

车用发动机 排放污染与控制

Emission Pollution
and Control for Vehicle Engines



张欣◎主 编
宁智 胡准庆◎副主编



北京交通大学出版社
<http://www.bjup.com.cn>

014035571

X511.06
08

内容简介

本书主要介绍汽车发动机排放污染与控制。全书共分五章。第一章介绍汽车发动机排放污染的危害及排放标准；第二章介绍汽车发动机排放污染的形成机理；第三章介绍汽车发动机排放污染的控制技术；第四章介绍汽车发动机排放污染的检测与诊断；第五章介绍汽车发动机排放污染的控制法规。本书可作为高等院校汽车专业及相关专业的教材，也可供从事汽车排放污染控制工作的工程技术人员参考。

车用发动机排放污染与控制

张欣 主编
宁智 胡准庆 副主编



北京交通大学出版社

· 北京 ·



北航

C1722797

X511.06

08

内 容 简 介

本书介绍了降低车用发动机排放的理论和实用技术及国外一些很有应用前景的排放控制技术研究前沿;综述了发达国家和地区对大城市机动车污染防治的管理对策和技术路线;阐述了车用发动机排放污染物的危害、生成机理和影响因素;详细介绍了点燃式和压燃式发动机的排放控制措施,重点介绍了柴油机、汽油机和新能源燃料发动机机内净化和后处理新技术;还分析了车用发动机噪声的危害、产生源、影响因素及降低噪声的新方法;并根据我国最新颁布的排放法规,介绍了车用发动机的排放限值和测量方法,以及对欧美国家的排放法规及其最新发展作了简要的叙述。

本书可作为高等院校车辆工程专业、能源与动力工程专业及相近专业本科生和研究生的教材或参考书,也可供从事这些专业及相关专业研究、设计、制造和使用的工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

车用发动机排放污染与控制/张欣主编. —北京:北京交通大学出版社, 2014. 2

ISBN 978-7-5121-1796-9

I. ①车… II. ①张… III. ①汽车排气-空气污染控制 IV. ①X734.201

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 018723 号

特邀编辑: 宋英杰

责任编辑: 陈跃琴

出版发行: 北京交通大学出版社

电话: 010-51686414

北京市海淀区高粱桥斜街 44 号

邮编: 100044

印刷者: 北京交大印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×260 印张: 19.75 字数: 493 千字

版 次: 2014 年 2 月第 1 版 2014 年 2 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5121-1796-9/X·6

印 数: 1~2 000 册 定价: 49.80 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010-51686043, 51686008; 传真: 010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前 言

随着汽车保有量的增加，城市汽车尾气排放污染日趋严重，已成为影响人类健康和自然环境的最大威胁之一。研究汽车发动机排放控制技术，是治理排放污染、改善城市环境质量的前提条件。

本书内容极其丰富，在把车用发动机常规排放污染物生成机理和噪声生成机理详细介绍的基础上，又对国内外最新开发和研制的有关发动机排放和噪声的研究进展进行了详细阐述，并对车用发动机传统燃料和新能源燃料的排放控制技术分别进行了分析。本书在编写过程中重视启发性和实用性，注重理论联系实际。本书的内容包括：车用发动机排放污染物及其危害、车用发动机有害排放生成机理、车用发动机有害排放污染物的排放特性及影响因素、车用发动机缸内低排放控制技术、车用发动机的后处理技术、车用发动机污染物测试技术、排放系统的检测技术、发动机主要噪声源、噪声检测及防治、在用车排放及噪声污染的控制。

本书编写的指导思想和追求的目标是将内容的基础性、先进性、科学性、实用性进行有机结合，注重体系，尽量全面和客观；取材新颖，努力反映当代最新车用发动机排放控制技术的研究成果和具有代表性的典型案例，分析发展过程中存在的问题；内容精简，突出重点，通俗易懂；力求深入浅出，层次分明，立足学科发展前沿。

本书由北京交通大学张欣担任主编并统稿，北京交通大学宁智和胡准庆担任副主编。第1章由张欣、刘建华编写，第2章由张欣、刘建华编写，第3章由宁智、刘建华编写，第4章由宁智、刘建华编写，第5章由张欣、刘建华编写，第6章由宁智、胡准庆编写，第7章由张欣、胡准庆编写，第8章由宁智编写，第9章由张欣、刘建华编写，第10章由胡准庆编写。

由于作者的水平有限和时间仓促，书中的缺漏和不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者
2014年1月

目 录

第1章 概述	1
1.1 环境污染概述	1
1.1.1 大气污染概述	1
1.1.2 大气环境质量标准	13
1.1.3 发动机噪声分类和评价	15
1.2 车用发动机排放污染物及其危害	16
1.3 车用发动机污染控制技术的发展趋势与应用前景	19
1.3.1 我国排放控制技术现状	19
1.3.2 燃油发动机排放控制技术	21
1.3.3 清洁燃料发动机排放控制技术	25
1.3.4 先进排放控制技术在中的应用前景	25
1.3.5 噪声控制	28
第2章 车用发动机有害排放生成机理	32
2.1 常规排放污染物生成机理	32
2.1.1 一氧化碳的生成机理	32
2.1.2 碳氢化合物的生成机理	36
2.1.3 氮氧化物的生成机理	40
2.1.4 微粒的生成机理	46
2.1.5 硫氧化化合物的生成机理	52
2.2 非常规排放污染物的生产机理	55
2.2.1 甲醛的生成机理	55
2.2.2 酮类的生成机理	57
2.2.3 单环芳香烃的生成机理	57
2.2.4 多环芳香烃的生成机理	58
2.2.5 金属粒子的生成机理	61
2.2.6 DDE 的生成机理	61

第3章 车用发动机有害排放污染物的排放特性及影响因素	62
3.1 车用发动机有害排放污染物的排放特性	62
3.1.1 汽油机的排放特性	62
3.1.2 柴油机的排放特性	69
3.2 车用发动机有害排放污染物的影响因素	74
3.2.1 汽油机有害排放物的影响因素	74
3.2.2 柴油机有害排放污染物的影响因素	79
第4章 车用发动机缸内低排放控制技术	84
4.1 低排放燃烧系统	84
4.1.1 汽油机低排放燃烧系统	84
4.1.2 柴油机燃烧系统	96
4.2 发动机电控系统	100
4.2.1 电控喷射系统	100
4.2.2 点火系统	112
4.3 增压系统及其技术	115
4.3.1 进气系统	115
4.3.2 增压系统及工作原理	118
4.3.3 汽油机涡轮增压技术难点	123
4.3.4 增压对柴油机排放的影响	124
4.4 废气再循环控制系统	125
4.4.1 废气再循环的工作原理	125
4.4.2 废气再循环的控制策略	127
4.4.3 EGR 率对汽油机的影响	127
4.4.4 EGR 率对柴油机的影响	128
4.4.5 柴油机 EGR 与汽油机 EGR 的比较	130
4.5 其他机内净化措施	131
4.5.1 多气门技术	131
4.5.2 可变配气技术	131
第5章 车用发动机的后处理技术	136
5.1 排放污染物的净化方案	136
5.2 汽油机后处理技术	137
5.2.1 三元催化装置	137
5.2.2 热反应器	149
5.2.3 空气喷射	150
5.3 柴油机后处理技术	151
5.3.1 微粒后处理技术	151
5.3.2 氧化催化转化器	164

5.3.3	富氧条件下 NO_x 后处理技术	167
5.4	典型发动机后处理技术	172
5.4.1	满足欧 VI 标准的柴油机排放技术	172
5.4.2	柴油机后处理技术的研究进展	174
5.4.3	对后处理系统的评价	175
第 6 章 车用发动机污染物测试技术		176
6.1	污染物取样系统	176
6.1.1	直接取样系统	177
6.1.2	稀释取样系统	178
6.1.3	定容取样系统	180
6.2	排气成分分析仪	183
6.2.1	不分光红外线气体分析仪 (NDIR)	183
6.2.2	化学发光分析仪 (CLD)	187
6.2.3	氢火焰离子型分析仪	188
6.2.4	顺磁分析仪	189
6.2.5	气相色谱仪 (GC)	190
6.3	微粒及烟度测量分析	191
6.3.1	微粒质量测量	191
6.3.2	微粒成分分析	192
6.3.3	滤纸式烟度计	193
6.3.4	消光式烟度计	195
6.4	非燃烧产物的测量与分析	196
6.4.1	曲轴箱排放物	196
6.4.2	蒸发排放物	196
第 7 章 排放系统的检测技术		198
7.1	故障诊断理论与 OBD 系统	198
7.1.1	故障诊断理论	198
7.1.2	车载诊断系统	205
7.2	排放系统诊断设备	214
7.2.1	FVEA-324H 汽车排气分析仪	214
7.2.2	FGA-4100 汽车排气分析仪	215
7.2.3	手持式汽车排气分析仪	223
7.2.4	柴油机排放的测试设备	224
第 8 章 发动机主要噪声源		227
8.1	噪声的分类	227
8.2	燃烧噪声	228

8.3	机械噪声	236
8.4	空气动力噪声	245
第9章 噪声检测及防治		255
9.1	噪声检测	255
9.1.1	噪声检测的基本要求	255
9.1.2	常用噪声源检测方法	256
9.1.3	信号分析法——相关分析法	259
9.1.4	新发展的识别方法——声强法	259
9.2	噪声防治	262
9.2.1	内燃机噪声等级	262
9.2.2	隔声技术	265
9.2.3	内燃机气动噪声的降低与消声器	274
第10章 在用车排放及噪声污染的控制		292
10.1	控制车用发动机排放的法规和政策	293
10.1.1	我国汽车燃料经济性标准法规和政策研究	293
10.1.2	机动车污染防治和排放法规发展状况	294
10.1.3	机动车和车用发动机排放法规现状	296
10.2	控制车用发动机排放的管理方法	297
10.2.1	新产品的管理方法	297
10.2.2	在用车的管理方法	300
10.3	北京市排放污染控制实例	303
10.3.1	优化改善市区交通	304
10.3.2	加快燃料的清洁化进程	305
10.3.3	完善在用车排放污染的 I/M 制度	306

第 1 章 概述

1.1 环境污染概述

1.1.1 大气污染概述

1. 大气污染定义及分类

1) 大气的组成

从地球表面至距离大约 1 000 km 的高空，绕着地球的空气层称为大气层或大气圈，它由多种气体组成。大气层的总质量约为 5.3×10^{18} kg，由于受重力的作用，大气从地面到高空逐渐稀薄，即下层浓密，上层稀薄，其密度随着高度的减小而增加，大气质量约 99.9% 都集中在 55 km 以下的空间。虽然大气层的质量仅占地球总质量的百万分之一左右，但它是人类生存必不可少的环境要素之一。大气是人类赖以生存必不可少的物质，成年人每天要吸入质量约 13 ~ 15 kg 的空气。一般情况下，人类在缺乏食物、断绝饮水的情况下，至少可生存 5 d；而离开空气，则 5 min 就会死亡。当然，人类生存需要的是新鲜、清洁的空气。

自然环境中的大气通常由干燥洁净的混合气体、水蒸气和悬浮微粒三部分组成。除了水蒸气和悬浮微粒以外的大气称为空气。地面上干燥洁净的空气主要由 N_2 （氮）、 O_2 （氧）、Ar（氩）和 CO_2 （二氧化碳）四种气体组成，共占大气总容积的 99.996%，其他气体属于微量成分，含量不足 0.004%。海平面附近的干燥洁净空气的组成基本不变，其物理性质基本稳定。干燥洁净空气的组成见表 1-1。

表 1-1 干燥洁净空气的组成

气体成分	体积分数	气体成分	体积分数
氮 (N_2)	78.084	甲烷 (CH_4)	1.5×10^{-4}
氧 (O_2)	20.948	氦 (Kr)	1.0×10^{-4}
氩 (Ar)	0.934	氢 (H_2)	5.0×10^{-5}

续表

气体成分	体积分数	气体成分	体积分数
二氧化碳 (CO ₂)	0.032	一氧化二氮 (N ₂ O)	5.0×10^{-5}
氖 (Ne)	18×10^{-4}	氙 (Xe)	0.8×10^{-5}
氦 (He)	5.2×10^{-4}	臭氧 (O ₃)	0.25×10^{-5}

大气中的悬浮微粒由大气中的固体和液体颗粒状物质所组成。固体微粒是指因自然现象如大风、火山爆发、森林火灾、陨石流星烧毁等产生的各种各样的悬浮物,包括尘土、火山灰、烟尘、宇宙尘埃及飘逸的植物花粉、细菌等。液体微粒是指水汽凝结物,如水滴、云雾和冰晶等。这些细小的微粒悬浮物能够影响大气的能见度,削弱太阳的辐射强度。由于自然环境因素的不确定性,大气中悬浮微粒物的形状、密度、大小、含量、种类及粒径分布和化学性质总是在不断变化。同样,大气中水蒸气的含量也是变化的,它取决于时间、地理位置及气象条件(如大气环流、气温)等自然因素。在干旱的沙漠地区水蒸气的含量可能低于0.01%,在温湿的热带水蒸气的含量可超过6%。大气中水蒸气含量虽然不大,但它却是构成各种天气现象,如云、雾、雨、霜、露等的主要因素。

大气环境中CO₂和O₃(臭氧)虽然含量甚微,但其物理性质变化对大气温度和人类的生存起着重要作用。自然生态系统中的CO₂主要来源于动物呼吸和火山喷发、森林火灾等,它们能够吸收来自地球表面的长波辐射,阻止地球热量向空间的散发,其含量随时间地点会有所变化。随着科学技术水平的发展和人民生活水平的提高,特别是有机燃料的大量使用,致使大气层中的CO₂含量不断增加,打破了大气中CO₂平衡,致使气候逐渐变暖。O₃是大气中的微量成分之一,但它能够吸收大部分太阳紫外线的辐射,使动植物免遭这种射线的危害。臭氧是氧原子和氧分子在N₂和O₂参与下生成,由于低层大气中光离解的原子氧太少,而在高层大气中气体分子又太稀少,因此O₃主要集中在大气层中距地面20~25 km的高度处,形成了平均厚度为3 mm的臭氧层。自然生态系统中O₃含量随季节和纬度变化。近年来由于人类活动使大量的氮氧化物和氟氯烃进入臭氧层,以及超音速飞机在臭氧层高度范围的飞行日益增多,使臭氧层遭到损耗和破坏,某些地区上空甚至出现臭氧空洞。

2) 大气污染的定义

大气污染的形成具有一定的条件,国际标准化组织(ISO)对此作出如下定义:“空气污染,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。”

从自然科学的观点来看,“空气”和“大气”两词并无实质性的差别。空气污染(Air Pollution)和大气污染(Atmospheric Pollution)常常通用,但在研究近地层空气污染规律时,往往根据研究的范围加以区分。有的学者将室外地区性空气污染称为大气污染,而对室内的空气污染称为空气污染;也有人认为空气污染是指小范围的气体污染,如室内、城市区域的空气污染,而大气污染则指大区域乃至全球性的空气污染,如气象学、大气环境讨论涉及的大范围污染。

在国际标准化组织对大气污染的定义中,明确了形成大气污染的原因包括自然因素和人为因素两个方面。自然因素是指自然过程造成的大气污染,包括火山活动、森林火灾、地震、土壤岩石风蚀、海啸、雷电、动植物尸体的腐烂及大气圈空气的运动等产生的尘埃、硫化物、氮氧化物等。人为因素包括人类的生活活动和生产活动两个方面,来自人类生活、

工业生产、交通运输等活动中的废弃物、燃烧、排放等,导致一些非自然大气组分的有害物质(如粉尘、碳氧化物、硫氧化物、氮氧化物等)进入大气,在大气中积累后超过自然大气中该组分的含量而形成污染。

通常说的大气污染主要是指由人类活动因素造成的。与人为因素相比较,自然因素引起的大气污染大多是暂时性的。因为自然环境具有一定的自净化能力,能够通过自身的物理、化学和生物机能,如扩散、稀释、沉降、雨水冲洗、地面吸附、植物吸收等作用,经过一段时间后会自动消除大气污染,以恢复、维持生态系统的平衡。因此,人类活动,尤其是生产活动是大气污染的主要原因,是防治大气污染的主要对象。

大气污染的定义还强调了造成大气污染的必要条件,即污染物在大气中要含有足够的浓度,并且停留足够的时间,超过了允许限度,使得大气质量恶化,从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,包括了对人体正常的生活环境和生理机能的影响,直至引起慢性病、急性病以致死亡等非常广泛的范围;而福利是指与人类协调共存的生物、自然资源、财产及器物等。需要指出的是,由于生物、建筑物及其他受体对污染物剂量和作用时间的反应存在各种差异,大气污染的“允许限度”难以准确界定。但是对污染物浓度和停留时间总要有允许值。根据人类生存对环境的要求和社会经济发展程度的不同,逐渐制定了各种污染物的排放标准。

3) 大气污染的一般分类

大气污染按其污染的范围可分为局部大气污染、区域性大气污染和全球性大气污染。局部大气污染是指出现在一个城市或更小区域范围的空气污染,其范围一般小于100 km,如北京、广州、兰州等城市的空气污染。区域性大气污染为范围在500 km以上的地区出现的空气污染,以及某些污染物的跨国输送,最典型的是酸雨问题,如北美、欧洲、中国西南三大酸雨区。全球性大气污染是指污染范围在数千公里以上的大气环境问题,如温室气体排放引起的全球气候变暖,以及空调制冷剂 and 有机溶剂在使用中排放的氯氟烃(CFCs)对地球平流层臭氧的破坏等。

4) 影响大气污染形成的主要因素

当人类直接或间接地向大气环境排放的污染物超过允许限度,即超过自然环境的自净化能力时,就有可能造成大气的污染。大气污染是一个极其复杂的气象、物理和化学的变化过程,最终能否形成大气污染,主要取决于污染物在大气中的浓度和滞留时间。大气中含有的污染物的浓度越高,停留时间越长,污染就越严重,对污染受体的危害也就越大。污染物质在大气中的浓度,取决于排放源的排放总量。此外,排放物的污染程度,还与地理位置、地形特征、气象条件及排放源高度等因素有关。

进入大气的污染物,在不同的地貌特征和气象条件之下会以扩散的形式在大气中被稀释、吸收。地貌特征直接影响大气的稀释扩散能力,因为复杂的地形条件和地面状况,在不同的气候条件下,会在局部区域形成各种大气环流——风,有随昼夜和年度变化的风,有以四季为周期变化的季风,有沿海地区的海陆风、山区的山谷风、狭窄通道形成的峡谷风,以及城乡之间的热岛效应等。风的存在加速了污染源附近大气污染物的扩散稀释,但另一方面,气流产生环流、旋涡及不同性质风的锋面交汇处,不利于大气中污染物质的扩散稀释,从而影响了局部地区的大气污染的形成及危害程度。

气象条件是影响大气运动的另一环境因素,不同的气象条件具有不同的稀释扩散能力。这些气象条件包括风速和风向变化、大气层气温垂直分布和稳定度及降水过程等。风速小,污染物扩散稀释速度慢。风向决定了污染物的水平扩散方向,处于污染源下风口方向区域容易受到污染,程度比较严重。另外,气温垂直分布决定了污染物在垂直方向的扩散程度,若近地面气温随高度递减,在浮升力的作用下,大气层上下对流剧烈,促使污染物迅速扩散;若气温出现了随高度递增的情况,则气流难以在垂直方向上运动,阻碍了污染物在大气中的扩散,容易在近地面形成大气污染。大气的稳定度影响着污染物的扩散程度,而降水过程促进了污染物的沉降,因此能净化大气。

在工程中,采用高烟囱排放有害物质可以有效减轻局部地区污染。高烟囱把污染物排向远离污染源的高空,使它们在更广阔的区域中扩散、稀释和混合,从而降低了污染物在近地面空气中的浓度。但是污染物的总量并没有因此而减少,有害物质仍然存在于大气中,长年累月的排放可能会引起广域性或全球性的大气污染。

2. 大气污染源及分类

1) 大气污染源

大气污染源通常是指造成大气污染的污染物发生源,也就是排放有害物质或对大气产生有害影响的场所、设备和装置等。如汽车排气管排放出 NO_x (氮氧化物)、HC (碳氢化合物)、CO (一氧化碳) 及微粒等污染物,汽车成为 NO_x 、HC、CO 及微粒的发生源,因此就将汽车称为大气污染源。大气污染源也可以理解为大气污染物的来源,如燃料燃烧产生了大气的污染物,则燃料燃烧为大气污染源。一般我们所说的大气污染源,其含义指的是前者。

大气污染物产生于人类活动或自然过程,因此大气污染源分为天然污染源与人工污染源两类。天然污染源是指自然界向大气排放有害物质的场所,如活动火山向大气的喷发等。人工污染源是指人类在从事各种活动中所形成的污染源。天然污染源排放污染物所造成的大气污染多为暂时的和局部的,人工污染源排放的污染物是造成大气污染的主要根源。因此,在大气污染控制工程中,主要的研究对象是人工污染源。

为了满足调查、评价、研究、解决大气污染及保护等不同方面的需要,往往根据人工污染源的特点进行分类。按污染物的排放方式分为点源(污染物排放集中在一点或可当作一点的较小范围,如高烟囱)、线源(污染物沿一条线排放,如某一条交通运输线)和面源(污染物在一个大范围内排放,如某一个工业区及分散式生活用煤装置等);按污染源存在形式分为固定污染源(排放污染物的装置处于固定位置,如工矿企业的烟囱、窑炉等)和流动污染源(排放污染物的装置处于运动状态,如交通运输工具);按污染物排放的时间分为连续源(污染物连续地排放,如火力发电厂的排烟)、间断源(污染物间歇性地排放,如非连续性生产过程的废气排放)和瞬时源(污染物短时间无规律地排放,如工厂事故排放);按污染物排放位置分为地面源(污染物在近地面处排放,如汽车)和高架源(污染物在距地面某一高度上排放,如高烟囱)。

但是,从总体大气污染的来源考虑,通常人工污染源分为四类:生活污染源、工业污染源、农业污染源和交通污染源。

(1) 生活污染源

生活污染源主要是生活中的炉灶、热水器、采暖锅炉等。日常生活中,人们由于生活需

要使用这些设备时,必须燃用化石燃料。然而不管是固体燃料,还是液体燃料或者气体燃料,在燃烧过程中必然会排放出大量的烟尘和一些有害气体物质。再者,由于城市居住人口稠密,燃料使用量过多,排放的污染物数量相当可观,危害有时甚至比工业生产所产生的污染还严重。此外,城市垃圾在焚烧过程中产生的废气,以及堆放过程中由于厌氧分解排出二次污染物都将污染大气。

(2) 工业污染源

工业污染源是大气污染的一个重要来源,主要包括工业用燃料燃烧及工业生产过程排放的废气,对大气的危害最严重。火力发电厂、钢铁工业、石化企业、建材工业等各种类型的工矿企业,在原材料及产品的运输、粉碎及由各种原料制成成品的过程中,排放出的大量废气均含有不同的污染物进入大气中。如化工企业排出含有硫化氢、碳氢化合物、含氮化合物、氟化氢、氯化氢、甲醛、氨等有害气体;火电厂排放的废气中就含有 CO 、 SO_2 (二氧化硫)、 NO (一氧化氮) 与粉尘等多种污染物。虽然不同的工业企业排放出不同的大气污染物,但生产过程中消耗的能源主要由燃烧化石燃料提供,这是造成大气污染的源泉。

(3) 农业污染源

农业污染源主要是由于施肥、喷洒农药而产生的有害气体排放,包括施用某些有机氯农药和氮肥分解产生的氮氧化物,以及农用燃料燃烧的废气对大气的污染。化学肥料和农药的使用是农业生产过程对大气的主要污染物。如施用的氮肥一方面可直接从土壤表面挥发成气体进入大气,而进入土壤内的有机氮或无机氮则在土壤微生物的生化作用下可转化为氮氧化物进入大气,从而增加了大气中氮氧化物的含量;某些有机氯农药施用于水中,能悬浮在水面,并同水分子一起蒸发而进入大气;此外,稻田释放的甲烷,也会对大气造成污染。

(4) 交通污染源

交通污染源是指交通运输工具如汽车、摩托、飞机、火车及船舶等使用汽油、柴油等燃料,燃烧过程中排放的含有氮氧化物、碳氧化物、碳氢化合物、含铅污染物、苯并芘等有害物质。由于汽车和摩托数量众多,遍及全球人类居住区的各个角落,因此排放的污染物也最多。一些工业发达的国家和城市中,汽车已成为主要的大气污染源。这些污染物排放到大气中,在阳光照射和一定条件下,还可在光化学反应作用下生成光化学烟雾,成为二次污染物的主要来源之一。其余的交通工具数量也相当大,流动性频繁,排出的污染物总量也是不容忽视的。

表1-2为大气污染的各种排放源及其产生的主要污染物。从表1-2中各污染源排放的污染物可以看出,不同行业排放的污染物虽然种类不同,但主要污染物的来源具有共性,即来自化石燃料的燃烧。无论是哪一类型的污染源或行业,能源利用必不可少。因此,燃料燃烧排放的废气是最大的大气污染源。这就说明大气污染问题与能源利用情况密切相关。根据对烟尘、二氧化硫、氮氧化物和一氧化碳四种主要污染物的统计表明,燃料燃烧排放出的这些污染物占到全部大气污染物的70%~80%。发达国家主要使用汽油、柴油、重油、天然气等液体燃料,我国的燃料构成是以燃煤为主,煤炭消耗约占能源消费的60%以上,因此煤的燃烧是造成我国大气污染的主要来源。目前,我国的机动车辆也在迅速增加,主要集中在大、中城市,汽车排放污染量也很可观,汽车排放污染已经成为大、中城市的主要污染源。需要指出的是,大气污染物的种类和来源,随各国和各地区的能源利用结构、经济发展水平、生产规模及生产管理方法的不同而变化。

表 1-2 大气污染源及污染物

大气污染源			大气污染物
人工污染源	生活污染源	生活、取暖用煤炉	烟尘、SO ₂ 、CO ₂ 、CO
		垃圾焚烧	CO、氮氧化物、CO ₂
		吸烟	CO、丙烯醛、气溶胶
	工业污染源	火力发电厂	SO ₂ 、烟尘、CO ₂ 、氮氧化物、CO、苯并芘
		钢铁工业	金属粉尘、氟化氢、CO、碳氢化合物、SO ₂
		有色金属冶炼厂	金属粉尘、SO ₂ 、汞蒸气、CO
		炼焦厂	烟尘、SO ₂ 、CO、H ₂ S、苯、酚、萘、烃类、氨、苯并芘
		炼油工业	CO、氮氢化合物、烟尘、SO ₂ 、烃类、苯、酚、H ₂ S
		石油化工	粉尘、恶臭、SO ₂ 、H ₂ S、氰化物、氮氧化物、氯化物、烃类、氨
		化肥工业	酸雾、粉尘、氟化硅、SO ₂ 、氮氧化物、CO、NH ₃ 、砷
		氯碱厂	氯气、氯化氢、汞蒸气
		农药制造	酚、氯化氢、H ₂ S、硫醇、砷、汞、氯
		染料厂	SO ₂ 、氮氧化物、H ₂ S
		建材工业	(水泥、石棉) 粉尘、SO ₂ 、H ₂ S、CO
		制革、印染工业	恶臭气体、气溶胶
		核试验、核电站	放射性尘埃、废气
		机械加工厂	金属、粉尘
		造纸厂	烟尘、硫醇、H ₂ S、SO ₂
		仪器仪表厂	氰化物、铬酸
		灯泡厂	烟尘、汞
	农业污染源	农药	有机氯
		氮肥	氮氧化物
	交通污染源	汽车	CO、氮氧化物、烃类、铅、苯并芘
		火车	SO ₂ 、粉尘、CO
		飞机	CO、氮氧化物、醛
		轮船	SO ₂ 、烟尘、氮氧化物
		拖拉机等农业机械	油烟、氮氧化物
天然污染源		大风、沙尘暴	沙土、灰尘
		火山活动	灰尘、岩浆、SO ₂ 、H ₂ S
		森林火灾	CO ₂ 、CO、灰尘
		森林沼泽生物腐败	沼气、氨、CO ₂ 、恶臭
		海水浪花飞溅	盐粒、CO ₂ 、水雾的气溶胶
		土壤生物作用	氮氧化物

2) 大气污染物种类

大气污染物的种类很多，根据大气污染物的存在形态可分为气溶胶态污染物和气象污染

物两大类。

(1) 气溶胶态污染物

气溶胶是指沉降速度可以忽略的固体或液体颗粒在气体介质中的悬浮体。按气溶胶的来源和存在的相态,以及物理化学特性等条件,气溶胶可以细分为10多种类型。从大气污染控制的角度,可以将气溶胶态污染物分为以下三种形式。

① 粉尘:粉尘指分散悬浮于气体介质中的较小固体颗粒,尺寸为 $1 \sim 200 \mu\text{m}$ 。它的形状往往不规则,是在破碎加工、运输、建筑施工、农业活动或土壤和岩石风化、火山喷发过程中形成的。在重力作用下能发生沉降,但在某一段时间内能保持悬浮状态。粉尘的种类很多,如煤粉、水泥、金属粉尘、黏土粉尘、石棉等。在国际标准化组织(ISO)的定义中,将粒径小于 $75 \mu\text{m}$ 的固体颗粒的悬浮体称为粉尘,而将在空气或烟道中能传输的固体颗粒,大于 $75 \mu\text{m}$ 的粒子称为粗尘。

② 烟尘:烟尘指气溶胶态物系中由燃烧、冶金过程形成的细微颗粒物,通常包括以下三种类型。

- 烟雾 在冶金过程中形成的固体粒子的气溶胶。它是熔融物质的挥发过程产生的气态物质的冷凝物,在生成过程中总是伴有诸如氧化之类的化学反应。烟尘的粒径非常微小,一般小于 $1 \mu\text{m}$ 。如金属铝、锌、铅的冶炼过程中,在高温熔融状态下,这些物质能够迅速挥发,并氧化生成氧化铝、氧化锌和氧化铅等烟尘。

- 飞灰 飞灰是燃料燃烧中产生的呈悬浮状的非常分散的细小灰粒,包括燃料完全燃烧和不完全燃烧后残留的固体残渣,尺寸一般小于 $10 \mu\text{m}$,主要在炉窑中产生,尤以粉煤为燃料燃烧时排出的飞灰比较多。

- 黑烟 燃烧产生的能见气溶胶,主要是化石燃料燃烧时,在高温缺氧条件下,烃类物质热分解生成的炭黑颗粒,粒径尺寸一般为 $0.01 \sim 1 \mu\text{m}$ 。

③ 雾:雾是大气中微小液体颗粒悬浮体的总称,泛指蒸气凝结、液体雾化和化学反应而形成的液滴,如水雾、油雾、酸雾、碱雾等,粒径尺寸小于 $100 \mu\text{m}$ 。在气象学中则是指造成能见度小于 1 km 的小水滴悬浮体。悬浮于大气中的固态和液态气溶胶态污染物的粒径尺寸通常小于 $500 \mu\text{m}$,大于 $100 \mu\text{m}$ 的颗粒易于沉降,对大气造成的危害较小。在大气污染控制中,对小于 $100 \mu\text{m}$ 的气溶胶固体颗粒物,又分为三种:

- 飘尘 粒径小于 $10 \mu\text{m}$ 的固体颗粒物,它的粒度小,质量轻,不易沉降,而能长期飘浮于空气中;

- 降尘 粒径大于 $10 \mu\text{m}$ 的固体颗粒物,靠重力作用,能在较短时间内沉降到地表面上;

- 总悬浮微粒 粒径小于 $100 \mu\text{m}$ 的所有固体颗粒物。

(2) 气态污染物

气态污染物在大气中以分子形式存在。气态污染物种类繁多,影响较大的气态污染物仍然来源于燃料燃烧。依据与污染源的关系,可将污染物分为一次污染物和二次污染物。主要的一次污染物有:含硫化合物、含氮化合物、碳氧化合物、碳氢化合物,以及某些行业排放的氧化剂如臭氧、氟化物等;二次污染物有光化学烟雾、硫酸烟雾等。通常,二次污染物对环境的危害比一次污染物更大。

① 含硫化合物:含硫化合物主要指 SO_2 、 SO_3 和 H_2S 等,其中 SO_2 来源广、数量大,

是影响和破坏全世界范围大气质量的最主要的气态污染物,尤其在燃用高硫煤的地区。含硫化物燃料燃烧、有色金属冶炼、火力发电、石油炼制、造纸、硫酸生产及硅酸盐制品熔烧等过程都向大气排放 SO_2 , 以化石燃料燃烧产生的 SO_2 最多, 约占 70% 以上。工业生产和生活中的煤燃烧是最大的 SO_2 排放源, 火力发电厂排出的 SO_2 浓度虽然较低, 但是总排放量却最大。 SO_3 往往伴随着 SO_2 同时排放, 但数量比较少。大气中的 H_2S 来源除了有机物的腐败外, 主要是造纸厂、炼油厂、炼焦厂、石化企业、农药制造、染料厂等工业生产中的排放。 H_2S 在大气中属于不稳定物质, 在有颗粒物存在的情况下, 很快就会被氧化成 SO_3 或 SO_2 。含硫化合物是造成二次污染硫酸烟雾的主要物质, 并参与了酸雨的形成。

② 含氮化合物: 大气污染物中含氮化合物种类很多, 如 NO 、 NO_2 、 N_2O (一氧化二氮)、 N_2O_3 (三氧化二氮), 以及 NH_3 (氨)、 HCN (氰化物) 等, 通常用符号 NO_x 表示这些氮氧化物。其中造成大气污染的 NO_x 主要是 NO 和 NO_2 。 NO_x 主要来源于化石燃料的燃烧, 大约 83% 的 NO_x 是由燃料的燃烧而产生的。各种燃烧设备 (如锅炉、窑炉)、燃气轮机装置, 以及各种交通车辆, 特别是以汽油、柴油、天然气为燃料的机动车辆排放出 NO_x 最多。在汽车稠密的城市, NO_x 是最主要的大气污染物。此外, 硝酸生产、氮肥厂、石化企业及炸药制备过程也产生 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 。在燃烧过程中, 空气中的氮气和燃料中的含氮化合物在不同的燃烧条件下都会生成 NO_x , 其中主要是 NO 和少量 NO_2 , 进入大气的 NO 在空气中被进一步氧化为 NO_2 。

③ 碳氧化合物: 污染大气的碳氧化合物主要有两种物质, 即 CO 和 CO_2 。 CO 和 CO_2 是各种大气污染物中排放量最大的污染物之一, 既来源于人工污染源, 也来源于天然污染源。化石燃料的燃烧排放是主要的人工污染源, 当燃料完全燃烧时形成 CO_2 ; 在缺氧条件下的不完全燃烧则形成 CO 。全世界 CO 每年排放量约为 $2.10 \times 10^8 \text{ t}$, 排放量为大气污染物之首, 主要来源于燃料的燃烧和汽车尾气。虽然 CO 氧化成 CO_2 的速率很慢, 但多年来地球上 CO 的浓度并未持续增加, 始终保持在大气本底浓度大约为 $0.1 \times 10^{-6} \text{ g/m}^3$ 的水平, 这表明自然界肯定存在着抑制 CO 增长的机制, 如土壤微生物的代谢作用和 HO 自由基的氧化作用能将 CO 转化为 CO_2 。但是, 对于 CO 排放集中的城市, 化石燃料的大量使用使城区的 CO 浓度远远超过自然水平。尤其是大城市交通繁忙时区或冬季取暖季节, 在不利于废气扩散时, CO 的浓度则有可能达到危害环境的水平。此外, 向大气释放 CO 的天然源有: 烃类物质的转化, 如甲烷经 OH 自由基氧化形成的 CO ; 海水中的海洋生物代谢向大气释放 CO ; 植物叶绿素光分解产生的 CO 等。

来源于化石燃料燃烧和生物呼吸作用的 CO_2 是无毒的气体, 参与地球上的碳循环。 CO_2 是主要的温室气体之一。近年来, 化石燃料的大量使用, 使地球上的 CO_2 逐年增多, 导致全球性气候变暖, 即温室效应加强。

④ 碳氢化合物: 大气中的碳氢化合物 (HC) 通常是指可挥发的各种有机烃类化合物, 由碳和氢两种元素组成, 如烷烃、烯烃和芳烃等。大气中的碳氢化合物大部分来自于植物的分解, 人工来源主要是石油燃料的不完全燃烧和石油类物质的蒸发, 其中汽车尾气排放占有主要的比重。此外, 石油炼制、石化工业、油漆、干洗等都会产生碳氢化合物而融入大气。人工排放的碳氢化合物数量虽然有限, 但它对环境的影响不可忽视。各种复杂的碳氢化合物, 如多环芳烃 (PAH) 中的苯并芘具有明显的致癌作用, 是一种强致癌剂, 油炸食品、

抽烟会产生苯并芘,更大危害还在于碳氢化合物和氮氧化物的共同作用会形成光化学烟雾。

⑤ 卤素化合物:对大气构成污染的卤素化合物,主要是含氯化物及含氟化合物,如 HCl 、 HF 、 SiF_4 等。其来源比较广泛,钢铁工业、石油化工、农药制造、化肥工业等工矿企业的生产过程中都有可能排放卤素化合物。虽然这些氟氯烃类气体排放数量不多,但对局部地区的植物生长具有很大的伤害,同时,它也是破坏臭氧层的主要成分之一。

⑥ 硫酸烟雾:硫酸烟雾是大气中的 SO_2 等含硫化合物,在有水雾、颗粒气溶胶及氮氧化物存在时,在一定的气象条件下,发生一系列化学或光化学反应而形成的硫酸雾或硫酸盐气溶胶。通常是在相对湿度比较高、气温比较低、并伴有煤烟尘、含有重金属的飘尘等存在时发生的。 SO_2 在洁净的大气中比较稳定,但在污染大气中,能在颗粒气溶胶表面上迅速氧化,从而形成硫酸烟雾,在大气中滞留或被远距离输送。

⑦ 光化学烟雾:光化学烟雾是排入大气的氮氧化物和碳氢化合物受太阳紫外线作用产生的一种具有刺激性的浅蓝色烟雾。它包含有臭氧 (O_3)、醛类、硝酸酯类 (PAN) 等多种复杂化合物。这些化合物都是光化学反应生成的二次污染物。当遇到低温或不利于扩散的气象条件时,烟雾会积聚不散,造成大气污染事件。这种污染事件最早出现在美国洛杉矶,所以又称洛杉矶光化学烟雾。近年来,光化学烟雾不仅在美国出现,而且在日本的东京、大阪、川崎市、澳大利亚的悉尼、意大利的热那亚和印度的孟买等许多汽车保有量大的城市先后出现过。在光化学反应中, O_3 约占 85% 以上。日光辐射强度是形成光化学烟雾的重要条件,因此每年夏季是光化学烟雾的高发季节;在一天中,下午 2 时前后是光化学烟雾达到峰值的时刻。在汽车排气污染严重的城市,大气中臭氧浓度的增高,可视为光化学烟雾形成的信号。光化学烟雾对人体最突出的危害是刺激眼睛和上呼吸道黏膜,引起眼睛红肿和喉炎,这可能与产生的醛类等二次污染物的刺激有关,光化学烟雾对人体的另一些危害则与臭氧浓度有关,当大气中臭氧的浓度达到 $200 \sim 1\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,会引起哮喘发作,导致上呼吸道疾病恶化,同时也刺激眼睛,使视觉敏感度和视力降低;浓度在 $400 \sim 1\,600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,只要接触两小时就会出现气管刺激症状,引起胸骨下疼痛和肺通透性降低,使机体缺氧;浓度再高,就会出现头痛,并使肺部气道变窄,出现肺气肿;接触时间过长,还会损害中枢神经,导致思维紊乱或引起肺水肿等。臭氧还可引起潜在性的全身影响,如诱发淋巴细胞染色体畸变、损害酶的活性和溶血反应,影响甲状腺功能、使骨骼早期钙化等。不同浓度 O_3 对人体健康的影响,如表 1-3 所示。所以必须采取一系列综合性的措施来预防和减轻光化学烟雾给人类造成的损害。

表 1-3 不同浓度 O_3 对人体健康的影响

O_3 的浓度/ 10^{-6}	对人体健康的影响
0.02	开始嗅到臭味
0.2	1 h 闻到臭味
0.2 ~ 0.5	3 ~ 6 h 视力下降
1	1 h 会引起气喘, 2 h 会引起头痛
5 ~ 10	全身痛, 麻痹, 引起肺气肿
50	30 min 即死亡