

铝电解槽 热场、磁场和流场 及其数值计算

冯乃祥 孙 阳 刘 刚 编著

06



NEUPRESS
东北大学出版社

铝电解槽热场、磁场和流场 及其数值计算

冯乃祥 孙 阳 刘 刚 编著

2 .

内 容 简 介

本书介绍了大型预焙阳极铝电解槽的电解反应热力学、热场、磁场以及金属铝液流动场。全书共分三篇:第一篇阐述了铝电解槽电解反应热力学,并对铝电解槽的热场进行了数值计算。第二篇介绍了铝电解槽磁场的测量方法和计算方法,并对铝电解槽的磁场进行了数值计算。第三篇介绍了铝电解槽流场的测量方法和计算方法,并对铝电解槽的铝液流动进行了数值计算。

本书可供铝厂工程技术人员、从事铝冶金科研与设计的人员以及高等院校相关专业的教师 and 研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

铝电解槽热场、磁场和流场及其数值计算/冯乃祥,孙阳,刘刚编著. —沈阳:东北大学出版社,2001

ISBN 7-81054-666-X

I. 铝… II. ①冯… ②孙… ③刘… III. 氧化铝电解-电解槽-场(力学)-数值计算 IV. TF821.327

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 078753 号

©东北大学出版社出版

(沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号 邮政编码 110004)

电话:(024)23890881(社务室) (024)23892538(传 真)

83687331(发行部) 83687332(出版部)

网址:<http://www.neupress.com> E-mail:neuph@neupress.com

铁岭市新华印刷厂印刷 东北大学出版社发行

开本:850mm×1168mm 1/32 字数:156 千字 印张:6.125

2001 年 10 月第 1 版 2001 年 10 月第 1 次印刷

责任编辑:李毓兴 责任校对:吴 然

封面设计:唐敏智 责任出版:秦 力

定价:20.00 元

序

近年来铝工业正在迅速发展，其主要标志是着力增大铝电解槽的电流容量。法国已从 300kA 增大到 500kA，形成新的生产系列，我国也已建立 280~320kA 系列。回顾 20 世纪 80 年代初，我国才刚刚引进 160kA 铝电解槽。增大电解槽容量的意义是节省基建投资，降低生产成本，故国内外风起云涌，形成一股迅猛发展的势头，令人振奋。

分析大型铝电解槽之所以能够如此大踏步地前进，首先应归功于其物理场的深入研究取得了丰硕的成果。所谓物理场包括磁场、流动场、力场、热场及铝液与电解质界面的波动场等，内容极其广泛。冯乃祥教授、孙阳博士和刘刚教授级高级工程师所作此书，涉及物理场中的温度场、磁场及铝液与电解质的流动形式，实即物理场中的核心部分。应用这些先进的计算技术，可以合理地、准确地确定电解槽的槽体结构和母线配置，以及生产操作中槽膛内形和液体高度，从而提高生产率，降低电耗，实即降低生产成本，其理论意义和经济价值十分重大。

环顾国内外书刊中，在此方面的公开著述较少，因其涉及生产和设计的机密技术。此书之出版，实则开辟了一座新的门户，对于高等教学和科研工作非常有益。我极其称赞此书的编写和出版，故乐为之序。

中国工程院院士 邱竹贤

2001 年 9 月 5 日

前 言

铝电解槽的热场、磁场和流动场是大型预焙阳极铝电解槽物理场的核心部分。铝电解槽的热场、磁场和槽内金属铝液的流动场与电解槽的母线设计、结构设计、热设计和电解槽的操作有关，它们对铝电解的生产有重要影响。这些物理场的研究、设计和计算是当前大型预焙阳极铝电解槽的核心计算问题，其技术特征代表着当代大型铝电解槽的技术水平。然而由于技术上的保密，国内外尚未有一本较为系统地介绍铝电解槽热场、磁场和流场的书籍。

本书是我们在多年的教学和对我国大型预焙阳极铝电解槽的热场、磁场和流场的研究的基础上编写而成的。书中除了介绍铝电解槽的热场、磁场和金属铝液的流场的计算方法之外，还对涉及到电解槽热平衡的电解反应的热力学问题做了综述，阐述了一些新概念。

本书的出版有幸得到沈阳顺达新技术有限公司和岫岩顺达气力输送设备制造厂的资助，该公司是成功开发我国电解铝厂超浓相输送的企业。此书的出版还得到了我的老师邱竹贤院士的大力支持，在此一并致谢。

由于我们的水平有限，缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

冯乃祥

2001 年 10 月于沈阳

目 录

第一篇 铝电解槽中的温度场

第一章 绪 论	1
1.1 铝电解发展概述	1
1.2 研究铝电解槽中传热问题的重要意义	2
1.3 铝电解槽的槽膛内形和槽帮结壳	3
1.3.1 铝电解槽槽帮结壳的形成、变化及其主要成分	3
1.3.2 铝电解槽槽帮结壳与电解质和铝液熔体之间的换热系数	4
1.3.3 槽帮结壳与熔体之间换热系数的研究现状	4
1.3.4 规整的槽膛内形对铝电解生产的重要意义	5
1.4 铝电解槽传热数学模型	6
第二章 冰晶石—氧化铝熔盐电解反应的热力学	8
2.1 冰晶石—氧化铝熔盐电解的能量消耗	8
2.2 铝电解槽的可逆电势 E_{rev}	10
2.3 氧化铝的活度	12
2.4 电解铝的当量电压 $E_{\Delta H}^{\ominus}$	12
2.5 铝电解槽的槽电压及其电能分配	15
2.6 铝电解槽的热损失和热平衡	15
第三章 铝电解槽的温度场	19
3.1 传热问题概述	19

3.1.1	传热的三种方式	19
3.1.2	传热问题的边界条件及求解方法	20
3.2	铝电解槽传热过程的物理模型	21
3.3	铝电解槽传热过程二维稳态数学模型	23
3.3.1	电解槽数学模型求解区域的单元划分	23
3.3.2	热交换过程的控制方程及其离散	23
3.3.3	铝电解槽数学模型的边界条件	31
3.4	计算实例	32
3.4.1	计算所需数据的选取	32
3.4.2	计算结果	35
第四章	槽帮结壳与介质换热系数的计算	38
4.1	铝电解槽电解质熔体和铝液与槽帮结壳之间 传热的基本原理	38
4.2	槽帮与电解质熔体和铝液熔体之间的换热系数	42
4.3	热流管法计算槽帮结壳与电解质熔体 之间的换热系数	43
4.3.1	铝电解槽中的热流线及其分布	44
4.3.2	计算原理	44
4.4	计算实例	46
4.4.1	计算所需数据	46
4.4.2	计算结果	48
第五章	铝电解过程中槽膛形状的变化	50
5.1	铝电解过程中铝液水平的变化对槽膛形状的影响	50
5.1.1	模型的建立	50
5.1.2	计算铝电解槽内槽帮结壳形状的方法	51
5.1.3	铝电解槽铝液最佳高度的判断标准	52
5.1.4	计算实例	53

5.2 选用不同的内衬炭材料对槽膛形状的影响.....	56
5.2.1 铝电解槽内衬炭材料及其导热性能.....	57
5.2.2 计算实例.....	58
5.2.3 计算结果.....	59
第六章 铝电解槽电压、电流强度变化对电解槽	
热状态的影响	64
6.1 计算原理和计算方法.....	64
6.1.1 计算原理.....	64
6.1.2 计算方法.....	67
6.2 计算实例.....	68
6.2.1 槽帮结壳变化厚度的选取.....	68
6.2.2 电解质初晶温度的计算方法.....	68
6.2.3 计算结果.....	69
参考文献	73
第二篇 大型预焙阳极铝电解槽磁场的计算	
第七章 绪 论	76
7.1 铝电解槽磁场计算及其研究的意义.....	76
7.2 电磁场的计算方法概述.....	77
7.3 国内外有关铝电解槽磁场计算研究的现状.....	78
7.3.1 磁衰减系数法.....	80
7.3.2 有限元素法.....	80
7.3.3 边界元素法.....	82
第八章 铝电解槽内外传导电流产生磁场的计算	90
8.1 基本概念.....	90
8.2 母线电流产生磁场的计算.....	91
8.2.1 电流恒定时线形导体所产生磁场的计算.....	92

8.2.2	电流线性变化时线形导体所产生磁场的计算	94
8.3	阴极炭块、阳极炭块以及铝液和电解质熔体中 电流所产生磁场的计算	95
第九章	表面磁荷法计算磁场的原理和步骤	100
9.1	表面磁荷法计算磁场的原理	100
9.2	应用表面磁荷法计算磁场的公式推导	104
9.3	非线性方程组的求解	107
9.4	应用表面磁荷法计算磁场的步骤	107
9.5	应用表面磁荷法计算磁场的程序框图	108
第十章	铝电解槽磁场计算程序的验证	109
10.1	磁场的测量	109
10.1.1	测量点位置的确定	110
10.1.2	测量仪器	110
10.1.3	电流分布的测定	110
10.1.4	高斯计探头的构造原理和测量装置 的制备	111
10.1.5	测量步骤	112
10.1.6	测量结果	114
10.2	磁场的计算	114
10.3	测量结果与计算结果的对比与讨论	115
10.4	误差分析	117
第十一章	铝电解槽磁场的计算实例	119
11.1	160kA 大型预焙阳极铝电解槽磁场的计算	119
11.1.1	计算结果	119
11.1.2	铁磁材料对铝电解槽磁场分布的影响	122
11.1.3	电流分布对铝电解槽磁场分布的影响	125
11.2	186kA 大型预焙阳极铝电解槽磁场的计算	128

11.3	230kA 大型预焙阳极铝电解槽磁场的计算·····	131
11.4	母线设计改进后的 186kA 大型预焙阳极铝 电解槽磁场的计算·····	135
11.5	母线设计改进后的 230kA 大型预焙阳极铝 电解槽磁场的计算·····	138
参考文献·····		138

第三篇 铝电解槽磁场对铝液流动影响的研究

第十二章 绪 论·····	143
12.1 铝电解槽流场计算及研究的意义·····	143
12.2 流体力学研究方法概述·····	144
12.3 紊流问题的数值计算方法概述·····	146
12.3.1 直接模拟法·····	146
12.3.2 大涡模拟法·····	146
12.3.3 雷诺时均方程法·····	146
12.4 国内外有关铝电解槽流场研究的现状·····	152
第十三章 铝电解槽流场控制方程的建立及离散·····	159
13.1 基本概念·····	159
13.1.1 连续性方程·····	159
13.1.2 运动方程·····	159
13.1.3 能量方程·····	160
13.2 铝电解槽流场的数学描述·····	161
13.2.1 模型的简化·····	161
13.2.2 铝电解槽流场的二维紊流数学模型·····	162
13.2.3 壁面函数法·····	163
13.3 求解区域的离散化·····	166
13.4 通用控制微分方程·····	167
13.5 离散方程的建立·····	168

13.5.1	控制微分方程的离散方法	168
13.5.2	通用控制微分方程的离散	168
13.5.3	动量方程的离散	170
13.6	离散方程的求解方法	172
13.6.1	SIMPLE 算法	172
13.6.2	SIMPLER 算法	173
第十四章	铝电解槽流场的计算	176
14.1	铝电解槽流场计算的边界条件	176
14.2	铝电解槽流场的计算实例	177
14.2.1	160kA 大型铝电解槽的流场	177
14.2.2	186kA 大型铝电解槽的流场	177
14.2.3	230kA 大型铝电解槽的流场	178
14.2.4	186kA 大型铝电解槽母线改进后的流场	179
参考文献		180

第一篇 铝电解槽中的温度场

第一章 绪 论

1.1 铝电解发展概述

熔盐电解法是目前世界上生产金属铝的主要方法。铝电解的生产,主要是以冰晶石-氧化铝熔盐做电解质,炭素材料为阴极和阳极,直流电从阳极导入,经过电解质溶体和铝液层后从阴极钢棒导出,氧化铝进行电化学反应,结果在阳极上生成二氧化碳气体,在阴极上析出液态金属铝的过程^[1, 2]。

铝电解槽是炼铝的主要设备。自采用电解法生产金属铝以来,电解槽的形式有了很大的改进和发展,现代铝工业上使用的电解槽主要类型有三种,分别为旁插棒式自焙阳极电解槽、上插棒式自焙阳极电解槽和预焙阳极电解槽。在这三种电解槽中,阳极装置有很大的不同,但阴极装置却大同小异。电解槽的槽底结构均由阴极炭块、阴极钢棒,耐火材料、保温材料,氧化铝粉等部分组成^[3]。

近几十年来,预焙槽的发展很快。为了进一步增加铝产量和降低能耗,许多国家致力于电解槽的大型化和操作自动化以及有关工艺设备的实验研究,新建成的铝电解槽大多为 200~230kA 的大型预焙阳极电解槽,最大的电解槽容量已达到 500kA 左右。电解生产的电流效率也不断提高,已经达到了 95% 左右。电解操作的自动化程度和劳动生产率也日益提高^[2, 3]。

我国的铝电解工业在建国后得到了很大的发展,2000年已经达到了近340万吨的年生产能力。近二十年来,我国电解铝工业高速发展,已在基础理论研究、现代大型预焙槽如135kA、160kA、186kA、280kA和320kA电解槽设计和生产过程的计算机控制方面以及生产取得了很大进步。20世纪70年代末,抚顺铝厂、沈阳铝镁设计研究院、东北大学和郑州轻金属研究院联合攻关,独立自主地开发了当时具有国际先进水平的135kA大型预焙阳极铝电解槽。之后又从日本引进160kA大型预焙阳极铝电解槽技术,在此基础上,我国铝行业科技工作者又通过“八五”和“九五”的辛勤工作,在贵州铝厂、郑州轻金属研究院和平果铝厂相继开发了186kA、280kA和320kA大型预焙阳极铝电解槽,使我国电解铝工业实现了电解槽设计从仿照设计到根据电解厂实际情况优化设计的飞跃,取得了电解铝电流效率从87%提高到95%,直流电耗从14500kWh/tAl降到13200kWh/tAl的接近世界先进水平的成就。

1.2 研究铝电解槽中传热问题的重要意义

在铝电解槽内,由于电解质和铝液熔体的温度很高,流动又很剧烈,使熔体中的热量不断地向电解槽的槽帮和内衬材料传递。在槽内衬中,热量以传导形式经由炭素材料、耐火砖、保温砖以及槽壳等部分传向电解槽的槽壳表面,再由槽壳表面以对流和辐射的形式向周围的环境散发。

铝电解槽的热损失,主要取决于电解槽的结构设计和操作。过分的保温妨碍槽侧部结壳的形成,容易导致侧部腐蚀和槽的早期破损。但是如果保温效果太差而导致槽帮结壳过厚,则容易造成压槽等生产事故^[3, 4]。

研究铝电解槽的热平衡,主要是研究电解槽内各部分结构中的温度分布。电解槽的温度场分布是否合理,直接影响到电解槽的寿命。如果电解槽的结构设计合理,生产过程中槽膛侧部和底

部的温度适当,能形成规整的槽膛内形,则可以减少电解槽的水平电流分布,提高电解槽内铝液流动的稳定性,提高电解槽的电流效率。由此可以看出,研究电解槽的温度场分布,并应用在电解槽的设计中,使电解槽的温度场分布更加合理,对电解槽的正常生产,具有重要意义^[5]。

1.3 铝电解槽的槽膛内形和槽帮结壳

1.3.1 铝电解槽槽帮结壳的形成、变化及其主要成分

在工业电解质体系中,由于使用酸性电解质,再加上添加剂的作用,电解质体系的初晶温度会降低到 950℃ 左右,甚至更低。

铝电解槽的正常电解温度为 965℃ 左右,而电解槽外部环境的温度却只有 40℃ 左右,在如此大的温度差下,电解槽内的电解质和铝液熔体内产生的热量将通过侧部和底部的保温材料向外传递。

当铝电解槽内的电解质熔体中的热量从槽膛内壁向外传递时,该处电解质的温度下降。等到其温度降低到电解质的初晶点时,电解质就在侧部结晶析出,形成凝固体,从而形成了侧部的槽帮结壳^[3]。在生产过程中,如果电解温度升高,电解质熔体向槽帮结壳传递的热量增加,槽帮结壳的温度也随之升高,超过电解质初晶点后,结壳会熔化。相反,电解质温度的降低,会使电解质熔体在靠近结壳的部分结晶沉积。

在电解过程中,由于要不断地向电解质熔体中添加氧化铝,而加入的氧化铝不能及时完全溶解,有一少部分粘着一些冰晶石沉积到槽壁附近的槽底上。这些沉淀开始时比较软,随着时间的延续,软沉淀的数量不断地增加,并逐步结晶和硬化,于是形成了底部结壳。

在侧部的槽帮结壳中,其主要成分是单斜晶体的冰晶石以及少量的冰晶石和氧化铝的共晶体,而底部结壳主要是由 60% ~

80%的大颗粒刚玉晶体和20%~40%的冰晶石组成^[3]。

1.3.2 铝电解槽槽帮结壳与电解质和铝液熔体之间的换热系数

在铝电解槽内,由于受到电解槽系列电流所形成的磁场的影响,电解质和铝液熔体处于剧烈的流动状态之中,因此在熔体与侧部的槽帮结壳之间必然有对流换热存在。对流换热系数的大小,直接影响到电解槽能否形成规整的槽膛内形,从而影响到电解槽的生产能否正常进行。如果熔体的流动加剧,它与结壳之间的换热系数就会增大,电解质对侧部结壳的冲刷也更加剧烈,结果是侧部的结壳表面温度升高,结壳熔化,厚度减小,铝液镜面增大,铝的溶解损失增加,电流效率降低。严重时,电解槽的侧部被烧穿,造成停槽大修。与此相反,如果侧部结壳与熔体之间的换热系数值很小,使侧部结壳长得很厚,向槽底延伸很长,会将电解槽内的铝液挤得很高,电解质萎缩,结果槽电压升高,同样不利于电解槽的正常生产^[1, 3, 4]。

1.3.3 槽帮结壳与熔体之间换热系数的研究现状

研究流体与固体壁面之间的换热,人们采用了测量和计算的方法。

有人采用实验测量的方法,不仅考虑到二者之间对流引起的换热,而且认为高温熔体的辐射换热也不能被忽视^[6~8]。

由于电解槽内的电解温度很高,给直接测量带来很大困难,因此大多数的研究者使用计算的方法来研究槽帮结壳与熔体之间的换热系数。其中一部分研究者认为对流换热是热量传递的主要方式,并使用流体的准数方程来计算:

$$Nu = c \cdot Re^m Pr^n \quad (1-1)$$

式(1-1)中, Nu ——努歇尔准数;

Re ——雷诺准数;

Pr ——普朗特准数;

c, m, n ——通过实验确定的常数。

由于各研究者所选取的计算数据如流体流速、粘度、边界层厚度以及 c, m, n 等不能完全相同, 因此计算结果差别很大^[9]。

还有人利用热流管内各截面传热量相等的原理计算了电解槽槽帮结壳与熔体之间的换热系数, 这种计算方法不考虑熔体的流速, 而是根据已知的实际内衬材料传热状况反推出铝电解槽内熔体与槽帮结壳之间的换热系数^[5, 9]。

关于铝电解槽内铝液与电解质的流动行为以及槽内熔体对侧部槽帮的对流换热, 许多人做了研究, 在文献[10~15]中均有较详细的报导。

根据文献报导, 槽帮结壳与槽膛内电解质和铝液熔体之间的换热系数在 $400 \sim 1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 之间^[9]。

1.3.4 规整的槽膛内形对铝电解生产的重要意义

正常生产的电解槽槽帮要求厚、硬、匀, 底部伸腿要对称, 整体要求槽膛规整, 伸腿位于阳极边缘正投影下。实践表明, 槽帮能调整电解槽的热平衡。可以说, 槽膛是否规整, 直接影响到电解槽的高产、优质、低耗与长寿。

保持规整的槽膛内形, 有如下的优点: 能调节电解质温度, 使电解温度保持在比较稳定的状态; 保护侧部炭块及槽底边缝, 盖住其裂缝, 使电解质不能直接进入结合薄弱的侧底部, 有助于延长槽寿命; 结壳的电阻很大, 可以防止侧部导电, 迫使电流集中垂直流向槽底; 在保持同一铝液水平的条件下, 槽帮结壳的存在可减少电解槽内的在产铝量, 缩小铝液镜面, 增大阴极电流密度, 有利于提高电流效率。

研究不同电解槽结构设计情况下的槽膛内形具有重要意义。通过电解槽数学模型的计算, 来预测采用某种结构设计时电解槽形成的槽膛内形, 看其是否规整, 是否能达到正常生产、取得高的电流效率以及电解槽长寿的要求, 以指导生产实践。

1.4 铝电解槽传热数学模型

随着计算机技术的发展,数学模型和自动控制在各行各业中的应用越来越广泛。在铝电解工业中也不例外。

铝电解工艺是非常复杂的。影响铝电解电流效率、电耗及生产成本的因素很多,如极距、电解质分子比、铝液水平以及内衬材料等。要研究这些因素究竟会对铝电解生产产生什么样的影响,可以采取两种方法:一种是工业试验;另外一种建立数学模型进行计算的方法。由于建立数学模型成本低,风险小,所以现在有越来越多的人重视运用数学模型来对铝电解的生产过程进行研究^[16~23]。

现代大型预焙阳极电解槽的生产过程中,如果操作条件稳定,那么电解槽的温度场分布也将处于一个比较稳定的状态。基于这样的前提,许多工作者对铝电解槽的稳态温度场进行了计算。所采用的计算方法有有限差分法和有限单元法两种。

计算中,对于槽膛内熔体(电解质和铝液)与槽帮结壳接触部分,有的研究者将其作为第一类边界条件进行处理,即已知结壳边界的温度为电解质的初晶温度^[5];也有研究者将其看成第三类边界条件,用流体准数计算熔体与结壳之间的换热系数,并将电解温度作为熔体的已知温度来进行计算^[24];还有的研究者把熔体本身也看作计算对象,将其划入计算区域进行计算^[25]。由于电解槽内熔体温度很高(900℃以上),生产中电解槽的表面又覆盖了一层氧化铝粉,因此要确定槽内熔体的流动状态非常困难,熔体的流速、密度、粘度等参数很难准确测定,用准数公式计算熔体与槽帮结壳之间的换热系数就有一定的不确定性。为避免使用熔体流速等参数,文献[5,9]中采用了热流管的原理对熔体与槽帮结壳之间的换热系数进行了计算。

在铝电解生产中,铝液水平的高低对电流效率有很大的影响。