阳极焙烧及其热工过程的数学分析与仿真

殷志云　著

中南大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

图书在版编目(CIP)数据

阳极焙烧及其热工过程的数学分析与仿真/殷志云著.
—长沙:中南大学出版社,2007.7
ISBN 978-7-81105-580-1

Ⅰ.阳… Ⅱ.殷… Ⅲ.①氧化铝电解-阳极-焙烧-热工学-数学分析②氧化铝电解-阳极-焙烧-热工学-数学仿真
Ⅳ.TF821

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 107869 号

阳极焙烧及其热工过程的数学分析与仿真

殷志云 著

责任编辑 谢贵良
责任印制 汤庶平
出版发行 中南大学出版社
社址:长沙市麓山南路 邮编:410083
发行科电话:0731-8876770 传真:0731-8710482
印 装 长沙市华中印刷厂

开 本 850×1168 1/32 印张 8.75 字数 206 千字
版 次 2007 年 7 月第 1 版 2007 年 7 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-81105-580-1
定 价 25.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

前 言

随着科学的进步，炼铝的研究十分活跃。在我国铝电解工业发展的历程中，科学家们做了大量的研究，相关论文一篇接一篇地发表，新技术、新理论、新材料不断涌现，极大地推动着我国铝工业的发展。然而我国铝电解工业的整体技术水平和生产指标与国际先进水平相比差距仍然很大，特别是在改进碳阳极与阴极质量方面，在我国还有很大潜力可挖。碳阳极是铝电解槽的“心脏”，我国的碳阳极质量标准还不够完善，一旦这些阳极应用到生产中，就会造成阳极局部过热、电流分布不均、阳极掉块、阳极掉渣等，对铝电解生产的电流效率和能耗等影响巨大。就铝电解对阳极质量的要求而言，要求生阳极的焙烧过程要有均匀的温度和合理的热工制度，所获得较小的温差，准确控制升温，其中温度曲线是热工制度的核心。长期以来，相关的数学模型只是在形式上进行单一的模拟，以解析方法为手段的经典燃烧理论只能在大量的简化的基础上得到定性的关系，热工方程的近似周期解不能收敛，渐近展开式解失效，从定量上反映不出其温度分布，燃烧装置的设计也主要靠实验。这是因为：我国对阳极焙烧与阳极焙烧炉燃烧室还没有系统地、综合地进行数值模拟，缺乏对十分复杂的热工现象及其内部的系统分析，对非线性系统中流体流动与传输过程缺少系统的数值理论与计算，因而不可能对阳极焙烧炉内的温度

场、流场、浓度场和燃烧释热场进行全息检测与耦合，直接影响了焙烧制品质量性能。就是在这种背景下，中南大学梅炽教授为领导，组成了理工结合课题研究小组。课题组成员有数学硕士、自动控制研究生、网络教师与热能工程和有色冶金专家。通过实地考察，下厂调研，承担项目，在线检测和寻优实验，结合现代工业炉窑热工工艺过程，以白银铝厂、青铜峡铝厂、青海铝厂（注：采用 2000 年的数据资料）等一系列的研究课题为基础，梅炽教授和他的课题组，大力推进了现代数学分析方法在阳极焙烧及其热工过程研究与开发中的应用工作。

作者所在的研究所（中南大学热工设备仿真与优化研究所）已具有多年从事工业炉窑计算机仿真与优化、改造的经验，研究所成员大都是具有高级职称或学历的教师，并且在此方面多次荣获国家级奖励。研究所已拥有工业炉窑测试和实验所需的大部分仪器和设备，拥有世界一流的计算流体力学软件，是 CFX4.2 软件中国办事处培训基地和软件开发应用中心，能随时了解计算流体力学国际发展动态等。

作者是粉碎“四人帮”后恢复高考的第一届大学毕业生，1984 年获硕士学位，1989 年出国留学，主要从事应用数学和有色代数（color algebra）理论研究，1991 年回国被聘为副教授，1993 年破格评为教授，是中南大学（原中南工业大学）的硕士生导师，并作为博士生副导师协助蔡海涛教授指导过数学方面的博士生。

本书通过详细分析国内外阳极焙烧及生产发展现状，实现对炉温在线检测动态曲线的在线显示、碳块中心温度计算，为焙烧炉热流流动提供了与经典方法相比更合理的结果。本书还从新的研究视角入手，强化热工过程的整体性、统一性和信息

的全面性，提出了提高生产阳极质量和产量、延长炉室寿命、降低能耗与排放量的若干建议与方案。

本书的主要研究内容有：

⑴ 通过详细分析国内外阳极工业发展研究现状，阐述生阳极在焙烧过程中的变化过程与影响焙烧制品质量的诸多因素及其对制品性能的影响，解决阳极焙烧炉内“四场”耦合问题，研究了多场关联项的性质和量值估算；

⑵ 建立阳极焙烧及其热工过程中的基本方程组；

⑶ 用混沌、分形理论描述和研究动力学系统和非线性系统，解决传输过程的一些实际问题；

⑷ 为提高和稳定焙烧阳极质量，进行了建立阳极焙烧炉的计算机全息监控系统及工程的应用研究，提出优化决策支持系统功能和管理信息系统功能；

⑸ 研究进一步生产高质量阳极的方法；

⑹ 对热工微分方程求取近似解，并对电脑自动实现进行应用研究。

本书的重点放在数学模型、全息仿真监控与现代数学分析方法的应用上。目前，对阳极焙烧与热工过程、燃烧理论、焙烧技术的研究正呈现出迅猛发展的势头。

本书研究的目的除上面所述原因之外，还旨在给出现代数学分析方法在阳极焙烧与热工过程中应用的具体途径，并为求解热工微分方程近似解提供具体方法和计算技巧，从而构建出近似恒等变换式。

本研究课题与内容对阳极生产发展具有重要的现实意义，对分析制品质量的理论与定量关系及其综合技术具有直接的指导作用。在这些工作的基础上，依据数学方法和原理，探索全

需要全本请访问 www.ertongbook.com

息仿真与寻优实验技术，将热工过程“宏观功能”与“微观机理”结合，清楚地揭示了阳极焙烧炉“四场”密切关联的耦合作用，取得了优化与决策的良好效果，为提高阳极质量和产量、降低能耗、加强环保进行了大胆探索。本书是理工结合、学科交叉、应用数学进一步走向热能工程科技创新的一种新尝试。

作者

2006.4

目 录

第 1 章 概述 …… (1)
1.1 国内外阳极生产发展与研究现状 …… (3)
1.1.1 国际阳极工业近年状态 …… (3)
1.1.2 焙烧原理 …… (5)
1.1.3 焙烧的工艺制度 …… (7)
1.1.4 焙烧工序 …… (9)
1.1.5 环式炉焙烧工艺 …… (14)
1.2 国内在提高阳极质量方面的研究 …… (16)
1.3 生阳极在焙烧过程中的物理 - 化学变化 …… (18)
1.4 制品质量的理论分析与综合技术 …… (20)
1.4.1 有关原料 …… (21)
1.4.2 生产工艺分析 …… (21)
1.5 影响焙烧制品质量的因素 …… (23)
1.5.1 焙烧体系中气氛的影响 …… (23)
1.5.2 压力的影响 …… (25)
1.5.3 加热制度的影响 …… (25)
1.5.4 填充料的影响 …… (26)
1.6 升温与冷却速度对焙烧后制品质量的影响 … (27)
1.6.1 挥发物析出量与升温速度的关系 …… (27)
1.6.2 焦炭密度与升温速度的关系 …… (27)
1.6.3 热应力与毛坯的平均温度 …… (28)
1.7 焙烧温度对制品性能的影响 …… (29)

1.7.1 焙烧温度对孔隙度的影响 …… (29)
1.7.2 焙烧温度对比电阻的影响 …… (29)
1.7.3 焙烧温度对抗压强度的影响 …… (30)
1.7.4 焙烧温度对预焙阳极电解消耗的影响 … (30)
1.7.5 焙烧温度对预焙阳极被空气氧化速率的影响 …… (32)
1.7.6 焙烧温度对预焙阳极被二氧化碳气体氧化速率的影响 …… (32)
1.7.7 焙烧温度对预焙阳极反电动势的影响 … (34)
1.8 动量、热量、质量传输过程模型的表述 …… (34)
1.8.1 一维传递机理 …… (35)
1.8.2 通用微分方程组 …… (36)
1.8.3 湍流计算的双微分方程模型 …… (38)
1.9 本章小结 …… (41)

第 2 章 阳极焙烧炉燃烧室数学模拟 …… (42)

2.1 焙烧室中流体流动的数学描述 …… (43)
2.2 焙烧室中传输过程的基本方程 …… (46)
2.3 源项表达式 …… (47)
2.3.1 化学反应率 …… (47)
2.3.2 能量方程的源项 …… (48)
2.3.3 动量方程的源项 …… (50)
2.4 数学模型的引入 …… (51)
2.4.1 k - ε - $\bar{f}$ - g 方程 …… (55)
2.4.2 PDF (概率密度分布函数) 模型 …… (57)
2.4.3 火焰传热过程的基本方程 …… (59)
2.5 本章小结 …… (60)

第 3 章 基本方程的数值理论与计算 …… (62)
3.1 方程的离散化 …… (62)
3.1.1 泰勒级数展开 …… (63)
3.1.2 变分法 …… (64)
3.1.3 权余法 …… (66)
3.1.4 控制体法 …… (66)
3.2 差分方程的系数 …… (70)
3.2.1 时间导数项和源项 …… (70)
3.2.2 总通量项 …… (71)
3.2.3 非定常差分方程的显式和隐式 …… (72)
3.2.4 差分方程的系数 …… (74)
3.3 网格理论与有限差分 …… (76)
3.3.1 非均匀网格中函数的导数 …… (78)
3.3.2 不稳定态问题的有限差分方程 …… (79)
3.4 有限元法在阳极焙烧室中的应用 …… (81)
3.5 阳极焙烧燃烧室火焰传热过程的数值计算 … (84)
3.5.1 三维空间的热流法数值计算 …… (84)
3.5.2 三维空间辐身换热的概率模拟 …… (86)
3.6 本章小结 …… (88)
第 4 章 混沌、分形及其现象分析与应用研究 …… (90)
4.1 混沌的基本知识 …… (91)
4.1.1 混沌的发展与简史 …… (91)
4.1.2 神经网络、模糊分析和混沌理论…… (92)
4.1.3 混沌在智能信息处理中的应用 …… (93)
4.1.4 铝工业经济混沌现象分析及其模型研究…… (95)

需要全本请访问 www.ertongbook.com

4.2 分形的基本知识 …… (97)
4.2.1 分形的发展与简史 …… (98)
4.2.2 分形空间与分形维数 …… (100)
4.2.3 仿射变换与收缩映射 …… (102)
4.2.4 分形插值 …… (104)
4.3 动力学系统 …… (107)
4.3.1 动力学系统的定义 …… (107)
4.3.2 耗散系统与保守系统 …… (109)
4.3.3 混沌 Lorenz 系统的控制研究 …… (110)
4.4 奇异吸引子 …… (112)
4.4.1 Lorenz 吸引子 …… (115)
4.4.2 奇异吸引子 …… (116)
4.4.3 混沌用于化学动力学系统中 …… (117)
4.5 混沌和混沌状态的判断 …… (120)
4.5.1 几个常用的判断方法 …… (120)
4.5.2 定性观察混沌现象 …… (122)
4.5.3 李雅谱诺夫特征指数 …… (125)
4.6 计算机模拟与优化算法 …… (127)
4.7 神经网络法 …… (131)
4.8 热混合层中温度脉动的分形特征 …… (134)
4.9 分形空间中的有限元法与逼近法 …… (136)
4.10 分形插值曲面及其维数 …… (140)
4.10.1 分形插值曲面计算公式 …… (141)
4.10.2 分形插值曲面维数定理 …… (144)
4.11 讨论 …… (145)
4.11.1 有序与混沌的区别问题 …… (145)
4.11.2 由规则向不规则的过渡 …… (146)

4.12 本章小结 …… (147)

第 5 章 阳极焙烧炉全息检测系统 …… (150)

5.1 检测系统方案 …… (150)
5.1.1 开发目的与意义 …… (151)
5.1.2 系统设计方案 …… (152)
5.2 通用计算机软件 CFX 的研究 …… (156)
5.2.1 CFD 计算机程序的种类和特点 …… (158)
5.2.2 CFX4 的性能简介 …… (159)
5.2.3 CFX4 程序框架系统简介 …… (162)
5.2.4 CFX 的核心技术分析 …… (167)
5.3 本章小结 …… (174)

第 6 章 现代炉窑的研究热点与碳阳极焙烧炉燃烧室的四场耦合仿真 …… (176)

6.1 碳阳极焙烧炉物理模型 …… (176)
6.2 数学模型 …… (178)
6.3 气体湍流的扩展 k - ε 模型 …… (178)
6.4 有限差分法的进一步应用与差分方程的稳定性 …… (180)
6.5 消去压力的做法 …… (181)
6.6 仿真和优化过程 …… (185)
6.6.1 边界及初始条件与网格划分 …… (185)
6.6.2 计算和分析 …… (185)
6.7 现代炉窑研究的热点——从简单模拟到全息仿真 …… (191)

6.7.1 从简单模拟到全息仿真及其全息仿真的特点 …… (192)
6.7.2 全息仿真数学模型与多场耦合问题 …… (194)
6.8 结论与建议 …… (198)

第 7 章 对生产高质量阳极的进一步设想 …… (202)

7.1 填充料的制备和使用方法应引起足够的重视 …… (202)
7.2 关于阳极焙烧过程的最佳化问题 …… (203)
7.3 优化焙烧工艺条件，向“三高两低”靠近 …… (204)
7.4 碳素焙烧炉的改进建议 …… (206)
7.5 烟气净化与余热利用 …… (208)
7.6 对阳极质量标准的探讨 …… (209)
7.6.1 阳极的 CO_2 反应性指标 …… (209)
7.6.2 阳极的空气氧化性指标 …… (210)
7.6.3 空气渗透率 …… (210)
7.6.4 关于阳极的热特性指标 …… (210)
7.7 本章小结 …… (210)

第 8 章 现代数学方法在求解热工微分方程近似解中的进一步应用 …… (212)

8.1 Lindstedt - Poincare 方法 …… (212)
8.1.1 渐近序列和渐近展开式 …… (212)
8.1.2 正则摄动与奇异摄动 …… (214)
8.1.3 Lindstedt - Poincare 方法的基本思想 …… (216)

8.1.4 Lindstedt - Poincare 方法的机器实现…… (218)
8.1.5 关于主函数和子函数的说明 …… (219)
8.2 多重尺度法 …… (220)
8.2.1 多重尺度法的基本思想 …… (221)
8.2.2 多重尺度法的机器实现 …… (224)
8.3 平均化方法 …… (226)
8.3.1 Krylov - Bogoliubov 技巧 …… (228)
8.3.2 Krylov - Bogoliubov - Mitropolsky 技巧 …… (230)
8.4 Lie 变换自动实现的研制 …… (232)
8.4.1 Lie 变换平均方法 …… (232)
8.4.2 Lie 变换正则系统 …… (242)
8.5 本章小结 …… (247)

参考文献 …… (249)

第 1 章　概述

我国 1991 年产铝已达 97 万吨，铝用碳制品用量近 60 万吨。当前，我国电解铝的年产量近 200 万吨，电解铝厂已发展到 120 多个。按铝产量排名 1995 年和 1996 年连续两年，我国在美国、俄罗斯、加拿大之后，位居第四，说明我国正在快速地迈进世界产铝大国的行列。我国铝电解工业发展的历程，就是不断采用新技术、新理论、新方法等发展铝电解工业的历史。同时也应该看到，铝电解工业的整体技术水平和生产指标与国际水平的差距仍然很大，特别是在改进碳阳极与阴极质量方面还有很大潜力。

铝工业是碳素制品的最大消耗用户者，碳阳极作为铝电解槽的“心脏”，其质量和工作状况对铝电解生产的电流效率和能耗等影响巨大。而碳阴极质量和工作状况不仅影响着电解槽使用寿命，而且也影响着电流效率和能耗。近年来，国内铝业界和碳素行业对铝用碳制品技术和理论甚为重视。“七五”和“八五”期间，相继在贵州、包头、青铜峡、青海、平果铝、白银铝厂的建设中引进国外铝用碳素制品生产的一些设备和技术，并先后邀请日本、法国、美国、瑞士、挪威、俄罗斯等国的专家来华进行铝及铝用碳素技术交流，还先后派出了铝用碳素技术和设备的出国考察团。国家把提高铝用碳素材料质量作为“科技攻关计划”，我国铝用碳制品技术取得了很大进展。

继日本和美国研究氯化铝电解和高炉炼铝后，各国正在积

极开展新法炼铝的研究[176]。这些研究包括：近于室温的熔盐电解铝[179]，非水溶液电积铝，电碳热 - 电化学法炼铝[177]，液 - 液萃取分离铝等等。这些研究对铝电解工业的意义十分巨大，但离大规模的工业应用还相距甚远。K. Grjotheim 指出：在 50 年之内，没有哪种方法能够代替现有的霍尔 - 埃鲁特法（以下简称 H - H 法）。因此更多的学者致力于 H - H 法的进一步完善和改进。这些工作主要针对电解槽的三个主要部分——阳极、电解质和阴极，而阳极则被称为铝电解槽的“心脏”。

阳极之所以被称为铝电解槽的“心脏”，是因为阳极的冷热直接影响电解质的温度。阳极氧化反应不均所产生的碳渣落入电解质中会使其粘度、电阻增大，严重时会生成碳化铝。郑州轻金属研究院通过对一系列的电解槽 10 年的观测指出：电流效率低于 84% 的病槽，有 80% 是因为阳极工作不正常所致，主要包括阳极局部过热、电流分布不均、阳极掉块、阳极掉渣等等[49]，这些都对电流效率有很大的影响。

铝电解过程中有高达几十或几百千安的电流通过阳极，因此，阳极电阻、导电距离等强烈影响电耗。阳极上电耗占铝电解电能消耗的 10% 左右，阳极质量的变化可使电阻变化 20% ~30%[49]。如果阳极电阻从 72 Ω·cm 降至 50 Ω·cm，则生产 1 t 铝可节电 500 kWh[12]。K. Grjotheim 也指出：电解质中含碳0. 04%，则导电率下降 1%；电解质中若含碳 1%，则导电率要下降 11%[180]。表 1. 1 为某厂（1991 ~ 1994 年）四年来平均阳极碳耗与电耗和电流效率的关系。

表 1.1　某厂四年来平均阳极碳耗、电耗和电流效率

项目 \ 年份	1991	1992	1993	1994
* 阳极碳耗/kg	788	682	681	634
* 阳极电耗/kWh	18077	16065	15936	14837
电流效率/%	76.69	81.35	82.05	86.97

* 以生产 1 t 铝计算。

1.1　国内外阳极生产发展与研究现状

1.1.1　国际阳极工业近年状态

碳阳极是用优质石油焦与沥青在一定条件下，经过混捏成型和焙烧后形成的碳块。但得到的这种阳极有如下缺点：阳极碳耗高以及环境污染严重。

针对以上缺点，国外许多学者进行了大量的研究。实践证明，通过改进配方提高阳极强度，可增加导电率；基于阳极的传热性质，更合理的焙烧热工制度也被提了出来，并被应用于实际操作中；同时，经过长时间研究，碳阳极电解理论进一步完善，出现的阳极效应以及碳阳极上电化学反应的机理也趋于成熟。Jones 指出：在铝电解的反应中，碳耗占 67%，铝的再氧化占 12%，空气的氧化占 17%，气化合机械损耗占 4%。而 Fisher 等人则在长期研究的基础上定量地分析了阳极消耗与阳极质量的关系[5]：

$$NC = C + 334/CE + 1.2(BT - 920) - 1.7CRR + 9.3AP + 8TC - 1.55ARR$$

其中，NC——极净耗；

C——电流效率影响因素；

CE——电流效率；

BT——电解质温度；

CRR——CO_2反应残余量；

AP——空气渗透率；

TC——导热率；

ARR——空气残余量。

还有许多文献专门研究了阳极的加宽、加高、合理安装等改进措施。所有这些都说明碳阳极有很大潜力可挖，特别是碳阳极的焙烧温度曲线改进等。

从 H - H 法问世，不少人提出非消耗阳极（惰性阳极）的概念。特别是近些年来，一直有许多人从事这方面的研究。从长远利益的观点和效益出发，冰晶石 - 氧化铝法采用惰性阳极意义十分重大；①阳极不消耗，无须更换，从而节省了大量优质焦炭；②阳极气体不再是 $CO + CO_2$，而是 O_2，大大地改善了现场的工作环境。

Meleod 等人系统地研究了数十种金属氧化物作为惰性阳极材料的可能性，要求材料做到：① 对氧的冰晶石溶液的反应能力小；② 具有较好的机械强度和热稳定性；③ 较高的导电能力；④ 不污染铝；⑤ 宜于制造大阳极；⑥ 价格低廉；⑦ 能与导电部件联结。许多铝业公司已经开始对惰性阳极进行实验。瑞士铝公司提议用氧化基阳极，佳友铝公司提议使用尖晶石型、金江石型惰性阳极。然而，值得指出的是，惰性阳极的研究，离大规模的工业应用还有很大的距离。

相对而言的复合阳极又一次引起人们的极大兴趣。复合阳极主要由 Al_2O_3 和碳组成。早在 1856 年世界上就开始了对复合

需要全本请访问 www.ertongbook.com