

钢铁烧结烟气多污染物 过程控制原理与新技术

甘 敏 范晓慧◎著



科学出版社

钢铁烧结烟气多污染物 过程控制原理与新技术

甘 敏 范晓慧 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍作者在钢铁烧结烟气多污染物过程控制原理与新技术方面的研究成果。全书共7章。第1章介绍烧结烟气污染物排放和控制现状;第2章揭示烧结烟气污染物的排放规律与特征;第3章阐明生物质燃料影响烧结的机理,开发强化生物质能烧结的技术;第4章研究烧结过程 NO_x 生成行为和影响因素,开发低 NO_x 烧结技术;第5章揭示烟气循环烧结的基本原理,构建适宜的烟气循环烧结模式;第6章研究 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放特性、生成机理及迁移机制,开发调控 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 迁移的关键技术;第7章探讨源头减排、过程控制与末端治理有机耦合的高效减排技术。

本书可供钢铁冶金、矿物加工工程专业的教师、研究生、高年级本科生参考,也可供相关专业的科研、设计、生产人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢铁烧结烟气多污染物过程控制原理与新技术/甘敏,范晓慧著. —北京:科学出版社,2019.3

ISBN 978-7-03-060596-2

I. ①钢… II. ①甘…②范… III. ①钢铁冶金-烧结-空气污染控制
IV. ①X511

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第034179号

责任编辑:牛宇锋 赵晓廷 / 责任校对:王萌萌

责任印制:吴兆东 / 封面设计:蓝正设计

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年3月第一版 开本:720×1000 1/16

2019年3月第一次印刷 印张:15 1/2

字数:295 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

钢铁工业是我国国民经济的基础性产业,对国民经济建设起到重要支撑作用。我国粗钢产量已连续 23 年保持世界第一。近年来,钢铁制造水平和钢材品质的不断提高,推动着我国向钢铁强国迈进。但是,钢铁工业是资源密集型和能源密集型产业,其能耗高、污染大,严重制约着我国钢铁工业的转型升级和绿色发展。

近年来,我国钢铁行业积极摒弃过去先污染后治理的传统观念,致力于打造环境友好型钢铁工业,创建集约化、洁净化、资源化、低碳化的绿色工厂,取得了阶段性的成效,已有少数钢铁企业基本达到国际先进绿色制造水平,但大多数钢铁企业环保工艺技术水平仍然较低、装备仍然落后。2018 年 7 月 3 日由国务院公开发布的《打赢蓝天保卫战三年行动计划》将钢铁工业纳入污染物减排的重点行业,生态环境部随即颁布了全球范围内最严格的钢铁工业超低排放标准,对我国钢铁企业环保技术挑战巨大。

我国钢铁工业以长流程生产为主,“烧结—高炉—转炉”的冶炼工艺占主导地位。能耗高、污染重的铁前工序是节能和减排的重点,其中烧结工序排放的烟气中含 CO_x 、 SO_x 、 NO_x 、二噁英、重金属、超细颗粒物等多种污染物,是钢铁流程中污染最为严重的环节,其污染占钢铁工业污染总负荷的 40%。当前烧结烟气主要采用末端治理技术,但存在设备复杂、流程长、投资和运行成本高、副产物难利用等诸多问题,且难以达到超低排放的苛刻要求。由于治理难度大,烧结烟气被列为钢铁工业“十三五”规划的重点治理对象。

面对日趋严苛的环保要求,污染物源头和过程控制方法变得越来越重要,从工艺本身和生产过程出发,减少烟气排放和污染物的产生量,减少末端治理的任务并提高净化效率,是烧结工序实现低成本超低排放的核心。中南大学长期致力于烧结烟气污染物源头和过程减排的研究工作,涵盖清洁能源替代化石燃料、烟气循环利用、污染物过程抑制生成、污染物集中排放等基础理论和新技术的研究,为钢铁工业超低排放改造及绿色制造提供了技术支撑。

该书是作者总结多年的研究成果撰写而成的。书中针对烧结烟气多污染物控制,以污染物的生成特性和排放规律为基础,构建了多污染物源头和过程控制技术路线,开发了生物质能烧结技术、烧结过程 NO_x 抑制生成技术、烟气循环烧结新工艺、 $\text{PM}_{2.5}$ 迁移和排放调控方法等,建立了节能、减排、低碳且具有广泛适用性的技术支撑体系,实现了烟气减量排放、污染物减量生成与集中排放,并通过耦合污染物综合治理技术,实现了烧结烟气多污染物的高效控制。

该书是一部系统反映钢铁烧结烟气污染物过程控制研究前沿和最新研究成果的专著,它的出版对提升钢铁制造绿色水平具有重要意义,将对钢铁工业环保技术的进步和可持续健康发展做出积极贡献。



2019年3月于长沙

前 言

我国是世界最大的钢铁生产国,粗钢产量占全球近 50%。巨大的产能导致能源消耗量大、环境负荷重。钢铁工业能源消耗占全国总能耗的 15%,烟尘、CO_x、SO_x、NO_x、二噁英排放量分别占全国排放总量的 8.3%、12%、7.4%、6%、32%,废气排放约占全国工业废气排放量的 21%。因此,为了推动我国钢铁产业持续健康发展,一方面要发挥钢铁在国民经济建设的支柱作用,另一方面要继续减少能源消耗和污染物排放以实现钢铁绿色生产。

近年来,国家非常重视钢铁行业的节能减排,并取得了阶段性的成效,2017 年统计的中国钢铁工业协会会员单位吨钢综合能耗同比下降 2.16%,外排废气中 SO₂ 排放量同比下降 3.69%,烟尘排放量同比下降 7.34%。但当前的排放水平与钢铁绿色制造的目标相比,仍有较大的差距。钢铁工业迫切需要转型升级,通过超低排放改造,使钢铁工业成为与社会、城市、生态环境共融共存的低碳绿色产业。

我国钢铁生产以“烧结—高炉—转炉”的长流程为主,烧结为炼铁提供 70% 以上的含铁炉料,是最重要的原料加工工序。但烧结是钢铁制造流程中的高能耗、高污染环节,其能耗仅次于高炉炼铁而居第二位,烧结烟气中的 SO_x、NO_x、二噁英、重金属、PM_{2.5} 等污染物的排放量均居钢铁工业首位,污染物排放到大气危害巨大,直接威胁到人类的生存环境。

烧结烟气超低排放改造是大气污染治理的重要内容,2018 年生态环境部发布的《钢铁企业超低排放改造工作方案(征求意见稿)》要求烧结球团行业颗粒物、二氧化硫、氮氧化物小时均值排放浓度分别不高于 10mg/m³、35mg/m³ 和 50mg/m³,力争到 2020 年、2022 年、2025 年底前分别完成钢铁产能改造 4.8 亿 t、5.8 亿 t、9 亿 t 左右的目标。因此,烧结烟气超低排放改造任务重、时间紧、难度大。目前主要依靠末端治理的方法存在以下问题:①污染物难以达到超低排放标准所需的脱除程度;②烧结烟气量大,污染物种类多,且治理多为组合工艺,导致设备投资高、占地空间大、运行成本高;③缺乏针对烧结烟气特征开发的控制技术,使得环保技术被动适应烧结工艺;④副产物产出量大,容易导致二次污染。

面对严峻的环保形势,以及当前主要依靠末端治理技术存在的不足,近十年来作者在国家自然科学基金的资助以及中冶长天国际工程有限责任公司(简称“中冶长天”)、中国宝武钢铁集团有限公司(简称“宝钢”)、湖南华菱湘潭钢铁有限公司(简称“湘钢”)等企业的支持下,持续开展了烧结烟气多污染物过程控制原理与新技术的研究,从清洁能源替代化石燃料、烟气循环利用、污染物过程抑制生成、污染

物集中排放等多方面实现烟气与污染物的源头和过程减排,并通过有机耦合末端治理技术,突破超低排放改造的关键科学问题。

本书是在总结研究成果和经验的基础上撰写而成的。全书共7章。第1章分析钢铁工业的发展趋势,介绍烧结烟气污染物排放和控制现状;第2章揭示烧结烟气污染物的排放规律和特征;第3章研究生物质燃料替代化石燃料对烧结过程的影响机理,开发生物质能烧结的强化技术;第4章研究烧结过程中 NO_x 的生成行为,探明抑制 NO_x 形成的关键因素,开发低 NO_x 烧结技术;第5章揭示烟气循环对烧结过程的影响机理,以及烟气污染物在循环过程中的减排行为,构建适宜的烟气循环烧结模式;第6章系统研究烧结烟气 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放特性,揭示 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 在烧结过程中的生成机理及迁移机制,开发调控 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 迁移和排放的关键技术;第7章介绍通过源头减排、过程控制技术有机耦合末端治理技术,实现多污染物综合减排。

本书第2~4章、第7章由甘敏撰写,第1章、第5章(5.1节、5.3~5.5节)、第6章(6.1节、6.2节、6.5~6.8节)由范晓慧撰写,陈许玲参与了5.2节的撰写,季志云参与了6.3节和6.4节的撰写,吕薇和汪国靖参与了本书的材料整理工作。在本书完稿之际,作者特别感谢中国工程院院士邱冠周教授在百忙之中审阅书稿并撰写序言,感谢邱冠周院士、胡岳华教授和姜涛教授多年的指导和培养,感谢同事和研究生的支持与帮助。

本书得到国家自然科学基金钢铁联合研究基金重点项目(U1660206)、国家自然科学基金面上项目(51474237)、国家自然科学基金青年科学基金项目(51804347、51304245)、国家自然科学基金钢铁联合研究基金项目(U1760107、51174253)等的资助。

由于作者水平有限,书中难免存在不足、疏漏之处,恳请各位读者批评指正。

作者

2019年3月于长沙

目 录

序

前言

第 1 章 钢铁绿色制造及烧结清洁生产现状	1
1.1 钢铁工业发展现状及趋势	1
1.2 烧结污染物排放与清洁生产现状	4
1.2.1 烧结能耗和污染物排放	4
1.2.2 烧结清洁生产与污染物排放标准	6
1.3 烧结烟气污染物控制现状	10
1.3.1 CO _x 控制技术	10
1.3.2 SO ₂ 控制技术	12
1.3.3 NO _x 控制技术	14
1.3.4 颗粒物控制技术	16
1.3.5 多污染物控制技术	18
1.4 污染物过程控制的意义及思路	21
1.4.1 过程控制对整体减排的意义	21
1.4.2 过程控制技术思路	23
参考文献	24
第 2 章 烧结烟气污染物排放特征	30
2.1 烧结过程烟气排放规律	30
2.1.1 烟气温度、流量及负压变化规律	30
2.1.2 气体污染物排放规律	31
2.1.3 PM ₁₀ 、PM _{2.5} 及重金属排放规律	33
2.2 烧结烟气污染物整体排放特征	35
2.2.1 气体污染物排放特征	35
2.2.2 颗粒态污染物排放特征	36
2.2.3 二噁英排放特征	37
2.3 烟气特征区域划分	38
2.4 本章小结	39
参考文献	40

第3章 生物质能烧结原理与减排技术	41
3.1 生物质燃料的物化特性	41
3.2 生物质燃料燃烧特征与气化特性	44
3.2.1 燃烧特征及其动力学	44
3.2.2 气化特性及其动力学	49
3.3 生物质燃料影响烧结的规律	53
3.3.1 对烧结矿产量、质量指标的影响	53
3.3.2 对烧结矿成分的影响	54
3.3.3 对烧结矿冶金性能的影响	54
3.4 生物质燃料对烧结污染物减排的影响	56
3.4.1 对 CO _x 减排的影响	56
3.4.2 对 SO ₂ 减排的影响	56
3.4.3 对 NO _x 减排的影响	57
3.5 生物质燃料影响铁矿烧结的机理	58
3.5.1 对燃烧前沿的影响	58
3.5.2 对燃料燃烧程度的影响	59
3.5.3 对燃烧带气氛的影响	60
3.5.4 对料层温度的影响	61
3.5.5 对烧结矿矿物组成的影响	63
3.5.6 对烧结矿微观结构的影响	64
3.5.7 影响机理分析	65
3.6 基于调控生物质燃料性能的强化烧结技术	65
3.6.1 优化炭化工艺	65
3.6.2 成型预处理技术	67
3.6.3 生物质改性技术	69
3.7 基于生物质与煤同步炭化的强化烧结技术	71
3.7.1 生物质型焦特性的研究	71
3.7.2 生物质型焦与秸秆炭/焦粉的燃烧性比较	75
3.7.3 生物质型焦的烧结应用效果	76
3.8 本章小结	77
参考文献	78
第4章 低 NO_x 烧结原理与新技术	81
4.1 烧结 NO _x 生成机理及来源分析	81
4.1.1 烧结 NO _x 生成机理	81
4.1.2 烧结 NO _x 来源	83

4.2 工艺参数对 NO_x 排放的影响	85
4.2.1 混合料水分的影响	85
4.2.2 焦粉的影响	86
4.2.3 生石灰的影响	88
4.2.4 碱度的影响	89
4.2.5 料层高度的影响	90
4.3 燃料性质对 NO_x 生成的影响	91
4.3.1 燃料氮含量的影响	92
4.3.2 固定碳含量的影响	92
4.3.3 挥发分含量的影响	92
4.3.4 燃料反应性的影响	94
4.3.5 燃料粒度的影响	94
4.4 烧结原料及产物对 NO_x 生成的影响	95
4.4.1 铁氧化物的影响	95
4.4.2 熔剂的影响	97
4.4.3 铁氧化物和熔剂混合物的影响	98
4.4.4 烧结过程生成物的影响	99
4.5 燃烧条件对 NO_x 生成的影响	101
4.5.1 燃烧温度的影响	101
4.5.2 气氛的影响	103
4.6 燃料分布对燃烧和 NO_x 生成的影响	105
4.6.1 制粒小球中燃料的分布状态	105
4.6.2 燃料分布对燃烧的影响	106
4.6.3 燃料分布对 NO_x 生成的影响	107
4.7 基于燃料预处理的低 NO_x 烧结技术	109
4.7.1 燃料预处理对燃烧过程 NO_x 生成的影响	109
4.7.2 燃料预处理对制粒的影响	109
4.7.3 燃料预处理对烧结指标和 NO_x 排放的影响	111
4.8 基于燃料预制粒的低 NO_x 烧结技术	116
4.8.1 预制粒工艺	116
4.8.2 预制粒物料比例对烧结的影响	117
4.8.3 预制粒物料比例对 NO_x 排放的影响	118
4.8.4 生物质燃料替代部分焦粉强化技术	119
4.9 本章小结	121
参考文献	122

第 5 章 烟气循环烧结原理与新工艺	124
5.1 循环烟气对烧结指标的影响	124
5.1.1 O ₂ 含量的影响	124
5.1.2 CO ₂ 含量的影响	126
5.1.3 H ₂ O(g) 含量的影响	127
5.1.4 CO 含量的影响	128
5.1.5 气体温度的影响	129
5.1.6 循环烟气的适宜组成	131
5.2 污染物在循环过程的反应行为	131
5.2.1 反应热力学分析	132
5.2.2 CO 的燃烧行为	134
5.2.3 NO _x 的催化还原	134
5.2.4 SO ₂ 的吸附反应	137
5.2.5 与常规烧结工艺的对比	140
5.3 烟气循环对烧结成矿的影响	141
5.3.1 对烧结气氛的影响	141
5.3.2 对料层温度场的影响	143
5.3.3 对烧结矿物相组成的影响	145
5.3.4 对烧结矿微观结构的影响	147
5.4 烟气循环模式的构建	149
5.4.1 烟气循环烧结设计原理	150
5.4.2 不同循环模式的循环烟气特性	152
5.4.3 循环模式对烧结指标的影响	154
5.4.4 循环模式对烧结矿微观结构的影响	154
5.4.5 循环模式对烧结矿冶金性能的影响	157
5.4.6 循环模式对烧结烟气排放的影响	158
5.4.7 烟气循环工艺比较	159
5.5 本章小结	161
参考文献	162
第 6 章 烧结 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 特性及控制技术	164
6.1 烧结烟气 PM ₁₀ 、PM _{2.5} 理化特性	164
6.2 影响烧结烟气 PM ₁₀ 、PM _{2.5} 排放的因素	169
6.2.1 水分的影响	169
6.2.2 焦粉配比的影响	169
6.2.3 制粒时间的影响	171

6.2.4 原料条件的影响	172
6.3 烧结过程 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 的生成机理	176
6.3.1 在干燥预热阶段的生成行为	177
6.3.2 在燃烧前期的生成行为	179
6.3.3 在燃烧后期的生成行为	181
6.3.4 在熔融阶段的生成行为	184
6.3.5 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 的生成机理	186
6.4 料层对 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 的吸附行为	190
6.4.1 湿料带厚度的影响	190
6.4.2 湿料带水分的影响	191
6.4.3 混合料粒度分布的影响	192
6.4.4 湿料带吸附 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 的机理	194
6.5 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 在料层的解吸行为	196
6.5.1 湿料带吸附 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 后的化学组成变化	196
6.5.2 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 在高温过程的解吸特征	197
6.5.3 有害元素在高温过程的解吸行为	201
6.5.4 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 排放与其生成-迁移的关系	203
6.6 基于分层布料调控 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 排放的技术	204
6.6.1 料层中有害元素的脱除规律	204
6.6.2 分层布料对 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 排放的影响	206
6.6.3 分层布料对烧结和有害元素脱除的影响	211
6.7 基于黏结剂强化料层吸附的 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 迁移调控技术	213
6.7.1 黏结剂强化料层吸附 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 的效果	213
6.7.2 黏结剂强化 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 集中排放的效果	214
6.7.3 黏结剂强化料层吸附 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 的机理	217
6.8 本章小结	220
参考文献	220
第7章 烧结烟气污染物综合控制技术探讨	222
7.1 基于烟气减量与生物质减排的综合技术	222
7.1.1 燃烧和传热行为	222
7.1.2 对烧结指标的影响	224
7.1.3 综合减排效果	224
7.2 基于集中排放的 $PM_{2.5}$ 综合控制技术	225
7.2.1 $PM_{2.5}$ 集中排放区烟气特点	225
7.2.2 $PM_{2.5}$ 集中区布袋除尘方法	226

7.2.3 活性炭吸附	226
7.3 过程控制耦合低成本净化工艺	229
7.3.1 过程综合控制技术	229
7.3.2 分段脱硫脱硝工艺	230
7.3.3 并联式活性炭脱硫脱硝工艺	232
7.4 本章小结	233
参考文献	233
作者简介	235

第 1 章 钢铁绿色制造及烧结清洁生产现状

钢铁是现代社会生活中最重要、应用最多且价格低廉的金属材料,也是最易于回收和再生的资源。钢铁享有“工业粮食”的美誉,对国防、交通、建筑、机械制造、汽车等工业起着重要的支撑作用,为人类社会的发展做出了巨大贡献,在今后相当长的时期内仍然是其他材料无法替代的、最重要的工业材料。

1.1 钢铁工业发展现状及趋势

世界钢铁工业经历了两次高速增长期(图 1.1)。1900 年世界粗钢产量为 2850 万 t,20 世纪 50~70 年代,粗钢产量由 2 亿 t 左右迅速增至 7 亿 t,经历第一次高速增长期,这一时期的高速增长源于美国、欧洲、日本等国家和地区第二次世界大战后的恢复和重建。进入 21 世纪,世界粗钢产量进入了第二次高速增长期,增长的主要原因是发展中国家(主要是中国)及新兴工业国家的工业化和大规模基础设施建设^[1-3]。2004 年世界粗钢产量首次突破 10 亿 t,受国际金融危机影响,2008 年、2009 年连续两年下降,而随着世界经济的逐步复苏,2010 年后稳步回升,2017 年世界粗钢产量达到 16.912 亿 t,我国粗钢产量达到 8.317 亿 t,约占世界粗钢产量的 49.2%。

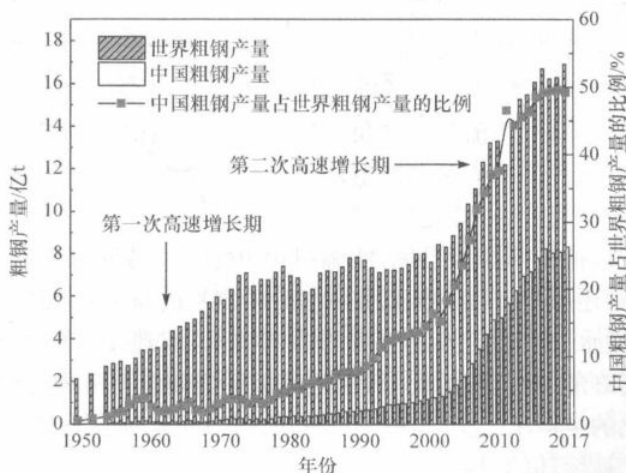


图 1.1 世界及中国历年粗钢产量

钢铁工业两次高速增长期的技术进步是不同的：第一次高速增长期的主体是发达国家，技术进步主要来自发达国家技术创新；第二次高速增长期的主体是发展中国家和新兴工业国家，技术进步主要依靠从发达国家引进技术。20世纪80年代初我国钢铁工业以宝钢系统引进日本钢铁设备与技术为切入点，开始对世界先进钢铁技术系统进行引进、消化与吸收；80年代末开始对钢铁行业“六大共性技术”实施工业攻关，致力于对当代钢铁先进技术的集成应用；90年代主要通过提高连铸比，提升钢铁生产工艺与效率水平；21世纪以来，工艺技术和装备水平持续提高，陆续建设了一批生产工艺先进的钢铁厂。但是，就当前的整体水平来看，我国的钢铁企业与世界最先进的钢铁企业相比仍有差距，需要在技术工艺、产品质量、环保标准、企业效益等方面进一步提升，通过前沿创新实现钢铁大国向钢铁强国转变^[4-7]。

随着钢铁产量的不断提高，传统生产模式带来的资源、能源和环境的制约越来越严重。当前，钢铁工业面临的主要矛盾已经转化为产业结构与市场竞争需求不适应、绿色发展水平与生态环境需求不适应的矛盾。为解决新时期面临的主要矛盾，钢铁企业未来的发展模式将通过绿色制造向生态化转型，应由单一功能向多功能转变。殷瑞钰院士提出了新时期钢铁企业的三大功能^[4]：①冶金材料生产功能，构建新一代生产流程，确立新一代钢厂模式，开发新一代钢铁材料；②能源转换功能，生产清洁能源，如低硫煤气、富氢煤气、富CO煤气，用于发电或作为化工原料，甚至探索转化为氢气，为社会提供能源；③处理大宗社会废弃物，处理社会废钢、废塑料、废轮胎和焚烧垃圾，为城区集中处理废水等。基于此，要实现钢铁制造业转型升级，从钢铁大国向钢铁强国迈进，钢铁制造工艺和流程创新、钢铁先进智能制造、钢铁绿色制造是三大基本要素。

(1) 钢铁制造工艺和流程创新。

钢铁工业是典型的流程工业，包括原料—烧结—炼铁—炼钢—连铸—热轧—冷轧—热处理等众多环节，流程中的每个环节都会对钢铁制造产生影响，全流程的综合作用，决定钢铁产品的质量和制造水平。因此，钢铁工业前沿性、战略性、颠覆性的创新，取决于全流程、一体化的创新。

炼铁工艺应以低碳冶炼为目标，能源结构由化石能源向富氢燃料转变，开发气基直接还原、熔融还原等非高炉炼铁技术，减少CO₂的排放；炼钢应发展电炉炼钢工艺，开发适应铁水、废钢、直接还原铁的炼钢技术，实现废钢资源的循环利用；轧钢工艺应发挥近终形、短流程的优势，优化薄板坯连铸连轧流程、薄带连铸流程等，开发流程减量化的生产工艺。总体来说，钢铁制造应走绿色化道路，开发减量化、高性能、长寿命、易循环的绿色钢铁材料^[8]。

(2) 钢铁先进智能制造。

智能化是未来钢铁工业技术发展的方向之一。为大幅提升生产效率，全球钢

铁企业都在致力于钢铁智能制造,将大数据、人工智能等技术应用于钢铁生产。韩国浦项钢铁公司光阳厂厚板分厂是智能工厂的典范,其智能化水平已经走在世界前列。光阳厂厚板分厂将物联网、大数据、人工智能等技术手段应用于钢铁生产,涵盖操作管理、质量管理、人工智能、虚拟工厂和安全管理五个方面,建立了高附加值产品量产体系,生产效率居世界领先水平。同时开发了降本增效、质量控制、信息融合等技术,扩大高附加值产品比例,灵活应对生产环境的变化^[9],其成功经验值得我国钢铁企业学习和借鉴。

钢铁生产流程和设备十分复杂,存在强烈的复杂性、非线性、时变性和不确定性等,一般很难用精确的数学模型描述,而人工智能技术恰恰在这方面具有优势^[5,10]。殷瑞钰院士提出了智能化钢厂建设的概念,构建起植根于流程运行要素及其优化的运行网络、运行程序的物理模型,通过以制造流程物理系统结构优化和数字化信息系统相互融合来实现钢厂智能化^[5]。

(3) 钢铁绿色制造。

钢铁工业作为污染和能耗大户,其排放的 SO_2 、 NO_x 、烟粉尘等污染物占全国工业的 7%~14%,是大气的主要污染源之一。因此,钢铁工业成为我国环境治理的重点领域。

我国为推进钢铁产业的可持续发展制定了阶段性目标:《钢铁工业调整升级规划(2016—2020年)》明确到 2020 年,我国钢铁产业能源消耗总量比 2016 年下降 10%以上。我国向国际社会承诺,“到 2030 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60%~65%”。钢铁产业作为重点碳排放行业,是履行国家应对气候变化目标责任的重要组成部分。

我国钢铁工业的绿色化必须从结构调整入手,并从三个层次上实施绿色化重点技术,积极推动我国钢铁工业的清洁生产和绿色化进程^[4-5]:①普及、推广相对成熟的节能减排技术,如干熄焦、厚料层烧结、高炉煤气和炉顶余压发电、转炉煤气回收、转炉溅渣护炉、钢渣的资源化再利用、蓄热式清洁燃烧、铸坯热装热送、高效连铸和近终形连铸等;②投资开发一批有效的绿色化技术,如烧结烟气脱硫脱硝综合治理技术、焦炉煤气净化技术、高炉喷吹废塑料或焦炉处理废塑料等;③探索研究一批未来的绿色化技术,如熔融还原炼铁技术及新能源开发、薄带连铸技术、新型焦炉技术,以及处理废旧轮胎、垃圾焚烧炉等与社会友好的废弃物处理技术。

钢铁工业的绿色发展,必须依托环保技术的更新,按照循环经济的基本原则,以清洁生产为基础,紧抓资源高效利用和节能减排,全面实现低成本高质量钢铁产品制造、能源高效转换与回收利用、大宗废弃物处理-消纳与资源化这三个功能,并与其他行业和周边社会实现生态化链接,从而构建绿色发展模式,大力发展生态效益、经济效益、社会效益相统一的绿色、循环、低碳钢铁产业。

1.2 烧结污染物排放与清洁生产现状

1.2.1 烧结能耗和污染物排放

我国炼铁系统以烧结球团—高炉流程为主,烧结是钢铁生产的第一道工序,其产品烧结矿是高炉冶炼的主要炉料,约占高炉含铁炉料的75%。我国历年烧结矿年产量如图1.2所示,从2013年起烧结矿年产量超过10亿t。

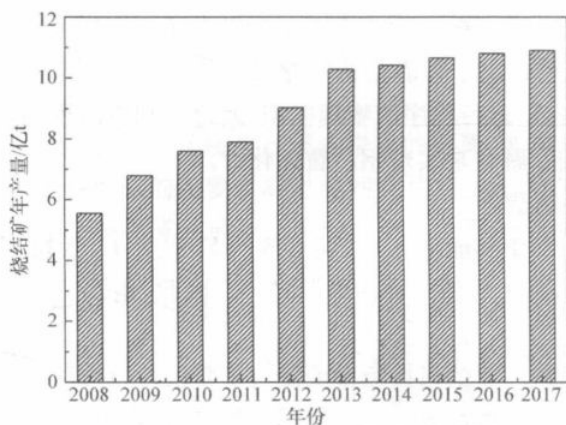


图 1.2 我国历年烧结矿年产量

目前,大部分细粒铁矿石原料都需经过烧结、球团工艺造块处理后,才能入炉进行冶炼。烧结是将细粒物料进行高温加热,在不完全熔化的条件下烧结成块,所得产品称为烧结矿,是一种由多种矿物组织构成的多孔集合体,孔隙率为40%~50%。高碱度烧结矿配加部分球团矿或块矿是我国高炉主要采用的炉料结构。高碱度烧结矿具有粒度均匀、粉末较少、还原性与高温软熔性能较好、化学成分稳定、造渣性能良好等优点,有利于降低高炉工序能耗和改善生产指标。烧结矿的上述特点,决定了其在高炉炉料结构中占主导地位。

但烧结也是典型的高能耗、高污染过程,其过程温度高达1300℃,导致能源消耗大,工序能耗占钢铁生产总能耗的10%~15%,是仅次于炼铁的钢铁生产第二耗能过程。烧结能耗主要由固体燃料消耗、电力消耗、点火能耗三部分构成,各自的比例为75%~80%、5%~10%、13%~20%。从烧结矿的加工费用来看,燃料费用占40%以上。

21世纪以来,我国烧结能耗下降明显(图1.3),2017年新疆八一钢铁有限公司烧结工序能耗降低至38.0kgce/t(千克标准煤/吨烧结矿),唐山钢铁集团有限责任公司(简称“唐钢”)也降至44.4kgce/t,达到了国际先进水平。另外,河钢集团承