

不同类型聚磺酰胺管式纳滤膜 制备工艺研究

房岩¹, 魏飞², 刘杉¹, 刘恩华^{1*}

(1.天津工业大学中空纤维膜材料与膜过程省部共建国家重点实验室, 天津 300387;
2.天津海普尔膜科技有限公司, 天津 300304)

摘要:以聚醚砜(PES)管式超滤膜为基膜,以无水哌嗪(PIP)为水相单体,均苯三磺酰氯(TSC)和1,3,6-萘三磺酰氯(NTSC)为有机相单体,通过界面聚合制备了不同类型的聚磺酰胺管式纳滤膜。分别研究了单体及添加剂各组分的浓度、2种磺酰氯以不同比例混合、反应温度对复合纳滤膜性能的影响。通过FT-IR和SEM分别对复合纳滤膜进行物理、化学结构进行表征。结果表明,通过调整有机相单体的混合比例和反应条件,所得聚磺酰胺综合了2种单体的结构特点,制备出了更加多样的复合纳滤膜,具有更优的选择性和截留性能。

关键词:聚醚砜;界面聚合;管式纳滤膜;磺酰氯;聚磺酰胺

中图分类号:TQ028.8

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)08-0124-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.08.023

Preparation of different types of polysulfonamide tubular nanofiltration membrane

FANG Yan¹, WEI Fei², LIU Shan¹, LIU En-hua^{1*}

(1.State Key Laboratory of Hollow Fiber Membrane Materials and Membrane Process, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2.Tianjin Hipure Membrane Technology Co., Ltd., Tianjin 300304, China)

Abstract: Taking polyether sulfone (PES) tubular ultrafiltration membrane as base membrane, anhydrous piperazine (PIP) as water phase monomer, pyrobenzenetrisulfonyl chloride (TSC) and 1,3,6-naphthalenetrisulfonyl chloride (NTSC) as organic phase monomers, different types of polysulfonamide (PSA) tubular nanofiltration membrane are prepared through interfacial polymerization. The influences of the concentration of monomers and additives, the mixing proportions of TSC and NTSC, and reaction temperature on the performance of the prepared PSA nanofiltration membrane are studied. The physical and chemical structures of PSA tubular nanofiltration membrane are characterized by means of FT-IR and SEM, respectively. It is shown that polysulfonamide prepared owns the structural characteristics of two organic monomers by adjusting the proportion of monomers in organic phase and the reaction conditions, and exhibits better selectivity and rejection performance.

Key words: polyethersulfone; interfacial polymerization; tubular nanofiltration membrane; sulfonyl chloride; polysulfonamide

随着人口增长和社会发展,水污染问题面临巨大挑战的同时,人们对优质饮用水的需求不断提升。膜处理技术因其高效、体积小、性能稳定等特点,成为提高饮用水质量和保障供水安全的重要手段^[1]。纳滤技术能够有效去除水中的天然有机物和重金属离子,是一种介于反渗透和超滤之间的压力驱动分离技术,具备高分离效率、低维护成本、较低的操作压力、简单的操作以及无需相变等优点。纳滤膜的孔径筛分和道南效应共同作用,形成了独特的分离性能,使其在小分子和不同价盐的选择性分离方面更加出色^[2-3]。目前,市场上销售的纳滤膜主要通

过界面聚合(IP)法制备,通常采用多孔支撑层作为基膜,在水相和有机相中分别溶解2种反应单体,并使其在两相界面进行聚合反应^[4]。

与其他膜组件相比,管式膜具有更显著的优势,便于更换和清洗,寿命更长且成本更低,操作压力适用范围更广,且对不同料液具有更强的适应性^[5]。因此本研究以聚醚砜(PES)管式超滤膜为基膜,分别以1,3,6-萘三磺酰氯、均苯三磺酰氯以及二者混合物为有机相单体,无水哌嗪(PIP)为水相单体,通过IP法来制备不同类型的聚磺酰胺管式纳滤膜。由哌嗪和1,3,6-萘三磺酰氯制备的复合纳滤膜选

收稿日期:2024-10-30;修回日期:2025-06-14

基金项目:天津市科技计划项目(16PTGCCX00070)

作者简介:房岩(2000-),男,硕士生,研究方向为管式纳滤膜的制备与应用,1304391713@qq.com;刘恩华(1973-),男,博士,副研究员,研究方向为管式纳滤膜的制备及应用,通讯联系人,450221508@qq.com。

择性较差,故选用1,3,6-萘三磺酰氯和均苯三磺酰氯共混与哌嗪聚合来获得更加复杂、选择性更高的复合纳滤膜,研究其最佳制备条件,并通过调控各因素对其性能进行探究^[6]。

1 实验部分

1.1 实验药品和仪器

PES管式超滤膜,天津海普尔膜科技有限公司生产;无水哌嗪,天津光复科技发展有限公司生产;均苯三磺酰氯,湖北云镁科技有限公司生产;1,3,6-萘三磺酰氯,北京百灵威科技有限公司生产;4-二甲氨基吡啶(DMAP),上海阿拉丁试剂有限公司生产;十二烷基硫酸钠(SDS)、无水硫酸镁($MgSO_4$),天津市科密欧化学试剂有限公司生产;丙酮、正己烷、四氯化碳(CCl_4),外购。

DDS-11A电导率仪,上海雷磁仪器有限公司生产;FLS-11B吹风机,日本佛兰仕公司生产;HH.B11-420电热恒温培养箱,天津市实验电炉有限公司生产;水浴锅、Nicolet iS50傅里叶变换红外光谱仪,赛默飞世尔科技(中国)有限公司生产;Gemini SEM 500场发射扫描电镜,英国卡尔蔡司公司生产;管式复合纳滤膜分离性能评价装置,自制(图1)。

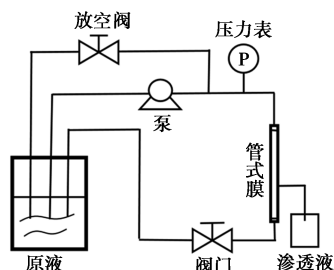


图1 管式复合纳滤膜分离性能评价装置

1.2 聚磺酰胺(PSA)管式复合纳滤膜的制备

将一定量的哌嗪、4-二甲氨基吡啶和十二烷基硫酸钠溶于一定量的水中配制水相溶液;以正己烷和四氯化碳(质量分数为3:1)为溶剂,分别配制丙酮+NTSC、丙酮+TSC、丙酮+NTSC+TSC有机相溶液。将长30 cm、直径8 mm的PES管式超滤膜在纯水中浸泡一段时间后取出,用纯水冲洗掉膜管上残留的甘油,再用鼓风机吹去膜管上残留的水分,将冲洗完的膜管浸泡入配好的水相溶液中,一段时间后取出,吹风,把膜管上多余的水相液滴吹干,再把膜管浸泡在配好的有机相溶液中在设定温度下进行界面聚合,待界面聚合完成之后,晾干、放入纯水中,得到PSA管式复合纳滤膜(简称PSA纳滤膜),具体

反应过程如图2所示。

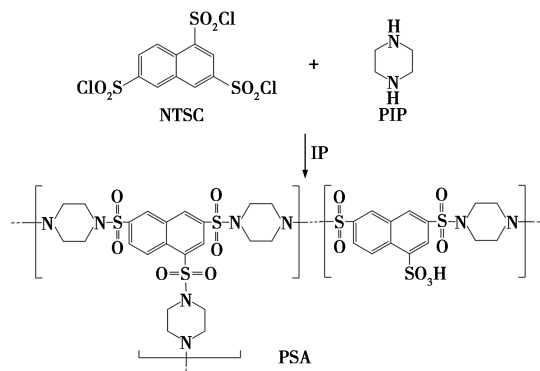


图2 PSA纳滤膜制备的反应流程

1.3 测试与分析

1.3.1 PSA纳滤膜的截留率与通量测试

室温时,将制备好的PSA纳滤膜对2 g/L的硫酸镁进行性能测试,在0.4 MPa压力下稳定运行15 min后开始接取渗透液,并记录一定时间内渗透液的体积。为避免误差,每组测3~4次取平均值,由式(1)来计算PSA纳滤膜的通量 F 。

$$F = \Delta V / At \quad (1)$$

式(1)中 F 为PSA纳滤膜的通量, $L/(m^2 \cdot h)$; ΔV 为单位时间内渗透液的体积, L ; A 为PSA纳滤膜的膜面积, m^2 ; t 为透过膜的时间, h 。

用式(2)来计算PSA纳滤膜的截留率 R ^[7]。

$$R = (1 - C_p / C_f) \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中的 R 为PSA纳滤膜的截留率,%; C_p 为渗透液的电导率, $\mu S/cm$; C_f 为原溶液的电导率, $\mu S/cm$ 。

1.3.2 傅里叶变换红外光谱(FT-IR)分析

将制备好的PSA纳滤膜制样后,用Nicolet iS50型号的红外光谱仪对膜进行表征分析^[8],通过测量和分析样品对红外光的吸收、反射或透射情况,揭示样品的分子结构和化学组成信息。

1.3.3 PSA纳滤膜表面形貌分析

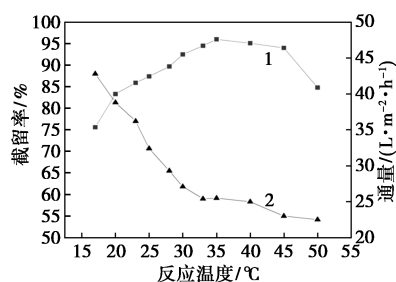
将制备好的PSA纳滤膜剪成小块,粘贴在涂有导电胶的样品台上,进行烘干和喷金处理,利用扫描电子显微镜对膜进行测试^[9],通过聚焦电子束扫描样品表面,收集不同信号生成高分辨率图像,从而揭示样品的表面形态、微观结构及成分信息。

2 结果与讨论

2.1 聚合温度对PSA纳滤膜性能的影响

如图3所示,当界面聚合反应温度(浸泡有机相溶液时的温度)较低时,PIP和NTSC的活性均较

低,分子的热运动相对较慢,难以克服反应所需的活化能,2种单体间发生界面聚合速率慢,所制备的纳滤膜结构疏松,因此截留率比较低,通量较大。当温度升高时,PIP和NTSC的反应活性提高,界面聚合反应加快,有助于形成更加致密、均匀的聚酰胺层,所得纳滤膜的截留率更高,膜通量降低,性能更好。随着反应温度继续升高,溶液温度过高,由于有机相中溶液的沸点低,且高温导致分子结构发生变化,破坏了反应的适宜条件,引发了副反应,抑制主反应的进行,导致纳滤膜性能下降^[10]。因此,反应温度为35℃时,所得PSA纳滤膜性能最好。

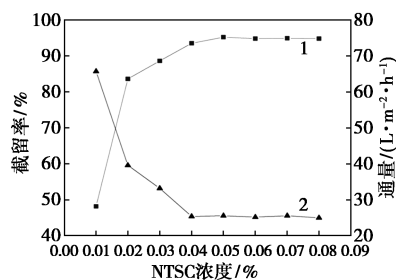


1—截留率;2—通量

图3 反应温度对PSA纳滤膜性能的影响

2.2 NTSC浓度对PSA纳滤膜性能的影响

在界面聚合反应中,单体的浓度起着重要作用。NTSC分子含有磺酰氯基团,具有较高的反应活性,能够与多胺反应生成聚磺酰胺纳滤膜,并对二价离子和小分子有机物等具有较高的截留率和水通量^[11]。如图4所示,当NTSC浓度较低时,由于有机相单体不足,导致发生的界面聚合不充分,制备的聚酰胺层较疏松,导致纳滤膜的截留性能下降,难以有效阻挡小分子有机物和二价离子等溶质通过。同时由于聚酰胺层疏松的结构,水在膜中的流动阻力较小,水通量较高。随着NTSC浓度的升高,有机相单体的浓度增加,聚合反应程度加深,使得聚酰胺层逐渐致密,所得纳滤膜的截留率提高,能够有效实现溶质的分离;致密的聚酰胺层会增大水在膜中的阻



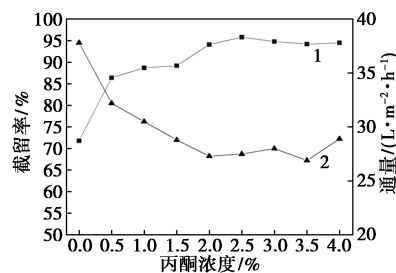
1—截留率;2—通量

图4 NTSC浓度对PSA纳滤膜性能的影响

力,导致通量降低^[12]。当NTSC的浓度进一步提高,界面聚合反应生成了分离膜层,多余的NTSC单体将不再与PIP发生反应,因此截留率变化不明显。实验确定,有机相中NTSC的最佳质量浓度为0.05%。

2.3 助溶剂对PSA纳滤膜性能的影响

由于NTSC在有机溶剂中的溶解度有限,导致其与PIP单体间反应速率缓慢。通常可以选择助溶剂加入有机相溶剂中^[13],例如选择丙酮作为助溶剂既可以提高有机相单体在有机溶剂中溶解度,增加单体有效浓度,又可以在反应后期溶解部分聚合物,降低聚合物粘度,促进其在反应体系中扩散,有利于聚合物在界面处的沉积和生长^[14]。如图5所示,随着丙酮浓度的增加,有机相中有效的有机相单体增加,与PIP的反应更加充分,反应速率加快,形成的聚酰胺层更致密,所生成的纳滤膜截留率升高,膜通量降低。当丙酮浓度继续提高,生成的纳滤膜可能会受到高浓度丙酮的化学侵蚀和物理破坏,膜结构受到损害,从而使其截留率降低,通量增加。由此确定,丙酮最佳质量浓度为2.5%。

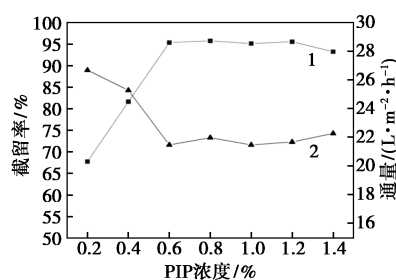


1—截留率;2—通量

图5 丙酮浓度对PSA纳滤膜性能的影响

2.4 水相PIP单体浓度对PSA纳滤膜性能的影响

由于有机相中单体NTSC的活性较低,因此选择了与活性较高的PIP进行反应^[11-12,15]。如图6所示,当PIP的浓度较低时,与NTSC反应不充分,所生成的膜交联程度较低,形成的聚酰胺结构相对疏松,所得纳滤膜截留率较低,通量较高。随着水相



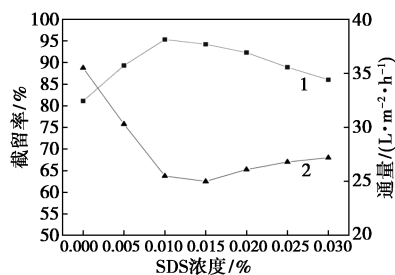
1—截留率;2—通量

图6 PIP浓度对PSA纳滤膜性能的影响

PIP 单体浓度增高,反应程度不断加深,形成更加致密的聚酰胺层,膜孔径变小,对大分子的截留能力增强,则所得纳滤膜截留率逐渐升高,通量降低。当 PIP 浓度继续上升时,界面聚合反应继续增强,膜表面将无法再提供足够的磺酰氯基团,膜表面的正电荷密度增加,导致最终所得纳滤膜的选择性下降,无法有效地分离不同物质,故截留率会稍微下降。由此确定,PIP 的最佳质量浓度为 0.6%。

2.5 表面活性剂对 PSA 纳滤膜性能的影响

SDS 是一种常见的阴离子表面活性剂。加入 SDS 后,使得水相单体在基膜上的分布更加均匀,降低了反应体系的表面张力促进 PIP 和 NTSC 在水相和有机相之间的扩散,这使得反应物能够快速到达反应界面,提高反应速率^[16]。如图 7 所示,随着 SDS 用量的逐渐增加,界面聚合反应得到促进,膜表面的性质得到优化,形成的聚酰胺层更加致密,提高了对大分子的截留能力,所制备纳滤膜截留率增大,通量减小。然而,当 SDS 用量进一步增加,聚酰胺的完整性会被破坏,膜表面水相单体分布增多,更多的哌嗪分布在膜表面,导致界面聚合难以形成网状大分子聚合物,进而产生更多低聚物,降低了膜的致密性,最终制得的纳滤膜截留率会下降,通量增大^[17]。由此确定,SDS 最佳质量浓度为 0.01%。



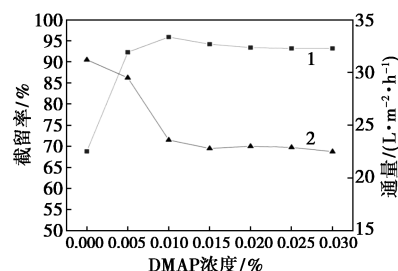
1—截留率;2—通量

图 7 SDS 浓度对 PSA 纳滤膜性能的影响

2.6 催化剂对 PSA 纳滤膜性能的影响

DMAP 是一种亲和酰化的催化剂,能够有效地促进 PIP 的氨基与 NTSC 的磺酰氯基团之间的反应,使得界面聚合反应更加迅速^[18]。如图 8 所示,当没有加入催化剂,聚合反应速率低,生成纳滤膜的速率缓慢,最终所得的纳滤膜截留率较低;随着 DMAP 加入,DMAP 上的二甲氨基与吡啶会发生共振,激活了氮原子,使得亲核性增强,界面聚合反应得到催化,反应所需的活化能降低,副反应减少,这一过程加快了聚合速率,生成的聚磺酰胺层更加致密,所得纳滤膜对大分子的截留能力增强^[19],截留

率提高,通量降低。实验确定,DMAP 最佳质量浓度为 0.01%。



1—截留率;2—通量

图 8 DMAP 浓度对 PSA 纳滤膜性能的影响

2.7 不同有机相单体组合及浓度对 PSA 纳滤膜性能的影响

如表 1 所示,当 NTSC 和 TSC 分别与哌嗪反应时,所制备的膜选择性单一,截留率和通量等性能不够理想^[20]。2 种单体混合加入可综合 2 种单体的结构特点,既保留了苯环的优点,具有更好的交联结构,同时又具有萘环优势,具备更复杂且更大的共轭体系,两者相互协同使形成的聚合物更加均匀,2 种单体相互制约防止过快反应而造成结构缺陷,所得纳滤膜结构更加复杂,具有更优的选择性。混合单体时可以通过调整 2 种磺酰氯单体的比例更灵活地调控膜的性能,得到最佳制备条件。实验发现,在 NTSC 和 TSC 的质量分数分别为 0.03% 和 0.02% 时,截留率最大,且在 35℃ 温度下制备的纳滤膜比 21℃ 温度制备的纳滤膜的截留率高。

表 1 2 种有机相单体以不同比例混合制备 PSA 纳滤膜的性能

| 编号 | NTSC 质量分数/% | TSC 质量分数/% | 反应温度/℃ | 通量/(L·m ⁻² ·h ⁻¹) | 截留率/% |
|----|-------------|------------|--------|--|-------|
| 1 | 0.05 | 0 | 21 | 30.2 | 88.1 |
| 2 | 0.05 | 0 | 35 | 23.3 | 94.1 |
| 3 | 0.04 | 0.01 | 21 | 23.9 | 93.3 |
| 4 | 0.04 | 0.01 | 35 | 24.3 | 94.4 |
| 5 | 0.03 | 0.02 | 21 | 22.3 | 94.1 |
| 6 | 0.03 | 0.02 | 35 | 25.5 | 96.0 |
| 7 | 0.02 | 0.03 | 21 | 29.1 | 90.8 |
| 8 | 0.02 | 0.03 | 35 | 27.9 | 94.0 |
| 9 | 0.01 | 0.04 | 21 | 28.2 | 90.5 |
| 10 | 0.01 | 0.04 | 35 | 26.5 | 94.2 |
| 11 | 0 | 0.05 | 21 | 28.6 | 89.2 |
| 12 | 0 | 0.05 | 35 | 23.3 | 94.0 |

综上所述,3 种 PSA 纳滤膜的最佳制备工艺为:反应温度 35℃,水相 0.6% PIP+0.01% SDS+0.01%

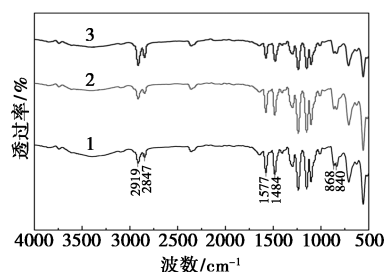
DMAP, 有机相分别为 0.05% NTSC+2.5% 丙酮、0.05% TSC+2.5% 丙酮、0.03% NTSC+0.02% TSC+2.5% 丙酮。表 2 分别为 3 种 PSA 纳滤膜及 PES 基膜的性能。

表 2 PSA 纳滤膜的性能

| 编号 | 膜 | 有机相 单体 | 通量/ ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$) | 截留率/ % |
|----|-------------|-----------|--|-----------|
| — | PES 基膜 | — | 5333.0 | 1.8 |
| 2 | PSA 纳滤膜 I | NTSC | 23.3 | 94.1 |
| 12 | PSA 纳滤膜 II | TSC | 24.3 | 94.0 |
| 6 | PSA 纳滤膜 III | NTSC+TSC | 25.5 | 96.0 |

2.8 PSA 纳滤膜红外光谱分析

如图 9 所示, 由于 3 种纳滤膜均为聚磺酰胺结构, 结构相似, 因此它们的吸收峰位置和形状具有较高的一致性。在 1577 cm^{-1} 和 1484 cm^{-1} 附近, 均出现 2 种特征吸收峰, 主要来自苯环和萘环骨架振动。此外, 在 2919 cm^{-1} 和 2847 cm^{-1} 处也出现了特征吸收峰, 这主要归因于脂肪族 C—H 的伸缩振动, 来自于哌嗪的结构。 840 cm^{-1} 和 868 cm^{-1} 处的吸收峰则为 S—N 键的拉伸振动特征峰, 表明聚磺酰胺结构的形成^[21]。



1—PSA 纳滤膜 I; 2—PSA 纳滤膜 II; 3—PSA 纳滤膜 III

图 9 PSA 纳滤膜的红外光谱图

2.9 PSA 纳滤膜表面形貌分析

扫描电子显微镜对所制备的 PSA 纳滤膜分析结果如图 10 所示。由图 10(a) 可以看出, PES 基膜表面比较平整, 孔径较小, 有利于反应生成的物质在膜表面均匀分布。图 10(b)、(c) 可以看出, 膜表面形成了相对均匀致密的聚磺酰胺层, 由于基膜的孔径小, 界面聚合反应会在孔洞处形成聚磺酰胺的堆积, 出现了层状和片状的突起结节, 致密的结构有助于形成较为稳定的过滤性能, 对大小不同的溶质分子具有更好的筛选作用^[22]。从图 10(d) 可以看出, 由于是 2 种磺酰氯混合与哌嗪反应, 2 种有机相单体共同作用的结果使纳滤膜结构兼具了图 10(b) 和

图 10(c) 2 种纳滤膜的特征, 孔隙结构更复杂, 既有均匀孔隙, 又有不规则的层状结构, 形成了更加复杂的孔隙结构。这种复杂的结构赋予了纳滤膜更多样的过滤性能。

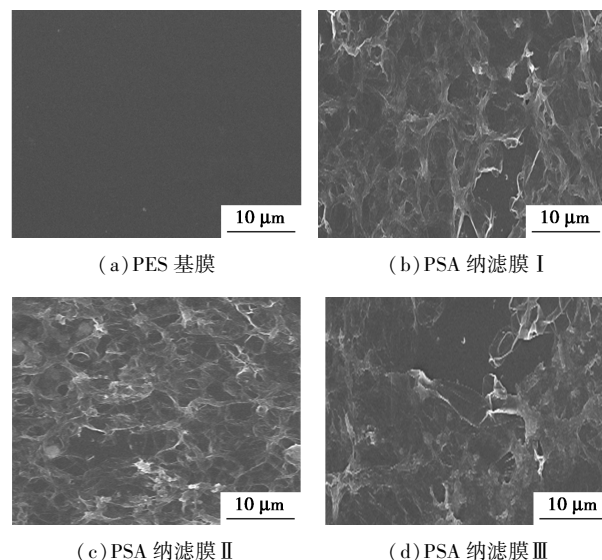


图 10 PES 基膜和 PSA 纳滤膜表面形貌

3 结论

本研究成功制备了不同类型的聚磺酰胺管式复合纳滤膜, 通过精确调控 2 种磺酰氯单体的配比, 系统优化单体浓度、添加剂含量、反应时间和温度等制备参数, 成功制备出具有优异选择性和环境适应性的高性能纳滤膜。实验结果显示, 在最佳反应温度 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、有机相单体最佳浓度为 0.05% (0.05% NTSC、0.05% TSC、0.03% NTSC+0.02% TSC)、有机相最佳丙酮浓度 2.5%、水相单体最佳浓度 0.8%、SDS 最佳浓度 0.01% 和 DMAP 最佳浓度 0.01% 条件下, 所制备的纳滤膜展现出优异的水通量和高效的重金属离子截留能力, 且单一 NTSC 或 TSC 制备的复合纳滤膜性能不如 2 种单体混合。本研究为复合纳滤膜的制备及其在水处理中的应用提供了新的思路, 未来的研究可以进一步探索其他单体和交联剂的使用, 以优化膜的性能并拓展其应用潜力。

参考文献

- [1] Salmanli Ö M, Durak S G, Demirkol G T, et al. Effect of PVP concentration on prepared PEI membranes for potential use on water treatment; Effect of additive on membranes prepared for water treatment[J]. Water Science & Technology Water Supply, 2019, 19 (7): 2072–2078.
- [2] Bruggen B V D. Chemical modification of polyethersulfone nanofiltration membranes; A review[J]. Journal of Applied Polymer Sci-

- ence, 2009, 114(1): 630-642.
- [3] Petersen R J. Composite reverse osmosis and nanofiltration membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 1993, 83(1): 81-150.
- [4] 郑力玮, 王昊, 李悦, 等. 聚乙烯亚胺在界面聚合法制备纳滤膜中的应用 [J]. *膜科学与技术*, 2023, 43(3): 158-166.
- [5] 王鹤铭, 刘恩华, 魏飞. 聚偏氟乙烯-聚酰胺管式复合膜的分离性能研究 [J]. *水处理技术*, 2021, 47(3): 47-51.
- [6] Yu S, Zhou Q, Shuai S, *et al.* Thin-film composite nanofiltration membranes with improved acid stability prepared from naphthalene-1,3,6-trisulfonylchloride (NTSC) and trimesoyl chloride (TMC) [J]. *Desalination*, 2013, 315: 164-172.
- [7] Zhu Y, Dou P, He H, *et al.* Improvement of permeability and rejection of an acid resistant polysulfonamide thin-film composite nanofiltration membrane by a sulfonated poly(ether ether ketone) interlayer [J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 239: 116528.
- [8] Borondics F, Jossent M, Sandt C, *et al.* Supercontinuum-based Fourier transform infrared spectromicroscopy [J]. *Optica*, 2018, 5(4): 378-381.
- [9] Orloff J. Thermal field emission for low voltage scanning electron microscopy [J]. *Journal of Microscopy*, 2011, 140(3): 303-311.
- [10] Mika Mänttari, Arto Pihlajamäki, Kaipainen E, *et al.* Effect of temperature and membrane pretreatment on the filtration properties of nanofiltration membranes [J]. *Desalination*, 2002, 145(1): 81-86.
- [11] Yuan T, Hu Y, He M, *et al.* Spinning-assist layer-by-layer assembled polysulfonamide membrane for reverse osmosis from naphthalene-1,3,6-trisulfonylchloride (NTSC) and piperazine (PIP) [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(9): 9.
- [12] Liu M, Yao G, Cheng Q, *et al.* Acid stable thin-film composite membrane for nanofiltration prepared from naphthalene-1,3,6-trisulfonylchloride (NTSC) and piperazine (PIP) [J]. *Journal of Membrane Science*, 2012, 415/416: 122-131.
- [13] Lee K R. Cosolvent-driven interfacial polymerization for superior separation performance of polyurea-based pervaporation membrane [J]. *Polymers*, 2021, 13(8): 12.
- [14] Moghadassi A R, Bagheripour E, Hosseini S M. Investigation of the effect of tetrahydrofuran and acetone as cosolvents in acrylonitrile-butadiene-styrene-based nanofiltration membranes [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, 134(26): 6.
- [15] Liu Y, Zhao Y, Wang X, *et al.* Effect of varying piperazine concentration and post-modification on prepared nanofiltration membranes in selectively rejecting organic micropollutants and salts [J]. *Journal of Membrane Science*, 2019, 582: 274-283.
- [16] Liu X C, Zhao Y X, Li Q X, *et al.* Surface tension, interfacial tension and emulsification of sodium dodecyl sulfate extended surfactant [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2016, 494: 201-208.
- [17] Zhang R, Zhu Y, Zhang L, *et al.* Polyamide nanofiltration membranes from surfactant-assembly regulated interfacial polymerization: The effect of alkyl chain [J]. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2021, 222(20): 9.
- [18] Cheng J, Zhang Z, Shi W, *et al.* A novel polyester composite nanofiltration membrane prepared by interfacial polymerization catalysed by 4-dimethylaminopyridine: Enhanced the water permeability and anti-fouling ability [J]. *Polymer: The International Journal for the Science and Technology of Polymers*, 2018, 153: 24-32.
- [19] Zhang R, Yu S, Shi W, *et al.* A novel polyesteramide thin film composite nanofiltration membrane prepared by interfacial polymerization of serinol and trimesoyl chloride (TMC) catalyzed by 4 dimethylaminopyridine (DMAP) [J]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 542: 68-80.
- [20] Wang B, Zhao D. Polyamide layer sulfonation of a nanofiltration membrane to enhance perm; Electivity via regulation of pore size and surface charge [J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2021, 32(10): 4041-4051.
- [21] Hoseinpour H, Peyravi M, Nozad A, *et al.* Static and dynamic assessments of polysulfonamide and poly(amide-sulfonamide) acid-stable membranes [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2016, 67: 453-466.
- [22] Trushinski B J, Dickson J M, Smyth T. Polysulfonamide thin-film composite reverse osmosis membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 1998, 143(1): 181-188. ■
-
- (上接第 123 页)
- [24] Ren Y S, Khan H, Khan B, *et al.* Application of eucalyptus wood waste-derived biochar for adsorption of aluminum from aqueous solutions [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2023, 287: 116-123.
- [25] Yang X Y, Deng D D, Liu Z, *et al.* Pb/As simultaneous removal from soil leachate of Pb/Zn smelting sites by magnetic biochar [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 365: 121526.
- [26] Su X Y, Chen Y, Li Y F, *et al.* Enhanced adsorption of aqueous Pb(II) and Cu(II) by biochar loaded with layered double hydroxide: Crucial role of mineral precipitation [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 357: 119083.
- [27] Lyu P, Li L F, Huang X Y, *et al.* Ternary Ca-Mg-Al layered double hydroxides for synergistic remediation of As, Cd, and Pb from both contaminated soil and groundwater: Characteristics, effectiveness, and immobilization mechanisms [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 442: 130030.
- [28] Chen X C, Zhong J Y, Lin H Y, *et al.* Efficient enrichment of uranium(VI) in aqueous solution using magnesium-aluminum layered double hydroxide composite phosphate-modified hydrothermal biochar: Mechanism and adsorption [J]. *Chemosphere*, 2024, 362: 142667.
- [29] Ji X G, Liu Y C, Gao Z L, *et al.* Efficiency and mechanism of adsorption for imidacloprid removal from water by Fe-Mg co-modified water hyacinth-based biochar: Batch adsorption, fixed-bed adsorption, and DFT calculation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 330: 125235.
- [30] Abdin Y, Usman A, Ok Y S, *et al.* Competitive sorption and availability of coexisting heavy metals in mining-contaminated soil: Contrasting effects of mesquite and fishbone biochars [J]. *Environmental Research*, 2020, 181: 108846.
- [31] Zhou J R, He Y J, Huang L K, *et al.* Preparation of magnetic biochar from macadamia nutshell pretreated by FeCl₃-assisted mechanochemical activation for adsorption of heavy metals [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(4): 113122.
- [32] Li Y C, Wang S J, Ouyang X F, *et al.* Acetate anions intercalated Fe/Mg-layered double hydroxides modified biochar for efficient adsorption of anionic and cationic heavy metal ions from polluted water [J]. *Chemosphere*, 2024, 362: 142652. ■