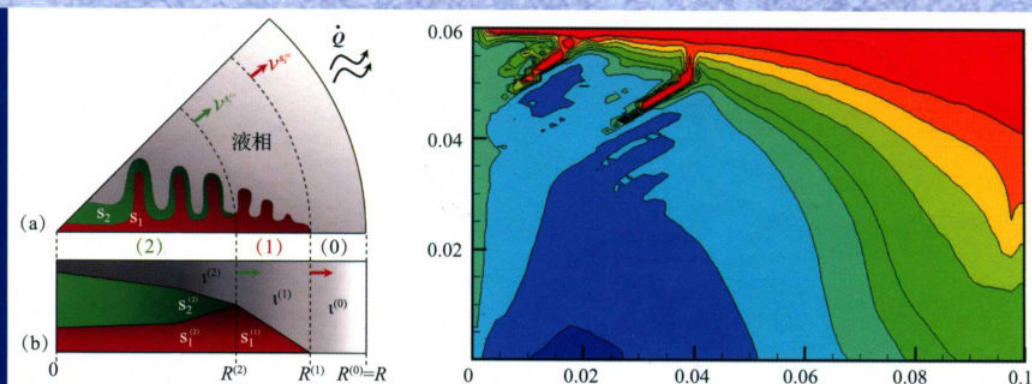


“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代冶金与材料过程工程丛书

计算冶金学



赫冀成 雷 洪 王 强 等◎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

计算冶金学

赫冀成 雷 洪 王 强 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书概述了计算冶金学的基本概念和冶金过程模拟的基础知识,系统地介绍了计算冶金学在炼铁和炼钢中的应用,涉及冶金热力学、冶金动力学、冶金反应工程、冶金传输原理、电磁冶金学、凝固理论等各个方面,总结了作者在高炉、钢包、中间包、结晶器等复杂系统内多尺度模拟方面的工作,将现代冶金学中的新理论和新方法应用于钢铁冶金过程,展现了计算冶金学的发展趋势。

本书可作为冶金有关专业研究生的教材,也可以作为冶金工程专业的教师和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

计算冶金学 / 赫冀成等著. —北京: 科学出版社, 2019.11

(现代冶金与材料过程工程丛书/赫冀成主编)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-061878-8

I. ①计… II. ①赫… III. ①冶金计算 IV. ①TF02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 146228 号

责任编辑: 张淑晓 高 微 / 责任校对: 杜子昂

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 东方人华

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

*

2019 年 11 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2019 年 11 月第一次印刷 印张: 21 1/4

字数: 428 000

定价: 158.00 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》编委会

顾 问 陆钟武 王国栋

主 编 赫冀成

副 主 编 (按姓氏笔画排序)

左 良 何鸣鸿 姜茂发

执行副主编 张延安

编 委 (按姓氏笔画排序)

王 强	王 磊	王恩刚	左 良	史文芳
朱苗勇	朱旺喜	刘承军	刘春明	刘相华
刘常升	杨洪英	吴 迪	吴文远	何鸣鸿
邹宗树	张延安	张殿华	茹红强	姜茂发
姜周华	姚广春	高瑞平	崔建忠	赫冀成
蔡九菊	翟玉春	翟秀静		

《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，世界冶金工业正朝着高效、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项目和面上项目的资助（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；获得国家发明专利 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 年国家科学技术进步奖一等奖。

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 年国家科学技术进步奖一等奖。

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 年国家技术发明奖二等奖。

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 年国家科学技术进步奖二等奖。

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 年国家科学技术进步奖二等奖。

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 年国家科学技术进步奖二等奖。

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 年的国家科学技术进步奖一等奖。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设施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 年辽宁省技术发明奖一等奖。

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 $12\,082\text{kW}\cdot\text{h/t Al}$,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授权多项国家发明专利。

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 年国家科技进步奖二等奖。

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

前 言

20 世纪 50 年代以来,随着现代冶金工艺的发展,冶金学的理论和研究方法发生了巨大的变化。具体而言,以传统冶金热力学为主要理论支柱的冶金基础理论,逐渐发展为描述冶金过程的反应机理和反应速率的现代冶金学。在此过程中,冶金动力学、反应工程学、传输原理、电磁冶金学、计算物理学等被广泛应用于冶金过程分析。随着 20 世纪 90 年代计算机硬件和软件技术的飞速发展,数值计算方法和并行计算技术与现代冶金学理论实现了有机的融合,从而在时间和空间上实现了对冶金过程的宏观、介观和微观尺度的数值再现,逐渐形成了一门独特的领域——计算冶金学。

计算冶金学作为冶金科学领域中的新兴学科,已经引起了国内外许多冶金学家的广泛关注。冶金领域的数值计算与模拟使人们看到了其在定量预测冶金反应器冶金效果及优化设备和工艺操作等方面的潜力,也使其成为现代冶金学者一个不可或缺的研究工具。计算冶金学主要涉及冶金对象的抽象和简化,数学模型的建立,数值求解方法的确定,验证和分析简化后冶金现象的合理性和准确性四个步骤。随着各种商业软件的普遍应用,计算冶金学在钢铁冶金领域得到了长足的发展,虽然冶金学者发表了大量的数值仿真方面的研究论文,但是目前尚没有系统介绍钢铁冶金长流程中高炉冶炼、钢包精炼、电磁冶金、金属凝固方面数值计算的著作。本课题组长期从事钢铁冶金工艺方面的数值仿真工作,本书即系统地介绍了我们多年来所取得的主要研究成果,希望本书的出版能够给广大的冶金工作者提供新的思路。

编入本书的各章节内容,大部分是作者主持和参与的科研工作,也介绍了部分国内外专家已发表的最新研究成果。本书共分为 8 章:第 1 章由赫冀成和王强撰写,主要介绍计算冶金学的发展;第 2 章由赫冀成和雷洪撰写,主要介绍数学模型中涉及的概念和常见解法;第 3 章由唐珏和储满生撰写,主要介绍回旋区模型、多流体高炉数学模型和高炉焖分析模型;第 4 章由耿佃桥撰写,主要介绍钢包真空精炼反应器内气液流动和混合;第 5 章由王强、李宏侠撰写,主要介绍钢包出钢过程漩涡的形成和防治;第 6 章由雷洪撰写,主要介绍中间包 RTD 曲线、通道式感应加热技术和夹杂物行为;第 7 章由张红伟撰写,主要介绍合金凝固路径、凝固宏观偏析以及凝固组织的预测;第 8 章由田溪岩撰写,主要介绍电磁制动下结晶器内传输过程。

本书由赫冀成教授、王强教授和雷洪教授担任主笔，负责书稿的组织、统稿和审定。陈士富和王连钰等同学参与了公式和文字的校对和排版等工作。在本书出版之际，对为本书的出版做出贡献的各位老师和同学表示深深的谢意。

感谢国家自然科学基金（U1560207、51574074、U1460108 和 U1808212）对作者工作持续多年的资助。在书稿准备与出版过程中，科学出版社的编辑人员也给予了大力的支持，在此一并表示感谢。

计算冶金学涉及多个学科和专业，由于作者的水平和专业知识所限，文中难免存在疏漏和不足之处，欢迎广大读者批评指正。

作 者

2019 年 5 月于东北大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 现代钢铁工业的发展	1
1.1.1 世界钢铁强国	1
1.1.2 中国现代钢铁工业的成长	3
1.2 计算冶金学的发展	3
1.2.1 原型和模型	3
1.2.2 过程解析与数学模型	4
1.2.3 数学模型、数值模拟和数学模拟	5
1.2.4 数学模拟的意义和优越性	6
1.2.5 计算冶金的实施方法	6
1.3 计算冶金学现状	9
1.3.1 计算机硬件的发展	9
1.3.2 计算机软件的发展	10
1.3.3 并行计算技术的发展	12
参考文献	12
第 2 章 数学模型	14
2.1 基本概念	15
2.1.1 控制方程的数量	15
2.1.2 衡算方程的形式	16
2.1.3 控制体	17
2.1.4 矢量方向与坐标轴方向	18
2.1.5 未知物理量的微小增量	18
2.1.6 通量矢量的微分衡算	19
2.1.7 传输速度项	20
2.1.8 化学反应动力学项	20
2.1.9 边界条件与初始条件	21
2.1.10 因次和谐	22
2.2 数学模型的分类	22
2.3 微分方程的分类及数值解法	24

2.3.1 常微分方程	24
2.3.2 偏微分方程	25
参考文献	27
第3章 高炉炼铁过程数学模拟	29
3.1 高炉数学模型的发展历程及方向	29
3.2 高炉风口回旋区模型	35
3.2.1 模型的假设条件	35
3.2.2 模型考虑的主要反应	35
3.2.3 模型的主要计算公式	36
3.2.4 模型的创建	41
3.2.5 喷吹焦炉煤气高炉风口回旋区模拟	41
3.3 多流体高炉数学模型	45
3.3.1 模型的框架	45
3.3.2 模型的求解	50
3.3.3 模型有效性的验证	51
3.3.4 喷吹焦炉煤气多流体高炉数学模拟	52
3.4 高炉烟分析模型	63
3.4.1 烟分析方法	63
3.4.2 烟分析模型	67
3.4.3 喷吹焦炉煤气高炉烟平衡及烟评价	67
3.5 小结	73
参考文献	73
第4章 钢液的真空精炼	75
4.1 钢液真空精炼技术的发展历史	76
4.2 钢液真空精炼流场数学模型的演变	78
4.3 真空精炼装置内钢液流动及混合数学模型	79
4.3.1 基本假设	80
4.3.2 控制方程	80
4.3.3 计算区域及边界条件	82
4.3.4 侧吹气体运动行为模型	83
4.4 VD 钢包精炼装置内钢液流动行为数值模拟	88
4.4.1 不同底吹方式对 VD 装置内钢液流场的影响	88
4.4.2 VD 钢包精炼的双底吹位置优化	90
4.5 RH 精炼装置内钢液流动行为数值模拟	94
4.5.1 RH 精炼装置内钢液流场及含气率分布	94

4.5.2 侧底复吹 RH 精炼装置内钢液流场	100
参考文献	106
第 5 章 钢包出钢末期底部漩涡形成机理及其防治	110
5.1 出钢过程中漩涡研究现状	110
5.1.1 出钢末期漩涡的危害及防漩的意义	110
5.1.2 自由表面涡的研究现状	113
5.1.3 防漩技术的研究概况	116
5.2 钢包钢液流场数学模型	123
5.2.1 基本假设	124
5.2.2 数学模型	124
5.2.3 几何模型与网格划分	126
5.2.4 边界条件	127
5.2.5 求解方法和收敛判据	128
5.2.6 流体物理性质	128
5.2.7 模型验证	128
5.3 钢包出钢过程中自由表面涡的形成机理	132
5.3.1 初始切向速度对自由表面涡形成的作用	132
5.3.2 科氏力对自由表面涡形成的作用	135
5.3.3 钢包出钢末期漩涡形成机理的分析	142
5.4 钢包出钢过程中自由表面涡的影响因素	146
5.4.1 水口位置对漩涡形成的影响	147
5.4.2 水口直径对漩涡形成的影响	148
5.4.3 流体物理性质对漩涡形成的影响	149
5.4.4 漩涡的临界高度公式	152
5.5 漩涡抑制机理的探究	154
5.5.1 不同偏心率条件下漩涡的运动	155
5.5.2 不同偏心率条件下速度场的变化	155
5.6 漩涡防治方法	159
参考文献	162
第 6 章 中间包控流技术及研究方法	166
6.1 中间包冶金技术	166
6.1.1 中间包的作用	166
6.1.2 中间包的主要控流元件	167
6.2 通道式感应加热中间包	175
6.2.1 电磁场	175

6.2.2 流场和温度场	177
6.3 中间包 RTD 曲线	183
6.3.1 基本假设	183
6.3.2 控制方程	183
6.3.3 初始条件和边界条件	183
6.3.4 单流中间包 RTD 曲线处理方法	184
6.3.5 多流中间包整体 RTD 曲线分析方法	186
6.3.6 多流中间包 RTD 曲线实例分析	187
6.4 中间包夹杂物的运动轨迹	189
6.4.1 基本假设	189
6.4.2 控制方程	189
6.4.3 基本求解方法	190
6.4.4 夹杂物上浮速度	190
6.4.5 中间包内夹杂物运动轨迹	191
6.5 夹杂物碰撞长大模型	192
6.5.1 颗粒碰撞理论	192
6.5.2 基本假设	194
6.5.3 控制方程	194
6.5.4 边界条件和收敛条件	195
6.5.5 中间包内夹杂物碰撞长大行为	195
参考文献	197
第 7 章 铸坯凝固过程模拟	200
7.1 合金凝固路径预测	200
7.1.1 多元合金微观偏析模型	202
7.1.2 模型验证	210
7.1.3 动力学与热力学预测的多元合金凝固路径	211
7.1.4 热力学、动力学模型预测合金凝固路径特点分析	214
7.2 凝固宏观偏析预测	215
7.2.1 偏析形成机理	215
7.2.2 宏观偏析预测的数学模型	217
7.2.3 连续介质宏观传输模型	219
7.2.4 方坯稳态凝固过程	225
7.2.5 考虑凝固收缩的宏观偏析预测	230
7.2.6 铸坯非稳态凝固过程预测	237
7.3 凝固组织预测	245

7.3.1 凝固组织预测模型概述	245
7.3.2 元胞自动机法	248
7.3.3 介观元胞自动机-控制容积法耦合模型	253
7.3.4 宏微观双向耦合预测铸锭凝固组织	256
7.3.5 宏微观单向耦合预测铸坯凝固组织	260
参考文献	261
第 8 章 薄板坯电磁制动	268
8.1 薄板坯电磁制动技术	268
8.1.1 薄板坯连铸的核心技术特点	270
8.1.2 电磁制动的发展	272
8.2 薄板坯电磁制动的电磁场数学模拟	275
8.2.1 电磁场基本理论	275
8.2.2 电磁场数学模型	276
8.2.3 电磁制动下薄板坯结晶器内电磁场特点	276
8.2.4 影响薄板坯结晶器内电磁场分布的因素	278
8.3 薄板坯电磁制动下钢液流动、传热和宏观凝固数学模拟	279
8.3.1 连铸中的钢坯凝固过程	279
8.3.2 凝固潜热的处理方法	280
8.3.3 凝固坯壳的测量方法	282
8.3.4 结晶器内钢液传热和凝固的数值模拟研究的发展	283
8.3.5 基本假设	284
8.3.6 数学模型	285
8.3.7 数值方法	287
8.3.8 无电磁制动作用下流场的特点	289
8.3.9 电磁制动作用下流场的特点	296
8.3.10 电磁制动对钢液流动、传热和凝固耦合行为的影响	305
参考文献	315

第1章 绪 论

1.1 现代钢铁工业的发展

近年来，新能源、信息产业、新医药、生物育种、节能环保等新兴产业发展迅速，成为朝阳产业；而钢铁等传统产业似乎成了夕阳产业。但钢铁就像粮食一样，并不会由于新兴产业的发展而变得可有可无。相反，钢铁和粮食虽然不是新兴产业，却是常青产业。无论什么时候，钢铁材料永远是国民经济发展中最重要的基础原材料。

钢铁工业在经过表 1.1 所示的两次技术创新高潮^[1]后，正式步入现代钢铁工业的成熟期。在世界钢铁工业近代发展上，美国、日本、欧洲曾经称雄多年。目前，中国已经成为世界最大的钢铁生产国和消费国。钢铁产业也朝着绿色制造、智能制造、满足超常制造的材料需求方向发展。

表 1.1 钢铁工业的创新高潮

	代表性技术	效果
第一次创新高潮 20 世纪 50~70 年代	(1) 转炉炼钢代替平炉炼钢	转炉炼钢投资少，冶炼速度快，冶炼品种多，冶炼质量改善，可以负能炼钢，生产效率高，经济效益好
	(2) 连铸取代模铸 + 初轧开坯	成材率提高 8%~10%，实现连续化的炼钢-轧钢工艺路线
	(3) 连续高速轧机取代横列式轧机	多机架串列式连续高速轧机节能、省地、安全、高质
第二次创新高潮 20 世纪 80~90 年代	(1) 纯净钢生产工艺	通过铁水预处理、炉外精炼、高效连铸等系列技术，使钢中的有害元素硫、磷、氧、氮、氢等降至下限，大幅度地提高钢材的性能
	(2) 控轧技术	保证了钢材的尺寸精度和质量性能
	(3) 短流程钢铁生产工艺	熔融还原、直接还原等新工艺、薄板坯连铸连轧与电炉(或转炉)相配合，可形成多种形式的短流程生产工艺，具有投资少、建设周期短、占地面积小、生产效率高、成本低、能耗低、污染少、产品质量好等优点

1.1.1 世界钢铁强国

18 世纪 60 年代，第一次技术革命引起的工业革命掀起了第一次现代化浪潮。