

范佳明, 代军, 郭剑浩, 等. 硅污染类型反渗透膜的清洗及预防试验[J]. 净水技术, 2025, 44(8): 122-128.

FAN J M, DAI J, GUO J H, et al. Experiment of cleaning and prevention of silicon fouling for RO membrane[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(8): 122-128.

硅污染类型反渗透膜的清洗及预防试验

范佳明¹, 代军^{2,*}, 郭剑浩¹, 任斌¹, 王鹏²

(1. 国家能源集团宁夏煤业有限责任公司煤炭化学工业技术研究院, 宁夏银川 754011; 2. 国家能源集团宁夏煤业有限责任公司煤制油分公司, 宁夏银川 754011)

摘要 【目的】宁夏某化工厂采用预处理与膜脱盐耦合工艺进行废水处理及产水回用, 生产过程中反渗透膜污堵频繁, 常规方案清洗后膜性能恢复有限, 严重制约膜系统长周期稳定运行, 影响废水处理效率。【方法】经分析可知, 膜组主要为进水中硅含量超标引发的硅垢污染, 为提升化学清洗效果, 文章开发出一种高效、温和的硅垢清洗液, 并确定了清洗液的最优投加浓度; 同时针对膜系统进水开展除硅工艺优化试验, 预防硅垢形成。【结果】平板膜试验表明, 先常规酸碱清洗, 再使用质量分数为 1.5% 的硅清洗液时效果最好, 污堵膜片脱盐率由 21.8% 恢复至 85.4%。不同污染程度卷式膜经该清洗方案离线清洗后, 初始脱盐率为 40% 的可恢复至 75%, 70% 的可恢复至 90% 以上。分别采用石灰液碱镁剂同步除硬除硅法、铝剂单独除硅法对前端来水进行处理, 试验结果表明, 除硬除硅同时进行除硅效果不佳, 硅去除率仅为 57%; 单独 NaAlO_2 处理时硅去除率可达 95%, 且 NaAlO_2 最佳投加量为 200 mg/L, 此时预处理系统出水硅质量浓度可降低至 13.9 mg/L。【结论】试验自主开发的清洗液对硅污染类反渗透膜清洗效果良好, 且性能温和不伤害膜元件, 具备工业推广应用可行性。建议该化工厂可在除硬单元前增设铝剂除硅单元, 实现水中硅的高效去除, 降低后端膜系统硅污染发生频次。

关键词 煤化工 反渗透膜 硅垢 清洗 预防

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)08-0122-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.08.016

Experiment of Cleaning and Prevention of Silicon Fouling for RO Membrane

FAN Jiaming¹, DAI Jun^{2,*}, GUO Jianhao¹, REN Bin¹, WANG Peng²

(1. Coal Chemical Industry Technology Research Institute, Ningxia Coal Industry Co., Ltd., China Energy Investment Corporation Co., Ltd., Yinchuan 754011, China;

2. Coal to Oil Branch of Ningxia Coal Industry Co., Ltd., China Energy Investment Corporation Co., Ltd., Yinchuan 754011, China)

Abstract [Objective] A chemical plant in Ningxia adopts the coupling process of pretreatment and membrane desalination for wastewater treatment and water reuse. In the production process, the reverse osmosis membrane fouling is frequent, the recovery of membrane performance after conventional cleaning is limited, which seriously restricts the long-term stable operation of membrane system and affects the efficiency of wastewater treatment. [Methods] The analysis showed that the membrane group was mainly caused by the silicon scale pollution caused by the excessive silicon content in the influent. In order to improve the chemical cleaning effect, this paper developed an efficient and mild cleaning solution, and the optimal dosing concentration of the cleaning solution was determined; At the same time, the optimization test of silicon removal process was carried out for the influent of membrane system to prevent the formation of silicon scale. [Results] The flat membrane experiment showed that the effect was the best when the conventional acid-base cleaning was first used, and then the silicon cleaning solution with a mass fraction of 1.5% was used. The desalination rate of the membrane was restored from 21.8% to 85.4%. After the off-line cleaning of the membrane with different degrees of pollution, the initial desalination rate of 40% could be restored to 75%, and the initial desalination rate of 70% could be restored to over 90%. The wastewater was treated by simultaneous hardness removal and silicon removal method and aluminum agent

[收稿日期] 2024-03-08

[作者简介] 范佳明(1993—), 男, 主要从事煤化工及科研管理等工作, E-mail: 332658733@qq.com。

[通信作者] 代军, 男, 高级工程师, E-mail: 15011019@chnenergy.com.cn。

silicon removal method respectively, the experimental results showed that the silicon removal effect was not good when the silicon removal was carried out at the same time, and the silicon removal rate was only 57%; When NaAlO_2 was used alone, the removal rate of silicon could reach 95%, and the optimal dosage of NaAlO_2 was 200 mg/L. At this time, the effluent silicon concentration of the pretreatment system could be reduced to 13.9 mg/L. [**Conclusion**] The cleaning solution independently developed in this experiment has a good cleaning effect on silicon-contaminated reverse osmosis membrane, mild performance and no damage to membrane components, and has the feasibility of industrial application. Proposal the chemical plant can add an aluminum agent silicon removal unit before the hard removal unit to achieve efficient removal of silicon in water and reduce the frequency of silicon pollution in the membrane system.

Keywords coal chemical industry reverse osmosis (RO) membrane silicon cleaning prevention

硅垢是反渗透系统运行过程中一类常见的污染物,其与反渗透膜表面之间形成的共价键(例如硅酸与膜表面的羧基或羟基官能团反应形成酸酐)难以通过常规的液碱配合表面活性剂、螯合剂等化学清洗方法去除,机械冲刷或氢氟酸清洗又会对膜组件造成不可逆损伤。因此,硅垢污染被称为水处理的“戈尔迪之结”。目前膜清洗领域研究方向多针对对于碳酸水垢的去除与预防,而对于硅垢报道较少,相关文献数量仅占膜污染文献总量的 10%^[1]。宁夏某化工厂水处理单元反渗透膜污堵严重,需对其进行频繁清洗,且常规酸碱清洗后脱盐性能恢复不佳,经表征分析确定为硅垢污染。本文自主开发出一种制备简便、性能温和且对硅污染类型膜元件具备良好清洗效果的清洗液,同时为延长膜组清洗周期、降低换膜成本,针对系统来水开展除硅系列试验,探索最优除硅预处理工艺,从源头预防硅垢形成,实现膜系统长周期高效稳定运行。

1 废水处理工艺流程简介及膜元件污染类型分析

该煤化工项目外排废水中含有大量有机物、盐分,其中无机盐离子以钙、镁、硅等元素为主,废水首先经生化单元降低有机物、氨氮含量,生化出水进入除硬单元去除钙、镁离子后输送至超滤、反渗透双膜浓缩单元脱盐处理,膜产水回用于循环水系统及除盐水站作为补充水。该反渗透系统设计 6 套膜组,5 用 1 备,均为一级两段设计,系统回收率为 70%。每套反渗透装置一段安装 46 支 7 芯膜壳(每支膜壳设计工作压力为 2 MPa),二段安装 23 支 7 芯膜壳(每支膜壳设计工作压力为 2 MPa),每套共计使用 483 支海德能 PROC10 反渗透膜元件。PROC10 卷式反渗透膜设计产水量为 39.7 m³/d,平均脱盐率为 99.75%,膜元件支撑层材料为聚砜,分离层为芳香

聚酰胺。

生产发现,该反渗透膜系统二段膜元件污堵频繁,运行 12 d 左右即需清洗,且采用常规 NaOH+乙二胺四乙酸四钠(EDTA)碱洗配合柠檬酸清洗方案时清洗效果有限,严重制约了膜系统连续稳定运行。因此,确定该系统膜元件实际污染类型并研发专用清洗液势在必行。解剖下线污堵膜元件,发现膜面附着厚厚的干燥松软白色无机盐类污染物,极易从膜面上自然脱落,无明显异味。收集污染物开展相关表征分析,确定其主要组成成分^[2]。

在 105 ℃ 下将污染物干燥至恒重,再升温至 600 ℃ 灼烧 2 h 以破坏污染物中的有机物,根据灼烧前后质量损失确定有机污染百分比。通过灼烧试验可知,污染物干燥后质量为 1.105 g,灼烧后剩余质量为 1.046 g,计算可知其中有机类物质比例约为 5.3%,无机类物质约为 94.7%,主要为无机类污染。对污染物开展 X 射线荧光光谱分析,得到无机成分主要组成元素种类及质量分数信息,测试结果如表 1 所示。

表 1 污染物主要成分质量分数
Tab. 1 Mass Fraction of Main Components of Pollutants

氧化物种类	质量分数
SiO_2	97.80%
Na_2O	0.50%
Fe_2O_3	0.40%
Al_2O_3	0.30%
MgO	0.20%
CaO	0.20%
SO_3	0.20%
其他	0.40%

由表征结果可确定该污染物主要成分为硅垢,此外还存在少量有机污染物及铁铝氧化物。测试得

知超滤产水中 SiO_2 质量浓度高达 124 mg/L,料液在反渗透系统中经一段膜浓缩后二段膜进水 SiO_2 质量浓度提升至 270 mg/L 左右,水中硅类物质浓度持续升高,超出溶解度达到饱和状态后在膜表面诱导单硅酸异相成核或主体成核形成硅聚集体(如聚硅酸和胶体硅),必将在膜面发生沉积形成硅垢^[3]。硅垢一旦形成不但会堵塞膜通道,影响膜通透性,还会吸附水中的金属化合物和有机物,这些物质共同沉积在膜表面形成混合型胶体垢,加重膜污染程度及加大除垢难度,系统运行效率大大降低^[4]。

2 硅污染类型反渗透膜清洗液开发及应用

由于市面上一般酸碱化学清洗方法无法对已形成的顽固硅垢进行有效清洗,本文首先筛选出可与硅垢发生明显化学反应的药剂配方,然后在实验室阶段开展膜片清洗系列试验,确定清洗液最优投加浓度,最后开展卷式膜清洗试验,验证该清洗液实际清洗效果。

2.1 硅垢专用清洗液筛选

通过查阅硅垢清洗相关文献报道^[5-6]并结合现场技术人员清洗经验,选择不同药剂配制成溶液后加入适量硅垢放置一段时间,观察硅垢在溶液中溶解情况,根据硅垢与所配制溶液反应难易程度持续改进药剂配方,最终筛选得到硅垢专用清洗液。由图 1 可知,经多轮复配尝试后,硅垢由在 a 溶液中仅发生轻微溶解逐渐优化为在 d 溶液中完全溶解,因此 d 溶液作为清洗液可与硅垢发生彻底反应。

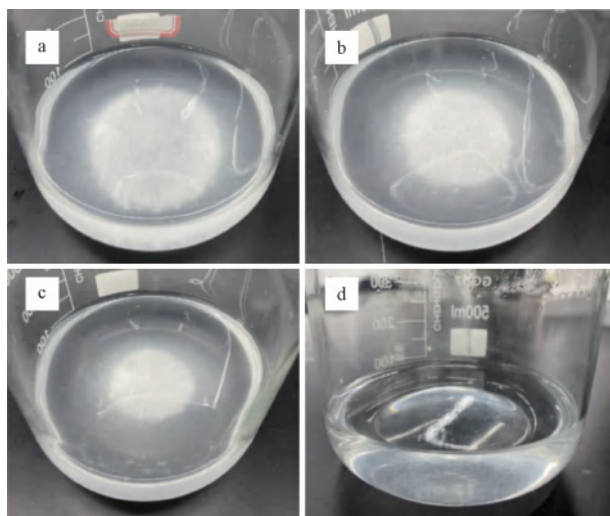


图 1 硅垢在不同溶液中溶解情况

Fig. 1 Dissolution of Silicon Scale in Different Solutions

2.2 清洗液最优投加浓度确定

在实验室阶段依托三联高压平板膜设备开展膜片清洗系列试验,配制 2 000 mg/L 的 NaCl 溶液加入原水池中作为试验进水,裁剪解剖后的膜元件得到膜片安装到膜池中,调节设备运行压力为 1.55 MPa、控制试验温度为 25 ℃,预压 30 min 后从产水管收集一定量试验产水,分别测试进水、产水电导率计算膜片脱盐率,根据脱盐率恢复情况确定清洗液最优浓度。经平板膜测试可知,该膜片清洗前脱盐率仅为 21.8%,污堵情况极其严重。

硅清洗液最优浓度确定试验之前首先应明确整体清洗方案,即统一硅清洗液质量分数为 1% 条件下开展单独常规碱洗+酸洗、单独硅清洗液清洗、碱洗+酸洗后硅清洗液清洗、碱洗后硅清洗液清洗后酸洗等不同清洗方式组合对比试验,分析不同清洗方案时膜片脱盐率恢复情况,同时研究清洗过程中常规碱洗+酸洗与硅垢专用清洗液清洗配合应用的必要性及顺序优先性,对比试验数据如表 2 所示。

表 2 对比试验结果
Tab. 2 Results of Comparative Experiments

指标	单独碱洗+酸洗	单独硅清洗液清洗	碱洗+酸洗后硅清洗液清洗	碱洗后硅清洗液清洗后酸洗
进水电导率/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	4 269	4 269	4 294	4 294
产水电导率/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	3 129	1 887	1 065	1 318
脱盐率	26.7%	55.8%	75.2%	69.3%

由表 2 可知,传统碱洗+酸洗清洗方式对膜片清洗效果较差,清洗后膜片脱盐率为 26.7%,较清洗前仅提升 4.9%,符合液碱、柠檬酸等常规药剂无法与硅垢发生活泼反应的相关结论。直接采用单独硅清洗液清洗膜片后脱盐率为 55.8%,清洗效果虽优于酸碱常规清洗,但提升程度有限。酸碱预处理后耦合硅清洗液对膜片清洗时脱盐率恢复至 75.2%,清洗效果得到极大改善,这可能是由于液碱、柠檬酸将污染物上层少量有机污染物及铁铝氧化物去除后下层硅垢得到充分暴露,有利于硅垢与硅清洗液完全反应。碱洗后硅清洗液清洗、最后酸洗时膜片脱盐率为 69.3%,清洗效果不如先碱洗+酸洗后硅清洗液清洗,猜测原因为单一碱洗预处理效果一般,导致后续清洗液与硅垢反应不够充分。试验结果表明,对该硅污染类型膜元件最佳清洗方案应为先碱洗+酸洗处理,后使用专用清洗液清洗。

为实现对硅污染类型膜元件的彻底清洗,本试验确定首先采用 NaOH+0.05% EDTA-4Na 碱洗、柠檬酸酸洗,对膜片上有机物类、金属氧化物污染进行去除,然后加入该清洗液将硅垢完全去除的清洗方案。分别配制不同浓度梯度清洗液按清洗方案开展膜片清洗试验,比较清洗后膜片脱盐率恢复情况,确定硅清洗液最优投加浓度,试验结果如图 2 所示。

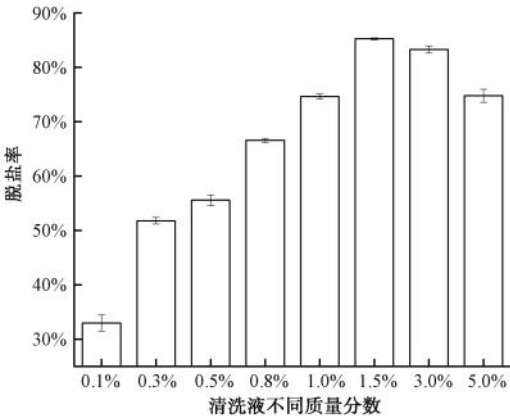


图 2 经不同质量分数清洗液清洗后膜片性能恢复情况
Fig. 2 Recovery Performance of Membrane after Cleaning with Different Mass Fraction Cleaning Solution

由图 2 可知,膜片脱盐率随清洗液浓度增大逐步提升,这是由于此时清洗液中有效成分含量增加,有利于除硅反应的进行。当清洗液质量分数为 1.5% 时清洗效果最好,膜片经该浓度清洗液清洗后脱盐率为 85.4%,脱盐性能得到显著恢复。继续增大清洗液浓度,清洗效果反而下降,这说明过高的药剂浓度对反应起抑制作用,另外也可能对膜性能产生不可逆的损伤,因此确定该清洗液最优投加质量分数为 1.5%。

该清洗方案处理后膜片外观形态及微观形貌恢复情况与脱盐性能表现一致,如图 3 所示。清洗前

膜片表面沉积大量硅垢,由扫描图片可看到,膜面已完全被层层叠叠致密的污染物覆盖。清洗后膜片外观干净光洁,且明显变软;扫描电镜分析发现,膜表面不再存在层叠状硅垢,可直接观测到紧致的聚酰胺分离功能层,恢复程度接近新膜水平,这也是膜片清洗后脱盐性能得到显著提升的根本原因。

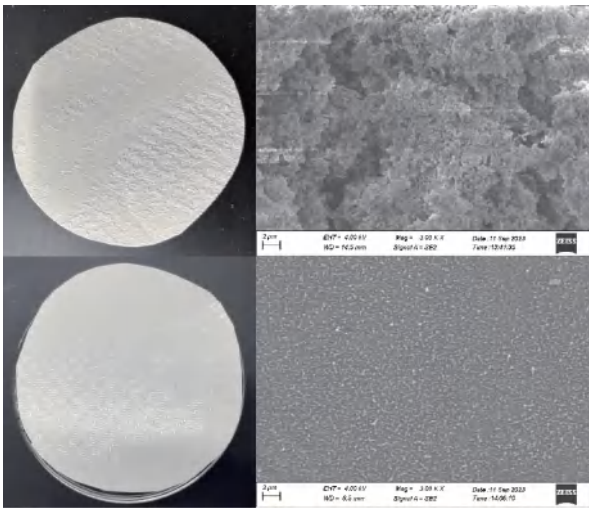


图 3 膜片清洗前后外观及微观形貌(放大 3 000 倍)
Fig. 3 Appearance and Micro-Morphology(3 000 Times Magnification) of the Membrane before and after Cleaning

2.3 硅清洗液工业试用

实验室研究工作完成后联合装置现场开展卷式反渗透膜清洗试验,验证该清洗方案实际清洗效果,具体方案为首先 NaOH+0.05% EDTA-4Na 碱洗,pH 值控制为 11.5 左右反应 4 h;然后柠檬酸酸洗,pH 值控制为 2 左右反应 4 h;最后 1.5% 硅清洗液反应 8 h。随机选取 8 支污堵膜元件依托离线清洗设备开展卷式膜清洗试验,测试时控制进水电导率为 2 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$,pH 值为 8 左右,操作压力为 1.55 MPa,试验结果如表 3 所示。

表 3 卷式反渗透膜清洗试验结果
Tab. 3 Test Results of Roll RO Membrane Cleaning

项目	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#
清洗前产水电导率/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	1 383	1 311	519	583	216	673	576	576
清洗前脱盐率	37.1%	40.4%	76.4%	73.5%	90.2%	69.4%	73.8%	73.8%
清洗前产水流量/($\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$)	2 200	2 200	1 800	1 850	1 700	1 900	1 900	1 900
清洗后产水电导率/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	660	541	66	187	132	328	200	211
清洗后脱盐率	70.0%	75.4%	97.0%	91.5%	94.0%	85.1%	90.9%	90.4%
清洗后产水流量/($\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$)	1 900	1 900	1 600	1 600	1 500	1 750	1 700	1 700

由表 3 可知,经该清洗方案清洗后,8 支膜元件脱盐性能均得到明显提升。其中清洗前脱盐率为 70% 左右膜元件清洗后脱盐率可恢复至 90% 以上,清洗效果满足生产现场反渗透膜化洗相关指标要求(即清洗后膜元件脱盐率需 $\geq 90\%$)。另外污染程度较重、已报废待填埋处理的脱盐率仅为 40% 左右膜元件经清洗后脱盐率可恢复至 75% 左右,可在对产水水质要求较低的工段进行循环再利用,实现装置整体降本增效。

另外可看到,膜元件清洗后通量普遍降低 200 L/h 左右,这是因为发生污染时膜孔被硅垢堵塞,强制改变了膜材质的韧性,膜孔无法收缩,表现体现为通量增大、脱盐率降低。经本方案清洗后膜面污染物得到有效去除,膜孔恢复原状,表现为产水流量降低及脱盐率提高。上文 2.2 处膜片清洗后变软也是膜材质恢复正常的佐证。

试用结果说明该清洗液及清洗方案对不同污染程度硅污染类型膜元件均体现良好的清洗效果,具备工业推广应用可行性。本研究成果完成前膜系统中硅污染类型膜元件需委托外部机构清洗,清洗费用为 680 元/(支·次),装置运维成本高昂,且企业无法掌握核心技术。按所需药剂种类及各自用量计

算,自主制定的清洗方案清洗成本约为 380 元/(支·次),企业生产成本显著降低。

3 废水预处理工艺优化

膜元件发生硅垢污染后尽管可通过上述清洗方案有效恢复脱盐性能,但上游预处理单元原设计未考虑除硅工艺,导致膜系统来水中溶解性硅含量始终超标是膜组污堵的根本原因,且膜组承受酸碱的耐性有限,频繁的化学清洗对膜性能造成不可逆损害的同时还可能引发二次污染。为有效延长膜元件使用寿命、降低清洗成本、保障膜系统长周期稳定运行,需要对废水进行有效的除硅处理降低水中溶解硅含量,从源头预防硅垢产生^[7]。

3.1 装置除硬单元运行情况

基于除硬单元进水水质碱度远大于硬度,同时为降低石灰加药量,装置现场采用石灰液碱法实现对水中硬度及碱度的去除^[8-9]。除硬单元进出水水质指标如表 4 所示,计算可知,处理后硬度去除率为 86.1%,碱度去除率为 75.8%,运行情况良好。此时硅去除率仅为 8.8%,应为 CaCO_3 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 矾花絮凝成团时吸附或包裹少量硅类物质发生共沉淀去除^[10]。

表 4 除硬单元进出水水质
Tab. 4 Influent and Effluent Quality of Softening Unit

位置	pH 值	钙/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	镁/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	总硬度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	碱度/($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	硅/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
进水	8.1	146	50	565	9.5	136
出水	6.2	17	9	78.5	2.3	124

3.2 除硬时同步除硅

由于除硬单元实际运行中软化反应池 pH 值为 11 左右,选取适宜在此 pH 条件下使用的 MgO 作为除硅药剂,在原有除硬工艺基础上加入不同浓度 MgO 开展同步除硬除硅试验^[11],分析除硅效果并确定药剂最佳投加量。取除硬单元进水作为试验用水,试验具体过程:取 6 份 300 mL 废水置于烧杯中,首先加入 450 mg/L NaOH 、600 mg/L $\text{Ca}(\text{OH})_2$,然后分别加入质量浓度为 100、200、300、400、500、600 mg/L MgO 药剂快速搅拌 10 min,随后加入 1 mL 质量分数为 0.1% 的聚丙烯酰胺慢速搅拌 5 min,反应结束后静置 30 min,在液面下 2 cm 处移取适量水样过滤后测定硬度、 SiO_2 残留量计算硬度及硅的去除率,结果如图 4 所示。

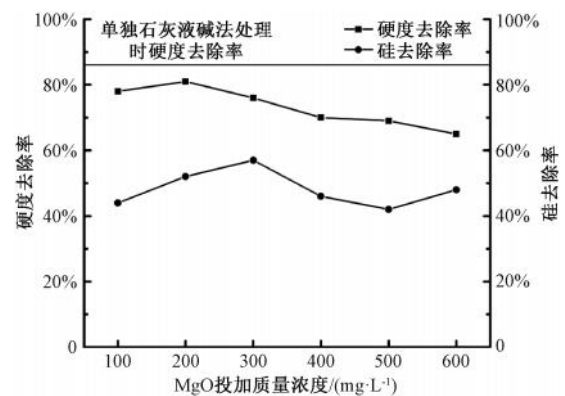


图 4 同步除硅除硬试验结果

Fig. 4 Experimental Results of Synchronous Removal of Silicon and Hardness

由图 4 可知,随 MgO 投加量不断增加,硅去除

率呈现先升高后降低趋势,药剂投加量为 300 mg/L 时硅的去除率达到最高 57%,此时出水中硅残留质量浓度为 58 mg/L,超出反渗透膜进水硅含量(以 SiO_2 计)需控制在 20 mg/L 以下的指标要求,后端膜系统仍存在极大硅污染发生隐患。另一方面,加入 MgO 后水样硬度去除率持续降低,除硬效果不如单独石灰液碱法处理。试验结果表明,除硬除硅同步进行时不能实现废水中硅的高效去除,而且对除硬效果起抑制作用。

3.3 除硬前单独除硅

在同步除硬除硅试验未能有效降低膜进水硅含量前提下,开展分步法除硬除硅研究,验证单独除硅方法的可行性。由于除硬单元进水 pH 为中性,出水 pH 偏酸性,为避免调节水样 pH 工作量,降低相关药剂消耗,选取反应适宜 pH 值为 8~9 的偏铝酸钠(NaAlO_2)在除硬反应前开展除硅试验^[12],分析 NaAlO_2 在该水质条件下的除硅效果。由于铝剂除硅时引入的 Al^{3+} 有可能对后端膜元件产生结垢风险,影响膜系统正常稳定运行,因此需关注除硅出水中 Al^{3+} 残留量^[12-13]。

取 6 份 300 mL 除硬单元进水,在不调整 pH 的条件下分别加入质量浓度分别为 100、200、300、400、500、600 mg/L 的 NaAlO_2 ,快速搅拌 30 min,然后加入 1 mL 质量分数为 0.1% 的聚丙烯酰胺慢速搅拌 5 min,反应结束后静置 30 min,分别检测出水 SiO_2 和 Al^{3+} 含量,确定 NaAlO_2 最佳投加量。

由图 5 可知, NaAlO_2 投加量为 100~300 mg/L 时,出水硅含量逐渐降低,且当 NaAlO_2 投加量为 200 mg/L 时,出水硅含量为 13.9 mg/L,满足膜系统进水硅含量要求; NaAlO_2 投加量继续增大,出水中硅含量不再明显下降,硅去除率保持在 95% 左右。 Al^{3+} 残留量随 NaAlO_2 投加量增大而增加,膜系统发生不溶性金属沉淀污染几率也随之增大。综合考虑硅去除效果及 Al^{3+} 残留量,确定 NaAlO_2 最佳投加量为 200 mg/L。

4 结论

(1) 废水预处理单元未设计降硅工艺,导致反渗透进水中溶解硅含量过高是膜系统频繁发生硅垢污堵的根本原因。

(2) 实验室研究开发出一种对硅污染类型膜具备良好清洗效果且性能温和不伤害膜元件的专用清洗液,确定先常规酸碱清洗,再使用 1.5% 专用清洗

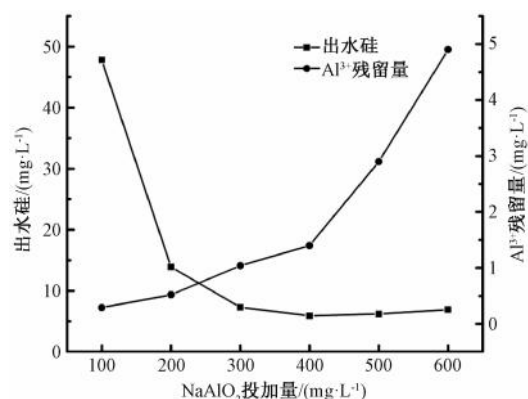


图 5 出水硅、 Al^{3+} 残留量随 NaAlO_2 投加量变化规律

Fig. 5 Effluent Residual Al^{3+} and Silicon Varying with NaAlO_2 Dosage

液为最优清洗方案;该清洗方案的推广应用可行性通过卷式膜清洗试验得到了成功验证。

(3) 结合装置现场废水来水实际水质情况,考察同步及分步除硅法对水中硅去除情况,结果表明,同步除硬除硅时不仅除硅效果有限,而且对除硬反应体现一定抑制作用;单独铝剂除硅效果更好,出水硅含量可降至 20 mg/L 以下。生产中对于已经明确的结垢污堵机理,把工作重心放在“预防”上可从根源降低污堵发生隐患,节约清洗运维成本,从而保障系统高效稳定运行。

参考文献

- [1] 张军, 赵颂, 郝展, 等. 反渗透膜硅垢形成机理及抗硅垢膜研究进展[J]. 膜科学与技术, 2022, 42(2): 128-137.
ZHANG J, ZHAO S, HAO Z, et al. Formation mechanism of silica scaling on reverse osmosis membrane and research progress of anti-silica scaling membrane [J]. Membrane Science and Technology, 2022, 42(2): 128-137.
- [2] 张欣然, 蒋才芳, 王健, 等. 膜污染表征技术研究进展[J]. 净水技术, 2024, 43(1): 32-42, 117.
ZHANG X R, JIANG C F, WANG J, et al. Research progress of the characterization technology for membrane fouling [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(1): 32-42, 117.
- [3] 高凌, 刘凤洋, 郭磊. 煤化工废水高密度池同步除硅除硬技术与运行[J]. 煤炭加工与综合利用, 2023(1): 88-93.
GAO L, LIU F Y, GUO. Simultaneous silicon and hardness removal technology in coal chemical wastewater high density pool research and operation [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2023(1): 88-93.
- [4] 李晨璐. 煤化工废水反渗透系统膜污染机理及控制研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2021.
LI C L. Membrane fouling mechanism and control for reverse

- osmosis (RO) in the coal chemical plant [D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2021.
- [5] 程晓婷, 张爱国, 马明安. 一种硅垢清洗剂及其制备方法和应用: 202110585033. 7[P]. 2021-05-27.
CHEN X T, ZHANG A G, MA M A. The invention discloses a preparation method and application of a silicon scale cleaning agent; 202110585033. 7[P]. 2021-05-27.
- [6] 陈启俊. 硅垢防治法[J]. 工业水处理, 1985, 8(3): 18-22.
CHEN Q J. Silicon scale control method[J]. Industrial Water Treatment, 1985, 8(3): 18-22.
- [7] 赵东升, 宋基瑜, 林治全, 等. 纳滤/反渗透膜硅垢形成影响因素及控制策略研究进展[J]. 化工进展, 2023, 42(11): 5920-5928.
ZHAO D S, SONG J Y, LIN Z Q, et al. Research progress on influencing factors and control strategies of silicascale formation in nanofiltration/reverse osmosis membranes[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(11): 5920-5928.
- [8] 纪志国. 高密度沉淀池在废水化学除硬中的研究与应用[J]. 科技资讯, 2019, 17(31): 56-57.
JI Z G. Research and application of high density sedimentation tank in chemical dehardening of wastewater [J]. Science & Technology Information, 2019, 17(31): 56-57.
- [9] 郁振标, 侯晓帮, 吕森, 等. 除硬度为目标的工业水厂工艺流程及药剂投加[J]. 净水技术, 2023, 42(10): 124-130.
YU Z B, HOU X B, LÜ M, et al. Process flow and chemical dosing under the target of hardness removal in industrial water treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(10): 124-130.
- [10] 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 Y T, WANG X Q, KOU G H, 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.
- [11] 祝海涛, 吴雅琴, 杨波. 工业废水处理中除硅工艺研究[J]. 水处理技术, 2023, 49(4): 38-40.
ZHU H T, WU Y Q, YANG B. Study on silicon removal process in industrial wastewater treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(4): 38-40.
- [12] 党平, 赛世杰, 张娜, 等. 偏铝酸钠去除高盐废水中二氧化硅的试验研究[J]. 工业水处理, 2019, 39(7): 74-76.
DANG P, SAI S J, ZHANG N, et al. Experimental study on removal of silicon dioxide in high salt wastewater by sodium aluminate[J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(7): 74-76.
- [13] 刘松涛, 党小梅, 贾文瑶, 等. 高盐废水同步除硬除硅实验研究[J]. 工业水处理, 2023, 43(10): 71-78.
LIU S T, DANG X M, JIA W Y, et al. Synchronous hardness and silicon removal of high-salt wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 2023, 43(10): 71-78.

(上接第 92 页)

- [16] ZHANG Z Z, ZHANG Y, CHEN Y G. Recent advances in partial denitrification in biological nitrogen removal: From enrichment to application [J]. Bioresource Technology, 2020, 298: 122444. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122444.
- [17] LIU F J, LI W, ZHOU Y S. Preparation and characterization of magnetic sodium alginate-modified zeolite for the efficient removal of methylene blue[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 629: 127403. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.127403.
- [18] YANG Y, JIANG W B, JIANG J L, et al. Synthesis of hierarchical ZSM-5 zeolites templated by sodium alginate toward enhanced catalytic activity for esterification[J]. Journal of Solid State Chemistry, 2020, 292: 121686. DOI: 10.1016/j.jssc.2020.121686.
- [19] 池伟利, 杨宏. 厌氧氨氧化包埋填料处理稀土尾矿废水的中试脱氮和优化 [J]. 化工进展, 2023, 42(1): 506-516.
CHI W L, YANG H. Pilot-scale nitrogen removal and optimization of anammox immobilized fillers in the treatment of rare earth tailings wastewater [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(1): 506-516.