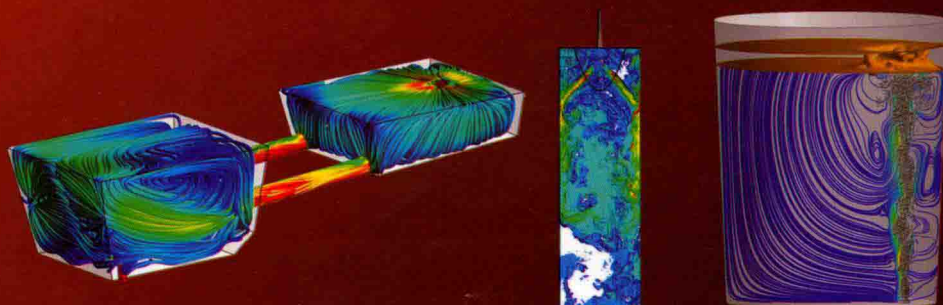




Computational Fluid Dynamics in
Steelmaking Processes

炼钢中的 计算流体力学

李宝宽 刘中秋 著



 冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

炼钢中的计算流体力学

李宝宽 刘中秋 著

冶金工业出版社

2016

内 容 提 要

本书共 11 章,系统地阐述了计算流体力学在炼钢中的应用,涉及从流动理论、数值方法到应用技术等各个方面。将现代流体力学中的新理论和新方法应用于金属冶炼过程,重点介绍了作者多年来在揭示高温熔体流动规律、发展工艺过程的数学模型和改善工艺操作等方面取得的一些有价值的研究成果,包括多相流动;流场、电磁场和温度场的耦合;先进湍流模拟方法的应用及人口平衡模型在炼钢过程中的应用等。

本书可供高等院校冶金、化工和热能工程方面的教师、学生阅读,也可供广大冶金企业和科研机构的科研工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

炼钢中的计算流体力学/李宝宽,刘中秋著. —北京:冶金工业出版社, 2016. 9

ISBN 978-7-5024-7265-8

I. ①炼… II. ①李… ②刘… III. ①炼钢—计算流体力学
IV. ①O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016) 第 200858 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp. com. cn 电子信箱 yjchs@cnmp. com. cn

责任编辑 唐晶晶 张熙莹 美术编辑 彭子赫 版式设计 彭子赫

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7265-8

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2016 年 9 月第 1 版, 2016 年 9 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 15.75 印张; 382 千字; 239 页

58.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp. com. cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs. tmall. com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

序

炼钢技术经过一百多年的发展，取得了长足的进步。但随着现代汽车工业、高层建筑、大型桥梁、航海及高速列车等行业发展需求的提高，对钢材质量与性能的要求日益严格，因此，进一步提高钢的品质仍是未来钢铁工业面临的挑战。

钢的去碳、脱硫及去除夹杂物等冶炼过程均是在金属熔融状态下进行的，钢坯凝固质量也主要取决于凝固前沿钢液的流动行为。流体流动现象广泛存在于炼钢各环节中，流动耦合传热、传质、化学反应、相变、电磁力、多相流等诸多现象形成复杂的冶炼过程。为促进产品质量的提升，冶金界投入大量人力、物力和财力研究伴随冶金过程的流动及相关的各种现象。就研究方法而言，传统的手段是模型实验和现场实测。但冶金过程原料条件复杂、装置庞大，且是在高温条件下进行的，实验室条件下无法完整地再现实际过程，只能进行冷态、局部或单元过程的实验。这不仅与实际过程差别很大，而且装置放大后的效果也很难掌握。另外，实验只能有限次进行，获得间断的有限种类的数据，加上现场测试不仅耗资巨大，而且可测试数据有限，准确性也难以保证。然而，随着计算机的发展和数值计算技术的不断成熟，利用计算机对实际过程进行数值模拟，即“数值实验”的计算流体力学方法迅速发展起来。

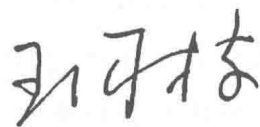
计算流体力学（computational fluid dynamics, CFD）是用计算机和离散化数值方法对流体力学问题进行模拟和分析的一门学科。随着计算机技术的飞速发展，CFD 学科已经居于流体动力学和热传递科学研究的前沿。在炼钢过程中，通过 CFD 流动可视，可提高冶金工作者对各反应器内流动状态的直观感受，更好地把握钢液的流动和热传递过程，深化对流动现象的理解。

作者课题组长期从事金属精炼与凝固过程热物理的基础研究，将现代流体力学中的新理论和新方法应用于金属冶炼过程。在揭示高温熔体流动规律、发展工艺过程的数学模型和改善工艺操作等方面取得了一些有价值的研究成果。主要包括：独立开发了可考虑电磁场作用的非稳态两相三维湍流流体流动及传

输过程的数学模型,解决了电磁场作用下钢液流动区与导电凝固壳区磁场和流场耦合的计算;揭示了结晶器液面涡流卷渣规律,利用可视化实验捕获液面涡流,发现水口偏斜出流是产生毗邻水口涡流的原因,并观察到不稳定的对涡和相对稳定的单涡,纠正了传统的上卷流流动剪切卷渣的观点;将先进的大涡模拟方法引入欧拉双流体模型,解决了以往湍流模型无法捕捉气相对液相造成的湍流脉动压力的难题,改善了局部湍流、气液运动参数的预测精度;将人口平衡方程数值方法与双流体湍流方程、相间动量传递模型和气泡聚并破碎模型相结合,构建了双流体人口平衡模型,为建立多尺寸泡状流数值模型提供了数学框架;将有限元法和有限体积法相结合,构建了电磁、传热、流动现象耦合计算的三维非稳态数学模型,解决了非稳态下多物理场耦合计算的难题;基于凝固前沿界面理论和力的平衡原理,构建了描述非金属夹杂物/气泡在凝固前沿运动及捕捉的数学模型,为提出夹杂物/气泡在凝固前沿的捕捉判据奠定了理论基础。

作者课题组在国际杂志“Metallurgical and Materials Transaction B”和“ISIJ International”及国内《金属学报》等冶金杂志上发表了大量有价值的论文,被国内外同行广泛引用和正面评述;并承担了国家高技术研究发展计划、国家自然科学基金、宝钢课题等多项基础与应用项目。相关研究成果获得2015年高等学校科学研究优秀成果奖——自然科学奖二等奖,本著作是这些研究成果的部分集成。

该著作的最大特点是将现代计算流体力学方法应用于炼钢工艺的发展。相信该书的出版能够引领高年级本科生、研究生和广大冶金工作者利用计算流体力学方法提升我国的炼钢工艺水平,并促进炼钢技术的进步。



2016年1月

前 言

钢的冶炼是在熔融状态下进行的，故钢液的流动现象具有特别重要的意义。钢液是高温熔体，在其流动的同时也伴随着热量的传递，故可称钢液为“热流体”。普通流体力学的研究方法可以用于研究热流体流动现象，数值计算方法是可利用的最重要的方法之一。炼钢中的热流体流动现象又具有不同于普通流体力学的特点。因而，如何利用普通流体力学的计算方法模拟炼钢中的热流体流动现象是本书的特色。

冶金学在经历了热力学、动力学和反应工程学阶段后，现已发展到过程模拟阶段，即对冶炼的全过程进行直接模拟阶段。过程模拟是目前世界范围内冶金学界最活跃的研究领域之一。建立数学模型是进行过程模拟的前提，因流体流动过程往往是制约钢的冶炼效率的“瓶颈”，故描述流动过程的模型是构成全过程模型的基础，而且全过程模型方程的求解方法也是以流动方程为核心而展开的。要正确地模拟炼钢过程中的复杂现象，不但要深刻的了解现象的物理本质，而且还要掌握数值计算方法，通晓计算机技术。

随着计算流体力学在炼钢领域中的快速发展，已有大量数值模拟方面的研究论文发表，但还没有一本系统介绍现代炼钢中计算流体力学方面的书，涉及从流动理论、数值方法到应用技术等各个方面。作者及其课题组长期从事炼钢领域计算流体力学研究，本书是将课题组多年来的研究成果系统化，并结合国内外专家学者在该领域的最新研究成果撰写而成，希望能够促进我国炼钢工艺理论的发展和创新。

本书共 11 章。可分为三大部分，即流动理论、数值方法和应用研究结果。第 1~3 章介绍了炼钢中的流体流动现象、模型化及湍流计算方法。第 4 章介绍了炼钢中计算流体力学的数值方法。第 5~11 章介绍了计算流体力学方法在模拟炼钢中传输现象的应用研究结果，包括多相流动模拟，流场、电磁场和温度场的耦合，先进湍流模拟方法的应用及人口平衡模型在炼钢过程中的应用等。

李宝宽教授进行全书的整体构思和统稿工作。书中给出的应用研究结果都是由李宝宽教授课题组完成的,其中连铸大涡模拟部分是刘中秋博士完成的,钢包精炼结果是由博士生李林敏完成的,中间包感应加热的研究是由博士生王强完成的。这些研究结果都在本课题组发表的国内外杂志论文中有所体现。

王国栋院士在百忙之中亲自为本书撰写了序,体现了他对炼钢中计算流体力学研究的重视和支持,在此表示衷心的感谢。同时感谢国家科学技术学术著作出版基金对本书出版的资助。

由于作者水平所限,文中不足之处敬请读者批评指正。

作 者

2016年1月

目 录

1 绪论	1
1.1 钢液的流动现象及冶金功能	1
1.1.1 钢包精炼	1
1.1.2 中间包冶金	2
1.1.3 结晶器冶金	3
1.2 流体流动的研究方法	4
1.3 计算流体力学在炼钢中的应用概述	5
1.3.1 钢包精炼过程数值模拟	5
1.3.2 中间包冶金过程数值模拟	7
1.3.3 结晶器冶金过程数值模拟	8
参考文献	9
2 炼钢中的流体流动现象及模型化	12
2.1 CFD 基本控制方程	12
2.1.1 连续性方程	12
2.1.2 动量方程	13
2.1.3 能量方程	15
2.1.4 湍流附加方程	18
2.1.5 初始条件及边界条件	19
2.2 单相流动	20
2.2.1 RANS 控制方程	20
2.2.2 LES 控制方程	21
2.3 多相流动	22
2.3.1 离散相模型	22
2.3.2 VOF 模型	26
2.3.3 双流体模型	27
2.4 相变流动	28
2.4.1 钢液运动方程	29
2.4.2 凝固过程能量方程	30
2.5 电磁场	31
2.5.1 磁场的计算	31
2.5.2 流场的计算	31

2.5.3 电磁力的计算	31
参考文献	32
3 炼钢中的湍流模型	34
3.1 湍流数值模拟方法	34
3.2 直接数值模拟	35
3.3 雷诺时均模拟	36
3.3.1 标准 $k-\varepsilon$ 模型	37
3.3.2 RNG $k-\varepsilon$ 模型	38
3.3.3 标准 $k-\omega$ 模型	39
3.3.4 SST $k-\omega$ 模型	41
3.3.5 雷诺压力模型	43
3.3.6 模型的缺陷	46
3.4 大涡模拟	46
3.4.1 基本思想	47
3.4.2 滤波	47
3.4.3 大涡模拟控制方程	49
3.4.4 亚格子模型	50
参考文献	53
4 计算流体力学的数值方法	55
4.1 常用的数值求解方法	55
4.1.1 有限差分法	55
4.1.2 有限体积法	58
4.1.3 有限元法	61
4.2 计算区域的划分	62
4.3 对流-扩散方程的离散格式	63
4.3.1 中心差分和迎风差分	64
4.3.2 混合格式、指数格式及乘方格式	66
4.3.3 二阶迎风格式	69
4.3.4 QUICK 格式	70
4.3.5 不同离散格式的对比	72
4.4 压力修正法	73
4.4.1 基本思想	73
4.4.2 SIMPLE 算法	73
4.4.3 修订的 SIMPLE 算法	75
4.4.4 COUPLED 算法	78
4.4.5 不同压力修正法的对比	79
4.5 代数方程的数值解法	80

4.5.1 直接方法	81
4.5.2 迭代方法	83
4.5.3 加速技术	83
参考文献	84
5 钢包内钢-渣-气三相流动	85
5.1 钢-渣-气三相流动的数学建模	85
5.1.1 基本假设	85
5.1.2 控制方程	86
5.1.3 模型建立及网格化	87
5.1.4 边界条件	87
5.2 钢包内钢液流动的基本特征	88
5.3 钢包内钢液流动行为的控制	89
5.3.1 氩气流量的控制	89
5.3.2 喷嘴位置对钢包内钢液流动的影响	93
5.3.3 喷嘴角度对钢包内钢液流动的影响	97
5.4 大涡模拟在钢包中的应用	101
5.4.1 数学模型	101
5.4.2 气泡合并行为及粒径分布	103
5.4.3 非稳态渣-金界面行为	104
5.4.4 剪切流及卷渣现象	105
参考文献	107
6 感应加热中间包内的流动及夹杂物运动	108
6.1 磁/热/流耦合模型的建立	109
6.1.1 基本假设	109
6.1.2 电磁场	109
6.1.3 流体流动	111
6.1.4 传热过程	111
6.1.5 模型建立及网格化	111
6.1.6 边界条件	113
6.2 磁流体流动与传热耦合数值分析	113
6.2.1 模型验证	113
6.2.2 电磁场分布	115
6.2.3 钢液的流动情况	118
6.2.4 钢液温度分布	120
6.2.5 示踪剂浓度分布	126
6.3 夹杂物运动	127
6.3.1 物理模型及网格	127

6.3.2 夹杂物运动的数学模型	127
6.3.3 结果与分析	128
参考文献	142
7 结晶器内钢液瞬态非对称流动的大涡模拟	144
7.1 大涡模拟数学模型	144
7.1.1 基本方程	144
7.1.2 模型建立及网格化	145
7.1.3 数值细节	146
7.2 模型的验证	147
7.3 瞬态流场结构	149
7.4 偏流流场及周期性分析	152
7.5 漩涡结构及产生机理	157
参考文献	159
8 结晶器凝固前沿氩气泡和夹杂物的瞬态运动	161
8.1 凝固过程数学模型	162
8.1.1 连续介质大涡模拟运动方程	162
8.1.2 凝固过程能量方程	163
8.1.3 数值细节	163
8.2 颗粒传输与捕捉模型	164
8.2.1 颗粒传输模型	164
8.2.2 颗粒动态捕捉模型	166
8.3 模型的验证	167
8.4 凝固坯壳内的瞬态流场	170
8.5 氩气泡和夹杂物的瞬态运动及统计	171
8.5.1 瞬态运动分布	171
8.5.2 捕捉统计	175
参考文献	178
9 氩气-钢液两相瞬态非对称流动的大涡模拟	181
9.1 Euler- Euler- LES 模型	181
9.1.1 Euler- Euler 双流体模型	181
9.1.2 LES 模型	182
9.1.3 气泡诱导湍流	182
9.1.4 相间作用力模型	183
9.1.5 数值细节	183

9.2 模型的验证	185
9.3 氩气-钢液两相瞬态流动结果与分析	186
9.3.1 瞬时含气率分布	186
9.3.2 两相瞬态流场结构	188
9.3.3 两相偏流流场	191
9.3.4 上表面裸露点	192
9.4 拉速对两相流动的影响	193
9.5 吹气量对两相流动的影响	196
参考文献	199
10 结晶器内多尺寸泡状流的人口平衡模型	201
10.1 多组群质量传递模型数学建模	202
10.1.1 双流体 MUSIG 模型	202
10.1.2 气泡的破碎率	203
10.1.3 气泡的聚并率	204
10.1.4 模型的封闭	204
10.1.5 数值细节	206
10.2 气泡粒径对气液两相流动的影响	208
10.2.1 含气率分布	208
10.2.2 钢液流型	209
10.3 数值方法的考核	211
10.3.1 网格独立性考核	211
10.3.2 弥散相子气泡组考核	212
10.4 多尺寸泡状流预测结果与分析	213
10.4.1 含气率分布	213
10.4.2 流场分布	215
10.4.3 Sauter 平均粒径分布	216
参考文献	219
11 气液两相流相间动量传递模型数值研究	220
11.1 非均相 MUSIG 模型的建立	220
11.1.1 非均相双流体 MUSIG 模型	220
11.1.2 封闭的相间动量传递模型	222
11.1.3 数值细节	222
11.2 湍流传递机制数值研究	225
11.3 相间作用力机制数值研究	227
11.3.1 曳力	227

11.3.2 侧升力	229
11.3.3 虚拟质量力	229
11.3.4 湍流离散力	231
11.3.5 壁面润滑力	233
11.4 实际氩气泡粒径的预测	234
11.5 问题与展望	236
参考文献	236
索引	238

1 绪 论

1.1 钢液的流动现象及冶金功能

流动现象广泛存在于钢的冶炼过程中，常常有耦合传热、传质、化学反应、相变、电磁、多相流等诸多过程，形成更复杂的流动现象^[1]。为促进钢产品质量的改进和产量的提高，冶金界已投入大量人力、物力和财力研究炼钢中的热流体流动及与其相关的各种现象。

在炼钢过程中，连铸工艺是将精炼后的钢水连续铸造成钢坯的生产工序，主要设备包括钢包、中间包、结晶器等。连铸系统工艺流程如图 1-1 所示^[2]，可以概括为：将经过钢包精炼好的钢水注入中间包，中间包再由水口将钢水分配到各个结晶器，最后钢液经结晶器冷却凝固成坯。在整个过程中，钢液的流动现象发挥着至关重要的作用。

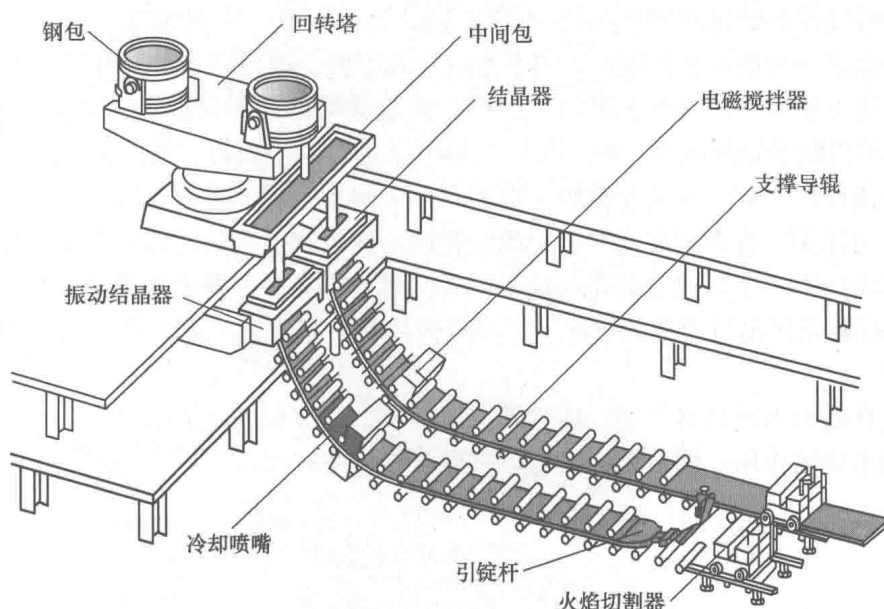


图 1-1 连续铸钢工艺的流程示意图^[2]

1.1.1 钢包精炼

图 1-2 所示为底吹钢包精炼工艺。钢液被导入钢包炉后，通过设置在钢包底部的透气砖吹入氩气，利用氩气对钢包内部的钢液进行搅拌。氩气在进入钢液后既起到搅拌作用，又可以吹动渣层运动形成渣眼，从而加快渣层与钢液接触面的化学反应，达到脱硫、脱碳及去除夹杂物的效果。其冶金功能主要包括：

(1) 钢液升温 and 保温功能。钢液经过电弧加热获得新的热能，这使得钢包精炼时可补加合金和调整成分，也可补加渣料，便于钢液深脱硫和脱氧，而且可以保证连铸要求的开浇温度。

(2) 氩气搅拌功能。氩气通过装在钢包底部的透气砖向钢液中吹氩，钢液获得一定的搅拌能。其作用为：使钢液温度均匀；渣层底部对钢液有洗刷作用，可以迅速脱硫；去除钢中的夹杂物；控制夹杂物形态；便于增碳或脱碳；降低氧含量。

(3) 真空脱气功能。通过钢包吊入真空罐后，采用蒸汽喷射泵进行真空脱气，同时通过包底吹入氩气搅动钢液，可以去除钢液中氢和氮，并进一步降低氧含量和硫含量，最终获得较高洁净度的钢液。

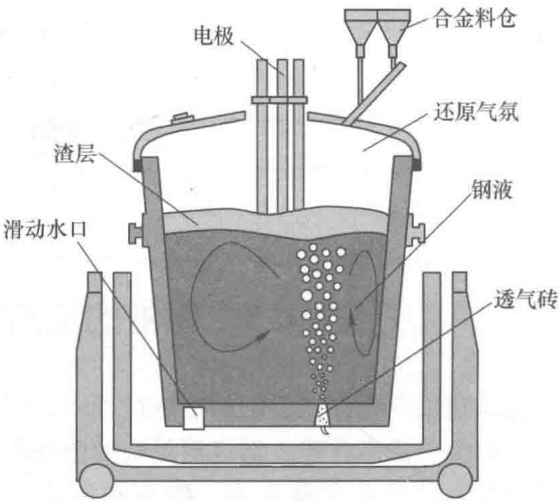


图 1-2 底吹钢包精炼示意图

1.1.2 中间包冶金

作为连铸过程中设置在钢包和结晶器间的冶金反应器，中间包除了对钢水实施分配外，还具有稳定、满足钢水供给，均匀钢水成分和温度，促进夹杂物排出等功能。从冶金反应工程学的角度来看，钢水在中间包中存在湍流流动以及伴随湍流流动的传质、传热、夹杂物碰撞和排除等物理现象。图 1-3 所示为中间包冶金示意图，其冶金功能主要包括：

- (1) 分流作用。对于多流连铸机，由多水口中间包对钢液进行分流。
- (2) 连浇作用。在多炉连浇时，中间包存储的钢液在换钢包时起到衔接作用。
- (3) 稳压作用。中间包液面高度比钢包低，而且在浇注过程中钢包液位时刻变化。中间包液位在控制钢包出口流量的情况下，可以保持相对稳定，从而减轻了出流对凝固坯壳的冲刷作用。
- (4) 优良的钢水净化器作用。通过采取适当的措施，提高钢液洁净度。
- (5) 钢水调温作用。调节钢液温度，以保证连铸工艺顺行。

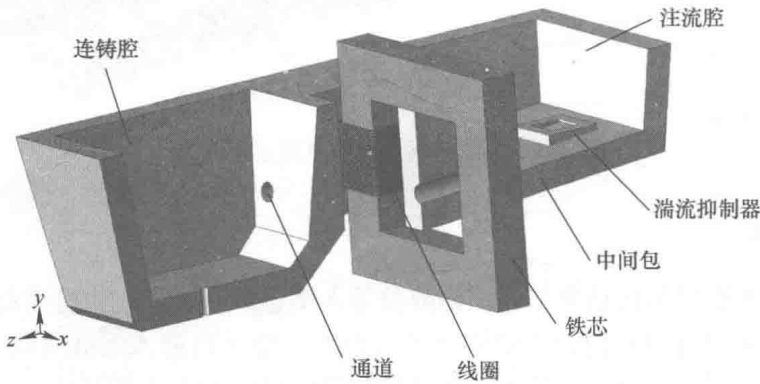


图 1-3 感应加热中间包冶金工艺示意图

1.1.3 结晶器冶金

结晶器是控制钢水洁净度的最后环节，是连铸的核心部件。其基本作用是钢液蓄积热量导出使铸坯成型。图 1-4 所示为结晶器内多种冶金现象示意图，可以将其分为渣金界面区、弯月面区、射流区、二冷区和凝固末端区，每个区域的流动现象及影响不同，构成了十分复杂的多物理场。结晶器内钢液的流动行为不仅对夹杂物的分离去除、保护渣的卷入影响很大，而且对凝固初生坯壳的均匀形成，防止注流冲刷局部凝固壳而造成拉漏或产生铸坯表面裂纹有重要影响，所以人们称结晶器是连铸的“心脏”。其冶金功能主要包括：

(1) 铸坯表面质量控制器。结晶器的性能对连铸机的生产能力和铸坯质量都起着十分重要的作用。

(2) 高效的传热器。把钢水的热量迅速地传给冷却水，减少铸坯的各种缺陷。

(3) 钢水净化器。使钢水中的非金属夹杂物充分上浮而被保护渣吸收，以进一步净化钢液。

(4) 钢水凝固成型器。把钢水凝固成规定的形状，浇注所需要的钢坯。

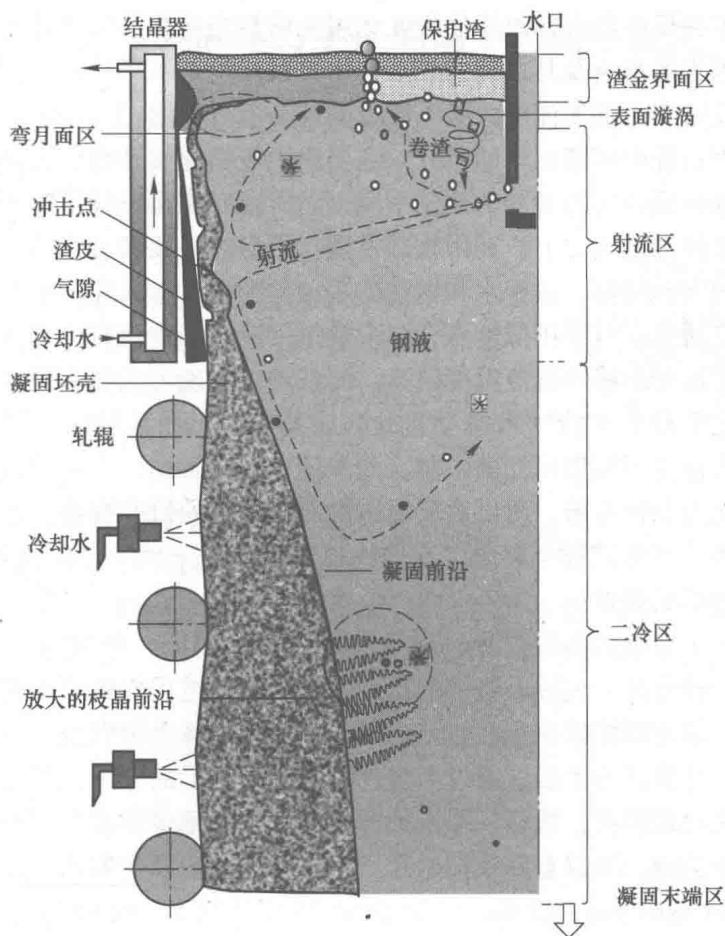


图 1-4 结晶器多种冶金现象示意图

○—氩气泡；●—夹杂物；■—夹杂物簇

在整个炼钢过程中,钢液的流动现象发挥着至关重要的作用。但由于冶金反应器涉及多相流动、凝固、渣金反应等多种传输现象,对于部分冶金现象,人们至今尚不了解其产生机理。随着工业对钢质量要求的不断提高,深入了解和控制不同冶金反应器内的多物理场流动行为是提高连铸坯质量的关键。

1.2 流体流动的研究方法

生产高质量的钢坯要依靠炼钢工序中钢液的合理流动。因而,深入了解和控制炼钢工序中各个反应器内的钢液流动行为是解决高速连铸生产问题、保证高速连铸过程顺利进行、提高连铸坯质量的关键。目前,对于不同反应器内钢液流场行为的研究,有理论分析、物理实验和数值模拟三种方法。

理论分析研究方法的特点在于科学的抽象(近似),即能够利用数学方法直接求得所研究问题的理论结果,同时理论研究的方法可以清晰地、普遍地揭示出物质运动的内在规律,从而可以用来指导产品的设计方案。理论分析也是实验研究和数值模拟这两种研究方法的理论基础。但是,由于数学发展水平的局限性,理论研究方法只能局限于针对较简单的物理模型,而炼钢反应器内部流场的相互作用关系相当复杂,所以要想通过理论分析的方法考虑到每个因素的影响及其之间的相互作用关系几乎是不可能的。因此,仅利用理论分析的方法研究反应器内部湍流场,是不够精确甚至不可行的。

目前针对炼钢过程中钢液流动的研究,主要集中在物理实验和数值模拟两大方面。物理实验是通过物理模型并实施必要的测试手段,对所研究体系进行实时观察和测量。物理模型是建立在相似原理基础之上,利用物理模型与原型之间几何、运动、动力等方面的相似性,研究流场的实际特征。由于水和钢液的运动黏度相近,因此以水为介质的模拟研究应用最广,但也有研究人员采用低熔点合金来模拟钢液。实验研究主要分为两种:热态实验和冷态实验。考虑到熔融的钢液温度很高,而且难以实现可视化和测量,所以热态实验较难实现;相比之下冷态实验(水模型实验)较易实现,而且可以实现可视化,便于测量。但实验研究往往受到模型尺寸的限制,此外还有外界影响,直接导致了实验对流场整体的认识和分析能力非常有限,所以对反应器内部湍流场的研究有着一定的局限性。而且现场测试耗资巨大,可测试数据有限,准确性也难以保证。另外,实验只能有限次进行,获得间断的有限种类的数据。

冶金过程是一个复杂的高温过程,由于测试手段的限制,很难对其进行直接实验研究。因此,寻求一种方便、快捷、经济的研究方法对冶金过程的理论研究和工艺改造具有特别重要的意义。数值模拟研究是在特定的条件下利用计算手段把数学模型的定量关系展示出来。它以电子计算机为手段,通过数值计算和图形显示的方法,对工程问题和物理问题进行研究。相比物理模拟,数值模拟所需的时间和费用都少得多。另外,它具有很好的重复性,条件易于控制,可以重复模拟过程。数值模拟逐渐演变为计算流体力学,即 CFD (computational fluid dynamics) 技术。自 20 世纪 70 年代初 J. Szekely 等人^[3]采用数值模拟法对结晶器内钢液的流动进行模拟以来,流体流动的数值模拟在计算模型和方法等方面都有了较大的发展。随着计算机技术的发展,数值模拟技术也发展很快,在各个领域得到迅速推广,已经被许多研究者应用于流动预测。