



## 基于超声波技术的矿井水井下预处理试验研究

李昂, 吕璐娜, 吕伟, 田胜祺, 范六一, 孙靖昕, 冯碧野, 杨佳康, 薛智轩

### Experimental study on ultrasound-based underground pretreatment of mine water well

引用本文:

李昂, 吕璐娜, 吕伟, 田胜祺, 范六一, 孙靖昕, 冯碧野, 杨佳康, 薛智轩. 基于超声波技术的矿井水井下预处理试验研究[J]. *矿业科学学报*, 2024, 9(5): 678–686.

LI Ang, L Luna, L Wei, et al. Experimental study on ultrasound-based underground pretreatment of mine water well[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 9(5): 678–686.

## 您可能感兴趣的其他文章

### 1. 煤矿地下水库对矿井水净化机理研究进展

引用本文: 蒋斌斌, 李井峰, 吴敏, 等. 煤矿地下水库对矿井水净化机理研究进展[J]. *矿业科学学报*, 2023, 8(2): 137–145.

### 2. 响应曲面法优化含氟矿井水处理及除氟机理研究

引用本文: 章丽萍, 安逸云, 吴二勇, 等. 响应曲面法优化含氟矿井水处理及除氟机理研究[J]. *矿业科学学报*, 2022, 7(6): 782–792.

### 3. 咖啡渣生物质炭的制备及其对矿井水中氟离子的去除研究

引用本文: 侯嫔, 李佳兴, 张春晖, 等. 咖啡渣生物质炭的制备及其对矿井水中氟离子的去除研究[J]. *矿业科学学报*, 2021, 6(6): 746–754.

### 4. 煤基复合絮凝剂对高浊度高矿化度矿井水的絮凝效果研究

引用本文: 蒋斌斌, 高昊, 杜坤, 等. 煤基复合絮凝剂对高浊度高矿化度矿井水的絮凝效果研究[J]. *矿业科学学报*, 2020, 5(6): 681–686.

### 5. 超声波同步处理强化煤泥浮选的试验研究

引用本文: 王卫东, 张楠, 靳立章. 超声波同步处理强化煤泥浮选的试验研究[J]. *矿业科学学报*, 2019, 4(4): 357–364.

李昂, 吕璐娜, 吕伟, 等. 基于超声波技术的矿井水井下预处理试验研究[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(5): 678-686. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024.05.003

LI Ang, LÜ Luna, LÜ Wei, et al. Experimental study on ultrasound-based underground pretreatment of mine water well[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(5): 678-686. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024.05.003

## 基于超声波技术的矿井水井下预处理试验研究

李昂, 吕璐娜, 吕伟, 田胜祺, 范六一, 孙靖昕, 冯碧野, 杨佳康, 薛智轩

西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西西安 710054

**摘要:** 混凝、沉淀(浮升)和过滤是矿井水的预处理方法,但设备占地面积大、耗费时间长、混凝剂与絮凝剂污染等问题一直制约着矿井水井下处理技术的进一步发展。为此,以现场采空区水样与岩样为研究对象,设计了一套基于超声波雾化技术的矿井水井下预处理装置,采用超声波雾化技术进行矿井水澄清与预软化处理,满足井下生产、消防及降尘用水需要。结果表明:(1)该方法可将黑灰色且有大量固体杂质悬浮物的浑浊矿井水澄清,有效去除水中难溶的固体杂质;(2)超声波雾化技术对水的总硬度降低72.24%, $\text{Ca}^{2+}$ 的质量浓度由试验前的5.33 mg/L降低到0.81 mg/L, $\text{Mg}^{2+}$ 的质量浓度由5.23 mg/L降低到2.13 mg/L,对pH值的影响较小;(3)经超声波雾化后的采空区水可满足井下消防洒水、喷淋降尘、采煤设备开采过程及冷却水的使用要求。

**关键词:** 水资源复用;超声波雾化;预软化处理;矿井水澄清

中图分类号: X 752; TD 98

文献标志码: A 文章编号: 2096-2193(2024)05-0678-09

## Experimental study on ultrasound-based underground pretreatment of mine water well

LI Ang, LÜ Luna, LÜ Wei, TIAN Shengqi, FAN Liuyi, SUN Jingxin,  
FENG Biye, YANG Jiakang, XUE Zhixuan

School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710054

**Abstract:** The conventional pretreatment methods for mine water generally include coagulation, sedimentation (flotation), and filtration. However, large equipment footprint, long processing time and pollution from coagulants and flocculants have been limiting the further development of underground mine water treatment. In this light, we designed an underground mine water pretreatment device based on ultrasonic atomization for clarifying and pre-softening mine water so that the turbid mine water could be treated to meet the needs of underground production, firefighting, and dust reduction. We conducted indoor experiments on mine water clarification and pre-softening treatment using water and rock samples from the field mined-out area. The results show that: (1) This method can clarify black-gray turbid mine water with a large amount of solid impurities, effectively removing insoluble solid impurities in the water. (2) Ultrasonic atomization reduces the total hardness of the water by 72.24%. The milligram equivalent concentration of  $\text{Ca}^{2+}$  is reduced from 5.33 mg/L to 0.81 mg/L and the milligram e-

收稿日期: 2024-04-18 修回日期: 2024-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(51874229); 陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(2020JZ-52)

作者简介: 李昂(1981—), 男, 辽宁鞍山人, 博士, 副教授, 主要从事矿井水灾害治理、巷道支护等方面的教学与研究工作。E-mail: 651238823@qq.com

equivalent concentration of  $Mg^{2+}$  drops from 5.23 mg/L to 2.13 mg/L, with little impact on pH. (3) The water from the mined-out area after ultrasonic atomization can meet the requirements of sprinkling in underground firefighting, spraying in dust reduction, the mining process of coal mining equipment, and the use of cooling water.

**Key words:** water resource reuse; ultrasonic atomization; pre-softening treatment; mine water clarification

煤炭开采或巷道掘进过程中产生的矿井水若不加以循环复用,容易造成矿区地下水及地表河流的严重污染,同时也是对水资源的极大浪费<sup>[1-3]</sup>。目前常规矿井水资源化处理工艺是将井下待处理水提升至地面,经过调节池、混凝沉淀池等一系列设备进行预处理,再根据具体水质处理要求设计深度处理手段<sup>[4-5]</sup>。或者通过设计针对性的矿井水处理设备直接放置于井下、修建地下水库,实现对矿井水的储存与净化<sup>[6]</sup>。许多科技工作者将矿井水处理与井下空间紧密结合,研发了矿井水井下处理技术与装备。郭强等<sup>[7]</sup>利用“直滤系统+反渗透系统”深度处理工艺和浓盐水井下封存技术实现高矿化度矿井水井下脱盐、净化和再利用;雷兆武等<sup>[8]</sup>以实际工程为案例,进行高矿化度矿井水井下回灌水指标的确定,采用“超滤-消毒”的深度处理工艺;郭建伟等<sup>[9]</sup>根据井下混合水的水质测试结果并结合井下生产用水对水质的要求,选配磁分离法进行地下水处理并评价了其经济效益。

矿井水的预处理就是除去水中悬浮的固形物及胶体杂质,为后期针对性的深度处理创造优良的水质条件。根据具体工程水质条件提出针对性的矿井水井下深度处理手段,普遍采用絮凝沉淀的传统预处理方法,更优条件下设置调节池和配水井<sup>[10-11]</sup>控制水量和水质,避免对预处理工艺设施的正常运行带来影响。然而,由于沉淀池、絮凝池等设备占地面积大、处理时间长,加上井下空间有限、规划严格等问题,严重限制了传统方法在井下的布置与使用<sup>[12-15]</sup>。因此,如何采取有效方法解决传统预处理单元中出现的设备占地面积大、额外添加化学试剂的耗材与污染<sup>[16-17]</sup>以及处理效率等问题,对于矿井水井下处理的发展尤为重要。

超声波雾化技术因其优良性能、操作稳定和环保处理,目前被广泛应用于海水淡化<sup>[18]</sup>、废弃污泥资源回收<sup>[19-20]</sup>、膜清洗<sup>[21]</sup>等领域。在污泥预处理中,超声波与化学方法<sup>[22]</sup>和热方法<sup>[23]</sup>的结合使用,已被证明可以提高效率<sup>[24-26]</sup>,以及提高有机物和固体的去除率<sup>[27-28]</sup>。本研究将超声波雾化技术

引入矿井水预处理环节中,设计了一套基于超声波雾化技术的矿井水井下处理试验系统,以现场原位取回采空区水样与岩样作为研究对象开展室内试验和水化学试验,探究超声波雾化技术在矿井水澄清和软化处理中的应用可行性,以期为矿井水井下预处理预软化手段提供借鉴与支持。

## 1 超声波雾化预处理试验系统

### 1.1 超声波雾化原理

超声波雾化技术是通过高频振动和空化效应来分散和聚集悬浮颗粒,但并不直接改变水中溶解的化学成分。超声波雾化技术利用高频超声波振动,将液体分散成细小的雾状颗粒,在处理浑浊矿井水方面,超声波振动器将电能转换为机械能,通过高频振动将水中的悬浮颗粒和污染物分散成更小的颗粒。另外,超声波在液体中传播时会产生大量的微小气泡(空化效应),这些气泡在破裂时会产生局部高温高压,能够破坏悬浮颗粒和污染物的结构,使其更容易沉淀或被滤除,细小的悬浮颗粒会相互碰撞并黏附在一起,形成较大的颗粒团。这些较大的颗粒团更容易通过重力沉降成污泥,从而实现水的澄清。

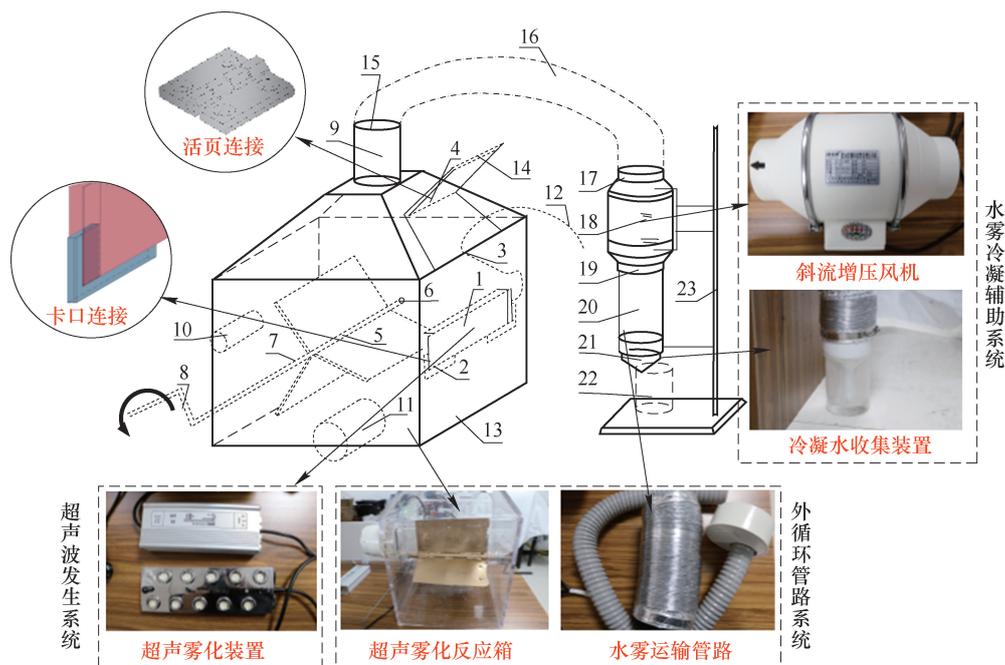
### 1.2 试验系统设计

结合超声波雾化理论及其在海水淡化等领域的应用设计了矿井水预处理试验系统工艺流程,并制造了超声波雾化试验装置(图1)。

试验系统主要分为3部分:超声波发生系统、外循环管路系统、水雾冷凝辅助系统。具体由超声波雾化装置、搅拌片及搅拌把手、试验水箱外壳装置、斜流增压风机、布氏漏斗及烧杯等构成,还配有固定卡槽及支架、进水/泥口、出水/泥口、通风管道和冷凝管道等构件。

#### 1.2.1 超声波发生系统

超声波发生系统包括超声波雾化器、变压器与电源和定位卡槽。超声波雾化装置额定输入直流电45~48 V,因此需要匹配400 W变压器,雾化器主体结构直接与待处理水体接触,可结合待处理水样需求量调整雾化器布置数量。



1—超声波雾化装置;2—定位卡槽;3—出线口;4—活页口;5—搅拌片;6—叶片固定口 A;7—叶片固定口 B;8—搅拌把手;  
9—风机口;10—进水口;11—进泥口;12—外接电源;13—超声波雾化反应箱;14—叶片揭盖;15—管路连接口 A;16—通风管道;  
17—管路连接口 B;18—斜流增压风机;19—管路连接口 B;20—冷凝管道;21—布氏漏斗;22—烧杯;23—铁架台

图1 超声波雾化试验系统结构示意图

Fig. 1 Structure of ultrasonic atomization experimental system

### 1.2.2 外循环管路系统

外循环管路系统包括超声雾化反应箱和水雾运输管路。超声雾化反应箱外壳装置尺寸为 500 mm×300 mm×400 mm。实际尺寸可根据具体需求的净化水量进行调整,水箱外壳使用透明亚克力板材材质,便于观察试验过程中搅拌效果以及后续试验现象。水雾运输管路是连接雾化反应箱与冷凝系统的密闭管路系统。外箱设有定位卡槽、出线口、搅拌叶片及把手、进水口和出水口等构件。搅拌把手和搅拌叶片的设置是为了均匀混合搅拌,使得待处理水样中的固态物质和液态水或胶体分散并均匀的混合,避免雾化后胶体或固形物直接沉底悬浮而反应不均匀。

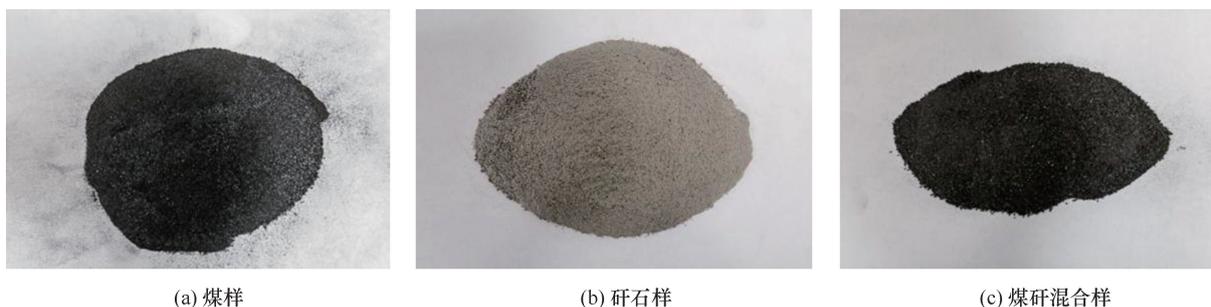
### 1.2.3 水雾冷凝辅助系统

水雾冷凝辅助系统包括斜流增压风机和冷凝水收集装置。通风管道与试验系统外壳上部伸出的风机口紧密连接,使用螺丝卡箍连接,保证各装置间紧密连接及系统整体密闭性良好。

## 2 超声波雾化试验

### 2.1 试验方案

试验所用造浑物质和水样为陕西省铜川市某煤矿现场原位取回的煤样、矸石、煤矸混合物和采空区水,如图 2 所示。试验设计不同浊度的多组试验(表 1),研究超声波雾化对降低矿井水浑浊度、去除水中固体杂质的作用效果。



(a) 煤样

(b) 矸石样

(c) 煤矸混合样

图2 550 μm 以上煤、矸石及煤矸石实物

Fig. 2 Photograph of coal, gangue and coal gangue

表1 超声波雾化试验方案

Table 1 Design of ultrasonic atomization experiment

试样	造浑物质	溶剂
采空区水样组	无	10 L 采空水
水-煤粉样混合组	300 g 煤样	10 L 自来水
水-矽石粉样混合组	300 g 矽石样	10 L 自来水
水-煤矽石样混合组	300 g 煤与矽石样 1:1 混和	10 L 自来水

## 2.2 试验流程

连接好各试验装置,并检查装置密闭性;试验开始并以 20 r/min 的速率转动搅拌叶片,试验流程如图 3 所示。

为保证各试验组初始条件一致,试验前对试验系统各部分使用蒸馏水进行清洗,根据表 1 中试验方案分组进行,分别收集采空区水样、煤样、矽石样和煤矽混合物 4 组对照试验中雾化前后水样,以便观察试验现象和进一步分析水质成分变化。

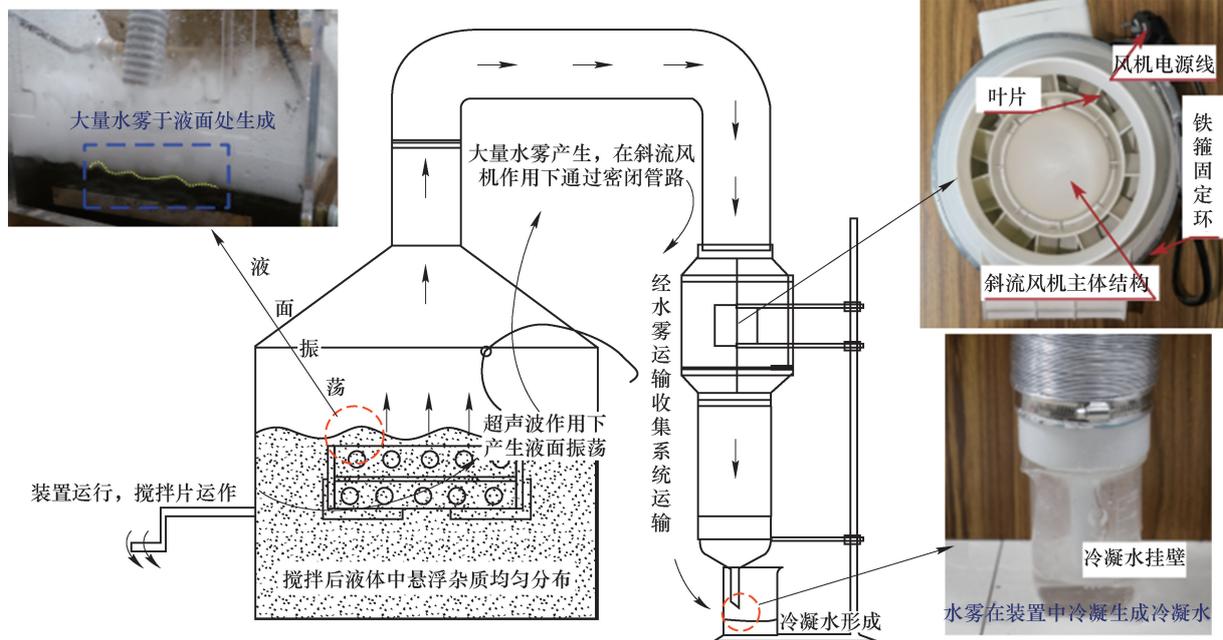


图3 试验流程示意图

Fig. 3 Process of the experiment

### 2.2.1 造浑物质试验组

通过添加造浑物质,增大水体的浑浊度和杂质,探究超声波雾化技术对水质澄清的作用效果,为此设计人为造浑物质试验组试验。将图 2 所示原位取回的 3 类造浑物质用打磨机打碎并用 1 700 μm 和 550 μm 的网格筛过滤,用以模拟井下矿井污染水中各种粒径煤渣杂质或矽石杂质。所

得试验样品按表 1 设计称量好后,用密封袋保存备用;连接好各试验装置,并且检查系统密闭性后开始试验。3 组试验的前后对比结果如图 3 所示。可以看出,经雾化后的冷凝水澄清透明且无异味,而水箱中雾化前液体悬浮且沉淀有大量黑灰色浑浊杂质。由此可见,超声波雾化对浑浊度极高水体的澄清效果十分明显。



(a) 水-矽石混合组

(b) 水-煤混合组

(c) 水-煤矽石混合组

图4 造浑物质试验组雾化前后对比

Fig. 4 Comparison of the mixed material test group before and after atomization

### 2.2.2 采空区水样试验组

收集采空区水时,现场观察到水样有少许浑浊物悬浮,呈半透明状,无特殊刺鼻气味;取样后运回试验室用聚乙烯广口瓶分装并密封保存,以便后续试验展开。

试验流程同人为造浑杂质试验组一样。可以观察到,雾化前水样呈少许不透明状,雾化后为澄清水样。可见,超声波雾化技术对低浑浊度液体的澄清效果同样作用明显。

## 3 超声波雾化试验结果及分析

### 3.1 处理效果分析

为进一步分析超声波雾化技术对矿井水的作用效果,需深入探究超声波雾化对水中微观离子组成变化的影响。采用电极法和铬酸钡分光光度法对试验前后水样进行常规水化学检测试验(图5),分析超声波雾化前后水样离子组分的变化。试验结果见表2。



图5 常规水化学试验分析

Fig. 5 Comparison of effects before and after experiment

表2 采空区水超声波雾化前后常规离子检测结果

Table 2 Conventional ion detection before and after ultrasonic atomization of water in mined-out area

检测项目	采空区-原水样			采空区-雾化后水			
	质量浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	毫克当量/ ( $\text{mmol/L}^{-1}$ )	百分比/ %	质量浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	毫克当量/ ( $\text{mmol/L}^{-1}$ )	百分比/ %	
阳离子	$\text{Ca}^{2+}$	106.86	5.33	25.63	16.27	0.81	6.34
	$\text{Mg}^{2+}$	63.54	5.23	25.14	25.76	2.12	16.55
	$\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$	256.78	10.24	49.23	247.12	9.88	77.11
阴离子	$\text{NO}_3^{-}$	4.10	0.06	0.36	5.80	0.09	0.85
	$\text{Cl}^{-}$	244.00	6.89	37.95	241.00	6.80	61.51
	$\text{SO}_4^{2-}$	127.00	2.64	14.58	49.45	1.03	9.32
	$\text{HCO}_3^{-}$	521.33	8.54	47.11	191.03	3.13	28.33
其他指标	TDS	1 322.83	—	—	776.31	—	—
	pH	8.345	—	—	8.044	—	—

根据试验结果利用 AqQa 水化学分析软件分别绘制经超声波雾化前后的水样 Piper 图(图6)。可以看出,采空区原水样水化学类型为  $\text{Na}-\text{HCO}_3$  型,经超声波雾化作用后水化学类型变为  $\text{Na}-\text{Cl}$  型。由试验结果(图7)可以看出,水中二价离子

( $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  等)的质量浓度明显降低, $\text{Mg}^{2+}$  的毫克当量百分比由 25.14% 降至 16.55%;一价离子( $\text{Na}^{+}$  和  $\text{Cl}^{-}$ )的质量浓度几乎不变;pH 值从雾化前的 8.345 降为 8.044,均属于中性范围,微小变化可以忽略;可溶解性固体物质总量(TDS)变化

从雾化前的 1 322.8 mg/L 降至 776.31 mg/L,这是 由于水样中二价离子的大量减少导致。

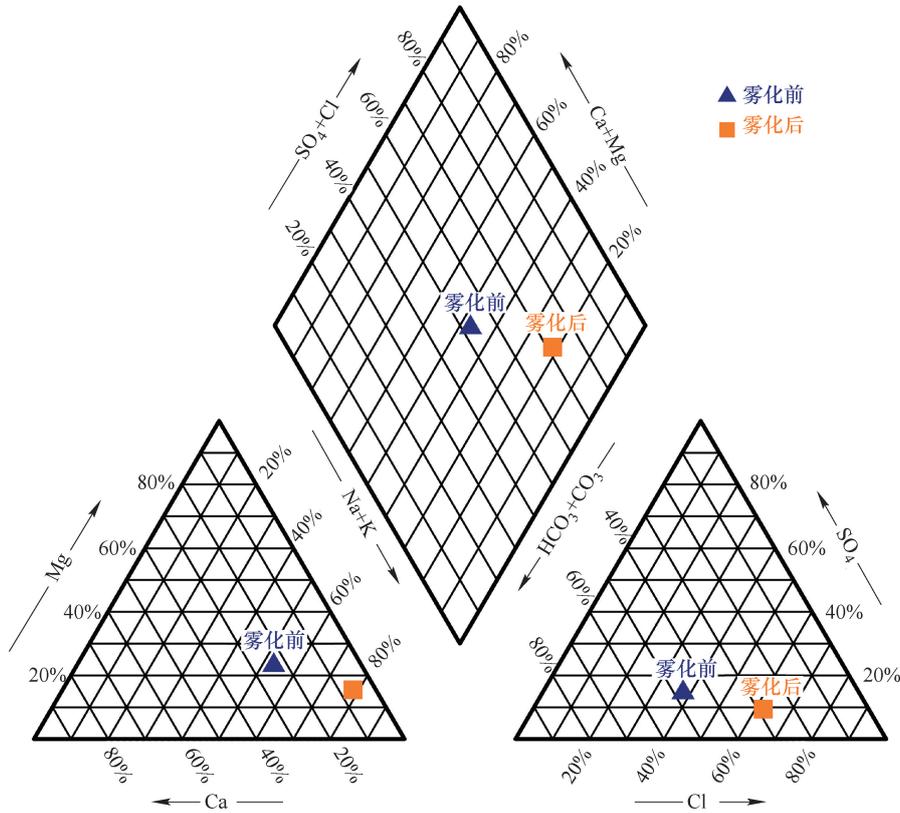


图 6 雾化前后水质 piper 图

Fig. 6 Piper map of water quality before and after atomization

水的硬度主要取决于水中的二价或三价离子 ( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$  等) 的质量浓度,由于矿井水中  $\text{Mn}^{2+}$  和  $\text{Cu}^{2+}$  的含量远远低于其他二价及三价离子,因此水的硬度往往取决于  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  的质量浓度。其常见的计算方法为

$$H_w = 2.497\rho_{\text{Ca}^{2+}} + 4.118\rho_{\text{Mg}^{2+}} \quad (1)$$

式中,  $H_w$  为水的硬度, mg/L;  $\rho_{\text{Ca}^{2+}}$  为  $\text{Ca}^{2+}$  的质量浓度, mg/L;  $\rho_{\text{Mg}^{2+}}$  为  $\text{Mg}^{2+}$  的质量浓度, mg/L。

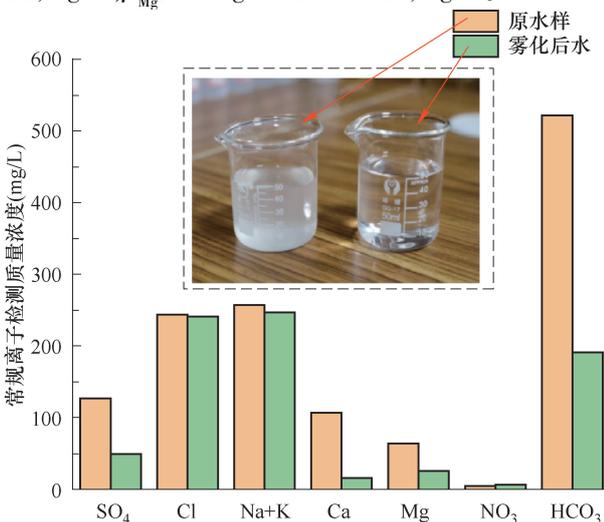


图 7 离子成分对比

Fig. 7 Comparison of ionic composition

经计算可得,超声波雾化对降低水的总硬度有明显效果,从试验前 528.49 mg/L 降低至 146.71 mg/L,降低率高达 72.24%。在超声波雾化的空化效应作用下,水样中的固体杂质由于不能形成气泡与液体分离,而是继续以固体的形式留存在原水样中,进而降低水的硬度,达到使浑浊矿井水澄清的目的。

目前,我国矿井水处理后主要用于井下消防洒水、选煤用水及设备冷却用水等,部分用于生活用水。矿井水的井下复用,至少应达到《煤矿井下消防、洒水设计规范》、井下消防洒水水质标准、选煤用水及设备冷却用水参考水质指标(表 3)的要求。对比可知,经超声波雾化作用后的水均满足井下消防洒水、喷淋降尘、采煤设备开采过程及冷却水等要求。

表 3 井下消防洒水、选煤用水及设备冷却用水参考水质指标  
Table 3 Reference water quality index of underground fire sprinkler water, coal preparation water and equipment cooling water

指标	消防洒水用水	选煤用水	设备冷却用水
悬浮物/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	<30	400	100~150
悬浮物粒径/mm	<0.3	0.7	<2.14
pH 值	6~9	—	6.5~9.5
总硬度	—	<500	—

### 3.2 经济效益分析

单一雾化器尺寸为 27.5 cm × 8.85 cm × 2.75 cm,设备占地面积为 0.64 m<sup>2</sup>。该装置应用场景广泛,实际现场应用时既可单独使用,也可考虑附加在沉淀池中迅速增加预处理效率。传统的井下预处理方式包括沉淀池和混凝系统。超声波雾化处理装置占地面积显著小于传统方法,更加适用于井下有限空间环境。

限于实验室规模,本次试验中仅使用单一雾化器,实际工程应用中可通过增加雾化喷嘴个数来提升雾化效率。雾化器成雾量为 42 L/h,总功率为 250 W,处理水量 420 L/h,处理 1 t 水所需的时间为 2.4 h。根据煤矿电价(0.86~1.40 元/kW·h)以及耗材成本,吨水的综合处理成本为 0.8~1.2 元。

在超声波雾化处理中,TDS 浓度的降低可能涉及多个过程。首先悬浮颗粒也可能在 TDS 测量中被部分检测到,而超声波雾化可以有效地去除悬浮颗粒,降低 TDS 浓度。其次,超声波的空化效应产生的微小气泡破裂时,会产生高温高压环境,可以促进一些溶解性离子形成不溶性沉淀物,再通过后续的沉淀或过滤被去除,从而降低水中的离子质量浓度。假设初始处理的污水量为  $Q_i$ ,其中回收的纯净水量为  $Q_p$ ,剩余的浓水或污泥量为  $Q_c$ ,则回收率为

$$\eta = \frac{Q_p}{Q_i} \quad (2)$$

经计算,超声波雾化装置的回收率可达到 80%~95%。残留污水中污染物浓度高,需要进一步处置,可以直接进行化学处理后排放。残留污水中含有大量的悬浮物,可以定期通过装置中的排泥口进行清理和处置。实际现场应用时,也可考虑将超声波雾化装置附加在原有的沉淀池中,使用沉淀池常规方法进行清淤即可。

综上所述,超声波雾化对去除水中固体杂质悬浮物和降低水的硬度效果十分明显,将超声波雾化原理应用于井下矿井水预处理是十分可行的,且具有占地面积小、净化效率高、不需要额外添加化学试剂等优点。因此,将超声波雾化技术创新性的引入到矿井水井下净化技术中,能为水质净化的预处理提供新的思路。

## 4 结论

(1) 引入超声波雾化技术,自行设计了一套超声波雾化器试验系统。该系统由超声波发生系统、

外循环管路系统和水雾冷凝辅助系统组成。

(2) 开展了室内超声波雾化试验,基于超声波空化效应极大降低了矿井水的浊度和总硬度,水的总硬度降低率可达 72.24%;可有效去除水中难溶性的固体杂质,且不需额外添加试剂,即可达到良好的净化效果。

(3) 经超声波雾化后的采空区水可满足井下消防洒水、喷淋降尘以及冷却水的使用要求。试验结果可为矿井水井下就地绿色、高效复用提供技术借鉴,为矿井水井下预处理提供新的思路。

## 参考文献

- [1] 孙亚军,徐智敏,李鑫,等. 我国煤矿区矿井水污染问题及防控技术体系构建[J]. 煤田地质与勘探, 2021,49(5):1-16.  
SUN Yajun, XU Zhimin, LI Xin, et al. Mine water drainage pollution in China's coal mining areas and the construction of prevention and control technical system[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(5): 1-16.
- [2] 顾大钊,李庭,李井峰,等. 我国煤矿矿井水处理技术现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2021,49(1): 11-18.  
GU Dazhao, LI Ting, LI Jingfeng, et al. Current status and prospects of coal mine water treatment technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 11-18.
- [3] 孙亚军,陈歌,徐智敏,等. 我国煤矿区水环境现状及矿井水处理利用研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1):304-316.  
SUN Yajun, CHEN Ge, XU Zhimin, et al. Research progress of water environment, treatment and utilization in coal mining areas of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 304-316.
- [4] 孙文洁,任顺利,武强,等. 新常态下我国煤矿废弃矿井水污染防治与资源化综合利用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6):2161-2169.  
SUN Wenjie, REN Shunli, WU Qiang, et al. Waterpollution's prevention and comprehensive utilization of abandoned coal mines in China under the new normal life[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6):2161-2169.
- [5] WANG F, WANG Y, JING C. Application overview of membrane separation technology in coal mine water resources treatment in western China[J]. Mine Water and the Environment, 2021, 40(2):510-519.
- [6] WANG X F, GAO Y H, JIANG X J, et al. Analysis on the characteristics of water pollution caused by under-

- ground mining and research progress of treatment technology[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021.
- [7] 郭强,宋喜东,虎晓龙,等. 高矿化度矿井水井下深度处理与浓盐水封存技术研究[J]. *煤炭工程*, 2020, 52(12):16-19.  
GUO Qiang, SONG Xidong, HU Xiaolong, et al. Treatment of high salinity mine water and storage of concentrated brine[J]. *Coal Engineering*, 2020, 52(12): 16-19.
- [8] 雷兆武,孙京敏,张尊举,等. 高矿化度矿井水井下循环利用水质指标研究[J]. *煤炭工程*, 2022, 54(6):128-131.  
LEI Zhaowu, SUN Jingmin, ZHANG Zunju, et al. Water quality index for underground cyclic utilization of highly-mineralized mine water[J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(6):128-131.
- [9] 郭建伟,陈晶,刘小满,等. 基于生产用水途径的矿井水井下处理系统配置[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(S1):239-243.  
GUO Jianwei, CHEN Jing, LIU Xiaoman et al. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(S1):239-243.
- [10] 顾大钊,李井峰,曹志国,等. 我国煤矿矿井水保护利用发展战略与工程技术[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(10):3079-3089.  
GU Dazhao, LI Jingfeng, CAO Zhiguo, et al. Technology and engineering development strategy of water protection and utilization of coal mine in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(10):3079-3089.
- [11] 崔玉川,曹昉. 煤矿矿井水处理利用工艺技术与设计[M]. 北京:化学工业出版社, 2016.  
CUI Yuchuan, CAO Fang. *Technology and design of water treatment and utilization in coal mine*[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2016.
- [12] 蒋斌斌,李井峰,吴敏,等. 煤矿地下水库对矿井水净化机理研究进展[J]. *矿业科学学报*, 2023, 8(2):137-145.  
JIANG Binbin, LI Jingfeng, WU Min, et al. Review on the purification mechanism of mine water by coal mine underground reservoir[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 8(2):137-145.
- [13] 万超然,解强,刘德钱,等. 饮用水深度处理用煤基活性炭吸附性能表征[J]. *矿业科学学报*, 2021(4):487-496.  
WAN Chaoran, XIE Qiang, LIU Deqian, et al. Adsorption capacity of coal-based activated carbon in advanced treatment of drinking water[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2021(4):487-496.
- [14] 侯嫔,李佳兴,张春晖,等. 咖啡渣生物质炭的制备及其对矿井水中氟离子的去除研究[J]. *矿业科学学报*, 2021, 6(6):746-754.  
HOU Pin, LI Jiaying, ZHANG Chunhui, et al. Preparation of coffee residual based biochar and its removal of fluoride ions from mine water[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 6(6):746-754.
- [15] 李福勤,赵桂峰,朱云浩,等. 高矿化度矿井水零排放工艺研究[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(9):81-86.  
LI Fuqin, ZHAO Guifeng, ZHU Yunhao, et al. Research on zero discharge process of highly-mineralized mine water[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(9):81-86.
- [16] 郭中权,毛维东,肖艳,等. 矿井水处理中聚丙烯酰胺残留物对反渗透膜污染的贡献[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(S2):986-992.  
GUO Zhongquan, MAO Weidong, XIAO Yan, et al. Contribution of polyacrylamide residue to reverse osmosis membrane pollution in mine water treatment[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S2):986-992.
- [17] 周如林,刘宗,赵中梅. 反渗透膜前阻垢预处理工艺研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(4):239-245.  
ZHOU Rulin, LIU Zong, ZHAO Zhongmei. Study on pretreatment process of scale inhibition to reverse osmosis membrane[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(4):239-245.
- [18] 张凌云. 超声波露点法海水淡化关键技术研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2011.  
ZHANG Lingyun. Study on key technology of seawater desalination by ultrasonic dew point method[D]. Qingdao:Qingdao Tehcnology University, 2011.
- [19] ZHEN G Y, LU X Q, KATO H, et al. Overview of pretreatment strategies for enhancing sewage sludge disin-tegration and subsequent anaerobic digestion; current advances, full-scale application and future perspectives[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 69:559-577.
- [20] ZHANG Jie, XU Dongyu, ZHANG Guangming, et al. Critical review on ultrasound lysis-cryptic growth for sludge reduction[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 9(5) [2024-09-17]. DOI: 10.1016/j.jece.2021.106263.
- [21] 何韞玉,李舒宏. 超声波雾化强化氨水降膜吸收特性的数值研究[J]. *东南大学学报:自然科学版*, 2022, 52(5):953-962.  
HE Yunyu, LI Shuhong. Numerical study on absorption characteristics of ammonia falling film enhanced by ultrasonic atomization[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2022, 52(5):953-962.

- [22] 杨自力. 超声波雾化溶液除湿系统的性能与评价研究[D]. 上海:上海交通大学,2017.  
YANG Zili. Study on performance and evaluation of ultrasonic atomizing solution dehumidification system [D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2017.
- [23] 曹兴岩,任婧杰,毕明树,等. 超细水雾雾化方式对甲烷爆炸过程影响的实验研究[J]. 煤炭学报,2017,42(7):1795-1802.  
CAO Xingyan,REN Jingjie,BI Mingshu,et al. Experiment study on effect of methane explosion process by atomization method of ultrafine water mist[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(7):1795-1802.
- [24] LE N T,JULCOUR-LEBIGUE C,DELMAS H. An executive review of sludge pretreatment by sonication [J]. Journal of Environmental Sciences;China,2015,37:139-153.
- [25] TYAGI V K,LO S L,APPELS L,et al. Ultrasonic treatment of waste sludge;a review on mechanisms and applications [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology,2014,44(11):1220-1288.
- [26] AREFI-OSKOUI S,KHATAEE A,SAFARPOUR M,et al. A review on the applications of ultrasonic technology in membrane bioreactors[J]. Ultrasonics Sonochemistry,2019,58:104633.
- [27] RYSKIE S,NECULITA C,ROSA E,et al. Active treatment of contaminants of emerging concern in cold mine water using advanced oxidation and membrane-related processes;a review[J]. Minerals,2021,11(3):259.
- [28] YUAN S C,SUI W H,HAN G L,et al. An optimized combination of mine water control, treatment, utilization, and reinjection for environmentally sustainable mining;a case study[J]. Mine Water and the Environment,2022,41(3):828-839.

(责任编辑:陈贵仁)