

国家自然科学基金项目 (51204089) 资助
辽宁省教育厅科研项目 (L2014131) 资助

矿井粉尘防治理论及技术

李雨成 主编

 煤炭工业出版社

国家自然科学基金项目(51204089)资助

辽宁省教育厅科研项目(L2014131)资助

矿井粉尘防治理论及技术

主 编 李雨成

副 主 编 杨艳国 赵千里 尹卫东

参编人员 李小峰 刘天奇 王思仪

赵 勉 郭柯惊 杨 靖

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

矿井粉尘防治理论及技术 / 李雨成主编. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2015

ISBN 978 - 7 - 5020 - 4723 - 8

I. ①矿… II. ①李… III. ①矽尘—防尘 IV. ①TD714

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 284725 号

矿井粉尘防治理论及技术

主 编 李雨成
责任编辑 李振祥 刘 博
责任校对 邢蕾严
封面设计 安德馨

出版发行 煤炭工业出版社 (北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
电 话 010 - 84657898 (总编室)
010 - 64018321 (发行部) 010 - 84657880 (读者服务部)

电子信箱 cciph612@126.com

网 址 www.cciph.com.cn

印 刷 煤炭工业出版社印刷厂

经 销 全国新华书店

开 本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 13³/₄ 字数 324 千字

版 次 2015 年 2 月第 1 版 2015 年 2 月第 1 次印刷

社内编号 7578 定价 28.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换,电话:010 - 84657880

内 容 提 要

本书系统阐述了矿井粉尘防治的研究背景, 矿井粉尘的相关特性, 粉尘测定, 粉尘爆炸及预防, 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, 防尘供水系统设计, 尘肺病及其预防等内容。本书以矿井粉尘问题为切入点, 以基本理论和基本试验为依据, 将理论和试验的结果用于分析粉尘的危害、矿井粉尘的治理等方面, 使本书内容由浅入深, 由简单到复杂, 由理论到实践, 适合学生和工程技术人员学习。

本书较为全面地汇集了国内外在矿井粉尘防治方面的现场经验和最新研究成果, 不仅可以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、设计和现场工程技术人员参考。

前 言

随着我国对煤炭能源需求的增大,不仅煤矿数量增多,综采、综掘技术也在迅猛发展,粉尘危害已经成为煤炭行业最为严重的灾害,如综放工作面的粉尘浓度在未采取防尘措施时普遍达到 3000 mg/m^3 ,最高达到 5000 mg/m^3 ,而且呼吸性粉尘占总粉尘的比例也高达20%左右,无论是总粉尘还是呼吸性粉尘均严重超标达100倍以上。由于种种原因,我国大多数煤矿的防尘措施达不到有效防尘的目的,甚至没有防尘措施。带来的严重后果是煤尘爆炸隐患增大,特别是煤矿尘肺人数的逐年增多。

本书综合矿井防尘的特点,包括了国内外矿井粉尘防治领域的最新理论及技术,内容能够满足现代化矿井对粉尘防治的需要,适合学生和工程技术人员学习,以满足科学研究、工程应用和现场技术管理等需要。

由于作者水平有限,对于书中的不妥和不当之处,恳请读者批评指正!

编 者

2014年11月

目 次

第一章 绪论	1
第一节 矿井粉尘的产生及其主要危害	1
第二节 粉尘防治安全形势	2
第二章 矿井粉尘基本理论	6
第一节 矿井粉尘的分类	6
第二节 粉尘几何特性及粒度分布函数	6
第三节 粉尘理化性质	13
第三章 我国粉尘防治技术标准及现状	20
第一节 我国粉尘防治基本特征	20
第二节 煤矿呼吸性粉尘	22
第四章 粉尘测定	32
第一节 粉尘测定技术发展	32
第二节 粉尘浓度测定	34
第三节 粉尘粒度和粒度分布测定	42
第四节 粉尘中游离二氧化硅含量测定	47
第五节 不同状态粉尘最低点火能测定	50
第五章 煤尘爆炸及其预防	56
第一节 粉尘爆炸基础知识	56
第二节 煤尘燃烧和爆炸	68
第三节 煤尘爆炸预防	76
第四节 煤尘爆炸抑制与隔绝	79
第六章 通风净化及除尘降尘技术	93
第一节 通风除尘	93
第二节 除尘器	94
第三节 重力降尘室和惯性除尘器	98
第四节 旋风除尘器	100
第五节 湿式除尘	103

第六节	化学和物理除尘	107
第七节	袋式除尘器	115
第八节	静电除尘器	119
第七章	采煤工作面综合防尘技术	124
第一节	防尘技术	124
第二节	采煤工作面粉尘产生	125
第三节	煤层注水防尘	128
第四节	采空区灌水防尘	131
第五节	炮采工作面综合防尘	133
第六节	工作面降尘剂防尘	135
第八章	掘进及运输、转载防尘	137
第一节	破岩防尘	137
第二节	掘进工作面通风除尘	145
第三节	装岩防尘	151
第四节	转载、运输防尘	152
第五节	支护防尘	162
第六节	掘进工作面除尘新技术	166
第九章	防尘供水系统设计	180
第一节	防尘供水要求	180
第二节	防尘供水水池	184
第三节	防尘供水管路系统	185
第十章	尘肺病及其防治	190
第一节	粉尘对人体的危害	190
第二节	尘肺的分类及我国尘肺发病现状	192
第三节	矽肺	194
第四节	煤工尘肺	203
第五节	其他尘肺	208
第六节	影响尘肺发病因素	210
第七节	预防尘肺措施	210
	参考文献	212

第一章 绪 论

矿井粉尘问题不仅是一个劳动保护问题，还是一个环境问题。由于人体对粉尘极为敏感，通常当粉尘粒度超过 $10\ \mu\text{m}$ 时就被气管黏液以及鼻腔等吸附，然后缓慢地排出体外；当其粒度小于 $10\ \mu\text{m}$ 时，这些粉尘就能够深入到气管的深层部位；当其粒度在 $5\ \mu\text{m}$ 以下时，这些粉尘的 90% 都将沉积于呼吸功能组织上，诸如气管、肺泡等，导致肺泡等部位形成充血反应，最终形成尘肺病。尘肺病较为严重时，会逐步恶化成为肺心病，极易导致死亡，因此矿井粉尘已经对煤矿工人的健康构成巨大的威胁，是煤矿工人的主要职业病之一。

第一节 矿井粉尘的产生及其主要危害

一、矿井粉尘的产生

煤炭在生产、运输、储存等过程中都会不断地向空气中排放出大量的粉尘。尤其是在空气流动性较强，或者是风速较快的作业场合，粉尘的排放量将急剧上升。据相关资料的统计，部分矿区所产生的煤炭粉尘量占到了矿区煤炭总产量的 1.7% 以上。

在粉尘产生的各个场合当中，采煤工作面是产生粉尘量较大的场合，占矿井粉尘总量的 60% 左右。因此以预防粉尘爆炸、防治矿井瓦斯爆炸以及改善工人的工作环境等为目的的粉尘治理是一项极其重要的安全环节，其中针对采煤工作面上的粉尘治理应该是整个治理工作的重点。

随着煤矿采掘自动化程度的提高，机器采掘面所产生的粉尘量也在不断上升。产生粉尘的主要环节包括：采煤机的割煤作业、支架的移架、放煤口的放煤操作以及后续的破碎机破煤作业等。据相关数据统计，这 4 道工序分别占整个作业面粉尘产生量的 60%、20%、10% 和 10% 左右。从整个角度来看，做好机采工作面粉尘治理是达到矿井粉尘治理目的的重要环节。同时巷道掘进也是产生粉尘的重要环节，尤其是没有完善的粉尘预防措施时将产生大量的粉尘。因此对掘进工作面的粉尘治理也是一项极其重要的工作。

二、矿井粉尘的相关特性及危害

1. 矿井粉尘的相关特性

从本质上讲，矿井粉尘就是指那些在煤矿生产的过程中所形成的微小煤尘或者是岩土微尘。矿井下的粉尘特性主要如下：

(1) 在粉尘的表面将吸附上一层厚度极小的空气膜，对粉尘之间以及粉尘与空气中水分的凝聚产生了阻碍作用，导致粉尘难以沉降。

(2) 由于吸附于粉尘上的空气薄膜的作用，尤其是其上的氧分子将增加，加速了对粉尘的氧化，使得其颗粒变得更小。

(3) 粉尘的表面积增大了其中二氧化硅溶解到人体肺泡中的概率。

(4) 产生的粉尘容易带电，尤其是那些产生于采掘工作面的粉尘。带电的粉尘更容易导致尘肺、引发燃烧与爆炸，同时还将造成矿井设备的磨损加快，电器设备的使用精度与寿命降低等。

2. 粉尘的危害

粉尘危害是多方面的。粉尘对人体、生产过程、产品质量、经济效益、环境和生态平衡等诸多方面会产生不良影响。

(1) 对人体的危害。长期接触生产性粉尘的作业人员，因长期吸入粉尘，使肺内粉尘的积累逐渐增多，当达到一定数量时即可引发尘肺病。尘肺是生产性粉尘对人体的最主要的危害之一，长期吸入游离二氧化硅粉尘可引发矽肺病，长期吸入金属性粉尘如锰尘、铍尘等，可引发锰肺病、铍肺病等各种金属肺病；长期吸入煤尘可引发煤肺病等。长期接触生产性粉尘还可引发鼻炎、咽炎、支气管炎等呼吸道疾病以及皮肤黏膜损害、皮疹、皮炎、眼结膜损害。例如吸入石灰粉尘可引起鼻黏膜损伤；吸入毛、麻等纤维性粉尘可引起气管炎、支气管炎；在阳光下接触沥青烟尘，可引起光感性皮炎、眼结膜炎等。吸入有害物质粉尘还可引起急性或慢性中毒，例如焊接作业长期吸入锰尘，可引发锰中毒，铅熔炼作业人员易发生铅中毒等。

(2) 对生产的危害。作业场所空气中的粉尘附着于高级、精密仪器、仪表，可使这些设备的精确度下降；附着于机器设备的传动、运转部位，使磨损加剧，使用寿命缩短；粉尘可以使某些化工产品、机械产品、电子产品，如油漆、胶片、微型轴承、电机、集成电路、电容器、电视机、录像机、照相机等质量下降；使人在生产过程中视线受影响，使工作效率降低。

(3) 对环境的危害。漂浮于空气中的粉尘可使其他有害物质附着其上，形成严重的大气污染。生物体吸入可引起各种疾病，文物、古迹、建筑物表面会被腐蚀、污染。另外，大量粉尘悬浮于空气中，可降低大气的可见度，促使烟雾形成，使太阳的热辐射受到影响。

(4) 对经济效益的影响。粉尘对经济效益的影响主要表现在使产品质量降低，产品合格率降低，产品价格降低；因机器、设备使用寿命缩短，使固定资产投资增加，产品成本上升，市场竞争力减弱；因粉尘而导致的职业病人丧失工作能力，医药费用、护理费用、保健福利性费用支出增加；在高浓度粉尘作业场所工作，操作者对健康担心，心理负担沉重，比之正常情况下较早地失去工作能力，使企业培养技术人员周期加快，培训费用投入大，同时造成劳动生产率的不稳定。

第二节 粉尘防治安全形势

一、安全形势

煤矿粉尘是矿井五大灾害之一，是安全生产的大敌。据不完全统计，从1866年美国奥古斯煤矿发生大型瓦斯煤尘爆炸起，到目前一百多年间共发生死亡300人以上的煤尘爆炸重大恶性事故达17起。1942年日伪时期本溪湖煤矿发生一次全井性煤尘爆炸事故，死

亡 1549 人，造成矿毁人亡。新中国成立以来，在党的安全生产方针指引下，煤矿安全生产局面得到很大改善，但由于种种原因，煤尘瓦斯事故始终没能杜绝，1976—1980 年纯煤尘爆炸事故就达 11 起，煤矽肺病危害更为惊人。

消除粉尘危害，杜绝煤尘事故，这在采掘机械化程度日益提高的今天，已成为煤矿安全生产的迫切任务。粉尘在矿井空间上分布于所有的井巷，具有广泛性；在时间上产生于各个工序和环节，具有连续性；在防治措施上必然造成复杂性、经常性，单一措施往往不能奏效。本书对煤矿井下粉尘的产生、分布规律、降尘和综合防治措施进行了初步研究。

二、国内外研究现状

1. 国外研究现状

目前，国外一些主要产煤国家，如美国、俄罗斯、波兰、英国、德国等，煤矿机械化程度较高，粉尘产生量增加更为严重，这对安全生产和劳动卫生条件的影响很大。因此这些国家比较重视煤矿粉尘问题。他们坚持综合防治，加强粉尘管理和科学研究，发展防尘技术，为煤矿提供了很多安全可靠的有效防尘、降尘、除尘和防、隔爆装置；重视粉尘对人体的危害，加强检测和矽肺防治研究工作，因而近几年煤矿粉尘状况有了根本性的好转，有效地控制住矽肺病发病率，基本上没有发生重大的煤尘爆炸事故。

1) 采掘工作面的防尘状况

采掘工作面的粉尘产生量占全矿井粉尘产生量的 80% 以上，机械化程度高的矿井更是如此，而采掘工作面的设备和人员都很集中，因此有效地降低采掘工作面的粉尘浓度，可根本上改变煤矿粉尘状况，改善安全生产和劳动卫生条件。

在机械化掘进工作面，各国广泛采用通风除尘、喷雾降尘和各种类型的除尘器，也有应用风水喷雾器、高压水喷雾器和泡沫除尘等措施。采用良好的喷雾器和除尘器能使掘进工作面的粉尘浓度达到或接近各自国家的标准。通风除尘主要是混合式通风，一种是用压入式风机向工作面供新鲜风，用有除尘器的风机处理含尘空气；另一种是用抽出式风机抽出工作面的含尘空气，经除尘器处理后排出，并用通风机将新鲜风压入工作面。

用于煤矿井下的除尘器有干式和湿式两类，除尘效率一般为 90%，最高达 99.9%。如美国的湿式纤维除尘器、旋流除尘器，奥地利的文丘里干式过滤器，前联邦德国的布袋除尘器，英国的湿式过滤器，前苏联的湿式旋流除尘器等。干式比湿式的优点是能耗少，噪声小，维修方便，还能在工作情况下改变吸入风量，保持较高的净化能力。

喷雾除尘是一项重要的降尘措施，不仅在机组上广泛采用，也用于转、装点。采用除尘器和良好的喷雾洒水可使掘进工作面粉尘浓度降低 90% ~ 99%。使用湿式除尘风机和泡沫降尘也有较好的降尘效果。

回采工作面广泛采用内外喷雾，煤层注水和通风除尘。机组喷雾降尘主要是喷嘴布置方式和无阻塞喷嘴。英国的研究表明，为了最大限度地湿润煤尘，需要在产尘地点喷洒洒水，即在截齿与煤体接触处（向截缝洒水）湿润。美国矿业局研制成功无阻塞的喷水装置，其主要构件是一个直径为 7.5 cm 的水力旋流器。它可以垂直或水平安装，也可以任意倾斜安装。试验表明，它可减少停机时间、降低成本和提高生产率。前苏联在卡拉干达煤田还试验用压气洒水，它比喷雾洒水和集尘器的效果都好。

前苏联试验过高压喷雾，目前已在综采工作面应用，其效果与一般洒水相比，可降低

空气含尘量 33% ~ 67%，减少 50% 耗水量。煤层注水防尘是一种有效的防尘措施，俄、波、法、德、比利时等国都广泛应用。通风除尘主要有多分支通风法，如 W、Y、H、Z、双 Z 形通风系统，也有利用风障及风管抽出含尘空气，或者在采煤机上安装风管和风机把含尘空气排放到回风巷。此外，英、美、俄等国还研究产尘少的采煤机，选择合理的切割参数，试验移架放顶时的自动喷雾以及泡沫除尘等措施。

2) 防止和隔绝煤尘爆炸

采用防、隔爆措施可避免煤尘飞扬，扑灭如电火花、摩擦火花、爆破火焰等引起煤尘爆炸可能性的火源。一旦发生爆炸，也可控制其传播，避免酿成重大事故。撒岩粉是一种很有效的措施，如美国回采工作面每推进 50 m 必须撒一次岩粉，西欧一些国家在使用水槽棚时，仍在主要巷道内撒岩粉。岩粉棚水槽、水幕、黏结剂和启动扑灭装置，各国都根据本国条件选择应用。必须注意到，防止和隔绝煤尘爆炸应采取综合措施，不能把希望只寄托在某一种措施上。

3) 煤矿粉尘检测

各国煤矿粉尘的测定有规程和标准仪器，除了全尘浓度外，美、日、英、前南斯拉夫等国还相继规定了呼吸性粉尘浓度标准。这两种标准都与游离二氧化硅有关，公认的确定方法是毒理实验研究加安全系数以求出安全浓度。对于呼吸性粉尘浓度的标准，美国科学家提出按公式 $10 / (\text{SiO}_2\% + 2) (\text{mg}/\text{m}^3)$ 计算。目前，已有不少国家开展了呼吸性粉尘浓度标准的研究，同时研究快速测尘仪和粉尘连续检测装置。

从国外发展趋势看，坚持综合防治，进一步研究高效喷雾技术和除尘装置，着重解决采掘工作面的粉尘问题，研究自动隔爆装置，可有效地防止和隔绝瓦斯煤尘爆炸。

2. 国内研究现状

进入 21 世纪以来，我国对煤炭能源的需求进一步增大，煤矿在提高工作面产量的同时不断增加工作面数量，使各煤矿不断向深部开采，导致我国高瓦斯采掘工作面不断增加，煤矿粉尘问题日趋严重。如高瓦斯大风量综放工作面的粉尘浓度在未采取防尘措施时普遍达到 $5000 \text{ mg}/\text{m}^3$ （最高达 $8000 \text{ mg}/\text{m}^3$ ），综掘工作面的粉尘浓度亦达 $2500 \text{ mg}/\text{m}^3$ ，而且呼吸性粉尘占总粉尘的比例也高达 20% 左右，无论是总粉尘还是呼吸性粉尘均严重超标达 100 倍以上。带来的严重后果是煤尘爆炸隐患增大，特别是煤矿尘肺病人数量逐年增多。据卫生部统计，截至 2007 年底，全国累计检出各类尘肺病人 627405 例，现患 480335 例，已死亡 147070 例。全国每年尘肺病造成的直接经济损失 100 多亿元，间接损失 300 ~ 400 亿元。

煤矿安全生产是党的一贯政策，有关部门十分重视安全第一的方针。在当前，我国煤矿掘进工作面有湿式凿岩、放炮喷雾，装岩洒水、冲洗岩帮、风流净化等五项综合防尘措施；回采工作面有煤层注水、采空区灌水湿润煤体，机组内外喷雾降尘。此外还研制出防尘帽，防尘口罩等个体防尘用具，光电式煤尘、岩尘、水泥粉尘浓度快速测定仪等检测仪表。

回采工作面采用煤层注水防尘，一般降尘率为 60% ~ 90%，我国有几十个局、矿采用这个行之有效的防尘措施，收到了很好的效果。在机采工作面使用内外喷雾和煤层注水防尘方法，可使煤尘浓度降到每立方米几十毫克。在炮采工作面使用水电钻打眼和水炮泥防尘，降尘率都在 85% 以上。使用水炮泥，不仅有防尘效果、而且能防止爆破时出现的

火焰引起煤尘爆炸事故。

总的说来，我国煤矿粉尘状况近几年有很大改善，为了有效防治尘肺，在坚持“预防为主，防治结合”方针的同时，已从治理总粉尘向治理呼吸性粉尘过渡，粉尘监测也从短时间断监测向连续在线监测发展，然而在煤矿安全专业中仍是最薄弱的，与国外比差距较大。各个矿的防尘工作很不平衡，防尘机构不健全，人员不足，没有防尘、防爆技术实施细则，管理制度不完善；对粉尘的危害性认识不足，工人也缺乏粉尘知识；防尘、防隔爆工作欠账多，没有很好地应用现有防尘措施，基本上没有防、隔爆措施。为了迅速改变落后状况、尽快赶上国外先进水平，应迅速健全防尘机构和专业队伍，强化粉尘管理，充分发挥现有措施的作用，加强科学研究，为煤矿提供更有效的防尘技术和装备。

第二章 矿井粉尘基本理论

第一节 矿井粉尘的分类

矿井粉尘简称矿尘，一般指矿物开采或加工过程中产生的微细固体集合体。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。对矿尘进行分类的方法很多，按其产生和形态，可以作如下分类。

一、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颗粒，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 $0.01 \sim 1 \mu\text{m}$ ，可长时间悬浮于空气中。

二、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，肉眼可以观察到，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，要用超倍显微镜可以观察到，可长时间悬浮于空气中，并能随空气分子做布朗运动。

三、其他分类

(1) 按爆炸性可分为易燃、易爆和非易燃、非易爆炸性粉尘。

(2) 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。

(3) 按有无毒性可分为有毒、无毒、放射性粉尘等。

第二节 矿尘几何特性及粒度分布函数

一、粉尘的粒度

矿尘颗粒的尺度，也叫做粒径，用 μm 表示。粉尘粒径是表征粉尘颗粒大小的最佳代

表性尺寸。对球形尘粒，粒径是指它的直径。实际的尘粒形状大多是不规则的，一般也用“粒径”来衡量其大小，此时的粒径却有不同含义。同一粉尘按不同的测定方法和定义所得的粒径，不但数值不同，应用场合也不同，因此在使用粉尘粒径时，必须了解所采用的测定方法和粒径的含义。粒径一般来说有3种形式：投影径、几何当量径、物理当量径。在选取粒径测定方法时，除需考虑方法本身的精度、操作难易程度及费用等因素外，还应特别注意测定的目的和应用场合。在给出或应用粒径分析结果时，也应说明或了解所采用的测定方法。

二、粉尘的分散度

粉尘分散度即粉尘的粒径分布。粉尘的粒径分布可用分组（按粉尘粒径大小分组）的质量百分数或数量百分数来表示，前者称为质量分散度，后者称为计数分散度。粉尘的分散度不同，对人体的危害以及除尘机理和采取的除尘方式也不同，因此掌握粉尘的分散度是评价粉尘危害程度，评价除尘器性能和选择除尘器的基本条件。由于质量分散度更能反映粉尘的粒径分布对人体和除尘器性能的影响，所以在防尘技术中多采用质量分散度。国内已生产出多种测定粉尘质量分散度的仪器，有不少单位已在使用。

三、粉尘的粒度分布曲线

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。常用的分布曲线有粒度分布曲线、累积分布函数曲线和通过率曲线。

1. 粒度分布曲线 (y)

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

$$y = f(x)$$

2. 累积分布曲线 (R)

如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，如图 2-1 所示中的 R 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：

$$R = \int_x^{\infty} f(x) dx \quad (2-1)$$

3. 通过率曲线 (D)

通过率曲线与累积分布曲线相对应，即把粒度分布按粒径的顺序 (x 由 ∞ 到 0) 累积所得到的，如图 2-1 所示中的 D 曲线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：

$$D = \int_0^x f(x) dx \quad (2-2)$$

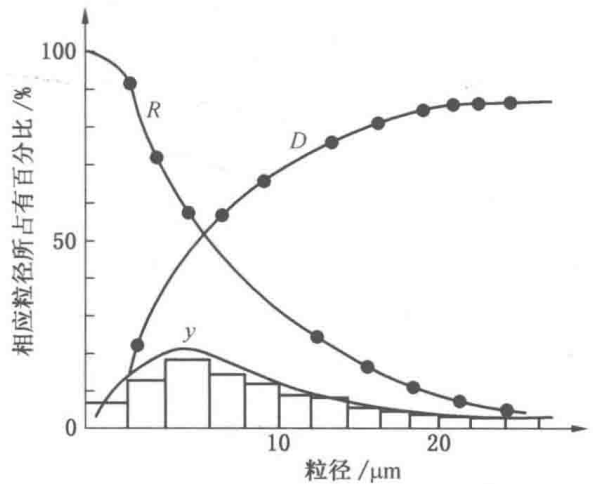


图 2-1 粉尘粒度分布、累积分布及通过率曲线

从图 2-1 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_m , 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:

$$y = f(x) = -\frac{dR}{dx} \quad (2-3)$$

$$R = 100\% - D \quad (2-4)$$

四、矿尘的几何特性

矿尘由于产生方式不同而具有规则形状或不规则形状。对于球体、立方体、圆柱体、三角锥体之类形状规则的物体, 可用直径或边长作为粒度的代表尺寸; 不规则形状的尘粒可分为各向同长的粒子、平板状粒子、针状粒子, 大多数粉尘属于各向同长的粒子。对于不规则的粉尘采用球形系数 (ϕ_s) 来评价其对球形的偏离程度。所谓球形系数就是指同样体积的球形粒子的表面积与尘粒的实际表面积之比, 煤的球形系数在 0.6 左右, 属于不规则形状。煤尘对人体的危害主要取决于粒径的大小, 另外对煤尘的捕捉和把煤尘从气流中分离出来等技术都要考虑煤尘粒径的大小。煤尘粒径一般以颗粒的长度尺寸来表示, 但实际上煤尘的颗粒形状极为复杂, 每一个颗粒都有其独自的形状。另外工业生产过程中产生的粉尘不仅形状不规则, 而且粒度分布也广泛, 大多属于多分散性粉尘, 对于这种粉尘采用粉尘平均粒径来表示, 由于“平均”方法不同, 有以下几种平均粒径的定义: 数目平均径、平均表面积径、体积 (或质量) 平均径、线性平均径、质量平均径、几何平均径。为了表示粉尘的光密度与重力场和惯性力场下的沉降速度, 应取平均表面积径; 在通风除尘中一般采用几何平均径。

对于不规则形状的煤尘颗粒粒度代表的尺寸, 通常按照如下几种方法来定义其粒径。

1. 球当量径

从几何学或是物理学的角度来看, 最容易处理的是球。因此以球为基础, 把不规则形状的颗粒看作为相当的球。与颗粒等体积 V 的球的直径称为等体积球当量径。

$$d_{ev} = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} \quad (2-5)$$

与颗粒等面积 S 的球的直径称为等表面积球当量径。

$$d_{es} = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (2-6)$$

与颗粒具有相同的表面积 S 对体积 V 之比, 即具有相同的体积比表面积 S_p 的球的直径称为体积比表面球当量径。

$$d_{esv} = \frac{6V}{S} = \frac{d_{ev}^3}{d_{es}^2} \quad (2-7)$$

或

$$\frac{S}{V} = \frac{6}{d_{esv}}$$

另外, 在流体中以等沉降速度下降的球的直径称为等沉降速度球当量径。

2. 三轴径

设在最小体积的长方体（外接长方体）内恰能装入某个颗粒，若以该长方体的长度 l 、宽度 b 、高度 h 来作为该颗粒尺寸的定义，称为三轴径。如采用显微测定，则所观测到的颗粒的平面图中，将最靠近的两平行线的间距称为短径 b ，与其垂直方向的平行线的间距称为长径 l ，由显微镜载玻片至颗粒顶面间的距离称为高度 h 。粒的外接长方体用显微镜测定时，通常先确定长径，然后取其垂直方向作为短径。显然这种取定方法有利于强调长形颗粒的存在。三轴径的平均值计算式及其物理意义见表 2-1。

3. 投影径

用光学显微镜、电子显微镜或其他投射摄影方法，直接观测颗粒的投影轮廓，并以与颗粒投影轮廓性质相同的圆的直径表示粒径：①随机平均径，其测定方法如图 2-2a 所示，统计得到随机的平均测定值；②面积等分径，指在一定方向上颗粒投影面积二等分线的长度，如图 2-2b 所示；③最大定向径，指在一定方向上颗粒投影轮廓的最大宽度，如图 2-2c 所示；④圆当量径，与颗粒投影面积相等的圆的直径称为投影圆当量径（或称等面积圆当量径），如图 2-2d 所示。另外，还有等周长圆当量径，系指其圆周与颗粒投影图形周长相等的圆的直径。

表 2-1 煤尘三轴径的平均值计算式

序号	计算式	名称	物理意义
1	$\frac{l+b}{2}$	长短平均径、二轴平均径	平面图形的算术平均值
2	$\frac{l+b+h}{3}$	三轴平均径	立体图形的算术平均值
3	$\frac{3}{1/l+1/b+1/h}$	三轴调和平均径	同外接长方体有相同比面积的直径，或立方体的一边长
4	\sqrt{lb}	二轴几何平均径	平面图形的几何平均值
5	$\sqrt[3]{lbh}$	三轴几何平均径	同外接长方体有相同体积的立方体的一边长

一般，上述各段投影径的关系为随机平均径大于投影圆当量径大于面积等分径。若长短径值比较小，用面积等分径代替投影圆当量径偏差不会太大，但细长颗粒的偏差则较大。

4. 平均粒径

平均粒径指由许多粒径不等的颗粒所组成的颗粒群的平均粒径，可用统计数学的方法求得。

1) 加权平均粒径

将颗粒群划分为若干个级别，设任意一粒级的粒径为 d ，该粒级的颗粒个数为 n 或占总颗粒群的质量分数为 $w(\%)$ 。则有如下 4 种不同加权的平均径 d_a 计算方法：

(1) 个数平均粒径：

$$d_{na} = \sum \left(\frac{n}{\sum n} d \right) = \frac{\sum (nd)}{\sum n} \quad (2-8)$$

(2) 长度平均粒径:

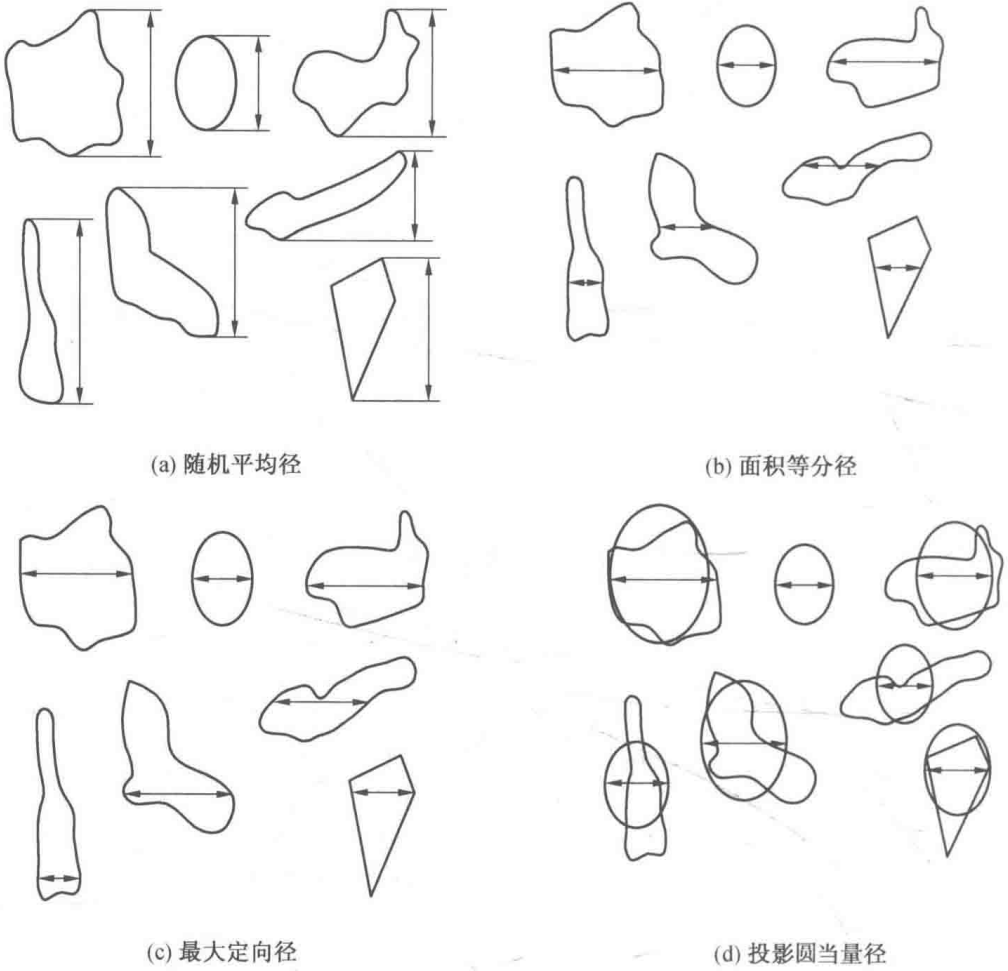


图 2-2 煤尘投影粒径的种类

$$d_{la} = \sum \left[\frac{nd}{\sum (nd)} d \right] = \frac{\sum (nd^2)}{\sum (nd)} \quad (2-9)$$

(3) 面积平均粒径:

$$d_{sa} = \sum \left[\frac{nd^2}{\sum (nd^2)} d \right] = \frac{\sum (nd^3)}{\sum (nd^2)} \quad (2-10)$$

(4) 体积平均粒径:

$$d_{va} = \sum \left[\frac{nd^3}{\sum (nd^3)} d \right] = \frac{\sum (nd^4)}{\sum (nd^3)} \quad (2-11)$$

2) 形状平均粒径

用假想的球形颗粒的粒径作为颗粒群的平均粒径。现有形状完全相同而颗粒大小不一的颗粒群，并设其粒径为 d 、表面积为 S 、体积为 V ，其形状系数为 ϕ_s 和 ϕ_v ，则颗粒表面积和体积的平均值为 $\sum (nS) / \sum n$ ， $\sum (nV) / \sum n$ 。若表面积、体积平均值与其相等