

三废处理技术及工程应用丛书

# 大气污染防治技术及 工程应用

熊振湖 费学宁 池勇志 等编

机械工业出版社

本书共分四篇。第一篇“概论”，不仅介绍了大气污染物及其发生源，污染物对人、植物及器物的影响，提出大气污染物的综合防治措施，还介绍了主要工业企业排放的废气污染物产生量和排放量的估算方法。第二篇“颗粒污染物控制技术”，介绍了颗粒污染物的主要物理特性及各种除尘器的工作原理、设备结构、设计选型、除尘系统的设计计算。第三篇“气态污染物控制技术”，介绍了气态污染物物理化学特性及气态污染物的各种净化方法的净化原理、净化装置的设计计算与应用。第四篇“特定污染行业废气控制技术及其实例”，主要阐述了汽车、石油化工、化学工业、钢铁工业、建材工业与电力工业废气的治理方法，并且列举了大量工程治理方面的实例。

本书是一部具有系统性、科学性、完整性、实用性的大气污染防治实用技术的专著。可供工业企业中从事大气环境保护的工程技术人员使用，也可供环境管理干部及技术人员参考，还可作为高等院校环境工程专业师生的参考书和工具书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

大气污染防治技术及工程应用 /熊振湖等编. —北京：  
机械工业出版社，2003.7

(三废处理技术及工程应用丛书)

ISBN 7-111-12294-1

I. 大... II. 熊... III. 空气污染-污染防治  
IV. X51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 041959 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)  
责任编辑: 杨少彤 版式设计: 冉晓华 责任校对: 魏俊云  
封面设计: 鞠 杨 责任印制: 闫 焱  
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行  
2003 年 7 月第 1 版·第 1 次印刷  
787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·28 印张·690 千字  
0 001—4 000 册  
定价: 45.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换  
本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646  
封面无防伪标均为盗版

# 前 言

我国的环境保护事业已取得了显著的成就，多年来进行了大量的环境治理和建设工程，取得了显著效益，但也无可否认，我国不少地区和部门环境污染问题仍然严重，必须引起全社会的高度重视，并下大决心积极寻求解决办法，绝不能等闲视之。

我国的大气污染问题正随着快速的城市化和工业化而加剧，探讨大气污染防治对策是一个急迫的问题。然而，在我国与大气污染防治对策密切相关的治疗技术尚处于起步阶段。

为此，我们编写了《大气污染防治技术及工程应用》一书，旨在总结、整理国内外有关的先进技术、科研成果和生产实践经验，为广大读者提供一部具有系统性、科学性、完整性、实用性的大气污染防治实用技术专著，以促进我国环境保护事业的发展，为我国社会主义建设、子孙千秋万代和人类的幸福作出贡献。

发达国家的实践经验表明，大气污染的防治应从末端治理转化为全过程的控制，这是完全正确的。但是和发达国家相比，我国大气污染防治水平还很低，尤其是大中型城市空气污染状况更为严重，末端治理还是必不可少的。因而在吸收和运用这些新概念时，要完整的理解，不能顾此失彼。

《大气污染防治技术及工程应用》共分四篇。第一篇“概论”包含了大气污染与污染源、废气污染物产生量和排放量估算等。第二篇“颗粒污染物控制技术”包含了颗粒污染物的物理特性及除尘器性能以及机械式除尘器、湿式除尘器、过滤式除尘器、电除尘器、除尘系统设计等。第三篇“气态污染物控制技术”包含了吸收法净化气态污染物、吸附法净化气态污染物、催化法净化气态污染物及气态污染物的其他净化法等。第四篇“特定污染行业废气控制技术及实例”，阐述了汽车、石油化工、化学工业、钢铁工业、建材工业与电力工业废气的治理方法，并且给出了工程治理方面的实例。本书实践性强，内容丰富，图文并茂，思路新颖。应用范围涉及矿业、化工、冶金、火电、建材等工业的许多领域，对关注环境保护事业或致力于大气环境治理工作的科研、工程技术人员以及教育工作者均具有一定的可读性。

本书是以我国的环境保护管理人员、大气污染防治技术工作者以及从事大气环境保护的团体和个人为对象编写而成的，殷切希望该书能广泛应用于相关各领域，以达到改善我国大气污染状况的目的。

在本书出版工作中，得到了有关部门的大力支持，承蒙许多有识人士的指

导，尤其在该书的编排和出版过程中得到杨少彤编辑的大力支持。在初稿完成后，国家环境保护恶臭污染控制重点实验室主任石磊先生在百忙中对本书进行了认真审核，提出了很多宝贵的意见，并为本书作序，在此一并表示衷心的感谢。本书第1、2章由吴丽萍编写；第3、4章、第5章第1~5节由熊振湖编写；第5章第6~8节、第9章、第20章由王佳编写；第6章、第8章第3节由付翠莲编写；第7章、第8章第1~2节由池勇志编写；第10、13章由张社鹏编写；第11、12章由马瑞巧编写；第14~19章由费学宁编写。由于编者水平有限，写作时间仓促，有错误之处，敬请读者和专家指正。

编 者

2003年7月

# 序

我国的大气污染是随着工业生产的发展而同时产生的。我国实行对外开放以来，经济发生了巨变，特别是经济发达地区，但随之而来的环境保护也成为了一个不容忽视的重要问题。特别是控制大气污染已成为急待解决的问题之一。

我国对大气污染的防治历来十分重视，自 20 世纪 70 年代以来，借鉴了工业发达国家的经验，加强了工业废气的控制与管理，国家和企业对大气污染治理投入了大量资金，建设了大批治理污染的设施，也取得了一定的环境效益。然而，由于我国工业污染治理的发展远远落后于工业发展。到目前为止，我国工业污染的治理率还较低，工业废气治理率仅为 50%，因此，我国大气污染的治理任务还是相当艰巨。

在环境污染中，最显而易见量大面广，而又危害严重的是大气污染，大气污染对健康的影响是最应受到重视的，因当大气被污染后，人们吸入的空气很难有别的选择。从已发生的污染事件看，大气污染事件的次数和所影响的人群都是最多的。

我国的大气污染中工业废气造成的污染约占 70%，随着工业生产的迅速发展，工业废气污染的防治工作越来越引起人们的广泛关注。造成大气污染的工业行业和产品种类繁多，组成复杂，污染物浓度高，各种不同类型的工业废气，致使大气污染防治技术有很大差异，因此，进行有效的工业废气防治需要一系列行之有效的防治技术和方法。我国很多工矿企业就是因为难觅比较适宜的防治技术，影响到治理设施迟迟不能建设，已经建成的治理设施的，也有不少企业，因治理技术不过关，结果既消耗了人力、物力而又没有收到预期的环境效益。因此，加强工业废气污染治理技术的开发，研究及技术应用的总结是非常重要的。

《大气污染防治技术及工程应用》一书是一部综合性的实用技术书籍，本书的主要内容是介绍我国工业生产中工业废气即：颗粒污染物、气态污染物和特定污染行业废气等的大气污染防治与工程应用的理论和实例。本书在阐述几乎涵盖大气污染主要污染物治理工程理论的同时，收集了大量的用不同工艺流程治理各种大气污染物的实例，这些实例都是根据技术可行、经济合理、环境效益比较显著的原则筛选出来的，而每个实例，又都从污染源状况、治理工艺、工程设计、运行参数、主要设备型号、构筑物尺寸、运行状况、投资金额及效益情况等诸多方面做了详尽地介绍。

《大气污染防治技术及工程应用》一书可直接为工矿企业环境保护治理工程

服务，工矿企业可以从书中全面了解有关的防治技术并从提供的大量技术信息中查找到可行的防治技术，从而为企业节约大量的人力和物力。

这本书还可供各级环境保护部门从事环境管理和工业污染源监督制定环境保护技术政策和工业废气排放标准等工作人员参阅，对我国从事环境保护教学和环境保护科研工作的技术人员也具有重要的参考价值。

《大气污染防治技术与工程应用》一书是天津城市建设学院环境保护工作同仁根据多年教学经验结合工程实例编纂而成，该书既有基础理论，又有实践技术，融国外先进经验和国内科研成果于一体。内容丰富，涉及面广，图文并茂，此书的出版定会有助于促进大气污染防治与技术应用的推广和发展。

石磊

2003年7月

# 目 录

## 前言 序

## 第 1 篇 概论 ..... 1

### 第 1 章 概述 ..... 1

- 1.1 大气污染 ..... 1
- 1.2 大气污染物及其发生源 ..... 3
  - 1.2.1 大气污染物的分类 ..... 3
  - 1.2.2 大气污染源分类 ..... 5
  - 1.2.3 污染物主要排放源简介 ..... 7
  - 1.2.4 大气污染的影响 ..... 8
- 1.3 大气污染物的综合防治措施 ..... 11

### 第 2 章 废气污染物产生量和排放量 估算 ..... 14

- 2.1 一般的估算方法 ..... 14
  - 2.1.1 有组织排放的估算方法 ..... 14
  - 2.1.2 无组织排放的估算方法 ..... 15
- 2.2 燃煤设备污染物产生量和排放量  
的估算 ..... 17
  - 2.2.1 工艺描述 ..... 18
  - 2.2.2 产污量和排污量的估算 ..... 19
  - 2.2.3 燃煤工业锅炉污染物的产污和  
排污系数 ..... 19
  - 2.2.4 燃煤茶浴炉、食堂大灶烟气中  
污染物的产污和排污系数 ..... 23
- 2.3 主要工业部门污染物产生量和  
排放量的估算 ..... 24
  - 2.3.1 产污量和排污量的估算  
方法 ..... 24
  - 2.3.2 主要工业部门产污和排污  
系数 ..... 25

## 第 2 篇 颗粒污染物控制技术 ..... 39

### 第 3 章 颗粒污染物物理特性及除尘 器性能 ..... 39

- 3.1 颗粒污染物的物理特性 ..... 39

- 3.1.1 粉尘的粒径 ..... 39
- 3.1.2 粉尘的粒径分布 ..... 43
- 3.1.3 粉尘的比表面积 ..... 47
- 3.1.4 粉尘的密度与堆积密度 ..... 47
- 3.1.5 粉尘的凝聚性 ..... 48
- 3.1.6 粉尘的湿润性 ..... 49
- 3.1.7 粉尘的荷电与导电性 ..... 49
- 3.1.8 粉尘的安息角与滑动角 ..... 51
- 3.1.9 粉尘的自燃性和爆炸性 ..... 52
- 3.1.10 粉尘的粘附性 ..... 54
- 3.1.11 粉尘的磨损性 ..... 55
- 3.1.12 粉尘的光学特性 ..... 56
- 3.1.13 粉尘的放射性 ..... 57
- 3.2 除尘器的性能及其分类 ..... 57
  - 3.2.1 流量 ..... 58
  - 3.2.2 压力损失 ..... 58
  - 3.2.3 除尘效率 ..... 58
- 3.3 除尘器的选择与分类 ..... 62
  - 3.3.1 除尘器的选择要点 ..... 62
  - 3.3.2 除尘器的分类 ..... 64

### 第 4 章 机械式除尘器 ..... 66

- 4.1 重力沉降室 ..... 66
  - 4.1.1 重力沉降室工作原理和  
分类 ..... 66
  - 4.1.2 重力沉降室设计与计算  
实例 ..... 67
  - 4.1.3 除尘效率和压力损失 ..... 70
  - 4.1.4 应用实例 ..... 71
- 4.2 惯性除尘器 ..... 72
  - 4.2.1 工作原理与构造型式 ..... 72
  - 4.2.2 重力沉降式气流反转惯性除尘  
器及其设计参数 ..... 73
  - 4.2.3 百叶窗式除尘器 ..... 74
- 4.3 旋风除尘器 ..... 77
  - 4.3.1 工作原理、结构尺寸、分类和

除尘性能影响因素 .....	78	6.2.1 滤料的材质、特性参数和种类 .....	128
4.3.2 设计计算与设计实例 .....	81	6.2.2 袋式除尘器滤料的选用 .....	130
4.3.3 国内主要旋风除尘器类型代号 .....	85	6.2.3 滤料的新进展 .....	132
4.3.4 国内主要旋风除尘器结构和性能介绍 .....	86	6.3 袋式除尘器的性能 .....	133
4.3.5 选型方法、选型实例和选型注意事项 .....	99	6.3.1 除尘效率 .....	133
<b>第5章 湿式除尘器</b> .....	102	6.3.2 过滤速度 .....	133
5.1 湿式除尘器的工作原理和分类 .....	102	6.3.3 阻力 .....	134
5.1.1 工作原理 .....	102	6.4 设计计算与设计实例 .....	135
5.1.2 分类 .....	103	6.4.1 设计计算 .....	135
5.2 泡沫除尘器 .....	104	6.4.2 设计实例 .....	136
5.2.1 结构与工作原理 .....	104	6.5 袋式除尘器的应用和选择 .....	138
5.2.2 板除尘效率、压力损失的计算与性能 .....	104	6.6 国内主要袋式除尘器介绍 .....	138
5.3 CLS型立式旋风水膜除尘器 .....	106	6.6.1 机械振动类袋式除尘器 .....	138
5.3.1 结构和工作原理 .....	106	6.6.2 分室反吹类袋式除尘器 .....	140
5.3.2 主要结构尺寸和性能参数 .....	107	6.6.3 喷嘴反吹类袋式除尘器 .....	143
5.4 卧式旋风水膜除尘器 .....	108	6.6.4 振动、反吹并用类袋式除尘器 .....	144
5.4.1 结构和工作原理 .....	108	6.6.5 脉冲喷吹类袋式除尘器 .....	146
5.4.2 主要结构尺寸和性能参数 .....	109	6.7 颗粒层除尘器 .....	152
5.5 麻石旋风水膜除尘器 .....	111	6.7.1 工作原理和分类 .....	152
5.5.1 结构和工作原理 .....	112	6.7.2 性能及影响因素 .....	153
5.5.2 主要结构尺寸和性能参数 .....	112	6.7.3 几种颗粒层除尘器介绍 .....	154
5.6 水浴除尘器 .....	113	<b>第7章 电除尘器</b> .....	159
5.6.1 结构和工作原理 .....	113	7.1 电除尘器的工作原理、分类和结构 .....	160
5.6.2 喷头的埋入深度与冲击速度 .....	113	7.1.1 工作原理 .....	160
5.6.3 主要结构尺寸和性能参数 .....	114	7.1.2 分类 .....	162
5.7 冲激式除尘机组 .....	114	7.1.3 结构 .....	163
5.7.1 结构和工作原理 .....	114	7.2 电除尘器的除尘效率及其影响因素 .....	166
5.7.2 供水与水位控制 .....	115	7.2.1 除尘效率 .....	166
5.7.3 主要系列和性能参数 .....	116	7.2.2 除尘效率的影响因素 .....	167
5.8 文丘里除尘器 .....	118	7.3 电除尘器的设计计算和计算实例 .....	170
5.8.1 构造和工作原理 .....	118	7.3.1 设计计算 .....	170
5.8.2 设计与计算 .....	119	7.3.2 设计实例 .....	176
5.8.3 主要结构尺寸和性能参数 .....	121	7.4 国内主要电除尘器介绍 .....	181
<b>第6章 过滤式除尘器</b> .....	122	7.4.1 板式电除尘器 .....	181
6.1 袋式除尘器的除尘原理和分类 .....	122	7.4.2 管式电除尘器 .....	184
6.1.1 除尘原理 .....	122	<b>第8章 除尘系统设计</b> .....	187
6.1.2 分类和命名代号 .....	124	8.1 管道系统的设计和实例 .....	187
6.2 袋式除尘器的滤料 .....	128	8.1.1 各种装置的定位及管道布置 .....	

的一般原则 .....	187	11.3 吸附法的应用 .....	283
8.1.2 管道系统的设计计算 .....	188	<b>第 12 章 催化法净化气态污染物</b> .....	293
8.1.3 设计实例 .....	196	12.1 催化原理与催化剂 .....	293
8.2 风机的选择 .....	198	12.1.1 催化原理 .....	293
8.2.1 风机的分类 .....	198	12.1.2 催化剂 .....	294
8.2.2 风机的选择计算 .....	199	12.2 气固催化反应器及催化系统 .....	301
8.2.3 选择风机时的注意事项 .....	199	12.3 催化转化法净化气态污染物	
8.3 排灰装置 .....	201	的应用 .....	308
8.3.1 排灰装置选用原则 .....	201	<b>第 13 章 气态污染物的其他净</b>	
8.3.2 干式排灰装置 .....	202	<b>化法</b> .....	317
8.3.3 湿式排灰装置 .....	207	13.1 冷凝法 .....	317
<b>第 3 篇 气态污染物控制</b>		13.1.1 冷凝原理及净化设备 .....	317
<b>技术</b> .....	211	13.1.2 冷凝法处理高浓度 HCl	
<b>第 9 章 气态污染物特性及治理方法</b>		废气 .....	320
概述 .....	211	13.2 燃烧法净化气态污染物 .....	321
9.1 气态污染物特性 .....	211	13.3 膜分离法净化气态污染物 .....	324
9.1.1 气态污染物的物理特征 .....	211	<b>第 4 篇 特定污染行业废气控制</b>	
9.1.2 气态污染物的物理化学		<b>技术及实例</b> .....	329
特性 .....	217	<b>第 14 章 汽车排气净化技术</b> .....	329
9.2 气态污染物治理概述 .....	220	14.1 汽车尾气净化技术概述 .....	329
<b>第 10 章 吸收法净化气态污染物</b> .....	224	14.1.1 汽车尾气污染物的形成 .....	330
10.1 吸收原理及工艺 .....	224	14.1.2 汽车排气的净化措施 .....	332
10.1.1 吸收原理 .....	224	14.1.3 汽车尾气的治理 .....	333
10.1.2 吸收工艺 .....	230	14.2 汽车燃料 .....	333
10.2 吸收设备的设计与选型 .....	232	14.2.1 汽车燃料分类 .....	333
10.2.1 吸收设备的分类 .....	232	14.2.2 汽车用燃料的改进 .....	334
10.2.2 吸收设备的设计程序 .....	234	14.2.3 适应环保要求的燃料	
10.2.3 填料塔的设计与实例 .....	235	技术 .....	334
10.2.4 吸收设备的选择原则与		14.2.4 可燃性气体替代燃料 .....	335
选型 .....	250	14.2.5 可燃性液体替代燃料 .....	336
10.3 吸收法的应用 .....	252	14.2.6 混合燃料或电力的替代 .....	337
<b>第 11 章 吸附法净化气态污染物</b> .....	258	14.3 汽车排气的机内净化 .....	338
11.1 吸附原理与吸附剂 .....	258	14.3.1 汽油机空燃比的控制 .....	338
11.1.1 吸附原理 .....	258	14.3.2 汽油机电控喷油系统介绍 .....	338
11.1.2 吸附剂 .....	265	14.3.3 废气再循环 .....	339
11.2 吸附装置的设计 .....	269	14.3.4 汽油机机内净化技术的基本	
11.2.1 吸附装置的类型 .....	269	方法 .....	339
11.2.2 吸附器的设计与设计		14.4 汽车排气的机外净化方法与	
举例 .....	273	净化装置的选用 .....	340
11.2.3 吸附装置的选择原则和		14.4.1 汽车排气的机外净化	
选型 .....	282	方法 .....	340

14.4.2 汽车排气净化装置的 选用 .....	341	17.2 工程实例 .....	385
14.5 柴油车的排烟净化 .....	344	17.2.1 实例名称 .....	385
14.5.1 柴油机排放污染物的形成与 特点 .....	344	17.2.2 概况 .....	385
14.5.2 柴油机排放污染物的控制 .....	345	17.2.3 废气处理工艺流程 .....	386
<b>第 15 章 燃烧烟气的净化技术</b> .....	348	17.2.4 IFAC 工艺的技术特点 .....	388
15.1 燃烧过程的含硫废气控制 .....	348	17.2.5 主要消耗指标 .....	388
15.1.1 燃烧前脱硫 .....	348	<b>第 18 章 石油化工废气的治理</b> .....	389
15.1.2 燃烧中脱硫 .....	349	18.1 概述 .....	389
15.1.3 燃烧后脱硫 .....	349	18.1.1 石油炼制及废气排放 .....	389
15.1.4 国外脱硫技术应用 .....	353	18.1.2 石油化工及废气排放 .....	390
15.1.5 国内脱硫技术发展概况及 应用事例 .....	354	18.1.3 废气来源、分类及特点 .....	390
15.2 燃烧过程的含氮废气控制 .....	354	18.1.4 废气对环境的污染 .....	391
15.2.1 NO <sub>x</sub> 形成机理概述 .....	354	18.1.5 存在问题 .....	393
15.2.2 氮氧化物的治理方法 .....	355	18.1.6 废气污染治理对策 .....	394
<b>第 16 章 建材工业废气治理</b> .....	359	18.2 石油化工废气治理 .....	394
16.1 概述 .....	359	18.2.1 石油化学工业废气治理 技术 .....	394
16.1.1 废气的来源 .....	359	18.2.2 治理现状 .....	398
16.1.2 废气的分类 .....	360	18.2.3 废气治理技术发展趋势 .....	400
16.1.3 废气的特点 .....	360	18.3 工程实例 .....	401
16.1.4 废气污染现状及防治 .....	361	18.3.1 氧化沥青废气治理工程 实例 .....	401
16.1.5 废气治理技术的发展 趋势 .....	365	18.3.2 胜利炼油厂高含硫酸性气的 治理 .....	403
16.2 特定建材工业废气治理 .....	367	<b>第 19 章 化学工业废气治理</b> .....	406
16.2.1 水泥工业废气治理 .....	367	19.1 化工废气概述 .....	406
16.2.2 建筑卫生陶瓷工业废气 治理 .....	370	19.1.1 化工废气的来源 .....	406
16.2.3 油毡、砖瓦工业废气治理 .....	372	19.1.2 化工废气的分类 .....	406
16.3 工程实例—北京燕山水泥厂采用 电除尘器治理立筒预热器窑窑层 废气工程实例 .....	378	19.1.3 化工废气的特点 .....	407
<b>第 17 章 电力工业废气治理</b> .....	382	19.1.4 治理现状、采用技术及存在 问题 .....	408
17.1 概述 .....	382	19.2 工程实例 .....	410
17.1.1 废气的来源和分类 .....	382	19.2.1 硝铵车间硝酸尾气治理工程 实例 .....	410
17.1.2 燃煤电厂烟气的特点 .....	382	19.2.2 南京化学工业公司化肥厂利用 普钙含氟废气生产氟硅酸钠 和硅胶 .....	413
17.1.3 烟气污染物的危害 .....	383	<b>第 20 章 钢铁工业废气治理</b> .....	417
17.1.4 燃煤电厂废气治理的对策 .....	383	20.1 概述 .....	417
17.1.5 电力工业废气处理 .....	384	20.1.1 钢铁工业废气的来源及 特点 .....	417
17.1.6 燃煤电厂废气治理技术的 发展趋势 .....	384	20.1.2 钢铁工业废气的特点 .....	418

20.1.3 钢铁工业废气的治理 对策 .....	419	20.2.2 炼铁厂废气治理 .....	422
20.1.4 减少钢铁工业中废气排放量 的技术措施 .....	419	20.2.3 炼钢厂废气治理 .....	423
20.1.5 废气治理现状 .....	420	20.2.4 轧钢厂及金属制品厂废气 来源 .....	424
20.2 特定钢铁工艺废气治理 .....	421	20.2.5 铁合金厂废气治理 .....	425
20.2.1 烧结厂废气治理 .....	421	20.3 工程实例 .....	426
		参考文献 .....	432

# 第 1 篇 概 论

## 第 1 章 概 述

### 1.1 大气污染

大气是人类赖以生存的最基本的环境要素，一切生命过程都离不开大气。大气不仅能通过自身运动进行热量调节，给人类创造一个适宜的生活环境和劳动环境，并且还能阻挡过量的紫外线照射到地球表面，有效地保护人类和地球上的生物。

一般说，从自然科学的观点来看，“空气”和“大气”两者并无实质性的差别。但在研究近地层空气污染规律时，往往将室外空气称为“大气”，将室外地区性空气污染称为“大气污染”，而对室内或车间内的空气污染称“空气污染”。亦有人将大气污染理解为这两种污染的总称。

国际化标准组织（ISO）认为，“大气污染，通常是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。”对人体舒适、健康的危害，包括对人体正常生理机能的影响，引起急性病以至死亡等；而福利，则包括与人类协调并共存的生物、自然资源及财产、器物等。人类活动包括生活活动和生产活动两方面。自然过程包括火山活动、森林火灾、海啸、土壤和岩石风化及大气圈的空气运动等。

随着经济的快速发展，人类在大量消耗能源的同时，将大量废气、烟尘杂质排入环境大气，严重影响了大气环境的质量，尤其在人口稠密的城市和大规模排放源的附近区域更为突出。表 1-1 列举了一些重要的气体污染物，这些污染物在污染区的典型含量与清洁区的含量相比可高出几倍甚至几百倍。

表 1-1 清洁与污染空气的成分含量对比

成 分	清洁空气	污染空气	成 分	清洁空气	污染空气
SO <sub>2</sub> 含量 / × 10 <sup>-6</sup>	0.001~0.01	0.02~2	NO <sub>x</sub> 含量 / × 10 <sup>-6</sup>	0.001~0.01	0.01~0.5
CO <sub>2</sub> 含量 / × 10 <sup>-6</sup>	310~330	350~370	碳氢物含量 / × 10 <sup>-6</sup>	1	1~20
CO 含量 / × 10 <sup>-6</sup>	<1	5~200	颗粒物含量 (μg/m <sup>3</sup> )	10~20	70~700

按大气污染的范围来说，大致可分为四类：①局限性的局部地区大气污染，如受某个工厂烟囱排气的直接影响；②涉及某个地区的地区性大气污染，如工矿区或其附近地区或整个城市大气受到污染；③涉及更广泛地区的广域污染，如超过行政区划的广大地域的大气污染；④必须从全球范围考虑的全球性大气污染或国际性大气污染。由于人类的活动，大气中

二氧化碳的含量已由 19 世纪的 0.028% 增加到现在的 0.033%，引起了全球性的气候异常；人类大量使用制冷剂导致臭氧层的破坏，又直接危及人类和动植物，这已是全世界人民共同关心的环境问题。

大气污染的产生与污染源排放的许多特征有关。显然，污染物的排放率及其物理和化学性质，决定了空气中所含污染物的数量和类型；另外，了解排放区的状况、排放的持续时间以及污染物排放的有效高度等污染源特征也很重要。

由大气污染流程图（图 1-1）可见，形成大气污染的三个要素是污染源、大气状态、污染汇——受体；大气污染的三个主要过程是：污染物排放、大气相互作用和接受体的影响；大气污染的流程顺序是：污染源排放污染物、进入大气环境的污染物与大气相互作用进行着散布、转化和排除等过程；最后，根据接受体的影响确定大气污染的程度。

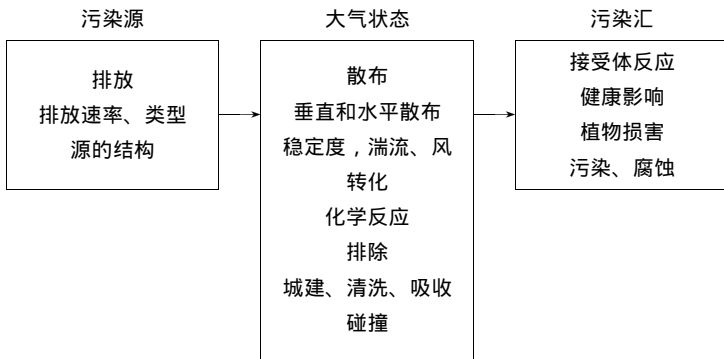


图 1-1 大气污染流程图<sup>[9]</sup>

污染物排放后，它们的扩散受多种尺度的大气运动（风和湍流）控制。温度层结构决定了大气稳定度，而稳定度本身又左右热力湍流强度（浮力）和地面混合层厚度。混合层厚度和湍流强度则调节污染物向上散布和较清洁空气从上空取代污染空气的速率。边界层内的风场对污染物的水平散布起着决定性的作用。风速不但决定污染物向下风向输送的距离，而且还决定由烟云“伸张”所引起的稀释，同时与地面粗糙度结合起来可以估计机械湍流的强度。风向则控制污染物输送的一般路径，它的变率约束烟云在横向展开的范围。

悬浮在大气中的污染物可能同时经受物理和化学的变化，这些变化由于气象特征如水汽或水滴多少、空气湿度、太阳辐射强度和其他大气物质等有关。污染物最后通过降水清洗、重力沉降或地面吸附和碰撞从大气中消除，这些都与大气状态有关。

总之，大气污染的形成需要具备三个条件：一是大量的污染物排入大气中；二是受当地不利气象条件的影响，使这些污染物不能在大气中及时扩散稀释；三是污染物在大气中积累或变化，以及有些污染物的协同作用，使这些污染物的浓度达到危害的程度。在这三个条件中，起重要作用的是大气污染物。

研究大气污染的目的在于：①查明污染物的来源；②查明污染物在大气中的物理化学行为及其对人体、动物、食品等的影响；③制定适宜的大气污染物监测手段，查明污染物在大气中的存在状态与存在浓度；④研究控制途径与治理方法；⑤提供立法管理的依据。这也是本书的研究重点。

## 1.2 大气污染物及其发生源

### 1.2.1 大气污染物的分类

按照 ISO 的定义，“大气污染物，系指由于人类活动或自然过程排入大气的并对人或环境产生有害影响的物质。”大气污染物的种类非常多，根据其存在状态，可将其概括为两大类：气溶胶状态污染物和气体状态污染物。

1. 气溶胶状态污染物 环境科学中把气溶胶定义为沉降速度可以忽略的固体粒子、液体粒子或固体和液体粒子在气体介质中的悬浮体。按其来源的性质不同，气溶胶又可分为一次气溶胶和二次气溶胶。前者系指从排放源排放的微粒，如从烟囱排出的烟粒、风刮起的灰尘以及海水溅起的浪花等；后者系指从源排放的气体，经过某些大气化学过程所形成的微粒，如来自火力发电厂、钢铁厂、金属冶炼厂、化工厂、水泥厂及工业和民用锅炉排放出的  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{SO}_2$  气体，经过大气氧化过程，最终转化为硫酸盐微粒。从大气污染控制的角度，按照气溶胶的物理性质，可将其分为如下几种：

(1) 粉尘 (dust)：系指悬浮于气体介质中的微小固体粒子，受重力作用能发生沉降，但在某一段时间内也能保持悬浮状态。通常是由于固体物质的破碎、分级、研磨等机械过程或土壤、岩石风化等自然过程形成的。粒子的形状往往是不规则的。粒子的尺寸一般为  $1\sim 200\mu\text{m}$  左右。

(2) 降尘：系指大气中的粒径大于  $10\mu\text{m}$  的固体粒子，靠重力作用能在较短时间内沉降地面。

(3) 飘尘：系指大气中的粒径在  $0.1\sim 10\mu\text{m}$  的固体粒子。它能长期地在大气中飘浮，故又称其为浮游粒子或可吸入颗粒物。

(4) 总悬浮微粒 (T.S.P.)：系指大气中的粒径小于  $100\mu\text{m}$  的固体粒子，它能较长时间地悬浮于大气中。这是为适应我国目前普遍采用的低容量 ( $10\text{m}^3/\text{h}$ ) 滤膜采样 (重量) 法而规定的指标。

(5) 飞灰 (fly ash)：系指由燃料燃烧产生的烟气带走的灰分中分散的较细的粒子。灰分 (ash) 系含碳物质燃烧后残留的固体残渣。

(6) 黑烟 (smoke)：通常系指由燃烧产生的可见气溶胶，是燃料不完全燃烧的碳粒，粒径约为  $0.5\mu\text{m}$ 。在某些文献中以林格曼数、黑烟的遮光率、沾污的黑度或捕集的沉降物的质量来定量地表示黑烟。

(7) 液滴 (droplet)：系指在静止条件下能沉降、在紊流条件下能保持悬浮，主要粒径范围在  $200\mu\text{m}$  以下的小液体粒子。

(8) 轻雾或霜 (moist)：系指液态分散性和液态凝聚性气溶胶的统称。粒径范围  $5\sim 100\mu\text{m}$ ，在气象学中它相当于能见度  $1\sim 2\text{km}$ 。

(9) 重雾 (fog)：系指属于气体中的液滴悬浮体的总称。在气象学中则指造成能见度小于  $1\text{km}$  的小水滴的悬浮体。在工程中，雾系泛指小液体粒子的悬浮体，是由液体蒸气的凝结、液体的雾化和化学反应等过程形成的，如水雾、酸雾、碱雾等。

2. 气态污染物 气态污染物种类极多，主要有五个方面：以二氧化硫为主的含硫化合

物、一氧化氮和二氧化氮为主的含氮化合物、碳氧化物、碳氢化物及卤素化合物等。

对于气态污染物，又可分为一次污染物和二次污染物。若大气污染物是从污染源直接排出的原始物质，则称为一次污染物。若是由一次污染物与大气中原有成分或几种一次污染物之间经过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，则称为二次污染物。气体状态污染物的种类见表 1-2 所示。在大气污染中，受到普遍重视的一次污染物主要有硫氧化物 ( $\text{SO}_x$ )、氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ )、碳氧化物 ( $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ ) 以及碳氢化合物 (HC)；受到普遍重视的二次污染物主要有硫酸烟雾和光化学烟雾等。硫酸烟雾为大气中的二氧化硫等硫化物，在有水雾、含有重金属的飘尘或氮氧化物存在时，发生一系列化学或光化学反应而生成的硫酸雾或硫酸盐气溶胶。光化学烟雾是在阳光照射下大气中的氮氧化物、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蓝色烟雾（有时带紫色或黄褐色），其主要成分有臭氧、过氧乙酰基硝酸酯、酮类及醛类等。

表 1-2 气体状态污染物的种类

污 染 物	一 次 污 染 物	二 次 污 染 物
含硫化合物	$\text{SO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$	$\text{SO}_3$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{MSO}_4$
含氮化合物	$\text{NO}$ 、 $\text{NH}_3$	$\text{NO}_2$ 、 $\text{HNO}_3$ 、 $\text{MNO}_3$
碳的氧化物	$\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$	无
碳氢化合物	HC	醛、酮、过氧乙酰基硝酸酯、 $\text{O}_3$
卤素化合物	$\text{HF}$ 、 $\text{HCl}$	无

(1) 硫氧化物。硫氧化物中主要是  $\text{SO}_2$ ，它是目前大气污染物中数量较大、影响面较广的一种气态污染物。大气中  $\text{SO}_2$  的来源很广，几乎所有工业企业都可能产生。它主要来自化石燃料（煤和石油）的燃烧过程以及硫化物矿石的焙烧、冶炼等热过程。火力发电厂、有色金属冶炼厂、硫酸厂、炼油厂以及所有燃煤或油的工业锅炉、炉灶等都排放  $\text{SO}_2$  烟气，在排放  $\text{SO}_2$  的各种过程中，约有 96% 来自燃料燃烧过程，其中火电厂排烟中的  $\text{SO}_2$  浓度虽然较低，但总排放量却最大。

(2) 氮氧化物。氮和氧的化合物有  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}_3$ 、 $\text{N}_2\text{O}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}_5$ ，总起来用氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ ) 表示。其中污染大气的主要是  $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ ，其中  $\text{NO}$  毒性不太大，但进入大气后可被缓慢地氧化成  $\text{NO}_2$ ，当大气中有  $\text{O}_3$  等强氧化剂存在，或在催化剂作用下，其氧化速度会加快。 $\text{NO}_2$  的毒性约为  $\text{NO}$  的 5 倍。当  $\text{NO}_2$  参与大气中的光化学反应，形成光化学烟雾后，其毒性更强。人类活动产生的  $\text{NO}_x$ ，主要来自各种炉窑、机动车和柴油机的排气，其次是化工生产中的硝酸生产、硝化过程、炸药生产及金属表面处理等过程。其中由燃料燃烧产生的  $\text{NO}$  约占 83%。

(3) 碳氧化物。 $\text{CO}$  和  $\text{CO}_2$  是各种大气污染物中发生量最大的一类污染物，它主要来自燃料燃烧和机动车排气。 $\text{CO}$  是一种窒息性气体，排入大气后，由于大气的扩散稀释作用和氧化作用，一般不会造成危害。但在城市冬季采暖季节或在交通繁忙的十字路口，当气象条件不利于排气扩散稀释时， $\text{CO}$  的浓度有可能达到危害环境的水平。

$\text{CO}_2$  是无毒气体，但当其在大气中的浓度过高时，使氧气含量相对减小，对人便会产生不良影响。地球上  $\text{CO}_2$  浓度的增加，能产生“温室效应”，使全球气温逐渐升高，生态系统

和气候发生变化。此事早已引起世界各国的密切关注。

(4) 碳氢化物。碳氢化物主要来自燃料燃烧和机动车排气。其中的多环芳烃类物质 (PAH), 如葱、萤葱、芘、苯并芘、苯并葱、苯并萤葱及晕苯等, 大多数具有致癌作用, 特别是苯并 (a) 芘就是致癌能力很强的物质, 并作为大气受 PAH 污染的依据。碳氢化物的危害还在于它参与大气中的光化学反应, 生成危害性更大的光化学烟雾。

由于近代有机合成工业和石油化学工业的迅速发展, 使大气中的有机化合物日益增多, 其中许多是复杂的高分子有机化合物。例如, 含氧的有机物有酚、醛、酮等, 含氮有机物有过氧乙酰基硝酸酯 (PAN)、过氧硝基丙酰 (PPN)、联苯胺、腈等, 含氯有机物有氯化乙烯、氯醇、有机氯农药 DDT, 除草剂 TCDD 等, 含硫有机物有硫醇、噻吩、二硫化碳等。这些有机物大量地进入大气中, 可能对眼、鼻、呼吸道产生强烈刺激作用, 对心、肺、肝、肾等内脏产生有害影响, 甚至致癌、致畸, 促进遗传因子变异, 因而是非常令人担忧的。

(5) 硫酸烟雾。硫酸烟雾系大气中的  $\text{SO}_2$  等硫化物, 在有水雾、含有重金属的飘尘或氮氧化物存在时, 发生一系列化学或光化学反应而生成硫酸盐或硫酸盐气溶胶。硫酸烟雾引起的刺激作用和生理反应等危害, 要比  $\text{SO}_2$  气体强烈得多。

(6) 光化学烟雾。光化学烟雾是在阳光照射下, 大气中的氮氧化物、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蓝色烟雾 (有时带些紫色或黄褐色), 其主要成分有臭氧、过氧乙酰基硝酸酯、酮类和醛类等。光化学烟雾的刺激性和危害要比一次污染物强烈得多。

### 1.2.2 大气污染源分类

污染源是导致环境污染的各种污染因子或污染物的发生源。从总体上看, 大气污染可认为是由自然界所发生的自然灾害和人类活动所造成的, 即自然污染源和人为污染源。在大气污染防治中, 主要研究和控制的对象是人为污染源。

污染源的划分方法:

#### (1) 按污染源存在的形式划分

1) 固定污染源。污染物由固定地点排出, 如各种类型工厂、火电厂、钢铁厂等的排烟或排气。

2) 移动污染源。污染物排放源可以移动, 如汽车行驶中排放废气等。

#### (2) 按污染物排放的方式划分

1) 高架源。污染物通过垂直高度  $\geq 15\text{m}$  的排气筒排放, 是排放量比较大的污染源。

2) 面源。由多个垂直高度  $< 15\text{m}$  的排气筒集合起来而构成的区域性污染源。

3) 线源。移动污染源, 如汽车在街道上行驶造成的尾气污染。

#### (3) 按污染物排放的时间划分

1) 连续源。污染物由排放源连续排放, 如造纸厂排放制浆蒸煮废气的排气筒。

2) 间歇源。排放源间歇排放污染物, 如取暖锅炉的烟囱。

3) 瞬时源。排放时间短暂, 如工厂的事故排放。

#### (4) 按污染物产生的类型划分

1) 工业污染源。这里主要包括燃料燃烧排放的污染物, 生产过程中的排气 (如炼焦厂向大气排放  $\text{H}_2\text{S}$ 、酚、苯、烃类等有害物质; 各类化工厂向大气排放具有刺激性、腐蚀性、

异味或恶臭的有机和无机气体；化纤厂排放的  $H_2S$ 、氨、二氧化硫、甲醇、丙酮等，以及生产过程中排放的各类物质和金属粉尘。

2) 生活污染源。由生活活动产生的废气，如烹调过程产生的废气。在我国这是一种排放量大、分布广、排放高度低、危害性不容忽视的空气污染源。

3) 交通污染源。由汽车、飞机、火车和船舶等交通工具所排出的废气造成大气污染的污染源称为交通污染源。

自然过程产生的大气污染物主要有：火山喷发排出的火山灰颗粒、二氧化硫 ( $SO_2$ )、硫化氢 ( $H_2S$ )、煤矿和油田自然逸出的煤气和天然气、腐烂的动植物排出的有害气体等。

人类活动产生的污染物大致可分为两种：燃煤、燃油、煤气和天然气燃烧排出的污染物有烟尘、二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳、二氧化碳、铅以及热能；工业生产过程排放出大量的废气，其中含有种类繁多的大气污染物。

大气中几种主要气态污染物的来源、发生量、背景浓度和主要反应如表 1-3 所示。

表 1-3 大气中主要气态污染物的来源、发生量、背景浓度和主要反应

物质	主要污染源	自然源	发生量/(t/年)		大气中背景浓度	推算的在大气中的留存时间	迁移中反应和沉降	备注
			污染源	自然源				
$SO_2$	煤和油的燃烧	火山活动	$146 \times 10^6$	未估计	$0.2 \times 10^{-9}$	4天	由于臭氧或固体和液体气溶胶的吸收而被氧化为硫酸盐	与 $NO_2$ 和 HC 发生光化学氧化,使 $SO_2$ 迅速转化为 $SO_4^{2-}$
$H_2S$	化学过程 污水处理	火山活动,沼泽地生物作用	$3 \times 10^6$	$100 \times 10^6$	$0.2 \times 10^{-9}$	2天	氧化为 $SO_2$	只有一组背景浓度是可用的
CO	机动车和其他燃烧过程排气	森林火灾,海洋、萜稀反应	$304 \times 10^6$	$33 \times 10^6$	$0.1 \times 10^{-6}$	<3年	很可能是土壤中有机体	海洋提供的自然源可能是小的
$NO$ $NO_2$	燃烧过程	土壤中的细菌作用	$53 \times 10^6$	$430 \times 10^6$ $658 \times 10^6$	$NO(0.2 \sim 2) \times 10^{-9}$ $NO_2(0.5 \sim 4) \times 10^{-9}$	5天	由于固体和液体气溶胶的吸着、HC和光化学反应被氧化为硝酸盐	关于自然源做的工作很少
$NH_3$	废物处理	生物腐烂	$4 \times 10^6$	$1160 \times 10^6$	$(6 \sim 20) \times 10^{-9}$	7天	与 $SO_2$ 反应形成 $(NH_4)_2SO_4$ , 被氧化为硝酸盐	$NH_3$ 的消除主要是形成铵盐
$N_2O$	无	土壤中的生物作用	无	$590 \times 10^6$	$0.25 \times 10^{-6}$	4年	在平流层中光离解,在土壤中的生物作用	还未提出用植物吸收 $N_2O$ 的报告
CH	燃烧和化学过程	生物作用	$88 \times 10^6$	$CH_4 1.6 \times 10^9$ 萜稀 $200 \times 10^6$	$CH_4 1.5 \times 10^{-6}$ 非 $CH_4 < 1 \times 10^{-9}$	4年	与 $NO$ / $NO_2$ 、 $O_3$ 发生光化学反应, $CH_4$ 必然大量消除	从污染源排出的“活性”HC为 $27 \times 10^6 t$
$CO_2$	燃烧过程	生物腐烂 海洋释放	$1.4 \times 10^{10}$	$10^{12}$	$320 \times 10^{-6}$	2~4年	生物吸附和光合作用,海洋的吸收	大气中浓度增长率为 $0.7 \times 10^{-6}/年$