

混合生长式膜生物反应器中导流板的流体力学影响

王博文¹, 孙安宁², 张国闽³, 薛鑫¹, Ahmed Bakr¹, 杨飞¹

(1. 海南大学 热带农林学院, 海南 海口 570228; 2. 北控水务集团 <海南> 有限公司, 海南 海口 570228; 3. BioEco Environmental Technologies Co. Ltd., 德国)

摘要: 在中试规模的混合生长式膜生物反应器(HG-MBR)中,采用导流板对膜区和填料区的隔离网进行了优化研究,通过清水试验分析了导流板面积和位置对反应器流体力学特性的影响。结果表明,使用导流板可以改善反应器的流体力学特性,减小隔离网对填料流动的负面效应,降低驱动填料流化所需的曝气量,促进填料在反应器内的循环流动,从而达到节能降耗的目的。优化运行结果表明,膜区和填料区之间的隔离网在上部采用导流板式封闭设计(面积约为 0.71 m^2),当填料填充率为50%时,驱动填料流动所需的曝气量可减少15%以上,节能效果明显。

关键词: 混合生长式膜生物反应器; 填料; 导流板; 隔离网; 流体力学特性

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)21-0080-06

Hydrodynamic Effect of Baffle in a Hybrid Growth Membrane Bioreactor

WANG Bo-wen¹, SUN An-ning², ZHANG Guo-min³, XUE Xin¹,
Ahmed Bakr¹, YANG Fei¹

(1. Institute of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou 570228, China; 2. Beijing Enterprises Water Group <Hainan> Co. Ltd., Haikou 570228, China; 3. BioEco Environmental Technologies Co. Ltd., Germany)

Abstract: The study was carried out for optimizing the separation mesh between the membrane area and the carrier area by using a baffle in a hybrid growth membrane bioreactor (HG-MBR). The effects of the area and the location of the baffle on the hydrodynamic characteristics of the reactor were investigated by clean water experiment. It was found that the use of a baffle could improve the hydrodynamic characteristics of the reactor, mitigate the negative impact of the separation mesh on the mobility of the carriers, reduce the aeration rate required for driving the carriers, enhance the recirculation of the carriers in the reactor, and therefore reduce the energy consumption. The optimized operation results showed, when the closed design of a baffle (an area of 0.71 m^2) on the upper part of the separation mesh between the membrane area and the carrier area was adopted and the filling ratio was 50%, obvious energy saving effects were achieved as aeration rate driving for the moving of the carriers was reduced more than 15%.

Key words: hybrid growth membrane bioreactor; carrier; baffle; separation mesh; hydrodynamic characteristics

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51568018); 中西部高校项目(MWECSP-RT08、ZXBHJH-XK004、ZXBHJH-XK); 海南省高校研究生创新科研课题项目(Hys2017-85)

通信作者: 杨飞 E-mail: Laochy@163.com

混合生长式膜生物反应器(HG-MBR)是在MBR基础上研发出来的一种新型、高效的工艺,其通过向好氧池中投加填料,依靠曝气产生的驱动力使填料处于流化状态,生物膜在填料表面附着生长,使反应器中既有悬浮微生物,又有生物膜,从而提高反应器中总生物量和生物多样性,增强系统的降解和抗冲击负荷能力。另外,还可在维持一定生物量的同时,降低MLSS浓度,从而显著减轻膜污染^[1]。填料在HG-MBR内循环流动时,为防止填料损伤膜表面,通常采用隔离网将反应器分为填料区和膜区,在两个区域内均需安装曝气装置,由于受反应器几何形状和曝气装置的限制,难以保证填料在反应器内的流动均衡性,使其容易出现不同程度的流动死区,混合传质效果受到影响。为确保填料的循环流动,通常需要过量的曝气量,导致曝气能耗偏高^[2,3]。因此,需要进一步优化HG-MBR的结构和水力特性设计,以达到节能降耗的目的。

笔者采用导流板对 HG-MBR 中的隔离网进行结构设计和研究,分析了导流板面积和位置对反应器流体力学特性和填料流动性的影响,旨在为反应器的结构优化设计及节能降耗提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验装置

混合生长式膜生物反应器如图 1 所示。

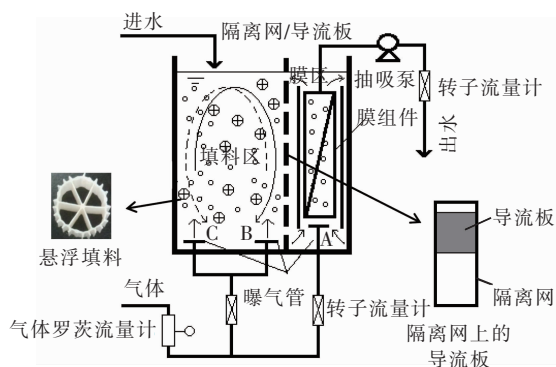


图1 混合生长式膜生物反应器示意

Fig. 1 Schematic diagram of HG-MBR

反应器主体由安装了浸没式平板超滤膜组件(有效膜表面积为 10 m^2)的好氧反应池组成,反应池的长 \times 宽 \times 高为 $0.98\text{ m}\times 0.84\text{ m}\times 1.96\text{ m}$,有效容积为 1.48 m^3 ,有效水深为 1.8 m ,中间用隔离网(冲孔不锈钢板,孔径为 8 mm)将其分隔成两个区域:填料区(容积为 0.98 m^3)和膜区(容积为 0.5

m³)。导流板为多块同样大小的不锈钢薄板,可按需要固定在隔离网上,以便调节其位置和面积,对隔离网进行局部遮盖,以达到调节水力特性的目的。填料区和膜区分别安装 A、B、C 三根微孔曝气管,在供氧的同时驱动填料循环流动,并冲刷膜表面来缓解膜污染,其中 B 管靠近隔离网安装。反应器还包括罗茨鼓风机、气体罗茨(腰轮)流量计(准确度为 0.5 级)、气体转子流量计(LZT M-15 型,精度为 4 级)。填料为白色聚乙烯圆柱体,尺寸为 $\varnothing 15\text{ mm} \times 11\text{ mm}$,单个质量为 0.5~0.6 g,密度约为 0.97 g/cm³,比表面积 $> 450\text{ m}^2/\text{m}^3$,截面由“*”状骨架支撑,外壁有突出的竖条状鳍翅。

1.2 试验方法

在设定的操作条件下,通过进气阀门来调节曝气量,观察填料在水中的流化状态。试验中 A、B、C 三根曝气管按 4 种方式组合: B 管单侧曝气、C 管单侧曝气、A + B 管组合曝气和 A + C 管组合曝气。其中,根据膜组件参数及膜污染控制需要, A 管曝气量设为 $5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

① 导流板面积的影响:导流板的面积分别为 0.35 m^2 ($0.42 \text{ m} \times 0.84 \text{ m}$)、 0.71 m^2 ($0.84 \text{ m} \times 0.84 \text{ m}$)、 1.06 m^2 ($1.26 \text{ m} \times 0.84 \text{ m}$),以及无导流板,导流板的上端均位于水面处(上部),曝气方式分别为 C 管单侧曝气和 A + C 管组合曝气,填料填充率为 20% 和 50%,进出水条件为静态(无进出水)。

② 导流板位置的影响:导流板面积为 0.71 m^2 ,导流板位置分别为上部(上端与水面平齐)、中部(上端距水面 0.25 m)、下部(上端距水面 0.5 m)和无导流板,曝气方式分别为 B 管单侧曝气、C 管单侧曝气、A + B 管组合曝气和 A + C 管组合曝气,填料填充率为 50% ,进出水条件为静态。

③ 面积和位置的综合影响:导流板面积分别为 0.35、0.71、1.06 m²,导流板位置分别为上部、中部、下部,曝气方式分别为 C 管单侧曝气和 A + C 管组合曝气,填料填充率为 50%,进出水条件为静态。

④ 进出水和膜区曝气量的影响:导流板面积为 0.71 m^2 ,导流板位置为上,曝气方式为 A + C 管组合曝气,填料填充率为 50%,进水条件分别为静态和动态(进水流量约为 200 L/h)。

在考察膜区曝气量对流体力学特性的影响时, A 管曝气量设为 4、5、6 m³/h, 其他条件下的 A 管曝气量设为 5 m³/h。

2 结果与讨论

试验采用流动的填料区域占填料区水面的面积百分比来表征流化状态。结果表明,随着曝气量的增加,在达到某一数值时填料才会突变流动,这时流动的填料区域约占填料区水面面积的50%,把这种状态定义为开始流动状态,此时的曝气量为填料开始流动时的驱动力;当填料在水面上的流动区域比达到约95%,仅在湍流死角区域中残留的少量填料也在5 s内下沉流动时的状态定义为完全流动状态,对应的曝气量为填料完全流动时的驱动力;而介于二者之间的流化状态可统称为一般流动状态。本试验仅关注填料开始流动和完全流动两种状态。

2.1 导流板面积的影响

采用C管单侧曝气与A+C管组合曝气方式,不同面积的导流板在两种填料填充率下对流体力学特性的影响如图2所示。可知,在两种填充率下,填料开始流动和完全流动时所需的曝气量随着导流板面积的增加整体呈减小的趋势(仅在20%填充率并处于开始流动状态时变化不大),说明隔离网对驱动填料的流动具有负面的耗散作用,其面积越大,负面作用越明显。而使用导流板可以明显改善反应器的流体力学特性,促进填料的循环流动,有利于降低能耗,特别是在填料填充率较高时(50%),与无导流板相比,面积为0.71 m²的导流板在C管单侧曝气时可使填料完全流化所需的曝气量减少54.2%,在A+C管组合曝气时可减少15%。这是因为导流板对循环水流具有阻挡和导流作用,改变了填料区的流体力学特性,使C管曝气产生的驱动力在导流板一侧得以集中向下,减少了其通过隔离网耗散到膜区的负面效应,提高了曝气产生的驱动力效应。

但如果导流板面积过大,就会阻碍填料区与膜区之间的物质交换,可能造成膜区活性污泥的累积,从而加剧膜污染。因此,实际应用中导流板的面积并非越大越好,在考虑促进填料流动的同时,也要注意两个区域间的物质交换,寻找一个优化面积。另外,在填料处于完全流动状态下,C管单侧曝气时驱动填料流动所需的曝气量在填充率为50%时约为20%时的2倍,A+C管组合曝气时则为2.2倍(扣除膜区5 m³/h的曝气量)。因此,在确定填料填充率时应充分考虑驱动力的能耗因素,不宜为增加附着生物量而使用过高的填充率,应同时结合对膜污染的控制确定。

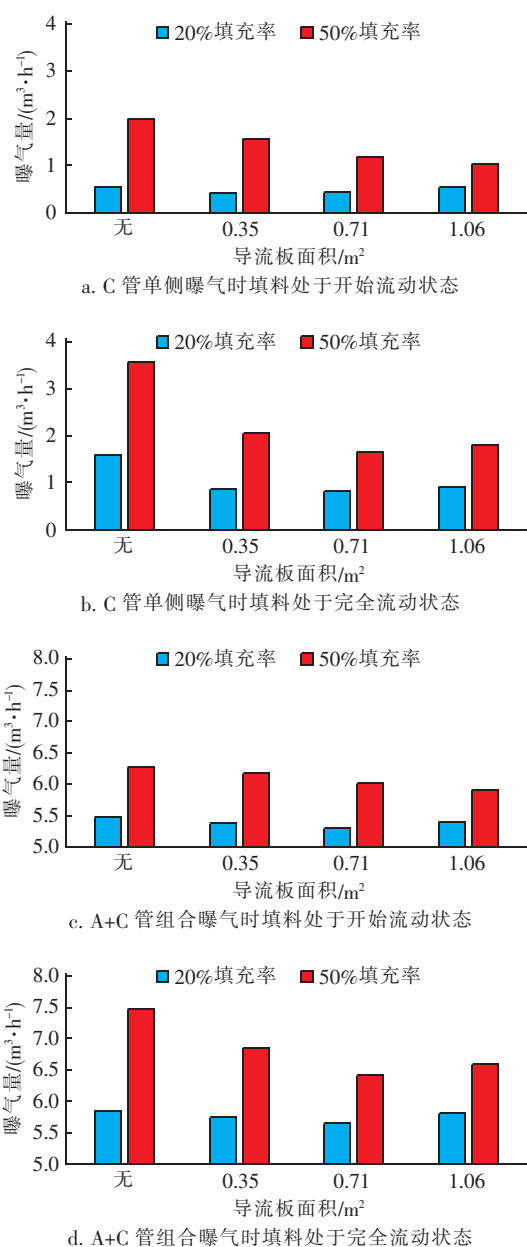


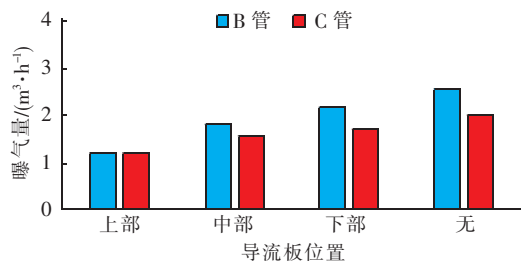
图2 不同曝气条件下导流板面积对填料流动的影响

Fig. 2 Effect of baffle area on carriers mobility under different aeration conditions

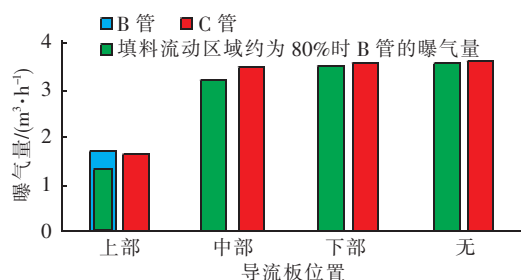
2.2 导流板位置的影响

在不同曝气组合方式下,导流板的位置对流体力学特性的影响如图3所示。可知,填料处于开始流动和完全流动时,不同曝气方式下驱动填料流动所需的曝气量(即能耗)均随着导流板位置的下移而增大,其中采用B管和A+B管的曝气方式更为明显。在B管单侧曝气且导流板位于中、下部时甚至无法达到完全流动状态。相比较而言,采用C管和A+C管驱动填料流动所需的曝气量更小,更节

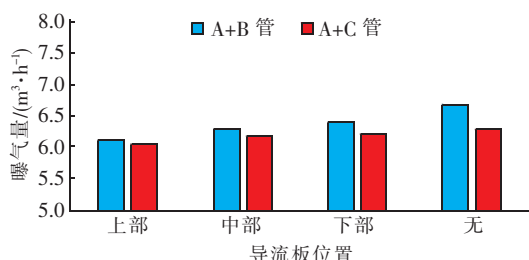
省能耗,这进一步证实了隔离网对填料流动的负面效应。理论上,B管和C管单侧曝气对填料的驱动力应该是一致的,但由于B管靠近隔离网,而C管靠近反应器壁,B管上升的气流会通过隔离网的孔洞进入膜区而损失部分驱动力,而导流板的使用减小了这种损耗,使气流容易集中在填料区而增加驱动力。导流板位置在上部时驱动填料的曝气量明显更小,而位于中、下部时所需曝气量差别不大,可见对流体上部驱动力的保持尤为重要。这是因为填料流动到水体上部时需要改变方向才能实现循环流动,这一方面靠填料流动的惯性力,另一方面需要持续的循环驱动力,而反应池内流态分布不均衡,尤其是C管单侧曝气时填料区隔离网侧上部水体流速较小,填料容易出现滞留与聚集,隔离网对驱动力的耗散作用更加剧了这种现象,而使用导流板有效减小了这种负面效应。吴云等^[4]在填料流动特征的数值模拟中,通过在生物接触氧化池内添加隔墙的方式加强了流体的湍流扰动程度,改善了填料在池内的混合状态,也有助于填料的循环流动。



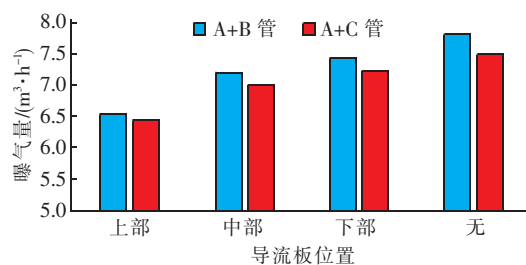
a. 单侧曝气时填料处于开始流动状态



b. 单侧曝气时填料处于完全流动状态



c. 组合曝气时填料处于开始流动状态



d. 组合曝气时填料处于完全流动状态

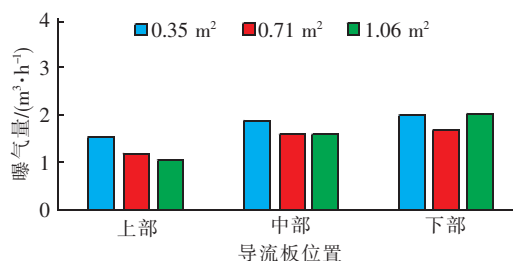
图3 不同曝气条件下导流板位置对填料流动的影响

Fig. 3 Effect of baffle location on carriers mobility under different aeration conditions

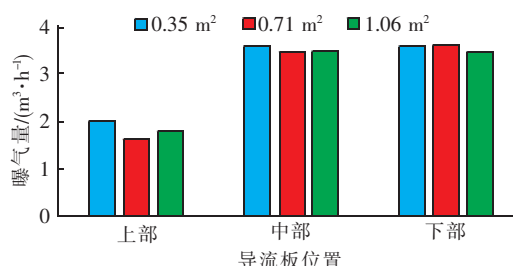
当采用组合曝气时,如果扣除膜区A管 $5\text{ m}^3/\text{h}$ 的曝气量,则B、C管的曝气量均少于相对应的单侧曝气量,特别是B管曝气时导流板位于中、下部时也可达到完全流动状态,说明膜区曝气产生的升流作用改善了填料区的流体力学特性,对填料的流动有促进作用。经计算,这种促进作用对B、C管的影响相似,导流板在上部时,曝气量可减少15%以上。

2.3 导流板面积和位置的综合影响

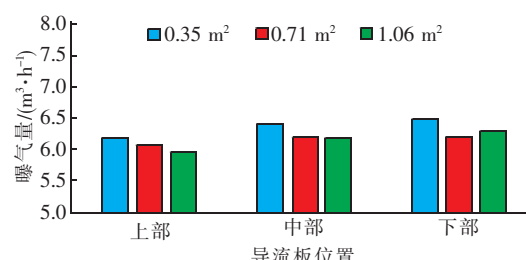
导流板面积与位置的综合影响如图4所示。



a. C管单侧曝气时填料处于开始流动状态



b. C管单侧曝气时填料处于完全流动状态



c. A+C管组合曝气时填料处于开始流动状态

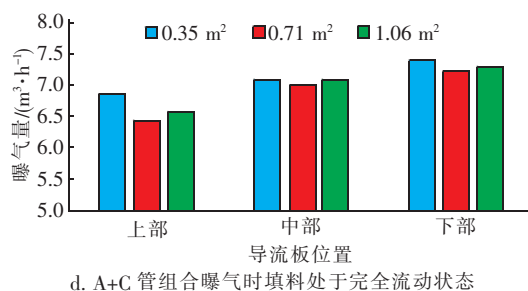


图4 不同曝气条件下导流板面积与位置对填料流动的影响

Fig. 4 Effect of area and location of baffle on carriers mobility under different aeration conditions

由图4可知,两种曝气方式下导流板位于上部时驱动填料流动所需的曝气量最小,具有节能优势。且导流板面积从 0.35 m^2 增加到 0.71 m^2 时效果明显,但从 0.71 m^2 增加到 1.06 m^2 时仅在导流板位于上部位置对开始流动有促进作用,其他工况条件下并无作用甚至有反作用,即面积增加反而导致能耗升高。这可能是因为膜区曝气的升流作用在底部对填料区的流体有拖拽作用,进而增加了填料沿隔离网的下沉速度,且导流板面积过大时减小了隔离网下端的通道面积,从而降低了来自膜区流体的拖拽力,加大了流体流动的阻力,特别是 1.06 m^2 的导流板处于下部位置时隔离网的下端通道几乎完全封闭了。综合来看,采用 0.71 m^2 的导流板且在上部安装可以得到最优化的节能效果,曝气量可以减少15%以上。

2.4 进出水和膜区曝气量的影响

在静态与动态条件下,不同膜区曝气量对流体力学性能的影响如图5所示。可知,填料处于开始流动和完全流动时,在不同膜区曝气量下,静态与动态两种条件对驱动填料流动所需的曝气量相似,说明反应器是否进出水不会对填料的循环流动产生明显影响。这可能是由于所用膜组件的最大出水流量为 200 L/h ,进出水流量远小于曝气量,因此对填料区与膜区的紊动程度影响很小,从而对整体流态影响也很小;而驱动填料流动所需的曝气量随着膜区(A管)曝气量的增大而增加,如果扣除A管曝气量,则相应C管间的曝气量依次略有减小,但差别不大,由于动态条件下膜区不同曝气量时的气水比分别为 $20:1$ 、 $25:1$ 、 $30:1$,因此在一定条件下,膜区中采用不同的曝气量冲刷膜组件时对填料区流体的流动性影响相似,可见膜区中的不同气水比不是

影响反应器流体力学特性的重要因素。

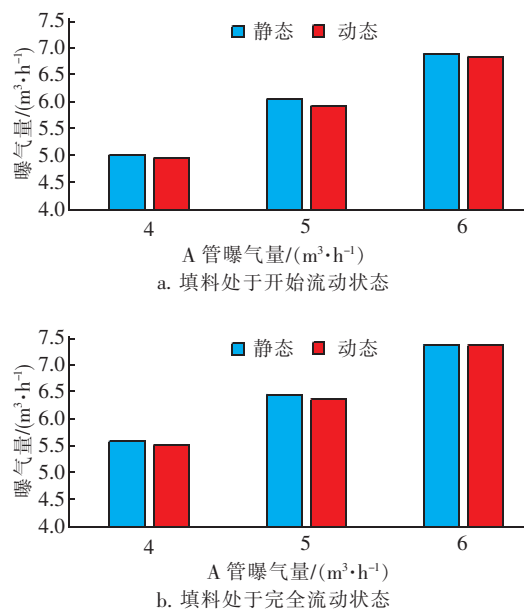


图5 进水和膜区曝气量对填料流动的影响

Fig. 5 Effects of influent and aeration rates in membrane area on carriers mobility

在试验过程中还发现,由于曝气的升流作用使填料区与膜区的液面均有所升高,尤其是在组合曝气方式下,膜区相对较大的曝气量使液面的抬升高度比填料区稍高,与无曝气时的液面相比抬升高度仅约为 3 cm ,隔离网两侧的水位差别并不大,不会造成过大的过孔损失及水位差。在实际应用中影响填料流动的因素主要有:①活性污泥混合液特性,即混合液本身的物理化学性质,如颗粒粒径分布、粘度和表面张力等;②反应器的运行条件,如曝气方式和曝气量^[5~7]、水力条件等;③反应器特性,如反应器的类型、结构与尺寸^[8],膜区和填料区的布局等;④填料类型与填充率^[9,10]等。试验过程中,采用导流板优化隔离网结构,改变了反应器中的流体力学特性,有效降低了隔离网对填料流动的负面效应,在相对较小的曝气量下即可驱动填料达到良好的循环流动,从而达到节能降耗的目的。

3 结论

① 采用导流板优化隔离网结构的设计可改变反应器内的流体力学特性,有利于填料的循环流动,减少驱动填料流化所需的曝气量,降低能耗。

② 导流板面积与所处位置是影响填料流动的重要因素,面积需要优化,而位置以上部安装为佳,即隔离网上部宜采用封闭结构,下部则需要有一个

大小合适的通道,以利于膜区和填料区的物质交换和流体运动的促进作用。

③ 本试验中,采用 A + C 管组合曝气方式更有利于驱动填料的循环流动,当导流板面积为 0.71 m^2 并放置在上部位置时为最优工况,当采用 50% 的填料填充率时可减少 15% 以上的曝气量,节能效果明显。

④ 在 HG - MBR 中确定填料填充率时应充分考虑驱动力的能耗因素,不宜为增加附着生物量而使用过高的填充率,应同时结合生化需氧量和膜污染情况确定。

参考文献:

- [1] Yang F, Wang Y, Bick A, *et al.* Performance of different configurations of hybrid growth membrane bioreactor (HG-MBR) for treatment of mixed wastewater[J]. Desalination, 2012, 284(1): 261 - 268.
- [2] Gu Q, Sun T, Wu G, *et al.* Influence of carrier filling ratio on the performance of moving bed biofilm reactor in treating coking wastewater[J]. Bioresour Technol, 2014, 166: 72 - 78.
- [3] Han S, Yue Q, Yue M, *et al.* Effect of sludge-fly ash ceramic particles (SFCP) on synthetic wastewater treatment in an A/O combined biological aerated filter[J]. Bioresour Technol, 2009, 100(3): 1149 - 1155.
- [4] 吴云, 杜小磊, 宋凯, 等. 生物接触氧化池悬浮填料流动特性数值模拟分析[J]. 化工学报, 2018, 69(7): 3242 - 3248.
- Wu Yun, Du Xiaolei, Song Kai, *et al.* Numerical simulation analysis of flow characteristics of suspended packing in biological contact oxidation tank[J]. CIESC Journal, 2018, 69(7): 3242 - 3248 (in Chinese).
- [5] 周艾文, 金腊华. 曝气量对生物陶粒 MBBR 处理效能的影响[J]. 工业用水与废水, 2014, 45(1): 22 - 26.
- Zhou Aiwen, Jin Lahua. Influence of aeration rate on wastewater treatment efficiency of bioceramic MBBR[J]. Industrial Water & Wastewater, 2014, 45(1): 22 - 26 (in Chinese).
- [6] Li S R, Cheng W, Wang M, *et al.* The flow patterns of bubble plume in an MBBR[J]. Journal of Hydrodynamics, 2011, 23(4): 510 - 515.
- [7] 许龙. 关于悬浮填料生物接触氧化池设计的探讨[J]. 中国给水排水, 2015, 31(24): 1 - 4.
- Xu Long. Discussion on design of suspended media biological contact oxidation tank[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(24): 1 - 4 (in Chinese).
- [8] Gu D Y, Liu Z H, Xie Z M, *et al.* Numerical simulation of solid-liquid suspension in a stirred tank with a dual punched rigid-flexible impeller[J]. Adv Powder Technol, 2017, 28(10): 2723 - 2734.
- [9] 张新波, 宋姿, 祁丽, 等. 聚氨酯海绵载体填充率对 MBBR 脱氮的影响[J]. 中国给水排水, 2017, 33(15): 78 - 81.
- Zhang Xinbo, Song Zi, Qi Li, *et al.* Effect of filling fraction on nitrogen removal of polyurethane sponge-based moving bed biofilm reactor[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(15): 78 - 81 (in Chinese).
- [10] 熊水应, 李翠红. MBBR 工艺在微污染原水预处理中的应用[J]. 给水排水, 2010, 36(7): 25 - 29.
- Xiong Shuiying, Li Cuihong. Application of MBBR in micro-polluted raw water pretreatment[J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(7): 25 - 29 (in Chinese).



作者简介:王博文(1992 -), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 研究方向为污水处理技术。

E-mail: haowangbowen@163.com

收稿日期: 2018 - 04 - 08