提高至 4.14—4.20 V 左右，有一点需要说明：那种认为高电压相应带来较高的电耗，使得生产成本增加的观点不一定很对，从图 4 可以看出高电压 B' 得到得高电流效率 B 和较低的电耗 B''，所取得的综合经济效果要比低电压 A' 取得综合经济

指标要好。

3.3.6 电解质水平

有学者指出，边部下料电解槽电解质水平每提高 1cm，大约使电流效率增加 0.3%。但是对中间下料的电解槽来说，其贡献绝对不低于这个数字。实际上电解质水平对电流效率的有益贡献，主要源于提高电解槽的稳定性作用。足量的电解质液体不仅可以提高电解槽的热稳定性，而且对电解温度变化有较强的自平衡能力。而适宜的电解质水平，能为加料后的氧化铝提供足够的溶解空间，防止产生沉淀。但保持过高的电解质水平也是不现实的，一要考虑残极高度和化钢爪因素；二是要避免阳极气体的排除困难和上层电解质的过度扰动；三是考虑经济性因素和出铝使电解质的损失。所以，国内工业槽上经常选择电解质高度为 20-22 cm，而国外较高精度控制的工业槽上电解质可保持 14--16 cm 水平。我公司 230kA 预焙电解槽生产实践和设计一样，保持在 20-22 cm。

3.3.7 铝水平

工业实践证明，电解槽内铝液水平对电流效率的影响是很大的。过去的许多研究指出，铝水平过低过高都是不宜的，适宜的铝水平为 18-20cm。但现在国内保持 20-22cm 高铝水平作业者认为，这有利于铝电解槽温度均匀，及时的传导阳极底部的过热，传递槽内多余热量，形成稳定的炉膛；以弥补磁场不平衡所产生的缺点，从而有效提高电流效率。而保持 18-20cm 低铝水平作业者认为，其有利于促进槽底沉淀的熔化，降低铝液波峰的高度，利于实现低极距的电解生产，避免局部短路从而提高电流效率。双方观点各异，且都有例证，但提高电流效率的目的和效果是一致的。国外也有工业槽保持 14-16cm 铝水平，取得较高电流效率的报导。因此合理的解释只能是不同的槽型、不同的磁场，需要不同的铝水平。最好的解决办法是利用槽膛形状计算机仿真技术，对大型预焙槽不同铝业水平槽帮结构的变化进行研究，并确定了铝电解槽正常生产时最佳的铝夜高度。现代电解槽典型的散热设计为：50% 的热量经过顶部，40% 的散热量经过侧部，只有 10% 的经过炉底。从下表可以看出随着容量增加，电解槽侧部槽壳单位面积散热量增加。可是大型槽设计时要考虑让热量从阴极侧部释放出去，否则电解槽炉帮很难形成，侧部碳块会很快被腐蚀掉。所以 230kA 系列预焙电解槽电解槽在产铝量要保持多一些，以 17-18 吨为宜。

表 3-3: 各槽型单位散热面积比较^[10, 11]

槽型 (kA)	单位散热槽面积 (m ² / kA)
160	0.220
200	0.190
230	0.188
300	0.171

即 230kA 系列预焙电解槽最佳的铝夜高度在 20cm 左右, 此时不仅形成规整的炉膛, 较小的铝液镜面, 且槽炉帮较厚, 阳极和阴极的电流分布也较好。这得到了实践上保持 19-21cm 铝水平作业, 取得了较好效果的验证。

3.3.8 其它条件的优化

以电解槽生产系列电压零点漂移为检验手段, 不断处理系列电路和槽体的接地漏电现象, 减少电流空耗。并强化过程管理, 回收提炼铝渣、铝灰, 降低铸造烧损指标, 杜绝铝的浪费现象, 这些都是对提高电流效率的另外一种体现。

另外在电解槽的管理上, 无论技术方面有什么样的技术观点, 都必须追求平稳高效的目标, 不同技术条件下的平稳运行, 都会取得其相应的高效指标。因此, 统一作业标准, 保证平稳运行, 尽量减少对电解槽的人工干扰, 提高一次性作业质量。在电解槽的管理上是极其重要的。某种程度上讲, 管理理念尤其是操作质量对电流效率的不良影响不亚于不恰当的技术条件摆放。

3.4 230kA 预焙槽生产技术条件综合优化运行效果评价

表 3-4 是生产试验现场优化后的生产工艺技术条件, 图 3-5 是采用优化条件后试验槽 (132# 和 122#) 和对比槽 (125#) 电流效率统计图。从图中可以看出, 采用优化的工艺技术条件可以明显地提高生产现场的电流效率。

表 3-4: 优化后工艺技术条件

参数	电解质温度	分子比	氧化铝浓度	阳极效应系数	极距	槽工作电压	电解质水平	铝水平
单位	°C		%	次/台·日	cm	V	cm	cm
数据	945-960	2.25-2.45	2-3	0.3	4-4.5	4.16-4.20	20-22	19-21

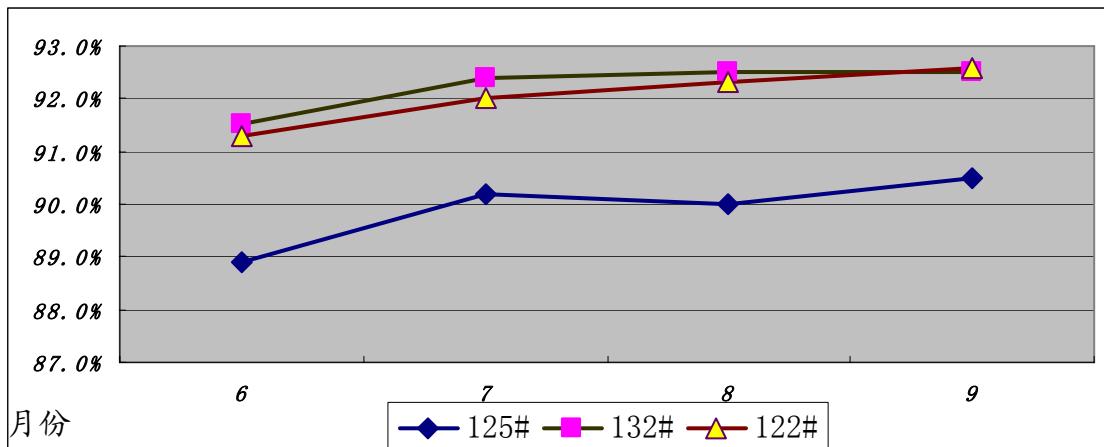


图 3-5：采用优化后工艺技术条件与采用原设计技术条件电流效率对比
其中：125#槽采用原设计技术条件；122#槽和132#槽采用优化后技术条件（仅抽取3台作比较）

3.4 本章小结

- 根据生产现场电解槽电流效率低的状况，从电解质温度、分子比、氧化铝浓度、阳极效应系数、极距、槽电压、电解质水平以及铝水平等方面对电解工艺技术条件进行了全面优化。
- 生产统计结果表明，优化后的电解槽与对比槽相比，电流效率提高了0.45%。系列电流效率达到了92.75%。
- 生产实践经验表明，随着优化条件在电解槽上的大面积推广使用，生产现场的整体电流效率还会有大幅度的提高，表明优化的工艺技术条件具有明显的增效效果。
- 在既定环境条件下，230kA预焙铝电解槽都存在一个稳定地电流效率，合理利用技术手段来确保电解槽技术经济指标和槽寿命至关重要。

第四章 结论与展望

作者通过对 230kA 预焙铝电解槽焙烧启动和工艺技术条件的综合优化研究，结合本人长期在铝电解生产第一线的工作经验，获得了如下的研究成果。

虽然我国电解槽型号众多，但是对于 20 万以上新建系列电解槽来说，采用焦粒焙烧、干法无效应启动应是一种值的推广的实践技术之一。

通过对 230kA 预焙铝电解槽焙烧启动的综合优化研究，可以得出一个结论那就是焙烧启动的过程需要一个平稳、有序的过程。在焙烧启动的生产实践中切忌急躁反复，要及时根据电解槽的状况适时适势的加以改变工作方法，从而确保电解槽的平稳启动。

结合 230kA 预焙铝电解槽焙烧启动的综合优化研究结果，我们可以得出结论并可以展望，采用焦粒焙烧、采用湿法启动是一种最理想的焙烧启动方法，这也是我们下一步的工作目标。

对 230kA 预焙铝电解槽生产技术的综合优化研究表明，不同的电解槽型有着不同的生产技术条件，关键是要保证技术条件不破坏，稳定的技术条件对于电解槽来说是最重要的。

技术条件确定之后，关键就是要良好的作业质量作为保障，良好的作业质量和作业习惯对电解槽来说非常重要。

虽然在我国大型预焙铝电解槽的开发应用已经有多年的历史，也取得了许多技术创新成果，但是，围绕优化铝电解生产技术条件和改善焙烧启动方法，以达到进一步提高电解槽电流效率、降低电解能耗和原材料消耗以及延长电解槽寿命的目标，是铝电解生产和科研工作者的一项长期而又艰巨的任务。本人在铝电解生产和管理第一线工作多年，深刻体会到要想进一步提高铝电解槽、其中尤其是大型预焙槽的生产技术指标，还需要业内人士的共同努力，我相信，在我们的共同努力下，一定会创造出铝电解行业更加光辉灿烂的明天。

参考文献

- [1] 邱竹贤. 预焙槽炼铝[M]. 冶金工业出版社, 1998
- [2] 邱竹贤. 铝电解原理与应用[M]. 中国矿业大学出版社, 1998
- [3] 杨重愚. 轻金属冶金学[M]. 冶金工业出版社, 1991
- [4] 高子忠. 轻金属冶金学[M]. 冶金工业出版社, 1993
- [5] 沈阳铝镁设计研究院. 初步设计 2001
- [6] 干益人等. 大型预焙电解槽焙烧工艺探讨. 轻金属. 2000. 9
- [7] 江苏大屯铝业有限公司焙烧启动方案. 内部资料. 2003. 10
- [8] 任永杰. 预焙槽炼铝的焦粒焙烧和启动工艺. [M] 甘肃文化出版社, 2000
- [9] 邱竹贤. 预焙槽炼铝(第三版). 北京: 冶金工业出版社, 2005.
- [10] 田应甫. 大型预焙铝电解槽生产实践[M] 中南工业大学出版社, 1997
- [11] 李朝辉. 预焙槽焦粒焙烧启动工艺的实践及探讨. 轻金属. 2006. 9
- [12] 曹新东. 电解铝生产技术分析及总结. 中国有色工程. 2006. 10
- [13] 吴智明. 160 千安电解槽电流效率的提高. 青铝科技. 2003. 10
- [14] 青铝人. 160 千安电解槽生产实践. 东北大学出版社. 1999.
- [15] 许茜, 邱竹贤. 铝电解质初晶温度的拟合及预报. 有色金属. 1995. 5
- [16] 李金国. 技术进步与电解铝工业的发展. 轻金属, 2003 (4)
- [17] 刘钢. 优质阴极是铝电解稳定生产的保证. 青履冶金, 2001, 1
- [18] 冯乃祥, 徐英林. 我国铝工业现状和国外先进技术水平的差距, 轻金属, 2001 (7)
- [19] 霍庆发. 电解铝工业技术与装备. 沈阳: 辽海出版社, 2002
- [20] 邱竹贤、王家庆等译. 铝电解导论(挪威). K·格罗泰姆, H·克望德. 沈阳:《轻金属》编辑部, 1994
- [21] 姚世焕. 开发新的 300kA 预焙槽的必要性. 《铝镁信息》 1999. 第 1 ~2 期
- [22] 中新丹. 铝电解技术和应用. 中国洛阳: 研讨会论文. 03 年 10 月
- [23] 邱竹贤. 铝电解原理与应用 中国矿业大学出版社 1998.
- [24] 姚世焕. 铝电解理论与实践在近代大型预焙槽上的应用. 南山集团讲义 2003
- [25] 王建军、刘海石 电解槽寿命的判定 第五届铝电解专业委员会论文集 (2005)
- [26] 龚春雷、李晓波、刘钢. 浅议延长铝电解槽寿命的技术方案及实践. 轻

金属 2003 (6)

- [27] 刘桂华、明瑞涛 影响铝电解槽寿命的因素探讨 轻金属 2000 (4)
- [28] 张明杰, 邱竹贤. 论铝电解质组成和加工制度的进展[J]. 轻金属, 1990, (2)

致 谢

本文是在导师李劼教授的悉心指导下完成的。在三年的工程硕士学习过程中，导师给予了我在学习和生活上无微不至的关怀，在此对尊敬的导师李劼教授表示诚挚的感谢。此外，在论文完成过程中，还得到了本人工作单位江苏大屯铝业有限公司各级领导和同事，以及中南大学冶金学院轻金属研究所全体教师和研究生们的大力支持，在此一并表示谢意。

三年的学习时间虽然短暂，但我相信，这段美好的时光将会深深印在我的脑海中，她将时刻鞭策我努力工作，不断进取，为我国铝电解工业的发展奉献我的一切。