

冶金 反应 工程学 丛书

钢的精炼过程

数学物理模拟

朱苗勇 萧泽强 著

YEJIN FANYING
GONGCHENGXUE
CONGSHU

冶金工业出版社

冶金

工程

力学

力学

钢的冶炼过程

数字图像处理

陈国良 陈国良 著

TECHNICAL
SCIENCE
BOOKS

国家自然科学基金资助

冶金反应工程学丛书

钢的精炼过程数学 物理模拟

朱苗勇 萧泽强 著

北 京
冶金工业出版社

内 容 简 介

本书介绍以钢包吹氩为基础的钢水精炼过程的数学物理模拟研究,主要包括理论分析,实验室研究,现场测定和数学模拟方法及结果;介绍了吹气搅拌金属熔池中气体射流的穿透、气泡形成、气泡泵现象、渣钢界面卷混的理论和实验研究结果;以全浮力模型为基础,对气体搅拌熔池中的流动、传热和混合过程进行了数学物理模拟。本书还对物理模型和数学模型的建立、程序编制和计算方法作了介绍。本书可供冶金专业本科生、研究生、教师和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢的精炼过程数学物理模拟/朱苗勇,萧泽强著. —北京:冶金工业出版社,1998
(冶金反应工程学丛书)
ISBN 7-5024-2208-0

I. 钢… II. ①朱… ②萧… III. 炼钢-精炼(冶金)-过程-模拟 IV. TF703

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 07658 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编)

责任编辑 肖放 杨传福 美术编辑 王耀忠 责任校对 侯瑞
北京市顺义兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1998 年 8 月第 1 版,1998 年 8 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32;8.75 印张;223 千字;265 页;1-1500 册

24.00 元

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

序 言

冶金学是研究人类从自然资源中提取有用金属和制造材料的科学。从人类最早使用金属到今天,已有数千年历史。在近一百多年的现代工业生产发展中,冶金工业作为一门基础材料工业,发挥了重大作用。本世纪上半叶以来,许多冶金学家应用化学热力学知识,对冶金过程中气体-熔渣-金属间的反应平衡和熔体的物理化学性质进行了大量的测定和研究,这些研究成果促进了现代冶金工艺的发展。冶金学也逐步完善为一门主要以热力学为理论基础的、独立的专业学科。

近几十年来,冶金学知识体系和结构,随着冶金技术的发展和相关学科的进步,也在发生变化。计算机技术的发展和广泛应用,使冶金学理论和工艺的研究方法、冶金生产及其控制技术发生了重大变革。由传统冶金学和传统冶金工艺学所构成的知识体系和结构,已不能完全满足现代冶金工艺发展和理论研究的需要。因此,诸如,对微观和宏观过程的认识、单元过程或现象的定量解析、反应过程的数学物理模拟、反应和生产速率的预测、反应器的仿真研究和设计、人工智能技术的应用以及反应器运行和整体生产过程的控制等等,均逐渐成为现代冶金学必须包括的内容。近二三十年中,许多冶金学学者努力学习相关学科,如现代化学工程学、计算流体力学(CFD)、传输理论等方面的知识,积极利用数学解析方

法和计算技术,来定量分析和解决冶金学理论和工艺方面的问题,并获得重要进展。日本学者靛岩、瀨川清等根据上述冶金学内容和研究方法的新发展,于70年代提出冶金反应工程学概念,并分别出版了《冶金反应工程学》和《铁冶金反应工程学》等专著。

我国在冶金学上述新兴内容方面的研究,起步于70年代末。近二十多年,国内许多冶金学者根据现代冶金学发展的趋势,吸收国外先进经验,注意促进多学科知识的交叉,逐步将传输理论、反应工程学的方法以及计算技术引入冶金学的理论研究和工艺开发中,并取得较大的进展。为及时总结冶金学近几十年的发展成果,增进国内外学术交流,改善专业教学、基础研究和工艺发展的条件,中国金属学会冶金反应工程学学术委员会决定组织我国冶金领域内的专家学者,并争取国外学者的参与或合作,编辑出版一套《冶金反应工程学丛书》。

本套丛书可大致划分为介绍冶金反应工程学理论的著作(一部分为高校教材或教学参考书)和介绍冶金反应工程学知识应用成果和经验的专著两类。第一批著作于1996年开始出版发行。欢迎国内外冶金学者参加《冶金反应工程学丛书》书目的著述。

《冶金反应工程学丛书》的编委会,由下列学者组成(按姓氏笔画排列,带*号者为执行小组成员):

干 勇(冶金部钢铁研究总院)

* 曲 英(北京科技大学)

任崇信(冶金工业出版社)

仲增墉(中国金属学会)

杨天钧(北京科技大学)

张丙怀(重庆大学)

李尚诒(冶金工业部科技司)

贺友多(包头钢铁学院)

柯家骏(中国科学院化工冶金研究所)

徐德龙(西安建筑科技大学)

梅 炽(中南工业大学)

* 萧泽强(东北大学)

赫冀成(东北大学)

* 蔡志鹏(中国科学院化工冶金研究所)

戴永年(昆明理工大学)

魏季和(上海大学)

由于《冶金反应工程学丛书》内容涉及面较宽,编写工作量大,且系初次组织,经验不足,错误和不足之处在所难免,请读者批评指正。

《冶金反应工程学丛书》编委会

1996年5月

前言

这册构思已久的书稿终于完成,很高兴能列为《冶金反应工程学丛书》书目之一出版。书中记述的主要内容为作者近 20 年来对钢水精炼过程所做的研究工作。这些工作的主要特点是作者和合作者结合相关工艺的开发和应用,利用冶金反应工程学的知识和方法,对以吹氩搅拌为基础的钢水精炼过程和现象,进行了较系统的理论和实验研究。

早在 80 年代初期,作者为描述喷吹钢包内气液两相流的能量传递过程,提出了一个“全浮力模型”(plume model),并就这一研究结果与雷勒、舍克里、葛斯里、奥特斯、森一美和佐野正道等国际知名学者作过多次交流和讨论,他们还在一些文章和专著中讨论和引伸了这一模型。在国内,徐匡迪教授、曲英教授、张信昭教授等,也对这些研究工作作过中肯的评议和介绍。这些讨论和交流使此研究结果在理论上和应用上得以不断完善,作者也因此受益匪浅。值本书出版之际,谨向这些朋友表示感谢。朱苗勇在结合本书所涉及的课题从事学位论文工作和博士后研究期间,曾得到日本学者的支持,几次赴新日本钢铁公司先端技术研究所从事相关研究,并取得良好成果。在此,作者向日本朋友不破祐教授和泽田郁夫博士表示衷心感谢。

近几十年来,现代冶金学理论和研究方法随现代科学技术的

进步,已经有了很大的发展。宏观动力学、传输理论、数值分析技术和反应工程学研究方法已被广泛应用于冶金过程的研究和工艺开发。作者在完成钢水精炼过程的研究中,注意应用了相关理论和方法,本书对这些工作和有关结果作了较系统的总结和介绍。全书共分9章。第2和第4章介绍有关金属熔池中气体射流喷吹、气泡形成、搅拌和混合现象的理论分析和实验研究,重点讨论了喷吹钢包中气泡泵现象的全浮力模型。第3章对喷吹熔池内流动、传热和传质过程的数值分析方法、计算机仿真模型的建立作了较系统的介绍。书中较详细地给出了作者所开发的TPS-2D程序。第5、6、7章分别介绍了对单和多喷嘴底吹、CAS-OB过程和熔池侧吹的流场和混合速率所作的模拟研究结果。喷吹钢包中渣金界面行为和喂入金属的升温熔化过程与熔池中各种传递状态有关,第8、9章介绍了作者对渣金界面卷混和喂入铝线熔化过程的仿真和实验研究结果。在完成本书所涉及的一些课题研究中,东北大学(原东北工学院)冶金传输原理及反应工程研究室许多同事参与或协助完成了不少工作,其中有彭一川、邹宗树和吴建国等教授,在此表示深切谢意。曾在本研究小组攻读学位的何庆林、桂美文、罗建江、韩旭、赵连刚和盛东源等人在其论文工作中也涉及本书内容,书中对他们的部分研究结果作了介绍。由于冶金反应多为复杂的高温物理化学过程,目前用于仿真分析的硬、软件条件并不完善,所得结果和意见不一定完整,错误和不足之处在所难免,欢迎读者批评指正。

本书第1~7章由朱苗勇执笔,萧泽强作修改补充,重写了部分章节,并补入第8、9两章,最后对全书进行总纂定稿。全书文稿承蔡志鹏研究员和曲英教授审阅指正,作者在此表示诚挚感谢。

萧泽强

一九九七年十二月



1 绪论	(1)
1.1 现代冶金工艺、理论和研究方法的发展	(1)
1.2 数学物理模拟研究方法的作用	(3)
1.3 数学模拟研究技术的发展和现状	(6)
1.4 钢水精炼过程研究的目的和意义	(9)
参考文献	(12)
2 浸入式气流喷吹熔池的主要特征	(16)
2.1 气体射流的特性	(16)
2.1.1 亚音速自由射流和限制射流的特性	(16)
2.1.2 气体射流的穿透深度	(20)
2.1.3 浸入式水平气体射流的轨迹	(21)
2.1.4 浸入式水平气粉射流的轨迹	(25)
2.2 熔池中气泡的行为	(30)
2.2.1 气泡形核生成	(30)
2.2.2 气泡孔口生成	(31)
2.2.3 液体中气泡的形状	(34)
2.2.4 液体中单个气泡的运动	(37)
2.2.5 两相区中气泡群的行为	(38)
2.2.6 孔口气泡流和连续流	(41)
2.3 气泡泵起现象的全浮力模型	(42)

2.3.1	钢包底吹氩循环流场的基本结构	(43)
2.3.2	喷吹钢包中流体流动现象的实验研究	(46)
2.3.3	全浮力模型的数学描述	(49)
2.3.4	全浮力模型的应用和讨论	(54)
2.4	喷吹气体对熔池的搅拌功分析	(55)
	参考文献	(58)
3	钢水精炼过程数值模拟计算程序的设计原理及构成	(63)
3.1	钢水精炼反应器内湍流流动的数学描述	(63)
3.1.1	湍流流动的数学描述	(63)
3.1.2	湍流模型	(65)
3.1.3	壁函数	(68)
3.2	描述钢水精炼传输过程的基本方程	(70)
3.3	流场的计算方法	(73)
3.3.1	流场计算的困难和方法	(74)
3.3.2	交错网格	(74)
3.4	二维柱坐标系下基本方程的离散化	(76)
3.4.1	差分方程的通式	(76)
3.4.2	动量方程的离散化方程	(79)
3.4.3	压力校对方程	(80)
3.4.4	压力方程	(82)
3.4.5	差分方程的求解	(82)
3.4.6	SIMPLE 和 SIMPLER 算法	(85)
3.5	三维适体坐标系下的离散化	(86)
3.5.1	适体坐标的特点与选择	(87)
3.5.2	积分微元体与速度矢量的定义	(88)
3.5.3	离散化方法	(93)
3.5.4	动量方程中速度分量的修正	(95)
3.5.5	SIMPLE 算法和差分方程的求解	(96)
3.6	壁函数的设定	(98)
3.7	边界条件	(99)
3.8	TPS-2D 计算程序概况	(100)
3.8.1	计算程序框图	(100)

3.8.2	计算程序中的变量及符号说明	(102)
3.8.3	计算网格生成子程序	(104)
3.8.4	计算有效粘度子程序	(105)
3.8.5	赋常数和初值子程序	(105)
3.8.6	动量方程(u 分量)计算子程序	(107)
3.8.7	动量方程(v 分量)计算子程序	(110)
3.8.8	速度校正子程序	(112)
3.8.9	ϵ 方程子程序	(112)
3.8.10	k 方程子程序	(114)
3.8.11	计算 ϵ 和 k 方程系数的子程序	(115)
3.8.12	计算对流扩散项系数(乘方格式)的子 程序	(117)
3.8.13	压力校正方程子程序	(117)
3.8.14	计算压力方程的子程序	(118)
3.8.15	计算压力和压力校正方程系数的子 程序	(119)
3.8.16	输出结果处理子程序	(120)
	参考文献	(121)
4	物理模型的建立及测量技术	(123)
4.1	物理模型的建立方法	(123)
4.1.1	几何相似	(123)
4.1.2	动力相似	(124)
4.2	两相区气泡特性的测定方法	(126)
4.3	物理模型中流速的测定方法	(129)
4.4	物理模型中混合特性的测定	(131)
4.5	物理模型中温度分布的测定	(132)
4.6	实际钢包中钢水速度的测定	(135)
	参考文献	(139)
5	底吹氩精炼钢包内流动和混合过程的数学物理模拟	(141)
5.1	概述	(141)
5.2	气液两相区结构	(143)
5.2.1	两相区结构模型	(143)

5.2.2	两相区结构模型对流场计算结果的 影响	(146)
5.3	吹氩钢包内钢水流动的基本规律	(150)
5.3.1	循环流	(150)
5.3.2	表面水平流	(151)
5.3.3	钢包下部流层流动	(153)
5.4	喷吹钢包内三维流动的数值模拟	(154)
5.4.1	控制方程	(155)
5.4.2	三维数学模型的验证	(156)
5.4.3	单喷嘴喷吹钢包内流动场的数学物理 模拟	(160)
5.4.4	多喷嘴喷吹钢包内流动场的数学物理 模拟	(163)
5.5	喷吹钢包内混合过程	(167)
5.5.1	混合过程和混合时间	(167)
5.5.2	以实验数据为基础的混合模型	(168)
5.5.3	混合过程和混合时间的数理研究方法	(171)
5.6	喷吹钢包内混合过程的数模分析	(172)
5.6.1	供气量对混合时间的影响	(174)
5.6.2	喷嘴布置对混合时间的影响	(175)
5.6.3	示踪剂加入位置的影响	(175)
5.6.4	钢包锥度的影响	(177)
5.7	混合时间的数学表达式	(179)
	参考文献	(180)
6	CAS-OB 钢包内钢水的流动和传热规律	(185)
6.1	概述	(185)
6.2	CAS-OB 过程特征分析	(186)
6.2.1	铝(或硅)氧化放热	(187)
6.2.2	底吹氩驱动的循环流	(187)
6.3	CAS-OB 过程的数学模拟	(189)
6.3.1	研究体系和假设	(189)
6.3.2	基本方程和边界条件	(190)

6.4	CAS-OB 包内的湍流流动特征	(191)
6.4.1	CAS-OB 钢包内循环流的基本特征	(191)
6.4.2	CAS-OB 钢包内浸渍管深度对流动和湍动能 耗散的影响	(195)
6.5	CAS-OB 包内温度动态分布	(197)
	参考文献	(201)
7	水平喷吹精炼反应器内流动和混合过程的模拟	(203)
7.1	概述	(203)
7.2	水平气体射流在液体中的特征	(206)
7.3	数学模拟	(207)
7.3.1	流体流动	(208)
7.3.2	示踪剂浓度方程	(209)
7.3.3	射流的处理	(209)
7.3.4	数值求解	(211)
7.4	熔池中的流动	(211)
7.4.1	计算结果的验证	(211)
7.4.2	水平喷吹熔池中的流动特征	(212)
7.4.3	水平喷吹与偏心底吹的比较	(218)
7.4.4	水平喷吹与中心底吹的比较	(219)
7.5	插入式单孔侧吹喷枪不同喷吹位置的流场和 混合时间	(220)
	参考文献	(222)
8	喷吹钢包顶渣卷混的数学物理模拟	(223)
8.1	物理模型观察	(224)
8.2	渣钢卷混现象的数学分析	(225)
8.2.1	基本方程	(226)
8.2.2	初始条件	(228)
8.2.3	求解	(228)
8.3	计算结果和分析	(229)
8.3.1	韦伯数较小($We_{bc} < 6$)下的界面行为	(229)
8.3.2	We_{bc} 数值增大后的界面行为	(230)

8.4	渣钢界面临界卷混条件	(231)
8.4.1	卷混出现的临界条件	(231)
8.4.2	喷吹钢包内顶渣出现卷混的工艺条件	(233)
8.5	喷吹钢包中渣金界面卷混的数值模拟	(235)
	参考文献	(238)
9	钢中喂线熔化过程的数学物理模拟	(240)
9.1	钢中喂铝线工艺概述	(241)
9.1.1	喂线法在炼钢生产中的应用	(241)
9.1.2	喂入铝线在钢中升温、熔化的基本 特征	(242)
9.2	钢中喂铝线过程的实验研究	(243)
9.2.1	热态实验方法和装置	(243)
9.2.2	热态实验结果	(246)
9.3	钢中喂入铝线升温熔化过程的数学模拟	(248)
9.3.1	数学模型	(249)
9.3.2	初始条件和边界条件	(250)
9.3.3	数值求解	(251)
9.3.4	计算结果	(251)
9.4	数模计算与实验结果比较及研究结果应用	(256)
9.4.1	数模计算与热态实验结果的比较	(256)
9.4.2	研究结果的应用	(256)
	参考文献	(258)
	译名对照	(260)
	索引	(261)

1

绪论

1.1 现代冶金工艺、理论和研究方法的发展

本世纪中叶以来,世界冶金工业的规模、工艺技术以及相关理论都有了巨大的发展。以钢铁生产为例,其主要的冶炼工艺发生了根本性的结构变化。平炉炼钢法的主导地位迅速被氧气转炉炼钢等方法所取代(图 1-1)^[1],铁水预处理、炉外精炼和钢的连续浇铸

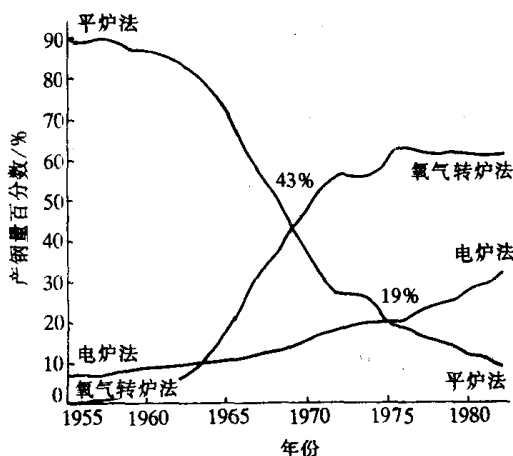


图 1-1 近代钢铁生产主要工艺方法所占比例的变化

彻底改变了传统炼钢车间的布局和生产流程(图 1-2)。各种新工艺的应用使得金属矿物的提取和精炼过程的速度、效率以及单元生产率得到成倍、几十倍甚至更明显的增长。以钢的脱硫为例,昔日平炉炼钢法的最佳脱硫率不超过 50%,最快脱硫速度仅为 $(5 \sim 10) \times 10^{-6} \text{min}^{-1}$,且很难获得含硫低于 300×10^{-6} 的成品钢^[2]。采

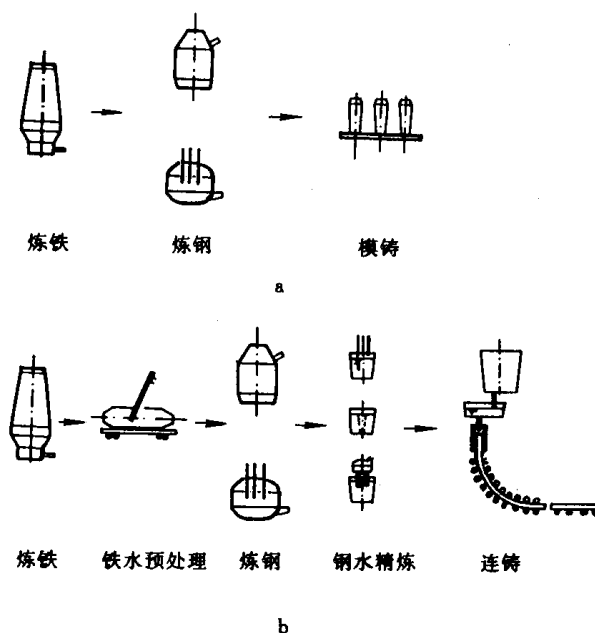


图 1-2 金属炉外处理对钢铁生产流程的影响
a—传统流程；b—现代流程

用钢包喷粉脱硫,由于包内传递效率的提高,最高脱硫率可达 95%,脱硫速度可达 $(60 \sim 80) \times 10^{-6} \text{min}^{-1}$ 。有文献报导,利用钢包处理,可冶炼出含硫量低于 5×10^{-6} 的钢水^[3,4]。我国曾经在很长的历史时期内,是一个冶金工业落后的国家,经过近几十年的努力,1996 年我国实产钢超过 1 亿吨(图 1-3),成为世界第一产钢大国^[5]。在国内各冶金企业内,炉外精炼等冶金新技术也得到了迅速推广。

上述冶金工业规模的增长和技术水平的提高与理论研究工作的深入有直接的联系。本世纪 60 年代以来,现代冶金学的重要研究领域开始转向过程动力学和反应工程学^[6~13]。例如,曾经在冶金热力学理论方面作出过卓越贡献的世界著名冶金学家里查德森