

杨倩, 胡瑞柱, 王小强, 等. 结晶造粒流化床软化处理矿井水生产性试验[J]. 净水技术, 2025, 44(9): 95-101,116.

YANG Q, HU R Z, WANG X Q, et al. Productive test of crystallization granulation fluidized bed for mine water softening treatment[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(9): 95-101,116.

结晶造粒流化床软化处理矿井水生产性试验

杨倩¹, 胡瑞柱^{2,*}, 王小强³, 魏继林³

(1. 西安建筑科技大学设计研究总院有限公司, 陕西西安 710055; 2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西西安 710055; 3. 中煤西安设计工程有限责任公司, 陕西西安 710055)

摘要 【目的】为解决矿井水中高硬度问题, 探究诱导结晶技术在矿井水资源化处理中的应用前景。【方法】文章采用化学结晶循环造粒流化床开展静态试验和生产性试验。【结果】结晶造粒流化床进水流速为 60~75 m/h, 进水 Ca^{2+} 硬度为 800~1 000 mg/L 时, NaOH 加药量为 100 mg/L, Na_2CO_3 加药量为 350 mg/L 时, Ca^{2+} 去除率可达到 60% 以上; 保持 NaOH 投加量不变, 增加 Na_2CO_3 加药量为 500 mg/L 时, Ca^{2+} 去除率可达到 70% 以上; Na_2CO_3 为 600 mg/L 时, Ca^{2+} 去除率可达到 75% 以上。对处理中产生的结晶颗粒物进行 X 射线衍射仪 (XRD) 及扫描电镜 (SEM) 分析可知, 结晶物表面结构光滑质密, 主要成分多为 CaCO_3 , 该结晶物具有资源化回收潜力, 可实现全过程的废物零排放。【结论】与传统药剂沉淀法相比, 结晶造粒流化床软化处理矿井水时具有去除率高、药剂投加量低、系统运行稳定可靠等特点, 更具工程应用前景和经济性优势。

关键词 矿井水 高硬水 双碱法 加药比 结晶造粒流化床 软化

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)09-0095-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.09.012

Productive Test of Crystallization Granulation Fluidized Bed for Mine Water Softening Treatment

YANG Qian¹, HU Ruizhu^{2,*}, WANG Xiaoqiang³, WEI Jilin³

(1. Xi'an University of Architecture and Technology Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710055, China;

2. School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

3. China Coal Xi'an Design Engineering Co., Ltd., Xi'an 710055, China)

Abstract [Objective] This paper is to address the problem of high hardness in mine water and explore the application prospects of induced crystallization technology in mine water resource treatment. [Methods] Static and pilot-scale experiments were conducted using a chemical crystallization circulating pelletized fluidized bed. [Results] When the influent velocity of the crystallization-pelletized fluidized bed was from 60 m/h to 75 m/h and the influent Ca^{2+} hardness was from 800 mg/L to 1 000 mg/L, a NaOH dosage of 100 mg/L combined with a Na_2CO_3 dosage of 350 mg/L achieved a Ca^{2+} removal rate of over 60%. Keeping the NaOH dosage constant and increasing the Na_2CO_3 dosage to 500 mg/L increased the Ca^{2+} removal rate to over 70%, and further increasing the Na_2CO_3 dosage to 600 mg/L raised the Ca^{2+} removal rate to over 75%. X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) analyses of the crystallized particles produced during treatment showed that the particle surfaces were smooth and dense, mainly composed of CaCO_3 , indicating potential for resource recovery and enabling a zero-waste discharge process. [Conclusion] Compared with the conventional chemical precipitation method, the crystallization pelletized fluidized bed offers higher removal efficiency, lower chemical consumption, and more stable and reliable operation in softening mine water, demonstrating superior engineering applicability and economic advantages.

Keywords mine water high-hard water double-alkali method dosing ratio crystallization granulation fluidized bed softening

[收稿日期] 2024-12-27

[基金项目] 陕西省教育厅重点科学研究计划项目(23JY047)

[作者简介] 杨倩(1982—), 女, 高级工程师, 主要从事建筑给排水设计等工作, E-mail: 41706829@qq.com。

[通信作者] 胡瑞柱(1991—), 男, 副教授, 研究方向为饮用水和工业水中污染物的去除技术开发和理论研究, E-mail: huruizhu@xauat.edu.cn。

矿井水水质通常具有总溶解性固体(TDS)含量高的特点^[1]。我国西北地区矿区产生的矿井水中钙离子(Ca^{2+})、镁离子(Mg^{2+})含量高,这类水质的直接排放会造成土壤板结、地下水污染等问题^[2],直接用于生产会对管道及设备产生腐蚀和结垢问题^[3]。我国煤矿开采及生产中吨煤产生的矿井水量约为 2.1 m^3 ,年产量可达到 $6.0 \times 10^9 \text{ m}^3$ 以上,是一种保有量较大非常规水资源^[4-5]。因此,在西北地区等水资源紧张地区,矿井水资源循环利用已成为煤炭行业节水减排的重要内容^[6-8]。随着矿区水资源状况紧张和国家《关于加强矿井水保护和利用的指导意见》的提出,矿井水资源化利用和零排放成为近年来的研究热点^[9]。常用的零排放主流技术路线是由预处理、浓缩减量及蒸发结晶 3 个工艺段组成^[10-13],其中预处理工艺段主要以去除水中总硬度、总碱度、胶体和悬浮物等污染物质为目标^[14],为后续处理工艺提供理想水质。目前矿井水软化脱盐通常使用化学药剂沉淀法工艺进行处理^[15-17],常使用石灰作为软化药剂进行处理,存在药剂投加量大、污泥产量大以及处理运行成本高等问题^[18-19]。

化学结晶循环造粒流化床(简称“结晶造粒流化床”)工艺技术近年来被广泛应用于工业废水处理^[20]、市政饮用水处理^[21]、热电厂循环排污水处理^[22]等领域,并取得了良好的处理效果,具有运行负荷高、抗冲击负荷能力强、加药量少、运行成本低等优点^[23-25]。

山西某煤现采用“砂滤+超滤+反渗透”工艺对矿井水进行资源化处理。在实际处理中,砂滤及超滤后直接进行反渗透处理,存在膜易堵塞和结垢问题,由此产生了设备透水率降低、反冲洗频次增加、反渗透浓水排水量增大以及设备易损坏等问题。因此,需对反渗透系统进水进行脱盐预处理以应对存在的上述问题。

此文章采用结晶造粒流化床工艺对矿井水进行软化处理,分别通过静态预试验和生产性试验探究该工艺的处理效果,并对生产性试验中的控制条件进行优化,为后续类似工程应用提供数据参考和理论支持。

1 试验材料与方法

1.1 原水水质

试验原水水质指标如表 1 所示,在进行生产

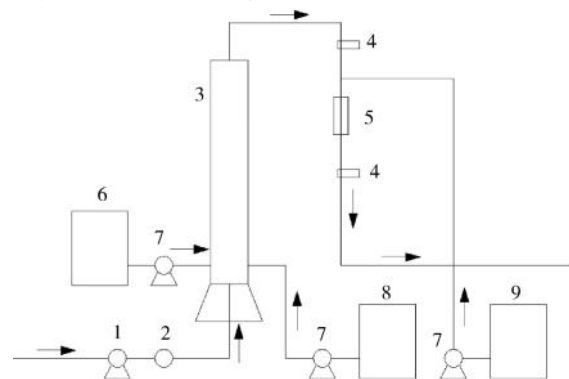
性试验之前通过模拟原水水质开展静态预试验,静态预试验中原水总硬度控制为 $1\,700 \text{ mg/L}$,钙硬度为 860 mg/L ,镁硬度为 840 mg/L ,总碱度为 162.5 mg/L 。

表 1 矿井水水质
Tab. 1 Water Quality of Mine Water

指标	数值
pH 值	7.5~8.0
水温/ $^{\circ}\text{C}$	20.3~24.0
浑浊度/NTU	1~5
总硬度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	1\,600~1\,800
$\text{Ca}^{2+}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	760~960
$\text{Mg}^{2+}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	800~960
总碱度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	100~165
$\text{HCO}_3^{-}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	100~165
$\text{SO}_4^{2-}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	5\,200~5\,300
TDS/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	7\,700~7\,800

1.2 工艺流程与试验内容

静态预试验中采用六联变速混凝搅拌仪。生产性试验系统如图 1 所示,原水通过水泵由进水管打入结晶造粒流化床内,与加入的 NaOH 、 Na_2CO_3 进行混合并发生结晶反应,装置出水 pH 为碱性条件,使用 HCl 对出水 pH 进行调节。结晶造粒流化床装置总高度为 6 m ,直径为 1 m ,设计处理量为 $60 \text{ m}^3/\text{h}$,诱导晶种填充高度为 0.8 m ,使用的药剂为 NaOH (质量分数为 20%)、 Na_2CO_3 (质量分数为 15%)、 HCl (质量分数为 10%)。



注:1—进水泵;2—流量计;3—结晶造粒流化床;4—pH计;
5—管式混合器;6— Na_2CO_3 药罐;7—加药泵;8— NaOH 药罐;9—
盐酸药罐。

图 1 生产性试验系统

Fig. 1 Productive Experiment System

1.3 指标测定方法

水中硬度和碱度分别采用乙二胺四乙酸(EDTA)滴定法和酸碱滴定法测定;pH采用pH计(AT101)测定;浑浊度采用WGZ-200雷磁浊度仪测定; SO_4^{2-} 采用铬酸钡分光光度法测定;TDS采用雷磁DDS-307电导率仪测定。生产性试验中定期进行结晶颗粒物的取样并进行分析,结晶颗粒物的表面形态和及元素组成由扫描电

镜(SEM,600 FEG)和X射线衍射仪(XRD,INCA E350)测定。

2 结果与分析

2.1 静态预试验

2.1.1 NaOH投加量控制

单独采用NaOH作为软化药剂进行试验,控制NaOH为不同投加量分析其对软化处理的影响,试验结果如图2所示。

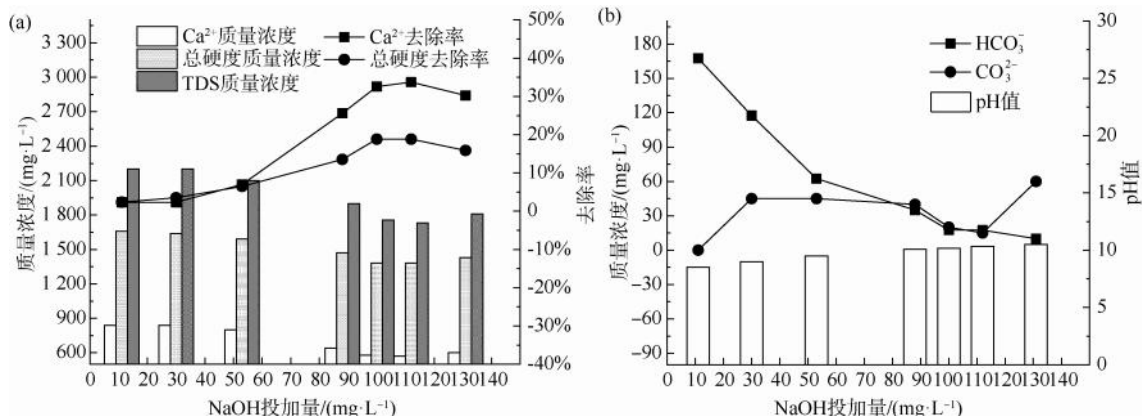
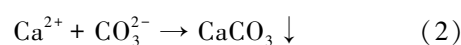
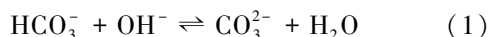


图2 NaOH投加量控制(a)硬度和TDS含量变化;(b)碳酸盐和pH值变化

Fig. 2 Control of NaOH Dosages (a) Variation of Hardness and TDS; (b) Variation of Carbonate Concentration and pH Values

由图2可知,随着NaOH投加量增加,Ca²⁺去除效果逐渐提升,NaOH投加量为100 mg/L时,总硬度和Ca²⁺的去除率分别为19%和33%,继续提高投加量对总硬度和钙硬度的去除率基本无影响。图2(b)中出水中HCO₃⁻浓度随着NaOH投加量增加逐渐降低,CO₃²⁻浓度先增加后降低并趋于稳定,pH值维持在10左右。水中Ca²⁺、CO₃²⁻以及HCO₃⁻同时存在时具有以下反应,如式(1)~式(2)^[26]。



NaOH加入促使式(1)~式(2)向右充分反应^[27],当NaOH投加量达到100 mg/L时原水中反应式(1)和式(2)达到最大程度,单一投加NaOH已无法进一步提升软化处理效果。

2.1.2 Na₂CO₃投加量控制

单独采用Na₂CO₃作为软化药剂进行投加量控制试验,试验结果如图3所示。

由图3可知,Na₂CO₃投加量为600 mg/L时,总

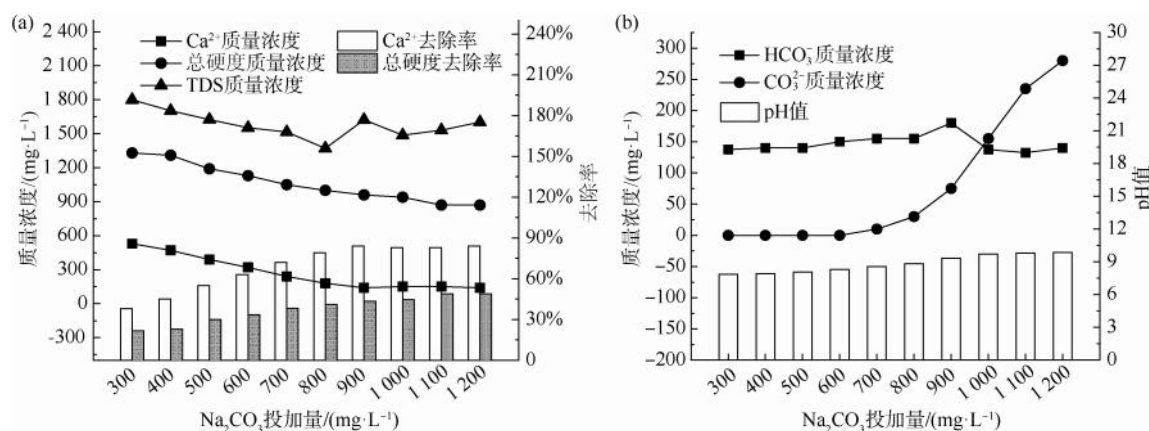


图3 Na₂CO₃投加量控制(a)硬度和TDS含量变化;(b)碳酸盐和pH值变化

Fig. 3 Control of Na₂CO₃ Dosage (a) Variation of Hardness and TDS; (b) Variation of Carbonate Concentration and pH Values

硬度和 Ca^{2+} 去除率分别为 34% 和 63%; Na_2CO_3 投加量达到 900 mg/L 时,总硬度和 Ca^{2+} 去除率为 44% 和 84%。图 3(b) 中当 Na_2CO_3 投加量 ≤ 600 mg/L 时, CO_3^{2-} 含量基本不变,此时投加至水中的 Na_2CO_3 多与水中 Ca^{2+} 发生式 (2), 投加量 > 600 mg/L 时,水中 CO_3^{2-} 含量开始升高,此时式 (2) 进程基本结束,投加至水中 Na_2CO_3 增加了水中 CO_3^{2-} 含量^[28]。 HCO_3^- 含

量随着 Na_2CO_3 投加量增加无明显变化, Na_2CO_3 的加入主要通过式 (2) 的过程影响软化效果。

2. 1. 3 NaOH 与 Na_2CO_3 联合投加控制

采用 NaOH 和 Na_2CO_3 联合投加进行软化处理, NaOH 投加量固定为 100 mg/L, 通过改变 Na_2CO_3 的加药量分析不同药剂投加配比时的软化处理效果, 试验结果如图 4 所示。

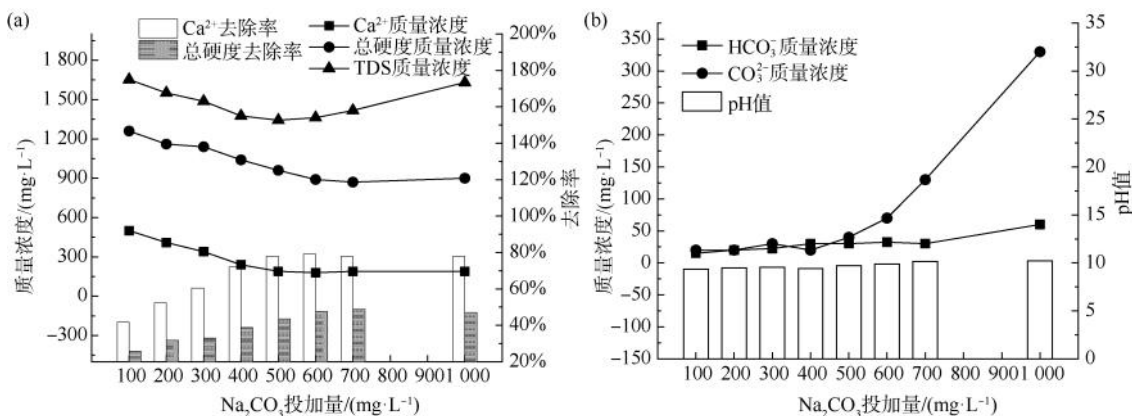


图 4 NaOH 和 Na_2CO_3 联合投加处理效果

Fig. 4 Effect of Combined Dosing of NaOH and Na_2CO_3 on Treatment

由图 4(a) 可知, 当 Na_2CO_3 投加量为 300 mg/L [$m(\text{Na}_2\text{CO}_3) : m(\text{NaOH}) = 1.1$] 时, 总硬度和 Ca^{2+} 去除率分别为 33% 和 60%; 当 Na_2CO_3 投加量为 500 mg/L [$m(\text{Na}_2\text{CO}_3) : m(\text{NaOH}) = 1.9$] 时, 总硬度和 Ca^{2+} 去除率分别为 44% 和 78%, 继续增加 Na_2CO_3 对水中总硬度和钙硬度的去除无显著提升。由图 4(b) 可知, 处理后水中 HCO_3^- 质量浓度降低至 20 mg/L 并保持恒定, 当 Na_2CO_3 投加量 ≤ 500 mg/L 时, CO_3^{2-} 质量浓度恒定在 40 mg/L 左右, 继续投加 Na_2CO_3 水中 CO_3^{2-} 浓度开始提高, 同时软化处理后水中 Ca^{2+} 也不发生明显变化, 此时式 (2) 已几乎反应完全, 投加的 Na_2CO_3 几乎全部转化为水中游离的 CO_3^{2-} 。软化处理后水中 pH 值维持在 10 左右且无明显波动。联合投加处理与 2 种药剂单独投加处理试验结果相比, 在相同 Ca^{2+} 去除率时联合投加法所需的加药量及成本更低, 且 2 种药剂的利用效率高, 采用 2 种药剂联用软化的方式具有显著的优势。

2. 2 生产性试验

结合静态预试验研究结果, 生产性试验中采用 NaOH 和 Na_2CO_3 联合投加的方法进行处理, 试验时

首先通过控制反应 pH 对 NaOH 投加量进行调控, 确定最适 NaOH 投加量后对 Na_2CO_3 投加量控制参数进行确定, 通过连续稳定运行试验对系统运行稳定性和可靠性进行分析。

2. 2. 1 NaOH 投加量控制

控制 NaOH 投加量使流化床出水 pH 值分别为 10.0、10.1、10.2、10.3、10.4、10.5、10.6、10.7 开展试验, 不同 pH 条件下试验结果如图 5 所示。

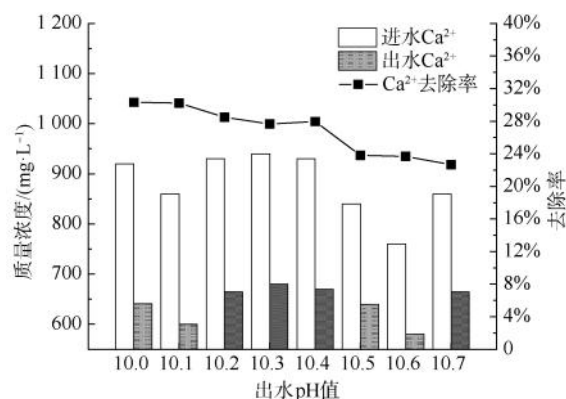


图 5 NaOH 投加量控制试验结果

Fig. 5 Test Results of NaOH Dosage Control

由图 5 可知, pH 值为 10.1 时系统出水 Ca^{2+} 质

量浓度为 600 mg/L,去除率为 30.2%。进一步提升出水 pH 对软化效果无较明显影响,此时 NaOH 投加量为 100 mg/L,确定该投加量为生产性系统中 NaOH 投加量控制参数。

2.2.2 Na₂CO₃ 投加量控制

NaOH 投加量控制为 100 mg/L,对不同 Na₂CO₃ 投加量条件下结晶流化床出水水质进行取样分析,试验结果如图 6 所示。

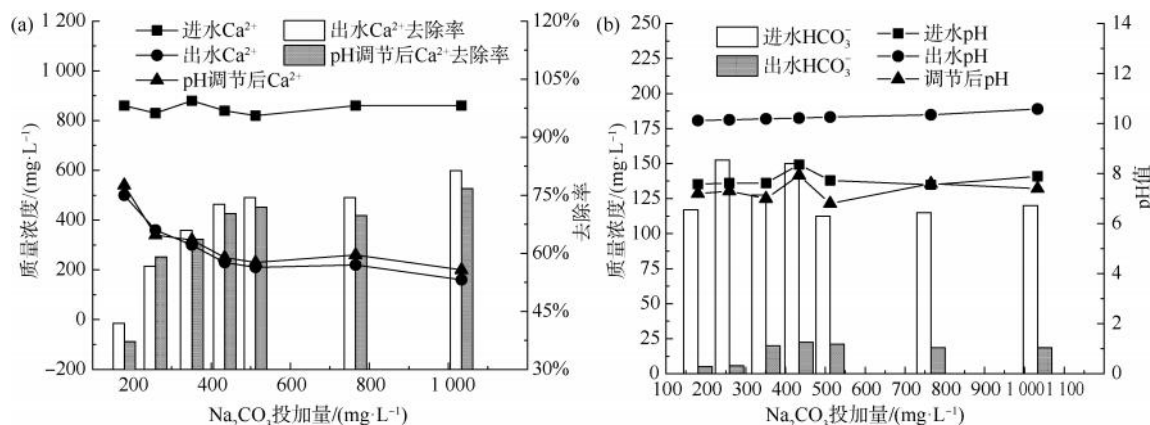


图 6 Na₂CO₃ 投加量控制试验结果

Fig. 6 Effect of Na₂CO₃ Dosage Control on Test Results

由图 6 (a) 可知,Na₂CO₃ 投加量为 350 mg/L 时,Ca²⁺ 去除率为 65.91%,使用 HCl 对出水 pH 调节后 Ca²⁺ 去除率为 63.64%;Na₂CO₃ 投加量为 500 mg/L 时,Ca²⁺ 的去除率为 74.39%,pH 调节后 Ca²⁺ 的去除率为 71.95%;Na₂CO₃ 投加量达到 1 000 mg/L 时,Ca²⁺ 的去除率为 81.40%,pH 调节后 Ca²⁺ 的去除率为 76.74%。加酸后 Ca²⁺ 含量有所上升,这是出水中部分粒径较小 CaCO₃ 结晶物在酸性条件溶解所致。

由图 6(b) 可知,流化床进水中 HCO₃⁻ 质量浓度为 107~157 mg/L,不同 Na₂CO₃ 投加量条件下流化床出水中 HCO₃⁻ 均可稳定为 5.0~22.5 mg/L,CO₃²⁻ 含量随 Na₂CO₃ 投加量的增加而升高,Na₂CO₃ 投加量<500 mg/L 时,出水 CO₃²⁻ 质量浓度维持为 40 mg/L 左右,Na₂CO₃ 投加量≥500 mg/L 时,出水 CO₃²⁻ 质量浓度显著增加,Na₂CO₃ 投加量达到 1 000 mg/L 时,出水 CO₃²⁻ 可达到 280 mg/L。因此,Na₂CO₃ 投加量高于 500 mg/L 时,投加的 Na₂CO₃ 已不能完全与水中 Ca²⁺ 发生反应,导致水中 CO₃²⁻ 浓度开始升高。

图 7 是不同 Na₂CO₃ 投加量时装置出水 pH 调节后浊度变化情况。试验结果表明,装置出水浊度在 0.75~2.60 NTU 且均小于进水浊度,该装置进行水质软化处理时,在获得良好软化效果的同时

可控制水中浊度不高于原水浊度,在处理原水浊度较低水质时无需进行后续絮凝沉淀处理,可有效减少处理工艺单元,降低水处理运行成本。

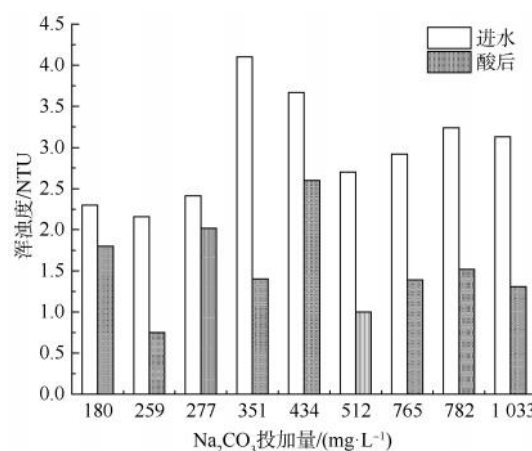


图 7 出水浊度变化

Fig. 7 Changes of Outflow Turbidity

2.2.3 连续稳定运行效果

NaOH 投加量控制为 100 mg/L,分别控制 Na₂CO₃ 投加量为 500 mg/L 和 600 mg/L 进行连续稳定运行试验,分别记为工况 1 和工况 2,试验结果如图 8 所示。

由图 8 可知,2 种药剂投加工况下装置出水中 Ca²⁺ 的去除率均在 20 min 时达到稳定,工况 1 中 Ca²⁺ 的去除率最高为 73.32%,工况 2 中 Ca²⁺ 的去

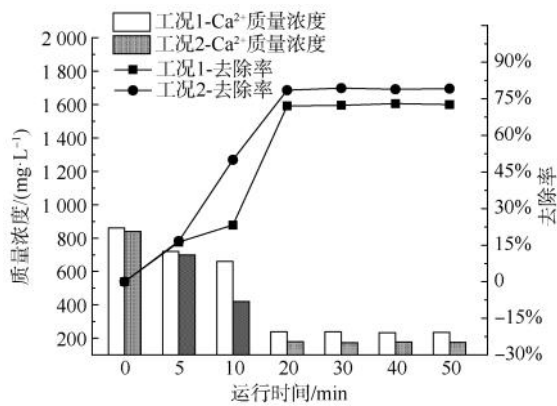


图8 反应时间对矿井水钙硬度去除率的影响

Fig. 8 Effect of Reaction Time on Removal Rate of Calcium Hardness in Mine Water

率最高为 79.16%, Na_2CO_3 投加量增加对 Ca^{2+} 去除速率无显著提升。因此在实际处理中需结合待处理原水水质通过试验确定最佳药剂投加量配比,有效控制运行成本。

2.3 结晶物物理表征分析

对处理过程中形成的结晶颗粒物进行取样,并进行扫描电镜(SEM)和X射线衍射仪(XRD)表征分析,结果如图9、图10所示。

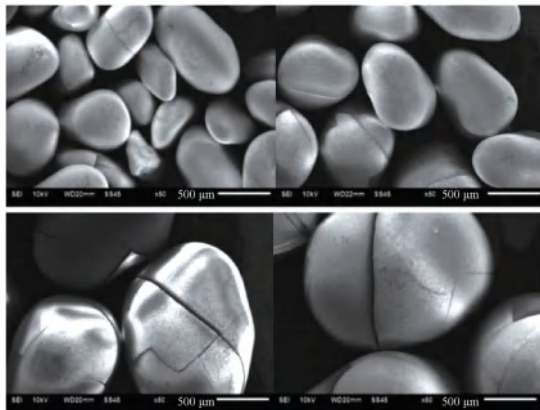


图9 SEM表征结果

Fig. 9 SEM Characterization Results

由图9可知,结晶颗粒物表面光滑质密,粒度分布均匀且无明显黏连,通过自然风干即可实现脱水处理。XRD分析结果表明,结晶颗粒物表面物质特征峰与 CaCO_3 标准峰显著对应,同时含有一定量的 SiO_2 ,该结晶颗粒物表面物质分布单一,可作为 CaCO_3 产品进行资源化利用。

2.4 技术经济分析

对本研究中静态预试验、生产性试验药剂投加

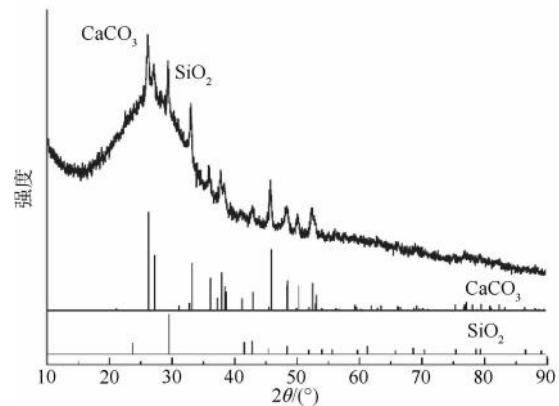


图10 XRD表征结果

Fig. 10 XRD Characterization Results

量与传统药剂沉淀法中采用相同药剂组合时的投加量进行对比^[18],分析结果如表2所示。

表2 技术经济分析

Tab. 2 Technical and Economic Analysis

项目	药剂组合	去除 1 mg 总硬度 所需药剂剂量	药剂投加 总量/mg
传统双碱法	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$	0.21 mg + 1.35 mg	1.56
静态试验	$\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$	0.17 mg + 0.53 mg	0.70
生产性试验	$\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$	0.10 g/L + 0.35 g/L (总硬度去除 60%)	≈0.75

分析结果可知,静态试验中采用 NaOH 与 Na_2CO_3 联合投加,药剂总投加量仅为传统方法的 44.9%。在更接近工程实际的生产性试验中,去除 60% 的总硬度所需药剂折算后,质量约为 0.75 mg,总体仍显著低于传统双碱法,结晶造粒流化床装置在规模化应用中具有良好的药剂节省效益和经济性支撑。

3 结论

(1)使用结晶造粒流化床可有效去除矿井水中的硬度离子,采用 NaOH 与 Na_2CO_3 联合投加方式, NaOH 、 Na_2CO_3 投加量分别为 100、500 mg/L 时 Ca^{2+} 去除率最高可达到 75% 以上,可连续稳定达到处理要求,装置出水浑浊度可控且低于进水浑浊度,与传统药剂沉淀法相比,可有效降低药剂投加量,具有良好的经济性。

(2)通过对结晶流化床处理中所产生的结晶颗粒物进行 SEM 和 XRD 分析可以看出,结晶颗粒物表面光滑质密,粒度分布均匀易脱水,其表面物质成分单一且主要为 CaCO_3 ,具有资源化回收利用潜力,与传统药剂沉淀法处理中会产生大量难以脱水的污泥相比,该装置具有良好的环保效益。

(3)结合研究中静态试验和生产性试验结果,结晶造粒流化床在矿井水软化脱盐预处理领域具有一定的应用潜力,其良好的经济性和环保性将有效解决传统药剂沉淀法中存在的药剂消耗大、污泥产量大、运行成本高等问题。

参考文献

- [1] 郑豪. 矿井水结垢特性及其软化应用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
ZHENG H. Study on fouling characteristics and softening application of coal mine water[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023.
- [2] 王锦, 彭年, 徐燕飞, 等. 煤矿矿井水井下深度处理与回用技术[J]. 陕西煤炭, 2022, 41(3): 42-48.
WANG J, PENG N, XU Y F, et al. Study on in-depth treatment and reuse technology of coal mine water [J]. Shaanxi Coal, 2022, 41(3): 42-48.
- [3] 王琳. 矿井水零排放工艺中钙与阻垢剂的作用方式及机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
WANG L. Study on the action mode and mechanism of calcium and inhibitor in zero discharge process of mine water [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [4] 潘树仁, 潘海洋, 朱开成, 等. 煤矿开采若干生态环境地质问题及解决思路[J]. 中国煤炭地质, 2020, 32(9): 21-25.
PAN S R, PAN H Y, ZHU K C, et al. Some environment geological issues and solution thinking during coal mining [J]. China Coal Geology, 2020, 32(9): 21-25.
- [5] 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科技[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3079-3089.
GU D Z, LI J F, CAO Z G, 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.
- [6] 高占彬, 宁掌玄, 叶军建, 等. 矿井水处理工艺综述[J]. 华北自然资源, 2021(1): 31-33.
GAO Z B, NING Z X, YE J J, et al. Review of mine water treatment technology[J]. North China Natural Resources, 2021(1): 31-33.
- [7] 朱云浩. 河北某矿矿井水处理工艺研究及设计[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019.
ZHU Y H. Research and design of water treatment technology for a mine in Hebei [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2019.
- [8] 龙涛, 王珍, 杨玮, 等. 高矿化度矿井水脱盐技术应用现状及研究进展[J]. 水处理技术, 2023, 49(5): 11-16.
LONG T, WANG Z, YANG W, et al. Application status and research progress of high salinity mine water desalination technology[J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(5): 11-16.
- [9] 何兴斌, 刘潘, 邹一. 双膜法工艺在矿井水深度处理中的应用实例[J]. 净水技术, 2024, 43(1): 118-124.
HE X B, LIU P, ZOU Y. Application case of double-membrane process in advanced treatment of mine water [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(1): 118-124.
- [10] 毛维东, 周如禄, 郭中权. 煤矿矿井水零排放处理技术与应用[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(11): 205-210.
MAO W D, ZHOU R L, GUO Z Q. Zero liquid discharge treatment technology and application for coal mine drainage water [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11): 205-210.
- [11] 郭强. 煤矿矿井水井下处理及废水零排放技术进展[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(1): 33-37.
GUO Q. Technical progress of underground mine water treatment and zero discharge of waste water [J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(1): 33-37.
- [12] 王小强, 赵泽盟, 林金平. MVR 技术在矿井水零排放及资源化中的应用[J]. 煤炭技术, 2020, 39(2): 112-114.
WANG X Q, ZHAO Z M, LIN J P. Application of mechanical vapor recompression on zero discharge and resource of mine water [J]. Coal Technology, 2020, 39(2): 112-114.
- [13] 李福勤, 薛甜丽, 高珊珊, 等. 高矿化度矿井水反渗透浓水软化实验研究[J]. 能源环境保护, 2022, 36(6): 81-87.
LI F Q, XUE T L, GAO S S, et al. Experimental study on softening of RO concentrated water of mine water with high salinity [J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(6): 81-87.
- [14] 张山山, 姬海宏, 吴巧玲, 等. 煤矿矿井水处理零排放技术与工程应用[J]. 中国给水排水, 2022, 38(2): 98-103.
ZHANG S S, JI H H, WU Q L, et al. Zero discharge treatment technology and engineering application of coal mine water [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(2): 98-103.
- [15] 候振华, 白成, 李珊, 等. 软化-混凝预处理高矿化度矿井水的试验研究[J]. 能源与节能, 2024(2): 67-70.
HOU Z H, BAI C, LI S, et al. Experimental study on pretreatment of high salinity mine water by soften-coagulate [J]. Energy and Energy Conservation, 2024(2): 67-70.
- [16] CHEN C M, HE Y, JIA W Y, et al. Experimental study of coagulation-tubular microfiltration integrated with high-salt wastewater to remove hardness and silica [J]. E3S Web of Conferences, 2023, 385: 01016. DOI: 10.1051/e3sconf/202338501016.
- [17] CHENG Q F, WU Y L, HUANG Y, et al. An integrated process of calcium hydroxide precipitation and air stripping for pretreatment of flue gas desulfurization wastewater towards zero liquid discharge[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 314: 128077. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128077.

(下转第 116 页)

- YU C X, LIN H, SU Y P, et al. Diversity and community characteristics of organic phosphate-mineralizing bacteria in the sea area between Minjiang Estuary to Pingtan [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(5): 1863–1872.
- [25] JIANG T, SUN S, CHEN Y, et al. Microbial diversity characteristics and the influence of environmental factors in a large drinking-water source [J]. Science of the Total Environment, 2021, 769: 144698. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2006.00251.x.
- [26] 冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 等. 生物炭对土壤酶活和细菌群落的影响及其作用机制[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 422–432.
- FENG H L, XU C S, HE H H, et al. Effect of biochar on soil enzyme activity & the bacterial community and its mechanism [J]. Environmental Science, 2021, 42(1): 422–432.
- [27] TA D T, BUI Q L, LE MINH T, et al. Eutrophication status of lakes in inner hanoi and a case study of Cu Chinh Lake [J]. Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University, 2021, 66(1): 97–104.
- (上接第 101 页)
- [18] 胡瑞柱, 黄廷林, 杨尚业. 石灰法与氢氧化钠法去除地下水硬度试验对比研究[J]. 给水排水, 2016, 42(7): 29–35.
- HU R Z, HUANG T L, YANG S Y. Comparative study on hardness test of lime method and sodium hydroxide method to remove groundwater source [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(7): 29–35.
- [19] 袁红彬, 薛石龙, 方素梅, 等. 石灰纯碱法和双碱法处理高硬度废水的试验研究[J]. 科学技术创新, 2024(24): 91–94.
- YUAN H B, XUE S L, FANG S M, et al. Experimental study on treatment of high astewater by lime soda ash method and double alkali method [J]. Scientific and Technological Innovation, 2024(24): 91–94.
- [20] HU R Z, TIAN Z, FAN Z X, et al. Pilot test on acidic fluoride-containing wastewater treatment in the photovoltaic industry through induced crystallization with a focus on calcium fluoride recovery [J]. Separation and Purification Technology, 2024, 341: 126879. DOI: 10.1016/j.seppur.2024.126879.
- [21] HU R Z, HUANG T L, ZHI A F, et al. Full-scale experimental study of groundwater softening in a circulating pellet fluidized reactor[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(8): 1592. DOI: 10.3390/ijerph15081592.
- [22] HU R Z, HUANG T L, WANG T W, et al. Application of chemical crystallization circulating pellet fluidized beds for softening and saving circulating water in thermal power plants [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(22): 4576. DOI: 10.3390/ijerph16224576.
- [23] 孙书博, 谢益佳, 黄廷林, 等. 循环造粒流化床处理水厂排泥水的试验研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(7): 12–18.
- SUN S B, XIE Y J, HUANG T L, et al. Treatment of sludge water in waterworks by circulating granulation fluidized bed [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(7): 12–18.
- [24] 唐章程, 李恺弘, 赵承东, 等. 化学结晶造粒流化床系统软化城市中水的实验研究[J]. 水处理技术, 2020, 46(12): 119–123, 137.
- TANG Z C, LI K H, ZHAO C D, et al. Experimental study on softening urban reclaimed water by chemical crystallization granulation fluidized bed system [J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(12): 119–123, 137.
- [25] ZENG G S, LING B, LI Z J, et al. Fluorine removal and calcium fluoride recovery from rare-earth smelting wastewater using fluidized bed crystallization process [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 373: 313–320. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.03.050.
- [26] 智奥帆. 化学结晶循环造粒法去除水中硬度的试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2018.
- ZHI A F. Experimental study on the removal of hardness in water by chemical crystallization cycle granulation [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.
- [27] SHIRURE V S, PORE A S, PANGARKAR V G. Intensification of precipitation using narrow channel reactors: Magnesium hydroxide precipitation[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2005, 44(15): 5500–5507.
- [28] LUO Q J, LEI Y T, CHEN J Y, et al. IOP conference series: Earth and environmental science: Treatment of high fluorine surface water by crystal seed method [C]. England: IOP Publishing Ltd, 2020.