

浸没式超滤膜处理水厂沉后水中试研究

谢观体¹, 邵森林², 梁恒², 陈杰², 李圭白²

(1. 东莞市东江水务有限公司, 广东 东莞 523000; 2. 哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090; 3. 苏州立升净水科技有限公司, 江苏 苏州 215152)

摘要: 从常规砂滤池改造成膜池的角度出发, 通过中试, 研究了浸没式超滤工艺处理水厂沉后水的处理效能及其运行的稳定性。结果表明, 超滤出水平均浊度为 (0.050 ± 0.014) NTU, 粒径 $>2 \mu\text{m}$ 的颗粒数小于 $20 \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}$, 能有效保证出水的生物安全性, 超滤膜膜丝作为生物载体附着生长一定量的微生物, 能去除少量氨氮, 超滤对沉后水中有机物的去除率不高, COD_{Mn} 和 UV_{254} 的去除率均为 10% 左右, 在试验工况下, 工艺稳定运行, 化学清洗周期可达 4 个月; 同时试验装置的等效滤速为 $8.6 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 。因此, 从除污染效能和基建用地上看, 超滤膜可以替代传统砂滤池。

关键词: 浸没式超滤膜; 沉后水; 工艺改造

中图分类号: TQ028.8; TU991.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3770(2012)04-0114-04

目前, 我国大部分水厂普遍采用常规给水处理工艺, 但近年水源污染严重, 出水水质难以达到 GB 5749-2006 的要求^[1]。加之“两虫”等重大微生物安全问题的出现, 给水处理工艺面临着新的挑战^[2]。

超滤(UF)比砂滤能更有效地截留水中的细菌和病毒, 几乎能全部去除水中的微生物, 从而降低氯消毒剂的用量, 可有效地保证出水的生物安全性和化学安全性^[2]。把水厂现有的普通砂滤池改造成 UF 膜池, 可提高水厂出水水质。利用水厂现有的滤池作为膜池安装 UF 膜组件, 既可充分利用水厂现有的构筑物, 节省基建成本, 又可利用原过滤水头, 降低动力消耗^[3]; 同时, 膜装置的模块化和标准化还有利于缩短水厂后续的扩建周期, 是水厂常规工艺升级改造的最佳技术选择之一。

目前国内很少水厂采用 UF 膜工艺处理饮用水, 对于 UF 的研究也主要集中在水质处理效果及膜污染方面, 针对 UF 膜取代传统砂滤的研究相对较少^[4-6]。本中试考察 UF 替代砂滤池处理水厂沉后水的效果及 UF 运行的稳定性, 探讨 UF 替代砂滤池的可行性, 为常规工艺水厂的技术升级改造提供参考。

1 装置与方法

1.1 试验装置

试验在东莞市某水厂进行, 以水厂常规工艺的沉后水为中试的进水。中试装置如图 1 所示。

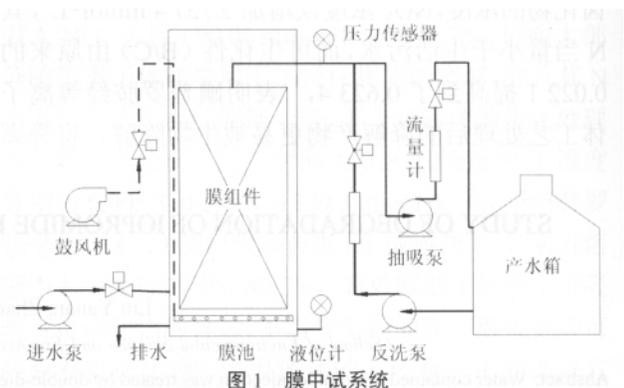


图 1 膜中试系统

Fig.1 Schematic diagram of pilot-scale membrane system

试验装置由膜池、帘式膜组件、抽吸泵、鼓风机、反洗泵、曝气系统、控制系统等组成。膜组件为束状中空纤维膜, 聚氯乙烯(PVC)材质, 膜孔径为 $0.01 \mu\text{m}$, 截留相对分子质量为 50×10^3 , 总有效膜面积为 100 m^2 。膜池有效容积约为 1.5 m^3 。过滤时, 沉后水通过进水泵进入膜池, 再通过抽吸泵的抽吸作用, 进入膜丝内部, 然后通过管道流入产水箱; 反洗时, 在反洗泵的作用下, 清水从膜丝内向外流出, 同时开启鼓风机, UF 膜在气泡和水流的共同作用下得到有效的清洗。

UF 膜系统的运行由 PLC 系统自动控制。膜系统运行工况: 通量为 $30 \text{ L} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$, 过滤 1 h, 气水反洗 30 s, 水洗强度为 $60 \text{ L} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$, 气洗强度为 $50 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ (以膜组件底面积计算), 系统回收率为 95%, 即每次反洗后排浓缩液 0.15 m^3 。

收稿日期 2011-09-09

作者简介 谢观体(1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为饮用水生物预处理技术及膜工艺的研发与应用

联系电话: 15813351429, E-mail: xieguanti@163.com

表 1 试验期间原水及沉后水水质
Tab.1 Water quality of raw water and sedimentation effluent

水样	浊度 /NTU	COD _{Mn} /mg·L ⁻¹	UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	ρ/mg·L ⁻¹				硬度 /mg·L ⁻¹
				NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	Fe	Mn	
原水	54.8±12.5	1.97±0.35	0.023±0.03	0.90±0.15	0.09±0.01	1.5±0.4	0.06±0.02	41±5
沉后水	2.24±0.47	1.25±0.43		0.76±0.59	0.19±0.09			

1.2 原水水质

试验于 12 月 7 日至 1 月 24 日进行。期间水厂原水和经水厂混凝沉淀处理后(沉后水)的水质见表 1。其中 12 月份平均水温 19.3 °C ,1 月份水温骤降至 14 °C。

1.3 检测项目及方法

试验期间,每天检测 1 次水厂沉后水、膜出水水质。检测项目包括水温、浊度、COD_{Mn}、UV₂₅₄、“三氮”(NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N)含量。

常规水质指标水温、COD_{Mn}、“三氮”含量等均按国家标准(GB/T 5750.1-2006)测定^[7];浊度采用 HACH-2100N 浊度仪测定,UV₂₅₄ 采用上海精科 752N 紫外可见分光光度计测定(水样测定前先用 0.45 μm 滤膜过滤,取滤过液检测)。

试验中,系统自动监测并记录跨膜压差(TMP)。

2 结果与讨论

2.1 浊度和颗粒数

试验期间,沉后水浊度(2.24±0.47) NTU,UF 对浊度的去除效果见图 1。

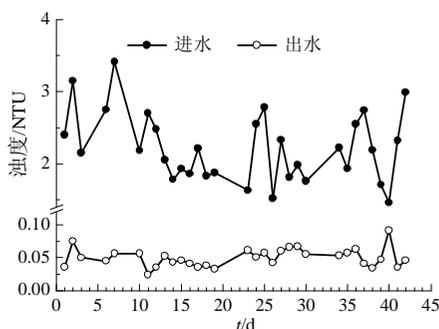


图 2 UF 对浊度的去除效果
Fig.2 Turbidity removal by UF

从图 1 可以看出,膜出水浊度为 (0.050±0.014) NTU,去除率 97.6%±1.0%,同时,出水中粒径 >2 μm 的颗粒数小于 20 个·mL⁻¹,表现了膜良好的去除颗粒物能力。由于被去除的悬浮物、胶体是水中各种细菌和病毒等微生物的载体,所以 UF 几乎能去除全部致病微生物,保证了出水的生物安全性。同时,对 UF 出水进行消毒时可大幅度降低氯消毒剂的使用量,使得消毒副产物的生成量大大减少,从而提高了出厂水的化学安全性。

2.2 有机物

COD_{Mn} 是衡量水中有机物质含量的综合性指标。UF 对 COD_{Mn} 的去除效果见图 3。

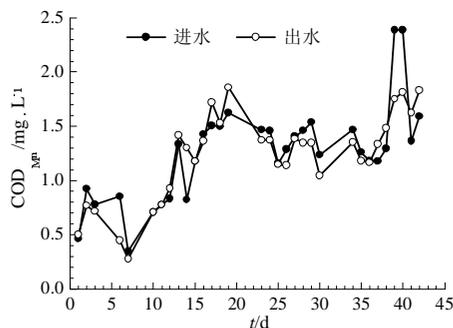


图 3 UF 对 COD_{Mn} 的去除效果
Fig.3 COD_{Mn} removal by UF

由 3 可以看出,试验期间沉后水 COD_{Mn} 为(1.25±0.43) mg·L⁻¹,膜出水 COD_{Mn} 为(1.21±0.40) mg·L⁻¹。部分时间膜出水 COD_{Mn} 比进水高,这是由于出水亚硝酸盐的累积造成的(参见图 5 和 2.3 节分析)。化学清洗后的一段时间(12 月 30 日-1 月 6 日),进出水 NO₂⁻-N 含量基本不变(参见图 5),NO₂⁻-N 不影响 COD_{Mn} 的大小,此时进水 COD_{Mn} 为(1.38±0.13) mg·L⁻¹,出水 COD_{Mn} 为(1.27±0.13) mg·L⁻¹,去除率 7.8%±4.9%,此数值基本可反映 UF 对 COD_{Mn} 的去除。

研究发现 UV₂₅₄ 与三卤甲烷(THMs)具有一定的相关性,可作为消毒副产物前体物的替代指标^[8]。UF 对 UV₂₅₄ 的去除效果见图 4。

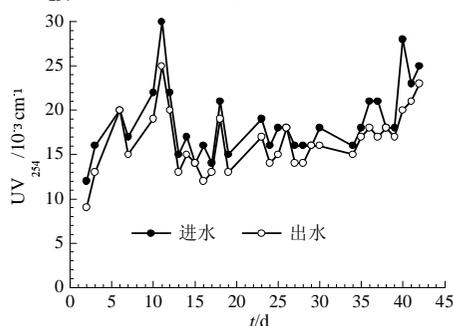


图 4 UF 对 UV₂₅₄ 的去除效果
Fig.4 UV₂₅₄ removal by UF

由 4 可以看出,试验期间沉后水 UV₂₅₄ 为(0.018±0.005) cm⁻¹,膜出水 UV₂₅₄ 为(0.016±0.004) cm⁻¹,去除率 13.0%±12.0%。

UF 对有机物去除率并不高,这是因为 UF 主要

通过物理截留作用去除有机物,而大部分的大分子有机物在混凝沉淀阶段已被去除,沉后水中大分子有机物已不多。当水中有机物含量较高时,可在膜池中投加适量的粉末活性炭(PAC),通过PAC良好的吸附性能来控制出水有机物的含量。

2.3 氨氮和亚硝酸盐氮

试验还考察了UF工艺对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果。图5为UF工艺进出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 含量变化。

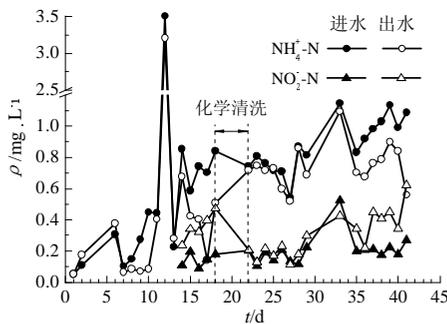


图5 UF进出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 含量变化

Fig.5 Concentration variation of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_2^-\text{-N}$ in influent and effluent

由5可知,试验期间沉后水和膜出水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的质量浓度分别为 $(0.76\pm 0.59)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(0.61\pm 0.55)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。沉后水和膜出水的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的质量浓度分别为 $(0.19\pm 0.09)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(0.31\pm 0.13)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

理论上讲, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是小分子,是无法通过UF膜截留去除的。但从图5中可以看到,化学清洗前(12月22日—12月26日)和化学清洗10d以后(1月12日—1月18日), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有一定的去除,且出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 有较大幅度的增大,这说明膜池中存在生物硝化作用。而在化学清洗后的前10d(12月30日—1月6日),进出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量并没有明显变化。

图6是UF进出水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度减少量($\Delta\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$)和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度增加量($\Delta\rho(\text{NO}_2^-\text{-N})$)随时间的变化情况。

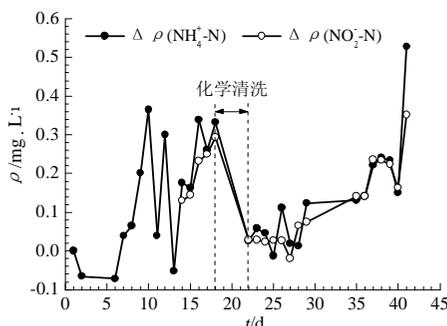


图6 进出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度减少量和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度增加量随时间的变化

Fig.6 Concentration variation of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_2^-\text{-N}$ in influent and effluent

由图6可以看出,随着系统运行, $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 不

断增加,运行大概10d左右, $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 基本稳定在 $0.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。而 $\rho(\text{NO}_2^-\text{-N})$ 与 $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 基本对应。试验期间水温较低($13\sim 20\text{ }^\circ\text{C}$),若水温升高,细菌活性将会增大, $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 应该也会相应升高。

由于 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 可被 KMnO_4 氧化,故 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 可导致 COD_{Mn} 增大。系统稳定的情况下, $\rho(\text{NO}_2^-\text{-N})$ 大约为 $0.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,假如按照 $m(\text{N}):m(\text{O})=14:16$, $0.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\rho(\text{NO}_2^-\text{-N})$ 可使进出水 COD_{Mn} 增大 $0.29\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这可能就是图3中出水 COD_{Mn} 高于进水的主要原因。

对于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在试验期间,进出水质量浓度基本保持不变(进水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的质量浓度为 $(1.88\pm 0.27)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,膜出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的质量浓度为 $(1.86\pm 0.16)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),膜池中主要发生了亚硝化作用,硝化作用不明显。

膜系统每运行8h排空1次,小于硝化细菌的世代周期,从理论上说,膜池浓缩液中难发生生物硝化作用。化学清洗后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 没有去除,也间接证明了这一点。但是随着系统的运行,膜系统逐渐可去除一定量的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,假如浓缩液无生物作用,那就可能是附着在膜丝上的微生物的生物作用。

为验证是否是生物附着在膜丝上从而产生了生物作用,做了一个验证性试验:将膜丝反复气水反洗,并排空膜池。然后立即过滤沉后水,并测量膜池和出水水质,其水质见表2。

表2 膜池进出水水质变化
Tab.2 Water quality in influent and effluent

项目	$\rho/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		
	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_2^-\text{-N}$	DO
膜池	1.08	0.28	8.97
出水	0.55	0.70	7.76
变化量	0.54	-0.42	1.21

从表2可以看出, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有较大幅度的去除,出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 含量相应增大,DO含量也相应减少。由于取膜池水作为对比,消除了膜池浓缩液中可能产生的生物作用的影响,因此可以说明膜丝作为生物载体,有生物附着在膜丝表面,并且附着的生物不易通过物理反洗脱落。

尽管膜丝上可以附着一定量的生物从而去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,但其去除能力有限。当进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量较高时,可采取适当的生物预处理措施,在UF前将 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除。

2.4 膜污染

图7为试验期间TMP的变化情况。其中12月24日至12月28日以 $30\text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的通量持续运行不反洗,其余时间工况均为:通量为 $30\text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,回收率为95%,过滤周期1h,气水反洗30s,反洗强度

$60 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

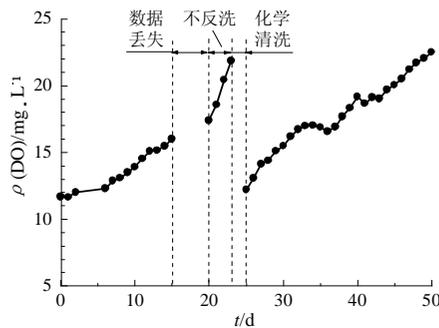


图7 试验期间 TMP 的变化情况
Fig.7 Variation of TMP

由图7可以看出,12月7日至12月24日TMP从11.7 kPa涨到17.4 kPa,平均增长率 $0.317 \text{ kPa} \cdot \text{d}^{-1}$,之后4 d持续运行不反洗,TMP从17.4 kPa涨到21.9 kPa,平均增长率 $1.125 \text{ kPa} \cdot \text{d}^{-1}$,因此物理反洗可以控制膜污染。12月29日进行化学清洗,先采用NaClO(质量分数 0.2×10^{-3}) + NaOH(pH=10)浸泡12 h,然后采用柠檬酸(pH=3)浸泡12 h,之后TMP恢复到12.2 kPa。12月29日至1月23日TMP由12.2 kPa增长至22.5 kPa,TMP平均增长率 $0.412 \text{ kPa} \cdot \text{d}^{-1}$,比12月的增长率,此期间水温较低。

一般情况下,TMP增长至50 kPa时应进行化学清洗^[9]。根据TMP的平均增长率可以推算此工况下,化学清洗周期约为4个月。也即在此原水水质和工况下,UF可以稳定运行4个月。

以通量 $30 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 计,试验装置的等效滤速为 $8.6 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 。从基建用地的角度看,可以将水厂砂滤池直接改造成膜池,不仅不增加用地,同时还有增加水厂处理水量的潜力。

3 结论

采用UF处理水厂沉后水,对颗粒物有良好的去

除效果,可以保证出水的生物安全性和化学安全性。

UF对沉后水中的有机物去除率不高,可能与沉后水中大分子有机物较少有关,可以向膜池中投加适量的粉末活性炭改善工艺对有机物的去除效果。

由于膜丝可以作为生物载体附着一定量的生物,所以UF对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有一定的去除效果,但是去除能力有限。当原水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量较高时,应采取适当的生物预处理措施,预先去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 。

在试验水质和工况条件下,可有效控制UF膜污染,系统可连续4个月稳定运行,也即化学清洗周期约为4个月。从UF的除污染效能和基建用地上看,可将砂滤池直接改造成膜池,为水厂常规工艺进行技术的升级改造。

参考文献:

- [1] GB 5749—2006 生活饮用水卫生标准[S].
- [2] 李圭白,杨艳玲. 第三代城市饮用水净化工艺——超滤为核心技术的组合工艺[J]. 给水排水, 2007,33(4): 1.
- [3] Sun Lihua, Li Xing, Zhang Guoyu, et al. The substitution of sand filtration by immersed-UF for surface water treatment: pilot-scale studies[J]. Water Science & Technology, 2009,69(9): 2337-2343.
- [4] 王琳,董秉直,高乃云. 超滤去除水中内分泌干扰物(BPA)的效果和影响因素[J]. 环境科学, 2007,28(2): 329-333.
- [5] 孙丽华,李星,杨艳玲,等. 浸没式超滤膜处理地表水的膜污染影响因素试验研究[J]. 给水排水, 2009,35(4): 18-21.
- [6] E Aoustin, A I Schäfer, A G Fane, et al. Ultrafiltration of natural organic matter[J]. Separation and Purification Technology, 2001(22/23): 63-78.
- [7] GB/T 5750.1—2006 生活饮用水标准检验方法 总则[S].
- [8] J Banks, D Wilson. Use of UV_{254} to predict the relationship between NOM and THMs on upland waters[C]. International Conference on Natural Organic Matter Characterization and Treatment. Cranfield: Cranfield University, 2002.
- [9] 曾一鸣. 膜生物反应器技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2006:66.

PILOT-SCALE STUDY ON IMMERSSED ULTRAFILTRATION PROCESS FOR SEDIMENTATION EFFLUENT TREATMENT

Xie Guanti¹, Shao Senlin², Liang Heng¹, Chen Jie³, Li Guibai¹

(1. Dongjiang Shui Wu Co. Ltd., Dongguan 523000, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. Suzhou Litree Water Purification Technology Co. Ltd., Suzhou 215152, China)

Abstract: A Pilot-scale study was performed to investigate the treatment efficiency and operation stability by using the Immersed Ultrafiltration Process in place of sand filter for treating the settled water of a conventional water plant. The results showed that the Immersed Ultrafiltration Process could ensure the biological-safety with (0.050 ± 0.014) NTU and 20 particles (particle size $>2 \mu\text{m}$) per milliliter effluent. But it couldn't remove COD_{Mn} and UV_{254} effectively, only 10% around. Though, the process could remove $\text{NH}_4^+\text{-N}$ slightly by nitrification. The process could run stably under the experimental condition. The equal filtration rate was $8.6 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$. With regard to treatment efficiency and land saving, the Immersed Ultrafiltration Process can substitute the sand filter as technological upgrading of conventional water plant.

Keywords: immersed ultrafiltration process; sedimentation effluent; technological upgrading of conventional water treatment process