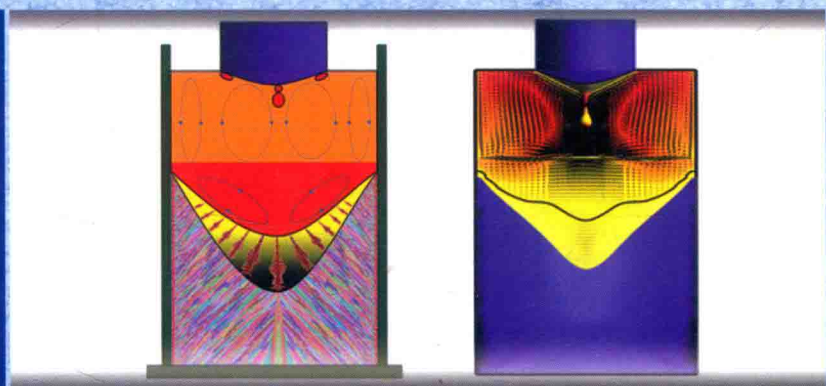


“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代冶金与材料过程工程丛书

基于数值模拟的 电渣重熔理论与技术



李宝宽 王 强◎ 著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代冶金与材料过程工程丛书

基于数值模拟的电渣重熔 理论与技术

李宝宽 王 强 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书将近年来迅猛发展的数值模拟方法引进到电渣重熔技术领域,研究基于数值模拟的电渣重熔理论与技术,为促进电渣重熔技术水平的提升提供一种新的途径。全书共12章。前6章介绍电渣重熔过程数值研究的发展历史和现状,提出了新的全耦合数学模型。基于有限体积法,利用商业软件结合自开发程序(UDF)建立二次开发程序。通过实验对所建模型加以验证,并研究了工艺参数对宏观偏析的影响;对双合金电渣重熔接续铸锭过程进行了模拟,并研究了工艺参数对双合金铸锭过渡段长度的影响,探求了工艺优化的途径。后6章在发展有限元模型的同时,测试若干项电渣重熔新技术,包括双极串联技术、三相多电极技术、管式电极技术和利用内柱外管的双极串联系统对大型铸锭进行电渣热封顶的技术等。通过对各种状态下电渣重熔系统中的电磁场、温度场和钢锭凝固过程进行参数研究和分析,确定新技术的效果和应用可能性。

本书内容涵盖材料、冶金、铸造、机械等多个领域,可供相应科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于数值模拟的电渣重熔理论与技术/李宝宽,王强著. —北京:科学出版社, 2016.11

(现代冶金与材料过程工程丛书/赫冀成主编)

“十二五”国家重点图书出版社规划项目

ISBN 978-7-03-050255-1

I. 基… II. ①李… ②王… III. 电渣熔炼-数值模拟 IV. TF14

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第248100号

责任编辑:张淑晓 李 洁/责任校对:杜子昂

责任印制:肖 兴/封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年11月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年11月第一次印刷 印张:16 3/4

字数:337 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《现代冶金与材料过程工程丛书》序

21 世纪世界冶金与材料工业主要面临两大任务：一是开发新一代钢铁材料、高性能有色金属材料及高效低成本的生产工艺技术，以满足新时期相关产业对金属材料性能的要求；二是要最大限度地降低冶金生产过程的资源和能源消耗，减少环境负荷，实现冶金工业的可持续发展。冶金与材料工业是我国发展最迅速的基础工业，钢铁和有色金属冶金工业承载着我国节能减排的重要任务。当前，世界冶金工业正向着高效、低耗、优质和生态化的方向发展。超级钢和超级铝等更高性能的金属材料产品不断涌现，传统的工艺技术不断被完善和更新，铁水炉外处理、连铸技术已经普及，直接还原、近终形连铸、电磁冶金、高温高压溶出、新型阴极结构电解槽等已经开始在工业生产上获得不同程度的应用。工业生态化的客观要求，特别是信息和控制理论与技术的发展及其与过程工业的不断融合，促使冶金与材料过程工程的理论、技术与装备迅速发展。

《现代冶金与材料过程工程丛书》是东北大学在国家“985 工程”科技创新平台的支持下，在冶金与材料领域科学前沿探索和工程技术研发成果的积累和结晶。丛书围绕冶金过程工程，以节能减排为导向，内容涉及钢铁冶金、有色金属冶金、材料加工、冶金工业生态和冶金材料等学科和领域，提出了计算冶金、自蔓延冶金、特殊冶金、电磁冶金等新概念、新方法和新技术。丛书的大部分研究得到了科学技术部“973”、“863”项目，国家自然科学基金重点和面上项目的资助（仅国家自然科学基金项目就达近百项）。特别是在“985 工程”二期建设过程中，得到 1.3 亿元人民币的重点支持，科研经费逾 5 亿元人民币。获得省部级科技成果奖 70 多项，其中国家级奖励 9 项；取得国家发明专利 100 多项。这些科研成果成为丛书编撰和出版的学术思想之源和基本素材之库。

以研发新一代钢铁材料及高效低成本的生产工艺技术为中心任务，王国栋院士率领的创新团队在普碳超级钢、高等级汽车板材以及大型轧机控轧控冷技术等方面取得突破，成果令世人瞩目，为宝钢、首钢和攀钢的技术进步做出了积极的贡献。例如，在低碳铁素体/珠光体钢的超细晶强韧化与控制技术研究过程中，提出适度细晶化（ $3\sim 5\mu\text{m}$ ）与相变强化相结合的强化方式，开辟了新一代钢铁材料生产的新途径。首次在现有工业条件下用 200MPa 级普碳钢生产出 400MPa 级超级钢，在保证韧性前提下实现了屈服强度翻番。在研究奥氏体再结晶行为时，引入时间轴概念，明确提出低碳钢在变形后短时间内存在奥氏体未在结晶区的现象，为低碳钢的控制

轧制提供了理论依据;建立了有关低碳钢应变诱导相变研究的系统而严密的实验方法,解决了低碳钢高温变形后的组织固定问题。适当控制终轧温度和压下量分配,通过控制轧后冷却和卷取温度,利用普通低碳钢生产出铁素体晶粒为 $3\sim 5\mu\text{m}$ 、屈服强度大于 400MPa , 具有良好综合性能的超级钢,并成功地应用于汽车工业,该成果获得 2004 年国家科技进步一等奖。

宝钢高等级汽车板品种、生产及使用技术的研究形成了系列关键技术(如超低碳、氮和氧的冶炼控制等),取得专利 43 项(含发明专利 13 项)。自主开发了 183 个牌号的新产品,在国内首次实现高强度 IF 钢、各向同性钢、热镀锌双相钢和冷轧相变诱发塑性钢的生产。编制了我国汽车板标准体系框架和一批相关的技术标准,引领了我国汽车板业的发展。通过对用户使用技术的研究,与下游汽车厂形成了紧密合作和快速响应的技术链。项目运行期间,替代了至少 50% 的进口材料,年均创利润近 15 亿元人民币,年创外汇 600 余万美元。该技术改善了我国冶金行业的产品结构并结束了国外汽车板对国内市场的垄断,获得 2005 年国家科技进步一等奖。

提高 C-Mn 钢综合性能的微观组织控制与制造技术的研究以普碳钢和碳锰钢为对象,基于晶粒适度细化和复合强化的技术思路,开发出综合性能优良的 $400\sim 500\text{MPa}$ 级节约型钢材。解决了过去采用低温轧制路线生产细晶粒钢时,生产节奏慢、事故率高、产品屈强比高以及厚规格产品组织不均匀等技术难题,获得 10 项发明专利授权,形成工艺、设备、产品一体化的成套技术。该成果在钢铁生产企业得到大规模推广应用,采用该技术生产的节约型钢材产量到 2005 年年底超过 400 万 t,到 2006 年年底,国内采用该技术生产低成本高性能钢材累计产量超过 500 万 t。开发的产品用于制造卡车车轮、大梁、横臂及建筑和桥梁等结构件。由于节省了合金元素、降低了成本、减少了能源资源消耗,其社会效益巨大。该成果获 2007 年国家技术发明二等奖。

首钢 3500mm 中厚板轧机核心轧制技术和关键设备研制,以首钢 3500mm 中厚板轧机工程为对象,开发和集成了中厚板生产急需的高精度厚度控制技术、TMCP 技术、控制冷却技术、平面形状控制技术、板凸度和板形控制技术、组织性能预测与控制技术、人工智能应用技术、中厚板厂全厂自动化与计算机控制技术等一系列具有自主知识产权的关键技术,建立了以 3500mm 强力中厚板轧机和加速冷却设备为核心的整条国产化的中厚板生产线,实现了中厚板轧制技术和重大装备的集成和集成基础上的创新,从而实现了我国轧制技术各个品种之间的全面、协调、可持续发展以及我国中厚板轧机的全面现代化。该成果已经推广到国内 20 余家中厚板企业,为我国中厚板轧机的改造和现代化做出了贡献,创造了巨大的经济效益和社会效益。该成果获 2005 年国家科技进步二等奖。

在国产 1450mm 热连轧关键技术及设备的研究与应用过程中,独立自主开发的

热连轧自动化控制系统集成技术,实现了热连轧各子系统多种控制器的无缝衔接。特别是在层流冷却控制方面,利用有限元素流分析方法,研发出带钢宽度方向温度均匀的层冷装置。利用自主开发的冷却过程仿真软件包,确定了多种冷却工艺制度。在终轧和卷取温度控制的基础之上,增加了冷却路径控制方法,提高了控冷能力,生产出了 $\times 75$ 管线钢和具有世界先进水平的厚规格超细晶粒钢。经过多年的潜心研究和持续不断的工程实践,将攀钢国产第一代 1450mm 热连轧机组改造成具有当代国际先进水平的热连轧生产线,经济效益极其显著,提高了国内热连轧技术与装备研发水平和能力,是传统产业技术改造的成功典范。该成果获 2006 年国家科技进步二等奖。

以铁水为主原料生产不锈钢的新技术的研发也是值得一提的技术闪光点。该成果建立了 K-OBM-S 冶炼不锈钢的数学模型,提出了铁素体不锈钢脱碳、脱氮的机理和方法,开发了等轴晶控制技术。同时,开发了 K-OBM-S 转炉长寿命技术、高质量超纯铁素体不锈钢的生产技术、无氩冶炼工艺技术和连铸机快速转换技术等关键技术。实现了原料结构、生产效率、品种质量和生产成本的重大突破。主要技术经济指标国际领先,整体技术达到国际先进水平。K-OBM-S 平均冶炼周期为 53min,炉龄最高达到 703 次,铬钢比例达到 58.9%,不锈钢的生产成本降低 10%~15%。该生产线成功地解决了我国不锈钢快速发展的关键问题——不锈钢废钢和镍资源短缺,开发了以碳氮含量小于 120ppm 的 409L 为代表的一系列超纯铁素体不锈钢品种,产品进入我国车辆、家电、造币领域,并打入欧美市场。该成果获得 2006 年国家科技进步二等奖。

以生产高性能有色金属材料和研发高效低成本生产工艺技术为中心任务,先后研发了高合金化铝合金预拉伸板技术、大尺寸泡沫铝生产技术等,并取得显著进展。高合金化铝合金预拉伸板是我国大飞机等重大发展计划的关键材料,由于合金含量高,液固相线温度宽,铸锭尺寸大,铸造内应力高,所以极易开裂,这是制约该类合金发展的瓶颈,也是世界铝合金发展的前沿问题。与发达国家采用的技术方案不同,该高合金化铝合金预拉伸板技术利用低频电磁场的强贯穿能力,改变了结晶器内熔体的流场,显著地改变了温度场,使液穴深度明显变浅,铸造内应力大幅度降低,同时凝固组织显著细化,合金元素宏观偏析得到改善,铸锭抵抗裂纹的能力显著增强。为我国高合金化大尺寸铸锭的制备提供了高效、经济的新技术,已投入工业生产,为国防某工程提供了高质量的铸锭。该成果作为“铝资源高效利用与高性能铝材制备的理论与技术”的一部分获得了 2007 年的国家科技进步一等奖。大尺寸泡沫铝板材制备工艺技术是以共晶铝硅合金(含硅 12.5%)为原料制造大尺寸泡沫铝材料,以 A356 铝合金(含硅 7%)为原料制造泡沫铝材料,以工业纯铝为原料制造高韧性泡沫铝材料的工艺和技术。研究了泡沫铝材料制造过程中泡沫体的凝固机制以及生产气孔均匀、孔壁完整光滑、无裂纹泡沫铝产品的工艺条件;研究了

控制泡沫铝材料密度和孔径的方法；研究了无泡层形成原因和抑制措施；研究了泡沫铝大块体中裂纹与大空腔产生原因和控制方法；研究了泡沫铝材料的性能及其影响因素等。泡沫铝材料在国防军工、轨道车辆、航空航天和城市基础建设方面具有十分重要的作用，预计国内市场年需求量在 20 万 t 以上，产值 100 亿元人民币，该成果获 2008 年辽宁省技术发明一等奖。

围绕最大限度地降低冶金生产过程中资源和能源的消耗，减少环境负荷，实现冶金工业的可持续发展的任务，先后研发了新型阴极结构电解槽技术、惰性阳极和低温铝电解技术和大规模低成本消纳赤泥技术。例如，冯乃祥教授的新型阴极结构电解槽的技术发明于 2008 年 9 月在重庆天泰铝业公司试验成功，并通过中国有色金属工业协会鉴定，节能效果显著，达到国际领先水平，被业内誉为“革命性的技术进步”。该技术已广泛应用于国内 80% 以上的电解铝厂，并获得“国家自然科学基金重点项目”和“国家高技术研究发展计划（863 计划）重点项目”支持，该技术作为国家发展和改革委员会“高技术产业化重大专项示范工程”已在华东铝业实施 3 年，实现了系列化生产，槽平均电压为 3.72V，直流电耗 $12082\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}\text{Al}$ ，吨铝平均节电 $1123\text{kW}\cdot\text{h}$ 。目前，新型阴极结构电解槽的国际推广工作正在进行中。初步估计，在 4~5 年内，全国所有电解铝厂都能将现有电解槽改为新型电解槽，届时全国电解铝厂一年的节电量将超过我国大型水电站——葛洲坝一年的发电量。

在工业生态学研究方面，陆钟武院士是我国最早开始研究的著名学者之一，因其在工业生态学领域的突出贡献获得国家光华工程大奖。他的著作《穿越“环境高山”——工业生态学研究》和《工业生态学概论》，集中反映了这些年来陆钟武院士及其科研团队在工业生态学方面的研究成果。在煤与废塑料共焦化、工业物质循环理论等方面取得长足发展；在废塑料焦化处理、新型球团竖炉与煤高温气化、高温贫氧燃烧一体化系统等方面获多项国家发明专利。

依据热力学第一、第二定律，提出钢铁企业燃料（气）系统结构优化，以及“按质用气、热值对口、梯级利用”的科学用能策略，最大限度地提高了煤气资源的能源效率、环境效率及其对企业节能减排的贡献率；确定了宝钢焦炉、高炉、转炉三种煤气资源的最佳回收利用方式和优先使用顺序，对煤气、氧气、蒸气、水等能源介质实施无人化操作、集中管控和经济运行；研究并计算了转炉煤气回收的极限值，转炉煤气的热值、回收量和转炉工序能耗均达到国际先进水平；在国内首先利用低热值纯高炉煤气进行燃气-蒸气联合循环发电。高炉煤气、焦炉煤气实现近“零”排放，为宝钢创建国家环境友好企业做出重要贡献。作为主要参与单位开发的钢铁企业副产煤气利用与减排综合技术获得了 2008 年国家科技进步二等奖。

另外，围绕冶金材料和新技术的研发及节能减排两大中心任务，在电渣冶金、电磁冶金、自蔓延冶金、新型炉外原位脱硫等方面都取得了不同程度的突破和进展。基于钙化-碳化的大规模消纳拜耳赤泥的技术，有望攻克拜耳赤泥这一世界性难题；

钢焖渣水除疤循环及吸收二氧化碳技术及装备,使用钢渣循环水吸收多余二氧化碳,大大降低了钢铁工业二氧化碳的排放量。这些研究工作所取得的新方法、新工艺和新技术都会不同程度地体现在丛书中。

总体来讲,《现代冶金与材料过程工程丛书》集中展现了东北大学冶金与材料学科群体多年的学术研究成果,反映了冶金与材料工程最新的研究成果和学术思想。尤其是在“985工程”二期建设过程中,东北大学材料与冶金学院承担了国家I类“现代冶金与材料过程工程科技创新平台”的建设任务,平台依托冶金工程和材料科学与工程两个国家一级重点学科、连轧过程与控制国家重点实验室、材料电磁过程教育部重点实验室、材料微结构控制教育部重点实验室、多金属共生矿生态化利用教育部重点实验室、材料先进制备技术教育部工程研究中心、特殊钢工艺与设备教育部工程研究中心、有色金属冶金过程教育部工程研究中心、国家环境与生态工业重点实验室等国家和省部级基地,通过学科方向汇聚了学科与基地的优秀人才,同时也为丛书的编撰提供了人力资源。丛书聘请中国工程院陆钟武院士和王国栋院士担任编委会学术顾问,国内知名学者担任编委,汇聚了优秀的作者队伍,其中有中国工程院院士、国务院学科评议组成员、国家杰出青年科学基金获得者、学科学术带头人等。在此,衷心感谢丛书的编委会成员、各位作者以及所有关心、支持和帮助编辑出版的同志们。

希望丛书的出版能起到积极的交流作用,能为广大冶金和材料科技工作者提供帮助。欢迎读者对丛书提出宝贵的意见和建议。

赫冀成 张延安

2011年5月

目 录

《现代冶金与材料过程工程丛书》序

前言

第 1 章 概论	1
1.1 电渣冶金技术概论	1
1.2 电渣重熔过程的研究现状	2
1.2.1 电磁热流与凝固过程的研究进展	3
1.2.2 宏观偏析的研究进展	11
1.3 本书的研究目的和主要内容	15
1.3.1 研究目的	15
1.3.2 主要内容	15
第 2 章 电渣重熔过程的数学模型	18
2.1 模型体系	18
2.2 模型假设	20
2.3 两相流模块	21
2.3.1 模型选择依据	21
2.3.2 VOF 算法	22
2.4 电磁场模块	23
2.5 溶质输运模块	25
2.5.1 两相流动控制方程	26
2.5.2 两相传热及凝固控制方程	27
2.5.3 溶质输运与再分配控制方程	29
2.6 边界条件	30
2.6.1 电磁场模型边界条件	30
2.6.2 流动模型边界条件	31
2.6.3 传热模型边界条件	31
2.7 数值求解方法	32
2.8 本章小结	39
第 3 章 电渣接续过程的实验研究	40
3.1 实验方案	40

3.1.1	实验设备	40
3.1.2	实验材料	41
3.1.3	实验参数	41
3.1.4	实验步骤	42
3.2	实验结果与分析	42
3.2.1	熔炼电流对宏观偏析的影响	42
3.2.2	渣层厚度对宏观偏析的影响	47
3.2.3	结晶器填充比对宏观偏析的影响	52
3.3	本章小结	56
第4章	电渣重熔接续过程的数值模拟	58
4.1	计算条件	58
4.2	计算结果与讨论	60
4.2.1	电磁场	60
4.2.2	流动、温度分布和凝固行为	62
4.2.3	元素质量分数分布	64
4.3	本章小结	69
第5章	过渡段长度的参数研究	71
5.1	参数设计	71
5.2	电流和渣层厚度对焦耳热产量的影响	73
5.3	电流和渣层厚度对流动、传热和凝固的影响	75
5.4	电流和渣层厚度对偏析度和过渡段长度的影响	79
5.5	过渡段长度函数拟合	83
5.6	本章小结	90
第6章	电渣接续制备工艺的优化	92
6.1	无量纲数分析	92
6.1.1	电流对ST数的影响	92
6.1.2	渣层厚度对ST数的影响	94
6.2	电渣接续制备双合金钢锭新工艺的实验研究	96
6.2.1	实验设备和参数	96
6.2.2	实验结果与分析	96
6.3	电渣接续制备双合金钢锭新工艺的数值模拟	97
6.3.1	计算条件	97
6.3.2	新接续制备过程中元素质量分数的分布	98
6.3.3	新工艺中电流对过渡段长度的影响	102

6.4 旋转电极电渣重熔过程的数值模拟	103
6.4.1 电磁场	104
6.4.2 流场、温度分布和金属熔池形状	106
6.4.3 自耗电极转速的影响	110
6.5 非定常电流控制对电渣重熔过程的影响	111
6.5.1 定常电流重熔情况	112
6.5.2 电流变化对金属熔池的影响	114
6.6 本章小结	115
第7章 电渣重熔微观组织数学模型	118
7.1 基本假设	118
7.2 数学模型	118
7.2.1 凝固计算模型	118
7.2.2 元胞自动机模型	120
7.2.3 元胞自动机法与有限元法的耦合	124
7.2.4 二次枝晶计算的数学模型	124
7.3 软件介绍	125
7.4 物理模型及边界条件	126
7.4.1 物理模型	126
7.4.2 边界条件	126
7.5 求解步骤	126
7.6 无电磁搅拌电渣重熔钢锭微观组织数值模拟	128
7.6.1 模型验证	128
7.6.2 微观组织模拟结果	129
7.6.3 熔炼电流对电渣重熔钢锭晶粒结构影响	131
7.7 电磁搅拌电渣重熔微观组织数值模拟	137
7.7.1 模型验证	138
7.7.2 搅拌电流对晶粒结构影响	138
7.8 本章小结	142
第8章 单电极电渣重熔有限元模型	144
8.1 有限元法	144
8.1.1 谐波算法	144
8.1.2 场量值的计算	146
8.1.3 焓基潜热演化法	149
8.1.4 多物理场耦合	151

8.2	基本假设与物理模型	152
8.3	单电极多物理场结果分析	154
8.3.1	电流密度分布	154
8.3.2	磁感应强度和电磁力分布	154
8.3.3	焦耳热分布	155
8.3.4	温度分布与凝固	156
8.4	不同电极尖端形状的影响	157
8.5	导电结晶器	159
8.5.1	电流密度分布	160
8.5.2	焦耳热分布	160
8.5.3	温度分布及凝固过程	161
第9章	双极串联电渣重熔有限元模型	163
9.1	双极串联电渣重熔系统基本假设与物理模型	163
9.2	双极串联电渣重熔系统多物理场	165
9.2.1	电流密度分布	165
9.2.2	磁感应强度分布	165
9.2.3	焦耳热分布	168
9.2.4	温度分布	169
第10章	三相多电极电渣重熔有限元模型	174
10.1	三相电渣重熔模型参数	175
10.2	三相电渣重熔电路分析	177
10.3	三相电渣重熔多物理场及凝固过程	180
10.3.1	三电极电渣重熔电磁场	180
10.3.2	三电极电渣重熔温度分布与凝固	182
10.3.3	三电极电渣重熔参数变化研究	183
10.3.4	六电极电渣重熔电磁场	187
10.3.5	六电极电渣重熔温度分布与凝固	190
10.3.6	六电极电渣重熔参数变化研究	191
第11章	管式电极电渣重熔数值模拟研究	200
11.1	管式电极电渣重熔电磁场分布	200
11.1.1	电流密度分布	200
11.1.2	磁感应强度分布	205
11.1.3	电磁力分布	208
11.1.4	焦耳热功率密度分布	210

11.2	管式电极电渣重熔温度场分布	211
11.3	从数值计算角度对管式电极尺寸的优化	213
11.4	本章小结	218
第 12 章	双极串联电渣热封顶设计及理论分析	220
12.1	双极串联电渣热封顶装置的设计	220
12.1.1	双极串联电渣热封顶装置的基本结构	220
12.1.2	双极串联电渣热封顶装置的工作原理	224
12.2	双极串联电渣加热下大钢锭凝固过程电磁场分布	224
12.2.1	电流密度分布	224
12.2.2	磁感应强度分布	226
12.2.3	电磁力分布	227
12.2.4	焦耳热功率密度分布	228
12.3	双极串联电渣加热下大钢锭凝固过程温度场分布	228
12.4	工艺参数分析	230
12.4.1	不同渣层厚度参数分析	230
12.4.2	不同电极插入深度参数分析	232
12.5	本章小结	235
参考文献		237

第1章 概 论

1.1 电渣冶金技术概论

电渣重熔是把一般冶炼方法制成的钢进行再精炼的工艺。电渣重熔工艺系统如图 1.1 所示。结晶器是由导热性能良好的铜制成的上下开口的圆筒。为了方便脱模，下端的半径要稍大于上端的半径。熔炼过程中，对结晶器通水冷却。自耗电极一端与导电柱连接，另一端插入液态渣中，电渣重熔主要使用交流电，由变压器通过短网导线输入自耗电极，则自耗电极、液态渣、液态金属、已凝固的钢锭、底水箱、短网和变压器形成了一个完整的电流回路。在熔炼过程中，可以通过改变电极送进速度调整电流大小^[1-4]。

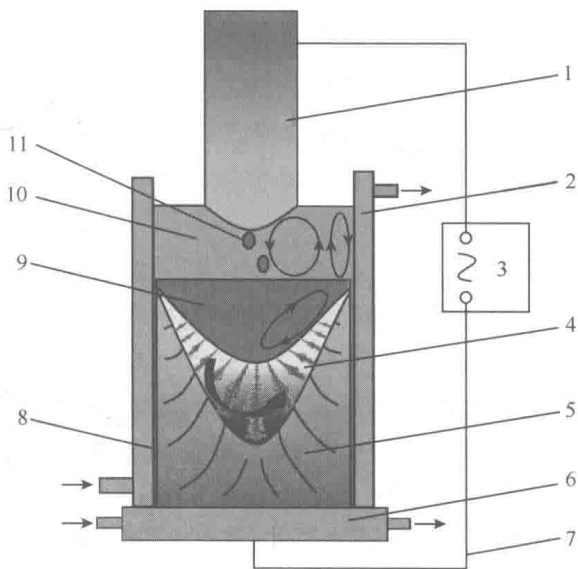


图 1.1 电渣重熔系统示意图

1. 自耗电极；2. 水冷结晶器；3. 变压器；4. 糊状区；5. 铸锭；6. 水冷底盘；7. 短网；8. 渣皮；9. 金属熔池；10. 渣池；11. 金属熔滴

当交流电通过回路时，由于熔渣的电阻率较大，在渣池中会产生大量的热量（焦耳热），渣池被焦耳热加热到高温熔融状态，还有一部分焦耳热会熔化自耗电极，在其端头形成液态金属薄膜，然后薄膜向端头中心汇聚形成小液滴。在力的

作用下,液滴从端头脱落,进入熔渣中,与熔渣发生电化学反应,即精炼过程。最后达到金属熔池中,在冷却水的作用下,液态金属沿一定方向发生凝固。在钢锭由下向上的凝固过程中,液态金属和熔渣不断上移。此外,由于凝固收缩,固体钢锭与结晶器侧壁之间存在缝隙,熔渣则会流入缝隙,冷却之后钢锭与结晶器侧壁之间形成一层渣壳,这层渣壳可以提高钢锭表面质量,使得表面平滑,同时也增大了钢锭与结晶器侧壁之间的传热热阻,使热量更多地传导至钢锭底部,然后被底水箱内的冷却水带走,有利于钢锭自下而上的结晶^[5-7]。

电渣冶金技术具有以下优势:

(1) 能够显著地去除非金属夹杂物。在电极熔化末端金属液滴形成阶段,液态金属以薄膜形态覆盖在电极端头,随后形成金属小液滴脱离电极滴落,一滴一滴地穿过渣池。在此过程中,液态金属与熔渣反应的比表面积很大,钢渣接触面积可达 $3.2\text{m}^2/\text{kg}$ 以上,反应进行得非常充分。同时,在电磁力的作用下渣池被强烈搅拌,不断更新钢渣接触面,强化了冶金反应,促进了有害夹杂元素和非金属夹杂物的去除(熔渣能够充分吸附非金属夹杂物)。

(2) 具有良好的冶金反应热力学和动力学条件。重熔过程中熔渣的过热度可达 600K 左右,钢液的过热度可达 450K 左右。熔池的高温促进了一系列物理化学反应的进行。

(3) 钢锭组织致密。在凝固过程中,液态金属受到结晶器底部和侧面的强烈冷却,且由于液态金属体积很小,钢锭的凝固只在很小体积内进行,凝固速度快。另外,电渣锭是顺序结晶,结晶过程容易控制,再加上合理的熔炼速度,就能得到无低倍缺陷的钢锭。

(4) 钢锭宏观偏析较轻。由于重熔过程中凝固速度快,凝固体积小,且凝固收缩可以得到源源不断的金属液补充,因此,固相和液相中溶质扩散受到抑制,减轻了宏观偏析。

(5) 钢锭表面质量好。在结晶器壁上形成的薄而均匀的渣皮能够保证钢锭的表面光洁,同时有效地减小钢锭径向传热,创造了良好的结晶条件。

1.2 电渣重熔过程的研究现状

电渣重熔结晶器被认为是目前最复杂的冶金反应器之一。在结晶器中,同时存在固体电极熔化、钢液精炼和液态金属凝固三个工艺,主要包括电磁场交变互感,熔渣和液态金属两相流动,两相之间的传热传质和化学反应,液相和固相之间的转变以及晶体的形核长大等复杂且耦合的物理化学现象^[8]。为了提高电渣锭的质量,实际生产中会对熔速进行实时监测调节,主要方法是调整电极端头与熔渣的接触面积,而接触面积的变化将会导致电流、热源和洛伦兹力等多物理场的

非稳定变化,更增加了该过程的复杂性^[9]。

对电渣重熔过程的研究方法主要有物理实验和数值模拟。物理实验是在电渣炉上安装必要的测量装置,然后对重熔过程进行观察和测量,认识熔炼过程中熔渣和金属的流动传热等规律。但电渣重熔过程现象复杂,且需要强电高温的操作环境,给实验观察和测量造成了很大的困难,测量结果十分有限,测量精度也大幅降低。另外,电渣重熔操作参数以及所用渣系和自耗电极化学成分都会影响电渣重熔工艺,要想搞清楚,实验费用是十分昂贵的。近年来,随着计算机硬件和数值计算方法的快速发展,数值模拟技术已经越来越被广大学者采用。数值模拟的主要目的是针对特定的物理现象,利用已经掌握的理论建立数学模型,而这个模型的计算结果能够可靠地再现该物理现象。这样,研究人员就可以利用模型预测和揭示大自然中存在的各种物理现象。由于数值模拟的便利性与高精度,而且数学模型能够对过程进行详细的描述,计算结果相对于测量结果更加丰富,所以数值模拟技术在电渣重熔的研究中应用十分广泛,成为主流的方法。自从1958年电渣重熔技术开始应用于工业领域以来,由于电渣生产的灵活性及产品的优越性,电渣钢产量持续增长。现代工业对金属品质的要求日益严格,所以电渣工业开始用计算机控制,而要进行控制必须有模型,电渣过程的理论模型则陆续开始出现,主要包括电磁场模型、热传递模型、熔渣金属两相流动传热耦合模型、溶质传输模型等^[10, 11]。

1.2.1 电磁热流与凝固过程的研究进展

早在1971年,A. Mitchell等就采用差分方法建立了自耗电极二维数学模型,得到了稳定条件下电极轴向的温度分布,然后对比了计算结果与实验测量结果^[12]。在自耗电极的上部,即远离熔渣的地方,计算结果与测量结果吻合得较好,但是在靠近熔渣的地方,计算值均高于测量值,这主要是没有考虑辐射散热的影响。随后J. Mendrykowski等在1972年发展了该模型,考虑了浸入熔渣内的电极,特别是电极壁面上固态渣皮对辐射传热的影响。结果发现计算值与测量值之间的误差减小了^[13]。

A. H. Dilawari和J. Szekely在1977年针对电渣重熔过程建立了一个二维轴对称数学模型,将渣池和金属熔池中的电磁力和流动耦合起来,考察了重熔过程中的磁流体流动行为^[14]。作者从麦克斯韦方程组出发推导出关于磁场强度 $\vec{H}$ 的输运方程:

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{H}) + \eta \nabla^2 \vec{H} \quad (1.1)$$

上式等号右边两项分别表示磁对流与磁扩散, η 为磁扩散系数, $\eta = 1/\sigma\mu_0$,其中 σ

为电导率, μ_0 为真空磁导率。在磁流体力学中, 一般用无量纲的磁雷诺数表征磁对流与磁扩散之比, 如果磁雷诺数小于 1, 说明磁对流作用可以忽略, 即仅考虑电磁力对流动的影响。通过计算, 电渣过程中渣和金属中的磁雷诺数数量级分别为 10^{-4} 和 10^{-2} , 都要远小于 1, 所以作者忽略了磁对流, 得到电渣重熔过程中的磁场输运方程:

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \eta \nabla^2 \vec{H} \quad (1.2)$$

进一步, 在柱坐标轴对称体系 (r, θ, z) 中, $H_z = H_r = 0$, 所以只需要对 H_θ 建立如下方程:

$$\frac{\partial H_\theta}{\partial t} = \eta \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\theta) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} (r H_\theta) \right] \right\} \quad (1.3)$$

采用有限体积法求解上述方程, 并且忽略 H_θ 随时间的变化, 最后得到电渣炉中稳态的 H_θ 的分布, 再根据各物理量的本构关系, 即可求得电流 $\vec{J}$ 、磁感应强度 $\vec{B}$ 和电磁力 $\vec{F}$ 的分布:

$$J_r = -\frac{\partial H_\theta}{\partial z}, J_z = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\theta) \quad (1.4)$$

$$F_r = -J_z B_\theta, F_z = J_r B_\theta \quad (1.5)$$

把电磁力作为源项加入动量方程中, 从而体现出电磁力对流动的影响。上面提出的计算方法奠定了电渣重熔过程磁流体数学模型的基础, 后来的大部分研究者都是采用此算法或在此算法上进一步开发。从计算得到的流场来看, 在电磁力的作用下, 熔池中会产生一个逆时针旋转的涡流, 且熔渣的运动速度要远大于金属液的运动速度。此外, 作者还发现不论是工业规模还是实验室规模的电渣炉中, 熔渣和金属液的流动都处于湍流状态。

但是此模型对于渣金两相的处理并不完善, 两相的分界面是固定不动的, 动量传输通过剪切力完成, 且认为界面上只存在径向速度而无轴向速度。

随后在 1978 年, A. H. Dilawari 等完善了上述模型, 加入了能量方程^[15]:

$$\rho_{\text{ref}} c_p \left(v_c \frac{\partial T}{\partial z} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{J_r^2 + J_z^2}{\sigma} + S_r \quad (1.6)$$

上式等号右边第二项表示的就是焦耳热, T 表示温度, 因为熔渣的电阻要远大于金属的电阻, 所以只考虑熔渣产生的焦耳热。由于未使用两相模型, 因此在能量方程中加入了源项 S_r , 代表的是金属液滴带入的热量。在渣金两相的分界面处, 认为轴向热通量相等, 且无径向热通量:

$$k_s \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_s = k_m \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_m \quad (1.7)$$

式中, k 为导热系数, 下标 s 表示熔渣, 下标 m 表示金属液。求解上述方程即可