

高频驻波声场与喷雾协同降尘试验

吴世先^{1,2}, 刘何清^{1*}, 陈永平^{1,2}, 朱辉²

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 桂林航天工业学院 能源与建筑环境学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对煤矿粉尘的高危害性, 借鉴声聚并理论, 提出 2 种高频驻波声场与喷雾协同降尘技术方案, 在自主设计试验平台上实测协同降尘效率, 分析喷嘴孔径、高压喷雾水流量、超声波雾化器水流量、声波功率以及管道风速对降尘效率的影响。试验结果表明: 采用超细雾滴+声波+高压喷雾协同降尘方案存在明显的增效作用, 可将呼吸性煤尘降尘效率提升 10% 左右 (相比高压喷雾降尘), 声波功率和管道风速是影响协同降尘效率的主因, 研究结果可为高频驻波声场与喷雾协同降尘的工程应用提供参考。

关键词: 煤尘防治; 驻波声场; 呼吸性煤尘; 降尘效率

中图分类号: TD711 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2023)01-0065-07

Experimental Study on High Frequency Standing Wave Sound Field and Spray for Dust Removal

WU Shixian^{1,2}, LIU Heqing¹, CHEN Yongping^{1,2}, ZHU Hui²

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. School of Energy Engineering and Building Environment, Guilin University of Aerospace Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Aiming at the dust hazards, two types of high frequency standing wave sound field and spray for synergistic dust removal technology schemes are proposed, and the synergistic dust removal efficiency is measured on the self-designed experimental platform. Furthermore, the effects of nozzle diameter, high pressure spray water flow rate, ultrasonic atomizer water flow rate, acoustic power and pipe velocity on dust removal efficiency are analyzed. The experimental results show that there is an obvious synergistic effect of superfine droplet + acoustic wave + high pressure spray, and the dust removal efficiency of respirable coal dust is increased by about 10% (compared to dust removal by high pressure spray), in addition, the acoustic power and pipe velocity are the main factors affecting the synergistic dust removal efficiency. The research results can provide reference for the engineering application of high frequency standing wave sound field and spray for synergistic dust removal.

Keywords: coal dust control; standing wave sound field; respirable coal dust; dust removal efficiency

煤矿粉尘具有高分散度、强吸湿、易爆炸等特性, 极易引发安全事故, 危害性大。2005 年—2020 年, 全国共发生煤尘爆炸事故 9 起, 死亡 279 人^[1], 其中, 2005 年 11 月 27 日黑龙江龙煤集团东风煤矿发生的煤尘爆炸事故, 就有 171 人遇难^[2]。消除粉尘危害, 杜绝煤尘事故, 已成为当下煤矿安全生产的迫切任务。

世界主要产煤国针对采掘工作面的粉尘防治主要是通过三方面措施来实现。一是在采煤之前, 通过注水提高煤体的润湿性, 以降低煤体产尘的可能性; 二是在开采时, 利用特定的防尘技术控制尘源; 三是利用

收稿日期: 2022-09-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (5226040433); 广西自然科学基金资助项目 (2021GXNSFAA220079); 交通运输部交通运输行业重点科技项目 (2021-MS5-126)

* 通信作者, E-mail: hqliu8222638@163.com

相关除尘技术或设备,及时把产生的粉尘过滤或排除掉.第一和第二方面的措施受煤矿条件限制,必须因地制宜开展,第三方面的措施才是防治矿井粉尘的关键^[3].目前,通常采用通风除尘、喷雾降尘、化学除尘、除尘器除尘和空气幕隔尘等 5 种除尘、降尘技术,其中喷雾降尘因具有经济、简便和实用等优点,已成为煤矿采掘工作面应用最为广泛的除尘方式^[4].但从实际实施效果看,喷雾降尘仍未达到应有的理想效果^[5-6],亟待寻求其他的能有效提高呼吸性粉尘降除效率的技术路径和机理.

近年来,声聚并技术作为粉尘运动调控手段开始应用于燃煤烟气净化、火灾消烟以及人工降雨等领域^[7-9].声聚并理论和已有试验结果表明:当粉尘浓度高、粉尘粒径分布宽、环境湿度大、有雾滴作为“聚并种子”时均有利于增强声聚并效果^[10-14].因此,在实施喷雾降尘的矿井中,具有粉尘浓度高、环境湿度大等背景,故矿井巷道和综采工作面具备实施驻波声场与喷雾协同高效降尘的优越工程条件.

基于上述研究,本文提出 2 种声波与喷雾协同降尘技术方案,采用试验方法研究喷嘴孔径、喷雾水流量、超声波雾化器水流量、超声波功率和风流速度等参量对声波与喷雾协同降尘的影响规律,以探索声波与喷雾协同降尘技术的工程应用路径.

1 试验方案设计

1.1 基本思路

声波与喷雾之间可以形成协同的组合较多,在对众多方案进行尝试性试验后,本文选取 2 种可以明确获得一定效果的协同方案进行数据采集与分析.方案 I:在喷雾前端,将高频声波致煤尘团聚作为预处理过程,再经高压喷雾降尘;方案 II:在团聚腔体上游,利用超声波雾化器产生超细雾滴,将超细雾滴作为“凝聚核”注入声波团聚腔,实施“煤尘-超细雾滴”声波团聚预处理,再经高压喷雾降尘.

1.2 试验平台设计

基于试验思路,设计开发“高频驻波声场与喷雾协同降尘试验平台”,如图 1 所示.试验平台主要包括巷道模型、干粉气溶胶发尘装置(SAG-410)和超声波发生系统(主要由 20 kHz 超声波发生器、换能器、反射板和线性定位平台组成),其中模型巷道由测量段、超声波雾化器发雾段、超声波团聚腔体、喷雾段、风机段组成.模型巷道长度为 3.5 m,断面为矩形,尺寸为 20 cm×20 cm,为便于对管道中粉尘运动规律可视化观测和雾滴粒度测量,模型巷道壁面采用透明有机玻璃加工而成.

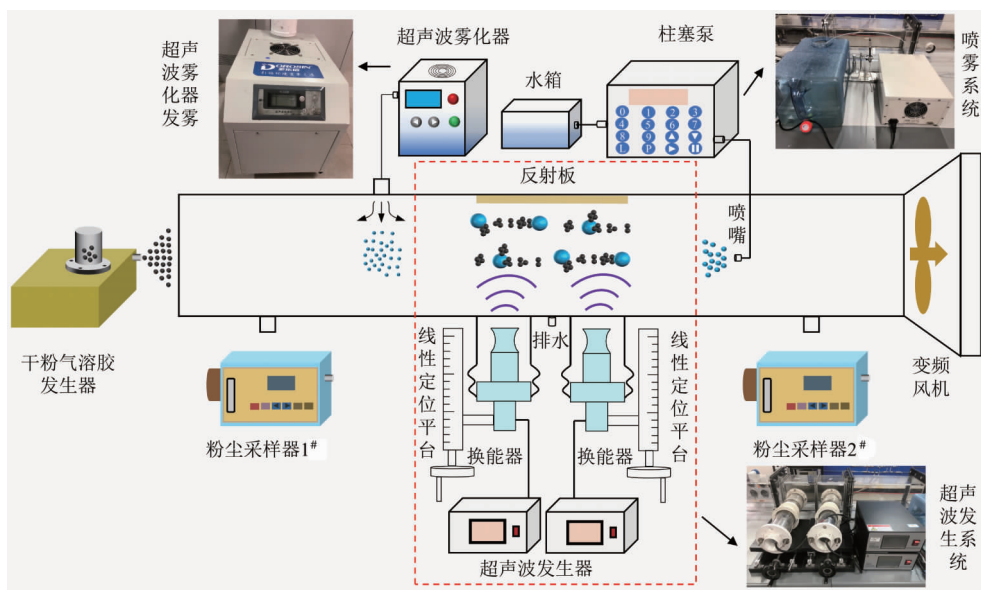


图 1 高频驻波声场与喷雾协同降尘试验平台

通过测量巷道模型上、下游粉尘浓度量化协同降尘效率.采用马尔文高速喷雾粒度分析仪、激光衍射粒度分析仪精确表征粉尘和雾滴粒径谱分布.

1.3 煤尘选取

为获得试验粉尘,将无烟煤煤块通过破碎机破碎后,再用孔径约 $31\ \mu\text{m}$ (500 目) 的工业筛网筛分后获得,制备的煤尘样品放入真空干燥箱内干燥 8 h,干燥箱内温度为 $80\ ^\circ\text{C}$,样品干燥后放入密封箱内备用.图 2 为试验煤尘的粒径分布图.由图 2 可以看到: $10\ \mu\text{m}$ 以下的煤尘占比高达 68%,煤尘最大粒径不超过 $33\ \mu\text{m}$.进一步对 $10\ \mu\text{m}$ 以下的粉尘体积占比分析发现:粒径为 $0\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 的粉尘约占总尘的 15%,粒径为 $2.5\sim 5.0\ \mu\text{m}$ 的粉尘约占总尘的 22%,粒径为 $5.0\sim 7.5\ \mu\text{m}$ 的粉尘约占总尘的 17%,粒径为 $7.5\sim 10.0\ \mu\text{m}$ 的粉尘约占总尘的 14%,可见 $10\ \mu\text{m}$ 以下的

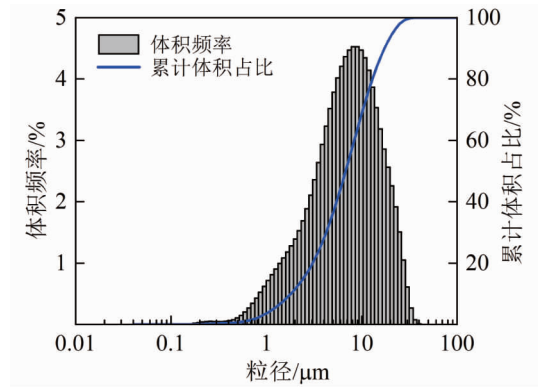


图 2 煤尘粒径分布

煤尘分布较为均匀.上述煤尘的粒径测量结果表明,经研磨筛分后的试验煤尘可以满足呼吸性煤尘降尘效率研究要求.喷嘴采用的是高压精细雾化喷嘴,具有雾化效果好、水流量小的特点.本试验选用孔径为 0.4, 0.6, 0.8 mm 的孔径喷嘴.

1.4 试验方案

对方案 I,分 2 个环节采集试验数据.第一个环节是关闭声波发生器,仅采集煤尘经巷道模型后被高压喷雾装置降尘的相关数据,此环节采集的数据记为数据 1;第二个环节是启动声波发生器,采集煤尘经声波团聚作用后被高压喷雾装置降尘的相关数据,此环节采集的数据记为数据 2.将数据 2 和数据 1 对比,验证方案 I 的作用.方案 I 中试验参数见表 1.

表 1 协同降尘方案 I 中试验参数

控制变量	变量	变量参数大小
超声波频率为 20 kHz,超声波功率为 180 W,喷雾水流量为 180 mL/min,喷嘴孔径 0.8 mm	风速	0.25, 0.50, 0.75 m/s
超声波频率为 20 kHz,风速为 0.25 m/s,喷雾水流量 180 mL/min,喷嘴孔径 0.8 mm	超声波功率	180, 120, 60 W
超声波频率为 20 kHz,风速为 0.25 m/s,超声波功率为 180 W,喷嘴孔径 0.8 mm	喷雾水流量	180, 160, 140, 120, 100 mL/min
超声波频率为 20 kHz,风速为 0.25 m/s,超声波功率为 180 W,喷雾水流量为 180 mL/min	喷嘴孔径	0.4, 0.6, 0.8 mm

对方案 II,亦分 2 个环节采集试验数据.第一个环节是关闭声波发生器,仅采集煤尘与超细雾滴混合后被高压喷雾装置降尘的相关数据,此环节采集的数据记为数据 3;第二个环节是启动声波发生器,采集煤尘与超细雾滴混合并经声波团聚作用后被高压喷雾装置降尘的相关数据,此环节采集的数据记为数据 4.将数据 4 和数据 3 对比,验证方案 II 的作用.方案 II 中试验参数见表 2.

表 2 协同降尘方案 II 中试验参数

控制变量	变量	变量参数大小
超声波频率为 20 kHz,风速为 0.25 m/s,超声波功率为 180 W,喷雾水流量为 180 mL/min,喷嘴孔径 0.8 mm	超声波雾化器水流量	10, 20, 30 mL/min
超声波频率为 20 kHz,风速为 0.25 m/s,喷雾水流量 180 mL/min,超声波雾化器水流量为 10 mL/min,喷嘴孔径 0.8 mm	超声波功率	180, 120, 60 W
超声波频率为 20 kHz,风速为 0.25 m/s,超声波功率为 180 W,超声波雾化器水流量为 10 mL/min,喷嘴孔径 0.8 mm	喷雾水流量	180, 160, 140, 120, 100 mL/min
超声波频率为 20 kHz,超声波功率为 180 W,喷雾水流量 180 mL/min,超声波雾化器水流量为 10 mL/min,喷嘴孔径 0.8 mm	风速	0.25, 0.50, 0.75 m/s
超声波频率为 20 kHz,风速为 0.25 m/s,超声波功率为 180 W,喷雾水流量 180 mL/min,超声波雾化器水流量为 10 mL/min	喷嘴孔径	0.4, 0.6, 0.8 mm

在此基础上,对比分析数据 2 和数据 4,明确最优协同降尘方案.

2 试验结果与分析

2.1 协同方案降尘效率对比分析

方案 I 和方案 II 与对照组示意图如图 3 所示,2 种方案都以声波关闭时作为对照组.图 4 给出了不同喷嘴孔径下方案 I 和方案 II 降尘效率变化曲线,试验参数值设置如下:超声波频率为 20 kHz,超声波功率为 180 W,管道风速为 0.25 m/s,超声波雾化器水流量为 10 mL/min(方案 II 超声波雾化器处于关闭状态),高压喷雾水流量为 180 mL/min.图 4 中降尘效率提升是以关闭声波时的降尘效率为基数.由图 4a 可知:采用声波+高压喷雾降尘方式(方案 I),全尘降尘效率有所提升,但提升幅度十分有限,且提升效果基本不随喷嘴孔径变化.由图 4b 可知:采用超细雾滴+声波+高压喷雾降尘方式(方案 II),全尘降尘效率提升 4%左右,整体提升效果优于方案 I.

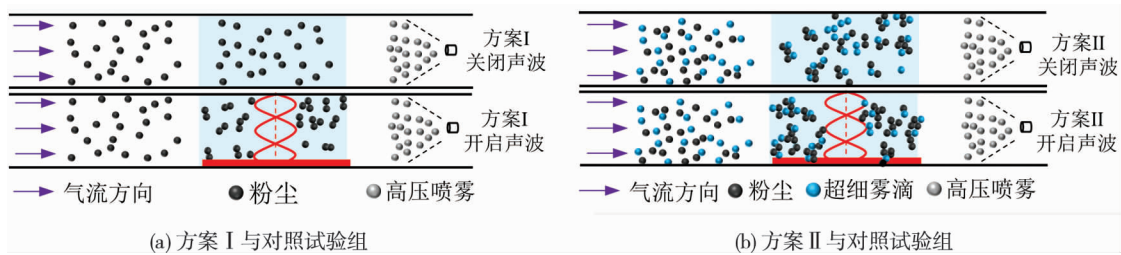


图 3 方案 I 和方案 II 与对照组

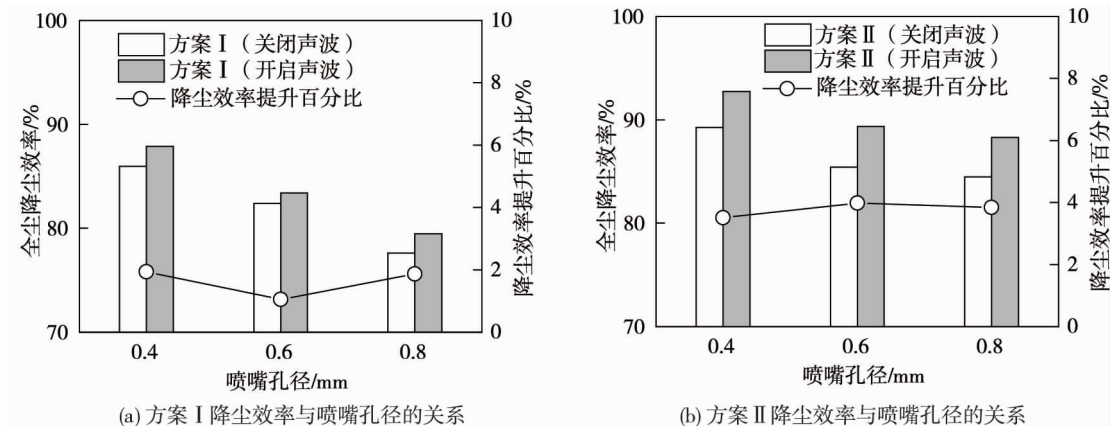


图 4 降尘效率与喷嘴孔径的关系

为进一步定量分析 2 种协同降尘技术方案的降尘效率与喷嘴孔径的关系,以单独采用高压喷雾降尘效率为基准,计算出方案 I 和方案 II 相比于高压喷雾降尘效率的提升百分比,如图 5 所示.由图 5 可知:相比单独采用高压喷雾降尘,采用方案 II 的降尘效率提升效果明显优于方案 I.当喷嘴孔径越大时,这一效果越明显,喷嘴孔径为 0.8 mm 时,降尘效率提升高达 11%,这表明由超声波雾化器产生的大量超细雾滴起到了“凝聚核”作用,能在声波团聚段有效促进煤尘的凝并.因此,超细雾滴+声波+高压喷雾存在明显的协同效应.

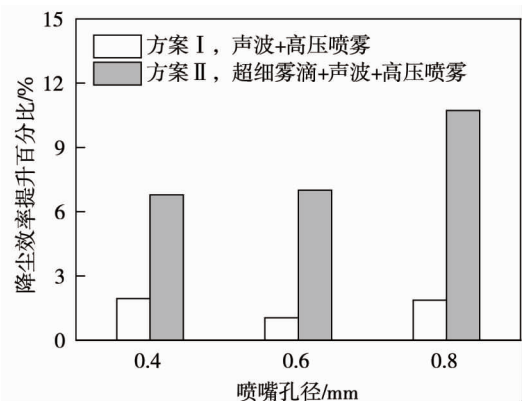


图 5 方案 I 与方案 II 降尘效率提升百分比与喷嘴孔径的关系

图 6 给出了不同喷雾水流量下 2 种协同方案的降尘效率.试验参数值设置如下:超声波频率为 20 kHz,声波功率为 180 W,管道风速为 0.25 m/s,超声波雾化器水流量为 10 mL/min(方案 II 超声波雾化器处于关闭状态),高喷嘴孔径为 0.8 mm.由图 6 可知:相比声波

关闭状态,开启声波后,降尘效率都有所提升,且方案Ⅱ的提升幅度更大;喷雾水流量的大小对降尘效率均有影响,喷雾水流量越大降尘效果越显著,但方案Ⅰ的降尘效率受喷雾水流量的影响较大,而方案Ⅱ的降尘效率受喷雾水流量的影响较小。

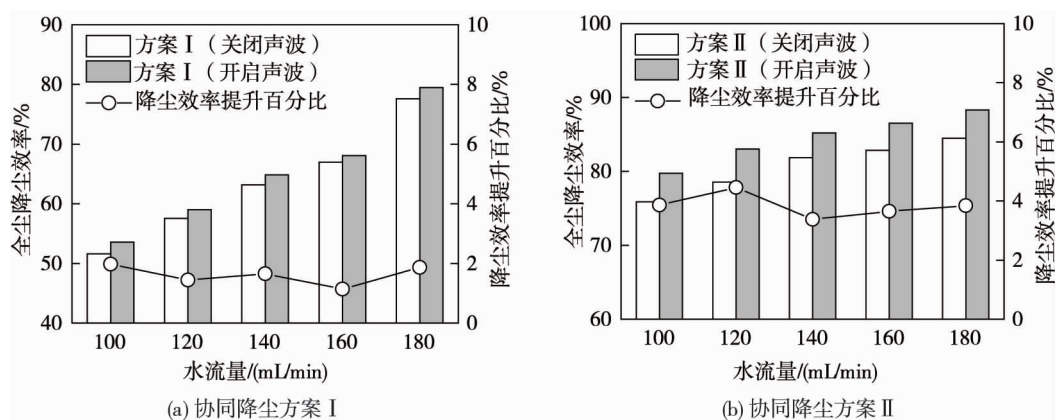


图6 协同降尘效率与喷雾水流量的关系

为进一步定量评价2种协同降尘技术方案降尘效率的优劣,以单独采用高压喷雾降尘效率为基准,计算出协同降尘技术方案Ⅰ和方案Ⅱ相比于高压喷雾降尘效率的提升百分比,如图7所示.相比单独采用高压喷雾降尘,方案Ⅱ的降尘效率提升效果明显优于方案Ⅰ,当喷雾水流量越小时,这一特性表现得越明显.喷雾水流量为100 mL/min时,提升幅度接近30%,当喷雾水流量增至180 mL/min时,提升幅度减小至11%左右.从图5和图7中还可看出,采用声波+高压喷雾降尘时,无论在何种喷雾水流量下,声波强化喷雾降尘效果甚微,不具备实际工程应用价值.鉴于方案Ⅱ可获得最高降尘效率,故将此方案作为声波与喷雾协同降尘的最优方案.后续将针对方案Ⅱ的协同降尘特性展开进一步的分析和讨论,重点讨论声波功率、风速和雾化器水流量对降尘效率的影响规律。

2.2 超声波雾化器水流量对协同降尘效率的影响

超声波雾化器的水流量决定超细雾滴的数量,对降尘效率有影响.为此,测量3种超声波雾化器水流量下的全尘降尘效率,结果如图8所示.试验中喷嘴喷雾水流量为180 mL/min,声波功率为180 W,管道风速为0.25 m/s.从图8中可以看出:随着超声波雾化器水流量的增加,无论是否开启超声波,降尘效率均有所提高,但提升幅度均较小.以协同降尘技术方案Ⅱ为例,当雾化器水流量由10 mL/min增至30 mL/min时,降尘效率由84.47%增加至87.10%,仅提升了2.63个百分点.由此可见,当团聚腔内超细雾滴达到一定浓度值,再增大雾滴量,降尘效率无实质性的提升,故在后续研究中超声波雾化器水流量取10 mL/min.

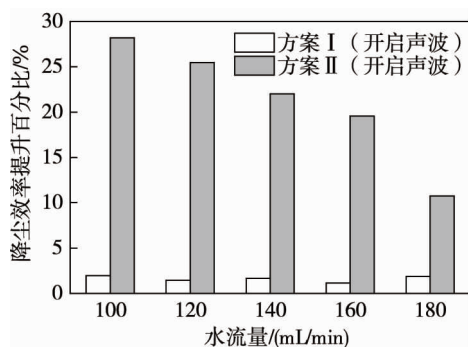


图7 方案Ⅰ与Ⅱ降尘效率提升百分比与喷雾水流量的关系

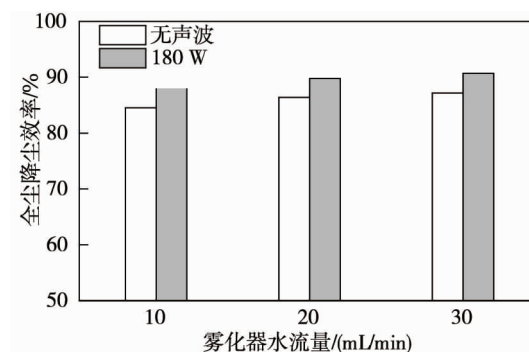


图8 雾化器水流量对降尘效率影响

2.3 超声波功率对声波与喷雾协同降尘效率的影响

试验中选取几种典型粒径段的煤尘,考察声波功率对不同粒径段煤尘的降尘效率影响,试验结果如图

9所示.试验中高压喷雾水流量为180 mL/min,雾化器水流量为10 mL/min,管道风速为0.25 m/s.图9中横轴粒径为5.0 μm 表示粒径段为0~5.0 μm ,其余粒径段规定类似.

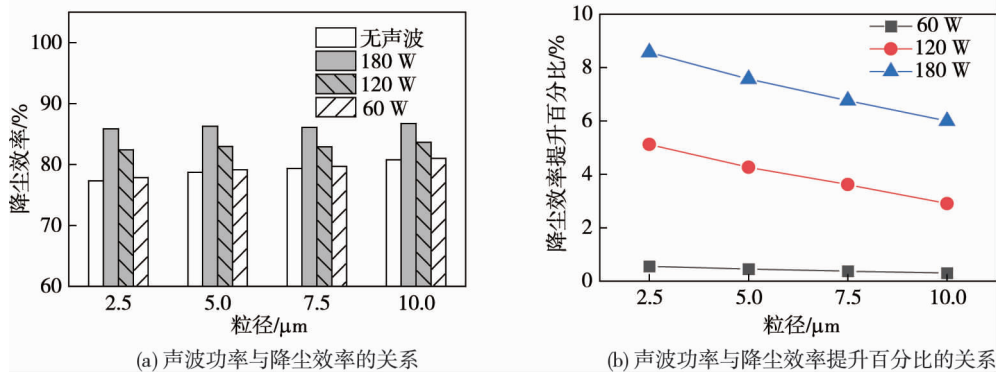


图9 声波功率对降尘效率的影响

由图9可知:无论对于哪种粒径段煤尘,声波功率均需达到某一量级,才能促使颗粒(煤尘或雾滴)发生声波团聚效应.其原因是在实际声波团聚段内存在强烈的湍流作用,由于湍流的随机脉动特性,将导致颗粒湍流扩散,这种扩散效应与声波团聚效应相反,起到抑制声波团聚作用.如果声波功率小,对颗粒的声辐射力不足以克服颗粒湍流扩散,达不到颗粒发生团聚的临界浓度,则此时的声波完全起不到促使颗粒团聚效果,自然无法提升喷雾降尘效率;当达到临界声波功率后,增大声波功率有利于提升降尘效率,但声波换能器发热量增大,能耗增大会降低设备使用寿命.

从图9b可以看出,对小粒子(如 $\text{PM}_{2.5}$),协同降尘作用更为明显,施加功率为180 W超声波时,协同降尘效率较声波关闭时提升了8.57%.

2.4 风速对声波与喷雾协同降尘效率的影响

风速大小决定声场对颗粒(煤尘或雾滴)的有效作用时间,影响超声波与喷雾协同降尘的实际效果,因此有必要分析风速对协同降尘效率的影响.图10给出了3种风速下声波与喷雾协同降尘效率测量结果.试验中喷雾水流量为180 mL/min,超声波雾化器水流量为10 mL/min,声波功率为180 W.由图10可知:管道风速增大,降尘效率显著降低.如声波功率为180 W时,0.25 m/s风速下的协同降尘效率达到88%,当风速增大至0.75 m/s时,降尘效率下降至65%,降尘效率降低了23个百分点.对比开启与未开启超声波两种情形的降尘效率,风速增大,声波与喷雾协同降尘增效越差.如风速为0.75 m/s时,开启与未开启超声波两种情形下的降尘效率几乎完全一致,可见,风速达到一定值时,声波未起到实质增效降尘作用.

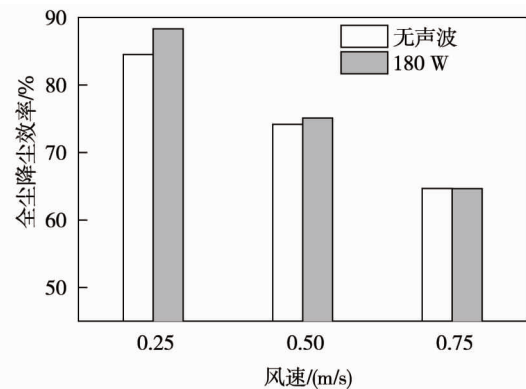


图10 风速对降尘效率影响

图11给出了不同风速下降尘效率与煤尘粒径的关系,其中降尘效率提升百分比是以无声波作用时的降尘效率为基准.试验中喷雾水流量为180 mL/min,超声波雾化器水流量为10 mL/min,声波功率为180 W.当风速为0.25 m/s时(见图11a),声波与喷雾协同降尘效果较明显,且粒径越小,效果越显著,如对10 μm 以下粒子(PM_{10}),协同降尘效率较无声波时提升了6.25%,对2.5 μm 以下的粒子($\text{PM}_{2.5}$),降尘效率提升了8.57%;当风速增大至0.50 m/s时(见图11b),声波与喷雾协同增效降尘作用已大为减弱,此时,对 $\text{PM}_{2.5}$ 煤尘的降尘效率较无声波时提升百分比不到3%;当风速进一步增大至0.75 m/s(见图11c),所有粒径段煤尘的协同降尘增效作用甚微(降尘效率提升百分比<1%),几乎无实质增效作用.

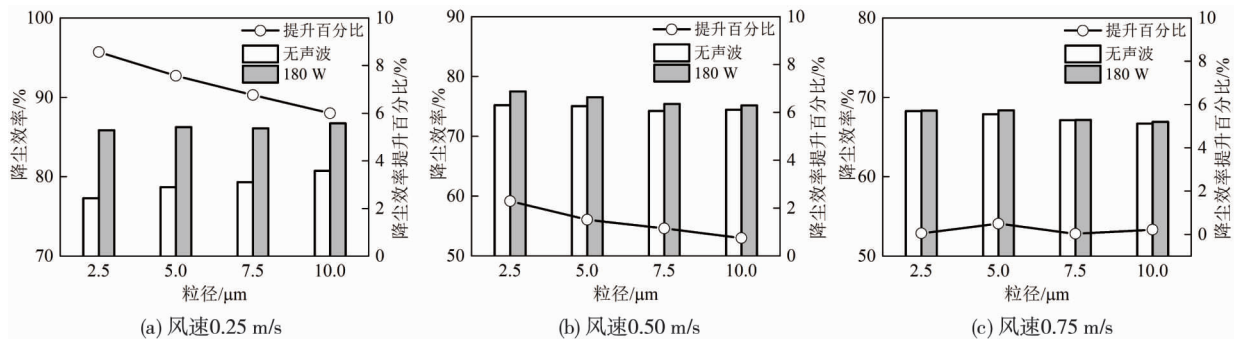


图11 不同风速下降尘效率与煤尘粒径的关系

3 结论

1) 相比高压喷雾降尘,采用声波+高压喷雾协同降尘方案对降尘效率的提升不够明显,而采用超细雾滴+声波+高压喷雾协同降尘技术方案对降尘效率有明显增益效果,降尘效率提升可达10%,这说明高频驻波声场与喷雾协同降尘有一定的工程应用价值和现实意义。

2) 声波功率越大,越有利于增强煤尘与煤尘、煤尘与超细雾滴的团聚作用;管道风速决定煤尘与煤尘、煤尘与超细雾滴团聚的作用时间,管道风速越大,越不利于协同增效降尘;喷嘴孔径、高压喷雾水流量和超声波雾化器水流量的大小对于团聚效果的影响较小.合理匹配声波功率和风速可获得声波与喷雾协同增效降尘效果。

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] 王俊铭,魏国营.煤尘爆炸事故救援任务模块化研究[J].煤矿开采,2017,22(6):96-99.
- [3] 宋马俊.国外煤矿粉尘控制新技术[J].湖南安全与防灾,2007(1):58-59.
- [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(自然科学版),2010,29(4):77-82.
- [5] 李德文,隋金君,刘国庆,等.中国煤矿粉尘危害防治技术现状及发展方向[J].矿业安全与环保,2019,46(6):1-7.
- [6] 顾大钊,李全生.基于井下生态保护的煤矿职业健康防护理论与技术体系[J].煤炭学报,2021,46(3):950-958.
- [7] 徐鸿,骆仲浚,王鹏,等.声波团聚对燃煤电厂可吸入颗粒物的排放控制[J].浙江大学学报(工学版),2007(7):1168-1171.
- [8] 曹志勇,罗志浩,金东春,等.声波团聚技术消除储能电站火灾烟雾的实验研究[J].安全与环境工程,2021,28(1):55-60.
- [9] SHI Y, WEI J H, LI Q, et al. Investigation of vertical microphysical characteristics of precipitation under the action of low-frequency acoustic waves[J]. Atmospheric Research, 2021, 249: 105283.
- [10] ZHANG G X, ZHOU T T, ZHANG L L, et al. Improving acoustic agglomeration efficiency of coal-fired fly-ash particles by addition of liquid binders[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 334: 891-899.
- [11] SHEN G Q, HUANG X Y, HE C L, et al. Experimental study of acoustic agglomeration and fragmentation on coal-fired ash with different particle size distribution[J]. Powder Technology, 2018, 325: 145-150.
- [12] RIERA-FRANCO DE SARABIA E, ELVIRA-SEGURA L, GONZALEZ-GOMEZ I, et al. Investigation of the influence of humidity on the ultrasonic agglomeration of submicron particles in diesel exhausts[J]. Ultrasonics, 2003, 41(4): 277-281.
- [13] ZHOU D, LUO Z Y, JIANG J P, et al. Experimental study on improving the efficiency of dust removers by using acoustic agglomeration as pretreatment[J]. Powder Technology, 2016, 289: 52-59.
- [14] GALLEGU-JUÁREZ J A, RIERA-FRANCO DE SARABIA E, RODRÍGUEZ-CORRAL G, et al. Application of acoustic agglomeration to reduce fine particle emissions from coal combustion plants[J]. Environmental Science and Technology, 1999, 33(21): 3843-3849.