

# 高碘酸钠促进 PG/PEI 共沉积改性中空纤维曝气膜性能优化及稳定性研究

李一心, 周军浩, 刘子强, 吴强, 王暄\*, 吕晓龙\*, 张萌萌, 胡皓楠

(天津工业大学材料科学与工程学院, 先进分离膜材料全国重点实验室,  
生物化工研究所, 天津 300387)

**摘要:**膜曝气生物膜反应器(MABR)在废水处理中具有高效率、低成本和环境友好等优势,而膜材料作为 MABR 系统的核心部分,须具备优异的氧传质性能和稳定性。针对 MABR 研究中疏水性聚偏氟乙烯(PVDF)微孔膜在氧传质性能方面的不足以及稳定性较差等问题,本研究采用邻苯三酚(PG)和聚乙烯亚胺(PEI)体系对自制 PVDF 疏水性微孔膜进行表面共沉积改性,并引入高碘酸钠(SP)作为氧化剂。研究表明,改性膜较原膜亲水性提高,水接触角从  $89.7^\circ$  下降到  $52.5^\circ$ ,泡点压力从 8 kPa 提升到 66 kPa,氧转移系数从  $0.76 \times 10^{-2}/\text{min}$  增加到  $1.47 \times 10^{-2}/\text{min}$  (1.93 倍),氧传质性能显著增强。此外,SP 的引入显著缩短了共沉积时间并提高了改性膜稳定性,其中高盐环境下的稳定性能尤其优越。

**关键词:**膜曝气生物膜反应器; 疏水膜; 邻苯三酚; 聚乙烯亚胺; 共沉积; 高碘酸钠

**中图分类号:** TQ028.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-8924(2025)03-0170-09

**doi:** 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2025.03.018

膜曝气生物膜反应器(MABR)是疏水膜曝气技术和生物处理技术相结合的新型水处理技术<sup>[1]</sup>。由于其出色的氧气利用率、高效的生物膜异向传质特性以及活性分层功能,在生活污水处理、黑臭水体治理、水体富氧和难降解、挥发性工业废水处理等方面展现出显著优势<sup>[2-3]</sup>。其中,膜材料作为 MABR 系统的核心组件,兼具膜曝气介质与生物膜附着生长载体两大功能,必须在曝气性能(气体传质能力)、机械性能、稳定性能、生物亲和性和经济性之间取得平衡。目前常使用疏水微孔膜、致密膜和复合膜<sup>[4]</sup>作为曝气膜材料应用于 MABR 系统研究中。疏水微

孔膜气体通量大、价格低廉,但其泡点低、耐污染性差;致密膜泡点高、机械性能好,但其透气性差、传质阻力大;相比之下,复合膜通过结合致密层和疏水性微孔基底的优势,不仅能够提升泡点压力,还可实现高效的氧传质效率及出色的生物亲和性能表现。然而,由于复杂、漫长的膜表面改性过程,高昂的材料成本,复合膜的大规模实际应用仍受到限制。因此,开发一种经济有效的方法来获得具有良好曝气性能和稳定性能的膜材料至关重要。

植物酚类广泛存在于天然来源中,例如水果、蔬菜、谷物和其他植物物种<sup>[5-6]</sup>。由于苯环,羧基和酚

收稿日期: 2025-01-08; 修改稿收到日期: 2025-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978466); 天津市科技计划项目(21ZYDJJC00050)

第一作者简介: 李一心(2000-),男,甘肃庆阳人,从事疏水性 PVDF 膜表面改性及 MABR 应用研究。\* 通讯作者,王暄, E-mail: xuanwang@tiangong.edu.cn; 吕晓龙, E-mail: 13920286131@163.com

引用本文: 李一心,周军浩,刘子强,等.高碘酸钠促进 PG/PEI 共沉积改性中空纤维曝气膜性能优化及稳定性研究[J].膜科学与技术,2025,45(3):170-178.

Citation: Li Y X, Zhou J H, Liu Z Q, *et al.* Research on the performance optimization and stability of PG/PEI *co*-deposition modified hollow fiber aeration membrane facilitated by sodium periodate[J]. Membrane Science and Technology (Chinese), 2025, 45(3): 170-178.

羟基的存在,植物酚类越来越多的被用于各种材料的表面改性<sup>[7-9]</sup>。目前,利用酚类物质对膜进行改性的方法主要有共沉积法、界面聚合法、层层组装法等。其中,共沉积法因其易于实施、能够确保高度均匀的膜结构而被广泛用于膜表面改性。但是,共沉积法最常见的问题是涂层的稳定性,特别是在一些极端条件下,例如酸、碱条件和高盐度。为了增强基体与涂层之间的作用力,提高涂层的稳定性,研究者尝试研究酚类物质与其他物质(如金属离子、有机物和纳米材料)的复合改性,希望通过多种机制提高膜的性能。Yu等<sup>[10]</sup>研究了 $Fe^{3+}$ 与酚羟基在各种基底上的沉积行为,研究表明,修饰过的微孔聚合膜具有超亲水性和水下超疏油性,对各种油/水乳液均显示出高分离效率和良好的重复使用性。Li等<sup>[11]</sup>将儿茶酚(CA)和带氨基的三乙氧基硅烷(KH550)在基材上形成共沉积涂层,随后利用涂层的二次反应原位生成铁基化合物,除高效去除阴离子燃料外,研究还证实了酚类物质和含氨基的硅氧烷偶联剂构建的共沉积涂层具有二次反应活性。

高碘酸钠(SP)是一种强氧化剂,可以将儿茶酚基团氧化形成醌,除提高沉积速率之外可以进一步提升涂层的稳定性。Xie等<sup>[12]</sup>通过 $Fe^{3+}$ 和SP协同诱导单宁酸(TA)沉积,PVDF膜的接触角在10 min内下降到 $34.6^\circ$ ,优化后的膜不仅具有良好的抗污性和可重复使用性,而且在长期运行期间具有理想的稳定性。Jiang等<sup>[13]</sup>通过在TA和SP混合溶液中进行一步浸涂,将疏水性PVDF膜轻松转变为高度亲水性和水下超疏油性膜,除具有出色的防污能力之外,即使在苛刻的pH溶液或超声处理下也具有稳定的TA涂层。Chen等<sup>[14]</sup>选用SP作为氧化剂,高效、廉价地构建了邻苯二酚(CA)涂层,具有良好均匀性的SP辅助CA薄膜有效地沉积在各种致密和多孔基材上,赋予了多孔膜极高的纯水渗透性、良好的重金属吸附能力和出色的油-水分离能力。目前,高碘酸钠辅助沉积酚类物质的研究主要集中在亲水膜领域,而MABR系统对膜材料的要求有所不同。因此,适用于MABR系统的表面改性膜仍需进一步探索和研究。

采用高碘酸钠(SP)作为氧化剂,结合邻苯三酚(PG)和聚乙烯亚胺(PEI)体系对PVDF膜进行一步共沉积改性,显著提高了膜的亲水性、氧传质性能和稳定性。首次系统研究了SP对PG/PEI共沉积过程的影响,优化了改性膜的制备工艺,为开发适用于

MABR系统的高性能膜材料提供了新的思路和方法。

## 1 实验部分

### 1.1 材料和试剂

PVDF中空纤维膜(非溶剂致相分离法制得;内径0.8 mm,壁厚0.15 mm,最大孔径 $0.16\ \mu\text{m}$ );邻苯三酚(PG,纯度 $>99\%$ ),聚乙烯亚胺(PEI, $M_w=600$ ,纯度 $\geq 99\%$ ),三羟甲基氨基甲烷(Tris),上海阿拉丁生化科技股份有限公司;高碘酸钠(SP, $M_w=213.89$ ),无水亚硫酸钠,氯化钴,上海麦克林生化科技有限公司;无水乙醇和浓盐酸,天津市科密欧化学试剂有限公司;去离子水,实验室自制。实验所用药品均为分析纯,不需其他提纯操作。

### 1.2 邻苯三酚/聚乙烯亚胺改性膜的制备

使用乙醇和去离子水对PVDF原膜进行前期处理。在配置好的Tris-HCl缓冲溶液(50 mmol/L, pH=8.5)中视实验目的添加SP,随后溶解一定量的PG和PEI(PG 2 g/L, PEI 1.3 g/L,由前期实验采用响应曲面法得到),将前期处理过的PVDF原膜用乙醇湿润30 s,将其分别浸入不同改性条件下的反应溶液中,在转速为150 r/min的摇床中共沉积反应一定时间,反应结束后将膜丝浸泡在去离子水中10 min,用滤纸擦干后放在 $40^\circ\text{C}$ 的烘箱中真空干燥4 h得到PG/PEI改性膜。

### 1.3 表征及基本性能测试

使用精密万能试验机(AGS X50N, Shimadzu, 日本)测试膜的力学性能<sup>[15]</sup>。通过全自动接触角测量仪(DSA30S, Kruss, 德国)测量膜表面静态水接触角。通过标准测试方法测定膜丝泡点压力<sup>[15]</sup>。使用皂泡流量计法<sup>[16]</sup>测试透气系数。实验中通过氧总转移系数( $K_{La}$ )表征曝气效果,氧转移系数越高,则供氧能力越强。通过溶氧仪(HQ40d, HACH, 美国)完成溶解氧的测定。氧传质性能测试采用多根膜丝制成的小型膜组件进行,其他基本性能选取5根及以上膜丝进行测试,测试结果取平均值。

采用冷场发射扫描电子显微镜(SEM, Regulus8100, 日本)观察膜表面形貌。通过傅里叶变换红外光谱(FTIR, Nicolet iS20, ThermoFisher, 美国)分析膜表面化学成分。使用原子力显微镜(AFM, Icon, Bruker Dimension, 德国)对膜表面粗糙度进行测量。

### 1.4 稳定性实验方法

物理稳定性:选取膜面积相同的2种改性膜

(有、无添加 SP), 分别浸泡在去离子水中, 在 40 Hz 的超声仪中震荡 30 min 后取出, 干燥后测量膜的基本性能。

化学稳定性: 选取膜面积相同的 2 种改性膜(有、无添加 SP), 分别浸泡在强酸(0.1 mol/L HCl, pH=1.0)、强碱(0.1 mol/L NaOH, pH=13.0)、中性条件(pH 7.0)及高盐溶液(1 mol/L NaCl)中, 摇床恒温震荡 2 h 后取出, 干燥后测量膜的基本性能。

## 2 结果与讨论

### 2.1 氧化剂 SP 对膜改性过程及性能的影响

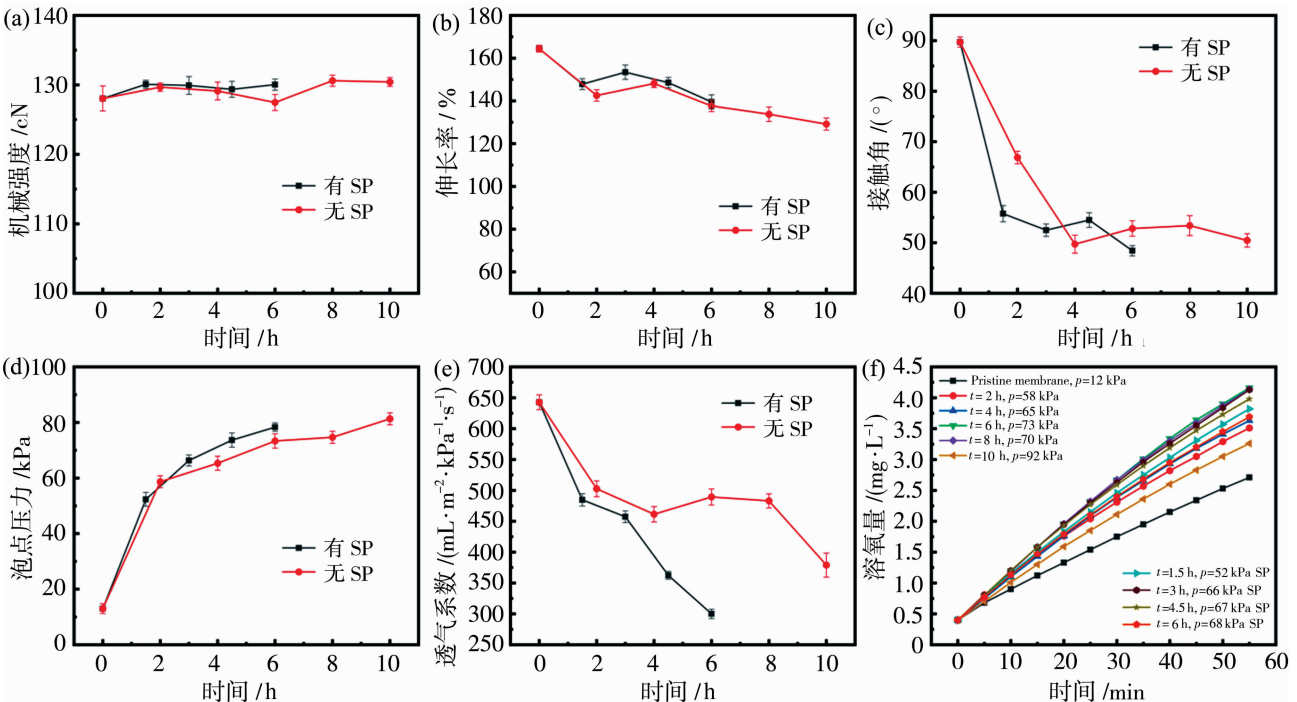
在前期共沉积改性条件优化研究的基础上, 为了探究氧化剂 SP 的引入对膜表面改性过程及改性膜性能的影响, 比较了在相同条件(PG/PEI 比例、共沉积温度)下, 未添加 SP 的改性膜(共沉积时间分别为 2、4、6、8、10 h)与添加 SP 的改性膜(共沉积时间分别为 1.5、3、4.5、6 h)的基本性能。实验结果如图 1 所示。

优异的机械性能是 MABR 长时间稳定运行的关键。如图 1(a)和图 1(b)所示, 不同共沉积时间下, 2 种改性膜的机械强度基本不变, 断裂伸长率略有降低, 这可能是因为涂层沉积在膜表面形成了一

个较为致密的膜层, 使得膜在外力拉伸时, 无法像原膜一样形成较大的形变, 从而导致断裂伸长率略有降低。总体来说, SP 的添加不会对改性膜的机械性能产生显著影响。

一定的亲水性在减缓膜污染的同时可以有效提高微生物的附着能力。图 1(c)展示了 2 种改性膜亲水性随着共沉积时间的变化。随着反应的进行 2 种改性膜接触角均呈降低趋势, 这是因为 PEI 中的氨基和 PG 中的羟基能够与水分子形成氢键或其他相互作用, 从而降低膜表面的接触角。随着共沉积时间的延长, 接触角变化不大, 但添加 SP 的改性膜接触角下降速率明显快于未添加 SP 的改性膜。由此可见, SP 能有效促进 PG/PEI 的反应, 在短时间内提高膜的亲水性。

实际应用中较高的操作压力可以给予膜丝更大的传质推动力, 从而有效提升氧传质效率。图 1(d)和图 1(e)展示了 2 种改性膜的泡点压力和透气系数随着共沉积时间的变化。随着共沉时间的增加泡点压力提高, 而透气系数下降, 这是因为 PG/PEI 涂层沉积在膜上, 膜表面变得更加致密, 膜孔变小, 增加了气体透过膜的难度。添加 SP 的改性膜泡点压力提高速率高于未添加 SP 的膜。



(a) 机械强度; (b) 伸长率; (c) 接触角; (d) 泡点压力; (e) 透气系数; (f) 氧传质性能

图 1 氧化剂 SP 对膜改性过程及性能的影响

Fig. 1 The effect of oxidant SP on membrane modification process and performance

在 MABR 中,膜作为氧气传输的通道,在极限操作压力(泡点压力)下的氧总转移系数( $K_{La}$ )是表征膜氧传质性能的关键综合性指标。氧总转移系数由不同时间下水中溶氧量计算得出。图 1(f)展示了原膜与 2 种改性膜的氧传质性能。与原膜相比,2 种改性膜的氧传质性能均得到提升。当未添加 SP 的改性膜共沉积时间为 6 h 时,氧总转移系数  $K_{La}$  从原膜的  $0.76 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$  提高至  $1.54 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ ,添加 SP 的改性膜共沉积时间为 3 h 时提高到  $1.47 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ ,SP 的添加显著缩短了共沉积时间,并且获得了具有优异氧传质性能的改性膜。

表 1 为原膜及最佳改性条件下(2 种改性膜质量浓度 PG 2 g/L、PEI 1.3 g/L,共沉积温度为 30 °C,未添加 SP 改性膜共沉积时间为 6 h,添加 SP 的

表 1 原膜及改性膜的基本性能

Table 1 Basic properties of original and modified films

膜类别	断裂强度 /cN	伸长率/%	泡点压力/kPa	透气系数/( $\text{mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )	接触角/(°)	氧总转移系数/ ( $10^{-2} \text{ min}^{-1}$ )	共沉积 时间/h
M0	128	164	8	660	89.7	0.76	
M1	123	148	73	489	52.8	1.54	6
M2	124	153	66	484	52.5	1.47	3

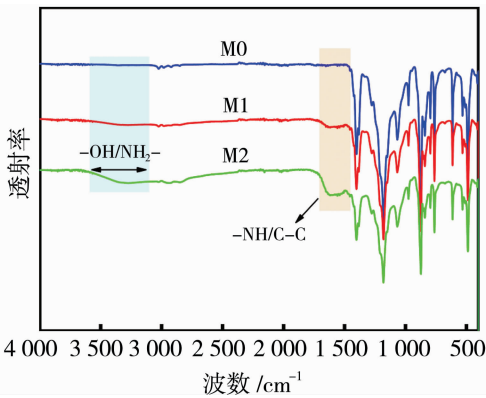


图 2 原膜 M0 及改性膜 M1 和 M2 的 FTIR 谱图  
Fig. 2 FTIR spectra of the pristine membrane M0 and modified membranes M1 and M2

图 3 与表 2 为原膜 M0 及改性膜 M1 和 M2 的 XPS 测试结果。图 3(a)和表 2 显示,经 PG/PEI 涂覆后,改性膜的元素含量较原膜发生了显著变化。C、N、O 元素含量上升是因为这是改性过程中主要引入的元素,F 元素含量下降是因为 PG/PEI 沉积在原膜表面所致。原膜中出现的 N 和 O 元素来自制备过程中使用的添加剂。图 3(b)~3(d)为 M0、M1 和 M2 的 XPS C 1s 光谱。通过考虑直接键合到碳原子上的元素和官能团,原膜和改性膜的 C 1s 峰

改性膜共沉积时间为 3 h)2 种改性膜的基本性能。原膜、未添加 SP 的改性膜和添加 SP 的改性膜分别记为 M0、M1 和 M2。

## 2.2 复合膜表面化学组成与形貌分析

### 2.2.1 膜表面化学组成分析

图 2 为原膜 M0 及改性膜 M1 和 M2 的 FTIR 光谱图。如图 2 所示,所有膜均展现出 PVDF 特有的宽 C—F 峰<sup>[17]</sup>。与 M1 相比,M2 膜的红外光谱强度明显提高。3 100~3 500  $\text{cm}^{-1}$  之间的宽峰是 PG 中的—OH 和 PEI 中的—NH<sub>2</sub> 的共同作用<sup>[18]</sup>。峰值强度在 1 450~1 650  $\text{cm}^{-1}$  之间的变化是由于 PEI 中—NH 的弯曲振动和 PG 中 C—C 环的振动<sup>[19]</sup>,M2 的峰值强度高于 M1,这是因为 SP 是一种强氧化剂,将 PG 中的邻位酚羟基氧化为邻苯醌。

被分别分解成 4 个和 6 个峰。在 M0 和 M2 的光谱中可以看到 PVDF 的特征峰—CF<sub>2</sub> 和 CH<sub>2</sub>—CF<sub>2</sub> 中 C 原子占总碳原子的百分比从原膜中的 24.39% 下降到 7.26%,—CH<sub>2</sub> 中 C 原子分数从原膜中的 34.95% 下降到改性膜中的 24.86%,这与膜上沉积的涂层有关。C=O 中 C 原子分数从 18.00% 下降到 7.18%,这是因为当 PEI 与膜表面的其他功能团反应时,导致原有的 C=O 基团被消耗或转换为不同的化学结构,导致 C=O 信号下降。C—N/C—O 中 C 原子分数从 0 增加到 19.81%,其中 C—N 来源于 Michael 加成反应。C=N 中 C 原子分数从 22.66% 增加到 31.34%,这归因于交联过程中的席夫碱反应。C—H 中 C 原子分数从 0 增加到 9.55%,这是由于 PEI 的存在<sup>[20]</sup>。这些结果表明 PG 和 PEI 已经成功地在 PVDF 膜上形成交联涂层。

### 2.2.2 膜表面形貌分析

图 4 为原膜 M0 及改性膜 M1 和 M2 的扫描电子显微镜(FE-SEM)照片,放大倍数分别为 2 000、3 000 和 5 000 倍。由图 4 可以观察到:原膜表面较光滑,改性后膜表面变得相对粗糙。这一变化可能是来源于 PG/PEI 涂层形成了致密的微观颗粒或凸起结构,特别是高碘酸钠参与反应后,促进涂层生成

了更多交联点,使涂层表现为更粗糙的颗粒状形貌。粗糙表面相比光滑表面具有更多的凹凸结构,可以为微生物的附着提供更多的“锚定点”,减少微生物在表面的滑动,提高附着的稳定性。此外,粗糙表面

上的凹凸结构能够在流体作用下形成微环境,能有效降低表面受流体剪切力的影响,使附着的微生物更加稳固。在 MABR 系统中,粗糙膜表面可以表现出更快的挂膜速率和更高的生物量。

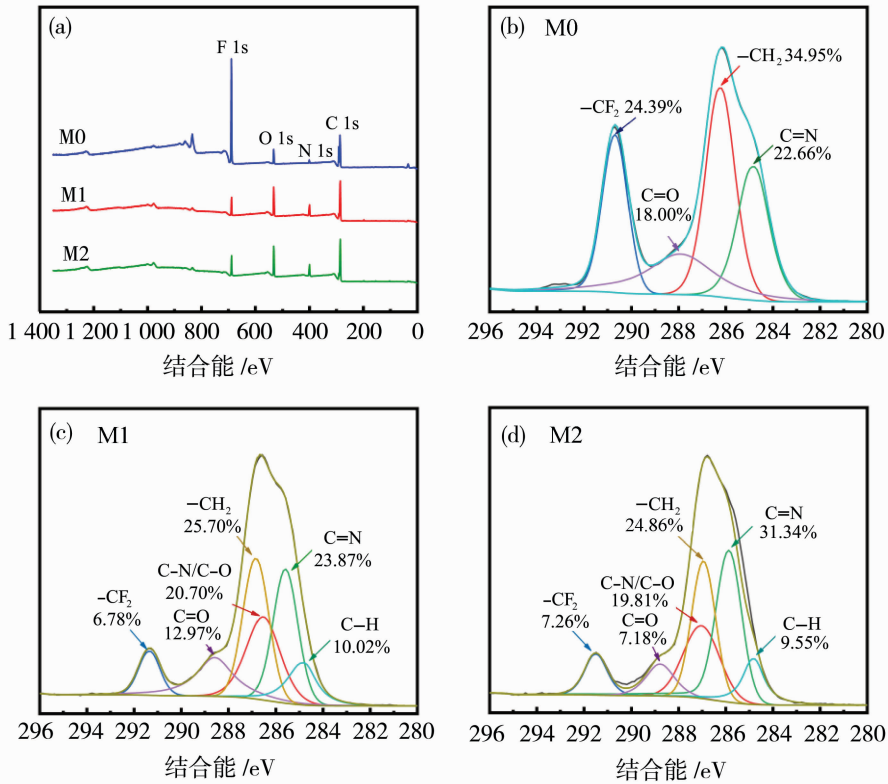


图 3 原膜 M0 及改性膜 M1 和 M2 的 XPS 全谱(a);M0 的 C 1s 谱图(b);M1 的 C 1s 谱图(c);M2 的 C 1s 谱图(d)  
 Fig. 3 XPS survey spectra of the pristine membrane M0 and modified membranes M1 and M2 (a); C 1s spectrum of M0 (b);C 1s spectrum of M1 (c);C 1s spectra of M2 (d)

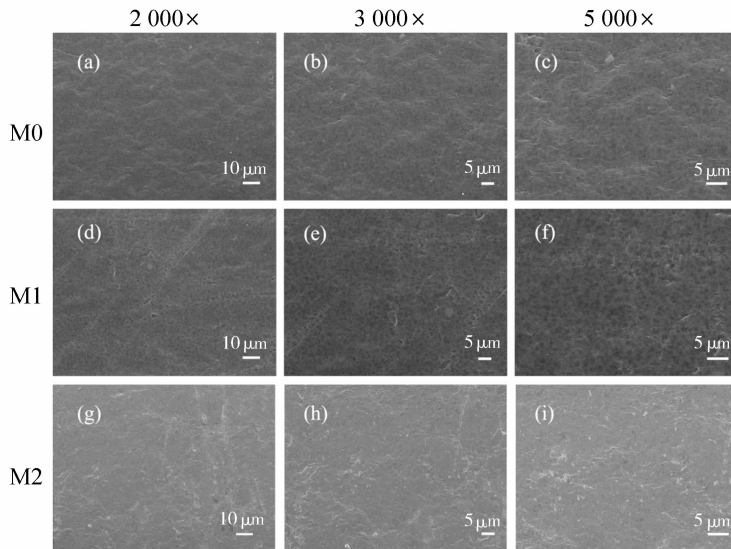


图 4 原膜 M0[(a),(b),(c)],改性膜 M1[(d),(e),(f)]及 M2[(g),(h),(i)]表面扫描电镜照片  
 Fig. 4 SEM images of pristine membrane M0 [(a),(b),(c)], modified membrane M1 [(d),(e),(f)], and modified membrane M2 [(g),(h),(i)] at different magnifications

表 2 原膜 M0 及改性膜 M1 和 M2 的 XPS 扫描测量结果

Table 2 XPS measurement results of the pristine membrane M0 and modified membranes M1 and M2

膜类别	原子分数/%			
	C 1s	O 1s	N 1s	F 1s
M0	54.56	6.91	1.86	35.57
M1	64.12	16.68	10.25	7.68
M2	63.70	16.80	10.65	7.08

图 5 为原膜 M0 及改性膜 M1 和 M2 的原子力

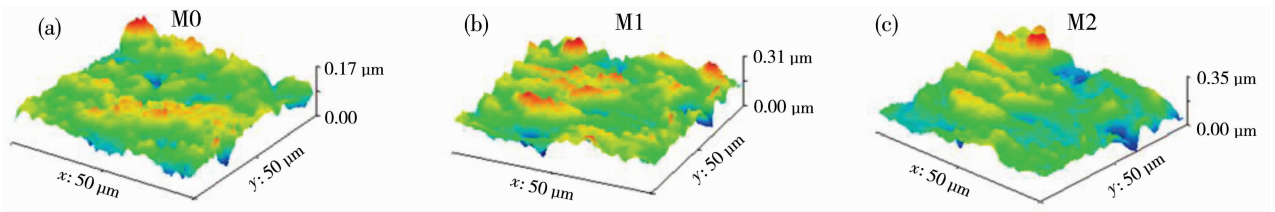
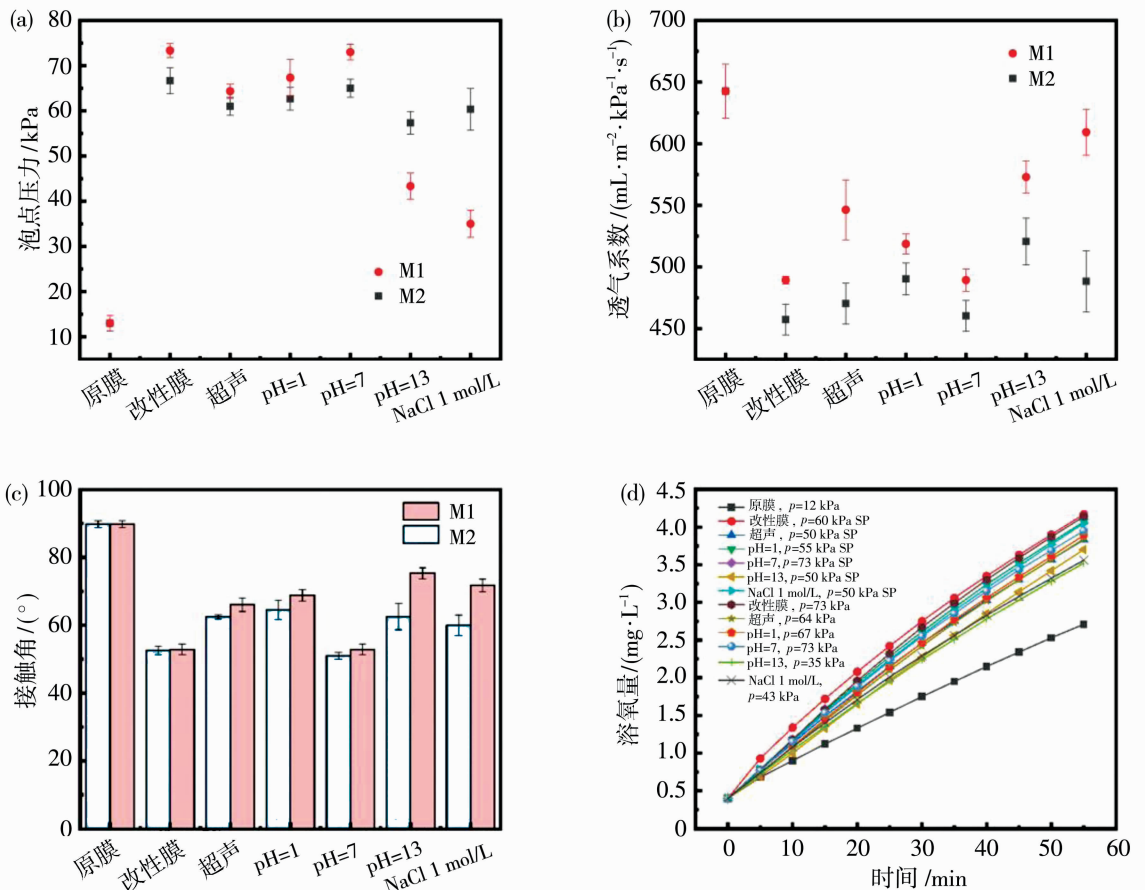


图 5 原膜 M0(a), 改性膜 M1(b) 及 M2(c) 原子力显微镜图像

Fig. 5 AFM images of pristine membrane M0 (a), modified membrane M1 (b), and modified membrane M2 (c)



(a) 泡点压力; (b) 透气系数; (c) 接触角; (d) 氧传质性能

图 6 不同环境下复合膜性能变化

Fig. 6 Changes in the performance of composite films in different environments

显微镜(AFM)照片。可以看出, M0 表面较为光滑, 粗糙度较低; 改性膜表面出现一定程度的颗粒状涂层, 粗糙度上升; 高碘酸钠参与氧化反应后引入了更复杂的表面结构, 粗糙度提升更加显著。粗糙度分别为 14.6 nm、29.5 nm 和 36.5 nm。粗糙度的提升增加了微生物的附着位点, 有利于生物膜的形成。

### 2.3 氧化剂 SP 投加对改性膜涂层稳定性影响

实验方法见 1.4。由图 6 和表 3 可知, 添加氧化剂 SP 的改性膜 M2 在各种环境下各项性能的稳

表 3 不同环境下复合膜氧总转移系数变化

Table 3 The variation of the overall oxygen transfer coefficient of the composite membrane under different conditions

膜类别	反应条件	$K_{La}/(10^{-2} \text{ min}^{-1})$	$K_{La}$ 变化倍数	$K_{La}$ 衰减率/%
M0		0.76	—	—
M1		1.54	2.02	—
	超声	1.31	1.72	14.9
	pH=1.0	1.34	1.76	13.0
	pH=7.0	1.49	1.96	3.2
	pH=13.0	1.14	1.56	26.0
	1 mol/L NaCl	1.16	1.52	24.7
	M2		1.47	1.93
M2	超声	1.30	1.71	11.6
	pH=1.0	1.44	1.89	2.0
	pH=7.0	1.46	1.92	0.7
	pH=13.0	1.23	1.38	16.3
	1 mol/L NaCl	1.42	1.52	3.4

定性均高于未添加氧化剂的改性膜 M1。在超声条件下, M2 的  $K_{La}$  衰减率为 11.6%, M1 的  $K_{La}$  衰减率为 14.9%。在强酸、中性、强碱、高盐溶液中 M2 的  $K_{La}$  衰减率分别为 2.0%、0.7%、16.3%、3.4%; M1 的  $K_{La}$  衰减率为 13.0%、3.2%、26.0%、24.7%。

综上所述, M2 的稳定性普遍高于 M1, 其中耐高盐性能尤其明显。这是因为 SP 的氧化作用会促使 PG 生成醌结构, 进而与 PEI 中的氨基形成共价交联反应。这种交联结构更加紧密, 减少了离子的渗透, 从而提高了涂层的稳定性。

### 3 结论与展望

#### 3.1 结论

本研究采用 PG/PEI 混合溶液对 PVDF 中空纤维膜进行一步沉积改性, 研究了氧化剂 SP 对改性过程及膜性能的影响。结果表明, SP 的加入可以显著缩短沉积时间, 同时获得氧传质性能、机械性能和亲水性能优异的 MABR 技术用膜。在 PG 质量浓度为 2 g/L, PEI 质量浓度 1.3 g/L, 共沉积温度 30 °C, 共沉积时间 3 h 的条件下, 与原膜相比, 泡点压力从 8 kPa 提升到 66 kPa, 氧转移系数从  $0.76 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$  增加到  $1.47 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ , 接触角从 89.7° 降低至 52.5°。表面分析显示, 加入 SP 的膜具有更高的粗糙度(有利于生物膜的形成)。在超声、强酸、中性、强碱、高盐条件下探究了 SP 对改性膜物理稳定性和化学稳定性的影响。研究表明, 未添加 SP 的改性膜氧传质性能衰减率分别为 14.9%、13.0%、3.2%、26.0%、24.7%; 添加 SP 的改性膜

氧传质性能衰减率分别为 11.6%、2.0%、0.7%、16.3%、3.4%, 加入 SP 的改性膜稳定性均高于未添加 SP 的改性膜, 其中耐高盐性能尤其优越。共沉积改性中引入氧化剂 SP, 不仅能够缩短共沉积时间, 而且能够获得稳定性更高的改性膜, 研究结果为研发适用于 MABR 的膜材料提供了技术基础。

#### 3.2 展望

本研究成功制备出具有高氧转移性能及稳定性的改性 PVDF 膜, 但面向 MABR 技术的工业化应用仍需解决不少问题。现有改性工艺涉及多步化学反应, 工业化应用时可能面临试剂消耗与废水排放等问题, 可以开发等离子体预处理-气相沉积联用技术, 降低药剂消耗量。此外, 现有膜性能评估多基于实验室模拟条件, 测试周期较短, 较难真实反应复杂废水环境下的长期运行性能, 建议进一步采用动态废水处理模拟系统开展长期连续运行测试, 系统考察生物污垢、机械应力及化学腐蚀耦合作用下的膜性能衰减机制。

#### 参考文献:

[1] 包进锋, 朱品尚, 朱圆圆, 等. 膜曝气生物膜反应器膜传氧速率的影响因素研究[J]. 膜科学与技术, 2023, 43(2): 123-127, 149.

[2] 袁晓彤, 郭东岳, 王 暄, 等. 氧化剂高碘酸钠诱发多巴胺自聚合在 MBfR 膜表面改性中的应用[J]. 膜科学与技术, 2017, 37(5): 36-41.

[3] 张 杨, 李庭刚, 强志民, 等. 膜曝气生物膜反应器研究进展[J]. 环境科学学报, 2011, 31(6): 1133-1143.

[4] 张利娟, 温 琦, 王 暄, 等. 膜表面改性技术在 MBfR

- 领域的应用[J]. 水处理技术, 2015, 41(8): 31-35.
- [5] Hu Q B, Luo Y C. Polyphenol-chitosan conjugates: Synthesis, characterization, and applications[J]. Carbohydrate Polym, 2016, 151: 624-639.
- [6] He Q, Shi B, Yao K. Interactions of gallotannins with proteins, amino acids, phospholipids and sugars[J]. Food Chem, 2006, 95(2): 250-254.
- [7] Ma W J, Ding Y C, Zhang M J, *et al.* Nature-inspired chemistry toward hierarchical superhydrophobic, anti-bacterial and biocompatible nanofibrous membranes for effective UV-shielding, self-cleaning and oil-water separation[J]. J Hazard Mater, 2020, 384: 121476.
- [8] Jeon J R, Kim J H, Chang Y S. Enzymatic polymerization of plant-derived phenols for material-independent and multifunctional coating[J]. J Mater Chem B, 2013, 1(47): 6501-6509.
- [9] Xu L Q, Neoh K G, Kang E T. Natural polyphenols as versatile platforms for material engineering and surface functionalization[J]. Prog Polym Sci, 2018, 87: 165-196.
- [10] Yu H, Zhong Q Z, Liu T G, *et al.* Surface deposition of juglone/FeIII on microporous membranes for oil/water separation and dye adsorption[J]. Langmuir, 2019, 35(10): 3643-3650.
- [11] Li J, Sun Y N, Yang X D, *et al.* Iron-based oxides anchored on the catechol/silane-coated polypropylene nonwoven fabrics for effective removal of anionic dyes[J]. Acs Appl Polym Mater, 2024, 6(10): 6150-6161.
- [12] Xie H, Shen L, Xu Y, *et al.* Tannic acid (TA)-based coating modified membrane enhanced by successive inkjet printing of Fe<sup>3+</sup> and sodium periodate (SP) for efficient oil-water separation[J]. J Membr Sci, 2022, 660: 120873.
- [13] Jiang B, Cheng K, Zhang N, *et al.* One-step modification of PVDF membrane with tannin-inspired highly hydrophilic and underwater superoleophobic coating for effective oil-in-water emulsion separation[J]. Sep Purif Technol, 2021, 255: 117724.
- [14] Chen Y, Liu Q J. Oxidant-induced plant phenol surface chemistry for multifunctional coatings: Mechanism and potential applications [J]. J Membr Sci, 2019, 570: 176-183.
- [15] 吕晓龙. 中空纤维多孔膜性能评价方法探讨[J]. 膜科学与技术, 2011, 31(2): 1-6.
- [16] Yang H C, Zhong W, Hou J, *et al.* Janus hollow fiber membrane with a mussel-inspired coating on the lumen surface for direct contact membrane distillation[J]. J Membr Sci, 2017, 523: 1-7.
- [17] 吴强, 周军浩, 李一心, 等. 具有坚固孔隙结构的超疏水纳米纤维膜设计用于膜蒸馏[J]. 膜科学与技术, 2024, 44(1): 63-70.
- [18] Yang X B, Yuan L C, Zhao Y Y, *et al.* Mussel-inspired structure evolution customizing membrane interface hydrophilization[J]. J Membr Sci, 2020, 612: 118471.
- [19] Liu R R, Chen Q, Cao M Y, *et al.* Robust bio-inspired superhydrophilic and underwater superoleophobic membranes for simultaneously fast water and oil recovery[J]. J Membr Sci, 2021, 623: 119041.
- [20] Wang A Q, Fang W X, Zhang J Y, *et al.* Zwitterionic nanohydrogels-decorated microporous membrane with ultrasensitive salt responsiveness for controlled water transport[J]. Small, 2020, 16(9): 1903925.

## Research on the performance optimization and stability of PG/PEI co-deposition modified hollow fiber aeration membrane facilitated by sodium periodate

LI Yixin, ZHOU Junhao, LIU Ziqiang, WU Qiang, WANG Xuan, LYU Xiaolong, ZHANG Mengmeng, HU Haonan  
(State Key Laboratory of Advanced Separation Membranes Materials, School of Materials Science and Engineering, Institute of Biochemical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** The membrane aerated biofilm reactor (MABR) demonstrates high efficiency, cost-

