

赵吉, 张洁, 黄天寅, 等. 亲水疏油改性 PVDF 超滤膜对沉淀出水处理的性能评估[J]. 净水技术, 2023, 42(8):75-80.

ZHAO J, ZHANG J, HUANG T Y, et al. Evaluation on UF performance of hydrophilic and oleophobic modified PVDF membrane for sedimentated outflow water treatment[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(8):75-80.

亲水疏油改性 PVDF 超滤膜对沉淀出水处理的性能评估

赵吉¹, 张洁^{2,3}, 黄天寅^{2,3}, 杨晶晶^{2,3,*}

(1. 华衍环境投资<江苏>有限公司, 江苏常州 213000; 2. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 江苏苏州 215009; 3. 苏州市海绵城市技术重点实验室, 江苏苏州 215009)

摘要 为拓宽亲水疏油改性聚偏氟乙烯(HiOo-PVDF)超滤膜的应用范围,以苏州市某水厂沉淀池出水为处理对象,采用自主制备的外压式中空纤维膜组件,研究HiOo-PVDF对水中浑浊度、叶绿素a及有机物的去除性能及过滤过程中的阻力。结果表明,在6个过滤周期中,HiOo-PVDF膜能够稳定去除含有少量藻细胞的沉淀池出水中的浑浊度,去除率稳定在90%以上,对叶绿素a的去除率约为40%,而对有机物的去除较差,DOC、COD_{Mn}和UV₂₅₄的去除率分别约为22%、20%和26%。过滤阻力分布显示,膜本身阻力占比为58.5%,浓差极化阻力和可逆阻力之和占比为25.4%,不可逆阻力占比为16.1%。因此,HiOo-PVDF膜表现出稳定的浑浊度去除能力和较强的耐污染性能,在饮用水处理领域有一定的应用价值。

关键词 亲水疏油改性 PVDF (HiOo-PVDF) 超滤 过滤阻力 浑浊度 有机物 叶绿素 a

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2023)08-0075-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.08.009

Evaluation on UF Performance of Hydrophilic and Oleophobic Modified PVDF Membrane for Sedimentated Outflow Water Treatment

ZHAO Ji¹, ZHANG Jie^{2,3}, HUANG Tianyin^{2,3}, YANG Jingjing^{2,3,*}

(1. Huayan Environmental Investment <Jiangsu> Co., Ltd., Changzhou 213000, China;

2. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

3. Key Laboratory of Suzhou Sponge City Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract In order to broadening the application of hydrophilic and oleophobic modified PVDF membrane (HiOo-PVDF), taking the outflow from sedimentation tank of a water treatment plant (WTP) in Suzhou City as the treatment target, the removal efficiency of turbidity, chlorophyll a and organic matters and the filtration resistance were studied by HiOo-PVDF ultrafiltration in outside-in hollow mode. Results in six filtration cycles showed that, HiOo-PVDF membrane could stably remove the turbidity from the sedimentation outflow containing a small amount of algae. The removal rate of turbidity was more than 90%, while the removal rate of chlorophyll a was about 40%. The removal rate of organic matter was much poorer, with the removal rate of DOC, COD_{Mn} and UV₂₅₄ was about 22%, 20% and 26%, respectively. The distribution of filtration resistance showed that the resistance of the membrane itself, the sum of concentration polarization resistance and reversible resistance, and the irreversible resistance accounted for 58.5%, 25.4% and 16.1%, respectively. Results indicated HiOo-PVDF membrane exhibits both the stable turbidity removal capacity and the strong resistance to the pollution, showing the application prospect in drinking water treatment.

Keywords hydrophilic and oleophobic modified PVDF (HiOo-PVDF) ultrafiltration (UF) filtration resistance turbidity organic matter chlorophyll a (Chl-a)

[收稿日期] 2023-02-09

[基金项目] 苏州市科技计划(SS202107)

[作者简介] 赵吉(1984—),男,博士,研究方向为固体废弃物资源化利用,E-mail:zhaoji1024@126.com。

[通信作者] 杨晶晶,女,博士,研究方向为水处理技术,E-mail:yjjnancy@163.com。

随着社会的发展,水生态环境日益恶化,传统水处理技术已经难以满足人们对更高水质的要求。因此,越来越多的新型水处理技术逐渐出现。膜分离技术具有分离效果好、占地面积小、系统自动化程度

高等优点,并且膜生产成本日趋降低,成为最具前景的水处理技术之一^[1]。

近年来,国内外已有不少学者就水中常见有机物的过滤特性及膜污染特性进行研究,发现有机物特性、膜表面性质、有机物与膜表面作用等均会影响膜的过滤性能和膜污染特性^[2-3]。待过滤水中的腐植酸、蛋白质等物质被认为是造成膜不可逆污染的重要因素之一,会降低膜处理效率,缩短膜的使用寿命,制约膜分离技术在水处理中的应用^[4]。研究^[5]通过对聚偏二氟乙烯(PVDF)膜进行表面亲水改性或低通量运行策略,以降低膜污染对过滤的影响。

本研究所采用的亲水疏油改性 PVDF (HiOo-PVDF) 膜是在前人研究^[6]基础上改进而来,由 PVDF 与一种超亲水超疏油添加剂共混制备而成。研究^[7]已证实其具有优异的油水分离及抗油污染性能,仅水力清洗即可完全恢复膜通量,并且发现该膜在过滤海藻酸钠、腐植酸等配水时,不可逆阻力占比较小,为 13.5%~16.7%^[8]。本研究进一步采用实际水体,即苏州市某水厂沉淀池出水为膜过滤对象,考察该膜的过滤除污染特性,并分析过滤过程中的阻力贡献,为拓展其应用奠定基础。

1 试验材料和方法

1.1 膜材料

试验采用自制外压式中空纤维膜组件,膜组件外形尺寸为 $\varphi 6 \times 440$ mm,膜丝外径为 1.3 mm,内径为 0.6 mm,有效过滤面积为 60 cm²。膜丝是实验室自主研发的 HiOo-PVDF 膜,膜孔径为 0.1~1.2 μm ,平均孔径为 0.5 μm ,中性条件下膜表面电位为 -25.12 mV。亲水疏油改性膜主要是从膜材料角度出发,通过将含有亲水疏油的高分子以一定比例与 PVDF 共混制膜实现研究,具体的制备方法参考刘坤朋等^[7]的研究。试验前先用去离子水将膜浸泡 24 h,再在跨膜压差为 0.02 MPa 下动态过滤去离子水 2 h,去除膜表面残留物质。

1.2 膜过滤试验

膜过滤对象为苏州市某水厂沉淀池出水,试验温度控制在 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 。膜过滤设置 2 组平行试验,采用外压式错流过滤,跨膜压差为 0.05 MPa,浓水流量为 2.7 L/h,浓液不回流,共过滤 6 个周期。分别测试每个周期的初始纯水通量,并且每隔 10 min 监测通量变化。每隔 40 min 采样分析水中

的溶解性有机物、耗氧量(以 COD_{Mn} 计)、UV₂₅₄、浊度和叶绿素 a。

当膜通量衰减趋于稳定时,进行冲洗强度为 27 L/h 的水力反冲洗 5 min。6 个过滤周期全部结束后,用 0.3 g/L 的 NaOH 和 1.2% 质量浓度的 H₂O₂ 混合液进行 20 min 化学反冲洗,冲洗强度为 27 L/h,测试化学清洗后的纯水通量。

1.3 主要分析仪器

研究涉及的水质指标由以下仪器分析所得:总有机碳分析仪(日本岛津,TOC-V CPN);浊度仪(美国哈希,2100Q);pH 计(德国赛多利斯 TF39-PB-10);藻类荧光仪(PSI,FL3500);纯水超纯水制备装置(美国 Millipore,Milli-Q)。

1.4 膜过滤过程中的阻力分析

HiOo-PVDF 膜在净化过程中会因膜污染出现通量逐渐减小的情况。对膜过滤过程中的阻力分析有利于了解膜污染特性,评价膜的性能。膜分离过程中的阻力叠加模型根据 Darcy 定律可得式(1)。

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_t} = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_c + R_{ir} + R_r)} \quad (1)$$

其中: J ——水通量, L/(h·m²);

μ ——料液黏度, MPa·s;

ΔP ——跨膜压差, MPa, 在本研究中固定为 0.05 MPa;

R_t ——总阻力, m⁻¹;

R_m ——膜自身阻力, m⁻¹;

R_c ——浓差极化阻力, m⁻¹;

R_{ir} ——不可逆阻力, m⁻¹;

R_r ——可逆阻力, m⁻¹。

各阻力的计算如下。

(1) 过滤总阻力 R_t 。在温度为 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 、跨膜压差为 0.05 MPa 的条件下过滤沉淀池出水,测量过滤结束时的水通量 J_1 ,则 R_t 可表示如式(2)。

$$R_t = R_m + R_c + R_{ir} + R_r = \frac{\Delta P}{\mu J_1} \quad (2)$$

(2) 膜自身阻力 R_m 。HiOo-PVDF 新膜组件使用前,在上述条件下首先测定稳定纯水通量 J_0 ,此时 R_c 、 R_{ir} 和 R_r 均为 0,则 R_m 可按式(3)进行计算。

$$R_m = \frac{\Delta P}{\mu J_0} \quad (3)$$

(3) 浓差极化阻力 R_c 。在膜组件过滤沉淀池出水后,对膜组件进行简单清洗,在上述条件下测量膜纯水通量 J_2 ,此时过滤阻力由 R_m 、 R_{ir} 和 R_r 组成,因此, J_2 的表达式可以简化为式(4)。

$$J_2 = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_{ir} + R_r)} \quad (4)$$

进一步, R_c 可按照式(5)进行计算。

$$R_c = R_t - \frac{\Delta P}{\mu J_2} \quad (5)$$

(4) 不可逆阻力 R_{ir} 。排空 HiOo-PVDF 膜组件中的沉淀池出水,将膜组件从系统中取下,仔细清洗膜丝,在与上述相同运行条件下测量其纯水通量 J_3 ,则测得的过滤阻力不含 R_c 和 R_r , J_3 表达如式(6)。

$$J_3 = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_{ir})} \quad (6)$$

膜孔或膜表面吸附产生的不可逆阻力 R_{ir} 可用式(7)表达。

$$R_{ir} = \frac{\Delta P}{\mu J_3} - R_m \quad (7)$$

(5) 膜滤饼层导致的可逆阻力 R_r 。结合式(2)可知, R_r 可表示为式(8)。

$$R_r = R_t - R_m - R_c - R_{ir} \quad (8)$$

2 试验结果与讨论

2.1 水质指标

试验用水于 2019 年 12 月 19 日取自苏州市某水厂平流沉淀池出水,其水质指标如表 1 所示。结果显示,各项水质指标较好。其中,叶绿素 a 质量浓度为 2.6 mg/L,根据叶绿素 a 与藻类密度间的线性关系^[9],可以推断出沉淀池出水中藻类含量较低,这可能是由于冬季原水中藻密度较低,也可能是水

表 1 沉淀池出水部分水质指标

Tab. 1 Indices of Sedimentation Tank Outflow

指标	数值	指标	数值
pH 值	7.2	COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)	2.06
叶绿素 a/(mg·L ⁻¹)	2.6	TOC/(mg·L ⁻¹)	2.38
浊度度/NTU	1.04	UV ₂₅₄ /(cm ⁻¹)	0.035

厂运行水平高,沉淀出水水质控制较好导致的。

2.2 HiOo-PVDF 膜处理沉后水的膜通量变化

图 1 是 HiOo-PVDF 膜对水厂沉淀池出水过滤试验中比通量随时间的变化。该超滤试验共进行了 25 h,6 个运行周期,每个周期结束后,水力反冲洗 5 min,并记录清洗后膜的纯水通量,用来计算膜的通量衰减率。以稳定通量控制在膜初始纯水通量的 50%左右为目标,前 3 个周期的每个运行时间为 5 h,从第四个周期开始每周期运行 3 h。

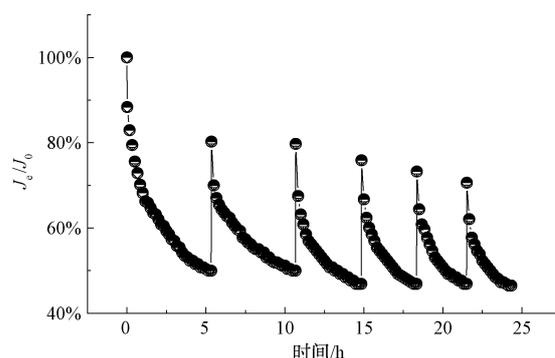


图 1 比通量随时间的变化

Fig. 1 Specific Flux Variation with Time

每个周期的膜初始通量 J_0 分别为 114.0、91.5、88.5、86.5、83.5、80.5 L/(h·m²),呈现逐步下降趋势。随着过滤时间的增加,每个周期膜通量呈现出一定的衰减趋势,其中第一个周期通量衰减较大,衰减率为 43.6%,第二、第三、第四个周期衰减率相当,分别为 29.5%、31.6%、30.1%,第五和第六个过滤周期的衰减率较低,分别为 27.5%和 25.5%。

每个周期水力反冲洗 5 min 后通量均有较好的恢复,通量恢复率分别为 80.3%、96.7%、97.7%、96.5%、96.4%、98.1%,表明膜表面的污染大多数是可逆污染,可经过水力清洗恢复。

在 6 个过滤周期后,对膜组件进行化学清洗,清洗后膜初始纯水通量为 129.2 L/(h·m²),过滤后纯水通量为 75.1 L/(h·m²),化学清洗后纯水通量为 128.5 L/(h·m²),基本恢复至膜初始纯水通量。总体来说,该膜对含藻浓度较低的水具有较强的抗污染性能。

2.3 浊度度

图 2 是 HiOo-PVDF 膜过滤过程对浊度度的去除率变化,由于膜的进水为水厂沉淀池出水,原液的浊度度很低,平均值在 1.0 NTU,这主要是沉淀未去

除的细小悬浮固体和胶体杂质。经过亲水疏油超滤膜过滤后,水中的浑浊度稳定保持在 0.1 NTU 以下,去除率稳定在 90%以上。由此可见,HiOo-PVDF 膜对水中浑浊度的去除稳定性很高,超滤膜的筛分作用形成了悬浮固体和胶体杂质的屏障,使超滤膜体现出优越的截留性能,这与目前水厂应用的超滤膜对浑浊度的去除率相近。

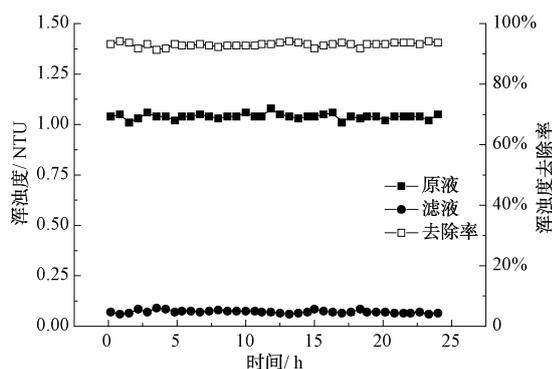


图2 膜过滤对浑浊度的去除

Fig. 2 Turbidity Removal by Membrane Filtration

2.4 叶绿素 a

根据文献^[10],太湖水藻类平均密度为 52 万~2 660 万个,以蓝藻和绿藻所占比例最高。本文以叶绿素 a 的浓度表征水中藻类的含量,考察 HiOo-PVDF 膜对沉后水中藻的去除效率。膜过滤前后水中叶绿素 a 的含量及该膜对叶绿素 a 的去除率变化如图 3 所示。

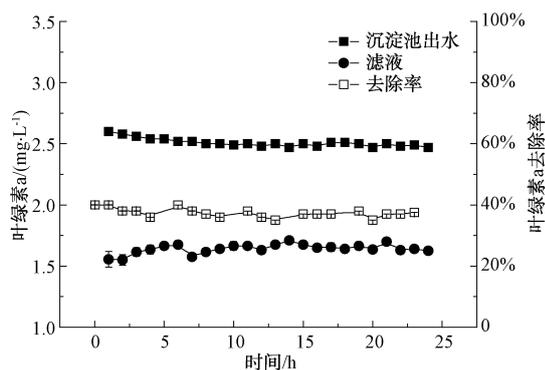


图3 膜过滤前后水中叶绿素 a 含量及去除率

Fig. 3 Concentration and Removal Rate of Chl-a before and after Membrane Filtration

随着时间的进行,膜进水的叶绿素 a 平均质量浓度为 2.6 mg/L,滤液中叶绿素 a 质量浓度稳定在 1.5~1.7 mg/L,膜对叶绿素 a 的去除率在 40%左右。这可能是本文所采用的超滤膜孔径为 0.1~

1.2 μm ,部分藻细胞可透过膜进入滤液当中造成的,同时不排除由于水样藻含量较低,不占优势,水中其他物质干扰其测定结果的可能。结合图 1 通量的变化可以看出,该膜对含低藻的水体不仅具有较好的耐污染性能,还表现出了较高的稳定性,在处理含低藻的实际水时可以考虑用该超滤膜进行更进一步的探究。

2.5 有机物指标

HiOo-PVDF 膜过滤沉淀池出水前后水中有机物指标的变化情况及去除率如图 4 所示。溶解性有机碳(DOC)一定程度上反映水中有机物的含量,图 4(a)是水厂沉淀池出水和滤液中 DOC 含量以及该膜对 DOC 去除率随时间的变化。由图 4(a)可知,沉淀池出水的 DOC 质量浓度为 1.9~2.4 mg/L,经过 HiOo-PVDF 膜过滤后,滤液中的 DOC 质量浓度初始阶段为 1.5~1.8 mg/L。滤液的 DOC 浓度与进水 DOC 变化趋势基本一致,膜组件对沉淀池出水中的 DOC 去除率稳定在 22%左右,这与有机粒子的大小和膜的截留分子量有关。文献^[11]报道太湖原水中溶解性有机物分布在 3 kDa 以下的占总 DOC 的 46.3%,分子量 1 kDa 以下的 DOC 占 36.1%,导致亲水疏油 PVDF 超滤膜对这部分物质的截留效果较差。

耗氧量(以 COD_{Mn} 计)在一定程度上也可以反映水中有机物的含量,图 4(b)是膜过滤前后水中的 COD_{Mn} 变化及去除率。太湖水水质较好,水中有机物含量较低,沉淀池出水的 COD_{Mn} 质量浓度为 1.9~2.1 mg/L,膜过滤后水中 COD_{Mn} 质量浓度为 1.6~1.8 mg/L,膜对 COD_{Mn} 的去除率在 20%左右。可以看出,水中 COD_{Mn} 的去除和 DOC 存在一定的相关性。

UV_{254} 主要代表着水体中腐殖质类有机物以及含有 C=C 双键和 C=O 双键的芳香族化合物含量。图 4(c)是膜过滤前后水中 UV_{254} 的变化及去除率。膜进水的 UV_{254} 平均含量为 0.034 cm^{-1} ,滤液的 UV_{254} 在 0.025 cm^{-1} 左右,平均去除率约为 26%。

结合 DOC、 COD_{Mn} 和 UV_{254} 的去除率发现,本研究采用的 HiOo-PVDF 膜对 3 种表征有机物含量的指标表现出相似的低去除率,表明水中的有机物除腐植酸类大分子有机物外,还存在大量小分子有机物。这一研究结果与文献^[12]中的 PVDF 以

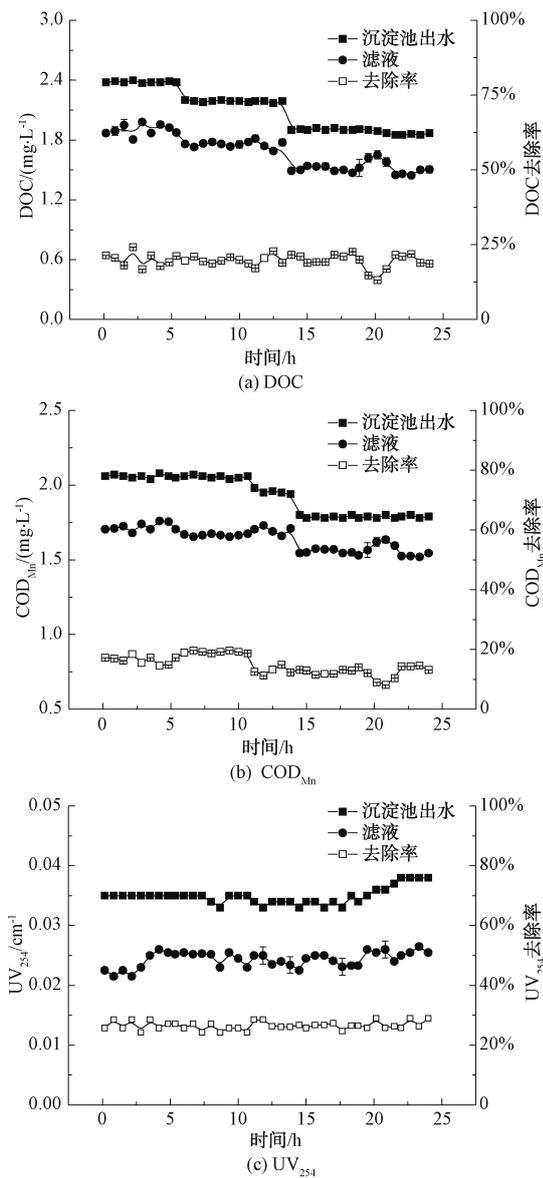


图4 膜过滤前后水中 DOC、COD_{Mn} 以及 UV₂₅₄ 的变化以及去除率

Fig. 4 Variation of DOC, COD_{Mn} and UV₂₅₄ Content and Removal Rates before and after Membrane Filtration

及亲水改性 PVDF 膜对水中有机物的去除效率相似,主要与超滤膜的孔径及其过滤筛分机制有关,而与膜的材质相关性较小。亲水疏油超滤膜去除中溶解性有机物存在着一定的局限性,一方面可以在保持超滤膜的同时,通过调整膜孔径以提高对有机物的去除,但是总体上超滤膜对溶解性有机物的去除能力有限;另一方面,可以结合预氧化、活性炭吸附、纳滤等技术提高溶解性有机物去除率^[13-15]。

2.6 膜污染分析

根据膜过滤阻力分析公式对 HiOo-PVDF 膜处理水厂沉淀池出水过程中各种膜阻力的大小进行计算,得到过滤阻力分布如图 5 所示。膜自身阻力占过滤总阻力的比例最大,为 58.5%,表明在过滤沉淀出水的过程中,膜材料和膜结构是过滤阻力的主要来源。浓差极化阻力和可逆阻力分别占总阻力的 13.2%和 12.2%,这两部分阻力可以通过改变膜组件内水流状态和水力清洗来克服。不可逆阻力占过滤总阻力的 16.1%,这部分阻力无法通过水力清洗去除,需要用化学清洗。值得注意的是,如果排除膜组件在长期储存后首次过滤膜孔隙被压缩外,HiOo-PVDF 膜在处理复杂水体过程中的不可逆阻力占比会进一步降低。膜本身阻力占比为主,而浓差极化阻力、不可逆阻力占比较小,表明膜的抗污染特性很强,明显优于文献^[16]报道中其他 PVDF 膜。

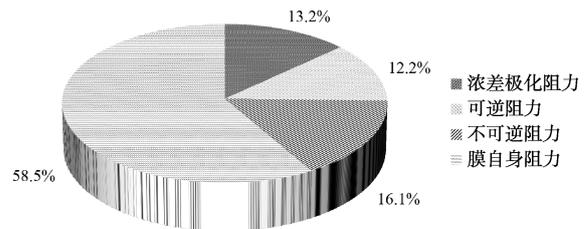


图5 膜过滤阻力分布

Fig. 5 Distribution of Membrane Filtration Resistance

3 结论

对 HiOo-PVDF 膜过滤沉后水的过滤特性和污染特性研究,表明其对含藻浓度较低的水体净化表现出了很高的稳定性和抗污染性能。具体如下结论。

(1) 由于 HiOo-PVDF 膜孔径较大,在 0.05 MPa 的跨膜压差下的初始产水通量可达 80.5 ~ 114.0 L/(h·m²),除第一个周期外,水力清洗后通量恢复率达 96.4% ~ 98.1%。

(2) 该膜对沉淀池出水中污染物的去除与污染物尺寸相关,去除率为浊度 > 叶绿素 a > UV₂₅₄ > DOC > COD_{Mn}。

(3) 过滤阻力分析结果表明,在处理沉淀池出水时,该膜自身阻力占比为 58.5%,不可逆阻力仅占 16.1%,具有较强的耐污染性能。

总体来讲,HiOo-PVDF 用于饮用水处理时具有与其他超滤膜相似的处理效果,但体现出跨膜压差

小、产水通量可观、不可逆膜污染占比小等优势。随着国产超滤膜生产质量保证体系的完善,自主生产的 HiOo-PVDF 膜或将成为用于饮用水膜处理的选择之一。

参考文献

- [1] 杨银, 丰桂珍, 徐璠璠, 等. 净水处理中膜技术应用研究进展[J]. 净水技术, 2019, 38(1): 25-30, 37.
YANG Y, FENG G Z, XU F F, et al. Research progress on application of membrane technology in water purification [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(1): 25-30, 37.
- [2] 赵文, 夏圣骥, 彭浩轩, 等. PTFE 超滤膜对水中三种典型天然有机物的去除及其膜污染机制[J]. 净水技术, 2018, 37(10): 33-38.
ZHAO W, XIA S J, PENG H X, et al. Removal of three typical natural organic matters in water by PTFE ultrafiltration membrane process and the mechanism of membrane fouling [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(10): 33-38.
- [3] HASHINO M, HIRAMI K, KATAGIRI T, et al. Effects of three natural organic matter types on cellulose acetate butyrate microfiltration membrane fouling [J]. Journal of Membrane Science, 2011, 379 (1/2): 233 - 238. DOI: 10.1016/j.memsci.2011.05.068.
- [4] 何林娟, 邹康兵, 盛云鸽, 等. 预处理对东江原水超滤过程中膜污染的控制作用[J]. 中国给水排水, 2021, 37(1): 16-21, 27.
HE L J, ZOU K B, SHENG Y G, et al. Control effect of pretreatment on membrane fouling during ultrafiltration of Dongjiang River raw water [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(1): 16-21, 27.
- [5] XIE W Y, SUN F Y, DONG W Y, et al. Strategy study of critical flux/threshold flux on alleviating protein fouling of PVDF-TiO₂ modified membrane[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(5): 106148. DOI: 10.1016/j.jece.2021.106148.
- [6] ZHU X Y, LOO H E, BAI R B. A novel membrane showing both hydrophilic and oleophobic surface properties and its non-fouling performances for potential water treatment applications [J]. Journal of Membrane Science, 2013, 436: 47-56. DOI: 10.1016/j.memsci.2013.02.019.
- [7] 刘坤朋, 沈舒苏, 聂士超, 等. 亲水疏油改性聚偏氟乙烯膜用于油水分离的实验研究[J]. 水处理技术, 2015, 41(6): 36-42.
LIU K P, SHEN S S, NIE S C, et al. The experimental study of oil/water separation by a modified polyvinylidene fluoride membrane with hydrophilic and oleophobic surface properties [J]. Technology of Water Treatment, 2015, 41(6): 36-42.
- [8] 孙程奇, 白仁碧, 杨晶晶. 含亲水疏油链段聚合物改性 PVDF 膜的抗污染性能[J]. 塑料工业, 2020, 48(9): 121-126.
SUN C Q, BAI R B, YANG J J. Anti-fouling performance of modified PVDF membranes with polymer containing hydrophilic and hydrophobic segments [J]. China Plastics Industry, 2020, 48(9): 121-126.
- [9] 于海燕, 周斌, 胡尊英, 等. 生物监测中叶绿素 a 浓度与藻类密度的关联性研究[J]. 中国环境监测, 2009, 25(6): 40-43.
YU H Y, ZHOU B, HU Z Y, et al. Study on correlation between chlorophyll a and algal density of biological monitoring [J]. Environmental Monitoring in China, 2009, 25(6): 40-43.
- [10] 王颖雪, 王沛芳, 王超, 等. 太湖浮游植物中重金属含量的季节变化特征及湖区差异[J]. 湖泊科学, 2015, 27(2): 258-265.
WANG Y X, WANG P F, WANG C, et al. Seasonal variation and distribution characteristics of heavy metals in phytoplankton of different parts of Lake Taihu [J]. Journal of Lake Science, 2015, 27(2): 258-265.
- [11] 张健, 华伟, 张璐, 等. 水处理工艺过程中有机物分子量分布规律[J]. 水资源保护, 2012, 28(1): 95-99.
ZHANG J, HUA W, ZHANG L, et al. Molecular weight distribution of organic matter during water treatment process [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(1): 95-99.
- [12] 于海宽, 李星, 周志伟, 等. 大型超滤水厂 PVC 和 PVDF 膜运行特性差异与优化[J]. 中国给水排水, 2021, 37(1): 28-33.
YU H K, LI X, ZHOU Z W, et al. Operation characteristics and optimization of PVC and PVDF membranes in full-scale ultrafiltration drinking water treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(1): 28-33.
- [13] DING A, REN Z, HU L, et al. Oxidation and coagulation/adsorption dual effects of ferrate (VI) pretreatment on organics removal and membrane fouling alleviation in UF process during secondary effluent treatment [J]. Science of the Total Environment, 2022, 850: 157986. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157986.
- [14] 丰桂珍, 范师秀, 黄林. 天然原水中 DOM 对纳滤膜的污染分析及过滤特性研究[J]. 膜科学与技术, 2021, 41(3): 105-110.
FENG G Z, FAN S X, HUANG L. Fouling analysis and filtration characteristics of nanofiltration membrane caused by DOM in natural raw water [J]. Membrane Science and Technology, 2021, 41(3): 105-110.
- [15] TAN Y, WEN Q, LI M, et al. Simultaneous antibiotic resistance genes reduction and membrane fouling mitigation by a hybrid process of magnetic activated carbon adsorption and ultrafiltration for wastewater reuse [J]. Separation and Purification Technology, 2022, 303: 122227. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.122227.
- [16] 白鹭, 吴春英, 谷风, 等. TiO₂ 薄膜改性聚偏氟乙烯膜污染机理[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(9): 2812-2816.
BAI L, WU C Y, GU F, et al. Pollution mechanism of PVDF membrane modified by TiO₂ film [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(9): 2812-2816.