



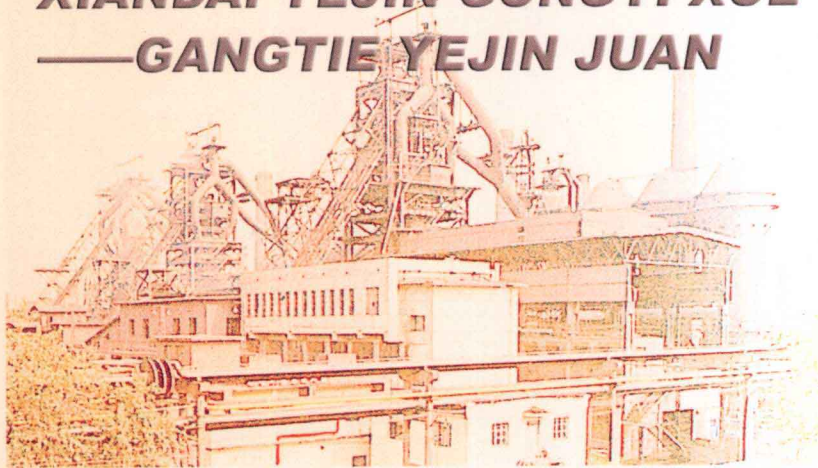
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

现代冶金工艺学

——钢铁冶金卷

朱苗勇 主编

XIANDAI YEJIN GONGYI XUE
——GANGTIE YEJIN JUAN



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

现代冶金工艺学

——钢铁冶金卷

朱苗勇 主 编
魏 国 杜 钢 阎立懿 副主编

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2011

内 容 提 要

本书为冶金工程专业主干课程“冶金学”钢铁冶金部分的配套教材,系统地阐述了钢铁冶金过程的基本原理与工艺,介绍了炼铁、炼钢、连铸的新工艺、新设备和新技术。全书分为炼铁和炼钢两篇,炼铁篇包括现代高炉炼铁工艺、高炉炼铁原料、高炉炼铁基础理论、高炉炉料和煤气运动、高炉操作制度与强化冶炼、非高炉炼铁等内容;炼钢篇包括炼钢的基础理论、炼钢用原材料和耐火材料、氧气转炉炼钢法、电炉炼钢、炉外处理、连续铸钢等内容。

本书可作为高等院校冶金工程专业的教学用书,也可供从事钢铁生产的技术人员、管理人员以及相关专业的学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代冶金工艺学. 钢铁冶金卷/朱苗勇主编. —北京:
冶金工业出版社, 2011. 6

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5024-5698-6

I. ①现… II. ①朱… III. ①钢铁冶金—高等学校—教材
IV. ①TF

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第179834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 yjchs@cnmip.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 王永欣 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-5698-6

北京鑫正大印刷有限公司印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2011年6月第1版, 2011年6月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 26.75印张; 716千字; 414页

49.00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(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

钢铁工业的发展需要大量高素质人才。冶金人才培养教育体系随着冶金学科的不断深入发展，内容不断变新，在半个多世纪的发展过程中，遵循着从宽广到细分，又从细分到综合的科学发展普遍规律，体现了社会需求与专业结构、人才素质之间的相互联系。

新中国成立初期，受到计划经济体制的制约和前苏联高等教育模式的影响，专业人才的培养目标主要是行业培养专业技术人才。在此后的 20 多年里，我国冶金类专业划分很细，冶金科学技术人才被划分在冶金物理化学、炼铁、炼钢、电冶金、特钢、轻金属冶金、重金属冶金、稀有金属冶金、贵金属冶金等多个专业进行培养。在当时的计划经济体制下，从招生到分配均由国家统一安排，培养的学生主要从事对口专业工作。

改革开放以来，随着我国经济建设和科学技术的飞速发展，冶金工程学科迅速发展和完善，各学科之间相互渗透和交叉。国外先进教育模式的影响，也促进了冶金工程学科的改革。从 20 世纪 80 年代末开始，冶金类专业组合为冶金物理化学、钢铁冶金和有色金属冶金三个学科，并与材料学学科、材料成型与加工学科及热能工程学科共同组成了学科群。我国冶金科学技术和人才培养进入了新的发展时期。

20 世纪 90 年代以来，随着我国经济体制从计划经济向市场经济转轨，拓宽专业面向市场势在必行。1998 年，教育部将我国高等学校 20 余个工科类专业整合为冶金工程、金属材料工程、无机非金属材料工程和高分子材料与工程四个一级学科，并提出了综合性的办学方针。冶金工程专业涵盖了冶金物理化学、钢铁冶金和有色金属冶金材料。

作为冶金工程专业的主干课，“冶金学”的内涵已发生了较大的改变。它不仅应包括钢铁冶金学和有色金属冶金的内容，而且教学学时必须适应专业宽口径的变化。因此，很有必要对教学内容进行调整和改革。为此，东北大学组织有关人员进行“冶金学”课程的教学改革与实践，组织了相应的教材编写

工作，分钢铁冶金和有色金属冶金两大部分内容。2005年，由冶金工业出版社出版了《现代冶金学（钢铁冶金卷）》。考虑到“冶金学”课程的工艺性特点以及这些年冶金工业及相关行业的迅速发展，教材建设也应适应课程特点和行业发展的要求，为此，东北大学组织编写了《现代冶金工艺学》（分钢铁冶金卷和有色冶金卷），并被教育部列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材。从钢铁冶金工艺学角度来看，本书内容比2005年版的教材更丰富、更全面、更有深度。

本书由东北大学材料与冶金学院的教师编写。各章的执笔人为：炼铁篇，第1章、第6章——魏国、杜钢，第2~4章——魏国，第5章——杜钢；炼钢篇，第7~10章、第13章——朱苗勇，第11章——阎立懿，第12章——战东平、郑淑国。参加编写工作的还有付贵勤、祭程、蔡兆镇、王卫领、程中福等。在编写过程中，杜鹤桂教授、沈峰满教授、萧泽强教授、戴云阁教授提出了许多宝贵意见并参与审核工作。全书由朱苗勇统编、定稿。

东北大学教务处对本书的编写和出版给予了大力支持，在此表示由衷的感谢。

由于编者水平所限，书中不足之处，诚望读者批评指正。

编 者
2011年5月
于东北大学

目 录

绪 论	1
-----------	---

炼 铁 篇

1 现代高炉炼铁工艺	7
1.1 高炉炼铁生产流程	7
1.2 高炉本体及主要构成	8
1.2.1 高炉内衬	9
1.2.2 高炉冷却设备	9
1.2.3 高炉附属系统	11
1.2.4 高炉区域划分	14
1.3 高炉冶炼产品	14
1.3.1 生铁	15
1.3.2 高炉渣	16
1.3.3 高炉煤气	16
1.4 高炉技术经济指标	16
思考题	19
2 高炉炼铁原料	20
2.1 铁矿石和燃料	20
2.1.1 铁矿石	20
2.1.2 熔剂	26
2.1.3 高炉燃料	27
2.2 烧结矿	30
2.2.1 烧结矿质量指标	30
2.2.2 烧结过程及主要反应	32
2.2.3 烧结矿固结机理	37
2.2.4 强化烧结过程分析	42
2.2.5 烧结新工艺	45
2.3 球团矿	46
2.3.1 球团矿质量指标	47
2.3.2 矿粉造球过程	48

2.4 其他固结方法	54
2.4.1 压力造块法	55
2.4.2 黏结剂固结法	55
2.4.3 其他方法	56
思考题	56
3 高炉炼铁基础理论	57
3.1 高炉内还原过程	57
3.1.1 铁氧化物的还原	57
3.1.2 其他元素的还原	61
3.1.3 直接还原与间接还原	65
3.1.4 铁矿还原动力学	67
3.2 渗碳和生铁的形成	69
3.3 造渣与脱硫	69
3.3.1 造渣的目的和作用	69
3.3.2 高炉造渣过程	70
3.3.3 高炉渣对冶炼的影响	71
3.3.4 高炉脱硫	76
思考题	78
4 高炉炉料和煤气运动	79
4.1 炉缸反应	79
4.1.1 炉缸燃烧反应机理	79
4.1.2 炉缸燃烧反应过程	80
4.1.3 燃烧带对高炉冶炼过程的影响	82
4.1.4 下部调剂原理	83
4.1.5 风口区理论燃烧温度	84
4.2 煤气运动	85
4.2.1 煤气上升过程中的变化	85
4.2.2 高炉热交换	87
4.3 炉料运动	88
4.3.1 炉料下降	88
4.3.2 高炉料柱压差	89
4.3.3 改善料柱透气性	89
4.3.4 改善煤气流分布	92
4.3.5 上部调剂原理	93
4.4 高炉能量利用分析	95
4.4.1 高炉能量利用计算	96
4.4.2 高炉操作线图及其应用	98

思考题	103
5 高炉操作制度与强化冶炼	104
5.1 高炉操作制度	104
5.1.1 热制度	104
5.1.2 造渣制度	105
5.1.3 装料制度	105
5.1.4 送风制度	105
5.1.5 冷却制度	107
5.2 炉况判断与处理	107
5.2.1 正常炉况	107
5.2.2 异常炉况	108
5.2.3 失常炉况	108
5.2.4 开炉、休风、停炉	109
5.3 高炉强化冶炼	111
5.3.1 精料	111
5.3.2 高压操作	118
5.3.3 高风温	122
5.3.4 喷吹燃料	124
5.3.5 富氧鼓风操作	127
思考题	129
6 非高炉炼铁	130
6.1 非高炉炼铁概况	130
6.2 直接还原	130
6.2.1 直接还原炼铁法的现状	130
6.2.2 直接还原生产工艺	131
6.3 熔融还原	136
6.3.1 熔融还原炼铁法的现状	136
6.3.2 熔融还原生产工艺	138
思考题	142

炼 钢 篇

7 概述	145
7.1 炼钢的发展历程	145
7.2 我国钢铁工业的状况	146
7.3 炼钢的基本任务	147
7.3.1 钢中的磷	147

7.3.2	钢中的硫	147
7.3.3	钢中的氧	148
7.3.4	钢中的气体	148
7.3.5	钢中的非金属夹杂物	149
7.3.6	钢的成分	154
7.4	钢的性能	154
7.4.1	铁碳相图	154
7.4.2	钢的力学性能	157
7.5	钢(材)的分类及编号	161
7.5.1	钢的分类	161
7.5.2	钢材的分类	163
7.5.3	钢的编号	163
	思考题	165
8	炼钢的基础理论	167
8.1	钢液的物理性质	167
8.1.1	钢液的密度	167
8.1.2	钢的熔点	168
8.1.3	钢液的黏度	169
8.1.4	钢液的表面张力	170
8.1.5	钢的导热能力	171
8.2	熔渣的物理化学性质	172
8.2.1	熔渣的作用、来源、分类与组成	172
8.2.2	熔渣的化学性质	173
8.2.3	熔渣的物理性质	176
8.3	硅、锰的氧化和还原反应	180
8.3.1	硅的氧化和还原	180
8.3.2	锰的氧化和还原	181
8.4	碳氧化反应	181
8.5	钢液的脱磷	184
8.6	钢液的脱硫	187
8.6.1	渣-钢间的脱硫反应	187
8.6.2	气化脱硫	188
8.6.3	脱硫反应动力学	189
8.7	钢液的脱氧	189
8.7.1	脱氧的方式	189
8.7.2	脱氧剂和脱氧能力	190
8.7.3	脱氧反应动力学	191
8.7.4	脱氧合金化	192

8.8 铬、钒、铌、钨的反应	192
8.8.1 铬的氧化与还原	192
8.8.2 钒的氧化	193
8.8.3 铌的氧化	194
8.8.4 钨的氧化	194
8.9 氢、氮的反应	194
8.9.1 铁液中氢、氮的溶解度	194
8.9.2 影响氢和氮在钢中溶解度的因素	195
思考题	196
9 炼钢用原材料和耐火材料	197
9.1 金属料	197
9.1.1 铁水	197
9.1.2 废钢	198
9.1.3 生铁	198
9.1.4 海绵铁	199
9.1.5 铁合金	199
9.2 非金属料	199
9.2.1 造渣剂	199
9.2.2 增碳剂	200
9.3 氧化剂	201
9.4 耐火材料	201
9.4.1 耐火材料的主要性能	201
9.4.2 耐火材料的分类	202
9.4.3 耐火材料的损毁与防治	204
思考题	204
10 氧气转炉炼钢法	205
10.1 顶吹氧气转炉炼钢法	205
10.1.1 一炉钢的吹炼过程和熔池内元素的氧化规律	206
10.1.2 熔池内炉渣成分和温度的变化规律	210
10.1.3 顶吹氧气转炉炼钢工艺	211
10.2 底吹氧气转炉炼钢法	224
10.2.1 底吹氧气转炉的结构特点	225
10.2.2 底吹氧气转炉的炉内反应	225
10.3 侧吹氧气转炉炼钢法	229
10.3.1 全氧侧吹转炉炼钢法冶金过程的基本规律	229
10.3.2 全氧侧吹转炉炼钢法的特点与优势	232
10.4 顶底复合吹炼转炉炼钢法	234

10.4.1	顶底复合吹炼转炉炼钢法的类型	234
10.4.2	底部供气元件的类型及特点	234
10.4.3	顶底复合吹炼转炉内的反应	235
10.4.4	顶底复合吹炼转炉少渣冶炼	237
10.5	氧气转炉炼钢的自动控制技术	237
10.5.1	转炉炼钢自动控制过程	238
10.5.2	转炉自动控制系统结构	238
10.5.3	转炉炼钢数学模型	238
10.5.4	转炉炼钢终点控制模型	238
	思考题	241
11	电炉炼钢	242
11.1	电炉炼钢的历史及其发展	242
11.1.1	电炉炼钢的发展历史	242
11.1.2	电炉炼钢的发展前景	243
11.2	电炉炼钢设备	245
11.2.1	电炉的大小与分类	245
11.2.2	电炉的机械结构	246
11.2.3	电炉炼钢的排烟与除尘	248
11.2.4	电炉的电气设备	249
11.2.5	电炉的电气特性及供电制度	251
11.3	电炉炼钢冶炼工艺	256
11.3.1	电炉冶炼操作方法	256
11.3.2	传统电炉炼钢冶炼工艺	256
11.3.3	现代电炉炼钢冶炼工艺	261
11.3.4	钢液的合金化	263
11.4	现代电炉炼钢技术	265
11.4.1	超高功率电炉的发展及其特征	265
11.4.2	超高功率电炉相关技术	268
11.4.3	废钢预热节能技术	274
11.4.4	直流电弧炉技术	277
11.4.5	高阻抗电弧炉	281
	思考题	282
12	炉外处理	283
12.1	炉外处理技术概述	283
12.1.1	铁水预处理技术发展概况	283
12.1.2	钢水炉外精炼技术发展概况	285
12.2	炉外精炼的基本手段	287

12.2.1	搅拌	287
12.2.2	真空	292
12.2.3	添加精炼剂	294
12.2.4	加热	295
12.3	铁水预处理技术	299
12.3.1	铁水预脱硅	299
12.3.2	铁水预脱硫	301
12.3.3	铁水预脱磷	306
12.3.4	铁水同时脱硫、脱磷	307
12.3.5	铁水预处理提钒	310
12.3.6	铁水预处理提铌	312
12.4	钢水二次精炼方法	312
12.4.1	钢包吹氩技术	313
12.4.2	钢包喷射冶金	316
12.4.3	喂线技术	317
12.4.4	循环真空脱气法	317
12.4.5	真空钢包处理	320
12.4.6	电弧加热的真空精炼炉	320
12.4.7	真空电弧脱气精炼炉	321
12.4.8	不锈钢炉外精炼	321
12.5	炉外精炼发展趋势	326
12.5.1	炉外精炼技术的发展趋势	326
12.5.2	尚待解决的问题	327
	思考题	328
13	连续铸钢	329
13.1	概述	329
13.1.1	连铸技术发展概况	329
13.1.2	连铸的优越性	332
13.1.3	连铸机的基本机型及其特点	332
13.2	连铸机的主要设备	334
13.2.1	连铸机的基本参数	334
13.2.2	钢包	336
13.2.3	中间包	337
13.2.4	结晶器	339
13.2.5	二次冷却系统	344
13.2.6	拉坯矫直装置	347
13.2.7	引锭装置	348
13.2.8	辊缝测量装置	349

13.2.9	铸坯切割装置	350
13.2.10	出坯系统的各种设备	350
13.2.11	连铸车间布置	350
13.3	钢的凝固及连铸坯的凝固结构	351
13.3.1	钢凝固结晶的特点	351
13.3.2	成分过冷	352
13.3.3	化学成分偏析	353
13.3.4	凝固收缩	354
13.3.5	连铸坯的凝固传热和结构特点	355
13.3.6	连铸凝固传热过程的数学描述	371
13.3.7	连铸坯凝固冷却过程中的相变和受力	375
13.4	连铸操作工艺	377
13.4.1	连铸钢液的准备	377
13.4.2	浇注前的准备	379
13.4.3	浇钢操作	381
13.4.4	浇注温度控制	383
13.4.5	拉速的控制	384
13.4.6	冷却水控制	384
13.4.7	保护浇注	387
13.4.8	保护渣	387
13.4.9	中间包覆盖剂	390
13.5	连铸坯质量	391
13.5.1	连铸坯的洁净度	391
13.5.2	连铸坯表面质量	392
13.5.3	连铸坯内部质量	399
13.5.4	连铸坯形状缺陷	402
13.6	薄板坯连铸连轧	403
13.6.1	薄板坯连铸工艺的的优点	404
13.6.2	薄板坯连铸连轧技术的发展历程	405
13.6.3	薄板坯连铸连轧的关键技术	405
13.6.4	典型的薄板坯连铸连轧工艺	408
13.6.5	我国的薄板坯连铸连轧技术	410
	思考题	412
	参考文献	413

绪 论

钢铁冶金是根据物理化学、热力学、动力学、传输原理和反应工程以及金属学等基本原理解，从矿石中提取金属，经精炼，再用各种加工方法制成具有一定性能的钢铁材料的过程。按工艺流程角度，可分为炼铁工艺学和炼钢工艺学两大领域。

炼铁工艺是以含铁矿石为主要原料，以焦炭、煤为主要能源，生产炼钢主原料——生铁（或铁水），并生产部分铸造生铁和铁合金的过程。

炼钢工艺是将铁水、直接还原铁或废钢（铁）加热、熔化，通过化学反应去除金属液中的有害杂质元素，配加合金并浇注成半成品——铸坯的过程。

公元前 14 世纪，人类开始使用铁器，这是人类文明的一大进步。钢铁冶金作为一门生产技术，最早起源于黑海南岸的山区，但在最初的一千多年内冶金技术发展十分缓慢，直至 14 ~ 16 世纪欧洲才出现水力鼓风的炼铁炉，生产铸铁，但基本上是经验式的实践，技术水平较低，生产规模不大。16 世纪，欧洲的冶金著作《火法技艺》和《论冶金》问世，对冶金技术发展起到了承前启后的作用。明末（1637 年）宋应星所著的《天工开物》中，较详细地记载了我国当时的冶金技术。可以说，18 世纪末冶金学才从自然科学中汲取营养，逐渐发育成一门独立的近代学科。

虽然人类使用钢铁的历史源远流长，但在 18 世纪中叶之前，人们对钢铁冶金尚没有系统的理性认识。1700 ~ 1890 年间，一系列重要的技术发明创造使炼铁工业得到蓬勃发展。1709 年，达比（A. Darbg）用焦炭代替木炭炼铁获得成功，使冶金企业摆脱了对木炭资源（森林）的依赖；1828 年，尼尔森（J. B. Neilson）采用热风，使炼铁焦比降低，生产效率成倍提高，这些工作为钢铁冶金深入研究创造了条件。18 世纪下半叶，伯格日曼（T. Bergman）在对钢的研究中做出结论：“钢是铁与碳交互作用的产物”，使人们对钢铁生产有了较正确的理解；此外，还提到氧化及还原是冶金的化学基础。在此基础上，伴随着近代自然科学理论和实验方法的产生和发展，逐步形成钢铁冶金学科。特别是在冶金热力学等理论指导下，人们逐渐掌握钢铁冶炼的内在规律。20 世纪下半叶以来，计算机的发展对钢铁产业产生了深刻的影响：一是计算机的应用使自动化技术与钢铁工艺紧密结合；二是电子器材对材料性能提出了新的要求，使钢铁冶金学发展成为材料科学的一个主要组成部分。应该说近几十年来，机械、电子、自动化、计算机、材料等相关基础科学和理论发展为钢铁工业提供了先进的技术手段，加速了生产的现代化，同时也促进并完善了钢铁冶金学科的发展，开始了钢铁冶金的辉煌年代。

钢铁冶炼中铁元素主要来源于铁矿石。从铁矿石中提取铁元素有高炉炼铁、直接还原和熔融还原等方式，产品有液态铁水和固态金属铁。高炉炼铁仍是炼铁工艺的主流，原因在于高炉炼铁技术较为成熟，单体设备生产能力大，消耗低，铁水质量较好；不足的是必须用高质量焦炭。高炉采用喷煤技术不仅降低了焦比，而且由于可少用焦炭，缩小了焦炭生产规模，减少了环境污染，相应地增强了高炉炼铁工艺的生命力。

20 世纪 50 年代，高炉冶炼提出以原料为基础，采用大风、高温等技术操作方针，使炼铁技术有了新的进步。1959 年，我国太钢、本钢高炉突破中等冶炼强度的制约，把冶炼强度提高到 $1.1 \sim 1.3t/(m^3 \cdot d)$ ，开创了世界高冶炼强度的先例，并在此基础上总结出高炉强化理论

(吹透强化, 上、下部调节剂), 促进了高炉炼铁学的发展。

20 世纪 70 年代以来, 高炉炼铁技术向着大型化、高产、优质、低耗、长寿、清洁的方向发展, 各项技术经济指标有明显提高, 大型高炉平均利用系数达 $2.0 \sim 2.2t/(m^3 \cdot d)$, 有的大型高炉达到 $2.4t/(m^3 \cdot d)$ 以上; 入炉综合焦比为 $510 \sim 540kg/t$, 个别高炉降至 $480kg/t$ 以下, 达到国际先进水平。

高炉大型化是现代钢铁工业发展的重要标志之一, 为了扩大生产规模, 提高质量, 降低消耗, 提高劳动生产力, 高炉必须大型化。目前我国还存在不少小高炉, 淘汰落后中、小高炉, 逐步实行大型化是高炉炼铁的发展趋势。

将生铁精炼成熟铁和钢的方法经历了许多变化。古代用生铁进行氧化精炼的方法称为炒熟铁或炒钢, 把生铁、矿石和燃料共同放在简单的炉灶中, 鼓风使生铁熔化成小滴, 在落下时与矿石或空气中的氧起作用, 同时工匠用力搅拌, 使生铁中的碳充分氧化去除, 成为可锻造的熟铁。由于此法是在固态或半固态下冶炼, 劳动强度大, 不可能发展成大规模的生产, 得到的产品质量也很差。

现代炼钢法始于 1856 年由英国人亨利·贝塞麦 (H. Bessemer) 发明的酸性底吹转炉炼钢法, 该方法首次解决了大规模生产液态钢的问题, 奠定了近代炼钢工艺方法的基础。由于空气与铁水直接作用, 贝塞麦炼钢方法具有较高的冶炼速度, 成为当时主要的炼钢方法。但是, 贝塞麦工艺采用酸性炉衬, 不能造碱性炉渣, 因而不能进行脱磷和脱硫。1879 年, 英国人托马斯 (S. G. Thomas) 发明了碱性底吹转炉炼钢法, 成功地解决了酸性转炉不能冶炼高磷生铁的问题。由于西欧许多铁矿为高磷铁矿, 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。几乎与贝塞麦炼钢工艺开发成功同时, 1856 年, 平炉炼钢方法 (称为 Siemens-Martin 法) 也发明成功。最早的平炉也是酸性炉衬, 随后, 碱性平炉炼钢方法也很快开发成功。当时, 平炉炼钢操作和控制较转炉炼钢平稳, 能适用于各种原料条件, 生铁和废钢的比例可以在很宽的范围内变化。1899 年, 电弧炉炼钢方法发明成功。至 20 世纪 50 年代氧气转炉炼钢发明前, 平炉是世界上最主要的炼钢方法。

第二次世界大战结束后, 20 世纪 50 年代, 世界钢铁工业进入了快速发展时期, 这一期间开发成功的氧气顶吹转炉炼钢技术和钢水连续浇注技术对随后的钢铁工业发展起到了非常重要的推动作用。1952 年, 奥地利发明氧气顶吹转炉炼钢方法, 由于具有反应速度快、热效率高、钢质量好、品种多等优点, 迅速被日本、西欧采用。20 世纪 70 年代, 氧气转炉取代平炉成为主要的炼钢方法。在氧气顶吹转炉炼钢迅速发展的同时, 法国、德国、美国等国家发明成功氧气底吹转炉炼钢方法, 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。我国也在此期间发明了通过炉侧吹入氧气的全氧侧吹转炉炼钢法, 并在国内得到了推广应用。20 世纪 80 年代中后期, 西欧、日本、美国等相继开发了氧气顶底复吹转炉炼钢方法, 氧气由顶部氧枪供入, 同时由炉底喷口吹入氩、氮、氧等气体。氧气顶底复吹转炉炼钢同时具备顶吹转炉炼钢和底吹转炉炼钢的优点, 目前世界上较大容量的炼钢转炉多数采用了氧气顶底复吹转炉炼钢工艺。

最早提出将液态金属连续浇注成形的设想可追溯到 19 世纪 40 年代, 美国的塞勒斯 (G. E. Sellers) 于 1840 年, 莱恩 (J. Lainy) 于 1843 年, 英国的贝塞麦 (H. Bessemer) 于 1846 年提出了各种连铸有色金属的方法。1913 年, 瑞典人皮尔逊 (A. H. Pehrson) 提出结晶器以可变的频率和振幅做往复振动的想法。1933 年, 德国人容汉斯 (S. Junghans) 真正将这一想法付诸实施。1954 年, 苏格兰人哈利德 (Halliday) 开发的连铸结晶器“负滑脱”振动技术, 真正有效地防止了铸坯与结晶器壁的黏连, 使钢连铸的关键技术得以突破, 从而使此技术步入工业

应用阶段。与模铸相比,连铸在建设投资、节能、钢材收得率、产量和质量等方面具有明显的优势。20世纪60~70年代,日本、西欧钢铁工业开始大规模采用连铸,至20世纪80年代,世界连铸比超过模铸,日本、德国、法国、意大利、韩国等钢铁发达国家连铸技术迅速发展,连铸比均超过了90%。

连续铸钢技术的采用不仅完全改变了旧的铸钢工序,还带动了整个钢铁企业的结构优化,因此被许多冶金学家称为钢铁工业的一次“技术革命”。由于连铸生产节奏快,为了适应连铸,必须缩短炼钢冶炼时间。因此,传统的炼钢工序与功能被进一步分解,铁水预处理、电炉短流程、钢水炉外精炼等重大技术快速发展。

铁水预处理最初主要用于冶炼少数高级钢或高硫铁水辅助脱硫。20世纪80年代,日本的钢铁企业开始大规模采用铁水“三脱”(脱硅、脱磷、脱硫)预处理,在高炉出铁沟喷吹氧化铁和CaO进行脱硅,在铁水包或混铁车内喷粉进行脱硫和脱磷处理。采用铁水“三脱”预处理和钢水炉外精炼后,转炉炼钢功能被简化为“钢水的脱碳和提温容器”,转炉吹炼时间减少至9~12min。此外,炼钢产生的炉渣量显著减少,减轻了炼钢的环境负荷。

传统电弧炉炼钢时间长达4~6h,采用连铸后,必须缩短电弧炉冶炼时间以保证与连铸节奏相匹配。现代化的电弧炉炼钢采用超高功率、余热预热废钢、氧-燃助熔以及二次精炼等技术,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40~50min。与氧气炼钢工艺相比,电弧炉炼钢具有建设投资少、流程短、劳动生产率高等优点。近年来电弧炉炼钢工艺发展很快,在美国、意大利、印度、马来西亚等国,电弧炉炼钢产量已超过氧气转炉炼钢产量。

20世纪50年代中后期,DH、RH等钢水炉外精炼方法开发成功,最初主要用于高级钢脱除氮、氢等处理。20世纪70年代后期,尤其是钢铁工业大规模采用连铸技术后,炉外精炼技术迅速发展,精炼方式包括吹氩搅拌、喂线、氩氧精炼、电弧加热、真空处理等多种方式,功能则由最初的钢水脱气发展为加热升温、渣-钢精炼脱硫和脱氧、超低碳钢脱碳、成分微调、去除夹杂物等多种功能。目前,现代化钢厂钢水炉外精炼比接近100%,原来由转炉和电弧炉炼钢承担的脱硫、深度脱碳、脱氧、合金化、夹杂物控制等,多数转为由炉外精炼工序承担。

毋庸讳言,21世纪,钢铁材料仍将是人类社会最主要的、不可替代的结构材料,也是产量最大、覆盖面最广的功能材料。进入铁器时代以来,钢铁一直是人类社会所需的最重要材料。2004年,全世界钢产量首次突破10亿吨。非金属材料中,虽然水泥产量最高,但水泥抗拉与抗折性无法与钢铁相比,应用范围有很大的局限性。高分子材料中,塑料年产量约为1亿吨,也比钢铁应用规模小。因此,钢铁作为一种重要的基础原材料,在经济发展中发挥着举足轻重的作用。尽管近年来钢铁面临着陶瓷材料、高分子材料、铝等有色金属材料等其他材料的挑战,但由于其在铁矿石储量、生产成本、回收再利用率、综合性能等方面具有明显优势,可以预测,钢铁在材料行业中所占据的统治地位不会改变。

近几十年来,钢铁工业的科学技术进步得到了前所未有的发展,推动了钢铁工业在产品、工艺和设备上的更新换代,使世界钢铁工业朝着高效、低耗、清洁和优质的方向发展。例如,高炉喷吹煤粉、高炉长寿、熔融还原、铁水“三脱”、炉外精炼、顶底复吹、薄板坯连铸连轧等一大批新技术被开发应用;信息网络、仿真模拟、人工智能等高新技术在钢铁制造过程中的应用水平不断提高,使我国钢铁工业取得了令人瞩目的成就,2010年,全国粗钢产量达6.28亿吨,已连续14年居世界第一。此外,我国的钢铁工业装备、工艺技术和产品质量也取得了显著的进步,已达到或接近国际先进水平。

虽然我国是世界钢铁大国,但与发达国家人均钢消费量达 400 ~ 500kg 相比,我国的人均钢消费量还比较低,2002 年才超过世界平均值,达到 141kg;此外,在生产成本、原燃料消耗、环境保护等方面也与世界先进水平存在较大差距,而且有的优质钢铁材料仍依赖进口。随着全面建设小康社会,为满足全国人民的基本需要,仍然要求大力发展钢铁材料。西部大开发、东北老工业基地振兴、中部崛起,建筑业、能源、交通、汽车、机械、石油、化学、轻工业等基础工业都是钢材消耗大户,可见,为满足国家发展战略的重大需求,我国钢铁工业将会持续发展。