

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.03.005

MBR中空纤维膜的臭氧微纳米气泡离线清洗方法

杨恬¹, 王亮^{1,2}, 赵斌^{1,2}, 张朝晖^{1,2}, 郭翔^{1,2}, 郭志信¹

(1. 天津工业大学环境科学与工程学院 先进分离膜材料全国重点实验室, 天津 300387;

2. 沧州市天津工业大学研究院, 河北 沧州 061000)

摘要: 针对传统化学离线清洗过程中MBR中空纤维膜所产生的有害消毒副产物及酸碱废液处置等环境问题,将臭氧微纳米气泡(O_3 -MNBs)技术应用到MBR中空纤维膜的离线清洗,考察了其清洗效果,并对相关参数进行了优化。结果表明,在相同清洗时间下, O_3 -MNBs的清洗效率均高于传统酸碱清洗方法。在臭氧液相浓度为5 mg/L、清洗时间为120 min条件下,清洗效率最高,达到96.6%。此外,针对膜组件填充密度增大所导致的内部清洗不均匀问题,对 O_3 -MNBs喷射器的布局结构进行了优化。经过优化后,对于填充密度为16.7%的膜组件,其清洗效率提升至90.5%以上;当膜丝有效长度为60 cm时,清洗效率仍能保持在88%以上。因此, O_3 -MNBs是一种环境友好的新型离线清洗技术,可用于MBR膜组件的离线清洗。

关键词: 膜生物反应器; 中空纤维膜; 臭氧微纳米气泡; 离线清洗; 膜污染

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)03-0031-07

Off-line Cleaning of MBR Hollow Fiber Membranes Using Ozone Micro-Nano Bubbles

YANG Tian¹, WANG Liang^{1,2}, ZHAO Bin^{1,2}, ZHANG Zhaohui^{1,2}, GUO Xiang^{1,2},
GUO Zhixin¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Separation Membrane Materials, School of Environmental Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Cangzhou Institute of Tiangong University, Cangzhou 061000, China)

Abstract: To address the environmental issues associated with harmful disinfection by-products and the disposal of acid/alkali wastewater generated during traditional off-line chemical cleaning of membrane bioreactor (MBR) hollow fiber membranes, ozone micro-nano bubbles (O_3 -MNBs) technology was applied to the off-line cleaning process of MBR hollow fiber membranes to investigate its cleaning effect and optimize relevant parameters. The results showed that the cleaning efficiency of O_3 -MNBs was consistently higher than that of traditional acid/alkali cleaning methods under the same cleaning duration. Under the conditions of ozone aqueous phase concentration of 5 mg/L and cleaning time of 120 minutes, the cleaning effect was best, reaching 96.6%. Furthermore, to address the issue of uneven internal cleaning caused by increased packing density in membrane modules, the layout structure of the O_3 -MNBs injectors was optimized to improve the cleaning uniformity. After optimization, for modules with a packing density of 16.7%, the cleaning efficiency increased to above 90.5%. Even when the effective fiber length

基金项目: 河北省自然科学基金资助重点项目(B2023110025); 沧州市重点研发“揭榜挂帅”项目(23242101002D)

通信作者: 王亮 E-mail: mashi7822@163.com

was 60 cm, the cleaning efficiency remained above 88%. O_3 -MNBs is an environmentally friendly new cleaning technology that can be used for off-line cleaning of MBR membrane modules.

Keywords: membrane bioreactor (MBR); hollow fiber membrane; ozone micro-nano bubble; off-line cleaning; membrane fouling

膜生物反应器(MBR)的长期稳定运行受多重因素制约,其中膜污染问题尤为突出^[1]。针对这一关键问题,目前主要采取预处理^[2]、膜表面改性及污染膜清洗^[3]等应对策略。在各类方法中,清洗工艺因其能有效去除污染物并恢复膜通量而备受关注^[4]。根据作用机理不同,膜清洗可分为物理清洗和化学清洗两类,其中,前者对可逆污染物具有良好的去除效果,但难以有效清除不可逆污染物;后者则对两类污染物均表现出显著去除效果^[5]。然而,传统化学清洗采用的酸碱药剂不仅产生有害消毒副产物^[6],还面临酸碱废液处置难题。因此,开发兼具高效性与环境友好性的清洗方法至关重要。中空纤维膜材料所具有的耐化学特性为采用臭氧(O_3)等绿色清洗技术提供了基础。作为一种强氧化剂,臭氧可通过直接氧化和 $\cdot OH$ 介导的间接氧化双重途径降解有机污染物,从而有效控制膜污染^[7]。

近年来,微纳米气泡(MNBs)因其高比表面积、持久的液相停留时间、显著的界面带电特性以及促进自由基生成等优点而受到广泛关注^[8-9]。研究表明,MNBs与臭氧氧化的协同作用,在废水处理领域展现出巨大的应用价值^[10]。相较于传统臭氧大气泡(MBs), O_3 -MNBs体系具有更高的气液传质系数,能显著提升臭氧的传质效率与利用率^[11]。这一特性使得 O_3 -MNBs技术既能强化清洗效果,又可最大限度降低化学药剂对环境的不利影响。Rafryanto等^[12]采用 O_3 -MNBs体系对陶瓷膜实施连续4 h清洗后,膜通量恢复率提高了近2倍。

笔者创新性地将 O_3 -MNBs技术引入MBR中空纤维膜的离线清洗领域,系统考察臭氧浓度、清洗时间及操作方式等关键参数对清洗效果的影响;深入揭示填充密度、有效长度等关键结构参数影响清洗效率的内在机制;通过优化 O_3 -MNBs喷射器的空间排布,攻克高填充密度导致的膜组件内部清洗不均技术瓶颈;综合评估清洗液用量对经济性的影响,并开展初步技术经济分析,旨在为该技术的工程化应用提供理论指导与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

原料及药品:中空纤维膜采用市售的MBR及浸没式超滤专用的PVDF中空纤维帘式膜,膜丝外径为2 mm,内径为1.1 mm,平均孔径为30 nm。柠檬酸、氢氧化钠、次氯酸钠购自天津市风船化工试剂科技有限公司。

仪器:浙江陆恒LH-D01F型臭氧液相浓度检测仪、保定雷弗BT100S调速型蠕动泵、广州迈浪MLS-A-1030G型臭氧发生器、上海众净ZJC-NM-200L型微纳米气泡发生器。

1.2 膜组件的制备

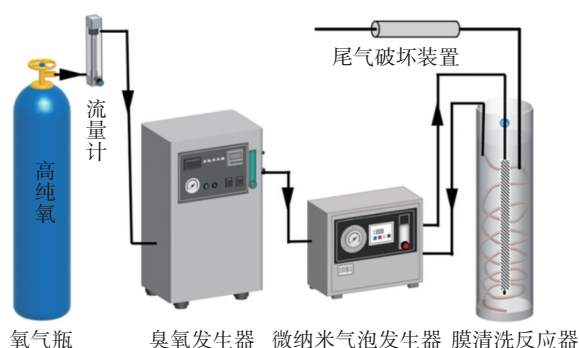
试验采用自制膜组件,将50、100、150根中空纤维膜用环氧树脂封于内径为60 mm的圆管内,制备了填充密度分别为5.6%、11.1%和16.7%的三种膜组件^[13],有效长度分别为20、40和60 cm。其中填充密度(Φ)定义为所有中空纤维的面积与整个膜组件截面面积的比值。

1.3 材料表征

采用马尔文Masterizer-2000激光粒度仪测量清洗液中气泡的粒径分布。采用日立S4800冷场扫描电子显微镜(SEM)对不同填充密度膜组件清洗前后的膜表面污染层形貌进行表征,分析 O_3 -MNBs对同一个膜组件中内外不同膜丝的清洗效果。

1.4 试验装置及方法

试验所用膜组件均预先在实验室规模的MBR系统中运行至一定污染程度(跨膜压差显著升高),取出后作为离线清洗对象。MBR中空纤维膜的 O_3 -MNBs离线清洗装置主要由臭氧发生器、微纳米气泡发生器和膜清洗反应器组成(见图1)。臭氧发生器气源采用纯度为99%的氧气,通过调节发生器功率控制气相臭氧浓度。微纳米气泡发生器以臭氧气体为气源,进气流量为150 mL/min,液体循环流量为2 L/min。膜清洗反应器内置冷却盘管,接入冷却水循环机控制清洗液温度在 $(20\pm 1)^\circ C$ 。反应器内加入定量的去离子水作为清洗液基底。

图1 O₃-MNBs 离线清洗系统示意Fig.1 Schematic diagram of O₃-MNBs off-line cleaning system

传统的酸碱离线化学清洗采用 2 000 mg/L 的 NaClO 和 0.5% 的柠檬酸溶液先后清洗 60 min。而 O₃-MNBs 清洗是在液相臭氧浓度设定值下清洗 120 min。清洗方式采用浸泡同时正向清洗和浸泡清洗进行对比,测试中空纤维膜组件的清洗效率。清洗效率由式(1)计算:

$$\text{清洗效率} = \frac{T_{\text{污染}} - T_{\text{清洗}}}{T_{\text{污染}} - T_{\text{初始}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $T_{\text{污染}}$ 、 $T_{\text{清洗}}$ 、 $T_{\text{初始}}$ 分别为污染膜、清洗后膜和原膜的跨膜压差(TMP)。跨膜压差由压力传感器测得。为确保计算结果具备可比性,污染后膜的 TMP 差异不应过大,均严格控制在 50 kPa 左右。

1.5 臭氧传质效能

在曝气期间和停止臭氧曝气后,监测水中溶解的臭氧浓度随时间的变化。基于一级动力学模型计算臭氧的体积传质系数($K_L a$)和自分解速率常数(K_d)。半连续流试验中臭氧质量平衡由式(2)计算。

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_s - C) - K_d C \quad (2)$$

式中: C 为臭氧曝气期间 t 时刻的溶解臭氧浓度, mg/L; C_s 为饱和臭氧浓度, mg/L。

在水中臭氧会发生自分解反应,臭氧自分解基本符合一级动力学,由式(3)计算:

$$\frac{dC_0}{dt} = -K_d C_0 \quad (3)$$

式中: C_0 为停止臭氧曝气后 t 时刻的溶解臭氧浓度, mg/L。

将式(2)和(3)积分^[14],分别得到式(4)和(5):

$$\ln \frac{C_s}{C_s - C} = (K_L a + K_d) t \quad (4)$$

$$\ln \frac{C_s}{C_0} = -K_d t \quad (5)$$

在水温为 20 °C、气体流量为 0.2 L/min、臭氧气相浓度为 50 mg/L、水体积为 4 L 的条件下进行测试,为确保测定结果仅反映溶解臭氧浓度,取样后先静置数十秒至气泡完全消散后再行检测。对式(4)和(5)进行联立即可得到 $K_L a$ 。

2 结果与讨论

2.1 微纳米气泡特性及臭氧传质效能

2.1.1 微纳米气泡粒径分布

利用微纳米气泡发生器向溶液中引入微纳米气泡,清洗液中气泡的粒径分布见图2。可见,所产生的纳米气泡直径主要集中在 300~400 nm。

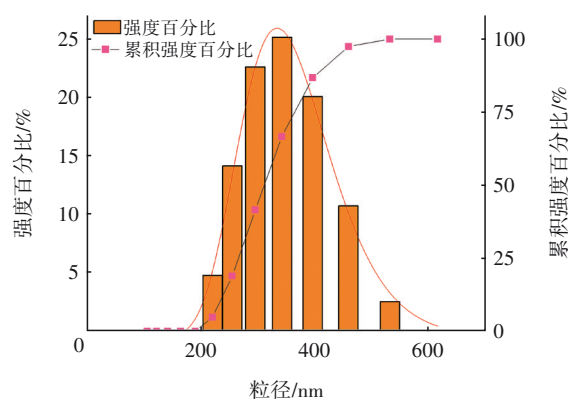


图2 纳米气泡直径分布

Fig.2 Size distribution of micro-nano bubbles

2.1.2 曝气方式对臭氧传质效能的影响

开始曝气后, O₃-MNBs 在 24 min 时达到臭氧溶解的饱和浓度, 臭氧大气泡在 39 min 时才达到, 两者分别为 6.55、5.65 mg/L。经计算, O₃-MNBs 的臭氧传质系数为 0.147 2 min⁻¹, 也高于臭氧大气泡的 0.086 1 min⁻¹。由此可见, 微纳米气泡曝气方式可以显著增强臭氧传质效能。停止曝气后, 两种曝气方式的液相臭氧浓度均逐渐降低, 其中大气泡在停止曝气 48 min 后下降至 1.75 mg/L, 微纳米气泡曝气方式在 60 min 后下降至 0.48 mg/L, 而且两者均符合一级动力学: $y = -0.037 6x + 0.182 3 (R^2 = 0.976 2)$ 和 $y = -0.023 7x + 0.063 3 (R^2 = 0.986 4)$ 。

2.2 O₃-MNBs 离线清洗效果的影响因素

2.2.1 清洗方式对清洗效率的影响

不同清洗方式的清洗效率见图3。120 min 的常规酸碱浸泡的清洗效率为 85.6%, 较浸泡同时正向清洗的清洗效率仅下降 0.8%; 采用 O₃-MNBs (5 mg/L) 浸泡清洗时清洗效率可以达到 96.6%, 比 O₃-MNBs (7 mg/L) 浸泡的清洗方式高 0.9%。综合考虑

操作性和经济成本等因素,选定 O_3 -MNBs(5 mg/L)浸泡清洗作为最优清洗方式,它在保证96%以上清洗效率的同时,可以节省正向清洗所需的设备投入。

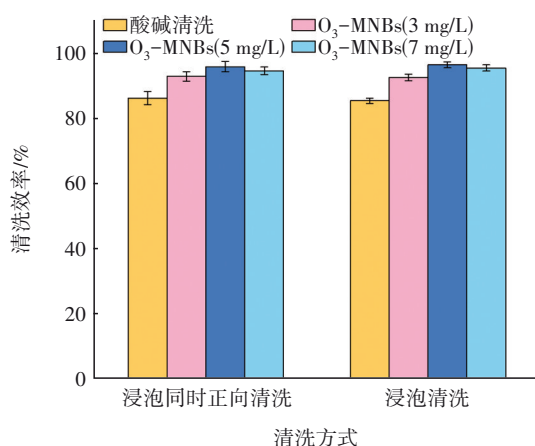


图3 不同清洗方式的清洗效率

Fig.3 Cleaning efficiency of different cleaning methods

2.2.2 填充密度对清洗效率的影响

对填充密度分别为5.6%、11.1%、16.7%,有效长度为20 cm的膜组件,在 O_3 -MNBs(5 mg/L)浸泡120 min的条件下进行清洗,测试对中空纤维膜组件的清洗效率,结果见图4。

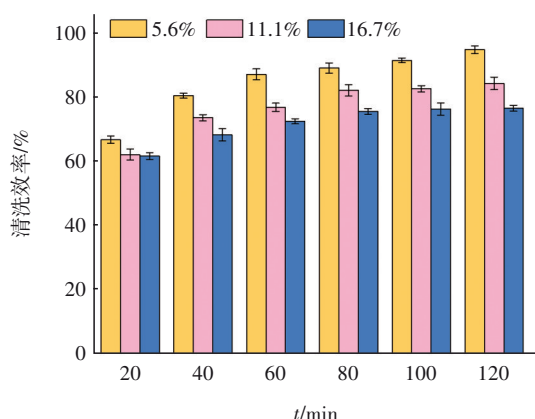


图4 填充密度对清洗效率的影响

Fig.4 Effect of packing density on cleaning efficiency

由图4可见,不同填充密度的膜组件在离线清洗80 min后清洗效率开始趋于平稳,达到稳定状态。在经过120 min的 O_3 -MNBs清洗后,随填充密度的增加,清洗效率降低。当填充密度为5.6%时清洗效率最高,达到94.8%;而当填充密度为11.1%和16.7%时清洗效率分别降至84.4%和76.7%。

采用SEM对清洗前后的MBR膜表面污染层形貌进行了分析,结果如图5所示。由于污染较均匀,污染膜内部和外部膜丝的表面形貌无显著差异。

因此,其污染状态均以图5(b)作为代表。与原始的未污染膜相比,污染膜呈现显著的污染特征,膜表面有很多大颗粒污染物,而且膜孔被污染物层完全遮蔽,这是导致跨膜压差上升的主要原因。经过120 min的 O_3 -MNBs离线清洗后,三种不同填充密度的膜组件外部膜丝表面的大颗粒污染物被清洗掉,表面均较为干净,膜污染得到改善。但是内部膜丝表面还存在污染物,并且填充密度越大,污染特征越明显。因此,离线清洗效率下降的原因是填充密度增大导致膜组件内部清洗不彻底。

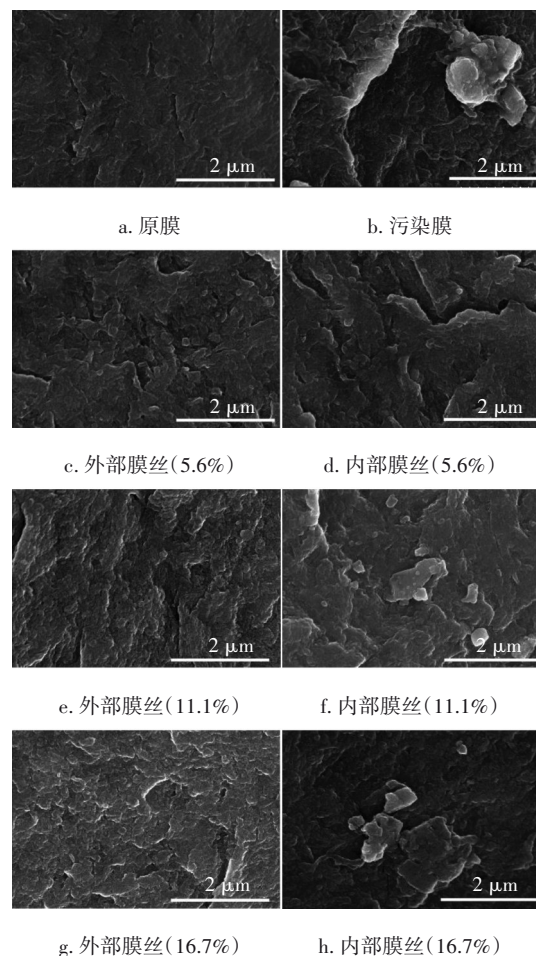


图5 O_3 -MNBs(5 mg/L)清洗120 min条件下干燥膜丝表面SEM照片

Fig.5 SEM images of the surface of dried membrane filaments cleaned with O_3 -MNBs (5 mg/L) for 120 minutes

2.2.3 喷射器布局对清洗效率的影响

为解决填充密度增大导致的内部清洗不彻底问题,优化了 O_3 -MNBs喷射器装置:将底部喷射改为底部与侧面协同喷射。优化后喷射器装置可以深入到膜组件内部,实现内外同步清洗。如图6所

示,喷射器优化后不同填充密度膜组件的清洗效率均得到显著提升,120 min 时的清洗效率分别为 96.1%(5.6%)、94.8%(11.1%)和 90.5%(16.7%),与优化前相比,分别提升了 1.3%、10.4%、13.8%。喷射器优化前,膜组件的高填充密度使膜丝间距缩小,导致气液接触面积减少,气泡流动路径受阻,部分区域形成“死区”,有效接触面积下降,从而显著削弱了微纳米气泡的界面传质效率。

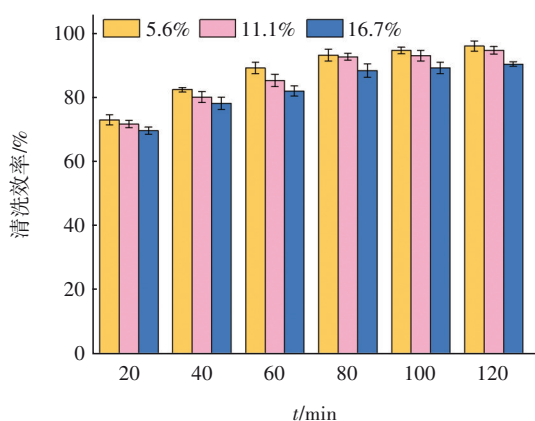


图6 喷射器布局对清洗效率的影响

Fig.6 Impact of injector layout on cleaning efficiency

2.2.4 膜丝有效长度对清洗效率的影响

为了使溶液中的 O_3 -MNBs 浓度在不同高度上保持均匀,在竖直方向上均匀设置喷射器,并保留原有的反应器底部位置的喷射器,从而提高清洗效率,优化后的喷射器装置如图 7 所示。

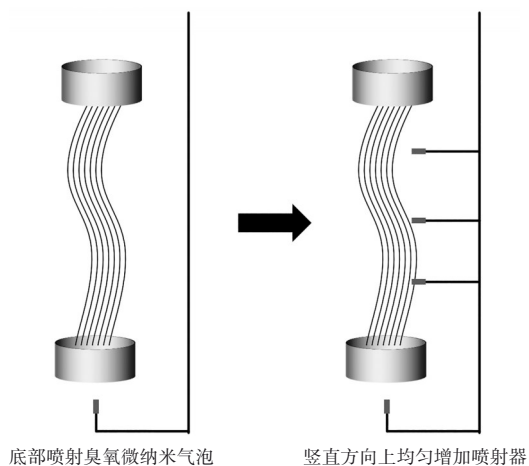


图7 膜组件长度增加后喷射器优化示意

Fig.7 Schematic diagram of injector optimization for elongated membrane modules

基于优化后的喷射器布局,进一步考察膜丝有效长度(20、40、60 cm)对膜组件清洗效率的影响。

在填充密度为 5.6%、11.1%、16.7% 的条件下,当膜丝有效长度为 20 cm 时,清洗效率分别为 96.2%、94.8%、90.4%;当膜丝有效长度为 40 cm 时,清洗效率分别为 95.2%、94.2%、90.1%;当膜丝有效长度为 60 cm 时,清洗效率分别为 93.6%、92.7%、88.1%。可见,当膜丝有效长度增加后,不同填充密度的膜组件清洗效率均有所下降。但填充密度为 16.7% 膜组件(膜丝有效长度为 60 cm)的清洗效率比清洗效率最高的膜组件(5.6% 和 20 cm)也仅仅下降了 8.1%。在膜组件长度增加 3 倍后,清洗效率仍能保持在 88% 以上。这为 O_3 -MNBs 用于中大型 MBR 中空纤维膜组件的离线清洗提供了重要理论支撑。

2.2.5 清洗液体积对清洗效率的影响

清洗液体积也是影响清洗效率的一个关键因素。体积过大会使水中臭氧达到饱和浓度的时间增加,从而提高运行能耗;而体积过小又可能导致膜组件与清洗液接触不充分,从而影响清洗效率。在优化喷射器布局后,进一步考察清洗液体积(6、8 和 10 L)对膜组件清洗效率的影响。结果表明,增加清洗液体积并不会提升清洗效率,清洗 120 min 后,在填充密度为 5.6%、11.1%、16.7% 的条件下离线清洗效率均维持相对稳定,分别约为 95.6%、94.6% 和 90.1%。因此,在保证清洗效率的前提下减少清洗液体积可以降低成本,即膜组件与清洗液充分接触时即可。该研究证实精准控制液相体积可实现经济性与高效性的协同优化。

2.3 O_3 -MNBs 对中空纤维膜物化特性的影响

2.3.1 对膜表面傅里叶红外光谱(FTIR)的影响

FTIR 光谱显示,经过浓度为 5 mg/L 的 O_3 -MNBs 持续清洗 120 min 后,位于 3360 cm^{-1} 处的 O—H 伸缩振动峰几乎消失,说明多糖类污染物已被清洗干净。同时,在 1651 cm^{-1} 附近与蛋白质酰胺相关的吸收峰强度明显下降,使得原本位于 1663 cm^{-1} 处归属于亲水性添加剂的酰胺羰基振动峰得以显现。这一结果表明, O_3 -MNBs 处理不仅能够高效清除膜上蛋白质类污染物,还不会损伤膜中原有的亲水性添加剂层^[15],呈现出良好的清洗选择性。

2.3.2 对膜表面原子力显微镜形貌的影响

膜表面原子力显微镜形貌见图 8。原膜表面呈现出相对有序的凹凸纹理形貌,平均粗糙度为 17.2 nm。在溶解臭氧浓度为 5 mg/L 的 O_3 -MNBs 中清洗

120 min后,平均粗糙度为19.6 nm。此时膜表面形貌与原始状态较为接近,污染物已被基本去除。

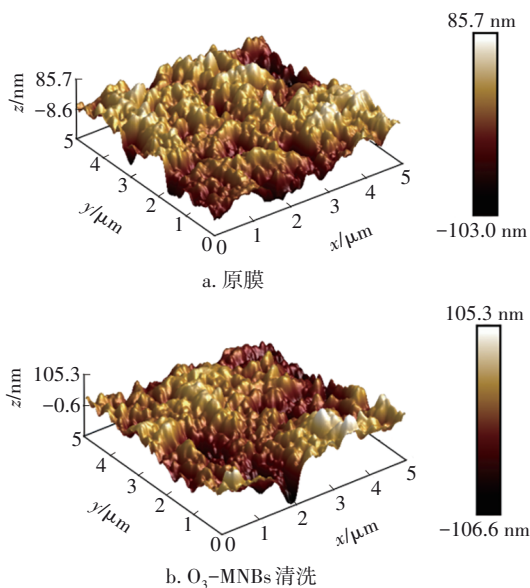


图8 膜表面AFM照片

Fig.8 AFM images of membrane surface

2.3.3 对膜表面亲疏水性的影响

初始PVDF膜表面的水接触角为71.6°,具有亲水特性;经5 mg/L的O₃-MNBs溶液浸泡120 min后,膜表面接触角仅略微增大至72.5°,亲水性能未发生显著变化,整体仍维持良好的亲水状态。

2.3.4 对膜机械强度的影响

通过对原始膜与清洗后膜的机械性能进行对比分析发现,原始膜的拉伸强度为48.4 MPa,而经O₃-MNBs浸泡处理120 min后,其拉伸强度保持在47.7 MPa,变化幅度极小,仅降低了0.7 MPa,表明该清洗过程对膜材料的机械性能影响甚微。同时,断裂伸长率与拉伸强度的变化趋势表现出高度一致性。原始膜的断裂伸长率为70.8%,经过120 min浸泡处理后,该值略降至68.2%,较初始值仅降低约2.6%,表明材料延展性未发生显著变化。由此可见,O₃-MNBs清洗对膜的机械强度影响较小。

2.4 经济分析

能耗是实际工程中决定处理成本和处理效率的关键因素。为评估微纳米气泡曝气技术的应用潜力,根据式(6)计算了臭氧微纳米气泡发生过程的能耗:

$$E = \frac{(P_{O_3} + P_{MNBs} + P_{O_2}) \cdot t}{S} \quad (6)$$

式中: E 为能耗,kW·h/m²; S 为膜面积,m²; t 为反应时间,h; P_{O_3} 、 P_{MNBs} 、 P_{O_2} 分别为臭氧发生器功率、微纳米气泡发生器功率、折算氧气功率,kW。其中, P_{O_3} =臭氧投加量(kg)×7.5,7.5为以臭氧投加量换算臭氧发生器功率的经验系数(kW/kg); P_{MNBs} =臭氧投加量(kg)×7.1,7.1为以臭氧投加量换算微纳米气泡发生器功率的经验系数(kW/kg);根据产生1 kg臭氧气体所需要氧气的费用,以用电成本0.8元/(kW·h)折算为功率值; P_{O_2} =臭氧投加量(kg)×0.84,0.84为核算后经验系数(kW/kg)。最终计算得到的能耗为0.22元/m²。传统离线清洗方法通常使用酸碱清洗,本试验采用的清洗液总体积为5 L,有效成分分别为2 000 mg/L的NaClO与0.5%的柠檬酸溶液。其中,NaClO有效氯含量为15%,总投加量为66.7 g,以单价为690元/t计,对应成本为0.046元;柠檬酸的总投加量为25 g,单价为2 800元/t,对应成本为0.07元。综合计算,清洗剂费用折合单位膜面积成本为0.62元/m²。可见,基于臭氧微纳米气泡技术的膜组件清洗方法具有显著的经济优势。

3 结论

① 通过参数优化确定了最佳清洗条件:臭氧浓度为5 mg/L,采用O₃-MNBs静态浸泡清洗方式。

② 经喷射器结构优化后,不同填充密度的膜组件在120 min清洗时间内均能获得90%以上的污染物去除率。

③ 当膜组件有效长度增至初始值的3倍时,系统仍可维持88%以上的稳定清洗效率。

④ 确保膜组件与清洗液的充分接触是实现该技术高效性与经济性的关键因素。

⑤ 在经过O₃-MNBs处理后中空纤维膜的物化特性得到了良好保持,未引起显著变化。

⑥ 与传统离线清洗方法相比,O₃-MNBs技术具有较低的运行成本,展现出良好的经济性和应用潜力。未来研究可考察长期清洗循环对膜材料使用寿命的影响,进一步降低能耗,并在实际工程规模下进行技术验证,以推动该技术的产业化应用。

参考文献:

- [1] WOO T, KIM S, JEONG C, et al. Membrane-informed multi-mechanistic predictive maintenance for MBR plants: early determination of membrane cleaning with biologically driven, physically deposited, and

- chemically induced fouling model [J]. Desalination, 2025, 594: 118263.
- [2] RACHMAN R A, WIDIASTUTI N, PURNOMO A S, et al. Permeate flux recovery and removal foulant performances of hollow fiber polyvinylidene fluoride membrane bioreactor with peroxodisulfate activated iron(II) sulfate as a chemical cleaning agent[J]. South African Journal of Chemical Engineering, 2024, 48(1): 436–450.
- [3] LI Z H, WANG J L, CHENG L H, et al. Alleviation of RO membrane fouling in wastewater reclamation plants using an enhanced acid-base chemical cleaning method [J]. Water Research, 2024, 261: 122039.
- [4] LEBRON Y A R, MOREIRA V R, COSTA P R, et al. Chemical cleaning procedures on permeability recovery and lifespan of MBR membranes treating petroleum refinery wastewater: from bench- to pilot-scale applications [J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 44: 102411.
- [5] MO J C, LIN T, LIU W, et al. Cleaning efficiency and mechanism of ozone micro-nano-bubbles on ceramic membrane fouling [J]. Separation and Purification Technology, 2024, 331: 125698.
- [6] WANG Z P, DING J Q, XIE P C, et al. Formation of halogenated by-products during chemical cleaning of humic acid-fouled UF membrane by sodium hypochlorite solution [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 332: 76–84.
- [7] 王晓,何海洋,朱洪涛,等. 臭氧对PVDF膜抗污和组合工艺净水效能的提升作用[J]. 中国给水排水, 2025, 41(1): 31–38.
- WANG X, HE H Y, ZHU H T, et al. Enhancement of ozone on anti-fouling apability of PVDF membrane and water purification efficiency of combined process [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(1): 31–38 (in Chinese).
- [8] 余哲帆,张可佳,毛如寅,等. 微纳米气泡协同PMS降解 2-MIB 的机制及影响因素[J]. 中国给水排水, 2025, 41(15): 31–38.
- YU Z F, ZHANG K J, MAO R Y, et al. Mechanism and influencing factors of 2-MIB degradation by micro-nano bubbles combined with PMS [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(15): 31–38 (in Chinese).
- [9] MALAHLELA H K, BELAY Z A, MPHAAHLELE R R, et al. Micro-nano bubble water technology: sustainable solution for the postharvest quality and safety management of fresh fruits and vegetables—a review[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2024, 94: 103665.
- [10] XIA Z R, HU L M. Treatment of organics contaminated wastewater by ozone micro-nano-bubbles [J]. Water, 2019, 11(1): 55.
- [11] JOHN A, BROOKES A, CARRA I, et al. Microbubbles and their application to ozonation in water treatment: a critical review exploring their benefit and future application [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2020(4): 1–43.
- [12] RAFRYANTO A F, RAMADINA Z D, SYARIFA N, et al. High recovery of ceramic membrane cleaning remediation by ozone nanobubble technology [J]. ACS Omega, 2024, 9(10): 11484–11493.
- [13] 任丹萍. 填充密度对中空纤维膜接触器精馏分离性能的影响[D]. 杭州:浙江工业大学, 2009.
- REN D P. Effect of Packing Density on Distillation Separation Performance in Hollow Fiber Membrane Contactors [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2009(in Chinese).
- [14] 董杰. 基于微纳米气泡技术的臭氧氧化有机废水过程强化研究 [D]. 天津:河北工业大学, 2022.
- DONG J. Process Intensification of Ozone Oxidation for Organic Wastewater Treatment Based on Micro-Nano Bubble Technology [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2022(in Chinese).
- [15] REN L, YU S, YANG H, et al. Chemical cleaning reagent of sodium hypochlorite eroding polyvinylidene fluoride ultrafiltration membranes: aging pathway, performance decay and molecular mechanism [J]. Journal of Membrane Science, 2021, 625: 119141.
-
- 作者简介:**杨恬(1998–),女,天津人,硕士,主要研究方向为臭氧微纳米气泡膜清洗技术。
E-mail:3443387420@qq.com
收稿日期:2025-08-19
修回日期:2025-09-02

(编辑:李德强)