

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

大气污染控制技术
与策略丛书

工业烟气多污染物深度治理 技术及工程应用

Advanced Technology and Application for Multi-
Pollutants Control in Industrial Flue Gas

李俊华 姚 群 朱廷钰 著



科学出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

大气污染控制技术与策略丛书

工业烟气多污染物深度治理 技术及工程应用

李俊华 姚 群 朱廷钰 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

我国钢铁、建材、有色、石油化工及电力等行业烟气成分复杂、多污染物深度治理难度大且排放标准日益严格。本书系统阐述了大气主要污染物颗粒物、硫氧化物、氮氧化物、挥发性有机物（VOCs）、重金属及多污染物协同控制等深度治理技术，详细介绍了相关技术原理、关键材料、关键装备及配套工艺设计优化等内容。结合不同行业的排放特征，并通过对电力、冶金、建材等行业超低排放工程案例的分析，给出了重点行业工业烟气深度减排的设计思路、减排技术、工程装备及运行情况。

本书可供工业烟气污染物控制研究相关专业的科研人员及学生阅读，也可供政府环境保护等有关部门及企事业单位相关科研及工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

工业烟气多污染物深度治理技术及工程应用 / 李俊华, 姚群, 朱廷钰著.
—北京: 科学出版社, 2019.8

(大气污染控制技术与策略丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-061989-1

I. ①工… II. ①李… ②姚… ③朱… III. ①工业废气-废气治理
IV. ①X701

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 159000 号

责任编辑: 霍志国 / 责任校对: 杜子昂

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 黄华斌

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 8 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2019 年 8 月第一次印刷 印张: 38

字数: 764 000

定价: 198.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

丛书编委会

主 编：郝吉明

副主编（按姓氏汉语拼音排序）：

柴发合 陈运法 贺克斌 李 锋 刘文清
朱 彤

编 委（按姓氏汉语拼音排序）：

白志鹏 鲍晓峰 曹军骥 冯银厂 高 翔
葛茂发 郝郑平 贺 泓 李俊华 宁 平
王春霞 王金南 王书肖 王新明 王自发
吴忠标 谢绍东 杨 新 杨 震 姚 强
叶代启 张朝林 张小曳 张寅平 朱天乐

丛 书 序

当前，我国大气污染形势严峻，灰霾天气频繁发生。以可吸入颗粒物（ PM_{10} ）、细颗粒物（ $PM_{2.5}$ ）为特征污染物的区域性大气环境问题日益突出，大气污染已呈现出多污染源多污染物叠加、城市与区域污染复合、污染与气候变化交叉等显著特征。

发达国家在近百年不同发展阶段出现的大气环境问题，我国却在近 20 年间集中爆发，使问题的严重性和复杂性不仅在于排污总量的增加和生态破坏范围的扩大，还表现为生态与环境问题的耦合交互影响，其威胁和风险也更加巨大。可以说，我国大气环境保护的复杂性和严峻性是历史上任何国家工业化过程中所不曾遇到过的。

为改善空气质量和保护公众健康，2013 年 9 月，国务院正式发布了《大气污染防治行动计划》，简称为“大气十条”。该计划由国务院牵头，环境保护部、国家发展和改革委员会等多部委参与，被誉为我国有史以来力度最大的空气清洁行动。“大气十条”明确提出了 2017 年全国与重点区域空气质量改善目标，以及配套的十条 35 项具体措施。从国家层面上对城市与区域大气污染防治进行了全方位、分层次的战略布局。

中国大气污染控制技术与对策研究始于 20 世纪 80 年代。2000 年以后科技部首先启动“北京市大气污染控制对策研究”，之后在“863”计划和科技支撑计划中加大了投入，研究范围也从“两控区”（酸雨区和二氧化硫控制区）扩展至京津冀、珠江三角洲、长江三角洲等重点地区；各级政府不断加大大气污染控制的力度，从达标战略研究到区域污染联防联控研究；国家自然科学基金委员会近年来从面上项目、重点项目到重大项目、重大研究计划各个层次上给予立项支持。这些研究取得丰硕成果，使我国的大气污染成因与控制研究取得了长足进步，有力支撑了我国大气污染的综合防治。

在学科内容上，由硫氧化物、氮氧化物、挥发性有机物及氨等气态污染物的污染特征扩展到气溶胶科学，从酸沉降控制延伸至区域性复合大气污染的联防联控，由固定污染源治理技术推广到机动车污染物的控制技术研究，逐步深化和开拓了研究的领域，使大气污染控制技术与策略研究的层次不断攀升。

鉴于我国大气环境污染的复杂性和严峻性，我国大气污染控制技术与策略领域研究的成果无疑也应该是世界独特的，总结和凝聚我国大气污染控制方面已有的研究成果，形成共识，已成为当前最迫切的任务。

我们希望本丛书的出版，能够大大促进大气污染控制科学技术成果、科研理论体系、研究方法与手段、基础数据的系统化归纳和总结，通过系统化的知识促进我国大气污染控制科学技术的新发展、新突破，从而推动大气污染控制科学研究进程和技术产业化的进程，为我国大气污染控制相关基础学科和技术领域的科技工作者和广大师生等，提供一套重要的参考文献。



2015年1月

前 言

我国环境保护已经取得阶段性进展，但目前环境形势依然严峻，区域性大气污染问题日趋明显，长三角、珠三角和京津冀地区等大气污染呈现明显的区域性特征。当前工业烟气排放成为我国大气污染物的主要来源，然而我国钢铁、焦化、水泥等主要工业的烟气污染物控制技术与装备水平参差不齐，导致生产过程产生的污染物总量大、排放浓度高，颗粒物（PM）、NO_x、SO₂、挥发性有机物（VOCs）及非常规污染物二噁英和汞等成为我国区域雾霾和光化学烟雾污染的主要前体物。因此，重点行业工业烟气多污染物的排放控制及系统解决方案成为改善我国当前空气质量的关键。

我国钢铁、水泥、焦化、玻璃等工业品产量位居全球首位，不同行业的工业生产工艺流程差异明显，造成烟气污染物排放特征差异大，烟气流量及温度等波动范围大，烟气成分复杂多变且腐蚀性强，对大气污染深度治理技术及工艺提出了更高要求。国外对工业烟气多污染物深度治理的研究较早，对污染物的控制多集中在单一污染物控制技术，包括除尘、脱硫与脱硝。随着环保加严及技术进步，除了PM、NO_x和SO_x外，非常规污染物的脱除也亟待解决，给后处理技术带来了更大挑战。本书基于国内外最新研究进展，以及本书作者多年的研究和创新性成果，从基础科学研究到工程应用示范，详细介绍了颗粒物、硫氧化物、氮氧化物、VOCs、重金属及多污染物协同控制等深度治理技术，重点涉及相关技术原理、关键材料、关键装备及配套工艺设计优化。

本书作者李俊华、姚群与朱廷钰长期从事烟气多污染物深度治理基础理论研究和新技术的研发工作，在烟气多污染物协同控制理论、关键材料、关键装备及工艺开发与系统集成等方面积累了许多成果，掌握国内外最新研究动态，主要技术成果在燃煤电厂、钢铁、水泥及玻璃等工业烟气深度治理开展了工程示范。本书作者合作筹建了烟气多污染物控制技术与装备国家工程实验室，分别在清华大学和江苏盐城建立了烟气减排联合研究中心和环境工程技术研发中心，形成“理论—技术—产品—装备”的技术创新链。在长期合作研究与实践中，希望能够共同完成一部从基础理论到工程实践的工业烟气深度治理新技术及应用示范专著，为从事大气污染控制的学者和工程师提供参考。

本书各章节的具体执笔如下：第1章由甘丽娜、陈雪、马永亮共同撰写；第2章由姚群、单良、陈建军共同撰写；第3章由朱廷钰、林玉婷、佟童共同撰写；第4章由李俊华、王栋、彭悦共同撰写；第5章由李俊华、杨雯皓、洪小

伟、宋华共同撰写；第6章由李俊华、熊尚超共同撰写；第7章由朱廷钰、李俊华、姚群、魏进超共同撰写；第8章由姚群、李俊华、朱廷钰、刘东辉共同撰写。

在本书成稿过程中，清华大学晏涛、刘帅、尹荣强、苏子昂等博士研究生对本书的资料收集、内容修订、图表编辑和文献校对做了大量工作，并提出了不少的宝贵意见；科学出版社霍志国编辑对本书的立项和出版的各个环节提供了诸多的建议、鼓励和帮助，在此一并表示衷心感谢。

本书涉及的部分内容和研究成果，得到国家高技术研究发展计划（“863”计划）、国家科技支撑计划、国家自然科学基金等项目的资助，项目团队包括清华大学、中国科学院过程工程研究所、中钢集团天澄环保科技股份有限公司、中冶长天国际工程有限责任公司、中国建材国际工程集团有限公司等单位的研发人员，以及产学研合作创新的成果，在此一并深表谢意。

恳请读者在阅读中发现本书的问题，并且提出批评和建议，以便作者更新知识及再版时改正和完善。

著 者

2019年5月于清华园

目 录

丛书序

前言

第 1 章 工业烟气污染物排放特征及标准	1
1.1 工业烟气污染物来源及危害	2
1.1.1 细颗粒物	2
1.1.2 硫氧化物 (SO_x)	4
1.1.3 氮氧化物 (NO_x)	6
1.1.4 挥发性有机物 (VOCs)	9
1.1.5 重金属	15
1.2 工业烟气排放控制法规与政策	19
1.2.1 电力行业	20
1.2.2 工业锅炉	23
1.2.3 建材行业	23
1.2.4 钢铁行业	28
1.2.5 有色冶金行业	30
1.2.6 焦化行业	32
1.2.7 石油化工行业	33
1.2.8 垃圾焚烧	35
1.2.9 典型行业挥发性有机物 (VOCs)	37
1.2.10 其他行业	39
参考文献	40
第 2 章 烟气颗粒污染物控制与除尘工艺	44
2.1 工业烟气颗粒物的来源、性质与控制	44
2.1.1 颗粒污染物来源与成因	44
2.1.2 工业烟气颗粒物的性质	46
2.1.3 烟气颗粒物捕集理论基础	53
2.1.4 我国除尘技术的发展与行业应用	57
2.2 电除尘	69
2.2.1 电除尘工作原理	69
2.2.2 电除尘器结构	73

2.2.3	电除尘器性能及其影响因素	80
2.2.4	电除尘提效新技术	85
2.2.5	电除尘器设计选型	98
2.2.6	电除尘工业应用	101
2.3	袋式除尘	105
2.3.1	袋式除尘器工作原理	105
2.3.2	袋式除尘过滤机理	106
2.3.3	袋式除尘清灰机理	109
2.3.4	袋式除尘器分类与结构形式	112
2.3.5	袋式除尘器性能及其影响因素	132
2.3.6	袋式除尘滤料	136
2.3.7	袋式除尘提效新技术	158
2.3.8	袋式除尘器设计选型	165
2.3.9	袋式除尘器工业应用	169
2.3.10	电袋复合除尘器	180
	参考文献	191
第3章	硫氧化物排放控制技术	194
3.1	硫氧化物的排放及控制技术	194
3.1.1	硫氧化物的来源及排放	194
3.1.2	硫氧化物的控制技术简述	197
3.1.3	烟气脱硫技术简述	198
3.2	湿法脱硫	201
3.2.1	石灰石-石膏法烟气脱硫技术	201
3.2.2	氨法烟气脱硫技术	210
3.2.3	氧化镁法烟气脱硫技术	216
3.2.4	双碱法烟气脱硫	220
3.3	半干法脱硫	224
3.3.1	循环流化床烟气脱硫技术	224
3.3.2	旋转喷雾干燥法	235
3.4	干法脱硫	242
3.4.1	NID干法烟气脱硫技术	242
3.4.2	活性炭法脱硫技术	245
3.5	高效烟气脱硫吸附剂	251
3.5.1	金属氧化物	251
3.5.2	活性炭材料	256

3.5.3	分子筛	257
3.5.4	结论与展望	258
	参考文献	259
第4章	烟气高效脱硝技术	265
4.1	烟气脱硝技术概况	265
4.2	选择性非催化还原 (SNCR) 脱硝技术	265
4.2.1	SNCR 技术简介	265
4.2.2	SNCR 技术原理	266
4.2.3	SNCR 技术工艺流程	268
4.3	选择性催化还原 (SCR) 脱硝技术	270
4.3.1	SCR 技术简介	270
4.3.2	SCR 技术原理	270
4.3.3	SCR 技术工艺流程	272
4.4	SCR 脱硝催化剂	280
4.4.1	SCR 脱硝催化剂分类	281
4.4.2	SCR 催化剂制备及性能测试	287
4.4.3	工业化催化剂的制造	299
4.4.4	SCR 催化剂失活因素及机理	307
4.4.5	SCR 催化剂再生机理及工艺	315
4.5	SCR 脱硝系统流场优化设计	320
4.5.1	流场优化设计目的	320
4.5.2	流场优化设计的一般过程	320
4.5.3	CFD 数值模拟	321
4.5.4	物理模型试验	325
4.5.5	流场优化设计的注意事项	327
4.6	臭氧氧化脱硝技术	327
4.6.1	臭氧氧化脱硝基本原理	328
4.6.2	影响因素	330
4.6.3	NO _x 吸收	332
4.6.4	臭氧发生器	334
4.6.5	应用状况	334
	参考文献	334
第5章	挥发性有机物排放控制技术	341
5.1	挥发性有机物概况	341
5.1.1	VOCs 来源	341

5.1.2	工业源 VOCs 排放及法规限值	342
5.1.3	工业源 VOCs 减排思路及挑战	342
5.2	VOCs 排放控制技术	346
5.2.1	治理技术概述及技术选择	346
5.2.2	吸附技术	349
5.2.3	吸收技术	358
5.2.4	直接燃烧与热力燃烧技术	360
5.2.5	蓄热式热力燃烧技术	363
5.2.6	催化氧化技术	370
5.2.7	等离子体技术	385
5.2.8	其他控制技术	395
5.3	应用工程案例	399
5.3.1	吸附浓缩+冷凝回收技术示范案例——某制药公司丙酮 废气治理	400
5.3.2	蓄热式燃烧法 (RTO) 示范案例——某制药公司 废气治理	405
5.3.3	活性炭吸/脱附+催化氧化示范案例——某印刷厂 废气治理	410
5.3.4	沸石转轮+三室蓄热式燃烧炉示范案例——某印刷公司 工业 VOCs 废气治理	413
5.3.5	生物法示范案例——某生物技术公司污水池废气治理	419
	参考文献	424
第 6 章	重金属污染排放控制技术	436
6.1	工业烟气重金属排放及控制概况	436
6.1.1	工业烟气中重金属的形成及迁移转化	437
6.1.2	工业烟气重金属排放监测技术	442
6.1.3	重金属排放控制技术概况	448
6.2	吸收法控制重金属 Hg 排放	450
6.2.1	氯化汞吸收法	451
6.2.2	碘络合吸收法	452
6.2.3	漂白粉吸收法	453
6.2.4	高锰酸钾吸收法	453
6.2.5	硫酸软锰矿吸收法	454
6.2.6	硒洗涤器法	454
6.3	吸附法控制重金属 Hg 排放	455

6.3.1	碳基吸附材料	455
6.3.2	飞灰吸附材料	458
6.3.3	金属吸附材料	459
6.3.4	磁性吸附材料	460
6.4	催化氧化法控制重金属 Hg 排放	462
6.4.1	贵金属氧化材料	462
6.4.2	钒系 SCR 催化剂	463
6.4.3	其他普通金属氧化物催化剂	465
6.5	冷凝法控制重金属 Hg 排放	467
6.6	其他重金属的排放控制技术	468
6.6.1	铅排放控制技术	468
6.6.2	砷排放控制技术	469
	参考文献	469
第7章	烟气多污染物协同控制技术	480
7.1	活性炭法多污染物协同控制技术	480
7.1.1	活性炭法多污染物协同控制技术概况	480
7.1.2	活性炭催化剂研发进展	484
7.1.3	活性炭法多污染物协同控制技术	495
7.2	除尘协同控制技术	508
7.2.1	除尘协同脱硝技术	508
7.2.2	除尘协同脱汞技术	509
7.2.3	干式除尘协同脱硫技术	514
7.3	SCR 脱硝协同控制技术	519
7.3.1	SCR 协同脱除二噁英 (S-SCR 技术)	520
7.3.2	SCR 脱硝协同脱汞技术	522
7.4	湿法脱硫协同控制技术	526
7.4.1	技术原理	526
7.4.2	工艺流程	527
7.4.3	某电厂脱硫协同脱汞技术案例	530
7.5	等离子体协同脱硫脱硝技术	532
7.5.1	电子束烟气脱硫脱硝技术	532
7.5.2	脉冲电晕放电烟尘脱硫脱硝技术	534
7.5.3	直流电晕放电烟气脱硫脱硝技术	535
	参考文献	535

第 8 章 重点行业深度减排技术集成示范	540
8.1 宝钢错流式烧结烟气活性炭法净化多污染物工艺	540
8.1.1 项目概述	540
8.1.2 设计条件	540
8.1.3 工艺系统	543
8.1.4 运行效果	549
8.2 邯钢逆流式活性焦烧结烟气净化工艺	549
8.2.1 项目概述	549
8.2.2 设计条件	550
8.2.3 工艺系统	550
8.2.4 运行效果	551
8.3 宝钢烧结烟气 SCR 净化工艺	552
8.3.1 项目概述	552
8.3.2 工艺系统	552
8.3.3 运行效果	556
8.4 邯宝焦化厂半干法脱硫+低温 SCR 脱硝多污染物一体化工艺	556
8.4.1 项目概述	556
8.4.2 设计条件	556
8.4.3 工艺系统	557
8.4.4 运行效果	557
8.5 安钢逆流活性炭焦化烟气净化工艺	558
8.5.1 项目概述	558
8.5.2 设计条件	559
8.5.3 工艺系统	562
8.5.4 运行效果	565
8.6 水泥厂烟气超低排放一体化工艺	565
8.6.1 项目概述	565
8.6.2 设计条件	566
8.6.3 工艺系统	570
8.6.4 运行效果	571
8.7 日用玻璃厂烟气超低排放一体化工艺	573
8.7.1 项目概述	573
8.7.2 设计条件	573
8.7.3 工艺系统	573
8.7.4 运行效果	575

8.8 平板玻璃企业熔窑烟气脱硫除尘脱硝一体化处理工程	575
8.8.1 项目概述	575
8.8.2 设计条件	575
8.8.3 工艺系统	576
8.8.4 运行效果	577
8.9 陶瓷厂烟气超低排放一体化工艺	578
8.9.1 项目概述	578
8.9.2 设计条件	578
8.9.3 工艺方案	578
8.9.4 运行效果	579
8.10 砖瓦厂烟气深度减排工艺	579
8.10.1 项目概述	579
8.10.2 设计条件	580
8.10.3 设计方案	581
8.10.4 运行效果	583
8.11 生活垃圾焚烧发电工程	584
8.11.1 项目概述	584
8.11.2 设计条件	584
8.11.3 工艺系统	585
8.11.4 运行效果	586
参考文献	586

第 1 章 工业烟气污染物排放特征及标准

近年来,随着石化能源、有机原料的大量消耗及机动车的日益普及,我国城市空气污染依然严峻,常见的大气环境污染物包括 NO_x (NO 和 NO_2 总称)、 CO 、 CO_2 、 SO_2 、 O_3 、颗粒物、挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 等。随着工业化的发展和城市化进程的加快,大气中挥发性有机物 (VOCs) 和 NO_x 的浓度大幅上升,导致了我国以细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ (空气动力学直径小于等于 $2.5\mu\text{m}$ 的颗粒物) 和臭氧 (O_3) 为特征的复合型大气污染^[1-3]。大气污染物与环境问题之间的相关性见表 1-1。

表 1-1 大气污染物与环境问题之间的相关性

环境/污染物名称	SO_2	NO_x	NH_3	VOCs	PPM (一次颗粒物)
酸雨	✓	✓	✓		
富营养化		✓	✓		
近地面臭氧		✓		✓	
细粒子健康影响	✓	✓	✓	✓	✓
气候变化	✓	✓	✓	✓	✓

2013 年我国经历了一次极其严重的灰霾污染,影响了 130 万 km^2 范围内的 8 亿人口^[4];当年 74 个重点监测城市中有 69 个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度超过世界卫生组织 (WHO) 建议的指导值^[5];2016 年,全国 338 个地级及以上城市中,有 254 个城市环境空气质量超标,占 75.1% 的比例^[6]。

当前,我国面临的区域性复合型大气污染问题是长期积累造成的,对于其有效治理需要付出长期且艰苦不懈的努力。2016 年 1 月,我国修订实施的《中华人民共和国大气污染防治法》,被称为“史上最严”污染防治法。目前,主要污染源的排放迅速下降,也取得了公认的阶段性成绩。从 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的前体物控制来看,近年来,全国 SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 控制取得明显进展。例如,全国火电厂的 SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放从 2000 年到 2012 年分别下降 61%、32% 和 80%^[7]。然而,大气污染防治刚刚走出第一步,依然任重而道远。

研发有效的工业烟气防治技术,可为实现大气污染物深度减排,改善空气质量,提供打赢蓝天保卫战技术支撑,促进经济高质量发展和美丽中国建设。

1.1 工业烟气污染物来源及危害

1.1.1 细颗粒物

可吸入颗粒物是指能够通过鼻和嘴进入人体呼吸道的颗粒物的总称,用 PM_{10} 表示(空气动力学直径小于 $10\mu m$ 的颗粒)。其中更细的为 $PM_{2.5}$,又称为细微颗粒物或可入肺颗粒物。 PM_{10} 污染已成为严峻的大气环境问题,会导致大气能见度降低、酸沉降、光化学烟雾等重大环境问题,并对人类的健康有严重危害^[8]。工业生产活动是形成 PM_{10} 的重要污染源,工业烟气中颗粒物主要来自电厂、钢铁厂、化工厂、建材厂、焦化厂、有色金属冶炼厂等工业部门的生产及燃料燃烧过程^[9]。

2011~2017年,全国烟尘排放总量如图1-1所示,自2014年烟尘排放总量开始呈现下降趋势。如表1-2所示,其中,2015年,全国烟尘排放量1538.0万t,比2014年减少11.6%。工业烟尘排放量1232.6万t,比2014年减少15.4%,占全国烟尘排放总量的80.1%。生活烟尘排放量249.7万t,比2014年增加10.0%,占全国烟尘排放总量的16.2%。机动车颗粒物排放量55.5万t,比2014年减少3.2%,占全国烟(粉)尘排放总量的3.6%。集中式污染治理设施烟尘排放量0.1万t。

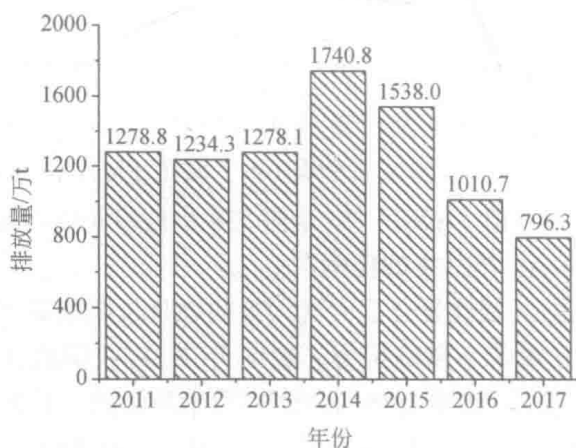


图1-1 2011~2017年间全国烟尘排放总量

(数据来源:国家统计局官网)