

工业

废气净化与利用

童志权 主编



化学工业出版社 
环境科学与工程出版中心

工业废气净化与利用

童志权 主编

化学工业出版社
环境科学与工程出版中心
·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

工业废气净化与利用/童志权主编. —北京: 化学工业出版社, 2001.5
ISBN 7-5025-3165-3

I. 工… II. 童… III. ①工业废气-净化
②工业废气-废气-废物综合利用 IV. X701

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 07840 号

工业废气净化与利用

童志权 主编

责任编辑: 管德存 白洁

责任校对: 洪雅姝

封面设计: 郑小红

*

化学工业出版社 出版发行
环境科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64918013

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 36 $\frac{1}{4}$ 字数 915 千字

2001 年 5 月第 1 版 2001 年 5 月北京第 1 次印刷

印数: 1—5000

ISBN 7-5025-3165-3/X·75

定价: 76.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

1982年,受化工部环保处的委托,我主持编写了《大气污染控制工程》(一、二两册,内部发行),书中除系统地论述了控制污染物污染大气环境的基本原理、方法和主要设备计算外,还按污染物的种类对含各种主要大气污染物废气的净化与回收利用的方法、流程及主要技术经济指标等作了系统介绍。在此基础上,1988年我和陈焕钦老师编著出版了《工业废气污染控制与利用》一书。1994年,该书第二次印刷发行。

近10年来,国内外在工业废气治理与综合利用方面开展了大量的研究工作,许多种大气污染物的治理技术都有所创新,特别是干法、半干法烟气脱硫技术在近10年间开创了许多新工艺、新设备。很多新技术都获得成功应用。近年来,我国在工业建设取得高速发展的同时,加大了新、改、扩建企业执行“三同时”的力度,采取了调整能源结构、划定“两控区”和“一控双达标”限期治理等一系列措施和行动,使我国几种主要大气污染物的排放总量逐年降低,万元产值的排污量大幅度下降。为总结近十多年来国内外在工业废气治理方面研究与开发的新成果,更好地为我国的工业废气治理服务,受化工出版社之约,主持编写了这本《工业废气净化与利用》,以期对有关读者从事的环保工作有所帮助。在内容选取上,本书尽量选取新技术、新设备予以介绍,在介绍至今仍在工业上广泛应用的老技术时,也力求补充近年来的新发展;在内容编排上,优先介绍在工业上获得成功应用的技术,但对某些代表发展方向的目前尚未工业化的新技术也介绍其基本原理和最新研究进展;由于尘和SO₂是我国当前最主要的大气污染物,因此对它们的净化被作为本书的重点。

本书共十六章,其中第一、二、七、八、十章由童志权编写,第三、四、五、六章由陈昭琼编写,第九、十四、十五、十六章由童华编写,第十一、十二、十三章由黄妍编写。全书由童志权审定。

由于水平有限,工作繁忙,时间不足,书中会有不少缺点和错误,敬请读者批评指正。

童志权

2001年1月于湘潭大学

内 容 提 要

本书第一章为绪论；第二章系统论述了净化工业废气中粉尘污染物的基础理论、方法及各类除尘设备；第三至第六章分别阐述了吸收、吸附、催化、燃烧、冷凝、膜分离、生物、电子束及脉冲电晕等各类净化气态污染物方法的原理及主要设备计算；第七至十六章则分别介绍了含 SO_2 、 NO_2 、 HF 、 SiF_4 、 H_2S 、 NH_3 、 CO 、 CO_2 、有机物、恶臭以及含 Hg 、 Pb 、 As 等各类污染物废气净化与综合利用的方法、流程、设备及主要技术经济指标等。书后附有国家最新制定的和仍在执行中的大气质量标准和污染物排放标准。

本书可供工业企业、环保科研院所、监测站及其他设计研究院（所）环保技术人员和各级环境管理人员参考。也可供高校环保专业师生参考。

目 录

第一章 绪论	1	第五节 过滤式除尘器	63
第一节 工业废气与大气污染	1	一、袋式除尘器的除尘过程	64
一、工业废气的含义及分类	1	二、袋式除尘器的性能	64
二、工业废气与大气污染	1	三、袋式除尘器的结构形式	67
第二节 工业废气中的大气污染物及其来源与危害	2	四、袋式除尘器的选择设计及应用	74
一、工业废气中的大气污染物	2	五、颗粒层除尘器	75
二、大气污染源	3	第六节 湿式除尘器	75
三、工业废气的污染危害	5	一、湿式除尘器的分类	76
第三节 我国工业废气污染及治理现状	5	二、湿式除尘器的捕尘机理	76
一、我国大气污染的特点	5	三、湿式除尘器的除尘效率	78
二、我国工业废气污染现状	5	四、重力喷雾洗涤器	81
三、我国工业废气治理现状	7	五、离心式洗涤器	82
第四节 我国控制工业废气污染的技术政策	8	六、板式塔洗涤器	85
第五节 大气环境标准	9	七、自激式洗涤器	86
一、大气环境质量标准	9	八、文丘里洗涤器	87
二、大气污染物排放标准	10	第七节 除尘器的卸灰装置	90
第二章 工业废气中粉尘污染物的净化	12	第三章 工业废气的吸收净化法	93
第一节 气溶胶力学基础	12	第一节 物理吸收过程	93
一、气溶胶颗粒的物理性质	12	一、气体在液相中的溶解及平衡	93
二、气溶胶颗粒的粒径和粒径分布	14	二、气液传质理论	95
三、气溶胶颗粒的流体阻力	20	三、填料吸收塔计算	97
四、气溶胶颗粒的沉降机理	23	四、板式吸收塔计算	103
第二节 除尘器的分类和性能	29	第二节 化学吸收过程	106
一、除尘器的分类	29	一、化学吸收汽液平衡	107
二、除尘器的性能指标	30	二、化学吸收速率	112
三、除尘器的压力损失	30	三、化学吸收塔计算	117
四、除尘器的除尘效率	30	第三节 吸收设备	122
第三节 机械式除尘器	33	一、填料塔	122
一、重力沉降室	33	二、板式塔	123
二、惯性除尘器	34	三、喷淋(雾)塔	125
三、旋风除尘器	35	四、鼓泡塔	127
第四节 电力除尘器	47	五、降膜吸收器	128
一、概述	47	六、超重力吸收器	129
二、电晕的发生	49	第四章 工业废气的吸附净化法	131
三、粒子荷电	54	第一节 吸附基本理论	131
四、粒子的捕集	56	一、物理吸附与化学吸附现象	131
		二、吸附剂	132
		三、吸附基本理论	133

第二节 固定床吸附过程计算	137	第一节 概述	198
一、吸附负荷曲线与透过曲线	138	一、大气中 SO ₂ 的来源	198
二、等温固定床吸附器的计算	141	二、SO ₂ 的危害	198
第三节 吸附剂的再生	148	三、酸雨的形成及危害	199
第四节 吸附浸渍	149	四、我国 SO ₂ 和酸雨的污染状况	201
第五节 吸附设备	150	第二节 SO ₂ 污染控制技术的发展及应用现状	202
一、固定床吸附器	150	一、燃料脱硫	202
二、移动床吸附器	150	二、燃烧过程脱硫	203
三、流化床吸附器	152	三、烟气脱硫 (FGD)	204
四、其他类型吸附器	152	四、国外烟气脱硫装置的应用情况	208
第五章 工业废气的燃烧及催化净化法	154	五、我国 FGD 技术研究及应用现状	209
第一节 燃烧基本概念	154	六、关于发展我国火电厂 FGD 技术及装	211
一、着火温度与爆炸浓度极限	154	备对策的建议	211
二、火焰传播理论概述	156	第三节 干法烟气脱硫技术	212
三、动力燃烧、扩散燃烧和混合燃烧	157	一、高能电子活化氧化法 (EBA 和 PPCP)	212
第二节 燃烧类型	157	212
一、直接燃烧	158	二、荷电干吸收剂喷射脱硫法 (CDSI)	219
二、热力燃烧	159	219
三、燃烧法经济性	163	三、超高压窄脉冲电晕分解有害气体技术	220
第三节 催化净化及催化燃烧法	164	(UPDD)	220
一、催化作用	164	第四节 半干法烟气脱硫技术	221
二、催化剂及载体	165	一、喷雾干燥法 (SDA)	221
三、气固催化反应器计算	166	二、炉内喷钙-炉后增湿活化脱硫技术	228
四、催化燃烧	169	(LIFAC)	228
第六章 工业废气的其他净化方法	175	三、烟气循环流化床脱硫技术 (CFB)	232
第一节 冷凝净化法	175	232
一、概述	175	四、增湿灰循环脱硫技术 (NID)	234
二、冷凝原理及污染物热力学性质	176	第五节 石灰 (石灰石) 湿法脱硫技术	238
三、冷凝计算	177	一、反应机理	238
第二节 生物净化法	184	二、脱硫产物的处理	242
一、概述	184	三、珞璜电厂石灰石-石膏法脱硫技术	242
二、生物净化法原理	185	及装置简介	242
三、净化设备及工艺	186	四、简易石灰 (石灰石)-石膏脱硫技术	247
第三节 高能电子辐射-化学净化法	189	247
一、概述	189	五、间接石灰 (石灰石) 脱硫技术	255
二、电子束辐照法	189	第六节 其他湿法脱硫技术	258
三、脉冲电晕法	190	一、海水脱硫技术	258
第四节 膜净化法	191	二、磷铵肥法 (PAFP) 脱硫技术	261
一、净化膜的特性参数	191	三、钠碱吸收法	265
二、气体膜分离机理	194	四、氨吸收法	267
三、Prism 分离器回收合成氨弛放气中的氢	196	五、氧化镁法	270
.....	196	六、氧化锌法	271
四、膜净化法回收治理有机废气	197	第八章 含氮氧化物废气的净化与利用	279
第七章 含二氧化硫废气的净化与利用	198		

第一节 概述	279	一、吸附净化原理及应用	335
一、大气中氮氧化物的来源	279	二、吸附净化电解铝废气	336
二、氮氧化物的性质	279	三、管道输送床	337
三、大气中氮氧化物的危害	279	第十章 含氯及氯化氢废气的净化与利用	339
四、氮氧化物污染控制方法	280	第一节 氯及氯化氢的主要性质	339
第二节 低 NO _x 燃烧技术	281	第二节 含氯及氯化氢废气源及危害	340
一、燃烧过程中 NO _x 的生成及控制机理	281	一、含氯及氯化氢废气源	340
二、低 NO _x 燃烧技术	284	二、氯及氯化氢的危害	341
第三节 气相反应法	287	第三节 氯气污染控制及资源化	341
一、电子束照射法 (EBA) 和脉冲电晕等	287	一、改革工艺, 加强管理, 控制排放	341
离子体法 (PPCP)	287	二、水吸收法	342
二、选择性催化还原法 (SCR)	287	三、碱吸收法	343
三、选择性非催化还原法 (SNCR)	293	四、氯化亚铁溶液吸收和铁屑反应法	347
四、炽热碳还原法	294	五、溶剂吸收法	348
五、低温常压等离子体分解法	295	六、其他净化法	352
第四节 液体吸收法	297	第四节 氯化氢污染控制及资源化	354
一、水吸收法	297	一、水吸收法	354
二、酸吸收法	297	二、资源化	356
三、碱液吸收法	301	三、氯化尾气的精制	359
四、氧化吸收法	305	第五节 含氯废气净化法的选择	359
五、液相还原吸收法	308	一、根据废气中氯含量选择	359
六、液相络合吸收法	313	二、按废气组成选择	360
七、液相吸收法的综合应用	314	三、按废气量大小选择	360
第五节 吸附法	314	第十一章 含氨、一氧化碳和二氧化碳废气的	净化与利用
一、分子筛吸附法	314	第一节 含氨废气的净化与利用	361
二、活性炭吸附法	318	一、大气中氨的危害及氨的物化性质	361
第六节 液膜法和微生物法	319	二、含氨废气的净化与利用	362
一、液膜法	319	第二节 含一氧化碳废气的净化与利用	372
二、微生物法	320	一、一氧化碳的性质、来源及危害	372
第九章 含氟废气的净化与利用	323	二、含一氧化碳废气的净化与利用	374
第一节 概述	323	第三节 含二氧化碳废气的净化和综合利用	380
一、含氟废气的来源及危害	323	一、大气中 CO ₂ 的来源及对环境的影响	380
二、气态氟化物 (HF, SiF ₄) 的有关性质	323	二、含 CO ₂ 废气的综合利用	382
第二节 水吸收净化法	324	第十二章 硫化氢废气的净化和利用	394
一、水吸收原理	324	第一节 概述	394
二、水吸收流程及设备	324	一、硫化氢废气的危害及来源	394
三、氟资源回收	327	二、硫化氢气体的主要性质	395
第三节 碱吸收净化法	332	第二节 克劳斯法硫磺回收装置尾气的净化	396
一、碱吸收净化法	332	一、克劳斯法的基本原理与流程	396
二、碱吸收制冰晶石	332		
三、氨水吸收法制冰晶石	334		
第四节 吸附净化法	335		

二、克劳斯硫磺回收装置的尾气净化法	398	第八节 含氧有机物废气的净化	450
第三节 吸收法和液相催化氧化法	406	一、含醛类废气的净化	450
一、有机溶剂吸收法	406	二、含酚废气的净化	452
二、碱液吸收法	408	三、合成脂肪酸尾气的治理	453
三、液相催化氧化法	410	四、苯酐尾气的净化与综合利用	454
第四节 吸附和气固反应法脱除 H ₂ S	413	第九节 其他有机化合物废气的净化	455
一、活性炭法	413	一、含有机硫化物废气的净化	455
二、氢氧化铁法	414	二、含有机氮化物废气的净化	458
三、氧化锌法	414	三、垃圾焚烧与二噁英	459
四、复合金属氧化物脱硫	414	第十四章 含恶臭废气的污染控制	463
第五节 脱除 H ₂ S 的其他方法	416	第一节 概述	463
一、生物法	416	第二节 气味物质的分类、来源及特征	463
二、湿式吸收-电解再生法	416	一、气味物的分类	463
第十三章 含有机化合物废气净化与利用	419	二、恶臭源	464
第一节 概述	419	三、气味物特性	465
一、含有机化合物废气的来源及危害	419	第三节 臭味的测定方法及评价标准	466
二、净化方法及选择	421	一、臭味测定方法	466
第二节 含烃类废气的直接燃烧	423	二、恶臭评价标准	468
第三节 含烃及其衍生物废气的催化燃烧 和吸收、吸附处理	425	第四节 恶臭污染控制方法	470
一、含烃及其衍生物废气的催化燃烧	425	一、掩蔽法	471
二、吸附浓缩-催化燃烧工艺	430	二、稀释扩散法	472
三、烃类废气的溶剂吸收	431	三、燃烧法	473
四、吸附法治理喷漆有机废气	433	四、化学氧化法	474
第四节 含卤代烃类废气的吸收、吸附净化	433	五、吸收法	476
一、含氯乙烯废气的净化	433	六、吸附法	477
二、含四氯化碳废气的净化	437	七、生物法	479
第五节 冷凝法的应用	438	八、联合法	481
一、直接冷凝法回收净化含癸二腈废气	438	第十五章 含汞废气的净化	483
二、吸收-冷凝法回收氯乙(甲)烷和丙烷	438	第一节 汞污染源及其危害	483
三、吸附-冷凝法净化含二氯乙烷尾气	440	一、汞污染源	483
第六节 生物法和脉冲电晕法的应用	441	二、汞的危害	483
一、生物法治理有机废气	441	第二节 汞及化合物性质	484
二、脉冲电晕法治理有机废气	443	一、汞	484
第七节 含沥青烟气的净化	443	二、汞的化合物	485
一、沥青的分类及组成	443	三、汞齐	487
二、沥青烟气的来源及危害	444	第三节 含汞蒸气净化	487
三、氧化沥青尾气的净化	444	一、吸收法	487
四、沥青烟气的净化	448	二、吸附法	494
		三、脉冲电晕法	499
		四、联合净化法	500
		第四节 含汞化合物废气净化	502
		一、含氯化汞废气净化	502
		二、消化吸附治理雷汞废气	503
		第十六章 含铅、砷废气的净化	504

第一节 含铅废气的净化	504	附录 4 生产车间空气中有害物质的最高 允许浓度	528
一、铅的相关性质、铅污染源及危害	504	附录 5 大气污染物排放标准 GB 16297—1996	530
二、铅污染控制	506	附录 6 锅炉大气污染物排放标准 GWPB3—1999	548
第二节 含砷废气的净化与资源化	514	附录 7 工业炉窑大气污染物排放标准 GB 9078—1996	551
一、砷及主要化合物的性质	514	附录 8 火电厂大气污染物排放标准 GB 13223—1996	556
二、砷污染源及危害	515	附录 9 水泥厂大气污染物排放标准 GB 4915—1996	560
三、砷污染控制	516	附录 10 炼焦炉大气污染物排放标准 GB 16171—1996	563
四、含砷物料的资源化	521	附录 11 恶臭污染物排放标准 GB 14554—93	567
附录	524		
附录 1 环境空气质量标准 GB 3095—1996	524		
附录 2 关于发布《环境空气质量标准》 (GB 3095—1996) 修改单的通知	527		
附录 3 居住区大气中有害物质的最高允 许浓度	528		

第一章 绪 论

第一节 工业废气与大气污染

一、工业废气的含义及分类

从各种工业生产及其有关过程中排放的含有污染物质的气体，统称为工业废气。其中包括直接从生产装置中物料经物理、化学变化和生物化学过程排放的气体，也包括间接的与生产过程有关的燃烧过程、物料储运和装卸等作业散发的含有污染物质的气体。

通常可按工业废气中所含污染物的种类对工业废气进行分类，例如含尘废气、含 SO_2 废气、含 NO_x 废气……。本书即按此分类法编写各章内容。也可按工业生产行业和产品门类对工业废气进行分类，例如按行业可分为钢铁工业废气、化工废气、电力工业废气等等，按产品门类可分为焦炉废气、硫酸废气、硝酸废气等。在许多情况下，同一工业生产行业或同一产品门类的工业废气中常含有多种污染物质。

二、工业废气与大气污染

按照国际标准化组织 (ISO) 的定义，“空气污染通常系指由于人类活动和自然过程引起某些物质进入大气中，呈现出足够的浓度，达到了足够的时间，并因此而危害了人体的舒适、健康和福利或危害了环境。”所谓自然过程包括火山活动、森林火灾、海啸、土壤和岩石的风化、雷电、动植物尸体的腐烂及大气圈空气的运动等。但是，由自然过程引起的空气污染，由于自然环境的自净化能力（如稀释、沉降、雨水冲洗、地面吸附、植物吸收等物理、化学及生物机能），一般经过一段时间后会自动消除，能维持生态系统的平衡。因而，大气污染主要是由于人类在生产活动与生活活动中，通过废气向大气中排放的污染物质，在大气中积累，超过了环境的自净能力而造成的。

主要由工业废气引起的大气污染可按以下两种方式进行分类。

1. 按污染所涉及的范围分 大气污染大体可以分为四类。

(1) 局部地区污染 由某个污染源造成的较小范围的污染。

(2) 地区性污染 涉及一个地区——工矿区及其附近地区或整个城市的大气污染。

(3) 广域污染 超过行政区划的广大地域的大气污染，涉及的地区更加广泛。

(4) 全球性污染或国际性污染 高烟囱排放的 SO_2 经大气输送后造成的酸雨污染已成为国际性污染，大气中二氧化碳和氟氯烃引起的气温升高和大气臭氧层破坏，已成为全球性的大气污染问题。

2. 按能源性质和污染物的种类分 可将大气污染划分为煤烟型、石油型、混合型和特殊型四类。

(1) 煤烟型 煤烟型污染物是由煤炭燃烧时排放的烟尘、二氧化硫等以及由这些污染物发生化学反应而生成的硫酸及其盐类所构成的气溶胶。早期(18世纪末到20世纪中)的大气污染和目前仍以煤炭作为主要能源的国家和地区的大气污染属于煤烟型。

(2) 石油型 来自石油开采、炼制和石油化工厂的排气以及汽车尾气的碳氢化合物、二氧化氮等造成的污染，以及这些物质经过光化学反应形成的光化学烟雾污染。

(3) 混合型 具有煤烟型和石油型的特点。

(4) 特殊型 由工厂排放某些特定的污染物所造成的局部污染或地区性污染，其污染特征由所排污染物决定。

第二节 工业废气中的大气污染物及其来源与危害

一、工业废气中的大气污染物

按照 ISO 定义，空气污染物系指由于人类活动或自然过程排入大气并对人或环境产生有害影响的那些物质。

随着城市人口的集中和现代工业的发展，排入大气的污染物种类愈来愈多，据不完全统计，目前已达 100 种以上。根据大气污染物的存在状态，可将其概括地分为两大类：气溶胶态污染物和气态污染物。

1. 气溶胶态污染物 气溶胶是指悬浮在气体介质中的固态或液态颗粒所组成的气体分散体系。从大气污染控制的角度，按照气溶胶颗粒的物理性质，可将其分为粉尘、皂、飞灰、烟、雾等。

(1) 粉尘(dust) 指固体物质的破碎、分级、研磨等机械过程或土壤、岩石风化等形成的悬浮小固体粒子。在国际化标准组织(ISO)的定义中，将粒径小于 $75\mu\text{m}$ 的固体粒子的悬浮体称为粉尘，而将在空气或烟道中能迅速沉降的固体粒子(在英国指大于 $75\mu\text{m}$ 的粒子)称为粗尘(grit)。此外，小于 $1\mu\text{m}$ 的粉尘颗粒又称为亚微粉尘(submicron dust)。

(2) 皂(fume) 熔融物质经高温挥发并伴随一些化学反应而生成气态物质经冷却凝结而成的固体粒子，粒径一般小于 $1\mu\text{m}$ 。

(3) 飞灰(fly ash) 指由固体燃料燃烧产生的烟气带走的灰分中较细的粒子。

(4) 烟(smoke) 通常指燃烧过程产生的不完全燃烧产物，又称炭黑，粒径一般为 $0.01\sim 1.0\mu\text{m}$ 。

(5) 雾(fog) 在工程中雾泛指小液滴的悬浮体，是由液体蒸气凝结、液体雾化和化学反应等过程形成的，如水雾、酸雾、碱雾等。

此外，在环保工作中，还常使用降尘、飘尘和总悬浮微粒(T. S. P)的概念。降尘是指空气中粒径大于 $10\mu\text{m}$ 的固体粒子，靠重力作用能在较短时间内沉降到地面。由于粒径小于 $10\mu\text{m}$ 的固体粒子不易沉降而能长期飘浮在空气中，故称飘尘。总悬浮物(T. S. P)系指空气中粒径小于 $100\mu\text{m}$ 的固体粒子。

在实际工作中，以及国内外一些文献资料中，常常未对“粉尘”、“飞灰”、“烟”、“雾”等名词作严格区分，多统称为“粉尘”或“烟尘”。本书中，对工业过程产生的气溶胶颗粒，常以“粉尘”称之，对燃烧过程所产生的固体粒子常称为“烟尘”。

2. 气态污染物 气态污染物包括无机物和有机物两类。

无机气态污染物有硫化物(SO_2 、 SO_3 、 H_2S 等)、含氮化合物(NO 、 NO_2 、 NH_3 等)、卤化物(Cl_2 、 HCl 、 HF 、 SiF_4 等)、碳的氧化物(CO 、 CO_2)以及臭氧、过氧化物等。

有机气态污染物则有碳氢化合物(烃、芳烃、稠环芳烃等)、含氧有机物(醛、酮、酚等)、含氮有机物(芳香胺类化合物、腈等)、含硫有机物(硫醇、噻吩、二硫化碳等)、含氯有机物(氯代烃、氯醇、有机氯农药等)等。

直接从污染源排出的污染物称为一次污染物，一次污染物与空气中原有成分或几种污染物之间发生一系列化学或光化学反应而生成的与一次污染物性质不同的新污染物，称为二次

污染物。在大气污染中受到普遍重视的二次污染物主要有硫酸烟雾(sulfurous smog)、光化学烟雾(photochemical smog)和酸雨(pH<5.6的大气降水)。

硫酸烟雾是空气中的二氧化硫等含硫化合物在有雾、重金属飘尘或氮氧化物存在时,发生一系列化学反应而生成的硫酸雾和硫酸盐气溶胶。光化学烟雾则是在太阳光照射下,空气中的氮氧化物、碳氢化合物和氧化剂之间发生一系列光化学反应而生成的淡蓝色烟雾,其主要成分是臭氧、过氧乙酰基硝酸酯(PAN)、醛类及酮类等。

大量 SO_2 和 NO_x 排入大气后进一步氧化,被大气降水吸收,成为酸性降雨返回地面,称为酸雨。酸雨目前已经酿成国际公害。

有一些气体,例如 CO_2 、氟氯烃类等,过去并不视为大气污染物加以控制,近年的研究发现,它们在全球气候变化中产生重大影响,氟氯烃类气体破坏臭氧层,过多的 CO_2 则使大气温度升高,因此现在也作为大气污染物限制排放。

工业废气或大气中污染物的浓度常用体积百分数和 mg/m^3 表示。体积百分数和以前常用的 ppm 之间的关系为

$$0.0001\%(\text{体积})=1\times 10^{-6}=1\text{ ppm}$$

二、大气污染源

人类活动排放的大气污染物主要来自以下三个大的方面。

1. 燃料燃烧 火力发电厂、工业和民用锅炉以及各种炉窑的燃料燃烧过程产生的大量烟尘、二氧化硫、氮氧化物等多种大气污染物,是造成大气污染最重要的原因。

表 1-1 各种主要工业企业产生的大气污染物

工业部门	企 业	排出的主要大气污染物
电力	火力发电厂	烟尘、 SO_2 、氮氧化物、CO、苯并芘
	核发电厂	放射性尘埃
冶金	钢铁厂	烟尘、 SO_2 、CO、氧化铁粉尘、氧化钙粉尘、锰尘
	有色金属冶炼厂	灰尘(含有各种金属如铅、锌、镉、铜等)、 SO_2 、汞蒸气
	炼焦厂	烟尘、 SO_2 、CO、 H_2S 、苯、酚、萘、烃类
石化、化工	炼油厂	烟尘、 SO_2 、烃类、苯、酚
	石油化工厂	SO_2 、 H_2S 、氟化物、氮氧化物、氯化物、烃类
	氮肥厂	粉尘、氮氧化物、CO、 NH_3 、酸雾
	磷肥厂	粉尘、氯化氢、四氟化硅、硫酸气溶胶
	硫酸厂	SO_2 、氮氧化物、砷、硫酸气溶胶
	氯碱厂	氯气、氯化氢、汞蒸气
	化学纤维厂	烟尘、硫化氢、氨、 CO_2 、甲醇、丙酮、二氯甲烷
	合成橡胶厂	丁二烯、苯乙烯、乙烯、异丁烯、异戊二烯、丙烯腈、二氯乙烷、二氯乙烯、乙硫醇、氯化甲烷
	农药厂	砷、汞、氯、农药
	冰晶石厂	氟化氢
染料厂	SO_2 、氮氧化物	

续表

工业部门	企业	排出的主要大气污染物
建材	水泥厂	烟尘、水泥尘
	石棉加工厂	石棉粉尘
	砖瓦厂	烟尘、CO 等
机械	机械加工厂	烟尘、金属、粉尘
轻工	造纸厂	烟尘、硫醇、硫化氢、二氧化硫
	仪器仪表厂	汞、氰化物、铬酸
	灯泡厂	烟尘、汞

2. 工业生产过程 表 1-1 列出了排放大气污染物较多的几个工业部门(电力、冶金、石化、化工、建材、机械、轻工等)所排放的主要大气污染物,表 1-2 则列出了各种大气污染物的主要来源。

表 1-2 各种主要空气污染物及其主要来源

污染物	主要来源
烟尘及生产性粉尘	火力发电厂、钢铁厂、有色金属冶炼厂、化工厂、造纸厂等
二氧化硫	火力发电厂、石油化工厂、有色金属冶炼厂、硫酸厂、染料厂、一些使用硫化物的企业如造纸厂、缫丝厂等
氮氧化物	氮肥厂、硝酸厂、合成纤维厂、染料厂、炸药厂、汽车废气
一氧化碳	焦化厂、炼铁厂、化工厂、煤气发生站、石灰窑、砖瓦窑、汽车废气等
烃类	石油化工厂、炼油厂、汽车废气等
硫化氢	化学纤维厂、炼油厂、制药厂、生产各种硫化物杀虫剂厂、生产二硫化碳厂
氯化氢	氯碱厂、镁厂、钛厂、石油化工厂等
二硫化碳	化学纤维厂、橡胶厂、生产二硫化碳厂
氟化氢	炼铝厂、磷肥厂、冰晶石厂、氟塑料生产厂等
氯气	氯碱厂、各种氯化物制造厂、漂白粉、合成盐酸等
氰化氢	有机玻璃厂、丙烯腈厂
氨气	合成氨厂、氮肥厂、石油化工厂等
汞	电解汞法氯碱厂、聚氯乙烯厂、农药厂、冶炼厂、灯泡厂、仪器仪表厂、炸药厂
光化学氧化剂	汽车废气、石油化工厂和氮肥厂的排气加上太阳辐射
铅	印刷厂、蓄电池厂、有色金属冶炼厂、烷基铅厂、汽车废气
砷	硫酸厂、农药厂、冶炼厂等
铬	有色金属冶炼厂、铬盐厂
镉、铜	有色金属冶炼厂等
锌粉尘	

3. 交通运输 汽车、火车、飞机、轮船等交通工具的动力装置在燃烧燃料时排放大量大气污染物。

以上前两项称为固定源,本书所述工业废气主要指这些污染源所排放的废气;第三项则称为流动源,所排废气的净化未作为本书讨论的重点。

三、工业废气的污染危害

工业废气将大量污染物排入大气,使大气环境质量下降,将造成以下 5 个方面的危害,即人体健康危害、居民生活费用增加、物质材料破坏、农林水产损失以及全球大气环境影响。这种危害和损失的程度取决于大气污染物的性质、浓度和滞留时间。

(1) 人体健康危害 工业废气污染对人体健康的危害包括急性和慢性两方面。急性危害一般出现在工业区及其附近地区。慢性危害是在大气污染物直接或间接的长期作用下对人体健康机能造成的危害。这种危害短期表现不明显,不容易觉察。据我国 10 个城市统计,呼吸道疾病的患病率和检出率在工业重污染区为 30%~70%,而轻污染区只有它的一半。

(2) 居民生活费用增加 大气污染造成的居民生活费用增加,包括家庭清扫、洗涤和生活物质损坏三方面。据 1985 年估算,每年全国损失达 16 亿元。

(3) 物质材料破坏 排到大气中的二氧化硫、氮氧化物、各种有机物等不仅直接腐蚀建筑物、桥梁、各种机器和设备,而且衍生的二次污染物光化学氧化剂、酸雨等能对这些物质材料产生更大的破坏。据调查,南京和重庆的大气环境相似,但重庆与南京相比,大气中二氧化硫的浓度和降水的酸度要高得多,所以重庆暴露在室外的金属材料和建筑物的腐蚀速度要快得多。南京这些材料和建筑物的维修周期要比之长 1~5 倍。

(4) 农林水产损失 大气污染物对我国农业、森林、水产也造成严重的危害,其中特别是农业和森林受害最大。大气污染导致农业减产、林木衰败。据 1985 年估算,仅 SO₂ 和氟污染这两项,全国每年约损失 20 亿元。

(5) 全球大气环境影响 工业废气中的污染物不仅能污染低层大气,对人体健康、农业、森林和物质材料造成危害,而且能对上层大气产生影响,形成酸雨、臭氧层破坏、气温升高区域性、全球性重大环境问题,可能给人类带来更严重的危害和灾难。

第三节 我国工业废气污染及治理现状

大气污染是我国当前最突出的环境问题之一,它已经给人体健康带来了严重危害,对国民经济造成了巨大损失。工业废气所排放的大量污染物是造成我国严重大气污染的最重要的原因。

一、我国大气污染的特点

概括地说,我国的大气污染是以尘和 SO₂ 为主要污染物的煤烟型污染。北方城市的污染水平高于南方城市(尤以冬季为甚),冬季高于夏季,早晚高于中午。北方城市的突出问题是冬季(采暖期)的颗粒物污染和 SO₂ 污染(虽然非采暖期大气中颗粒物浓度也较高,但主要来自风沙和扬尘),南方城市则是 SO₂ 造成的酸雨和高硫煤地区的 SO₂ 污染。

我国大气污染的特点是由于我国能源以煤炭为主,且大部分直接燃烧,能源利用方式落后、利用率低、能耗高,低空排放,以及城市畸形发展,人口、经济、交通过分集中于城区等原因造成的。此外,南方气候湿润,土质偏酸性,大气中碱性物质少,对酸的缓冲能力弱,加上大气中 SO₂ 浓度高,有利于酸雨的形成。

二、我国工业废气污染现状

我国大气污染物的排放量很大,最主要的污染物是二氧化硫和颗粒物。1995 年我国二氧化硫排放总量达 2341 万吨,超过美国,成为世界二氧化硫排放第一大国。1997 年,我国二氧化硫排放总量为 2346 万吨,达到了最高值。近几年,由于我国原煤产量和用量有所降低,各地加大了工业废气的治理力度,使我国主要大气污染物的排放量有所降低。尽管如此,我国

主要大气污染物的排放总量仍然是巨大的(见表 1-3)。

表 1-3 1997~1999 年我国 SO₂、烟尘和工业粉尘排放量(万吨)^①

污 染 物	1997 年		1998 年		1999 年	
	SO ₂	2346	工业 1852(78.9%) 生活 494(21.1%)	2090	工业 1593(76.2%) 生活 497(23.8%)	1857
烟 尘	1873	工业 1565(83.6%) 生活 308(16.4%)	1452	工业 1175(80.9%) 生活 277(19.1%)	1159	工业 953(82.2%) 生活 206(17.8%)
生产粉尘	1505		1322		1175	

① 摘自中国环境公报(1997~1999)。

大量工业废气的排放造成了我国严重的大气污染。据中国环境状况公报报道,1998年,我国大气环境污染仍然以煤烟型为主,主要污染物是二氧化硫和烟尘。酸雨问题依然严重。1998年,我国城市空气质量总体上虽比1997年有所改善,但仍处于较重的污染水平,北方城市重于南方城市。部分大、中城市出现煤烟与机动车尾气混合型污染,一些城市细粒子污染问题突出。

据对全国322个省控以上城市空气质量监测结果分析,总悬浮颗粒物(TSP)年日均值范围在0.011~1.199mg/m³之间,全国平均为0.289mg/m³。二氧化硫(SO₂)年日均值范围在0.002~0.385mg/m³之间,全国平均为0.056mg/m³。氮氧化物(NO_x)年日均值范围在0.006~0.152mg/m³之间,全国平均为0.037mg/m³。

在以上三项常规监测项目中,均达到国家《环境空气质量标准》二级标准的仅有89个城市,占统计城市数的27.6%。至少有一项超过国家《环境空气质量标准》二级标准的城市达233个,占统计城市数的72.4%。有140个城市空气质量超过《环境空气质量标准》三级标准,占统计城市数的43.5%。

我国以煤烟型为主的大气污染导致酸雨的覆盖面积约占国土面积的30%,呈明显的区域性特征。

1998年,全国降水平均pH值在4.13~7.79之间,降水年均pH值低于5.6的城市占统计城市数的52.8%。73.03%的南方城市降水平均pH值低于5.6,降水pH值低于4.5的城市有临安、株洲、益阳、韶关、清远、南昌、鹰潭和长沙等。北方城市中的图们、青岛、西安和铜川降水年均pH值低于5.6。

华中酸雨区的污染有所减轻,但中心区域降水年均pH值仍低于5.0,酸雨频率在70%以上。

华南酸雨区污染总体格局未变,但南部沿海部分城市降水年均pH值逐年降低,酸雨出现频率逐年上升。

华东、西南酸雨区总体污染程度仍维持在上一年水平,但福建西部的武夷山和云南、贵州西部的部分地区有所好转,降水年均pH值高于5.6。

青岛和图们是北方两个较为稳定的酸雨污染局部区域。其他几个北方城市降水年均pH值虽低于或接近5.6,但从酸雨频率来看,尚不足以说明该区域已形成稳定的酸雨区。

1999年酸雨频率大于80%的城市有怀化、景德镇、遵义、宜宾、赣州。

除了尘、SO₂及酸雨污染以外,我国一些城市还受到来自汽车尾气、石油和石油化工废气的污染。同时也可能产生光化学氧化剂污染。兰州西固地区烃类污染严重,这些烃类主要来

自该地区的炼油厂和石油化工厂,20世纪80年代非甲烷烃浓度一般达到 $3\sim 4\text{mg}/\text{m}^3$,最高曾超过 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 。烃类是二次污染物光化学氧化剂的前体物之一。因此在西固地区夏季常出现 O_3 超标现象,严重时就发生了光化学烟雾。近年来,由于加大了治理力度,该地区的烃类及氧化剂污染有所缓解。

其他不少地区还存在着与该地区生产相关的大气污染。如包头等城市的氟污染就很严重。

三、我国工业废气治理现状

近年来,我国工业结合技术改造,结构调整,开发综合利用新技术、新工艺和新设备,工业废气的治理取得了显著成就。一些地区的工业废气污染受到控制或缓解。我国工业废气所排污染物的增长远低于工业产值和能源消耗的增长(一些污染物甚至呈负增长),万元产值的排污量大幅度下降。

近年来,我国逐步减少了原煤的产量和用量,调整了一些大中城市的能源结构,增加了低硫煤、天然气和城市煤气的用量,限制高硫煤的使用,致使1997年以后, SO_2 和尘的排放总量逐年下降(见表1-3)。

1998年,国务院批准了国家环境保护总局《酸雨控制区和二氧化硫污染控制区划分方案》,划定“两控区”的总面积为109万平方公里,占国土面积的11.4%,其中酸雨控制区面积为80万平方公里,占国土面积的8.4%;二氧化硫污染控制区面积为29万平方公里,占国土面积的3%。方案规定,在“两控区”内,禁止新建煤层含硫分大于3%的矿井,对建成的生产煤层含硫分大于3%的矿井,逐步实行限产或关停。除以热定电的热电厂外,禁止在大中城市城区及近郊区新建燃煤火电厂。新建、改造燃煤含硫量大于1%的电厂,必须建设脱硫设施。此后又编制了《酸雨控制区和二氧化硫污染控制区规划》。

在保护臭氧层方面,我国通过履行《保护臭氧层的蒙特利尔议定书》,控制了消耗臭氧层物质(ODS)的生产和消费的增长势头。1998年共有30个项目获《保护臭氧层的蒙特利尔议定书》多边基金的资助。截止到1998年底,获多边基金资助项目262个,总金额2.9亿美元。其中,已有23个项目验收合格,实现ODS淘汰量23898吨ODP(ODP系指以CFC11为当量的消耗臭氧层潜能值)。1998年,对多边基金项目的申报方式和实施方式进一步创新,以逐渐形成根据行业和ODS生产和消费特点的单个项目、伞型项目和行业淘汰相结合的淘汰方式,不仅保证了ODS淘汰的效果,同时提高了多边基金的使用效率。

1. 我国工业废气治理的基本经验

① 严格执行“三同时”,控制新污染源。近年来工业建设中环境保护设施与主体工程同时设计、同时投产执行率逐年提高,新建企业的废气排放受到较严格的控制。新建企业由于执行“三同时”规定,一批大型骨干工程废气排放控制达到了国际先进水平。宝山钢铁总厂、一些大型化肥厂和石油化工厂等废气排放都达到了国际同类企业的先进水平。

② 限期治理重点工业污染源。近年来,国家和地方政府对一些污染严重的企业采取了限期治理的措施,收到了良好的效果。特别是截止到2000年12月31日的“一控双达标”措施大大强化了工业废气治理的力度,一大批工业废气源在2000年12月31日前得以治理,对遏制我国大气污染日趋严重的状况起到了十分重要的作用。

③ 开发一批新技术、新设备用于工业废气治理,显著提高了废气治理的效率。

④ 开发了一批工业废气资源化新技术。这些技术的应用既解决了工业废气中某些污染物的污染,又回收了资源,变废为宝。

⑤ 建成一批废气治理示范工程。针对我国量大面广的颗粒物和二氧化硫污染,建设了一