

曝气对一体式 PAC/UF 工艺的影响

邵森林¹, 梁恒¹, 张建辉², 陈杰³, 李圭白¹

(1. 哈尔滨工业大学 城市水资源与环境国家重点实验室, 150090 哈尔滨; 2. 河北工程大学 城市建设学院, 056005 河北 邯郸; 3. 苏州立升净水科技有限公司, 215152 江苏 苏州)

摘要: 针对一体式 PAC/UF 工艺的重要环节——曝气, 通过小试和中试实验, 研究曝气方式、曝气量等因素对一体式 PAC/UF 工艺运行及除污染性能的影响。结果表明: 相对于间歇曝气, 连续曝气情况下 PAC/UF 工艺去除有机物效果略好; 连续曝气会使出水颗粒数略微增多; 同时连续曝气可以更充分发挥粉末活性炭减缓膜污染的作用。增加曝气量也可以减缓膜污染。但是在实验条件下, 间歇曝气可以节约电能 $0.221 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。综合考虑 PAC/UF 工艺膜污染、除污染效能和运行成本, 对于 PAC/UF 工艺, 间歇曝气更经济合理。

关键词: 曝气; 浸没式超滤膜; 粉末活性炭; 膜污染; 经济性评价

中图分类号: TU991.2 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2012)06-0016-04

Influence of aeration on hybrid PAC/UF process

SHAO Sen-lin¹, LIANG Heng¹, ZHANG Jian-hui², CHEN Jie³, LI Gui-bai¹

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;
2. School of Urban Construction, Hebei University of Engineering, 056005 Handan, Hebei, China;
3. Suzhou Litree Water Purification Technology Co. Ltd., 215152 Suzhou, Jiangsu, China)

Abstract: Pilot-scale and bench-scale studies were performed to investigate the influence of aeration on hybrid PAC/UF process, in terms of pollutants removal and membrane fouling. The results showed that, compared with intermittent aeration, PAC/UF process had a better organic matter removal under continuous aeration condition. PAC could relieve the membrane fouling, and the function could be improved by the utilization of continuous aeration. Increasing aeration rate could relieve membrane fouling either. While intermittent aeration could save energy about $0.221 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$. Taking all factors into consideration, intermittent aeration was economical and reasonable for hybrid PAC/UF process.

Key words: aeration; immersed ultrafiltration; powered activated carbon; membrane fouling; economic evaluate

超滤 (UF) 膜技术作为饮用水处理的一个独立工艺, 是水处理领域近 20 年来重要的技术突破, 其出水水质优良, 生物安全性高^[1]。但是由于 UF 具有较高的截留分子量, 不能有效去除色度、天然有机物 (特别是小分子腐殖质) 和一些人工合成有机物^[2]。为了强化这些物质的去除, 常常将粉末

活性炭 (PAC) 投加到 UF 系统中组成一体式 PAC/UF 工艺^[3]。一体式 PAC/UF 工艺充分发挥了 PAC 吸附去除有机物的性能, 还有效利用了超滤优良的固液分离能力, 保障了生物安全性的同时, 进一步提高工艺的化学安全性; 同时水厂可根据进水有机污染程度来投加 PAC, 具有很强的灵活性^[4]; PAC 还可以一定程度减缓膜污染^[5]。由于一体式 PAC/UF 工艺是将 PAC 直接投加于膜池, 需要在膜过滤过程中曝气以防止 PAC 沉淀。曝气不仅可以防止 PAC 在膜池中沉淀, 同时通过气泡在膜丝表面的振动和摩擦等作用, 在膜丝表面产生剪切力并有效促使膜丝抖动, 使得抽吸过程中形成的滤饼层松动脱落, 从而抑制污染物在膜表面聚集, 减缓膜

收稿日期: 2011-07-15.

基金项目: 国家“水体污染控制与治理科技重大专项”项目 (2008ZX07423-002-4); 粤港关键领域重点突破项目 (2010Z52401); 禅城区产学研项目 (20101072028)。

作者简介: 邵森林 (1989—) 男, 博士研究生;

李圭白 (1931—) 男, 博士生导师, 中国工程院院士。

通信作者: 邵森林, shaosenlin826@yahoo.com.cn.

污染^[6].但是曝气能耗巨大^[7].

目前国内对一体式 PAC/UF 工艺的研究主要集中于其对污染物的去除效果^[8-9]和 PAC 对膜污染的影响^[10],未曾发现对工艺曝气方面的研究.本文先通过小试,研究曝气方式、曝气量等因素对工艺的影响,然后通过中试验证小试的结果,并进行经济性分析,以期为一体式 PAC/UF 工艺中曝气系统的设计和运行提供参考.

1 实验

1.1 实验装置

小试实验装置如图 1 所示,实验系统为两组膜系统平行运行.系统通过可编程控制器 (PLC) 自动控制运行.采用恒水位水箱控制膜池液位,在蠕动泵的抽吸作用下,水由膜丝外部进入膜丝内部,然后流入出水箱.反洗时,蠕动泵反转,出水箱的水由膜丝内部流向膜丝外部.通过空压机和曝气头可以对膜池曝气,防止 PAC 沉淀,并通过气泡擦洗抖动膜丝.

小试试验所用 UF 膜为外压式 PVC 中空纤维超滤膜 (苏州立升净水科技有限公司提供),膜组件自行制作,膜面积 0.05 m^2 ,其标准孔径为 $0.01 \mu\text{m}$,截留分子量 $5 \times 10^4 \text{ u}$.

小试采用死端过滤方式过滤,通量恒定为 $30 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,原水在膜池中的停留时间为 12 min .试验中过滤 1 h ,气水反洗 1 min ,反洗强度为 $60 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.PAC 一次性手动投加至膜池,每 12 h 投加一次,投加 PAC 前将膜池排空.

表 1 实验期间小试和中试进水水质

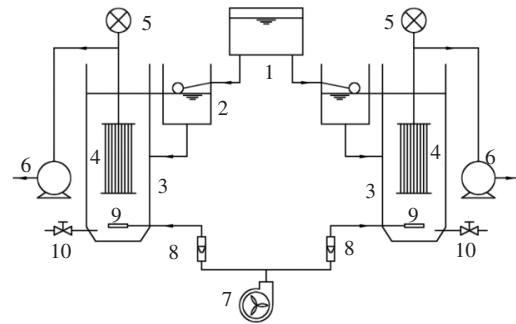
项目	温度 ℃	浊度 NTU	UV_{254} cm^{-1}	COD_{Mn} $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho(\text{NO}_2^- - \text{N})$ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
小试	32.4 ± 2.1	0.63 ± 0.47	0.021 ± 0.004	1.11 ± 0.29	< 0.01	
中试	18.0 ± 0.7	1.70 ± 0.46	0.021 ± 0.004	1.37 ± 0.19	0.86 ± 0.16	0.18 ± 0.05

1.3 检测项目及分析方法

试验期间,每天检测 1 次膜进出水水质.检测项目包括水温、浊度、颗粒数、 COD_{Mn} 、 UV_{254} .

水温、 COD_{Mn} 等均按国家标准 (GBT5750.1—2006) 测定,浊度采用 HACH-2100N 浊度仪测定, UV_{254} 采用上海精科 752N 紫外可见分光光度计测定 (除膜出水外测定前均先经 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤).颗粒数采用 IBR 便携式颗粒技术仪 (型号:ZH-IBR-Z1).

试验过程中,中试系统自动检测并记录跨膜压 (P_{TM}).



1—原水水箱;2—恒水位水箱;3—膜池;4—膜组件;
5—压力传感器;6—蠕动泵;7—空压机;8—气体流量计;
9—曝气头;10—排水阀.

图 1 膜小试系统图

中试进水采用水厂的待滤水.膜材料同小试,总有效膜面积 100 m^2 ,膜系统运行工况同小试.PAC 通过蠕动泵连续性投加到膜池,投加量为 $20 \text{ mg}/\text{L}$.

中试膜系统运行工况:通量 $30 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,过滤 1 h ,气水反洗 30 s ,反洗强度 $70 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,反洗曝气量为 $50 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (以膜组件底面积计算).回收率为 95% ,即每次反洗后排水 0.15 m^3 .

1.2 实验材料

实验在南方某水厂进行,实验期间小试和中试的进水水质如表 1 所示.

实验所用 PAC 为水厂自用活性炭,福建省龙福炭业有限公司生产,木质炭,碘吸附值为 $522 \text{ mg}/\text{g}$,亚甲基蓝吸附值为 $108 \text{ mg}/\text{g}$,水分 8.51% ,灰度 2.34% .小试 PAC 投加前预过 200 目筛子,中试 PAC 投加前预过 100 目筛子.

2 结果与讨论

2.1 PAC 的沉降性能

2.1.1 PAC 质量浓度和浊度的关系

将 PAC 配置成 $50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 \text{ mg}/\text{L}$ 的浑浊液,然后测其浊度.图 2 显示了 PAC 的质量浓度和浑浊液浊度之间的关系,可以看出 PAC 质量浓度和浑浊液浊度之间符合很好的线性关系 ($R^2 = 0.9956$),可以用浊度表征 PAC 的质量浓度.

2.1.2 PAC 的静态沉降实验

将中试膜池排空,进水至水位 2.4 m .投加

PAC 使膜池内混合液 PAC 质量浓度为 400 mg/L. 曝气,使 PAC 混合均匀,停止曝气. 测量膜组件顶部(水位 2.0 m)不同时间点 PAC 混合液的浊度. 图 3 为停止曝气后,膜组件顶部 PAC 质量浓度随时间变化. 可以看出,在静置的前 10 min, PAC 质量浓度迅速降低至初始质量浓度的 1/3, 之后 PAC 质量浓度缓慢下降,按初始质量浓度为 400 mg/L 计算,此时膜组件顶部的 PAC 仍有 100 mg/L 左右.

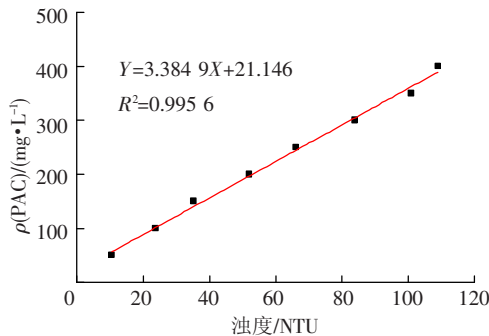


图 2 PAC 质量浓度与浊度的关系

从 PAC 的沉降曲线可以看出,只要保持一定的时间曝气一次就可以维持膜池 PAC 于一定的浓度,保证其吸附作用的发挥.即在 PAC/UF 工艺中可以采取间歇曝气防止 PAC 沉淀. 试验中,间歇曝气取曝气 1 min,停止 4 min.

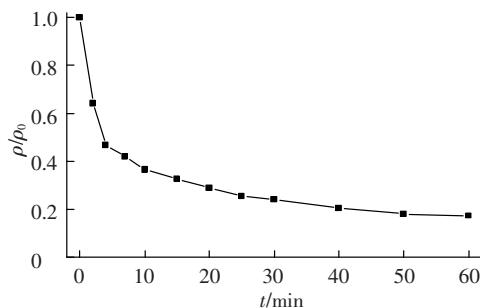


图 3 膜组件顶部 PAC 质量浓度随时间变化

2.2 曝气方式对 PAC/UF 工艺的影响

2.2.1 曝气方式对有机物去除效果的影响

COD_{Mn} 和 UV_{254} 是衡量水中有机物的重要指标. 图 4、5 为 PAC 投加量为 40 mg/L、曝气量为 0.7 L/min 情况下,不同曝气方式对 COD_{Mn} 和 UV_{254} 去除效果的比较.

在试验运行期间,进水 COD_{Mn} 和 UV_{254} 平均为 (0.94 ± 0.07) mg/L 和 (0.020 ± 0.020) cm^{-1} . 对于连续曝气,出水 COD_{Mn} 和 UV_{254} 平均为 (0.47 ± 0.08) mg/L 和 (0.008 ± 0.030) cm^{-1} , 对应平均去除率为 $(50 \pm 11)\%$ 和 $(60 \pm 15)\%$. 对于间歇曝气,出水 COD_{Mn} 和 UV_{254} 平均为 (0.51 ± 0.11) mg/L 和 (0.009 ± 0.030) cm^{-1} , 对应平均去除率为 $(46 \pm 11)\%$ 和 $(55 \pm 15)\%$.

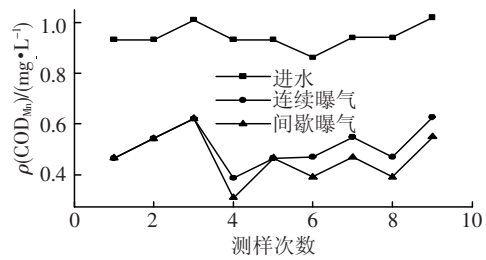


图 4 不同曝气方式下 COD_{Mn} 去除效果比较

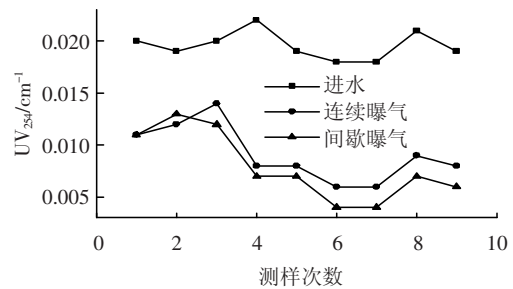


图 5 不同曝气方式下 UV_{254} 去除效果比较

显然,连续曝气情况下工艺对有机物的去除效果要略好于间歇曝气,但是差别并不是特别明显.这是因为和连续曝气相比,间歇曝气会导致部分 PAC 沉淀,无法发挥吸附作用;同时,由于连续曝气充分搅动混合液使膜池中水与 PAC 更加充分地接触.因此,连续曝气工况下工艺对有机物的去除效果略好.

2.2.2 曝气方式对膜污染的影响

图 6 为不同 PAC 投加量 (20 和 40 mg/L) 下连续曝气和间歇曝气 P_{TM} 的变化情况.可以看出,在 PAC 投加量为 20 mg/L 的情况下,曝气方式对 P_{TM} 影响很大,间歇曝气时 P_{TM} 增长明显快于连续曝气时.而在 PAC 投加量为 40 mg/L 的情况下,曝气方式对 P_{TM} 变化几乎没有影响,两条 P_{TM} 变化曲线基本重合.这可能是由于 PAC 投加量为 20 mg/L 时,膜池中 PAC 质量浓度不高,PAC 的沉淀使膜池中 PAC 质量浓度进一步低,从而影响其减缓膜污染的作用;而 PAC 投加量为 40 mg/L 时,由于膜池中 PAC 质量浓度很大,尽管有部分沉淀,膜池中未沉淀的 PAC 足以发挥其减缓膜污染的作用.

2.3 曝气量对膜污染的影响

图 7 为 PAC 投加量为 20 mg/L、连续曝气情况下,不同曝气量 (0.40 和 0.8 L/min) P_{TM} 的变化情况.可以看出,0.8 L/min 曝气量情况下 P_{TM} 增长明显比 0.4 L/min 曝气量情况下缓慢.在高曝气量情况下气泡的擦洗作用更加强烈,同时膜丝的抖动也更加剧烈,可以使滤饼层一定程度上脱落.同时,高曝气量情况下浓差极化也可以得到一定程度的抑制.所以,增大曝气量可以减缓膜污染.

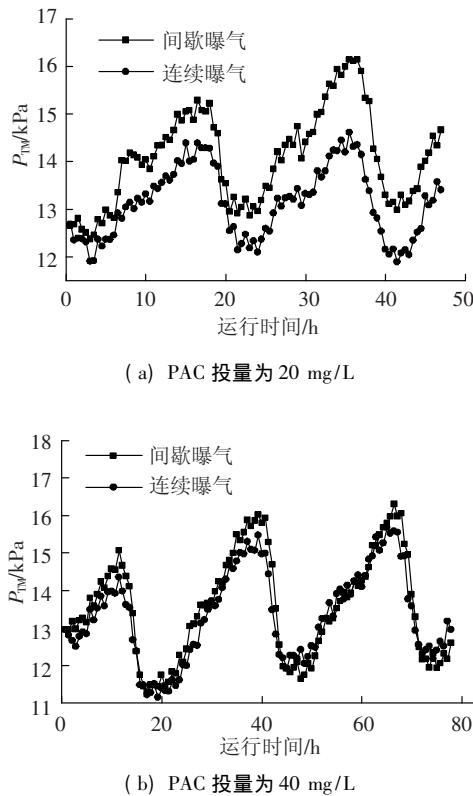


图 6 曝气方式对 P_{TM} 的影响

2.4 中试验证性试验

从小试结果可以看出, 连续曝气的出水水质略好, 同时在低 PAC 投加量下, 可以更好发挥 PAC 减缓膜污染的作用; 增加曝气量也可以减缓膜污染。在小试研究结果的基础上, 通过中试对小试的结果进行验证。连续曝气和间歇曝气均采用膜试验系统的设计曝气量: $50 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (以膜组件底面积计算)。间歇曝气开/停时间为 1 min/4 min。

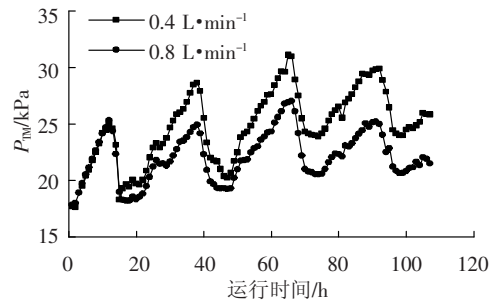


图 7 不同曝气量情况下 P_{TM} 的变化

表 2 为连续曝气和间歇曝气情况下中试去除污染物效果比较。可以看出, PAC/UF 对颗粒物有良好的去除效果, 出水浊度小于 0.05 NTU, $>2 \mu\text{m}$ 颗粒数小于 27 个。不同的曝气方式对浊度的影响不大, 连续曝气使出水颗粒数略有增加。

表 2 不同曝气方式下中试去除污染物效果

水质指标	浊度/NTU	$>2 \mu\text{m}$ 颗粒数/ mL^{-1}	$\text{UV}_{254} / \text{cm}^{-1}$	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	
进水	1.70 ± 0.46	4900 ± 915	0.021 ± 0.004	1.37 ± 0.19	
连续曝气	出水	0.041 ± 0.009	17 ± 10	0.010 ± 0.004	1.08 ± 0.08
	去除率/%	97.6 ± 0.5	99.6 ± 0.2	52.2 ± 22.8	21.8 ± 5.8
间歇曝气	出水	0.040 ± 0.005	11 ± 7	0.011 ± 0.003	1.09 ± 0.10
	去除率/%	97.7 ± 0.3	99.8 ± 0.1	47.6 ± 14.4	20.7 ± 7.3

对比表 2 中 COD_{Mn} 和 UV_{254} 可以看出, 连续曝气比间歇曝气对有机物处理效果好, 但是差别不是太大, 该结果和小试结果完全一致。

图 8 为连续曝气和间歇曝气情况下 P_{TM} 的变化。可以看出, 连续曝气情况下 P_{TM} 增长明显慢于间歇曝气。这个结论与小试结果相符。

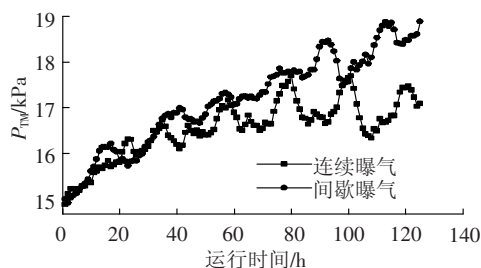


图 8 中试连续曝气和间歇曝气下 P_{TM} 的变化

2.5 经济评价

不同曝气方式下, 运行成本主要区别于曝气能耗上。连续曝气和间歇曝气的抽吸和反洗能耗基本相同, 都为 $0.146 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{m}^3$, 但间歇曝气的曝气能

耗只为 $0.044 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{m}^3$, 占总能耗的 23%; 而连续曝气的曝气能耗为 $0.265 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{m}^3$, 占总能耗的 62%。间歇曝气比连续曝气可以节约能耗 $0.221 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{m}^3$ 。如按电价 0.5 元/($\text{kW} \cdot \text{h}$) 计, 间歇曝气可节约成本 0.11 元/ m^3 。

相对于间歇曝气, 连续曝气可以一定程度上减轻膜污染, 同时连续曝气情况下 PAC/UF 工艺去除有机物效果略好。但间歇曝气可以节约成本 0.11 元/ m^3 。综合考虑 PAC/UF 工艺膜污染、除污染效能和运行成本可以看出, 对于 PAC/UF 工艺, 间歇曝气更经济合理。

3 结 论

1) 采用浊度可以间接表征 PAC 质量浓度, 只要保证一定的时间曝气 1 次, 就可以维持膜池浓缩液中一定的 PAC 质量浓度。

(下转第 57 页)

- [3] ZHOU G C. Application of stiffness/strength corrector and cellular automata in predicting response of laterally loaded masonry panels [D]. Plymouth, U K: University of Plymouth, UK. 2002.
- [4] YAFIQ M Y, ZHOU G C, EASTERBROOK D. Analysis of brickwork wall panels subjected to lateral loading using correctors [J]. *Journal of Masonry International*, 2003, 16(2): 75-82.
- [5] 谢玲燕, 余志鹏, 周广春. 修正值和类似区域在砌体墙板中的应用 [J]. *低温建筑技术*, 2006, 111: 50-52.
- [6] ZHOU G C, RAFIQ Y M, BUGMANN G, *et al.* Cellular automata model for predicting the failure pattern of laterally loaded masonry wall panels [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2006, 20(6): 400-409.
- [7] 周广春, 谢玲燕, 余志鹏. 预测面外荷载下砌体墙板破坏模式的 CA 模型 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, 39(10): 1518-1519.
- [8] 潘登. 砌体结构智能技术实验环境的探讨 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [9] ZHANG Y, ZHOU G C, XIONG Y, *et al.* Techniques for predicting cracking pattern of masonry wall using artificial neural networks and cellular automata [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2010, 24(2): 161-172.
- [10] ZHOU G C, PAN D, XU X, *et al.* Innovative ANN technique for predicting failure/cracking load of masonry wall panel under lateral load [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2010, 24(4): 377-387.
- [11] LAWRENCE S J. Design of masonry panels for lateral loading [R]. Chatswood, NSW, Experimental Building Station, 1980.

(编辑 赵丽莹)

(上接第19页)

2) 相对于间歇曝气, 连续曝气情况下 PAC/UF 去除 COD_{Mn} 和 UV_{254} 的效率分别平均提高 4% 和 5%; 连续曝气会使出水颗粒数略微增加; 在 PAC 投加量为 20 mg/L 的情况下, 曝气方式对 P_{TM} 影响很大, 间歇曝气时 P_{TM} 增长明显快于连续曝气时. 而在 PAC 投加量为 40 mg/L 的情况下, 曝气方式对 P_{TM} 变化几乎没有影响. 0.8 L/min 曝气量情况下 P_{TM} 增长明显比 0.40 L/min 曝气量情况下缓慢, 增加曝气量也可以减缓膜污染.

3) 与连续曝气相比, 间歇曝气可以节约能耗 0.221 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$, 节约成本约 0.11 元/ m^3 . 综合考虑 PAC/UF 工艺膜污染、除污染效能和运行成本, 对于 PAC/UF 工艺, 间歇曝气更合适.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] LIN C F, LIU S H, HAO O J. Effect of functional groups of humic substances on UF performance [J]. *Water Research*, 2001, 35: 2395-2402.
- [3] KONIECZNY K, KLOMFAS G. Using activated carbon to improve natural water treatment by porous membranes [J]. *Desalination*, 2002, 147: 109-116.
- [4] HUANG H, SCHWAB K, JACANGELO J G. Pretreatment for low pressure membranes in water treatment: a review [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(9): 3011-3019.
- [5] CAMPINAS M, ROSA M J. Assessing PAC contribution to the NOM fouling control in PAC/UF systems [J]. *Water Research*, 2010, 44(5): 1636-1644.
- [6] WICAKSANA F, FANE A G, CHEN V. Fiber movement induced by bubbling using submerged hollow fiber membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 271(1/2): 186-195.
- [7] JUDD S, JUDD C. The MBR book [M]. Elsevier. [s. n.], 2006: 69-71.
- [8] 杨忆新, 刘文君, 尹艳敏. 超滤/粉末活性炭组合工艺深度处理黄河源水 [J]. *中国给水排水*, 2010, 26(15): 48-53.
- [9] 范茂军, 高乃云, 黄鑫, 等. PAC/超滤组合工艺处理常规工艺出水的中试研究 [J]. *中国给水排水*, 2007, 23(17): 84-86.
- [10] 李永红, 张伟, 张晓健, 等. PAC 及颗粒物对超滤膜有机物污染的影响 [J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2010, 50(9): 1392-1395.

(编辑 刘彤)