

# 涂覆聚多巴胺层对提高薄膜复合聚酰胺膜选择性和防污性的影响

王通军, 蒋超, 周郁, 洪建权, 魏慧贤\*

(江南大学化学与材料工程学院, 合成与生物胶体教育部重点实验室, 江苏无锡214122)

**摘要:**通过聚多巴胺(PDA)涂覆作用对薄膜复合聚酰胺(TFC-PA)膜进行改性,以提高膜的防污性和选择性能。采用衰减全反射傅里叶变换红外光谱(ATR-FTIR)、扫描电子显微镜(SEM)、原子力显微镜(AFM)和接触角分析仪考察改性后膜表面结构、形貌和亲水性的变化,通过正渗透实验和结垢实验评估改性前后膜的渗透性和防污性。结果表明,改性后膜表面成功涂覆了均匀的聚多巴胺层,膜表面的亲水性增加;改性膜拥有较高的水渗透通量和较低的反向溶质通量。原始膜经过改性后选择性由 $(0.26\pm 0.3)\times 10^{-3}$ 变化至 $(0.09\pm 0.2)\times 10^{-3}$ ,膜的选择性变高。原始膜经过改性后结垢指数由12.26%降低到5.45%,改性膜显示出更好的防污性。

**关键词:**正渗透;聚多巴胺改性;渗透性;选择性;防污性

中图分类号:TQ51;TQ53

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)12-0170-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2021.12.034

## Improving selectivity and antifouling properties of thin-film composite polyamide membrane by coating with a polydopamine layer

WANG Tong-jun, JIANG Chao, ZHOU Yu, HONG Jian-quan, WEI Hui-xian\*

(Key Laboratory of Synthetic and Biological Colloids of the Ministry of Education, School of Chemical and Material Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:**Thin-film composite polyamide (TFC-PA) membrane is modified through coating a surface layer of polydopamine (PDA) to improve its selectivity and antifouling property. Attenuated total reflectance Fourier transform infrared (ATR-FTIR), scanning electronic microscopy (SEM), atomic force microscopy (AFM) and contact angle analyzer are employed to study the changes in surface structure, morphology and hydrophilicity of the membrane after modification. The membrane's permeability and antifouling properties before and after the modification are evaluated through forward osmosis and scaling experiments. The results show that the surface of the modified membrane has successfully been coated with a uniform polydopamine layer, and the hydrophilicity of the membrane surface increases; the modified membrane exhibits higher water permeation flux and lower reverse solute flux. After the modification of original membrane, the selectivity ( $J_s/J_w$ ) changes from  $(0.26\pm 0.3)\times 10^{-3}$  to  $(0.09\pm 0.2)\times 10^{-3}$ . The smaller the value of  $J_s/J_w$ , the higher the selectivity of the membrane. Meanwhile, the fouling index drops from 12.26% to 5.45% due to modification, and the modified membrane shows better antifouling properties.

**Key words:** forward osmosis; modification by polydopamine; permeability; selectivity; antifouling property

近几十年,由于全球人口呈指数级增加和能源消耗量显著增加,水污染问题已成为全球许多国家亟待解决的问题。随着膜过滤技术的应用和发展,使用反渗透(RO)、微滤(UF)和纳滤(NF)等膜脱盐工艺从咸水、地表水、农业排水和工业废水中获得清洁水的技术愈加成熟<sup>[1-3]</sup>。但是,这些依靠外部机械压力运行的膜渗透工艺的水回收率受到膜污染的极大限制。严重的膜污染不仅降低了水渗透通量,而且也降低膜分离性能,膜污染造成的膜表面的不

可逆结垢将会缩短膜的使用寿命。

正向渗透(FO)利用渗透压差作为进料液和汲取溶液之间的驱动力,该技术可在无压操作下实现较低的能耗以及较高的结垢可逆性<sup>[4]</sup>。薄膜复合聚酰胺(TFC)膜因拥有较好的分离能力、宽范围的pH耐受性以及可独立调整的支撑层和活性层等特性而被广泛用于FO的研究<sup>[5-6]</sup>。到目前为止,一些学者对TFC膜表面功能化进行了广泛地研究,如Kim等<sup>[7]</sup>在TFC膜的表面涂覆中性聚合物聚乙烯

收稿日期:2021-01-27;修回日期:2021-10-10

基金项目:中央高校基本科研业务费(JUSRP22020)

作者简介:王通军(1995-),男,硕士研究生,研究方向为污水处理,1536837096@qq.com;魏慧贤(1971-),女,博士,副教授,研究方向为化工废水资源化处理,通讯联系人,weihuixian@jiangnan.edu.cn。

醇(PVA),结果发现光滑的改性膜表面在处理印染废水中表现出较好的抗污性。Louie 等<sup>[8]</sup>在 TFC 渗透膜表面合成聚醚-聚酰胺嵌段共聚物涂层,该保护涂层具有较优的抗污性,但涂层后的膜通量下降。因此,在不断改善膜分离技术的研究中,具有低反向溶质通量、高水渗透通量和防污性能优异的膜一直是研究重点。

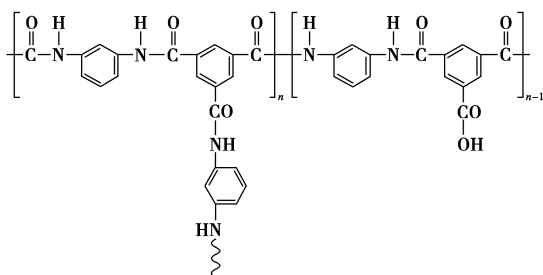
近几年的仿生学研究发现,*L*-3,4-二羟基苯丙氨酸(DOPA)及其酚衍生物可以对材料表面产生较好的附着性。如 3,4-二羟基苯乙胺(Dopamine)在水溶液中进行氧化聚合形成聚多巴胺(PDA),PDA 结构中的酚、醌和氨基等官能团可以和材料表面建立共价或非共价(范德华力、氢键、 $\pi$ - $\pi$ 等)的相互作用<sup>[9]</sup>。这一现象为 TFC 膜的分离层改性提供了一种新的研究思路,即通过在分离层表面涂覆功能材料来改善膜的防污和分离性能。

笔者利用多巴胺在 Tris-HCl 缓冲溶液中氧化聚合成 PDA,并通过表面涂覆方法将其附着在 TFC 膜分离层。通过表征膜表面化学结构、形貌、亲水性,分析由 PDA 层沉积引起的变化。通过正渗透性能测试评估了原始膜和改性膜的渗透性能。通过脱硫废水(FGD)的正渗透结垢实验研究了改性前后膜的防污性能变化。

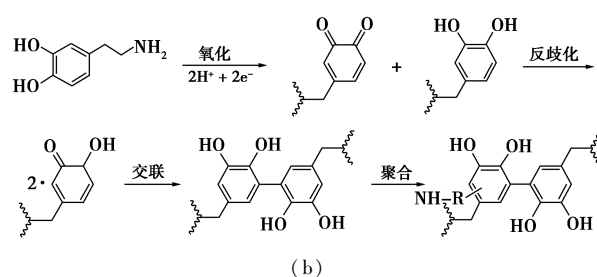
## 1 改性膜的制备及表征

### 1.1 实验材料

采用苏州润膜水处理技术有限公司提供的 TFC 膜,膜的支撑层为聚砜(PFS),分离层为聚酰胺(PA),PA 结构式如图 1(a)所示;盐酸多巴胺(DA·HCl),质量分数为 98%,由 Adanas-beta(China)提供,其氧化聚合机理如图 1(b)所示<sup>[10-12]</sup>;三(羟甲基)氨基甲烷(Tris),质量分数 >99.9%。使用去离子水作为溶剂,用于制备水性溶液以及在膜改性过程中浸泡和冲洗膜样品;脱硫废水取自某火力发电厂出水,经离心和 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜预处理后使用;其余实验药品均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司生产。



(a)



(b)

图 1 TFC 膜表面聚酰胺(PA)分离层结构及多巴胺在水溶液中聚合过程

### 1.2 TFC 膜表面涂覆

多巴胺(DA)的聚合仅在水溶液中进行,且需要氢氧化物基团来促进多巴胺的官能团化<sup>[13]</sup>。将 15 g/L 的多巴胺溶液加入 50 mL Tris-HCl 缓冲溶液(10 mmol/L, pH 8.5)和乙醇的混合溶剂 [ $V(\text{tris}):V(\text{乙醇}) = 9:1$ ]中,并加入 1.0 mL 的  $\text{H}_2\text{O}_2$ (0.05 mol/L)溶液配制浓度为 0.08 mol/L 的多巴胺涂覆液。将涂覆液放置在分离层侧的容器中,在支撑层侧放入相同条件不含多巴胺的 Tris-HCl 缓冲溶液,以平衡整个膜上的浓度梯度。在 30 $^\circ\text{C}$ 下避光振荡涂覆 90 min,涂覆结束后取出膜,用去离子水和乙醇交替冲洗干净,放入超纯水中浸泡 60 min 除去未反应的单体和过量的固体聚合物,将改性膜浸渍一段时间后进行真空固化。最后,将膜片在纯水中浸泡存储 24 h 后测试。

### 1.3 膜的表征

通过衰减全反射傅里叶变换红外光谱法(Nicolet 6700 型,USA)鉴定改性前后膜的化学官能团变化。通过场发射扫描电子显微镜(S-4800, Japan)观察涂覆膜的表面和横截面的形貌。通过原子力显微镜(MuLtimode 8 型,Germany)分析膜表面粗糙度,以均方根粗糙度(RMS)表示表面粗糙度<sup>[14]</sup>。膜表面的亲水性通过光学接触角测量仪(OCA 40, Germany)进行接触角测量,将表面 6 个不同点测量值的平均值作为接触角。

### 1.4 原始膜与改性膜的正渗透性能测试

利用实验室自制的过滤单元进行 FO 性能测试,该过滤单元的有效膜面积为 21.24  $\text{cm}^2$ 。将膜的分离面向渗透液(AL-FS)进行正渗透实验。用不同渗透压的 NaCl 溶液(2.2、3.2、4.2、5.2 MPa)作为汲取液,去离子水用作渗透液。体系的温度控制在(30 $\pm$ 0.5) $^\circ\text{C}$ 。计算水渗透通量( $J_w$ )、反向溶质通量( $J_s$ )和膜选择性( $J_s/J_w$ ):

$$J_w = [(V_{\text{DS},t} - V_0) \times \rho_w] / (18 \times A \times t) \quad (1)$$

$$J_s = [\Delta(C_{FS,t} V_{FS,t})] / (A \times t) \quad (2)$$

$$J_s / J_w = [\Delta(C_{FS,t} V_{FS,t}) \times 18] / [(V_{DS,t} - V_0) \times \rho_w] \quad (3)$$

式中:  $t$  为渗透时间, h;  $V_{DS,t}$  为  $t$  时汲取液的体积, L;  $V_0$  是初始汲取液的体积, L;  $\rho_w$  为水的密度, g/cm<sup>3</sup>;  $A$  为渗透面积, m<sup>2</sup>;  $C_{FS,t}$  为  $t$  时渗透液中的盐浓度, mmol/L;  $V_{FS,t}$  为  $t$  时渗透液的体积, L。

利用 van't Hoff 方程计算汲取溶液产生的渗透压<sup>[15]</sup>。通过电导率仪(SX751 型, 上海)测量渗透液电导率变化, 根据预先测定的电导率与电解质浓度的关系计算膜的反向溶质通量, 每个测试平均实验 3 次。

### 1.5 原始膜与改性膜的结垢实验

选用 KHCO<sub>3</sub> 溶液为汲取液, 在 9.92 MPa 的恒定渗透压下以燃煤电厂的 FGD 废水为渗透液进行 12 h 的正渗透实验。为排除渗透压差下降对通量降低的影响, 用与 FGD 废水相同渗透压的 MgCl<sub>2</sub> 溶液为渗透液进行基线实验。在结垢实验中, 结垢膜的水通量与其初始通量进行归一化, 计算膜结垢指数(FI), 从而评估膜的防污性。所有实验均在(30±0.5)℃的恒定温度和(6.9±0.1)的进料 pH 下进行。膜结垢指数(FI)计算式为:

$$FI = (1 - J_{w,FGD} / J_{w,基线}) \times 100\% \quad (4)$$

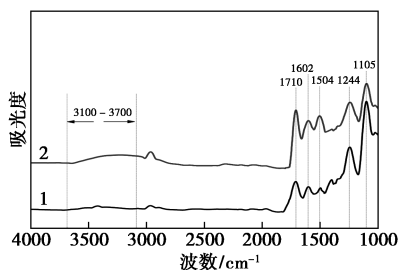
式中:  $J_{w,FGD}$  是以 FGD 废水为渗透液时水渗透通量, mol/(m<sup>2</sup>·h);  $J_{w,基线}$  是以 0.142 mol/L 氯化镁为渗透液时水渗透通量, mol/(m<sup>2</sup>·h);

## 2 结果与讨论

### 2.1 膜表征

#### 2.1.1 聚多巴胺改性对膜表面结构的影响

原始膜与 PDA 改性膜的 ATR-FTIR 谱图如图 2 所示。



1—原始膜; 2—PDA 改性膜

图 2 原始膜与 PDA 改性膜的 ATR-FTIR 谱图

由图 2 中可以看出, 在 1 244 cm<sup>-1</sup> 和 1 105 cm<sup>-1</sup> 处的吸收峰为聚砜结构中 C—O—C 伸缩振动和 SO<sub>2</sub> 对称伸缩的特征峰。在 2 种膜的 ATR-FTIR 谱

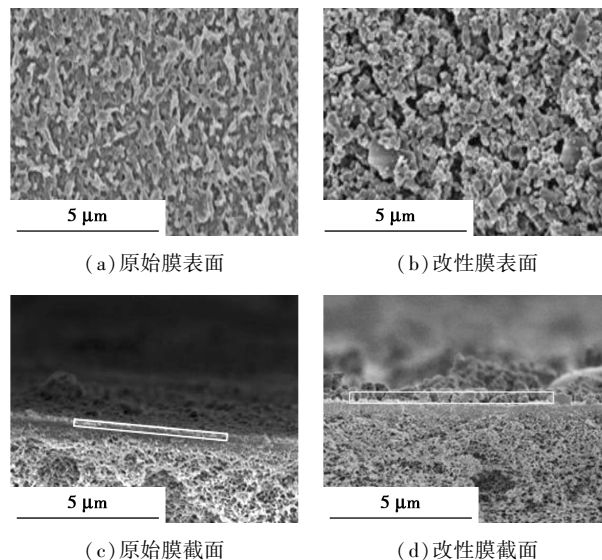
图中, 1 710 cm<sup>-1</sup> 处的吸收峰属于聚酰胺中 C=O 的伸缩振动峰(酰胺 I 带), 1 602 cm<sup>-1</sup> 处的吸收峰为苯环骨架上 C=C 的共振峰, 1 504 cm<sup>-1</sup> 处为 N—H 的弯曲振动峰(酰胺 II 带)。在 3 100~3 700 cm<sup>-1</sup> 处的吸收峰属于 N—H 和 O—H 的伸缩振动峰。聚多巴胺改性后的膜表面 C=O 的伸缩振动峰、苯环骨架上 C=C 的共振峰、N—H 的弯曲振动峰以及 N—H 和 O—H 伸缩振动峰逐渐增强。此外, 在 PDA 修饰的 TFC 膜中, 3 100~3 700 cm<sup>-1</sup> 内的宽度都有不同程度增加, 这归因于 DA 在氧化自聚过程生成具有邻苯二酚、邻苯二醌等结构的化合物, 形成的 PDA 中 N—H 和 O—H 拉伸振动也增加了膜表面的亲水性<sup>[16-17]</sup>。通过 ATR-FTIR 分析表明, 多巴胺在膜分离层表面发生聚合反应, 形成含有氨基、羟基及苯环结构的聚多巴胺层(PDA), 证实膜表面成功涂覆了聚多巴胺涂层。

#### 2.1.2 聚多巴胺改性对膜表面亲水性的影响

水接触角(WCA)是表征膜表面相对亲水性的常规方法。一般来说, 亲水表面对污垢有较小吸附性。因此, 亲水性的膜将具有更好的防污性能<sup>[18-19]</sup>。用去离子水在 25℃ 环境下测量得到原始膜与改性膜的 WCA 分别为(74.96±1.5)° 和(31.26±2.7)°, 这是由于 DA 在氧化聚合的过程中引入了胺基和羟基等亲水基团, 并在膜表面快速形成亲水性的 PDA 涂层<sup>[20-21]</sup>。因而膜表面接触角减小, 亲水性增加。膜表面接触角的测试表明, PDA 修饰后的膜表面亲水性得到提升。

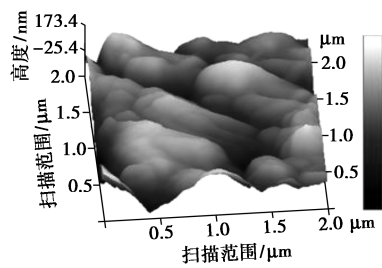
#### 2.1.3 聚多巴胺改性对膜表面形貌的影响

聚多巴胺改性对膜表面形貌的影响如图 3 所示。

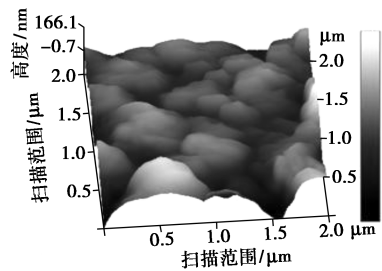


(c) 原始膜截面

(d) 改性膜截面



(e) 原始膜表面 AFM 形貌



(f) 改性膜表面 AFM 形貌

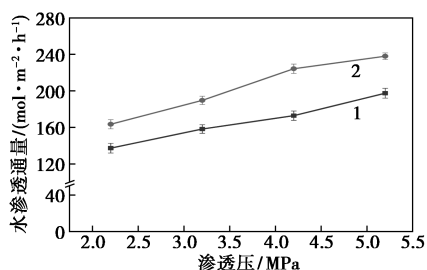
图 3 原始膜与改性膜 SEM 和 AFM 图像

从图 3(a) 中可以看出,原始膜表面具有“峰谷”特征,这与界面聚合的 PA 膜的典型形态是一致的<sup>[6,17,22]</sup>。从图 3(b) 中可以看出,改性膜表面有着均匀的 PDA 颗粒涂覆层,原始膜表面峰谷结构逐渐被聚多巴胺颗粒涂覆。从图 3(c) 和图 3(d) 中可以看出,PDA 改性后膜的分离层厚度增加。膜表面 SEM 表明改性后 PDA 成功涂覆在原始膜的聚酰胺层。

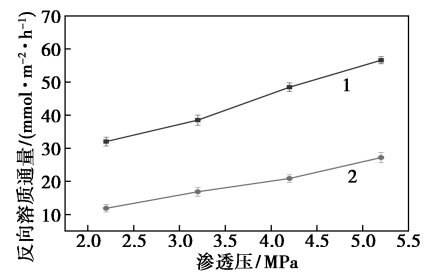
从图 3(e) 中可以看出,原始膜表面凹凸不平,粗糙度较大,原始膜的均方根粗糙度 ( $RMS$ ) 为 57.7 nm。从图 3(f) 中可以看出,改性膜表面较平整,这是由于在振荡涂覆过程中生成的 PDA 颗粒逐渐均匀分散在聚酰胺层的谷底区域,膜表面形貌更光滑,改性膜的  $RMS$  为 43.0 nm。光滑的膜表面可以减小膜过滤时的表面阻力和污染物在膜表面的粘附力,从而提高膜表面的防污性能<sup>[23]</sup>。

## 2.2 不同汲取液渗透压下的正渗透性能

原始膜和改性膜分别在不同渗透压下正渗透 2 h 后的水渗透通量和反向溶质通量如图 4 所示。



(a) 水渗透通量



(b) 反向溶质通量

1—原始膜;2—改性膜

图 4 原始膜和改性膜在不同渗透压下正渗透 2 h 后的渗透性能

由图 4(a) 中可以看出,2 种膜的水渗透通量均随汲取液渗透压的增加而增加,这是因为渗透压越高,膜两侧的驱动力越大,水渗透通量越高。比较 2 种膜的水渗透通量发现,改性膜的水渗透通量是原始膜水通量的 1.2 倍,这归因于改性膜表面 PDA 层疏松均匀沉积在膜表面导致膜的润湿性增加,从而促进水分子透过膜的增溶和扩散作用,使得水渗透通量增加。由图 4(b) 中可以看出,反向溶质通量中,原始膜的反向溶质通量是改性膜的 3 倍。随着渗透压的增加,原始膜的反向溶质通量从 32.10  $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  增大到 57.70  $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;对于改性膜,汲取溶液渗透压每增加 1.2 MPa,反向溶质通量增加约 5  $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

正渗透实验中原始膜与改性膜的膜选择性 ( $J_s/J_w$ ) 如表 1 所示。通常  $J_s/J_w$  越小,表明膜具有较高的选择性<sup>[24]</sup>。由表 1 中可以看出,原始膜与改性膜的  $J_s/J_w$  值分别为  $(0.26 \pm 0.3) \times 10^{-3}$  和  $(0.09 \pm 0.2) \times 10^{-3}$ 。因此,改性膜比原始膜具有更高的选择性。亲水性 PDA 层不仅提高了膜的水渗透通量,而且分离层厚度的增加也降低了溶质在渗透过程中的反向扩散。因此,改性膜比原始膜具有更低的反向溶质通量和较好的选择性,表明涂覆 PDA 的膜在正渗透水处理中有着更大的优势。

表 1 不同渗透压 NaCl 汲取液中原始膜与改性膜的  $J_s/J_w$  ( $\times 10^{-3}$ )<sup>①</sup>

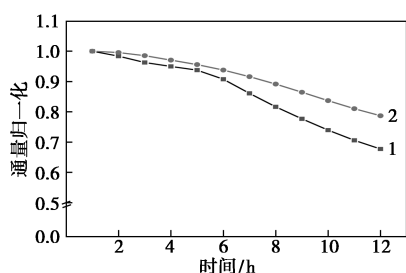
渗透压/MPa	2.2	3.2	4.2	5.2
原性膜	0.23	0.24	0.28	0.29
改性膜	0.07	0.09	0.09	0.11

注:①渗透溶液为去离子水。

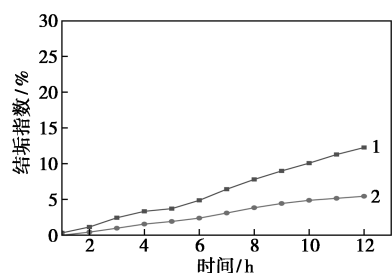
## 2.3 膜对脱硫废水抗污性影响

以燃煤电厂的 FGD 废水为渗透液,研究了原始膜和改性膜对 FGD 废水的防污性。原始膜和改性

膜随时间变化的水渗透通量归一化曲线及膜结垢指数如图 5 所示。



(a) 水渗透通量归一化( $J_w/J_0$ ) 曲线



(b) 膜结垢指数

1—原始膜;2—改性膜

图 5 原始膜和改性膜的抗污性

从图 5(a) 中可以看出,随着渗透时间的延长,原始膜和改性膜的通量均逐渐降低,原始膜在渗透 6 h 后通量下降明显,改性膜的通量下降速度较慢。原始膜和改性膜在渗透 12 h 后通量下降率分别为 32.29% 和 21.32%。2 种膜的水通量下降是由于膜表面结垢和净渗透压损失造成的。在排除渗透压差的下降对通量降低的影响后,2 种膜的结垢指数如图 5(b) 所示,随着时间的延长,2 种膜的结垢指数均增大,原始膜表面的结垢程度更加严重,原始膜较高的通量下降率表明膜表面发生了严重的结垢。渗透 12 h 原始膜的结垢指数(12.26%)是改性膜结垢指数(5.45%)的 2.25 倍。改性膜表面结垢指数较小,归因于改性膜较光滑的表面,也减少了污垢在膜表面上的附着和积累,从而提高膜表面的防污性<sup>[17]</sup>。因此,当在相同渗透压下对 FGD 废水进行正渗透时,PDA 涂覆膜的防污性比原始膜更强。

### 3 结论

利用聚多巴胺对 TFC-PA 膜进行涂覆改性以提高膜的选择性和抗污性。从正渗透实验结果可以得出,与原始膜相比,涂有 PDA 层的改性膜表现出更低的反向溶质通量和更好的选择性。2 种膜的水渗透通量和反向溶质通量均随着渗透压的增加而增加,改性膜的水渗透通量是原始膜的 1.2 倍,反向溶

质渗透通量是原始膜的三分之一,改性膜的选择性较原始膜提高了 3 倍;在 FGD 废水结垢实验中,改性膜的通量下降速率小于原始膜,改性膜显示出更低的结垢指数,证实 PDA 涂覆后的 TFC 膜表面防污性增加。

### 参考文献

- [1] Arias-Paić M S, Korak J A. Forward osmosis for ion exchange waste brine management [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2020, 7(2): 111-117.
- [2] 汪伟宁, 王大新, 王晓琳, 等. 无机盐水溶液体系的纳滤膜分离实验研究[J]. *高校化学工程学报*, 2002, 16(3): 257-262.
- [3] Lee K P, Arnot T C, Mattia D. A review of reverse osmosis membrane materials for desalination—Development to date and future potential[J]. *Journal of Membrane Science*, 2011, 370(1-2): 1-22.
- [4] A N A, A S P, B Y C, *et al.* Recent advances in nanomaterial-modified polyamide thin-film composite membranes for forward osmosis processes[J]. *Journal of Membrane Science*, 2019, 584: 20-45.
- [5] Li Y, Yang Y, Li C, *et al.* Comparison of performance and biofouling resistance of thin-film composite forward osmosis membranes with substrate/active layer modified by graphene oxide[J]. *RSC Advances*, 2019, 9(12): 6502-6509.
- [6] Han G, Zhang S, Li X, *et al.* Thin film composite forward osmosis membranes based on polydopamine modified polysulfone substrates with enhancements in both water flux and salt rejection [J]. *Chemical Engineering Science*, 2012, 80: 219-231.
- [7] I C Kim Y H K, Park J Y, Lee K H. Preparation of fouling resistant nanofiltration and reverse osmosis membranes and their use for dyeing wastewater effluent [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2004, 10: 115-121.
- [8] Louie J S, Pinnau I, Ciobanu I, *et al.* Effects of polyether-polyamide block copolymer coating on performance and fouling of reverse osmosis membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 280(1): 762-770.
- [9] 徐又一, 蒋金泓, 朱利平, 等. 多巴胺的自聚-附着行为与膜表面功能化[J]. *膜科学与技术*, 2011, (3): 32-38.
- [10] Ball V. Polydopamine films and particles with catalytic activity[J]. *Catalysis Today*, 2018, 301: 196-203.
- [11] Chen C T, Ball V, De Almeida Gracio J J, *et al.* Self-assembly of tetramers of 5,6-dihydroxyindole explains the primary physical properties of eumelanin: experiment, simulation, and design [J]. *ACS Nano*, 2013, 7(2): 1524-1532.
- [12] D'ischia M, Napolitano A, Pezzella A. 5,6-Dihydroxyindole chemistry: Unexplored opportunities beyond eumelanin [J]. *European Journal of Organic Chemistry*, 2011, 2011(28): 5501-5516.
- [13] Lee H, Dellatore S M, Miller W M, *et al.* Mussel-inspired surface chemistry for multifunctional coatings [J]. *Science*, 2007, 318(5849): 426-430.
- [14] Hirose M, Ito H, Kamiyama Y. Effect of skin layer surface structures on the flux behaviour of RO membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 1996, 121(2): 209-215.

(下转第 179 页)

- acetate from cotton cellulose and its effect on specific surface area and particle size distribution[J]. Iranian Polymer Journal, 2017, 26(4): 261–272.
- [4] Lan T, Shao Z Q, Wang J Q, *et al.* Fabrication of hydroxyapatite nanoparticles decorated cellulose triacetate nanofibers for protein adsorption by coaxial electrospinning [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 260: 818–825.
- [5] Im S J, Jeong G, Jeong S, *et al.* Fouling and transport of organic matter in cellulose triacetate forward-osmosis membrane for wastewater reuse and seawater desalination[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 384: 123341.
- [6] Prihatiningtyas I, Gebreslase G A, Van der Bruggen B. Incorporation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> into cellulose triacetate membranes to enhance the performance of pervaporation for desalination of hypersaline solutions [J]. Desalination, 2020, 474: 114198.
- [7] Chen K, Xiao C, Liu H, *et al.* Design of robust twisted fiber bundle-reinforced cellulose triacetate hollow fiber reverse osmosis membrane with thin separation layer for seawater desalination[J]. Journal of Membrane Science, 2019, 578: 1–9.
- [8] Zhang B, Song X, Nghiem L D, *et al.* Osmotic membrane bioreactors for wastewater reuse: Performance comparison between cellulose triacetate and polyamide thin film composite membranes[J]. Journal of Membrane Science, 2017, 539: 383–391.
- [9] Nguyen T P N, Yun E T, Kim I C, *et al.* Preparation of cellulose triacetate/cellulose acetate (CTA/CA)-based membranes for forward osmosis[J]. Journal of Membrane Science, 2013, 433: 49–59.
- [10] Gu Y, Wang Y N, Wei J, *et al.* Organic fouling of thin-film composite polyamide and cellulose triacetate forward osmosis membranes by oppositely charged macromolecules[J]. Water Research, 2013, 47(5): 1867–1874.
- [11] Khaldia S, Lamia B, Yasmina K, *et al.* Preparation, characterization and antioxidant activity of microspheres made of cellulose triacetate (CTA) to control the release of vitamin C[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2020, 95(6): 1800–1807.
- [12] Fan X, Liu Z T, Liu Z W. Preparation and application of cellulose triacetate microspheres[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 177(1–3): 452–457.
- [13] Kajjari P B, Manjeshwar L S, Aminabhavi T M. Novel blend microspheres of cellulose triacetate and bee wax for the controlled release of nateglinide[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2014, 20(2): 397–404.
- [14] Han S O, Son W K, Youk J H, *et al.* Ultrafine porous fibers electrospun from cellulose triacetate[J]. Materials Letters, 2005, 59(24–25): 2998–3001.
- [15] Sassi J F, Chanzy H. Ultrastructural aspects of the acetylation of cellulose[J]. Cellulose, 1995, 2(2): 111–27.
- [16] Tang L G, Hon D N S, Zhu Y Q. An investigation in solution acetylation of cellulose by microscopic techniques[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1997, 64(10): 1953–1960.
- [17] Viera R G P, Rodrigues Filho G, de Assunção R M N, *et al.* Synthesis and characterization of methylcellulose from sugar cane bagasse cellulose[J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 67(2): 182–189.
- [18] Hindi S S Z, Abohassan R A. Cellulose triacetate synthesis from cellulosic wastes by heterogeneous reactions[J]. BioResources, 2015, 10(3): 5030–5048.
- [19] Nabili A, Fattoum A, Brochier-Salon M C, *et al.* Synthesis of cellulose triacetate-I from microfibrillated date seeds cellulose (Phoenix dactylifera L.) [J]. Iranian Polymer Journal, 2017, 26(2): 137–147.
- [20] Huang K, Zhang M, Zhang G, *et al.* Acetylation modification of rice straw fiber and its thermal properties[J]. Cellulose Chemistry and Technology, 2014, 48(3–4): 199–207. ■
- (上接第 174 页)
- [15] 蔡卫滨, 朴香兰, 李继定, 等. 不同交联剂对 PDMS/PVDF 纳滤膜溶剂回收性能的影响[J]. 化工学报, 2013, 64(2): 581–581.
- [16] Huang Y, Jin H, Li H, *et al.* Synthesis and characterization of a polyamide thin film composite membrane based on a polydopamine coated support layer for forward osmosis[J]. RSC Advances, 2015, 5(128): 106113–106121.
- [17] Yi W, Zhendong F, Shuaifei Z, *et al.* Dopamine incorporating forward osmosis membranes with enhanced selectivity and antifouling properties [J]. RSC Advances, 2018, 8(40): 22469–22481.
- [18] Akamatsu K, Furue T, Han F, *et al.* Plasma graft polymerization to develop low-fouling membranes grafted with poly(2-methoxyethylacrylate) [J]. Separation & Purification Technology, 2013, 102: 157–162.
- [19] Mondal S, Wickramasinghe S R. Photo-induced graft polymerization of N-isopropyl acrylamide on thin film composite membrane: Produced water treatment and antifouling properties[J]. Separation & Purification Technology, 2012, 90: 231–238.
- [20] Jiang J H, Zhu L P, Li X L, *et al.* Surface modification of PE porous membranes based on the strong adhesion of polydopamine and covalent immobilization of heparin [J]. Journal of Membrane Science, 2010, 364(1–2): 194–202.
- [21] Kasemset S, Wang L, He Z, *et al.* Influence of polydopamine deposition conditions on hydraulic permeability, sieving coefficients, pore size and pore size distribution for a polysulfone ultrafiltration membrane[J]. Journal of Membrane Science, 2017, 522: 100–115.
- [22] Lu P, Liang S, Qiu L, *et al.* Thin film nanocomposite forward osmosis membranes based on layered double hydroxide nanoparticles blended substrates[J]. Journal of Membrane Science, 2016, 504: 196–205.
- [23] Han G, Zhang S, Li X, *et al.* Thin film composite forward osmosis membranes based on polydopamine modified polysulfone substrates with enhancements in both water flux and salt rejection [J]. Chemical Engineering Science, 2012, 80: 219–231.
- [24] Cui Y, Ge Q, Liu X Y, *et al.* Novel forward osmosis process to effectively remove heavy metal ions[J]. Journal of Membrane Science, 2014, 467: 188–194. ■