



■ 朱廷钰 李玉然 编著

烧结烟气排放控制技术 及工程应用



Emission Control Technologies and Engineering
Applications for Sintering Flue Gas



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

烧结烟气排放控制技术及 工程应用

朱廷钰 李玉然 编著



北京
冶金工业出版社
2015

内 容 提 要

本书系统介绍了烧结烟气中主要有害污染物的排放特征及控制技术,详细论述了单一污染物控制技术,包括烧结烟气粉尘脱除技术、二氧化硫控制技术、氮氧化物控制技术、二噁英控制技术、重金属汞及氟化物控制技术等,注重技术原理阐述与工程应用相结合。本书介绍了目前国内外的前沿技术以及作者研究团队的最新成果,论述了正在开展研究的多污染物协同控制技术,包括联合脱硫脱硝技术、联合脱硫脱二噁英技术、细粒子/重金属一体化捕集技术等。本书还论述了钢铁行业二氧化碳的排放特征及减排技术。

本书可供从事环境保护/钢铁生产的科研人员、工程技术人员、相关领域管理人员参考,也可作为高等院校环境保护专业的本科生、研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

烧结烟气排放控制技术及工程应用/朱廷钰,李玉然编著. —
北京:冶金工业出版社,2015.1

ISBN 978-7-5024-6623-7

I. ①烧… II. ①朱… ②李… III. ①烧结—烟气排放
IV. ①TF046.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 220222 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmip.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmip.com.cn

责任编辑 谢冠伦 李维科 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6623-7

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京百善印刷厂印刷

2015 年 1 月第 1 版,2015 年 1 月第 1 次印刷

169mm×239mm;21.25 印张;2 彩页;417 千字;324 页

89.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)



鞍钢 328m² 烧结机 SDA 法脱硫



宝钢 495m² 烧结机石灰石 - 石膏法脱硫



宝钢 495m² 烧结机 LJS 法脱硫



攀钢钒 360m² 烧结机石灰石 - 石膏法脱硫 (在建)



攀成钢 210m² 烧结机氨法脱硫



邯钢 400m² 烧结机 CFB 法脱硫



武钢 435m² 烧结机氨法脱硫 (在建)



徐州成日钢铁 132m² 烧结机 IOCFB 法多污染物协同控制



太钢 450m² 烧结机活性炭法脱硫脱硝



中科院过程工程所 IOCFB 多污染物协同控制小试实验台 ($300\text{m}^3/\text{h}$, 标志)



中科院过程工程所活性焦法脱硫脱硝小试实验台 ($100\text{m}^3/\text{h}$, 标志)

序 言

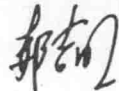
近年来,我国许多地区频发大范围的雾霾重污染事件。为改善区域空气质量,国家大力开展了支撑大气环境质量改善的工作。“十一五”期间,我国实现了二氧化硫排放总量减少10%,城市大气可吸入颗粒物浓度明显下降,但是大气污染态势依旧十分严峻。从发展趋势看,大气污染正经历由煤烟型污染向复合型污染转变的过程。

钢铁行业作为仅次于电力行业的污染排放大户,面临着巨大的污染减排压力,该书的出版顺应了我国科学技术发展的需求。“十二五”期间,国家针对钢铁行业出台了严格的总量控制与浓度控制的政策及标准。新颁布的排放标准在粉尘、二氧化硫的基础上,增加了氮氧化物、二噁英及氟化物。本著作介绍了烧结烟气多污染排放控制技术,它的出版对钢铁行业污染减排有很大的指导作用。

本著作内容翔实,数据丰富,从不同层次系统论述了烧结烟气净化技术,包括发展较为成熟的除尘技术,当前急需、有待发展的脱硫技术,以及氮氧化物、二噁英、重金属、多污染物协同控制等正处于研发阶段的技术。书中详细论述了20余套烧结烟气排放控制技术的工程应用,包括技术原理、技术特点、工艺参数及运行经济指标,这将为钢铁企业选择烧结烟气排放控制技术提供重要参考。

本著作是朱廷钰研究员多年的工程建设经验及近年来对烧结烟气排放控制技术调研的积累,是其多年基础应用研究及技术研发的成果。该书的出版将为我国钢铁行业烧结环保工作者及相关科研人员提供有益的帮助。

中国工程院院士



2014年8月

前言

目前,我国钢铁企业的二氧化硫(SO_2)排放量占全国总排放量的11%,居第二位,仅次于煤炭发电,粉尘排放量占总排放量的23%,氮氧化物(NO_x)占总排放量的7%,二噁英占总排放量的33%。在钢铁企业中,有20%的粉尘、60%以上的 SO_2 、约50%的 NO_x 、90%的二噁英来自烧结烟气。进行烧结烟气排放控制对改善我国大气环境质量具有重要意义。

《国家环境保护“十二五”规划》要求,“推进钢铁行业 SO_2 排放总量控制,全面实施烧结机烟气脱硫,新建烧结机应配套建设脱硫脱硝设施”、“重点行业二噁英排放强度降低10%”。《节能减排“十二五”规划》要求,“十二五”期间钢铁行业 SO_2 排放量削减27%。在燃煤电厂烟气减排 SO_2 空间有限的情况下,加强钢铁行业 SO_2 排放总量的控制迫在眉睫。目前,国家环保部已颁布《钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准》(GB 28662—2012),规定新建烧结机烟气粉尘的排放限值为 $50\text{mg}/\text{m}^3$, SO_2 的排放限值为 $200\text{mg}/\text{m}^3$,并在原标准的基础上新增 NO_x 、氟化物和二噁英的排放标准,排放限值分别为 $300\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $4.0\text{mg}/\text{m}^3$ 和 $0.5\text{ng}-\text{TEQ}/\text{m}^3$;其中京津冀、长三角和珠三角等特别排放限值地域,执行粉尘的排放限值为 $40\text{mg}/\text{m}^3$, SO_2 的排放限值为 $180\text{mg}/\text{m}^3$ 。

随着国家环保政策的逐步落实,钢铁企业对烧结烟气排放控制技术的需求加大。成熟的烟气排放控制技术通常应用于燃煤电厂,不能简单转移到钢铁企业的烧结机上,因为二者的烟气工况和烟气成分差异较大。我国现有烧结机1240余台,截至2013年底,已建及在建脱硫装备526套,不足总套数的1/2,存在同步运行率较低和脱硫效率较低等问题。在调研了多家钢铁企业烧结烟气排放特征及控制工程的基础

上,本书阐述了烧结烟气除尘、脱硫、脱硝、脱除二噁英等的技术原理、工艺系统和工程应用,以期当前钢铁企业选择合适的烧结烟气排放控制技术或进行技术升级改造提供参考。

本书的特点是根据污染物控制技术的发展现状展开了不同层次的论述:(1)对目前比较成熟的除尘、脱硫、脱硝技术,论述了技术原理、工艺系统和工程应用;(2)对非常规污染物二噁英、重金属,论述了排放特征、测试方法和现有设备的控制效果等;(3)论述了目前国内外常用的多污染物协同控制技术的原理、工艺系统和工程应用;(4)对钢铁企业不同生产工序排放的二氧化碳(CO_2)进行了碳素流分析,论述了 CO_2 的排放特征及碳减排技术现状。

本书由中国科学院过程工程研究所朱廷钰研究员承担主要的编写工作,并负责全书的统稿和整体修改工作;李玉然副研究员负责第3章和第7章的编写。叶猛博士参与了第1章的编写,王雪副研究员参与了第2章的编写,徐文青副研究员、刘霄龙博士、刘瑞辉博士参与了第4章的编写,王雪副研究员、王健博士参与了第5章的编写,徐文青副研究员、刘瑞辉博士、郭旸旸博士参与了第6章的编写,叶猛博士参与了第7章的编写,徐文青副研究员、曹万杰硕士参与了第8章的编写,课题组的多位研究生参与了书稿校对工作。感谢钢铁企业对调研工作的支持与帮助,书中参考和引用了钢铁企业同行的工程应用数据,作者在此一并表示诚挚的谢意。感谢国家科学技术学术著作出版基金资助本书出版。感谢国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目、科技支撑计划项目、环保公益性项目和中国科学院战略性先导科技专项(碳专项)的资助。感谢清华大学郝吉明院士在百忙之中为本书作序。

由于作者水平所限,书中不足之处,恳请广大读者批评指正。

朱廷钰 李玉然

2014年8月

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	定价(元)
冶金工业节能减排技术	69.00
烧结球团生产技术手册	280.00
钢铁冶金的环保与节能(第2版)	56.00
钢铁产业节能减排技术路线图	32.00
冶金工业节能与余热利用技术指南	58.00
冶金工业节水减排与废水回用技术指南	79.00
钢铁工业烟尘减排与回收利用技术指南	58.00
冶金工业节能与环保丛书	
铁矿石烧结过程二噁英类排放机制及其控制技术	35.00
转炉烟气净化与回收工艺	46.00
冶金过程污染控制与资源化丛书	
绿色冶金与清洁生产	49.00
冶金过程固体废物处理与资源化	39.00
冶金过程废水处理与利用	30.00
冶金过程废气污染控制与资源化	40.00
冶金企业污染土壤和地下水整治与修复	29.00
冶金企业废弃生产设备设施处理与利用	36.00
矿山固体废物处理与资源化	26.00
工业企业节能减排技术丛书	
大型循环流化床锅炉及其化石燃料燃烧	29.00
燃煤汞污染及其控制	19.00
冶金资源高效利用	56.00
电炉炼钢除尘与节能技术问答	29.00
钢铁工业废水资源回用技术与应用	68.00
电子废弃物的处理处置与资源化	29.00
工业固体废物处理与资源	39.00
中国钢铁工业节能减排技术与设备概览	220.00
生活垃圾处理与资源化技术手册	180.00
环保设备材料手册(第2版)	178.00

目 录

1 概述	1
1.1 烧结烟气特点	1
1.2 烧结烟气污染物排放特征	2
1.2.1 粉尘	2
1.2.2 SO_2	3
1.2.3 NO_x	4
1.2.4 氟化物	4
1.2.5 二噁英类有机污染物	4
1.3 烧结烟气污染物排放控制技术现状及发展趋势	5
1.3.1 烧结烟气污染物排放控制技术	5
1.3.2 控制技术现状及发展趋势	6
1.4 烧结烟气污染物控制标准及政策	8
参考文献	9
2 烧结烟气粉尘控制技术	11
2.1 烧结烟气粉尘排放及控制技术概述	11
2.1.1 烧结过程粉尘来源	12
2.1.2 粉尘的危害	13
2.1.3 粉尘控制技术	13
2.2 电除尘器	15
2.2.1 原理及结构	15
2.2.2 影响除尘效率的主要因素	18
2.2.3 烟气工况对除尘效率的影响	19
2.2.4 粉尘特性对除尘效率的影响	21
2.2.5 除尘效率的数值模拟	22
2.2.6 粉尘运动的数值模拟	23
2.2.7 在鞍钢 214m ² 烧结机和安钢 400m ² 烧结机的应用	26
2.3 新型高效电除尘技术	28
2.3.1 湿式电除尘技术	28

2.3.2	电凝并技术	30
2.3.3	旋转电极技术	32
2.3.4	新型电源技术	33
2.3.5	新型结构技术	37
2.4	袋式除尘器	38
2.4.1	结构及原理	38
2.4.2	滤料种类	41
2.4.3	过滤理论	43
2.4.4	滤料过滤效率的影响因素	45
2.4.5	滤袋清灰机理	46
2.4.6	清灰效率的影响因素	49
2.4.7	气流分布的数值模拟	52
2.4.8	在湘钢 180m ² 烧结机的应用	52
2.5	电袋复合除尘器	53
2.5.1	电袋复合除尘器特点	53
2.5.2	电袋复合除尘技术形式	53
2.5.3	串联式电袋复合除尘器原理	55
2.5.4	板线配置对除尘效率的影响	56
2.5.5	电晕放电对除尘效率的影响	62
2.5.6	气流分布的数值模拟	65
2.5.7	在莱钢 132m ² 烧结机的应用	68
2.6	烧结粉尘资源化利用	69
2.6.1	烧结粉尘循环利用技术	69
2.6.2	含钾烧结粉尘特点及资源化利用	71
2.6.3	烧结粉尘中提取 KCl 技术	72
	参考文献	75
3	烧结烟气二氧化硫控制技术	79
3.1	二氧化硫排放与控制技术概述	79
3.1.1	来源及排放	79
3.1.2	控制现状	81
3.1.3	控制技术	83
3.2	石灰石-石膏法	85
3.2.1	工艺原理	85
3.2.2	工艺系统及设备	88
3.2.3	副产物脱硫石膏的特点及再利用	90
3.2.4	宝钢 495m ² 烧结机石灰石-石膏气喷旋冲法烟气脱硫工程	93

3.2.5 湘钢 360m ² 烧结机石灰石-石膏空塔喷淋法烟气脱硫工程	99
3.3 氨-硫酸铵法	103
3.3.1 工艺原理	104
3.3.2 工艺系统及设备	105
3.3.3 影响脱硫效率的主要因素	106
3.3.4 主要技术难点及对策	107
3.3.5 副产物硫酸铵的特点及再利用	108
3.3.6 柳钢 2×83m ² 、110m ² 、265m ² 烧结机氨法烟气脱硫工程	109
3.3.7 日照钢铁 2×180m ² 烧结机氨法烟气脱硫工程	112
3.3.8 昆钢玉溪 2×105m ² 烧结机氨法烟气脱硫工程	113
3.4 循环流化床法	114
3.4.1 工艺原理及流程	114
3.4.2 工艺系统及设备	116
3.4.3 影响脱硫效率的主要因素	118
3.4.4 副产物脱硫灰的特性及再利用	119
3.4.5 邯钢 400m ² 烧结机 CFB 法烟气脱硫工程	121
3.4.6 梅钢 400m ² 烧结机 CFB 法烟气脱硫工程	124
3.4.7 三钢 180m ² 烧结机 CFB 法烟气脱硫工程	126
3.5 旋转喷雾干燥法	129
3.5.1 工艺原理及流程	129
3.5.2 工艺系统及设备	130
3.5.3 技术特点	131
3.5.4 副产物脱硫灰的特性及再利用	132
3.5.5 济钢 400m ² 烧结机 SDA 法烟气脱硫工程	134
3.5.6 鞍钢 328m ² 烧结机 SDA 法烟气脱硫工程	135
3.5.7 泰钢 180m ² 烧结机 SDA 法烟气脱硫工程	137
3.6 氧化镁法	138
3.6.1 工艺原理	138
3.6.2 工艺系统及设备	139
3.6.3 韶钢 105m ² 烧结机氧化镁法烟气脱硫工程	140
3.7 双碱法	142
3.7.1 工艺原理	143
3.7.2 工艺系统及设备	144
3.7.3 广钢 2×24m ² 、35m ² 烧结机双碱法烟气脱硫工程	146
3.8 NID 法	147
3.8.1 工艺原理	147

3.8.2 工艺系统及设备	149
3.8.3 武钢 360m ² 烧结机 NID 法烟气脱硫工程	150
3.9 再生胺法	151
3.9.1 工艺原理	151
3.9.2 工艺系统及设备	152
3.9.3 莱钢银前 265m ² 烧结机再生胺法烟气脱硫工程	153
3.10 离子液法	154
3.10.1 工艺原理及流程	154
3.10.2 技术特点	156
3.10.3 攀钢 173.6m ² 烧结机离子液法烟气脱硫工程	157
参考文献	158
4 烧结烟气氮氧化物控制技术	161
4.1 氮氧化物的来源及排放	161
4.1.1 烧结过程 NO _x 来源	161
4.1.2 生成机理	162
4.1.3 排放特征	164
4.2 氮氧化物控制技术概述	165
4.3 烟气循环	166
4.3.1 工艺原理及流程	166
4.3.2 奥钢联 250m ² 烧结机废气循环脱硝工程	167
4.4 活性炭吸附法	168
4.5 选择性催化还原法	169
4.5.1 反应机理	169
4.5.2 催化剂	170
4.5.3 还原剂	172
4.5.4 工艺流程及系统	172
4.5.5 脱硝效率影响因素	175
4.5.6 台湾中钢烧结机烟气 SCR 脱硝工程	177
4.6 氧化吸收法	180
4.6.1 工艺原理及流程	180
4.6.2 脱硝效率影响因素	181
参考文献	183
5 烧结烟气二噁英控制技术	185
5.1 二噁英简介	185

5.1.1 结构和理化性质	185
5.1.2 生成途径	187
5.1.3 毒性和计量方法	189
5.2 烧结过程二噁英的排放	191
5.2.1 排放特征	191
5.2.2 排放因子	194
5.2.3 形成路径	195
5.3 烧结过程影响二噁英排放的因素	198
5.3.1 烧结原料	198
5.3.2 操作条件	200
5.4 二噁英控制技术概述	201
5.5 源头削减	202
5.6 过程控制	202
5.6.1 添加抑制剂	202
5.6.2 烟气循环	204
5.7 末端治理	205
5.7.1 湿式净化法	205
5.7.2 选择性催化还原法	208
5.7.3 活性炭吸附法	211
参考文献	213
6 烧结烟气重金属汞控制技术	218
6.1 汞的来源及排放	218
6.2 烧结过程汞的来源与归趋	219
6.3 汞监测方法	220
6.3.1 吸附管法 (30B 法)	220
6.3.2 安大略法 (OHM 法)	222
6.4 现有污染控制设施脱汞效果	225
6.5 汞脱除技术	226
6.5.1 吸附法	227
6.5.2 零价汞氧化法	228
6.6 烧结烟气氟化物的控制	229
6.6.1 氟化物的来源及生成	229
6.6.2 氟化物的排放及控制现状	230
参考文献	230

7 烧结烟气多污染物协同控制技术	233
7.1 烧结烟气多污染物协同控制概述	233
7.2 活性炭法脱硫脱硝技术	234
7.2.1 技术原理	234
7.2.2 工艺系统及设备	236
7.2.3 太钢 450m ² 烧结机烟气活性炭法脱硫脱硝工程	239
7.3 旋转喷雾法脱硫脱二噁英技术	242
7.3.1 技术原理	242
7.3.2 工艺流程及系统	242
7.3.3 沙钢 360m ² 烧结机脱硫脱二噁英工程	243
7.4 MEROS 技术	245
7.4.1 技术原理	245
7.4.2 工艺流程及系统	245
7.4.3 马钢 300m ² 烧结机 MEROS 法脱硫工程	247
7.5 曳流吸收塔技术	249
7.5.1 技术原理	249
7.5.2 工艺流程及系统	250
7.5.3 ROGESA 钢铁公司 180m ² 烧结机曳流吸收法工程	251
7.6 IOCFB 多污染物协同控制技术	253
7.6.1 技术原理	253
7.6.2 工艺流程及系统	253
7.6.3 成日钢铁 132m ² 烧结机多污染物协同脱除工程	255
参考文献	257
8 钢铁行业二氧化碳排放与减排	261
8.1 CO ₂ 排放概述	261
8.1.1 CO ₂ 的温室效应	261
8.1.2 CO ₂ 的来源及生成	262
8.1.3 CO ₂ 的排放特征	263
8.2 钢铁生产 CO ₂ 排放影响因素	264
8.2.1 工艺流程	264
8.2.2 能源结构	266
8.2.3 能源效率	267
8.2.4 生产设备	267