

结晶器

JIEJINGQI YEJIN GUOCHENG MONI

冶金过程模拟

雷洪 张红伟 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

结晶器冶金过程模拟

雷 洪 张红伟 著



北 京
冶 金 工 业 出 版 社

2014

内 容 提 要

本书阐述了动量、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、元胞自动机等理论和实验研究结果。

本书可作为有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

结晶器冶金过程模拟/雷洪,张红伟著. —北京:冶金工业出版社,2014.11

ISBN 978-7-5024-6635-0

I. ①结… II. ①雷… ②张… III. ①铸造—结晶器(冶金炉)—冶金工程—过程模拟 IV. ①TF3

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第244526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 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 常国平 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6635-0

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

2014年11月第1版,2014年11月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;19.75印张;473千字;299页

59.00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 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

结晶器是连铸机的关键部件。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和影响，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过程中存在着一些误区，如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。因而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，我国冶金工程技术人员及研究人

员，都迫切希望缩短各学科知识的融会贯通过程，尽快地、高质量地完成各自的科研任务。另外，虽然国内外冶金工作者针对结晶器进行了大量的研究，取得了重要的进展，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。而且目前还缺少类似的完整、系统地阐述结晶器冶金过程数值仿真的书籍。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成果，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。

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。同时对于同一个问题，往往存在不同的解决方案。这些解决方案，有时会给出相同的答案（如第6章电磁制动中感生电流的计算），但是在更多情况下不同解决方案（如第2章介绍的不同湍流模型）会给出不同的答案。在这些情况下，对冶金基本过程的深入理解和对结果的仔细甄别直接决定了科研工作的成败。

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。本书中所介绍数值模拟工作均通过作者开发的自编程序完成。全书对《结晶器冶金学》内容进行了补充，并邀请张红伟副教授撰写了凝固部分（第8~10章和附录）。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4~7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、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。第8~10章和附录部分介绍了凝固过程宏观传输过程、合金凝固路径和凝固组织预测方面的理论和应用。

在作者从事研究和写作过程中，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，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，法国巴黎矿业大学材料成型中心 Charles-Andre Gandin 教授表示深深的谢意。在书稿的整理过程中，得到作者团队中研究生们的大力协助，在此一并表示感谢！

本书在出版方面得到了辽宁省百千万人才工程培养经费（2013921073）和北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室开放课题（KF13-10）的资助。在书稿准备与出版过程中，冶金工业出版社的编辑人员也给予了大力支持，在此一并表示感谢。

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，力求简单、易懂。但由于作者水平所限，缺点和错误在所难免，欢迎读者批评指正。

雷 洪

2014 年 7 月于东北大学

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	定价(元)
连铸坯质量控制	69.00
连续铸钢原理与工艺	25.00
连铸结晶器保护渣应用技术	50.00
连铸结晶器(连续铸钢技术丛书)	69.00
连铸设备的热行为及力学行为	68.00
连续铸钢过程数学物理模拟(冶金反应工程学丛书)	45.00
连铸结晶器振动技术	11.00
连续铸钢用电磁搅拌的理论及技术	69.00
连铸电磁搅拌和电磁制动的理论及实践	36.00
连铸坯热送热装技术	20.00
常规板坯连铸技术	20.00
现代电炉—薄板坯连铸连轧	98.00
薄板坯连铸连轧(第2版)	45.00
连铸连轧理论与实践	32.00
新编连续铸钢工艺及设备	20.00
连续铸钢	25.00
连铸过程控制理论与技术	15.00
炼钢—连铸新技术 800 问	46.00
连续铸钢 500 问	28.00
现代连续铸钢实用手册	248.00
炼钢常用图表数据手册(第2版)	249.00
炉外精炼及铁水预处理实用技术手册	146.00
铁水预处理与钢水炉外精炼	39.00
炉外精炼的理论及实践	48.00
炉外精炼	22.50
中间包冶金学(冶金反应工程学丛书)	35.00
电磁冶金学(冶金反应工程学丛书)	35.00
钢冶金学(冶金反应工程学丛书)	45.00
钢铁冶金原理(第3版)	40.00
钢铁冶金概论	24.00
炼钢原理与工艺	26.00
钢铁冶金学(炼钢部分)	35.00

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	2
1.3 结晶器冶金学的形成	3
1.4 结晶器冶金过程研究方法	4
参考文献	5
2 结晶器内流体流动分析基础	8
2.1 欧拉方法和拉格朗日方法	9
2.2 雷诺输运方程	10
2.3 连续性方程	11
2.4 雷诺第二输运方程	12
2.5 黏性流体力学	12
2.5.1 牛顿内摩擦定律	12
2.5.2 流体微团运动分析	13
2.5.3 面积力和应力张量	17
2.5.4 广义牛顿内摩擦定律	19
2.5.5 牛顿流体的动量方程	21
2.5.6 牛顿流体的能量方程	23
2.5.7 不可压缩流体的连续性方程	25
2.5.8 不可压缩流体的动量方程	26
2.5.9 不可压缩流体的能量方程	27
2.6 湍流的描述	28
2.6.1 湍流的基本特征	28
2.6.2 湍流的数值模拟方法	29
2.7 湍流基本方程	30
2.7.1 时均值和脉动值	30
2.7.2 时均连续性方程	31
2.7.3 时均动量方程	32

2.7.4 时均能量方程	33
2.8 湍流动量模型	34
2.8.1 涡黏模型及其演变	35
2.8.2 二阶矩模型	37
2.8.3 雷诺时均法缺陷	38
2.9 湍流能量模型	39
2.10 大涡模拟	40
2.11 湍流流动通用微分方程	40
参考文献	41
3 控制体积法	42
3.1 计算流体力学常用数值方法	42
3.1.1 有限差分方法	42
3.1.2 有限元法	43
3.1.3 控制体积法	43
3.2 计算区域的剖分	44
3.3 导数的差分表达	45
3.4 偏微分方程在控制体上的积分	47
3.5 扩散项的离散	48
3.6 对流项的离散	50
3.6.1 中心差分格式	50
3.6.2 一阶迎风格式	51
3.6.3 虚假扩散和其他格式	52
3.7 源项的线性化	53
3.8 压力和速度的耦合计算	55
3.9 交错网格	55
3.10 SIMPLE 算法	57
3.10.1 速度校正方程	57
3.10.2 压力校正方程	58
3.10.3 计算步骤	59
3.10.4 SIMPLE 系列算法比较	59
3.11 边界条件	60
3.12 离散代数方程组的求解	61
3.12.1 TDMA 算法	61
3.12.2 Gauss-Siedel 方法	62
3.12.3 逐次亚松弛	63
3.13 收敛法则	64

3.13.1 线性代数方程组迭代收敛条件	64
3.13.2 方程离散的四条法则	64
3.13.3 收敛判据	66
参考文献	67
4 结晶器内钢液流动数值模拟	69
4.1 结晶器内钢液流动行为及其研究	69
4.1.1 钢液流动行为	69
4.1.2 结晶器流场计算	70
4.2 基本假设	71
4.3 控制方程	71
4.4 计算区域及边界条件	72
4.5 计算方法	73
4.6 结晶器内钢液流动行为的控制	74
4.6.1 水口张角	74
4.6.2 拉坯速度	74
4.6.3 水口插入深度	75
4.6.4 铸坯宽度	76
4.6.5 立弯式铸机	77
参考文献	78
5 结晶器钢液流动的水力学模拟和卷渣模型	80
5.1 结晶器内钢液流动的水力学模拟	80
5.1.1 水模型的建立	80
5.1.2 模型相似条件	81
5.1.3 水模型流体流动特点	82
5.1.4 渣金界面的相似条件	85
5.2 结晶器内渣金界面形态及分析	86
5.2.1 结晶器内渣金卷混现象及分类	86
5.2.2 表面回流与卷渣	86
5.2.3 漩涡与卷渣	91
5.2.4 水口吹氩与卷渣	93
5.2.5 水口插入深度与卷渣	94
5.3 卷渣数学模型	95
5.3.1 渣金界面速度分布	95
5.3.2 钢液中渣滴的形成	97
5.3.3 渣金卷混的临界条件	98



5.3.4 渣金两相流动特征	98
参考文献	100
6 电磁制动下结晶器内钢液流动的数值模拟	102
6.1 电磁制动的发展史	102
6.2 电磁制动下结晶器内磁场数学模型	103
6.2.1 麦克斯韦方程组	103
6.2.2 磁场计算控制方程	105
6.2.3 基本方程的离散化	105
6.2.4 磁感应强度计算公式	107
6.2.5 计算区域和网格剖分	107
6.2.6 边界条件	107
6.2.7 磁化曲线的数学处理	108
6.2.8 离散方程的求解	108
6.2.9 插值公式	108
6.2.10 结晶器内磁场的基本特征	109
6.3 任意形状矩形截面线圈稳恒磁场的积分算法	109
6.3.1 线圈的剖分	110
6.3.2 电流元的磁场	110
6.3.3 磁场中的奇异点	112
6.3.4 坐标变换	113
6.3.5 模型验证	114
6.4 电磁制动下结晶器内钢液流动数学模型	116
6.4.1 基本假设	116
6.4.2 控制方程	117
6.4.3 计算区域和边界条件	117
6.4.4 感生电流密度计算公式	117
6.4.5 电磁力计算公式	120
6.4.6 方程的求解和收敛判据	121
6.5 电磁制动下结晶器钢液流场	121
6.5.1 电磁制动下结晶器内物理场	121
6.5.2 影响电磁制动效果的因素	123
参考文献	126
7 夹杂物行为的数值模拟	129
7.1 夹杂物形核热力学	130
7.1.1 化学反应热力学	130

7.1.2 形核热力学	130
7.2 夹杂物长大动力学	131
7.2.1 奥斯特瓦德熟化	131
7.2.2 颗粒碰撞理论	132
7.2.3 夹杂物碰撞机理	134
7.3 结晶器中夹杂物的去除	136
7.3.1 水口壁面的吸附	136
7.3.2 凝固坯壳的捕获	137
7.3.3 保护渣的吸附	138
7.4 夹杂物行为的基本数学模型	139
7.4.1 非均相模型	139
7.4.2 均相模型	144
7.5 多模式数学模型	146
7.5.1 多尺度夹杂物数量守恒模型	146
7.5.2 夹杂物数量和质量守恒模型	146
7.5.3 欧拉-拉格朗日混合模型	150
7.5.4 夹杂物形核长大模型	158
7.6 多过程耦合数学模型	168
7.6.1 凝固的影响	168
7.6.2 气泡的影响	169
7.7 夹杂物数学模型的发展方向	170
参考文献	171
8 合金凝固宏观传输过程的数值模拟	177
8.1 合金凝固和偏析模拟现状	178
8.2 宏观传输模型基本假设	180
8.3 连续介质运动方程	180
8.4 凝固过程能量方程	182
8.4.1 焓法	182
8.4.2 等效比热法	184
8.4.3 焓和温度混合模式法	185
8.4.4 热浮力	185
8.5 溶质宏观输运方程	186
8.5.1 控制方程	186
8.5.2 溶质浮力	187
8.5.3 溶质输运与夹杂物输运的比较	187
8.6 薄片移动传热模型	188

8.6.1	薄片传热模型的假定条件	188
8.6.2	热焓计算	188
8.6.3	温度和固相率	188
8.6.4	导热系数的确定	189
8.7	铸坯凝固过程的稳态模拟	189
8.7.1	凝固模型的离散和求解方法	189
8.7.2	稳态凝固过程边界条件和收敛条件	190
8.7.3	板坯连铸过程	191
8.7.4	方坯凝固过程	194
8.8	铸坯凝固过程的非稳态模拟	197
8.8.1	方程的离散和时间步长选取	197
8.8.2	初始条件和边界条件	198
8.8.3	计算结束判据	199
8.8.4	温降曲线	200
8.8.5	温度场	200
8.8.6	凝固壳厚度与凝固末端位置	201
8.9	铸锭凝固过程的非稳态分析	203
8.9.1	铸锭凝固过程边界条件和收敛条件	203
8.9.2	基准实验验证	204
8.9.3	热-溶质浮升力对合金凝固过程的影响	206
8.10	Fe-C 合金铸锭和铸坯的溶质分布分析	209
	参考文献	210
9	合金凝固路径	214
9.1	二元合金微观偏析模型	214
9.1.1	解析解模型中液相线温度的确定	215
9.1.2	固相完全扩散、液相充分混合模型	215
9.1.3	固相无扩散、液相充分混合模型	216
9.1.4	固相有限扩散、液相充分混合模型	217
9.1.5	固液相溶质有限扩散的数值解模型	218
9.1.6	溶质再分配模型比较分析	218
9.2	多元合金微观偏析模型	220
9.2.1	杠杆定律	221
9.2.2	Gulliver-Scheil 模型	221
9.2.3	偏平衡模型	222
9.2.4	固相溶质有限扩散模型	222
9.2.5	耦合热力学计算的固、液相溶质有限扩散模型	223

9.3 偏平衡模型预测的凝固路径	226
9.3.1 Fe-C-V-W-Cr-Mo 高速钢中碳化物析出	226
9.3.2 含 Ti 高 Cr 铸铁中碳化物的析出	235
9.4 耦合热力学计算的固、液相溶质有限扩散模型预测的凝固路径	249
9.5 再辉及包晶转变过程	251
9.6 微观偏析模型特点分析	252
参考文献	254
10 合金凝固组织预测的元胞自动机模型	257
10.1 凝固组织预测模型概述	257
10.2 介观元胞自动机法	260
10.2.1 晶粒形核模型	260
10.2.2 晶体生长动力学	261
10.2.3 生长捕获算子	261
10.3 微观元胞自动机法	267
10.4 介观 CA-FV 双向强耦合模型	268
10.4.1 宏观传输数学模型	269
10.4.2 微观形核模型	269
10.4.3 流场下枝晶尖端生长动力学模型	269
10.4.4 偏心生长捕获算子	270
10.4.5 宏观/微观耦合	270
10.4.6 初始条件和边界条件	272
10.4.7 宏/微观耦合求解过程	272
10.5 介观 CA-FV/FD 单向弱耦合模型	272
10.5.1 宏观温度场	272
10.5.2 微观形核、晶粒生长	272
10.5.3 宏/微观单向耦合	272
10.6 柱状晶/等轴晶 (CET) 转变机制	273
10.6.1 由 CA-FD 耦合模型预测的凝固组织形貌判定 CET 转变	274
10.6.2 Hunt 模型判定 CET 转变	276
10.6.3 Stefanescu 模型判定 CET 转变	278
10.7 铸锭凝固组织预测及分析	278
10.7.1 宏/微观耦合典型模拟结果	279
10.7.2 晶粒结构对溶质分布、偏析的影响	282
10.7.3 与仅模拟宏观传输结果的比较	282
10.7.4 流动对合金凝固过程的影响	283
10.8 连铸坯组织预测	284

参考文献	285
附 录	289
附录 1 连续介质的混合密度	289
附录 2 推导连续介质的质量守恒方程	289
附录 3 推导连续介质的动量守恒方程	290
附录 4 推导连续介质的能量守恒方程	292
附录 5 推导连续介质的溶质守恒方程	293
附录 6 连续介质的层流传输方程	294
附录 7 连续介质的紊流传输方程	294
附录 8 对流-扩散方程的上风方案离散	295
附录 9 源项的线性化处理	296
附录 10 固/液相质量分数的迭代更新	297
附录 11 推导偏平衡模型中间隙溶质的质量守恒方程	299
参考文献	299

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。

自新中国成立以后，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。

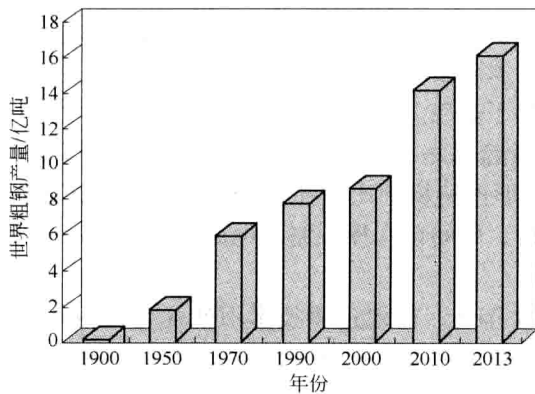


图 1-1 世界粗钢产量的发展历程

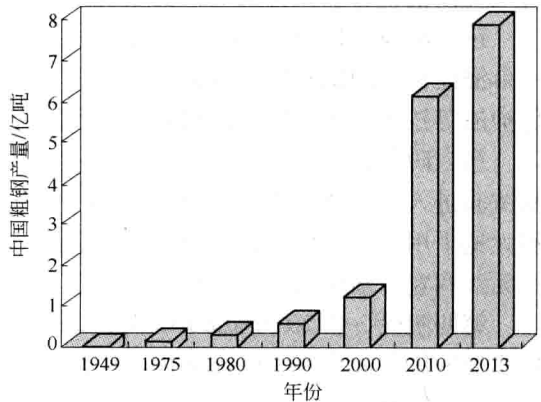


图 1-2 中国粗钢产量的发展历程

总体上，中国钢铁工业的发展可分为以下三个阶段。

第一阶段，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%，居世界第四位。

第二阶段，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，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%。2013 年我国钢产量达到 7.79 亿吨，占世界钢产量的 48.5%。

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四个阶段^[2]。

第一阶段，1840~1930 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，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，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，从 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。