



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 Fuqin, XUE Tianli, GAO Shanshan, 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.

移动扫码阅读

高矿化度矿井水反渗透浓水软化实验研究

李福勤,薛甜丽,高珊珊,豆硕超

(河北工程大学 能源与环境工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要:为解决高矿化度矿井水膜浓缩结垢问题,针对总硬度为2 800 mg/L的反渗透浓水,采用“药剂软化+离子交换软化”工艺协同去除钙、镁、硅。结果表明:Ca(OH)₂和Na₂CO₃的最佳投药量分别为550 mg/L和3 500 mg/L;最佳反应时间为30 min,相应条件下的出水硬度和总硬度去除率分别为188 mg/L和93.29%;离子交换装置的最佳树脂型号和最佳流速分别为D402和15 m/h,相应条件下的出水硬度未检出;该协同工艺将二氧化硅含量降至1.61 mg/L,相应的去除率达到92.3%。

关键词:高矿化度矿井水;药剂软化;离子交换树脂;除硅;石灰;碳酸钠

中图分类号:X703

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2022)06-0081-07

Experimental study on softening of RO concentrated water of mine water with high salinity

LI Fuqin, XUE Tianli, GAO Shanshan, DOU Shuochao

(College of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: In order to solve the scaling problem of the high salinity mine water reverse osmosis system, a process of "chemical softening + ion exchange softening" was used to remove calcium, magnesium and silicon synergistically from the reverse osmosis concentrated water with a total hardness of 2 800 mg/L. The results showed that the optimum dosages of Ca(OH)₂ and Na₂CO₃ were 550 mg/L and 3 500 mg/L, respectively. The optimum reaction time was 30 minutes. Under the above conditions, the effluent hardness was 188 mg/L and the total hardness removal efficiency was 93.29%. The optimum resin model was D402 and the optimum flow rate was 15 m/h. Under the above conditions, the effluent hardness was not detected. The silica content was decreased to 1.61 mg/L, and the corresponding removal efficiency was 92.3% by the collaborative process.

Key Words: Mine water with high salinity; Chemical softening; Ion exchange resin; Silicon removal; Lime; Sodium carbonate

0 引言

21世纪以来,矿井水的处理与资源化技术获得了较为丰硕的研究成果^[1-3]。国家提倡的“零排放”技术也有了突飞猛进的成绩,在废水处理中

已经有较多成功应用的案例。河北某矿高矿化度矿井水反渗透浓盐水处理方案设计采用“预处理+膜浓缩+双极膜水分离”新工艺,浓盐水中的总硬度及硅含量都比较高^[4-5],达不到后续膜浓缩处理对进水的要求,很容易发生钙镁硅结垢问题,将会

收稿日期:2022-08-03;责任编辑:金丽丽

基金项目:河北省自然科学基金智慧矿山联合基金资助项目(E2021402015)

第一作者简介:李福勤(1966—),男,山西吕梁人,博士,教授,主要研究方向为水污染控制工程及资源化、膜法水处理技术。

E-mail: lifuqin2003@163.com

造成严重的膜污染,工艺的运行效果大打折扣^[6]。

在废水进入设备之前需对其进行软化处理,已经开发的众多软化技术中,如离子交换法、沸石法、纳滤法和化学沉淀法等,化学沉淀法是最常用的软化水方法^[7-8]。对于硅垢,在预处理中多价金属氢氧化物(如 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$)可除去水中可溶性和胶体态的二氧化硅^[9]。二氧化硅也可以通过阴离子交换树脂或在 $\text{pH}>10$ 条件下通过化学(石灰或苛性钠)软化来去除,化学软化除硅是在与氢氧化镁的共沉淀过程中进行的^[10]。Ayoub 等人还探究了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 NaOH 和 Na_2CO_3 对在混凝-沉淀过程中同时去除水中二氧化硅、钙和镁的影响,作为膜前预处理步骤并优化了工艺,实现了高效、连续的工艺技术^[11]。在实际工程中处理水量较大的情况下,通常首先使用化学药剂软化法除硬,效率高且经济成本低。根据处理废水水质的不同,通过比较硬度及碱度的

大小关系来选出适合的药剂软化方法^[12]。当废水水质变化时,在软化工艺中用苛性钠代替石灰反而有更好的效果。药剂软化不能 100% 去除硬度,可联合离子交换软化去除剩余硬度,并在联合过程中协同去除硅。现阶段离子交换软化法工艺成熟,出水水质较好,硬度可以降至 $0^{[13]}$ 。

基于解决河北某矿高矿化度矿井水反渗透浓盐水膜浓缩结垢问题,根据硬度高碱度低的水质特点,本文采用“药剂软化+离子交换软化”工艺协同去除钙镁硅,通过实验探究去除钙镁硅的最佳工艺参数,为工程设计提供技术支撑。

1 实验部分

1.1 实验材料与装置

(1) 实验水质

实验原水为河北某矿高矿化度矿井水反渗透后浓盐水,其水质主要指标见表 1。

表 1 实验用水水质

Table 1 Quality of experimental water

参数	pH	浊度/NTU	电导率/($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)	总硬度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总碱度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SiO_2 /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
数值	7.79	10.50	12.16	2 800	258	21.0

(2) 实验药剂

5%的氢氧化钙乳液;5%的碳酸钠溶液;5%的氢氧化钠溶液;苏青牌 D113 树脂、苏青牌 D402 树脂、争光牌 D860 树脂。

(3) 实验器材

实验仪器:ZR4-6 混凝试验搅拌机、离子交换软化实验装置、pHS-3C 型 pH 计、WTW Multi 340i 型电导仪。

1.2 检测方法

总硬度采用 EDTA 滴定法测定;硅含量采用 DZ/T 0064.63—2021 分光光度法测定;pH 采用玻璃电极法测定;电导率采用 WTW Multi 340i 型电导仪测定。

1.3 实验方法

药剂软化方法:量取 1 000 mL 水样倒入试验杯中,将试验杯装入搅拌机;反应搅拌结束后,自动提起叶片,进行静置沉淀 10 min,从取样口提取各试验杯中上清液,采用 $0.45 \mu\text{m}$ 微滤膜抽滤后,测定硬度、pH、电导率等水质指标。

ZR4-6 混凝试验搅拌机参数:混合搅拌转速 120 r/min,混合 1 min,反应搅拌转速 60 r/min,反应时间 10 min,静置沉淀 10 min。

新树脂在使用前必须进行预处理,失效的树

脂需要再生后使用,因原水含盐量高,采用传统 NaCl 再生效果较差,为此树脂的预处理及再生均采用如下方法:

(1)树脂装入离子交换装置后,用去离子水将交换柱内树脂层反冲洗直至出水澄清、无异味、无树脂碎渣。

(2)用约 2 倍树脂体积的 HCl 溶液,浓度为 3%,以 2 m/h 的流速通过树脂层。当全部树脂浸入 HCl 溶液后,浸泡 6 h,排去 HCl 溶液,并用去离子水冲洗至排出液呈中性。

(3)用约 2 倍树脂体积的 NaOH 溶液,浓度为 3%,按(2)中相同方法进通入和浸泡。排去 NaOH 溶液,并用去离子水冲洗至排出液呈中性。

离子交换软化方法:采用内径 34 mm 的有机玻璃管交换柱,高 100 cm,内填树脂高度 70 cm,蠕动泵提升原水进入离子交换柱,流量计测定交换流量,一定时间取样测定出水硬度,根据软化处理水量和原水硬度计算树脂的工作交换容量。

2 实验结果与分析

2.1 药剂软化实验结果

根据表 1 可知,实验用水水质硬度高、碱度低,硬度以非碳酸盐硬度为主。本实验应采用石

灰-纯碱软化法。理论上 1 mol 的非碳酸盐硬度需要 1 mol 的碳酸钠软化,另外 1 mol 的镁硬度还需 1 mol 的氧化钙(氢氧化钙)彻底软化。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的理论用量等于镁硬度和总碱度之和, Na_2CO_3 的理论用量等于镁硬度和钙硬度之和。因此,可以初步确定, Na_2CO_3 投加量在 2 000 mg/L

表 2 石灰-纯碱法与烧碱-纯碱法的软化效果

Table 2 Softening results of the lime-soda method and caustic soda-soda method

方法	硬度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	硬度去除率/%
石灰-纯碱法	876	68.71
烧碱-纯碱法	955	65.89

实验过程中观察到,采用石灰-纯碱法的水样在反应阶段颗粒形成速度快且密实,沉淀阶段颗粒沉降阻力小,沉淀后沉淀层较薄,上清液较澄清。采用烧碱-纯碱法的水样呈现出现象较石灰-纯碱法差。结合表 2 实验结果可得,在相

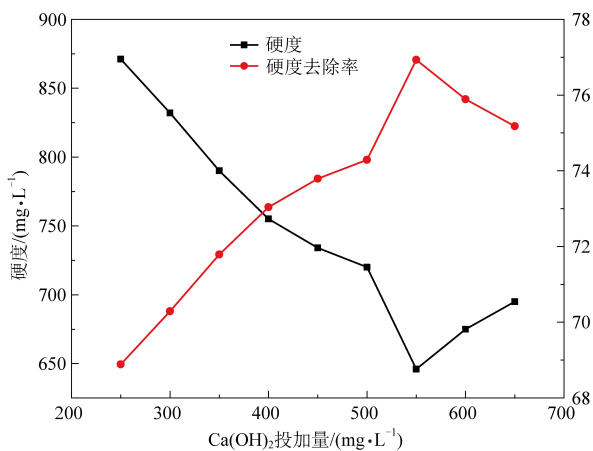
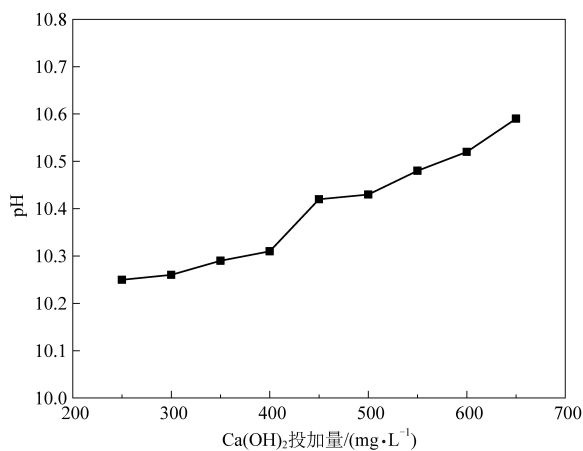
以上,而 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的投加量在 250 mg/L 以上。

2.1.1 石灰-纯碱法与烧碱-纯碱法软化效果对比
反应时间为 10 min,固定 Na_2CO_3 投药量为 2 000 mg/L,在两个反应试验杯中分别投加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 NaOH,使其浓度分别达到 250 mg/L 和 250 mg/L,实验结果见表 2。

同条件下,石灰-纯碱法软化效果优于烧碱-纯碱法。

2.1.2 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的最佳投药量

固定 Na_2CO_3 投药量为 2 000 mg/L,改变 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量,实验结果如图 1 所示。

(a) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量对硬度去除率的影响(b) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量对pH的影响图 1 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量的影响Fig.1 The effects of the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dosage

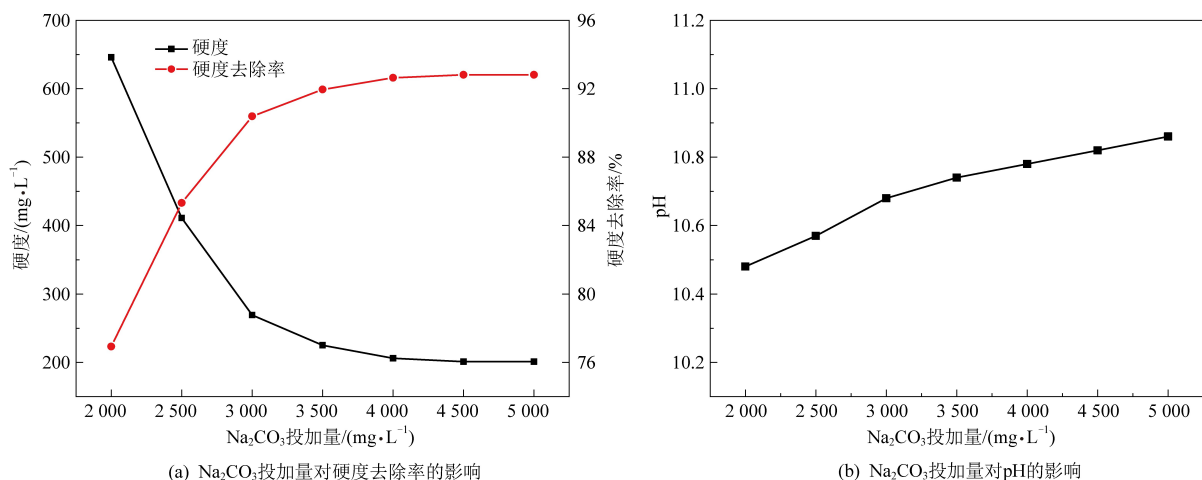
由图 1(a)可知,总硬度随 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投药量的增大呈现先降后升的变化趋势。当 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的投药量逐渐增大时,越来越多的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生解离反应,解离得到的 OH^- 与水中原有的镁硬度形成氢氧化镁沉淀,镁硬度得以去除,钙硬度变化不大,总硬度有所下降。随着 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的投加量由 550 mg/L 持续升高,水的总硬度反而增大,原因是在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量为 550 mg/L 时,水中大部分的镁硬度已经去除。继续投加除硬效果不明显,并且过量的这部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 会解离产生多余的 Ca^{2+} ,导致水中钙硬度的增加,反而使总硬度增加。通过本次实验可以得出, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度为 550 mg/L 是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的最佳投药量。此

时,水的总硬度降为 646 mg/L,去除率为 76.93%。

由图 1(b)可知,水的 pH 随着 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投药量的增大呈现上升的变化趋势,但数值变化较小,由 10.25 逐渐增加至 10.59。当 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的投加量为最佳投药量时,水样的 pH 约为 10.48。pH 的小幅度上升是由于加入的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 解离成 Ca^{2+} 和 OH^- ,大部分 OH^- 与水中的 Mg^{2+} 形成沉淀,小部分的 OH^- 未反应形成沉淀,处于游离状态。

2.1.3 Na_2CO_3 的最佳投药量

固定 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度 550 mg/L,改变 Na_2CO_3 投加量,确定 Na_2CO_3 的最佳投药量,实验结果如图 2 所示。

图2 Na_2CO_3 投加量的影响Fig.2 The effects of the Na_2CO_3 dosage

由图2(a)可知,总硬度随着 Na_2CO_3 投药量的增大,首先呈现出十分明显的下降趋势,后又趋于稳定。 Na_2CO_3 的加入,伴随着解离反应,其在水中解离为 Na^+ 和 CO_3^{2-} , CO_3^{2-} 与水中原有的钙硬度相结合形成碳酸钙沉淀,从而使水中钙硬度快速去除,继而总硬度亦呈降低之势。随着 Na_2CO_3 的投加量由3500 mg/L 持续增加时,水的总硬度基本保持稳定。通过本次实验可以得出, Na_2CO_3 浓度3500 mg/L 是 Na_2CO_3 的最佳投药量。此时,水的总硬度降为218 mg/L ,去除率为92.21%。

由图2(b)可知,随着 Na_2CO_3 用量的增加,水样的pH缓慢增大,由10.48逐渐增加至10.86。当 Na_2CO_3 的投加量为最佳投药量时,水的pH约为10.74。pH缓慢增大是由于 Na_2CO_3 强碱弱酸盐在水中的溶解所致。

2.1.4 最佳反应时间

固定 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量550 mg/L , Na_2CO_3 投加量3500 mg/L ,改变反应时间为10、20、30、60、90 min进行实验,实验结果如图3所示。

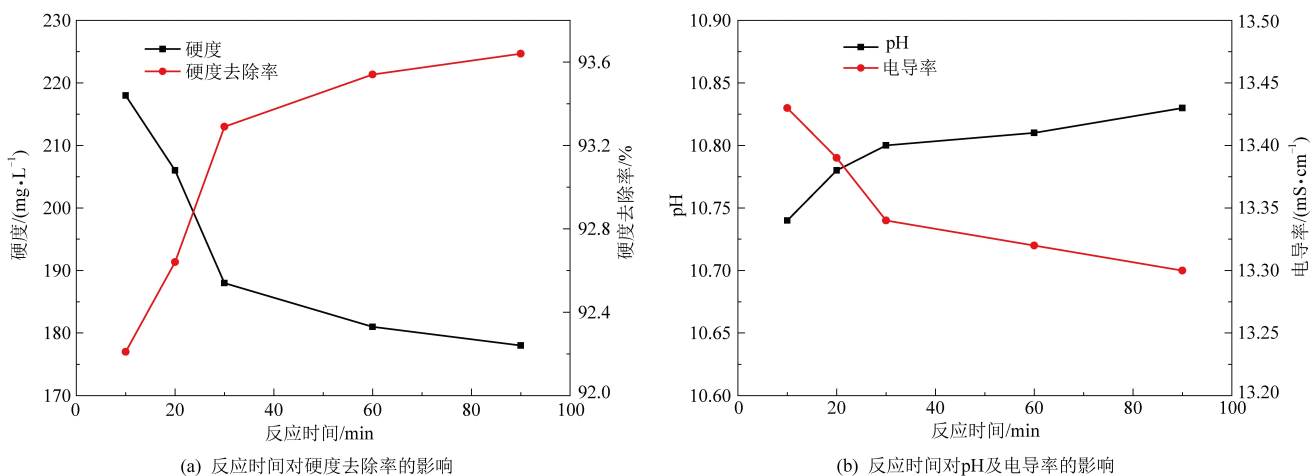


图3 反应时间的影响

Fig.3 The effects of reaction time

由图3(a)可看出,反应时间越长,硬度去除效果越好,硬度呈下降趋势。反应搅拌30 min时,硬度为188 mg/L ,即可达到200 mg/L 以下,硬度去除率为93.29%,之后变化较小。综合经济因素,选择反应搅拌30 min最佳。

加,水的电导率呈下降的趋势,这是因为水中没有完全反应的钙、镁硬度进一步沉淀,反应更加彻底,电导率下降。随着反应搅拌时间的增加,pH呈上升趋势,但是变化较小。

综上所述,石灰-纯碱软化法对降低该矿反渗透浓盐水的总硬度效果显著,当采用最佳反应条

由图3(b)可以看出,随着反应搅拌时间的增

件,即 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投药量为 550 mg/L 、 Na_2CO_3 投药量为 3500 mg/L 、反应时间为 30 min 时,原水总硬度由 2800 mg/L 下降至 188 mg/L ,电导率为 13.34 mS/cm , pH 为 10.80 。

2.2 离子交换软化实验结果

2.2.1 最佳树脂选型

三种不同树脂在同样的预处理方法及再生方法条件下,以 25 m/h 流速进行离子交换软化时,实验结果如图 4 所示。

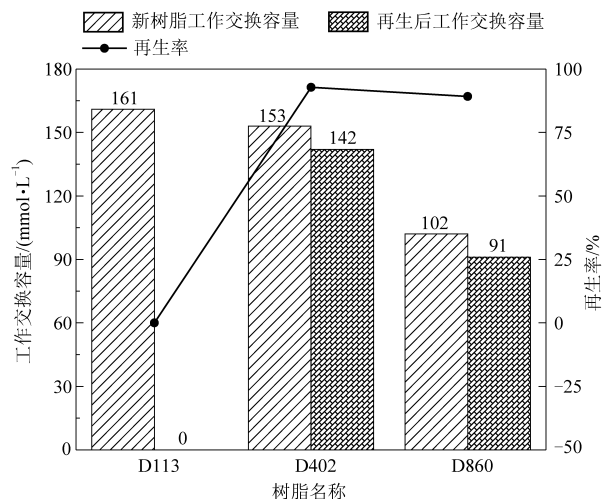


图 4 新树脂、再生后树脂工作交换容量及其再生率变化图

Fig.4 The working exchange capacity and regeneration efficiency of new resin and regenerated resin

由图 4 可得 D113 新树脂工作交换容量最高, D402 新树脂工作交换容量和 D113 相差不大, D860 新树脂工作交换容量最低。D113 再生后处理水质硬度均大于 1 mmol/L ,再生率可认为是 0; D402 再生后工作交换容量为 142 mmol/L ,再生率为 92.5% ; D860 再生后工作交换容量为 91 mmol/L ,再生率 89.2% 。综合考虑 D402 是最佳离子交换树脂。D402 树脂是一种螯合型树脂,由于其含有亚胺基二乙酸官能团,所以可与金属离子形成多配位络合物。苏青牌 D402 树脂结构十分牢固,稳定性良好,树脂交换容量大,并且在同时含有一价和二价金属离子的溶液中,有选择性吸附二价金属离子的能力,主要应用于氯碱工业中盐水的软化精制,尤其是在废水领域得到了广泛的运用。

2.2.2 离子交换软化最佳流速

选择最佳树脂 D402 改变流速,进行新树脂工作交换容量的对比,实验结果如图 5 所示。

由图 5 可知,随着流速的增大, D402 新树脂工作交换容量逐渐降低。但是考虑工业上一般采

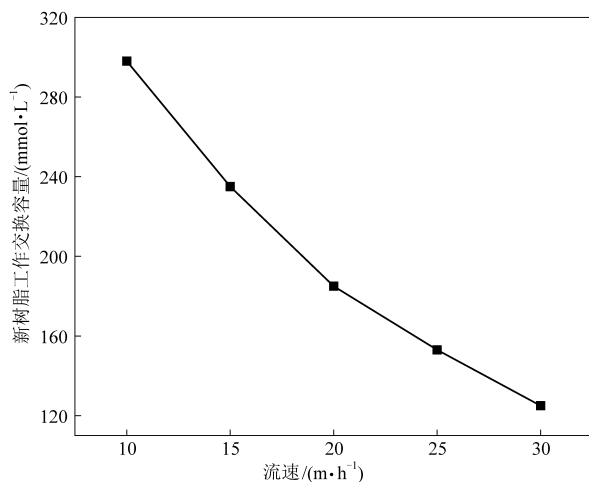


图 5 D402 新树脂工作交换容量随流速的变化

Fig.5 Change of the working exchange capacity of new resin D402 with the flow rate

用的流速范围为 $15 \sim 25 \text{ m/h}$,所以选取流速为 15 m/h 时为最佳流速,此时 D402 新树脂的工作交换容量为 235 mmol/L 。综上所述,药剂软化工艺出水进入离子交换装置后,当采用最佳反应条件时,即选用最佳树脂型号为 D402,最佳流速为 15 m/h ,出水硬度未检出。

2.3 软化过程中协同除硅效果

软化过程中硅的去除情况如图 6 所示。

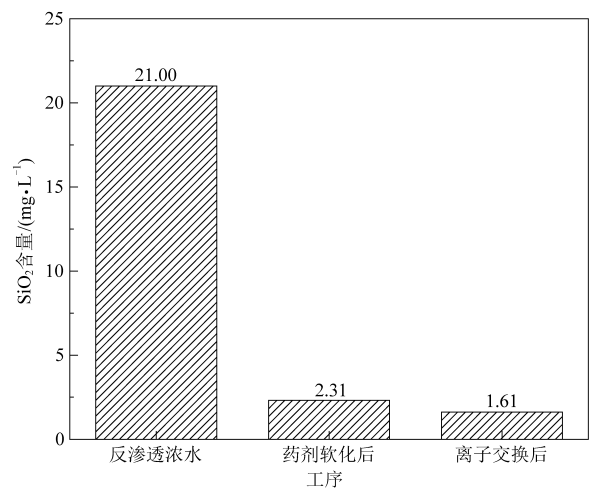


图 6 不同工序段二氧化硅含量的变化

Fig.6 Change of silica content in different process sections

地壳中约有 25% 的硅元素,是自然界中一种常见的元素。根据资料显示,水中的二氧化硅含量通常在 $10 \sim 40 \text{ mg/L}$ 之间,在某些地区的浓度却高达 100 mg/L 。二氧化硅非晶态溶解度较低,因此结垢是膜分离过程中遇到的一个常见问题。该反渗透浓水作为本实验用水,其二氧化硅含量约为 21 mg/L ,属于常规含量。水中二氧化硅的存在

方式较多,常常溶解成硅酸盐,或以胶体硅的形式存在^[14],并且长链的胶体硅没有带电荷的离子特性,无法通过离子交换除去。结合图1(b),在药剂软化过程中随着Ca(OH)₂投加量的增加,pH升高。pH的升高有利于增加硅的溶解度,进而有更多的可溶性硅与钙、镁离子反应形成难溶物而被去除^[15]。因此在进行离子交换软化时,较高的pH有利于硅的去除。

由图6可知,在“药剂软化+离子交换软化”工艺下,药剂软化阶段除硅效果最明显,协同去除钙镁硅效果较好,离子交换阶段去除量相对较小。全部工艺结束后,二氧化硅含量为1.61 mg/L,去除率达到92.3%。

3 工艺的应用与对比讨论

本文中高矿化度矿井水反渗透浓水应用离子交换软化工艺,由于硬度较大,树脂迅速失效,出水检测出硬度,且钙镁硅难以协同去除,工艺运行总费用较高;应用纳滤软化工艺,只能去除部分硬度,不满足下阶段膜进水要求,后期膜处理部分还需添加阻垢剂,并且膜的使用寿命缩短。

经计算,“药剂软化+离子交换软化”工艺在此实验水质条件下,吨水运行成本如下:Ca(OH)₂药剂运行费用为0.35元/t;Na₂CO₃药剂运行费用为8.75元/t;由于树脂可再生利用,平均运行费用约为13.5元/t;树脂酸碱再生运行费用约2.5元/t;电耗运行费用约为1.5元/t。药剂价格与电费按照市场价格计算,项目吨水运行成本为26.6元/t。“药剂软化+离子交换软化”工艺可达到后续阶段膜进水要求,且运行成本适中,是该矿反渗透浓水最佳预处理工艺。

为进一步探究该工艺在类似水质的高盐废水处理中的适用性,实验组还将该工艺应用于某冶炼厂动力车间废水处理站。对于硬度约为1 600 mg/L的高盐废水,Ca(OH)₂投加量为300 mg/L、Na₂CO₃投加量为2 000 mg/L、反应搅拌时间为10 min时,硬度去除率为94.5%;后续流经D402树脂,硬度可完全去除,并且测得二氧化硅含量大大降低。

4 结 论

该矿反渗透浓盐水药剂软化阶段的最佳工艺参数为:Ca(OH)₂投加量为550 mg/L、Na₂CO₃投加量为3 500 mg/L、反应搅拌时间为30 min,总硬

度下降至188 mg/L,去除率达到93.29%;离子交换树脂软化阶段最佳工艺参数为:选用D402树脂,流速15 m/h,出水硬度未检出;在药剂联合离子交换软化工艺下,二氧化硅含量可降至1.61 mg/L,去除率可达92.3%。

“药剂软化+离子交换软化”工艺适用于类似该矿水质的高盐废水,可去除废水中全部硬度及大部分二氧化硅,且运行成本较低。该工艺的应用对解决膜浓缩结垢问题具有重要的理论和现实意义,为实际工程中类似水质的高盐废水预处理提供可行的技术方案。

参考文献

- [1] 肖艳. 煤矿高矿化度矿井水零排放处理技术现状及展望[J]. 能源环境保护, 2021, 35(2): 7-13.
XIAO Yan. Current situation and prospect of zero discharge treatment technology for high mineralized mine water [J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(2): 7-13.
- [2] 何绪文, 张晓航, 李福勤, 等. 煤矿矿井水资源化综合利用体系与技术创新[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(9): 4-11.
HE Xuwen, ZHANG Xiaohang, LI Fuqin, et al. Comprehensive utilization system and technical innovation of coal mine water resources [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(9): 4-11.
- [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] 史元腾, 王小强, 寇光辉, 等. 反渗透浓盐水双碱法除硬与除硅工艺研究[J]. 水处理技术, 2019, 45(12): 110-112+117.
SHI Yuanteng, WANG Xiaoqiang, KOU Guanghui, et al. The treatment of silica and hardness by double-alkali method for reverse osmosis high-salinity water [J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(12): 110-112+117.
- [5] 卢斯煜, 陈凯, 李建飞, 等. 高硬度电镀废水中水回用工程实例分析[J]. 能源环境保护, 2020, 34(3): 57-61.
LU Siyu, CHEN Kai, LI Jianfei, et al. An engineering example of reuse of electroplating wastewater with high hardness [J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(3): 57-61.
- [6] 张静, 吴慧芳, 陈佳琪, 等. 预处理技术对超滤膜污染控制的研究现状[J]. 能源环境保护, 2022, 36(1): 18-22.
ZHANG Jing, WU Hui Fang, CHEN Jiaqi, et al. Research on pretreatment control of membrane fouling [J]. Energy Environ-

- mental Protection, 2022, 36 (1): 18-22.
- [7] 冉光阳. 高盐废水零排放关键技术研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2017: 3-4.
- [8] DAVID Hasson, GEORGIY Sidorenko, RAPHAEL Semiat. Calcium carbonate hardness removal by a novel electrochemical-seeds system [J]. Desalination, 2010, 263: 285-289.
- [9] S Salvador Cob, B Hofs, C Maffezzoni, et al. Silica removal to prevent silica scaling in reverse osmosis membranes [J]. Desalination, 2014, 344: 137-143.
- [10] 李伟, 郭剑浩, 杨帅, 等. 煤化工废水除硅工艺研究 [J]. 能源与节能, 2021 (6): 95-97.
LI Wei, GUO Jianhao, YANG Shuai, et al. Study on silicon removal process of coal chemical wastewater [J]. Energy and Energy Conservation, 2021 (6): 95-97.
- [11] George M Ayoub, Lea Korban, M Al-Hindi, et al. Brackish water desalination: An effective pretreatment process for reverse osmosis systems [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2019, 230 (10): 1-12.
- [12] 黄本科, 王开春. 石灰纯碱法去除高硬度废水中硬度的试验研究 [J]. 广州化工, 2022, 50 (9): 64-65.
HUANG Benke, WANG Kaichun. Experimental study on removing hardness from high hardness wastewater by lime soda ash method [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2022, 50 (9): 64-65.
- [13] 田媛媛, 周立岱, 于永杰, 等. 离子交换技术去除锦州自来水硬度的实验研究 [J]. 绿色科技, 2015 (8): 229-232.
TIAN Yuanyuan, ZHOU Lidai, YU Yongjie, et al. Experimental study on removal of Jinzhou tap water hardness by ion exchange technology [J]. Journal of Green Science and Technology, 2015 (8): 229-232.
- [14] 孔祥贡, 李建兴. ICP-OES 法测量核电厂二回路水中的二氧化硅 [J]. 中国核电, 2020, 13 (3): 363-366.
KONG Xianggong, LI Jianxing. ICP - OES method for measuring silicon dioxide in the secondary circuit of nuclear power plant [J]. Nuclear Power Operation, 2020, 13 (3): 363-366.
- [15] 滕晓慧, 孙丽月, 庄立军. 沉钒废水除硅制备冶金级氢氧化铬研究 [J]. 无机盐工业, 2020, 52 (9): 88-90.
TENG Xiaohui, SUN Liyue, ZHUANG Lijun. Study on preparation of metallurgical grade chromium hydroxide by removing silicon from vanadium wastewater [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2020, 52 (9): 88-90.