

煤矿采煤作业粉尘检测及喷雾降尘技术研究进展

王甜^{1,2} 刘锡明¹

1. 黑龙江科技大学安全工程学院 黑龙江哈尔滨 150022

2. 哈尔滨石油学院机械工程学院 黑龙江哈尔滨 150028

摘要: 本文以煤层润湿性研究为主线, 针对煤矿采煤作业粉尘检测及喷雾降尘技术研究系统回顾。首先, 进行了粉尘检测技术介绍与整理; 然后分析粉尘基本性质及运动特性特性及其影响因素; 最后指出了喷雾降尘技术仍有待研究的方向。该工作对深入了解煤的润湿性能研究有一定的借鉴和指导意义。

关键词: 煤尘; 粉尘检测; 润湿特性; 喷雾降尘

Progress in dust detection and spray dust fall technology in coal mining operations

Tian Wang^{1,2}, Ximing Liu¹

1. School of Safety Engineering, Heilongjiang University of Science of Technology, Harbin 150022, China

2. School of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Petroleum, Harbin 150028, China

Abstract: Based on the research of coal seam wettability, this paper focused on the research on dust detection and spray dust control technology in coal mining operations. Firstly, the dust detection technology is sorted out and introduced. Then, the basic properties, motion characteristics and influencing factors of dust are analyzed. Finally, the future directions were presented related to the direction of spray dust control technology. This work has a certain reference and guiding significance for the wettability of coal.

Keywords: Coal dust; Dust detection; Wetting characteristics; Spray dust suppression

引言:

在影响煤矿安全生产的因素中, 煤尘较为关键。而且, 煤尘的防治工作事关煤矿安全生产和井下工人的人身安全。在国家产品安全政策相关内容中, 明确规定了减少粉尘危害、预防煤尘爆炸事故的重要作用。一方面, 可确保我国矿工生命健康, 另一方面, 这几项工作也是保障国家经济快速发展的重要因素。因此, 怎样使用有效的防尘措施, 减少开采现场的煤尘含量对保障我国煤矿工人的身体健康来说非常重要。目前, 粉尘的润湿性是影响喷雾降尘效果的重要因素之一, 喷雾降尘仍是煤矿最常用的防尘手段。但中国65%以上的煤层煤尘较难润湿, 鉴于此, 为减少开采现场的煤尘量, 确保工人的身体健康, 避免发生安全事故。而且, 为保障煤矿开采

效率, 有必要加强煤尘检测技术及喷雾降尘技术的研究。

一、粉尘检测技术

应通过控制工作场所的粉尘浓度、井巷粉尘产生量来确保工人的身体健康。煤矿粉尘的测定主要包括粉尘质量浓度、粉尘粒径和粉尘中游离SiO₂含量。其中, 粉尘浓度包括两种, 分别为总粉尘浓度和呼吸性粉尘浓度。目前, 粉尘采样器、直读式测尘仪和粉尘质量浓度传感器是常见粉尘质量浓度监测仪。

1. 粉尘基本性质及运动特性

(1) 粉尘浓度

粉尘浓度具体是指单位体积空气中的粉尘质量, 单位为mg/m³, 是判断综掘面环境恶劣与否的重要指标, 其标准如表1所示。

当前, 很多发达国家均将TWA视为核心的卫生标准以评估开采现场的粉尘危害程度。从技术上讲, 可使用长时间、低流量的采样器用于轮班期间的连续和多次

项目名称: 黑龙江省科学自然基金项目, 项目号: JJ2022LH1354.

采样。我国关于作业场所中粉尘容许浓度的相关规定见表2。

表1 粉尘浓度标准表^[9]

粉尘种类	游离二氧化硅含量/ (%)	呼吸性粉尘浓度/ (mg/m ³)
煤尘	≤5	5.0
	0.05~1000	2.5
岩尘	0.01~10	1.0
	0.2~1000	0.5
	0.1~1000	0.2
水泥尘	0.05~1000	1.5

表2 我国作业场所中粉尘浓度许用标准
(GBZ2.1-2007)

粉尘性质	PC-TWA	
	总粉尘/ (mg/m ³)	呼吸性尘/ (mg/m ³)
矽尘 (含10%~50%游离SiO ₂ 的粉尘)	1.0	0.7
矽尘 (含10%~80%游离SiO ₂ 的粉尘)	0.7	0.3
矽尘 (含80%以上游离SiO ₂ 的粉尘)	0.5	0.2
煤尘 (含<10%游离SiO ₂ 的粉尘)	4.0	2.5
玻璃钢粉尘	3.0	-
聚丙烯粉尘	5.0	-

备注：PC-TWA为时间加权平均容许浓度。

(2) 粉尘的分散度

粉尘的分散度表示不同粒径的粉尘颗粒所占粉尘总量。粉尘分散程度越大，粉尘粒径越小的占比越大。

粉尘的分散度越低，表明粉尘粒径越大的占比越高。大多数小巷道路的粉尘颗粒小于10微米，这类粉尘通常在空气中停留时间较长，而且小于2μm的粉尘很容易被人体吸收。

(3) 粉尘的润湿性

粉尘的润湿性取决于液体的表面张力和粉尘的大小和形状。粉尘的润湿性是指灰尘和液体颗粒碰撞或粘在一起的程度，用于表示二者之间附着的难易程度，它是衡量液体与固体间亲和力的重要标准。粉尘的润湿性对喷雾除尘效果起着关键作用。润湿性越好，粉尘就越容易被喷雾吸附。液体的表面张力越低，越容易与粉尘结合，因此可以通过在喷雾水中加入表面活性剂来提高喷雾除尘效果，从而提高除尘效率。

(4) 粉尘的扩散性

粉尘的扩散取决于内部和外部因素。内部因素主要与煤炭质量有关。切割后的煤质粗或切煤时，粉尘颗粒小，分散速度快；如果切割后的煤质较软，则粉尘颗粒会比较大，其分散度会低。外部因素主要取决于风速和湍流度等因素。

2. 粉尘运移模型研究

(1) 离散元素法理论

以前，连续体力学的宏观理论被用来分析散体过程，但“分散”和“动态”的性质往往与理论中的均匀性和连续性概念重叠，导致理论与实践分离。随着现代力学、数值方法和计算机技术的飞速发展，为了解决离散力学领域的问题，产生了一种新的数值方法——离散元素法。离散元素法是求解和分析复杂离散系统的行为规律和力学性质的一种新的数值方法，其物理意义和数学概念与求解复杂连续系统的有限元法和边界元法相似，但是，模型和处理方法不同。它为微观力学、散体力学问题的数值求解提供了手段。

离散元素法由Dr. Perer Kundal于1971年在伦敦大学帝国理工学院攻读博士学位时提出的。威廉姆斯和霍金详细讨论了离散元素法的理论基础。他们将离散元素法视为一般有限元法，并对离散元素法的概念作了一般性分析。1985年，石根华博士在加州大学伯克利分校创建了一个新的数值模型来分析系统的静态和动态特性，并提出了在连续变形分析方法中求解离散元素法的思想。1992年，日本化械工程学会副理事长Yutaka Tsuji提出了基于Kandal模型的基于粒子的离散元素法的模拟模型。Williams在研究了对离散元素法算法的总结后，将离散元素法视为解决接触问题的关键。

(2) 气固两相流理论

气清两相流的数值模拟涉及模拟气相、颗粒相和两相之间的相互作用。根据两种介质处理方式，气清两相流可分为双流体模型颗粒轨道模型：双流体模型，别名为拟流体模型。在该模型下，流体作为连续介质，粒子作为拟流体，其中粒子和流体在空间中连续分布并且可以碰撞。而且，颗粒轨道模型综合考虑了欧拉坐标系中流体相的运动和拉格朗日坐标系中的离散粒子运动。也就是说，该模型将流体视为连续介质，将颗粒视为离散系统。

3. 粉尘运移沉降实验、数值模拟研究

1950年以后，欧美国家先后研究了风速与粉尘浓度、粒度分布与沉降条件、风速与颗粒浓度的关系，推动了矿井防尘技术的发展。

于1960年, S.L.SOO^[36]将含尘气流描述为相互联系的“固、气两相流”, 并建立了两相流模型。此外, GUO等研究人员建立了基于固气两相流原理的粉尘运动数学模型。根据某综采场地的具体特点和实测数据, 阐述了综采场地产生的粉尘的运动规律。Seaman等人使用LES大涡方法模拟气体运动过程, 并使用Euler-Lagrange方法数值模拟灰尘颗粒的空间分布。另外, Tan比较了综采工作面粉尘质量浓度分布与实测粉尘切割规律, 以及影响综采工作面粉尘质量浓度的一些重要因素, 特别是风速、采煤滚筒速度、刮板输送机速度和煤壁表面情况。针对综采工作面不同尘源的特点, 建立了综采风积尘颗粒DPM耦合流动数学模型, 并用Euler-Lagrange方法描述了空气中粉尘的湍流扩散。1999年, 当地研究人员徐景德、周新全^[38-39]指出, 根据分布情况, 在路段中部、道路一侧、道路中间等部分建立了实验模型, 用来测试道路粉尘运动和浓度分布情况。通过试验可以得到道路附近的粉尘分布情况, 其中风速和尘源这两个因素是分析粉尘分布情况的重要因素。2002年, 来自美国的Jun Wang对平均粒径约为 $60\mu\text{m}$ 的煤尘进行了气固两相流动实验, 发现边界层中的粉尘流动速度高于气体速度, 并且两者之间存在动量转移。21世纪以来, 周刚和程卫民根据三大守恒定律建立了风流中粉尘的运动和扩散方程, 但该模型尚未在实际领域得到求解或验证, 因此需要更多的实验来检验其合理性和科学性。刘亚利通过建立粉尘迁移的数学模型, 在此模型的基础上分析了粉尘在静止空气中的沉降情况、粉尘的摩擦系数和电阻率、粉尘在风流中的运动以及粉尘碰撞情况。

二、喷雾降尘技术研究进展

喷雾降尘是指在喷嘴的旋转和冲击下, 将水流喷射成细水滴。喷雾除尘效率在很大程度上取决于液滴和粉尘颗粒的相对速度以及液滴粒子的大小。在没有受到外界干扰的情况下, 相对速度和液滴粒子大小呈负相关, 与除尘效率呈正相关。因为液滴很小, 在暴露的情况下很容易受多种因素影响蒸发, 也容易受到风流干扰。针对不同喷尘部位提供不同的喷雾除尘液滴粒径, 采取有效措施抑制外界风流干扰对于提高降尘效率至关重要。

目前常用的喷雾降尘技术有以下两方面:

1. 采掘机组喷雾主要包括内外喷雾降尘、径向雾幕降尘、高压喷雾负压降尘、含尘气流控制降尘。
2. 喷雾包括安装在支架前梁、机架前后和放顶煤口的喷嘴, 以在提升、降低和移动机架时实现同时喷雾和降尘。

1. 喷雾降尘实验研究

(1) 实验装置

喷雾降尘装置利用高压泵输出不同的工作压力将水从喷嘴喷出, 通过高速液滴颗粒分析仪分析人工雾场, 通过使用可调速机模拟道路的气流情况, 借助粉尘扩散器模拟道路环境的各个细节, 然后统计喷雾前后的粉尘浓度。之后, 根据结果分析出在不同喷雾压力下的喷雾效果。

(2) 煤尘润湿特性对实验结果的影响因素

煤的灰分是影响煤尘润湿性的最重要因素, 与煤尘的接触角呈良好的负相关关系。煤尘灰分含量越高, 则表明煤所含的矿物质越多, 相应地, 煤尘润湿性越好。但是, 煤尘的润湿性越好, 煤中所含的水分就越高。此外, 煤的孔径越大, 水就越容易进入煤体, 致使接触角变小, 煤尘的润湿性就越好。煤的比表面积于煤尘地润湿性呈正相关, 研究认为是由于随着煤比面积的增大, 煤的微观结构越发复杂, 也就使煤尘润湿性越高。或者可能是因为煤的比面积小, 由于中孔和大孔会因煤尘含水量低而截留空气并产生压力, 致使煤尘润湿性变差。此外, 煤的稳定率低, 表层煤体主要受成分影响, 煤尘可混入较多的矿物质, 可达到较好的润湿性。除此之外, 煤羟基是最重要的亲水基团, 羟基含量越高, 煤粉的润湿性越好; 固体碳产率高, 煤中有机物含量高, 煤中有机物具有疏水性, 可导致润湿性差。

研究结果显示, 喷雾降尘效率与煤尘润湿性能紧密相连。一般来说, 煤尘的润湿性能越好, 喷雾降尘能力就越大。但是, 由于疏水性煤尘难以与雾滴混合, 就很难达到理想效果, 但可以通过增大雾滴运动速度和浓度来达到目的。

三、结语

近年来, 我国煤矿机械化、自动化、智能化开采技术在不断优化, 但开采环境却扬尘污染日益严重, 这极大地影响了煤矿的生产效率和工人的身体健康。国内外科研人员针对矿山的粉尘防治积极开展矿山各项研究, 取得了多项成果。但我国煤矿不同开采区在采煤条件、工作方法、技术装备水平、综合管理水平等方面存在较大差异, 所以, 防尘技术还有很多需要改进的地方。

1. 加强对粉尘逸散机理的基础研究, 由于地下输煤巷道空气温度高、湿度大, 可以考虑分析地下输煤巷道的温湿度以研究粉尘在风流中的扩散规律, 以及影响其扩散和运移的因素。

2. 为实现高效抑尘降尘, 针对外喷雾水流量喷嘴易

生锈堵塞等问题研究预荷电喷雾、磁化水喷雾、声波雾化喷雾等新技术。

3.增强水溶液和粉尘(尤其是呼吸性粉尘)间的湿润性能,研制表面活性剂水溶液理化性能方面的协同增效作用,提供新思路优化降尘方法。

4.基于局部雾化控尘原理,依据不同尘源粉尘理化特性与污染溯源结果,研发针对采煤—移架区域空间立体化雾化控除尘技术装备,实现综采面粉尘高效控除,切实保障矿工身心健康。

参考文献:

[1]李斌.神东矿区超远距离掘进工作面粉尘防治技

术[J].煤炭科学技术,2021,49(S2).129-133.

[2]尹中凯,周健,牛红杰等.高地温矿井职业危害防控体系研究[J].煤矿安全,019,50(8):249-252.

[3]陈舒玲.浅析尘肺病发病原因及其防治举措[J].大家健康(学术版),2013(24)36.

[4]程卫民,刘伟,聂文等.煤矿采掘工作面粉尘防治技术及其发展趋势[J].山东科技大学学报,2010,29(4):77-81.

[5]程卫民,周刚等.我国煤矿粉尘防治技术与技术20年研究进展及展望[J].煤炭科学技术,2020,48(2):1-20.