

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.01.005

大型超滤水厂 PVC 和 PVDF 膜运行特性差异与优化

于海宽¹, 李 星¹, 周志伟¹, 蔡传义², 田希彬², 焦振涛³

(1. 北京工业大学 城市建设学部, 北京 100124; 2. 东营市自来水公司, 山东 东营 257091;

3. 苏州立升净水科技有限公司, 江苏 苏州 215000)

摘 要: 超滤技术已广泛应用于城镇给水处理厂,使得饮用水水质得到显著改善。不同材质超滤膜的运行周期、膜通量、跨膜压差(TMP)等的变化规律会有显著的差异,需要根据各自的特点对超滤系统进行运行参数调控与优化,以保证超滤系统的长期稳定运行。分析了山东某大型超滤水厂超滤系统长期运行的特点,对比了 PVC 膜和 PVDF 膜孔结构特征、膜通量、跨膜压差变化趋势及膜过滤阻力特性,调控和优化超滤系统运行参数,并进行了长时间的运行验证。结果表明,膜孔径和膜孔结构不同造成的膜污染是 PVC 膜与 PVDF 膜过滤特性差异的主要因素,恒定过滤周期运行模式下 PVC 膜通量加速衰减时段为 82 ~ 220 min,造成 PVC 膜通量衰减了 9.14%,并形成了约 5% 的永久衰减膜通量,而 PVDF 膜的通量衰减并不明显,使得水厂超滤系统在恒定过滤周期(180 min)运行模式下,出现了 PVC 膜的污染速率明显高于 PVDF 膜、系统的运行工况出现显著差异的现象。按照恒定过滤阻力模式运行时,PVC 膜和 PVDF 膜的最佳过滤周期范围分别为 82 ~ 108 min 和 96 ~ 155 min。水厂超滤系统在恒定过滤阻力运行模式下将 PVC 膜与 PVDF 膜在高温期和低温期的过滤周期分别调整为 110、90 min 和 150、120 min,TMP 的增长速率和化学维护清洗周期均基本一致,超滤系统实现了长期稳定运行。研究成果为我国超滤水厂中不同材质超滤膜的运行参数优化及协同稳定运行提供了参考。

关键词: 超滤; 膜材质; 膜污染; 膜通量; 参数调控

中图分类号: TU991.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)01-0028-06

Operation Characteristics and Optimization of PVC and PVDF Membranes in Full-scale Ultrafiltration Drinking Water Treatment Plant

YU Hai-kuan¹, LI Xing¹, ZHOU Zhi-wei¹, CAI Chuan-yi², TIAN Xi-bin²,
JIAO Zhen-tao³

(1. Faculty of Urban Construction, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Dongying Waterworks Company, Dongying 257091, China; 3. Suzhou Litree Water Purification Technology Co. Ltd., Suzhou 215000, China)

Abstract: Ultrafiltration (UF) technology has been widely used in various urban water supply treatment plants and the quality of UF permeate is higher than that of conventional drinking water treatment process. The significant differences have been consisted in the operating cycle, membrane flux, transmembrane pressure (TMP) among UF membranes with different materials. According to respective

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07404-003、2014ZX07406-002)

通信作者: 李星 E-mail:lixing@bjut.edu.cn

characteristics of UF membranes to adjust the operating parameters is necessary for its long-term stable operation. The long-term operation characteristics of UF system in a full-scale drinking water treatment plant (DWTP) in Shandong was analyzed. The pore structure, flux, TMP and filtration resistance of polyvinyl chloride (PVC) and polyvinylidene fluoride (PVDF) membranes were compared. After adjusting and optimizing the operation parameters of the UF system, the operation verification was carried out for a long time. The results showed that membrane fouling caused by different pore diameter and structure was the main factor for the different filtration characteristics between PVC and PVDF membranes. In the constant filtration cycle operation mode, the flux acceleration decay period of PVC membrane was 82 – 220 min, which caused the membrane flux to attenuate by 9.14%, and formed a permanent decay membrane flux of about 5%. While flux attenuation of PVDF membrane was not obvious. Because of these situations, the operation of PVC and PVDF membranes system appeared a significant difference, of which the fouling rate of PVC membrane was obviously higher than that of PVDF membrane. When the UF system operated in constant filtration resistance mode, the optimal filtration cycle range of PVC and PVDF membranes were 82 – 108 minutes and 96 – 155 minutes, respectively. The filtration cycles of PVC and PVDF membranes at high and low temperatures were adjusted to 110 min, 90 min and 150 min, 120 min respectively. At this point, the TMP growth rate and the chemical maintenance cleaning cycle of PVC and PVDF membranes had very good consistency, and the UF system achieved long-term stable operation. Therefore, the research results provide a reference for optimizing operation parameters and keeping cooperative stable operation of different material UF in DWTP.

Key words: ultrafiltration; membrane material; membrane fouling; membrane flux; optimization of operating parameters

超滤技术是第三代饮用水处理工艺的核心^[1],可有效截留水中的颗粒物、微生物、非溶解性有机物等,显著改善饮用水水质,提高饮用水安全性,已在众多新建水厂和已有水厂升级改造中得到广泛应用。目前,用于饮用水处理领域的超滤膜主要为有机高分子膜,国内城镇超滤水厂采用的主要为 PVC 膜和 PVDF 膜。据统计,2009 年—2017 年投产运行的 13 座规模超过 $7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的大型超滤水厂中,采用 PVC 膜的为 7 座,采用 PVDF 膜的为 6 座。水厂超滤系统的长期稳定运行、节能降耗、提高产水率是今后面临的重点问题,越来越受到业界的关注。

在实际应用中超滤膜的材质对膜通量、跨膜压差(TMP)、运行周期、膜维护频率等都有显著影响,是保障超滤系统稳定运行、降低运维成本、控制膜污染、延长膜使用寿命的关键因素^[2-4]。膜污染是引起膜通量衰减、影响超滤系统运行稳定性的主要因素^[5-7],水中天然有机物、胶体颗粒、微生物代谢产物等是造成超滤膜污染的主要物质。由于材质、膜孔结构、亲疏水性等方面的不同,使得超滤膜的抗污染能力有明显差异^[8],因此不同材质超滤膜的运行

周期、膜通量、跨膜压差等的变化规律都会有显著的差别,需要根据各自的特点进行运行参数的调控与优化,以保证超滤系统长期稳定运行。

山东某 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 大型水厂是国内首家采用浸没式 PVC 超滤膜进行常规工艺升级改造的水厂,近年来进行了超滤膜的更换,其中 PVDF 膜和 PVC 膜各占 50%。水厂超滤系统更换 PVC 膜后在运行中出现膜通量下降快、跨膜压差增长迅速的现象,产水量下降幅度、化学维护频率明显高于同期更换的 PVDF 膜,使整个超滤系统的运行工况出现严重的不平衡现象,影响了水厂的正常运行。为此,分析了水厂 PVC 膜和 PVDF 膜的运行特性,对比了膜通量、膜孔结构、膜污染阻力等的变化趋势,解析了两种膜的污染特征,提出了超滤系统的调控方法,优化了其运行参数,实现了两者的协同稳定运行,为城镇给水厂超滤系统的调控和优化提供了支持。

1 材料及方法

1.1 试验装置

超滤膜测试系统如图 1 所示,其中压力传感器量程为 $-0.1 \sim 0.1 \text{ MPa}$,无纸记录仪的输入信号为

4~20 mA, 电子天平的量程为 0.01~3 200 g, 蠕动泵流量范围为 1~100 mL/min。纯水采用 Milli-Q 超纯水机制备, 电阻率为 18.2 MΩ·cm。

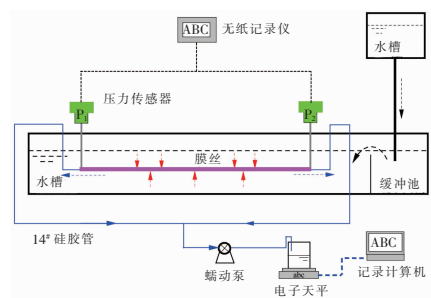


图1 超滤膜测试系统

Fig. 1 Ultrafiltration membrane testing system

1.2 试验材料

试验用超滤膜的新膜和旧膜分别取自水厂的备用膜组和生产膜组(已使用8个月), PVC和PVDF膜的规格均为长度×直径=2 200 mm×2 mm, 膜孔径分别为0.01和0.02 μm。

试验用水为水厂砂滤出水, 试验期间浊度为(0.53±0.21) NTU、DOC为(2.23±0.32) mg/L、COD_{Mn}为(1.58±0.22) mg/L、UV₂₅₄为(0.034±0.04) cm⁻¹、水温为(20.5±0.7) °C。

1.3 试验方法

截取一束长度为2 000 mm的超滤膜丝, 两端封装后放到超滤膜测试系统中, 用NaClO和纯水清洗后测定膜通量(J)及跨膜压差(TMP)。膜丝产水量由电子天平和计算机测量与记录, 膜丝的TMP由压力传感器和无纸记录仪测量与记录。

利用图1所示测试装置, 在压力为-15 kPa、过滤时间为120 min条件下, 分别采用纯水和砂滤出水进行新PVC膜和新PVDF膜的通量测定; 在通量为30 L/(m²·h)、过滤时间为220 min条件下, 采用砂滤出水进行旧PVC膜和旧PVDF膜的通量和跨膜压差测定, 利用公式 $R = \text{TMP}/(\mu_T \times J)$ 计算旧膜的过滤阻力(R), 其中 μ_T 为黏度。

将新膜纯水通量作为空白膜通量(J_0), J_0 与旧膜纯水通量之差作为永久衰减膜通量(J_s), J_0 与旧膜砂滤水通量之差作为膜污染及 J_s 共同导致的总衰减通量(J_T), 旧膜纯水通量与砂滤水通量之差作为膜污染的衰减通量(J_R), 则 $J_T = J_R + J_s$; 新膜纯水通量与砂滤水通量之差作为可逆膜污染的衰减通量(J_{Rr}), 化学维护清洗恢复的不可逆膜通量为 $J_{Rir} =$

$J_R - J_{Rr}$ 。

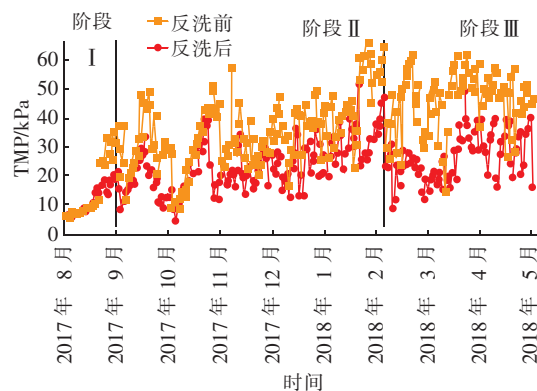
1.4 检测项目及方法

浊度采用哈希台式浊度仪测定, UV₂₅₄采用紫外分光光度计测定, DOC采用SHIMADZU总有机碳分析仪测定, 三维荧光光谱(EEM)采用荧光光谱仪测定, COD_{Mn}采用酸性高锰酸钾法测定。测定UV₂₅₄和DOC时, 水样先经0.45 μm滤膜过滤。超滤膜的膜孔结构采用场发射扫描电子显微镜(SEM)测定, 测试前先将膜丝烘干, 然后采用液氮脆断并喷金制样。

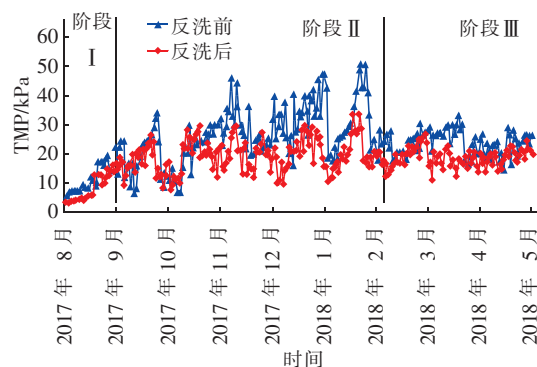
2 结果与讨论

2.1 水厂PVC和PVDF膜的TMP变化特征

依照水厂的运行工况, 超滤系统的膜通量变化可分为3个阶段, 阶段I的平均膜通量为22.23 L/(m²·h), 运行时间为30 d; 阶段II的平均膜通量为25.48 L/(m²·h), 运行时间为147 d; 阶段III的平均膜通量为30.25 L/(m²·h), 运行时间为83 d。水厂超滤系统以180 min恒定过滤周期模式运行, 水力反冲洗强度为60 L/(m²·h), 水力反洗时长为90 s。阶段I~III两种膜的TMP变化如图2所示。



a. PVC膜



b. PVDF膜

图2 运行参数调控前PVC与PVDF膜的TMP变化趋势

Fig. 2 Variation of TMP before parameters adjustment of PVC and PVDF membranes

在阶段 I ~ III, PVC 膜的 TMP 及其平均增长率分别为 (16.20 ± 10.39) 、 (34.53 ± 12.02) 、 (45.01 ± 9.92) kPa 和 1.058、1.873、3.170 kPa/d, PVDF 膜的分别为 (11.18 ± 4.81) 、 (26.65 ± 9.87) 、 (23.58 ± 4.07) kPa 和 0.703、0.968、0.602 kPa/d。可见,膜污染程度加剧会导致膜通量衰减和 TMP 增加^[5],采用水力反洗可有效去除可逆膜污染^[7],在阶段 I ~ III 的运行中, PVC 膜的 TMP 增长速率提高了 2.99 倍,而 PVDF 膜的 TMP 增长速率基本保持稳定。

表 1 为 3 个阶段水厂 PVC 膜和 PVDF 膜的化学维护清洗次数,其中 PVC 膜和 PVDF 膜在阶段 I 都没有进行化学维护清洗,但在阶段 II 和阶段 III 时 PVC 膜各实施了 9 次化学维护清洗,化学维护清洗周期分别为 16 和 9 d,化学维护清洗频率分别为同时期 PVDF 膜的 1.80 倍和 3.00 倍。可见,经过 30 d 运行后, PVC 膜就已出现明显的膜污染现象,频繁化学维护清洗后膜污染控制效果仍不佳, PVC 膜与 PVDF 膜的运行状态差异越来越大,严重影响了超滤系统的正常运行。

表 1 PVC 膜和 PVDF 膜的化学维护清洗频率

Tab. 1 Chemical cleaning frequency of PVC and PVDF membranes

项目	膜通量/ $(\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	化学维护清洗/次		化学恢复清洗/次	
		PVC	PVDF	PVC	PVDF
阶段 I	22.23	0	0	0	0
阶段 II	25.48	9	5	0	0
阶段 III	30.25	9	3	1	0

2.2 PVC 与 PVDF 膜的膜通量变化特征

采用图 1 测试装置得到的新、旧 PVC 和 PVDF 膜在过滤纯水和砂滤水时的膜通量如图 3 所示。

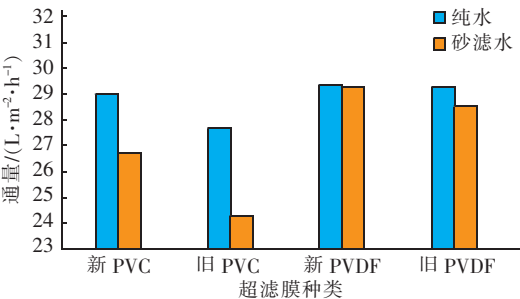


图 3 PVC 与 PVDF 膜过滤纯水、砂滤水的通量变化

Fig. 3 Flux of PVC and PVDF membrane when treating prue water and sand filtrate

由图 3 可知,旧 PVC 膜的纯水通量和砂滤出水

通量分别比新膜的衰减了 4.59% 和 9.14%,旧 PVDF 膜的纯水通量和砂滤出水通量分别比新膜的衰减了 0.31% 和 2.93%。新 PVC 膜和新 PVDF 膜的 J_0 值分别为 29.00 和 29.36 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,旧 PVC 膜和旧 PVDF 膜的砂滤出水通量分别为 24.25 和 28.50 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。可见,新 PVC 膜的 J_0 值仅比新 PVDF 膜低了 1.23%,而旧 PVC 膜的砂滤水通量比旧 PVDF 膜低了约 14.91%,呈现出更大幅度的通量衰减,这与水厂 PVC 膜和 PVDF 膜的通量变化趋势相符。

在旧 PVC 膜的 J_T 中, J_S 与 J_R 的百分比分别为 28% 与 72%,其中 J_{Rr} 占 J_R 的 67.54%, J_S 为新膜砂滤水通量的 4.98%;在旧 PVDF 膜的 J_T 中, J_S 与 J_R 的百分比分别为 10.47% 与 89.53%,其中 J_{Rr} 占 J_R 的 15.58%, J_S 为新膜砂滤水通量的 0.30% (见表 2)。旧 PVC 膜的 J_T 为 PVDF 膜的 5.52 倍, J_S 为 PVDF 膜的 14.78 倍, J_{Rr} 为 PVDF 膜的 19.25 倍, J_{Rir} 为 PVDF 膜的 1.71 倍。可知,膜污染对 PVC 膜通量的影响远大于 PVDF 膜, PVDF 膜的抗污染能力优于 PVC 膜的主要原因是过滤过程中形成较低的永久衰减通量和可逆污染。

表 2 旧 PVC 膜与旧 PVDF 膜的通量衰减特性

Tab. 2 Decayed flux distribution of PVC and PVDF membranes $\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$

项 目	J_T	J_S	J_R	J_{Rr}	J_{Rir}
旧 PVC 膜	4.75	1.33	3.42	2.31	1.11
旧 PVDF 膜	0.86	0.09	0.77	0.12	0.65

PVC 膜和 PVDF 膜的电镜检测结果显示, PVC 膜孔呈不对称指状孔结构,指状亚层膜孔垂直于膜表面分布,膜表面有一层致密的皮层,具有非对称结构膜特点,过滤形式为表层过滤^[9]; PVDF 膜孔呈对称均匀圆孔状结构,膜孔在各个方向均匀分布,表面无致密皮层,具有均匀分布对称结构膜特点^[9]。在过滤过程中, PVC 膜表面致密皮层可截留水中大部分颗粒污染物,形成的滤饼层进一步提高了对颗粒污染物的截留能力^[10]; PVDF 膜截留的水中颗粒污染物会形成由表面向膜孔内均匀分布的截留污染带^[11],因此 PVC 膜表面形成的滤饼层比 PVDF 膜的更加密实,造成的可逆污染也比 PVDF 膜严重。可见,膜孔径和膜孔结构是导致两种膜的污染程度出现明显差异的主要原因。这是因为过滤初期的 J_T 主要由膜孔堵塞造成,多为可逆污染;过滤后期的

J_T 主要由膜孔堵塞形成的膜孔径窄化造成,多为不可逆污染^[11]。随着膜污染程度的加剧,小分子污染物会在膜孔内形成难以清洗的永久性沉积,成为超滤膜的永久衰减通量(J_s)。

2.3 PVC与PVDF膜的过滤阻力变化特征

PVC与PVDF膜的过滤阻力(R)变化趋势见图4。可以看出,在0~82 min两种膜的 R 值增长趋势相似,增长速率分别为 0.038×10^9 和 $0.034 \times 10^9 \text{ m}^{-1}/\text{min}$;在82~220 min,PVC膜的 R 值增长趋势明显快于PVDF膜,其增长速率达到了 $0.060 \times 10^9 \text{ m}^{-1}/\text{min}$,为0~82 min的1.58倍,而PVDF膜的 R 值增长速率仅为 $0.025 \times 10^9 \text{ m}^{-1}/\text{min}$ 。由此可知,82~220 min是PVC膜的通量加速衰减时段,为了保持膜通量稳定,可考虑缩短该过滤时段。

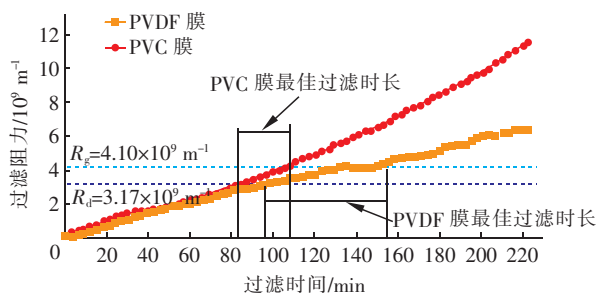


图4 PVC与PVDF膜过滤阻力增长趋势

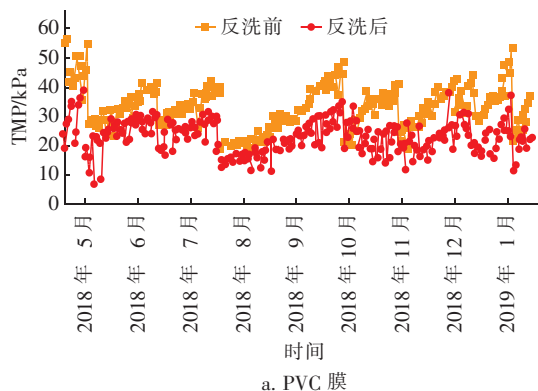
Fig. 4 Growth curve of filtration resistance in PVC and PVDF membrane permeate

结合水厂超滤系统恒定过滤阻力运行的工艺要求,PVC膜和PVDF膜的过滤需采用相同的 R 值。以水厂超滤系统的水力反洗控制条件 $\text{TMP} = 30 \text{ kPa}$ 为依据(高温期取 $T = 25^\circ\text{C}$,低温期取 $T = 15^\circ\text{C}$),得到超滤膜系统在高温期和低温期的过滤阻力分别为 4.10×10^9 和 $3.17 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ 。通过图4的过滤阻力曲线可得到PVC膜和PVDF膜的最佳过滤周期范围分别为82~108 min和96~155 min。

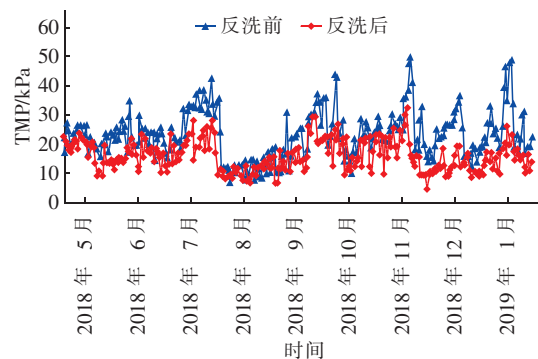
2.4 超滤系统运行参数的调控

超滤系统的运行周期缩短会造成自用水量及能耗的增加,结合两种膜前期的运行工况,将PVC膜和PVDF膜在高温期和低温期的最佳过滤周期调整为110、90 min和150、120 min。水厂超滤系统以恒定过滤阻力模式运行,高温期和低温期的恒定过滤阻力分别为 4.10×10^9 和 $3.17 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$,膜通量为 $30 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,水力反洗时长为90 s,为强化对可逆污染的清除,水力反冲洗强度由 $60 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 调整为 $80 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。运行参数调控后的TMP变化趋势

势如图5所示。可以看出,水厂超滤系统在参数调控后运行的250 d期间,PVC膜和PVDF膜的TMP分别为 $(32.29 \pm 6.65) \text{ kPa}$ 和 $(22.92 \pm 5.37) \text{ kPa}$,TMP分别比阶段Ⅲ降低了28.26%和9.69%;PVC膜的TMP增长速率降低至 $0.777 \text{ kPa}/\text{d}$,与PVDF膜的TMP增长速率($0.712 \text{ kPa}/\text{d}$)基本一致。在此期间PVC膜和PVDF膜分别进行了8次和6次化学维护清洗以及各1次化学恢复清洗。PVC膜的化学维护清洗周期由阶段Ⅲ的9 d延长至29 d,已经与PVDF膜30 d的维护清洗周期基本相同。可见,通过运行参数的调控与优化,使得PVC膜和PVDF膜的TMP增长速率和化学维护清洗周期相近,超滤系统的运行稳定性得到大幅度提升。



a. PVC膜



b. PVDF膜

图5 PVC膜与PVDF膜参数调整后的TMP变化趋势

Fig. 5 Variation of TMP after parameters adjustment in production of PVC and PVDF membranes

3 结论

① 水厂超滤系统在恒定过滤周期运行模式下,PVC膜的污染程度更严重,化学维护清洗更频繁,与PVDF膜的TMP及其增长速率存在显著差异;在阶段Ⅲ,PVC膜的TMP增长速率达到 $3.170 \text{ kPa}/\text{d}$,化学维护清洗周期低至9 d,分别为PVDF膜

的 5.27 倍和 3.00 倍。

② 膜孔径和膜孔结构不同造成的膜污染是导致 PVC 膜与 PVDF 膜过滤特性差异的主要原因,长期运行的 PVC 膜通量衰减了 9.14%,并形成了 4.98% 的永久衰减膜通量。在恒定过滤周期运行模式下,PVC 的膜污染速率明显高于 PVDF 膜,过滤阻力加速衰减的时段为 82~220 min;超滤系统以恒定过滤阻力模式运行时,PVC 膜与 PVDF 膜的最佳过滤周期范围分别为 82~108 min 和 96~155 min。

③ 将水厂超滤系统的 PVC 膜和 PVDF 膜在高温期和低温期的过滤周期分别调整为 110、90 min 和 150、120 min 后,在 250 d 运行期间 TMP 平均增长速率分别为 0.777 和 0.712 kPa/d,PVC 膜的 TMP 比阶段Ⅲ降低了 28.26%,化学维护清洗周期由阶段Ⅲ的 9 d 延长至 29 d,与 PVDF 膜基本一致,超滤系统的运行稳定性得到大幅度提升。

参考文献:

- [1] 李圭白,田家宇,齐鲁. 第三代城市饮用水净化工艺及超滤的零污染通量[J]. 给水排水,2010,36(8): 11-15.
LI Guibai, TIAN Jiayu, QI Lu. The third generation of urban drinking water treatment process and zero-membrane fouling flux of ultrafiltration[J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(8): 11-15 (in Chinese).
- [2] 鄢忠森,瞿芳术,梁恒,等. 超滤膜污染以及膜前预处理技术研究进展[J]. 膜科学与技术,2014,34(4): 108-114.
YAN Zhongsen, QU Fangsu, LIANG Heng, et al. A review on the ultrafiltration membrane pollution and pretreatment technology[J]. Membrane Science and Technology, 2014, 34(4): 108-114 (in Chinese).
- [3] GAO W, LIANG H, MA J, et al. Membrane fouling control in ultrafiltration technology for drinking water production: a review[J]. Desalination, 2011, 272(1/2/3): 1-8.
- [4] YU W, GRAHAM N J D, FOWLER G D. Coagulation and oxidation for controlling ultrafiltration membrane fouling in drinking water treatment: application of ozone at low dose in submerged membrane tank[J]. Water Research, 2016, 65: 1-10.
- [5] 王小兵,游浩荣,叶元柳,等. PAC/UF 工艺处理微污染水源水的膜污染特性[J]. 中国给水排水,2020,36(11): 27-32.
WANG Xiaobing, YOU Haorong, YE Yuanliu, et al. Membrane fouling of PAC/UF process treating micro-polluted source water[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(11): 27-32 (in Chinese).
- [6] 乔沐阳,李星,于海宽,等. 石灰软化/超滤组合工艺处理高硬度纳滤浓水[J]. 中国给水排水,2019,35(19): 33-39.
QIAO MUYANG, LI XING, YU Haikuan, et al. Treatment of nanofiltration concentrate by combined process of lime softening/ultrafiltration [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(19): 33-39 (in Chinese).
- [7] CHANG H Q, QU F S, LIANG H, et al. Correlating ultrafiltration membrane fouling with membrane properties, water quality, and permeate flux [J]. Desalination and Water Treatment, 2014, 56(7): 1-12.
- [8] SHAO J H, HOU J, SONG H C. Comparison of humic acid rejection and flux decline during filtration with negatively charged and uncharged ultrafiltration membranes[J]. Water Research, 2011, 45(2): 473-482.
- [9] MOCHIZUKI S, ZYDNEY A L. Effect of protein adsorption on the transport characteristics of asymmetric ultrafiltration membranes[J]. Biotechnology Progress, 1992, 8(6): 553-561.
- [10] 刘婷. 三种预处理技术对超滤膜污染的影响及其机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
LIU Ting. Effect of Three Pretreatment Methods on Fouling of Ultrafiltration Membrane and Involved Mechanisms [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011 (in Chinese).
- [11] NAZEM-BOKAEE H, FALLAHIANBIJAN F, CHEN D Y, et al. Probing pore structure of virus filters using scanning electron microscopy with gold nanoparticles [J]. Journal of Membrane Science, 2018, 552: 144-152.

作者简介:于海宽(1980-),男,内蒙古兴和人,博士研究生,主要研究方向为膜法水处理。

E-mail: yhk_123@qq.com

收稿日期: 2020-08-20

修回日期: 2020-09-06

(编辑:李德强)