

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.01.006

基于小区供水的聚醚砜中空纤维纳滤膜中试研究

刘水¹, 肖丹^{1,2}, 范雅倩², 黄铿霖³, 赵骏东³, 张伟杰²,
谢明润⁴, 朱加运⁴

(1. 广东佛水环境科技集团股份有限公司, 广东 佛山 528000; 2. 佛山市禅城区供水有限公司, 广东 佛山 528000; 3. 佛山大学 环境与化工学院, 广东 佛山 528000; 4. 北纳新材料<珠海>有限公司, 广东 珠海 519000)

摘要: 随着人们对高品质饮用水的迫切需求,常规水处理工艺在保障健康水质方面存在一定的局限性。采用聚醚砜中空纤维纳滤膜作为居民小区前端供水设施进行中试研究,通过分析电导率、溶解性总固体(TDS)、浊度和回收率等指标,建立纳滤系统产水周期、进水压力等最佳运行参数;采用三维荧光光谱和膜比通量分析膜污染机制;通过扫描电镜、X射线光电子能谱以及傅里叶红外光谱,分析出厂水中余氯对膜材料性能的影响。结果表明,在产水周期为60 min、进水压力为0.35 MPa条件下,电导率下降率以及纳滤膜对TDS和浊度的去除率分别达到29.8%、24.0%、71.2%,回收率高达80%~90%。经过8个月的运行,膜污染与产水周期和进水压力呈正相关性,当进水含有余氯时,虽在纳滤膜上检测出少量氯元素,但对膜的运行效能影响较小,中空纤维纳滤膜表现出优异的耐氯性。

关键词: 中空纤维纳滤膜; 二次供水; 运行参数优化; 高品质饮用水

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)01-0035-07

Pilot Study on Polyether-sulfone Hollow Fiber Nanofiltration Membranes for Residential Water Supply

LIU Shui¹, XIAO Dan^{1,2}, FAN Yaqian², HUANG Kenglin³, ZHAO Jundong³,
ZHANG Weijie², XIE Mingrun⁴, ZHU Jiayun⁴

(1. Guangdong Foshui Environmental Technology Group Co. Ltd., Foshan 528000, China;
2. Foshui City Chancheng District Water Supply Co. Ltd., Foshan 528000, China; 3. School of Environment and Chemical Engineering, Foshan University, Foshan 528000, China; 4. Beina New Materials <Zhuhai> Co. Ltd., Zhuhai 519000, China)

Abstract: With the growing demand for high-quality drinking water, conventional water treatment processes have limitations in ensuring healthy water quality. Pilot-scale studies were conducted using polyether-sulfone hollow fiber nanofiltration membranes as front-end water supply facilities in residential communities. By analyzing parameters such as conductivity, total dissolved solids (TDS), turbidity, and recovery rate, optimal operating conditions including water production cycle and feed water pressure were established. Membrane fouling mechanisms were investigated through three-dimensional fluorescence

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52300003); 佛山市禅城区供水有限公司项目(FS11S001250085)

通信作者: 赵骏东 E-mail: 2112460014@stu.fosu.edu.cn

spectroscopy and membrane flux ratio analysis. The impact of residual chlorine on membrane performance was evaluated using scanning electron microscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, and Fourier transform infrared spectroscopy. Results showed that under 60-minute water production cycles and 0.35 MPa feed water pressure, the nanofiltration membranes achieved removal rates of 29.8% for conductivity, 24.0% for TDS, and 71.2% for turbidity, with recovery rates reaching 80% to 90%. After eight months of operation, membrane fouling showed positive correlations with water production cycle and feed pressure. Although trace chlorine was detected on the membrane when feed water contained residual chlorine, its impact on operational efficiency remained minimal. The hollow fiber nanofiltration membranes demonstrated excellent chlorine resistance.

Keywords: hollow fiber nanofiltration membrane; secondary water supply; optimization of operational parameter; high-quality drinking water

在我国饮用水安全保障体系向“优质化、高品质化”升级的背景下,上海、深圳等一线城市已率先出台“高品质饮用水”专项政策与技术规范^[1]。传统净水工艺(混凝-沉淀-过滤-消毒)在去除溶解性有机物、重金属和致病微生物等污染物方面存在潜在不足,而纳滤膜技术凭借其独特的纳米级过滤精度与“筛分-电荷排斥”协同作用机制,可以有效截留新污染物与重金属等,同时对水体中的阳离子(如 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等)截留率较低,能够有效保留水中对人体有益的矿物质成分,提供更加安全、健康的饮用水^[2]。

目前,国内市场纳滤膜按照材料主要划分为聚酰胺(PA)、复合陶瓷、聚醚砜(PES)等,按照膜组件结构划分,主要包括卷式纳滤膜和中空纤维纳滤膜两大类。卷式纳滤膜因其制备工艺简单,在纳滤膜市场占据主导地位^[3]。但是卷式纳滤膜受限于结构设计,其在填装密度与抗污染性能方面存在明显短板。中空纤维纳滤膜凭借独特的结构特性展现出更优的综合性能,其三维立体的纤维状结构可显著提升组件填装密度;并且,中空纤维膜组件具备可反冲洗的操作优势,通过反向水流冲洗可有效剥离膜表面附着的污染物层;此外,中空纤维膜的自支撑结构无需额外支撑材料,从生产端降低了组件制备成本^[4]。

目前中空纤维纳滤膜的应用仍主要集中在国外商品膜,相关研究对18种市售商品纳滤膜进行了理化性质表征与过滤性能评测,纳滤膜对有机物截留率均高于70%,而对于硬度离子的截留率差异较大^[5]。我国自主研发并具备应用品质的纳滤膜相对

较少,多数纳滤膜产品仍处在不同场景的测试性研究阶段,而对于中空纤维纳滤膜用于实际水处理中试或工程应用的相关研究报道则更少。为推动中空纤维纳滤膜在高品质饮用水制备中的工程化应用,本研究以自主研发的改性聚醚砜中空纤维纳滤膜为核心,在佛山市某市政水厂构建中试系统开展应用研究。纳滤进水为该水厂常规工艺(混凝-沉淀-过滤-消毒)处理后的出厂水,通过调控产水周期、进水压力等关键运行参数,优化并确立兼顾高品质出水与高回收率的最佳工艺条件;同时,采用三维荧光光谱和膜比通量分析膜污染特征,并借助表征手段探究余氯对膜分离性能的影响机制,为该类中空纤维纳滤膜在居民小区二次供水场景的应用提供技术支撑。

1 材料与amp;方法

1.1 原水来源及水质

中试装置设置于佛山市某市政水厂,该水厂以北江水作为饮用水水源,其浊度为19.7~31.1 NTU, pH为6.8~7.7,电导率为210~280 $\mu\text{S}/\text{cm}$,溶解性总固体(TDS)为117~170 mg/L,温度为6~30 $^{\circ}\text{C}$,对应的出厂水指标分别为0.1~0.2 NTU、7.4~7.8、200~270 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、117~170 mg/L、10.5~29.5 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 中试装置

中试装置如图1所示。膜组件采用自主研发的新型改性聚醚砜中空纤维纳滤膜,膜通量为17~25 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,膜丝内径为0.6~0.8 mm,处理量为1 m^3/h 。采用内压错流过滤出水,运行方式为恒定压力过滤,同时设置浓水回流管路,部分浓水回流至进水端以维持系统稳定的错流速度与进水浓度,剩余

浓水按需排放。采用化学与物理清洗方式,先进行次氯酸钠(0.25%)化学清洗,再进行气水洗。

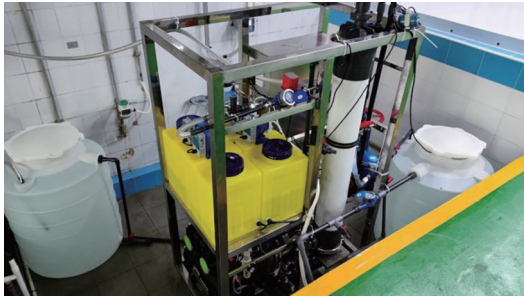


图1 现场纳滤装置

Fig.1 Diagram of nanofiltration pilot-scale device

1.3 分析方法

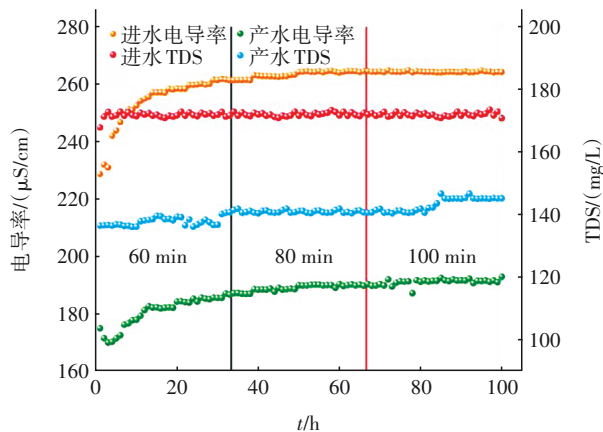
浊度采用美国哈希2100N台式浊度仪测定;pH采用台式PHSJ-3F pH计测定;电导率、溶解性总固体采用上海雷磁DDB-305A便携式电导率仪测定;有机物采用岛津RF-6000荧光分光光度计测定;X射线光电子能谱(XPS)采用岛津AMICUS测定;纳滤膜表面形貌和元素分布采用捷克TESCAN的MIRA LMS扫描电子显微镜(SEM-EDS)测定;表面官能团采用美国赛默飞Nicolet iS5傅里叶红外光谱仪(FIR)测定。

2 结果与分析

2.1 工艺参数优化

2.1.1 产水周期对产水水质及回收率的影响

纳滤工艺的长期稳定运行与产水周期密切相关。产水周期过长易导致膜污染以及膜通量下降,而周期过短则清洗频繁,增加运行成本^[6]。结合实际运行工况,探讨了不同产水周期(60、80、100 min)对电导率、TDS、浊度和回收率的影响,结果如图2所示。



a. 电导率和TDS

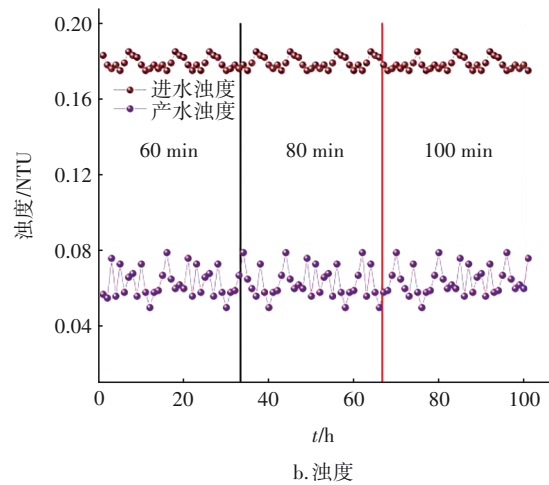


图2 不同产水周期下水质指标变化

Fig.2 Changes in conductivity, TDS and turbidity under different water production cycles

产水电导率与产水TDS在运行初期因膜孔道“压实效应”或污染物初期吸附存在小幅上升,随后逐渐趋于平稳,电导率平均值为 $187.07 \mu\text{S}/\text{cm}$,TDS平均值为 $140.70 \text{ mg}/\text{L}$;随运行时间延长产水浊度呈波动趋势,但全程波动幅度较小($0.05\sim 0.08 \text{ NTU}$),表明膜对颗粒物的截留性能良好而稳定。当产水周期为60 min时,电导率下降率以及TDS和浊度的平均去除率分别为28.0%、18.6%和64.6%,去除效率最高。在60 min短周期下,膜的产水过程更频繁地“扰动”膜表面,抑制了污染物的持续沉积。当产水周期延长至80 min和100 min时,虽短期内水质无较大变化,但从长期运行趋势看,膜表面污染物累积风险增加,易引发后续产水水质波动。

不同产水周期下回收率呈现显著差异化特征(如图3所示)。在60 min产水周期下,初始回收率接近90%,为三组中最高;虽随运行时间延长出现一定下降,但运行6 000 min后仍维持在80%以上。在80 min产水周期下,初始回收率为87%,低于周期为60 min的,且长期运行中衰减更显著,6 000 min时降至78%。在100 min产水周期下,初始回收率仅75%,为三组最低,后期维持在76%。产水周期为60 min可有效抑制溶质在膜表面的积累,尽管冲洗相对频繁,但是可以减少污染物在膜表面的吸附与成垢时长,延缓了膜污染的发展进程,因此既维持了高初始回收率,又缓解了长期衰减趋势。产水周期为80和100 min时,膜表面溶质积累与污染物沉积随时间延长而增加,浓差极化层逐渐增厚,水

透过阻力持续增加,导致初始回收率降低且长期衰减更显著。综合考虑净化效率和回收率,确定最优产水周期为 60 min,它在保障高品质出水的同时,还有效平衡了膜污染防控与运行连续性。

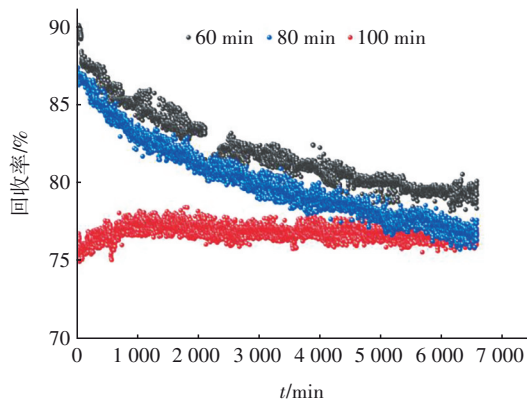


图 3 不同产水周期下回收率变化

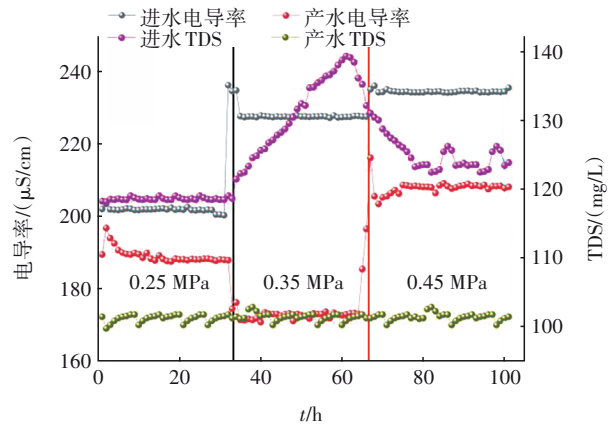
Fig.3 Changes in recovery rate under different water production cycles

2.1.2 进水压力对产水水质及回收率的影响

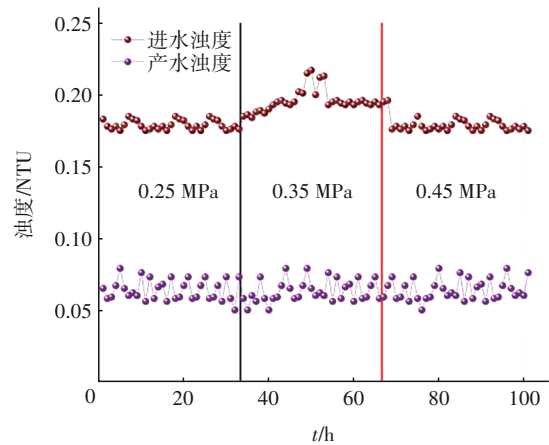
进水压力不仅决定膜通量的大小,也影响膜污染及分离性能之间的动态平衡^[7]。如图 4(a)所示,电导率下降率与进水压力呈正相关,在进水压力为 0.25、0.35、0.45 MPa 下,电导率平均下降率分别为 8.1%、31.6% 和 12.8%,这是由于进水压力增加使得膜通量增大,在溶质颗粒粒径不变时,脱盐率会有所上升。但过高的进水压力会破坏膜表面结构,降低膜组件的使用寿命^[8]。驱动力与进水压力呈正相关,进水压力越高,驱动力越大,将消耗更多能量。在进水压力为 0.35 MPa 下,TDS 的平均去除率为 29.48%,优于 0.25 MPa 时的 17.15% 和 0.45 MPa 时的 23.33%。由图 4(b)可见,纳滤膜对浊度有较好的截留效果,且在不同压力下,产水浊度未出现明显的变化,说明进水压力对产水浊度的影响不显著。在进水压力为 0.35 MPa 下对浊度的去除效果最好,产水浊度的平均值为 0.063 NTU。

图 5 为不同进水压力下回收率的变化趋势,随着运行时间的延长,回收率均出现不同程度的下降。其中,进水压力为 0.25、0.35 MPa 时平均回收率分别为 73.8% 和 80.3%;进水压力为 0.45 MPa 时回收率虽然高达 90% 以上,但在 0~2 000 min 内从 91% 下降至 85%。较高的进水压力会产生更高的电耗,增加运行成本。对比三组不同进水压力下的回收率,进水压力为 0.35 MPa 时效果最佳,可以兼顾

高回收率和低成本。



a. 电导率和 TDS



b. 浊度

图 4 不同进水压力下水质指标变化

Fig.4 Changes in conductivity, TDS and turbidity under different feed water pressures

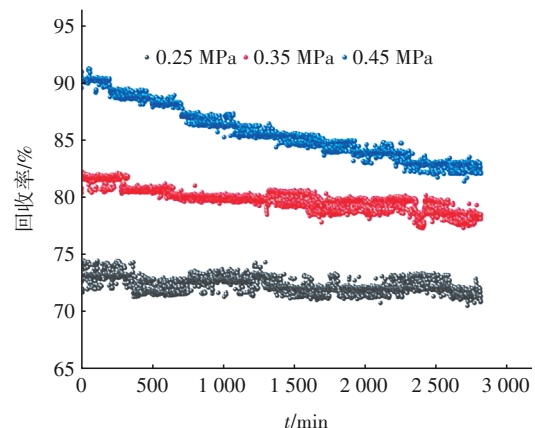


图 5 不同进水压力下回收率变化

Fig.5 Changes in recovery rate under different feed water pressures

2.2 膜污染影响因素分析

在纳滤过程中,污染物、金属离子及有机物等

在膜表面会形成滤饼层,造成膜污染,严重影响膜通量,从而导致产水率下降并降低膜使用寿命。因此,采用三维荧光光谱和膜比通量考察了膜污染情况^[9]。

2.2.1 三维荧光光谱分析

在产水周期为60 min、进水压力为0.35 MPa工况下运行30 d,分析纳滤进水和不同运行时间(10、20、30 d)下纳滤出水的三维荧光光谱(3D-EEM)特征。结果表明,纳滤进水在I区与II区呈现显著蛋白类荧光峰,同时在IV区出现中等强度信号,说明原水中的溶解性有机物(DOM)以小分子蛋白质以及部分溶解性微生物代谢产物为主^[10]。纳滤出水的I、II、IV区荧光峰几乎完全衰减,仅残留弱散射带,表明中空纤维纳滤膜对蛋白质和溶解性微生物代谢产物具有比较高的截留效率;且随运行时间由10 d增至30 d,出水光谱变化甚微,说明延长运行时间并未降低对低分子有机物的屏障功能,改性聚醚砜中空纤维纳滤膜表现出优异的抗污染性能。

2.2.2 膜比通量变化

膜比通量下降反映膜污染程度加剧,膜污染会导致膜的透水性能下降,使实际通量(J_1)与初始通量(J_0)的比值(即膜比通量)降低^[11]。不同产水周期条件下膜比通量(J_1/J_0)随运行时间的变化如图6(a)所示。产水周期为60 min时,运行初期膜比通量接近1,随着运行时间延长膜比通量下降相对缓慢,运行30 d后,仍维持在0.96。产水周期为80 min时,初期的膜比通量与60 min产水周期的相近,但在随后下降趋势明显,运行30 d后下降至0.92。产水周期为100 min时膜比通量下降最为显著,运行初期约为1,运行20 d后下降到0.89。随着产水周期延长,膜比通量下降明显,表明膜污染随产水周期延长而加重,长周期运行会加速膜污染的进程^[12]。

图6(b)反映了不同进水压力下膜比通量随运行时间的变化。进水压力为0.25 MPa条件下,初期的膜比通量约为1,且运行30 d时仍维持在1。进水压力为0.35 MPa时,初期的膜比通量约为1,随后呈缓慢下降趋势,运行至第30天时降至约0.97。进水压力为0.45 MPa时膜比通量下降最为显著,运行30 d后降至约0.93。进水压力增大时,膜表面的浓差极化加剧,同时污染物更易在膜表面沉积,从而加重膜污染,导致膜比通量下降。所以,随着进水压力升高,膜比通量下降更明显,说明膜污染程度

随进水压力升高而加重,更高进水压力下膜污染发展更快,所以低压运行可减缓膜污染。

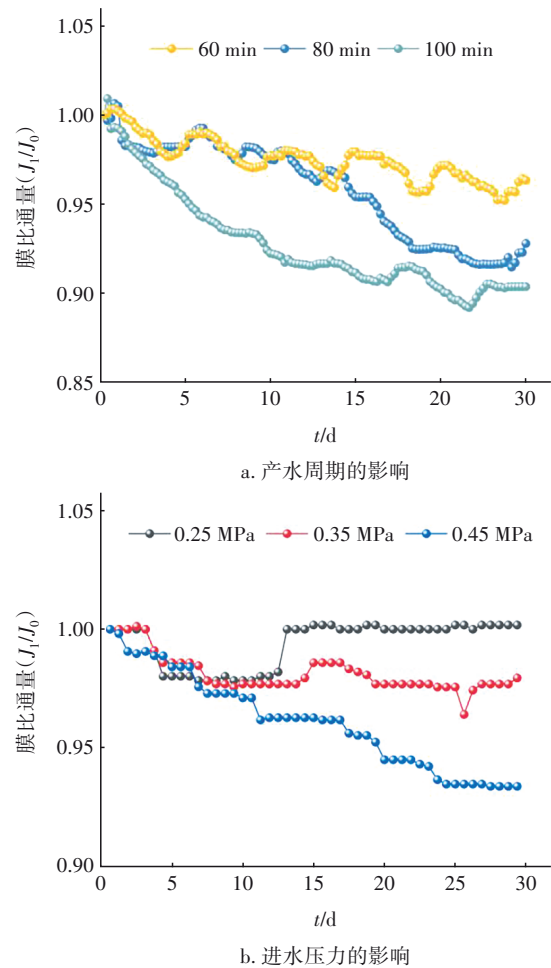


图6 膜比通量随产水周期和进水压力的变化

Fig.6 Variation of membrane specific flux under different water production cycles and feed water pressures

2.3 余氯对膜材料性能的影响

纳滤膜的进水来源于含有余氯的出厂水,纳滤膜长时间浸泡在余氯环境中,可能会破坏其分子链中的醚键和砜基,导致膜的机械强度降低,膜孔径变大^[13]。为此,对比了有无余氯工况下纳滤膜的性能变化。在产水周期为60 min、进水压力为0.35 MPa,以及进水余氯浓度为0、0.6 mg/L条件下连续运行120 d后,分析改性聚醚砜膜材料表面形态、元素分布和官能团的变化,探究余氯对膜材料性能的影响。

2.3.1 SEM-EDS分析

纳滤膜材料的SEM-EDS能谱分析显示,当无余氯残留时,在1 000倍的扫描电镜下纳滤膜表面出现极少量颗粒物堆积现象,而当有余氯残留时纳

滤膜表面存在一定量丝状物质。表1为膜材料表面元素百分比,通过EDS表征分析进水有无余氯对改性聚醚砜纳滤膜表面元素组成的影响,无余氯时膜表面C、O、S质量占比分别为69.61%、11.28%、

17.31%,有余氯时C、O微升至74.29%、13.33%,S降至7.99%但仍留存;Al、F等杂质及Cl残留均处于低水平。可见余氯对膜表面元素有一定影响,但未破坏材料的核心结构。

表1 有无余氯残留时纳滤膜表面元素

Tab.1 Elements on surface of nanofiltration membranes with or without residual chlorine

项目		C	O	N	Al	F	Cl	S	Si	Ca
无余氯	质量百分比	69.61	11.28	1.31	0.18	0.11	0.05	17.31	0.11	0.03
	原子百分比	81.03	9.86	1.31	0.09	0.08	0.02	7.55	0.05	0.01
有余氯	质量百分比	74.29	13.33	3.98	0.07	0.03	0.16	7.99	0.04	0.01
	原子百分比	81.76	11.02	3.76	0.03	0.02	0.06	3.29	0.02	—

2.3.2 XPS分析

为探究余氯对纳滤膜化学结构与性能稳定性的影响,采用XPS对纳滤膜开展全谱扫描与C 1s高分辨能谱分析。从XPS全谱特征来看,无余氯残留时,纳滤膜存在显著的F 1s特征峰,该峰对应膜表面或基体中引入的含氟官能团;而当纳滤膜进水中含有余氯时,其F 1s特征峰完全消失,这一现象表明余氯可通过强氧化作用与膜中含氟基团发生化学反应,引发含氟官能团的分解或脱落。进一步对C 1s高分辨能谱进行分峰分析,纳滤膜的C 1s能谱可解释为C—C(结合能:284.80 eV,峰面积占比:54.58%)、C—Si(结合能:284.48 eV,峰面积占比:15.73%)、C—O(结合能:286.13 eV,峰面积占比:29.69%)等特征峰,这符合改性聚醚砜类纳滤膜典型的醚键分子结构;经过余氯作用后,上述各碳化学态的结合能偏移量小于0.2 eV,分别为284.80、284.28、286.14 eV,且各峰的面积占比(分别为59.30%、22.08%、18.62%)未发生显著性改变,说明纳滤膜的核心碳基结构(以醚键为代表的聚酰胺主链)未受余氯的实质性破坏。余氯的强氧化性主要选择性攻击膜中起辅助功能的含氟官能团,而聚醚砜类膜的酰胺键对余氯具有耐受性,核心结构的稳定性确保了膜基础化学性质的保留。

2.3.3 FTIR分析

傅里叶变换红外光谱分析结果显示,与进水无余氯残留相比,纳滤膜在含余氯水环境中运行120 d后膜表面官能团特征峰存在一定变化,但整体差异相对温和。在3 200~3 600 cm⁻¹的羟基(O—H)伸缩振动区域,无余氯残留的特征吸收峰强度略高于有余氯残留的,表明余氯对膜表面羟基存在一定氧化作用,不过峰形仍保持连续,未出现明显断裂或消

失的现象;在1 500~1 700 cm⁻¹的酰胺键振动区域,氯化后膜的酰胺I带(1 645 cm⁻¹,C=O伸缩振动)与酰胺II带(1 576 cm⁻¹,N—H弯曲振动)峰强虽有轻微衰减,但峰位未发生偏移,说明聚酰胺表层酰胺基团的核心结构未出现大规模破坏;对于1 000~1 200 cm⁻¹的醚键(C—O—C)伸缩振动峰(1 146、1 101 cm⁻¹),氯化后膜的峰强仅微弱降低,未伴随峰形宽化或分裂的显著变化。在含余氯水环境中运行时,余氯对纳滤膜表面官能团存在一定氧化影响,但该影响尚未表现出明显的破坏性,改性聚醚砜膜的化学结构仍保持相对完整。

3 结论

① 通过在佛山市某市政水厂开展中试,系统验证了自主研发的改性聚醚砜中空纤维纳滤膜应用于二次供水场景的技术可行性,其最佳运行工况:产水周期为60 min、进水压力为0.35 MPa。在该条件下,出厂水电导率下降率以及纳滤系统对TDS和浊度的去除率分别为29.8%、24.0%和71.2%。

② 三维荧光光谱和膜比通量分析表明,降低产水周期以及低压运行工况下纳滤膜的抗污染性能最稳定;通过膜材料表征分析,改性聚醚砜膜具有稳定的耐氯性以及抗污染能力。研究成果为该技术的规模化应用提供了关键中试数据支撑,对推动高品质饮用水保障体系的构建具有重要实践意义。

参考文献:

- [1] 鲍任兵,邹磊,刘海燕,等. 高品质供水要求下水质指标及净水新技术应用思考[J]. 给水排水,2025,51(6):14-20.

- BAO R B, ZOU L, LIU H Y, et al. Considerations on water quality improvement and application of new purification technologies under high-quality water supply requirements [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2025, 51(6):14-20 (in Chinese).
- [2] 孙宇,王永磊,沈虎,等. 基于微气泡阻垢的纳滤制备直饮水工艺优化[J]. *中国给水排水*, 2025, 41(3): 43-49.
- SUN Y, WANG Y L, SHEN H, et al. Optimization of nanofiltration for preparation of direct drinking water based on microbubble scale inhibition [J]. *China Water & Wastewater*, 2025, 41(3):43-49 (in Chinese).
- [3] 马振梅,李少宇,李泳嫱,等. 中空纤维纳滤膜与卷式纳滤膜对比分析[J]. *价值工程*, 2022, 41(32): 133-135.
- MA Z M, LI S Y, LI Y Q, et al. Comparative analysis of hollow fiber nanofiltration membranes and spiral wound nanofiltration membranes [J]. *Value Engineering*, 2022, 41(32):133-135(in Chinese).
- [4] JONKERS W A, CORNELISSEN E R, DE VOS W M. Hollow fiber nanofiltration: from lab-scale research to full-scale applications [J]. *Journal of Membrane Science*, 2023, 669: 121234.
- [5] 翟春霖,段冬,张欣然,等. 用于饮用水处理的商品纳滤膜理化特性与过滤性能研究[J]. *给水排水*, 2024, 50(6):57-66.
- ZHAI C L, DUAN D, ZHANG X R, et al. Research on the physicochemical properties and filtration performance of commercial nanofiltration membranes for drinking water treatment [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2024, 50(6):57-66(in Chinese).
- [6] NIR O, NNEBUO C S. Backwashable hollow-fiber membranes enable ultrahigh recovery ratio effluent nanofiltration [J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 372:133354.
- [7] 张子钰,何国峰,王杰,等. 膜阻垢剂及其阻垢机理研究新进展[J]. *华东理工大学学报(自然科学版)*, 2024, 50(1):4-14.
- ZHANG Z Y, HE G F, WANG J, et al. New advances in the research on membrane scale inhibitors and their mechanisms of scale inhibition [J]. *Journal of East China University of Science and Technology*, 2024, 50(1):4-14(in Chinese).
- [8] 石洁,姚家隆,唐娜,等. 纳滤膜工艺在太仓某水厂深度处理工程中的应用[J]. *净水技术*, 2024, 43(1): 50-57.
- SHI J, YAO J L, TANG N, et al. Application of NF membrane technology in advanced treatment project of a WTP in Taicang [J]. *Water Purification Technology*, 2024, 43(1):50-57(in Chinese).
- [9] 徐小虎. 公共供水中纳滤膜污染行为的影响机制研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2023.
- XU X H. Mechanism of Impairment by Nanofiltration Membrane in Public Water Supply Systems [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023 (in Chinese).
- [10] HUANG W, WANG L, ZHOU W, et al. Isopropanol thermal treatment strategy for enhancing commercial nanofiltration membrane performance: high selectivity and superior antifouling capability [J]. *Journal of Membrane Science*, 2025, 735: 124579.
- [11] 林达超. 纳滤膜硫酸钙结垢污染及控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2022.
- LIN D C. Study on Scale Pollution and Control of Calcium Sulfate in Nanofiltration Membranes [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022 (in Chinese).
- [12] 孙丽华,邓斯,梅筱禹,等. 颗粒活性炭-纳滤处理二级出水中有机物膜污染机制研究[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(7):3749-3758.
- SUN L H, DENG S, MEI X Y, et al. Study on the mechanism of organic membrane pollution in secondary effluent from granular activated carbon-nanofiltration treatment [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(7):3749-3758(in Chinese).
- [13] 李梦菲. 氯化对聚酰胺纳滤膜性能的影响及机理[D]. 北京:华北电力大学(北京), 2023.
- LI M F. Effects and Mechanism of Chlorination on the Performance of Polyamide Nanofiltration Membranes [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2023(in Chinese).

作者简介:刘水(1983—),男,辽宁锦州人,硕士,高级工程师,主要研究方向为饮用水安全保障及膜技术应用。

E-mail:liushui@fswater.com

收稿日期:2025-09-17

修回日期:2025-09-28

(编辑:李德强)