

PACT – UF 组合工艺深度处理工业废水的中试

刘鲁建^{1,2}, 董俊^{1,2}, 张岚欣¹, 熊蔚¹

(1. 湖北君集水处理有限公司, 湖北 武汉 430065; 2. 湖北省污水资源化工程技术研究中心, 湖北 武汉 430065)

摘要: 开展了 PACT – UF 组合工艺深度处理某工业废水的中试研究,探讨了粉末活性炭 (PAC) 投加量、炭浆回流比、曝气方式等对组合工艺去除 COD 和色度的影响,并分析了不同工况下膜污染情况。结果表明:PACT – UF 组合工艺连续运行 45 d 后可稳定去除废水中的 COD 和色度物质,出水水质满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 的一级 A 标准;PACT – UF 系统稳定后,随着投炭量的增大,出水水质提升,综合考虑投炭量为 60 ~ 80 mg/L 比较合适;提高回流比可有效提高 COD 和色度去除率,回流比为 150% ~ 200% 较合适;增大回流比能延缓归一化膜比通量的下降趋势,有效改善超滤膜的污染程度,利于延长膜使用寿命。

关键词: 工业废水; 浸没式超滤; 生物活性炭法; 回流; 膜污染

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 – 4602(2019)15 – 0086 – 06

Pilot-scale Study on Combined Process of PACT – UF for Industrial Wastewater Advanced Treatment

LIU Lu-jian^{1,2}, DONG Jun^{1,2}, ZHANG Lan-xin¹, XIONG Wei¹

(1. Hubei Junji Water Treatment Co. Ltd., Wuhan 430065, China; 2. Engineering and Technology Research Center of Hubei Province for Wastewater Reclamation, Wuhan 430065, China)

Abstract: A pilot-scale study on PACT – UF process was carried out for the advanced treatment of industrial wastewater. The influencing factors including dosage of powdered activated carbon (PAC), recycling ratio of carbon slurry, and aeration mode on the removal of COD and color were investigated. The membrane fouling situations under different working conditions were also analyzed. The results indicated that stable removal of COD and color was achieved after 45-day of continuous operation, and the effluent met the first level A standard specified in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918 – 2002). The effluent quality of PACT – UF process was improved as the increase of PAC dosages after the system was stabilized, and it was determined that the dosage of 60 – 80 mg/L was suitable. The removal efficiency of COD and color was enhanced as the recycling ratio of carbon slurry was increased, and a recycling ratio of 150% – 200% was suitable. The increase of recycling ratio could postpone the decline of normalized membrane specific flux, improve the UF membrane fouling degree, which was beneficial to extending the membrane life expectancy.

Key words: industrial wastewater; immersed ultrafiltration; powdered activated carbon

基金项目: 2019 年湖北省技术创新专项(重大项目)(2019AAA012)

通信作者: 董俊 E-mail: 279315202@qq.com

treatment(PACT); recycle; membrane fouling

目前工业废水的处理工艺种类繁多,主要分为物理吸附法、化学氧化法及生化降解法等^[1]。由于废水排放量大,而单纯的物理吸附法吸附速率缓慢,不适合废水深度处理;生物降解法对部分化学污染物的降解效率差,因而处理难度较大;化学氧化法虽可以利用强氧化剂快速彻底分解污染物,但成本较高且污泥产量大^[2]。因此,采用单一工艺无法达到满意的处理效果,需寻找一种操作简单、运行稳定、经济实用、处理效果好的工业废水处理方法。

生物活性炭法(PACT),将活性炭(PAC)投加到曝气池前(或曝气池内),与二沉池回流污泥混合后一起进入曝气池,完成对废水中有机污染物的去除过程^[3],通过PAC改善污泥性能、强化生化作用以此来更大程度地降解污染物,从而有效去除COD和氨氮。已有一些工程案例采用超滤膜深度处理工业废水,但超滤膜孔径大,对溶解性有机物的去除效果较差,而PAC比表面积大、吸附能力强,将两者有效结合即形成PACT-UF组合工艺,可进一步有效去除溶解性污染物等^[4]。瞿芳术等^[5]采用生物活性炭滤池与超滤膜组合工艺处理微污染水,对 COD_{Mn} 和氨氮的去除率分别达到了35.38%和96.54%,远高于单独UF工艺;高伟等人^[6]采用PAC-MBR处理低温低浊微污染引黄水库水,对TOC、 UV_{254} 和氨氮的去除效果明显,优于常规工艺及单独超滤膜系统的去除效果。朱炜等人采用“PACT+A/O+MBR”组合工艺处理高氨氮化工废水,当进水COD和氨氮平均浓度分别为5 813 mg/L和217.9 mg/L时,出水平均浓度分别为100.5 mg/L和1.91 mg/L,可达到《化学合成类制药工业水污染物排放标准》^[7]。本研究自制PACT-UF工艺中试装置,研究了不同的加炭量、回流比、曝气方式等对工艺出水水质的影响,并考察了不同工况下膜污染情况。

1 试验材料与方法

1.1 原水水质

原水来源于浙江省某工业园区附近的集中污水处理厂,以工业废水为主,含少量生活污水,该污水处理厂的工艺流程为:粗格栅→细格栅→旋流沉砂池→倒置 A^2/O 生化池→二沉池→消毒池,目前出水水质基本可满足《城镇污水处理厂污染物排放标

准》(GB 18918—2002)的一级B标准。在现阶段工艺条件下,出水水质无法达到一级A排放标准。

试验取污水厂倒置 A^2/O 池入口处的废水作为原水,水质指标如下:COD为350~760 mg/L,平均为555 mg/L; BOD_5 为108~240 mg/L,平均为174 mg/L;氨氮为15~25 mg/L,平均为20 mg/L;总氮为20~40 mg/L,平均为30 mg/L;SS为130~350 mg/L,平均为240 mg/L;色度为200~400倍,平均为300倍;TP为1.6~7.8 mg/L,平均为4.7 mg/L;pH值为7.0~9.2,平均为8.1。

1.2 中试装置及工艺流程

中试装置如图1所示。该装置的处理能力为 $12 \text{ m}^3/\text{d}$,包含了倒置 A^2/O 生化池(池容为 4 m^3 , $\text{HRT}=8 \text{ h}$)、二沉池[池容为 0.98 m^3 ,表面水力负荷为 $0.61 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,沉淀时间为 1.96 h]、混凝沉淀池(池容为 1.3 m^3)、浸没式超滤膜反应池(池容为 0.5 m^3 , $\text{HRT}=1 \text{ h}$),膜池内进水端通过隔断分离出1个预混合池(池容为 0.25 m^3 , $\text{HRT}=0.5 \text{ h}$),膜组件安装于膜池的后半段,预混合池设置超越管,通过阀门控制,可使混凝沉淀池出水直接进入前端预混合池或直接进入后端膜池。池体材质均为碳钢,管道、阀门材质为PVC。

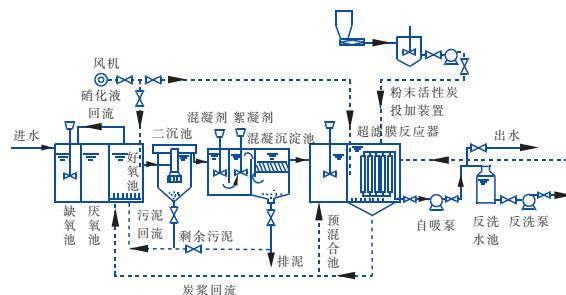


图1 中试装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of pilot-scale experiment

原水首先进入倒置 A^2/O 生化池,生化出水进入二沉池实现固液分离,混凝沉淀出水最终进入膜池中,膜池中的PAC浆液回流至好氧池,初始运行回流比设定为100%。混凝沉淀池投加混凝剂聚合氯化铝(10~20 mg/L)、絮凝剂PAM(1~3 mg/L);超滤膜产水通量为 $40 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,运行压力为20 kPa,经膜处理的清水由自吸泵提升排放,部分清水进入反洗水池,清洗周期为24 h。超滤膜池内PAC

一次性投加量为 5 000 mg/L,运行过程中每日向膜池中补充 50 mg/L 的 PAC。

倒置 A²/O 生化池接种污泥来源于该污水厂好

氧池的活性污泥,接种污泥在系统内进行培养和驯化。试验共分为 5 个阶段,为期 105 d,各阶段主要考察内容和工况条件如表 1 所示。

表 1 各试验阶段的主要考察内容和工况条件

Tab. 1 Main investigation contents and working conditions of each test stage

项 目	考察内容	工况条件
阶段 I (第 1 ~ 45 天)	污泥驯化及培养,系统稳定运行及工艺调试,考察 PACT 池出水及 PACT - UF 出水中 COD、色度的变化情况	试验时间为 45 d,其中运行前 20 d 活性炭不进入生化系统,第 21 天时 PAC 进入倒置 A ² /O 生化池循环,形成 PACT 工艺,继续运行 25 d,分别取第 5、10、15、20、25、30、35、40、45 天 PACT 池出水以及 PACT - UF 出水进行检测。污泥龄为 25 d,污泥浓度为 4 000 ~ 5 000 mg/L
阶段 II (第 46 ~ 60 天)	逐步调整 PAC 投加量,探讨其对 PACT - UF 出水中 COD、色度的影响	维持其他工况不变,将每日向膜池中补充的 PAC 量由 50 mg/L 依次调整为 0、20、40、60、80、100、120 mg/L
阶段 III (第 61 ~ 75 天)	调整炭浆回流比,探讨其对 PACT 池及 PACT - UF 出水中 COD、色度的影响	维持其他工况不变,将第 I 阶段工况下的回流比初设值由 100% 依次调整为 25%、50%、150%、200%、250%、300%
阶段 IV (第 76 ~ 90 天)	调整生化池曝气方式,探讨其对 PACT 池及 PACT - UF 出水中 COD 的影响	维持其他工况不变,将倒置 A ² /O 生化池内的好氧池底分为 8 格,按次序依次命名为 A1、A2、A3、A4、A5、A6、A7、A8,相邻方格区域采用好氧 - 缺氧交替进行的方式运行,即 A1、A3、A5、A7 采用曝气好氧,溶解氧浓度维持在 0.6 ~ 2.0 mg/L,A2、A4、A6、A8 采用缺氧运行,溶解氧浓度维持在 0.3 ~ 0.6 mg/L
阶段 V (第 91 ~ 105 天)	调整回流比,改变膜池内炭浆回流至预混合池及生化池的比例,探讨其对膜污染的影响	工况 1:开启膜池前端的预混合池进水阀,混凝沉淀池出水进入预混合池,膜池至预混合池的炭浆回流比 $R_{预} = 50\%$,膜池至生化池的炭浆回流比 $R_{生化} = 50\%$; 工况 2:关闭预混合池进水阀,混凝沉淀池出水通过超越管直接进入膜池后端,关闭膜池内至预混合池的炭浆回流阀门,使炭浆全部回流至生化系统, $R_{预} = 0$, $R_{生化} = 100\%$; 工况 3:关闭预混合池进水阀,混凝沉淀池出水通过超越管直接进入膜池后端,关闭膜池内至预混合池的炭浆回流阀门,仅让炭浆部分回流至生化系统, $R_{预} = 0$, $R_{生化} = 25\%$; 以上 3 种工况分别连续运行 5 d

COD 采用重铬酸钾法测定,色度采用稀释倍数法测定,膜通量采用定时取样法计算。

2 结果与讨论

2.1 工艺启动阶段对污染物的去除效果

第 I 阶段,PACT 与 PACT - UF 组合工艺对 COD 和色度的去除效果如图 2 所示。原水 COD 和色度波动较大,分别为 398 ~ 670 mg/L、260 ~ 400 倍。在系统运行初期,第 5 天与第 10 天时 PACT 的去除效果一般,对 COD 的去除率分别为 48% 和 68%,对色度的去除率分别为 26% 和 42%,这是由于活性污泥菌胶团尚未成熟^[8]。PACT - UF 组合工艺对 COD 的去除率在第 5、10 天时则分别达到了 77%、87%,这是由于膜池内高浓度 PAC 可有效吸

附难降解污染物。在运行 20 d 时,PACT 对 COD 的去除率持续上升并稳定至 80% 左右,色度去除率稳定在 50% 左右,说明活性污泥已具备了吸附和氧化降解有机物的能力,污泥已成功驯化。第 21 天开启膜池内炭浆回流至生化池的运行方式,在之后的运行时间内,PACT 对 COD 的去除率上升至 85% ~ 88%,PAC 与活性污泥之间存在耦合作用,去除效果优于纯 PAC 吸附和单独活性污泥法。PACT - UF 组合工艺对 COD 的去除率达到 91%,对色度的去除率始终保持在 89% ~ 94%,说明膜池内高浓度的 PAC 对生化出水 COD 和色度仍有良好的去除效果。此外,PACT、PACT - UF 组合工艺对 COD、色度的去除率保持着同等速率的稳定增长,整个系统趋于

稳定、良好的运行状态,出水水质满足一级 A 排放标准。

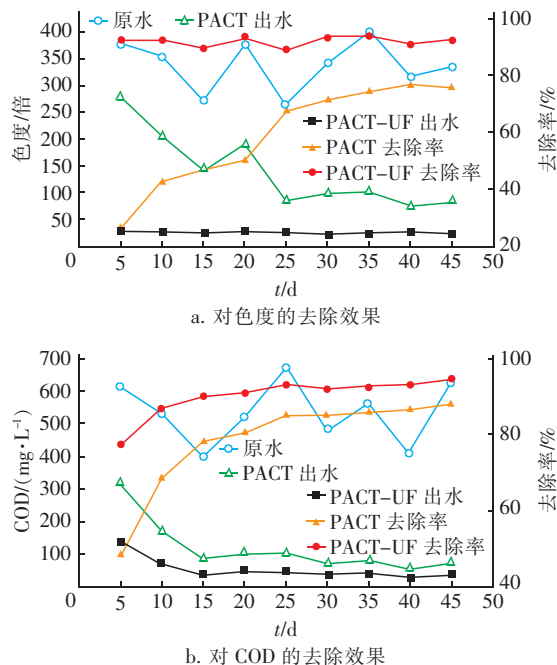


图2 第Ⅰ阶段对COD和色度的去除效果

Fig.2 Removal effects of COD and color at phase I

2.2 PAC投加量对出水水质的影响

第Ⅱ阶段,考察PAC投加量对COD及色度去除效果的影响。结果表明,随着隔日PAC投加量的增加,出水COD浓度、色度降低,系统对COD、色度的去除率升高。这是由于PAC能够吸附腐殖质类物质,并改善污泥性能,提高对COD的去除率,并且随着PAC投加量的增加吸附作用增强^[9],在投加量达到80 mg/L时,COD、色度去除率的上升趋势趋于平缓,此时出水水质已可以稳定达到一级A标准。综合考虑,PAC投加量在60~80 mg/L较合适。

2.3 炭浆回流比对出水水质的影响

第Ⅲ阶段,改变炭浆回流比对COD和色度去除效果的影响如图3所示。可知,增大炭浆回流比可明显提升PACT单元对COD、色度的去除率,尤其是对色度的去除。这是由于PAC的大量回流提升了好氧池内生物活性炭的浓度,同时活性炭巨大的比表面积和发达的孔隙结构使其成为良好的生物载体^[10],强化了生化作用,对COD的去除率大大提升,对色度的去除则更为显著。当回流比为25%~200%时,对COD和色度的去除率上升速率较快,当回流比>200%时,去除率则增长较慢,这主要是因

为系统内投加PAC的总量是恒定的。从经济成本、运行费用和去除效果等方面考虑,选择150%~200%的回流比较为合适。

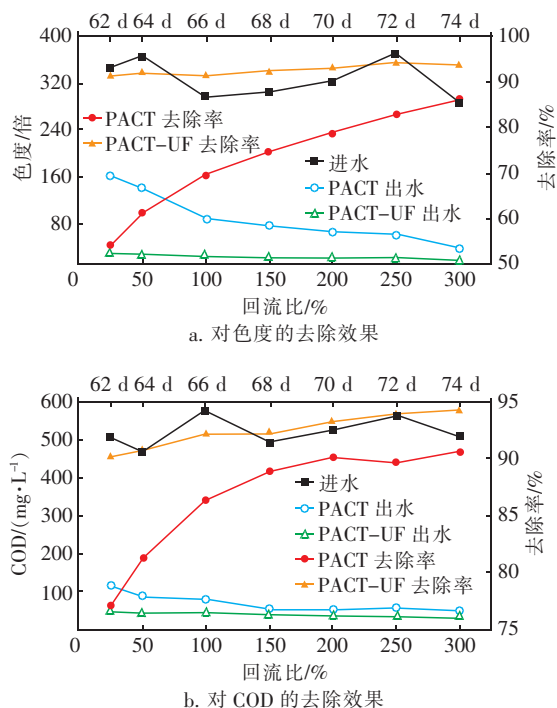


图3 炭浆回流比对COD和色度去除效果的影响

Fig.3 Influence of PAC recycling ratio on COD and color removal

2.4 生化池曝气方式对出水水质的影响

第Ⅳ阶段,考察生化池曝气方式对COD去除效果的影响。结果表明,采用间歇曝气方式,COD去除率与连续曝气运行相差不大,稳定在91.1%~93.6%之间,系统出水COD浓度可以满足一级A排放标准。

2.5 不同工况时膜污染情况

为了消除膜运行初始状态的影响,采用归一化膜比通量 J_{SF}/J_{SF0} 作为考察指标, J_{SF}/J_{SF0} 即每个时刻的膜比通量(J_{SF})与过滤周期初始时膜比通量(J_{SF0})的比值,其变化如图4所示。可知,3种工况下 J_{SF}/J_{SF0} 值均随连续运行时间的增加而下降,说明膜在未按时清洗的情况下,废水中颗粒物会在过滤过程中和PAC共同形成逐渐加厚的滤饼层,导致跨膜阻力逐渐增大,膜污染趋于严重,出水通量逐渐衰减,但这部分过滤阻力通过气水反冲洗能够得到很好的去除,属于可逆污染^[11]。不同工况在相同时刻 J_{SF}/J_{SF0} 值的大小为:工况1>工况2>工况3,说明膜池在大量回流炭浆的同时降低了池内PAC浓度,使得

膜表面附着的物质减少,因此减缓了膜表面的污染情况,使得膜比通量衰减缓慢,可延缓超滤膜的清洗周期,有利于节能,但增大回流比势必会增加更多的能耗。因此,需从处理效果、膜污染情况、运行成本等因素综合考虑,选择最佳的运行方式。

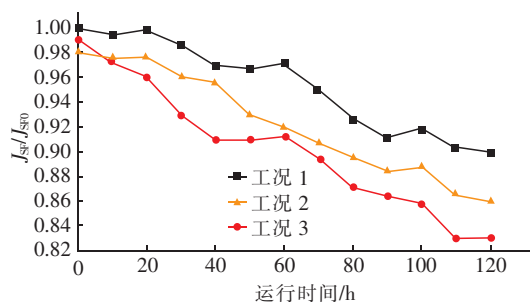


图4 归一化膜比通量的变化情况

Fig. 4 Changes of normalized membrane specific flux

超滤膜清洗前后电镜扫描照片见图5。可知,使用过的膜外表面附着较多杂质,形成较厚的沉积物,经清洗后膜表面堆积物较少,几乎无可见杂质,可观察到清晰的膜孔内部结构及分子形态,说明清洗得比较干净,且在日常使用过程中基本不存在因炭粉摩擦而造成的功能层破坏。

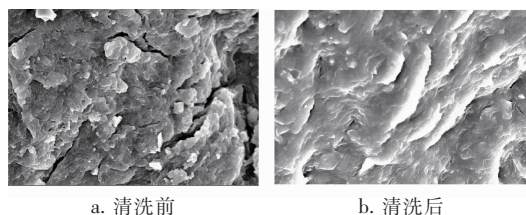


图5 清洗前后膜丝外表面 SEM 照片

Fig. 5 SEM images of membranes before and after cleaning

3 结论

① PACT-UF 工艺可通过 PAC 形成一定浓度的生物活性炭,有效吸附和降解污染物,再采用浸没式超滤膜对污染物进行截留,降低悬浮物、颗粒物和有机物浓度,出水 COD 和色度可满足一级 A 排放标准。

② 随着 PAC 投加量的增大,PACT-UF 工艺出水水质提升,60~80 mg/L 的投炭量比较合适。

③ 在一定范围内提高炭浆回流比可有效提升 PACT 和 PACT-UF 对 COD 和色度的去除率,综合考虑炭浆回流比取 150%~200% 较合适。

④ 增大炭浆回流比能延缓归一化膜比通量的下降趋势,有效改善超滤膜的污染程度,延长膜使用

寿命。

参考文献:

- [1] 许效天,霍林,霍聪. 造纸废水处理技术应用及研究进展[J]. 化工环保,2009,29(3):230-234.
Xu Xiaotian, Huo Lin, Huo Cong. Application and research progresses of treatment technologies for papermaking wastewater[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2009, 29(3): 230-234 (in Chinese).
- [2] 于兰平. 微波辐射处理造纸工业污水[J]. 北京工业大学学报,2012,38(7):1109-1113.
Yu Lanping. Treatment of paper waste water by microwave radiation[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2012, 38(7): 1109-1113 (in Chinese).
- [3] 吴伟,张龙,刘伟京,等. PACT 工艺系统中的吸附和生物降解性能研究[J]. 环境科学研究,2010,23(8):1062-1067.
Wu Wei, Zhang Long, Liu Weijing, et al. Adsorption and biodegradation effects in PACT process systems[J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(8): 1062-1067 (in Chinese).
- [4] 寻昊,蔡磊,邓慧萍,等. 生物粉末活性炭与超滤组合工艺膜污染物质研究[J]. 水处理技术,2015,41(7):61-64.
Xun Hao, Cai Lei, Deng Huiping, et al. Membrane contaminants in the combined process of biological powdered activated carbon and ultrafiltration[J]. Technology of Water Treatment, 2015, 41(7): 61-64 (in Chinese).
- [5] 瞿芳术,王小波,任南琪,等. 生物活性炭滤池/超滤组合工艺处理华南山区水库水[J]. 中国给水排水,2017,33(9):16-21.
Qu Fangshu, Wang Xiaobo, Ren Nanqi, et al. Biological activated carbon filter combined with ultrafiltration process for purification of South China reservoir water[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(9): 16-21 (in Chinese).
- [6] 高伟,梁恒,韩梅,等. 膜生物反应器净化微污染引黄水库水效能[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(8):31-34,93.
Gao Wei, Liang Heng, Han Mei, et al. Purification of micro-polluted reservoir water from Huanghe river by membrane bioreactors[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(8): 31-34, 93 (in Chinese).
- [7] 朱炜,张锐,李辉. UASB-PACT-A/O-MBR 工艺

- 处理高氨氮化工废水工程设计[J]. 给水排水, 2013, 39(5): 61-63.
- Zhu Wei, Zhang Rui, Li Hui. Project design of UASB - PACT - A/O - MBR process for treatment of chemical wastewater with high ammonia nitrogen [J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39 (5): 61 - 63 (in Chinese).
- [8] 花勇刚, 林华东, 王秋艳. 污水处理中 CASS 工艺活性污泥培养与驯化[J]. 中国市政工程, 2008(4): 52-54.
- Hua Yonggang, Lin Huadong, Wang Qiuyan. Cultivation and domestication of activated sludge in a process for sewage treatment [J]. China Municipal Engineering, 2008(4): 52-54 (in Chinese).
- [9] 孙琪媛, 胡以松, 王晓昌, 等. 投加粉末活性炭对 DMBR 处理污水性能的影响[J]. 中国给水排水, 2016, 32(19): 40-43.
- Sun Qiyuan, Hu Yisong, Wang Xiaochang, et al. Effect of addition of powdered activated carbon on wastewater treatment performance of DMBR [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(19): 40-43 (in Chinese).
- [10] 袁青彬, 庞金钊, 苗飞. 组合化学混凝-水解酸化-好氧-生物活性炭工艺处理高盐度钻井废水[J]. 水处理技术, 2010, 36(12): 87-91.
- Yuan Qingbin, Pang Jinzhao, Miao Fei. Treatment of high salinity drilling wastewater with oil separation - flocculation pre-treatment - hydrolytic acidification - aerobic treatment - BAC combined process [J]. Technology of Water Treatment, 2010, 36(12): 87-91 (in Chinese).
- [11] 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.
- Li Yonghong, Zhang Wei, Zhang Xiaojian, et al. Influence of PAC and particulates on natural organic matter membrane fouling during ultrafiltration process [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2010, 50(9): 1392-1395 (in Chinese).



作者简介: 刘鲁建(1982-), 男, 山东泰安人, 硕士, 高级工程师, 湖北君集水处理有限公司总工, 研究方向为废水处理理论与技术。

E-mail: 273894469@qq.com

收稿日期: 2019-03-13

