

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: 大型预焙铝电解槽电磁场设计
与优化研究

研究生姓名: 刘杰

学科专业: 电化学工程

学院(系、所): 冶金科学与工程学院

指导老师: 李劼(教授、博导)

分类号 UDC_____

密级_____

硕士学位论文

大型预焙铝电解槽电磁场设计 与优化研究

Study on Design and Optimization of the Electric-Magnetic
Field of Large Prebaked Aluminum Reduction Cells

作者姓名: 刘 杰
学科专业: 电化学工程
学院(系、所): 冶金科学与工程学院
指导教师: 李劫(教授、博导)

论文答辩日期_____

答辩委员会主席_____

中 南 大 学

2007年5月

摘要

铝电解槽内电场、磁场等物理场的相互耦合作用，对铝电解槽的电流效率、直流电耗、槽寿命等主要技术经济指标有重要影响。因此，深入研究铝电解槽内电场、磁场的分布形式及相互耦合关系，对提高铝电解槽优化设计、工程分析以及新型电解槽的开发与设计均具有重要的理论与实践指导意义。本文综合铝电解槽电场和磁场的最新研究进展，以 ANSYS 为开发平台，综合考虑各影响因素，建立了高准确度的电磁场耦合计算、优化模型，着重研究了大型电解槽的电场和磁场分布规律。主要的研究内容及成果如下：

(1) 以 350kA 预焙铝电解槽系列为对象，综合考虑槽内导体、母线系统、铁磁材料、空气漏磁、炉帮、相邻槽和相邻厂房等因素，运用有限元软件 ANSYS 建立了三维稳态磁场计算模型，采用国内某铝厂电解槽实测电流为载荷计算得到磁场分布，与该槽实测磁场对比，数值非常接近。与其他研究者所建立的模型相比，本文建立的磁场计算模型无论是计算的准确性还是研究的全面性均明显提高。运用该模型在理想情况下对该系列电解槽的磁场设计进行了分析和优化。

(2) 建立了 350kA 预焙铝电解槽系列母线电场分析模型，对母线系统各组成部分在母线电阻平衡中的作用进行了研究。其中提出了阴极软母线的电阻配置计算方法，该方法可以有效指导阴极母线电阻网络的局部设计。同时，研究了当前所采用的横梁母线结构所带来的问题，并作了相关的优化。所建立的电场分析模型能够排除其他因素的干扰准确反应母线的电阻配置情况，为电解槽母线系统电阻的设计、测试和优化提供了新的参考。

(3) 延用 350kA 电解槽的磁场计算方法，开发了超大型预焙铝电解槽的仿真模型。从磁场设计的角度，分解研究了铝电解槽各部分所产生的磁场以及它们对铝电解槽磁场的作用，包括槽内导体及槽壳部分、端部回流母线、槽底回流母线、阳极立柱母线和横梁母线等。运用这些磁场分布特点，对超大型预焙槽进行了初步磁场设计，得到了一些可参考的磁场配置方案，并对其磁场的稳定性与可行性进行了初步探讨。同时，总结出一套较为有效的磁场设计方法，该方法对电解槽的磁场设计有较好的参考作用。

关键词 铝电解槽，电场，磁场，母线，耦合仿真

ABSTRACT

Coupling of the electric field, magnetic field etc in aluminum reduction cells has a significant influence on the current efficiency, energy consumption, and cells' life. It is very important in theoretic and practical guideline for optimization design, engineering analysis and development of new cells to understand coupled relation of electric field and magnetic field in aluminum reduction cells. In this thesis, with the integration of latest study, considering all of primary factors comprehensively, electric and electric-magnetic models with high accuracy were developed based on the finite element software ANSYS. The emphases were laid on the study of the laws of the electric and magnetic distribution in large aluminum reduction cells. The main research contents and achievements are as follows:

(1) Three-dimensional (3-D) steady models of 350kA prebaked aluminum reduction cells were developed to calculate coupled physics fields. Effects caused by inside induced current, bus bar system around, the ferromagnetic shell air as well as ledge were taken into account. First, the measured current values in a running cell were applied on the model as boundary condition to calculate the magnetic field distribution which is very close to the measured magnetic field distribution in the same cell. Compared with the models built by other researchers, the results of this model were more precise and comprehensive. Then, the model was used to evaluate and optimize the design of magnetic field of this potline.

(2) A three-dimensional (3-D) electric field model of 350 kA prebaked aluminum reduction cells was developed for learning and analyzing the resistance relationship of bus bar system. First, an effective method optimizing the resistance of flexes was obtained, it could help guiding the design of cathode bus bar. Then, the problems which the current structure of anode beam bus bar brings along were studied and some suggestion of optimization were put forward. With other facts eliminated, the model can give veracious results, therefore, it is strongly recommended for design, test and optimization of resistance of bus bar

system.

(3) A model of large aluminum reduction cells was developed by the same approach validated by 350kA series cells. From the angle of design of magnetic field, most parts of aluminum reduction cells, including cell body, shell and bus bar system, were picked out for analysis of the magnetic distribution singly. Then using these traits, several primary design of magnetic field were performed and the stability and feasibility of magnetic field were studied simply. Finally, an effective approach was summarized for magnetic field design.

KEY WORDS: aluminum reduction cell, electric field, magnetic field, bus bar, coupled simulation

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
目 录.....	IV
第一章 文献综述.....	1
1.1 铝电解工业的发展与现状.....	1
1.1.1 现代铝电解工业简介.....	1
1.1.2 铝电解工业技术展望.....	2
1.1.3 我国铝电解工业现状.....	3
1.2 铝电解槽电、磁场研究方法评述.....	4
1.2.1 铝电解槽电场数值计算方法.....	4
1.2.2 铝电解槽磁场数值计算方法.....	6
1.2.3 磁场仿真计算研究现状.....	11
1.3 母线设计研究现状.....	13
1.4 课题研究目的及意义.....	15
1.5 本文的主要研究内容与方案.....	15
第二章 铝电解槽电场、磁场解析数学物理模型.....	17
2.1 铝电解槽电场模型.....	17
2.1.1 母线电场解析模型.....	17
2.1.2 槽内导体部分电场解析模型.....	17
2.1.3 铝电解槽导电系统综合解析模型.....	18
2.2 铝电解槽磁场模型.....	19
2.2.1 母线系统磁场计算模型.....	19
2.2.2 槽内导体部分磁场计算模型.....	20
2.2.3 槽壳磁场计算模型.....	21
2.2.4 电磁力场计算模型.....	21
2.3 材料电、磁物性参数.....	22
第三章 铝电解槽电磁场计算方法验证及优化.....	23
3.1 模型建立.....	23
3.1.1 电场模型的建立.....	23
3.1.2 磁场模型的建立.....	25
3.2 边界条件.....	26
3.2.1 电场载荷与边界条件.....	26
3.2.2 磁场载荷与边界条件.....	26

3.3 模型及计算方法验证	26
3.4 优化与讨论	28
3.4.1 电场结果分析	29
3.4.2 同厂房相邻电解槽对本槽磁场的影响	29
3.4.3 相邻厂房电解槽对本槽磁场的影响	30
3.4.4 磁场结果分析与讨论	32
3.4.5 关于厂房间距的优化	33
3.5 本章小结	35
第四章 铝电解槽母线电场优化研究	36
4.1 模型和边界条件	36
4.1.1 模型建立	36
4.1.2 边界条件	37
4.2 结果分析	37
4.3 阴极软母线电阻优化	39
4.3.1 方法推导	39
4.3.2 实例计算	42
4.3.3 结果分析	42
4.3.4 讨论与建议	43
4.4 阳极横梁母线的优化	43
4.4.1 两侧之间的电流平衡的研究	44
4.4.2 同侧阳极之间的电流平衡研究	46
4.5 本章小结	46
第五章 预焙铝电解槽磁场设计研究	47
5.1 铝电解槽磁场构成研究	47
5.1.1 槽内实体及槽壳部分	47
5.1.2 母线部分的设计	48
5.2 铝电解槽磁场设计步骤	54
5.3 总结与讨论	59
5.4 本章小结	59
第六章 总结与展望	60
参考文献	62
附 录	69
致 谢	70
攻读硕士学位期间发表的论文及参与的科研项目	71

第一章 文献综述

1.1 铝电解工业的发展与现状

铝是世界上最丰富的金属元素，由于其良好的物理化学性能，铝的用途日益广泛，因此铝工业呈现出蓬勃发展的状况。目前世界上每年原铝产量约 2447 万吨，2006 年，我国原铝产量 920 万吨，近十年来年平均增长率达 10% 以上^[1]。

霍尔—埃鲁特电解铝法诞生一百多年来，一直是工业上大规模炼铝的唯一方法。虽然近年来开展了一些炼铝新方法的研究，以试图取代现行的霍尔—埃鲁特电解铝法，但目前还未在工业应用方面取得实质性进展。专家们估计，在相当长时间内霍尔—埃鲁特电解铝法仍然是工业上唯一的炼铝方法。

1.1.1 现代铝电解工业简介

霍尔—埃鲁特电解铝法，即冰晶石—氧化铝熔盐电解法，其实质是氧化铝熔于含多种氟化物添加剂的冰晶石熔体中，电流从阳极碳块导入，阴极碳块导出，在阳极上析出 CO_2 和 CO 气体，在阴极上沉积金属铝，如图 1-1 所示。此法经过一百多年来的发展，无论在生产工艺、还是技术水平上都有巨大的进步。目前，现代大型预焙铝电解槽电流强度已达到 500kA，电流效率超过 95%，电耗低于 $13000\text{kWh} / \text{t-Al}$ ^[2]，采用点式自动加料系统、自动控制与生产环境达到较高的水平。

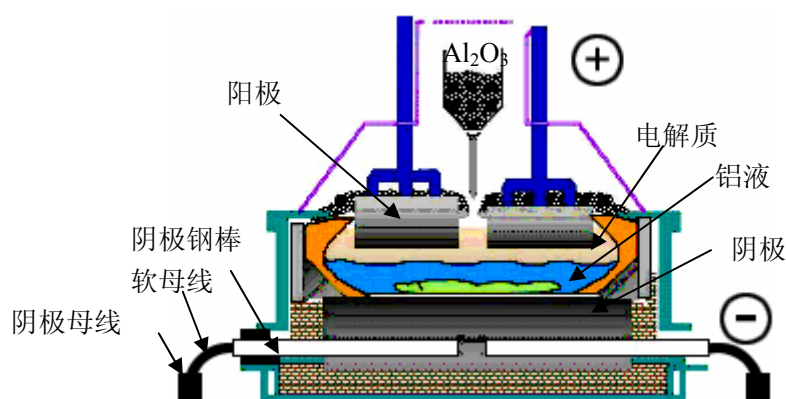


图 1-1 预焙阳极铝电解槽示意图

目前，铝电解工业的发展主要有以下几方面的特点：

(1) 采用大容量预焙阳极铝电解槽^[3-5]。20 世纪 90 年代以来，大型预焙阳极铝电解槽占据了主导地位，为了确保大容量电解槽有良好的电、热、磁、流特性，

在设计大容量槽型时采用了大量新技术与新方法：如采用大面多点进电和母线补偿以减小槽内磁场和流速；采用船形结构和窄加工面以减少投资和加强侧部散热；采用计算机优化设计来优化铝电解槽内“三场”分布特性。

(2) 筑炉新材料的应用^[6-7]。在筑炉中铝电解槽底部采用干式防渗料，简化了施工和加强了底部保温；侧部采用碳化硅及其复合块增强了侧部防腐能力及加强了侧部散热；阴极采用 TiB₂ 涂层技术，提高了电流效率、延长了槽使用寿命；阳极部分采用掺杂技术增加了阳极导电性能和减小了阳极过电压。

(3) 工艺条件的优化与控制^[8-9]。采用低分子比、低氧化铝浓度、低温、低效应系数、高槽电压、“按需下料”的模糊控制技术，采用动态仿真与神经网络技术加强对槽况的监测和预报。采用焦粒或燃气进行铝电解槽的焙烧启动。

1.1.2 铝电解工业技术展望

为了进一步提高铝电解电流效率、降低能耗、增加铝产量，近年来国内外铝业科技工作者进行了大量的基础研究和应用研究。主要有下列三个方面：

(1) 新槽型的开发——导流型铝电解槽^[10-13]

导流型阴极铝电解槽（或称导流型铝电解槽）与传统预焙槽比较，主要的改变是将阳极与阴极碳块做成斜坡状。设计合理时，电解生成的铝液将可以顺着斜坡流入中间沟槽内，再定期被抽走。因此阳极底掌上基本不存在铝液，这样就没有传统槽特别是大型预焙槽的铝液波动问题，因而可以大幅度的降低极距，从而减小极间电压降。理论和实践证明^[12]，电流密度为 0.97A/cm² 时，极距每降低 1cm，极间压降约减少 300~330mV。如将极距由日前的 5~6cm 降至 2~3cm，在电流密度相同的情况下则槽电压可降低 1V 左右。换言之，如槽电压保持不变，则电流密度可大幅度提高，从而得以提高产能，降低吨铝能耗。

(2) 惰性阳极技术开发^[14]

传统铝电解槽采用消耗性碳阳极，并排出 CO₂ 等温室气体污染环境，能量利用率低，电能消耗大，生产效率不高。如使用惰性阳极，铝电解反应变为：



阳极不参加电解反应，节约了碳阳极及所含能量，并可降低 75% 左右的极化电压^[16]从而节约了电能。同时由于惰性阳极在电解中外形尺寸稳定，能把电解槽结构设计得更紧凑，还可降低极距，则可进一步降低能耗。由此设计新型高效电解槽，具有节电 20% 的诱人前景。因而研制惰性阳极已成为国际上革新铝冶金技术的重要发展方向。惰性阳极材料要求要耐腐蚀、抗氧化、高导电率、机械强度高、易加工、价廉易得。目前正在开发的惰性阳极材料主要有：氧化物陶

瓷如尖晶石型氧化物陶瓷、 SnO_2 基氧化物陶瓷；金属陶瓷如镍基金属陶瓷；合金电极如 Cu-Ni-Fe 系合金电极及其它功能材料等，其中合金电极最具前途。

(3) 低温铝电解理论^[15]

通过优化电解质体系组成，配合电极组成和电解槽结构的改变，将电解温度由目前的 950~970℃降低到 800~880℃，从而降低电能消耗。主要的技术措施是通过高比例添加氯化物来达到降低电解温度。

1.1.3 我国铝电解工业现状

我国铝电解工业现状^[16-17]主要表现在以下几个方面：

(1) 自焙阳极铝电解槽占很大一部分，槽容量偏小。目前，国外大型预焙槽电流强度已达到 500hA，国内达到 350kA。

(2) 我国铝电解生产的电流效率不高，与国外先进指标相比有 3%~5% 的差距。目前国外通过铝电解槽内衬、母线等合理设计，已使电解槽的平均电流效率达 95% 以上。相比之下，我国同类型槽平均电流效率除个别 185~200kA 电解槽系列能达到 91~92% 之外，大多数电解槽的电流效率只在 87~88%（按整流效率 98% 核算）左右，相差 3~7%（见表 1-1）。

表 1-1 我国铝厂与国外部分铝厂电流效率对比（预焙槽）^[17]

我国铝厂（按整流效率 98% 核算）		国外铝厂	
电解槽类型	电流效率	电解槽类型	电流效率
70~80kA，纵向排列	87~88%	80kA，纵向排列（俄）	94.0%
135kA，横向排列	87~88%	175kA，纵向排列（挪）	92.4%
160kA，横向排列	90~91%	200kA，横向排列（新西兰）	95.5%
185~200kA，横向排列	91~92%	210kA，横向排列（法国）	95.3%
		325kA，横向排列（加拿大）	96.0%

(3) 铝电解生产的直流电耗偏高，与国外相比相差 1000kWh/t-Al。目前，国外直流电耗已降到 13000 kWh/t-Al 以下，我国某些大型预焙槽的直流电耗达到 13300~13500 kWh/t-Al，已接近或达到了同类槽的国际先进水平，但多数厂的电耗仍很高^[18]。

(4) 我国铝电解槽的平均寿命短。目前国外系列电解槽平均寿命可达到 2500~3000 天，而我国电解槽平均寿命为 1300 天左右，约为国外槽平均寿命的一半左右^[17]。

我国电解铝厂生产成本比国外高 2000 元/吨左右，加入 WTO 后，使我国在

竞争中更加处于不利地位。因此，加强铝电解工业方面的科学研究和技术创新，更具有紧迫性和战略意义。

针对我国铝电解工业现状，国家也正在组织各有关高校、科研院所进行铝电解槽新技术的开发研究。如“973”项目“新型导流型铝电解槽设计基础及相关技术的开发”、“低温电解理论研究”、“铝电解电催化机理研究”、“惰性阳极材料和涂层的研究”等，所有这些新技术的开发与研究将为我国整体提高铝电解工业水平起着重大作用。

1.2 铝电解槽电、磁场研究方法评述

铝电解过程中强大的电流产生强大磁场，强大的磁场和强电流的相互作用产生电磁力，在电磁力等力的作用下铝电解槽内熔体产生剧烈的运动。熔体的剧烈运动有双重效果：一是电解质的运动有利于氧化铝的均匀分布和溶解，电解质成份的均匀及熔体内温度的均匀，对电解过程有利；另一方面是铝液的流动，使得铝液层金属铝向电解质中的扩散加速，降低电流效率。铝液的流动也使电解槽阴极破损速度加快^[19]。目前的研究表明^[19]，铝液的运动状态（流动、波动、倾斜等）主要受电磁力的作用，电解质的运动由电磁力和阳极气体搅拌力共同控制。在某些情况下电磁力的作用会导致生产事故，如滚铝、“漏槽”及短路等。因此铝电解槽电、磁场设计是否合理对大型预焙阳极铝电解槽的稳定运行和技术经济指标都会产生重要影响。

1.2.1 铝电解槽电场数值计算方法

电场（电流与电压分布）是电解槽运行的能量基础，是其它各物理场形成的根源。强电流将产生强大的磁场，电磁力的作用导致熔体运动，从而影响槽内热质交换和运行状况；电流也直接产生焦耳热，使电解槽能维持合适的电解温度。因此，铝电解槽的电流分布好坏对铝电解槽的生产有重要影响，所以对铝电解槽电流场的研究显得尤为重要。长期以来，人们对铝电解槽电流场分布进行了大量的研究，大概经历了三个发展阶段：（1）母线和阳极、熔体（电解质和铝液）、阴极导电部分分开进行计算；（2）把阳极、熔体（电解质和铝液）、阴极导电部分看成一个整体，采用二维方法进行计算；（3）把阳极、熔体（电解质和铝液）、阴极导电部分看成一个整体，采用三维方法进行计算。

（1）母线和阳极、熔体、阴极导电部分的分步计算方法

对母线电流的计算，J.Imery Buiza^[20]、Vao. Shi Huan^[21]和 A.Moraru^[22]等人分别采用等效网络电阻法对铝电解槽母线进行了电流场计算，也就是将所有母线

段都用等效电阻代替,然后根据总电流及各段母线间的串并联关系,绘出电路网络图,应用计算程序计算出各节点电位及各段母线上的电流和方向。

阳极电流的计算,一般根据已经确定的经阳极导杆流入阳极块的电流大小,在合适的边界条件假设下,采用有限差分法或有限元法,同样根据基尔霍夫定律和取定的阳极碳块电阻率数据,计算出各控制体(节点)电位,电流大小和方向,文献^[23-26]均采用这种方法。

铝电解槽熔体由于槽底伸腿和沉淀及侧部槽帮的存在,电流分布比较复杂。铝电解槽中熔体包括电解质和铝液两部分。由于其电阻率相差较大,其中的电流分布也存在很大差异。电解质熔体的电阻率较大,因而在阳极底掌下的电解质中,电流密度基本一致,方向垂直向下,而阳极侧面的电解质中电流密度较小。Haupin W^[27]提出了用扇形系数法近似计算这部分电流的方法。此外,铝电解槽熔体电流分布的计算方法还有:有限差分法、有限元法、网络图论法、边界元法等多种^[28-35],因载流体的布置是对称的,所以熔体内的电流分布也是沿纵轴对称的,故一般近似为二维来处理。

对于阴极部分,由于汇流棒的存在,解析模型一般需采用三维处理(也可近似为二维和三维混合模型)。当考虑槽帮形状改变和铝液界面变形,采用所谓边界元法更方便。国内学者采用有限差分法^[34]、边界元法^[35-36]及图论法^[37]对阴极电流分布,但从报道的计算结果来看,模型的精度还有待于进一步提高。

(2) 阳极、熔体、阴极导电部分的二维计算方法

最初的阳极、熔体(电解质和铝液)、阴极导电部分电流场的整体计算方法,各研究者基本上是利用欧姆定律和电流守恒定律的进行数值求解。Evans 等^[38]用欧姆定律的微分形式 $\vec{J} = -\sigma \nabla \bar{E}$ 和电量守恒方程 $\nabla \cdot \vec{J} = 0$,在忽略槽长轴方向的水平电流时,对整个电解槽区域进行二维有限元求解,但没有计算结果的报道。Fraser^[39]利用二维有限元法解欧姆定律和基尔霍夫定律联立方程组来考查炉帮伸腿对熔体内电流分布的影响,认为如果电解槽长轴方向的电流很小时,此模型可以给出满意的结果。Zoric J.^[40-41]等人运用二维有限元法计算了铝电解槽阳极、熔体、阴极的电流场分布,发现从阳极到电解质电流密度变化较大,从阳极电流密度 0.8 A/m^2 下降到电解质电流密度 0.26 A/m^2 。Donald P. Zeglen^[42-43]等用有限元法计算得到电流分布时,由于铝电解槽阳极高度不同、槽膛内形的差异等因素,造成铝电解槽电流分布计算结果与实测结果有较大的差距。由于采用二维方法不能考虑槽长轴方向的水平电流的影响,在边界条件的处理上也有较大的局限性,因此最终得到的计算结果不甚理想。

(3) 阳极、熔体、阴极导电部分的三维计算方法

因二维方法的局限性,后来逐渐发展到用三维方法计算阳极、熔体、阴极导

电部分电流分布。W.E.Wahnsiedley^[44]用三维有限元求解欧姆定律和基尔霍夫定律，得到熔体内电流分布来计算槽内磁场和流场。M. Dupuis^[45]运用三维有限元法对阳极、熔体（电解质和铝液）、阴极导电部分同时求解，取得较为满意的结果。

除了上述研究外，还有学者用电动力学模型计算了不同阳极高度下的铝液电流分布^[46-47]，计算结果表明阳极高度对铝液电流分布有影响。

综合文献报导，铝电解槽电流场研究的主要困难在于边界条件的确定及电解过程中有太多的影响因素：如槽膛内形、槽底沉淀、各阳极碳块高度、阳极形状、铝液界面形状，所有这些在电流场计算中不可能全面考虑，这给电流场分布的准确计算带来了很大的困难：此外，阳极电流分布与阴极电流分布的不均匀对铝电解槽电流场的计算也产生重要的影响，在以前普遍采用母线系统导电部分和铝电解槽导电部分分开计算的方法中没有也不可能得到充分考虑。因此，采用母线系统导电部分和铝电解槽导电部分的整体计算方法，不仅可以避免边界条件的人为设定或试算逼近的近似确定，还可以自动计算出阳极及阴极电流分布，提高铝电解槽电流分布的计算精度。为此，本文采用等效电阻法与有限元法相结合的方法，对母线系统导电部分采用等效电阻法、对铝电解槽导电部分采用有限元法，进行铝电解槽系统电流场的整体三维数值计算，将可以更加准确地反映铝电解槽电流场分布。

1.2.2 铝电解槽磁场数值计算方法

由于铝电解槽内通过的磁场与电解质及铝液中的电流相互作用产生电磁力，使电解质和铝液发生循环流动、界面波动和隆起变形。在铝电解生产中，电解质的循环流动对氧化铝的快速扩散和温度的均匀分布又是必不可少的；但电解槽内铝液的隆起和波动减少了有效的极间距离，也增加了铝的溶解损失，导致电流效率下降，因此磁场分布的好坏对电解槽的生产操作和电流效率有重要影响。所以在设计时，力求精确计算铝电解槽内磁场分布，优化母线配置，使磁场的不良影响降到最低^[48-49]。铝电解槽中磁场问题的研究起于 20 世纪 60 年代，特别是随着铝电解工业往槽容量大型化的发展，这些问题愈来愈得到人们的重视，最近十几年来已成为铝电解槽物理场研究的热点之一。

磁场的计算一般可归结为求解某些偏微分方程的边值问题。求解边值问题的方法大致可以分为以下四种类型：模拟法、图解法、解析法和数值法^[50]。

模拟法是通过试验测试一个模拟场区来求待求场，模拟场和待求场具有同样的方程、边界和交界面。这种方法一般仅用于二维或三维情况的拉普拉斯方程，但要用不同于实际问题中所用的介质去模拟非均质和非线性等情况实际上是不

可能的。

图解法很早以前就已得到应用,但是这种方法仅用于二维形式的拉普拉斯方程,因为通常它们是以解析函数的性质作为基础的,而且其精度也很有限。

解析法应用于电磁场的计算,能够获得精确解,但解析法缺乏普适性,许多算法只适用于二维和稳态问题,除了某些极为简单的特殊问题之外,针对非均质和非线性问题的通用算法实际上是不存在的。

数值法在很大程反上避免了解析法的缺点。数值法的思想是采用数值计算方法来研究电磁场的分布,随着计算机技术的发展,数值法具有了真正的实用性并取得了巨大的进步,已被广泛应用于各种工程领域的计算问题。应用数值法对电磁场进行计算,可达到较高的精度。

与其它领域中磁场问题相比,铝电解槽内磁场问题尤为复杂,主要是由于(1)铝电解过程电流分布规律十分复杂,例如铝液中的水平方向电流随槽帮形状与阴极表面氧化铝沉淀堆积物范围与形状等非确定因素的影响等,很难用准确的数学模型来描述;(2)铝电解槽系列中相邻槽之间及铝电解槽周围铁磁体的分布范围广,几何形状复杂,铁磁元件的受热过程和磁化过程不尽相同。这两方面因素对槽内磁场的影响都很大。由于影响因素的复杂性,因此不能指望电解槽内磁场的计算有很高的精度,国内外最近关于磁场的一些计算结果也说明了这一点。

铝电解槽的磁场可以分为三部分:(1)母线电流(包括各种母线、阳极导杆等)产生的磁场;(2)阴极碳块、阳极碳块及熔体(熔融电解质和铝液)和阴极钢棒中电流产生的磁场;(3)铁磁材料被磁化后产生的磁场。铝电解槽的磁场是由这三部分磁场迭加而成的。

在铝电解槽磁场的计算中,对第(1)、(2)部分磁场的计算,人们已经取得了共识,即应用毕奥-萨伐定律的线积分和体积分法^[51-65]进行计算:

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \int_L \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (1-2)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \iiint_V \frac{\vec{J} \times \vec{r}}{r^3} dV \quad (1-3)$$

而对第(3)部分磁场的计算,即包括铁磁材料在内的磁场计算,人们采用不同的计算方法取得了不同的计算精度。铁磁材料是产生磁场的二次源,它的磁化强度受外部磁场的影响,而它产生的磁场叠加于外部磁场,从而影响最终磁场,尤其是它的非线性磁导率,使得铁磁材料对磁场的影响不易精确计算。因而,国内外研究者都在努力寻找解决该问题的有效方法。最初,人们在计算铝电解槽的磁场时,都将这一部分磁场忽略或进行经验性修正,但是这样得到的计算结果误差很大。随着计算机技术的发展,使数值计算方法成为可能,因此人们开始用数

值计算方法对这部分磁场进行了计算研究^[66-92]。围绕铁磁体产生的磁场问题，人们运用的方法主要有以下几种。

(1) 磁衰减系数法^[67-68]

磁衰减系数的表达式为：

$$MAF = 4 \times DRP / (DRP + 1)^2 \quad (1-4)$$

式中，MAF 为磁衰减系数，即当量电流所产生的磁场由于钢壳的存在而减小的程度，DRP 表示相对磁导率的微分。该公式的推导是假定铝电解槽槽壳为无限厚和无限大，槽壳外平行槽壳的电流 I，在槽内部所产生的磁场可等效为在 I 处放置一个等效电流 I_{MM} 将槽壳移去后无磁性材料存在时的磁场。由于其方法本身含有一个近似假设，即认为钢壳的厚度和长度是无限的，而实际情况并非如此，所以用该方法计算铝电解槽的磁场会产生较大的偏差。

Robel 在 1978 年采用磁衰减系数法计算了铝电解槽的磁场分布^[67]，就是先计算槽内某处的磁场强度，再乘上一个系数来校正槽壳的影响，他给出了一些曲线来表示磁衰减系数随磁场强度的变化关系，他认为磁衰减系数除受场强的影响外还受槽壳钢结构性能的影响。这种方法由于处理问题简单，曾被许多学者引用过，但随着计算技术及计算机技术的发展逐渐被其它方法代替。磁衰减系数法，虽然简单，但理论依据不足，计算误差大，另外磁衰减系数法须依据实验确定，所以目前很少采用。

(2) 微分法^[69-71]

微分法即有限元法，是近些年来使用较多的方法，最早是 Sief^[69]等在上世纪 70 年代提出，他采用有限元法求解方程： $div(\mu \nabla F) = -div(\mu \nabla H_c)$ ，其中 F 为标量磁位， H_c 为外磁场， μ 为磁导率。当时报道的计算结果与实测值相差不到 10%，所以后来众多学者都认为这种方法是可行的，然而从最近的研究表明，有限元法计算得到的结果远未达到 10% 的精度。

微分法从理论上来说，只要边界条件能准确给出，单元分割足够小，计算机内存及速度足够大，此法能得出足够高的精度，但正是由于这些方面的限制，加上如此复杂的数值分析过程会出现不稳定性，严重影响了此法的精度。国外学者广泛使用此法^[70-71]，一是由于有限元程序的通用性，二是由于国外计算机技术的先进性，三是通过长期实践，掌握了某些规律。

(3) 磁化强度积分方程法^[72-85]

磁化强度积分方程法又有直接计算法和积分方程法之分，这二种方法都是通过铁磁体区域积分求解来计算铁磁体产生的磁场，Segatz 等^[72-74]以磁场微分方程 $\nabla(\mu \nabla \varphi) = \nabla \mu \nabla H_p$ 为基础导出的计算磁场的积分方程为：

$$\overline{H_\varepsilon(r)} = \frac{1}{4\pi} \int_v \nabla_r \frac{\overline{M(r') \square (\vec{r} - \vec{r}')}}{(\vec{r} - \vec{r}')^3} d^3 r' \quad (1-5)$$

积分在铁磁区域中进行。

从计算结果看，实测值与计算值的趋势符合较好，但在某些点误差超过 80%。在计算过程中比较了考虑相邻槽铁磁物质的影响和不考虑时的结果，认为邻槽铁磁物质的影响会引起 10% 的误差，这个误差不能忽略。

邱捷等人提出的积分方程法^[75]，基本原理与直接算法相似，她从磁场的基本定律出发得到磁介质内部的积分方程为：

$$\frac{1}{\mu_1 - 1} \overline{M} = \overline{H_s} + \frac{1}{4\pi} \left[\int_v (-\nabla \square \overline{M}) \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dv_1 + \int_s (\overline{M}_1 \square \vec{n}_1 + \overline{M}_2 \square \vec{n}_2) \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} ds \right] \quad (1-6)$$

利用数值分析求解出 \overline{M} 的分布，再计算出槽内的磁场强度，计算结果的验证采用 10~15kA 的试验槽，计算结果表明计算值与测量值趋势基本一致，但某些点误差也较大。

积分法与有限元法相比，求解区域大大缩小，并且区域不像有限元那样要求连续，所以在处理分散的铁磁元件时有一定的优势，但积分方程法在计算过程中方程组的系数矩阵为满秩，当单元分割很多时，计算工作量急剧增加，单元分割较少时，计算误差将增加，因为计算过程中没有考虑单元本身对自身处磁场的影响。

(4) 磁标量位法^[86-87]

这一方法在铁磁材料以外的区域（通常有电流存在），仍采用简化标量位法，而在铁磁材料内部则使用全标量位法。必须注意的是，这时在上述两种区域交界处必须保证方程解的一致性。

双标量位法计算电解槽内磁场是最近李国华等人^[86-87]提出的，他是利用两种标量位处理不同的区域，在计算的场区用简化标量位，在铁磁元件区用全标量位，从而避免了向量计算，他们推出双标量位法求解电解槽磁场的微分方程为：

$$\text{铁区: } \nabla \square \mu \nabla \varphi = 0 \quad (1-7)$$

$$\text{场区: } \nabla^2 \varphi = 0 \quad (1-8)$$

场区与铁区交界面条件为：

$$-\mu \frac{\partial \varphi}{\partial n} = \mu_0 \left(-\frac{\partial \varphi}{\partial n} + H_m \right) \quad (1-9)$$

进一步采用数值分析法可得到槽内磁场的数值解。作者没有给出计算结果，更没有计算结果与实测结果的比较。因此，此种方法有待进一步研究。

(5) 磁偶极子法^[88-92]

磁偶极子是由许多微小的分子电流环构成。等效磁偶极子模型不考虑铁磁材料磁化的过程，只考虑磁化后对周围磁场的贡献。

Sele 在 1973 年提出磁偶极子模型来考虑铁磁体的影响，他把钢壳看成是由许多二端呈半球形的圆柱状磁偶极子相互连接构成的网络，电解槽内某点的磁场为电流产生的磁场和所有磁偶极子产生的磁场的矢量和，各磁偶极子处的磁场由电流和磁偶极子产生，并考虑了本身磁偶极子的退磁场。

姜昌伟等人采用此模型计算了 150kA 预焙槽磁场并与实测值对比，结果表明在某些点偏差达 30~35%，磁场平均值符合的程度较好，并指出在考虑钢壳影响时计算值与实测值的符合程度比不考虑钢壳时磁场计算值与实测值的符合程度要好得多。另外还强调这种偏差的主要原因有：一是测量时探针无法准确定位，而小的移动就可导致较大的偏差；二是各电解槽电流分布的不一致和随时间的波动，导致计算时采用的电流分布与实际有差距。中南工业大学蔡晖也用此法计算了 160kA 预焙槽磁场。前中南工业大学的曾水平等人以及 Sele 应用此法对铝电解槽磁场进行了计算，均取得了比较满意的结果。

Sele 提出的磁偶极子法，具有一定的优越性，它有电磁学理论作依据，处理问题也相对简单，计算结果也较为准确，但此法有一些问题需进一步解决，例如：槽壳和阳极钢爪的铁磁元件如何用磁偶极子等效，各磁偶极子处场强存在一个分布，如何计算被磁化的磁偶极子的场强；偶极子的取向如何确定等等。由此看来，磁偶极子方法也还有待进一步研究和完善。

(6) 表面磁荷法^[93-96]

在均匀的铁磁材料中，与 H_m 相联系的标量磁位为：

$$U_m = \frac{1}{4\pi} \iint_s \frac{\sigma_m ds}{r} \quad (1-10)$$

为了计算表面磁荷 σ_m ，将铁磁材料的表面离散为 N 个小面元，则对每一小面元的中心点，可写出：

$$\overline{H}_i = \overline{H}_{ci} - \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^n \sigma_{mj} \iint_{\Delta s_j} \nabla \left(\frac{1}{r_i} \right) ds \quad (1-11)$$

电流源产生的磁场强度 H_{ci} 可由毕奥—萨伐定律直接求得。将上式两端都与面积 s_j 的

法向单位向量 n_0 点积，则得法向分量的关系式。

$$\overline{H}_{in} = \overline{H}_{cin} - \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^n \sigma_{mj} \iint_{\Delta s_j} n_0 \cdot \nabla \left(\frac{1}{r} \right) ds \quad (1-12)$$

由于电流源产生的磁场强度和其它面元的面磁荷在第*i*单元所产生的法向磁场强度在交界面两侧连续,且第*i*单元自身面磁荷所产生的磁场在交界面两侧大小相等、方向相反,由式(1-12)可得:

$$\left(\frac{1}{\chi} + \frac{1}{2}\right)\sigma_{mj} + \frac{1}{4\pi} \sum_{\substack{j=1 \\ j=i}}^n \frac{\sigma_{mj}}{4\pi \Delta s_j} \iint n_0 \square \nabla \left(\frac{1}{r}\right) ds = \overline{Hcin} \quad (1-13)$$

求解上式,解得表面磁荷 σ_{mj} ,再代入式(1-10),便可计算出空间任一点的磁场强度。

此外,还有学者研究了铝液界面波动对铝电解槽的磁场的影响^[97]。他们把磁场计算分成两部分:第一部分是由于铝液界面变形而引起的铝液磁场变化;第二部分是由母线及槽壳引起的铝液磁场变化。计算结果表明:母线电流的变化对铝液的长轴(Bx)方向和垂直磁场(Bz)基本上无影响而对短轴(By)方向的磁场有影响:熔体电流的变化对短轴和垂直磁场有影响而对长轴磁场基本上无影响。

上述这些磁场的计算方法,从计算结果来看还不能令人满意,故在计算方法上有进一步完善的必要,此外,由于电流场和磁场分开计算,不能充分反映其间的耦合作用,也造成了磁场计算结果的误差,因此如何采用电流场计算与磁场计算相结合,并且采用较新的磁场计算方法,将是影响磁场计算结果的关键。通过比较、分析,本文对铝电解槽母线及钢爪部分的电场采用标量电位法,对阴极碳块、阴极钢棒、熔体及阳极碳块电流的电场采用有限元法进行求解;对母线及钢爪部分的磁场采用毕奥—萨伐定律计算,对阴极碳块、阴极钢棒、熔体阳极碳块及铁磁物质槽壳的磁场采用有限元法进行计算。

1.2.3 磁场仿真计算研究现状

采用有限元模型进行仿真磁场计算,已经有研究者做了较多的相关工作。如M.Dupuis^[98]于1993年使用ANSYS软件建立了包括槽外空气、槽壳、相邻槽的电磁场有限元分析模型,如图1-2,对比分析了有槽壳与无槽壳情况下铝液中间面电磁力的分布情况。D. S. Severo^[99]等在2005年采用相同的方法建立了240kA电解槽电磁场有限元模型,如图1-3,先运用电场单元对整个电解槽的电场进行计算,然后将电场结果用于磁场的计算,分析了槽壳的磁场分布、铝液中间磁场分布,并将电磁力耦合到流场分析中。但是这两个模型都并未考虑相邻厂房对磁场分布的影响。国内姜昌伟等^[100]用标量电位法与双标量磁位法计算了154kA铝电解槽系列的磁场,此模型只考虑本槽侧部的空气模型,忽略了上部和下部空气的作用,如图1-4。闫照文等^[101]在考虑一系列槽的情况下对230kA试验槽建立了磁场计算简化模型,如图1-5。

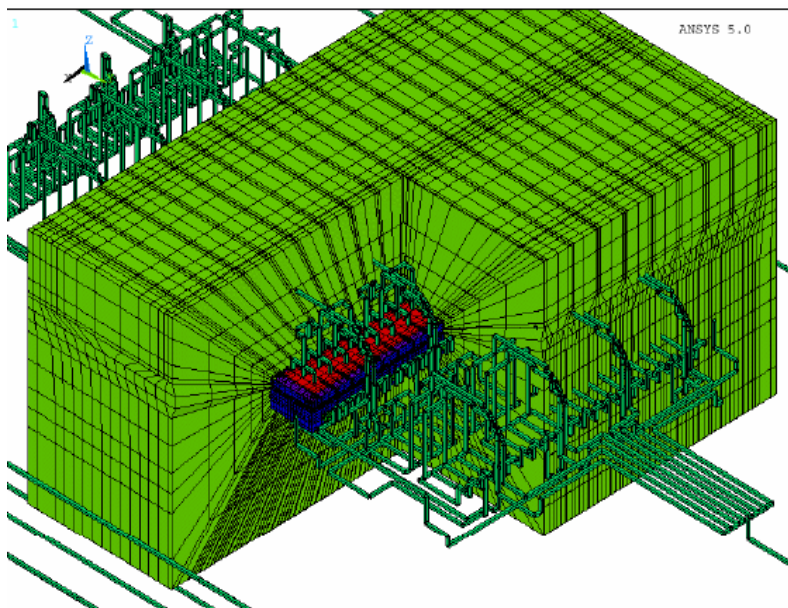


图 1-2 M.Dupuis 等建立的铝电解槽磁场计算模型图

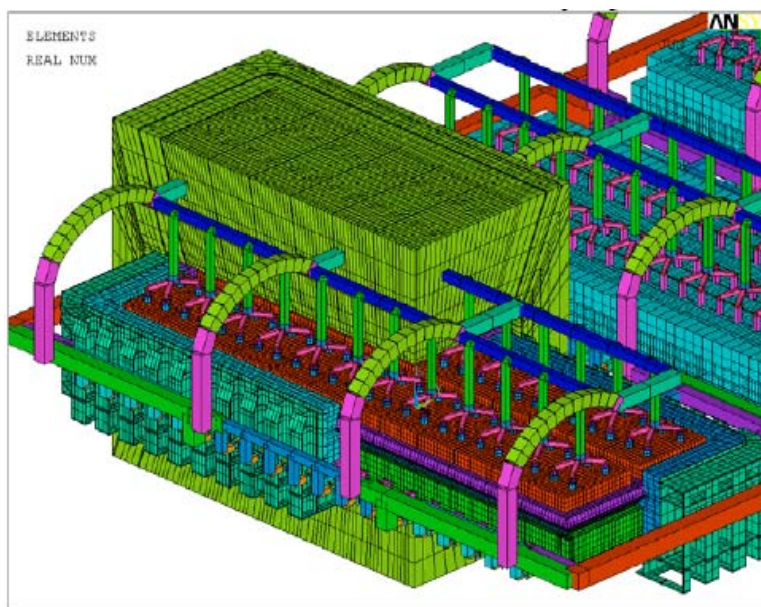


图 1-3 D. S. Severo 等建立的 240kA 铝电解槽电场和磁场计算模型图

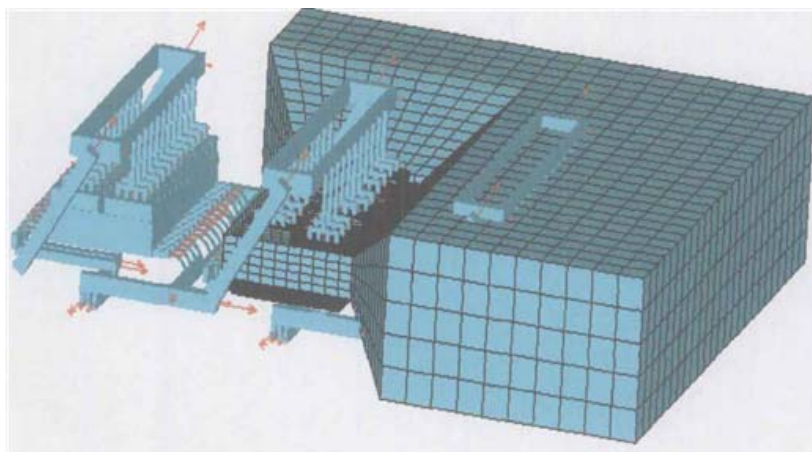


图 1-4 姜昌伟等建立的 154kA 铝电解槽磁场计算模型

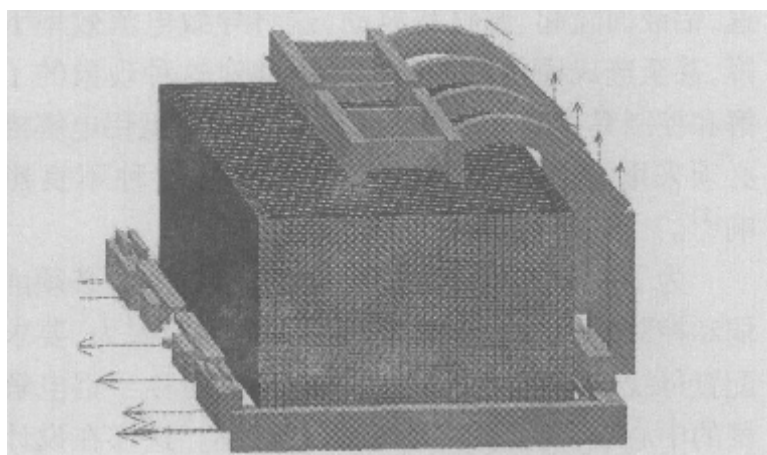


图 1-5 闫照文等建立的 230kA 试验槽磁场计算单槽模型

1.3 母线设计研究现状

铝电解槽的母线设计灵活性较大,各公司和研究单位所设计的方案都有较大的差别,对于已有槽型的母线配置情况基本可总结为以下三类。

(1) 大面进电,阴极母线全部绕行配置

如图 1-6 中,阳极大面两点进电,从进电侧所有阴极钢棒流出的电流都从端部回流至下台电解槽。采用这种母线配置的比较典型是挪威 Hydro230kA 系列电解槽,国内 200kA 槽系列也是采用这种设计。

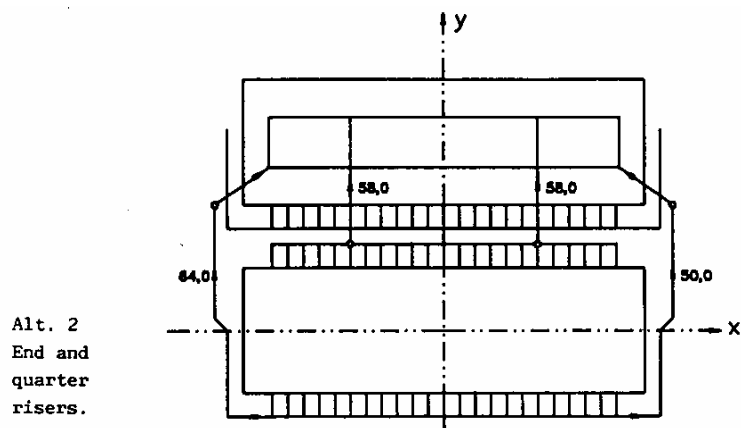


图 1-6 大面进电+阴极母线全部绕行方案

(2) 大面进电，阴极母线槽底强补偿配置

Pechiney 280kA (专利号 2505368) 大面均为五点进电，采用槽底回流较强的电流，图 1-7 中，端部回流 35kA 电流，槽底也分两根母线回流 35kA 电流。我国的 280kA 试验槽、平果 320kA 槽的设计也是采用这一思想。

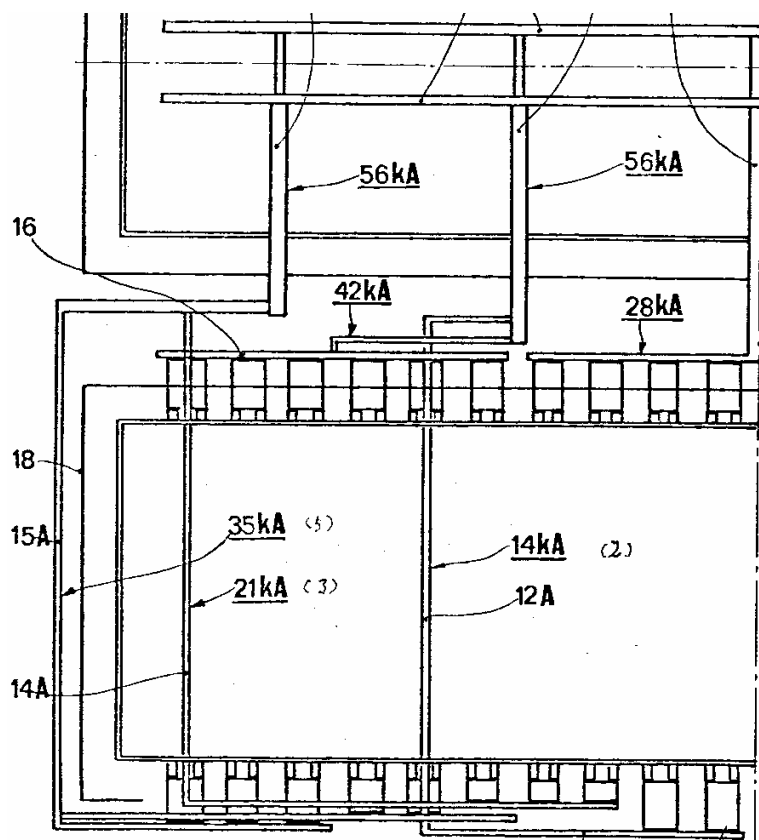


图 1-7 280kA 槽槽底与槽边等电流补偿方案

(3) 大面进电，阴极母线槽底弱补偿方案

如图 1-8 中，端部回流 42kA 电流，槽底分两根母线回流 28kA 电流。采用该设

设计方案比较典型的电解槽有瑞士的 EPT-18 系列, 我国的 230kA 试验槽等。

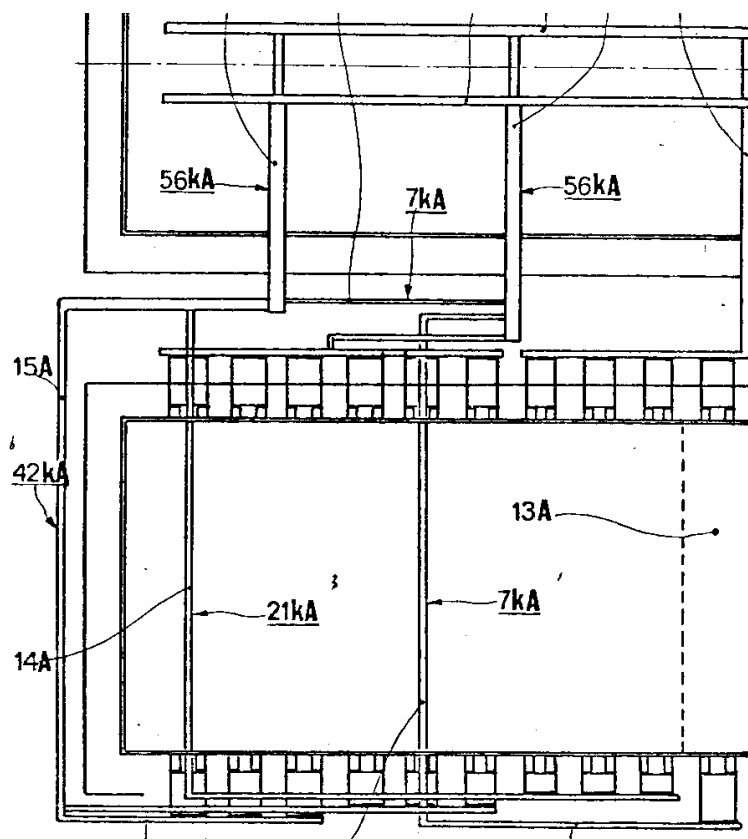


图 1-8 280kA 槽底弱补偿方案

1.4 课题研究目的及意义

作者在攻读硕士学位期间, 以校企合作项目为资助, 选题为“大型预焙铝电解槽电磁场设计”, 对现行 350kA 预焙铝电解槽的电、磁场分布规律作较为深入的研究, 并对超大型预焙铝电解槽进行初步的设计, 对其磁场的可行性作初步的论证。

1.5 本文的主要研究内容与方案

本文旨在通过仿真计算, 准确反映出铝电解槽的电场、磁场分布规律, 进而有效指导铝电解槽的设计与优化。首先, 以现行的 350kA 系列电解槽为对象, 利用有限元软件 ANSYS 建立电磁场计算模型, 并用某厂的实测数据对模型和计算方法进行了验证; 随后, 对该系列电解槽的电场和磁场进行相关的优化; 最后, 沿用该方法对超大型电解槽进行磁场部分的设计。

本文主要完成了以下工作:

(1) 运用大型通用有限元软件 ANSYS, 使用其二次开发工具 APDL, 建立了参数化的 350kA 预焙阳极铝电解槽稳态电场和磁场模型。

(2) 采用国内某厂实际测得的电流分布作为载荷, 运用该模型仿真计算得到磁场结果, 与现场实际测得的磁场分布对比, 无论是分布规律还是各个部分的极值都非常接近, 证明了模型和计算方法的准确性。

(3) 采用理想的电流分布作为载荷, 计算出该系列电解槽的磁场设计情况, 对相邻电解槽与相邻厂房的影响作了对比分析, 并对厂房间距对磁场的影响作了深入的研究。

(4) 运用有限元软件 ANSYS 建立了 350kA 预焙铝电解槽母线电场计算模型, 该模型选取两台相邻槽的铝液之间的部分为研究对象, 假设铝液下表面为等势面, 排除了其他因素的干扰准确反应母线的电阻配置情况, 为铝电解槽母线电阻的设计、测试以及优化提供了一种新的参考。

(5) 运用该电场模型对阴极软母线以及阳极立柱母线的电阻配置情况作了相关的优化。

(6) 延用 350kA 电解槽的磁场计算方法, 开发了超大型预焙铝电解槽的仿真模型。从磁场设计的角度, 分解研究了铝电解槽各部分所产生的磁场规律以及它们对铝电解槽磁场的作用, 包括槽内导体及槽壳部分、端部回流母线、槽底回流母线、阳极立柱母线和横梁母线等。运用这些磁场分布特点, 对超大型预焙槽进行了初步磁场设计, 得到了一些可参考的磁场配置方案, 并对其磁场的稳定性与可行性进行了初步探讨。

第二章 铝电解槽电场、磁场解析数学物理模型

2.1 铝电解槽电场模型

铝电解槽中电流从阳极导入，通过电解质和金属铝液到阴极碳块再由阴极钢棒导出。电场（电流与电压分布）是铝电解槽运行的能量基础，是其它各物理场形成的根源。因此，铝电解槽的电流分布好坏对铝电解生产有重要的影响。本文采用等效电阻法（计算母线部分电场分布）和有限元法（计算槽内导体部分的电场分布）相结合的方法来研究铝电解槽电流分布。

2.1.1 母线电场解析模型

流经母线系统、阳极导杆及阳极钢爪各部份的电流可根据基尔霍夫定律计算：

$$\sum E = \sum I \square R \quad (2-1)$$

$$\sum_j I_j = 0 \quad (j \text{ 表示节点}) \quad (2-2)$$

2.1.2 槽内导体部分电场解析模型

对于阳极、熔体（电解质和铝液）、阴极和阴极钢棒的电流场采用有限元法进行数值计算。由于铝电解槽的电流场属于静态电场，场量与时间无关，因此铝电解槽内导电部分的导电微分方程可表示为拉普拉斯方程，即式(2-3)。

$$\sigma_x \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \sigma_y \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \sigma_z \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (2-3)$$

$$\sum V = \sum I \square R \quad (2-4)$$

式中： V 为标量电位， V ； I 为电流， A ； R 为电阻， Ω ； σ 为电导率， $\Omega^{-1} \square m^{-1}$ 。

求解铝电解槽阳极、阴极与熔体电流场的有限元基本方程可以从泛函数出发经变分求得，也可从微分方程出发用加权余量法求得。本文采用加权余量的伽辽金法建立电流场有限元问题求解的一般格式。

对电位分布方程取插值函数：

$$\square V(x, y, z) = \square \hat{V}(x, y, z, V_1, V_2 \dots V_n) \quad (2-5)$$

式中 $V_1, V_2 \dots V_n$ 为 n 个待定系数。

根据加权余量法的定义可得：

$$\iiint_V W_i \left[\sigma_x \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \sigma_y \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \sigma_z \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right] dx dy dz = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2-6)$$

式中 V 为三维电场的定义域； W_i 为权函数。

根据伽辽金法对权函数的选取方式，得：

$$W_i = \frac{\partial^2 V}{\partial V_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2-7)$$

为了引入边界条件，利用高斯公式把区域内的体积分与边界上的曲面积分联系起来，经变换可得^[50]：

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial V_i} = & \iiint_V W_i \left(\sigma_x \frac{\partial W_i}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial W_i}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial y} + \sigma_z \frac{\partial W_i}{\partial z} \frac{\partial V}{\partial z} \right) dx dy dz - \\ & \iint_{\Sigma} \left[W_i \left(\sigma_x \frac{\partial V}{\partial x} \cos \alpha + \sigma_y \frac{\partial V}{\partial y} \cos \beta + \sigma_z \frac{\partial V}{\partial z} \cos \gamma \right) \right] dS = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2-8)$$

一般在整体区域对方程进行计算，将求解区域熔体（电解质和铝液）、阳极碳块、阴极碳块和阴极钢棒进行网格剖分，先在每一个局部的网格单元中计算，最后合成为整体的线性方程组求解。如果将区域划分为 E 个单元和 n 个结点，则电场 $V(x, y, z)$ 离散为 $V_1, V_2 \dots V_n$ 等 n 个结点的待定电位，得到合成的总体方程为^[50]：

$$\frac{\partial J}{\partial V_i} = \sum_{e=1}^E \frac{\partial J^e}{\partial V_i} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2-9)$$

方程(2-9)有 n 个，相应可求得 n 个节点的电位。

最后得到矩阵方程式：

$$[k]^e \{V_i\}^e = [f_p]^e \quad (2-10)$$

迭代并求解，即可得求解域内各点的标量电位 V ，并求解出各点的电流密度 J ，电场强度 E 及电流 I 等量。

2.1.3 铝电解槽导电系统综合解析模型

铝电解槽导电系统综合解析模型也就是将母线电流等效电阻网络解析模型与阳极、阴极、阴极钢棒与熔体电流有限元解析模型综合于一体，实现铝电解槽整槽电流场的总体解析。本文通过采用耦合自由度和合并节点的方法将两个模型连接为一体来求解整槽的电流场。

2.2 铝电解槽磁场模型

把铝电解槽磁场计算区域划分为四部分：母线系统区 Ω_1 ，阳极、电解质、铝液、阴极碳块和阴极钢棒区 Ω_2 ，铝电解槽槽壳钢板区 Ω_3 ，分别采用不同的计算方法进行计算。这里需要指出的是，由于温度对铁磁性的影响很大。铁的强磁性随温度上升而减弱，在某一转变温度时消失，这个转变温度被称为居里温度或居里点。纯铁的居里点为 770°C 。而根据铝电解槽中的温度分布，阴极钢棒的一部分超过该温度，一部分低于居里点，但是温度也较高，认为其磁性已经较弱，故在计算时将阴极钢棒的磁性忽略。

2.2.1 母线系统磁场计算模型

铝电解槽的母线分为斜立母线和平行轴线母线，其中平行轴线母线又可分为串接母线和非串接母线。计算母线电流产生的磁场采用均匀分布的有限长矩形母线来计算槽内的磁场，亦称为矩形母线模型。

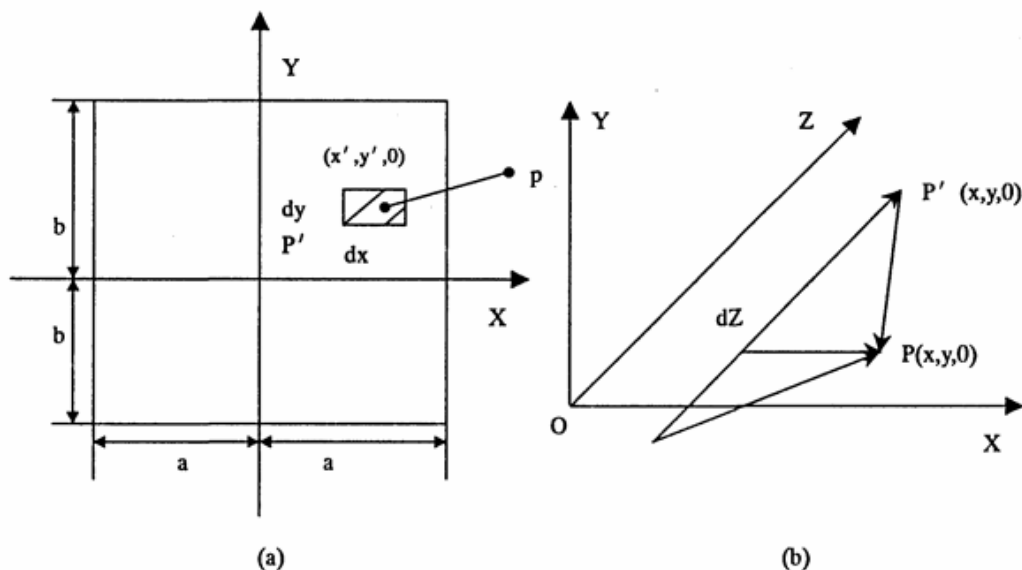


图 2-1 矩形载流母线磁场计算示意图

设矩形母线与 z 轴平行，母线截面的边长分别为 $2a$ 和 $2b$ ，如图所示。母线长度为 $z_2 - z_1$ ，通过母线的电流为 I ，电流沿 z 轴方向流通。取一截面为 $dx'dy'$ 的细丝形成一平行 z 轴的线形电流，长度为 1，线电流 I' ，如图 2-1 示，并将坐标原点取在母线断面的中心。根据毕奥—萨伐定律：

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I'}{4\pi} \frac{d\vec{z} \times \vec{r}^0}{r^2} \tag{2-11}$$

式中, \vec{r}^0 是 P 点指向 P' 的矢量 \vec{r} 方向上的单位矢量, μ_0 为真空中的磁导率。

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ 亨利/米}$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I'}{4\pi} \frac{d\vec{z} \times \overrightarrow{r_p - r_{p'}}}{r^3} \quad (2-12)$$

$$\text{由于 } r = \sqrt{R^2 + Z^2}, R = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}, \sin(\vec{z}, \vec{r}^0) = R/r$$

因此线电流 I' 在 $P(x, y, 0)$ 点产生的磁感应强度为^[50]:

$$B' = \frac{\mu_0 I'}{4\pi} \int \frac{\sin(\vec{z}, \vec{r}^0)}{R^2 + Z^2} dz = \frac{\mu_0 I'}{4\pi \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}} \left(\frac{z_2}{\sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + z_2^2}} - \frac{z_1}{\sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + z_1^2}} \right) \quad (2-13)$$

载流母线可视为由有限根细丝线形电流所组成, 因此矩形母线所产生的磁场为各线形电流产生的磁场的迭加。线形电流为:

$$I' = \frac{I}{4ab} dx dy \quad (2-14)$$

将 I' 代入式 并对之积分, 即得 P 点的磁场强度为:

$$B = \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{\mu_0 dx' dy'}{16ab\pi \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}} \left(\frac{z_2}{\sqrt{(x' - x)^2 + ((y' - y)^2 + z_2^2}} - \frac{z_1}{\sqrt{(x' - x)^2 + ((y' - y)^2 + z_1^2}} \right) dx dy \quad (2-15)$$

采用数值积分求得式结果后, 再利用 $d\vec{Z} \times d\vec{r}^0$ 的方向余弦, 求得三个分量 B_x, B_y, B_z 。当计算槽内任一点 $P(x, y, z)$ 上的磁感应强度时, 首先进行坐标变换, 将坐标原点沿 z 轴向上移动 z , 变换坐标 P 点的坐标为 $P(x, y, 0)$, 利用上面的方法即可得到载流母线的磁场。

2.2.2 槽内导体部分磁场计算模型

槽内导体部分包括阳极、电解质、铝液、阴极和阴极钢棒等。采用矩形母线数学模型^[92]进行计算, 在计算中将该部分应用有限元划分成若干六面体有限元单元, 通过有限元方法计算出每个单元的电流分布, 作为该部分磁场计算的电流源, 然后应用毕奥—萨伐定律计算出该部分的磁场。其计算方法如下:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu \vec{H}_s \quad (2-16)$$

$$\nabla \times \vec{H}_s = \vec{J}_s \quad (2-17)$$

其中 \vec{H}_s 为源电流区域产生的磁场强度, \vec{J}_s 为源电流区域电流密度, μ 为磁导率, H/m 。式 x 中源电流区域产生的磁场强度可以由毕奥-萨伐定律直接积分计算得出:

$$\vec{H}_s = \frac{1}{4\pi} \int_v \frac{\vec{J}_s \times \vec{r}}{r^3} dV \quad (2-18)$$

$$\text{即 } B = \mu \frac{1}{4\pi} \int_v \frac{\vec{J}_s \times \vec{r}}{r^3} dV \quad (2-19)$$

其中 \vec{r} 为源点到场点的径向矢量; r 为场点到源点的距离。

2.2.3 槽壳磁场计算模型

槽壳部分磁场可以采用全标量磁位法计算, 如下式:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = -\mu \nabla \phi \quad (2-20)$$

计算时先用标量电位法计算出母线系统、阳极、阴极、熔体及阴极钢棒的电流密度分布, 然后应用毕奥-萨伐定律、全标量磁位法和简化标量磁位法分别计算出各部分的磁感应强度, 最后综合各部分的磁感应强度, 得出所计算区域任一点的磁感应强度。

2.2.4 电磁力场计算模型

铝液电磁力场的计算主要分为三步: (1) 铝电解槽电流场的计算; (2) 铝电解槽磁场的计算; (3) 根据铝电解槽的电流场和磁场计算结果计算出铝液电磁力场。

求出槽内各点磁感应强度及其分量后, 其电磁力由所计算单元内电流密度矢量 J 与磁场矢量 B 的叉积确定, 即: $F = \int_v J \times B dV$, 用 x 、 y 、 z 方向的分量表示为:

$$F_x = \int_v (J_y B_z - J_z B_y) dV \quad (2-21)$$

$$F_y = \int_v (J_z B_x - J_x B_z) dV \quad (2-22)$$

$$F_z = \int_v (J_x B_y - J_y B_x) dV \quad (2-23)$$

2.3 材料电、磁物性参数

由以上的模型解析过程可知，要求得铝电解槽的电场分布和磁场分布，需要相关的已知参数。要在考虑温度的情况下进行电场分析，必须知道各材料的电导率 ρ 等，见附表 1；而要进行磁场分析，在电场的基础上，还要知道各材料的导磁率，除了铁磁物质外，认为其他材料均不导磁，导磁率均为 1。详细参数参见附表 2。

第三章 铝电解槽电磁场计算方法验证及优化

如第一章所述,前人已经采用不同的计算方法对不同系列铝电解槽的磁场进行了相关分析研究。本章中,以国内某厂的 350kA 系列预焙铝电解槽为对象,采用有限元法与毕奥—萨伐直接积分法相结合的方法对磁场进行分析计算,这即可以评价和分析现行大型电解槽磁场的设计,又能够根据现有电解槽的实测数据反过来验证计算方法的准确性,从而将该方法用于新的铝电解槽的磁场设计。

3.1 模型建立

3.1.1 电场模型的建立

铝电解槽电解过程中,电流经阳极母线流入电解槽内,并沿着阳极导杆、阳极钢爪、阳极、电解质、铝液、阴极、阴极钢棒至阴极母线的线路传输,所以电场的确定即是确定在传输过程的各个环节的电流密度分布情况,进而用它来计算该部分产生的磁场。

建立模型时,坐标定义为: x 方向由出铝端 (TE) 指向烟道端(DE), y 方向由进电侧指向出电侧, z 方向由铝液下表面指向铝液上表面。

同时,考虑建立模型的方便和计算的简化,对模型作了相关的假设:

- 1) 假设阳极下表面处于同一水平面。
- 2) 假设铝液高度和电解质高度各处均匀。
- 3) 假设适当厚度的炉帮结壳。

本文采用有限元法求解包括电解槽内实体部分的电场,而母线等其余部分的电场采用等效电阻法来求解。图 3-1 为 350kA 预焙铝电解槽电场计算有限元模型的角部示意图,包括阳极、电解质、铝液、阴极以及阴极钢棒。所有实体均采用 Solid5 三维单元进行网格划分。图 3-2 为连接相邻两台电解槽的等效电阻网络图,包括整个母线系统、铝导杆和阳极钢爪。电阻网络采用 link68 电场单元建立。在两个模型的交接处(阳极钢爪和阳极的连接以及阴极钢棒和阴极软母线之间的连接),采用合并节点或者耦合电压自由度来连接。连接后的 3 槽电场计算模型如图 3-3 所示。

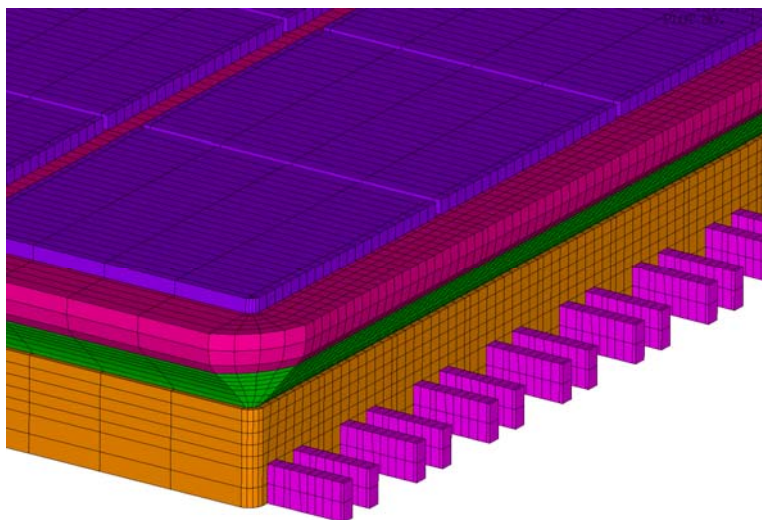


图 3-1 电场计算有限元模型角部模型图

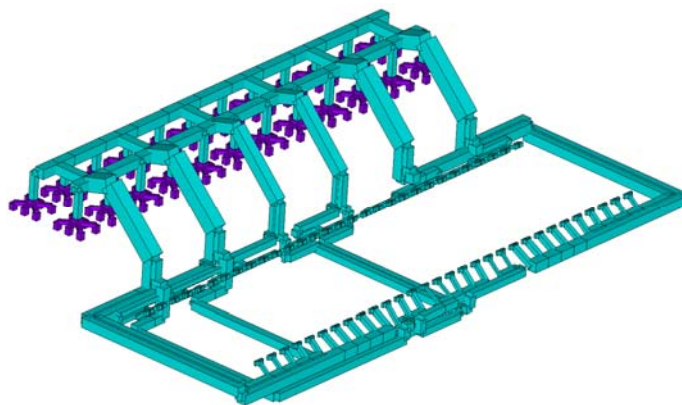


图 3-2 母线电场计算模型

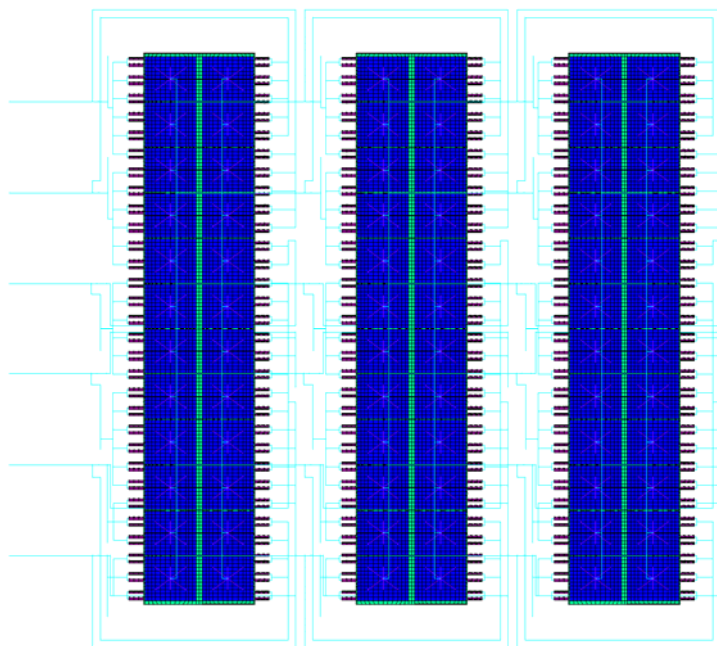


图 3-3 电场计算 3 槽模型图

3.1.2 磁场模型的建立

电场模型只能计算出槽内导电实体部分产生的磁场，而计算整体的磁场，还需在上述电场模型的基础上，补充建立其他部分的模型，包括槽周围的导电系统部分和属于铁磁物质的槽壳部分。另外，为了使结果更合理，需考虑空气对磁场的影响，所以还需补充建立空气模型。而对于槽壳部分，作了一定的简化，采用一定厚度的铁磁材料代替。图 3-4 为 350kA 预焙铝电解槽磁场计算实体模型示意图。

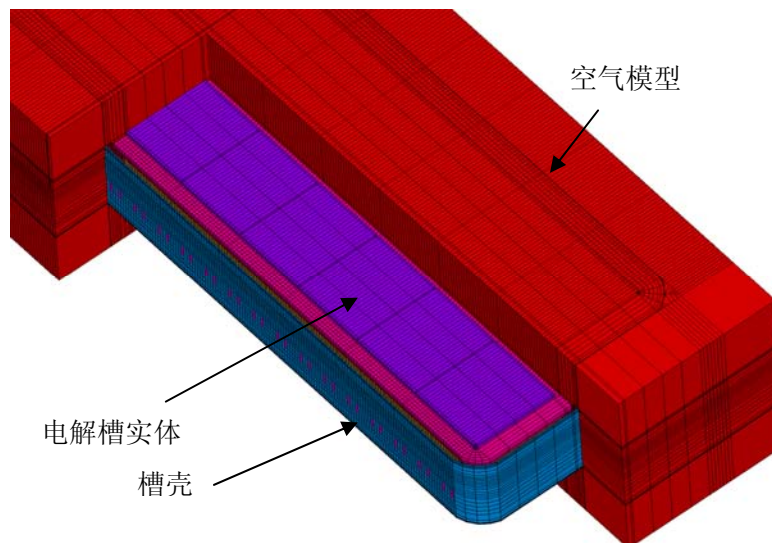


图 3-4 磁场计算实体模型图

而对于槽周围的母线系统部分以及导杆、钢爪等，采用 source36 电流源单元建立。考虑相邻槽和相邻厂房等条件时，同样也可以用 source36 单元建立。用该单元建立模型时，采用参数化程序段落循环使用较为简便，如下：

先指定 $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, x_3, y_3, z_3, width$ (单元宽), $height$ (单元高), $current$ (电流值) 等 12 个参数，接下来用以下代码建立母线模型。

```
*get, nnum, node, 0, num, max      ! 取得当前最大的节点编号
*get, rnum, rcon, 0, num, max     ! 取得当前最大的实常数编号
R, rnum+1, 2, current, width, height ! 定义下一个实常数，编号增加 1
N, nnum+1, x1, y1, z1             ! 建立单元的起始节点
N, nnum+2, x2, y2, z2             ! 建立单元的终止节点
N, nnum+3, x3, y3, z3             ! 建立单元的方向节点
TYPE, 1                           ! 设置单元类型
REAL, rnum+1                       ! 指定实常数
E, nnum+1, nnum+2, nnum+3         ! 建立 source36 单元
```


3.2 边界条件

3.2.1 电场载荷与边界条件

为了得到磁场计算需要的电场结果，需要对实体部分进行电场计算，而母线等部分的电场根据磁场计算的需要实时添加。实体部分电场计算的边界条件为：在所有阳极的上表面施加零电位，在所有阴极钢棒的出口施加负的电流（即流出的电流）。

3.2.2 磁场载荷与边界条件

耦合得到的实体电场结果，在磁场模型中的空气外表面都施加零磁位，便可以开始进行磁场求解。

3.3 模型及计算方法验证

在使用上述模型和计算方法进行具体的分析前，我们需要验证该模型和方法的准确性。根据已有的现场测试数据，这里采用某厂 350kA 系列中一台电解槽生产运行时的磁场测试结果和仿真计算结果进行对比。

测试数据中给出了各阴极钢棒出口处的电流值（如表 3-1），根据该数值和母线结构可计算出流过各段母线的电流值；槽内导体部分的电场采用以下边界条件计算得出：各阳极表面施加等电位；各阴极钢棒出口施加实际测得的电流值。

在上述边界条件下进行仿真计算，得到的结果和实测结果各方向的磁场分布规律非常相似，x 方向磁场分量基本沿 x 轴呈反对称分布，极值出现在大面处，如图 3-5；y 方向磁场分量基本沿 y 轴呈对称分布，极值出现在两个端部，如图 3-6；z 方向磁场分量基本沿原点呈中心反对称分布，极值出现在靠近四个角部处，如图 3-7。取各个位置的极值进行对比如表 3-2 至表 3-4：

表 3-1 测试槽中各阴极钢棒电流值

A 侧				B 侧			
编号	电流值 (A)	编号	电流值 (A)	编号	电流值 (A)	编号	电流值 (A)
1	5405	16	3939	1	6095	16	5489
2	5284	17	4247	2	6937	17	5882
3	5355	18	5337	3	6319	18	6251
4	6829	19	7068	4	6217	19	6677
5	5733	20	8711	5	6248	20	5980
6	6176	21	5520	6	6433	21	6467
7	6226	22	5130	7	5663	22	4966
8	4932	23	4986	8	4912	23	6032
9	6274	24	6184	9	6623	24	5578
10	6494	25	6110	10	6054	25	4090
11	5608	26	5348	11	6122	26	5462
12	6367	27	6838	12	6574	27	4960
13	5281	28	5341	13	4778	28	6393
14	5289	29	5792	14	6084	29	6294
15	6176	30	6454	15	5959	30	6135

注：阴极钢棒编号由出铝端到烟道端依次增大。

表 3-2 x 方向磁场分量结果对比

	A 侧	B 侧	TE 端	DE 端	全槽
实测极值	162	136	84	90	162
计算极值	180	145	85	87	180

表 3-3 y 方向磁场分量结果对比

	A 侧	B 侧	TE 端	DE 端	全槽
实测极值	54	35	34	49	54
计算极值	46	29	36	29	46

表 3-4 z 方向磁场分量结果对比

	A 侧	B 侧	TE 端	DE 端	全槽
实测极值	25	22	22	33	33
计算极值	25	22	22	34	34

由上述对比可以看出，在实际测得电流数据的基础上，用本文所建立的模型和计算方法所计算得到的磁场和实际测得的磁场分布规律非常相似，极值出现的位置接近，且数值上也非常吻合，可以证明本文所采用的模型和计算方法是合理的，可以将该方法运用至其他的分析和计算。

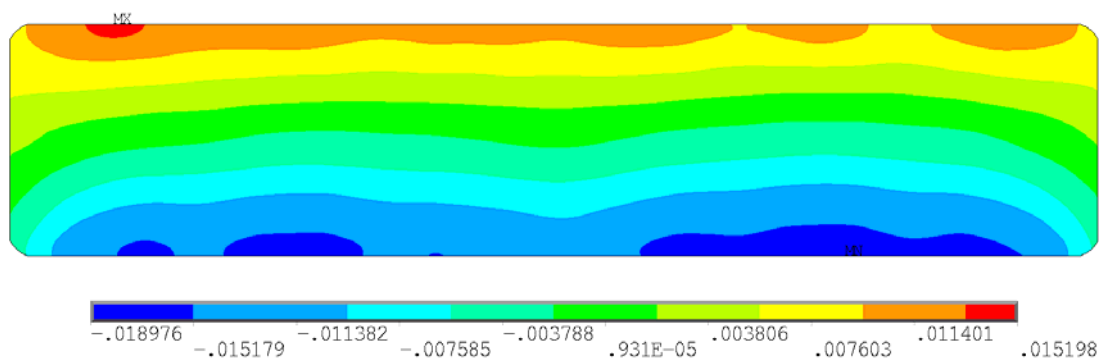


图 3-5 使用实测电流计算出的 x 方向水平磁场分布图

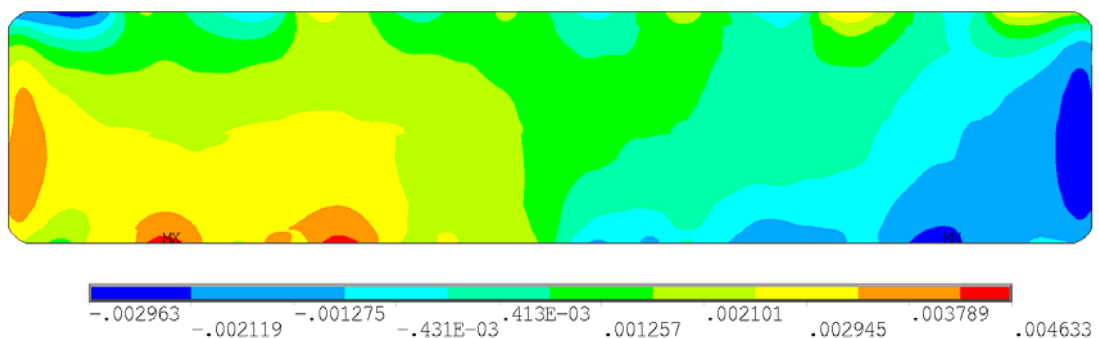


图 3-6 使用实测电流计算出的 y 方向水平磁场分布图

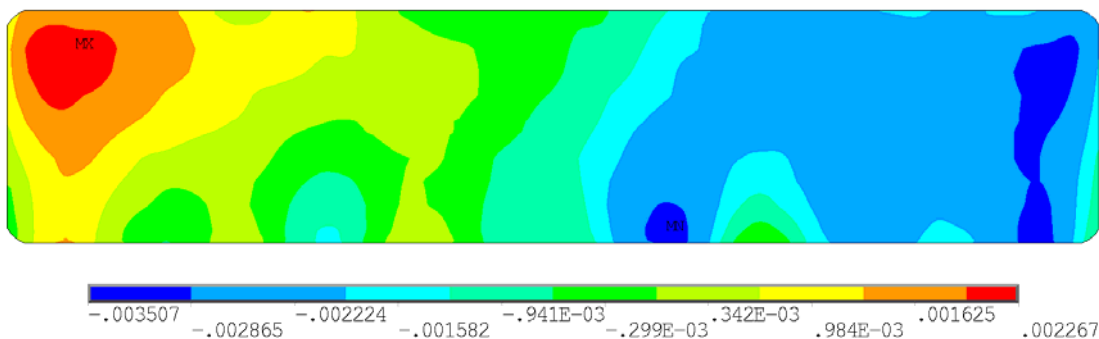


图 3-7 使用实测电流计算出的 z 方向垂直磁场分布图

3.4 优化与讨论

上述验证是以实际测得的电流分布情况作为边界条件进行计算，而要对 350kA 系列电解槽的磁场设计进行分析与优化，需在理想条件的情况下进行。这里的理想条件是指假设从各阴极钢棒流出的电流都相等。以下用同样的方法在理想条件下进行计算，这样也有利于对该系列电解槽的设计进行评价。

3.4.1 电场结果分析

理想条件下,经过电场模型的求解,得到模型中各部分的电流密度分布结果,图 3-8 显示了铝液中的电流密度分布状况。从图中可以看到,铝液中的电流密度分布沿中心线呈对称状,且沿小面方向由中心向外基本呈递增趋势,最大约 1.09A/cm²。

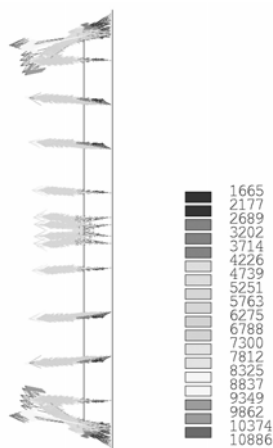


图 3-8 铝液中电流密度分布图(A/m²)

3.4.2 同厂房相邻电解槽对本槽磁场的影响

由于大型铝电解槽大都采用横排布置、大面进电的配置方式,实际生产中,相邻的上下游电解槽对本槽的磁场有较大的影响,所以计算电解槽磁场时,需考虑相邻上下游槽的影响,而考虑几台电解槽的影响就成为一个需要确定的参数,针对模型分别计算了无相邻槽以及上下游各 1、2、3、4 台的情况。考虑到相邻厂房中电解槽对本槽磁场的影响,在计算相邻槽影响时,也同时建立了相邻厂房的模型,和本槽所在厂房电解槽数目一样,最后得到计算结果如表 3-5。

表 3-5 不同相邻槽数目计算结果 (×10⁻⁴ T)

相邻槽数目/台	B _x _{max}	△ B _x _{max}	B _y _{max}	△ B _y _{max}	B _z _{max}	△ B _z _{max}
0(无相邻槽)	179.56	—	79.72	—	88.41	—
1	174.95	-4.61	32.79	-46.93	36.54	-51.87
2	185.90	+10.95	34.58	+1.79	27.85	-8.69
3	188.55	+2.65	37.01	+2.43	28.71	+0.86
4	189.58	+1.03	38.12	+1.11	30.01	+1.30

注:表中|B_x|_{max}、|B_y|_{max}、|B_z|_{max}分别为铝液中磁场 x、y、z 方向分量的绝对值最大值,下同

从表中数据可以看出,有无相邻槽对本槽磁场有很大的影响。随着相邻电解

槽数目的增加, $|B_x|_{\max}$ 逐渐增大, $|B_y|_{\max}$ 也逐渐增大, 而 $|B_z|_{\max}$ 在相邻槽数由 1 台变为 2 台时有明显的减小, 然后呈逐渐增加的趋势。

考虑的电解槽数量越多, 计算得到结果固然越接近实际情况, 但同时, 模型会变得更庞大, 计算消耗的资源和时间也越多, 所以必须权衡准确度和计算效率来确定相邻槽的数目, 由表中数据可知, 当相邻槽数由 3 台变为 4 台时, $|B_x|_{\max}$ 变化为 1.03×10^{-4} T, $|B_y|_{\max}$ 变化为 1.11×10^{-4} T, $|B_z|_{\max}$ 变化为 1.30×10^{-4} T, 可认为在数值上变化已不明显, 而从计算得到的磁场分布规律图来看 (如图 3-9 和图 3-10), 磁场分布规律也无大的变化, 可以认为第四台及以后的相邻电解槽产生的磁场对本槽磁场的影响已经很弱, 基本可以忽略, 所以确定 3 台作为相邻电解槽的数目, 建立的整体模型如图 3-11 所示。

3.4.3 相邻厂房电解槽对本槽磁场的影响

上面已经提到, 在确定同厂房相邻电解槽数目时, 同时考虑了相邻厂房的影响。为了了解相邻厂房在计算中对本槽磁场的具体影响情况, 进行了以下的分析:

首先, 计算了只有一侧存在相邻厂房的情况, 这在现实中也是存在的, 如第一排和最后一排厂房, 可以分为两种情况进行计算, 即只有左侧存在或只有右侧存在相邻厂房。

然后, 建立了两侧都无相邻厂房, 只有本槽所在厂房的模型, 上下游各考虑有 3 台相邻电解槽, 并进行了计算。

综合计算结果, 并与前面两侧都有相邻厂房的结果进行对比, 得到表 3-6 中的数据。

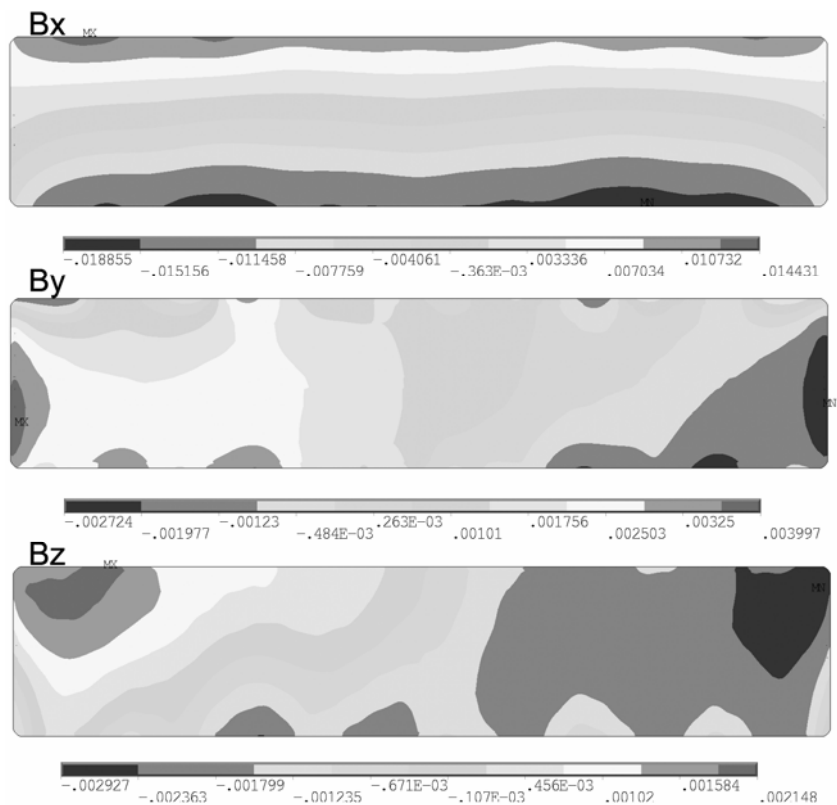


图 3-9 相邻槽数为 3 的磁场分布图(T)

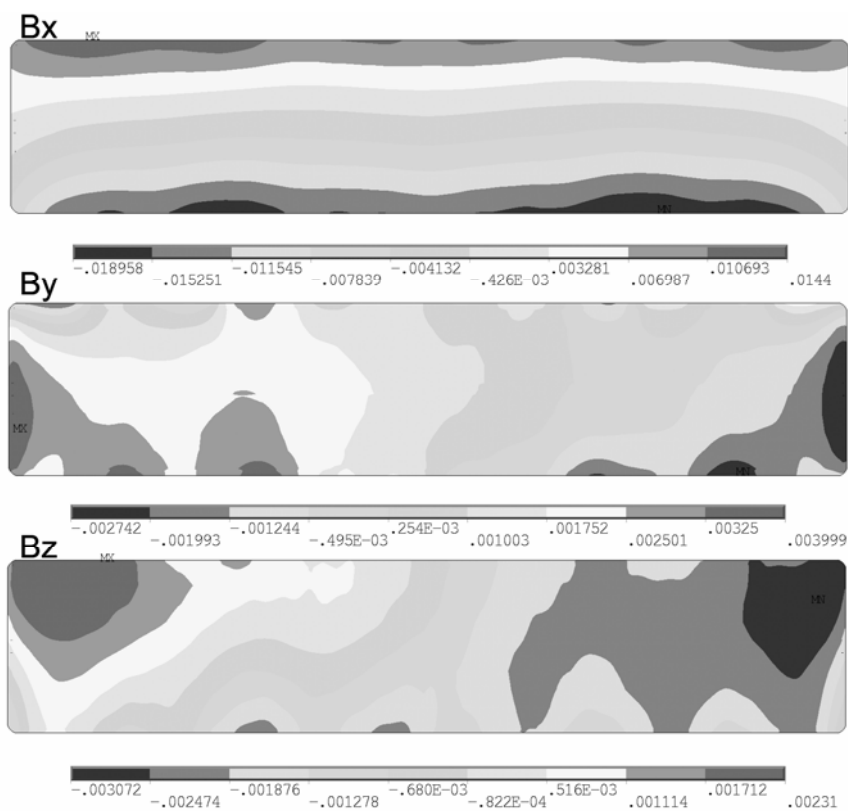


图 3-10 相邻槽数为 4 的磁场分布图(T)

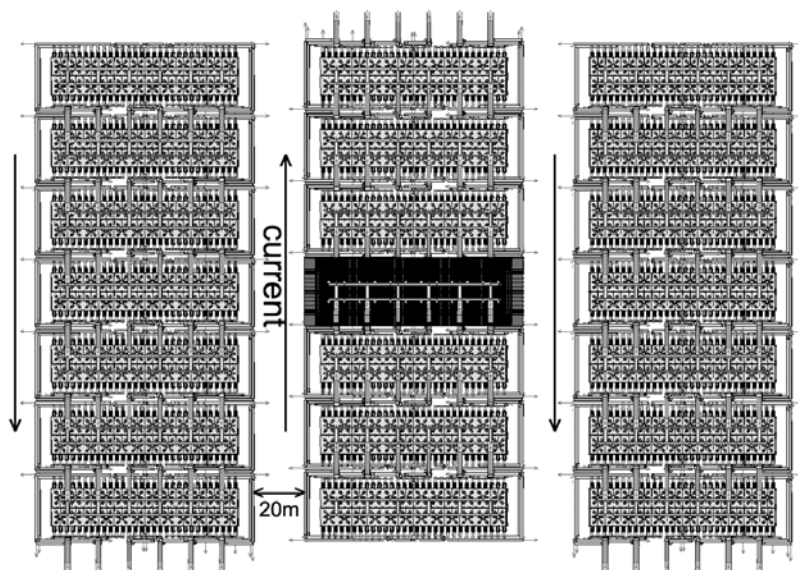


图 3-11 磁场计算整体模型俯视图

从表 3-6 中的数据可以看到，相邻厂房的存在与否对铝液中水平磁场影响并不明显， B_x 几乎无变化， B_y 变化也很微弱，而对垂直磁场 B_z 却存在有一定的影响。与无相邻厂房的结果对比，左侧的相邻厂房对本槽的垂直磁场整体上有减弱的作用，而右侧的相邻厂房却起到相对较大的增强作用。而当两侧都存在相邻厂房时，垂直磁场的变化又相对较小，说明当某厂房两侧都存在相邻厂房时，能相对较好地平衡其相邻厂房产生的磁场所带来的影响。

表 3-6 相邻厂房磁场的影响对比($\times 10^{-4}$ T)

相邻厂房	$ B_x _{\max}$	$ B_x _{\text{ave}}$	$ B_y _{\max}$	$ B_y _{\text{ave}}$	$ B_z _{\max}$	$ B_z _{\text{ave}}$
两侧都无	188.09	89.45	35.94	13.70	27.04	11.51
只有左侧	188.19	89.56	39.42	13.81	26.64	9.51
只有右侧	188.44	89.62	35.10	14.08	33.06	17.39
两侧都有	188.55	89.61	37.01	14.01	28.71	13.22

3.4.4 磁场结果分析与讨论

如上所述，在考虑上下游各三台相邻电解槽和两侧都存在相邻厂房的情况下，得到 350kA 预焙铝电解槽磁场分布结果，其规律大致如下：X 方向的磁感应强度在 -1.89×10^{-2} T 至 1.44×10^{-2} T 之间，极值出现在大面(A 面和 B 面)边缘；Y 方向的磁感应强度在 -2.7×10^{-3} T 至 3.7×10^{-3} T 之间，极值出现在电解槽两个端部；Z 方向磁感应强度在 -2.87×10^{-3} T 至 2.15×10^{-3} T 之间，极值出现在电解槽的四个角部，如图 3-12；总的磁感应强度在 7.36×10^{-3} T 至 1.89×10^{-2} T 之间。槽壳的磁场分布如图 3-13 所示，槽壳上的最大磁场达到了 2.418T。

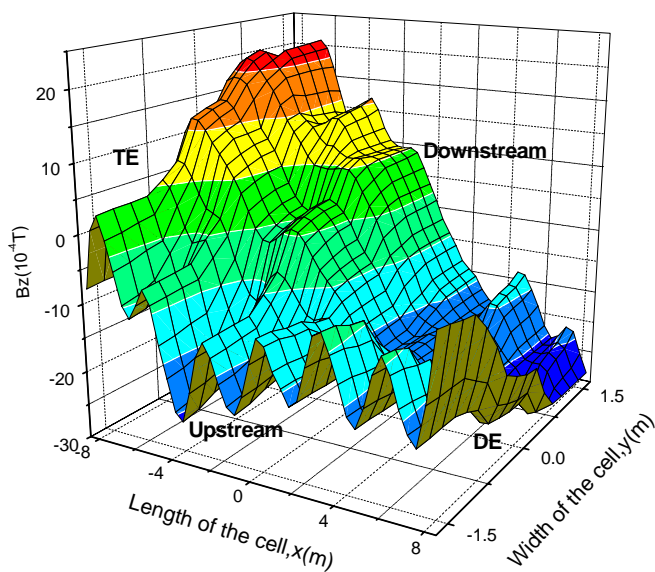


图 3-12 350kA 预焙铝电解槽垂直磁场分布图

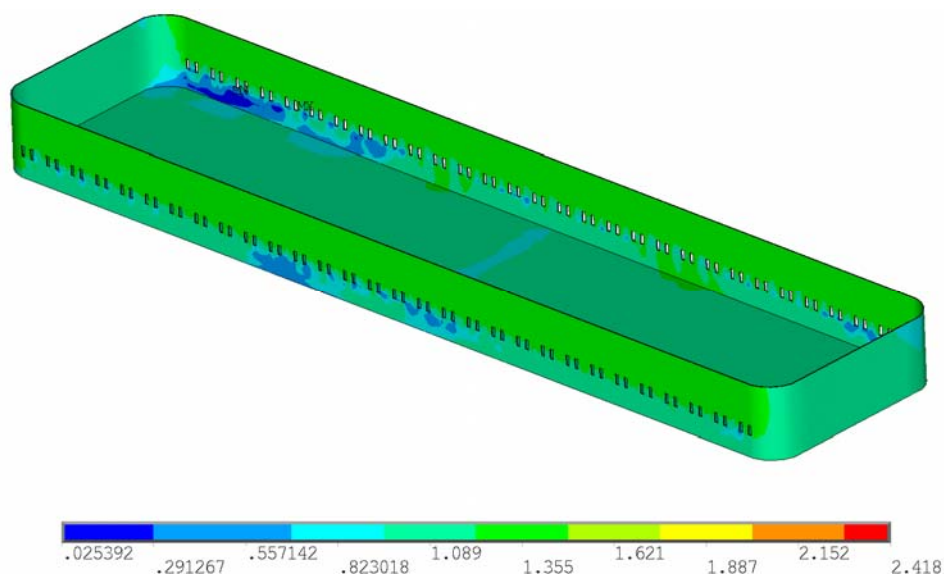


图 3-13 槽壳磁场分布图

3.4.5 关于厂房间距的优化

如果电解厂房间距过大，会使得设计成本的增加，电耗增加等，如果间距过小，会使得相邻厂房的磁场影响程度增大，不利于磁场的平衡，以下针对各种厂房情况对厂房间距的磁场影响进行研究讨论。

(1) 两侧都存在厂房时

表 3-7 两侧都存在厂房时厂房间距变化对磁场的影响 ($\times 10^{-4}$ T)

厂房间距 m	Bx max	Bx ave	By max	By ave	Bz max	Bz ave
10	-188.83	79.07	+39.35	14.19	-36.86	16.47
20	-188.55	89.61	+37.01	14.01	-28.71	13.22
30	-188.36	78.87	+39.47	13.76	-26.78	12.30
40	-188.26	78.84	+39.48	13.71	-26.39	11.91
50	-188.20	78.83	+39.49	13.68	-26.70	11.73
60	-188.16	78.82	+39.49	13.67	-26.87	11.63

由表 3-7 可以看出, 当两侧都存在相邻厂房时, 随着间距的增加, Bx 和 By 都变化很小, 也证明, 当两侧都存在相邻厂房时, 相邻厂房对水平磁场几乎没有影响, 而 Bz 呈递减的趋势, 而当间距由 30m 变至 40m 时, Bz 变化也已很小, 所以可以认为, 对于此 350kA 系列电解槽, 当厂房间距为 30m 时, 其相邻电解槽的作用可以忽略。

(2) 只有左侧存在厂房时

表 3-8 只有左侧存在厂房时厂房间距变化对磁场的影响($\times 10^{-4}$ T)

厂房间距 m	Bx max	Bx ave	By max	By ave	Bz max	Bz ave
10	-188.25	89.67	42.26	14.10	37.81	11.07
20	-188.19	89.56	39.42	13.81	26.64	9.51
30	-188.14	89.51	39.55	13.73	22.57	9.71
40	-188.12	89.49	39.54	13.70	-23.54	10.06

由表 3-8 可以看出, 当只有左侧存在相邻厂房时, 随着间距的增加, Bx 变化较小, By 在间距由 10m 变化到 20m 时有略微减少, 由 Bz 数值的变化规律可知, 左侧厂房给本列厂产生一个较大的正方向垂直磁场影响, 而根据图中 Bz 的分布可以看出 Bz 的正方向最大值出现在左上角, 所以, 二者的叠加会使得 Bz 的正方向最值明显增加, 且为正, 而随着距离的增加, 这个影响减弱, 当间距为

40m 时， B_z 的最大值为负值。

(3) 只有右侧存在厂房时

表 3-9 只有右侧存在厂房时厂房间距变化对磁场的影响($\times 10^{-4}$ T)

厂房间距 m	Bx max	Bx ave	By max	By ave	Bz max	Bz ave
10	-188.63	89.53	39.26	14.63	-45.29	23.00
20	-188.44	89.62	35.10	14.08	-33.06	17.39
30	-188.30	89.47	39.41	13.93	-31.23	15.01
40	-188.22	89.46	39.44	13.84	-30.07	13.81

由表 3-9 可以看出，与只有左侧存在厂房类似，间距的变化对 B_x 的影响并不明显， B_y 略有变化，右侧的厂房主要作用是个本列厂房产生一个较大的负方向的磁场，根据图中 B_z 的分布可以看出 B_z 的负方向最大值出现在右上角，所以，二者的叠加会使得 B_z 的负方向最值明显增加，超过正值，而随着距离的增加，该影响减弱。

3.5 本章小结

本章运用有限元软件 ANSYS，全面考虑槽内导体、母线系统、铁磁材料、空气漏磁、炉帮、相邻槽和相邻厂房等因素对磁场分布的影响，建立了 350kA 预焙阳极铝电解槽稳态电场和磁场模型。以某厂实测电流作为边界条件进行磁场求解，并与实测的磁场对比，数值非常接近，证明了模型和计算方法的准确。在理想条件下，对相邻电解槽以及相邻厂房对磁场的影响进行了分析计算，认为上下游各选用 3 台相邻槽和两侧都有相邻厂房的情况下计算结果与实际情况偏差不大，并对该系列电解槽的磁场设计进行了分析。最后，详细分析厂房间距对磁场的影响。

第四章 铝电解槽母线电场优化研究

本章主要研究大型铝电解槽中，为了得到较好电流分布，各部分母线所必须的电阻调节，为大型铝电解槽的电场设计和优化提供参考。

4.1 模型和边界条件

铝电解过程中，电流通过阳极立柱母线和横梁母线引入到阳极，经过电解质、铝液层后进入阴极碳块层，由多根阴极钢棒将电流导出，阴极钢棒导出的电流再由阴极软母线分组集中到阴极母线上，阴极母线将电流汇入下台电解槽的阳极立柱母线。

4.1.1 模型建立

为了计算得到母线的电场分布，同样以 350kA 预焙阳极铝电解槽系列为例，建立了电场计算三维有限元模型，如图 4-1。

模型选择两台相邻槽铝液层之间的所有导体为研究范围，包括 1 号电解槽的阴极碳块、阴极钢棒、爆炸焊接块、阴极软母线、全部的阴极母线和 2 号电解槽的立柱母线、横梁母线、阳极钢爪、阳极、电解质、铝液等。其中阴极碳块、阴极钢棒、阳极、电解质、铝液等采用 Solid5 实体单元建立，实体模型部分均采用正六面体进行网格划分；爆炸焊接块、母线系统、阳极钢爪等采用 Link68 电场单元建立。

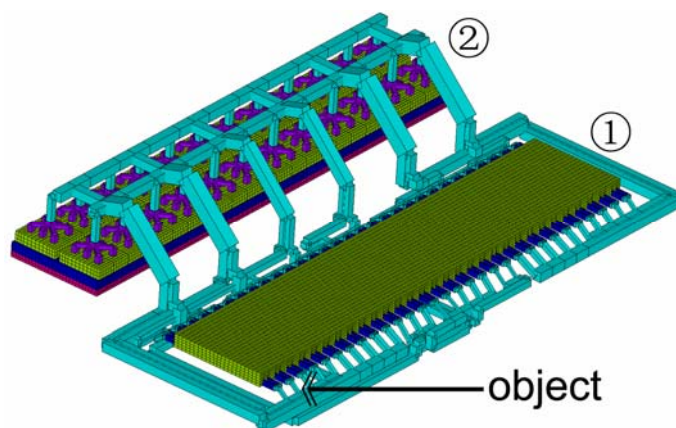


图 4-1 350kA 铝电解槽三维电场计算模型

4.1.2 边界条件

铝电解槽的电场仿真计算中，因为研究对象的复杂性，边界条件一直是影响电场计算准确性的主要因素之一。在本模型中，假设铝液下表面为等势面作为边界条件。

首先在 2 号电解槽的铝液下表面施加零电位边界，在 1 号电解槽阴极碳块上表面施加标准的 350000 A 电流边界，根据模型中各部分的材料属性和电阻分布，即可以求出整个模型在标准电流下的电压降。

求得整个模型在标准电流下的电压降后，经过适当的调节，得到一个使模型中的电流保证为 350000A 的电压降值，边界条件即可确定如下：在 2 号电解槽的铝液下表面施加零电位边界；在 1 号电解槽阴极碳块上表面施加所得到的电压降值。

4.2 结果分析

在上述边界条件下对模型进行求解，便得到整个母线系统的电场分布情况。其中各阴极钢棒出口处的电流分布如图 4-2，各阳极中的电流分布如图 4-3，立柱中的电流分布如图 4-4。（注：图中编号均为从出铝端至烟道端递增）

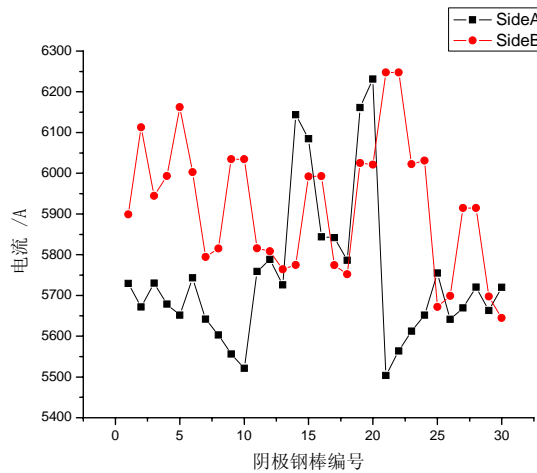


图 4-2 阴极钢棒出口处流出的电流分布

从图 4-2 可以看出，该系列电解槽两侧各阴极钢棒流出的电流量基本均匀，经过计算，进电侧所有母线的总电阻 $9.47e-7$ 欧姆，出电侧所有母线总电阻为 $8.69e-7$ 欧姆，从进电侧阴极钢棒中流出的总电流量为 172395.6A，占总电流的 49.25%，从出电侧阴极钢棒流出的总电流量 177604.9A，占总电流的 50.75%。

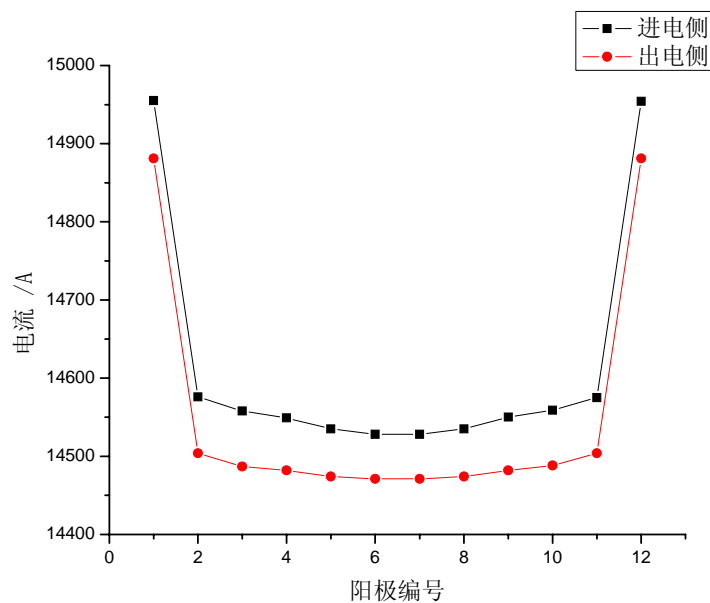


图 4-3 各阳极的电流分布

从图 4-3 可以看出，除了端部的阳极电流有起伏，其他阳极的电流较为均匀，进电侧所有阳极的电流之和为 175402A，占总电流的 50.11%，出电侧所有阳极的电流之和为 174599A，占总电流的 49.89%，与图 4-2 中两侧流出的电流两相比，可以推断，在理想的情况下，该系列的电解槽也将产生 3006A 的 A 侧至 B 侧的水平电流。

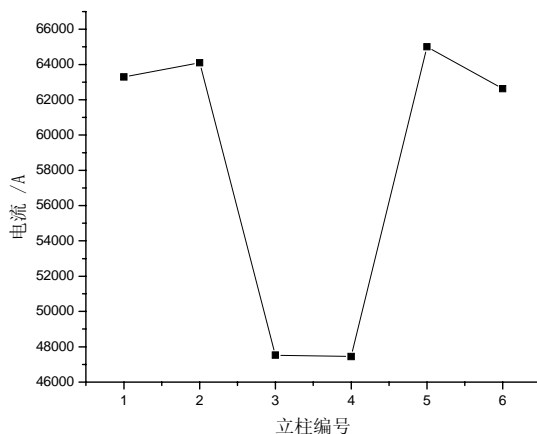


图 4-4 流过各立柱的电流

由图 4-4 可以看出，仅考虑母线的影晌时，两侧立柱流过的电流较大，中间两根立柱电流相对较小。

4.3 阴极软母线电阻优化

4.3.1 方法推导

阴极软母线的主要作用是将阴极钢棒流出的电流导入到阴极母线。阴极软母线连接到阴极母线时，通常是几根阴极软母线为一组，把它们的电流集中到一根阴极母线上。在现行的电解槽中，特别是大型的电解槽中，由于电流的不断增大，就需要将电流分散成更多的分支导出，而被分散的电流最后还必须集中后再导入下台电解槽，所以经常有较多的阴极软母线为一组将电流集中到某根阴极母线上。

在几根阴极软母线编为一组连接到阴极母线时，它们的连接方式可以归纳为如图 4-5 所示的基本连接模式。各阴极软母线按电流方向分别编号，并认为各阴极钢棒之间是等间距的，阴极软母线与阴极母线间的连接为垂直连接，且连接的阴极母线截面积保持不变。不考虑各接触处的接触电阻时，其等价的电路图如图 4-6。

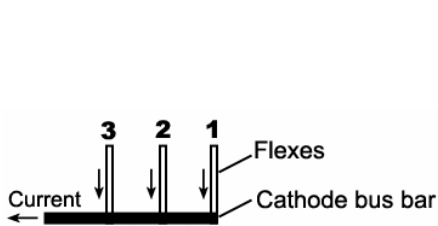


图 4-5 基本连接模式示意图

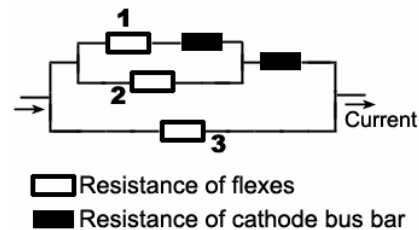


图 4-6 基本连接模式的等价电路图

图 4-5 和图 4-6 中，当 3 根阴极软母线都采用同一种规格的配置时，其电阻一样。假设各根阴极软母线的起点都等势，对该电路施加一定的电势差，我们可以得到流过 3 根阴极软母线的电流的基本分布规律如图 4-7。

由图 4-7 可知，流过 3 根阴极软母线的电流按编号的由小到大依次增大，如果在同一组中阴极软母线数目更多时，这种趋势仍将延续下去，这势必造成同一组中各阴极软母线流出的电流差较大，即从连接它们的阴极钢棒流出电流的差别较大，显然这将影响电解槽电流的分布均匀。

根据分析，希望通过改善各根阴极软母线的电阻配置，来使得连接它们的阴极钢棒所流出电流较为均匀，为此，进行了以下的推导。

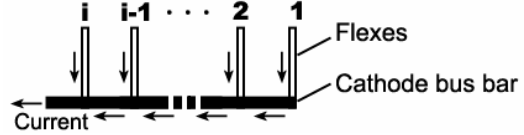
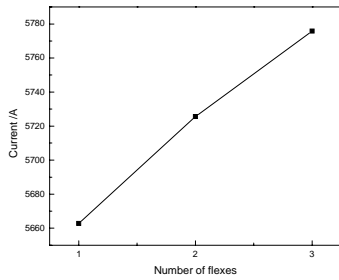


图 4-7 基本连接模式等电阻时的电流分布规律图 图 4-8 一般形式的示意图

图 4-5 中 1、2、3 号阴极软母线对应的电阻分别用 R_1 、 R_2 、 R_3 表示，两相邻阴极软母线间长度的阴极母线的电阻用 R' 表示，当流过每根阴极软母线的电流相同时，可以推导出以下的电阻关系。

$$R_2 = R_1 + R' \tag{4-1}$$

$$R_3 = 2\left(\frac{R_2}{2} + R'\right) \tag{4-2}$$

根据以上的推导，针对有 i 段阴极软母线为一组连接到一根阴极母线的情况，如图 4-8，用数学归纳法推广到一般的形式，可以得出以下计算公式：

$$R_i = (i-1)\left(\frac{R_{i-1}}{i-1} + R'\right) = R_{i-1} + (i-1)R' \quad i \text{ 为大于 1 的整数} \tag{4-3}$$

式 (4-3) 中 R_i 为第 i 根阴极软母线电阻， i 的编号是按阴极软母线所连接的阴极母线的电流方向依次增加的，如图 5 所示。

式 (4-3) 清楚地表明：越靠近电流方向下游的阴极软母线，其电阻需要越大。

得到式 (4-3) 后，就可以得到同组中阴极软母线电阻的计算优化方法，主要包括以下几步：

- 1) 选出待计算优化的对象，按如图 4-8 所示顺序对阴极软母线进行编号。
- 2) 估算出 1 号阴极软母线的 R_1 值。
- 3) 其它阴极软母线的电阻则可以利用式 (4-3) 计算得到。

根据电流接出点位置的不同，图 4-2 所示的阴极软母线连接到阴极母线的的基本连接模式可以总结扩展出以下几种形式。

形式 1——电流的接出点在阴极软母线侧部，如图 4-8 所示。

这种形式实际就是图 4-2 基本连接模式的扩展，可以用以上所述的计算方法来配置各阴极软母线的电阻。

形式 2——电流的接出点在两根阴极软母线的中间，如图 4-9 所示。

这种形式可以看成是两部分形式 1 的阴极软母线分别在左右的组合，所以左

右两部分还是可以单独按照上述计算方法来计算配置电阻,但是由于左右两部分所有的阴极软母线又属于同一组,还必须保证左部分各阴极软母线流出的电流量和右部分各阴极软母线流出的电流量都相等。经过推导,可以用以下方程组来计算配置这类连接的阴极软母线电阻。

$$R_i = R_{i-1} + (i-1)R' \tag{4-4}$$

$$R_{\max(j)} = R_{\max(i)} + \frac{R' \times (\max(i) - \max(j))}{2} \tag{4-5}$$

$$R_{j-1} = R_j - (j-1)R' \tag{4-6}$$

$i \geq j$, i, j 为大于 0 的整数, 当 i 或 j 为 0 时, 则为形式 1。

计算时, 先确定 $i=1$ 的阴极软母线电阻值, 该部分其他阴极软母线的电阻根据式 (4-4) 计算得到, 直至求出 $R_{\max(i)}$, 再用式 (4-5) 求出 $R_{\max(j)}$ 的值, 最后用式 (4-6) 计算出其他阴极软母线的电阻。

形式 3——电流的接出点对应某根阴极软母线的位置, 如图 4-10 所示。

这种形式和形式 2 基本类似, 只是电流接出点位置稍有改变, 使得左右两部分之间的电阻关系也有所改变, 可以用以下的方程组来配置计算电阻。

$$R_i = R_{i-1} + (i-1)R' \tag{4-7}$$

$$R_{\max(j)} = R_{\max(i)} \tag{4-8}$$

$$R_{j-1} = R_j - (j-1)R' \tag{4-9}$$

$i \geq j$, i, j 为大于 0 的整数, 当 i 或 j 为 0 时, 则为形式 1。

同样, 先确定 $i=1$ 的阴极软母线电阻值, 该部分其他阴极软母线的电阻根据式 (4-7) 计算得到, 直至求出 $R_{\max(i)}$, 再用式 (4-8) 求出 $R_{\max(j)}$ 的值, 最后用式 (4-9) 计算出其他阴极软母线的电阻。

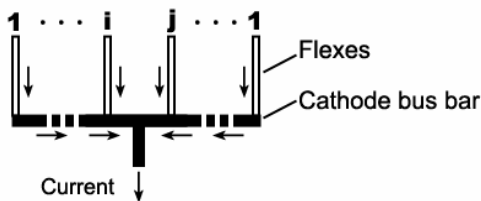


图 4-9 出点在两根阴极软母线中间形式

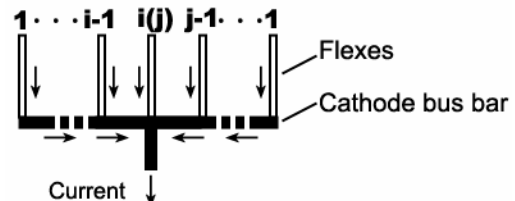


图 4-10 出点对应某根阴极软母线的形式

4.3.2 实例计算

在本次分析中，选用 1 号电解槽的 A 侧第一组阴极软母线为分析对象，位置如图 4-1 中所示。该组总共有五根阴极软母线，按阴极母线上电流的方向由上游至下游依次编号，如图 4-11 所示。

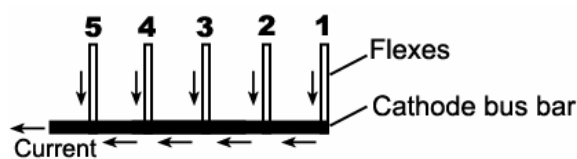


图 4-11 第一组阴极软母线示意图

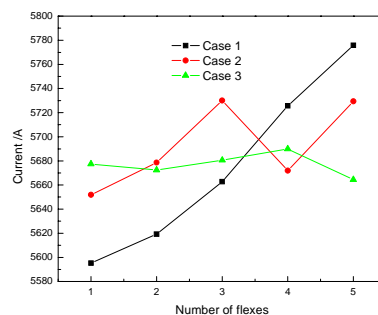


图 4-12 各种方案结果对比图

针对所选取的对象，进行了三种不同电阻配置方案的计算。

方案 1：所有 5 根阴极软母线的电阻配置完全一致。

方案 2：1、2、3 号三根阴极软母线选用相同的电阻配置，且电阻较小；4、5 号阴极软母线选用相同的电阻配置，电阻相对 1、2、3 要大。

方案 3：每根阴极软母线的电阻配置都不同，先确定 1 号阴极软母线的电阻，其他四根的电阻由式（4-3）计算得到，依次增大。

在计算过程中，仅对所选取的研究的对象中的电阻进行了调整，模型中其他的部分保持一致，边界条件也都一致，忽略该组阴极软母线电阻变化引起的整个模型的电阻变化。

4.3.3 结果分析

经过计算，得到各方案的计算结果如图 4-12 所示。

图 4-12 中，方案 1 中各阴极软母线流出的电流随编号的增大依次增大，最大值和最小值之差为 180.6 A。方案 2 中，4 号和 5 号阴极软母线的电阻有所调整，所以从 4 号阴极软母线开始电流值有所下降，然后再按照规律依次增加，最大电流值和最小电流值之差为 78.2 A。方案 3 中各阴极软母线所分得的电流较为均衡，但由于计算时，各阴极钢棒出口处的电势并不能完全一致，所以电流还是有所波动，最大电流值和最小电流值之差为 25.4 A，但是这已足够证明本文所给出的阴极软母线电阻计算方法的正确性和有效性。

4.3.4 讨论与建议

本文所述的阴极软母线电阻配置计算方法是在理想情况下推导出的,实际情况中,能够按照该方法精确计算和设计每根阴极软母线的电阻固然好,但这样做,在工业实施时势必也会耗费较多人力物力。为了降低其复杂性,可以变化运用式(4-3)所得出的规律,分段来调节阴极软母线的电阻大小,如图 4-12 中方案 2 的情况,在靠近电流上游端的阴极软母线采用相对较小的电阻,靠近下游端的阴极软母线采用相对较大的电阻,当然这个电阻同样可以通过本文所述的计算方法来估算得出,这种配置也能较好地改善阴极钢棒流出的电流,如图 4-12 中方案 2 的结果。这种方法即不会耗费太大,又能较好的平衡各阴极钢棒流出的电流,适应于工业上的设计或改善电解槽的稳定性时采用。

对比图 4-5、图 4-9 和图 4-10 的三种形式容易看出,相同根数的阴极软母线为一组时,要达到好的电流平衡,选择形式 2 和形式 3 的电流接出方式,其电阻需要调节的范围比选择形式 1 的要小。所以,如果有较多数目的阴极软母线编为一组,选用形式 1 来调节电阻有困难时,选用形式 2 或形式 3 的连接方式可以有效地减少调节电阻的范围。

特别地,如果只考虑尽量小地调节阴极软母线的电阻来达到较好的电流平衡,则当一组中阴极软母线的根数为奇数时,选用形式 3 的电流接出方式,对称分布阴极软母线是较理想的;而当一组中阴极软母线的根数为偶数时,选用形式 2 的电流接触方式,对称分布阴极软母线是较好的。

不同的电流接出方式,该部分的总电阻也会有大有小,这在整个母线系统的设计时也是不能忽略的。

众所周知,调节阴极软母线的电阻,是通过调节其长度和横截面积来实现的,在工程实践中,它们的调节范围是受到很多因素制约的,特别还需要考虑投资、耗费、异常状况的处理等,所以需要根据实际的情况来灵活选择合适的电流的接出方式和电阻配置。

4.4 阳极横梁母线的优化

横梁母线的主要作用是将电流由立柱母线导入并分配到各个阳极中。为了减少分配不均匀引起的水平电流,通常希望能电流能尽量平均的分入每个阳极中去。

在现行的大型槽中,通常采用以下的横梁母线结构,如图 4-13。

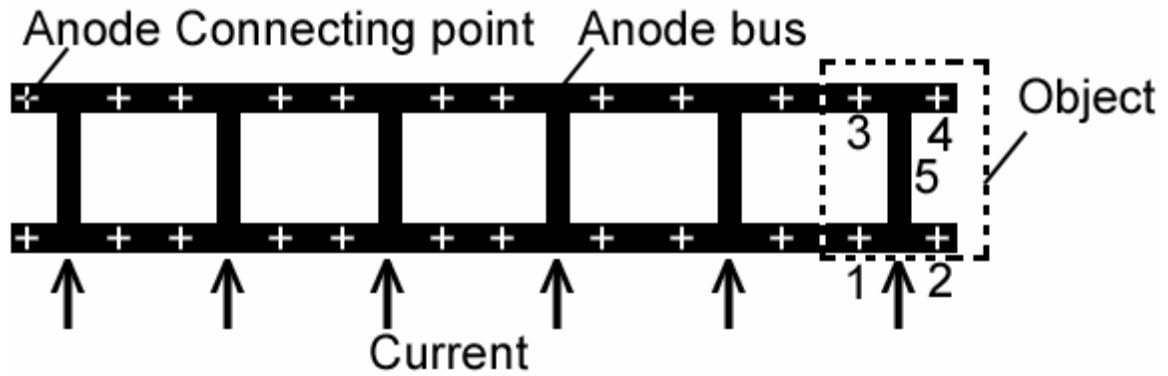


图 4-13 横梁母线结构示意图

首先，在现有的横梁母线结构下，采用上述图 4-1 的模型，在同样的边界条件下进行计算，得到 2 号电解槽中各阳极中的电流如图 4-3 所示：

由图 4-3 可知，容易看出流入各阳极的电流并不完全相同，主要可总结为以下两个问题：

- 1) AB 两侧的阳极所分得的电流是不能平衡的，B 侧的电流普遍比 A 侧所分得的电流要小。
- 2) 同一侧的阳极中，两端的阳极所流入的电流相对中间的明显要大。

4.4.1 两侧之间的电流平衡的研究

取一根立柱母线进口附近的母线来研究，如图 4-13 所示，其等价电阻图如图 4-14 所示：

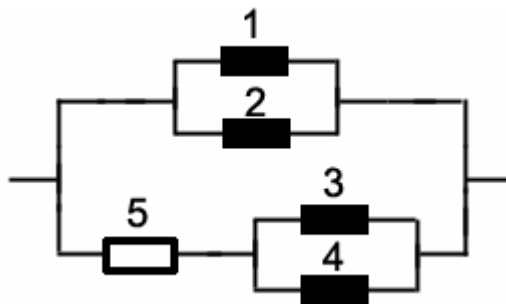


图 4-14 横梁母线端部等价电阻图

当横梁两侧的母线尺寸和材料完全相同时，根据电路图分析，可以推断，这是由于中间连接条部分的 5 号电阻的存在导致这种情况。所以我们尝试将中间连接条部分的电阻调整到很小，相对其他的电阻，可以忽略，计算后，结果和前面没有调整的相比，如图 4-15 所示。

由图 4-15 可知，A、B 两侧所分得的电流几乎一致，说明当横梁两侧的母线尺寸和材料完全相同时，中间连接条的电阻是影响两侧电流分配不均程度的主要

因素。

所以在当横梁两侧的母线尺寸和材料完全相同时，只有靠尽量调节小中间条的电阻来减少 AB 侧阳极分得电流的不均匀。但是实际的调节中，由于电流密度等其他因素的限制，不改变横梁母线的结构，该电阻是不可能调节到可以忽略的，所以在该种横梁结构下，AB 两侧的阳极所分得的电流是不可能完全平衡的。

对电路图进行分析，如果使得 AB 侧两根横梁母线的电阻不一致，即 1、2 号电阻大于 3、4 号电阻，也可能改善电流的平衡。

所以尝试将 A 侧的横梁的电阻增大，B 侧保持不变，进行计算，结果如图 4-16，证明该推断的正确性。

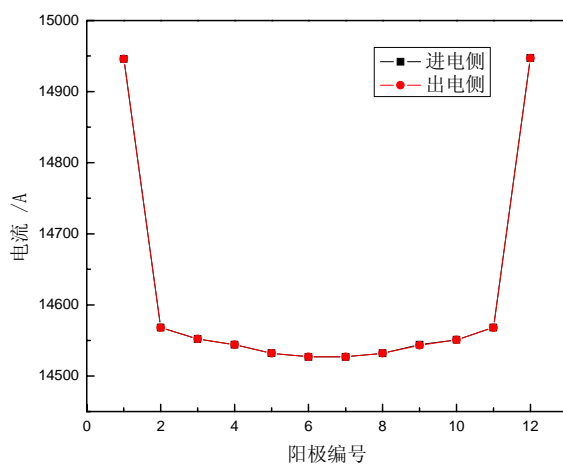


图 4-15 调节连接处电阻后的阳极电流分布

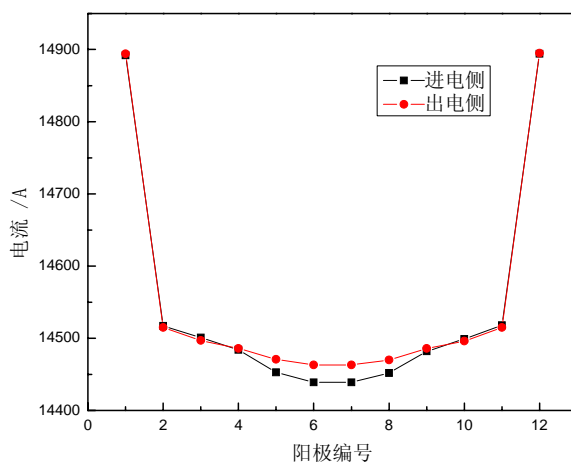


图 4-16 增大 A 侧横梁电阻后阳极电流分布

由图 4-16 可以看出, 两侧阳极所分得的电流也基本一致, 所以在制作横梁时, 使得 A 侧电阻大于 B 侧电阻, 可以改善两侧的电流分布不均匀。主要包括两种方法:

- 1) 调整两侧横梁母线的横截面积。
- 2) 当横截面积限制时, 可以选用不同导电率的材料来制作两侧的横梁母线。

4.4.2 同侧阳极之间的电流平衡研究

在温度等其他影响因素都不变的情况下, 同侧阳极之间的电流分布取决于母线的设计, 特别是与立柱母线的设计有很大的关系。如图 4-13 中的横梁母线配置, 计算的结果表明两端的阳极所流入的电流相对中间的要高。

为此, 尝试改变两端头的横梁母线的电阻, 使其电阻比中间的要大, 计算得到结果如图 4-17 所示:

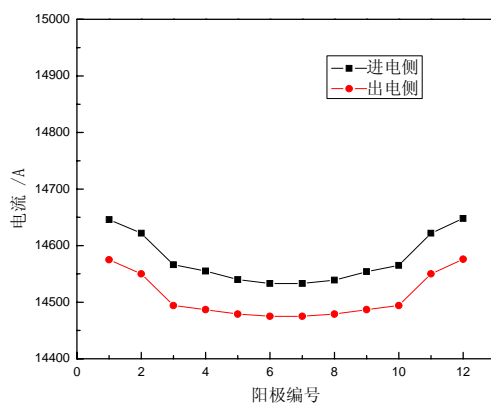


图 4-17 改变横梁母线两端电阻后的阳极电流分布

由图 4-17 可知, 增大两端头的电阻可以较明显地减小流入两端头阳极的电流, 而如果由于其他因素的限制而使得两端头的电阻不能增大到理想的效果, 也可以对端头的阳极进行相关的处理, 包括降低阳极位置以使其电阻增大等。

4.5 本章小结

本章运用有限元软件 ANSYS 建立了 350kA 预焙铝电解槽母线电场计算模型, 该模型能排除其他因素的干扰准确反应母线的电阻配置情况。运用该模型, 对铝电解槽中各种阴极软母线的电阻配置进行了计算, 推导出较为有效的各种配置模式的电阻配置公式。针对当前电解槽所采用的横联母线结构所带来的问题进行了仿真分析, 并给出了相关的优化建议。

第五章 预焙铝电解槽磁场设计研究

在第三章中,以现行的电解槽为基础,验证了所用模型和计算方法的正确性。本章沿用第三章所确立的电解槽建模和计算方法,以超大型电解槽为对象,进行了相应的磁场设计研究。

5.1 铝电解槽磁场构成研究

如第三章所述,铝电解槽中的磁场是由母线系统和槽内实体以及槽壳共同作用而成,所以对于电解槽的磁场设计,主要是针对这三部分的设计。磁场是矢量,是有方向的,各方向的分量是可以叠加,所以铝电解槽中的总磁场可以看成是每个部分所产生磁场叠加的结果,这即是说我们可以先单独研究各个部分所产生磁场的分布规律,以及它们对铝电解槽磁场的贡献程度,再反过来利用这些规律来进行铝电解槽的磁场设计。

5.1.1 槽内实体及槽壳部分

这部分所产生的磁场主要取决于槽结构的设计,即槽尺寸、阴阳极数量及尺寸等。除了磁场,槽结构的设计还必须综合考虑电、热平衡等问题,需反复对比修改,过程较为复杂,以下用一种具体的槽结构来进行分析。经过计算,其磁场分布如图 5-1 至图 5-3。

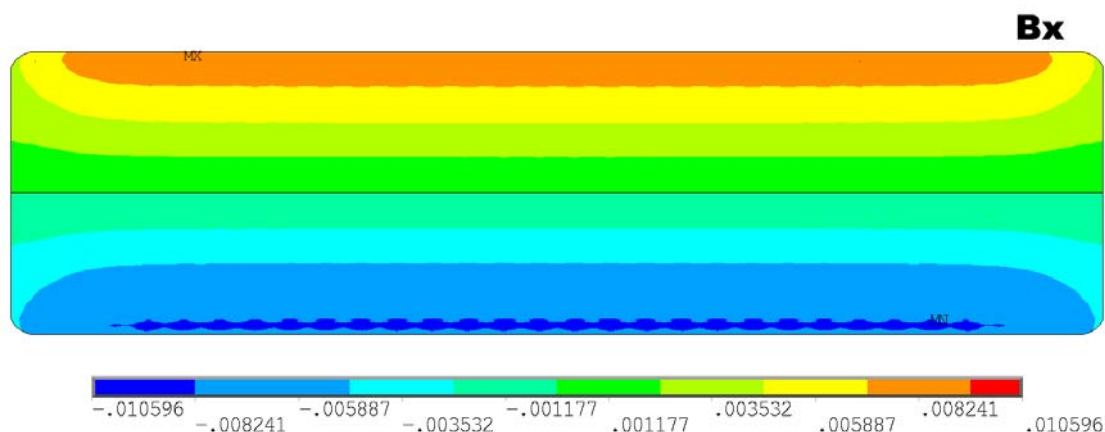


图 5-1 槽结构实体模型部分产生的 x 方向水平磁场 (铝液上表面)

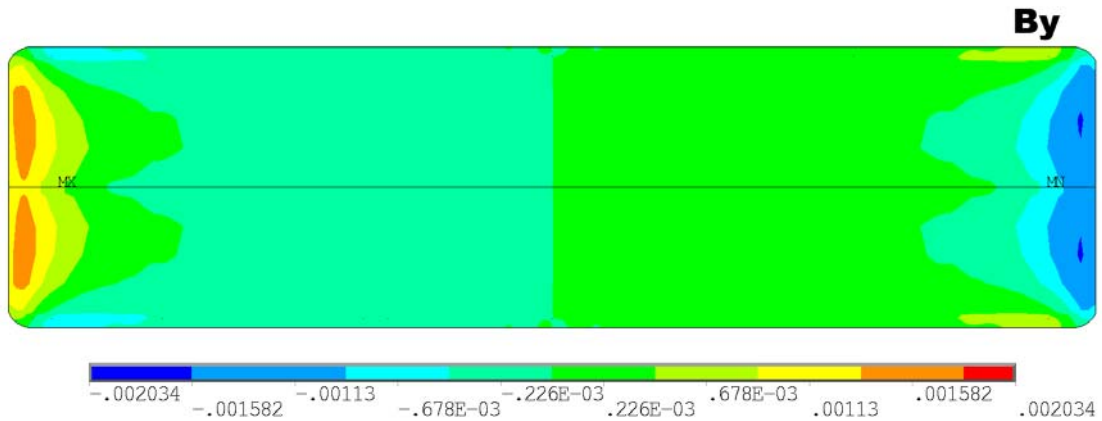


图 5-2 槽结构实体模型部分产生的 y 方向水平磁场（铝液上表面）

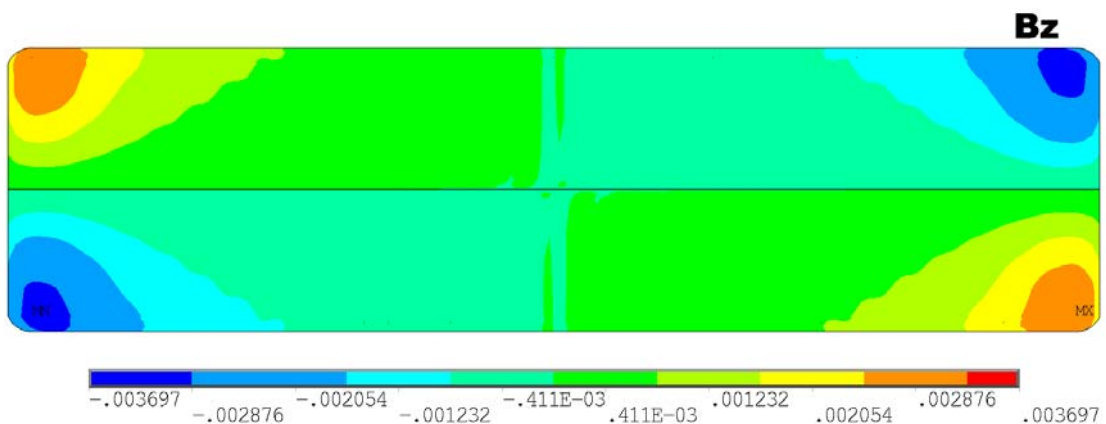


图 5-3 槽结构实体模型部分产生的垂直磁场（铝液上表面）

由图可以看到，由于槽结构的对称性，在各个方向均产生了完全对称的磁场分布，其中图中最突出的特点是：在出电侧一出铝端角部和进电侧一烟道端角部产生了正方向的高达 $3.7 \times 10^{-3} \text{T}$ 的垂直方向磁场，同样在进电侧一出铝端角部和出电侧一烟道端角部产生了负方向的 $3.7 \times 10^{-3} \text{T}$ 的垂直方向磁场。对比第三章中图 3-9 中磁场分布特点，我们可以看出，磁场各方向分量的分布规律是基本一致的，亦即是说该部分所产生的磁场基本决定了整个铝电解槽中的磁场分布情况。这也决定了母线部分设计需要从减弱该磁场的角度考虑。

5.1.2 母线部分的设计

如上所述，槽结构确定后，槽内导体及槽壳所产生的磁场已基本固定，所以母线部分的设计对整个电解槽的磁场平衡尤为重要，母线部分的设计也变得越来越复杂，按其对接电解槽磁场的作用，可以分为槽底回流母线、端部回流母线、阳极立柱母线、阳极横梁母线等。要对超大型电解槽进行母线部分的设计，就需要

对其各个组成部分的作用进行初步分析。说明：以下的计算分析中槽内导体中未施加电流，结果仅为母线的所产生的磁场。

(1) 端部回流母线

端部回流是指从阴极钢棒流出的电流经电解槽两端流过电解槽而导入阳极立柱母线。图 5-4 至图 5-6 是一根阴极钢棒流出的电流，理想状况即 10kA 大小的电流在一定的高度由出铝端流过电解槽所得到的磁场分布情况。

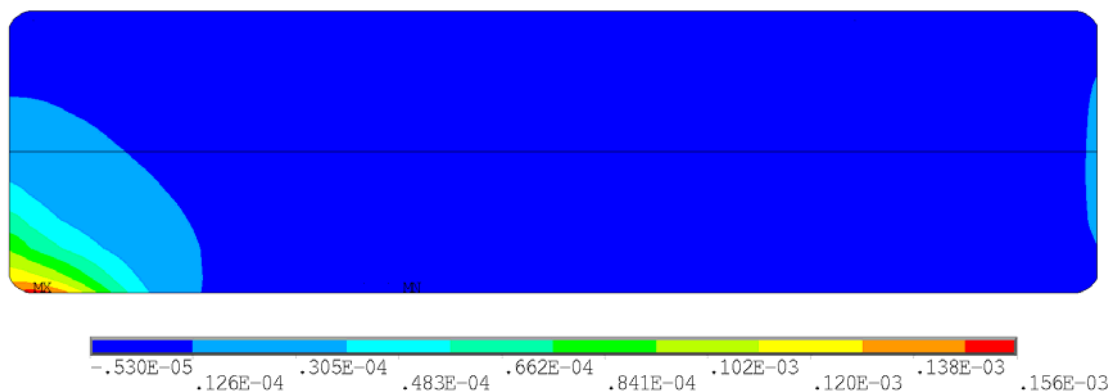


图 5-4 端部回流母线产生的 x 方向水平磁场特征图

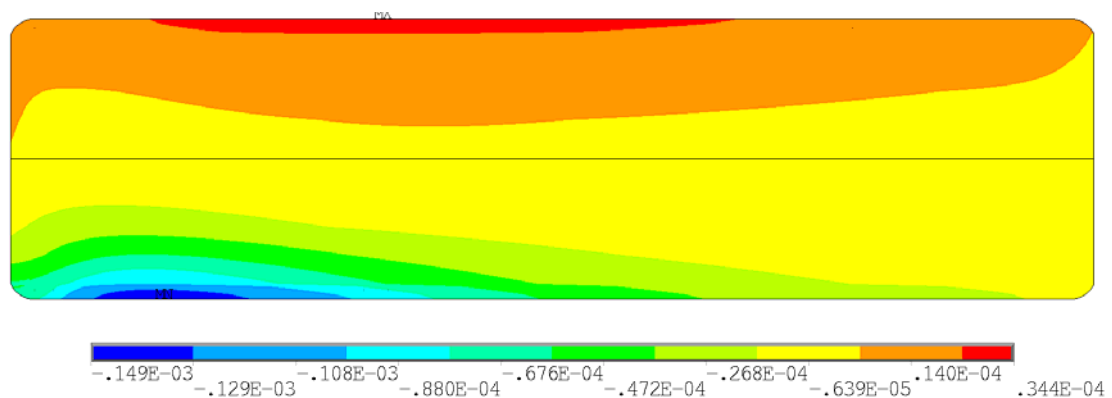


图 5-5 端部回流母线产生的 y 方向水平磁场特征图

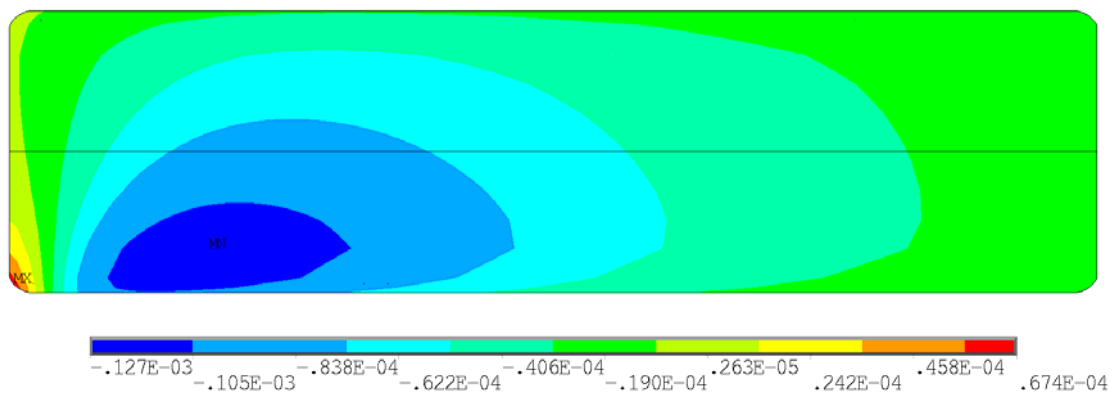


图 5-6 端部回流母线产生的垂直磁场特征图

如图所示，由于该部分母线基本都是水平的，它产生的水平磁场基本是可以忽略的。但正是由于这样，使得它在端部，特别是角部位置产生了很强的负方向垂直磁场。对比图 5-3 中槽内导体及槽壳所产生的垂直磁场，可以发现它们在进电侧两个角部位置所产生的垂直磁场方向相同，这即是说，这将导致在进电侧两个角部产生相当强的磁场，而这个磁场是必须要被减弱的。

(2) 槽底回流母线

槽底回流是指从阴极钢棒流出的电流经电解槽底部流过电解槽而导入立柱母线。图 5-7 至图 5-9 是一根阴极钢棒流出的电流，理想状况即 10kA 大小的电流在 x 轴中心处由槽底端流过电解槽所得到的磁场分布情况。

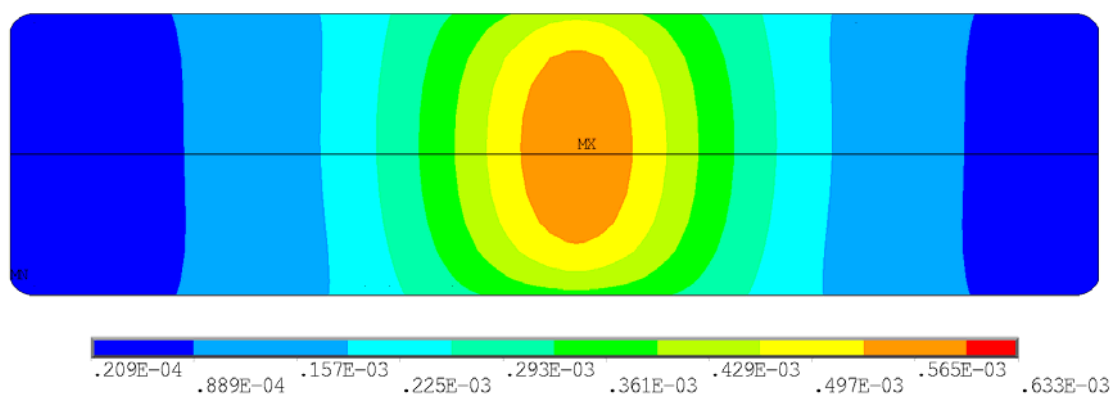


图 5-7 槽底回流母线产生的 x 方向水平磁场特征图

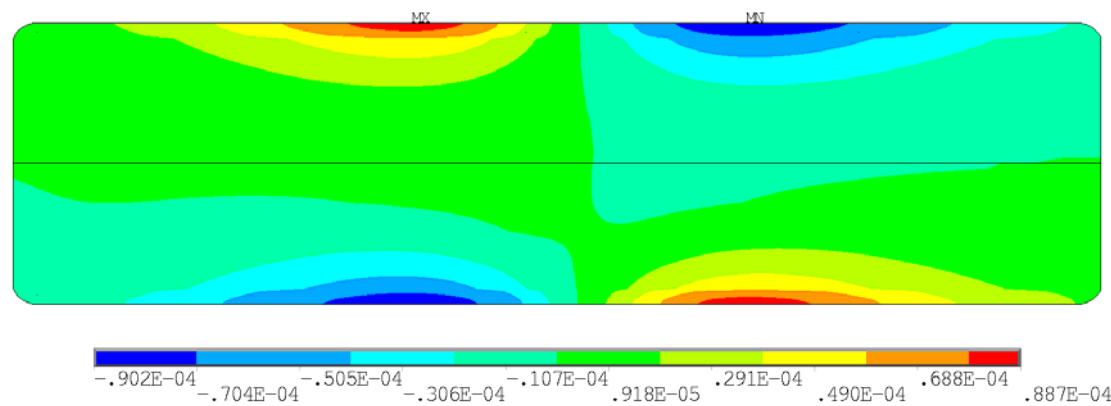


图 5-8 槽底回流母线产生的 y 方向水平磁场特征图

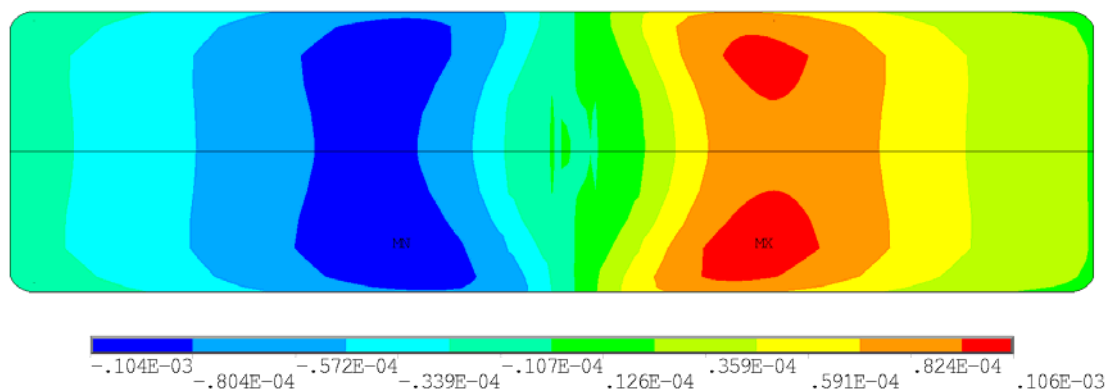


图 5-9 槽底回流母线产生的 z 方向水平磁场特征图

由图可以看出，与以上其他部分所产生的水平磁场相比，槽底回流母线产生的水平磁场相对较小；而垂直方向的磁场的虽然数值上也不大，但和其他部分产生的垂直磁场相比是不能忽略的，且由于槽底回流母线的位置、回流电流量可以较为方便的调节，我们可以利用该垂直磁场的分布特点对整个电解槽的磁场作较为细致的调节。另外，由于槽底回流母线和端部回流母线电流方向相同且并行，使得它们中间间隔的区域磁场方向相反，所以如果端部回流母线产生的磁场过大时，也可以用槽底回流母线将其减弱。

(3) 阳极立柱母线

阳极立柱母线的主要作用是汇集由上台电解槽流过来的电流并将其较为均匀地导入本槽，所以立柱母线上通常有较大的电流量。图 5-10 至图 5-12 是有 8 根阴极钢棒流出的电流量（理想状况即 80kA 的电流）的一根立柱母线在 x 轴原点处所产生的磁场分布情况。

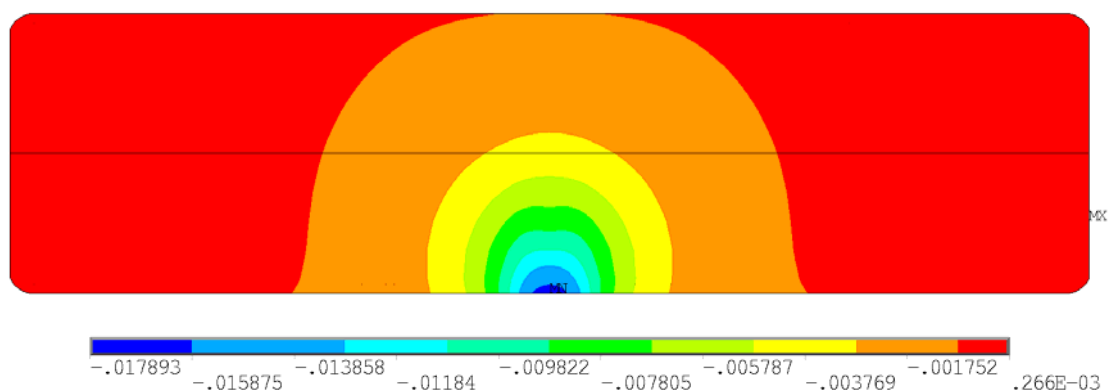


图 5-10 阳极立柱母线产生的 x 方向水平磁场特征图

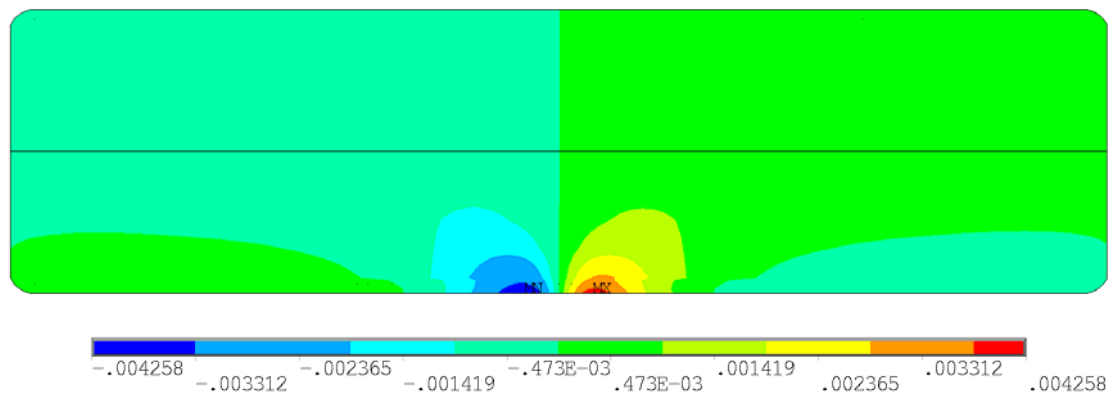


图 5-11 阳极立柱母线产生的 y 方向水平磁场特征图

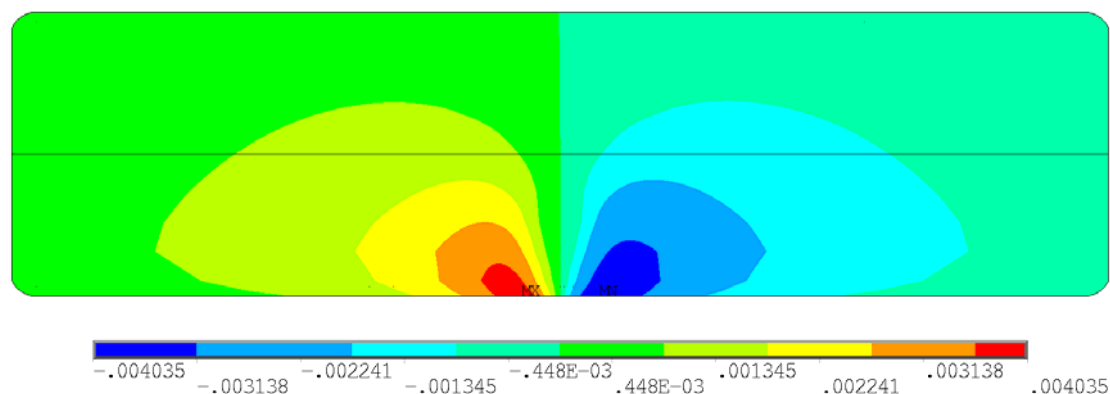


图 5-12 阳极立柱母线产生的垂直磁场特征图

由图可以看出，在立柱母线附近区域产生较为密集的磁场，特别是产生了高达 $4 \times 10^{-3} \text{T}$ 的垂直方向磁场，这显然将在局部产生很强的磁场波动。根据图 x 所示，可以推断当多根立柱大面进电时，将在每根立柱位置产生很强的负方向的 x 方向磁场分量，而且这与槽内导体部分在该方向上所产生的磁场方向相同，显然这将很大程度的加强进电侧 x 方向的磁场；多根立柱母线大面进电的情况，各根立柱间的 y 方向磁场将由于方向相反而减弱，而对于两个端部，特别是角部，由于不能被减弱，将产生较大的磁场，其中进电侧-出铝端角部为负方向磁场，进电侧-烟道端角部为正方向磁场，这与槽内导体在两端产生的 y 方向磁场相互减弱；多根立柱母线大面进电时在 z 方向产生的磁场与 y 方向的磁场类似，只不过是方向正好相反，即它将会在进电侧-出铝端产生很强的正方向垂直磁场，在进电侧-烟道端角部产生很强的负方向垂直磁场，与槽内导体以及端部回流母线在角部产生的垂直磁场相比，方向正好相反，使得进电侧两个角部的垂直磁场能够平衡。

(4) 阳极横梁母线及其他

对于一种确定的槽结构和立柱母线配置，横梁母线部分的电场和磁场基本就可以确定下来。图 5-13 至图 5-15 为上述确定的槽结构、立柱母线等下，横梁母

线部分所产生磁场的分布情况。还有其他部分的母线，如钢爪、软母线和焊接部分等，由于其产生的磁场较小或相互之间基本抵消，所以整体设计时不作为主要因素考虑。

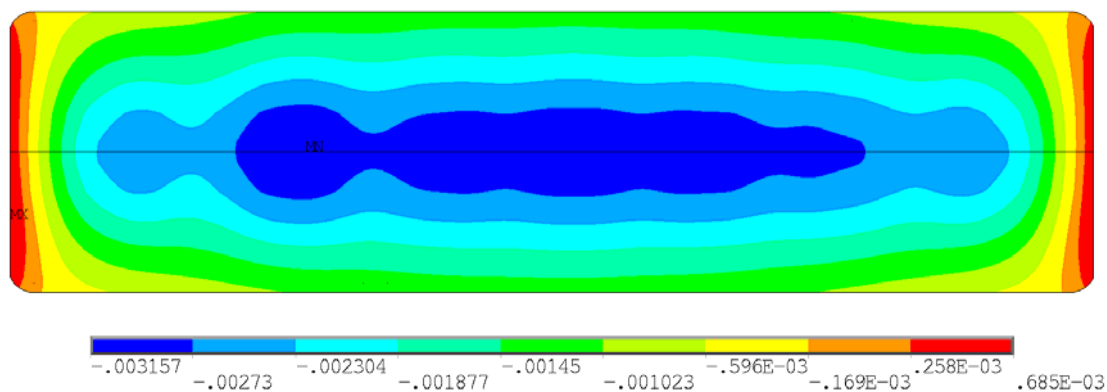


图 5-13 阳极横梁母线产生的 x 方向水平磁场特征图

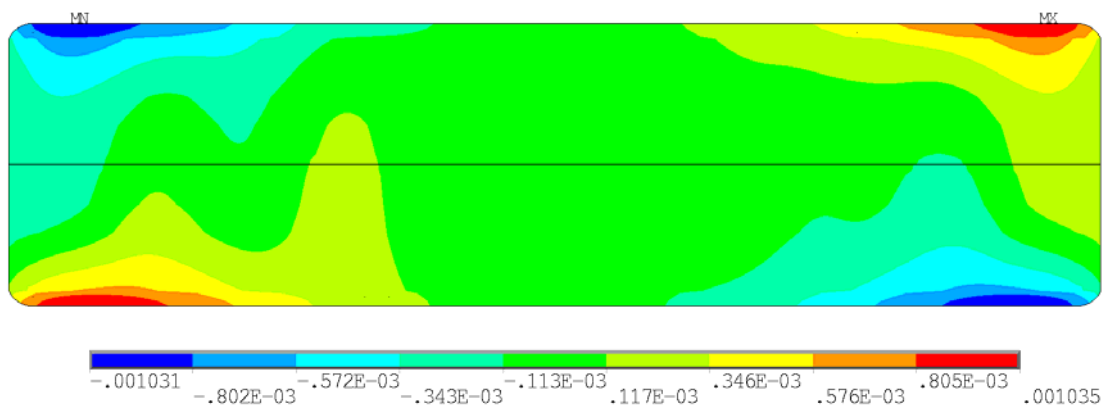


图 5-14 阳极横梁母线产生的 y 方向水平磁场特征图

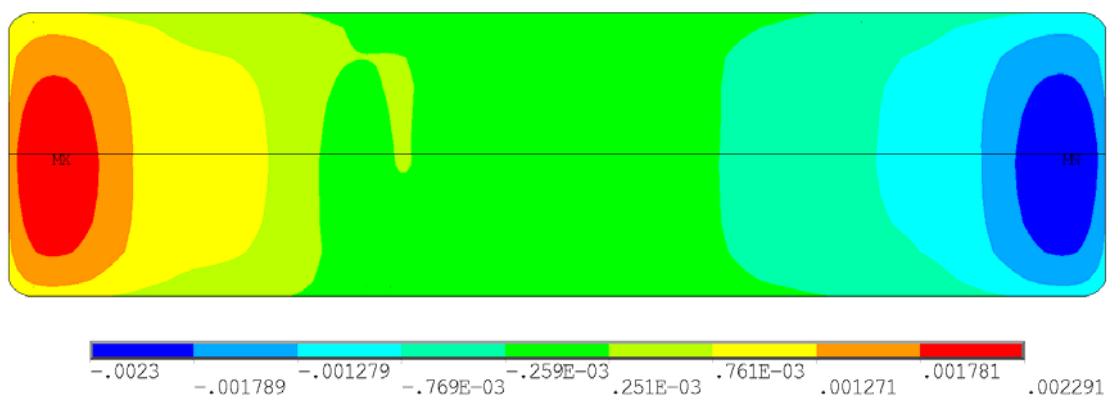


图 5-15 阳极横梁母线产生的垂直磁场特征图

由图可以看出，横梁母线部分在产生了一定的负方向 x 方向水平磁场；y 方向的水平磁场的最值出现在四个角部，会与槽内导体部分产生的 y 方向的磁场叠加，从而使得出电侧一出铝端角部的负方向磁场和出电侧一烟道端角部的正方向

磁场将相互减弱,而另两个角部的将被增强,可以估计其基本分布规律还会和槽内导体部分产生的分布规律类似;值得注意的是,横梁母线在出铝端产生了正方向的 $2.3 \times 10^{-3} \text{T}$ 的垂直磁场,烟道端产生同等大小的负方向垂直磁场,可以估计,该磁场能够一定程度的减弱端部回流母线所产生的垂直磁场。

5.2 铝电解槽磁场设计步骤

以上是将铝电解槽分解至各个组成部分,对各部分所产生的磁场特征进行试验分析。反过来思考,我们便可以利用这些特征,以磁场平衡为导向,对各个部分进行有效的调节和组合,便可以很快得到有较好磁场分布的铝电解槽,以下本文便采用该思路进行铝电解槽的磁场设计。

第一步,确定槽结构,对槽内实体及槽壳部分的磁场进行计算。针对文中所选用的槽结构,计算出的槽内实体及槽壳部分磁场分布情况如图 5-2 至 5-4。

第二步,考虑相邻电解槽的影响。由第三章的论述可知,同厂房中相邻电解槽对本槽的磁场有较大的影响,350kA 系列电解槽考虑上下游各三台电解槽时计算结果较为准确。对于本电解槽系列,经过计算比较,在上下游各四台电解槽情况下磁场才可以认为是准确的。所以接下来必须在考虑相邻电解槽情况下进行磁场设计,才能使得得到的磁场是可用的。

第三步,确定立柱母线的配置方案。立柱母线可以调节的主要参数包括立柱根数、各根的位置、各根的电流流量等。

首先,确定立柱的根数。对于超大型电解槽系列,由于电流过于强大,如果立柱根数较少,可能会使得电解槽中电流分布不均,而选用立柱根数太多将使得电解槽结构的复杂性和成本增加。根据经验,初步估计立柱根数在 6 至 8 根之间较为可行,所以需要分别对 6、7、8 立柱母线的情况分别进行计算分析,以下以 7 根立柱为例进行分析说明。

接下来,确定每根立柱母线的位置。如前所述,立柱母线的主要作用是将电流较为均匀的导入电解槽中,这即是说我们可以尽量均匀地排列各根立柱。但对于确定的阳极数目,由于与横梁母线的连接问题,阳极钢爪的位置也可能会影响到立柱母线的位置。根据这两条限制,立柱母线的位置就较容易确定了。对于 7 根立柱的情况,我们可以采用沿 x 轴原点完全对称的分布。

最后,各根立柱母线电流流量的确定。前面研究立柱母线的磁场分布特点时,我们得出阳极立柱母线会在进电侧两个角部产生较大的垂直磁场,而这个磁场需要与其他部分特别是端部回流母线和槽内导体部分在角部产生的磁场相平衡,所以各立柱的电流流量需要结合端部回流母线的电流流量所产生的磁场来调节,这里初步假设各立柱电流平均,都为 8 根阴极钢棒的电流流量,还剩下的 4 根阴极钢棒电

流先不进行分配。

第四步，添加横梁母线。对于已经确定的槽结构和立柱母线方案，横梁母线的结构就已基本确定。添加横梁母线后的磁场如图 5-16 所示。

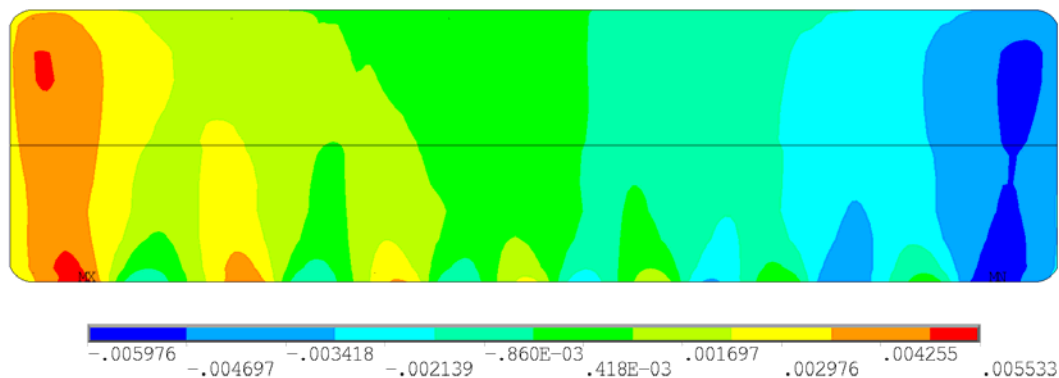


图 5-16 添加横梁母线后的垂直磁场分布图 (T)

第五步，配置端部回流母线及立柱母线电流量的调节。针对上述图 5-17 的垂直磁场，我们可以看出两个端部，特别是进电侧的两个角部形成了较强的垂直磁场，同时根据图 5-7 端部回流母线产生的垂直磁场分布特点，可以得出必须要有较大电流从端部回流来平衡两个端部的强垂直磁场。端部回流母线可调整的参数主要有电流量、高度等。而磁场大小主要由电流量决定，高度起到微调的作用。对于高度，可以先假设一定的标高，即两侧阴极母线的高度。

当两个端部各回流 10 根阴极钢棒流出的电流量时，其垂直磁场的分布图如图 5-17 所示。

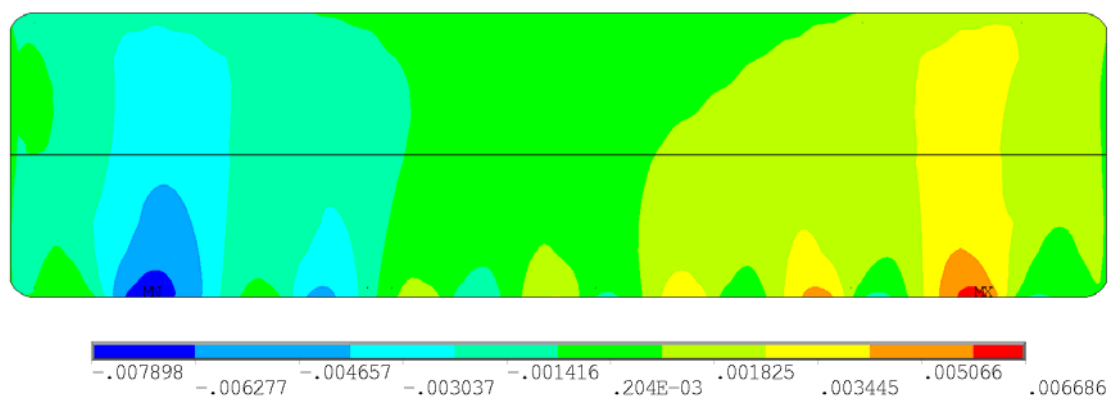


图 5-17 配置端部回流母线后的垂直磁场分布图 (T)

由图 5-18 我们可以看到，原来出现在端部的垂直磁场极值基本被抵消，进电侧一出铝端角部原来两根立柱间的负方向磁场被加强，同样进电侧一烟道端的两根立柱间的正方向也被加强。有两种方法减小这个磁场，第一是增大靠近端部

的两根立柱母线的电流量；第二是通过在该位置附近增加槽底回流母线来补偿。

由于其磁场较大，采用两种方法相结合来平衡，经过调节对比，得到将立柱电流比调节为 10:10:8:7:7:8:10（从出铝端到烟道端，下同）时能够达到较为理想的效果。

第六步，槽底回流母线的调节。如果说端部回流母线主要是用来平衡两个端部的磁场，那么槽底回流母线就是用来平衡槽中某些部位的磁场。其可以调节的参数主要包括根数、每根在 x 轴上的左右位置、每根的电流量等。要平衡如图 x 所示的磁场分布，根据需要平衡的磁场位置及数量，需要的槽底回流母线根数以及其在 x 轴上的左右位置基本就确定了下来。至于电流量需要根据需要的磁场大小来确定。针对例中已得到的磁场分布规律，显然我们需要在图 5-18 中两个最值附近的槽底各排列一根母线对磁场进行补偿，如图 5-19。

第七步，阴极母线的分组。根据确定的立柱进电比、从端部回流母线的大致电流量以及槽底回流母线的电流量根数，阴极母线分组便基本确定了。对于进电侧的阴极母线，从两端需各回流 10 根阴极钢棒的电流量，且该端的两根立柱母线电流量都为 10，可以将其分为两根各 5 阴极钢棒的电流；出铝端槽底需补偿 4 根阴极钢棒的电流，烟道端槽底需补偿 3 根阴极钢棒的电流；进电侧剩下的另外 3 根阴极钢棒从槽底回流至另一侧。所以得到进电端阴极母线分组为 5:5:4:3:3:5:5，根据阳极立柱母线的进电比 10:10:8:7:7:8:10，推出出电端阴极母线分组为 5:5:4:3:4:3:5。调节后，得到的初步母线配置如图 5-18 所示。

第八步，考虑相邻厂房的影响。以上都是在只考虑一列电解槽的情况下进行磁场设计，由第三章的论述可知，相邻厂房的电解槽对本槽的磁场也有一定的影响，一套完整的磁场设计，相邻厂房所产生的磁场是不能忽略的。首先，我们需要得到一个合适的厂房间距，经过计算，当厂房间距为 40 米时，其产生磁场的影响基本可以控制。然后，为了平衡相邻厂房产生磁场所带来的磁场波动，需要进一步调节局部的母线来平衡，这里选择调整端部回流母线高度。考虑相邻厂房和相邻电解槽后如图 5-19 所示。经过计算，得到磁场分布图如图 5-20 至 5-22。

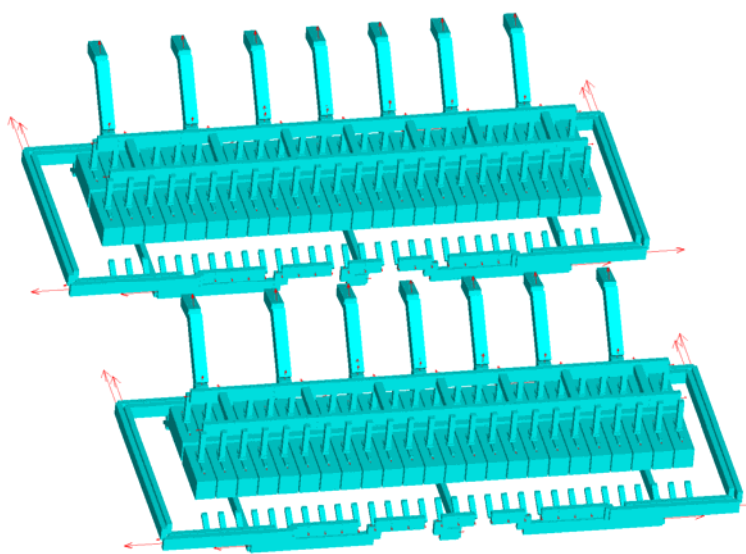


图 5-18 初步的母线配置图

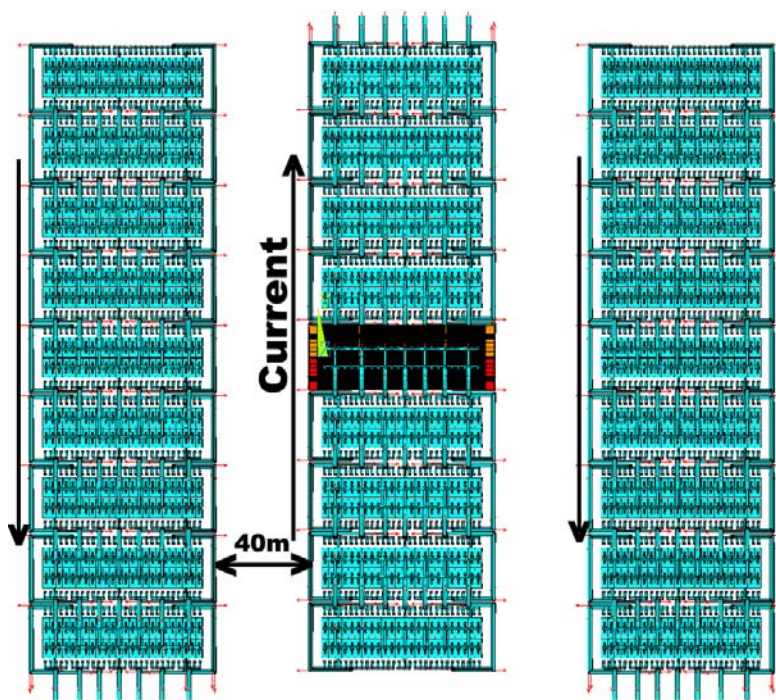


图 5-19 磁场计算整体模型俯视图

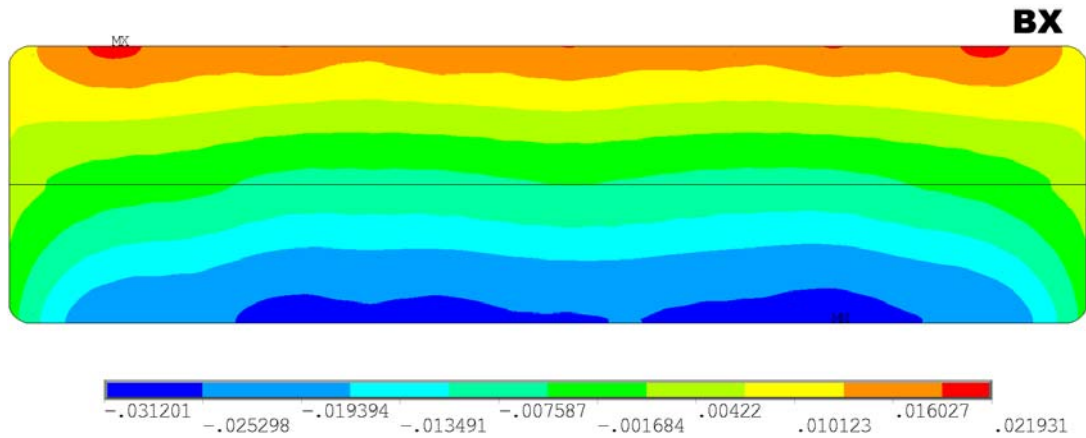


图 5-20 铝液上表面 x 方向水平磁场分布 (T)

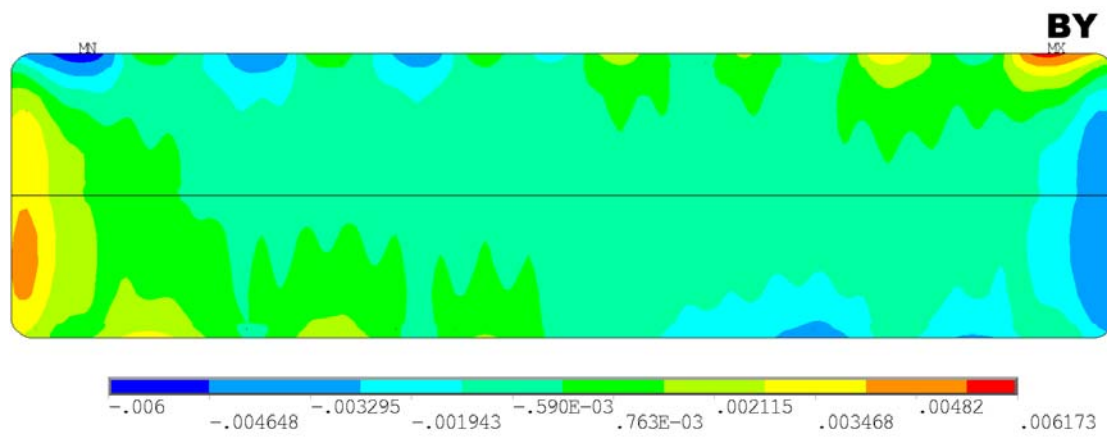


图 5-21 铝液上表面 y 方向水平磁场分布 (T)

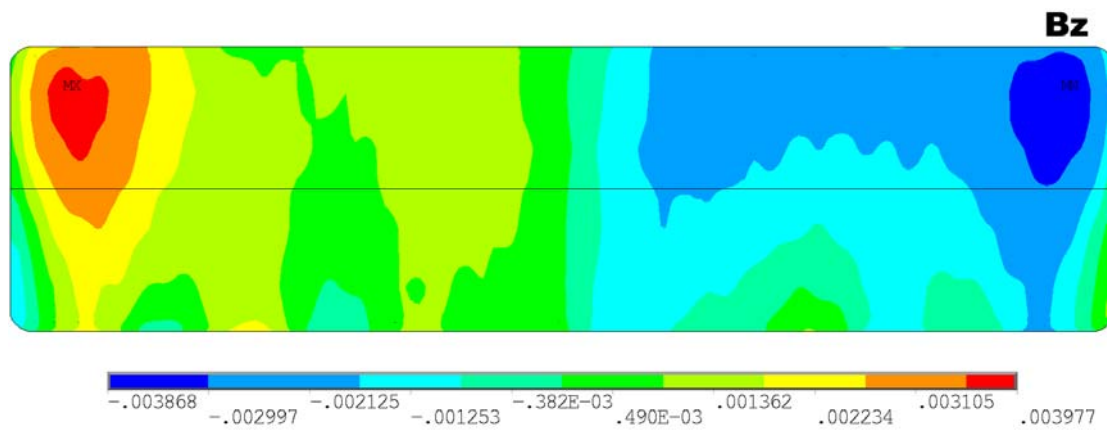


图 5-22 铝液上表面垂直磁场分布 (T)

由图可以看出，在该母线配置下，x 方向水平磁场进电侧比出电侧要强约 1×10^{-2} T，这主要是由立柱母线的强电流产生的；y 方向水平磁场还是基本沿 y 轴呈反对称分布；对于垂直磁场，在进电侧的波动较多、起伏较大，而出电侧基本沿 x 轴正方向呈递减趋势，正方向极值出现在出铝端，约 3.8×10^{-3} T，负方向

极值出现在烟道端，约 3.9×10^{-3} T。

5.3 总结与讨论

经过上述磁场设计过程，可以提出以下几点讨论：

- 1) 经过初步的磁场设计，该结构下的超大型电解槽垂直磁场可以控制在 4×10^{-3} T 之内，且其磁场分布规律与现行大型电解槽的分布规律类似，这些只能初步判断该磁场设计的可行，而具体还需要通过流场的计算结果来判断。
- 2) 对于磁场的设计，主要从垂直磁场的角度考虑进行设计，特别是平衡四个角部垂直磁场的考虑。
- 3) 现有的磁场设计思路，垂直磁场很大程度上取决于槽结构本身所产生的磁场，而对于母线部分的设计基本是采取自我平衡的设计原则。对于大型电解槽，如果槽结构所产生的垂直磁场过大，继续采取这种设计思路将可能得不到理想的磁场分布。

5.4 本章小结

运用第三章所确立的电解槽建模和计算方法，以超大型电解槽为对象，对其各母线各部分所产生的磁场特征进行了分解研究，包括槽内导电部分、槽壳、端部回流母线、槽底回流母线、立柱母线、横梁母线等。综合这些磁场特点，对超大型预焙槽的磁场进行了初步设计，并总结出一套较为有效的磁场设计方法。

第六章 总结与展望

本文对大型铝电解槽的电场和磁场进行了数值仿真研究,论文的主要工作与结论如下:

(1) 运用大型通用有限元软件 ANSYS, 使用其二次开发工具 APDL, 建立了参数化的 350kA 预焙阳极铝电解槽稳态电场和磁场模型, 所建立的程序具有较强的通用性, 稍做修改便可以用于其他电解槽的建模。特别是母线部分的模型建立, 完全实现了参数化、独立化、模块化的程序建模, 彻底解决了顺序化建模的修改复杂以及通用性低等问题。该模型全面考虑了槽内导体、母线系统、铁磁材料、空气漏磁、炉帮、相邻槽和相邻厂房等因素对磁场分布的影响。

(2) 采用国内某厂实际测得的电流分布作为载荷, 运用该模型仿真计算得到磁场结果, 与现场实际测得的磁场分布对比, 无论是分布规律还是各个部分的极值都非常接近, 证明了模型和计算方法的准确性。为了分析相邻槽以及相邻厂房对磁场的影响情况, 经过多种对比计算, 认为对于 350kA 系列电解槽, 上下游各考虑三台电解槽后的其他电解槽影响才可以忽略。研究表明, 相邻厂房的存在与否对铝液中水平磁场影响并不明显, 对垂直磁场存在有一定的影响; 同时, 对于一定的厂房间距, 两侧各一列厂房的情况比只有一侧存在或没有相邻厂房磁场分布要好。在考虑了相邻电解槽和相邻厂房的情况下, 计算出 350kA 预焙铝电解槽系列的磁场设计情况, 其规律大致如下: x 方向的磁感应强度在 -1.89×10^{-2} T 至 1.44×10^{-2} T 之间, 极值出现在大面(A 面和 B 面)边缘; y 方向的磁感应强度在 -2.7×10^{-3} T 至 3.7×10^{-3} T 之间, 极值出现在电解槽两个端部; z 方向磁感应强度在 -2.87×10^{-3} T 至 2.15×10^{-3} T 之间, 极值出现在电解槽的四个角部; 总的磁感应强度在 7.36×10^{-3} T 至 1.89×10^{-2} T 之间。

(3) 对厂房间距对磁场的影响做了深入的研究。研究表明, 当两侧都存在相邻厂房时, 厂房间距的变化使得垂直方向磁场有所变化, 当厂房间距达到 30m 后, 相邻电解槽的作用基本可以忽略。当只有左侧存在厂房时, 左侧厂房给本列厂房产生一个较大的正方向垂直磁场影响, 这会使得的正方向最大值明显增加, 而随着距离的增加, 这个影响减弱, 当间距为 40m 时, 垂直最大值变为负值。同样, 右侧的厂房主要作用是个本列厂房产生一个较大的负方向的磁场。

(4) 运用有限元软件 ANSYS 建立了 350kA 预焙铝电解槽母线电场计算模型, 该模型选取两台相邻槽的铝液之间的部分为研究对象, 假设铝液下表面为等势面, 排除了其他因素的干扰准确反应母线的电阻配置情况, 为铝电解槽母线电阻的设计、测试以及优化提供了一种新的参考。

(5) 提炼出了阴极软母线的基本连接模式, 并推导出一般的电阻优化公式, $R_i = R_{i-1} + (i-1)R'$, 针对三种阴极软母线的连接模式, 推出了相关的优化方法。并以上述模型对方法进行了验证, 证明了方法的有效性。

(6) 提出了现行电解槽所采用的横梁母线结构所带来的两个主要问题: 1. AB 两侧的阳极所分得的电流是不能平衡的, B 侧的电流普遍比 A 侧所分得的电流要小。2. 同一侧的阳极中, 两端的阳极所流入的电流相对中间的明显要大。针对这两个问题, 做了相关的优化, 并给出了相关的优化建议。

(7) 延用 350kA 电解槽的磁场计算方法, 开发了超大型预焙铝电解槽的仿真模型。从磁场设计的角度, 分解研究了铝电解槽各部分所产生的磁场规律以及它们对铝电解槽磁场的作用, 包括槽内导体及槽壳部分、端部回流母线、槽底回流母线、阳极立柱母线和横梁母线等。运用这些磁场分布特点, 对超大型预焙槽进行了初步磁场设计, 得到了一些可参考的磁场方案, 认为垂直磁场可以控制在 $4 \times 10^{-3} \text{T}$ 之内。同时总结出一套较为有效的磁场设计方法, 该方法对电解槽的磁场设计有较好的参考作用。

本文的不足之处与后续工作建议:

(1) 磁场模型虽然考虑因素较为全面, 但还是作了一些相关的假设, 如一定厚度的炉帮、简化的槽壳结构等。另外, 模型中的所有电解槽的电流分布都相同, 而实际上各个槽的电流分布是有差别的。

(2) 对于超大型电解槽只进行了初步的磁场设计, 并未对母线进行进一步精细的调节。包括局部磁场的优化、母线横截面积的调节、母线电场的优化和调节等。如果对该系列电解槽做进一步的磁场开发, 这些工作都是不可回避的。

(3) 本文所得到的铝电解槽磁场结果均是从磁场的角度去判别其优劣, 对进一步将磁场结果用于流场计算的工作进行得较少, 将磁场结果用入进行流场计算, 通过流场结果来分析磁场配置的好坏才是最直接评价。

参考文献

- [1] <http://www.dg668.com/info/19993.html>
- [2] C.Vanvoren, P.Homsi, J.L.Basquin.AP50: The Pechiney 500kA Cell[J].Light Metals, 2001: 221~226
- [3] D.Mota, G.E.De Andrade. Magnetic Compensation Project at ALBRAS Smelter[J].Light Mtals,2001: 413~417
- [4] M.V.Romerio, J.Antille.The Numerical Approach to Analysing Flow Stability in the Aluminum Reduction Cell[J].Aluminum 76.Jabrgang,2000(12): 1031~1037
- [5] 梁学民.铝电解槽物理场数学模型及计算机仿真研究[J].轻金属(增刊),1998: 145~149
- [6] E.Skybakmoen. Chemical Resistance of Sidelineing Materials Based on SiC and Carbon in Cyrolitic Melt[J].Light Metals,1999: 215~222
- [7] 刘业翔. 互联网上最新轻金属动态[J].轻金属,2001(1): 3~5
- [8] 李晋宏. 冷正旭,席灿明. 模型控制和模型专家系统技术在大型预焙铝电解槽中的开发与应用[J].轻金属,2001(3):44~47
- [9] R.Bemd. Thermal Bake-out of Aluminum Reduction Cells.Technology for the Future[J]. Minerals, Metals and Materials Society,2002: 343~346
- [10]G.D.Brown, G.J.Hardie, E.W.Shaw. TiB₂ Coated Aluminum Reduction Cells: Status and Future Direction of Coated in Coated in Comalco.Proc[J].6th Aust.Al Smelting Workshop,1998: 499~508
- [11]T.Palmer.Changing Trends in Aluminum Production[J].Proc6th Aust.Al Smelting Workshop,1998: 1~2
- [12]H.A.Oye,B.J.Weelch.Cathode Performance.The Influence of Design.Operations and Operating Conditions[J].JOM,Fel,1998: 18~23
- [13]周乃君.导流型铝电解槽技术进展与应用基础研究[J].轻金属,2000(9): 29~31
- [14]邱竹贤.中国铝工业应用新型电极材料的研究与展望[J].中国工程科学,2001: 3(5): 50~54
- [15]邱竹贤,何鸣鸿,范立满. 融盐铝电解中若干物理化学问题的研究[J].东北大学学报,2001: 22(2): 119~122
- [16]中国金属工业“十五”规划(经济论坛)[J].有色设备,2001(5): 20~27
- [17]冯乃祥.我国铝电解工业现状和与国外先进技术水平的差距[J].轻金属,2000(7): 29~33
- [18]邱竹贤.世界铝工业与新技术发展趋势[J].有色冶炼,2000: 29(2): 1~6

- [19] 维丘科夫等著,邱竹贤等译.铝镁冶金学[M].沈阳:辽宁出版社,1990.55~60
- [20] J.Imery Buiza. Electromagnetic Optimization of the V-350 Cell[J]. Light Metals, 1989: 211~212
- [21] Shi Huan Vao. Selection of Bus Bar Optimum Section in High Amperage Reduction Cells[J]. Light Metals, 1990: 453~455
- [22] A.Moraru. On the Current in the Aluminum Reduction Cell[J]. Rev.Roum.Sci.Techn.Bucarest, 1998: 473~484
- [23] 曹国法. 阴极电压降的三维数值计算[J]. 铝镁通讯, 1991(3): 10~12
- [24] 曾水平. 铝电解槽内电磁场计算及电流效率连续检测的研究[D]. 长沙: 中南工业大学学报, 1996(4): 22~25
- [25] 曾水平. 铝电解槽三维电流分布的数值模拟[J]. 有色金属, 1996(3): 88~93
- [26] 杜水荣, 毛宗源. 用 VC++ 实现铝电解槽电流分布的计算和仿真[J]. 华南理工大学学报, 2001 (9): 65~69
- [27] W.Haupin. Calculation of the Crust Profile in Aluminum Reduction Cells by thermal Computer Modeling[J]. The 9th International Course Process Metallurgy of Aluminum. Ronheim, 1990: 23~26
- [28] 有田池内. 铝电解槽中电解质与金属对流图像及其界面形状的数值计算[J]. 轻金属 (日), 1983(11): 66~58
- [29] E.D.Tarapore. The Effect of Operating Variables on Flow in Aluminum Reduction Cells[J]. Light Metals, 1982: 34(2): 541
- [30] M.C.Richard. A New Approach for Comparing the Impact on Magnetic Fields From Pot Design Alterations[J]. Light metals, 1976(1): 209
- [31] 陈世玉. 采用相对电参量计算铝电解槽的电流场, 铝电解槽“三场”研究论文集, 1986: 55~58
- [32] 贺志辉. 电解槽槽膛内形对电流分布的影响[J]. 轻金属, 1987(6): 28~30
- [33] 陶先绪, 陈世玉. 应用耦合法计算大型铝电解槽的电流场[J]. 华中工学院学报, 1987(6): 93~100
- [34] 李德详, 郭天立. 贵州铝厂 160kA 铝电解槽电场计算[J]. 轻金属, 1991(3): 31~35
- [35] A.Furman. A Systematic Approach to Cathodic Current[J]. Light Metals, 1978: 87~106
- [36] 陆家榆. 利用边界元法计算大型铝电解槽的电流场[J]. 铝电解槽“三场”研究论文集, 1986(9): 73~81
- [37] 孙敏. 铝电解槽磁场计算的数学模型及其误差[J]. 铝电解槽“三场”研究论文

- 集,1986(9): 65~70
- [38]J.W.Evans. A Mathematical Model for Prediction of Currents、Magnetic Fields、Melt Velocities、Melt Topography and Current Efficiency in Hall-Herroult Cells[J].Metall Trans.B,1981: 353~361
- [39]K.J.Frasel. Some Application of Mathematical Modeling of Electric Current Distributions In Hall-Herroult Cell[J].Light Metals,1989: 218~226
- [40]J.Zoric, I.Rousar, Z.Kuang. Current Distribution in Aluminum Electrolysis Cells with Soderberg Anodes.Part II: Mathematical Modeling[J].Journal of Applied Electrochemistry,1996: 795~802
- [41]J.Zoric, I.Rousar, Z.Kuang. Mathematical Modeling of Industrial Aluminum Cells with Prebaked Anodes.Part I: Current Distribution and Anode Shape[J].Journal of Applied Electrochemistry,1997: 916~927
- [42]P.Z.Donald.Current Distribution Modeling for Novel Alumina electrolysis[J].Light Metals(Warrendale,PA,USA,TMS) ,1991: 363~374
- [43]P.Z.Donald, L.Rohbert, Kozarek. Hall-Herroult cell Magnetic Measurements and Comparison with Calculations[J].Light Metals(Warrendale,PA,USA,TMS) ,1991: 381~391
- [44]W.E.Wahnsiedley, D.Vogelsang. Effect of Steel Parts on Magnetic Fields in Aluminum Reduction Cell[J].Light Metal(Warrendale,PA,USA,TMS) ,1991: 393~398
- [45]M.Dupuis. Computation of Accurate Horizontal Current Density on Metal Pad Using a Full Quarter Cell Thermo-electric Model[J].CIM Light Metals,2001: 3~11
- [46]A.Moraru, Lleana Panaitescu, A.Panaitescu. On the Current Field in the Aluminum Reduction Cell[J].Techn-Electrotechn et Energ,1999: 281~297
- [47]A.Moraru,Lleana Panaitescu,A.Panaitescu.An pproach to the Electro-kinetic Problem in Aluminum Cell[J].8th International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering.Austria,1998: 512~518
- [48]K.Grjotheim,B.Kvands. Introduction to Aluminum Electrolysis. Dusseldorf[J].Aluminium Veriag,1993: 100~102
- [49]J. I. Buiza. "Electromagnetic Optimization of the V-350 Cell", Light Metals, (1989): 211~214
- [50]张榴晨,徐松.有限元法在电磁计算中的应用[M].北京: 中国铁道出版社,1996
- [51]N.Urata, Y.Arita, H.Ikeuchi. Magnetic Field and Flow Pattern of Liquid

- Aluminum[J].Light Metals,1975(1): 233~250
- [52]G.A.Solinas. Advanced Mathematical Model for the Calculation of Magnetic Fields in Aluminium Reduction cells[J],Light Metals.1978(1): 15~41
- [53]武丽阳. 电解槽磁场计算方法及计算程序[J],轻金属.1984(4): 23~30
- [54]干益人,宋桓温. 对《电解槽磁场计算方法及计算程序》一文若干问题的商榷[J].轻金属,1985(1): 48~52
- [55]宋桓温,干益人.铝电解槽磁场的计算方法[J].有色金属,1985: 37(3): 63~69
- [56]陈世玉.提高铝电解槽磁场计算准确度的讨论[J].铝电解槽“三场”研究论文集,1986
- [57]邱捷.用局部坐标法计算大电流母线产生的三维磁场[J].有色金属,1988,40(1): 48~52
- [58]V.F.Almukhametov. Magneto-hydrodynamic Phenomena in Production of Aluminum by Eletrolysis[J].Light Metals,1990: 249~256
- [59]E.D.Tarapore. Magnetic Fields in Aluminum Reduction cells and Their Influence on Metal Pad Circulation[J].Light Metals,1979(1): 541~550
- [60]A.Furman. Mathematical Modeling Applied to Aluminum Reduction Cells[J].Nonferrous Processes,1979(2): 215~234
- [61]J.W.Evans, Y.Zundelevich, D.Sharma. A Mathematical Model for Prediction of Currents Magnetic Fields、Melt Velocities、Melt Topography and Current Efficiency in Hall-Herroult cells[J].Metallurgical Transactions B,1981,12B: 253~360
- [62]Kolenda Zygmunt et al.Electromagnetic Field Modeling of the Hall-Herroult Cell on Personal Computer[J].Modeling and Simulation,Proceedings of the Annual Pittsburgh Conference,1990: 1455~1460
- [63]李国华,李德详,邱竹贤.铝电解槽中三维分布电流磁场的计算[J].有色金属(冶炼部分),1994(2): 16~20
- [64]许孙曲,陈文纯,陈芳华.30kA 铝电解槽的磁场计算[J].有色金属(冶炼部分),1998(5): 31~34
- [65]陈文纯,许孙曲,陈芳华.大型铝电解槽磁力计算及分析[J].集美大学学报,1999: 4(2): 22~26
- [66]宋桓温,张祖明.铁磁物质对铝电解槽磁场分布影响的模型[J].铝镁通讯,1990(2): 1~13
- [67]R.F.Robl. Influence by Shell Steel on Magnetic Fields Within Hall-Herroult Cell[J].Light Metals,1978(1): 1~14

- [68] G.Degan. Use of Iron Shields for correcting Local Disturbances of Magnetic Fields in the Electrolytic Pots[J].Light Metals,1986 : 551~554
- [69] I.Sief, A.Meregalli. Evaluation of the Effect of Steel Parts on Magnetic Induction in Aluminum Reduction Cells[J].Light Metals,1977(1): 35~47
- [70] E.D.Tarapore. Calculation of the Magnetic Field Distribution in an Aluminium Electryzer[J].Light Metals,1981: 341~351
- [71] Alexander Kalimov.Application of Integral Methods for Computation of 3D Magnetic Fields in Aluminum Electrolyzers[J].The 11th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields.Janeiro,1997: 85~86
- [72] 冯之鑫. 三维非线性静电场及静磁场问题的积分方程法[J].电工技术学报,1981(1): 101~110
- [73] D.P.Zeigler, R.L.Kozarek. Hall-Herroult Cell magnetic Measurements and Comparison with Calculations[J].TMS Light Metals Committee,New Orleans, Louisiana,1991: 381~391
- [74] S.K.Banerjee, J.W.Evans. Further Results from a Physical Model of a Hall-Herroult cell[J]. Light Mertals,1987: 321~326
- [75] 邱捷,钱秀英.铝电解槽非线性磁场的计算[J].有色金属,1992 (3): 55~58
- [76] M.Segatz, D.Vogelsang. Modeling of Transient Magneto-hydrodynamic Phenomena in Hall-Herroult Cells[J].Light Metals, 1993: 361~368
- [77] D.Vogelsang, M.Segayz. Simulation Tools for the Development of High-Amperage Reduction Cells[J].Light Metals,1991; 375
- [78] M.Segatz, D.Vogelsang. Effect of Steel Parts on Magnetic Fields in Aluminum Reduction Cells[J].Light Metals,1991: 393~398
- [79] M.Segatz,D.Vogelsang, C.Droste. Modeling of Transient Magneto-Hydrodynamic Phenomena in Hall-Herroult Cells[J].Light Metals,1993: 361
- [80] M.Segatz,C.Droste.Analysis of Magneto-hydrodynamic Instabilities in Aluminum Reduction Cells[J].Light Metal,1994: 313
- [81] M.Chiampi,M.Repettol.Magnetic Modeling and Magneto-hydro-dynamic Simulations of an Aluminum Production Electrolytic Cell[J].The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering,1999: 18(3); 528~538
- [82] A.Kalimov, V.Krukovski, L.Minevich. Application of the Spatial Integral Equation Method for Analysis Three Dimensional Magnetic Fields of Pots[J].The 14th International Conference on Magneto-Hydrodynamics,Riga,Latvia,1996:

124~130

- [83] O. Bottauscio, M. Chiampi, M. Repetto. 3D BEM Formulation for Shielding Problems[J]. Process of 7th IGYE Symposium, Graz, Austria, 1996: 482~487
- [84] 张丽燕, 胡青春. 计算铝电解槽内磁场分布的方法研究[J]. 青岛大学学报. 1996: 9(4): 82~88
- [85] Liang xue-min. Optimization of cross section of bus bar of aluminum reduction cells [J]. Nonferrous Metals (Metallurgy), 1995: 54(2): 23~27
- [86] Li Guohua, Li Dexing, Li Dianfeng. Further Studies on Calculation Method of Magnetic Field in Aluminum Reduction cell[J]. Light Metals, 1996; 389~396
- [87] Li Guohua, Li Dexiang. New Method for calculation of Magnetic Field in Aluminum Reduction cell[J]. Light Metals, 1995: 301~303
- [88] 曾水平. 铝电解槽内磁场的三维数值分析[J]. 中南工业大学学报. 1995: 26(5): 618~622
- [89] 刘业翔. 80kA 上插式自焙铝电解槽熔体中电磁力场的计算与分析[J]. 中国有色金属学报. 1996: 6(1): 27~31
- [90] 曾水平. 铝电解槽熔体中电磁力的计算机仿真[J]. 北京科技大学学报 (冶金反应工程专辑) . 1995(12): 65~70
- [91] S. Thoreif. Computer Model for Magnetic Fields in Electrolytic Cells Including the Effect of Steel Parts[J]. Metallurgical Transactions, 1974(5): 145~215
- [92] 蔡晖. 铝电解槽的磁场计算及研究[D]. 长沙: 中南工业大学, 1992
- [93] 孙阳, 冯乃祥, 崔建忠. 186kA 大型预焙阳极铝电解槽磁场的三维数值计算[J]. 金属学报, 2001: 37(3): 332~336
- [94] 孙阳, 冯乃祥, 崔建忠. 电流分布对 160kA 预焙阳极铝电解槽磁场影响的数值计算[J]. 轻金属, 2001(2): 30~33
- [95] 冯乃祥, 孙阳. 贵州铝厂 160kA 大型预焙阳极铝电解槽磁场测量与计算[J]. 轻金属, 2000(11): 43~47
- [96] Sun Yang. Magnetic Field Measurement and Calculation for 160kA Prebake Cells in the GuiXhou Aluminum Smelter[J]. Light Metals, 2001(1): 433~437
- [97] Richard Boivin, Sylvie Martel. Effect of an Instability of the metal surface on the magnetic field inside a cell[J]. Light Metals, 1990: 233~241
- [98] M. Dupuis. Using ANSYS to Model Aluminum Reduction Cell Since 1984 and Beyond[A]. Light Metals, 2000: 307~313
- [99] D.S. Severo, A.F. Schneider, E.C. V. Pinto, et al. Modeling Magnetohydrodynamics of Aluminum Electrolysis Cells with ANSYS and

- CFX[A]. *Light Metals*, 2005: 360~371
- [100] 姜昌伟,周乃君,梅焱,等. 154kA 预焙铝电解槽三维磁场的双标量磁位法计算. *有色金属*, 2003: 8(3): 33~35
- [101] 闫照文,苏东林,李朗如,等. 基于 ANSYS 分析的铝电解槽电磁场计算方法 [J]. *电机与控制学报*, 2005: 9(4): 326~329
- [102] D.Kacprzak, M. Gustafsson, Liren Li and M.Tayle, Numerical Analysis of the Collector Bar Current Distribution of a Reduction Cell. *Light Metals*, 2006: 367-369

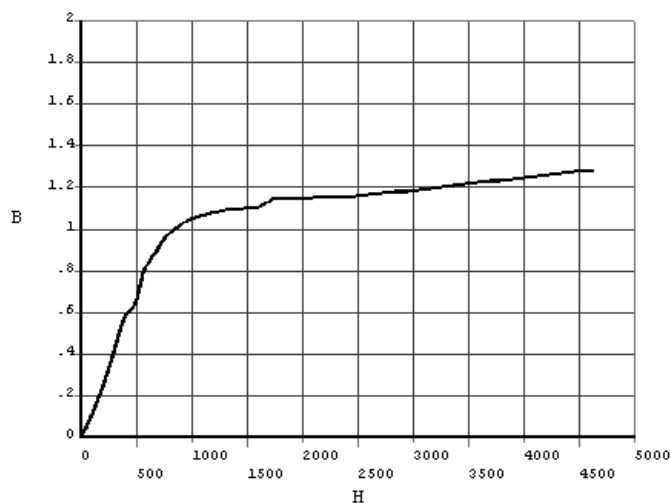
附录

附表1 电导率参数列表^[102]

材料	电导率 (S/m)	材料	电导率 (S/m)
阳极碳块	1.43×10^4	铝液	3.50×10^6
阳极钢爪	4.12×10^6	阴极碳块	2.80×10^4
阳极铝导杆	2.60×10^7	阴极钢棒	9.00×10^5
电解质	1.90×10^2	母线	2.60×10^7

附表2 铁磁物质导磁率

温度	100	200	300	400	500	560	600	640	680
导磁率	0.11	0.25	0.418	0.58	0.658	0.79	0.83	0.865	0.895
温度	720	760	800	860	900	1000	1100	1200	1400
导磁率	0.93	0.96	0.98	1.005	1.02	1.05	1.064	1.08	1.10
温度	99*1600	1800	2200	2400	2800	3200	4200		
导磁率	1.104	1.16	1.14	1.152	1.176	1.200	1.260		



附图1 铁磁材料的BH曲线图

致 谢

本文是在导师李劫教授的悉心指导下完成的，在整个论文的选题、研究与撰写期间，始终得到了导师悉心的指导、热情鼓励和支持。导师严谨的治学作风、一丝不苟的工作态度，使学生受益非浅；生活上导师无微不至的关怀使学生如沐春风。导师的高尚品质和人格魅力将使学生终身受益。在此，学生谨向尊敬的导师致以崇高的敬意和衷心的感谢！

我要特别感谢赖延清老师。感谢他对课题研究的指导和建议，学习和生活上的帮助和关怀。

感谢刘伟、王志刚、伍玉云等师兄弟。他们在课题研究的各方面上给予了大量的帮助。他们学习刻苦、工作认真负责的态度，营造了一个良好的学术氛围，使我受益匪浅。另外，特别感谢长沙理工大学的姜昌伟老师给我的指导与建议。

在硕士学位的学习和研究工作中，得到了中南大学冶金科学与工程学院的轻金属及工业电化学研究所的领导、老师和同学们的关心和帮助。特别是苏玉兰老师和刘宏专老师等给了我多方面的帮助，在此一并表示感谢。

向多年来含辛茹苦抚养、培养我的父母致以深情的谢意！

向百忙之中抽出时间审稿及参加本论文答辩的老师致以深深的谢意。

最后，感谢所有以各种方式关心与帮助我的人。

刘杰

二零零七年四月

攻读硕士学位期间发表的论文及参与的科研项目

发表的论文

1. 350kA 预焙阳极铝电解槽磁场分布研究. 矿冶工程. 2007 年 12 月第六期 (第一作者) (已接收)
2. Resistance Optimization of Flexes in Aluminum Reduction Cells. 中南大学学报 (English letters) (第二作者) (待发表)

参与的科研项目

1. 国家自然科学基金课题“铝电解槽内衬应力的形成、演变及其与槽破损关系的研究”编号 (50374081)
2. 校企合作项目“600kA 预焙铝电解槽多物理场耦合仿真及阴极内衬热应力的优化设计”