

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.11.004

微絮凝/中空平板陶瓷膜工艺处理微污染地表水的效能

张瑞君¹, 范忠航¹, 韩正双², 闫慧敏², 宋佳¹, 田家宇¹

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 天津市公用事业设计研究所, 天津 300100)

摘要: 研究了以中空平板陶瓷微滤膜为核心的微絮凝/微滤组合工艺对微污染地表水的净化效能与膜污染特征,并与传统的PVDF中空纤维有机微滤膜进行了系统对比。结果表明,当微絮凝/微滤组合工艺选用中空平板陶瓷膜时,不仅可以有效地保证出水浊度低于0.3 NTU,而且可以更好地去除分子质量<5 ku的有机物和蛋白质类有机物,最终保证出水COD_{Mn}低于3 mg/L,满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的相关规定。与此同时,通过膜污染阻力变化、化学清洗效果以及膜面SEM形貌的综合对比分析,证实了中空平板陶瓷膜比中空纤维有机膜具有更强的抗污染能力和易清洁性。

关键词: 微絮凝; 中空平板陶瓷膜; 中空纤维有机膜; 微污染地表水; 膜污染

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)11-0023-07

Combined Process of Micro-flocculation + Hollow Flat-sheet Ceramic Membrane for Treatment of Micro-polluted Surface Water

ZHANG Rui-jun¹, FAN Zhong-hang¹, HAN Zheng-shuang², YAN Hui-min²,
SONG Jia¹, TIAN Jia-yu¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Tianjin Public Utility Design & Research Institute, Tianjin 300100, China)

Abstract: Based on the systematical comparison with traditional PVDF hollow fiber MF membrane, the water purification efficiency as well as membrane fouling property of “micro-flocculation + MF” process was studied by taking the hollow flat-sheet ceramic MF membrane as the core component. The results showed that the selection of hollow flat-sheet ceramic membrane in the combined process of “micro-flocculation + MF” could not only ensure the effluent turbidity lower than 0.3 NTU, but also achieve a higher removal of organic matter with molecular weight less than 5 ku and protein. Consequently, the COD_{Mn} of effluent was kept lower than 3 mg/L, which could meet the requirement of the *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2022). In the meantime, it was confirmed that the hollow flat-sheet ceramic membrane presented stronger anti-fouling ability and cleanability than the hollow fiber organic membrane after the comprehensive comparison and analysis of membrane fouling resistance change, chemical cleaning efficiency and membrane surface SEM morphology.

Key words: micro-flocculation; hollow flat-sheet ceramic membrane; hollow fiber organic

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51908180); 天津水务集团有限公司科技项目(2021KY-06)

通信作者: 田家宇 E-mail: tjy800112@hebut.edu.cn

membrane; micro-polluted surface water; membrane fouling

随着我国社会经济的长期发展、工业化水平的不断提升以及城市化进程的持续推进,县级以上的城市供水基础设施已经得到了较为完善的建设^[1],但在点源污染屡禁不绝与面源污染普遍存在的现实背景下,广大农村的安全供水问题不容忽视^[2]。就目前的农村水资源现状分析来看,由于受到程度不等的污染,诸多农村的饮用水原水与供水水质达不到国家规定的相关标准^[3]。与此同时,目前大部分农村水厂仍采用混凝、沉淀、过滤、消毒等常规处理工艺,难以满足微污染原水的污染物去除要求。此外,流程较长的常规处理工艺运行维护较为繁琐,这给缺乏专业技术管理人才的农村地区带来额外的挑战^[4]。

国内外大量研究均表明:微絮凝/微滤组合工艺具有占地面积少、操作管理方便、处理费用低、产出水水质稳定等优点^[5-8],适合于农村地区小规模供水应用。然而,以往的研究与应用中广泛采用的微滤膜为高分子有机材料,存在膜污染严重、使用寿命短等问题,在一定程度上限制了该工艺的推广。中空平板陶瓷膜是近些年新兴的一类无机膜分离材料,具有机械强度大、耐酸碱、易于清洗及使用寿命长等优势,以中空平板陶瓷膜为核心的水处理技术逐渐被视为一种具有竞争力的水处理方案^[9-12]。笔者探究了以中空平板陶瓷微滤膜为核心的微絮凝/微滤工艺对微污染地表水的净化效能与膜污染特征,并与传统的中空纤维有机微滤膜进行对比,旨在为微絮凝/中空平板陶瓷微滤膜组合工艺用于农村地表水处理提供理论依据。

1 实验材料与方法

1.1 原水及其水质

选用天津市红桥区段的北运河河水作为处理对象,其主要水质指标如下:浊度为4.96~6.80 NTU, UV_{254} 为0.055~0.065 cm^{-1} , COD_{Mn} 为3.76~5.36 mg/L, pH 为7.47~8.02, TDS 为220.50~242.55 mg/L。

1.2 微滤膜性能

研究采用了两类微滤膜,分别为福建华膜环保有限公司生产的PVDF中空纤维微滤膜和实验室自制的中空平板陶瓷微滤膜,二者的平均孔径均为

0.2 μm 。

中空平板陶瓷膜主要由氧化铝颗粒烧结而成,具体制备方法如下:①将氧化铝(平均粒径为3 μm)、黏结剂、烧结剂、造孔剂按质量为100:4:10:10进行混合而配成粉料,随后在粉料中分别加入6%的润滑油和去离子水;②将上述组分置于搅拌机中充分搅拌制成泥料,然后放置于温度为30 $^{\circ}C$ 、湿度为90%的恒温恒湿箱中均化24 h;③使用炼泥机对均化的泥料进行炼制,同时去除泥料中的气泡,然后继续放置于恒温恒湿箱中再次均化24 h;④采用挤出成型法将上述均化完成的泥料制成多孔平板状生胚,其宽度为72 mm,厚度为6 mm,带有15个3 mm×3 mm的矩形内孔;⑤将生胚在室温下干燥48 h,最后在高温箱式电炉中高温烧结,由此获得如图1所示的多孔道中空平板陶瓷膜。

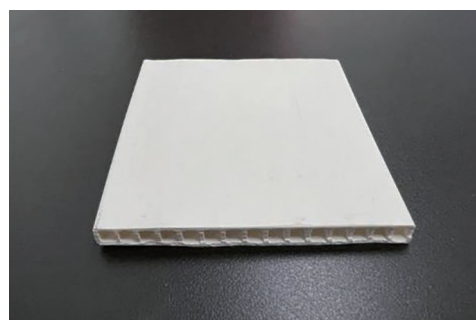


图1 实验室自制中空平板陶瓷膜

Fig.1 Hollow flat-sheet ceramic membrane made in laboratory

1.3 实验装置与流程

采用定制封头与环氧树脂对两类微滤膜进行封装,获得有效膜面积均为40 cm^2 的浸没式微滤膜组件。随后利用膜组件、压力表、蠕动泵等搭建如图2所示的实验装置。整个系统运行由自控系统控制,采用恒通量、死端过滤方式,由蠕动泵提供抽吸力,滤后水流入出水箱。原水先在絮凝池内与混凝剂混合,混凝剂选用氯化铁,投加量为4 mg/L,用电动搅拌器先200 r/min快速搅拌1 min,随后保持60 r/min的慢速搅拌,以免絮体沉降,将带有絮体的混合液导入反应器进行膜过滤。实验期间,中空平板陶瓷膜与中空纤维有机膜的运行通量皆定为50 L/($m^2 \cdot h$),每2 h进行一次反冲洗,持续60 s,反洗水使

用出水箱中的水,反洗通量为 $100 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

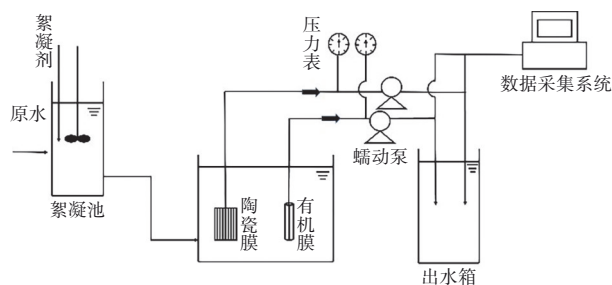


图2 微絮凝/微滤装置示意

Fig.2 Schematic diagram of micro-flocculation /MF experimental device

1.4 分析项目与方法

采用标准方法测定浊度、 COD_{Mn} 等水质指标(取3个平行样进行检测分析);采用瓦里安 Cary Eclipse 荧光光谱仪对水中的荧光类有机物进行分析;利用膜分级法^[13]对进出水中的有机物分子质量分布情况进行测定,并划分为 <5 、 $5\sim 10$ 、 $>10 \text{ ku}$ 三个范围;采用日立SU8020扫描电镜对不同污染状态的微滤膜进行表征。根据基于达西定律的串联阻力模型^[5],微滤膜过滤阻力可表示为:

$$R = \frac{\Delta P}{\mu J} \quad (1)$$

式中: R 为总阻力,是膜固有阻力(R_m)和膜污染阻力(R_f)之和, m^{-1} ; ΔP 为跨膜压差, kPa ; μ 是渗透液黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; J 是膜通量, $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

根据式(2)测试并计算化学清洗效率(S),用以衡量化学清洗过程中受污染微滤膜的易清洁性。

$$S = \frac{R - R_a}{R - R_m} \times 100\% \quad (2)$$

式中: R_a 是化学清洗后的过滤阻力, m^{-1} 。

2 结果与讨论

2.1 净水效能对比分析

2.1.1 对浊度的去除效果

浊度反映了地表水中悬浮物和胶体物质的含量,是饮用水的关键感官指标之一,有研究表明微滤膜对浊度物质的去除主要源于其微小孔径的机械筛分作用^[14],所以微滤膜对浊度的去除效果较为稳定,几乎不受原水水质的影响。两种微絮凝/微滤组合工艺对浊度的去除效果如图3所示。可以发现,虽然原水浊度在 $4.96\sim 6.80 \text{ NTU}$ 的范围内波动,但两类微滤膜的出水浊度均较为稳定,其中中空平板陶瓷膜的出水浊度平均值为 0.29 NTU ,中空纤维

有机膜的出水浊度平均值为 0.24 NTU ,均远低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中要求的 1.0 NTU 。

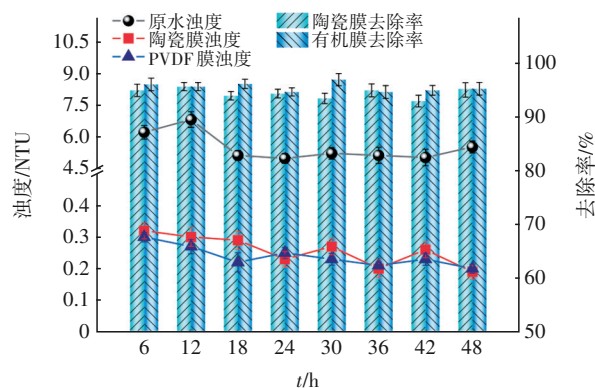


图3 陶瓷膜和PVDF膜对浊度的去除效果

Fig.3 Turbidity removal efficiency of ceramic membrane and PVDF membrane

2.1.2 对 COD_{Mn} 的去除效果

传统水处理工艺(混凝/沉淀/砂滤)对有机物的去除能力通常较差,而微污染地表水的典型水质特征即为有机物浓度超标,为此不得不增设臭氧/活性炭深度处理环节,增加了工艺复杂性、运行管理难度以及制水成本^[15]。 COD_{Mn} 是反映水中有机物含量的典型指标,两种微絮凝/微滤工艺对 COD_{Mn} 的去除效果如图4所示。

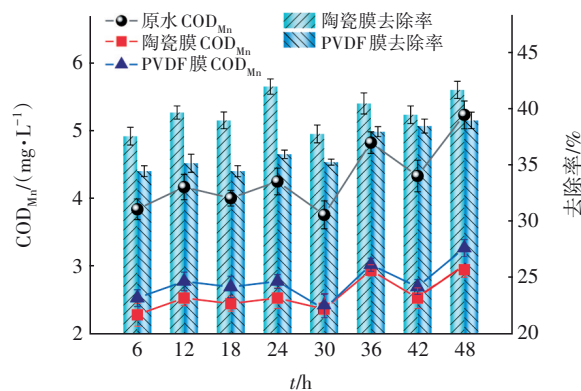


图4 陶瓷膜和PVDF膜对 COD_{Mn} 的去除效果

Fig.4 COD_{Mn} removal efficiency of ceramic membrane and PVDF membrane

运行期间原水 COD_{Mn} 在 $3.76\sim 5.36 \text{ mg/L}$ 之间,中空平板陶瓷膜、PVDF中空纤维有机膜出水 COD_{Mn} 分别在 $2.33\sim 2.96$ 、 $2.44\sim 3.30 \text{ mg/L}$ 之间,平均去除率分别为 39.76% 、 36.94% ,即前者对 COD_{Mn} 的去除效果更好,且在整个运行期间均能保证出水 COD_{Mn} 低于 3 mg/L 的标准限值。这可能是由于氧化铝微

球堆叠而成的分离层结构具有更强的亲水性,强亲水膜材料表面形成的水化层抑制了疏水性有机物和微絮体的跨膜传质^[16]。

2.1.3 对不同分子质量有机物的去除效果

地表水中天然有机物的分子质量分布反映了有机物的分子结构特性,是影响水处理效率的重要因素之一^[17]。两种工艺对不同分子质量有机物的去除效果如图5所示。

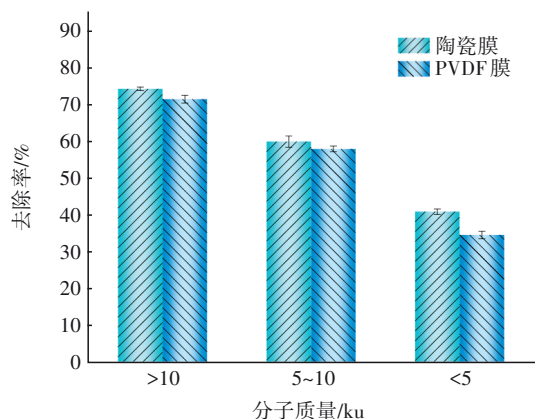


图5 两类微滤膜对不同分子质量区间有机物的去除效果

Fig.5 Removal efficiency of two kinds of MF membranes for organic matters with different molecular weight

中空平板陶瓷膜与中空纤维有机膜对于分子质量>10 ku有机物的去除率分别为74.3%和71.5%,对分子质量<5 ku的有机物去除率也均达到30%以上。当采用中空平板陶瓷微滤膜时,微絮凝/微滤工艺对不同分子质量的有机物去除效果均更好,中空平板陶瓷膜与中空纤维有机膜对有机物的去除差距主要集中在分子质量<5 ku的部分,这是由于分子质量>5 ku的有机物大多与微絮体结合并被截留在了膜表面的滤饼层中,而分子质量<5 ku的有机物,由于其分子质量小且移动能力强,难以被微絮凝过程捕捉,因此更容易穿透滤饼层进入微滤膜,所以,相较于PVDF中空纤维有机膜,中空平板陶瓷膜对这类有机物的去除率更高。

2.1.4 对荧光类有机物的去除效果

地表水中的天然有机物种类丰富^[18],采用三维荧光光谱仪识别地表水及两类膜出水中的腐殖质、蛋白质类等荧光性物质,结果见图6。地表水中有机物的三维荧光光谱存在4个峰,对应A、B、C和T四个区域,分别指代富里酸、蛋白质、腐殖酸和微生物产物^[19]。

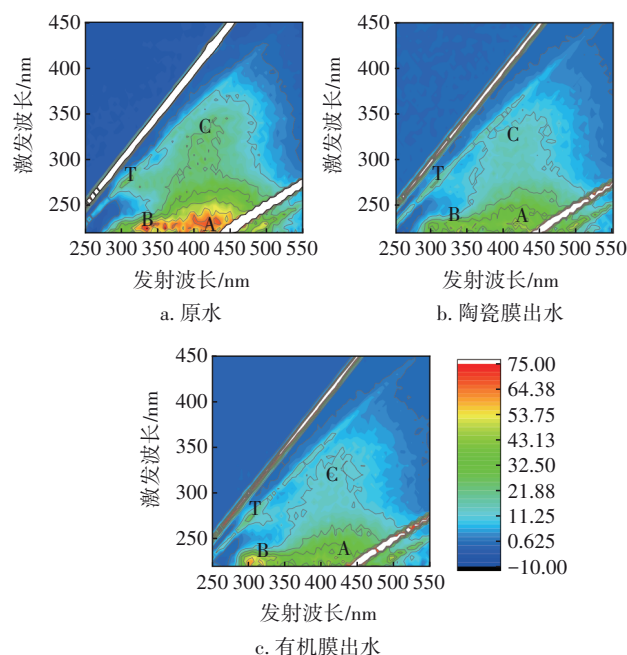


图6 不同水样的三维荧光光谱

Fig.6 3D fluorescence spectra of different water samples

由图6(a)可知,原水在A、B区域的荧光峰较强,C、T区域的荧光峰较弱,说明原水中的富里酸和蛋白质含量较多,腐殖酸和微生物产物的含量较少。由图6(b)、(c)可以看出,原水经过微絮凝/微滤工艺处理后,各区域的荧光峰强度均有不同程度的下降,说明组合工艺对地表水中的荧光类有机物均有一定的去除效果,特别是对富里酸、蛋白质和腐殖酸的去除效果较好。同时,相较于PVDF中空纤维有机膜,中空平板陶瓷膜出水的荧光峰强度在B区域明显更弱,表明其对蛋白质类有机物具有更强的去除能力。

2.2 抗污染能力的对比分析

2.2.1 膜阻力变化

膜污染是限制微滤技术应用与推广的重要瓶颈之一^[20],因此明确微滤膜的膜污染情况对于推广微絮凝/微滤工艺极为重要。对于恒通量过滤而言,可根据膜阻力变化规律来反映其污染程度。根据文献所述方法^[21]测试并计算后发现,中空平板陶瓷膜与中空纤维有机膜本身的阻力相差无几,分别为 $4.698 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$ 和 $4.940 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$ 。将总阻力扣除膜本身阻力后可以获得膜污染阻力(见图7),经过48 h的连续运行后,中空平板陶瓷膜的膜污染阻力为 $5.346 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$,平均增长速率为 $0.115 \text{ m}^{-1}/\text{h}$,均明显低于中空纤维有机膜(膜污染阻力为 $7.858 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$)。

m^{-1} ,平均增长速率为 $0.160 \text{ m}^{-1}/\text{h}$)。

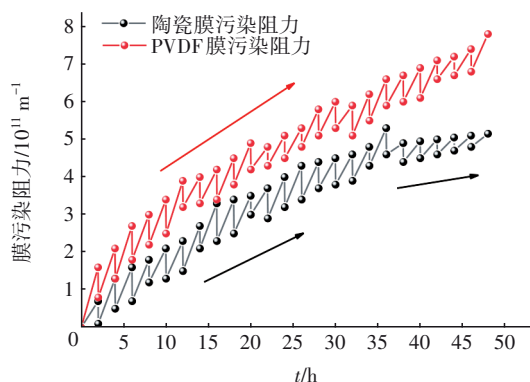


图7 膜污染阻力变化

Fig.7 Variation in membrane fouling resistance

由图7可知,中空平板陶瓷膜和中空纤维有机膜污染阻力分别在0~35 h和0~48 h呈现出一个较快的增长过程,这是由于在死端过滤过程中污染物在垂直于膜表面的方向上以较快的速度向膜面迁移,很容易在短时间内在膜孔和膜面上堆积与吸附,随着滤饼层的形成,膜污染阻力逐渐增大^[22],其中中空纤维有机膜的膜污染阻力快速增长阶段比中空平板陶瓷膜持续时间更长,说明污染物在中空纤维有机膜表面和膜孔内堆积和吸附更严重。而中空平板陶瓷膜膜污染阻力值在35~48 h间虽然略有增长但逐渐趋于平稳,说明此时滤饼层污染是膜污染阻力值变化的主要原因。通过上述分析可以发现,中空平板陶瓷膜比中空纤维有机膜具有更强的抗污染能力。

2.2.2 化学清洗效果分析

化学清洗是去除不可逆污染与恢复膜性能的重要举措^[23]。作为一种典型的氧化剂,次氯酸钠能够将有机污染物中的疏水官能团氧化为亲水性基团,使污染物易溶解于水中,从而使膜上的污染物减少,因此次氯酸钠成为一种广泛使用的膜材料化学清洗剂^[24]。为了对比两类微滤膜在污染后的易清洁性,采用1%的次氯酸钠溶液对污染后的膜浸泡清洗30 min,随后测定并计算清洗前后的膜污染阻力变化情况和清洗效率。

经过化学清洗后,中空平板陶瓷膜与中空纤维有机膜的膜污染阻力分别由 $4.927 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$ 和 $6.602 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$ 降低至 $0.229 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$ 和 $1.662 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$,化学清洗效率分别为93.0%和80.3%,表明中空平板陶瓷膜具有更强的易清洁性。这是由于与

亲水性极强的中空平板陶瓷膜相比,中空纤维有机膜更加疏水,原水中的有机物与PVDF高分子之间具有更强的结合力,降低了化学清洗过程对膜污染物质的剥离效能。此外,有研究证明长期使用氧化性物质对PVDF膜进行清洗会损坏其本身固有的化学键,引起膜结构和性能的恶化^[25]。相较于中空纤维有机膜而言,中空平板陶瓷膜本身显著的耐氧化性能能够极大地强化其对氧化性清洗剂的抵抗能力,使得其能够长期稳定运行。

2.2.3 抗污染性能分析

采用SEM对污染与清洗前后的两类微滤膜微观形貌进行表征,结果如图8所示。中空纤维有机膜新膜表面较为光滑,而中空平板陶瓷膜表面则能看到清晰的氧化铝原料颗粒。在经过一段时间的过滤与污染后,两类微滤膜的表面均形成了由微絮体构成的污染层,其中PVDF有机膜的表面已经被污染物完全覆盖,而中空平板陶瓷膜表面聚集的污染物显然更少,依然可以隐约看到污染层下面的原料颗粒凸起。采用1%的次氯酸钠溶液对两类受污染微滤膜进行30 min的浸泡清洗后,均能在一定程度上实现膜污染物质的清除与膜性能的恢复,然而相较于仍然残余着部分污染物的中空纤维有机膜,中空平板陶瓷膜的化学清洗效果明显更好,清洗后的膜面结构几乎与新膜相同,这是由于中空平板陶瓷膜表面更加亲水,有机物与膜表面的结合力更小,由此体现出更强的抗污染能力和易清洁性。

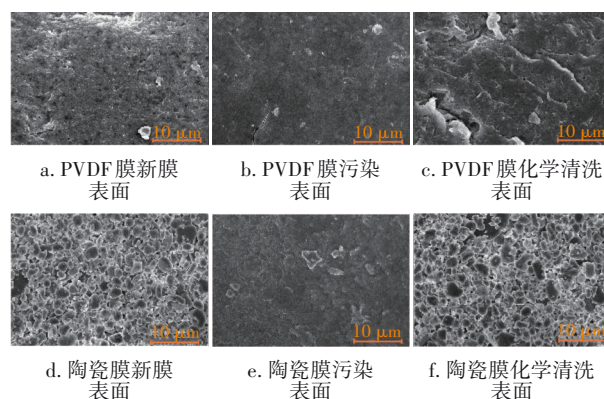


图8 不同陶瓷膜与PVDF膜的SEM形貌对比

Fig.8 SEM morphology comparison of different ceramic membranes and PVDF membranes

3 结论

① 中空平板陶瓷膜与PVDF中空纤维有机膜均能保证系统出水平均浊度低于0.3 NTU,但中空

平板陶瓷膜本身的氧化铝微球堆叠亲水性分离层赋予其更强的有机物去除能力,不仅对分子质量<5 ku的有机物和蛋白质具有更强的截留能力,而且可以保证出水 COD_{Mn} <3 mg/L,满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)要求。

② 在膜污染方面,中空平板陶瓷膜在连续运行中的膜污染阻力增长速度更低、膜污染阻力绝对值更小,比PVDF中空纤维有机膜具有更强的抗污染能力和易清洁性。

参考文献:

- [1] 高伟,章林伟,刘锁祥.浅析城市供水行业存在问题、发展趋势与立法建议[J].给水排水,2020,46(8):1-5,18.
GAO Wei, ZHANG Linwei, LIU Suoxiang. On the problems, development trends and legislative proposal of city water supply industry [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(8): 1-5, 18 (in Chinese).
- [2] 曾洁,陈正福,吴尚书,等.炭砂滤池对农村饮用水中浊度及细菌的去除效果[J].环境工程学报,2020,14(10):2736-2741.
ZENG Jie, CHEN Zhengfu, WU Shangshu, *et al.* Removal effect of turbidity and bacteria in rural drinking water by GAC-sand filter [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14 (10): 2736-2741 (in Chinese).
- [3] 姜鸿烈,薛军,徐立军.山区农村饮用水厂(站)的运维策略研究[J].中国给水排水,2021,37(12):36-41.
JIANG Honglie, XUE Jun, XU Lijun. Research on operation and maintenance strategy of rural drinking water plants (stations) in mountainous areas [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37 (12): 36-41 (in Chinese).
- [4] 秦宇,雷晓玲,钱伶琤,等.超滤膜技术在农村安全供水中的应用[J].中国给水排水,2012,28(13):64-66,69.
QIN Yu, LEI Xiaoling, QIAN Lingcheng, *et al.* Application of ultrafiltration membrane in safe water supply in rural areas [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(13): 64-66, 69 (in Chinese).
- [5] 金海斌,张光望,曾耀添,等.絮凝-微滤处理洗煤废水及膜污染机理研究[J].工业水处理,2017,37(11):83-86,100.
JIN Haibin, ZHANG Guangwang, ZENG Yaotian, *et al.* Research on the flocculation-microfiltration for the treatment of coal-washing wastewater and membrane fouling mechanism [J]. Industrial Water Treatment, 2017, 37(11): 83-86, 100 (in Chinese).
- [6] 宫玉柱,公茂雷,康少鑫,等.陶瓷膜微滤技术在火电厂含煤废水处理中的应用[J].工业水处理,2021,41(6):262-265.
GONG Yuzhu, GONG Maolei, KANG Shaoxin, *et al.* Application of flat ceramic membrane microfiltration technology in coal-containing wastewater treatment system of power plant [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(6): 262-265 (in Chinese).
- [7] DONG B, GUI B, LIU J, *et al.* Analysis of organic foulants in the coagulation-microfiltration process for the treatment of Taihu Lake [J]. Environmental Technology, 2019, 40(25): 3364-3370.
- [8] TENG J, CHEN Y, MA G, *et al.* Membrane fouling by alginate in polyaluminum chloride (PACl) coagulation/microfiltration process: molecular insights [J]. Separation and Purification Technology, 2020, 236: 116294.
- [9] 徐晴,王健,温官.平板陶瓷膜深度处理石化废水试验研究[J].能源环境保护,2020,34(2):25-29.
XU Qing, WANG Jian, WEN Guan. Experimental study on advanced treatment of petrochemical wastewater by flat ceramic membranes [J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(2): 25-29 (in Chinese).
- [10] 俞沈晶,张亚超,洪芳.陶瓷平板膜与PVDF中空纤维膜在MBR中的应用[J].中国给水排水,2020,36(3):80-85.
YU Shenjing, ZHANG Yachao, HONG Fang. Application of ceramic flat membrane and PVDF hollow fiber membrane in MBR process [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(3): 80-85 (in Chinese).
- [11] 张勇,秦玉兰,樊晓丽,等.平板陶瓷膜MBR工艺在农村污水处理中的应用[J].中国给水排水,2021,37(10):120-125.
ZHANG Yong, QIN Yulan, FAN Xiaoli, *et al.* Application of flat ceramic MBR process in rural sewage treatment [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37 (10): 120-125 (in Chinese).
- [12] 张伟,樊震坤,杨东亮,等. Al_2O_3 平板陶瓷膜的工业化制备与应用展望[J].净水技术,2019,38(S2):6-10,59.
ZHANG Wei, FAN Zhenkun, YANG Dongliang, *et al.* Industrial preparation and application prospect of Al_2O_3 flat ceramic membrane [J]. Water Purification

- Technology, 2019, 38(S2): 6-10, 59 (in Chinese).
- [13] LIU Y, LI X, YANG Y, *et al.* Analysis of the major particle-size based foulants responsible for ultrafiltration membrane fouling in polluted raw water [J]. Desalination, 2014, 347: 191-198.
- [14] 崔俊华, 王培宁, 李凯, 等. 基于在线混凝-超滤组合工艺的微污染地表水处理 [J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2011, 28(1): 52-56, 63.
CUI Junhua, WANG Peining, LI Kai, *et al.* Treatment of slightly polluted water using inline coagulation-UF combined process [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2011, 28(1): 52-56, 63 (in Chinese).
- [15] 侯琮语, 李佳宾, 付宛宜, 等. 臭氧/陶瓷膜-活性炭组合工艺处理农村饮用水中试 [J]. 中国给水排水, 2022, 38(8): 38-45.
HOU Congyu, LI Jiabin, FU Wanyi, *et al.* A combined ozone/ceramic membrane and activated carbon process for rural drinking water treatment: a pilot study [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(8): 38-45 (in Chinese).
- [16] LEE S J, KIM J H. Differential natural organic matter fouling of ceramic versus polymeric ultrafiltration membranes [J]. Water Research, 2014, 48: 43-51.
- [17] 李勇, 张晓健, 陈超, 等. 基于有机物分子质量分布的饮用水处理工艺选择 [J]. 中国给水排水, 2008, 24(21): 1-4.
LI Yong, ZHANG Xiaojian, CHEN Chao, *et al.* Selection of drinking water treatment process based on molecular weight distribution of organic matters [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(21): 1-4 (in Chinese).
- [18] 蒋丹阳, 彭玮瑄, 廖思颖, 等. 再生水补给型城市景观水体中溶解性有机物的分布及特征——以圆明园为例 [J]. 环境科学学报, 2021, 41(6): 2201-2211.
JIANG Danyang, PENG Weixuan, LIAO Siying, *et al.* Distribution and characteristics of dissolved organic matters in urban landscape water supplied with reclaimed water: taking Yuanmingyuan as an example [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(6): 2201-2211 (in Chinese).
- [19] QU F, LIANG H, ZHOU J, *et al.* Ultrafiltration membrane fouling caused by extracellular organic matter (EOM) from *Microcystis aeruginosa*: effects of membrane pore size and surface hydrophobicity [J]. Journal of Membrane Science, 2014, 449: 58-66.
- [20] 张守彬, 钟敬秀, 赵世凯, 等. 陶瓷膜处理二级出水运行优化控制与膜污染机制分析 [J]. 环境工程学报, 2021, 15(10): 3233-3243.
ZHANG Shoubin, ZHONG Jingxiu, ZHAO Shikai, *et al.* Operational optimization control and membrane fouling mechanism analysis of ceramic membrane treating secondary treated effluent [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(10): 3233-3243 (in Chinese).
- [21] LIU Y, HE G, LI B, *et al.* A comparison of cake properties in traditional and turbulence promoter assisted microfiltration of particulate suspensions [J]. Water Research, 2012, 46(8): 2535-2544.
- [22] 李昆, 辛佳期, 丁梓尧, 等. 光催化剂表面修饰陶瓷超滤膜的抗污染性能 [J]. 南昌大学学报(理科版), 2021, 45(5): 485-493.
LI Kun, XIN Jiaqi, DING Zirao, *et al.* Anti-fouling properties and performance of ceramic membrane modified by photocatalyst-supported montmorillonite [J]. Journal of Nanchang University (Natural Science), 2021, 45(5): 485-493 (in Chinese).
- [23] 章婧, 张小珍, 周健儿, 等. 油水乳液污染纳米TiO₂改性Al₂O₃陶瓷膜的化学清洗 [J]. 膜科学与技术, 2014, 34(5): 53-57, 72.
ZHANG Jing, ZHANG Xiaozhen, ZHOU Jian'er, *et al.* Chemical cleaning of TiO₂ modified Al₂O₃ ceramic MF membranes fouled by oil/water emulsion [J]. Membrane Science and Technology, 2014, 34(5): 53-57, 72 (in Chinese).
- [24] YIN N, ZHONG Z, XING W. Ceramic membrane fouling and cleaning in ultrafiltration of desulfurization wastewater [J]. Desalination, 2013, 319: 92-98.
- [25] RABUNI M, SULAIMAN N N, AROUA M K, *et al.* Impact of in situ physical and chemical cleaning on PVDF membrane properties and performances [J]. Chemical Engineering Science, 2015, 122: 426-435.

作者简介:张瑞君(1989-),男,河北张家口人,工学博士,副教授,研究方向为膜法水处理理论与技术。

E-mail: zrj@hebut.edu.cn

收稿日期:2022-06-01

修回日期:2022-10-10

(编辑:李德强)