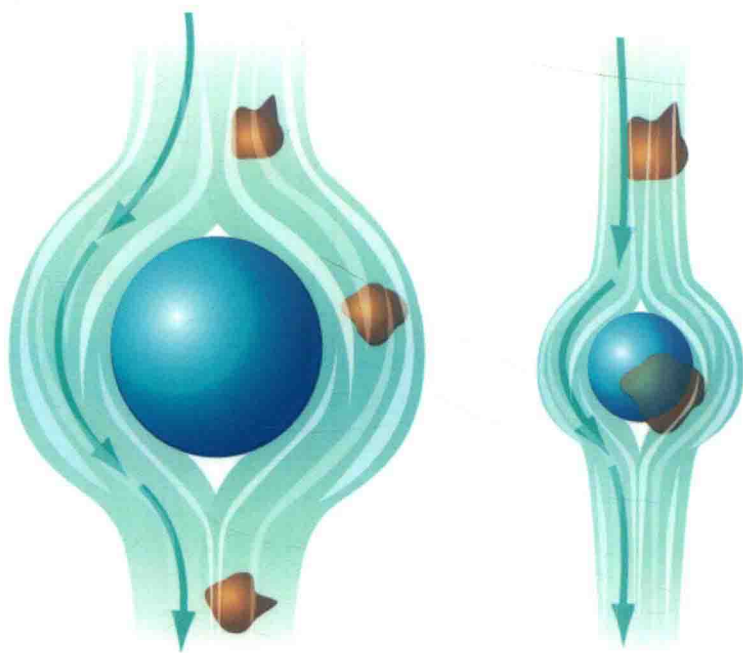


Fine Particles and Trace Elements
Control Technology

微细颗粒物及痕量有害物质 污染治理技术

郭东明 编著



化学工业出版社

Fine Particles and Trace Elements
Control Technology

微细颗粒物及痕量有害物质 污染治理技术

郭东明 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书系统地介绍了微细颗粒物、二氧化硫、氮氧化物、三氧化硫和汞等污染物的治理理论知识以及相关治理技术装置的工程设计方法。

全书共分为十二章，第一章至第五章介绍微细颗粒物的物化性质及其治理设备的工程设计方法，并列举了大量工程实践数据；第六章介绍了气液分离技术，它是保证湿法脱硫除尘最终性能的重要因素之一；第七章和第八章主要对现有的脱硫脱硝装置性能的提高提出了改进方法；第九章针对目前备受关注的蓝烟和白烟问题，分析其原因并提出解决措施；第十章至第十二章主要介绍了烟气中痕量有害物质的治理工艺与设备，其中对汞和三氧化硫的吸收、吸附技术做了详细的介绍。

本书可供从事环境保护工作的管理人员、工程技术人员、科研人员参考使用，也可作为在校学生学习参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

微细颗粒物及痕量有害物质污染治理技术/郭东明编著.

—北京: 化学工业出版社, 2018. 9

ISBN 978-7-122-32582-2

I. ①微… II. ①郭… III. ①粒状污染物—污染防治

IV. ①X513

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 152140 号

责任编辑: 戴燕红

文字编辑: 汲永臻

责任校对: 王 静

装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编

印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 26 字数 661 千字 2019 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷



购书咨询: 010-64518888 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 148.00 元

版权所有 违者必究

前言

经过多年的努力，我国在大气污染防治方面取得了很大的成绩，雾霾天数逐渐减少，蓝天天数不断增加，特别是脱硫脱硝除尘的超低改造，对保护人们的身体健康、提高人们的生活质量做出了重要的贡献。但与此同时，也付出了巨大的经济、能源代价。

从目前的改造情况看，大多采用串联的方式，即低氮燃烧+SNCR/SCR+除尘器+脱硫装置+湿式电除尘器方式，整个脱硫脱硝除尘系统变得更为复杂，投资费用、运行费用和能耗都有较大的增加。此外，从脱硫脱硝除尘的减排量与系统的能耗相比来看，性价比也并不佳。

继常规的二氧化硫、氮氧化物和粉尘的污染之后，近年来，人们对蓝烟、白烟和重金属的污染也日益关注。烟气中的微细颗粒物和三氧化硫是烟气呈蓝色的罪魁祸首，以汞、砷、镉、硒和铬为代表的重金属也是首要的几种技术污染物，二噁英和呋喃则是烟气中主要的有机污染物。相对于这些污染物，白烟更多的是视觉污染，笔者并不主张对白烟消除提出过高的要求，只有当出现石膏雨和缺水地区（采取冷凝回收的方法）或者靠近市区和景区时才考虑消除白烟的问题。

一套性能优越的环保系统是多种工艺技术的有机结合。因此，立足于现有环保设备的改进提高，充分挖掘各自的性能潜力，同时提高运行人员的管理操作水平，以最小的代价获得最大的效益是需要的。

《微细颗粒物及痕量有害物质污染治理技术》就是在上述背景下编写的。书中重点介绍了微细颗粒物、三氧化硫、汞的脱除技术，以及对现有脱硫脱硝系统的改造优化技术，目的是通过核心工艺技术以及装备的介绍使读者能够结合现有的环保设备，因地制宜，改进提高目前现有环保装置的设计和运营水平，乃至开发出新的、更有效的环保工艺技术和装备。

本书可供环保等相关院校、科研院所以及电力、化工、冶金、建材等行业的工程技术人员、管理人员参考。

本书在编写过程中得到了国内外同行的无私帮助，所以本书也是他们心血的结晶，在此一并表示感谢。

编著者

2018年3月于北京

目 录

第一章 微细颗粒物的基本性质	1
第一节 微细颗粒物的来源与危害	1
一、微细颗粒物的来源与危害概述	1
二、PM _{2.5} 浓度的测量	5
第二节 微细颗粒物的主要特性	6
一、凝聚性	6
二、润湿性	7
三、附着性	7
四、磨啄性	8
第二章 干式除尘技术	9
第一节 提高干式静电除尘器效率的主要措施	9
一、增加预处理设施	11
二、烟气调质	13
三、添加团聚剂	15
四、液滴荷电	16
五、调整烟气温度	16
六、改进电除尘器结构参数	16
七、提高气流分布的均匀性	16
八、改善锅炉系统运行条件	16
九、电源改造	17
第二节 低低温电除尘器	17
第三节 电袋复合除尘器	20
第四节 移动极板静电除尘技术	24
一、移动电极式电除尘器的技术特点	26
二、移动电极式电除尘器设计使用中应注意的问题	26
第五节 交流凝并技术	27
一、电凝并的机理	27
二、电凝并装置	29

第三章 湿式除尘技术	32
第一节 湿式除尘装置基本原理及设计参数	32
一、湿式除尘装置基本原理	32
二、湿式除尘装置主要设计参数	37
第二节 湿式除尘装置	40
一、喷雾塔	43
二、冲激式除尘器	47
三、水浴除尘器	47
四、筛板塔/托盘塔	47
五、纤维除尘器	55
六、多级静态混合塔	55
七、S形泡罩塔盘	55
八、动力波除尘器	56
九、顺流填料床	57
十、生态冷凝洗涤系统	57
十一、电荷塔	58
十二、机械助力洗涤塔	59
十三、鼓泡装置	60
十四、撞击流	62
十五、气动塔	62
十六、喷射式除尘器	63
十七、涡扇洗涤器	66
第三节 凝并除尘技术	67
一、冷凝洗涤除尘	67
二、蒸汽相变除尘	75
三、冷凝在湿式脱硫系统中的应用	77
第四节 提高湿式除尘装置效率的其他措施	78
第四章 湿式电除尘技术	85
第一节 湿式电除尘器原理与结构	85
一、湿式电除尘器的工作原理	85
二、湿式电除尘器的结构与材料	88
三、湿式电除尘器的布置	93
第二节 湿式电除尘器的电源	94
一、工频电源	95
二、高频电源	95
三、三相电源	96

四、脉冲电源	97
第三节 影响湿式电除尘器性能的几个因素	98
第四节 湿式电除尘器的废水处理	103
一、絮凝沉淀流程	104
二、精密过滤装置	104
第五节 湿式电除尘器运行与日常维护	106
一、湿式电除尘器的检查与投运	107
二、湿式电除尘器的正常停运	107
三、湿式电除尘器运行与维护中的注意事项	107
四、湿式电除尘器设备故障现象、原因及消除方法	109
第五章 文丘里除尘技术	112
第一节 文丘里管的基本结构	112
一、收缩段	114
二、喉道	114
三、扩散段	115
四、文丘里管等效设计	115
第二节 文丘里管的主要工艺参数	116
一、喉道布液方式	117
二、喉道气速	118
三、洗涤液雾化粒径	118
四、压力损失	122
五、液气比	125
六、气流雾化粒径	125
七、除尘效率	128
第三节 预饱和对文丘里管除尘效率的影响	132
第四节 喷射文丘里装置	138
一、喷射文丘里装置的结构参数	139
二、喷射文丘里装置的性能参数	142
三、喷射文丘里装置的传质	145
第六章 气液分离技术	148
第一节 雾滴分离基本原理	148
一、湿式脱硫塔中雾滴的产生	148
二、除雾原理	149
三、气流中液滴在离心力场中的运动	149
四、雾滴的二次携带	153
第二节 折板式除雾器	154

一、折板除雾器的结构	154
二、影响折板除雾器性能的几个特征参数	157
三、影响折板除雾器性能的其他因素	159
四、折板除雾器的材质	161
五、几种除雾器性能比较	162
六、除雾器在脱硫塔中的布置	167
七、除雾器冲洗系统的设计	168
八、除雾器的监测	171
第三节 离心式分离器	171
一、直流式分离器	172
二、切向式旋风分离器	177
三、轴流式旋风分离器	180
第四节 旋流板分离器	180
第五节 其他形式的除雾器	184
一、重力式气水分离器	184
二、弯头气水分离器	184
三、丝网除雾器	184
四、PRS 分离器	186
五、静电除雾器	187
六、PP 管式除雾器	188
七、填料床除雾	189
第六节 组合式雾滴分离器	191

第七章 脱硫超低改造技术

第一节 脱硫塔协同除尘技术	195
一、预洗涤	196
二、改变吸收剂	196
三、脱硫塔入口优化	197
四、喷淋层优化	197
五、增效环	199
六、增混元件	200
七、采用高效除雾器	204
八、冷凝	205
九、改善吸收介质	205
第二节 脱硫废水零排放技术	206
一、FGD 系统需要排放废水的原因	206
二、废水排放量的确定	207

三、湿法脱硫废水特征	208
四、FGD 废水处理系统	209
五、废水烟道蒸发系统 (WES)	214
六、废水浓缩固化系统 (WCS)	217
七、废水蒸发结晶系统	217
第八章 脱硝超低排放技术	220
第一节 SCR 脱硝工艺运行中的主要问题	220
一、氮氧化物的物化性质	220
二、运行中的主要问题	222
第二节 臭氧脱硝技术	226
一、臭氧的物化性质	226
二、臭氧生产	227
三、臭氧氧化反应的选择性	227
四、臭氧脱硝的影响因素	229
五、几种脱硝技术比较	233
第三节 双氧水高温脱硝技术	234
一、双氧水的基本物化性质	234
二、双氧水脱硝	235
第四节 其他氧化剂脱硝技术	238
一、氮氧化物的其他氧化剂	238
二、氮氧化物的氧化产物的吸收	239
第五节 SCR 协同脱除二噁英	241
一、二噁英的基本性质	241
二、二噁英的主要来源	241
三、二噁英的去除方法	242
四、影响 SCR 催化分解二噁英的主要因素	244
第六节 活性焦同时脱硫脱硝除尘技术	246
一、脱硫、脱硝、解吸工艺和原理	247
二、主要设备	250
三、活性炭的选择	255
第九章 烟羽清除技术	257
第一节 烟羽不透明度的影响因素	257
一、硫酸气溶胶对不透明度的影响	258
二、微细颗粒物对不透明度的影响	259
三、烟气温度对不透明度的影响	261

第二节 烟羽不透明度产生的原因及其控制措施	262
一、脱硫塔中硫酸气溶胶的生成	262
二、烟气冷凝与颗粒物	264
三、不透明度的控制措施	269
第三节 白烟产生的原因及解决措施	270
一、白烟产生的原因	271
二、换热器/冷凝器的布置	273
第四节 回转式再热器	275
一、传热元件与搪瓷技术	276
二、超低漏风控制系统	277
三、清洗装置	277
第五节 热管式换热器	279
一、热管烟气换热器的特点	279
二、热管的防腐	281
三、热管换热器防堵	282
第六节 水媒式换热器	283
一、水媒式换热器的工艺流程与结构	283
二、防磨损、防积灰技术措施	285
三、换热管防腐蚀	287
四、防泄漏的技术保障措施	288
五、换热器循环水防止汽化措施	288
六、材料的选择	289
第十章 痕量有害物质治理技术	295
第一节 痕量元素的来源与危害	295
一、痕量元素的来源	295
二、影响痕量元素最终形态的因素	300
三、痕量元素的基本性质	302
第二节 痕量元素的控制	307
第三节 油烟控制技术	312
一、油烟的来源	312
二、油烟的危害	313
三、油烟的控制措施	313
四、香烟	315
第十一章 三氧化硫脱除技术	318
第一节 三氧化硫的来源与危害	318
一、 SO_3 的生成途径	318
二、 SO_3 对电厂运行的影响	320
第二节 三氧化硫控制技术	321
一、炉内喷碱性物质	322

二、控制较低的空气预热器出口温度	322
三、在空气预热器和电除尘器之间喷射 NH_3	323
四、对湿式脱硫后烟气进行冷凝或喷射蒸气	323
五、脱硝催化剂配比的调整	323
六、燃料切换和混煤掺烧	324
七、湿式静电除尘器	324
八、干式电除尘器	325
九、炉后喷射碱性物质	325
第三节 碳酸氢钠脱除三氧化硫技术	329
一、碳酸氢钠干粉喷射	329
二、碳酸钠溶液喷射	333
第十二章 汞的脱除技术	338
第一节 汞的基本性质与测量	338
一、汞的基本性质	339
二、汞的存在形态	341
三、影响汞形态的几个因素	342
四、汞的测量技术	346
第二节 活性炭脱汞	348
一、活性炭	349
二、其他吸附剂	362
第三节 氧化法脱汞	363
一、臭氧	364
二、 HCl 和 Cl_2	366
三、煤中添加溴盐	371
四、亚氯酸钠和次氯酸钠	371
五、金基、钯基类氧化剂	375
六、SCR 催化剂	377
七、添加硫化物	380
八、Fenton 试剂	380
九、添加 KMnO_4	381
十、飞灰	381
十一、铜或铁的氧化物	381
第四节 沉淀法除汞	382
第五节 湿法脱硫系统脱汞	390
一、二价汞还原的影响因素	393
二、二价汞还原的控制	397
三、脱硫石膏中汞的稳定性	401
主要参考文献	403

第一章

微细颗粒物的基本性质

第一节 微细颗粒物的来源与危害

一、微细颗粒物的来源与危害概述

微细颗粒物通常指 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 。

$PM_{2.5}$ 是指悬浮于空气中的空气动力学等效直径等于或小于 $2.5\mu m$ 的粒子。 $PM_{2.5}$ 的形成方式有 3 种：直接以固态形式排出的一次粒子；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粒子；由气态前体污染物通过大气化学反应而生成的二次粒子。 $PM_{2.5}$ 中的一次粒子主要产生于化石燃料和生物质燃料的燃烧，某些工业过程也能产生大量的一次 $PM_{2.5}$ ，一次粒子源包括从铺装路面和未铺装路面扬起的无组织排放及矿物质的加工和精炼过程等，其他的一些来源，如来自建筑、农田耕作、风蚀等的地表尘对环境 $PM_{2.5}$ 的贡献则相对较小。可凝结粒子主要由可在环境温度下凝结而形成颗粒物的半挥发性有机物组成。二次 $PM_{2.5}$ 由多相化学反应形成，普通的气态污染物通过该反应可转化为极细小的粒子。在大多数地区，硫（S）和氮（N）为所观察到的二次 $PM_{2.5}$ 的主要组分。燃煤 $PM_{2.5}$ 组成一般分为可溶性组分、元素组分和碳质组分。可溶性组分一般包括硫酸盐、硝酸盐、铵盐、氯化钠等无机组分及甲酸、乙酸、乙二酸等可溶性有机物，可溶性组分一般占 $PM_{2.5}$ 的 20%~50%（质量分数）；元素组分包括 Na、Mg、Al、S、P、Cl、K、Ca、Br、Ni、Cu、Fe、Mn、Zn、Pb 等近 40 种金属及非金属元素；碳质组分包括有机碳和无机碳，有机物包括正构烷烃、多环芳烃、杂环化合物等。

PM_{10} 是指空气动力学直径小于或等于 $10\mu m$ 的可吸入颗粒物。燃煤 PM_{10} 微粒的主要元素组分是 Ca、Al、Si，占 94.58%，其余为 Ca、S、Na、Mg、K、Cl 等次要元素，主要由硅铝质矿物颗粒组成，多呈规则的球形结构，球体表面光滑无孔，为难溶于水且吸湿性较差的硅铝质矿物颗粒；燃油 PM_{10} 微粒的主要元素组分是 C、O，主要为有机组分，属强憎水性微粒，润湿性能不及燃煤微粒，平均粒径约为 $0.4\mu m$ 。

总悬浮颗粒物是指悬浮在大气中的空气动力学直径小于 $100\mu m$ 的颗粒物。气溶胶是指液相或固相微粒均匀地分散在气体中形成的相对稳定的悬浮体系，大气气溶胶一词习惯上是



指大气中悬浮的固体或液体粒子。

PM_{2.5}、PM₁₀与人类头发直径大小比较见图 1-1。

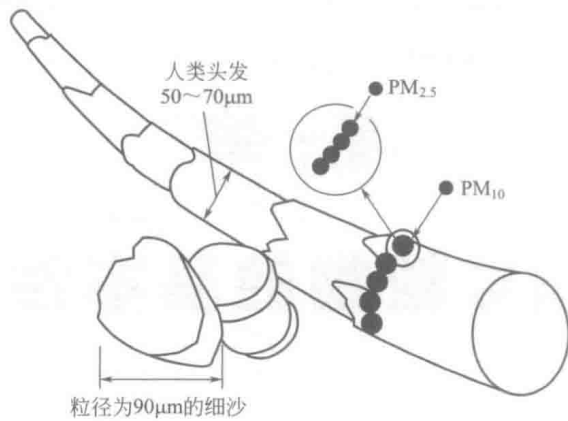


图 1-1 PM_{2.5}、PM₁₀与人类头发直径大小比较

大气颗粒物已对人体健康、环境和气候产生主要的影响。研究表明，影响人体健康的最大污染因子是 PM₁₀、PM_{2.5} 和 TSP，其次是 SO₂，而 NO_x 的影响相对较弱。

颗粒的大小决定其进入人体的位置，直径小于 2.5 μm 的颗粒能够进入人体肺部的气体交换系统。颗粒越细，其表面积越大，会吸附较多的有害物质。大于 10 μm 的颗粒会被人的鼻毛阻挡，5~10 μm 的颗粒会被呼吸道阻挡，而小于 2.5 μm 的颗粒可进入人体肺部。

颗粒物的粒径与深式呼吸气流的关系见表 1-1。颗粒物在呼吸系统内的沉积见图 1-2。

表 1-1 颗粒物的粒径与深式呼吸气流之间的关系

粒径	深式呼吸气流
30 μm	达到肺部气管,未达到支气管以上
10 μm	达到末端细支气管
3 μm	达到肺泡部位
0.3 μm	在肺泡壁和肺泡囊中大部分沉着(2.6%左右再呼出)
0.1 μm	在肺泡壁和肺泡囊中大部分沉着(2.6%左右再呼出)
0.03 μm	在肺泡壁和肺泡囊中大部分沉着(34%左右再呼出)

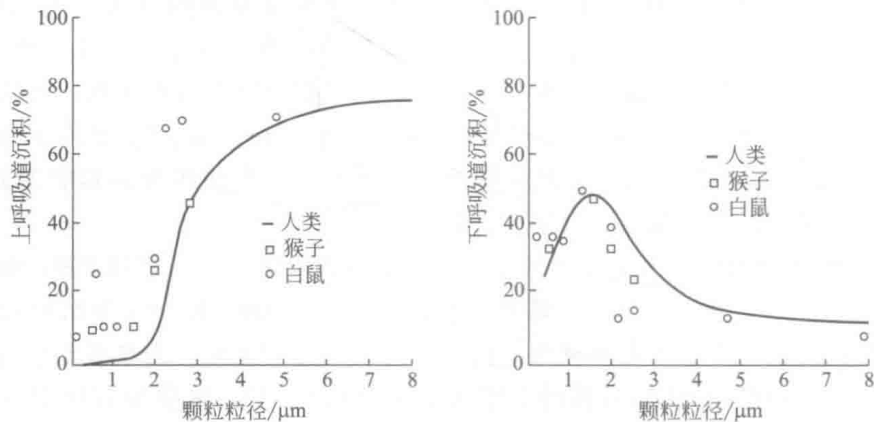


图 1-2 颗粒物在呼吸系统内的沉积

常见颗粒物污染源中的粒径分布见表 1-2。



表 1-2 常见颗粒物污染源中的粒径分布

颗粒物污染源	道路与土壤扬尘/%	农业燃烧/%	薪柴燃烧/%	柴油车/%	石油燃烧/%	建筑扬尘/%
<1μm	4.5	81.6	92.4	91.8	87.4	4.6
<2.5μm	10.7	82.7	93.1	92.3	97.4	5.8
<10μm	52.3	95.8	95.8	96.2	99.2	34.9
>10μm	47.7	4.2	4.2	3.8	0.8	65.1

一些雾滴及其他颗粒的直径范围见表 1-3。

表 1-3 一些雾滴及其他颗粒的直径范围

颗粒种类	大小范围/μm
大型有机分子	约 0.004
冷凝生成的雾滴	0.1~30
烟	0.0045~1
大气层中的云或雾	4~50
高压雾化生成的雾滴	1~500
大气层中生成的薄雾	50~100
沸腾液体形成的颗粒	20~1000
管道中二项流生成的颗粒	10~2000
雨滴	400~4000

室内空气污染物粒径见表 1-4。

表 1-4 室内空气污染物粒径

颗粒物	粒径/μm	颗粒物	粒径/μm
头皮屑	1~40	石棉	0.25~1
毛绒	225	飘尘	5~25
虫螨	50	香烟烟雾	0.1~0.8
螨原虫	5~10	柴油车烟气	0.01~1
花粉	2~200	硫酸盐/硝酸盐	0.1~25
猫皮屑	1~3	油烟	<0.1
细菌	0.05~0.7	金属烟	<0.1
病毒	<0.01~0.05	臭氧、烃等气溶胶	<0.1
阿米巴虫	8~20	金属纤维	3~10

单纯的机械过程无法获得粒径小于 10μm 的颗粒，粒径为 0.1~10μm 的颗粒主要由燃烧、蒸发和冷凝产生。

常见颗粒物的粒径范围见图 1-3。

微细颗粒物较小的粒径造成了其表面具有很强的吸附能力，能够吸附有害气体、重金属粒子和致癌性的苯并芘（BaP）有机物等。细粒子也是细菌和病毒的载体，有机粉尘为空气中细菌和病毒提供了所必需的营养和滋生场所。颗粒表面还具有催化作用，能促进大气反应的进行。大气中的多环芳烃（PAHs）主要集中于细粒子范围内，而粗粒子中的 PAHs 含量很少。大约 70%~90% 的 PAHs 吸附于小于 5μm 的可吸入颗粒物上，其中致癌活性的苯并芘（BaP）绝大多数吸附于 1.1μm 粒径的颗粒物上。大气颗粒物中对人体有害的一些元素如 Cr、Ni、As、Pb、V、Cu、Zn、Mn 等主要富集在小于 2μm 的颗粒表面，被人体吸收后多易沉积于肺泡区。国际标准化组织（ISO）提出的易引起儿童和成人发生肺部疾病的“高危险性颗粒物”为小于 2.4μm 的颗粒物，与 PM_{2.5} 甚为接近。如吸入铬能引起鼻中溃疡和穿孔，肺癌发生率增加；吸入锰会引起中毒性肺炎；吸入镉能引起心肺功能不全；苯并芘侵入肺部引起肺癌等。

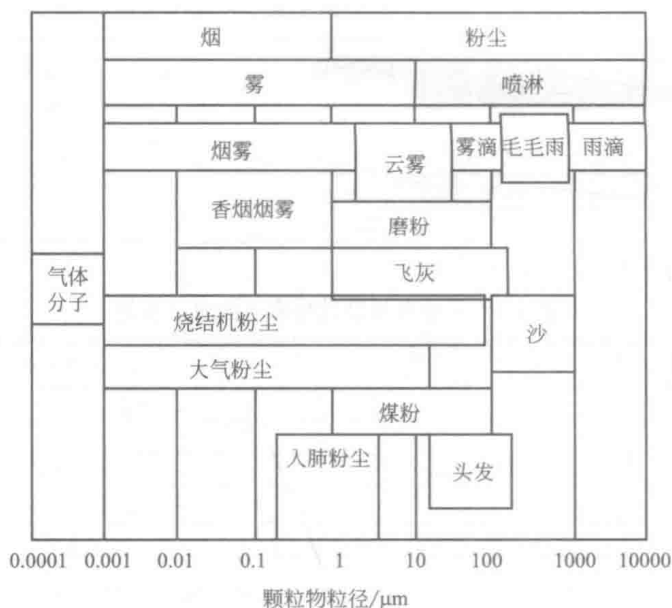


图 1-3 常见颗粒物的粒径范围

存在于细颗粒中的元素种类达 70 多种。其中, Cl 和 Br 主要以气体形式存在于大气中, Si、Ni、Ca、Mg、Fe、Ti、Se、Na 等地壳元素以氧化物的形式存在于粗粒子 ($>3.5\mu\text{m}$) 中, As、Cr、Ni、Cu、Zn 等元素大部分存在于细粒子 ($0.1\sim0.2\mu\text{m}$) 中。

Zn 是一种被认为可能具有生物活性的元素, 它可以影响生物体中酶的形成和作用。

Cu 元素在大气中的增加与使用柴油取代燃煤作为取暖燃料有关。

As 常被当作燃煤来源颗粒物的标识元素, 它是一种典型的污染元素, 具有潜在的生物活性。

Pb 常被当作一种具有潜在生物活性的元素, 是被世界卫生组织、欧盟和美国 EPA 唯一规定了质量浓度标准的元素, 它在大气中的含量被认为与使用含铅汽油有关。

大气颗粒物中的痕量金属元素 (主要是 Hg、As、Cd、Cr、Se 及其化合物) 是造成 DNA 氧化性损伤的主要因素, 特别是其中的水溶部分。

汞的原子量为 80, 密度为 $13.5336\text{g}/\text{cm}^3$, 熔点为 -38.83°C , 银白色, 无味; 沸点为 356.7°C , 室温下呈液态, 25°C 时的蒸气压为 0.266644Pa ; 溶解于浓硝酸和热硫酸中, 在脂类物质中具有一定的溶解度; 氧化态化合价为 +1 和 +2; 每天暴露 8h 或每周暴露 40h, 允许的汞浓度为 $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ 。

煤中的汞主要存在于含硫化合物 (如 HgS) 和有机化合物中, 也有少量以单质汞的形式存在。当煤在锅炉中燃烧时, 其燃烧温度可达 1500°C 左右, 此温度可将煤中汞蒸发, 形成气态单质汞, 随着烟气温度下降以及与烟气中其他物质的相互作用, 部分单质汞转化为其他价态的汞。

烟气中的汞主要以三种形态出现, 即 Hg^0 、 Hg^{2+} 和颗粒汞 (Hg_p)。氧化态汞以 Hg^{2+} 表示; 颗粒汞指黏附在固体颗粒上的汞, 以 Hg_p 表示。氧化态汞化合物主要有 HgCl_2 、 HgO 、 HgSO_4 和 $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ 等, 一些研究人员亦将氧化态汞统称为离子汞。例如, 某电站汞的形态分布为 Hg^0 占 3%、 Hg^{2+} 占 43% 和 Hg_p 占 54%。对于亚烟煤, SCR 对 Hg^0 的氧化作用不大, 对湿式 FGD 捕捉汞的作用不大。

由于 Hg^{2+} 是水溶性的, 湿式 FGD 对汞的去除是有效的。然而, 现场测试表明, 湿式



脱硫装置的除汞率从未有超过 70% 的，单质汞的浓度反而还有所增加，这说明，有部分二价汞被还原成了单质汞。如果利用现有的湿式脱硫装置在脱除 SO_2 的同时，也能除去汞，将具有重大的意义。因此，需要了解脱硫装置内汞的再挥发原因及其防治技术。

As 的化合物中以 As_2O_3 为最毒。

Cd 是典型的导致水俣病的元凶。

二、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的测量

测定 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度一般分两步：第一步把 $\text{PM}_{2.5}$ 与较大的颗粒物分离；第二步再测定分离出来的 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量。目前，各国环保部门广泛采用的 $\text{PM}_{2.5}$ 测定方法有重量法、 β 射线吸收法、微量振荡天平法和光散射法等。这些方法的第一步是一样的，主要区别在于第二步。

1. 重量法

重量法采用滤膜收集颗粒物，再进行称量检验其浓度，是最直接、最可靠的方法，是验证其他方法是否准确的标杆，目前被公认为最准确的颗粒物测量方法，是欧美国家以及我国颗粒物浓度测量中规定的标准方法。虽然该法仍有一定的不确定性和较低的时间分辨率，但可以保留颗粒物样品，用来进行化学成分分析。重量法需人工称重，程序烦琐费时。如果要实现自动监测，就需要用到另外两种方法。

2. β 射线吸收法

β 射线法是通过颗粒物对 β 射线能量的吸收来反映颗粒物的浓度。将 $\text{PM}_{2.5}$ 收集到滤纸上，然后照射一束 β 射线，射线穿过滤纸和颗粒物时由于被散射而衰减，衰减的程度和 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量成正比。根据射线的衰减就可以计算出 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量。

β 射线法操作简单，维护方便，但测量值往往高出振荡天平法的测量值，而且随颗粒物浓度高低、成分以及环境湿度变化有较大差异。

3. 微量振荡天平法

从仪器原理上来说，振荡天平法相对更能客观反映颗粒物的真实浓度，但在较高湿度环境下容易出现噪声，其加热管也易使颗粒物中的挥发性物质损失从而使测量浓度降低。由于构造复杂，振荡天平法仪器维护起来相对麻烦。

4. 光散射法

光散射法通过颗粒物对测量光线的散射特征来反映颗粒物的大小和数量，从而确定颗粒物的浓度。该法采用一头粗一头细的空心玻璃管，粗头固定，细头装有滤芯。空气从粗头进，细头出， $\text{PM}_{2.5}$ 就被截留在滤芯上。在电场的作用下，细头以一定频率振荡，该频率和细头质量的平方根成反比。于是，根据振荡频率的变化，就可以算出收集到的 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量。

光散射法的优点是反应迅速、设备占地小、安装操作简便、可同时测量多个粒径的颗粒物数量等。但光的散射与颗粒物浓度之间的关系受到诸多因素影响，如颗粒物的化学组成、形状、密度、粒径分布等。这意味着光散射和颗粒物浓度之间的换算公式随时随地都可能在



变, 需要仪器使用者不断用标准方法进行校正。

在线测量方法相对于称重法有操作简单、时间分辨率高的优点, 但在准确性上还存在较大争议, 其中对 β 射线法和振荡天平法测量准确性的争议尤其激烈。普遍认为, 若要使振荡天平仪器所测值更准确, 需要加装膜动态测量系统 (FDMS)。

由上述知, 各种方法均有优缺点, 价格昂贵, 亟需开发研究新的测量方法, 降低成本。

第二节 微细颗粒物的主要特性

微细颗粒物的特性主要包括凝聚性、润湿性、附着性及磨啄性等。

一、凝聚性

微细颗粒物具有彼此相互附着或附着在其他物体表面的特性, 当悬浮的微细颗粒物相互接触时就彼此吸附从而凝聚在一起。微细颗粒物的凝聚力与其种类、形状、粒径分布、含水量和表面特征等多种因素有关, 综合起来可用安息角来表征微细颗粒物的凝聚力。例如, 安息角小于 30° 的称为低凝聚力, 流动性好; 安息角大于 45° 的则称为高凝聚力, 流动性差。细颗粒物的团聚现象可分为软团聚效应和硬团聚效应。软团聚主要由范德华力和库仑力产生, 它可以很容易被化学效应、机械效应和其他效应清除; 硬团聚主要由范德华力、库仑力、液体塔桥和边界层引力产生, 它很难被化学效应和机械效应清除。

对于沥青混合料拌和机袋式除尘器用滤料, 如果与微细颗粒物的凝聚力过小将失去捕集微细颗粒物的能力, 而凝聚力过大又造成微细颗粒物凝聚紧密、清灰困难。因此, 对于凝聚性强的微细颗粒物宜选用长丝织物滤料, 或经表面烧毛、压光、镜面处理的针刺毡滤料。从滤料的材质来说, 尼龙、玻璃纤维优于其他品种。对于黏性微细颗粒物, 不能选用起毛的织物滤料, 因为它可能黏附微细颗粒物并扩展到整个过滤表面, 致使清灰十分困难。

对于处于布朗运动的微细颗粒, 如果颗粒是固体, 它们之间的碰撞是非弹性的, 如铅烟、氧化锌、氧化镁、氧化铁, 这些物质的颗粒碰撞后将形成链状聚集。

静止空气中, 微细球形颗粒的均相凝聚颗粒的凝聚速率可用下式表达:

$$-\frac{dc}{dt} = \frac{4RT}{3\mu N} \left(1 + \frac{K\lambda}{D_p} \right) C^2 \quad (1-1)$$

式中 c ——颗粒体积;

t ——时间;

R ——气体常数;

T ——热力学温度;

μ ——气体黏度;

N ——阿伏伽德罗常量;

K ——修正系数, 对于空气, K 取 1.72;

D_p ——颗粒直径;

C ——颗粒物浓度, 个/ m^3 ;

λ ——分子平均自由程, μm 。