

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.10.002

# 电辅助碳基超滤膜处理地表水的研究

陈鹏辉<sup>1,2</sup>, 孙雪菲<sup>1,2</sup>, 殷翼云<sup>1,2</sup>

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 纳米矿物与污染控制安徽普通高校重点实验室, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**文章采用耦合电化学氧化技术与膜分离技术的电化学辅助膜过滤(electrochemical membrane filtration, EMF)工艺对地表水体进行处理;通过相转化法制备一种成本低廉、导电性能良好的碳纤维布(carbon fiber cloth, CC)聚醚砜(polyethersulfone, PES)CC/PES 复合膜,利用电化学辅助作用强化复合膜对污染物的去除率和解决膜分离过程中膜污染问题。地表水处理实验结果表明:单纯膜过滤在 3 个循环周期后的膜通量为初始通量的 31.5%,而在电辅助下,施加电压为 $\pm 2.0$  V,膜分别作为阳极和阴极时,膜通量分别为初始通量的 40.8%、43.8%;膜系统在电化学辅助反冲洗下,通量恢复率接近 96%,且系统出水水质有明显提升;系统能耗分析表明,电场作用下的膜过滤系统具有更好的经济效益。研究结果可为电化学辅助膜过滤工艺在饮用水处理中的实际应用提供理论基础。

**关键词:**碳纤维基;复合膜;电辅助;抗污染性能;地表水过滤

**中图分类号:**TU991.24 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)10-1307-07

## Study on the treatment of surface water by electro-assisted carbon based ultrafiltration membrane

CHEN Penghui<sup>1,2</sup>, SUN Xuefei<sup>1,2</sup>, YIN Yiyun<sup>1,2</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Key Laboratory of Nanominerals and Pollution Control of Anhui Higher Education Institutes, Hefei 230009, China)

**Abstract:** This paper uses an electrochemical membrane filtration (EMF) process that couples electrochemical oxidation technology and membrane separation technology to treat surface water bodies. A carbon fiber cloth/polyethersulfone (CC/PES) composite membrane with low cost and good conductivity was prepared by phase conversion method, and the electrochemical assistance was used to enhance the removal rate of pollutants by the composite membrane and solve the problem of membrane fouling during membrane separation. The experimental results of surface water treatment show that the membrane flux of pure membrane filtration after three cycles is 31.5% of the initial flux, while under the assistance of electricity, the membrane flux is 40.8% and 43.8% of the initial flux when the voltage is  $\pm 2.0$  V and the membrane is used as the anode and cathode, respectively; under electrochemical assisted backwashing, the flux recovery rate of the membrane system is close to 96%, and the effluent quality of the system has significantly improved; the energy consumption analysis of the system indicates that the membrane filtration system under the action of an electric field has better economic benefits. The research results can provide a theoretical basis for the practical application of EMF technology in drinking water treatment.

**Key words:** carbon fiber based; composite membrane; electro-assistance; antipollution performance; surface water filtration

收稿日期:2022-05-17;修回日期:2022-06-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978227);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(PA2020GDKC0025)

作者简介:陈鹏辉(1997—),男,福建泉州人,合肥工业大学硕士生;

孙雪菲(1984—),女,山东聊城人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: xfsun2018@163.com.

目前,根据国际卫生组织的相关调查结果,大部分的人类疾病是由于饮用水中的细菌、病毒和原生动植物等组成的水媒病原微生物(pathogenic microorganisms, PMs)引起的<sup>[1]</sup>,通过水处理工艺减少水中病原微生物的传播,从而抑制疾病的发生率成为水净化处理研究的重要方向<sup>[2-3]</sup>。当前常用的水净化处理工艺是通过絮凝—沉淀—氯消毒来完成的,但该处理工艺存在明显缺陷,如絮凝过程需要额外投加化学试剂,氯消毒过程会因水体中存在大量天然有机物而形成三卤甲烷、卤乙酸等消毒副产物,这些试剂和副产物都会对人体健康造成影响<sup>[4]</sup>。因此,迫切需要开发高效、低成本、生态友好的水处理工艺,实现 PMs 的有效灭活,确保饮用水安全以满足人类发展需要。

膜分离技术因其具有能耗低、占地面积小、无需添加化学试剂等独特的优势,在废水处理和给水净化领域得到广泛的运用<sup>[5]</sup>,然而该技术的实际应用受到膜污染问题的制约。膜污染是指在膜分离过程中,系统进水中的污染物在膜表面或膜孔内吸附、沉积导致膜渗透性能和分离性能下降的现象,其缩短了膜的使用寿命,无形中使膜系统的运行成本居高不下<sup>[6]</sup>。为克服膜分离技术的局限性,通常将其与其他水处理技术结合,如电化学辅助膜过滤技术<sup>[7]</sup>,该技术是在电辅助条件下,通过电增强润湿作用、电化学氧化、静电排斥等功能调节污染物与膜界面间的相互作用,强化污染物的去除效率和减缓分离过程中的膜污染<sup>[8-9]</sup>。

电化学辅助膜过滤技术具有简单高效、清洁节能等优点,为缓解膜污染提供了新策略,在水处理领域具有广阔的应用前景<sup>[10]</sup>。该技术的关键因素之一是导电膜,导电膜的应用可以减少所需电场强度,在较低的操作电压条件下实现预期的膜分离效果<sup>[11]</sup>。目前导电膜主要采用碳基材料<sup>[12]</sup>、金属材料<sup>[13]</sup>或者导电聚合物<sup>[14]</sup>制备,但制备的导电膜存在一些问题,如通过单纯碳基材料制备的导电膜机械强度较差,且制备工艺复杂,通过金属材料制备的导电膜易腐蚀、孔隙连通性低等<sup>[15]</sup>。与其他导电膜材料相比,碳纤维基膜具有良好的导电和吸附性能、较强的化学稳定性和生产方式简单等优点,在电化学辅助膜过滤技术中得到推广应用。

本文通过相转化法制备具有导电性能的碳纤维布(carbon fiber cloth, CC)聚醚砜(polyether-sulfone, PES)CC/PES 复合膜,考察该复合膜的微观形貌和物理性质,并构建电化学辅助膜过滤

系统,评估该系统对地表水的处理性能及运行成本,分析其作用机制;考察电化学辅助膜过滤技术处理实际地表水体的可行性,以期为抗膜污染研究和该技术在处理实际水体中的应用提供参考。

## 1 复合膜制备、水体过滤实验及指标计算

### 1.1 CC/PES 复合膜的制备

采用相转化法完成 CC/PES 复合膜的制备,主要步骤包括碳纤维布的预处理、PES 铸膜液的制备和 CC/PES 复合膜的涂覆制备。

1) 将 CC 浸泡于丙酮、无水乙醇、去离子水的混合溶液(三者体积比为 1:1:1)中超声处理 30 min,清除 CC 表面的杂质,然后用去离子水清洗,置于鼓风干燥箱中烘干备用<sup>[16]</sup>。

2) 将聚合物 PES 粉末预先干燥,按照 1:5 的质量比将其加入 N-甲基吡咯烷酮(NMP)溶液与 N,N-2 甲基甲酰胺(DMF)溶液形成的混合溶液(两者的质量比为 1:1)中,磁力搅拌 24 h 后室温静置,排出混合液中的气泡,制得 PES 铸膜液备用<sup>[17]</sup>。

3) 利用铸膜刀将 5 mL PES 铸膜液涂覆于预处理后的 CC 基底上,刮涂出 200  $\mu\text{m}$  厚度的 PES 薄膜,涂层于空气中蒸发 30 s 后,将其浸入室温下的去离子水中,制得 CC/PES 复合膜。

### 1.2 CC/PES 复合膜表征及物理性质测定

使用 Regulus8230 扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)(日本 Hitachi 公司)分析 CC/PES 复合膜表面和横截断面的微观形貌。使用 Dimension Icon 原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)(德国布鲁克公司)分析膜表面的粗糙度和表面孔径分布。使用 JC2000X 接触角测量仪(上海中晨数字技术设备有限公司)分析膜材料的亲疏水性。

通过测量复合膜样品的干质量和湿质量获得膜的孔隙率  $\epsilon$ <sup>[18]</sup>,  $\epsilon$  的计算公式为:

$$\epsilon = \frac{m_1 - m_2}{AL\rho_w} \times 100\% \quad (1)$$

其中:  $m_1$  为膜潮湿状态下的质量;  $m_2$  为膜干燥状态下的质量;  $A$  为膜的有效面积;  $\rho_w$  为水的密度,取值为 0.998  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $L$  为膜材料的厚度。

对于膜的平均孔径  $r_m$ ,根据膜过滤系统的纯水通量,利用 Guerout-Elford-Ferry 方程计算得到  $r_m$ <sup>[19]</sup>,计算公式为:

$$r_m = \sqrt{\frac{8\mu L Q(2.9 - 1.75\epsilon)}{\epsilon A \Delta P}} \quad (2)$$

其中: $\mu$  为纯水的黏度,取值为  $8.9 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ;  $Q$  为单位时间膜渗透纯水的体积; $\Delta P$  为膜系统运行时的跨膜压差。

系统纯水通量测试条件如下:操作压力为 0.10 MPa,测试时间为 30 min,通过天平监测渗透出水质量来计算通量。

### 1.3 电辅助膜过滤系统处理地表水测试

在实验室搭建电辅助膜过滤系统装置,其示意图如图 1 所示。处理的水体取自某池塘地表水,取样点位于水深 0.5 m 处。在错流过滤模式,压力为 0.10 MPa 条件下进行实验,施加辅助

电压为  $-2.0$ 、 $2.0 \text{ V}$ ,CC/PES 复合膜作为工作电极,石墨板作为对电极,两个电极之间的距离为 5 mm。根据膜通量变化和出水水质指标(包括总有机碳(total organic carbon, TOC)质量浓度  $\rho_{\text{TOC}}$ 、高锰酸盐指数  $\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$ 、 $\rho_{\text{氨氮}}$ 、浊度和菌体数量等)分析结果,评估电辅助膜过滤系统处理地表水体的可行性。该系统采用二电极体系,利用 CHI1030C 多通道恒电位仪(上海辰华仪器有限公司)为电辅助膜过滤提供电压;利用 BT600-2J 蠕动泵驱动器(保定兰格恒流泵有限公司)为系统提供运行压力和错流动力。

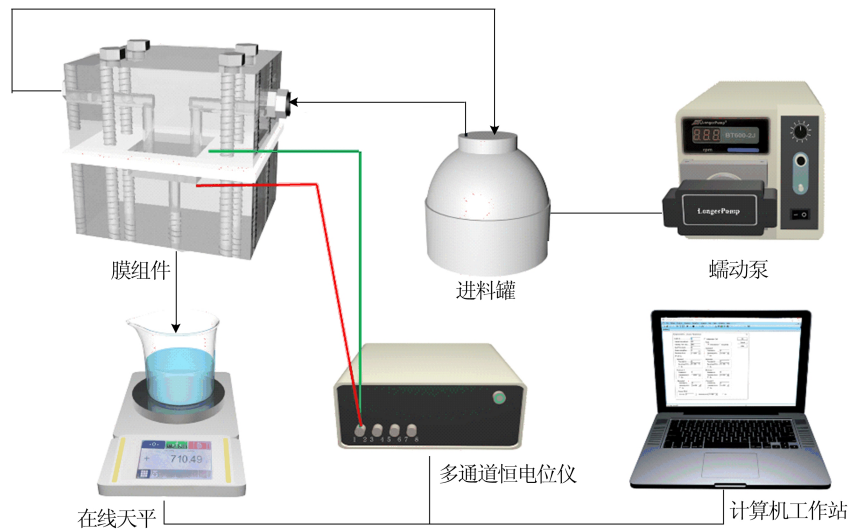


图 1 电辅助膜过滤系统装置示意图

在地表水过滤实验中,首先以去离子水作为进料液,对 CC/PES 复合膜在 0.15 MPa 条件下压实 20 min,系统稳定运行后记录纯水通量  $J_0$ 。地表水体需经过沉淀和尼龙筛网预处理,然后进行实验,水样水温为  $12.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\text{pH}=6.73$ ,电导率为  $8.07 \text{ } \mu\text{S}/\text{cm}$ 。主要水质指标取值如下: $\rho_{\text{TOC}}=4.72 \text{ mg/L}$ ,  $\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}=3.54 \text{ mg/L}$ ,浊度为  $6.27 \text{ NTU}$ ,总菌数为  $10^4 \text{ CFU/L}$ ,  $\text{UV}_{254}$  为  $0.102 \text{ cm}^{-1}$ 。实验采用间歇式运行,每运行 1 h 后进行电辅助反冲洗 10 min,运行过程中,通过监测天平记录渗透出水质量变化,测试系统的瞬时实际通量  $J_t$  和通量恢复率(flux recovery rate, FRR)  $F_{\text{RR}}$ ,并分析出水水质指标。瞬时实际通量  $J_t$ 、通量恢复率  $F_{\text{RR}}$  计算公式为:

$$J_t = \frac{\Delta V}{At} \quad (3)$$

$$F_{\text{RR}} = \frac{J_t}{J_0} \times 100\% \quad (4)$$

其中: $\Delta V$  为膜的渗透液体积差; $t$  为膜系统的运

行时间; $J_0$  为系统纯水压实后的初始通量; $J_t$  为每个周期过滤结束时的稳定通量。

### 1.4 电辅助膜过滤系统的能耗分析

膜过滤系统的运行能耗是衡量该系统能否投入实际运用的重要指标之一,其中电能消耗是系统可持续运行和经济可行的关键因素<sup>[20]</sup>。电辅助膜过滤系统运行期间的能量比耗(specific energy consumption, SEC)  $C_{\text{SEC}}$  计算公式<sup>[21-22]</sup>为:

$$C_{\text{SEC}} = \frac{U_{\text{cell}} It}{V} \quad (5)$$

其中: $U_{\text{cell}}$  为施加的电极电位; $I$  为电流; $V$  为系统过滤体积。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 CC/PES 复合膜的形貌结构分析

CC 和 CC/PES 复合膜的 SEM 图像如图 2 所示。预处理后的 CC 作为复合膜的支撑层,从图 2a、图 2b 可以看出,CC 具有丰富交错的网状

结构且纤维感明显,表面结构粗糙。在完成铸膜液流延及相转化后,CC 支撑层上形成富含微孔结构的 PES 有机膜层,从图 2c 可以看出大小不均匀的膜孔。

由图 2d 可知,CC/PES 复合膜形成了特征性的指状空腔,复合膜的分层明显,上层是 PES 有机膜层,底层是 CC 与 PES 聚合物交联后堆积聚集的膜基底<sup>[23-24]</sup>。

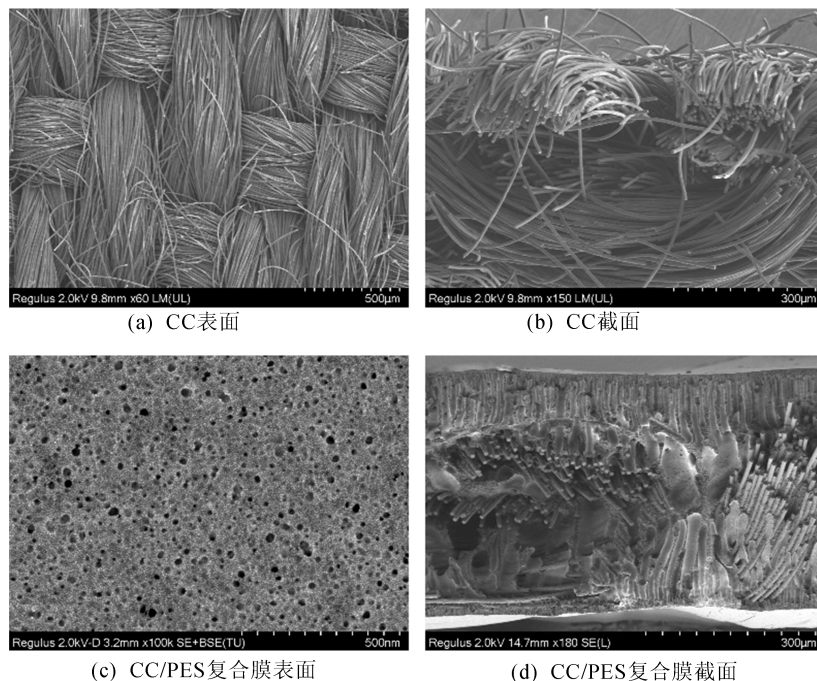


图 2 CC 和 CC/PES 复合膜 SEM 图像

CC 和 CC/PES 复合膜 AFM 图像如图 3 所示。通过 AFM 图像分析膜表面的粗糙程度,从图 3 可以看出,CC/PES 复合膜具有更光滑的表面形貌。

复合膜的均方根粗糙度  $R_q$  分别为 262、8.54 nm,平均粗糙度  $R_a$  分别为 210、6.44 nm,由此可见复合膜具有更低的表面粗糙度。

根据 AFM 分析的计算结果,CC 和 CC/PES

由图 3 可知,膜面分布着很多离散孔,表现出较好的孔隙分布。

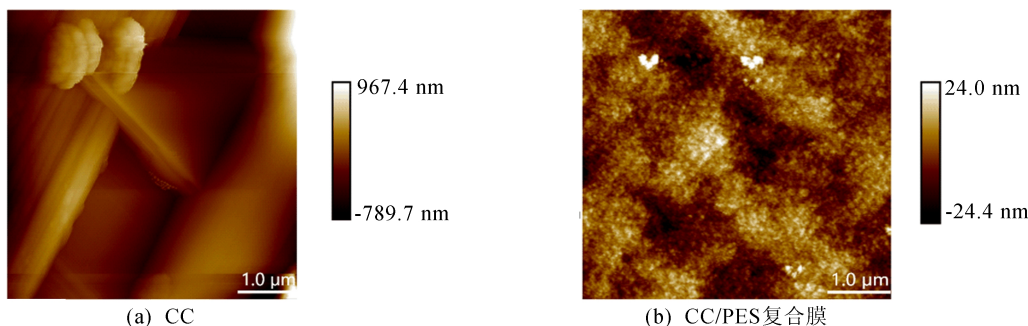


图 3 CC 和 CC/PES 复合膜 AFM 图像

## 2.2 CC/PES 复合膜的物理性质分析

CC 和 CC/PES 复合膜的物理性质分析主要包括膜样品的厚度、孔隙率  $\epsilon$ 、平均孔径  $r_m$  及表面接触角等参数,结果见表 1 所列。CC 涂覆 PES 层后,相比疏水性表面的 CC 基底,负载 PES 涂层后提高了膜基底的表面亲水性,一定程度上改

善了膜的渗透性能<sup>[25]</sup>。利用游标卡尺测量膜样品的厚度,可知膜材料厚度的增加并不是简单的涂层厚度叠加,而是伴随铸膜液在碳纤维结构中的流延而增大。由复合膜的孔隙率(26.22%)、平均孔径(199.77 nm),可以看出其在污染物截留方面的优越性能。

表 1 膜材料的物理性质指标取值

膜材料参数	CC	CC/PES 复合膜
厚度/ $\mu\text{m}$	284.66 $\pm$ 5.34	407.00 $\pm$ 5.66
表面接触角/ $^{\circ}$	104.50 $\pm$ 3.60	52.70 $\pm$ 1.40
$\epsilon/\%$		26.22 $\pm$ 2.15
$r_m/\text{nm}$		199.77 $\pm$ 2.54

### 2.3 电辅助膜过滤系统处理地表水性能评估

不同电压下,膜过滤系统采用 2 种冲洗方式处理地表水的通量变化如图 4 所示。由图 4 可知,在处理实际地表水体时,每个运行周期内,未施加电压和电辅助条件下的膜通量随着系统运行而逐渐下降,这是由于实际地表水体中存在大量悬浮颗粒物、菌体和天然有机物等,过滤期间易吸附在膜面形成滤饼层,阻塞膜孔,从而影响膜系统的渗透性能<sup>[26-27]</sup>。由图 4a 可知,膜过滤系统运行 1 h 时,0 V 条件下的膜通量降至 33.1%,而施加 +2.0、-2.0 V 时的膜通量分别降至 40.9%、43.9%,说明电辅助条件下膜过滤系统具有更强的渗透性能和抗膜污染能力。在 +2.0 V 电辅助条件下,原水中的天然有机物通过间接电化学氧化作用分解甚至矿化,菌体受到电化学阳极氧化的影响而活性降低,同时微小的氧气气泡在膜表

面产生,这些气泡通过物理推动方式使得菌体脱离膜面;而在 -2.0 V 电辅助条件下,静电排斥作用抑制水体中带负电的菌体、有机物等物质在膜表面沉积,同时通过水解在膜面产生氢气气泡,形成屏障阻碍污染物的沉降,有效减缓膜面滤饼层的形成。因此,电辅助条件下,膜过滤系统通量衰减速度小于未施加电压条件下的速度。

在膜过滤系统运行 3 个循环周期内,由图 4a 可知:单纯膜过滤在 3 个循环周期后的膜通量为初始通量的 31.5%,而施加电压为  $\pm 2.0$  V,膜分别作为阳极和阴极时,膜通量分别为初始通量的 40.8%、43.8%;经过 10 min 的电辅助反冲洗,未施加电压和  $\pm 2.0$  V 电辅助条件下的膜通量均能获得再生,电辅助条件下的通量恢复率接近 96%。

由图 4b 可知,利用传统水力反冲洗对膜过滤系统进行再生时,未施加电压时的通量恢复率仅为 86%, $\pm 2.0$  V 电辅助条件下的通量恢复率约为 90%,表明电化学辅助反冲洗能够加快膜清洗过程中污染物的脱落,静电排斥作用和错流过滤模式下的剪切力作用可减少水体中污染物与膜面的附着,从而有效减缓膜污染。

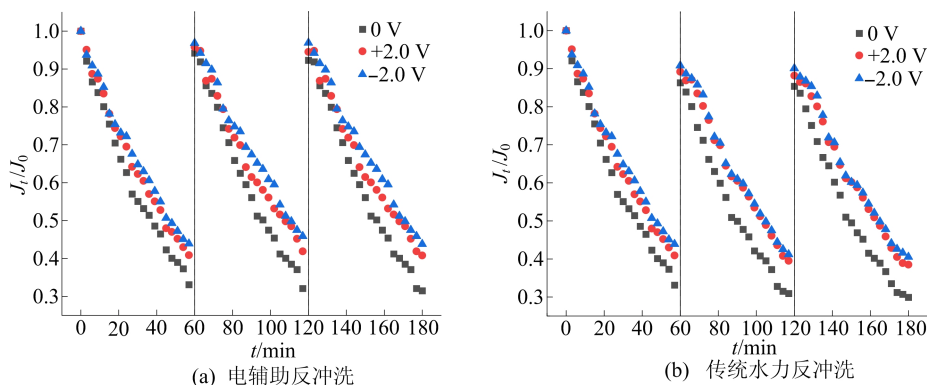


图 4 不同电压下地表水循环过滤实验 2 种冲洗方式下的通量变化

下面考察未施加电压和电辅助条件下膜过滤系统对实际地表水体中菌体、浊度、TOC 的去除效果。相关研究表明,水体中的 TOC 不受其他无机还原性物质存在的影响,可完全氧化  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  测定中不能被氧化的有机物, $\rho_{\text{TOC}}$  测定方法快速准确、灵敏度高、不产生二次污染、易于实现在线监测,且理论上 TOC 和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  之间具有一定的相关性<sup>[28-29]</sup>,故选择  $\rho_{\text{TOC}}$  来表征膜法处理前后水体的有机污染程度。

不同电压下,地表水过滤实验的出水浊度、 $\rho_{\text{TOC}}$  和出水菌落总数变化如图 5 所示。由图 5a

可知,在未施加电压和  $\pm 2.0$  V 电辅助条件下,出水浊度均明显降低,分别为 0.45、0.15 NTU 左右,都满足饮用水浊度指标( $\leq 1.00$  NTU),表明电辅助作用可增强浊度去除效果。

由图 5b 可知:对于未施加电压的膜过滤系统,出水  $\rho_{\text{TOC}}$  为 3.68 mg/L 左右,去除率为 21.9%;而 +2.0、-2.0 V 电辅助条件下的出水  $\rho_{\text{TOC}}$  分别为 2.22、1.83 mg/L,去除率分别为 52.8%、61.2%;电辅助条件下, $\rho_{\text{TOC}}$  和浊度的去除率较单纯膜过滤时有明显提高,施加 +2.0 V 时, $\rho_{\text{TOC}}$  和浊度的去除率分别提高 30.9%、4.3%,

而施加  $-2.0\text{ V}$  时去除率分别提高  $39.3\%$ 、 $4.3\%$ 。在电辅助作用下,出水  $\rho_{\text{TOC}}$  有所降低,这是由于静电排斥和电动现象作用能够抑制悬浮颗粒物及有机胶体在膜面的附着,从而降低污染物通过吸附扩散作用过膜的几率,使得 TOC 去除效果增强。但原水中存在尺寸较小的游离态有机物,无法通过膜孔的截留筛分作用去除,导致出水中存在部分 TOC。由图 5c 可知,无论是否进行电辅助,膜过滤系统都能有效去除菌体,对系统出水进行菌落培养 24 h 后基本没有观察到菌落生成,这是由于大多数细菌的尺寸( $0.5\sim 3.0\ \mu\text{m}$ )大于 CC/PES 复合膜的平均孔径( $199.00\ \text{nm}$ ),在膜的尺寸筛分作用下能够达到  $100\%$  的去除率,截留的细菌将会阻塞膜孔,造成膜生物污染,而不同电压下的系统通量变化说明电辅助增强了分离膜的抗生物污染性能。

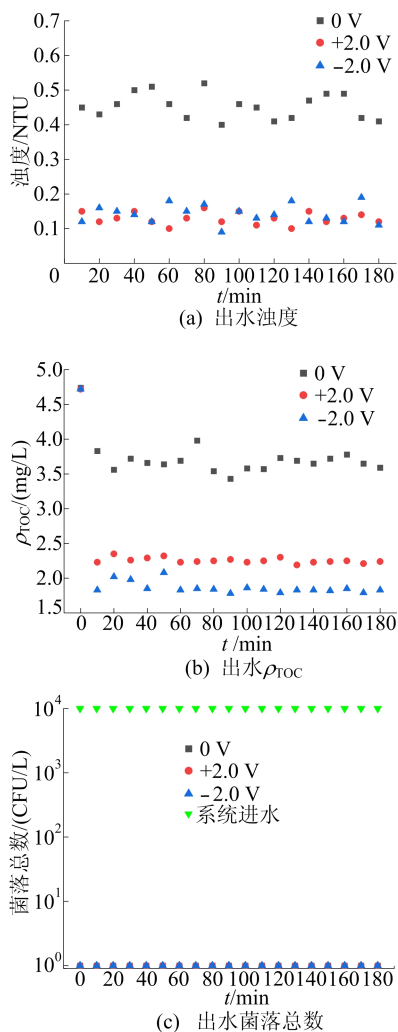


图 5 不同电压下地表水过滤实验的 3 个水质指标变化情况

## 2.4 电辅助膜过滤系统的运行能耗评估

电辅助膜过滤系统的运行能耗主要由泵能

耗、电辅助能耗组成。膜过滤系统的操作电位是低直流电压  $2.0\text{ V}$ ,运行电流小于  $1\ \text{mA}$ ,使得电辅助能耗仅为  $0.006\ \text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ,而系统所用蠕动泵的能耗为  $0.72\ \text{kW}\cdot\text{h}/\text{d}$ ,相比于泵能耗,电辅助能耗是很小的。电辅助条件下,膜过滤系统的渗透通量是未施加电压时的 1.2 倍,且电辅助下的出水水质明显优于未施加电压时的出水水质。而在循环过滤实验中,结合电辅助进行反冲洗使得膜系统的通量恢复率高达  $96\%$ ,相比于传统的水力反冲洗,电辅助反冲洗使得系统具备更好的可再生性,延长了膜的使用寿命,因此一定程度上降低了系统运行成本。

电辅助作用能有效减缓膜污染,使膜系统运行更稳定,从而提高膜系统的产水量,有利于减少反冲洗和更换膜组件的频次,在实际地表水体处理中,电辅助膜过滤系统具有更好的经济效益。

## 3 结 论

本研究以 CC 作为膜基底,通过铸膜刀刮涂和相转化法完成 PES 的负载,制得稳定多孔、具有良好渗透性和截留性能的 CC/PES 复合膜。采用电辅助膜过滤系统处理实际地表水体,在静电排斥、电化学氧化和电动现象的协同作用下,复合膜表现出更好的渗透性能和抗污染性能。运行周期之间的电辅助反冲洗使得通量恢复率达到  $96\%$ ,电辅助膜系统的出水水质有明显提升,  $+2.0\text{ V}$  电辅助条件下 TOC 质量浓度和浊度的去除率较单纯膜过滤时分别提高  $30.9\%$ 、 $4.3\%$ ,而  $-2.0\text{ V}$  电辅助条件下去除率分别提高  $39.3\%$ 、 $4.3\%$ ,且在实际运用中,电辅助膜过滤系统的能耗较低,表现出较大的应用前景。

## [参 考 文 献]

- [1] LU S, ZHANG G. Recent advances on inactivation of waterborne pathogenic microorganisms by (photo) electrochemical oxidation processes: design and application strategies [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 431: 128619.
- [2] MEIRELES A, GIAOURIS E, SIMÕES M. Alternative disinfection methods to chlorine for use in the fresh-cut industry [J]. Food Research International, 2016, 82: 71-85.
- [3] GE Y X, ZHANG X R, SHU L F, et al. Kinetics and mechanisms of virus inactivation by chlorine dioxide in water treatment: a review [J]. Bulletin of Environmental Contamination Toxicology, 2021, 106(4): 560-567.
- [4] 范新飞. 基于碳纳米管分离膜的制备及其电化学辅助膜分离性能的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016.

- [5] ZHANG R N, LIU Y N, HE M R, et al. Antifouling membranes for sustainable water purification: strategies and mechanisms[J]. *Chemical Society Reviews*, 2016, 45(21): 5888-5924.
- [6] 杜磊,魏朔,全燮,等. CNT-PVDF 复合中空纤维膜的制备及其电辅助抗膜污染性能[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(4): 864-874.
- [7] LI C Y, GUO X Y, WANG X, et al. Membrane fouling mitigation by coupling applied electric field in membrane system: configuration, mechanism and performance[J]. *Electrochimica Acta*, 2018, 287: 124-134.
- [8] MAMEDA N, PARK H J, CHOO K H. Membrane electrooxidizer: a new hybrid membrane system with electrochemical oxidation for enhanced organics and fouling control[J]. *Water Research*, 2017, 126: 40-49.
- [9] PAN Z L, SONG C W, LI L, et al. Membrane technology coupled with electrochemical advanced oxidation processes for organic wastewater treatment: recent advances and future prospects[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 376: 120909.
- [10] SUN M, WANG X X, WINTER L R, et al. Electrified membranes for water treatment applications[J]. *ACS ES & T Engineering*, 2021, 1: 725-752.
- [11] ZHU X B, JASSBY D. Electroactive membranes for water treatment: enhanced treatment functionalities, energy considerations, and future challenges[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2019, 52(5): 1177-1186.
- [12] WU Y C, XIA Y F, JING X X, et al. Recent advances in mitigating membrane biofouling using carbon-based materials[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 382: 120976.
- [13] SI Y R, SUN C Y, LI D F, et al. Flexible superhydrophobic metal-based carbon nanotube membrane for electrochemically enhanced water treatment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(14): 9074-9082.
- [14] AHMED F, LALIA B S, KOCHKODAN V, et al. Electrically conductive polymeric membranes for fouling prevention and detection: a review[J]. *Desalination*, 2016, 391: 1-15.
- [15] ZHANG Z X, HUANG G H, LI Y P, et al. Electrically conductive inorganic membranes: a review on principles, characteristics and applications[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 427: 131987.
- [16] 刘琳娜. 电化学辅助 CF/SiO<sub>2</sub>/PES 膜过滤系统的构建及去除抗生素废水的应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [17] WANG Y Q, OU R W, WANG H T, et al. Graphene oxide modified graphitic carbon nitride as a modifier for thin film composite forward osmosis membrane[J]. *Journal of Membrane Science*, 2015, 475: 281-289.
- [18] YU L, ZHANG Y T, ZHANG B, et al. Preparation and characterization of HPEI-GO/PES ultrafiltration membrane with antifouling and antibacterial properties[J]. *Journal of Membrane Science*, 2013, 447: 452-462.
- [19] SUHARTONO J, TIZAOUI C. Polyvinylidene fluoride membranes impregnated at optimised content of pristine and functionalised multi-walled carbon nanotubes for improved water permeation, solute rejection and mechanical properties[J]. *Separation and Purification Technology*, 2015, 154: 290-300.
- [20] HUANG J, WANG Z W, ZHANG J Y, et al. A novel composite conductive microfiltration membrane and its antifouling performance with an external electric field in membrane bioreactors[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 9268.
- [21] FU W C, WANG X Y, ZHENG J J, et al. Antifouling performance and mechanisms in an electrochemical ceramic membrane reactor for wastewater treatment[J]. *Journal of Membrane Science*, 2019, 570/571: 355-361.
- [22] MOREIRA F C, BOAVENTURA R A R, BRILLAS E, et al. Electrochemical advanced oxidation processes: a review on their application to synthetic and real wastewaters[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2017, 202: 217-261.
- [23] LIU Q, QIU G L, ZHOU Z Z, et al. An effective design of electrically conducting thin-film composite (TFC) membranes for bio and organic fouling control in forward osmosis (FO)[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(19): 10596-10605.
- [24] MA C Y, YI C, LI F, et al. Mitigation of membrane fouling using an electroactive polyether sulfone membrane[J]. *Membranes*, 2020, 10(2): 21.
- [25] ZHANG N, LEE H J, WU Y C, et al. Integrating biofouling sensing with fouling mitigation in a two-electrode electrically conductive membrane filtration system[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 288: 120679.
- [26] CHEN S, WANG G L, LI S S, et al. Porous carbon membrane with enhanced selectivity and antifouling capability for water treatment under electrochemical assistance[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2020, 560: 59-68.
- [27] ZHANG Q Y, VECITIS C D. Conductive CNT-PVDF membrane for capacitive organic fouling reduction[J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 459: 143-156.
- [28] 陈光, 刘廷良, 孙宗光. 水体中 TOC 与 COD 相关性研究[J]. *中国环境监测*, 2005, 21(5): 9-12.
- [29] 袁懋, 董德明, 花修艺, 等. 吉林省不同水系的高锰酸盐指数、化学需氧量和总有机碳的相关关系比较[J]. *地理科学*, 2008, 28(2): 286-290.

(责任编辑 张淑艳)