

碳基太阳能海水淡化复合膜的设计及其性能研究

郭艳艳¹, 宋程燕¹, 苏海建², 李媛欣¹, 马 准^{1,3*}

(1. 山东科技大学 化学与生物工程学院, 青岛 266590; 2. 山东中烟工业有限责任公司, 青岛 266100;
3. 泉州师范学院 化工与材料学院, 泉州 362000)

摘要: 随着全球淡水资源短缺问题的日益严峻, 太阳能驱动界面蒸发技术因其高效性与环保性成为海水淡化领域的研究热点。本文提出基于聚偏二氟乙烯(PVDF)膜的 Janus 结构设计, 通过化学改性、真空抽滤与涂覆工艺制备了聚偏二氟乙烯-炭黑-聚二甲基硅氧烷(PVDF-CB-PDMS)复合光热膜。系统研究了炭黑(CB)用量、PVDF 膜浸泡时间及聚二甲基硅氧烷(PDMS)用量对蒸发速率的影响, 并通过响应面分析法优化得到最佳工艺条件: 炭黑用量 0.51 g、PVDF 膜浸泡时间 19.7 min、PDMS 用量 0.20 g。在此条件下, 界面光热蒸发速率预测值为 $2.87 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 实验值为 $2.87 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 二者高度吻合。微观表征显示, 炭黑的均匀分散显著提升了光吸收率($>99\%$), 而 PDMS 疏水层有效抑制了盐分结晶。本研究为低成本、高稳定性太阳能海水淡化膜的开发提供了理论支持。

关键词: 界面蒸发; 海水淡化; 碳基材料; 聚偏二氟乙烯复合膜; 光热转换

中图分类号: TQ028 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-8924(2025)04-0133-10

doi: 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2025.04.014

淡水资源短缺已成为 21 世纪全球性挑战^[1]。据联合国统计, 目前约 20 亿人口面临缺水问题^[2], 预计至 2050 年缺水地区人口将增至 50 亿。尽管海水淡化技术[如反渗透^[3] (RO)、多效蒸馏^[4] (MED)、电渗透^[5] (ED)以及多级闪蒸^[6] (MSF)]已实现工业化应用, 但其高能耗($3 \sim 10 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$)与维护成本限制了推广。近年来, 太阳能驱动界面蒸发^[7-8] (solar-driven interfacial evaporation, SDIE)技术因其低能耗和环境友好的特性备受关注。该技术通过光热材料将太阳能局域化于蒸发界面, 相比传统整体加热方式, 可减少 60% 以上的热损失^[9]。

碳基材料^[10] (如石墨烯、炭黑)因其宽光谱吸收($>90\%$)和抗盐性能, 成为 SDIE 领域的研究热点。例如, Wang 等^[11]开发的还原氧化石墨烯(rGO)基蒸发器实现了 94.7% 的光吸收率; 孔岩^[12]用生物质基气凝胶获得了 $3.22 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的蒸发速率。然而, 现有碳基材料仍面临成本高、制备工艺复杂等问题。炭黑^[13] (CB)作为一种廉价且光吸收性能优异的材料, 其与聚合物基底的结合潜力尚未充分挖掘。此外, 界面蒸发过程中盐分结晶易导致膜性能衰减, 亟需开发兼具高效光热转换与抗盐性能的复合膜。

本文以聚偏二氟乙烯(PVDF)膜为基底, 通过三(羟甲基)氨基甲烷(Tris)-盐酸多巴胺(PDA)改

收稿日期: 2025-03-10; 修改稿收到日期: 2025-04-23

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2020MB118)

第一作者简介: 郭艳艳(1998-), 女, 山东平度人, 硕士研究生, 研究方向为新型膜材料的开发与性能。* 通讯作者, E-mail: mzyxy199@163.com

引用本文: 郭艳艳, 宋程燕, 苏海建, 等. 碳基太阳能海水淡化复合膜的设计及其性能研究[J]. 膜科学与技术, 2025, 45(4): 133-142.

Citation: Guo Y Y, Song C Y, Su H J, et al. Design and performance study of carbon-based solar desalination composite membranes[J]. Membrane Science and Technology(Chinese), 2025, 45(4): 133-142.

性提升其亲水性,结合炭黑(CB)增强光吸收,并引入聚二甲基硅氧烷(PDMS)作为疏水屏障抑制盐结晶。通过响应面分析法优化制备工艺,系统探究各因素对蒸发性能的影响机制,旨在为低成本、高性能太阳能海水淡化膜的开发提供理论支撑。

1 实验部分

1.1 实验材料与仪器

实验所用材料:PVDF 膜(购自 Millipore)、水性炭黑分散液(购自宿迁纳开特新材料科技有限公司)、聚二甲基硅氧烷(PDMS)(购自 SYLGARD™)、聚乙烯亚胺(PEI)(购自 aladdin 阿拉丁)、盐酸多巴胺(PDA)(购自上海麦克林生化科技有限公司)、三(羟甲基)氨基甲烷(Tris)(购自上海麦克林生化科技有限公司)。所有化学试剂均为分析纯。主要仪器包括扫描电镜(FEI APREO)、接触角仪(Mettler TGA2)、紫外-可见-近红外分光光度计(Hitachi UH4150)及热重分析仪(Mettler TGA2)等。

1.2 PVDF-CB-PDMS 复合光热膜的制备

1.2.1 亲水性 #PVDF 膜的制备

PVDF 膜具有疏水性,需进行亲水化改性处理。首先配制 Janus 溶液:在 100 mL 蒸馏水中加入 0.12 g Tris,使用稀盐酸调整 pH 值至 8.5,加入 0.20 g PEI 和 0.20 g PDA,搅拌均匀。将 PVDF 膜的一侧浸入 Janus 溶液中,浸泡 10 min、20 min、30 min 不等,随后放入 60 °C 的真空干燥箱中干燥 4~6 h,获得亲水化改性后的 #PVDF 膜。

1.2.2 #PVDF-CB 膜的制备

将改性后的 #PVDF 膜固定于抽滤装置(有效面积 19.6 cm²),抽滤压强设置为 0.1 MPa,分别均匀负载 0.30 g、0.50 g、0.70 g 炭黑(对应单位面积负载量 1.53 g/m²、2.55 g/m²、3.57 g/m²),随后在 60 °C 真空干燥箱中干燥 30 min。

1.2.3 #PVDF-CB-PDMS 复合光热膜的制备

将 #PVDF-CB 膜平铺于玻璃板上,配制 PDMS 溶液,将 PDMS 与固化剂以 10:1 的比例混合,搅拌均匀后利用超声波振动去泡,静置 1h 后均匀涂覆在炭黑膜表面,涂覆质量为 0.15 g、0.20 g、0.25 g(对应单位面积涂覆量 0.77 g/m²、1.02 g/m²、1.28 g/m²),随后在 120 °C 真空干燥箱中固化 2 h。

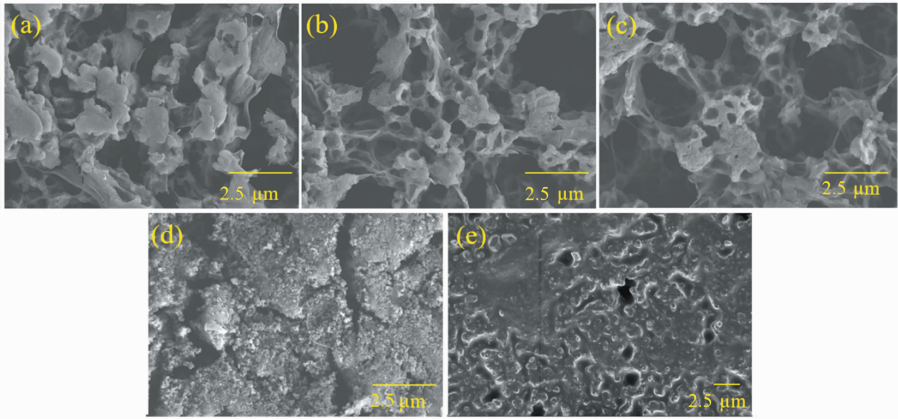
1.3 表征与测试

通过扫描电子显微镜(SEM)、热重分析(TGA)、傅里叶红外光谱(FTIR)、接触角测量等手段对制备的 #PVDF-CB-PDMS 复合光热膜进行表征。使用紫外-可见-近红外分光光度计测量膜的吸光率,并通过红外热成像仪观察膜表面温度变化。

2 结果与讨论

2.1 扫描电子显微镜分析

图 1 展示了浸泡时间为 10 min、20 min、30 min 的 PVDF 膜的 SEM 图像。通过 SEM 观察 #PVDF 膜在不同浸泡时间下的微观形貌,随着浸泡时间的增加,#PVDF 膜的孔隙直径逐渐增大,孔隙率也随



(a) 浸泡时间 10 min #PVDF 膜;(b) 浸泡时间 20 min #PVDF 膜;(c) 浸泡时间 30 min #PVDF 膜;
(d) #PVDF-CB 膜;(e) #PVDF-CB-PDMS 膜

图 1 PVDF 膜的 SEM 图像

Fig. 1 SEM image of PVDF membranes

之增大。经 Image J 测试,孔隙率分别为 21.13%、34.31%和 38.63%。#PVDF-CB 膜的 SEM 图显示了其微观样貌,如图 1(d)所示,可以观察到炭黑在其表面分布均匀。图 1(e)为 #PVDF-CB-PDMS 膜的 SEM 图,由图可见 PDMS 层均匀覆盖在炭黑层的表面,形成了一个分层结构。PDMS 层的引入进一步优化了膜的表面特性,使其具有良好的疏水性,从而有效抑制盐分结晶。

对 #PVDF 膜及 #PVDF-CB 膜的元素组成及分布特征分析(图 2、图 3)表明,炭黑的引入显著改变了膜的材料特性。#PVDF 膜以氟(28.89%,质

量分数,以下同)和碳(68.87%)为主,氧(2.15%及微量氯(0.09%)的存在可能与制备工艺相关。经炭黑负载后,#PVDF-CB 膜的碳含量提升至 71.37%,氟含量降低至 26.04%,氧含量微增至 2.39%,同时氯含量略有上升(0.20%),推测为改性试剂残留所致。

EDS 图谱(图 4)进一步显示,炭黑颗粒在 #PVDF 基底上呈现均匀分散,碳元素信号强度显著增强且分布连续,而氟元素信号密度降低,表明炭黑通过抽滤法有效覆盖于 #PVDF 表面,形成稳定的异质结构。

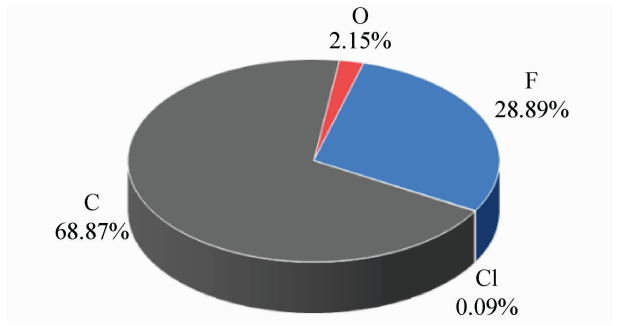


图 2 #PVDF 膜元素分布

Fig. 2 Total elemental distribution map of #PVDF membrane

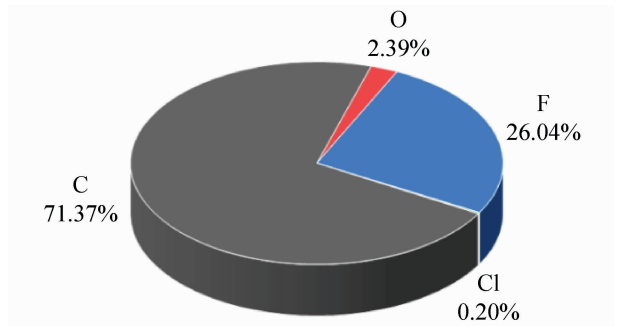


图 3 #PVDF-CB 膜元素分布

Fig. 3 Total elemental distribution map of #PVDF-CB membrane

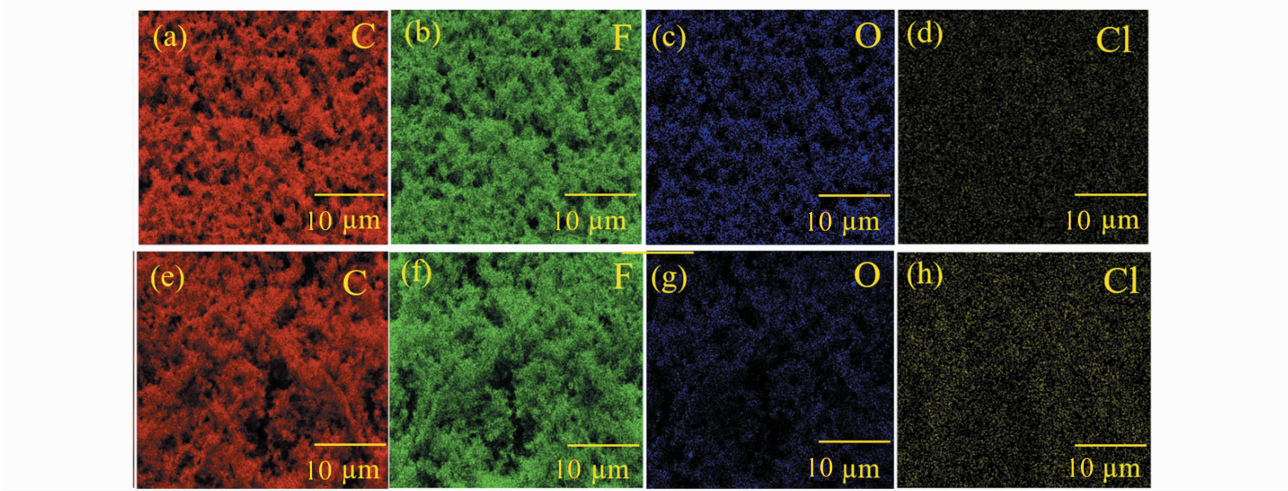


图 4 #PVDF 膜 EDS 分层图像[(a)~(d)]; #PVDF-CB 膜 EDS 分层图像[(e)~(h)]

Fig. 4 EDS layered images of #PVDF membrane [(a)~(d)]; EDS layered images of #PVDF-CB membrane [(e)~(h)]

由图 5 中 EDS 图谱可知,经 PDMS 涂覆后的 #PVDF-CB 膜,各元素分散均匀并且可检测出明显的硅元素分布情况。但各元素浓度偏低,主要是 PDMS 的涂覆量的原因。

XPS 分析进一步验证了炭黑的沉积对膜表面化学组成的影响,图 6(c)和 6(d)的 C 1s 峰显示,

#PVDF膜的 C1s 峰主要由 CF₂-CH₂ 和 C-C 的贡献组成,而 #PVDF-CB 膜的 C 1s 峰中,C-C 峰的强度显著增强,同时出现了新的 C-C 峰(占比 34.31%)。此外,#PVDF-CB 膜的全谱图[图 6(b)]中,C 1s 峰强度显著增强,而 F 1s 峰强度相对减弱,表明炭黑成功负载在 #PVDF 膜表面,碳元素

的信号强度显著提升,而氟元素的信号密度降低。这些结果与 EDS 分析一致,进一步证实了炭黑的均

匀分散优化了膜的表面特性,印证了炭黑通过异质结构构建成功修饰 #PVDF 膜表面的结论。

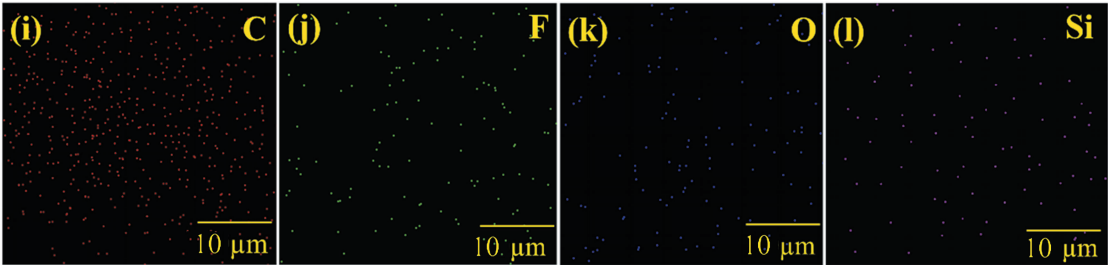


图 5 #PVDF-CB- PDMS 膜 EDS 分层图像[(i)~(l)]

Fig. 5 EDS layered images of #PVDF-CB- PDMS membrane [(i)~(l)]

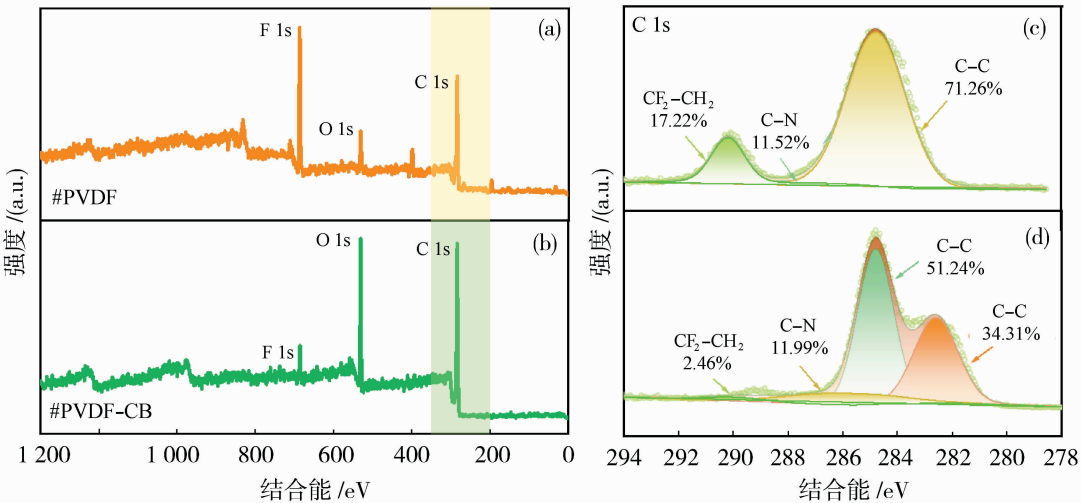


图 6 #PVDF 膜(a)、#PVDF-CB 膜(b)XPS 全谱图; #PVDF 膜(c)、#PVDF-CB 膜(d)XPS C 1s 谱图

Fig. 6 XPS full spectra of #PVDF membrane (a) and #PVDF-CB membrane (b); XPS C 1s plot of #PVDF membrane (c) and #PVDF-CB membrane (d)

2.2 接触角测量与分析

通过接触角测量仪测量 PVDF 膜在亲水化改性前后的接触角(如图 7 所示),发现未改性的 PVDF 膜接触角较大,表现出较强的疏水性。随着浸泡时间的增加,#PVDF 膜的接触角逐渐减小,亲水性增强。炭黑涂覆后,亲水性更加明显,表明炭黑在 #PVDF 基底上的均匀分散与改性处理协同优化了膜表面特性,同时炭黑的高光吸收率(>99%)确保了光热转换效率,最终实现了蒸发速率与抗盐性能的协同提升。

#PVDF-CB-PDMS 复合光热膜的界面蒸发机制主要依赖于其独特的 Janus 结构和光热转换性能。炭黑作为光热活性组分,在太阳光照射下迅速吸收光能并将其转化为热能。由于炭黑颗粒均匀分布在 #PVDF 膜表面,光热转换过程中产生的热量

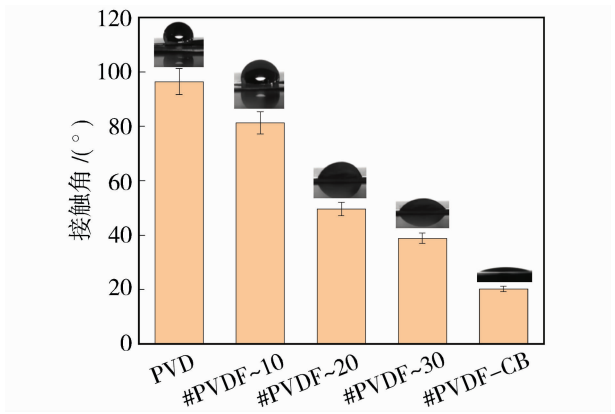


图 7 PVDF、#PVDF 膜浸泡不同时间及 #PVDF-CB 的接触角变化

Fig. 7 Contact angle variation of PVDF membrane modified at different soaking times and #PVDF-CB membrane

被局域化于蒸发界面,显著提高了光热转换效率。亲水化的 PVDF 基底一侧通过毛细作用快速吸收水分,水分通过膜的孔隙结构迅速运输至蒸发界面。在光热加热作用下,水分子在蒸发界面处迅速汽化,形成水蒸气。PDMS 疏水层则抑制了盐分在膜表面的结晶,避免了盐污对蒸发效率的负面影响。此外,膜两侧的亲水性和疏水性形成的界面平衡,不仅实现了水分的有效运输和蒸发,还能够在蒸发过程

中维持界面的动态平衡,进一步提高了膜的长期稳定性和自清洁能力。在浸泡时间为 20 min,炭黑用量 0.50 g, PDMS 用量为 0.20 g 条件下制备的 #PVDF-CB-PDMS 光热复合膜的接触角测量结果显示(图 8),接受太阳能的一侧疏水,与水直接接触的一侧亲水,表明该膜具有 Janus 结构,能够实现自漂浮、抗污防雨、水分运输和太阳能蒸发平衡的效果。

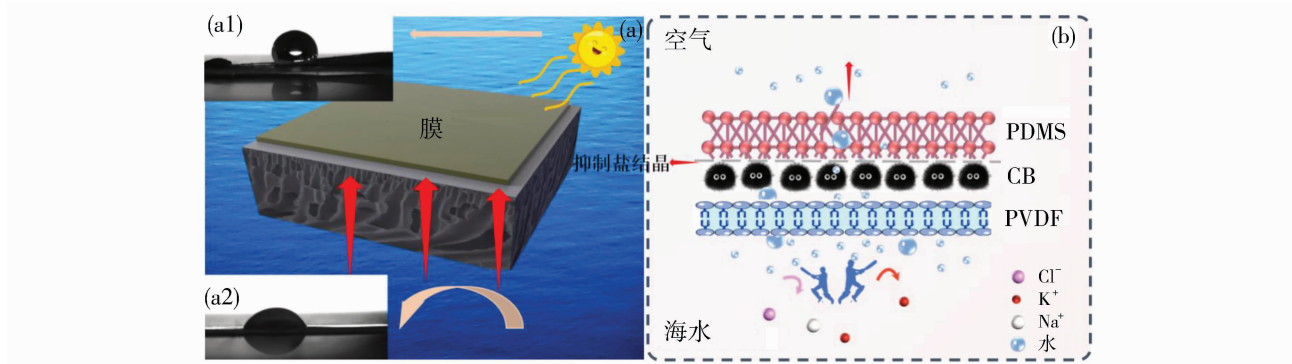


图 8 PVDF-CB-PDMS 膜接触角(a):PVDF-CB-PDMS 膜与水直接接触的一侧接触角(a1), PVDF-CB-PDMS 接受太阳能的一侧接触角(a2);PVDF-CB-PDMS 膜接触角微观示意图(b)

Fig. 8 Contact angle diagram of PVDF-CB-PDMS membrane (a); microscopic schematic diagram of contact angle of PVDF-CB-PDMS membrane (b)

2.3 傅里叶红外光谱分析

通过傅里叶红外光谱(FTIR)分析(图 9),观察到 #PVDF 膜在亲水化改性前后的特征吸收峰与文献报道一致。未改性 PVDF 膜的红外光谱中,1 171 cm^{-1} 和 1 210 cm^{-1} 处的吸收峰来源于 PVDF 主链中 CF_2 基团的伸缩振动^[14],而 1 061 cm^{-1} 、976 cm^{-1} 、837 cm^{-1} 、798 cm^{-1} 、763 cm^{-1} 、690 cm^{-1} 及

611 cm^{-1} 处的吸收峰对应于 PVDF 结晶相的晶格振动^[10]。此外,874 cm^{-1} 、744 cm^{-1} 和 600 cm^{-1} 处的吸收峰归属为 PVDF 无定形相的特征振动模式^[15]。改性后的 PVDF 膜在 762 cm^{-1} (PDA 的 C-H 弯曲振动)和 1 653 cm^{-1} (PEI 的 N-H 弯曲振动)处出现新吸收峰,表明 PDA 和 PEI 成功与 PVDF 反应。此外,亲水化改性后的 PVDF 膜出现原有峰位的偏移(如图 9),表明 Tris-PDA/PEI 改性处理未改变 PVDF 的化学结构,仅通过表面官能团引入提升了亲水性。这一结果与文献中关于 PVDF 膜化学稳定性的研究相符^[14],即 PVDF 在弱碱性改性条件下仍能保持其主结构的完整性。

2.4 热重分析

对亲水化改性的 #PVDF 膜、#PVDF-CB 膜、#PVDF-CB-PDMS 膜进行热重分析,结果如图 10 所示。在 0~300 $^{\circ}\text{C}$ 范围内,三种膜的稳定性较好。当温度升至 370 $^{\circ}\text{C}$ 时,#PVDF 膜出现约 5% 的质量损失,表明存在未完全干燥的残留物分解。在 400~600 $^{\circ}\text{C}$ 范围内,#PVDF 膜结构迅速崩溃,出现约 77% 的质量损失。#PVDF-CB 膜和 #PVDF-CB-PDMS 膜的热重曲线与 #PVDF 膜相似,但由

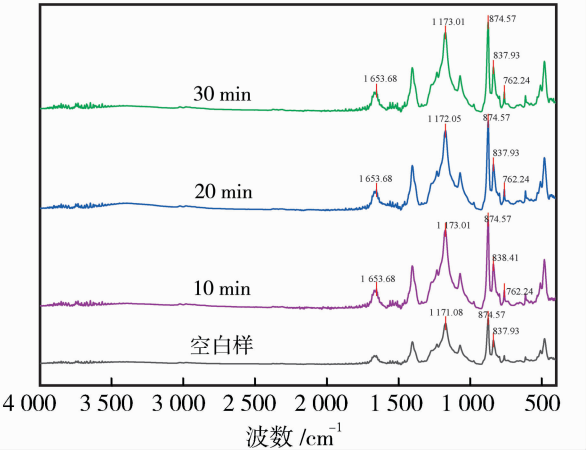


图 9 不同改性时间前后膜的 FTIR 谱图

Fig. 9 FTIR spectra of membranes before and after different modification times

于炭黑和 PDMS 的存在,失重比例有所降低。

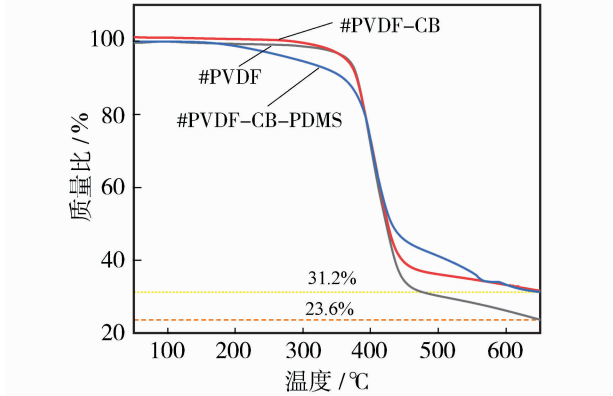


图 10 #PVDF、#PVDF-CB、#PVDF-CB-PDMS 的热重图

Fig. 10 Thermogravimetric diagrams of #PVDF, #PVDF-CB, #PVDF-CB-PDMS

2.5 光热性能分析

通过紫外-可见-近红外分光光度计测量了 #PVDF-CB-PDMS 复合光热膜的吸光率,发现其在全光谱范围内的吸光率可达 99% 以上(图 11),表明炭黑的加入显著提高了膜的光热转换性能。进一步通过红外热成像仪观察了膜表面温度随时间的变化(图 12)。结果表明,随着光照时间的增加,膜表面温度逐渐升高,前 30 min 升温速度较快,30 min 后升温速度减缓,最终达到平衡状态。在光照条件下,膜表面温度升高约 50 °C,光吸收率超过 99%。相比之下,Wang 等^[11]开发的还原氧化石墨烯(rGO)基蒸发器在光照下表面温度升高约 40 °C,光吸收率为 94.7%,但材料成本较高;孔岩^[12]报道的

生物质基气凝胶在光照下表面温度升高约 30 °C,光热转换效率较低,蒸发速率仅为 3.22 kg/(m²·h);Simayee 等^[13]研究的石墨烯-炭黑复合材料在光照下表面温度升高约 45 °C,但光吸收率未达到 99%,且制备工艺复杂。而本文制备的 #PVDF-CB-PDMS 复合光热膜凭借 PDMS 疏水层有效抑制盐结晶,展现出更优的光热转换效率和升温效果,且制备工艺简单、成本低,应用潜力大。

此外,为评估 #PVDF-CB-PDMS 光热复合膜的实际应用价值,模拟高盐环境,在 1 个太阳光照强度下,采用 10% NaCl 溶液对膜进行 20 个连续循环(每循环 15 h)的稳定性测试(图 13)。结果显示,膜的蒸发速率在整个测试过程中保持稳定,平均变化幅度低于 1.5%。这表明 CB 与 PDMS 的协同涂覆结构具有出色的光热稳定性和抗盐性能。

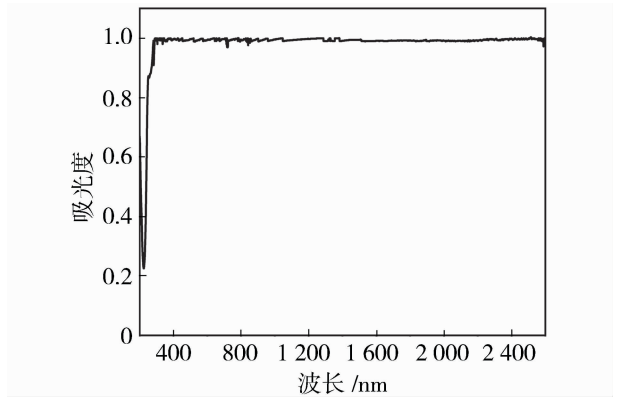


图 11 #PVDF-CB-PDMS 复合光热膜的吸光率
Fig. 11 Absorbance of #PVDF-CB-PDMS composite photothermal membrane

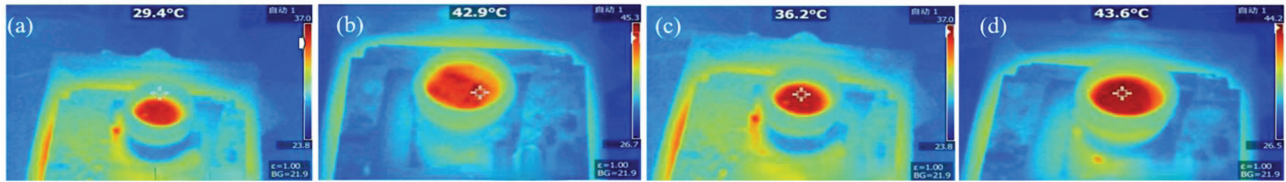


图 12 炭黑用量为 0.3 g 的起始表面温度(a)和最终表面温度(b);炭黑用量为 0.5 g 的起始表面温度(c)和最终表面温度(d)

Fig. 12 Initial surface temperature (a) and final surface temperature (b) with 0.3 g of carbon black; initial surface temperature (c) and final surface temperature (d) with 0.5 g of carbon black

2.6 响应面分析与工艺优化

利用 Design-Expert 13 软件对试验数据炭黑用量(A)、#PVDF 膜浸泡时间(B)及 PDMS 用量(C)对蒸发速率(Y)进行回归分析,采用 Box- Behnken设计(BBD)进行三因素三水平响应面试

验,试验设计及结果如表 1 所示,并建立回归模型并得出回归方程:

$$Y=1.69+0.0021\times A-0.0010\times B+0.0008\times C-0.0002\times AB+0.0009\times AC-0.0001\times BC-0.0236\times A^2-0.0162\times B^2-0.0143\times C^2 \quad (1)$$

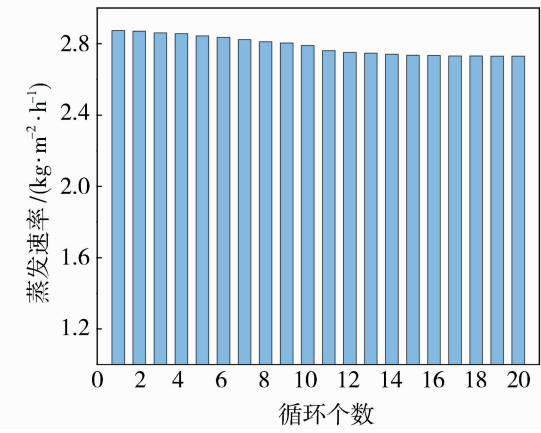


图 13 #PVDF-CB-PDMS 1 个太阳照射下
循环蒸发实验结果

Fig. 13 1 solar irradiation cyclic evaporation experiment
results of #PVDF-CB-PDMS membrane

表 1 结果显示,中心点试验($A=0.5\text{ g}$, $B=20\text{ min}$, $C=0.20\text{ g}$)的蒸发速率稳定于 $2.86\sim2.87\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,与模型预测值[$2.87\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$]偏差仅 0.1% ,这一结果验证了模型的可靠性和参数优化区间的合理性。在极端条件下(如 $A=0.3\text{ g}$ 或 0.7 g , $C=0.15\text{ g}$ 或 0.25 g)蒸发速率显著下降[$2.73\sim2.75\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$],表明炭黑过量(0.7 g)导致光热转换效率降低,而 PDMS 不足(0.15 g)引发盐结晶积累。SEM-EDS 表征证实,炭黑均匀分布于 PVDF 表面[图 1(d)],碳含量(质量分数)由 68.87% 提升至 71.37% (图 2、图 3),形成宽光谱吸收($>99\%$)的异质结构。PDMS 疏水层(接触角 128.6°)通过抑制盐结晶及减少热扩散,实现热量局域化。表 2 方差分析表明,模型 P 值 <0.0001 且

失拟项 $P=0.5533$,证实模型与实验数据高度吻合。炭黑用量(A)及其二次项(A^2)对蒸发速率影响最为显著($P<0.01$),三因素影响排序为: $A>B>C$ 。交互作用分析(图 14~图 16)显示,AC 交互显著: $A=0.3\text{ g}$ 时 $C=0.25\text{ g}$,阻碍水分输运[$2.73\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$]; $A=0.7\text{ g}$ 时 $C=0.15\text{ g}$,引发盐结晶[$2.75\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$]。优化条件下($A=0.51\text{ g}$, $B=19.7\text{ min}$, $C=0.20\text{ g}$),炭黑与 PDMS 协同作用使蒸发速率达 $2.87\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ (误差 $<0.35\%$),验证了界面结构设计 with 组分调控对性能提升的关键作用,为低成本、高稳定性太阳能海水淡化膜的开发提供了重要参考。

表 1 响应面试验结果

Table 1 Response surface test results				
试验号	A	B	C	蒸发速率/(kg·m ⁻² ·h ⁻¹)
1	−1	1	0	2.729
2	0	0	0	2.861
3	0	0	0	2.873
4	0	1	1	2.763
5	−1	0	1	2.732
6	0	0	0	2.870
7	−1	−1	0	2.731
8	1	0	1	2.756
9	−1	0	−1	2.733
10	1	1	0	2.738
11	0	1	−1	2.759
12	0	0	0	2.866
13	1	−1	0	2.742
14	0	−1	−1	2.768
15	1	0	−1	2.745
16	0	0	0	2.872
17	0	−1	1	2.774

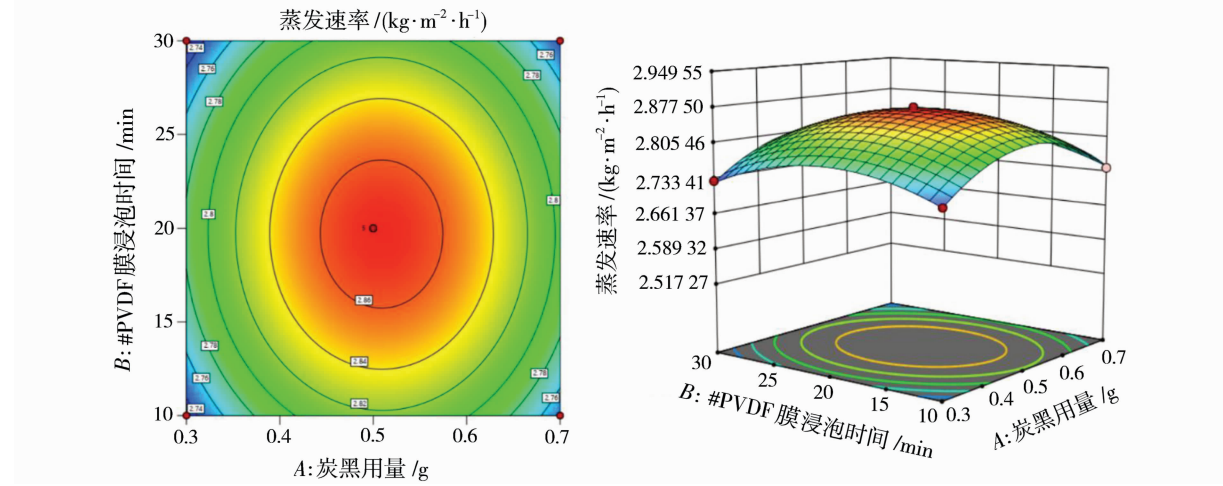


图 14 AB 交互作用对蒸发速率影响的等高线图和响应面图

Fig. 14 Contour and response surface plots of the effect of AB interaction on evaporation rate

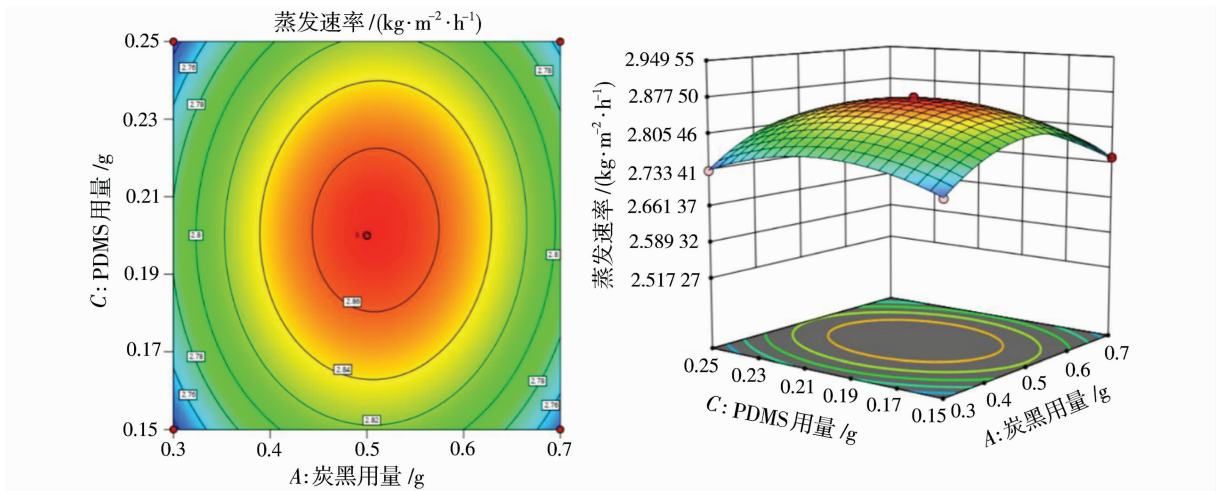


图 15 AC 交互作用对蒸发速率影响的等高线图和响应面图

Fig. 15 Contour and response surface plots of the effect of AC interaction on evaporation rate

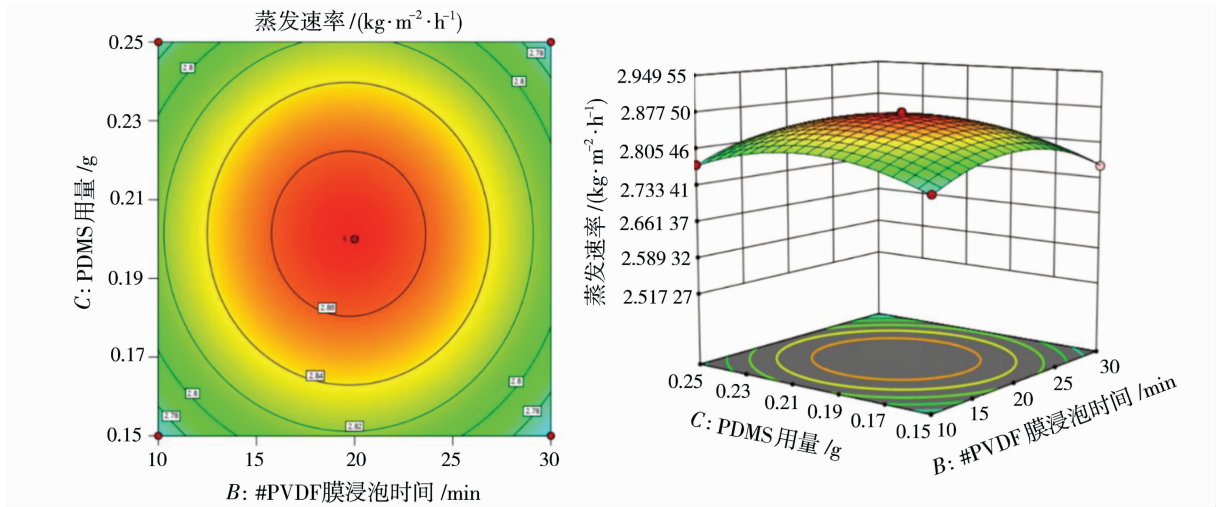


图 16 BC 交互作用对蒸发速率影响的等高线图和响应面图

Fig. 16 Contour and response surface maps of the effect of BC interaction on evaporation rate

表 2 回归模型的方差分析结果

Table 2 ANOVA results of the regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	0.004 8	9	0.000 5	277.1	<0.000 1
A	0	1	0	18.43	0.003 6
B	7.66×10^{-6}	1	7.66×10^{-6}	3.94	0.087 4
C	4.53×10^{-6}	1	4.53×10^{-6}	2.33	0.170 5
AB	9.09×10^{-8}	1	9.09×10^{-8}	0.046 8	0.834 8
AC	3.27×10^{-6}	1	3.27×10^{-6}	1.69	0.235 2
BC	0.00	1	8.96×10^{-8}	0.046 1	0.836 0
A ²	0.002 3	1	0.002 3	1 209.98	<0.000 1
B ²	0.001 1	1	0.001 1	571.68	<0.000 1
C ²	0.000 9	1	0.000 9	441.84	<0.000 1
残差	0	7	1.94×10^{-6}	—	—
失拟项	5.11×10^{-6}	3	1.70×10^{-6}	0.804 1	0.553 3
纯误差	8.48×10^{-6}	4	2.12×10^{-6}	—	—
总差	0.004 9	16	—	—	—

3 结论

本文通过化学改性、真空抽滤与涂覆工艺制备了具有 Janus 结构的 #PVDF-CB-PDMS 复合光热膜。基于响应面分析优化得到最佳制备条件:炭黑用量 0.51 g、#PVDF 膜浸泡时间 19.7 min、PDMS 涂覆量 0.20 g,实验测得蒸发速率为 2.87 kg/(m²·h),与预测值高度吻合(误差<0.35%)。微观表征表明,炭黑均匀分散显著提升了膜的光吸收率(>99%),PDMS 疏水层有效抑制盐结晶,Janus 结构通过亲水侧快速输水与疏水侧光热局域化的协同作用,实现了高效蒸发与抗污性能。热重分析及接触角测试验证了膜的热稳定性和界面平衡机制。本研究为低成本、高稳定性太阳能海水淡化膜的开发提供了可行方案,未来需进一步优化规模化制备条件及复杂环境下的长期运行性能。

参考文献:

[1] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Four billion people facing severe water scarcity[J]. *Sci Adv*,2016,2(2): 6.

[2] Pointet T. The united nations world water development report 2022 on groundwater, a synthesis[J]. *LHB*, 2022, 108(1): 21.

[3] Li S, Duran K, Delagah S, *et al.* Energy efficiency of staged reverse osmosis (RO) and closed-circuit reverse osmosis (CCRO) desalination: a model-based comparison [J]. *Water Supply*, 2020, 20(8): 3096-3106.

[4] Aly S, Jawad J, Manzoor H, *et al.* Pilot testing of a novel integrated multi effect distillation-absorber compressor (MED-AB) technology for high performance seawater desalination[J]. *Desalination*, 2022, 521: 15.

[5] Doornbusch G, Van Der Wal M, Tedesco M, *et al.* Multistage electrodialysis for desalination of natural

seawater[J]. *Desalination*, 2021, 505: 11.

[6] Ali E, Orfi J, Alansary H, *et al.* Advanced structures of reversal multi-stage flash desalination [J]. *Desalination*, 2024, 571: 117095.

[7] Li J H, Mu L H, Liu Q H, *et al.* A review: Fabric-based solar driven interfacial evaporator [J]. *Nano Energy*, 2024, 132: 28.

[8] Wang D X, Zhang X T, Yang C Y, *et al.* Photocatalysis assisted solar-driven interfacial water evaporation: principles, advances and trends[J]. *Sep Purif Technol*, 2025, 360: 27.

[9] Luo X, Shi J C, Zhao C Y, *et al.* The energy efficiency of interfacial solar desalination[J]. *Appl Energy*, 2021, 302: 10.

[10] Li Y M, Shi Y Y, Wang H W, *et al.* Recent advances in carbon-based materials for solar-driven interfacial photothermal conversion water evaporation: Assemblies, structures, applications, and prospective [J]. *Carbon Energy*, 2023, 5(11): 42.

[11] Wang Y D, Wu X, Gao T, *et al.* Same materials, bigger output: A reversibly transformable 2D - 3D photothermal evaporator for highly efficient solar steam generation[J]. *Nano Energy*, 2021, 79: 9.

[12] 孔 岩. 生物质基光热界面材料的制备及其在高盐废水中的应用研究 [D]. 青岛:山东大学,2023.

[13] Simayee M, Zad A I, Esfandiar A. Synergistic effect of reduced graphene oxide and carbon black as hybrid light absorber for efficient and antifouling texture-based solar steam generator[J]. *Solar Energy*, 2022, 238: 226-237.

[14] Yu J T, Sun D, Yue D M, *et al.* CuMOF functionalized PVDF membrane with hierarchical structure for photothermal vacuum membrane distillation[J]. *J Membr Sci*, 2024, 706: 16.

[15] 赵建玲, 马晨雨, 李建强, 等. 基于全光谱太阳光利用的光热转换材料研究进展[J]. *材料工程*, 2019, 47 (6): 11-19.

Design and performance study of carbon-based solar desalination composite membranes

GUO Yanyan¹, SONG Chengyan¹, SU Haijian², LI Yuanxin¹, MA Zhun^{1,3}
(1. College of Chemical and Biological Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. China Tobacco Shandong Industrial Co., Ltd., Qingdao 266100, China; 3. College of Chemical Engineering and Materials Science, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China)

Abstract: With the increasingly severe shortage of freshwater resources around the world, solar-driven

interfacial evaporation technology has become a research hotspot in the field of seawater desalination due to its high efficiency and environmental friendliness. In this paper, the Janus structure design based on polyvinylidene fluoride (PVDF) membrane was proposed, and the composite photothermal membrane of polyvinylidene fluoride-carbon black-polydimethylsiloxane (PVDF-CB-PDMS) was prepared by chemical modification, vacuum filtration and coating process. The effects of the amount of carbon black (CB), the soaking time of PVDF membrane and the amount of polydimethylsiloxane (PDMS) on the evaporation rate were systematically investigated, and the optimal conditions were optimized by response surface analysis: the amount of carbon black was 0.51 g, the soaking time of PVDF membrane was 19.7 min, and the amount of PDMS was 0.20 g. The predicted interfacial photothermal evaporation rate was $2.87 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, and the experimental value was $2.87 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, which were in high agreement. Microscopic characterization showed that the uniform dispersion of carbon black significantly enhanced the light absorption ($>99\%$), while the PDMS hydrophobic layer effectively inhibited salt crystallization. This paper provides theoretical support for the development of low-cost and high-stability solar desalination membranes.

Key words: interfacial evaporation; seawater desalination; carbon-based materials; polyvinylidene fluoride composite membrane; photothermal conversion

(上接第 132 页)

Hydrophobically modified polytetrafluoroethylene (PTFE) hollow fiber membranes and their applications in ethanol-water separation

WU Zhichao¹, LIU Di², HUA Conggui², WU Mingyuan¹, WU Qingyun¹,
LIU Jiuyi¹, YANG Jianjun¹, ZHANG Jian'an¹

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China;

2. Anhui Konanuo Membrane Technology Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: In this study, the hydrophobicity of PTFE hollow fiber membranes was enhanced by a two-step modification strategy to improve their performance in ethanol-water separation. First, the membrane fibers were coated with a cross-linked network formed by branched polyethylenimine (PEI) and glutaraldehyde (GA), and then grafted with stearyl chloride (SC) to reduce the surface energy and increase the roughness of the membrane. The surface chemical and morphological changes of the modified membranes were characterized by FTIR, XPS and SEM, and the water contact angle (WCA), air permeability and ethanol-water separation performance were analyzed before and after modification. The results showed that the modified membrane exhibited the WCA increased from $(118.8 \pm 0.5)^\circ$ to $(141.7 \pm 0.9)^\circ$ and maintained good air permeability. The tensile strength was 53.86 MPa, the elongation at break was 90.7% and the elastic modulus was 307.2 MPa, which did not decrease compared with the mechanical properties of the original membrane. The properties of the modified membrane were stable after chemical and physical cleaning. The ethanol-water separation test showed that the ethanol permeation flux of the modified membrane was $285.41 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, and the separation factor was 10.25, which indicated that the modified membrane had excellent separation performance and durability.

Key words: PTFE hollow fiber membrane; hydrophobic; ethanol-water separation