

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.18.021

华北某集约型污水厂BFM工艺设计与运行分析

周家中¹, 韩文杰¹, 宋平周¹, 张晶晶¹, 纪庚好², 杨永刚¹,
吴迪¹, 于林静¹

(1. 青岛思普润水处理股份有限公司 青岛市绿色低碳生物膜与水环境恢复重点实验室,
山东 青岛 266510; 2. 青岛思普润智能系统有限责任公司, 山东 青岛 266510)

摘要: 华北某新建处理规模为 $2\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的污水处理设施,面临占地受限、进水水质复杂(含工业废水)、出水水质要求高(需达到地表水准V类标准)、需在4个月内通水达标等难题。采用BFM为核心工艺,即纯膜MBBR工艺(B段)与改良磁加载沉淀工艺(M段),同时采用模块化设计,80 d完成了设计施工,20 d实现了通水达标。工艺流程为预处理+BFM+臭氧氧化+转盘滤池,B段总HRT仅为10 h,不设二沉池;M段设计表面负荷为 $11.57\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$;除预处理采用土建形式,其余均采用模块方式,可以缩短建设周期。全厂出水COD、氨氮、TN、TP、SS分别为 (21.86 ± 3.26) 、 (0.44 ± 0.24) 、 (10.19 ± 1.37) 、 (0.09 ± 0.03) 、 $(4.77\pm 0.89)\text{ mg/L}$,出水水质稳定达到地表水准V类标准。当BFM出水COD $>30\text{ mg/L}$ 时开启臭氧氧化装置。智水优控信息控制平台的加载,提高了污水厂的综合运营管理水平,实现了26%的节能降耗。本项目经营成本为0.98元/ m^3 。

关键词: 悬浮载体; 生物膜; 磁加载沉淀; BFM; 应急处理; 雨季溢流; 装配式
中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)18-0126-07

BFM Process Design and Operation Analysis of an Intensive WWTP in North China

ZHOU Jia-zhong¹, HAN Wen-jie¹, SONG Ping-zhou¹, ZHANG Jing-jing¹,
JI Geng-hao², YANG Yong-gang¹, WU Di¹, YU Lin-jing¹

(1. Qingdao Key Laboratory of Green and Low Carbon Biofilm and Water Environment
Restoration, Qingdao SPRING Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266510, China; 2. Qingdao
SPRING Intelligent System Co. Ltd., Qingdao 266510, China)

Abstract: The treatment capacity of a new WWTP in north China is $2\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, which faced with many problems, such as limited land occupation, complex quality of influent containing industrial wastewater, high effluent quality to reach level quasi-V standard for surface water within four months. BFM was adopted as core process, which consists of pure moving bed biofilm reactor, MBBR in section B and improved magnetic coagulation precipitation process in section process M. At the same time, the modular design was adopted. The design and construction were completed in 80 days, and the water supply reached the standard in 20 days. The process flow is pretreatment, BFM, ozone oxidation, and rotary filter. The HRT of section B without secondary sedimentation tank is 10 h. The design surface load

基金项目: 泰山产业领军人才工程专项

通信作者: 吴迪 E-mail: hitwudi@126.com

of section M is $11.57 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Except that the pre-processing adopts civil construction, the rest sections are modular, which shortens the construction period. The effluent of COD, NH_4^+-N , TN, TP and SS are (21.86 ± 3.26) , (0.44 ± 0.24) , (10.19 ± 1.37) , (0.09 ± 0.03) and $(4.77 \pm 0.89) \text{ mg/L}$ respectively. The effluent quality could stably superior to the design effluent criteria of level quasi-V. When the COD of BFM effluent exceeds 30 mg/L , the ozone oxidation device will be started. The loading of artificial intelligence system improves the comprehensive operation and management level of WWTP, and saves 26% of energy and consumption. The operating cost of this project is 0.98 yuan/m^3 .

Key words: suspended carrier; biofilm; magnetic loading precipitation; BFM; emergency treatment; rainy season overflow; prefabricated

污水厂新、改、扩建项目越来越关注用地,而传统工艺流程长、占地大且实施速度慢,所以迫切需要紧凑高效且能够快速实施的污水处理工艺。目前MBR、BAF、泥膜复合MBBR工艺都具备紧凑型工艺特点,已获得了广泛应用,可实现污水厂出水水质稳定达标,但也各自存在一些问题,如MBR和BAF工艺对预处理要求较高且抗水量冲击能力较差,MBR需要定期换膜,维护成本较高,BAF工艺为保障TN达标,外投碳源量较大、药耗高;而泥膜复合MBBR工艺则由于泥膜竞争,使得生物膜性能未能充分发挥,限制了其进一步缩减占地。

以北方某新建 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 中高浓度污水处理设施为例,重点分析了纯膜MBBR+改良磁加载沉淀,即BFM工艺,该紧凑型污水厂的建设思路以及运行效果,可为类似新、改、扩建项目提供技术参考。

1 项目概况

原有污水厂设计处理规模为 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,已满负荷运行,但仍有处理量缺口,亟需扩容 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。受限于已有工艺类型及运营方式,难以原池扩容,只能在厂内新建一座独立的 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 污水处理设施。设计进、出水水质见表1,其中设计进水水质参考原污水厂实际进水水质数据,满足95%的保证率。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	COD	BOD ₅	SS	TN	NH_4^+-N	TP
设计进水	500	200	260	72	60	8.0
设计出水	40	10	10	15	2	0.4

新建项目出水在执行一级A标准的基础上,COD、氨氮、TP需达到《地表水环境质量标准》(GB

3838—2002)的V类水标准,即准V类标准。

该项目难点主要包括:

① 占地受限。新建污水处理设施需在原污水厂厂址内实施,仅有部分绿化带可供使用,占地仅为 $4\,300 \text{ m}^2$,对于建设 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 污水处理设施,难度极大。

② 出水标准要求高。原厂出水执行一级A标准且达标运行压力极大,新建项目出水水质需要满足地表准V类水标准,且需要在极为紧凑的占地下实现,所以新项目所采用的工艺应具有容积负荷高且同时可达到高出水标准的特点。

③ 工艺运行稳定性要求高。新建项目进水中工业废水占比高达70%。工业废水来源主要是汇水范围内的化工企业,处理工艺需考虑来水冲击以及难降解有机物的处理,已有污水厂达标压力大,经常遭受冲击,因此新项目整体对工艺运行稳定性要求更高。

④ 实施周期短。需在4个月内快速实现污水厂的建设并通水达标运行,扣除前期准备,实施需在2~3个月内完成,所以应选择装配式模块化设计,以缩短工期。

针对以上难点,本项目核心工艺拟采用BFM+高级氧化,其中BFM为纯膜MBBR+改良磁加载沉淀工艺。同时进行了中试验证,效果稳定达标,为工程实施奠定了基础;采用装配式模块化设计,可确保快速实施。

2 BFM工艺

2.1 工艺简介

移动床生物膜反应器(MBBR),按微生物培养富集形式,主要分为泥膜复合MBBR工艺(S-MBBR,又称IFAS)和纯膜MBBR工艺(P-MBBR)两种形式。

其中S-MBBR是国内最早的应用形式,通过向生化池投加悬浮载体富集生物膜,使得生化池内同时存在附着态微生物和悬浮态微生物,可原池提高生化系统的处理能力,主要用于污水厂生化池的原池扩容提标。2008年,无锡芦村污水厂作为国内首座一级A提标改造的污水厂,率先采用了泥膜复合MBBR工艺,解决了提标缺地的难题^[1]。在我国“十二五”到“十三五”的提质增效阶段,S-MBBR工艺获得了广泛应用。从工程实际运行效果看,S-MBBR工艺虽然实现了生化池处理性能的原位提升,但并未取得“泥膜复合MBBR系统的处理能力 \geq 单独活性污泥处理能力+单独生物膜处理能力”的效果,主要是由于生物膜和活性污泥存在竞争关系。生物膜的优势功能菌富集能力强,可达到活性污泥的10倍以上,但活性污泥的存在也限制了生物膜效能的充分发挥。在极端不利的条件下,如低温、高盐、强冲击时,活性污泥处理能力大幅降低,此时生物膜主要发挥污染物去除性能,对系统的稳定达标起到了主导性作用^[2-3]。由此可见,在S-MBBR系统中,生物膜的抗逆性更强,功能菌的富集能力更强,但在常态化的运行过程中其生化潜力有待进一步释放。

P-MBBR工艺系统中只存在悬浮载体生物膜,不富集活性污泥,悬浮载体生物膜成为真正的“主角”。在工艺流程上,该工艺可不设二沉池,不设污泥回流,流程更加集约;在运行上,生物膜实现动态更新,运行简便,无需反冲洗;在设计上,对进水的“容忍度”高,无需严格的预处理措施。P-MBBR是MBBR工艺最早的应用形式,主要用于节地新建,从应用效果来看,具有占地省、负荷高等优势。如Lillhammer污水厂处理市政污水,在生化段HRT仅为3.2 h条件下,出水可以实现远优于国内一级A标准的水平^[4]。如国内南方某污水厂,在进水氨氮浓度为30 mg/L时,实际生化段HRT仅为1.99 h,保障出水氨氮低于1.5 mg/L,取得了良好的应用效果^[5]。除市政污水领域外,纯膜MBBR也已在微污染水治理等方面取得了良好的工程实践效果^[6-8]。

悬浮载体生物膜存在动态更新,以维持高效的处理能力。脱落的生物膜称为腐殖污泥。对腐殖污泥的泥水分离过程,国外早期进行过探索,如采用沉淀、混凝沉淀、气浮等均可以实现固液分离,但单独一种工艺很难实现SS稳定低于10 mg/L的效果。腐殖污泥一般含水率较低,易于沉降,但由于

其胞外聚合物(EPS)含量高,所以沉淀时间过长,容易反硝化上浮,故应采用快速沉淀工艺。针对市政污水,P-MBBR工艺出水SS增量大多为50~150 mg/L,导致P-MBBR出水SS浓度高于一般深度处理的进水,故对于快速沉淀工艺还应考虑能够承受更大的固体通量。磁加载沉淀工艺是其中较优的选择,该工艺通过向混凝池投加密度为5~6 g/cm³的磁粉,在特殊的搅拌环境下使其与混凝絮体结合,生成更大、更密实的磁絮体,从而达到高速沉降的目的。与传统工艺相比,磁加载沉淀工艺具有速度快、占地少、效果好等优点。由于传统的磁加载沉淀工艺主要用于深度处理,应用场景不含长期进水高SS的情况,故需对传统磁加载沉淀工艺进行改良,以适应P-MBBR出水中等浓度SS的去除。如青啤二厂采用改良磁加载沉淀工艺,在进水SS为(473.48 \pm 40.01) mg/L的条件下,出水SS可降至(7.62 \pm 1.08) mg/L,保障了出水水质稳定达标,显示了较好的处理效果及抗冲击性^[9]。

BFM工艺,即是将纯膜MBBR工艺和改良磁加载沉淀工艺耦合,形成针对污水处理的全流程核心工艺,分别为BFM-B段和BFM-M段。B段利用纯膜MBBR工艺高负荷去除能力,对NH₄⁺-N、TN、有机物进行充分、彻底地去除;M段利用改良磁加载沉淀工艺高效的固液分离性能实现对TP、SS充分、彻底地去除。此外,为实现节能降耗、提高污水厂的运营管理水平,该工艺还加载了智水优控系统,即BFM-F段。该系统综合电气自控、云计算、物联网、大数据、移动互联等技术,在通常的电气自动化运行基础上,实现了能耗分析、智能控制、数字运营、移动中控室等智慧化功能。与MBR和BAF工艺相比,BFM工艺运行费用低;与国外纯膜MBBR工艺相比,BFM工艺优化了泥水分离过程,一次沉淀即可获得传统工艺需两次沉淀的SS去除效果;与泥膜复合MBBR工艺相比,BFM工艺缩短了工艺流程,占地更加集约。目前,该工艺已成功用于南方某污水厂新建,采用模块化设计,用时40 d即完成了3 \times 10⁴ m³/d的设计、施工并实现了通水达标,占地仅为0.067 m²/(m³·d⁻¹),实现了紧凑型布置且优于一级A标准的运行效果^[6]。

2.2 适用场景

BFM工艺具有稳定、集约、经济、快速、智能的优势,可解决污水厂面临的用地紧张、运行不稳定、

建设周期长等难题,适用于对占地、建设周期敏感的污水处理设施建设。

① 全地下污水厂建设。全地下污水厂的核心是投资和运维。BFM工艺流程短、占地紧凑、智能化水平高,可极大地降低建设投资成本且易于维护,管理简便。

② 无二沉池类污水厂连续流改造。对于SBR等间歇运行的生化工艺,由于BFM工艺无二沉池,可实现对上述工艺的替换,使生化段连续流运行。此外,BFM工艺也适用于MBR工艺改造,可以实现节能降耗。

③ 污水厂原厂区大规模提量。传统污水厂原池水量提升,主要受限於二沉池过水能力,提升量一般低于1.5倍。BFM工艺无需二沉池,破除了二沉池对污水厂提升量的限制,且由于B段高效的处理性能,满足了污水厂大规模提量的需求。

④ 黑臭水体治理(含河道旁位治理)。黑臭水体可采用旁位治理、源头治理、末端治理等方式。BFM工艺实施速度快、应用灵活,可在短期内成为黑臭水体的有效应对措施。

⑤ 微污染水治理。微污染水通常为劣V类水体,由于其污染物浓度不高,传统活性污泥法很难富集微生物。宜采用生物膜法,即BFM-B段,而M段可根据具体需求实现对TP、SS的稳定去除。

⑥ 工业废水处理。工业废水单独处理,面临的首要问题是占地,其次是工业废水水质波动大、出水标准多样化。BFM工艺可根据实际处理要求进行灵活布置,且B段和M段均能够应对较强的水质、水力冲击,适用于工业废水处理。

⑦ 应急污水治理。随着我国提质增效、水环境综合整治的开展,新的污染源不断涌现。并且,城市雨污合流导致的汛期冲击也对污水厂的稳定运行构成了威胁。快速建立起新的污水处理设施是保障污水厂稳定运行、改善城市人居环境的重要手段。BFM工艺以其流程短、模块化安装、挂膜填料直接投加等方式,可在短期内快速建立污水处理设施,满足水环境治理的需求。

3 工艺设计与实施

3.1 工艺流程

本项目新建工艺流程见图1。污水处理以BFM工艺为核心,预处理采用常规的粗格栅、提升泵房、

细格栅、曝气沉砂池、初沉池,以去除SS等颗粒物;由于进水中难降解有机物含量高,深度处理增加了臭氧高级氧化和纤维转盘滤池。初沉池和改良磁加载沉淀池的剩余污泥进入污泥贮池,采用叠螺机进行脱水,将污泥含水率降至80%以下外运。

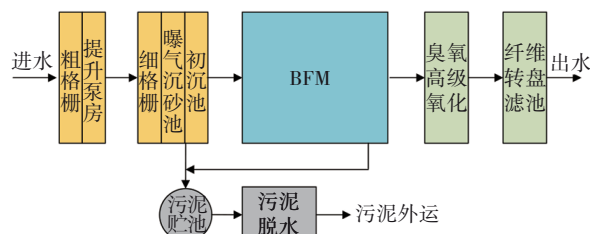


图1 新建污水厂工艺流程

Fig.1 Process flow chart of the new WWTP

3.2 预处理

粗格栅和提升泵房合建,长×宽为9.60 m×6.50 m。粗格栅采用回转式格栅,栅隙10 mm。提升泵房设4台潜污泵,单台流量500 m³/h,扬程250 kPa,配套变频器,实现流量稳定控制。进水渠及细格栅的长×宽为12.50 m×3.60 m,细格栅采用内进流垂直网板精细格栅,网板孔径2 mm。曝气沉砂池的长×宽为12.50 m×5.35 m。

3.3 BFM

BFM的B段采用搪瓷拼接圆形池体,为两级A/O工艺,共设置2组。各区域均投加悬浮载体,其中缺氧区填充率58%、好氧区填充率66%,总停留时间10 h。硝化液从第一级O段回流至第一级A段,总回流比300%。配4台流量为1 250 m³/h的干井式不堵塞泵,2用2备。好氧区设计DO为2~6 mg/L。缺氧区针对悬浮载体流化,安装专用推流搅拌器。M段采用钢制一体化设备,长×宽为10.30 m×6.00 m,混合池、磁种加载池、絮凝池停留时间均为2 min,沉淀区设计表面负荷为11.57 m³/(m²·h)。采用斜管沉淀,斜管斜长1 200 mm,管径DN80,安装角度60°,总面积62 m²。

3.4 COD深度处理

臭氧高级氧化接触池采用不锈钢制一体化设备。长×宽为12.00 m×3.50 m,停留时间42 min。配套紫外光催化反应器,N=24 kW,316L钛板曝气盘80个。尾气破坏及流量调配间的长×宽为5.5 m×4.8 m。臭氧发生间采用20GP标准集装箱型式,共设4套臭氧发生器,以液氧为氧源,臭氧产量为15 kg/h。

纤维转盘滤池共设2组,为钢制一体化设备,长×宽为5.40 m×3.20 m。设计滤速为6.94 m/h,转盘直径2 m,每套12片,过滤面积为60 m²,驱动电机1.1 kW,反洗泵2台, $Q=42$ m³/h, $H=90$ kPa, $N=2.2$ kW。

3.5 其他附属构筑物

污泥贮池为钢筋混凝土结构,长×宽为4.65 m×2.20 m,配潜水搅拌器1台,功率1.5 kW。污泥脱水机房为钢筋混凝土结构,长×宽为16.40 m×10.40 m。设水平螺旋输送机2套, $L=7$ m,输送量5 m³/h, $N=3.0$ kW;倾斜螺旋输送机1套, $L=7$ m,输送量5 m³/h,倾角30°, $N=3.0$ kW;一体化PAM溶解加药装置1套;进泥螺杆泵3台, $Q=27\sim45$ m³/h, $H=200$ kPa, $N=15$ kW;叠螺污泥浓缩脱水一体机2台,处理量270~450 kgDS/h, $N=4.13$ kW,日运行10 h,出泥含水率降至80%以下。

加药间主要用于反硝化脱氮投加碳源。长×宽为16 m×7 m。风机房采用轻钢板房,长×宽为16.4 m×7.5 m。放置3台磁悬浮鼓风机,单台 $Q=70$ m³/min(标准状态), $P=98$ kPa, $N=150$ kW。

全厂除臭采用生物除臭,占地长×宽为9 m×6 m。除臭风量2 000 m³/h,装机功率15 kW。共安装2台离心风机(1用1备), $Q=2\ 000$ m³/h, $P=2$ kPa, $N=4$ kW。配套喷淋、循环、储水箱等辅助设施;硫化氢及氨检测仪器各1套。

3.6 工程实施

各工艺段除预处理采用土建方式外,其余均采用模块化产品。该项目从设计、施工安装到具备通水条件仅用时80 d。项目实施后平面布置如图2所示,采用以BFM工艺为核心的全流程系统,实现了在4 300 m²土地上的紧凑型布置,占地仅为0.215 m²/(m³·d⁻¹)。与原污水厂相比,吨水占地仅为原污水厂的26%,节省了74%的占地。

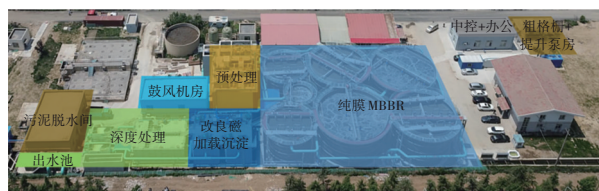


图2 污水厂实施后平面布置

Fig.2 Layout of the WWTP after implementation

表2列举了华北地区其他污水厂^[10-13]的占地情况。从表2可以看出,与泥膜复合MBBR、MBR、BAF

工艺相比,BFM不仅占地省,而且出水标准高,极具应用价值。

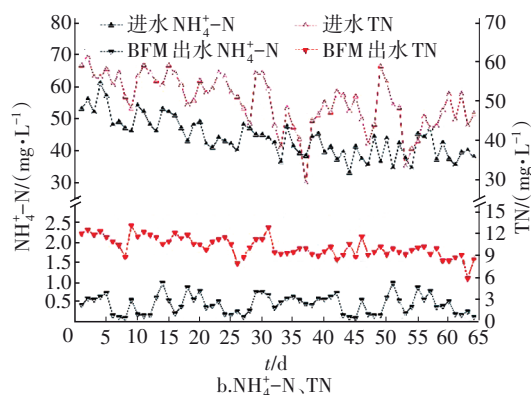
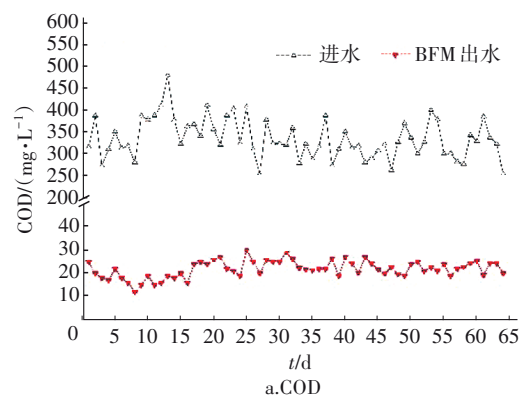
表2 华北地区污水厂占地指标

Tab.2 Land occupation indexes of WWTPs in north China

项目名称	处理规模/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	生化工艺	占地/(m ² · m ⁻³ ·d)	出水标准
A污水厂	10	泥膜复合 MBBR	1.300	一级A
B污水厂	5	多级AO	1.200	一级A
C污水厂	12	泥膜复合 MBBR	0.583	一级A
D污水厂	4	MBR	0.328	准V类
E污水厂	18	泥膜复合 MBBR	0.405	一级A
F污水厂	14	BAF	0.314	一级A
本新建 BFM项目	2	BFM	0.215	准V类

4 项目实施效果

经过20 d调试,新建项目出水实现了稳定达标。系统对COD、NH₄⁺-N、TN、TP、SS的去除效果如图3所示,进、出水取样点分别为细格栅出水和BFM工艺出水。



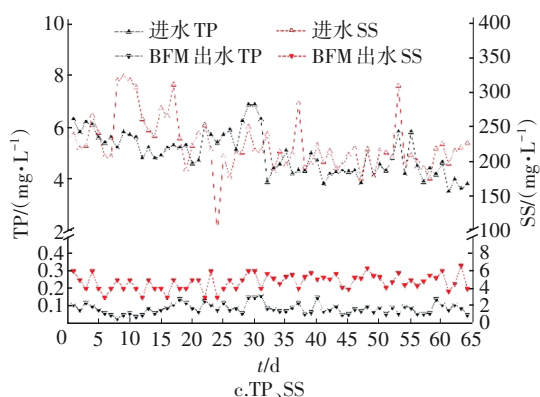


图3 BFM工艺对主要污染物的处理效果

Fig.3 Treatment effect of BFM process on main pollutants

从图3可以看出,实际进水水质波动较大,峰值基本能够接近设计值。在系统进水COD、氨氮、TN、TP、SS分别为 (336.17 ± 44.90) 、 (43.95 ± 5.97) 、 (49.77 ± 6.70) 、 (4.97 ± 0.82) 、 (225.15 ± 40.00) mg/L的情况下,经过BFM工艺处理后,出水COD、氨氮、TN、TP、SS分别为 (21.86 ± 3.26) 、 (0.44 ± 0.24) 、 (10.19 ± 1.37) 、 (0.09 ± 0.03) 、 (4.77 ± 0.89) mg/L,出水水质稳定且优于地表水准V类标准,BFM工艺系统具备良好的脱氮除磷及抗冲击性能。

表3汇总了沿程各工艺断面的检测数据。

表3 BFM工艺系统沿程断面检测数据

Tab.3 Cross-section inspection along the BFM system

项目	总COD	溶解性COD	氨氮	TN	SS	TP	溶解性TP
样品类型	混合液	过滤液	过滤液	过滤液	混合液	混合液	过滤液
细格栅出水	349.37	219.20	41.08	49.33	211.05	4.40	3.13
初沉池出水	246.84	203.93	40.89	45.76	110.55	3.91	3.12
B段出水	189.45	24.48	0.48	10.79	161.71	3.89	2.59
M段出水	22.67	18.18	0.45	10.67	5.10	0.08	0.004

从表3可以看出,B段承接了全部的硝化、脱氮,以及大部分有机物和少量TP的去除。经过B段的处理,对氨氮和TN的去除率分别达到98.8%和76.4%,出水氨氮和TN分别降至0.48 mg/L和10.79 mg/L,实现了达标。M段的主要功能是去除TP以及SS,包括以SS和胶体形式存在的有机物的去除。经过M段的处理,对SS和TP的去除率分别达到97.6%和98.2%,出水浓度分别降至5.10 mg/L和0.08 mg/L,且出水COD进一步降低,实现了稳定达标。整体上经过BFM工艺处理后,C、N、P均实现

了优于排放标准的运行效果,故实际深度处理间歇运行即可。

该项目F段采用智水优控控制系统。目前通过自控运行,已实现了26%的节能降耗。

本新建项目总投资8 498.76万元,包含勘察、设计、施工、设备等费用;经营成本为0.98元/m³。

5 结论

华北某新建处理规模 2×10^4 m³/d污水处理设施,以BFM为核心工艺,同时采用装配式模块化设计,最终80 d完成了工程实施,20 d完成了通水达标,解决了项目面临的占地受限、进水水质复杂(含工业废水)、出水水质要求高(需达到地表水准V类标准)、需在4个月内通水达标等难题。项目实施后占地仅为2 150 m²/(10⁴ m³·d⁻¹)。沿程断面测定表明,B段承接了全部的硝化、脱氮,以及大部分有机物和少量的TP去除,M段的主要功能是去除TP以及SS,包括以SS和胶体形式存在的有机物的去除。经过BFM工艺处理后,出水COD、氨氮、TN、TP、SS分别降至 (21.86 ± 3.26) 、 (0.44 ± 0.24) 、 (10.19 ± 1.37) 、 (0.09 ± 0.03) 、 (4.77 ± 0.89) mg/L,出水水质稳定达到地表水准V类标准。当BFM出水COD>30 mg/L时开启臭氧氧化装置。智水优控信息控制平台的加载,提高了污水厂的综合运营管理水平,实现了26%的节能降耗。本项目经营成本为0.98元/m³。BFM工艺具有稳定、集约、经济、快速、智能的优势,解决了污水厂面临的用地紧张、运行不稳定、建设周期长等难题,适用于对占地、建设周期敏感的污水处理设施建设,如全地下污水厂建设、无二沉池类污水厂连续流改造、污水厂原厂区大规模提量、黑臭水体治理(含河道旁位治理)、微污染水治理、工业废水处理、应急污水处理等。

参考文献:

- [1] QU J H, WANG H C, WANG K J, *et al.* Municipal wastewater treatment in China: development history and future perspectives [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2019, 13(6):1-7.
- [2] 刘强,王泰,沈淳,等. MBBR工艺用于污水厂提标改造的低温运行效果[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(13): 7-13.
- LIU Qiang, WANG Tai, SHEN Bo, *et al.* Operation effect of MBBR applied in upgrading and reconstruction

- of a wastewater treatment plant in Tianjin at low temperature[J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(13):7-13 (in Chinese).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] 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*, 2019, 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*, 2019, 39(7): 24-29, 34 (in Chinese).
- [7] 刘妍,余军,杨忠启,等. 微污染水处理厂纯膜 MBBR 工艺改造工程设计[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(6): 107-112.
- LIU Yan, YU Jun, YANG Zhongqi, *et al.* Design of pure MBBR process retrofitting project for a micro-polluted water treatment plant[J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(6):107-112(in Chinese).
- [8] 刘妍,滕一杰,周家中,等. 纯膜 MBBR 用于南方某大型水质净化厂改造效果分析[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(1):1-8.
- LIU Yan, TENG Yijie, ZHOU Jiazhong, *et al.* Operation effect of pure MBBR process used in a large-scale water purification plant in south China [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(1): 1-8 (in Chinese).
- [9] 卢立念,韩文杰,吴迪,等. 基于磁加载沉淀的超效分离工艺的应用[J]. *市政技术*, 2019, 37(6):209-213.
- LU Linian, HAN Wenjie, WU Di, *et al.* Application of super-efficiency separation technology based on magnetic loading precipitation [J]. *Municipal Engineering Technology*, 2019, 37(6): 209-213 (in Chinese).
- [10] 李国金,李霞,王继苗,等. 青岛城阳某污水处理厂多级 AO 工艺的工程应用[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(8):40-44.
- LI Guojin, LI Xia, WANG Jimiao, *et al.* Project application of multi-stage A/O process in a wastewater treatment plant in Chengyang, Qingdao [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(8):40-44(in Chinese).
- [11] 路晖,辛涛,吴迪,等. MBBR 工艺在污水处理厂提量增效中的应用[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(4): 100-105.
- LU Hui, XIN Tao, WU Di, *et al.* Application of MBBR in increasing capacity and improving efficiency of a wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(4):100-105(in Chinese).
- [12] 孟涛,于小强,宋永健. 青岛某全地下 MBR 污水处理厂的设计[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(12):96-100.
- MENG Tao, YU Xiaoqiang, SONG Yongjian. Design of an underground MBR wastewater treatment plant in Qingdao [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(12):96-100(in Chinese).
- [13] 曹卫峰,王海波,赵鹏,等. 全地下污水厂特色结构布置及经济性分析[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(10): 63-65.
- CAO Weifeng, WANG Haibo, ZHAO Peng, *et al.* Characteristic structure layout and economic analysis of fully underground wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(10): 63-65 (in Chinese).

作者简介:周家中(1990—),男,河北张家口人,硕士,正高级工程师,主要从事水处理强化脱氮除磷技术研究工作。

E-mail:zhoujiazhong@qdspr.com

收稿日期:2022-01-15

修回日期:2022-03-31

(编辑:衣春敏)