

高等学校试用教材

# 大气污染控制工程

● 林肇信 主编

高等教育出版社



DAQI WURAN

KONGZHI GONGCHENG

高等学校试用教材

# 大气污染控制工程

林肇信 主编

童志权 余名汉 刘凤志 合编

高等教育出版社

## 内 容 提 要

本书系统地介绍了大气污染控制基本知识，深入而又清晰地阐述了有关大气污染控制工程的基本概念和基本原理。本书主要内容有大气污染的基本概念；燃料、燃料燃烧及计算；大气污染气象与污染物的大气扩散；除尘技术的流体力学基础；气溶胶力学基础；除尘装置的设计与计算；以及应用吸收、吸附和催化等过程原理治理气态污染物的方法和工艺流程。

本书可作为高等工科院校环境工程专业的教材。也可作为化工、冶金、建材、电子、机械等工业，正在从事大气环境保护设计，科研、气体净化装置运行工程技术人员以及大专院校环境工程专业教师的参考书。

高等学校试用教材

### 大气污染控制工程

林肇信 主编

董志权 余名汉 刘凤志 合编

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张 36.25 字数 900 000

1991年5月第1版 1991年5月第1次印刷

印数0-001—1 590

ISBN 7-04-002704 6/K·161

定价 11.10 元

## 前 言

《大气污染控制工程》课是环境工程专业的主干专业课之一。多数院校急待选择一本适宜的教材。我们根据国家教委审定的、高等工业学校环境工程专业教材委员会制定的教学基本要求，并结合多年教学实践经验，编写了这本教材。本书较系统、全面地介绍了大气污染控制工程的基本概念、基本原理、基本方法及有关设计计算问题。在编写过程中参考了大量的国内外文献，力求取众家之长树自家风格。始终遵循着学生的认识规律，教材理论方面既要有一定深度，又要易于理解，使学生能够循序渐进地接受新的知识。本书内容较为丰富，例题选题广泛，书中主要章节都安排了能够深入理解、运用基本理论的大小例题，增强了本书的科学性、实用性和通用性。

全书共分九章。第一章主要讲述了大气污染的含义、主要污染物的发生机制、国内外大气污染控制概况、大气控制质量标准的制定以及大气污染综合防治的基本知识；第二章中讲述化石燃料的种类及性质、燃料燃烧的计算方法以及各类燃料燃烧过程和燃烧器。本章还专述几种实用性的低 $\text{NO}_x$ 生成的烧嘴；第三章在简要介绍大气污染气象的基本概念及主要气象要素对大气污染的影响之后，着重阐述污染物在大气中扩散规律的基本理论，以及各类污染源扩散数学模型参数估算。还简要论述了烟囱高度的设计；在第四、五章里主要讲述与除尘气体净化有关的流体和气溶胶力学的基础知识；第六章是以较大篇幅讲述了六种常规除尘器（沉降室、惯性力除尘器、离心刀除尘器、湿式除尘器、过滤除尘器以及电除尘器）的除尘机理及其设计计算，并对具有代表性的除尘器结构特点给予必要地说明；第七、八、九章讲述应用吸收、吸附、催化过程原理治理气态污染物的方法和工艺流程。

本书由北京工业大学林肇信教授主编。参加编写人员有：

第一章 概论：林肇信

第二章 燃料、燃料燃烧及燃烧器：林肇信

第三章 大气污染气象与污染物的大气扩散：林肇信、童志权

第四章 除尘技术的流体力学基础：林肇信

第五章 气溶胶力学基础：林肇信

第六章 除尘装置：林肇信、张小鹏

第七章 吸收法净化气态污染物：刘凤志

第八章 吸附法净化气态污染物：余名汉

第九章 催化法净化气态污染物：刘凤志

在本书编写过程中，国家教委环境工程专业教材委员会委员叶昌仁副教授主持了该书审稿会，参加审稿会的还有郝吉明、马广大、沈德树、季学礼等先生。高等教育出版社的张月娥、陈文等同志对本书的审查和加工作了很多工作，在此一并感谢！

由于编者水平所限，缺点错误在所难免，欢迎批评指正。

编 者

1990年8月

# 目 录

<b>第一章 概 论</b>	
<b>第一节 大气及大气污染</b> .....	1
一、大气圈及其结构	1
二、大气的组成	3
三、大气的重要性	4
四、大气污染的含义	4
<b>第二节 大气污染源及主要污染物的发生</b> .....	4
一、大气污染源	4
二、主要大气污染物的发生机制	5
<b>第三节 大气污染概况</b> .....	11
一、大气污染的历史	11
二、我国大气污染概况	13
<b>第四节 大气污染综合防治</b> .....	15
一、大气污染综合防治的含义	15
二、大气污染综合防治的基本内容	15
<b>第五节 大气质量控制标准</b> .....	16
一、大气质量控制标准的种类和作用	17
二、大气环境质量的制定	18
三、大气污染物排放标准的制定	20
<b>第二章 燃料、燃料燃烧及燃烧器</b>	
<b>第一节 燃料的种类、性质及其组成的表示方法</b> .....	25
一、燃料的种类	25
二、燃料组成的表示方法及换算	32
三、燃料的发热量	35
<b>第二节 燃烧计算</b> .....	38
一、可燃组分的燃烧计算方法	38
二、燃烧所需空气量的计算	40
三、烟气量的计算	41
四、理论空气量和理论烟气量的近似计算	43
五、烟气组成与过剩空气系数的计算	44
<b>第三节 燃料的燃烧过程及燃烧器</b> .....	47
一、气体燃料的燃烧过程及燃烧器	47
二、液体燃料的燃烧过程及燃烧器	53
三、煤粉的燃烧过程及燃烧器	58
四、块状固体燃料的燃烧过程及燃烧设备	61
五、低氮氧化物烧嘴	64
<b>第三章 大气污染气象与污染物的扩散</b>	
<b>第一节 主要气象要素与大气的热力过程</b> .....	67
一、主要气象要素	67
二、低层大气的增热与冷却	70
三、气温的绝热变化	71
四、大气稳定度	73
五、逆温	75
<b>第二节 大气的水平运动和湍流运动</b> .....	77
一、大气的水平运动	77
二、大气的湍流运动	79
<b>第三节 气象条件和下垫面对大气污染的影响</b> .....	80
一、气象条件对大气污染的影响	80
二、下垫面对大气污染的影响	84
<b>第四节 湍流扩散的基本理论</b> .....	87
一、湍流扩散的梯度输送理论	87
二、湍流扩散的统计理论	91
<b>第五节 实用的大气扩散模式</b> .....	92
一、有界条件下的大气扩散模式	92
二、几种常用的大气扩散模式	94
<b>第六节 有效源高</b> .....	96
一、影响烟气抬升高度的因素	96
二、常用的烟气抬升高度计算式	96
<b>第七节 扩散参数的确定</b> .....	100
一、P-G 扩散曲线法确定扩散参数	100
二、布里格斯法确定扩散参数	104
三、史密斯法确定扩散参数	105
四、中国国家标准规定的扩散参数取	

用原则 .....105

## 第八节 特殊气象条件下的大气扩

散模式 .....106

一、封闭型大气扩散模式 .....106

二、熏烟型大气扩散模式 .....110

三、微风下的大气扩散模式 .....111

四、危险风速下的大气扩散模式 .....113

## 第九节 城市及山区的大气扩散模

式 .....115

一、城市大气扩散模式 .....115

二、山区大气扩散模式 .....124

## 第十节 长期平均浓度估算和烟囱

高度设计 .....125

一、长期平均浓度的估算 .....125

二、烟囱高度的设计 .....127

## 第四章 除尘技术的流体力学基础

### 第一节 流体的分类 .....129

一、不可压缩流体与可压缩流体 .....130

二、粘性流体与非粘性流体 .....130

三、单相流体与多相流体 .....130

### 第二节 气体的性质及计算 .....130

一、气体的湿度 .....130

二、气体的密度、比容、重度 .....133

三、气体体积的换算 .....139

四、气体的粘度 .....141

五、气体的热容及显热计算 .....144

### 第三节 除尘技术中流体流动的基

本理论 .....149

一、流体的流动 .....149

二、迹线与流线 .....150

三、速度与加速度 .....150

四、流体微团运动的基本形式 .....151

五、有势流动和有涡流动 .....154

六、环量 .....155

七、气体流动微分方程式 .....156

八、粘性流体运动的微分方程式 .....157

九、平面势流 .....161

十、旋涡流 .....164

十一、蠕流的阻力 .....167

## 第五章 气溶胶力学基础

### 第一节 气溶胶的分类 .....170

一、按气溶胶颗粒的形成过程分类 .....170

二、按气溶胶颗粒物态分类 .....170

### 第二节 气溶胶颗粒的粒径 .....171

一、单颗粒粒径 .....171

二、颗粒群的平均粒径 .....174

### 第三节 气溶胶颗粒的分布 .....175

一、粉尘粒子的频数分布 .....175

二、粉尘粒子的相对频数分布(或称  
频率分布)( $\Delta R$ ) .....176

三、频度分布(或称频率密度)( $f$ ) .....177

四、筛上累计频率分布( $R$ ) .....178

### 第四节 气溶胶颗粒粒径的分布函

数 .....180

一、正态分布函数(又称高斯分布函  
数) .....180

二、对数正态分布函数 .....181

三、罗辛-拉姆勒(Rosin-Rammler)  
分布函数 .....183

### 第五节 粉尘的物理性质 .....186

一、粉尘颗粒的形状及形状系数 .....187

二、粉尘的密度 .....189

三、粉尘的比表面积 .....190

四、粉尘的安息角与滑动角 .....190

五、粉尘的润湿性 .....191

六、粉尘的爆炸性 .....191

七、粉尘的荷电性及导电性 .....192

### 第六节 气溶胶颗粒的流体阻力 .....195

一、绕流阻力 .....195

二、绕过球形粒子的阻力系数 .....196

三、滑动修正系数 .....199

四、非球形粒子的阻力系数 .....200

### 第七节 气溶胶粒子的沉降机理 .....202

一、粉尘粒子的重力沉降 .....203

二、粉尘粒子的离心沉降 .....206

三、惯性力沉降 .....207

四、拦截捕获 .....210

五、扩散沉降 .....212

六、粉尘粒子的电力沉降 .....215

七、热泳力沉降 .....	218	二、气液系统的相平衡 .....	375
八、扩散泳力沉降 .....	220	三、双膜理论 .....	380
九、紊流中粉尘粒子的沉降 .....	221	四、物理吸收过程的物料平衡 .....	381
		五、单相传质和总传质方程式 .....	386
		六、传质单元数计算方法 .....	393
<b>第六章 除尘装置</b>			
<b>第一节 除尘装置的性能及其分类</b> .....	224	<b>第二节 化学吸收的基本原理与计算</b> .....	399
一、除尘装置的性能 .....	224	一、化学吸收的基本原理 .....	399
二、除尘装置的分类 .....	232	二、伴有化学反应的吸收计算 .....	411
<b>第二节 干式机械除尘器</b> .....	232	<b>第三节 吸收设备</b> .....	418
一、重力沉降室 .....	233	一、表面吸收器 .....	419
二、惯性除尘器 .....	239	二、鼓泡式吸收器 .....	426
三、离心力除尘器 .....	241	三、喷洒式吸收器 .....	432
<b>第三节 湿式除尘器</b> .....	265	<b>第四节 吸收法净化气态污染物</b> .....	439
一、湿式除尘器的理论基础 .....	267	一、从排烟中去除 SO <sub>2</sub> 的技术 .....	439
二、湿式除尘器效率的计算 .....	278	二、从排烟中去除氮氧化物 (NO <sub>x</sub> ) 的技术 .....	449
三、湿式除尘器的流体阻力 .....	282	三、氟化物的治理 .....	450
四、重力喷雾洗涤除尘器 .....	282		
五、填料洗涤器 .....	285	<b>第八章 吸附法净化气态污染物</b>	
六、可浮动填料层气体净化器 .....	287	<b>第一节 吸附的基本概念</b> .....	451
七、贮水式洗涤除尘器 .....	289	一、吸附过程及有关特性 .....	451
八、湿式离心力除尘器 .....	290	二、物理吸附与化学吸附 .....	453
九、文丘里洗涤除尘器 .....	296	三、工业上常用的吸附剂及其性质 .....	454
十、喷射式洗涤除尘器 .....	302	<b>第二节 吸附平衡理论</b> .....	456
十一、旋转式洗涤除尘器 .....	302	一、等温吸附线 .....	456
<b>第四节 过滤除尘器</b> .....	303	二、等温吸附方程式 .....	458
一、过滤除尘器的类型及其滤尘过程 .....	304	三、多组分吸附 .....	463
二、过滤除尘器的滤尘机理 .....	305	四、吸附的测定 .....	464
三、袋式除尘器 .....	310	<b>第三节 吸附速率</b> .....	467
四、颗粒层除尘器 .....	327	一、吸附速率的实验测定 .....	468
<b>第五节 电除尘器</b> .....	332	二、吸附速率的计算式 .....	468
一、电除尘器的分类及除尘过程 .....	333	<b>第四节 吸附过程及其计算</b> .....	472
二、电除尘器的理论基础 .....	336	一、吸附过程的工艺流程 .....	472
三、电除尘器的除尘效率 .....	355	二、固定床吸附过程及其计算 .....	473
四、电除尘器的构造 .....	360	三、移动床吸附过程计算 .....	486
五、粉尘比电阻 .....	363	四、流化床吸附过程计算 .....	490
六、电除尘器的供电 .....	365	五、吸附剂的再生 .....	495
七、电除尘器的选择、设计和应用 .....	368	<b>第五节 吸附设备的类型及其特性</b> .....	498
		一、固定床吸附器 .....	498
		二、移动床吸附器 .....	498
<b>第七章 吸收法净化气态污染物</b>			
<b>第一节 物理吸收的基本概念</b> .....	372		
一、气液相中组分组成的表示方法 .....	372		

三、流化床吸附器 .....	500
四、模拟移动床吸附器 .....	501
五、其它类型的吸附器 .....	501
<b>第六节 吸附法在气态污染物控制</b>	
<b>中的应用</b> .....	503
一、概述 .....	503
二、几种污染物的吸附治理 .....	504
<b>第九章 催化法净化气态污染物</b>	
<b>第一节 催化剂和催化作用</b> .....	513
一、催化剂 .....	513
二、催化作用 .....	518
<b>第二节 气固相催化反应的宏观动</b>	
<b>力学</b> .....	519
一、表面化学反应速度和动力学方程	
式 .....	519
二、气固相催化反应宏观动力学方程	
式 .....	523
<b>第三节 气固催化反应器</b> .....	530
一、固定床催化反应器的结构型式 .....	530
二、固定床反应器内流体的流动 .....	533
三、固定床绝热催化反应器催化剂体	
积的计算 .....	535
<b>第四节 气态污染物的催化净化工</b>	
<b>艺</b> .....	542
一、催化氧化法去除 SO <sub>2</sub> .....	542
二、催化还原法去除 NO <sub>x</sub> .....	544

三、催化燃烧法净化有机废气及脱臭 .....	547
四、汽车尾气的催化净化 .....	547
<b>参考文献</b> .....	549
<b>附录</b> .....	552
附录 1 常用常数 .....	552
附录 2 SI 单位制的基本单位和辅助	
单位 .....	552
附录 3 环境工程常用SI单位制专门	
名称的导出单位 .....	552
附录 4 单位换算表 .....	553
附录 5 空气的物理参数 .....	558
附录 6 干空气的物理参数 .....	560
附录 7 水的物理参数 .....	560
附录 8 烟道气的物理参数 .....	561
附录 9 气体平均容积热容 .....	561
附录 10 大气环境质量标准 .....	562
附录 11 居住区大气中有害物质的最	
高容许浓度 .....	562
附录 12 车间空气中有害物质的最高	
容许浓度 .....	563
附录 13 十三类有害物质的排放标准 .....	564
附录 14 中国国家标准规定的锅炉烟	
尘排放标准 .....	567
附录 15 几种气体或蒸气的爆炸特性 .....	567
附录 16 标准筛目对照 .....	568
附录 17 可燃气体的主要热工特性 .....	569
附录 18 干高炉煤气的主要特性 .....	569
附录 19 局部阻力系数 .....	570



# 第一章 概 论

本章主要讲述大气与大气污染的含义；大气污染源及主要污染物的发生机制；国内外大气污染及控制概况；大气控制质量标准以及大气污染综合防治等有关大气污染控制的基本知识。

## 第一节 大气及大气污染

### 一、大气圈及其结构

#### 1. 大气圈

地球是太阳系存在有生命的一个行星，在这个星体上具有适于人类生存和发展的自然环境。大气是自然环境的重要组成部分，是人类赖以生存必不可少的物质。

在自然地理学上，把由于地心引力而随地球旋转的大气层叫做大气圈。大气圈层厚度大约有 10000 公里<sup>[49]</sup>。由于大气圈与宇宙空间很难确切地划分，在大气物理学和污染气象学研究中，常把大气圈层上界定为 1200~1400 公里，超出 1400 公里以外，气体非常稀薄，就是宇宙空间了。

大气圈中的空气，分布是不均匀的。海平面上的大气最稠密，近地层的大气密度，随高度上升而迅速变小，但在地球表面上空 400~1400 公里的大气层里，空气是渐渐变稀薄的。

温度随高度的变化是地球大气的最显著的特征。为了描述大气气温垂直分布的特点，常用每上升单位高度（常取 100 m）时，气温的变化率来表示。这称为气温的垂直递减率或气温直减率，也叫气温铅直梯度。通常以  $\gamma$  表示， $\gamma = -\frac{\partial T}{\partial Z}$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ )。当气温随高度升高而降低时  $\gamma > 0$ ；当气温随高度升高而增加时  $\gamma < 0$ 。气温铅直梯度随地区、季节和高度不同而异。

#### 2. 大气圈结构

根据大气圈在垂直高度上，温度变化特点、大气的组成状况以及其运动状态，将大气划分为如图 1-1 所示的大气圈层结构<sup>[76]</sup>。

从地球表面上到大约 80~85 公里高度，大气的主要成分氧和氮的组成比例几乎没有什么变化，具有这样特性的大气层，称作均质大气层（简称均质层）。在这一层中根据气温在垂直方向上的变化情况分为对流层、平流层和中间层。在均质层以上的大气层，其气体组成随高度而有很大变化，称它为非均质层，在非均质层中又分暖层（电离层）和散逸层（外层）。

(1) 对流层 对流层是大气圈中最下面的一层，该层的厚度随地球纬度不同有所差别，在极地约为 6~10 公里；在中纬度约为 10~12 公里；在赤道处可达 16~18 公里。对流层的平均厚度约为 12 公里，只有十几公里厚的对流层的空气质量约占大气层总质量的 75% 左右。在这一层里除有纯净的干空气外，还含有一定量的水蒸气，适宜的湿度对人和动植物的生存起着重要作用，对流层的温度分布特点是下部气温高，上部气温低。大气易形成较强烈的对流运

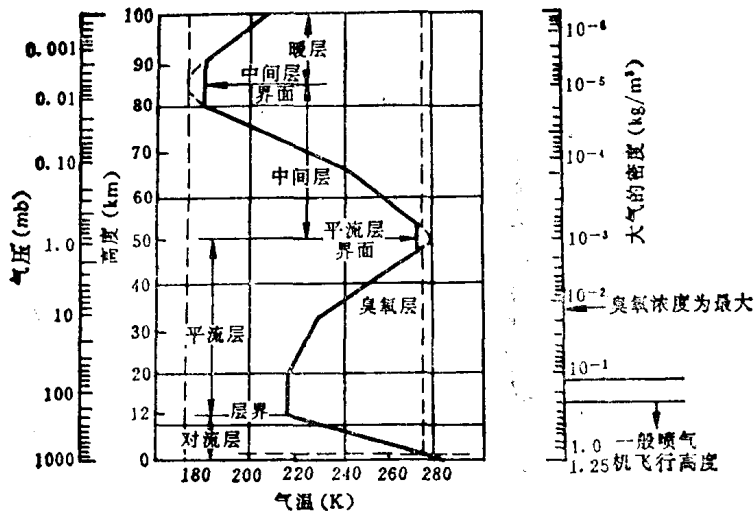


图1-1 大气圈层的结构

动。并由于太阳辐射和大气环流的影响，出现极其复杂的气象现象，有时形成易于扩散的气象条件，有时形成对生态系统有危害的逆温。风、雪、雨、霜、雾和雷电等自然现象也都出现在这一层。人类活动排放的污染物绝大多数聚集于对流层，大气污染主要发生在这一层，特别是靠近地面1~2公里的近地层，因此对流层与人类的关系最为密切。

(2) 平流层 平流层位于对流层之上，平流层的下部气温几乎不随高度而变化，为一等温层。该等温层的上界大约距地面为35~40公里。平流层的上部气温随高度上升而增高。在距地面50~55公里的平流层层顶处，气温可升至-0~-3℃，比对流层顶处的气温高出60~70℃。这是因为在平流层的上部存在一厚度约为20公里的臭氧(O<sub>3</sub>)层。该臭氧层能强烈吸引200~300nm的太阳紫外线，致使平流层上部的气层发生明显地增温。

在平流层中，很少发现大气上下的对流，虽然有时也能观察到高速风或在局部地区有湍流出现，但一般多是处于平流流动，极少出现云、雨、风暴天气。大气的透明度好，气流也稳定。进入平流层中的污染物，由于在大气层中扩散速度缓慢，污染物在此层停留时间较长，有时可达数年之久。进入平流层的氮氧化物、氯化氢以及氟利昂有机制冷剂等能与臭氧层中的臭氧发生光化学反应；光化学反应将会使臭氧层的臭氧浓度降低，严重时臭氧层还可能出现“空洞”。经臭氧层辐射到地球表面上的太阳紫外线增强，将会导致地球上更多的人患有皮肤癌，地球上人类生态系将会受到极大的威胁。

(3) 中间层 中间层位于平流层顶之上，层顶高度大约为80~85公里，在这一层里有强烈的垂直对流运动，气温随高度增加而下降，中间层顶温度可降至-83~-113℃。从中间层顶继续升高就进入非均质层了。

(4) 暖层 暖层位于中间层的上部，暖层的上界距地球表面约有800多公里，该层的下部基本上是由分子氮所组成，而上部是由原子氧所组成。原子氧层可吸收太阳辐射出的紫外光，因而在这层的气体温度是随高度增加而迅速上升。由于太阳光和宇宙射线的作用，使得暖层中的气体分子大量被电离。因为在这个气层里有大量的离子和电子，所以又称为电离层。电离层对短波或超短波、无线电通讯有很重要的作用。

(5) 外层 这是大气圈的最外层，在热层的上部，这层相当厚，是从大气圈逐步过渡到星际空间的大气层。靠近热层的外层是原子氮层，外层的上部，直到星际空间是原子氢层。

## 二、大气的组成

### 1. 大气与空气

从自然科学的角度来看，空气和大气是同义词，二者并没有实质性的差别，但是在研究大气污染规律及对空气质量进行评价时，为了便于说明问题，两个名词常分别使用。一般对于室内或特指某个场所（如车间，会议室和厂区等）供人和动植物生存的气体，习惯上称为空气。而在大气物理学、大气气象学、自然地理学以及环境科学的研究中，需要常常以大区域或全球性的气流为研究对象，常用大气一词。

### 2. 大气的组成

大气是多种气体的混合物，其组成包括恒定的，可变的和不定性的三种组分。

大气的恒定组分系指大气中含有的氮、氧、氩及微量的氦、氖、氪、氙等稀有气体。其中氮、氧、氩三种组分共占大气总量（体积）的99.96%。在从地球表面向上，大约到80~85公里这段大气层（均质层）里，这些气体组分的含量几乎可认为是不变的。

大气的可变组分主要是指大气中的二氧化碳和水蒸气等。这些气体的含量由于受地区、季节、气象，以及人们生活和生产活动等因素的影响而有所变化。在通常情况下，水蒸气的含量为0~4%，二氧化碳的含量近年来已达到0.033%。

由恒定组分及正常状态下的可变组分所组成的大气，叫做洁净大气。近地层洁净大气的组成如表1-1所示。

表1-1 近地层大气组成

大气的组成	符 号	在大气中的体积浓度		在大气中的质量 ( $\times 10^{17}$ kg)
		%	ppm	
氮 气	N <sub>2</sub>	78.09	—	38.648
氧 气	O <sub>2</sub>	20.94	—	11.841
氩 气	Ar	0.93	—	0.665
二氧化碳	CO <sub>2</sub>	0.033	330	0.0253(逐渐在增加)
氦 气	Ne	—	18	0.000636
氖 气	He	—	5.2	0.000037
氪 气	Kr	—	1.0	0.000146
氙 气	Xe	—	0.08	0.000018
氢 气	H <sub>2</sub>	—	0.5	0.000002
甲 烷	CH <sub>4</sub>	—	1.5	0.000043
一氧化碳	CO	—	0.1	} 受污染的大气大于此浓度
氧化二氮	N <sub>2</sub> O	—	0.25	
				干空气总质量约 $51.17 \times 10^{17}$ kg
水 蒸 气	H <sub>2</sub> O	0~4		随地区及季节的不同有很大差异 随受污染程度的不同而变化 臭氧层
臭 氧	O <sub>3</sub>	—	地表面处 0~0.07 20~30km处 0.1~0.2	

大气中不定组分，有时是由自然界的火山爆发、森林火灾、海啸、地震等暂时性灾害所产

生的，由此所形成的污染物有尘埃、硫、硫化氢、硫氧化物、氮氧化物、盐类及恶臭气体等。一般来说，这些不定组分进入大气中，可造成局部和暂时性的大气污染。大气中不定组分除上述来源之外，其最主要来源是由于人类社会的生产工业化，人口密集，或由于城市工业布局不合理和环境管理不善等人为因素所造成的。其排放的不定组分的种类和数量与该地区工业类别、气象条件等多种因素有关。如电厂、焦化厂、冶炼厂所在地区，大气中烟尘、硫氧化物、氮氧化物、重金属元素及其氧化物等较多，而在化工区则有机或无机的化学物质等较多，当大气中不定组分达到一定浓度时，就会对人、动植物造成危害，这是环境保护工作者应当研究的主要对象。

### 三、大气的重要性

人们生活在汪洋的空气“海”里，洁净的空气对生命来说，比任何东西都更重要，人需要呼吸新鲜洁净的空气来维持生命，一个成年人每天呼吸大约两万次，吸入的空气量约  $10\sim 15\text{ m}^3$ ，大约为每天所需食物重量的 10 倍。生命的新陈代谢一时一刻也离不开空气，人 5 周不吃饭，6 天不饮水，尚能生存，而 5 分钟不呼吸就会死亡。

然而，在受污染的大气中，常含有一氧化碳 (CO)、二氧化硫 (SO<sub>2</sub>)、氮氧化物 (NO<sub>x</sub>)、硫化氢 (H<sub>2</sub>S)、萜烯 (C<sub>10</sub>H<sub>16</sub>) 以及多种无机或有机气体等。这些有害气体常与排入大气中的颗粒物 (气溶胶) 共同悬浮于大气中。悬浮大气中的污染物，不仅对太阳—地球间热量收支平衡有影响，造成局部地区或全球性的气候和气象变化，而且能直接对动植物的生长和生存造成危害，甚至夺去其生命。

### 四、大气污染的含义

自然界中局部的质能转换和人类所从事种类繁多的生活、生产活动、向大气排放出各种污染物，当污染物超过环境所能允许的极限 (环境容量) 时，大气质量就发生恶化，使人们的生活、工作、健康精神状态，设备财产以及生态环境等遭受到恶劣影响和破坏，此类现象即为大气污染。

## 第二节 大气污染源及主要污染物的发生

### 一、大气污染源

大气污染源通常是指向大气排放出足以对环境产生有害影响的有毒或有害物质的生产过程、设备或场所等。按污染物质的来源可分为天然污染源和人为污染源。天然污染源是指自然界向环境排放污染物的地点或地区，如排出火山灰、SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 等污染物的活火山，自然逸出瓦斯气和天然气的煤田和油气井，以及发生森林火灾、飓风和海啸等自然灾害地区等。而人为污染源系指人类生活和生产活动所形成的污染源。人为污染源多在人类群居的地方。人为污染源有多种分类方法，按污染源空间分布方式可分为：点污染源 (集中于一点或相当于一小范围排放污染物的发生源)；面污染源 (在相当大的面积内有多个污染物发生源)；区域性污染源 (能超出行政区划或国界的大气污染物的发生源)。此外，更常见的是按人们的社会活动功

能，将人为污染源分为生活污染源、工业污染源及交通运输污染源。

### 1. 生活污染源

人们由于烧饭、取暖、沐浴等生活上的需要，燃烧化石燃料，而向大气排放煤烟所造成的大气污染的污染源，如炉灶、锅炉等称为生活污染源。

### 2. 工业污染源

由火力发电厂、钢铁厂、化工厂及水泥厂等工矿企业在生产和燃料燃烧过程中所排放的煤烟、粉尘及无机或有机化合物等造成的大气污染的污染源，称为工业污染源。

### 3. 交通运输污染源

由汽车和船舶等交通工具排放尾气所造成的大气污染，称作交通污染源，这种污染源位置是移动的，又称移动污染源。生活污染源和工业污染源，其位置多为固定的，故称固定污染源。

## 二、主要大气污染物的发生机制

在我国大气环境中，具有普遍影响的污染物，最主要的来源是燃料燃烧及工业排放的尾气。当前，在我国对环境质量影响较大的污染物有总悬浮微粒物、飘尘、二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳和光化学氧化剂等六种，我国政府已对这六种主要大气污染物颁布了国家级的大气质量标准（见附录 10）。由某地区或厂矿的特定污染源排放危害较重的污染物，也可作为该地区的主要污染物。例如铝厂或磷肥厂所在地区的氟化物污染，氟化物就成为该地区的主要污染物之一。下面将对几种主要大气污染物的发生机制作一简要介绍。

### 1. 硫氧化物

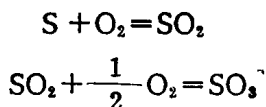
硫氧化物（ $SO_x$ ）主要是指二氧化硫（ $SO_2$ ）和三氧化硫（ $SO_3$ ）。大气中的硫化氢（ $H_2S$ ）是不稳定的硫化物，当有颗粒物存在时，它在大气中可迅速地被氧化成  $SO_2$ 。大气中的  $SO_x$  有一半是由人为污染源所散发（见表 1-2），主要是由燃烧含硫煤和石油等燃料产生的。此外，有色金属冶炼厂、硫酸厂等也排放出相当数量的硫氧化物气体。

表 1-2 地球上全年  $SO_x$  的发生量<sup>(76)</sup> (Robinson, et al, 1969)

发 生 源	发生量 ( $10^6 t$ )	发 生 源	( $10^6 t$ )
煤燃烧	102	从工厂发生的 $H_2S$ (算成 $SO_2$ )	3
石油燃烧		从人为污染源排的 $SO_2$ 总量	149
汽油、柴油	2	从海洋发生的 $H_2S$ (算成 $SO_2$ )	32
重油	20	陆地上发生的 $H_2S$ (换算成 $SO_2$ )	72
石油炼制	6	从海盐粒子形成的 $SO_4^{2-}$ 中的硫 (换算成 $SO_2$ )	44
有色金属冶炼	16		

通常一吨煤中约含有 5~50kg 硫，一吨石油约含 5~30kg 硫。燃料中的硫不完全是以单体硫存在，多以有机或无机硫化物的形式存在。燃料中的硫醚和硫醇等一类有机硫化物和黄铁矿等无机硫化物，燃烧后可生成硫氧化物（ $SO_x$ ），称这种硫化物为可燃性硫化物；燃料中的硫酸盐类的硫化物不参与燃烧反应，燃烧后多残存于灰中，此种硫化物为非可燃性硫化物。

可燃性硫化物燃烧，主要是生成  $\text{SO}_2$ ，只有 1~5% 氧化成  $\text{SO}_3$ 。其主要化学反应如下：



$\text{SO}_2$  在洁净干燥的大气中氧化成  $\text{SO}_3$  是缓慢的，但是在相对湿度比较大，有颗粒物存在时可发生催化氧化反应；在太阳紫外光照射下，可发生光化学反应，生成  $\text{SO}_3$  和硫酸雾。

自本世纪七十年代以来，全球二氧化硫排放总量平均每年递增 5%，1980 年达到 2 亿吨，预计本世纪末可超过 3.3 亿吨。

由电厂排放出  $\text{SO}_2$  的量是相当可观的。据资料介绍，在一个燃油火电厂，每小时生产 1MW(兆瓦)的电力约需  $0.20 \sim 0.25 \times 10^8 \text{ l}$  燃料重油，排放烟气体积约为  $3000 \text{ m}^3_{\text{N}}$  (标准立方米)。那么，一个发电量为  $30 \times 10^4 \text{ kW}$  (即 300MW) 的燃油火力发电厂，每小时耗用  $60 \sim 75 \times 10^8 \text{ l}$  重油，排烟量为  $90 \times 10^4 \text{ m}^3_{\text{N}}$ ，若燃料重油中含硫以 3% 计，则每小时将向大气排放 1.95 吨的硫磺，每天约排放 47 吨，一年有 15700 吨硫磺排放到大气中，若以  $\text{SO}_2$  计算，则还要增加一倍。

我国太原第二热电厂装机容量为  $25 \times 10^4 \text{ kW}$  机组，每小时耗用煤粉为 127 吨，燃用的煤含硫率并不高，只有 1.8% 左右，而每小时向大气排放的  $\text{SO}_2$  达 4000kg 之多，全年  $\text{SO}_2$  的排放量可达 25000 多吨。

目前，我国重有色冶炼厂排放烟气中的含硫也是很高的。如每生产一吨铜，随烟气要排放 2 吨硫；每生产一吨铅约排放 0.3 吨硫；每生产一吨锌约排放 0.6 吨硫。根据 1977 年对我国重点有色冶炼厂进行调查结果表明，进入烟气的总硫量约为  $50 \times 10^4 \text{ t/a}$ ，其中高浓度  $\text{SO}_2$  烟气 ( $\text{SO}_2$  含量  $> 3.5\%$  的烟气) 含硫  $38.4 \times 10^4 \text{ t/a}$ ，低浓度  $\text{SO}_2$  烟气 ( $\text{SO}_2$  含量  $< 3.5\%$ ) 含硫为  $11.6 \times 10^4 \text{ t/a}$ 。

我国利用有色金属冶炼产生的高浓度  $\text{SO}_2$  烟气制酸工业发展很快，截至 1978 年底制酸能力已达到  $108 \times 10^4 \text{ t/a}$ 。

对于低浓度  $\text{SO}_2$  烟气，目前除个别厂采用吸收法处理外，大多数是放空的。这不仅是硫资源的浪费，而且还造成了环境污染。

据 1969 年美国罗宾逊等人报导，全世界由人为污染源每年排放到大气中的  $\text{SO}_2$  约有  $1.5 \times 10^8 \text{ t}$ 。表 1-2 给出了不同发生源  $\text{SO}_x$  的排放量。

我国当前和今后一段时期的能源仍以燃煤为主，随着经济的发展，能源的消耗将有很大的增加。因此，应积极开展从烟气中回收  $\text{SO}_2$ ，特别是回收低浓度  $\text{SO}_2$  的科学研究工作，争取在较短的时间内控制和消除  $\text{SO}_2$  烟害，以保护环境，造福人民。

## 2. 烟尘

烟尘是燃料和其他物质燃烧的产物。燃烧产物中，通常含有由于燃烧不完全所生成的碳黑、结构复杂的多环芳烃有机化合物和飞灰等。煤燃烧过程中生成碳黑的机制，至今还不是十分清楚，但一般可简单地认为是煤中挥发分，在高温下经氧气、分解、脱氢、聚合等多种复杂化学反应过程而生成的。当燃烧条件较为理想时，生成的碳黑及大分子多环芳烃致癌物，可能会少一些，从烟囱排出的烟气多呈淡淡的白烟。当燃烧条件不好，燃烧不够充分时，排出的

烟气多为滚滚的黑烟。

烟尘发生的设施通常有锅炉、加热炉、焙烧炉、熔矿炉、平炉、锻烧炉以及焚烧炉等。从这些设施排出的污染物，除烟尘外，还有硫化物、氮氧化物和其它有害物。

### 3. 粉尘

所谓粉尘是指煤、矿石等固体物料在运输、筛分、碾磨、加料和卸料等机械处理过程中所发生的，或者是由风扬起的灰尘。粉尘发生设施有如下五种：

(1) 炼焦炉（如加煤、推焦、熄火等过程）；

(2) 料场或废弃物的堆积场；

(3) 带式运输机，斗式提升机；

(4) 破碎机或研磨机；

(5) 筛分机。

### 4. 一氧化碳

大气中的一氧化碳来源于人为污染源和自然污染源。在1970年全世界由人为污染源向大气排放的CO量约为  $3.59 \times 10^8$  t，主要是由于燃料燃烧不完全所产生的。由于近代对燃烧装置和燃烧技术的改进，所以从固定燃烧装置排放的CO量逐渐有所减少，而由汽车等移动源燃烧发生的CO量每年有  $2.5 \times 10^8$  t，占人为污染源排放的CO总量的70%左右。表1-3给出了各类发生源向大气排放的CO量。

当从工业窑炉或其它固定源排放出的CO浓度在1%以下时，可认为对大气不会造成污染。汽车尾气排放的CO量与汽车运行的工况有关。表1-4给出了汽车在不同行驶工况下，排放的CO浓度。汽车在空挡工况时排放的CO浓度为最高。

表1-4 汽车在不同行驶工况下排放的CO浓度<sup>(7)</sup> (%)

空 挡	加 速	常 速	减 速
4.9	1.8	1.7	3.4

由汽车尾气排放的CO造成大气污染已引起世界各国重视，许多国家正在积极开展汽车尾气净化的研究工作。

### 5. 氮氧化物

氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 种类很多，它是NO、NO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、NO<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>等的总称。造成大气污染的NO<sub>x</sub>主要是指NO和NO<sub>2</sub>。大气中氮氧化物几乎1/2以上是由人为污染源发生的。人为污染源一年向大气排放的NO<sub>x</sub>量约为  $52.1 \times 10^6$  吨。它们大部分来源于化

表1-3 全世界在一年间向大气排放的CO量<sup>(76)</sup>

(Jaffe, 1970)

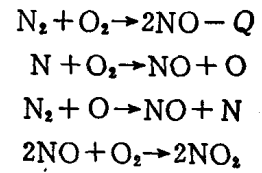
发 生 源	发生量 (10 <sup>6</sup> t)
汽车	197
汽油车	2
柴油车	5
飞机	2
机车	18
船舶	26
建筑机械、拖拉机等移动源	4
煤燃烧	41
石油炼制、金属冶炼等工业	23
垃圾焚烧	41
其它 (农业废弃物及火灾等)	
人为污染源的CO发生量	359
森林火灾	11
海中生物	3—360
萜烯反应	60
植物叶绿素的分解	90

石燃料的燃烧过程（如汽车、飞机、内燃机及工业窑炉等的燃烧过程），也来自硝酸或使用硝酸等的生产过程，氮肥厂、有机中间体厂、有色及黑色金属冶炼厂的某些生产过程。表 1-5 是罗宾逊等人在 1968 年推算出来的、由各类人为污染源向大气排放的 NO<sub>x</sub> 量。

表 1-5 全世界人为污染源一年间向大气排放的 NO<sub>x</sub> 量<sup>(76,81)</sup>

发 生 源	发生量 (10 <sup>6</sup> t)	发 生 源	发生量 (10 <sup>6</sup> t)
煤		重油燃烧	9.2
火电厂	12.2	天然气	
工业	13.7	发电厂	0.6
居民、商业	1.0	工业	1.1
石油		居民、商业	0.4
石油炼制	0.7	垃圾焚烧	0.5
汽油燃烧	7.5	木材燃烧	0.3
灯油燃烧	1.3	总计	52.1
轻油燃烧	3.6		

由燃烧过程生成的 NO<sub>x</sub> 有两类：一类是燃料在高温燃烧时，由空气中的 N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 反应生成的，由此而生成的 NO<sub>x</sub> 叫热 NO<sub>x</sub> (thermal NO<sub>x</sub>)；另一类是由于燃料含有吡啶 (C<sub>5</sub>H<sub>5</sub>N)、咪唑 (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>N) 及氨基化合物 (RNH<sub>2</sub>) 等含氮化合物，在燃烧时分解出的 N<sub>2</sub> 和空气中的 O<sub>2</sub> 反应而形成的 NO<sub>x</sub>，由此生成的 NO<sub>x</sub> 叫做燃料 NO<sub>x</sub> (fuel NO<sub>x</sub>)。由燃料燃烧生成的 NO<sub>x</sub> 主要是 NO。在一般锅炉烟气中，只有不到 10% 的 NO 氧化成 NO<sub>2</sub>。其主要反应如下：



在无光照情况下，由 NO 氧化成 NO<sub>2</sub> 是很慢的，其反应速度与 NO 浓度的二次幂和 O<sub>2</sub> 的浓度之乘积成正比。表 1-6 列举了 NO 浓度与 NO<sub>2</sub> 生成量之间的关系。曾有人实验，欲使浓度为 7ppm 的 NO 有 10% 转化为 NO<sub>2</sub>，大约需要 3 年时间。但是如有碳氢化合物共同存在时，在紫外光照射下发生光化学作用，可使 NO 迅速转化为 NO<sub>2</sub>。

重油中一般含有 0.1~0.4% 的含氮化合物，燃烧转换率为 30~50%，燃烧重油时，燃料 NO 发生量如表 1-7 所示。

表 1-6 NO 浓度与 NO<sub>2</sub> 生成量的关系

大气中 NO 浓度 (ppm)	NO <sub>2</sub> 的生成量
200	11
100	2.8
25	0.18

表 1-7 燃烧重油时燃料 NO 发生量

重油中含氮化合物量 (%)	燃料 NO 的生成量 (ppm)
0.1	41~68
0.2	82~137
0.3	125~195

在一般情况下，燃烧不同的化石燃料 NO<sub>x</sub> 的排放率如表 1-8 所示。NO<sub>x</sub> 的排放率按煤、燃料油、天然气的顺序而减小。

6. 光化学烟雾和氧化剂

自从 1973 年以来，资本主义国家曾先后发生过 19 次严重的大气污染事件，每次事件都造

四  
C  
兴  
原  
①

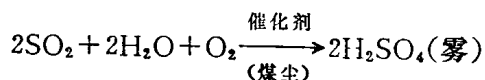


表1-8 化石燃料燃烧NO<sub>x</sub>的排放率 (kg/kJ)

燃料的种类及发热值	一般工业	火力发电厂
煤 276.33 × 10 <sup>2</sup> kJ/kg	3.63	3.63
燃料油 418.68 × 10 <sup>2</sup> kJ/l	2.05	2.91
天然气 576.81 × 10 <sup>2</sup> kJ/m <sup>3</sup>	0.884	1.60

成大批的人患病与死亡，引起人们极大的惊恐。在这些事件中，最严重的要算英国伦敦烟雾事件，日本四日市的二氧化硫污染事件和美国洛杉矶光化学烟雾事件。它们属于不同类型的烟雾事件。

(1) 英国伦敦型烟雾 伦敦曾多次发生煤烟事件，其中最严重的一次是于1962年12月5日发生的，历时5天，死亡4000多人。伦敦型烟雾是由居民、工厂取暖排放的煤烟和冬季早晨的雾相伴而生。构成这次事件的一次污染物是SO<sub>2</sub>和煤尘，其二次污染物主要是硫酸雾和硫酸盐气溶胶。硫酸雾是大气中的SO<sub>2</sub>在相对湿度比较高、气温比较低，而且又有煤烟颗粒物存在时所发生的催化反应而形成的，其反应式为：



若大气中有NH<sub>3</sub>存在时，则可形成硫酸铵气溶胶。硫酸雾是强氧化剂。在大气中，SO<sub>2</sub>生成硫酸雾是伦敦型烟雾的特点。

(2) 美国洛杉矶型光化学烟雾 光化学烟雾是碳氢化合物和氮氧化物在阳光作用下发生化学反应而形成的。光化学反应生成的二次污染物主要有NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>和H<sub>3</sub>C-C(=O)-O-O-NO<sub>2</sub> (过氧乙酰硝酸酯, Peroxyacetalnitrate, 缩写为PAN), 后者通常被称为光化学氧化剂。

表1-9 伦敦型烟雾与洛杉矶型烟雾的比较

项 目	伦 敦 型	洛 杉 矶 型
概 况	发生年代较早，曾多次发生，煤烟与早雾相伴而生，多发生在夜晚和早晨	发生年代较晚，属于氮氧化物及碳氢化合物在强大阳光作用发生的，多发生在中午
污 染 物	悬浮颗粒物、SO <sub>2</sub> 、硫酸雾、硫酸盐	碳氢化合物、NO <sub>x</sub> 、O <sub>3</sub> 、PAN、醛、酮等
燃 料	煤、燃料油	汽油、煤气、石油
气 象 条 件	季节	冬
	气温	低 (4℃以下)
	湿度	高
	日光	暗
臭 氧 浓 度	低	高
	出现时间	白天夜间连续
视 野	非常近	稍近 (半英里)
毒 性	对呼吸道有刺激作用，严重时可致死亡	对眼和呼吸道有刺激作用，O <sub>3</sub> 等氧化剂氧化性很强，严重者可导致死亡