

钢冶炼过程

耐火材料与渣/钢作用的 数值模拟

黄 奥 张美杰 顾华志 著



科学出版社

钢冶炼过程耐火材料与 渣/钢作用的数值模拟

黄 奥 张美杰 顾华志 著

科学出版社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229,010-64034315,13501151303

内 容 简 介

本书主要内容包括耐火材料冶金过程及其数值模拟必需的基础知识概述,卷渣关键区域模型与边界条件,耐火材料与渣/钢三相区的卷渣行为,底吹钢包耐火材料蚀损的数学模型,底吹钢包耐火材料的蚀损规律,耐火材料渣蚀的基本模型,耐火材料的渣蚀行为模拟,气幕挡墙中间包钢液流动数学模型,气幕挡墙中间包内夹杂物运动与去除数值模拟,透气耐火材料对气幕挡墙中间包钢液流场的影响,二流板坯连铸中间包数值模拟,中间包内多物理场场协同分析方法,中间包内钢液流场与温度场数值计算与场协同分析,单流中间包夹杂物去除数值模拟与场协同分析,透气耐火材料服役过程热应力分析。

本书可供高等学校从事冶金等高温过程工业、耐火材料行业的相关专业学生使用,也可作为从事此方面科研、生产设计与应用工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢冶炼过程耐火材料与渣/钢作用的数值模拟/黄奥,张美杰,顾华志著. —北京:科学出版社,2018.10

ISBN 978-7-03-058765-7

I. ①钢… II. ①黄… ②张… ③顾… III. ①炼钢-冶金过程-数值模拟 IV. ①TF703

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 205345 号

责任编辑:谭耀文 王 晶/责任校对:董艳辉

责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

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>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2018年10月第 一 版 印张:12 1/2

2018年10月第一次印刷 字数:300 000

定价:72.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

耐火材料是高温过程工业的基础材料,其技术进步对洁净钢冶炼和高性能钢铁材料的生产起到至关重要的作用。近年来,重质耐火材料轻量化成为耐火材料的重要发展方向,在钢精炼等苛刻服役条件下耐火材料与冶金过程的相互作用机理及耐火材料轻量功能化的突破,对促进新型优质高性能钢铁品种的开发及钢铁生产节能降耗具有重要意义。传统上,耐火材料服役科学是一个试验科学,具有复杂多变和高温难见等特点。近年来,基于电子计算机的高速发展,数值模拟已成为一些领域的有效研究方法,因此作者在耐火材料服役数学模型及数值模拟方面进行了相关研究。

为有效增大渣/钢间的传质,减小耐火材料与渣/钢间的传质,在钢精炼卷渣这一常见现象中,尤其是采用精度更高的大涡模拟时,以米为基本尺度的大容器和以毫米为基本尺度的渣滴显现出多尺度的模拟难题。本书通过数学框架分析法确定和建立边界条件参数与底吹参数的关系,从而实现耐火材料与渣/钢关键三相区域的卷渣大涡模拟,揭示卷渣机制:随着气液股和渣眼的形成,渣钢边界一大块熔渣将被拉向下部钢液中,达到一定临界条件后,渣滴将在渣块的近钢液末端形成,最终卷入钢液中;修正后的 Ca 准数方程可以作为临界卷渣标准(速率),同时本书建立关联模型及底吹参数临界卷渣标准,这将有利于工业应用和预测。其后,本书建立钢精炼耐火材料的冲蚀模型,仿真计算耐火材料服役过程中溶解蚀损和冲蚀协同作用下钢包内衬材料的蚀损,为精炼参数优化及耐火材料损毁提出新的评价手段。熔渣向耐火材料渗透侵蚀时,对于多孔耐火材料,根据熔渣组成,控制其孔径小于某一临界值(如小于 $0.7\ \mu\text{m}$),可以得到较好的抗渣性能,这将为钢精炼工作衬耐火材料的轻量化提供理论指导。在洁净钢冶炼中,连铸中间包是钢液凝固前最后一个耐火材料容器,其对钢水精炼的作用日益得到人们的重视。中间包底吹氩技术,不仅可以改变钢液的流动状态,起到中间包挡墙的作用,而且氩气泡产生的浮力产生气泡泵现象,促使该局部的湍动能耗散率显著增大,有利于夹杂物颗粒长大而排除。同时,上浮的气泡可以捕获夹杂物颗粒,并携带它一同上浮。近年来,国内外材料及冶金学者纷纷采用不同的研究手段,对气幕挡墙中间包的冶金作用进行了广泛研究,但均没有与透气耐火材料相结合。本书根据实际生产用透气耐火材料结构性能,建立底吹中间包气幕挡墙技术的数学模型,介绍底吹中间包气幕挡墙分析计算方法。同时,将引入场协同原理,定义中间包内钢液流场与温度场的协同数、钢液流场与夹杂物浓度场的协同角,从场协同角度分析控流装置的优化效果,为中间包流场优化提供新的理论指导。

本书共 16 章,绪论、第 1~7 章由黄奥编写,第 8~14 章由张美杰编写,第 15 章由顾华志编写。第 1 章介绍耐火材料冶金过程数值模拟必需的基础知识。第 2~7 章分别介绍耐火材料与熔渣/熔钢界面行为及对耐火材料蚀损的影响,内容包括渣钢乳化关联耐火材料蚀损、耐火材料渣蚀与冲蚀等数学模型与数值模拟研究;第 8 章和第 9 章分别介绍气

幕挡墙中间包钢液流动数学模型、夹杂物运动与去除数值模拟;第 10 章介绍透气耐火材料对气幕挡墙中间包钢液流场的影响;第 11 章以二流板坯连铸中间包为例,介绍了气幕挡墙中间包数值模拟计算与分析方法;第 12 章介绍中间包内场协同分析方法;第 13 章和第 14 章分别介绍中间包内钢液流场与温度场的场协同关系、钢液流场与夹杂物浓度场之间的协同关系;第 15 章介绍透气耐火材料服役过程及其烧氧排除渗入钢渣过程的热应力数值分析与优化。本书配有图书二维码,通过扫描二维码可看见部分彩图。

本书是在国家自然科学基金“基于多场耦合的精炼钢包轻量化耐火材料渣蚀行为研究”(51204126)、湖北省自然科学基金重点项目“耐火材料与熔渣能质交换多场耦合数值模拟与控制研究”(2011CDA053)、奥地利 K1-MET 项目“Investigation of possible slag entrainment in steel ladles with respect to refractories”及湖北省博士后科技活动项目择优一等资助下完成的。感谢奥地利莱奥本矿业大学陶瓷所的 Harald Harmuth 教授的指导以及 Sandra Vollmann 和 Marianne Doletschek 的建议,感谢付绿平博士、邹阳博士、林小龙博士、连鹏飞硕士对基础知识完善做了一些工作,此外,王雅杰硕士为本书的出版做了许多工作。在此一并表示衷心感谢。

对耐火材料与渣/钢作用的研究不仅涉及耐火材料学科的知识,还涉及冶金学科、流体动力学相关知识,作者知识有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

著 者

2018 年 3 月

目 录

绪论	1
第 1 章 基础知识概述	4
1.1 钢的精炼	4
1.2 渣/钢界面行为	5
1.3 大涡模拟	10
1.4 钢精炼用耐火材料	13
1.5 耐火材料渣蚀行为	15
1.6 耐火材料的钢液冲刷蚀损	23
1.7 电磁场对冶金熔体的影响	25
1.8 电磁场对流体物理性质的影响	28
1.9 本章小结	29
参考文献	29
第 2 章 卷渣关键区域模型与边界条件	34
2.1 卷渣过程分析	34
2.2 边界条件的确定	41
2.3 模型验证与分析	43
2.4 本章小结	48
参考文献	48
第 3 章 耐火材料与渣/钢三相区的卷渣行为	49
3.1 底吹钢包参数	49
3.2 关键参数确定	50
3.3 二维模拟	50
3.4 三维模拟	53
3.5 本章小结	55
参考文献	55
第 4 章 底吹钢包耐火材料蚀损的数学模型	56
4.1 多相流模型	56
4.2 多孔介质模型	56
4.3 耐火材料溶解蚀损的数学模型	56
4.4 耐火材料冲刷蚀损的数学模型	57
4.5 边界条件	62
4.6 相关参数	62

4.7 网格划分与求解	63
4.8 本章小结	64
参考文献	64
第5章 底吹钢包耐火材料的蚀损规律	65
5.1 计算方案	65
5.2 结果与分析	65
5.3 本章小结	72
参考文献	72
第6章 耐火材料渣蚀的基本模型	73
6.1 几何模型	73
6.2 多相流模型	73
6.3 渗透模型	73
6.4 热力学预测	75
6.5 反应模型	76
6.6 电磁模型	77
6.7 本章小结	77
参考文献	77
第7章 耐火材料的渣蚀行为模拟	78
7.1 计算条件与假设	78
7.2 结果与讨论	79
7.3 本章小结	86
参考文献	86
第8章 气幕挡墙中间包钢液流动数学模型	87
8.1 水力学模拟实验研究	87
8.2 钢液流动数学模型	91
8.3 网格划分与求解	94
8.4 多孔介质模型对计算结果的影响	95
8.5 数学模型的验证	99
8.6 本章小结	100
参考文献	101
第9章 气幕挡墙中间包内夹杂物运动与去除数值模拟	102
9.1 夹杂物的去除方式	102
9.2 夹杂物的碰撞与长大模型	104
9.3 夹杂物去除率的计算方法	104
9.4 气幕挡墙中间包夹杂物去除率的数学模拟	105
9.5 本章小结	108
参考文献	108

第 10 章 透气耐火材料对气幕挡墙中间包钢液流场的影响	109
10.1 透气耐火材料阻力系数分析与计算	109
10.2 计算条件	110
10.3 透气耐火材料对气体流动的影响	110
10.4 气幕挡墙砖性能参数对气泡逃逸速度的影响	112
10.5 中间包内液相的流场	113
10.6 中间包内气体的体积分布	115
10.7 本章小结	117
参考文献	118
第 11 章 二流板坯连铸中间包数值模拟	119
11.1 计算条件	119
11.2 数值求解	121
11.3 计算结果及讨论	122
11.4 本章小结	150
参考文献	151
第 12 章 中间包内场协同分析方法	152
12.1 中间包流场优化研究方法概述	152
12.2 场协同概述	153
12.3 流场与温度场之间的场协同分析	153
12.4 流场与夹杂物浓度场之间的场协同分析	155
12.5 本章小结	157
参考文献	157
第 13 章 中间包内钢液流场与温度场数值计算与场协同分析	160
13.1 数学模型与计算条件	160
13.2 设置冲击板装置时计算结果及分析	162
13.3 设置挡墙、挡坝装置时计算结果及分析	164
13.4 设置湍流控制器装置时计算结果及分析	165
13.5 设置湍流控制器加挡墙挡坝时计算结果及分析	167
13.6 流场及温度场的场协同数分析	169
13.7 温度场的热量积耗散	169
13.8 本章小结	170
参考文献	170
第 14 章 单流中间包夹杂物去除数值模拟与场协同分析	171
14.1 数学模型与计算条件	171
14.2 湍流碰撞对夹杂物浓度的影响	172
14.3 不同控流装置对夹杂物去除率的影响	177
14.4 中间包内流场与夹杂物数量浓度场的协同分析	179

14.5 本章小结.....	183
参考文献.....	183
第 15 章 透气耐火材料服役过程热应力分析	184
15.1 数学模型.....	184
15.2 计算条件与方法.....	184
15.3 结果与分析.....	186
15.4 本章小结.....	192
参考文献.....	192

绪 论

耐火材料是服务和保障钢铁等高温过程安全运行、节能减排和技术进步的重要基础材料,参与钢铁等高温熔炼全过程,也是钢中非金属夹杂物和有害元素的主要来源之一。随着洁净钢冶炼技术的发展和钢包精炼炉(LF)等精炼手段的采用,其耐火材料的服役寿命显著降低,更多的耐火材料消耗意味着更多的杂质进入钢水,也意味着更大量的资源消耗和冶金废渣等排放。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》和中华人民共和国工业和信息化部《钢铁产业调整政策(2015年修订)(征求意见稿)》将“高效率、低成本洁净钢生产平台集成技术”作为工业技术发展中的一个方向;同时,《中国制造2025》《工业转型升级规划(2011—2015年)》《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》均提出了重点行业单位工业增加值能耗、物耗及污染物排指标达到或接近世界先进水平的战略目标。

洁净钢质量的提高不仅要求生产装备升级和工艺技术创新,而且对耐火材料的寿命和功能提出新的要求。《2011—2020年中国钢铁工业科学与技术发展指南》提出重点发展提高钢水洁净度和使用寿命的新型耐火材料,《工业转型升级规划》也将“大力推进工业节能降耗”和“资源利用高效化”作为重点任务。耐火材料的技术进步不仅对洁净钢冶炼和高性能钢铁材料的生产起到了至关重要的作用,而且一定程度上关乎钢铁等高温工业的可持续发展。尤其是近年来,重质耐火材料轻量化成为耐火材料的重要发展方向之一,耐火材料与冶金过程的相互作用机理及耐火材料本身性能的突破,对促进新型优质高性能钢铁品种的开发及钢铁生产节能降耗具有重要意义。

传统上,耐火材料服役科学是一个试验科学,具有复杂多变和高温难见等特点,采用“炒菜式或试错式”的研究方法,造成人力物力大量的浪费。钢精炼过程中,钢液顶部和熔渣接触,通过搅拌能够促进夹杂排入熔渣中。但有时,如在深脱硫情况下,需要足够大的搅拌能量来加速冶金反应,这便可能导致卷渣和冲刷,不仅恶化钢液质量,而且很可能加速炉衬-渣-钢三相区的耐火材料消耗,外生夹杂对钢的质量有重要影响,且速损局部易造成严重安全隐患;同时,材料的微结构(包括相组成)决定材料的性质,耐火材料的微结构是一种多相多组分的非均质结构,渣蚀损毁包含渣的渗透和熔损的物理、化学交互过程,轻量化耐火材料由于体积密度较低,气孔较多,熔渣的扩散通道更多、黏度更小,其渣蚀过程更加复杂。总而言之,钢精炼耐火材料面临材料微结构、温度、流动、化学反应等多种因素影响下的动态界面行为和苛刻服役条件,一般仅凭现行实验手段难以探明。近年来,基于电子计算机的高速发展,数值模拟已成为相关领域的有效研究方法。这一方法通过数学建模、数值计算和图像动静态显示,实现对工程过程和物理化学问题等复杂系统的探索。因此,发展和利用数值模拟技术,对于解析耐火材料在冶炼过程复杂苛刻条件下的蚀损机理和提高钢的品质具有重要的理论价值和实际意义。

为了评估耐火材料的寿命,实现其功能化,近年来作者及其团队在耐火材料服役数学模型及数值模拟上做了一些创新工作,得到一定的认识。例如,通过数学分析框架,突破精炼容器中耐火材料多相界面的跨(多)尺度制约,实现精炼过程卷渣行为的大涡模拟,探索渣滴的形成和运动及其对耐火材料蚀损的影响,明确卷渣机制,获得预测方法;以精炼主流铝镁系耐火材料为对象,构建高温钢液对耐火材料的冲刷蚀损模型,探明精炼过程耐火材料蚀损规律;建立耐火材料与熔渣界面耦合温度-流动-反应的多场耦合模型,获得多因素耦合作用下耐火材料与熔渣间的传输与蚀损机制,实现精炼过程轻量化耐火材料蚀损的预测,为设计和开发面向绿色、低耗冶金钢精炼耐火材料提供理论指导;结合透气耐火材料的结构与性能,研究气幕挡墙中间包冶金技术,建立钢液流动与夹杂物去除的数学模型;突破传统的“炒菜式”研究方法,开展连铸中间包内多物理场协同分析,用场协同理论探索钢铁冶炼优化新的理论与方法。

(1) 在常见的底吹精炼钢包卷渣这一常见现象中,以米为基本尺度的大钢包和以毫米为基本尺度的渣滴显现出一个多尺度的模拟难题。尤其是采用精度更高的大涡模拟时,整个模拟需要划分非常精细的网格,也需要大量的计算时间和配置非常高端的高成本计算机。本书通过数学框架分析法确定和建立边界条件参数与吹气参数的关系,从而可以实现耐火材料与渣/钢关键三相区域的卷渣大涡模拟。

(2) 卷渣机制:随着气液股和渣眼的形成,渣钢边界一大块熔渣将被拉向下部钢液中,达到一定临界条件后,渣滴将在渣块的近钢液末端形成,最终卷入钢液中。卷渣临界条件:以某一精炼钢包为例,渣滴脱离渣块末端形成的临界渣/钢界面的钢液速度为 0.48 m/s ;卷渣的临界的吹氩流量为 210 L/min ;渣滴触蚀耐火材料的临界吹氩流量为 230 L/min ;随着吹氩流量的增加,渣滴尺寸的分布范围渐变宽广,且大于 2 mm 的渣滴数量占比增大,这很可能会加大耐火材料蚀损风险;熔渣的黏度是渣滴形成和卷渣行为的重要影响因素。

(3) 相比双吹精炼过程,单吹条件下耐火材料的蚀损程度较轻、范围较小,近渣线的耐火材料承受较大的蚀损;吹气量增大会加剧钢包内衬蚀损,而透气砖偏心度过大则造成透气砖内衬的局部过早损毁。因此应在保证吹气效果的同时,尽量选择小的底吹偏心度,以免短板效应。

(4) 在熔渣向耐火材料渗透过程中,由于不同材料存在不同的黏性和惯性阻力,实际渗透深度明显小于比可曼(Bilkerman)公式计算值;对于多孔耐火材料,控制其孔径小于某一临界值时,可以得到较好的抗渣性能;在没有严重黏渣的情况下,熔渣渗透后与耐火材料反应生成的致密高熔点相可以提高材料的抗渣性;在保持骨料显气孔率不明显增大的情况下设法减小骨料平均孔径(至少小于 $0.7 \mu\text{m}$)并使基质致密化,同时根据熔渣性质调整耐火材料化学组成,将轻量化铝镁耐火材料应用于精炼钢包内衬是有望的。

(5) 多孔介质模型能更好地描述气体在气幕挡墙砖内的流动过程。气幕挡墙砖的气孔率及透气度对形成气泡的大小、气泡的逃逸速度有重要影响,对中间包内钢液的流动特性及气体的体积分布有一定影响。在吹气参数相同时,气幕挡墙砖的气孔率及透气度越大,所形成的气泡越大,气泡进入钢液的初始速度越大,从而带动钢液向上流动的速度增

加,中间包内全混流体积分数增加,死区体积分数降低,上浮到液面的气体的体积分数增加,对平均停留时间、活塞流体积分数及中间包内气体的体积分数影响不大。

(6) 气幕挡墙中间包内夹杂物通过碰撞长大、斯托克斯定律的上浮作用、耐火材料壁面吸附作用、气泡对夹杂物的黏附作用而去除。壁面吸附及夹杂物的碰撞长大对夹杂物去除率的影响不大,约占总去除率的4%;大颗粒夹杂物主要通过斯托克斯定律的上浮作用而去除;小颗粒夹杂物主要靠气泡吸附作用而去除,占总去除率的50%以上。

(7) 气幕挡墙中间包内吹气参数及控流装置的使用情况对钢液流动特性、气体的体积分布及夹杂物去除率有重要影响;气幕挡墙代替中间包内的挡渣堰或挡渣坝均可以有效延长钢液的停留时间,促进夹杂物上浮去除。其中代替坝时,效果更显著;在同时使用湍流控制器、堰、坝的中间包内,在能形成有效气幕并不引起表面卷渣的吹气量下,气幕挡墙两侧形成的回流有助于降低死区体积,促进夹杂物的碰撞长大,稳定的上扬流动有利于延长停留时间,促进夹杂物上浮去除。

(8) 协同效果对夹杂物去除的影响分析得出,场协同数大、质量积耗散小的方案其传质效果好,夹杂物去除率高。场协同理论在中间包去夹杂适用。

综上所述,结合高温热模拟等实验,数值模拟技术对于高温冶炼苛刻环境下耐火材料服役过程现象的理解和设计指导非常有帮助。上述研究仅是一个初期的探索和发掘,还有更复杂的环境,如高压冶金技术是实现高氮钢等特殊钢种冶炼的重要手段,高压底吹气相渗氮是其重点开发技术之一,工况条件极为苛刻,同时电磁等外场冶金技术的发展也很迅速,其耐火材料蚀损过程还有待借助模拟手段进行探索。

第 1 章 基础知识概述

耐火材料是钢铁等高温工业技术进步的基础材料,是高温新技术、新工艺流程具有现实使用价值的重要保障。耐火材料参与钢铁熔炼全过程,也是钢中杂质的主要来源之一。洁净钢质量的提高不仅要求生产装备升级和工艺技术创新,而且对耐火材料与冶金过程的相互作用机理及耐火材料本身性能的突破有重大需求。

1.1 钢的精炼

1.1.1 炉外精炼技术

炉外精炼是指在特定的条件下(包括真空和各种气氛)进行脱氧、脱硫、去除杂质、调整成分(合金化)、夹杂物变性、控制和均匀钢水温度等的冶金过程。它的出现将传统的钢冶炼过程划分成初炼和精炼两个阶段,是在转炉或电炉等初炼完成之后,在精炼钢包中进行的真空脱气、脱碳、消除杂质元素和排除钢液中的非金属夹杂物。因此,炉外精炼也称为“二次精炼”。

随着冶金技术的发展,钢冶炼中温度和成分控制的精度要求越来越高,使得钢包二次精炼技术即炉外精炼技术兴起和快速发展,极大地满足、丰富和扩展了炼钢过程工艺及其冶金功能,钢包精炼炉(ladle furnace, LF)、氩氧脱碳法(argon-oxygen decarburization process, AOD)、真空吹氧脱碳法(vacuum oxygen decarburization process, VOD)、真空循环脱气法(Ruhrstahl Heraeus degassing process, RH)、氩封成分微调吹氧(composition adjustments by sealed argon-oxygen blowing process, CAS-OB)、钢包吹氩搅拌(ladle argon stirring, LAS)真空脱气(vacuum degassing, VD)等各式各样的精炼设备和技术也成为高品质洁净钢生产流程中必不可少的关键工艺。

1.1.2 底吹氩工艺

精炼钢包作为转炉或电炉钢的初炼和连铸工艺之间的装载钢液的容器,是炼钢工艺流程中必不可少的设备。它不仅是承接和运输钢液的容器,同时也是进行炉外二次精炼的精炼设备。精炼钢包吹氩技术是一种经济实用而且易于安装操作的精炼技术,能有效地均匀钢液温度和合金化成分,消除有害气体和排除夹杂物,改善钢液质量,从而得到广泛应用。钢包吹氩可以采取顶部喷吹或底部喷吹两种方式,但因顶部喷吹氩工艺存在吹气死角、再现性差等弊端,逐渐被底部喷吹氩工艺所取代,目前大多数钢厂均采用底吹氩搅拌钢液技术(图 1-1),并取得良好的冶金效果^[1]。

钢包底吹氩工艺原理是通过各种形式的透气砖将具有一定压力的氩气由钢包底部喷

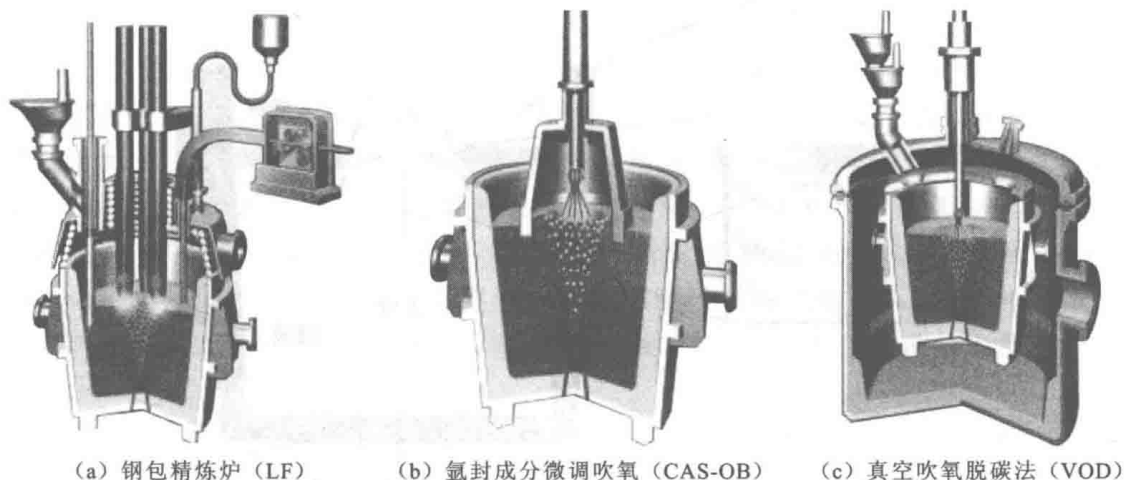


图 1-1 精炼钢包底吹氩示意图

吹至钢液中。氩气进入钢液后会形成气泡,气泡依靠浮力作用而上浮,带动下部钢液向液面流动,而到达液面后又回落至包底,钢液经如此循环往复的运动形成环流,达到搅拌钢液的目的^[1]。钢包底部喷吹氩气来搅拌钢液有利于钢液温度的均匀化,而且钢液在流动过程中会使夹杂物上升到顶渣而得到去除,另外,钢液中的小气泡能够黏附微小夹杂物,并对钢液中的杂质气体和元素有捕获及排除功能,从而最大化地净化钢液。

1.2 渣/钢界面行为

1.2.1 卷渣现象

在钢冶炼过程中,从转炉、钢包、中间包至结晶器,钢渣乳化是非常重要的普遍现象。特别是在炉外精炼和连铸过程,高品质钢冶炼的决定性环节中,其有效增大钢液与熔渣的反应面积,提高钢液的精炼效率,但也能产生夹杂物污染钢液。通常在气体搅拌中,氩气从钢包底部吹入,当气流足够大时,气-液两相流股内的上升流将穿透渣层,并在熔池表面的升高区域形成一个圆顶形区域,通常称为“喷柱”。之后,熔渣被推向两侧,使熔融金属表面暴露,通常称为“渣眼”,接下来就可能发生卷渣。

例如,在脱硫等工艺过程中需要较大的氩气流量来加速反应,当吹入氩气过快时,会带动钢液剧烈环流,重者容易引起顶部钢液喷溅,轻者会导致熔渣卷入钢液中形成杂质,造成钢液的污染^[2](图 1-2)。更重要的是,卷入的渣滴有可能接触渣线下部的工作衬耐火材料,造成额外的过速侵蚀。

1.2.2 临界条件

很多专家和学者利用物理与数学模拟对渣钢卷混的临界条件进行了研究,表 1-1 对这些研究的结果进行了总结。Asai^[3]、Mietz 等^[4]以及 Oeters^[5]通过惯性力、表面张力和浮力的平衡分析得到卷渣临界速度。然后 Oeters^[5]和 Wei 等^[6]利用边界层理论获得熔

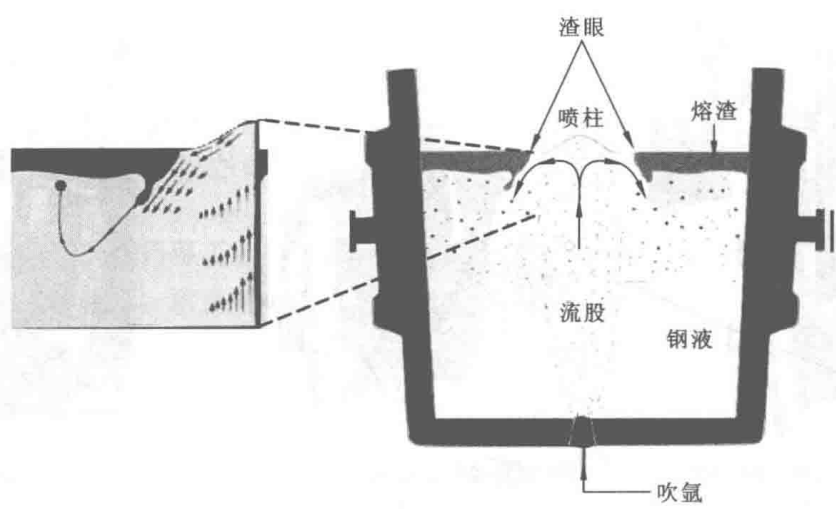


图 1-2 底吹氩气卷渣示意图

融金属的临界卷渣速度。Iguchi 等^[7]通过对三维水-油模型模拟实验数据的分析定义了两相流股中心的临界卷渣速度。Krishnapisharody 等^[8]在开尔文-亥姆霍兹不稳定性模型的基础上,提出了熔渣和熔融金属之间的临界速度差异的临界卷渣条件。Kim 等^[9]和 Gan 等^[10]根据在大范围内应用密度、黏度和界面张力的几个不相混溶的液-液体系的实验数据的多维分析,确定了临界吹气量。

表 1-1 卷渣临界条件

临界参数	临界条件	研究者
临界熔渣速度	$u_{cr} = \left(\frac{48 \Delta \rho g \sigma}{\rho_s^2} \right)^{\frac{1}{4}}$	Asai ^[3]
	$u_{cr} = \left(\frac{128 \Delta \rho g \sigma}{3 \rho_s^2} \cos \beta \right)^{\frac{1}{4}}$	Mietz 等 ^[4]
		Oeters ^[5]
临界熔渣速度	$u_{cr} = \frac{u_i}{u_l}$	Oeters ^[5]
	$= \left(\frac{\rho_l}{\rho_s} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{u_l L}{\nu_s} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{u_l L}{\nu_l} \right)^{-\frac{2}{15}} [(1 - u_{cr})(0.11 - 0.069 u_{cr})]^{\frac{2}{15}}$	Wei 等 ^[6]
临界流股中心速度	$u_{cr} = 1.2 \left(\frac{g \sigma}{\rho_s} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{h_s}{D} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\nu_s}{\nu_l} \right)^{0.068}$	Iguchi 等 ^[7]
临界渣/钢速度差	$\Delta u_{cr} = \left(\frac{2(\rho_l + \rho_s)}{\rho_s \rho_l} \sqrt{g(\rho_l - \rho_s)} \right)^{\frac{1}{2}}$	Krishnapisharody 等 ^[8]
临界吹气量	$Q_{g,cr} = 0.035 H^{1.8} \left(\frac{\Delta \rho \sigma}{\rho_s^2} \right)^{0.35}$	Kim 等 ^[9]
	$Q_{g,cr} = 54.41 \left(\frac{\Delta \rho \sigma}{\rho_s^2} \right)^{0.35} \left(\frac{h_s}{H} \right)^{-0.42} \left(\frac{\mu_s}{\mu_l} \right)^{0.3}$	Gan 等 ^[10]
修正 We	$We_{mo} = \frac{u_{cr}^2 \rho_l}{\sqrt{g(\rho_l - \rho_s)}}$	Hsiao 等 ^[11]
修正 Ca	$Ca = \frac{u_{cr} \mu_l}{\sigma} = 3 \times 10^{-6} \left(\frac{\nu_s}{\nu_l} \right) + 2.8 \times 10^{-3}$	Hagemann 等 ^[12]

Hsiao 等^[11]采用底吹气水-油模型研究了卷渣现象。他们观察了下层相(水)的临界流率,并作为临界条件,表明上层相(油)开始形成液滴并分散到下层相中。 We 是表示惯性力和表面张力的比值的准数,被直接或修正后用于判定二液系统的近似混合可能性。其被用于水-油系统的物理模型中,通过观测上层相强烈地分散进入下层相,计算出修正的 We 的临界值为 12.3。该判定临界标准被认为在钢-渣系统是有效的,且被广泛地用于熔渣的卷渣预测中。但是,该临界条件仅在当低密度相黏度影响很低时奏效。Hagemann 等^[12]确定了临界 Ca 与临界速度和两相运动黏度之比的关系,研究了连铸工业中不同不相混溶流的特性,并得到临界修正 Ca 函数关系式,其仅在两相密度差的影响较低时是准确的。

通过改进的无量纲准数能够捕捉卷渣的起始点,预测渣滴的分离。在工业应用上,临界吹气量能够很容易地评判卷渣并且减少耐火材料蚀损。

1.2.3 研究方法

目前,工业试验、物理模拟和数值模拟三种方法通常被用来深入探究熔渣和熔钢之间的界面现象。

1. 工业试验

工业试验的目的是直接获得在高温或恶劣条件下熔渣和钢之间的界面现象的真实信息或数据。通常有两种途径,一种是离散型的静态采样,另一种是连续型的动态监测。

静态采样途径在各种不同的炼钢厂方式不同。例如,Beskow 等^[13]发明了一种采样方法,成功地获取了钢包精炼处理中(包括气体搅拌)的熔渣/熔融金属界面的样品。这种新的取样方法如图 1-3 所示。但这些采样方法仍然难以开展实验研究,因为即使不考虑复杂性和成本,样品尺寸(相对于大块)和采样频率(相对于动态)是有限的。

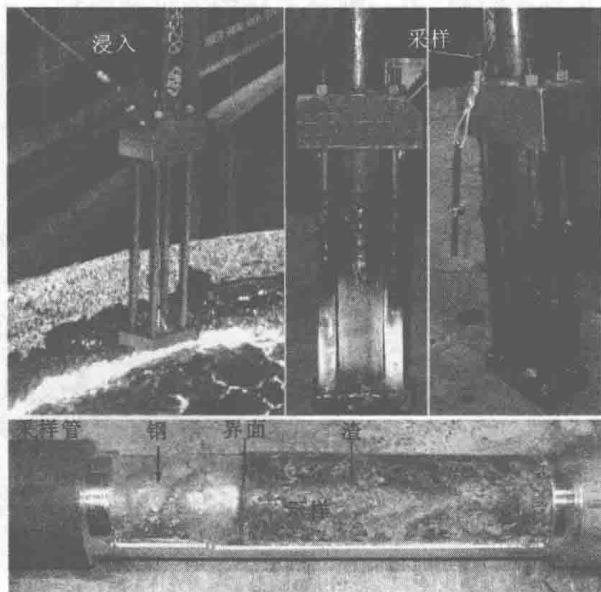


图 1-3 卷渣静态采样方法

动态监测是一种较好的方法。Dannert 等^[14]试图通过红外影像处理来监控底吹钢包搅动时的熔渣乳化作用,并且用一个过程控制的参数来量化它,如图 1-4 所示。首先要鉴定图像的相关特征,然后采用一个合适的图像处理程序来估测乳化作用是否发生,最后图像处理程序被用来量化底吹钢包搅动过程中的乳化作用。但是红外监测仪的分辨率使得熔渣液滴的出现无法被监控到(它们的特征尺寸小于 2 mm,远小于红外监测仪的最小分辨尺寸 25 mm)。



图 1-4 卷渣红外动态监测过程

因此,上述的工业途径太复杂和昂贵,并且无法记录熔渣卷入熔钢内部的动态卷渣情况。

2. 物理模拟

采用物理模型研究液-液两相界面和卷吸的相关文章有很多。其中,水和油是最常见的模型模拟相,相关研究者也取得不少研究成果。

Huang 等^[15]用水-油-氮气模型研究可能的卷渣现象,并且观察钢包底吹气量增加时渣滴的运动。结果表明如图 1-5 所示,熔渣、钢液与耐火材料接触处有两种卷渣的可能,一种是熔渣/钢液的乳化形成渣滴,另一种是大块熔渣可能顺着三相边界向下运动。

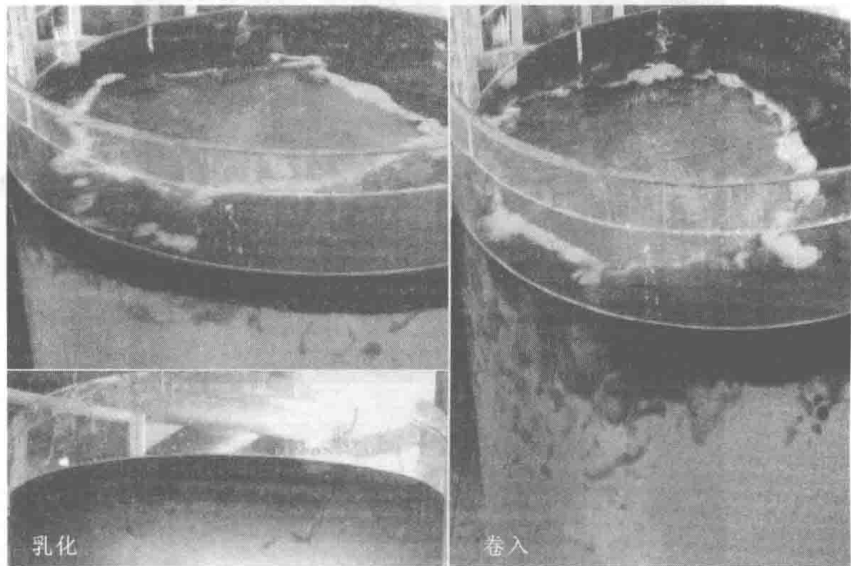


图 1-5 底吹钢包卷渣模拟结果