



普通高等教育“十五”国家级规划教材

大气污染控制工程(第二版)

Daqi Wuran Kongzhi Gongcheng

郝吉明 马广大 主编



高等教育出版社



普通高等教育“十五”国家级规划教材

大气污染控制工程(第二版)

Daqi Wuran Kongzhi Gongcheng

郝吉明 马广大 主编

郝吉明(1) 马广大(2) 主编

郝吉明、马广大主编，北京：高等教育出版社，2005

(北京：高等教育出版社，2005)

ISBN 7-04-01089-4

010-82028464

大气污染控制工程(第二版) 郝吉明、马广大主编

ISBN 7-04-01089-4

中国标准书号(CIP) 031690

大气污染控制工程(第二版)

郝吉明、马广大主编

010-82028464

800-810-0298

http://www.hep.edu.cn

http://www.hep.com.cn

1988年8月第1版

2002年8月第2版

2004年2月第4次印刷

39.10元

高等教育出版社

大气污染控制工程(第二版)

内容提要

本书是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果,是面向 21 世纪课程教材和国家“十五”规划教材。本书根据教育部环境工程专业教学指导委员会制定的基本教学要求,在第一版的基础上修订而成。全书框架基本保持了第一版的结构,但根据近年大气污染控制工程在理论、技术等领域的发展和教学改革的经验与要求,对相关内容作了修订和补充,增加了机动车污染控制、大气污染与全球气候等章节。全书由 14 章组成,包括概论、燃烧与大气污染、大气污染气象学、大气扩散浓度估算模式、颗粒污染物控制技术基础、除尘装置、气态污染物控制技术基础、硫氧化物污染控制、固定源氮氧化物污染控制、挥发性有机物污染控制、城市机动车污染控制、大气污染和全球气候、集气罩、管道系统的设计。为便于使用,每章后附有思考题和习题。

本书是高等学校环境工程专业的主干课教材,也可供从事环境保护工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大气污染控制工程 / 郝吉明, 马广大主编. —2 版.
北京: 高等教育出版社, 2002(2004 重印)

本科环境工程专业

ISBN 7-04-010819-4

I. 大... II. ①郝...②马... III. 空气污染控制—
高等学校—教材 IV. X510.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 031690 号

大气污染控制工程 第二版
郝吉明 马广大 主编

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

经 销 新华书店北京发行所
排 版 高等教育出版社照排中心
印 刷 北京外文印刷厂

开 本 787×960 1/16
印 张 38
字 数 700 000

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

版 次 1988 年 6 月第 1 版
2002 年 8 月第 2 版
印 次 2004 年 2 月第 4 次印刷
定 价 39.10 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

第二版前言

本书第一版自 1989 年出版以来,深受广大读者喜爱,先后印刷 6 万余册,为推动我国的环境工程教育起到一定作用,本书于 1992 年获国家级优秀教材称号。

《大气污染控制工程》问世已逾 13 年。目前,人们对大气污染的关注已由局部的或区域的污染扩展至全球气候变化;关注的污染物也不仅是常规的一次污染物,人们越来越关注二次污染物和一些微量的有毒有害物质对环境和人体健康的影响;大气污染控制技术自身也由末端控制为主发展为以清洁生产为中心的全过程控制。随着社会和经济的发展,我国大气污染控制的重点逐渐由控制燃煤污染扩展至机动车污染控制。最近,清华大学将“大气污染控制工程”列为首批“精品课程”建设计划。为满足 21 世纪教学的需要,充分体现本学科当前的发展水平,在众多同事及朋友的热情鼓励和催促下,我们对第一版教材作了较大的修改和补充。

在修订过程中,我们对教材的体例进行了新的尝试。在第一版中,对气态污染物的控制是以控制手段为主线展开的。实际上人们更希望对一些重要污染物的控制获得系统的知识。为此,我们在简要讨论气态污染物控制技术基础后,以控制主要污染物和主要控制对象为主线展开。原书的第十章“大气污染控制系统分析”,对于学生建立大气污染控制系统和综合控制的观念是重要的,但多数学校将这部分内容放到“环境系统分析”或类似的课程中,鉴于篇幅和字数的限制,第二版中删去了这部分内容。此外,教材中较多的引用了国外的最新研究成果,其中有些图表的单位不符合国际单位制,为保持原图表的风格和特色,不便对其进行转化,但在书后给出了相关的转换系数,以供读者参考。

全书由郝吉明和马广大担任主编,参加编写的人员有:

- | | |
|-------|--------------|
| 第一章 | 马广大、黄学敏; |
| 第二章 | 郝吉明; |
| 第三章 | 马广大、黄学敏; |
| 第四、五章 | 马广大; |
| 第六章 | 郝吉明; |
| 第七章 | 郝吉明、王书肖; |
| 第八章 | 陆永琪、郝吉明、王书肖; |
| 第九章 | 郝吉明; |

- 第十章 郝吉明、李国文；
第十一章 傅立新；
第十二章 贺克斌；
第十三、十四章 张承中。

本书在编写过程中,得到了教育部“高等学校环境工程教学指导委员会”同仁的热情鼓励和帮助,使用本书第一版的兄弟院校教师对第二版的编写提出了许多宝贵意见。高等教育出版社张月娥编审帮助审阅了部分书稿,本书的责任编辑陈文副编审对工作一丝不苟,为本书的出版付出了辛勤的劳动。清华大学和西安建筑科技大学的多届本科生和研究生为该教材的完善提出过许多积极建议。在此,对上述同志表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,缺点和错误在所难免,热忱希望读者提出批评和建议。

编 者

2002.4

第一版前言

“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。

全书由郝吉明和马广大担任主编,参加编写的人员有:清华大学郝吉明(第二、五、六、七章)、徐康富(第八章)、俞珂(第十一章),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。由于我们水平有限,实践经验不足,如有缺点、错误,欢迎读者批评指正。

编者

1988年3月14日

目 录

第一章 概论	1
第一节 大气与大气污染	1
一、大气的组成	1
二、大气污染	3
三、全球性大气污染问题	3
第二节 大气污染物及其来源	4
一、大气污染物	4
二、大气污染物的来源和发生量	7
三、中国城市的大气污染概况	11
第三节 大气污染的影响	12
一、对人体健康的影响	12
二、对植物的伤害	15
三、对器物和材料的影响	16
四、对大气能见度和气候的影响	17
第四节 大气污染综合防治	19
一、大气污染综合防治的含义	19
二、大气污染综合防治措施	19
第五节 环境空气质量控制标准	21
一、环境空气质量控制标准的种类和作用	22
二、环境空气质量标准	22
三、工业企业设计卫生标准	23
四、大气污染物排放标准	24
五、空气污染指数及报告	25
习题	27
第二章 燃烧与大气污染	29
第一节 燃料的性质	29
一、煤	29
二、石油	35
三、天然气	36
四、非常规燃料	36
第二节 燃料燃烧过程	37
一、影响燃烧过程的主要因素	37
二、燃料燃烧的理论空气量	39

三、燃烧产生的污染物	42
四、热化学关系式	43
第三节 烟气体积及污染物排放量计算	45
一、烟气体积计算	45
二、污染物排放量的计算	47
第四节 燃烧过程硫氧化物的形成	49
一、燃料中硫的氧化机理	49
二、 SO_2 和 SO_3 之间的转化	51
第五节 燃烧过程中颗粒污染物的形成	54
一、碳粒子的生成	54
二、燃煤烟尘的形成	55
第六节 燃烧过程中其他污染物的形成	58
一、有机污染物的形成	59
二、一氧化碳的形成	60
三、汞的形成与排放	61
习题	61
第三章 大气污染气象学	63
第一节 大气圈结构及气象要素	63
一、大气圈垂直结构	63
二、主要气象要素	65
第二节 大气的热力过程	70
一、太阳、大气和地面的热交换	70
二、气温的垂直变化	71
三、大气稳定度	73
四、逆温	74
五、烟流形状与大气稳定度的关系	76
第三节 大气的运动和风	77
一、引起大气运动的作用力	77
二、大气边界层中风随高度的变化	79
三、近地层中的风速廓线模式	79
四、地方性风场	80
习题	82
第四章 大气扩散浓度估算模式	84
第一节 湍流扩散的基本理论	84
一、湍流概念简介	84
二、湍流扩散理论简介	84
第二节 高斯扩散模式	85
一、高斯模式的有关假定	85

二、无界空间连续点源扩散模式	86
三、高架连续点源扩散模式	87
四、地面连续点源扩散模式	89
五、颗粒物扩散模式	89
第三节 污染物浓度的估算	90
一、烟气抬升高度的计算	90
二、扩散参数的确定	92
第四节 特殊气象条件下的扩散模式	100
一、封闭型扩散模式	100
二、熏烟型扩散模式	102
第五节 城市及山区的扩散模式	103
一、城市大气扩散模式	103
二、山区扩散模式	107
第六节 烟囱高度的设计	109
一、烟囱高度的计算	109
二、烟囱设计中的几个问题	110
第七节 厂址选择	111
一、厂址选择中所需的气候资料	111
二、长期平均浓度的估算	112
三、厂址选择	113
习题	115
第五章 颗粒污染物控制技术基础	117
第一节 颗粒的粒径及粒径分布	117
一、颗粒的粒径	117
二、粒径分布	119
三、平均粒径	123
四、粒径分布函数	126
第二节 粉尘的物理性质	132
一、粉尘的密度	132
二、粉尘的安息角与滑动角	134
三、粉尘的比表面积	134
四、粉尘的含水率	135
五、粉尘的润湿性	136
六、粉尘的荷电性和导电性	137
七、粉尘的粘附性	139
八、粉尘的自然性和爆炸性	140
第三节 净化装置的性能	141
一、净化装置技术性能表示方法	141

二、净化效率的表示方法	142
第四节 颗粒捕集的理论基础	145
一、流体阻力	146
二、阻力导致的减速运动	148
三、重力沉降	150
四、离心沉降	151
五、静电沉降	152
六、惯性沉降	152
七、扩散沉降	155
习题	158
第六章 除尘装置	161
第一节 机械除尘器	161
一、重力沉降室	161
二、惯性除尘器	165
三、旋风除尘器	167
第二节 电除尘器	178
一、电除尘器的工作原理	178
二、电晕放电	179
三、粒子荷电	182
四、荷电粒子的运动和捕集	186
五、被捕集粉尘的清除	189
六、电除尘器结构	190
七、粉尘比电阻	194
八、电除尘器的选择和设计	197
第三节 湿式除尘器	199
一、概述	199
二、湿式除尘器的除尘机理	201
三、喷雾塔洗涤器	206
四、旋风洗涤器	207
五、文丘里洗涤器	209
第四节 过滤式除尘器	213
一、袋式除尘器工作原理	213
二、袋式除尘器的压力损失	215
三、袋式除尘器的滤料	216
四、袋式除尘器的清灰	218
五、袋式除尘器的选择、设计和应用	221
六、颗粒层除尘器	223
第五节 除尘器的选择与发展	224

一、除尘器的合理选择	224
二、除尘设备的发展	227
习题	229
第七章 气态污染物控制技术基础	235
第一节 气体扩散	235
一、气体在气相中的扩散	235
二、气体在液体中的扩散	237
第二节 气体吸收	238
一、吸收机理	238
二、气液平衡	240
三、物理吸收	246
四、化学吸收	252
第三节 气体吸附	262
一、吸附剂	262
二、吸附机理	267
三、吸附工艺与设备计算	274
第四节 气体催化净化	288
一、催化作用和催化剂	288
二、气固催化反应动力学	291
三、SO ₂ 催化氧化动力学方程	296
四、气-固相催化反应器的设计	297
习题	301
第八章 硫氧化物的污染控制	304
第一节 硫循环及硫排放	304
第二节 燃烧前燃料脱硫	306
一、煤炭的固态加工	306
二、煤炭的转化	307
三、重油脱硫	309
第三节 流化床燃烧脱硫	310
一、流化床燃烧技术概述	310
二、流化床燃烧脱硫的化学过程	312
三、流化床燃烧脱硫的主要影响因素	312
四、脱硫剂的再生	315
第四节 高浓度二氧化硫尾气的回收与净化	316
第五节 低浓度二氧化硫烟气脱硫	319
一、烟气脱硫方法概述	319
二、主要的烟气脱硫工艺	321
三、同时脱硫脱氮工艺	340

四、烟气脱硫工艺的综合比较	347
习题	352
第九章 固定源氮氧化物污染控制	354
第一节 氮氧化物性质及来源	354
第二节 燃烧过程中氮氧化物的形成机理	356
一、热力型 NO_x 形成的热力学	356
二、热力型 NO_x 形成的动力学——泽利多维奇(Zeldovich)模型	359
三、瞬时 NO 的形成	363
四、燃料型 NO_x 的形成	363
第三节 低氮氧化物燃烧技术	366
一、传统的低 NO_x 燃烧技术	366
二、先进的低 NO_x 燃烧器技术	369
第四节 烟气脱硝技术	372
一、选择性催化还原法(SCR)脱硝	373
二、选择性非催化还原法(SNCR)脱硝	374
三、吸收法净化烟气中的 NO_x	374
四、吸附法净化烟气中的 NO_x	375
习题	376
第十章 挥发性有机物污染控制	378
第一节 蒸气压及蒸发	378
一、蒸气压	378
二、挥发与溶解	382
第二节 VOCs 污染预防	384
一、 VOCs 替代	384
二、工艺改革	386
三、泄露损耗及控制	387
第三节 燃烧法控制 VOCs 污染	389
一、 VOCs 燃烧转化原理及燃烧动力学	389
二、燃烧工艺	393
第四节 吸收(洗涤)法控制 VOCs 污染	399
一、吸收工艺及吸收剂	399
二、吸收设备	400
第五节 冷凝法控制 VOCs 污染	401
一、冷凝原理	402
二、气态污染物的冷凝分离	402
三、 VOCs 的冷凝	404
四、冷凝类型和设备	405
第六节 吸附法控制 VOCs 污染	409

一、吸附工艺	409
二、吸附容量	410
三、多组分吸附	412
四、活性炭的吸附热	414
第七节 生物法控制 VOCs 污染	416
一、生物法控制 VOCs 污染的原理	416
二、生物法处理 VOCs 工艺	417
三、生物法工艺性能比较及其应用前景	428
习题	429
第十一章 城市机动车污染控制	431
第一节 城市交通趋势及影响	431
一、机动车保有量的增长	431
二、交通源对城市空气污染的影响	431
第二节 汽油发动机污染物的形成与控制	433
一、汽油机的工作原理与污染来源	433
二、燃烧过程中污染物的形成	436
三、降低污染排放的发动机技术	441
四、汽油车尾气排放后处理技术	445
五、曲轴箱的污染物排放与控制	447
六、燃油蒸发排放控制	448
七、汽油车排放污染控制的最新发展	450
第三节 柴油发动机污染物的形成与控制	451
一、四冲程柴油机的工作原理	451
二、柴油机污染物的形成过程	453
三、控制柴油机污染物排放的发动机技术	457
四、柴油车排气后处理技术	461
第四节 新型动力车	463
一、电动汽车	463
二、燃料电池汽车	465
三、混合动力车	468
第五节 交通规划与交通管理	471
一、城市交通的综合规划	471
二、城市交通规划方法	472
三、关键的战略措施	473
四、减少空气污染的交通管理对策	476
习题	476
第十二章 大气污染和全球气候	478
第一节 温室气体和气候变化	478

一、全球气候变化问题	478
二、影响气候变化的大气成分	483
三、应对措施与策略	486
第二节 臭氧层破坏问题	488
一、大气臭氧层的主要特征和臭氧层破坏现象	488
二、平流层臭氧形成及破坏机理	490
三、臭氧层破坏的危害	492
四、消耗臭氧层的物质	493
五、臭氧层破坏的应对措施与策略	496
第三节 致酸前体物与酸雨	497
一、酸雨问题	497
二、致酸前体物	499
三、控制措施与策略	499
习题	502
第十三章 集气罩	504
第一节 净化系统的组成及系统设计的基本内容	504
一、局部排气净化系统的组成	504
二、局部排气净化系统设计的基本内容	505
第二节 集气罩的集气机理	506
一、吸入气流	506
二、吹出气流	508
三、吸入气流与吹出气流	511
四、吹吸气流	511
第三节 集气罩的基本类型	512
一、密闭罩	512
二、排气柜	513
三、外部集气罩	514
四、接受式集气罩	515
五、吹吸式集气罩	515
第四节 集气罩性能参数及计算	516
一、排风量的确定	517
二、压力损失的确定	521
第五节 集气罩的设计方法	522
一、密闭罩的设计	522
二、外部集气罩的设计	523
三、槽边集气罩的设计	526
四、热源上部接受式集气罩的设计	529
五、吹吸式集气罩的设计	532

习题	534
第十四章 管道系统的设计	536
第一节 管道系统压力损失计算	536
一、管道内气体流动的压力损失	536
二、管道系统压力损失计算	538
三、管道计算实例	541
第二节 管道系统布置及部件	543
一、管道系统布置	543
二、管道和部件	545
第三节 管道系统保温、防腐和防爆	551
一、管道系统保温	551
二、管道系统防腐	554
三、管道系统防爆	555
习题	556
主要参考文献	557
附录	562
附录一 空气的物理参数(压力为 101 325 Pa)	562
附录二 水的物理参数	564
附录三 《环境空气质量标准》规定的各项污染物的浓度限值	565
附录四 居住区大气中有害物质的最高容许浓度	566
附录五 车间空气中有害物质的最高容许浓度	567
附录六 现有污染源大气污染物排放限值	570
附录七 新污染源大气污染物排放限值	576
附录八 几种气体或蒸气的爆炸特性	582
附录九 几种粉尘的爆炸特性	583
附录十 通常状态下空气的性质	583
附录十一 常用的换算系数	584

第一章 概 论

第一节 大气与大气污染

一、大气的组成

1. 大气与空气

按照国际标准化组织(ISO)对大气和空气的定义:大气(atmosphere)是指环绕地球的全部空气的总和(The entire mass of air which surrounds the Earth);环境空气(ambient air)是指人类、植物、动物和建筑物暴露于其中的室外空气“(Outdoor air to which people, plants, animals and structures are exposed)。可见,“大气”与“空气”是作为同义词使用的,其区别仅在于“大气”所指的范围更大些,“空气”所指的范围相对小些。大气(或空气)污染控制工程的研究内容和范围,基本上都是环境空气的污染与防治,而且更侧重于和人类关系最密切的近地层空气。即使研究大环境的大气物理学、大气气象学等,主要研究范围也是对流层空气,很难将大气与空气截然区分开。本书以后的论述中,无论使用“大气”或“空气”一词,皆主要指“环境空气”。

2. 大气的组成

大气是由多种气体混合而成的,其组成可以分为三部分:干燥清洁的空气、水蒸气和各种杂质。干洁空气的主要成分是氮、氧、氩和二氧化碳气体,其含量占全部干洁空气的99.996%(体积);氦、氖、氫、甲烷等次要成分只占0.004%左右。表1-1列出了乡村或远离大陆的海洋上空典型的干燥空气的化学组成。

由于大气的垂直运动、水平运动、湍流运动及分子扩散,使不同高度、不同地区的大气得以交换和混合。因而从地面到90 km的高度,干洁空气的组成基本保持不变。也就是说,在人类经常活动的范围内,地球上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(273.15 K, 101 325 Pa)密度为1.293 kg/m³。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,不可能液化,因此可以看成是理想气体。

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/ 10^{-6}
氮(N ₂)	28.01	78.084 ± 0.004	氖(Ne)	20.18	1.8
氧(O ₂)	32.00	20.946 ± 0.002	氦(He)	4.003	5.2
氩(Ar)	39.94	0.934 ± 0.001	甲烷(CH ₄)	16.04	1.2
二氧化碳(CO ₂)	44.01	0.033 ± 0.001	氪(Kr)	83.80	0.5
			氢(H ₂)	2.016	0.5
			氙(Xe)	131.30	0.08
			二氧化氮(NO ₂)	46.05	0.02
			臭氧(O ₃)	48.00	0.01~0.04

大气中的水蒸气含量,平均不到 0.5%,而且随着时间、地点和气象条件等不同而有较大变化,其变化范围可达 0.01%~4%。大气中的水蒸气含量虽然很少,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,而且还导致大气中热能的输送和交换。此外,水蒸气吸收太阳辐射的能力较弱,但吸收地面长波辐射的能力却较强,所以对地面的保温起着重要的作用。

大气中的各种杂质是由于自然过程和人类活动排到大气中的各种悬浮微粒和气态物质形成的。大气中的悬浮微粒,除了由水蒸气凝结成的水滴和冰晶外,主要是各种有机的或无机的固体微粒。有机微粒数量较少,主要是植物花粉、微生物、细菌、病毒等。无机微粒数量较多,主要有岩石或土壤风化后的尘粒、流星在大气层中燃烧后产生的灰烬、火山喷发后留在空中的火山灰、海洋中浪花溅起在空中蒸发留下的盐粒,以及地面上燃料燃烧和人类活动产生的烟尘等。

大气中的各种气态物质,也是由于自然过程和人类活动产生的,主要有硫氧化物、氮氧化物、一氧化碳、二氧化碳、硫化氢、氨、甲烷、甲醛、烃蒸气、恶臭气体等。

在大气中的各种悬浮微粒和气态物质中,有许多是引起大气污染的物质。它们的分布是随时间、地点和气象条件变化而变化的,通常是陆上多于海上,城市多于乡村,冬季多于夏季。它们的存在,对辐射的吸收和散射,对云、雾和降水的形成,对大气中的各种光学现象,皆具有重要影响,因而对大气污染也具有重要影响。