

二氧化硫减排技术与 烟气脱硫工程

杨 颺 编著



冶金工业出版社

二氧化硫减排技术与 烟气脱硫工程

杨 颀 编著

内 容 简 介

本书主要介绍大气硫污染及控制,首端控制、清洁燃烧、末端控制3种二氧化硫减排技术的基本原理和工艺装备、国外烟气脱硫典型工艺,我国烟气脱硫工程实践,烟气脱硫技术经济评价分析,烟气脱硫工程建设。该书重点论述烟气脱硫,尤其侧重于脱硫工程的设计与实践。

本书以环境科学研究、环境工程设计和环境管理工作者为对象,可供从事能源、环境建设和生产的有关人员以及大专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

二氧化硫减排技术与烟气脱硫工程/杨颀编著. —北京:
冶金工业出版社, 2004.1

ISBN 7-5024-3331-7

I. 二… II. 杨… III. ①二氧化硫—大气扩散—技术
②烟气脱硫—技术 IV. X701.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第067048号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷39号,邮编100009)

责任编辑 王之光 美术编辑 王耀忠 责任校对 符燕蓉 责任印制 李玉山

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2004年1月第1版,2004年1月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 22.25印张; 608千字; 340页; 1—4000册

56.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010) 64044283 传真:(010) 64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010) 65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

序

根据环境年鉴资料，我国2000年SO₂排放总量已达到1995万t，为世界之冠。SO₂排放是构成我国酸雨污染的主要因素。以1995年为例，我国酸雨面积覆盖40%的国土，局部地区的污染程度相当于发达国家上世纪五六十年代水平，如贵阳、重庆等地的大气SO₂平均浓度是国家二级标准的5倍以上。据分析测算，全国由此造成的年社会经济损失达950亿元，约占GDP的1.6%。

近10年来，由于国家推行清洁生产，加大环保投入，强化环境管理的结果，SO₂污染势头有所遏制，但尚未发生根本变化。未来10年将是我国经济持续高速发展时期，如不采取有效措施，SO₂污染可能制约发展的速度。我国的一次能源以煤炭为主，约有2/3以上的煤炭直接用于燃烧，有燃烧便有SO₂排放，目前尚无法做到燃煤而不排放SO₂，只能将SO₂减排到最小限度，这就是“减排技术”的重要性。

我国SO₂减排技术的研究与开发，早在上世纪60年代就已开始，历经40年两代人的艰辛努力，已奠定了一定的基础。最近10余年，为适应我国进入全面现代化发展时期的需要，国家有选择地引进了一批示范工程，为大幅度控制SO₂污染铺平了道路。改革开放以来，综合国力逐年增强，为实施有效减排创造了条件。借鉴发达国家的成功经验，我国的SO₂减排工作有望在近10~15年内大有作为。

现在，人类普遍处于环境觉醒之中，生产经营者和环境管理者找到了共识。减排SO₂不再被视为“负担”，而是在追逐经济效益的同时谋求减少损失和持续发展。据有关资料称，如以常规方法减排1t SO₂需耗用投资费用1000元，同时可减少损失4000元。然而这必须通过立法手段把政府行为变为企业行为，要求制定一系列的配套技术政策和经营管理法规。环境科技工作者有责任为实现减排目标而努力创新，开拓与我国国情国力相适应的减排技术路线和方法。

本书作者长期从事有害气体治理的设计研究工作，特别是从上世纪80年代初，宝钢面临SO₂问题质询，作者开始潜心研究大气硫污染的防治对策，并进行了大量的调查、分析和综合研究及参加多项攻关课题的研讨、论证、评审和鉴定，经多年的积累和研究，终撰成此书。本书按照全过程控制的现代环境工程原理，将燃烧过程分为三段：首端、中段和末端，并逐一加以分析论述，重点放在末端，从理论基础、基本原理到工程实践；从方案比较、技术经济评价到两段设计和技术装备引进；从国内的技术发展历程和进展到国外的最新动向，所涉之处有一定的深度和广度。需着重指出的是，本书是目前关于减排脱硫技

术方面较为系统的一本书，书中的几个主要论点值得引起重视：

- (1) 清洁生产是生产经营与环境管理的契合点；
- (2) 减排 SO_2 有多种办法，FGD 并不是惟一的却是最终的和重要的减排技术；
- (3) 技术经济评价是正确选择减排措施和 FGD 工艺的关键；
- (4) 必须加速形成符合我国国情国力的减排技术路线。

这些观点的提出，表明本书作者在研究控制 SO_2 方面有着深层的思考，在一定程度上标志着我们在新世纪对环境保护和 SO_2 控制的共同理念正在走向成熟，期望能够引起广泛的共鸣。

徐王中

2003.3

前 言

20世纪80年代后期，世界进入知识经济和可持续发展的时代。可持续发展战略共识的要点是：社会经济的发展不应超过环境允许的限度。人类的发展，绝不是凭借技术和资金，耗竭资源，牺牲环境，毁坏生态来取得，而应坚持与自然环境相和谐的方式，追求高质量的精神文明和物质文明的生活。

可持续发展的观点是建立在对环境和发展这一对立统一体的认识之上的，它包括经济持续、生态持续和社会持续三个互相关联的部分。持续发展时代的显著特征是人类各种经济行为从排斥环境原则转到纳入环境原则。人们对待污染控制的态度也发生相应的转变，从传统的仅要求末端治理转到全过程控制和综合防治。于是，长期困扰人们的企业经营与环境管理“两张皮”终于由持续发展和清洁生产找到了契合点。这项巨大进展是全世界的共同财富，必将被强有力地带入21世纪。

现代科学环境观包含生态学的原理、清洁生产的方法和可持续发展的目标。工业革命以后的一段较长时期，人们走在只图发展和只顾末端的误区里。自上世纪50年代后，人们逐渐萌生环境良知，不断端正和约束自己的行为。发展经济需要接受环境和法规的制约。20世纪70年代后，人类才真正开始有了环境觉醒，相继提出了零排放、无废技术、清洁生产、循环经济、可持续发展等种种新的观点和理念。

理论上，任何生产过程都没有废弃物，只有未被充分利用的资源。但是在实际生产中，产生“废物”和泄漏物料，又是不可避免的。所以清洁生产首先包括污染源的削减，即采用清洁原、燃料，实施清洁工艺和节能降耗，使污染物的发生最少量化，资源和能源的利用最大化和最优化，然后进行末端处理，包括综合利用和无害化贮存。

现代环境科学理论认为，大气环境并不是无穷尽的，如同水和矿物资源一样。它是人类共有的财富，必须保护、珍惜和合理利用。随着人口的增加和工业的发展，必将产生大量的污染物进入大气环境，改变气候，破坏生态，危及人类生活和生产安全。应该说，大气污染与近代工业发展并存，是人类自己造成的。人类对环境的利用和改造程度取决于生产力和科学技术的发展水平。工业革命以来的200年，生产力和科学技术迅速发展，人类活动对环境的影响大大超过了工业革命前数千年的总和。18世纪的蒸汽机，19世纪的电气，20世纪的原子、空间技术，21世纪的信息、生物工程、纳米技术，曾经推动和正在推

动人类社会经济文化的迅猛发展，形成和将进一步形成庞大的城市群和城市带，大量产生和排放“三废”，一旦空间、水体和地面不堪污染负荷，就会发生报复性的环境灾难。

大气污染曾经肆虐人类，造成过巨大的生命和财产损失，今天仍然从多方面威胁着人类，稍有懈怠就会引发区域性甚至全球性灾难。酸雨、臭氧空洞和温室效应就是公认的大气环境问题。20世纪中叶，著名的世界八大公害事件，其中五起缘于大气污染。烟雾和SO₂曾经充当大气污染的元凶，直到今天，它们仍然是大气环境评价的主要污染因子，受到人们高度关注。当然，大气污染物并不仅限于此，随着工业经济的发展，产生的污染物越来越多而且复杂。

研究大气污染问题主要在于：查明污染物的发生源和它在大气中相互的物理和化学作用；研究污染物对人体、动物、植物、物品等的影响；研究大气污染控制途径和方法以及有关大气环境的立法管理。

我国是煤炭大国，探明储量在8600亿t以上，年开采量14亿t，分别居世界第三位和第一位。我国的一次能源以煤为主，在能源消费结构中，煤占75%。在商品煤中，80%用做燃料。我国的大气污染属于煤烟型，大气中90%的SO₂来自煤的燃烧。目前我国SO₂年排放总量在2000万t左右，位居全球之首，由此造成的酸雨覆盖面积超过国土总面积的1/3，年社会经济损失近千亿元。

在我国的煤炭中，动力用煤超过70%，炼焦用煤不到30%。就硫分来讲，主要是中低硫煤，低硫煤约占1/4，高硫煤的比例不大，仅占1/6。

燃煤烟气中SO₂浓度的高低决定于煤中硫的含量、形态以及燃烧过程。控制SO₂就是从这里出发，循着生产的全过程进行。

SO₂减排技术包括洁净燃料、节能增效、改善燃烧过程和烟气净化处理。传统的高烟囱是一种改善局部大气环境的高空稀释排放措施，并不能根本减轻大气硫污染的负荷。事实证明，通过长程输送和高空大气化学过程正是酸雨的根由。因此，现代工业社会不再用“烟囱林立，浓烟滚滚”来描绘经济繁荣兴旺，恰恰相反，它代表落后的工艺和与可持续发展相悖的理念。常用的洁净燃料技术是洗煤。煤的洗选属于物理脱硫，仅能去除大部分无机硫分，而化学脱硫的成本较高，难以达到广泛应用的程度。煤的气化是成熟的工艺，现已成为广泛接受和受欢迎的“清洁燃料”。实践证明，改革开放以来，许多城市的大气环境不但没有因经济的发展而变坏，相反有明显的改善，其主要原因之一就是推进和普及煤气化。另一个重要原因是淘汰小锅炉和小机组，实行城市区域供热和热电联供，大大降低了煤耗，提高了能效。这样的措施收到了经济与环境之双利，降低了生产成本，减少了SO₂的发生量。

在锅炉燃烧过程中，直接向炉膛注入脱硫剂，或采用循环流化床燃烧工艺，实际是炉内造渣，将SO₂固定于炉渣中排出，从而减少随烟气排放的数量。这项减排技术正在发展完善之中，原因是它同锅炉制造和燃烧工艺有密切的关系，

因而一时还不能普遍被采用，尽管它是比较简便和廉价的减排技术。

烟气脱硫作为“末端控制”措施是当前应用最广的有效技术，在SO₂减排技术中占有重要地位。对于火电厂来说，在今后相当长的时期内，烟气脱硫仍然是首选的SO₂减排技术。我国目前正面临广泛开展烟气脱硫的形势。从上世纪70年代开始，开展了大量的前驱性试验研究，为实施烟气脱硫奠定了基础。近10年，为加速突破技术经济关，导向性地引进和建成若干示范工程，为推动烟气脱硫工作铺平了道路。改革开放以来，社会经济蓬勃发展，国家综合实力大大增强，为大规模实施SO₂减排和开展烟气脱硫提供了必要的条件。

现在，国外烟气脱硫技术已臻于成熟，在进一步改进和完善的基础上，所追求的主要目标是：大幅度降低投资和运行费用，提高运转可靠性和自动化水平，扩大副产物资源化途径。

烟气脱硫在SO₂减排技术与工程中占有重要地位，它是最终的保障性环节。实施烟气脱硫是一项跨行业、多学科的系统工程，实际上是要求在火电厂的末端，以锅炉烟气为“原料”续建化学处理工厂，涉及化工、环保、发电、机械、电子、材料等多个专业，以及规划、管理、科研、设计等多方面的内容。

本书中涉及的气体体积(m³)，除了特指条件外，概为标准状态下的体积。

编撰本书的初衷是试图通过20年的潜心研究，将心得成果和有关资料加以综合归纳，供同行朋友参考，希望对大家的工作有所助益。书中的疏漏和不妥之处，请读者朋友不吝指正。

本书断断续续地写了3年，在编撰、审阅和出版过程中，得到宝钢领导的关怀和支持，得到智西巍、张桐庆、舒惠芬、任同生、徐正中、谭天恩、江研因、张殿印、季学李、侯惠奇、陈秋则、李德、胡健民等先生的热情帮助和鼓励，还得到金强、张孔瑜、慕元、王必松、邬冠君、黄浩、黄小英等众多朋友和家人的鼎力相助，在此一并深致谢忱。

谨以此书献给宝钢开工建设25周年！

作者
2003年2月

目 录

第一章 大气硫污染及控制	1
第一节 概述	1
第二节 大气硫污染	4
一、大气硫污染物的特性	4
二、大气硫污染物的产生	6
三、大气硫污染物的转化和循环	7
四、二氧化硫的危害	9
第三节 二氧化硫的减排	11
一、二氧化硫减排技术的发展	11
二、我国二氧化硫减排对策	14
三、二氧化硫减排技术应用选择	21
第二章 首端控制——燃料洁净加工	24
第一节 我国燃料概况	24
一、液体燃料——石油	27
二、气体燃料——天然气和煤气	28
三、固体燃料——煤炭	30
第二节 煤的基本性质和硫分	33
一、物理性质	34
二、化学特性	35
三、硫分	37
四、煤的脱硫可选性	39
第三节 煤的物理脱硫	40
一、我国煤炭洗选状况	40
二、硫铁矿硫的洗选脱除	42
三、泡沫浮选脱硫	44
四、油团聚分选脱硫	46
五、磁选脱硫	47
第四节 煤的化学脱硫	48
一、热碱液浸出 (BHC) 法	49
二、硫酸铁溶液浸出 (Meyers) 法	49
三、液相氧化 (LOL) 法	50
四、催化氧化法	50

五、PETC法	50
六、Ames法	50
七、KVB法	51
八、氯解法	52
九、熔碱(MCL)法	53
十、溶剂抽提法	53
第五节 煤的生物脱硫及其他方法	53
一、煤的生物脱硫	53
二、其他脱硫方法	57
第六节 煤的转化去硫	60
一、煤的液化	60
二、煤的气化	61
三、煤的地下气化工艺	67
第三章 清洁燃烧——造渣固硫	69
第一节 型煤技术	69
一、型煤的特点与分类	69
二、添加剂	70
三、型煤的应用	71
第二节 水煤浆技术	72
一、水煤浆的种类和用途	72
二、煤的成浆性	72
三、水煤浆制备	74
四、水煤浆输送	77
五、水煤浆燃用	78
六、水煤浆的工业应用	78
七、水煤浆技术在我国的发展前景	81
第三节 循环流化床燃烧脱硫工艺	82
一、概述	82
二、流化床燃烧脱硫的基本原理	85
三、循环流化床锅炉的结构与特性	88
四、增压流化床锅炉	90
五、循环流化床锅炉技术经济分析	91
六、国内外循环流化床锅炉工程实例	93
第四节 动力配煤与粉煤燃烧	100
一、动力配煤	100
二、煤粉燃烧	103
第五节 完全清洁燃烧方式	103
一、燃气——蒸汽联合循环	103
二、燃料电池	106

第四章 末端控制——烟气脱硫	107
第一节 国外烟气脱硫技术的发展与应用	107
一、技术发展的特点.....	107
二、烟气脱硫装置的工业应用.....	109
三、烟气脱硫产业的兴起.....	113
第二节 我国烟气脱硫的进展与前景	114
一、二氧化硫排放态势.....	114
二、先驱性工作.....	116
三、引进技术建设示范工程.....	118
四、我国烟气脱硫发展前景.....	119
第三节 烟气脱硫技术	122
一、工艺流程分类.....	122
二、脱硫剂及其选用.....	124
三、脱硫设备.....	127
第五章 烟气脱硫基本原理	132
第一节 烟气脱硫化学基础	132
一、二氧化硫的基本性质.....	132
二、脱硫过程的化学基础.....	135
第二节 钙法	135
一、石灰/石灰石干式直喷法.....	136
二、石灰/石灰石湿式洗涤法.....	141
第三节 钠法	151
一、吸收.....	151
二、再生.....	154
第四节 氨法	155
一、循环吸收.....	155
二、吸收液处理.....	158
第五节 镁法	159
一、化学吸收.....	159
二、热解再生.....	161
第六节 其他方法	162
一、喷雾干燥——半干法.....	162
二、吸附法.....	165
三、电子束辐照法.....	167
四、海水法.....	171
五、循环流化床烟气脱硫技术.....	173
第六章 国外烟气脱硫典型工艺	175
第一节 常用的烟气脱硫技术	175
一、日本三菱重工：石灰/石灰石-石膏法.....	175

二、德国 SHU: 石灰石-石膏法	177
三、日本石川岛播磨重工 (IHI): 石灰石-石膏工艺	180
四、美国阿尔兰通: AFGD	181
五、德国诺尔-克尔茨: 双循环石灰石法	182
六、美国 GE: 氨洗涤工艺	184
七、菲达-尼罗: 旋转喷雾干燥法	185
八、美国 Davy McKee: W-L 法	186
九、日本川崎: CAL 法	188
十、芬兰 Fortum: LIFAC 工艺	189
十一、ABB: 海水法	191
第二节 高新烟气脱硫技术	193
一、电子束辐照法 (EBA)	193
二、吸收剂荷电活化技术	196
三、新型一体化工艺 (NID)	200
四、回流烟气循环流化床工艺 (RCFB)	202
五、气体悬浮吸收技术 (GSA)	203
六、脉冲电晕等离子体技术	204
七、二氧化硫和氮氧化物的化学双脱技术	206
第七章 我国烟气脱硫工程实践	211
第一节 中小规模烟气脱硫工程	211
一、湖南三〇〇电厂: 亚钠循环法 (W-L)	211
二、松木坪电厂: 活性炭法	211
三、南京化学公司: 氨-酸法	212
四、水口山矿务局: 氧化锌法	214
五、南宁铝厂: 氧化锰法	215
六、杭州铁路分局: 双碱法	216
七、沈阳黎明公司热电厂: 半干法	218
八、内江白马电厂: 石灰旋转喷雾干燥法	220
九、宜宾豆坝电厂: 活性炭-磷铵复肥法	223
十、绵阳科学城热电厂: 等离子体双脱工艺	226
十一、无锡化工集团公司热电厂: 循环流化床烟气脱硫工艺	229
第二节 我国大型燃煤电厂烟气脱硫示范工程	230
一、重庆珞璜电厂: 湿式石灰石-石膏工艺	232
二、太原第一热电厂: 简易石灰石-石膏工艺	246
三、山东黄岛电厂: 旋转喷雾干燥工艺	250
四、南京下关电厂: 炉内喷钙加烟气增湿活化工艺	253
五、深圳西部电厂: 海水洗涤工艺	258
六、成都热电厂: 电子束辐照脱硫工艺	260
第三节 其他烟气脱硫工程	263
一、重庆发电厂: 石灰石-石膏法	263

二、扬州发电厂：简易石灰石-石膏法	266
三、广东连州电厂：石灰石-石膏抛弃法	269
四、漳州后石电厂：海水法脱硫工艺	271
五、浙江衢化热电厂：NID 烟气脱硫工艺	273
六、云南小龙潭电厂：GSA 烟气脱硫	275
第八章 烟气脱硫技术经济评价分析	278
第一节 概述	278
一、经济分析方法	278
二、经济评价的意义	280
三、影响经济评价的因素及说明	281
第二节 国外评价简介	283
一、美国 EPA 对 5 种烟气脱硫工艺的评价研究	283
二、美国 TVA 对 9 种烟气脱硫工艺的评价分析	285
三、其他评价工作	292
第三节 我国的评价尝试	295
一、技术经济一般分析	295
二、现行电厂加装改造的经济评价	302
第四节 综述评	307
一、传统湿法仍是主流技术	307
二、半干法和干法工艺值得重视	308
三、循环流化床烟气脱硫技术前景看好	308
四、其他脱硫技术简议	309
第九章 烟气脱硫工程建设	311
第一节 设计前期工作	312
一、工程立项	312
二、设计准备	313
三、工艺抉择的原则	318
第二节 高阶设计设计与施工图	320
一、可行性研究	320
二、初步设计	321
三、施工图设计	321
第三节 烟气脱硫工程设计中的若干问题	322
一、工艺设计要不断优化	322
二、注意防止结垢、堵塞	322
三、防腐蚀与抗磨损	323
四、烟气预除尘和预冷却	324
五、吸收液处理	324
六、除雾和氧化	324
七、烟气再加热	324

八、脱硫风机布置方式·····	325
九、脱硫副产品石膏的利用和处置·····	326
十、关注传统湿式工艺的发展趋向·····	326
十一、推进技术、装备国产化·····	328
十二、系统组成设备的投资比例·····	331
附录 ·····	332
附表 1 烟道气的物理参数 ·····	332
附表 2 气态二氧化硫的物理性质 ·····	332
附表 3 气态二氧化硫的热容与热焓 ·····	334
附表 4 二氧化硫水溶液的蒸气分压 ·····	335
附表 5 低浓度二氧化硫的溶解度 ·····	336
附表 6 几种物质的 mg/m ³ 与 ppm 换算系数 ·····	336
附表 7 金属氧化物、碳酸盐对二氧化硫的吸收能力 ·····	337
参考文献 ·····	339

大气硫污染及控制

第一节 概 述

空气是最宝贵的资源之一，一个成人每天需要 $10\sim 12\text{m}^3$ 空气，相当于一天的食物重量的 10 倍，饮水量的 5~6 倍。人们可以断食、断水几天，但没有空气 5min 便不能生存，而且需要新鲜空气。大气圈内，除了恒定组分和可变组分属于洁净气体外，还有不定组分，它是一些伴随自然变化和人类活动而产生的污染物质，当达到一定浓度，并滞留足够时间，便会危害人类和环境，构成大气污染。洁净空气与污染空气的区分见表 1-1。

表 1-1 洁净空气与污染空气的区分

污染成分	清洁空气/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	污染空气/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	污染成分	清洁空气/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	污染空气/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$
SO_2	0.0029~0.029	0.06~5.72	NO_x (以 NO_2 计)	0.0021~0.021	0.021~1.025
CO_2	604.5~643.5	682.5~721.5	碳氢化物(以 CH_4 计)	0.71	0.71~14.2
CO	<1.25	6.25~250	颗粒物	$10\sim 20\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$70\sim 700\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

造成大气污染的三要素是污染源、大气状态、污染受体。大气污染的主要过程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，扩散、转化和消除，最后根据对受体的影响确定大气污染程度。

大气污染形成的条件是：(1) 大量的污染物排入大气中；(2) 由于当地不利的地理和气象条件等影响，污染物不能在大气中及时扩散稀释；(3) 由于污染物在大气中积累以及某些物质的协同作用，使污染物的浓度达到危害的程度。在这 3 个条件中，起主要作用的是大气污染物。大气污染物中最重要的应数粉尘和 SO_2 。

目前已知产生危害并受到关注的大气污染物约有 100 多种，其中影响较大的有粉尘、 SO_2 、 NO_2 、CO、碳氢化物、氟化物、 H_2S 、HCl、Pb、Cd、Hg、光化学氧化剂等，这些都是大气监测和控制的重点。粉尘和 SO_2 是最广泛、最常见和最主要的大气污染物。

大气污染物有一次污染物和二次污染物之分。直接从排放源进入大气中的各种有害气体和烟尘称为一次污染物。一次污染物主要有颗粒物、硫氧化物、氮氧化物、碳氢化物、碳氧化物、重金属等。一次污染物是空气污染控制工程的主要控制对象。

一次污染物在大气中发生一系列的物理、化学反应，这些反应大致可归纳为：气体污染物之间直接的化学反应；气体污染物之间的催化反应；微粒污染物对气体污染物的吸附；气体污染物与微粒的表面化学反应；气体污染物溶于液体气溶胶；气体污染物的光化学反应等。反应的结果，生成新一代污染物，即所谓二次污染物。二次污染物种类很多，重要的有臭氧、酸雾和盐类等。光化学烟雾是由二次污染物构成的，其成分十分复杂，含有醛类、臭氧、过氧乙酰基硝酸酯(PAN)、过氧丁酰硝酸酯(PBN)等。

大气污染物按其性质分为物理性、化学性、生物性及放射性四大类。物理性污染物系指颗粒

物和气溶胶而言，化学性污染物有无机化合物、有机化合物、光化学烟雾物质，生物性污染物则是昆虫类和病原微生物等，放射性污染物包括各种射线物质、微波和电磁辐射等。

大气污染物按其形态分为颗粒物（包括气溶胶）和气体污染物两大类。常见的颗粒物有粉尘、降尘、飘尘、重金属烟尘、雾滴等。

通常，大气中的微粒以 $10\mu\text{m}$ 为界线划分，降尘粒径大于 $10\mu\text{m}$ ，飘尘粒径小于 $10\mu\text{m}$ 。在工业上也常以 $1\mu\text{m}$ 为界线划分，烟尘粒径大于 $1\mu\text{m}$ ，烟气粒径小于 $1\mu\text{m}$ 。

一般的水汽雾粒径在 $5\sim 6\mu\text{m}$ 之间，硫酸雾粒径为 $0.1\sim 10\mu\text{m}$ ，碱雾为 $0.1\sim 2\mu\text{m}$ ， SO_2 雾为 $0.5\sim 3\mu\text{m}$ ，粉尘为 $10\sim 200\mu\text{m}$ ，飞灰为 $3\sim 80\mu\text{m}$ 。

气体污染物的种类繁多，是一个庞大的家族，主要包括以下五类：（1）含硫化合物如 SO_x 和 H_2S ；（2）含氮化合物如 NO_x 和 HN_3 ；（3）含碳化合物，如 CO 和 CH_4 ；（4）卤素化合物如 HCl 和 HF ；（5）氧化剂，如 O_3 和 PAN 等。

大气污染物的一般特征是来源广，数量大，有气味，有毒性，能够协同转化和长程扩散迁移，与人类生存息息相关。大气中的各种污染物，从排放到最终归宿，经历一系列的大气物理和化学过程：扩散、迁移、转化和循环，它们在大气中的滞留时间或长或短，对人类和环境的危害也或轻或重。

几种主要大气污染物的特征见表 1-2。

表 1-2 主要大气污染物的特征

污染物	主要来源		在大气对流层中停留时间	转化作用
	人为源	天然源		
SO_2	火电、化石燃料燃烧	火山、海水	约 4d	氧化成硫酸及其盐
CO	燃烧、交通	林火、海洋	$0.1\sim 3a$	
CO_2	燃烧	生物分解、火山、林火	4a	生物吸收、光合作用、海洋吸收
H_2S	化学过程（污水处理）	生物分解、火山	约 2d	氧化、湿沉降
O_3	光化学反应	雷电、火山、林火	$30\sim 90d$	还原成 O_2
NO_x	燃烧、化学过程	土壤生物作用	5d	氧化、湿沉降
NH_3	废物处理	生物腐败	$2\sim 5d$	与 SO_2 作用、生成铵盐
CH_4	农牧业	天然气、生物分解		光化学反应
碳氢化物	燃烧、化学过程	生物过程		光化学反应
气溶胶	工农业、交通	火山、林火、扬尘	$10\sim 30d$	湿沉降

大气污染源有自然源和人为源两大类。自然源包括尘暴和扬尘，天然油气田放出的硫化氢和甲烷，地热流释放的硫化物、甲烷和氨，火山喷发的 SO_2 和灰粒，闪电产生的臭氧，植物产生的酯和烃，森林火灾造成的烟气和飞灰，自然腐败物分解产生的臭气以及海啸和海水溅射，自然放射性源放出的各种有害物质等等，这些自然界产生的污染物构成了空气的背景污染。自然源多具有偶发性和局域性，人类还不能完全控制。由于大气环境有一定的自净能力，自然源造成的大气污染经过一段时间后会自动消失，生态平衡常可自行恢复。自然源基本无大变动，而最令人忧虑的是人为源，它随着社会经济的发展而变化很大，特别是工业污染源已成为导致现今大气污染的主要方面。

人为源是产生空气污染的主要方面，人为源是指任何向大气排放污染物的工厂、设备、车辆或其他生产和生活活动等。人们常根据具体需要结合污染源的某些特性，对这种污染源进行分类。不同类型污染源排出的污染物有所不同。按污染物产生的方式分为：工业企业排放源、交通工具排放源、家庭炉灶排放源。按污染源存在的形式分为：固定源、移动源。按污染源几何形体分为：点源、线源、面源。按污染源排放的时间分为：连续源、间断源、瞬时源。按污染物排放的高度分为：地面源、高架源、高空源。

工业污染源包括3个方面：(1) 燃料燃烧；(2) 废弃物焚烧；(3) 工业生产过程。由于投入的原燃料不同，燃烧温度、方式和状态的不同，生产工艺过程、条件和工况的不同，因而产生的污染物也不同。SO₂主要来自火电厂，各种交通工具排放碳氢化物和NO_x，钢铁厂和水泥厂的主要污染物是粉尘，有色金属冶炼厂的主要污染物是SO₂和金属烟尘，碳氢化物的另一个重要来源是石油化工厂。

煤燃烧所排放出的污染物有：SO₂、SO₃、CO、氮氧化物、烃类和醛类等，此外，还有由固体颗粒物组成的烟尘。烟尘是多种无机物的混合物，主要成分是SiO₂、Al₂O₃、FeO、CaO等。燃油排放的有害物质除烟尘较少外，大体与燃煤相同。

大气污染物来源很广，几乎涉及每个行业。大气污染程度不仅仅由企业排放污染物的量决定，还与企业排放污染物的种类有很大关系。一般企业都有不同的燃料燃烧设备，因而它们所排放的污染物也不尽相同。

在人为污染源中，以燃料的燃烧（特别是化石燃料的燃烧）最为重要。通过燃烧产生飞灰和二氧化硫；燃烧过程还会产生一氧化碳、碳氢化合物等不完全燃烧产物和氮氧化物，所以，燃烧与大气污染关系十分密切。

火电厂是最大的大气污染源。这是因为火电厂大多以煤为燃料，煤是一种非清洁燃料，通常含硫0.5%~5%，灰分5%~20%，在燃烧过程中，以SO₂和飞灰形式随烟气排出。一般火电厂排出的大气污染物总量是相当大的，其中各种污染物所占比例大致为：SO₂ 58%；粉尘 17%；NO_x 15%；CO 5%；碳氢化合物 5%。

生活活动引起的大气污染，也同样与燃烧有关。民用炉灶和小型锅炉，数量多，分布面广，燃烧条件差，烟气近地排放，对局部地区的大气环境影响很大。

各种燃料燃烧产生的主要污染物见表 1-3。

表 1-3 燃料燃烧产生的主要污染物

污 染 物	发电厂烟气/g·kg ⁻¹			1kg 垃圾燃烧烟气/g		1kg 燃油汽车排气/g	
	煤	油	气	露天燃烧	多室燃烧炉	汽油	柴油
CO				50.0	可略	165.0	可略
SO ₂	20 (S)	20	16 (S)	1.5	1.0	6.8	7.5
NO ₂	0.43	0.68	0.16	2.0	1.0	16.5	16.5
醛酮	可略	0.003	0.001	3.0	0.5	0.8	1.6
总烃	0.43	0.05	0.005	7.5	0.5	33	30.0
总颗粒物	7.5 (A)	2.8 (A)	可略	11	11	0.05	18.0

注：S和A分别为燃料中硫分和灰分的质量分数，%。

炼焦和钢铁生产的污染物排放量见表 1-4 和表 1-5。