

# 冶金工业

## 节能减排技术

Energy-saving and Emission-reduction Technologies of Metallurgical Industry

张琦 王建军 编著



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

# 冶金工业节能减排技术

张 琦 王建军 编著

北 京  
冶 金 工 业 出 版 社  
2013

## 内 容 提 要

本书分为三篇：钢铁工业节能理论及节能减排现状、钢铁工业节能减排技术和有色冶金工业节能减排技术，主要分析了冶金工业节能减排基础理论、方法和技术。具体内容包括：我国钢铁冶金、有色冶金工业的能源消耗、污染物排放特征和节能减排现状；节能与减排理论、思路和方法；针对钢铁冶金行业，重点分析了焦化、烧结、炼铁、炼钢和轧钢等生产过程节能减排技术及煤气利用、能源管理系统等综合节能技术；针对有色冶金行业，分析了铝、铜、铅锌等冶金过程节能减排技术等内容。

本书可供冶金行业的工程技术人员、科研人员、管理者及大专院校冶金工程、热能工程及相关专业的师生参考和阅读。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

冶金工业节能减排技术/张琦, 王建军编著. —北京:  
冶金工业出版社, 2013. 10  
ISBN 978-7-5024-6284-0

I. ①冶… II. ①张… ②王… III. ①冶金工业—  
节能—技术 IV. ①TF

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 241248 号

出 版 人 谭学余

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 谢冠伦 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6284-0

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京慧美印刷有限公司印刷

2013 年 10 月第 1 版, 2013 年 10 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 21.5 印张; 423 千字; 333 页

69.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿邮箱: 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

节能减排工作是国家的重要政策，冶金工业作为工业系统重要的组成部分，其节能减排的重要性不言而喻。冶金生产过程消耗大量的能源和资源，同时也产生大量的污染物。要实现冶金工业的节能减排，先进技术与装备是重点，分析冶金工业的能源消耗、污染物排放和关键节能减排技术意义重大。

进入 21 世纪后，冶金工业把系统节能作为指导方针，加快了节能减排技术的研究与应用。其中，国家首要推广的“三干一电”（高炉煤气干法除尘、转炉煤气干法除尘、干熄焦和高炉煤气余压发电）技术应用率逐年提高，冶金工业的节能减排工作取得了前所未有的成绩，但是与先进国家相比还有一定差距。随着全球能源和环境压力增大，特别是我国国民经济快速发展所面临的巨大能源需求和环境的压力，我国冶金工业的进一步发展受到资源、能源和环境的制约，可持续发展面临严峻的挑战。

本书内容紧紧围绕国家节能减排政策和《钢铁工业“十二五”发展规划》、《有色金属工业“十二五”发展规划》以及工业和信息化部颁布的《钢铁行业节能减排先进适用技术指南》，重点对钢铁冶金、有色冶金节能减排技术展开分析论述，希望能为读者提供一本实用的冶金工业节能减排方面的参考书。

全书共分三篇。上篇以冶金工业的资源、能源与环境问题开篇，共分 3 章，介绍了钢铁生产的工艺流程及特点，重点分析了钢铁工业节能减排现状以及钢铁工业的节能理论与方法、节能与减排等内容。中篇介绍了钢铁生产过程中的节能减排技术，共包含 9 章内容，第 4 章为钢铁工业节能减排技术概要，第 5~10 章分别从炼焦、烧结（球

团)、炼铁、转炉炼钢、电炉炼钢、轧钢过程阐述了能源消耗、污染物排放和节能减排技术;第11章为冶金煤气综合利用技术,第12章为能源管理系统。下篇为有色冶金工业节能减排技术,共包含4章内容,主要介绍了铝、铜、铅锌冶金工业节能减排技术。

本书由张琦、王建军编著。张琦负责上篇、中篇的组织和撰写,王建军负责下篇的组织和撰写。其中,第1~5、7章由张琦撰写(其中3.2节、5.2.6节和7.2.3节由安静撰写);第6章由董辉、刘文超撰写;第8、9章由王爱华、安静撰写;第10章由刘文超、安静撰写;第11、12章由王建军、张琦撰写;第13~16章由王建军撰写。

感谢教育部中央高校基本科研业务费专项资金对本书的资助(N110702001、N110402005);感谢东北大学、国家环境保护生态工业重点实验室、材料与冶金学院、热能与环境工程研究所的各位领导、同事对本书给予的帮助。

感谢东北大学陆钟武院士、蔡九菊教授、鞍钢徐春柏处长对本书提出的宝贵意见。

由于书中涉及的内容较广,在编写过程中参考了大量国内外公开发表的论文资料和书籍,在此对这些文献的作者及其所在单位表示衷心的感谢!在本书的编写过程中,作者的学生贾国玉、邴晓师、孙皓、常志荣等进行了文献收集、文字录入和图表绘制等工作,对他们付出的辛勤工作表示感谢。

感谢冶金工业出版社的编辑在本书出版过程中付出的辛勤劳动。

冶金工业的节能减排技术进步很快,涉及的科学和工程领域很广。由于作者水平所限,书中不足之处,敬请读者批评指正。

张琦 王建军

2013年9月

# 目 录

## 上篇 钢铁工业节能理论及节能减排现状

1 绪论 .....	3
1.1 钢铁工业的发展和技术进步 .....	3
1.1.1 中国钢铁工业的发展 .....	3
1.1.2 钢铁工业的技术进步 .....	5
1.2 钢铁生产的工艺流程及特点 .....	6
1.2.1 钢铁生产的工艺流程及能耗和排放 .....	6
1.2.2 钢铁生产的特点 .....	10
1.3 我国钢铁工业节能减排现状 .....	11
1.3.1 钢铁工业能耗现状 .....	11
1.3.2 钢铁工业污染物减排现状 .....	15
2 钢铁工业的节能理论与方法 .....	19
2.1 能源及冶金能源 .....	19
2.1.1 能源及其分类 .....	19
2.1.2 我国能源结构 .....	20
2.1.3 冶金能源种类及用途 .....	20
2.2 节能的基本原理 .....	24
2.2.1 节能概念 .....	24
2.2.2 节能的基础理论 .....	25
2.2.3 冶金节能的方向与途径 .....	34
2.3 钢铁工业节能分析方法 .....	38
2.3.1 吨钢能耗分析法 .....	38
2.3.2 物质流-能量流分析法 .....	39
2.3.3 过程集成方法 .....	40
2.3.4 能源系统模型化方法 .....	41
2.3.5 投入产出分析法 .....	42

<b>3 钢铁工业的节能与减排</b> .....	43
3.1 钢铁工业的节能.....	43
3.1.1 能耗指标及影响因素分析.....	43
3.1.2 典型钢铁企业的能源消耗.....	49
3.2 钢铁工业的减排.....	51
3.2.1 钢铁工业污染物产生.....	51
3.2.2 污染物的治理.....	57
<b>上篇参考文献</b> .....	61

## 中篇 钢铁工业节能减排技术

<b>4 钢铁工业节能减排技术概要</b> .....	65
<b>5 炼焦生产与节能减排</b> .....	68
5.1 炼焦生产.....	68
5.1.1 炼焦工艺及设备.....	69
5.1.2 炼焦能源消耗及污染物排放.....	69
5.2 炼焦过程节能减排技术.....	72
5.2.1 干熄焦技术.....	72
5.2.2 型煤炼焦技术.....	76
5.2.3 煤调湿技术.....	80
5.2.4 日本 SCOPE21 炼焦新技术 .....	89
5.2.5 利用焦炉处理废塑料技术.....	93
5.2.6 炼焦工艺废水处理与回用技术.....	97
<b>6 烧结（球团）生产与节能减排</b> .....	100
6.1 烧结生产与节能减排 .....	100
6.1.1 烧结生产 .....	100
6.1.2 烧结过程节能减排技术 .....	102
6.2 球团生产与节能减排 .....	117
6.2.1 球团生产 .....	117
6.2.2 球团过程节能减排技术 .....	122

<b>7 高炉炼铁生产与节能减排</b> .....	124
7.1 高炉炼铁 .....	125
7.1.1 高炉炼铁工艺及设备 .....	125
7.1.2 高炉炼铁能源消耗及污染物排放 .....	127
7.2 炼铁过程节能减排技术 .....	130
7.2.1 富氧喷煤技术 .....	130
7.2.2 高炉煤气炉顶余压发电技术 .....	133
7.2.3 高炉煤气干法除尘技术 .....	141
7.2.4 高炉脱湿鼓风技术 .....	144
7.2.5 高炉渣余热回收技术 .....	148
7.2.6 热风炉余热利用技术 .....	155
7.2.7 高炉喷吹含氢物质技术 .....	156
<b>8 转炉炼钢生产与节能减排</b> .....	164
8.1 转炉炼钢 .....	164
8.1.1 转炉炼钢工艺及设备 .....	164
8.1.2 转炉炼钢能源消耗及污染物排放 .....	164
8.2 转炉炼钢过程节能减排技术 .....	166
8.2.1 转炉煤气回收技术 .....	166
8.2.2 转炉蒸汽回收及饱和蒸汽发电技术 .....	173
8.2.3 转炉“负能炼钢”技术 .....	177
8.2.4 转炉烟气干法除尘技术 .....	179
8.2.5 钢渣的处理与综合利用技术 .....	181
<b>9 电炉炼钢生产与节能减排</b> .....	185
9.1 电炉炼钢 .....	185
9.1.1 电炉炼钢工艺及设备 .....	185
9.1.2 电炉炼钢能源消耗及污染物排放 .....	185
9.2 电炉炼钢过程节能减排技术 .....	187
9.2.1 电炉烟气余热回收利用技术 .....	187
9.2.2 废钢预热节能技术 .....	188
9.2.3 电炉优化供电技术 .....	192
9.2.4 电炉炉尘处理技术 .....	193
9.2.5 电炉炼钢二噁英减排技术 .....	197
<b>10 轧钢生产与节能减排</b> .....	199
10.1 轧钢生产 .....	199



10.1.1	轧钢生产工艺及设备	199
10.1.2	轧钢能源消耗及污染物排放	199
10.2	轧钢过程节能减排技术	201
10.2.1	轧钢加热炉节能与减排技术	201
10.2.2	热送热装节能技术	208
10.2.3	低温轧制技术	210
10.2.4	轧钢氧化铁皮资源化技术	212
10.2.5	轧钢工序废水处理技术	213
<b>11</b>	<b>冶金煤气综合利用技术</b>	<b>219</b>
11.1	冶金煤气产生与利用现状	219
11.2	煤气发电技术	220
11.2.1	掺烧煤气燃煤锅炉发电技术	221
11.2.2	全烧煤气锅炉发电技术	222
11.2.3	燃气-蒸汽联合循环发电技术	224
11.3	煤气制取清洁能源技术	231
11.3.1	煤气制氢	231
11.3.2	煤气制甲醇	233
11.3.3	煤气直接还原铁	235
<b>12</b>	<b>能源管理系统</b>	<b>237</b>
12.1	概述	237
12.1.1	能源管理系统的沿革与发展趋势	238
12.1.2	建设能源管理系统的必要性	240
12.2	能源管理系统架构	241
12.2.1	总体架构	241
12.2.2	数据流图	244
12.2.3	网络结构	245
12.3	能源管理系统功能模块	247
12.3.1	集中监控系统	247
12.3.2	数据采集系统	248
12.3.3	基础能源管理系统	248
12.3.4	能效分析系统	249
12.3.5	能源优化调度系统	250
12.4	能源子系统管控技术	251
12.4.1	煤气系统节能管控技术	251
12.4.2	蒸汽系统节能管控技术	255

12.4.3	氧气系统节能管控技术	257
12.4.4	电力系统节能管控技术	258
12.5	能源管理系统的实施	259
12.5.1	建设内容	259
12.5.2	实施流程	260
中篇参考文献		262

## 下篇 有色冶金工业节能减排技术

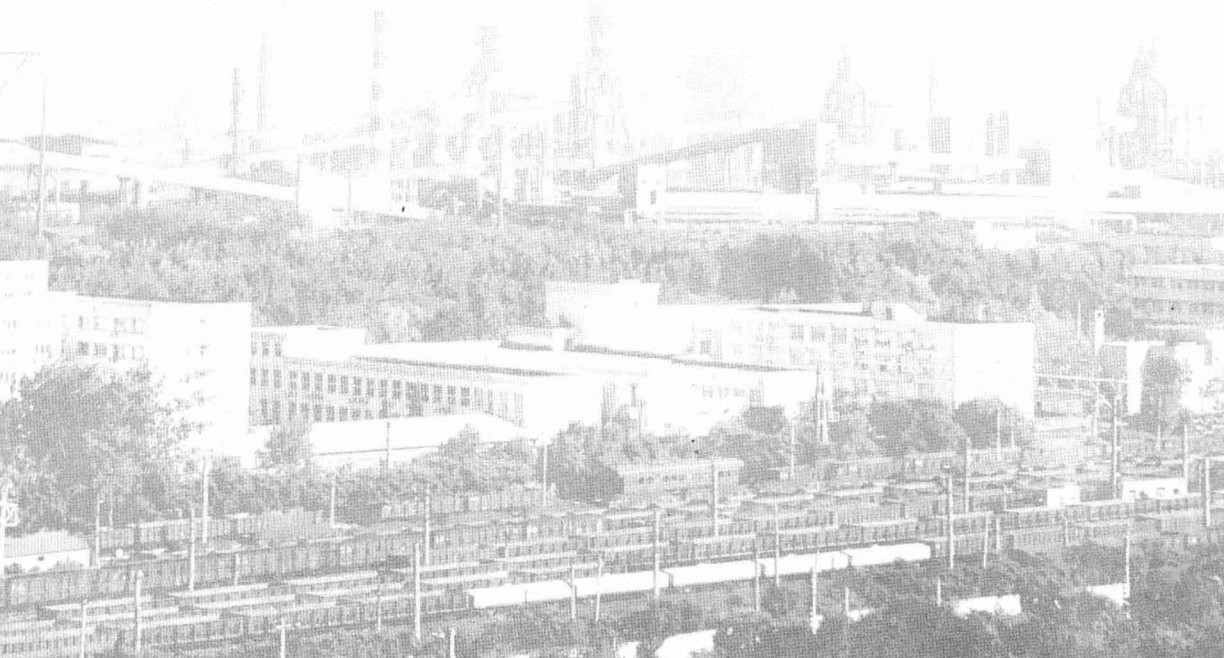
13	有色冶金工业节能减排概述	267
13.1	有色冶金工业能耗与排放特点	267
13.1.1	有色冶金工业能耗特点	268
13.1.2	有色冶金工业排放特点	271
13.2	有色冶金工业节能减排现状与差距分析	273
13.2.1	有色冶金工业节能现状	273
13.2.2	有色冶金工业减排现状	274
13.2.3	有色冶金工业节能减排存在的差距	276
13.3	有色冶金工业节能减排的方向与途径	277
13.3.1	有色冶金工业节能方向与途径	277
13.3.2	有色冶金工业减排方向与途径	278
14	铝冶金工业节能减排	279
14.1	铝冶炼工艺概述	280
14.1.1	氧化铝生产	281
14.1.2	电解铝生产	283
14.2	氧化铝生产过程节能减排技术	284
14.2.1	节能技术	284
14.2.2	减排技术	285
14.3	电解铝生产过程节能减排技术	287
14.3.1	节电技术	288
14.3.2	减排技术	292
14.4	铝材加工过程节能减排技术	294
14.4.1	节能技术	294

14.4.2 减排技术	296
<b>15 铜冶金工业节能减排</b>	<b>297</b>
15.1 火法炼铜工艺概述	297
15.1.1 铜的性质	297
15.1.2 铜冶炼工艺发展	298
15.1.3 现代火法铜冶炼技术	298
15.2 熔炼过程节能减排技术	300
15.2.1 富氧强化熔炼机理	300
15.2.2 富氧强化铜冶炼技术	301
15.2.3 熔炼过程减排技术	305
15.3 吹炼过程节能减排技术	307
15.3.1 闪速吹炼技术	307
15.3.2 PS 转炉烟气管网优化	307
15.3.3 PS 转炉烟气收尘工艺优化	308
15.4 电解过程节能减排技术	309
15.4.1 电解过程节能措施	309
15.4.2 电解过程减排措施	311
15.5 铜材加工过程节能减排技术	311
<b>16 铅锌冶金工业节能减排</b>	<b>314</b>
16.1 铅锌冶炼工艺概述	314
16.1.1 铅的性质	314
16.1.2 铅的冶炼	315
16.1.3 锌的性质	315
16.1.4 锌的冶炼	318
16.1.5 铅锌冶炼的节能减排方向	320
16.2 铅冶金节能减排技术	321
16.2.1 节能技术	321
16.2.2 减排技术	323
16.3 锌冶金节能减排技术	324
16.3.1 节能技术	324
16.3.2 减排技术	326
下篇参考文献	328
索引	331

冶金工业 节能 减排 技术

钢铁工业节能理论及  
节能减排现状

上  
篇







# 绪 论

## 1.1 钢铁工业的发展和技术进步

### 1.1.1 中国钢铁工业的发展

钢铁无论是材料的性能、适用性和经济性，资源的可靠性或是可回收利用程度以及实现可持续发展的可能性，都比其他材料更为优越<sup>[1]</sup>。钢铁以其优良的综合性能、较低的价格和易使用加工满足不同使用者的需求，从而成为“首选材料”、“必选材料”，成为推动全球经济不断发展和社会文明进步的重要物质基础。并且，由于其优良的再生、循环利用特性，在可预见的时间内，钢铁将继续对全球经济发展和社会文明进步起到积极的支撑作用<sup>[2]</sup>。钢铁工业是国民经济的重要支柱产业和基础产业，也是一个国家经济、社会发展水平以及综合实力的重要标志。钢铁工业是 21 世纪“很有魅力的工业”，是世界上最高产、高效和技术先进的工业之一，其发展状况对国民经济的影响举足轻重<sup>[3]</sup>。

20 世纪，世界钢铁工业得到空前的发展。1900 年世界钢产量为 2850 万吨，到 2000 年达到 8.4 亿吨，增长 28.5 倍，1900~2000 年全球累计钢产量 335 亿吨。进入 21 世纪，世界钢产量快速增长，进入钢铁工业第二个高速发展期。2002 年世界钢产量突破 9 亿吨，2004 年突破 10 亿吨，2005 年突破 11 亿吨；2000~2005 年年均粗钢增长约 5600 万吨，2006 年粗钢产量进一步跃升到 12.4 亿吨，2010 年达到 14.2 亿吨，目前仍处在高速增长期之内<sup>[4]</sup>。图 1-1 所示为 1900~2010 年世界钢产量的变化情况。

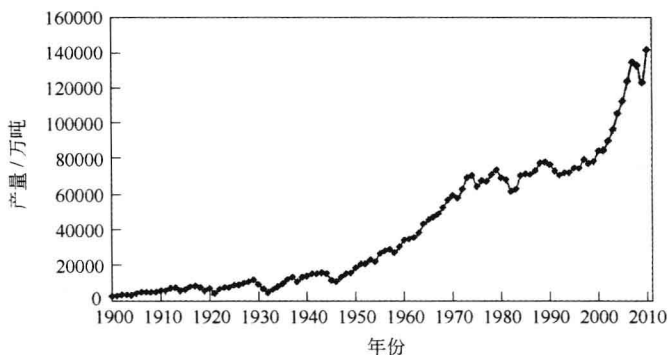


图 1-1 1900~2010 年世界钢产量的变化情况

中国钢铁工业的发展经历了曲折、徘徊、崛起和实现跨越式发展的历史进程。20世纪90年代以来,中国钢铁工业得到快速发展,取得了举世瞩目的成就,这一时期也是中国钢铁工业在全球崛起的时代。1990年以来,中国粗钢产量持续增长,如图1-2所示,自1996年突破1亿吨后,已连续16年保持世界第一,在全球钢铁工业占有重要地位。到2004年,中国粗钢产量达到27246万吨,占世界粗钢产量的25.8%;2007年,又跃升到48966万吨,占世界粗钢产量的36.4%。2012年,中国粗钢产量已达71654万吨,占世界粗钢产量的46.3%。

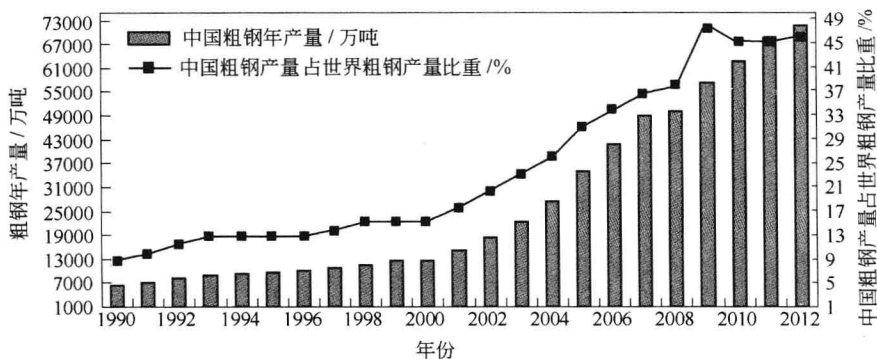


图 1-2 1990~2012 年中国粗钢产量及占世界粗钢产量比重

在产量快速增长的同时,中国钢铁工业总体发展水平也有了较大的提高,宝钢、首钢、武钢、鞍钢、攀钢等大型企业的主要技术装备水平已达到或超过世界先进水平。同时,我国钢铁工业对工艺流程和钢材产品结构调整,取得重大进展,一些高端、高附加值产品的产量和比重大幅增加,提高了企业在国内外市场激烈竞争中的适应能力,在世界上占有了一席之地。

中国钢铁工业的快速发展不仅体现在钢产量的增加上,更重要的是工艺流程和钢厂结构得到了调整和优化。其原因一方面是在经济全球化的大环境中,我国政府宏观经济政策的正确引导以及由此产生的工业化、城市化发展步伐的加快所带动的巨大市场对钢铁产品需求的拉动作用;另一方面是对钢铁行业技术进步战略的正确判断、选择和有序展开,使我国钢铁工业技术进步和结构优化,取得了突出成就,使全行业对国内外市场激烈竞争的适应能力大大提高;同时积极利用国际资源以及连铸、连轧机、高炉、转炉等大批技术装备的国产化,也是我国钢铁工业得以快速发展的直接原因<sup>[5]</sup>。

多年来,我国钢铁工业的快速发展对经济社会的发展起了重要作用,有力地支撑了我国的工业化进程和国民经济的快速增长。然而,钢铁工业是资源、能源密集型产业,一段时期以来,我国钢铁工业走过的是一条高能源消耗、高资源消

耗和相应高污染的粗放式增长道路,资源、能源和环境已日益成为制约其发展的重要因素<sup>[6]</sup>。进入 21 世纪,国际钢铁工业共同的时代命题是市场竞争力和可持续发展问题。我国钢铁工业要解决资源、能源和环境对进一步发展的制约,提高市场竞争力、实现可持续发展并与环境友好<sup>[7]</sup>。

“十五”及“十一五”时期是我国钢铁工业发展速度最快、节能减排成效显著的时期,市场配置资源的作用不断加强,各种所有制形式的钢铁企业协同发展,有效支撑了国民经济平稳较快发展。但是,产品结构、布局等结构性矛盾依然突出,资源、环境等外部因素对行业发展的制约作用逐步增强。

### 1.1.2 钢铁工业的技术进步

中国钢铁工业 20 世纪 90 年代快速发展的原因主要有:市场需求的拉动;技术进步战略的正确选择;有效投资与技术进步战略结合,产生协同效应;工艺、装备国产化与单位产能投资额的降低;大量利用国际铁矿、铬矿、锰矿资源的促进作用。特别是连铸技术,高炉喷吹煤粉技术,高炉一代炉役长寿技术,棒、线材连轧技术,流程工序结构调整综合节能技术,转炉溅渣护炉技术等六个关键共性技术的正确选择与展开<sup>[6]</sup>。在六项关键共性技术中,连铸技术是核心。连铸技术的快速发展,促进了整个生产流程的衔接、匹配和系统优化,具有明显的关联带动作用 and 协同效应。六项关键共性技术的先后突破和有时序性的集成,使中国大多数钢铁企业的生产流程产生了结构性的变化,可以说是绝大多数钢铁企业在增产、节能、提高产品质量、减少各工序的消耗与排放、提高劳动生产率等方面都具有明显效果的技术整合过程。

进入 21 世纪后,我国钢铁工业的技术装备水平得到大幅度提高。“十一五”时期,重点钢铁企业 1000m<sup>3</sup> 及以上高炉生产能力所占比例由 48.3% 提高到 56.7%,大部分企业已配备铁水预处理、钢水炉外精炼设施,精炼比达到 70%。轧钢系统基本实现全连轧,长期短缺的热连轧、冷连轧带钢轧机分别由 26 套和 16 套增加到 72 套和 50 套。宝钢、鞍钢、武钢、首钢京唐、马钢、太钢、沙钢、兴澄特钢等大型钢铁企业技术装备达到国际先进水平<sup>[8]</sup>。目前,世界上最先进、最大型的冶金装备几乎在中国都有,如 5500m<sup>3</sup> 以上的高炉、5500mm 大型宽厚板轧机、2250mm 宽带钢热连轧机和 2180mm 宽带钢冷连轧机<sup>[9]</sup>。

“十一五”期间,节能减排成效显著,我国共淘汰落后炼铁产能 12272 万吨、炼钢产能 7224 万吨,干熄焦、高炉喷煤、高炉煤气和转炉煤气干法回收、蓄热燃烧技术等一批节能减排技术得到大面积推广,企业能源管理水平不断提高,重点钢铁企业吨钢综合能耗从 694kgce 下降到 605kgce,下降了 12.8%;吨钢二氧化硫排放量从 2.83kg 下降到 1.63kg,下降了 42.4%;吨钢耗新水量由 8.6t 下降到 4.5t,下降了 47.7%。重点推广“三干三利用”节能减排技术



(干法熄焦, 高炉煤气干法除尘, 转炉煤气干法除尘; 水综合利用, 副产煤气利用, 高炉渣、转炉渣的综合利用)<sup>[9]</sup>, 有力地促进了钢铁工业节能减排工作的推进。

“十一五”期间, 我国钢铁工业节能减排取得了很大进步, 但是与国际先进水平相比仍有一定差距。一是仍存在约 7500 万吨炼铁、4000 万吨炼钢等落后产能; 二是一些节能减排技术尚未推广应用, 如烧结脱硫技术应用率仅为 20%; 三是企业能源管理水平有待提高; 四是钢材“减量化”应用亟需推进; 五是还没有形成完善的各产业间循环经济体。总体上看, 我国钢铁工业节能减排仍有可挖掘的潜力。进入“十二五”时期后, 我国钢铁工业仍面临着品种质量亟待升级、布局调整进展缓慢、能源环境和原料约束增强、自主创新能力不强等主要问题。因此, 亟需在“十二五”期间, 加快产业升级、深入推进节能减排、强化技术创新和技术改造、淘汰落后生产能力、优化产业布局、增强资源保障能力、加快兼并重组、加强钢铁产业延伸和协同及进一步提高国际化水平, 全面提升我国钢铁工业核心竞争力。

## 1.2 钢铁生产的工艺流程及特点

### 1.2.1 钢铁生产的工艺流程及能耗和排放

#### 1.2.1.1 钢铁生产的工艺流程

钢铁工业是典型的流程工业, 随着冶金科学技术的进步, 钢铁制造流程逐步走向大型化、连续化、自动化和高度集成化。目前, 世界钢铁冶炼的工艺流程主要有两类: 一类是高炉—转炉生产流程 (简称 BF—BOF 长流程), 它是指从铁矿石开始, 经采矿、选矿、烧结、炼铁、炼钢、轧钢等工序生产钢铁产品的流程, 该流程应用最广, 全球约 70% 的钢铁企业采用这种流程, 其特点是资源、能源消耗量大, 污染物排放严重; 另一类是电炉流程 (简称 EAF 短流程), 它是指以废钢及部分铁水为原料, 经过电炉炼钢、连铸、热轧等工序生产钢铁产品, 该流程的典型特点是流程短、能源消耗低, 如图 1-3 所示<sup>[10]</sup>。

钢铁生产流程随着冶金理论和工程技术的进步, 不断发生变迁, 逐步走向大型化、连续化、自动化和高度集成化, 其多年来的流程演变过程如图 1-4 所示<sup>[11]</sup>。可见, 钢铁生产流程经历了从简单到复杂, 再从复杂到简单的演变过程。连铸 (凝固) 工序不断向近终型、高速化方向发展, 促进了钢铁生产流程向连续化、紧凑化、协同化的方向演变。连铸 (凝固) 工序之前, 生产工序呈不断解析、优化的趋势。虽然工序数目有所增加, 但其实是另一种类型的简化, 即工序功能集合的简化。铁水“三脱”预处理和钢的二次冶金工艺的出现使包括转