

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.12.008

水厂膜处理过程中阻垢剂的典型种类及应用

贾丽晴^{1,2}, 刘 成^{1,2}

(1. 河海大学 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 膜结垢会降低膜的渗透通量,影响膜的使用寿命,是水厂膜处理过程的重要限制因素之一。投加阻垢剂是阻止膜结垢的一种方便、有效的方法,分别从阻垢机理、阻垢剂的种类和阻垢剂的应用三方面介绍了水厂膜处理过程中含磷阻垢剂、聚合物阻垢剂和环保阻垢剂的特点及合成方法,阐述了阻垢剂在水厂膜处理过程中的应用形式和阻垢性能。在此基础上,总结了阻垢剂应用过程中仍存在的问题,并对阻垢剂的未来发展和应用进行了展望。

关键词: 阻垢剂; 膜结垢; 反渗透; 纳滤; 饮用水

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)12-0057-06

A Review of Typical Types and Application of Antiscalants in Membrane Treatment of Waterworks

JIA Li-qing^{1,2}, LIU Cheng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Membrane scaling is one of the important limitations of membrane treatment process in waterworks, resulting in the decline of membrane flux and the shortening of membrane lifespan. The addition of antiscalants is a convenient and effective method to prevent membrane scaling. The scale inhibition mechanism, the various types of antiscalants available and their respective applications in membrane treatment processes are reviewed respectively. The structures, characteristics and synthesis methods of phosphorus antiscalants, polymeric antiscalants and environment-friendly antiscalants are also summarized. It further elucidates the application forms and scale inhibition performance of these antiscalants in membrane treatment processes within waterworks. Additionally, it identifies existing challenges in the application of antiscalants and offers prospects for their future development and utilization.

Key words: antiscalants; membrane scaling; reverse osmosis; nanofiltration; drinking water

近年来,膜分离技术由于去除效果稳定、占地面积小、可实现自动化处理和规模化应用等优点,

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07406005)

通信作者: 刘成 E-mail: 107489860@qq.com

被广泛用于水厂提标改造工艺中。然而,膜结垢问题是制约其推广应用的一个重要限制^[1],它不仅影响污染物的去除效果,而且会改变膜的分离性能,降低膜的使用寿命,从而增加运行成本。因此,必须采取措施防止膜结垢的发生,常用的有效方法之一为投加阻垢剂^[2]。相比于其他阻垢方法(如增加预处理过程、优化膜操作过程、开发高效的膜材料),投加阻垢剂不仅阻垢性能高效,而且成本低、易于操作。介绍了阻垢剂的阻垢机理,整理了水厂膜处理过程中阻垢剂的典型种类及研究进展,综述了阻垢剂在膜处理工艺中的应用形式及条件,以期后续阻垢剂的选择和使用提供一定参考。

1 阻垢剂的阻垢机理

目前,常用的阻垢剂主要有含磷阻垢剂、聚合物阻垢剂、环保阻垢剂三种,阻垢机理主要体现在四个方面:络(螯)合增溶、凝聚分散、晶格畸变和阈值效应。其中,络(螯)合增溶指阻垢剂能与水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等成垢阳离子作用形成稳定的可溶性螯合物,抑制 CaCO_3 、 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 、 BaSO_4 等结垢物质的生长。凝聚分散指聚合物阻垢剂在水溶液中解离生成的阴离子吸附在 CaCO_3 晶体上,产生的静电排斥作用使晶体均匀分散于溶液中,从而达到抑制 CaCO_3 垢形成的目的。晶格畸变指在 CaCO_3 微晶成长过程中,阻垢剂掺杂在晶格点阵中或晶体界面上,使晶体发生畸变,直接抑制或扭曲晶体生长。阈值效应指用亚化学计量的阻垢剂破坏聚集和排序过程,从而防止难溶盐沉淀。

2 阻垢剂的典型种类及应用

2.1 含磷阻垢剂

含磷阻垢剂主要分为无机磷酸盐阻垢剂和有机磷酸盐阻垢剂,两种阻垢剂的结构和性能有较大区别。

无机磷酸盐阻垢剂指含有 P—O 键的化合物,以正磷酸根离子(PO_4^{3-})作为基本结构单元,以三聚磷酸钠(STPP)、六偏磷酸钠(SHMP)为主。这类阻垢剂用量少,没有毒性且具有缓蚀性能,但是热稳定性低,易水解为正磷酸盐,从而降低阻垢剂效果;也易与钙离子结合生成磷酸钙沉淀,从而引起土壤污染和水体富营养化,目前已很少使用。

有机磷酸盐阻垢剂是含有一个或多个 $\text{C—PO}(\text{OH})_2$ 基团的化合物,主要有羟基乙叉二磷酸(HEDP)、氨

基三亚甲基膦酸(ATMP)和2-膦酸基丁烷-1,2,4-三羧酸(PBTCA)等。这类阻垢剂存在稳定的共价 C—P 键,比无机磷酸盐更稳定,对 CaCO_3 和 CaSO_4 垢的阻垢效果较好,成本低廉,还有优良的防蜡性能,在膜处理过程中应用范围更广。

Qu等^[3]研究了在直接接触膜蒸馏(DCMD)过程中,PTP-0100、SHMP和MDC220三种含磷阻垢剂的残留对石膏结垢和膜润湿的影响。研究发现,在阻垢剂存在的情况下,DCMD过程中的进料压力升高和通量下降得到了明显的缓解。SHMP和MDC220在控制DCMD膜结垢方面优于PTP-0100,在进料温度升高时阻垢性能也比PTP-0100更稳定。Mangal等^[2]研究了AS-A、AS-C和AS-D等8种阻垢剂对磷酸钙的阻垢性能。结果表明,测试的阻垢剂虽然不能抑制 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 颗粒的形成,也不能阻止其在反渗透膜上的沉积,但阻垢剂的投加可以阻碍形成的 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 颗粒的团聚,在一定程度上缓解了反渗透系统渗透通量的下降。然而,由于有机膦酸盐阻垢剂含磷量仍然较高,易造成水体富营养化,且膜处理过程中阻垢剂也会被浓缩进入浓水中,故其使用受到限制。

2.2 聚合物阻垢剂

根据功能基团的不同,聚合物阻垢剂主要分为阴离子聚合物阻垢剂和阳离子聚合物阻垢剂。前者主要用于抑制金属离子结垢,后者主要用于抑制硅垢。

阴离子聚合物阻垢剂主要有聚丙烯酸、聚甲基丙烯酸、聚马来酸及其盐类、聚苯乙烯磺酸盐、磺酸-丙烯酸共聚物、氨基丙磺酸-丙烯酸共聚物、丙烯酸/2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸共聚物等。它们是以丙烯酸、马来酸、水解马来酸酐等为主要单体,在合适的催化条件或引发剂作用下,与另一种或几种单体共聚而成的高分子有机物。这类阻垢剂的分子中含有多种基团,不仅可以有效阻止 CaCO_3 垢、 MgCO_3 垢和 CaSO_4 垢的生长,还可以有效阻滞锌垢、铁垢等的生长。

在加热条件和引发剂的作用下,陈家驰^[4]分别以马来酸酐与次亚磷酸盐单体、马来酸与丙烯酸盐单体为原料,合成了膦基水解聚马来酸酐(PHPMA)和丙烯酸-马来酸共聚物(AA/MA)。随后采用 CaCO_3 沉积法考察了阻垢剂的静态阻垢性能,结果表明,阻垢剂显著改变了 CaCO_3 的微观形态,阻垢效果顺

序为 PHPMA > AA/MA > 水解聚马来酸酐(HPMA),其中 PHPMA 在 80 °C 恒温条件下保持 10 h,其阻垢率可达 95.9%。

阳离子聚合物阻垢剂主要有合成阳离子菊粉(CATIN)、聚氨基酰胺(PAMAM)、聚乙烯亚胺(PEI)、聚烯丙胺盐酸盐(PALAM)和丙烯酰胺基二烯丙基二甲基氯化铵(PAMALAM)等。这类聚合物含有不同的阳离子基团,包括弱阳离子基团(伯胺和仲胺)和强阳离子基团(季铵)。Ketsetzi 等^[5]在过饱和硅酸盐溶液中测试了三种不同取代度(DS)的 CATIN 聚合物的阻垢性能,研究发现,CATIN 的阻垢性能与其主链上的阳离子电荷密度有关,取代度高的 CATIN 阻垢性能更高好。

聚合物阻垢剂的阻垢性能受到多种因素的影响,如分子中官能团的含量、种类和电荷密度以及聚合物的结构形态、分子大小和构象等。当阻垢剂的分子质量过高或投加过量时,其阻垢性能受到桥接絮凝作用的影响而变差。对于具有多种类型官能团的聚合物阻垢剂,除官能团的含量和类型外,这些官能团在聚合物主链上的分布也会明显影响阻垢效果。这类阻垢剂虽然发展迅速、阻垢性能良好、耐高温,但存在黏度较高、单体共聚较多、易引起絮凝作用、不可生物降解等缺点。

2.3 环保阻垢剂

环保阻垢剂主要包括聚天冬氨酸(PASP)和聚环氧琥珀酸(PESA)及其衍生物,是以马来酸酐为原料,在催化剂或引发剂作用下聚合而成的。由于 PASP 和 PESA 的螯合能力和分散性能良好,故这类阻垢剂具有无毒性、可生物降解、成本低、种类多等优点。

雒和明等^[6]采用电导法研究了 PASP 对 CaCO_3 垢的阻垢性能,考察了 PASP 用量、温度、溶液中钙离子浓度、pH 等因素的影响。研究表明,当 PASP 投加量为 40 mg/L 时,对 CaCO_3 垢有较好的阻垢性能。此外,PASP 对 BaSO_4 垢、 CaF_2 垢等也有一定程度的阻垢效果,适用于高钙离子含量的溶液及高温环境。朱水平等^[7]也采用电导法研究了 PESA 对 CaCO_3 垢、 BaCO_3 垢和 BaSO_4 垢的阻垢性能,试验结果表明,在 50~60 °C 的温度条件下,PESA 的投加量为 40~60 mg/L 时,阻垢效果最好。温度对 PESA 阻 CaCO_3 垢性能的影响较大,而对阻 BaCO_3 垢和 BaSO_4 垢的影响较小。

此外,一些天然聚合物也有良好的阻垢性能,如壳聚糖、淀粉、纤维素、腐殖酸等。这些有机物的分子中含有大量的醇羟基、酚羟基、甲氧基以及羧酸基团等,具有来源广泛、成本低、无毒环保和制作简单等优点,是环保阻垢剂的良好原料。

然而,环保阻垢剂的阻垢性能与其官能团的种类、含量和分布有关,其成分组成较复杂、用量大、易分解,仅靠分子中单一基团,往往很难实现较高的阻垢率^[8],而且还有增强生物污染的风险,因此需要对其进行改性和复配。其中,改性是使用开环或共聚的方法对阻垢剂进行改性,复配阻垢剂是指将两种及以上的阻垢剂按照一定的质量比进行混合,通过协同作用来提高阻垢率。

Yu 等^[9]采用静态试验和反渗透操作系统研究了羧甲基纤维素(CMC)的阻垢效果。研究结果表明,在反渗透操作系统中,CMC 的阻垢性能随着羧基含量的增加而提高,在羧甲基取代程度为 0.71 时阻垢性能最优,此后阻垢性能略有下降。CMC 的最佳投加量为 2.0 mg/L,共存的阴离子(如 CO_3^{2-} 和 PO_4^{3-})对 CMC 的阻垢性能没有明显影响。方钊^[10]采用邻氨基酚磺酸(3A4HBSA)对 PASP 的中间体聚琥珀酰亚胺(PSI)进行改性,将磺酸基与羟基引入聚天冬氨酸分子结构中,提高了阻垢剂的阻垢效率和缓蚀效率。当阻垢剂浓度分别为 50 mg/L 和 100 mg/L 时,对 BaSO_4 垢和 CaCO_3 垢的阻垢率分别达到 95.8% 和 97.2%。Zhang 等^[11]将天冬氨酸-柠檬酸共聚物(PAC)与聚马来酸(HPMA)按一定比例复配成复合阻垢剂(PAC-HPMA),采用静态阻垢法探究阻垢剂对 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 垢的阻垢性能。结果表明,当阻垢剂投加量为 8 mg/L 时,PAC、HPMA 和 PAC-HPMA 对 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 的阻垢率分别为 23%、41.5% 和 63%,复合阻垢剂的缓蚀性能优于单种阻垢剂。

3 阻垢剂在膜处理过程中的应用

在反渗透和纳滤处理过程中,往往需要通过浓水循环的方式提高回收率,从而产生无机结垢,造成膜污染、膜堵塞和膜性能恶化。因此,在水厂膜处理过程中需要投加阻垢剂来减少膜结垢,确保膜系统的长期稳定运行。

3.1 阻垢剂的应用形式

在膜处理过程中,阻垢剂一般为全程投加,投加量受阻垢剂种类、进水水质和回收率等因素的影

响^[12-16],需通过小试或中试确定投加量后,再进行生产系统验证。具体见表 1。

表 1 膜处理过程中阻垢剂的应用效果

Tab.1 Application effect of antiscalants in membrane treatment

膜系统类别	膜材料	阻垢剂成分	阻垢剂投加量	阻垢性能
反渗透		国产 DM101 阻垢剂(聚丙烯酸类)和进口 Titan ASD 200SC 阻垢剂	DM101: 1.5 mg/L ASD200SC: 1.7 mg/L	国产 DM101 阻垢剂起效浓度更低,阻垢效果更好,可有效替代进口阻垢剂
反渗透		天冬氨酸、琥珀酰亚胺的均聚物和共聚物	2.5~10.0 mg/L	低分子质量阻垢剂优于其高分子质量阻垢剂,在 40 ℃和 3 倍 RO 浓盐水浓度条件下,仅 10.0 mg/L 的剂量浓度即可防止石膏结垢
反渗透	BW30-4040 型膜	羧甲基纤维素接枝聚丙烯酸(CMC-g-PAA)	2.0~20.0 mg/L	中等接枝率(59%)的 CMC-g-PAA 表现出较好的阻垢性能,在 2.0~20.0 mg/L 浓度范围内可有效防止 RO 膜结垢
反渗透/纳滤	DS-11 型膜、TFC-S 型膜	Flocon 100、Permatreat 391、Hypersperse AF200 等 8 种阻垢剂	5.0 mg/L 或 10.0 mg/L	膜的类型(RO/NF、成分、表面电荷、粗糙度)会影响 CaCO ₃ 沉积物的形态特征,阻垢剂可以有效抑制 CaCO ₃ 垢的形成
纳滤	国产 8040 型膜	微磷无机盐	0.38 mg/L	阻垢剂的加入延长了 NF 系统的运行周期,且不会对 NF 系统出水水质造成影响
纳滤	聚酰胺膜	MAS208 型阻垢剂	4.0 mg/L	阻垢剂可以延缓膜面结垢形成,产水中离子截留率上升

3.2 阻垢剂应用过程中存在的问题

① 目前使用的阻垢剂仍然存在缺陷。理想的阻垢剂不仅应满足阻垢性能优良、无毒、环境友好、成本低廉等要求,还需考虑原料的选择、中间的合成以及后续的处理环节^[17]。然而,含磷阻垢剂含磷量高,不符合环保要求;聚合物阻垢剂单体共聚较多、易引起絮凝作用、不可生物降解;环保阻垢剂成分组成较复杂、用量大、易分解、基团单一,而且可能会增强生物污染。

② 阻垢剂的性能评价方法不够完善。在膜处理过程中,高效评价阻垢剂的阻垢性能不仅可以为阻垢剂的选择和投加量的控制提供参考,也有利于进一步探究分子水平上的阻垢机理。然而,目前的性能评价方法主要分为静态方法和动态方法。静态方法主要包括静态烧杯试验、气泡法、浑浊法、电导法等,虽然方法简单,但与实际情况有较大差别,多用于预实验;动态方法是利用小型的膜处理装置评价阻垢剂的阻垢性能,虽然运行条件接近实际情况,但是试验工作量大、数据获取周期长、能耗和药耗均较大。

③ 阻垢剂与膜之间的相互作用机制尚不明晰。阻垢剂在减少膜结垢的同时,会通过吸附改变膜表面的物理化学性质。Sweity 等^[18]研究发现,投加聚磷酸酯、聚丙烯酸酯或树枝状羧化基阻垢剂后,反渗透膜的疏水性更好,Zeta 电位也发生改变。

杨伟等^[19]研究发现,过量投加 HEDP、ATMP 后,阻垢剂可能会相互缠绕吸附在膜的表面,从而导致膜通量下降。此外,阻垢剂有可能通过形成有机调节层、改变膜表面特征或提供细菌的能源、碳源、磷源的方式来促进膜的生物污染。Ashfaq 等^[20]研究发现,从卡塔尔海水中分离出的 *P. fragi* 和 *P. stutzeri* 菌株可以将阻垢剂作为能源和碳源,促进膜系统中的细菌生长,最终导致膜的生物污染,同时也会使阻垢剂降解失效。

④ 阻垢剂影响后续的膜浓水处置。在膜处理过程中,阻垢剂在膜的浓缩作用下以较高的浓度进入浓水,可能会通过螯合作用增强重金属的溶解度,或者通过凝聚分散作用降低浓水中磷、硬度和重金属的去除效果^[21],从而不利于浓水的进一步处置。研究发现,可以采用生物处理、吸附去除和高级氧化工艺从膜浓水中去除阻垢剂。Huang 等^[22]采用 UV/氯氧化工艺去除 HEDP 阻垢剂,研究发现两种工艺对 HEDP 氧化具有显著的协同作用,工艺的主要机理是活性自由基氧化,受到氯用量、pH 和无机阴离子的影响。该团队的另一项研究^[21]发现,在臭氧氧化过程中,ATMP 阻垢剂的螯合和抗沉淀性能会降低,臭氧-混凝组合工艺可有效去除含 ATMP 的反渗透浓水中的总磷和无机磷。

4 结论与展望

投加阻垢剂是膜处理过程中常见的抑制膜结

垢的方法,具有操作简单、成本低、阻垢性能高效等优点。然而,在实际应用过程中,各类阻垢剂存在的缺陷仍然限制了其使用,而且阻垢剂也可能给膜系统带来负面影响。因此,后续阻垢剂的研究还需从以下几个方面展开:

① 开发和研制更高效的阻垢剂。针对不同膜处理系统的阻垢需求,对现有阻垢剂材料进行改性和复配,研究和开发更有针对性、成本低廉、性能更优良的高纯度阻垢剂。

② 完善阻垢剂的性能评价方法。由于阻垢剂的阻垢性能受到结垢物质、投加量、膜和溶液性质等多种因素的影响,需要对当前的静态方法和动态方法进行完善,并建立一种快速准确的阻垢剂性能评价方法。

③ 进一步探究阻垢剂的阻垢机理及与膜的相互作用。当前对阻垢剂的研究主要局限于控制 CaCO_3 垢和 CaSO_4 垢,但实际工程中,膜结垢物质更加复杂,涉及有机物、微生物等,因此需要针对不同膜处理过程开展研究,更加明确阻垢剂的阻垢机理,有针对性地对阻垢剂进行改性,在膜处理过程中还可以考虑抗菌单元与阻垢剂的组合。

④ 寻找高效安全的浓水处置手段。通过采用适当的预处理手段去除或降解阻垢剂,或者用可生物降解的阻垢剂代替人工合成的阻垢剂。

参考文献:

- [1] 杨银,丰桂珍,徐璠璠,等. 净水处理中膜技术应用研究进展[J]. 净水技术, 2019, 38(1): 25-30, 37.
YANG Yin, FENG Guizhen, XU Fanfan, *et al.* Research progress on application of membrane technology in water purification [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(1): 25-30, 37 (in Chinese).
- [2] MANGAL M N, SALINAS-RODRIGUEZ S G, DUSSELDORP J, *et al.* Effectiveness of antiscalants in preventing calcium phosphate scaling in reverse osmosis applications [J]. Journal of Membrane Science, 2021, 623: 119090.
- [3] QU F, YAN Z, YU H, *et al.* Effect of residual commercial antiscalants on gypsum scaling and membrane wetting during direct contact membrane distillation [J]. Desalination, 2020, 486: 114493.
- [4] 陈家驰. 阻垢剂的性能机理及高温高压下阻垢剂研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- CHEN Jiachi. Performance and Mechanism of Scale Inhibitors and Study on It at High Temperature and High Pressure [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017 (in Chinese).
- [5] KETSETZI A, STATHOULOPOULOU A, DEMADIS K D. Being "green" in chemical water treatment technologies: issues, challenges and developments [J]. Desalination, 2008, 223: 487-493.
- [6] 雒和明, 李丹, 冯辉霞, 等. 溶液电导率法对绿色水处理剂聚天冬氨酸的阻垢性能的研究[J]. 应用化工, 2013, 42(6): 987-989.
LUO Heming, LI Dan, FENG Huixia, *et al.* Study on evaluation of a green scale inhibitor polyaspartic acid based on conductivity measurement [J]. Applied Chemical Industry, 2013, 42 (6): 987-989 (in Chinese).
- [7] 朱水平, 曹丽亚, 殷甜甜, 等. 利用电导率法研究聚环氧琥珀酸的阻垢性能[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2016, 22(2): 211-217.
ZHU Shuiping, CAO Liya, YIN Tiantian, *et al.* Anti-scale performance of polyepoxysuccinic acid with conductivity measurement [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2016, 22 (2): 211-217 (in Chinese).
- [8] 白鹏凯, 许萍. 水处理领域中的绿色环保阻垢剂及其研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2020, 40(2): 87-95.
BAI Pengkai, XU Ping. Synthesis and modification of green environment-friendly scale inhibitors in the field of water treatment: the state-of-art technological advances [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2020, 40(2): 87-95 (in Chinese).
- [9] YU W, SONG D, LI A M, *et al.* Control of gypsum-dominated scaling in reverse osmosis system using carboxymethyl cellulose [J]. Journal of Membrane Science, 2019, 577: 20-30.
- [10] 方枋. 聚天冬氨酸衍生物的合成及阻垢性能研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
FANG Fang. Synthesis and Scale Inhibition of Polyaspartic Acid Derivatives [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017 (in Chinese).
- [11] ZHANG Y L, ZHAO C X, LIU X D, *et al.* Application of poly (aspartic acid-citric acid) copolymer compound inhibitor as an effective and environmental agent against calcium phosphate in cooling water systems [J]. Journal of Applied Research and Technology, 2016, 14 (6):

- 425-433.
- [12] 钱灏, 张平允, 徐超. 阻垢剂投加对纳滤系统的影响[J]. 净水技术, 2021, 40(z2): 89-93.
QIAN Hao, ZHANG Pingyun, XU Chao. Influence of adding inhibitor on nanofiltration system [J]. Water Purification Technology, 2021, 40 (z2): 89-93 (in Chinese).
- [13] 薛伟, 焦春联, 靳亚鹏, 等. 国产RO膜用阻垢剂DM101性能对比及工程应用[J]. 净水技术, 2020, 39(6): 161-166.
XUE Wei, JIAO Chunlian, JIN Yapeng, *et al.* Performance comparison and engineering application of home-made RO membrane scale inhibitor [J]. Water Purification Technology, 2020, 39 (6): 161-166 (in Chinese).
- [14] ALI S A, KAZI I W, RAHMAN F. Synthesis and evaluation of phosphate-free antiscalants to control $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ scale formation in reverse osmosis desalination plants [J]. Desalination, 2015, 357: 36-44.
- [15] YU W, CHEN W, YANG H. Evaluation of structural effects on the antiscaling performance of various graft cellulose-based antiscalants in RO membrane scaling control [J]. Journal of Membrane Science, 2021, 620: 118893.
- [16] 宋金玲. 集成膜法海水软化试验及阻垢剂对纳滤过程的影响研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
SONG Jinling. Investigation on Performance of Integrated Membrane Seawater Softening System and Effect of Scale Inhibitor on Nanofiltration Process [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013 (in Chinese).
- [17] 余嵘, 赫雷刚, 马志祥. 环保型无磷反渗透膜用阻垢剂的合成及性能研究[J]. 应用化工, 2017, 46(2): 328-331.
YU Rong, HE Leigang, MA Zhixiang. Synthesis and properties of environment-friendly non phosphorus reverse osmosis membrane scale inhibitor [J]. Applied Chemical Industry, 2017, 46(2): 328-331 (in Chinese).
- [18] SWEITY A, RONEN Z, HERZBERG M. Induced organic fouling with antiscalants in seawater desalination [J]. Desalination, 2014, 352: 158-165.
- [19] 杨伟, 刘芳, 高雅, 等. 循环水排污水中残余阻垢剂对反渗透膜性能的影响[J]. 化工进展, 2015, 34(2): 565-570.
YANG Wei, LIU Fang, GAO Ya, *et al.* Effects of residual scale inhibitors on the performance of reverse osmosis membrane in blow-down water from circulating water system [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(2): 565-570 (in Chinese).
- [20] ASHFAQ M Y, AL-GHOUTI M A, AL DISI Z A, *et al.* Interaction of seawater microorganisms with scalants and antiscalants in reverse osmosis systems [J]. Desalination, 2020, 487: 114480.
- [21] HUANG N, XU Z B, WANG W L, *et al.* Elimination of amino trimethylene phosphonic acid (ATMP) antiscalant in reverse osmosis concentrate using ozone: anti-precipitation property changes and phosphorus removal [J]. Chemosphere, 2022, 291: 133027.
- [22] HUANG N, WANG W L, XU Z B, *et al.* UV/chlorine oxidation of the phosphonate antiscalant 1-Hydroxyethane-1, 1-diphosphonic acid (HEDP) used for reverse osmosis processes: organic phosphorus removal and scale inhibition properties changes [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 237: 180-186.

作者简介: 贾丽晴(1999-), 女, 山西临汾人, 硕士研究生, 主要研究方向为饮用水膜处理技术。

E-mail: jlxqfp@163.com

收稿日期: 2022-05-06

修回日期: 2022-06-08

(编辑: 丁彩娟)