

铝电解槽

非稳态非均一信息模型及节能技术

李贺松 编著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

铝电解槽非稳态非均一 信息模型及节能技术

李贺松 编著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2008

内 容 提 要

本书在简单介绍铝电解槽非稳态非均一模型的概念和分类的基础上,重点介绍了这些模型的建立及其相关系统的开发,包括:铝电解槽槽电压与阳极电流波动模型及其动态槽况诊断系统、铝电解槽铝液界面波动模型及数值模拟、铝电解槽实时非均一极距模型及极距和铝液波动在线监测系统、铝电解槽信息的多数据库集成技术、铝电解槽操作优化集成式智能型决策模型及系统、铝电解槽关键极节能技术。

本书可供冶金工程、热能工程、控制工程的研究生和科技人员参考,也可供铝电解现场操作人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

铝电解槽非稳态非均一信息模型及节能技术/李贺松
编著. —北京:冶金工业出版社, 2008. 10

ISBN 978-7-5024-4652-9

I. 铝… II. 李… III. 氧化铝电解—电解槽模型
IV. TF821. 327

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008) 第 140245 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 张熙莹 美术编辑 张媛媛 版式设计 葛新霞

责任校对 王永欣 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-4652-9

北京百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2008 年 10 月第 1 版, 2008 年 10 月第 1 次印刷

850mm × 1168mm 1/32; 8. 625 印张; 229 千字; 260 页; 1-1500 册

26. 00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010) 65289081

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

铝具有特殊的化学、物理特性，是当今最常用的工业金属之一，是国民经济发展的重要基础原材料。2007 年我国电解铝年产量为 1240 万 t，占全球铝产量的 32%，行业用电量占全国工业总用电量的 7% 左右，可见降低铝电解的能耗对我国单位 GDP 能耗的降低有着举足轻重的作用。铝电解槽的电流效率和槽电压是决定直流电耗的重要指标，因为其分别受铝电解槽的稳定性和极距的制约，所以提高铝电解槽的稳定性并同时降低极距是降低铝电解槽能耗的关键。传统节能技术中以降低铝电解槽外围材料的电阻率来实现节能，而对通过增加极距的均一性来降低极距同时提高电流效率实现节能的研究较少。我国铝电解槽的极距所消耗的能耗占铝电解槽总能耗的 40% 左右，极距平均值大致为 4.5 ~ 5.5 cm，而国外极距的最低值为 4 cm 以下，降低 1 cm 极距就相当于降低铝电解槽总能耗的 8% 左右。因此，研究通过增加极距的均一性来降低极距并提高电流效率的关键极节能新方法也是降低我国铝电解能耗进而降低我国单位 GDP 能耗的一个极有潜力且能较快获取效益的重要课题。

铝电解槽的槽电压信号中隐藏了大量的槽况信息，所以建立非稳态槽电压波动模型可以找出提高铝电解槽稳定性的途径，进而为降低极距来实现节能提供了信息支持。另外要想通过研究极距来实现节能，必须要建立极距的可视化，但

由于极距区的电解质具有高温、高腐蚀的特点，所以很难实现极距的直接测量，有必要建立非均一极距软测量模型。因此，铝电解槽非稳态铝液波动模型是提高铝电解槽稳定性的理论基础，铝电解槽非均一极距模型是降低极距而保持稳定性的理论基础，对铝电解槽非稳态非均一模型的研究是从深层次上挖掘节能潜力、降低铝电解能耗的一个重要理论和技术课题。

近期国际和国内对铝电解槽非稳态模型研究较多，但对铝电解槽非均一模型研究较少。本书在综合国内外同行相关研究成果的基础上，结合作者在博士期间承担的一些课题的科研成果，主要介绍了铝电解槽非稳态非均一模型的概念、分类、建立方法和步骤，对相关系统的开发和应用进行了详细的描述，并对关键极节能方法及其配套的新工艺制度进行了介绍。

本书共分 12 章，第 1 章主要介绍铝电解槽非稳态非均一模型的概念和分类。第 2 章主要针对铝电解槽稳态均一模型的发展和不足进行讨论，进而为第 3 章做好铺垫。第 3 章和第 4 章主要介绍了铝电解槽非稳态非均一模型的发展过程和开发方法，目的是使读者对本书所研究的对象和所使用的新技术、新方法有所了解。第 5 章和第 6 章主要介绍了铝电解槽非稳态模型的两个方面：铝电解槽电压波动信息元分析模型和铝电解槽铝液界面波动模型，并对动态槽况诊断系统和铝液界面波动的数值模拟进行了阐述。第 7 章和第 8 章主要介绍了铝电解槽非均一模型及其系统的建立，其中列出了在中铝广西分公司 320kA 系列槽上的试验数据。第 9 章和第 10

章主要介绍了铝电解槽操作优化决策支持系统的开发与应用,并对多数据库进行了介绍。第 11 章主要介绍了铝电解槽关键节能技术的概念和实施方法,并对与之配套的新工艺制度进行了阐述。第 12 章主要介绍了铝电解槽非稳态非均一模型的研究成果及今后发展方向。

在此,真诚感谢导师梅炽教授和副导师殷恩生高工在本书的资料收集、编写直到定稿的过程中给予的精心指导,感谢中铝公司广西分公司电解铝厂唐骞厂长、黄涌波副厂长,三车间、计算机中心及技术处在试验数据的获取中给予的支持和帮助。感谢蔡祺风教授、周乃君教授和张家奇博士在项目的完成过程中所付出的努力,感谢姜昌伟博士为第 2 章提供的一部分数据。同时真诚感谢为本书出版付出过心血和劳动的所有人员。

由于作者水平所限,书中不足之处恳请读者批评指正。

作 者
2008 年 5 月

目 录

1 铝电解槽模型概述	1
1.1 铝电解槽模型的分类	1
1.2 铝电解槽稳态均一模型	1
1.3 铝电解槽非稳态非均一模型	2
1.4 发展铝电解槽非稳态非均一模型的意义	4
1.5 本书的主要内容	5
参考文献	7
2 铝电解槽稳态均一模型	8
2.1 概述	8
2.2 建立铝电解槽稳态和均一模型的意义	9
2.3 铝电解槽内物理场耦合关系分析	9
2.4 解析模型与计算方法	11
2.4.1 电流场解析	11
2.4.2 磁场解析	14
2.4.3 热场解析	21
2.4.4 流场解析	22
2.5 耦合解析方法	25
2.6 仿真实例	27
2.6.1 主要工艺参数	27
2.6.2 仿真结果及其分析	27
2.7 本章小结	42
参考文献	43

3 铝电解槽非稳态非均一模型的发展过程	51
3.1 铝电解槽模型的发展过程	51
3.1.1 铝电解槽热电及热应力模型的研究进展	51
3.1.2 铝电解槽电磁流动模型的研究进展	52
3.1.3 铝电解槽热、电、磁、流动耦合模型的研究进展	53
3.2 铝电解槽模型存在的问题	55
3.3 铝电解槽非稳态和非均一模型的研究进展	56
3.3.1 铝电解槽非稳态非均一模型的分类	56
3.3.2 槽电压波动信息元分析模型	56
3.3.3 铝液波动模型	58
3.3.4 实时阳极电流波动及其非均一分布模型	63
3.3.5 实时非均一极距模型	64
3.3.6 操作优化集成式智能型决策模型	64
3.4 铝电解槽节能技术的研究进展	65
参考文献	67
4 开发铝电解槽非稳态非均一模型的方法	75
4.1 开发铝电解槽非稳态非均一模型的传统方法	75
4.1.1 开发铝电解槽模型的仿真方法	75
4.1.2 开发铝电解槽模型的混合编程方法	83
4.1.3 开发铝电解槽非稳态非均一控制模型的方法	89
4.1.4 开发铝电解槽非稳态非均一在线检测模型的方法	91
4.1.5 开发铝电解槽非稳态非均一故障诊断模型的方法	93
4.2 开发铝电解槽非稳态非均一模型的新方法	94
4.2.1 小波包和神经网络诊断方法	94
4.2.2 模糊和神经网络诊断方法	99

4.2.3	小波包和 ANFIS 诊断方法	104
4.2.4	基于模糊 C 和多神经网络的软测量方法	106
4.2.5	多相流仿真和界面跟踪方法	107
	参考文献	108
5	铝电解槽电压波动信息元分析模型与动态槽况 诊断系统	110
5.1	概述	110
5.2	基于小波包和 ANFIS 的电压波动信息元分析模型	111
5.2.1	基于小波包和 ANFIS 的电压波动信息元分析 模型的结构	111
5.2.2	小波包分解	112
5.2.3	自适应神经模糊推理系统 (ANFIS)	112
5.3	铝电解槽电压波动信号的特征提取	116
5.3.1	电压波动信号的小波包分解	118
5.3.2	对小波包分解系数重构	118
5.3.3	求小波包能量谱	120
5.3.4	构造能量特征向量	121
5.4	动态槽况实时诊断系统的开发	121
5.4.1	系统总体结构及特点	121
5.4.2	系统功能模块	123
5.4.3	Delphi 自定义组件的开发	123
5.5	应用实例	125
5.5.1	离线诊断实例及模型验证	125
5.5.2	在线运行实例	127
5.6	本章小结	129
	参考文献	130
6	铝电解槽铝液界面波动模型及数值模拟	132
6.1	概述	132

6.2	铝电解槽内铝液界面波动机理分析	133
6.2.1	重力波理论	133
6.2.2	Kelvin-Helmholtz (KH) 不稳定性理论	134
6.2.3	Magnetic-hydro-dynamic(MHD)不稳定性理论 ...	136
6.2.4	气泡驱动理论	137
6.3	铝液界面波动物理模型	139
6.4	铝电解槽两流体界面波动控制方程	140
6.4.1	基本控制方程	140
6.4.2	无量纲准数和方程	142
6.4.3	边界条件	143
6.5	数值求解	143
6.5.1	跟踪铝液界面的 Level Set 技术	143
6.5.2	有限体积分法	145
6.6	结果分析和验证	147
6.6.1	磁场计算结果分析	147
6.6.2	铝液界面波动计算结果分析与验证	149
6.7	本章小结	153
	参考文献	154
7	铝电解槽实时非均一极距软测量模型的建立	156
7.1	概述	156
7.2	极距软测量模型辅助变量的确定	157
7.2.1	实验步骤	157
7.2.2	阳极等距压降和极距之间的关系	158
7.2.3	阳极电流和阳极底掌气泡区压降之间的关系 ...	159
7.2.4	极距软测量模型辅助变量的确定	160
7.3	导杆温度和阳极电阻的实验研究	161
7.3.1	导杆温度的实验研究	161
7.3.2	阳极电阻的实验研究	163
7.4	四阳极热电场的数值模拟	164

7.4.1	四阳极热电场的数学模型	164
7.4.2	边界条件	165
7.4.3	计算结果分析	165
7.5	阳极底掌面电流分布的数值模拟	168
7.6	基于模糊 C 均值聚类 (FCM) 和多神经网络的 铝电解槽非均一动态极距模型	170
7.6.1	模糊 C 均值聚类算法	172
7.6.2	基于 FCM 和多神经网络的非均一极距软测量 模型的建立与验证	173
7.7	误差分析	175
7.8	本章小结	176
	参考文献	177
8	铝电解槽极距和铝液波动在线监测系统的开发与应用 ...	179
8.1	概述	179
8.2	系统硬件组成与开发	179
8.2.1	采集卡的工作原理	180
8.2.2	采集卡的性能和技术指标	182
8.2.3	采集卡接线方式	182
8.3	系统软件组成与开发	183
8.3.1	软件功能组成	183
8.3.2	采集程序开发步骤	184
8.4	系统应用与结果分析	186
8.4.1	单振源波动	188
8.4.2	多因素耦合波动	191
8.4.3	外界扰动	194
8.5	本章小结	203
9	铝电解槽操作优化 IIDSS 的开发与应用	206
9.1	概述	206

9.2	铝电解槽操作优化 IIDSS 多库系统总体方案	207
9.2.1	系统结构	207
9.2.2	系统功能模块	209
9.2.3	系统开发环境和系统界面	210
9.3	基于神经网络的铝电解槽模糊专家系统的研究	210
9.3.1	系统结构	211
9.3.2	知识的获取	213
9.3.3	知识表示	215
9.3.4	推理系统	215
9.3.5	系统的输入与输出	216
9.4	铝电解槽操作优化 IIDSS 面向对象的知识表示方法	218
9.4.1	铝电解槽 IIDSS 的异构知识的分类	218
9.4.2	面向对象的知识表示	219
9.5	铝电解槽操作优化 IIDSS 面向对象的知识库 模型设计	223
9.5.1	面向对象知识库的结构	223
9.5.2	基于多层链表的知识库内存结构模型	224
9.5.3	铝电解槽 IIDSS 知识库知识的推理机制	225
9.6	铝电解槽操作优化 IIDSS 模型库系统的设计	225
9.6.1	面向对象模型库的模型对象表示方法	225
9.6.2	基于目标驱动的模式库的集成技术	226
9.7	工业应用实例及效果	227
9.8	本章小结	229
	参考文献	230
10	铝电解槽的多数据库研究	233
10.1	概述	233
10.2	铝电解槽多数据库系统	234
10.3	铝电解槽多数据库的模式集成	236
10.3.1	集成模式的体系结构	236

10.3.2	集成模式的实现·····	237
10.4	铝电解槽多数据库的事务处理·····	238
10.4.1	事务模型·····	238
10.4.2	事务模型的设计和实现·····	239
10.5	铝电解槽多数据库的查询处理和优化·····	239
10.5.1	多数据库全局查询语言·····	239
10.5.2	多数据库查询分解·····	240
10.5.3	多数据库查询处理优化·····	240
10.6	本章小结·····	241
	参考文献·····	242
11	铝电解槽关键极节能技术研究·····	244
11.1	概述·····	244
11.2	铝电解槽节能技术概述·····	245
11.3	铝电解槽关键极节能技术的定义和特征·····	246
11.3.1	极距均一性的必要性和条件·····	246
11.3.2	关键极节能技术的定义和特征·····	249
11.4	铝电解槽关键极节能技术的实现·····	250
11.4.1	基于整体降低阳极母线的技术研究·····	250
11.4.2	关键极节能技术的实施·····	252
11.5	铝电解槽关键极节能技术的应用·····	253
11.6	本章小结·····	254
	参考文献·····	254
12	铝电解槽非稳态非均一模型的研究成果及今后 发展方向·····	256
12.1	铝电解槽非稳态非均一模型的研究成果·····	256
12.2	今后的发展方向·····	259
	参考文献·····	260

1 铝电解槽模型概述

1.1 铝电解槽模型分类

我国铝电解技术水平的提高有两个重要的原因：铝电解槽数学模型的建立和操作制度的完善。计算机技术和数值仿真技术为铝电解槽物理场的设计提供了有力的工具，首先初步确定铝电解槽的母线结构和内衬结构，然后建立数学模型，对铝电解槽的电场、磁场、温度场、流场和热应力场进行求解^[1]，根据求解的结果重新修改铝电解槽的母线结构和内衬结构，直到得到最优结构。这些数学模型的基本假设都是稳定的。稳态的数学模型对铝电解槽的设计优化起了很大的作用，但在实际生产过程中，各种生产参数都是不稳定的，如要更大程度地提高铝电解槽的稳定性和挖掘其节能的潜力，就必须建立非稳态模型^[2]。非稳态模型既包括电场、磁场、流场和热应力场的非稳定求解，又包括对某个生产参数的动态信息进行数字处理，比如电压波动信息元分析模型^[3]、阳极电流波动的快速傅里叶分析模型等。

铝电解槽模型的类型如图 1-1 所示。

1.2 铝电解槽稳态均一模型

传统的铝电解槽模型基本上都是基于稳态和均一的，即铝电解槽的电场、磁场、流场、热场和应力场都是稳态的，电场中的电流分布也看成是固定不变的。而在生产过程中电流是变化的，这样就会影响电场、磁场、热场和流场的分布；铝液界面也是波动的，在建立模型时没有考虑铝液界面的波动，只考虑了流场在水平方向的流动；还有极距是按一个平均值来处理的，而实际上每个阳极下的极距都是不一样的，所以均一模型是对实际生产情况的一种假设。

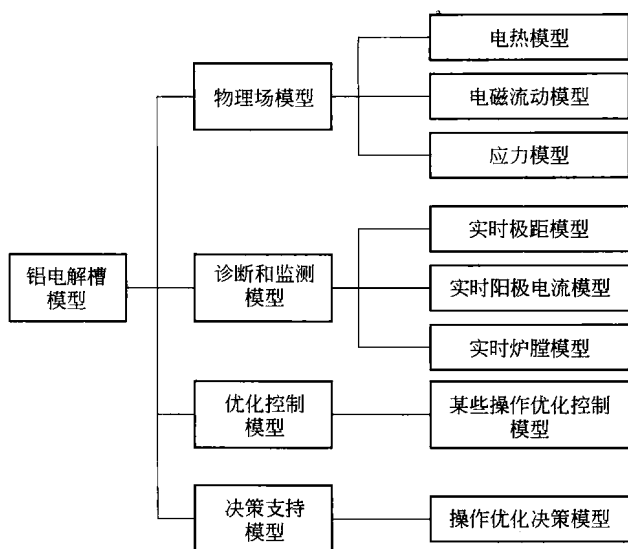


图 1-1 铝电解槽模型的类型

在以前的研究中，物理场模型中电热模型、电磁流动模型和应力模型基本上都是基于稳态的和均一的。诊断和监测模型中的参数基本上都是变化的，所以都属于非稳态和非均一模型。优化控制模型和决策支持模型中的参数都是稳态和均一的，所以这些模型也是基于稳态和均一的。

铝电解槽稳态均一模型主要是对铝电解槽的设计进行评价和分析，对进一步改善物理场的分布提供依据。比如磁场的分布都是在多种阴极母线配置中优化出最佳磁场分布而最终完成的，热场的分布也是改变槽内衬的结构而实现的。但这些稳态均一模型只能对设计做出评价，对生产过程控制的指导意义不大，所以建立铝电解槽非稳态非均一模型势在必行。

1.3 铝电解槽非稳态非均一模型

铝电解槽非稳态非均一模型是目前铝电解技术研究的重点和

热点，在完善物理场耦合模型的基础上进一步研究铝电解槽非稳态非均一模型既能充分利用现有模型的优势，又能开发出适应时代需要的模型。铝电解槽非稳态非均一模型的构成如图 1-2 所示。

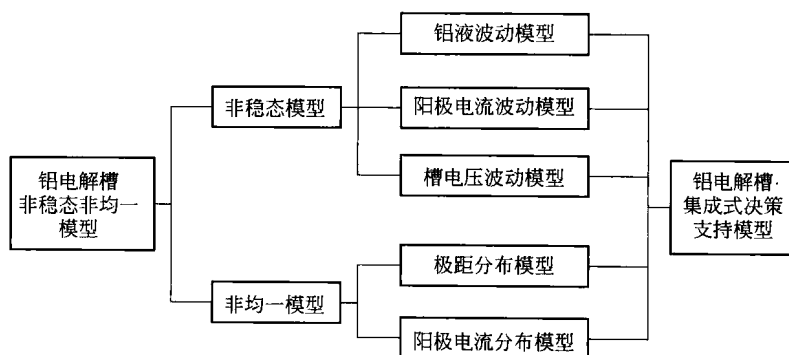


图 1-2 铝电解槽非稳态非均一模型的构成

非稳态模型包括铝液波动模型、阳极电流波动模型和槽电压波动模型，主要用以研究铝电解槽的动态特性，这些动态特性表征了电解槽的稳定程度，比如铝液波动状况代表磁流体动力学（MHD）稳定性，阳极电流波动状况反映局部铝液的稳定性，槽电压波动反映整槽的稳定性。它们分别反映了电解槽的不同部位、不同性质的不稳定性，但它们之间又有联系，比如铝液波动状况会引起阳极电流波动和槽电压波动。

非均一模型^[4]主要研究铝电解槽内各参数的非均一分布情况，研究较多的是极距和阳极电流非均一分布模型。

建立铝电解槽非稳态非均一模型的主要目的是更好地指导生产，使电解槽处于更加稳定、各参数更加均一的状态，所以通过集成铝电解槽非稳态非均一模型而形成的铝电解槽集成式决策支持模型可用于铝电解槽的操作整体优化，最终可实现提高铝电解槽电流效率和降低能耗的目的。

1.4 发展铝电解槽非稳态非均一模型的意义

“十五”期间，我国社会与经济发展取得了巨大成就，每年经济平均增长 8.8%，其中 3 年达到了 9% 以上，2004 年我国 GDP 已达 1.93 万亿美元，世界排名第六，2005 年我国 GDP 上升到 2.2 万亿美元。国家统计局报告预计，“十一五”期间我国 GDP 年均增长率将达到 8.5% 左右。我国如此高的经济增长速度必然会增加对金属铝的需求，据中国有色金属工业协会数据显示，2005 年中国铝产量为 741.21 万 t，而铝需求量达到 678 万 t，供略大于求。随着铝在交通运输、建筑、包装等领域应用的不断增加，我国铝的需求量将继续增长。2007 年我国铝需求量已达到 1240 万 t，约占全球铝产量的 30%，我国铝产量的稳定增长将推动经济的高速持续发展。

我国的能源紧张制约了铝行业的发展。国内铝电解的吨铝直流电耗一般在 $13700\text{kW}\cdot\text{h}$ 以上，个别铝厂甚至达到 $14600\text{kW}\cdot\text{h}$ ，而国外先进电解企业的吨铝直流电耗都较低，一般在 $13000\text{kW}\cdot\text{h}$ 以下，这增加了我国单位 GDP 能耗。虽然 2006 年与 1990 年比，全国每万元 GDP 能耗下降了 50% 左右，但目前我国能源利用率仅 33%，比发达国家低约 10 个百分点。“十一五”规划中明确指出我国单位 GDP 能耗要比“十五”期末降低 20%。因此，降低铝的直流电耗是实现我国单位 GDP 能耗降低的一个重要方面。

如何解决持续增长的铝的市场需求和能源紧张之间的矛盾是我国目前铝电解行业面临的严峻问题。只有通过节能降耗，减小铝的吨铝能耗，才能保持铝工业的健康发展，进而促进我国经济的发展。因此对铝电解槽节能技术的研究有着重要的现实意义。

近年来我国铝电解技术水平有了较大的提高，取得了一些节能的效果，主要是从优化电解槽结构、合理配置母线、提高自动化控制水平等方面来实现的，但是没能成功地挖掘出降低电解质压降的潜力。我国对铝电解槽稳态和均一模型的研究已经较为成