

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.05.007

鸟氨酸纳滤膜制备及其分离有机物和矿物质的效能

黄晓艺^{1,2}, 白富彪^{1,2}, 王兴林^{1,2}, 于水利^{1,2}, 侯立安¹, 黎雷^{1,2}

(1. 同济大学环境科学与工程学院 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 2. 上海污染控制与生态安全研究院, 上海 200092)

摘要: 制备针对矿物质/天然有机物选择性分离的纳滤膜在饮用水处理中具有重要意义。常规聚酰胺纳滤膜(CIP)主要以哌嗪(PIP)为水相单体、以均苯三甲酰氯(TMC)为有机相单体,一般不具备选择性,在去除有机污染物的同时也会截留 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 。为此,通过界面聚合(IP),在聚乙烯醚砜基膜上利用带有柔性脂肪链的鸟氨酸(Orn)作为独立水相单体、以TMC作为有机相单体,制备具有强电负性及疏松结构聚酰胺(PA)层的纳滤膜,用于 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等矿物质和天然有机物(腐殖酸、海藻酸钠)的高效分离,并利用扫描电镜(SEM)、X射线光电子能谱仪(XPS)和傅里叶红外光谱仪(FTIR)等分析手段对该鸟氨酸纳滤膜(Orn-NF)进行表征。结果表明,Orn的 α -氨基在酰胺化反应过程中会受到 α -羧基的位阻,易使PA层的交联度低于CIP,可促进疏松PA层的生成;Orn引入了额外的 $-\text{COOH}$,增强了PA层整体的电负性,有利于正电荷离子的透过;Orn-NF实现了 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等矿物质的高效透过(截留率为6.34%~15.34%)和腐殖酸、海藻酸钠等天然有机污染物的高截留(截留率>98%),展现出卓越的分选性能、渗透性和操作稳定性。

关键词: 饮用水; 纳滤膜; 鸟氨酸; 天然有机物; 矿物质; 选择性分离

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)05-0047-08

Development of Ornithine-based Nanofiltration Membranes for Selective Separation of Organic Matter and Minerals

HUANG Xiaoyi^{1,2}, BAI Fubiao^{1,2}, WANG Xinglin^{1,2}, YU Shuili^{1,2}, HOU Li'an¹,
LI Lei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Institute of Pollution Control and Ecological Security, Shanghai 200092, China)

Abstract: The fabrication of nanofiltration (NF) membranes capable of selectively separating minerals from natural organic matter (NOM) holds significant importance for drinking water treatment. Conventional polyamide NF membranes (CIP), typically synthesized via interfacial polymerization (IP) using piperazine (PIP) as the aqueous monomer and trimesoyl chloride (TMC) as the organic monomer, generally lack selectivity. While effectively removing organic pollutants, they also retain beneficial divalent cations such as Ca^{2+} and Mg^{2+} . To address this, an NF membrane featuring a strongly electronegative and loosely structured polyamide (PA) layer was developed. This was achieved by employing ornithine (Orn)—an amino acid with a flexible aliphatic chain—as the sole aqueous monomer,

通信作者: 于水利 E-mail: ysl@tongji.edu.cn

reacting with TMC on a polyethersulfone support membrane via IP. The resulting ornithine-based NF membrane (Orn-NF) was designed for the efficient selective separation of minerals (e.g., Ca^{2+} , Mg^{2+}) and NOM (e.g., humic acid, sodium alginate). The membrane was characterized using scanning electron microscopy (SEM), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The results indicated that during amidation, the α -amino group of Orn experiences steric hindrance from its adjacent α -carboxyl group. This likely led to a lower cross-linking density in the PA layer compared to the CIP membrane, facilitating the formation of a more open structure. Furthermore, Orn introduced additional carboxyl groups ($-\text{COOH}$), enhancing the overall electronegativity of the PA layer and promoting the permeation of positively charged ions. Consequently, the Orn-NF membrane demonstrated remarkable separation performance: high permeation of minerals (retention rates of 6.34% to 15.34% for Ca^{2+} and Mg^{2+}) coupled with high rejection of NOM (retention rates >98% for humic acid and sodium alginate). The membrane also exhibited excellent permeability and operational stability.

Keywords: drinking water; nanofiltration membrane; ornithine; natural organic matter; minerals; selective separation

饮用水作为日常矿物质摄入的重要来源,其生产过程中需要保留这些对身体健康有益的矿物盐。纳滤(NF)凭借其对小分子物质的高截留率,逐渐成为饮用水处理的核心技术^[1-2]。因此,在饮用水处理中,亟须研发能够截留有机物的同时允许矿物质离子通过的松散型纳滤膜(LNF),以实现天然有机物和矿物质的高效选择性分离。

制备LNF时常通过向哌嗪(PIP)溶液中引入新型单体,在界面聚合(IP)过程中优化膜结构,以提升渗透选择性。例如,Boo等人^[2]通过向PIP溶液中加入双哌嗪(BP),成功合成一种LNF并用于去除全氟烷基物质,同时提高了 Ca^{2+} 的透过率;Liu等人^[3]选择3,5-二氨基苯甲酸(BA)作为非活性反应物,以调控膜孔径和表面电荷特性,从而制备出对有机污染物及二价阳离子具有高分离效率的纳滤膜。尽管这些膜对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等的透过率相比传统哌嗪纳滤膜有一定提高,但仍然较低。并且,PIP的健康风险不可忽视。研究表明,PIP水溶液具有腐蚀性,可能刺激皮肤和眼部,长期接触或引发过敏性皮炎及呼吸系统敏感化反应^[4]。因此,探索无健康风险的、可以实现选择性分离天然有机物和矿物质的新型膜单体具有重要意义。

最近研究表明,鸟氨酸(Orn)作为一种无毒且环保的氨基酸,其展示出的分子构型和两性离子特性,有利于其作为独立水相单体制备LNF^[5]。Orn中的 α -氨基($-\text{NH}_2$)在酰胺化反应中容易和 α -羧酸

基团($-\text{COOH}$)产生空间位阻,使得 $-\text{NH}_2$ 在和均苯三甲酰氯(TMC)进行IP反应时受到阻碍,生成较疏松的聚酰胺(PA)层。此外,Orn单体的应用引入了额外的 α -羧基,有利于增强PA层的电负性,促进 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的渗透。与现有的氨基酸改性膜,例如以精氨酸和赖氨酸为水相单体的纳滤膜相比^[6-7],鸟氨酸没有胍基,不容易引起纳滤膜局部交联密度不均匀;其也没有庞大的侧链,更有利于制备低粗糙度、高稳定性的纳滤膜。因此,可以将Orn用作IP反应的水相单体,探讨其制备的纳滤膜在饮用水处理中的潜力。

笔者采用Orn作为单独二胺单体,通过IP反应制备鸟氨酸纳滤膜(Orn-NF),系统研究了鸟氨酸浓度对Orn-NF膜形态、结构和化学性质的影响,探讨了Orn-NF膜对饮用水中盐类和天然有机污染物的分离性能;通过膜的物理化学性质表征和过滤分析,深入研究分离机制,并对Orn-NF膜进行了长期运行的错流实验,旨在为解决传统纳滤膜对矿物质/天然有机污染物分离效率低的难题提供新思路。

1 材料与方法

1.1 实验材料

聚醚砜(PES)超滤膜购自北京分离设备公司。鸟氨酸(Orn, >98%)、均苯三甲酰氯(TMC, 98%)、正己烷(>98%)、硫酸钠(Na_2SO_4 , $\geq 99\%$)、氯化钠(NaCl , 99.99%)、氯化镁(MgCl_2 , 99.9%)、氯化钙(CaCl_2 , $\geq 96\%$)、硫酸镁(MgSO_4 , $\geq 99.5\%$)、腐殖酸(HA, $\geq 97\%$)和海

藻酸钠(SA, ≥97%)等试剂购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司,测试所用的纯水为实验室自制去离子水。

1.2 Orn-NF膜的制备

PES基膜先用0.05%的乙醇溶液冲洗24 h,去除膜表面的杂质,然后用超纯水清洗,储存在超纯水中备用。采用界面聚合法制备复合纳滤膜,将PES基膜固定在玻璃板表面,用另一空心环形板压在PES表面并固定。首先,将PES膜浸入不同浓度的鸟氨酸溶液中并保持2 min,以确保膜孔完全湿润;然后,倒掉PES膜上的液体,用橡胶辊轻轻排除膜表面多余的水相溶液;之后,倒入20 mL含0.1% TMC的正己烷溶液;在1 min后倒掉有机相溶液,并用正己烷溶液清除膜表面残余的TMC。设置鸟氨酸浓度分别为0.5%、1.0%、1.5%和2.0%,制得的纳滤膜分别命名为Orn-NF1、Orn-NF2、Orn-NF3和Orn-NF4。

1.3 膜表面性质和结构表征

采用傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)分析膜中聚酰胺层的化学成分;使用扫描电子显微镜(SEM)观察膜的表面形貌;采用X射线光电子能谱(XPS)分析膜表面的化学元素组成;使用SurPASS分析仪测定膜的Zeta电位。

1.4 纳滤膜水处理性能测试方法和实验装置

采用如图1所示的实验室自制纳滤错流装置对所制纳滤膜进行性能测试,纳滤测试压力为0.3 MPa、原液温度控制在25℃、预压时间为1 h,有效膜面积为15 cm²。每种膜取3张做平行实验,过滤时先采用0.3 MPa压力纯水过滤1 h。

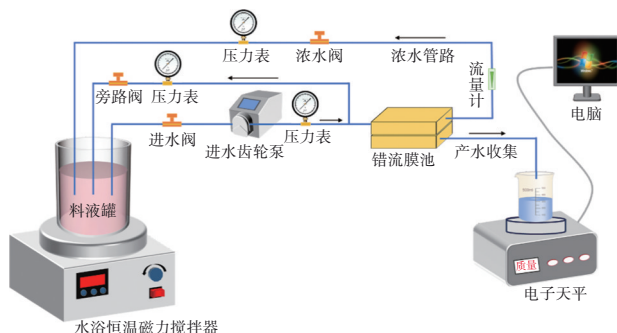


图1 错流过滤装置示意

Fig.1 Schematic diagram of cross-flow filtration device

纳滤膜的长期运行稳定性:以无机盐溶液作为进料液,连续运行120 h,通过测量过滤通量及脱盐率随运行时间的变化曲线来评价纳滤膜过滤性能

的稳定性。

纳滤膜的抗污染性能:通过评估纳滤膜对海藻酸钠/腐殖酸和NaCl(10 mmol/L)混合污染物的水通量恢复情况来考察其抗污染性能。实验以去离子水为进料液,在0.3 MPa压力下过滤1 h,测定膜的初始纯水通量(J_0);随后,以混合污染物溶液为进料液,在相同压力下过滤5 h,记录渗透通量(J_1);然后,在0.1 MPa下用纯水冲洗1 h,测定清洗后的通量;此后进行3个污染周期,每周期持续2 h,并采用相同的清洗程序。

膜通量可通过式(1)计算得到:

$$J = \frac{V}{S \times \Delta t \times \Delta p} \quad (1)$$

式中: J 为膜的渗透通量, L/(m²·h·Pa); V 为一定时间内透过液的体积, L; S 为膜片有效面积, m²; Δt 为测试时间, h; Δp 为测试压力, Pa。

膜对盐的截留率可通过式(2)计算得到:

$$R = \frac{C_f - C_p}{C_p} \times 100\% \quad (2)$$

式中: R 为膜对盐的截留率, %; C_f 为进料液的电导率, mS/cm; C_p 为透过液的电导率, mS/cm。采用电导率仪检测盐浓度。

在0.3 MPa压力条件下,将平均分子质量为200、400、600、1 000 u的聚乙二醇(PEG)溶液通过纳滤膜,使用总有机碳分析仪测试原料液和渗透液的溶质浓度,确定膜的截留分子质量(MWCO,截留率达到90%时PEG的分子质量)和孔径分布。

纳滤膜对上述溶质的截留率可通过式(3)计算得到:

$$R_{\text{TOC}} = \left(1 - \frac{C_b}{C_a}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: R_{TOC} 为膜对溶质的截留率, %; C_a 、 C_b 分别为原料液和渗透液中的溶质浓度, g/L。

2 结果与讨论

2.1 Orn-NF膜的表面性质与结构表征

利用扫描电子显微镜观察PES基膜和不同Orn-NF膜的表面,结果见图2。由图2(a)可知,PES基膜表面整体平整且均匀分布有大量微孔。随着鸟氨酸和TMC界面聚合反应的进行,基膜的微孔逐渐被形成的PA层覆盖,如图2(b)~(e)所示。当鸟氨酸浓度为0.5%时,所制得的Orn-NF1膜表面仍保留部分小尺寸微孔,表明此时形成的PA层较薄

且不完整,未能完全覆盖PES基膜的多孔结构。随着鸟氨酸浓度的增加,纳滤膜表面逐渐趋于平滑,当浓度达到1.5%时,Orn-NF3膜呈现出光滑的表面形貌,且基膜的微孔被全部覆盖,这可能有助于提高膜的抗污染性能。然而,当鸟氨酸浓度进一步提高至2.0%时,膜表面出现明显的结块现象,原因可能是,较高的单体浓度使得膜表面单体富集,致使局部反应区域浓度过高,进而形成不均匀的PA层,导致膜表面粗糙度增加。

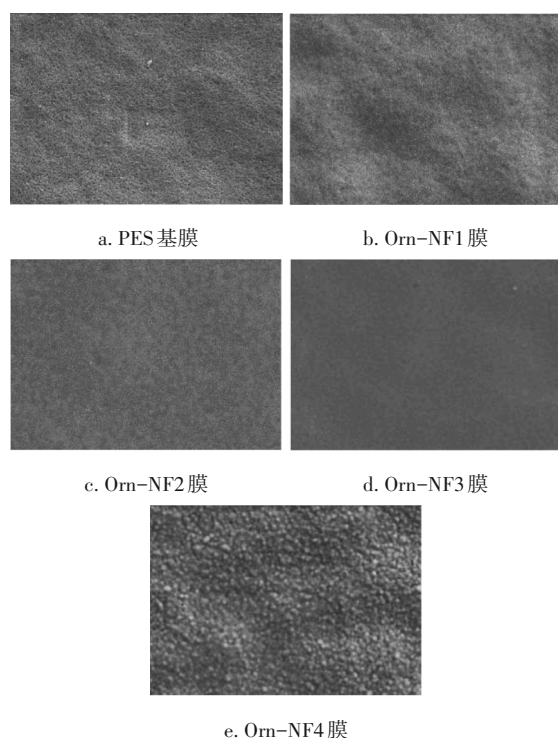


图2 PES基膜和不同Orn-NF膜表面的SEM图像
Fig.2 SEM images of PES membrane and different Orn-NF membranes

原子力显微镜(AFM)分析结果显示,Orn-NF1、Orn-NF2、Orn-NF3和Orn-NF4膜的算术平均粗糙度分别为2.52、4.06、4.52和10.60 nm。随着鸟氨酸浓度从0.5%提高到1.5%,膜表面粗糙度虽有所增加,但整体仍较低;然而,当鸟氨酸浓度达到2.0%时,膜表面粗糙度显著提升,可能会对膜的长期使用产生不利影响。

2.2 Orn-NF膜的化学组成

利用FTIR对Orn-NF膜表面PA层的形成进行了验证,并对其化学结构进行了深入分析,结果如图3所示。Orn-NF膜的红外光谱在 $2\,933\text{ cm}^{-1}$ 和 $2\,865\text{ cm}^{-1}$ 处出现了新特征峰,分别对应鸟氨酸分子

中亚甲基($-\text{CH}_2-$)的对称和不对称伸缩振动峰^[7]。值得注意的是,这两个特征峰的强度随着鸟氨酸浓度的增加而增强,表明PA层中鸟氨酸单元的含量随单体浓度升高而增加。在 $1\,543\text{ cm}^{-1}$ 处出现的新特征峰可归因于 $-\text{C}-\text{N}-\text{H}$ 键的弯曲振动,此特征峰的存在进一步验证了PA层中二级酰胺基团的形成^[8]。同时,在 $1\,651\text{ cm}^{-1}$ 处出现了显著的新特征峰,这是由于酰胺基团中 $-\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动^[9]。此外,在 $1\,720\text{ cm}^{-1}$ 处检测到新的特征峰^[10],推断这些特征峰来源于羧基($-\text{COOH}$)的拉伸振动,由此表明Orn-NF膜中含有羧基^[7]。综上所述,FTIR分析结果验证了鸟氨酸在界面聚合反应中的有效参与,并证实了Orn-NF膜表面PA层的成功合成。

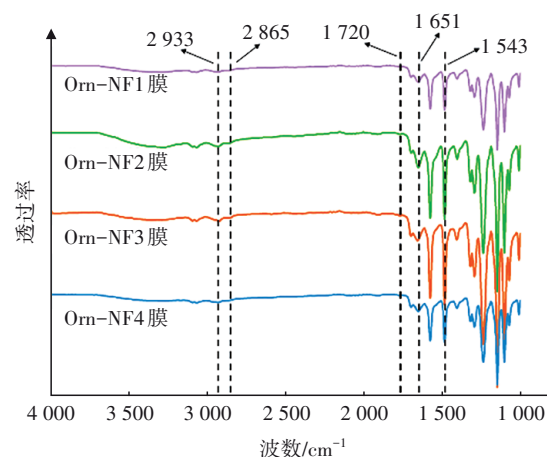


图3 Orn-NF膜的红外光谱

Fig.3 Infrared spectra of Orn-NF membranes

通过XPS分析Orn-NF膜表面PA层的元素组成,并计算其O/N值,结果见表1。

表1 Orn-NF膜表面的元素组成

Tab.1 Composition of elements in surface of Orn-NF membranes

项目	C/%	N/%	O/%	O/N
Orn-NF1	67.83	11.86	20.31	1.712
Orn-NF2	68.56	11.80	19.64	1.664
Orn-NF3	70.49	12.42	17.09	1.376
Orn-NF4	70.25	12.45	17.31	1.373

由表1可知,随着水相单体浓度的增加,膜表面的O/N值呈下降趋势。较低的O/N值通常表明更高的聚合物交联度和更致密的选择层结构^[8]。因此说明,随着鸟氨酸浓度的提高,Orn-NF膜表面PA层的交联度增加,选择层的致密性相应增强,这与FTIR分析中二级酰胺基团特征峰的增强相一致,进一步

验证了鸟氨酸参与界面聚合反应的有效性。

2.3 Orn-NF膜的表面性能与孔径分布

通过测量Zeta电位对不同Orn-NF膜表面的电荷特性进行分析,结果见图4。随着鸟氨酸浓度的增加,Orn-NF膜的Zeta电位逐渐降低,表明其表面电负性逐步增强。当溶液pH为10时,Orn-NF膜的Zeta电位在-28.5~-22.3 mV之间,而即使在pH为3的环境下,Zeta电位仍保持在-2.5 mV左右。这归因于鸟氨酸单体引入的羧基含量增加,以及PA层中残留的酰基氯($-\text{COCl}$)基团的存在,从而增强了纳滤膜表面的电负性。同时,随着鸟氨酸浓度的升高,Orn-NF膜表面的酰胺基团、羧基及氨基含量相应增加。

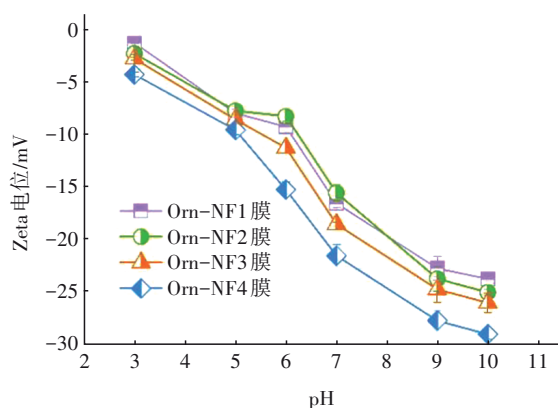


图4 不同Orn-NF膜的Zeta电位

Fig.4 Zeta potentials of different Orn-NF membranes

通过截留分子质量(MWCO)评估不同Orn-NF膜的孔径特性及分离能力,结果如图5所示。

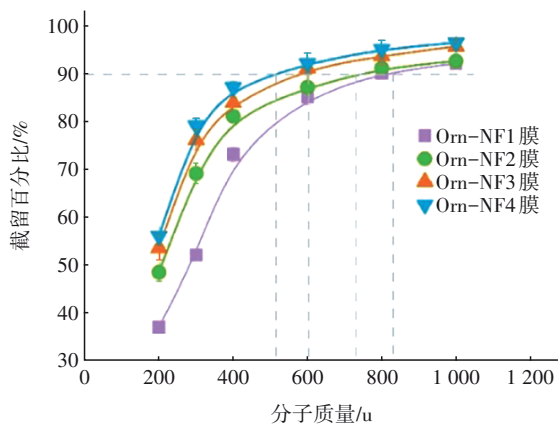


图5 不同Orn-NF膜的截留分子质量

Fig.5 Molecular weight cut-off of different Orn-NF membranes

MWCO可用于表征纳滤膜的孔径大小,并间接反映其对溶质的截留性能。由图5可知,当PEG截

留率达到90%时,Orn-NF1、Orn-NF2、Orn-NF3和Orn-NF4膜的MWCO值分别约为838、735、607和516 u。相比传统NF膜^[11-14],Orn-NF膜的MWCO值整体偏大,表明Orn-NF膜的结构比传统NF膜更松散,更有利于 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子通过。

2.4 Orn-NF膜的渗透性和截留性能

2.4.1 不同膜的渗透性和截留性能

腐殖酸和海藻酸钠是地表水源中存在的主要有机污染物,因此以腐殖酸和海藻酸钠作为有机污染物模型,探究Orn-NF膜对有机污染物及饮用水中常见无机盐的分离性能,结果见图6。可知,不同Orn-NF膜对腐殖酸和海藻酸钠的截留率均显著高于对单盐的截留率。当鸟氨酸浓度从0.5%增至2.0%时,氯化镁和氯化钙的截留率从7.7%提高到12.9%,NaCl的截留率从0.9%增加到3.4%,这主要归因于更厚的聚酰胺选择层。在界面聚合过程中,随着鸟氨酸浓度的提高,其与TMC的反应程度增加。多余的鸟氨酸携带的羧基增强了聚酰胺表面的负电荷,由于道南效应,氯化钠、氯化镁和氯化钙的截留率虽然都有小幅度的提升,但仍处于较高的透过率水平。值得注意的是,当鸟氨酸浓度提升到1.5%时,Orn-NF3膜对腐殖酸和海藻酸钠的截留率均可以达到98%以上,其纯水通量可以达到337 L/($\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{MPa}$)。表2是与文献报道中典型NF膜的对比情况,进一步表明Orn-NF膜相对于传统NF膜更加疏松,纯水渗透性更强,在饮用水处理中具有良好的应用前景。

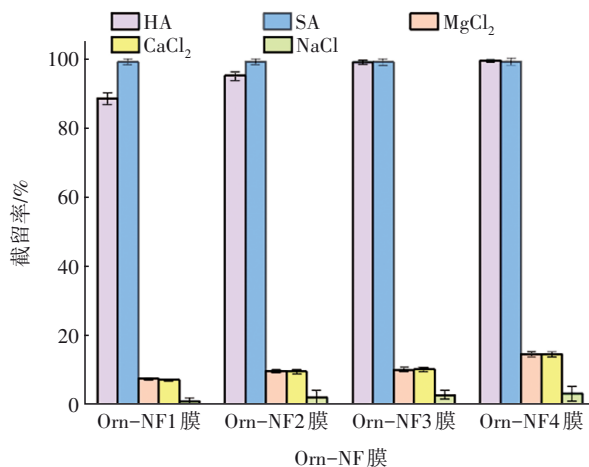


图6 不同Orn-NF膜对有机污染物和无机盐的截留率

Fig.6 Retention rates of organic pollutants and inorganic salts by different Orn-NF membranes

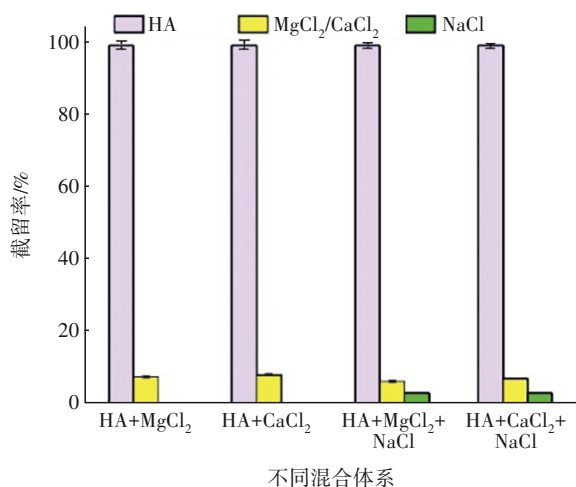
表 2 不同纳滤膜的分离性能对比

Tab.2 Comparison of separation performance among different nanofiltration membranes

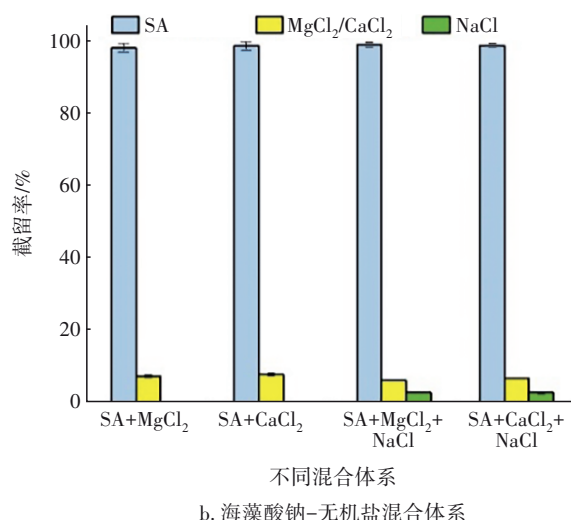
膜类型	水通量/ [L/(m ² ·h· MPa)]	MWCO/ u	MgCl ₂ 截 留率/%	NaCl截 留率/%	参考 文献
Orn-NF3	337	607	8.21	3.89	本研究
PIP/TMC// PES	75	430	10.3		[11]
TAC/TMC	15.6	600	84.5	54.6	[12]
PEI/IPC// PAN	30	200	95	61	[13]
PIP/BTEC// PAN	113	300	94.9	58.0	[14]
PVM/IPC// PSF	61		96.7	61.2	[15]
PIP/BHAC// PAN	153	570	95.0	59.6	[16]
TFC-0.6	107	520	55.7	9.5	[17]
SCOF/PA	73	325	40.0	29.0	[18]
NF90	60	200~300	95~97	85~95	[19]
NF270	100	300~500	>60	49	[20]

2.4.2 对有机污染物和无机盐的分离效能

基于上述研究结果,选取在有机污染物截留性能方面表现最优的 Orn-NF3 膜,进一步评估其在有机污染物与无机盐混合体系中的分离能力,结果如图 7 所示。在腐殖酸-无机盐混合体系中,Orn-NF3 对腐殖酸的截留率高达 99.1%,而对 MgCl₂ 和 CaCl₂ 的截留率均低于 8.7%,对 NaCl 的截留率甚至低于 4.0%。这一结果表明,Orn-NF3 膜具有优异的腐殖酸-无机盐分离性能。



a. 腐殖酸-无机盐混合体系



b. 海藻酸钠-无机盐混合体系

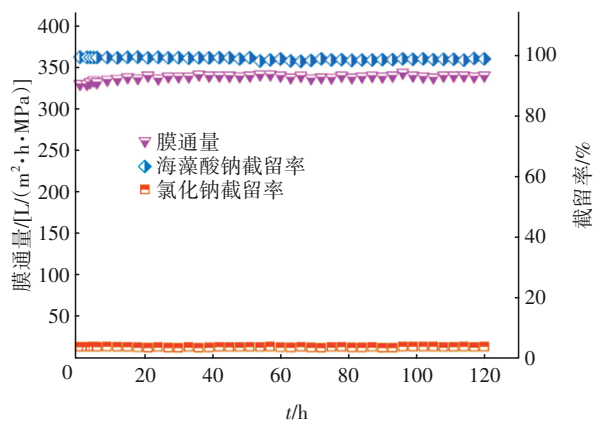
图 7 Orn-NF3 膜对有机污染物和无机盐的分离效能

Fig.7 Separation efficiency of Orn-NF3 membrane for organic pollutants and inorganic salts

在海藻酸钠-无机盐混合体系中,Orn-NF3 膜同样表现出优异的海藻酸钠-无机盐分离性能,进一步验证了其高效的有机污染物截留能力和优异的阳离子透过性能。这一分离特性可能主要归因于 Orn-NF3 膜具有相对松散的聚酰胺层结构,有利于 Ca²⁺、Mg²⁺ 和 Na⁺ 透过。大分子的海藻酸钠由于其空间位阻效应被纳滤膜有效截留,而小分子的腐殖酸由于膜表面的静电排斥作用也被有效截留。综上所述,Orn-NF3 膜兼具优异的有机污染物截留性能与矿物离子高透过特性,在饮用水处理中具有良好的应用前景。

2.5 长期运行稳定性

分别选用 NaCl 和腐殖酸混合溶液以及 NaCl 和海藻酸钠混合溶液作为进料液,对 Orn-NF3 膜的运行通量及脱盐能力进行了长期监测,结果见图 8。



a. 含盐的海藻酸钠溶液

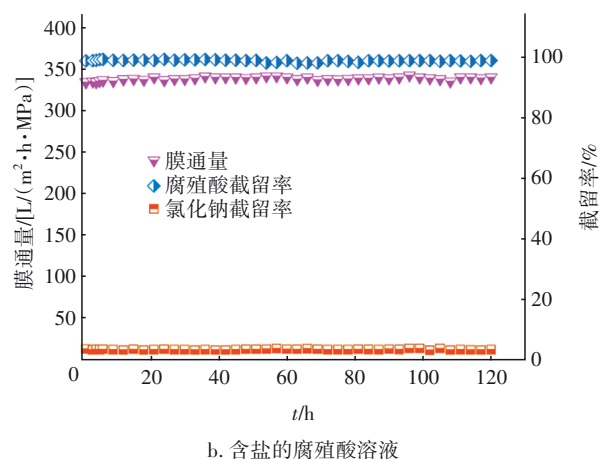


图8 Orn-NF3膜的长期运行稳定性

Fig.8 Long-term operational stability of Orn-NF3 membrane

由图8可知,Orn-NF3膜通量在120 h的长期运行中均保持稳定,对腐殖酸和海藻酸钠的截留率分别维持在98.6%和99.0%的较高水平,展现出了良好的运行稳定性,这进一步证明了鸟氨酸和TMC的良好交联性及纳滤膜结构的稳定性。

2.6 抗污染性能

Orn-NF3膜在1 g/L海藻酸钠和腐殖酸溶液中的归一化通量随运行时间的变化曲线见图9。

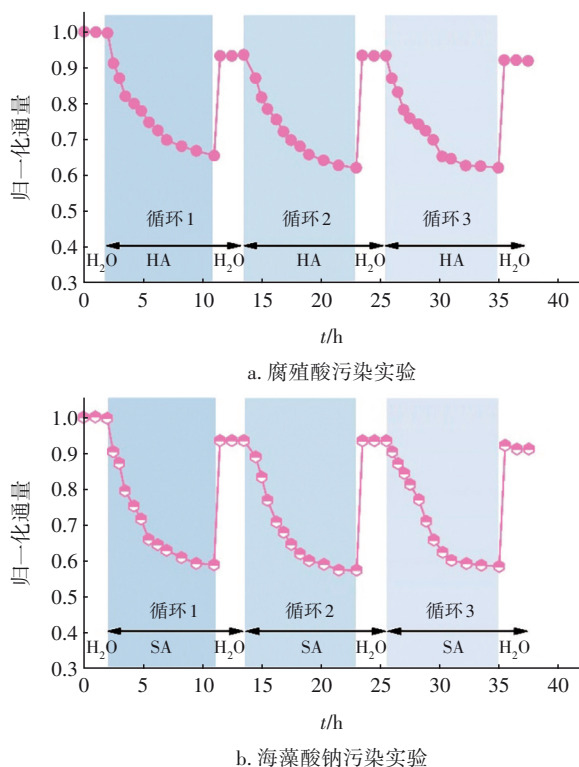


图9 Orn-NF3膜的抗污染性能

Fig.9 Anti-fouling performance of Orn-NF3 membrane

在海藻酸钠和腐殖酸污染实验中,运行1个周期后,Orn-NF3膜的归一化通量分别下降至58.6%和65.4%,表明膜受到一定程度的污染;经过水力冲洗处理后,其归一化通量可恢复至92.8%和93.2%,表明该膜具有良好的清洗可恢复性。经过3轮污染-清洗循环后,Orn-NF3膜的归一化通量仍能恢复至91.5%和91.8%,表明该膜具有优异的抗污染能力。这主要归因于Orn-NF3膜表面具有光滑的PA层,其较低的表面粗糙度可有效减少污染物的吸附,从而提高膜的抗污染性能。

3 结论

① 使用界面聚合技术,采用鸟氨酸作为水相单体,在聚乙烯醚砜基底上制备了Orn-NF膜。鸟氨酸的柔性脂肪链和两性性质有助于形成疏松且高亲水性的聚酰胺层,增强纳滤膜的渗透性和选择性。随着鸟氨酸浓度的增加,膜表面的羧基基团增多,提高了纳滤膜的亲水性,使得膜表面更利于水分子通过,膜结构比传统纳滤膜更为松散。

② Orn-NF膜表现出卓越的分选性能,通过道南排斥效应,膜表面对带负电的腐殖酸、海藻酸钠产生强静电排斥(截留率>98%),同时促进正电性矿物质离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^{+})的渗透。

③ 在长时间的错流实验中,鸟氨酸的极性基团提升了膜的亲水性,光滑的膜表面有利于抑制有机物吸附,使其在抗污染过程中通量恢复率大于91%,保障了长期运行稳定性。Orn-NF膜具有良好的操作稳定性和高通量,展现了其在饮用水处理中的应用潜力,为开发环保、无毒且具有优异分离性能的纳滤膜提供了新思路。

参考文献:

- [1] GUO H, LI X, YANG W, et al. Nanofiltration for drinking water treatment: a review [J]. Frontiers of Chemical Science and Engineering, 2022, 16 (5) : 681-698.
- [2] BOO C, WANG Y, ZUCKER I, et al. High performance nanofiltration membrane for effective removal of perfluoroalkyl substances at high water recovery [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(13): 7279-7288.
- [3] LIU Y L, WANG X M, YANG H W, et al. Preparation of nanofiltration membranes for high rejection of organic micropollutants and low rejection of divalent cations

- [J]. Journal of Membrane Science, 2019, 572: 152–160.
- [4] PATNAIK P. A Comprehensive Guide to the Hazardous Properties of Chemical Substances [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2007.
- [5] JAIN N, GOLDSCHMIDT V, ONCUL S, et al. Lactose–ornithine bolaamphiphiles for efficient gene delivery in vitro [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2012, 423: 392–400.
- [6] ZHAO R, JIN P, ZHU J, et al. Amino acid-based loose polyamide nanofiltration membrane with ultrahigh water permeance for efficient dye/salt separation [J]. Journal of Membrane Science, 2023, 673: 121477.
- [7] BAI C, GU Z, LI P, et al. A novel salt-swelling nanofiltration membranes for drinking water purification: high mineral ions passage and efficient organic removal [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineering, 2024, 159: 105473.
- [8] TANG C Y, KWON Y N, LECKIE J O. Effect of membrane chemistry and coating layer on physiochemical properties of thin film composite polyamide RO and NF membranes I. FTIR and XPS characterization of polyamide and coating layer chemistry [J]. Desalination, 2009, 242: 149–167.
- [9] GU S G, MA Y, ZHANG T, et al. MXene nanosheet tailored bioinspired modification of a nanofiltration membrane for dye/salt separation [J]. ACS ES&T Water, 2023, 3(7): 1756–1766.
- [10] HASANA M M, HASAN M N, AWUAL M R, et al. Biodegradable natural carbohydrate polymeric sustainable adsorbents for efficient toxic dye removal from wastewater [J]. Journal of Molecular Liquids, 2020, 319: 114356.
- [11] LI Y, SU Y, DONG Y, et al. Separation performance of thin-film composite nanofiltration membrane through interfacial polymerization using different amine monomers [J]. Desalination, 2014, 333: 59–65.
- [12] LIU Z N, KUANG W, KANG G D, et al. Preparation and characterization of a composite nanofiltration membrane interfacially polymerized from *cis*, *cis*-1,3,5-triaminocyclohexane and trimesoyl chloride [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 133(23): 43511.
- [13] CHIANG Y C, HSUB Y Z, RUAAN R C, et al. Nanofiltration membranes synthesized from hyperbranched polyethyleneimine [J]. Journal of Membrane Science, 2009, 326: 19–26.
- [14] GOHIL J M, RAY P. A review on semi-aromatic polyamide TFC membranes prepared by interfacial polymerization: potential for water treatment and desalination [J]. Separation and Purification Technology, 2017, 181: 159–182.
- [15] YU S, MA M, LIU J, et al. Study on polyamide thin-film composite nanofiltration membrane by interfacial polymerization of polyvinylamine (PVAm) and isophthaloyl chloride (IPC) [J]. Journal of Membrane Science, 2011, 379: 164–173.
- [16] WANG T, YANG Y, ZHENG J, et al. A novel highly permeable positively charged nanofiltration membrane based on a nanoporous hyper-crosslinked polyamide barrier layer [J]. Journal of Membrane Science, 2013, 448: 180–189.
- [17] ZHU B, SHAO R, LI N, et al. Narrowing the pore size distribution of polyamide nanofiltration membranes via dragging piperazines to enhance ion selectivity [J]. Journal of Membrane Science, 2023, 667: 121187.
- [18] XU S, LIN H, LI G, et al. Anionic covalent organic framework as an interlayer to fabricate negatively charged polyamide composite nanofiltration membrane featuring ions sieving [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 427: 132009.
- [19] ALHUSSAINI M A, SOUZA-CHAVES B M, FELIX V, et al. Tailored divalent-monovalent selectivity of nanofiltration and reverse osmosis membranes through controlled oxidation [J]. Desalination and Water Treatment, 2025, 323: 101252.
- [20] HILAL N, AL-ZOUBI H, DARWISH N A, et al. Performance of nanofiltration membranes in the treatment of synthetic and real seawater [J]. Separation and Purification Technology, 2007, 42: 493–515.
-
- 作者简介:黄晓艺(1997—),女,福建泉州人,博士研究生,主要研究方向为膜分离技术与理论以及高级氧化技术。
- E-mail:hxyqut@tongji.edu.cn
- 收稿日期:2025-04-28
- 修回日期:2025-06-24

(编辑:刘贵春)