

高等学校教学用书

矿尘防治

叶钟元 编著

中国矿业大学出版社

高等学校教学用书

矿尘防治

叶钟元 编著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书应煤炭高等院校矿山通风与安全专业教学急需而编写的。全书共六章,系统地阐述了粉尘的基本性质和危害、粉尘运动规律以及矿井抑尘、降尘技术的基本理论和测试技术等内容。书中对综合防尘、矽肺病预评价方法和降低矽肺病发病率的技术措施、煤尘爆炸预防方法、矿井洒水设计等方面的工作经验和国内外新的研究成果,都进行了较全面的介绍。

本书可供煤炭高等院校矿山通风与安全专业使用教材,也可供从事煤炭工业科研、设计及现场工程技术人员参考。

责任编辑:马跃龙

高等学校教学用书

矿 尘 防 治

叶钟元 编著



中国矿业大学出版社出版

新华书店经销 中国矿业大学印刷厂印刷

开本737×1092毫米1/16 印张9.75 字数:236千字

1991年2月第一版 1991年2月第一次印刷

印数:1—3000册

ISBN 7-81021-285-0

TD·67 定价:2.00元

前 言

矿井粉尘是影响矿井安全生产,危害工人健康的灾害之一。为贯彻党的“预防为主,安全第一”的安全生产方针,根治粉尘危害,杜绝煤尘爆炸事故,是保障矿工生命安全、身体健康和高速发展煤炭工业的重要前提。国内外学者对除尘基础理论、尘肺病预防及防尘技术等方面开展了大量的研究工作,结合我国实际情况,广大科研和生产工程技术人员,进行了大量的现场试验研究,创造和总结出许多有效的防尘技术,积累了丰富的治理粉尘的管理经验,为控制和消除粉尘危害提供了良好的条件。

本书经煤炭工科高校教材编审委员会审定,为煤炭高校矿山通风安全专业本科生适用的教材,目的在于使学生了解矿井粉尘的基本性质、运动规律、尘肺病预防方法、预防煤尘爆炸措施、粉尘测试技术、综合防尘技术、矿井洒水防尘设计等内容。本书也可供采煤专业及从事矿山防尘技术的现场工程技术人员参考。

本书曾于1985年作为讲义形式在校内印刷,经几届使用,得到师生好评。在这次教材编写过程中,对原讲义进行了较多修改。本教材第一、二章由李瑞琼同志编写,其余各章由叶钟元同志编写。

由于编者水平所限,在内容安排和资料取舍方面难免疏漏,缺点错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

一九八九年三月

目 录

第一章 矿尘的性质及危害	(1)
第一节 概述.....	(1)
第二节 矿尘的粒度、分散度和粒度分布.....	(2)
第三节 矿尘的物理化学性质.....	(8)
第二章 尘肺病及其预防	(14)
第一节 肺脏的防御功能及尘肺病发病原理.....	(14)
第二节 影响尘肺病的发病因素.....	(16)
第三节 硅尘危害特性及矽肺病发病率的数学模型.....	(18)
第四节 预防尘肺病的措施.....	(21)
第三章 粉尘测定	(23)
第一节 粉尘浓度测定.....	(23)
第二节 粉尘粒度和粒度分布测定.....	(28)
第四章 煤尘爆炸及其预防	(32)
第一节 煤尘爆炸.....	(32)
第二节 煤尘爆炸性鉴定.....	(38)
第三节 防止煤尘爆炸技术措施.....	(39)
第四节 隔绝煤尘爆炸传播技术措施.....	(64)
第五章 综合防尘技术	(70)
第一节 通风排尘.....	(70)
第二节 重力和惯性力除尘.....	(81)
第三节 旋风除尘.....	(83)
第四节 湿式除尘.....	(85)
第五节 物理化学除尘.....	(94)
第六节 个体防护.....	(100)
第七节 ✓回采工作面综合防尘技术.....	(102)
第八节 ✓掘进工作面综合防尘.....	(109)
第九节 ✓装运系统定点降尘.....	(118)
第六章 矿井洒水防尘设计	(123)
附表	(140)
附表 1 编制钢管和铸铁管水力计算表时所用的计算内径尺寸.....	(140)
附表 2 中等管径与大管径的钢管 1000 <i>i</i> 值的修正系数 K_1	(140)
附表 3 中等管径与大管径钢管 v 值的修正系数 K_2	(141)
附表 4 钢编(水煤气管)的1000 <i>i</i> 和 v 值.....	(142)
参考文献	(148)

第一章 矿尘的性质及危害

第一节 概 述

一、矿尘

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：常把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（或飘尘）。落尘与浮尘在不同风流环境下是可以相互转化的。防尘技术研究的对象，主要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。现在还没有对矿尘进行统一的分类方法，按其性质和形态，可以作如下分类：

（一）按矿尘产生的过程可分为：

1. 矿尘 矿物（岩石、煤等）由机械、爆破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 由燃烧、氧化等伴随着物理化学变化过程所产生的固体微粒，如井下煤的自燃发火、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。

（二）按矿尘颗粒的大小可分为：

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 $10 \sim 40\mu\text{m}$ ，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 $0.25 \sim 10\mu\text{m}$ ，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，并能随空气分子作布朗运动。

（三）其它分类

1. 按粉尘的成分分为煤尘、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. 按爆炸性可分为易燃、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三个方面：

（一）对人体健康的危害。长期从事采掘和粉尘作业环境的职工，能引起职业病——尘肺病；

（二）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，操作中容易造成人身事故；

（三）若矿井煤尘具有爆炸危险，对矿井安全生产带来很大威胁。

第二节 矿尘的粒度、分散度和粒度分布

一、单一粉尘粒径的定义

粉尘颗粒大小的尺度，也叫作粒径，用 μm 表示。

粉尘颗粒形状很不规则，为了有统计上的相似意义，需采用适当的代表尺寸来表示各个粒子的粒径。一般说有三种形式的粒径：投影径、几何当量径、物理当量径。

(一) 投影径

投影径是指尘粒在显微镜下所观察到的粒尘，图 1-1 为尘粒的投影。

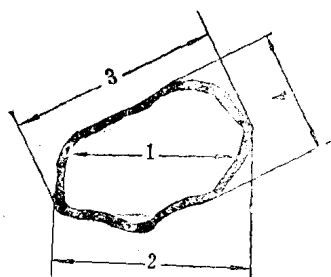


图 1-1 尘粒的投影径
1—面积等分径；2—定向径；
3—长径；4—短径

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。

(二) 几何当量径 取尘粒的某一几何量（面积、体积等等）相同时的球形粒子的直径。如：

1. 等投影面积径 d_A 与粉尘的投影面积相同的某一圆面积的直径：

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

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体积的直径：

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

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：

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

(三) 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。譬如：

1. 阻力径 d_d 在相同粘性的气体中，速度 u 相同时，粉尘所受到的阻力 P_d 与圆球受的阻力相同时的圆球直径：

$$P_d = C_d A_p \rho_g \frac{u^2}{2} \quad (1-5)$$

式中 C_D ——阻力系数;

ρ_g ——气体密度, kg/m^3 ;

A_p ——垂直于气流方向的粉尘断面积, m^2 。

而 C_D 、 A_p 为尘粒直径 d_p 的函数, 由此可得出尘粒的阻力径 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:

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

式中 μ ——空气动力粘性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

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它几何、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, 因此在使用粉尘的粒径时, 必须清楚了解所采用的粒径的含义。不同的粒径测试方法, 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; 用光散射法测定时为等体积径, 过滤除尘常应用几何径等等。

二、粉尘平均粒径

在自然界或工业生产过程产生的粉尘, 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。

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

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

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。

(二) 平均表面积径 $\bar{d}_{20}$ 指粉尘表面积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的表面特性。

(三) 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:

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

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

(四) 线性平均径 $\bar{d}_{21}$ (面积长度平均径)

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

(五) 体积表面平均径 $\bar{d}_{32}$

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

(六) 重量平均径 $\bar{d}_{43}$

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

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

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

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

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和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群的组成特征。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，有两种表示方法：

(一) 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：

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

式中 P_{ni} ——某粒级尘粒的数量百分比，%；

n_i ——某粒级尘粒的颗粒数。

(二) 重量标准的粒度分布 (又称重量分散度)

用各粒级尘粒的重量占总重量的百分数表示，按下式计算：

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

式中 P_{wi} ——某粒级尘粒的重量百分比，%；

W_i ——某粒级尘粒的重量。

个数标准与重量标准的换算：如果粉尘是均质的，可用下式表示两者的关系。

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

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四个计测粒级范围: $<2\mu\text{m}$; $2\sim5\mu\text{m}$; $5\sim10\mu\text{m}$; $>10\mu\text{m}$ 。

由于表示的基准不同,同一种粉尘的数量分散度与重量分散度的数值相差很大,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三种。

(一) 粒度分布曲线

在坐标纸上,横轴表示粒径(用 x 代表或 d_p 代表),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,也叫作频率曲线,如图1-2中的 y 曲线。 y 曲线表示的关系式为:

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

(二) 累积分布曲线(R)

如图1-2所示,是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,所以也叫作筛上残留率,用下式表示。

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

(三) 通过率曲线(D)

如图1-2所示,是与累积分布曲线对应的,把粒度分布按粒径顺序(x 由0到 ∞)累积所得到的,它表示到某一粒级的筛下通过率,可用下式表示。

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

从图1-2可知,粒径的间隔划分越细,则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_{mod} 。

上述三种曲线的关系是:

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

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

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,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

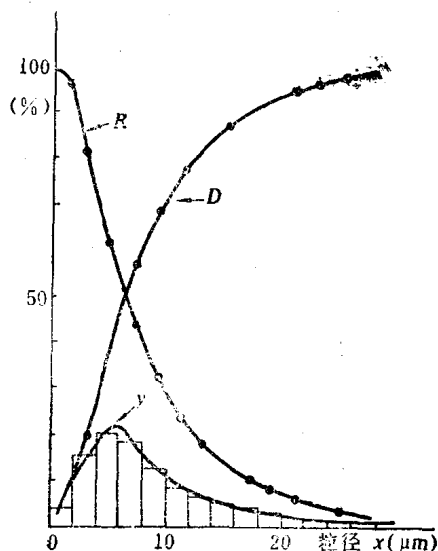


图1-2 粉尘粒度分布曲线

分布函数、罗辛-拉姆勒分布函数等。

(一) 正态分布

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：

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

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

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

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

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($\bar{d}_p + 2\sigma$)的区间内则包括了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(图1-3)，由该直线可以得出，在相应于累计频率为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。

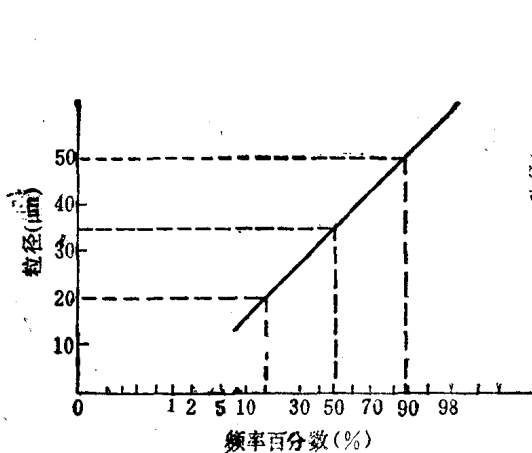


图1-3 粒径的正态概率分布图

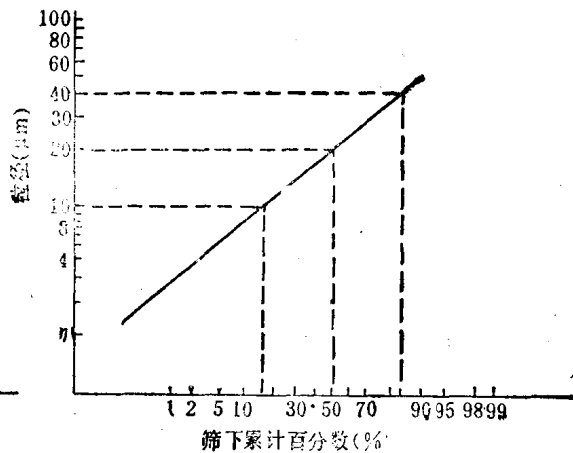


图1-4 粒径的对数正态概率分布图

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。

(二) 对数正态分布

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

式中 $\bar{d}_g$ ——尘粒的几何平均径，是指几个粉尘粒径的连乘积的 n 次方根。

$$(\bar{d}_g)^n = d_1^{n_1} \cdot d_2^{n_2} \cdot \dots \quad (1-28)$$

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，可以得出一直线（图1-4）。

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 $\lg d_{84.13} - \lg d_{50}$

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

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两个常数 (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。

(三) 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的函数。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 为实验常数。

为求出常数 a 、 s 可用如下方法：

1. 将(1-31)式改写为以10为底的指数函数：

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

两边取常用对数，

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

或

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

两边再取一次常用对数，

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

取 $\lg d_p$ 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)，如附合这种规律，则成为直线，直线的斜率为指数 s 值。当粒径 $d_p = 1$ 时的 $(2 - \lg R)$ 值，为系数 a' 值，且 $a' = 0.434a$ 。

2. 将 $R = e^{-a d_p^s}$ 式改变为如下形式：

$$R = e^{-(d_p/d_{p_0})^s} \quad (1-36)$$

当 $d_p = d_{p_0}$ 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 $R = 36.8\%$ 时的 d_p 值即为 d_{p_0} 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窄小， 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(1-31)式，

$$0.5 = e^{-ad_{50}^s}$$

两侧取自然对数，

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

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(1-31)式，

$$R = e^{-\ln 2 (d_p/d_{50})^s} \quad (1-39)$$

从上式容易看出，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 $0.7 \sim 2$ ， 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 矿尘的物理化学性质

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。矿岩中往往有多种矿物成分所组成，这些成分其硬度具有差别，某些成分较易破碎形成细小颗粒，或者比重较小的细小颗粒容易飘扬到空气中，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份与矿岩粉尘成分等同对待。

一、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。

二氧化硅是地壳上最常见的氧化物，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($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$)；石棉($CaO \cdot 3MgO \cdot 4SiO_2$)；高岭土($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$)，滑石($3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$)等等。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，其游离二氧化硅含量变化较大，煤层中以煤为主，或者时也伴有夹石等，从煤种来看，无烟煤的

游离二氧化硅含量高于烟煤，以北票煤田中各类岩石游离二氧化硅含量如下表1-1。

表1-1

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

二、粉尘的密度和比重

单位体积粉尘的质量称为粉尘的密度，这里指的粉尘的体积，不包括尘粒之间的空隙，常称为粉尘的真密度 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。

$$\rho_p = \frac{\text{粉尘质量}}{\text{粉尘体积}} \quad \text{kg}/\text{m}^3 \quad (1-40)$$

粉尘是非常细微颗粒的集合体，单纯尘粒的单位体积的重量叫做粉尘的真比重，包括空隙在内的集合体的单位体积的重量叫做假比重。

粉尘的比重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($1.013 \times 10^5 \text{Pa}$)和温度为 4°C 时纯水作为标准物质。由于在这种状态下 1cm^3 的水的质量为 1g ，因而粉尘的比重在数值上就等于其密度(g/cm^3)。但是比重和密度应是两个不同的概念。

三、粉尘的比表面积和表面能

物料被粉碎为微细的粉尘，其总表面积显著增加。单位质量(或单位体积)粉尘的总表面积称为比表面积。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 的关系如下式。

$$s_w = \frac{\pi d_p^2}{\left(\frac{\pi}{6}\right) d_p^3 \rho_p} = \frac{6}{\rho_p \cdot d_p} \quad \text{m}^2/\text{kg} \quad (1-41)$$

式中 ρ_p ——粉尘的密度， kg/m^3 ；
 d_p ——粉尘的直径， m 。

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集以及影响其

尘粒的湿润性，更难于把它从空气中捕捉分离出来。

四、粉尘的凝聚与附着

细微粉尘增大了表面能，即增强了尘粒的结合力。一般把尘粒间互相结合形成一个新的大尘粒的现象叫作凝聚，尘粒和其它物体结合的现象叫附着。

粉尘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捕集分离。

五、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，而对同一粉尘尘粒来说，液体分子对尘粒表面的作用力又与液体的力学性质即表面张力的大小有关。表面张力愈小的液体，对尘粒越容易湿润。不同性质的粉尘对同一性质的液体的亲和程度是不相同的，这种不同的亲和程度称为粉尘的湿润性。

粉尘湿润性还与粉尘的形状和大小有关，球形粒子的湿润性比不规则形状的粒子要小，粉尘越细，亲水能力越差。如石英的亲水性好，但粉碎成粉末后亲水能力大大降低。

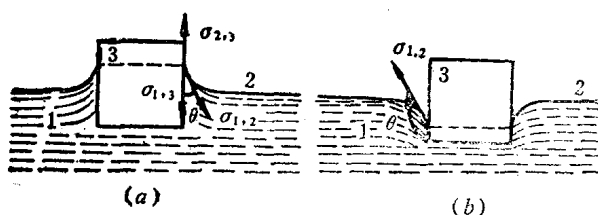


图1-5 粉尘的湿润性

a—亲水性尘粒；b—疏水性尘粒

粉尘的湿润性不同，当其沉于水中时会出现两种不同的情况，如图1-5所示。粉尘湿润的周长(虚线)为水(1)、气(2)、固(3)三相相互作用的交界线。在此有三种力的作用：气与固的交界面的表面张力 $\sigma_{2,3}$ ，气与水的交界面的表面张力 $\sigma_{1,2}$ ，水与固

的交界面的表面张力为 $\sigma_{1,3}$ 。这里 $\sigma_{1,3}$ 及 $\sigma_{2,3}$ 作用于尘粒的表面的平面内，而 $\sigma_{1,2}$ 作用于接触点的切线上，切线与尘粒表面的夹角 θ 称为湿润角或边角。若忽略重力及水的浮力作用，在形成平衡角 θ 时，上述三种力应处于平衡状态，平衡的条件为：

$$\sigma_{2,3} = \sigma_{1,3} + \sigma_{1,2} \cos \theta \quad (1-42)$$

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{2,3} - \sigma_{1,3}}{\sigma_{1,2}} \quad (1-43)$$

$\cos \theta$ 的变化由1到-1， θ 角的变化为 $0 \sim 180^\circ$ 。这样可以用湿润角 θ 来作为评定粉尘湿润性的指标：(1)亲水性粉尘 $\theta \leq 60^\circ$ ，如石英、方解石的湿润角 θ 为 0° ，石灰石粉、磨细的石英粉 $\theta = 60^\circ$ ，(2)湿润性差的粉尘 $60^\circ < \theta < 85^\circ$ ，如滑石粉 $\theta = 70^\circ$ ，以及焦炭粉及经热处理的无烟煤粉等，(3)疏水性粉尘 $\theta > 90^\circ$ ，如碳黑、煤粉等。

粉体的湿润性还可以用液体对试管中粉尘的湿润速度来表征，通常取湿润时间为20分钟，测出此时的湿润高度 L_{20} (mm)，于是湿润速度为

$$U_{20} = \frac{L_{20}}{20} \text{ mm/min} \quad (1-44)$$

按 U_{20} 作为评定粉尘湿润性的指标，可将粉尘分为四类(表1-2)。

表1-2 粉尘对水的湿润性

粉尘类型	I	I	II	IV
湿润性	绝对憎水	憎水	中等亲水	强亲水
$U_{20}(\text{mm/min})$	<0.5	$0.5\sim 2.5$	$2.5\sim 3.0$	>8.0
粉尘举例	石蜡、沥青	石墨、煤	石英	锅炉飞灰

在除尘技术中,粉尘的湿润性,是选用除尘设备的主要依据之一。对于湿润性好的亲水性粉尘(中等亲水、强亲水),可选用湿式除尘器。为了加强液体(水)对粉尘的浸润,往往要加入某些湿润剂,以减少固、液之间的表面张力,增加粉尘的亲水性,提高除尘效率。

六、粉尘的光学特性

粉尘的光学特性包括粉尘对光的反射、吸收和透光程度等。在通风除尘中可以利用粉尘的光学特性来测定粉尘的浓度和分散度。

通过含尘气流的光强减弱程度与粉尘的透明度和形状有关,但主要取决于粉尘粒子的大小及浓度。尘粒大于光的波长和小于光的波长对光的反射和折射的作用是不相同的。对于大小为 $0.6\sim 0.7\mu\text{m}$ 的粒子反射光的能力可用下式表示。

$$I = KS/d, \quad (1-45)$$

式中 I ——反射光强,

K ——常数,

S ——单位体积内粉尘的重量浓度;

$$S = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p \cdot n$$

n ——单位体积内尘粒的个数。

于是式(1-45)可写成:

$$I = K'nd_p^3, \quad (1-46)$$

式中 K' ——与粉尘的特性有关的物理常数。

由(1-45)式中可以看出,尘粒大小对光线的反射能力有很大影响。当粒径大于 $1\mu\text{m}$ 时,光线由于直线反射而消失,光线损失与反射面面积成正比。当粉尘浓度相同时,光强的反射值,随粒径的减少而增加。

当光线穿过含尘介质时,由于尘粒对光的吸收和散射等,光强被减弱。减弱的程度与介质中的含尘浓度与尘粒粒径有关。对于尘粒大小与光波波长接近的均匀微细尘粒,其光强减弱的程度可用下式表示。

$$I = I_0 \exp \left(-Kn \frac{V^2}{\lambda^4} \right) \quad (1-47)$$

式中 I ——通过的光强;

I_0 ——照射的初始光强;

K ——系数;

n ——单位体积介质中的尘粒数;

V ——尘粒的体积;

λ ——光波波长。

由式 (1-47) 可以看出, 通过介质的光强减弱的程度与波长的 4 次方有关, 而与粒径的 6 次方 (体积的平方) 成反比。因此, 光强的衰减与粒径有着密切联系。

对于粒径大于波长的尘粒, 通过的光强服从几何光学的“平方定律”, 即正比于尘粒所遮挡的横断面面积。当粒径大于 $1\mu\text{m}$ 时, 通过的光强实际上与波长无关。

罗斯引入消光系数的概念, 用以说明全部粒径范围的尘粒对光的吸收作用。消光系数定义为各种粒径尘粒对光的实际遮挡强度与按理论的几何光学“平方定律”计算的遮

挡强度的比值。罗斯对一组粉尘在粒径为 $0 \sim 80\mu\text{m}$ 范围内进行了测试。所得的消光系数示于图 1-6。

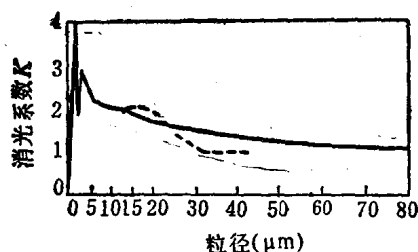


图1-6 消光系数与粒径的关系

——实验曲线; -----理论曲线

当粒径为 $12\mu\text{m}$ 以下时, 试验曲线与理论曲线重合; 当粒径大约为 $1\mu\text{m}$ 时, 消光系数最大达到 4, 小于 $1\mu\text{m}$ 的尘粒的消光系数逐渐减少至 0。而大于 $1\mu\text{m}$ 的尘粒的消光系数处于不稳定状态, 开始急剧下降到 2, 然后上升到 3, 当粒径为 $8\mu\text{m}$ 左右时又回到 2。在 2 处保持稳定, 以后

逐渐降低, 一直到 $80\mu\text{m}$ 时到达 1 为止。

通过均匀含尘的悬浊介质时的光强, 可按下式确定:

$$\ln \frac{I_0}{I} = KSL \quad (1-48)$$

式中 K ——吸收系数。可用在光线中每 kg 粉尘的投影面积 A 来表示, m^2/kg ;

S ——粉尘的浓度, kg/m^3 ;

L ——光线通过的长度, m 。

I_0 ——采样前通过滤膜的光通量, lm ;

I ——采样后通过滤膜的光通量, lm 。

根据罗斯提出的消光系数对 A 进行修正, 式 (1-48) 就可适用于各种粒径的粉尘。

七、自燃性和爆炸性

当物料被研磨成粉料时, 总表面增加, 系统的自由表面能也增加, 从而提高了粉尘的化学活性, 特别是提高了氧化产热的能力, 这种情况在一定的条件下会转化为燃烧状态。粉尘的自燃是由于粉尘氧化反应产生的热量不能及时地散发, 而使氧化反应自动加速所造成的。

各类粉尘的自燃温度相差很大。根据不同的自燃温度可将可燃性粉尘分成两类。第一类粉尘的自燃温度高于周围环境的温度, 因而只能在加热时才能引起燃烧。第二类粉尘的自燃温度低于周围空间的温度, 甚至在不加热时都可能引起自燃。这种粉尘造成火灾危险性最大。在封闭或半封闭空间内 (包括矿井各种坑道) 可燃性悬浮粉尘的燃烧会导致化学爆炸。但只是在一定浓度范围内才能发生爆炸。这一浓度称为爆炸的浓度极限。能发生爆炸的粉尘最低浓度和最高浓度称为爆炸的下限和上限。处于上下限浓度之间的粉尘都属于有爆炸危险的粉尘。在封闭或半封闭容积内低于爆炸浓度下限或高于爆炸浓