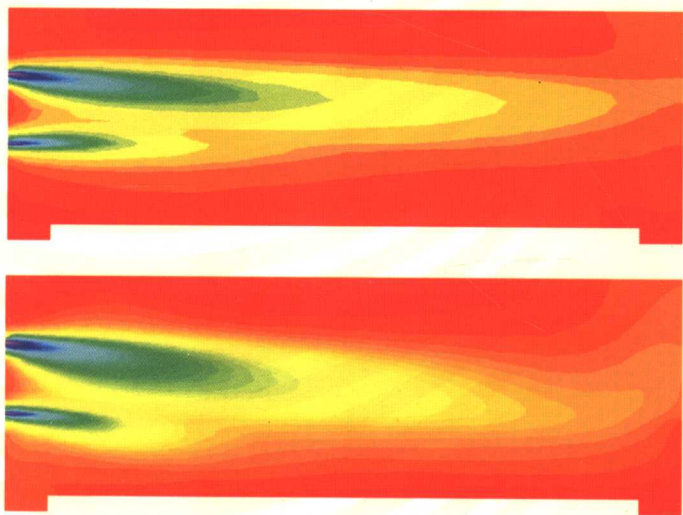


Applications of Numerical Simulation for
Analysis of Metallurgical Processes

冶金过程数值模拟 分析技术的应用

萧泽强 朱苗勇 等编著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

内 容 提 要

本书分上、下两篇。上篇介绍计算流体力学基础理论和工程软件的使用,包括计算流体力学基础、数值计算方法和程序设计、冶金过程实验研究和 CFD 通用工程软件的应用等内容;下篇为数值模拟技术在冶金过程分析中的应用实例,主要包括对吹氩钢包内的流动与混合过程、连铸和中间包内的流动过程、几种热工装置内的流动和换热过程、高温低氧空气燃烧过程以及冶金反应器内一些单元过程和现象等的数值模拟分析。

本书可供冶金领域的工程技术人员、教学人员、管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

冶金过程数值模拟分析技术的应用/萧泽强等编著.

—北京:冶金工业出版社,2006.10

ISBN 7-5024-4077-1

I. 冶… II. 萧… III. 冶金—过程—数值模拟
IV. TF01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 088740 号

出 版 人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 刘小峰 美术编辑 李 心

责任校对 王永欣 李文彦 责任印制 牛晓波

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2006 年 10 月第 1 版,2006 年 10 月第 1 次印刷

169mm×239mm;25 印张;4 插页;491 千字;381 页;1-2000 册

65.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)



萧泽强, 1934年出生于湖南长沙, 1961年东北工学院钢铁冶金本科毕业后留校工作, 先后任助教、副教授、教授、博士生导师。1973~1974年在地拉那大学讲授冶金专业课, 1978~1980年赴瑞典进修, 1988~1994年兼任瑞典皇家工学院冶金专业研究生课讲师。1996年起在中南工业大学热能工程专业任博士生导师。自20世纪70年代起, 先后从事熔池侧吹氧、喷射冶金、炉外精炼、熔融还原和高温空气燃烧等工艺技术的研究, 开发出“全氧侧吹转炉炼钢法”; 80年代起重点从事冶金中单元过程和现象、冶金过程数值分析技术的应用, 以及冶金反应工程学领域的学术研究和教学工作, 提出金属熔池搅拌现象分析的全浮力模型、渣钢界面卷混模型和中间包非等温流动模型等。发表论文百余篇, 专著5部, 参与和组织编著出版《冶金反应工程学丛书》。



朱苗勇，1965年6月生，浙江绍兴人。1988年东北大学钢铁冶金专业本科毕业，1994年获钢铁冶金学科博士学位，1996年完成博士后研究后留校任教。现任东北大学材料与冶金学院教授、博士生导师。兼任中国金属学会连铸分会理事，青年连铸学术委员会主任委员，冶金反应工程学术委员会委员，“Journal of Iron and Steel Research, International”编委。2004年入选国家教育部“新世纪优秀人才支持计划”和辽宁省“新世纪百千万人才工程”百人层次。主要研究方向为冶金过程模拟仿真与控制、钢的高效连铸等。已承担国家创新计划重点项目、国家重大装备国产化创新项目、国家自然科学基金科研项目等30余项；获省部级科技进步奖和教学奖3项。出版学术专著（合著）和教材3部，发表学术论文110余篇。

封底照片说明：

中间包停留时间铜示踪剂现场测定

序

萧泽强教授最近将他 20 世纪 80 年代以来的教学和科学研究活动中的主要过程和结果，结合一些典型的冶金单元过程和冶金反应工程学研究方法，汇编成两册专著：《冶金中单元过程和现象的研究》和《冶金过程数值模拟分析技术的应用》。两书的出版发行对促进我国冶金学领域的学术交流和进步是很有意义的。出版前有幸拜读了书稿，很高兴与徐匡迪院士和曲英教授一起为两书的出版写些感受。

20 世纪 50 年代以来，现代冶金工艺和冶金学理论及研究方法都有了很大的发展和进步，主要表现在冶金工艺的巨大进步、冶金学理论的扩展和深入、多学科知识的交叉、反应工程学研究方法和数值计算技术的引入等。这些发展给现代冶金学学者，特别是冶金高等院校的教师扩大了科学研究和教学活动的范围，也提出了新的任务。萧泽强教授早在 30 年前就注意到了这一发展形势，他虽然出身于学科范围较窄的炼钢专业，但善于观察学习，积极吐故纳新，努力将自己科学研究和教学活动置于现代冶金工艺技术和冶金学理论发展的前沿。两书所记述的活动过程、研究成果和获得国内外学术界的反应，充分说明了萧泽强教授在这方面所做的努力。

数值模拟，或称数值仿真，是在传统的实验室模拟实验研究分析方法、数学方程描述方法、代数性的集总参数表象方程描述方法等近似分析方法的基础上，利用现代信息技术原理和手段，发展起来的一种全新概念和方法，是现代科技研究方法的一个具有标志性的进展，目前已成为现代很多工业生产过程及制造业领域实现科技创新的先进思维模式和重要的核心技术。数值模拟不仅限于应用计算流体力学（CFD）的理论和方法，不少研究中，几乎同样多地用到了计算传热传质学、计算燃烧学以及数值反应动力学等。在计算流体力学中，湍流模拟理论和方法在近几十年中发展很快，其中新概念、新理论和新模型很多。对于工科类应用性研究人员来说是比较复杂和生疏的，应用

中需要深入学习和强化。

萧泽强教授为了帮助冶金学领域年轻一代科研和工程技术人员注重和学习以 CFD 为基础的仿真技术,在国内较早地在研究生培养中加强 CFD 技能和知识的训练。本书上篇介绍了 CFD 的一些基本概念、简单编程方法和一些工程软件信息。下篇汇编的几十篇论文中作者在推介数值模拟方法、过程和结果的同时,十分强调实验室研究和现场测量的不可替代的重要作用,这些教学和研究工作已为我国培养出一批熟练掌握 CFD 技术、水平较高的冶金技术人才,他们受到国内外冶金高等院校和研究院所的欢迎和聘用。

应该特别提到的是萧泽强教授为 CFD 数值模拟技术有效和更符合实际地应用于冶金过程分析所提出的许多观点和模型,这里有:全浮力模型、卷渣模型、中间包非等温模型、侧吹射流模型等。这些模型不仅用做 CFD 分析的物理基础,也为正确描述工艺过程、改善工艺操作提供了依据。其中一些模型被国内外学者广为讨论和接受,有力地推动了冶金学领域的科学研究活动,一些模型被国外学者称为“萧氏理论”,如 Plume model 被普遍接受为描述气液两相区模式和吹气下循环流的 CFD 模拟基础。

萧泽强教授原籍湖南,十分关心家乡的发展。90 年代中期他将博导资格转来中南大学,积极培养青年教师和学生,努力推动 CFD 和高温空气燃烧技术 (HTAC) 在我国的应用,我们之间有了长时期合作和交流。几年前,我和萧泽强同志等一起组织编辑出版《冶金反应工程学丛书》和建立中南大学冶金炉窑仿真和优化研究所,推动 CFD 数值模拟分析技术的应用。今天,他在结束教学工作后又花心血编著出版这两本专著,留惠于青年学者,我和我周围的同事及青年学生都很赞赏萧泽强教授这种广泛的学术兴趣和献身精神。

中南大学教授



2006 年 5 月 20 日

前 言

自 20 世纪 50 年代以来，随着现代冶金工艺的发展，现代冶金学理论和研究方法也有了很大发展，它由传统的以热力学为主要内容的冶金学理论结构，朝着了解和描述冶金过程反应机理和速率的方向发展。在这一发展中，化学工程学、化工反应器理论、传输理论、计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）和数值计算方法等被应用于冶金过程分析中。利用计算机技术和相关软件对冶金反应器内的过程或现象进行仿真，可以从时间和空间上对所研究的过程进行数值再现，包括宏观和微观的再现。一些成功的数值模拟可以提供远多于物理模拟和实物内观测所能获得的信息与数据。

在一个与流体流动有关的比较独立的学科或工程领域里，例如冶金行业，培养一批适应本专业需要的 CFD 软件的开发和应用人才，并在这一基础上加强所有工程技术人员对 CFD 技术和功能的了解，是现代工程学科发展的一种趋势。冶金过程与流体流动和传输过程密切相关，且多为高温、多相、非稳态、未平衡、反应器几何结构复杂、外来因素干扰多和计量困难等，使得其中许多过程和现象迄今为止了解甚少，一些冶金反应器迄今还被称为“黑匣子”。因此，冶金工程领域也必将像所有工程领域那样，将越来越多地使用和依靠计算机和数值模拟技术。20 世纪 60 ~ 70 年代以来，欧美许多冶金院校将计算流体力学方法和数值模拟作为重要内容和研究手段，用于研究生的教学，并取得重大进步。我国改革开放以来，国内各冶金院校先后开设了冶金传输理论和冶金反应工程学等课程，这为培养冶金行业熟悉 CFD 软件的开发和应用人才，推动 CFD 知识的普及创造了良好的条件。

本书作者所在课题组成员从 20 世纪 80 年代初起，结合喷射冶金

等课题，开始将计算流体力学的知识和数值计算方法引入部分研究生的教学内容和一些冶金过程的研究。80年代初，研究生何庆林编制出钢包中心吹氩的二维循环流场的计算程序，并完成了计算示例。这个数值计算程序考虑了喷吹钢包内气液两相区的行为和结构，比70年代末国外文献发表的不能考虑两相区的模拟计算有了进步。在两相区的处理上，引用了全浮力模型对两相区的分析，使数值计算工作及时反映了冶金单元过程的研究结果。加拿大学者沙哈依和葛斯里利用全浮力模型解决吹氩钢包内两相区处理问题，发表了引起国际学术界重视的喷吹钢包数值计算也是在这个期间完成的。80年代末和90年代初朱苗勇从本科学习的第三年开始，先后在课题组内从事冶金过程研究和数值模拟分析近十年时间，与日本和瑞典等国冶金行业 CFD 研究工作者广泛进行合作和交流，完成了冶金反应器内三维传输过程的仿真程序编制和数值计算。90年代中期，课题组与英国 AEA 公司合作，承担了 CFX/CFD 工程软件在引入国内各大专院校和研究院所时所需的技术支持和服务。1996年，课题组协助中南工业大学利用 AEA 公司赠送的 CFX4.1 软件建立了我国冶金行业首个 CFD 工程分析中心，在完成本身科学研究任务的同时，还承担了国内冶金、化工、热能工程和其他行业的与 CFD 技术有关的培训、解题和咨询等任务，先后直接参加 CFX 软件在华技术服务工作的有盛东源、杨卫宏和詹树华等。

课题组在推动冶金学领域 CFD 技术的引入和应用是与研究生的教学活动结合进行的，目的之一是希望国内冶金学领域里尽快出现一批熟悉冶金学知识并掌握 CFD 工程分析技术的年轻研究工作者。除何庆林和朱苗勇等同志以外，先后还有近十位同学在课题组内接受过 CFD 技能的训练，完成了冶金、化工、燃烧和一些单元过程和现象数值模拟的学位论文，发表了相关研究结果。他们目前分别在国内和瑞典几家冶金院校继续从事冶金过程数值模拟的教学和研究工作。为了记录和总结 20 多年来课题组成员上述教学和科研活动的经验和教训，本书

上篇简要介绍了 CFD 数值模拟的基本知识和方法，下篇将发表过的主要论文按专题汇编成集，供年轻读者参考。

应该指出的是，CFD 数值模拟技术在冶金过程分析中的成功应用，与冶金过程本身特征和规律的实验研究是分不开的。通过实物内的直接观测、物理模拟和相关的实验室条件下所进行的研究，不仅是验证和鉴别数值计算结果所必需，往往还是对冶金过程进行 CFD 数值模拟分析以前必备的条件和基础。本书下篇所介绍的 CFD 数值模拟计算都是与相关冶金过程的研究配合进行的。本书上篇第 4 章简要介绍了课题组所完成的一些实验研究，有关冶金单元过程和现象的实验研究详细过程和结果，请参阅同时出版的《冶金中单元过程和现象的研究》（冶金工业出版社，2006 年）。这些研究工作的部分结论，如全浮力模型、卷渣模型、侧吹射流模型和中间包非等温模型，已被课题组内和国内外一些研究工作者接纳为 CFD 数值模拟相关过程的基础模型和条件。

在作者和所在课题组成员完成上述各个时期的教学和科学研究活动中，一直受到许多国内外学者和同事的鼓励、支持和帮助。许多研究生在参考资料不全、经费不足的困难条件下出色地完成了实验研究和计算任务，他们的工作已反映在两册书中所汇编的有关论文中。

本书上篇中 CFD 基础和数值计算方法等内容由朱苗勇执笔，彭世恒、詹树华、欧俭平、杨卫宏等参加了全书的资料整理。全书由萧泽强汇总。中南大学梅焯教授在百忙中为之作序，给作者以热情鼓励和支持，在此谨代表全书及论文作者表示衷心感谢。

在《冶金中单元过程和现象的研究》、《冶金过程数值模拟分析技术的应用》两书出版之际，作者还要特别感谢瑞典朋友、国际知名的喷射冶金专家特·内勒先生，钢铁研究总院李正邦院士，北京科技大学曲英教授，中南大学能源及动力工程学院各位老师和东北大学彭一川等同志，感谢他们在作者完成冶金中单元过程和现象的研究、参与

冶金反应工程学方面的教学科研活动和从事 CFD 数值模拟技术的推广和应用中所给予的指导、帮助和支持。也感谢张苏先生代表 AEA 公司提供 CFX4.1 工程分析软件和相关资料。

冶金中单元过程和现象，以及冶金过程数值模拟都是冶金学领域里新的研究课题和方法，两册书中所记述的主要是一些初期研究过程和结果。不完善、遗漏和不妥之处，谨请读者指正。

萧泽强

2006 年 5 月

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	定价(元)
冶金反应工程学丛书	
冶金反应工程学基础	32.00
高炉过程数学模型及计算机控制	28.00
钢的精炼过程数学物理模拟	24.00
连续铸钢过程数学物理模拟	45.00
中间包冶金学	35.00
钢冶金学	45.00
钢冶金过程动力学	32.00
金属轧制过程人工智能优化	36.00
化工冶金过程人工智能优化	26.00
化工冶金模型实验研究及测试技术	30.00
有色冶金炉窑仿真与优化	32.50
有色金属熔池熔炼	32.00
有色冶金动力学和新工艺(英文版)	28.00
固体电解质和化学传感器	45.00
传输理论和计算	24.00
冶金传输原理基础	49.00
传递过程原理及应用	38.00
熔融还原	24.00
铁合金冶金工程	34.00
有色金属材料的真空冶金	42.00
电磁冶金学	35.00
冶金传输原理	40.00
传输过程基本原理	26.00
冶金物理化学	39.00
冶金物理化学研究方法(第3版)	48.00
冶金热力学数据测定与计算方法	28.00
实用无机物热力学数据手册(第2版)	178.00
现代冶金学(钢铁冶金卷)	36.00
钢铁冶金学(炼铁部分)(第2版)	29.00
钢铁冶金学(炼钢部分)	35.00
钢铁冶金概论	24.00
有色冶金概论	20.00
有色冶金原理(第2版)	35.00
有色金属冶金学	48.00
冶金过程动力学导论	45.00
冶金流程工程学	65.00
冶金试验研究方法	29.00
冶金工程实验技术	39.00
冶金工艺工程设计	20.00
冶金单元设计	28.00
现代流体力学的冶金应用(英文版)	25.00
炉外精炼及铁水预处理实用技术手册	146.00
中国电炉流程与工程技术文集	60.00
现代电炉—薄板坯连铸连轧	98.00
薄板坯连铸连轧(第2版)	45.00
薄板坯连铸连轧工艺技术实践	56.00
燃料及燃烧(第2版)	29.50
冶金设备液压润滑实用技术	68.00
冶金中单元过程和现象的研究	96.00

目 录

上篇：计算流体力学的基础和方法

1 绪 论	1
1.1 现代冶金工艺流程及研究方法的发展	1
1.2 冶金中流体流动现象	2
1.3 冶金过程分析中计算流体力学研究方法的发展	6
参考文献	8
2 计算流体力学基础	10
2.1 流体的物理性质	10
2.1.1 密度	10
2.1.2 压缩性	11
2.1.3 黏性	11
2.1.4 导热性和导热系数	12
2.1.5 扩散性与扩散系数	13
2.1.6 表面张力	13
2.2 基本物理定律	13
2.2.1 质量守恒定律	13
2.2.2 牛顿第二运动定律	15
2.2.3 热力学第一定律	16
2.3 流体运动的基本方程	18
2.3.1 Navier-Stokes 方程	18
2.3.2 流函数方程和涡量方程	19
2.3.3 压强泊松方程	20
2.3.4 欧拉方程	20
2.4 流体流动控制方程	20
参考文献	21
3 数值计算方法和计算程序设计	22
3.1 数学模型的建立方法	22

3.1.1	准备	22
3.1.2	数学模化	22
3.2	冶金过程传输现象的数学描述	23
3.2.1	湍流流动的数学描述	23
3.2.2	湍流模型	25
3.2.3	壁面函数	28
3.3	描述冶金传输过程的基本方程	29
3.4	基本方程的离散化方法	32
3.4.1	基本方程的类型	32
3.4.2	空间领域的离散化方法	32
3.4.3	有限差分离散方程的建立方法	34
3.5	流场的计算方法	37
3.5.1	流场计算的困难和方法	37
3.5.2	交错网格	37
3.5.3	二维柱坐标系下基本方程的离散化	38
3.5.4	SIMPLE 和 SIMPLER 算法	46
3.6	边界条件	47
3.6.1	熔池表面	47
3.6.2	固体壁面	47
3.6.3	对称面	47
3.6.4	两相区域	47
3.7	流场计算程序设计	48
3.7.1	计算程序框图	48
3.7.2	计算程序中的变量及符号说明	49
3.7.3	计算钢包中心底吹氩二维流场主程序	51
3.7.4	计算网格生成子程序	52
3.7.5	计算有效黏度子程序	53
3.7.6	赋常数和初值子程序	54
3.7.7	动量方程 (u 分量) 计算子程序	55
3.7.8	动量方程 (v 分量) 计算子程序	58
3.7.9	速度校正子程序	61
3.7.10	计算 ϵ 方程子程序	61
3.7.11	计算 k 方程子程序	63
3.7.12	计算 ϵ 和 k 方程系数的子程序	65
3.7.13	计算对流扩散项系数 (乘方格式) 的子程序	66

3.7.14	压力校正方程子程序	67
3.7.15	计算压力方程的子程序	68
3.7.16	计算压力和压力校正方程系数的子程序	68
3.7.17	计算区域气体分率和流体密度的子程序	70
3.7.18	输出结果处理子程序	72
	参考文献	73
4	冶金过程的实验研究	74
4.1	概述	74
4.2	实物内的直接测定	76
4.3	物理模拟	77
4.4	冶金中单元过程和现象的研究	78
4.4.1	金属熔池中浸入式侧吹射流的研究	79
4.4.2	喷吹钢包中流体流动和混合现象的研究	81
4.4.3	喷吹钢包中渣钢界面卷混现象的研究	83
4.4.4	中间包非等温流动的研究	84
	参考文献	86
5	CFD 工程软件简介及应用	88
5.1	概述	88
5.1.1	CFD 与其他过程模拟工具的关系	88
5.1.2	CFD 工程应用的发展	90
5.2	CFD 商业软件介绍	96
5.2.1	CFD 通用商业软件的主要特点	98
5.2.2	CFD 通用商业软件简介	99
5.2.3	CFD 商业软件的求解过程	104
5.2.4	CFD 的应用技巧	105
5.3	几何造型与拓扑结构	107
5.3.1	几何模型简介	107
5.3.2	坐标体系与有限差分网格	112
5.3.3	多块数据结构	115
5.3.4	多块结构	116
5.3.5	贴体坐标	116
5.4	几何	118
5.4.1	坐标变换	118
5.4.2	网格结构	121

5.4.3 非相配的网格界面	125
5.4.4 梯度离散	125
5.5 CFD 工程软件的商业应用图例	126
参考文献	129

下篇：数值模拟分析方法的应用

6 吹氩钢包内钢液循环流动和混合过程的数值计算	139
6.1 吹气搅拌熔池内轴对称循环流速度场的计算 (I) ——流场的物理模型及数模边界条件的确定	何庆林 萧泽强 140
6.2 吹气搅拌熔池内轴对称循环流速度场的计算 (II) ——数学模型及其应用	何庆林 萧泽强 145
6.3 吹氩钢包内三维流动和混合现象的数值模拟	朱苗勇 沢田郁夫 萧泽强 152
6.4 冶金反应器内三维流动模拟计算软件及应用	朱苗勇 沢田郁夫 邹宗树 萧泽强 165
6.5 柱坐标系下圆筒形反应器内三维湍流流动的数值模拟	赵连刚 朱苗勇 萧泽强 171
6.6 ANS-OB 钢包内钢液流动现象的数学物理模拟	朱苗勇 王文仲 任子平 萧泽强 175
6.7 CAS-OB 过程熔池传热规律的模拟研究	朱苗勇 赵连刚 萧泽强 181
7 连铸及中间包内冶金过程的数学模型分析	188
7.1 耦合流动和凝固过程连铸结晶器内数学模型的建立	杨宏亮 赵连刚 张兴中 邓开文 刘家奇 倪满森 萧泽强 189
7.2 板坯连铸结晶器内钢液流动过程的模拟仿真	朱苗勇 刘家奇 萧泽强 198
7.3 连铸中间包内三维流动的数学模拟	朱苗勇 萧泽强 204
7.4 中间包内钢液流动、温度控制和夹杂物行为的数学模拟	盛东源 倪满森 邓开文 刘家奇 干勇 萧泽强 208
7.5 钢液密度对板坯中间包流场影响的数学模型	王建军 戴朝珊 李正邦 萧泽强 215
7.6 连铸中间包内钢液流动的数学模型	彭世恒 程乃良 谢蕴国 萧泽强 220

7.7	CFD 技术在分析连铸中间包中冶金过程的应用	彭世恒 程乃良 杨卫宏 萧泽强	227
7.8	梅钢 40t 板坯中间包的工业试验与仿真分析	程乃良 彭世恒 王建军 萧泽强	236
7.9	底吹气连铸中间包内气液两相流的数值模拟	詹树华 欧俭平 萧泽强	244
8	几种热工装置及过程的数学模拟分析		257
8.1	转炉型熔融还原反应器内二次燃烧现象物理和数学模型研究	余仲达 裴文国 萧泽强	258
8.2	U 型蓄热式辐射管表面温度分布数值模拟研究	欧俭平 马爱纯 詹树华 蒋绍坚 萧泽强	265
8.3	锅炉烟气走廊三维流动特性数值计算	杨卫宏 赵渝渝 陈冬林 萧泽强	271
8.4	离心通风机内部流场三维瞬态计算	杨卫宏 周 萍 萧泽强	278
8.5	双级旋风分离器特性的计算机预报	杨卫宏 萧泽强	285
9	高温低氧空气燃烧过程的数值模拟		291
9.1	高温空气燃烧及换向过程中火焰结构和炉内燃烧 产物流动状态的数值模拟	萧泽强 杨卫宏 蒋绍坚 周子民	292
9.2	蜂窝陶瓷蓄热体格孔壁面应力变化特性的数值研究	欧俭平 蒋绍坚 吴创之 萧泽强	303
9.3	蓄热式加热炉内流体流动、燃烧与传热的数值模拟	欧俭平 吴道洪 萧泽强	308
9.4	蓄热式钢包烘烤器钢包内衬温度分布数值分析	欧俭平 詹树华 萧泽强	315
9.5	蓄热式钢包烘烤过程中钢包内高温低氧特性数值模拟	欧俭平 蒋绍坚 马爱纯 萧泽强	321
10	冶金单元过程和现象的数值模拟		328
10.1	回转窑过程的数学模型及应用	肖兴国 李家新 曹同友 萧泽强	329
10.2	钢液中喂入铝线升温熔化过程的数学模拟	桂美文 萧泽强	341
10.3	熔渣中加入铬矿球团初期熔融现象的研究	王景华 萧泽强	351
10.4	气粉流喷吹熔池的通用数学模型	彭一川 韩 旭 萧泽强	360
10.5	熔池浸入式侧吹下气液两相流流动状态的三维数值计算	詹树华 萧泽强	365

CONTENTS

Part I : Fundamentals and Methods of Computational Fluid Dynamics (CFD)

1 Introduction	1
1.1 Modern Metallurgical Processes and Their Investigation Methods	1
1.2 Fluid Flow Phenomena in Process Metallurgy	2
1.3 Application of CFD Methods in Analysis of Metallurgical Processes	6
References	8
2 Fundamentals of Computational Fluid Dynamics	10
2.1 Physical Properties of Fluids	10
2.1.1 Density	10
2.1.2 Compressibility	11
2.1.3 Viscosity	11
2.1.4 Thermal conduction and its coefficient	12
2.1.5 Diffusion and its coefficient	13
2.1.6 Surface tension	13
2.2 Basic Laws of Physics	13
2.2.1 Mass conservation law	13
2.2.2 Newton's second law of motion	15
2.2.3 First law of thermodynamics	16
2.3 Basic Equations of Fluid Flow	18
2.3.1 Navier-Stokes equation	18
2.3.2 Stream function and eddy equation	19
2.3.3 Pressure and Possion equation	20
2.3.4 Euler equation	20
2.4 Governing Equations of Fluid Flow	20
References	21