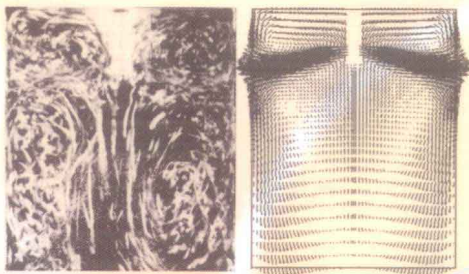


结晶器冶金学

雷洪 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

结晶器冶金学

雷 洪 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2011

内 容 提 要

本书共有 8 章, 阐述了动量、热量和质量传输基本规律在结晶器冶金学中的应用。从物理学基本理论出发, 建立了湍流运输的通用微分方程组, 给出了冶金传输控制方程组的起源和前提条件, 系统地介绍了控制体积法原理和关键求解过程, 并结合结晶器内传输行为特点, 介绍了结晶器内钢液流动、凝固和溶质偏析, 渣金界面行为, 夹杂物的形核和长大, 电磁制动技术等理论和实验研究结果。

本书可作为相关院校冶金专业研究生的教材, 也可以作为连续铸钢领域的教师和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

结晶器冶金学/雷洪著. —北京: 冶金工业出版社, 2011. 11

ISBN 978-7-5024-5763-1

I. ①结… II. ①雷… III. ①结晶器—冶金—连铸机—研究 IV. ①TQ051.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 217056 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcs@cnmip.com.cn

责任编辑 杨盈园 美术编辑 李 新 版式设计 葛新霞

责任校对 石 静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-5763-1

北京百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2011 年 11 月第 1 版, 2011 年 11 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 8.625 印张; 228 千字; 259 页

30.00 元

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

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(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

结晶器是连铸机的关键部件。因为钢液一经凝固成铸坯，其成分偏析、内部裂纹等缺陷将永远保留在最终产品中，无法通过热处理等工艺手段去除，因此结晶器又被称为连铸机的“心脏”。铸坯的缺陷往往与结晶内传输现象密切相关，主要涉及钢液的流动和凝固、夹杂物行为、渣金界面行为及相关的电磁控制技术。这些因素的相互作用，相互影响，形成了结晶器内十分复杂的冶金现象。

在结晶器内复杂的冶金现象中，渣金界面行为，钢液的流动、凝固和溶质偏析，夹杂物的去除构成了结晶器冶金的三大核心问题。在现有的研究手段中，水力学模拟和数学模拟一直是冶金工作者研究传输现象的有力工具。这两个工具相辅相成，互为补充。

随着计算机硬件和软件的发展，数值模拟技术得到了越来越广泛的应用，FLUENT, CFX, PHENICS, STAR - CD, PROCAST 等商业软件在冶金领域的应用日渐深入。在这些商业软件的帮助下，冶金工作者对冶金传输过程的数值模拟有了更深刻的认识。但是，人们在从事冶金过程模拟仿真研究中存在一些误区，如往往经常使用商业软件中的各种默认模式，而不深究选取这些默认模式的原因以及是否存在其他更有效的模式。因此这些误区的存在不利于对冶金现象开展深入细致的基础研究，在某些情况下甚至还会将研究工作引入歧途。可喜的是，作者进入数值模拟领域是从 FORTRAN 编程开始的。在编程过程中，对控制方程的离散、边界条件的设定逐项进行核实，对数值模拟中数学模型的选择、方程的离散等有着较为深刻的认识，积累的每个数值结果都记录

着编程过程有所突破的喜悦。

结晶器内传输现象的数值仿真主要涉及高等数学、线性代数、偏微分方程、电磁学、流体力学、传热学、传质学和金属学等课程。虽然冶金专业学生在本科和研究生学习期间均系统地学习了上述课程，但是利用这些知识来解决实际冶金问题仍需一个长期的融合过程。当前，一方面我国冶金工程技术人员及研究生们，都迫切希望缩短各学科知识融会贯通过程，尽快地高质量完成各自的科研任务；另一方面，虽然国内外冶金工作者针对结晶器进行了大量的研究，取得了重要进展，发表了大量论文，但结晶器冶金的复杂性导致不同学者仅针对结晶器某一部分领域开展工作，无法窥其全貌，而且迄今尚无一本完整、系统地阐述结晶器冶金基本理论及其应用的书籍。因此，作者在国内外冶金学者的研究基础上，总结了自己在结晶器冶金方面的研究心得，并经多年教学实践，撰写成本书，希望本书的出版能对揭示结晶器冶金的复杂性起到抛砖引玉的作用。

本书按照由浅入深的原则，使相近学科的读者在掌握基本理论后，能将相关课程串连在一起，并将其他学科的相关知识应用于本学科的研究中。编入本书各章节内容，大部分是作者主持和参与的研究工作，也引用了一些已发表的国内外专家最新研究成果。本书中所介绍的数值模拟工作均通过作者开发的自编程序完成。全书共分8章。第1章介绍了结晶器冶金的相关技术和主要研究手段。第2章介绍了湍流的特性和各种数学模型之间的区别和联系。第3章介绍了控制体积方法所关注的核心问题。第4章~第8章分别介绍了作者采用水力学模型、数学模型和数值模拟方法，在结晶器内钢液流动和凝固、渣金界面行为、夹杂物运动和碰撞聚合行为以及电磁制动技术等方面进行的研究工作。

随着冶金过程的数学模拟工作的推广，更需要强调掌握

基本理论的重要性。只有在深入了解流体力学、传热学和传质学及冶金原理的基础上，才能建立正确的数学模型，才能选择正确合理的数值方法，才能对数值结果进行正确的分析。不对数值结果进行验证，轻信并盲目地应用数值结果在很多情况下会带来十分危险的后果。

在作者的学习和工作过程中，得到了国内外多位专家的大力帮助。在此，作者向东北大学赫冀成教授、王文忠教授、朱苗勇教授、邹宗树教授、施月循教授、张红伟副教授，辽宁科技大学赵连刚教授，清华大学吴子牛教授、袁新教授、王连泽副教授，法国里昂中央理工大学 Danel Henry 教授、Hamda Benhadid 教授，美国俄亥俄州立大学 Yogeshwar Sahai 教授，日本东北大学谷口尚司教授，瑞典皇家工学院中岛敬治教授表示深深的谢意。

本书主要面向工科研究生和科研人员。写作过程中在保证基础理论完整的同时，尽量避免繁琐的公式推导，力求全文简单、易懂。但由于作者水平有限，缺点和错误在所难免，欢迎读者批评指正。

雷 洪
2011年4月

目 录

1 绪论	1
1.1 钢铁工业的发展	1
1.2 连铸技术的发展及现状	3
1.3 结晶器冶金学的形成	5
1.4 结晶器冶金过程研究方法	6
参考文献	9
2 结晶器内流体流动分析基础	12
2.1 欧拉方法和拉格朗日方法	14
2.2 雷诺输运方程	16
2.3 连续性方程	18
2.4 雷诺第二输运方程	18
2.5 黏性流体力学	19
2.5.1 牛顿内摩擦定律	19
2.5.2 流体微团运动分析	20
2.5.3 面积力和应力张量	26
2.5.4 广义牛顿内摩擦定律	29
2.5.5 牛顿流体的动量方程	32
2.5.6 牛顿流体的能量方程	34
2.5.7 不可压缩流体的连续性方程	38
2.5.8 不可压缩流体的动量方程	39
2.5.9 不可压缩流体的能量方程	40
2.6 湍流的描述	43
2.6.1 湍流的基本特征	43
2.6.2 湍流的数值模拟方法	43

2.7 湍流基本方程	46
2.7.1 时均值和脉动值	46
2.7.2 时均连续性方程	47
2.7.3 时均动量方程	48
2.7.4 时均能量方程	50
2.8 湍流动量模型	51
2.8.1 涡黏模型及其演变	52
2.8.2 二阶矩模型	56
2.8.3 雷诺时均法缺陷	57
2.9 湍流能量模型	58
2.10 大涡模拟	59
2.11 湍流流动通用微分方程	60
参考文献	61
3 控制体积法	63
3.1 计算流体力学常用数值方法	64
3.1.1 有限差分方法	64
3.1.2 有限元法	64
3.1.3 控制体积法	65
3.2 计算区域的剖分	66
3.3 导数的差分表达	69
3.4 偏微分方程在控制体上的积分	71
3.5 扩散项的离散	72
3.6 对流项的离散	75
3.6.1 中心差分格式	76
3.6.2 一阶迎风格式	77
3.6.3 虚假扩散和其他格式	78
3.7 源项的线性化	79
3.8 压力和速度的耦合计算	82
3.9 交错网格	83

3.10	SIMPLE 算法	85
3.10.1	速度校对方程	86
3.10.2	压力校对方程	87
3.10.3	计算步骤	88
3.10.4	SIMPLE 系列算法比较	89
3.11	边界条件	90
3.12	离散代数方程组的求解	91
3.12.1	TDMA 算法	92
3.12.2	Gauss - Siedel 方法	94
3.12.3	逐次亚松弛	95
3.13	收敛法则	96
3.13.1	线性代数方程组迭代收敛条件	96
3.13.2	方程离散的四条法则	97
3.13.3	收敛判据	99
	参考文献	101
4	结晶器内钢液流动数值模拟	102
4.1	结晶器内钢液流动行为及其研究	102
4.1.1	钢液流动行为	102
4.1.2	结晶器流场计算	104
4.2	基本假设	105
4.3	控制方程	106
4.4	计算区域及边界条件	107
4.5	计算方法	109
4.6	结晶器内钢液流动行为的控制	110
4.6.1	水口张角	110
4.6.2	拉坯速度	112
4.6.3	水口插入深度	114
4.6.4	铸坯宽度	115
	参考文献	116

5 结晶器钢液流动的水力学模拟和卷渣模型	119
5.1 结晶器内钢液流动的水力学模拟	120
5.1.1 水模型的建立	120
5.1.2 模型相似条件	121
5.1.3 水模型流体流动特点	122
5.1.4 渣金界面的相似条件	126
5.2 结晶器内渣金界面形态及分析	128
5.2.1 结晶器内渣金卷混现象及分类	128
5.2.2 表面回流与卷渣	130
5.2.3 漩涡与卷渣	136
5.2.4 水口吹氩与卷渣	140
5.2.5 水口插入深度与卷渣	143
5.3 卷渣数学模型	143
5.3.1 渣金界面速度分布	143
5.3.2 钢液中渣滴的形成	146
5.3.3 渣金卷混的临界条件	148
5.3.4 渣金两相流动特征	149
参考文献	151
6 电磁制动下结晶器内钢液流动的数值模拟	154
6.1 电磁制动的发展史	154
6.2 电磁制动下结晶器内磁场数学模型	156
6.2.1 麦克斯韦方程组	156
6.2.2 磁场计算控制方程	158
6.2.3 基本方程的离散化	159
6.2.4 磁感应强度计算公式	161
6.2.5 计算区域和网格剖分	161
6.2.6 边界条件	162
6.2.7 磁化曲线的数学处理	162

6.2.8	离散方程的求解	163
6.2.9	插值公式	163
6.2.10	结晶器内磁场的基本特征	164
6.3	电磁制动下结晶器内钢液流动数学模型	165
6.3.1	基本假设	165
6.3.2	控制方程	165
6.3.3	计算区域和边界条件	165
6.3.4	感生电流密度计算公式	166
6.3.5	电磁力计算公式	171
6.3.6	方程的求解和收敛判据	171
6.4	电磁制动下结晶器钢液流场	172
6.4.1	电磁制动下结晶器内物理场	172
6.4.2	影响电磁制动效果的因素	176
	参考文献	181
7	夹杂物行为的数值模拟	184
7.1	夹杂物形核热力学	185
7.2	夹杂物长大动力学	186
7.2.1	奥斯特瓦德熟化	186
7.2.2	颗粒碰撞理论	188
7.2.3	夹杂物碰撞机理	190
7.3	结晶器中夹杂物的去除	194
7.3.1	水口壁面的吸附	194
7.3.2	凝固坯壳的捕获	196
7.3.3	保护渣的吸附	197
7.4	夹杂物行为的基本数学模型	199
7.4.1	非均相模型	199
7.4.2	均相模型	204
7.5	多模式数学模型	207
7.5.1	多尺度夹杂物数量守恒模型	208

7.5.2	夹杂物数量和质量守恒模型	208
7.5.3	欧拉-拉格朗日混合模型	214
7.6	多过程耦合数学模型	217
7.6.1	凝固的影响	217
7.6.2	气泡的影响	220
7.7	夹杂物数学模型的发展方向	221
	参考文献	222
8	结晶器内钢液凝固的数值模拟	229
8.1	连铸过程凝固数学模型分类	229
8.2	凝固基本假设	232
8.3	连续介质运动方程	232
8.4	凝固过程能量方程	235
8.4.1	焓法	236
8.4.2	等效比热法	238
8.4.3	焓和温度混合模式法	239
8.4.4	热浮力	239
8.5	凝固微观偏析模型	240
8.5.1	固相完全扩散、液相充分混合模型	241
8.5.2	固相无扩散、液相充分混合模型	241
8.5.3	固相有限扩散、液相充分混合模型	242
8.5.4	溶质再分配模型比较分析	243
8.6	溶质宏观输运方程	247
8.6.1	控制方程	247
8.6.2	溶质浮力	247
8.6.3	溶质输运与夹杂物输运的比较	248
8.7	输运方程边界条件	249
8.8	凝固模型的离散和求解方法	249
8.9	结晶器内钢液凝固现象分析	251
8.9.1	凝固坯壳厚度	251

8.9.2 钢液流动速度分布	253
8.9.3 钢液温度分布	253
8.9.4 钢液中碳分布	255
参考文献	257

1 绪 论

1.1 钢铁工业的发展

钢铁，素有“工业粮食”之称，在国民经济中具有重要地位。20 世纪的实践表明，国家的工业化必须有钢铁工业的支撑。一个经济体系完善的国家要进入工业化阶段，人均钢消费量必须达到一个最低门槛；随着工业化进程的深入，人均钢消费量不断增长；在基础设施建设完备之后，人均钢消费量将逐渐下降。经济增长带来的市场需求是钢铁工业增长的强劲动力。1850 年全球粗钢产量仅为 6.6 万吨，1900 年为 2850 万吨，1950 年接近 2 亿吨，2000 年突破 8 亿吨，2010 年达到 14 亿吨。图 1-1 所示的是世界粗钢产量的发展历程，这实际上就是一百多年来世界经济、科技迅猛发展的一个缩影。

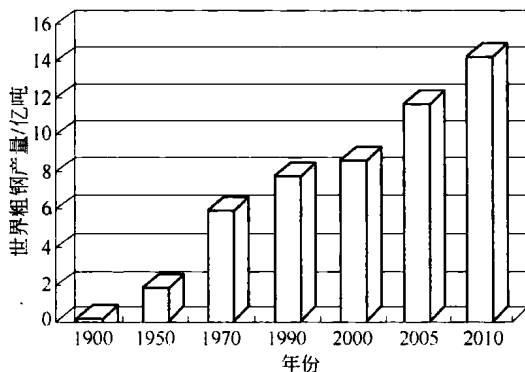


图 1-1 世界粗钢产量的发展历程

我国自解放以后，特别是改革开放以来，钢铁工业取得了举世瞩目的成就，如图 1-2 所示，1936 年，钢产量仅 4 万余吨；1949 年为 15.8 万吨；到 2007 年，我国钢产量达到 4.89 亿吨，

占世界钢产量的 36.4%，是世界钢产量第二~第八名的总和。总体上，中国钢铁工业的发展可分为 3 个阶段。

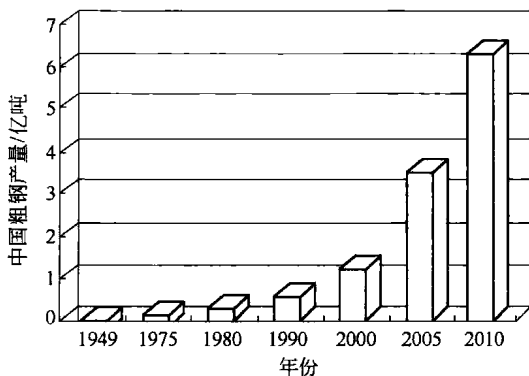


图 1-2 中国粗钢产量的发展历程

第一阶段，从 1949~1978 年。建国初期，我国钢铁工业十分薄弱，全国几乎没有一家完整的钢铁联合企业。在“以钢为纲”的工业发展方针指导下，中国的钢铁工业走上了以追求产值、产量为目标的粗放型发展道路。1978 年，钢铁产量达到 3178 万吨，占世界钢产量的 4.5%，居世界第 4 位。

第二阶段，从 1978~2000 年。1978 年，在改革开放政策指引下，中国钢铁工业进入了现代化、大型化的稳步快速发展阶段。1980 年，中国粗钢产量仅为 3712 万吨，是日本的 1/3；1986 年，中国钢产量达到 5221 万吨；1996 年，中国钢产量首次超过 1 亿吨，达到 1.01 亿吨^[1]，占世界钢产量的 13.5%，成为世界第一产钢大国；2000 年，中国钢产量达到 1.28 亿吨，占世界钢产量的 15.0%。

第三阶段，从 2000 年至今的持续高速发展阶段。2003 年，我国钢产量达到 2.22 亿吨，占世界钢产量的 22.9%；2005 年，钢产量超过 3 亿吨，达到 3.56 亿吨，占世界钢产量的 31.0%；2006 年，钢产量超过 4 亿吨，达到 4.23 亿吨，占世界钢产量的 33.8%；2008 年，钢产量超过 5 亿吨，占世界钢产量的 37.6%。

2001 ~ 2007 年期间, 钢产量年均增长率达 21%。2010 年我国钢产量达到 6.27 亿吨。

作为资源和能源的消耗大户, 钢铁工业的发展、产量的增加必然受到资源、能源和环境的限制。近年来, 通过抑制钢铁工业低水平重复建设, 淘汰落后产能, 加快结构调整等措施, 使中国钢铁工业走上了从钢铁大国向钢铁强国转变的道路。

1.2 连铸技术的发展及现状

连铸是钢铁生产的重要环节。连铸技术具有显著的高生产效率, 高成材率, 高质量和低成本的优点, 对现代钢铁工业生产流程的变革、产品质量的提高和结构优化等方面起到了革命性的作用。连铸技术的发展大致可以分为 4 个阶段^[2]。

第一阶段, 从 1840 年到 1930 年, 是连铸思想的启蒙阶段。1840 年, 美国人 Sellers 获水平连铸铅管专利, 1846 年英国人 Bessemer 提出使用水冷旋转双辊式连铸机生产锡箔、铅板和玻璃板。1933 年, 德国人 Junghan 建成了第一台 1700t/月立式带振动结晶器的连铸机, 首先浇注铜铝合金获得成功, 使连续浇注应用于非铁金属生产^[3]。

第二阶段, 从 1940 ~ 1949 年, 是连铸技术的开发阶段。1943 年, 德国人 Junghan 建成第一台浇注钢液的试验性连铸机, 并提出了振动的水冷结晶器、浸入式水口、结晶器上部加保护渣等技术, 为现代连铸机的形成和发展奠定了基础。

第三阶段, 从 1950 ~ 1976 年, 传统连铸技术日趋成熟。20 世纪 50 年代中期, 连铸技术从试验进入了工业化阶段。20 世纪 60 年代, 弧形连铸机的出现使连铸技术在世界范围内被大量采用, 具有代表性的技术有: 钢包回转台, 中间包塞棒控制, 电磁搅拌, 结晶器在线无级调宽, 渐进弯曲矫直技术等^[3~5]。

第四阶段, 是 20 世纪 80 年代到 20 世纪 90 年代, 传统连铸技术不断优化, 朝高效、近终形连铸方向发展。以连铸技术优化发展为契机, 带动传统钢铁生产流程向紧凑化、连续化和高度自

动化方向迈进。

1964年,全世界仅有80多台连铸机,年产铸坯仅为700万吨。到1970年,世界连铸坯产量为3500万吨,连铸比仅为6.0%。20世纪70年代后期,虽受两次能源危机的影响,钢铁生产不景气,各国普遍压缩钢铁生产规模,但是连铸技术由于可以显著提高金属收得率,节约能源,提高劳动生产率等突出优点得到了突飞猛进的发展。到1980年,全世界连铸机增加到1000台以上,连铸坯产量超过2亿吨,连铸比达到30%。到1987年连铸坯产量超过4亿吨,连铸比达到54.8%^[6]。到1996年,连铸坯的年产量已达到5.8亿吨,连铸比达到77.6%。1999年连铸坯产量达到6.62亿吨,连铸比为84.4%。目前,各钢铁工业强国的连铸生产量已接近饱和,连铸比已达到95%以上^[7]。连铸技术早已成为钢铁企业必不可少的一个工艺环节。连铸技术和连铸比也已成为衡量一个国家、一个钢铁企业工业现代化程度的重要标志。

我国也是连铸技术开发研究起步较早的国家之一,但经历了一个曲折的过程。从1957年开始试验研究,1958年12月在重庆钢铁公司第三钢铁厂建成我国第一台立式双流方坯连铸机,用以浇注175mm×200mm的铸坯。1964年6月,世界第一台弧形板坯连铸机在重庆钢铁公司第三钢铁厂问世^[5,6]。但从1958年到1980年,我国仅建造了25台连铸机,设计能力为年产铸坯345万吨,1980年生产铸坯230万吨,连铸比仅为6.18%。1985年,连铸机数量增加到49台,连铸比增长到10.83%。这5年间连铸比平均增长不足1%。经过认真总结经验教训,于1988年提出了大力发展连铸的战略思想。1988年的连铸比为14.67%,1990年达到22.7%,1998年提高到68.8%^[8]。1999年我国共有连铸机342台1088流,生产能力达到1.35亿吨,连铸坯产量达到9367万吨,同比增加了1484万吨,居世界第一位^[9,10]。2000年连铸坯产量为1.096亿吨,连铸比达到85.3%^[11]。2001年连铸比超过90%^[12]。2003年,连铸比达到