

深井循环通风快速空气净化系统试验研究

谢怡霄¹, 聂兴信^{1*}, 张鑫¹, 孙泽宇¹, 赵一迪¹, 张晨煜¹, 赵林海², 李宗利²

(1. 西安建筑科技大学资源工程学院; 2. 宝鸡西北有色二里河矿业有限公司)

摘要: 为了提高深井可控循环通风空气洁净度, 加速爆破尘毒的过滤与排出, 提出了将微纳米气泡水喷雾系统与水浴丝炭系统相结合的快速空气净化系统。基于自行设计的快速空气净化试验平台, 以微纳米气泡水和雾化喷头为研究对象, 优选出了雾化效果最佳的喷嘴孔径, 对比了自来水与微纳米气泡水的喷雾降尘效率。并基于此平台, 选定湿式喷淋纤维栅和炭式吸附网进行单因素试验, 得到单一最佳水平。基于效果最佳的试验参数, 进行最优组合净化试验。结果表明: 在同一工况下, 孔径0.4 mm的高压喷头雾化角最大, 可达90°。微纳米气泡水的喷雾降尘效率均高于自来水降尘效率, 并且微纳米气泡水更易捕获呼吸性粉尘。湿式喷淋纤维栅的孔径大, 更易形成大面积的水膜, 扩大与水溶性气体接触的面积, 过滤效率也随之增高。较厚的活性炭纤维棉具有更多孔隙和更大的接触面积, 对于CO的吸附效果更明显。快速空气净化系统的最优参数组合为: 微纳米气泡水作为喷雾介质, 采用0.4 mm孔径的高压喷头, 供水压力3 MPa, 湿式喷淋纤维栅采用双层10目金属丝网, 炭式吸附网选用5 mm活性炭纤维棉。在该最优配置下, 全尘与呼尘的平均降尘效率分别为72.83%和79.12%, CO、H₂S和SO₂平均净化效率分别达到84.47%、78.56%、55.42%。

关键词: 深井开采; 循环通风; 金属矿山; 快速空气净化系统; 爆破尘毒; 喷雾降尘; 微纳米气泡水; 水浴丝网

中图分类号: TD711

文献标志码: A

文章编号: 1001-1277(2025)09-0082-08

doi: 10.11792/hj20250909

引言

近年来, 随着矿产资源需求的不断提高, 对金属矿山深部矿产资源的规模化开采成为发展趋势。但矿山开采过程中爆破尘毒严重危害井下作业人员的身心健康, 降低矿山生产效率, 制约了企业安全生产^[1-4]。《“健康中国2030”规划纲要》《国家职业病防治规划(2016-2020年)》等一系列政策、法规指出, 加强高危粉尘、高毒物品等职业病危害源头治理是中国“十四五”规划时期矿业生产的主要任务之一, 其中, 矿井呼吸性粉尘和有毒有害气体的控制, 是加强矿井安全和职业健康工作的关键^[5-9]。

目前, 对于金属矿山深井爆破尘毒治理的普遍方法是应用通风降尘减污。近年来, 矿山引入可控循环通风技术, 该技术是将采区高温高湿的含尘污风经过净化冷却后重新送回用风点的通风工艺^[10-11]。相比传统通风改造技术, 可控循环通风技术具有见效快、成本低的优势, 有效缓解深井开采通风能力不足、采空区漏风、局扇布局混乱等问题, 是实现降温和节能

目标的新举措。但是, 在使用可控循环通风技术时, 需要遵循以下原则: 循环风流的引入不得导致系统内污染物浓度超出标准, 必须经过有效净化后才能引入^[12]。深井爆破尘毒主要含有粉尘、CO、H₂S、SO₂等有害物质, 对此, 研究人员开始对循环风净化技术进行探索。王鹏飞等^[13]首次将微纳米气泡强化喷雾降尘应用于煤矿除尘研究, 验证微纳米气泡水有助于粉尘的润湿和凝聚, 更有利于捕获呼吸性粉尘。江丙友等^[14]针对湿式除尘器中气水喷雾降尘效果进行试验研究, 确定喷嘴与风机距离、喷嘴供气压力、喷嘴供水压力和风机供气压力对降尘效果的影响, 得出最优降尘系统参数。吴洁葵等^[15]将雾化喷淋、水浴丝网过滤和活性炭网吸附等手段相结合, 设计了净化金属矿山井下大风流污风的水浴丝网净化技术。周英烈^[16]将水浴丝网净化技术应用于红透山矿井循环风系统建设, 并验证了其可行性和经济性。

当前深井空气净化系统研究仍然有较大空缺, 也鲜有人对空气净化系统进行实验室研究。本文提出将微纳米气泡水喷雾系统与水浴丝炭系统相结合, 形

收稿日期: 2025-03-27; 修回日期: 2025-05-15

基金项目: 陕西省重点研发计划工业攻关项目(2023-YBGY-137); 国家自然科学基金资助项目(5197040521)

作者简介: 谢怡霄(1995—), 女, 硕士研究生, 从事矿业工程通风等方面研究工作; E-mail: xieyixiao@xauat.edu.cn

*通信作者: 聂兴信(1972—), 男, 教授, 从事矿山数字化及矿山系统优化研究工作; E-mail: niexingxin@126.com

成一种组合式空气净化装置,进一步实现高效降尘和有害气体过滤。本研究采用试验测量的方法,探究该装置降尘效率和气体净化的规律,并在此基础上开展相关因素分析研究。研究结果可为深井空气净化系统的优化及可控循环通风的应用提供理论支撑,也对矿山爆破尘毒防治和作业人员职业安全具有重要的现实意义^[17-20]。

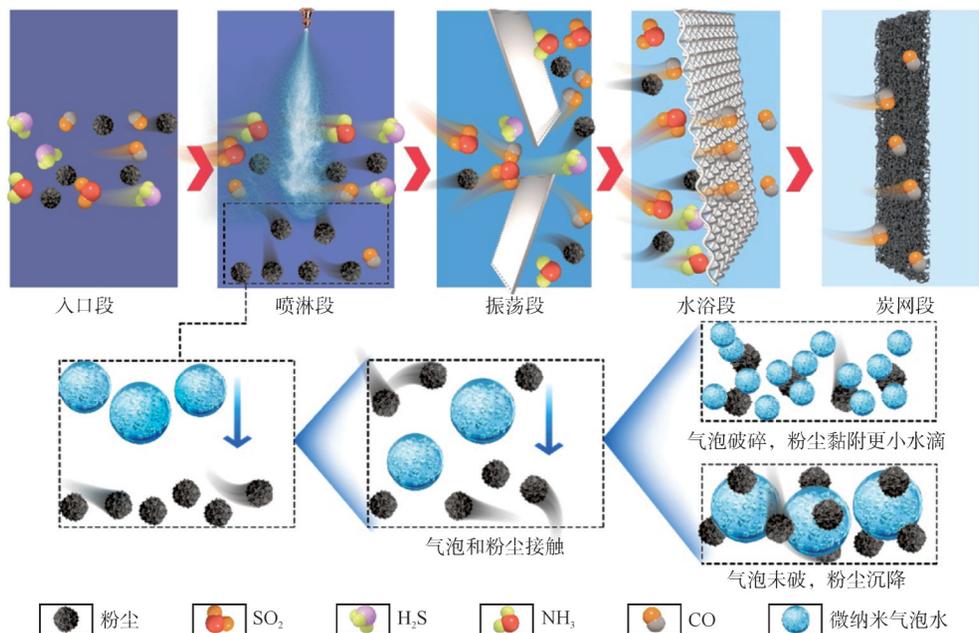


图1 快速空气净化装置原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the mechanism of rapid air purification device

1) 喷淋段: 喷雾降尘装置采用微纳米气泡水作为介质, 微纳米气泡水富含直径小于 $10\ \mu\text{m}$ 的极细微气泡, 通过喷头喷出, 与风流中的粉尘接触。微纳米气泡水具有的表面能、电荷性和润湿能力, 可以吸附粉尘沉降; 在喷出过程中破碎的气泡, 会分解为更小的水滴进而吸附粉尘。

2) 振荡段: 在风道两侧设置一组不同角度的纤维栅, 改变风流在巷道内的流动路线, 使之呈“S”形振荡流动, 有效增加气流碰撞和与净化装置的接触效率, 进一步强化水浴丝网对粉尘及其他气体的吸附吸收。

3) 水浴段: 利用喷水装置向由金属丝编织成的网板喷水, 在金属丝网的网孔上形成向下流动的水膜, 当气流穿过金属丝网时, 污风中所含 H_2S 和 SO_2 易溶于水, 能有效被湿式喷淋纤维栅吸收, 残余矿尘可在湿润的净化系统中被进一步吸收。

4) 炭网段: 通过设置活性炭网格过滤板, 对污风进行脱水和末级净化处理, 吸附风流中残存的微细颗粒及难溶于水的 CO 。

最终在纳米气泡喷雾降尘装置与水浴丝炭净化装置的共同作用下, 达到对含尘含污气流过滤、净化的目的。

1 快速空气净化装置原理

快速空气净化装置原理见图1。该装置由纳米气泡喷雾降尘和水浴丝炭净化装置组合而成, 主要分为4个净化段。风机开启将空气吸入巷道内, 粉尘及有害气体随风流进入巷道, 流经喷淋段、振荡段、水浴段和炭网段, 实现喷雾降尘和空气过滤。

2 试验平台及试验方案

2.1 试验平台

快速空气净化试验平台主要由通风系统、巷道模型、粉尘发生器、微纳米气泡发生系统、气体雾化系统、水浴丝炭过滤系统、供水系统等7部分组成。快速空气净化系统试验设计见图2。

通风系统选用风机风量 $2\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$, 功率 $0.12\ \text{kW}$, 风压 $59\ \text{Pa}$, 连接天圆地方过渡段间设置防火软接头, 固定巷道风速 $1.3\ \text{m/s}$ 。

巷道模型主体长度为 $3.5\ \text{m}$, 其中, 喷雾段长度为 $1.0\ \text{m}$, 入口段、振荡段、水浴段、炭网段和出口段均为 $0.5\ \text{m}$, 断面规格为 $60\ \text{cm} \times 60\ \text{cm}$, 巷道材质为 $4\ \text{mm}$ 透明亚克力板, 便于喷嘴喷雾效果观测与仪器读数。

粉尘发生器用于向除尘系统入口稳定发送定量粉尘, 发生量为 $30\ \text{g}/\text{min}$ 。

生产微纳米气泡水的仪器为 Ruke-RWP150 型微纳米气泡发生器, 微纳米气泡储水水箱连接气体雾化系统, 见图3-a)。

气体雾化喷雾水泵的输出水压可控制与调节, 测定值可直接在仪器上读取, 雾化喷头采用三段式高压

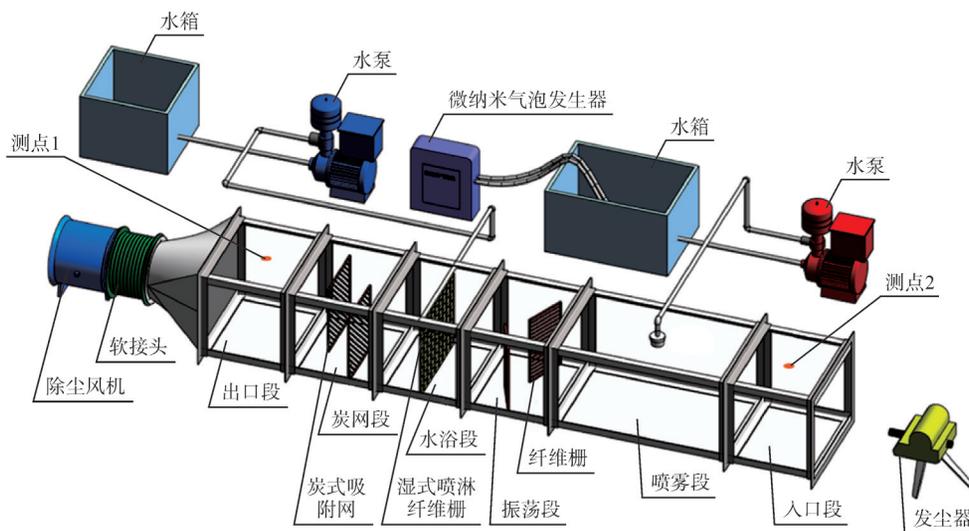


图2 快速空气净化系统试验设计

Fig. 2 Experimental design of the rapid air purification system



图3 快速空气净化试验仪器

Fig. 3 Experimental apparatus for rapid air purification

喷头。

水浴丝炭过滤系统中,振荡段纤维栅采用加密金属丝网,规格 60 cm×30 cm,设置 1 组,位于巷道左右两侧,角度为 30°。水浴段设置 60 cm×60 cm 金属丝网,丝网上方布置内径 9.52 mm 高压尼龙管并设置出水口,水管另一端连接供水系统;炭网段采用 1 组规格为 40 cm×60 cm 的活性炭网。

2.2 试验材料及仪器

1) 试验粉尘。为测定快速空气净化试验平台的降尘效率,选取陕西省镇巴屈家山锰矿粉尘进行试验。采用激光衍射粒度分析仪进行粒度分布测试,试验结果见图 4。其中,特征粒径 d_{10} 、 d_{50} 和 d_{90} 分别为 42.993 μm、287.142 μm 和 609.868 μm。

2) 试验仪器。试验所用仪器包括便携式四合一气体检测仪(见图 3-b)、CCZ1000 直读式粉尘浓度测量仪(见图 3-c)、CFJD25 型煤矿用机械电子式风速表(见图 3-d),主要用于粉尘浓度测定、有害气体测定及巷道风速测定。

3) 试验喷头。喷头选用喷雾除尘常用的三段式高压喷头,选用 3 种不同孔径的三段式高压喷头进行

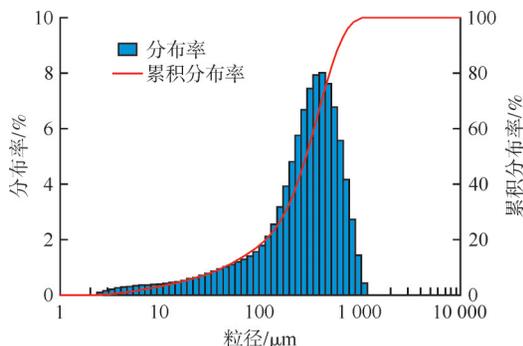


图4 试验粉尘粒径分布

Fig. 4 Particle size distribution of test dust

试验,优选出降尘效果最佳的喷头用于快速空气净化系统。喷头孔径分别为:0.1 mm、0.2 mm 和 0.4 mm,其结构见图 5。

4) 过滤段对比。水浴段采用 2 种规格金属丝网,第一种为双层 16 目丝网,第二种为双层 10 目丝网;炭网段采用 3 mm 和 5 mm 不同厚度的活性炭纤维棉。通过试验比较得出净化效果最佳的过滤层。

2.3 试验方案

共设置 3 组试验,分别为微纳米气泡水喷雾降尘试验、水浴丝炭净化试验、最优组合净化试验。试验中将供水压力设置为 1~3 MPa。

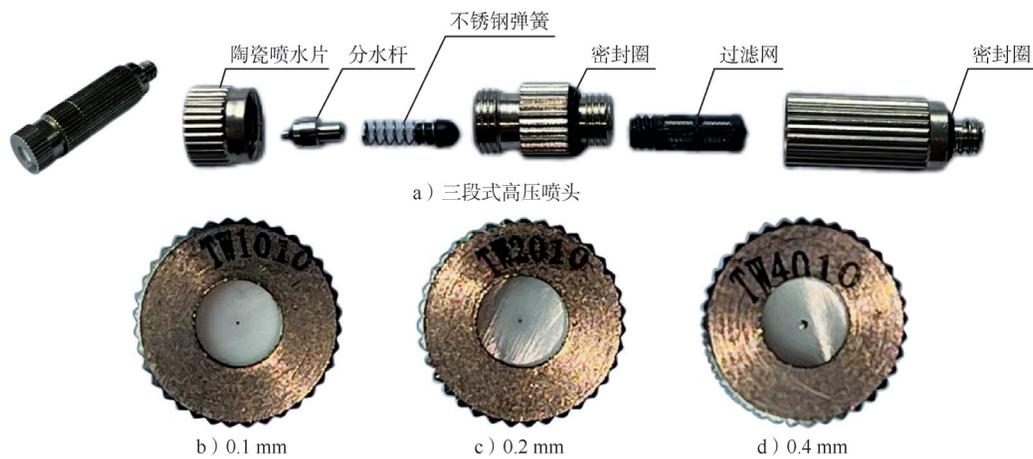


图5 试验所用3种喷嘴

Fig. 5 3 types of nozzles used in the test

第1组试验为微纳米气泡水喷雾降尘试验。通过调整供水压力、喷雾介质和喷头型号,考察喷头的雾化角度、降尘效率与不同工况之间的关系。抽取自来水进入微纳米气泡发生器,生成微纳米气泡水,进出水管均选用内径9.52 mm高压尼龙管,分别使用自来水和微纳米气泡水作为喷雾介质。设置供水压力为1 MPa、2 MPa、3 MPa,喷头孔径为0.1 mm、0.2 mm、0.4 mm。在风流入口段和出口段分别布置CCZ1000直读式粉尘浓度测量仪进行等速粉尘采样,同时测得降尘前后全尘和呼吸性粉尘(呼尘)浓度,采样时间1 min,以此计算2种喷雾介质喷嘴降尘效率(η),计算公式见式(1)。

$$\eta = (1 - \frac{m_2}{m_1}) \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_1 为入口采样质量(g); m_2 为出口采样质量(g)。

第2组试验为水浴丝炭净化试验。采用燃烧定量火药来模拟井下爆破后炮烟成分,通过改变过滤网型号来考察其对炮烟过滤效率的影响。火药置于入口段燃烧,每次定量为2 g。调整湿式喷淋纤维栅型号及炭式吸附网型号,考察不同过滤材料下装置净化效率的变化规律。

第3组试验为最优组合净化试验。根据前两组试验确定单一最佳工况,验证快速空气净化装置的降尘效率和空气过滤效率。

3 试验结果与分析

3.1 微纳米气泡水喷雾降尘试验

3.1.1 微纳米气泡水宏观特性

根据前人研究结果,气泡粒径影响气泡吸附细微颗粒物的能力,微纳米气泡水能促进水捕获细微颗粒物。

自来水与新制微纳米气泡水的区别见图6。不同于自来水,新制的微纳米气泡使水呈乳白色,气泡逐渐上浮至水面破裂。随着微纳米气泡水静置时间增加,水中微纳米级气泡缓慢上升,最终破裂,溶液逐

渐澄清。



图6 自来水与微纳米气泡水的物理形态

Fig. 6 Physical form of tap water and micro-nanobubble water

3.1.2 高压喷头宏观特性

在不同供水压力条件下,3种型号高压喷头的雾化角变化特征见图7,高压喷头雾化角实况见图8。由图7可知:随着供水压力的增加,这3种型号高压喷头雾化角逐渐增大,当供水压力增至2 MPa,供水压力对雾化角的影响变得相对有限。在相同工况下,孔径为0.4 mm的高压喷头有最大的雾化角。当供水压力为1~3 MPa时,0.4 mm的高压喷头覆盖范围最为广泛,雾化角始终大于60°;当供水压力为3 MPa时,其高压喷头雾化角达到最大值90°。

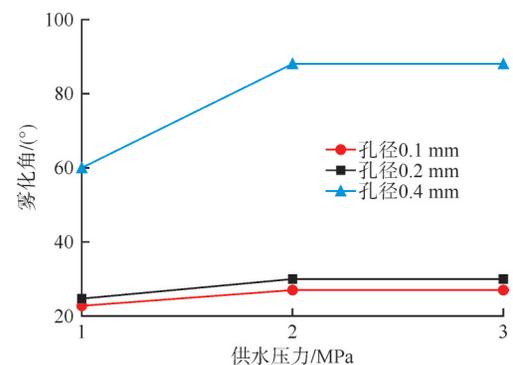


图7 3种型号高压喷头雾化角对比

Fig. 7 Comparison of atomizing angles of 3 types of high-pressure nozzles

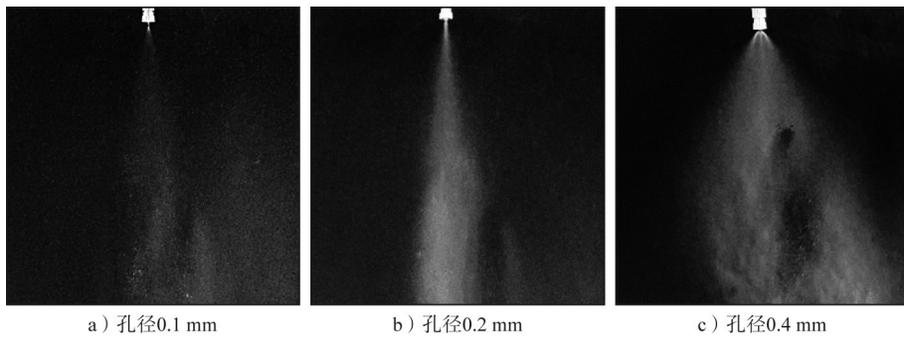


图8 高压喷头雾化角实况

Fig. 8 Actual atomizing angle of high-pressure nozzles

3.1.3 微纳米气泡水喷雾降尘

泡水对全尘和呼尘的降尘效果明显优于自来水降尘效果。

不同工况下微纳米气泡水、自来水的全尘和呼尘

降尘效率见图9、图10。由图9、图10可知,微纳米气

由图9-a)可知:喷头孔径为0.1 mm,供水压力为

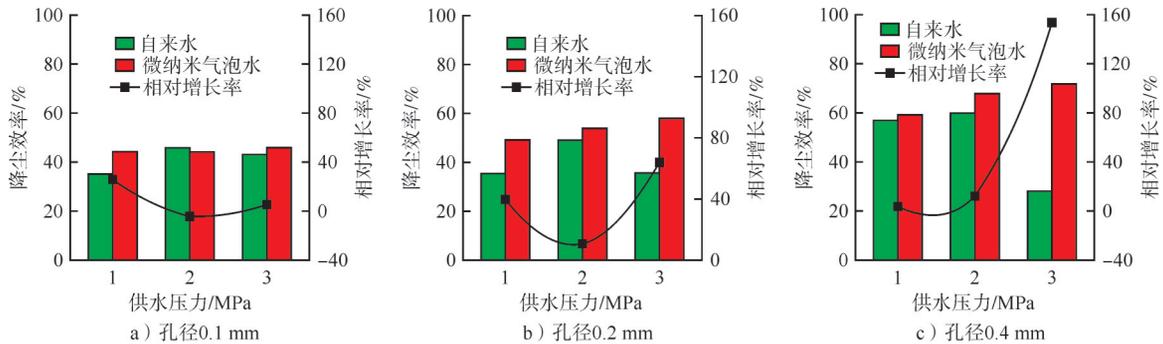


图9 不同型号喷头和不同喷雾介质的全尘降尘效率

Fig. 9 Total dust suppression efficiency of different nozzle models and spray media

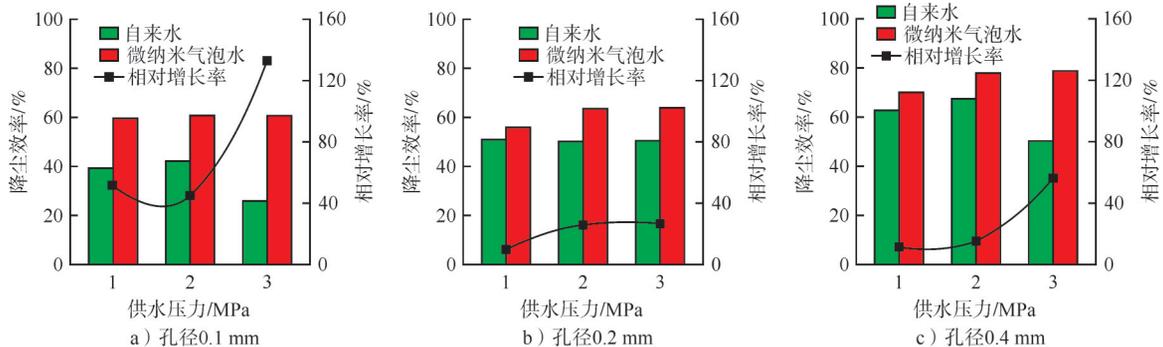


图10 不同型号喷头和喷雾介质的呼尘降尘效率

Fig. 10 Respirable dust suppression efficiency of different nozzle models and spray media

1 MPa时,微纳米气泡水作为喷雾介质的降尘效率为44.37%,自来水作为喷雾介质的降尘效率为35.29%,降尘效率提高了25.73%。微纳米气泡水由于其较小的表面张力,能够有效改善粉尘表面的亲水性能,从而提高降尘效率。随着喷嘴供水压力增加,自来水和微纳米气泡水的降尘效率变化不显著。当供水压力过小时,全尘的降尘效率变化不明显。

由图9-b)可知:在喷头孔径为0.2 mm,供水压力为1 MPa时,微纳米气泡水的全尘降尘效率达到了49.32%,较自来水提高了39.09%。随着喷嘴供水压力增加,自来水和微纳米气泡水的降尘效率均呈现明

显提升,这是供水压力的增加导致了喷头的雾化效果改善,雾滴粒径减小,喷水流量增大,进而提高了降尘效率。值得注意的是,相比于2 MPa情况下的降尘效率,1 MPa情况下的增量更为显著,这表明供水压力变化对喷头的雾化效果影响较小。

由图9-c)可知:喷头孔径为0.4 mm时,不同喷水压力下的降尘效率均得到明显提升。当供水压力为1 MPa时,微纳米气泡水的降尘效率最高,达到71.81%,而自来水则仅为28.22%。水蒸气的分压随着喷水流量增大而增大,同时在气泡破裂、静电力和吸附等众多因素的共同作用下,降尘效率的相对增长

率达到了154.46%。

根据图10的数据,微纳米气泡水在降尘效率方面的相对增长率为10.00%~132.84%,其呼尘的降尘效率显著提升。两类喷雾介质相比较,雾滴粒径与粉尘粒径较为接近时更容易捕获粉尘,对于空气中飘浮的粉尘颗粒,雾滴粒径更小,更有利于捕获。微纳米气泡水相较于自来水,具有增强环境润湿度的特性,并且具备吸附静电作用等特性,因此在相同处理条件下,微纳米气泡水喷雾对呼吸性粉尘的降尘效率显著高于自来水。

由图10可知:随着喷头孔径的增大和供水压力的增加,两类喷雾介质对呼尘的降尘效率呈正相关增长趋势。当供水压力维持在1 MPa时,孔径为0.1 mm、0.2 mm和0.4 mm微纳米气泡水的降尘效率分别为59.82%、56.07%、70.17%。相较于自来水,微纳米气泡水的降尘效率相对增长率分别为51.43%、10.00%、11.53%。当供水压力较小时,自来水喷雾流量较小,降尘效率远低于微纳米喷雾。随着供水压

力的增加,自来水的喷雾降尘效率也会随之提高,但仍然不及微纳米气泡水的降尘效率。

在3 MPa的供水压力下,不同喷头工况下,微纳米气泡水对呼尘的降尘效率分别为60.75%、63.94%、79.03%,相对增长率分别为132.85%、26.51%、56.62%。随着供水压力增加,喷嘴的流量也相应增加,单位时间内喷出的微纳米气泡数量增加,从而增加了粉尘和喷雾的接触面。微纳米气泡水具有附着性、静电吸附性及包裹和沉降呼尘的特性。此外,随着供水压力的增加,空气中负氧离子的浓度逐渐增加,有利于沉降细小颗粒物。微纳米气泡水对呼尘的沉降具有更高的效率,对小颗粒物的沉降效果优于对大颗粒物的沉降效果。

综上,微纳米气泡水为喷雾介质,供水压力为3 MPa,喷头孔径为0.4 mm时,喷雾全尘降尘效率为71.81%,喷雾呼尘降尘效率为79.03%,效率最高。孔径为0.4 mm时喷雾降尘的实测数据见表1、表2。

表1 不同喷雾介质测量段内全尘浓度与喷雾降尘效率

Table 1 Total dust concentration and spray dust suppression efficiency in the measurement section with different spray media

喷头孔径/mm	供水压力/MPa	微纳米气泡水			自来水		
		全尘浓度/(mg·m ⁻³)		降尘效率/%	全尘浓度/(mg·m ⁻³)		降尘效率/%
		降尘前	降尘后		降尘前	降尘后	
0.4	1	39.05	15.95	59.15	40.07	17.18	57.1
	2	40.95	13.12	67.97	40.47	16.20	59.97
	3	42.10	11.87	71.81	43.65	31.33	28.22

表2 不同喷雾介质测量段内呼尘浓度与喷雾降尘效率

Table 2 Respirable dust concentration and spray dust suppression efficiency in the measurement section with different spray media

喷头孔径/mm	供水压力/MPa	微纳米气泡水			自来水		
		呼尘浓度/(mg·m ⁻³)		降尘效率/%	呼尘浓度/(mg·m ⁻³)		降尘效率/%
		降尘前	降尘后		降尘前	降尘后	
0.4	1	26.15	7.80	70.2	25.93	9.62	62.9
	2	26.35	5.77	78.1	24.75	8.02	67.6
	3	21.70	4.55	79.03	26.92	13.33	50.5

3.2 水浴丝炭空气净化试验

3.2.1 湿式喷淋纤维栅的净化效率

1号纤维栅为双层16目金属丝网,2号纤维栅为双层10目金属丝网。由于CO不溶于水,仅考虑湿式喷淋纤维栅对H₂S和SO₂的净化效率。

不同湿式喷淋纤维栅的净化效率见图11。由图11可知:2号纤维栅对H₂S的净化效率为70.83%~84.17%,整体高于1号纤维栅;同时,2号纤维栅对SO₂的平均净化效率为55.07%,比1号纤维栅提升了11.32个百分点。湿式喷淋纤维栅表面覆有曲线状水膜,该水膜旨在用于H₂S和SO₂的气体分离。将2种类型的纤维栅孔径进行对比,2号纤维栅具有更大的孔

径,从而形成更广阔的水膜面积,进而扩大与H₂S和SO₂接触的表面积,有效吸收空气中的水溶性有害气体。因此,在相同条件下,2号纤维栅对硫化物废气的净化效果优于1号纤维栅。综上,双层10目金属丝网的湿式喷淋纤维栅对H₂S和SO₂的平均净化效率分别为77.50%、55.07%。

3.2.2 炭式吸附网的净化效率

以活性炭和活性炭纤维为典型代表的传统炭质材料,其孔隙结构丰富,比表面积大(500~2 000 m²/g),表现出出色的吸附性能,且具有良好的化学稳定性和易于再生的特点。活性炭纤维具有狭窄的孔径分布

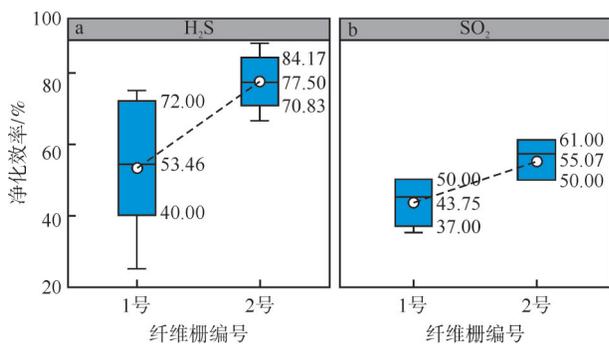


图 11 不同湿式喷淋纤维栅的净化效率

Fig. 11 Purification efficiency of different wet spray fiber grids

和小尺寸孔径,其比表面积高达 2 000 m²/g,因此具有快速吸附和脱附速度,以及较大的吸附容量。相对于普通活性炭而言,活性炭纤维在吸附低浓度物质方面具有明显的优势^[21]。

1号炭式吸附网的厚度为 3 mm 活性炭纤维棉,2号炭式吸附网的厚度为 5 mm 活性炭纤维棉。活性炭纤维对无机气体如 CO 有良好的吸附能力。不同炭式吸附网的净化效率见图 12。由图 12 可知:2号炭式吸附网对 CO 的平均净化效率为 84.83%,相较于 1号炭式吸附网净化效率有显著提升。在相同工况下,较厚的活性炭纤维具有更多孔隙和更大的接触面积,对

于 CO 具有最佳的吸附效果。

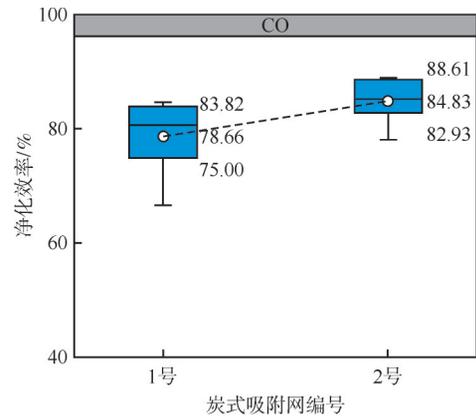


图 12 不同炭式吸附网的净化效率

Fig. 12 Purification efficiency of different carbon adsorption filters

3.3 最优组合净化试验

根据上述试验结果,选取微纳米气泡水作为喷雾介质,使用 0.4 mm 孔径的高压喷头,供水压力为 3 MPa,湿式喷淋纤维栅采用双层 10 目金属丝网,炭式吸附网选用 5 mm 厚活性炭纤维棉。在此优化的快速空气净化系统配置下进行试验,共进行了 6 次重复试验并取平均值,结果见表 3。

在最优配置条件下,全尘和呼尘的平均降尘效率

表 3 最优配置下的空气净化效率

Table 3 Air purification efficiency under the optimal configuration

序号	降尘效率/%		净化效率/%			平均降尘效率/%		平均净化效率/%		
	全尘	呼尘	CO	H ₂ S	SO ₂	全尘	呼尘	CO	H ₂ S	SO ₂
1	67.84	82.45	86.67	76.67	56.50					
2	79.49	82.23	85.00	76.00	52.00					
3	67.33	82.02	87.21	76.00	55.50					
4	78.29	70.00	88.68	86.67	51.50	72.83	79.12	84.47	78.56	55.42
5	73.45	74.93	77.27	80.00	54.50					
6	70.57	83.08	82.00	76.00	62.50					

分别提高至 72.83% 和 79.12%。这是由于随后的净化装置也会截留部分粉尘,增强了降尘效果,因此降尘和除污效果更加显著。而 H₂S 和 SO₂ 的平均净化效率分别提升至 78.56%、55.42%,这是因为一部分水溶性气体 H₂S 和 SO₂ 在喷淋段已经溶于水,同时 CO 在组合式净化过程中的平均净化效率为 84.47%,与炭式吸附网净化效率试验结果相符。

4 结论

1)通过喷头宏观特性试验得出,高压喷头的雾化角排序为孔径 0.4 mm>孔径 0.2 mm>孔径 0.1 mm;当供水压力为 3 MPa 时,孔径为 0.4 mm 的高压喷头的雾化角最大可达到 90°。观察试验现象可知,微纳米气泡水呈悬浮的乳白色状态,随着时间的推移,这种状态由底部逐渐向上转变为相对澄清的状态。

2)在喷雾降尘效率上,微纳米气泡水优于自来水,且微纳米气泡能强化高压喷头的降尘效果。供水压力和喷雾介质相同时,喷头孔径越大,喷水流量越大,降尘效果也越显著。在孔径 0.4 mm、供水压力 3 MPa 时,微纳米气泡水降尘效果最优,对全尘降尘效率达到最大,为 71.81%,呼尘降尘效率也达到最大,为 79.03%,并且微纳米气泡水强化呼尘降尘更加明显。

3)孔径大的湿式喷淋纤维栅间更易形成面积大的水膜,扩大与 H₂S 和 SO₂ 接触的表面积,更有效吸收空气中的水溶性有害气体。在相同工况下,较厚的活性炭纤维棉具有更多孔隙和更大的接触面积,对于 CO 具有最佳的吸附效果。

4)快速空气净化系统的最优参数组合为:微纳米气泡水作为喷雾介质,采用 0.4 mm 孔径的高压喷头,

供水压力为3 MPa,湿式喷淋纤维栅采用双层10目金属丝网,炭式吸附网选用5 mm活性炭纤维棉。在此最优配置下,全尘与呼尘的平均降尘效率分别提升至72.83%和79.12%,CO、H₂S和SO₂的平均净化效率分别达到84.47%、78.56%、55.42%。

参考文献

- [1] 袁亮.我国煤炭主体能源安全高质量发展的理论技术思考[J].中国科学院院刊,2023,38(1):11-22.
- [2] 蒋仲安,曾发镔,王亚朋.我国金属矿山采运过程典型作业场所粉尘污染控制研究现状及展望[J].金属矿山,2021(1):135-153.
- [3] KURNIA J C, SASMITO A P, MUJUMDAR A S. Dust dispersion and management in underground mining faces [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24(1): 39-44.
- [4] 金龙哲,郭敬中,李刚,等.金属矿山采场爆破尘毒防控技术研究进展及展望[J].金属矿山,2021(1):120-134.
- [5] 中华人民共和国国家卫生健康委员会规划发展与信息化司.健康中国行动(2019—2030年)[EB/OL].(2019-07-15)[2024-12-25].<http://www.nhc.gov.cn/guihuaxxs/s3585u/201907/e9275fb95d5b4295be8308415d4cd1b2.shtml>.
- [6] 中华人民共和国国家卫生健康委员会规划发展与信息化司.国务院关于实施健康中国行动的意见[EB/OL].(2019-07-15)[2024-12-25].<http://www.nhc.gov.cn/guihuaxxs/s7824k/201907/511f490925994d99864d606a13eaa73.shtml>.
- [7] 中华人民共和国国家卫生健康委员会规划发展与信息化司.国务院办公厅关于印发健康中国行动组织实施和考核方案的通知[EB/OL].(2019-07-15)[2024-12-25].<http://www.nhc.gov.cn/guihuaxxs/s7824k/201907/ba2849bfc6584a46bf6c9f9b337b847f.shtml>.
- [8] 中华人民共和国中央人民政府.国务院办公厅印发《国家职业病防治规划(2016-2020年)》[EB/OL].2019-12-20[2024-12-25].
http://www.gov.cn/xin-wen/2017-01/04/content_5156463.htm.
- [9] YANG X H, YU H M, WANG Y H, et al. Study on the modularized airflow-diverging system and dust-control technology in the fully mechanized heading face[J]. Powder Technology, 2022, 402: 117325.
- [10] 贾敏涛,汪群芳,吴冷峻.深部开采热环境控制技术研究现状及展望[J].黄金科学技术,2017,25(2):83-88.
- [11] 聂兴信,赵好瑞,付小艳,等.基于大风流综合净化技术的深井可控循环通风系统研究[J].金属矿山,2021(2):201-208.
- [12] 李锦峰,谢贤平,章能胜,等.受控循环通风技术国内外研究概况[J].云南冶金,2012,41(6):1-6.
- [13] 王鹏飞,邬高高,袁新虎,等.微纳米气泡强化喷雾降尘试验研究[J].煤炭学报,2022,47(12):4495-4503.
- [14] 江丙友,张琦,朱志辉,等.湿式除尘器中气水喷雾降尘效果试验研究[J].金属矿山,2023(7):82-90.
- [15] 吴洁葵,袁梅芳.金属矿山井下大风流净化技术研究与应[J].矿业研究与开发,2014,34(3):78-81.
- [16] 周英烈.深井可控循环风浴丝网净化降温技术研究[J].现代矿业,2015,31(9):146-149.
- [17] 王鹏飞,谭焯昊,刘荣华,等.供水压力对气水喷雾雾化特性及降尘效果的影响[J].应用基础与工程科学学报,2018,26(6):1348-1359.
- [18] 李刚.高效水雾降尘技术的实验研究及工程应用[D].湘潭:湖南科技大学,2009.
- [19] 刘荣华,朱必勇,莫世途,等.一种新型组合式喷雾降尘装置流场及雾化特性试验研究[J].安全与环境学报,2024,24(5):1749-1757.
- [20] 江玖鸿.微纳米气泡强化喷雾降尘实验研究[D].湘潭:湖南科技大学,2022.
- [21] 林舒媛,张儒静,姜欣,等.碳质材料的气体吸附性能及其在空气净化中的应用[J].新型炭材料,2015,30(6):502-510.

Experimental study on a rapid air purification system for deep mine circular ventilation

Xie Yixiao¹, Nie Xingxin¹, Zhang Xin¹, Sun Zeyu¹, Zhao Yidi¹, Zhang Chenyu¹, Zhao Linhai², Li Zongli²

(1. School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology;

2. Baoji Erlihe Mining Co., Ltd., NWME Group Ltd.)

Abstract: To improve the air cleanliness of controllable circular ventilation in deep mines and to accelerate the filtration and discharge of blasting-related dust and toxic gases, a rapid air purification system combining a micro-nano bubble water spray system and a water bath wirecarbon system was proposed. Based on a self-designed experimental platform for rapid air purification, micro-nano bubble water and atomizing nozzles were investigated to determine the optimal nozzle aperture for the best atomization performance. The dust suppression efficiency of tap water and micro-nano bubble water sprays was compared. Single-factor experiments were conducted using a wet spray fiber grid and a carbon adsorption mesh to identify optimal individual performance parameters. Finally, an optimal combination purification experiment was performed using the best-performing parameters. The results show that under the same operating conditions, a pressure fan-shaped nozzle with a 0.4 mm aperture achieved the largest atomization angle, reaching up to 90°. The dust suppression efficiency of micro-nano bubble water was consistently higher than that of tap water, and micro-nano bubbles more effectively captured respirable dust. Wet spray fiber grids with larger apertures formed larger water films, increasing the contact area with water-soluble gases and thereby improving filtration efficiency. Thicker activated carbon fiber cotton offered more pores and a larger surface area, significantly enhancing CO adsorption. The optimal parameter combination for the rapid air purification system was as follows: micro-nano bubble water as the spray medium; high-pressure nozzles with a 0.4 mm aperture and 3 MPa water supply pressure; wet spray fiber grid using double-layer 10-mesh metal screen; and 5 mm thick activated carbon fiber cotton for the carbon adsorption mesh. Under this optimal configuration, the total dust and respirable dust removal efficiencies reached 72.83% and 79.12%, respectively, while the purification efficiencies for CO, H₂S, and SO₂ were 84.47%, 78.56%, and 55.42%, respectively.

Keywords: deep mining; circular ventilation; metal mine; rapid air purification system; blasting dust toxins; spray dust suppression; micro-nano bubble water; water bath wire mesh