


金属材料制备工艺的 计算机模拟

Computer Simulation of Metal Processing

李依依 李殿中 朱苗勇 等著

 科学出版社
www.sciencep.com

金属材料制备工艺的 计算机模拟

李依依 李殿中 朱苗勇 等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍金属材料制备工艺的计算机模拟。全书共七章,主要内容包括概论、液态金属精炼过程的计算机模拟、铸造工艺的计算机模拟、凝固过程微观组织模拟、热轧带钢组织性能预报、奥氏体-铁素体转变的计算机模拟和塑性成形工艺模拟。

本书可供冶金、机械、材料、工艺模拟等相关专业的科技人员、工程技术人员及本科生、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料制备工艺的计算机模拟/李依依,李殿中,朱苗勇等著. —北京:科学出版社, 2006

ISBN 7-03-016598-5

I. 金… II. ①李…②李…③朱… III. 金属材料-制备-工艺学-计算机模拟 IV. TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 146080 号

责任编辑:童安齐 何舒民 / 责任校对:柏连海
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

北京双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006 年 6 月第一次印刷 印张: 18 1/2

印数: 1—3 000 字数: 357 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA03)

前 言

在材料科学与工程中,经常处理“正”、“反”相左等复杂的问题,计算机模拟是继理论与实验之外的第三种有效手段与方法,已得到广泛的应用。

1995年,在日本筑波金属材料研究所召开了21世纪材料发展国际研讨会及对日本金属材料研究所进行国际评议会议,该会议邀请了国际知名(Leading Institutes)的五位研究所所长,我作为中国科学院金属研究所所长应邀参加会议之外,还有德国的马普研究所所长佩卓夫、美国国家标准与技术研究所副所长诺克、英国国家物理实验室主席侯赛因和日本金属材料研究所所长尼一。会议讨论中注意到各国在材料领域中运用计算机模拟材料制备工艺及材料设计做了许多工作,发展很快。我回国后在一次科技部召开的规划会上做了一个发言,提出我国应该大力支持开展计算材料学工作,其中包括材料设计和材料制备工艺的计算机模拟两个部分。鉴于我们是从事材料应用研究的,因此向金属研究所及中国科学院提出引进“百人计划”——材料制备工艺计算机模拟的人才,并于同年组建了材料制备工艺计算机模拟研究组,李殿中研究员任组长,我作为顾问,与他一起陆续招收20余名研究生从事该项工作。多年来,该模拟组完成了国家“973”、“863”、国家自然科学基金有关项目以及通过国际合作引进国外优秀专家,建立高技术传输平台,并在生产实际中运用计算机模拟手段指导工艺设计,制备出合格的产品,解决了企业中存在的多项问题;开展了应用基础研究工作,论文发表在*Acta Materialia*、*Metall. Transactions A*、*MSMSE*等杂志上90余篇。本书旨在介绍材料制备工艺计算机模拟的基本知识和应用实例,系统地阐述钢与合金的炉外精炼、铸造、凝固、固态相变、轧制、塑性成形等材料制备工艺模拟的基本方法,不仅注重理论建模、计算及工艺模拟,更注重与实践的结合,并将模拟的结果与实践相比较,确定最佳的制备工艺制度。我们希望将已经得到的结果总结整理成书,目的在于使人们对材料制备工艺的计算机模拟知识有一个基本的理解,并能以计算机模拟提升我国的冶金与装备制造水平,达到省时、节能、提高质量、降低成本和优化环境的目的。

本书由李依依策划并统稿,张玉妥负责编辑。全书共分7章,具体分工为:第一章概论由李依依撰写;第二章液态金属精炼过程的计算机模拟由东北大学材料与冶金学院朱苗勇撰写;第三章铸造工艺的计算机模拟由李殿中、韩维新、胡志勇、杜强、康秀红撰写;第四章凝固过程微观组织模拟由赵九洲、张玉妥撰写;第五章热轧带钢组织性能预报由李殿中、张玉妥、沙孝春、王利明撰写;第六章奥氏体-铁素体转变的计算机模拟由佟铭明、兰勇军、黄成江撰写;第七章塑性成形工艺模拟由张士宏、李建国撰写。本书内容主要反映中国科学院金属研究所材料制备工艺计

计算机模拟组的研究成果。感谢中国工程物理研究院赵鹏骥研究员在本模拟组成立前期给予的帮助。感谢北京大学数学科学学院张平文教授、清华大学物理系倪军教授以及中国科学院金属研究所范存淦研究员、王元明研究员、戎利建研究员和李秀艳博士。本书既可作为研究生、本科生的学习用书,也可供企业、科研与教学单位从事装备制造和材料应用相关专业的科技人员参考。

李依依

2006年1月20日

目 录

前言

第一章 概论	1
1.1 材料制备工艺的基本概念和实例	1
1.1.1 材料制备工艺的基本概念	1
1.1.2 钢铁生产工艺流程	2
1.1.3 我国钢铁工业的现状	7
1.2 材料制备工艺模拟的基本知识	8
1.2.1 材料模拟的基本概念	8
1.2.2 金属材料制备工艺的计算机模拟	14
1.2.3 工艺模拟的判据	15
1.3 材料制备工艺模拟常用软件.....	16
1.3.1 铸造工艺模拟软件	16
1.3.2 热轧带钢组织性能预报软件	18
1.3.3 塑性成形工艺模拟软件	20
参考文献	22
第二章 液态金属精炼过程的计算机模拟	23
2.1 金属熔体传输过程的基本方程与计算方法.....	23
2.1.1 描述金属熔体传输过程的基本方程	23
2.1.2 冶金反应器内金属熔体流场的计算方法	27
2.2 底吹氩精炼钢包内三维流动的计算机模拟.....	36
2.2.1 控制方程	36
2.2.2 吹氩精炼钢包内气液两相区的描述	36
2.2.3 三维数学模型的验证	38
2.2.4 单喷嘴喷吹钢包内流场模拟	40
2.2.5 多喷嘴喷吹钢包内流场模拟	41
2.3 浸入式喷枪喷吹金属熔池和 AOD 炉内三维流动的数值模拟	44
2.3.1 水平气体射流在液体中的行为特征	44
2.3.2 数学模型	45
2.3.3 浸入式喷枪喷吹熔池中的流动特征	46
2.3.4 AOD 炉内的流动特征	47

2.4	液态金属熔池中的混合过程模拟	49
2.4.1	混合过程和混合时间的数理研究方法	49
2.4.2	精炼金属熔池混合过程的模拟分析	50
2.5	LF 钢包精炼炉内夹杂物行为的计算机模拟	52
2.5.1	LF 炉内夹杂物描述的理论模型	52
2.5.2	喷嘴布置对夹杂物去除的影响	54
2.6	RH 真空精炼过程的计算机模拟	56
2.6.1	模型描述	56
2.6.2	RH 真空装置内钢液的流动特征	58
2.6.3	RH 真空精炼装置内钢液的循环流量	59
2.6.4	脱碳行为	60
2.6.5	脱碳的影响因素	61
	参考文献	63
第三章	铸造工艺的计算机模拟	65
3.1	铸件充型及传热过程模拟	65
3.1.1	充型及传热过程的数理方程	66
3.1.2	充型及传热过程模拟	67
3.1.3	标准实验(benchmark test)的模拟	69
3.2	铸件凝固过程中的三场耦合模拟与宏观偏析的定量预测	70
3.2.1	铸件凝固过程的三场耦合	70
3.2.2	三场耦合模型	71
3.2.3	钢锭三场耦合的模拟计算	73
3.3	使用水平集方法模拟铸造双金属轧辊	75
3.3.1	冲洗法生产铸造双金属轧辊	75
3.3.2	数学模型	75
3.3.3	数值稳定性分析	76
3.3.4	计算结果与分析	76
3.4	大型铸钢支承辊整体铸造工艺的计算机模拟	80
3.4.1	铸钢支承辊的整体铸造工艺	80
3.4.2	铸钢支承辊充型过程的模拟	80
3.4.3	铸钢支承辊凝固过程模拟结果与分析	81
3.5	电磁离心铸造工艺模拟	84
3.5.1	电磁场、熔体流场和温度场的耦合	85
3.5.2	熔体流场与压力场模拟结果与分析	86
3.5.3	温度场的模拟结果与分析	88
3.5.4	电磁搅拌对离心铸造 0Cr17Mn14Mo2N 不锈钢管坯显微组织的影响	89

参考文献	91
第四章 凝固过程微观组织模拟	93
4.1 凝固过程微观组织模拟方法	93
4.1.1 确定性方法	93
4.1.2 概率方法	95
4.1.3 相场方法	98
4.2 凝固过程数学模型	101
4.2.1 形核模型	101
4.2.2 晶体生长模型	104
4.3 铸锭凝固过程中柱状晶与等轴晶的转变	108
4.3.1 元胞自动机与有限差分耦合	108
4.3.2 模拟的基本步骤	110
4.3.3 铸锭凝固过程中柱状晶与等轴晶的转变	110
4.4 喷射成形中金属液滴凝固过程模拟	113
4.4.1 喷射成形中金属液滴凝固	113
4.4.2 模型的描述	114
4.4.3 液滴凝固过程模拟	116
参考文献	120
第五章 热轧带钢组织性能预报	122
5.1 热轧带钢组织性能预报的基本模块	122
5.2 板坯加热的奥氏体化过程及晶粒长大	123
5.2.1 板坯加热的奥氏体化过程	123
5.2.2 晶粒长大动力学参数的确定	125
5.3 轧制过程中的再结晶模拟	127
5.3.1 热轧温度模型	127
5.3.2 热形变过程中的再结晶	129
5.3.3 再结晶模型	132
5.3.4 热轧带钢再结晶的模拟	134
5.4 热轧带钢冷却过程的相变计算	135
5.4.1 热轧低碳钢冷却相变计算	136
5.4.2 卷取温度控制模型	140
5.4.3 计算结果与分析	142
5.5 铁素体晶粒尺寸预测	145
5.5.1 钢卷冷却过程的温度场模拟	145
5.5.2 铁素体晶粒尺寸模型	147
5.5.3 计算结果与分析	148

5.6	热轧带钢组织性能预报	150
5.6.1	物理冶金模型预报带钢性能	150
5.6.2	Rollan 软件的应用	154
	参考文献	156
第六章	奥氏体-铁素体转变的计算机模拟	158
6.1	等温奥氏体-铁素体相变的元胞自动机介观模拟	158
6.1.1	等温奥氏体-铁素体相变二维元胞自动机模型	158
6.1.2	等温奥氏体-铁素体相变元胞自动机模拟	163
6.2	等温相变过程中单个铁素体晶粒长大行为的模拟	170
6.2.1	等温相变过程中单个铁素体晶粒的长大模拟	170
6.2.2	单个铁素体晶粒的六种长大模式模拟	171
6.3	连续冷却奥氏体-铁素体相变元胞自动机模拟	175
6.3.1	连续冷却奥氏体-铁素体相变元胞自动机模型	175
6.3.2	连续冷却奥氏体-铁素体相变模拟	177
6.4	形变奥氏体-铁素体相变晶体塑性有限元-元胞自动机耦合模拟	183
6.4.1	晶体塑性形变模型	183
6.4.2	形变奥氏体-铁素体相变模型	186
6.4.3	晶体塑性有限元模型与元胞自动机模型的耦合	188
6.4.4	形变奥氏体-铁素体相变的晶体塑性有限元-元胞自动机耦合模拟 结果	190
6.5	Fe-C 二元系未形变奥氏体等温分解的蒙特卡罗法模拟	196
6.5.1	蒙特卡罗模型	197
6.5.2	单个晶粒中碳扩散过程的模拟	200
6.5.3	双晶粒体系中的等温奥氏体-铁素体相变模拟	203
6.5.4	未形变奥氏体等温分解过程中非平衡奥氏体-铁素体相界面状态的 分析	206
6.5.5	未形变多晶奥氏体等温分解过程中奥氏体-铁素体相变模拟	212
6.6	Fe-C 二元系等温热形变过程中形变诱导铁素体相变的蒙特卡罗法 模拟	215
6.6.1	形变诱导铁素体相变	215
6.6.2	多态波茨模型	217
6.6.3	模拟结果与分析	221
6.7	深过冷轧制热力耦合有限元分析	235
6.7.1	钢板热轧过程界面换热系数的测定	236
6.7.2	热轧板表层超细晶形成过程分析	238
	参考文献	242

第七章 塑性成形工艺模拟	246
7.1 体成形工艺模拟	246
7.1.1 体积成形工艺模拟	246
7.1.2 体积成形过程中的热力耦合模型.....	246
7.1.3 近 β 型钛合金的塑性成形过程模拟	247
7.1.4 NiTi 形状记忆合金管件热挤压过程数值模拟	249
7.2 板材冲压成形过程的计算机模拟	252
7.2.1 油底壳成形过程的三维有限元模拟	252
7.2.2 镁合金板材筒形件拉深成形	261
7.2.3 板件液压成形	264
7.3 板成形回弹过程的计算机模拟	270
7.3.1 板成形回弹的计算方法及影响因素	270
7.3.2 汽车纵梁成形及回弹过程的模拟.....	272
参考文献.....	280
关键术语	281

第一章 概 论

在材料科学与工程中,经常要处理“正”、“反”相左的、复杂的问题,计算机模拟作为理论与实验之外的第三种有效手段和方法,对于设计、解释和检验材料结构特性和工艺因素是非常有用的。本章介绍了材料制备工艺及其计算机模拟的一些基本概念、模型建立和常用的模拟软件等。

1.1 材料制备工艺的基本概念和实例

1.1.1 材料制备工艺的基本概念

材料在人类社会的发展中至关重要,它同生物、能源、信息技术共同构成了当今新技术革命的四大支柱。材料是人类赖以生存和发展的物质基础,从日常生活用具到尖端产品,从简单的工具到复杂的航天飞机,都是由不同性能的材料加工成形、组合装配而成。材料具有五大特性^[1]:① 实用性:在对物质的研究中,材料居核心地位,其研究更加突出的是它的实用性。金属材料在今后的数十年里仍将起着不可替代的主导作用。② 基础性、带动性:材料是工业的基础,一种新材料的诞生甚至可以创造一个崭新的产业,导致国民经济和社会生活的深刻变革。例如,20世纪70年代光纤通信的出现,引起了信息传输领域的一场革命,用光纤通信已经成为本世纪通信技术发展的必然。因此,材料是一个带动性、基础性很强的领域。③ 分散性或称多样性:各应用部门对材料性能的要求不同,因此材料研究与发展具有分散性。④ 综合性:以往人们对“材料科学”这个概念一直存在争议,现在多数人认同这一提法,即认为它是20世纪后半叶在冶金学、金属物理、陶瓷、化学、数学、生物学与计算科学等基础上发展起来的,是这些学科交叉融合的产物,是多学科的核心,是一门新的学科。⑤ 依赖性:材料科学是一门实验性很强的学科,如材料冶炼、铸造、轧制、热处理、焊接等加工制造过程,对设备和实验仪器具有很强的依赖性。

材料根据其组成与结构可分为金属材料、无机非金属材料、高分子材料和复合材料等,但是金属、陶瓷与高分子材料之间的界限已日益模糊,许多内容都在相互融合与交叉,逐渐形成大材料的概念。而金属材料仍是应用最为广泛的结构材料,是装备制造业等国民经济支柱产业及国防的主体结构材料。材料发展至今已形成了独立的材料科学与工程体系,其内容是研究材料成分、工艺、结构、性能与使用性

能以及它们之间的关系,因而把成分、工艺、结构、性能与使用性能称为材料科学与工程四个基本要素。在这四大要素中,材料的制备工艺起着关键的作用,它能保证材料的成分和结构,达到需求材料的性能和使用性能。研究与发展材料的目的在于应用,材料又必须通过合理的工艺流程才能制备出具有合理价格与实用价值的工程材料。

那么,什么是金属材料制备工艺?一般来讲,通过一定的生产流程,将金属原料制备成具有一定的成分、结构与性能,可以作为工业或工程中使用的工件、零件或部件这个过程叫做金属材料制备工艺。其内容既包括传统的冶炼、铸造、压力加工、热处理、焊接等,也包括各种新发展的快速凝固、激光原位成型、真空溅射、化学气相沉积等其他新方法和新工艺。研究材料中的基本规律,目的在于为发展新型材料提供新技术、新方法和新流程;或者为更好地使用已有的材料,以充分发挥其作用。无论是改进现有材料,还是研究新材料,都离不开材料制备,材料制备工艺决定着材料的稳定性及可靠性,并且是新材料转化为商品的关键,因此,它本身也是一门重要的、综合性的现代科学技术^[2]。下面以钢铁生产为例,说明材料制备工艺的重要作用。

1.1.2 钢铁生产工艺流程

19世纪以来,钢铁工业发生了三件大事^[3]:一是氧气顶吹转炉炼钢,它问世之后便风靡全球,逐步取代了平炉,成为主要的炼钢技术。二是连续铸钢(简称连铸),是由德国曼内斯曼公司和容汉斯公司组成连铸共同体以后,连铸技术才不断完善,取代了以前广泛使用的、劳动强度很高的模铸。连铸技术不断完善,代替模铸后经济效益不断提高:金属收得率提高8%~10%,能耗降低50%~70%,生产成本降低10%~12%,劳动生产率提高大于20%。我国钢铁企业连铸比2002年达到93.03%,2003年达到更高,即96.19%,日本、美国的连铸比接近100%。三是炉外精炼技术。炉外精炼技术使用的前30年,几乎所有钢都是在炼钢炉中完成的。现在,炉外精炼已经是钢铁生产流程中不可缺少的一道提高质量的工序。钢的生产涉及诸多的工艺过程,这些工艺过程消耗来自全球各地的原料和再生材料,生产出数千种产品及其副产品,图1.1为钢铁生产工艺概况^[4]。不同的钢种其生产流程不尽相同,图1.2为碳钢和低合金钢的生产过程^[5]。

传统的钢铁生产流程是:高炉—炼钢炉(平炉、转炉、电弧炉)—铸锭—加热炉—锻造—初轧—精轧—成材。先进的钢铁生产流程为:高炉—铁水预处理—炼钢炉(转炉、电弧炉)—炉外精炼—连铸连轧—成材。

(1) 高炉冶炼生铁

炼铁常用的方法为高炉冶炼法,高炉冶炼过程是在密闭的竖炉中进行,如图1.2中(a)所示。炉料与煤气流逆向运动,完成还原、造渣、传热及渣铁反应的过程。最后从炉缸上部出渣、炉缸底部获得铁水。

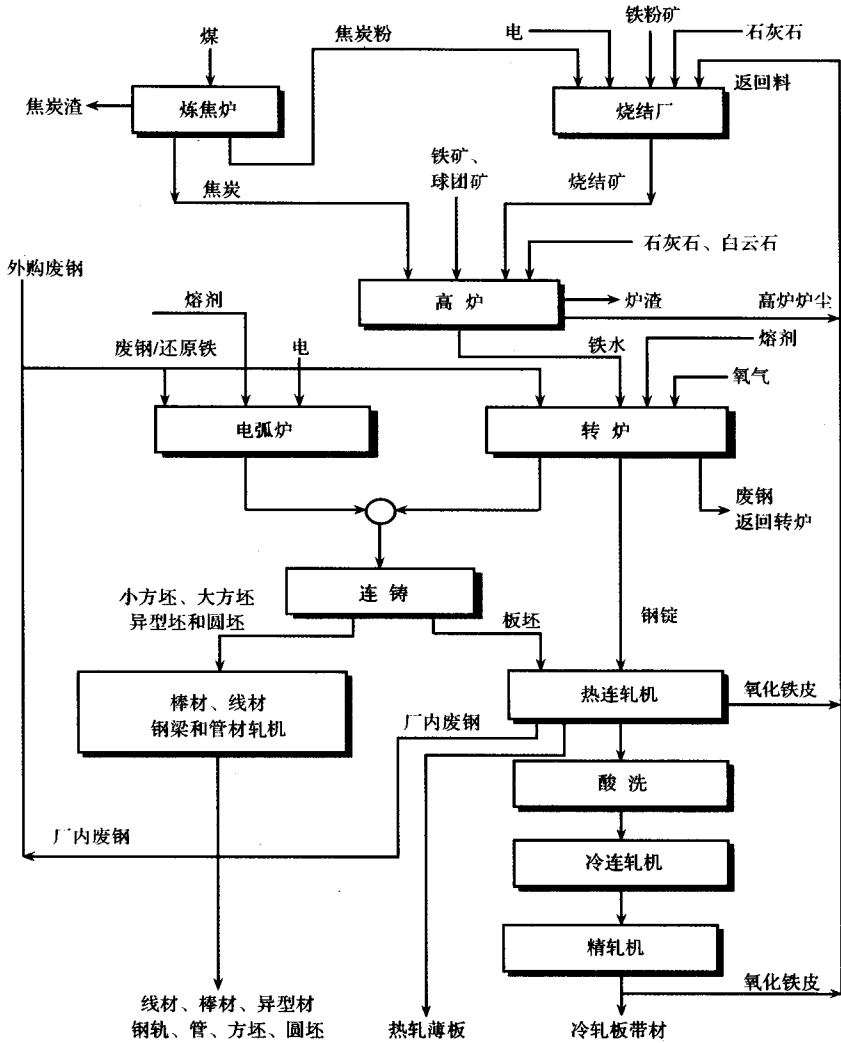


图 1.1 钢铁生产工艺概况^[4]

(2) 转炉炼钢

在美国和加拿大,氧气转炉炼钢的产量几乎占 60%, 尽管随着电弧炉短流程钢厂的增加, 这个比例可能下降, 但仍然是重要的炼钢工艺。图 1.2 中(b)为转炉和氧气转炉炼钢包括常规的顶吹转炉、底吹转炉、侧吹转炉和顶底复合吹炼的转炉。转炉的优势在于其高生产率和低残留元素的钢水。转炉中的铁水主要来自高炉, 约占总原料的 65% ~ 90%, 平均为 74%, 其余为回收废钢。由于质量和效益的驱使, 世界上主要工业化国家的钢铁企业整体优化水平提高很快, 有的转炉炼钢厂

已实现了四个百分之百新技术:铁水预处理、炉顶和炉底复合吹炼、精炼和连铸。

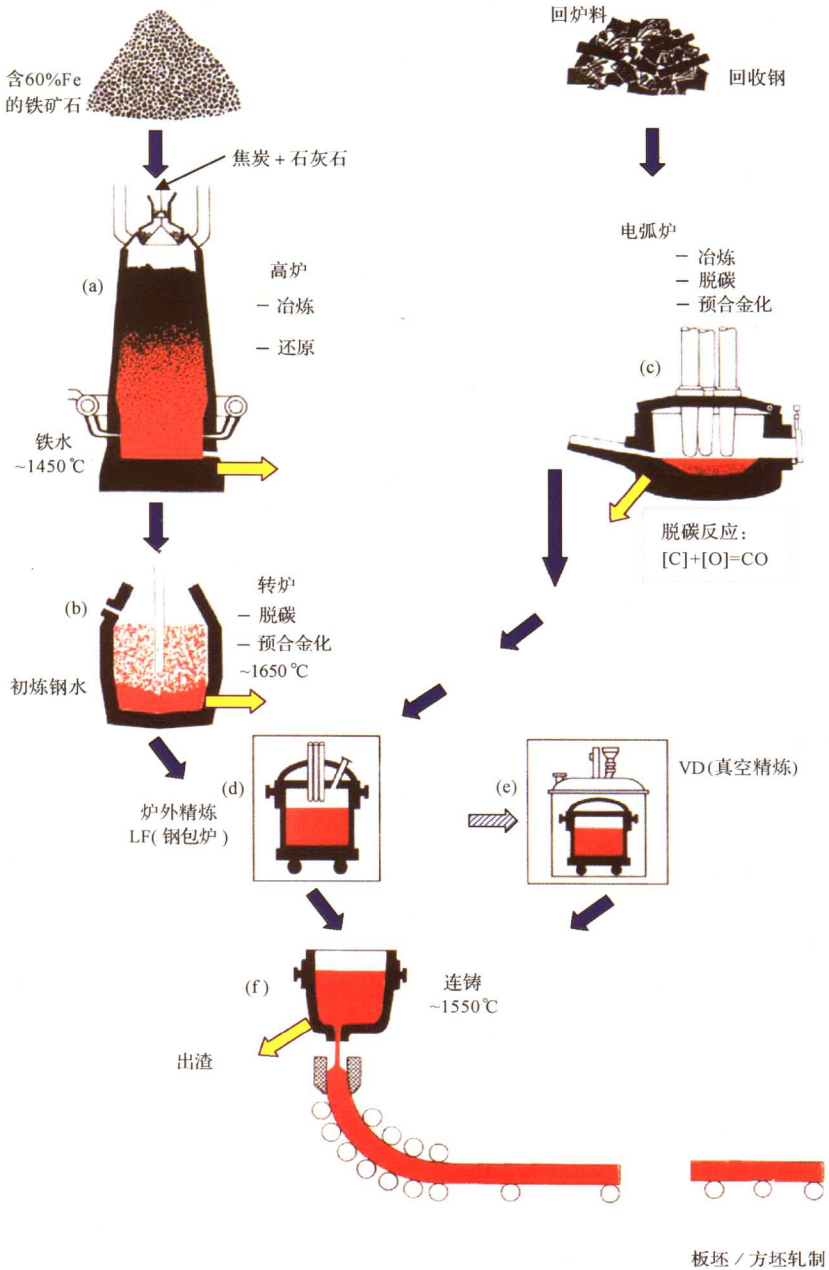


图 1.2 碳钢和低合金钢的生产过程^[5]

(3) 电弧炉炼钢

电弧炉炼钢以电能为热源,利用电极与炉料间产生电弧的高温来加热和熔化炉料,如图 1.2 中(e)所示。现代炼钢电弧炉的基本功能是将尽可能高的电功率输入到熔池内,获得高的生产率和低的物料与能量消耗^[6]。由传统的电弧炉炼钢到配置炉外精炼和连铸机要扩大炉容到数百吨,吨钢的电弧炉功率由原来的 $100 \sim 399 \text{ kV} \cdot \text{A/t}$ 提高到大于 $700 \text{ kV} \cdot \text{A/t}$,冶炼一炉钢约需要一小时,这就是超高功率电弧炉。20 世纪 90 年代又发展了直流超高功率电弧炉,进一步缩短了冶炼周期,降低能耗,减少噪声,使电弧炉炼钢水平又达到一个新高度。

(4) 炉外精炼

炉外精炼是把转炉、电弧炉中初炼的钢水移到另一个容器中(主要是钢包)进行的精炼过程,图 1.2 中(d)和(e)所示。这些过程包括脱氧(去除夹杂物)、脱碳、脱硫、非金属夹杂物的形态控制;成分调整(添加合金);钢水成分及温度的微调及均匀化等。炉外精炼把传统的炼钢方法分为两步,即初炼加精炼。初炼是指在氧化气氛下进行炉料熔化、脱碳和主合金化。精炼是在真空、惰性气氛或可控气氛下进行脱氧、脱硫、去除夹杂、调整成分、控制钢水温度等。图 1.3 为炉外精炼示意图^[3]。炉外精炼一般分

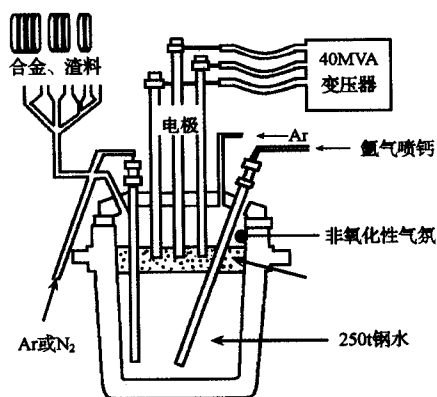


图 1.3 炉外精炼示意图^[3]

为两类:钢包处理型炉外精炼法,如 RH 真空循环法;钢包精炼型炉外精炼炉法,如 VOD 真空脱氧脱碳法、LF 钢包炉法、AOD 氩氧精炼炉法、VD 真空脱气等方法。炉外精炼技术的应用,必须符合产品质量要求,以及炉外精炼工艺和生产规模匹配,只有主体设备和辅助设备配套,才能获得最佳效果。

为了使连铸工艺顺利进行,通过炉外精炼来降低钢中的硫、氧含量,均匀钢包中的钢水成分和温度,冶炼出洁净钢就非常有必要。铁水预处理可以在鱼雷罐车或铁水包中进行脱硅、脱磷、脱硫的“三脱”处理。铁水预处理和炉外精炼技术的发展,使冶炼效率进一步提高,环境和质量改善,能耗和成本降低,从而将转炉、电弧炉炼钢技术推到一个全新的发展阶段。

(5) 连铸连轧

连铸技术是将钢水通过连铸机直接成连铸坯,从而取代模铸和初轧开坯的一种钢铁生产先进工艺,是 20 世纪世界钢铁工业科技发展的大趋势。世界各产钢国都以连铸比(连铸坯产量占钢总产量比例)的高低来衡量钢铁工业生产结构优化的程度和技术水平的高低。连铸技术的发展,推动了“炼钢—炉外精炼—连铸连

轧”工艺流程的优化组合,使炼钢、铁水预处理和炉外精炼、连铸与轧钢工序优化、流程缩短。与传统的模铸相比可提高成材率 10% 以上、能耗降低 50% ~ 70%。

板坯连铸连轧是将铸造及轧制技术综合在一起在凝固过程中形变的工艺,如图 1.2 中(f)所示。连铸技术的功能不只是取代模铸、提高成材率、改善劳动条件和节能,而且连铸机还是一个高效的凝固结晶器和节能器,在连铸连轧工艺中起着承上启下的衔接器作用。板坯连铸连轧工艺按连铸坯断面尺寸的选择又可分为普通板坯和薄板坯连铸连轧工艺。普通板坯的厚度在 210 ~ 250mm,薄板坯的厚度在 90mm 以下。

薄板坯连铸连轧工艺和熔融还原、直接炼铁技术一起又被视为当代冶金的新潮流。薄板坯连铸连轧技术是继氧气转炉炼钢、连续铸钢、炉外精炼之后的钢铁工业的重要技术之一,在保证成品钢材品质的前提下,尽量缩小铸坯的断面,部分取代压力加工。其特点是:①工艺简化,设备减少,生产流程短,省去初轧和部分精轧机,生产线一般仅有 200m 长;②生产周期短。从炼钢到热轧板卷输出仅需 1.5h;③节约能源,提高成材率,可直接节能(标煤)66kg/t,间接节能 145kg/t,成材率提高 11% ~ 13%。

连铸坯断面尺寸的选择,除了应考虑铸坯的传热、凝固过程中的形变问题外,还要考虑铸机与转炉及轧机在流量上的匹配、轧制压下量和性能及显微组织的要求。与薄板坯连铸连轧配套的炼钢车间起初是一台超高功率电炉和一台钢包精炼炉,其生产规模为 30 万 t/年、50 万 t/年、80 万 t/年、甚至 150 万 t/年。目前,许多工厂都以转炉代替电炉进行薄板坯连铸连轧生产。

具有代表性的连铸机是德国曼内斯曼·德马克公司杜依斯堡-胡金根钢厂的弧形连铸机^[6],如图 1.4 所示。其特点是:铸坯在未完全凝固的条件下轧制,使其

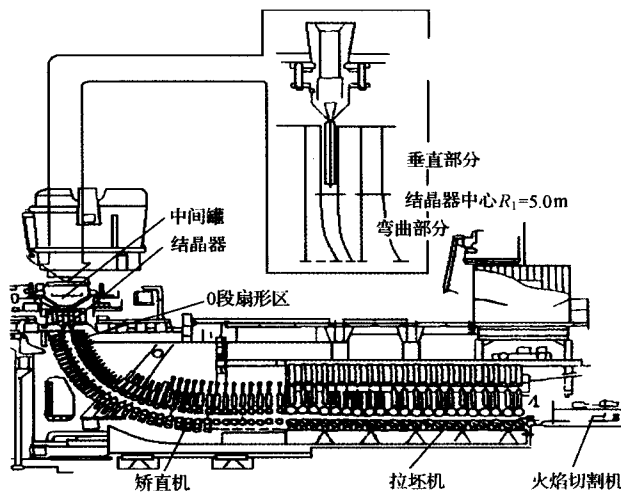


图 1.4 曼内斯曼钢管公司杜依斯堡-胡金根钢厂的弧形连铸机^[6]

在凝固过程中逐渐减薄,提高了铸坯内部质量,C、Mn 偏析小,更加均质化,等轴晶比例高,钢的韧性更好。

1.1.3 我国钢铁工业的现状

图 1.5 为世界主要国家钢产量的变化情况^[7],可以看出,美国在 1951 年钢产量达到 1 亿 t,前苏联在 1966 年钢产量达到 1 亿 t,日本则在 1972 年钢产量达到 1 亿 t。我国钢产量 1996 年突破了 1 亿 t。表 1.1 为 2002~2004 年世界主要产钢国的钢产量^[8]。

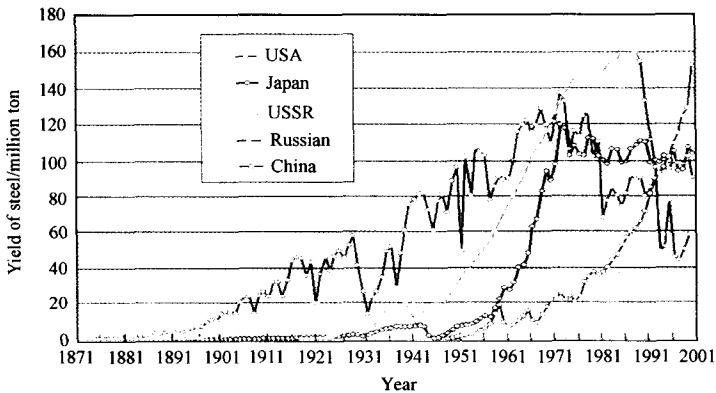


图 1.5 世界主要国家钢产量^[7]

表 1.1 2002~2004 年世界主要产钢国的钢产量(万 t)^[8]

年	中国	日本	欧盟 15 国	前苏联	美国	世界 63 国合计
2002	18 168	10 774	15 856	9990	9224	88 576
2003	22 011	11 051	15 976	10 588	9136	94 514
2004	27 250	11 270	16 830		9850	105 000

钢铁作为最广泛使用的结构材料,应用于国民经济建设的各个方面,其中八大行业(建筑、机械、汽车、造船、铁道、石油、集装箱和家电)用去钢铁的 95% 以上。中国钢铁工业协会 2003 年通过调查研究,预测 2005 年我国国内市场对钢需求量为 2.7 亿 t 以上,2010 年 3.3 亿 t 以上。同时,预测 2005 年消费的钢材中,板带材的比重将由 2002 年的 39.42% 上升到 43.46%,2010 年将进一步上升到 50.18%。虽然我国的钢产量居世界第一,但是钢铁工业中存在的技术问题为通材多,低档产品多,一些高附加值的钢材仍然需要进口,目前进口量最大的是优质冷轧薄板和各类涂镀层板。所以,通过技术创新,用信息化带动工业化,提升传统产业,向高效、节能、短流程、高性能和多功能化、环境友好及可持续方向发展。

钢铁生产的主要原材料是铁矿石、废钢和焦炭、焦煤。由于我国尚在工业化过