

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.01.001

超亲水超疏油导电碳膜的制备及其油水分离性能

赵冀宁¹, 刘子豪¹, 赵智龙¹, 魏伟², 吴静³, 张朝晖³

(1. 国网河北省电力有限公司超高压分公司, 石家庄 050000; 2. 艾科维尔(天津)科技有限公司, 天津 300384;
3. 天津工业大学 环境科学与工程学院, 天津 300387)

摘要: 为了改善膜分离工艺在用于含油废水处理过程中通量低、连续运行稳定性差的难题, 采用“静电纺—预氧化—碳化”工艺制备超亲水、水下超疏油的纳米纤维导电碳膜, 并研究该导电碳膜的油水分离性能。结果表明: 导电碳膜做阴极, 在-50 V/cm 电压下过滤正己烷、大豆油和二氯甲烷3种油水乳液时, 膜通量显著提高, 分别比不加电时提高了57.6%、94.3%和53.4%; 而且, 膜通量衰减得到明显抑制, 10周期连续过滤后, 膜比通量衰减幅度比不加电时分别降低了9.2%、26%和16%。此外, 与不加电时相比, 导电碳膜对3种油水乳液的分离效率虽然只是略有提高, 但分离效率的稳定性却显著增强, 连续10周期过滤后, 导电膜的油水分离效率始终稳定在99%左右。导电膜过滤工艺的产水效率和运行稳定性都比传统膜过滤工艺显著提高。

关键词: 油水分离; 导电碳膜; 膜污染; 含油废水; 超亲水超疏油

中图分类号: TQ051.893

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2025)01-0001-07

Preparation of super hydrophilic and super oleophobic conductive carbon membrane and its oil-water separation performance

ZHAO Jining¹, LIU Zihao¹, ZHAO Zhilong¹, WEI Wei², WU Jing³, ZHANG Zhaohui³

(1. Ultra-High Voltage Branch of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China; 2. Aikeweier (Tianjin) Technology Co., Ltd., Tianjin 300384, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: To solve the problems of low flux and poor continuous operation stability during the treatment of oily wastewater by membrane separation process, a nanofiber conductive carbon membrane with super hydrophilic and super oleophobic underwater is prepared using the process of electrospinning pre-oxidation carbonization, and its oil-water separation performance is studied. The results show that when the conductive carbon membrane is used as cathode to filter n-hexane, soybean oil and dichloromethane emulsions at the voltage of -50 V/cm, the membrane flux is significantly increased by 57.6%, 94.3% and 53.4%, respectively, compared with that without electricity. Moreover, the decline of membrane flux is significantly inhibited. After 10-cycle filtration, the attenuation of membrane specific flux decreases by 9.2%, 26% and 16%, respectively, compared with that without power-on. In addition, although the separation efficiency of the three oil-water emulsions by conductive carbon membrane is only slightly improved compared with that without power-on, its stability of oil-water separation efficiency is significantly enhanced. After 10 consecutive cycles of filtration, the oil-water separation efficiency of conductive carbon membrane is always maintained at approximately 99%. Therefore, the water production efficiency and operation stability of conductive membrane filtration process are significantly higher than those of conventional membrane filtration process.

Key words: oil-water separation; electricity conductive carbon membrane; membrane fouling; oily wastewater; super hydrophilic and super oleophobic

收稿日期: 2023-09-21

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(kj2022-055); 天津市科技计划项目(22JCYBJC01510)

第一作者: 赵冀宁(1980—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电气工程及电力系统环境保护。E-mail: cgyyjb111@163.com

通信作者: 张朝晖(1974—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为膜法水处理工艺及原理。E-mail: zzh7448@126.com

石油加工、金属加工和食品加工是产生含油废水的三大行业^[1]。油类污染物不仅会影响水体复氧,还会对水生生物造成严重影响。水体中油类质量浓度达到 0.06 mg/L 时,可能导致水生生物的胚胎和幼虫死亡^[2],达到 0.1 mg/L 时,海鲜产品的肉质中就会散发油味^[3],超过 200 mg/L 时,水体鱼类生物等将无法存活^[4]。

油类在水中存在的状态有 4 种:游离态、分散态、乳化态和溶解态^[5-7]。其中乳化态油类粒径小、稳定性强,处理难度远大于其他形态的油类^[8]。目前已有多种方法用于含油废水的处理,如絮凝、气浮、吸附、电化学氧化和膜分离等^[9-11]。其中,膜分离技术因分离效率高、占地小、易操作、不产生二次污染等特点,受到越来越多的关注,但油类造成的膜污染会严重影响膜系统运行的稳定性(分离效率和膜通量衰减速度快),也限制了该技术的大规模推广应用^[12-13]。膜材料亲水改性^[14-15]和外加电场^[16-17]都可以有效减缓含油废水处理过程中的膜污染。但膜材料改性短期运行效果显著,长期运行的稳定性存在争议^[18]。外加电场的抗污染原理主要是电泳作用,对膜污染的减缓效率有待提高^[19]。导电膜耦合了膜材料改性和外加电场的双重优势,在含油废水处理过程中正逐渐受到关注。Li 等^[19]制备了煤基碳膜,并以其做阳极处理含油废水,膜的总污染率从 78.9% 降到 33.3%。Zheng 等^[20]通过在不锈钢网上进行分层静电纺制备 PAN 膜,施加负电压分离石蜡乳液,获得了高达 99.88% 的油水分离效率。但是导电膜用于油水分离的研究还较少,特别是对不同油类的连续油水分离性能还需要深入研究。

本文采用“静电纺-预氧化-碳化”工艺制备了高亲水、超疏油的导电碳膜,同时选择正己烷模拟矿物油中的轻油、二氯甲烷模拟矿物油中的重油和大豆油模拟植物油,分别制备相应的稳定油水乳液,从油水分离效率、膜产水通量、膜比通量衰减几方面分析了相比于传统膜过滤,导电膜在油水分离性能方面的提高,以及多周期连续运行的稳定性。

1 材料与方法

1.1 实验试剂与仪器

试剂:聚丙烯腈(PAN),重庆中纳科技有限公司;无水醋酸锌、三乙氧基-1H,1H,2H,2H-十三氟-N-辛基硅烷(PFTS),上海麦克林生化科技有限公司;N,N-二甲基甲酰胺(DMF)、正己烷、二氯甲烷、大豆油和吐温 80,天津市江天化工技术股份有限公司。

仪器:JLBG-126 型红外测油仪,中国吉林吉光科技有限责任公司;Porolux 1000 型毛细流孔径仪,比利时普罗美特公司;DSA30S 型全自动接触角测量仪,德国 KRÜSS 公司;Hitachi S4800 型冷场发射扫描电子显微镜,日本 Hitachi 公司;Dimension Icon 型原子力显微镜,德国 Bruker 公司;ZS90 型激光粒度分析仪,英国 Malvern 公司;UTM2102 电子万能试验机,中国深圳三思纵横科技股份有限公司;膜过滤装置,实验室自制。

1.2 导电碳膜的制备

将质量分数为 12% 的 PAN 粉末溶于 DMF 中,同时加入无水醋酸锌和 PFTS,二者的添加量分别为 PAN 质量的 40% 和 10%。在集热式恒温磁力搅拌器中于 60 °C 下恒温搅拌 12 h 至所有药品完全溶解,得到均匀的纺丝液。静置 12 h 脱泡后,利用静电纺丝机制备纳米纤维膜。纺丝完成后,将制得的纳米纤维膜置于烘箱中,于 60 °C 下干燥 1 h。然后将该纳米纤维膜在程序升温电热鼓风干燥箱中进行预氧化处理。预氧化过程以 5 °C/min 的速率升温,并分别在 160、220 和 270 °C 各恒温 1 h,然后以 5 °C/min 的速率降至室温。最后将预氧化膜在氮气氛围的管式炉中进行高温碳化。碳化过程的升温速率同样为 5 °C/min,并在 850 °C 下恒温 2 h,之后以 5 °C/min 的速率降至室温。

1.3 油水乳液的制备

实验选择正己烷、二氯甲烷和大豆油 3 种油类,分别模拟矿物油类的轻油、重油以及植物油类。3 种油类的稳定油水乳液制备方法为:于 500 mL 烧杯中按体积比为 99:1 配制水和油混合溶液 300 mL,并在烧杯中加入质量分数为 0.1% 的表面活性剂吐温 80。将配制的溶液先在超声波清洗机中超声 30 min,使表面活性剂均匀分散于溶液中,然后利用乳化机在 7 000 r/min 转速下高速搅拌 1 h,最终形成均匀的油水乳液。该乳液非常稳定,静置 7 d 都不会出现分层现象。

1.4 膜过滤实验

膜过滤实验装置如图 1 所示。

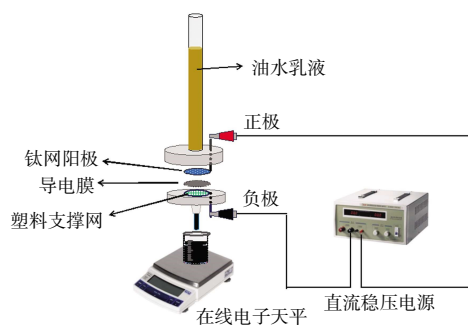


图1 实验装置

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

实验装置最上部是盛放待分离油水乳液的圆柱形进液管,下部与膜池相连,膜池有效直径 24 mm。膜池内顶部镶嵌有钛网阳极,底部嵌有塑料支撑网,导电膜置于支撑网上,并通过电极线与电源阴极相连。膜池内阳极和阴极间距为 1 cm,膜池下部是产水管。实验时以直流稳压电源向钛网阳极和导电膜阴极施加外电场。膜产水通过在线天平计量并转化成膜的产水通量。为防止进液管内液柱变化对膜通量的影响,整个过滤期间进液管内液柱高度始终保持在 30 cm。多周期过滤实验期间,每过滤 100 mL 为一个过滤周期,每个过滤周期结束后取下导电膜用去离子冲洗 2 min。膜的油水分离效率、膜产水通量和膜比通量的计算公式分别为:

$$\eta = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$J = \frac{V}{A \cdot \Delta t} \quad (2)$$

$$J' = \frac{J}{J_0} \quad (3)$$

式中: η 为导电碳膜对油水乳液的分离效率(%); C_0 为膜过滤前油水乳液中油含量(mg/L); C 为膜过滤产水中油含量(mg/L); J 为导电碳膜产水通量(L/(m²·h)); V 为液体透过膜的体积(m³); A 为膜有效过滤面积(m²); Δt 为液体透过膜所用时间(h); J' 为膜比通量; J_0 为膜的初始通量(L/(m²·h))。

1.5 分析方法

采用 JLBG-126 型红外测油仪测定水中油含量;采用 Porolux 1000 型毛细流孔径仪通过泡点法表征导电膜孔径分布;采用 DSA30S 型全自动接触角测量仪测量导电膜的水接触角及水下油接触角;采用 Hitachi S4800 型冷场发射扫描电子显微镜表征膜面形貌;采用 Dimension Icon 型原子力显微镜测定膜表面粗糙度;利用 ZS90 型激光粒度分析仪测定正己烷、大豆油和二氯甲烷 3 种油水乳液的 Zeta 电位;采用 UTM2102 型电子万能试验机测定导电碳膜的拉伸强度和断裂伸长率。

2 结果与讨论

2.1 导电碳膜的基本性能

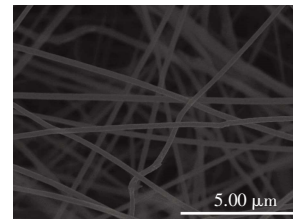
导电碳膜的主要性质参数如表 1 所示,其表面形貌如图 2 所示。本文制备得到的导电碳膜的水接触角在水滴接触膜面 0.15 s 内就变为 0°,水下油接触角 1 s 内为 155.34°,30 s 后仍然保持在 150.8°,表现出超亲水、超疏油特征,同时该导电碳膜表现出优异的导电性能和较好的机械强度。碳化后的纳米纤维丝交叠

形成的不规则孔径较大。同时,该导电碳膜具有显著的表面粗糙度,其算术平均粗糙度(R_a)和均方根粗糙度(R_q)分别高达 461 nm 和 570 nm。伴随着粗糙度增加,膜的过滤面积也随之增大,这些都有利于膜产水通量的提高。

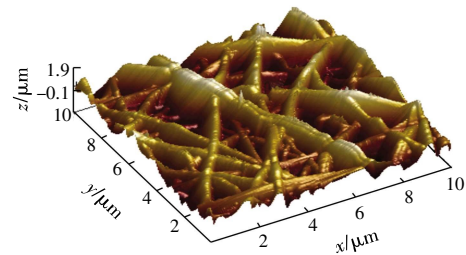
表 1 导电碳膜主要参数

Tab.1 Main parameters of conductive carbon membrane

电导率/ (S·m ⁻¹)	水接触角/ (°)	水下油接触角/ (°)	孔径/ μm	拉伸强度/ MPa	断裂伸长率/ %
0.77	0	155.34	0.8~1.75	1.21	2.93



(a) 导电碳膜 SEM 形貌



(b) 导电碳膜的表面粗糙度

图 2 导电碳膜形貌

Fig.2 Morphology of conductive carbon membrane

2.2 导电碳膜的油水分离性能

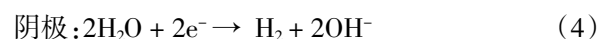
2.2.1 外加电场对导电碳膜油水分离性能的影响

图 3 显示了不加电情况下导电碳膜对 3 种油水乳液的分离性能。

由图 3 可知,不加电时碳膜对 3 种油水乳液的分离效率相差不大,其中,对大豆油的分离效率最低(98.9%),对正己烷的分离效率最高(99.41%),两者相差仅 0.52%。但是碳膜对 3 种油水乳液的分离膜通量却相差很大。大豆油的膜通量最低,仅 286.3 L/(m²·h),正己烷和二氯甲烷的膜通量都明显高于大豆油,分别是 488.6 和 418.7 L/(m²·h),这与大豆油的高黏度有关。

图 4 探讨了外加电场强度对导电碳膜油水分离效率和膜通量的影响。

由图 4 可知,随着外加电场强度的增大,导电碳膜对 3 种油水乳液的分离效率均有不同程度的增加。当对导电碳膜施加电场时,导电碳膜阴极和钛网阳极两处分别发生式(4)和式(5)的反应:



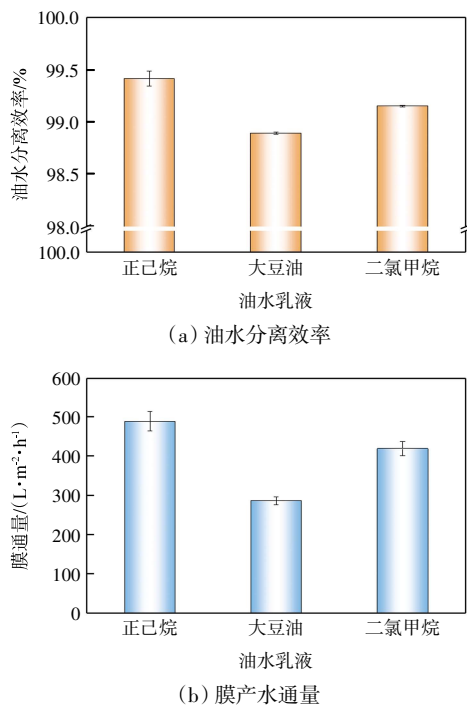


图 3 不加电时导电碳膜对油水乳液的分离性能

Fig.3 Separation performance of conductive carbon membrane for oil-water emulsions without power supply

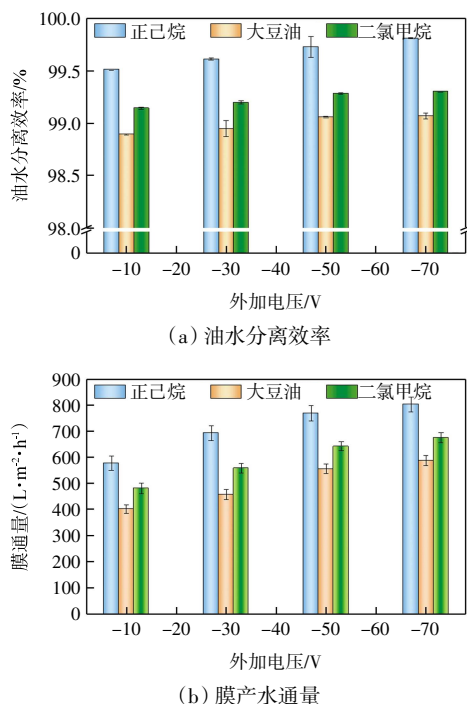
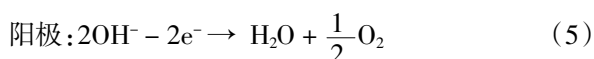


图 4 外加电场对导电碳膜油水分离性能的影响

Fig.4 Effect of applied electric field on oil-water separation performance of conductive carbon membrane



在两极表面都有微米级气泡产生^[21],由于油水乳液中的油滴粒径非常小,气泡会附着在油滴上,带着

油滴一起上浮,通过气浮效应实现油水分层^[22]。随着施加电场强度的增大,这种电气浮效应越加明显。但二氯甲烷油滴密度大于水,电气浮效应带来的影响不如正己烷和大豆油那样明显。通过 Zeta 电位测试 3 种油水乳液中的油滴均荷负电,如图 5 所示。

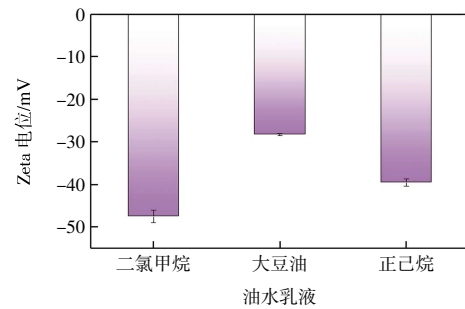


图 5 3 种油水乳液的 Zeta 电位

Fig.5 Zeta potentials of three kinds of oil-water emulsions

导电膜被施加负电压后,随着电压的增大,膜与油滴间的静电斥力也不断增大,阻止油滴靠近膜面,有利于油水分离效率的提升。此外,外电场对油滴的电泳作用也促使荷负电的油滴向阳极迁移。上述原因共同导致了导电膜对油水乳液的分离效率随着外电场强度的提高而增大。但可能是碳膜本身对 3 种油水乳液的分离效率就很高的缘故,外加电场对导电碳膜油水分离效率提高的程度并不显著(图 4(a))。以油水分离效果提升最明显的正己烷为例,电压从 0 V 增加至 70 V,导电膜对正己烷的油水分效率也仅仅提升了 0.4%。相比之下,外加电场强度对导电碳膜油水分离膜通量的影响则非常显著(图 4(b))。施加 -10 V 电压时,大豆油的膜通量增幅最显著,从不加电时的 286.3 增加到 402.4 L/(m²·h),增长了 40.6%,电压进一步增加到 -50 V 时,膜通量又增加了 38.2%。之后增加不再明显。施加 -10 V 电压对正己烷和二氯甲烷膜通量的影响不如对大豆油那样显著,与不加电时相比分别增加了 18.2% 和 15.1%。电压进一步升高到 -50 V 时,二者的膜通量都增加了 33% 左右,之后再增加到 -70 V 时膜通量都不再明显增加,增幅在 4%~5% 左右。电场对油滴产生的电泳作用,荷负电油滴与和荷负电膜面之间的静电斥力,以及电气浮效应带来的破乳都有助于膜产水通量的增加。另一方面,水分子属于典型的极性分子,在外电场作用下发生偶极化。水分子偶极化有 2 种可能:一种是分子偶极化后电荷在两端分布,正电荷分布一侧在膜面静电引力作用下促使水分子向膜面迁移,然后穿过膜面到达产水侧;另一种可能是偶极化导致水分子之间的氢键断裂,水分子团尺度减小或形成大量单个水分子,减少了水透过膜的阻力。

2.2.2 导电碳膜的连续油水分离性能

本文进一步探讨了在-50 V 电压下导电碳膜的连

续油水分离性能。图 6 对比了加电和不加电时导电碳膜连续 10 个过滤周期的油水分离效率。

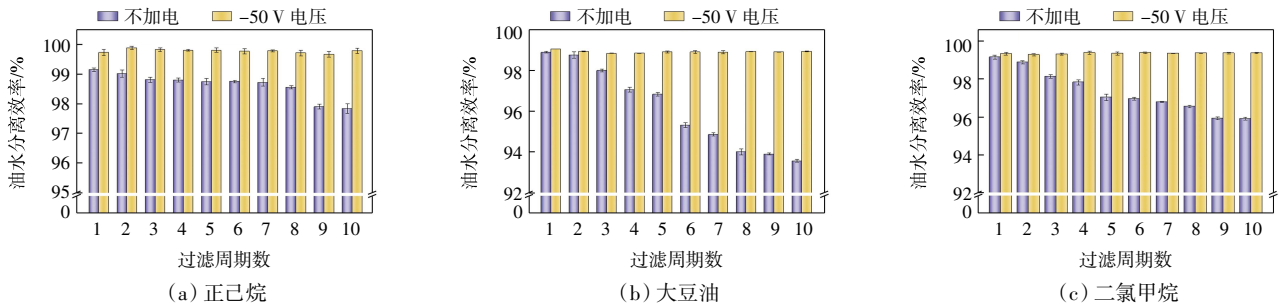


图 6 导电碳膜多周期连续运行的油水分离效率

Fig.6 Oil-water separation efficiency of conductive carbon membrane during multi-cycle continuous operation

由图 6 可知,不加电时碳膜的油水分离效率随着运行周期数的延长而下降。特别是大豆油的分离效率下降最明显,第 10 周期时的油水分离效率已经由 98.9% 降到 93.6%。这是因为随着过滤时间的延长,膜面及膜孔逐渐被油类污染,造成膜的疏水性升高,更利于同样是疏水性的油类黏附到膜面并透过膜孔,导致膜的油水分离效率下降。大豆油的高黏度加重了

油在膜上的附着,因此分离效率下降的更加明显。施加-50 V 电压后,电泳作用和导电膜面对油滴的静电排斥效应都在阻碍油滴靠近膜面。因此,导电膜对 3 种油水乳液的分离效率都始终非常稳定,连续运行 10 个周期基本没有变化。

图 7 对比了加电和不加电条件下导电碳膜多周期运行的膜通量变化。

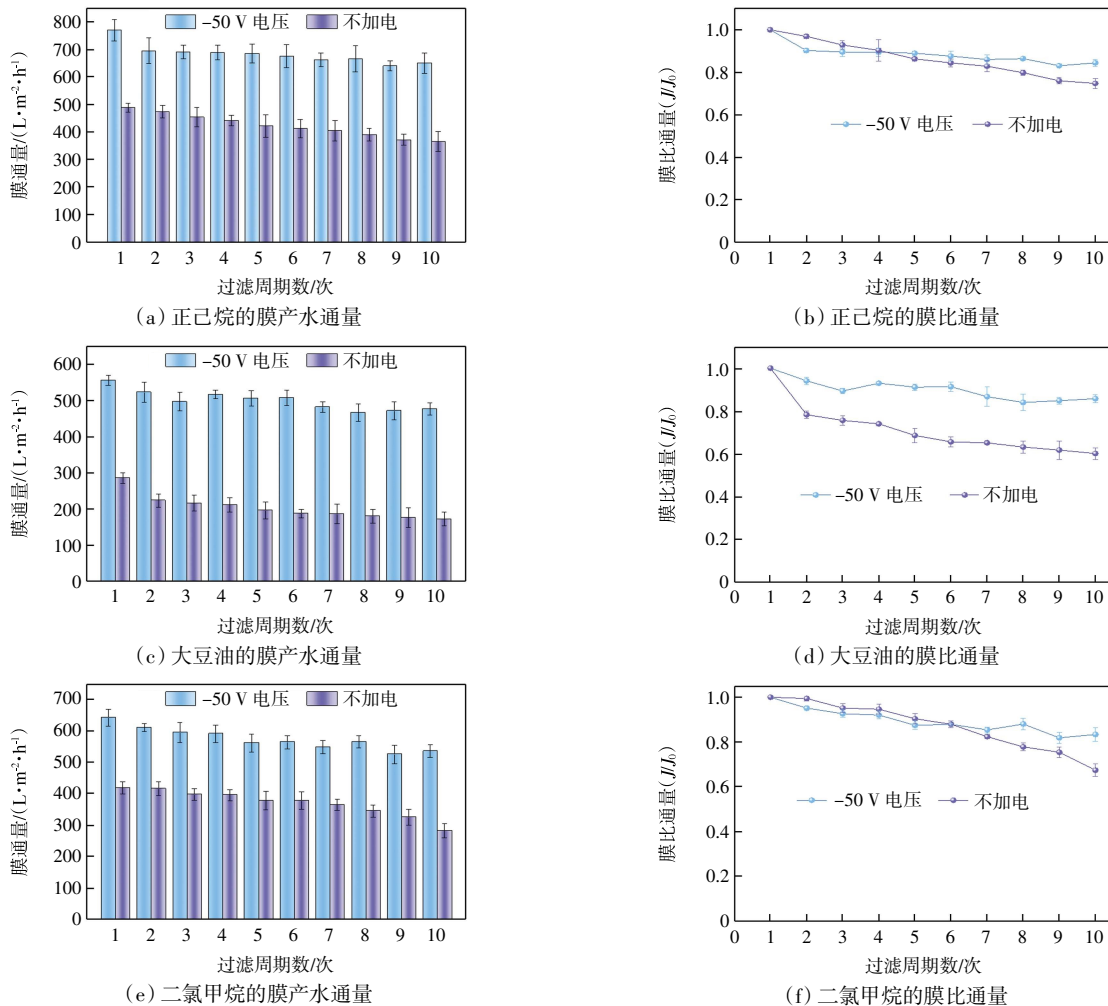


图 7 导电碳膜多周期连续运行的油水分离通量

Fig.7 Membrane flux of oil-water separation with conductive carbon membrane during multi-cycle continuous operation

由图7可见,在-50 V电压下导电碳膜过滤正己烷、大豆油和二氯甲烷3种油水乳液的膜产水通量远高于不加电时,分别是不加电时提高了57.6%、94.3%和53.4%。连续10个周期的膜比通量衰减曲线进一步证明,-50 V电压下导电碳膜的抗污染性能明显好于不加电时。10周期过滤结束时,加电条件下导电碳膜过滤正己烷、大豆油和二氯甲烷3种油水乳液的膜比通量分别衰减至初始通量的84%、86%和83%,衰减幅度分别比不加电时降低了9.2%、26%和16%。显然,外加电场下的导电膜过滤技术不仅显著提高了膜的产水通量,还明显改善膜系统在连续油水分离过程中的稳定性。特别是对于黏度很高的大豆油类,导电膜过滤的优势显得更加突出。这是因为大豆油的主要成分是不饱和脂肪酸类,根据导电碳膜阴极的反应式(1),在-50 V电压下导电膜面及膜孔内都是强碱性环境,当大豆油靠近碳膜阴极时,在近膜区域及膜孔内的碱性环境下会生成脂肪酸盐,导致大豆油的黏度显著下降,同时也提高了大豆油的电导率,使荷负电碳膜对大豆油的静电排斥和电场电泳作用都增强。这些都有利于膜产水通量的提高,以及减轻连续运行过程中高黏度大豆油对膜面及膜孔内的污染。

3 结 论

(1) 与不加电时相比,外加电场下导电膜的油水分离效率虽然略有提高,但提升的幅度并不明显。即使外加电压增加到-70 V,导电膜油水分离效率的提升幅度也不超过0.5%。

(2) 不加电时,膜过滤的油水分离效率随着运行时间的延长不断下降。相比之下,导电膜的油水分离效率却非常稳定,-50 V电压下连续运行10个周期都基本没有衰减。

(3) 导电膜的油水分离膜通量比不加电时显著提高。施加-50 V电压下,导电膜对正己烷、大豆油和二氯甲烷3种油水乳液的膜通量分别比不加电时提高了57.6%、94.3%和53.4%。

(4) 导电膜可以有效减缓油水分离过程中的膜污染,显著提高膜系统运行的稳定性。导电膜连续10个周期过滤正己烷、大豆油和二氯甲烷3种油水乳液,膜比通量衰减幅度分别比不加电时减少了9.2%、26%和16%。

参考文献:

[1] SINGH C J, MUKHOPADHYAY S, RENGASAMY R S. Fi-

- brous coalescence filtration in treating oily wastewater: A review[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2022, 51: 3648-3682.
- [2] BECHMANN R K, LARSEN B K, TABAN I C, et al. Chronic exposure of adults and embryos of *Pandalus borealis* to oil causes PAH accumulation, initiation of biomarker responses and an increase in larval mortality[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(11): 2087-2098.
- [3] 温泽玲. 聚丙烯腈基油水分离材料的制备及性能研究[D]. 太原:太原理工大学, 2021.
- WEN Z L. Preparation and properties of polyacrylonitrilebased oil-water separation materials[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021 (in Chinese).
- [4] 杨继斌. 超疏水超亲油三维海绵的制备及油水分离性能研究[D]. 天津:天津工业大学, 2019.
- YANG J B. Preparation of super hydrophobic and lipophilic three-dimensional sponge and its oil-water separation performance[D]. Tianjin: Tiangong University, 2019 (in Chinese).
- [5] 张泰. 微纳米碳复合吸油与分离功能材料研究[D]. 天津:天津工业大学, 2021.
- ZHANG T. Study on micro-nano carbon composite oil absorption and separation functional materials[D]. Tianjin: Tiangong University, 2021 (in Chinese).
- [6] ZHU H, GUO Z G. Understanding the separations of oil/water mixtures from immiscible to emulsions on super-wettable surfaces[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2016, 13(1): 1-29.
- [7] ZHU Y, WANG D, JIANG L, et al. Recent progress in developing advanced membranes for emulsified oil/water separation[J]. *Npg Asia Materials*, 2014, 6(5): e101.
- [8] CHU Z L, FENG Y J, SEEGER S. Oil/water separation with selective superantivetting/superwetting surface materials[J]. *Angewandte Chemie-Intern Ational Edition*, 2015, 54(8): 2328-2338.
- [9] CHERYAN M, RAJAGOPALAN N. Membrane processing of oily streams: Wastewater treatment and waste reduction[J]. *Journal of Membrane Science*, 1998, 151(1): 13-28.
- [10] MUNIRASU S, ABU H M, BANAT F. Use of membrane technology for oil field and refinery produced water treatment; A review[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2016, 100: 183-202.
- [11] 高亚男, 李建新, 何本桥. 光催化复合膜制备及其性能研究[J]. *天津工业大学学报*, 2009, 28(2): 17-20.
- GAO Y N, LI J X, HE B Q. Preparation and evaluation of photocatalytic membrane[J]. *Journal of Tiangong University*, 2009, 28(2): 17-20(in Chinese).
- [12] WEI Y, QI H, GONG X, et al. Specially wettable membranes for oil-water separation[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2018, 5(23): 1800576.

- [13] GUPTA R K, DUNDERDALE G J, ENGLAND M W, et al. Oil/water separation techniques; A review of recent progresses and future directions[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5(31): 16025–16058.
- [14] WANG J, YU Z, XIAO X, et al. A novel hydroxyapatite super-hydrophilic membrane for efficient separation of oil-water emulsions, desalting and removal of metal ions[J]. *Desalination*, 2023, 565: 116864.
- [15] 李培军, 董林芳, 王明霞, 等. 聚醚胺 D230 对聚偏氟乙烯膜表面亲水改性及其油水分离性能[J]. *天津工业大学学报*, 2024, 43(2): 29–35.
- LI P J, DONG L F, WANG M X, et al. Hydrophilic modification of polyvinylidene fluoride membrane surface by polyetheramine D230 and its oil-water separation performance[J]. *Journal of Tiangong University*, 2024, 43(2): 29–35 (in Chinese).
- [16] WENG Y, LI K, HAN L, et al. Removal of humic substances (HS) from water by electro-microfiltration (EMF)[J]. *Water Research*, 2006, 40: 1783–1794.
- [17] SARKAR B, PAL S, GHOSH T B, et al. A study of electric field enhanced ultrafiltration of synthetic fruit juice and optical quantification of gel deposition[J]. *Journal of Membrane Science*, 2008, 311: 112–120.
- [18] ZHU L J, ZHU L P, JIANG J H, et al. Hydrophilic and anti-fouling polyethersulfone ultrafiltration membranes with poly(2-hydroxyethylmethacrylate) grafted silica nanoparticles as additive[J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 451: 157–168.
- [19] LI C, SONG C, TAO P, et al. Enhanced separation performance of coal-based carbon membranes coupled with an electric field for oily wastewater treatment[J]. *Separation and Purification Technology*, 2016, 168: 47–56.
- [20] ZHENG W, XU J, WANG L, et al. Electro-enhanced rapid separation of nanosized oil droplets from emulsions via the superhydrophilic micro-sized pore membrane[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 314: 123453.
- [21] JING G G, REN S, POOLEY S, et al. Electrocoagulation for industrial wastewater treatment: An updated review[J]. *Environmental Science – Water Research & Technology*, 2021, 7(7): 1177–1196.
- [22] MOHTASHAMI R, SHANG J Q. Treatment of automotive paint wastewater in continuous-flow electroflotation reactor[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 218: 335–346.

本文引文格式:

赵冀宁, 刘子豪, 赵智龙, 等. 超亲水超疏油导电碳膜的制备及其油水分离性能[J]. *天津工业大学学报*, 2025, 44(1): 1–7.

ZHAO J N, LIU Z H, ZHAO Z L, et al. Preparation of super hydrophilic and super oleophobic conductive carbon membrane and its oil-water separation performance[J]. *Journal of Tiangong University*, 2025, 44(1): 1–7 (in Chinese).