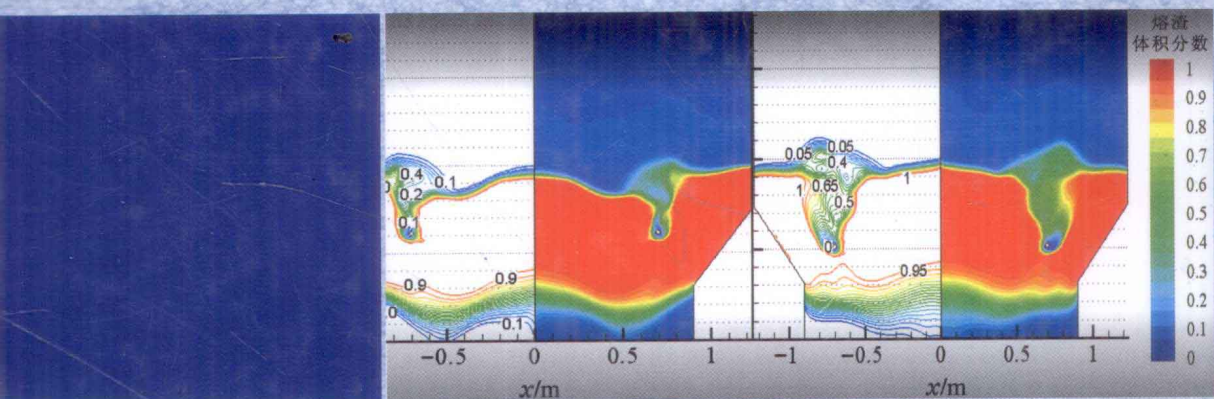


“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代冶金与材料过程工程丛书

钢铁冶金过程数学模型



王楠 邹宗树◎编著



科学出版社

内 容 简 介

本书共分六章:第1章介绍数学模型的理论基础,包括数学模型基本原理及数学模型的求解方法;第2~6章重点介绍钢铁冶金相关操作单元数学模型的建立和求解、典型反应器解析以及计算结果的分析讨论,包括炼铁过程数学模型、铁水喷粉预处理过程数学模型、复吹转炉冶炼过程数学模型、精炼过程数学模型和连铸过程数学模型,对工艺数学模型、反应动力学数学模型以及反应器解析数学模型的建立方法和求解过程进行详细介绍,对计算结果进行分析讨论。

本书可供高等院校钢铁冶金专业高年级本科生、研究生和科研院所及企业研究人员和工程技术人员参考,也可作为高等院校钢铁冶金专业本科生和研究生培养的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

钢铁冶金过程数学模型 / 王楠,邹宗树编著. —北京:科学出版社,2011
(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 978-7-03-033040-6

I. 钢… II. ①王…②邹… III. 钢铁冶金-冶金过程-数学模拟
IV. TF4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 264713 号

责任编辑:张淑晓 房 阳 / 责任校对:钟 洋

责任印制:钱玉芬 / 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.sciencecp.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年12月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011年12月第一次印刷 印张:39 1/4

字数:764 000

定价:120.00 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 杨红英 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，在保证韧性的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(例如,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 年底超过 400 万 t,到 2006 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,为某国防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,吨铝直流电耗 12 082kW·h,平均节电 1123kW·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科技奖。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 年国家科学技术进步奖二等奖。

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资助者、学科学术带头人等。在此,衷心感谢丛书的编委会成员、各位作者以及所有在丛书编辑出版过程中给予关心、支持和帮助的同志们。

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

本书立足于冶金热力学及动力学、冶金传输原理、冶金宏观动力学以及冶金反应工程学等理论,通过对钢铁冶金单元过程和现象的定量解析、冶金反应过程的数学模拟、反应和生产速率的预测以及反应器的仿真研究和优化设计,系统介绍钢铁冶金过程数学模型的建立及其典型反应器的解析,以期实现对钢铁冶金高温过程和复杂反应器的深入揭示,从而达到分析和指导现代钢铁冶金生产的目的。

本书共分为六章。为了使读者了解和掌握数学模型的相关基础知识,本书在第1章首先对数学模型基本知识和数学模型的求解方法进行介绍,包括数学模型定义、数学模型分类及主要特点、数学模型建立步骤、数学模型选择、物流能流平衡模型的求解方法、解析型数学模型的数值求解方法等内容。第2~6章重点介绍钢铁冶金相关操作单元数学模型的建立和求解、典型反应器解析以及计算结果的分析讨论。第2章详细介绍炼铁过程相关数学模型,包括高炉炼铁工艺模型、Corex熔融还原炼铁工艺模型、Finex熔融还原炼铁工艺模型、HIs melt熔融还原炼铁工艺模型、COSRI熔融还原炼铁工艺模型等炼铁工艺模型,以及竖炉生产直接还原铁过程的数值模拟、Corex预还原竖炉的数值模拟、碳基填充床煤气富氢改质的数值模拟、鼓泡流化床参数设计模型、鼓泡流化床流场数值模拟、鼓泡流化床铁矿粉还原动力学模型、HIs melt熔融还原炉流场及温度场数值模拟等反应器的模拟与解析,并对典型熔融还原炼铁工艺从原料和设备特点、技术成熟度、经济成本、环保等方面进行分析与评价。第3章为铁水喷粉预处理过程数学模型,包括铁水喷粉预处理脱硫过程数学模型和铁水喷粉预处理脱磷过程的动力学模型。第4章以复吹转炉为例,介绍复吹转炉冶炼过程数学模型,包括复吹转炉冶炼过程预测数学模型以及基于炉气分析的转炉动态预测数学模型。第5章介绍较为典型的炉外精炼过程数学模型,包括钢包炉内流动和混合过程的数值模拟、CAS-OB-PI(喷粉)精炼过程数学模型。第6章为连铸过程所涉及的相关数学模型,包括连铸坯凝固传热数值模拟、超宽板坯结晶器流场与温度场的耦合数值模拟、旋流中间包数值模拟、板坯连铸结晶器内钢液吹氩过程的数学模拟。

本书介绍的相关钢铁冶金过程数学模型均是作者及所在课题组十余年教学和科研工作的总结、凝练,不仅在结构上体现出较好的系统性和完整性,而且在内容上突出了原始创新性。同时,本书中所建立和开发的部分钢铁冶金过程数学模型已应用于相关钢铁企业冶金过程的预报、优化及控制,并取得了良好的实际应用效果。

本书围绕钢铁冶金有关工艺和过程单元展开,内容界定在与冶金过程及反应器相关数学模型的建立和开发,目的是将钢铁冶金过程数学模型的建立方法详细介绍给读者,使读者在从事与本书内容相关的研发工作时有据可依。此外,作者希望本书的出版能起到抛砖引玉的作用,进一步推动国内自主开发的钢铁冶金过程数学模型在我国相关钢铁企业的推广和广泛应用,促进我国钢铁冶金工业高水平发展。

衷心感谢课题组谢雪梅、李海峰、张少魁、曲迎霞、王臣、徐辉、周继良、余珊、邹友生、胡春霞、赵成林、万学峰、匡世波、李霞、宋清诗、岳强、倪冰等的工作为本书所提供的重要支持。

本书中的部分工作是在国家自然科学基金项目(51174052,51174053)资助下进行的,在此深表谢意!

由于作者水平有限,书中疏漏与不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2011 年于东北大学

目 录

《现代冶金与材料过程工程丛书》序

前言

第 1 章 数学模型的理论基础	1
1.1 数学模型基本原理	1
1.1.1 数学模型的定义与要素	1
1.1.2 数学模型的分类	2
1.1.3 数学模型的建立	3
1.1.4 数学模型的意义	4
1.2 数学模型的求解方法	4
1.2.1 物流能流平衡数学模型的求解方法	4
1.2.2 解析型数学模型的数值求解方法	8
参考文献	26
第 2 章 炼铁过程数学模型	27
2.1 高炉炼铁工艺模型	27
2.1.1 高炉炼铁工艺模型的建立方法及结构	27
2.1.2 模型计算结果及分析	33
2.1.3 小结	37
2.2 Corex 熔融还原炼铁工艺模型	38
2.2.1 Corex 熔融还原炼铁工艺整体静态模型	39
2.2.2 Corex 熔融还原熔化气化炉区域静态模型	48
2.2.3 Corex 熔融还原炼铁工艺评述	66
2.3 Finex 熔融还原炼铁工艺模型	68
2.3.1 模型建立方法及结构	69
2.3.2 模型计算结果及分析	72
2.3.3 Finex 熔融还原炼铁工艺评述	80
2.4 HIs melt 熔融还原炼铁工艺模型	81
2.4.1 模型建立方法及结构	84
2.4.2 模型计算结果及分析	87
2.4.3 HIs melt 熔融还原炼铁工艺评述	96
2.5 COSRI 熔融还原炼铁工艺模型	97

2.5.1	COSRI 熔融还原炼铁工艺简介	97
2.5.2	COSRI 熔融还原炼铁工艺模型建立方法及结构	100
2.5.3	模型计算结果及分析	101
2.5.4	COSRI 熔融还原炼铁工艺评述	110
2.6	移动填充床解析数学模型(Ⅰ)——竖炉生产直接还原铁过程的 数值模拟	111
2.6.1	模型的建立	112
2.6.2	算例分析与讨论	120
2.6.3	工艺参数讨论	124
2.6.4	小结	126
2.7	移动填充床解析数学模型(Ⅱ)——Corex 预还原竖炉的 数值模拟	127
2.7.1	模型的建立	127
2.7.2	算例分析与讨论	134
2.7.3	小结	138
2.8	固定填充床解析数学模型——碳基填充床煤气富氢改质 数值模拟	139
2.8.1	绪言	139
2.8.2	模型的建立	140
2.8.3	算例结果及讨论	143
2.8.4	小结	154
2.9	鼓泡流化床解析数学模型(Ⅰ)——流化床参数设计模型	155
2.9.1	流化床内气固相流动	155
2.9.2	流化床设计原理	157
2.9.3	流化床参数计算	158
2.9.4	流化床设计的整体策略	170
2.9.5	设计模型的应用	171
2.9.6	小结	177
2.10	鼓泡流化床解析数学模型(Ⅱ)——流化床流场数值模拟	178
2.10.1	计算流体力学在流化床领域的应用	178
2.10.2	计算流体力学模拟的应用	182
2.10.3	小结	194
2.11	鼓泡流化床解析数学模型(Ⅲ)——流化床铁矿粉还原 动力学模型	194
2.11.1	动力学模型	195

2.11.2 模型求解	197
2.11.3 模型应用	203
2.11.4 小结	214
2.12 HIs melt 熔融还原炉流场及温度场数值模拟	215
2.12.1 HIs melt 熔融还原工艺基本原理	215
2.12.2 模型概述	215
2.12.3 熔融还原炉下部熔池模型	216
2.12.4 上部空间模型	226
2.12.5 小结	240
参考文献	240
第3章 铁水喷粉预处理过程数学模型	245
3.1 铁水喷粉预处理脱硫过程数学模型	245
3.1.1 喷粉脱硫基本原理	246
3.1.2 喷粉脱硫数学模型的建立	246
3.1.3 模型计算结果及讨论	259
3.1.4 模型计算结果与生产数据比较	268
3.1.5 模型预测	272
3.1.6 小结	273
3.2 铁水喷粉预处理脱磷动力学模型	274
3.2.1 脱磷模型	274
3.2.2 脱硅模型	279
3.2.3 脱碳反应速率模型	281
3.2.4 顶渣量的计算	282
3.2.5 模型计算方法	282
3.2.6 反应模型的计算结果	282
3.2.7 小结	289
参考文献	289
第4章 复吹转炉冶炼过程数学模型	291
4.1 复吹转炉冶炼过程预测数学模型	291
4.1.1 反应区域的动力学	291
4.1.2 冶炼过程成分变化	299
4.1.3 冶炼过程温度变化	303
4.1.4 炉气组成与温度的计算	305
4.1.5 模型关键参数的计算	308
4.1.6 模型一般参数的确定	313

4.1.7 数学模型求解步骤	313
4.1.8 模型计算结果及分析	313
4.1.9 小结	325
4.2 基于炉气分析的转炉动态预测数学模型	327
4.2.1 转炉炉气分析技术的概况	327
4.2.2 炉气成分变化规律及分析	329
4.2.3 基于炉气分析的转炉冶炼过程动态预测数学模型	335
4.2.4 数学模型的计算结果及讨论	348
4.2.5 小结	369
参考文献	370
第5章 精炼过程数学模型	372
5.1 钢包炉内流动和混合过程的数值模拟	372
5.1.1 吹气钢包精炼炉流动数学模型研究概述	372
5.1.2 吹气钢包精炼炉混合程度的研究	375
5.1.3 LF钢包炉流动和混合的数值模拟概况	377
5.1.4 LF钢包炉三维数学模型的建立及其数值求解	377
5.1.5 LF钢数值模拟结果讨论与分析	393
5.1.6 小结	402
5.2 CAS-OB-PI 精炼过程数学模型	403
5.2.1 CAS-OB-PI 精炼工艺简介	403
5.2.2 CAS-OB-PI 精炼过程喷吹粉剂的配料计算模型	404
5.2.3 CAS-OB-PI 精炼过程温降预测模型	408
5.2.4 CAS-OB-PI 精炼脱硫过程数学模型	416
5.2.5 精炼过程夹杂物生成与去除数学模型	437
5.2.6 小结	449
参考文献	451
第6章 连铸过程数学模型	453
6.1 连铸坯凝固传热的数值模拟	453
6.1.1 连铸坯凝固传热概述	453
6.1.2 铸坯凝固传热模型的建立	457
6.1.3 传热模型的计算方法	462
6.1.4 计算结果与分析	478
6.1.5 小结	488
6.2 超宽板坯结晶器流场与温度场的耦合数值模拟	489
6.2.1 结晶器内钢液的流动和传热	489

6.2.2	结晶器内流动与传热数学模型的建立	491
6.2.3	计算结果与讨论	496
6.2.4	小结	540
6.3	旋流中间包数值模拟	541
6.3.1	中间包冶金概述	541
6.3.2	中间包结构对钢水流动状态及铸坯质量的影响	542
6.3.3	旋流中间包设计原理	544
6.3.4	旋流室内钢液和非金属夹杂物运动分析	544
6.3.5	单流旋流中间包流场数值模拟	548
6.3.6	单流旋流中间包内钢/渣界面行为的数值模拟	561
6.3.7	双流旋流中间包非对称数值模拟	570
6.3.8	小结	574
6.4	板坯连铸结晶器内钢液吹氩过程的数学模拟	575
6.4.1	结晶器内钢液吹氩对铸坯质量的影响	575
6.4.2	结晶器内吹氩过程的研究进展	576
6.4.3	单双循环流行为的数值模拟	579
6.4.4	结晶器内气泡运动行为的数值模拟	586
6.4.5	结晶器内气泡去除夹杂物行为的数值模拟	595
6.4.6	小结	603
	参考文献	604

第 1 章 数学模型的理论基础

1.1 数学模型基本原理

1.1.1 数学模型的定义与要素

1. 数学模型的定义

数学模型是针对现实世界的某一特定对象,为了一个特定的目的,根据特有的内在规律,作出必要的简化和假设,运用适当的数学工具,采用形式化语言,概括或近似地表述出来的一种数学结构。它或者能解释特定对象的现实性态,或者能预测对象的未来状态,或者能提供处理对象的最优决策或控制。数学模型既源于现实又高于现实,不是实际原形,而是一种模拟,在数值上可以作为公式应用,可以推广到与原事物相近的一类问题,可以作为某事物的数学语言,可译成算法语言,编写程序输入计算机。数学模型的常见形式有一个或一组方程式,一个或一组抽象图形、算法和计算机语言等。按照数学观点,一个完整的数学模型还必须包括相应的约束条件,如初始条件、边界条件等。

2. 数学模型的要素^[1]

一般情况下,数学模型是由参数、变量以及函数关系三部分组成。

1) 参数

这是最广泛的一类量,它主要包括表征设备的特性和物料的物理性质的量。这一类量在一个实验中始终保持为常数,但在不同实验中可以取不同的常数值。例如,设备的总尺寸、流量、传热系数、比热容、密度和因变量的初值或边值等。

2) 变量

包括自变量和因变量。

(1) 自变量。自变量是指在一个特定实验中,可以独立地来描述系统变化的量。

(2) 因变量。当自变量的数值改变时,反映一个系统某些性质的量就要随之发生变化,这些量叫因变量,实验时因变量是不能直接控制的。

3) 函数关系

是指描述组成数学模型的各种参数、变量之间的相互关系。这种关系是根据

系统的物理性质或工艺机理,按照一定的定理、规则建立起来的,通过这种函数关系就可建立所需的数学模型。

1.1.2 数学模型的分类^[2]

1. 根据模型的经验成分分类

1) 理论型模型

根据实际过程的机理,即根据基本物理定律推导、通过理论分析方法建立的模型。例如,热传导问题、层流问题等。这类模型在过程机理比较清楚的条件下,容易考虑多种因素的影响,且结构严谨,物理概念比较清晰,因而尤其适用于理论研究和模拟。理论模型多以偏微分方程形式出现,与相应边界条件一起采用数值方法求解。但理论模型由于要求严格的理论依据,模型结构通常比较繁杂,尤其在过程机理尚不十分清楚时,往往要作多种假设,从而影响其精度,故应用范围受到限制。

2) 经验型模型

这是一种输入-输出型黑箱模型。它不是以物理定律为依据,而是输入与输出变量间一种总的经验表达式。而通常为了使模型结构简单,仅考虑主要过程参数之间的相互关系。因此,这类模型一般结构均比较简单,且能保证控制精度。尤其在过程比较复杂、机理又不十分清楚的条件下,建立这类模型比较适宜。但是这类模型有较强的条件性,不便推广使用。特别是当生产条件经常改变时更为不便。这种模型虽然不能反映过程内部的本质与特征,但对过程的自动控制往往很有效,如氧气转炉炼钢过程静态控制模型就多属于这一类。

3) 半经验型模型或混合型模型

主要依据物理定律而建立的模型,但同时又包括一定的经验假设。在这种模型中,常常需要根据生产数据估计其中的参数;或者由于研究的过程过于复杂而难于求解,需要提出一些经验假设。半经验型模型兼有以上两类模型的优点,并可有效地克服它们的缺点,故在工程上得到广泛应用。在冶金中,大量经常使用的数学模型多属于这一类。

2. 根据所依据的物理或数学原理分类

1) 传输原理模型

这类模型是根据质量、动量及能量的传输理论建立的。上述的理论型或半经验型模型多属于这一类。

2) 统计原理模型

根据概率理论,如停留时间分布函数、响应函数等概念建立的模型,多与传输