



MAICHONG DAISHI  
CHUCHENQI SHOUCE

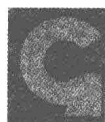
# 脉冲袋式除尘器

# 手册

张殿印 王纯 主编



化学工业出版社



MAICHONG DAISHI  
CHUCHENQI SHOUCHE

# 脉冲袋式除尘器

---

# 手册

张殿印 王纯 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书分三篇，共十二章，主要介绍了气体粉尘性质、测试方法，过滤清灰理论和基础知识；脉冲袋式除尘器设计，脉冲袋式除尘器一般形式和特殊形式，除尘器滤料、附属设备、仪表、控制；应用技术措施和系统设计，在各行业的工程应用实例和安装、运行、维护管理等内容。

本书凝聚了作者多年来的实践经验和研究成果，很多内容是首次公开发布，内容翔实，具有较强的可操作性，利用本书能进行脉冲袋式除尘设备的设计、选择、工程应用，维护管理并能判断、解决生产过程中遇到的技术和设备问题。

本书可供科研设计单位、工矿企业用户、设备生产厂家的环保技术人员、运行管理人员阅读，也适合高等院校环保专业师生参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

脉冲袋式除尘器手册/张殿印, 王纯主编. —北京: 化学工业出版社, 2010. 12  
ISBN 978-7-122-09647-0

I. 脉… II. ①张…②王… III. 脉冲除尘器: 滤袋除尘器-技术手册 IV. TM925. 31-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 198562 号

---

责任编辑: 刘兴春  
责任校对: 蒋 宇

文字编辑: 汲永臻  
装帧设计: 王晓宇

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)  
印 刷: 化学工业出版社印刷厂  
装 订: 三河市万龙印装有限公司  
787mm×1092mm 1/16 印张 40 $\frac{1}{4}$  字数 1091 千字 2011 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 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: 180.00 元  
京化广临字 2011—3 号

版权所有 违者必究

# 《脉冲袋式除尘器手册》编委会

主 编：张殿印 王 纯

副主编：俞非澍 王海涛 刘克勤 赵 宇 朱晓华

主 审：杨景玲 戴京宪

编 委（按姓氏笔画排序）：

王 纯 王 冠 王宇鹏 王雨清 王海涛

卞锦保 申 丽 申桂秋 田雨霖 白洪娟

冯馨瑶 安登飞 陈 媛 陈盈盈 朱晓华

任 旭 刘克勤 庄剑恒 肖 春 肖敬斌

沈建忠 杨建勋 高华东 赵 宇 张 鹏

张学义 张学军 张殿印 俞非澍 顾晓光

顾生臣 钱连山 徐 飞 魏淑娟

# 前 言

随着社会的发展和人类的进步，人们对生活质量和自身健康愈来愈重视，对生态环境和空气质量也愈来愈关注。然而人类在生产和生活活动中，通过种种途径成年累月地向大气排放各类污染物质，使大气环境遭到污染和破坏，有些地域和城市环境质量不断下降，甚至影响人类基本生存条件。在大气污染物中粉尘颗粒物的污染占据重要部分，可吸入颗粒物过多进入人体，直接威胁人体的健康。粉尘污染还会造成能见度降低、设备磨损和动植物受害等。所以防治粉尘污染、保护大气环境是刻不容缓的重要任务。

脉冲袋式除尘器是防治大气污染应用最多的除尘设备，也是除尘工程中最重要设备之一。除尘器设计制作是否优良，应用维护是否得当，直接影响工程投资费用、除尘效果、运行作业率。所以，掌握脉冲袋式除尘器工作机理，精心设计、精心制造和严格管理，对搞好环境保护工作具有重要意义。

编写本书的目的在于给环境工程和环保管理工作提供一本具有理论和实际相结合、新颖与实用相结合的袋式除尘工具书。全书分为三篇：第一篇基础篇，包括气体粉尘性质、测试方法、过滤清灰理论和基础知识；第二篇设备篇，包括脉冲袋式除尘器设计、脉冲袋式除尘器一般形式和特殊形式、除尘器滤料、附属设备、自动控制等；第三篇应用篇，包括应用技术措施和系统设计，在各行业的工程应用实例和安装、运行、维护管理等。本书特点是：①内容新颖，如粉尘的黏附力分析，脉冲袋式除尘器气流相似理论、数值模拟方法和设计技术要点等；②内容全面，如过滤理论，技术要求，应用特点，滤袋破损和除尘器配套装置等均有较全面分析；③联系实际，如重要计算公式和方法举出设计计算实例，分析不同行业烟尘性质，列举了脉冲袋式除尘器应用注意事项和工程实例等。编写力求重点突出、层次清楚、图表简明、文字精练、深入浅出、资料翔实，释义准确，以体现出新内容、新术语、新规范，并充分注意手册的完整性和系统性。为了直观、清晰、加深理解，书中增加了工程图片。读者通过本书可以对脉冲袋式除尘器有全面的了解和掌握，对脉冲袋式除尘器的开发、设计、制造、管理均有切实的裨益和帮助。

本书由张殿印、王纯主编，参加本书编写工作的有（按章节顺序）：张殿印（第一章），王纯（第二章），俞非漉（第三章第一节），王海涛（第三章第二节、第三节），朱晓华（第四章第一节、第二节），肖春（第四章第三节、第四节），赵宇（第四章第五节、第六节），王冠（第五章第一节、第二节），庄剑恒（第五章第三节、第四节），徐飞（第五章第五节），王雨清（第六章第一节），王宇鹏（第六章第二节），白洪娟（第六章第三节），田雨霖（第六章第四节）、陈盈盈（第六章第五节），冯馨瑶（第六章第六节），任旭（第七章第一节、第二节），刘克勤（第七章第三节、第四节），魏淑娟（第七章第五节、第六节），顾生臣（第八章第一节、第二节），肖敬斌（第八章第三节、第四节），陈媛（第八章第五节），张学义（第九章），高华东（第十章第一节、第二节），张鹏（第十章第三节、第五节），杨建勋（第十章第四节），张

学军（第十章第五节），申丽（第十一章第一节、第二节），张学军（第十一章第三节），安登飞（第十二章第四节、第五节），顾晓光（第十二章第六节、第七节）。钱连山（第十二章第一节、第二节），沈建忠（第十二章第三节、第四节）。另外，杨景玲教授、戴京宪教授对全书进行了总审核。本书在编写、审阅和出版过程中得到白万胜等多位专家的鼎力相助，在此一并深致谢忱。本书在编写中参考和引用了一些科研、设计、教学和生产工作同行撰写的著作、论文、手册、教材和学术会议文集等，在此对所有作者表示衷心感谢。

由于作者学识和水平有限，书中疏漏和不当之处在所难免，殷切希望读者朋友不吝指正。

编者

2011年1月

# 目 录

## 第一篇 基础篇

<b>第一章 粉尘和气体的性质</b> .....	1	一、处理气体流量	41
<b>第一节 粉尘的来源、分类和危害</b> .....	1	二、设备运行阻力	42
一、粉尘的涵义	1	三、除尘效率	43
二、粉尘的来源	2	四、除尘器排放浓度	44
三、粉尘的分类	3	五、除尘器漏风率	44
四、粉尘的危害	4	六、壳体耐压强度	45
<b>第二节 粉尘的基本性质</b> .....	5	七、设备耗钢量	45
一、粉尘颗粒的形状	5	八、脉冲喷吹参数	45
二、粉尘的粒径和粒径分布	7	九、压缩空气耗量	48
三、粉尘的物理性质	11	<b>第五节 脉冲袋式除尘器性能测定</b> .....	49
四、粉尘的化学性质	19	一、测定条件选择原则和安全措施	49
<b>第三节 气体的基本性质</b> .....	21	二、袋式除尘器测试项目及要求	49
一、流体的基本性质	21	三、袋式除尘器测试方法	50
二、气体三定律和状态方程	22	<b>第三章 纤维过滤和脉冲清灰基本理论</b> .....	58
三、气体静止和运动方程	23	<b>第一节 含尘气体和尘粒运动</b> .....	58
四、气体的主要参数	25	一、粒子运动的基本方程	58
<b>第二章 脉冲袋式除尘器基础知识</b> .....	31	二、粒子的流体阻力	58
<b>第一节 袋式除尘器发展历程</b> .....	31	三、粒子在气体中的运动	59
一、袋式除尘历史沿革	31	<b>第二节 纤维过滤基本理论</b> .....	61
二、我国袋式除尘器发展进程	33	一、滤料的过滤机理	61
<b>第二节 脉冲袋式除尘器术语和分类</b> .....	33	二、稳定过滤和非稳定过滤	64
一、脉冲袋式除尘器术语	33	三、粉尘层和表面过滤机理	65
二、脉冲袋式除尘器分类	35	<b>第三节 脉冲清灰基本理论</b> .....	69
三、脉冲袋式除尘器命名	38	一、粉尘黏附力	69
<b>第三节 脉冲袋式除尘器组成和工作原理</b> .....	38	二、影响黏附力的因素	70
一、脉冲袋式除尘器组成	38	三、脉冲喷吹清灰机理	71
二、工作原理	40	四、声波辅助清灰原理	76
<b>第四节 脉冲袋式除尘器性能参数</b> .....	41	五、联合清灰机理	78

## 第二篇 设备篇

<b>第四章 脉冲袋式除尘器设计</b> .....	79	四、脉冲清灰装置设计	100
<b>第一节 设计条件和依据</b> .....	79	五、离线装置设计	106
一、设计原则	79	六、旁路装置设计	107
二、设计条件分析	79	<b>第三节 脉冲袋式除尘器结构设计</b> .....	108
三、设计要点	79	一、结构设计要点	108
<b>第二节 脉冲袋式除尘器工艺设计</b> .....	81	二、袋式除尘器荷载分析	113
一、工艺设计注意事项	81	三、袋式除尘器结构形式	116
二、主要技术参数设计计算	92	四、材料选用	119
三、除尘器箱体设计	96	五、结构极限状态设计	120

第四节 气流组织试验和设计 .....	125	二、高炉煤气脉冲袋式除尘器 .....	217
一、气流组织和均布设计要点 .....	126	第二节 高温脉冲袋式除尘器 .....	218
二、相似理论和近似模拟方法 .....	128	一、高温脉冲袋式除尘器滤料 .....	218
三、计算机数值模拟 .....	135	二、金属纤维高温脉冲袋式除尘器 .....	220
第五节 除尘器改造设计 .....	138	三、陶瓷高温脉冲袋式除尘器 .....	222
一、改造设计原则 .....	138	第三节 塑烧板除尘器 .....	226
二、袋式除尘器改造设计 .....	139	一、塑烧板除尘器特点 .....	226
三、电除尘器改为脉冲袋式除尘器设计 .....	139	二、普通塑烧板除尘器 .....	229
四、电除尘器改为电-袋复合除尘器设计 .....	140	三、高温塑烧板除尘器 .....	232
第六节 脉冲袋式除尘器涂装设计 .....	141	四、塑烧板除尘器应用 .....	233
一、钢材除锈 .....	141	第四节 滤筒式除尘器 .....	234
二、涂料选择和涂层结构 .....	142	一、滤筒式除尘器的特点 .....	234
三、涂装设计和检验 .....	144	二、除尘器滤筒 .....	237
<b>第五章 脉冲袋式除尘器一般形式</b> .....	148	三、横插式滤筒除尘器 .....	242
第一节 脉冲除尘机组 .....	148	四、立式滤筒除尘器 .....	244
一、脉冲除尘机组技术特点 .....	148	五、焊接滤筒除尘器 .....	246
二、扁袋脉冲除尘机组 .....	148	六、RS型滤筒除尘器 .....	247
三、圆筒体脉冲除尘机组 .....	152	第五节 电袋复合式除尘器 .....	248
四、HMC型脉冲除尘机组 .....	155	一、分类 .....	248
第二节 料仓泄压脉冲袋式除尘器 .....	157	二、两种除尘器的特点 .....	249
一、料仓除尘器技术特点 .....	157	三、电袋复合除尘器工作原理 .....	251
二、KMC型库顶脉冲袋式除尘器 .....	159	四、技术性能 .....	252
三、DMCC型仓顶脉冲袋式除尘器 .....	160	五、应用注意问题 .....	253
四、LCDMCC型仓顶脉冲袋式除尘器 .....	164	第六节 防爆脉冲袋式除尘器 .....	255
第三节 小型脉冲袋式除尘器 .....	165	一、袋式除尘器本体设计 .....	255
一、技术特点 .....	165	二、防爆装置设计 .....	256
二、普通小型脉冲袋式除尘器 .....	167	三、配套件选用 .....	257
三、小型低压脉冲袋式除尘器 .....	169	<b>第七章 除尘用滤料</b> .....	259
四、圆筒形脉冲袋式除尘器 .....	175	第一节 滤料的分类和技术要求 .....	259
五、旁插扁袋脉冲除尘器 .....	179	一、滤料分类与命名 .....	259
六、环隙喷吹袋式除尘器 .....	181	二、滤料技术要求 .....	261
七、旋风脉冲袋式除尘器 .....	182	第二节 滤料纤维 .....	263
八、VLG型吸料脉冲除尘器 .....	184	一、天然纤维 .....	264
九、凹凸式脉冲袋式除尘器 .....	186	二、普通合成纤维 .....	265
第四节 箱式喷吹脉冲袋式除尘器 .....	187	三、高性能纤维 .....	267
一、箱式喷吹主要技术特点 .....	187	四、玻璃纤维 .....	269
二、侧喷脉冲袋式除尘器 .....	188	第三节 滤料织造和后处理 .....	270
三、气箱脉冲袋式除尘器 .....	195	一、滤料的织造 .....	270
第五节 大型脉冲袋式除尘器 .....	199	二、滤料的后处理 .....	272
一、主要技术特点 .....	199	第四节 常用滤料 .....	274
二、长袋离线脉冲袋式除尘器 .....	199	一、中常温滤料 .....	274
三、直通式脉冲袋式除尘器 .....	204	二、防静电滤料 .....	275
四、旋转式脉冲袋式除尘器 .....	206	三、拒水防油滤料 .....	278
五、大中型脉冲袋式除尘器 .....	209	四、覆膜滤料 .....	280
<b>第六章 脉冲袋式除尘器的特殊形式</b> .....	212	五、玻璃纤维滤料 .....	283
第一节 高压脉冲袋式除尘器 .....	212	六、高温滤料 .....	286
一、高压脉冲袋式除尘器设计 .....	212	七、锅炉专用滤料 .....	287
		八、金属纤维滤料 .....	288



九、滤筒用滤料 .....	289	五、贮灰仓 .....	345
第五节 滤袋制作与配件 .....	291	六、粉尘加湿与外运 .....	348
一、滤袋的组成和分类 .....	291	第四节 气力输送装置 .....	350
二、滤袋的规格 .....	292	一、气力输送装置的分类 .....	350
三、滤袋的加工制作 .....	294	二、稀相气力输送系统 .....	352
四、脉冲除尘器滤袋骨架 .....	294	三、风动溜槽 .....	359
第六节 滤料性能检验方法 .....	297	四、仓式泵输送装置 .....	363
一、滤料检验的内容和抽样 .....	297	五、栓状气力输送系统 .....	367
二、物理性能测试 .....	297	第五节 压缩空气系统设计 .....	369
三、滤料力学性能检验 .....	300	一、供应方式 .....	370
四、滤料透气性和阻力的检验 .....	302	二、用气量计算 .....	371
五、滤料除尘效率测定 .....	304	三、压气管道的设计计算 .....	373
六、阻燃性能测试 .....	306	四、贮气罐选型和设计 .....	374
七、荷电性能检验 .....	308	五、压缩空气装置配件 .....	381
第七节 选用滤料注意事项 .....	311	第九章 脉冲袋式除尘器自动控制 .....	392
一、选用的原则 .....	311	第一节 脉冲袋式除尘器控制功能需求 .....	392
二、根据含尘气体性质选用 .....	311	一、除尘器脉冲清灰控制 .....	392
三、根据粉尘性质选用 .....	312	二、除尘器输排灰控制 .....	392
四、按除尘器的清灰特点选用 .....	313	三、除尘器贮灰卸灰装置控制 .....	392
第八章 脉冲袋式除尘器配套装置 .....	314	四、其他控制功能 .....	393
第一节 电磁脉冲阀 .....	314	第二节 脉冲袋式除尘器自动控制装置 .....	393
一、脉冲阀的分类 .....	314	一、除尘系统自动控制特点 .....	393
二、脉冲阀结构 .....	315	二、自动控制系统组成 .....	393
三、脉冲阀技术性能 .....	319	三、可编程序控制 .....	394
四、脉冲阀安装方法 .....	326	四、脉冲控制仪 .....	398
五、脉冲阀的选用 .....	326	五、智能型脉冲控制器 .....	402
第二节 除尘器的排灰装置 .....	328	第三节 脉冲袋式除尘器自动控制设计 .....	405
一、排灰装置的分类 .....	328	一、脉冲袋式除尘器的工作特点 .....	405
二、插板阀 .....	328	二、除尘器控制内容 .....	405
三、翻板式卸灰阀 .....	330	三、控制设计案例 .....	407
四、回转卸灰阀 .....	332	四、袋式除尘器电控技术发展趋势 .....	409
五、排灰装置的选用要求 .....	336	第四节 电气控制仪表 .....	410
第三节 机械输灰装置 .....	336	一、温度仪表 .....	410
一、机械输灰装置组成与工作原理 .....	336	二、压力仪表 .....	414
二、螺旋输送机 .....	337	三、粉尘物位仪表 .....	418
三、埋刮板输送机 .....	340	四、差压变送器 .....	421
四、斗式提升机 .....	343		

### 第三篇 应用篇

第十章 脉冲袋式除尘系统设计 .....	425	七、除尘系统节能的途径和措施 .....	440
第一节 除尘系统设计技术措施 .....	425	八、气体含尘浓度高时的技术措施 .....	443
一、防止粉尘爆炸技术措施 .....	425	第二节 脉冲袋式除尘系统设计要点 .....	444
二、可燃气体安全技术措施 .....	431	一、除尘系统组成 .....	444
三、处理高温烟气技术措施 .....	431	二、除尘系统分类及特点 .....	444
四、滤袋预涂层技术措施 .....	435	三、除尘系统配置一般原则 .....	447
五、潮解、腐蚀、磨损性粉尘技术措施 .....	437	四、除尘系统的设计计算 .....	449
六、寒冷、含焦油、低排放气体措施 .....	439	第三节 集气吸尘罩 .....	460

一、集气吸尘罩分类和工作原理 .....	460	应用 .....	553
二、密闭集气吸尘罩 .....	465	五、在石灰炉炉气净化系统中的应用 .....	556
三、半密闭集气吸尘罩 .....	466	六、在净化烟化炉烟气中的应用 .....	557
四、外部集气吸尘罩 .....	467	七、在净化电石炉烟气中的应用 .....	559
五、吹吸式集气吸尘罩 .....	476	第五节 在焦化生产中的应用 .....	560
第四节 除尘系统通风机 .....	478	一、粉尘来源和特点 .....	560
一、通风机的分类和型号 .....	479	二、在煤粉碎除尘改造中的应用 .....	561
二、通风机的主要性能参数 .....	481	三、在回送焦台除尘中的应用 .....	563
三、通风机的运行调节 .....	483	四、在装煤车除尘中的应用 .....	566
四、通风机调速与节能 .....	485	五、在干熄焦除尘中的应用 .....	567
第五节 噪声和振动防范 .....	487	第六节 在垃圾焚烧厂的应用 .....	571
一、噪声的概念 .....	487	一、粉尘的产生与特性 .....	571
二、噪声控制 .....	489	二、垃圾焚烧炉配套脉冲袋式除尘器 .....	572
三、减振器 .....	494	三、在垃圾焚烧发电技术上的应用 .....	574
<b>第十一章 脉冲袋式除尘器工程应用</b>		四、在医疗垃圾焚烧炉尾气净化中的	
<b>实例</b> .....	498	应用 .....	576
第一节 在锅炉和燃煤电厂的应用 .....	498	第七节 袋式除尘器在其他行业中的应用 .....	579
一、粉尘来源和特点 .....	498	一、在焊接作业烟尘净化中的应用 .....	579
二、电改袋在燃煤锅炉上的应用 .....	500	二、在粮食饲料行业的应用 .....	581
三、在燃油锅炉尾气治理中的应用 .....	504	三、在热镀锌槽烟气净化中的应用 .....	582
四、电袋一体化除尘器在锅炉除尘的		四、在沥青混凝土作业中的应用 .....	583
应用 .....	507	五、在橡胶行业的应用 .....	584
五、在秸秆锅炉除尘中的应用 .....	511	六、在湿型铸造生产中的应用 .....	586
六、电袋复合除尘器在电厂除尘改造中的		七、在化肥厂高湿条件下的应用 .....	587
应用 .....	514	<b>第十二章 脉冲袋式除尘器安装、运行和</b>	
七、旋转喷吹袋式除尘器在电厂的应用 .....	516	<b>维护</b> .....	590
第二节 在钢铁工业中的应用 .....	518	第一节 脉冲袋式除尘器安装 .....	590
一、粉尘的来源和特点 .....	518	一、安装准备 .....	590
二、在高炉煤气净化中的应用 .....	520	二、安装的分类和流程 .....	591
三、在碾泥机室除尘中的应用 .....	522	三、安装质量标准和要求 .....	593
四、在炼钢转炉二次烟气除尘中的应用 .....	526	四、安装质量检查 .....	600
五、在炼钢电炉高温烟气治理的应用 .....	528	第二节 脉冲袋式除尘器调试和运行 .....	600
六、滤筒式除尘器在焙烧厂应用 .....	530	一、调试准备 .....	600
七、塑烧板除尘器在精轧机除尘中的		二、调试主要内容 .....	601
应用 .....	534	三、脉冲袋式除尘器的运行 .....	603
第三节 在建材工业的应用 .....	536	第三节 脉冲袋式除尘器维护管理 .....	605
一、生产工艺对除尘的要求 .....	537	一、维护管理注意事项 .....	605
二、在净化水泥窑尾烟气中的应用 .....	538	二、脉冲袋式除尘器的维护管理 .....	607
三、在烘干机烟气除尘上的应用 .....	540	三、附属设备维护管理 .....	611
四、在水泥熟料粉磨系统改造上的应用 .....	542	第四节 脉冲袋式除尘器的故障及排除 .....	616
五、在治理水泥磨粉尘中的应用 .....	545	一、常见故障及处理 .....	616
六、在治理石膏注模粉尘中的应用 .....	547	二、脉冲袋式除尘器防灾 .....	619
七、在玻璃窑烟气治理中的应用 .....	547	三、滤袋的失效与防范 .....	620
第四节 在有色金属工业的应用 .....	549	四、脉冲阀故障分析与排除 .....	624
一、有色金属工业烟尘特性 .....	549	五、除尘设备事故与处理预案 .....	627
二、在电解铝烟气净化中的应用 .....	550	<b>参考文献</b> .....	631
三、在净化铝冶炼炉高温烟气中的应用 .....	552		
四、在治理硅锰矿热电炉高温烟气中的			

# 第一篇 基础篇

## 第一章 粉尘和气体的性质

人类生存一刻也离不开空气，空气新鲜可使人生活舒畅，空气污染可使人得各种疾病。在大气污染中，粉尘是大气主要污染物质。粉尘的基本特性与它们的危害程度和治理方法密切相关。在除尘措施中，选择除尘设备和设计除尘系统都要依据粉尘性质和气体性质为基本条件。本章主要介绍粉尘和气体的性质。

### 第一节 粉尘的来源、分类和危害

#### 一、粉尘的涵义

国家标准中有关粉尘颗粒等的定义如下。

(1) 粉尘 (dust) 由自然力或机械力产生的，能够悬浮于空气中的固态微小颗粒。国际上将粒径小于  $75\mu\text{m}$  的固体悬浮物定义为粉尘。在通风除尘技术中，一般将  $1\sim 200\mu\text{m}$  乃至更大粒径的固体悬浮物均视为粉尘。

(2) 总粉尘 (total dust) 简称“总尘”，指用直径为  $40\text{mm}$  滤膜，按标准粉尘测定方法采样所得到的粉尘。

(3) 呼吸性粉尘 (respirable dust) 简称“呼尘”，指按呼吸性粉尘标准测定方法所采集的可进入肺泡的粉尘粒子，其空气动力学当量直径均在  $7.07\mu\text{m}$  以下，空气动力学当量直径  $5\mu\text{m}$  粉尘粒子采样效率为  $50\%$ 。

(4) 总悬浮颗粒物 (TSP) 能悬浮在空气中，空气动力学当量直径为大于  $100\mu\text{m}$  的颗粒物。

(5) 可吸入颗粒物 ( $\text{PM}_{10}$ ) 悬浮在空气中，空气动力学当量直径不大于  $10\mu\text{m}$  的颗粒物。

(6) 大气尘 (airborne particles; particulates; atmospheric dust) 悬浮于大气中的固体或液体颗粒状物质，也称悬浮颗粒物。

(7) 纤维性粉尘 (fibrous dust) 天然或人工合成纤维的微细丝状粉尘。

(8) 亲水性粉尘 (hydrophilic dust; lyophilic dust) 易于被水润湿的粉尘，如石英、黄铁矿、方铅矿粉尘等。

(9) 疏水性粉尘 (hydrophobic dust; lyophobic dust) 难以被水润湿的粉尘，如石蜡粉、炭黑、煤粉等。

(10) 粒子 (particle; particulate) 特指分散的固体或液体的微小粒状物质，也称微粒。

(11) 气溶胶 (aerosol) 悬浮于气体介质中的粒径范围一般为  $0.001\sim 1000\mu\text{m}$  的固体、液体微小粒子形成的胶溶状态分散体系。

(12) 烟尘 (smoke) 高温分解或燃烧时所产生的，其粒径范围一般为  $0.01\sim 1\mu\text{m}$  的可见气溶胶。

除尘工程中泛指“烟尘”是指金属熔炼过程中产生的氧化物或升华凝结形成的微粒，以及燃料在燃烧过程产生的微粒。

(13) 烟雾 (fume) 由燃烧或熔融物质挥发的蒸气冷凝后形成的, 其粒径范围一般为  $0.001 \sim 1 \mu\text{m}$  的固体悬浮粒子。

ISO 定义: 烟雾是指由燃烧产生能见的气溶胶, 不包括水蒸气。

(14) 烟气 (fumes) 在化学工艺过程中生成的通常带有异味的气态物质。

(15) 液滴 (droplet) 在静止条件下能沉降, 在湍流条件下能悬浮于气体中的微小液体粒子。

(16) 雾 (mist) 悬浮于气体中的微小液滴, 如水雾、漆雾、硫酸雾等。

ISO 中定义: 属于气体中液滴的悬浮体总称。在气象学中指造成的能见度小于  $1\text{km}$  的水滴悬浮体。

## 二、粉尘的来源

### (一) 自然过程来源

粉尘来源可分成两大类: 一是人类活动引起的; 二是自然过程引起的。后者包括火山爆发、山林火灾、雷电等造成各种尘埃 (见表 1-1)。自然过程对大气的污染, 目前人类还不能完全控制, 但这些自然过程多具有偶然性、地区性, 而两次同样过程发生的时间往往较长。由于自然环境有一定的容量和自净能力, 自然过程所造成的粉尘污染, 经过一段时间后会自动消失, 对整个人类的发展尚无根本性的危害。

表 1-1 粉尘来源

种类	粉尘来源
自然现象	火山爆发、大风飞沙、沙尘暴、地震、土沙崩溃、由于温度或混合率的变化而引起的气体爆炸、腐烂、花粉、微生物、森林火灾
日常生活	烹调、采暖、冷气、衣服、清扫、吸烟、农业、渔业、医疗、娱乐、焚烧、教育、体育比赛
商业交易	采暖、冷气、烹调、包装输送、陈列、集会、展会等活动
工业	燃烧、冶炼、粉碎、破碎、混合、分离、化合、分解、干燥、研磨、输送、包装、爆炸、凝聚等物理化学操作、轧制、切割、采矿、爆破、装卸、焊接
交通运输	河海运输、航空、汽车、火车运输、装卸
军事	军事转移、军队作战、炮击、爆炸、军训、军演

### (二) 人类活动来源

人类的生活和生产活动引起的粉尘污染, 自有人类以来从未间断过。特别是 100 年以来, 工业和交通运输业的迅速发展, 城市不断扩大, 以及人口的高度集中, 使得大气污染日趋严重。目前, 全世界每年排入大气的煤粉尘及其他粉尘在 1 亿吨以上, 严重污染了大气, 对人类健康构成了威胁。

人类活动引起的粉尘主要来源于三个方面, 即工业生产污染源、生活活动污染源及交通运输污染源。

(1) 工业生产污染源 如火力发电厂、钢铁厂、建材厂、化工厂、有色金属厂、矿山作业区等工业部门的生产及燃料燃烧过程, 皆向大气中排入大量的粉尘及其他有害成分。工业生产污染源是造成粉尘污染的最主要的来源。

(2) 生活污染源 城市和工矿企业住宅区、商业区千家万户的生活炉灶, 经营性炉灶以及采暖锅炉的烟囱, 同样会向大气中排入烟尘。这些污染源分布广, 污染物总量大, 对局部的大气环境质量常有很大影响, 也是不可忽视的。

(3) 交通运输污染源 汽车、火车、轮船、飞机等交通工具排放的尾气及行走时的二次扬尘都含有粉尘污染物。在交通运输业十分发达的今天, 尤其在城市, 它已成为粉尘污染的重要

来源之一。

在各种粉尘来源中工业粉尘有以下特点。

(1) 集中固定源 工业企业生产地点固定,生产过程集中,所排出的粉尘对于邻近地区的大气环境污染最严重,随着与厂区距离的逐渐加大,污染情况逐渐减弱。例如,钢铁企业对大气的污染其影响范围基本为方圆 10km。

(2) 烟尘排放量大 火力发电、冶金、矿山、石油、化工及水泥等企业,生产规模大,烟尘排放量大。轻工业生产规模虽较小,但涉及众多的行业,粉尘排放总量也不容忽视。

(3) 连续排放 大多数企业生产不间断,每天向大气中连续排放粉尘。

大气中粒度小于  $1\mu\text{m}$  的颗粒是由于凝结作用而产生的,而较大的颗粒则来自粉碎过程或燃烧过程。因为粉碎干磨方法很少产生小于几个微米的颗粒。燃烧过程会产生数种不同类型的颗粒,它们是由于以下途径产生的:①加热能使物质蒸发,这些物质随后凝结为  $0.1\sim 1\mu\text{m}$  的颗粒;②燃烧过程的化学反应可能产生小于  $0.1\mu\text{m}$ 、存在期短的不稳定的分子团颗粒;③机械加工过程会排放出  $1\mu\text{m}$  或较大的灰或燃料颗粒;④如使用液体燃料喷雾装置,会有极细的灰直接逸出;⑤矿物燃料的不完全燃烧会产生烟炱。

空气污染物总量中约有  $10\%\sim 15\%$  是以粉尘颗粒物形式存在的。在颗粒物总量中,来自机动车辆的占  $3\%$ ,来自工业方面的占  $53\%$ ,来自发电厂的占  $13\%$ ,来自工业锅炉的占  $20\%$ ,由垃圾处理造成的占  $9\%$ 。来自其他源的颗粒物有海洋盐类、火山灰、风蚀的灰尘、道路尘土、森林火灾的生成物以及植物花粉和种子。

大气尘组成成分和比例见表 1-2。

表 1-2 大气尘组成成分和比例

组 成	含有率/%	组 成	含有率/%
矿物碎粉、燃烧飘浮细渣	10~90	腐败的植物、动物排放的皮毛屑	0~10
烟雾、花粉	0~20	金属粉末	0~0.5
棉等植物纤维	5~40	微生物	极微
煤、炭、水泥、建筑等细粉	0~40		

### 三、粉尘的分类

#### 1. 按物质组成分类

按物质组成粉尘可分为有机尘、无机尘、混合尘。有机尘包括植物尘、动物尘、加工有机尘;无机尘包括矿尘、金属尘、加工无机尘等。

#### 2. 按粒径分类

按粒径大小或在显微镜下可见程度粉尘可分为:粗尘,粒径大于  $40\mu\text{m}$ ,相当于一一般筛分的最小粒径;细尘,粒径  $10\sim 40\mu\text{m}$ ,在明亮光线下肉眼可以见到;显微尘,粒径  $0.25\sim 10\mu\text{m}$ ,用光学显微镜可以观察;亚显微尘,粒径小于  $0.25\mu\text{m}$ ,需用电子显微镜才能观察到。不同粒径的粉尘在呼吸器官中沉着的位置也不同,又分为:可吸入性粉尘即可吸入呼吸器官,直径约大于  $10\mu\text{m}$  的粉尘;微细粒子直径小于  $2.5\mu\text{m}$  的细粒粉尘,微细粉尘会沉降于人体肺泡中。

#### 3. 按形状分类

不同形状的粉尘可分为:①三向等长粒子,即长、宽、高的尺寸相同或接近的粒子,如正多边形及其他与之相接近的不规则形状的粒子;②片形粒子,即两方向的长度比第三方向长得多,如薄片状、鳞片状粒子;③纤维形粒子,即在一个方向上长得多的粒子,如柱状、针状、纤维粒子;④球形粒子,外形呈圆形或椭圆形。

#### 4. 按物理化学特性分类

由粉尘的润湿性、黏性、燃烧爆炸性、导电性、流动性可以区分不同属性的粉尘。如按粉尘的润湿性分为湿润角小于 $90^\circ$ 的亲水性粉尘和湿润角大于 $90^\circ$ 的疏水性粉尘；按粉尘的黏性力分为拉断力小于 $60\text{Pa}$ 的不黏尘， $60\sim 300\text{Pa}$ 的微黏尘， $300\sim 600\text{Pa}$ 的中黏尘，大于 $600\text{Pa}$ 的强黏尘；按粉尘燃烧、爆炸性分为易燃、易爆粉尘和一般粉尘；按粉料流动性可分为安息角小于 $30^\circ$ 的流动好的粉尘，安息角为 $30^\circ\sim 45^\circ$ 的流动性中等的粉尘及安息角为大于 $45^\circ$ 的流动性差的粉尘。按粉尘的导电性和静电除尘的难易分为大于 $10^{11}\Omega\cdot\text{cm}$ 的高比电阻粉尘， $10^4\sim 10^{11}\Omega\cdot\text{cm}$ 的中比电阻粉尘，小于 $10^4\Omega\cdot\text{cm}$ 的低比电阻粉尘。

#### 5. 其他分类

其他分类中还有分为生产粉尘和大气尘，纤维性粉尘和颗粒状粉尘，一次扬尘和二次扬尘等。

### 四、粉尘的危害

#### 1. 粉尘的一般危害

人类各种生产、生活区域空气污染形成的危害见表 1-3。

表 1-3 人类各种生产、生活区域空气污染形成的危害

序号	空气污染场合	污染危害产生	后果
1	使用的工具设备	汽车、工程机械、航空器等发动机进气时，空气中尘埃对进气道侵害	机件在滑动部位磨损造成发动机短寿、燃料系统喷嘴堵塞、发动机熄火
2	工厂、车间	产生粉尘、烟尘、纤维尘的工厂车间和劳动场地、操作工人长时间吸入污染颗粒	可吸入尘粒对人体肺部严重侵害，20年后疾病缠身，甚至死亡
3	精密产品组装线	精密电子元件装配、液压精密件装配等场合，空气尘埃落入机件中形成颗粒残留物	手机、电视机等无线电工具寿命短、液压装备的飞机、起重机、轧钢机等会因颗粒卡死精密阀体，工作中会发生事故和灾难
4	居住、办公	人一生有70%的时间在居住、休息和办公室生存。这里的换气工具若无防尘装置，大气灰尘会进入，厨房烟气也会进入	虽然相比室外大气，空气可能清洁一些，但因人类在此生存的时间长，也会造成人体不适或产生疾病
5	公共场馆	电影院、游艺厅、商场、理发厅等人员集中场所，空气中菌类集中 文物、图书等馆藏珍品受污染空气侵害	传染病容易发生。换气时无防护也会使大气污染物侵害人体，这些场合最容易使人产生疾病 物品损坏，失去价值
6	文化、体育场馆、场地	体育馆空气污染，可吸入颗粒侵害人体	运动员在运动中活动量增大，呼吸量大，颗粒容易在肺泡中沉积
7	医疗	手术室、治疗室、污染空气的微尘、菌类、对手术部位、器械产生侵入	手术部位感染

#### 2. 粉尘对人体的危害

人的呼吸器官由鼻、咽、喉、气管、支气管、肺组成。人在呼吸时吸入氧气，排出二氧化碳，其过程包括3个方面：①在肺内，空气和血液之间的交换，称为外呼吸；②在组织内，在血液和组织之间的交换，称为内呼吸；③在肺和组织之间，由血液输送气体。

人呼吸时微尘对呼吸系统影响见表 1-4。

表 1-4 微尘粒径对呼吸系统的影响

微尘粒径 / $\mu\text{m}$	到达人体内部器官的部位	微尘粒径 / $\mu\text{m}$	到达人体内部器官的部位
30	可到达背部器官，未到达支气管部分以上	0.3	在肺泡囊中大部分沉着(有6.5%再呼出)
10	到达末端支气管	0.1	在肺泡囊中大部分沉着
3	到达肺泡道	0.03	在肺泡道上和肺泡囊中大部分沉着(有34%再呼出去)
1	在肺泡道和肺泡囊中大量沉着(有2.6%再呼出去)		

大气浮尘中最危险的微颗粒是  $10\mu\text{m}$  和  $2.5\mu\text{m}$  两种尺寸的微颗粒。这两种“可吸入颗粒物”的含义是空气中“总悬浮颗粒物”去掉大于  $10\mu\text{m}$  的大颗粒，其余就是“可吸入颗粒物”称其为  $\text{PM}_{10}$ ；其将  $2.5\sim 10\mu\text{m}$  的颗粒去掉，余下的“可吸入颗粒物”称其为  $\text{PM}_{2.5}$ 。

从图 1-1 中可看到，人吸入空气中的微尘后，大于  $10\mu\text{m}$  的颗粒在口、鼻腔可 100% 截留，甚至小于  $1\mu\text{m}$  的颗粒被阻滞在鼻腔；而小于  $10\mu\text{m}$  的颗粒，至少有 25% 被积存在肺泡中，小于  $2.5\mu\text{m}$  的颗粒在肺泡中滞留也达 30%。危害是显而易见的。

粉尘引起的疾病因粉尘性质不同而不同。

(1) 矿物粉尘 人长期吸入某些矿物粉尘，肺组织和淋巴结会产生以非可逆性的纤维病变为主的慢性疾病，使肺机能降低（尘肺）。尘肺随吸入粉尘不同，其病理组织与临床状态也有所不同。

(2) 金属粒子 某些金属粒子会引起的主要疾病或症状如下。

① 锌。与锌的烟雾接触几小时后，就会引起发热，呼吸困难，再过几小时自然消失（锌热）。

② 镉。长期接触会引起肺气肿或全身肾功能失调（以低分子蛋白尿为特征）。

③ 铬。特别是六价铬，引起鼻中隔穿孔症。

④ 铅。导致造血功能失调、贫血和白血球、血小板减少（再生不良性贫血）。另外，也曾出现过很多末梢神经炎（上肢引肌麻痹）的病例。

⑤ 锰。急性中毒引起肺炎，慢性中毒引起脑细胞衰退性变化等中枢神经系统的疾病。

⑥ 铍。急性中毒引起肺炎，慢性中毒引起肺肉芽肿。

(3) 有害雾有以下几种。

① 硫酸雾。对呼吸道的刺激作用比二氧化硫高，引起喉头、气管收缩或者肺水肿。

② 氢氟酸雾。对呼吸道的刺激作用很强，也会引起肺水肿。

③ 油雾。对呼吸道有刺激性。据报道也有类似于尘肺的症状。

(4) 有机粉尘、纤维性粉尘。主要有以下几种。

① 棉、麻和亚麻。主要症状为胸闷、呼吸困难等，有一定程度的支气管收缩。

② 甘蔗纤维。长期吸入榨取糖汁之后的干燥甘蔗茎粉尘时，引起呼吸急促、发热等症状。

③ 真菌类、花粉。在它们之中，有的与室内尘一起吸入，作为变态反应原而起重要作用（例如花粉症和由干草引起的农夫肺）。和牧草接触后，会引起发热、呼吸困难（外因性变态反应肺炎）等症状。

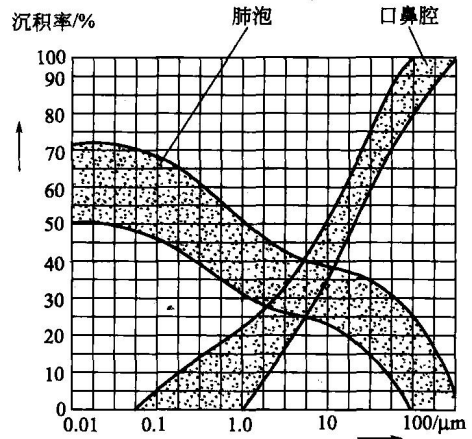


图 1-1  $10\mu\text{m}$  以下颗粒在人体呼吸系统的沉积率

## 第二节 粉尘的基本性质

尘粒具有形状、粒径、密度、比表面积四大基本特性，还具有磨损性、荷电性、湿润性、黏着性以及爆炸性等重要性质。这些都是除尘技术的重要内容，本节将详细叙述粉尘的这些性质。

### 一、粉尘颗粒的形状

粉尘颗粒的形状是指一个尘粒的轮廓或表面上各点所构成的图像。由于在工业和自然界中遇到的粉尘形状千差万别，表 1-5 中定性描述了尘粒形状。

测量得到的粉尘颗粒大小与颗粒的面积或体积之间的关系则称为形状系数。形状系数反映

了尘粒偏离球体的程度。将尘粒的粒径与实际的体积、表面积和比表面积关联，可以定义3种最常见的形状系数：体积形状系数 $\phi_v$ 、表面积形状系数 $\phi_s$ 和比表面积形状系数 $\phi$ 。

### 1. 体积形状系数和表面积形状系数

尘粒的形状如表1-5所列。

表 1-5 尘粒的形状

形状	形状描述	形状	形状描述
针状	针形体	片状	板状体
多角状	具有清晰边缘或有粗糙的多面形体	粒状	具有大致相同量纲的不规则形体
结晶状	在流体介质中自由发展的几何形体	不规则状	无任何对称性的形体
枝状	树枝状结晶	模状	具有完整的、不规则形体
纤维状	规则的或不规划的线状体	球状	网球形

设一个尘粒的粒径为 $d_D$ ，尘粒的表面积 $S$ 为：

$$S = \pi d_s^2 = \phi_s d_D^2 = X_s^2 \quad (1-1)$$

尘粒的体积 $V$ 为：

$$V = \frac{\pi}{6} d_v^3 = \phi_v d_D^3 = X_v^3 \quad (1-2)$$

式中， $d_s$ ， $d_v$ 分别为与尘粒具有相同表面积或体积的圆球直径； $X_s$ ， $X_v$ 为包含了形状系数在内的粒径尺寸。

$X_s$ 和 $X_v$ 与尘粒的粒径不同，它包含了形状系数。

### 2. 比表面形状系数

对于一个尘粒，单位体积的表面积 $S_v$ 和单位质量的表面积 $S_w$ 分别是：

$$S_v = \frac{S}{V} = \frac{6}{d_{sv}} = \frac{\phi}{d_D} = \frac{1}{X_{sv}} \quad (1-3)$$

$$S_w = \frac{S_v}{\rho_D} \quad (1-4)$$

式中， $d_{sv}$ 为与颗粒具有相同比表面积的球体直径； $\rho_D$ 为颗粒的密度。

对于球体， $\phi=6$ 。

若以等体积当量直径 $d_v$ 代替方程 $S_v = \frac{\phi}{d_D}$ 中的 $d_D$ ，则得

$$S_v = \frac{6}{\phi_c d_v} \quad (1-5)$$

式中， $\phi_c$ 为卡门形状系数。对于球体， $\phi_c=1$ 。

表1-6中列出了几种规则形状颗粒的形状系数，其中包括球形、圆锥体、圆板形、立方形、方柱体等。上述的形状系数是以球体作为基础的，这种方法在工程上有着广泛的应用。

表 1-6 粉尘颗粒的形状系数

颗粒形状	$\phi_s$	$\phi_v$	$\phi$	颗粒形状	$\phi_s$	$\phi_v$	$\phi$
球形 $l=b=t=d$	$\pi$	$\pi/6$	6	立方体形 $l=b=t$	6	1	6
圆锥形 $l=b=t=d$	$0.81\pi$	$\pi/12$	9.7	方柱及方板形			
圆板形 $l=b, t=d$	$3\pi/2$	$\pi/4$	6				
$l=b, t=0.5d$	$\pi$	$\pi/8$	8				
$l=b, t=0.2d$	$7\pi/10$	$\pi/20$	14				
$l=b, t=0.1d$	$3\pi/5$	$\pi/40$	24				
				$l=b$			
				$t=b$	6	1	6
				$t=0.5b$	4	0.5	8
				$t=0.2b$	2.3	0.2	14
				$t=0.1b$	2.4	0.1	24

注： $l$ 、 $b$ 、 $t$ 和 $d$ 分别表示粉尘颗粒的长、宽、高和直径。



粉尘形状的测量是用显微镜观测和照相。大颗粒粉尘用普通光学显微镜观测，小颗粒粉尘或要求严格时用电子显微镜观测。

粉尘的形状直接影响除尘器的捕集效果和清灰情况，例如对纤维性粉尘选用机械式除尘器和电除尘器时除尘效果往往不理想，对球形粉尘用各种除尘器都会取得满意效果。

## 二、粉尘的粒径和粒径分布

### (一) 粉尘颗粒的粒径

颗粒的尺寸大小是粉尘最基本的特性之一。颗粒大小通常以粒径表示，可是，粉尘一般都指包含各种不同大小颗粒在内的粒子群，单个颗粒是用肉眼难以直接观察得到的。所以其粒径通常分为代表单个颗粒的单一粒径和代表粒子群粗细程度以及粒径分布特点的特征粒径或叫代表粒径。

#### 1. 颗粒的单一粒径

粉尘单个颗粒的粒径可用其几何尺寸表示。球形颗粒用球的直径  $d_p$  表示；正方体颗粒用其边长  $a$  表示；锥形颗粒用底部直径  $d$  与高度  $h$  表示；矩立方体用其长、宽、高  $a \times b \times c$  表示。然而，在实际中粉尘颗粒多属于不规则形状，根据测量方法或直接或间接的确定其直径，常常是确定其“当量径”。

用显微镜观察粉尘颗粒的投影尺寸时，可用定向径  $d_F$ 、等分面积径  $d_M$  或等圆投影面积径  $d_A$  等方式表示；用筛分分析时所指的颗粒径是颗粒能通过的筛孔宽度；几何当量径中还有等体积径、等表面积径、周长径等都是与之相对应的球形粒子的直径为等效关系的表示法。在常用的计重法粒径测量中，物理当量径应用最普遍。斯托克斯径  $d_{st}$ ，指与所测粉尘粒子具有同样沉降速度的球形粒子直径。它要求在层流条件下（即颗粒雷诺数  $Re_p < 0.2$ ）进行测量；颗粒在空气中沉降时，其斯托克斯径可用下式表示：

$$d_{st} = \sqrt{\frac{18\mu v_g}{(\rho_D - \rho_a)g}} \quad (1-6)$$

式中， $\mu$  为空气动力黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ； $\rho_D$ 、 $\rho_a$  分别为尘粒、空气的密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $g$  为重力加速度， $\text{m}/\text{s}^2$ ； $v_g$  为颗粒的沉降速度， $\text{m}/\text{s}$ 。

空气动力径是指真密度为  $1\text{g}/\text{cm}^3$  的粉尘颗粒的  $d_{st}$  值。这里若  $\rho_D = 1$ ，所求的  $d_{st}$  即为空气动力径。为了与一般  $d_{st}$  区别，将之标为  $d_{st(1)}$ 。

随测试所用仪器的构造和作用原理不同，也有用其他物理量表示等效直径的。例如，用光电测尘仪测试气溶胶浓度时，仪器上显示的粒径大小，实际是指被测粒子在仪器内引起的散射光和相应的光电量与预先用来标定仪器的某种标准颗粒的反映等效而已。在除尘、空气净化和环境保护工程中，最常应用的是粉尘颗粒的斯托克斯径。

#### 2. 颗粒群的代表粒径

在工程技术应用中所遇到的粉尘，无论是悬浮状的还是堆积状的，其粒径总有一定的分布范围。对于这些颗粒群，要用一些代表径，如各种意义上的平均径、中位径、最大频率径等来表示它的粒级粗细。

(1) 平均径 有算术平均径  $\bar{d}$ 、平均表面积径  $d$ 、体积（或质量）平均径  $\bar{d}_v$ （或  $d_m$ ）等，其涵义和表示方法如表 1-7 所列。

(2) 中位径 在粒径累积分布线上，将颗粒按大小分为两个相等部分的中间界限直径。按质量将颗粒从大至小排列，其筛上累积量  $R=50\%$  时的那个界限直径就是质量中位径（此时筛下率  $D=50\%$ ），标为  $d_{m50}$ ；按颗粒个数依小到大排列，将其分布线分为个数相等的两个部分时所对应的中界粒径叫做计数中位径，标为  $d_{n50}$ 。在平时，工程技术中最常用的是质量分布线，并以质量中位径为代表径，简单地标为  $d_{50}$ 。由于众数直径是指颗粒出现最多的粒度值，