

基于 A^2O 的 MBBR 工艺污水厂设计及运行效果

白华清¹, 郑爽¹, 李瑞², 阳春², 辛涛³

(1. 中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610081; 2. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400045; 3. 青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266510)

摘要: 移动床生物膜工艺(MBBR)可大幅提高污水处理系统中的微生物总量,是应对处理水量增加和污染物负荷增加的有效技术措施,在国内污水厂的扩能和提标升级改造中广泛采用,对有机物、氨氮和总氮均有良好的处理效果。四川某新建污水处理厂(近期 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)因用地限制,在设计中采用了基于 A^2O 的 MBBR 工艺,按 25% 的填充率在好氧区投加 SPR-Ⅱ 型悬浮载体,深度处理采用 D 型滤池和紫外线消毒,吨水占地仅为 $0.31 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ 。建成至今运行效果良好,出水主要水质指标均稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级 A 标准。本项目设计参数和针对悬浮填料的系列技术措施可为采用该工艺的污水厂设计和运行提供参考。

关键词: 污水处理厂; 移动床生物膜工艺; 悬浮载体

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2019)24-0056-06

Design and Performance of a MBBR Wastewater Treatment Plant Based on A^2O Process

BAI Hua-qing¹, ZHENG Shuang¹, LI Rui², YANG Chun², XIN Tao³

(1. Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu 610081, China;
2. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
3. Qingdao Spring Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266510, China)

Abstract: Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) is able to increase biomass amount in wastewater treatment system, and is regarded as an effective technique and widely used in dealing with the surge loads of inflow and pollutants. It is widely used in the expansion and upgrading of wastewater treatment plants, and has a good treatment effect on removal of organic materials, ammonia nitrogen and total nitrogen. Due to the limitation of land, a new wastewater treatment plant (current treatment capacity $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$) in Sichuan was designed as MBBR based on Anaerobic-Anoxic-Oxidation (A^2O) process, with the SPR-Ⅱ suspended carriers dosed into the oxidation section by 25% filling rate. The advanced treatment units were D-filter and ultraviolet disinfection, and only $0.31 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ was occupied. Up to now, stable and effective performance was achieved, and the effluent quality could stably meet the first grade A criteria specified in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002). The design and special measures on suspended carriers can provide reference for wastewater treatment plants using similar treatment process.

Key words: wastewater treatment plant; MBBR; suspended carriers

移动床生物膜工艺(MBBR)是国际上成熟的污水生化处理技术。MBBR工艺汲取了生物接触氧化及生物流化床的优点,以悬浮载体为微生物提供生长载体,通过悬浮载体的充分流化,使其既具有传统生物膜法耐冲击负荷、泥龄长、剩余污泥少的特点,又具有活性污泥法的高效性和运转灵活性,最终实现污水的高效处理。

自1989年挪威Stensholt市政污水厂工程首次应用MBBR以来,全球已在50多个国家建成了超过600座市政和工业(污)水处理设施,取得了良好的效果。四川某污水处理厂设计总规模为 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,受周边环境限制,建设用地有限,因而采用了基于A²O的MBBR工艺。

1 工程概况

本项目设计总规模为 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,分二期建设,一期工程规模为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,同时预留二期扩建用地。污水厂一期主要负责收集老城区的污水,进水来自沿岷江的合流制截污干管。厂址地形条件复杂、高差大且用地有限,厂址西侧为岷江、北侧及南侧为山体、东侧为待拆迁的居民楼,无增加建设用地的可能性。

污水处理厂进水以生活污水为主,含有约10%的工业废水,在进水水质设计中依据了污水厂服务范围内各污水排放口的水质监测数据,并充分考虑

了城市的发展需要,以及西南地区城市排水管网特性和雨季泥沙进入等水质特点。设计出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,出水就近排入岷江。本工程设计进、出水水质见表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	BOD ₅	COD	SS	NH ₃ -N	TP	TN
进水	200	400	250	35	3~4	50
出水	10	50	10	5	0.5	15

2 工程设计

在本工程用地红线范围内,围墙内用地为 $37\,498 \text{ m}^2$,若按传统A²O工艺布置,总规模为 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的污水处理厂,需将生化池水深由常规的6.0 m增加至9.0 m,将增加土建成本和运行能耗。因此本工程在设计时选择了占地面积小、运行能耗低、运行成本少、处理效果稳定的工艺进行经济技术比较,并最终选择了MBBR生化池+二沉池+D型滤池+紫外线消毒主体处理工艺(见图1)。MBBR工艺占地面积小,且能强化脱氮除磷^[1],生物膜系统的优势可以有效避免活性污泥中惰性成分过高。D型滤池同样具有传统快滤池的主要优点,且节省占地面积,抗冲击负荷。

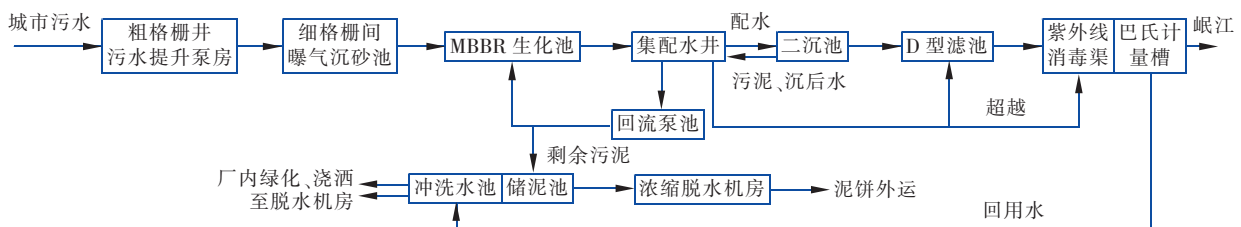


图1 工艺流程

Fig. 1 Process flow chart

本工程在工艺设计时兼顾近期合流制污水雨季时对系统的运行影响、MBBR工艺的系统性设计、尽量减少占地等因素。除生化池设计未考虑变化系数外,其余构筑物总变化系数为1.3。

2.1 MBBR设计

MBBR工艺并不是简单的悬浮载体投加,而是一个完整的系统。设备上包含了悬浮载体、进出水系统、流化系统等,设计上包括悬浮载体有效生物膜面积的确定、悬浮载体投加区域的确定、推流搅拌器

选型等。在实际工程中,容易出现局部悬浮载体堆积、挂膜效果差,或悬浮载体难以形成流化状态,或悬浮载体流失等现象,因此需在原生化池设计的基础上基于MBBR工艺的特点进行系统设计。

2.1.1 MBBR生化池整体设计

本工程MBBR池总尺寸为 $105.4 \text{ m} \times 36.4 \text{ m} \times 7.2 \text{ m}$,池内有效水深为6.0 m,总停留时间约8.9 h,池体分为独立的两格,每格可独立运行。池内共分为5个区,其中预脱硝区池容为 $1\,262 \text{ m}^3$,停留时

间为0.5 h;厌氧区池容为2 590 m³,停留时间为1.0 h;缺氧区池容为7 529 m³,停留时间为3.0 h;好氧区(加填料)池容为9 338 m³,好氧区(无填料)池容为1 606 m³,好氧区总停留时间为4.4 h。污泥回流比为100%,混合液回流比为200%。

好氧 MBBR 区采用循环流动池型,尺寸为43 m×18 m×7.2 m,中间设置导流墙。该池型利用氧化沟廊道使悬浮载体在池内循环流动,以保证悬浮载体在池中良好的流态。为防止悬浮载体在末端堆积,通过加装推流器同曝气产生的剪切力共同实现悬浮载体流化,该池型具有水力条件好、无水力死角等特点。

MBBR 生化池示意图见图2。

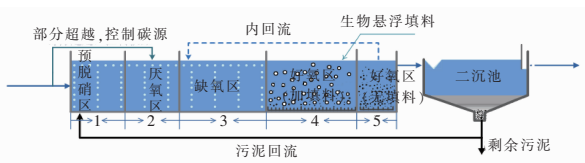


图2 MBBR 生化池示意

Fig. 2 Schematic diagram of biochemical tank based on MBBR

2.1.2 悬浮载体设计

悬浮载体是微生物栖息的场所,是生物膜的载体。悬浮载体应具有密度稍小于水、有效比表面积大、空隙率高、表面粗糙且有利于微生物附着的特点。Ødegaard 等^[2]的研究表明,为了使悬浮载体能在反应器内自由运动,从流化角度考虑,生物悬浮载体的最大填充率应小于70%。该团队通过对各式悬浮载体的对比,得出影响运行效果的主要因素为悬浮载体的有效比表面积(即单位体积悬浮载体能实现良好的传质传氧,且能生长有效微生物的受保护面积),其典型值为450~1 200 m²/m³。悬浮载体的材质以有机材料为主,综合考虑材料质量、密度、耐老化性、耐磨性等因素,多采用高密度聚乙烯(HDPE)作为 MBBR 工艺处理污水的悬浮载体,并实现了工程化应用。目前,HDPE 扁圆柱状悬浮载体,已成为 MBBR 工艺悬浮载体主流应用,在国外应用超过25年,国内最长也超过10年,效果好^[3]。

从流化角度考虑,好氧池填充率应<67%,从运行能耗及运行维护管理角度考虑,一般要求填充率>15%。实际工程中,好氧池悬浮载体填充率一般为25%~60%,在团岛和盐城城东污水处理厂好氧

池 MBBR 好氧池中的填充率分别为29%^[4]和30%~40%^[5]。综合考虑,本次工程好氧池悬浮载体的填充率的设计在满足上述要求的同时参考实际的运行案例。

本工程在好氧区放置悬浮载体,MBBR 悬浮载体投加量按照表面负荷进行设计,设计污泥浓度为4 000 mg/L,好氧区有效生物膜面积为1.688×10⁶ m²。选用 SPR-II 型 HDPE 悬浮载体,其直径为(25±0.5) mm,高为(10±1) mm,挂膜后密度与水接近,有效比表面积大于620 m²/m³,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^[3]。其挂膜前密度(0.94~0.97 g/cm³)略小于水,挂膜后与水接近[(1.000±0.003) g/cm³],可以依靠微小扰动使载体流化。经计算,填料体积为1 688 000÷620=2 723 m³,好氧池填充比为25%。

2.1.3 曝气系统

对于 MBBR 系统,DO 浓度与曝气强度之间相互影响。在曝气作用下,水流紊流程度与无悬浮载体时相比更大,氧的传递速率提高,氧的利用率也随之提高^[6]。同时,反应器中的悬浮载体依靠曝气和水流的提升作用处于流化状态。但随着曝气强度的增大,强烈的流化作用反而会导致悬浮载体上的生物数量减少,进而影响污水处理效果。在保证供氧充分的情况下,合理减少曝气量,从而保证悬浮载体合适的流化状态。因此,曝气量的设计需要综合考虑需氧量及悬浮载体流化。

张忠华等^[7]在研究移动式生物膜反应器启动挂膜的影响因素中得到,DO 质量浓度在5.0 mg/L时,紊流剧烈,不利于挂膜,而在挂膜前5天调节 DO 质量浓度为1.5 mg/L,有利于微生物在悬浮载体表面黏附及膜的生长和形成,之后调节 DO 质量浓度为3 mg/L,有利于挂膜和缩短启动时间。王学江等^[8]在对 DO 对 MBBR 同步硝化反硝化生物脱氮影响的研究中表明,DO 质量浓度为2 mg/L、水力停留时间为8 h、悬浮载体填充率为50%时,MBBR 工艺可以通过同步硝化反硝化实现90%以上的脱氮效果。

曝气系统采用盘式橡胶膜微孔曝气器,单盘供气量为0~5.0 m³/h,共计7 024套。另外,为避免悬浮载体堆积,另设辅助穿孔曝气系统2套,安装于好氧悬浮载体区,ABS 材质。

2.1.4 搅拌、进出水系统

潜水搅拌器的选择应满足在均匀、慢速搅拌下,生物填料和水体产生回旋水流状态,达到均匀混合的理想流态,同时使生物填料、搅拌器在搅拌过程中免受损坏。进出水滞留滤网在保持池内良好设计流态的同时,应满足把生物填料保留在生化池中。滤网的形式、孔径大小、安装位置因生物填料不同而不同,出水面积取决于不同孔径的单位出流负荷。滤网装置有多孔平板式或缠绕焊接管式等方式。

搅拌器叶片采用不锈钢材质,不易磨损,选用低转速搅拌器不易损坏且不容易打坏填料。预脱硝区:安装双曲面搅拌器2台,叶轮 $\varnothing 730$ mm,转速 $n=306$ r/min,电机 $N=4.8$ kW;厌氧区:安装水下低速推进器4台,叶片 $\varnothing 2300$ mm, $n=39$ r/min,电机 $N=3.0$ kW;缺氧区:安装水下低速推进器4台,叶片 $\varnothing 2300$ mm, $n=45$ r/min,电机 $N=3.6$ kW;好氧区:安装水下低速推进器4台,叶片 $\varnothing 2300$ mm, $n=20\sim 40$ r/min,电机 $N=7.5$ kW。

在缺氧区与好氧填料区间的孔洞处设置拦截网,在好氧区填料区与非填料区间的孔洞处设置拦截网,拦截网材质0Cr18Ni9,保证悬浮填料与混合液正常分离,出水口不堵塞,不堆积。拦截网自带活动门,可作为检修时填料流入时用。

生化池为满足除臭要求,池体顶部加盖,混凝土材质,覆土0.3 m并种植草坪。池顶布置通风除臭管路系统及放置除臭设备。为满足填料的打捞及曝气盘的更换要求,在MBBR池顶各反应区前端、末端、搅拌器前后均设置 $3.0\text{ m}\times 2.8\text{ m}$ 的孔洞,可在日常运行中作为观察孔,以及填料及曝气盘更换时作为操作孔。

2.2 其他工艺设计

① 粗格栅井及提升泵房

粗格栅井与污水提升泵房合建,规模为 $12\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。设1座粗格栅井,内分2格,采用钢丝绳自动格栅除污机,栅条间隙为5 mm。水泵采用潜水泵,湿式安装,一期4台水泵,两大两小,大泵 $Q=1700\text{ m}^3/\text{h}$, $H=180\text{ kPa}$, $N=132\text{ kW}$;小泵 $Q=850\text{ m}^3/\text{h}$, $H=180\text{ kPa}$, $N=75\text{ kW}$ 。粗格栅井处设节流室,上装电动可调式闸门,可控制雨季进水流量。同时考虑到雨季提升泵房流量变化大、扬程变化小的情况,考虑一台水泵采用变频控制来适应流量的变化,简单实用。

② 细格栅渠、曝气沉砂池

细格栅与曝气沉砂池组合建设,规模为 $12\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,共1组2池。为避免污水中细小的杂质进入生化池对填料造成缠绕,设计细格栅采用回转式格栅除污机,并选用较小的栅条间隙。细格栅栅条间隙为3 mm;曝气沉砂池总停留时间为6.5 min,水平流速为0.08 m/s。

③ 二沉池

二沉池采用周边进水、周边出水圆形辐流式沉淀池,设计规模为 $6\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,共2座。单座平面尺寸为 $\varnothing 40.00\text{ m}$,周边池深为5.10 m,采用单管吸、刮泥机。

设计最大表面负荷为 $1.3\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$;设计平均表面负荷为 $1.0\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$;理论回流污泥浓度为 8.0 g/L ;有效泥水分离时间为1.5 h。

④ D型滤池

D型滤池具有传统快滤池的主要优点,且节省占地面积,抗冲击负荷。滤池规模为 $6\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,1座6格,每格面积为 40.56 m^2 ,采用纤维滤料,滤料松散填装高度为800 mm。最大流量时正常滤速为 17.88 m/h ;最大流量且1格反冲时滤速为 22.34 m/h 。滤池反冲洗房内设供气罗茨鼓风机3台(2用1备),每台风量为 $29.76\text{ m}^3/\text{min}$,风压为0.05 MPa。滤池反冲洗水泵3台(2用1备),每台流量为 $335\text{ m}^3/\text{h}$,扬程为130 kPa。

⑤ 紫外线消毒渠

紫外线消毒渠土建规模为 $12\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,设备分期安装,共分二个渠道,单渠宽为1800 mm。紫外线剂量为 $20\sim 30\text{ mJ}/\text{cm}^2$,紫外线穿透率为65%。紫外线消毒渠与巴氏计量渠合建。

⑥ 配套建筑

鼓风机房:选用空气悬浮鼓风机,3台(2用1备),每台风量为 $180\text{ m}^3/\text{min}$,风压为69 kPa,配套电机功率为246 kW。

脱水机房:脱水系统采用转鼓浓缩带式脱水一体机脱水,一期3套(2用1备),单台处理能力为 $35\sim 45\text{ m}^3/\text{h}$,进泥含固率为0.5%,出泥含固率低于20%,带宽为2.0 m。

加药间:絮凝剂采用聚丙烯酰胺(PAM)高分子药剂。除磷剂采用PAC,设计PAC加药点为3个,分别为沉淀池进、出水及滤池进水处,PAC投加量为 $10\sim 15\text{ mg/L}$ 。

3 运行效果

污水厂 2018 年 6 月—12 月的实测监测数据见

表 2, 可见, 出水水质稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 的一级 A 标准。

表 2 实际进、出水水质

Tab. 2 Actual influent and effluent quality

项 目	COD	BOD ₅	氨氮	总氮	总磷	总雌激素
设计进水/(mg · L ⁻¹)	400	200	30	50	3~4	—
实际进水/(mg · L ⁻¹)	134.33 ± 36.21	40.14 ± 12.03	21.53 ± 7.31	27.30 ± 4.77	2.54 ± 0.46	(110.5 ± 2.14) × 10 ⁻⁶
实际出水/(mg · L ⁻¹)	12.73 ± 3.49	2.52 ± 0.72	0.31 ± 0.85	11.40 ± 1.84	0.28 ± 0.09	(7.10 ± 0.94) × 10 ⁻⁶
平均去除率/%	89.9	93.3	98.6	57.3	88.7	93.6

实际进水水质都低于设计值, 且 BOD₅/TN 和 BOD₅/TP 值分别为 1.48 和 15.8, 均不利于生物脱氮除磷。但从处理效果来看, 出水指标可以稳定达到一级 A 标准。这说明悬浮填料上的附着生物系统, 增强了生物脱氮除磷效果。MBBR 工艺填料区污泥龄长, 增大了微生物种群的丰度, 同时局部存在好氧、缺氧微环境, 有利于其在恶劣水质条件下, 适应微生物的筛选与富集。特别是在冬季温度较低不利于硝化时, 污水厂的各出水指标的浓度也无明显的提升, 这表明 MBBR 工艺在添加悬浮填料后形成的泥膜复合工艺增加了系统内菌群的多样性, 而生物膜传质比活性污泥慢, 同样生物降解产生的热量与水体交换较慢, 提高微生物的局部环境温度, 有利于细菌活性的维系, 在宏观上表现出了 MBBR 对于低温的适应性。

实际工程中, 悬浮载体对系统硝化的贡献率可以达到 70%, 投加悬浮填料增强生物硝化能力也使 MBBR 工艺对去除雌激素有着良好效果。经检测杨湾污水处理厂雌酮(E1)、雌二醇(E2)和炔雌醇(EE2)获得的总雌激素浓度(以雌二醇为当量,

TE = [E1]/3 + [E2] + 10[EE2])[⁹], 进水平均总雌激素浓度为 110.5 ng/L, 经过 MBBR 生化池处理后的中间出水平均总雌激素浓度为 15.8 ng/L, 而经过 D 型滤池过滤之后, 总雌激素浓度降为 7.1 ng/L。对比西南地区长江流域某采用卡鲁塞尔氧化沟工艺的污水厂, 其总的雌激素进、出水浓度分别为 112.8 和 24.8 ng/L^[9]。这表明采用 MBBR 工艺是可以有效提高雌激素去除效果的, 而且在雌激素进水浓度差别不大的情况下, MBBR 工艺对雌激素的去除效果略优于卡鲁塞尔氧化沟。说明采用悬浮填料的强化硝化工艺可提高污水处理过程中的雌激素去除能力, 而且 D 型滤池的深度处理进一步加强了该痕量有机物的去除效果。

4 主要技术经济指标

本工程总投资约 1.8 亿元, 工程直接投资约 1.4 亿元, 吨水基建投资为 2 300 元, 单位处理成本为 1.04 元/m³, 单位经营成本为 0.63 元/m³, 工程投资及运行费用均较低。

本污水厂吨水占地仅为 0.31 m²/(m³ · d⁻¹), 与国内其他同类型污水厂相比优势明显(见表 3)。

表 3 同类型污水厂占地概况

Tab. 3 Site footprint of similar wastewater treatment plants

污水厂	规模/(10 ⁴ m ³ · d ⁻¹)	单位水量占地/(m ² · m ⁻³ · d)	排放标准	工艺流程
青岛高新区	18	0.35	一级 A	初沉 + 生化 + 二沉 + 高效 + 转盘
青岛李村河	25	0.62	一级 A	初沉 + 生化 + 二沉 + 高效 + 滤布
团岛	10	1.037	一级 A	初沉 + 生化 + 二沉 + 高效 + 滤布
佛山高明	10	0.87	一级 A	生化 + 二沉 + 高效 + 转盘
广州大坦沙	55	0.43	准 V	生化 + 二沉 + 砂滤
宁波小港	4	0.49	一级 A	生化 + 二沉 + 磁混凝 + 转盘
宁波新周	16	0.68	准 IV	生化 + 二沉 + 高效 + 深床

5 结语

四川某污水处理厂是西南地区几个采用 MBBR 工艺的大型污水厂之一, 结合深度过滤采用 D 型滤池, 占地仅 0.31 m²/(m³ · d⁻¹)。该厂采用 SPR -

II 型悬浮载体, 填充率为 25%, 运行效果良好, 出水主要水质指标均稳定达到一级 A 标准。本项目设计及运行经验对现有污水厂的挖潜改造及污水厂新建有重大的参考意义。

参考文献:

- [1] 吴迪. MBBR 在国内的工程应用与发展前景[J]. 中国给水排水, 2018, 34(16): 22-31.
Wu Di. Application and development prospect of MBBR in China[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(16): 22-31 (in Chinese).
- [2] Ødegaard H, Givsgaard B, Strickland J. The influence of carrier size and shape in the moving bed biofilm process [J]. Water Sci Technol, 2000, 41(4): 383-391.
- [3] 吴迪. 水处理用悬浮载体填料行业标准解读与投加量设计[J]. 中国给水排水, 2017, 33(16): 13-17.
Wu Di. Interpretation of high density polyethylene suspended carrier for water treatment and calculation of added amount of suspended carrier[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(16): 13-17 (in Chinese).
- [4] 韩萍, 许斌, 宋美芹, 等. 团岛污水厂 MBBR 工艺的升级改造及运行效果[J]. 中国给水排水, 2014, 30(12): 110-114.
Han Ping, Xu Bin, Song Meiqin, et al. Design features and operational effect of Tuandao WWTP upgrading by MBBR in Qingdao [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(12): 110-114 (in Chinese).
- [5] 熊建英. MBBR + 磁混凝工艺用于污水处理厂提标改造[J]. 中国给水排水, 2018, 34(20): 50-55.
Xiong Jianying. Application of MBBR + magnetic coagulation process for upgrading of wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(20): 50-55 (in Chinese).
- [6] 孟涛, 刘杰, 杨超, 等. MBBR 工艺用于青岛李村河污水处理厂升级改造[J]. 中国给水排水, 2013, 29(2): 59-61.
Meng Tao, Liu Jie, Yang Chao, et al. Application of MBBR process in upgrading and reconstruction of Licunhe WWTP in Qingdao City [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(2): 59-61 (in Chinese).
- [7] 张忠华, 汤兵, 赵一宁, 等. 移动床生物膜反应器的启动及影响因素的研究[J]. 水处理技术, 2012, 38(11): 84-89.
Zhang Zhonghua, Tang Bing, Zhao Yining, et al. Start-up and its influence factors in moving bed biofilm reactor [J]. Technology of Water Treatment, 2012, 38(11): 84-89 (in Chinese).
- [8] 王学江, 夏四清, 陈玲, 等. DO 对 MBBR 同步硝化反硝化生物脱氮影响研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(4): 514-517, 538.
Wang Xuejiang, Xia Siqing, Chen Ling, et al. Effect of DO on simultaneous nitrification and denitrification in MBBR [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(4): 514-517, 538 (in Chinese).
- [9] 阳春, 邹玲, 胡碧波, 等. 固相萃取/高效液相色谱/串联质谱法同时测定水中雌激素[J]. 中国给水排水, 2014, 30(4): 87-91.
Yang Chun, Zou Ling, Hu Bibo, et al. Simultaneous detection of estrogens in sewage and river water by solid phase extraction/HPLC-MS/MS [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(4): 87-91 (in Chinese).



作者简介: 白华清(1975-), 男, 安徽宣城人, 本科, 高级工程师, 注册咨询(投资)工程师, 注册公用设备师(给水排水), 主要从事市政给排水工程、生态环境保护、综合管廊等方面的设计工作, 先后主持完成 100 多个工程项目, 获得省部级勘察设计奖项十多次。

E-mail: 499695851@qq.com

收稿日期: 2019-06-29