




研究生教育“十二五”规划教材

# 环境工程

宁平 主编

 科学出版社

研究生教育“十二五”规划教材

# 环境工程

宁平 主编



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

环境工程是环境科学与工程专业的研究生主修课程之一,本书根据污染要素的分类,内容涵盖空气污染控制工程、水污染控制工程、固体废物污染控制及资源化工程三部分,各部分内容涉及环境污染问题的治理技术,现有环境问题的类型、特点和现状及各类环境污染治理技术的原理、方法和设备;同时体现污染治理技术的最新科研成果、工程应用实践与新理论、新技术,着力提高学生以实践能力、创新能力为核心的综合素质。本书内容全面、重点突出,以利于学生依据研究方向进行自主选择,达到充分调动学生学习积极性和主动性的目的。

本书可作为高等学校环境工程专业的本科生、研究生教材,也可供从事相关专业的科研工作者和教师参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

环境工程/宁平主编. —北京:科学出版社,2016.3

研究生教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-03-047886-3

I. ①环… II. ①宁… III. ①环境工程-研究生-教材 IV. ①X5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 058359 号

---

责任编辑:赵晓霞 / 责任校对:张小霞

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张:16 1/2

字数:400 000

定价:65.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 《环境工程》编写委员会

主 编 宁 平

副主编 黄小凤 王向宇 瞿广飞

编 委(按姓名汉语拼音排序)

黄小凤 李 彬 李 凯 宁 平

瞿广飞 史建武 孙 鑫 王向宇

# 前 言

随着全球人口的增长和社会经济与科学技术的飞速发展,环境和环境问题已越来越引起人们的普遍关注。因此,环境工程技术对国家的经济和公众健康有着非常重要的意义。多年来,各国的科技工作者致力于环境污染控制技术的研究和实践,获得了许多防治污染和解决环境问题的成就,从而促进了环境工程技术的兴起和发展,同时也为环境工程的发展带来了更加广阔的前景。

环境工程是在人类同环境污染斗争的过程中逐渐形成并迅速发展的一门工程技术学科。多年来,尽管人类不断努力,但环境问题总体上仍未得到根本解决,还有诸多层出不穷的新污染和交叉污染问题,污染的控制不再是单纯的“末端治理”,而是转变为预防和治理相结合的“全过程控制”,这已成为世界各国人民的共识。

环境工程专业是培养具有可持续发展理念,具备废气污染控制、废水污染控制和固体废物处理与处置技术等方面知识,能解决当前环境污染所涉及的控制技术和装备问题,能从事环境工程技术研究和开发的高级工程技术人才的专业。同时为我国应用型的环境类人才培养提供示范作用。

本书共分为三部分,涵盖空气污染控制工程、水污染控制工程、固体废物污染控制及资源化工程;内容涉及环境问题的类型、特点及现状,各类环境污染治理技术的原理、方法和设备,最新科研成果、工程应用实践;紧密结合环境工程领域的发展动态及近年来的科研成果,尽可能反映近几年国内外环境工程技术开发研究和实际应用的新成果和新技术。

本书由昆明理工大学“研究生百门核心课程”专项资金资助出版,内容均由昆明理工大学的教师编撰,主编为宁平,全书共分为三篇,具体分工如下:第一篇由黄小凤、史建武编写,第二篇由王向宇、李彬编写,第三篇由瞿广飞、李凯、孙鑫编写,全书由宁平审核定稿。此外,博士生宋辛、何力为,硕士生李国标、陈丹莉、丁祥、刘寅、孙宝磊、米雪峰、刘贵、郭惠斌、刘烨、阮昊天、刘思健、张瑞元、王英伍、董国丽、王翠翠、张贵剑、何文豪参与了资料收集、编辑工作,在此一并致谢。

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2015年10月

# 目 录

## 前言

## 第一篇 空气污染控制工程

第 1 章 颗粒污染物控制	3
1.1 颗粒物的性质	3
1.2 颗粒物的主要来源	5
1.3 颗粒物的转化机制	6
1.4 颗粒物的主要控制方法	6
1.5 颗粒物治理工程案例	9
思考题及习题	10
第 2 章 二氧化硫污染控制	12
2.1 大气中二氧化硫的危害	12
2.2 大气中二氧化硫的主要来源	13
2.3 大气中二氧化硫的转化机制	13
2.4 二氧化硫的主要控制方法	14
2.5 二氧化硫治理工程案例	28
思考题及习题	30
第 3 章 氮氧化物污染控制	31
3.1 大气中氮氧化物的危害	31
3.2 氮氧化物的主要来源	32
3.3 大气中氮氧化物的转化机制	32
3.4 氮氧化物的主要控制方法	38
3.5 氮氧化物治理工程案例	45
思考题及习题	46
第 4 章 挥发性有机污染物控制	47
4.1 大气中挥发性有机物的危害	47
4.2 挥发性有机物的主要来源	47
4.3 挥发性有机物的转化机制	48
4.4 VOCs 的主要控制方法	48
4.5 挥发性有机物治理工程案例	56
思考题及习题	58
第 5 章 机动车污染物控制	59
5.1 机动车主要污染物的成因	59
5.2 机动车污染物排放的影响因素	61
5.3 机动车污染物的主要控制方法	63

5.4 机动车污染物治理方案..... 67

    思考题及习题 ..... 68

**第6章 磷化氢废气资源化及污染控制** ..... 69

    6.1 磷化氢的来源及危害..... 69

    6.2 磷化氢废气治理技术..... 70

    6.3 磷化氢废气治理工程案例..... 72

    思考题及习题 ..... 77

**第7章 重金属废气污染控制** ..... 78

    7.1 大气重金属污染来源及特点..... 78

    7.2 大气重金属污染控制技术..... 79

    7.3 某冶炼厂含重金属废气治理工程案例..... 80

    思考题及习题 ..... 81

**第二篇 水污染控制工程**

**第8章 基础理论** ..... 85

    8.1 水的循环..... 85

    8.2 水质概念及水质指标..... 86

    8.3 水污染控制模式..... 87

    思考题及习题 ..... 88

**第9章 水体污染防治和管理** ..... 89

    9.1 水体污染..... 89

    9.2 污水出路..... 91

    9.3 工业废水处理概述..... 93

    9.4 雨水的收集及利用..... 97

    思考题及习题..... 104

**第10章 水污染控制基础理论** ..... 105

    10.1 污水物理处理理论模型..... 105

    10.2 生物处理及生化反应动力学基础..... 120

    10.3 重金属的污染治理..... 129

    思考题及习题..... 133

**第11章 活性炭吸附废水处理** ..... 134

    11.1 活性炭的性能..... 134

    11.2 吸附等温线..... 137

    11.3 吸附理论及应用..... 138

    11.4 吸附设备设计..... 142

    11.5 典型案例分析..... 148

    思考题及习题..... 150

**第12章 活性污泥法** ..... 151

    12.1 活性污泥法概述..... 151

    12.2 CSTR型活性污泥法及设计..... 155

12.3 活塞流型活性污泥法及设计·····	160
思考题及习题·····	164
<b>第三篇 固体废物污染控制及资源化工程</b>	
<b>第13章 固体废物的收集、储存及清运·····</b>	<b>167</b>
13.1 城市生活垃圾的收集与清运·····	167
13.2 工业固体废物的收集、储存及清运·····	172
13.3 危险废物的收集、储存及清运·····	174
思考题及习题·····	175
<b>第14章 固体废物的预处理方法·····</b>	<b>176</b>
14.1 固体废物的压实·····	176
14.2 固体废物的破碎·····	178
14.3 固体废物的分选·····	186
14.4 固体废物的脱水·····	200
思考题及习题·····	206
<b>第15章 固体废物的物化处理·····</b>	<b>207</b>
15.1 浮选·····	207
15.2 稳定化/固化处理·····	208
15.3 典型案例·····	208
思考题及习题·····	209
<b>第16章 固体废物的生物处理·····</b>	<b>210</b>
16.1 堆肥和有机废物生物处理过程的基本生物原理·····	210
16.2 厌氧消化处理·····	215
16.3 微生物浸出·····	215
16.4 固体废物的其他生物处理技术·····	216
16.5 固体废物生物处理典型案例·····	217
思考题及习题·····	217
<b>第17章 固体废物的热处理·····</b>	<b>219</b>
17.1 焚烧处理·····	219
17.2 固体废物的热解处理·····	223
17.3 固体废物的其他热处理方法·····	225
17.4 典型案例·····	225
思考题及习题·····	227
<b>第18章 固体废物的资源化与综合利用·····</b>	<b>228</b>
18.1 工业固体废物的综合利用及案例·····	228
18.2 矿业固体废物的综合利用及案例·····	231
18.3 城市生活垃圾的综合利用及案例·····	234
18.4 农林固体废物的综合利用及案例·····	240
18.5 城市污泥的综合利用及案例·····	241
思考题及习题·····	242



---

第 19 章 危险废物及放射性固体废物处理与处置 .....	244
19.1 危险废物的处置 .....	244
19.2 放射性固体废物处置 .....	245
19.3 典型案例 .....	246
思考题及习题 .....	248
主要参考文献 .....	249

# 第一篇

## 空气污染控制工程



# 第 1 章 颗粒污染物控制

## 1.1 颗粒物的性质

大气颗粒物不是一种单一成分的污染物,而是由各种各样的人为源和自然源排放的大量成分复杂的化学物质所组成的混合物,并在粒径、形貌、化学组成、时空分布、来源、大气过程(包括干、湿沉降)及寿命等方面均具有很大的变化。大气颗粒物中的半挥发性组分,如水、硝酸铵和许多有机物在气态与颗粒态之间持续改变,同时其表面是大气物理化学反应的良好界面,因此颗粒物的化学组成在其大气历程中持续变化,并且颗粒表面的化学组成可能有别于其总体的化学组成。不同的单个颗粒可能包含化学性质截然不同的组分,并通常是由难溶的组分(如 BC、矿物尘和海盐)为核,外裹有机物、硫酸盐和硝酸盐等。大气颗粒物的基本性质与其来源、形成、在大气中的历程、大气能见度和气候变化等复杂影响密切相关。

### 1.1.1 粒径与粒径分布

大气颗粒物通常根据其大小和化学成分等加以表征。大气颗粒物的来源和形成过程、在大气中的迁移转化、输送和清除过程及其物理化学性质均与粒径有着直接的关系。大气颗粒物的来源和形成过程决定了其粒径大小,而粒径是影响大气颗粒物迁移转化、输送和清除过程及其物理化学性质的重要参数。

大气颗粒物的大小可以用半径或直径(粒径)来表示,意味着将其视作球体。实际大气中的颗粒物形状多为极不规则的,无法用几何半径或直径确切描述。对于不规则形状的颗粒物,通常采用当量直径或等效直径来表示。

对于大气颗粒物,目前普遍采用等效直径表示法,最常用的是空气动力学直径( $D_a$ )。PM<sub>x</sub>表示空气动力学当量直径为  $x\mu\text{m}$  的颗粒物。出于实际的需要,大气颗粒物通常采用简化的、颗粒群的统计特征加以表征,如某一粒径范围颗粒物的数量浓度和质量浓度。按粒径划分颗粒物的方法主要有三种:

(1) 按模态划分,基于颗粒物的形成机制及在大气中所观察到的模态结构。

(2) 按分割粒径划分,基于特定采样装置的 50%切割点(如 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>)。

(3) 按吸入人体的剂量划分,基于颗粒物进入呼吸系统某些部位的能力,如 PM<sub>10</sub> 也称为可吸入颗粒物(inhalable particles),PM<sub>2.5</sub> 也称为可入肺颗粒物(respirable particles),即能够进入人体肺泡的颗粒。粗颗粒物 PM<sub>2.5~10</sub> 是指空气动力学当量直径处于 2.5~10 $\mu\text{m}$  的颗粒物。此外,还有超细颗粒物(ultrafine particles)PM<sub>0.1</sub>及纳米颗粒物(nanoparticles)等。表 1-1 列出了 PM<sub>2.5</sub>与粗颗粒物在形成方式、化学组成、来源以及其他性质上的差别。

表 1-1 大气颗粒物不同粒径部分的比较

来源	细颗粒物(<2.5 $\mu\text{m}$ )		粗颗粒物
	超细颗粒物(<0.1 $\mu\text{m}$ )	积聚模态(0.1~2.5 $\mu\text{m}$ )	(2.5~10 $\mu\text{m}$ )
来源	燃烧,高温过程,大气反应		大的固体/液滴的破碎

续表

	细颗粒物(<2.5 $\mu\text{m}$ )		粗颗粒物 (2.5~10 $\mu\text{m}$ )
	超细颗粒物(<0.1 $\mu\text{m}$ )	积聚模态(0.1~2.5 $\mu\text{m}$ )	
形成方式	成核(有机物和硫酸蒸气), 冷凝, 凝并	冷凝, 凝并, 已有气体溶解并反应的云雾液滴的蒸发等	机械破坏(如碾压、研磨、表面磨损), 海浪飞沫蒸发, 尘土扬起, 气体在颗粒物上的反应等
组成	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , EC, 金属化合物, 低挥发性有机物	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , H <sup>+</sup> , EC, 有机物, 金属, 颗粒物所含的水分等	地壳扬尘(如土壤尘或道路尘), 煤、油和木材非控制燃烧的飞灰, 硝酸盐, 氧化物, 地壳元素(Si、Al、Ti、Fe等)的氧化物, CaCO <sub>3</sub> , NaCl, 海盐, 花粉, 孢子, 动植物碎屑, 轮胎和刹车片等的磨损碎屑等
典型的滞留时间	数分钟至数小时	数天至数周	数分钟至数小时
重要的去除机制	增长至积聚模态干湿沉降	干湿沉降	干湿沉降
典型的传输距离	<1km至数十公里	数百至数千公里	<1km至数十公里

### 1.1.2 形貌

大气颗粒物的形貌很复杂。液体颗粒的形状近乎球形, 而固体颗粒的形貌则多不规则, 有链状、似圆状、长条状、粗粒不规则状、球形、结晶体等。一些生物颗粒物具有规则的形态。不同来源和不同成分的颗粒物往往以外部混合或内部混合的形式结合在一起, 譬如硫酸盐通常与生物质燃烧和化石燃料燃烧的 BC 和 OC、矿物尘、硝酸盐粒子等不同程度地内部混合或外部混合在一起。

### 1.1.3 化学组成

大气颗粒物是由许多不同的人为源和自然源排放的大量化学组成复杂的物质所构成的混合物, 主要包括水溶性离子组分、含碳组分以及无机元素的化合物。这些物质中既有性质稳定的组分, 也有半挥发性成分, 包括硝酸铵、半挥发性有机物和水蒸气。大气颗粒物的含水量取决于其成分与相对湿度, 当相对湿度超过 80% 时颗粒物中的含水量急剧增加。颗粒物中许多无机组分(如水溶性组分 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 和其他无机离子)以及部分有机物在大气中具有吸湿性, 当相对湿度较高时会导致颗粒物的质量大幅度增加。

大气细颗粒物与粗颗粒物都是化学成分复杂的混合物, 但其来源与形成机制除了小部分重叠之外截然不同, 从而导致其化学组成有着很大的区别(表 1-1)。粗颗粒物的主要成分为无机物, 与产生它的矿物、土壤、材料等的成分相近。PM<sub>2.5</sub> 则主要由硫酸盐、硝酸盐、铁盐、元素碳、重金属(如 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Mn 等)、有机物(包括烷烃、烯烃、芳香烃、杂环化合物等)及微生物组成, 其中可能含有数量可观的有毒、有害化学成分。与粗颗粒物相比, 细颗粒物中许多有毒、有害化学成分(包括致癌、致突变和致畸形化合物)的富集度更高, 同时由于其比表面积要大得多而更易成为其他污染物的运载体和反应界面。

### 1.1.4 光学特性

对于大气中光的削弱作用有两种不同的机理, 即散射与吸收。悬浮在大气中的气溶胶颗

粒通过散射和吸收而影响太阳辐射的传输,使其强度和传输方向发生改变。这种作用与颗粒物的粒径、成分及混合状态等性质有关。对气溶胶光散射的研究始于19世纪末 Tyndall 的实验研究和 Rayleigh 的理论分析。Mie 于1908年在 Maxwell 电磁辐射理论的基础上提出光散射理论。光散射理论尽管复杂,但对于球形、均匀的颗粒是精确的,这也为气溶胶特性(如颗粒物的粒径和浓度)的测量提供了一种准确、可靠的工具。近年来,大气能见度降低的问题受到越来越多的关注,对其受大气气溶胶影响的研究也相应从大气物理学拓展到大气化学层面,包括基于观测构建化学消光算法以解析其各化学物种对消光(能见度降低)的贡献。

## 1.2 颗粒物的主要来源

大气颗粒物的来源根据作用的主体不同分为自然源和人为源,见表1-2。由机械力如破碎、研磨、爆破和开采等产生的粉尘以及沙尘可随风进入大气中;林木和农业废物不完全燃烧时排出烟;光化学反应所形成的烟雾则是大都市城区常见的人为排放所致。自然源大部分是大尺度的面源,因而自然源颗粒物(如随海浪飞沫产生的海盐颗粒和大风扬起的沙尘等)的分布较为均匀,且在较长的时间段内可以近似视为不变。人为源排放的颗粒物总量虽然不及自然源,但主要集中在地球上的小部分地区,即人口密集的工业区或城市,并且在这些地区人为源可能超过自然源。大气颗粒物来源贡献的大小随地理位置的不同和季节的变化而变化。自工业化革命以来,人为源颗粒物的大量排放已经显著增加,且全球气溶胶的平均含量,如由  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、VOCs 形成的二次颗粒物有较大幅度增加。

表 1-2 大气颗粒物化学组分的主要来源

成分	一次		二次	
	自然源	人为源	自然源	人为源
$\text{SO}_4^{2-}$	海浪沫	化石燃料燃烧	海洋与湿地排放的硫以及火山与森林火灾排放的 $\text{SO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ 的氧化	化石燃料燃烧排放的 $\text{SO}_2$ 氧化
$\text{NO}_3^-$	—	机动车排放与大型燃烧源	土壤、森林火灾和闪电产生的 $\text{NO}_x$ 氧化	化石燃料燃烧和机动车排放的 $\text{NO}_x$ 氧化
$\text{NH}_4^+$	—	机动车排放	野兽和未开垦土地释放的 $\text{NH}_3$	饲养动物、污水和施肥土地释放的 $\text{NH}_3$
OC	野火	露天燃烧,木材燃烧,烹调,机动车排放,轮胎磨损	植物释放的碳氢化合物氧化(如萜与腊),野火	机动车、露天燃烧和烧木材排放的碳氢化合物氧化
EC	野火	机动车排放,木材燃烧,烹调	—	—
矿物尘	风蚀,再扬起	无组织排放,铺砌与未铺砌道路,农业与林业	—	—
金属	火山活动	化石燃料燃烧,冶炼,刹车磨损	—	—
生物气溶胶	病菌、细菌	—	—	—

### 1.3 颗粒物的转化机制

大气颗粒物的产生方式包括以下三种:人为源或自然源直接以固态形式排出一一次颗粒物;在高温状态下以气态形式排出,在烟羽的稀释和冷却过程中凝结成固态的一次可凝结颗粒物;呈气态的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  和 VOCs 等前体物通过大气均相或非均相成核而形成二次细颗粒物。大气颗粒物的成核作用是通过物理过程和化学过程完成的,其中化学反应是推动力(唐孝炎等,2006),气体为大气中的化学反应提供了分子物质或自由基,它们在互相碰撞中结成分子团(属均相成核,即某物种的蒸气在气体中达到一定过饱和度时,由蒸气分子凝结成为分子团的过程)。如果大气中已存在大小适宜的颗粒物,则气体分子或自由基就优先在颗粒物的表面成核(属非均相成核)。

$\text{PM}_{2.5}$  中的一次颗粒物主要是 OC、EC 和矿物尘等;它们在源与受体之间经历的变化很小,其环境浓度在总体上与其排放成正比;其来源包括铺砌路面和未铺砌路面的无组织排放以及矿物质的加工和精炼过程等。而其他的来源如建筑、农田耕作、风蚀等的地表尘的贡献则相对较小。 $\text{PM}_{2.5}$  中的可凝结颗粒物主要由可在环境温度条件下通过凝结而形成气溶胶的 SVOCs 组成。 $\text{PM}_{2.5}$  中的二次颗粒物主要有硫酸盐、硝酸盐、铵盐和 SVOCs 等。二次硫酸盐颗粒物很稳定,而硝酸铵和由 SVOCs 生成的 SOA 因具有挥发性而在气、粒之间转化以维持化学平衡。

### 1.4 颗粒物的主要控制方法

颗粒物进入大气之后,在传输过程中由于积聚、凝结、碰并、化学反应和吸水等作用而发生变化,最终通过干沉降和湿沉降从大气中被消除。气体经过均相成核或非均相成核形成细颗粒物分散在大气中,通过其表面的多相气体反应及布朗凝聚和湍流凝聚等作用而长大。干沉降是指颗粒物在重力作用下或与地面其他物体碰撞后,发生沉降而去除。湿沉降是指颗粒物与云滴或雨滴结合后降落下来,分为雨除和冲刷两种不同的过程。然而,在实际的生产生活中,我们对一次颗粒物排放的控制主要是采用除尘器,对二次颗粒物则只能控制其前体物质,二次颗粒物的形成和变化规律是环境科学的重大研究课题之一。下面分别介绍几种常用除尘装置的工作原理、结构及性能以及除尘器的选择与发展。

#### 1.4.1 机械除尘器

机械除尘器通常指利用质量力(重力、惯性力和离心力)的作用使颗粒物与气体分离的装置,常用的有重力沉降室、惯性除尘器、旋风除尘器。

##### 1. 重力沉降室

重力沉降室是通过重力作用使尘粒从气流中沉降分离的除尘装置。气流进入重力沉降室后,流动截面积扩大,流速降低,较重颗粒在重力作用下缓慢向灰斗沉降。

考虑清灰的问题,一般隔板数在 3 以下。

重力沉降室的优点有结构简单、投资少、压力损失小(一般为  $50\sim 100\text{Pa}$ )、维修管理容易。缺点为体积大、效率低,仅作为高效除尘器的预除尘装置,除去较大和较重的粒子。

## 2. 惯性除尘器

### 1) 机理

沉降室内设置各种形式的挡板,含尘气流冲击在挡板上,气流方向发生急剧转变,借助尘粒本身的惯性力作用,使其与气流分离。

### 2) 惯性除尘器结构形式

冲击式——气流冲击挡板捕集较粗粒子。

反转式——改变气流方向捕集较细粒子。

### 3) 惯性除尘器的应用

惯性除尘器一般应用在如下情况:①一般净化密度和粒径较大的金属或矿物性粉尘;②净化效率不高,一般只用于多级除尘中的一级除尘,捕集 $10\sim 20\mu\text{m}$ 的粗颗粒;③压力损失 $100\sim 1000\text{Pa}$ 。

## 3. 旋风除尘器

旋风除尘器是利用旋转气流产生的离心力使尘粒从气流中分离的装置,用来分离粒径 $5\sim 10\mu\text{m}$ 及以上的颗粒物,工业上已有100多年的使用历史。

普通旋风除尘器由进气管、筒体、锥体和排气管等组成。气流沿外壁由上而下旋转运动。

外涡旋:少量气体沿径向运动到中心区域,旋转气流在锥体底部转而向上沿轴心旋转。

内涡旋:气流运动包括切向、轴向和径向,对应有关切向速度、轴向速度和径向速度。

优点:①结构简单、占地面积小;②投资少、操作维修方便;③可用于各种材料制造,能用于高温、高压及腐蚀性气体,并可回收干颗粒物。

缺点:①压力损失较大、动力消耗也较大;②效率在80%左右,捕集 $<5\mu\text{m}$ 颗粒的效率不高,一般作预除尘用。

切向速度决定气流质点离心力大小,颗粒在离心力作用下逐渐移向外壁;到达外壁的尘粒在气流和重力共同作用下沿壁面落入灰斗;上涡旋气流从除尘器顶部向下高速旋转时,一部分气流带着细小的尘粒沿筒壁旋转向上,到达顶部后,再沿排出管外壁旋转向下,最后从排出管排出。

### 1.4.2 电除尘器

电除尘器是含尘气体在通过高压电场进行电离的过程中,使尘粒荷电,并在电场力的作用下使尘粒沉降在集尘极上,将尘粒从含尘气体中分离出来的一种除尘设备。

电除尘器的主要优点:①压力损失小,一般为 $200\sim 500\text{Pa}$ ;②处理烟气量大,可达 $10^5\sim 10^6\text{m}^3/\text{h}$ ;③能耗低,为 $0.2\sim 0.4\text{kWh}/1000\text{m}^3$ ;④对细粉尘有很高的捕集效率,可高于99%;⑤可在高温或强腐蚀性气体下操作。缺点:①一次性投资高;②安装精度要求高;③对粉尘比电阻有一定要求。

电除尘器的工作原理:①悬浮粒子荷电——高压直流电晕;②带电粒子在电场内迁移和捕集——延续的电晕电场(单区电除尘器)或光滑的不放电的电极之间的纯静电场(双区电除尘器);③捕集物从集尘表面上清除——振打除去接地电极上的粉尘层并使其落入灰斗。分为单区(延续的电晕电场)和双区(光滑的不放电的电极之间的纯静电场)电除尘器。



### 1.4.3 湿式除尘器

湿式除尘器是使含尘气体与液体(一般为水)密切接触,利用水滴和尘粒的惯性碰撞及其他作用捕集尘粒或使粒径增大的装置,可以有效去除直径为 $0.1\sim 20\mu\text{m}$ 的液态或固态粒子,也能脱除气态污染物,工程上使用的湿式除尘器形式很多,大体分为低能、高能两类。低能压力损失 $0.2\sim 1.5\text{kPa}$ ,包括喷雾塔、旋风洗涤器等。一般耗水量( $L/G$ ) $0.5\sim 3.0\text{L}/\text{m}^3$ ,对 $10\mu\text{m}$ 以上的净化效率可达 $90\%\sim 95\%$ ,常用于焚烧炉、化肥制造、石灰窑的除尘;高能湿式除尘器压力损失为 $2.5\sim 9.0\text{kPa}$ ,净化效率可达 $95\%$ 以上,如文丘里洗涤器。

根据湿式除尘器的净化机理,大致分为:重力喷雾洗涤器、旋风洗涤器、自激喷雾洗涤器、板式洗涤器、填料洗涤器、文丘里洗涤器、机械诱导喷雾洗涤器。

湿式除尘器的优点主要有:①在耗用相同能耗时,除尘效率比干式机械除尘器高。高能耗湿式除尘器清除 $0.1\mu\text{m}$ 以下粉尘粒子,仍有很高效率;②除尘效率可与静电除尘器和布袋除尘器相比,而且还可适用于它们不能胜任的条件,如能够处理高温、高湿气流,高比电阻粉尘及易燃易爆的含尘气体;③在去除粉尘粒子的同时,还可去除气体中的水蒸气及某些气态污染物。既起到除尘作用,又起到冷却、净化的作用。

湿式除尘器的缺点主要有:①排出的污水污泥需要处理,澄清的洗涤水应重复回用;②净化含有腐蚀性的气态污染物时,洗涤水具有一定程度的腐蚀性,因此要特别注意设备和管道腐蚀问题;③不适用于净化含有憎水性和水硬性粉尘的气体;④寒冷地区使用湿式除尘器时容易结冻,应采取防冻措施。

湿式除尘机理涉及各种机理中的一种或几种,主要是惯性碰撞、扩散效应、黏附、扩散漂移和热漂移、凝聚等作用。

### 1.4.4 过滤式除尘器

过滤式除尘器是使含尘气流通过过滤材料将粉尘分离捕集的装置。主要形式有:①空气过滤器,如滤纸或玻璃纤维;②颗粒层除尘器,如砂、砾、焦炭等颗粒物;③袋式除尘器,如纤维织物。

袋式除尘器除尘的机理为惯性碰撞、扩散、筛分。采用纤维织物作滤料的袋式除尘器,在工业尾气的除尘方面应用较广,除尘效率一般可达 $99\%$ 以上,其效率高、性能稳定可靠、操作简单,因而获得越来越广泛的应用。

袋式除尘器除尘效率的影响因素:①粉尘负荷;②过滤速度。过滤速度是烟气实际体积流量与滤布面积之比,也称气布比。过滤速度是一个重要的技术经济指标,选用高的过滤速度,所需要的滤布面积小,除尘器体积、占地面积和一次投资等都会减小,但除尘器的压力损失却会加大。一般来讲,除尘效率随过滤速度增加而下降。过滤速度还与滤料种类和清灰方式有关。

袋式除尘器作为一种高效除尘器,被广泛用于各种工业部门的尾气除尘。它比电除尘器结构简单、投资省、运行稳定,可以回收高比电阻粉尘。与文丘里洗涤器相比,动力消耗小、回收的干粉尘便于综合利用。对于微细的干燥粉尘,采用袋式除尘器捕集是适宜的。