

★ 高等学校试用教材

大气污染控制工程

郝吉明 马广大 等编著

★ 高等教育出版社



大气污染控制工程

郝吉明 马广大 俞珂
张承中 徐康富

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是根据国家教育委员会高等工业学校环境工程专业教材委员会制定的基本要求编写的。全书系统地阐述了大气污染控制的原理、方法及有关设计计算问题。以介绍国内常用的成熟技术为主，并适当介绍了国内外的先进实用技术。

本书主要作为高等学校环境工程专业教材，亦可供从事大气污染控制设备设计和使用的有关人员以及环境保护管理干部和环境工程技术人员使用。

高等学校试用教材

大气污染控制工程

郝吉明 马广大等 编著

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

天津新华印刷二厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 18.75 字数 480 000

1989年5月第1版 1989年5月第1次印刷

印数 0001—4 450

ISBN 7-04-001981-7/K·94

定价 5.15 元

(平装本)

前 言

“大气污染控制工程”是高等学校环境工程专业的一门重要专业课。本书是根据国家教育委员会高等工业学校环境工程专业教材委员会制定的教学基本要求，结合清华大学和西安冶金建筑学院多年讲授“大气污染控制工程”的经验，在参考了各校教材讲义的基础上，为高等院校环境工程专业编写的一本教材，本书系统地阐述了大气污染控制的原理、方法和有关设计计算问题，并以国内常用的较为成熟的技术为主，适当介绍了国内外的先进实用技术，力求理论联系实际，注意培养学生分析问题和解决问题的能力。其内容适应80—100学时教学需要，也可供从事大气污染控制设备设计和使用的化学、环境及机械工程人员以及环境保护管理干部学习参考。

本书以控制“煤烟型”大气污染为主要内容，不仅包括了除尘技术和气态污染物控制等部分，而且对燃烧过程中污染物的产生及控制进行了较深入的论述；为了充分利用大气对污染物的稀释和扩散作用，列入了“大气扩散”一章；结合环境区域规划、综合防治，在单项治理技术的基础上，另列了“大气污染控制系统分析”一章。这些内容反映了国内外同类教科书的目前水平，也初步反映了我国大气污染控制的工业实践和科学研究的现状。

本书由郝吉明、马广大主编，参加编著的人员有：清华大学郝吉明（第二、五、六、七章）、徐康富（第八章）、俞珂（第十章），西安冶金建筑学院马广大（第一、三、四章）和张承中（第九章）。

在本书编写过程中，许多兄弟院校及研究单位曾给予了大力的支持和帮助，国家教委环境工程专业教材委员会委员林肇信

和叶昌仁主持了该书的审稿会，并对全书进行了认真的审校，付出了辛勤的劳动，在此一并致以衷心感谢。由于我们水平所限，实践经验不足，如有缺点、错误，欢迎读者批评指正。

编著者

一九八八年三月十四日

目 录

第一章 概论	(1)
§ 1-1 大气污染和大气污染物	(1)
1-1-1 大气污染	(1)
1-1-2 大气污染物	(3)
1-1-3 大气污染物的来源和发生量	(7)
§ 1-2 大气污染及其控制概况	(8)
1-2-1 大气污染概况	(8)
1-2-2 几种大气污染物的控制概况	(12)
§ 1-3 大气污染的综合防治措施	(14)
§ 1-4 大气环境标准	(17)
1-4-1 大气环境标准的种类和作用	(17)
1-4-2 大气环境质量标准	(18)
1-4-3 工业企业设计卫生标准	(20)
1-4-4 大气污染物排放标准	(21)
第二章 燃烧与大气污染	(26)
§ 2-1 燃料的性质	(26)
2-1-1 煤	(26)
2-1-2 石油	(30)
2-1-3 天然气	(31)
2-1-4 非常规燃料	(32)
§ 2-2 燃料燃烧过程	(34)
2-2-1 影响燃烧过程的主要因素	(34)
2-2-2 燃料燃烧的理论空气量	(35)
2-2-3 燃烧产生的污染物	(38)
2-2-4 热化学关系式	(40)
§ 2-3 烟气体积及污染物排放量计算	(42)
2-3-1 烟气体积计算	(42)

✓ 2-3-2 污染物排放量的计算	(44)
§ 2-4 燃烧过程硫氧化物的形成与控制	(47)
2-4-1 燃料中硫的氧化机理	(47)
2-4-2 SO_2 和 SO_3 之间的转化	(50)
2-4-3 硫氧化物形成的控制	(52)
§ 2-5 燃烧过程氮氧化物的形成与控制	(57)
2-5-1 NO 和 NO_2 形成的热力学	(58)
2-5-2 燃烧过程中 NO 形成的动力学	(61)
2-5-3 由含氮燃料形成的 NO_x	(67)
2-5-4 低 NO_x 燃烧技术	(68)
§ 2-6 燃烧过程中颗粒污染物的形成	(71)
2-6-1 碳粒子的生成	(71)
2-6-2 燃煤粉尘的形成	(73)
§ 2-7 燃烧过程中其它污染物的形成	(77)
2-7-1 有机污染物的形成	(78)
2-7-2 一氧化碳的形成	(79)
第三章 大气扩散	(83)
§ 3-1 大气层结构及气象要素	(83)
3-1-1 大气层结构	(83)
✓ 3-1-2 气象要素	(86)
§ 3-2 大气边界层的温度场	(88)
3-2-1 气温直减率	(88)
3-2-2 气温的垂直分布	(90)
3-2-3 大气的静力稳定度及其判据	(90)
3-2-4 烟流形状与大气稳定度的关系	(92)
3-2-5 逆温	(93)
§ 3-3 大气的运动和风	(97)
3-3-1 引起大气运动的作用力	(97)
3-3-2 大气边界层中风随高度的变化	(99)

3-3-3 近地层中的风速廓线模式	(99)
3-3-4 地方性风场	(101)
§ 3-4 湍流扩散的基本理论	(103)
3-4-1 湍流概念简介	(103)
3-4-2 湍流扩散理论简介	(104)
3-4-3 点源扩散的高斯模式	(105)
§ 3-5 污染物浓度的估算方法	(110)
3-5-1 烟流抬升高度的计算	(110)
3-5-2 帕斯奎尔扩散曲线法	(112)
3-5-3 稳定度分类方法及扩散参数的选择	(118)
3-5-4 污染物浓度与采样时间的关系	(120)
§ 3-6 非点源污染物浓度估算模式	(123)
3-6-1 线源扩散模式	(123)
3-6-2 面源扩散模式	(125)
§ 3-7 特殊情况下的扩散模式	(127)
3-7-1 封闭型扩散模式	(127)
3-7-2 熏烟型扩散模式	(129)
§ 3-8 烟囱高度的设计	(132)
3-8-1 烟囱高度的计算	(132)
3-8-2 烟囱设计中的几个问题	(134)
§ 3-9 厂址选择	(134)
3-9-1 厂址选择中所需的气候资料	(135)
3-9-2 长期平均浓度的估算	(137)
3-9-3 厂址选择	(139)
第四章 除尘技术基础	(145)
§ 4-1 粉尘的粒径及粒径分布	(145)
4-1-1 单一颗粒的粒径	(145)
4-1-2 粒径分布	(147)
4-1-3 平均粒径	(151)

4-1-4 粒径分布函数	(152)
§ 4-2 粉尘的物理性质	(157)
4-2-1 粉尘的密度	(157)
4-2-2 粉尘的比表面积	(158)
4-2-3 粉尘的润湿性	(159)
4-2-4 粉尘的荷电性及导电性	(159)
4-2-5 粉尘的粘附性	(161)
4-2-6 粉尘的安息角	(161)
4-2-7 粉尘的爆炸性	(162)
§ 4-3 净化装置的性能	(163)
4-3-1 净化装置技术性能表示方法	(163)
4-3-2 净化效率的表示方法	(164)
§ 4-4 颗粒捕集理论基础	(168)
4-4-1 流体阻力	(168)
4-4-2 阻力导致的减速运动	(172)
4-4-3 重力沉降	(173)
4-4-4 离心沉降	(176)
4-4-5 静电沉降	(176)
4-4-6 惯性沉降	(177)
4-4-7 扩散沉降	(180)
第五章 除尘装置	(187)
§ 5-1 机械式除尘器	(187)
5-1-1 重力沉降室	(187)
5-1-2 惯性除尘器	(193)
5-1-3 旋风除尘器	(195)
§ 5-2 电除尘器	(213)
5-2-1 电除尘器的工作原理	(213)
5-2-2 电晕放电	(214)
5-2-3 粒子荷电	(218)

5-2-4 荷电粒子的运动和捕集	(225)
5-2-5 被捕集粉尘的清除	(230)
5-2-6 电除尘器结构	(231)
5-2-7 粉尘比电阻	(236)
5-2-8 电除尘器的选择和设计	(240)
§ 5-3 湿式除尘器	(243)
5-3-1 概述	(243)
5-3-2 湿式除尘器除尘机理	(244)
5-3-3 喷雾塔洗涤器	(251)
5-3-4 旋风洗涤器	(253)
5-3-5 文丘里洗涤器	(256)
§ 5-4 过滤式除尘器	(263)
5-4-1 袋式除尘器工作原理	(264)
5-4-2 袋式除尘器的压力损失	(266)
5-4-3 袋式除尘器的滤料	(269)
5-4-4 袋式除尘器的清灰	(271)
5-4-5 袋式除尘器的选择、设计和应用	(274)
5-4-6 颗粒层除尘器	(277)
§ 5-5 除尘器选择与发展	(279)
5-5-1 除尘器的合理选择	(279)
5-5-2 除尘设备的发展	(283)
第六章 吸收法净化气态污染物	(289)
§ 6-1 吸收过程的气液平衡	(290)
6-1-1 气体在液相中的平衡溶解度	(290)
6-1-2 化学吸收中的气液平衡关系	(293)
§ 6-2 伴有化学反应的吸收动力学	(297)
6-2-1 双膜理论	(297)
6-2-2 化学吸收过程的传质速率	(301)
6-2-3 各类化学吸收的速率方程	(306)

§ 6-3 吸收设备	(312)
6-3-1 吸收设备的类型与特点	(312)
6-3-2 化学吸收时填料塔高度的计算	(323)
§ 6-4 吸收法净化低浓度二氧化硫烟气	(327)
6-4-1 概述	(327)
6-4-2 石灰 / 石灰石法烟气脱硫	(329)
6-4-3 其它吸收剂脱硫	(342)
§ 6-5 吸收法净化其它气态污染物	(345)
6-5-1 吸收法净化含 NO_x 废气	(345)
6-5-2 吸收法净化含氟废气	(348)
第七章 吸附法净化气态污染物	(355)
§ 7-1 吸附过程与吸附剂	(355)
7-1-1 吸附过程	(355)
7-1-2 吸附剂	(356)
7-1-3 影响气体吸附的因素	(359)
§ 7-2 吸附理论	(362)
7-2-1 吸附平衡	(362)
7-2-2 吸附速率	(365)
7-2-3 吸附剂的解吸	(367)
§ 7-3 吸附设备及其计算方法	(368)
7-3-1 固定床吸附器及其计算方法	(369)
7-3-2 移动床吸附器的计算方法	(377)
§ 7-4 吸附法净化有机蒸气	(383)
7-4-1 有机溶剂蒸发量	(384)
7-4-2 多组分吸附	(386)
7-4-3 活性炭的吸附热	(389)
7-4-4 脱附时水蒸气的消耗量	(393)
7-4-5 干燥炭时空气及热的消耗量	(394)
§ 7-5 吸附法净化其它气态污染物	(397)

7-5-1 低浓度二氧化硫的吸附净化	(397)
7-5-2 含氟化氢废气的吸附净化	(399)
7-5-3 吸附脱除臭味	(403)
第八章 催化转化法净化气态污染物	(407)
§ 8-1 概述	(407)
§ 8-2 催化剂和催化作用	(408)
8-2-1 催化剂的定义与组成	(408)
8-2-2 催化剂的性能	(410)
8-2-3 催化作用及其特征	(412)
§ 8-3 催化作用原理	(413)
8-3-1 催化作用的化学本质	(413)
8-3-2 催化理论	(414)
§ 8-4 多相催化反应的物理化学过程及动力学方程	(415)
8-4-1 多相催化反应的物理化学过程	(415)
8-4-2 表面化学反应速度和动力学方程	(417)
8-4-3 表面化学反应的宏观动力学方程	(419)
8-4-4 内外扩散对表面化学反应速度的影响	(421)
§ 8-5 气-固相催化反应器的设计计算与结构类型选择	(422)
8-5-1 气-固相催化反应器的设计基础	(422)
8-5-2 气-固相催化反应器设计计算	(424)
8-5-3 气-固相催化反应器的结构类型与选择	(427)
8-5-4 固定床的阻力计算	(432)
8-5-5 固定床催化反应器设计的注意事项	(434)
§ 8-6 气态污染物的催化净化工艺	(435)
8-6-1 催化转化法净化 SO ₂ 气体	(435)
8-6-2 催化还原法净化 NO _x 气体	(440)
8-6-3 催化燃烧法净化有机蒸气及脱臭	(444)
8-6-4 汽车尾气的催化净化	(447)
第九章 集气罩及管道设计	(451)

§ 9-1 净化系统的组成及系统设计的基本内容	(451)
9-1-1 局部排气净化系统的组成	(451)
9-1-2 局部排气净化系统设计的基本内容	(453)
§ 9-2 集气罩的设计	(454)
9-2-1 集气罩的捕集机理	(454)
9-2-2 集气罩的基本形式	(462)
9-2-3 集气罩的主要性能	(466)
9-2-4 集气罩的设计方法	(472)
§ 9-3 管道系统的设计	(488)
9-3-1 管道内气体流动的压力损失	(488)
9-3-2 管道内流动气体的压力分布	(491)
9-3-3 管道计算	(493)
9-3-4 管道系统设计中的有关问题	(500)
§ 9-4 净化系统的计算机辅助设计	(505)
9-4-1 设计过程自动化及计算机辅助设计	(505)
9-4-2 计算机辅助设计系统的组成及功能	(507)
9-4-3 计算机辅助设计的基本程序	(509)
9-4-4 计算机辅助设计在净化系统设计中的应用实例	(509)
第十章 大气污染控制系统分析	(517)
§ 10-1 大气污染控制系统分析的任务和内容	(517)
10-1-1 问题的提出	(517)
10-1-2 研究的任务和内容	(518)
§ 10-2 大气污染控制系统的分类和组成	(520)
10-2-1 大气环境质量控制系统	(520)
10-2-2 污染源的控制系統	(520)
10-2-3 废气净化系统	(521)
§ 10-3 规划的经济评价依据	(522)
§ 10-4 规划的过程与步骤	(523)
10-4-1 规划目标	(523)

10-4-2 建立模型	(525)
10-4-3 模拟与优化	(527)
10-4-4 评价与决策	(527)
§ 10-5 城市与工业区大气污染的数学模拟	(528)
10-5-1 城市大气污染特征	(528)
10-5-2 罗尔勃克 (Rollback) 比例缩减模型	(530)
10-5-3 城市多源高斯模式	(532)
10-5-4 "箱"模式	(535)
§ 10-6 大气污染控制系统规划实例	(537)
10-6-1 排放总量控制优化	(537)
10-6-2 大气污染综合防治规划系统分析	(542)
10-6-3 城市经济—能源—环境系统分析	(548)
主要参考文献	(559)
附录	(565)
附录一 空气的物理参数	(565)
附录二 水的物理参数	(568)
附录三 空气污染物三级标准浓度限值	(569)
附录四 居住区大气中有害物质的最高容许浓度	(570)
附录五 车间空气中有害物质的最高容许浓度	(571)
附录六 十三类有害物质的排放标准	(574)
附录七 锅炉烟尘排放标准 (摘要)	(577)
附录八 几种气体或蒸气的爆炸特性	(578)
附录九 几种粉尘的爆炸特性	(578)
附录十 镀槽边缘控制点的吸入速度 v_x (m/s)	(579)
附录十一 局部阻力系数	(581)

第一章 概 论

§ 1-1 大气污染和大气污染物

1-1-1 大气污染

1. 大气的组成

大气是由多种气体混合组成的，按其成分可以概括为三部分：干燥清洁的空气、水汽和悬浮微粒。干洁空气的主要成分是氮、氧、氩、二氧化碳气体，其含量占全部干洁空气的99.996%（体积）；氦、氖、氪、甲烷等次要成分只占0.004%左右，如表1-1所示。

由于空气的垂直运动、水平运动以及分子扩散，使得干洁空气的组成比例直到90—100km的高度还基本保持不变。也就是说，在人类经常活动的范围内，任何地方干洁空气的物理性质是基本相同的。例如，干洁空气的平均分子量为28.966，在标准状态下（273.15K，1atm）密度为 $1.293\text{kg}/\text{m}^3$ 。在自然界大气的温度和压力条件下，干洁空气的所有成分都处于气态，不易液化，因此可以看成是理想气体。

大气中的水汽含量，随着时间、地点、气象条件等不同而有较大变化，其变化范围可达0.02—6%。大气中的水汽含量虽然很少，但却导致了各种复杂的天气现象：云、雾、雨、雪、霜、露等。这些现象不仅引起大气中湿度的变化，而且还引起热量的转化。同时，水汽又具有很强的吸收长波辐射的能力，对地面的保温起着重要的作用。

大气中的悬浮微粒，除由水汽变成的水滴、冰晶外（云、雾即是由微小的水滴或冰晶组成的），主要是大气尘埃和悬浮在空气中的其他杂质。它们有的来自流星在大气中燃烧后产生的宇宙

灰尘；有的是地面上燃料燃烧产生的烟尘，或被风卷起的尘土；有的是海洋中浪花溅起在空中蒸发留下的盐粒；有的是火山喷发后留在空中的火山灰；有的是由细菌、动物呼出的病毒、植物花粉等组成的有机灰尘等。悬浮微粒对大气中的各种物理现象和过程也有重要影响，例如，削弱太阳辐射，在大气中形成各种光学现象，影响大气能见度等。

表 1-1 干洁空气的组成

成 分	分子量	体积比(%)	成 分	分子量	体积比(ppm)
氮(N ₂)	28.01	78.09	氖(Ne)	20.18	18
氧(O ₂)	32.00	20.95	氦(He)	4.003	5.3
氩(Ar)	39.94	0.93	甲烷(CH ₄)	16.04	1.5
二氧化碳 (CO ₂)	44.01	0.03	氪(Kr)	83.80	1
			一氧化二氮(N ₂ O)	44.01	0.5
			氢(H ₂)	2.016	0.5
			氙(Xe)	131.30	0.08
			臭氧(O ₃)	48.00	0.01—0.04

2. 大气污染

大气污染系指由于人类活动或自然过程引起某些物质介入大气中，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。所谓人类活动不仅包括生产活动，而且也包括生活活动，如做饭、取暖、交通等。自然过程，包括火山活动、山林火灾、海啸、土壤和岩石的风化及大气圈中空气运动等。一般说来，由于自然环境所具有的物理、化学和生物机能（即自然环境的自净作用），会使自然过程造成的大气污染，经过一定时间后自动消除（即使生态平衡自动恢复）。所以可以说，大气污染主要是人类活动造成的。

大气污染对人体的舒适、健康的危害，包括对人体的正常生活环境和生理机能的影响，引起急性病、慢性病以至死亡等；而所谓福利，系指与人类协调并共存的生物、自然资源以及财产、器物等。

按照大气污染的范围来分，大致可分为四类：(1) 局限于小范围的大气污染，如受到某些烟囱排气的直接影响；(2) 涉及一个地区的大气污染，如工业区及其附近地区或整个城市大气受到污染；(3) 涉及到比一个城市更广泛地区的广域污染；(4) 必须从全球范围考虑的全球性（或国际性）污染，如大气中的飘尘和二氧化碳气体的不断增加，就成了全球性污染，受到世界各国的关注。

1-1-2 大气污染物

大气污染物系指由于人类活动或自然过程排入大气的并对人或环境产生有害影响的那些物质。

大气污染物的种类很多，按其存在状态可概括为两大类：气溶胶状态污染物，气体状态污染物。

1. 气溶胶状态污染物

在大气污染中，气溶胶系指固体粒子、液体粒子或它们在气体介质中的悬浮体。从大气污染控制的角度，按照气溶胶的来源和物理性质，可将其分为如下几种：

(1) 粉尘 (dust)：粉尘系指悬浮于气体介质中的小固体粒子，能因重力作用发生沉降，但在某一段时间内能保持悬浮状态。它通常是由于固体物质的破碎、研磨、分级、输送等机械过程，或土壤、岩石的风化等自然过程形成的。粒子的形状往往是不规则的。粒子的尺寸范围，在气体除尘技术中，一般为 1—200 μm 左右。属于粉尘类的大气污染物的种类很多，如粘土粉尘、石英粉尘、煤粉、水泥粉尘、各种金属粉尘等。

(2) 烟 (fume)：烟一般系指由冶金过程形成的固体粒子的