

基于不同厂家聚醚砜基膜的薄膜复合正渗透膜性能的比较

许素博¹, 赵 频^{1*}, 刘 浩¹, 宋伟龙¹, 王新华^{1,2,3}

(1. 江南大学 环境与土木工程学院, 无锡 214122; 2. 江苏省生物质能与减碳技术工程实验室, 无锡 214122; 3. 江苏省水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009)

摘要: 薄膜复合(TFC)膜由多孔基底层和通过界面聚合反应生成的聚酰胺层组成,在纳滤、反渗透和正渗透等领域已经得到广泛的应用. 近年来,基底膜对 TFC 膜性能的影响受到越来越多的关注. 早期实验数据显示,即使在制备方法和基底膜名义孔径完全相同的条件下,由不同厂家生产的基膜所制备的 TFC 膜也存在显著差异. 本文选择两家公司名义孔径均为 0.22 μm 的商品聚醚砜(PES)膜为基底,通过调节界面聚合过程水相的沥干时间,对比研究了 2 种基膜的不同性质及其对 TFC 膜性能的影响. 结果表明,亲水性更强、膜孔位置分布更密集且均匀、孔径更均一的基膜具有更高的水通量和更低反向盐质通量. 此外,基于 2 种基膜的 TFC 正渗透膜的水通量均随沥干时间的拉长而呈现不断降低的趋势,而反向盐通量始终保持较低水平. 综上,本研究可为未来 TFC 膜的规范化制备提供技术支持.

关键词: 薄膜复合膜; 基底膜; 界面聚合反应; 沥干时间; 正渗透

中图分类号: TQ028.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-8924(2024)02-0072-08

doi: 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2024.02.009

工业生产以及人类活动产生了大量的废水,这不仅对地球环境造成了威胁,而且使得社会和经济面临着巨大的挑战^[1-2]. 但随着各项水处理技术的发展,膜分离技术凭借其高效、绿色环保等独特优势得以脱颖而出,成为废水净化和脱盐等领域重要的可持续发展技术之一^[3-4]. 其中,正渗透(FO)因具有成本低、净水效率高、脱盐率好、绿色环保等优点,在海水淡化、污水处理、药品浓缩等领域展示出了巨大应用前景^[5-6].

作为最常见的 FO 膜,薄膜复合(TFC)膜包括多

孔支撑层和通过界面聚合反应生成的致密聚酰胺层. 其中,多孔支撑层作为聚合反应界面,其孔径、孔隙率、亲水性等性质对制备的 TFC 膜性能具有至关重要的影响^[7-10]. 比如,Jimenez-Solomon 等^[11]认为,亲水性强的支撑层对胺单体具有较高的亲和性,膜孔可储存更多的胺溶液,这将增强界面聚合过程胺溶液的可用性并有利于聚酰胺层的形成;Peng 等^[12]发现,同时具有高表面孔隙率和较高孔隙密度的支撑层有利于聚酰胺叶状结构的形成. 聚醚砜(PES)微滤膜是目前最常用的基底膜之一,市面上

收稿日期: 2023-08-31; 修改稿收到日期: 2023-12-27

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(52100089)

第一作者简介: 许素博(2000-),男,山东菏泽人,硕士生,主要从事膜法水处理技术研究. * 通讯作者, E-mail: pinzhao@jiangnan.edu.cn

引用本文: 许素博,赵 频,刘 浩,等. 基于不同厂家聚醚砜基膜的薄膜复合正渗透膜性能的比较[J]. 膜科学与技术, 2024,44(2):72-79.

Citation: Xu S B, Zhao P, Liu H, et al. Comparative study of the performance of thin-film composite forward osmosis membranes based on polyethersulfone-based membranes from different manufacturers[J]. Membrane Science and Technology (Chinese), 2024,44(2):72-79.

存在众多相同规格,但来自不同品牌的 PES 膜,包括美国 GVS^[13-15]、德国 Microdyn-Nadir^[16-18]、中国海宁益博^[19-21]等。这些 PES 基底膜性能是否相同,所合成的 TFC 膜之间是否具有可比性? 以上问题对于 TFC 膜制备领域具有重要意义。据笔者所知,目前国内外尚未有相关的研究报道。

本工作选择 2 种来自不同厂家的商业化程度较高、使用广泛、名义孔径相同的 PES 商品膜作为基底,通过对其进行形貌、亲疏水性和孔径分布的表征分析,并结合不同水相沥干时间(40、50、60、70 s)下合成的 TFC 膜性能,考察了不同基底膜对 TFC 膜性能的影响。

1 实验部分

1.1 药品和材料

商品聚醚砜膜(PES, 0.22 μm)分别来自美国 GVS 公司和中国海宁市益博过滤器材厂;间苯二胺(MPD)、均苯三甲酰氯(TMC)均为分析纯,来自 Sigma-Aldrich 贸易有限公司;氯化钠(NaCl)、海藻酸钠(SA)、正己烷(*n*-hexane)均为分析纯,来自中国药集团化学试剂有限公司;去离子水,电导率 $< 3.0 \mu\text{S}/\text{cm}$,为实验室自制。

1.2 不同水相沥干时间的 TFC FO 膜的制备

使用 2 种购自不同公司的商业 PES 膜为基膜,并将其分别标记为 PES-A 和 PES-B。在基膜上以 MPD 和 TMC 分别作为水相单体与油相单体进行界面聚合反应,通过控制不同水相沥干时间获得不同 TFC FO 膜,并分别记为 TFC-A/B-水相沥干时间,其中,沥干时间为 40、50、60、70 s。首先将 PES 基膜置于玻璃板上,并使用内部直径为 4 cm 的圆形聚四氟乙烯板框、橡胶垫和夹子将其固定。使用移液枪精准移取 6.70 mL 的 MPD 水溶液(质量分数 3.4%)倒在基膜上浸泡 2 min,随后倒掉水相溶液,并使用橡胶辊迅速去除膜表面多余的溶液。随后,分别等待 40、50、60、70 s 后将 7.33 mL TMC/正己烷溶液(质量分数 0.15%)倾倒在膜面上,反应 1 min 后倒掉多余溶液。之后将膜进行 1 min 晾干处理,并转入 98 $^{\circ}\text{C}$ 的水浴中静置 2 min。最后,将制备得到的膜片置于去离子水中,并于 4 $^{\circ}\text{C}$ 下保存备用。

1.3 TFC FO 性能评价

图 1 为实验室规模的正渗透膜性能评价装置图。图中,膜运行 Cell 内部两侧膜室均为底部直径

为 3 cm、高为 3 mm 的圆柱形。FO 膜在膜室中间运行,运行过程采用选择层(AL)面向料液(FS)的 AL-FS 模式。进料液和汲取液均保持在 25.0 $^{\circ}\text{C}$,并通过截面直径为 6.4 mm 的橡胶软管以 1.42 cm/s 的流速错流进入膜室。

为研究不同基膜对 TFC 膜性能的影响,使用 1 L 去离子水作为进料液,1 L 浓度 2 mol/L NaCl 溶液作为汲取液,并测定 TFC 膜的清水通量和反向盐通量。另外,为研究不同基膜对 TFC 膜抗污染能力的影响,选取 TFC-A-60 s 膜和 TFC-B-60 s 膜进行膜污染实验。其中,进料液更换为 1 L 质量浓度 200 mg/L 海藻酸钠溶液,污染进行 10 h 后立刻将进料液和汲取液均换成 1 L 去离子水,以 2.13 cm/s 的错流速率进行 1 h 膜清洗。污染过程连续运行 3 次,且 TFC 膜的污染水通量数据每 0.5 h 取平均值,以评价膜的抗污染能力和长期稳定性。

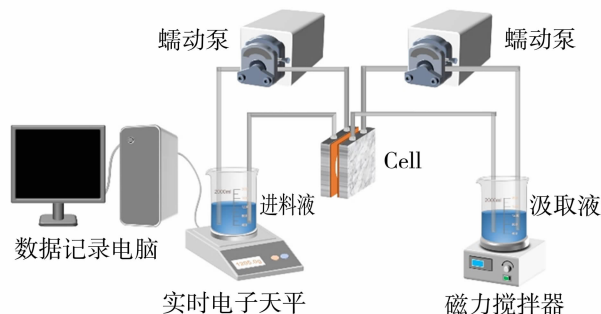


图 1 正渗透性能评价装置

Fig. 1 Schematic diagram of forward osmosis system

TFC 膜运行过程中,使用连接电脑的电子天平(PL6001E, Mettler Toledo)记录每分钟的进料液质量变化数据,使用电导率仪(Mettler Toledo S3)测定进料液的电导率变化。运行结束后根据所记录数据,由方程(1)和(2)分别计算 TFC 膜的水通量(J_w)和反向盐通量(J_s):

$$J_w = \frac{m_t - m_0}{A_m \cdot \Delta t \cdot \rho_{25}} \quad (1)$$

式中: J_w [$\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]表示膜的水通量; m_t (g)和 m_0 (g)分别代表 FS 运行前和运行后的质量; Δt (h)表示运行时间; A_m (m^2)表示膜的有效面积,为 $7.065 \times 10^{-4} \text{ m}^2$; ρ_{25} (g/L)表示 25 $^{\circ}\text{C}$ 下水的密度,为 1 000 g/L。

$$J_s = \frac{C_t \cdot \frac{m_t}{\rho_t} - C_0 \cdot \frac{m_0}{\rho_0}}{A_m \cdot \Delta t} \quad (2)$$

式中: J_s [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]为膜的反向盐通量; C_t (mg/L)

和 C_0 (mg/L) 分别代表运行前和运行后进料液中的氯化钠质量浓度, 在低浓度情况下, 氯化钠浓度可由电导率数据通过两者之间的正相关关系式计算得出; m_t (g) 和 m_0 (g) 分别代表 FS 运行前和运行后的质量; ρ_t (g/L) 和 ρ_0 (g/L) 分别代表进料液运行前和运行后于 25 °C 下的密度, 由于反向盐质极少, 所以两者均可近似为 1 000 g/L; A_m (m²) 代表有效膜面积, 为 7.065×10^{-4} m²; Δt (h) 代表运行时间。

1.4 膜表征

使用扫描电子显微镜 (SEM, 日本 Hitachi Regulus 8100) 观察膜样品表面形貌; 基于表面 SEM 图像, 使用图像处理软件 Image J (版本 1.50) 测定 PES 膜的表面孔隙密度和孔径分布。使用原子力显微镜 (AFM, 德国 Bruker Dimension Icon) 观察膜样品表面形貌和粗糙度。使用 X 射线光电子能谱仪 (XPS, 美国 Thermo Scientific K-Alpha) 对 TFC 膜样品聚酰胺层进行表面化学元素组成及元素含量的表征分析; 将 TFC 膜样品浸没在液氮中冷冻断裂, 使用 SEM 拍摄其横断面图像, 之后使用 Image J 获得 5 个视野中聚酰胺层的厚度并计算平均值。此外, 对于 PES-A、PES-B、TFC-A-60 s (简写为 A-60 s)、TFC-B-60 s (B-60 s) 以及进行 10 h 膜污染后的 TFC-A-60 s-污染 (A-污染)、TFC-B-60 s-污染 (B-污染) 均使用接

触角测量仪 (Biolin Theta Flow) 测量膜表面静态接触角进行膜表面亲水性的评估。

2 结果与讨论

2.1 PES 基底膜的结构性质

图 2 为 PES-A 与 PES-B 的 SEM、AFM 和表面孔径分布图。由图 2 可以很直观的看出 2 种膜的结构差异。PES-A 膜表面孔径分布相对集中且较均匀, 平均孔径较小且膜孔数量较多; 而 PES-B 膜的表面孔径分布范围宽, 非膜孔连续区域大, 平均孔径较大且膜孔数量只为 PES-A 膜的 44%。图 2(c) 和 2(f) 表示 2 种基底膜的孔径分布, 该数据再次证明 PES-A 膜的孔径分布范围较窄, 而 PES-B 膜则较宽。如表 1 所示, PES-A 和 PES-B 膜的平均孔径分别为 0.19 和 0.27 μm , 而孔隙密度分别为 5.20 和 2.29 个/ μm^2 。根据 AFM 结果可知, PES-B 膜的粗糙度 [$R_a = (75.6 \pm 12.2)$ nm] 略大于 PES-A 膜 [$R_a = (62.2 \pm 6.1)$ nm]。另外, PES-A 膜和 PES-B 膜选择层的接触角 (CA) 分别为 68.8° 和 91.5°, 表明 PES-A 膜比 PES-B 膜具有更强的亲水性。

2.2 TFC 膜的表面结构性质

图 3 为 2 种 TFC 膜 SEM、AFM 图像及粗糙度

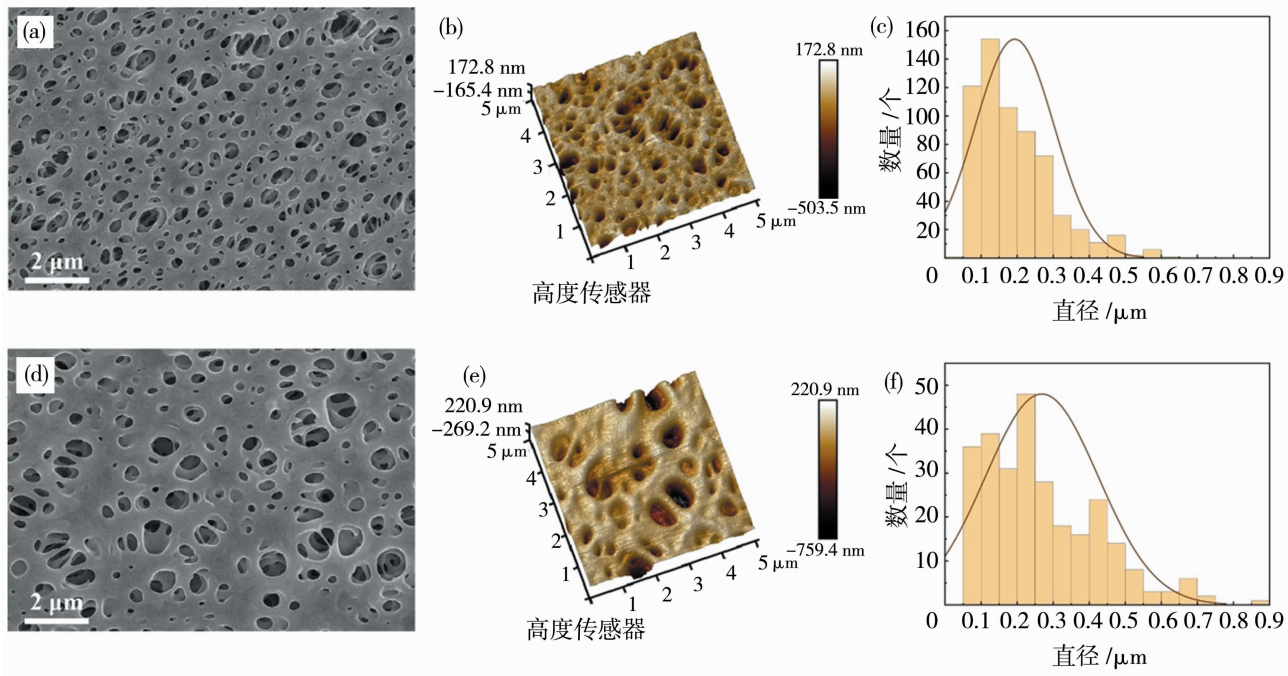


图 2 PES-A(a,b,c)与 PES-B(d,e,f)的 SEM、AFM 和表面孔径分布图

Fig. 2 SEM, AFM, and surface pore size distribution images of PES-A (a, b, c) and PES-B (d, e, f)

表 1 两种 PES 膜的物理特性数据

Table 1 Physical property data of two PES membranes

PES 膜	粗糙度/nm	接触角/(°)	平均孔径/ μm	孔隙密度/(个 $\cdot\mu\text{m}^{-2}$)
PES-A	62.2 ± 6.1	68.8 ± 0.7	0.19	5.20
PES-B	75.6 ± 12.2	91.5 ± 0.4	0.27	2.29

数据. 可以看出, TFC-A-60 s 的表面粗糙度 $[R_a=(56.5\pm6.3)\text{ nm}]$ 明显小于 TFC-B-60 s $[R_a=(73.2\pm9.0)\text{ nm}]$. 这可能是因为, 相比于 PES-B 基底膜, PES-A 基底膜具有更小的孔径和更高的亲水性. 在 MPD 水相浸润环节, 小孔径通常会导致 MPD 侵入量较少, 使得界面聚合反应较为平缓; 而且在 TMC 有机相加入后, 高亲水性会导致 MPD 从水相扩散到有机相的速率变缓, 从而使得生成的聚酰胺选择层的凸起较小, 呈现出较为平滑的形

貌^[22-24]. 其次, 由于 PES-A 膜膜孔位置分布密集且均匀、孔径更加均一, 所以在其上聚合形成的“脊谷状”聚酰胺层也更加密集且大小均匀. 而 PES-B 膜则由于膜孔孔径分布范围及非膜孔连续区域均较大, 导致在基底大孔上方形成了较为稀疏的“叶片状”聚酰胺层, 在小孔上方则有一些相对小的突起, 并且膜表面有着更大的“空洞”区域. 此外, 从图 3(f) 中可以看出, TFC-A-60 s 膜($CA=77.4^\circ$)和 TFC-B-60 s 膜($CA=75.6^\circ$)均具有良好的亲水性.

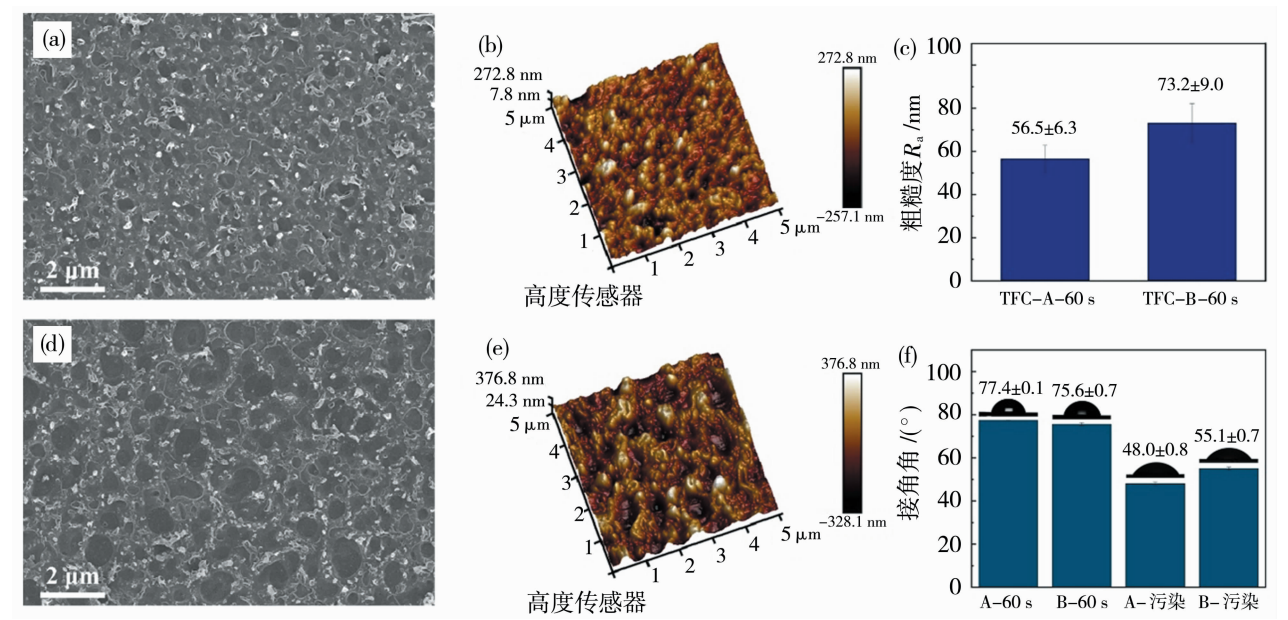


图 3 TFC-A-60 s 膜(a,b,c,f)与 TFC-B-60 s 膜(d,e,c,f)的 SEM、AFM、粗糙度数据、接触角数据图以及 A-污染(f)、B-污染(f)的接触角数据图

Fig. 3 SEM, AFM, roughness data, contact angle data images of TFC-A-60 s (a, b, c, f) and TFC-B-60 s (d, e, c, f) and contact angle data images of A-fouling (f) and B-fouling (f)

2.3 TFC 膜性能

反应单体浓度、沥干时间和热交联温度等各制膜参数都会影响到膜的性能. 研究了沥干时间对基于 2 种基底的 TFC 膜性能的影响, 如图 4 所示, 随着沥干时间的拉长, TFC-A 膜和 TFC-B 膜的水通量均呈现缓慢下降的趋势. 当沥干时间从 40 s 增长到 70 s 时, TFC-A 膜的水通量从 $10.84\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 下降到了 $8.86\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, TFC-B 膜的水通量从 $9.42\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 下降到了 $7.92\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 但二者反向盐通量变化较小. 该研究中, TFC-FO 膜

水通量随沥干时间拉长而降低的变化趋势与之前薄膜复合纳滤膜的研究结果刚好相反^[25]. 对于该区别的解释会在 2.4 节详细展开. 此外, 在相同沥干时间下, TFC-A 膜总是表现出比 TFC-B 膜更高的水通量以及更低的反向盐通量/水通量比值(比盐通量).

为进一步评价 TFC-A 膜与 TFC-B 膜的抗污染性能和稳定性, 选用 TFC-A-60 s 与 TFC-B-60 s 进行膜污染实验. 图 5 即为 3 次海藻酸钠污染循环实验下的膜通量变化图. 从图中数据可以得出, 在 3 次循环实验结束时, TFC-A-60 s 水通量分别下降

0.63 L/(m² · h)(降幅 5.3%)、0.58 L/(m² · h)(降幅 4.6%)、1.01 L/(m² · h)(降幅 7.7%), TFC-B-60 s 膜水通量分别下降 0.09 L/(m² · h)(降幅 1.0%)、0.56 L/(m² · h)(降幅 5.7%)、0.63 L/(m² · h)(降幅 5.9%)。从总体来看,2 种膜的水通量下降幅度都很小且比较接近,说明 2 者的抗污

染性能并无明显区别。此外需要注意的是,2 种膜在污染实验中的水通量均要高于它们的清水通量,这个现象在先前的研究中也曾出现^[21]。而且尽管经过冲洗之后,2 种膜的水通量均又有不同程度的提升,但是它们在后续的循环中的水通量下降幅度也在逐渐增大。

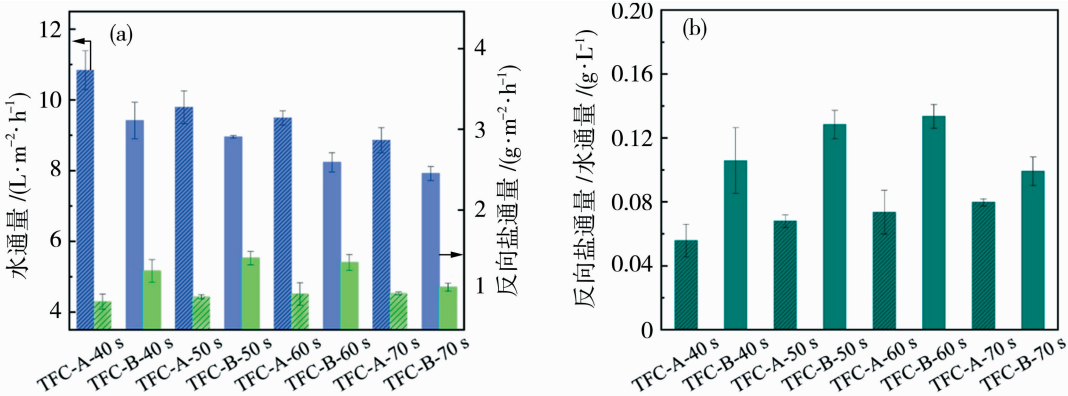


图 4 不同沥干时间的 TFC-A 膜、TFC-B 膜的渗透性能

Fig. 4 Permeation performance of TFC-A membrane and TFC-B membrane with different draining time

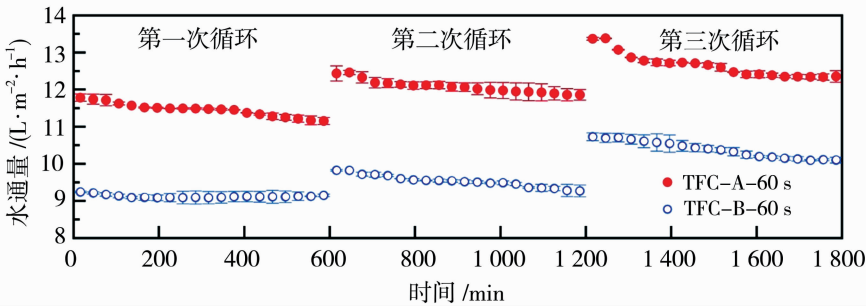


图 5 TFC-A-60 s 和 TFC-B-60 s 的 3 次海藻酸钠污染循环水通量变化图

Fig. 5 Flux variation of TFC-A-60 s and TFC-B-60 s under three sodium alginate contamination cycling experiments

2.4 机理分析

由表 2 及图 6 中的 TFC 膜聚酰胺层厚度和氧/氮摩尔比(O/N 摩尔比)数据可知,相较于 40 s 时,沥干时间为 60 s 时的 TFC 膜的厚度和 O/N 摩尔比均降低,并且 TFC-A 膜的 O/N 摩尔比整体低于 TFC-B 膜。一般认为,O/N 摩尔比越低,其所对应的 TFC 膜聚酰胺层的交联度越高。

表 2 TFC 膜的聚酰胺层厚度及 O/N 摩尔比数据
Table 2 Polyamide layer thickness and O/N mole ratio for TFC

TFC 膜	膜厚度/nm	O/N 摩尔比
TFC-A-40 s	32.7±2.2	1.51
TFC-A-60 s	28.9±2.8	1.43
TFC-B-40 s	30.7±2.9	1.82
TFC-B-60 s	27.8±2.2	1.62

在本研究中,2 种 TFC 膜的水通量均会随着沥干时间的拉长而不断降低。随着沥干时间的增加,水相会不断的蒸发,MPD 浓度和界面聚合反应强度也相应增强,从而形成了具有更高交联度、厚度稍薄的聚酰胺层。虽然本研究中的聚酰胺层的厚度略微变薄,但是厚度减小对于水通量的提升作用并不足以抵消交联度升高对水通量的抑制作用,因此水通量呈现不断降低的趋势。

另外,尽管 TFC-A 膜选择层的交联度更高、粗糙度更小,但由于 TFC-A 膜的支撑层具有较高的孔隙密度和亲水性,使得其水有效传输距离较小^[26]以及内浓差极化现象较轻^[6]。此外,由于 TFC-B 膜的交联度较低,其较高的反向盐通量也会抵消更多的渗透压差。因此,相比于 TFC-B 膜,TFC-A 膜总

是拥有更高的水通量和更低反向盐通量。

由图 3(f) 可知, 经过一次膜污染实验后, 2 种 TFC 膜的表面亲水性均有一定程度的提高, 这可能是由其本身具有较好亲水性的海藻酸钠沉积在膜表面所导致的^[27]。膜表面提升的亲水性也使 2 种膜的污染实验水通量均高于清水通量^[28]。但当过多的海

藻酸钠沉积到膜上时, 膜孔反而被阻塞, 从而引起水通量不断下降。在经过清洗之后, 虽然大部分膜孔上方的污染物被去除, 但是仍然存留着比上一次循环开始前更多的海藻酸钠, 使得膜亲水性和水通量更高。不过这也导致膜表面更容易沉积海藻酸钠, 水通量损失速率更快。

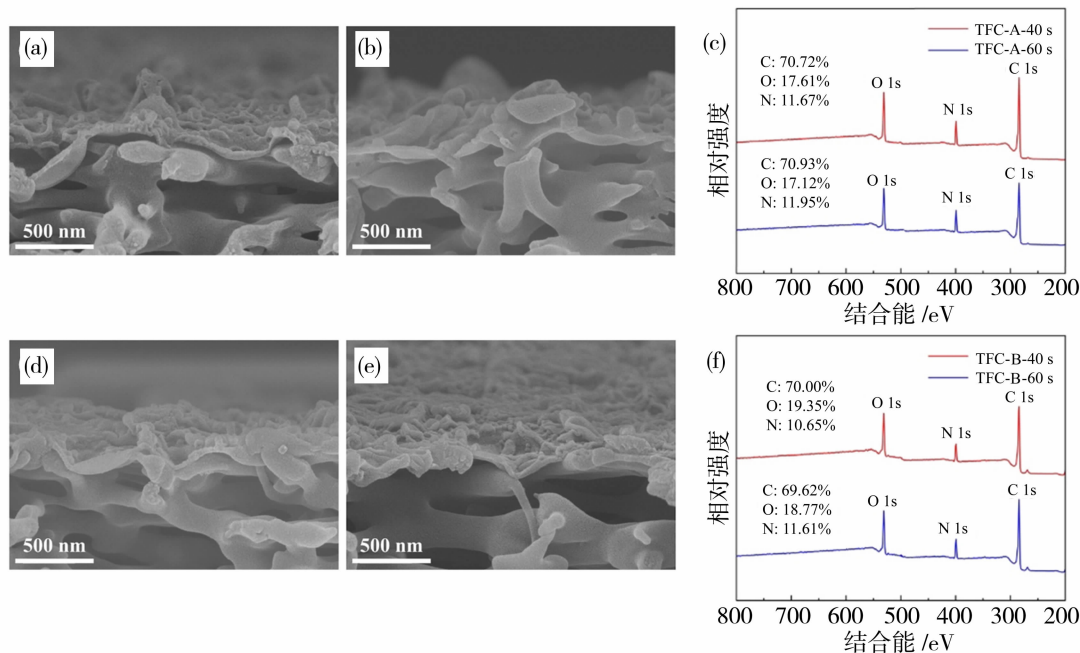


图 6 TFC-A-40 s(a)、TFC-A-60 s(b)、TFC-B-40 s(d)与 TFC-B-60 s(e)的截面 SEM 图像、XPS 图谱(c、f)

Fig. 6 Cross-sectional SEM of TFC-A-40 s (a), TFC-A-60 s (b), TFC-B-40 s (d) and TFC-B-60 s (e) and their XPS spectrum (c, f)

3 结论

在使用界面聚合法制备 TFC 膜的过程中, 水相溶液烘干时间的拉长会导致水相收缩和 MPD 浓度增大, 从而使得形成的聚酰胺膜具有更高的交联度和稍薄的厚度, 导致水通量降低, 但对反向盐通量影响不大。此外, 相比于 TFC-B 基膜, PES-A 基膜具有更强的亲水性、更密集且均匀的膜孔分布和更均一的孔径分布, 从而导致 TFC-A 膜的交联度更高、水传输距离更小、内浓差极化现象较轻。因此, 相比于 TFC-B 膜, TFC-A 膜拥有更高的清水通量和更低的比盐通量。

参考文献:

[1] Shannon M A, Bohn P W, Elimelech M, *et al.* Science and technology for water purification in the coming decades [J]. Nature, 2008, 452: 301—310.

[2] Elimelech M, Philip W A. The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment [J]. Science, 2011, 333: 712—717.

[3] Logan B E, Elimelech M. Membrane-based processes for sustainable power generation using water [J]. Nature, 2012, 7411: 313—319.

[4] Kamali M, Suhas D P, Costa M E, *et al.* Sustainability considerations in membrane-based technologies for industrial effluents treatment [J]. Chem Eng J, 2019, 368: 474—494.

[5] She Q, Wang R, Fane A G, *et al.* Membrane fouling in osmotically driven membrane processes: A review [J]. J Membr Sci, 2016, 499: 201—233.

[6] Lutchmiah K, Verliefde A R D, Roest K, *et al.* Forward osmosis for application in wastewater treatment: A review [J]. Water Res, 2014, 58: 179—197.

[7] Yang Z, Zhou Z, Guo H, *et al.* Tannic acid/Fe³⁺ nanoscaffold for interfacial polymerization: Toward en-

- hanced nanofiltration performance [J]. *Environ Sci Technol*, 2018, 52(16): 9341–9349.
- [8] Peng L E, Yang Z, Long L, *et al.* A critical review on porous substrates of TFC polyamide membranes: Mechanisms, membrane performances, and future perspectives[J]. *J Membr Sci*, 2022, 641: 119871.
- [9] Lalia B S, Kochkodan V, Hashaikheh R, *et al.* A review on membrane fabrication: Structure, properties and performance relationship[J]. *Desalination*, 2013, 326: 77–95.
- [10] Zhao S, Liao Z, Fane A, *et al.* Engineering antifouling reverse osmosis membranes: A review[J]. *Desalination*, 2021, 499: 114857.
- [11] Jimenez-Solomon M F, Gorgojo P, Munoz-Ibanez M, *et al.* Beneath the surface: Influence of supports on thin film composite membranes by interfacial polymerization for organic solvent nanofiltration[J]. *J Membr Sci*, 2013, 448: 102–113.
- [12] Peng L E, Yao Z, Yang Z, *et al.* Dissecting the role of substrate on the morphology and separation properties of thin film composite polyamide membranes: seeing is believing[J]. *Environ Sci Technol*, 2020, 54(11): 6978–6986.
- [13] Kim J P, Go C Y, Kang J, *et al.* Nanoporous multi-layer graphene oxide membrane for forward osmosis metal ion recovery from spent Li-ion batteries[J]. *J Membr Sci*, 2023, 676: 121590.
- [14] Kang J, Choi Y, Kim J H, *et al.* Functionalized nanoporous graphene membrane with ultrafast and stable nanofiltration[J]. *J Membr Sci*, 2021, 618: 118635.
- [15] Kwon O, Kim M, Choi E, *et al.* High aspect ratio zeolitic imidazolate framework (ZIF) nanoplates for hydrocarbon separation membranes[J]. *Sci Adv*, 2022, 8(1): eabl6841.
- [16] Qian Y, Li H, Lu J, *et al.* Inhibiting polyamide intrusion of thin film composite membranes: Strategies and environmental implications[J]. *Environ Sci Technol*, 2023, 57: 10860–10869.
- [17] Long L, Peng L E, Zhou S, *et al.* NaHCO₃ addition enhances water permeance and Ca/haloacetic acids selectivity of nanofiltration membranes for drinking water treatment[J]. *Water Res*, 2023, 242: 120255.
- [18] Wu C, Long L, Yang Z, *et al.* Porous substrate affects fouling propensity of thin-film composite nanofiltration membranes[J]. *J Membr Sci Lett*, 2022, 2(2): 100036.
- [19] 徐梦思, 马广翔, 易夏文等. 内嵌碳纳米管层的导电正渗透膜制备及其缓解有机污染的研究[J]. *膜科学与技术*, 2021, 41(03): 9–15, 23.
- [20] Sun P F, Sarkar P, Yun E T, *et al.* Multi-layer structure toward simultaneous enhancement of forward osmosis membrane separation performance and anti-biofouling property [J]. *J Membr Sci*, 2023, 683: 121804.
- [21] Zhou Q, Zhao P, Xu R, *et al.* Porous graphene oxide surface-coated thin-film composite membrane for simultaneously increasing permeation performance and organic-fouling migration capacities [J]. *J Membr Sci*, 2022, 661: 120942.
- [22] Ren J, Chowdhury M R, Qi J, *et al.* Relating osmotic performance of thin film composite hollow fiber membranes to support layer surface pore size[J]. *J Membr Sci*, 2017, 540: 344–353.
- [23] Ghosh A K, Hoek E M V. Impacts of support membrane structure and chemistry on polyamide-polysulfone interfacial composite membranes [J]. *J Membr Sci*, 2009, 336: 140–148.
- [24] Vatanpour V, Paziresh S, Mehrabani S A N, *et al.* TiO₂/CDs modified thin-film nanocomposite polyamide membrane for simultaneous enhancement of antifouling and chlorine-resistance performance[J]. *Desalination*, 2022, 525: 115506.
- [25] 宋玉军, 程淑英, 刘福安等. 制备 NF-TFC 膜的界面聚合反应研究[J]. *水处理技术*, 2000(4): 203–206.
- [26] Shao S, Zeng F, Long L, *et al.* Nanofiltration membranes with crumpled polyamide films: A critical review on mechanisms, performances, and environmental applications[J]. *Environ Sci Technol*, 2022, 56(18): 12811–12827.
- [27] 刘晓辉, 杨 璇, 闫弘津. 海藻酸钠/聚丙烯腈超滤膜的制备及性能[J]. *天津工业大学学报*, 2023, 42(2): 22–27, 33.
- [28] Xu W, Ge Q. Novel functionalized forward osmosis (FO) membranes for FO desalination: Improved process performance and fouling resistance [J]. *J Membr Sci*, 2018, 555: 507–516.

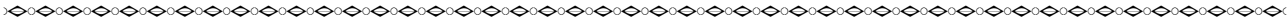
Comparative study of the performance of thin-film composite forward osmosis membranes based on polyethersulfone-based membranes from different manufacturers

XU Subo¹, ZHAO Pin¹, LIU Hao¹, SONG Weilong¹, WANG Xinhua^{1,2,3}

(1. School of Environmental and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;
2. Jiangsu Engineering Laboratory for Biomass Energy and Carbon Reduction Technology, Wuxi 214122, China; 3 Jiangsu Cooperative Innovation Center of Technology and Material of Water Treatment, Suzhou 215009, China)

Abstract: Thin film composite (TFC) membranes, which consist of a porous substrate and a polyamide layer generated by interfacial polymerization (IP) reaction, have been widely used in the fields of nanofiltration, reverse osmosis and forward osmosis (FO). Recently, the influence of substrate properties on the performance of TFC membranes has received increasing attention. Our early study found that even under the conditions of identical preparation methods and nominal pore sizes of the substrate membranes, there were significant differences in the TFC membranes prepared from substrate membranes produced by different manufacturers. In this paper, commercial polyethersulfone (PES) membranes with nominal pore size of 0.22 μm from two companies were selected as the substrate, and the different properties of the two substrate membranes and their effects on the performance of TFC membranes were comparatively studied by adjusting the draining time of the aqueous phase in the IP process. The results showed that the substrate membrane with stronger hydrophilicity, denser and more uniform distribution of membrane pore locations, and more homogeneous pore size had higher water flux and lower reverse salt flux. In addition, the water flux of TFC FO membranes based on both substrate membranes showed a decreasing trend with the elongation of the draining time, while the reverse salt flux always remained low. In conclusion, this study provides a reference for the standardized preparation of TFC membranes in the future.

Key words: thin film composite (TFC) membrane; substrate; interfacial polymerization; draining time; forward osmosis



广 告 目 次

哈尔滨乐普实业有限公司	(封 面)	研究所	前插 3
沃顿科技股份有限公司	(封 二)	山东招金膜天股份有限公司	前插 4
海南立昇净水科技实业有限公司	(封 三)	利得膜(北京)新材料技术有限公司	前插 5
上海湛信科技发展有限公司	(封 四)	厦门嘉戎技术股份有限公司	前插 6
北京碧水源膜科技有限公司	前插 1	蓝星工程有限公司	前插 7
绵阳市聚合新材料有限公司	前插 2	天邦膜技术国家工程研究中心有限	
自然资源部天津海水淡化与综合利用		责任公司	前插 8