



普通高等教育“十三五”规划教材

矿井粉尘防治

主编 李雨成



 煤炭工业出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

矿井粉尘防治

主 编 李雨成

副主编 辛宪耀 毕秋革 赵学斌

煤炭工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

矿井粉尘防治/李雨成主编. --北京:煤炭工业出版社,
2017

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5020-5949-1

I. ①矿… II. ①李… III. ①矽尘—防尘—高等学校—教材
IV. ①TD714

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 150865 号

矿井粉尘防治 (普通高等教育“十三五”规划教材)

主 编 李雨成
责任编辑 闫 非
编 辑 田小琴
责任校对 姜惠萍
封面设计 北京地大天成印务 设计印前中心

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 北京玥实印刷有限公司
经 销 全国新华书店

开 本 787mm×1092mm¹/₁₆ 印张 15³/₄ 字数 371 千字
版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷
社内编号 8829 定价 32.00 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

前 言

煤炭是我国能源的主要来源，随着矿井采煤机械化程度的不断提高，先进的煤矿挖掘设备为我国矿井机械化快速发展奠定了基础。我国矿井作业还无法达到全自动化机械作业，由于矿井中粉尘的存在，对安全生产造成了很大的威胁，粉尘的危害主要表现在其可能造成不可估量的爆炸事故和严重影响矿井工作人员的健康。但由于各种因素，我国不少煤矿企业对于粉尘防治没有足够的重视，这就增加了矿井中因为粉尘所引发爆炸危险的机率，同时也增加了井下工作人员患上尘肺病的人数。卫生部等相关部门发布资料表明，目前在全国范围内所有的尘肺病患者和疑似患者人口总数可能已经超过百万，其中煤炭行业患病的人数约占全国各行业人数的40%。鉴于粉尘的危害巨大，粉尘防治工作也就凸显出了其本身的重要性。

目前，国内多所院校都设立了安全工程本科专业，迫切需要能系统介绍粉尘防治相关的教材，让学生掌握矿井粉尘的相关基础知识、粉尘测定、粉尘爆炸及预防、采煤工作面综合防尘技术等。鉴于此编者组织编写了本书。

本书由李雨成担任主编，赵学斌、毕秋苹、辛宪耀担任副主编。全书具体编写分工为：第一章、第二章和第七章由李雨成和赵学斌共同编写，第三章由罗红波编写，第四章由刘天奇编写，第五章由毕秋苹编写，第六章由辛宪耀编写，第八章和第九章由高军军编写。本书在资料整理、图表绘制、计算机整理等方面由郑强和沙迪完成。本书在编写过程中参考了大量文献资料，在此对各作者表示诚挚的谢意。

鉴于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请各位读者批评指正。

编 者

2017年6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
第三节 国内粉尘防治技术标准现状	5
第四节 粉尘对人体的危害	6
第二章 矿井粉尘基本理论	9
第一节 矿井粉尘的分类	9
第二节 粉尘的几何特性及粒度分布函数	9
第三节 粉尘理化性质	18
第四节 煤矿呼吸性粉尘	25
第三章 粉尘测定	34
第一节 粉尘测定技术的发展	34
第二节 粉尘检测	36
第三节 粉尘浓度测定	38
第四节 粉尘粒度和粒度分布测定	47
第五节 粉尘中游离二氧化硅含量的测定	52
第六节 不同状态粉尘最低点火能测定	56
第四章 煤尘爆炸及其预防	62
第一节 粉尘爆炸基础知识	62
第二节 煤尘燃烧和爆炸	74
第三节 煤尘爆炸的预防	92
第四节 煤尘爆炸的抑制与隔绝	95
第五章 通风净化及除尘降尘技术	110
第一节 通风除尘	110
第二节 除尘器	111
第三节 重力降尘室和惯性除尘器	116
第四节 旋风除尘器	118
第五节 湿式除尘	121

第六节	化学和物理除尘	126
第七节	袋式除尘器	135
第八节	静电除尘器	140
第九节	净化新方法	145
第六章	采煤工作面综合防尘技术	146
第一节	防尘技术	146
第二节	采煤工作面粉尘的产生	150
第三节	煤层注水防尘	153
第四节	采空区灌水防尘	158
第五节	炮采工作面综合防尘	160
第六节	工作面降尘剂防尘	163
第七章	掘进及运输、转载防尘	166
第一节	破岩防尘	166
第二节	掘进工作面通风除尘	177
第三节	装岩防尘	184
第四节	转载、运输防尘	185
第五节	支护防尘	198
第六节	掘进工作面除尘新技术	203
第八章	防尘供水系统设计	220
第一节	防尘供水的要求	220
第二节	防尘供水的水池	226
第三节	防尘供水管路系统	228
第四节	供水系统事故预防保障体系	232
第九章	矿井防尘效果评价	235
第一节	粉尘防治措施效果的统计分析方法	235
第二节	矿井防尘措施对预防矽肺病发生效果的评价指标	237
第三节	防尘效果评价方法	239
第四节	矿井防尘效果评价方法应用实例	239
参考文献		244

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，通常当粉尘大小超过 $10\ \mu\text{m}$ 时就容易被气管黏液以及鼻腔等吸附，然后缓慢地排出体外；当其小于 $10\ \mu\text{m}$ 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、贮存等过程中都会不断地向空气中排放出大量的粉尘和颗粒。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。据相关资料统计，部分矿区所产生的煤炭粉尘量占矿区煤炭总产量的 1.7% 以上。

在粉尘产生的各个场合中，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、防止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，其中针对采煤工作上的粉尘治理是整个治理工作的重点。

随着煤矿采掘自动化程度的上升，机器采掘面所产生的粉尘量也在不断地上升。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 道工序分别约占整个作业面粉尘产生量的 60%、20%、10% 和 10%。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，尤其是在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个极其重要的工作环节。

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一层厚度极小的空气膜，对粉尘之间以及粉尘与空气水分的凝聚产生了阻碍作用，导致粉尘难以沉降。

(2) 由于其上空气薄膜的作用，尤其是氧分子的增加，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,同时还将使得矿井设备的磨损加快,以及电气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、产品质量、经济效益、环境和生态平衡等诸多方面产生不良影响。

(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,长期吸入金属性粉尘如锰尘、铍尘等,可引发锰肺、铍肺等各种金属肺;长期吸入煤尘,可引发煤肺等。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、眼结膜损害等,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、机械产品及电子产品(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,可降低大气的能见度,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。其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了工作能力,医药费用、护理费用、保健性费用支出增加;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,到目前近120年间共发生死亡300人以上的重大恶性事故达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1527

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,据统计,截至1981年末,确诊矽肺患者占接尘总数的6.05%;疑似矽肺占接尘总数的10.75%;已经死于矽肺病的累计14880人,危害之甚居各部门之首位。

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。粉尘的危害,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;在防治措施上必然带来复杂性、经常性。单一措施往往不能奏效。本文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初步研究。

二、研究现状

1. 国外现状

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)的煤矿机械化程度较高,粉尘产生量成倍地增加,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。

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,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,并用辅扇或压气风扇将鲜风压入工作面。

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,英国的湿式过滤器,苏联的湿式旋流除尘器等。干式除尘器的优点是能耗少,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,也用于转点、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%。

在回采工作面,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水,即在截齿与煤体接触处(向截缝洒水)湿润。喷嘴移到离截槽50mm处,抑尘效果从90%降至30%。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7.5cm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。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。

2) 防止和隔绝煤尘爆炸

采用防、隔爆措施可避免煤尘飞扬,扑灭火源,如电火花、摩擦火花、爆破火焰等引起煤尘爆炸的可能性。一旦发生爆炸,也可控制其传播,避免酿成重大事故。撒播岩飞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,美国、日本、英国等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 $10/(SiO_2\%+2)$ (mg/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,有效地防止和隔绝瓦斯煤尘爆炸。

4) 国外安全管理理念

对于安全管理理念,西方发达国家早已有一套完整的体系,他们不叫安全生产而叫安全健康,这就是理念上的差别之一。依国外经验,有效监管建立在监管者人事、财务独立之上,并以定期对安监人员轮换对调作保障。

如何才能使煤矿企业保持高产量低伤亡,国外注意的是这三大因素:新技术的应用提高了煤矿生产安全;矿主和政府部门都增强了安全责任感;增强了对煤矿工人的培训。矿业安全与卫生局则将其经验总结为“成功三角”,构成这“三角”的三边分别是执法、培训与技术支持。

从国外的安全管理理念上来看,我们要控制事故,必须控制人为失误,在规范安全生产操作的基础上,逐步提高职工对安全的认识,更新职工的安全观念。回过头来理性反思中国矿难,理念上的疏于防范、监管上的软弱无力、矿工权益立法的缺乏滞后等。比如,有的煤矿本来就是高瓦斯矿井,但在干部下井时,为了所谓的形象宣传,经常拿来没有防爆功能的新闻灯及照相机、摄像机下井,造成事故。

2. 国内现状

21 世纪以来,我国对煤炭能源的需求进一步增大,煤矿在提高工作面单产的同时不断增加工作面数量,使各煤矿不断向深部开采,导致我国高瓦斯大风量采掘工作面不断增加,煤矿粉尘污染问题日趋严重。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 $5000 mg/m^3$ (最高达 $8000 mg/m^3$),综掘工作面的粉尘浓度也达到 $2500 mg/m^3$,而且呼吸性粉尘占总粉尘的比例也高达 20%,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逐年增多。据卫生部统计,截至 2006 年底,全国累计检出各类尘肺病人 616442 例,现患 470247 例,死亡 146195 例。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。2007 年,尘肺病新增病例 10963 例,新增病例中煤工尘肺和矽肺占 89.37%。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。

当前,我国煤矿掘进工作面有湿式凿岩、爆破喷雾、装岩洒水、冲洗岩帮、风流净化五项综合防尘措施;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。

掘进工作面的五项防尘措施,各矿实施情况不一样,有的五项同时使用,有的只使用其中几项,其防尘效果由各矿的具体条件(技术水平、管理工作)所决定。例如,双鸭山矿务局对岩巷掘进工作面的实测结果为:湿式凿岩降尘率为 65%~70%,爆破喷雾降尘率为 75%,装岩洒水降尘率为 60%,冲洗岩帮降尘率为 20%,净化风流降尘率为 25%~28%,水炮泥降尘率为 80%~85%。生产实践证明,在掘进工作面使用综合防尘措施其效果尤为显著。例如,双鸭山矿务局七星煤矿 9 个岩巷掘进工作面同时使用五项综合防尘措施,有 33.3%的工作面粉尘浓度达到 2 mg/m^3 , 44.3%的工作面粉尘浓度接近 2 mg/m^3 ,其余工作面粉尘浓度为 $4\sim 5 \text{ mg/m}^3$ 。

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。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,避免引起煤尘爆炸事故。

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,已从治理总粉尘为主向治理呼吸性粉尘过渡,粉尘监测也从短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,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。

第三节 国内粉尘防治技术标准现状

生产性粉尘的危害是完全可以预防的,为了防止粉尘的危害,我国颁布了一系列法规法令。根据这些政策法规,各企业在防尘上做了不少工作,并总结了预防粉尘危害八条经验,即“隔、水、密、风、护、管、教、查”综合措施,使粉尘浓度逐步下降,接触粉尘的工人尘肺发病率逐步降低,发病工龄和病死年龄大大延长。目前,为了加强粉尘危害的防治工作,保护作业人员的健康与安全,在结合我国实际情况的条件下制定了一系列粉尘防治法规、技术标准及其他重要规定。

一、法规

2002 年颁布实施了《中华人民共和国安全生产法》和《中华人民共和国职业病防治法》,2009 年颁布实施了《作业场所职业健康监督管理暂行规定》,对《煤矿安全规程》进行了 5 次修订(2006 年、2009 年、2010 年、2011 年、2015 年),以及制定了《中华人民共和国尘肺防治条例》,为我国煤矿粉尘防治的监督管理提供了一定的法律依据。

二、技术标准

2006年发布实施了《煤层注水可注性鉴定方法》《煤矿井下粉尘综合防治技术规范》《煤矿采掘工作面高压喷雾降尘技术规范》和《煤矿用袋式除尘器》，2008年发布实施了《煤矿粉尘粒度分布测定装置》和《煤矿用粉尘浓度传感器》等技术标准，为我国煤矿粉尘防治提供了技术支撑。

第四节 粉尘对人体的危害

一、局部伤害

水泥、碳化钙、漂白粉、纺织性粉尘、氟化钠、硫化钠、苛性钠、生石灰、二硝基氯苯、沥青、铝等许多种粉尘具有局部刺激性及腐蚀性。这种局部作用也可引起全身症状及其他器官或组织的病变。粉尘危害最严重的是可引起矽肺。此外，长期接触生产性粉尘还可能引起其他一些疾病。

1. 眼睛

粉尘对眼睛可产生局部的机械性刺激作用，多见于接触煤尘、金属粉尘、木尘的工种中。在从事银制品或电镀银时，可引起银质沉着病，即角膜可因粉尘的作用使其反射减弱甚至丧失而造成眼外伤，使视力减弱。金属和磨料粉尘能损伤角膜。酸性或碱性的粉尘如生石灰、苛性钠、漂白粉及其他染料、药物等粉尘对角膜有腐蚀作用，可引起急性角膜炎、角膜混浊、角膜溃疡，造成视力下降。

2. 牙齿、耳、消化系统

粉尘可引起龋齿的发病率。因为口腔细菌可分解粉尘中的糖类，产生的乳酸破坏了珐琅质（牙釉质），多见于接触粮食的工人中。在水泥工人中也多见龋齿炎等。粉尘又可促使外耳道形成“耳垢栓塞”，侵入鼻咽部的粉尘又能引起中耳炎、鼓膜炎，耳咽管炎。

煤、硅、锌及其他粉尘进入消化道后，可使消化腺分泌机能破坏，引起消化不良和胃炎。调查发现，接触TNT、煤、二氧化硅粉尘和铝粉的工人中，患胃肠系统疾病者占25%~60%，这也说明了粉尘对消化系统的影响。

3. 皮肤

粉尘是一种吸入性抗原，并且一切经呼吸道进入的可以刺激机体使之产生抗体或致敏的大分子物质可引起变态反应并导致皮肤病。变态反应是人体与抗原物质接触后发生的不正常的免疫反应。它与正常的免疫反应不一样，是由于反应的过度剧烈而导致生理功能的紊乱或组织的损伤。例如，粉尘是荨麻疹和湿疹的重要发病因素。除此之外，某些粉尘粒子在皮肤上沉积并经皮肤吸收，可刺激皮肤或引起皮肤病。如由于灯管里含有铍化物，被破碎的荧光灯割破皮肤，皮下可见铍结节；砷及其化合物可引起皮肤癌；铬酸盐可引起鼻中隔穿孔和皮肤的“铬疮”；长期接触矿物油烟可引起皮炎，甚至皮肤癌；接触塑料粉尘及植物性粉尘可引起皮肤过敏反应；稀土粉尘作业工人可能会发生皮肤瘙痒、干燥、色素沉着、毛发脱落及指甲变形等症状，毛囊炎、毛细血管扩张等皮损的患病率也有明显的提高。某些吸湿性较强的粉尘可造成皮肤的皲裂、干燥、角化等。粉尘可阻塞汗腺、皮脂

腺，引起粉刺、毛囊炎，多见于锅炉、水泥、陶瓷、采煤工人和冶金工厂的修理工人。一些可溶性化学毒物也能穿透未破损的皮肤引起全身中毒。

二、致癌性

致癌的粉尘有沥青、砷化合物、铬酸盐、石棉、放射性物质及镍等。沥青（特别是煤焦油沥青）、铀矿粉尘可引起皮肤癌，石棉可促使肺癌、肝癌、胃癌的高发，其他如镍、铬、砷等粉尘可引起肺癌。木料粉尘中还含有木焦油，这种物质由各种酚类和烃类组成，并含有致癌性较强的物质，这些物质通过支气管和肺泡进入血液，溶解在血液中，对人体健康的伤害更大。生产人员长期在粉尘环境中工作，对健康影响很大，甚至会患上癌症。

三、变态反应

变态反应也叫超敏反应，是指机体对某些抗原初次应答后，再次接受相同抗原刺激时，发生的一种以机体生理功能紊乱或组织细胞损伤为主的特异性免疫应答。人们日常遇到的皮肤过敏、皮肤瘙痒、红肿就是一种变态反应。吸入性抗原包括合成有机化合物和多种植物粉尘，如对苯二胺、氧化铍、某些塑料粉尘、谷物、某些棉花、亚麻、大麻、黄麻、绢丝、稻草、茶、烟、木尘和生咖啡等。据研究，粉尘作为吸入性抗原还可引起导致皮肤病以外的其他变态反应。例如，接触对苯二胺可引发血管神经性鼻炎、头痛等变态反应疾病。吸入含甲苯二异氰酸酯的粉尘可引起哮喘。吸入植物粉尘可引起哮喘或棉尘病等变态反应。变态反应引起的支气管哮喘，多见于毛皮工业的工人中。棉尘病患者主要表现为在休息 24 h 或 48 h 后，第一天上上班接触棉麻粉尘数小时后，出现胸部紧束感、气急、咳嗽、畏寒、发热等症状，又称“星期一症状”，这些病状在该病初期可于工作的第二天或第三天消失，随着病情的加重，这些病状出现的时间越来越长，以致持续存在，患者的劳动能力将因病变程度的加重而下降。

四、粉尘的光化学作用

粉尘的光化学作用多见于接触沥青粉尘的工人中。当皮肤接触沥青粉尘后，再经过日光晒，就会产生光照性皮炎，临床表现为痛性红斑皮炎。沥青粉尘的慢性中毒作用也可表现毛囊角化、粉刺、毛囊炎、湿疹、色素沉着症、皮肤落屑和萎缩等。沥青引起的光感性皮炎消失后，可遗留下弥漫性过度色素沉着现象。

五、中毒

呼吸系统为一些细小的粒子进入提供了一个非常方便的途径，粒子在体内经溶解后进入血液循环和内脏器官，引起全身中毒现象。具有中毒作用的粉尘有石英、铅、锰、砷、镉、铍、氧化锌、氟化物、氰化钠、重铬酸钾及汞化物、三硝基甲苯等。

六、粉尘的疾病传染性

粉尘传染疾病的方式很多，易携带的致病菌也不少，如葡萄杆菌、链球菌、水痘病毒、天花病毒、流感病毒、麻疹病毒、百日咳杆菌、白喉杆菌、真菌等。

容易受到粉尘携带细菌感染的人群有：垃圾处理工人、铸造工人、陶瓷工人、废品收集整理工人、水泥工人、制粉工人、农业工人、啤酒酿造工人、皮革工人等。例如，工人接触含炭疽杆菌的兽毛可引起炭疽。室内装修粉尘主要是由于凿内墙地面、刨木屑及抛光造成的，装修产生的大量粉尘对人的眼睛、上呼吸道、肺部等都非常有害。粒径小于 $5\ \mu\text{m}$ 的粉尘，可以直接进入肺泡，把细菌带人体内。如果装修后的废物得不到及时清理，其中的粉尘还会成为病菌的载体，传播疾病的机会就会大大增加。另外装修的油漆、涂料等产生的苯、甲醛等化学污染物可通过呼吸道进入体内，也会刺激呼吸道黏膜，降低人们对疾病的免疫能力。

七、粉尘对呼吸系统的损害作用

1. 对呼吸道的机械刺激和感染作用

当粉尘落于鼻、咽、气管、支气管时，尤其是尖锐的粒子如玻璃、石英、铜铁、硅石等，常能损伤呼吸道黏膜，随后细菌通过损伤的黏膜侵入呼吸道组织造成感染，即使不造成损伤往往也会引起黏膜充血肿胀、分泌亢进，引起卡他性炎症（鼻炎、咽炎、喉炎、气管炎等）。

2. 粉尘对肺部的影响

(1) 尘肺。它是呼吸性粉尘所引起的最为广泛、严重的职业病，也是目前迫切需要解决的问题。

(2) 肺癌。引起癌症除与环境是否有致癌剂、促癌剂有关外，还与机体免疫功能有密切关系。

(3) 肺炎。锰、铍、铬等氧化物粉尘能引起化学性肺炎、水肿或细支气管炎。麦草、稻草尘可引起肺泡炎和肉芽肿、慢性间质性纤维化。吸入谷物尘、木尘、人造纤维、聚氯乙烯尘可引起慢性堵塞性肺病。

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，一般是指矿物开采或加工过程中产生的微细固体集合体。矿尘按其存在状态分为沉积粉尘和浮游粉尘。沉积于器物表面或井巷四壁之上的称为沉积粉尘（或落尘）；悬浮于井巷空气中的称为浮游粉尘（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。

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微颗粒，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。其直径一般很小，多在 $0.01\sim 1\ \mu\text{m}$ ，可长时间悬浮于空气中。燃烧过程产生的飞灰和黑烟，在不必细分时也称为烟尘。

二、按矿尘的颗粒大小分类

(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，要用超倍显微镜才可以观察到，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、易爆和非燃、非爆性粉尘。

(2) 按其成分可分为煤尘、岩尘、石棉尘、水泥尘以及动、植物粉尘等。

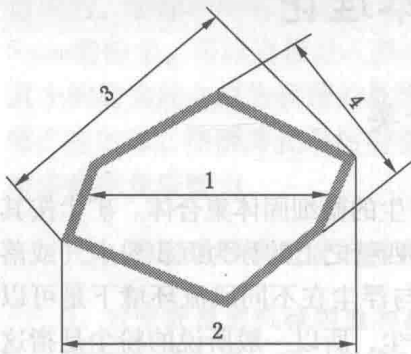
(3) 按有无毒性可分为有毒、无毒、放射性粉尘等。

第二节 矿尘的几何特性及粒度分布函数

一、粉尘的粒度

矿尘颗粒大小的尺度，也叫作粒径，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，然而此时的粒径却有不同含义。一般来说，有投影径、几何当量径、物理当量径3种形式的粒径。



1—面积等分径；2—定向径；
3—长径；4—短径

图 2-1 尘粒的投影径

1. 投影径

投影径是指矿尘尘粒在显微镜下所观察到的粉尘尺度，图 2-1 所示为尘粒的投影径。

(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。

2. 几何当量径

几何当量径是指矿尘尘粒的某一几何量（面积、体积等）相同时的球形粒子的直径。

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

$$d_A = \sqrt{\frac{4A_p}{\pi}} = 1.128 \sqrt{A_p} \quad (2-1)$$

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。

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

式中 V_p ——尘粒的体积。

(3) 等表面径 d_S 。与尘粒对的外表面积相同的某一球体的直径。

$$d_S = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = 0.56\sqrt{S} \quad (2-3)$$

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球体的直径。

$$d_{SV} = \frac{d_V^3}{d_S^2} \quad (2-4)$$

3. 物理当量径

物理当量径是指矿尘尘粒的某一物理量相同时的球形粒子的直径。

(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

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

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 $C_D A$ 为尘粒直径的函数, 由此可得出粉尘的阻力径 d_d 为

$$d_d = \sqrt{\frac{4C_D A}{\pi}}$$

(2) 自由沉降径 d_f 。在特定气体中, 密度相同的矿尘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, 矿尘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} 。在层流区内 (对粉尘粒子的雷诺数 $Re_p < 1$) 的空气动力径, 即

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

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

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

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含义, 利用不同粒径的测试方法, 得出不同概念下的粒径。例如, 用显微镜法测得的是投影径, 用沉降罐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)

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。其表达式为

$$P_{n_i} = \frac{n_i}{\sum n_i} \times 100\% \quad (2-8)$$

式中 P_{n_i} ——某粒数尘粒的数量百分比, %;

n_i ——某粒级尘粒的颗粒数。