

普通高等教育“十一五”规划教材

大气污染控制工程

第二版

郭 静 阮宜伦 主编 马德刚 副主编



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”规划教材

大气污染控制工程

第二版

郭 静 阮宜纶 主编 马德刚 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是郭静、阮宜纶主编的高等学校教材《大气污染控制工程》的第二版,较系统地介绍了大气污染控制工程技术的基本知识和防治大气污染的基本原理、各种工程途径、主要设备及部分典型工艺。随着大气污染控制工程的科学发展,本版书中增加了燃料燃烧与大气污染的内容,简要地介绍了清洁煤技术。

本书可供高等学校环境工程专业的学生使用,也可供从事大气污染控制工程设计、科研和管理工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大气污染控制工程/郭静,阮宜纶主编.—2版.—北京:
化学工业出版社,2008.1
普通高等教育“十一五”规划教材
ISBN 978-7-122-01725-3

I. 大… II. ①郭…②阮… III. 空气污染控制-高等学校-
教材 IV. X510.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 198411 号

责任编辑:王文峡
责任校对:陶燕华

文字编辑:刘莉珺
装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:大厂聚鑫印刷有限责任公司

装订:三河市延风装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张16 字数421千字 2008年3月北京第2版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:27.00元

版权所有 违者必究

第二版前言

本书第一版自 2001 年出版后，由于具有整体结构简明、紧凑，课程内容系统、完整，实用性较强等特点，受到广大读者的喜爱。承蒙众多读者的热情鼓励与支持，在第一版教材的基础上进行了适当的修改与补充，编写了第二版。

本书问世以来，大气污染控制技术与管理水平不断在发展。现在，能源与大气污染已经成为制约各国经济发展的重要因素；大气污染控制技术与管理水平的提高受到全人类的关注；大气污染控制的重点由控制燃煤污染扩展到控制机动车污染；大气污染控制技术已经由末端控制发展为以清洁生产为中心的全过程控制。在修订的过程中，我们力求保持原书结构紧凑的特色，同时充分反映大气污染控制工程的科学发展，增加了燃料燃烧与大气污染的内容，并简要地介绍了清洁煤技术。

本书第二版由郭静、阮宜纶任主编，马德刚任副主编，全书共分 13 章，参加各章编著的人员有郭静（第 1、3、4、5、6、7、8 章），马德刚（第 2、9 章），王晓玲（第 9、10、11 章）和邢国平（第 12、13 章），阮宜纶和马德刚对全书进行了统稿工作。

由于编者水平有限，书中难免存在着缺点和疏漏，欢迎读者批评指正。

编 者

2008 年 1 月于天津大学

Inscription

For me—an German Professor dealing with energy and environment—It's a great honour to write the first sentences in this book.

Energy is beside food and water the most important goods for welfare and economic growth. The resources of energy are limited on long term range as well as the capacity of nature for emissions from energy conversion.

An important task of engineers work is to find the best solutions for an problem under technical and economic limitations. The knowledge about the origin of air pollutants and the ways to reduce it belongs to the basic tools of engineers to do so. It may be interesting for students to learn it because it is an exciting mixture of knowledge from different sciences: e. g. chemistry, physics, process engineering, civil engineering, electrical engineering and economics.

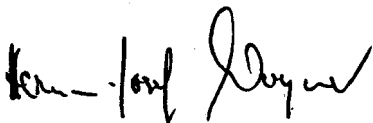
These book covers all important fields of air pollution control. It starts from the origin of pollutants, their distribution in the atmosphere and it closes with the different technologies to abate the pollutants.

Since a lot of years I have the opportunity to do common research activities on the field of air pollution control with my colleagues and friends at the Tianjin university. I'm always impressed about the high quality level of their lectures and about the education at Chinese universities. The engagement of my friends and that of other Chinese scientists will bring much progress on the way to control air pollution in China.

I would like congratulate Prof. Guo Jing for initiating this book. She with her colleagues has done an excellent work.

I would like to congratulate also all students using this book. They have the big opportunity to learn thinks which make fun to know. The application of your knowledge will help China and the world to get an better environment and more welfare for people. Let's do so. It is also one way to deepen the friendship between peoples.

I wish all readers "Viel Erfolg" (much success).



Prof. Dr. -Ing. H. -J. Wagner
University of Essen

GERMANY
January 2001

第一版前言

大气污染控制工程是高等院校环境工程专业的一门主干专业课。本书是根据全国高等院校环境工程类专业教学委员会制定的教学基本要求，在天津大学1984年首次编写的同名教材的基础上，结合多年教学实践以及读者的意见和要求编写的。

本书系统地阐述了大气污染控制的原理、方法和设计计算问题。选材以成熟的常用技术为主，适当地介绍国内外新技术，力求做到理论联系实际，注意培养学生分析问题和解决问题的能力，其内容适合68~80学时的教学需要。

本书的编写强调了章节之间的前后联系，整体结构简明、紧凑，并保持课程内容的系统性和完整性，具有较强的实用性。

本书在综述大气污染成因，大气污染物产生及其特性，以及中国大气污染特点的基础上，重点介绍了大气污染控制技术原理和工程措施，包括大气扩散作用，颗粒物分离技术、设备计算和设计选型，气态污染物控制工艺与设备，控制系统设计、运行与管理。本书除作为环境工程学科教材外，还可以供从事大气污染控制设备设计、管理人员及环境工程技术人员参考。

本书由天津大学郭静、阮宜纶任主编，参加编著人员有郭静（第1、2、3、4、5、6、7章）、王晓玲（第8、9、10章）和邢国平（第11、12章），全书由阮宜纶统稿。清华大学郝吉明教授对全书进行了审校，付出了辛勤的劳动，并提出了有益的指导性意见。德国埃森大学能源和生态学专家H-J. 瓦格纳教授给予了大力支持，并为本书热情寄语。美国堪萨斯大学Dennis. D. 莱恩教授、河北科技大学任爱玲教授、兰州电力修造厂王小强先生给予了关怀和帮助，在此一并致以衷心的感谢。

受水平限制，编写时间紧，书中难免有缺点和错误，欢迎读者批评指正。

编 者

2001年4月于天津大学

目 录

1 概论	1
1.1 大气污染	1
1.1.1 大气的组成	1
1.1.2 大气污染的定义	2
1.1.3 影响大气污染形成的主要因素	2
1.2 大气污染物及其发生源	3
1.2.1 大气污染物	3
1.2.2 大气污染物的发生源	5
1.3 大气污染概况及综合防治措施	7
1.3.1 国外大气污染概况	7
1.3.2 我国大气污染概况	7
1.3.3 大气污染的综合防治措施	9
1.4 大气环境质量控制标准	11
1.4.1 大气环境质量标准	11
1.4.2 工业企业设计卫生标准	12
1.4.3 大气污染物排放标准	13
习题	15
2 燃烧与大气污染	16
2.1 燃料及其性质	16
2.1.1 煤	16
2.1.2 石油	18
2.1.3 气体燃料	18
2.1.4 非常规燃料	20
2.2 燃料的燃烧过程	20
2.2.1 燃料完全燃烧的条件	20
2.2.2 燃烧所需空气量	21
2.2.3 燃烧产生的烟气量	22
2.3 燃料燃烧产生的主要污染物	22
2.3.1 颗粒状污染物	22
2.3.2 主要气态污染物	23
2.4 主要气态污染物的燃烧控制	24
2.4.1 燃烧前脱硫	24
2.4.2 燃烧中脱硫	25
2.4.3 燃烧过程中 NO_x 的控制	26
习题	27
3 气象与大气扩散	28
3.1 大气的垂直结构	28
3.1.1 对流层	28
3.1.2 平流层	28
3.1.3 中间层	28
3.1.4 热层	29
3.1.5 外逸层	29
3.2 主要的气象要素	29
3.2.1 气温	30
3.2.2 气压	30
3.2.3 湿度	30
3.2.4 风	30
3.2.5 湍流	30
3.2.6 云	31
3.2.7 太阳高度角	31
3.2.8 能见度	31
3.3 大气稳定度及其分类	31
3.3.1 气温的垂直分布	31
3.3.2 干绝热直减率	32
3.3.3 大气稳定度	33
3.3.4 大气稳定度的分类方法	34
3.4 大气污染与气象	36
3.4.1 气象要素对大气污染的影响	36
3.4.2 地形、地物对大气污染的影响	39
3.5 烟囱的有效高度	42
3.5.1 烟囱的有效高度	42
3.5.2 烟气抬升高度的计算公式	42
3.6 大气扩散模式及污染物浓度估算	45
方法	45
3.6.1 高斯扩散模式	46
3.6.2 扩散参数 σ_y 和 σ_z 的确定	48
3.6.3 有上部逆温时的扩散	49
3.6.4 非点源扩散模式	52
3.7 烟囱高度的设计	54
3.7.1 烟囱高度的计算方法	54

3.7.2 烟囱设计中的几个问题	54	3.8.2 长期平均浓度的计算	56
3.8 厂址选择	55	3.8.3 厂址选择	57
3.8.1 厂址选择中所需的气象资料	55	习题	58
4 除尘技术基础	60		
4.1 粉尘的粒径及其分布	60	4.2.6 粉尘的安息角	69
4.1.1 粉尘的粒径	60	4.2.7 粉尘的爆炸性	69
4.1.2 粉尘的粒径分布	61	4.3 尘粒在流体中的动力特性	70
4.1.3 粉尘粒径的分布函数	63	4.3.1 尘粒的沉降速度	70
4.1.4 粉尘粒径分布的测定方法	66	4.3.2 尘粒在管道中的运动特性	71
4.2 粉尘的物理性质	67	4.4 除尘器的性能	72
4.2.1 粉尘的密度	67	4.4.1 除尘器性能的表示方法	72
4.2.2 粉尘的比表面积	68	4.4.2 除尘器的除尘效率	72
4.2.3 粉尘的含水量及其润湿性	68	4.5 除尘器的分类	76
4.2.4 粉尘的荷电性及导电性	69	习题	76
4.2.5 粉尘的黏附性	69		
5 机械式除尘	78		
5.1 重力沉降室	78	5.3.1 工作原理	81
5.1.1 重力沉降室的工作原理及捕集效率	78	5.3.2 压力损失	82
5.1.2 重力沉降室的设计计算和应用	79	5.3.3 除尘效率	83
5.2 惯性除尘器	80	5.3.4 结构形式	84
5.3 旋风除尘器	81	5.3.5 设计选型	86
		习题	88
6 湿式除尘	90		
6.1 概述	90	6.3.3 旋筒式水膜除尘器	93
6.1.1 湿式除尘器的分类	90	6.3.4 中心喷雾式旋风洗涤器	94
6.1.2 湿式除尘器的除尘机理	90	6.4 文丘里洗涤器	94
6.2 重力喷雾洗涤器	92	6.4.1 文丘里洗涤器的构造	94
6.3 旋风式洗涤器	93	6.4.2 文丘里管的压力损失	95
6.3.1 环形喷液旋风洗涤器	93	习题	96
6.3.2 旋风水膜除尘器	93		
7 过滤式除尘	97		
7.1 袋式除尘器的除尘原理	97	7.2.2 袋式除尘器的结构形式	102
7.1.1 除尘原理	97	7.3 袋式除尘器的选型、设计和应用	104
7.1.2 过滤速度	98	7.3.1 袋式除尘器的选型与设计	104
7.1.3 压力损失	99	7.3.2 袋式除尘器的应用	105
7.2 袋式除尘器的滤料和结构形式	101	7.4 颗粒层除尘器	105
7.2.1 滤料	101	习题	106
8 静电除尘	107		
8.1 概述	107	8.2 粉尘的捕集	109
8.1.1 工作原理	107	8.2.1 粒子的驱进速度	109
8.1.2 除尘过程	108	8.2.2 捕集效率	109
8.1.3 电除尘器的分类	108	8.2.3 粉尘的比电阻	111

8.3 电除尘器的主要部件及简单结构	112	8.3.5 电除尘器外壳	115
8.3.1 电晕电极	113	8.4 电除尘器的选择、设计和应用	116
8.3.2 集尘电极	114	8.4.1 电除尘器的选择与设计	116
8.3.3 电极清灰装置	115	8.4.2 电除尘器的应用	117
8.3.4 气流分布装置	115	习题	117
9 吸收法净化气体污染物	119		
9.1 概述	119	9.5.2 湍流塔	144
9.2 吸收的基本原理	119	9.5.3 筛板塔	144
9.2.1 气液平衡——亨利定律	120	9.6 吸收气体污染物的工艺配置	144
9.2.2 吸收过程机理——双膜理论	122	9.6.1 吸收剂的选择	144
9.2.3 吸收速率方程	122	9.6.2 吸收工艺流程中的配置	145
9.3 吸收塔的计算	126	9.7 烟气脱硫	146
9.3.1 物料衡算	126	9.7.1 石灰或石灰石湿式洗涤法	146
9.3.2 最佳液气比的确定	127	9.7.2 双碱法	148
9.3.3 填料塔塔径和阻力的计算	128	9.7.3 旋转喷雾干燥法烟气脱硫	149
9.4 化学吸收	138	9.7.4 炉内喷钙尾部增湿脱硫 (LIFAC) 技术	149
9.4.1 传质控制时的浓度分布和传质 速度	138	9.7.5 电子束法烟气脱硫 (EBA) 技术	150
9.4.2 动力学控制时吸收传质的 分析	140	9.7.6 海水烟气脱硫技术	151
9.5 吸收设备	142	9.7.7 烟气循环流化床脱硫技术	151
9.5.1 填料塔	142	习题	153
10 催化转化法净化气态污染物	154		
10.1 催化作用的基础概念	154	10.5 汽车尾气的催化还原	167
10.2 催化剂的制备和使用	155	10.5.1 净化原理及方法	167
10.3 环境工程中使用的催化剂	158	10.5.2 催化剂	168
10.3.1 催化氧化法	158	10.5.3 转化器与净化流程	170
10.3.2 催化还原法	159	10.6 催化燃烧法脱臭	171
10.4 催化还原法净化废气中的氮氧 化物	159	10.7 高浓度二氧化硫烟气的催化转化	172
10.4.1 氮氧化物的来源	159	10.7.1 冶炼烟气制酸的生产过程	172
10.4.2 氮氧化物的主要净化方法	160	10.7.2 二氧化硫的催化转化	173
10.4.3 非选择性催化还原法	161	10.7.3 二氧化硫催化转化流程 和设备	174
10.4.4 选择性催化还原法	164	习题	176
11 吸附法净化气态污染物	177		
11.1 概述	177	11.3 吸附反应设备的计算	185
11.1.1 吸附类型	177	11.3.1 气体的穿床速度和床型的 确定	185
11.1.2 吸附剂	178	11.3.2 固定床吸附器	186
11.1.3 吸附法净化气态污染物的 适用范围	180	11.3.3 固定床吸附过程的计算	187
11.2 吸附理论	180	11.4 混合蒸气的吸附	192
11.2.1 吸附平衡及吸附等温线	180	11.5 含氯乙烯废气的吸附净化法	194
11.2.2 吸附速率	183	习题	196
11.2.3 吸附剂的再生	184		

12 净化系统中管道设计计算	197
12.1 流动气体能量方程	197
12.2 气体流动压力损失	198
12.2.1 沿程压力损失	198
12.2.2 局部压力损失	199
12.2.3 空气流动总阻力	200
12.2.4 流动气体的压力变化	200
12.3 局部排气罩的设计	200
12.3.1 局部排气罩的基本形式	200
12.3.2 局部排气罩的排气量和压力损失	202
12.3.3 局部排气罩的设计要点	203
12.4 气体管道的设计计算	204
12.4.1 管道系统设计要点	204
12.4.2 管道系统计算方法	205
12.5 高温烟气管道的设计计算	209
12.5.1 高温烟气管道的布置	209
12.5.2 高温烟气管道的计算	210
习题	212
13 大气污染控制系统分析	213
13.1 系统分析研究的任务和内容	213
13.1.1 系统分析的研究任务	213
13.1.2 系统分析的研究内容	213
13.2 大气环境质量识别	214
13.2.1 大气环境质量的监测	214
13.2.2 城市大气污染特征	214
13.2.3 大气环境质量模型	214
13.3 大气污染控制系统分类	215
13.3.1 大气污染控制系统	215
13.3.2 污染源控制系统	215
13.3.3 废气净化系统	215
13.4 大气污染控制系统经济评价	215
13.5 大气污染控制系统规划	216
13.5.1 基本模型	216
13.5.2 系统规划的优化方法	217
13.6 集中供热大气污染控制系统规划	217
13.6.1 基本模型	217
13.6.2 费用函数的确定	217
13.6.3 约束条件的确定	218
13.6.4 模型的求解	219
附录	220
附录 1 空气的物理参数 (压力为 101.325kPa)	220
附录 2 水的物理参数	222
附录 3 中华人民共和国国家标准 环境空气质量标准 GB 3095—1996	222
附录 4 工作场所空气中有毒物质容许浓度 (摘自 GB Z2—2002)	225
附录 5 工作场所空气中粉尘容许浓度 (摘自 GB Z2—2002)	232
附录 6 锅炉烟尘排放标准 (GB 13271—2001 摘要)	234
附录 7 现有污染源大气污染物排放限值 (摘自 GB 16297—1996)	235
附录 8 几种气体或蒸气的爆炸特性	240
附录 9 几种粉尘的爆炸特性	240
附录 10 局部阻力系数	241
参考文献	244

1 概 论

1.1 大气污染

1.1.1 大气的组成

大气是包围地球的空气层，通常又称之为大气层或大气圈。大气的总质量约为 $5.3 \times 10^{15} \text{ t}$ ，其密度随着高度的增加而迅速减小，通常 98.2% 的空气都集中在 30km 以下的空间。虽然在上千公里的高空中仍有微量的气体存在，但通常都是把从地球表面到 1100~1400km 的气层视为大气圈的厚度。

大气是自然环境的重要组成部分，是人类及一切生物赖以生存的物质。一个成年人一昼夜要呼吸两万多次，吸入的空气量约为 $10 \sim 12 \text{ m}^3$ ，质量约 13~15kg，相当于每天所需食物量的 10 倍、饮水量的 3 倍。人离开空气，5min 就会死亡。但是人类所需要的是新鲜、清洁的空气。为了评价大气质量和研究大气污染现象，首先要了解大气的组成。

自然状况下的大气由混合气体、水汽和悬浮颗粒组成。除去水汽和悬浮颗粒的大气称为干洁空气。

干洁空气的组成在 85km 以下是基本保持不变的，主要成分是氮 (N_2)、氧 (O_2) 和氩 (Ar)。按大气层容积计算，氮占 78.08%，氧占 20.95%，氩占 0.93%，三者共占大气总容积的 99.96%。其他气体，如二氧化碳 (CO_2)、氦 (Ne)、氦 (He)、氪 (Kr)、氢 (H_2)、臭氧 (O_3)、氙 (Xe) 等，仅占 0.04% 左右。干洁空气的组成见表 1-1。

表 1-1 干洁空气的组成

气体成分	体积分数	气体成分	体积分数
氮(N_2)	78.08%	氪(Kr)	1.0×10^{-4}
氧(O_2)	20.95%	氢(H_2)	0.5×10^{-4}
氩(Ar)	0.93%	一氧化二氮(N_2O)	0.5×10^{-4}
二氧化碳(CO_2)	0.03%	氙(Xe)	0.08×10^{-4}
氦(Ne)	1.8×10^{-4}	臭氧(O_3)	0.02×10^{-4}
氦(He)	5.2×10^{-4}	干空气	100

由于气体的流动和动植物的气体代谢作用，从地面到 85km 高度范围内，干洁空气的各气体成分不仅有着比较稳定的容积混合比，而且各种气体的临界温度都很低，它们在自然条件下都呈气体状态，因此干洁空气的物理性质基本稳定，可视为理想气体。干洁空气的平均相对分子质量为 28.966，在标准状态下 (273.15K, 101325Pa)，其密度为 1.293 kg/m^3 。二氧化碳和臭氧是干洁空气中的可变成分，含量虽小，但是对大气的物理状况却有很大的影响。它们能够吸收来自地表的长波辐射，阻止地球热量向空间的散发使大气层变暖。 CO_2 主要来源于燃料燃烧和动物呼吸。大气中的 CO_2 含量随时间地点会有所变化，但是由于生态系统的调节作用而很稳定。现在的观察表明，自工业革命以来，因燃料的大量使用和森林植被的严重破坏导致了大气中 CO_2 含量增加。

臭氧是大气中的微量成分之一，10km 以下大气层中含量甚微，在 10~50km 范围的大

气层中臭氧浓度较高,在20~25km高度处浓度最大。因为臭氧是氧原子和氧分子在 N_2 、 O_2 参与下生成的,在高层大气中气体分子太稀少,低层大气中光离解的原子氧又太少,所以臭氧集中在25km处,形成了平均厚度为3mm的臭氧层。它能够吸收掉大部分的太阳紫外辐射,对地球上的生物起着保护作用。臭氧含量随纬度和季节变化。近年来由于超音速飞机在臭氧层高度范围飞行日益增多,人类活动使大量的氮氧化合物和氟氯烃进入臭氧层,使臭氧层遭到破坏。大气中臭氧层出现耗竭会产生紫外辐射效应问题。

大气中的水汽含量随着时间、地区以及气象条件的变化差异很大。例如在潮湿的热带地区,水汽的体积分数可以达到4%,而在干旱的沙漠地带还不足0.01%。大气中水汽含量虽然不大,但它却在云、雾、雨、霜、露等各种天气现象的演变中起主要作用。

大气中的悬浮颗粒物是悬浮在大气中的固体、液体颗粒状物质的总称。液体悬浮颗粒是指水汽凝结物,如水滴、云雾和冰晶等。固体颗粒物是形形色色各种各样的,如火山爆发喷出的火山灰,大风刮起的尘土,森林火灾产生的烟尘,陨石流星烧毁产生的宇宙尘埃,海水溅沫蒸发散出的盐粒,以及飘逸的植物花粉、细菌等。由此可见大气中悬浮颗粒物的形状、密度、大小及光、电、磁等物理性质和化学组成因其来源及形成过程的不同而有很大差异。大气中悬浮颗粒的含量、种类、粒径分布和化学性质不断变化。细小的颗粒能够削弱太阳的辐射强度,影响大气的能见度。

1.1.2 大气污染的定义

所谓大气污染,广义地说,是指自然现象和人类活动向大气中排放了过多的烟尘和废气,使大气的组成发生了改变,或介入了新的成分,而达到了有害程度。这些自然现象包括火山活动、森林火灾、海啸、土壤和岩石的风化以及大气圈空气的运动等。一般来说,自然现象所造成的大气污染,自然环境能通过自身的物理、化学和生物机能经过一定的时间后使之自动消除,这就是所谓的地球自净能力和自然生态平衡的自动恢复。通常说的大气污染主要是指人类活动造成的,人类活动既包括了各种生产活动,也包括了如取暖做饭等生活活动。所谓的大气污染就是指由于人类活动或自然过程引起某些物质介入大气中,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。这里所说的舒适和健康,是包括了从人体正常的生活环境和生理机能的影响到引起慢性病、急性病以致死亡这样一个广泛的范围;而所谓的福利,则认为是与人类协调共存的生物、自然资源、财产以及器物等。

根据影响范围,大气污染可分为四类:①局部地区污染,如工厂或单位烟囱排气引起的污染;②地区性污染,如工业区及其附近地区或整个城市大气受到污染;③广域污染,是指跨越行政区划的广大地域的大气污染;④全球性大气污染,某些超越国界、具有全球性影响的大气污染,例如人类活动产生的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。

1.1.3 影响大气污染形成的主要因素

污染物进入大气中,会不会造成污染呢?分析历史上发生的大气污染事件可以知道,大气中有害物质的浓度越高,滞留时间越长,污染就越重,危害也就越大。污染物质在大气中的浓度,首先取决于排放的总量(即源强,单位时间污染物的排放量),除此之外,还同气象条件、地形地貌以及排放源高度等因素有关。

污染物进入大气后,首先会得以稀释扩散。大气在不同的气象条件之下,具有不同的稀释扩散能力。这些气象条件包括风向、风速、湍流、降雨及逆温等。风向决定了污染物质的水平输送方向,一般来说,下风向污染程度比较严重。风速大,污染物迅速随风而下,稀释速度快。大气湍流决定着污染物的扩散程度。降雨雪促进了污染物质的沉降,因此能净化大

气。逆温决定了污染物质在气层中滞留状况。在正常情况下,近地面气层的空气温度随高度递减,这样气层处在不稳定状态,上下对流剧烈,促使污染物迅速扩散。如果局部地区气温出现了随高度递增的情况,那么上层则像一个“罩子”,阻碍了污染物在大气中的扩散,容易在局部地区形成大气污染。

地形、地貌和地物是影响大气运动的环境因素。因为复杂的地形及地面状况,会形成局部地区的热力环流,如山区的山谷风,滨海的海陆风,以及城市的热岛效应等,会使气流产生环流和旋涡,大气中的污染物质容易聚集,从而影响了局部地区的大气污染的形成及危害程度。

为了减轻局部地区污染,目前广泛采用高烟囱排放。高烟囱把污染物送上高空使它们在远离污染源的更广阔的区域中扩散、混合,从而降低了污染物在近地面空气中的浓度。但是这并非减少了污染物的总量,天长日久可能会引起区域性或国际性的大气污染。

大气污染是一个极其复杂的气象、物理和化学的变化过程,在第2章中将详细地分析研究影响其形成的主要因素。

1.2 大气污染物及其发生源

1.2.1 大气污染物

大气污染物是指由于人类活动或自然过程排入大气的并对人类或环境产生有害影响的那些物质。大气污染物的种类很多,根据其存在的特征可分为气溶胶状态污染物和气体状态污染物两大类。

(1) 气溶胶状态污染物

在大气污染中,气溶胶是指空气中的固体粒子和液体粒子,或固体和液体粒子在气体介质中的悬浮体。按照气溶胶的来源和物理性质,可将其分为以下几种。

① 粉尘(dust) 粉尘是指悬浮于气体介质中的微小固体颗粒,受重力作用能发生沉降,但在某一段时间内能保持悬浮状态。粉尘通常是在固体物质的破碎、研磨、筛分及输送等机械过程,或土壤、岩石风化,火山喷发等自然过程形成的。因此粉尘的种类很多,如黏土粉尘、石英粉尘、滑石粉、煤粉、水泥粉尘以及金属粉尘等,其形状往往是不规则的。粉尘的粒径范围很广,一般为 $1\sim 200\mu\text{m}$ 左右。

② 烟(fume) 烟一般是指燃料不完全燃烧产生的固体粒子的气溶胶。它是熔融物质挥发后生成的气态物质的冷凝物,在其生成的过程中总是伴有氧化之类的化学反应。烟的特点是粒径很小,一般在 $0.01\sim 1\mu\text{m}$ 的范围内,烟颗粒能够长期地存在于大气之中。金属的冶炼过程,是烟产生的主要途径之一。例如精炼铅和锌时,在高温熔融状态下,铅和锌能够迅速挥发并氧化生成氧化铅烟和氧化锌烟。在核燃料后处理过程中,会产生氧化钙烟。

③ 飞灰(fly ash) 飞灰是指由燃料燃烧所产生的烟气中分散得非常细微的无机灰分。

④ 黑烟(smoke) 黑烟一般是指燃料燃烧产生的能见气溶胶,是燃料不完全燃烧的碳粒。黑烟颗粒的大小约为 $0.5\mu\text{m}$ 左右。

在某些情况下,粉尘、烟、飞灰和黑烟等小固体颗粒气溶胶之间的界限难以确切划分。按照我国的习惯,一般将冶金过程或化学过程形成的固体颗粒气溶胶称为烟尘;将燃料燃烧过程产生的固体颗粒气溶胶称为飞灰和黑烟。

⑤ 雾(fog) 雾是指气体中液滴悬浮体的总称。在气象学中则是指造成能见度小于 1km 的小水滴悬浮体。在工程中,雾一般泛指小液体颗粒悬浮体。液体蒸气的凝结、液体的雾化以及化学反应等过程均可形成雾,如水雾、酸雾、碱雾或油雾等。

在大气污染控制中,根据大气中颗粒物的大小,又将其分为飘尘、降尘和总悬浮微粒。

① 飘尘 飘尘是指大气中粒径小于 $10\mu\text{m}$ 的固体微粒。它的粒度小,质量轻,能长期飘浮在大气中,故又称其为浮游粒子或可吸入颗粒物。

② 降尘 降尘是指大气中粒径大于 $10\mu\text{m}$ 的固体微粒。在重力的作用下,降尘能够在较短的时间内沉降到地表面上。

③ 总悬浮微粒 (TSP) 总悬浮微粒是指大气中粒径小于 $100\mu\text{m}$ 的所有固体颗粒。

(2) 气体状态污染物

大气中的气体状态污染物又简称为气态污染物,它是以分子状态存在的。气态污染物的种类很多,常见的有五大类,其一为以二氧化硫为主的含硫化合物,如 SO_2 、 H_2S 等;其二为以一氧化氮和二氧化氮为主的含氮化合物,如 NO 、 NH_3 等;其三为碳的氧化物,如 CO 、 CO_2 等;其四为碳氢化合物,如烷烃 ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$)、烯烃 (C_nH_{2n}) 和芳香烃类;其五为卤族化合物,如 HF 、 HCl 等。

气态污染物,又分为原发性污染物和继发性污染物,即一次污染物和二次污染物。一次污染物系指从污染源直接排放出来的原始污染物质,它们介入大气之后,其物理化学性质均未发生改变,例如燃烧煤时,从烟囱里直接排放出来的烟尘和 SO_2 等。二次污染物系指一次污染物与大气中原有成分之间,或者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质。如硝酸、硝酸盐等是由一氧化氮氧化后生成的新污染物。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) 和光化学烟雾 (photochemical smog)。

① 硫氧化物 硫氧化物中主要的是 SO_2 。 SO_2 是目前来源广泛,影响面比较大的一种气态污染物。 SO_2 是具有辛辣及刺激性的无色气体,吸入过量的 SO_2 会损害呼吸器官。 SO_2 是大气中的主要酸性污染物,在大气中会氧化而形成硫酸烟雾或硫酸盐气溶胶。 SO_2 与大气中的烟尘有协同作用,著名的伦敦烟雾事件就是这种协同作用所造成的危害。

SO_2 主要来自含硫化石燃料的燃烧、金属冶炼、火力发电、石油炼制、硫酸生产及硅酸盐制品熔烧等过程。各种燃煤、燃油的工业锅炉和供热锅炉都会排放大量的 SO_2 。全世界每年向大气中排放的 SO_2 量约为 1.5 亿吨,其中化石燃料燃烧产生的 SO_2 约占 70% 以上。火力电厂排烟中的 SO_2 浓度虽然较低,但是总排放量却最大。

② 氮氧化物 氮氧化物有 N_2O 、 NO 、 NO_2 、 N_2O_3 、 N_2O_4 和 N_2O_5 , NO_x 是其总代表式。在大气中常见的氮氧化物污染物是 NO 和 NO_2 。 NO 是无色气体,毒性不太大,但进入大气后,会被氧化成 NO_2 ,当大气中有 O_3 等强氧化剂存在时,其氧化速度加快。 NO_2 是一种红棕色的、具有恶臭刺激性的气体,其毒性约为 NO 的 5 倍。 NO_2 会参加大气中的光化学反应,形成光化学烟雾,其毒性更大。

NO_x 主要来自燃料的燃烧,例如各种炉窑。以汽油和柴油为燃料的各种机动车,特别是汽车,排出的废气中,含有大量的 NO_x 。美国洛杉矶烟雾就是由数量巨大的汽车废气经太阳光作用而形成的光化学烟雾。

NO_x 的生成途径有两个:一是空气中的氮在高温下被氧化而形成 NO_x ,温度愈高、燃烧区氧的浓度愈高,则 NO_x 的生成量也就愈大。据分析,燃煤发电厂排出的废气中, NO_x 含量为 $400\sim 24000\text{mg}/\text{m}^3$;二是燃料中的各种氮化物在燃烧时生成 NO_x 。

此外,硝酸生产、炸药制备以及金属表面的处理过程也产生 NO_x 。土壤和水体的硝酸盐在微生物的反硝化作用下也可生成 N_2O 。但大约 83% 的 NO_x 是由燃料的燃烧而产生的。

③ 碳氧化物 CO 和 CO_2 是各种大气污染物中发生量最大的一类污染物。 CO 是一种无色无味无刺激性的气体。吸入人体后,能与血红蛋白结合,损害其输氧能力,使机体缺氧,严重时使人窒息而死。冬季在我国北方煤气中毒事件时有发生,实际上是 CO 中毒。 CO 主

要来源是燃料的不完全燃烧过程和汽车尾气。CO 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。但是在城市冬季取暖季节或交通繁忙地区, 在不利于尾气扩散时, CO 的浓度则有可能达到危害环境的水平。

CO₂ 是无毒的气体, 但是局部地区的空气中 CO₂ 浓度过高时, 会使氧含量相对减小而对人体产生不良影响。地球上 CO₂ 逐年增多, 能产生“温室效应”, 导致全球气候变暖, 这已受到世界各国的密切关注。

④ 碳氢化合物 碳氢化合物是由碳、氢两种元素组成的各种有机化合物的总称, 包括烷烃、烯烃和芳香烃类等。碳氢化合物主要来自煤和石油的燃烧以及各种机动车辆排出的废气。

大气受到碳氢化合物的污染, 能使人的眼、鼻和呼吸道受到刺激, 并影响肝、肾和心血管的生理功能。在这类污染物中, 多环芳烃 (PAH) 如蒽、苯并蒽、萤蒽和苯并芘等, 都具有一定的致癌作用, 尤其苯并[a]芘更是强致癌剂。大多数多环芳烃是吸附在大气颗粒物上的, 冬季因取暖燃煤量大增, 烟尘多, 附在其上的苯并[a]芘是大气受到 PAH 污染的标志。

碳氢化合物的更大危害还在于它与氮氧化物共同引起的光化学烟雾。由汽车、工厂等污染源排入大气的碳氢化合物和氮氧化物, 在阳光照射下, 发生一系列的光化学反应, 生成了如臭氧、醛类、过氧乙酰硝酸酯 (PAN) 等二次污染物, 其危害性远大于一次污染物。

还有许多复杂的高分子有机化合物, 如酚、醛、酮等含氧有机化合物; 过氧乙酰硝酸酯 (PAN)、过氧硝基丙酮 (PPN)、联苯胺、腈等含氮有机化合物; 硫醇、噻吩、二硫化碳 (CS₂) 等含硫有机化合物以及氯乙烷、氯醇、有机农药 DDT (223)、除草剂 TCDD, 等等。随着化学工业和石油化工的迅速发展, 大气中的有机化合物日益增加, 这些有机污染物对人体危害甚大, 它们能强烈地刺激眼、鼻、呼吸器官, 严重地损害心、肺、肝、肾等内脏, 甚至致癌、致畸, 并促使遗传因子变异。

⑤ 硫酸烟雾 硫酸烟雾是大气中的 SO₂ 等硫氧化物, 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。硫酸烟雾引起的刺激作用和生理反应等危害远比 SO₂ 大得多, 其对生态环境、金属和建筑材料也都有很大的危害。

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 (有时呈紫色或黄褐色), 其主要成分有臭氧、过氧乙酰硝酸酯、高活性自由基 (RO₂、HO₂、RCO 等)、醛类、酮类和有机酸类等二次污染物。光化学烟雾形成的机制很复杂, 其危害性也比一次污染物更强烈。

1.2.2 大气污染物的发生源

大气污染物的发生源也简称为大气污染源。大气污染物质产生于人类活动或自然过程, 因此大气污染源可以概括为两类: 人为污染源和自然污染源。在大气污染控制工程中, 主要的研究对象是人为污染源。

根据对大气中主要污染物进行分类统计, 人为污染源又可以分作 3 类: 燃料燃烧、工业生产过程和交通运输。从污染物发生源的移动性来看, 前两类统称为“固定源”, 而第三类称为“流动源”。另外, 在环境监测中又把污染源分为: 点源, 如某一烟囱; 线源, 如某一条运输线; 面源, 如某一个工业区等。

大气污染物的来源及种类因各国、各地区的发展与结构、能源利用的情况不同而差异明显, 而且随着年代也在变化。我国于 1981 年对烟尘、SO₂、NO_x 和 CO 四种量大面广的污染物的发生量进行了调查统计, 结果表明燃料燃烧产生的污染物约占 70%, 而工业生产过程和机动车排出的污染物是 20% 和 10% 左右。直接燃烧燃料而产生的污染物中, 有

96%是燃煤所致。由此可见，煤的直接燃烧是我国大气污染物的主要来源。根据美国 1968 年统计的资料来看，与我国的情况有所不同，美国大气污染物的主要来源是交通运输（其中汽车排气占首位），约为大气污染物总量的 56%左右。洛杉矶更为突出，700 万人口，约有 400 万辆汽车，每天汽车排放污染物近 2 万吨，占该市空气污染物总量的 70%之多。

我国汽车排污量集中于城市交叉路口，港口码头及铁路沿线，这些地带污染状况是相当严重的。

在各种工业生产过程排入大气的污染物质中，有的是原料，有的是产物，有的则是废气。污染物质的种类、数量及其组成也因生产工艺、原材料、能源及操作管理方法等条件不同而差异显著。工矿区污染源因排放集中，常常造成危害。

燃料燃烧是最大最广泛的大气污染源，不同种类的燃料、燃料的不同组成，以及不同的燃烧方式产生的大气污染物质的量和成分也不同。因为物质的燃烧，不仅是简单的氧化，而且会发生裂解、环化、缩合或聚合等化学反应过程。除了生成 CO₂ 和水之外，其他有害物质，如 CO、SO₂、NO_x、烟灰、金属及其氧化物、金属盐类、醛、酮及稠环碳氢化合物等，其形成均和燃烧时间、温度等因素有关。表 1-2 就是几种锅炉因燃烧条件不同，同样烧掉 1t 煤而产生的主要污染物排放量。CO 最为明显，电厂锅炉燃烧条件好，CO 生成量小。而燃烧条件差，完全燃烧的程度低的取暖锅炉排出的 CO 量最大。

表 1-2 燃烧 1t 煤各主要污染物排放量/kg

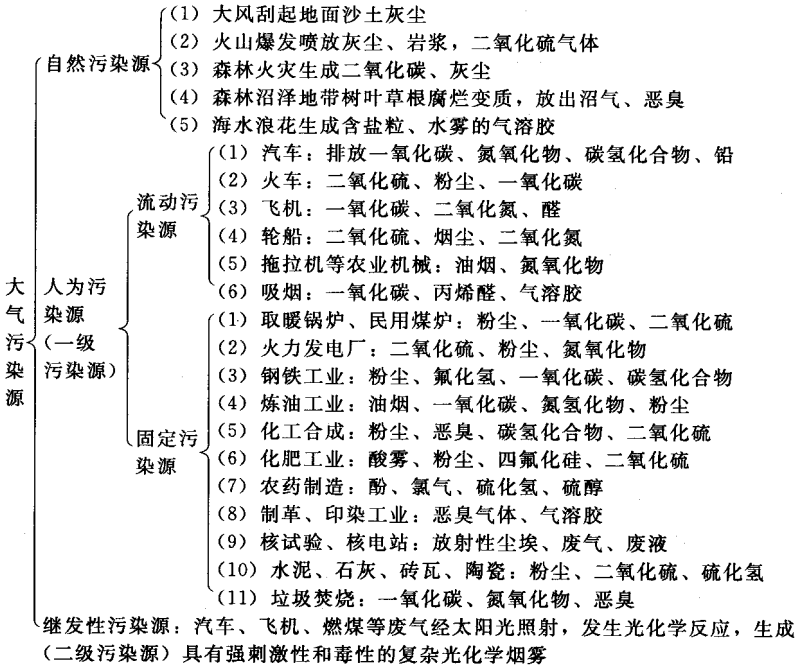
污染物	电厂锅炉	工业锅炉	取暖锅炉	污染物	电厂锅炉	工业锅炉	取暖锅炉
SO ₂	60	60	60	碳氢化合物	0.1	0.5	5
CO	0.23	1.4	22.7	烟尘(一般情况)	11	11	11
NO ₂	9	9	3.6	(燃烧较完全时)	3	6	9

改进燃烧方法、集中供热是节约能源、改善大气环境质量的有效途径。

大气污染的发生源及其产生的主要污染物归纳于表 1-3 中。

在污染源分类中，有人根据一次污染物和二次污染物的特征，将大气污染源分作一级污染源和二级污染源（即继发性污染源），表 1-3 显示了这种分类方法。

表 1-3 大气污染源一览表



由表 1-3 可知,大气污染物主要来源于自然过程和人类活动。由自然过程排放污染物所造成的大气污染,多为暂时的和局部的,人类活动排放污染物是造成大气污染的主要根源。研究大气污染问题主要针对人为污染源。

1.3 大气污染概况及综合防治措施

1.3.1 国外大气污染概况

人类活动造成的大气污染问题是和能源的利用及城市规模的扩大分不开的。因此大气污染状况在各个工业发达国家都有一个发生、发展和演变的过程。自从 12 世纪人们开始用煤作燃料之后,排出的煤烟使大气污染日趋严重。到 18 世纪,伴随着蒸汽机的发明和钻探石油的成功,生产力迅速发展,大气污染的状况也随着工业的发展而恶化。

从 18 世纪末到 20 世纪中期,大气污染的主要特征是燃煤引起的所谓“煤烟型”污染,主要污染物是烟尘和 SO_2 。20 世纪 50~60 年代,由于工业高速发展,城市林立,汽车数量倍增,石油类的燃料消耗量剧增,大气污染也发展成为“石油”型污染。飘尘、重金属、 SO_2 、 NO_x 、CO 和 HC 等污染物普遍存在,多种污染物共同作用造成的危害,已经不再局限于城市和工矿区,形成了广域的复合污染,在此期间发生了令世界瞩目的英国“伦敦烟雾”、美国的“多诺拉烟雾”、日本的“四日市哮喘病”、美国的洛杉矶光化学烟雾等一系列重大的大气污染事件。这些事件造成的危害,不是某一种污染物所为,而是大气中的 SO_2 与飘尘中的重金属反应形成的硫酸盐雾,以及汽车排气引起的光化学烟雾污染的结果。工业发达,使人们享受到前所未有的物质文明。但是过度地消耗地球资源,大量的废弃物,使环境恶化而直接威胁着人体的健康和福利。各国政府与企业不得不高度重视环境污染的治理问题,投入了大量的人力、财力和物力,采取了一系列的治理和预防措施,在 20 世纪 70 年代后期大气污染状况有了不同程度的好转。例如伦敦,自 1952 年烟雾事件后,便没有出现过类似的情景。

但是,由于汽车数量的不断增加,CO、 NO_x 、HC 和光化学污染仍然很严重。人口的增长和生产活动的增强,强烈地冲击着地球环境,许多自然资源日益减少。全世界每年消耗的矿物燃料,20 世纪初不足 $15 \times 10^8 \text{t}$,70 年代增至 $70 \times 10^8 \sim 80 \times 10^8 \text{t}$ 。大量的 SO_2 和 NO_x 进入大气圈形成酸雨,CO₂ 浓度持续增高。监测结果表明,自 1958 年以来的 28 年中,大气中 CO₂ 的体积分数由 0.0315 增加到 0.0350,而工业革命之前则不超过 0.028。由此产生的温室效应势必影响全球气候,这已成为国际社会普遍关注的全球性大气污染问题。

1.3.2 我国大气污染概况

(1) 我国大气污染概况及主要特征

我国是世界上大气污染状况比较严重的国家之一,城市大气污染更为突出。我国大气污染特征为煤烟型。据统计,我国每年排出的粉尘量约为 $2.8 \times 10^7 \text{t}$, SO_2 约为 $1.46 \times 10^7 \text{t}$ 。由于烧煤排放的烟尘约为 $2.2 \times 10^7 \text{t}$, SO_2 约为 $1.31 \times 10^7 \text{t}$,分别占总量的 78.6% 和 89.7%。北方城市,尤其是冬季,污染更严重。根据我国对北方和南方城市每年例行的监测报告可以清楚地看到这一点。例行监测的大气污染物有 SO_2 、 NO_x 、TSP 及降尘量。1982 年的监测结果是: TSP 年日平均浓度,北方和南方城市分别是 $870 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $330 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 冬夏两季差别不大; SO_2 年日平均浓度,北方和南方城市分别是 $106 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $82 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 季节变化明显,北方城市冬夏 SO_2 浓度分别是 $215 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 1982 年 NO_x 污染处于较低水平。

近年来,我国在城市中通过窑炉改造、改进燃烧技术、安装除尘装置等措施,并进行能