



普通高等教育“十二五”规划教材

能源动力类专业

燃烧污染物 控制技术

李建新 主 编

徐美娟 副主编

应用型



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

能源动力类专业

燃烧污染物控制技术

主 编 李建新
副主编 徐美娟
编 写 李海广 张克凡 王 斌
主 审 袁镇福



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

全书共分七章，分别从能源与环境，污染物的大气扩散，除尘、烟气脱硫脱硝、二氧化碳的控制、煤中微量污染物的控制理论及技术等方面阐述燃烧过程中污染物的生成机理及其控制技术的基本原理、基本方法和有关设计计算。

本书理论联系实际，结合现场设备及工艺流程对国内外燃烧污染物的控制技术进行了详尽的阐述。

本书可作为普通高等院校本科能源与动力工程（能源与环境系统工程）、环境工程、环境科学等相关专业教材，也可供有关专业技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

燃烧污染物控制技术/李建新主编. —北京：中国电力出版社，2012.12

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 3816 - 6

I. ①燃… II. ①李… III. ①燃烧产物—空气污染控制—高等学校—教材 IV. ①X51

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 288172 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 12 月第一版 2012 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 10 印张 238 千字

定价 20.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

如今,大气污染问题已经引起世界各国的重视,它主要因物质燃烧引起,特别是化石燃料在燃烧过程中将会有大量的污染物质排入大气。而我国由于燃烧设备陈旧,燃烧效率低下,大气污染问题更为突出,如何有效控制燃烧污染物排放已是当务之急。

本书阐述了燃烧过程中污染物的生成机理及其控制技术的基本原理、基本方法和有关设计计算。第一章主要讲述世界和我国能源的现状、大气污染概括和化石燃料燃烧过程中污染物排放及危害。第二章主要讲述大气圈的基本情况、气象条件对污染物扩散的影响、污染物的扩散模式和相关计算。第三~六章主要讲述物质燃烧过程中烟尘、 SO_2 、 NO_x 等污染物的生成机理、控制技术和研究进展。第七章讲述了煤中氯、氟、汞和砷四种微量污染物的理化性质、在煤中的含量分布、赋存形态、热解迁移和脱除技术。

本书由浙江大学宁波理工学院李建新教授主编,浙江大学宁波理工学院徐美娟副教授副主编,参加编写的还有内蒙古科技大学李海广、内蒙古呼和浩特金桥发电厂张克凡和宁波枫林绿色能源有限公司的王斌。李建新编写第一、五章并负责全书统稿,徐美娟编写第二、三章,张克凡和王斌编写第四章,李海广编写第六、七章。

在编写过程中得到了浙江大学能源与环境系统工程系、浙江大学宁波理工学院能源与环境工程专业教师大力支持和关心。书稿承浙江大学袁镇福教授主审,主审老师仔细审阅并提出了许多宝贵意见使本书增色不少,在此表示衷心感谢。

编 者

2012年11月

目 录

前言	
第一章 能源与环境	1
第一节 能源的现状与发展	1
第二节 大气污染概况	4
第三节 化石燃料燃烧过程中污染物排放及危害	8
第四节 环境空气质量国家标准	16
第二章 污染物的大气扩散	18
第一节 大气圈垂直结构及气象要素	18
第二节 气象条件对烟气扩散的影响	20
第三节 污染物浓度的估算	26
第四节 污染控制的常用数据及计算	34
第三章 除尘理论及技术	39
第一节 机械式除尘	39
第二节 静电除尘	42
第三节 过滤式除尘器	49
第四节 湿式除尘	55
第五节 除尘技术的新进展	58
第四章 烟气脱硫理论及技术	61
第一节 烟气脱硫技术分类	61
第二节 石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术	62
第三节 其他湿法烟气脱硫技术	67
第四节 干法/半干法烟气脱硫技术	71
第五节 多种污染物同时脱除一体化技术	83
第六节 脱硫技术的新进展及应用情况	90
第五章 烟气脱硝理论及技术	92
第一节 氮氧化物的生成和分类	92
第二节 脱硝技术的特点及分类	94
第三节 低氮氧化物燃烧技术	94
第四节 烟气脱硝技术	98
第五节 选择性催化还原烟气脱硝技术	102
第六节 氮氧化物控制的新进展及应用情况	112
第六章 二氧化碳的控制理论及技术	119
第一节 CO ₂ 分离理论和技术	119

第二节	CO ₂ 减排理论和技术	126
第三节	CO ₂ 的捕获与封存	130
第四节	CO ₂ 的利用	135
第七章	煤中微量污染物的控制理论及技术	139
第一节	煤中氯污染物的控制理论和技术	139
第二节	煤中氟污染物的控制理论和技术	142
第三节	煤中汞污染物的控制理论和技术	147
第四节	煤中砷污染物的控制理论和技术	149
参考文献		152

不仅如此，世界能源需求还将继续增长。据国际能源署（IEA）的预测，2005～2030 年世界一次能源需求年均增长率为 1.7%，2020 年后增速会稍有放慢。世界能源消费在 25 年内（2005～2030 年）将增加 50%。全球能源消费总量将从 2005 年的 4.62×10^{17} kJ 增加到 2030 年的 6.95×10^{17} kJ，年平均增长率为 1.6%。

能源需求在日益增长，而一次能源资源却在快速枯竭。以石油为例，截至 2008 年底，全世界剩余石油探明可采储量为 1708 亿 t。至 2009 年，已探明的世界石油储藏量为 5102.1 亿 t，其中包括加拿大正在积极开发的油砂和委内瑞拉新发现的石油储量。全球石油储藏量按 2009 年生产量只可开采 45.7 年，其中包括不可开采的石油，天然气只可开采 62.8 年，煤炭为 119 年。

随着能源需求的不断增加和化石能源的不断枯竭，世界一次能源消费结构被逐步优化。近几十年来，石油、煤炭在一次能源利用中所占比例缓慢下降，天然气的比例逐渐上升，而

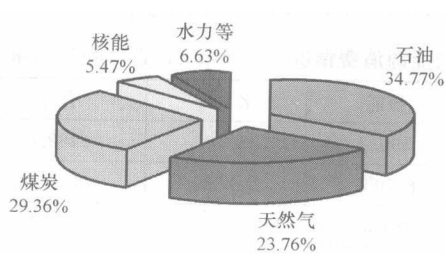


图 1-1 2009 年世界一次能源消费结构

核能、风能、水力、地热等其他形式的新能源也逐渐被开发和利用，形成了目前以化石燃料为主和可再生能源、新能源并存的能源结构格局（见图 1-1）。为了发展可再生能源，世界许多国家都制订了未来可再生能源开发目标（见表 1-2）。但不管如何，面对持续增长的能源需求，任何一种新能源在短期内都无法满足需求，化石能源仍将是 21 世纪中叶之前能源生产和消费的主体。

表 1-2 部分国家制订的未来可再生能源开发目标

国家	2020 年	2050 年
美国	风电比例将达 5%；可再生能源发电比例 20%	—
加拿大	水电比例将达 76%	—
德国	可再生能源发电比例将达 20%	可再生能源发电比例将达 50%
英国	可再生能源发电比例将达 20%	—
法国	—	可再生能源发电比例将达 50%
日本	到 2030 年，可再生能源利用率将达 20%	—
韩国	—	—
中国	风电比例将达 2%；可再生能源发电比例将达 12%	可再生能源利用率将达 30%；2100 年将达到 50%

二、我国能源的现状

我国地大物博，能源资源总量比较丰富，能源蕴藏量位居世界前列，是世界第二大能源生产国与消费国。由于我国煤炭资源极其丰富，我国也是世界上最大的煤炭生产国和消费国。煤炭生产量和消费量占世界总产量的三分之一左右。已探明的煤炭储量已超过 3 万亿 t，仅次于美国和俄罗斯，位居世界第三位。然而，我国优质能源资源相对不足，开发难度较大，制约了供应能力的提高；能源资源分布不均，增加了持续稳定供应的难度。

我国能源资源人均占有量远低于世界平均水平，但经济快速发展的我国能源需求量较

大, 供需存在较大差距。据国际能源署对 2005~2030 年的能源需求进行预测, 以中国和印度为首的新兴经济体将在 2005~2030 年驱动全球能源需求, 中国的能源需求量在 2008~2035 年间会上升 75%, 到 2035 年, 中国占世界能源需求的比例将从 2005 年的 17% 上升至 22%。国家发改委能源研究所也指出, 若按 2005 年的趋势发展, 到 2020 年, 我国一次能源需求量将达 3500Mtce (百万吨煤当量)。可见, 我国工业已进入重化阶段, 按世界各国发展的历史规律来看, 能耗迅速增长阶段不可逾越。从 2000~2020 年, 国家规划全国 GDP 增长四倍, 而能源消耗增长一倍, 这意味着能源弹性系数应为 0.5, 但是 2002~2004 年, 这个系数为 1.3 以上, 即能源需求远远大于规划。这是因为, 长期以来, 粗放型的经济增长方式、相对落后的能源技术装备水平和管理水平, 导致我国单位国民生产总值能耗和主要耗能产品能耗高于主要能源消费国家平均水平, 加剧了能源供需矛盾。

中国能源部门面临巨大的国际竞争压力。在石油方面, 中国陆地上原油平均生产成本和原油加工成本比国外大公司高 30% 以上, 成品油质量低 2、3 个档次; 在煤炭方面, 由于煤矿劳动生产率十分低下, 每吨煤劳动成本比美国还高; 在电力方面, 现在东南沿海地区工业用户电价水平为美国平均值的 2 倍以上; 在能源效率方面, 国内外的差距也很大。随着社会经济的发展, 我国的石油需求量将会越来越大。据有关部门预测, 到 2020 年, 我国石油消费量最少也要 4.5 亿 t, 届时石油的对外依赖度将有可能接近 60%。国际能源署公布的数据甚至称, 到 2030 年, 中国进口石油占石油总需求的百分比将激增至 80% 以上。因此, 保障能源安全, 尤其是石油安全是中国面临的巨大挑战。

能源消费结构不合理, 环境污染严重。我国是一个富煤、贫油、少气的国家 (见图 1-2), 以煤为主的能源结构在未来相当长时期内难以改变。不论是火力发电还是工业用煤, 相对落后的煤炭生产方式和消费方式, 加大了环境保护的压力。煤炭消费是造成煤烟型大气污染的主要原因, 也是温室气体排放的主要来源。随着中国机动车保有量的迅速增加, 部分城市大气污染已经变成煤烟与机动车尾气混合型。这种状况持续下去, 将给生态环境带来更大的压力。目前我国 SO_2 和 CO_2 排放总量都居世界第一位, 直接导致了我国有 30%~40% 的地区 (尤其是西南地区) 出现酸雨现象, 呼吸系统疾病不断增加。因此, 必须在发展的同时, 下大力气控制排放, 开发新能源。

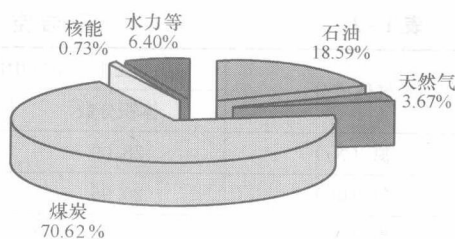


图 1-2 2009 年中国一次能源消费结构

能源利用对环境的影响

能源利用引起的环境问题是指能源在使用过程中对环境造成的污染与破坏, 即次生环境问题。在能源开发过程中, 煤炭开采可能造成岩层地表塌陷、地层表面破坏、水土流失严重、粉尘飞扬等; 水能开发利用可能造成地面沉降、地震、上下游生态系统显著变化、地区性疾病 (如血吸虫病) 蔓延、土壤盐碱化、野生动植物灭绝、水质发生变化等; 地热能的开发利用可能引起地面下沉, 使地下水或地表水受到氯化物、硫酸盐、碳酸盐、二氧化硅的污染, 水质发生变化等。

在能源消费过程中, 需要将能源从初级形式转换为可以消费应用的高级形式, 这种转换过程对环境产生了多种负面影响。根据热力学定律, 任何能量转换装置的效率都不能达到

100%。如使用常规能源，火力发电厂将煤的化学能转化为电能的效率约为 40%；汽车发动机将石油化学能转化为机械能的效率约为 25%；核电厂的效率约为 33%。可见，大部分能源在消费过程中以热能的形式散失于环境，造成热污染，同时还向环境排放有害污染物，产生不良的环境效应。特别是化石能源在利用过程中会产生大量的粉尘、硫氧化物、氮氧化物、二氧化碳等污染物，这些一次污染不仅自身具有毒性，还会通过一系列反应产生酸雨、光化学烟雾、气溶胶、温室效应等二次污染物，严重污染环境。因此，由于化石能源利用产生的大气污染问题已经上升到国际重视的高度。

第二节 大气污染概况

一、大气的组成及基本定义

国际标准化组织（ISO）对大气和空气的定义：大气是指环绕地球的全部空气的总和。它由多种气体混合组成的气体和悬浮其中的水分及杂质组成。大气中除去水汽和各种杂质以外的所有混合气体统称干洁空气。干洁空气的主要成分是氮、氧、氩和二氧化碳。这四种气体占空气总容积的 99.98%，而氦、氖、氦、氙、氡、臭氧等稀有气体的总含量不足 0.02%（见表 1-3）。环境空气是指人类、植物、动物和建筑物暴露于其中的室外空气。它和大气的区别仅在于大气所指的范围更大些，空气所指的范围则相对较小，而我们所讨论的大气与大气污染都主要指环境空气。

表 1-3 干洁空气的成分 (85km 以下)

气体成分	在干洁空气中的含量 (%)		分子量	临界温度 (℃)
	体积分数	质量分数		
氮 (N ₂)	78.09	75.52	28.02	-147.2
氧 (O ₂)	20.95	23.15	30.00	-118.9
氩 (Ar)	0.93	1.28	39.88	-122.0
二氧化碳 (CO ₂)	0.03	0.05	44.00	31.0
氖 (Ne)	1.8×10 ⁻³	—	20.18	-228.0
氦 (He)	5.24×10 ⁻⁴	—	4.00	-257.9
氪 (Kr)	1.0×10 ⁻⁴	—	83.75	-63.0
氢 (H ₂)	5.0×10 ⁻⁵	—	2.02	-240.0
氙 (Xe)	8.0×10 ⁻⁶	—	131.10	16.6
臭氧 (O ₃)	1.0×10 ⁻⁶	—	48.00	-5.0
氡 (Rn)	6.0×10 ⁻¹⁸	—	222.00	—
甲烷 (沼气) (CH ₄)	—	—	16.04	—

二、大气污染及基本定义

按照国际标准化组织的定义，大气污染通常是指由于人类活动或自然过程引起某些物质进入大气中，呈现出足够的浓度，达到足够的时间，并因此危害了人体的舒适、健康和福利或产生环境污染的现象。目前已知的大气污染物约有 100 多种。有自然因素（如森林火灾、火山爆发等）和人为因素（如工业废气、生活燃煤、汽车尾气、核爆炸等）两种，且以后者

为主,尤其以工业生产和交通运输造成占多数。大气污染对大气物理状态的影响,主要是引起气候的异常变化。这种变化有时很明显,有时则以渐渐变化的形式发生,为一般人所难以觉察,但若任其发展,后果可能非常严重。

大气污染会随着主要使用能源种类不同而有所不同。从20世纪50年代煤炭燃烧时排放煤尘开始,由于20世纪五六十年代工业化迅速进展,各地的大气污染问题不断激化。进入20世纪60年代,石油在能源消费结构中所占比重逐渐增大,大气污染问题也从煤尘变为粉尘和硫氧化物问题。20世纪70年代,随着除尘和脱硫技术的进步以及飞速的机械化,大气污染问题转移到悬浮颗粒物、氮氧化物和光化学烟雾的问题。进入20世纪80年代,矿物燃料燃烧时排放的二氧化碳等气体造成的地球温室效应、硫氧化物、氮氧化物等气体引起的酸雨,氟利昂排放带来的臭氧层破坏等环境问题越加严重。

按污染的范围,大气污染可分为四类:

(1) 局部地区大气污染,如某个工厂烟囱排气所造成的直接影响。

(2) 区域性大气污染,如工矿区或其附近地区的污染,或整个城市的大气污染。

(3) 广域性大气污染,该类污染是指更广泛地区,更广大地域的大气污染,在大城市及大工业带可以出现这种污染,最主要的污染是酸雨。

(4) 全球性大气污染,该类污染是指跨国界乃至涉及整个地球大气层的污染,如温室效应、臭氧层破坏等。

三、大气污染物及其来源

排入大气的污染物种类很多,依照污染物存在的形态,可将其分为颗粒污染物与气态污染物。而污染物主要来源于自然过程和人类活动。

1. 颗粒污染物

大气颗粒物指除气体之外的所有包含在大气中的物质,包括各种各样的固体或液体气溶胶。气溶胶指沉降速度可以忽略的小固体粒子、液体粒子或它们在气体介质中的悬浮体系,一般粒径分布在 $100\sim 10\,000\text{nm}$ 之间。气溶胶根据其产生原理和状态的差异,主要有自然形成的气溶胶和人类活动产生的气溶胶,如烟尘、灰尘、雾等。具体划分如下:

(1) 尘粒。一般是指粒径大于 $75\mu\text{m}$ 的颗粒物。这类颗粒物由于粒径较大,在气体分散介质中具有一定的沉降速度,因而易于沉降到地面。

(2) 粉尘。在固体物料的输送、粉碎、分级、研磨、装卸等机械过程中产生的颗粒物,或由于岩石、土壤的风化等自然过程中产生的颗粒物,悬浮于大气中称为粉尘,其粒径一般小于 $75\mu\text{m}$ 。在这类颗粒物中,粒径大于 $10\mu\text{m}$,靠重力作用能在短时间内沉降到地面者,称为降尘;粒径小于 $10\mu\text{m}$,不易沉降,能长期在大气中飘浮者,称为飘尘。

(3) 烟尘。在燃料的燃烧、高温熔融和化学反应等过程中所形成的颗粒物,飘浮于大气中称为烟尘。烟尘的粒子粒径很小,一般小于 $1\mu\text{m}$ 。它包括了因升华、焙烧、氧化等过程所形成的烟气,也包括了燃料不完全燃烧所造成的黑烟和飞灰,以及由于蒸汽的凝结所形成的烟雾。

(4) 雾尘。雾尘是小液体粒子悬浮于大气中的悬浮体的总称。这种小液体粒子一般由蒸汽的凝结、液体的喷雾、雾化以及化学反应过程所形成,粒子粒径小于 $100\mu\text{m}$ 。水雾、酸雾、碱雾、油雾等都属于雾尘。

(5) 煤尘。燃烧过程中未被燃烧的煤粉尘,大、中型煤码头的煤扬尘以及露天煤矿的煤

扬尘等。

2. 气态污染物

以气体形态进入大气的污染物称为气态污染物。气态污染物种类极多，有五种类型的气态污染物是主要污染物。

(1) 含硫化合物。该类污染物主要指 SO₂、SO₃ 和 H₂S 等，其中以 SO₂ 的数量最多，危害也最大，是影响大气质量的最主要的气态污染物。

(2) 含氮化合物。含氮化合物种类很多，其中最主要的是 NO、NO₂、NH₃ 等。

(3) 碳氧化合物。污染大气的碳氧化合物主要是 CO 和 CO₂。

(4) 碳氢化合物。该类污染物主要是指有机废气。有机废气中的许多组分构成了对大气的污染，如烃、醇、酮、酯、胺等。

(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、SiF₄ 等。

气态污染物从污染源排入大气，可以直接对大气造成污染，同时还可以经过反应形成二次污染物。主要气态污染物和由其所生成的二次污染物种类见表 1-4。

表 1-4 气体状态大气污染物的种类

污染物	一次污染物	二次污染物
含硫化合物	SO ₂ 、H ₂ S	SO ₃ 、H ₂ SO ₄ 、MSO ₄
碳的氧化物	CO、CO ₂	—
含氮化合物	NO、NH ₃	NO ₂ 、HNO ₃ 、MNO ₃ 、O ₃
碳氢化合物	C _m H _n	醛、酮、过氧乙酰基硝酸酯
卤素化合物	HF、HCl	--

注 M代表金属离子。

3. 人为污染物

不管是气态污染物还是颗粒污染物均主要来源于自然过程和人类活动，其排放源及排放量的情况见表 1-5。

表 1-5 地球上自然过程及人类活动的排放源及排放量

污染物名称	自然排放		人类活动排放		大气中背景浓度
	排放源	排放量 (t/a)	排放源	排放量 (t/a)	
SO ₂	火山活动	-	煤、石油等化石燃料燃烧	146×10 ⁶	0.2×10 ⁻⁹
H ₂ S	火山活动、沼泽中生物作用	100×10 ⁶	化学过程、污水处理	3×10 ⁶	0.2×10 ⁻⁹
CO	森林火灾、萜烯反应	33×10 ⁶	机动车和其他燃烧过程排气	304×10 ⁶	0.1×10 ⁻⁶
NO、NO ₂	土壤中的细菌作用	NO: 430×10 ⁶ NO ₂ : 658×10 ⁶	燃烧过程	53×10 ⁶	NO: 0.2~4×10 ⁻⁹ NO ₂ : 0.5~4×10 ⁻⁹
NH ₃	生物腐烂	1160×10 ⁶	废物处理	4×10 ⁶	6~20×10 ⁻⁹

续表

污染物名称	自然排放		人类活动排放		大气中背景浓度
	排放源	排放量 (t/a)	排放源	排放量 (t/a)	
N ₂ O	土壤中生物作用	590×10 ⁶	—	—	0.25×10 ⁻⁶
C _m H _n	生物作用	CH ₄ : 1.6×10 ⁹ 萜烯: 200×10 ⁶	燃烧和化学过程	88×10 ⁶	CH ₄ : 1.510 ⁻⁶ 非 CH ₄ : ≤1×10 ⁻⁹
CO ₂	生物腐烂、海洋释放	10 ¹²	燃烧过程	1.4×10 ¹⁹	320×10 ⁻⁹

由于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，人类活动产生的污染物通常在人类的活动区域，所以人类活动产生的污染物对人类的影响更显著，也是造成大气污染的主要根源。

人为污染源有多种分类方法。

(1) 按污染源存在形式分：①固定污染源，即排放污染物的装置、处所位置固定，如火力发电厂、烟囱、炉灶等；②移动污染源，即排放污染物的装置、处所位置是移动的，如汽车、火车、轮船等。

(2) 按污染物的排放形式分：①点源，即集中在一点或在可当作一点的小范围内排放污染物，如烟囱；②线源，即沿着一条线排放污染物；③面源，即在一个大范围内排放污染物。

(3) 按污染物发生类型分：①工业污染源，主要包括工业用燃料燃烧排放的废气及工业生产过程的排气等；②农业污染源，包括农用燃料燃烧的废气、某些有机氯农药对大气的污染，施用的氮肥分解产生的 NO_x 等；③生活污染源，包括民用炉灶及取暖锅炉燃煤排放污染物，焚烧城市垃圾的废气、城市垃圾在堆放过程中由于厌氧分解排出二次污染物；④交通污染源，即交通运输工具燃烧燃料排放污染物。

四、大气污染的危害

大气污染对人体健康、工农业生产、器物及大气能见度和气候都有重要影响。

大气污染对人体的影响，首先是感觉上不舒服，随后生理上出现可逆性反应，再进一步就出现急性危害症状。大气污染对人的危害大致可分为急性中毒、慢性中毒、致癌三种。急性中毒是指人体受到污染的空气侵袭后，在短时间内表现出不适或中毒症状的现象。历史上曾经发生过数起急性中毒事件，如伦敦烟雾事件，造成空气中二氧化硫高达 3.5mg/m³，总悬浮颗粒物达 4.5mg/m³，一周雾期内伦敦地区死亡 4703 人。慢性中毒是指人体在低污染物浓度的空气长期作用下产生的慢性危害。这种危害往往不易引人注意，而且难以鉴别，其危害途径是污染物与呼吸道粘膜接触。主要症状是眼、鼻粘膜刺激、慢性支气管炎、哮喘、肺癌及因生理机能障碍而加重高血压、心脏病的病情。近年来我国城市居民肺癌发病率很高，其中最高的是上海市，城市居民呼吸系统疾病明显高于郊区。致癌作用是长期影响的结果，这是由于污染物长时间作用于肌体，使体内遗传物质变化，引起了突变。

大气污染对工农业的危害也十分严重，可影响经济发展，造成大量人力物力和财力的损失。大气中的酸性污染物和 SO₂、NO₂，会使工业材料、设备和建筑设施腐蚀；而大气中的

飘尘的增多则会给精密仪器、设备的生产、安装调试和使用带来不利影响。

大气污染还会影响天气和气候，颗粒物使大气能见度降低，减少到达地面的太阳光辐射量。尤其是在大工业城市中，在烟雾不散的情况下，日光比正常情况少 40%。大气能见度降低，不仅会使人感觉不舒服，而且会造成心理影响，还会产生交通安全方面的危害。高层大气中的氮氧化物、碳氢化合物和氟氯烃类等污染物使臭氧大量分解，引发“臭氧洞”。相对而言，大气污染对气候的影响更为严重。如大气中 CO₂ 等温室气体引起的温室效应是对全球气候的最主要影响。除此之外，在较低大气层中的悬浮颗粒物会形成水蒸气的“凝结核”，这种“凝结核”有可能潜在地导致降水的增加或减少。

第三节 化石燃料燃烧过程中污染物排放及危害

化石燃料在燃烧过程中会排放大量的粉尘、硫氧化物、氮氧化物、二氧化碳、重金属、氟、氯无机污染物和一些有机污染物，这些一次污染物会产生一系列的二次污染物，如气溶胶、酸雨、光化学烟雾、温室效应等。化石燃料燃烧产生的一次污染物和二次污染物已经对我们赖以生存的环境造成了极大威胁。

一、粉尘与气溶胶

大气粉尘主要是指悬浮在空气中的固体微粒，按大小可分为不可吸入颗粒物和可吸入颗粒物，可吸入颗粒物是指可以通过鼻和嘴进入人体呼吸道的颗粒物总称，粒径小于或等于 10μm，用 PM10 表示。其中粒径小于或等于 2.5μm 的颗粒物又称为可入肺颗粒，用 PM2.5 表示，它能够进入人体肺泡甚至血液系统中，直接导致心血管病等疾病。

煤、石油等化石燃料的燃烧会产生大量的粉尘，造成大气污染。目前，可吸入颗粒物是我国城市大气环境的首要污染物，尤其是 PM2.5 的污染问题已经十分严重。粉尘的危害具体可表现在危害人体、影响生产和污染环境三个方面，如图 1-3 所示。

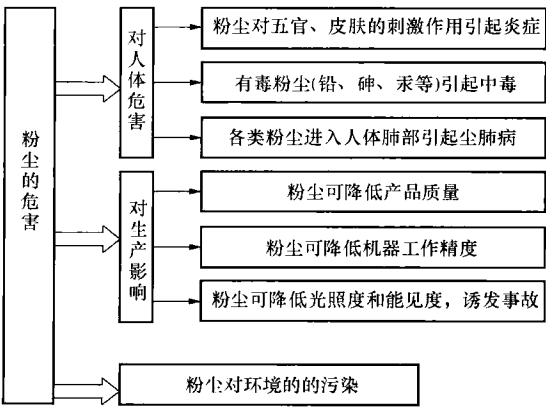


图 1-3 粉尘危害的主要表现

粉尘的化学性质是危害人体的主要因素。飘在大气中的粉尘往往含有许多有毒成分，如铬、锰、镉、铅、汞、砷等。当人体吸入粉尘后，小于 5μm 的微粒，极易深入肺部，引起中毒性肺炎或矽肺，有时还会引起肺癌。沉积在肺部的污染物一旦被溶解，就会直接侵入血液，引起血液中毒，未被溶解的污染物，也可能被细胞所吸收，导致细胞结构的破坏。

当大气处于逆温^❶（temperature inversion）状态时，污染物便不易扩散，悬浮颗粒物浓度会迅速上升。历史上曾发生多起

与粉尘污染引发的人类死亡事件（见表 1-6），如 1952 年 12 月英国伦敦发生烟雾事件时，大气中悬浮颗粒物的含量比平时高 5 倍，引起居民死亡率激增，4 天内较同期死亡人数增加

❶ 大气对流层中出现的气温随高度增加而升高的现象，称为逆温。

4000 余人。美国自然资源保护委员会对 239 个城市的研究表明,因吸入空气中的粉尘而死亡的人数在洛杉矶地区每年达 5000 多人,在纽约达 4000 多人。如果不加以限制,那么每年可能引起约 6 万美国人的死亡。美国环境保护组织说,如果联邦法律限制每立方米的微粒重不超过 20mg,那么,每年可能挽救 4700 人的生命,如果限定 10mg,每年就可挽救大约 6 万人。

表 1-6 历史上因大气污染引发的事件

时 间	地点	污染程度 (24h 平均值)	过度死亡
1930 年 12 月	马斯河谷 (比利时)	SO ₂ 、氟化物、微粒	60~80
1948 年 10 月 27 日~31 日	多诺拉 (美)	SO ₂	20
1948 年 11 月 26 日~12 月 1 日	伦敦 (英)	微粒: 2800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; SO ₂ : 0.75×10^{-6} 容积浓度	700~800
1952 年 12 月 5~9 日	伦敦 (英)	微粒: 4500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	4000
1954 年	洛杉矶 (美)	SO ₂ : 1.34×10^{-6} 容积浓度, CO、NO _x 、O ₃ 、醛类	75% 居民患眼病
1956 年 1 月 3~6 日	伦敦 (英)	微粒: 2400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; SO ₂ : 0.55×10^{-6} 容积浓度	1000
1961 年	四日市 (日)	烟尘和 SO ₂ , 著名的“四日市哮喘病”	患者 800 多人, 死亡 10 人
1962 年 12 月 5~10 日	伦敦 (英)	SO ₂ : 1.98×10^{-6} 容积浓度	700
1962 年 12 月 7~10 日	大阪 (日)		60
1963 年 1 月 29 日~2 月 12 日	纽约 (美)	SO ₂ : 0.5×10^{-6} 容积浓度	200~400

粉尘对生产的影响主要表现为降低产品质量和机器工作精度。如感光胶片,集成电路、化学试剂、精密仪表和微型电机等产品,要是被粉尘沾污或其转动部件被磨损、卡住,就会降低质量甚至报废。粉尘还使光照度和能见度降低,影响室内作业的视野。爆炸性粉尘如煤尘、铝尘和谷物粉尘在一定条件下会发生爆炸,造成经济损失和人员伤亡。粉尘还会沾污建筑物,使有价值的古代建筑遭受腐蚀。降落在植物叶面的粉尘会阻碍光合作用,抑制其生长。

粉尘也是气溶胶的主要组成物质。当气溶胶的浓度达到足够高时,将对人类健康造成威胁,尤其是对哮喘病人和其他有呼吸疾病的人群。空气中的气溶胶还能传播真菌和病毒,这可能会导致一些地区疾病的流行和爆发。另外,由于气溶胶具有丁达尔效应^① (Tyndall effect),气溶胶粒子还能够从两方面影响天气和气候。一方面会使大气的能见度变坏;另一方面却能通过微粒散射、漫射和吸收一部分太阳辐射,减少地面长波辐射的外逸,使大气升温。

我国粉尘污染非常严重,在 2009 年对全国 612 个城市进行的环境空气质量监测中,其中达到一级标准的城市只有 26 个 (占 4.2%),达到二级标准的城市 479 个 (占 78.3%),

① 当一束光线透过胶体,从入射光的垂直方向可以观察到胶体里出现的一条光亮的“通路”,这种现象称为丁达尔现象,也称为丁达尔效应。

达到三级标准的城市 99 个 (占 16.2%), 劣于三级标准的城市 8 个 (占 1.3%), 如图 1-4 所示。可吸入颗粒物年均浓度达到或优于二级标准的城市占 84.3%, 劣于三级标准的占 0.3% (见图 1-5)。

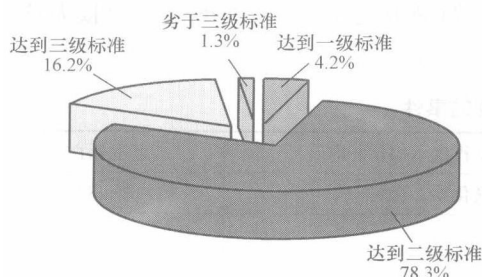


图 1-4 2009 年城市空气质量达标情况

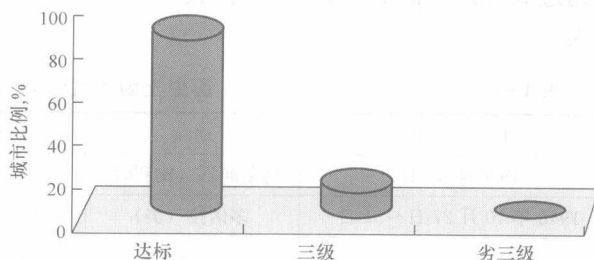


图 1-5 2009 年可吸入颗粒物浓度分级城市比例

二、二氧化硫与酸雨

煤中通常含有 1% 左右的硫, 每燃烧 1t 煤, 就会产生 20kg 左右的硫氧化物 (以 SO_2 计), 其中大部分为 SO_2 。 SO_2 是当今人类面临的主要大气污染物之一, 它对人体的危害很大。当 SO_2 日平均浓度达到 $3.5\text{mg}/\text{m}^3$ 时, 会使人们的呼吸系统、心血管系统的发病率和死亡率显著增加。敏感的人在浓度为 $2.5\text{mg}/\text{m}^3$ 的短时间作用下, 就会引起呼吸道阻力增加。历史上曾发生多起与 SO_2 污染有关的污染事件, 如 1948 年美国多诺拉镇由于工厂排放到大气中的 SO_2 等有害气体大量累积致使 6000 余人受害。而我国重庆市是 SO_2 污染严重区, 肺癌死亡率逐年上升; 长沙市个别街区的肺癌死亡率居高不下也与 SO_2 污染有关。

天然降水的 pH 值为 5.65, 一般将 pH 值小于 5.6 的降水称为酸雨。氧化硫和氮氧化物在大气中可被氧化成不易挥发的硫酸和硝酸, 并溶于雨水, 形成了酸雨降落到地面。煤和石油的燃烧通常会排放大量的 SO_2 和 NO_x ,

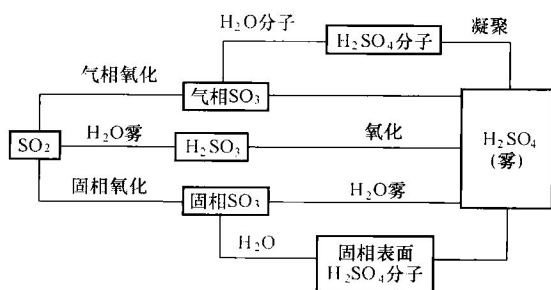


图 1-6 SO_2 氧化成硫酸的途径

的燃烧通常会排放大量的 SO_2 和 NO_x , SO_2 和 NO_x 的 90% 都是燃烧矿物燃料造成的, 是造成酸雨的主要原因。中国酸雨以硫酸为主, 硝酸的含量不到硫酸的 1/10, 带有大气 SO_2 污染的明显特征。排入大气的 SO_2 可通过三种途径氧化成硫酸, 如图 1-6 所示。 SO_2 可以通过气相、液相和固相三种途径, 最终氧化成液态的硫酸。

酸雨给地球生态环境和人类社会经济

都带来严重的影响和破坏。研究表明, 酸雨对土壤、水体、森林、建筑、名胜古迹等人文景观均带来严重危害, 不仅造成重大经济损失, 更危及人类的生存和发展。酸雨使土壤酸化, 肥力降低, 有毒物质更毒害作物根系, 杀死根毛, 导致发育不良或死亡。酸雨还杀死水中的浮游生物, 减少鱼类食物来源, 破坏水生生态系统; 酸雨污染河流、湖泊和地下水, 直接或间接危害人体健康; 酸雨对森林的危害更不容忽视, 酸雨淋洗植物表面, 直接伤害或通过土壤间接伤害植物。促使森林衰亡。酸雨对金属、石料、水泥、木材等建筑材料均有很强的腐蚀作用, 因而对电线、铁轨、桥梁、房屋等均会造成严重损害。在酸雨区, 酸雨造成的破坏比比皆是, 触目惊心, 如在瑞典的 9 万多个湖泊中, 已有 2 万多个遭到酸雨危害, 4 千多个

成为无鱼湖。美国和加拿大许多湖泊成为死水，鱼类、浮游生物、水草和藻类均一扫而光。北美酸雨区已发现大片森林死于酸雨。德、法、瑞典、丹麦等国家已有 700 多万公顷森林正在死亡，我国四川、广西等省、自治区有 10 多万公顷森林也正在衰亡。世界上许多古建筑和石雕艺术品遭酸雨腐蚀而严重损坏，如我国的乐山大佛、加拿大的议会大厦等。最近发现，北京卢沟桥的石狮和附近的石碑、五塔寺的金刚宝塔等均遭酸雨浸水而严重损坏。

由燃烧化石燃料引起的 SO_2 大量排放已导致我国城市空气污染十分严重。2008 年， SO_2 年均浓度达到二级标准及以上的城市占 85.2%，劣于三级标准的占 0.6%。贵州、山东、河北、山西、内蒙古、四川、湖南等 7 省区参加统计的地级城市中 SO_2 未达到二级标准的比例超过 20%。 SO_2 的大量排放同时也使得我国酸雨污染发展扩展。20 世纪 70 年代以前，酸雨现象只是在一些工业发达国家出现，但随着世界经济的快速增长，酸雨现象越来越严重，并且正在向全球扩展。现在我国是继欧洲、北美之后在世界上出现的第三大酸雨片区，酸雨区的覆盖面积占我国国土面积的 40% 左右。2009 年监测的 488 个城市（县）中，出现酸雨的城市 258 个，占 52.9%；酸雨发生频率在 25% 以上的城市 164 个，占 33.6%；酸雨发生频率在 75% 以上的城市 53 个，占 10.9%（见表 1-7）。

表 1-7 2009 年全国酸雨发生频率分段统计

酸雨发生频率	0	0~25%	25%~50%	50%~75%	≥75%
城市数（个）	230	94	62	49	53
所占比例（%）	47.1	19.3	12.7	10	10.9

数据来源：《2009 年中国环境公报》。

全国酸雨分布区域主要集中在长江以南—青藏高原以东地区，主要包括浙江、江西、湖南、福建、重庆的大部分地区以及长江、珠江三角洲地区。酸雨发生面积约 120 万 km^2 ，重酸雨发生面积约 6 万 km^2 。

三、氮氧化物与光化学烟雾

氮氧化物包括多种化合物（见表 1-8），其中被认为最主要的两个空气污染物是 NO 和 NO_2 ，一般可用 NO_x 表示。

表 1-8 氮氧化物种类

分子式	名 称	分子式	名 称
N_2O	氧化二氮、氧化亚氮（笑气）	NO_2	二氧化氮、四氧化二氮
NO	一氧化氮	N_2O_5	五氧化二氮
N_2O_3	三氧化二氮		

氮氧化物最常见的来源是高温燃烧过程，如汽车发动机中和工业生产中的高温燃烧过程，还有燃气炉和家用火炉等居民生活用火燃烧过程等。其中又以汽车尾气排放的氮氧化物居多。氮氧化物对环境及人类的影响都很大。氮氧化合物对人的呼吸器官有较大的刺激作用，引起气管炎，能同肺部湿润的表面接触，形成损伤肺组织的硝酸和亚硝酸，造成肺水肿和复杂的反应失调。亚硝酸进入人体可生成强致癌物亚硝酸氨，也可与人体血液中的血红蛋白结合，形成正铁血红蛋白，使人产生缺氧症状。而且 NO_2 的毒性是 NO 的 4~5 倍，当空气中 NO_2 的浓度达到 $50 \times 10^{-6} \text{ mg/L}$ 时，1min 内人就会感到呼吸困难；当其浓度达到