

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.10.022

平板陶瓷膜 MBR 工艺在农村污水处理中的应用

张 勇^{1,2}, 秦玉兰¹, 樊晓丽^{1,2}, 林啸峰¹, 秦键滨¹, 代晋国¹

(1. 广西碧清源环保投资有限公司, 广西 梧州 543002; 2. 北京贝蓝特环保科技有限公司, 北京 100071)

摘 要: 为了解平板陶瓷膜生物反应器用于农村污水处理的可行性,分析了某处理能力为 500 m³/d 的一体化陶瓷膜污水处理设备的运行数据。该项目进水水质水量波动大,冬季水温低,稳定运行期设备出水 COD、氨氮、TP 浓度平均值分别约为 17.54、1.35、0.19 mg/L。平板陶瓷膜在 16~40 L/(m²·h) 的通量下运行时,其跨膜压差平均上升速率为 1 kPa/d,可通过在线化学清洗恢复。在处理农村污水时,需做好预处理,定期观察膜吹扫曝气的均匀性,控制污泥浓度 < 15 g/L。对于进水浓度低、污泥浓度 < 1 g/L 的项目,可增大反冲洗频次且同步减少反冲洗时间,将跨膜保护压差设置为 -55 kPa 左右。

关键词: 膜生物反应器; 平板陶瓷膜; 膜污染; 跨膜压差

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)10-0120-06

Application of Flat Ceramic MBR Process in Rural Sewage Treatment

ZHANG Yong^{1,2}, QIN Yu-lan¹, FAN Xiao-li^{1,2}, LIN Xiao-feng¹, QIN Jian-bin¹,
DAI Jin-guo¹

(1. Guangxi Briwater Environment Investment Co. Ltd., Wuzhou 543002, China; 2. Beijing Brilliant Environmental Technology Co. Ltd., Beijing 100071, China)

Abstract: In order to understand the feasibility of flat ceramic membrane bio-reactor in village sewage treatment, the operation data of an integrated ceramic membrane sewage treatment facility with processing capacity of 500 m³/d was analyzed. The inlet water quality and quantity fluctuate greatly, and water temperature is low in winter. Under stable operation, the average effluent concentrations of COD, NH₄⁺ - N, and TP are about 17.54, 1.35, and 0.19 mg/L respectively. When the flat ceramic membrane is operated at a flux of 16~40 L/(m²·h), the average rise rate of the transmembrane pressure (TMP) is 1 kPa/d, which can be restored through cleaning in place. As for treating village sewage, it is necessary to pay attention to pre-treatment, to regularly inspect the uniformity of the membrane purge aeration, and to control sludge concentration less than 15 g/L. For projects with low water concentration load and low sludge concentration as below 1 g/L, the backwash frequency can be increased and the backwash time can be reduced simultaneously, so as to increase the transmembrane pressure to about -55 kPa.

Key words: membrane bioreactor; flat ceramic membrane; membrane fouling; transmembrane pressure

随着活性污泥生物处理技术的发展,MBR 工艺因其占地小、出水水质好、泥浓度高、产泥量少等优

点^[1]而得以迅速发展并应用。膜组件作为 MBR 工艺的核心组成之一,按常用材料类型,可分为有机材

料的 PVDF 中空纤维膜、平板膜和无机材质的纳米平板陶瓷膜等。目前,MBR 污水处理系统多数采用有机膜,有机膜 MBR 大规模应用已经有 10 年多的时间^[2]。近几年,纳米平板陶瓷膜国产化使得制作成本降低,采用平板陶瓷膜的 MBR 工艺开始崭露头角。相比有机膜而言,陶瓷膜采用无机材料高温烧制而成,具有化学稳定性高、耐酸碱、寿命长等优点^[3-4]。平板陶瓷膜在处理水质成分复杂或高浓度的工业废水时优势较为显著,而对于平板陶瓷膜在农村污水处理中的应用情况,现阶段则鲜有报道。

通过对北京南部某区采用一体化陶瓷膜污水处理设备的农村污水处理项目的应用研究,一方面分析农村污水处理的一些难点、痛点,另一方面也根据陶瓷膜 MBR 工艺在农村污水处理中的应用情况分析其设计、运行控制要点,为陶瓷膜 MBR 工艺更好地应用于农村污水处理提供一定的参考。

1 项目概况

该项目包括十多个农村污水处理站点,分散分

布,每个站点均采用一体化陶瓷膜污水处理设备,重点介绍其中 7 套设计处理规模为 500 m³/d 的设备运行情况。每个站点的工艺流程相同,均为 AAO + 陶瓷膜 MBR 工艺。

工艺流程如图 1 所示。

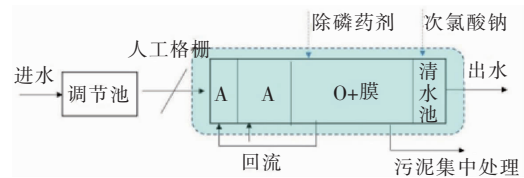


图 1 农村污水处理工艺流程

Fig. 1 Flow chart of rural sewage treatment process

其中,纳米平板陶瓷膜是以无机陶瓷材料经特殊工艺制备而成的非对称膜。陶瓷膜壁密布孔径约为 100 nm 的微孔,在抽吸外压的作用下,水等小分子可以透过膜,其他大分子物质被膜截留,从而达到分离目的。

平板陶瓷膜主要参数见表 1。

表 1 平板陶瓷膜参数

Tab. 1 Parameters of flat ceramic membrane

膜形状	主要材质	标称孔径/ μm	过滤方式	纯水透过性能(100 kPa, 25 $^{\circ}\text{C}$)/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)	粒子捕捉性能/%	使用 pH 范围	使用温度上限/ $^{\circ}\text{C}$
平板膜	Al_2O_3	0.1	外进内吸	>40	>95	2 ~ 12	80

由于农村污水水质水量波动大,不同项目差别较大,因此部分运行参数波动范围也较大。

该项目一体化设备的设计参数及运行条件如表 2 所示。纳米陶瓷膜如图 2 所示。

表 2 系统运行条件

Tab. 2 System operating conditions

项 目		设计参数
SRT/d		>30
HRT/h	厌氧段	1
	缺氧段	2
	O + 膜段	8
DO/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	好氧段	0.2 ~ 3
曝气强度/($\text{L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{膜片}^{-1}$)	膜池	3 ~ 4
回流比/%	O + 膜池至缺氧池	设计 250
	O + 膜池至厌氧池 (气提设计)	设计 100
MLSS/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	膜池	1 ~ 15(实际)
膜通量/ ($\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)		20 ~ 30
温度/ $^{\circ}\text{C}$		1 ~ 28
pH 值		6 ~ 9

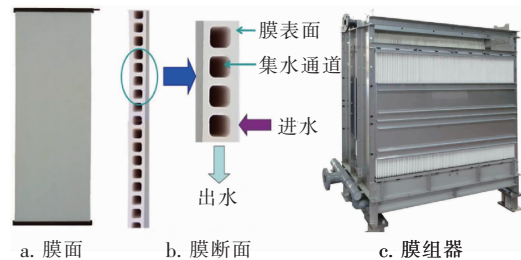


图 2 纳米陶瓷膜

Fig. 2 Image of nano flat ceramic membrane

2 运行情况与分析

2.1 处理难点

① 水量波动

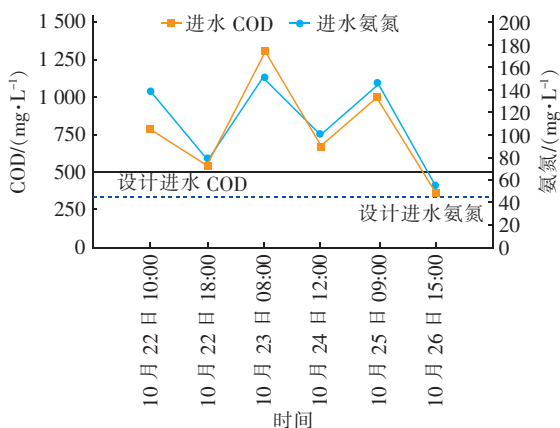
该项目中 7 个设计处理规模为 500 m³/d 的站点实际平均处理水量约为 198 m³/d,平均水量负荷率仅有 39.6%,各站点负荷率标准偏差为 15% ~ 20%。而其中也不乏部分来水量达到或超过站点设计水量,以及当日来水量极少的情况。这体现了农村污水处理站点的一个重要特点,即水量波动大。

分析原因主要有:农村人口流动性大、农业灌溉

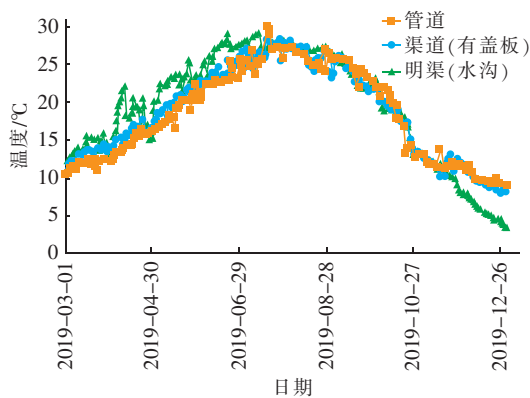
和雨水的间歇性混入、周边小型企业的间歇性生产废水排入以及污水输送管网或沟渠的漏损等。针对水量波动大的特点,设计时设有冗余量,在设备选型时留有一定的安全系数。此外,水量波动大带来的另一个显著问题就是水量负荷小时,吨水能耗显著增加。

② 水质波动

农村污水处理站点受雨水混入或企业、养殖户排污影响,水质波动较大。对其中一个进水异常站点进行了连续一周不同时间点的进水水质检测,结果如图3所示。



a. 小企业排污引起的水质波动



b. 不同来水方式下的水温变化

图3 农村污水水质波动情况

Fig. 3 Rural wastewater quality fluctuations

该站点进水水质波动较大且普遍浓度较高,通过对该村污水来源进行排查分析后,发现该站点水质波动主要是其周边存在小型作坊,间歇排水所致。同样,也有部分站点来水污染物浓度较低,这些站点分为两类:一类是明渠来水,存在雨水稀释作用;另一类是村民在冬季为防止水管冻裂采取的长流水习惯所致,这两类情况下进水浓度即可接近排放标准。

进水浓度较高,以及进水中含难生物降解的有机物时,会导致出水难以达标,而低浓度又会导致污泥浓度难以维持。

除水质的波动外,农村污水由于管网不完善,还带来了冬季进水水温低的严重问题,对于明渠来水的站点,其冬季水温可低至4℃以下。众多研究表明,微生物在低温下的活性将大幅降低,这是因为在低温下一方面微生物的酶活性降低,水中基质间的传递变得缓慢,微生物生长繁殖迅速减缓,从而降低常规生化反应的速率,其中对生化反应速率的影响可以参考阿伦尼乌斯反应公式^[5];另一方面生化系统中起硝化作用的硝化细菌活性受温度影响尤为明显,当温度<11℃后,硝化反应将受到严重的抑制。因此,低温将会严重影响污水生物处理的效果,特别是会抑制系统的硝化,使得出水氨氮浓度难以达标^[6]。

2.2 陶瓷膜MBR工艺处理情况

选取进水水质及水量较为稳定的一个站点进行一定频次(出水每周2~3次,进水每月2~3次)的水质检测,以了解采用陶瓷膜MBR一体化设备处理常规农村污水时的效果以及膜污染变化情况。

该站点来水主要为生活污水,部分时段有少量雨水混入,平均进水COD、氨氮、TP浓度分别为189.02、40.03、3.95 mg/L,平均出水浓度分别为17.54、1.35、0.19 mg/L,由于未考核TN指标,仅进行了几次达标验证,通过少量投加外碳源(乙酸钠),使得进水碳氮比(COD/TN)>5即可保证出水TN达标。

来水为管道结合有盖板渠道的形式,在冬季该点进水温度能维持在8℃左右,设备内水温在10℃左右,加之本系统的污泥浓度较高(>10 g/L),且在30 d以上的长污泥龄下,有助于系统驯化适应低温的微生物,因此在此温度下,系统出水水质仍能保持稳定。出水TP通过化学除磷的方式去除,温度对其影响较小。本项目中明渠进水水温在4℃左右,出水氨氮基本未去除。

2.2.1 膜污染及其控制

该稳定运行站点的膜污染情况如图4所示。正常运行时通量为16~40 L/(m²·h),平均运行通量约为24 L/(m²·h)。在此运行通量下,跨膜压差(TMP)为-40~-20 kPa,压差上升速率约为1 kPa/d。每隔半个月对膜系统进行一次在线维护清

洗,停止产水,在清水池中配制浓度约为1 000 mg/L的次氯酸钠溶液,通过重力形式药液反向流入膜腔内部,浸泡4~6 h。在线清洗后,跨膜压差可恢复至初始的-20 kPa左右,之后再逐步上升至-35 kPa左右。平板陶瓷膜由于强度大,部分站点运行压差维持在-55 kPa左右,但为了保证系统的稳定,通常建议控制在-40 kPa以内运行。

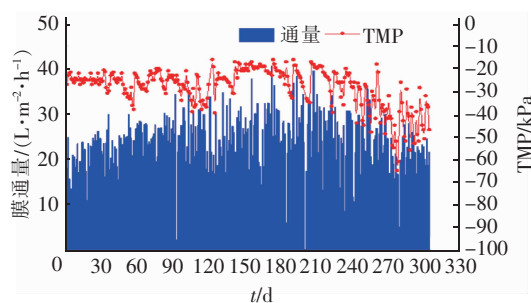


图4 膜系统通量及跨膜压差变化情况

Fig. 4 Changes of membrane system flux and transmembrane pressure

从图4还可以看出,当运行超过240 d后,系统的运行跨膜压差增大,且上升速率较快,在线化学清洗后较难恢复到-20 kPa,分析原因主要是该段时间排泥少,污泥老化严重,且污泥浓度高达15 g/L以上。此外,冬季水温较低,污泥分泌的大量胞外聚合物等黏性物质,使得膜污染加剧^[7-8]。此时采取的措施是降低污泥浓度至10 g/L以内,并进行一次高浓度的化学清洗,将次氯酸钠浓度提高至2 000 mg/L,同时将浸泡时间延长一倍,碱洗后再采用质量分数为2%的柠檬酸酸洗3~4 h,以去除膜表面长期积累的少量无机结垢污染物,双重清洗后运行压差可恢复到-20 kPa左右。

2.2.2 膜运行注意事项

根据近一年对平板陶瓷膜污水处理设备在农村污水中的应用观察,汇总整理了不同进水特点下陶瓷膜系统运行的一些注意事项,主要包括以下几个方面:

① 进水硬质物拦截

平板陶瓷膜由于其平板膜的特性,不会发生毛发纤维缠绕等问题,可以不设置超细膜格栅,但由于平板陶瓷膜属于硬质材料,不能承受硬质物体的不断撞击。而农村污水普遍存在雨污合流的问题,进水中经常会混入石块、石子等硬质物体,因此必须设置粗、细(5~10 mm)两道格栅以防止石块、石子等

硬质物体进入系统,在曝气水流下撞击膜片导致膜破裂。在进水试运行前,也必须保证系统中无施工期残留的硬质物体。

② 曝气均匀性

膜曝气吹扫是控制膜污染最有效的方法之一,在日常巡检中,一定要注意观察设备内膜组器的曝气状态,判断膜组器曝气是否均匀。曝气强度小的组器,膜表面积累的污泥增多,膜污染速度会逐渐加快,形成恶性循环,最终将导致污泥板结硬化,甚至挤压膜片至断裂。当发现膜曝气不均时,可通过调整不同膜组器的曝气阀门,通过憋气的形式,将堵塞的曝气装置进行大气量冲擦。若是由于底部淤泥过多导致曝气装置堵塞,则需清淤。膜组器的曝气均匀性、高效性还与曝气强度、吹扫曝气装置的设计关系密切,建议采用开放式曝气结构,避免积泥,以及大气泡形式提高冲刷效果。

③ 污泥浓度

高污泥浓度是MBR工艺相比传统工艺的一大优势,然而过高的污泥浓度也会带来一些不利的影响。一方面,污泥老化分泌较多的胞外聚合物会污堵膜面,使得膜污染加剧;另一方面,过高的污泥浓度可能会堵塞曝气系统,导致曝气不均。而过低的污泥浓度除对水质处理效果有不利影响外,也会引起膜污染加剧,影响膜系统稳定运行,在低污泥浓度下活性污泥难以形成菌胶团絮体,加之膜池吹扫曝气强度较大,使得微生物更加松散,易堵塞孔径约为100 nm的微滤膜孔。根据经验值,建议控制污泥浓度不超过15 g/L,最佳范围可保持在8~12 g/L,其机理有待于进一步研究。

④ 反冲周期与时间

本项目设计的陶瓷膜反冲洗频次是产水9 min,反冲1 min,但在进水污染物浓度低、污泥浓度长期低于1.5 g/L时,此运行参数需要进行适当调整。本项目中的站点C,一段时间内长期进水水质浓度低,来水量也不稳定,平均负荷率仅为26.5%,导致污泥浓度很难增长,仅有1 g/L左右,然而其膜运行压差却依然很高,每次低浓度次氯酸钠在线清洗后跨膜压差会大幅下降,开机产水后在短时间内迅速上升。为稳定运行,该站点调整为产水6 min、反冲洗0.5 min。此外,由于低污泥浓度下不会发生积泥问题,因此适当降低膜吹扫风量以及提高运行压差的上限值。一般陶瓷膜系统运行时设置的保护限值

为 -40 kPa, 在低浓度下可将其限值调整为 -55 kPa, 以延长在线清洗的周期。

2.3 运行成本分析

一体化平板陶瓷膜污水处理设备的直接运行成本主要包括电费、药剂费(除磷和膜化学清洗)、常规设备维护维修费以及污泥处理费。以上述水质水量较为稳定的站点为例, 2019 年各项直接运行费用平均分别约为 0.449 、 0.062 (除磷 0.02)、 0.05 、 0.01 元/ m^3 , 共计 0.571 元/ m^3 。其中电费占比最大, 而电耗受水量负荷率影响较大(见图 5), 水量负荷率为 80% 左右, 平均电耗为 0.45 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$, 而在水量负荷率不足 60% 时, 电耗高达 0.65 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

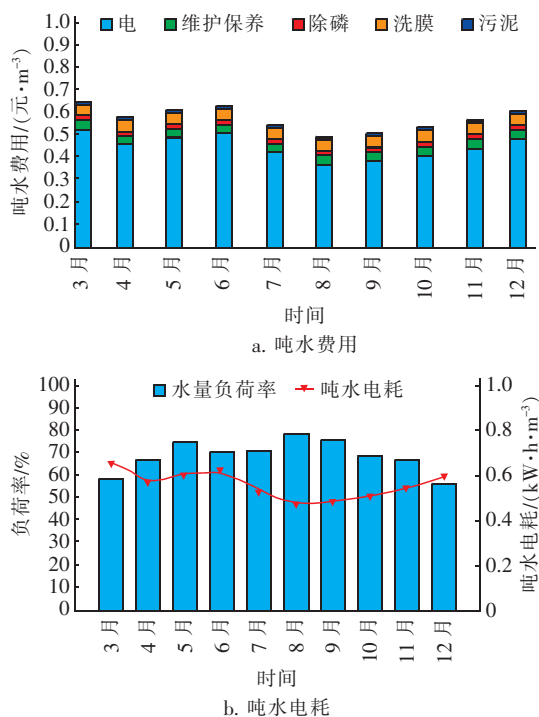


图5 直接运行成本及吨水电耗情况

Fig. 5 Direct operating costs and electricity consumption per ton of sewage

平板陶瓷膜 MBR 的能耗主要为膜吹扫风机能耗, 水量低时风量不变, 但吨水能耗相应增大。该情况下可通过调整设备启停时间, 用液位控制集中产水, 降低系统电耗。因此在采用此类设备处理农村污水时, 一定要做好水量估算, 同时调节池的设置不可或缺, 并且其容积不能过小, 以调节来水水量、水质, 使得在低水量时能暂停运行, 集中产水, 降低能耗。当然, 关于膜工艺的能耗, 还需要通过开发新的吹扫装置、新型抗污染膜材料等来进一步优化。

MBR 工艺由于泥龄长, 生物除磷能力较弱, 需

要辅助化学除磷使 TP 达标。同时由于泥龄长, 污泥浓度高, 因此污泥产量较少, 污泥处理费用较少。由于农村污水处理设备站点过于分散, 若采用传统工艺, 污泥产量大, 污泥处理处置极为麻烦。本项目采用移动式叠螺机, 根据 MBR 设备中的污泥浓度(通常 ≥ 12 g/L)对站点污泥进行脱水, 部分进水水质较低或间歇水量少的站点, 排泥时间会超过 3 个月。

3 结论

① 该农村污水处理项目水质、水量波动大, 各站点平均水量负荷率仅为 39.6% , 明渠来水的站点冬季水温 < 4 $^{\circ}\text{C}$ 。

② 陶瓷膜 MBR 出水水质较好, 平均进水 COD、氨氮、TP 浓度分别为 189.02 、 40.03 、 3.95 mg/L, 出水平均浓度分别为 17.54 、 1.35 、 0.19 mg/L。

③ 平板陶瓷膜在 $16 \sim 40$ $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的通量下运行时, 其压差平均上升速率为 1 kPa/d, 可通过定期在线维护清洗恢复。

④ 采用陶瓷膜处理农村污水时, 由于长期无人值守, 因此需注意做好预处理, 严禁坚硬固体大量进入; 定期巡检观察膜吹扫曝气的均匀性; 建议半个月到一个月检测一次污泥浓度, 控制污泥浓度 ≤ 15 g/L; 对于进水浓度低的项目, 污泥浓度 ≤ 1 g/L 时, 可增大反冲洗频次且同步减少反冲洗时间, 将跨膜保护压差设置为 -55 kPa 左右。

⑤ 陶瓷膜一体化设备处理常规农村污水的直接运行成本(电、药、泥、维护)约为 0.571 元/ m^3 。

参考文献:

- [1] SANTOS A, MA W, JUDD S J. Membrane bioreactors: two decades of research and implementation [J]. Desalination, 2011, 273(1): 148–154.
- [2] 黄霞, 曹斌, 文湘华, 等. 膜-生物反应器在我国的研究与应用新进展[J]. 环境科学学报, 2008, 28(3): 416–432.
HUANG Xia, CAO Bin, WEN Xianghua, et al. State-of-the-art of membrane bioreactors: research and application in China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(3): 416–432 (in Chinese).
- [3] 崔佳, 王鹤立, 龙佳. 无机陶瓷膜在水处理中的研究进展[J]. 工业水处理, 2011, 31(2): 13–16.
CUI Jia, WANG Heli, LONG Jia. Research on inorganic ceramic membranes applied to water treatment [J].

- Industrial Water Treatment, 2011, 31 (2): 13 - 16 (in Chinese).
- [4] 曹义鸣,徐恒泳,王金渠. 我国无机陶瓷膜发展现状及展望[J]. 膜科学与技术, 2013, 33(2): 1 - 5, 11.
CAO Yiming, XU Hengyong, WANG Jinqu. Development status and prospect of inorganic ceramic membrane in China[J]. Membrane Science and Technology, 2013, 33 (2): 1 - 5, 11 (in Chinese).
- [5] ANTONIOU P, HAMILTON J, KOOPMAN B, *et al.* Effect of temperature and pH on the effective maximum specific growth rate of nitrifying bacteria[J]. Water Research, 1990, 24(1): 97 - 101.
- [6] 张勇,王淑莹,赵伟华,等. 低温对中试 AAO - BAF 双污泥脱氮除磷系统的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(1): 56 - 65.
ZHANG Yong, WANG Shuying, ZHAO Weihua, *et al.* Effect of low temperature on pilot-scale AAO - BAF two-sludge system[J]. China Environmental Science, 2016, 36(1): 56 - 65 (in Chinese).
- [7] 郑祥,樊耀波. 影响 MBR 处理效果及膜通量的因素研究[J]. 中国给水排水, 2002, 18(1): 19 - 22.
ZHENG Xiang, FAN Yaobo. Study on the factors influencing treatment effect and membrane flux of anaerobic/oxic membrane reactor (A/O MBR) [J]. China Water & Wastewater, 2002, 18 (1): 19 - 22 (in Chinese).
- [8] 傅金祥,苏锦明,周晴,等. 温度对 PAC - MBR 组合工艺的影响[J]. 膜科学与技术, 2005, 25(6): 55 - 58.
FU Jinxiang, SU Jinming, ZHOU Qing, *et al.* Influence of temperature on PAC - MBR integration process [J]. Membrane Science and Technology, 2005, 25(6): 55 - 58 (in Chinese).

作者简介:张勇(1989 -),男,安徽芜湖人,硕士,注册环保工程师,主要从事水环境保护相关工作,已发表论文 8 篇,授权专利 5 项。

E-mail: zy4444444@163.com

收稿日期:2020 - 02 - 24

修回日期:2020 - 05 - 26

(编辑:衣春敏)

(上接第 119 页)

- reclaimed water engineering [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(1): 27 - 31 (in Chinese).
- [2] 张攀,文湘华,王波,等. 纳滤生产再生水示范工程运行效果分析[J]. 环境工程学报, 2017, 11(9): 4985 - 4992.
ZHANG Pan, WEN Xianghua, WANG Bo, *et al.* Operation effect of a nanofiltration demonstration project for producing reclaimed water [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(9): 4985 - 4992 (in Chinese).
- [3] 邱明海. 昆明市第十四污水处理厂工程设计技术方案[J]. 给水排水, 2019, 45(1): 31 - 34.
QIU Minghai. Technical design scheme of the fourteenth wastewater treatment plant project in Kunming City [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45 (1): 31 - 34 (in Chinese).
- [4] World Health Organization. Potable Reuse: Guidance for Producing Safe Drinking-water [M]. Geneva: World Health Organization, 2017.
- [5] BOWEN W R, MUKHTAR H. Characterisation and prediction of separation performance of nanofiltration membranes [J]. Journal of Membrane Science, 1996, 112 (2): 263 - 274.
- [6] TANG C Y, FU Q S, CRIDDLE C S, *et al.* Effect of flux (transmembrane pressure) and membrane properties on fouling and rejection of reverse osmosis and nanofiltration membranes treating perfluorooctane sulfonate containing wastewater [J]. Environment Science & Technology, 2007, 41(6): 2008 - 2014.

作者简介:张彩云(1991 -),女,安徽淮北人,硕士,工程师,研究方向为膜法污水深度处理与资源化技术。

E-mail: 1018468540@qq.com

收稿日期:2020 - 03 - 03

修回日期:2020 - 09 - 15

(编辑:衣春敏)