

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.15.005

不同超滤组合工艺对滤池反冲洗废水的处理效能

林锦棠¹, 韩永辉², 许泽彬³, 董燕珊³, 刘 贝¹, 梁 恒²

(1. 佛山市环境保护投资有限公司, 广东 佛山 528000; 2. 哈尔滨工业大学 环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 3. 佛山水业三水供水有限公司, 广东 佛山 528000)

摘 要: 为了探究超滤对滤池反冲洗废水的处理效果及其组合工艺对膜污染的控制效能,采用直接超滤、在线混凝/超滤、混凝/沉淀/超滤3种不同工艺处理滤池反冲洗废水。结果表明,3种工艺对浊度的去除率都在99.5%以上,出水 COD_{Mn} 均在1.20 mg/L以下,表明超滤对浊度和 COD_{Mn} 具有优异的去除效果;直接超滤工艺对 UV_{254} 的去除率为 $(26.93 \pm 4.14)\%$,而在线混凝/超滤工艺与混凝/沉淀/超滤工艺对 UV_{254} 的去除率分别可达到 $(37.41 \pm 3.57)\%$ 和 $(40.87 \pm 6.22)\%$,明显优于直接超滤工艺;3种工艺对原水中荧光类污染物的去除效果均不明显;通过分析3种工艺的出水水质、膜污染情况以及傅里叶红外光谱图和膜表面形貌图发现,直接超滤造成的膜污染最为严重,且不可逆污染占主导,出水水质情况表明预处理能够降低超滤进水污染物负荷,并且改变水中污染物形态,因此预混凝能够有效缓解膜污染,而混凝/沉淀/超滤工艺对膜污染的缓解效果最好;同时,膜污染模型拟合结果表明,滤饼层过滤和临界阻塞是引起直接超滤膜污染的主要原因。

关键词: 滤池反冲洗废水; 超滤; 混凝; 膜污染

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)15-0028-07

Performance of Different Ultrafiltration Combined Processes for Treatment of Filter Backwash Wastewater

LIN Jin-tang¹, HAN Yong-hui², XU Ze-bin³, DONG Yan-shan³, LIU Bei¹,
LIANG Heng²

(1. Foshan Environmental Protection Investment Co. Ltd., Foshan 528000, China; 2. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. Foshan Water Industry Sanshui Water Supply Co. Ltd., Foshan 528000, China)

Abstract: In order to investigate the treatment effect of ultrafiltration on filter backwash wastewater and the control effect of combined processes on membrane fouling, three different processes (direct ultrafiltration, on-line coagulation/ultrafiltration and coagulation/sedimentation/ultrafiltration) were employed to treat filter backwash wastewater. Turbidity removal efficiencies of the three processes were all above 99.5%, and the effluent COD_{Mn} concentrations were always below 1.20 mg/L, indicating that ultrafiltration had excellent turbidity and COD_{Mn} removal performance. UV_{254} removal efficiency of direct ultrafiltration was $(26.93 \pm 4.14)\%$, while the UV_{254} removal efficiencies of on-line coagulation/ultrafiltration and coagulation/sedimentation/ultrafiltration reached $(37.41 \pm 3.57)\%$ and $(40.87 \pm 6.22)\%$, respectively, which were obviously better than that of direct ultrafiltration. The three treatment processes had no obvious removal effect on fluorescent pollutants in raw water. Effluent quality of the three processes, membrane fouling, FTIR spectroscopy and membrane surface morphology were analyzed. It was found that the membrane fouling caused by direct ultrafiltration was the most serious, and

irreversible fouling played a dominant role. The effluent quality indicated that pretreatment could reduce the pollutant load in the influent of the ultrafiltration and change the form of pollutants in the water. Therefore, pre-coagulation could effectively relieve membrane fouling and the coagulation/sedimentation/ultrafiltration process had the best alleviating effect on membrane fouling. Meanwhile, membrane fouling model fitting results showed that the main membrane fouling mechanism of direct ultrafiltration was cake filtration and intermediate blocking.

Key words: filter backwash wastewater; ultrafiltration; coagulation; membrane fouling

在现有的净水厂中,滤池在使用过程中需要定期反冲洗,反冲洗废水中含有大量的污染物(颗粒、有机物、细菌等),若将这些废水直接排放不仅浪费水资源,还会造成环境污染^[1]。因此,对滤池反冲洗废水进行安全回收利用对于水厂的节水具有重要的现实意义。而以超滤为核心的第三代饮用水处理工艺能有效截留水中的颗粒物、悬浮物及细菌等,从而保证水质安全^[2]。超滤已被证明是一种有效的滤池反冲洗废水回收方法^[3],但在实际运行中,膜污染始终是阻碍超滤工艺进一步应用的关键性问题。膜污染会引起膜通量下降或跨膜压差(TMP)升高,增加运行和维护成本,影响超滤运行的稳定性。因此,在运行中通常采取一些预处理措施来减缓超滤膜污染,例如混凝^[4]、氧化^[5]、吸附^[6]等。其中,混凝是研究较多、使用较普遍的超滤膜预处理方法。

为了探究超滤对滤池反冲洗废水的处理效果,以及预混凝/超滤组合工艺对膜污染的控制效能,笔者分别采用在线混凝和混凝/沉淀两种不同的混凝方式与超滤工艺进行联用,并与直接超滤工艺进行对比,考察了3种不同超滤工艺对滤池反冲洗废水的处理效果,同时通过污染模型拟合以及膜阻力分布对膜污染情况进行了研究,并进行了傅里叶红外光谱和膜表面形貌分析。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

试验原水取自广东省佛山市某水厂排水池,该排水池主要收集砂滤池周期反冲洗后的废水。试验装置如图1所示,分别采用直接超滤、在线混凝/超滤以及混凝/沉淀/超滤3种不同工艺处理滤池反冲洗废水。直接超滤时,原水不经任何预处理直接通过膜组件进行超滤;在线混凝/超滤时,先向原水中投加混凝剂,经过混凝后不静置沉淀直接通过膜组件进行超滤;混凝/沉淀/超滤时,向原水中投加混凝

剂,经六联搅拌器搅拌后先沉淀一定时间,然后再通过膜组件进行超滤。为了加速膜污染,3种工艺的超滤膜通量均调为 $72 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,运行周期为30 min,每个周期结束后进行水力反冲洗,水力反冲洗通量为膜通量的两倍,水力反冲洗时间为1 min。混凝剂选用聚合氯化铝(PACl),投加量为 $3 \text{ mg}/\text{L}$ 。试验采用的中空纤维超滤膜由海南立升公司提供,膜丝面积为 0.011 m^2 ,超滤膜材质为聚偏氟乙烯,公称孔径为 $0.02 \mu\text{m}$,截留分子质量为150 ku。

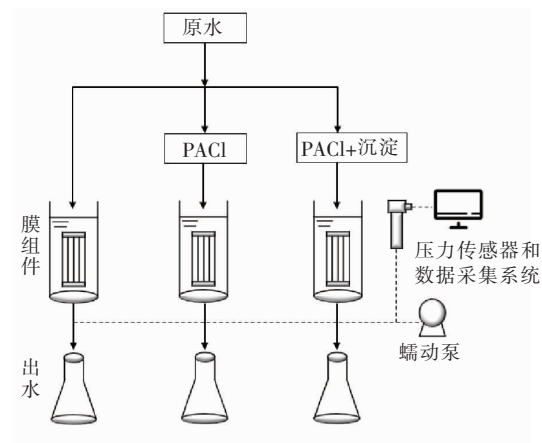


图1 试验装置

Fig. 1 Diagram of experimental setup

1.2 分析项目与方法

COD_{Mn} 、 UV_{254} 、浊度分别采用酸性高锰酸钾滴定法、紫外分光光度法、HACH-2100N台式浊度仪测定,TMP的变化通过压力传感器采集,利用日立F-7000荧光光谱仪进行荧光性有机物的检测,采用傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)定性表征超滤膜表面的官能团,采用扫描电子显微镜(SEM)对膜丝表面形貌进行分析。

膜污染阻力的计算方法如下^[7]:

$$R_t = \text{TMP}/(\mu \cdot J) = R_m + R_{ir} + R_r \quad (1)$$

$$R_m = \text{TMP}_0/(\mu \cdot J) \quad (2)$$

$$R_t = \text{TMP}_1/(\mu \cdot J) \quad (3)$$

$$R_r = \text{TMP}_1/(\mu \cdot J) - \text{TMP}_2/(\mu \cdot J) \quad (4)$$

$$R_{ir} = R_t - R_m - R_r = \text{TMP}_2 / (\mu \cdot J) - \text{TMP}_0 / (\mu \cdot J) \quad (5)$$

式中: R_t 为总阻力, m^{-1} ; R_m 、 R_r 和 R_{ir} 分别为膜自身阻力、膜可逆阻力和膜不可逆阻力, m^{-1} ; μ 为水的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; J 为膜通量, $\text{m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$; TMP_0 为试验开始时过滤纯水的初始跨膜压差, Pa ; TMP_1 为过滤水样后的跨膜压差, Pa ; TMP_2 为水力反冲洗后的跨膜压差, Pa 。

2 结果与讨论

2.1 不同工艺的出水水质分析

试验中,滤池反冲洗废水的浊度平均值为 40.4 NTU,经 3 种不同超滤工艺处理后,对浊度的去除率都在 99.5% 以上,出水浊度稳定在 0.1 NTU 左右。这是由于超滤膜纳米级的膜孔径对水中的颗粒物、胶体和悬浮物具有强大的截留能力,因此不论是否有混凝前处理,超滤对浊度都有优异的去除效果。

滤池反冲洗废水的 COD_{Mn} 变化幅度较大,试验期间的平均值为 5.180 mg/L,经过 3 种超滤工艺处理后, COD_{Mn} 分别降至 (1.062 ± 0.089) 、 (0.957 ± 0.067) 、 (0.920 ± 0.144) mg/L,相应的去除率分别达到了 $(77.08 \pm 9.42)\%$ 、 $(78.74 \pm 10.88)\%$ 和 $(80.42 \pm 7.16)\%$,表明超滤对滤池反冲洗废水中的有机污染物具有良好的去除效果。同时,混凝/沉淀对 COD_{Mn} 也有较好的去除效果,经混凝和沉淀后所取上清液的 COD_{Mn} 为 (1.445 ± 0.417) mg/L,由此可以看出,与混凝/沉淀/超滤相比,直接超滤将 77% 左右的有机物通过超滤膜的空间位阻效应直接截留,这可能会导致超滤膜污染迅速加剧。同时可以看出,3 种工艺对 COD_{Mn} 的去除效果差别并不大。这是由于预混凝的作用主要是通过投加混凝剂使水中的胶体颗粒和大分子有机物聚集沉降,从而更有利于超滤的截留,对于溶解性有机物的去除效果并不好,而超滤的截留作用主要去除的也是大分子有机物,对于滤池反冲洗废水来说,不论是否有预混凝前处理,超滤出水 COD_{Mn} 均在 1.20 mg/L 以下,能够很好地满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求。

试验还考察了不同工艺对滤池反冲洗废水中 UV_{254} 的去除效果。进水 UV_{254} 为 $(0.034 \pm 0.003) \text{ cm}^{-1}$,经过在线混凝或者混凝/沉淀后, UV_{254} 分别降低至 (0.025 ± 0.002) 、 $(0.024 \pm 0.004) \text{ cm}^{-1}$ 。值得注意的是,原水直接超滤后的 UV_{254} 为 $(0.024 \pm$

$0.004) \text{ cm}^{-1}$,去除率达到 $(26.93 \pm 4.14)\%$,基本与单独混凝/沉淀后的效果相同,由此可以看出,预混凝去除了部分有机污染物,减轻了后续超滤工艺的污染物负荷,会对膜污染起到缓解作用,而对于直接超滤来说,高负荷的有机污染物可能会加剧膜污染。同时发现,在线混凝/超滤与混凝/沉淀/超滤出水的 UV_{254} 分别为 (0.021 ± 0.001) 、 $(0.020 \pm 0.004) \text{ cm}^{-1}$,去除率分别达到了 $(37.41 \pm 3.57)\%$ 、 $(40.87 \pm 6.22)\%$,对 UV_{254} 的去除效果明显优于直接超滤。 UV_{254} 主要表征水中带有苯环或共轭双键的腐殖质类有机物,这类有机物一般是溶解性和分子质量较小的物质,单独的超滤空间位阻作用对这类物质的去除能力有限,而混凝可以通过电中和、吸附等作用使水中的小分子有机物凝聚,从而更利于超滤的截留去除。

2.2 三维荧光光谱分析

荧光区域一般可以划分为芳香族蛋白质 I、芳香族蛋白质 II、类富里酸、类溶解性微生物代谢产物和类腐殖酸等 5 个区域^[8]。3 种工艺进、出水的三维荧光光谱如图 2 所示。

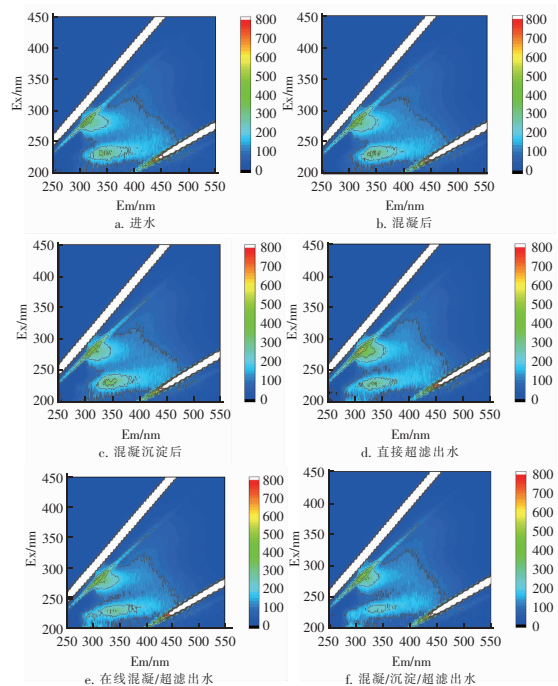


图2 不同工艺的进、出水的三维荧光光谱

Fig. 2 Fluorescence spectrum of influent and effluent in different processes

由图 2 可知,进水以及经不同工艺处理后的出水在 $\text{Ex}/\text{Em} = 280 \text{ nm}/310 \text{ nm}$ 、 $225 \text{ nm}/343 \text{ nm}$ 、 220

nm/438 nm 处存在特征峰,说明水中类溶解性微生物代谢产物、类蛋白类物质以及类富里酸物质含量较多。直接超滤对于这些荧光类物质的去除效果并不明显,出水荧光强度无明显减弱;在线混凝/超滤出水荧光强度有较小减弱;相比之下,混凝/沉淀/超滤对荧光类物质的去除效果最好,在类蛋白类特征峰处的强度有明显的减弱。由于存在特征峰的荧光类有机物如类溶解性微生物代谢产物、类富里酸物质多为溶解性污染物,由此可知,单独超滤对于溶解性有机物的去除作用微弱,当超滤与混凝前处理联用时,对此类污染物有一定的去除效果。

2.3 不同工艺的膜污染情况

2.3.1 膜污染阻力分析

图 3 为不同超滤工艺运行过程中的膜污染情况。由图 3(a)可知,采用直接超滤处理时,TMP 上升迅速,3 个周期后从初始的 12 kPa 增长至 67 kPa,而在线混凝/超滤和混凝/沉淀/超滤的 TMP 上升趋势较为平缓,其中混凝/沉淀/超滤的 TMP 增长最为缓慢,3 个周期结束后 TMP 仅增至 19 kPa,远远低于在线混凝/超滤和直接超滤。

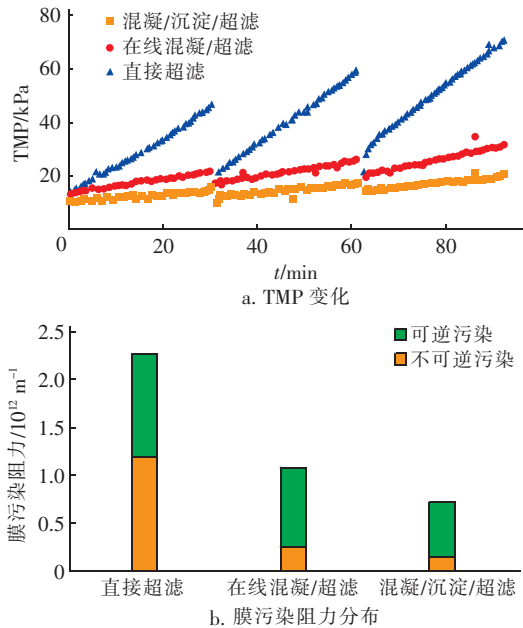


图 3 不同工艺的膜污染情况

Fig. 3 Membrane fouling in different processes

从图 3(b)可以看出,直接超滤所造成的膜污染最为严重,无论是总污染阻力、可逆污染阻力还是不可逆污染阻力,都远远超过其他两种工艺,其中不可逆污染阻力占总污染阻力的比例大于 50%,说明不可逆污染在膜污染中占主导地位。混凝/沉淀对超

滤膜污染的缓解效果最好,膜污染很大一部分都为可逆污染,能够通过水力反冲洗除去,造成的不可逆污染比例较小。这说明对于滤池反冲洗废水,不经预混凝前处理直接超滤容易造成小分子物质堵塞超滤膜孔,从而快速引起严重的膜污染。经过混凝预处理后,小分子物质凝聚成絮体,易被膜孔截留在外,不易堵塞膜孔,而混凝后再进行沉淀作用则能够进一步减少超滤进水中的污染物,从而最大程度上缓解膜污染。

2.3.2 膜污染模型拟合

为了进一步研究超滤膜污染机理,引入了完全阻塞、标准阻塞、临界阻塞和滤饼层过滤 4 种经典膜污染模型^[9]。完全阻塞模型假设在超滤过程中,颗粒污染物粒径与超滤膜孔大小接近,从而导致膜孔被颗粒物质完全堵塞,水流无法通过堵塞的膜孔。标准阻塞模型假设颗粒污染物粒径小于膜孔,在过滤过程中颗粒物逐渐沉积到膜孔内壁,引起膜孔过水能力下降。临界阻塞介于完全阻塞和标准阻塞模型之间。滤饼层过滤模型假设颗粒污染物随着过滤时间的增加逐渐在膜表面积累和压实,从而导致膜表面滤饼层的形成。4 种膜污染模型的表达式如表 1 所示^[7]。

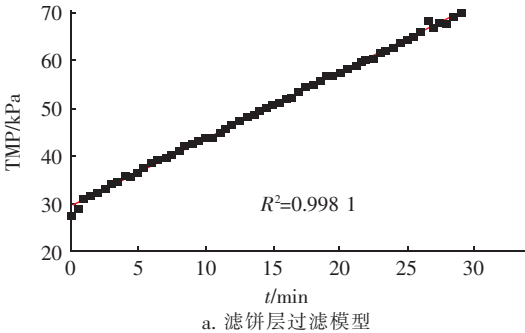
表 1 4 种经典膜污染模型公式

Tab. 4 Four typical pollution model formulas

项 目	公式
滤饼层过滤模型	$p = p_0 + At$
完全阻塞模型	$1/p = 1/p_0 - Bt$
临界阻塞模型	$p^{-0.5} = p_0^{-0.5} - Ct$
标准阻塞模型	$\ln p = \ln p_0 + Dt$

注: p 为过滤跨膜压差, t 为过滤时间, A 、 B 、 C 、 D 均为常数。

在直接超滤工艺条件下,4 种膜污染模型的拟合曲线如图 4 所示。其余两种工艺的膜污染模型拟合结果见表 2。



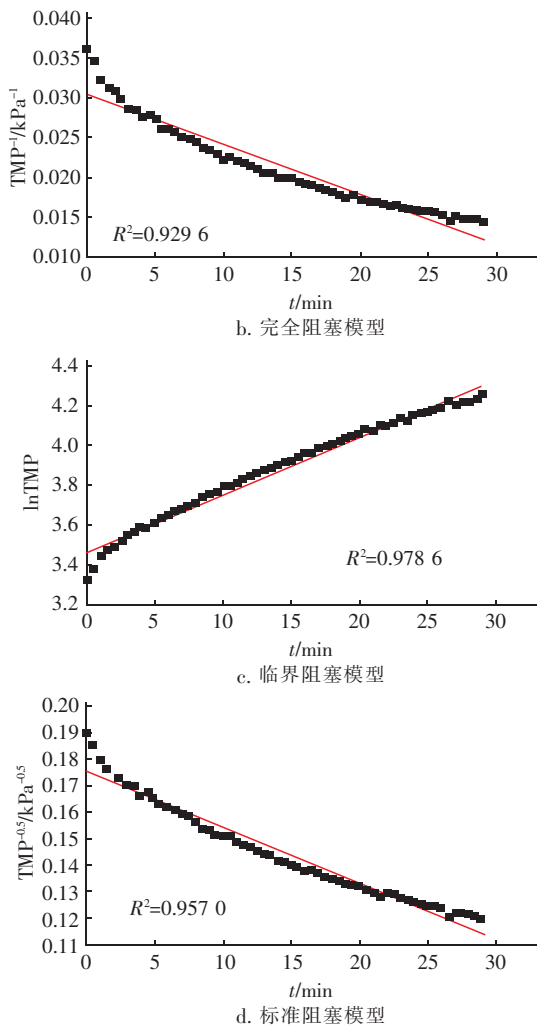


图 4 直接超滤工艺的膜污染模型拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of four membrane fouling models of direct UF process

表 2 不同超滤工艺的膜污染模型拟合曲线的线性回归值比较

Tab. 2 Comparison of linear regression values of membrane fouling models fitting curves in different UF processes

项 目	滤饼层过滤模型	完全阻塞模型	临界阻塞模型	标准阻塞模型
混凝/沉淀/超滤	0.941 9	0.939 3	0.943 9	0.943 4
在线混凝/超滤	0.951 7	0.949 9	0.956 9	0.955 3
直接超滤	0.998 1	0.929 6	0.978 6	0.957 0

由表 2 可知,当采用直接超滤工艺时,滤饼层过滤模型、完全阻塞模型、临界阻塞模型和标准阻塞模型的 R^2 值分别为 0.998 1、0.929 6、0.978 6 和 0.957 0,这说明直接超滤处理滤池反冲洗水的过程中存在多个污染机理共存的情况。相比较来说,滤饼层过滤和临界阻塞是引起超滤膜污染的主要原

因。在过滤的初始阶段,滤池反冲洗废水中的小分子有机物可以进入超滤膜膜孔,积累在膜孔内壁,形成阻塞作用;同时,进水中的悬浮颗粒物以及大分子有机物会被超滤膜截留在膜表面,从而形成滤饼层。当运行方式由直接超滤变为在线混凝/超滤和混凝/沉淀/超滤时,可以发现,滤饼层过滤模型的 R^2 值由 0.998 1 降至 0.951 7 和 0.941 9,这说明与直接超滤相比,通过投加混凝剂能够有效减弱滤饼层污染的作用。而对于在线混凝/超滤和混凝/沉淀/超滤,临界阻塞和标准阻塞相对来说是引起膜污染的主要原因,分析认为,原水经过混凝后,悬浮颗粒物以及大分子有机物聚集成松散的絮体,经过沉淀作用可被去除,此时未被去除的小分子有机污染物会在过滤时造成膜孔的标准阻塞,若混凝后不经沉淀直接进行膜过滤,絮体会吸附在膜表面,但由于絮体较为松散,因此对水流的阻碍作用较小,同时也易于在反冲洗的作用下脱离膜表面,从而减轻膜污染。

2.4 傅里叶红外光谱分析

对 3 种不同工艺过滤后的膜丝以及原膜进行了傅里叶红外光谱扫描,结果如图 5 所示。

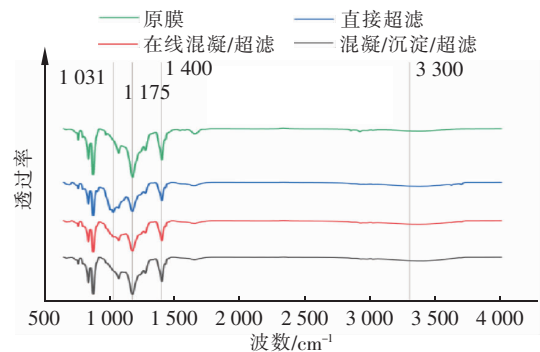


图 5 原膜和不同工艺膜的傅里叶红外光谱

Fig. 5 FTIR spectra of pristine membrane and different process membranes

由图 5 可知,所有光谱在 1400 cm^{-1} 和 1175 cm^{-1} 处均有很强的吸收峰,这是由于 $\text{H}-\text{C}-\text{H}$ 键的弯曲振动和 $\text{C}-\text{F}$ 键的拉伸振动所致,这是 PVDF 聚合物的典型光谱^[10]。与原始膜相比,其他 3 种膜在 3300 cm^{-1} 处均出现了微弱的吸收峰,这可能是亲水性污染物引起 $\text{O}-\text{H}$ 和 $\text{N}-\text{H}$ 化学键的拉伸所致^[11]。值得注意的是,与其他膜相比,直接超滤后的膜在 1031 cm^{-1} 处出现了新的吸收峰,这可能是由于多糖类污染物引起 $\text{C}-\text{O}$ 或 $\text{C}-\text{C}$ 键拉伸所致^[12]。与直接超滤相比,经过混凝预处理后的膜表

面主要官能团的峰值强度和原始膜基本一致,表明预混凝对于膜表面污染具有缓解作用。

2.5 膜丝表面形貌分析

对试验结束后的膜丝取样进行了扫描电镜表征,观察膜表面形貌的变化,扫描电镜放大倍数为2 000倍,结果见图6。可以看出,原膜的表面比较平整光滑,表层分布均匀,可看到小的膜孔的存在。经过直接超滤后,膜表面残留了大量污染物,覆盖了厚厚的污染层,膜表面变得粗糙不平整,与原膜相比,膜污染明显且严重。经过在线混凝/超滤后,与原膜相比,膜丝表面出现明显的大块污染物,但与直接超滤相比,该膜表面相对平整。分析认为,在线混凝形成的絮体增大了原水中污染物的粒径,这些松散的絮体可被超滤膜吸附截留,一部分经反洗后容易脱落,未脱落的絮体则覆盖在膜表面,造成污染。经过混凝/沉淀/超滤后,膜表面与原膜最为接近,比较平整光滑,并且可以观察到未被堵塞的膜孔。这是因为经混凝/沉淀后,大分子有机污染物被去除,污染物颗粒粒径变小,膜表面污染因此得到缓解。由此可知,3种超滤工艺中,直接超滤造成的膜污染最为严重,而混凝/沉淀后再超滤则能够有效缓解膜污染,这与前文中膜污染的分析结果一致。

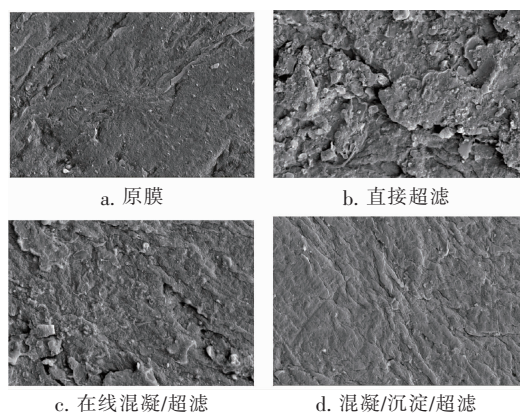


图6 超滤膜表面的SEM照片

Fig.6 SEM images of UF membrane surface

2.6 膜污染机理

图7所示为3种不同超滤工艺处理滤池反冲洗废水过程中的膜污染机理。超滤膜的主要截留机制通常认为是孔径筛分作用,原水经混凝作用后,水中的胶体颗粒以及大分子污染物脱稳形成矾花絮体,直径较大且较密实的矾花容易下沉,因此混凝/沉淀/超滤工艺中由于混凝和沉淀的预处理作用,改变了水中污染物的形态,导致超滤进水的污染物负荷

最小,并且造成膜污染的主要是小分子污染物,在过滤过程中吸附在膜孔中;而在线混凝/超滤工艺由于没有沉淀作用,混凝形成的矾花在过滤过程中吸附沉积在膜表面,与混凝/沉淀/超滤工艺相比,膜表面的矾花会造成过流量下降,但由于形成的矾花较为松散,易于在反洗水流的作用下脱离膜表面。对于直接超滤,由于没有任何前处理,因此超滤进水的污染物负荷最大,在过滤过程中比膜孔径小的小分子污染物容易在膜孔内积累,而与膜孔径接近的大分子污染物会造成严重的膜孔堵塞,继而逐渐在膜表面积累压实形成密实的滤饼层,在水流的反冲洗作用下难以去除,造成滤饼层污染。

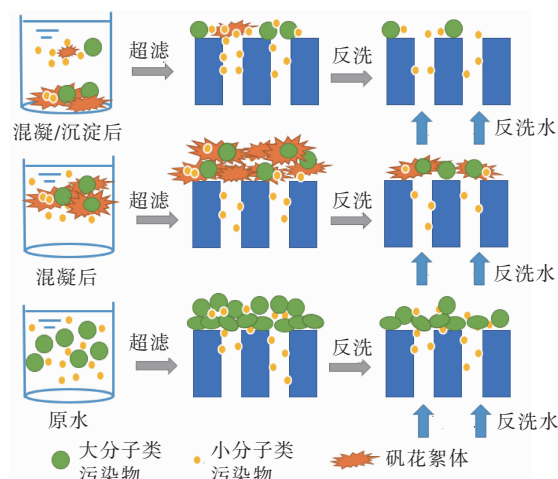


图7 不同超滤工艺的膜污染机理

Fig.7 Schematics of membrane fouling mechanism of different UF processes

3 结论

① 超滤对浊度具有优异的去除能力,三种超滤工艺对滤池反冲洗废水的浊度均能达到99.5%以上的去除率。在线混凝/超滤工艺与混凝/沉淀/超滤工艺对 UV_{254} 的去除率分别可达到 $(37.41 \pm 3.57)\%$ 和 $(40.87 \pm 6.22)\%$,明显优于直接超滤的 $(26.93 \pm 4.14)\%$;对于 COD_{Mn} ,不论是否有混凝预处理,超滤出水的 COD_{Mn} 浓度均在1.20 mg/L以下,但预混凝能够降低超滤进水污染物负荷,减缓膜污染,而直接超滤由于没有预处理作用,高负荷的污染物会导致膜污染迅速加剧。

② 直接超滤对滤池反冲洗废水中的荧光性污染物的去除效果不佳,而混凝/沉淀/超滤工艺对蛋白类荧光物质有一定的去除效果。

③ 直接超滤造成的膜污染最为严重,而且不

可逆污染在膜污染中占据主导地位,而与混凝联用的两种超滤工艺中的膜污染主要是可逆污染。混凝/沉淀预处理对超滤膜污染的缓解效果最好。另外,对膜表面进行的傅里叶红外光谱分析和SEM分析结果也表明,相对于直接超滤,预混凝作用能够有效缓解膜污染。

④ 由膜污染模型拟合结果可知,直接超滤引起的膜污染存在多个污染机理共存的情况,相对而言,滤饼层过滤和临界阻塞是引起直接超滤膜污染的主要原因。

参考文献:

- [1] 柯水洲,袁辉洲,袁韧,等. 滤池反冲洗废水回用和混凝性能的改善[J]. 中国给水排水,2000,16(6):9-12.
KE Shuizhou, YUAN Huizhou, YUAN Ren, *et al.* Reuse of filter backwash water and improvement of coagulation properties [J]. China Water & Wastewater, 2000, 16(6):9-12 (in Chinese).
- [2] 付宛宜,吴启龙,张锡辉,等. 超滤膜及其组合工艺在饮用水处理中的应用[J]. 中国给水排水,2013,29(22):1-6.
FU Wanyi, WU Qilong, ZHANG Xihui, *et al.* Application of ultrafiltration and its combined process in drinking water treatment [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(22):1-6 (in Chinese).
- [3] 姚左钢. 超滤膜在水厂滤池反冲洗废水处理中的应用[J]. 给水排水,2013,39(10):44-49.
YAO Zuogang. Application of ultrafiltration membrane in the treatment of filter backwash water [J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(10):44-49 (in Chinese).
- [4] 魏永,姚维昊,桂波,等. 在线混凝/超滤处理太湖水的试验研究[J]. 中国给水排水,2019,35(15):54-58.
WEI Yong, YAO Weihao, GUI Bo, *et al.* Treatment of Taihu Lake water by on-line coagulation/ultrafiltration [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(15):54-58 (in Chinese).
- [5] 王慧文,陈卫,陶辉. 预氧化/超滤组合除锰工艺的膜污染特性[J]. 中国给水排水,2020,36(9):22-26.
WANG Huiwen, CHEN Wei, TAO Hui. Membrane fouling characteristics of pre-oxidation/ultrafiltration combined process for manganese removal [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(9):22-26 (in Chinese).
- [6] 陈楚晓,杨博喧,陈志强,等. 含炭高密度沉淀池/超滤工艺处理污水厂二级出水[J]. 中国给水排水,2020,36(1):18-22.
CHEN Chuxiao, YANG Boxuan, CHEN Zhiqiang, *et al.* Advanced treatment of secondary effluent by combined process of high-density sedimentation tank with powdered activated carbon and ultrafiltration [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(1):18-22 (in Chinese).
- [7] GUO Y, BAI L, TANG X, *et al.* Coupling continuous sand filtration to ultrafiltration for drinking water treatment: improved performance and membrane fouling control [J]. Journal of Membrane Science, 2018, 567:18-27.
- [8] CHEN W, WESTERHOFF P, LEENHEER J, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(24):5701-5710.
- [9] HO C C, ZYDNEY A L. A combined pore blockage and cake filtration model for protein fouling during microfiltration [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2000, 232(2):389-399.
- [10] TIAN J, WU C, YU H, *et al.* Applying ultraviolet/persulfate (UV/PS) pre-oxidation for controlling ultrafiltration membrane fouling by natural organic matter (NOM) in surface water [J]. Water Research, 2018, 132:190-199.
- [11] HER N, AMY G, CHUNG J, *et al.* Characterizing dissolved organic matter and evaluating associated nanofiltration membrane fouling [J]. Chemosphere, 2008, 70(3):495-502.
- [12] LIN D, TANG X, XING J, *et al.* Application of peroxymonosulfate-based advanced oxidation process as a novel pretreatment for nanofiltration: comparison with conventional coagulation [J]. Separation and Purification Technology, 2019, 224:255-264.

作者简介:林锦棠(1980-),男,广东佛山人,大学本科,高级工程师,研究方向为环境保护技术。

E-mail:13500252443@139.com

收稿日期:2021-03-31

修回日期:2021-04-29

(编辑:刘贵春)