

环境保护知识丛书 



工业烟气净化

(第二版)

台炳华 编著
冶金工业出版社

工业烟气净化
(第二版)

冶金工业出版社



全国“星火计划”丛书

环境保护知识丛书

工业烟气净化

(第二版)

台炳华 编著

北京

冶金工业出版社

1999

内 容 提 要

本书系环境保护知识丛书之一，重点介绍烟气净化的实用技术，同时适当介绍一些新技术。本书前两章简要阐述空气和混合气体的物理性质及其基本净化方法的原理。第三章至第八章分别介绍常用的净化设备以及主要气态污染物的性质、危害和净化方法。

本书可供具有中等文化程度的环境保护管理干部和技术人员阅读，也可作为环境保护人员的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

工业烟气净化/台炳华编著. —2版. —北京:冶金工业出版社,1999.1
(环境保护知识丛书)
ISBN 7-5024-2268-4

I. 工… I. 台… III. 工业-烟气-净化 IV. X511

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 26864 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)
责任编辑 许晓海 美术编辑 熊晓梅 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
1999 年 1 月第 2 版,1999 年 1 月第 2 次印刷
850mm×1168mm 1/32;4.375 印张;114 千字;129 页;4601-8600 册
9.50 元

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

《全国“星火计划”丛书》编委会

顾 问：杨 浚

主 任：韩德乾

第一副主任：谢绍明

副 主 任：王恒璧 周 谊

常务副主任：罗见龙

委 员(以姓氏笔画为序)：

向华明 米景九 达 杰 (执行)

刘新明 应曰珪 (执行) 陈春福

张志强 (执行) 张崇高 金 涛

金耀明 (执行) 赵汝霖 俞福良

柴淑敏 徐 骏 高承增 蔡盛林

序

经党中央、国务院批准实施的“星火计划”，其目的是把科学技术引向农村，以振兴农村经济，促进农村经济结构的改革，意义深远。

实施“星火计划”的目标之一是，在农村知识青年中培训一批技术骨干和乡镇企业骨干，使之掌握一、二门先进的适用技术或基本的乡镇企业管理知识。为此，亟需出版《全国“星火计划”丛书》，以保证教学质量。

中国出版工作者协会科技出版工作委员会主动提出愿意组织全国各科技出版社共同协作出版《全国“星火计划”丛书》，为“星火计划”服务。据此，国家科委决定委托中国出版工作者协会科技出版工作委员会组织出版《全国“星火计划”丛书》，并要求出版物科学性、针对性强，覆盖面广，理论联系实际，文字通俗易懂。

愿《全国“星火计划”丛书》的出版能促进科技的“星火”在广大农村逐渐形成“燎原”之势。同时，我们也希望广大读者对《全国“星火计划”丛书》的不足之处乃至缺点、错误提出批评和建议，以便不断改进提高。

《全国“星火计划”丛书》编委会

1987年4月28日

第二版前言

环境问题与资源、人口问题已被国际社会公认为是影响 21 世纪可持续发展的三大关键问题。随着二十几年来我国经济的高速发展和人民生活水平的不断提高，污染物排放量迅速增加，环境污染已成为制约我国经济与社会的进一步发展及人民生活与健康水平进一步提高的重大因素。我国早将保护环境确定为一项基本国策，并制订了经济建设、城乡建设和环境建设同步规划、同步实施、同步发展，实现经济效益、社会效益和环境效益相统一的方针。近年来，我国人民的环境意识普遍提高，保护、治理、改善环境的重要性已得到全社会的共识，环保工作者更是责无旁贷。因此，广大环保管理工作、环保技术人员和技术工人，以及社会各界人士有必要进一步了解学习和掌握环境保护的基础知识和基本技能，本丛书正是为适应这一需要而编写的。

本丛书第一版出版于 80 年代，出版后受到了广泛好评。由于近几年来环保理论与技术又有了新的发展，有关法规与标准也有所修改，为此，我们对丛书作了必要的修订。本丛书属于技术普及性读物，在内容上力求做到理论与技术相结合，理论与实际相结合，并重在实际应用，尽可能回答生产实践中经常遇到的种种问题；在编写风格上，则尽可能做到语言简练，深入浅出，概念明确，内容翔实。全套丛书包括八个方面：环境工程入门、工业烟气净化、除尘装置与运行管理、工业废水处理、固体废物的处理与利用、工业噪声与振动控制、环境污染物监测，以及环境监测仪器使用与维护。

参加本丛书编写与再版修订工作的有（以姓氏笔画为序）：王檣、台炳华、张殿印、陈康、陈尚芹、易洪佑、徐世勤、黄西谋、崔志激、梁泽斌、董保澍。丛书由张殿印、陈康总编。

1998 年 8 月

目 录

第一章 空气污染和治理概述.....	(1)
第一节 空气和混合气体的性质.....	(1)
第二节 大气污染及防治措施.....	(5)
第三节 烟气净化技术发展概况	(10)
第二章 气体净化原理	(13)
第一节 吸收净化法原理	(13)
第二节 吸附净化法原理	(20)
第三节 催化净化法原理	(30)
第三章 净化装置	(35)
第一节 吸收法净化装置	(35)
第二节 吸附法净化装置	(44)
第三节 催化反应器	(47)
第四章 排烟脱硫方法	(50)
第一节 石灰和石灰石法	(52)
第二节 氨水吸收法	(55)
第三节 碱金属法	(58)
第四节 带反应的干式吸附法	(61)
第五节 活性炭吸附法	(64)
第五章 含氟烟气的净化与回收	(67)
第一节 磷肥工业含氟烟气的净化与回收	(69)
第二节 铝电解含氟烟气的净化与回收	(75)
第六章 氮氧化物控制	(85)
第一节 改善燃烧方法减少氮氧化物排放量	(87)
第二节 湿法吸收净化	(89)
第三节 干法净化	(93)
第七章 有机气体净化	(99)

第一节	碳氢化合物和有机溶剂蒸气的处理	(99)
第二节	沥青烟净化	(107)
第三节	除臭	(110)
第八章	其他有毒气体净化	(116)
第一节	硫化氢气体净化	(116)
第二节	氯气净化	(122)
第三节	汞蒸气净化	(124)
附录	(127)

第一章 空气污染和治理概述

空气是所有生物生存的必需物质之一，人不呼吸空气生命即将停止，地球上能量的流动和食物链的结构也都与空气密切相关。可是，随着大规模的工业生产和交通运输的发展，一些城市和工业区的空气受到了严重的污染，居民由于呼吸了污浊的空气而患上各种疾病，生物的生长也受到了影响。因此，为了保护大气环境，必须控制人为的空气污染，以保障人民身体健康和保持生态平衡。

第一节 空气和混合气体的性质

无论是研究大气污染，还是研究烟气净化，都需要掌握有关空气和混合气体性质的一般知识。

一、空气的性质

按体积计算，空气的主要组成为：

氮	78.8%
氧	20.7%
二氧化碳	0.03%
臭氧、氩	1.0% (波动变化)
水蒸气	0.47% (波动变化)
氦、氖、氦、氙	微量

除此之外，空气中还含有无机、有机化合物和微生物等。

含水蒸气的空气称为湿空气，除水蒸气和杂质之外，其余部分称为干空气。空气中水蒸气含量多少与气候有关，能影响空气的物理性质。因此，研究空气的性质就要阐明湿空气的含湿量、密度、比热容、焓与温度、压力之间的基本关系。

众所周知，在大气压力和一定温度下，1kg 空气含有最大的水

蒸气量称为饱和含湿量。如果同一条件下，空气中含湿量超过饱和含湿量，则超过部分就以水雾状态存在。在一定大气压力下，空气饱和含湿量随着空气温度提高而增加，在一定温度下，空气饱和含湿量随大气压力提高而减少。

湿空气的大气压力 p 等于干空气的分压力 p_1 与水蒸气分压力 p_2 之和，即

$$p = p_1 + p_2 \quad (1-1)$$

1m^3 湿空气含有的水蒸气量称为绝对湿度 Z (g/m^3)。

通常工程上所用的空气含湿量 d 是指 1kg 干空气含有水蒸气的量，以 g 表示，可按下列公式求得

$$d = 622 \frac{p_2}{p - p_1} \quad (1-2)$$

经常使用的则是相对湿度 ϕ ，它表示在一定温度和大气压力下，空气绝对湿度 Z 与 1m^3 空气饱和含湿量 $Z_{\text{饱}}$ 之比，并以百分数表示，

$$\phi = \frac{Z}{Z_{\text{饱}}} \approx \frac{p}{p_{\text{饱}}} \quad (1-3)$$

干空气的密度，在标准大气压 ($p=101325.32\text{Pa}$) 下，仅随温度不同而变化，其关系为

$$\rho_{\text{干}} = \frac{1.293}{1 + \frac{1}{273}t} \quad (1-4)$$

式中 1.293 —— 0°C 时，干空气的密度， kg/m^3 ；

t ——温度， $^\circ\text{C}$ 。

湿空气的密度比干空气密度小，可按下列公式计算

$$\rho_{\text{湿}} = \rho_{\text{干}} - 0.0129 \frac{\phi p_{\text{饱}}}{T} \quad (1-5)$$

湿空气的比热容在常温下的计算公式为

$$c_{\text{湿}} = \frac{1.005 + 1.926 \frac{d}{1000}}{1 + \frac{d}{1000}} \quad (1-6)$$

式中 1.005——干空气比热容, kJ/(kg·K);

1.926——水蒸气比热容, kJ/(kg·K)。

湿空气的焓是按 1kg 干空气和 $\frac{d}{1000}$ kg 水蒸气计算的

$$I = 1.005t + (1.926t + 2491.15) \frac{d}{1000} \quad (1-7)$$

式中 2491.15——温度为 0℃ 时水蒸气的汽化潜热。

二、混合气体的性质

在烟气净化工程中经常遇到的是混合气体, 例如锅炉燃烧的烟气、冶炼炉及各种工业炉窑的烟气等。组成混合气体的各种成分都可看成是理想气体, 混合气体也按理想气体计算。

对于由几种成分组成的混合气体, 各成分的分压力为 $p_1, p_2, p_3 \cdots p_n$, 则混合气体的总压力等于各分压力之和, 即

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \cdots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i \quad (1-8)$$

这个关系式称为道尔顿定律。根据这个定律可以推导出混合气体的总体积, 它等于各成分体积之和, 即

$$v = v_1 + v_2 + v_3 + \cdots + v_n = \sum_{i=1}^n v_i \quad (1-9)$$

在实际计算中经常给出混合气体各种成分的质量百分数和体积百分数。

混合气体质量为 m , 各成分的质量为 m_1, m_2, \cdots, m_n 。并以 m_i 表示每种成分的质量百分数, 则

$$\sum_{i=1}^n m_i = \frac{m_1 + m_2 + \cdots + m_n}{m} = 1 \quad (1-10)$$

同样, 混合气体的各种成分的体积百分数以 γ_i 表示, 则

$$\sum_{i=1}^n \gamma_i = \frac{v_1 + v_2 + \cdots + v_n}{v} = 1 \quad (1-11)$$

混合气体的密度、比容、平均相对分子质量和气体常数均可以假设为一种单纯气体的, 通过计算求得假想的单纯气体的各项数值。这种替代在计算上非常方便。

混合气体的计算公式见表 1-1。

表 1-1 混合气体计算公式表

成分表示法	表示法换算	混合气体密度	混合气体比容
质量百分数 m_i	$\gamma_i = \frac{\frac{m_i}{\mu_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\mu_i}}$	$\gamma = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\gamma_i}}$	$V = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\gamma_i}$
体积百分数 γ_i	$m_i = \frac{\gamma_i \mu_i}{\sum_{i=1}^n \gamma_i \mu_i}$	$\gamma = \sum_{i=1}^n \gamma_i \gamma_i$	$V = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \gamma_i \gamma_i}$
成分表示法	平均分子量	气体常数	分 压 力
质量百分数 m_i	$\mu = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\mu_i}}$	$R = \sum_{i=1}^n m_i R_i$	$p_i = g_i p \frac{R_i}{R}$
体积百分数 γ_i	$\mu = \sum_{i=1}^n \gamma_i \mu_i$	$R = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\gamma_i}{R_i}}$	$p_i = \gamma_i p$

混合气体的比热容是各种成分气体都升高 1℃ 时所需热量的总和。因为气体比热是随温度变化的，因此下式表示的混合气体比热容是从温度 t_1 到 t_2 的平均比热容。

$$c = \sum_{i=1}^n m_i c_i \quad (1-12)$$

混合气体的平均体积比热容为

$$c = \sum_{i=1}^n \gamma_i c_i \quad (1-13)$$

混合气体的焓为各种成分气体的焓之和，即

$$I = \sum_{i=1}^n m_i c_i t \quad (1-14)$$

第二节 大气污染及防治措施

某些物质进入大气或水体中对人类和生态平衡产生不良影响，这些物质被认为是污染物。引起大气污染的物质，按其来源可分为两大类：其一来自自然界，如狂风席卷的沙土，火山爆发喷出的灰烬和二氧化硫，森林大火产生的二氧化碳、氮氧化物、二氧化硫和碳氢化合物，雷电产生的臭氧等；其二来自人类活动，包括生产和生活所产生的气体。

有毒气体可按无机物和有机物进行分类。

无机污染物有：

- (1) 硫化物：二氧化硫、三氧化硫、硫化氢。
- (2) 碳的氧化物：一氧化碳、二氧化碳。
- (3) 氮氧化物：氧化亚氮、氧化氮、二氧化氮等。
- (4) 卤素及卤化物：氟化氢、氯化氢、氯、氟、四氯化硅。
- (5) 光化学产物：臭氧、光化学氧化剂。
- (6) 氰化物：氰化氢。
- (7) 铵化合物：氨。

有机污染物有：

- (1) 碳氢化合物，即
 - 1) 烷烃：甲烷、乙烷、辛烷。
 - 2) 烯烃：乙烯、丁二烯。
 - 3) 炔烃：乙炔。
 - 4) 芳香烃：苯、甲苯、苯并芘。
- (2) 脂族氧化合物，即
 - 1) 醛类：甲醛。
 - 2) 酮类：丙酮。
 - 3) 有机酸类。
 - 4) 醇类；
 - 5) 有机卤化物：氯化氰、溴苯甲腈。
 - 6) 有机硫化物：二甲硫。

7) 有机氢过氧化物：过氧酰基亚硝酸盐或过氧酰基硝酸盐 (PAN)。

根据有关资料统计，全世界每年向大气中排放的主要有毒气体总量为：

二氧化硫	1.46~1.50 亿 t
一氧化碳	2.57 亿 t
二氧化碳	154 亿 t
氮氧化物	0.53 亿 t
碳氢化合物	0.88 亿 t
硫化氢	0.03 亿 t

还有氟化物、氯气和氯化氢气体排放量亦很大。这些有毒气体的危害各不相同（其危害将在有关章节中分别说明）。特别值得指出的是二次污染愈来愈受到人们的重视。研究证明，大气中的一氧化氮与氧分子化合生成二氧化氮，二氧化氮在太阳光紫外线照射下，分离出游离氧离子。游离氧的活性强，能与大气中氧结合成臭氧。臭氧的氧化性极强，能将大气中的碳氢化合物氧化成甲醛、乙醛、丙烯醛与酮类等一系列有机含氧化合物，最后生成过氧酰基硝酸酯。所有这些反应加上大气中的水蒸气，在特定条件下就构成了浅蓝色的光化学烟雾。

光化学烟雾对人体有很大的刺激和毒害作用。光化学烟雾浓度（以臭氧浓度计）为 $(0.2\sim0.6)\times 10^{-6}$ 时，人接触 3~6h 后，视力会降低；浓度为 $(1\sim2)\times 10^{-6}$ 时，人接触 2h，就会感到头痛、胸痛、肺活量减小而慢性中毒；浓度为 $(5\sim10)\times 10^{-6}$ 时，全身就会疼痛，开始出现麻痹症和肺水肿病；当浓度为 $(10\sim20)\times 10^{-6}$ 时，小动物接触 2h 即会死亡；当浓度达到 50×10^{-6} 时，人接触 1h 内，就可能死亡。

光化学烟雾对植物也有严重的危害。当浓度为 0.05×10^{-6} 时，植物会受到损害；当浓度为 0.11×10^{-6} 时，烟草 100% 发病；当达到 0.165×10^{-6} 时，烟草严重受害。

另外，各国都非常重视酸雨问题。联合国环境规划署

(UNEP)发表的内罗毕宣言中指出：“酸雨等大气污染正在成为人类环境更严重的威胁。”酸雨是降雨时水滴吸收了一次污染物（如 SO_2 、 NO_x 和 HCl 等）以及二次污染物（如 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、乙醛类和过氧化物）而形成的。从酸雨的检验分析结果来看，其中含有阴离子 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 以及阳离子 H^+ 、 NH_4^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} ，它们的比例都比较高。由酸雨的主要污染物质组成，也可看出其形成的原因。

目前衡量酸雨的指标是pH值。雨水与大气中碳酸气保持平衡的pH值为5.6~5.7。因此pH值低于5.6的雨水称为酸雨。酸雨是大气污染的结果，由于雨水的传递作用，其影响波及到土壤和水圈。酸雨的危害因当地条件不同而有差异，例如日本大气污染程度已超过北欧、北美，雨水的污染也像北欧、北美一样不断地发展，但是日本没有出现类似北欧、北美那样的森林受害和水资源受害的情况。

酸雨问题尚未被人们完全认识，酸雨的形成、影响和解决对策，是当前环境污染研究的中心课题之一。

在经济发展的不同阶段，各种污染源对大气污染所造成的影响也不相同。以美国为例，汽车运输造成的污染占60.6%，工业生产占16.2%，发电站占14.1%，供暖占5.6%，垃圾焚烧占3.5%。参考这些基本数据，可以有计划地研究开发急需解决的污染控制技术。

我国在控制大气污染方面采取了综合防治措施，取得了不少的经验。这些综合防治措施可归纳为下列几个方面：

(1) 改革工艺和设备。首先考虑采用无害工艺和改革设备结构，使之不产生或少产生污染物质。例如，钢铁工业中炼焦生产，以干法熄焦代替湿法熄焦，这不仅从根本上解决了烟尘对大气污染和废水排放的问题，而且还可以回收余热用于发电。过去氯乙烯生产采用的是乙炔与氯化氢在催化剂氯化汞作用下的加成反应，现在则大力推广应用以乙烯为原料的氧氯化法，以避免汞污染，并减少氯化氢的排放量。氯碱厂液氯工段用冷却法液化时，必

须排放一部分惰性气体，其中含有一定数量氯气，造成大气污染。有些工厂以吸收和解吸方法代替冷却法，从而减少了污染。

(2) 对燃料进行选择和处理以及改善燃烧方法。我国煤炭生产已有一定的洗煤能力。民用炉灶和没有脱硫设备的工厂，燃烧低硫、低灰分煤将对环境保护起到很大作用。许多发达国家为了达到燃料低硫化，正在推进煤的气化和液化以及重油脱硫的技术开发。国内针对民用锅炉和中小型采暖锅炉燃烧型煤做了不少工作，取得了很好的效果。燃烧型煤不仅可以降低二氧化硫和烟尘的排放量，还可以提高燃烧效率，节约大量燃料。

(3) 开发废气净化回收新工艺，化害为利，综合利用。化害为利，综合利用是我国治理环境污染的方针。一般说来，排放的有毒气体都是有价值的生产原料。可是由于排放的废气量大、浓度低(与原料气相比)，净化回收在技术经济上有一定困难，因此，废气往往被排放掉。生产设备的密闭操作或采用新的废气净化回收工艺流程可为综合利用创造有利条件。例如冶炼厂回收二氧化硫废气制硫酸已取得明显的经济效益；氧气顶吹转炉炼钢采用炉口微差压控制技术，保证对煤气在未燃状态下除尘以回收煤气作为燃料；对于铝电解槽产生的氟化氢烟气，大型中心加料预焙槽密闭操作作为干法净化回收氟提供了良好条件等。实践证明，有毒废气净化回收能达到减少空气污染和资源再利用的目的。

(4) 采用高烟囱排放。同等的有害物排放量，由于向大气中排放的方式不同，大气污染所造成的影响也不相同。虽然高空排放有毒气体可以降低地面上的浓度，但它并不能减少大气中有害物量。改善烟气扩散的具体措施是建造高烟囱或增大烟气的出口排放速度，从而把有毒气体送至高空进行扩散稀释。烟气在大气中的扩散与当地的气象条件、逆温情况、地形地物等因素有关，烟囱高度是在保证污染物最大落地浓度不超过允许值的条件下根据烟气扩散规律确定的。当前，对于某些低浓度废气，从技术经济上分析，采用高烟囱排放以减轻大气污染可能是实用、经济的方法。

(5) 城市绿化。众所周知，植物在保持大气中氧与二氧化碳的平衡以及吸收有毒气体等方面有着举足轻重的作用。地球上的生命依赖大气才得以生存。绿色植物是主要的氧气制造者和二氧化碳的消耗者。地球上大气总量约为 5pt，氧气的 60% 来自陆生植物，特别是森林。1 万 m² 常绿阔叶每天可释放 700kg 氧气，消耗 1000kg 二氧化碳。按成年人每天呼吸需要氧气 0.75kg、排出二氧化碳 0.9kg 计算，则每人应拥有 10m² 森林或者 50m² 生长良好的草坪。植物还有吸收有毒气体的作用，不同的植物可以吸收不同的毒气，见表 1-2。植物对大气飘尘和空气中放射性物质也有明显的过滤、吸附和吸收作用。植物吸收大气中有毒气体的作用是明显的，但当污染十分严重，有害物浓度超过植物能忍受的限度时，植物本身也将受害，甚至枯死。从这方面来说选择某些敏感性植物又可起到毒气的警报作用。

表 1-2 各种植物可吸收毒气的种类

毒气种类	植物名称
二氧化硫	臭椿、垂柳、早柳、合欢、悬铃木、加拿大杨、刺槐、柳杉、梧桐、槐树、泡桐、白蜡、女贞、海桐、枣树、柑桔、山渣、板栗、丁香等
氟化氢	油茶、垂柳、榆树、加拿大杨、桑树、泡桐、梧桐、滇柏、滇杨、樟树、棕榈、枣树、山杏等
氯气	银桦、滇朴、兰按、女贞、刺槐、悬铃木、白桦、家榆、梧桐、紫椴、珊瑚树、大叶黄杨、糖槭、桉柳、山渣、山梨、山杏、京桃、君迁子、美人蕉、鸡冠花等
二氧化氮	铁树、美洲槭、樱桃、三角枫、木等
臭氧	银杏、柳杉、日本扁柏、樟树、海桐、青冈栎、日本女贞、夹竹桃、栎树、刺槐、悬铃木、冬青等
醛、酮、吡啉、安息香	栓皮栎、桂香柳、加拿大杨等
苯酚	刺槐、紫穗槐、欧洲女贞、添树等