

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.06.021

微污染水处理厂纯膜 MBBR 工艺改造工程设计

刘妍¹, 余军², 杨忠启³, 周家中³, 吴迪³, 贺姗姗²,
陈柱堆⁴

(1. 东莞市水务集团工程有限公司, 广东 东莞 523113; 2. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430019; 3. 青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266510; 4. 东莞市水务集团净水有限公司, 广东 东莞 523113)

摘要: 华南某微污染水处理厂总处理规模为 $260 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 为改善河道水质, 需对原工艺进行升级改造, 其核心控制指标为氨氮。通过对比曝气生物滤池、生物转盘、生物接触氧化、纯膜 MBBR 对处理微污染水氨氮的适用性, 并综合考虑进出水水质、投资运维成本、施工难易程度等因素, 最终选取纯膜 MBBR 工艺进行改造, 将部分沉淀区改为纯膜 MBBR 区。分析了不同水力池型对悬浮载体流态的影响。采用侧进侧出微动力混合池型进行改造, 改造后出水水质稳定, 氨氮浓度低于 0.5 mg/L , 在沉淀时间缩短的情况下, TP 去除率仍达到 81%, 优于排放要求; 在处理水量长期超标情况下出水水质保持稳定, 抗冲击负荷能力强。纯膜 MBBR 工艺路线简单、占地省, 投资运维成本低, 适于微污染水处理厂新建或改扩建。

关键词: 微污染水; 河道治理; 悬浮载体; 生物膜; 纯膜 MBBR; 平流沉淀池

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)06-0107-06

Design of Pure MBBR Process Retrofitting Project for a Micro-polluted Water Treatment Plant

LIU Yan¹, YU Jun², YANG Zhong-qi³, ZHOU Jia-zhong³, WU Di³,
HE Shan-shan², CHEN Zhu-dui⁴

(1. Dongguan Water Group Engineering Co. Ltd., Dongguan 523113, China; 2. Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430019, China; 3. Qingdao SPRING Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266510, China; 4. Dongguan Water Group Water Purification Co. Ltd., Dongguan 523113, China)

Abstract: The original process of a micro-polluted water treatment plant in South China with a total treatment capacity of $260 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ needs to be upgraded in order to improve the river water quality. The core control effluent index is ammonia nitrogen. By comparing the applicability of biological aerated filter, rotating biological disk, bio-contact oxidation, and pure MBBR to reduce ammonia nitrogen in micro-polluted water, and considering the quality of influent and effluent, the cost of investment, operation and maintenance, and the difficulty of construction, the pure MBBR process was selected to retrofit the micro-polluted water treatment plant. A part of the sedimentation tank was transformed into a

基金项目: 青岛西海岸新区自主创新重大专项(2019-20)

通信作者: 吴迪 E-mail: hitwudi@126.com

pure MBBR zone. The influence of different types of hydraulic tank on the flow pattern of suspended carrier is analyzed. After retrofitted by side inlet and side outlet micro-dynamic mixing tank type, the effluent quality remains stable, the ammonia nitrogen concentration is less than 0.5 mg/L, and the TP removal rate remains 81% under the shortened hydraulic retention time, which is superior to the discharge standard. Even if the influent volume exceeded the standard for a long time, the effluent quality of effluent remained stable, which shows a strong impact load resistance. The pure MBBR process has simple route, occupies a small area, and has low investment, operation and maintenance costs, which is suitable for new construction or expansion and retrofitting of micro-polluted water treatment plants.

Key words: micro-polluted water; river treatment; suspended carrier; biofilm; pure MBBR; horizontal flow sedimentation tank

微污染水一般指受污染程度较轻的水,其水质一般优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,但劣于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅲ类水标准。微污染水的存在,一方面降低了河道水体评级,另一方面作为饮用水原水时需进行额外处理以满足给水相关标准。微污染水的水质特点更接近饮用水原水,处理方法与自来水厂处理工艺相似。去除微污染水中的氨氮,若采用传统折点加氯方法,则成本高,效果不理想,因此一般借鉴污水生化脱氮方式。生物膜法是最常用的硝化方案,曝气生物滤池(BAF)是典型的工艺之一。BAF应用时多新建为独立系统,难以在已有构筑物内改建,需额外新增占地,同时也存在投资运行费用高等问题。纯膜MBBR工艺(Pure MBBR)作为连续流生物膜法工艺之一,是去除微污染水中氨氮的另一种选择方案。以华南某微污染水处理厂纯膜MBBR工艺升级改造项目为例,介绍了在平流沉淀池内镶嵌纯膜MBBR工艺实现原池硝化的方法与运行效果,并分析了纯膜MBBR悬浮载体流化的水力设计,可为微污染水处理厂新建和改扩建提供参考。

1 项目背景

1.1 项目概况

该微污染水处理厂处理规模 $260 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,主要处理河道水,解决城区段的河道水污染问题。该厂原采用一级强化混凝沉淀工艺,有效地削减了悬浮物、有机物、总磷等污染物,改善了河道水质。但该工艺对氨氮几乎没有处理效果,为解决氨氮的污染问题,需对该污水厂进行改造,使其同时具备硝化、除磷功能。考虑到进水氨氮浓度变化范围较

大,根据不同进水氨氮浓度分别设定出水氨氮限值、氨氮去除率和氨氮去除量要求(见表1)。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	TP	NH ₃ -N		
设计进水	1.5	<3.0	3.0~6.0	≥6.0
设计出水	1.0	≤0.5	去除率≥84%	去除量≥5.0

1.2 工程难点

本项目的主要难点包括:

① 无扩建用地。原工艺为一级强化混凝沉淀,对悬浮物、有机物和总磷等污染物有较好的去除效果,但无生物处理单元,对氨氮基本无处理能力,需要增加生物处理单元,强化硝化能力,实现出水水质稳定达标。由于厂内已无新建用地,需要在原混凝沉淀池的基础上提标改造,同时实现硝化、除磷功能。

② 进水水质、水量波动大。该厂涵盖水系多,涉及流域面广,导致进水水质、水量波动较大,尤其是氨氮浓度变化范围大,处理难度高,改造工艺需具有较强的抗冲击能力。

③ 实施周期短。微污染水的氨氮胁迫已然形成,需快速实施,实现河道水体的恢复。

④ 投资受限。该项目体量大,但总投资受限,需选择经济型工艺以降低投资。

综合以上工程难点,需寻求高效、原位、稳定、快速、经济的氨氮去除技术进行工艺升级改造。

2 工艺选择

针对微污染水的氨氮去除,若采用活性污泥法难以有效富集微生物,一般采用生物膜法。常规的

生物膜法,包括曝气生物滤池(BAF)、生物转盘、生物接触氧化等。近年来,移动床生物膜反应器(MBBR)也得到了广泛应用。常见生物膜法处理微污染水的工艺对比如表2所示。

表2 常见生物膜法处理微污染水对比
Tab.2 Comparison of micro-polluted water treatment by biofilm methods

项目	BAF	生物转盘	生物接触氧化	纯膜 MBBR
硝化效果	稳定	一般	较稳定	稳定
处理负荷及占地	负荷高,占地省	负荷低,自然复氧效率低,占地大	负荷一般,滤料有效比表面积小,占地大	负荷高,占地省
运行稳定性	较高,需要反冲洗	一般	较高,可通过控制 DO 实现稳定运行,内部若出现流道堵塞则影响稳定性	高,可通过控制 DO 实现稳定运行
运行管理	设备多,管理复杂,通过自动化降低工作量	设备多,管理较复杂	设备少,管理简单,但维修复杂,内部设备损坏维修困难	设备少,管理简单,维修简单,若需要可采用悬浮载体专用转移装置
核心产品寿命	定期更换滤料	定期更换	寿命长	寿命长,悬浮载体寿命>25 a
实施周期	略长,需完全新建	短,能够实现产品模块化安装	短	短
原位实现能力	一般需新建	一般需新建	可原位镶嵌	可原位镶嵌,对已有构筑物条件要求低
水量变化适应性	一般,设计应充分考虑	不适合大水量系统,单组处理能力低	较好	好,完全连续流运行,设计应重复考虑拦截筛网过水能力
投资(基于微污染水)	300~500 元/m ³ ,偏高	偏高	低,滤料形式多,价格差异大	50~100 元/m ³ ,偏低
案例及研究	上海周家渡生产性试验 ^[1] ,规模为1×10 ⁴ m ³ /d,HRT=22 min;浙江微污染水中试 ^[2] ,HRT=25 min	西南地区低浓度污染河水处理工程 ^[3] ,规模为1×10 ⁴ m ³ /d,HRT=45 min	东深供水工程 ^[4] ,规模为400×10 ⁴ m ³ /d	江苏某原水预处理厂工程 ^[5] ,规模为30×10 ⁴ m ³ /d,HRT=1 h;江苏某河道水处理工程,改建及新建,规模为60×10 ⁴ m ³ /d

MBBR,即通过向反应器中投加悬浮载体富集生物膜,在悬浮载体流化过程中,实现微生物的动态更新及污染物的高效去除,其在国内的工程应用规模已超过2 000×10⁴ m³/d。MBBR工艺,按照其系统内微生物主要存在方式,分为泥膜复合 MBBR 工艺(S-MBBR)和纯膜 MBBR 工艺(P-MBBR)。S-MBBR,行业内又称为 IFAS,但 IFAS 包含范围更广,也包括其他载体与活性污泥复合的工艺,而 S-MBBR 专指悬浮载体。S-MBBR 中既包含悬浮态活性污泥,又包含附着态悬浮载体生物膜,处理能力以活性污泥为主、生物膜为辅,多用于污水厂提标改造和节地新建。P-MBBR 工艺不设置污泥回流,不富集活性污泥,微生物主要以附着态的悬浮载体生物膜方式富集,其应用方式灵活,可分别用于预处理、二级处理、深度处理等。但 P-MBBR 在国内的应用起步较晚,近3年逐步涌现了相关工程

应用。肇庆某市政污水厂设计处理水量3×10⁴ m³/d,二级工艺采用纯膜 MBBR 工艺,可实现出水氨氮低于1.5 mg/L的处理目标^[6]。广东某水质净化厂^[7]设计处理水量1.8×10⁴ m³/d,采用纯膜 MBBR 工艺作为深度处理持续强化去除氨氮,保障出水氨氮稳定达到地表Ⅳ类水要求。针对微污染水治理,纯膜 MBBR 工艺已在江苏盐城实现了大规模的成功应用,该项目为新建原水预处理厂,处理水量30×10⁴ m³/d,采用纯膜 MBBR 工艺保障出水水质达到地表Ⅲ类水标准,实际运行在进水氨氮为1.4 mg/L的条件下,最优可使出水氨氮低于0.1 mg/L,取得了良好的应用效果^[5]。已有项目均证明 P-MBBR 工艺在应对高标准出水情况下具有良好的处理效果。S-MBBR 多用于改造,P-MBBR 多用于新建,而 P-MBBR 改造还鲜有工程应用报道。

综上,结合本项目的难点及需求,拟采用纯膜

MBBR工艺对沉淀池进行改造,实现原位高效去除氨氮的目标。

3 工艺设计

3.1 工艺流程

该微污染水处理厂原工艺以一级强化混凝沉淀工艺为核心,上游河道水依次经过粗/细格栅、平流沉砂池、絮凝反应池和平流沉淀池后流入下游,削减水体悬浮物、有机物、总磷等污染物。栅渣及污泥脱水后外运。本次改造将原平流沉淀池末端45 m切割改造为纯膜 MBBR 区,其余构筑物保持原状不动,以最大限度减少工程量,基于原池实现硝化、除磷的目标。改造后工艺流程见图1。

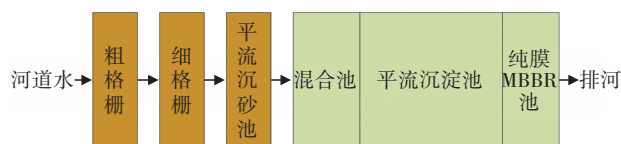


图1 改造后工艺流程

Fig.1 Process flow chart after retrofitting

3.2 MBBR 池型设计

MBBR工艺的工程应用,流化是核心,池型是关键。该工艺于2000年引入国内,但迟迟未得到工程化应用,核心是流化问题未能解决。2008年,MBBR工艺在国内实现了首个大规模的成功应用,破除了流化对于MBBR工程应用的壁垒^[8]。在该项目中,MBBR区采用循环流动池型,即在悬浮载体投加区域安装推流器,增加导流墙,形成内部循环,类似于氧化沟池型。随着MBBR工艺的不断优化与创新,已形成了好氧区在无推流作用下的悬浮载体流化池型,称之为微动力混合池型^[9]。与循环流动池型中悬浮载体在平面循环流动不同,微动力混合池型中悬浮载体主要是在曝气的作用下纵向循环流动。通过合理布置进出水方向,降低池内水平流速,同时优化曝气布置,在系统内部构建了上部自出水端指向进水端、下部自进水端指向出水端的内循环。对于微动力混合池型的应用,核心是需要平衡气速和水的水平流速,从而确保悬浮载体良好的流化效果。

本项目为改造项目,受已有池型限制,不适合进行大规模土建改造,因此不适合采用循环流动池。在工程设计上,综合考虑平流沉淀池出水方向、池内水平流速、处理效果等,提供两种池型,分别为侧进侧出微动力混合池型(S)和推流池型(P),

见图2。其中,S为侧进侧出两级微动力混合池型,P为三级推流式池型。根据实际进水水量、具体的池型规格,并以布水方向为长,垂直布水方向为宽,得出池型S的水平流速以及单级长宽比分别为24.6 m/h、2.7;池型P的水平流速以及单级长宽比分别为65.3 m/h、0.53。不同的进水方式,导致了池型P的水平流速为池型S的2.7倍。水平流速的降低有利于悬浮载体的均匀流化,防止在末端堆积。因此本次改造纯膜 MBBR 工艺选用侧进侧出两级微动力混合池型(S)。

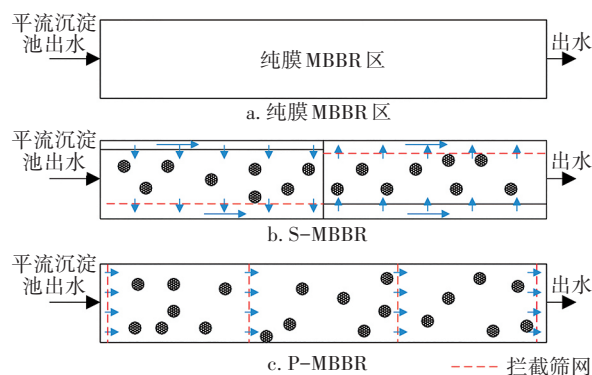


图2 MBBR区改造池型比选

Fig.2 Comparison of tank types for MBBR zone retrofitting

3.3 功能区改造

3.3.1 沉淀池改造

该厂现有平流沉淀池12座,长×宽×高分别为115.0 m×40.7 m×6.5 m,池底坡度0.01。每座分成5格,每格净宽7.9 m。每格设计流量 $4.33 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,水平流速18.1 mm/s,表面负荷 $2.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,停留时间为106 min。本次改造将沉淀池末端45 m处区域切割改造为纯膜 MBBR 工艺,如图3所示。

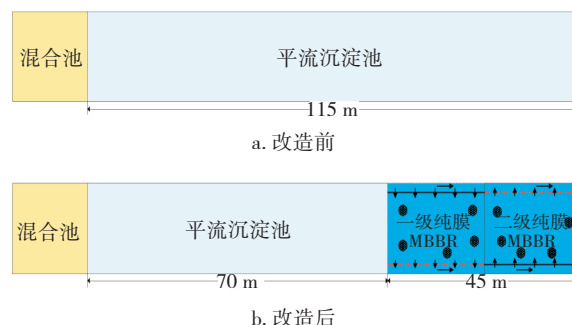


图3 平流式沉淀池改造前、后示意

Fig.3 Schematic diagram of horizontal flow sedimentation tank before and after retrofitting

拆除沉淀池末端45 m处的刮泥设施。改造后平流沉淀池长70 m,表面负荷升至 $3.3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,沉淀池停留时间缩短至64 min,采用网格絮凝方式实现混凝药剂充分混合。沉淀池末端水深3.95 m,底部坡度0.01,坡向絮凝池方向,便于沉淀池污泥聚集至泥斗处。

3.3.2 MBBR区改造

纯膜MBBR工艺段在原沉淀池末端45 m范围内进行改造。包括新增进出水拦截系统、曝气系统、悬浮载体、MBBR智慧管理系统及配套在线仪表(氨氮仪、DO仪)等。纯膜MBBR区停留时间0.69 h。投加SPR-Ⅲ型悬浮载体,悬浮载体密度为 $0.94 \sim 0.97 \text{ g/cm}^3$,材质为HDPE,符合《水处理用高密度聚乙烯悬浮载体填料》(CJ/T 461—2014)行业标准,各级悬浮载体填充率均为40%,符合悬浮载体流化最大填充率<67%的要求。纯膜MBBR池设计硝化负荷 $>0.174 \text{ kgNH}_3\text{-N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,确保系统的抗冲击性能。纯膜MBBR区末端有效水深3.5 m,底部坡度0.01,最深处3.95 m。采用微孔配合穿孔的曝气方式,为悬浮载体流化提供动力并实现充氧,由于水深较浅且进水氨氮浓度波动较大,气水比按最不利情况考虑,最大为2:1。

3.3.3 其他附属构筑物

① 更换细格栅。主要用于拦截进水中的悬浮物和漂浮物。考虑原细格栅使用时间较长、故障率高、拦截效果差等问题,本次改造同时对细格栅进行了更换,共更换18台细格栅及2套皮带输送机。细格栅采用回转式齿耙清污机, $Q=6500 \text{ m}^3/\text{h}$,渠宽2890 mm,渠深2060 mm,格栅间隙由原10 mm降为8 mm,安装角度 70° ,功率3 kW,304不锈钢材质,含电气自控系统。皮带输送机 $B=500 \text{ mm}$, $L=52 \text{ m}$, $N \leq 11 \text{ kW}$,共2套,机架为304不锈钢材质,含电气自控系统。

② 新建鼓风机房。由于原厂未设置鼓风机房,本次改造需要新建。鼓风机房占地 647.16 m^2 ,配套离心式鼓风机16台,共分为2组,每组8台,7用1备, $P=43 \text{ kPa}$, $N=240 \text{ kW}$,风量 $260 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

③ 提升泵房更换水泵。由于该厂运行时间较长,提升泵磨损严重,运行效率差,本次改造新增备用水泵2台。新增水泵采用原厂同规格、同类型水泵,为抽芯式混流泵,单台流量 $7.523 \text{ m}^3/\text{s}$,扬程9.628 m,带变频,采用立式异步电动机,额定转速

298 r/min,额定电压10 kV,功率710 kW。

4 工艺效果

本项目规模为 $260 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其中 $130 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 由青岛思普润水处理股份有限公司提供MBBR工艺包,采用侧进侧出微动力混合池型(S方案)进行改造。纯膜MBBR区投加悬浮载体后,未接种活性污泥,自然挂膜,挂膜效果如图4所示。悬浮载体投加5 d后表面已经富集生物膜,30 d后表面已完全被生物膜覆盖,实现了低基质条件下无接种污泥的快速挂膜,稳定期一、二级悬浮载体生物量均值分别为2.66、2.14 g/m^2 。

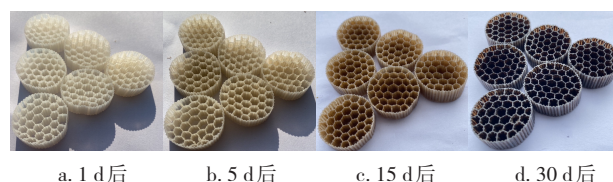


图4 悬浮载体挂膜效果

Fig.4 Suspended carrier biofilm

跟踪监测该工程2020年8月—2021年2月的运行情况,虽然沉淀池沉淀时间缩短了40%,但并未影响其除磷效果,在进水TP为 $(0.89 \pm 0.22) \text{ mg/L}$ 的基础上,出水TP为 $(0.17 \pm 0.04) \text{ mg/L}$,TP去除率达到81%,稳定优于设计标准。MBBR区进水氨氮浓度维持在 $3 \sim 5 \text{ mg/L}$,均值为 $(3.85 \pm 0.44) \text{ mg/L}$,悬浮载体投加完成10 d后,系统出水氨氮即达到设计要求,出水氨氮浓度持续稳定在 0.5 mg/L 以下,为 $(0.42 \pm 0.07) \text{ mg/L}$,稳定性强。在实际进水量连续超过设计值15%的情况下,出水水质稳定。此外,在生物膜弹性负荷的作用下,系统能轻松应对进水氨氮的波动,保障出水水质的稳定达标,纯膜MBBR工艺具备良好的抗水质水量冲击性能。

5 经济分析

本项目建设总投资2.63亿元,针对微污染水硝化,纯膜MBBR工艺包投资为55元/ m^3 。运行增加的费用主要为电费 $(0.009 \sim 0.018 \text{ 元}/\text{m}^3)$ 。纯膜MBBR区不需要添加药剂及菌种,药剂费用未增加。采用PAC进行化学除磷,项目整体运行费用为 $0.076 \sim 0.109 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

6 结论

采用纯膜MBBR工艺处理微污染水,在已有平流沉淀池末端45 m区域改造,使原工艺同时具备硝化、除磷的功能。实际运行效果显示,在沉淀池沉

淀时间缩短40%的情况下,未影响混凝沉淀池的除磷效果,出水TP为 $(0.17 \pm 0.04) \text{ mg/L}$;悬浮载体自然挂膜,投加10 d后氨氮即实现了稳定达标,出水氨氮长期稳定低于 0.5 mg/L ,系统具备良好的抗水质、水量冲击性能,得益于侧进侧出微动力混合池型的设计;项目整体运行费用为 $0.076 \sim 0.109 \text{ 元/m}^3$ 。纯膜MBBR工艺处理微污染水时投资为 $50 \sim 100 \text{ 元/m}^3$,具备经济、高效、持续、稳定的优势,适于微污染原水的预处理及河道断面控制。

参考文献:

- [1] 周云,戴婕,王占生,等.曝气生物滤池在上海周家渡水厂的应用[J].中国给水排水,2002,17(10):6-8.
ZHOU Yun, DAI Jie, WANG Zhansheng, *et al.* Application of biological aerated filter in Shanghai City Zhoujiadu Water Plant [J]. China Water & Wastewater, 2002, 17(10): 6-8 (in Chinese).
- [2] 肖文胜,徐文国,杨桔材.曝气生物滤池Biostyr处理微污染水源[J].环境科学与技术,2006,29(1):84-86.
XIAO Wensheng, XU Wenguo, YANG Jucui. Treatment of micro-polluted raw water with biological aerated filter[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 29(1): 84-86 (in Chinese).
- [3] 陈彦洁,付国楷,李轩,等.低温条件下生物转盘处理低浓度污染地表水[J].中国给水排水,2021,37(3):85-91.
CHEN Yanjie, FU Guokai, LI Xuan, *et al.* Treatment of low concentration polluted surface water by rotating biological contactor at low temperature[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(3): 85-91 (in Chinese).
- [4] 肖明威,罗建中,徐鸣.供水工程原水生物预处理技术应用与研究[J].能源环境保护,2004,18(5):29-31.
XIAO Mingwei, LUO Jianzhong, XU Ming. Technical discussion on biological pretreatment of micro-polluted raw water[J]. Energy Environmental Protection, 2004, 18(5): 29-31 (in Chinese).
- [5] 王毅,井添祺,周家中,等.盐城市某原水预处理厂设计与运行分析[J].净水技术,2020,39(7):24-29,34.
WANG Yi, JING Tianqi, ZHOU Jiazhong, *et al.* Analysis of design and operation for a raw water pretreatment plant in Yancheng City [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(7): 24-29, 34 (in Chinese).
- [6] 彭明,周家中,韩文杰,等.基于纯膜MBBR的BioFIMag工艺用于新建污水处理厂[J].中国给水排水,2021,37(6):71-75.
PENG Ming, ZHOU Jiazhong, HAN Wenjie, *et al.* Application of BioFIMag process based on pure MBBR in new wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(6): 71-75 (in Chinese).
- [7] 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. Engineering application of pure MBBR process at home and abroad [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(22): 37-47 (in Chinese).
- [8] 王翥田,叶亮,张新彦,等.MBBR工艺用于无锡芦村污水处理厂的升级改造[J].中国给水排水,2010,26(2):71-73.
WANG Zhutian, YE Liang, ZHANG Xinyan, *et al.* Application of MBBR process to upgrading and reconstruction of WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(2): 71-73 (in Chinese).
- [9] 周家中,宋平周,张爽,等.占地受限下北方某高标准新建污水厂工程设计[J].中国给水排水,2021,37(12):76-82.
ZHOU Jiazhong, SONG Pingzhou, ZHANG Shuang, *et al.* Engineering design of a new high-standard wastewater treatment plant with limited footprint area in north China [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(12): 76-82 (in Chinese).

作者简介:刘妍(1988-),女,河南新蔡人,硕士,工程师,主要从事污水处理生产运营管理工作。

E-mail:lyyan@163.com

收稿日期:2021-07-19

修回日期:2021-08-10

(编辑:衣春敏)