



高等学校“十一五”规划教材

粉尘防治理论及技术

Fenchen Fangzhi

Lilun Ji Jishu

杨胜强 主编

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

高等学校“十一五”规划教材

粉尘防治理论及技术

主 编 杨胜强

副主编 倪文耀 程庆迎 谢耀社

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书是根据安全技术及工程专业的《粉尘防治理论与技术》的课程教学大纲要求进行编写的。全书共有八章,系统地阐述了粉尘的性质,尘肺病及其预防,粉尘测定,煤尘爆炸及其预防,通风净化及除尘降尘技术,采煤工作面综合防尘技术,掘进及运输、转载防尘,以及防尘供水系统设计等内容。本书以基本概念为切入点,以基本理论和基本实验为依据,将理论和实验的结果用于分析粉尘的危害、工业粉尘的治理、矿业粉尘的治理以及粉尘综合防治等方面,使本书由浅入深,由简单到复杂,由理论到实践,主要适合于学生循序渐进的学习规律和工程技术人员自学的需要,以满足于科学研究、工程应用和现场技术管理等需要。

本书较为全面地汇集了国内外在粉尘防治理论与技术方面的现场经验和最新研究成果,不仅可作为高等院校安全工程、环境工程和采矿工程专业的教材和教学参考书,而且也可供从事通风防尘研究、设计和现场工作工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

粉尘防治理论及技术/杨胜强主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2007.6

ISBN 978 - 7 - 81107 - 636 - 3

I. 粉… II. 杨… III. 煤尘—防尘—高等学校—教材
IV. TD714

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 080409 号

书 名 粉尘防治理论及技术
主 编 杨胜强
责任编辑 杨 廷
责任校对 周俊平
出版发行 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
排 版 中国矿业大学出版社排版中心
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
经 销 新华书店
开 本 787×1092 1/16 印张 16.75 字数 418 千字
版次印次 2007年6月第1版 2007年6月第1次印刷
定 价 33.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

工业生产过程中产生的大量粉尘不仅严重危害作业人员的身体健康,引起尘肺病,而且许多粉尘在一定的条件下还具有燃烧爆炸性,导致人员伤亡、财产损失,同时大量粉尘排向大气会造成环境污染。为了贯彻“安全第一,预防为主,综合治理”的安全生产方针,根治粉尘危害,杜绝煤尘爆炸事故,是保障职工生命安全、身体健康和我国工业高速发展的重要前提。

随着工业生产过程中机械化程度的提高,生产强度的加大,在各种生产过程中均会产生大量粉尘。含尘气流的运动过程、各种喷雾降尘设备的降尘过程和除尘风机的除尘过程是一个多相流的混合流体运动变化的过程。国内外学者以含尘气流的多相流运动为基本假设,对粉尘的基本理论、粉尘职业病的危害、煤尘的爆炸机理及其预防以及粉尘运动规律、采掘工作面和运输系统的除尘降尘技术和测试技术等方面进行了大量的理论研究和现场试验研究,创造和总结出许多非常有效的防尘降尘技术,积累了丰富的粉尘治理和管理经验。

本教材以基本概念为切入点,以基本理论和基本实验为依据,针对安全技术及工程专业十余年的最新科技发展,按照工业安全和矿业安全的培养目标,编写既适合于工业安全,又适合于矿业安全的《粉尘防治理论及技术》,该书内容综合了工业防尘和矿业防尘的特点,包括了国内外粉尘防治领域的最新理论及技术。本书内容能够满足现代化企业对粉尘防治的需要,主要适合于学生循序渐进的学习规律和工程技术人员自学的需要,以满足于科学研究、工程应用和现场技术管理等需要。

本书不仅可作为高等院校安全工程、环境工程和采矿工程专业的教材和教学参考书,而且也可供从事通风防尘研究、设计和现场工作工程技术的人员参考。

本教材由杨胜强教授担任主编,第一章和第三章由杨胜强教授编写,第二章和第五章由程庆迎老师编写,第四章和第六章由倪文耀教授编写,第七章和第八章由谢耀社副教授编写,最后由杨胜强教授对全书进行审稿。本书在资料整理、图表绘制、计算机整理与排版和校对等方面得到了研究生于宝海、欧晓英、王义江和凌志迁的大力帮助,他们为完成此书付出了艰辛的劳动。在本书的编写过程中,还得到了中国矿业大学出版社有关领导和工作人员的大力支持和帮助,在本书完成之际,向他们表示衷心的感谢!

对于书中的不妥和不当之处,恳请读者批评指正!

编 者

2007年4月

第一章 粉尘的性质	1
第一节 概述	1
第二节 粉尘的粒度、分散度和粒度分布	2
第三节 粉尘的物理化学性质	8
第二章 尘肺病及其防治	17
第一节 粉尘对人体的危害	17
第二节 尘肺的分类及我国尘肺发病现状	19
第三节 矽肺	21
第四节 煤工尘肺	24
第五节 其他尘肺	25
第六节 影响尘肺发病的因素	28
第七节 预防尘肺的措施	34
第三章 粉尘测定	36
第一节 粉尘浓度测定	36
第二节 粉尘粒度和粒度分布测定	44
第三节 粉尘中游离二氧化硅含量的测定	47
第四章 煤尘爆炸及其预防	51
第一节 粉尘爆炸基础知识	51
第二节 煤尘燃烧与爆炸	65
第三节 煤尘爆炸的预防	75
第四节 煤尘爆炸的抑制与隔绝	79
第五章 通风净化及除尘降尘技术	94
第一节 通风除尘	94
第二节 重力沉降室和惯性除尘器	104
第三节 旋风除尘器	108
第四节 湿式除尘	113
第五节 化学和物理除尘	121
第六节 过滤式除尘器	125

第七节	电除尘器	133
第八节	个体防护	145
第六章	采煤工作面综合防尘技术	151
第一节	采煤工作面粉尘的产生	151
第二节	煤层注水防尘	154
第三节	采空区灌水防尘	167
第四节	炮采工作面综合防尘	169
第五节	机采工作面综合防尘	172
第七章	掘进及运输、转载防尘	198
第一节	破岩防尘	198
第二节	掘进工作面通风除尘	207
第三节	装岩防尘	216
第四节	转载、运输防尘	217
第五节	支护防尘	231
第六节	掘进工作面除尘新技术	236
第八章	防尘供水系统设计	240
第一节	防尘供水的要求	240
第二节	防尘供水的水池	243
第三节	防尘供水管路系统	244
附录		257
参考文献		260
13		胡其区我数尘数 章四第
12		只成脚基我数尘数 节一章
20		我数已数数尘数 节二第
27		我数已数数尘数 节三第
29		我数已数数尘数 节四第
40		木数尘数尘数尘数尘数 章五第
40		尘数尘数 节一章
401		器尘数数数数数数数数 节二第
801		器尘数尘数 节三第
811		尘数尘数 节四第
121		尘数尘数尘数尘数 节五第
221		器尘数尘数 节六第

第一章 粉尘的性质

第一节 概 述

一、矿尘及其分类

矿尘,一般指矿物开采或加工过程中产生的微细固体集合体。矿尘的存在状态:沉积于器物表面或井巷四壁之上的称为落尘;悬浮于井巷空间空气中的称为浮尘(或漂尘)。落尘与浮尘在不同风流环境下是可以相互转化的。防尘技术研究的主要对象是悬浮于空气中的粉尘,所以,一般所说的粉尘就是指这种状态的粉尘。对矿尘进行分类的方法很多,按其性质和形态,可以作如下分类。

1. 按矿尘产生的过程分类

(1) 矿尘 矿物(岩石、煤等)由于机械、爆破等作用被粉碎而生成的细小颗粒,尘粒形状不规则,颗粒大小分布范围很广,其中 $1\sim 100\ \mu\text{m}$ 的尘粒能暂时悬浮于空气中。

(2) 烟尘 伴随着燃烧、氧化等物理化学变化过程所产生的固体微粒,如井下煤的自然发火、外因火灾产生的烟尘,直径一般很小,多在 $0.01\sim 1\ \mu\text{m}$ 范围,可长时间悬浮于空气中。

2. 按矿尘颗粒的大小分类

(1) 粗尘 直径大于 $40\ \mu\text{m}$ 的粉尘,是一般筛分的最小直径,极易沉降。

(2) 细尘 直径为 $10\sim 40\ \mu\text{m}$ 的粉尘,在明亮的光线条件下,肉眼可以看到,在静止空气中呈加速沉降。

(3) 微尘 直径为 $0.25\sim 10\ \mu\text{m}$ 的粉尘,用普通光学显微镜可以观察到,在静止空气中呈等速沉降。

(4) 超微粉尘 直径小于 $0.25\ \mu\text{m}$ 的粉尘,要用超倍显微镜才能观察到,可长时间悬浮于空气中,并能随空气分子做布朗运动。

3. 其他分类

(1) 按粉尘的成分可分为煤尘、岩尘、石棉尘、水泥尘以及动、植物粉尘等。

(2) 按有无毒性可分为有毒、无毒、放射性粉尘等。

(3) 按爆炸可分为易燃、易爆和非燃、非爆炸性粉尘。

二、粉尘的危害性

煤矿井下生产,矿尘危害主要表现在以下3个方面:

(1) 对人体健康的危害。长期从事采掘和粉尘作业环境的职工,易患职业病——尘肺病。

(2) 采、掘等粉尘作业环境,若矿尘在空间达到较高的浓度,影响视野,操作时容易造成人身事故。

(3) 若矿井煤尘具有爆炸危险,会给矿井安全生产带来很大威胁。

第二节 粉尘的粒度、分散度和粒度分布

一、单一粉尘粒度的定义

粉尘颗粒大小的尺度,也叫做粒径,用 μm 表示。

粉尘颗粒形状很不规则,为了有统计上的相似定义,需采用适当的尺寸来表示各个粒子的粒径。一般说有 3 种形式的粒径:投影径、几何当量径、物理当量径。

1. 投影径

投影径是指尘粒在显微镜下所观察到的粉尘的尺寸,图 1-1 为尘粒的投影。

(1) 面积等分径 指将粉尘的投影面积二等分的直线长度,通常采用等分线与底边平行。

(2) 定向径 指尘粒投影面上两两平行切线之间的距离,它可取任意方向,通常取其与底边平行。

(3) 长径 不考虑方向的最长径。

(4) 短径 不考虑方向的最短径。

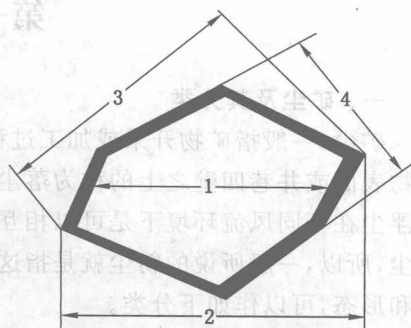


图 1-1 尘粒的投影径

1——面积等分径;2——定向径;
3——长径;4——短径

2. 几何当量径

取尘粒的某一几何量(面积、体积等)相同时的球形粒子的直径。如:

(1) 等投影面面积径 d_A 取尘粒的投影面与粉尘的投影面积相同的某一圆的直径。

$$d_A = \sqrt{\frac{4A_p}{\pi}} = 1.128 \sqrt{A_p} \quad (1-1)$$

式中 A_p ——尘粒的投影面积。

(2) 等体积径 d_v 与粉尘体积相同的某一圆球的直径。

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{6V_p}{\pi}} = 1.24 \sqrt[3]{V_p} \quad (1-2)$$

式中 V_p ——尘粒的体积。

(3) 等表面径 d_s 与尘粒的外表面积相同的某一圆球的直径。

$$d_s = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = 0.56 \sqrt{S} \quad (1-3)$$

式中 S ——尘粒的外表面积。

(4) 体面积径 d_{sv} 尘粒的外表面积与体积之比相同的圆球的直径。

$$d_{sv} = \frac{d_v^3}{d_s^2} \quad (1-4)$$

3. 物理当量径

取尘粒的某一物理量相同时的球形粒子的直径。如:

(1) 阻力径 d_d 在相同黏性的气体中,速度 v 相同时,粉尘所受到的阻力 P_D 与圆球受到的阻力相同时的圆球直径。

阻力 P_D 的计算公式为:

$$P_D = C_D A \rho_g \frac{v^2}{2} \quad (1-5)$$

式中 C_D ——阻力系数;

ρ_g ——气体密度, kg/m^3 ;

A ——垂直于气流方向的粉尘断面积, m^2 。

而 $C_D A$ 为尘粒直径 d_p 的函数, 由此可得出粉尘的阻力径 d_d 。

(2) 自由沉降径 d_f 在特定气体中, 密度相同的尘粒在重力作用下自由沉降所达到的末速度与圆球所达到的末速度相同时的球体直径。

(3) 空气动力径 d_a 在静止的空气中, 尘粒的沉降速度与密度为 1 g/cm^3 的圆球的沉降速度相同时的圆球直径。

(4) 斯托克斯径 d_{st} 在层流区内(对粉尘粒子的雷诺数 $Re_p < 1$) 的空气动力径, 即:

$$d_{st} = \left[\frac{18\mu}{(\rho_p - \rho_g)g} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-6)$$

式中 μ ——空气动力黏度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

ρ_p ——尘粒的密度, kg/m^3 ;

ρ_g ——空气的密度, kg/m^3 ;

u ——沉降速度, m/s ;

g ——重力加速度, m/s^2 。

斯托克斯径与阻力径和等体积径的关系为:

$$d_{st}^2 = \frac{d_v^3}{d_d} \quad (1-7)$$

还可以根据尘粒的其他几何、物理量来定义粉尘的粒径。同一尘粒按不同定义所得的粒径在数值上是不同的, 因此在使用粉尘粒径的同时, 还必须清楚了解所采用的粒径的含义, 利用不同粒径测试方法, 得出不同概念下的粒径, 例如, 用显微镜法测得的是投影径, 用沉降管测得的是斯托克斯径, 用光散射法测定的是等体积径, 用过滤除尘法测定的是几何当量径等。

二、粉尘平均粒径

在自然界或工业生产过程中产生的粉尘, 不仅形状不规则, 其粒度的分布范围也广, 对于这种粉尘由于“平均”的方法不同, 其平均粒径也有不同的定义。

(1) 算术平均值径 \bar{d}_{10} 指粉尘直径的总和除以粉尘的颗粒数。

$$\bar{d}_{10} = \frac{1}{N} \sum (\bar{d}_i n_i) \quad (1-8)$$

式中 N ——粉尘的颗粒总数;

d_i ——第 i 种粉尘的直径;

n_i ——粒径为 d_i 的粉尘颗粒数。

(2) 平均表面积径 \bar{d}_{20} 指粉尘表面积径的总和除以粉尘的颗粒数。

$$\bar{d}_{20} = \left(\frac{1}{N} \sum d_i^2 n_i \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-9)$$

平均表面积径特别适用于研究粉尘表面的特性。

(3) 体积(或重量)平均径 \bar{d}_{30} 指各粉尘的体积(或重量)的总和除以粉尘的颗粒数。

$$(1-10) \quad \bar{d}_{30} = \left(\frac{1}{N} \sum d_i^3 n_i \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1-10)$$

在一般情况下, $\bar{d}_{10} < \bar{d}_{20} < \bar{d}_{30}$ 。

(4) 线性平均径 \bar{d}_{21} (面积长度平均径)

$$(1-11) \quad \bar{d}_{21} = \frac{\sum d_i^2 n_i}{\sum d_i n_i} \quad (1-11)$$

(5) 体积表面平均径 \bar{d}_{32}

$$(1-12) \quad \bar{d}_{32} = \frac{\sum d_i^3 n_i}{\sum d_i^2 n_i} \quad (1-12)$$

(6) 重量平均径 \bar{d}_{43}

$$(1-13) \quad \bar{d}_{43} = \frac{\sum d_i^4 n_i}{\sum d_i^3 n_i} \quad (1-13)$$

(7) 几何平均径 \bar{d}_g 指几个粉尘粒径连乘积的 n 次方根。

$$(1-14) \quad \bar{d}_g = \sqrt[n]{d_1^{n_1} d_2^{n_2} d_3^{n_3}} \quad (1-14)$$

$$(1-15) \quad \lg \bar{d}_g = \frac{1}{N} \sum n_i \lg d_i \quad (1-15)$$

可以根据不同的要求选择平均径的表达式。例如,为了表示粉尘的光密度及在重力场和惯性力场下的沉降速度,应取平均表面积径,对于通风除尘几何平均径具有重要意义。

三、粉尘的分散度与粒度分布

粉尘是由各种不同粒径的粒子组成的集合体,显然,单纯用平均粒径来表征这种集合体是不够的,它不能充分反映粒子的组成特征。在气溶胶力学中经常用“分散度”这一概念。分散度是指粉尘整体组成中各种粒度的尘粒所占的百分比。分散度又叫粒度分布,有以下两种表示方法:

1. 个数标准的粒度分布(又称计数分散度)

用粒子群各粒级尘粒的颗粒数占总颗粒数的百分数表示,按下式计算:

$$(1-16) \quad P_{n_i} = \frac{n_i}{\sum n_i} \times 100\% \quad (1-16)$$

式中 P_{n_i} ——某粒数尘粒的数量百分比, %;

(1-17) n_i ——某粒级尘粒的颗粒数。

2. 重量标准的粒度分布(又称重量分散度)

用粒子群各粒级尘粒的重量占总重量的百分数表示,按下式计算:

$$(1-17) \quad P_{w_i} = \frac{W_i}{\sum W_i} \times 100\% \quad (1-17)$$

式中 P_{w_i} ——某粒级尘粒的重量百分比, %;

(1-18) W_i ——某粒级尘粒的重量。

个数标准与重量标准的换算:如果粉尘是匀质的,可用下式表示两者的关系。

$$P_{w_i} = \frac{n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^3} \times 100\% \quad (1-18)$$

式中 d_i ——某粒级尘粒的代表粒径。

粒级的划分要根据粉尘组成状况及研究目的来确定,从卫生角度,我国工矿企业把粉尘划分为 4 个计测粒级范围: $<2 \mu\text{m}$; $2\sim 5 \mu\text{m}$; $5\sim 10 \mu\text{m}$; $>10 \mu\text{m}$ 。

由于表示的基准不同,同一种粉尘的计数分散度与重量分散度的数值相差不大,必须是同样的表示方法才可直接对比,所以在给出数值时,必须说明表示方法。

四、粉尘粒度分布曲线

自然界和生产中产生的粉尘,如采取的样品具有代表性,粒度分布是连续的,可以用分布曲线或分布函数表示,常用的分布曲线有下述 3 种。

1. 粒度分布曲线

在坐标纸上,横轴表示粒径(用 x 或 d_p 表示),纵轴表示相应粒径所占的百分比(y),根据实测结果,按划分的粒级画成柱状图(即分散度 P_i),连接各柱面的中点,即为粒度分布曲线,也叫频率曲线,如图 1-2 中的 y 曲线。 y 曲线表示的关系式为:

$$y = f(x) \quad (1-19)$$

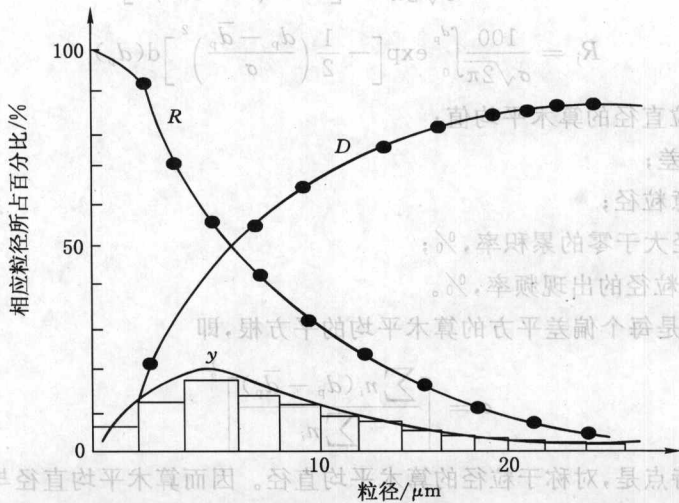


图 1-2 粉尘粒度分布、累积分布及通过率曲线

2. 累积分布函数(R)

如图 1-2 所示,把粒度分布按粒径的顺序(x 由 ∞ 到 0)累积起来即是累积分布曲线,它可表示到某一粒级的筛上残留率,所以也叫筛上残留率,用下式表示:

$$R = \int_x^{\max} f(x) dx \quad (1-20)$$

3. 通过率曲线(D)

如图 1-2 所示,与累积分布曲线相对应,即把粒度分布按粒径的顺序(x 由 0 到 ∞)累积所得到的,它表示到某一粒级的筛下通过率,所以叫筛下通过率,用下式表示:

$$D = \int_0^x f(x) dx \quad (1-21)$$

从图 1-2 可知,粒径的间隔划分越细,所得曲线越接近实际。 R 、 D 两曲线交点对应的是中位径 d_{50} , y 曲线最高点对应的是最高频率径 d_{max} 。

上述 3 种曲线的关系是:

$$y = f(x) = -\frac{dR}{dx} \quad (1-22)$$

$$R = 100 - D \quad (1-23)$$

五、工业粉尘的粒度分布函数

工业粉尘的粒度分布一般是有规律性的,可以用表格或图形表示,然而在某些场合用函数形式表示对于数学分析要方便得多。一般来说,粒度分布是随意的,但它近似和符合某种规律,因而可以用一些分布函数来表示,但因物料性质及产生过程极不相同,其分布状态差异很大,故需用不同的分布函数来表示。常用的有正态分布函数、对数正态分布函数、罗辛—拉姆勒分布函数等。

1. 正态分布函数

粉尘粒度的正态分布是相对于频率最大的粒径呈对称分布,其函数形式为:

$$f(d_p) = \frac{100}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{d_p - \bar{d}_p}{\sigma}\right)^2\right] \quad (1-24)$$

$$R_j = \frac{100}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{d_p} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{d_p - \bar{d}_p}{\sigma}\right)^2\right] d(d_p) \quad (1-25)$$

式中 \bar{d}_p ——尘粒直径的算术平均值;

σ ——标准差;

d_p ——任意粒径;

R_j ——粒径大于零的累积率, %;

$f(d_p)$ ——粒径的出现频率, %。

其中,标准差是每个偏差平方的算术平均的平方根,即

$$\sigma = \left[\frac{\sum n_i (d_p - \bar{d}_p)^2}{\sum n_i} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-26)$$

正态分布的特点是,对称于粒径的算术平均直径。因而算术平均直径与中位径吻合,当已知算术平均径(\bar{d}_p)和标准差(σ),该函数就完全确定了。在($\bar{d}_p - \sigma$)到($\bar{d}_p + \sigma$)的区间内包括了 68.3% 的粒子,而在($\bar{d}_p - 2\sigma$)到($\bar{d}_p + 2\sigma$)区间内则包括了 95.5% 的粒子。

正态分布是最简单的形式,在正态概率纸上可以表示成一条直线,如图 1-3 所示,由该直线可以得出,相应于累积频率为 50% 的粒径即为算术平均径;而相应于累计频率 84.13% 与 15.87% 的粒径之差,即为标准差。

工业粉尘属于此种分布的较少,从溶液中析出的结晶、化学反应的升华等属此种分布。

2. 对数正态分布函数

$$f(d_p) = \frac{100}{\sigma_g \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{d_p - \lg \bar{d}_g}{\sigma_g}\right)^2\right] \quad (1-27)$$

式中 \bar{d}_g ——尘粒的几何平均径,指几个粉尘粒径连乘积的 n 次方根;

$$(\bar{d}_g)^n = d_1^n \cdot d_2^n \cdot \dots \quad (1-28)$$

σ_g ——几何标准差。

$$\sigma_g^2 = \frac{\sum (\lg d_p - \lg \bar{d}_g)^2}{N-1} \quad (1-29)$$

与正态分布曲线相类似,将粒径分布绘于对数正态概率纸上,可以得到一直线,如图1-4所示。

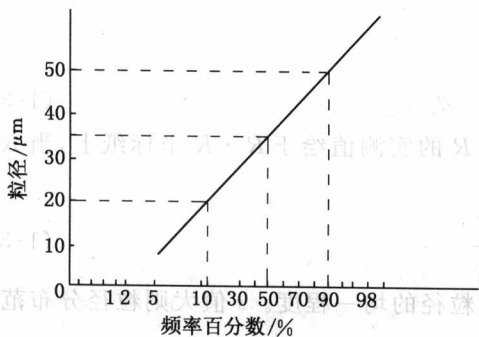


图 1-3 粒径的正态概率分布图

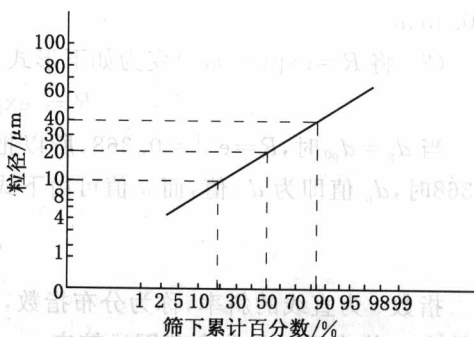


图 1-4 粒径的对数正态概率分布图

同样,相应于筛下累计 50% 的粒径为中位径(d_{50}),而几何标准差为 $\lg \sigma_g = \lg d_{50} - \lg d_{15.87}$ 或 $\lg \sigma_g = \lg d_{84.13} - \lg d_{50}$ 。

$$2 \lg \sigma_g = \lg d_{84.13} - \lg d_{15.87} = \lg \frac{d_{84.13}}{d_{15.87}} \quad (1-30)$$

由图 1-4 所示的例中可以得出, $d_{84.13} = 40 \mu\text{m}$, $d_{15.87} = 10 \mu\text{m}$, 故得:

$$\lg \sigma_g = \frac{1}{2} \lg \frac{40}{10} = \lg 2$$

$$\sigma_g = 2$$

对数正态分布是具有 2 个常数(σ_g, \bar{d}_g)的分布函数,多数机械粉碎的产尘都符合此种分布,是应用最广泛的一种分布函数。

3. 罗辛—拉姆勒分布函数

1933 年,罗辛—拉姆勒等对破碎实验进行了概率统计学的研究进行归纳后导出了罗辛—拉姆勒分布函数。这一分布函数的经验关系式最初是为研磨产尘的粗粉尘而提出的,近年来应用范围有所扩大,因为表达式中的常数可根据具体粉尘来确定,故较多的粉尘可以用这种分布函数描述,表达式如下:

$$R = 100 \exp(-a d_p^s) \quad (1-31)$$

式中 a, s ——实验常数。

为求出常数 a, s , 可用如下方法:

(1) 将式(1-31)改写为以 10 为底的指数函数,即:

$$R = 100 \times 10^{-a' d_p^s} \quad (1-32)$$

两边取常用对数,得

$$\lg R = \lg 100 - a' d_p^s \quad (1-33)$$

或

$$2 - \lg R = a' d_p^s \quad (1-34)$$

两边再取一次常用对数,得

$$\lg(2 - \lg R) = \lg a' + s \lg d_p \quad (1-35)$$

在 $\lg d_p$ 为横坐标, $\lg(2 - \lg R)$ 为纵坐标的专用坐标纸上 ($R \cdot R$ 坐标纸绘图), 如符合这种规律, 则为直线, 直线的斜率为指数 s 值。当粒径 $d_p = 1$ 时, $(2 - \lg R)$ 值为系数 a 值, 且 $a' = 0.434a$ 。

(2) 将 $R = \exp(-ad_p^s)$ 变为如下形式:

$$R = \exp[-(d_p/d_{p0})^s] \quad (1-36)$$

当 $d_p = d_{p0}$ 时, $R = e^{-1} = 0.368$, 所以把 d_p 和 R 的实测值绘于 $R \cdot R$ 坐标纸上, 当 $R = 0.368$ 时, d_p 值即为 d_{p0} 值, 而 a 值可由下式计算。

$$a = \frac{1}{d_{p0}^s} \quad (1-37)$$

指数 s 为直线的斜率, 称为分布指数, 它表示粒径的均一程度。 s 值大则粒径分布范围比较小, s 值小则粒径分布范围比较广。

系数 a 值越大, 直线越往左移, 表明粒度越细。

(3) 用中位径 d_{50} 表示, 当粒径为 d_{50} 时, 筛上残留率等于筛下通过率, $R = 0.5$, 根据式 (1-31), 可得

$$0.5 = \exp(-ad_{50}^s)$$

两边取自然对数, 得

$$-ad_{50}^s = \ln 2^{-1} = -\ln 2$$

由此, 系数 a 可由下式确定:

$$a = \frac{\ln 2}{d_{50}^s} = \frac{0.693}{d_{50}^s} \quad (1-38)$$

代入式 (1-31), 得

$$R = \exp[-\ln 2 (d_p/d_{50})^s]$$

从式 (1-38) 容易看出, 中位径 d_{50} 可作为粉尘的代表粒径, 中位径越小, a 值越大, 说明粉尘粒度越细。

一般粉尘的 s 值为 $0.77 \sim 2.0$, a 值为 $0.01 \sim 0.2$ 。对于机械破碎的粉尘, 大多适合罗辛—拉姆勒分布。研究粒度分布对分离和捕尘技术, 防治矿尘危害有着重要意义。

第三节 粉尘的物理化学性质

矿物由各种机械破碎所产生的粉尘, 一般都不伴有化学或物理变化, 飘浮于空气中的粉尘的化学成分与被处理的矿岩物料基本相同。矿岩中往往由多种矿物成分所组成, 这些成分的硬度是有差别的, 某些成分较易破碎形成细小颗粒, 或者密度较小的细小颗粒容易飘浮到空气中, 所以飘浮于空气中的粉尘, 其成分与原始物料略有不同, 但一般来说差别很小, 所以工程上常把矿岩的化学成分与矿岩粉尘成分同等对待。

一、粉尘粒子的形状

单个粉尘粒子的形状取决于形成粒子的方法。破碎、研磨形成的粉尘粒子形状在很大

程度上由母料的性质决定。一般情况下,它们表现为不规则的结晶颗粒。由蒸气冷凝形成的粒子(如金属烟)或高温燃烧过程产生的粒子(如燃烧粉煤产生的颗粒状排出物——飞灰),形状常常是规则的球形或立方形。粉尘粒子形成以后,其形状可能由于结果作用、水合作用以及碰撞、凝聚或同气相组分起化学反应等原因而改变。冷凝成的球形液体粒子可能因相互接触而结合成较大的液滴。冶金蒸气在挥发时一般都发生氧化,接着冷凝成固体原生粒子,粒径通常小于 $2\sim 10\ \mu\text{m}$,并且若干烟粒凝聚成链状的集合体(如氧化铁、氧化镁)。大气中粉尘粒子的典型形状如表 1-1 所列。

表 1-1 大气中粉尘粒子的形状举例

形 状	品 种	面积形状系数 a_s	体积形状系数 a_v
球形	烟、花粉、飞灰、液滴		
立方体	盐晶体、MgO 单个粉尘粒子		
不规则立方体	矿物尘、熔渣	3~8	0.2~0.5
薄片	矿物、石墨、表皮、云母	1.5~2	0.02~0.1
针状、多刺	氧化锌、硫酸铵		
纤维状	棉线、植物纤维、石棉、滑石玻璃纤维、人造纤维	$\pi d_p L$	$\frac{\pi}{4} d_p^2 L$
集合体	煤烟、金属氧化物烟	0.2~2	0.01~0.1

二、粉尘的游离二氧化硅(即游离二氧化矽)含量

从工业卫生角度来说,各种粉尘对人体都是有害的,粉尘的化学组成及其在空气中的浓度直接决定对人体的危害程度,粉尘中含游离二氧化硅的量越高,危害越严重。

二氧化硅是地球上最常见的氧化物,是许多种岩石和矿物的重要组成部分,它有两种存在状态:一种是结合状态的二氧化硅,即硅酸盐矿物,如长石($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$),石棉($\text{CaO} \cdot 3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2$),高岭土($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),滑石($3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)等;另一种是游离状态的二氧化硅,主要是石英,在自然界中分布很广。粉尘中的游离二氧化硅的含量是引起并促进尘肺病及病程发展的主要因素,含量越高,其危害越大。

许多矿岩都含有游离二氧化硅,煤系地层由于沉积环境不同、岩性不同,其二氧化硅含量变化较大,煤层中以煤为主,或有时也伴有夹石等。从煤种来看,无烟煤的游离二氧化硅含量高于烟煤,北票煤田各类岩石游离二氧化硅含量如表 1-2 所列。

表 1-2 各类岩石游离二氧化硅含量

岩石种类	样品数	游离二氧化硅含量/%		
		最 大	最 小	平 均
页岩	8	23.0	14.0	19.6
砂页岩	6	28.0	16.0	23.5
砂岩	7	54.0	34.2	42.7
粗砂岩	10	54.5	38.9	46.9
砾岩	12	52.1	15.1	35.7
砂砾岩	5	68.1	54.2	60.1

三、粉尘的密度

单位体积粉尘的质量称为粉尘的密度。不包括尘粒之间空隙的密度称为粉尘的真密度 ρ_p , 单位为 kg/m^3 或 g/cm^3 。物质密度与粉尘的真密度是不相同的, 因为粉尘在形成过程中, 粉尘的表面甚至其内部可能形成某些孔隙。只有表面光滑又密实的粉尘的真密度才与其物质密度相同, 通常物质密度比粉尘的真密度大 20%~50%。粉尘的真密度可用下式表示:

$$\rho_p = \frac{\text{粉尘质量}}{\text{粉尘体积}} \quad (1-39)$$

固体磨碎而形成的粉尘, 其密度与母料相同。但是, 如果它经受表面氧化等作用, 则其密度将发生变化。由冷凝过程形成的粉尘粒子, 如 ZnO , MgO , Fe_2O_3 之类的冶金烟尘或炭黑等会大规模凝聚。由于包含空气, 这些凝聚成的集合体的密度小于组成集合体的单个粉尘粒子的密度, 例如, 燃料粉煤产生的飞尘粒子含有熔融的空心球, 其密度大大低于只根据物料性质推算的密度。当研究从人为发生源排放出来的粉尘粒子在大气中的扩散、污染环境的问题, 以及推算和说明除尘器的性能时, 应当考虑粉尘粒子的实际密度。

四、粉尘的相对密度

粉尘的相对密度系指粉尘的质量与同体积标准物质的质量之比, 因而是无因次量。通常采用标准大气压力 ($1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$) 和温度为 4°C 的纯水作为标准物质。由于在这种状态下 1 cm^3 的水的质量为 1 g , 因而粉尘的相对密度在数值上就等于其密度 (g/cm^3)。但是相对密度和密度应是两个不同的概念。

粉尘是非常细微颗粒的集合体, 单纯尘粒的单位体积的质量叫做粉尘的真密度, 包括空隙在内的集合体的单位体积的质量叫做假密度。

五、粉尘的比表面积和表面能

每单位质量(体积)粉尘的表面积称为比表面积(简称比面)。微细尘粒的重要特性是比表面积大。例如, 1 cm^3 单位密度的物料分散成 $1 \mu\text{m}$ 的球, 其比表面积达 $11.5 \text{ m}^2/\text{kg}$ 。当微粒粒度减小时, 比表面积迅速增加。可以这样来看一下比表面积增加的程度: 假设把一个单位密度的棱长为 1 cm 的立方体分成棱长为 $a \text{ cm}$ 的若干个立方体, 这些立方体的总表面积和原来那个立方体的表面积之比将为 $(1 \times 6a^2)/(a^3 \times 6) = 1/a$, 也就是说, 后来分成的小立方体的总表面积是原来那个立方体表面积的 $1/a$ 倍。例如, 把棱长为 1 cm 的立方体分成棱长为 $1 \mu\text{m}$ (10^{-4} cm) 的小立方体, 可得 10^{12} 个, 其总表面积将增加 10^4 倍, 即增加到 60000 cm^2 , 这也就是它的比表面积。物料的许多物理、化学性质实质上与其表面积有很大关系, 细粉尘粒子常常表现出显著的物理和化学活性。如氧化、溶解、蒸发、吸附、催化以及生理效应等, 都能因细粉尘粒子的比表面积大而被加速。有些粉尘的爆炸危险性和毒性随其粒度的减小而增加, 原因也在于此。

物料被粉碎为微细的粉尘, 其总表面积显著增加, 假设尘粒为与它具有同样体积的球形粒子时, 则比表面积 S_w 与粒径 d_p 的关系如下:

$$S_w = \frac{\pi d_p^2}{\left(\frac{\pi}{6}\right) d_p^3 \rho_p} = \frac{6}{\rho_p d_p} \quad (1-40)$$

式中 S_w ——粉尘的比表面积, m^2/kg ;

ρ_p ——粉尘的密度, kg/m^3 ;

d_p ——粉尘的直径, m。

由上式看出,粉尘的比表面积与直径成反比,粒径越小,比表面积越大。

由于粉尘的比表面积增大,它的表面能也随之增大,增强了表面活性,在研究粉尘的湿润、凝聚、附着、吸附、燃烧等性能时,必须考虑其比表面积。例如,微细粉尘的表面吸附能力增强,容易吸附空气而在尘粒表面形成气膜,降低了尘粒间的凝聚以及影响其尘粒的湿润性,更难于把它从空气中捕捉分离出来。

六、粉尘的凝聚与附着

一般把尘粒间互相结合形成新的大尘粒的现象叫做凝聚;尘粒和其他物体结合的现象叫做附着。

尘粒的凝聚与附着是在粒子间距离非常近时,由于分子间引力的作用而产生的。一般尘粒间距离较大,需要有外力作用使尘粒间碰撞、接触,促进其凝聚和附着。这些外力有粒子热运动(布朗运动)、静电力、超声波、紊流脉动速度等。

粉尘的凝聚有利于对它进行捕集分离。凝聚是粉尘表征之一,它对粒子质量、粒度、形状和结构有显著影响。凝聚是单个粉尘粒子之间相对运动和碰撞的结果。布朗运动或是布朗运动之外再加上流动动力、静电力、重力等其他力的作用,都能使粉尘粒子相互靠近而接触。对于约小于 $1\ \mu\text{m}$ 的粉尘粒子来说,促使其互相接触的主要原因是粉尘粒子的布朗运动。由于凝聚减少了粉尘粒子浓度和最小粉尘粒子的相对数量,所以凝聚受到粉尘本体的限制,随着时间的延长而减弱。除形状差异大的粉尘粒子外,例如,长棍状或链状粉尘粒子和球形粒子,粉尘粒子形状对凝聚没有大的影响。据福克斯计算,轴的比值为 $10:1$ 的椭圆体与球形粒子凝聚的系数 K 值比球形粒子相互凝聚的 K 值要大 111 倍,而扁形粒子则大 1 104 倍。但福克斯指出,由于数学上的困难,他的计算忽略了粒子的布朗旋转,这种旋转应使增大的倍数有相当大的增加,特别是在椭圆体粒子互相凝聚的情况下会更加显著。

粉尘粒子附着在固体表面上,或者粉尘粒子彼此相互附着的现象,称为黏附,后者亦称为自黏。附着的强度也就是克服附着现象所需要的力(垂直作用于粉尘粒子重心),称为黏附力。

在气态介质中产生黏附的力有:

(1) 范德华力,即分子间的吸力。它是在粉尘粒子和某个表面直接接触之前出现的。随着分子之间的距离加大,吸力迅速下降。在几个分子直径的距离以内,这种力有显著影响。它的大小还取决于接触的物体的特性和粉尘粒子粒度,以及实际的接触面积。改变这些因素中的一种,就可以改变分子力,从而改变黏附力。

(2) 电场力。有一些实验证明了静电荷能使粉尘粒子黏附的强度显著增加。但如果相邻两表面的间隙内是潮湿的,电场力的作用就不能出现或大大减小。

(3) 在粉尘粒子和物体表面之间的空隙内存在液体的毛细力。根据实验可知,当空气相对湿度超过 65% 时,开始出现毛细冷凝现象,这时黏附力上升。液体的表面张力愈大,粉尘粒子的粒度愈粗,相互接触的表面可湿性愈好,则产生粉尘粒子黏附的毛细力愈大。毛细力和电场力实际上是不能同时作用的。

这 3 种力都和产生黏附的 2 种物体的物理、化学性质有关。

七、粉尘的湿润性

液体对固体表面的湿润程度取决于液体分子对固体表面作用力的大小,而对同一粉尘