

分类号_____

密级_____

UDC_____

编号_____

中南大學

CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

硕士学位论文

论文题目: 铝电解槽高温烟气焙烧过程中

加热制度的选择与控制

研究生姓名: 王金融

学科、专业: 控制工程

学院(系、所): 信息科学与工程学院

指导老师: 桂卫华(教授) 张久明(教授级高工)

分类号 UDC_____

密级_____

硕士学位论文

铝电解槽高温烟气焙烧过程中 加热制度的选择与控制

The Selection and Control of Heating System in the
Process of High-temperature Fume Prebaking
of Aluminum Reduction Cell

作者姓名: 王金融
学科专业: 控制工程
学院(系、所): 信息科学与工程学院
指导教师: 桂卫华 (教授)
张久明(教授级高工)

论文答辩日期_____

答辩委员会主席_____

中 南 大 学
年 月

摘 要

面对电解铝行业竞争与机遇并存的时代,关注企业的经济效益成为永恒的主题。随着电解工艺日趋成熟、不同企业电解铝各项经济技术指标日愈趋同(同类技术装备水平),诸如原铝的交流电耗、电流效率、氧化铝消耗、阳极消耗与氟化盐消耗的差距正在缩小。作为电解铝生产的核心设备铝电解槽的寿命还存在着较大的差距,由此对电解铝的生产成本造成了较大的影响。也就是说在某种程度上电解铝工业的竞争归根结底要体现在铝电解槽寿命。

经研究分析认为:影响铝电解槽寿命因素大致体现在铝电解槽设计、筑炉材料、筑炉工艺、焙烧工艺和生产操作工艺等五个方面。论文研究了在目前技术水平情况下影响铝电解槽寿命的瓶颈因素为铝电解槽的焙烧方法。论文对目前国际上常用焙烧方法—铝液焙烧法、焦粒焙烧法和火焰直接焙烧法进行了分析比较,结合国内外相关领域的研究现状,选用了高温烟气焙烧法。

为确保高温烟气焙烧技术优势的充分发挥,论文结合铝电解槽的焙烧标准对铝电解槽高温烟气焙烧的加热制度进行重点研究。主要通过铝电解槽槽底的传热数学模型分析热量的变化,为铝电解槽烟气焙烧的加热制度的制定提供理论依据;研究结果表明采用 72 小时的缓慢加热制度较为合理,其主要体现在焙烧效果和焙烧经济性等方面。

为确保高温烟气焙烧方法的有效实施,研究开发出了高温烟气焙烧系统,高温烟气焙烧系统主要由燃烧装置和控制系统构成。说明了控制系统的硬件组成、控制算法和软件的实现。以铝电解槽阴极表面温度和烟气中的空气过剩系数为主要控制参数。通过 PLC,运用增量 PID 算法,依据论文研究的加热制度和现场标定的风油比例系数对控制对象进行有效的控制,实现了铝电解槽的高温烟气焙烧。

论文所研究开发的基于 PLC 与增量 PID 算法的高温烟气焙烧过程自动控制系统在山西关铝股份有限公司的 75kA 铝电解槽上进行工业应用并取得较好的效果。

关键词: 铝电解槽, 高温烟气焙烧方法, 加热制度, 焙烧控制系统

ABSTRACT

Facing the time of opportunities and competitions existing in aluminium electrolyze industry, the economic effects will become the constant subject noticed by the enterprises. With the electrolyze processes becoming more and more maturity and the economic parameters also becoming more approach (the same class technology and the equipment), the parameter difference of the aluminium reduction cell become much small such as the electricity consumptions, the current efficiency, the alumina consumptions, consumptions of the carbon anode and the fluoride melts consumptions. But the cells' life still has the many differences, at the same time, the issue can be effect the aluminum production cost, which is the industry main equipment. In another words, the competitions of the industry lie in the cells' life.

In light of the study, we think the factors effect, the cell's life have the five factors, include of the cells devise, the materials for cells installation, the quality of the install cells and the production managements of the aluminium electrolysis. In this paper, the author thinks the bottle-neck factor effect the cells' life is bake technology. The paper discusses the common bake technology, such as the metal bake, coke bake and the fume bake method. Just on the base of the relevant fields study in our nation and other country, the paper expound the high temperature fume bake method.

In order to confirm the technology the carrying out, the temperature system's choice in the high temperature fume bake, which is this paper's emphasis. This paper provide the theory evidence for raising the temperature system of the cell , in terms of variety coming from the conduction math model element, and the paper also believe the 72h gradual increase the temperature system is justified , which behave in the bake results and the economic effects.

In order to apply the technology fully, the paper develop the high temperature fume bake system, which be comprised of the burn facilities and control system. The research is also emphasis, focusing on the made up principle, hardware, the calculating methodology and the software is this paper's emphases. The main object to control is the temperature distribution of the coke baked cathode and the air superfluity coefficient in the fume. The paper realize the high temperature fume bake through PLC, PID numerical calculation, relying on the raising temperature system and controlling effectively proportion coefficient between the air and the oil on line.

The high temperature fume bake developed from PLC and the PID numerical calculation already is used successfully on the 75 kA of the Shan xi Guan Aluminum Group Lt. d, and received the good results.

KEY WORDS: aluminum reduction cell, the high temperature bake method, the raising the temperature system, the bake control system

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
第一章 绪 论.....	1
1.1 炼铝发展概况.....	1
1.2 电解铝工业发展概况.....	1
1.3 电解法炼铝工艺流程.....	2
1.4 铝电解槽发展概况.....	4
1.5 铝电解槽寿命与原铝生产成本的关系.....	5
1.6 影响铝电解槽寿命的因素分析.....	6
1.7 论文研究的内容和结构安排.....	7
第二章 铝电解槽的焙烧方法.....	8
2.1 铝电解槽的阴极结构.....	8
2.2 铝电解槽焙烧目的.....	8
2.3 铝电解槽焙烧方法.....	9
2.4 铝电解槽焙烧效果评价.....	10
2.5 传统焙烧方法的比较.....	11
2.6 高温烟气焙烧法.....	12
2.7 小结.....	14
第三章 铝电解槽高温烟气加热制度的选择.....	15
3.1 铝电解槽槽底传热数学模型描述.....	16
3.1.1 物理模型及简化假设.....	16
3.1.2 基本方程.....	16
3.1.3 边界条件.....	17
3.2 模型求解及计算工况.....	18
3.2.1 模型求解.....	18
3.2.2 计算工况.....	18
3.3 铝电解槽高温烟气焙烧的传热特性.....	19
3.3.1 阴极上下表面温度及表面热流.....	19
3.3.2 快速加热制度时铝电解槽槽底断面温度分布.....	21
3.3.3 慢速加热制度时铝电解槽槽底断面温度分布.....	23
3.4 铝电解槽高温烟气焙烧的加热制度.....	25

3.4.1 加热过程中阴极炭块上、下表面温度变化.....	25
3.4.2 供热强度和燃料消耗量的变化.....	27
3.4.3 加热终了时电解槽槽底各层的温度分布.....	28
3.4.4 各焙烧制度的比较.....	29
3.5 小 结.....	30
第四章 高温烟气焙烧过程自动控制系统的.....	31
4.1 控制系统的原理.....	31
4.2 控制系统的硬件构成.....	33
4.3 增量式 PID 算法.....	34
4.4 控制软件系统的实现.....	36
4.5 控制系统辅助装置.....	38
4.6 小结.....	39
第五章 铝电解槽高温烟气焙烧技术的工业应用.....	40
5.1 高温烟气焙烧技术在 75kA 预焙槽上的应用.....	40
5.2 75kA 铝电解槽焦粒焙烧实例.....	45
5.3 小结.....	45
第六章 结论.....	47
参 考 文 献.....	48
致 谢.....	51

第一章 绪论

1.1 炼铝发展概况

炼铝的历史可划分为两个阶段：化学法炼铝阶段和电解法炼铝阶段。

1、化学法炼铝阶段

1825年丹麦厄尔施泰用钾汞还原无水氯化铝，得到一种灰色的金属粉末，在研磨时呈现银色光泽，但当时未能加以鉴定。1827年，德国韦勒用钾代替汞还原无水氯化铝，也得到铝灰色粉末。1845年，他把氯化铝蒸气通过熔融钾表面，结果得到金属铝珠，每个重10~15毫克。后来法国的维特尔用钠代替钾还原 $\text{NaCl}\cdot\text{AlCl}_3$ 络合盐，制取出金属铝。1854年在法国巴黎附近建立了钠还原法炼铝小工厂。1865年俄国别克托夫提议用镁还原冰晶石来生产铝，这种方案后来在德国盖墨林根铝厂得到采用。后来在1887~1888年间，电解法炼铝工厂开始投入生产，化学法便逐渐停止了。

2、电解法炼铝阶段

1807年英国的戴维曾试验电解法炼铝，但未成功。1854年德国的本生和法国的维特尔分别研究了 $\text{NaCl}\cdot\text{AlCl}_3$ 的电解，制得金属铝。维特尔还试验了各种以冰晶石为基础的混合熔盐电解，曾提出要用氯化铝来补充冰晶石电解质里的铝。但是，在那时用蓄电池作电源太贵了，而且不能获得较大的电流，因而不能用电解法进行工业实验。后来1867年发明了发电机，并在1880年加以改进，才使之可以用于工业生产。1883年美国的布雷德利提出了利用氧化铝溶于熔融冰晶石的特性来电解冰晶石-氧化铝熔盐的方案。三年之后美国的霍尔和法国的埃鲁不约而同地申请了冰晶石-氧化铝熔盐电解法的专利并得到了批准，这就是历来称呼的霍尔-埃鲁法。1888年在美国匹兹堡电解厂内建造了两台预焙阳极铝电解槽，1887~1888年间，瑞士冶炼公司利用莱茵河上水力发电站的电力，采用冰晶石-氧化铝电解法炼铝。以后其它各国相继采用该法炼铝。法国开始于1889年，德国开始于1898年，挪威开始于1906年，意大利开始于1907年，西班牙开始于1927年，苏联开始于1931年。

1.2 电解铝工业发展概况

自世界上首次发现铝土矿以来，铝工业已经走过了一个世纪。其间中国的铝工业也走过了50多年的发展历程，在“优先发展铝”的方针指引下，中国铝工业取得了令世人瞩目的成绩。我国自改革开放以来尤其是20世纪90年代

至今,铝工业得到了高速发展,特别是经过最近几年的高速发展,中国已经成为全球铝工业关注的焦点和亮点。我国采用先进技术和装备先后新建了山西铝厂、平果铝厂、中州铝厂、青海铝厂、华北铝加工厂等大中型企业,同时,还对抚顺铝厂、贵州铝厂、郑州铝厂、山东铝厂、青铜峡铝厂、西南铝加工厂、兰州铝厂、焦作铝厂、云南铝厂等企业进行了技术改造,此外,部分地区也积极推进当地铝工业的技术进步,极大地改变了我国铝工业整体技术装备水平落后的状况。据统计:2002年我国年产原铝436万吨,占世界原铝产量的15.9%,在2003年,中国原铝产量541.9万吨,占世界总产量的24.7%,2004年中国原铝产量683.7万吨。在世界铝产量排序上,我国由90年代初排位第七名,2002年一举跃居世界第一名,并稳定保持,这是令世界瞩目的成绩。但是我国现有电解铝厂数量多、规模小、集约化程度低、劳动生产率低、电解效率低、电耗高、槽寿命短、环境污染严重。据统计,我国现有电解铝厂133个,年产10万吨以上的铝厂仅10多家,小型铝厂过多,因而造成投资分散,生产规模集中度不够,市场竞争能力弱。单位企业产能水平远远低于国外水平,难以形成规模效应。2003年,以原铝产量排名的全球前9家企业的原铝产量在70万—350万吨之间,位于第9名的中铝的产量大约在72万吨。2003年中国原铝厂平均产能为5.67万吨/年,而国外原铝平均产能为19.9万吨/年,全球原铝企业平均产能亦有11.6万吨/年。分散化的经验背离了全球铝工业的发展趋势,所导致的后果就是中国铝工业的整体丧失规模经济性,因此对于建设铝厂条件不优越的地方,要从严控制,避免盲目地建设那些技术落后,环境污染严重的自焙电解槽,应当把有限的资金和资源集中使用,建设技术先进的现代大型预焙槽大厂,形成规模效益,增强综合实力,使我国铝工业尽快地赶上国际先进水平。

从全球来看,除我国外,目前世界有产铝国家42个,电解铝厂125个,2002年全世界原铝总产量2750万吨,铝工业企业向大型化、规模化、集约化方向发展,电解铝工艺技术向大型现代化预焙阳极电解槽及其配套高新技术方向发展。若以人均消费量评价,我国与世界差距更是惊人,2002年我国铝消费量425万吨,人均年消费量3.2公斤,只占世界人均消费量4公斤的80%左右;发达国家和地区人均消费量都在20公斤左右,其中:日本达32公斤、美国达29公斤、德国达26公斤。由此可见,我国在铝的产消上尚有很大发展潜力。

1.3 电解法炼铝工艺流程

电解铝是以氧化铝为原料、以直流电提供电化学反应能和保证电解温度、以氟化盐为氧化铝溶解的熔剂、以碳素阳极为消耗性导电材料,同时利用铝电解

槽设备时行电解电化学反应把氧化铝生成原铝的过程，其生产的工艺流程如图 1-1 所示。

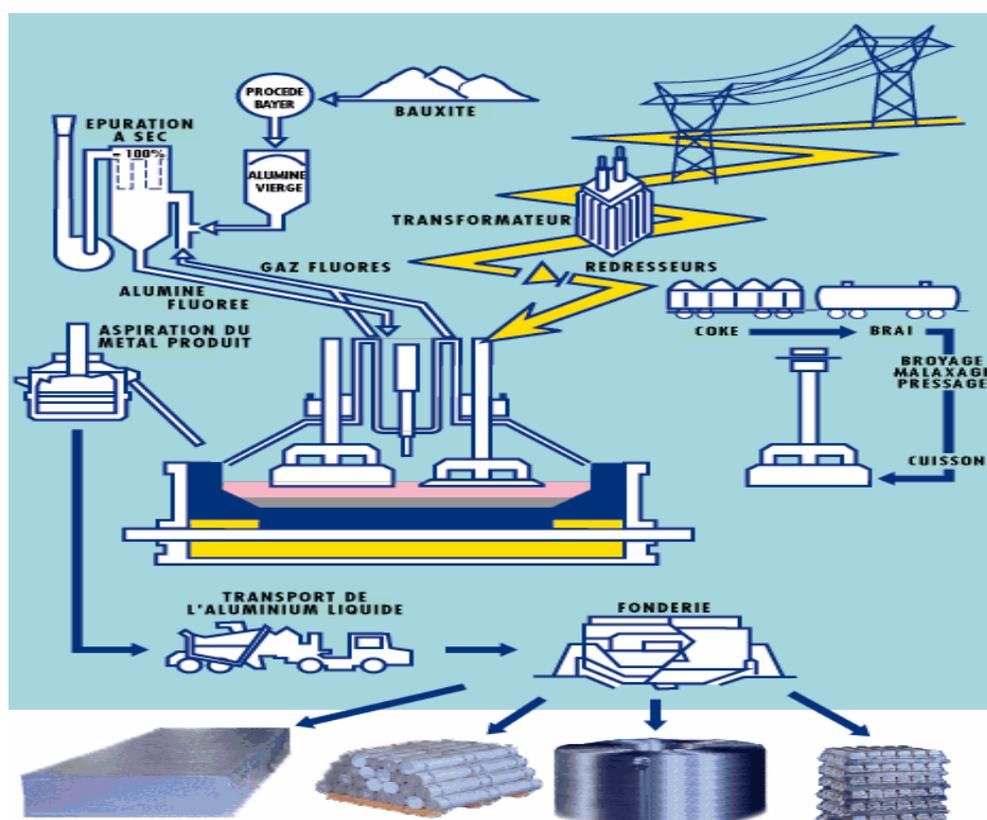


图 1-1 电解法炼铝工艺流程图

电解铝工艺的主要经济技术指标为：电流效率、直流电单耗、综合交流电单耗、阳极单耗、氟化盐单耗、阳极效应系数、槽寿命等。

铝电解槽在正常的技术条件下和规范的操作下进行电解生产。电解槽的常规作业包括加料、出铝、换极作业等几项：

- 1、加料（NB）：向电解槽中按需添加氧化铝以确保电解生产的连续进行。
- 2、出铝（TAP）：确保技术条件的稳定性，定时按量从电解槽中抽出铝液。
- 3、换极作业（AC）：为确保生产的连续性，定期更换阳极即取出残极换上新极。
- 4、抬母线（IRR）：为确保生产的连续性，定期将阳极母线大梁抬到上限位。
- 5、熄灭效应（AEB）：阳极效应为铝电解熔盐电解的特有现象，由于其的出现对电解指标造成影响，需及时进行熄灭。

1.4 铝电解槽发展概况

冰晶石-氧化铝融盐电解法自十九世纪发明以来已有近百年的历史了。随着相关技术的发展,铝电解槽的生产技术有了重大的进展,尤其是近三十年铝电解技术有了突飞猛进的进步。铝电解槽作为电解生产的主体设备如图 1-2 所示,铝电解槽发展体现在以下几个方面^[4]:

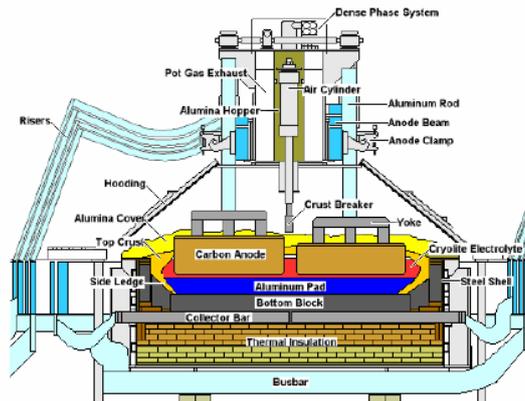


图 1-2 工业铝电解槽示意图

1、阳极的预焙化 工业铝电解槽从发明到现代化生产经历了由预焙阳极—自焙阳极—连续预焙阳极—预焙阳极的转变。这主要是基于对环保的要求和电解铝生产成本的降低。通过对阳极的集中焙烧可使其中的有害气体(沥青烟气)进行集中处理,使其排放达标;同时预焙阳极铝电解槽的烟气更有利收集与干法净化。阳极的预焙化使得铝电解槽的指标更合理。

2、铝电解槽的大型化 工业铝电解槽的初期曾采用 4000~8000A 的电流其每日的产量仅为 20~40kg,随着与铝电解槽相关技术的发展,铝电解槽的电流强度已达到 200~350kA(已普通应用于电解铝工业生产);特别是法国彼施涅的 AP50 其电流强度已达到 500kA、单槽日产量为 3825kg、系列槽为台系列产能为 40 万吨。由于铝电解槽投资占电解铝项目的%,同时随着产能的增加,相关辅助设施的分摊费用也会大幅下降,在条件允许的情况下,企业每每以增大产能来降低单位投资,这样铝电解槽的大型化也成为必然。

3、铝电解槽的高效化 随着预焙阳极的使用、阳极质量的改善、阳极电流密度的提高;电解槽按需下料的自动控制应用;铝电解槽设计模拟技术应用,“三场”指标优化,铝电解槽产量得以大幅提高,电流效率由 70%提高到目前最高的 96%、而电能消耗由铝工业发展初期的 42kWh/kg,降低到现在的 13kWh/kg。

4、铝电解槽的长寿化 铝电解槽的寿命主要是指电解槽阴极寿命,电

解槽寿命已由铝工业初期几百天提升到现在的 2000~3000 天。随着铝电解槽的大型化，虽然吨铝的单位投资不断降低，但单台槽的投资却在不断提高，一台 190kA 铝电解槽的阴极投资约为 40 余万元，而 300kA 铝电解槽则约为 60 余万元。这样从经济学的角度来说，在铝电解槽的大型化的同时更应该考虑电解槽的阴极寿命。

现代工业铝电解槽的发展主要体现在以上几个方面，在关注原铝生产成本的同时我们不得不注重铝电解槽寿命对原铝成本的影响。

1.5 铝电解槽寿命与原铝生产成本的关系

铝电解槽作为原铝生产的主体设备，它不仅在电解铝项目一次性投资中占较大的比例，而且在正常生产过程中电解槽投资和投入费用在原铝成本中分摊比例也影响着企业的经济效益，所以投资者把铝电解槽作为项目规模和项目经济评价的重要指标。这里我们以山西关铝股份有限公司电解一分厂的 75kA、190kA 铝电解槽为例来说明不同槽型的铝电解槽寿命与原铝生产成本分摊费用的对应关系如图 1-3 所示。

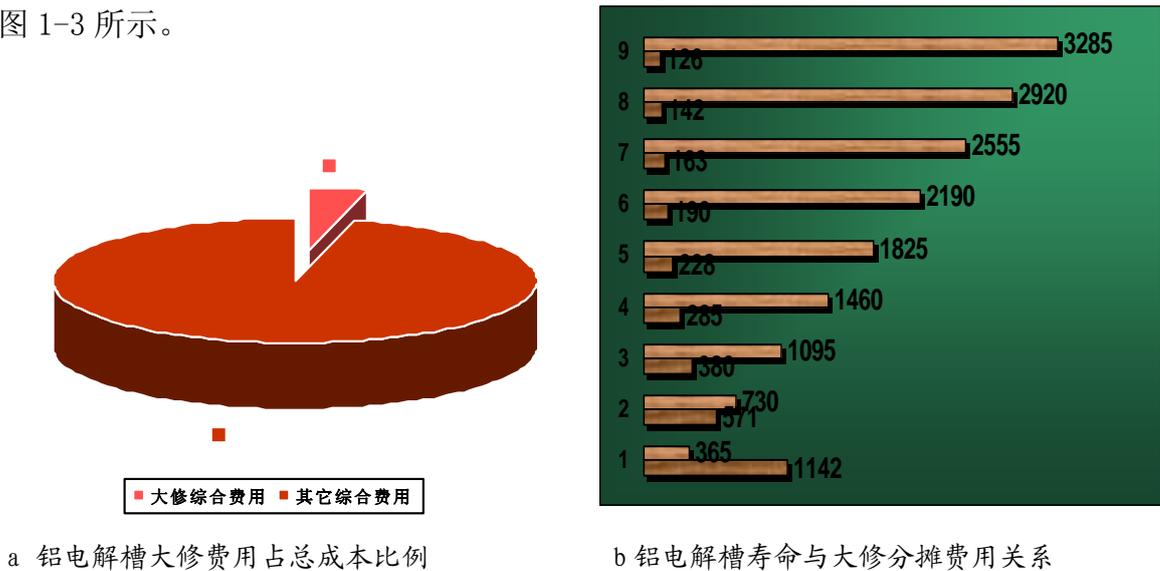


图 1-3 铝电解槽寿命与生产成本的关系

从图中我们可看出：

- 1、铝电解槽大修费用虽占原铝总成本不足 4%（平均水平），但其随槽寿命变化波动较大；
- 2、随着槽寿命缩短，尤其是铝电解槽早期破损原铝分摊成本大幅上升，甚至影响到企业的盈亏点。

在如此竞争激励的市场经济中，尤其是在宏观政策调控的影响下（银根紧缩、电力紧张、电价上涨、碳素材料供应紧张、原铝出口退税取消及加收关税和氧化

铝进口关税的增收)，电解铝行业进入微利时代甚至亏损时代。原铝生产的利润空间已被压榨得所剩无几，挖潜增效已成所有原铝生产企业追求的目标，从槽寿命与原铝生产分摊成本来看，给人们提出铝电解生产提出了一个新的课题——如何延长铝电解槽使用寿命，降低原铝的分摊成本，增强企业的综合竞争力？

1.6 影响铝电解槽寿命的因素分析

铝电解槽使用寿命的研究分析是铝电解生产中永恒的主题。由于其原铝生产成本的相关性，同时也其也对铝电解槽的生产指标、设备利用率都有着较大的影响，为此我们有必要研究影响铝电解槽寿命的末端因素。理论上讲铝电解槽的使用寿命可 10 年甚至 10 年以上，但在实际的生产过程中，由于种种因素的影响槽寿命都不同程度地要打折扣，甚至出现早期破损 (<500 天)。按学术界的传统观念来看⁽³⁾，影响铝电解槽使用寿命的主要因素及其所占比例可分为：阴极设计 20%、铝电解槽筑炉工艺 20%、材料质量 10%、焙烧启动方法 25%、技术条件和工艺操作 25%如图 1-4(a)所示，以上诸多因素中的任何一项的严重失误都会使铝电解槽寿命受到严重的影响，论文认为这可用木桶效应来解释，如图 1-4 (b) 所示。

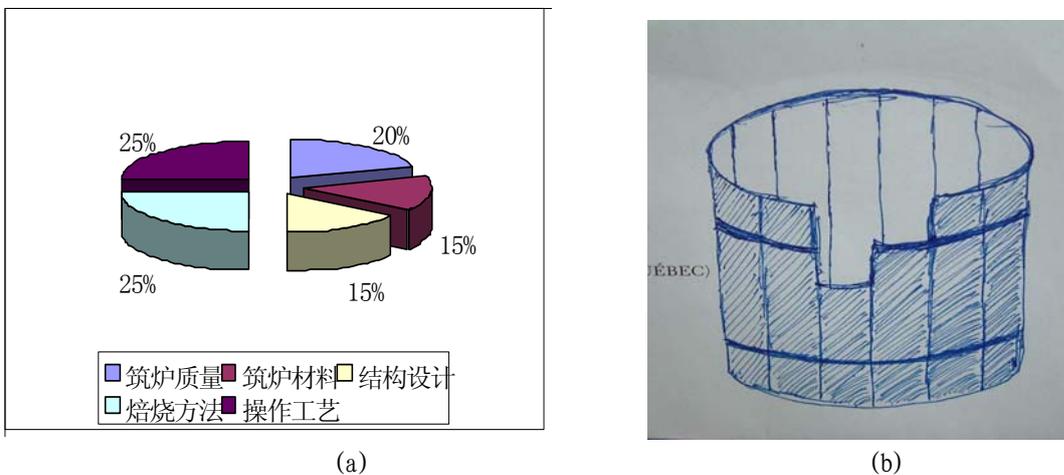


图 1-4 影响铝电解寿命的因素

目前国外的平均槽寿命约为 2000 天左右，甚至达到 3000 天以上，而我国的电解槽使用寿命约为 1500 天，甚至不足 1000 天⁽⁶⁾。经过近十年的努力，我们的铝电解槽设计水平、材料质量、筑炉工艺、操作水平都有了长足的进步，在某种程度上也达到国际先进水平。不足之处，就是我们的焙烧技术和理念还落后于国际先进水平，如当国外已基本淘汰铝液焙烧技术时而我们还在大面积使用。

同时作为电解铝主体设备，铝电解槽在其生命周期内生产过程可分为三个

阶段，即焙烧、后期管理和正常生产阶段如图 1-5 所示。其中，焙烧阶段大约是几天，然后是电解槽的后期管理，其余绝大部分时间属于正常生产阶段，约 4~5 年甚至更长。焙烧阶段虽然时间很短，但是焙烧启动的好坏对于以后的正常生产以及电解槽的寿命有很大的影响。

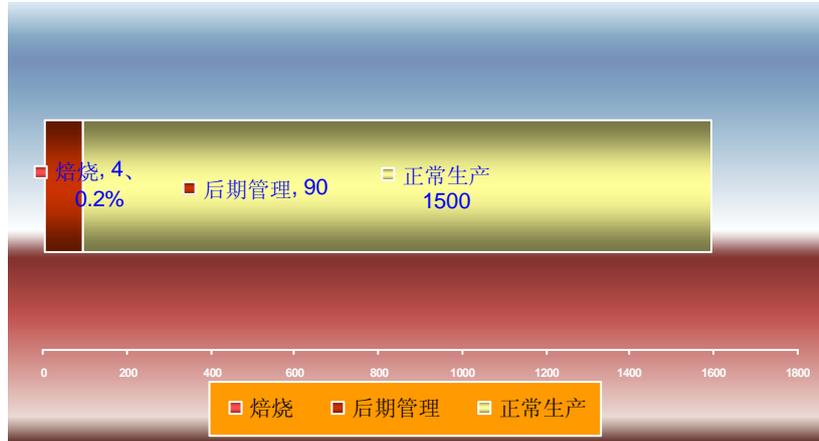


图 1-5 铝电解生命周期示意

1.7 论文研究的内容和结构安排

我们以上谈到电解铝的发展概况、铝电解槽的发展趋势、铝电解槽寿命与原铝生产成本的相关性，也谈到了影响我们铝电解槽寿命主要因素以及我们的差距。为此论文将选择正确焙烧方法以达到延长槽寿命的要求？选择最佳加热制度以对电解槽进行合理的焙烧；设计科学的高温烟气焙烧过程自动控制系统以保证好的方法、最佳的制度得以有效落实。从而达到提高铝电解槽寿命、降低原铝生产成本的目的。

论文研究的整体安排共分为六章：

- 1、分析在目前技术水平情况下，槽寿命与企业经济效益的关系；
- 2、对目前国内外铝电解槽焙烧方法进行分析来选择科学焙烧的方法；
- 3、选择了较好的焙烧方法，但加热制度对电解槽的寿命还起较大的影响作用。
- 4、为确保加热制度的有效实施，论文研究烟气焙烧自动控制系统满足加热制度的效果。
- 5、为体现自动控制系统的效果，论文焦粒焙烧方法与其进行对比。
- 6、论文对以上内容进行总结。

第二章 铝电解槽的焙烧方法

2.1 铝电解槽的阴极结构

铝电解槽的阴极是由碳素内衬（包括阴极碳块、侧部碳块和填充材料）、阴极导电棒、耐火材料、保温材料和槽壳组成。它们依据电解槽热场、力场和磁场等设计来确定具体的尺寸和结构，具体的结构如图 2-1 所示。

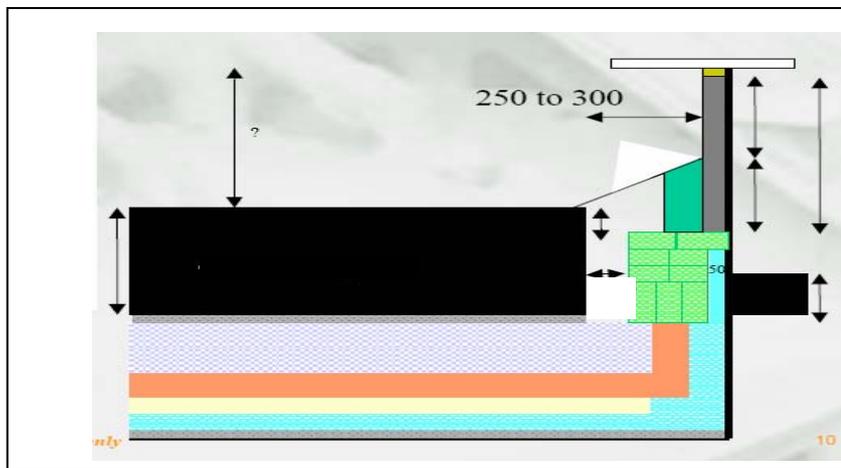


图 2-1 铝电解槽的阴极结构示意图

铝电解槽阴极的碳素内衬起着熔融金属、电解质耐火容器作用，同时也起着导电的作用。阴极的破损一般是指电解槽的阴极碳素内衬破损不足以起到容器和导电的作用。

2.2 铝电解槽焙烧目的

在铝电解槽第一次投运或经大修后都需经焙烧启动、后期管理后才能转入正常生产。铝电解槽焙烧的目的主要基于以下几个方面考虑：

- 1、使铝电解槽平稳地由室温转入高温（阴极碳块上表面温度达 900°C 以上、下表面温度达到 750°C 以上），避免热冲击对内衬的损坏，尤其是对碳素内衬的损坏。

- 2、使阴极碳块之间、阴极碳块与侧块之间的扎固糊得到良好的焙烧，使其与阴极碳块成为一体，并具备相近的性质。

- 3、使阴极内衬中的水分得到充分、缓慢的驱逐，以免对内衬材料造成损坏。
- 4、对形成电解质的物料进行充分的预热或熔化，为电解槽的启动提供条件。

焙烧是铝电解槽使用周期中不可或缺的重要环节，如何在低成本下提高铝电解槽的焙烧质量，方法则显得尤其重要。

2.3 铝电解槽焙烧方法

按照热量的来源来讲，铝电解槽焙烧方法可分为热阻法和燃料法两大类。电阻法可按焙烧时所用发热电阻物料的不同又可分为铝液焙烧法和焦床焙烧法；燃料焙烧法最常用的燃料为液化石油气和天然气，其工作原理相同。这里对铝液焙烧法、焦床焙烧法和燃料焙烧法分别介绍如下：

1、铝液焙烧法

铝液焙烧法是利用原铝作为发热电阻对电解槽进行焙烧。其操作方法为：在铝电解槽砌筑和安装完毕后，将一定量液态金属铝灌入铝电解槽阴极，再将阳极下降与铝液充分接触并保证极距高度，以使其满足电解槽焙烧热量的供给。然后通过短路口的操作使电解槽通电，这样可以对电解槽进行焙烧。

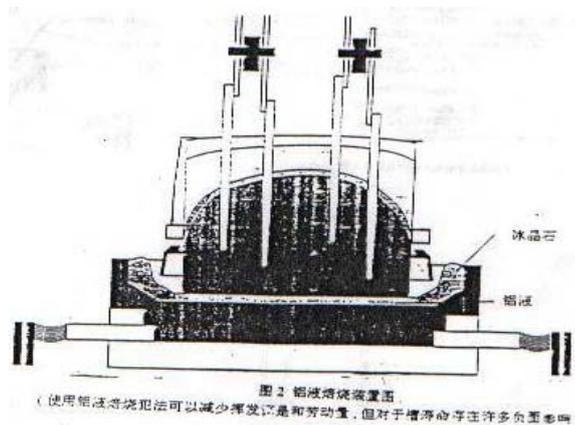


图 2-2 铝液焙烧法示意图

2、焦粒焙烧法

焦粒焙烧法是利用焦床（焦粒、石墨等）作为发热电阻对电解槽进行焙烧。其操作方法是在阳极与阴极之间铺设一定厚度的焦床，以满足电解槽焙烧热量的供给。然后通过短路口的操作使电解槽通电，这样可以对电解槽进行焙烧。

焦粒焙烧方法中所选择的焦粒理化指标、粒度和粒层厚度是至关重要的，一般选用抗氧化性强、体积密度变化小和粒度适当的锻后焦粒，以利于焦粒层和阳极底掌之间的电接触良好和发热电阻稳定，应防止过细的焦粉末混入。将焦粒均匀地覆盖在整个碳阴极表面上，保护整个阴极表面不致氧化，为稳定焦粒层电阻，在吊挂阳极时如发现阳极底掌与焦粒层表面有脱离之处，应用焦粒塞满填实，这样能更好的保护阴极表面不致氧化，并得到一个稳定的焦粒电阻层。

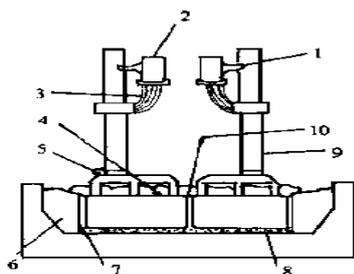


图 2-3 焦粒焙烧法示意

3、火焰焙烧法

火焰焙烧法是利用燃料燃烧的高温火焰气体对电解槽进行焙烧。这种方法可以做到使阴极内衬的温度缓慢均匀的上升，阴极表面温度均匀；对阴极的扎缝和边部扎固糊进行充分焙烧，能达到以上焙烧方法无法达到的结果。

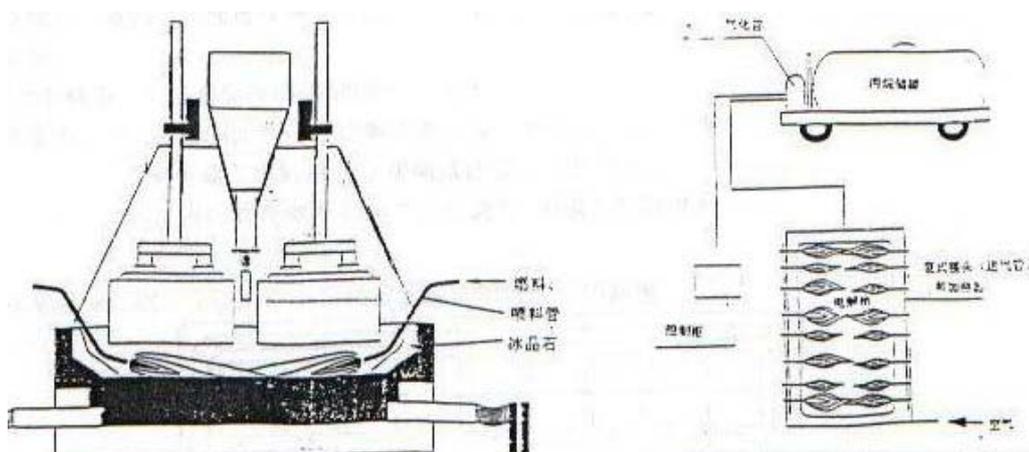


图 2-4 燃料焙烧法示意图

2.4 铝电解槽焙烧效果评价

以上所介绍的焙烧方法都可以对铝电解槽进行焙烧，但其对铝电解槽的焙烧

效果如何？能量利用率的高低？操作的方便性和安全性如何？论文从以下几个方面对这几种焙烧方法进行评价。

1、技术方面 它主要考虑铝电解槽的焙烧效果，主要体现在铝电解槽焙烧的工艺需求与焙烧功率控制的完美结合。

1) 升温速度的可控性 按照工艺要求使电解槽在一定的升温梯度进行焙烧，同时升温梯度可在较大的范围内变化且可控。

2) 阴极表面温度分布均匀性 避免因温度分布不均使得阴极碳块产生缺陷以致影响槽寿命，则要求温度分布愈均匀愈好，一般要求温度分布的相对标准差小于 10%，阴极表面杜绝有超过 1000℃的灼热点。

3) 焙烧过程中的垂直温度梯度 为确保整体阴极的焙烧效果，阴极碳块的下表面温度在可控的范围内。

4) 焙烧终了阴极表面温度 理想的情况是这一温度接近铝电解槽的正常生产温度 (>900℃)，避免启动过程中的热冲击；阴极下表面的温度达到 750℃以上。

5) 阳极电流分布 这是考核铝液焙烧法和焦床焙烧法焙烧效果的重要指标，阳极电流分布的相对标准差小于 10%。

6) 阴极电流分布 这是考核铝液焙烧法和焦床焙烧法焙烧过程及所有焙方法最终焙烧效果的重要指标，阴极电流分布的相对标准差小于 10%。

2、经济方面 主要考虑铝电解槽焙烧功率的利用率和焙烧时间对铝电解槽设备利用率的影响，一般用单位能耗 (kW/kA) 和焙烧时间 (h) 来表示。

3、操作的可行性方面 主要考虑铝电解槽焙烧投入的人力、操作标准化、标准化操作的执行难度、以及焙烧过程中的安全隐患等。

2.5 传统焙烧方法的比较

铝液焙烧法的弊端是 900℃以上的高温铝液直接接触常温的阴极炭块及捣固糊，热冲击所引发的热应力会使炭块内衬产生裂纹或层状剥离，以及液体金属可以通过炭块内衬的任何一个小裂缝进入阴极底部，并与耐火材料和保温材料发生反应，形成腐蚀空腔，并进一步发展为泄漏。另外，由于高温液体金属的直接加入，使阴极表面和捣固糊的温度迅速升至与液体金属相近的温度。铝电解槽在启动初期的断面温度梯度很高（甚至高达 800℃/m），在热应力作用下，很容易使阴极炭块产生裂纹，降低铝电解槽的寿命。而且该方法不容易控制电解槽升温的速度，同时其焙烧的完全性较差。

焦床焙烧法虽然不会导致高温液体铝渗入阴极，焙烧初期断面温度梯度也不是很大，但铺设焦粒的操作复杂，要求的精度高。如果焦粒铺设不均匀，在通电

焙烧时会导致电流不均而使温差过大。虽然焙烧初期的断面温度梯度不是很大，但随着焙烧的进行，炭块表面温度梯度逐渐加大，产生热应力不均匀，可导致变形和炭块破裂。焦粒焙烧还会使阴极炭块局部过热，焙烧终了时测的阴极表面过热和温度分布不均，局部温度高达 1600℃左右，温差高达 1100℃以上，同时其的焙烧完全性也较差。

火焰焙烧法虽可对焙烧功率有效的控制，其焙烧的自动性和完全性相对有所提高，但高温火焰对电解槽的直接焙烧使其氧化加剧。

为了更有效地说明焙烧方法的可控性、经济性、操作性和安全性，我们用下表来对比说明。

表 2-1 铝电解槽传统焙烧方法综合定性比较一览

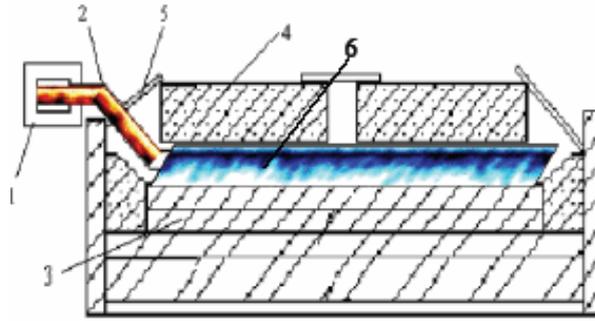
项 目	焙烧功率可控性		焙烧经济性		完全性	可操 作性	安全性	综合 性能
	升温 梯度	温度 分布	能量利 用率	焙烧 时间				
铝液焙烧法	1	2	1	1	1	2	3	9
焦床焙烧法	2	1	3	2	2	1	3	14
火焰焙烧法	3	3	2	3	3	3	1	18

注：1、2、3 分别表示为差、良、优

从上表的定性比较中我们可以看出三种方法的综合性能以燃料焙烧法较为优越，但其不足之处在于安全性，同时其焙烧过程中的阴阳极氧化性更值得关注。为此我们选用了高温烟气焙烧法。

2.6 高温烟气焙烧法

高温烟气焙烧法⁽²⁾是在燃料焙烧法基础上开发出来的，它可充分发挥燃料焙烧法的优点即焙烧功率可控、焙烧操作自动化、焙烧完全性、焙烧成本较低；同时克服完全隐患和铝电解槽阴极的氧化、灌入的电解液能填充阴极内衬和人造伸腿因焙烧而出现的裂纹，有利于延长槽寿命。其工作原理是利用燃料在燃烧室中完全燃烧产生高温烟气，然后利用高温烟气在低空气过剩条件下对电解槽有目的进行焙烧，如图 2-5 所示。



1-燃烧装置，2-烟气喷管，3-铝电解槽阴极，4-铝电解槽阳极，
5 保温盖板，6-高温烟气

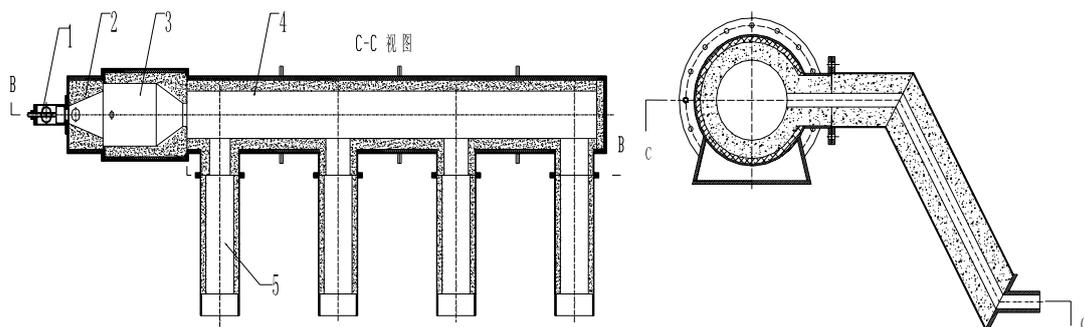
图 2-5 高温烟气焙烧法示意图

高温烟气焙烧技术与火焰直接加热的燃料焙烧技术相比，最大的区别在于烟气焙烧技术采用燃料预燃室完全燃烧方式，利用燃烧完全的高温烟气对铝电解槽进行焙烧，烟气氧含量有效控制在 1%以内，解决阴、阳极燃烧与氧化等问题。

认文采用的高温烟气焙烧装置主要包括：燃烧装置，保温密封盖板、燃料与空气供给系统、控制系统等。

燃烧装置的作用是：使充分雾化的燃料完全燃烧，将其所产生的高温烟气(低空气过剩系数)通过喷射装置以一定的速度直接喷入铝电解槽阴极与阳极所形成的空间中，将铝电解槽加热至启动所必需的温度 ($\geq 900^{\circ}\text{C}$)，燃烧装置在设计已考虑烟气分布的均匀性(论文不作研究)。

燃烧装置由五部分组成，分别是燃烧器、烧嘴砖、预燃室、分配室和喷射管，其结构示意如图 2-6 所示，图 2-7 为实物的照片。



1-燃烧装置，2-耐火墙，3-预燃室 4-燃烧室，5-分配室

图 2-6 燃烧装置示意图



图 2-7 燃烧装置实物照片

保温密封盖板的作用是：保证在焙烧期间整个电解槽内部形成一个有利于烟气循环的空间，并使烟气通过顶部散热量足够小，实物如图 2-8 所示。

燃料与空气供给系统的作用是：保证燃料与空气的供给量按控制要求供给。

整个焙烧过程中应保证铝电解槽表面的热流密度分布均匀，各阶段的加热强度和温升速度能够有效地调节控制，从而使铝电解槽阴极内部的温度分布均匀、断面梯度较小，并且铝电解槽阴极表面无明显氧化烧损。由于整个焙烧过程将持续 72 小时以上，为了能够很好的使电解槽的温度按给定曲线上升、状态监视以及故障报警，有必要采用自动控制。



图 2-8 烟气焙烧系统各装置的实物照片

2.7 小结

经过对目前国内外采用的铝电解槽焙烧方法从焙烧功率可控性、经济性、完全性、可操作性等进行定性比较，论文认为已的选用高温烟气焙烧方法为最合理的。

第三章 铝电解槽高温烟气加热制度的选择

在铝电解槽启动之前需要对其阴极进行焙烧,减小启动时的热应力以及可能对槽体造成的损害,从而延长铝电解槽的使用寿命。虽然我们具备较为科学的焙烧技术和方法,但合理的加热制度是保证电解槽焙烧效果及电解槽使用寿命的必要条件。电解槽焙烧良好的标准是^(3、5):以足以避免阴极材料产生热应力的低速度把碳素材料加热到电解槽的操作温度(900℃以上),尽量使阴极表面加热的温度梯度最小,以避免在表面上产生热应力;保证全部生糊区的沥青的热解速度,以使焙烧糊具有最佳特性。

对于碳素糊料的加热过程而言,理想的加热制度是⁽⁴⁹⁾:在200℃以前为碳素糊料的软化阶段,主要是排除吸附水和化合水,升温速度可以而且应加快,可达10℃/h,否则软化时间过长易造成碳素材料变形;在200~700℃之间,特别是200~500℃是碳素糊料的挥发份大量排出的阶段,此阶段升温速度应尽可能慢,不宜超过5℃/h,否则挥发份急剧排出使之产生焙烧裂纹,会导致结构疏松、强度降低、气孔度增加;在700℃以上,粘结剂的焦化过程已基本完成,此阶段可以适当加快,可达10℃/h。根据上述要求,可以计算出碳素糊料理论上较理想的焙烧时间应达到136小时以上。但从经济上看,焙烧时间不是越长越好,因为对100台280KA槽来讲,每延长一天,按2.7V的焙烧电压,要多支出63万元电费。当然焙烧时间也不是越短越好,缩短焙烧时间可能造成的槽寿命缩短会增加大修费20%,还会损失约10个槽日。因此,焙烧时间是加热制度的一个重要参数。

目前,国内电解槽实际的焙烧时间是⁽⁵⁾:对铝液焙烧,一般大型预焙槽的焙烧时间为7~8昼夜;对焦粒焙烧,一个典型的焦粒焙烧时间约需72小时;对石墨焙烧,当测量炉底的平均焙烧温度达到780℃时,就具备了启动条件,到达780℃的启动温度平均只需72小时。关于热焙烧的焙烧时间,除我们的研究外,国内未见其他报道;在国外,据前苏联B. M. B a r a e B的报道⁽⁴⁸⁾,焙烧时间波动于48~72小时之间。

除焙烧时间外,升温速度、电解槽槽底温度分布等也是制定合理加热制度的重要依据。因此,本章通过铝电解槽槽底的传热数学模型分析,从铝电解槽高温烟气焙烧的传热特性出发,理论上探讨升温速度对铝电解槽槽底断面温度分布的影响以及碳质材料热物性对电解槽槽底温度场的影响^(1、39),研究各种加热制度下的温度分布、供热强度和燃料消耗量的变化,为铝电解槽烟气焙烧的加热制度的制定提供理论依据。

3.1 铝电解槽槽底传热数学模型描述

3.1.1 物理模型及简化假设

研究对象为山西关铝股份有限公司 75kA 铝电解槽，鉴于物理模型的对称性，取电解槽槽底的 1/4 为计算对象。电解槽槽底结构如图 3-1，其电解槽结构及工艺技术参数如表 3-1 所示。

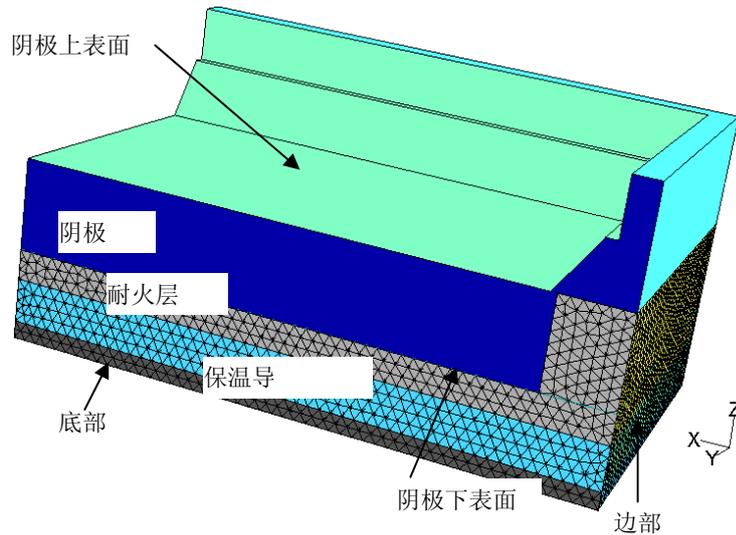


图 3-1 计算模型及网格划分示意图

对物理模型作如下假设：

1、槽底各层内衬视为均质多孔结构，其温度场用传热微分方程描述。

2、忽略液态沥青转变为固态结构的相变热能，据估计这部分热量在总的热平衡中不超过 5%。

3、槽底各层之间紧密接触，不考虑接触热阻。

表 3-1 电解槽槽底尺寸及物性参数

槽底结构		侧部结构		工艺技术参数	
硅酸钙板	0.065m	耐火砖	0.065m	电流强度	75KA
氧化铝粉	0.025m	侧部炭块	0.060m	槽工作电压	4.03V
保温砖	0.130m	阳极到侧壁距离	0.525m	阳极电流密度	0.7215A/cm ²
耐火砖	0.130m	槽膛深度	0.460m		
阴极炭块	0.450m				

3.1.2 基本方程

电解槽槽底的传热属于固体三维不定态导热，其基本方程为⁽¹⁾：

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} = \text{div}\left(\frac{\lambda}{C_p} \text{grad}T\right) + S \quad (3.1)$$

上式中 S 为源项，在本模型中，主要考虑为阴极扎糊的水分及挥发份蒸发而吸收的热。扎糊水分蒸发假设全部发生于某一固定温度下，水的汽化潜热为

$\Delta H_v = 3.1563 \times 10^6 - 2396.6T_w$, J/kg, 式中 T_w 为湿球温度。

3.1.3 边界条件

① 阴极上表面的边界条件

阴极上表面传热的边界条件按第三类边界条件处理, 即

$$\alpha_{\Sigma 1}(T_f - T_w) = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial s} \right)_{s=0} \quad (3.2)$$

式中 T_f ——加热气体的温度, $T_f = f(t)$; $\alpha_{\Sigma 1}$ ——电解槽内腔的综合传热系数, $\alpha_{\Sigma 1} = \alpha_c + \alpha_r$; α_r ——辐射传热系数, $W/m^2 \cdot ^\circ C$, 按下式计算:

$$\alpha_r = \frac{C_0}{\frac{1}{a_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \left[\frac{\varepsilon_1}{a_1} \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] / (T_f - T_w) \quad (3.3)$$

a_1 ——气体的吸收率, 可用下列经验公式来计算^[97]。

$$a_1 = \left[\frac{0.78 + 1.6 p_{H_2O} / p}{\sqrt{(p_{H_2O} + p_{CO_2}) \cdot l / p}} - 0.1 \right] \times (1 - 0.37 \frac{T_f}{100}) (p_{H_2O} + p_{CO_2}) \quad (3.4)$$

式中 p 为气体总压, p_{H_2O} 、 p_{CO_2} 分别为 H_2O 、 CO_2 的分压, l 为有效射线行程, T_f 为气体温度, K。上式的适用范围为温度在 $450^\circ C \sim 1650^\circ C$, $p_{CO_2} \cdot l = 8 \sim 60$ KPa.m 和 $p_{H_2O} \cdot l = 0.4 \sim 130$ KPa.m。

ε_1 ——气体的黑度, 可用下列经验公式来计算^[98]。

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{CO_2} + \beta \varepsilon_{H_2O} \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_{CO_2} = \exp \left\{ - \left[\begin{aligned} &1.4918 + 0.398 C_{CO_2}^{-0.2609} + (0.053 - 0.1239 C_{CO_2}^{0.1718}) \times \left(\frac{T_f}{100} \right) \\ &+ (0.003504 + 0.0009446 C_{CO_2}^{0.54}) \times \left(\frac{T_f}{100} \right)^2 \end{aligned} \right] \right\}$$

$$\varepsilon_{H_2O} = \exp \left[0.5708 - 1.2016 C_{H_2O}^{-0.2146} - (0.0038 + 0.05133 C_{H_2O}^{-0.2105}) \times \left(\frac{T_f}{100} \right) \right]$$

$$\beta = 1 + (5 + 5.3114 C_{H_2O}^{-0.01191}) \times p_{H_2O}^{0.77705} \times C_{H_2O}^{-0.1561}$$

$$C_{CO_2} = p_{CO_2} \cdot l, C_{H_2O} = p_{H_2O} \cdot l$$

α_c ——对流传热系数, 考虑为辐射传热系数的 15%。

② 槽底侧面及槽底底面的边界条件

侧面及底面传热的边界条件仍按第三类边界条件处理, 即

$$\alpha_{\Sigma 2}(T_w - T_0) = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial s} \right)_{s=0} \quad (3.6)$$

式中 T_0 ——电解槽侧面或底面的环境温度, $\alpha_{\Sigma 2}$ ——根据 T_w 的值, 由经验公式确定。

各种内衬材料的导热系数如下 (单位: $W/(m \cdot K)$)^(45、46、47、48、49) :

- A. 硅酸钙板 (假比重 0.334 g/cm^3): $\lambda = 0.047 + 0.234 \times 10^{-3}(T-200)$
- B. 氧化铝粉 (含 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 41%): $\lambda = 0.166 + 0.293 \times 10^{-3}(T-300)$
- C. 保温砖 (在铝电解槽上使用过, 假比重 0.72 g/cm^3):
 $\lambda = 0.184 + 0.068 \times 10^{-3}(T-100)$
- D. 耐火砖 (在铝电解槽上使用过, 假比重 2.10 g/cm^3):
 $\lambda = 0.84 + 0.58 \times 10^{-3}(T-273)$
- E. 阴极钢棒: $\lambda = 56.6 + 0.0545(T-200)$
- F. 阴极炭块 (在铝电解槽上使用过): $\lambda = 2.3 + 5.78 \times 10^{-3}(T-300)$
- G. 底糊 (在铝电解槽上使用过, 真比重 2.02 g/cm^3 , 假比重 1.43 g/cm^3 , 气孔率 29.1%):
 $\lambda = 2.98 + 2.05 \times 10^{-3}(T-300)$
- H. 侧部炭块 (在铝电解槽上使用过): $\lambda = 0.305 + 4.28 \times 10^{-3}(T-300)$
- 式 (3.1) ~ (3.6) 即构成铝电解槽槽底传热数学模型的全部方程。

3.2 模型求解及计算工况

3.2.1 模型求解

采用内节点方法离散计算区域, 选用非结构化的四面体网格, 计算模型划分的网格单元数为 183222 个, 其网格划分如图 3-1 所示。用隐式差分格式对三维温度场进行求解。

3.2.2 计算工况

为考察加热制度对铝电解槽槽底断面温度分布、供热强度和燃料消耗量的影响, 用上述已建立的传热模型对不同加热制度条件下的传热特性进行了计算, 个加热制度分别为:

极限速度加热: $t < 4$ 小时 $T_f = 423 + 200t \text{ K}$; $4 < t < 72$ 小时 $T_f = 1233 \text{ K}$

加热制度 1: $t \leq 16$ 小时 $T_f = 423 + 50t \text{ K}$; $t > 16$ 小时 $T_f = 1233 \text{ K}$

加热制度 2: $t \leq 20$ 小时 $T_f = 423 + 40t \text{ K}$; $t > 20$ 小时 $T_f = 1233 \text{ K}$

加热制度 3: $t \leq 27$ 小时 $T_f = 423 + 30t \text{ K}$; $t > 27$ 小时 $T_f = 1233 \text{ K}$

加热制度 4: $t \leq 40$ 小时 $T_f = 423 + 20t \text{ K}$; $t > 40$ 小时 $T_f = 1233 \text{ K}$

加热制度 5: $t \leq 54$ 小时 $T_f = 423 + 15t$ K; $t > 54$ 小时 $T_f = 1233$ K

加热制度 6: $t \leq 5$ 小时 $T_f = 423 + 20t$ K; $5 < t < 10$ 小时 $T_f = 523$ K; $10 < t < 15$ 小时 $T_f = 523 + 30t$ K; $15 < t < 20$ 小时 $T_f = 673$ K; $20 < t < 40$ 小时 $T_f = 673 + 20t$ K; $40 < t < 50$ 小时 $T_f = 1073$ K; $50 < t < 65$ 小时 $T_f = 1073 + 15t$ K; $65 < t < 72$ 小时 $T_f = 1233$ K

其中, t 为加热时间。

3.3 铝电解槽高温烟气焙烧的传热特性

3.3.1 阴极上下表面温度及表面热流

根据铝电解槽启动的工艺要求,在向槽内加入电解质之前,阴极的上表面温度必须达到 900°C 以上,阴极下表面温度达到 750°C 以上,以利于电解槽的正常启动,故合理的加热制度也必须达到这一基本要求。

图 3-2~图 3-4 给出了极限速度加热、快速加热(此处即加热制度 2,下同)和慢速加热(此处即加热制度 6,下同)等三种工况时,阴极上、下表面温度及表面热流随加热时间的变化。图中 T_f —铝电解槽加热气体温度, T_{w1} —阴极上表面平均温度, T_{w2} —阴极下表面平均温度, q —阴极上表面的热流,下同。

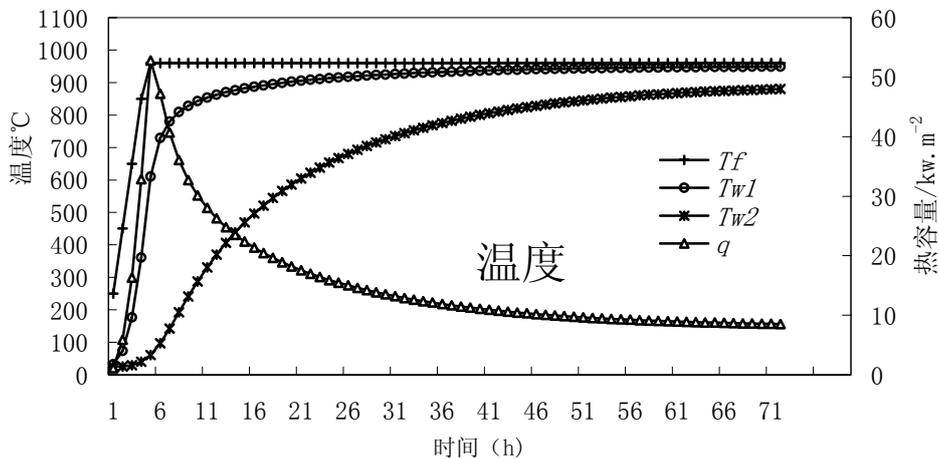


图 3-2 极限速度加热时温度及热流变化

图 3-2 为电解槽以极限加热速度加热时温度及热流的变化。所谓极限加热速度是指电解槽上部气流温度在 4 小时内升至 960°C ,然后保持温度不变。研究此种加热制度的目的,就在于考察高温烟气焙烧启动法加热所需的最少时间及阴极

下表面所能达到的极限温度。从图中 T_{w1} 线可看出，阴极上表面升温很快，加热 20 小时后，上表面温度已达到 902°C ，但阴极下表面温度要到 33 小时后才能达到 750°C 以上，如图中 T_{w2} 线所示。在整个加热过程中，阴极上、下表面温差在加热初期较大，最大温差达到 640°C 左右，可见这种加热制度是不可取的。 T_{w2} 线还表明，当加热时间超过 60 小时后，阴极下表面温度达 880°C ，由此可知，对电解槽以极限加热速度进行高温烟气焙烧时，要使阴极下表面温度达到 750°C 以上，加热的最少时间为 33 小时；阴极下表面所能达到的最高加热温度为 880°C 。

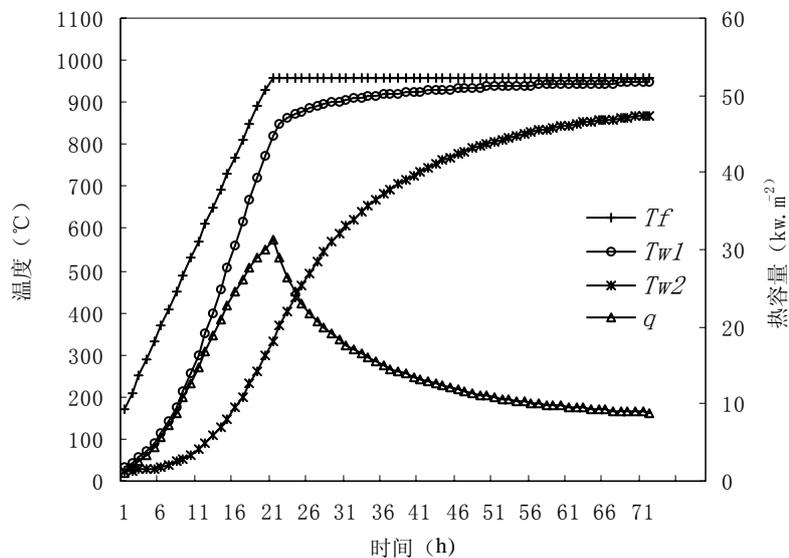


图 3-3 快速加热时温度及热流变化

图 3-3 为快速加热时（加热制度 2）温度及热流的变化。从图 3-3 可看出，阴极上表面温度在约 30 小时后可达到 900°C 以上，阴极下表面温度要在 44 小时后才能达到 750°C 以上，在加热过程中，阴极上、下表面的最大温差在 488°C 左右。这种加热制度加热速度快，铝电解槽经过约 48 小时的加热后，阴极上、下表面温度分别达到了 930°C 和 789°C ，能满足电解槽启动前的温度要求，可以进入电解槽的启动阶段了。但这种加热制度由于升温速度较快，阴极上、下表面在加热过程中的温差仍较大。另外，由于加热过程中没有保温期，使水分的蒸发速度及扎糊挥发速度过快，造成铝电解槽启动初期有轻微的“剥皮”现象，这种现象并已在某厂 160KA 电解槽上焙烧启动的工业实践所证实。

针对快速加热制度的不足，考虑到水分蒸发和扎糊挥发份的挥发均需要一定的时间，对慢速加热制度（加热制度 6）时的情况也进行研究。图 3-4 给出了慢速加热制度下阴极上、下表面温度及热流变化。考虑到吸附水的蒸发，阴极上表

面温度在 100~120℃时升温速度慢；在 200~240℃时结晶水析出，升温缓慢；在 700℃左右为扎糊焦化温度，设计热工制度时考虑一个较长的保温期。在此加热制度下，阴极上表面温度升温较为缓慢，经约 72 小时后可达到 930℃以上，而阴极下表面温度在约 72 小时后可达到 770℃左右，上、下表面的温差在 160℃左右。加热过程中阴极上、下表面的最大温差在 300℃左右。这种加热制度可以避免铝电解槽启动初期的“剥皮”现象，这一点也为我们在某厂 160KA 电解槽上焙烧启动的工业实践所证实。

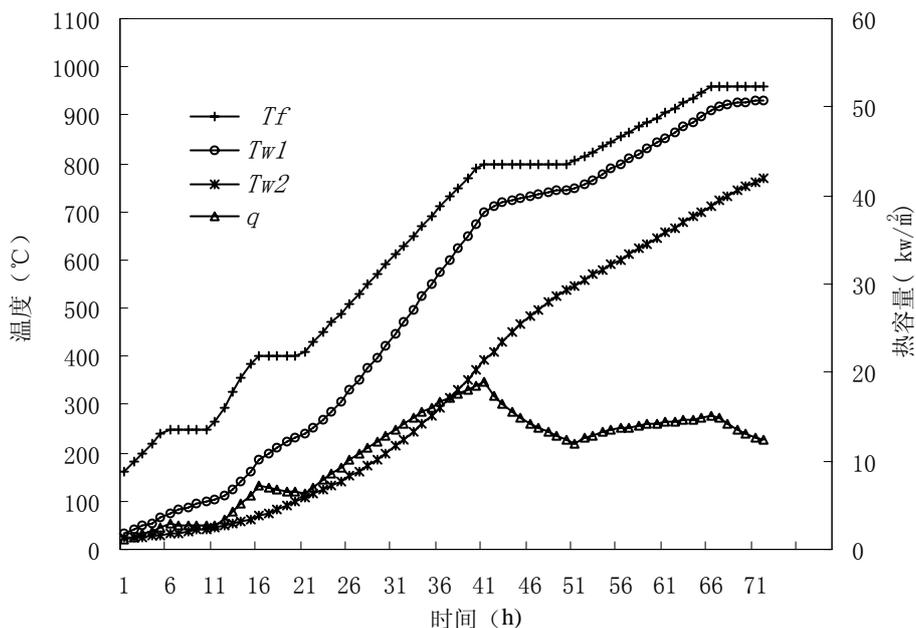


图 3-4 慢速加热时温度及热流变化

3.3.2 快速加热制度时铝电解槽槽底断面温度分布

图 3-5~图 3-7 分别给出了快速加热制度时，加热 21 小时、30 小时和 42 小时后，铝电解槽槽底断面（图中的 a 图）和阴极炭块下表面（图中的 b 图）的温度分布，下同。根据快速加热制度，加热介质从 150℃开始，以 40℃/h 的升

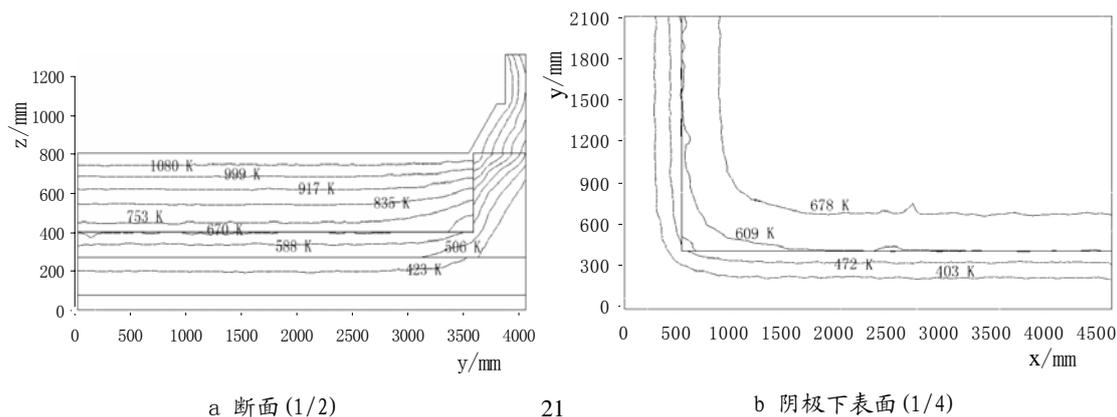


图 3-5 快速加热 20 小时后的温度场

温速度升温，经 20 小时后达到 950℃并保持 950℃不变。图 3-5 是升温结束进入保温阶段时的温度分布。由图 3-5 可见，在升温结束时，阴极上表面温度可达到 867℃（1150 K），人造伸腿扎糊的温度在 726℃（999 K）以上，扎糊的焦化已基本结束，由于没有保温期，扎糊焦化速度过快，是造成铝电解槽启动初期有轻微的“剥皮”现象的原因。但由于受阴极炭块内部传热速度的限制，此时阴极下表面温度只有 336℃（609 K），因此快速升温后必须有一个保温期，在保温期主要进行阴极炭块的内部传热。

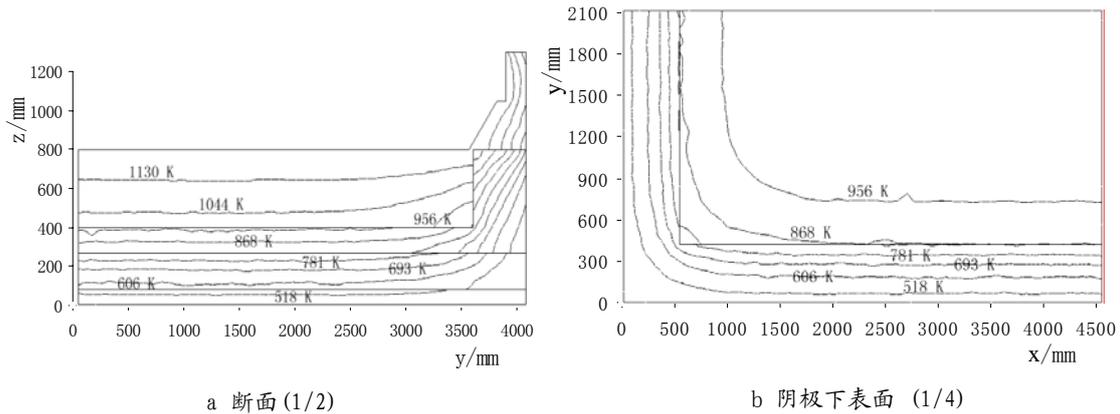


图 3-6 快速加热 30 小时后的温度场

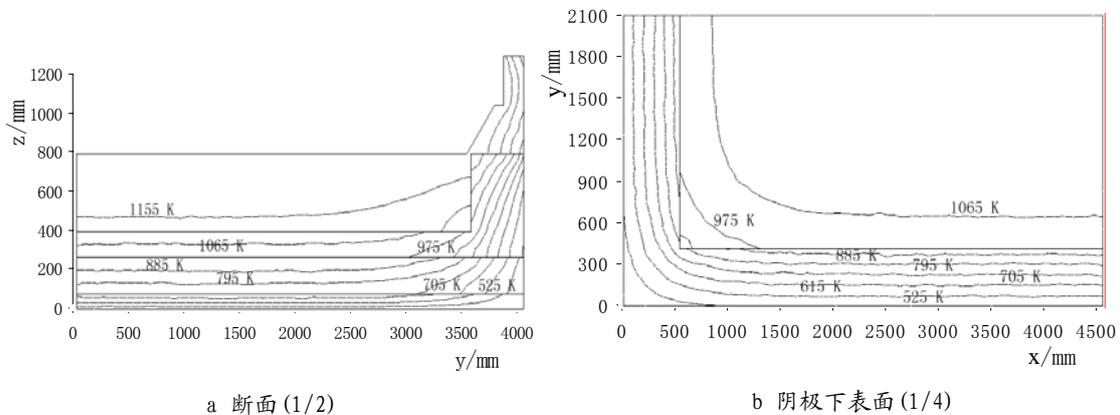


图 3-7 快速加热 42 小时后的温度场

图 3-6 是加热总时间为 30 小时（即升温 20 小时，保温 10 小时）后的温度分布。由图 3-6 可见，升温结束再保温 10 小时后，尽管阴极炭块上表面温度已经到 922℃（1175 K），人造伸腿扎糊的温度在 771℃（1044 K）以上，但由于受阴极炭块内部传热速度的限制，此时阴极下表面温度只有 595℃（868 K），因此快速升温后再保温 10 小时阴极下表面温度不能满足电解槽焙烧启动的要求，必须进一步延长保温期。

图 3-7 是加热总时间为 42 小时（即升温 20 小时，保温 22 小时）后的温度

分布。由图 3-7 可见, 保温 10 小时后, 再保温 12 小时, 阴极上表面温度基本维持 930°C (1203 K) 不变, 但阴极下表面和人造伸腿扎糊的温度均有所提高。在加热总时间为 42 小时后, 阴极下表面大部分区域已达到 747°C ($(1065+975)/2=1020\text{ K}$) 以上, 人造伸腿扎糊的温度已达到 792°C (1065 K) 以上, 对扎糊和人造伸腿扎糊的焙烧能达到其他焙烧方法无法达到的效果, 这正是高温烟气焙烧的优点之一。因此快速升温 20 小时, 再保温 22 小时后阴极下表面温度能满足电解槽焙烧启动的要求, 已经具备启动的条件。

3.3.3 慢速加热制度时铝电解槽槽底断面温度分布

图 3-8~图 3-11 分别给出了慢速加热制度时, 加热 40 小时、50 小时、65 小时和 72 小时后, 铝电解槽槽底断面 (图中的 a 图) 和阴极炭块下表面 (图中的 b 图) 的温度分布。根据加热制度 6, 加热 40 小时后又进入一个较长的保温期, 目的是使扎糊有充分的时间焦化。图 3-8 是加热 40 小时后, 即进入扎糊焦化前的温度分布, 由图 3-8 可见, 慢速加热 40 小时后, 阴极上表面温度可达到 702°C (975 K), 阴极下表面温度为 387°C (660 K), 同时人造伸腿扎糊的温度

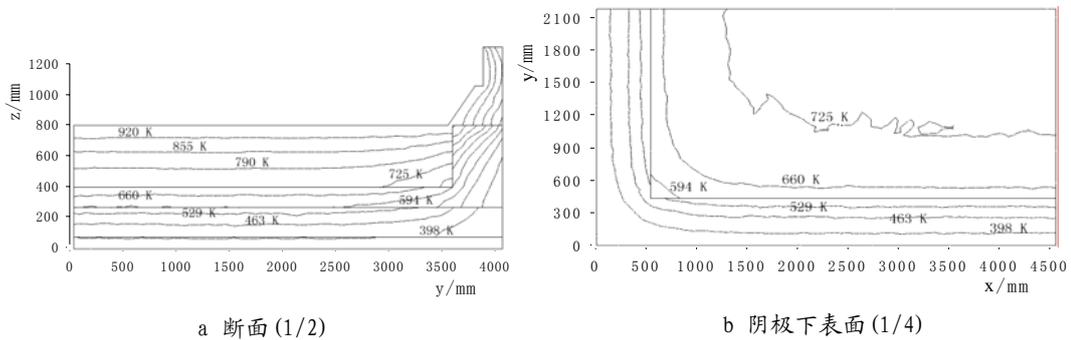


图 3-8 慢速加热 40 小时后的温度场

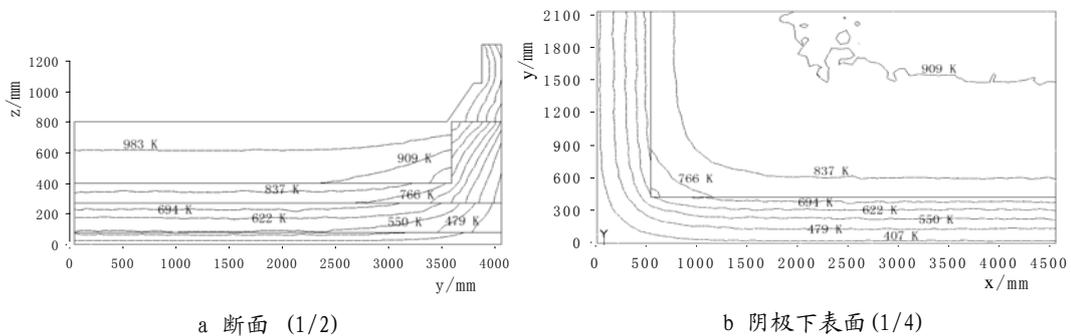


图 3-9 慢速加热 50 小时后的温度场

也在 582°C (855 K) 以上, 因此扎糊的焦化已经开始。比较图 3-8 和图 3-5 还可知, 快速加热制度下加热 20 小时后, 尽管阴极上表面温度可达到 867°C (1150

K)，比慢速加热制度下加热 40 小时后的温度高 285℃，但阴极下表面温度仅为 336℃（609 K），比慢速加热 40 小时后的温度还低 51℃，这说明阴极下表面的升温速度不完全由阴极上表面的升温速度决定，而在很大程度上取决于阴极炭块内部的导热速率。

当加热 40 小时后又进入一个保温期，在此的保温时间是 10 小时，即整个加热时间为 50 小时，图 3-9 即为加热 40 小时，再保温 10 小时后的温度分布。由图 3-9 可见，在保温期结束时阴极上表面温度可达到 757℃（1030 K），阴极下表面温度为 564℃（837 K），同时人造伸腿扎糊大部分的温度也在 710℃（983 K）左右，因此扎糊的焦化已基本完成。加热可以进入一个较快的升温阶段。

当加热 50 小时后设置了一个较快的升温阶段，加热介质的升温速度为 15℃/h，升温时间是 15 小时，整个加热时间达到 65 小时，图 3-10 即为此时的温度分布。由图 3-10 可见，加热 65 小时可使阴极上表面温度达到 927℃（1200 K），阴极下表面温度达 721℃（994 K），同时人造伸腿扎糊大部分的温度也在 842℃

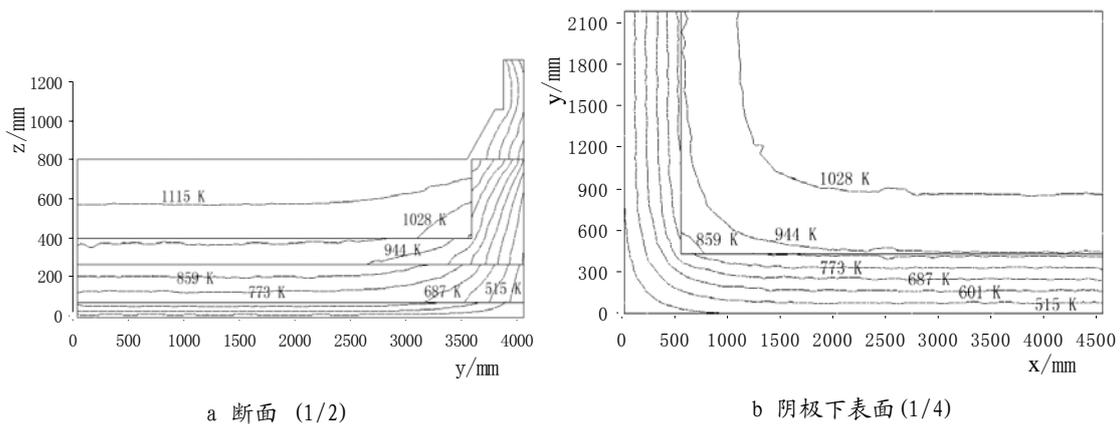


图 3-10 慢速加热 65 小时后的温度场

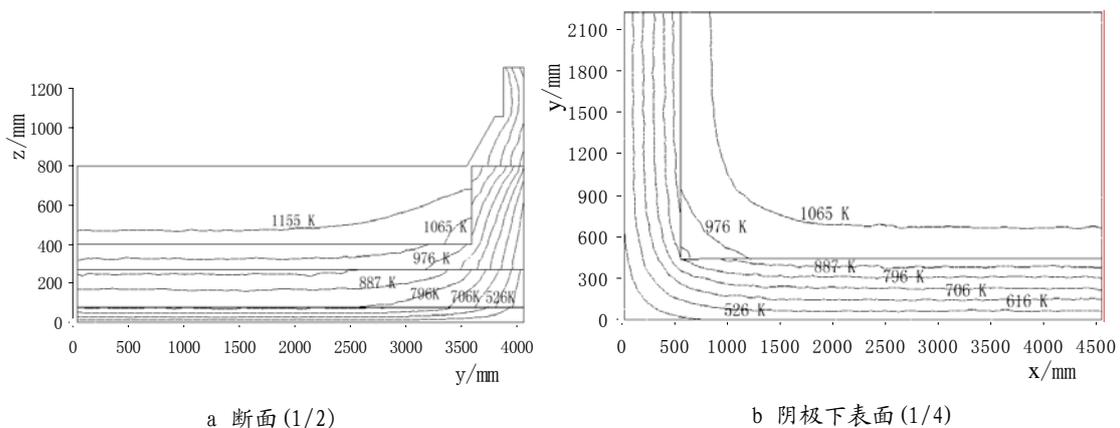


图 3-11 慢速加热 72 小时后的温度场

(1115 K) 左右。但阴极炭块的上下表面温差仍在 200℃ 左右，有必要再进入一个保温期，以减小阴极炭块的上下表面温差。

在加热 65 小时后设置了一个保温期，在此的保温时间是 7 小时，即整个加热时间为 72 小时，图 3-11 为此时的温度分布。由图 3-11 可见，当保温结束时，阴极上表面温度基本维持在 930℃ (1203 K) 不变，但阴极下表面和人造伸腿扎糊的温度均有所提高。在加热总时间为 72 小时后，阴极下表面大部分区域已达到 747℃ ($(1065+976)/2=1020$ K) 以上，人造伸腿扎糊的温度已达到 792℃ (1065 K) 以上。比较图 3-11 和图 3-7 还可知，快速升温 20 小时，再保温 22 小时后的槽底温度分布和阴极下表面温度分布与慢速加热 72 小时后的温度分布十分接近，加热终了时，阴极大部分区域温度已超过 750℃，均能满足电解槽焙烧启动的要求。因此，不能以加热终了时槽底和阴极下表面温度分布为标准来判断加热制度的优劣，关于铝电解槽烟气焙烧加热制度对加热质量的影响在下节中讨论。

图 3-12 为阴极下表面温度的计算值与实测值的比较，图中的实测值是某铝业公司 160KA 电解槽按加热制度 6 进行焙烧时，阴极炭块下表面温度随时间的变化，焙烧所用的燃料为液化石油气，温度控制采用自动控制。从图中可看出，计算值与实测值十分吻合，说明所建立的铝电解槽槽底传热数学模型是可靠的。

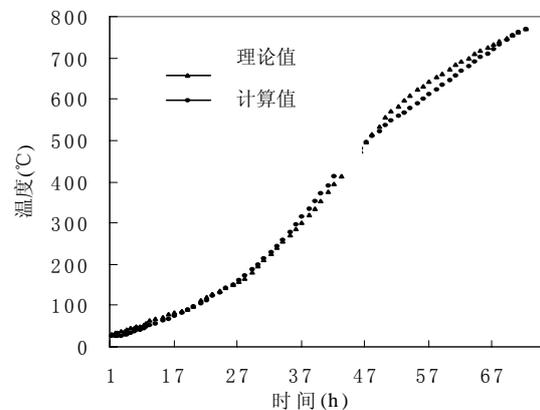


图 3-12 阴极下表面温度的计算值与实测值

3.4 铝电解槽高温烟气焙烧的加热制度

3.4.1 加热过程中阴极炭块上、下表面温度变化

图 3-13、图 3-14 给出了在加热制度 1~6 的条件下，阴极上表面平均温度、阴极下表面平均温度与加热时间的关系。由图可知，在不同加热制度下，不论是上表面温度还是下表面温度，升温速度相差均较大，如前所述，在采用电解槽烟气焙烧启动时，要求在向电解槽加电解质进行启动之前，其阴极上、下表面的温度应分别加热到 900℃ 及 750℃ 以上。根据这一要求，加热时间以同时满足阴极上表面平均温度大于 900℃ 和下表面平均温度大于 750℃ 为标准确定。由图 3-13、

图 3-14 可知，不同加热制度的加热时间相差很大，加热制度 1 的加热时间最短，约为 41 小时，加热制度 6 的加热时间最长，约为 70 小时。

图 3-15 给出了不同加热制度时，加热过程中，阴极炭块上、下表面温差随时间的变化。由图 3-15 可知，在加热过程中，不同加热制度下的阴极上、下表面温差变化相差较大。加热制度 1 时，最大温差达到 530℃ 左右；最大温差最小的是加热制度 5，其最大温差为 273℃，其次是加热制度 6，其最大温差为 306℃；此外加热制度 5 在整个加热过程中，升温速度和温度变化均较平稳；而加热制度 6 的升温变化虽也较平稳，但温差变化相对较大，且加热制度 6 的升温曲线比加热制度 5 要复杂得多。

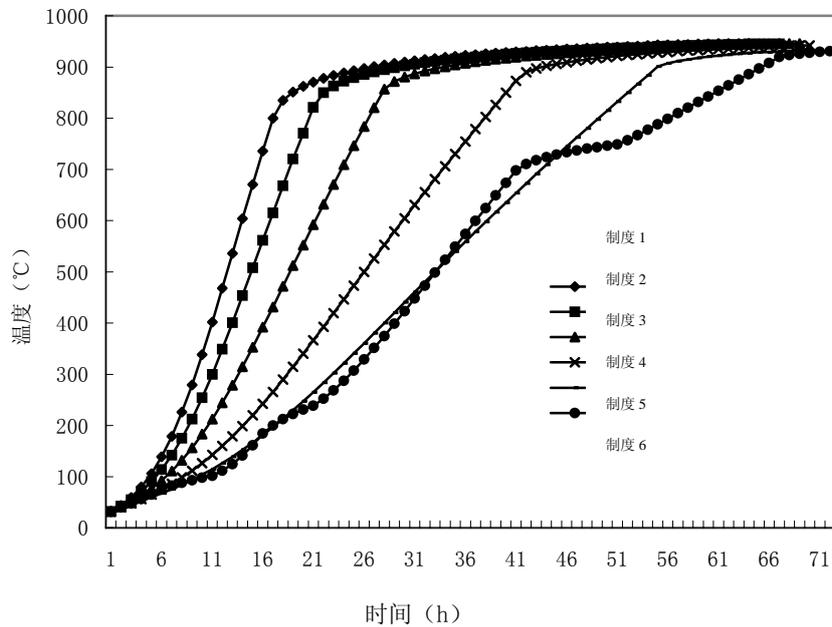


图 3-13 不同加热制度时阴极上表面温度的变化

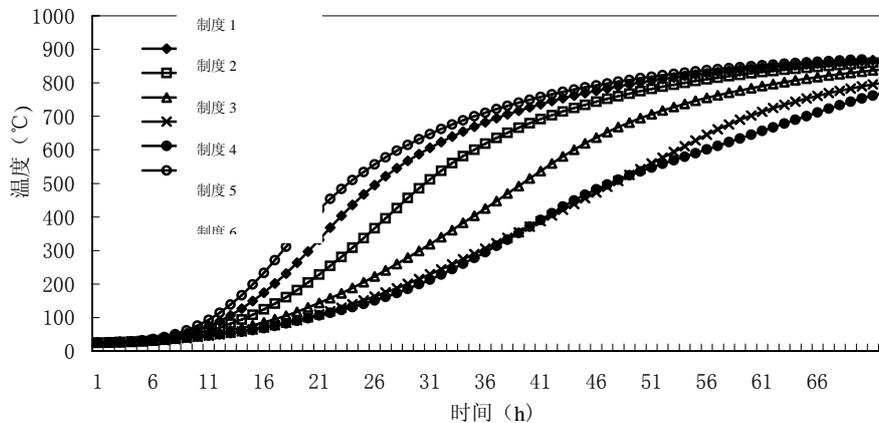


图 3-14 不同加热制度时阴极上表面温度的变化

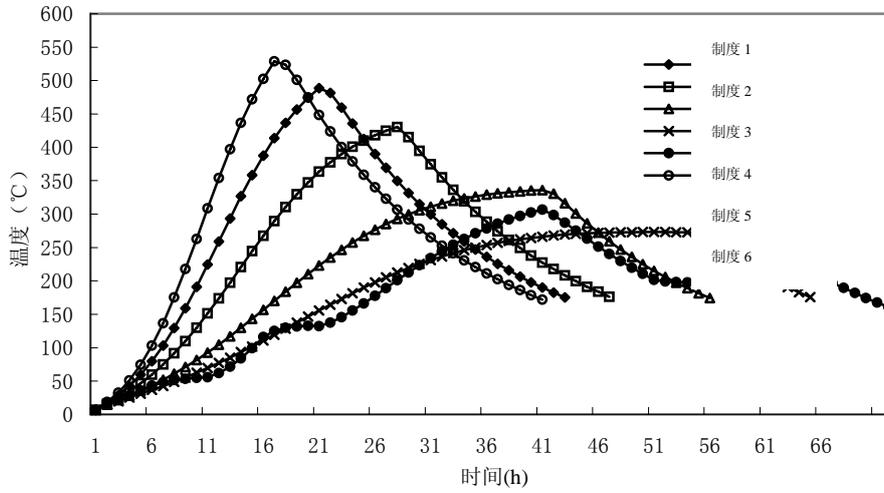


图 3-15 不同加热制度时阴极上下表面温差的变化

3.4.2 供热强度和燃料消耗量的变化

图 3-16 为不同升温制度下，供热强度与时间的关系，供热强度以需要的液化石油气的量来计算。由图 3-16 可知，除加热制度 6 以外，供热强度随时间的变化规律大致相同，但供热强度相差较大，而加热制度 6 的供热强度的变化则较为复杂。造成这种情况的原因在于加热制度 6 设有多个保温期，在保温期的供热量需减少，而其它加热制度的保温期均只有一个。

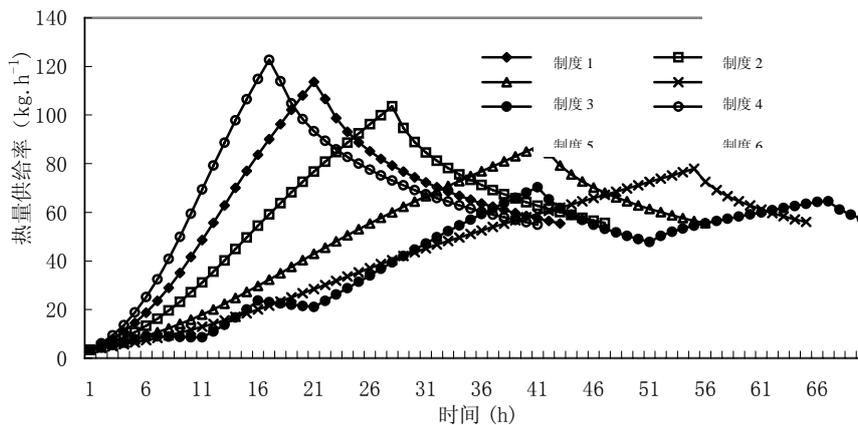


图 3-16 不同加热制度时供热强度的变化

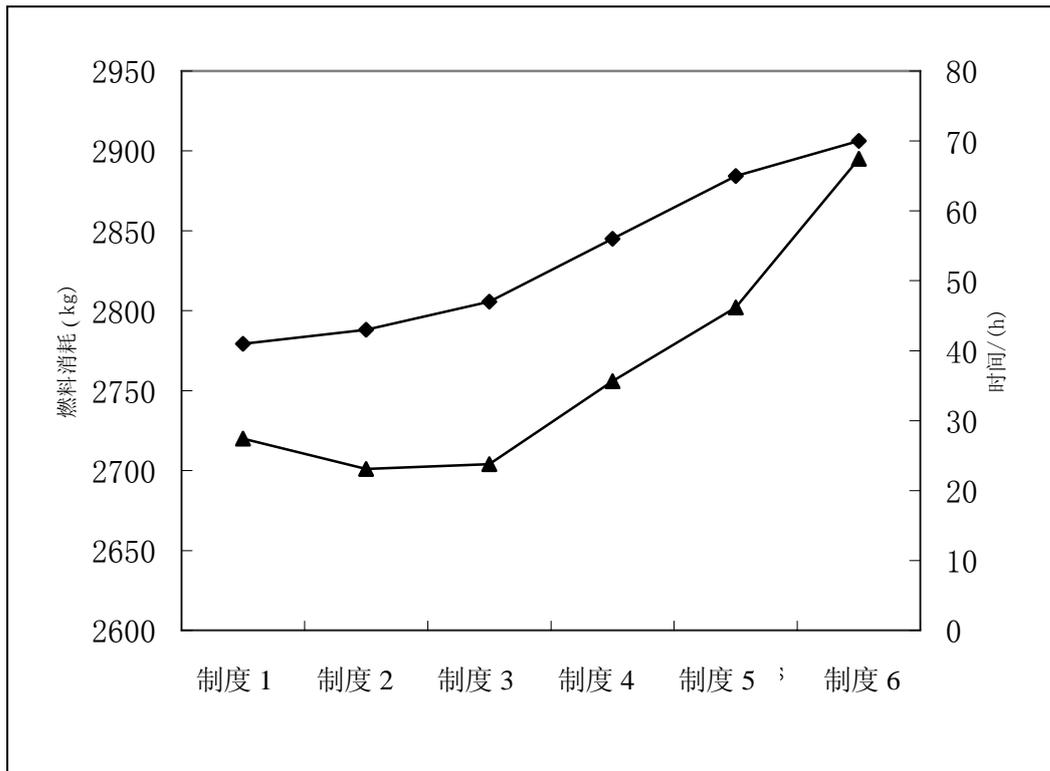


图 3-17 不同加热制度时加热时间与燃耗的变化

图 3-17 为不同加热制度下，燃料总的消耗（以液化石油气的量来计算）及总加热时间的变化。由图 3-17 可知，对于 75KA 电解槽，加热时间的变化范围从 41 小时到 70 小时，均能满足电解槽启动前的焙烧要求，这说明烟气焙烧升温速度有较大的调节范围，这也是高温烟气焙烧的优点之一。对于 75KA 电解槽，各加热制度下燃料总的消耗相差不大，燃耗最高的是加热制度 6，为 2895kg，燃耗最低的是加热制度 2，为 2700kg。从加热制度 1 到加热制度 6，随升温速度变慢，总的趋势是加热时间延长、燃耗增加，但比较加热制度 1 和加热制度 2、3 可知，当升温速度大于 30℃/小时后，随升温速度变快，燃耗未降低，反而有所增加，而加热时间减少的幅度也变小，其原因是升温速度增大后，阴极炭块上、下表面温差增大，为减小该温差，必须延长保温时间。

3.4.3 加热终了时电解槽槽底各层的温度分布

不同加热制度下，加热终了时电解槽槽底的温度变化如表 3-2 所示。由表 3-2 可见，不论何种加热制度，加热终了时，槽底各层内的温度较接近，因此，

不能以加热终了时槽底温度分布为标准来判断各加热制度的优劣。

表 3-2 不同加热制度下, 槽底的温度变化

指标	制度 2	制度 3	制度 4	制度 5	制度 6
加热总时间/h	43	47	56	65	70
阴极上表面温度/°C	929.9	929.6	929.9	929.5	928.7
阴极下表面温度/°C	754.2	752.7	755.2	753.4	753.4
耐火层温度/°C	671.8	670	673.9	672.8	678.2
保温层温度/°C	485.2	483.5	490.3	492.5	510.1
绝热层温度/°C	160.9	160.3	162.8	163.8	170.3
槽底温度/°C	66.7	66.5	67.1	67.3	68.8

3.4.4 各焙烧制度的比较

为比较各加热制度的优劣, 下面以加热总时间、上下表面最大温差、供热制度、燃料消耗和高温期时间等为指标进行对比分析, 各加热制度的各种指标如表 3-3 所示。对高温烟气焙烧而言, 理想的加热制度是加热总时间短、加热过程中阴极炭块上下表面的温差小、供热制度简单、燃料消耗少和高温期时间短。在这些指标中, 加热过程中阴极炭块上下表面的温差和高温期时间这两个指标又更重要些。这是因为延长高温期时间, 将使阴极和阳极的氧化烧损的可能性增大, 这对电解槽的寿命不利; 增大阴极炭块上下表面的温差, 可能会使炭块的热应力过大, 从而引起阴极炭块出现裂纹, 同样对电解槽的寿命不利。阴极炭块上下表面的温差除与加热制度有关外, 还与阴极炭块自身的导热性能有较大的关系, 关于这个问题, 下节将详细讨论。根据上述标准, 比较各加热制度可见, 加热制度 5 和加热制度 6 较好。而加热制度 5, 尽管供热制度简单, 升温过程中温差较小, 燃耗较低, 但由于在水分蒸发和扎糊焦化期没有保温制度, 易使扎糊挥发份急剧排出使之产生焙烧裂纹, 导致槽底接缝结构疏松、强度降低。因此综合考虑, 采用加热制度 6 更优。

表 3-3 各加热制度的比较

指标	制度 1	制度 2	制度 3	制度 4	制度 5	制度 6
加热总时间/h	41	43	47	56	65	70
升温时间/h	16	20	27	40	54	45
保温时间/h	25	23	20	16	11	25
上下表面最大温差/°C	528	489	430	336	272	306
升温制度	简单	简单	简单	简单	简单	复杂
供热制度	简单	简单	简单	简单	简单	复杂
燃料消耗/kg	2720	2700	2704	2756	2802	2895
高温期时间/h (表面温度>800°C)	22	21	19	17	14	12

3.5 小 结

通过对铝电解槽高温烟气焙烧的传热理论计算和加热制度的分析,得出以下结论:

1、高温烟气焙烧的升温速度可调的范围很大,因此,采用高温烟气焙烧方法能满足铝电解槽启动前的预热要求。由于调节灵活,升温速度和度分布控制方便,可用此方法克服铝液焙烧和焦粉焙烧之缺点。

2、对所研究的电解槽,采用高温烟气焙烧启动,阴极下表面温度达到 750℃以上,所需的最少时间为 33 小时,在阴极上表面温度为 950℃时,阴极下表面温度最高可达 880℃。理论和实践证明,快速加热可在 48 小时内完成电解槽启动前的加热但因升温速度过快,会造成启动后电解槽有“剥皮”现象。

3、考虑水分蒸发和扎糊的焦化时间,制定的加热制度 6,在 72 小时内能阴极下表面温度达到 750℃以上,人造伸腿扎糊的温度达到 800℃左右,对扎糊和人造伸腿扎糊的焙烧能达到其他焙烧方法无法达到的效果。各个加热制度下,加热终了时,铝电解槽的温度分布十分接近。

4、从热过程的温度分布、温升速率、能耗等来综合判断加热制度的优劣。在加热过程中,各加热制度产生的效果相差较大。综合各加热指标,认为加热制度对铝电解槽的加热来说更合理。优化确定的加热制度完全能够满足铝电解槽高温烟气焙烧启动的工艺要求。

5、各加热制度下,燃料消耗量相差不大。延长加热时间,燃料消耗量略有增加,但供热强度差别却很大。

第四章 高温烟气焙烧过程自动控制系统的的设计

基于第二章铝电解槽焙烧方法的比较,我们认为采用高温烟气焙烧铝电解槽在诸多方面都是可行和有效的,为此我们有必要选用铝电解槽高温烟气焙烧系统;同时我们在第三章中又为确保焙烧效果,对铝电解槽的高温烟气焙烧制度进行了科学的研究,并得出了相应的结论。那么如何充分保证高温烟气焙烧技术的实施,又确保我们所研究的加热制度的有效实现,为此论文设计了用于铝电解槽高温烟气焙烧过程自动控制系统。

4.1 控制系统的原理

铝电解槽高温烟气焙烧过程自动控制系统的控制最终对象是铝电解槽阴极,被控量是铝电解槽阴极表面温度,是以利用 PLC⁽¹²⁾ 通过 PID 算法对供油量与供风量进行控制,以实现给定温度的有效控制,其原理如图 4-1 所示

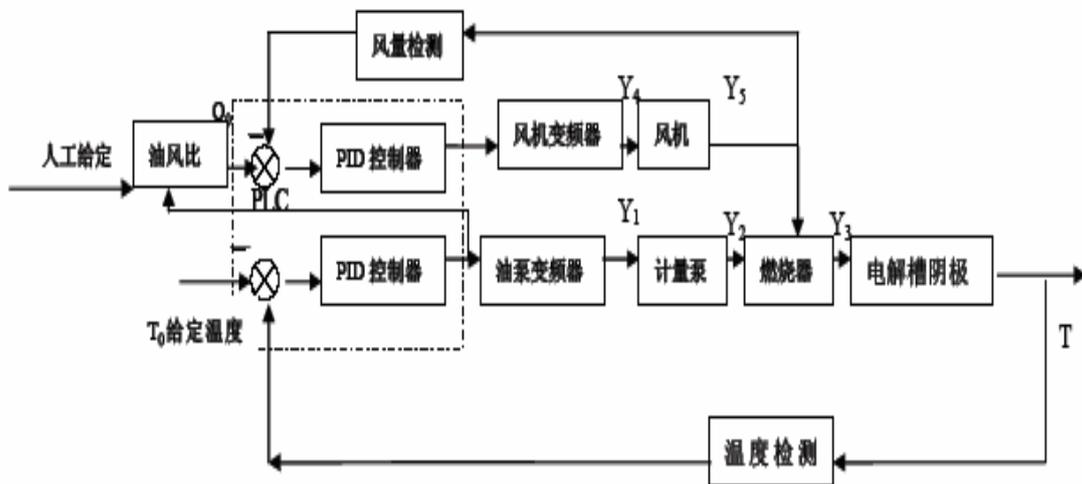


图 4-1 高温烟气焙烧过程自动控制系统原理图

图 4-1 变量表示: Y1 为油泵变频器输出电压、Y2 供油量、Y3 烟气量、Y4 风机变频器输出、Y5 供风量

铝电解槽阴极表面温度为高温焙烧过程自动控制系统主要控制参数,它是采用闭环控制。温度控制的目的是为了使铝电解槽阴极表面的温度按专家升温曲线

进行,以保证铝电解槽的焙烧效果。温度给定曲线依据第三章理论研究与生产经验的结合,将其以数据库的形式存入PLC中。在程序执行的过程中,每过一段时间就读取数据库以得到温度给定值。为了反映出实际的温度控制效果,在电解槽上选一点具有代表性的位置安装热电偶,然后通过补偿导线连接,将该温度信号送入温度巡回检测仪中。巡回检测仪再把送来的热电偶信号显示,并将其转换为4~20mA的电流信号送入PLC的AD模块。PLC将这个温度信号作为温度的主控信号,将此信号与温度给定值相比较后得到偏差,根据此偏差进行PID控制。计算后的控制信号由DA模块转换成4~20mA模拟信号进入油泵变频器,油泵变频器根据送入的模拟信号的大小去控制计量泵的转速以控制进入燃烧器的油量,从而达到控制温度的目的。关于油泵变频器与计量关系需在系统运行之前进行现场标定,即做出油泵变频器输出的频率值与油量值之间的关系,这是本系统要采用计量泵来供给燃油的原因。计量泵输出的油量值准确,与油泵变频器的输出有一一对应的关系,如图4-2。风量的控制是根据送入燃烧器的油量,乘以一个风油比例系数(根据燃烧计算确定)得到风量的给定值,根据计量泵变频器的输出值来确定送入燃烧器的油量进而得到风量给定值。风量经孔板测量后,流量信号经变送之后送入PLC的AD模块,与给定值进行比较得到偏差,根据此偏差进行专家PID控制。计算后的控制信号DA模块转换成4~20mA模拟送入风机变频器,风机变频器根据送入的模拟信号的大小去控制风机的转速以控制进入燃烧器的风量。

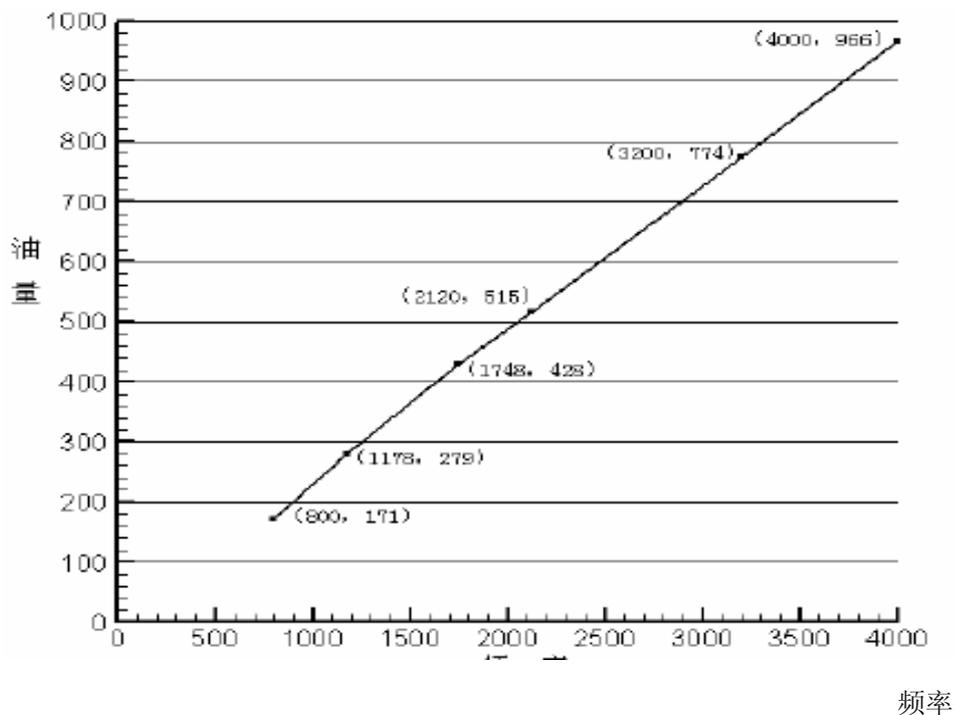


图 4-2 油量与频率关系图

高温烟气中的空气过剩系数（烟气中的氧含量百分比）是高温烟气过程自动控制系统关注的参数，其目的是不仅要保证燃料充分燃烧确保温度控制的有效性，同时又要控制烟气中的过剩空气量，以免阴阳极的氧化。由于无法检测到烟气中的含氧量，而是以对风量控制达到对烟气中空气过剩系数控制实现。

4.2 控制系统的硬件构成

铝电解槽高温烟气焙烧过程自动控制系统由可编程控制器（PLC）、变频器、手操作器等硬件、温度传感器、压力传感器构成，其硬件组成框图如图 4-3 所示，其硬件如表 4-1 所示。

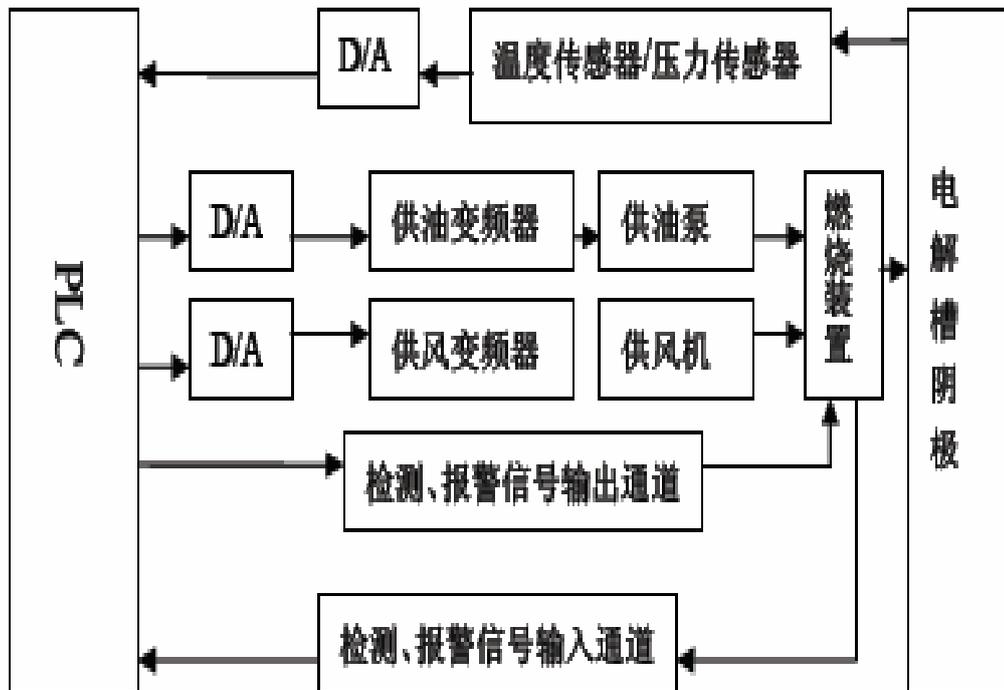


图 4-3 高温烟气焙烧过程自动控制系统硬件组成框图

表 4-1 高温烟气焙烧过程自动控制系统硬件一览表

名称	数量	型号
底板	1	C200H-BC051-V1
CPU	1	C200HE-CPU42-E
AC 输入(220VAC)	1	C200H-IA222
8 点继电器输出	1	C200H- OC221
模拟量输入单元	1	C200H-AD003
模拟量输出单元	1	C200H-DA004
手持编程器	1	C200H-PRO27-E
编程器电缆	1	C200H-CN311
风机	1	ARD-150 (150) 罗茨风机
油泵	1	OBL 计量泵
风机变频器	1	三菱 FR-F540
油泵变频器	1	富士 E11S
手操器	2	DFQ2100
温度变送器	8	SBWR-115/0-1100
差压变送器	2	
多路巡回检测仪	1	WP806
火焰监测器	2	ZK-1(2 路 2 传感器) (驱动电压 220V)

4.3 增量式 PID 算法

PID 算法是整个自动控制的核心部分^(14、15、16、17)。给定的温度曲线以数据库的形式存放在 PLC 的存储器中，程序每隔固定的一段时间就读取数据库一次，取得的值作为温度信号的给定值来进行温度控制，采集的温度信号与给定值进行比较得到偏差信号，依据此偏差信号以及偏差变化的速度决定 PID 控制参数的值，然后进行 PID 控制。本次研究对象就是采用增量式控制算法来实现。

位置式数字 PID 控制器的表达式为：

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^k e(i) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (4.1)$$

或：

$$u(k) = K_p \times e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)] \quad (4.2)$$

其中：

- k : 采样序号, $k=0, 1, 2, \dots$;
- $u(k)$: 第 k 次采样时刻的计算机输出值;
- $e(k)$: 第 k 次采样时刻输入的偏差值;
- $e(k-1)$: 第 $(k-1)$ 次采样时刻输入的偏差值;
- K_I : 积分系数, $K_I=K_p \times T/T_I$; T 为采样周期;
- K_D : 微分系数, $K_D=K_p \times T_D/T$ 。

这种算法的缺点是, 由于全量输出, 所以每次输出均与过去的状态有关, 计算时要对 $e(k)$ 进行累加, 计算工作量大。而且, 因为计算输出的 $u(k)$ 对应的是执行机构的实际位置, 如计算出现故障, $u(k)$ 会大幅度变化, 这种情况往往是生产实践中不允。

增量式 PID 是指数字控制器的输出只是控制量的增量 $\Delta u(k)$ ^(21~28)。根据递推原理, 由式 (4.2) 可得式 (4.3):

$$u(k-1) = K_p e(k-1) + K_I \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + K_D [e(k-1) - e(k-2)] \quad (4.3)$$

用式 (4.2) 减式 (4.3), 可得式 (4.4)

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= K_p [e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \\ &= K_p \Delta e(k) + K_I e(k) + K_D [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \end{aligned} \quad (4.4)$$

式 (4.4) 就是增量 PID 控制算法。可以将 (4.4) 进一步改写为

$$\Delta u(k) = A e(k) - B e(k-1) + C e(k-2) \quad (4.5)$$

式中:

$$A = K_p \left(1 + \frac{T}{T_I} + \frac{T_D}{T}\right) \quad B = K_p \left(1 + 2\frac{T_D}{T}\right) \quad C = K_p T_D / T$$

它们都是采样周期、比例系数、积分时间常数、微分时间常数有关的系数。可以看出, 由于控制系统采用恒定的采样周期 T , 一旦确定了 K_p 、 K_I 、 K_D , 只要使用前后三次测量值的偏差, 即可由式 (4.4) 或式 (4.5) 求出控制增量。

采用增量算法时, 计算输出控制的增量 $\Delta u(k)$ 对应的是本次执行机构位置的增量。对应阀门实际位置的控制量, 即控制量增量的累积 $u(k)$ 需要采用一定的方法来解决, 目前较多的是利用算式 $u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$ 通过执行软件来完成。就整个系统来说, 位置式与增量式控制算法并无本质区别。增量式算法虽然只是算法上作了一点改进, 却带来了不少的优点:

(1) 由于计算输出增量，所以误动作时影响小，必要时可用逻辑判断的方法去掉。

(2) 手动/自动切换时冲击小，便于实现无扰切换。此外，当计算发生故障时，由于输出通道或执行机构具有信号锁存作用，故仍然能保持原值。

(3) 算式中不需要累加。控制增量 $\Delta u(k)$ 的确定仅与最近的 k 次采样有关，所以较容易通过加权处理获得比较好的控制效果。

4.4 控制软件系统的实现

本系统的程序编制采用 ORMON PLC 自带的汇编语言，通过手持编程器输入 PLC 并进行现场调试，其程序框图如图 4-4 所示。

程序分为手动部分、自动部分和系统启动后就要一直执行的部分。在系统启动的初期，由于孔板流量计测出的流量不准确以及其它一些原因，不能投入自动运行。当系统运行一段时间，工况稳定之后才能投入自动运行。手动到自动的切换必须是无扰切换。

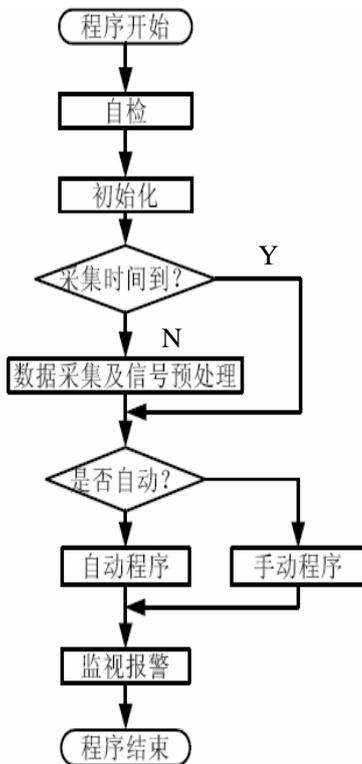


图 4-4 调试程序框图

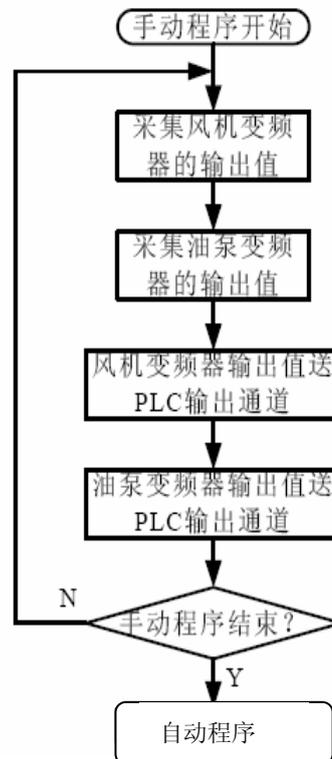


图 4-5 手动程序框图

1、手动程序

手动程序主要是实现无扰切换。当系统处于手动时，手动程序不停采集数据，跟踪风机变频器和油泵变频器的输出，并将其送入自动模块的输出通道，这样，自动模块的输出就能跟踪手动模块的输出，在手动到自动切换的瞬间，系统的输出不变，实现无扰切换。其程序框图如图 4-5 所示。

2、自动程序

自动程序要实现的功能主要是每隔一段时间读取温度给定值，根据温度给定值调节送入燃烧室的油量，根据油量值计算风量给定值，以此为依据进行风量控制。自动程序包含以下几个子程序。

1) 计算温度给定值子程序

给定的温度曲线以数据库的形式存放在 PLC 的存储器 DM0950~DM0964 中，程序每隔固定的一段时间就读取数据库一次，取得的值作为温度信号的给定值来进行温度控制，其程序框图如图 4-6 所示。

2) 计算风量给定值子程序

由于要对风量进行控制，需要风量给定值。论文采用的方法是先计算送入燃烧室的油量值，根据此油量乘以一个风油比系数（经验值）得到风量给定值。送入燃烧室的油量的计算过程是先采集油泵变频器的输出的频率信号，然后根据这个频率信号读取油泵频率/油量数据库得到送入燃烧室的油量值。由于油泵采用的是计量泵，所以油泵变频器的输出值与油量值有一一对应的关系，在系统运行之前已经得到该对应关系并输入数据库。

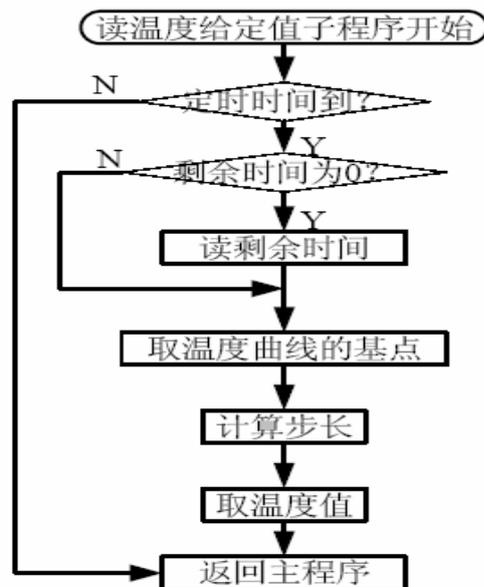


图 4-6 计算温度给定值子程序框图

3) 增量式 PID 子程序

增量式 PID 子程序是整个自动程序的核心部分。采集的信号与给定值进行比较得到偏差信号，依据此偏差信号以及偏差变化的速度决定 PID 控制参数的值，然后进行 PID 控制。其算法如图 4-7 所示。

以上介绍的是自动程序中包含的各个子程序的框图，自动程序的总体算法流程图如图 4-8 所示。

4) 系统启动即执行的程序

这部分程序无论是手动状态还是自动状态都要执行，包括系统自检程序，数据采集程序，数据预处理程序以及监视报警程序。这部分程序较为简单，就不一一介绍。



图 4-7 增量式 PID 算法控制程序框图

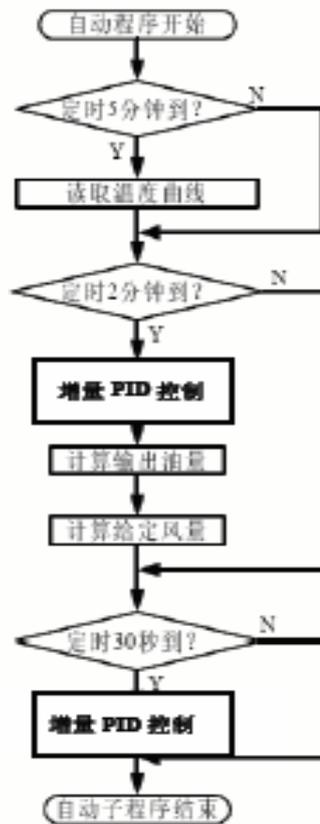


图 4-8 自动程序框图

4.5 控制系统辅助装置

控制系统的辅助装置包括安全报警装置和焙烧检测装置，其实物如图 4-9 所示。

安全报警装置主要为熄火报警（包括灯光报警及声音报警），在燃烧器熄火时，根据火焰检测器（双探头）的检测信号，判断是否熄火，发出熄火报警信号，同时切断燃料的供给而达到安全保护的目的。

电解槽焙烧检测的参数有：空气、燃料流量，空气、燃料压力，电解槽阴极上表面和下表面各点温度，分配室、预燃室及喷射管的外表面温度等参数，检测方法如下：

空气、燃料流量的显示由玻璃转子流量计检测，并经过流量计前压力修正；电解槽阴极上表面温度由铠装镍铬热电偶测量，共设6点分布在电解槽靠近边线位置，下表面温度通过在炭阴极下表面预埋的镍铬热电偶测量，也设6点分布，分布的平面位置与上表面的位置一致，主要目的是考察阴极下表面的升温情况，以及和上表面相应位置相对比，考察断面温差情况。分配室预燃室及喷射管的外表面温度由红外测温仪检测。系统的热电偶温度由安装在控制柜的温度巡检仪检测。



图4-10 检测与控制系统的实物照片

4.6 小结

论文在本章对高温烟气焙烧过程中的自动控制系统进行了认真的研究并对其进行设计，利用PLC采用增量式PID算法的自动控制系统可实现对高温烟气焙烧过程的控制。

第五章 铝电解槽高温烟气焙烧技术的工业应用

在山西关铝股份有限公司 75kA 系列铝电解槽上进行高温烟气焙烧技术的工业应用；同时为比较高温烟气焙烧技术应用效果，我们也选取了采用焦粒焙烧铝电解槽作为对比。

5.1 高温烟气焙烧技术在 75kA 预焙槽上的应用

在山西关铝股份有限公司 75kA 系列 156# 预焙槽上，进行高温烟气焙烧技术的工业试验。焙烧用的燃料为轻质柴油，采用 72 小时缓慢加热制度。

1、准备工作：电解槽燃油焙烧系统调试正常，并保证风机和油路畅通正常，确保程序试验运行正常。

- 电解槽验收：依据验收标准对大修后电解槽验收，着重检查升降机构、阳极母线、打壳下料装置、绝缘和槽控箱等。
- 原材料的准备：包括轻质柴油 2.5 吨、液体电解质 4 吨、预焙阳极碳块 12 组、高分子冰晶石 10 吨、纯碱 1.5 吨、氟化钙 0.5 吨。各种检测装置的检查。

2、燃油高温烟气焙烧操作：

- 安装阳极：对电解槽进行清扫，使槽内干净，降阳极大母线至下限位 2~3cm 处，准备装极。检查阳极组，并擦洗接触面；阳极上槽，开始从中间向两边逐个交替安装，拧紧卡具，画好线做好标示；抬阳极母线至上限位。
- 安装焙烧装置：燃烧装置安装在后大面，如图 5-1 所示；控制小车在后大面通道上纵向放置；油罐和风机放在车间外。连接好各种管道。下降阳极到合适位置，注意喷射管与阳极碳块之间留出 2~3cm 空隙，避免受热膨胀后无缝隙，而增加拆卸困难。



图 5-1 燃烧装置安装示意图

- 提升电解质水平，电解槽进入启动阶段。

3、试验结果及分析

76#槽高温烟气焙烧用时间为 72 小时，共用轻质柴油 1200kg，折合人民币约 5000 元。

图 5-4 给出了 76#槽设定温度与主控温度的比较，从比较中可以看出实际的升温曲线与设定的升温曲线基本吻合，充分说明了论文研究的具有自动控制高温烟气焙烧技术升温的可控性与控制的效果。

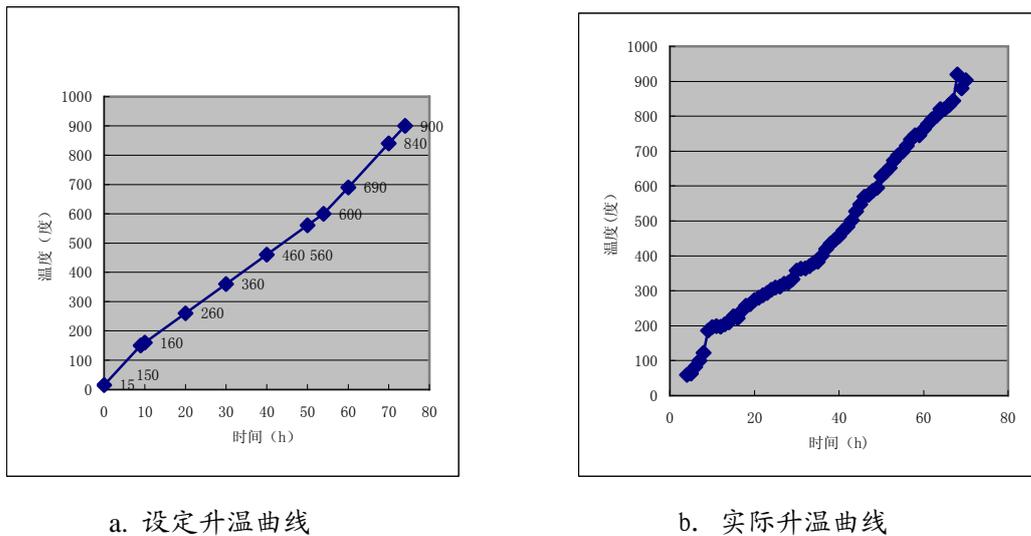


图 5-4 实际升温与设定升温的比较

图 5-5 给出了 156#槽阴极上下表面各个测点温度随时间的变化。由图可知，经约 70 小时后阴极上表面的温度可达到 900℃左右，而阴极下表面温度在加热终了时可达到 750℃左右，上、下表面的温差在 150℃左右。由图 5-5a 可见，在整个焙烧过程中，阴极上表面温度较均匀，最大温差为 160℃左右；经过对同一时间不同测温点的标准差率进行分析其最大值不超过 10%；在加热终了时最大温差约为 90℃。由图 5-5b 可看出，阴极下表面四周温差变化不大，槽底中心温度（AA4 和 AA2）明显高于四周各个温度，但最大温差也只有 165℃。在加热终了时阴极下表面最大温差约为 115℃。

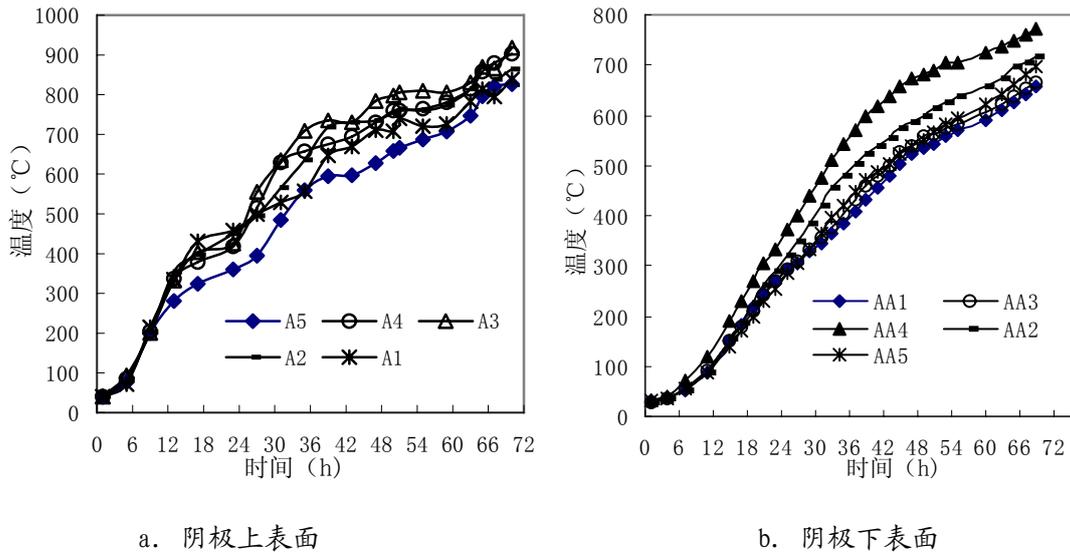


图 5-5 156# 槽阴极表面温度变化

表 5-1 是 156# 槽在高温烟气焙烧过程中槽侧部方框钢板温度的变化。从表 5-1 可见，单看某个面，不论是南大面还是北大面，是东小头还是西小头，槽侧部方框钢板温度的均匀性都非常好，这从另一个侧面也说明了高温烟气焙烧的温度均匀性。

表 5-1 槽侧部方框钢板温度 (°C)

时间	南大面			北大面			东小头		西小头	
4 月 28 日 21:20	42	45	48	55	71	74	40	39	38	38
4 月 29 日 9:20	132	156	111	122	125	153	94	94	70	76
4 月 29 日 13:20	164	170	170	141	139	168	111	108	86	92
4 月 29 日 17:20	192	214	218	163	170	192	138	133	116	123
4 月 29 日 21:20	229	250	246	181	196	204	142	143	134	139
4 月 30 日 1:20	256	259	239	181	238	209	145	142	152	163
4 月 29 日 5:20	258	264	268	209	248	239	146	158	168	167
4 月 29 日 9:20	298	300	292	242	266	260	188	188	195	208
4 月 29 日 13:20	300	306	297	246	266	269	198	202	203	214
4 月 29 日 17:20	306	309	282	243	257	252	205	203	211	220
4 月 29 日 21:20	300	316	290	249	250	270	224	213	220	225
5 月 1 日 1:20	284	288	273	294	285	263	225	212	212	203
5 月 1 日 5:20	298	300	271	255	260	295	216	206	172	226
5 月 1 日 9:20	364	361	330	278	276	268	246	237	249	252
5 月 1 日 12:20	363	366	362	296	291	294	264	255	277	276
5 月 1 日 15:00	371	382	386	301	295	295	262	254	285	281

由于在现场环境中电解槽直接连通大气，所以无法检测到烟气中的空气过剩系数，因此不能采用闭环控制，必须采取风油比定量控制的措施。空气过剩系数控制的精确程度对阴阳极的氧化起着决定性的作用，同时对燃料的利用率也有着较大的影响。由于在实际生产中阴极表面不易观察，我们可以阳极的表面氧化情况来作说明。从图 5-6 可知阳极表面氧化率不足 20%，其氧化深度最深处 < 5mm，也可看出阳极的棱角依然整齐、清晰可辨；同时观察阴极扎糊炭帽和人造伸腿基本完整（易氧化部份）。这些都充分说明了论文研究的系统对空气过剩系数的控制精度。

从图 5-7 中可以看出 76#槽在启动后其阴极电流分布较为均匀，也说明了论文研究的具有自动控制的高温烟气焙烧技术焙烧效果。



图 5-6 阳极表面氧化示意图

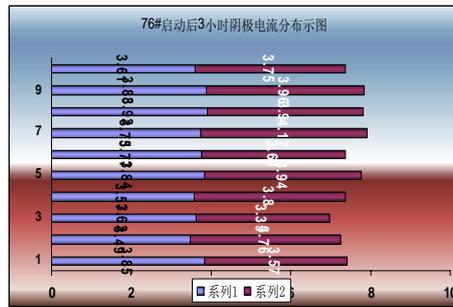


图 5-7 76#槽启动后的阴极电流分布

从图 5-8 可看出论文研究的具有自动控制高温烟气焙烧技术在对铝电解槽焙烧的过程中，不仅对铝电解槽阴极进行了较好的焙烧也对人造伸腿进行有效的焙烧。

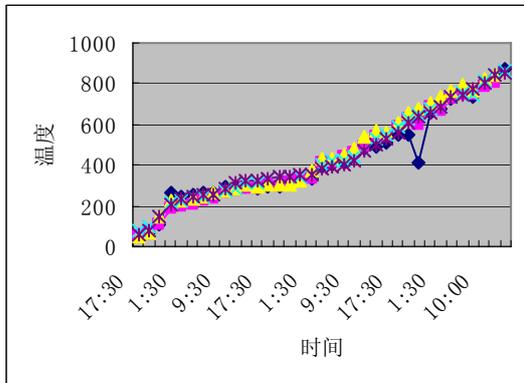


图 5-8 76#人造伸腿升温曲线图

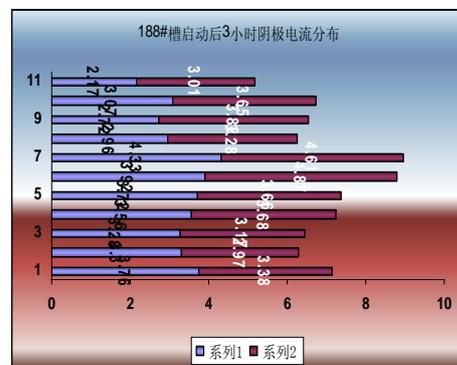


图 5-9 188#槽启动后阴极电流分布

5.2 75kA 铝电解槽焦粒焙烧实例

为了比较采用高温烟气焙烧与焦粒焙烧这两种方法时温度的均匀性,对该厂188#槽采用焦粒焙烧方法的电解槽在焙烧过程中阴极炭块的温度进行了检测,温度检测也采用预埋热电偶的方法,测点位置与高温烟气焙烧时相同。188#槽焦粒焙烧共用时为96小时,耗电20832度,折合人民币6500元。

从图5-9中我们可看出经焦粒焙烧的铝电解槽其在启动后的阴极电流分布还存在着较大的偏差,也就是说其焙烧效果不佳。

188#槽焦粒焙烧过程的温度分布如图5-10所示,由图可见,焦粒焙烧时无论是阴极上表面还是阴极下表面温度分布均匀性都较差,温差最大达到500℃以上,而且温度波动也很大,其相对标准差超过20%以上。从图5-10a还可知,焦粒焙烧时在开始时的升温速度很快,在2小时左右可达到300-400℃,在高温时的温差比低温时的温差大。焦粒焙烧由于是电阻加热方式,加热终了时的断面温差小于高温烟气焙烧。

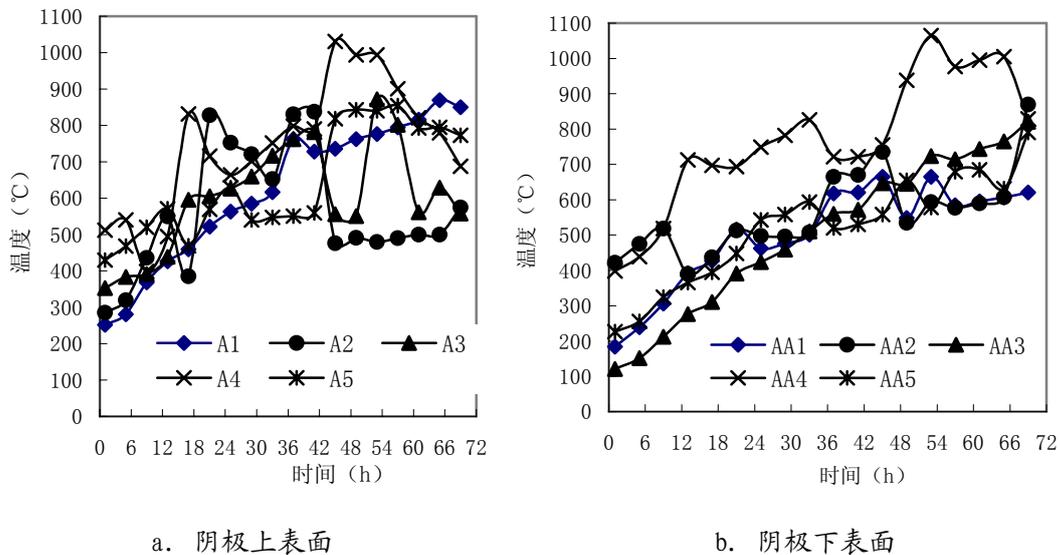


图5-10 188#槽焦粒焙烧阴极表面温度

5.3 小结

通过对采用高温烟气焙烧76#槽与采用焦粒焙烧188#的效果进行比较,可得出以下结论:

1、使用的高温烟气焙烧技术易于实现电解槽焙烧操作的自动化,同时其有较大的调温范围以适应铝电解槽在不同加热制度下进行焙烧。可以做到使阴极内

衬上下表面温度缓慢均匀上升且温度分布均匀，其相对标准差控制在 10% 以内；同时阴极上下表面温差较小，温度梯度较低则焙烧对阴极的冲击较小。

2、使用基于 PLC 与增量式 PID 算法的自动控制系统的的高温烟气焙烧技术易于实现电解槽焙烧操作的自动化。可以做到使阴极内衬表面温度缓慢均匀、可控地上升，阴极表面温度分布均匀，阴阳极氧化在可控范围之内。充分说明了基于 PLC 与增量式 PID 算法的自动控制系统在高温烟气焙烧技术应用中的有效性和适应性。

4、高温烟气焙烧技术不但能方便地按要求焙烧好炉底阴极，而且能使边部捣固糊（人造伸腿）取得很好的焙烧效果，弥补了其它焙烧方法不能很好地焙烧边部的缺陷。因此该法有着其它焙烧方法无可比拟的优点，具有很现实的推广价值。

5、避免了燃料焙烧时捣固糊及阴极碳块燃烧损坏的可能性，扎固糊及阴极碳块的氧化得到了有效的控制。

6、可以直观检测及目测各部位的焙烧情况，启动时，首先灌入的电解质液能填充阴极内衬以及人造伸腿因焙烧出现的裂纹，有利于延长槽寿命。

7、从高温烟气焙烧与焦炭焙烧的效果比较可以看出前者的效果明显好于后者，以经验来推断在电解槽的后期管理相同的条件下，前者的槽寿命较后者可延长 200~300 天。从铝电解槽两种焙烧方法所用的费用与其所用的时间来比较可知，论文研究的高温烟气焙烧方法具有较大的优势，也就是说单台用能源成本降低 1500 元，同时还可提高槽工作日一天。

第六章 结论

论文讨论了铝电槽寿命与电解铝企业经济效益的关系、讨论了焙烧方法对铝电解槽寿命的影响,选用了铝电解槽高温烟气焙烧技术;为确保高温烟气焙烧技术有效实施,论文着重研究铝电解槽加热制度选择以及如何确保加热制度实施自动控制系统;同时通过对 75kA 铝电解槽上进行高温烟气焙烧,并与焦粒焙烧的铝电解槽进行效果比较。为此可得出以下结论:

1、面对日益激烈的市场竞争与国家产业政策的调整,电解铝行业进入微利甚至亏损时代,铝电解槽寿命对原铝生产成本则起着重要的影响。

2、影响铝电解槽寿命可分为五个方面,论文关注焙烧方法对铝电解槽寿命影响,并对焙烧方法从六个方面进行比较,认为高温烟气焙烧方法具有较为明显的优势。

3、为确保高温烟气焙烧技术的实施,论文对铝电解槽加热制度进行优化选择,认为采用 72 小时的缓慢加热制度更利于高温烟气焙烧技术在相对经济的条件下发挥。

4、论文设计高温烟气焙烧过程自动控制系统,对铝电解槽阴极焙烧温度采用基于 PLC 与增量式 PID 算法的控制系统进行闭环控制;同时对烟气中空气过剩系数采用开环控制。

5、论文选用的高温烟气焙烧技术对电解槽的焙烧效果与目前常为采用的焦粒焙烧技术比较,在升温可控性、阴极上下表面温度分布均匀性、阴极断面温度梯度具有明显的优势。

6、论文选用高温烟气焙烧技术在提高铝电解槽焙烧能量利用率与设备利用率、延长槽电解槽寿命和降低生产成本等方面具有较大优势。槽寿命的延长 200~300 天可有效降低原铝的生产成本 50 元。以年产 20 万吨原铝来可降低生产成本 1000 余万元。

参 考 文 献

- [1] 张力, 伍成波. 大型铝电解槽气体焙烧启动传热特性. 大连理工大学学报. 2001, 41 (1): 80~83
- [2] 张力, 伍成波. 铝电解槽燃料直接焙烧启动方法. 轻金属. 2000, 10: 34~36
- [3] 赵无畏. 现代大型铝电解槽焙烧启动方法研究. 轻金属. 1996, 11: 26~29
- [4] 赵无畏, 张伦和. 推广应用现代大型预焙槽技术振兴我国铝工业. 世界有色金属. 1997. 6: 31~36
- [5] 何晓东. 铝电解槽的石墨焙烧启动法. 轻金属. 1996, 6: 40~42
- [6] 程祥, 赵永来, 贾新武. 大型电解预焙槽槽寿命的探析. 河南冶金. 2003, 11 (2): 21~23
- [7] 邱竹贤. 预焙槽炼铝. 冶金工业出版社. 1998
- [8] C.H.Clell and J.T./keniryetal. A study of some cathodes advantages and problem areas. Light Metals. 1983, 6: 31~33
- [9] G.R.Peltier and G.E.Stockman. Cathode preheat and startup temperatures and bottom block displacement. Light Metals. 1989, 8: 43~45
- [10] W.R.Hale. Improving the useful life of aluminium industry cathodes. JOM. 1989, 41(11): 21~23
- [11] 朱善君, 翁樟, 邓丽曼, 等. 可编程序控制系统. 清华大学出版社. 1992
- [12] 尹宏业. PLC 可编程控制器教程. 航空工业出版社. 1997
- [13] 殷国富. 工程专家系统技术及其应用. 成都电子科技大学出版社. 1993
- [14] 陶永华, 尹怡欣, 葛芦生. 新型 PID 控制及其应用. 机械工业出版社. 1998
- [15] 陶永华. PID 控制原理和自整定策略. 工业仪表与自动化装置. 1997 (4): 60~64
- [16] 谢新民. 具有专家系统的 PID 自适应调节器. 自动化与仪器仪表. 1992(4): 4~7
- [17] 胡晚霞. 专家式 PID 自整定控制器的设计和实现. 自动化仪表. 1997, 17 (3): 21~25
- [18] 周爱红. 汽轮机状态监测与故障智能诊断系统. 重庆大学硕士学位论文. 2003
- [19] 杨叔子. 基于知识的诊断推理. 清华大学出版社. 1993
- [20] 董泽, 刘娜. 专家整定 PID 控制系统的设计, 计算机仿真, 2002, 19 (1): 23~25

- [21]王春鸣, 陈刚. 专家PID控制器, 石油化工自动化, 2002, 5: 25~27
- [22]Paul Harmon and David King. Expert System. New York: John Willey and Sons. 1985
- [23] F.Hayes Roth, etc. Building Expert System. Addison-Wesley Publishing Company. 1983
- [24]McDermott J.R1. A Rule-Based Configurer of Computer Systems. Artificial Intelligence. 1982(19)
- [25]Davis R. , Buchanan B. , and Shortliffe E. Production Rule as a Representation for a Knowledge Based Consultation Program. Artificial Intelligence. 1977, 8
- [26]E.A.Feigenbanm. The Art of Artificial Intelligence. Thems and Case Studies in Knowledge Engineering. In: Proc. 5th IJCAI, 1977
- [27]B.ChandrasekAran and S.Mittal. Deep Versus Complied Knowledge Approaches to Diagnostic Problem-Solving. Int. J. Man-Machine Studies, 1983, 19 (5): 425~436
- [28]Robert E. Shanmon, etc. Expert System and Simulation. Simulation June, 1985
- [29]J.M.KAratzki. Expert System in Engineering. Computer-Aided Engineering Journal, 1987, 4 (2): 99~102
- [30]B. J.Davies and I.L.Darbyshire. The Use of Expert System in Process Planning. Annals of the CIRP, 1984, 33 (1)
- [31]B.G.Buchanan and E.H.Shortliffe. Rule Based Expert System. Addison Wesley, 1984
- [32]Gero. J. S. Expert System in Computer Aided Design. North-Holland Amsterdam, 1987
- [33]H. A.Eimaraghy. Expert System for Inspection Planning. Annals of CIRP, 1987, 36 (1)
- [34]Paul Hamon, Rex Maus and William Morrissey. Expert Systems Tools and Applications. New York: John Widely & Sons, Inc. , 1988
- [35] 卢剑. 铝电解槽早期破损与焙烧启动[J]. 湖南有色金属. 2003. (10):16~18
- [36] 张力, 伍成波. 铝电解槽高温气体焙烧启动的加热制度[J]. 重庆大学学报(自科版). 2001. 24(2): 100~102.
- [37] 张力, 伍成波, 潘良明, 等. 大型铝电解槽气体焙烧启动传热特性[J]. 大连理工大学学报. 2001. 41(S1):80~83.

- [38] В. М. Вагаев.. Влияние углеродистых материалов на формирование температурного поля педины. [J]. Цветные металлы. 2000. (2): 56~59.
- [39] 冯乃祥. 铝电解槽热场、磁场和流场及其数值计算[M]. 沈阳. 东北大学出版社. 2001. 32~35.
- [40] 王应时. 燃烧过程数值计算[M]. 北京. 科学出版社. 1986. 135
- [41] 马科夫斯基, В. А., 拉夫连契克, N. N. 著, 高家锐译. 加热炉控制算法[M]. 北京. 冶金工业出版社. 1985.
- [42] К. 格罗泰姆, В. 威尔奇著. 邱竹贤, 王家庆, 刘海石等译. 铝电解厂技术. 沈阳: 《轻金属》编辑部. 1997.
- [43] Фrlie M. S, Фye H. Cathode in Aluminium Electrolysis[A]. Lecture on the 5th International Course on Process Metallurgy of Aluminium. Norway. 1986. 13~19.
- [44] 于军等. 铝电解槽阴极碳块的分类、评价与质量保证[J]. 世界有色金属. 1996. (5): 19~23.
- [45] 冯乃祥. 热模压碳块的电阻和导热性能[J]. 碳素技术. 1996. (6): 18~23.
- [46] 中华人民共和国有色金属行业标准. 铝电解用普通阴极炭块. YS/T286-1999. 国家有色金属工业局.
- [47] 中华人民共和国有色金属行业标准. 铝电解用半石墨质阴极炭块. YS/T287-1999. 国家有色金属工业局.
- [48] Моделирование Углеродистого Блока Алюминиевого Электролизера [J]. Цветные Металлы. 1998. (1): 73.
- [49] 朱旺喜, 王湘南. 使用半石墨化阴极炭块时铝电解槽内衬温度分布计算[J]. 矿冶. 1994. 3(3): 67~70.

致 谢

本论文是在导师桂卫华教授和张久明教授的悉心指导下完成的，导师严谨的工作作风和渊博的知识让我受益匪浅，在论文完成之际，对导师的教诲表示深情的感谢！同时向所有帮助和指导我的同事表示感谢！

王金融
2005年11月

攻读学位期间主要的研究成果

在《轻金属》2005年9月增刊上发表基于PLC与PID算法的专家控制系统在铝电解槽高温烟气焙烧的应用