

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2024.06.002

耐溶剂聚酰亚胺/聚醚酰亚胺复合纳滤膜的制备及其性能

丁晓莉, 崔浩然, 张 良, 范晓倩, 程显昀, 赵红永
(天津工业大学 省部共建分离膜与膜过程国家重点实验室, 天津 300387)

摘要: 为了提升纳滤膜在有机溶剂体系使用过程中的耐受性, 选用 O, O'-二(2-氨基丙基)聚丙二醇-嵌段-聚乙二醇-嵌段-聚丙二醇和均苯四甲酰氯作为两相单体, 在聚醚酰亚胺超滤基膜上发生界面聚合反应制备耐溶剂复合纳滤膜, 再选用 O, O'-二(2-氨基丙基)聚丙二醇-嵌段-聚乙二醇-嵌段-聚丙二醇作为交联剂对复合膜进行交联改性处理; 将交联膜浸泡在丙酮溶剂中以探究交联膜的耐溶剂性能。结果表明: 复合纳滤膜被成功交联改性, 且交联后膜表面的致密程度增加; 亲水性也有所提升, 接触角下降 29%; 交联前, 丙酮溶胀后膜截留率下降 70%, 交联后膜截留率仅仅下降 5%, 纳滤膜的耐溶剂性能有很大提升。

关键词: 耐溶剂; 聚酰亚胺/聚醚酰亚胺复合纳滤膜; 界面聚合; 交联改性

中图分类号: TS102.54; TQ427.26

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2024)06-0009-06

Preparation and performance of solvent-resistant polyimide/polyetherimide composite nanofiltration membrane

DING Xiaoli, CUI Haoran, ZHANG Liang, FAN Xiaoqian, CHENG Xianyun, ZHAO Hongyong

(State Key Laboratory of Separation Membranes and Membrane Processes, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In order to improve the organic solvent resistance of nanofiltration membranes, O, O'-bis(2-aminopropyl) polypropylene glycol-block-polyethylene glycol-block-polypropylene glycol and pyromellitic chloride were selected as monomers to conduct interfacial polymerization on the polyetherimide ultrafiltration membrane to prepare solvent resistant composite nanofiltration membrane. Then, O, O'-bis(2-aminopropyl) polypropylene glycol-block-polyethylene glycol-block-polypropylene glycol was selected as the crosslinking agent to modify the composite membrane. The prepared crosslinked membrane was immersed in acetone solvent to investigate its solvent resistance. The results show that the composite nanofiltration membrane is successfully crosslinked and modified, and the compactness of the membrane surface increases after crosslinking; the hydrophilicity of the membrane surface has also been improved, with a 29% decrease in the contact angle. Before crosslinking, the membrane rejection decreases by 70% after acetone swelling, and that of the crosslinked membrane only decreases by 5%. The solvent resistance of the nanofiltration membrane is greatly improved.

Key words: solvent resistance; polyimide/polyetherimide composite nanofiltration membrane; interfacial polymerization; crosslinking modification

近年来, 纳滤膜在各领域得到了广泛的应用, 如: 水质软化、有机污染物去除、重金属离子过滤、工业污水及生活污水净化与海水淡化等^[1-5]。研究者们对纳滤膜各种性能如渗透分离性能、化学稳定性、抗污染性能的研究更加深入。将纳滤膜的应用从水体系拓展到有机溶剂体系中, 首要解决的问题就是使纳滤膜具有耐溶剂的性能, 在操作过程中才能增强使用寿命, 降

低成本, 同时避免使纳滤膜发生溶胀甚至是溶解现象, 保证纳滤膜在运行过程中对有机溶剂的化学稳定性^[6-7]。纳滤膜抗污染性的提升在实际操作中具有重要意义, 可以使纳滤膜在长期操作中维持高渗透分离性能, 提升处理效率^[8]。

纳滤膜材料分为无机纳滤膜和有机纳滤膜。无机膜通常由具有优秀稳定性的氧化物制成, 如氧化锆、

收稿日期: 2023-05-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21978214)

通信作者: 丁晓莉(1980—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为气体膜分离。E-mail: dingxiaoli@tiangong.edu.cn

氧化铝、二氧化钛等无机材料,制得的无机膜具有优异的力学性能、化学稳定性、耐热性能。但无机膜存在缺乏韧性、脆性极大的缺点,因此难以进行大批量产业化生产,并且相关的设备与工艺复杂,价格高昂,经济收益较低^[9]。同时无机材料自身的亲水性一定程度上限制了其在耐溶剂纳滤(SRNF)膜中的应用,使得制成的无机 SRNF 膜对于非极性溶剂渗透通量不高。虽然目前学术界对无机纳滤膜的研究比较活跃,但由于无机膜固有的这些缺陷,无机膜在大规模产业化与实际应用中远远不如有机纳滤膜^[10-12]。用于制备有机 SRNF 膜的聚合物材料通常含有苯环等芳香族基团或酰亚胺键等刚性结构,这些结构单元赋予了聚合物材料一定的耐溶剂性能^[13]。但聚合物本身结构带来的耐溶剂性能有限,一般只能应对特定的溶剂与环境,不具有普适性,无法满足 SRNF 膜的需求^[14]。

目前,使纳滤膜提高耐溶剂性能的方法有化学交联法、有机-无机杂化法、构建中间层法等方法。其中,化学交联法的应用最为广泛。董香灵等^[15]采用多种小分子二胺作为交联剂,包括乙二胺、己二胺、1,3-二氨基-2-羟基丙烷,对不同分子质量的聚乙烯亚胺进行交联,探讨其对聚酰亚胺(PI)中空纤维纳滤膜分离性能的影响,发现交联改性后,PI 中空纤维纳滤膜耐溶剂性能均得到了提升。Li 等^[16]在 PI 超滤基膜上使用掺多巴胺的间苯二胺水溶液和均苯四甲酰氯(BTAC)溶液进行界面聚合,然后进行酰亚胺化过程、己二胺化学交联以及 N,N-二甲基甲酰胺溶剂活化工序,制备薄膜复合纳滤膜。在 80 °C 条件下,将耐溶剂纳滤膜浸泡在 N,N-二甲基甲酰胺等强极性溶剂中 2 周后仍具有良好的性能,对染料罗丹明 B 的截留率仍可达 98%。

本文选择 PI 作为纳滤膜的功能层,它具有稳定的酰亚胺环结构及主链上的芳香族基团使得其分子链具有较强的刚性,从而赋予了其优异的综合性能^[17],通过交联还可进一步提升其在有机溶剂中的耐溶剂性能^[18]。本课题组在之前的工作中选用 O,O'-二(2-氨基丙基)聚丙二醇-嵌段-聚乙二醇-嵌段-聚丙二醇(Jeffamine)和均苯三甲酰氯作为界面聚合单体制备了具有耐溶剂性能的纳滤膜^[19]。本文根据文献[20]制备 BTAC,选用耐溶剂材料聚醚酰亚胺(PEI)为基膜,选用 Jeffamine 为水相单体、BTAC 为有机相单体进行界面聚合,在 PEI 超滤基膜表面制备了 PI/PEI 复合纳滤膜。由于 Jeffamine 具有抑制疏水性大分子如蛋白质吸附的性质被广泛应用到分离膜的抗污染领域中^[21],所以本文再选用 Jeffamine 对膜表面进行交联改性,使纳滤膜具备一定的耐溶剂以及抗污染性能。

1 实验部分

1.1 实验材料与仪器

实验材料:聚醚酰亚胺,宝丰塑化公司;聚乙二醇,上海润捷化学试剂有限公司;N,N-二甲基乙酰胺、丙酮、乙醇,天津市风船化学试剂科技有限公司;均苯四甲酰氯,实验室自制;Jeffamine,上海西格玛贸易有限公司;正己烷,天津市科密欧化学试剂有限公司;硫酸钠,天津市大茂化学试剂厂;腐殖酸,天津市光复科技发展有限公司。

实验器材:KQ2200B 型超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司;AR2140 型分析天平,上海浦春计量仪器有限公司;202-0 型电热真空干燥箱,北京市永光明医疗仪器公司;Nicolet i S50 型傅里叶红外光谱仪,NEXSA 型 X-射线光电子能谱仪,美国赛默飞世尔科技公司;界面聚合装置,自制;DDS-11A 型电导率仪,上海今迈仪器仪表有限公司;JC-2000C1 型接触角测定仪,上海晨光数字技术设备有限公司;GeminiSEM 500 型扫描电子显微镜,英国卡尔蔡司有限公司。

1.2 PI/PEI 复合纳滤膜的制备

将一定比例的聚乙二醇、PEI 和 N,N-二甲基乙酰胺配制成铸膜液,通过相转化法制得 PEI 基膜。在 PEI 基膜上界面聚合制备 PI/PEI 复合纳滤膜,制备条件:Jeffamine 质量分数为 2%,静置吸附时间为 2 min;均苯四甲酰氯质量分数为 0.1%,聚合反应时间 60 s;热亚胺化温度 60 °C,时间为 10 min。

1.3 复合纳滤膜的交联改性

配置体积分数为 10%的 Jeffamine 水溶液,将复合膜浸泡在溶液里,交联 48 h 后取出。Jeffamine 的胺基与酰亚胺基团发生反应,使其转化为酰胺基团,交联示意如图 1 所示。交联反应可以使膜形成稳定的三维立体网状结构,进一步提升膜的耐溶剂性能。

1.4 结构表征和性能测定

(1) 红外光谱分析:采用傅里叶变换红外光谱仪分别对交联改性前后的复合膜表面的分子结构进行定性分析。

(2) X-射线光电子能谱分析:使用 X 射线光电子能谱分析仪(XPS)对交联前后膜表面的元素扫描得到谱图,利用元素浓度和信号强度的对应关系来进行定量分析。以 Al-K_α 作为 X 射线的光源,能量 1 486.6 eV,通能 93.3 eV,高压 14 kV,真空度 1.2×10⁻⁸ Torr(1 Torr=133 Pa)。将样品膜剪至合适大小后用导电胶贴样品台上,并安装好样品托,然后将样品托放入 XPS 能谱分

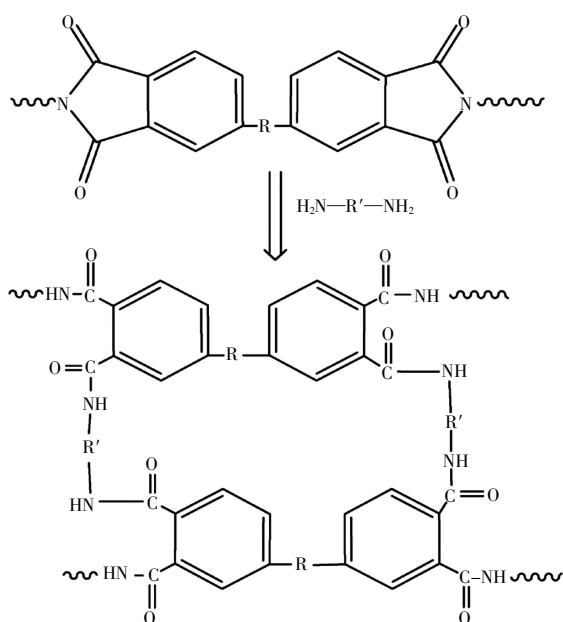


图1 交联示意

Fig. 1 Crosslinking schematic

析仪的样品池内,开启泵将分析仪抽至真空后进行测试,采集 Cls、NIs、OIs 的扫描图谱。

(3) 扫描电镜分析:采用扫描电子显微镜(SEM)对基膜、交联膜表面及断面的微观形貌进行分析。断面样品膜的制备是将膜放在液氮中充分冷却后淬断,将膜表面平整地贴在样品台的表面上,断面样品膜则贴在样品台的两侧后进行镀金,在加速电压下观察微观形貌。

(4) X-射线衍射仪分析:采用 X 射线衍射仪(XRD)对界面聚合膜和交联膜的链段间距进行测试。设置扫描范围 $5^{\circ}\sim 40^{\circ}$,扫描速率控制在 $2^{\circ}/\text{min}$ 。高分子链段的活动性是通过聚合物的链段间距体现的,链段间距可通过布拉格方程计算,具体如式(1)所示:

$$d_s = \frac{\lambda_0}{2\sin\theta_s} \quad (1)$$

式中: λ_0 (0.154 nm) 为铜靶的波长; θ_s 为衍射峰的角度 ($^{\circ}$)。

(5) Zeta 电位测定:膜的渗透分离性能与膜本身的孔径及电负性大小是密切相关的,本文对交联膜的 Zeta 电位进行测试。将样品膜用胶带固定在测试样品池内,测试前先对仪器进行清洗,清洗后将清洗池替换成样品池插入到分析仪接口处,测试时使用 1 mmol/L 的 KCl 电解质溶液。首先调整样品池的狭缝,随后调整要测试的 pH 范围,每张膜反复测试 3 次求平均值。纳滤膜的 Zeta 电位可根据 Helmholtz-Smoluchowski 方程求得,方程如式(2)所示:

$$\zeta = \frac{4\pi\eta}{\varepsilon} \times \frac{UX}{\Delta P} \times G \quad (2)$$

式中: η 为介质黏度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$); ε 为介电常数 (F/m); U 为流动电位 (V); X 为电导率 (S/m); ΔP 为压力差 (Pa); ζ 为电位差 (V); G 为设备修正因子。

(6) 膜接触角分析:将干燥后的复合膜、交联膜用胶带平整地贴在载玻片上,选用合适的针头接入膜接触角测试装置中,采用躺滴法在室温下测试,每滴纯水体积约为 $5\ \mu\text{L}$ 。测试时,每张膜选取不同的 5 个位置进行测试,求平均值。

(7) 复合膜截留分子质量和平均孔径测试:使用 200 至 1 000 u 的聚乙二醇 (PEG) 溶液测试复合膜的截留分子质量。配置 0.1 g/L 不同分子质量的 PEG 溶液,在 $25\ ^{\circ}\text{C}$ 、0.5 MPa 下进行截留测试。使用总有机碳分析仪测试进料液和渗透液的 PEG 浓度。膜的斯托克斯半径可根据式(3)进行计算:

$$r_p = 16.73 \times 10^{-3} \times M^{0.557} \quad (3)$$

式中: M 为 PEG 溶液截留率为 90% 时 PEG 的分子质量 (u); r_p 为斯托克斯半径 (nm)。

(8) 纯水通量测试:复合膜纯水通量使用如图 2 所示的装置进行测试。

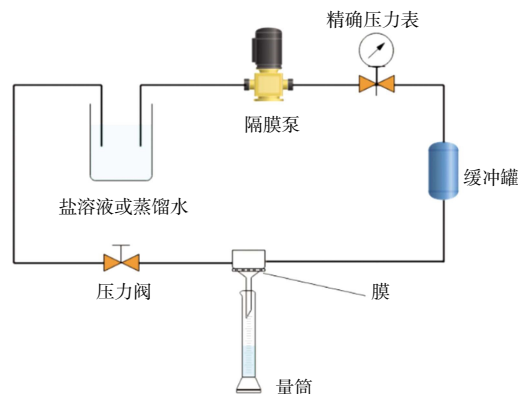


图2 膜性能测试装置

Fig.2 Testing device for performance of membrane

由图 2 可知,具体操作步骤为:首先将样品膜剪成合适的大小放入膜池通过管子接入到装置中,原液侧烧杯中放入一定体积的纯水,将压力表调整到 0.5 MPa 下预压 30 min,随后在该压力下测试,通过测量一定时间内渗透液侧的纯水体积 V (L),根据公式(4)计算复合纳滤膜的纯水通量:

$$F = \frac{V}{A \cdot t} \quad (4)$$

式中: F 为纯水通量 ($\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$); V 是透过液体积 (L); A 为膜的有效面积 (m^2); t 为测试时间 (h)。

(9) 截盐率测试:配置 1 g/L 硫酸钠盐溶液,使用图 2 装置测试复合纳滤膜对盐的截留率。原液侧烧杯中放入一定体积的盐溶液,调整压力到 0.5 MPa 预压 30 min 后在此压力下测试,用数显电导率仪测试原液与透过液的电导值(由于电导值易受温度影响,测试温度控制在 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$)。根据盐溶液的标准曲线计算出原液与透过液的浓度,再根据公式(5)计算出平板纳滤复合膜的脱盐率:

$$R = (1 - \frac{C_P}{C_F}) \times 100\% \quad (5)$$

式中: R 为截留率(%); C_P 为透过液质量浓度(g/L); C_F 为原液质量浓度(g/L)。

(10) 耐溶剂性能测定:将复合膜、交联膜分别浸泡在丙酮溶液中 3 h,在 25°C 、0.5 MPa 下,以硫酸钠溶液作为分离体系,对膜的耐溶剂性能进行考察。

2 结果与讨论

2.1 红外光谱

复合膜交联前后的红外光谱如图 3 所示。

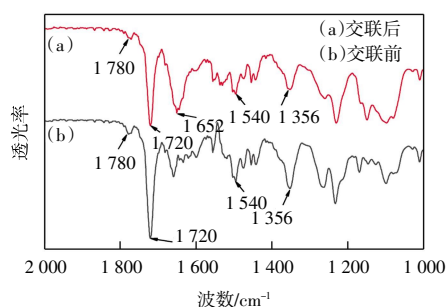


图 3 交联膜的 FTIR 光谱

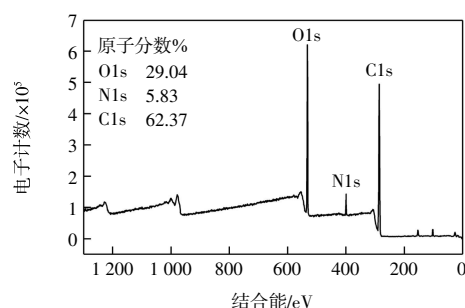
Fig.3 FTIR spectral analysis of crosslinked membrane

由图 3 可以看出,复合膜在进行 Jeffamine 化学交联之后,在 1356 、 1720 和 1780 cm^{-1} 处的属于聚酰亚胺、聚醚酰亚胺的特征峰峰值明显减弱,且在 1540 和 1652 cm^{-1} 处出现了聚酰胺的 N—H(酰胺 II) 伸缩振动峰和 C=O(酰胺 I) 伸缩振动峰,这些均表明了复合膜与 Jeffamine 的成功交联。

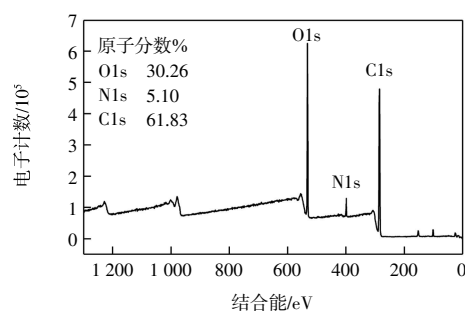
2.2 膜表面元素组成

通过 XPS 谱图对界面后复合膜及交联膜元素的组成进行分析,结果如图 4 所示。

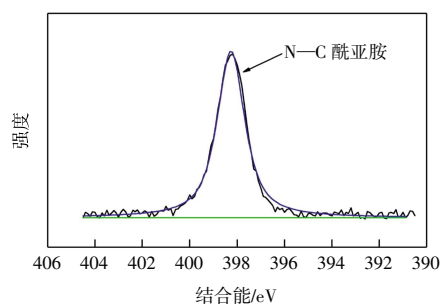
由图 4 可以看出,发生化学交联反应后膜表面氮元素的含量提升,证明了复合纳滤膜与二胺单体 Jeffamine 发生了化学交联反应,成功地将 Jeffamine 分子引入复合膜高分子链中。复合膜的 N1s 特征峰位于 398.4 eV , 对应复合膜中酰亚胺的 N—C 键; 而经



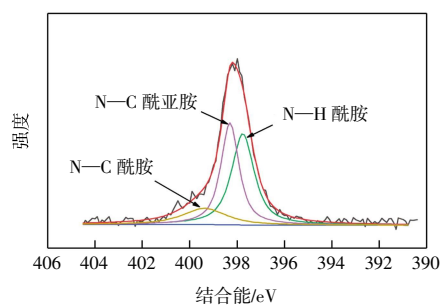
(a) 复合膜表面元素含量分布



(b) 交联膜表面元素含量分布



(c) 复合膜化学键基团含量



(d) 交联膜化学键基团含量

图 4 复合膜及交联膜的 XPS 能谱

Fig.4 XPS of composite membrane and crosslinked membrane

Jeffamine 溶液交联改性后,交联膜在 397.8 、 398.8 、 399.5 eV 处出现特征峰,分别对应交联之后酰胺键中的一N—H、酰亚胺的 N—C 键和酰胺键 $\text{O}=\text{C}-\text{NH}-\text{C}$ 。进一步可以得出,Jeffamine 溶液与复合膜发生交联反应,酰亚胺键被打开变成酰胺键,最终达到 Jeffamine 交联改性复合膜的效果。

2.3 表面形貌分析

使用扫描电子显微镜观察基膜和交联膜表面与断面的微观形貌,结果如图5所示。

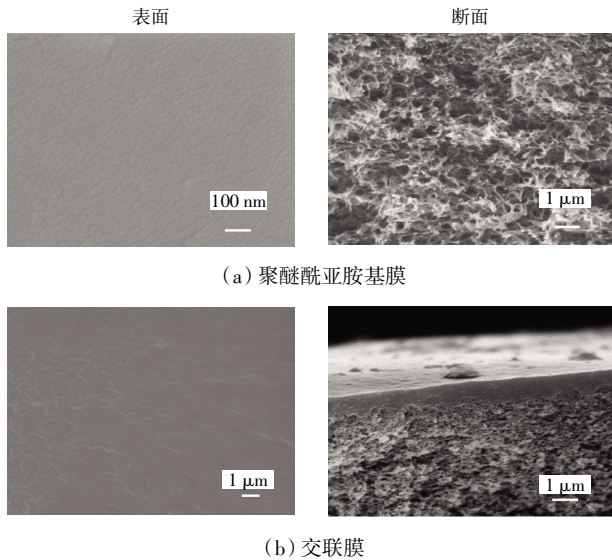


图5 聚醚酰亚胺基膜和交联膜的SEM图

Fig.5 SEM images of polyetherimide-based membrane and crosslinked membrane

由图5可以看出,聚醚酰亚胺基膜表面致密程度较高,无明显大孔,膜的结构为海绵状孔;交联膜表面致密,无明显大孔,分离层厚度约为650 nm。

2.4 XRD 谱图

交联前后膜的XRD谱图如图6所示。

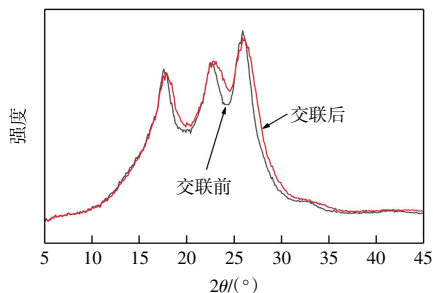


图6 交联前后膜的XRD光谱

Fig.6 XRD diagram of membranes before and after crosslinking

由图6可以看出,经过Jeffamine对纳滤膜的交联,交联膜的尖峰向右偏移,衍射峰角度值变大,根据式(1)可得出 d_s 值变小,进而证明分子的平均链间距离减小。这说明膜经过交联后,分子链段堆砌更加紧密,交联膜表面致密程度增加,有可能会使交联后的膜水通量减小。

2.5 膜表面亲水性能和电荷性质

通过对交联前后膜表面水接触角的测试,发现经过交联改性后的膜表面的静态水接触角相较交联前

减小,数值从 $69.1^\circ \pm 0.9^\circ$ 减小为 $49.2^\circ \pm 0.5^\circ$,证明了膜亲水性能得到进一步提高;同时交联改性使交联膜更易被水浸润,这是由于交联反应将分子链段中的酰亚胺基团转化成酰胺基团,导致膜表面亲水性增强^[22]。

膜表面的Zeta电位如图7所示。

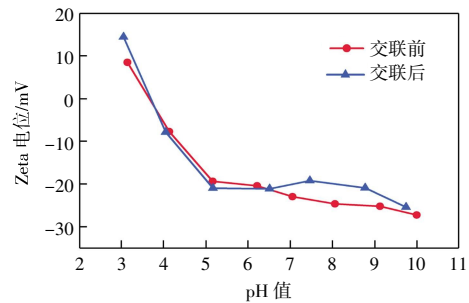


图7 复合膜及交联膜表面Zeta电位随pH值的变化

Fig.7 Change of Zeta potential with pH value on surface of composite membrane and crosslinked membrane

由图7可知,交联前后膜都呈电负性。与交联前膜表面的Zeta电位进行对比可知,pH值等于7时,交联后膜表面Zeta电位的数值减小,证明交联后的膜比交联前的膜带有更多的正电荷,这主要是由于经过交联处理的膜结构中引入许多氨基基团,从而使得膜表面带有许多正电荷。这一结果导致交联后的膜对呈负电性的盐的截留率较交联前略微变小。

2.6 交联膜平均孔径

通过不同分子质量PEG对复合纳滤膜的截留测试,发现PEG溶液截留率为90%时PEG的分子质量为800 u,根据式(3)进行计算,得到复合膜的斯托克斯半径为0.69 nm。通过不同分子质量PEG对交联膜的截留测试,发现PEG溶液截留率为90%时PEG的分子质量为600 u,计算得到交联膜的斯托克斯半径为0.59 nm。与XRD结果相同,交联导致膜结构更为致密,会影响其渗透分离性能。一般来说,水通量会减小,因为截留率还与水通量有关,孔径对其既能产生正面影响也会导致负面影响。

2.7 交联膜耐溶剂性能

图8所示为交联前后复合膜的耐溶剂性能。由图8可以看出,交联前膜浸泡丙酮溶剂后相较于浸泡之前水通量明显变大,增幅超过190%,截留率明显减小,降幅达65%。经过交联反应后,将交联膜浸泡在丙酮溶剂中,测试膜的渗透分离性能,发现相较于未浸泡的交联膜,浸泡后的交联膜水通量略微增大,截留率变化较小。交联产生的永久网络结构有助于提高耐溶剂性能,有机溶剂难以溶胀聚合物,对膜孔径的影响较小,所以截留率变化较小。相对来说,水通量的变化要更大一些,这可能是交联改性后,膜表面亲水性增加所引起的。

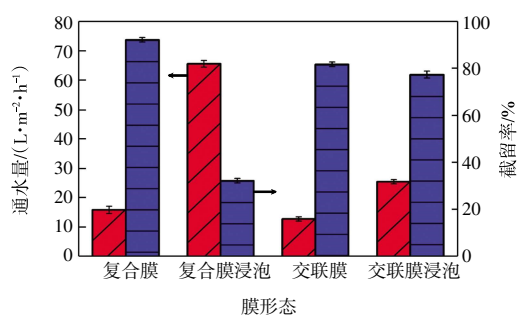


图 8 复合膜及交联膜的耐溶剂性能

Fig.8 Solvent resistance performance of composite and crosslinked membranes

3 结 论

本文选用 Jeffamine 对有一定耐溶剂性能的 PI/PEI 复合纳滤膜表面进行化学交联改性,结果表明:

(1) Jeffamine 和 PI/PEI 复合纳滤膜成功发生交联,交联后膜的致密化程度增加。

(2) 交联后分离层的厚度约 650 nm,且交联膜为荷负电性纳滤膜。

(3) 化学交联使纳滤膜耐溶剂性能有很大提升,使其可以应用在有机溶剂体系分离领域。

参考文献:

- [1] SETIAWAN L, SHI L, WANG R. Dual layer composite nanofiltration hollow fiber membranes for low-pressure water softening[J]. *Polymer*, 2014, 55(6): 1367-1374.
- [2] 庞金钊, 李景义, 王倩, 等. 纳滤膜在盐化工废水处理中的应用研究[J]. *天津工业大学学报*, 2010, 29(5): 6-9.
PANG J Z, LI J Y, WANG Q, et al. Study on treatment of salt chemical industry wastewater with nanofiltration membrane[J]. *Journal of Tiangong University*, 2010, 29(5): 6-9 (in Chinese).
- [3] 张宇峰, 陈冰倩, 张健. 乙酰乙酸纤维素酯疏松纳滤膜的制备及染料/盐分离[J]. *天津工业大学学报*, 2023, 42(3): 1-6.
ZHANG Y F, CHEN B Q, ZHANG J. Preparation and dye/salt separation of cellulose acetoacetate loose nanofiltration membrane[J]. *Journal of Tiangong University*, 2023, 42(3): 1-6 (in Chinese).
- [4] FIGOLI A, CASSANO A, CRISCUOLI A, et al. Influence of operating parameters on the arsenic removal by nanofiltration[J]. *Water Research*, 2010, 44(1): 97-104.
- [5] LAU W J, ISMAIL A F. Polymeric nanofiltration membranes for textile dye wastewater treatment: Preparation, performance evaluation, transport modelling, and fouling control: A review[J]. *Desalination*, 2009, 245(1/2/3): 321-348.
- [6] WHU J A, BALTZIS B C, SIRKAR K K. Nanofiltration stud-

- ies of larger organic microsolute in methanol solutions[J]. *Journal of Membrane Science*, 2000, 170(2): 159-172.
- [7] PRISKE M, LAZAR M, SCHNITZER C, et al. Recent applications of organic solvent nanofiltration[J]. *Chemie Ingenieur Technik*, 2016, 88(1/2): 39-49.
- [8] VANDEZANDE P, GEVERS L E M, VANKELECOM I F J. Solvent resistant nanofiltration: Separating on a molecular level[J]. *Chemical Society Reviews*, 2008, 37(2): 365-405.
- [9] GUIZARD C, AYRAL A, JULBE A. Potentiality of organic solvents filtration with ceramic membranes: A comparison with polymer membranes[J]. *Desalination*, 2002, 147(1/2/3): 275-280.
- [10] TSURU T, NARITA M, SHINAGAWA R, et al. Nanoporous titania membranes for permeation and filtration of organic solutions[J]. *Desalination*, 2008, 233(1/2/3): 1-9.
- [11] DOBRAK A, VERRECHT B, VAN DEN DUNGEN H, et al. Solvent flux behavior and rejection characteristics of hydrophilic and hydrophobic mesoporous and microporous TiO₂ and ZrO₂ membranes[J]. *Journal of Membrane Science*, 2010, 346(2): 344-352.
- [12] BUEKENHOUDT A, BISIGNANO F, DE LUCA G, et al. Unravelling the solvent flux behaviour of ceramic nanofiltration and ultrafiltration membranes[J]. *Journal of Membrane Science*, 2013, 439: 36-47.
- [13] VANDEZANDE P, GEVERS L E M, VANKELECOM I F J. Solvent resistant nanofiltration: Separating on a molecular level[J]. *Chemical Society Reviews*, 2008, 37(2): 365-405.
- [14] GOH K, KARAHAN H E, WEI L, et al. Carbon nanomaterials for advancing separation membranes: A strategic perspective[J]. *Carbon*, 2016, 109: 694-710.
- [15] 董香灵, 于海军, 张靖昱, 等. 交联法制备聚酰亚胺中空纤维纳滤膜[J]. *膜科学与技术*, 2018, 38(6): 69-75.
DONG X L, YU H J, ZHANG J Y, et al. Preparation of polyimide hollow fiber nanofiltration membranes by crosslinking[J]. *Membrane Science and Technology*, 2018, 38(6): 69-75 (in Chinese).
- [16] LI C, LI S X, LV L, et al. High solvent-resistant and integrally crosslinked polyimide-based composite membranes for organic solvent nanofiltration[J]. *Journal of Membrane Science*, 2018, 564: 10-21.
- [17] DE ABAJO J, DE LA CAMPA J G. Processable aromatic polyimides[C]//*Advance in Polymer Science*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999: 23-59.
- [18] VANHERCK K, KOECKELBERGHS G, VANKELECOM I F J. Crosslinking polyimides for membrane applications: A review[J]. *Progress in Polymer Science*, 2013, 38(6): 874-896.
- [19] 康特. PEO 亲水型聚酰胺纳滤膜制备与研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2017.
KANG T. Preparation and study of PEO hydrophilic polyamide nanofiltration membrane[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2017 (in Chinese).

(下转第 21 页)

- biorenewable chemical industry[J]. *The Plant Journal: For Cell and Molecular Biology*, 2008, 54(4): 536-545.
- [8] GANDINI A, LACERDA T M. From monomers to polymers from renewable resources: Recent advances[J]. *Progress in Polymer Science*, 2015, 48: 1-39.
- [9] TONG X L, MA Y, LI Y D. Biomass into chemicals: Conversion of sugars to furan derivatives by catalytic processes[J]. *Applied Catalysis A: General*, 2010, 385(1/2): 1-13.
- [10] SWEYGERS N, HARRER J, DEWIL R, et al. A microwave-assisted process for the *in situ* production of 5-hydroxymethylfurfural and furfural from lignocellulosic polysaccharides in a biphasic reaction system[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 187: 1014-1024.
- [11] WANG G Q, JIANG M, ZHANG Q, et al. Polyesters containing furan rings based on renewable resources[J]. *Progress in Chemistry*, 2018, 30(6): 719.
- [12] SHELDON R A. Green and sustainable manufacture of chemicals from biomass: State of the art[J]. *Green Chemistry*, 2014, 16(3): 950-963.
- [13] GANDINI A, LACERDA T M, CARVALHO A J F, et al. Progress of polymers from renewable resources: Furans, vegetable oils, and polysaccharides[J]. *Chemical Reviews*, 2016, 116(3): 1637-1669.
- [14] YANG Y D, WANG Y Y, LI S P, et al. Selective hydrogenation of aromatic furfurals into aliphatic tetrahydrofurfural derivatives[J]. *Green Chemistry*, 2020, 22(15): 4937-4942.
- [15] CHO A, BYUN S, CHO J H, et al. AuPd-Fe₃O₄ nanoparticle-catalyzed synthesis of furan-2,5-dimethylcarboxylate from 5-hydroxymethylfurfural under mild conditions[J]. *ChemSusChem*, 2019, 12(10): 2310-2317.
- [16] SOUSA A F, VILELA C, FONSECA A C, et al. Biobased polyesters and other polymers from 2,5-furandicarboxylic acid: A tribute to furan Excellency[J]. *Polymer Chemistry*, 2015, 6(33): 5961-5983.
- [17] GANDINI A, COELHO D, GOMES M, et al. Materials from renewable resources based on furan monomers and furan chemistry: Work in progress[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2009, 19(45): 8656-8664.
- [18] GANDINI A, SILVESTRE A J D, NETO C P, et al. The furan counterpart of poly(ethylene terephthalate): An alternative material based on renewable resources[J]. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2009, 47(1): 295-298.
- [19] GOMES M, GANDINI A, SILVESTRE A J D, et al. Synthesis and characterization of poly(2,5-furan dicarboxylate)s based on a variety of diols[J]. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2011, 49(17): 3759-3768.
- [20] FENG Y C, JIA W L, YAN G H, et al. Insights into the active sites and catalytic mechanism of oxidative esterification of 5-hydroxymethylfurfural by metal-organic frameworks-derived N-doped carbon[J]. *Journal of Catalysis*, 2020, 381: 570-578.
- [21] 赫爽. 生物基聚呋喃二甲酸二醇酯的合成及纤维的制备与表征[D]. 上海: 东华大学, 2022.
HE S. Synthesis of bio-based polyfuran dicarboxylate and preparation and characterization of fibers[D]. Shanghai: Donghua University, 2022 (in Chinese).
- [22] KNOOP R J I, VOGELZANG W, VAN HAVEREN J, et al. High molecular weight poly(ethylene-2,5-furanoate); critical aspects in synthesis and mechanical property determination[J]. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2013, 51(19): 4191-4199.
- [23] ZHOU W D, WANG X W, YANG B, et al. Synthesis, physical properties and enzymatic degradation of bio-based poly(butylene adipate-co-butylene furandicarboxylate) copolymers[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2013, 98(11): 2177-2183.

本文引文格式:

- 苏坤梅,张祥辉,刘成志,等. 生物基呋喃聚酯纤维的制备与表征[J]. 天津工业大学学报, 2024, 43(6): 15-21.
- SU K M, ZHANG X H, LIU C Z, et al. Preparation and characterization of bio-based furan polyester fiber[J]. *Journal of Tiangong University*, 2024, 43(6): 15-21 (in Chinese).

(上接第14页)

- [20] CHERN Y T, CHEN L W. Interfacial polyfunctional condensation: Effect of the reaction conditions[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1991, 42(9): 2543-2550.
- [21] KALTALI G, KALIPCILAR H, CULFAZ-EMECEN P Z. Effect of three different PEO-containing additives on the fouling behavior of PES-based ultrafiltration membranes[J]. *Separation and Purification Technology*, 2015, 150: 21-28.
- [22] 孟新迪. PA/PI耐溶剂复合纳滤膜的制备与性能研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2018.
MENG X D. Preparation and performance study of PA/PI solvent resistant composite nanofiltration membrane[D]. Dongying: China University of Petroleum (Huadong), 2018 (in Chinese).
- 本文引文格式:
丁晓莉,崔浩然,张良,等. 耐溶剂聚酰亚胺/聚醚酰亚胺复合纳滤膜的制备及其性能[J]. 天津工业大学学报, 2024, 43(6): 9-14, 21.
DING X L, CUI H R, ZHANG L, et al. Preparation and performance of solvent-resistant polyimide/polyetherimide composite nanofiltration membrane[J]. *Journal of Tiangong University*, 2024, 43(6): 9-14, 21 (in Chinese).