

# 表面修饰无机粒子亲水改性聚醚砜膜的研究进展

何福英<sup>1</sup>, 何颖<sup>1</sup>, 付海<sup>1</sup>, 秦舒浩<sup>1,2</sup>, 张冰心<sup>1,3</sup>, 杨顺维<sup>3</sup>, 崔振宇<sup>2</sup>, 周焕勇<sup>3\*</sup>

(1. 贵州师范大学材料与建筑工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州省材料产业技术研究院, 贵州 贵阳 550014;  
3. 贵州中车绿色环保有限公司, 贵州 贵阳 550000)

**摘要:** 聚醚砜(PES)具有优异的抗氧化性、抗水解性、热稳定性和力学性能,在废水处理领域得到广泛应用。然而,PES膜本身疏水,在分离过程中易导致膜污染和使用寿命缩短,限制其在水处理领域的应用,因此需要对其进行亲水改性以提升抗污染性能。常用的膜改性方法包括表面改性和共混改性。文章介绍了PES膜的制备及改性方法,重点阐述表面修饰无机粒子亲水改性的研究进展,分析当前无机粒子亲水改性PES膜面临的挑战,为进一步研究提供参考。

**关键词:** 聚醚砜; 亲水改性; 表面改性; 无机粒子

中图分类号: TQ321

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)01-0204-06

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.01.037

## Research Progress of Hydrophilic-modified Polyethersulfone Membranes with Surface-modified Inorganic Particles

HE Fuying<sup>1</sup>, HE Ying<sup>1</sup>, FU Hai<sup>1</sup>, QIN Shuhao<sup>1,2</sup>, ZHANG Bingxin<sup>1,3</sup>, YANG Shunwei<sup>3</sup>, CUI Zhenyu<sup>2</sup>, ZHOU Huanyong<sup>3\*</sup>

(1. School of Materials and Construction Engineering, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Institute of Materials Industry and Technology, Guiyang 550014, China;

3. Guizhou CNR Green Environmental Protection Co., Ltd., Guiyang 550000, China)

**Abstract:** Polyether sulfone (PES) was widely used in the field of wastewater treatment due to its excellent antioxidant properties, hydrolysis resistance, thermal stability, and mechanical performance. However, PES membranes are hydrophobic, which can easily lead to membrane fouling and a shortened service life during the separation process, thereby limiting their application in the water treatment field. Therefore, it was necessary to modify PES membranes to be hydrophilic in order to enhance their antifouling properties. The commonly used membrane modification methods included surface modification and blending modification. The article introduced the preparation and modification methods of PES membranes, with a focus on the research progress of hydrophilic modification by surface decoration with inorganic particles. At the same time, it analyzed the challenges faced by inorganic particle-modified PES membranes, providing references for further research.

**Keywords:** PES; Hydrophilic modification; Surface modification; Inorganic particles

城市面积的扩大、人口的增长以及工业化进程的加速使人类对水资源的需求显著增加。水资源的短缺以及生产生活中产生的水污染引发了人们对全球范围内清洁和可用水供应的担忧<sup>[1]</sup>。因此,开发经济高效的含染料废水处理技术显得尤为迫切,这对改善水质恶化和保护人类及

环境健康至关重要<sup>[2]</sup>。在众多污水处理技术中,膜分离技术因其高效性和经济性脱颖而出,被认为是当前污水处理领域最具潜力的技术之一。在膜材料中,聚酰亚胺(PI)<sup>[3]</sup>、聚偏氟乙烯(PVDF)<sup>[4]</sup>、聚砜(PSF)<sup>[5]</sup>和聚醚砜(PES)<sup>[6]</sup>等被广泛应用。其中,以PES为原料的高分子材料因其优

收稿日期 Submitted date 2025-03-10; 修回日期 Revised date 2025-04-25; 录用日期 Accepted date 2025-05-16

基金项目: 贵阳市观山湖区科技计划项目(观科合同[2024]7号); 贵州省省级科技计划项目(黔科合成果[2024]一般069、黔科合服企[2023]001)

\*联系人, zhy@nfht.com

引用本文: 何福英, 何颖, 付海, 等. 表面修饰无机粒子亲水改性聚醚砜膜的研究进展[J]. 塑料科技, 2026, 54(1): 204-209.

Citation: HE F Y, HE Y, FU H, et al. Research progress of hydrophilic-modified polyethersulfone membranes with surface-modified inorganic particles[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(1): 204-209.

异的抗氧化性、抗水解性、热稳定性和力学性能,在废水处理领域得到广泛应用,尤其是在超滤(UF)<sup>[7]</sup>和纳滤(NF)<sup>[8]</sup>膜的制造中<sup>[9]</sup>。然而,PES膜存在亲水性不足、使用寿命短、耐污性差等缺点,这些缺陷在很大程度上限制其应用范围。因此,探索提高PES基复合膜的亲水性和防污性能的方法,以更好地应用于水处理领域,已成为当前研究的热点<sup>[10-11]</sup>。

本文综述PES复合膜的制备方法、改性方法以及无机粒子亲水改性PES复合膜的研究进展,总结复合膜目前存在的问题和挑战,并对该领域未来的研究方向和发展前景进行展望。

## 1 PES膜制备方法

### 1.1 相转化法

相转化法(L-S法)是目前最常用的制备聚合物分离膜的方法,主要分为非溶剂致相分离法(NIPS)和热致相分离法(TIPS)。

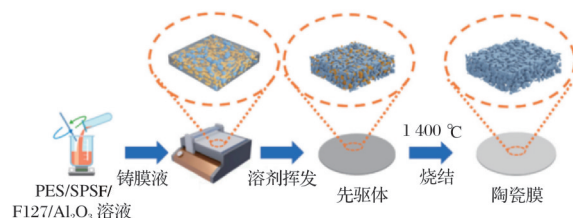
NIPS法的制备步骤如下:首先将高分子材料和致孔剂溶解于有机溶剂中,制得铸膜液;随后将脱泡后的铸膜液均匀涂覆于玻璃板或无纺布基材上;最后将膜浸入非溶剂浴中,通过溶剂与非溶剂的交换引发相分离,形成具有多孔结构的分离膜<sup>[12]</sup>。ZHANG等<sup>[9]</sup>采用NIPS工艺制备了聚醚砜/磺化碳纳米洋葱(PES/SCNO)纳米复合超滤膜。具体而言,将SCNO、PVP和PES按一定比例溶解于N,N-二甲基甲酰胺(DMF)中,制得铸膜液;通过调节刮刀高度为250 μm,在干净的玻璃板上刮膜;将膜暴露于25℃、50%相对湿度的空气中10 s,随后浸入25℃的去离子水凝固浴中,完成成膜过程,得到PES/SCNO纳米复合超滤膜。

TIPS法要求聚合物的溶解温度高于其熔点,且溶剂需要具备低挥发性、高沸点等特性。通过精确控制体系温度,最终冷却得到分离膜<sup>[13]</sup>。YANG等<sup>[14]</sup>采用热诱导相分离结合非溶剂诱导相分离法,制备用于复合正向渗透(TFC-FO)膜的低内部浓度极化(ICP)PES膜。TIPS法的优点在于膜孔径可控性高、机械强度高,但存在能耗高、制膜设备要求严格以及孔隙率低等缺点。鉴于实际应用需求,通常将TIPS法与NIPS法联用,以制备兼具高通量和高强度的复合膜。

### 1.2 烧结法

烧结法是将粉末材料压制成一定形状后,置于高温炉中加热。在烧结过程中,颗粒之间会发生局部熔融,晶粒间的界面逐渐消失,烧结后颗粒间残留的孔隙即构成膜孔,最终形成具有多孔结构的致密膜。通过烧结法制备的膜具有耐高温、耐腐蚀和高机械强度等优点,但存在孔隙率较低、能耗较高等缺点。WANG等<sup>[15]</sup>以氧化铝陶瓷粉末为原料,PES为黏合剂,采用有机-无机共混溶剂蒸发结合高温烧结的方法,成功合成结构精细、性能卓越的超薄陶瓷膜。图1为陶瓷膜的制备流程<sup>[15]</sup>。当Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粒径为100 nm时,该膜展现出较小的孔径、良好的性能、高透水性

以及高油水截留率。



注:SPSF为磺化聚砜,F127为聚环氧乙烷-聚环氧丙烷-聚环氧乙烷三嵌段共聚物。

图1 陶瓷膜的制备流程

Fig.1 Preparation process of ceramic membrane

### 1.3 静电纺丝法

静电纺丝法是利用高压静电场制备纤维膜的一种方法。其主要过程为:首先使聚合物溶液带上电荷,在电场力作用下,针头处的液滴被拉伸形成锥状;当电场力克服表面张力时,溶液射流从锥尖射出并被拉伸成细丝,经溶剂挥发和固化后,无序沉积在收集装置上,最终形成纳米纤维膜<sup>[16]</sup>。BAO等<sup>[17]</sup>将合成的聚(甲基丙烯酸乙酯-三甲基氯化铵-共聚甲基丙烯酸甲酯)共聚物与PES共混,通过静电纺丝制备纳米纤维膜,用于快速大量去除染料和细菌。静电纺丝法制备的纳米纤维膜具有比表面积大、孔隙率高且结构可控等优点,在膜分离技术中可用于不同尺度的分离,但存在膜机械强度低、不适于量产以及制备过程中影响因素多(如纺丝速度、纺丝电压和纺丝液黏度等)等缺点。

## 2 PES膜的亲水改性

在采用膜技术分离染料、蛋白质、油污等污染物时,污染物极易被吸附或沉积在膜表面,堵塞膜孔,致使膜孔径减小,进而降低膜的渗透通量和分离性能,大大缩短膜的使用寿命,增加膜的使用成本<sup>[18-19]</sup>。因此,提高膜的亲水性是获得具有优异分离性能和抗污性能膜的关键。表面改性和共混改性是用于PES膜改性的主要方法。

### 2.1 表面改性

#### 2.1.1 表面涂覆

膜的表面涂覆改性是通过物理吸附或化学键合在膜表面覆盖一层亲水性涂层,从而改善膜的抗污染性能。这种改性方法不需要复杂的设备,生产效率高,适用于多种膜基底材料。文欣等<sup>[20]</sup>采用表面涂覆法在超滤膜表面分别涂覆二硫化钼(MoS<sub>2</sub>)和氮化硼(BN)纳米颗粒,制备抗污染超滤膜。结果表明,膜表面的纳米层因其物理屏障和静电排斥作用,可有效减少膜污染,提高膜的抗污染性能。DESIRIANI等<sup>[21]</sup>将壳聚糖(CS)和绿茶多酚60(PGT)作为天然添加剂,通过表面涂覆法制备防污抗菌PES超滤膜。研究表明,优化后的改性膜具有比原始PES膜更好的亲水性。其中,CS1PGT3膜在所有改性PES膜中展现出最高的牛血清白蛋白(BSA)截留率(99.99%)、较高的通量恢复率(78.78%)以及最高的水通量(46.83 L/m<sup>2</sup>·h)。AGUILAR-

SANCHEZ等<sup>[22]</sup>利用PES基膜、聚烯丙基胺盐酸盐(PAHCl)锚定层和纳米纤维素功能层之间的静电相互作用,将由纤维素纳米晶体(CNC)或TEMPO氧化纤维素纳米纤维(T-CNF)组成的纳米多孔和纳米纹理层涂覆在PES膜上。该涂层显著提高了膜的润湿性,接触角降低了52%,在pH值4~8范围内,与未涂覆的膜相比,涂层显示出更高的负表面电荷。

### 2.1.2 表面接枝

表面接枝法通过化学键将亲水性聚合物链段接枝到膜表面,实现改性目的。该方法可有效避免因物理吸附形成的亲水层与膜表面发生分层的问题。陈可佳等<sup>[23]</sup>以甲基丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DMC)为接枝单体,采用紫外线接枝法对PES纳滤膜表面进行改性,制备荷正电纳滤膜。HENG等<sup>[24]</sup>在涂覆NCQDs-TiO<sub>2</sub>光催化剂之前利用紫外诱导聚丙烯酸(PAA)的接枝聚合对PES膜载体表面进行改性。图2为PES和氮掺杂碳量子点修饰二氧化钛(NTO)/PAA/PES膜的制备流程<sup>[24]</sup>。该复合膜展现出优异的光催化辅助自清洁性能,在可见光照射后,其原始通量恢复率达93.7%。此外,复合膜对亚甲基蓝(MB)的降解效率显著,1 h内可见光照射可去除94.9%的MB。最佳复合膜NTO-0.5/PAA/PES在经过3次降解循环后未出现明显劣化,充分证明了其黏合复合材料的稳定性和降解性能的一致性。

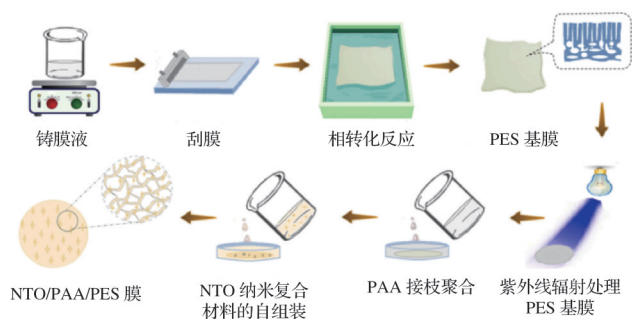


图2 PES和NTO/PAA/PES膜的制备流程

Fig.2 Preparation process of PES and NTO/PAA/PES membranes

## 2.2 共混改性

共混改性是将亲水性添加剂与膜材料直接机械混合,混合均匀后通过相转化法成膜,是一种简单且直接的改性方法。该方法的关键在于聚合物与添加剂的相容性。常见的3种改性添加剂包括两亲性嵌段共聚物、亲水性聚合物和无机纳米材料<sup>[25]</sup>。

RAJABNIA等<sup>[26]</sup>将亲水性纳米粒子聚多巴胺丙烯酸酯与PES共混,制备一种高性能混合超滤膜,用于从含油废水中分离水。该膜的亲水性、透水性和排油性显著提升。与纯PES膜(接触角80.67°)相比,杂化膜的膜表面油黏附显著降低。此外,经过5个循环后,其纯水通量比未改性膜高446%。

VATANPOUR等<sup>[27]</sup>将深共晶溶剂(DESS)作为新型亲

水改性剂引入PES/N,N-二甲基乙酰胺(DMAc)铸膜液中,通过NIPS方法制备PES-NF膜。在不同DES含量的膜中,含有质量分数为2% DES的膜表现出最高的纯水通量[241.3 L/(m<sup>2</sup>·h)]、理想的BSA截留率(98.9%)和优异的染料去除率(99.2%)。

## 3 无机粒子改性PES膜

在众多亲水改性方法中,通过与无机粒子物理共混制备有机-无机共混膜,已成为膜改性领域的研究热点。二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)<sup>[28]</sup>、碳纳米管(CNT)<sup>[29]</sup>、氧化锌(ZnO)<sup>[30]</sup>和二氧化钛(TiO<sub>2</sub>)<sup>[31]</sup>等无机添加剂常用于提升混合基质膜的亲水性能<sup>[32]</sup>。然而,纳米填料在聚合物基体中易发生团聚。为了提高纳米填料的分散性,通常利用特定官能团结合有机改性剂对其进行表面改性<sup>[33]</sup>。

### 3.1 CNT/PES复合膜

CNT是一种微米级长度、纳米级直径的圆柱形结构,属于一维碳纳米材料,具有独特的纳米管状结构、稳定的物理和化学性质以及优异的透水性,在水处理膜改性中展现出广阔的应用前景<sup>[34-35]</sup>。NIU等<sup>[29]</sup>采用SI-eATRP法将2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)接枝到CNT上,制备亲水性CNT,并以相转化法制备以CNT-g-PAMPS为改性添加剂的聚阴离子防污PES膜。改性后的膜表面更亲水,渗透性能得到改善。膜表面带有负电荷,可静电排斥污水中的污染物,从而提高防污性能。当改性膜铸液中CNT-g-PAMPS含量为20 mg时,所得M-CgP-2超滤膜的水通量可达365.5 L/(m<sup>2</sup>·h),BSA和刚果红染料(CR)的截留率接近100%,通量恢复率可达96%,显示出显著的防污效果。HEGAB等<sup>[36]</sup>合成了氨基SiO<sub>2</sub>共价官能化羧基化多壁碳纳米管(MWCNTs-COOH)纳米杂化物,并将其与PES膜共混用于油水分离,以提升防污性能。纳米杂化材料的加入增强了纳米复合膜的润湿性和孔径分布。添加2% SiO<sub>2</sub>-f-MWCNT的纳米复合膜透水性从原始PES膜的(188±8) L/(m<sup>2</sup>·h·bar)提高至(293±9) L/(m<sup>2</sup>·h·bar),油截留率提高至(97.0±0.1)% ,腐殖酸(HA)通量增加16%,而与原始PES的9.9%相比,不可逆的HA污染显著降低至0.9%。

### 3.2 氧化石墨烯(GO)/PES复合膜

GO具有特殊的二维结构,这使其易于与其他物质结合,从而增强了染料吸收能力(通过π-π堆叠)<sup>[37]</sup>,已被证明是超滤(UF)膜中去除染料的有效成分之一,在染料去除领域受到广泛关注<sup>[38]</sup>。ABDOLMALEKI等<sup>[39]</sup>将磺化聚醚砜(sPES)和亚氨基二乙酸官能化氧化石墨烯(IDA-GO)纳米片掺入PES膜中,制备一种新型纳米复合膜。将IDA-GO纳米片加入基于PES/sPES的铸膜液中,实现了膜结构的进一步优化。结果表明,膜的平均孔径和孔隙率显著增加。当PES/sPES@IDA-GO负载量为0.1% IDAGO纳米片时,该膜可有效净化阳离子染料废水,染料截留率达到99.9%,纯水通量为19.4 L/(m<sup>2</sup>·h)。GENG等<sup>[40]</sup>合成了具有良好亲水性和抗菌性能的咪唑改性羧基氧化石墨烯

(Im-CGO), 并将其作为膜改性剂掺入铸膜液中, 制备 Im-CGO/PES 超滤膜。引入膜改性剂后, Im-CGO/PES 超滤膜的孔结构和渗透性得到了显著改善。

### 3.3 SiO<sub>2</sub>/PES 复合膜

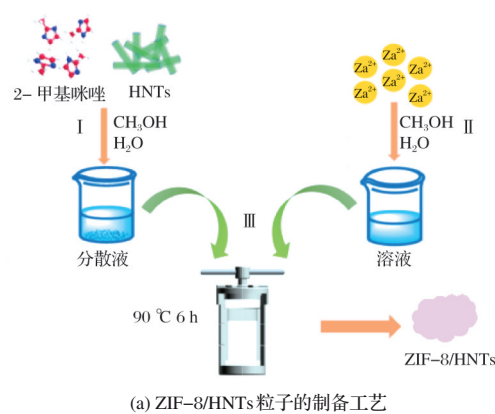
SiO<sub>2</sub>的合成条件温和, 成本低, 易于改性, 在水性系统中具有低毒性, 能够改善 PES 膜的疏水性。然而, 由于 SiO<sub>2</sub>表面硅烷醇基团的强氢键作用, SiO<sub>2</sub>颗粒易聚集或附聚, 导致其在膜中的分散度较低<sup>[41]</sup>。HUSSEIN 等<sup>[42]</sup>通过将聚乙烯亚胺(PEI)分子接枝到 SiO<sub>2</sub>纳米粒子表面, 减少了纳米颗粒的团聚, 合成了亲水性 SiO<sub>2</sub>-g-PEI。随后, 通过相转化法将纳米粒子以不同比例嵌入 PES 聚合物基质中, 制备出改性的混合基质膜。当 SiO<sub>2</sub>-g-PEI 的质量分数为 0.7% 时, 改性膜的亲水性、孔隙率和渗透性显著提高, 达到最佳性能。与原始膜相比, 添加 0.7% SiO<sub>2</sub>-g-PEI 的膜展现出更优异的抗 BSA 蛋白黏附性和自清洁特性。

### 3.4 埃洛石纳米管(HNTs)/PES 复合膜

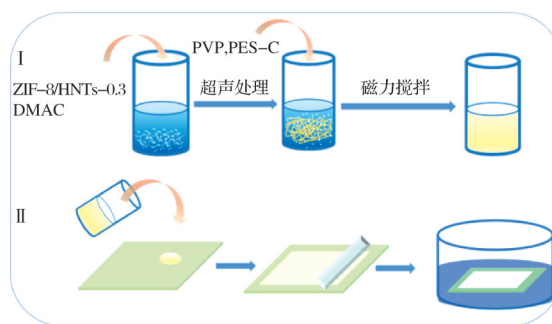
HNTs 储量丰富且价格低廉, 是一种典型的一维纳米管结构, 其内外表面均含有大量可与金属离子直接相互作用的极性羟基和羧基(也可通过化学修饰引入), 并具有高长径比、高强度和耐腐蚀等优异性能<sup>[43]</sup>。SUN 等<sup>[44]</sup>以 HNTs 为载体, 通过 L-精氨酸和盐酸多巴胺的共聚及一步反应构建了功能化 HNTs, 并将其作为添加剂通过非溶剂诱导相分离法共混制备 PES 膜。改性后的 PES 膜显著提高了渗透通量, 且在整个超滤过程中能耗更低。优化的膜结构和化学特性为 BSA、CR 和 MB 分子提供了高截留率。CHEN 等<sup>[45]</sup>采用溶剂热技术制备了 ZIF-8 改性埃洛石纳米管(ZIF-8/HNTs), 并将其作为亲水性填料用于酚酞聚醚砜(PES-C)膜的改性。图 3 为 ZIF-8/HNTs 粒子和 ZIF-8/HNTs/PES-C 膜的制备流程<sup>[45]</sup>。结果表明, 添加 ZIF-8/HNTs-0.3 颗粒的 PES 膜渗透性得到改善, 纯水通量从 226.21 L/(m<sup>2</sup>·h)增加至 490.88 L/(m<sup>2</sup>·h)。随着 ZIF-8/HNTs-0.3 颗粒含量的增加, 混合基质膜的水接触角逐渐减小至 64.87°, 通量恢复率提高至 75.86%。

### 3.5 勃姆石(TA-BM)/PES 复合膜

TA-BM 纳米颗粒因化学稳定性高、生物相容性好、无毒性、易于表面改性、制备简单以及表面富含大量羟基等优点<sup>[46]</sup>, 成为理想的纳米填料, 广泛应用于聚合物纳米复合材料的制备。OULAD 等<sup>[47]</sup>将单宁酸包覆的 TA-BM 作为绿色纳米填料直接加入铸膜液中, 制备 PES 复合膜。研究表明, 掺入单宁酸包覆的 TA-BM 后, 膜中羟基的富集显著增强了膜的亲水性、表面光滑度和整体孔隙率。当 TA-BM 质量分数为 0.5% 时, 膜的渗透通量达到最高值 111 kg/(m<sup>2</sup>·h)。此外, 在错流过滤设备中, 使用 0.5% TA-BM/PES 复合膜处理甘草染料溶液 8 h, 甘草染料的截留率为 97.3%, 通量仅降低 20.8%。TA-BM 纳米填料的加入赋予了膜高渗透通量、出色的染料截留率和优异的抗污染能力。



(a) ZIF-8/HNTs 粒子的制备工艺



(b) ZIF-8/HNTs/PES-C 膜的制备工艺

图 3 ZIF-8/HNTs 粒子和 ZIF-8/HNTs/PES-C 膜的制备流程

Fig.3 Preparation Process of ZIF-8/HNTs particles and ZIF-8/HNTs/PES-C membrane

## 4 结论

废水中含有大量污染物, 如塑料、重金属和染料, 这些污染物会导致水生系统污染和突变, 危及人类的生命与健康。膜分离技术因其能耗低、渗透通量大和分离效率高的优点, 在解决水资源问题方面具有显著优势。PES 作为膜材料在废水处理领域应用广泛, 但其疏水性强, 导致渗透通量低且易污染, 分离效率较低。本文主要介绍了 PES 膜的制备方法和改性技术, 并对表面修饰无机粒子改性 PES 膜的研究进展进行了综述。

目前, 膜分离技术已广泛应用于水处理、制药和化工等行业。然而, 人们对膜分离技术的要求也在不断提高。对于无机粒子改性 PES 膜, 未来应从以下几个方面进行完善: (1) 采用无机粒子进行亲水改性时, 重点考虑 PES 与无机粒子的相容性及无机粒子的分散性。长时间运行可能导致无机粒子脱落, 影响膜的使用寿命。虽然表面改性无机粒子可改善这一问题, 但在大规模生产应用方面仍需突破。(2) 表面改性无机粒子应减少传统有机溶剂的使用, 转向水相体系, 以降低制备过程对环境的影响。(3) 部分亲水性无机粒子的添加量过多可能会降低膜的机械强度。开发多元协同改性技术, 结合多种无机粒子以同时提高膜的亲水性、抗污染性和机械强度, 有望进一步拓展 PES 膜的应用领域。

## 参考文献

- [1] KHODAKARAMI M, BAGHERI M. Recent advances in synthesis and

- application of polymer nanocomposites for water and wastewater treatment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 296: 126404.
- [2] KIM A, KIM J H, PATEL R. Modification strategies of membranes with enhanced Anti-biofouling properties for wastewater treatment: A review[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 345: 126501.
- [3] ALI J, ALHSEINAT E, JAOUDE MABI, et al. A mixed matrix polyimide ultrafiltration membrane for efficient removal of bentazon from water[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 433: 134596.
- [4] ZHANG X Y, WANG T, WU L G, et al. Construction of Ag@ZIF-8/PVDF mixed-matrix ultrafiltration membranes with high separation performance for dye from high-salinity wastewater by microemulsion coupling with blending[J]. *Journal of Membrane Science*, 2023, 670: 121371.
- [5] SUN H W, LIU Q, LIU J Y, et al. A high-flux phytic acid functionalized SiO<sub>2</sub> blend polysulfone ultrafiltration membrane for extraction of uranium from seawater[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(5): 113749.
- [6] NIE Z, LIU C H, JIANG X H, et al. Dopamine-triggered one-step codeposition of zwitterionic surfactants for anti-fouling polyethersulfone ultrafiltration membrane modification[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 598: 153871.
- [7] LIAO Z P, WU Y W, CAO S C, et al. Facile engineering of PES ultrafiltration membranes using polyoxometalates for enhanced filtration and antifouling performance[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 308: 122911.
- [8] DADARI S, RAHIMI M, ZINADINI S. Novel antibacterial and antifouling PES nanofiltration membrane incorporated with green synthesized nickel-bentonite nanoparticles for heavy metal ions removal [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 431: 134116.
- [9] ZHANG J J, CHEN S W, LI J S, et al. Sulfonated carbon nano-onion incorporated polyethersulfone nanocomposite ultrafiltration membranes with improved permeability and antifouling property[J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 256: 117825.
- [10] ZHANG X, REN P F, YANG H C, et al. Co-deposition of tannic acid and diethylenetriamine for surface hydrophilization of hydrophobic polymer membranes[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 360: 291-297.
- [11] SUN T Y, LIU Y, SHEN L G, et al. Magnetic field assisted arrangement of photocatalytic TiO<sub>2</sub> particles on membrane surface to enhance membrane antifouling performance for water treatment[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2020, 570: 273-285.
- [12] BAIG N, SALHI B, SAJID M, et al. Recent progress in microfiltration/ ultrafiltration membranes for separation of oil and water emulsions[J]. *The Chemical Record*, 2022, 22(7): e202100320.
- [13] KAMMAKAKAM I, LAI Z P. Next-generation ultrafiltration membranes: A review of material design, properties, recent progress, and challenges[J]. *Chemosphere*, 2023, 316: 137669.
- [14] YANG L B, WANG Z, ZHANG J L, et al. TIPS-co-NIPS method to prepare PES substrate with enhanced permeability for TFC-FO membrane[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2017, 80: 137-148.
- [15] WANG Y X, CHEN Z S, ZHU Y X, et al. An ultrathin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic membrane prepared by organic-inorganic blending with solvent evaporation and high-temperature sintering for highly efficient oil/water separation[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2025, 70: 107116.
- [16] MISHRA R K, MISHRA P, VERMA K, et al. Electrospinning production of nanofibrous membranes[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2019, 17(2): 767-800.
- [17] BAO J X, LI H, XU Y T, et al. Multi-functional polyethersulfone nanofibrous membranes with ultra-high adsorption capacity and ultra-fast removal rates for dyes and bacteria[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 78: 131-143.
- [18] ASHFAQ M Y, AL-GHOUTI M A, ZOUARI N. Investigating the effect of polymer-modified graphene oxide coating on RO membrane fouling [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 49: 103164.
- [19] 兰佳宝, 宋宏臣, 孙秀花. 聚醚砜膜亲水改性研究进展[J]. *塑料科技*, 2022, 50(5): 118-122.
- [20] 文欣, 海玉琰, 何灿, 等. MoS<sub>2</sub>/BN表面涂覆对PES超滤膜抗污染性能的提升[J]. *水处理技术*, 2025, 51(2): 79-84.
- [21] DESIRIANI R, SUSANTO H, ISTIROKHATUN T, et al. Preparation of polyethersulfone ultrafiltration membrane coated natural additives toward antifouling and antimicrobial agents for surface water filtration [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(1): 111797.
- [22] AGUILAR-SANCHEZ A, JALVO B, MAUTNER A, et al. Waterborne nanocellulose coatings for improving the antifouling and antibacterial properties of polyethersulfone membranes[J]. *Journal of Membrane Science*, 2021, 620: 118842.
- [23] 陈可佳, 史宝利. 紫外光接枝改性制备荷正电聚醚砜纳滤膜的研究 [J]. *化工新型材料*, 2020, 48(1): 93-96, 101.
- [24] HENG Z W, CHONG W C, PANG Y L, et al. Novel visible-light responsive NCQDs-TiO<sub>2</sub>/PAA/PES photocatalytic membrane with enhanced antifouling properties and self-cleaning performance[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(4): 105388.
- [25] AHMAD T, GURIA C, MANDAL A. A review of oily wastewater treatment using ultrafiltration membrane: A parametric study to enhance the membrane performance[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 36: 101289.
- [26] RAJABNIA H, AROUJALIAN A, SALIMI P. Antifouling performance enhancement of PES membranes using hydrophilic nanoparticles of poly(dopamine-acrylate) for oil/water separation[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(3): 112797.
- [27] VATANPOUR V, DEHQAN A, HARIFI-MOOD A R. Ethaline deep eutectic solvent as a hydrophilic additive in modification of polyethersulfone membrane for antifouling and separation improvement [J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 614: 118528.
- [28] DEHBAN A, KARGARI A, ASHTIANI F Z. Preparation and optimization of antifouling PPSU/PES/SiO<sub>2</sub> nanocomposite ultrafiltration membranes by VIPS-NIPS technique[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2020, 88: 292-311.

- [29] NIU X Q, CHANG K J, LI W D, et al. An anionic polyethersulfone membrane modified by poly(2-acrylamide-2-methylpropanesulfonic acid sodium salt) grafted carbon nanotubes[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 182: 930-938.
- [30] SHARMA M, ALVES P, GIL M H, et al. Fractionation of black liquor using ZnO nanoparticles/PES ultrafiltration membranes: Effect of operating variables[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 345: 131183.
- [31] MATINDI C N, HU M Y, KADANYO S, et al. Tailoring the morphology of polyethersulfone/sulfonated polysulfone ultrafiltration membranes for highly efficient separation of oil-in-water emulsions using TiO<sub>2</sub> nanoparticles[J]. *Journal of Membrane Science*, 2021, 620: 118868.
- [32] QADIR D, MUKHTAR H, KEONG L K. Mixed matrix membranes for water purification applications[J]. *Separation & Purification Reviews*, 2017, 46(1): 62-80.
- [33] ZARINWALL A, WANIEK T, SAADAT R, et al. Comprehensive characterization of APTES surface modifications of hydrous boehmite nanoparticles[J]. *Langmuir*, 2020, 37(1): 171-179.
- [34] BARATTA M, NEZHANOV A V, MASHIN A I, et al. Carbon nanotubes buckypapers: A new frontier in wastewater treatment technology[J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 924: 171578.
- [35] IHSANULLAH. Carbon nanotube membranes for water purification: Developments, challenges, and prospects for the future[J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 209: 307-337.
- [36] HEGAB H M, ELARABY A, IBRAHIM Y, et al. Designing of amino silica covalently functionalized carboxylic multi-wall carbon nanotubes-based polyethersulfone membranes for enhancing oily wastewater treatment[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(6): 108667.
- [37] DIN I, KHAN I, AZIZ F, et al. Graphene oxide nanoparticles a remedy for chromium pollution[J]. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 2023, 7: 100372.
- [38] NAVANEETHA PANDIYARAJ K, VASU D, RAJI A, et al. Combined effects of direct plasma exposure and pre-plasma functionalized metal-doped graphene oxide nanoparticles on wastewater dye degradation[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2023, 122: 185-199.
- [39] ABDOLMALEKI A, MOHAMADI Z, FASHANDI H, et al. Synergistic contribution of sulfonated poly(ether sulfone) and iminodiacetic acid functionalized-graphene oxide nanosheets towards enhancing cationic dye wastewater purification using nanocomposite membranes[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 481: 148622.
- [40] GENG C B, ZHAO F B, NIU H Y, et al. Enhancing the permeability, anti-biofouling performance and long-term stability of TFC nanofiltration membrane by imidazole-modified carboxylated graphene oxide/polyethersulfone substrate[J]. *Journal of Membrane Science*, 2022, 664: 121099.
- [41] RATTANA-ARPORN P, POOMPRADUB S. Polyethersulfone/silica composite membrane for desalination[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 345: 127395.
- [42] HUSSEIN AL-TIMIMI D A, ALSALHY Q F, ABDULRAZAK A A, et al. Novel polyether sulfone/polyethylenimine grafted nano-silica nanocomposite membranes: Interaction mechanism and ultrafiltration performance[J]. *Journal of Membrane Science*, 2022, 659: 120784.
- [43] GRYLEWICZ A, MOZIA S. Polymeric mixed-matrix membranes modified with halloysite nanotubes for water and wastewater treatment: A review[J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 256: 117827.
- [44] SUN Z J, WANG D H, SUN N L, et al. Dopamine hydrochloride and L-arginine co-functionalized halloysite nanotubes for modification of polyethersulfone ultrafiltration membrane with improved separation performance[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 356: 129873.
- [45] CHEN P, WANG S, DAI J N, et al. Efficiently enhancing permeability and antifouling performances: ZIF-8 modified halloysite nanotubes to blend phenolphthalein polyethersulfone cardo[J]. *Desalination*, 2025, 600: 118494.
- [46] MOHAMMADI M, KHODAMORADY M, TAHMASBI B, et al. Boehmite nanoparticles as versatile support for organic-inorganic hybrid materials: Synthesis, functionalization, and applications in eco-friendly catalysis[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2021, 97: 1-78.
- [47] OULAD F, ZINADINI S, ZINATIZADEH A A, et al. Fabrication and characterization of a novel tannic acid coated boehmite/PES high performance antifouling NF membrane and application for licorice dye removal[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 397: 125105.