

织物增强型正渗透复合膜的制备、表征及性能研究

赵运涛^{1,2} 王 啸¹ 任以伟^{1*} 裴得胜¹

(1.中国科学院重庆绿色智能技术研究院,重庆 400714;2.中国科学院大学,北京 100049)

摘 要 以高强度、高开孔率、低厚度聚酯机织物为新型增强基材,首次采用双刮刀共涂布法,结合铸膜液黏度选择,实现了聚砜铸膜液在机织物表面上的超薄、低缺陷涂布,并通过非溶剂致相分离和界面聚合,成功制备了织物增强型薄层复合正渗透膜。该膜具有活性层-织物嵌入式多孔支撑层两层结构,整体厚度约 60 μm ,拉伸强度和杨氏模量分别约为 90MPa 和 370MPa。该膜结构强度满足了正渗透膜规模化生产与使用的要求,具有良好的实际应用价值。此外,由于增强机织物嵌入多孔支撑层内部,所制备的正渗透复合膜内浓差极化现象较轻,结构参数低至 303.0 μm ,以 1.0mol/L 的 NaCl 溶液作汲取液,正渗透(FO)模式下膜渗透通量可达 21.8LMH。

关键词 织物,双刮刀,正渗透膜,结构参数,内浓差极化

Preparation, characterization and performance of fabric-reinforced FO composite membrane

Zhao Yuntao^{1,2} Wang Xiao¹ Ren Yiwei¹ Pei Desheng¹

(1.Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract The polyester woven fabric with high strength, high porosity and low thickness was explored as a new reinforcement material for polymeric membrane. An ultrathin and low-defect coating of polysulfone membrane casting solution with suitable viscosity on the fabric surface was realized via double-blade casting method for the first time. Then, through non-solvent induced phase separation and interfacial polymerization, fabric-reinforced thin film composite membrane was successfully developed for forward osmosis (FO). The as-prepared membrane consisted of polyamide active layer and fabric-embedded polysulfone support layer and had an overall thickness of 60 μm . Its tensile strength and Young's modulus were about 90MPa and 370MPa respectively, which was practical for designing commercially available FO membrane. Furthermore, the fabricated FO membrane had low-level internal concentration polarization because the fabric was integrated into the polysulfone matrix instead of being a separate backing layer on the bottom. The optimal FO membrane achieved a structural parameter of as low as 303.0 μm and gains an osmotic water flux of 21.8 LMH in FO mode when using 1.0mol/L NaCl draw solution.

Key words woven fabric, double-blade casting, FO membrane, structural parameter, internal concentration polarization

正渗透(FO)是目前最前沿的膜分离技术之一。FO 过程以膜两侧溶液自身渗透压差为驱动力,使水分子自发地从低渗透压原料液/进水侧向高渗透压汲取液侧渗透,其他分子或离子则由于膜的选择性分离作用而被截留。与传统压力驱动膜法脱盐技术相比,FO 具有常温低压运行、进水预处理要求低、膜污染轻、易清洗和水回收率高等优点^[1]。

膜材料是 FO 过程的核心部件,缺乏高性能 FO 膜是制约当前 FO 技术发展的主要瓶颈^[1]。解决 FO 膜内浓差极化所造成的低膜渗透通量问题是突破这一瓶颈的关键。内浓差极化现象会导致 FO 膜分离层汲取液一侧有效渗透压减小,使实际水通量低于理论值,构成了 FO 过程中主要的水传质阻力^[2]。薄层复合(TFC)膜是在 FO 中应用最广、综

基金项目:国家自然科学基金(51478452、51503205)

作者简介:赵运涛(1989-),男,博士研究生,从事正渗透水处理关键技术研究。

联系人:任以伟(1982-),男,研究员,从事膜技术与应用工程研究。

合性能最优的膜材料, TFC-FO 膜内浓差极化程度与基膜结构和物理化学性质密切相关^[3-4]。基于此, 研究者近年来围绕 TFC-FO 膜基膜设计与制备开展了大量研究工作, 所制备 TFC-FO 膜的内浓差极化程度有了大幅降低, 渗透通量有了显著提升。但其中绝大多数膜不含任何增强织物, 导致膜结构强度无法满足实际应用的要求。而传统压力驱动膜用增强织物——无纺布应用于 TFC-FO 膜时会引起严重的内浓差极化^[5-6]。最近有研究指出, 机织物较适用于 FO 膜的增强基材^[7]。然而, 目前有关机织物增强 TFC-FO 膜的研究非常有限, 其设计、制备及分离性能仍有较大优化空间。

本研究以聚酯(PET)机织物为增强材料, 聚砜(PSU)为多孔支撑层材料, 利用双刮刀在机织物上均匀涂布铸膜液, 通过非溶剂致相分离和界面聚合制备了机织物内嵌增强型 TFC-FO 膜, 并对其物理化学性质、形态结构和分离性能进行了详细分析研究。

1 实验部分

1.1 原料与仪器

PSU(Udel P-3500), 苏威(上海)有限公司; N-甲基吡咯烷酮(NMP, 分析纯)、正己烷(分析纯)、均苯三甲酰氯(TMC, 分析纯)、间苯二胺(MPD, 分析纯), 西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司; 氯化钠(NaCl, 分析纯), 国药集团化学试剂有限公司; PET 机织物, 上海上筛丝网制造有限公司。

旋转粘度计(LVDVII+Pro), 美国 Brookfield 公司; 液液置换法孔径分析仪(PRM-1200GL), Benelux Scientific 公司; 原子力显微镜(AFM, Dimension Icon), 美国 Bruker 公司; 台式厚度计(CH-12.7-STXS), 上海六菱仪器厂; 万能拉力试验机(HD-609A), 厦门海达精密仪器有限公司; 扫描电子显微镜(SEM, JSM-7800F), 日本 JEOL 公司; 错流 FO 装置, 自制; 电导率仪(DDSJ-308A), 上海仪电科学仪器股份有限公司; 天平(BSA6202S-CW), 德国 Sartorius 公司。

1.2 铸膜液黏度表征

采用旋转黏度计测定铸膜液黏度, 转速设为 100 r/min。

1.3 TFC-FO 膜材料制备

TFC-FO 膜基膜(以下简称基膜)制备: 将 PSU 和 NMP 按一定比例加入玻璃螺口血清瓶中, 室温下磁力搅拌至完全溶解, 静置脱泡约 24h; 利用胶带

将机织物固定于平整、洁净的玻璃板上, 采用自制刮刀将 PSU 铸膜液均匀涂布在机织物表面, 立刻将其放入 20℃ 凝固浴(实验室三级水)中进行相转化, 10min 后取出; 然后将制备好的基膜用去离子水冲洗并浸泡约 24h, 每隔约 8h 更换一次去离子水以完全去除残留在膜孔中的溶剂; 最后, 将制备的基膜保存在 4℃ 去离子水中待用。根据制备过程中 PSU 铸膜液的浓度(9%、12% 和 15%), 将制备的基膜分别记为 PSU9、PSU12 和 PSU15。

TFC-FO 膜活性层制备: 将上述所制备的基膜正面朝上固定于自制板框中, 倒入 2.0% (wt, 质量分数, 下同) 的 MPD 水溶液, 浸泡 2min 后倒掉, 用高纯氮吹扫基膜表面至干; 然后倒入 0.15% 的 TMC 正己烷溶液, 反应 1min 后倒掉, 放入 60℃ 烘箱中热处理 3min; 最后, 将制备好的 TFC-FO 膜保存在 4℃ 的去离子水中待用。根据所用基膜, 相应制备的 TFC-FO 膜分别记为 TFC/PSU9、TFC/PSU12 和 TFC/PSU15。

1.4 膜材料表征

采用干湿重法测定基膜的孔隙率(ϵ): 将去离子水中所保存的基膜截取大小适宜的膜片, 用滤纸吸掉表面多余的水, 称重记为 m_1 (g); 将湿态膜片在 60℃ 下真空干燥约 12h, 称重记为 m_2 (g); 用 NMP 将干态膜片中的 PSU 溶解去除, 再用去离子水清洗残余织物后, 将其在 60℃ 下真空干燥约 12h, 称重记为 m_3 (g)。 ϵ 按公式(1)计算。

$$\epsilon = \frac{(m_1 - m_2)/\rho_w}{(m_1 - m_2)/\rho_w + (m_2 - m_3)/\rho_p + m_3/\rho_m} \quad (1)$$

式中, ϵ 为孔隙率, %; ρ_w 为水的密度, g/mL; ρ_p 为 PSU 的密度, g/mL; ρ_m 为 PET 的密度, g/mL。

利用液液置换法孔径分析仪、原子力显微镜、台式厚度计和万能拉力试验机分别测定基膜的孔径、粗糙度、厚度和机械性能。利用扫描电子显微镜表征基膜、TFC-FO 膜的表面和断面形貌, 将充分干燥的膜样品用导电胶带固定在样品台上, 喷金处理后进行 SEM 观察。

利用自行搭建的错流 FO 装置测定所制备 TFC-FO 膜的水通量和反向盐通量, FO 单元的有效测试膜面积为 42cm²。测试过程中, 选择 FO 模式(支撑层朝向汲取液), 原料液(去离子水)和汲取液(NaCl 溶液)的错流速度同为 6.4cm/s, 通过水浴控温系统使原料液和汲取液的温度控制在 25 ± 1℃。利用电导率仪和天平分别记录原料液电导率变化和汲取液质量变化, 每隔 2min 记录一次, 总计

录时长为 30min。水通量(J_w)和反向盐通量(J_s)分别按公式(2)和公式(3)计算:

$$J_w = \frac{\Delta V}{\Delta t \times A_m} \quad (2)$$

式中, Δt 为时间,h; ΔV 为 Δt 时间内渗透水体积,L; A_m 为有效膜面积, m^2 ; J_w 为水通量, $L/(m^2 \cdot h)$ 即 LMH; J_s 为反向盐通量, $g/(m^2 \cdot h)$ 即 gMH。

$$J_s = \frac{C_t \times V_t}{A_m \times \Delta t} \quad (3)$$

式中, C_t 为经 Δt 时间原料液中汲取液溶质(NaCl)的浓度,g/L,可由记录的原料液电导率值得到; V_t 为原料液体积,L。

依据 Tiraferri 等^[8]报道的方法,由测得的不同汲取液浓度下的水通量和反向盐通量,通过拟合计算得到所制备 TFC-FO 膜的水渗系数(A)、盐渗系数(B)和结构参数(S)。

2 结果与讨论

2.1 基膜制备质量的影响因素分析

铸膜液在机织物上的高质量涂布是制备机织物内嵌增强型多孔支撑层的关键。实验发现,采用传统单刮刀一次涂布法在机织物上刮膜极易产生气泡、脱膜和针孔等缺陷,类似现象虽有少数文献提及^[9],但其产生机制尚未见报道。笔者认为,增强织物与多孔支撑层嵌入复合易出现缺陷是由制膜中铸膜液需透过织物这一特殊性所决定的。铸膜液经刮刀涂布在织物上后沿织物开孔向下流动,由于高分子铸膜液具有一定黏度,使织物孔内和织物与玻璃板之间的空气不能及时排出,最终形成气泡缺陷;铸膜液渗漏也会使织物表面上铸膜液变薄,在表面张力的作用下造成涂膜脱落。基于以上分析,笔者提出双刮刀共涂布的新型涂布方法(图 1),双刮刀共涂布中的前端刮刀涂布使机织物被铸膜液浸润,后端刮刀涂布对已形成的缺陷进行填补,使新涂布的铸膜液不再发生渗漏。实验发现,采用双刮刀共涂布法可实现铸膜液在机织物上的高质量涂布。其中铸膜液涂布厚度是影响涂膜加工的一个重要因素^[4,10]。实验发现,铸膜液有效涂布厚度越大,相转化后所得基膜卷曲收缩越严重,这可能是由于铸膜液涂布量越大则其成膜过程中产生的收缩力越大。铸膜液涂布厚度大也会增加所制备膜的内浓差极化程度,但涂布厚度过小会导致机织物上铸膜液涂覆完整性差。基于以上考虑,经过多次实验尝试,确定铸膜液有效涂布厚度以 $45\mu m$ 为宜。铸膜液黏度是影响铸膜液渗漏和涂膜稳定性的重要因素,其与铸

膜液中成膜高分子材料的浓度正相关。实验发现,PSU 铸膜液浓度过低时,即使采用双刮刀共涂布法,也难以实现铸膜液在机织物表面上的低缺陷涂布(表 1),而铸膜液浓度降低有利于减小所制备膜的内浓差极化现象^[4,11]。基于以上考虑,本研究所用铸膜液中 PSU 浓度为 12% 和 15%。

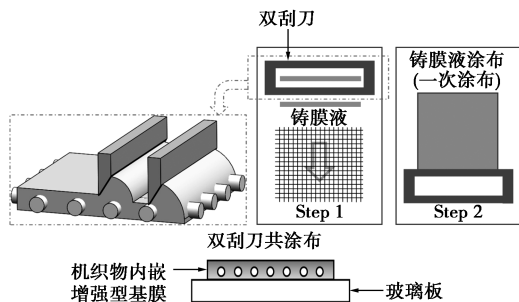


图 1 双刮刀共涂布法制备机织物内嵌增强型基膜示意图

表 1 铸膜液浓度对机织物内嵌增强型基膜制备的影响

基膜 编号	成膜高分子 材料	铸膜液浓度/ %	铸膜液黏度/ cp	基膜制备 质量
PSU9	PSU	9	64.8	差
PSU12	PSU	12	167	中
PSU15	PSU	15	434	优

2.2 基膜的物理化学性质和形态结构分析

表 2 为测得的基膜孔隙率、表面平均孔径、表面粗糙度和厚度,由表可见,PSU12 和 PSU15 基膜的孔隙率分别为 $56.1 \pm 1.3\%$ 和 $53.3 \pm 1.4\%$,与已报道的不含任何增强织物的自支撑基膜相比^[12-13],本研所得增强型基膜的整体孔隙率因机织物的引入而降低,这是由于机织物的经纬纱线不具有多孔结构。基膜表面孔径是影响 TFC-FO 膜活性层形成的一个重要因素,PSU12 和 PSU15 基膜的表面平均孔径位于超滤膜孔径范围内,有利于高质量活性层的生成^[14]。此外,由于 PSU12 基膜比 PSU15 基膜中铸膜液 PSU 含量更低,PSU12 基膜的孔隙率和表面平均孔径均大于 PSU15 基膜。表面平整是对基膜的一个基本要求,由表可见,湿态 PSU12 和 PSU15 基膜的表面平均粗糙度分别仅为 $2.9 \pm 0.1nm$ 和 $1.5 \pm 0.2nm$ 。基膜厚度与 TFC-FO 膜内浓差极化程度正相关,由表可见,本研究所制备的增强型基膜的整体厚度约 $60\mu m$,除去所用机织物的厚度(约 $50\mu m$),PSU 多孔支撑体的厚度仅约 $10\mu m$ 。由于双刮刀共涂布法的使用,铸膜液在机织物表面上实现了超薄、低缺陷涂布,并结合机织物选

型,使基膜整体厚度和 PSU 多孔支撑层厚度均得到有效控制。如图 2 所示,本研究所制备的增强型基

表 2 基膜的孔隙率、表面平均孔径、表面粗糙度和厚度

基膜 编号	孔隙率/ %	表面平均 孔径/nm	表面粗糙度/ nm	厚度/ μm
PSU12	56.1 ± 1.3	22.5 ± 2.1	2.9 ± 0.1	59.2 ± 1.4
PSU15	53.3 ± 1.4	17.0 ± 4.2	1.5 ± 0.2	61.3 ± 2.6

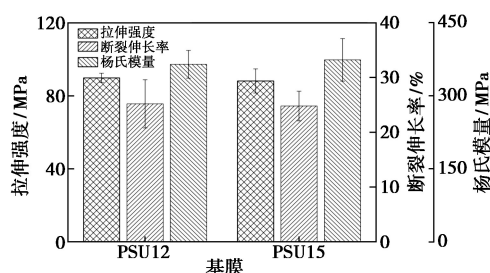


图 2 基膜的机械性能

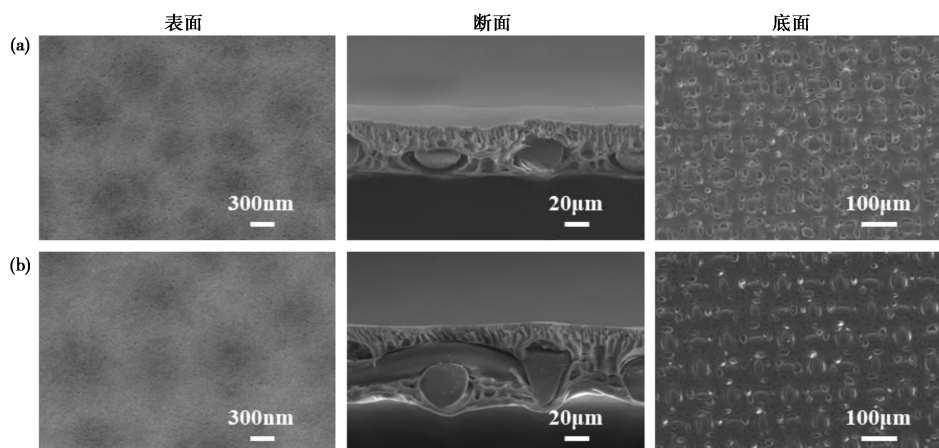


图 3 基膜表面、断面和底面的 SEM 图

[(a)PSU12;(b)PSU15]

2.3 TFC-FO 膜的形态结构分析

TFC-FO 膜的表面和断面的 SEM 图如图 4 所示,

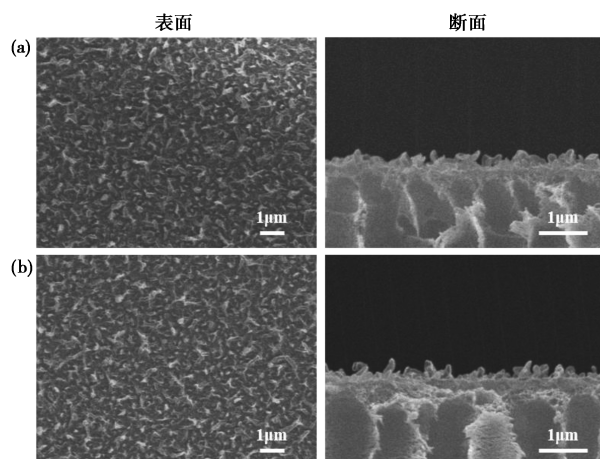


图 4 TFC-FO 膜表面和断面的 SEM 图

[(a)TFC/PSU12;(b)TFC/PSU15]

膜具有优异的机械性能,其拉伸强度(约 90MPa)和杨氏模量(约 370MPa)比自支撑基膜高近 10 倍^[15-16]。

基膜的表面、断面和底面的 SEM 图如图 3 所示,由图可见,PSU12 和 PSU15 基膜的表面形貌相似,表面孔径均在纳米级,与液液置换法孔径分析结果相符。断面的 SEM 图显示,机织物嵌入到多孔支撑层内而非衬垫,在多孔支撑层底部;PSU 多孔支撑层呈典型非对称结构,由薄致密皮层和大量的指状孔组成,部分指状孔被机织物的经纬纱线所截断,仅在机织物开孔内的指状孔贯通到基膜底部,这可能会增加孔弯曲度。PSU12 和 PSU15 基膜的底面均出现许多大孔,且 PSU12 基膜底面的大孔数更多,这些大孔的存在可能有利于溶液进出基膜。此外,除经纬纱线相交处裸露出来,大部分机织物包埋在 PSU 多孔支撑层内,这保证了机织物与 PSU 多孔支撑层的牢固结合。

由图可见,TFC/PSU12 和 TFC/PSU15 两种 TFC-FO 膜的表面均呈现典型的“峰-谷”结构,且均有大小不一的凸起结构,包括较大尺寸的叶状凸起和较小尺寸的结核状凸起。断面 SEM 图显示,活性层与多孔支撑层紧密结合。TFC-FO 膜活性层的形成、性质受界面聚合反应条件和基膜表面性质两者的综合影响。由于 PSU12 和 PSU15 基膜的表面性质较为接近,因此在相同界面聚合反应条件下所形成的活性层差别不大。

2.4 TFC-FO 膜的分离性能分析

TFC-FO 膜的分离性能测试结果如图 5 显示,由图可见,TFC/PSU12 和 TFC/PSU15 膜的水通量和反向盐通量均随 NaCl 汲取液浓度的增加而增大,这是由于正渗透过程中正向水传递和反向盐扩散的驱动力均与汲取液浓度正相关。图 5(c)显示,

所制备 TFC-FO 膜的盐/水通量比基本不随汲取液浓度而变化,与文献报道相一致^[7,17]。此外,图 5(a)显示,TFC/PSU12 膜的水通量高于 TFC/PSU15 膜,且两者间差距随汲取液浓度增加而有所增大,这表明 TFC/PSU12 膜内浓差极化程度可能更低。FO 膜内浓差极化程度可用结构参数 S 值定量描述, S 值越大,内浓差极化越严重。TFC-FO 膜的固有传质性质见表 3,由表可知,TFC/PSU12 膜的 S 值小于 TFC/PSU15 膜;TFC/PSU15 膜的 A/B 值略大于 TFC/PSU12 膜,与所测得的盐/水通量比相符。 A/B 值和盐/水通量比可定量反映 TFC-FO 膜渗透选择性, A/B 值越高,盐/水通量比越低,TFC-FO 膜渗透选择性越好。

本研究采用非溶剂致相分离制备织物增强型 PSU 多孔支撑层,通过界面聚合反应在支撑层表面形成活性层,未进行任何物理改性和化学改性,而所制备 TFC/PSU12 和 TFC/PSU15 膜的 S 值分别仅为 $303.0\pm20.1\mu\text{m}$ 和 $370.0\pm40.1\mu\text{m}$,均低于文献报道中未改性 PA-PSU TFC-FO 膜的 S 值(表 4);以 1.0mol/L NaCl 溶液作汲取液,以纯水作原料液,在正渗透模式下 TFC/PSU12 膜的水通量达 21.8LMH ,高于文献报道中未改性 TFC-FO 膜的水通量(表 4)。

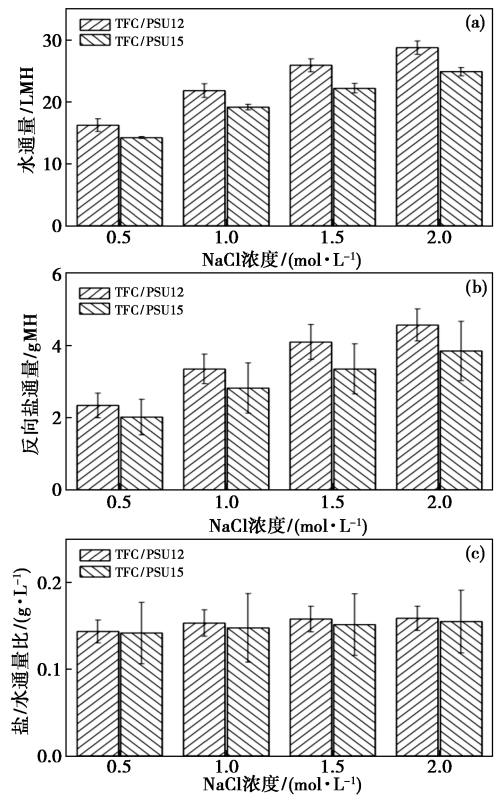


图 5 TFC-FO 膜的分离性能
[(a)水通量;(b)反向盐通量;(c)盐/水通量比]

表 3 TFC-FO 膜的固有传质性质

FO 膜编号	TFC/PSU12	TFC/PSU15
$A/[L\cdot(m^{-2}\cdot h^{-1}\cdot bar^{-1})]$	1.56 ± 0.28	1.45 ± 0.15
$B/[L\cdot(m^{-2}\cdot h^{-1})]$	0.21 ± 0.05	0.19 ± 0.07
$A/B/bar^{-1}$	7.61 ± 0.66	8.10 ± 1.74
$S/\mu\text{m}$	303.0 ± 20.1	370.0 ± 40.1

表 4 若干 TFC-FO 膜的分离性能比较

编号	FO 膜性能			$S/\mu\text{m}$	参考文献
	水通量/ LMH	反向 盐通量/ gMH	盐/水 通量比/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)		
TFC/PSF12	11.3	3.4	0.30	685	[11]
TFC/PSF15	6.4	2.4	0.38	1100	[11]
PSF _{12%} -TFC	13.9	—	—	530	[4]
PSF _{15%} -TFC	9.2	—	—	964	[4]
SPSU-0	18.4	2.76	0.15	580	[6]
PSF _{12%} -TFC	15.1	—	—	492	[18]
TFC/PSU12	21.8	3.4	0.15	303	本研究
TFC/PSU15	19.2	2.8	0.15	370	本研究

3 结论

(1)采用传统单刮刀一次涂布在机织物表面上涂膜易出现缺陷,铸膜液通过机织物开孔向下渗漏是造成缺陷的根本原因,而双刮刀共涂布可实现铸膜液在机织物表面上的低缺陷涂布。

(2)所制备机织物内嵌增强型基膜表面平整,表面平均孔径位于超滤膜孔径范围内,基膜整体厚度约 $60\mu\text{m}$,拉伸强度和杨氏模量分别约为 90MPa 和 370MPa ,结构强度满足规模化生产与使用的要求。

(3)所制备机织物增强型 TFC-FO 膜具有优异的传质性能,其结构参数最低至 $303\mu\text{m}$,正渗透模式下水通量达 21.8LMH (1.0mol/L NaCl 溶液和纯水分别作汲取液和原料液),优于文献报道中未改性 TFC-FO 膜。

参考文献

[1] Shaffer D L, Werber J R, Jaramillo H, et al. Forward osmosis: where are we now? [J]. Desalination, 2015, 356: 271-284.

[2] Deshmukh A, Yip N Y, Lin S H, et al. Desalination by forward osmosis: identifying performance limiting parameters through module-scale modeling [J]. Journal of Membrane Science, 2015, 491: 159-167.

[3] Werber J R, Deshmukh A, Elimelech M. The critical need for increased selectivity, not increased water permeability, for desalination membranes [J]. Environmental Science & Technol-

- ogy Letters, 2016, 3(4): 112-120.
- [4] Tiraferri A, Yip N Y, Phillip W A, et al. Relating performance of thin-film composite forward osmosis membranes to support layer formation and structure[J]. Journal of Membrane Science, 2011, 367(1-2): 340-352.
- [5] Wei J, Qiu C Q, Tang C Y Y, et al. Synthesis and characterization of flat-sheet thin film composite forward osmosis membranes[J]. Journal of Membrane Science, 2011, 372(1-2): 292-302.
- [6] Ren J, O'grady B, Dejesus G, et al. Sulfonated polysulfone supported high performance thin film composite membranes for forward osmosis[J]. Polymer, 2016, 103: 486-497.
- [7] Nguyen T P N, Jun B M, Lee J H, et al. Comparison of integrally asymmetric and thin film composite structures for a desirable fashion of forward osmosis membranes[J]. Journal of Membrane Science, 2015, 495: 457-470.
- [8] Tiraferri A, Yip N Y, Straub A P, et al. A method for the simultaneous determination of transport and structural parameters of forward osmosis membranes[J]. Journal of Membrane Science, 2013, 444: 523-538.
- [9] Sahebi S, Phuntsho S, Tijing L, et al. Thin-film composite membrane on a compacted woven backing fabric for pressure assisted osmosis[J]. Desalination, 2017, 406: 98-108.
- [10] Yasukawa M, Mishima S, Tanaka Y, et al. Thin-film composite forward osmosis membrane with high water flux and high pressure resistance using a thicker void-free polyketone porous support[J]. Desalination, 2017, 402: 1-9.
- [11] Stillman D, Krupp L, La Y H. Mesh-reinforced thin film composite membranes for forward osmosis applications: the structure-performance relationship[J]. Journal of Membrane Science, 2014, 468: 308-316.
- [12] Zhang X, Shen L, Lang W Z, et al. Improved performance of thin-film composite membrane with PVDF/PFSA substrate for forward osmosis process[J]. Journal of Membrane Science, 2017, 535: 188-199.
- [13] 刘仁啸, 陈刚, 王艳强, 等. 聚乙二醇添加剂对聚砜正渗透膜性能的影响[J]. 膜科学与技术, 2017, 37(01): 36-43.
- [14] Sharabati J-a-D, Guclu S, Erkoç-İlter S, et al. Interfacially polymerized thin-film composite membranes: impact of support layer pore size on active layer polymerization and seawater desalination performance[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 212: 438-448.
- [15] Widjojo N, Chung T S, Weber M, et al. A sulfonated polyphenylenesulfone (sPPSU) as the supporting substrate in thin film composite (TFC) membranes with enhanced performance for forward osmosis (FO) [J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 220: 15-23.
- [16] Sahebi S, Phuntsho S, Woo Y C, et al. Effect of sulphonated polyethersulfone substrate for thin film composite forward osmosis membrane[J]. Desalination, 2016, 389: 129-136.
- [17] Phillip W A, Yong J S, Elimelech M. Reverse draw solute permeation in forward osmosis: modeling and experiments[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(13): 5170-5176.
- [18] Yip N Y, Tiraferri A, Phillip W A, et al. High performance thin-film composite forward osmosis membrane[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(10): 3812-3818.

收稿日期: 2019-02-14

(上接第 96 页)

(4) 在 PAA 聚合前, 预先将 SiO_2 气凝胶在溶剂 DMAc 中分散均匀再制备 SiO_2 气凝胶/PI 复合薄膜, 能够充分发挥 SiO_2 气凝胶的优异性能, 显著提高了 PI 的耐热性能和隔热性能, 延长了 PI 的使用寿命, 有利于其在耐高温、隔热领域的应用。

参考文献

- [1] Tillotson T M, Hrubesh L W. Transparent ultralow-density silica aerogels prepared by a two-step sol-gel process[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1992, 145: 44-50.
- [2] Fricke J, Emmerling A. Aerogels—preparation, properties, applications[J]. 1992, 77(4): 37-87.
- [3] Mulder C A M, Lierop J G V. Preparation, densification and characterization of autoclave dried SiO_2 gels [M]. Berlin: Springer, 1986: 68-75.
- [4] Yoldas B E, Annen M J, Bostaph J. Chemical engineering of aerogel morphology formed under nonsupercritical conditions for thermal insulation[J]. Chemistry of Materials, 2000, 12(8): 2475-2484.
- [5] 吴晓栋, 崔升, 王岭. 耐高温气凝胶隔热材料的研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(9): 102-108.
- [6] Kistler S S. Coherent expanded aerogels and jellies[J]. Nature, 1931, 127(3211): 741.
- [7] 周立鸣, 邓蔚. 纳米孔硅质绝热材料[J]. 宇航材料工艺, 2000, 32(9): 11-14.
- [8] White S, Rasky D, Herlth P. Tough, lightweight, superinsulating aerogel/tile composites have potential industrial applications[J]. Materials & Processing Report, 1999, 14(1): 13-16.
- [9] Randall J P, Meador M A B, Jana S C. Tailoring mechanical properties of aerogels for aerospace applications[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2011, 3(3): 613-626.
- [10] Fricke J, Schwab H, Heinemann U. Vacuum insulation panels—exciting thermal properties and most challenging applications [J]. International Journal of Thermophysics, 2006, 27(4): 1123-1139.
- [11] Katti A, Shimpi N, Roy S, et al. Chemical, physical, and mechanical characterization of isocyanate cross-linked amine-modified silica aerogels[J]. Chemistry of Materials, 2006, 18(2): 285-296.
- [12] Tarrío-Saavedra J, López-Beceiro J, Naya S, et al. Effect of silica content on thermal stability of fumed silica/epoxy composites[J]. Polymer Degradation & Stability, 2008, 93(12): 2133-2137.
- [13] Maghsoudi K, Motahari S, Maghsoudi K, et al. Mechanical, thermal, and hydrophobic properties of silica aerogel-epoxy composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 135: 45706.
- [14] 曹红葵. 聚酰亚胺性能及合成方法[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2008, 6(3): 24-26.
- [15] 冯坚. 气凝胶高效隔热材料[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 39-41.

收稿日期: 2019-01-16

修稿日期: 2020-02-11