

基于水介质的煤尘抑制技术应用

李 鹏¹,王成龙²,张漠鑫²

(1. 国能神东煤炭洗选中心, 陕西 榆林 719315; 2. 中国煤炭科工集团 信息技术有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要:长期接触煤尘会导致各种肺部疾病如尘肺病(CWP), 威胁地下矿井矿工的健康。溶液喷淋和煤层注水是广泛应用于降低地下开采煤尘浓度的有效方法。综述了基于水介质的煤尘控制技术, 并分析了水介质的粉尘控制技术效果的影响因素。同时, 讨论了基于水介质的煤尘抑制技术的挑战和未来研究方向, 除提高溶液润湿性外, 建议研究粉尘颗粒与液滴之间的凝固机理。此外, 应进一步研究喷淋场的形成方法和产尘区附近液滴的空间分布, 对提高除尘喷雾的液滴数密度具有重要意义。

关键词:润湿性; 喷雾; 煤尘性质; 除尘效率

中图分类号: TK229

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2023)S2-0767-05

Application of coal dust suppression technology based on aqueous media

LI Peng¹, WANG Chenglong², ZHANG Moxin²

(1. CHN Energy Shendong Coal Separating Center, Yulin 719315, China; 2. Information Technology Co., Ltd., China Coal Technology and Engineering Group, Xi'an 710054, China)

Abstract: Long term exposure to coal dust will lead to various lung diseases, such as pneumoconiosis (CWP), threatening the health of underground miners. Solution spraying and coal seam water injection are widely used to reduce the concentration of coal dust in underground mining. Coal dust control technology based on water medium was reviewed. The influencing factors of the dust control technology effect of water medium were analyzed. At the same time, the challenges and future research directions were discussed. In addition to improving the wettability of solution, it is suggested to study the solidification mechanism between dust particles and droplets. In addition, the formation method of spray field and the spatial distribution of droplets near the dust producing area should be further studied, which is of great significance for improving the droplet number density of dust removal spray.

Key words: wettability; spray; coal dust properties; dust removal efficiency

0 引 言

煤炭作为一种不可再生资源, 仍占世界一次能源消耗的30%以上。由于机械化煤矿开采技术广泛应用地下开采, 煤尘浓度急剧增加, 对矿工健康造成威胁。截至2020年底, 我国已报告的职业性尘肺病病例超80万例, 其中60%以上来自煤炭行业。此外, 随煤尘浓度增加, 加剧了地下煤矿煤尘爆炸的危险程度。因此, 煤尘一直是煤炭行业中严重影响企业安全生产的紧迫问题^[1-2]。

为抑制煤尘, 目前研究了许多基于水介质的技术, 如煤层注水和水喷雾。煤层注水具有预润湿煤体的优点, 但我国大多数煤层的渗透性较低, 注水难

以达到预期效果。水喷雾因其工艺简单、成本低而得到广泛应用, 但由于煤尘疏水性强、水表面张力高, 效率低于50%^[3]。因此, 在水中添加表面活性剂可提高溶液的润湿性, 表面活性剂在溶液表面和空气之间会形成隔离层。此外, 在表面活性剂的特点的基础上研究了抑尘剂^[4]。目前泡沫防尘、保湿剂喷雾除尘、保水、防尘剂等除尘技术在矿山除尘防治中发挥一定作用, 但在除尘过程、方法、成本和效率等方面仍存在不足^[5]。现阶段, 大部分地下煤矿采用基于水介质的单一除尘方法来改善工作环境, 其除尘效果难以实现^[6]。

介绍了典型的基于水介质的除尘技术, 分析了影响其除尘效率的关键因素。通过上述技术的防尘

收稿日期: 2022-08-20; 责任编辑: 张 鑫 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.22082001

作者简介: 李 鹏(1983—), 男, 汉, 陕西横山人, 高级工程师, 硕士。E-mail: 94652456@qq.com

引用格式: 李鹏, 王成龙, 张漠鑫. 基于水介质的煤尘抑制技术应用[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(S2): 767-771.

LI Peng, WANG Chenglong, ZHANG Moxin. Application of coal dust suppression technology based on aqueous media[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(S2): 767-771.

机理和综述,对比粉尘控制技术的优缺点,并系统分析了影响除尘效率的因素。最后,讨论了基于水介质的防尘技术所面临的问题,并提出了进一步提高防尘效果的研究前景,为地下采矿除尘提供参考。

1 基于水介质的煤尘抑制技术

基于水介质的除尘方法一般分为3类,溶液喷雾、煤层注水、空气-水混合喷雾。

1.1 溶液喷雾

目前,使用喷雾的除尘技术是切割煤过程中应用最广泛的技术。喷雾按照安装位置不同分为内部喷雾和外部喷雾。内部喷雾主要应用在采矿机的切割齿周围,在切割过程中应用于湿煤体,大幅减少了粉尘颗粒的产生^[7]。采矿机摇臂上安装一定数量的喷嘴形成外喷嘴,在切煤筒的周围形成封闭喷雾场,捕获和隔离煤尘颗粒。然而,在采矿机的切割过程中,使用内部喷雾的粉尘控制系统的喷嘴常受外部因素(水质、碎煤等)影响而被堵塞,这导致了喷雾雾化能力减弱。因此,在综采面开采过程中,外部喷雾在粉尘控制过程中起决定性作用。对于外部喷雾,不同的水压和喷嘴孔径对外部喷雾雾化特性有明显影响,需确定防尘喷雾所需的最佳水压和喷嘴^[8]。此外,通过数值模拟分析机械化面喷雾的分布规律,开发了一种新型除尘喷雾系统控制井下粉尘颗粒。

虽已对使用水喷雾的防尘技术进行了大量研究,但煤尘浓度仍保持在高于极限的水平。这可能有2个原因,一是煤粉的润湿性较差,二是除尘喷雾的形成方法不科学,不能有效覆盖和捕获粉尘。虽然水喷雾的技术可忽略液滴和粉尘颗粒之间的凝结影响,但需消耗较大的溶液和水高压来实现较高的粉尘控制效率,导致了水资源浪费,加剧煤矿工作环境恶化。

1.2 煤尘注水

注水的除尘机制主要是通过向煤层注入溶液增加煤体的含水量。一方面,煤粉可通过注水润湿黏结,使煤体破碎时失去飞行能力,另一方面,由于含水量增加,提高了煤体塑性,导致破碎工艺中的粉尘产量减少^[9]。19世纪提出煤层注水除尘技术。在德国萨尔煤矿进行了相关工业试验,现场应用结果表明,当1 m³煤体注入超过10 L水时,除尘效果显著。煤层含水量的增加可显著降低粉尘浓度,当含水量提高0.7%时,布里煤层的粉尘浓度降低了30%~50%。

煤体的孔隙结构和渗透性对除尘效率影响较

大。煤体应力区裂隙发育良好,沿钻孔深度的应力相对集中,原应力区煤层注水作用逐渐减弱。采用局部气体排水实现局部注水,进一步提高煤层的加湿化,降低煤层输水的应用成本。此外,煤层含水量、孔隙率和灰分是影响煤层的关键影响因素^[10]。随煤层含水量、孔隙率、灰分的增加,注水后煤层的除尘效果较好。目前,已发展了3种输水方法,表面输注、内部输注和远程输注。密封孔技术对实现煤层注水的成功起重要作用,因为需要高压帮助水溶液在煤层中的扩散。如果密封件质量不好,无法实现保压。目前,利用煤层注水的除尘技术已蓬勃发展,在高渗透性矿区得到广泛应用,有效降低了粉尘产量。但煤层输水的3个问题仍需解决,即提高水润湿性,提高煤层渗透性,提高输水技术的稳定性。

1.3 空气-水混合喷雾

空气-水喷雾的除尘技术是采用水与空气混合的形式,增强喷射装置中的溶液湍流强度。增强空气和溶液从喷嘴离开时的混合程度,进一步使液滴更易被二次压碎。该技术的优点是用少量的水形成水喷雾,更有效实现雾化。空气-水喷雾的防尘效率比普通水喷雾高30%以上,其用水量比原水喷雾的用量低30%。DOMINIK等^[11]发现一种基于空气-水喷雾的新型粉尘控制装置能够降低PM₁₀和PM_{2.5}粉尘的平均效果超过60%。WANG等^[12]对气-水喷雾中使用的喷嘴结构进行了相关研究。结果表明空水雾的混合方法对雾化效果有重要影响。此外,空气-水体积比对喷雾流场的液滴大小有重要影响。通过数值模拟研究了空气喷嘴的内部流动状态。模拟结果表明,决定雾化性能的关键因素是喷嘴内空气与加压水之间的能量变化状态。但由于空气-水混合喷雾需要压缩空气,电缆空间有限,很难在煤矿面铺设供风管道。因此,采用空-水混合喷雾的粉尘控制方法很难应用于煤矿开采层面,而广泛应用于驾驶工作面^[12-13]。

2 除尘效果的影响因素

影响基于水介质的技术提高粉尘控制效率的因素一般包括水介质的润湿性、喷雾的雾化特性、煤的性能等因素。

2.1 水介质的润湿性

煤含有大量疏水官能团,使某些水溶液难以处理湿煤尘。因此,该溶液的润湿性能直接决定了相应技术的除尘效率。较高的润湿性不仅提高了液滴在煤尘表面的扩散能力,而且提高了煤层中溶液的渗透性^[14]。近年来,水介质的润湿性通常通过表面

张力、接触角、下沉时间等润湿参数评价。随溶液表面张力从 72.8 mN/m 降至 34.6 mN/m,溶液的润湿性显著提高。下沉时间从 1 500 s 显著减至 108 s。同时,表面张力是由水分子在水与气界面上的黏聚而形成的薄膜,直接影响了液滴的二次断裂过程。这是因为表面张力决定了液滴保持其原始形状的能力,具体的影响过程如下^[15]:

$$\frac{\phi s \rho v^2}{2} = \pi d_1 \sigma_d, \quad (1)$$

式中,左端为气动力; ϕ 为无量纲系数; s 为液滴的投影面积; ρ 为空气密度; v 为液滴与气流之间的相对速度;右端为表面张力; d_1 为液滴直径; σ_d 为表面张力系数。

由于 s 可按公式(2)计算

$$s = \frac{1}{4} \pi d_1^2, \quad (2)$$

方程(1)可以化简为:

$$\frac{\rho v^2 d_1}{\sigma_d} = \frac{8}{\phi}. \quad (3)$$

左端为韦伯数,用 We 表示。韦伯数表示液滴表面的气动力和表面张力之间的无量纲压力比。液滴高速运动过程中,当惯性力比表面张力大几倍时,液滴会分裂成更小液滴。韦伯数越大,喷雾性能越好。分析可知液体的物理化学性质在液体的破碎过程中起关键作用。液体的表面张力和黏度较小,更有利于注入过程中液滴的破裂。

2.2 喷雾剂的雾化特性

表面活性剂溶液等具有良好的润湿性能,一个关键因素是由水溶液形成的喷雾流场能否有效碰撞和凝结煤尘^[16]。因此,有必要研究喷水场的雾化特性与除尘效率之间的关系。当液滴的大小更接近粉尘颗粒时,溶液喷雾的粉尘控制效率明显提高。这是因为当惯性碰撞法接近尘埃颗粒时,尘埃颗粒更有可能被液滴捕获。当液滴尺寸 D_{32} 为 58.36 μm , 40~70 μm 粉尘颗粒更易被喷雾流场捕获。当液滴尺寸大小在 9~30 μm 时,喷雾剂捕获效果更好。此外,喷雾流场是否覆盖尘源,不仅直接影响煤粉颗粒与液滴的碰撞概率,且影响喷雾场中液滴数密度。通过在卢瓦煤矿的现场应用,当总粉尘和可呼吸性粉尘的平均除尘率分别为 85.17% 和 84.74%。采用最佳喷雾方法实现了可呼吸性粉尘和总粉尘效率分别为 88.6% 和 89.7%。因此,提高溶液的雾化能力对提高溶液的除尘效率具有重要作用。有效构建油井除尘喷雾,掌握喷嘴直径和溶液压力对雾化特性(液滴尺寸、覆盖范围等)的影响对喷雾流场非常重

要。随出口直径增加,射流距离和液滴速度不断减小,而雾化角度和雾滴尺寸一般中呈增加趋势。此外,随喷雾压力提高,液滴尺寸显著减小,而溶液消耗量不断提高^[17]。

2.3 煤的理化性质

煤粉润湿性决定于煤体的理化性质,如煤的变质程度、煤粉大小和煤粉表面结构。通过了解煤的理化性质,确定影响煤粉润湿性的关键因素,有利于构建最佳的改善粉尘控制系统对水溶液的抑制效率。

2.3.1 煤变质程度

煤的疏水性由其变质程度决定。通过对煤的工业分析和润湿特征测量,评价了煤的变质程度对煤尘润湿性的影响。随固定碳增加,煤的变质程度有所提高。煤中固定碳增加通常会导致润湿性较差,这是因为随固定碳的增加,煤体中脂肪族烃和芳香烃的含量显著提高,从而提高了煤尘的疏水性^[18]。此外,不同煤变质程度表明煤尘灰分不同。灰分一般表现出亲水性,即高灰分煤粉颗粒易被水溶液捕获。此外,煤中含氧官能团含量与煤的润湿性呈正相关。随煤变质程度增加,煤中含氧官能团含量显著降低。在褐煤阶段,褐煤的表面氧官能团相对高于其他阶段,因此其润湿性较好。

2.3.2 煤尘颗粒尺寸

随粒径减小,煤尘表面变粗,这可能会改变液滴对煤尘表面的润湿效应。较小的颗粒在空气中漂浮的时间更长,增加了溶液喷雾控制过程的粉尘控制难度。煤尘的表面特征与煤尘的大小呈较强正相关^[19]。随着煤尘粒径减小,煤尘的气体吸附能力显著增强,更易在煤尘表面形成气膜,阻碍了煤尘与水介质的直接接触。小尺寸煤尘的接触角大于大直径粉尘颗粒,例如当粉尘直径从 37.31 μm 减至 3.607 μm 时。水溶液的接触角从 76.3° 增至 95.4°。当液滴为粉尘大小的 6~13 倍时,喷雾流场可以很好捕捉到小于 10 μm 的煤尘。此外,不同粒径的煤尘(来自一种煤体)表面的光谱官能团变化趋势非常相似,但光谱的位置、强度和峰宽都不同。在机械破碎过程中的机械力和热量可以促进大分子芳构化和缩合的进一步改善,使官能团(C=C)和取代苯等含量增加。随粒径减小,煤粉中芳烃(以芳香族 C=C 和取代苯为代表)、—C—O 和无机矿物 Si—O—Si 增加,表明随粒径减小,煤尘润湿性降低^[20]。

2.3.3 煤尘颗粒表面结构

煤粉表面有许多孔隙结构,为气体渗入煤尘提供了大量空间,更易在尘粉周围形成气膜,溶液更难

以浸入煤粉的孔隙结构中^[21]。同时,由于孔隙结构的存在,煤尘表面的粗糙度较高,阻碍了溶液在煤尘表面的扩散。此外,利用气体吸附仪对煤尘的气体吸附量进行了测量。结果发现,煤尘粒径越小,气体吸附量越大。因此,煤尘表面吸附的气体较多,导致煤尘颗粒的润湿性较差,二者之间呈正相关。随气体吸附量的增加,接触角增大。因为煤尘表面孔隙结构的增加为气体提供了更多吸附位点。气体被注入煤尘的孔隙结构中,使润湿液体难以进入,增强了煤尘的疏水性^[22]。

3 发展状况

近年来,通过增加水压,喷雾流场的液滴尺寸和液滴密度显著提高。然而,在碰撞过程液滴间是否湿润粉尘颗粒是关键,直接影响粉尘控制效率。但目前缺乏关于喷雾流场与粉尘颗粒有效碰撞的科学指导理论,现有利用喷雾流场的除尘技术在现场应用过程中具有很大盲目性。现有技术一般采用大流量喷雾换取较高的除尘效率,导致喷雾溶液浪费,无法捕获煤尘颗粒。忽略了液滴和尘埃颗粒之间的碰撞关系,使这些技术的除尘效果没有显现。因此,通过了解液滴与煤尘之间的相互作用关系,提高喷雾流场的除尘效率具有重要科学意义^[23-24]。

同时,产尘区中液滴的数量密度和粒径是影响粉尘颗粒与液滴碰撞概率和凝固的重要因素。高效雾化是形成体积小、液滴密度高的喷雾流场的前提。然而,现有除尘过程中,为提高溶液的雾化效果,往往会盲目增加喷雾压力。忽略了水压、用水量、液滴大小和喷雾范围之间的关系,导致喷雾用水量显著增加,雾化覆盖率显著降低。此外,具有高雾化特性的喷雾流场是否能有效覆盖产尘区,会影响产尘源周围的液滴数密度。然而,大多使用溶液喷雾的除尘技术仍采用旧方法:粉尘先逸出后捕获,使大量喷雾溶液不能有效利用。因此,研究喷雾流场的形成方法和地下煤矿液滴的空间分布特征,对克服现有喷雾技术的盲目性,节约水溶液消耗,提高喷雾流场的利用率具有重要的科学意义。

4 结论与展望

1) 根据不同方法的功能,煤尘控制技术一般分为3类:①主要用于抑制浮尘颗粒的溶液喷雾;②在生产过程中减少煤粉的煤层注水;③一种空气-水混合喷雾。

2) 从煤尘控制的角度,分析了除尘技术效果的影响因素。结果表明溶液的润湿性、喷雾的雾化特

性、煤的性能、粉尘产生特性和空气湿度可抑制效率。

3) 为提高注水的防尘效果,应进行进一步的研究透析煤层注水的润湿性和渗透机制。

4) 应进一步研究粉尘颗粒与液滴之间的凝结机理。喷雾流场的形成方法和尘源附近液滴的空间分布有待研究,这对节约水溶液消耗和提高喷雾流场利用率具有重要意义。

参考文献:

- [1] 陈刚,张晓蕾,徐帅,等.我国2005—2020年粉尘爆炸事故统计分析[J].中国安全科学学报,2022,32(8):76-83.
- [2] 袁亮.煤矿粉尘防控与职业安全健康科学构想[J].煤炭学报,2020,45(1):1-7.
- [3] VALADKHANI A, SMYTH R, NGUYEN J. Effects of primary energy consumption on CO₂ emissions under optimal thresholds: Evidence from sixty countries over the last half century[J]. Energy Econ 2019;80:680-90.
- [4] LIU Z G, CAO A Y, GUO X S, et al. Deep-hole water injection technology of strong impact tendency coal seam: A case study in Tangkou coal mine [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11:10.
- [5] XU C, WANG H, WANG D, et al. Improvement of foaming ability of surfactant solutions by water-soluble polymers: Experiment and molecular dynamics simulation [J]. Polymers, 2020, 12(3):571.
- [6] ZHAO Y, QIU P H, CHEN G, et al. Selective enrichment of chemical structure during first grinding of Zhundong coal and its effect on pyrolysis reactivity[J]. Fuel,2017,189:46-56.
- [7] LU X X, WANG D M, XU C H, et al. Experimental investigation and field application of foam used for suppressing roadheader cutting hard rock in underground tunneling[J].Tunnelling and Underground Space Technology,2015,49(6):1-8.
- [8] REN T, WANG Z W, COOPER G. CFD modelling of ventilation and dust flow behaviour above an underground bin and the design of an innovative dust mitigation system[J].Tunnelling and Underground Space Technology,2014,41:241-254.
- [9] 司建廷,康望,刘寅超.陕西省某煤矿综采面云喷雾煤尘浓度测定及除尘效率[J].中国卫生工程学,2021,20(3):361-363.
- [10] LIU Z, YANG H, WANG W Y, et al. Experimental study on the pore structure fractals and seepage characteristics of a coal sample around a borehole in coal seam water infusion[J]. Transport in Porous Media,2018,125:289-309.
- [11] DOMINIK B, MICHAL S, KALITA M, et al.Selection of operational parameters for a smart spraying system to control airborne PM₁₀ and PM_{2.5} dusts in underground coal mines [J]. Process Safety and Environmental Protection,2021, 148(9):482-494.
- [12] WANG G, SHEN J, CHU X, et al. Characterization and analysis of pores and fissures of high-rank coal based on CT three-dimensional reconstruction[J].Journal of China Coal Society,2017,42:2074-2080.

- [13] WANG Y P, JIANG Z A, CHEN J S, et al. Study of high-pressure air curtain and combined dedusting of gas water spray in multilevel ore pass based on CFD-DEM [J]. *Advanced Powder Technology*, 2019, 30: 1789-1804.
- [14] WANG P, TAN X, LIU R. Influence of outlet diameter on atomization characteristics and dust removal properties of internal-mixing air atomizing nozzle [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 43: 2823-2831.
- [15] WANG X N, YUAN S J, LI X, et al. Synergistic effect of surfactant compounding on improving dust suppression in a coal mine in Ordos, China [J]. *Powder Technology*, 2019, 344: 561-569.
- [16] ZHONG Y, DU H, ZHANG Y, et al. Experimental research on dynamic characteristics of viscous droplets impacting rough solid surfaces at different temperatures [J]. *Canadian Journal of Physics*, 2019, 97: 1288-1300.
- [17] WANG P, TAN X, ZHANG L, et al. Influence of particle diameter on the wettability of coal dust and the dust suppression efficiency via spraying [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 132: 189-199.
- [18] YIN W, ZHOU G, LIU D, et al. Numerical simulation and application of entrainment dust collector for fully mechanized mining support based on orthogonal test method [J]. *Powder Technology*, 2021, 380: 553-566.
- [19] 张建国, 李红梅, 刘依婷, 等. 煤尘微观润湿特性及抑尘剂研发初探: 以平顶山矿区为例 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46(3): 812-825.
- [20] XU C, WANG D, WANG H, et al. Effects of chemical properties of coal dust on its wettability [J]. *Powder Technology*, 2017, 318: 33-39.
- [21] GENG F, GUI C, TENG H, et al. Dispersion characteristics of dust pollutant in a typical coal roadway under an auxiliary ventilation system [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 275: 122889.
- [22] WANG H, WANG C, WANG D. The influence of forced ventilation airflow on water spray for dust suppression on heading face in underground coal mine [J]. *Powder Technology*, 2017, 320: 498-510.
- [23] 方树林. 中国煤矿灾害防治技术的研究现状与发展趋势 [J]. *洁净煤技术*, 2012, 18(1): 90-94.
- [24] YUAN D, ZHANG S, ZHANG Q. New spraying and dust reduction technology by dust source tracking for coal cutter [J]. *Safety in Coal Mines*, 2016, 47: 87-89.