

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.01.006

臭氧对PVDF膜抗污和组合工艺净水效能的提升作用

王 晓^{1,2}, 何海洋², 朱洪涛¹, 陈凤祥³, 武贤智³, 吴慧峰³,
文湘华²

(1. 北京林业大学 环境科学与工程学院, 北京 100083; 2. 清华大学 环境学院, 北京 100084; 3. 中信环境技术投资有限公司, 广东 广州 511457)

摘 要: 采用原位臭氧氧化结合PVDF膜,构建了O₃/PVDF/BAC组合工艺。基于臭氧对天然有机物(NOM)的氧化效能,该工艺在保持PVDF膜对NOM截留效果的同时,有效提高了其抗污染性能。在O₃/PVDF/BAC工艺中,PVDF膜的TMP/TMP₀在运行7.5 d后升至1.9,优于单独PVDF膜、亲水改性PVDF-OH膜和PVDF-PVP膜的抗污效果。此外,O₃/PVDF工艺对京密引水渠水中溶解性有机碳(DOC)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})的去除率分别为11.02%和16.85%。由于臭氧对NOM的氧化分解作用,部分小分子NOM透过膜孔进入BAC单元,进一步增强了BAC内微生物和活性炭对NOM的去除能力,使O₃/PVDF/BAC工艺对DOC和COD_{Mn}的去除率分别达到37.12%和48.95%。运行结束后,O₃/PVDF/BAC工艺中的PVDF膜在接触角、泡点压力和断裂拉伸强度等方面未发生显著变化,表明原位臭氧氧化未加速PVDF膜的老化。综上,O₃/PVDF/BAC工艺展现出显著的协同效应,有效控制了PVDF膜的污染,并显著提高了净水效果。

关键词: 原位臭氧氧化; PVDF膜; 生物活性炭; 膜污染; 净水效能

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)01-0040-06

Enhancement of Ozone on Anti-fouling Capability of PVDF Membrane and Water Purification Efficiency of Combined Process

WANG Xiao^{1,2}, HE Hai-yang², ZHU Hong-tao¹, CHEN Feng-xiang³, WU Xian-zhi³,
WU Hui-feng³, WEN Xiang-hua²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Citic Environmental Technology Investment Co. Ltd., Guangzhou 511457, China)

Abstract: O₃/PVDF/BAC combined process was developed by integrating in-situ ozonation with a PVDF membrane. Leveraging ozone's oxidation efficiency on natural organic matter (NOM), the process not only maintained the PVDF membrane's NOM retention performance but also significantly enhanced its antifouling properties. In the O₃/PVDF/BAC process, the TMP/TMP₀ of the PVDF membrane increased to 1.9 after 7.5 days of operation, outperforming the antifouling effects of the PVDF membrane, hydrophilic-modified PVDF-OH membrane, and PVDF-PVP membrane. Additionally, the O₃/PVDF process achieved removal rates of 11.02% for dissolved organic carbon (DOC) and 16.85% for the

基金项目: 清华大学(环境学院)-中信环境技术投资有限公司先进膜水处理及资源化技术联合研究中心项目

通信作者: 朱洪涛 E-mail: zhuhongtao@bjfu.edu.cn; 文湘华 E-mail: xhwen@tsinghua.edu.cn

permanganate index (COD_{Mn}) in water from the Jingmi Diversion Channel. Due to ozone's oxidative decomposition of NOM, some small-molecule NOM passed through the membrane pores and entered the BAC unit, further enhancing the microbial and activated carbon degradation capacity for NOM. This resulted in overall DOC and COD_{Mn} removal rates of 37.12% and 48.95%, respectively, in the O_3 /PVDF/BAC process. Furthermore, after the operation, no significant changes were observed in the contact angle, bubble point pressure, or tensile strength of the PVDF membrane, indicating that ozonation did not accelerate the aging of the PVDF membrane. The O_3 /PVDF/BAC process demonstrated a significant synergistic effect, effectively controlling membrane fouling and markedly improving water purification efficiency.

Key words: in-situ ozonation; PVDF membrane; biological activated carbon; membrane fouling; water purification efficiency

超滤技术因其良好的固液分离效率,被广泛应用于饮用水处理中。按制作材料,超滤膜可分为有机膜和无机膜,尽管无机膜具有机械强度高和化学稳定性好的特点,但较高的制作成本限制了其进一步应用^[1-3]。相比之下,有机膜制作成本较低,故基于有机膜开发高效的净水系统是十分必要的。

在众多有机膜中,PVDF材质具有良好的化学稳定性,PVDF基膜因其表面C—F键难以与 H_2O 形成氢键作用,呈现出弱亲水性(接触角: $80^\circ \sim 90^\circ$),具有较高的过滤通量,对水中的有机物截留效果好,但同时易产生膜孔堵塞和滤饼层污染^[4-5]。在饮用水处理工艺中,水源水中产生膜污染的物质主要为天然有机物(NOM)和少量的无机物(如Ca、Mg和Fe等矿物质)。由于PVDF基膜的低抗污性能,目前鲜见直接使用PVDF基膜开展过滤的研究。

研究发现,聚乙烯吡咯烷酮亲水改性PVDF膜(PVDF-PVP)与18.1 mg/L臭氧接触240 h后,仅膜表面PVP亲水改性层产生脱落,而PVDF基膜无明显变化^[6]。同时,臭氧氧化可改变NOM的结构和性质,提升超滤膜通量。因此,将原位臭氧氧化和PVDF基膜相结合有望在维持PVDF对NOM截留性能的基础上,有效缓解膜污染问题。针对于此,构建了“原位臭氧/PVDF超滤/生物活性炭(O_3 /PVDF/BAC)”组合工艺,考察了PVDF膜的抗污性能以及该组合工艺的净水效能,并分析原位臭氧氧化对PVDF膜理化性能的影响。

1 材料与方法

1.1 原水水质

原水取自南水北调工程中线的京密引水渠,试

验期间的平均水质:DOC为5.88 mg/L, COD_{Mn} 为5.19 mg/L, UV_{254} 为0.069 cm^{-1} ,浊度为2.33 NTU,总Ca为1.68 mg/L,总Fe为228.68 ng/L, pH为6.89。

1.2 试验装置与流程

O_3 /PVDF/BAC组合工艺试验装置见图1。试验所用超滤膜包括:PVDF基膜(PVDF)、碱亲水改性PVDF膜(PVDF-OH)和PVDF-PVP膜,膜孔径均为0.04 μm ,内径为0.89 mm,外径为1.60 mm,膜通量为55 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,过滤单元的停留时间为23.6 min。臭氧浓度为2.86 mg/L,流量为0.4 L/min。BAC单元填充煤质活性炭,停留时间为9.5 min。

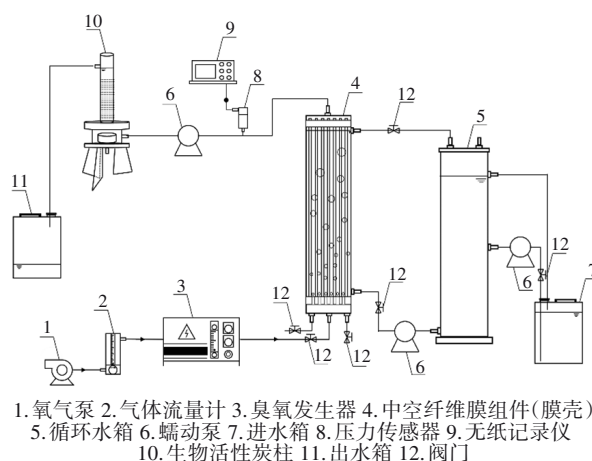


图1 原位臭氧/PVDF超滤/生物活性炭装置示意

Fig.1 Schematic diagram of in-situ ozonation/PVDF ultrafiltration/BAC device

在连续运行中,当超滤膜的比跨膜压差(TMP/TMP₀)超过2.0时对膜丝进行清洗,清洗方式包括气水清洗(气体流速:20 L/min,冲洗时间:30 min)和化学清洗(500 mg/L的NaClO浸泡120 min)。BAC单

元每24 h进行一次气水冲洗,气体流速为20 L/min,冲洗时间为15 min。

1.3 分析项目与方法

在运行过程中,水样经0.45 μm 玻璃纤维滤头过滤后进行DOC、 COD_{Mn} 和 UV_{254} 分析。其中,DOC采用岛津TOC分析仪进行测定, COD_{Mn} 采用高锰酸钾/硫酸亚铁铵/邻菲罗啉显色法测定, UV_{254} 采用普析T6紫外-可见分光光度计进行测定。采用岛津排阻色谱(配备TOC在线检测器)对水样中NOM的分子质量进行分析。

在运行周期结束后,采用NaOH溶液(400 mL, pH=12)浸泡膜丝72 h以提取膜丝表面的污染物,并测定DOC和 COD_{Mn} 浓度。同时,采用Hitachi F7000三维荧光光谱仪对膜污染物中的溶解性有机物进行荧光光谱分析。

采用Hitachi SU8000扫描电镜分析超滤膜表面形貌,采用Hokuto CA 200接触角测定仪测定膜的接触角,采用BSD-PB膜孔径分析仪测定膜的泡点压力。超滤膜总污染阻力(R_{total})的计算见文献[7],其中包括滤饼层污染阻力(R_{cake})、凝胶层污染阻力(R_{gel})和膜孔污染阻力(R_{pore})。

2 结果与讨论

2.1 PVDF膜的抗污性能

2.1.1 比跨膜压差的变化

在膜通量为55 L/($\text{m}^2 \cdot \text{h}$)的条件下,不同超滤膜在运行中的TMP/TMP₀变化如图2所示。

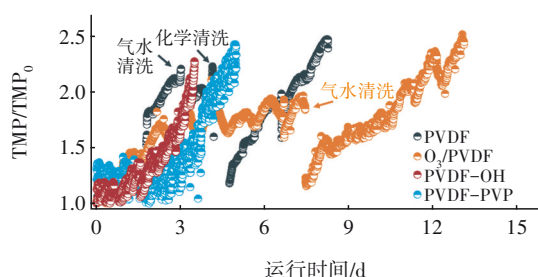


图2 运行过程中PVDF膜比跨膜压差的变化

Fig.2 Variation of TMP/TMP₀ during PVDF membrane filtration

对于PVDF膜,其TMP/TMP₀在第3天即升高至2.2,经过气水清洗后TMP/TMP₀仅降低至1.7,继续运行至第4.7天,TMP/TMP₀便再一次升高至2.2。与之相比,PVDF-OH膜和PVDF-PVP膜的TMP/TMP₀分别在第3.5天和第4.5天提升至2.2,说明经过亲水改性后其具有了更优良的抗污性能,且

PVDF膜的污染物质难以通过气水清洗有效去除。同时,由于PVP常作为制作有机超滤膜的造孔剂^[8],其对PVDF膜的亲水改性效果优于NaOH表面羟基化改性效果,故PVDF-PVP膜较PVDF-OH膜呈现出更好的抗污性能。

以往的研究指出,PVDF基膜具有良好的稳定性和耐氧化性,但PVDF基膜表面的C-F键难以与水中的H形成氢键作用,因此其亲水性较弱^[4-5]。这一特性导致NOM易于造成PVDF膜的膜孔堵塞和滤饼层污染。而经过亲水改性的PVDF-OH膜和PVDF-PVP膜的抗污效能强于PVDF膜。

当原位臭氧氧化与PVDF膜结合后,PVDF膜的TMP/TMP₀在第7.5天仅提升至1.9,且经气水清洗后降至1.2。这一结果表明,原位臭氧氧化可以有效减缓PVDF膜在运行过程中的膜污染,且膜表面污染物易于气水清洗去除。因此,O₃/PVDF体系有效利用了原位臭氧氧化和PVDF膜耐氧化的特点,可有效控制膜污染。

2.1.2 膜污染阻力构成的变化

对运行3 d后的PVDF膜、PVDF-OH膜和PVDF-PVP膜进行了膜污染阻力构成分析,结果表明,PVDF膜的 R_{total} 、 R_{cake} 、 R_{gel} 和 R_{pore} 分别为 6.89×10^{14} 、 1.88×10^{14} 、 3.65×10^{14} 和 $1.36 \times 10^{14} \text{ m}^{-1}$ 。产生 R_{cake} 和 R_{gel} 的膜污染物可由物理清洗和化学清洗去除。对于PVDF膜,其 R_{gel} 远大于 R_{cake} ,因此气水清洗对膜污染物的去除效果有限,该结果与图2一致。

对于PVDF-OH膜和PVDF-PVP膜, R_{total} 、 R_{cake} 、 R_{gel} 、 R_{pore} 分别为 6.08×10^{14} 、 3.56×10^{14} 、 1.96×10^{14} 、 $0.56 \times 10^{14} \text{ m}^{-1}$ 和 5.16×10^{14} 、 3.02×10^{14} 、 1.65×10^{14} 、 $0.49 \times 10^{14} \text{ m}^{-1}$ 。可见,经亲水改性后,占主导的膜污染阻力从 R_{gel} 转变为了 R_{cake} 。因此,PVDF-OH和PVDF-PVP膜污染易于被物理清洗去除。

当PVDF膜与原位臭氧氧化结合时,连续运行7.5 d后,上述阻力分别为 4.69×10^{14} 、 2.81×10^{14} 、 1.35×10^{14} 和 $0.53 \times 10^{14} \text{ m}^{-1}$ 。可见,原位臭氧氧化与PVDF膜结合后, R_{gel} 明显降低,伴随着 R_{cake} 升高。因此,气水清洗能有效降低O₃/PVDF体系的TMP/TMP₀,是通过臭氧将原本产生 R_{gel} 的膜污染物质氧化降解实现的,也提升了PVDF膜的气水清洗效果。此外,O₃/PVDF体系的 R_{pore} 大幅降低。以往研究表明,臭氧氧化可以降低NOM的分子质量,故造成 R_{pore} 的有机物在原位臭氧氧化环境下转变为可穿透膜

孔的小分子物质,从而降低了PVDF膜的 R_{pore} [9]。

2.2 PVDF污染层形貌与成分

2.2.1 膜污染层形貌分析

未使用的PVDF膜可观察到清晰的孔状结构,膜面物质由C和F元素组成,即制作PVDF的材料。当PVDF膜运行3 d后,膜表面变得较为光滑,且未能观察到原有的孔状结构,说明PVDF膜表面被污染物覆盖。

在 O_3/PVDF 体系内,运行7.5 d后,PVDF膜表面较未经使用的PVDF膜变得更为光滑,但其表面仍可以观察到清晰的孔状结构。这一现象说明,尽管 O_3/PVDF 体系内的PVDF膜运行了更长时间,但是膜表面的污染程度更轻。结合膜污染阻力构成分析,原位臭氧氧化改变了凝胶层和滤饼层污染物的分布,进而改变了膜表面污染层的形貌。这再一次说明,原位臭氧氧化可以有效去除PVDF膜表面的污染,从而减缓 TMP/TMP_0 的增长。此外,EDS图谱分析表明, O_3/PVDF 体系内的PVDF膜表面未检出Ca,而单独PVDF膜体系的膜表面检测到Ca沉积,这说明原位臭氧氧化可促进矿物质的溶解,减少运行过程中PVDF膜的无机污染。

2.2.2 PVDF膜污染层成分分析

当PVDF膜运行3 d后提取膜丝表面的污染物进行分析,结果显示DOC和 COD_{Mn} 浓度分别为8.81和8.27 mg/L。与之相比,在 O_3/PVDF 体系内,膜丝运行7.5 d后,PVDF膜表面污染物的DOC和 COD_{Mn} 浓度分别只有5.89和3.33 mg/L。这一结果再次证明,原位臭氧氧化可以减缓PVDF膜表面污染物的积聚。同时,在 O_3/PVDF 体系内,PVDF膜表面污染物的 COD_{Mn} 浓度更低,这是由于臭氧与膜表面污染物相互作用,从而降低了污染物的化学需氧量。

此外,还对膜丝表面提取的污染物进行了三维荧光光谱分析,结果如图3所示。可见四个主要荧光峰:峰I和峰II为蛋白质类物质($\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}=225\sim 280/310\sim 340\text{ nm}$),峰III为腐殖酸类物质($\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}=300\sim 320/400\sim 500\text{ nm}$),峰IV为富里酸类物质($\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}=230\sim 260/400\sim 500\text{ nm}$) [10]。单独PVDF膜运行3 d后,膜丝表面的污染物主要由蛋白质类物质组成(峰I强度:689,峰II强度:956)。而在 O_3/PVDF 体系中,PVDF膜表面蛋白质类物质浓度明显降低,其中峰I强度下降至568,峰II强度下降至652。根据以往研究,蛋白质类膜污染物黏度高,不易于物理

清洗去除 [10],因此PVDF膜表面的凝胶层污染物主要由蛋白质类物质组成,致使气水清洗难以降低 TMP/TMP_0 。当PVDF膜结合原位臭氧后,蛋白质类物质中的氨基易于被臭氧氧化,使膜污染物中的蛋白质类物质变性,从而将膜表面凝胶层污染物转变为滤饼层污染物,提升了气水清洗效能。对于PVDF膜污染物中的腐殖酸类和富里酸类物质,原位臭氧氧化未能有效降低其浓度,故 O_3/PVDF 体系中PVDF膜具有更优良的抗污效能归因于臭氧对蛋白质类物质的氧化,使凝胶层污染物转变为滤饼层污染物,延缓了 TMP/TMP_0 的增长。

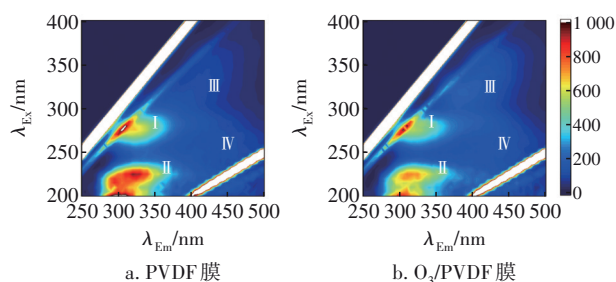
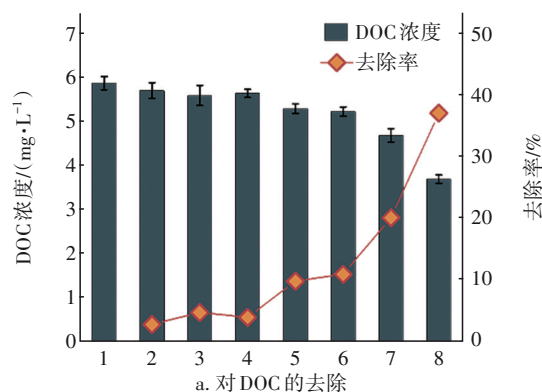


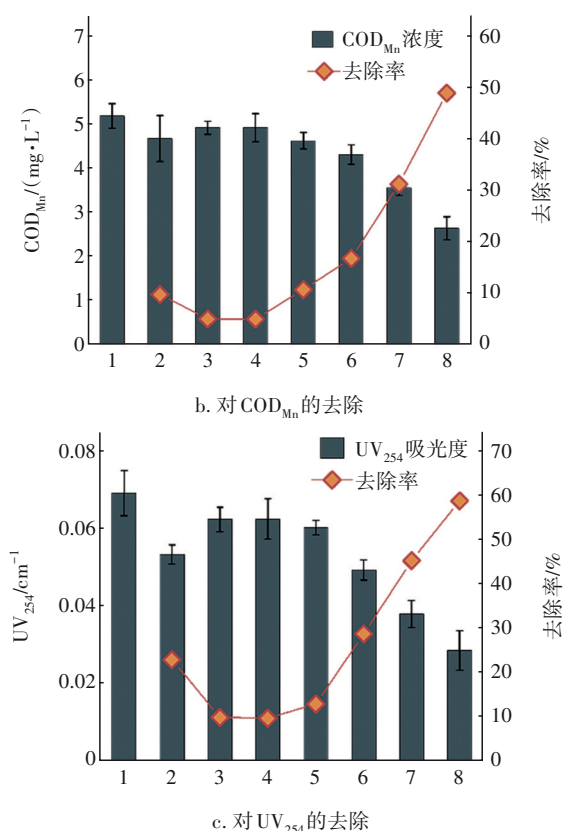
图3 PVDF膜污染层成分分析

Fig.3 Component of PVDF membrane fouling layer

2.3 $\text{O}_3/\text{PVDF}/\text{BAC}$ 工艺的净水效能

除PVDF膜的抗污性能之外,膜的净水效能也是一个重要指标, $\text{O}_3/\text{PVDF}/\text{BAC}$ 工艺对DOC、 COD_{Mn} 和 UV_{254} 的去除效果见图4(横轴的1~8分别代表原水、 $\text{O}_3/\text{PVDF}-\text{OH}$ 、 $\text{PVDF}-\text{PVP}$ 、 PVDF 、 O_3/PVDF 、 PVDF/BAC 和 $\text{O}_3/\text{PVDF}/\text{BAC}$)。在运行周期内,PVDF、 $\text{PVDF}-\text{OH}$ 和 $\text{PVDF}-\text{PVP}$ 三种膜对DOC的平均去除率分别为9.89%、4.81%和4.02%。由于PVDF膜的亲水性较弱,因此其与NOM的相互作用强于亲水改性的PVDF膜,因而具有更好的DOC去除效果。此外,三种膜对 COD_{Mn} 的去除效果与DOC相似,去除率分别为10.80%、5.11%和5.08%。



图4 O_3 /PVDF/BAC工艺的净水效能Fig.4 Purification efficiency of O_3 /PVDF/BAC system

经原位臭氧氧化处理后,原水的DOC和 COD_{Mn} 分别从5.88 mg/L和5.19 mg/L下降至5.71 mg/L和4.68 mg/L。可见,原位臭氧氧化对NOM的矿化效果十分有限,仅有2.89%的DOC被去除。与之相比,在臭氧氧化条件下 COD_{Mn} 浓度下降了9.86%,这是由于臭氧易于与可生化的有机物反应,从而降低了 COD_{Mn} 浓度。此外, O_3 /PVDF体系对DOC和 COD_{Mn} 的平均去除率分别为11.02%和16.85%,该去除效果强于单独PVDF膜体系。原因可能是原位臭氧氧化改变了膜表面污染层的结构和组分,进而改变了膜表面污染层与NOM的相互作用,提高了PVDF膜对NOM的截留效果。除DOC和 COD_{Mn} 之外, O_3 /PVDF体系对 UV_{254} 的去除率达到28.65%,高于单独PVDF膜体系(12.86%)。水中产生 UV_{254} 吸收的主要为富电子基团,即碳碳双键、碳碳三键和芳香环。臭氧易于攻击有机物的富电子基团,因此原位臭氧氧化可降低22.85%的 UV_{254} ,进而使得 O_3 /PVDF对 UV_{254} 的去除率达到28.65%。

原位臭氧氧化不仅增强了PVDF膜对NOM的截留效果,也增强了后续BAC单元对NOM的去除

效果。PVDF/BAC工艺对DOC、 COD_{Mn} 和 UV_{254} 的平均去除率分别为20.18%、31.25%和45.16%。与之相比, O_3 /PVDF/BAC工艺对这三个指标的平均去除率增加至37.12%、48.95%和58.66%。分析原因可能是:原位臭氧氧化改变了NOM的性质,使得进入BAC单元的有机物利于被微生物和活性炭去除。如图5所示,原水中NOM的分子质量分布在0.001~10 000 ku;经PVDF膜过滤后,30~10 000 ku范围内的NOM强度有所下降,而0.001~30 ku范围内的NOM强度无明显变化,这说明PVDF膜易于截留NOM中的大分子有机物。经原位臭氧氧化后,30~10 000 ku范围内的NOM强度明显下降,同时0.001~30 ku范围内的NOM强度上升,这一结果表明原位臭氧氧化可以将30~10 000 ku范围内的NOM氧化降解至0.5~30 ku范围,进而再降解至0.001~0.5 ku范围。由于原位臭氧氧化产生了大量的小分子有机污染物,因而会出现小分子有机物穿透PVDF膜孔的现象,导致膜后出水中小分子NOM浓度升高。然而,小分子NOM更易于被BAC单元内的微生物和活性炭利用和去除,故 O_3 /PVDF/BAC工艺的净水效能强于PVDF/BAC工艺。

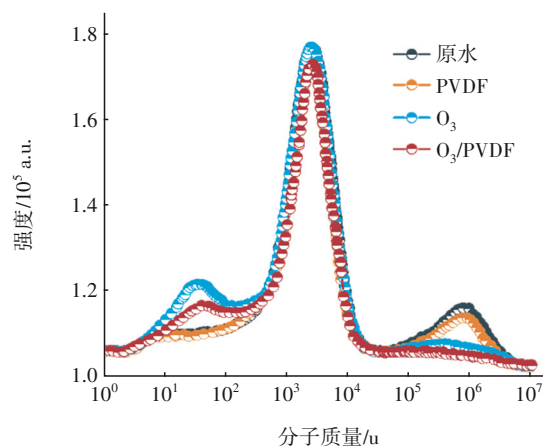


图5 天然有机物的分子质量分布

Fig.5 Molecular weight distribution of NOM

2.4 原位 O_3 对PVDF膜理化性质的影响

在 O_3 /PVDF/BAC工艺运行周期结束后,对PVDF膜的接触角、泡点压力和断裂拉伸强度等理化性质进行了测定。结果表明,PVDF膜的接触角为 88.8° ,与未经使用的PVDF膜(88.6°)相比无明显变化,说明原位臭氧未与PVDF膜表面发生反应,提升PVDF膜表面羟基化程度。此外,未经使用的PVDF膜的起泡点压力、多泡点压力和断裂拉伸强

度分别为0.26 mPa、0.27 mPa和16.18 cN/mm²,运行结束后这三个指标均无明显变化,分别为0.26 mPa、0.28 mPa和16.07 cN/mm²。这说明,在运行周期内原位臭氧氧化并未造成PVDF膜老化,反映出PVDF基膜良好的抗臭氧氧化性能。

3 结论

① O₃/PVDF/BAC工艺中的PVDF膜具有良好的抗污性能,其TMP/TMP₀在7.5 d时增加至1.9,优于单独运行的PVDF膜(3 d)和亲水改性后的PVDF-OH和PVDF-PVP膜(3.5和4.5 d)。

② 单独PVDF膜的膜污染主要为蛋白质类物质凝胶层污染,使得气水冲洗难以有效降低TMP/TMP₀。在O₃/PVDF/BAC工艺中,原位臭氧氧化可将凝胶层污染物转变为滤饼层污染物,进而提升PVDF膜的气水清洗效能。

③ O₃/PVDF/BAC工艺具有更为优良的净水效能,O₃/PVDF对DOC、COD_{Mn}和UV₂₅₄的平均去除率分别为11.02%、16.85%和28.65%。且经原位臭氧氧化后更多的小分子NOM进入BAC单元,使得O₃/PVDF/BAC工艺对DOC、COD_{Mn}和UV₂₅₄的去除率分别提升至37.12%、48.95%和58.66%。

④ O₃/PVDF/BAC工艺运行周期结束后,PVDF膜的接触角、泡点压力和断裂拉伸强度无明显变化,即原位臭氧氧化并未导致PVDF膜发生老化现象,且PVDF基膜具有良好的耐臭氧氧化性能。

参考文献:

- [1] 宋亚丽,王贺,朱文芳,等. 臭氧对陶瓷膜去除地表水中有机物的影响研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(11): 45-49.
SONG Yali, WANG He, ZHU Wenfang, *et al.* Effect of ozone on organic matter removal in surface water using ceramic membrane [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(11): 45-49 (in Chinese).
- [2] HE H Y, YOU N, DENG S H, *et al.* Nanoparticles formed in Fe(II)/KMnO₄-catalyzed ozonation to alleviate ceramic membrane fouling and improve membrane rejection performance of humic acid [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 435: 140513.
- [3] 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 Zongyu, 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).
- [4] LIU W Z, GUO Y Q, XUE Z W, *et al.* Fabrication of PVDF membranes via γ -ray irradiation and investigation into their membrane formation mechanisms and water treatment properties[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 494: 152975.
- [5] KANG G D, CAO Y M. Application and modification of poly(vinylidene fluoride) (PVDF) membranes—a review [J]. Journal of Membrane Science, 2014, 463: 145-165.
- [6] LI K, XU W H, WEN G, *et al.* Aging of polyvinylidene fluoride (PVDF) ultrafiltration membrane due to ozone exposure in water treatment: evolution of membrane properties and performance [J]. Chemosphere, 2022, 308: 136520.
- [7] LIU J, ZHANG Z H, CHEN Q H, *et al.* Synergistic effect of ferrate(VI)-ozone integrated pretreatment on the improvement of water quality and fouling alleviation of ceramic UF membrane in reclaimed water treatment [J]. Journal of Membrane Science, 2018, 567: 216-227.
- [8] HOU C G, PANG Z G, XIE S C, *et al.* Dual PVP roles for preparing PVDF hollow fiber membranes with bicontinuous structures via the complex thermally induced phase separation (c-TIPS) [J]. Separation and Purification Technology, 2024, 332: 125766.
- [9] XIE X Y, WANG L J, WEI J, *et al.* Progress in ceramic membrane coupling ozonation process for water and wastewater treatment: a critical review [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 493: 152475.
- [10] LIU L B, DU L, LU S, *et al.* Molecular insight into DOM fate using EEM-PARAFAC and FT-ICR MS and concomitant heavy metal behaviors in biologically treated landfill leachate during coagulation: Al speciation dependence [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 460: 132374.

作者简介:王晓(1999-),女,山东聊城人,硕士研究生,主要研究方向为膜法水处理技术。

E-mail:wxiao0221@163.com

收稿日期:2024-08-31

修回日期:2024-10-14

(编辑:李德强)