

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.23.004

PVDF膜修复再生技术工程应用中试

张禹城¹, 王欣¹, 陈毅涵¹, 林丹^{2,3}, 张新颖¹, 戴若彬²,
张莉敏³, 陈美香³, 吴秀琴³, 王志伟²

(1. 福州大学 环境与安全工程学院, 福建 福州 350108; 2. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 3. 福建海峡环保集团股份有限公司, 福建 福州 350014)

摘要: 在膜生物反应器(MBR)工艺实际运行过程中,污水中含有的硬质颗粒物等会对膜表面或膜内部造成物理性损伤,并且伴随聚偏氟乙烯(PVDF)膜使用时间的增长,周期性的化学清洗也会导致膜材料老化加重,直至出现产水性能不断下降、维护成本逐渐上升的现象,膜组件不可避免地达到寿命终点。基于实验室小试,采用二甲基亚砜(DMSO)转换膜结构,并且使用单宁酸-铁涂覆的方式修复工程受损膜,使其恢复生产能力,并进行工程应用中试。经过135 d的连续运行发现,修复再生膜的产水性能持续显著优于对照组,出水水质稳定,经修复后膜组件的物理化学性能均得到较为全面的提升。

关键词: 聚偏氟乙烯(PVDF)膜; 膜生物反应器(MBR); 修复再生; 单宁酸

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)23-0023-07

Pilot Experiment on Application of PVDF Membrane Repair and Regeneration Technology in Engineering

ZHANG Yu-cheng¹, WANG Xin¹, CHEN Yi-han¹, LIN Dan^{2,3}, ZHANG Xin-ying¹,
DAI Ruo-bin², ZHANG Li-min³, CHEN Mei-xiang³, WU Xiu-qin³, WANG Zhi-wei²

(1. College of Environmental & Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092,
China; 3. Fujian Haixia Environmental Protection Group Co. Ltd., Fuzhou 350014, China)

Abstract: In the actual operation of membrane bioreactor (MBR), the hard particles contained in sewage will cause physical damage to the membrane surface or inside the membrane. With the increase of the service time of polyvinylidene fluoride (PVDF) membrane, periodic chemical cleaning will also lead to the aging of the membrane materials, and the membrane module will inevitably reach the end of its life when the phenomenon such as continuous decline of water production performance and gradual increase of maintenance cost is observed. Based on the laboratory experiment, the membrane structure was transformed by dimethyl sulfoxide (DMSO), the damaged membrane was repaired by tannic acid-iron coating to restore its production capacity, and the method was eventually applied in a pilot experiment. After 135 days of continuous operation, the water production performance of the repaired and regenerated membrane was significantly better than that of the control group, the effluent quality was stable, and the

基金项目: 国家自然科学基金资助青年项目(52000035); 福建省自然科学基金资助面上项目(2023J01420)

通信作者: 张新颖 E-mail: xyzhang@fzu.edu.cn; 戴若彬 E-mail: dairuobin@tongji.edu.cn

physical and chemical properties of the repaired membrane modules were improved comprehensively.

Key words: polyvinylidene fluoride (PVDF) membrane; membrane bioreactor (MBR); repair and regeneration; tannic acid

膜生物反应器(MBR)结合生物处理和膜分离技术于一体,具有工艺流程简单、占地面积小、自动化程度高、剩余污泥量少等优点^[1]。城市生活污水处理厂中最常用的膜组件为低压膜组件,其中聚偏氟乙烯(PVDF)超滤膜由于机械性能较强,具有良好的热稳定性和可塑性等优势得到了广泛应用^[2]。但在实际工程中,膜组件的老化是由物理性损伤和化学性损伤共同导致的,污水中的硬质颗粒物对膜表面的物理性损伤会导致膜组件持续老化并逐渐缩短离线清洗周期,同时频繁地使用化学药剂进行清洗会导致膜聚合物基质膨胀直至变形^[3],增加维护成本。当其过水通量呈下降趋势以及跨膜压力在极短时间内上升到较高数值,直至难以恢复的水平时,膜组件达到寿命终点,必须更换新膜以维持生产,这必然会产生大量的废弃膜组件,而目前几乎所有的废弃膜都会进行卫生填埋或焚烧处理^[4],这造成了极大的资源浪费,同时不可降解的膜材料对环境造成的影响也难以估量。基于减少资源浪费以及最终减少与废弃膜相关碳足迹的目的,近年来有一些针对老化膜材料修复的尝试^[5-7],但多集中于膜本身的改性修复,且仍处于实验室阶段。实际工程中运行条件更为复杂多变,考虑到工程成本以及操作可行性的问题,需要通过中试来验证实验室膜修复技术在工程上的适用性。

笔者针对即将报废的寿命终点膜,将实验室小试优选出来的最佳膜修复再生方式应用于实际工程,连续观测修复再生中空纤维PVDF膜在工程运行中的生产能力和污染物截留性能,并对修复前后寿命终点膜的物理化学性质进行对比研究,为膜修复再生技术在MBR工程上的应用提供技术参考。

1 材料和方法

1.1 试验场地

本次修复再生试验场地为福州市洋里污水处理厂四期生产线,工艺为A²/O+MBR,处理量为20×10⁴ m³/d。试验膜架位于MBR工程的1号廊道,该廊道池容为100 m³,每个廊道有8个膜架。考虑到相邻膜架的工况相近,因此选择1号廊道中5号膜架

作为修复再生膜架,以未修复再生的4号膜架作为对照,开展中试(试验前两个膜架的生产状态相似,后续将修复再生膜架和对照膜架分别称为5#和4#)。

1.2 修复药剂及其修复原理

本次修复再生试验共涉及3种药剂,其中试剂A主要成分为90%二甲基亚砜(DMSO),同时采用5%乙醇和5%甲醇作为添加剂,试剂B为0.01%氯化铁,试剂C为0.02%单宁酸。DMSO是一种含硫的有机溶剂,具有一个亲水的亚硫酰基和两个疏水的甲基,可高效溶出疏水化合物并破坏氢键结构^[8],能够有效溶出膜孔中的不可恢复污染物;单宁酸中的3个甲苯丙基可以分别与Fe³⁺离子反应形成稳定的八面体配合物,使每个单宁酸分子与几个Fe³⁺中心反应形成交联膜,同时单宁酸具有表面结合亲和力,可沉积在膜表面^[9],从而在膜表面形成单宁酸-铁涂层,进而覆盖膜表面原有的破损点。

1.3 修复再生试验

中试涉及的膜架已持续运行6~8年,单个膜架体积为7.54 m³,含有80个膜片,膜片排布较为密集,直接采用整个膜架修复再生可能存在药剂扩散不均匀的问题,导致在膜架内侧的膜片再生效果不佳。因此,本研究考虑以单一膜片为反应基本单元,实施修复再生试验。

图1为膜组件中试修复流程。试验分两组进行,每组反应槽可同时修复4个膜片,其中药剂A反应槽设置循环加热装置(30℃以上)且为不锈钢材料(DMSO对塑料材料有一定的腐蚀作用且对温度有一定要求),药剂B和药剂C所使用的反应槽均为塑料材质。修复试验开始前,需要对试验膜架所在廊道进行彻底的离线清洗,并提前将需要修复的膜片拆卸放置于清水中浸泡保湿,修复时从水中取出膜片稍加沥干后分为两组浸入药剂A中,更换修复药剂时需要在托盘上收集滴落的残余药剂,接下来在药剂B和药剂C中浸入一定时间后完成修复流程,并暂时放入装有清水的容器中保持湿润,待试验完成后依次安装到膜架上,检查气密性后接入改造管路进行独立监测。考虑到膜片中含有的水分

对药剂有稀释作用,故药剂仅重复使用两次,其中药剂A的浸泡时间分别为6和10 min,药剂B和药剂C两次的浸泡时间均为5 min。

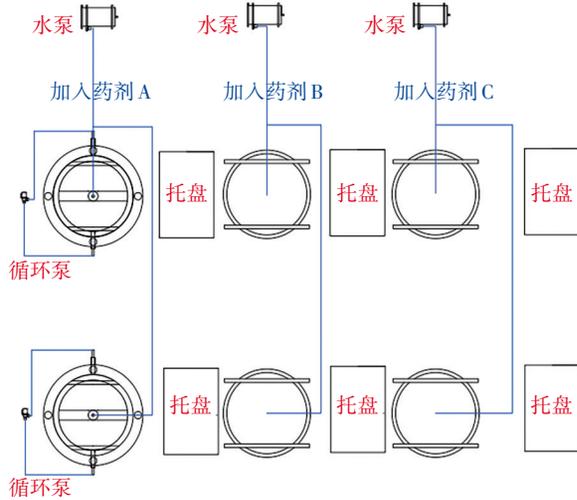


图1 膜组件中试修复流程

Fig.1 Membrane component pilot experiment repair process

1.4 修复膜组件运行试验

本次中试产水流量设置为 $27.5 \text{ m}^3/\text{h}$;反洗流量为 $30.5 \text{ m}^3/\text{h}$ (工程上以产水流量的 $1.1\sim 1.3$ 倍为准)。生产周期为9 min,其中产水为8 min,停产水为1 min。维护性反洗24 h进行一次,反洗可分为两个阶段,第一阶段为:加药3 min+静置3 min+吹扫1 min,重复6次;第二阶段为:加药1 min+静置2 min+吹扫3 min,重复1次,其中药剂为0.03%次氯酸钠,为防止药剂残留腐蚀管道和影响水质,单个膜架反洗结束后会进行时长为3 min的管道反冲洗。膜池启动液位设置为4.20 m,低液位为4.15 m,系统可实时反馈膜池液位。以上参数均可手动调整并由系统自动执行。

试验膜架的运行数据可从污水厂中控室调取,每小时获取一次数据,并连续24 h实时监测。

1.5 常规水质监测分析方法

待试验膜架稳定运行后,监测膜架进、出水水质,每3 d监测1次。其中COD采用重铬酸钾法测定,TP采用钼酸铵分光光度法测定,浊度采用浊度仪测定。

1.6 其他水质监测分析方法

膜架进出水中多糖(PS)采用硫酸-苯酚法^[10]测定,以葡萄糖为标准物质;蛋白质(PN)采用Folin-

酚法^[11]测定,以牛血清白蛋白为标准物质;UV₂₅₄采用紫外分光光度法测定。

1.7 膜性能分析测试方法

采用扫描电镜(SEM)对修复前后的膜丝以及新膜进行形貌分析,同时使用能谱分析仪(EDS)研究膜表面特征元素;采用电子万能试验机对膜丝进行力学测试,测定最大断裂拉伸强度和伸长率,从而进行机械性能分析;膜表面亲疏水性分析以《外压中空纤维超滤膜表面亲水性的测试 接触角法》(HY/T 266—2018)为参考,采用接触角/表面张力测量仪测定膜丝的亲疏水性能;膜丝孔径分布分析以《中空纤维微孔滤膜测试方法》(HY/T 051—1999)为参考,使用泡点法以及孔径相关公式^[12]获取膜丝样品孔径分布曲线以及关键参数。

2 结果与分析

2.1 生产环节

2.1.1 产水流量和透水率

本研究设定产水流量为 $27.5 \text{ m}^3/\text{h}$,以恒流模式运行。图2为试验膜架产水流量变化。

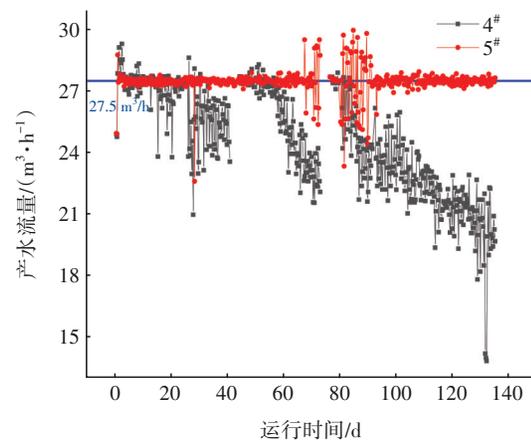


图2 试验膜架产水流量变化

Fig.2 Change in water production flow rate of test membrane frame

由图2可知,修复膜架5#的平均产水流量为 $(27.48\pm 0.02) \text{ m}^3/\text{h}$,4#的平均产水流量则为 $(25.01\pm 2.0) \text{ m}^3/\text{h}$ 。5#共运行了两个离线清洗周期,持续时间分别为73和59 d,产水流量稳定,在第一周期终点以及第二周期起始时分别出现了3、13 d左右的流量波动,经过现场排查已排除了管道连接和漏气的问题,这可能是受到反洗药剂或者当时工程条件的影响。膜架4#则运行了3个周期,持续时间分别为41、29和59 d,产水流量稳定时间极短,分别为

26、13 和 7 d, 离线清洗后不久即无法满足生产要求, 流量远远偏离设定值, 表明寿命终点膜的产水性能随着污染-清洗周期的进行而不断下降, 产水稳定时间也随之下降。对比可知, 修复再生膜的产水周期较长且流量稳定, 但在长期运行下仍会出现流量波动的现象。

透水率是指膜系统在单位跨膜压差(TMP)、时间、膜面积上的产水量, 也称比通量, 其数值反映了膜的受污染程度。图 3 为试验膜架透水率变化。4# 第一周期的透水率始终低于 0.4 L/(m²·h·kPa), 即使离线清洗后仍在 1 d 内跌到 0.4 L/(m²·h·kPa) 以下, 不可恢复的水渗透通量损失表明污染物与膜基质之间具有很强的相互作用, 传统的化学清洗难以使污垢与膜材料的化学键断裂, 从而体现为透水率的快速损失。在第一离线清洗周期同期生产条件下, 5# 的透水率始终优于 4#, 表现出持续稳定的下降趋势; 第二周期的透水率波动可能是由于清洗配方与 5# 本身相冲突或者工程条件的影响。

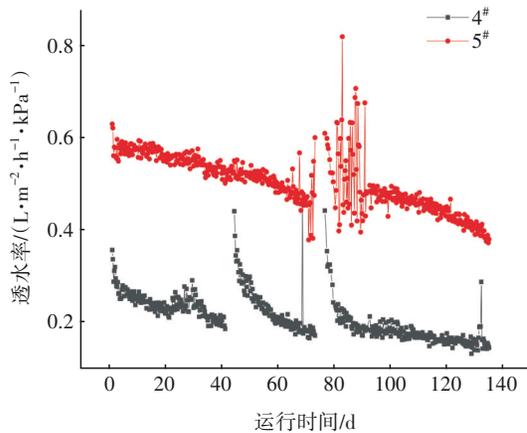


图 3 试验膜架透水率变化

Fig.3 Change in permeability of test membrane frame

2.1.2 跨膜压差

图 4 为试验膜架 TMP 变化。可知, 4# 的 TMP 在离线清洗后的极短时间内迅速飙升, 第一周期仅用 7 d 即从初始的 43.65 kPa 增长到 70 kPa, 并且出现不稳定波动; 第二周期也在相同时间达到 70 kPa; 第三周期仅在 4 d 内即超过 70 kPa 并长期保持在 80 kPa 以上。根据渗流理论, 沉积层中污染物的不断累积导致污垢层孔隙率减小, 当孔隙率低于临界值时, TMP 迅速增加, 这表明寿命终点膜中存储着大量不可恢复污染物且无法被化学药剂所去除, 离线清洗后污垢层孔洞仍会在较短时间内被填满且时

间随着频繁的离线清洗而缩短, 从而直接影响膜的使用寿命, 这也与次氯酸钠对 PVDF 膜的负面影响有关。5# 的 TMP 在第一周期时缓慢增长, 持续显著优于对照组, 这表明 DMSO 能够有效转换膜结构, 扩宽膜孔径的同时使不可恢复污染物被冲出, 但缺点是对污垢的清除较为彻底, 使得每日维护性反洗后会出现短时间的浊度超标; 同时在离线清洗后持续了 13 d 的波动, 且第二周期 TMP 的增速整体高于第一周期, 这表明修复再生膜的污染累积速率逐渐增大且污染-清洗周期缩短。

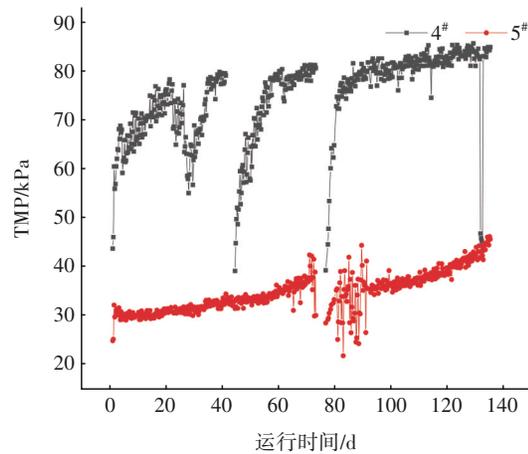


图 4 试验膜架 TMP 变化

Fig.4 Change in TMP of test membrane frame

2.2 修复再生膜的污染物截留能力

中试所在的 MBR 池位于 A²/O 反应池之后, 其处理对象是已经过 A²/O 生化处理的污水, 故膜架进水水质指标浓度较低, 其中 COD、TP、糖类、蛋白质分别为 (26.80±3.15)、(0.53±0.09)、(5.64±0.75)、(6.97±0.90) mg/L, UV₂₅₄ 为 (0.33±0.07) cm⁻¹, 浊度为 (3.83±0.81) NTU。表 1 为试验膜架的污染物截留能力。可知在中试期间, 4# 和 5# 对常规污染物的截留率较为接近, 出水水质均符合《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准, 表明修复再生膜具有良好且稳定的污染物截留能力。

表 1 试验膜架的污染物截留能力

Tab.1 Pollutants interception performance of test membrane frame %

项目	4#截留率	5#截留率	项目	4#截留率	5#截留率
COD	49.02±9.70	49.97±10.83	蛋白质	57.99±7.00	57.02±7.23
TP	57.53±9.27	56.95±7.29	UV ₂₅₄	60.62±8.40	56.17±9.58
糖类	61.3±9.05	61.1±9.18	浊度	90.13±2.16	89.89±2.12

2.3 修复前后寿命终点膜性能变化

2.3.1 SEM和EDS

图5为新膜与修复前后膜的SEM及EDS分析结果。整体来看,寿命终点膜膜丝外表面均存在不同程度的膜材料脱落,在膜表面形成较多絮状纤维物质,且有部分物理性贯穿孔洞以及划痕,下膜架膜丝则有更多的片状纤维堆积区域,表面更加蓬松,出现内部中空的现象,老化程度更为显著。经修复再生后,上膜架膜丝的外表面较为平整且纤维絮状物基本消失,膜面孔洞得以覆盖,修复再生后膜丝表面C、O、F、Fe等元素占比大幅提高,表明经过试剂A结构转换后膜材料本体得到充分暴露,同时单宁酸-铁试剂在膜表面形成涂层,覆盖原有的贯穿

孔洞和划痕,从而达到延寿目的,但其表面的密实平整程度仍未达到新膜水平。下膜架膜丝经修复再生后,表面片状纤维堆积区域基本消失,形貌基本恢复到修复再生前上膜架膜丝的水平,但外表面仍有较多的纤维絮状物。由EDS可知,膜材料的主要组成元素为C和F,其余元素则主要为O、S、Na、Mg、Fe、Al、Si等,其中占比最高的为O,这可能是由于膜表面存在亲水添加剂,也可能是膜表面还存在无机含氧酸根或有机污染物。寿命终点膜中检出Mn、Al、Si、Fe、Ag、Ca等易结垢元素,证明膜表面仍存在部分无机污垢,难以通过离线清洗去除,同时经药剂修复再生后,部分元素占比上升,这可能是由于修复过程中人工操作导致污染物重新附着。

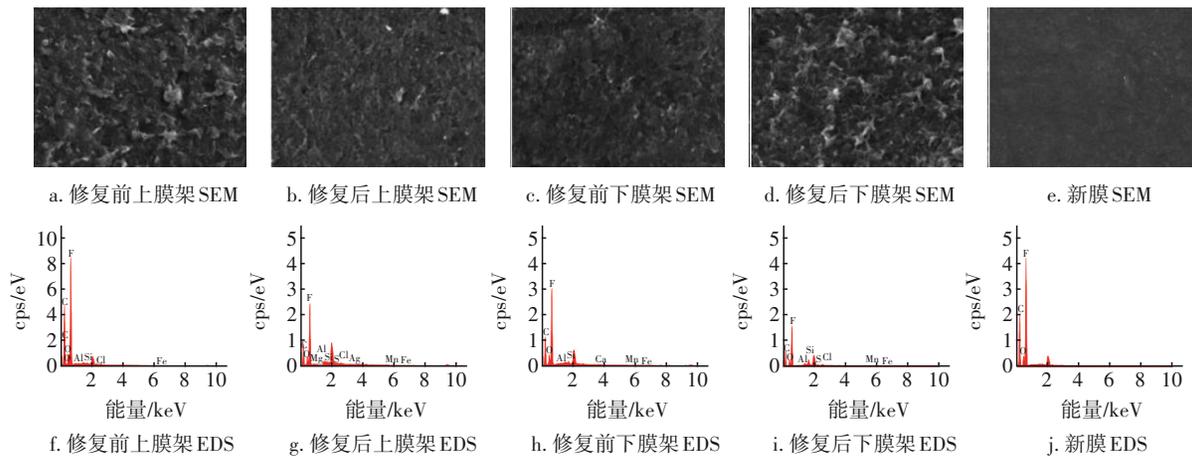


图5 新膜与修复前后膜的SEM($\times 2000$)及EDS分析结果

Fig.5 SEM ($\times 2000$) and EDS analysis results of new membrane and the membrane before and after repair

2.3.2 机械性能分析

采集修复前后寿命终点膜的上、下膜架膜丝进行断裂拉伸强度以及伸长率的测定,并与新膜进行对比,探究修复再生膜机械性能的变化(见图6)。

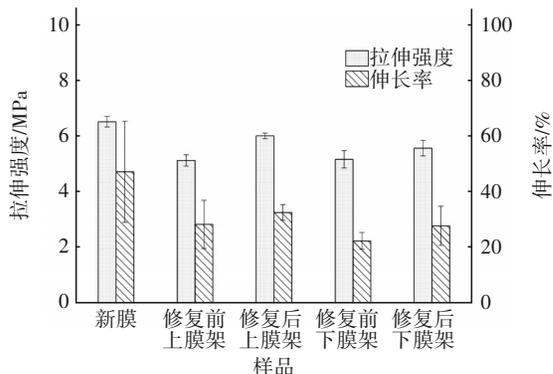


图6 新膜与修复前后膜的机械性能

Fig.6 Mechanical property of new membrane and the membrane before and after repair

由图6可知,寿命终点膜的断裂拉伸强度以及伸长率相较于新膜有较大程度的损失,尤其是下膜架的下降更为明显,这可能是由于工程生产过程中污泥的不断累积使得下膜架膜丝的污染程度较大,导致其机械性能损伤更为严重。同时愈加频繁的离线清洗导致PVDF超滤膜变性,膜丝老化程度加剧,韧性降低,膜丝的拉伸强度和伸长率随之减小,容易断丝,这与酸碱对PVDF膜的侵蚀有关。经过修复再生的膜丝机械性能均有所提升,且上膜架膜丝提升更为显著,其拉伸强度和伸长率分别从 (5.122 ± 0.204) kPa和28.32%提升至 (6.003 ± 0.101) kPa和32.95%,下膜架则从 (5.162 ± 0.310) kPa和22.39%提升至 (5.563 ± 0.279) kPa和27.79%,但仍未达到新膜水平。

2.3.3 亲疏水性分析

一般来说,把接触角(CA)小于 90° 作为亲水性

的判定,大于 90°作为疏水性的判定,即接触角度越小,膜丝表面的亲水性越好。对修复前后寿命终点膜的上、下膜架膜丝取样进行接触角测量,并与新膜进行比较,探究寿命终点膜经过修复后亲疏水性的改善情况(见图 7)。

MBR 工程中使用的 PVDF 膜均通过使用亲水性添加剂来增强膜表面亲水性,故新膜的 CA 较小,仅为 $63.70^{\circ} \pm 1.058^{\circ}$ 。寿命终点膜上膜架的 CA 为 $82.23^{\circ} \pm 0.503^{\circ}$,下膜架为 $87.83^{\circ} \pm 1.380^{\circ}$,处于亲水的范畴,这是由于寿命终点膜在修复前经过酸碱离线清洗后,膜表面的疏水性污染物已被大量去除,但同时长期的离线清洗导致亲水性添加剂析出,暴露出疏水性的 PVDF 膜本体,故经过清洗后的寿命终点膜相较于新膜的 CA 仍然较高。对于修复再生膜,经过单宁酸-铁的清水改性后,上膜架的 CA 降低到 $79.80^{\circ} \pm 2.691^{\circ}$,下膜架的 CA 降低到 $78.83^{\circ} \pm 2.346^{\circ}$,亲水性得到一定程度的加强,但距离新膜仍有较大差距。

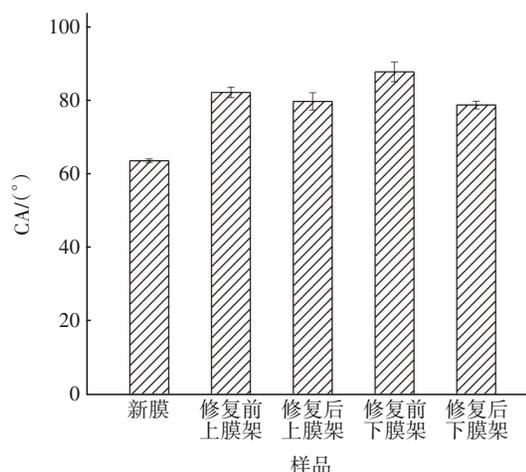


图 7 新膜与修复前后膜表面的接触角

Fig.7 Contact angle of new membrane and the membrane before and after repair

2.3.4 孔径分布分析

采集修复前后寿命终点膜上、下膜架膜丝进行孔径分析,并与新膜进行比较,探究修复再生膜孔径分布的变化,结果见图 8。

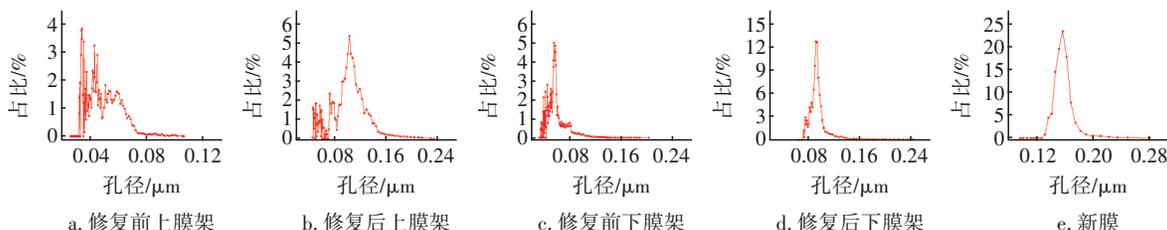


图 8 新膜与修复前后膜的孔径分布曲线

Fig.8 Aperture distribution curve of new membrane and the membrane before and after repair

由图 8 可知,新膜孔径分布较为集中且分布占比较高,呈现出金字塔形状,孔径最高占比可达 23.27%。一般来说,频繁使用次氯酸钠和柠檬酸浸泡会导致膜孔膨胀,但寿命终点膜的孔径微分分布曲线整体向左偏移,表现出孔径缩小的趋势,这可能是由于泥水混合液中所含有的细小颗粒、胶体或大分子物质与膜基质间存在物理化学相互作用,从而出现持续性的吸附沉积现象,并最终导致膜孔径变小或堵塞。同时,从表征结果来看,修复再生后的膜丝孔径微分曲线右移,大多孔径分布于 0.1 μm 以上,相较于寿命终点膜,膜孔径得到极大的扩展,推测试剂 A 起到关键作用,DMSO 通过溶出不可恢复污染物使得膜丝内壁更加光滑或者使其污泥淤堵的程度降低,从而恢复膜孔径^[8]。

取孔径微分分布曲线的关键数值进行分析,结果见表 2。

表 2 孔径分布曲线关键参数

Tab.2 Key parameters of aperture distribution

项 目	curve				
	新膜	修复前上膜架	修复后上膜架	修复前下膜架	修复后下膜架
泡点孔径	0.291 8	0.106 4	0.234 0	0.202 5	0.286 3
最小孔径	0.131 6	0.032 5	0.044 8	0.033 8	0.072 3
平均孔径	0.159 5	0.050 2	0.105 2	0.056 1	0.093 9
最可几孔径	0.156 8	0.034 8	0.101 9	0.054 7	0.091 9
注: 泡点孔径即为最大孔径;最可几孔径则为孔径微分分布曲线上的峰值,其物理含义为孔容积随孔径变化率最大的孔径。					

由表 2 可知,新膜的平均孔径和最可几孔径集中在 0.15~0.16 μm,寿命终点膜上、下膜架的平均孔径均在 0.05~0.06 μm,远小于新膜,其中下膜架平均孔径和最可几孔径稍大于上膜架。其原因可能是在上膜架所处的水位,小颗粒悬浮污染物数量

较多,对膜孔的填充作用更为显著;下膜架所处的水位污泥浓度较高,含有更多的大颗粒污染物,更偏向于形成滤饼层,不容易进入膜孔内。修复再生膜的平均孔径和最可几孔径均在0.09~0.11 μm ,表明结构转化步骤释放了膜孔内淤积的污染物,使得孔径得以恢复。

3 结论

① 修复再生膜架稳定生产时,其产水流量长期维持在27.5 m^3/h ,跨膜压差持续稳定增长,透水率缓慢下降,显著优于对照组。

② 修复再生膜架与寿命终点膜架的出水水质均符合《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,二者对污染物的截留率均处在同一水平,总体波动较小。

③ 通过对修复前后寿命终点膜的表面形貌、EDS能谱、机械性能、接触角、孔径分布曲线分析可知,经过药剂修复后膜的物理化学性能得到了较为全面且显著的提升,但仍需对后续生产过程进行持续的监测。

参考文献:

- [1] PAULA E C D, AMARAL M C S. Environmental and economic evaluation of end-of-life reverse osmosis membranes recycling by means of chemical conversion [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 194:85–93.
- [2] XIAO K, XU Y, LIANG S, *et al.* Engineering application of membrane bioreactor for wastewater treatment in China: current state and future prospect [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2014, 8(6):805–819.
- [3] WADEKAR S S, WANG Y, LOKARE O R, *et al.* Influence of chemical cleaning on physicochemical characteristics and ion rejection by thin film composite nanofiltration membranes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(17):10166–10176.
- [4] LEJARAZU-LARRANAGA A, MOLINA S, ORTIZ J M, *et al.* Circular economy in membrane technology: using end-of-life reverse osmosis modules for preparation of recycled anion exchange membranes and validation in electrodialysis [J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 593: 117423.
- [5] ZUO J H, CHENG P, CHEN X F, *et al.* Ultrahigh flux of polydopamine-coated PVDF membranes quenched in air via thermally induced phase separation for oil/water emulsion separation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 192:348–359.
- [6] ASADI A, GHOLAMI F, NAZARI S, *et al.* Improved filtration performance of polyvinylidene fluoride nanocomposite membranes embedded with deep eutectic solvent: application towards MBR [J]. *Desalination*, 2022, 543:116088.
- [7] YANG Z, ZHOU Z W, GUO H, *et al.* Tannic acid/ Fe^{3+} nanoscaffold for interfacial polymerization: toward enhanced nanofiltration performance [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(16): 9341–9349.
- [8] 方志聪, 戚智. 二甲基亚砜对生物膜的作用机理 [J]. *生物物理学报*, 2012, 28(8): 638–643.
FANG Zhicong, QI Zhi. Molecular mechanism of action of dimethyl sulfoxide on biological membranes [J]. *Acta Biophysica Sinica*, 2012, 28 (8) : 638–643 (in Chinese).
- [9] EJIMA H, RICHARDSON J J, LIANG K, *et al.* One-step assembly of coordination complexes for versatile film and particle engineering [J]. *Science*, 2013, 341 (6142):154–157.
- [10] GOODWIN J A S, FORSTER C F. A further examination into the composition of activated sludge surfaces in relation to their settlement characteristics [J]. *Water Research*, 1985, 19(4): 527–533.
- [11] NI B J, XIE W M, LIU S G, *et al.* Granulation of activated sludge in a pilot-scale sequencing batch reactor for the treatment of low-strength municipal wastewater [J]. *Water Research*, 2009, 43(3):751–761.
- [12] LI D P, FREY M W, JOO Y L. Characterization of nanofibrous membranes with capillary flow porometry [J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 286 (1/2) : 104–114.

作者简介:张禹城(1996–),男,福建莆田人,硕士研究生,主要研究方向为膜法污水资源化技术。

E-mail:913604622@qq.com

收稿日期:2023-05-30

修回日期:2023-07-19

(编辑:沈靖怡)