

大气环境和污染控制丛书

# 大气污染控制技术

DAQI WURAN KONGZHI JISHU

◎ 吴忠标 编著



化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

大气环境和污染控制丛书

# 大气污染控制技术

吴忠标 编著

化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

·北京·

(京) 新登字 039 号

**图书在版编目 (CIP) 数据**

大气污染控制技术/吴忠标编著. —北京: 化学工业出版社, 2002.5

(大气环境和污染控制丛书)

ISBN 7-5025-3780-5

I. 大… II. 吴… III. 空气污染-污染防治 IV. X51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 020244 号

---

大气环境和污染控制丛书

大气污染控制技术

吴忠标 编著

责任编辑: 夏叶清 赵晓怡

责任校对: 洪雅姝

封面设计: 蒋艳君

\*

化学工业出版社 出版发行

环境科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

北京市云浩印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 12 插页 1 字数 326 千字

2002 年 5 月第 1 版 2002 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3780-5/X·182

定 价: 28.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

# 前 言

大气污染极大地影响并将继续影响人类赖以生存的大气环境。大气污染造成的几大公害事件，曾令世人震惊，也使地球人觉醒，人们终于认识到我们只有一个地球。如何在发展现代物质文明的同时保护好我们共同的大气环境？如何能让我们重新拥有一片蔚蓝的天空？如何能让我们重新在清洁的空气中自由地呼吸？每一个地球人都在思考……发达国家几十年来治理大气污染和改善大气环境的经验表明，保护好大气环境的关键和重要保障正是先进、有效、实用的大气污染控制技术。

本书力求做到简明实用、重点突出，在介绍大气污染控制技术基础后，重点阐述了除尘技术、二氧化硫控制技术和氮氧化物控制技术，并较系统地介绍了有机废气、恶臭、硫化氢、含氟废气、酸雾、含铅废气等气态污染物的治理技术。本书在较全面系统地阐述大气污染控制实用技术和原理的同时，还在各相关章节中简要介绍了大气污染控制高新技术及发展趋势。

本书旨在让读者较全面地了解大气污染控制技术，并兼顾了专业人员和大众读者两方面的不同要求，适用于从事大气环境工程设计和管理工作的人员参考，也可供关心支持大气环境事业的公众阅读。

本书由浙江大学吴忠标主编，吴晓琴参加了部分章节的整理和编写。

由于编写人员学术水平和时间经验所限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

吴忠标

2002年3月

## 内 容 提 要

本书是大气环境和污染控制丛书中的一本，全书内容共分5章。详细阐述了粉尘、氮氧化物、二氧化硫等有害气体成分的颗粒捕集、物理吸附、化学吸收的机理，重点阐述了除尘、二氧化硫、氮氧化物的控制技术，系统介绍了有机废气（VOC）、硫化氢、含氟废气、恶臭、铅雾等大气污染物的治理技术，本书在较全面系统地阐述大气污染控制实用技术和原理的同时，在相关章节中简要介绍了大气污染控制高新技术及发展趋势。

本书理论联系实际，集中了大量详实的实验数据及设备结构图供专业人员参考，适用于从事大气环境工程设计和管理工作的人员及环境工程、工业通讯等专业的大、中专院校师生阅读。

# 目 录

<b>第 1 章 大气污染控制技术基础</b> .....	1
1.1 大气污染控制技术概论 .....	1
1.1.1 大气构成 .....	1
1.1.2 大气污染 .....	3
1.1.3 大气污染控制概论 .....	7
1.2 烟尘控制技术基础 .....	10
1.2.1 烟尘的定义 .....	11
1.2.2 烟尘控制技术概述 .....	12
1.3 气态污染物控制技术基础 .....	14
1.3.1 气体吸收 .....	14
1.3.2 解吸(脱吸) .....	23
1.3.3 吸收设备选择的基本原则 .....	24
1.3.4 气体吸附 .....	26
1.3.5 燃烧法 .....	41
1.3.6 冷凝法 .....	58
<b>第 2 章 除尘技术</b> .....	61
2.1 除尘技术特点及分类 .....	61
2.1.1 除尘装置分类 .....	61
2.1.2 除尘装置的性能 .....	61
2.1.3 除尘装置分类 .....	62
2.2 机械式除尘器 .....	62
2.2.1 重力沉降室 .....	63
2.2.2 惯性除尘器 .....	66
2.2.3 旋风除尘器 .....	70
2.3 湿式除尘器 .....	77
2.3.1 湿式除尘原理 .....	79
2.3.2 水膜除尘器 .....	83

2.3.3	文丘里除尘器 .....	93
2.3.4	自激喷雾除尘器 .....	98
2.3.5	喷淋除尘器 .....	104
2.3.6	板式塔除尘器 .....	104
2.3.7	湿式除尘的脱水装置 .....	107
2.4	电除尘器 .....	108
2.4.1	电除尘器分类 .....	109
2.4.2	电除尘原理 .....	112
2.4.3	电除尘器的结构 .....	119
2.4.4	电除尘器选型 .....	126
2.4.5	电除尘器的应用 .....	128
2.5	过滤式除尘器 .....	131
2.5.1	过滤除尘原理 .....	131
2.5.2	过滤除尘器性能 .....	134
2.5.3	袋式除尘器 .....	138
2.5.4	颗粒层除尘器 .....	156
2.6	除尘器的选择和维护 .....	163
2.6.1	除尘器的选择 .....	163
2.6.2	除尘器的维护 .....	165
2.7	除尘高新技术及发展趋势 .....	167
2.7.1	高效除尘器的发展 .....	167
2.7.2	高梯度磁分离技术 (HGMS) 在烟气除尘中的应用 .....	171
2.7.3	高频声波助燃除尘新技术 .....	171
<b>第3章</b>	<b>二氧化硫控制技术 .....</b>	<b>173</b>
3.1	脱硫技术基础 .....	173
3.1.1	SO <sub>2</sub> 的性质 .....	173
3.1.2	硫氧化合物的生成机理 .....	174
3.2	燃烧前脱硫技术 .....	177
3.2.1	燃煤脱硫的物理方法 .....	177
3.2.2	燃煤脱硫的化学方法 .....	182
3.2.3	煤的其他脱硫方法 .....	184
3.2.4	其他燃料脱硫 .....	187
3.3	燃烧中脱硫 .....	188

3.3.1	型煤固硫 .....	189
3.3.2	流化床燃烧脱硫技术 .....	193
3.3.3	炉内喷钙脱硫技术 .....	196
3.4	烟气脱硫技术及装置 .....	204
3.4.1	石灰石-石灰湿法 .....	205
3.4.2	双碱法 .....	215
3.4.3	氨法 .....	218
3.4.4	喷雾干燥法 .....	225
3.4.5	海水烟气脱硫技术 .....	228
3.4.6	金属氧化物吸收法 .....	234
3.5	脱硫高新技术及发展趋势 .....	236
3.5.1	国外脱硫技术进展 .....	236
3.5.2	我国脱硫技术现状 .....	238
3.5.3	我国烟气脱硫技术研究开发进展 .....	240
3.5.4	我国脱硫技术发展方向 .....	243
<b>第4章</b>	<b>氮氧化物控制技术 .....</b>	<b>244</b>
4.1	氮氧化物控制技术特点及分类 .....	244
4.1.1	氮氧化物性质 .....	244
4.1.2	氮氧化物生成机理 .....	246
4.1.3	氮氧化物控制技术特点及分类 .....	257
4.2	氮氧化物燃烧控制技术 .....	259
4.2.1	空气分级燃烧技术 .....	259
4.2.2	燃料分级(或再燃)燃烧法 .....	262
4.2.3	烟气再循环燃烧技术 .....	265
4.2.4	其他类型的低NO <sub>x</sub> 燃烧器 .....	267
4.3	炉膛喷射脱硝技术 .....	270
4.3.1	选择性催化还原(SCR)脱硝 .....	271
4.3.2	非选择性催化还原(SNCR)脱硝 .....	274
4.4	湿法烟气脱硝技术 .....	276
4.4.1	稀硝酸吸收法 .....	277
4.4.2	氨-碱溶液两级吸收法 .....	280
4.4.3	碱-亚硫酸铵吸收法 .....	281
4.4.4	硝酸氧化-碱液吸收法 .....	284



4.4.5	尿素还原法 .....	287
4.4.6	液相络合吸收法 .....	289
4.4.7	分子筛吸附 .....	289
4.4.8	活性炭吸附法 .....	292
4.5	机动车尾气污染控制技术 .....	295
4.5.1	燃料改进和替代 .....	296
4.5.2	机内净化 .....	297
4.5.3	机外净化 .....	302
4.6	氮氧化物控制高新技术及发展趋势 .....	306
4.6.1	膜技术及电化学方法在烟气脱硫脱硝中的应用 .....	306
4.6.2	高能辐射-化学法烟气脱硫脱硝 .....	309
4.6.3	脱硫脱硝一体化技术 .....	311
4.6.4	微生物法脱氮 .....	316
<b>第5章</b>	<b>其他气态污染物治理技术 .....</b>	<b>320</b>
5.1	有机废气治理技术 .....	320
5.1.1	有机废气的来源及危害 .....	320
5.1.2	净化方法及选择 .....	321
5.1.3	常见的净化工艺及流程 .....	322
5.2	恶臭治理技术 .....	333
5.2.1	恶臭的来源 .....	333
5.2.2	恶臭的治理 .....	334
5.3	硫化氢废气治理技术 .....	338
5.3.1	干法治理技术 .....	341
5.3.2	湿法治理技术 .....	344
5.3.3	净化尾气回收硫磺的克劳斯法 .....	349
5.4	含氟废气治理技术 .....	350
5.4.1	湿法 .....	350
5.4.2	干法 .....	353
5.5	酸雾治理技术 .....	353
5.5.1	丝网除雾器 .....	354
5.5.2	折流式除雾器 .....	356
5.5.3	离心式除雾器 .....	357
5.6	含铅废气的治理 .....	358

5.6.1 铅污染的来源与危害 .....	358
5.6.2 含铅烟气的治理 .....	360
5.7 生物技术气态污染物治理中的应用及发展趋势 .....	365
5.7.1 生物法净化气态污染物原理 .....	366
5.7.2 生物法治理气态污染物的应用及发展趋势 .....	367
主要参考文献 .....	372

# 第 1 章 大气污染控制技术基础

## 1.1 大气污染控制技术概论

大气污染不是一个新问题，从工业革命大量使用煤作为能源开始，大气污染就已存在。300 多年前著名的科学家和日记作家约翰·伊凡林在一本名为《驱逐烟气》的小册子中描述了伦敦的大气污染，以及烧煤引起的空气污染及所造成的危害：日照减少、呼吸道疾病增加、降尘、材料腐蚀等。但由于当时全球的大气污染问题还不严重，没有引起足够重视。到了 20 世纪，一些著名的大气污染事件相继发生，全球的大气污染问题日益严重，大气污染所造成的危害也逐步得到了科学证明，大气污染问题才日益受到各国政府和民众的重视，并成为全球普遍关注的重大环境问题。

### 1.1.1 大气构成

地球被一层混合气体包围着，它们主要由氮和氧组成，统称为大气层或大气圈，简称为大气。大气受地心引力的作用，在地球表面作各种运动，大气在地表附近的密度最大，随高度的增加迅速变稀薄。大气的结构见图 1-1。

未经污染的大气 99.9% 由  $N_2$ 、 $O_2$  和 Ar 组成，其他气体含量很少。干洁大气中各种气体的临界温度都是很低的，如  $N_2$  的临界温度  $-147.2^\circ\text{C}$ ，氧为  $-118.9^\circ\text{C}$ ，氩为  $-122.0^\circ\text{C}$ 。在自然界的情况下，不能达到这样低的温度，因此这些气体在大气圈中永远不会液化，所以大气中的主要组成部分总是保持为气体状态。大气的总质量近似值可以通过以下方法估算：标准大气压力  $p = 1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ ，地球平均半径  $r = 6.37 \times 10^6 \text{m}$ ，重力加速度  $g = 9.8 \text{m/s}^2$ ，所以大气圈的大气总质量估算为  $4\pi r^2 p / g = 5.3 \times 10^{18} \text{kg}$ 。但由于 29% 的大陆平均高度高出海面 1km，所以这个数值高估了 3%，大

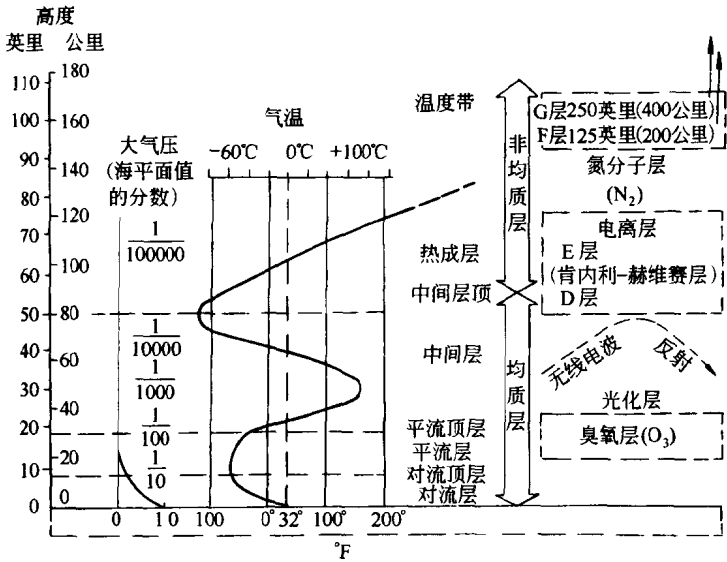


图 1-1 大气结构

气总质量约为  $5.1 \times 10^{18}$  kg。

按照分子组成，大气可分为两大层次：均质层和非均质层。均质层为从地表至 90km 的大气层，除了水汽有较大波动之外，其组成是均一的，是大气低层的风连续湍流运动的结果。非均质层可分为四个明显层次：氮层（90 ~ 200km）、原子氧层（200 ~ 1100km）、氦层（1100 ~ 3200km）和氢层（3200 ~ 9600km）。非均质层的质量虽然只有大气质量的 0.01%，但对地球上的生物起着十分重要的作用。非均质层能将太阳光的高能部分过滤掉，是向上扩散的污染物的强氧化室，同时人们还利用它传播和反射无线电波。按照气象学分类，大气可分为对流层、平流层、中间层和热成层。

### (1) 对流层

对流层是大气的最下层，厚度为 8~17km，随纬度和季节的变化而变化。对流层最大的特点是空气垂直运动明显，同时由于温度、湿度水平分布不均匀，也出现水平运动，主要的天气现象都发

生在对流层。

对流层中，由于地表高低起伏的影响可分为两层：低层大气和自由大气。低层大气在 1000~2000m 以下，受地面影响最大，机械作用和热力作用表现最强烈，通称扰动层、摩擦层、机械混合层或行星边界层。在低层大气中含有大量水汽和尘埃，云和雾在此层发生，进入大气中的污染物质绝大部分在此层活动。自由大气中发生主要的天气过程，如大气的波动、对流的发展和降水的形成均出现在该层，地面气流运行和天气变化受自由大气的控制。

### (2) 平流层

在对流层之上，温度向上降低的速率迅速减少，气温渐趋于稳定，在约 32km 的高度，气温开始有轻微上升。对流层和平流层之间的过度区称为对流层顶。

平流层代表性特点是：气温在  $-50\sim-68^{\circ}\text{C}$  之间，没有空气对流，气温稳定，因此平流层中的扩散十分缓慢，如硝酸盐微粒停留的时间估计为两年，超音速飞机在平流层中飞行排出的氮氧化物与臭氧层迅速反应，降低了大气遮蔽波长小于 300nm 的紫外线的的能力。

### (3) 中间层

中间层的温度随高度增加而上升，在大气层高度达到 48km 以后温度才开始下降，至中间层顶，气温在  $-73^{\circ}\text{C}$  以下。中间层会出现夜光云。

### (4) 热成层

热成层中，温度轮廓线由中间层折入，不断上升。热成层中空气十分稀薄，分子和原子获得很高动能，因此形成高“温”，不过实际热量十分小，声波在此层不能传播，空气处于高度电离状态，亦称为电离层。

## 1.1.2 大气污染

人类的生活、生产活动和自然界中局部的质能转换向大气排放各种污染物，当污染物超过环境所能允许的极限（环境容量）时，大气质量就会恶化，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，这种现象就是大气污染。

在现代工业密集的区域和人口密集的城市，在大气条件适合的情况下，大气污染会导致灾难性的事件，如历史上发生在 1952 年 12 月 5 日至 9 日的伦敦雾事件。

#### 1.1.2.1 大气污染源

大气污染物的起点总是某种污染源，通常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、设备和场所等，主要分为两大类——自然排放源和人为排放源，污染物可能是气态的，也可能是颗粒状的。自然界产生的污染物主要来自大风刮起的地面沙尘；火山喷发出的灰、二氧化硫等；森林火灾产生的大量二氧化碳、二氧化氮、二氧化硫及一些碳氢化合物等。人为污染排放源一般有以下 3 种。

##### (1) 生活污染源

由于人们烧饭、取暖、沐浴等生活上的需要，燃烧矿物燃料，从而向大气排放烟尘造成的大气污染的污染源，如炉灶、锅炉等。

##### (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大气污染的污染源，称为工业污染源。

##### (3) 交通运输污染源

交通工具排放尾气所造成的大气污染，称为交通污染源，这种污染源是移动污染源。

在我国大气环境中，具有普遍影响的大气污染物主要来自工业污染源：燃料、物料加工和输送、工艺和贮存器泄漏与蒸发、通风排气以及颗粒物粉碎工艺过程。

#### 1.1.2.2 主要大气污染物

##### (1) 颗粒物

颗粒物是指悬浮在大气中的固体和液体气溶胶，它们起始于凝聚过程或是扩散过程（腐蚀、粉碎、喷射等）。虽然“烟”通常

表示颗粒物质、烟气、气体和雾的混合物，但它恰好是指的固体（或固体和液体）凝聚气溶胶。“尘”系指固体气溶胶，而“雾”则指液体气溶胶。表 1-1 表现的是大气微粒的特性。

表 1-1 大气微粒的特性

粒径大小/ $\mu\text{m}$	名称	主要性质	沉降速度
小于 0.1	Aitken	燃烧气溶胶	小于 $8 \times 10^{-7} \text{m/s}$
0.1~1	大微粒	燃烧产物和光化学气溶胶	居中
大于 1	巨大微粒	自然和工业粉尘	大于 $4 \times 10^{-5} \text{m/s}$

表 1-1 所列出的微粒在空气中的质量占大部分为“大的”和“巨大的”两种微粒。巨大微粒主要产生于扩散过程，而大部分小微粒是燃烧过程产生的。颗粒在大气中的行为受到多种因素的影响，一般来说大颗粒靠重力沉降就可以从大气中分离出来，但对于小微粒而言，其运动类似于规则的分子运动，可以在空气中飘留很长时间。

颗粒物质的影响之一是大气中的颗粒能散射和吸收阳光，减弱物体的光并照亮空气，从而降低能见度，其后果是城市比农村所接受的太阳辐射少 15%~20%，阳光减少量在夏季可高至三分之一，冬季达三分之二。能见度减小，从审美观点来讲是不理想的，而且对飞机和机动车辆也是危险的。

颗粒物的影响之二是对物质的危害，包括空气潮湿时对金属的腐蚀、侵蚀和玷污建筑物、雕塑品、油漆表面、衣着服装以及对电子设备的腐蚀和损害，特别是通过对电接点发生化学和机械作用而产生的危害尤其严重，这些问题很多是由从空气中沉降下来的颗粒引起的。

颗粒物质的影响之三是对动物和人类的毒性作用：a. 由化学和物理特性决定的内在毒性；b. 对呼吸道清理机制的干扰；c. 由于吸附了毒物带来的毒性，包括金属尘、石棉和芳香烃。虽然它们的浓度一般是极小的，但它们对城市的癌症高发病率可能有影响，甚至在清除了城市大量烟雾后，城市的癌症发病率也比农业地区

高。许多研究表明，颗粒物浓度越高死亡率和发病率也越高。呼吸道疾病，特别是气管炎和肺气肿等慢性病，同颗粒物浓度的关系最为明显，在年几何平均浓度少到  $80\mu\text{g}/\text{m}^3$  的情况下，就曾观察到对健康的不良影响。在这些研究中，浓度较高的颗粒物常常与浓度较高的二氧化硫联合在一起，而把这两种污染物的影响分开却很不容易。

### (2) 硫氧化物

硫氧化物主要是二氧化硫 ( $\text{SO}_2$ )，是无色不易燃的气体，产生危害的原因主要是转化成反应性高的硫酸造成的，可使建筑材料（尤其是石灰石、大理石、石板瓦和灰浆）以及雕塑褪色和变质。在受  $\text{SO}_2$  污染的大气中，多数金属特别是铁、铜和锌的腐蚀过程加快，而且颗粒物、湿度和高温能起很大的协同作用； $\text{SO}_2$  还会使纤维（如棉、尼龙和人造丝）、皮革和纸张变质和褪色；油漆的干燥时间、脆性、光泽甚至颜色也受到影响。

### (3) 氮氧化物

在城市地区，氮氧化物的污染主要是由机动车辆排气引起的，其中机动车辆尾气中氮氧化物的主要形式是一氧化氮 ( $\text{NO}$ ) 和二氧化氮 ( $\text{NO}_2$ )。这些氮氧化物排放到大气中以后，会在光催化作用下形成气溶胶，产生光化学烟雾污染。另外，氮氧化物在大气中会转变生成硝酸盐微粒，使金属产生腐蚀，氮氧化物还能使纺织品染色和添加剂褪色，使棉花和尼龙变质。

### (4) 碳氢化合物

碳氢化合物主要指有机烃类，包括直链烃和环状烃。直链烃可以是饱和烃和不饱和烃，环状烃则包括碳原子环。较轻的烃在常温下是气体，如甲烷和丙烷；较重的烃如自然界产生的石油是液体，有的碳氢化合物还具有很强的挥发性（如苯）。气体和挥发性碳氢化合物是特别重要的大气污染物。碳氢化合物特别引起人们的注意是由于它们是大气中形成光化学烟雾和光化学氧化剂的罪魁祸首之一。

### (5) 一氧化碳



一氧化碳 (CO) 是无色、无味、无臭的气体, 人不易戒备, 产生于含碳物质的不完全燃烧, 而且是排放量最大的空气污染物。CO 在大气中可被氧化成  $\text{CO}_2$ , 但氧化速度缓慢, CO 和  $\text{O}_2$  混合物在阳光照射下若干年几乎保持不变, 但 CO 在大气中停留的时间至多只有几个月, 存在着某些消失的过程, CO 或为某些物体的表面所吸附和氧化, 或为植物和动物利用而消失, 或与光化学过程和催化, 土壤也能从大气中消除大量 CO。

#### (6) 其他污染物

除了上述主要的大气污染物之外, 还有一些别的大气污染物, 在某些局部区域可能是大气污染总负荷中的重要组成。排放量较少的大气污染物有: 地面扬尘、喷雾器产生的气溶胶和蒸汽、汽车轮胎的橡胶颗粒、香烟的烟、香料和香水产生的有机化合物、卫生球挥发的萘等。还有一类大气污染物是大气中能引起过敏症的东西, 如花粉和草籽。工业生产过程中还会产生一些特殊的空气污染物——如硫酸、氯化氢、甲醛、各种醇和许多其他标志着我们这个技术社会的高级化合物, 典型的化合物是制冷剂——氟里昂。

### 1.1.3 大气污染控制概论

大气污染可能起始于重工业区居民对某些不良现象的感知, 如可见度、气味、破坏迹象、健康症状以及对颗粒物的感触等。图 1-2 表示了大气污染链。

在图 1-1 中以虚框表示的是可供选择的污染源控制方法, 如法律法规、行政手段以及广泛采用的技术手段, 但不一定都予以采用, 但通过改变工艺过程、原料、生产率或能源种类等技术措施是可以做到的。

以技术为基础, 采用某种控制工艺或装置, 总能防止或减少污染物排放。潜在污染物可被回收、出售, 也可排放到陆地或水体中。控制工艺还可使污染物分解, 改变其化学性质或物理性质, 使其无害化, 至少可减少有害程度。

排放方法有时可作为大气扩散控制手段。烟囱足够高时, 具有良好的稀释作用, 能避开建筑物周围气流的影响, 有助于控制近距