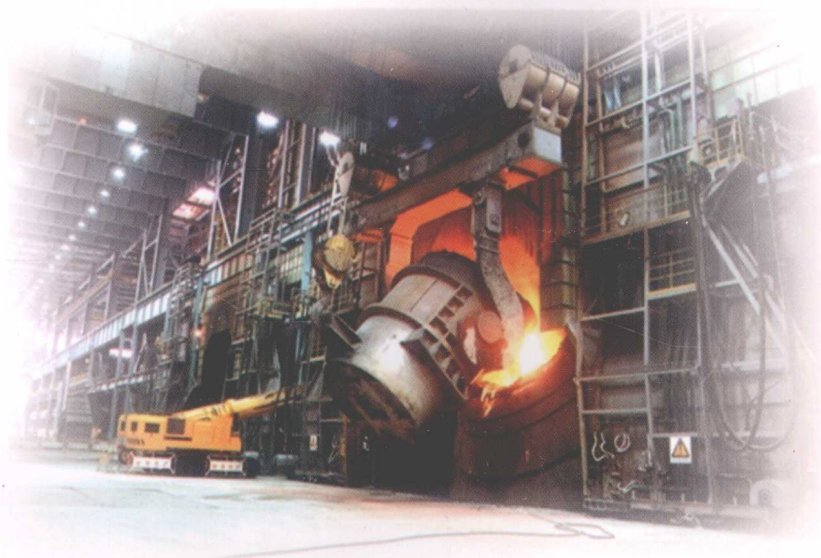


高等学校规划教材  
GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

# 炼钢学

雷亚 杨治立 任正德 孙亚琴 周书才 编著



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

高等学校规划教材

# 炼 钢 学

雷 亚 杨治立 任正德 编著  
孙亚琴 周书才

北 京  
冶 金 工 业 出 版 社  
2010

## 内 容 提 要

本书根据冶金工程专业特点,介绍了炼钢原理、炼钢原材料、气体射流与熔池的作用以及转炉炼钢工艺制度、复吹转炉炼钢、溅渣护炉、炼钢生产计算机控制、电炉炼钢、现代电炉炼钢技术等内容。

本书在吸收冶金类相关教材精华的基础上,注重教材内容的针对性和实用性,未介绍一些与冶金原理、冶金传输课程重复的内容,充分照顾到应用型本科学生的实际接受能力,强调应用型人才的培养目标,面向现场应用;加强了与专业关系密切的内容,紧密结合钢铁冶金前沿新技术补充有关内容,将最新科研成果融入本书体系中,充实和丰富了教学内容。

本书是冶金行业“十一五”应用型本科学校冶金工程类专业规划教材,也可作为冶金工程技术人员参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

炼钢学 / 雷亚等编著. —北京: 冶金工业出版社,  
2010. 6

高等学校规划教材

ISBN 978-7-5024-5002-1

I. ①炼… II. ①雷… III. ①炼钢学—高等学校—  
教材 IV. ①TF7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 077536 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 postmaster@cnmp. com. cn

责任编辑 王 优 宋 良 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 刘 倩 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5002-1

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

2010 年 6 月第 1 版, 2010 年 6 月第 1 次印刷

787 mm × 1092 mm 1/16; 20. 25 印张; 536 千字; 308 页

42. 00 元

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(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

# 前 言

近十年来,我国的钢铁工业持续高速增长,取得了举世瞩目的成就。全国产钢能力从十多年前的1亿吨,发展到目前的6亿吨左右。钢铁生产流程的主流装备已经达到国际先进水平并立足于国内制造。钢铁材料实物质量的稳定提高、产品结构的进一步优化需要大批钢铁冶金的应用型人才。因此,本着理论联系实际、强调基本理论与实践相结合、重视工艺操作、注重实用性、突出应用的原则,在认真研究了冶金工程专业教学大纲的基础上,为提高学生理论分析能力和培养实际操作能力而编写本书。

本书是冶金行业“十一五”规划教材。根据冶金工程专业特点,本书重点介绍了炼钢原理、炼钢原材料、气体射流与熔池的作用、转炉炼钢工艺制度、复吹转炉炼钢、溅渣护炉、炼钢生产计算机控制、电炉炼钢、现代电炉炼钢技术等内容。铁水预处理和炉外精炼、连续铸钢的相关内容则在另外两本规划教材《炉外处理》、《连续铸钢》中介绍,三本教材可以配套使用。

本书由雷亚、杨治立、任正德、孙亚琴、周书才编著。全书共12章,其中,第1、6、9、12章由雷亚编写,第2章由周书才编写,第3~5章由孙亚琴编写,第7、8章由杨治立编写,第10、11章由任正德编写,全书由雷亚统稿。郑沛然审阅了全稿,并提出许多建设性的意见和建议,使本书的内容更加严谨。同时,在本书编写过程中得到冶金同行的大力支持,引用了他们部分公开发表的资料,编者在此表示衷心的感谢。

由于时间紧迫、经验不足,加之编者水平有限,书中如有不妥和疏漏之处,恳请读者批评指正。

编 者

2009年12月

# 目 录

1 概论 .....	1
1.1 炼钢的发展过程 .....	1
1.2 我国钢铁工业的发展 .....	2
1.2.1 钢产量的迅速增加 .....	2
1.2.2 现代化炼钢生产流程的建立 .....	3
1.2.3 钢纯净度的大幅度提高 .....	3
1.2.4 炼钢技术的重大创新 .....	4
1.3 国外钢铁工业的发展 .....	5
思考题 .....	5
2 炼钢的基础理论 .....	6
2.1 钢液的物理性质 .....	6
2.1.1 钢的密度 .....	6
2.1.2 钢的熔点 .....	6
2.1.3 钢液的黏度 .....	7
2.1.4 钢液的表面张力 .....	8
2.1.5 钢的导热能力 .....	9
2.2 炉渣的物理化学性质 .....	10
2.2.1 炉渣的作用与组成 .....	10
2.2.2 炉渣的化学性质 .....	10
2.2.3 炉渣的物理性质 .....	13
2.3 熔融金属中的炼钢反应 .....	16
2.3.1 反应的物理化学特征 .....	16
2.3.2 单一元素脱除杂质时各组成的变化和控制 .....	17
2.3.3 两种元素脱除一种杂质时的分析 .....	18
2.4 炉渣和钢液之间的反应 .....	19
2.4.1 渣量在炼钢过程中的作用 .....	19
2.4.2 渣量和脱氧的关系 .....	22
2.4.3 钢渣界面反应 .....	24
2.5 硅、锰的氧化和还原反应 .....	25
2.5.1 硅的氧化和还原 .....	25
2.5.2 锰的氧化与还原 .....	26
2.6 钢液脱碳 .....	27

2.6.1	氧气的溶解 .....	27
2.6.2	钢液中碳的溶解 .....	28
2.6.3	钢液的脱碳反应 .....	29
2.7	钢液的脱磷 .....	37
2.7.1	磷对钢材性能的影响 .....	37
2.7.2	氧化脱磷 .....	37
2.7.3	还原脱磷 .....	42
2.8	钢液的脱硫 .....	43
2.8.1	金属熔体中的脱硫 .....	44
2.8.2	炉渣脱硫 .....	46
2.8.3	气化脱硫 .....	50
2.8.4	脱硫量的确定 .....	51
2.8.5	脱硫反应动力学 .....	52
2.9	钢液的氧化与脱氧 .....	52
2.9.1	钢液中元素的氧化 .....	53
2.9.2	钢液的脱氧 .....	54
2.10	铬、钒、铌的氧化 .....	62
2.10.1	铬的氧化 .....	62
2.10.2	钒的氧化 .....	64
2.10.3	铌的氧化 .....	65
2.11	氢、氮的反应 .....	65
2.11.1	气体对钢的危害 .....	65
2.11.2	氢、氮的溶解度 .....	66
2.11.3	炼钢过程中气体的溶解 .....	68
2.11.4	影响氢和氮在钢中溶解度的因素 .....	68
2.11.5	钢液的脱气反应和工艺参数的关系 .....	69
2.12	炼钢过程中钢液的搅拌 .....	71
2.12.1	电磁搅拌 .....	71
2.12.2	气体搅拌 .....	72
2.12.3	RH 真空搅拌 .....	73
2.12.4	钢液出钢过程中的搅拌功和比搅拌功率 .....	73
	思考题 .....	74
3	炼钢原材料 .....	75
3.1	金属料 .....	75
3.1.1	铁水 .....	75
3.1.2	废钢 .....	76
3.1.3	生铁 .....	77
3.1.4	直接还原铁 .....	77

3.1.5 铁合金 .....	77
3.2 造渣材料 .....	78
3.2.1 石灰 .....	78
3.2.2 镁质石灰 .....	81
3.2.3 白云石 .....	81
3.2.4 萤石 .....	82
3.2.5 合成造渣剂 .....	82
3.2.6 菱镁矿 .....	82
3.2.7 火砖块 .....	82
3.3 氧化剂、冷却剂和增碳剂 .....	83
3.3.1 氧化剂 .....	83
3.3.2 冷却剂 .....	83
3.3.3 增碳剂 .....	84
思考题 .....	84
<b>4 气体射流与熔池的相互作用 .....</b>	<b>85</b>
4.1 气体射流的状态与特征 .....	85
4.1.1 顶吹供氧的射流 .....	85
4.1.2 底吹供气的射流 .....	88
4.2 气体射流与熔池的相互作用 .....	89
4.2.1 顶吹氧射流与熔池的相互作用 .....	89
4.2.2 底吹气体对熔池的作用 .....	94
4.2.3 复合吹炼气体对熔池的搅拌 .....	97
思考题 .....	97
<b>5 氧气顶吹转炉炼钢工艺 .....</b>	<b>99</b>
5.1 氧气转炉炼钢工艺概述 .....	99
5.1.1 吹炼过程操作工序 .....	99
5.1.2 转炉吹炼过程中金属成分的变化规律 .....	99
5.1.3 转炉吹炼过程中熔渣成分的变化规律 .....	104
5.1.4 转炉吹炼过程中熔池温度的变化规律 .....	104
5.2 装入制度 .....	104
5.2.1 装入量的确定 .....	104
5.2.2 装入制度类型 .....	105
5.2.3 装料次序 .....	105
5.3 供氧制度 .....	106
5.3.1 供氧制度的内容 .....	106
5.3.2 氧枪 .....	106
5.3.3 供氧参数 .....	106

5.3.4 供氧操作 .....	108
5.4 造渣制度 .....	109
5.4.1 造渣的定义、目的和要求 .....	109
5.4.2 炉渣的形成 .....	109
5.4.3 石灰的溶解机理及影响石灰溶解速度的因素 .....	110
5.4.4 快速成渣的措施 .....	112
5.4.5 成渣路线 .....	113
5.4.6 造渣方法 .....	114
5.4.7 渣料加入量计算 .....	115
5.4.8 渣料加入时间 .....	116
5.4.9 泡沫渣 .....	116
5.5 温度制度 .....	119
5.5.1 热量来源与热量支出 .....	119
5.5.2 出钢温度的确定 .....	120
5.5.3 冷却剂的种类及其冷却效应 .....	121
5.5.4 吹炼过程的温度控制 .....	123
5.6 终点控制和出钢 .....	123
5.6.1 终点的标志 .....	123
5.6.2 终点控制方法 .....	124
5.6.3 人工判断方法 .....	124
5.6.4 出钢 .....	126
5.7 脱氧与合金化 .....	129
5.7.1 脱氧目的 .....	129
5.7.2 脱氧剂的选择原则 .....	129
5.7.3 脱氧方法 .....	129
5.7.4 脱氧操作 .....	130
5.7.5 合金加入量的计算 .....	131
5.8 吹损与喷溅 .....	132
5.8.1 吹损 .....	132
5.8.2 喷溅 .....	132
思考题 .....	134
<b>6 氧气底吹转炉和顶底复合吹炼转炉炼钢 .....</b>	<b>135</b>
6.1 氧气底吹转炉炼钢 .....	135
6.1.1 氧气底吹转炉的发展 .....	135
6.1.2 氧气底吹转炉设备 .....	136
6.1.3 熔池反应的基本特点 .....	137
6.1.4 工艺操作 .....	139
6.2 顶底复合吹炼转炉的冶金特点 .....	140



6.2.1 顶底复吹转炉的炼钢工艺类型 .....	140
6.2.2 顶底复吹转炉的底吹供气和供气元件 .....	141
6.2.3 顶底复吹转炉内的冶金反应 .....	150
6.2.4 冶金效果 .....	153
6.3 顶底复合吹炼转炉的冶炼工艺 .....	154
6.3.1 装入制度 .....	154
6.3.2 供氧制度 .....	154
6.3.3 底部供气 .....	154
6.3.4 造渣制度 .....	156
6.3.5 脱氧合金化 .....	157
6.3.6 少渣冶炼工艺 .....	157
思考题 .....	159
<b>7 溅渣护炉 .....</b>	<b>160</b>
7.1 溅渣护炉技术的发展概况和技术特点 .....	160
7.1.1 发展概况 .....	160
7.1.2 技术特点 .....	161
7.2 溅渣护炉的基本原理 .....	162
7.2.1 炉渣的性质 .....	162
7.2.2 溅渣护炉的机理 .....	165
7.2.3 溅渣层的蚀损机理 .....	167
7.3 溅渣护炉工艺 .....	168
7.3.1 溅渣护炉工艺参数 .....	168
7.3.2 炉渣成分的调整 .....	171
7.3.3 调渣剂的选择 .....	171
7.3.4 合适的留渣量 .....	172
7.3.5 调渣工艺 .....	173
7.3.6 复吹转炉溅渣工艺 .....	174
7.3.7 炉渣-金属蘑菇头的形成与生长控制技术 .....	175
7.3.8 底部供气元件的防堵和复通 .....	176
思考题 .....	177
<b>8 转炉炼钢计算机控制 .....</b>	<b>178</b>
8.1 转炉炼钢计算机控制概况 .....	178
8.2 转炉炼钢计算机控制系统 .....	180
8.2.1 生产管理计算机 .....	181
8.2.2 过程自动化控制系统 .....	182
8.2.3 基础自动化控制系统 .....	184
8.3 静态控制 .....	187

8.3.1	静态模型 .....	187
8.3.2	静态模型计算 .....	189
8.4	动态控制 .....	192
8.4.1	动态控制方法 .....	192
8.4.2	动态控制模型 .....	194
8.4.3	静态模型及控制图 .....	197
8.5	动态控制的信息检测 .....	198
8.5.1	熔池温度测定 .....	198
8.5.2	熔池碳含量测定 .....	198
8.5.3	成渣过程检测 .....	200
8.5.4	喷溅预测 .....	202
8.6	转炉吹炼控制专家系统 .....	205
8.6.1	新日铁堺厂的 LD-ES 专家系统 .....	205
8.6.2	日本钢管福山厂的吹炼控制专家系统 .....	206
	思考题 .....	208
<b>9</b>	<b>电弧炉炼钢设备 .....</b>	<b>209</b>
9.1	电弧炉的炉体构造与机械结构 .....	210
9.1.1	电弧炉的炉体构造 .....	210
9.1.2	电炉倾动机构 .....	213
9.1.3	电极升降机构 .....	213
9.1.4	炉顶装料系统 .....	214
9.2	电弧炉炼钢的排烟与除尘 .....	215
9.2.1	排烟方法 .....	215
9.2.2	除尘方法 .....	216
9.3	电弧炉的电气设备 .....	217
9.3.1	电弧炉的主电路 .....	217
9.3.2	电弧炉的电控设备 .....	227
9.3.3	电炉电气特性及供电制度 .....	229
	思考题 .....	233
<b>10</b>	<b>电弧炉炼钢冶炼工艺 .....</b>	<b>234</b>
10.1	配料与装料 .....	234
10.1.1	配料 .....	234
10.1.2	装料 .....	234
10.2	熔化期 .....	237
10.2.1	炉料的熔化过程 .....	237
10.2.2	炉料熔化时的物化反应 .....	238
10.2.3	熔化期工艺操作要点 .....	239

10.2.4 加速炉料熔化的措施 .....	240
10.3 氧化期 .....	241
10.3.1 氧化期的任务 .....	241
10.3.2 脱磷与脱碳 .....	242
10.3.3 氧化期的工艺操作 .....	248
10.3.4 增碳 .....	251
10.3.5 几种情况的处理 .....	251
10.4 还原期 .....	252
10.4.1 还原期的任务 .....	252
10.4.2 钢液的脱氧 .....	252
10.4.3 钢液的脱硫 .....	254
10.4.4 温度控制 .....	255
10.4.5 炉渣控制 .....	256
10.4.6 钢液的合金化 .....	258
10.4.7 出钢操作 .....	262
思考题 .....	263
<b>11 现代电弧炉炼钢技术 .....</b>	<b>264</b>
11.1 概述 .....	264
11.2 超高功率电弧炉的主要技术特征 .....	264
11.2.1 较高的功率水平 .....	264
11.2.2 高的变压器利用率 .....	265
11.2.3 优化的电弧炉炼钢工艺及其流程 .....	266
11.2.4 抑制电弧炉产生的公害 .....	266
11.3 超高功率电弧炉相关名词术语与技术 .....	267
11.3.1 相关名词术语 .....	267
11.3.2 超高功率电弧炉相关技术 .....	268
11.4 废钢预热节能技术 .....	278
11.4.1 废钢预热的发展过程 .....	278
11.4.2 双壳电弧炉 .....	278
11.4.3 竖密式电弧炉 .....	279
11.4.4 Consteel 炉 .....	280
11.5 直流电弧炉技术 .....	281
11.5.1 直流电弧炉的发展概况 .....	281
11.5.2 直流电弧炉的设备特点 .....	281
11.5.3 直流电弧炉的炼钢工艺特点 .....	288
11.5.4 直流电弧炉的优越性 .....	290
11.6 新型电弧炉 .....	292
11.6.1 高阻抗电弧炉 .....	292

11.6.2	带风口喷吹的电弧炉 .....	292
11.6.3	Comelt 直流电弧炉 .....	293
	思考题 .....	294
<b>12</b>	<b>其他冶炼方法 .....</b>	<b>295</b>
12.1	感应炉冶炼 .....	295
12.1.1	概述 .....	295
12.1.2	感应炉的耐火材料及坩埚打结 .....	295
12.1.3	无芯感应炉的冶炼 .....	296
12.2	电渣重熔法 .....	297
12.2.1	概述 .....	297
12.2.2	电渣炉的设备 .....	298
12.2.3	电渣重熔的冶金特点 .....	298
12.2.4	电渣重熔的工艺参数 .....	299
12.2.5	电渣重熔的工艺过程 .....	301
12.3	真空感应炉熔炼法 .....	302
12.3.1	概述 .....	302
12.3.2	真空感应炉的熔炼过程 .....	303
12.3.3	真空感应炉的熔炼特点 .....	304
12.4	真空自耗炉熔炼 .....	304
12.4.1	真空自耗炉的设备 .....	304
12.4.2	真空自耗炉主要工艺参数 .....	304
12.4.3	真空自耗炉的熔炼过程 .....	305
12.5	等离子电弧熔炼 .....	305
12.5.1	等离子弧和等离子枪 .....	306
12.5.2	等离子熔炼炉 .....	306
12.5.3	等离子感应炉 .....	306
12.5.4	等离子电弧重熔炉 .....	307
	思考题 .....	307
	参考文献 .....	308

# 1 概 论

## 1.1 炼钢的发展过程

钢与生铁的区别首先体现在碳的含量上,理论上一般把碳含量小于2.11%的铁碳合金称为钢,它的熔点为1450~1500℃;而生铁的熔点为1100~1200℃。在钢中,碳元素和铁元素形成 $\text{Fe}_3\text{C}$ 固溶体,随着碳含量的增加,其强度、硬度增加,而塑性和冲击韧性降低。由于钢具有很好的物理化学性能与力学性能,可以进行拉、压、轧、冲、拔等深加工,所以用途十分广泛,而且用途不同对钢的性能要求也不同,从而对钢的品种也提出了不同的要求。钢铁材料是人类社会主要使用的结构材料,也是产量最大、应用最广泛的金属材料,在经济发展中发挥着举足轻重的作用。石油、化工、航天航空、交通运输、农业、国防等许多重要的领域均需要各种类型的大量钢材,人们日常生活更离不开钢。尽管近年来钢铁面临着陶瓷材料、高分子材料、有色金属材料(如铝)等的竞争,但由于其在矿石储量、生产成本、回收再利用、综合性能等方面所具有的明显优势,在可以预见的将来,钢铁在各类材料中所占据的重要地位仍不会改变。

炼钢学是研究将高炉铁水(生铁)、直接还原铁(DRI)、热压块铁(HBI)或废钢(铁)加热、熔化,通过化学反应去除铁液中的有害杂质元素,配加合金并浇注成半成品(铸坯或钢锭)的工程科学。最早的液态钢生产方法是1740年出现的坩埚法,它是将生铁和废铁装入由石墨和黏土制成的坩埚内,用火焰加热熔化炉料,之后将熔化的炉料浇注成钢锭。但此法几乎无杂质元素的氧化反应,不能去除钢中的有害杂质。

1856年,英国人亨利·贝塞麦(H. Bessemer)发明了酸性空气底吹转炉炼钢法,也称为贝塞麦法,第一次解决了用铁水直接冶炼钢水的难题,奠定了近代炼钢工艺方法的基础,从而使钢的质量得到提高,产量提高了一大步,成为当时主要的炼钢方法。但是,贝塞麦工艺采用的是酸性炉衬,不能造碱性炉渣,因而不能进行脱磷和脱硫,目前该方法已被淘汰。

1865年,德国人马丁(Martin)利用蓄热室原理发明了以铁水、废钢为原料的酸性平炉炼钢法,即马丁炉法。1880年,出现了第一座碱性平炉。由于其成本低、炉容大、钢水质量优于转炉、能解决废钢问题、原料的适应性强,平炉炼钢法一时间成为世界上主要的炼钢法。

1878年,英国人托马斯(S. G. Thomas)发明了碱性炉衬的底吹转炉炼钢法,即托马斯法。该方法是在吹炼过程中加入石灰造碱性渣,从而解决了高磷铁水的脱磷问题。此法对于当时西欧的一些国家特别适用,因为西欧的矿石普遍磷含量高,直到20世纪70年代末,托马斯炼钢法仍被法国、卢森堡、比利时等国的一些钢铁厂所采用。但托马斯法的缺点是炉子寿命低,钢水中氮的含量高。

1899年,出现了完全以废钢为原料的电弧炉炼钢法,解决了充分利用废钢炼钢的问题。此炼钢法自问世以来一直在不断发展,是当前主要的炼钢法之一,由电炉冶炼的钢目前占世界总产量的30%~40%。

20世纪40年代,大型空气分离机出现,人们开始提供大量廉价的氧气,使氧气制造成本大大降低,这样为氧气在炼钢中的应用奠定了基础。瑞典人罗伯特·杜勒(R. Durrer)首先进行了氧气转炉炼钢的试验,并获得成功。1952年,奥地利的林茨城(Linz)和多纳维兹城(Donawitz)先

后建成了 30 t 的氧气顶吹转炉车间并投入生产,所以此法也称为 LD 法;美国称为 BOF(Basic Oxygen Furnace)或 BOP(Basic Oxygen Process)法。由于氧气转炉炼钢法的生产率高、成本低、钢水质量高、热效率高,还可使用近 30% 的废钢,便于自动化操作,一经问世就在世界范围内得到迅速推广和发展,在 20 世纪 70 年代,氧气转炉炼钢法已取代平炉法成为主要的炼钢方法。目前,世界上用平炉炼钢的国家相当少,我国已经没有平炉。可以说,氧气顶吹转炉炼钢是近 50 年钢铁领域的重大事件之一。1964 年 12 月,我国第一座 30 t 氧气顶吹转炉在首钢投产。

在氧气顶吹转炉炼钢迅速发展的同时,德、美、法等国发明成功了氧气底吹转炉炼钢法。该方法通过喷吹甲烷、重油、柴油等对喷口进行冷却,使纯氧能从炉底吹入熔池而不致损坏炉底。1965 年,加拿大液化公司成功研制双管氧气喷嘴。1967 年,联邦德国马克西米利安钢铁公司引进此技术并成功开发了底吹氧转炉炼钢法,即 OBM(Oxygen Bottom Maxhuette)法。美国钢铁公司 1971 年引进 OBM 法,1972 年建设了 3 座 200 t 底吹转炉,命名为 Q-BOP(Quiet BOP)。

在顶吹氧气转炉炼钢发展的同时,1978 ~ 1979 年成功开发了转炉顶底复合吹炼工艺,即在转炉上方供给氧气(顶吹氧),从转炉底部供给惰性气体或氧气,它不仅提高了钢的质量,降低了消耗和吨钢成本,而且更适合供给连铸优质钢水。

值得一提的是,我国首先于 1972 ~ 1973 年,在沈阳第一炼钢厂成功开发了全氧侧吹转炉炼钢工艺,并在上海、唐山等地的企业推广应用;但后来受到了转炉复吹工艺的挑战,因而未能发展起来。

自 20 世纪开始发展电弧炉炼钢以来,它就长期作为熔炼特殊钢和高合金钢的方法。由于市场需求量大和质量要求高,采用超高功率电弧炉和炉外精炼技术已成为国内外广泛使用的冶金生产方法。在电力充裕的国家,电弧炉常作为熔化和生产普通钢的设备。

冶金生产的发展过程是取决于社会需要和当时的生产条件的,要求产量和质量越来越高、成本越来越低,每一个冶金工作者都应学习并掌握冶金生产规律,用已取得的生产经验和冶金理论去指导冶金生产。生铁中杂质的氧化、钢液中的脱氧和夹杂物的去除,依然是冶金生产中的主要问题,不仅要从热力学的观点去分析应用,而且也要从动力学角度研究并促进反应进行。总之,炼钢技术经过 200 多年的发展,技术水平、自动化程度得到了很大的提高,21 世纪炼钢技术将面临更大的挑战,相信会有新技术不断地涌现。

## 1.2 我国钢铁工业的发展

### 1.2.1 钢产量的迅速增加

钢铁素有“工业粮食”之称,在国民经济中具有重要地位。我国很早就掌握了铁的冶炼技术,东汉时就出现了冶炼和锻造技术,南北朝时期就掌握了灌钢法,曾在世界范围内处于领先地位。但旧中国钢铁工业非常落后,产量很低,从 1890 年建设汉阳钢铁厂以来至 1948 年的半个世纪中,钢累计产量仅 200 万吨,1949 年的产钢量只有 15.8 万吨,居世界第 26 位,不到当时世界钢铁年总产量 1.6 亿吨的 0.1%。

新中国成立后,特别是改革开放以来,我国的钢铁工业得到了迅速发展。1978 年,我国钢产量达到 3178 万吨,居世界第 5 位,占当年世界钢铁产量的 4.42%;1980 年,钢产量达到 3712 万吨;1990 年,达到 6500 万吨;1996 年,首次突破 1 亿吨大关,成为世界第一产钢大国;2003 年,产量突破 2 亿吨,达到 2.2 亿吨,占世界产量的 1/4,是美国、日本、韩国三国产量之和;2005 年,突破 3 亿吨,2006 年突破 4 亿吨,2008 年突破 5 亿吨。中国钢产量突破 1 亿吨,如果从清末建立现代钢铁企业开始计算,用了一百多年时间,如果从建国后算起也用了 47 年;从 1 亿吨到 2 亿吨,用了 7 年时间;从 2 亿吨到 3 亿吨,只用了 2 年时间;而从 3 亿吨到 4 亿吨,则只用了 1 年的时间;

从4亿吨到5亿吨,又用了2年的时间。我国近五年来钢产量增幅均在7%以上。图1-1所示表明了我国钢产量的变化情况。

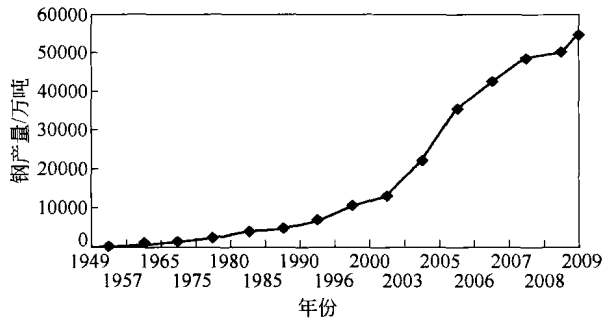


图 1-1 我国钢产量的变化情况

图 1-2 所示表明了我国钢产量在世界中的排名变化情况,从中也可以看出我国钢铁工业的发展状况。可以这样讲,我国的钢铁工业对世界产生了重要影响,我国不仅是产钢大国,而且已经进入了钢铁强国的行列。除钢产量外,我国钢铁工业在装备、工艺技术水平和钢材品种质量等方面也取得了显著的进步,已接近或达到国际先进水平。

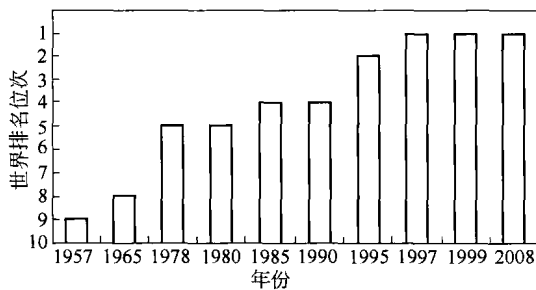


图 1-2 我国钢产量居世界位次

### 1.2.2 现代化炼钢生产流程的建立

目前,国内绝大多数炼钢厂均已实现了炼钢生产现代化,建立起包括铁水脱硫预处理—转炉复合吹炼—炉外精炼—连铸的现代化转炉炼钢生产流程和以大型超高功率电炉为主体、实现炼钢—精炼—连铸—连轧“四位一体”的短流程生产线,淘汰了平炉、模铸、化铁炼钢等落后的生产工艺。2005年,我国大、中型钢铁企业连铸比已达到95.68%;转炉平均炉龄达到5647炉,最高炉龄超过30000炉;炉外精炼比接近30%。现代化炼钢生产流程的确立,为我国迅速提高炼钢生产效率、改善产品质量和扩大生产品种发挥了极为重要和关键的作用。

### 1.2.3 钢纯净度的大幅度提高

现代化炼钢生产流程的建立为我国大幅度提高钢材质量,特别是提高钢的纯净度做出了巨大的贡献,使我国钢水的纯净度,即钢中杂质元素质量分数的总量 $\Sigma(w(S) + w(P) + w(T.O) + w(N) + w(H))$ 从传统流程的 $(550 \sim 600) \times 10^{-6}$ 直接跨越到现代化钢铁流程的 $(200 \sim 250) \times 10^{-6}$ ,宝钢、武钢等先进钢铁企业已经达到小于 $100 \times 10^{-6}$ 的国际先进水平。表1-1给出典型高附加值钢的纯净度要求及国内外水平的对比数据。从表1-1可以看出,国内生产钢的纯净度水

平已接近国际先进水平,但和国际领先水平尚有较大差距。进一步提高钢水的纯净度,稳定和扩大超纯净钢的生产,是今后国内炼钢技术中亟待解决的重大技术问题。

表 1-1 典型高附加值钢的纯净度要求及国内外水平的对比

标准	线材		长型材			板材		管线钢		电工钢	
	帘线钢		轴承钢	齿轮钢	弹簧钢	IF 钢		X70		无取向	
	$w(B)/10^{-6}$	$d_s/\mu\text{m}$	$w(B)/10^{-6}$	$w(B)/10^{-6}$	$w(B)/10^{-6}$	$w(B)/10^{-6}$	$d_s/\mu\text{m}$	$w(B)/10^{-6}$	$d_s/\mu\text{m}$	$w(B)/10^{-6}$	$d_s/\mu\text{m}$
纯净度标准	T. O $\leq 30$ $Al_s \leq 4$	$\leq 10$	T. O $\leq 10$	T. O $\leq 20$	T. O $\leq 15$	C $\leq 20$ N $\leq 25$ S $\leq 50$ P $\leq 100$	$\leq 20$	S $\leq 20$ P $\leq 100$	$\leq 10$	C $\leq 20$ S $\leq 20$	$\leq 20$
国际领先		$\leq 5$	T. O $\leq 6$	T. O $\leq 10$	T. O $\leq 8$	夹杂总量 $\Sigma \leq 80$		S $\leq 5$		(C+S) $\leq 20$	
国际先进		$\leq 10$	T. O $\leq 8$	T. O $\leq 15$	T. O $\leq 15$	夹杂总量 $\Sigma \leq 100$		S $\leq 10$		(C+S) $\leq 30$	
国内先进		$\leq 20$	T. O $\leq 12$	T. O $\leq 20$	T. O $\leq 20$	(C+N) $\leq 100$		S $\leq 20$		(C+S) $\leq 50$	

注: $d_s$  为夹杂的直径; $w(B)$  为杂质 B 的质量分数, B 可以是 S、P、T. O、C、N 等; T. O 为钢中全氧含量; $Al_s$  为酸溶铝含量。

随着我国钢的纯净度大幅度提高,国内钢材的生产品种正在逐年增加,表 1-2 给出我国典型高品质钢种的增长率。从表 1-2 可以看出,2000~2005 年期间,国内钢铁厂生产的高品质、高附加值钢种(如重轨钢、大型工程结构钢、冷轧薄板、电工钢、无缝钢管等)增长率在 96.6%~287.6% 间波动,平均增长率为 174.4%,说明国内钢铁厂已逐步从以规模为主的发展模式走向以产品效益为主的发展模式。

表 1-2 2000~2005 年典型高品质钢种的增长率

钢种	2000 年产量/万吨	2005 年产量/万吨	增长率/%
铁道用钢	158	311	96.6
大型型钢	360	726	101.4
特厚板	76	219	187.6
中厚板	1668	6466	287.6
冷轧薄板	495	1527	203.8
镀层板	328	796	142.8
冷轧电工钢板	64	212	228.7
无缝钢管	415	1023	146.6

## 1.2.4 炼钢技术的重大创新

在转炉炼钢方面,开发了一系列的先进技术,例如,溅渣护炉与长寿复吹转炉工艺技术,使大型转炉平均炉龄达到 10181.5 炉,中型转炉平均炉龄达到 15298.2 炉,地方骨干小型转炉钢厂的平均炉龄也已达到 10316 炉;转炉高效吹炼工艺技术,使国内小型转炉的作业率和利用系数均高于大、中型转炉,平均冶炼周期为 24.7 min,最短的可达到 23 min,接近日本钢铁厂采用“三脱”铁水少渣冶炼转炉的生产效率。

在电弧炉炼钢方面,也开发了电弧炉兑铁水高效冶炼工艺、强化用氧、废钢预热及超高功率化、氧燃助熔等先进技术,使我国电弧炉的冶炼时间、电极消耗、电耗等指标达到了国际先进水平。电弧炉冶炼功能也由传统的熔化、脱碳、脱磷、脱硫、脱氧等简化为熔化和脱碳升温,冶炼时



间缩短至 40 ~ 60 min。

我国钢铁工业对国民经济的快速发展起到了重要的支持作用,但目前整体生产效率、能耗、高级产品性能、环境保护、重要技术研发能力等方面与发达国家相比还存在差距。今后,我国钢铁工业还将会有更大的发展,而随着钢铁工业的不断发展,我国也将会成为世界钢铁科学研究和教育的中心之一。

21 世纪初,炼钢生产技术的发展方向是实现批量、低成本、稳定生产超纯净钢。同时,为了加速 21 世纪初先进钢铁厂的建设,应加大国内自主创新、原始创新和集成创新的力度,使我国炼钢生产工艺技术达到国际领先水平。为实现这一目标,要求在 20 世纪现代化炼钢的基础上研究和开发 21 世纪初更先进的炼钢技术,其主要内容应包括:

(1) 进一步优化国内炼钢生产工艺及装备技术,快速实现设备大型化,加快淘汰小转炉、小电炉等落后设备;

(2) 在设备大型化的基础上,研究开发高效化生产工艺技术,推广采用转炉铁水“三脱”预处理工艺、少渣转炉高速吹炼技术、高速连铸技术,使炼钢生产效率大幅度提高;

(3) 研究开发转炉全自动吹炼、连铸机无人操作等先进的控制技术,实现生产过程自动化、工艺制度智能化和生产调度信息化;

(4) 积极推广转炉负能炼钢、干法除尘、转炉集成处理与溅渣、留渣操作等先进工艺,实现炼钢厂“零”排放,进行无公害化生产。

### 1.3 国外钢铁工业的发展

据报道,全世界 2008 年产钢 13.297 亿吨。到目前为止,氧气转炉仍然是炼钢的主要方法,其中转炉钢及电炉钢产量占 90%。

近 20 余年,全世界电炉炼钢取得了突飞猛进的发展。20 世纪 80 年代中期,欧洲各国、美国、日本、韩国、马来西亚、中国等国家纷纷建设超高功率电炉炼钢—炉外精炼—连铸—连轧四位一体的短流程生产线。近年来,电炉钢比例与日俱增,电弧炉炼钢工艺发展很快,在美国、意大利等国,电弧炉炼钢产量已超过氧气转炉炼钢产量。21 世纪电炉炼钢工艺的基本指导思想是高效、节能、低消耗、环保。为了达到这一目标,现代电炉发展了诸多先进技术,如电炉的超高功率化、强化供氧、废钢预热、人工智能优化供电等技术,大大提高了电炉的生产率,降低了电耗和电极消耗,节省了能源,降低了生产成本,改善了熔池的搅拌性能和冶金性能。

当前,转炉炼钢仍然是世界炼钢的主要方法,最近 20 年来,转炉炼钢技术的进步主要是采用了转炉铁水预处理、长寿转炉、长寿复吹、复吹转炉强化冶炼等先进技术,使转炉的炉龄、冶炼时间等指标大大提高。

为了满足市场的需求,要求转炉生产技术进一步发展,重点应解决以下问题:全面推广铁水脱硫预处理工艺,基本实现 100% 铁水脱硫;尽快解决目前转炉回硫较严重的问题,充分发挥铁水预处理的效果;在大、中型转炉上推广高效复吹转炉冶炼技术;进一步提高转炉的生产能力;开发和推广转炉全自动吹炼技术及转炉冶炼高合金钢生产工艺。

### 思考题

1-1 简述炼钢的发展过程。

1-2 我国钢铁工业取得了哪些进步?

1-3 21 世纪我国要研究和开发的炼钢技术应包括哪些主要内容?