

冶金

反应

工程
学

丛书

中间包冶金学

王建军 包燕平 曲 英 著

YEJIN FANYING
GONGCHENGXUE
CONGSHU

冶金工业出版社

国家自然科学基金资助

冶金反应工程学丛书

中间包冶金学

王建军 包燕平 曲 英 著

北 京
冶金工业出版社
2001

内 容 简 介

本书是《冶金反应工程学丛书》之一种。书中对钢液在连铸中间包内的物理化学变化过程及其数值模拟方法进行了系统的阐述,讨论了中间包内钢液流动的基本原理和控制措施、温度差引起的自然对流现象以及在流动状态下钢中非金属夹杂物的碰撞和去除过程,介绍了作者和国内同行的最新研究成果。本书还介绍了国内外关于中间包冶金技术的措施和研究方法。本书可供炼钢生产技术工作者认识中间包内冶金规律、改进中间包设计和操作的使用,也可作为研究人员进一步研究中间包冶金过程的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

中间包冶金学/王建军等著. —北京:冶金工业出版社, 2001. 4

(冶金反应工程学丛书)

ISBN 7-5024-2651-5

I. 中… II. 王… III. 炉外精炼 IV. TF114

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 43924 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 赵培德 杨传福 美术编辑 王耀忠 责任校对 侯 珏

北京源海印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2001 年 4 月第 1 版, 2001 年 4 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32, 12 875 印张, 344 千字, 396 页; 1 2000 册

35.00 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)

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。日本学者鞭岩、濑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)

李尚诣(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

中间包冶金是一项特殊的炉外精炼技术,是从钢的熔炼和精炼到制成固态连铸坯这个生产流程中保证获得优良钢质量的关键一环。在连续铸钢技术发展的初期,中间包只是作为钢液的储存和分配器来使用。随着连铸技术的发展,钢液质量对连铸工艺的重要意义渐渐为人们所认识。为了保证连铸顺行,为了保证多炉连浇,钢液必须有足够的纯净度,钢液成分范围要尽可能精确地控制,钢液温度和过热度要在足够长的时间保持稳定。因此作为钢的冶炼过程中的最后一个耐火材料容器,中间包的冶金作用受到了更多的注意。

“中间包冶金”的概念是在 20 世纪 80 年代初期被提出的,多伦多大学教授麦克莱恩(A. McLean)是首倡者。近 20 年来,国内外关于中间包冶金的学术研究,开始只有不多的几篇论文,后逐渐成为热门论题,并且研究成果已转化为生产中实际应用的技术措施,如中间包结构设计、流动控制技术、抑制二次氧化、耐火材料和覆盖渣控制、更换钢包操作时温度和成分控制、吹氩清洗、过滤、加热钢液、热中间包重复应用等。这说明冶金界已经接受了中间包冶金的概念,并且成为实际操作中的工艺技术。

中间包冶金有独特的理论和研究方法。作为一种连续操作的反应器,它与转炉、电炉及钢包等间歇操作反应器的概念是不同

的。在中间包冶金技术中,反应工程学的原理得到更多更深入的运用。中间包内的流体流动并非是均相流体的理想流动,而是钢和渣两相的复杂的流动,而且有数量巨大的弥散相颗粒的碰撞和运动。中间包内钢液的温度场既不是等温的也不是绝热的,而在非等温条件下传热和流动相互促进互为因果。因此对中间包冶金过程的研究,也进一步丰富了冶金反应工程学的内容。

作者对中间包冶金过程中的钢液流动、传热、夹杂物去除等现象做过较长时期的研究。作者结合自己的研究方法和结论,并总结了近十多年国内外关于本领域的论文文献,撰写出《中间包冶金学》这本著作。本书上篇讨论了中间包内有关现象和冶金过程,如钢液的流动、二次氧化、夹杂物颗粒的碰撞、过滤和去除等,试图对中间包冶金的规律提出较系统的分析。本书下篇介绍了中间包内流动、传热、传质的计算方法和一些计算程序,提供研究和设计中间包的方法。作者期望本书的出版对使用和研究中间包冶金的冶金工作者有所裨益,对我国连续铸钢的工艺进步有所贡献。

本书的撰写提纲上篇由包燕平提出,下篇由王建军提出。第1章由曲英执笔,第2~7章由包燕平执笔,第8~11章由王建军执笔。全书的最后审核定稿由曲英完成。承蒙蔡开科、萧泽强两位教授审阅书稿并提出宝贵意见,萧泽强并且补充撰写了关于中间包内自然对流的临界条件等最新研究内容,作者对此谨致以衷心感谢。

本书中存在的不足之处,恳请读者给予批评指正。

王建军 包燕平 曲 英

1999年5月20日



作者简介

王建军, 1955年生, 山东文登人。1982年华东冶金学院炼钢专业毕业后留校工作, 1988年获北京科技大学硕士学位。1999年获钢铁研究总院博士学位。现任华东冶金学院冶金系副教授, 中国金属学会冶金反应工程学学术委员会委员。从事计算流体力学应用基础、炉外精炼和连续铸钢方面的研究。已发表学术论文30余篇。



作者简介

包燕平, 1961年生。湖北随州人。1985年北京科技大学钢铁冶金专业本科毕业, 分别于1988年、1992年在北京科技大学获硕士和博士学位。现任北京科技大学炼钢研究所副所长、副教授, 中国金属学会炼钢分会电炉学术委员会委员。1999年以访问学者身份赴德国亚琛工业大学进修。主要研究领域为钢质量及连续铸钢、钢铁生产过程物流管制及冶金反应工程学。已在学术刊物和重要学术会议上发表论文20余篇。



作者简介

曲英，1930年生，山东德州人。1952年天津北洋大学冶金系毕业，毕业后参加北京钢铁学院建校工作并任教，现任北京科技大学教授。1990年任柏林工业大学冶金研究所客座访问教授。1988年被选为中国金属学会冶金反应工程学学术委员会主任。主要研究领域为转炉炼钢、炉外精炼、冶金物理化学和冶金反应工程学。主编的《炼钢学原理》，在1988年被评为全国高等院校优秀教材。其他著作有《冶金反应工程学导论》、《物理化学和炼钢》(译著)、《炼钢过程的物理化学计算》(译著)等。

目 录

1 绪论	(1)
1.1 钢铁制造流程的演进及现代炼钢车间 生产流程	(1)
1.2 钢的连续浇铸和中间包的作用	(4)
1.3 中间包的结构及其分类	(6)
1.4 中间包冶金学研究内容和方法	(7)
参考文献	(10)
上篇 中间包冶金过程和工艺技术	
2 中间包内过程的实验研究方法	(15)
2.1 物理模拟方法	(15)
2.1.1 相似准数	(16)
2.1.2 中间包内钢液流动的物理模拟	(19)
2.2 停留时间分布的测定	(27)
2.2.1 刺激—响应实验技术	(27)
2.2.2 停留时间分布函数	(28)
2.3 流场显示及流速测量的实验技术	(31)
2.3.1 流动显示技术	(31)
2.3.2 高速摄影在流场显示中应用	(32)

2.3.3	激光多普勒测速(LDA)	(33)
2.3.4	热线(膜)流速仪	(35)
2.4	夹杂物的模拟方法	(36)
2.5	多级取样和系统分析	(38)
	参考文献	(40)
3	中间包内的钢液流动现象	(42)
3.1	中间包内钢液流动特性	(42)
3.1.1	液-液射流	(45)
3.1.2	驻点流动	(48)
3.1.3	注流卷吸气体	(52)
3.1.4	出口汇流旋涡	(56)
3.1.5	自然对流的影响	(64)
3.1.6	钢液在中间包内的停留时间分布	(72)
3.2	改进中间包流动特征的途径	(78)
3.2.1	增大中间包容量	(79)
3.2.2	挡墙、坝和导流隔墙的应用	(80)
3.2.3	多水口中间包流动的特点及改进途径	(84)
3.2.4	中间包中湍流控制技术	(89)
	参考文献	(91)
4	钢液的二次氧化和夹杂物控制	(94)
4.1	连铸钢中夹杂物的来源及特征	(94)
4.1.1	连铸钢坯中夹杂物的主要来源	(94)
4.1.2	连铸钢中夹杂物的主要特征	(95)
4.2	中间包钢液的二次氧化	(97)
4.2.1	注流的二次氧化及保护措施	(98)
4.2.2	中间包覆盖剂	(101)
4.3	中间包钢液中夹杂物的运动	(105)
4.3.1	流动状态下夹杂物去除的规律	(105)
4.3.2	中间包内去除夹杂物的综合分析	(110)
4.4	中间包吹氩	(115)

4.5	中间包内钢液卷渣及其控制·····	(122)
4.5.1	采用长水口或套管注入钢液·····	(123)
4.5.2	合理的液面深度·····	(123)
4.5.3	旋涡控制装置·····	(124)
4.6	夹杂物形态控制·····	(129)
	参考文献·····	(130)
	附注1 液滴在湍流碰撞中的碰撞频率系数·····	(132)
5	钢液过滤技术·····	(135)
5.1	过滤技术在冶金工业中的应用·····	(135)
5.1.1	过滤器的类型·····	(135)
5.1.2	过滤机理·····	(137)
5.2	钢液过滤器·····	(138)
5.2.1	钢液过滤器的要求·····	(139)
5.2.2	过滤器的结构与形式·····	(139)
5.2.3	过滤器的材质·····	(140)
5.2.4	过滤器的加工与制造·····	(141)
5.2.5	过滤器的尺寸和安装·····	(142)
5.3	钢液应用过滤器去除夹杂物原理及效果·····	(144)
5.3.1	泡沫陶瓷过滤器过滤原理·····	(144)
5.3.2	CaO直通孔过滤器过滤原理·····	(145)
5.3.3	钢液过滤器的使用效果·····	(147)
	参考文献·····	(149)
6	中间包钢液温度控制及加热技术·····	(151)
6.1	中间包内钢液温度控制·····	(151)
6.1.1	对中间包内钢液温度的要求·····	(151)
6.1.2	中间包内钢液温度的变化规律·····	(152)
6.1.3	中间包钢液热损失的途径·····	(159)
6.1.4	浇铸温度的确定·····	(164)
6.2	中间包加热技术·····	(167)
6.2.1	钢液感应加热技术·····	(167)

6.2.2	等离子加热技术	(169)
6.2.3	其他加热法	(171)
6.3	中间包中钢液温度及加热数学模型	(173)
	参考文献	(176)
7	中间包设计和包衬耐火材料	(178)
7.1	中间包结构设计	(178)
7.1.1	中间包容量	(178)
7.1.2	中间包类型和结构参数	(182)
7.2	中间包耐火材料	(183)
7.2.1	硅质绝热板	(183)
7.2.2	碱性耐火材料	(185)
7.2.3	流动控制元件材料	(191)
	参考文献	(192)

下篇 中间包内传输现象的数值模拟

8	中间包三维常密度稳态流场计算	(197)
8.1	钢液流动的运动方程	(197)
8.1.1	连续方程	(197)
8.1.2	动量方程	(197)
8.1.3	K - ϵ 双方程模型	(199)
8.2	离散化方法	(200)
8.2.1	求解区域的离散化	(200)
8.2.2	控制容积法	(202)
8.2.3	交错网格法	(204)
8.2.4	动量方程的离散化	(205)
8.2.5	K 和 ϵ 方程的离散化	(236)
8.3	压力校正方程	(245)
8.3.1	压力和速度的校对方程	(245)
8.3.2	流场计算方法——SIMPLER 算法	(248)
8.4	代数方程组的求解方法	(249)

8.4.1	TDMA 法	(249)
8.4.2	三维 TDMA 法计算程序	(252)
8.5	欠松弛法	(255)
8.6	流场计算框图	(256)
8.7	计算实例	(258)
8.7.1	网格划分	(258)
8.7.2	边界条件处理	(261)
8.7.3	材料代码	(262)
8.7.4	计算结果	(262)
9	中间包三维常密度稳态温度场计算	(266)
9.1	能量方程	(266)
9.2	温度 T 的离散化方程	(267)
9.3	控制容积面上参数	(271)
9.3.1	控制容积面上的速度	(271)
9.3.2	控制容积面上的导温系数	(273)
9.4	温度离散化方程的计算程序	(274)
9.5	中间包边界传热的处理方法	(277)
9.5.1	侧面固体墙	(277)
9.5.2	对称面	(279)
9.5.3	中间包液面(辐射面)	(279)
9.6	中间包温度场计算方法	(280)
10	中间包内钢液停留时间数值计算	(285)
10.1	质量传递方程	(285)
10.2	浓度离散化方程	(286)
10.3	浓度离散化方程计算程序	(288)
10.4	浓度边界条件	(289)
10.5	中间包平均停留时间计算方法	(289)
11	中间包特殊课题的数值计算	(293)
11.1	中间包内含不规则表面时的流场计算	(293)
11.1.1	不规则形状的处理方法	(293)

11.1.2	加入挡墙的中间包流场计算	(294)
11.2	中间包近壁流动的壁面函数修正	(298)
11.2.1	近壁区速度	(299)
11.2.2	近壁区湍动能 K	(299)
11.2.3	近壁区耗散率 ϵ 函数	(299)
11.2.4	近壁区温度	(299)
11.3	中间包非等温状态下钢液流动计算	(300)
11.3.1	非等温条件的运动方程	(300)
11.3.2	非等温流动计算流程图	(301)
11.3.3	计算实例	(302)
11.4	中间包等离子加热温度场计算	(303)
11.4.1	等离子加热模型	(303)
11.4.2	计算实例	(304)
11.5	中间包夹杂物去除和运动轨迹计算	(304)
11.5.1	夹杂物上浮排除率	(304)
11.5.2	夹杂物运动迹线	(308)
	推荐参考资料	(310)
附录 1	中间包三维流场计算软件	(312)
附录 2	中间包三维温度场计算软件	(363)
附录 3	中间包平均停留时间计算软件	(381)
	主要符号表	(391)
	译名对照	(393)
	主题索引	(394)

1

绪论

1.1 钢铁制造流程的演进及现代炼钢车间生产流程

钢铁作为一种重要的基础原材料,在世界各国的经济发展中发挥着举足轻重的作用。自 18 世纪 50 年代以来,随着贝塞麦转炉和平炉的出现以及大规模的钢铁制造业的兴起,人类社会的文明进步明显加快。尤其是 20 世纪以来,钢铁工业的蓬勃发展,成为全球经济和社会文明进步的重要物质基础。在可以预见的时间内,钢铁仍然是世界上非常重要的材料,钢铁材料的综合优异性能使其在主要基础工业和基础设施中仍是不可替代的材料。钢铁以其成本的竞争力和原料的高储备量、易开采、易加工以及良好的再生利用性,仍将作为全球性的主要基础原材料。

图 1-1 展示了 20 世纪粗钢年产量总的变化趋势。从 20 世纪 70 年代中期以来,世界年产钢总量在 7 亿 t 上下浮动,增长甚慢,表明市场需求达到饱和。其间发展中国家,如中国、韩国、巴西、印度等钢年产量持续增长,图 1-2 为 1974 年以来中国钢年产量和连铸坯年产量(未计中国台湾省)的增长情况,虽然增幅很大,但人均产钢量,目前只有 60~70kg/a,远低于工业发达国家的水平。只要在钢质量和成本方面提高自己的竞争力,处理好“投入—产出”关系,中国钢铁工业还有相当大的发展潜力。

在钢铁工业的发展进程中,其基本原理并没有出现根本性的变化,但钢铁生产工艺流程中各工序的技术形式以及工程的组成内涵则发生了巨大的变化,从而使钢厂结构模式及制造流程发生了深刻变化。20 世纪 50 年代氧气转炉的出现,使炼钢工业面貌迅速改观。70 年代石油危机以后,由于能源价格上涨,连铸技术