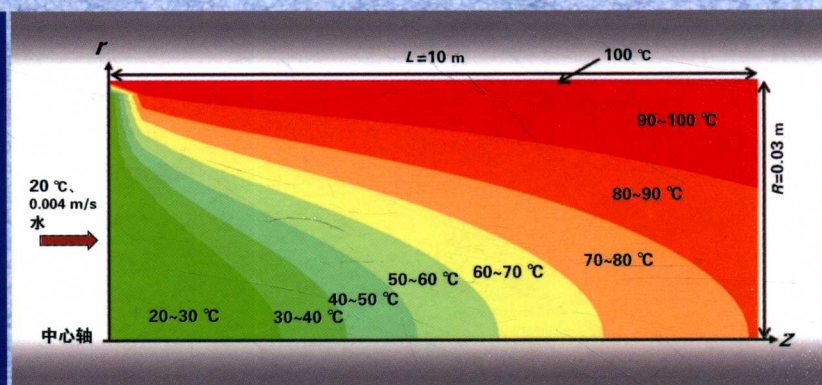


“十二五”国家重点图书出版规划项目
现代冶金与材料过程工程丛书

冶金传输原理及反应工程 ——用Excel解析



孟繁明 © 编著



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

冶金传输原理及反应工程 ——用 Excel 解析

孟繁明 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书利用 Excel 2010 作为数值解析工具,介绍了冶金传输原理及反应工程(“三传一反”)中典型问题的数值解析方法。解析过程中,采用“问题”→“分析”→“求解”→“问题扩展”→“参考解答”等步骤模式,详细介绍了解析工具的使用技巧,并在分析解析过程及获得解析结果的基础上,对“三传一反”典型问题的实质进行了详细论述。通过这些解析,深刻揭示了仅凭解析无法说明其问题实质的重要内容,破除了“三传一反”内容复杂、耗时费力等印象,展示了解析工具的简便性、数值解析的优越性及解析过程的简明性,为真正理解掌握“三传一反”的内容实质奠定了坚实基础。

本书可供高等院校冶金工程专业研究生、本科生以及冶金相关企业事业单位的工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

冶金传输原理及反应工程:用 Excel 解析/孟繁明编著. —北京:科学出版社, 2015. 10

(现代冶金与材料过程工程丛书/赫冀成主编)

ISBN 978-7-03-046053-0

I. ①冶… II. ①孟… III. ①表处理软件-应用-冶金过程-传输-研究
IV. ①TF01-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 248115 号

责任编辑:张淑晓 宁 倩/责任校对:郑金红

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>

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

*

2015 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 10 月第一次印刷 印张:30 1/4

字数:580 000

定价:138.00 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 年国家科技进步奖一等奖。

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 年国家科技进步奖二等奖。

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限

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 年国家科技进步奖二等奖。

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 年的国家科技进步奖一等奖。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 082kW·h/t Al，吨铝平均节电 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。

依据热力学第一定律和第二定律，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；确定了宝钢高炉、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

冶金传输原理及反应工程(“三传一反”)是冶金工程专业的基础理论,其中涉及很多微分方程求解、非线性方程求解、图表制作等内容,而且还含有较多的复杂公式推导过程以及作为结论的复杂解析解公式。如果机械地套用公式进行一些应用计算,往往使人感到单调、枯燥,也为真正理解内容、掌握理论实质留下隐患,影响教学或学习效果。此外,解析解的求解过程及结果的表现形式一般较为复杂且只能用于一些简单问题,同时,仅凭解析解往往难以阐明问题的实质。为此,只能求助于数值求解。而随着计算机的普及,数值解法越来越受到重视并被广泛应用。

Excel 是微软公司出品的 Office 系列软件中的一个组件,被公认为是世界上功能强大、技术先进、使用方便的电子表格软件。虽然 Excel 几乎成为电脑的标准配置软件,但真正将其高水平地运用于实际教学或科研工作中的还不多见,甚至有人认为该软件只能用来“办公”,科学计算所需的工具仍沿用 Fortran、BASIC 语言、C 语言等传统编程软件。

针对上述问题,本书另辟蹊径,选择“三传一反”中的典型问题,利用 Excel 或 VBA 进行数值求解,改变以往相关书籍中的内容叙述→理论公式推导→按照最终理论解析解公式计算的传统模式,试图将 Excel 与实际问题相结合进行数值解析。通过这些解析,实现摆脱传统观念,充分展示、发挥 Excel 的功能特点,使仅凭解析解无法说明的问题实质得以深刻揭示的目的。

本书读者对象定位于既有一般 Excel 使用能力,又有“三传一反”学习需求者。限于篇幅,本书尽力精选二者的最佳关联点,在将难易程度及计算规模控制在一定范围内的前提下,使所选择的问题不仅有“三传一反”的典型问题特征,而且在其解析过程中又可显示 Excel 的解析工具特点。期待通过本书可以使读者加深对“三传一反”内容的理解与掌握,提高专业的学习兴趣及 Excel 的使用水平,为未来将计算机应用于实际问题的解析中奠定坚实基础。

全书由“解析基础篇”、“传输原理篇”、“反应工程篇”三部分,共 10 章组成。在解析基础篇中,以 Excel 2010 为例,分 3 章介绍与数值解析相关的 Excel 及 VBA 的重点内容,可使具备 Excel 基础常识的读者在较短时间内快速掌握解析工具,为进入后续问题的解析打下基础。在传输原理篇中分动量传输、热量传输及质量传输三部分,以问题解析的形式介绍了“三传”中的重点内容。在反应工程篇中,除了选择反应器理论及典型反应器解析作为重点解析内容之外,还介绍了

冶金宏观动力学、冶金工艺过程等相关内容的解析方法。

在数值解析过程中，为弥补现有同类书籍中普遍存在的理论分析过多、具体实例不足的缺憾，采用“问题”→“分析”→“求解”→“问题扩展”→“参考解答”等步骤模式，针对具体实例，详细介绍了解析工具的使用技巧，并在分析解析过程及获得解析结果的基础上，对“三传一反”中典型问题的实质进行了详细分析和论述。同时，对部分问题还进行了数值解与解析解的对比，以确保数值解的正确性。书中出现的 VBA 程序代码都附有详细注释，易于理解。限于篇幅，本书省略了典型问题中解析解的推导过程，将重点放在数值解析过程。（附：本书附有 Excel 解析用文件。）

本书编写过程中，参考和引用了相关书籍和文献，在此向相关作者表示感谢。此外，东北大学王文忠、施月循及邹宗树为本书的编写提供了宝贵资料和建议，在此也向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，加之时间仓促，书中不妥之处，敬请读者批评与指正。

孟繁明

2015 年 7 月于东北大学材料与冶金学院

电子邮箱：mengfm@smm.neu.edu.cn

目 录

《现代冶金与材料过程工程丛书》序

前言

解析基础篇

第 1 章 Excel 操作基础	3
1.1 单元格操作	3
1.1.1 单元格引用	3
1.1.2 引用方式	4
1.1.3 引用样式	8
1.1.4 错误处理	9
1.2 解析结果图示	10
1.2.1 散点图	10
1.2.2 曲面图	14
第 2 章 VBA 编程基础	19
2.1 VBA 概述	19
2.1.1 显示开发工具	19
2.1.2 简单编程举例	19
2.2 单元格与变量	25
2.2.1 对象及属性	26
2.2.2 单元格操作	27
2.2.3 使用变量	28
2.2.4 编程举例	30
2.3 选择与循环	34
2.3.1 选择计算	34
2.3.2 循环计算	35
2.3.3 使用数组	36
2.3.4 编程举例	37
2.4 过程调用	45
2.4.1 Sub 过程	46
2.4.2 Function 过程	47

2.4.3 编程举例	48
2.5 自动编程——宏录制	51
2.5.1 宏录制举例	51
2.5.2 设置宏按钮	55
2.5.3 查看宏代码	57
2.5.4 理解宏代码	59
第3章 数值解析举例	61
3.1 常微分方程	61
3.1.1 一级反应	61
3.1.2 连串反应	64
3.1.3 一维稳态导热	69
3.2 偏微分方程	72
3.2.1 一维非稳态导热	72
3.2.2 二维稳态导热	73
3.3 非线性方程	78
3.4 线性方程组	80
3.5 非线性方程组	84
3.6 牛顿插值	87
3.7 黄金分割	91

传输原理篇

第4章 动量传输	99
4.1 边界速率引起的流动	100
4.1.1 一维平板库埃特流动	100
4.1.2 二维平板库埃特流动	104
4.1.3 一维双圆筒库埃特流动	108
4.2 压力梯度引起的流动	116
4.2.1 一维平板泊肃叶流动	116
4.2.2 二维微小通道泊肃叶流动	123
4.2.3 一维圆管哈根-泊肃叶流动	126
4.3 外力引起的流动	135
4.4 伴有对流的流动	142
4.5 非稳态流动	148
第5章 热量传输	157
5.1 传导传热	158

5.1.1 一维传导传热	158
5.1.2 二维传导传热	162
5.1.3 一维非稳态传导传热	167
5.1.4 二维非稳态传导传热	175
5.2 对流传热	188
5.2.1 内部流动	188
5.2.2 强制对流	194
5.2.3 自然对流	204
5.3 辐射传热	214
5.3.1 封闭空间内的辐射传热	214
5.3.2 含有辐射的混合传热	221
第6章 质量传输	227
6.1 稳态扩散	227
6.2 非稳态扩散	233
6.2.1 半无限大扩散介质	233
6.2.2 有限大扩散介质	238
6.3 对流传质	244
6.3.1 下降液膜内的扩散	244
6.3.2 层流浓度边界层	253
6.4 伴随化学反应的扩散	261
反应工程篇	
第7章 冶金宏观动力学	271
7.1 气固反应	271
7.1.1 不同形状颗粒的气固反应	271
7.1.2 无产物层生成的气固反应	278
7.1.3 三界面还原反应模型	283
7.1.4 气固反应的微粒模型	294
7.2 熔体反应	306
7.2.1 渣金反应级数及活化能	306
7.2.2 钢液中锰的氧化脱出	313
7.2.3 废钢的溶解速率	320
第8章 非理想流动反应器	324
8.1 停留时间分布	324
8.1.1 问题	324

8.1.2 分析	324
8.1.3 求解	325
8.1.4 问题扩展	326
8.1.5 参考解答	327
8.2 流动模型	328
8.2.1 问题	328
8.2.2 分析	328
8.2.3 求解	329
8.2.4 问题扩展	330
8.2.5 参考解答	330
第9章 典型气固反应器	332
9.1 固定床(一维等温模型)	332
9.1.1 问题	332
9.1.2 分析	335
9.1.3 算法	339
9.1.4 求解	342
9.1.5 问题扩展	344
9.1.6 参考解答	344
9.1.7 公式推导	352
9.1.8 符号列表	355
9.2 移动床(一维扩散等温模型)	357
9.2.1 问题	357
9.2.2 分析	357
9.2.3 求解	360
9.2.4 问题扩展	360
9.2.5 参考解答	360
9.2.6 公式推导	363
9.2.7 符号列表	366
9.3 流化床(一维两相等温模型)	367
9.3.1 问题	367
9.3.2 分析	369
9.3.3 求解	375
9.3.4 问题扩展	377
9.3.5 参考解答	377
9.3.6 公式推导	377

9.3.7 符号列表	382
第 10 章 冶金工艺过程	384
10.1 热风炉内气体及格子砖温度变化	384
10.1.1 问题	384
10.1.2 分析	385
10.1.3 求解	386
10.1.4 结果	387
10.1.5 问题扩展	387
10.1.6 参考解答	388
10.1.7 符号列表	388
10.2 连铸坯厚度剖面温度分布	392
10.2.1 问题	392
10.2.2 分析	394
10.2.3 参数	396
10.2.4 求解	398
10.2.5 结果	402
10.2.6 问题扩展	404
10.2.7 参考解答	405
10.2.8 符号列表	409
10.3 氧化精炼过程中组元浓度变化	410
10.3.1 问题	410
10.3.2 分析	411
10.3.3 参数	413
10.3.4 求解	414
10.3.5 结果	417
10.3.6 问题扩展	417
10.3.7 参考解答	418
10.3.8 符号列表	418
10.4 高炉风口燃烧带气体浓度及温度变化	420
10.4.1 问题	420
10.4.2 分析	421
10.4.3 求解	423
10.4.4 结果	428
10.4.5 问题扩展	429
10.4.6 参考解答	429

10.4.7	公式推导	429
10.4.8	符号列表	437
10.5	单级蒸馏的最优化	438
10.5.1	问题	438
10.5.2	分析	439
10.5.3	求解	439
10.5.4	问题扩展	444
10.5.5	参考解答	444
10.5.6	符号列表	445
10.6	多级逆流萃取	446
10.6.1	问题	446
10.6.2	分析	448
10.6.3	求解	449
10.6.4	问题扩展	454
10.6.5	参考解答	454
10.6.6	符号列表	459
参考文献		461