

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.03.004

## 给水处理纳滤膜阻垢剂性能评价

颌亚玮<sup>1,2</sup>, 余文庆<sup>1</sup>, 樊丞越<sup>1</sup>, 刘浩东<sup>1</sup>, 严嘉明<sup>1</sup>, 刘宏远<sup>1,2</sup>,  
朱方俊<sup>1</sup>

(1. 浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州 310023; 2. 浙江工业大学水工程与应急技  
术研发中心, 浙江 杭州 310023)

**摘要:** 针对浙江某给水厂纳滤(NF)工程筛选合适的阻垢剂的需求,采用静态法和改进的动态法评价了5种商品阻垢剂(3种含磷、2种不含磷)。静态实验表明,5种阻垢剂的阻垢效果存在差异,但实验条件与实际工程运行环境差距大,无法得出适用于工程需要的阻垢剂最优投加量。在改进的基于浓缩原水的部分循环法动态实验中,5号阻垢剂在投量为2 mg/L时阻垢性能最优,但会导致NF浓水磷浓度超出0.06 mg/L的限值;在满足浓水TP要求下,2号阻垢剂、2 mg/L投量为最佳选择。静态和动态实验均表明,含磷阻垢剂的阻垢性能优于无磷阻垢剂。阻垢剂缓解膜污染的效果与膜比通量变化具有较好的相关性,且动态实验未造成膜的机械损伤以及影响膜截留能力。每组动态实验时间仅为2 h,实验条件更接近实际工程环境,可为阻垢剂选用提供更为合理的依据。

**关键词:** 纳滤; 阻垢剂; 静态实验; 动态实验; 评价

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)03-0023-08

## Performance Evaluation of Nanofiltration Membranes Scale Inhibitors for Drinking Water Treatment

XIE Ya-wei<sup>1,2</sup>, YU Wen-qing<sup>1</sup>, FAN Cheng-yue<sup>1</sup>, LIU Hao-dong<sup>1</sup>, YAN Jia-ming<sup>1</sup>,  
LIU Hong-yuan<sup>1,2</sup>, ZHU Fang-jun<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;  
2. Water Engineering and Emergency Technology R&D Center of Zhejiang University of  
Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** To meet the needs of the nanofiltration project in a drinking water plant in Zhejiang Province, five kinds of commercial scale inhibitors (three containing phosphorus and two without phosphorus) were evaluated by the static method and improved dynamic method. The static experiment showed differences in the effect of the five scale inhibitors, however, there was a critical difference between the experimental conditions and the actual engineering operation environment, so it was impossible to obtain the optimal dosage of scale inhibitors suitable for engineering needs. In the dynamic experiment based on an improved partial circulating method for concentrated raw water, performance of No. 5 scale inhibitor was the best under the dosage of 2 mg/L, but the phosphorus concentration in concentrates exceeded 0.06 mg/L. Under the conditions of meeting the TP requirements for concentrated

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07201004)

通信作者: 刘宏远 E-mail: lhyzyy@qq.com

water, the best choice was No.2 scale inhibitor with the dosage of 2 mg/L. Both the static and dynamic experiments showed that the scale inhibition performance of containing phosphorus scale inhibitors were better than that of non-phosphorus scale inhibitors. The analysis of membrane fouling showed that the effect of scale inhibitors on alleviating membrane fouling was highly correlated with normalized flux. The analysis of membrane damage and water quality proved that the experiment would not lead to mechanical damage and change the rejection characteristics of the membrane. The dynamic experiment time of each group was only 2 hours, and the operating conditions were closer to the actual engineering environment, which could provide a reasonable basis for the selection of scale inhibitors.

**Key words:** nanofiltration; scale inhibitor; static experiment; dynamic experiment; evaluation

纳滤(NF)因其优异的二价离子截留效率,以及对中等以上分子质量有机物的截留作用,在给水处理领域受到越来越多的关注<sup>[1]</sup>。但原水中的颗粒物、有机污染物、难溶盐类以及微生物等会在NF膜表面不断沉降、结晶、压实而形成滤饼层<sup>[2]</sup>,引发膜通量下降,严重时可导致滤饼层难以洗脱甚至造成膜损伤报废<sup>[3]</sup>。为了减少膜污染,目前最为常用的方法是在NF系统前端投加阻垢剂以缓解膜表面结晶的形成<sup>[4-5]</sup>。然而,在NF给水处理系统排放污水的过程中,含磷阻垢剂可能因膜对原水的浓缩导致浓排水中总磷(TP)超标<sup>[6]</sup>。

基于阻垢剂的螯合、分散以及晶格畸变等阻垢机制,目前阻垢性能的评价方法可分为静态和动态阻垢性能测定两大类<sup>[7]</sup>。静态测定方法包括碳酸盐沉积法、pH位移法<sup>[8]</sup>、电导率法<sup>[9]</sup>以及浊度法<sup>[10]</sup>等,然而静态实验方法主要考察阻垢剂对原水中难溶盐的螯合作用,难以考察分散作用、晶格畸变等阻垢机制对阻垢效率的影响。此外,目前最常用的碳酸钙沉积法的反应温度为80℃,远高于给水NF系统正常工作时的环境温度,由于高温促进分子运动会加快螯合反应的进行<sup>[11]</sup>,因此,该方法得到的结果在实际应用中缺乏有效性,且静态实验非基于NF膜开展,因此无法得出可靠的最优阻垢剂投加量。目前发展出了一系列结合膜与阻垢剂、原水相互作用的动态实验方法<sup>[12-14]</sup>,如部分循环法、原水一次通过法等,然而两者的实验周期过长(往往超过10d<sup>[15]</sup>),同时动态实验主要针对再生水、循环冷却水以及浓盐水等具有较强结垢特性的原水,而浙江地区给水厂NF工程以去除有机物为目的,原水具备腐蚀性而非结垢倾向,可能导致动态实验周期相对

延长。此外,实验结果的可重复性高度依赖于原水水质的稳定性(通过工程原水开展实验周期可长达60d<sup>[16]</sup>),难以满足实际工程对阻垢药剂性能快速测定并得出最优投加量的要求。

浙江某给水厂拟建成产水量为 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的三段式NF系统进一步提升饮用水水质,工程调试前亟需在短时间内针对该水厂水质比选阻垢剂。针对常用的静态和动态实验方法存在的问题,采用静态碳酸钙沉积法以及基于浓缩原水的部分循环法改进的动态实验方法,从阻垢性能和浓水磷浓度角度分别评价了5种阻垢剂,通过膜污染及膜损伤分析了该动态实验方法的可行性,以期得到更适合评价给水NF系统阻垢剂阻垢性能的方法。

## 1 实验方法和目标

### 1.1 材料与药剂

拟评价的5种阻垢剂均为商品阻垢剂,其中1号和2号为无磷阻垢剂,3号、4号和5号则为含磷阻垢剂,其标准液含磷量分别为0.025 58、0.012 28、0.025 77 mg/mL。动态实验装置使用的纳滤膜为Dupont FilmTec™ NF270,为实验水厂工程中拟采用型号,实验前将NF膜裁剪成直径为60 mm。

所使用的分析药剂为:KOH、NaHCO<sub>3</sub>、CaCl<sub>2</sub>(AR, ≥99.5%, 国药集团),十水四硼酸钠缓冲溶液(pH=9),HCl标准溶液(0.1 mol/L, 国药集团),乙二胺四乙酸二钠标准溶液(EDTA-2Na, 0.01 mol/L, 国药集团),溴甲酚绿-甲基红和钙-羧酸指示剂。

### 1.2 静态实验

静态实验根据《水处理剂阻垢性能的测定 碳酸钙沉积法》(GB/T 16632—2019)开展,所用装置如图1所示,包括恒温水浴锅、圆底烧瓶以及冷凝管。

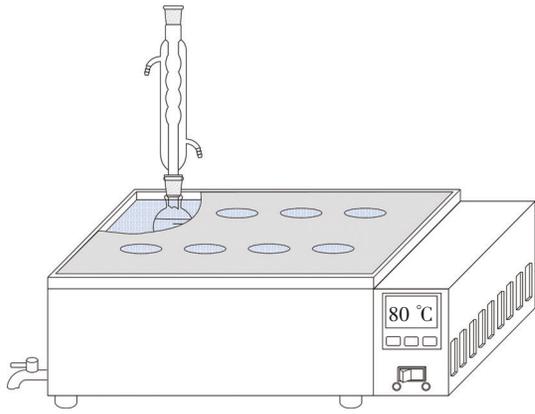


图1 CaCO<sub>3</sub>沉积法实验装置

Fig.1 CaCO<sub>3</sub> precipitation method experimental device

静态阻垢剂性能以阻垢效率表征,计算如下:

$$\eta = \frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_1 - \rho_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\eta$ 为阻垢效率,%; $\rho_3$ 为加入阻垢剂的试液实验后的Ca<sup>2+</sup>浓度,mg/mL; $\rho_2$ 为未加阻垢剂的空白试液实验后的Ca<sup>2+</sup>浓度,mg/mL; $\rho_1$ 为实际工况水中或配制水中的Ca<sup>2+</sup>浓度,mg/mL。

TP的测试依照《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB 11893—1989)进行,由于NF膜对磷具有很高的截留效率<sup>[17]</sup>,对于实际NF工程的浓水TP可由式(2)计算:

$$TP = \frac{\text{投加阻垢剂TP} + \text{原水TP}}{100\% - \text{回收率}} \quad (2)$$

### 1.3 动态实验

基于浓缩原水的动态测定法多适用于以再生水、循环冷却水等具有较高结垢倾向的原水的膜处理工艺的阻垢剂性能测试,然而结合前期研究<sup>[18-19]</sup>,根据韩雪<sup>[6]</sup>的计算方法得出该水厂NF工程原水(砂滤工艺产水)的朗格利尔饱和指数(LSI)为-0.37、雷兹纳稳定指数(RSI)为7.92,即不具有结垢倾向,若仅以原水开展实验并结合阻垢剂的作用,将导致原水需水量大以及实验时间过长。针对上述问题,对所在水厂NF工程原水以浓水回流至原水的方式对浓水循环浓缩,分别取得10倍、100倍浓缩后水样,以NF270膜过滤该水样开展膜比通量测定预实验,结果如图2所示。过滤10倍浓缩后的原水膜通量始终未出现下降趋势,无法反映投加阻垢剂对膜比通量的影响;过滤100倍浓缩后原水在90 min时膜比通量下降38.2%,因此以100倍浓缩的NF工程原水作为实验原水可充分反映阻垢剂对维持膜通量

的作用,此外适当延长每组过滤时间至2 h,并在动态实验中分析膜通量变化、表面形态、进产水水质,从而适当改进了原动态实验方法。

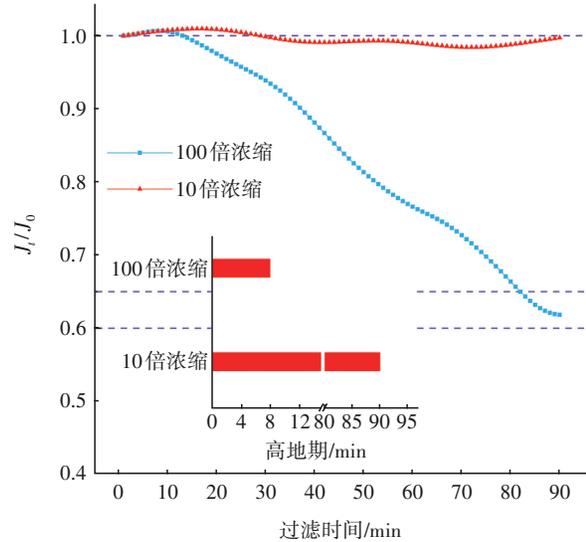


图2 过滤不同浓缩倍数原水的膜比通量与高地期时长  
Fig.2 Normalized flux and plateau length for filtration of raw water of different concentrations

因此,基于阻垢剂本身性质、原水水质、NF膜的性质以及上述三者的相互作用在原水污染物及阻垢剂投加量按比例浓缩时,其相互作用机理不变这一假设,以高倍数浓缩原水开展动态实验,可在较短实验周期内考察阻垢剂的作用效果。

#### 1.3.1 实验装置和方法

动态实验装置见图3,原水箱有效容积为4 L,膜池有效直径为60 mm,使用泵后阀门控制膜过滤驱动压为0.7 MPa,浓水流量为20 L/h,均回流至原水箱,通过电子天平每1 min抓取产水质量变化,并计算膜产水通量。每组膜以2 h为过滤终点,实验期间维持原水水温为24~25 °C。

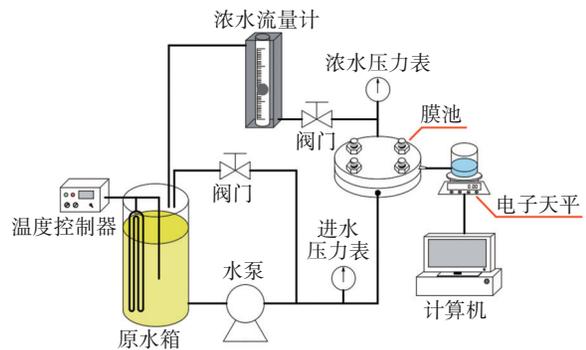


图3 动态实验装置

Fig.3 Dynamic experimental device

### 1.3.2 相关参数

NF 过程中的膜比通量是衡量膜工作情况的重要参数,由此比较5种阻垢剂的阻垢性能,膜比通量  $J_t/J_0$  通过式(3)计算。

$$J_t/J_0 = \frac{m_t/\Delta t}{m_0/t_0} \quad (3)$$

式中:  $J_t$  为  $t$  时刻膜产水通量,  $\text{m}^3/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ ;  $J_0$  为初始膜通量,  $\text{m}^3/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ ;  $m_t$  为  $t$  时刻后的  $\Delta t$  分钟内膜产水质量,  $\text{g}$ ;  $m_0$  为初始  $t_0$  分钟内膜产水质量,  $\text{g}$ 。

NF 过程可描述为通量稳定发展至产生剧烈下降,据此 Lin 等<sup>[20]</sup>将整个 NF 过程分为高地期与下降期,高地期由产浓水侧产生大量晶核至结晶时间所组成<sup>[21]</sup>,而后晶体生长并与原水中有机物协同作用加剧垢层的形成与压缩造成下降期<sup>[22]</sup>,投加阻垢剂后高地期的长短取决于阻垢剂对晶核形成过程的迟滞以及最终晶体总量的削减,因此对膜比通量的二阶微分随时间突降的时间点作为高地期末,通过阻垢剂对高地期的延长能力和最终膜比通量下降情况来评价阻垢性能。

### 1.3.3 膜污染与膜损伤表征

为验证动态实验可行性以及膜表面污染情况,每组实验结束后对膜片表面进行 SEM-EDS 分析,并对实验原水、阻垢剂投加不足(1 mg/L)和阻垢剂投加过量(5 mg/L)的膜产水进行 pH、电导率、TDS、总硬度、硫酸盐与 TOC 测定,以分析膜污染特征与膜损伤状况。

### 1.4 实验目标

通过静态实验和动态实验评价不同阻垢剂的阻垢性能,并结合 SEM-EDS 分析验证动态实验操作的可行性以筛选阻垢剂,得到适宜的阻垢剂投量和阻垢效果。同时,该水厂 NF 工程系统回收率为 90%,由于原水实际 TP 小于检出限,因此要求投加阻垢剂不应使浓水 TP 超过 0.06 mg/L,基于此从阻垢性能和浓水磷浓度两个方面对 5 种商品阻垢剂进行综合评价。

## 2 结果与讨论

### 2.1 静态实验阻垢性能

静态实验中不同阻垢剂的阻垢性能见图 4,可知 5 种阻垢剂的投加均达到了一定阻垢效果,但不同投量下各阻垢剂的阻垢性能存在差异,其中含磷阻垢剂的阻垢性能普遍优于无磷阻垢剂,可能是基于有机磷对金属离子的强螯合作用,以及有机磷吸

附在  $\text{CaCO}_3$  表面并进一步络合  $\text{Ca}^{2+}$ <sup>[23]</sup>,因此表现出高于无磷阻垢剂的效能,而低投加量下螯合位点不足导致含磷与无磷阻垢剂的阻垢效率差异不明显。

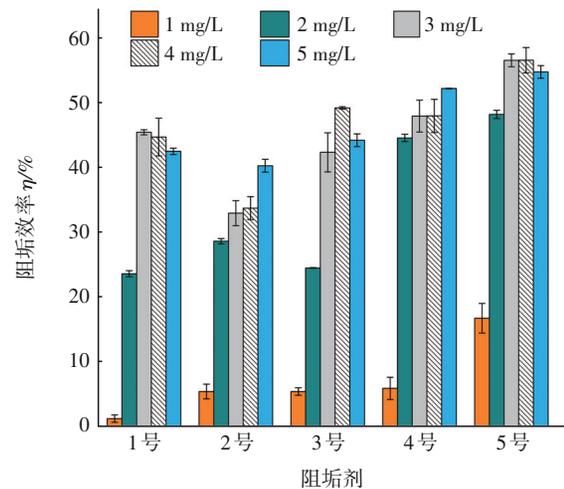


图4 静态测定阻垢剂效率

Fig.4 Static determination of scale inhibitor efficiency

在投量为 3 mg/L 下各阻垢剂的阻垢性能较好,其中 5 号阻垢剂最优达到 56.00%,但其浓水中的磷含量也达到了约 0.77 mg/L(见表 1),远超出 0.06 mg/L 的要求。在满足浓水磷浓度要求下,1 号阻垢剂的阻垢性能为 45.48%,是最优选择。

表1 90%回收率不同阻垢剂投加量下浓水 TP 浓度

Tab.1 TP of concentrates with different scale inhibitor dosing at a 90% recovery rate

阻垢剂	阻垢剂投量				
	1	2	3	4	5
3号	0.025 6	0.511 6	0.767 4	1.023 2	1.279 0
4号	0.122 8	0.245 6	0.368 4	0.491 2	0.614 0
5号	0.257 7	0.515 4	0.773 1	1.030 8	1.288 5

注: 投加 1 号和 2 号阻垢剂时浓水 TP < 0.1 mg/L。

由于静态实验方法单组阻垢效率的测定时长超过 10 h,且实验配水以及 80 °C 恒温条件与工程实际有很大差别,因此其结果仅能作为阻垢剂的阻垢性能对比,所得到的最优投量无法为工程实际提供参考。

### 2.2 动态实验阻垢性能

#### 2.2.1 膜比通量

动态实验中膜比通量变化如图 5 所示,表现出中等阻垢剂投加量下的膜比通量下降率最低。由图 5(b)可知,各阻垢剂在 2 mg/L 投量下膜比通量变

化趋势最平缓且高地期长,下降期膜比通量下降小于20%,因此该浓度下阻垢效果最优。此外,投加5号阻垢剂后在各个投加量下膜比通量最稳定,并在投加量为2~4 mg/L时高地期相对较长,表明各个型

号中5号阻垢剂阻垢性能最优,但由于水厂NF工程回收率为90%,因此如表1所示,投加含磷阻垢剂均会导致浓水磷浓度高于0.06 mg/L,在满足浓水磷浓度要求下2号无磷阻垢剂、2 mg/L投量是最优选择。

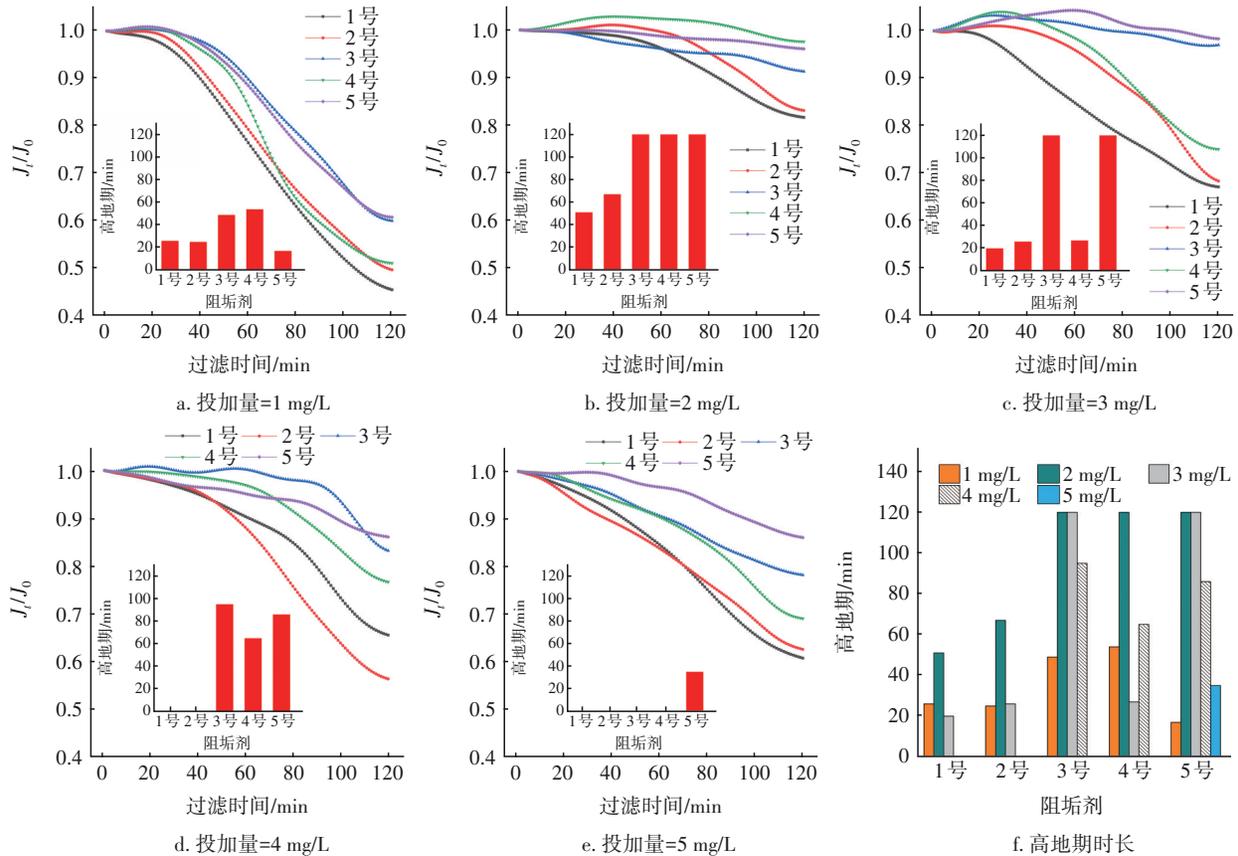


图5 阻垢剂不同投加量组别的NF实验装置过滤期间膜通量变化与高地期时长

Fig.5 Variation of normalized flux of NF experimental device in different concentration groups of scale inhibitors and the duration of plateau

未投加阻垢剂时,高地期仅8 min,随后为下降期,在90 min过滤终点时膜通量下降了38.2%(见图2),因此,如不投加阻垢剂,NF膜系统的产水效率将受到严重影响。由图5可知,与最优投加量(2 mg/L)相比,阻垢剂投加量为1 mg/L时高地期短、下降期下降趋势加剧,膜比通量最终下降了40%~54%,表明阻垢剂投加量明显不足。当阻垢剂投加量为3 mg/L时,与最优投量的相比,投加1号、2号与4号阻垢剂后高地期明显缩短,且1号和2号阻垢剂的膜比通量最终下降超过25%。阻垢剂投加量为4、5 mg/L时,相较于最优投加量高地期随浓度增加而进一步缩短,5 mg/L投加量下仅5号阻垢剂存在35 min的高地期,因此各阻垢剂性能均发生不同程度的降低,说明阻垢剂投加过量,尽管3号、5号阻垢

剂随投加量增加仍有一定的阻垢性能,但不足以维持NF膜稳定运行。此外,各含磷阻垢剂的高地期更长,反映出有机磷对难溶盐的强螯合作用优于无磷阻垢剂,因此在过滤初期对通量下降起到有效缓解作用,从而表现出更好的阻垢性能。动态实验中[图5(c)中4号阻垢剂为例]存在高地期膜通量下降不明显甚至略微上升,这主要是由于过滤期间水泵工作导致原水温度上升,温度控制存在一定的响应时间使得降温调控稍滞后所致。

相较于常见的阻垢剂动态实验方法,本实验中所使用的基于部分循环法改进的动态实验方法,以膜比通量变化、高地期时长为评价依据分析了不同阻垢剂的阻垢效能,结合原水水质特征与磷排放的要求,得出2号阻垢剂在2 mg/L投加量下最优,实验

基于水厂原水开展更符合工程需要,单组实验时间缩短至2 h,可在较短的时间内得出符合工程需要的阻垢剂及其最优投量。

### 2.2.2 膜污染与膜损伤

膜比通量测定结束后对膜片进行了SEM扫描,结果显示不同阻垢剂在相同投加量下对膜表面污染层的影响呈现相似的变化趋势,因此选择具有普遍性和代表性的阻垢剂型号进行讨论。其中,4号阻垢剂标准溶液的磷浓度最低,且动态实验中阻垢效率处于中间水平,因此以4号阻垢剂为例分析动态实验后膜表面形貌,结果如图6所示。不投加阻垢剂时,膜表面覆盖有较厚且主要由晶体构成的致密污染层,且晶体呈大尺寸、光滑、规则的菱形六面体,晶体之间相互嵌合并黏附纺锤形小尺寸晶体,结合EDS分析(C、O、S、Ca含量分别为8.66%、64.05%、11.14%、16.15%)推测膜表面钙盐结晶协同原水中有机物形成了有机-无机复杂污染层,在膜表面覆盖压实引发膜通量的严重下降<sup>[24]</sup>。在最佳阻垢剂投量为2 mg/L条件下,与未投加阻垢剂时相比仅形成了少量、薄且未完整覆盖膜表面的松散污染层,晶体尺寸整体偏小,且形态无定型,说明膜污染显著减轻,EDS分析结果同样表明垢层中钙的比例下降(C、O、S、Ca含量分别为9.38%、67.36%、9.75%、13.51%),因此在合适的阻垢剂投量下,整合与分散作用有效减少了污染层中的晶体总量,同时受晶格畸变效应影响,晶体形态的规则不佳,导致垢层中存在大量细密而深的裂隙,在过滤过程中易发生崩解脱落,因此在多种阻垢机制的共同作用下膜污染速度减缓,有效延长了高地期时长<sup>[20]</sup>。

相比阻垢剂投加量为2 mg/L时,阻垢剂投加量为1 mg/L的膜表面污染物显著增加,污染层增厚且不平整,存在较大尺寸晶体,因此膜污染较为严重,印证了图5(a)膜比通量快速下降的结果,表明1 mg/L阻垢剂投加量不足。阻垢剂投加过量(3~5 mg/L)时,与最优阻垢剂投加量相比晶体尺寸仍较大,因此膜污染程度较重;而5 mg/L投加量下出现膜表面污染物总量较少的情况,然而在NF过程中快速形成了大量松散絮状物,EDS分析结果表明其主要由有机污染与钙盐结晶组成(C、O、S、Ca含量分别为21.90%、50.93%、1.38%、25.79%),且有机污染比例超过最优投量2倍,因此在NF过程中存在更多小尺寸晶体被有机物包裹,在驱动压产生的朝向膜产

水侧的拖曳力作用下在膜表面快速聚集并压实<sup>[25]</sup>,将引发如图5(e)所示的膜比通量剧烈下降。

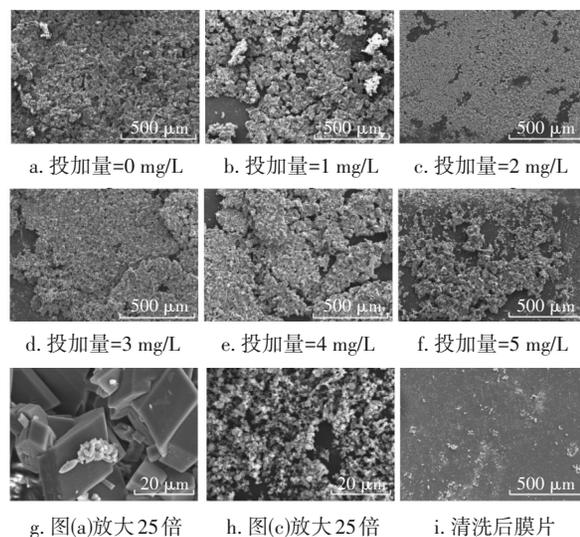


图6 不同阻垢剂投加量下膜表面形貌

Fig.6 Surface morphology of membrane under different scale inhibitor concentrations

经对比清洗后的膜与清洁膜,未发现机械损伤与表面结构变化。动态实验过程中NF原水及产水的TDS和电导率分别为5 230、1 545 mg/L和9 875、2 950  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,去除率均约为70%;原水及产水pH分别为7.15和7.5;总硬度、硫酸根、TOC分别为4 594、5 400、209.4 mg/L和105.6、54.32、20.9 mg/L,相应的去除率为97.7%、99%、90%。这符合NF270膜的过滤能力,表明NF膜对污染物的截留性能仍保持完好,动态实验过程未导致膜截留能力的下降。

### 3 结论

① 在静态实验中,不同阻垢剂投量下的阻垢性能存在差异,但由于静态实验条件与实际工程运行环境差异过大,不适合作为实际工程参考。改进的动态实验结果表明,在满足浓水磷排放要求的条件下,2号阻垢剂且投加量为2 mg/L是最优选择。静态与改进的动态实验均表明含磷阻垢剂的阻垢性能优于无磷阻垢剂。

② SEM-EDS分析表明,适量投加阻垢剂能有效减少晶体数量,缩小晶体尺寸以破坏垢层完整性,同时在水流作用下促进垢层的崩解脱落,有效缓解膜污染和膜比通量下降,且动态实验中未出现膜机械损伤,膜截留特性也均未发生变化。

③ 基于浓缩原水的部分循环法改进的动态实验,相比静态实验其时间缩短至2 h,能更好地满

足实际工程需要。目前该水厂根据动态实验结论进行阻垢剂选用与投加,NF系统已稳定运行超过30 d。此外,膜比通量、高地期能够反映各阻垢剂缓解膜污染效果,同时联合膜损伤分析证明了动态实验的可行性。

#### 参考文献:

- [1] GUO H, LI X H, YANG W L, *et al.* Nanofiltration for drinking water treatment: a review [J]. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 2022, 16 (5) : 681-698.
- [2] LI C, SUN W J, LU Z D, *et al.* Ceramic nanocomposite membranes and membrane fouling: a review [J]. *Water Research*, 2020, 175:115674.
- [3] AL-AMOUDI A, LOVITT R W. Fouling strategies and the cleaning system of NF membranes and factors affecting cleaning efficiency [J]. *Journal of Membrane Science*, 2007, 303(1): 4-28.
- [4] CHEN G, YANG X, LU Y, *et al.* Heat transfer intensification and scaling mitigation in bubbling-enhanced membrane distillation for brine concentration [J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 470: 60-69.
- [5] MARUF S H, GREENBERG A R, PELLEGRINO J, *et al.* Critical flux of surface-patterned ultrafiltration membranes during cross-flow filtration of colloidal particles [J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 471: 65-71.
- [6] 韩雪. 阻垢剂对水处理纳滤工艺的影响[D]. 南京:南京师范大学,2020.  
HAN Xue. Impact of Scale Inhibitors on Water Treatment Nanofiltration Process [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2020 (in Chinese).
- [7] 聂宗利, 武玉民, 张君, 等. 阻垢剂的阻垢性能评价方法 [J]. *应用化工*, 2011, 40(5): 875-879,887.  
NIE Zongli, WU Yumin, ZHANG Jun, *et al.* Evaluation methods for scale inhibitor [J]. *Applied Chemical Industry*, 2011, 40 (5) : 875-879, 887 (in Chinese).
- [8] 雷武, 赵志仁, 夏明珠, 等. pH位移法评定阻垢剂的阻垢性能 [J]. *理化检验(化学分册)*, 2002, 38(3): 125-127.  
LEI Wu, ZHAO Zhiren, XIA Mingzhu, *et al.* pH shift method of evaluating the efficiency of scale inhibitors [J]. *PTCA (Part B: Chemical Analysis)*, 2002, 38 (3): 125-127 (in Chinese).
- [9] 曹生现, 杨善让, 刘豫峰, 等. 电导率法评定阻垢剂性能的影响因素分析 [J]. *化工进展*, 2007, 26(6): 849-852,856.  
CAD Shengxian, YANG Shanrang, LIU Yufeng, *et al.* Analysis of the factors affecting evaluation of scale inhibitor performance based on conductivity measurement [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2007, 26(6): 849-852,856 (in Chinese).
- [10] ABDEL-AAL E A, ABDEL-GHAFAR H M, EL ANADOULI B E. New findings about nucleation and crystal growth of reverse osmosis desalination scales with and without inhibitor [J]. *Crystal Growth and Design*, 2015, 15(10): 5133-5137.
- [11] 何江龙, 张凤魁, 陆彦平, 等. 糖醇螯合钙肥的反应条件及其对螯合率的影响 [J]. *环境工程*, 2019, 37 (6): 160-164.  
HE Jianglong, ZHANG Fengkui, LU Yanping, *et al.* Reaction conditions of sugar alcohol chelated calcium fertilizer and their influence on chelating rate [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37 (6) : 160-164 (in Chinese).
- [12] SHMULEVSKY M, LI X, SHEMER H, *et al.* Analysis of the onset of calcium sulfate scaling on RO membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 524: 299-304.
- [13] 段亚威, 韩聪, 钟振成, 等. 阻垢剂对常温结晶纳滤分盐系统的影响 [J]. *应用化工*, 2022, 51 (4) : 948-952.  
DUAN Yawei, HAN Cong, ZHONG Zhencheng, *et al.* Effect of scale inhibitor on the ambient temperature crystallization and pure salt recovery system [J]. *Applied Chemical Industry*, 2022, 51(4): 948-952 (in Chinese).
- [14] HAN X, ZHANG X Q, YANG S Q, *et al.* The effects of scale inhibitor ATMP in water on nanofiltration [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2019, 160: 9-13.
- [15] YU W, SONG D, CHEN W, *et al.* Antiscalants in RO membrane scaling control [J]. *Water Research*, 2020, 183: 115985.
- [16] 李利华, 崔勇, 蒋玉明, 等. 反渗透膜阻垢剂投加量优化及其阻垢性能评价 [J]. *膜科学与技术*, 2021, 41(3): 135-141.  
LI Lihua, CUI Yong, JIANG Yuming, *et al.* Optimization of reverse osmosis membrane scale inhibitor and its performance evaluation [J]. *Membrane Science and Technology*, 2021, 41(3): 135-141 (in Chinese).

- [17] 张彩云,张朋川,袁璐璐,等. 超高标准除磷的纳滤再生水工艺设计及工程验证 [J]. 中国给水排水, 2021, 37(10):116-119,125.  
ZHANG Caiyun, ZHANG Pengchuan, YUAN Lulu, *et al.* Design and engineering verification of nanofiltration process for super high standard phosphorous removal in wastewater reclamation [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(10):116-119,125 (in Chinese).
- [18] 颀亚玮,徐振峰,裘嘉琪,等. 纳滤膜去除水中有机物及提高产水率的生产性试验 [J]. 中国给水排水, 2023, 39(7):29-34.  
XIE Yawei, XU Zhenfeng, QIU Jiaqi, *et al.* Productive test on nanofiltration membrane to remove organic matter from water and improve water production rate [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(7):29-34 (in Chinese).
- [19] 蔡孝楠,刘宏远,朱海涛,等. 纳滤膜处理微污染河网水中试研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(9):27-32.  
CAI Xiaonan, LIU Hongyuan, ZHU Haitao, *et al.* Treatment of micro-polluted river water by nanofiltration membrane [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(9):27-32 (in Chinese).
- [20] LIN D, BAI L, XU D, *et al.* Effects of oxidation on humic-acid-enhanced gypsum scaling in different nanofiltration phases: performance, mechanisms and prediction by differential log-transformed absorbance spectroscopy [J]. Water Research, 2021, 195: 116989.
- [21] LIN D, BAI L, XU D, *et al.* Nanofiltration scaling influenced by coexisting pollutants considering the interaction between ferric coagulant and natural organic macromolecules [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 413: 127403.
- [22] LIN C J, SHIRAZI S, RAO P. Mechanistic model for CaSO<sub>4</sub> fouling on nanofiltration membrane [J]. Journal of Environmental Engineering, 2005, 131(10): 1387-1392.
- [23] 万高杰,潘顺龙,韩旭,等. 低磷阻垢剂在低温多效海水淡化过程中的应用[J]. 精细化工, 2018, 35(3): 469-473.  
WAN Gaojie, PAN Shunlong, HAN Xu, *et al.* Application of low phosphorus scale inhibitor in low-temperature thermal seawater desalination [J]. Fine Chemicals, 2018, 35(3):469-473 (in Chinese).
- [24] LIU Y, MI B. Combined fouling of forward osmosis membranes: synergistic foulant interaction and direct observation of fouling layer formation [J]. Journal of Membrane Science, 2012, 407/408: 136-144.
- [25] SEIDEL A, ELIMELECH M. Coupling between chemical and physical interactions in natural organic matter (NOM) fouling of nanofiltration membranes: implications for fouling control [J]. Journal of Membrane Science, 2002, 203(1/2): 245-255.

作者简介:颀亚玮(1988- ),男,甘肃天水人,博士,副教授,主要从事水处理技术研究。

E-mail:xyw@zjut.edu.cn

收稿日期:2023-02-20

修回日期:2023-04-18

(编辑:李德强)

依法划定河湖管理范围

严格水域岸线水生态空间管控