



普通高等教育“十三五”规划教材

煤矿井下粉尘防治

主编 鲁忠良



 煤炭工业出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

煤矿井下粉尘防治

主 编 鲁忠良

副主编 陆卫东 樊小利

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

煤矿井下粉尘防治 / 鲁忠良主编. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2016
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5020-4871-6

I. ①煤… II. ①鲁… III. ①煤矿开采—井下作业—煤尘—防尘—
高等学校—教材 IV. ①TD714

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 101849 号

煤矿井下粉尘防治 (普通高等教育“十三五”规划教材)

主 编 鲁忠良
责任编辑 彭 竹
责任校对 邢蕾严
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 北京京华虎彩印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 12³/₄ 字数 297 千字

版 次 2016 年 5 月第 1 版 2016 年 5 月第 1 次印刷

社内编号 7717 定价 30.00 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

本书系统讲述了煤矿井下粉尘的性质及危害、煤矿井下粉尘产生及运移规律、尘肺病及其预防、煤矿井下粉尘的测定、煤尘爆炸及其预防、煤矿井下粉尘防治技术与设备等内容。

本书可供矿业高等院校采矿工程、安全科学与工程、环境科学与工程的本科生及研究生作为教材使用，也可作为从事煤炭工业科研、设计及现场工程技术人员的参考资料。

前 言

煤矿井下粉尘防治对于改善煤矿井下工作环境、保护井下工作人员的身心健康、提高生产效率、保证设备的正常运转都起着重要作用。煤矿井下粉尘防治是流体动力学、气固两相流理论、物理化学学科、医学原理及方法在职业安全学科的综合应用,主要研究煤矿井下粉尘的治理及预防,从环境保护的角度给井下作业人员创造一个安全、舒适、清新的工作环境。

本书从选材上力求新颖,尽量采用近年来的粉尘防治理论和国内外新的研究成果,对煤矿井下粉尘的来源、运移规律、性质、危害、治理及预防进行了系统总结与归纳;本书在体系上注意完整性、条理性,与新世纪高等学校对学生的“厚基础、宽口径、强能力”的培养要求相适应;对于本书的难点,通过从感性到理性、从现象到本质尽量采用通俗易懂的语言进行阐述。为便于开拓学生及工程人员的视野,本书还给出了一些案例分析,有利于培养读者分析问题和解决问题的能力。

本书由鲁忠良任主编,由鲁忠良、陆卫东、樊小利三人负责统稿、定稿。其中,河南理工大学鲁忠良拟定全书的编写内容提纲并编写了前言;河南理工大学王兰云编写第一章;河南理工大学高保彬、河南理工大学张攀、河南理工大学张书霞联合编写第二章;河南理工大学张飞燕、河南理工大学段振伟、新疆工程学院陆卫东联合编写第三章;河南理工大学樊小利、王兰云、张书霞联合编写第四章;河南理工大学段振伟编写第五章;河南理工大学张攀编写第六章;鲁忠良、陆卫东、张攀、张书霞联合编写第七章;河南理工大学王洪丽对全书的数学公式进行了编校。

本书在编写过程中参考了相关的教材、专业书籍、期刊以及网络最新资料;同时本书的编写与出版还得到了国家安全生产监督管理总局 2015 年度安全生产重大事故防治关键技术重点科技计划项目(项目编号 henan-0041-2015AQ)的资助,在此一并表示感谢!

由于编者的水平有限,书中可能存在疏漏和不当之处,敬请各位读者提出宝贵意见。

编 者

2016 年 3 月

目次

第一章 煤矿井下粉尘的性质及危害	1
第一节 煤矿井下粉尘的性质	1
第二节 粉尘的危害	15
复习思考题	20
第二章 煤矿井下粉尘产生及运移规律	21
第一节 煤矿井下粉尘的产生机理和来源及影响因素	21
第二节 煤矿井下粉尘在风流中的运移规律	32
复习思考题	41
第三章 尘肺病及其预防	42
第一节 概述	42
第二节 煤工尘肺病的发病机理和症状及影响因素	44
第三节 尘肺病的预防与治疗	45
复习思考题	49
第四章 煤矿井下粉尘的测定	51
第一节 煤矿井下粉尘浓度以及测定方法分类和测定仪器基本要求	51
第二节 总粉尘浓度测定	55
第三节 呼吸性粉尘浓度测定	71
第四节 粉尘分散度测定	86
第五节 粉尘中游离二氧化硅含量测定	91
第六节 煤矿井下粉尘的在线监测	97
复习思考题	108
第五章 煤尘爆炸及其预防	109
第一节 概述	109
第二节 煤尘爆炸性的鉴定	115
第三节 煤矿防止煤尘爆炸的技术措施	117
第四节 煤尘爆炸的抑爆隔爆技术	126
第五节 煤尘爆炸的案例	138
复习思考题	140

第六章 煤矿井下粉尘防治技术与设备..... 141

 第一节 煤矿井下减尘技术..... 141

 第二节 煤矿井下排尘和控尘..... 142

 第三节 煤矿井下降尘技术..... 147

 第四节 煤矿井下除尘技术..... 154

 第五节 煤矿井下的个体防护..... 160

 复习思考题..... 162

第七章 煤层防尘注水设计..... 163

 第一节 基础要求..... 164

 第二节 煤层注水设计..... 165

 第三节 矿井防尘注水供水与管路系统..... 166

 第四节 煤层注水参数计算..... 181

 第五节 煤层注水设备与设备选型..... 187

 第六节 煤层注水工艺..... 191

参考文献..... 194

第一章 煤矿井下粉尘的性质及危害

学习目标

1. 掌握煤矿井下粉尘的物理化学性质。
2. 掌握煤矿井下粉尘的危害种类以及对人体危害的影响因素。
3. 了解煤矿井下粉尘防治的相关法律法规。

粉尘是指固体物质细微颗粒的总称。一般来说，在生产过程中产生的粉尘统称为生产性粉尘。所谓煤矿井下粉尘，通常是指在矿山建设和生产过程中所产生的各种煤、岩微粒的总称，主要包括煤尘、岩尘等细微的固体颗粒。

第一节 煤矿井下粉尘的性质

通常情况下，由于各种机械原因导致破碎而产生的粉尘，都不伴有化学变化。在空气中飘浮的粉尘颗粒的化学成分也不会发生改变，其主要的化学成分与产生粉尘的矿岩物料基本相同。悬浮粉尘实际上是一种气溶胶（尘、烟和雾统称为气溶胶），其分散介质为空气，分散相是固体粒子。因此，粉尘在空气中的运动规律，不但与其本身的理化特性有关，还与空气的物理特性密切相关。

煤矿作业场所的空气中所悬浮的粉尘由于自身重力的作用会逐渐向下沉降，慢慢沉积在工作面的底板、巷道壁或者机电设备的表面。通常情况下，粉尘在沉积状态时并不能直接被人吸入呼吸道而对人体造成危害。在实际生产过程中，往往由于生产中的机械运转、局部通风、人员走动或者爆破等原因，会使已经沉降了的粉尘再次飞扬起来，形成二次扬尘，导致作业场所空气中的粉尘浓度进一步增加，从而加重粉尘对人体的危害程度。如果遇到瓦斯或者煤尘爆炸，爆炸产生的冲击波会导致积尘扬起，而扬起的煤尘接着参与爆炸，使得瓦斯或煤尘爆炸破坏力加倍，事故后果更加严重。

在煤矿井下生产过程中，如钻眼作业、炸药爆破、掘进机及采煤机作业、顶板控制、矿物的装载及运输等各个环节都会产生大量的矿尘。而不同矿井由于煤岩地质条件和物理性质存在差别，且采掘方法、作业方式、通风状况和机械化程度不尽相同，矿尘的生成量有很大的差异；即使在同一矿井中，产尘的多少也因地因时发生变化。一般来说，在现有防尘技术措施的条件下，采煤工作面产尘量占45%~80%，掘进工作面产尘量占20%~38%，锚喷作业点产尘量占10%~15%，运输通风巷道产尘量占5%~10%，其他作业点占2%~5%。各作业点随机械化程度的提高，矿尘的生成量也将增大。

一、粉尘的化学组成及二氧化硅含量

煤矿井下粉尘对人体危害程度往往取决于其化学组成及其在空气中的浓度。由于矿井采掘工作面的尘源较多，采掘工作面的地质情况也可能随着采掘的推进而发生变化，因此

采掘工作面空气中的粉尘多数情况下都是一种混合性粉尘，包括煤炭尘粒、岩石尘粒、油雾和炮烟，以及钻头或其他金属部件受磨损产生的金属微粒，木料或其他有机纤维物质的散落颗粒等，但主要组分还是煤、岩尘粒。

煤、岩尘粒的主要化学成分为砂岩、砾岩、游离二氧化硅等。其中，粉尘中的二氧化硅对人体的危害极大。二氧化硅不溶于酸和水，但溶于氢氟酸及热浓磷酸，能和熔融碱类起作用，是很常见的氧化物，在地壳中的含量占 60% ~ 70%。如果人长期吸入含二氧化硅的粉尘，可能导致硅肺病。

自然界中的二氧化硅几乎都是以游离状态存在的。广义的游离二氧化硅是岩石或矿物中没有与金属或金属化合物结合而呈游离型的二氧化硅。游离型二氧化硅按晶体结构分为结晶型、隐晶型和无定型 3 种。结晶型游离二氧化硅的硅氧四面体排列规则，如石英、鳞石英，以及存在于石英石、花岗岩或夹杂于其他矿物内的硅石；隐晶型游离二氧化硅的硅氧四面体排列不规则，主要有玛瑙、火石和石英玻璃；无定型游离二氧化硅主要存在于硅藻土、硅胶和蛋白石、石英熔炼产生的二氧化硅蒸汽、空气中凝结的气溶胶中。职业卫生领域的游离型二氧化硅特指结晶型游离二氧化硅。由于晶体结构不同，游离型二氧化硅致纤维化强弱顺序为结晶型>隐晶型>无定型。结晶型二氧化硅的致病能力也因游离二氧化硅含量的不同而有所差异，如石棉肺的症状在尘肺病中最重，而滑石肺症状则相对较轻。

粉尘中游离二氧化硅的含量不同，其所引起的硅肺病的表现形式通常也有区别。研究发现，由游离二氧化硅浓度在 70% 以上的粉尘所引起的硅肺病，病情发展较为快速；由游离二氧化硅浓度低于 10% 的粉尘所引起的硅肺病，病情发展较为缓慢。实际工作中往往通过测定悬浮粉尘中游离二氧化硅的含量，来反映粉尘对人体的危害程度。

至于煤矿井下粉尘，不同煤系的二氧化硅含量也有所差异。石英中游离二氧化硅含量几乎是 100%；砂岩和砂质页岩中游离二氧化硅的含量也比较高，达到 20% ~ 50%；石灰岩中游离二氧化硅的含量则不超过 10%。一般来说，煤矿围岩中游离二氧化硅的含量都在 10% 以上；多数煤中游离二氧化硅的含量在 5% 以下；而在一些贫煤或者劣质煤炭中，由于含矸量比较大，其游离二氧化硅的含量也可在 10% 以上；无烟煤中游离二氧化硅的含量一般要高于烟煤。岩尘、煤尘和岩块、煤块样品中的游离二氧化硅含量差别较大，原矿石中的游离二氧化硅含量比粉尘要高出 20% ~ 30%。一般矿岩中二氧化硅含量见表 1-1。

表 1-1 一般矿岩中二氧化硅含量 %

矿 岩	二氧化硅含量	矿 岩	二氧化硅含量
黄铜矿（含磁铁矿）	1 ~ 50	菱铁矿	0.5 ~ 30
斑铜矿	5 ~ 10	镜铁矿	1 ~ 10
辉铜矿	20 ~ 30	褐铁矿	1 ~ 5
黄铁矿	10 ~ 20	赤铁矿	0.5 ~ 10
花岗闪长岩	50 ~ 60	断层角闪岩	30 ~ 50
硅化灰岩	20 ~ 30	燧石条带灰岩	50 ~ 65
含铜铅锌多种矿物	20 ~ 30	花岗岩	60 ~ 75
方铅矿	0.5 ~ 15	石英岩	> 95

表 1-1 (续)

%

矿 岩	二氧化硅含量	矿 岩	二氧化硅含量
铅锌矿	5 ~ 15	燧石石灰岩	50 ~ 60
闪锌矿	1 ~ 10	石英砂岩	80 ~ 90
石英脉 (含黑钨矿)	90 ~ 95	硬砂岩	10 ~ 15
钨、铜矿	70 ~ 90	硬质板岩	50 ~ 60
钨锰铁矿	50 ~ 70	页岩 (含硅石)	10 ~ 20
锡矿 (在石英脉中)	80 ~ 90	次生石英岩	> 90
辉钼矿	3 ~ 90	小白石英岩	80 ~ 90
黑云母花岗岩	50 ~ 60	混合片麻岩	50 ~ 70
石英斑岩	50 ~ 70	闪长岩	40 ~ 50
千枚岩	30 ~ 50	辉岩	30 ~ 40
辉锡矿	5 ~ 10	硅卡岩	15 ~ 25
长石英	50 ~ 60	云英岩	75 ~ 80
磁铁矿	0.5 ~ 30		

二、粉尘的电性质

1. 粉尘荷电性

空气中的粉尘一般也都带有电荷，尘粒所带电荷的来源往往比较多。在进行机械凿岩或者采煤时，高速运转的钻头、截齿与煤岩的摩擦会使产生的粉尘表面荷上电荷；悬浮在空气中的粉尘颗粒也可直接吸附空气中的带离子而带上电荷。通常情况下，粉尘所带有的正电荷和负电荷大致相当。因此，在空气中的粉尘整体还是呈现电中性。粉尘粒子的荷电量一般取决于尘粒颗粒的大小、质量、物料的化学成分以及与其接触使之带电的物质成分。同时，粉尘颗粒的荷电量还会受到环境湿度和温度的影响（湿度越高，其荷电量越低；温度越高，其荷电量越高）。在干燥空气中，粉尘颗粒表面的最大荷电量大约为 $2.7 \times 10^9 \text{ C/cm}^2$ 。一般情况下，非金属粉尘和酸性氧化物粉尘，如二氧化硅、铝矾土粉尘，通常带有正极性电荷；金属粉尘或碱性氧化物粉尘，如石灰石尘粒，通常带有负极性电荷。研究发现，呼吸性粉尘（粒径小于 $5 \mu\text{m}$ 的粉尘）一般带负电荷，较大颗粒的粉尘往往带正电荷或者呈电中性。此外，尘粒荷电还与作业方式关系密切。不同作业方式产生的带正负电荷的粉尘粒子的百分比见表 1-2。

粉尘的荷电特性会对粉尘在空气中的稳定性产生一定的影响。同性电荷粉尘粒子之间

表 1-2 不同作业方式产生的带正负电荷的粉尘粒子的百分比

%

作业方式	带正电荷粒子	带负电荷粒子	不带电粒子
干式凿岩	49.8	44.0	6.2
湿式凿岩	46.7	43.0	10.3
爆破	34.5	50.6	14.9

由于存在相互排斥力的作用，尘粒在空气中的相对稳定性较高，增加粉尘悬浮性；异性电荷粉尘粒子之间由于存在相互吸引力作用，粒子间将结合黏附，导致粉尘颗粒尺寸增加，增加了粉尘颗粒的沉降性，因此尘粒在空气中的稳定性将降低。研究发现，煤矿井下带正电荷和带负电荷的尘粒通常是并存的，带有异种电荷的尘粒之间相互吸引发生凝聚，可使粉尘更加易于沉降。

粉尘的荷电特性还会影响粉尘被人体吸收后在体内的滞留量。与非荷电性粉尘相比，在相同的条件下，荷电粉尘比较易沉积在人体的支气管和肺泡管中。有关数据显示，荷电性粉尘在人体肺部的滞留量可高达 70% ~ 74%，而非荷电性粉尘通常只有 10% ~ 16%。同时，粉尘的荷电量大小也会对人体细胞的吞噬作用产生负面的影响，从而增加粉尘对人体的危害。

2. 粉尘比电阻

粉尘的电性质对于电除尘方面的研究有着十分重要的意义，在一些地面环境的除尘技术中，利用电性质来捕捉和吸附粉尘越来越受到大家的关注。为了达到更好的除尘效果，一般需要利用一些技术手段对粉尘进行荷电。通常粉尘的导电性用比电阻 λ 表示，其计算公式为

$$\lambda = \frac{U}{I\delta} \quad (1-1)$$

式中 λ ——比电阻， $\Omega \cdot \text{m}$ ；

U ——通过粉尘层的电压，V；

I ——通过粉尘层的电流密度，A/cm；

δ ——粉尘层的厚度，cm。

粉尘的比电阻大小通常用圆板电极法测出，即在两块圆板电极之间堆积上粉尘层，在两电极板上加上直流电压。通过测定电压和电流值的大小，根据式（1-1）计算出粉尘的比电阻值。比电阻是评定粉尘导电性的一个重要指标，适宜于静电除尘的取值范围一般为 $10^4 \sim 10^{11} \Omega \cdot \text{m}$ 。

三、粉尘的密度

粉尘的密度是指单位体积内粉尘的质量，单位为 kg/m^3 或 g/cm^3 ，分为体积密度、真密度、假密度、堆积密度。

（1）粉尘的体积密度指包括内闭孔和外开孔体积在内的单位体积内尘粒的质量。

（2）粉尘的真密度指不包括尘粒之间的间隙及尘粒本身的微孔在内的单位体积尘粒质量。当表面光滑、构造密实的条件下，粉尘的物质密度才与其真密度相同。粉尘的真密度可用下式来表示：

$$\rho = \frac{\text{粉尘质量}}{\text{粉尘体积}} \quad (1-2)$$

实际测量过程中常用液体置换法将粉尘颗粒之间的孔隙和外开孔孔隙的空气置换出来以获得粉尘的真实密度值。

（3）粉尘的假密度是指包括内闭孔体积在内的单位体积尘粒的质量。一般很难测出尘粒内闭孔体积，而且在机械破碎过程中产生的粉尘一般没有内闭孔，只有在化学过程中

形成的某些粉尘才存在内闭孔, 这种粉尘的真密度比假密度值大。

(4) 粉尘的堆积密度指单位体积内松散堆积的粉尘质量, 具体分为振实堆积密度和松散堆积密度。振实堆积密度是指通过振动使粉尘或粉料达到最大填充率时的单位体积内粉尘或粉料的质量; 松散堆积密度是指把捕集的粉尘或粉料自由填充在某一容器中, 在刚填充完后未经振实状态下所测得的其单位体积的质量。

固体磨碎而形成的粉尘密度与母料的密度大致相当, 但如果表面经过了氧化等作用, 那么其密度很可能会发生相应的变化。冷凝作用而形成的粉尘粒子, 由于包含有空气, 这些凝聚而成的集合体的密度通常要小于构成集合体的单个粉尘颗粒的密度。比如, 粉煤燃烧时所产生的飞尘粒子中含有熔融的空心球, 其密度就会大大低于仅仅根据物料性质计算所得的密度。研究粉尘粒子的实际密度, 有利于解决一些粉尘粒子的扩散和除尘器的设计等问题。

四、粉尘的比表面积

粉尘的比表面积是指单位体积(质量)粉尘的表面积。粉尘的比表面积往往都较大, 特别是被破碎成细微颗粒的物料, 其总表面积将大大增加。假设尘粒为一与其具有同样体积的球形粒子, 则单位质量粉尘比表面积 S_w 与粒径 d_p 的关系为

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

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 ——粉尘的粒径, m 。

由式(1-3)可以看出, 粉尘的比表面积与其粒径成反比。

粉尘比表面积的增加会增大其表面能和表面活性。氧化、溶解、催化、蒸发和吸附等效应都会因粉尘粒子比表面积的增大而加速。粉尘的爆炸危险性以及毒性随其粒径减小而增加, 其原因也与其比表面积增加有关。所以, 在研究粉尘的燃烧、湿润、凝聚和附着等性能时, 必须要考虑它的比表面积。在粉尘的表面吸附能力增强以后, 粉尘会更加容易吸附空气, 在尘粒的表面形成气膜, 降低尘粒间的凝聚力, 从而影响尘粒的湿润性, 这样就更难把粉尘粒子从空气中分离出来。

五、粉尘的黏附性

粉尘粒子附着在固体物质表面上, 或者粉尘粒子间彼此互相附着的现象称为黏附, 后者也称为自黏。尘粒相互凝聚, 以及粉尘在巷道表面的堆积都与粉尘的黏附性有关。通常把若干尘粒相互结合形成新的大尘粒的现象叫作凝聚, 把尘粒和其他物质相结合的现象叫作附着。

尘粒的凝聚和附着是依靠分子间相互吸引的力作用而产生的, 通常在粒子间的距离相当近时发生。在尘粒间距离比较大时, 通常需要借助外力的作用才促使尘粒间发生碰撞、接触, 进而相互凝聚和附着。这些外力作用常见的有布朗运动、静电力、超声波等。

凝聚性对粉尘尘粒的质量、形状、粒径和结构等特征都有显著的影响。粉尘粒子间的

相对运动和碰撞会导致尘粒凝聚。布朗运动，或者是布朗运动加上流动力、静电力，或重力等其他力的作用，也能够促使粉尘粒子相互靠近接触而凝聚。一般来说，对于粒径小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的粉尘粒子，布朗运动是促使它们相互接触的主要原因。由于凝聚作用减少了粉尘粒子浓度以及最小粉尘粒子的相对数量，所以随着时间的推移，尘粒的凝聚作用会逐渐减弱。另外，一般情况下粉尘粒子形状对凝聚的作用影响非常小，但若发生凝聚的尘粒形状差异越大，凝聚系数 K 则越大。根据福克斯的理论，轴比值为 $10:1$ 的椭圆体状与球形粒子间的凝聚系数 K 的值要比球形粒子间相互凝聚的 K 值大 1.1 倍左右，而扁形粒子则要大 1.04 倍左右。

克服黏附现象所需要的力（力的方向垂直作用于粉尘粒子的重心）称为黏附力。在气态介质中常见的黏附力有分子力、静电力、毛细力。

(1) 分子力。分子力是分子间的相互作用力，又称范德华力，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，分子间主要表现为吸引力；而在几个分子直径的距离之内，分子间作用主要表现为排斥力。此外，粉尘所接触的物体本身的特性、粉尘粒子粒度，以及实际相互接触的面积都可以改变粒子间的分子力，从而影响黏附力的大小。

(2) 静电力。静电荷能使粉尘粒子的黏附强度显著增加，但如果相邻的两尘粒表面间隙内有水分，则会降低粉尘比电阻，削弱静电力的增黏效果，甚至完全消除。

(3) 毛细力。毛细力是粉尘粒子和物体表面之间的空隙内存在弯液面时产生的力。实验发现，当空气的相对湿度超过 65% 时就会开始出现毛细冷凝现象，此时黏附力将增加。液体的表面张力越大，粉尘粒子的粒度越粗，相互接触表面的润湿性越好，则产生粉尘粒子黏附的毛细力就越大。实际上，毛细力和静电力是不能同时作用的。

六、粉尘的湿润性

粉尘的湿润性是指粉尘与液体亲和的能力。湿润性除了与粉尘的种类、形状、粒径、荷电性、表面粗糙度及含水率有关，还与本身的组分、温度、生成条件，以及尘粒与液体之间的黏附力和接触方式有关。当尘粒与液体接触时，接触面能够扩大而且相互附着，则能湿润；反之，接触面趋于缩小而且不能附着，则不能湿润。

根据粉尘能够被水湿润的程度可将粉尘分为亲水性粉尘和憎水性粉尘。亲水性粉尘（如锅炉飞灰、石英砂等）容易被水湿润，与水接触后会发生凝聚、增重现象，有利于把粉尘从气流中分离；憎水性粉尘（如炭黑、石墨等）很难被水湿润。

影响粉尘湿润性的因素包括粉尘和液体两方面。

(1) 粉尘方面。粉尘的湿润性与粉尘的种类、形状、大小有关。不同种类粉尘对同一液体的亲和能力是不同的，如水对锅炉飞灰的亲合力要比对滑石粉强；对于同一液体，球形颗粒的粉尘湿润性比不规则尘粒要差；对于同一种类粉尘，粉尘粒径越小，亲水能力越差，如石英的亲水性好，但粉碎成粉末后的亲水能力却大大降低。

(2) 液体方面。液体对固体表面的润湿程度取决于液体对固体表面作用力的大小。水滴内部与水滴表面间的分子引力为水的表面张力，表面张力是使液体表面积缩小的力。当水的表面张力小于水与固体间的分子引力时，固体容易被湿润；反之，固体则不易被湿润。而对同一矿尘尘粒来说，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。表面张力越小的液体，对尘粒的湿润越容易，如酒精、煤油的表面张力小，对粉尘的润湿比洁净水要好。

一般可用接触角 θ 来作为评定粉尘湿润性的指标（图 1-1），它是指从接触点画出的固液交界面与气液交界面切线间的夹角。接触角 θ 的变化为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。据此可以对粉尘进行分类。以水为例，浸润性好的粉尘， $\theta \leq 60^\circ$ ，如石英的 θ 为 $0^\circ \sim 4^\circ$ ，方解石的 θ 为 20° ，云母的 θ 为 0° ，黄铁矿的 θ 为 30° ，石灰石粉、磨细石英粉的 θ 为 60° 。浸润性差的粉尘， $60^\circ < \theta < 85^\circ$ ，如滑石粉的 θ 为 70° 。疏水性粉尘， $90^\circ < \theta < 180^\circ$ ，如石蜡粉的 θ 为 105° 。

粉尘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 min，测出此时的湿润高度 L_{20} ，于是湿润速度为

$$U_{20} = \frac{L_{20}}{20} \tag{1-4}$$

按湿润速度 U_{20} 作为评定粉尘湿润性的指标，可将粉尘分为 4 类（表 1-3）。

表 1-3 粉尘对水的湿润性分类

粉尘类型	I	II	III	IV
湿润性	绝对憎水	憎水	中等亲水	强亲水
$U_{20}/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	< 0.5	$0.5 \sim 2.5$	$2.5 \sim 3.5$	> 8.0
粉尘示例	石蜡、沥青	石墨、煤	石英	锅炉飞灰

颗粒物湿润性还与固液相对运动速度有关。例如， $1\ \mu\text{m}$ 以下尘粒很难被水湿润，主要源于细微尘粒和水滴表面均附有一层气膜，只有在两者具有较高相对速度的情况下，水滴才能冲破气膜将尘粒湿润。此外，粉尘的湿润性随着压力增大而增大，随着温度升高而下降。

粉尘的湿润性是选择湿式除尘器的重要依据之一，亲水性粉尘被液体湿润后会发生凝聚，有利于粉尘从空气中分离。亲水性粉尘可以选用湿式除尘器，而憎水性粉尘则不宜采用湿式除尘器。但在亲水性粉尘中有的粉尘属于水硬性粉尘（即遇水硬结），如水泥、石灰熟料、白云石砂等的尘粒，就不能采用湿式除尘器除尘。另外，在水中加入某些湿润剂（如皂角素等），则可以减少水的表面张力，提高水对粉尘的湿润程度，从而达到提高除尘效率的目的。

七、粉尘的溶解度

粉尘的溶解性对人体的危害因粉尘对肌体作用的性质而异。一般来说，粉尘对人体危害主要分为机械性刺激作用和化学毒性作用。

当粉尘对人体危害主要是机械性刺激作用（如形状不规则且硬度较大颗粒易造成呼吸道黏膜损伤和肺泡机械损伤）时，粉尘粒子溶解得越快，对人体危害越小。当粉尘对人体呈现化学毒作用时，粉尘溶解性越强，其危害越大。有毒的脂溶性和水溶性粉尘，通

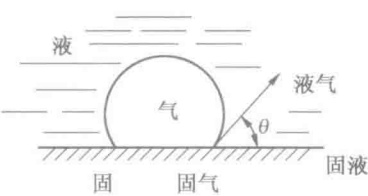


图 1-1 湿润接触角

过湿润的上呼吸道能迅速溶解而被吸收，还可通过人体表皮的汗腺、皮脂腺、毛囊进入人体而产生中毒反应。

当粉尘为无毒粉尘（如面粉、糖）时，其溶解度越高，对人体的不良作用越低。相反，有些难溶性粉尘（如煤尘、水泥尘）在呼吸道不能溶解，往往进入肺泡沉积，经过长期持续作用，能引起气管炎和肺组织纤维化（尘肺）。

另外，如果吸入的粉尘溶解引起 pH 值范围改变（正常情况下呼吸道黏膜的 pH 值为 6.8~7.4），会引起呼吸道黏液纤毛上皮系统排除功能障碍，导致粉尘阻留。

八、粉尘的光学特性

光线射到尘粒上会出现两种现象：一种现象，尘粒接收到的能量可被尘粒以相同的波长再辐射，该辐射具有全方位、各方向辐射强度不等的特点，该现象称为辐射；另一种现象，光线射到尘粒上的辐射能可转换为其他形式的能，如热能、化学能或不同波长的辐射，该现象称为吸收。

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

通过含有粉尘气流的光强减弱程度与粉尘的浓度、粒径、透明度和形状有关，但主要取决于粉尘粒子的粒径分布和浓度。

尘粒粒径与光波波长之间的长短关系直接影响尘粒对光的反射和折射作用。

1. 粒径为 0.6~0.7 μm 时粒子反射光的能力

对于粒径为 0.6~0.7 μm 的粒子，其反射光的能力可用下式来表示：

$$I = KS/d_p \quad (1-5)$$

$$S = \frac{\pi}{6} \rho_p d_p^3 n \quad (1-6)$$

式中 I ——反射光强度， mW/m^2 ；

K ——消光系数， m^2/kg ；

S ——单位体积内粉尘的质量浓度， kg/m^3 ；

n ——单位体积内尘粒的个数。

于是，将式（1-6）代入式（1-5）可写为

$$I = K' n d_p^2 \quad (1-7)$$

式中 K' ——与粉尘特性有关的物理常数。

从式（1-7）可知，尘粒对光线的反射能力受尘粒个数及尘粒粒径影响较大。

2. 粒径大于 1 μm 时粒子反射光的能力

当粒径大于 1 μm 时，由于直线反射而造成光线消失，光线损失与反射面面积呈正比关系。当粉尘的浓度相同时，光强的反射值随着粉尘粒径的增加而减少。

至于光线通过含尘介质的光强衰减规律，可分以下两种情况：

（1）对于尘粒粒径大小和光波波长接近的均匀细微的尘粒来说，其对光强的减弱程度可以用下式表示：

$$I = I_0 \exp\left(-Kn \frac{V^2}{\lambda^4}\right) \quad (1-8)$$

式中 I ——通过含尘介质的光强, mW/m^2 ;

I_0 ——初始光强, mW/m^2 ;

K ——消光系数, m^2/kg ;

n ——单位体积内尘粒的个数;

V ——尘粒体积, m^3 ;

λ ——照射的光波的波长, μm 。

从上式中可以看出, 光强在通过含有粉尘的介质时的减弱程度与照射光波波长的 4 次方成正比, 而与尘粒体积的平方 (即粒径的 6 次方) 成反比, 所以光强的衰减和粒径有密切的关系。

(2) 对于粒径大于光波波长的粉尘, 通过含尘介质的光强服从几何光学的平方定律, 即其正比于尘粒所遮挡住的横截面的面积。当尘粒的粒径大于 $1\ \mu\text{m}$ 时, 通过的光强和波长无关。

至于尘粒对光的吸收作用, 罗斯引入消光系数 (各种粒径尘粒对光的实际遮挡程度与按理论的几何光学平方定律计算的遮挡强度的比值) 来说明不同粒径范围的尘粒对光的吸收规律。通过均匀含尘的悬浊介质时的光强, 可按下式确定:

$$\ln \frac{I_0}{I} = KSL \quad (1-9)$$

式中 K ——消光系数 (吸收系数), 可用在光线中每千克粉尘的投影面 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, 取 $1\ \text{m}$;

I ——采样后通过滤膜的光通量, 取 $1\ \text{m}$ 。

根据罗斯提出的消光系数对 A 进行修正, 上式就可适用于各种粒径的粉尘。

九、粉尘的氧化性及爆炸性

当固体物料被破碎或研磨成粉料时总表面积大大增加, 例如, 每边长 $1\ \text{cm}$ 的立方体粉碎成每边长 $1\ \mu\text{m}$ 的小粒子后, 总表面积由 $6\ \text{cm}^2$ 增加到 $6\ \text{m}^2$ 。表面积增加后系统的自由表面能也相应增加, 从而增强了粉尘的化学活性, 特别是氧化产热的能力。某些在堆积状态下不易燃烧的可燃物 (如糖、面粉、煤粉等), 当它以粉末状悬浮于空气中时, 与空气中的氧充分接触, 在一定的温度和浓度下可能会发生爆炸。

粉尘的自然是由于粉尘氧化反应产生的热量不能及时散发, 从而使氧化反应自动加速所致。各种粉尘的自然温度相差很大。根据不同的自然温度可将可燃性粉尘分为两类: 第一类粉尘的自然温度高于环境温度, 因而只能在加热时才能引发自燃; 第二类粉尘的自然温度低于环境温度, 甚至在不加热时都可能自燃, 这种粉尘造成火灾的危险性最大。

在封闭空间内可燃性悬浮粉尘的燃烧会导致化学爆炸。引起可燃性粉尘爆炸必须具备两个条件: 一是可燃性粉尘的浓度在爆炸界限内; 二是存在能量足够且具有一定温度的火源。能引起爆炸的最低浓度称为爆炸下限, 最高浓度称为爆炸上限。可燃混合物的浓度低于爆炸下限或高于爆炸上限时, 均无爆炸危险。在实际生产中, 爆炸下限对防爆工作更有

意义。某些尘粒爆炸浓度的下限见表 1-4。

表 1-4 某些尘粒爆炸浓度的下限 g/m³

粉尘名称	爆炸浓度	粉尘名称	爆炸浓度	粉尘名称	爆炸浓度
铝粉末	58.0	玉米粉	12.6	硫黄	2.3
豌豆粉	25.2	亚麻皮屑	16.7	硫矿粉	13.9
木屑	65.0	硫的磨碎粉末	10.1	页岩粉	58.0
渣饼	20.2	奶粉	7.6	烟草末	68.0
樟脑	10.1	面粉	30.2	泥炭粉	10.1
煤粉	45 (30~70)	茶	2.5	棉花	25.2
松香	5.0	燕麦	30.2	茶叶末	32.8
饲料粉末	7.6	麦糠	10.1	一级硬橡胶尘末	7.6
咖啡	42.8	沥青	15.0	谷仓尘末	227.0
染料	270.0	甜菜糖	8.9	电焊尘	30.0

十、粉尘的电化学特性

粉尘的电化学特性主要是指矿井粉尘的溶解度、电导率、表面电性、降解和残留、防腐等。以离子键为主的粉尘水溶液常有多级电离，混合键型水溶液常伴有水解反应。粉尘水溶液 pH - 电导率的测定值是其溶解、电离、水解离子综合作用的结果。矿物粉尘在水介质中的 pH - 电导率比值与其粒度成正比关系。

矿物的溶解是一个包含微粒、胶粒、络合离子和离子化的复杂过程，可以用水溶液电导率和 pH 值的大小及其变化来表征矿物在水中的溶解性能。矿物的溶解速率较慢，初始的溶解速率较大。矿物的溶解速率受粒度、表面活性、温度、浓度差、时间等因素影响，这是不同矿物的溶解性能不同的内在原因。矿物粉尘 pH - 电导率是矿物表面的特征值，可以反映其溶解度、化学活性、表面电性、降解和残留、防腐等方面的特征。

在矿物粉尘与水组成的多相体系中，大部分矿物呈颗粒形式，一部分较细的颗粒呈胶体形式，溶解的部分大多数电离后呈离子状态，少部分呈络合离子状态。

电导率的大小主要与溶液中带电粒子的多少、种类、电荷大小以及溶液的温度等因素有关。物质溶液的电导率和 pH 值可反映其在水相体系中的化学活性和水质特性。矿尘在水溶液中的 pH 值偏离中性点越远，其在溶液中离子浓度也越大，反映出水相化学活性越强。电导率也是如此，由矿尘自身溶解电离和水解的离子引起的电导率变化越大，其化学活性也越大。另外，水中矿物迁移、沉淀、反应、产物以及地表水矿物质含量、水网水质监测均以矿物的 pH - 电导率为重要研究数据。对于表面组成与结构简单的矿尘，可根据其 pH - 电导率列出其电势的大小。开放体系中由于矿尘溶解、电离、水解平衡的破坏和转移，其电势的性质和绝对值会发生变化。

十一、粉尘的可见性

在普通的日光下，特别是在强烈的光线下，当尘粒与背景的颜色不同时，可以看见