

设计经验

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.02.009

BFM装配式用于占地受限型污水处理工程设计

高彦博¹, 杨忠启², 周家中², 张港¹, 张磊¹, 韩文杰²,
吴迪², 门艳辉², 李海明², 钟晨³

(1. 烟台市城市排水服务中心, 山东 烟台 264001; 2. 青岛思普润水处理股份有限公司,
山东 青岛 266510; 3. 葛洲坝集团生态环保有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘要: 北方某污水处理厂新建处理规模为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的污水处理设施, 要求出水水质达到地表水准V类标准。采用BFM装配式进行施工建设, 仅用时29 d就完成污水处理设施建设并实现通水运行, 通水7 d后实现达标排放, 解决了项目面临的占地受限、实施周期短、稳定性要求高等难题。项目实施完成后单位占地仅为 $0.142 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ 。实际运行效果显示, BFM出水水质稳定并优于设计标准, 通过纯膜MBBR后缺氧区碳源调控, 可保障BFM出水TN低于 5 mg/L 。BFM装配式具有集约紧凑、高效稳定、经济快速的优势, 为污水厂提标扩容提供了新思路。

关键词: 移动床生物膜反应器; 磁加载沉淀工艺; 装配式; 高标准; 占地; 快速实施; BFM; 合流制溢流

中图分类号: TU992.3 文献标识码: B 文章编号: 1000-4602(2023)02-0046-06

Application of BFM Fabricated Structure in the Design of Land Limited Wastewater Treatment Plant

GAO Yan-bo¹, YANG Zhong-qi², ZHOU Jia-zhong², ZHANG Gang¹, ZHANG Lei¹,
HAN Wen-jie², WU Di², MEN Yan-hui², LI Hai-ming², ZHONG Chen³
(1. Yantai Urban Drainage Service Center, Yantai 264001, China; 2. Qingdao SPRING Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266510, China; 3. Gezhouba Group Eco-Environmental Protection Co. Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: A new treatment facility with a treatment capacity of $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ has built in a wastewater treatment plant in north China, and the effluent quality is required to meet the surface water quasi class V standard. It only took 29 days to complete the construction of wastewater treatment facilities and realized wastewater treatment by using BFM fabricated structure. After 7 days of operation, the effluent quality reached the discharge standard, which solved the problems such as limited footprint area, short construction time and high stability requirements. After the completion of the project, the unit occupied area was only $0.142 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$. The effluent quality was stable and better than the design standard. The TN in effluent from BFM was guaranteed to be lower than 5 mg/L through the regulation of carbon source in post-anoxic zone of pure MBBR. BFM fabricated structure has the advantages of

intensive, compact, efficient, stable, economic and time-saving, which provides a new idea for the upgrading and expansion of wastewater treatment plant.

Key words: MBBR; magnetic coagulation; fabricated structure; high standard; land occupation; rapid construction; BFM; combined sewer overflows

目前很多污水处理厂占地已接近控制指标,如果进一步进行改造,将面临用地超标的风险。同时,传统工艺流程长、实施速度慢,难以满足污水厂新、改、扩建项目建设周期的要求。因此亟需采用紧凑高效、实施周期短的节地型污水处理工艺。

北方某污水处理厂新建污水处理设施在占地面积小、实施周期短、稳定性要求高的情况下,采用了BFM装配式技术。

1 项目概况

1.1 项目背景

该污水处理厂设计规模为 $12\times10^4\text{m}^3/\text{d}$,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,现已满负荷运行。为缓解原厂运行压力,拟在原厂内新建一座独立污水处理设施,设计规模为 $1\times10^4\text{m}^3/\text{d}$ 。

污水厂原设计水质与实际相符,能满足90%保证率,新建部分设计进水水质仍参考污水厂原设计值。出水水质要求氨氮 $\leq 3\text{mg/L}$,COD和TP达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中V类水标准,即准V类标准,设计进、出水水质见表1,设计水温 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

mg·L ⁻¹						
项目	COD	BOD ₅	SS	TN	NH ₃ -N	TP
设计进水	580	260	430	70	50	11
设计出水	40	10	10	15(5)**	3(5)*	0.4
注: *温度低于12℃时执行括号内标准;**设计时考虑可满足括号内标准。						

1.2 项目难点与工艺选择

本新建项目面临以下困难:

① 占地受限:污水处理厂周边已无扩建用地,新建污水处理设施需建在原厂址内,且厂内无预留规整用地,仅有部分绿化用地可供使用(1 417 m²,见图1),极为紧凑,新建污水处理设施应选取节地型工艺。



图1 新建污水处理设施可用地情况

Fig.1 Available land for new wastewater treatment facility

② 高标准下稳定性要求高:该污水厂进水基质浓度较高,主要为生活污水,2018年—2020年进水水质见表2,以90%涵盖率时的进水水质确定本项目进水水质;准V类标准对NH₃-N、TN和TP的去除要求更高,因此新工艺要有较强的脱氮除磷能力;同时考虑进水水质变化大,工艺需具有较强的抗冲击负荷性能;本项目水量上需与原厂进行平衡与调节,进水水量会有较大的波动,应关注工艺对水量的耐冲击性;为满足后续水质提标要求,工艺要达到使出水TN $<5\text{mg/L}$ 的能力。

表2 2018年—2020年污水处理厂进水水质

Tab.2 Influent quality of the WWTP from 2018 to 2020

涵盖率/%	COD/(mg·L ⁻¹)	BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	SS/(mg·L ⁻¹)	氨氮/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)
95	649	290	496	52.7	12.8	75
90	580	260	430	50.0	11.0	70
85	537	252	391	48.0	10.5	62
80	494	236	357	46.4	10.0	59

③ 实施周期短:为尽快缓解污水处理厂运行压力,需在2个月内完成新建并通水运行,所以新建设施应选择短流程技术,宜采用装配式模块化设计,以缩短实施周期。

1.3 工艺比选

常见的节地型污水处理工艺包括MBR、BAF等。本项目进水量会有较大的波动,需与原厂在

水量上进行平衡与调节,应关注工艺对于水量的耐冲击性。而上述两种工艺,在应对水量冲击时均具有短板,若获得更强的耐水量冲击能力,只能增大设计变化系数,大幅增大投资。

BFM工艺是以纯膜MBBR为核心,耦合改良磁加载沉淀—超效分离工艺的组合创新技术,其工艺原理如图2所示。BFM利用纯膜MBBR高负荷特点实现节地;系统不富集活性污泥,可省去传统工艺流程中的二沉池,进一步大幅缩减占地;采用超效分离工艺实现纯膜MBBR出水的固液分离,通过一段沉淀代替传统工艺流程中二沉池、深度处理两段沉淀。纯膜MBBR在国外有较多成功案例,脱氮效果良好^[1]。在国内,广东某污水处理厂处理能力不足,存在 $3\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的污水处理缺口,采用BFM工艺在 $20\text{ m}\times 100\text{ m}$ 的长条形土地上新建污水处理设施,仅用时30 d即完成项目的设计、施工和调试,出水可稳定优于一级A标准,实际吨水占地仅为 $0.067\text{ m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$,实现了极限占地条件下的快速实施、稳定达标^[2],首次验证了BFM工艺在南方低基质条件下的可行性。华北某污水处理厂采用BFM为核心工艺新建 $2\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的污水处理设施,采用模块化设计并于厂区绿化带实施,仅用时100 d即完成项目的设计、施工及通水达标,出水水质能够稳定达到“准V类”标准,吨水占地仅为 $0.215\text{ m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$,为原厂占地的26%^[3],实现了BFM在市政污水领域的应用。因此,本项目采用BFM工艺进行新建。

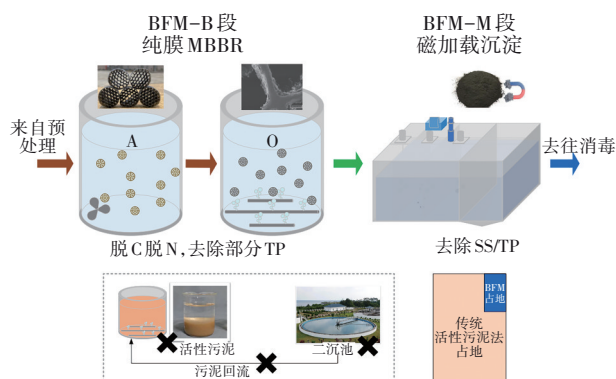


图2 BFM工艺原理示意

Fig.2 Schematic diagram of BFM process principle

2 提标改造方案

2.1 工艺流程

本项目新建工艺流程见图3,平面布置见图4。进水取自原厂初沉池,核心工艺为BFM工艺,B段采

用纯膜MBBR实现微生物的专性富集,提高系统有效生物量,保证碳、氮的稳定达标,M段采用超效分离工艺,进一步去除SS和TP,保障出水指标达标。出水与原厂工艺出水混合,经紫外消毒后直接排放至受纳水体。剩余污泥先进入污泥储池,然后排放至原厂污泥脱水车间与原厂剩余污泥共同处理,含水率降至80%以下后外运处理。

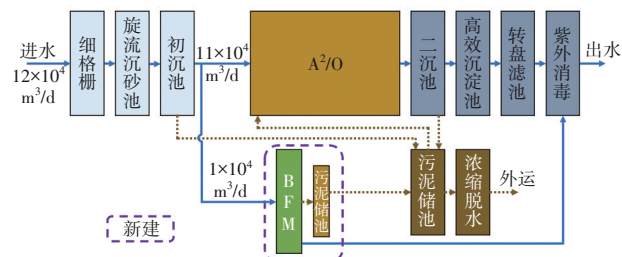


图3 污水处理厂工艺流程

Fig.3 Process flow chart of the WWTP



图4 污水处理设施平面布置

Fig.4 Plane layout of wastewater treatment facilities

2.2 进水系统

本项目进水为原厂初沉池出水,设转子泵3台(2用1备),单台流量 $271\text{ m}^3/\text{h}$,扬程 150 kPa , $N=22\text{ kW}$ 。

2.3 BFM系统

B段为纯膜MBBR生物池,共设置2组,单组设置9个圆柱形罐体,碳钢材质,单个罐体尺寸均为 $\varnothing 6.5\text{ m}\times 8.0\text{ m}$,埋地 1.5 m ,为保证TN高标准排放,生物池整体为两级AO工艺。前3个罐体为第一级缺氧区,第4~7个罐体为第一级好氧区,第8个罐体为第二级缺氧区,第9个罐体为第二级好氧区。通过生物池多级多段设置,实现各功能区核心菌种的专性富集和功能分置,提高脱碳、硝化反硝化效率及抗冲击能力。纯膜MBBR工艺前、后缺氧区填充率均为55%,前好氧区填充率为60%,后好氧区填充率为65%。系统总停留时间为 10.75 h ,其中前缺氧区为 3.66 h 、前好氧区为 4.76 h 、后缺氧区为 1.17

h、后好氧区为1.16 h。反应器内投加SPR-Ⅲ型悬浮载体,尺寸为 $\varnothing 25\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,HDPE材质,密度为 $0.94\sim 0.97\text{ g/cm}^3$,有效比表面积 $\geq 800\text{ m}^2/\text{m}^3$,挂膜后密度接近于水,轻微扰动下即可实现均匀流化。

缺氧区设置MBBR专用搅拌器, $N=4.0\text{ kW}$,在保证推力前提下使悬浮载体均匀扩散。考虑充分利用原水碳源,设计6台硝化液回流泵(4用2备),单台流量 $320\text{ m}^3/\text{h}$,扬程 100 kPa , $N=15\text{ kW}$,硝化液回流比300%。好氧区采用磁悬浮风机对生物池进行曝气,共设3台(2用1备),单台风量 $42\text{ m}^3/\text{min}$,风压 $70.0\sim 80.0\text{ kPa}$, $N=75\text{ kW}$,设计DO为 $2\sim 6\text{ mg/L}$ 。

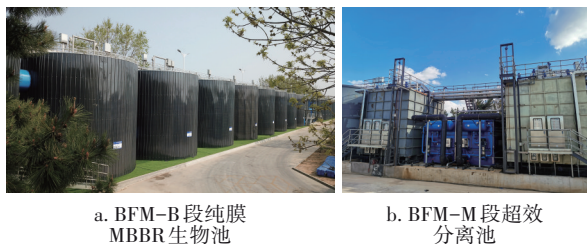
M段共新建2组,单组设计水量为 $5\,000\text{ m}^3/\text{d}$,采用钢制一体化设备,含混合池、加载池、絮凝反应池各1格,停留时间分别为 2.6 、 2.6 、 3.16 min ,混合池、加载池、絮凝反应池均采用立式搅拌器,功率分别为 1.1 、 1.5 、 1.5 kW 。沉淀区采用斜管沉淀,斜管斜长 1.2 m ,孔径 80 mm ,安装倾角 60° ,共安装 36 m^2 ,设计表面负荷 $11.57\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。

2.4 污泥储池

新建污泥储池1座,置于M段下方,设计尺寸 $5.8\text{ m}\times 5.7\text{ m}\times 1.6\text{ m}$,含排泥泵2台(1用1备), $N=2\text{ kW}$ 。

2.5 装配式模块

装配式BFM在工厂内进行模块化单元体加工制作,完成项目现场地面平整准备后,整体运输至项目现场进行安装。本项目BFM-B段为碳钢罐体结构(见图5),现场仅需进行固定及管路焊接,BFM-M段为模块化装备,可直接运输至现场与BFM-B段进行安装连接,在厂内无新建用地的条件下,利用厂区边缘绿化带进行实施,吨水占地 $0.142\text{ m}^2/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$,仅为原厂吨水占地的17%,克服了建设占地受限、实施周期短的难题。自设计至安装完成共计用时29 d,调试7 d后实现达标排放,有效缓解了原厂运行压力。



a. BFM-B段纯膜MBBR生物池

b. BFM-M段超效分离池

图5 BFM装配式实景

Fig.5 Actual view of BFM fabricated structure

3 运行效果

3.1 工艺运行效果

本项目采用同类型污水处理厂挂膜成熟的悬浮载体进行接种启动,水温 20°C ,调试7 d后实现出水达标,调试完成后项目实际进、出水情况如表3所示,其中实际进水取自原厂初沉池出水,B段及M段出水水质均为水样经中速定性滤纸过滤后测定。

表3 BFM沿程污染物变化情况

Tab.3 Variation of pollutants concentration along the BFM $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TN	TP	SS
实际进水	542.94±96.69	224.94±43.87	59.01±5.62	68.36±7.06	10.58±4.05	137.84±15.08
B段出水	36.79±5.22	3.78±1.01	0.47±0.38	4.60±2.53	9.34±3.98	388.74±17.42
M段出水	31.09±3.95	3.69±0.95	0.41±0.38	4.21±2.40	0.08±0.04	4.56±0.91

项目稳定运行阶段实际进水水量为 $(9\,148.59\pm 591.55)\text{ m}^3/\text{d}$,达到设计进水量的90%,实际停留时间约 11.5 h 。进水COD、BOD₅和TN浓度基本达到设计标准,而BFM-B段即生化段出水COD、BOD₅和TN浓度已达到设计出水标准,出水TN浓度稳定低于 10 mg/L ,通过两级A/O,前缺氧区利用原水碳源去除大部分TN,后缺氧区调控碳源投加量实现TN的深度去除,依靠生物膜高效的反硝化速率,可使出水TN稳定低于 5 mg/L 。经过BFM-M段后,以SS形式存在的有机物进一步被去除,保证出水总COD稳定达标。进水氨氮浓度达到 $(59.01\pm 5.62)\text{ mg/L}$,长期超过设计值近20%,但BFM-B段出水氨氮即可稳定达到 1 mg/L 以下,均值仅为 0.47 mg/L 。实际进水SS和TP分别为 (137.84 ± 15.08) 、 $(10.58\pm 4.05)\text{ mg/L}$,经过生化段后,TP有少量降低,而由于生物膜的动态更新过程,SS出现增长,继续经过BFM-M段处理后,出水SS、TP分别为 (4.56 ± 0.91) 、 $(0.08\pm 0.04)\text{ mg/L}$ 。BFM-B段保证了出水碳、氮的稳定达标以及少量TP的去除,而BFM-M段则进一步保障了TP和SS的达标排放,整体出水水质稳定优于设计排放标准。

3.2 生物膜性状

悬浮载体生物膜挂膜情况如图6所示,图6(a)为邻近本项目的另一个泥膜复合MBBR项目中悬浮载体挂膜情况,图6(b)为本项目纯膜MBBR中悬浮

载体挂膜情况。可见,常规泥膜复合MBBR中,悬浮载体生物膜厚度一般为 $100\sim 200\ \mu\text{m}$ ^[4],而本项目中好氧区生物膜更厚,厚度在 $200\sim 400\ \mu\text{m}$,这主要是由于纯膜MBBR中没有活性污泥与生物膜的竞争^[5],因此可以充分发挥生物膜的高效富集作用,其有效生物量更高,有效功能菌的数量更多,处理负荷更高,同时生物膜厚度的适量增加也提高了系统的抗冲击负荷能力。

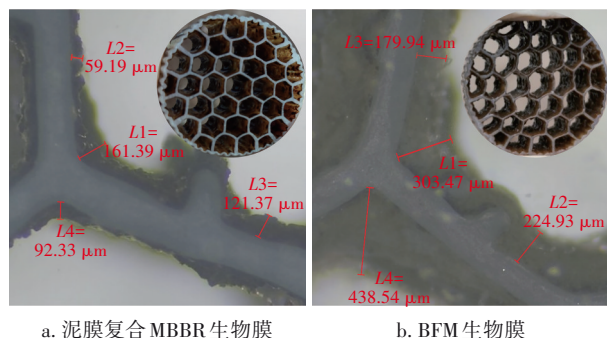


图6 好氧悬浮载体挂膜情况

Fig.6 Suspended carrier biofilm of aerobic carrier

3.3 系统流化效果

MBBR工艺能够成功运行的核心在于悬浮载体是否能够良好流化,而在BFM系统中,纯膜MBBR工艺的填充率比传统泥膜复合MBBR工艺更高,如何实现高填充率下悬浮载体的低耗流化成为纯膜MBBR工艺大规模应用的关键。对于好氧区,由于存在曝气系统,仅需对其进行合理布置,即可实现悬浮载体的均匀流化,无需额外曝气量;而针对缺氧区,则需要配备推流搅拌器,国外项目缺氧区的功率密度高达 $30\ \text{W}/\text{m}^3$ 。本项目基于传统泥膜复合MBBR的设计经验,缺氧区采用了MBBR专用搅拌器,在保证推力前提下能够使悬浮载体扩散,功率密度可降低50%以上。本项目实际流化效果如图7所示,悬浮载体流化状态良好,无堆积现象。

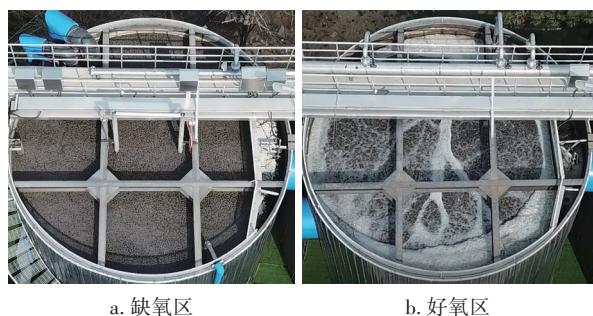


图7 本项目实际流化效果

Fig.7 Actual fluidized state of the project

改造完成后,借助基于CFD软件的仿真模拟对生物池整体水流场进行了模拟分析,清晰体现了系统内的流化状态。图8显示了基于该项目的悬浮载体分布情况,缺氧池悬浮载体受专用推流搅拌器的推流作用做循环流动,初始阶段,悬浮载体分布于水池上方,在专用推流搅拌器的搅拌作用下,将悬浮载体均匀分散开,缺氧池整体分布较为均匀。好氧池内的穿孔曝气管置于池底,悬浮载体受到气体冲击向四周分散运动,分布均匀,没有出现悬浮载体堆积现象。

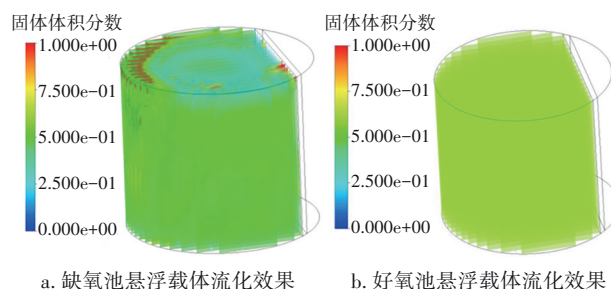


图8 水池内悬浮载体分布

Fig.8 Distribution of suspended carrier in the tank

图9显示了基于该项目的流场分布,从整体的水流速度分布看,水流分布受到外力作用而变化,缺氧池内推流器附近水流速度较大,带动了水池内的水体运动,水体在运动的同时携带悬浮载体进行循环流动。好氧池内的穿孔曝气带动水流向上运行,造成水体在水池内震荡波动,悬浮载体在水池内也跟随水体进行震荡波动,保证了悬浮载体在水池内的运动状态。专用推流搅拌器使水池内的水体呈现较高的速度分布,并且推流器位置的合理设置也能保证水体在水池内的循环运动。好氧池内的水体速度在池壁附近有所增大,这是由水体液面震荡所致,局部速度增大值有限,局部速度增大也有利于加快悬浮载体在水池内的运动速率。

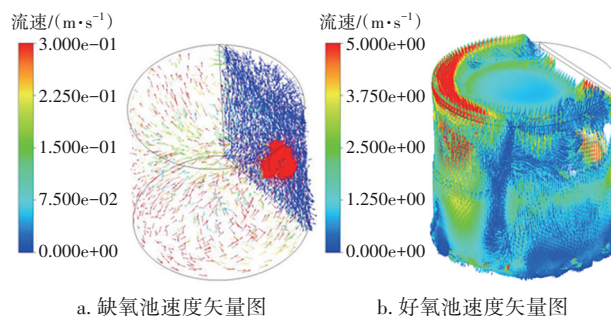


图9 水池内流场分布

Fig.9 Flow field distribution in the tank

通过CFD模拟,验证了其模拟效果与实际运行效果的相似性,对于后续的指导调控与优化运行具有重要的参考意义。

3.4 投资与运行费用

新建项目总投资4 595.57万元,其中工程费用为4 223.75万元,单位水量总成本为1.9元/m³,单位水量经营成本为1.29元/m³,吨水耗电量为0.55 kW·h/m³。

4 结论

北方某污水处理厂新建处理规模为1×10⁴ m³/d的污水处理设施,需同时满足占地面积小、稳定性高、实施周期短的要求。核心工艺采用BFM,利用绿化带进行实施,吨水占地仅为0.142 m²/(m³·d⁻¹),同时采用装配式模式进行施工,设计及建设仅用时29 d,通水7 d后实现达标排放,实现了在缺地条件下污水处理设施的快速新建。BFM出水各指标稳定达到并优于设计出水标准,其中出水氨氮浓度稳定低于1 mg/L,出水TN浓度稳定低于10 mg/L,且通过纯膜MBBR工艺段后缺氧区的优化调控,可保障出水TN稳定低于5 mg/L,出水TP稳定低于0.1 mg/L,实现了高效的脱氮除磷效果;纯膜MBBR流化效果良好,缺氧区搅拌功率密度较国外项目降低50%以上,实现了节能降耗,并通过CFD模拟,实现了悬浮载体流化的指导调控与优化运行。BFM装配式具有集约紧凑、高效稳定、经济快速的优势,针对污水厂原厂提标扩容,可在原系统不变的基础上,通过新建装配式序列,增加系统处理能力,实现整体提标,为污水厂原厂提标扩容提供了新思路。

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. Engineering application of pure MBBR process at home and abroad [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(22): 37-

47 (in Chinese).

- [2] 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).

- [3] 周家中,韩文杰,宋平周,等. 华北某集约型污水厂BFM工艺设计与运行分析[J/OL]. (2022-05-06) [2022-05-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1073.TU.20220409.1928.002.html>.

ZHOU Jiazhong, HAN Wenjie, SONG Pingzhou, et al. BFM process design and operation analysis of an intensive WWTP in north China [J/OL]. (2022-05-06) [2022-05-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1073.TU.20220409.1928.002.html> (in Chinese).

- [4] 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).

- [5] 周家中,韩文杰,吴迪,等. MBBR泥膜复合系统泥膜竞争关系的影响因素[J]. 中国环境科学,2020,40(11):4735-4743.

ZHOU Jiazhong, HAN Wenjie, WU Di, et al. Factors influencing the competition between activated sludge and biofilm in hybrid MBBR nitrification system [J]. China Environmental Science, 2020, 40(11): 4735-4743 (in Chinese).

作者简介:高彦博(1975-),男,山东青岛人,大学本科,高级工程师,主要研究方向为污水处理厂运营管理。

E-mail: ytwtp@163.com

收稿日期:2022-05-09

修回日期:2022-07-23

(编辑:孔红春)