



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
江苏高校品牌专业建设工程资助项目 (PPZY2015A055) 资助
江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD) 资助
中国矿业大学教材建设工程资助教材

粉尘防治

理论与技术

杨胜强 主编

第二版

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

江苏高校品牌专业建设工程资助项目(PPZY2015A055)资助

江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD) 资助

中国矿业大学教材建设工程资助教材

粉尘防治理论与技术

(第二版)

主 编 杨胜强

副主编 程庆迎 谢耀社 李晓伟 程健维

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

基于粉尘对人体健康的影响和生产安全的主要危险源,再加上 PM_{2.5} 粉尘粒子是造成雾霾的主要元凶,编写一本高质量的粉尘防治理论与技术教材对于满足安全工程、环境工程和采矿工程专业教学需要和当前国家对 PM_{2.5} 的治理以及职业病防治的需求迫在眉睫。

本书作为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材,是为了满足全国不同行业背景的各大高校安全工程专业《粉尘防治理论与技术》的课程教学大纲要求而进行编写的。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,粉尘爆炸及其预防,通风净化及除尘降尘技术,煤矿生产系统综合防尘技术,防尘供水系统设计以及大气雾霾的性质、危害及其防治等内容。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、矿山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

粉尘防治理论与技术/杨胜强主编. —2版. —徐州:中国矿业大学出版社, 2015.12
ISBN 978-7-5646-2976-2
I. ①粉… II. ①杨… III. ①粉尘—防治—高等学校—教材 IV. ①X513

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第304078号

书 名 粉尘防治理论与技术

主 编 杨胜强

责任编辑 杨 廷 黄本斌

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 江苏淮阴新华印刷厂

开 本 787×1092 1/16 印张 21.5 字数 537 千字

版次印次 2015 年 12 月第 2 版 2015 年 12 月第 1 次印刷

定 价 46.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

粉尘防治理论与技术是安全工程和环境工程专业的主干专业课程之一。工矿企业生产过程中所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(煤尘)在一定的条件下还具有燃烧和爆炸性,导致人员伤亡、财产损失,同时大量粉尘排向大气还会污染环境,成为形成雾霾的主要原因之一,成了我国社会经济发展和工业技术进步的一大技术障碍。

为了贯彻“安全第一、预防为主、综合治理”的安全生产方针,根治粉尘危害和杜绝粉尘(煤尘)爆炸事故,保障职工的身体健康和生命安全,保护环境,实现我国工矿企业的高速发展,为此根据“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材的要求,出版和发行一本高质量的《粉尘防治理论与技术》教材,满足安全工程和环境工程专业的教学需要和当前国家对PM_{2.5}的治理以及职业病防治的需求,同时满足我国经济建设及现代化工矿企业的可持续发展和安全生产的需要。

随着工矿企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(包括大气中的雾霾运动)、各种喷雾降尘设备的降尘过程及泡沫除尘和除尘设备的除尘过程均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,对含尘气流运动的基本理论、粉尘职业病的危害、可燃可爆粉尘的爆炸机理及其预防,以及对粉尘的运动规律、粉尘各种指标的测试技术、各生产环节和物料运输环节的除尘降尘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、排尘、降尘和除尘技术,积累了丰富的粉尘治理和管理经验。

本教材以粉尘的基本概念为切入点,以粉尘防治的基本理论和基本实验为依据,针对安全技术及工程和环境工程专业十余年的最新科技发展。该书内容不仅充分体现了工业安全和矿业安全工程中粉尘产生及其治理的特点,而且深入探讨了大气环境中雾霾的产生、特点和治理,同时包括了国内外有关粉尘防治领域的最新理论及技术。本书内容不仅能够满足现代化工矿企业对粉尘防治的需要,而且能够初步满足对环境大气中雾霾治理的需要。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,粉尘(煤尘)爆炸及其预防,通风净化及除尘降尘技术,煤矿生产系统综合防尘技术,防尘供水系统设计以及大气雾霾的性质、危害及其防治等内容,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要求。

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,主要特点体现在以下几个方面:①增加了雾霾粉尘(PM_{2.5})的概念及其相关性质和对人体健康的影响;②增加了关于粉尘的监测监控的内容,特别是粉尘浓度直读仪的使用和粉尘环境监测监控及物联网利用;③对于粉尘爆炸,将煤尘爆炸与其他爆炸性粉尘联系起

来,使工业粉尘和煤矿粉尘的防尘体系统一起来;④增加了粉尘抑尘技术,特别是细微粉尘的防治技术,主要包括泡沫抑尘、高压喷雾及气雾降尘及除尘;⑤最后,增加了关于粉尘技术综合设计。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、设计和现场工作的工程技术人员参考。

本教材由杨胜强教授担任主编,第一章和第七章由杨胜强教授编写,第二章由程庆迎老师编写,第三章由杨胜强教授和赵彤宇博士共同编写,第四章由李晓伟老师编写,第五章由程庆迎老师和杨胜强教授共同编写,第六章由谢耀社教授编写,第八章由程健维副教授编写,最后由杨胜强教授对全书进行修改、完善和定稿。

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刘杰、王建波、张淦鑫、孙家伟、伦嘉云、谢兵兵、赵欢欢、刘迎春、王刚琦和杨盼的大力帮助,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 and 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

2015年10月

目 录

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.....	9
第二章 尘肺病及其预防	17
第一节 粉尘的危害	17
第二节 尘肺病的分类及发病领域	21
第三节 矽肺	23
第四节 煤工尘肺	27
第五节 硅酸盐尘肺	29
第六节 其他尘肺	32
第七节 影响尘肺病发病的因素	34
第八节 预防尘肺病的措施	38
第九节 粉尘引发职业病患者的权益	39
第三章 粉尘测定	43
第一节 粉尘浓度测定	43
第二节 粉尘浓度监测监控	55
第三节 粉尘中游离二氧化硅含量的测定	60
第四节 粉尘粒度和粒度分布测定	63
第四章 粉尘爆炸及其预防	67
第一节 粉尘爆炸基础知识	67
第二节 煤尘燃烧与爆炸	78
第三节 煤尘爆炸的预防	88
第四节 煤尘爆炸的抑制与隔绝	94
第五节 煤尘爆炸事故的处理.....	110
第六节 其他粉尘爆炸.....	113
第七节 其他粉尘爆炸预防.....	121

第五章 通风净化及除尘降尘技术	125
第一节 粉尘在空气中的运动.....	125
第二节 通风排尘.....	132
第三节 工业通风方法及风量确定.....	134
第四节 重力沉降室和惯性除尘器.....	140
第五节 旋风除尘器.....	143
第六节 湿式除尘.....	151
第七节 化学和物理除尘.....	162
第八节 过滤式除尘器.....	167
第九节 电除尘器.....	180
第十节 呼吸防护用品.....	193
第六章 煤矿生产系统综合控尘技术	204
第一节 采煤工作面减尘技术.....	204
第二节 采煤工作面综合控尘技术.....	224
第三节 掘进工作面综合控尘技术.....	241
第四节 转载运输综合控尘技术.....	257
第五节 支护工艺综合控尘技术.....	266
第六节 掘进工作面除尘新技术.....	269
第七章 防尘供水系统设计	276
第一节 防尘供水的要求.....	276
第二节 防尘供水的水池.....	279
第三节 防尘供水管路系统.....	281
第四节 矿井防尘供水系统设计实例.....	283
第五节 矿井防尘洒水系统设计条件及要求.....	287
第八章 大气雾霾的性质、危害及其防治	289
第一节 大气污染及大气污染物.....	289
第二节 PM _{2.5} 与雾霾的关系及其季节与地域分布特性	296
第三节 PM _{2.5} 的监测与测定	305
第四节 PM _{2.5} 对人体健康的影响	314
第五节 PM _{2.5} 治理措施	317
附表	324
参考文献	335

第一章 粉尘的性质

第一节 概 述

一、粉尘

粉尘,一般指矿物开采或材料加工过程中产生的微细固体集合体。常把沉积于器物表面或井巷四壁之上的粉尘称为落尘;悬浮于空气中或井巷空间中的粉尘称为浮尘(或漂尘)。落尘与浮尘在不同环境下是可以相互转化的。防尘技术研究的主要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。粉尘可以做如下分类:

(1) 按粉尘产生的过程可分为:

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。有燃烧、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) 按粉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 $10\sim 40\ \mu\text{m}$ 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

在煤矿井下生产过程中,粉尘危害主要表现为以下三个方面:

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

(2) 在采、掘等粉尘作业环境中,若粉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。

(3) 若矿井煤尘具有爆炸危险性,会给矿井安全生产带来很大威胁。

(4) 加速机械磨损,缩短精密仪器、仪表的使用寿命。

第二节 粉尘的粒度、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,单位为 μm 。

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。一般来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粉尘,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)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面积的直径:

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

式中 A_p ——尘粒的投影面积。

2. 等体积径 d_V

指与粉尘体积相同的某一圆球体积的直径:

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

式中 V_p ——尘粒的体积。

3. 等表面径 d_S

指与尘粒的外表面积相同的某一圆球的直径:

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

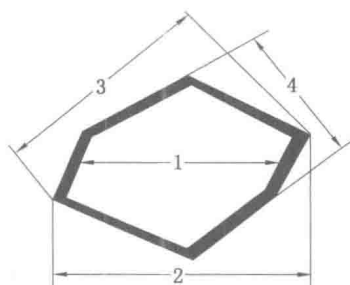


图 1-1 尘粒的投影径

1——面积等分径;2——定向径;
3——长径;4——短径

式中 S ——尘粒的外表面积。

4. 体面积径 d_{SV}

指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

指在相同黏性的气体中，速度 v 相同时，粉尘所受的阻力 P_D 与圆球受的阻力相同时的圆球直径。

阻力 P_D 的计算公式：

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

式中 C_D ——阻力系数；

ρ_g ——气体密度， kg/m^3 ；

A_p ——垂直于气流方向的粉尘断面积， m^2

2. 自由沉降径 d_f

指在特定气体中，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

指在静止的空气中，尘粒的沉降速度与密度为 $1 \text{ g}/\text{cm}^3$ 的圆球的沉降速度相同时的圆球直径。

4. 斯托克斯径 d_{st}

指在层流区内(对粉尘粒子的雷诺数 $Re_p < 1$)的空气动力径，即：

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

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

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，因此在使用粉尘的粒径的同时，必须清楚了解所采用的粒径的含义；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；用光散射法测定时为等体积径；过滤除尘常应用几何当量径；等等。

二、粉尘平均粒径

在自然界或工业生产过程中的粉尘,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 $\bar{d}_{10}$

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。

(2) 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:

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

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)

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

(5) 体积表面平均径 $\bar{d}_{32}$

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

(6) 重量平均径 $\bar{d}_{43}$

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

(7) 几何平均径 $\bar{d}_g$

指几个粉尘粒径连乘积的 N 次方根。

$$\bar{d}_g = \sqrt[N]{d_1^{n_1} d_2^{n_2} \cdots d_i^{n_i}} \quad (1-14)$$

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

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以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

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} ——某粒级尘粒的颗粒数百分比, %;

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:如果粉尘是匀质的,可用下式表示两者的关系。

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

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: $<2 \mu\text{m}$; $2 \sim 5 \mu\text{m}$; $5 \sim 10 \mu\text{m}$; $>10 \mu\text{m}$ 。

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很大,必须是同样的表示方法才可以直接对比,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(y)

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),连接各柱面的中间点,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:

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

(二) 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,所以也叫作筛上残留率,用下式表示:

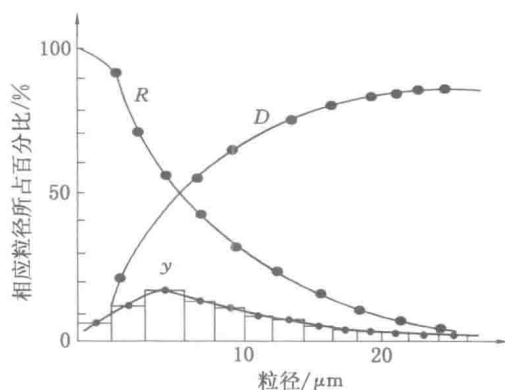


图 1-2 粉尘粒径分布曲线

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

(三) 筛下通过率曲线(D)

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

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

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 曲线最高点对应的粒径叫作最高频率径 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,但因物料性质及产尘过程极不相同,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、对数正态分布函数、罗辛-拉姆勒分布函数等。

(一) 正态分布函数

粉尘粒度的正态分布是相对于频率最高的粒径呈对称分布,其函数形式为:

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

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

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_i ——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粒径吻合，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，在相应于累积频率为 50% 的粒径，即为算术平均径；而相应于累积频率 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。

(二) 对数正态分布函数

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

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

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

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；

σ_g ——几何标准差。

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，可以得到一条直线，如图 1-4 所示。

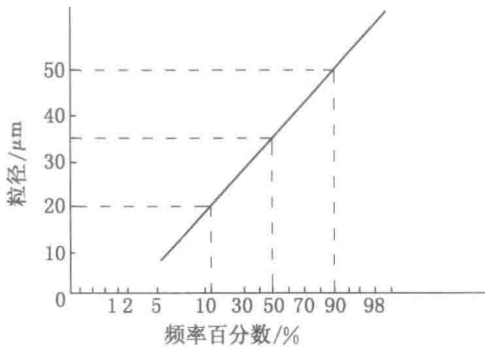


图 1-3 粒径的正态概率分布图

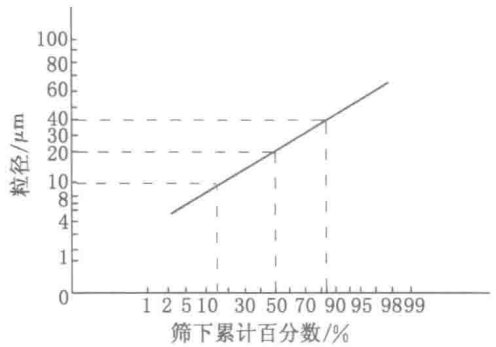


图 1-4 粒径的对数正态概率分布图

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 $\lg \sigma_g = \lg d_{84.13} - \lg d_{15.87}$ 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 所示的例子可以得出， $d_{84.13} = 40 \mu\text{m}$ ， $d_{15.87} = 10 \mu\text{m}$ ，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($\sigma_g, \bar{d}_g$)的分布函数,多数机械粉碎的产生尘都符合此种分布,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,通过统计归纳后导出函数,这一分布函数的经验关系式最初是为研磨产生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。

常数 a, s 可以通过以下方法求出:

(1) 将式(1-31)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:

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

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

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($R \cdot R$ 坐标纸),将实测值绘于坐标纸上,如符合这种规律,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 $R = 100 e^{-a d_p^s}$ 改变为如下形式:

$$R = 100 e^{-(d_p/d_{p_0})^s} \quad (1-36)$$

当 $d_p = d_{p_0}$ 时, $R = 100 e^{-1} = 36.8$, 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:

$$a = \frac{1}{d_{p_0}^s} \quad (1-37)$$

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, $R = 50$, 根据式(1-31),得:

$$50 = 100 e^{-a d_{50}^s}$$

两侧取自然对数:

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

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:

$$R = 100 e^{-\ln 2 (d_p/d_{50})^3}$$

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, α 值越大,说明粉尘粒度越细。

一般粉尘的 s 值为 $0.77 \sim 2.0$, α 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。矿岩中往往有多种矿物成分,这些成分的硬度具有差别,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分与矿岩的粉尘成分等同对待。

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(如燃烧粉煤产生的粉煤灰),形状常常是规则的球形或立方形。粉尘粒子形成后,其形状可能由于结晶作用、水合作用以及碰撞、凝集或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,通常小于 $2 \sim 10 \mu\text{m}$,并且若干烟粒凝集成链状的集合体(如氧化铁、氧化镁)。大气中粉尘的典型形状如表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		
立方形	盐晶体, MgO 单个粉尘粒子		
不规则立方形	矿物尘,熔渣	$3 \sim 8$	$0.2 \sim 0.5$
薄片	矿物,石墨,云母	$1.5 \sim 2$	$0.02 \sim 0.1$
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	$\pi d_i L$	$\frac{\pi}{4} d_i^2 L$
集合体	煤烟,凝集了的金属氧化物烟	$0.2 \sim 2$	$0.01 \sim 0.1$

二、粉尘的游离二氧化硅含量

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,粉尘中游离二氧化硅的含量越高,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;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。粉尘中游离二氧化硅的含量是引起尘肺病并促进其病程发展的主要因素,含量越高,其危害越大。

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,或者时常也伴有夹石等,从煤种来看,无烟煤的游离二氧化硅含量高于烟煤。以北票煤田为例,其各类岩石游离二氧化硅含量如表 1-2 所列。

表 1-2 北票煤田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。不包括尘粒之间孔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密度大 20%~50%。粉尘的密度可用下式表示:

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

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集。由于包含空气,这些凝集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

粉尘的相对密度是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