

论述与研究

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.09.001

高宽长比 MBBR 配水不均的运行优化工程实践

孙贤鹏^{1,2}, 孟雪¹, 刘旭阳³, 顾瑞环⁴, 包苏俊⁵

(1. 青岛市排水运营服务中心, 山东 青岛 266000; 2. 青岛市海润自来水集团有限公司, 山东 青岛 266000; 3. 青岛百发海水淡化有限公司, 山东 青岛 266041; 4. 青岛水务集团, 山东 青岛 266000; 5. 上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

摘要: 高宽长比移动床膜生物反应器(MBBR)的出水口与进水配水渠距离较近,易产生配水不均问题,造成短流现象,从而影响工艺处理效率。为充分发挥该 MBBR 的高效处理能力,以青岛市某污水厂宽长比为 2.3:1 的 MBBR 为研究对象,通过采取调整内回流比、封堵部分出水口、调整曝气系统运行工况、降低液位使配水渠形成跌水等措施,在确保系统氧转移效率的同时,缓解了 MBBR 内短流现象,并通过水质测试和示踪试验进行了验证。在常规运行条件(内回流比为 200%、外回流比为 100%)下,MBBR 的出水氨氮浓度逐渐升高,示踪试验结果证实系统内存在短流现象。当保持外回流比不变、内回流比改为 100% 和 300% 时,尽管短流现象有所改善,但综合考虑处理效果和运行能耗等因素,这两种工况均不可取。采用封堵部分出水口和调整曝气系统运行工况的解决方案后,MBBR 出水横断面的氧转移效率差距减小,但进水氧转移效率差距增加,因此进一步增加降低液位使配水渠形成跌水措施来保障配水渠进水均匀性。经示踪试验验证,所采用的工艺优化措施解决了进出水配水不均问题,有效缓解了 MBBR 在常规运行工况下的出水短流现象。

关键词: MBBR; 高宽长比; 短流; 曝气量分布; 示踪

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)09-0001-07

Optimization for Uneven Water Distribution in MBBR with High Width-Length Ratio Based on Practical Engineering

SUN Xian-peng^{1,2}, MENG Xue¹, LIU Xu-yang³, GU Rui-huan⁴, BAO Su-jun⁵

(1. Qingdao Drainage Operation Service Center, Qingdao 266000, China; 2. Qingdao Hairun Water Supply Group Co. Ltd., Qingdao 266000, China; 3. Qingdao Baifa Seawater Desalination Co. Ltd., Qingdao 266041, China; 4. Qingdao Water Group, Qingdao 266000, China; 5. Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: The outlet of moving bed biofilm reactor (MBBR) with high width-length ratio is closely located to the inflow distribution channel, which leads to uneven distribution of inflow and outflow, resulting in a short circuit phenomenon, thereby affecting the pollutants removal. To fully utilize the treatment capability of the MBBR, this study focused on a MBBR with width-length ratio of 2.3:1 in a wastewater treatment plant in Qingdao. Measures such as adjusting the internal reflux ratio, partially blocking the outlet, altering the operating conditions of the aeration system, and lowering the water level to form a waterfall in the distribution channel were implemented. These measures, while ensuring the

oxygen transfer efficiency of the system, alleviated the short circuit phenomenon within the MBBR. The effectiveness of these measures was verified through water quality tests and tracer experiments. The results showed that under conventional operating conditions (200% internal reflux, 100% external reflux), the effluent ammonia nitrogen concentration in the MBBR gradually increased. Tracer test results confirmed the presence of a short circuit phenomenon within the system. When the external reflux ratio was kept constant and the internal reflux ratio was adjusted to 100% and 300%, the short circuit phenomenon within the MBBR improved. However, considering factors such as treatment effectiveness and operational energy consumption, neither of these conditions was recommended for use. After implementing the solution of partially blocking the outlet and adjusting the operating conditions of the aeration system, the difference in the oxygen transfer efficiency between the inlet and outlet cross-sections of the MBBR decreased, but that of the inflow increased. Therefore, the measure of further lowering the water level to form a waterfall in the distribution channel was introduced to ensure the uniformity of inflow. Tracer experiments confirmed that the process optimization measures effectively mitigated the short circuit phenomenon of the effluent under conventional operating conditions by addressing the issue of uneven distribution of inflow and outflow.

Key words: moving bed biofilm reactor (MBBR); hight width-length ratio; short circuit; aeration distribution; tracer

移动床膜生物反应器(MBBR)因结构简单、占地面积小、运行稳定和处理效率高等优点,在市政污水处理领域得到了广泛应用^[1-4]。然而,在实际运行中,高宽长比池型的MBBR由于出水口与进水配水渠距离较近,易产生进出水配水不均问题,造成短流现象,从而影响处理效率^[5-6]。因此,如何有效避免短流现象并充分发挥MBBR反应器的高效处理效能,是当前需要解决的关键问题。

国内外学者以及污水厂运行管理人员已针对MBBR的运行优化开展了大量研究^[7-8],包括:通过改变填料材质和形状来提高填料表面的生物膜活性^[9-10];改进MBBR工艺,如采用磁混凝提高对悬浮物的去除效率^[11-12];通过改变流速、调整曝气模式^[13]等措施来改善MBBR的混合条件,这些成果都在一定程度上改善了MBBR的运行效果。然而,上述研究多是针对传统长窄池型或圆罐池型的MBBR系统,对于高宽长比MBBR,由于其特殊的池型结构和水力流态^[14],上述优化措施往往无法达到预期效果。特别是,由于高宽长比MBBR的出水口与进水配水渠距离较近,容易导致反应器内发生短流现象^[15],严重影响处理效率。因此,有必要对高宽长比MBBR进行运行优化。

以青岛某污水厂宽长比为2.3:1的MBBR为研

究对象,通过调整内回流比、封堵部分出水口、调整曝气系统运行工况以及采取降低液位使配水渠形成跌水等措施,开展了优化研究。最后,通过水质测试、曝气系统氧转移效率测试和示踪试验,验证了工况调整后MBBR内的流态改变和改善效果。

1 材料与方法

1.1 MBBR 试验单元简介

青岛市某污水处理厂采用改良A/A/O+MBBR工艺,设计进水COD、BOD₅、SS、NH₃-N、TN、TP分别为950、500、750、58、80、13 mg/L,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。试验期间进水水温为19~22℃。MBBR单元结构见图1。

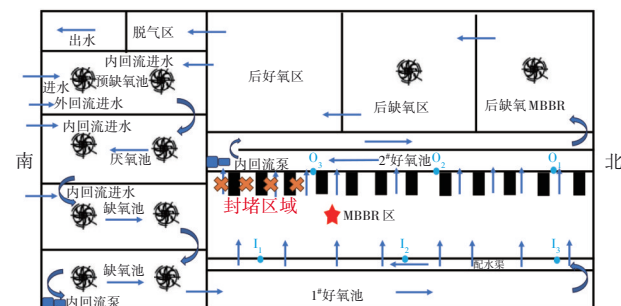


图1 青岛某污水处理厂三期MBBR工艺流程

Fig.1 Schematic diagram of the three-phase MBBR unit of a WWTP in Qingdao

试验在该污水处理厂的三期MBBR进行,三期工艺的设计处理水量和实际处理水量均为 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。MBBR中装载SPR-1填料,初始填充率为43%,进水采用渠道及堰配水。如图1所示, I_1 、 I_2 、 I_3 为进水取样点, O_1 、 O_2 、 O_3 为出水取样点,橙色标注部分为出水封堵区域(长度约为18 m)。MBBR单元尺寸为 $24 \text{ m} \times 55 \text{ m} \times 7 \text{ m}$,有效水深为6 m,宽长比为2.3:1。采取降低进水配水渠液位以形成跌水。常规运行的内回流比和外回流比分别为200%、100%。

1.2 MBBR示踪试验方法

1.2.1 仪器与试剂

示踪试验采用的仪器为UVmini-1240紫外分光光度计,试剂为荧光素钠。

荧光素钠母液的配制:准确称取0.1506 g荧光素钠固体,采用去离子水溶解后转入200 mL的容量瓶中,用去离子水定容至刻度线,摇匀后备用。此溶液中荧光素钠的浓度为0.7525 g/L。通过对母液进行稀释得到荧光素钠标准系列溶液。

乙酸钠溶液配制:称取68.0 g固体乙酸钠,用500 mL去离子水溶于广口瓶后得到1 mol/L乙酸钠溶液。

1.2.2 测定方法

准确移取一定量荧光素钠溶液于25 mL比色管中,加入2 mL乙酸钠溶液,用去离子水定容至刻度线并摇匀。用5 cm比色皿,在波长为485 nm条件下测量荧光素钠溶液的吸光度。

1.2.3 荧光素钠作为示踪剂的可行性分析

于生物池取适量的活性污泥于5 L烧杯中,另一个烧杯加入等量的清水,在两个烧杯中加入等量、相同浓度的荧光素钠溶液,在0、30、60、180 min时取样,测得上清液的荧光素钠浓度分别为0.0334、0.0330、0.0290、0.0344 $\mu\text{g/mL}$ 和0.0330、0.0332、0.0328、0.0324 $\mu\text{g/mL}$ 。这表明荧光素钠在清水和活性污泥中的浓度基本一致,且浓度没有减小,可以认为在一定时间内,荧光素钠不会被活性污泥降解和吸附,也不会见光分解,可以作为本次试验的示踪剂。

1.2.4 MBBR示踪试验方法

示踪剂投加点位和取样测试点位如图2所示。在常规运行工况条件(内回流比和外回流比分别为200%和100%)下,于实施工艺优化措施前后进行了两次示踪试验。当进行示踪试验时,在稳定的工艺

运行条件下,将100 g荧光素钠溶解在10 L水中,然后将配制的示踪剂溶液一次性瞬时投加在MBBR进水配水渠始端。在投加示踪剂后,从第10分钟开始取样并带回实验室进行化验,取样点位于3#好氧池靠近MBBR出水口的液面下约2.2 m处。

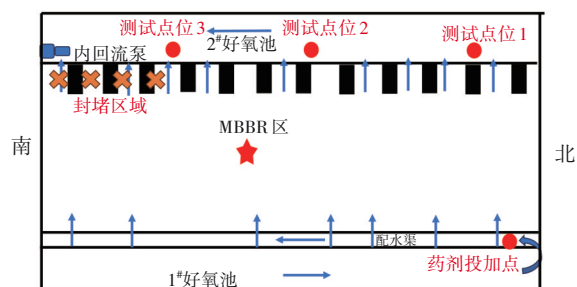


图2 MBBR池示踪试验取样点位

Fig.2 Cross-sectional sampling locations for the MBBR pool tracer test

1.3 曝气系统氧转移效率测试装置与方法

设置两种工况,其中工况一的进水端和末端微孔曝气系统均为自动调节,穿孔曝气系统开度为25%,DO设定值为2~3 mg/L;工况二的进水端微孔曝气系统开度为0,末端微孔曝气系统为自动调节,穿孔曝气系统开度为25%,DO设定值为1.2 mg/L;工况一和二测试时长均为15 d,水温分别为21~22、19~21 $^{\circ}\text{C}$ 。

曝气系统氧转移效率测试采用美国ASCE标准推荐的尾气法,测试点位分布见图3。测试期间,在MBBR池面等距布设三套测试装置,每1 min采集一次数据,测试持续15 d,再根据监测数据分别计算各测点处的 αOTE ,计算公式见文献[13]。

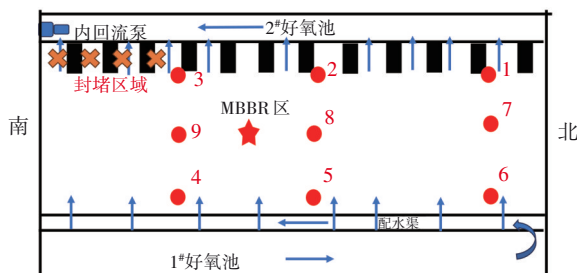


图3 监测点位布设示意

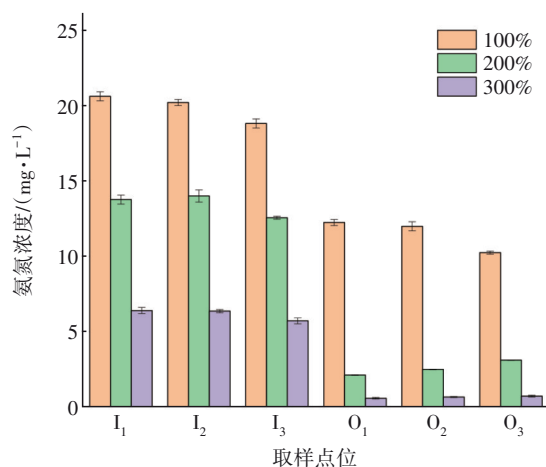
Fig.3 Schematic diagram of monitoring points layout

2 结果与讨论

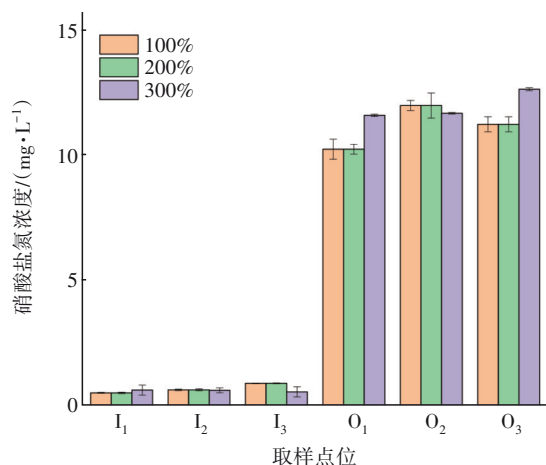
2.1 出水口部分封堵前后的水质效果对比

如图1所示,2#好氧池单侧廊道末端设有回流泵,由于其距离MBBR南侧出水口较近,当内回流比

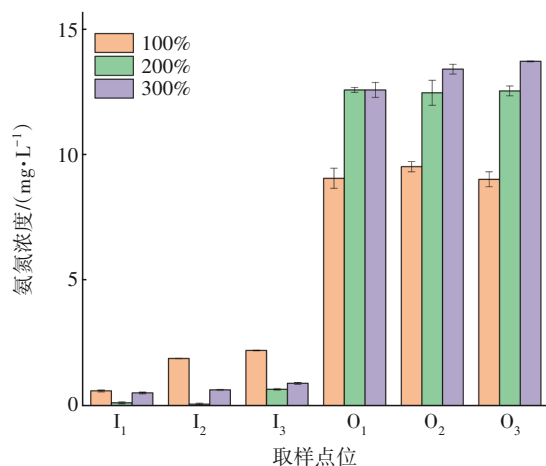
较大时,内回流泵对活性污泥混合液的强大抽吸力可能会导致 MBBR 出水配水不均,出现短流现象。图4展示了在不同内回流比条件下,MBBR 出水口封堵前后反应器进出水氨氮和硝酸盐氮的测试结果。



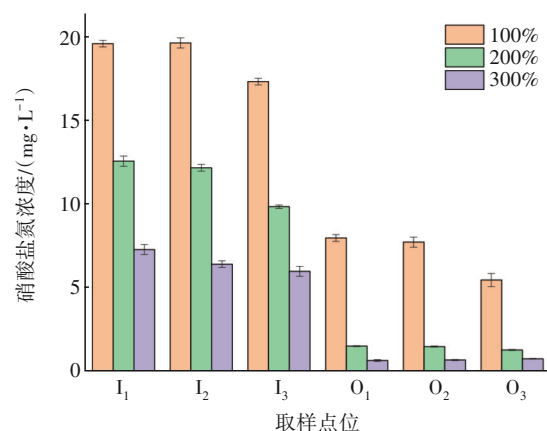
a. 封堵前氨氮测试结果



b. 封堵前硝酸盐氮测试结果



c. 封堵后氨氮测试结果



d. 封堵后硝酸盐氮测试结果

图4 MBBR 出水口封堵前后进出水氨氮和硝酸盐氮测试结果对比

Fig.4 Comparison of inflow and outflow ammonia nitrogen and nitrate before and after the sealing of the MBBR outlet

由图4(a)和(b)可知,在常规运行工况(内回流比为200%、外回流比为100%)下,封堵前的MBBR出水氨氮基本降至5 mg/L以下,经过后续处理工艺可实现出水达标。然而,此时出现了MBBR出水中氨氮和硝酸盐氮的浓度沿程升高的现象,经过厂内评估,推断这可能是由于反应器内部存在短流现象所引起的。当进水量或进水负荷增加时,可能会对后续处理工艺施加更大的压力,严重时可能导致出水不达标。因此,厂内首先尝试通过改变系统运行工况来解决这个问题。由图4(a)和(b)可以看出,当调整内回流比和外回流比均为100%时,MBBR沿程氨氮和硝酸盐氮浓度升高的现象得到改善,但由于出水氨氮浓度均高于10 mg/L,给后续处理带来较大压力,因此不采用此方案;当调整内回流比为300%、外回流比为100%时,虽然MBBR出水氨氮浓度基本在1 mg/L以下,但该工况的运行能耗较高^[16-17],并且后续还有多个工艺处理段可以保障出水水质,故也不建议采用该运行工况。因此,最终采取部分封堵MBBR南侧出水口(约18 m)的解决方案开展试验研究。

由图4(c)和(d)可知,在对MBBR反应器出水口部分封堵后,氨氮浓度沿程增高的现象得到了缓解。同时,保持外回流比为100%的条件下,最佳运行工况是系统常规内回流比为200%的运行工况。

综上所述,在试验条件下,常规的内回流比是较优的运行工况,通过采取部分封堵MBBR南侧出

水口的措施可以缓解短流问题。

2.2 曝气运行工况优化前后的氧转移效率

高宽长比池型的水力流态介于半混合与推流之间,本研究拟通过调整曝气系统工况,在 MBBR 中形成水流反推以提高混合效果,避免短流现象的发生。然而,由于同时还需要考虑改进措施对曝气系统氧转移效率的影响,防止降低 MBBR 的处理能力,因此开展了曝气运行工况优化研究。

试验在常规和改进的曝气系统运行工况下,对 MBBR 内不同测点的氧转移效率进行了连续监测。图 5 展示了运行工况优化前后连续 15 d 的 MBBR 内三个横断面氧转移效率测试结果。

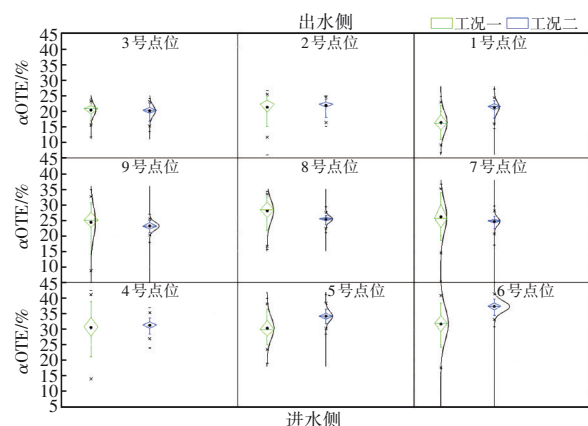


图 5 不同曝气工况下 MBBR 各测试点位的氧转移效率变化

Fig.5 Changes in oxygen transfer efficiency at various testing points of MBBR under different aeration operating conditions

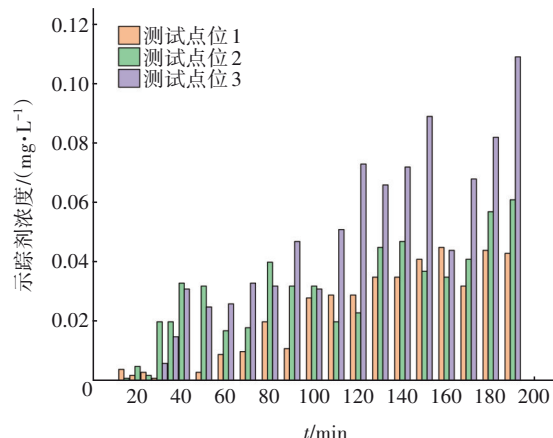
在曝气工况优化前(工况一),进水端沿水流方向的 4 号、5 号和 6 号测点的氧转移效率逐渐增加,说明进水配水渠存在配水不均的现象,而在曝气工况优化后(工况二),进水端各氧转移效率均值虽有所增加,且波动幅度降低,但各点位的差距更大了,说明进水配水不均的问题进一步加剧。反应器中间的 7 号、8 号和 9 号测点,在工况优化后氧转移效率均值略微减小,但三个测点的氧转移效率均值更加接近,反映出反应器中部的污染物浓度更加均匀,说明反应器内污染物浓度梯度问题得到改善。反应器出水端沿水流方向的 1 号、2 号和 3 号测点,优化后的氧转移效率均值也有所增加,且三个测点的氧转移效率数值更为平均,波动幅度降低,说明出水配水不均问题得到一定程度改善。同时,对于高宽长比 MBBR 中间区域和出水区域中间测点氧转移效率高的问题,可能是由于反应器内流态影响,

中间区域集中了大量填料,微生物需氧量较大,因此提高了测点处曝气系统的氧转移效率。

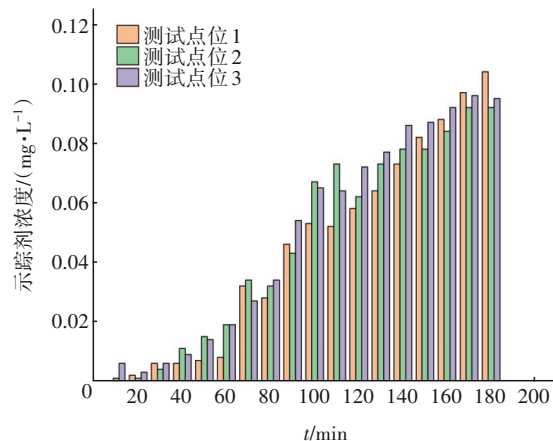
综上所述,在对运行工况进行调整优化后,中部和出水端在同一横断面上的氧转移效率差距减小,说明污染物浓度分布更加均匀,并改善了出水配水不均问题,同时多个点位处的氧转移效率较优化前都有所提高,但这种优化方式加剧了进水端配水的不均。因此,拟进一步采取降低液位使配水渠形成跌水来改善进水端配水渠配水不均的问题。

2.3 优化前后的示踪试验结果

经过上述试验过程,最终确定了缓解进出水配水不均问题的解决方案,即调整内回流比、封堵部分出水口、调整曝气系统运行工况、降低液位使配水渠形成跌水,并采用示踪试验来验证优化措施对内部流态的改善效果结果见图 6。



a. 封堵前常规曝气工况



b. 封堵后改进曝气工况

图 6 封堵出水口和调整曝气工况前后的示踪试验结果

Fig.6 Results of tracer tests before and after the sealing of the outlet and adjustment of aeration conditions

由图 6(a)可知,在示踪试验进行到约第 40 分钟

时,位于MBBR南侧靠近内回流泵的2号和3号测试点已经检测到示踪剂的存在,并且随着时间的推移,3号测试点的示踪剂浓度逐渐升高。相比之下,位于北侧远离内回流泵的1号测试点的示踪剂浓度较低,这表明MBBR内可能存在短流现象。

由图6(b)可知,在工艺运行优化后,当示踪试验进行到约第70分钟时,测试点位处才检测到示踪剂浓度有较大幅度的升高。这表明,相较于工艺运行优化前,污染物在反应器内的停留时间有所增加。同时,在工艺运行优化后,三个测试点位的示踪剂浓度差距缩小,各测试点位出水水量和污染物浓度相比优化前更加均匀,说明出水配水不均匀问题得到了有效改善。需要注意的是,尽管所开展的示踪试验并未经历完整的示踪剂停留周期,但试验结果揭示的现象能够有效地帮助污水处理厂的管理人员分析发现问题,并提出改进措施。

3 结论

① 对MBBR出水口部分封堵,当采取常规运行工况(内回流比为200%、外回流比为100%)时,系统具有良好的硝化能力,但反应器内存在短流现象。当保持外回流比不变,将内回流比分别调整为100%和300%时,MBBR出水的浓度梯度现象得到了缓解。然而,综合考虑处理效果和运行能耗等因素,这两种运行工况均不适合。

② 调整曝气系统运行工况后,MBBR在同一横断面上的氧转移效率差距缩小,且多个测试点位处的氧转移效率均有所提高。这说明调整曝气系统运行工况不仅能提高MBBR的供氧能力,还会提高反应器内的曝气均匀度。但优化后的工况会加剧进水配水渠的配水不均匀度。

③ 工艺运行优化前,在常规工况下,MBBR南侧出水口处较早监测到示踪剂存在,并且距离回流泵较近的测试点位的示踪剂浓度始终大幅高于其他两个测试点位,这说明MBBR内存在一定的短流现象。在对工艺进行运行优化后,示踪剂的停留时间延长,且MBBR出水口处的示踪剂浓度梯度减小,这表明所采取的运行优化措施有效地缓解了常规运行工况下的短流现象。

④ 针对高宽长比MBBR池型,通过采取调整内回流比、封堵后端几个出水筒筛网、调整曝气系统运行工况、降低液位使配水渠形成跌水等措施,

可以提高MBBR内部均匀性和保障高效运行。

参考文献:

- [1] 周家中, 吴迪, 郑临奥. 纯膜MBBR工艺在国内外的工程应用[J]. 中国给水排水, 2020, 36(22):37-47.
ZHOU Jiazhong, WU Di, ZHENG Lin'ao, et al. Engineering application of pure MBBR process at home and abroad[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(22):37-47(in Chinese).
- [2] 杨晓峰, 秦翠霞, 徐思涵, 等. 太原城南污水厂MBBR系统不停水提质增效改造[J]. 中国给水排水, 2022, 38(18):125-128.
YANG Xiaofeng, QIN Cuixia, XU Sihan, et al. Quality and efficiency improvement of MBBR system without water shutoff in Taiyuan Chengnan WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(18):125-128 (in Chinese).
- [3] 杨平, 周家中, 管勇杰, 等. 基于MBBR的AAO和Bardenpho工艺改造效果对比[J]. 中国给水排水, 2021, 37(7):11-19.
YANG Ping, ZHOU Jiazhong, GUAN Yongjie, et al. Comparison of AAO and Bardenpho processes transformation effect based on MBBR [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(7):11-19 (in Chinese).
- [4] 周家中, 韩文杰, 吴迪, 等. MBBR工艺应用于市政污水处理的系列解决方案探讨[J]. 中国给水排水, 2023, 39(12):1-12.
ZHOU Jiazhong, HAN Wenjie, WU Di, et al. Discussion on series solutions of MBBR process applied to municipal sewage treatment [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(12):1-12 (in Chinese).
- [5] 刘浩, 杨俊杰, 于宁. Bardenpho五段法/MBBR用于青岛李村河污水厂三期扩建[J]. 中国给水排水, 2016, 32(24):62-66.
LIU Hao, YANG Junjie, YU Ning. Design and operation of third-phase expansion project of Qingdao Licunhe WWTP by five-stage Bardenpho and MBBR process [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(24):62-66 (in Chinese).
- [6] 黄青, 周家中, 吴迪, 等. Bardenpho镶嵌MBBR工艺用于北方某污水厂抗冲击性能[J]. 环境工程学报, 2020, 14(6):1698-1704.
HUANG Qing, ZHOU Jiazhong, WU Di, et al. Shock-loading resistance of Bardenpho-embedded MBBR process in a WWTP of northern China [J]. Chinese Journal of

- Environmental Engineering, 2020, 14(6): 1698-1704 (in Chinese).
- [7] 杨平, 徐康康, 周家中, 等. MBBR+磁混凝用于A²O微曝氧化沟污水厂提标扩容[J]. 中国给水排水, 2023, 39(10):67-74.
- YANG Ping, XU Kangkang, ZHOU Jiazhong, *et al.* Application of MBBR and magnetic coagulation process in upgrading and expansion of a WWTP with A²O microporous aeration oxidation ditch [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(10):67-74(in Chinese).
- [8] 茹春, 张爽, 路晖, 等. 低温条件下污水处理厂的除污效果及运行调控分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(9):1-6.
- RU Chun, ZHANG Shuang, LU Hui, *et al.* Pollutants removal performance and operation regulation of urban wastewater treatment plant under low temperature condition [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(9):1-6 (in Chinese).
- [9] WOLFF D, HELMHOLZ L, CASTRONOVO S, *et al.* Micropollutant transformation and taxonomic composition in hybrid MBBR—a comparison of carrier-attached biofilm and suspended sludge [J]. Water Research, 2021, 202:117441.
- [10] 韩文杰, 徐康康, 杨忠启, 等. 多级多段纯膜MBBR工艺的脱氮稳定性与微生物菌落结构分析[J]. 环境工程学报, 2023, 17(9):3066-3078.
- HAN Wenjie, XU Kangkang, YANG Zhongqi, *et al.* Analysis of denitrification stability and microbial structure in multi-stage pure MBBR process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(9):3066-3078 (in Chinese).
- [11] 沈浩, 杨忠启, 汪凡, 等. MBBR+磁混凝沉淀工艺用于用地受限污水厂改造[J]. 中国给水排水, 2023, 39(8):112-119.
- SHEN Hao, YANG Zhongqi, WANG Fan, *et al.* Application of MBBR and magnetic coagulation precipitation process in retrofitting of a WWTP with limited construction land [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(8):112-119 (in Chinese).
- [12] 初振宇, 李骏飞, 林英, 等. MBBR+磁混凝+反硝化滤池工艺用于全地下污水厂[J]. 中国给水排水, 2023, 39(12):80-84.
- CHU Zhenyu, LI Junfei, LIN Ying, *et al.* Application of MBBR, magnetic coagulation and denitrification deep bed filter process in an underground wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(12):80-84 (in Chinese).
- [13] 顾瑞环, 刘旭阳, 毕学军, 等. 曝气量分配和填料填充率对MBBR氧转移效率的影响[J]. 中国给水排水, 2023, 39(1):1-8.
- GU Ruihuan, LIU Xuyang, BI Xuejun, *et al.* Effect of aeration distribution and carrier filling rate on oxygen transfer efficiency of MBBR [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(1):1-8 (in Chinese).
- [14] WANG J, YING X B, HUANG Y H, *et al.* Numerical study of hydrodynamic characteristics in a moving bed biofilm reactor [J]. Environmental Research, 2020, 194:110614.
- [15] XIE Y X, WAN A J, WU Y P. Numerical simulation and experimental investigation on the effect of a new suspended carrier filler on mass transfer in MBBR [J]. Chemical Engineering and Processing, 2020, 156: 108104.
- [16] 李天宇, 高辉, 王飞, 等. 生物建模在污水处理厂问题诊断与运行优化中的应用[J]. 环境工程学报, 2021, 15(10):3443-3454.
- LI Tianyu, GAO Hui, WANG Fei, *et al.* Application of biological modeling in problem diagnosis and operation optimization of wastewater treatment plants [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(10): 3443-3454(in Chinese).
- [17] 孙月娣. Bardenpho工艺内回流与碳源投加耦合控制动态模拟[J]. 中国给水排水, 2017, 33(23):66-70.
- SUN Yuedi. Dynamic simulation of coupled control between internal reflux and carbon source dosing in Bardenpho process [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(23):66-70 (in Chinese).

作者简介:孙贤鹏(1986-),男,山东青岛人,硕士,高级工程师,从事水处理技术与污水厂运营管理。

E-mail:xianpengandyou@163.com

收稿日期:2023-12-11

修回日期:2024-01-03

(编辑:李德强)