

# 空气洁净技术原理

许 钟 麟 著

中国建筑工业出版社

本书系统地阐述了洁净技术的基本原理。叙述了微粒的分布特性，大气尘特性和我国大气尘的分布规律，悬浮微粒的特性和在室内的运动特性；具体分析了过滤机理和过滤器的各项特性；探讨了空气洁净度级别问题以及它和成品率的关系；论述了洁净室的作用原理、特性和计算理论，以及具体计算方法和局部洁净区的研究成果；并详细介绍了采样和检测的方法及基本原理。书中还提供设计和测试用的数据、公式、计算方法、步骤等。

本书为作者多年的科研成果与心得的总结，是国内关于这门技术原理的第一本专门著述，提出了许多新观点、新方法，可供从事空调净化专业技术人员、研究人员及大专院校师生参考，也可供环保、卫生、电子等专业技术人员参考。

## 空气洁净技术原理

许 钟 麟 著

\*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

\*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：20 1/2 插页：1 字数：497 千字

1983年6月第一版 1983年6月第一次印刷

印数：1—10,000册 定价：2.80元

统一书号：15040·4475

# 目 录

第一章 微粒的分布特性 .....	1
1-1 微粒的分类 .....	1
1-1-1 按微粒的形成方式分类(1)  1-1-2 按微粒的来源分类(1)  1-1-3 按微粒的大小分类(1)  1-1-4 微粒的通俗分类(1)	
1-2 微粒大小的量度 .....	2
1-2-1 粒径(2)  1-2-2 平均粒径(3)	
1-3 微粒的统计分布 .....	6
1-3-1 粒径分布曲线(6)  1-3-2 按粒径的正态分布和对数正态分布(8)  1-3-3 在双对数纸上的粒径分布(11)  1-3-4 按密度的分布(12)	
1-4 微粒大小的集中度 .....	14
1-5 对数正态分布的应用 .....	15
1-5-1 集中度的确定(16)  1-5-2 平均粒径的计算(17)  1-5-3 粒径分布的几种关系(18)	
参考文献 .....	19
第二章 大气中的悬浮微粒——大气尘 .....	20
2-1 大气尘的概念 .....	20
2-2 大气尘的发生源 .....	20
2-2-1 自然发生源和人为发生源(20)  2-2-2 大气尘的发生量(21)	
2-3 大气尘的组成 .....	23
2-3-1 无机性非金属微粒(23)  2-3-2 金属微粒(24)  2-3-3 有机性微粒(28)	
2-3-4 大气尘的一般组成(29)	
2-4 大气尘的浓度 .....	29
2-4-1 浓度表示方法(29)  2-4-2 计重浓度(30)  2-4-3 计数浓度(31)  2-4-4 计数浓度和计重浓度的对比(33)	
2-5 大气尘的粒径分布 .....	34
2-5-1 全粒径分布(34)  2-5-2 在双对数纸上的分布(34)	
2-6 影响大气尘浓度和分布的因素 .....	39
2-6-1 风的影响(39)  2-6-2 湿度的影响(41)  2-6-3 高度的影响(46)	
2-6-4 绿化的影响(46)	
参考文献 .....	47
第三章 对微粒的过滤机理 .....	48
3-1 概述 .....	48
3-2 过滤器中的基本过滤过程 .....	51
3-3 纤维过滤器的过滤机理 .....	51
3-3-1 拦截(或称接触、钩住)效应(51)  3-3-2 惯性效应(52)  3-3-3 扩散效应(52)  3-3-4 重力效应(52)  3-3-5 静电效应(53)	

3-4 计算纤维过滤器效率的步骤 .....	53
3-5 孤立单根纤维对微粒的捕集效率——孤立圆柱法 .....	54
3-5-1 拦截捕集效率(54) 3-5-2 惯性捕集效率(56) 3-5-3 扩散捕集效率(56)	
3-5-4 重力捕集效率(57) 3-5-5 孤立单根纤维对微粒的总捕集效率(57)	
3-6 过滤器内单根纤维对微粒的捕集效率——纤维干涉的影响和修正方法 .....	59
3-6-1 有效半径法(59) 3-6-2 结构不均匀系数法(60) 3-6-3 实验系数法(61)	
3-6-4 半经验公式法(61)	
3-7 计算纤维过滤器总效率的对数穿透定律 .....	61
3-7-1 对数穿透定律(61) 3-7-2 对数穿透定律的适用性(63)	
3-8 影响效率的因素 .....	65
3-8-1 微粒尺寸的影响(65) 3-8-2 微粒种类的影响(67) 3-8-3 微粒形状的影响(67)	
3-8-4 纤维粗细和断面形状的影响(67) 3-8-5 过滤速度的影响(67)	
3-8-6 纤维填充率的影响(69) 3-8-7 气流温度的影响(69)	
3-8-8 气流湿度的影响(69) 3-8-9 气流压力的影响(69) 3-8-10 容尘量的影响(69)	
参考文献 .....	69
第四章 过滤器的特性和设计 .....	71
4-1 空气净化系统中过滤器的作用和分类 .....	71
4-2 过滤器的特性指标 .....	71
4-3 面速和滤速 .....	72
4-4 效率 .....	72
4-4-1 效率(72) 4-4-2 穿透率(73) 4-4-3 净化系数(73)	
4-5 阻力 .....	73
4-5-1 滤料阻力(73) 4-5-2 过滤器全阻力(76)	
4-6 容尘量 .....	77
4-7 过滤器的设计效率 .....	77
4-8 过滤器的串联效率 .....	80
4-8-1 高效过滤器串联效率(80) 4-8-2 中效过滤器串联效率(81)	
4-9 使用期限 .....	82
4-10 滤纸过滤器 .....	83
4-11 纤维层过滤器 .....	89
4-12 发泡材料过滤器 .....	91
4-13 静电自净器 .....	93
4-13-1 静电自净器的用途(93) 4-13-2 静电自净器的工作原理(93) 4-13-3 静电自净器的结构(95)	
4-13-4 静电自净器的效率(96) 4-13-5 二次电离式静电自净器(97)	
参考文献 .....	100
第五章 室内微粒的运动 .....	101
5-1 作用在微粒上的力 .....	101
5-2 微粒的重力沉降 .....	101
5-3 微粒在惯性力作用下的运动 .....	103
5-4 微粒的扩散运动 .....	104
5-5 微粒在表面上的沉积 .....	105

5-5-1 微粒在无送风室内垂直表面上的扩散沉积 (105)	5-5-2 微粒在无送风室内底(平)面上的沉积 (106)	5-5-3 微粒在送风室内平面上的沉积 (107)	
5-6 气流对微粒运动的影响			110
5-6-1 影响室内微粒分布的因素 (110)	5-6-2 微粒的迁移 (111)	5-6-3 热对流气流的影响 (113)	
5-6-4 人走动的二次气流影响 (117)			
5-7 平行气流中点源的污染包络线			118
5-7-1 点源污染包络线 (119)	5-7-2 污染源的实际微粒分布 (120)	5-7-3 污染包络线的计算 (126)	
参考文献			127
<b>第六章 空气洁净度级别</b>			<b>128</b>
6-1 空气洁净度标准(级别)的沿革			128
6-2 表示空气洁净度级别的平行线			130
6-3 空气洁净度所要控制的对象			131
6-3-1 控制的最小粒径 (131)	6-3-2 控制的微粒数量 (132)		
6-4 被控制的含尘浓度的具体规定			132
6-5 由成品率确定空气洁净度的理论方法			133
6-5-1 空气洁净度和单道工序合格率的关系 (133)	6-5-2 多道工序的成品率 (136)		
6-6 生物微粒的标准			137
6-6-1 微生物的尺度 (137)	6-6-2 浮游细菌数量和标准 (137)	6-6-3 沉降细菌数量和标准 (139)	
参考文献			140
<b>第七章 洁净室原理</b>			<b>141</b>
7-1 控制污染的途径			141
7-2 气流的状态			142
7-2-1 几种基本流动状态 (142)	7-2-2 紊流过程的物理状态 (143)		
7-3 乱流洁净室原理			144
7-3-1 乱流洁净室原理 (144)	7-3-2 乱流洁净室的风口 (145)	7-3-3 乱流洁净室的效果 (146)	
7-4 平行流洁净室原理			147
7-4-1 平行流洁净室的分类 (148)	7-4-2 平行流洁净室原理 (151)		
7-5 平行流洁净室的三项特性指标			156
7-5-1 流线平行度 (156)	7-5-2 乱流度 (158)	7-5-3 下限风速 (161)	
7-6 全顶棚送风, 两侧下回风洁净室的特性			166
7-6-1 线汇模型 (166)	7-6-2 流场的特点 (170)	7-6-3 允许室宽 (173)	
7-7 洁净室的压力			174
7-7-1 静压差的确定 (174)	7-7-2 维持静压差所需的换气次数 (178)		
7-8 生物洁净室			179
7-8-1 生物洁净室的应用 (179)	7-8-2 微生物污染的控制 (181)	7-8-3 一般生物洁净室 (184)	7-8-4 隔离式生物洁净室 (186)
参考文献			189
<b>第八章 洁净室均匀分布计算理论</b>			<b>192</b>
8-1 乱流洁净室三级过滤系统			192
8-2 乱流洁净室含尘浓度瞬时式			193

8-3 乱流洁净室含尘浓度稳定式	194
8-3-1 单室的稳定式(194)	
8-3-2 多室的稳定式(195)	
8-4 有局部净化设备时的含尘浓度稳定式	197
8-5 瞬时式和稳定式的物理意义	197
8-6 乱流洁净室其他计算方法	198
8-7 平行流洁净室含尘浓度计算法	199
8-8 乱流洁净室自净时间和污染时间的计算	200
8-8-1 概念(200)	
8-8-2 自净时间的计算(200)	
8-8-3 发尘污染时间的计算(204)	
8-9 平行流洁净室的自净时间	205
参考文献	206
<b>第九章 洁净室不均匀分布计算理论</b>	<b>207</b>
9-1 不均匀分布的影响	207
9-2 三区不均匀分布模型	208
9-3 三区不均匀分布的数学模型	209
9-4 $N-n$ 通式的物理意义	211
9-5 不均匀分布计算和均匀分布计算对比	212
参考文献	213
<b>第十章 洁净室特性</b>	<b>214</b>
10-1 静态特性	214
10-2 动态特性	219
10-3 不均匀分布特性曲线	223
10-4 浓度场的不均匀性	227
10-4-1 主流区和回风口区浓度之比(227)	
10-4-2 涡流区和主流区浓度之比(227)	
10-4-3 涡流区和回风口区浓度之比(228)	
10-4-4 不均匀分布和均匀分布浓度之比(228)	
参考文献	229
<b>第十一章 洁净室的设计计算</b>	<b>230</b>
11-1 室内外计算参数的确定	230
11-1-1 大气尘浓度(230)	
11-1-2 室内单位容积发尘量(230)	
11-1-3 新风比(234)	
11-2 高效空气净化系统计算	237
11-2-1 $N$ 的计算(237)	
11-2-2 $n$ 的计算(238)	
11-2-3 $\psi$ 的计算(238)	
11-2-4 三种设计计算原则(240)	
11-2-5 例题(241)	
11-3 中效空气净化系统计算	243
参考文献	246
<b>第十二章 局部洁净区</b>	<b>247</b>
12-1 主流区概念的应用	247
12-2 部分围挡壁式洁净区	251
12-3 气幕洁净棚	253
12-3-1 应用(253)	
12-3-2 空气幕的隔离作用(255)	
12-3-3 气幕洁净棚隔离效果的理论分析(255)	
12-3-4 气幕洁净棚的性能(257)	
参考文献	260

第十三章 采样与检测.....	262
13-1 采样.....	262
13-1-1 采样系统(262) 13-1-2 等速采样(266) 13-1-3 采样管中微粒的 损失(268)	
13-2 微粒浓度的测定方法.....	270
13-2-1 计重浓度法(270) 13-2-2 计数浓度法——滤膜显微镜计数法(272)	
13-2-3 计数浓度法——光散射式粒子计数器计数法(274) 13-2-4 相对浓度 法(279) 13-2-5 生物微粒测定法(279)	
13-3 过滤器的测定.....	281
13-3-1 测定范围(281) 13-3-2 过滤器效率的测定(285) 13-3-3 过滤器容尘量的 测定(289)	
13-4 检漏.....	292
13-4-1 渗漏的定义(292) 13-4-2 高效过滤器的检漏(293) 13-4-3 隔离式生物洁净 装置的检漏(294)	
13-5 洁净室的测定.....	295
13-5-1 洁净室测定的种类(295) 13-5-2 洁净室的测定状态(298) 13-5-3 最小检测 容量(298) 13-5-4 最小沉降面积(300) 13-5-5 必要测点数(300)	
13-5-6 洁净室测定结果的评定(302)	
参考文献.....	304
常用术语(中、英、日对照).....	305
索引.....	309

# 第一章 微粒的分布特性

空气洁净技术的目的，就是要极大程度地将空气介质中的悬浮微粒除掉。含有分散相—悬浮微粒的空气介质是一种分散体系，被称为气溶胶。

气溶胶的微粒在空气中如何运动和分布，是空气洁净技术的重要基础。为了叙述方便，先介绍微粒的分布特性。

## 1-1 微粒的分类

### 1-1-1 按微粒的形成方式分类

1. 分散性微粒 固体或液体在分裂、破碎、气流、振荡等作用下变成悬浮状态而形成。其中固态分散性微粒是形状完全不规则的粒子，或是由集结不紧、凝并松散的粒子组成的形状极不相同的集合体；液态分散性微粒是球形有规则的粒子，或是在凝并时互相并合而又形成球形的粒子。

2. 凝集性微粒 通过燃烧、升华和蒸气凝结以及气体反应而形成。其中固态凝集性微粒，一般是由数目很多的有着规则结晶形状或者球状的原生粒子结成的松散集合体组成；液态凝集性微粒是比液态分散性微粒小得多、多分散性也小的粒子。

### 1-1-2 按微粒的来源分类

1. 有机性微粒 例如植物纤维，动物毛、发、角质、皮屑，化学染料和塑料等。
2. 无机性微粒 例如金属尘粒、矿物尘粒和建材尘粒等。
3. 生物微粒 例如各种藻类、菌类、原生动物和病毒等。

### 1-1-3 按微粒的大小分类

气溶胶的微粒的范围从 $10^{-7}$ 厘米到 $10^{-1}$ 厘米，在这么宽的范围，随着微粒大小的变化，它的物理性质和规律都将发生变化。

1. 可见微粒 肉眼可见，微粒直径大于10微米。
2. 显微微粒 在普通显微镜下可以看见，微粒直径为0.25~10微米。
3. 超显微微粒 在超显微镜或电子显微镜下可以看见，微粒直径小于0.25微米。

### 1-1-4 微粒的通俗分类

在气溶胶的技术领域中，经常采用如“灰尘”“烟”“雾”等术语，空气洁净技术中的一些名词概念也常涉及这些术语，（如空气含“尘”浓度，油“雾”仪等等）这就是对微粒的通俗分类。

1. 灰尘 包括所有固态分散性微粒。这类微粒在空气中的运动受到重力、扩散等多种因素的作用，是空气洁净技术接触最多的一种微粒。

2. 烟 包括所有固态凝集性微粒，以及液态粒子和固态粒子因凝集作用而产生的微粒，还有从液态粒子过渡到结晶态粒子而产生的微粒。一般情况下，微粒大小为0.5微米



以下（如香烟的烟，木材的烟，油烟，煤烟等），在空气中主要呈布朗运动，有相当强的扩散能力，在静止空气中很难沉降。在空气洁净技术中常用发烟剂的烟流来检查空气过滤器有无渗漏。

3.雾 包括所有液态分散性微粒和液态凝集性微粒。微粒大小因生成状态而异，介于0.1~10微米之间。其运动性质主要受斯托克斯定律支配。例如从SO<sub>2</sub>气体产生的硫酸雾，因加热和压缩空气的作用产生的油雾，就都是这种微粒，后者可作为试验空气过滤器的标准尘源。

4.烟雾 包括液态和固态，既含有分散性微粒又含有凝集性微粒。微粒大小从十分之几微米到几十微米，例如工业区空气中由煤粉尘、二氧化硫、一氧化碳和水蒸汽所形成的结合体（典型的如伦敦雾就是烟与雾的混合物，还有钢铁厂产生的氧化铁烟雾）就是这种烟雾型微粒。

图1-1给出了气溶胶微粒的大小和范围。

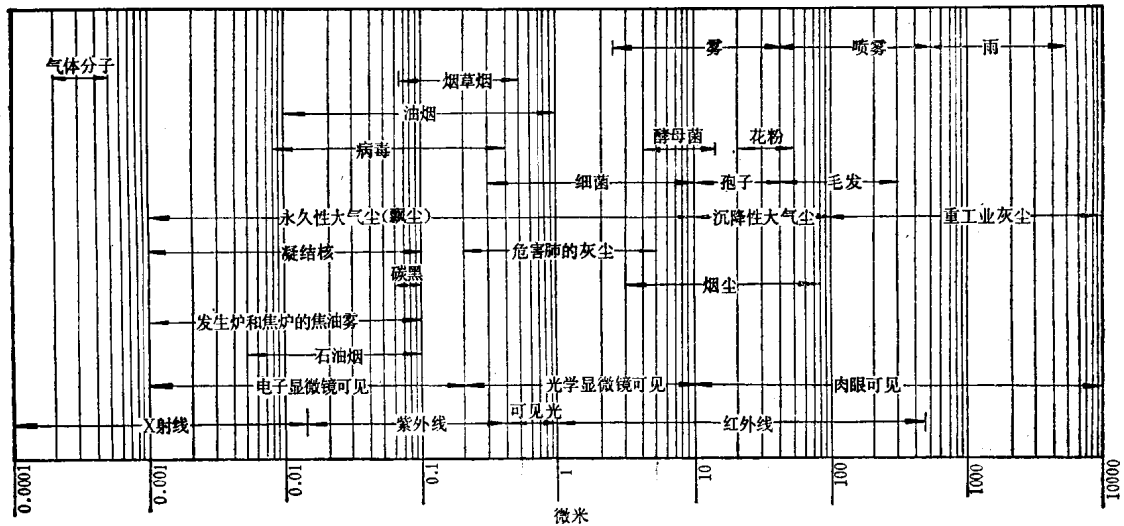


图 1-1 微粒的大小和范围

## 1-2 微粒大小的量度

### 1-2-1 粒径

微粒的大小通常以粒径表示。但是微粒特别是灰尘粒子并不都具有球形、立方体等规则的几何外形，因此，通常所称微粒的“粒径”，并不是指真正球体的直径。在气溶胶及空气洁净技术中，“粒径”的意义通常是指通过微粒内部的某一个长度因次，而并不含有规则几何形状的意义。在分析微粒大小的时候，“粒径”就是指的这种含意。

例如，在灰尘采样以后，用普通光学显微镜来观测时，使灰尘标本向一个方向移动通过标尺，此时微粒投影通过测微标尺时，为标尺刻度线所切的两端的长度就代表粒径。顺序地、无选择地逐粒进行量测，遇尘粒的长径则测其长径，遇短径则测其短径（如图1-2所示）。这里的长径和短径叫做定方向切线径，当被测微粒足够多时，结果能正确反映样

本尘粒的平均断面。《空气洁净技术措施》就是按这种粒径定义的，这样对测定比较方便。但是也有规定只取投影最大线距为微粒直径的，例如美国关于洁净室的几个标准就是如此。显然，这就必须在测定时旋转测微尺，而且也不可能精确确定最大线距位置，所以日本的“洁净室中悬浮微粒测定法”（工业标准 JIS）就说明不必旋转测微尺，而只要估测投影最大径，并认为引起的误差很小。

也可以用和测量方法有关的各种当量直径来表示粒径。用光散射式粒子计数器测定时，“粒径”是指将所测微粒与标准粒子（如聚苯乙烯小球）作散射光强度的等效比较，而得到的综合效果，代表着某一个几何尺寸的范围，这是一种当量直径。还可以测出微粒沉降速度，按第五章所述斯托克斯定律求出沉降速度与所测速度相等的球体直径，称为沉降直径，也是一种当量直径，一般小于其他直径。西德标准 VDI—2083 就用当量直径表示粒径。

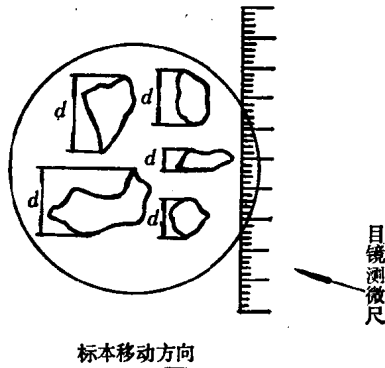


图 1-2 确定粒径的一种方法

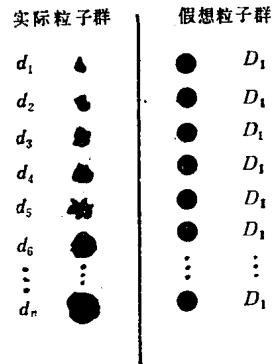


图 1-3 假想的粒子群和平均粒径

### 1-2-2 平均粒径

由于微粒形状极不相同，按上述方法得到的粒径，对于一个微粒群来说，也是不一样的，这在实际应用中就很不方便。因此，必须确定一种能反映全部微粒某种特征的粒径的平均数值，这就是“平均粒径”，它是用特殊的方法表示全部微粒某种特征的一个假设的微粒直径。

设实际的全部微粒粒径为  $d_1, d_2, \dots, d_n$ （如图 1-3，是用前述方法确定的）。它们的某种特性（如光的散射特性）可用  $f(d_1), f(d_2), \dots, f(d_n)$  来表示，则这一群微粒所具有的这种特性  $f(d)$  和各别微粒的这种特性应有如下关系：

$$f(d) = f(d_1) + f(d_2) + \dots + f(d_n) \quad (1-1)$$

假想另有一群具有同样粒径  $D$  的微粒，和实际的微粒群有着相同的某种特性（如光的散射特性），那末就应该：

$$f(d) = f(D) \quad (1-2)$$

粒径  $D$ ，就是针对某种特性而言的这群微粒的平均粒径。 $D$  可定为正六面体的一个边长，也可定为球体的直径，但一般用后者，即把假想的微粒群看作是一群一般大小的球。

最简单的一种考虑就是设想具有等直径  $D_1$  的一群微粒，其直径的总长度这一特性和实际的一群微粒的全部直径的总长度这一特性相同，则根据式（1-2）的定义可写出下式：

$$\begin{aligned} \sum n_i d_i &= \sum n_i D_1 = \sum n_i D_1 = n D_1 \\ D_1 &= \frac{\sum n_i d_i}{\sum n_i} \quad \text{或} \quad \frac{\sum n_i d_i}{n} \end{aligned} \quad (1-3)$$

这就是算术平均直径。

式中  $d_i$ ——用任意手段测得的粒径；

$n_i$ ——相应于每一种直径 $d_i$ 的微粒数目；

$n$ ——微粒总数。

如果令实际的微粒群和设想的微粒群的面积（投影面积或表面积）总和这一特性相同，则同样由式（1-2）可得到：

$$D_s = \sqrt{\frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i}} \quad (1-4)$$

这个直径称为平均面积直径。

微粒的平均直径

表 1-1

符号	名称	意义	算式
$D_{mod}$	模型直径	标本或试样中大多数的微粒的直径，是所有借频率分布算出的直径中最小的	从粒径频率分布曲线最高点求得
$D_{50}$ 或 $D_m$	中值(或中位)直径	大于此直径的微粒数恰好等于小于此直径的微粒数，为粒数中值直径；大于此直径的微粒重量(质量)恰好等于小于此直径的微粒重量(质量)，为重量(质量)中值直径	从粒径累积频率分布曲线上50%的微粒数(重量或质量)处求得
$D$ 或 $D_1$	算术(或粒数)平均直径	是一种算术平均值，也是习惯上最常使用的粒径。但是由于作为气溶胶的微粒群中小颗粒常占多数，即使重量很小，也能大大降低算得的平均值，所以在反映微粒群中微粒的真实大小和该微粒群的物理性质上有很大局限性	$D_1 = \frac{\sum n_i d_i}{\sum n_i}$ $n_i$ 为各粒径的粒数 $\sum n_i$ 为总粒数
$D_2$	比长度(或长度平均)直径	是各微粒的投影面积除以相应的直径的加和总数而得，即单位长度的平均直径	$D_2 = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i d_i}$
$D_3$	比面积(或面积平均)直径	是由各微粒的总体积除以相应的断面积的加和总数而得，即单位面积的平均直径	$D_3 = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2}$
$D_4$	比重量(或重量平均、质量平均、体积平均)直径	基于单位重量的表面积而得，即单位重量(体积、质量)的平均直径，比其他各径都大	$D_4 = \frac{\sum n_i d_i^4}{\sum n_i d_i^3}$
$D_s$	平均面积直径	是按微粒粒数平均面积的直径	$D_s = \sqrt{\frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i}} = \sqrt{D_1 \times D_2}$
$D_v$	平均体积(重量或质量)直径	是按微粒粒数平均体积(重量或质量)的直径	$D_v = \sqrt[3]{\frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i}} = \sqrt[3]{D_1 \times D_2 \times D_3}$
$D_0$	几何平均直径	是对数正态分布时，频率最大的粒径，等于中值直径。总是等于或小于算术平均直径	<ul style="list-style-type: none"> <li>从对数正态分布曲线的最高点求得</li> <li><math display="block">D_0 = \left( \prod_i^n d_i \right)^{1/n}</math></li> <li><math display="block">\therefore \lg D_0 = \frac{\sum n_i \lg d_i}{n}</math></li> <li>或者：<math display="block">\lg D_0 = \overline{\lg d_i} = \frac{\sum n_i \lg d_i}{\sum n_i}</math></li> </ul>

如果令实际的微粒群和设想的微粒群的比长度面积（即单位长度的截面积）这一特性相同，则可写出：

$$\frac{\sum n_i \frac{\pi}{4} d_i^2}{\sum n_i d_i} = \frac{n \frac{\pi}{4} D_2^2}{n D_2}$$

即

$$\frac{\frac{\pi}{4} \sum n_i d_i^2}{\sum n_i d_i} = \frac{\pi}{4} D_2$$

∴

$$D_2 = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i d_i} \quad (1-5)$$

这个直径称为比长度直径。

以同样的方法可以求出其它平均直径，微粒的面积可考虑用圆形（球形）或方形，此外，还可以根据粒径频率分布确定一些平均直径。现将这些平均直径列于表1-1。

对于表中所列平均粒径名称要注意的是，在文献中常出现互相颠倒的称呼，例如此处称“平均面积直径”，而彼处则称“面积平均直径”，所以只有知道其表达式才能弄清准确意义。至于选用哪种平均直径合理，这要看工作目的而定。研究计重测尘时显然应采用和重量有关的直径 $D_V$ ；而研究微粒的光散射性质时宜用平均面积直径 $D_S$ 或平均体积直径 $D_V$ ，因为光散射量在不同的粒径范围内，可能与微粒面积或者微粒体积有关；在与光的折射性质有关的范围内的问题应采用算术平均直径 $D_1$ ，这种性质与微粒长度因次有关。

现举例计算微粒平均直径。

在钠焰法测尘中，用电子显微镜测得在送风气流中采样的某标本片上的823个氯化钠微粒尺寸如下：

粒 径 (微米)	<0.05	0.05~<0.1	0.1~<0.2	0.2~<0.4	0.4~<0.6	0.6~<1.0
粒 数	17	99	429	225	40	13

根据这个数据列成表1-2。

平均粒径计算表

表 1-2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
粒径区间 (微米)	平均值 $d_i$	粒数 $n_i$	$n_i d_i$	$d_i^2$	$n_i d_i^2$	$d_i^3$	$n_i d_i^3$	$d_i^4$	$n_i d_i^4$
<0.05	0.025	17	0.425	$6.25 \times 10^{-4}$	$1.06 \times 10^{-2}$	$0.16 \times 10^{-4}$	$2.72 \times 10^{-4}$	$0.39 \times 10^{-6}$	$6.63 \times 10^{-6}$
0.05~<0.1	0.075	99	7.425	$56.25 \times 10^{-4}$	$55.69 \times 10^{-2}$	$4.23 \times 10^{-4}$	$418.77 \times 10^{-4}$	$31.64 \times 10^{-6}$	$3132.36 \times 10^{-6}$
0.1~<0.2	0.15	429	64.350	$2.25 \times 10^{-2}$	$956.25 \times 10^{-2}$	$33.75 \times 10^{-4}$	$14479 \times 10^{-4}$	$506 \times 10^{-6}$	$200000 \times 10^{-6}$
0.2~<0.4	0.3	225	67.500	$9 \times 10^{-2}$	$2025 \times 10^{-2}$	$270 \times 10^{-4}$	$60750 \times 10^{-4}$	$8100 \times 10^{-6}$	$1822500 \times 10^{-6}$
0.4~<0.6	0.5	40	20.000	$25 \times 10^{-2}$	$1000 \times 10^{-2}$	$1250 \times 10^{-4}$	$50000 \times 10^{-4}$	$62500 \times 10^{-6}$	$2500000 \times 10^{-6}$
0.6~<1.0	0.8	13	10.400	$64 \times 10^{-2}$	$832 \times 10^{-2}$	$5120 \times 10^{-4}$	$66560 \times 10^{-4}$	$409600 \times 10^{-6}$	$5324800 \times 10^{-6}$
$\Sigma$		823	170.10		48.68		19.2		9.85

由表1-2可以求出:

算术平均直径

$$D_1 = \frac{\sum n_i d_i}{\sum n_i} = \frac{170.10}{823} = 0.207 \text{微米}$$

比长度直径

$$D_2 = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i d_i} = \frac{48.68}{170.10} = 0.286 \text{微米}$$

比面积直径

$$D_3 = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2} = \frac{19.2}{48.68} = 0.394 \text{微米}$$

比重量直径

$$D_4 = \frac{\sum n_i d_i^4}{\sum n_i d_i^3} = \frac{9.85}{19.2} = 0.513 \text{微米}$$

平均面积直径

$$D_g = \sqrt{D_1 \times D_2} = \sqrt{0.207 \times 0.286} = \sqrt{5.92 \times 10^{-2}} \\ = 0.243 \text{微米}$$

$$\text{平均体积直径 } D_v = \sqrt[3]{D_1 \times D_2 \times D_3} = \sqrt[3]{0.207 \times 0.286 \times 0.394} = \sqrt[3]{2.33 \times 10^{-2}} \\ = 0.286 \text{微米}$$

几何平均直径

$$\therefore \lg D_g = \frac{\sum_i^n n_i \lg d_i}{\sum n_i} = -\frac{623}{823} = -0.757$$

$$\therefore D_g = 0.175 \text{微米}$$

钠焰法测定所用的光电火焰光度计的读数,与氯化钠的含量(质量)成比例,所以上面计算的氯化钠微粒平均直径以取重量平均直径 $D_4$ 较好,在上例中 $D_4=0.513$ 微米,而国外标准规定的该粒径是0.6微米。

### 1-3 微粒的统计分布

在空气洁净技术中经常要接触许多关于微粒大小的数据,例如把空气中的灰尘采在化学微孔滤膜上,当在显微镜下观察这种滤膜时,就可以看到大大小小形状不一的灰尘,而且即使是同一个时间采集的标本,也不一样,灰尘大小的数据在表面上完全是杂乱无章的。但是,就在这杂乱无章的数据里蕴藏着有用的“信息”,如果对这些数据作一番科学的整理与分析,就可能充分和正确地提取出有用的“信息”,从而可以作为测尘、防尘和除尘净化所采取技术措施的依据。这种对微粒大小的数据进行整理分析的工作,就是要找出微粒按粒径分布和按密度(在一定空间或面积中的粒数)分布的规律。

#### 1-3-1 粒径分布曲线

微粒的许多特性只依靠算出粒子的平均粒径是不足以表示的,在很大程度上更取决于粒径分布的规律。

微粒按粒径的分布也就是微粒的分散度,它反映一群微粒中不同粒径的微粒各占总体

数量或重量的百分数。如果微粒愈小，而且占的比重愈大，则这一群微粒的分散度就高，反之就低。所以分散度代表分散相物质被粉碎分散的程度。通常所说求某群微粒的分散度，就是指求某群微粒按粒径的分布。

粒径分布曲线是指微粒大小的某种尺寸重复出现的次数（或称频率），与这个尺寸量度之间的关系曲线，这种曲线可由频率分布直方图加以光滑化而得到。

首先将微粒的粒径按需要或测定方法分成若干组，例如第一组粒径从0到小于0.1微米，以后各组依次为从0.1到小于0.2微米，0.2到小于0.3微米等等；或者第一组为粒径从0到小于0.5微米，以后依次为0.5到小于1微米，1微米到小于2微米，2微米到小于4微米等等。然后数出每一组的粒数即频数，以纵坐标对应频数，横坐标对应组距画出高度为频数的矩形，这种图形就是频率分布直方图。如果纵坐标取相对频率（某一粒径的粒数与全部微粒数目之比），就得到相对频率分布直方图。

频率分布表 1-3

粒径分组 (微米)	频数	相对频率 (%)	累计频率 (%)
0~<0.05	17	2.06	2.06
0.05~<0.1	99	12.03	14.09
0.1~<0.2	429	52.13	66.22
0.2~<0.4	225	27.34	93.56
0.4~<0.6	40	4.86	98.42
0.6~<1.0	13	1.58	100.00
Σ	823	100	

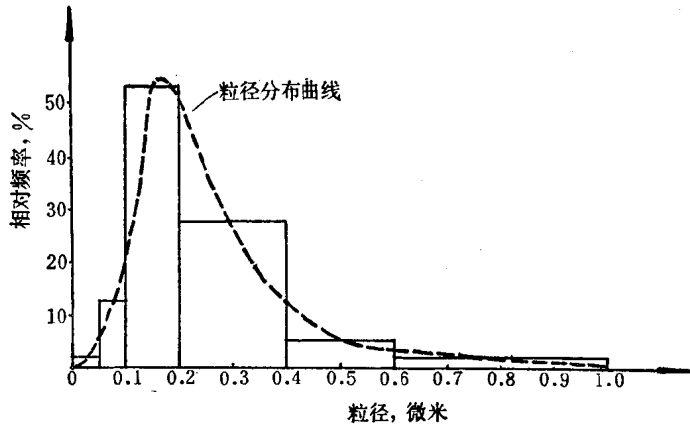


图 1-4 相对频率分布

仍以前面举过的氯化钠粒子为例，得到如表1-3的频率分布表和如图1-4的直方图。图中虚线则为由直方图光滑化后的粒径分布曲线。

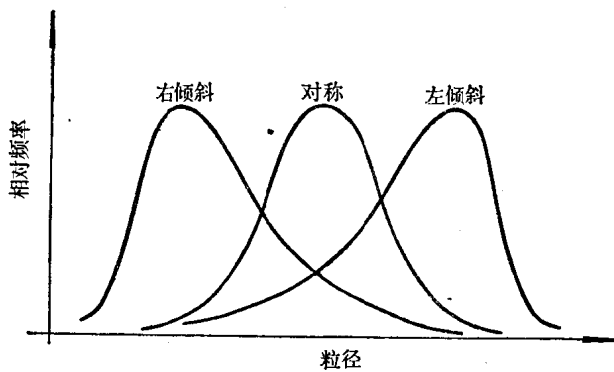


图 1-5 粒径频率分布

大多数微粒群的粒径分布曲线并不是对称的，而是向着直径大的一边倾斜，对于灰尘粒子这差不多是一个固有的特性。这种分布称为“右倾斜”分布，这是因为在粉尘微粒中，小颗粒占绝大多数。此外，还有“左倾斜”分布和“对称分布”，如图1-5所示。

从图中可见，如果粒径的间距取得更小、更密，而且从更小的微粒开始分组，则由直方图加以平滑化而得到的分布曲线将越接近真实情况。但是，在实际计数粒子的时候，由于测量仪器精度的限制，在很小的粒径范围内不可能分出足够狭小的间隔，而只能笼统地

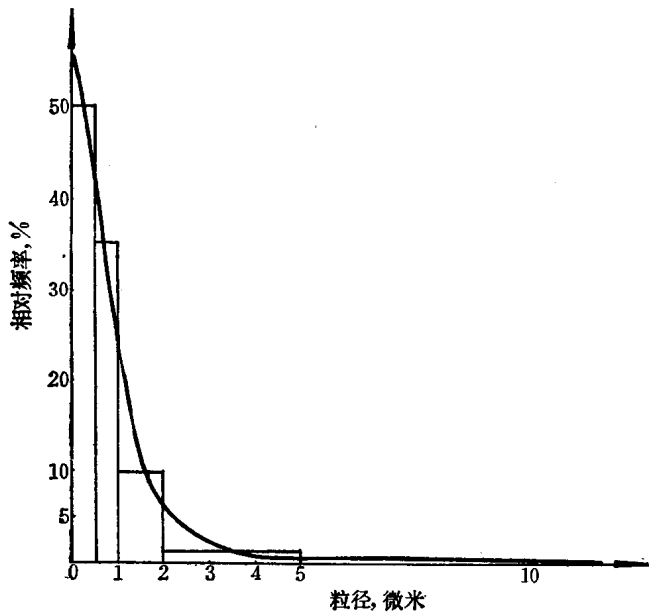


图 1-6 某洁净室空气中灰尘的分布曲线

给出小于、等于某尺寸的微粒总数，因而得到的分布曲线是一条与纵坐标在离原点一定距离上相交的曲线，如图 1-6 所示。这个图上的曲线是根据表 1-4（此表是实际测定的某洁净室内空气含尘浓度滤膜法测定值）绘制的。这样的粒径分布曲线实际上是虚假的曲线，不能完全正确反映微粒分布的真正特性，因为从 1 微米到 0 之间的数据由于测定方法所限很不充分，实际曲线不应该象图上那样。

如果将小于（或大于）某一尺寸的所有微粒的数目加起来并绘成曲线，就得到累积频率分布

曲线，如图 1-7 所示。图 1-8 是由表 1-4 或图 1-6 得到的一种实际累积频率分布曲线。

频率分布曲线（或叫相对频率分布曲线）和累积频率分布曲线的关系是互为积分与微分的关系，可参看图 1-9。

某洁净室空气中尘粒  
粒径的频率分布 表 1-4

粒径分布 (微米)	频 数	相对频率 (%)	累 计 频 率 (%)
≤0.5	51.05	51.05	51.05
>0.5~≤1	35.47	35.47	86.52
>1~≤2	10	10	96.52
>2~≤5	2.41	2.41	98.93
>5~≤10	0.6	0.6	99.53
>10	0.47	0.47	100.00
Σ	100	100	

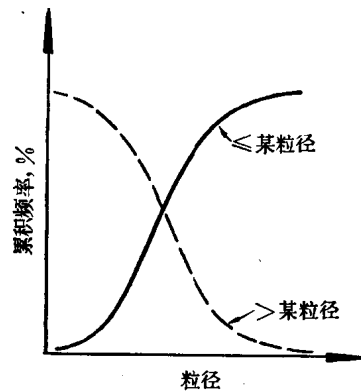


图 1-7 典型累积频率分布曲线

### 1-3-2 按粒径的正态分布和对数正态分布

如图 1-5 所示的中间对称的曲线叫正态分布曲线，曲线有个最高点，以此点的横座标为中心，对称地向两边快速单调下降。正态分布在数理统计中是一种极重要的分布概念，现根据研究粒径分布的需要介绍一些要点。

正态分布曲线可以由正态概率密度函数来描写，如下式：

$$\varphi(d) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(d-\bar{d})^2}{2\sigma^2}} \quad (1-6)$$

式中  $d_i$ ——粒径;

$\bar{D}$ ——算术平均粒径。在正态分布情况下,  $\bar{D}=D_m=D_{mod}$ ;

$\sigma$ ——某一群微粒的标准离差(也叫标准偏差), 由于微粒群作为子样来说数目很大, 一般可取

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum\{n_i(d_i - \bar{D})^2\}}{\sum n_i}} \quad (1-7)$$

经计算可知, 很多次测定后, 测定值在  $\bar{D} \pm \sigma$  内的机会(也叫概率)是 68.3%, 在  $\bar{D} \pm 2\sigma$  内的机会是 95.4%, 在  $\bar{D} \pm 3\sigma$  内的机会是 99.7%。同时,  $\sigma$  的大小表达曲线的“胖”“瘦”程度, 大则曲线“胖”, 数据分散, 小则曲线“瘦”, 数据集中, 图1-10就是这种情形的示意。

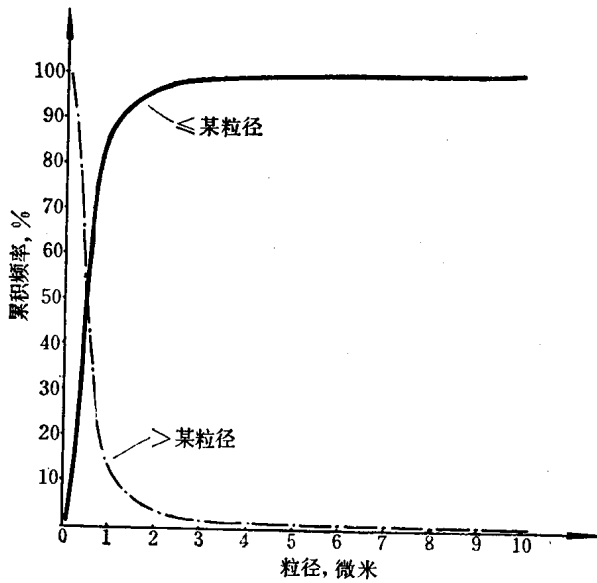


图 1-8 粒径累积频率分布的实例

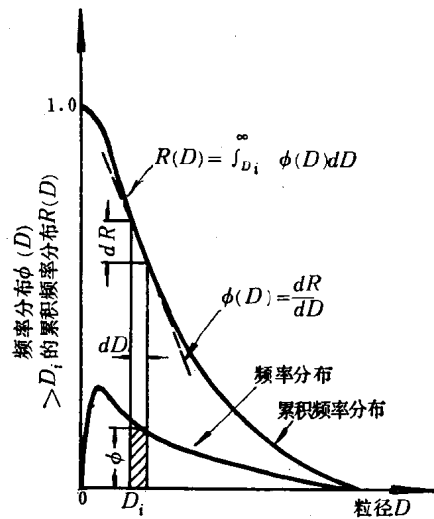


图 1-9 相对频率分布与累积频率分布的关系

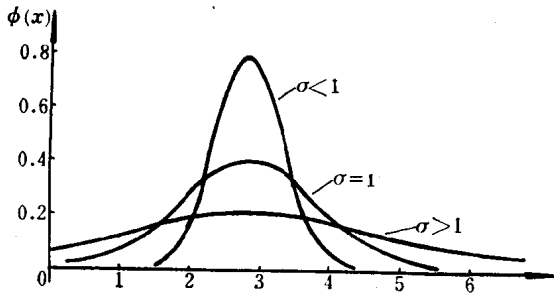


图 1-10  $\sigma$  的直观意义

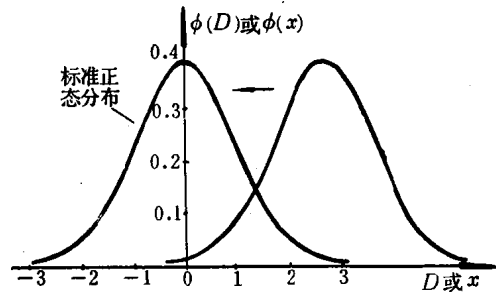


图 1-11 标准正态分布

当曲线最高点的横座标等于 0, 标准离差等于 1 时的正态分布, 叫做标准化的正态分布, 记为  $N(0, 1)$ 。把任意的非标准的正态分布曲线平移, 就得到标准正态分布曲线, 如图1-11所示。

有一种特殊的座标纸, 叫正态概率纸, 它的横座标是普通刻度, 纵座标按正态分布的规律刻划, 如图1-12所示。如果以横座标表示粒径, 纵座标表示粒径的累积分布频率, 如



果是正态分布的情形，则得出的一定是一条直线。这也是检验粒径分布是不是正态分布的一个简单方法。

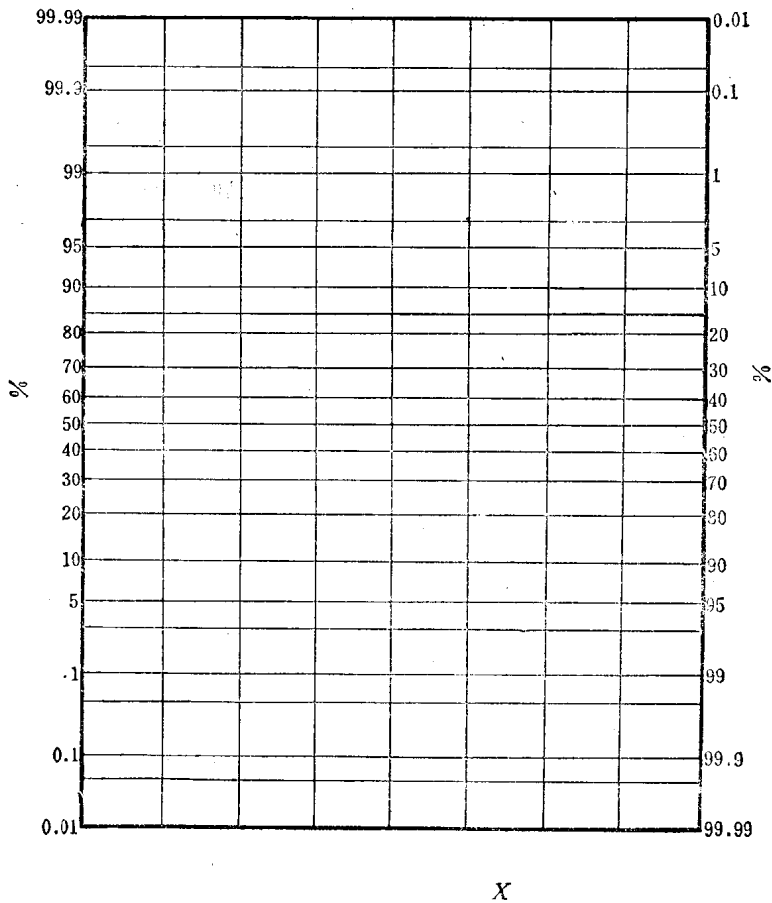


图 1-12 正态概率纸

但是大部分微粒的粒径分布并不完全是正态分布，而只是接近正态分布，如图 1-4 所代表的情形，则其累积分布画在正态概率纸上就不成为直线。如果把图 1-4 的横座标改为对数刻度，那末就能得到更为对称 更接近正态分布的曲线，图 1-13 就是由图 1-4 转画过来的这种曲线，所以把这样的分布称为对数正态分布。根据这样的分布曲线在对数正态概率纸（横座标为对数刻度的正态概率纸）上打点，仍然可以得到一条直线，图 1-14 上面的实线就是由图 1-13 转画过来的。这也是检验粒径分布是不是对数正态分布的简单方法。由于样本（计数的微粒群）的随机波动，画直线时多少有点偏差是允许的，但不能偏得太多，一般来说，中间的点不能偏离直线太远，两端的点（对于尘粒来说，特别是大粒子）可以偏

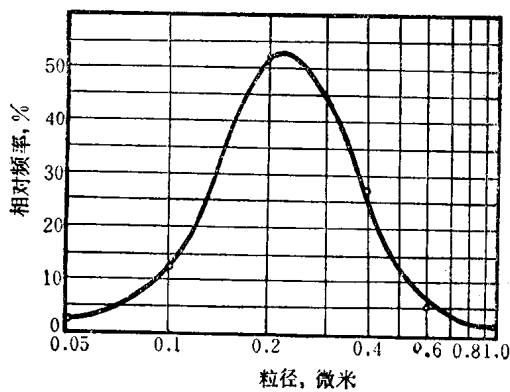


图 1-13 对数正态分布

（对于尘粒来说，特别是大粒子）可以偏