

中文引用格式:蔡思慧,王鹏飞,李泳俊,等.微纳米气泡水降尘及消纳CO性能试验研究[J].中国安全科学学报,2026,36(5):251-259.

英文引用格式:Cai Sihui, Wang Pengfei, Li Yongjun, et al. Experimental study on dust suppression and CO absorption performance of micro-nano bubble water[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(5): 251-259.

微纳米气泡水降尘及消纳CO性能试验研究*

蔡思慧¹, 王鹏飞^{**1,2}教授, 李泳俊^{1,2,3}副教授, 欧阳丹¹, 陈勇¹副研究员

(1 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2 湖南科技大学

南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

3 安徽理工大学工业粉尘防控与职业安全健康教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001)

中图分类号:X964

文献标志码:A

DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.05.0679

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金C类项目资助(52504217);湖南省杰出青年基金资助(2024JJ2032);湖南科技大学研究生科研创新项目(S202508);福建省自然科学基金资助(2023J01252)。

【摘要】 为在矿山领域有效应用微纳米气泡水炮泥,以微纳米气泡水为研究对象,探究其作为水炮泥内部填充物质在降尘与消纳CO方面的关键性能。通过表面张力、接触角、喷雾降尘、溶液吸附等试验,考察微纳米气泡水润湿、氧化等基本特性及其对粉尘的降尘性能和CO的消纳效率。结果表明:微纳米气泡水比自来水的表面张力低,对煤接触角小,增强对煤颗粒的润湿性;随静置时间延长,坍塌的微米气泡提供大量 $\cdot\text{OH}$,提高微纳米气泡水催化氧化性能;微纳米气泡水比自来水降尘效率高,最高达到62.27%,且对呼吸性粉尘降尘作用效果更为明显;微纳米气泡水有效提高CO消纳效果,随微纳米气泡发生器循环时间延长、进气量增加以及洗气用水量升高,微纳米气泡水对CO消纳效率逐渐上升,但其增长率呈现先升高后降低的趋势;在最佳试验条件下,微纳米气泡水对CO消纳效率可达到64.27%。

【关键词】 微纳米气泡; 降尘效率; CO消纳效率; 爆破; 润湿性

Experimental study on dust suppression and CO absorption performance of micro-nano bubble water

Cai Sihui¹, Wang Pengfei^{1,2}, Li Yongjun^{1,2,3}, Ouyang Dan¹, Chen Yong¹

(1 College of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China; 2 Southern Mine Gas and Roof Disaster Prevention and Control Safety

Production Key Laboratory, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China;

3 Key Laboratory of Industrial Dust Prevention and Control & Occupational Safety and Health,

Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: To effectively apply micro-nano bubble water stemming in mining operations, this study investigated the key performance of micro-nano bubble water as the internal filling material in stemming for

* 文章编号:1003-3033(2026)05-0251-09; 收稿日期:2025-11-14; 修稿日期:2026-02-10

** 通信作者:王鹏飞(1984—),男,江西修水人,博士,教授,博士生导师,主要从事矿山通风、粉尘防治、矿井热害治理等方面的研究。E-mail: pfwang@sina.cn。

dust suppression and CO absorption. Experiments including surface tension measurement, contact angle analysis, spray dust suppression, and solution adsorption were conducted to examine the fundamental properties of micro-nano bubble water, such as wettability and oxidation capability, as well as its effectiveness in suppressing blasting dust and CO absorption efficiency. The results show that: compared with tap water, micro-nano bubble water exhibits lower surface tension and a smaller contact angle with coal, thereby enhancing the wettability of coal particles. With prolonged standing time, collapsed microbubbles generates abundant OH radicals, improving the catalytic oxidation performance of micro-nano bubble water. Micro-nano bubble water achieves higher dust suppression efficiency than tap water, reaching up to 62.27%, with a more pronounced effect on respirable dust. In addition, it significantly enhances CO absorption efficiency. As the circulation time of the micro-nano bubble generator increases, along with higher air intake and larger scrubbing water volume, the CO absorption efficiency gradually increases, though its growth rate first rises and then declines. Under optimal experimental conditions, the CO absorption efficiency of micro-nano bubble water reaches 64.27%.

Keywords: micro-nano bubbles; dust removal efficiency; CO absorption efficiency; blasting; wettability

0 引言

在矿山开采爆破过程中,控制炮烟中粉尘和CO体积分数一直是安全生产和保障矿工健康的重要课题^[1-2]。高质量浓度粉尘及CO积聚不仅严重影响作业环境^[3-5],更直接威胁人员生命安全^[6-7]。水炮泥是一种抑制爆破烟尘有效方式,在矿山爆破领域广泛应用。多组分水炮泥通过化学吸附、催化氧化等机制,显著降低爆破烟尘中的粉尘和毒害气体体积分数^[8-9]。因此,深入研究水炮泥组分的作用机制和配方技术优化,对提升爆破粉尘及CO治理效果具有重要的应用价值。

近年来,水炮泥改性及微纳米气泡技术在爆破烟尘治理领域取得了显著进展。邹常富^[10]、彭剑平^[11]等在水炮泥中加入高效降尘剂,加入新物质的水炮泥较纯水水炮泥降尘效率提高20%以上,有害气体平均体积分数降低50%以上;金龙哲等^[12]致力于研制新型多组份水炮泥配方,并测定炮烟中CO、NO的体积分数变化,对比不同装填类型的水炮泥对采场爆破烟尘的抑制效果。近年来,微纳米气泡凭借比表面积大^[13-14]、停留时间长^[15-16]、具有催化氧化等特性^[17-18],在矿井降尘、有害气体净化等领域展现出巨大的应用潜力^[19-21]。江玖鸿^[22]、欧阳丹^[23-24]、王鹏飞^[25]、袁新虎^[26]等开展试验,研究了微纳米气泡水对粉尘的吸附和润湿性能,证明微纳米气泡水具有较高的降尘效率;吴思成^[27]利用微纳米气泡体系直接催化氧化烟气中的CO,研究初始温度、循环次数、初始pH等因素对CO去除的影响,发

现不同状态条件下微纳米气泡均对CO有一定的去除效果。

综上所述,当前学者已经对水炮泥组分开展了一定的研究,但针对以微纳米气泡水为基液的水炮泥以及微纳米气泡水降尘和消纳CO协同治理方面研究较少。鉴于此,笔者拟开展微纳米气泡水的基本性能试验,通过搭建喷雾降尘平台和有毒有害气体净化试验平台,测定微纳米气泡水雾态化的降尘性能和液态的消纳CO效率,评估微纳米气泡水作为功能性介质的可行性,以期为微纳米气泡水炮泥在矿山领域的应用提供理论依据和技术支持。

1 微纳米气泡水试验样品及方案

1.1 微纳米气泡水基本性能试验

采用微纳米气泡发生器制作微纳米气泡水。为测定微纳米气泡水基本性能共设置3组试验,分别为气泡粒度与存在时间试验、润湿性能试验、催化氧化特性试验。利用激光衍射粒度分析仪测定微纳米气泡水中纳米、微米气泡粒径及其分布特征;通过接触角测量仪和表面张力仪进行微纳米气泡水的润湿性能测定;采用稳态/瞬态荧光光谱仪检测微纳米气泡催化氧化性。试验所用的主要仪器设备有微纳米气泡发生器、激光衍射粒度分析仪、24 t粉末压片机、接触角测量仪、表面张力仪、电子分析天平等。

1) 气泡粒度试验。微纳米气泡发生器持续运行3 min,取100 mL微纳米气泡水至粒度分析仪的样品池中进行测量,通过控制静置时间,得到静置不同时

间的样品粒径分布;将发泡 1 min 内的微纳米气泡水和装入水炮泥袋 5 天的微纳米气泡水分别与自来水进行激光笔照射,对比丁达尔效应发生强度^[28]。

2) 润湿性试验。微纳米气泡发生器循环 3 min 配制 6 组微纳米气泡水样本,利用表面张力仪测量样本静置 1、4、7、10、13 min 后溶液的表面张力;取 0.5 g 干燥的煤粉倒入压片机得到表面光滑的煤片,将微纳米气泡水溶液滴在测试片上,利用接触角测量仪分别测定水溶液、微纳米气泡水溶液与煤片接触时间为 0、15、25、35、45 min 共计 5 种工况时接触角。试验所用的煤尘为焦煤,其特征粒度 $D_{10}=1.95\text{ }\mu\text{m}$ 、 $D_{50}=19.82\text{ }\mu\text{m}$ 、 $D_{90}=76.89\text{ }\mu\text{m}$ 。

3) 催化氧化特性试验。使用 0.04% 质量分数

的氢氧化钠和对苯二甲酸溶液,利用微纳米气泡发生器对溶液进行 3 min 的循环发泡处理,将发泡溶液放入荧光光谱仪测量溶液的荧光强度,从而检测其催化氧化特性^[29-30]。

1.2 微纳米气泡水降尘性能试验

为考察微纳米气泡水降尘性能,搭建喷雾降尘试验平台,如图 1 所示。试验平台由模型巷道及相应的仪器设备组成,设有风机、风速控制器、气溶胶发生器、空压机、粉尘采样器、微纳米气泡发生器、电磁流量计、压力表等仪器设备。在试验过程中,采用气溶胶发生器模拟掘进爆破过程中产生的粉尘,并通过在巷道中布置喷嘴形成微纳米气泡水雾场,以评估微纳米气泡水的降尘效果。

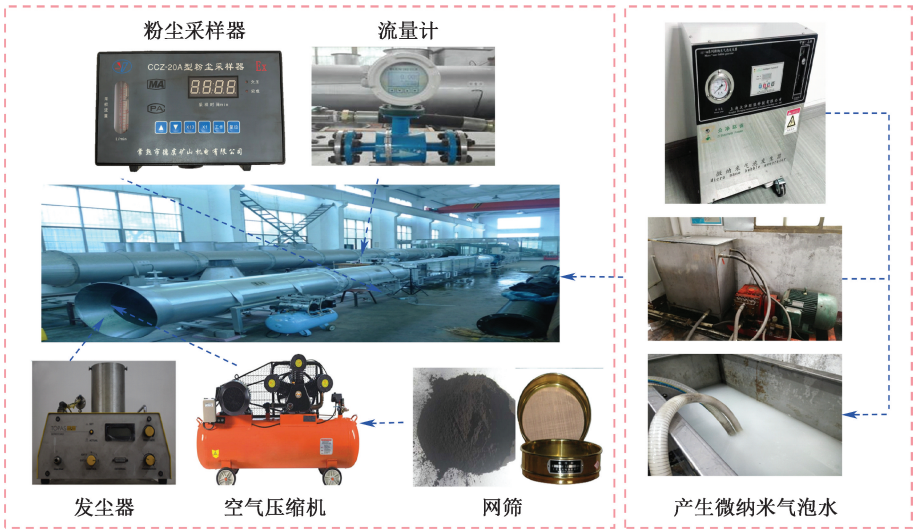


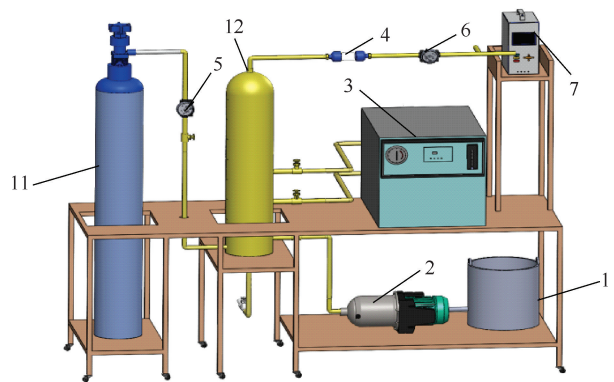
图 1 喷雾降尘试验平台

Fig. 1 Experimental platform for spray dust suppression

同时考察 3 个供水压力(0.5、1.0、2.0 MP),在喷雾场前后设置防爆粉尘采样器,采用滤膜称重法测量空气中粉尘质量浓度。通过雾场前后采样器滤膜质量差计算喷雾降尘效率,粉尘采样器流量为 15 L/min,采样的时间为 2 min。同时,为突出微纳米气泡水显著作用,分别测定自来水和微纳米气泡水 2 种情况下的降尘效率。

1.3 微纳米气泡水消纳 CO 性能试验

搭建微纳米气泡水有毒有害气体净化试验平台,如图 2 所示。通过改变微纳米气泡发生器进气量、循环时间、洗气用水量等参数,考察不同工况下 CO 消纳效率。将水箱内自来水通过水泵加入至洗气瓶中,连接微纳米气泡发生器在洗气瓶中形成含有大量微纳米气泡的净化体系,设置 CO 气体流量分别为 0.3、0.5、0.8 L/min。



1-储存罐,2-水泵,3-微纳米气泡发生器,4-干燥管,5、6-流量计,7-烟气分析仪,11-CO 气瓶,12-洗气瓶

图 2 有毒有害气体净化试验平台

Fig. 2 Toxic and harmful gas purification platform

1) 第 1 组试验。固定微纳米气泡发生器进气量为 2.5 L/min,将微纳米气泡发生器循环时间分别

设置为 30、60、90、120、150、180、210、240 s,考察循环时间对 CO 消纳效率影响。

2) 第 2 组试验。固定循环时间为 210 s,将微纳米气泡发生器进气量分别设置为 0.5、1、1.5、2、2.5、3 L/min,测定不同进气量下的 CO 消纳效率;

3) 第 3 组试验。固定循环时间为 210 s,将微纳米气泡发生器进气量设置为 2.5 L/min,改变洗气瓶内水量为 14、16、18、20、22、24 L,测定不同洗气用水量下的 CO 消纳效率。

2 微纳米气泡水降尘及消纳 CO 性能试验分析

2.1 微纳米气泡水基本特性

通过试验得到微纳米气泡基本特性的具体数据,分别检测微纳米气泡粒度、存在时间、接触角、表面张力以及羟基自由基含量,验证其应用于水炮泥的可行性。

2.1.1 微纳米气泡粒度和存在时间

分别分析微纳米气泡水和静置后的微纳米气泡水的气泡粒度,结果如图 3 所示。

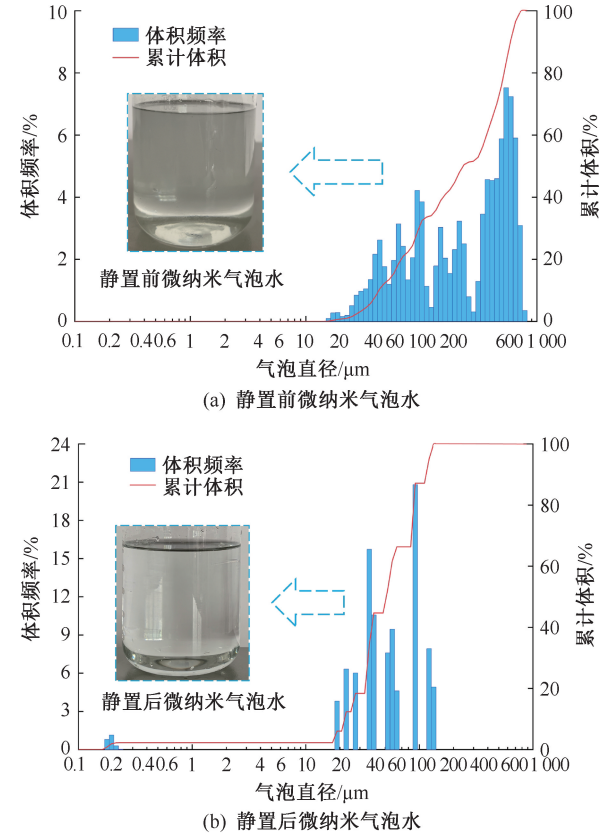


图 3 微纳米气泡粒度分析

Fig. 3 Micro and nano bubble particle size analysis

从图 3a 可以看出,微纳米气泡水气泡粒径集中在 50~700 μm。由图 3b 可知:静置后的微纳米气泡水气泡粒径分布更为集中,主要分布在 0.1~200 μm 的范围内,在 18~134 μm 分布尤为集中,这是由于粒径大的微米气泡更易由于薄膜收缩而坍塌。

由于自来水对光的散射作用极其微弱,而在纳米气泡充当胶体的微纳米气泡水中激光能呈现明显光路。为考察纳米气泡存在时间,采用激光分别照射几种水体,图 4 为丁达尔效应对比。将微纳米气泡水盛装到水炮泥袋中,静置 5 天后再进行照射,发现微纳米气泡水静置后光路颜色较浅,但线条粗细几乎无差别,证明静置后仍存在纳米气泡。静置 16~19 天后光路逐渐减弱最终消失。

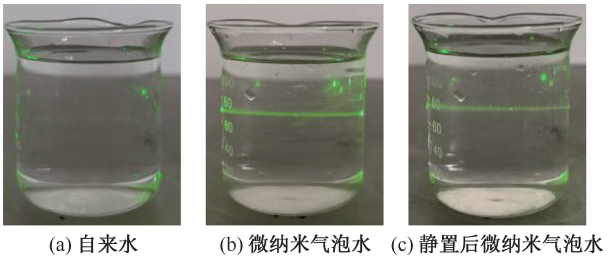


图 4 丁达尔效应对比

Fig. 4 Comparison chart of the Tyndall effect

2.1.2 微纳米气泡水润湿性

微纳米气泡的接触角和表面张力是判断润湿性的主要指标参数,图 5 为微纳米气泡水表面张力和对煤片接触角随时间变化曲线。从图 5 可以看出,随静置时间增加微纳米气泡水的表面张力明显上升,尤其在前 8 min 微米级气泡的消失导致表面张

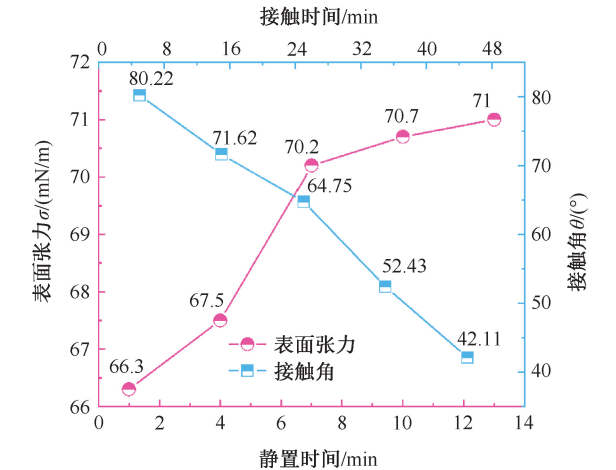


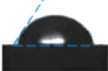
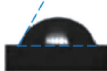
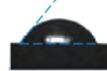
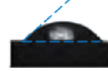
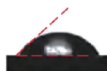
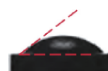
图 5 表面张力和接触角随静置时间变化

Fig. 5 Variation of surface tension and contact angle with standing time

力变化显著,从 66.3 mN/m 上升至 70.2 mN/m,接近自来水的表面张力。微纳米气泡水对煤片的接触角随接触时间延长逐渐降低,静置接触 45 min 后接触角从 80.22°降为 42.11°,减少近 50%。为更直观

显示接触角变化,表 1 为自来水与微纳米气泡水在煤片上的接触角对比。随时间延长微纳米气泡水作用效果增强,说明微纳米气泡长时间与煤粉接触可持续作用。

表 1 微纳米气泡水与自来水在煤片上的接触角

Table 1 Contact angle between micro-nano bubble water and tap water on the coal sheet					
静置时间/min	5	15	25	35	45
自来水/(°)					
	83.94	77.35	73.05	67.04	57.01
微纳米气泡水/(°)					
	80.22	71.62	64.75	52.43	42.11

2.1.3 微纳米气泡水催化氧化性

由于·OH 较难直接检测,在微纳米气泡水中加入对苯二甲酸(Terephthalic Acid,TA),使微纳米气泡水中存在的·OH 与 TA 反应生成产物 2-羟基对苯二甲酸(2-Hydroxyterephthalic Acid,TAOH),利用其极强的荧光特性辅助检测^[31-32]。在相同条件下比较荧光光谱仪中清水与微纳米气泡水荧光强度,图 6 为·OH 荧光强度峰谱图。清水与微纳米气泡水荧光特性波峰均出现在 λ = 397 nm 波长处,在波长 λ ∈ (400~440 nm) 之间差距最大。微纳米气泡水荧光强度始终高于自来水,即证明微纳米气泡水中·OH 数量远高于清水。与普通气泡相比,在扰动状态下微纳米气泡更容易压缩坍塌^[33-34],图 7 为微纳米气泡水与 CO 反应。微纳米气泡水中的微米气泡坍塌时会产生大量·OH 增强微纳米气泡水氧化性^[35-36],发生·OH+CO→CO₂+·H 化学反应,迅速氧化水中存在的 CO 达到消纳效果。

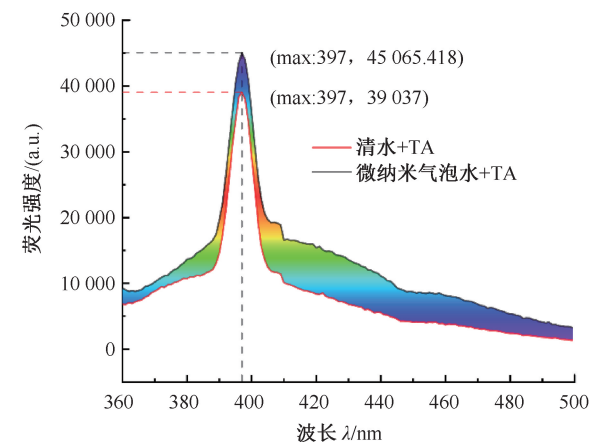


图 6 ·OH 荧光强度峰谱图

Fig. 6 ·OH fluorescence intensity peak spectrum

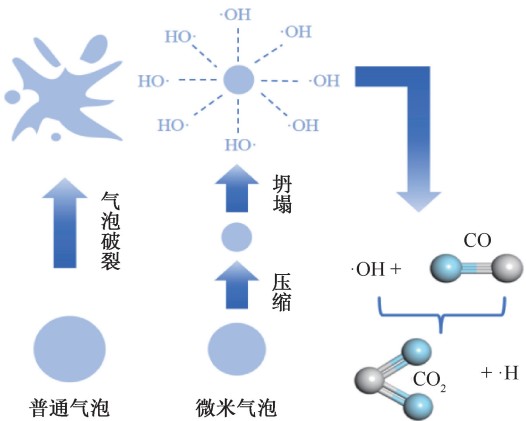


图 7 微纳米气泡水与 CO 反应

Fig. 7 Reaction of micro-nano bubble water with CO

2.2 微纳米气泡水降尘性能

图 8 为不同工况条件下自来水和微纳米气泡水的降尘效率。从图 8 中可以看出,自来水降尘效率分布在 38.68%~57.23%,微纳米气泡水降尘效率分布在 43.29%~62.27%,始终高于自来水。这是由于上述试验得到微纳米气泡水具有表面张力低、对煤接触角小的特性,能更好地润湿和附着在粉尘表面。微纳米气泡水和普通自来水对全尘的降尘效率均较呼吸性粉尘高,这是由于呼吸性粉尘粒径小、比表面积更大、表面能更高的理化性质导致其难以被润湿和捕获。同时,微纳米气泡水对全尘和呼吸性粉尘的降尘强化效果存在差异,呼吸性粉尘相对增长率为 11.92%~16.05%,而对全尘的相对增长率仅为 6.44%~9.73%,可见微纳米气泡水对呼吸性粉尘的降尘效率提升较明显。此外,随供水压力增高,增大溶液雾化效果和与粉尘接触面积,二者降尘效率分别提高 18.55%、18.98%,证明液力雾化压

力增加降尘作用效果显著。

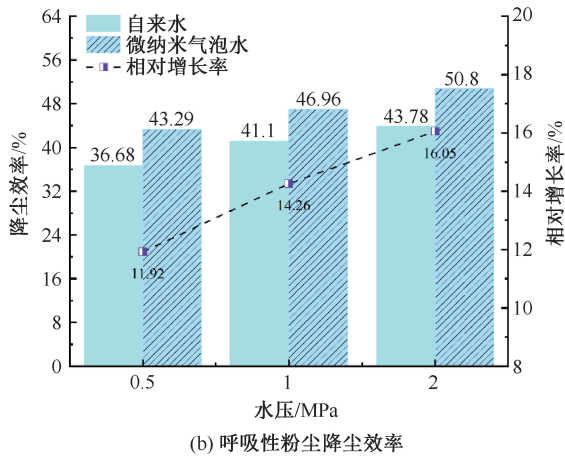
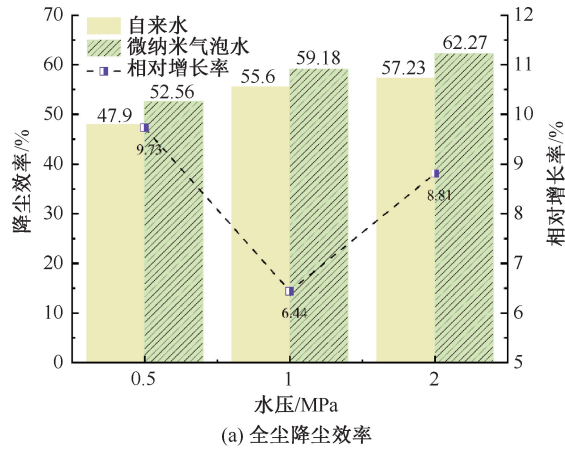


图8 降尘效率对比

Fig. 8 Comparison chart of dust suppression efficiency

2.3 CO 消纳效率

通过改变微纳米气泡发生器循环时间、微纳米气泡发生器进气量和洗气用水量3个因素,判断微纳米气泡水消纳CO的影响条件,并分析其消纳CO能力。

2.3.1 微纳米气泡发生器循环时间对消纳效率影响

固定洗气用水量和微纳米气泡发生器进气量,图9为微纳米气泡发生器循环时间对CO消纳效率的影响。由图9可知:改变微纳米气泡发生器循环时间,CO消纳效率分布在22.17%~65.83%,且循环时间越长产生气泡量越多,CO消纳效率越高,在210 s达到效率上升峰值后消纳效率增长速度明显减缓。图10为微纳米气泡发生器循环时间210 s前CO消纳效率增长分布。3种CO流量在210 s前循环时间每延长30 s,平均消纳效率提升率分别为7.02%、6.51%、6.08%,从210 s后,净化消纳提升率仅为1.56%、0.97%。可知过长时间发泡会导致气泡相互作用增强,失去稳定性,气泡逐渐合并或增大导致气泡解体,从而减少微纳米气泡数量。

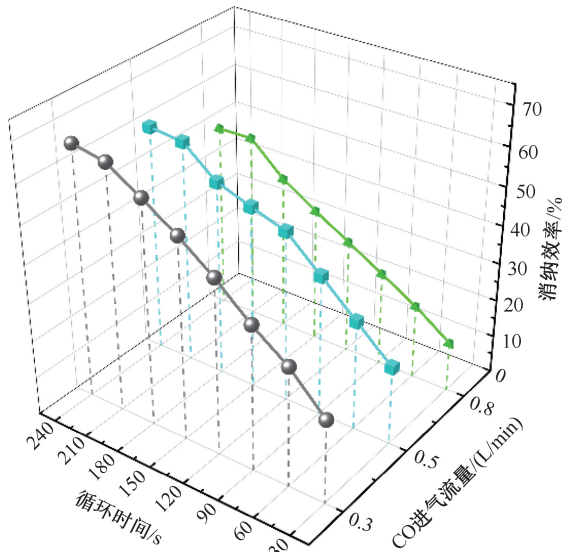


图9 循环时间对CO消纳效率影响

Fig. 9 Effect of cycle time on CO absorption efficiency

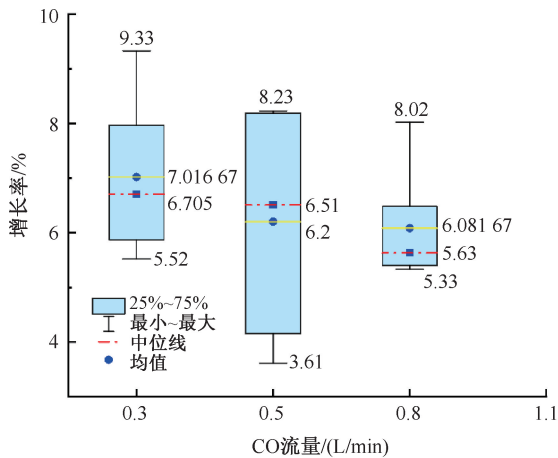


图10 210 s前CO消纳效率增长分布

Fig. 10 Distribution of CO absorption efficiency growth before 210 s

2.3.2 微纳米气泡发生器进气量对消纳效率影响

固定洗气用水量和微纳米气泡发生器循环时间,图11为改变微纳米气泡发生器进气量对溶液颜色影响,可见:随进气量升高溶液由澄清乳白色变为浓稠的乳白色,且透光性差、亮度偏低。

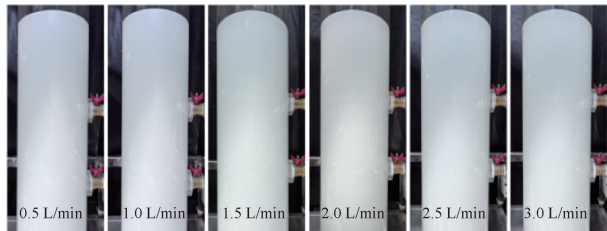


图11 进气量对溶液颜色影响

Fig. 11 Amount of air inlet affects the color of the solution

图 12 为微纳米气泡发生器进气量对 CO 消纳效率影响。由图 12 可知:随着进气量的增加,CO 消纳效率呈现上升趋势。当进气量从 0.5 L/min 变化为 2.5 L/min 时,3 种流量下 CO 消纳效率增幅分别为 28.29%、24.36%、31.91%,是因为进气量的增加使更多气体能够被有效溶解并转化成微纳米气泡。其中,进气量每变化 0.5 L/min 消纳效率最低增幅分别为 8.18%、6.27%、2.59%、6.97%、1.87%,进气量达到 3.0 L/min 时,由于气体溶解量接近饱和状态,消纳效率增长率急剧下降达到极限值。

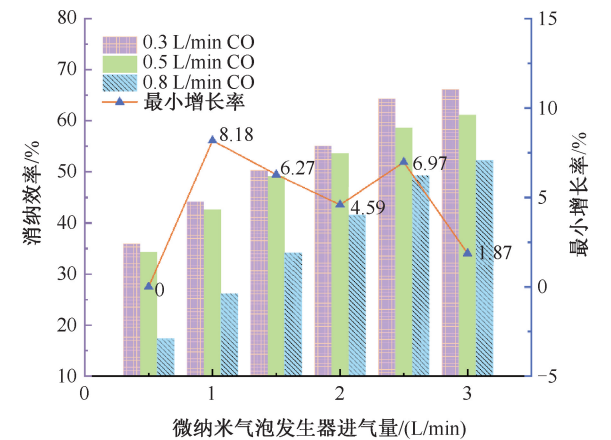


图 12 进气量对 CO 消纳效率的影响
Fig. 12 Effect of air intake on CO absorption efficiency

2.3.3 洗气用水量对消纳效率影响

固定微纳米气泡发生器循环时间和进气量,表 2 为改变洗气用水量对 CO 消纳效率影响。在 3 种不同的 CO 流量条件下,随用水量增加,CO 消纳效率随之上升,而在 24 L 消纳效率明显突出,这是因为用水量的加大会增加微纳米气泡水中·OH 数量,催化氧化作用效果增强。从表 2 中可以看出,缓流的 CO 气体通入增加了微纳米气泡水与 CO 气体

的作用时间,提升了 CO 的溶解效率,导致传质效率高、接触面积增大,为微纳米气泡水中·OH 催化氧化提供便利,进而提高消纳效率。

表 2 用水量对 CO 消纳效率的影响

Table 2 Effect of water consumption on CO absorption efficiency

用水量/L	CO 进气流量/(L/min)			%
	0.3	0.5	0.8	
14	51.8	48.83	39.92	
16	54.18	50.11	41.02	
18	57.13	51.21	42.44	
20	59.85	54.82	44.73	
22	61.04	57.63	47.89	
24	64.27	58.63	49.25	

3 结 论

- 1) 微纳米气泡水比自来水的表面张力低,对煤接触角小,增强了对煤颗粒的润湿性。微纳米气泡水在静置一段时间后大粒度的气泡坍塌,小粒度的气泡仍存在,而坍塌的微米气泡为气泡水提供大量·OH,提高微纳米气泡水催化氧化性能。
- 2) 微纳米气泡水最高降尘率为 62.27%,对全尘的降尘效率始终高于对呼吸性粉尘的降尘效率,其中,与自来水相比微纳米气泡水对呼吸性粉尘的降尘效率提升明显。
- 3) 微纳米气泡水有效提高 CO 消纳效果,随微纳米气泡发生器循环时间延长、进气量增加以及洗气用水量升高,微纳米气泡水对 CO 消纳效率逐渐上升,但其增长率呈现先升高后降低的趋势。在最佳试验条件下,微纳米气泡水对 CO 消纳效率可达到 64.27%。

参 考 文 献

[1] 赵永岗,王德胜,秦鹏渊,等.露天矿爆破(烟)粉尘的爆炸水雾降尘技术研究[J].金属矿山,2022,51(10):204-208.
Zhao Yonggang, Wang Desheng, Qin Pengyuan, et al. Study on dust reduction technology of blasting smoke and dust by explosion water mist in open-pit min [J]. Metal Mine, 2022, 51(10): 204-208.

[2] He Sheng, Gao Shuo, Li Jia, et al. Research on an in-situ synchronous CO elimination method in blasting operations and engineering experimental application based on nano-CO catalysts[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(4): 113 260-113 276.

[3] 李德文,隋金君,赵政,等.“十四五”以来煤矿粉尘防治新技术及发展方向[J].矿业安全与环保,2024,51(6):1-8.
Li Dewen, Sui Jinjun, Zhao Zheng, et al. Control technology and development direction of coal mine dust from the 14th Five-Year Plan Period[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(6):1-8.

[4] Akanyange S N, Nie Wen, Mwabaima F I, et al. A systematic review of the physiological and environmental impacts of

- coal dust and its control technologies[J]. Fuel, 2024, 371(1): 131 876–131 897.
- [5] 王璐. 煤矿安全监控系统中一氧化碳无线传感器的设计与实现[J]. 煤矿机电, 2020, 41(4): 5–8,12.
Wang Lu. Design and implementation of carbon monoxide wireless sensor in coal mine safety monitoring system [J]. Coal Mine Electromechanical, 2020, 41(4): 5–8, 12.
- [6] 薛希龙, 李佳乐, 武拴军, 等. 下向进路采场内炮烟的扩散特征及通风参数确定[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(4): 76–84.
Xue Xilong, Li Jiale, Wu Shuanjun, et al. Diffusion characteristics of blasting fumes in downward drift stope and determination of ventilation parameter[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(4): 76–84.
- [7] Xie Zhuwei, Huang Chen, Zhao Zhongtai, et al. Review and prospect the development of dust suppression technology and influencing factors for blasting construction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2022, 125(7): 104 574–104 606.
- [8] 董祥杰, 石艳, 林椿松, 等. 基于 SEKOA 的煤尘环境下机械臂转运煤粉物料轨迹规划[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(8): 171–179.
Dong Xiangjie, Shi Yan, Lin Chunsong, et al. Trajectory planning for robotic arm transfer of pulverized coal material in coal dust environment based on SEKOA[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(8): 171–179.
- [9] 李向东, 孙萌苑. 新型水炮泥降低爆破烟尘的试验[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(1): 53–56.
Li Xiangdong, Sun Mengyuan. Experiment on new water stemming to reduce blasting smoke and dust[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(1): 53–56.
- [10] 邹常富, 张启平, 秦秀合, 等. 爆破作业面水炮泥降尘试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(5): 126–129.
Zou Changfu, Zhang Qiping, Qin Xiuhé, et al. Experimental study on dust-reduction of water cannon mud on blasting operation face[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(5): 126–129.
- [11] 彭剑平, 邹常富. 高效水炮泥降尘技术的应用研究[J]. 矿业安全与环保, 2018, 45(6): 29–31.
Peng Jianping, Zou Changfu. The Application research on dust removal technology of high efficiency water stemming [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2018, 45(6): 29–31.
- [12] 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, 50(1): 120–134.
Jin Longzhe, Guo Jingzhong, Li Gang, et al. Study progress and prospect on prevention and control technology of blasting dust and poison in metal mine stope [J]. Metal Mine, 2021, 50(1): 120–134.
- [13] 王一彪. 微纳米气泡体系的制备及稳定性能研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
Wang Yibiao. Study on the preparation and stability of micro and nanobubble [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2023.
- [14] 高浩翔. 微纳米气泡高效制备及其环保型应用研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2023.
Gao Haoxiang. Efficient preparation of micro-nano bubbles and their environmentally friendly application [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2023.
- [15] Wang Tianzhi, Yang Ci, Sun Peizhe, et al. Generation mechanism of hydroxyl free radicals in micro-nanobubbles water and its prospect in drinking water[J]. Processes, 2024, 12(4): 692–706.
- [16] Chen Cang, Feng Ganlin, Long Wujiang, et al. Enhancing cement early hydration with micro-nano bubble water: bubble characteristics analysis and mechanism insight [J]. Construction and Building Materials, 2025, 460(2): 139 807–139 821.
- [17] 李婷竹, 郭冀峰, 王嘉琳, 等. 微纳米气泡及其在环境工程领域的应用[J]. 净水技术, 2021, 40(2): 88–92, 110.
Li Tingzhu, Guo Jifeng, Wang Jialin, et al. Micro and nano bubbles and the applications in environmental engineering[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(2): 88–92, 110.
- [18] 刘永立, 全金峰, 方磊, 等. 微纳米气泡协同活性水雾化降尘实验研究[J]. 煤炭工程, 2025, 57(1): 169–176.
Liu Yongli, Quan Jinfeng, Fang Lei, et al. Experiment on atomizing water activated by micro-nano bubbles for dust reduction [J]. Coal Engineering, 2025, 57(1): 169–176.
- [19] Guan Nan, Wang Yao, Hu Jun, et al. Micro-nano bubbles: a new field of eco-friendly cleaning[J]. Nanomaterials, 2025, 15(7): 480–501.
- [20] 彭昕翊, 王承军, 李波, 等. 微纳米气泡与普通气泡曝气性能对比[J]. 南昌大学学报(理科版), 2024, 48(1): 64–70.
Peng Xinyi, Wang Chengjun, Li Bo, et al. Comparative scientific research on aeration performance of micro nano bubbles and ordinary large bubbles[J]. Journal of Nanchang University (Natural Science), 2024, 48(1): 64–70.
- [21] Xiao Yatao, Liu Hailin, Sun Chaoxiang, et al. Research progress of micro-nano bubbles in environmental remediation: mechanisms, preparation methods, and applications [J]. Journal of Environmental Management, 2025, 375(2): 124 387–124 401.
- [22] 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.

- Jiang Jiuhong. Experimental study on micro-nano bubbles strengthening spray dust suppression[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2022.
- [23] 欧阳丹, 王鹏飞, 李石林, 等. 矿山采场水压爆破降尘技术研究进展[J]. 化工矿物与加工, 2023, 52(3): 60-68.
- Ouyang Dan, Wang Pengfei, Li Shilin, et al. Research progress of dust reduction technology in mine quarries by hydraulic blasting[J]. Industrial Minerals & Processing, 2023, 52(3): 60-68.
- [24] Ouyang Dan, Wang Pengfei, Yuan Xinhui, et al. Experimental study on the synergistic dust reduction of MNBs and surfactants[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 183(3): 757-770.
- [25] 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.
- Wang Pengfei, Wu Gaogao, Yuan Xinhui, et al. An enhanced spray dust suppression method by micro-nano bubbles[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4495-4503.
- [26] 袁新虎. 微纳米气泡与表面活性剂协同增效强化喷雾降尘实验研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2023.
- Yuan Xinhui. Experimental study of micro-nano bubbles and surfactant synergistic enhancement of dust reduction by spraying[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2023.
- [27] 吴思成. 微纳米气泡一体化氧化脱除烟气中CO、NO_x和SO₂的研究[D]. 上海: 东华大学, 2022.
- Wu Sicheng. Integrated oxidative removal of CO, NO_x and SO₂ from flue gas by micro-nano bubbles[D]. Shanghai: Donghua University, 2022.
- [28] 岳基伟, 廖杰, 张雷林, 等. 微纳米气泡水对煤体的润湿特性及其增润机制[J/OL]. 煤炭学报: 1-16. [2025-02-20]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.1438>.
- Yue Jiwei, Liao Jie, Zhang Leilin, et al. Wetting characteristics of micro nano bubble water on coal body and its moistening mechanism[J]. Journal of China Coal Society: 1-16. [2025-02-20]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.1438>.
- [29] Tsutomu H, Yoshio N. Properties of O-2 (center dot-) and OH center dot formed in TiO₂ aqueous suspensions by photocatalytic reaction and the influence of H₂O₂ and some ions[J]. Langmuir: The ACS Journal of Surfaces and Colloids, 2002, 18(8): 3247-3254.
- [30] 卢成龙, 常红, 孙福红. 环境水体中自由基的检测技术研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(1): 70-80.
- Lu Chenglong, Chang Hong, Sun Fuhong. Progress on the detection technology of free radicals in waters[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(1): 70-80.
- [31] 孙乐, 张锋华, 杨卫民. 微纳米气泡形成羟基自由基的研究进展[J]. 净水技术, 2021, 40(2): 37-41.
- Sun Le, Zhang Fenghua, Yang Weimin. Research progress of hydroxyl radicals formed by micro-nanobubble[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(2): 37-41.
- [32] Wang Wanting, Fan Wei, Huo Mingxin, et al. Hydroxyl radical generation and contaminant removal from water by the collapse of microbubbles under different hydrochemical conditions[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2018, 229(3): 1-11.
- [33] Jin Juan, Wang Ru, Tang Jian, et al. Dynamic tracking of bulk nanobubbles from microbubbles shrinkage to collapse[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 589(1): 124430-124442.
- [34] 吴思成, 李登新, 孙红蕊, 等. 微纳米气液分散体系氧化吸收CO[J]. 应用化工, 2022, 51(4): 928-932.
- Wu Sicheng, Li Dengxin, Sun Hongrui, et al. Removal of CO by gas-liquid dispersion system of micro-nano bubbles[J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(4): 928-932.
- [35] Masayoshi T, Yasuyuki S, Shigetoshi S. Free-radical generation from bulk nanobubbles in aqueous electrolyte solutions: ESR spin-trap observation of microbubble-treated water[J]. Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids, 2021, 37(16): 5005-5012.
- [36] 李德烈, 张晓, 张玉玲, 等. 体相微纳米气泡理化特性研究进展[J]. 广州化工, 2025, 53(6): 1-5.
- Li Delie, Zhang Xiao, Zhang Yuling, et al. Physicochemical properties of bulk micro nano bubbles[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2025, 53(6): 1-5.



作者简介: 蔡思慧 (2001—), 女, 辽宁鞍山人, 硕士研究生, 主要研究方向为粉尘防治、建筑消防。E-mail: 3338535430@qq.com。