

反渗透膜阻垢剂配方优化及其阻垢性能评价

周士捷^{1*}, 赵 博^{2#}

¹矿冶科技集团有限公司, 北京

²紫金矿业集团股份有限公司, 福建 龙岩

收稿日期: 2024年11月11日; 录用日期: 2024年12月12日; 发布日期: 2024年12月27日

摘 要

为解决广西某稀土矿淋洗尾水反渗透膜系统的结垢问题, 本研究选用聚羧酸盐(PASP)和有机膦羧酸盐(PBTCA)作为配方成分进行复配制备成了复合阻垢剂。基于静态试验和中试试验研究结果表明, 当PASP占比为80%, 复合阻垢剂投加量达3 mg/L时, 阻垢效率达最高的94.3%; 溶度积常数 K_{sp} 的指标满足现场水质需求。配方5阻垢剂在钙离子浓缩倍率与膜通量方面的表现优于其他配方, 特别是在供水浓缩因子 K_i 高于3的条件下依然保持稳定。且基于ROSA7.0反渗透模拟软件模拟结果可知, 在加入阻垢剂后, $CaSO_4$ 和 $BaSO_4$ 的溶度积常数分别达到360%和3000%, 远高于系统要求的控制指标, 显现出优异的阻垢性能。此研究结果为稀土矿山尾水的处理提供了有效、低成本的解决方案, 促进了水处理技术在生态环境保护中的应用。

关键词

阻垢剂, 反渗透膜, 聚羧酸盐, 膜通量

Optimization of Reverse Osmosis Membrane Scale Inhibitor Formulation and Evaluation of Scale Inhibition Performance

Shijie Zhou^{1*}, Bo Zhao^{2#}

¹BGRIMM Technology Group, Beijing

²Zijin Mining Group Co., Ltd., Longyan Fujian

Received: Nov. 11th, 2024; accepted: Dec. 12th, 2024; published: Dec. 27th, 2024

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 周士捷, 赵博. 反渗透膜阻垢剂配方优化及其阻垢性能评价[J]. 环境保护前沿, 2024, 14(6): 1330-1338.
DOI: 10.12677/aep.2024.146167

Abstract

To address structural issues in the reverse osmosis (RO) membrane system for leaching water from a rare earth mine in Guangxi, this study selected polycarboxylic acid (PASP) and organic phosphonic carboxylic acid (PBTCA) as formulation components to develop a composite scale inhibitor. Based on results from static and pilot-scale experiment, the study found that when the proportion of PASP reached 80% and the composite scale inhibitor was dosed at 3 mg/L, the highest scale inhibition efficiency of 94.3% was achieved. The saturation index (Ksp) met on-site water quality requirements. Formulation 5 demonstrated superior performance than other formulations in terms of calcium ion concentration ratio and membrane flux, especially under conditions where the feedwater concentration factor (Ki) was higher than 3, maintaining stability. Moreover, simulation results using ROSA7.0 reverse osmosis software indicated that after adding the scale inhibitor, the saturation indices of CaSO_4 and BaSO_4 reached 360% and 3000%, respectively. This is far higher than the system's control indicators, demonstrating excellent scale inhibition performance. The study offers an effective, low-cost solution for treating tailwater from rare earth mine, promoting the application of water treatment technologies in environmental protection.

Keywords

Scale Inhibitor, Reverse Osmosis Membrane, Polycarboxylic Acid, Membrane Flux

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

原地浸矿工艺为离子型稀土矿唯一允许的开采工艺,而原地浸矿母液中稀土浓度低时处理成本显著增加,而当收集母液中稀土含量小于一定比例时(此外称为尾水),稀土矿山一般停止尾水收集。尾水未收集不仅造成稀土的流失,而且尾水随降雨入渗或径流进入周边水土环境,会造成周边水土环境的污染[1]。因此对矿山尾水进行有效处理是保护生态环境的必要措施。目前的矿山尾水处理方法包括化学沉淀、离子交换、吸附、凝结和絮凝、浮选、电化学处理以及膜过滤等[2]-[5]。然而,传统方法通常存在污泥产生量大、运营成本高或二次污染风险的缺点。反渗透(RO)系统因其占地小、处理效果佳、运行稳定等优点,逐渐成为矿山尾水处理的主要技术之一[1][6]。然而目前限制反渗透法高效、稳定、低成本处理矿山废水的关键问题在于废水中多种难溶盐和金属氧化物引起的无机结垢问题。

废水中如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 CO_3^{2-} 和 SO_4^{2-} 等离子及其他无机离子极易发生结垢,生成包括但不限于 CaCO_3 、 CaSO_4 、 BaSO_4 、 SrSO_4 、 CaF_2 和 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 等沉淀物[7][8]。这些结垢会导致 RO 系统出现膜孔阻塞、膜通量减小、脱盐效率下降和渗透压增大等问题[9]-[11]。通常,膜发生局部结垢之后使得局部膜压增大和其余部分水力负荷增大,从而逐渐引起膜系统大面积地膜结垢,最终导致 RO 装置的瘫痪[12]。此外,无机盐晶体带有尖锐的棱角,易造成膜表面的划伤,从而使膜的使用寿命缩短,提高了处理成本[13]。综上,现阶段开发阻垢剂以缓解膜结垢具有现实意义。

前期研究表明, CaCO_3 、 CaSO_4 和 BaSO_4 结垢过程可以通过使用含有羧基、膦基和磷酸基等官能团的阻垢剂来抑制[14][15]。如 Ma 等[16]开发了一种具有低磷、富含羧基的新型共聚物 P (IA-MA-SHP)阻垢剂并将其用于工业水处理中反渗透膜的阻垢,实验显示,该阻垢剂对 CaCO_3 和 CaSO_4 的抑制率分别达

到 94.3% 和 85.2%，且这种共聚物可有效干扰晶体结构，降低结垢倾向。而由化学接枝法制备阻垢剂存在合成方法复杂、成本较高且对设备要求较高的问题，因此有必要开发简单易行的阻垢剂合成方法。

综上所述，本研究选择聚羧酸盐 PASP 作为复合阻垢剂的主剂，同时选择具有低磷含量、优异协同复配性和出色 CaSO_4 阻垢性能的有机膦羧酸盐 PBTCA 作为辅剂采用复配的方法制备了复合阻垢剂，并将其应用于并应用于广西某稀土矿淋洗尾水反渗透膜系统的结垢处理中。

2. 材料与方法

2.1. 实验材料

聚羧酸盐采购自武汉华翔科洁生物技术有限公司，有效成分 $\geq 45\%$ ；2-膦酸丁烷-1,2,4-三羧酸钠盐作为有机膦阻垢缓蚀剂采购自武汉麟盛科技有限公司，有效成分 $\geq 30\%$ 。

实验用水为广西某稀土矿淋洗尾水微滤出水，其水质如下表 1 所示。结垢物样品均取自广西某稀土矿淋洗尾水反渗透膜系统。

Table 1. Reverse osmosis membrane system water inlet index
表 1. 反渗透膜系统进水指标

水质指标	质量浓度/(mg/L)	水质指标	质量浓度/(mg/L)
pH (无量纲)	4.2	氟化物	3.76
钠	89.4	氯化物	11.9
镁	1342	全盐量	6439
钙	264	铝	52.6
铊	0.00202	锶	0.841
砷	9.18	钡	0.035
锰	6.05	Re	90
铁	0.247	硫酸盐	3527

2.2. 阻垢剂复配配方

根据原水水质和前期结垢物的分析，阻垢剂应主要针对硫酸钙。因此研究选用 PASP 作为复合阻垢剂的主剂，PBTCA 作为复合阻垢剂的主剂辅剂进行复配试验，其中复配方案表如下表 2 所示。

Table 2. Compound scale inhibitor formulation table
表 2. 复合阻垢剂复配方案表

编号	PASP/%	PBTCA/%
1	0	100
2	20	80
3	40	60
4	60	40
5	80	20
6	100	0

2.3. 阻垢剂筛选试验

2.3.1. 静态试验

复合阻垢剂的阻垢效果测试采用静态测定法，依据国家标准 GB 7476-1987《水质测定 EDTA 钙滴定法》和国家标准 HG/T 2430-2018《水处理剂阻垢缓蚀剂II》进行。实验过程如下：在 0.25 L 容量瓶中，

分别配制水样: CaCO_3 (Ca^{2+} 96.00 mg/L + CO_3^{2-} 150.72 mg/L)、 CaSO_4 (Ca^{2+} 3000 mg/L、 SO_4^{2-} 7335 mg/L), 取适量阻垢剂溶液于容量瓶中, 在设定温度下水浴加热适当时间, 反应结束后冷却至室温, 用定量滤纸过滤。实验结束后使用乙二胺四乙酸(EDTA)标准溶液滴定滤液中的 CaCO_3 和 CaSO_4 , 测定 Ca^{2+} 浓度, 同时进行空白试验, 以计算阻垢效率。计算公式如下式(1)所示。

$$\eta = \frac{V_1 - V_0}{V_a - V_0} \quad (1)$$

其中 V_1 为添加阻垢剂后滴定溶液中钙离子所消耗的 EDTA 体积, mL; V_0 为未添加阻垢剂时滴定溶液中钙离子所消耗的 EDTA 体积, mL; V_a 为滴定溶液中全部钙离子所消耗的 EDTA 体积, mL。

2.3.2. 中试试验

本试验采用了如图 1 所示的反渗透(RO)实验装置。首先, 将装置设定在特定的回收率下, 按全循环模式运行一段时间, 即将浓排水与产水全部回流至供料罐, 实现循环运行, 这一阶段即为第一个循环周期。在该周期结束时, 通过测量供料罐和浓排水中晶体离子的浓度变化, 来评估该回收率下的膜结垢情况。如果未发生结垢, 则排出部分产水, 使供料罐中的各离子浓度相应增加, 然后再次启动全循环模式, 进入第二个运行周期。在此周期中, 装置回收率保持不变, 但相对于原水的总回收率有所提高。待装置运行稳定后, 再次检测供料罐和浓排水中的晶体离子浓度, 以观察在当前总回收率下的膜结垢情况。如果仍无结垢迹象, 则进入下一全循环周期, 以此类推。随着每个循环周期结束后供料罐中的供水离子浓度逐步升高, 浓排水的结垢趋势会愈发显著, 同时总回收率也在逐渐上升, 直至浓排水侧出现结垢现象。此过程称为“周期性浓缩的全循环模式”。通过该方法, 膜元件在各循环周期内接触全循环溶液, 该溶液的成分反映了不同回收率下的浓缩程度。膜元件周期性接触逐步过饱和的溶液, 通过监测产水流量的下降与溶液组分的变化, 来评估结垢的极限以及阻垢剂的效果。

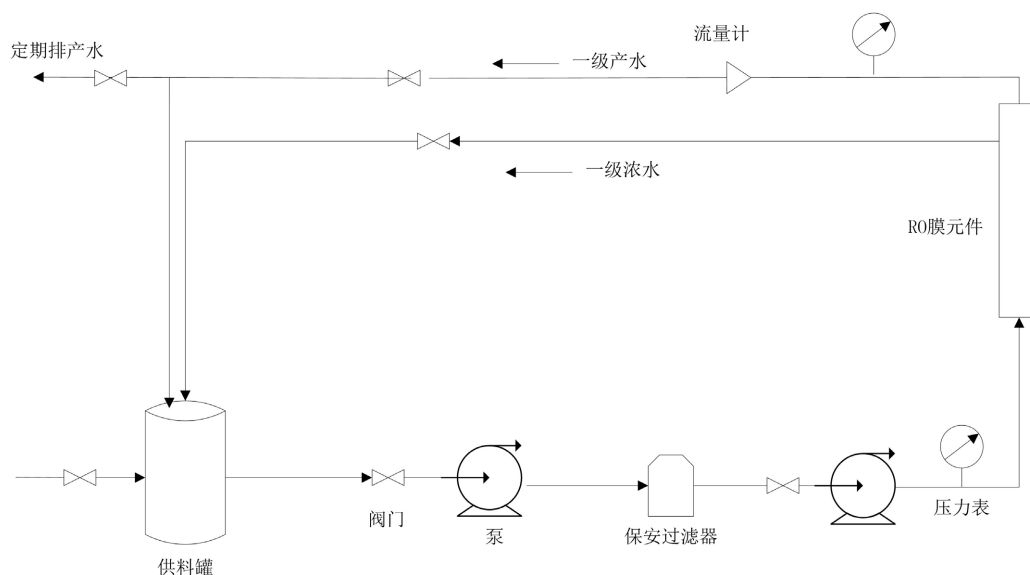


Figure 1. Schematic diagram of the test device

图 1. 试验装置示意图

中试实验中主要采用不同阻垢剂对钙离子浓缩倍率和膜通量的影响来评估阻垢剂的阻垢效果。其中钙离子浓缩倍率由 Ca^{2+} 的浓缩倍数随非结晶离子 Cl^- 浓缩倍数的变化来表征。计算公式如下式(2)和(3)所示。

$$K_{Cl}^{i-} = \frac{C_{Cl}^{i-}}{C_{Cl}^{0-}} = K_i \quad (2)$$

$$K_{Ca}^{i^{2+}} = \frac{C_{Ca}^{i^{2+}}}{C_{Ca}^{0^{2+}}} \quad (3)$$

其中, 设第 i 个循环周期供水浓缩因子为 K_i , $K_{Ca}^{i^{2+}}$ 为 Ca^{2+} 的浓缩倍数, C_{Cl}^{i-} 和 $C_{Ca}^{i^{2+}}$ 分别为第 i 个循环周期供水 Cl^- 、 Ca^{2+} 的质量浓度, C_{Cl}^{0-} 和 $C_{Ca}^{0^{2+}}$ 分别为供料罐原水 Cl^- 、 Ca^{2+} 的质量浓度, 则计算式如下所示:

膜通量则由实际运行计算, 试验中进水压力控制在 0.5 Mpa, 测定膜出水通量。

$$J_w = \frac{V_w}{S \cdot t} \quad (4)$$

其中 J_w 为溶剂透过速度, $L/(m^2 \cdot h)$; V_w 为溶剂透过速度, L ; S 为膜的有效面积, m^2 ; t 为运转时间, h 。

3. 用于污水处理系统中 PPCPs 的分析方法

3.1. 结垢样品分析

对结垢样品的扫描电镜及能谱分析如下图 2 和表 3 所示。由分析结果可知, 结垢物中绝大部分物质为石膏(图 2(c)、图 2(d)), 另外也见有硅酸钙(图 2(f))、碳酸镁(2(g))等晶体。结合元素分析结果可知, 结垢物以硫酸钙为主, 另有少量镁、铁、铝、锶的结垢物。

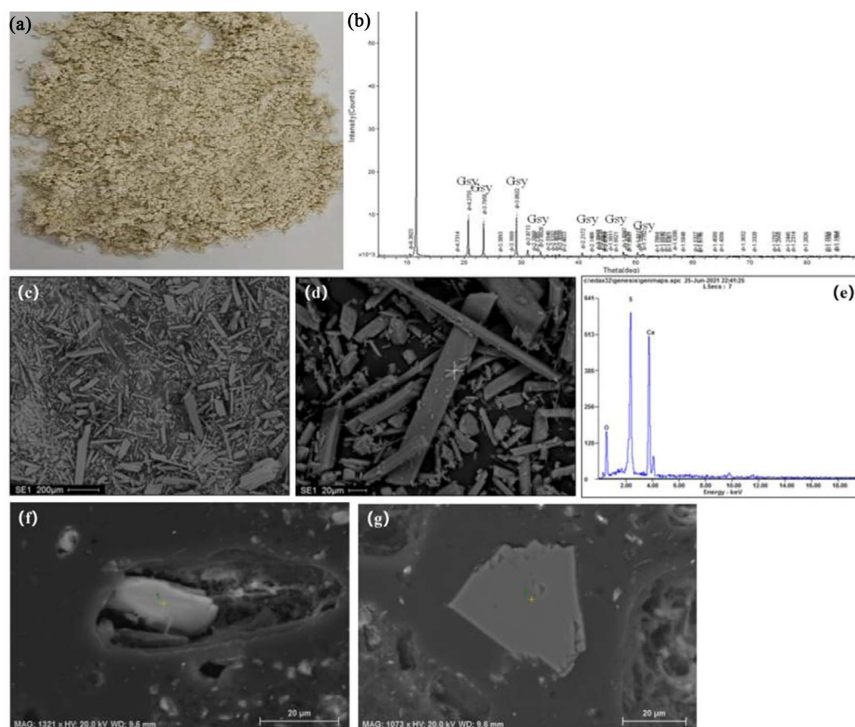


Figure 2. Analysis of scale samples: (a) Scale sample image; (b) X-ray diffraction analysis of scale samples (Gsy—gypsum: $CaSO_4 \cdot 2H_2O$); (c) Backscattered electron image of gypsum bundles and fibrous aggregates; (d) Backscattered electron image of gypsum crystals; (e) Backscattered electron image and energy spectrum of long columnar gypsum crystals; (f) Backscattered electron image of calcium silicate; (g) Backscattered electron image of magnesium carbonate

图 2. 垢样分析: (a) 垢样实物图; (b) 垢样 X-射线衍射分析图(Gsy——石膏: $CaSO_4 \cdot 2H_2O$); (c) 石膏束状、纤维状集合体背散射电子图像; (d) 石膏晶体背散射电子图像; (e) 长柱状石膏晶体背散射电子图像及能谱图; (f) 硅酸钙背散射电子图像; (g) 碳酸镁背散射电子图像

Table 3. Analysis results of multi-component element ratios of scale (unit: %)
表 3. 结垢物的多组分元素占比分析结果(单位: %)

Al	Fe	Mn	Ca	Mg	Si	Re	C	S
0.017	0.05	<0.001	22.78	0.11	0.018	0.40	0.11	20.9

3.2. 阻垢剂配方及反应条件筛选研究

3.2.1. 阻垢剂配方对比研究

在静态阻垢实验中分别对比不同配方的阻垢效率，实验结果如图 3 所示。由图 3 可知，随着配方中 PASP 占比的升高，阻垢剂的阻垢效率呈先上升后下降的趋势；当 PASP 占比达 80% 时，阻垢效率最高可达 94.3%，表明最优阻垢剂配方为 80% PASP + 20% PBTCA。

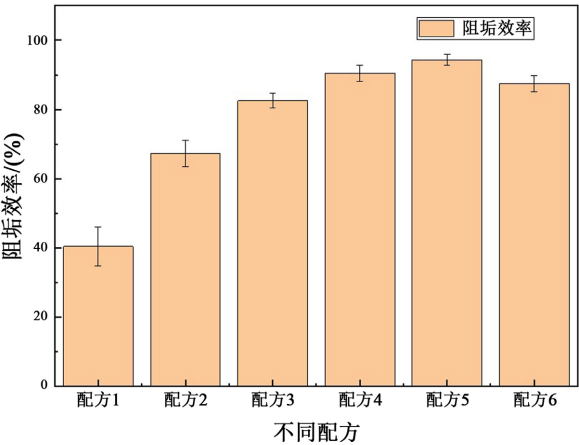


Figure 3. Comparison of scale inhibition efficiency of different scale inhibitor formulations
图 3. 不同阻垢剂配方的阻垢效率对比图

3.2.2. 阻垢剂投加量对比研究

在静态阻垢实验中分别对配方 5 (80% PASP + 20% PBTCA) 在不同投加量条件下的阻垢效率，实验结果如图 4 所示。由图 4 可知，随着阻垢剂投加量的升高，阻垢效率呈先上升后下降的趋势，当阻垢剂投加量达 3 mg/L 时，最高阻垢效率最高可达 94.6%，表明最优阻垢剂投加量为 3 mg/L。

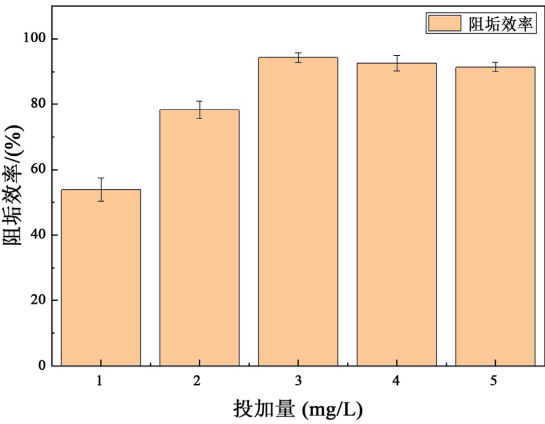


Figure 4. Comparison of scale inhibition efficiency at different scale inhibitor dosages
图 4. 不同阻垢剂投加量的阻垢效率对比图

3.3. 水质结垢倾向控制指标验证

在反渗透过程中, 当难溶性盐类在水中浓缩超过其溶解平衡极限时, 可能会析出沉淀并导致膜面污染。水处理行业使用溶度积常数(K_{sp})判断难溶盐类和二氧化硅的结垢倾向。以表 1 中实测水质参数作为模拟水质参数, 设置水温为 25℃、pH 值为 4.2 和回收率为 80%的条件下, 基于 ROSA7.0 反渗透模拟软件对结垢趋势进行了计算模拟, 其中若浓水侧任一控制参数超过了其过饱和极限, 则表明有结垢风险; 在添加阻垢剂后, 该极限由阻垢剂供应商提供, 模拟所得结垢控制指标列于 4。由表 4 可知, 在未添加阻垢剂的情况下, 浓水侧 CaSO_4 和 BaSO_4 的水质结垢倾向均高于控制指标, 表明在模拟情况下该 RO 系统需要采取结垢控制措施。而添加复配阻垢剂后, 浓水侧 CaSO_4 和 BaSO_4 的 K_{sp} 可达 360%和 3000%, 表明复配阻垢剂的理论阻垢性能可满足现场水质要求。

Table 4. water scaling tendency control indicators
表 4. 水质结垢倾向控制指标

控制参数	给水侧指标 /(%)	浓缩侧指标 /(%)	未加阻垢剂控制指标 /(%)	投加阻垢剂后控制指 标/(%)
$K_{sp}(\text{CaSO}_4)$	12.33	101.97	≤ 80	≤ 360
$K_{sp}(\text{BaSO}_4)$	116.54	543.91	≤ 80	≤ 3000
$K_{sp}(\text{SrSO}_4)$	3.61	19.63	≤ 80	≤ 1000
$K_{sp}(\text{CaF})$	0.068	8.54	≤ 80	≤ 400
$K_{sp}(\text{SiO}_2)$	1.31	6.98	≤ 80	≤ 200

3.4. 中试试验

3.4.1. 不同阻垢剂钙离子浓缩倍率对比

不同配比的阻垢剂在不同浓缩倍率下的钙离子浓缩倍率对比如图 5 所示。
由图 5 可知, 除了配方 5 以外的其余阻垢剂均在溶液浓缩因子 K_f 大于 2.5 时, Ca^{2+} 离子的浓缩倍数偏离氯离子的浓缩曲线; 而在投加配方 5 阻垢剂时, 当溶液浓缩因子 K_f 大于 3 时, Ca^{2+} 离子的浓缩倍数才开始偏离氯离子的浓缩曲线。说明此时硫酸钙可能沉积于膜表面上, 这是因为在周期地运行期间, 供料罐溶液的浓缩因子将逐渐增加。若没有出现钙沉积, 供料罐溶液中的 Ca^{2+} 的浓度将随着浓缩因子的增加而成比例地增加, 若出现钙沉积, 供料罐溶液中的 Ca^{2+} 离子的浓度将小于浓缩因子的增加。因此, 通过对比可知, 配方 5 的阻垢剂具有最为优异的阻垢效果。

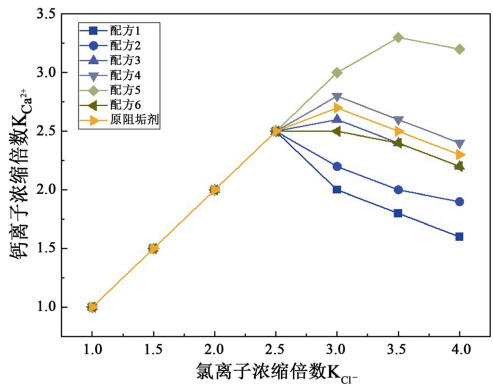


Figure 5. Comparison of calcium ion concentration ratios of different scale inhibitors at different concentration ratios
图 5. 不同阻垢剂在不同浓缩倍率下的钙离子浓缩倍率对比图

3.4.2. 不同阻垢剂膜通量对比

复配阻垢剂不同投加量条件下出水通量的变化结果见图6。由实验结果可知, 在 1~5mg/L 投加量范围内, 出水通量随阻垢剂投加量增大呈先上升后下降的趋势。因此选择最优阻垢剂投加量为 3 mg/L。

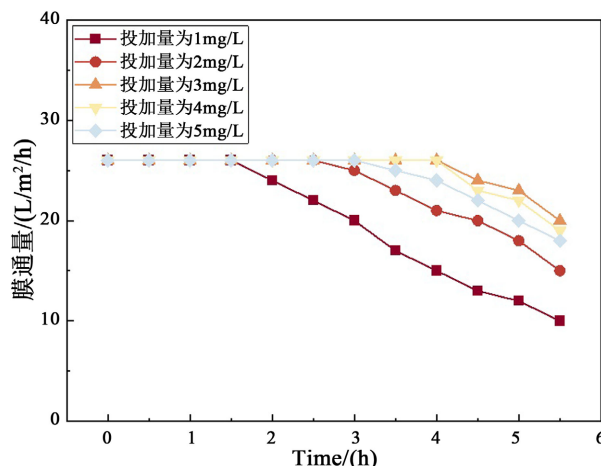


Figure 6. Comparison of membrane flux under different dosage conditions of antiscalant
图 6. 阻垢剂在不同投加量条件下的膜通量对比图

4. 结论与展望

4.1. 研究结论

本研究针对稀土矿山尾水反渗透系统中硫酸钙等难溶性盐的结垢问题, 通过复合阻垢剂的配方筛选与应用试验, 开发出了有效且低成本的阻垢剂配方。实验中选用聚羧酸盐(PASP)作为主剂, 并引入具有协同增效作用的有机膦酸盐(PBTCA)为辅剂, 制备了针对性复配阻垢剂。通过静态试验与中试验证发现, 当 PASP 占比为 80%时, 阻垢效率最高达 94.3%, 且在投加量为 3 mg/L 时, 结垢抑制效率达到最高。且添加阻垢剂后, 系统的 CaSO_4 和 BaSO_4 的溶度积常数分别达到 360%和 3000%, 显示了优异的阻垢性能, 满足矿山尾水处理的要求。阻垢剂在钙离子浓缩倍数与膜通量方面的表现均优于其他配方, 特别是在供水浓缩因子 K_i 高于 3 的条件下依然保持稳定, 有效避免了系统瘫痪。

4.2. 未来展望

随着稀土矿山尾水成分的复杂化及环境保护要求的提升, 如何高效、环保地处理矿山尾水, 成为亟待解决的重要问题。因此, 未来的研究应进一步探索更加高效、低污染的绿色阻垢剂配方, 特别是要关注阻垢剂的绿色环保性、经济性和高效性, 以满足矿山尾水处理对可持续发展和环境保护的需求。具体来说, 未来的研究可以从以下几个方向展开: ① 绿色阻垢剂的研发: 目前, 尽管一些新型阻垢剂已经投入应用, 但大多数仍然依赖于磷、氯等化学成分, 这些成分可能对环境造成一定的污染。因此, 开发无磷、低毒、易降解的绿色阻垢剂将是未来研究的重要方向; ② 复合阻垢剂性能的多水质适应性研究: 稀土矿山尾水的水质差异性较大, 原地浸矿工艺主要分为铵盐浸矿和镁盐浸矿, 不同工艺和不同区域的稀土矿山, 其尾水中的盐分浓度存在较大差异, 并且稀土矿山开采过程中, 浸矿剂 pH 会根据实际情况调整, 相应尾水中的盐份成分和浓度也随之变化。因此, 开发具有广泛适应性的复合阻垢剂, 以应对不同地区稀土矿山尾水中的钙盐、硫酸盐等难溶性盐的结垢问题, 仍是技术突破的关键。未来研究应针对不同水质条件(如高硬度水、含有有机物的水等)下复合阻垢剂的性能表现进行深入分析和优化; ③ 提高反

渗透系统的稳定性与运行效率: 未来的研究可以在阻垢剂配方优化的基础上, 结合膜材料的改性、膜清洗技术的创新等方面, 探索如何在长时间运行条件下保持系统的高效稳定性, 延长膜使用寿命, 并减少膜的维护和更换成本。

基金项目

离子型稀土矿山开采全程水污染控制技术研发(基金编号: 02-2205)。

参考文献

- [1] 欧阳慧, 梅毅. 离子型稀土矿山水处理技术的研究与应用[J]. 当代化工研究, 2024(14): 84-86.
- [2] Lin, Y., Jin, X., Khan, N.I., Owens, G. and Chen, Z. (2022) Bimetallic Fe/Ni Nanoparticles Derived from Green Synthesis for the Removal of Arsenic (V) in Mine Wastewater. *Journal of Environmental Management*, **301**, Article 113838. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113838>
- [3] 祁超, 周杰, 黄海, 等. 采选废水协同处理工程化研究与应用[J]. 广东化工, 2023, 50(22): 106-108.
- [4] 卢致明, 韩彬, 张亮亮, 等. 生物制剂在多金属选矿废水处理的应用研究[J]. 世界有色金属, 2019(6): 127-129.
- [5] 陈文宝, 刘祖文, 张立楠. 酸性矿山废水治理技术研究进展[J]. 市政技术, 2023, 41(6): 157-163.
- [6] Andrade, L.H., Aguiar, A.O., Pires, W.L., Miranda, G.A., Teixeira, L.P.T., Almeida, G.C.C., et al. (2017) Nanofiltration and Reverse Osmosis Applied to Gold Mining Effluent Treatment and Reuse. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, **34**, 93-107. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20170341s20150082>
- [7] Jiang, S., Li, Y. and Ladewig, B.P. (2017) A Review of Reverse Osmosis Membrane Fouling and Control Strategies. *Science of the Total Environment*, **595**, 567-583. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.235>
- [8] Madaeni, S.S. and Samieirad, S. (2010) Chemical Cleaning of Reverse Osmosis Membrane Fouled by Wastewater. *Desalination*, **257**, 80-86. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.03.002>
- [9] Peters, C.D., Li, D., Mo, Z., Hankins, N.P. and She, Q. (2022) Exploring the Limitations of Osmotically Assisted Reverse Osmosis: Membrane Fouling and the Limiting Flux. *Environmental Science & Technology*, **56**, 6678-6688. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c00839>
- [10] Sim, L.N., Chong, T.H., Taheri, A.H., Sim, S.T.V., Lai, L., Krantz, W.B., et al. (2018) A Review of Fouling Indices and Monitoring Techniques for Reverse Osmosis. *Desalination*, **434**, 169-188. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.12.009>
- [11] Peña, N., Gallego, S., del Vigo, F. and Chesters, S.P. (2013) Evaluating Impact of Fouling on Reverse Osmosis Membranes Performance. *Desalination and Water Treatment*, **51**, 958-968. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.699509>
- [12] Matin, A., Rahman, F., Shafi, H.Z. and Zubair, S.M. (2019) Scaling of Reverse Osmosis Membranes Used in Water Desalination: Phenomena, Impact, and Control; Future Directions. *Desalination*, 455, 135-157. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.12.009>
- [13] Si, W. and Guo, Z. (2022) Enhancing the Lifespan and Durability of Superamphiphobic Surfaces for Potential Industrial Applications: A Review. *Advances in Colloid and Interface Science*, **310**, Article 102797. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102797>
- [14] Zhang, Z.Y., He, G.F., Wang J., et al. (2024) Membrane Scale Inhibitor and the New Research Progress of Its Scale Inhibition Mechanism. *Journal of East China University of Science and Technology*, **50**, 4-14.
- [15] Antony, A., Low, J.H., Gray, S., Childress, A.E., Le-Clech, P. and Leslie, G. (2011) Scale Formation and Control in High Pressure Membrane Water Treatment Systems: A Review. *Journal of Membrane Science*, **383**, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.08.054>
- [16] Ma, W., Zhang, Y. and Li, H. (2022) Synthesis and Performance Evaluation of Carboxyl-Rich Low Phosphorus Copolymer Scale Inhibitor. *Journal of Applied Polymer Science*, **140**, e53333. <https://doi.org/10.1002/app.53333>