



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

环境工程专业主干课程短学时系列教材

大气污染 控制工程

蒋文举 主编

VOCs

环境空气质量标准

PM₁₀



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
环境工程专业主干课程短学时系列教材

大气污染控制工程

蒋文举 主编

高等教育出版社

内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,为全国环境工程专业主干课程短学时系列教材之一,是为适应目前学科发展和人才培养的需求而编写的应用型教材,适合32~51学时的教学。

本书比较系统、简明地介绍了大气污染控制技术的基础理论知识和防治大气污染的基本原理、各种工程途径、主要设备和部分典型工艺。全书分为十一章,选取目前成熟的常用技术为主,以其基本原理为起点,强调工程设计方法和设备选型,突出工程应用的特点。同时,本书也介绍了当代大气污染控制技术的新发展,探讨了目前广泛关注的全球性大气污染问题和我国复合型污染问题。

本书可作为高等院校环境工程、环境科学专业及相关专业的本科生和研究生的教材或参考书,亦可供从事环境保护、环境监测、环境规划与管理等工作的有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大气污染控制工程 / 蒋文举主编. —北京: 高等教育出版社, 2006.11

ISBN 7-04-020208-5

I. 大... II. 蒋... 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(2006)第 122888 号

策划编辑 陈文 责任编辑 谭燕 封面设计 张申申
责任绘图 朱静 版式设计 余杨 责任校对 美国萍
责任印制 陈伟光

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800 - 810 - 0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010 - 58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landracom.com
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landracom.com.cn
印 刷	北京宝旺印务有限公司	畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787 × 960 1/16	版 次	2006 年 11 月第 1 版
印 张	22.25	印 次	2006 年 11 月第 1 次印刷
字 数	400 000	定 价	25.60 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

物料号 20208-00

序

高等学校环境工程专业主干课程短学时系列教材与本专业“水污染控制工程”、“大气污染控制工程”、“固体废物处理与处置”、“环境影响评价”、“环境规划与管理”、“环境工程原理”、“环境监测”、“物理性污染控制”8门核心课程相对应,其内容在近年来不断进行教学改革的基础上已经历过十年以上的应用和教学实践,并根据我国高等学校本科环境工程专业相关课程的基本要求,受教育部全国高等学校环境科学与工程教学指导委员会环境工程分委员会的委托组织编写的。各分册主编都具有非常丰富的教学经验,本系列教材各门课程的讲义在很多学校都进行了试用(见各分册材料),教学效果很好。

本系列教材是一套学时短,但内容精练的教材。教材的编写根据环境工程专业本科学生培养目标,针对当前各高校学时缩短和教学改革的情况,适应目前学科发展和人才培养的需求,全面整合教学内容,突出本学科相关知识在实践中的应用,注重学生实际操作能力的培养,强调系列课程教材的整体性和系统性,尽可能避免课程间内容的重复。

本系列教材从体系结构到内容具有新颖、系统、全面、科学、实用和普及的特点,注意与相关课程的区别与联系。教材的取材和内容的深度都尽量充分考虑符合我国环境工程专业人才培养目标及课程教学的要求,能反映本学科研究和发展的先进成果和完整地体现相应课程应有的知识,重点考虑如何有利于学生认识、分析和解决环境污染控制与污染物的处理、处置原理和方法等相关问题的掌握与应用,以及对环境污染防治的发展战略、规划、建设项目及其它开发活动的实施行为进行分析、预测和评估,提出防治的对策与措施。

本系列教材也可用于环境工程领域工程技术人员的培养与培训,同时可作为工业企业环境保护与环境工程专业及管理的重要参考书。

本系列教材由重庆大学、四川大学、昆明理工大学、西安交通大学、西安建筑科技大学负责组织编写,重庆大学罗固源教授担任编委会主任。各教材的主编分别是:《水污染控制工程》:罗固源教授(重庆大学);《大气污染控制工程》:蒋文举教授(四川大学);《固体废物处理与处置》:宁平教授(昆明理工大学);《环境影响评价》:曾向东教授(昆明理工大学);《环境规划与管理》:张承中教授(西安建筑科技大学);《环境工程原理》:陈杰瑛教授(西安交通大学);《环境监测》:但德忠教授(四川大学);《物理性污染控制》:陈杰瑛教授(西安交通大学)。

全国高等学校环境工程教学指导分委员会组织了对本系列教材的编写审查。环境科学与工程教学指导委员会环境工程分委员会主任委员、中国工程院

院士、清华大学郝吉明教授担任本系列教材的主审,环境工程教学指导分委员会副主任委员、同济大学周琪教授担任本系列教材的副主审。在此一并致谢。

罗固源

2006年2月20日

前 言

本书是全国环境工程专业主干课程短学时系列教材之一。本教材是根据教育部“环境工程专业规范”中“大气污染控制工程”基本教学内容要求,结合我们多年讲授“大气污染控制工程”的经验,为高等院校环境工程专业编写的一本短学时教材,其内容可供32~51学时教学使用。

本书系统地阐明了大气污染控制的原理、方法和设计计算问题,全书分为十一章,内容新颖,理论联系实际,着重工程应用。总体上,教材在介绍了大气污染控制基础理论之后,以选取目前成熟的常用技术为主,从其基本原理出发,强调工程设计方法和设备选型,突出工程应用的特点,力求引导读者把理论应用于各种控制装置的实际设计与分析,培养读者的创新思维和工程应用能力。此外,本书也反映了当今最新的科技发展,书中除了对各种传统控制技术如除尘技术、吸收、吸附、催化转化等进行介绍外,还对大气污染控制的新技术如生物法、膜法、电子束法等也进行了介绍,同时对目前国内外关注的全球性大气污染问题和我国复合型污染问题进行了探讨。

全书由蒋文举主编,参加编写的人员有:四川大学蒋文举(第七、八、十章),苏仕军(第十一章),刘勇军(第五章);昆明理工大学宁平(第六、九章);西安建筑科技大学张承中(第四章);西安交通大学陈杰榕(第一、二章);西南科技大学薛勇(第三章)。

2005年11月16—18日环境工程主干课短学时系列教材编委会特邀教育部环境科学与工程专业教学指导委员会环境工程分委员会主任委员郝吉明院士,副主任委员周琪教授参加了在四川大学召开的系列教材审稿会,并担任本系列教材的主审。本书的主审由郝吉明院士担任。

编写本书时编者参阅并引用了国内外的有关文献资料,得到许多兄弟院校及研发单位的大力支持和帮助。在此,一并向他们表示衷心的感谢。

由于编者学识水平所限,实践经验不足,书中难免存在错误与不足,热诚欢迎读者批评指正。

编 者

2006年6月30日

目 录

第一章 概论	1
第一节 大气污染及其影响	1
一、大气的结构及组成	1
二、大气污染	3
三、大气污染物及其来源	4
四、大气污染的影响	6
五、全球性大气污染	9
第二节 大气污染综合防治策略	10
一、大气污染综合防治的含义	10
二、大气污染综合防治的基本措施	10
第三节 防治大气污染的法规及标准	13
一、大气污染防治法	13
二、环境空气质量控制标准	13
三、空气污染指数	16
习题	18
第二章 燃烧与大气污染	20
第一节 燃料	20
一、燃料的分类	20
二、燃料的成分	23
三、燃料的发热量	23
第二节 燃料的燃烧	24
一、燃烧过程	24
二、燃烧的基本条件	24
三、燃料燃烧的空气量	25
四、燃烧产生的污染物	26
第三节 燃烧过程污染物排放量计算	27
一、烟气量计算	27
二、污染物排放量的计算	28
第四节 燃烧过程中污染物的生成与控制	29
一、燃烧过程中硫氧化物的生成与控制	29
二、燃烧过程中氮氧化物的生成与控制	34
三、燃烧过程中颗粒污染物的形成与控制	38
四、燃烧过程中其它污染物的形成与控制	40
第五节 机动车污染与控制	43

一、汽油机污染与控制	43
二、柴油车的污染与控制	45
三、新型动力车	47
习题	48
第三章 大气污染控制的基础知识	50
第一节 气体的物理性质	50
一、气体的状态方程	50
二、气体的湿度	50
三、气体的密度	51
四、气体的比热	51
五、气体的黏度	51
第二节 物料衡算与热量衡算	52
一、物料衡算	52
二、热量衡算	53
第三节 颗粒粒径及粒径分布	55
一、粒径	55
二、粒径分布的表示方法	56
三、粒径分布函数	59
第四节 粉尘颗粒的物理性质	64
一、密度	64
二、比表面积	65
三、颗粒的润湿性	65
四、颗粒的荷电性与导电性	65
五、颗粒的休止角	66
六、颗粒的黏附性	66
七、颗粒群的爆炸性	66
第五节 颗粒捕集的理论基础	67
一、流体阻力	67
二、受外力作用的球形颗粒在流体中的运动	70
三、重力沉降	70
四、离心沉降	71
五、静电沉降	71
六、惯性沉降	71
七、扩散沉降	73
第六节 净化装置的性能	74
一、处理气体量	74
二、压降	74
三、净化效率	75
习题	78

第四章 颗粒污染物的去除	80
第一节 机械式除尘器	80
一、重力沉降室	80
二、惯性除尘器	82
三、旋风除尘器	84
第二节 湿式除尘器	92
一、湿式除尘原理	92
二、湿式除尘器分类和性能	93
三、喷雾塔洗涤器	94
四、旋风洗涤器	96
五、自激喷雾洗涤器	96
六、文丘里洗涤器	97
七、湿式除尘器的设计	100
第三节 电除尘器	102
一、电除尘的工作原理	102
二、电晕放电	103
三、粒子荷电	105
四、粒子的捕集	108
五、电除尘器的类型和结构	111
六、电除尘器的设计和选型	114
第四节 过滤式除尘器	115
一、袋式除尘器的除尘机理	115
二、袋式除尘器的滤料	119
三、袋式除尘器的结构形式	120
四、袋式除尘器的设计	122
第五节 除尘器的选择	124
一、除尘器选择的原则	124
二、常用除尘器性能比较	126
习题	126
第五章 吸收法净化气态污染物	129
第一节 吸收平衡	129
一、物理吸收平衡	129
二、化学吸收平衡	131
第二节 吸收速率	134
一、物理吸收速率	134
二、化学吸收速率	136
第三节 吸收设备与设计	143
一、吸收设备	143

二、吸收设备的选择	144
三、吸收设备设计	146
第四节 吸收工艺的配置	150
一、吸收剂的选择	150
二、工艺流程设置中的其它问题	150
第五节 吸收净化法的应用	152
一、吸收法在烟气脱硫中的应用	152
二、吸收法净化含氮氧化物废气	159
三、吸收法净化含氟废气	161
习题	162
第六章 吸附法净化气态污染物	164
第一节 吸附及吸附剂	164
一、物理吸附与化学吸附	164
二、吸附剂的选择原则及工业吸附剂	165
第二节 吸附机理	168
一、吸附平衡	168
二、吸附速率	169
第三节 吸附装置及工艺	172
一、吸附装置	172
二、吸附工艺	174
三、变压吸附工艺	174
四、吸附剂再生	175
第四节 固定床吸附过程的计算	176
一、固定床吸附过程的分析	176
二、固定床吸附器计算	180
第五节 吸附净化法的应用	188
一、吸附法净化含氮氧化物废气	188
二、吸附法净化有机废气	191
三、吸附法净化含二氧化硫废气	193
习题	195
第七章 催化法净化气态污染物	198
第一节 催化作用和催化剂	198
一、催化作用	198
二、催化剂	199
第二节 气固相催化反应过程及速率方程	201
一、气固相催化反应过程	201
二、气固相催化反应动力学	203
三、总反应速率方程式	207

第三节 催化反应器及其设计	208
一、固定床催化反应器的分类及选择	208
二、固定床反应器的设计计算	209
三、固定床的压力降计算	214
第四节 影响催化转化的因素	214
一、温度	215
二、空速	216
三、操作压力	216
四、废气的初始组成	216
第五节 催化转化法的应用	217
一、催化法净化含 SO ₂ 废气	217
二、汽车尾气的催化净化	218
三、催化还原法净化含 NO _x 废气	219
四、石油炼厂 H ₂ S 尾气的催化氧化处理回收	221
习题	222
第八章 生物法净化气态污染物	224
第一节 废气生物处理原理	224
一、基本原理	224
二、废气生物处理的微生物	225
三、生物净化反应器	227
第二节 影响生物净化废气的主要因素	229
一、填料	229
二、温度	230
三、pH	231
四、溶解氧	231
五、湿度	231
第三节 生物法净化废气的工艺及设计	232
一、生物洗涤法	232
二、生物过滤法	234
第四节 生物净化法的应用	239
一、生物吸收装置的应用	239
二、生物过滤装置的应用	241
三、生物滴滤装置的应用	243
习题	244
第九章 气态污染物的其它净化法	245
第一节 燃烧净化法	245
一、燃烧转化原理	245
二、燃烧过程与装置	246

三、燃烧法的工业应用	250
第二节 冷凝法	251
一、冷凝原理	251
二、冷却方式和冷凝设备	253
三、冷凝法的应用	255
第三节 膜分离法	256
一、气体膜及性能	256
二、气体膜分离机理	257
三、膜分离设备	258
四、膜分离法的应用	259
第四节 电子束照射法	260
一、电子束照射法净化 SO_2 和 NO_x 的基本原理	260
二、电子束辐照烟气脱硫脱硝工艺流程	261
三、电子束辐照烟气脱硫脱硝技术的研究和应用	263
习题	264
第十章 大气扩散与污染控制	265
第一节 主要的气象要素	265
一、气温	265
二、气压	265
三、气湿	265
四、风	265
五、云	266
六、能见度	266
第二节 大气的热力学过程	267
一、太阳、大气和地面的热交换	267
二、气温的垂直分布	268
三、大气稳定度	268
四、逆温	269
五、大气稳定度与烟流扩散的关系	271
第三节 大气的运动和风	273
一、引起大气运动的作用力	273
二、大气边界层中风随高度的变化	273
三、地方风	274
第四节 大气扩散模式	276
一、高斯扩散模式	276
二、有上部逆温时的扩散模式	278
三、熏烟扩散模式	280
四、颗粒物扩散模式	282
五、城市和山区的扩散模式	282

第五节 大气污染浓度估算	285
一、烟气抬升高度的计算	285
二、扩散参数的确定	287
三、大气污染物浓度计算	292
第六节 烟囱计算	293
一、烟囱高度的计算	294
二、烟囱出口直径的计算	296
第七节 厂址选择	296
一、厂址选择所需要的气候资料	297
二、长期平均浓度	297
三、厂址选择	298
习题	300
第十一章 废气净化系统	302
第一节 废气净化系统的组成及设计内容	302
一、废气净化系统的组成	302
二、废气净化系统的设计内容	303
第二节 集气罩设计	304
一、集气罩气流流动的基本理论	304
二、集气罩的基本形式	309
三、集气罩设计	313
第三节 管道系统的设计	317
一、管道布置的一般原则	317
二、管径的选取	318
三、管道压力损失的计算	321
四、管道系统的计算举例	323
第四节 风机和泵的选择	326
一、离心通风机的选择	326
二、电动机的选择	327
三、离心泵的选择	327
习题	328
附录	330
参考文献	334

第一章 概 论

第一节 大气污染及其影响

一、大气的结构及组成

(一) 大气圈及其结构

大气是人类和其它生物赖以生存的基本条件之一。在自然地理学上,把由于地心引力而随地球旋转的大气层称为大气圈,其厚度大约为 10 000 km。离地面越远,空气越稀薄,到地表上空 1 400 km 以外的区域已非常稀薄。因此,从污染气象学研究的角度来讲,大气圈是指地球表面到 1 000 ~ 1 400 km 的范围,大气圈的总质量约为 6×10^{15} t,仅为地球总质量的百万分之一。

大气的密度、温度和组成随高度的不同而不同,呈现层状结构。根据气温在垂直方向的变化情况,将大气圈分为对流层、平流层、中间层、暖层和散逸层五层。如图 1-1 所示。

1. 对流层

对流层是大气圈中最接近地面的一层,对流层顶高度随着纬度和季节的变化而变化。在赤道低纬度区为 16 ~ 18 km,在两极地附近的高纬度地区为 6 ~ 10 km。暖季比冷季要高。对流层的平均厚度约为 12 km。这一层的特点是:①由于地球表面大陆和海洋分布不均匀,再加上不同纬度接收的太阳辐射及地形的差别,因而在对流层中,特别是在下层中存在着大气在垂直和水平方向的对流,空气发生强烈的混合。②空气质量约占大气层总质量的 3/4,并且还含有一定量的水蒸气,对人和动植物的生存起着重要的作用。③云、雾、雨、雪和雷电等天气现象都在这一层发生。污染物的迁移扩散和转化也主要是在这一层进行,特别是在离地 1 ~ 2 km 的大气边界层或摩擦层。因此,对流层是对人类生产、生活影响最大的一层。④气温随高度的增加而下降,一般情况下,平均每升高 100 m 下降 0.65℃。

2. 平流层

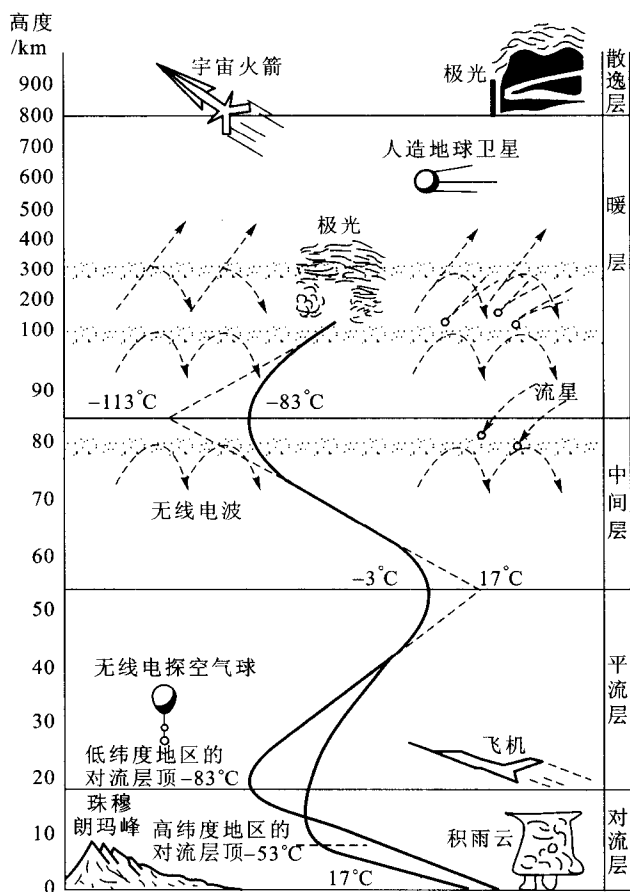


图 1-1 大气圈层的结构

对流层顶至 50 ~ 55 km 高度称为平流层。从对流层顶到 30 ~ 35 km, 气温几乎不随高度而变化, 称为同温层。在同温层上部气温则随高度的增加而迅速增高, 这是因为在该层中存在一厚度约为 20 km 的臭氧层, 能够强烈吸收太阳紫外线(波长为 200 ~ 300 nm) 使气温增高, 从而对地面生物起重要的保护作用。在平流层中, 大气多是处于平流流动, 因此, 不利于进入平流层的污染物扩散, 致使污染物在此层停留时间较长, 甚至可达数年之久。

3. 中间层

平流层顶至 85 km 高度称为中间层。该层气温随高度增加而迅速下降, 有强烈的垂直对流运动。

4. 暖层

中间层顶至 800 km 高度称为暖层。由于太阳的强烈紫外线辐射和宇宙射

线的作用,气温随高度增加而迅速上升,暖层空气处于高度的电离状态,故又称为电离层。

5. 散逸层

散逸层是大气圈的最外层,层顶不明确。该层空气更加稀薄,距离地面越远,气温越高,气体电离度越大,气体离子可散逸到宇宙空间。

(二) 大气组成

通常认为大气是由干燥清洁的空气(简称干洁空气)、水蒸气和悬浮颗粒三部分组成。地面上干洁空气的组成几乎是不变的,它的主要成分是氮、氧和氩,三者共计约占空气总量的 99.96% 以上,其它气体含量很少,表 1-1 列出了干洁空气中各组分所占的体积分数。

大气中水蒸气、悬浮微粒含量受地区、季节、气象和人们的生产、生活活动的影响而发生变化。水蒸气含量在热带有时高达 4%,而在南北极则不到 0.1%。大气中的悬浮微粒,主要是自然因素(如火山爆发)和人类活动所造成的,不论是含量还是化学成分都是变化的。

表 1-1 干燥清洁空气的组成

成分	相对分子质量	体积分数/%	成分	相对分子质量	体积分数/ 10^{-6}
氮(N ₂)	28.01	78.084 ± 0.004	氖(Ne)	20.18	18
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

二、大气污染

(一) 大气污染的定义

按照国际标准化组织(ISO)的定义,“大气污染通常系指由于人类活动或自然过程引起某些物质进入大气中,呈现出足够的浓度,达到足够的时间,并因此危害了人体的舒适、健康和福利或环境的现象”。

所谓对人体的舒适、健康的危害,包括对人体正常生理机能的影响,引起急性病、慢性病以致死亡等;而所谓福利,则包括与人类协调并共存的生物、自然资

源以及财产、器物等。人类活动包括生活活动和生产活动两方面,自然过程包括火山活动、山林火灾、海啸、土壤和岩石风化及大气圈的空气运动等。

(二) 大气污染的分类

大气污染按影响范围大致可分为四类:①局地性污染,如锅炉排气或工厂废气的直接影响;②地区性污染,如工业区或整个城市范围的大气污染;③广域性污染,如跨地区、大型工业地带的污染;④全球性污染,涉及全球(或国际性)的大气污染。

三、大气污染物及其来源

(一) 大气污染物

大气污染物是指由于人类活动或自然过程,排放到大气中对人或环境产生不利影响的物质。大气污染物质种类很多,按存在状态可分为气溶胶态污染物和气态污染物。按形成过程,又可分为一次污染物和二次污染物。

1. 气溶胶态污染物

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细小固体颗粒。粒子的尺寸范围一般为 $1 \sim 200 \mu\text{m}$ 左右,能因重力作用发生沉降,但在一段时间内能保持悬浮状态。它通常是在煤、矿石等固体物料运输、筛分、碾磨、加料和卸料等机械处理过程中形成,或者是由风所扬起的灰尘。

(2) 烟(fume):烟一般系指由冶金过程形成的固体粒子的气溶胶。烟的粒子尺寸一般为 $0.01 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 左右。它是由熔融物质挥发后生成的气态物质的冷凝物,在生成过程中总是伴有诸如氧化之类的化学反应,如有色金属冶炼过程中产生的氧化铅烟、氧化锌烟,在核燃料后处理厂中的氧化钙烟等。

(3) 飞灰(fly ash):飞灰指随燃料燃烧过程产生的随烟气排出的分散得较细的灰分。

(4) 黑烟(smoke):黑烟一般系指由燃料燃烧产生的能见气溶胶。

(5) 雾(fog):雾是气体中液滴悬浮体的总称。在气象中指造成能见度小于 1km 的小水滴悬浮体。在工程中,雾一般泛指小液体粒子悬浮体,它可能是由于液体蒸气的凝结、液体的雾化及化学反应等过程形成的,如水雾、酸雾、碱雾、油雾等。

在环境空气质量标准中,还根据大气中粉尘(或烟尘)颗粒的大小,将其分为