

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.19.002

天津市某净水厂超滤膜维护性化学清洗方案优化

张瑞君¹, 冯晓琳¹, 肖峰², 韩正双³, 闫慧敏³, 范忠航¹,
董俊良¹, 田家宇¹

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 天津市自来水集团有限公司
凌庄水厂, 天津 300381; 3. 天津市公用事业设计研究所, 天津 300100)

摘要: 针对天津市某净水厂超滤膜维护性化学清洗方案清洗效果不佳的问题,对现行维护性化学清洗方案中的药剂接触方式、清洗时间、药剂浓度、清洗顺序等进行了研究,考察对跨膜压差恢复率的影响,同时采用扫描电子显微镜(SEM)和衰减全反射傅里叶变换红外光谱仪(ATR-FTIR)对原膜、受污染膜及清洗后的超滤膜表面形貌及官能团进行微观表征。结果表明,膜表面主要污染物为腐殖质类、蛋白质类和多糖类有机物,先后采用450 mg/L的次氯酸钠和500 mg/L的柠檬酸作为清洗剂进行两次循环清洗,并且当每次清洗循环时间为等压循环10 min+错流循环40 min+浸泡10 min时,清洗效果更好,跨膜压差恢复率能够由原来的31.6%提高至91.9%。进一步提出在上述清洗方案的第一次循环中添加100 mg/L的氯化钠用于强化清洗效果,发现跨膜压差恢复率可以提高至94.7%。

关键词: 超滤; 膜污染; 化学清洗; 跨膜压差恢复率

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)19-0008-08

Optimization of Chemical Cleaning Protocol for Ultrafiltration Membrane Maintenance in a Water Purification Plant in Tianjin

ZHANG Rui-jun¹, FENG Xiao-lin¹, XIAO Feng², HAN Zheng-shuang³,
YAN Hui-min³, FAN Zhong-hang¹, DONG Jun-liang¹, TIAN Jia-yu¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Lingzhuang Water Plant, Tianjin Water Group Co. Ltd., Tianjin 300381, China; 3. Tianjin Public Utility Design & Research Institute, Tianjin 300100, China)

Abstract: This study systematically investigated key parameters including the contact mode of cleaning agents, cleaning duration, chemical concentration, and cleaning sequence, focusing on their impact on the recovery rate of transmembrane pressure, and analyzed the surface morphology and functional group composition of the original membrane, fouled membrane, and cleaned membrane using scanning electron microscopy (SEM) and attenuated total reflectance Fourier-transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR), so as to address the issue of the unsatisfactory cleaning performance of the current maintenance chemical cleaning protocol for ultrafiltration membranes at a water purification plant in Tianjin. The primary foulants on the membrane surface included organic matters such as humic

基金项目: 天津水务集团有限公司科技项目(2021KY-06)

通信作者: 董俊良 E-mail: 2018023@hebut.edu.cn; 田家宇 E-mail: tjy800112@hebut.edu.cn

substances, proteins, and polysaccharides. Two consecutive cleaning cycles were performed using 450 mg/L sodium hypochlorite followed by 500 mg/L citric acid as cleaning agents. Each cleaning cycle consisted of 10 minutes of isobaric circulation, 40 minutes of cross-flow circulation, and 10 minutes of immersion. Under this cleaning protocol, a significantly improved cleaning performance was achieved, with the transmembrane pressure recovery rate increasing from the initial 31.6% to 91.9%. It was further proposed to incorporate 100 mg/L of sodium chloride into the first cycle of the aforementioned cleaning protocol with the aim of enhancing the cleaning efficiency. The results indicated that this modification increased the transmembrane pressure recovery rate to 94.7%.

Key words: ultrafiltration; membrane fouling; chemical cleaning; transmembrane pressure recovery rate

全球范围内工业化的持续推进和社会经济的不断发展促进了人们对饮用水品质的日益重视^[1]。超滤分离过程因其跨膜压差低、用药量少且能够有效去除大分子有机物等优点而逐渐在饮用水处理过程中得到广泛应用^[2]。然而实际运行时水中的各类污染物会逐渐吸附或沉积在膜表面形成滤饼层,抑或聚集在膜孔内导致膜孔逐渐缩小或堵塞,由此大幅降低超滤膜的分离效率,缩短膜的使用寿命,增加运行成本^[3-4]。因此,实现对超滤膜污染的有效管控是确保超滤净水厂长期稳定运行的关键举措之一。

超滤膜污染取决于多种复杂因素^[5],虽然通过加强膜前预处理、优化操作条件等措施能够在一定程度上缓解膜污染^[6-7],但膜污染终究无法完全避免。当不可逆膜污染越来越严重、物理清洗效率越来越低时,需要进行原位维护性化学清洗或离线化学清洗来实现膜性能的有效恢复^[8]。化学清洗剂的使用要以膜污染机理为依据,以有效去除污染物,减少膜损伤,延长膜的使用寿命。例如,刘彩虹等^[9]在实验室进行了聚氯乙烯(PVC)超滤膜清洗的相关研究,采用不同药剂对受污染的超滤膜进行清洗,发现顺次使用1%氢氧化钠和2%乙醇清洗时,通量恢复率超过100%。另外,Yu等^[10]对一座处理规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的大型超滤膜水厂进行了追踪研究,在此期间利用500 mg/L的次氯酸钠(NaClO)清洗剂进行了多次维护性化学清洗,有效抑制了跨膜压差的持续上升。

天津市某净水厂针对膜污染问题设定了维护性化学清洗,但清洗前后跨膜压差并未出现明显变化,跨膜压差恢复率仅为31.6%,难以实现污染物

的有效剥离。为此,笔者对现行的维护性化学清洗方案进行了优化,主要从清洗时间、药剂浓度、清洗顺序的优化选择着手,并提出氯化钠(NaCl)强化清洗效能的新策略,以提升维护性化学清洗效果,旨在为同类型超滤净水厂的膜污染控制提供参考。

1 工程现状

净水厂原水取自南水北调中线工程,水质较好,采用预氧化+上向流炭吸附澄清池+自清洗过滤+超滤+消毒短流程工艺,具体工艺流程如图1所示。在现行运行过程中,对超滤膜每周进行1次维护性化学清洗,清洗步骤为:等压循环20 min→错流循环20 min→浸泡20 min→废液排放5 min→清水冲洗30 s,上述循环过程进行两次,使用的药剂分别为500 mg/L的次氯酸钠清洗剂和600 mg/L的柠檬酸清洗剂。

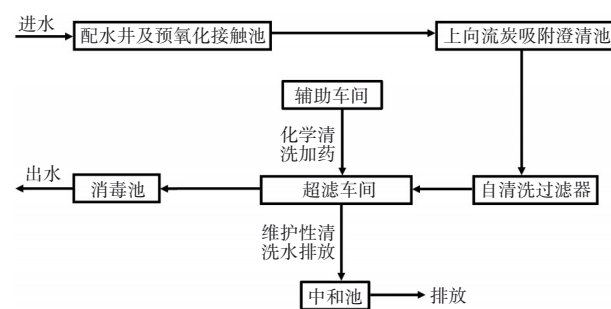


图1 净水工艺流程

Fig.1 Flow chart of water purification process

2 材料与方法

2.1 样品与试剂

为了模拟现行超滤系统的运行状况,小试所用的超滤进水为该自来水管厂的自清洗过滤器出水,所用的超滤膜由水厂提供。该超滤膜为聚偏氟乙烯

(PVDF)材质,其纯水通量为 $200 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (25°C , 0.1 MPa),孔径为 $0.03 \mu\text{m}$,运行跨膜压差为 $30\sim 150 \text{ kPa}$, NaClO 最大耐受程度为 5000 mg/L 。所用的主要化学试剂包括柠檬酸(分析纯)、氯化钠(99.5%)、次氯酸钠(4%)、氢氧化钠(分析纯)和草酸(分析纯)等。

2.2 膜污染与膜清洗试验

以水厂提供的PVDF中空纤维超滤膜为核心,在实验室构建了4套如图2(a)所示的浸没抽吸式超滤装置,由此进行连续一周恒温、恒通量的膜污染试验。随后利用图2(b)所示的膜清洗装置对受污染超滤膜进行维护性化学清洗,清洗方案同样为等压循环+错流循环+浸泡+废液排放+清水冲洗,在此过程中分析了药剂接触方式、清洗时间、药剂浓度和清洗顺序对清洗效能的影响。以维护性化学清洗前后跨膜压差的恢复率(η)为评价指标,对比不同清洗方法的清洗效果,其中 η 的计算方法参照文献[11]。

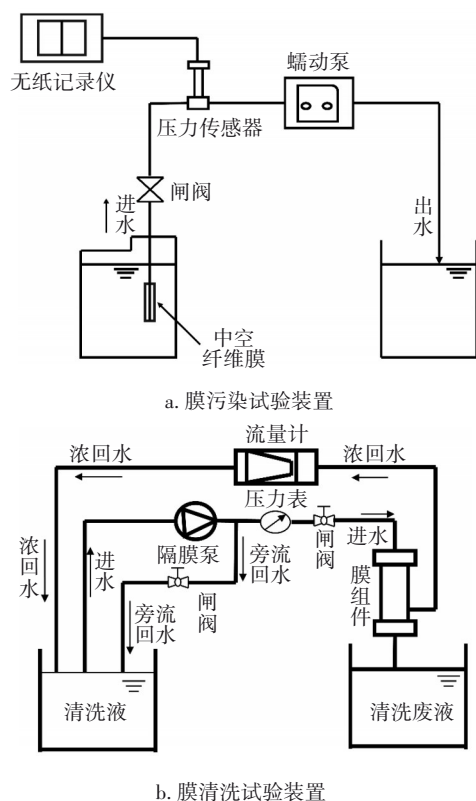


图2 膜试验装置示意

Fig.2 Schematic diagram of membrane experimental device

2.3 水样分析与膜材料表征

采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)对酸洗液中铁元素和铝元素含量进行测定;采用扫描电子显微镜(SEM)、扫描电子显微镜-能谱仪(SEM-EDS)和衰减全反射傅里叶变换红外光谱仪(ATR-FTIR)对原膜、受污染膜和经过不同清洗方案清洗后的超滤膜进行微观形貌、元素类型和比例以及有机物官能团表征,待表征的膜样品首先需要在防尘措施下自然干燥 24 h ,随后在 30°C 的真空干燥箱中继续干燥 24 h 。

3 结果与讨论

3.1 维护性化学清洗方案的优化

该水厂目前分别选用次氯酸钠和柠檬酸依次对受污染的PVDF超滤膜进行清洗,其中次氯酸钠可以作为杀菌剂,也可以作为氧化剂,能将有机物的官能团降解为羧基、酮基和醛基等,从而去除污染层中的大分子有机物^[12],而柠檬酸作为酸性药剂,主要用于溶解并清除无机污染物^[13]。同时,在药剂选择类型不变的基础上分析了药剂接触方式、清洗时间、药剂浓度和清洗顺序对跨膜压差恢复率的影响。

3.1.1 清洗时间

清洗时间是影响清洗效果的重要因素,清洗时间过短可能无法有效去除膜上的污染物,导致跨膜压差恢复率偏低;清洗时间过长则可能对膜造成过度的化学冲击,从而引起膜材料的损伤和膜使用寿命的缩短^[14]。因此本研究首先探索清洗时间对清洗效能的影响,在此过程中使用 500 mg/L 的次氯酸钠作为清洗剂来确定第一次循环的清洗时间分配。分别改变三种药剂接触方式(等压循环、错流循环、浸泡)的时间,以确定其对清洗效果的影响,具体实施方案如下:方案一将错流循环和浸泡时间固定在 20 min ,设定等压循环时间分别为 $10、15、20、25、30 \text{ min}$;方案二保持等压循环和浸泡时间均为 20 min ,调整错流时间分别为 $10、15、20、25、30 \text{ min}$;方案三保持等压循环和错流循环时间均为 20 min ,调整浸泡时间分别为 $10、15、20、25、30 \text{ min}$ 。

不同方案对应的跨膜压差恢复率如图3所示。可以看出,随着错流循环时间由 10 min 增加至 30 min ,跨膜压差恢复率可由 59.9% 提高至 82.1% ;同等情况下,延长等压循环时间后跨膜压差恢复率可

由 64.2% 提高至 78.5%,改变浸泡时间后跨膜压差恢复率可由 68.1% 提高至 75.0%。由此可见,错流循环的延续时间对跨膜压差恢复率的影响最大,其次是等压循环时间和浸泡时间。推测这是由于错流循环时清洗剂较快的流动速度增加了药剂组分的扩散传质,有利于化学物质和污染物充分接触,从而提高其溶解效率。此外,药剂的错流循环还可以带来清洗剂对污染物的剥离效应,被溶解破坏后的污染物碎片更容易随清洗剂一起进入主体溶液,进而减少对膜孔的阻塞,提高跨膜压差恢复率。

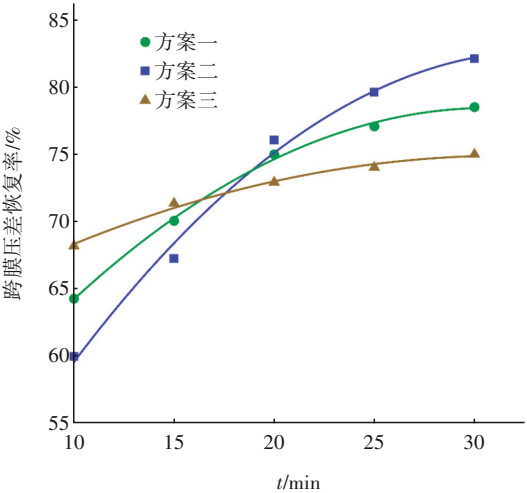


图3 不同方案的清洗效果

Fig.3 Cleaning effects of different schemes

综上分析认为,通过延长错流循环的时间有望提高清洗效率,因此在保持总体清洗时间不变的前提下,重新分配不同药剂接触方式的延续时间,具体方案见表1。

表1 两次循环清洗的时间安排方案

Tab.1 Timing plan for two cleaning cycles

项 目	等压循环	错流循环	浸泡
方案 1	20	25	15
方案 2	25	30	5
方案 3	15	35	10
方案 4	10	40	10

使用 500 mg/L 的次氯酸钠作为清洗剂,采用表 1 中方案 1~4 进行清洗,不同方案的跨膜压差恢复率如图 4(a)所示。可以看到,方案 1~4 的跨膜压差恢复率分别为 79.0%、81.5%、83.0%、84.6%,即方案 4 的跨膜压差恢复率最大,因此在第一次循环清洗中选择方案 4,即等压循环 10 min+ 错流循环 40

min+浸泡 10 min,可在保证总的清洗时间不变的前提下增强清洗效果。

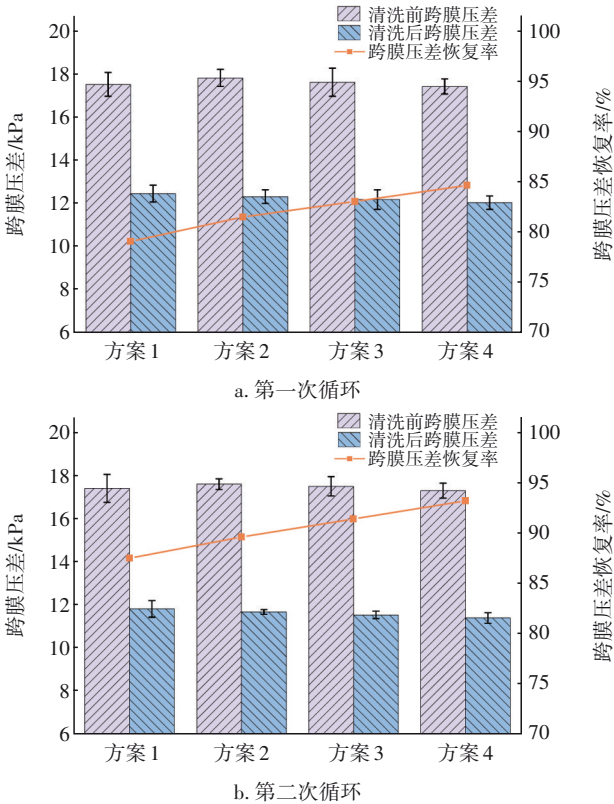


图4 两次循环中不同方案的清洗效果

Fig.4 Cleaning effect of two cycles of different schemes

在确定了第一次循环清洗方案的基础上,进一步确定第二次循环清洗方案。第二次循环清洗使用 600 mg/L 的柠檬酸作为清洗剂,同样按照表 1 所示的方案进行清洗,不同方案的跨膜压差恢复率如图 4(b)所示。可知,方案 1~4 的跨膜压差恢复率分别为 87.5%、89.6%、91.4%、93.2%,因此在第二次循环清洗中也选择方案 4,即等压循环 10 min+错流循环 40 min+浸泡 10 min。

3.1.2 药剂浓度

药剂浓度对膜清洗效果有重要影响,浓度过高可能会对膜造成损坏,如破坏膜表面结构或膜孔结构,降低膜的机械强度或选择性,缩短膜的使用周期,抑或残留在膜上影响后续处理过程;浓度过低可能无法充分去除污染物,降低清洗效率^[15]。因此,需要在保证清洗效果的前提下尽量降低药剂浓度。分别选取 300、350、400、450、500 mg/L 的次氯酸钠作为清洗剂进行第一次循环清洗,确定次氯酸钠浓度对清洗效果的影响,不同药剂浓度对应的跨

膜压差恢复率如图5(a)所示。

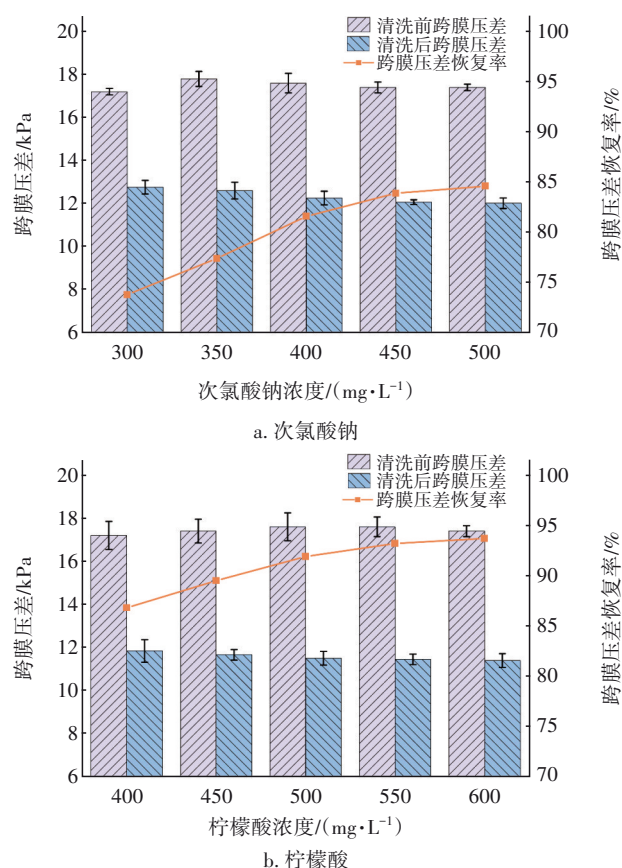


图5 不同药剂浓度的清洗效果

Fig.5 Cleaning effect of different agent concentrations

由图5(a)可知,与300、350、400、450、500 mg/L次氯酸钠清洗剂对应的跨膜压差恢复率分别为73.8%、77.4%、81.6%、83.9%、84.6%,即随着次氯酸钠浓度的增加而逐渐升高,但当次氯酸钠浓度由450 mg/L增加至500 mg/L时,跨膜压差恢复率的提升幅度并不明显,说明450 mg/L的次氯酸钠已经确保了足够的药剂量。因此,为了得到较好的清洗效果并尽可能降低投药量,次氯酸钠清洗剂浓度可由原来的500 mg/L降低至450 mg/L。

在次氯酸钠清洗优选结果的基础上,进一步选取400、450、500、550、600 mg/L的柠檬酸作为清洗剂,进行第二次循环清洗,不同柠檬酸浓度对应的跨膜压差恢复率如图5(b)所示。可以看到,与400、450、500、550、600 mg/L柠檬酸清洗剂对应的跨膜压差恢复率分别为86.8%、89.5%、91.9%、93.2%和93.7%,换言之,将柠檬酸浓度由500 mg/L增加至600 mg/L后清洗效率并未得以明显提升,因此在第二次循环中所用的柠檬酸浓度优选为500 mg/L。

3.1.3 清洗顺序

两次循环的清洗顺序也会对清洗效果造成影响,合适的清洗顺序可以增强清洗效果,提高清洗剂的使用效率^[16]。原有的清洗方案为次氯酸钠+柠檬酸,即第一次循环清洗采用次氯酸钠,第二次循环清洗采用柠檬酸。在此基础上,本研究调换了两类药剂的使用顺序,即第一次循环清洗采用柠檬酸,第二次循环清洗采用次氯酸钠。结果发现,上述两种方案对应的跨膜压差恢复率分别为91.9%、80.2%,可以看出次氯酸钠+柠檬酸的清洗效果更好,推测这可能是因为超滤膜主要被有机物污染,其中夹杂着部分无机物,先使用次氯酸钠清洗能够分解有机物,去除包裹在无机物上的有机污染层,随后的柠檬酸清洗便可以进一步去除“暴露”的无机物并中和清洗过程中残留的次氯酸钠,进而更为有效地恢复超滤膜的渗透性能。

为了证明这一推断,采用ICP-OES分别测定次氯酸钠+柠檬酸和柠檬酸+次氯酸钠两种清洗方式的柠檬酸洗液的Fe、Al含量(0.13、0.91 $\mu\text{g/L}$)均高于柠檬酸+次氯酸钠清洗方案的(0.11、0.75 $\mu\text{g/L}$),说明次氯酸钠+柠檬酸的清洗方案确实能更为有效地清除污染层中的无机物。综上所述,将原方案优化为两次循环清洗,清洗药剂依次采用450 mg/L的次氯酸钠和500 mg/L的柠檬酸,每次清洗循环的时间均为等压循环10 min+错流循环40 min+浸泡10 min。

3.2 NaCl强化清洗效能

有研究表明,适当浓度的NaCl对超滤膜污染层有一定的清洗效果^[17],但是大多数研究仅使用盐溶液对膜进行清洁,很少分析将盐溶液与其他类型清洗剂联合使用进而强化清洗效果。为此,在上述优化清洗方案的第一次循环中分别添加0、50、100、150、200 mg/L的NaCl来强化清洗效果。结果表明,不同浓度的NaCl对应的跨膜压差恢复率分别为91.5%、92.8%、94.7%、94.9%、95.2%。可以看出,随着NaCl浓度的增加,相应的跨膜压差恢复率也在升高,这可能是因为NaCl溶液中的 Cl^- 和 Na^+ 与膜表面污染物发生了一定程度的离子交换反应,或者增强了有机物的溶解性,从而强化了清洗效能^[18]。但当NaCl浓度由100 mg/L升高到200 mg/L时,跨膜压差恢复率的提升幅度并不明显,这可能是由于NaCl浓度的增加影响了柠檬酸的酸碱平衡,削弱了强化

效果^[19]。因此,将在优化清洗方案的第一次循环清洗中添加 100 mg/L 的 NaCl 作为最终优化清洗方案。

3.3 优化清洗方案的清洗效能分析

3.3.1 清洗前后超滤膜表面形貌分析

采用 SEM 对原膜、受污染膜、原有清洗方案及最终优化清洗方案清洗后的超滤膜表面进行表征,结果如图 6 所示。可以看出,原膜的表面整洁平滑。经过一段时间的污染后,超滤膜表面黏附了一层污染物,说明超滤膜受到了污染。分别采用原清洗方案和最终优化清洗方案清洗后,均能在一定程度上实现污染层的清除,但经过原清洗方案清洗后,超滤膜表面仍然可以看到一些纹理的存在,表面还有部分污染物残留;而经过最终优化清洗方案清洗后,膜面结构几乎与新膜相同。可见,最终优化清洗方案具有优异的清洁效果。

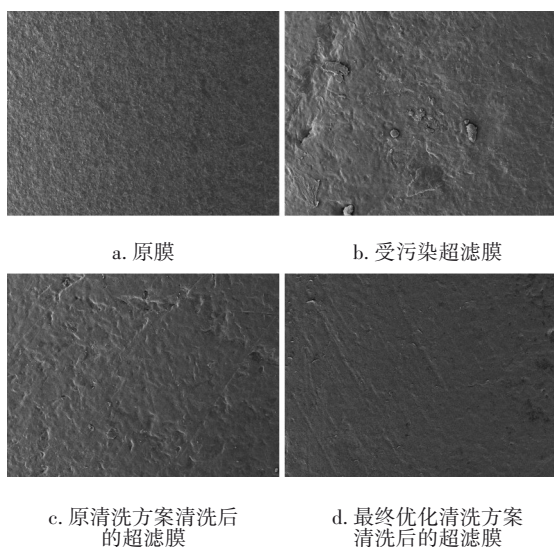


图 6 清洗前后不同膜面的 SEM 照片

Fig.6 SEM photos of different membrane surfaces before and after cleaning

3.3.2 清洗前后超滤膜表面元素分析

通过 SEM-EDS 对上述四种膜的表面元素成分进行了表征,结果如图 7 所示。可以看出,相对于原膜,受污染膜表面出现了 N 元素和 Mg、Al、Si、Ca、Fe 等其他元素(图中以“其他”表示)。O 元素含量的大幅增加和 N 元素的出现说明造成膜污染的主要污染物是有机物,“其他”元素的出现表明其中夹杂着少量无机物。与此同时,F 元素含量下降,这是由于 PVDF 材料被污染层覆盖。经过两种方案清洗后,膜表面 F 元素含量升高,说明经过清洗后被污染物

覆盖的 PVDF 聚合物已经逐步显露出来。此外,与原清洗方案相比,受污染膜面在经过优化清洗方案清洗后,F 元素含量更高,N 和“其他”元素的含量更低,说明清洗效果更好。

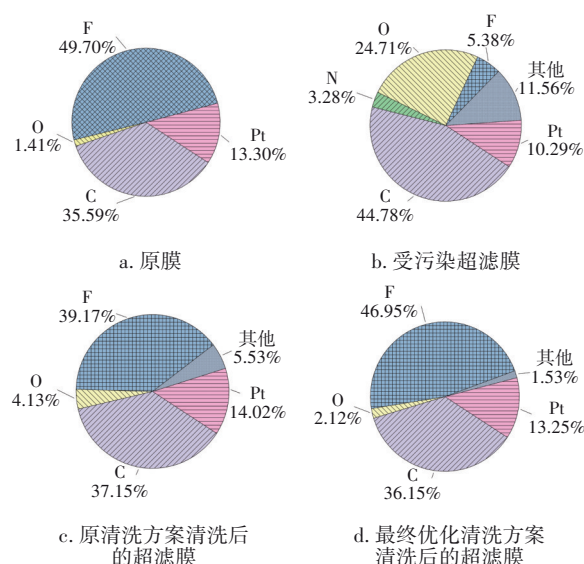


图 7 不同膜面元素含量的变化

Fig.7 Change in content of elements on different membrane surface

3.3.3 清洗前后超滤膜表面官能团分析

为进一步判断原有清洗方案和最终优化清洗方案对膜表面有机物的去除效果,采用 ATR-FTIR 对上述四种膜表面的官能团构成进行了表征,结果如图 8 所示。

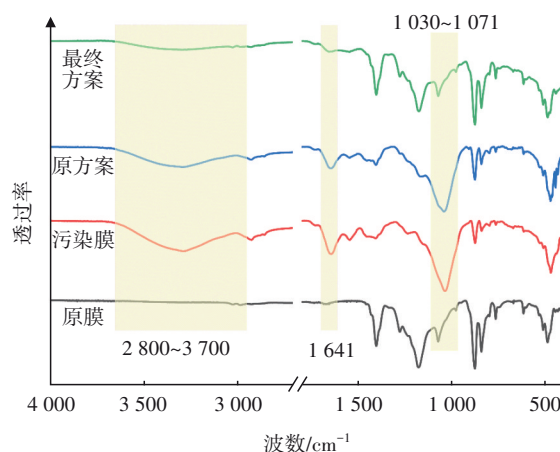


图 8 不同清洗方案对有机污染层的影响

Fig.8 Influence of different cleaning schemes on organic contaminated layer

由图 8 可以看出,受污染膜在 2 800~3 700 cm^{-1} 附近出现特征峰,该峰对应的是一 OH 伸缩振动,表

明受污染膜表面存在腐殖质类有机物^[20];在1 641、1 030~1 071 cm^{-1} 处出现的特征峰分别对应C=O伸缩振动和C—O伸缩振动,说明受污染膜表面存在蛋白质类和多糖类物质^[21-22]。因此,受污染膜表面含有腐殖质类、蛋白质类和多糖类有机物。与受污染膜相比,经两种方案清洗后的超滤膜红外特征吸收峰位置变化不大,但相应吸收峰的强度降低,说明这两种清洗方案都能去除有机物。但最终优化清洗方案中有机物的特征吸收峰强度明显更低,表明最终优化清洗方案对有机物的去除效果更佳。

4 结论

① 水厂原有的维护性化学清洗方案清洗效果较差,在模拟试验装置中执行该清洗方案时取得的跨膜压差恢复率仅为31.6%。通过分析清洗药剂接触方式、清洗时间、药剂浓度和清洗顺序对跨膜压差恢复率的影响,认为将循环清洗的时间分配为等压循环10 min+错流循环40 min+浸泡10 min更为合适,同时将450 mg/L的次氯酸钠和500 mg/L的柠檬酸清洗剂作为两次循环的清洗药剂,该清洗方案可将跨膜压差恢复率提高至91.9%。

② 进一步提出在上述方案的第一次循环清洗中添加100 mg/L的NaCl,发现跨膜压差恢复率可进一步提高至94.7%,即联合使用清洗剂与氯化钠可以强化维护性化学清洗的效果,因此以此作为最终优化清洗方案。

③ 采用SEM及ATR-FTIR对清洗前后的受污染超滤膜进行微观表征,发现污染后的超滤膜表面黏附了包括腐殖质类、蛋白质类和多糖类等有机物,经原方案和最终优化方案清洗后,最终优化清洗方案能够更为有效地清除污染层,使得清洗后的膜面结构几乎与原膜相同,有机物相应红外吸收峰强度明显降低。

参考文献:

- [1] 董秉直,肖健,华建良,等. 高品质饮用水的思考以及苏州实践[J]. 给水排水, 2021, 47(8): 19-27.
DONG Bingzhi, XIAO Jian, HUA Jianliang, *et al.* View of high quality drinking water and its practice in Suzhou [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(8): 19-27(in Chinese).
- [2] 郭久亦,于冰. 世界水资源短缺: 节约用水和海水淡化[J]. 世界环境, 2016(2): 58-61.

GUO Jiuyi, YU Bing. Worldwide water shortage: water conservation and seawater desalination [J]. World Environment, 2016(2): 58-61(in Chinese).

- [3] 杨敬葵,靳进波,张凯舟,等. 抗污染PVDF膜研究进展[J]. 塑料, 2021, 50(2): 104-107, 130.
YANG Jingkui, JIN Jinbo, ZHANG Kaizhou, *et al.* Research progress in anti-fouling property of modified PVDF membrane [J]. Plastics, 2021, 50(2): 104-107, 130(in Chinese).
- [4] 汪田莉,李成才,朱海霖,等. PVDF共混亲水膜的制备及其性能研究[J]. 水处理技术, 2023, 49(3): 66-71.
WANG Tianli, LI Chengcai, ZHU Hailin, *et al.* Preparation and properties of PVDF blended hydrophilic membrane [J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(3): 66-71(in Chinese).
- [5] 班福忱,于涵同. 水处理中超滤膜污染成因及其控制方法研究[J]. 水处理技术, 2023, 49(2): 1-5, 17.
BAN Fuchen, YU Hantong. Study on causes and control methods of ultrafiltration membrane fouling in water treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(2): 1-5, 17(in Chinese).
- [6] MA B W, XUE W J, BAI Y H, *et al.* Enhanced alleviation of ultrafiltration membrane fouling by regulating cake layer thickness with pre-coagulation during drinking water treatment [J]. Journal of Membrane Science, 2020, 596: 117732.
- [7] 聂煜东,李金,张贤明. 水处理过程中膜污染问题及其预处理技术研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(4): 2278-2289.
NIE Yudong, LI Jin, ZHANG Xianming. Research progress on membrane fouling and its pretreatment technology in water treatment [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(4): 2278-2289 (in Chinese).
- [8] XIAO T, ZHU Z H, LI L C, *et al.* Membrane fouling and cleaning strategies in microfiltration/ultrafiltration and dynamic membrane [J]. Separation and Purification Technology, 2023, 318: 123977.
- [9] 刘彩虹,刘百仓,林佳琪,等. 处理含氨氮地表水的混凝-超滤工艺中膜清洗方法的研究[J]. 给水排水, 2013, 39(9): 121-126.
LIU Caihong, LIU Baicang, LIN Jiaqi, *et al.* Membrane cleaning methods in the coagulation ultrafiltration process used to treat ammonia-contaminates surface water [J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(9):

- 121-126(in Chinese).
- [10] YU H K, LI X, CHANG H Q, *et al.* Performance of hollow fiber ultrafiltration membrane in a full-scale drinking water treatment plant in China: a systematic evaluation during 7-year operation [J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 613:118469.
- [11] ZUO X, ZHANG S, MA G, *et al.* Analysis of ceramic membrane fouling behavior and cleaning technology [J]. *E3S Web of Conferences*, 2020, 194: 04048.
- [12] DING J Q, WANG S L, XIE P C, *et al.* Chemical cleaning of algae-fouled ultrafiltration (UF) membrane by sodium hypochlorite (NaClO): characterization of membrane and formation of halogenated by-products[J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 598:117662.
- [13] 上官思源. 化学清洗中PVDF/PTFE微滤膜的老化特性及膜污染去除特性研究[D]. 广州: 广州大学, 2023.
- SHANGGUAN Siyuan. Study on the Aging Characteristics and Membrane Pollution Removal Characteristics of PVDF/PTFE Microfiltration Membranes in Chemical Cleaning [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2023(in Chinese).
- [14] 泰佳, 苏齐, 白桦. 北方某水厂超滤膜化学清洗方式优化研究[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(1): 38-42.
- TAI Jia, SU Qi, BAI Hua. Optimization of chemical cleaning method for ultrafiltration membrane in a waterworks in north China [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(1): 38-42(in Chinese).
- [15] CHENG Y J, ZOU Y J, YU S W, *et al.* Further understanding NaClO cleaning of bacteria-fouled ultrafiltration membrane: variation of membrane structure and formation of halogenated by-products [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(1): 111681.
- [16] 贺维鹏, 屈梦军, 施周, 等. 不同清洗剂对BF/UF联用工艺膜污染的减缓特性[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(19): 33-39.
- HE Weipeng, QU Mengjun, SHI Zhou, *et al.* Characteristics of membrane fouling mitigated by different cleaning agents in BF/UF combined process [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(19): 33-39 (in Chinese).
- [17] CORBATON-BAGUENA M J, ALVAREZ-BLANCO S, VINCENT-VELA M C. Salt cleaning of ultrafiltration membranes fouled by whey model solutions [J]. *Separation and Purification Technology*, 2014, 132: 226-233.
- [18] ROUQUIE C, SZYMCHYK A, RABILLER-BAUDRY M, *et al.* NaCl precleaning of microfiltration membranes fouled with oil-in-water emulsions: impact on fouling dislodgment[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 285:120353.
- [19] WANG Z, LI Y L, SONG P, *et al.* NaCl cleaning of 0.1 μm polyvinylidene fluoride (PVDF) membrane fouled with humic acid (HA) [J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2018, 132: 325-337.
- [20] ZHOU Z W, YAN J K, LI X, *et al.* The pre-coated photocatalytic ceramic membrane with $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ / powdered activated carbon nanoparticles to alleviate ultrafiltration fouling caused by intracellular organic matter of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Journal of Membrane Science*, 2024, 693: 122353.
- [21] ZHANG Y W, TENG J C, ZOU H, *et al.* The molecular weight-fouling matrix: a novel dissection of polysaccharide interactions in ultrafiltration processes [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 345: 127340.
- [22] 肖萍, 邹瑜斌, 段淑璇, 等. 某自来水厂超滤膜污染物成分及化学清洗效果案例分析[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(5): 1404-1411.
- XIAO Ping, ZOU Yubin, DUAN Shuxuan, *et al.* Case analysis of foulant component on ultrafiltration membrane and its chemical cleaning effect in a drinking water plant [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(5): 1404-1411(in Chinese).

作者简介:张瑞君(1989-),男,河北张家口人,博士,教授,博士生导师,主要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:2024-02-20

修回日期:2024-04-24

(编辑:任莹莹)