

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.20.002

BFM技术规程解读与工程实践

周家中^{1,2}, 孙 逊³, 吴 迪^{1,2}, 韩文杰^{1,2}, 张晶晶², 杨忠启^{1,2},
薛 磊⁴

(1. 青岛思普润水处理股份有限公司 生物膜研究院, 山东 青岛 266510; 2. 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; 3. 济南市市政工程设计研究院<集团>有限责任公司, 山东 济南 250003;
4. 青岛思普润智能系统有限责任公司, 山东 青岛 266510)

摘 要: 在总结大量工程案例的基础上,2022年10月山东省环境保护产业协会发布《水处理生物膜速净工艺(BFM)技术规程》(T/SDEPI 031—2022)。该规程是我国污水处理领域首个BFM团体标准,适用于采用BFM工艺处理市政污水、工业废水、农村污水、微污染水。为促进相关单位对该规程的准确理解与执行,从规程制定背景出发,回顾了BFM工艺的发展历程,介绍了规程编制的必要性、适用范围,梳理了BFM工艺设计、运行维护等方面的特殊性以及与其他标准内容的差异性,以期作为BFM工艺在不同场景下的设计、运维等提供参考。

关键词: BFM; MBBR; 超效分离; 标准; 表面负荷; 节地; 生化效率

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)20-0010-07

Interpretation and Engineering Practice of BFM Technical Specification

ZHOU Jia-zhong^{1,2}, SUN Xun³, WU Di^{1,2}, HAN Wen-jie^{1,2}, ZHANG Jing-jing²,
YANG Zhong-qi^{1,2}, XUE Lei⁴

(1. *Biofilm Research Institute, Qingdao SPRING Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266510, China*; 2. *Qingdao Key Laboratory of Green and Low Carbon Biofilm and Water Environment Restoration, Qingdao SPRING Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266510, China*; 3. *Jinan Municipal Engineering Design & Research Institute<Group> Co. Ltd., Jinan 250003, China*;
4. *Qingdao SPRING Intelligent System Co. Ltd., Qingdao 266510, China*)

Abstract: On the basis of summarizing a large number of engineering cases, the *Technical Specification for Water Treatment of Biofilm & Magnetic-separation Process (BFM) (T/SDEPI 031-2022)* was released by Shandong Association of Environmental Protection Industry in October, 2022. This specification is the first group standard in the field of sewage treatment for BFM process in China. The specification is suitable for using BFM process to treat municipal wastewater, industrial wastewater, rural wastewater, and slightly polluted water. In order to promote the accurate understanding and implementation of this specification by relevant units, the development process of BFM process was reviewed from the background of specification formulation. This document introduces the necessity and

基金项目: 泰山产业领军人才工程专项(tsex202211036); 青岛西海岸新区科技攻关“揭榜制”专项(2024-4)

通信作者: 吴迪 E-mail: hitwudi@126.com

scope of application of the specification, and sorts out the unique aspects of BFM process design, operation and maintenance, as well as the differences with other standard content. It also provides useful guidance for the design, operation, and maintenance of BFM process in different scenarios.

Key words: BFM; MBBR; super-efficient separation; standard; surface load; land saving; biochemical efficiency

1 标准编制背景

2008年,无锡芦村污水厂进行一级A提标改造,通过向活性污泥系统投加悬浮载体,形成活性污泥-生物膜复合系统(泥膜复合MBBR),原位提升活性污泥的生化效率,在无新增生化用地条件下,出水氨氮、TN浓度稳定达到一级A标准^[1]。截至2021年,MBBR工艺应用规模超过 $2\,500\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,其中市政污水领域应用规模超过 $2\,000\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,占全国市政污水处理总量的10%,有效解决了污水厂提标改造面临的缺地问题。2021年,MBBR作为应用广泛且运行可靠的工艺被编入《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)。对于泥膜复合MBBR系统而言,一方面泥和膜之间的竞争限制了生物膜高效作用的发挥^[2],另一方面以活性污泥法为核心的生化工艺流程须配套二沉池,而二沉池的表面负荷又限制了生化系统原位提量的能力。

2015年,国内开展了纯膜MBBR用于市政污水深度脱氮的研究,10℃下反硝化负荷可达 $0.45\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,出水 NO_x^--N 可低至 5 mg/L 以下,实现了污水深度脱氮,满足TN高排放要求^[3]。2018年,在 $30\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的污水处理项目中,纯膜MBBR工艺实现了出水氨氮 $<0.5\text{ mg/L}$ 的优异效果,出水水质满足地表水Ⅱ类标准^[4]。2019年,纯膜MBBR工艺应用于高氨氮工业废水处理,在进水氨氮高达 950 mg/L 的情况下,出水氨氮达到低于 5 mg/L 的要求,同时纯膜MBBR系统具备较强的抗冲击能力和快速恢复能力,保障了出水水质稳定达标^[5]。同年,基于市政污水处理,通过耦合改良磁混凝沉淀工艺(超效分离技术),解决了纯膜MBBR工艺的固液分离问题,建立了纯膜MBBR耦合超效分离的BFM工艺^[6]。2020年和2021年,BFM技术分别在南方和北方建立了示范工程,实现了污水处理的集约化,吨水占地可较传统工艺节约70%以上,同时满足高排放标准需求^[7-8]。截至2024年底,BFM工艺已完成近 $400\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的处理规模,用于处理市政污水、工业废水、微

污染水等,取得了良好的实践效果。

针对MBBR工艺和磁混凝沉淀工艺,《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)和《磁介质混凝沉淀污水处理技术规程》(T/CECS 636—2019)已有相关规定。但前者主要针对泥膜复合MBBR,且未具体规定应用场景;后者主要针对市政污水的深度处理过程,实现二沉池出水的深度除磷,但难以应用于纯膜MBBR脱落生物膜的膜水分离过程。对于BFM工艺,一方面纯膜MBBR与泥膜复合MBBR相比,其工艺本质、工艺流程、设计参数均有较大差异;另一方面超效分离技术与传统磁混凝沉淀技术所承受的进水SS浓度及污泥性状亦存在较大不同,故现有的各类标准均难以有效覆盖BFM工艺。《水处理生物膜速净工艺(BFM)技术规程》(T/SDEPI 031—2022,简称《BFM技术规程》)的制定填补了我国纯膜MBBR技术设计标准的空白,通过系统性阐述纯膜MBBR以及超效分离技术的设计理念、参数选择影响因素及定量参数,为相关工艺进一步的工程应用奠定了基础。

2 BFM工艺特点

2.1 适用范围广

相比于活性污泥法,生物膜法应用领域更加广泛。BFM工艺适用于市政污水、工业废水、农村污水处理工程的新(改、扩)建,也适用于黑臭水体、初期雨水等的处理,且均有示范工程,获得了良好的处理效果。对于低温水(3℃)或高盐废水($40\,000\text{ mgTDS/L}$),BFM仍具有良好的处理效果。例如,Lillehammer污水处理厂在3.5℃的低温条件下出水各项指标优于国内大部分地区的地表准Ⅳ类水要求^[9]。国内西藏地区应用MBBR同样显示了较强的抗低温性能^[10]。BFM工艺具有悬浮载体生物膜专性培养、筛选、富集的特性,提高了微生物的环境适应性与抗逆性,故应用广泛。

2.2 预处理简便

采用BFM工艺处理市政污水时,预处理细格栅

栅距应不大于3 mm。同时, BFM进水SS宜小于300 mg/L,除此则无其他严格的预处理要求。

2.3 施工周期短

区别于传统污水处理厂建设方式, BFM工艺设施可采用装配式施工方式,施工周期短,降低了污水厂建设期的碳排放量。装配式BFM处理设施施工时间如表1所示。BFM工艺采用装配式的优势在于:①工艺流程短,工艺构筑物少;②核心工艺高效,工艺构筑物规模小。

表1 装配式BFM污水处理设施实施时间

Tab.1 Implementation time of prefabricated BFM sewage treatment facilities

处理规模/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	实施时间/d
≤1.0	20~60
1.0~5.0	30~70
5.0~10.0	40~90
>10.0	50~100

2.4 占地省

BFM工艺能够提升生化处理效率,直接降低污水处理设施占地面积。BFM工艺与活性污泥系统占地指标对比如表2所示。

表2 BFM与活性污泥系统占地指标对比

Tab.2 Comparison of land occupation index between BFM process and activated sludge process

处理规模/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	BFM工艺占地 ^① / (m ² ·d·m ⁻³)	活性污泥工艺占地/ (m ² ·d·m ⁻³)
≤1.0	0.20~0.45	0.75~1.20 ^②
1.0~5.0	0.15~0.40	1.55~1.95 ^③
5.0~10.0	0.10~0.35	1.30~1.55 ^③
10.0~20.0		1.05~1.30 ^③
20.0~50.0		0.85~1.05 ^③

注: ①《BFM技术规程》;②《小城镇污水处理工程建设标准》(建标148—2010);③《城市污水处理工程项目建设标准》(建标198—2022)。

由表2可以看出, BFM工艺占地远低于活性污泥系统,吨水节约70%以上的用地。节地意味着水力停留时间缩短,对控制精准度与灵敏度要求较高,这也是BFM工艺需要配备智能控制系统的原因之一。对于新建项目,采用BFM工艺可大幅降低征地成本;对于改建项目,采用BFM工艺可以实现原址处理水量的翻倍提升,提高土地利用效率。在国家积极推动因地制宜探索污水处理厂下沉、地上地下空间综合开发的背景下,集约型污水处理工艺优

势突出且潜力巨大。

3 BFM工艺设计与典型案例

3.1 纯膜MBBR工艺设计

对于活性污泥法,一般根据污泥负荷或污泥龄来计算生化池池容。对于纯膜MBBR,以表面污染物去除负荷作为设计参数已被行业公认且熟知^[11]。影响生化池池容的两个关键参数分别是悬浮载体填充率和有效比表面积,其相关关系如下:

$$V = \frac{Q(C_{\text{inf}} - C_{\text{eff}})}{1000\varphi SL_s} \quad (1)$$

式中: V 为生物池有效池容, m³; φ 为填充率; S 为悬浮载体的有效比表面积, m²/m³; L_s 为表面污染物去除负荷, g/(m²·d); Q 为设计处理水量, m³/d; C_{inf} 为进水污染物浓度, mg/L; C_{eff} 为出水污染物浓度, mg/L。

从式(1)可以看出,对于纯膜MBBR,在表面污染物去除负荷确定的情况下,提高填充率和悬浮载体的有效比表面积均可以提升系统的容积负荷,实现生物池有效池容的降低。对于悬浮载体填充率,泥膜复合MBBR填充率根据提标、扩容的量而定,一般为20%~40%;而纯膜MBBR,填充率一般为40%~67%,填充率更高。根据工程经验,载体填充率应低于67%,以避免悬浮载体的流化受限。有效比表面积是悬浮载体的核心参数,随着MBBR工艺的应用发展,载体有效比表面积已由最初的350 m²/m³提升至800 m²/m³,相同条件下容积处理负荷提升了1.3倍。在系统悬浮载体总有效表面积需求一致的情况下,提高有效比表面积会降低载体的投加体积,降低填充率。因此,持续提高悬浮载体的有效比表面积是MBBR工艺未来的发展方向之一,也是纯膜MBBR工艺实现持续升级的关键。但是,在实现有效比表面积提升的同时,也需要关注壁厚与空隙率两项指标。

根据进水水质与脱氮要求,纯膜MBBR工艺可以设置成不同的处理流程,如AO、多级AO、AOA等,由于生物除磷需要厌氧-好氧交替及排泥来实现,而纯膜MBBR不富集活性污泥,不具备传统生物除磷条件,因此不设置厌氧区。区别于活性污泥沿程流动的状态,纯膜MBBR中悬浮载体生物膜属于专性富集培养。因悬浮载体所处环境不同,故不同功能区生物膜的优势功能菌类型、菌群丰度等均不同^[12]。《BFM技术规程》与GB 50014—2021中给出的表面负荷如表3所示。《BFM技术规程》给出了不同

应用场景、不同去除要求时的脱碳、硝化、脱氮表面污染物去除负荷,与GB 50014—2021相比,内容更细致、更丰富。

表3 《BFM技术规程》与GB 50014—2021给定的表面负荷

Tab.3 Surface load specified in the BFM technical specification and GB 50014—2021

项目	《BFM技术规程》	GB 50014—2021
水温/°C	12	20
BOD ₅ 表面负荷/(gBOD ₅ ·m ⁻² ·d ⁻¹)	BOD ₅ 去除率<80%:5~20;BOD ₅ 去除率≥80%:1~12;微污染水或含生物抑制性污水:0.5~4.0	5~15
硝化表面负荷/(gNH ₄ ⁺ -N·m ⁻² ·d ⁻¹)	氨氮去除率<85%:0.12~1.20;氨氮去除率≥85%:0.10~0.85;微污染水或含生物抑制性污水:0.01~0.25	0.5~2.0
反硝化表面负荷/(gNO _x ⁻ -N·m ⁻² ·d ⁻¹)	一般反硝化区 ^① :0.05~0.80,外投碳源反硝化区:0.15~2.00	
注: ^① 主要利用原水碳源进行反硝化脱氮。		

3.2 纯膜MBBR流化要求

流化对工程中MBBR基本原理的展现效果具有重要影响。在流化保障方面,纯膜MBBR与泥膜复合MBBR虽然设备相同(均基于曝气以及搅拌),但是设计上存在较大不同。一方面,泥膜复合MBBR悬浮载体多投加于好氧区,而纯膜MBBR既要投加在好氧区,也要投加在缺氧区,缺氧区对流化要求更高;另一方面,纯膜MBBR的填充率更高,对流化要求也更高。同时,在保障悬浮载体流化的基础上,需兼顾运行能耗与使用寿命。

对于好氧区,流化动力以底部曝气为核心。泥膜复合MBBR多以“微孔曝气+穿孔曝气”相结合方式进行曝气,穿孔曝气主要敷设于拦网处,用于保障拦网的正常过水;对于纯膜MBBR,《BFM技术规程》建议只采用穿孔管曝气方式。从应用效果考虑,穿孔曝气的气速更高,动力更强;同时已有工程研究表明,采用“高填充率+穿孔管”曝气方式,其氧利用率与微孔曝气相当^[13],其主要原因在于大量悬浮载体与气泡相碰撞不仅将大气泡变成小气泡,而且延长了气泡逸出时间,增加了气液接触时间,提高了氧利用率。从使用寿命角度考虑,穿孔管曝气的使用寿命更长,可避免运行中途更换维修曝气设施。对于缺氧区,流化动力以搅拌器为核心。国外缺氧区纯膜MBBR应用案例较多,但搅拌器的功率

密度多在30 W/m³以上,远高于活性污泥法的3~5 W/m³。此外,搅拌器的高速旋转桨叶与悬浮载体不断碰撞会加速两者的磨损,降低使用寿命。《BFM技术规程》提出采用大桨叶、低转速的专用搅拌器,通过水力模拟手段,实现了搅拌器安装位置、桨叶形式等方面的优化,搅拌器的功率密度已降至7~15 W/m³,较国外搅拌器降低了50%以上。虽然BFM工艺的搅拌器功率密度仍高于活性污泥法,但生物膜活性高,池容小,最终装机功率与活性污泥法基本持平。

在流化池型上,纯膜MBBR反应区水平流速不宜大于65 m/h,采用方形池体时,布水边与非布水边的比宜为1:5~8:1。这与GB 50014—2021的规定(流速为35 m/h以及长宽比宜为2:1~4:1)差异较大。悬浮载体的运动受到流化动力以及水平流速的双重影响,水平流速越大,对流化动力的要求就越高。纯膜MBBR由于填充率更高,在流化装备上已经进行了改良,其流化动能较一般的泥膜复合MBBR更高,因此所允许的水平流速更大。在池型比例上,《BFM技术规程》从布水方式以及水平流速两方面考虑,在设计上更具实用性,比例范围也比GB 50014—2021的要求更宽泛。

3.3 超效分离技术设计及装备

针对纯膜MBBR脱落生物膜的固液分离问题,通过生产性验证,对比了二沉池、传统磁混凝沉淀、改良磁混凝(超效分离)、气浮等固液分离方式,发现只有超效分离技术能够实现一段式固液分离,不仅弥补了纯膜MBBR固液分离以及除磷方面的不足,而且能够确保磁粉的回收率>99.5%。与传统的磁混凝沉淀相比,超效分离技术的设计难点在于:①进水SS浓度较高,传统的磁混凝沉淀进水SS一般为20~40 mg/L,而超效分离技术的进水SS可达200~400 mg/L,峰值可至2 000 mg/L,固体通量负荷大;②脱落生物膜EPS含量高,易聚集,易裹挟磁粉,导致磁粉回收率低,药剂损耗高。

在设计和核心装备方面,《BFM技术规程》与现行磁混凝沉淀相关标准《磁介质混凝沉淀污水处理技术规程》(T/CECS 636—2019)、《磁混凝沉淀水处理装备》(T/CAMIE 13—2021)存在一定的差异,具体如表4所示。可以看出,《BFM技术规程》中设计水力负荷较T/CECS 636—2019偏低,主要在于其进水SS浓度较高。同时,《BFM技术规程》中磁粉粒径

范围更广。研究^[14]表明,磁粉随着水体搅拌作用做离心运动,由于磁粉密度较水体大,运动路径后方会形成许多微小涡旋,而微小漩涡的离心效应产生的紊流动力在絮凝反应中起到关键作用。不同粒径的磁粉与混凝过程生长尺度不一的絮体发生碰撞后会产生适中的离心惯性力,使得微粒间的有效碰撞几率增大,从而显著提升处理效果。磁分离机是利用磁力实现磁粉回收的关键设备,《BFM技术规程》要求磁感应强度高于700 mT,目的是满足高磁粉回收率的要求,实际应用时磁粉回收率可达99.5%以上。

表4 《BFM技术规程》中超效分离技术与其他磁混凝沉淀标准的比较

Tab.4 Comparison between the specification and other magnetic coagulation sedimentation standards

项目	《BFM技术规程》	T/CECS 636—2019	T/CAMIE 13—2021
设计水力负荷/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	10~25	15~40	
磁粉粒径/目	100~600	30~180	80~500
磁性物质含量/%	≥96	≥85	≥85
磁分离机磁感应强度/mT	≥700	≥300	≥300

3.4 BFM与厌氧氨氧化

实现厌氧氨氧化的工程推广,对于实现污水处理节能减排具有重要意义。生物膜以其特有的“菌种固定化”作用,可以有效解决限制 Anammox 工程化的菌种富集难、启动难、运行难等问题。杨忠启等^[15]采用 CANON-MBBR 系统处理实际污泥厌氧消化脱水液,并实现长期的稳定运行,其厌氧氨氧化菌的相对丰度高达 30.2%。狄斐等^[16]采用泥膜复合 Anammox 工艺开展主流三级脱氮研究,结果表明厌氧氨氧化菌在生物膜和污泥絮体中的相对丰度分别为 0.77%~2.19% 和 0.01%~1.49%,生物膜对厌氧氨氧化菌的富集能力更强。基于 BFM 的主流厌氧氨氧化过程已在烟台某项目中实现稳定运行,其厌氧氨氧化菌 *Candidatus Brocadia* 的相对丰度超过 1%,主流 Anammox 脱氮占比达到 25% 以上。智水优控系统实现了 BFM 工艺运行参数的精确控制,是 BFM 系统发生稳定 Anammox 的因素之一,可保障工艺运行安全,解决了 Anammox 工艺运维难题。

3.5 BFM 典型案例

BFM 应用典型案例如表 5 所示。

表5 BFM工艺应用典型案例

Tab.5 Typical cases of BFM process application

项目	青岛某污水处理项目	山东某制药废水处理项目	潍坊某市政污水尾水处理项目	安徽某生态治理项目
应用场景	市政污水	工业废水	市政尾水	黑臭水体
建设类型	新建	改造	新建	新建
处理规模/($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	2	0.1	6	10
出水标准	准V类	一级A	准IV类	准III类
纯膜 MBBR 工艺流程	AOAO	三级O	OAO	两级O
好氧区填料填充率/%	60	41	40	45
缺氧区填料填充率/%	55		35	
生化池 HRT/h	10	44.4	2.9	3
超效分离水力负荷/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	11.57		15.12	12.33

青岛某污水处理项目处理具有典型北方水质特点的中高浓度市政污水,设计进水 TN 为 72 mg/L,采用装配式搪瓷罐体拼接形式,80 d 完成建设,吨水占地 0.215 $\text{m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$,与活性污泥系统相比,吨水节地 74%。纯膜 MBBR 段采用 AOAO 工艺,控制出水 TN 为 10~12 mg/L,其他主要出水水质指标优于地表 IV 类水,出水作为景观用水补充河道。

山东某制药废水处理项目进水氨氮高达 950 mg/L,改造目的是确保出水氨氮达到一级 A 标准。纯膜 MBBR 采用三级好氧工艺流程,第一级好氧具备较强的耐 FA 抑制性能,目的是削减氨氮负荷,此后氨氮沿程逐步降低,最后一级好氧确保氨氮稳定低于 5 mg/L。

潍坊某市政污水尾水处理项目中 BFM 工艺用于深度处理段,以保障总出水由一级 A 提升至地表准 IV 类水;纯膜 MBBR 段采用 OAO 工艺,可同时削减氨氮和 TN。该项目采用 BFM 工艺实现了对传统反硝化滤池的替代,为市政污水处理厂尾水的进一步处理提供了新的工艺选择。

安徽某生态治理项目通过建立 BFM 污水处理系统实现河道水质的改善,出水水质优于地表水准 III 类标准,作为稳定的高标准活水源补充城市内河,7 d 即可将城市内河的水置换一遍,有效解决了水体黑臭问题,同时满足河道断面控制的稳定达标,生态效益和环境效益显著。

4 BFM 工艺运行维护

BFM 工艺运行维护的重点是纯膜 MBBR 段。

值得注意的是,纯膜MBBR段并非一定投加新的悬浮载体,而是可以根据调试紧迫性、调试时间选择直接投加已挂膜悬浮载体,从而缩短挂膜时间,加速污水处理达标。BFM工艺运行过程中须重点关注悬浮载体的流化及拦网前后的液位差。如果拦网前后液位差超过10 cm,应及时进行调整,首先关闭内回流,调节筛网曝气量,待流化情况改善后再逐步开启内回流。

BFM工艺剩余污泥包括生化污泥和化学污泥,表观产率系数为0.1~0.6 kgSS/kgBOD₅,低于活性污泥(0.3~0.8 kgVSS/kgBOD₅)。BFM工艺剩余污泥量较少的原因主要是生物膜中微生物复杂多样,食物链长,同时其有机物代谢多转化为能量。

5 BFM工艺效益分析

BFM工艺具有显著的社会效益、环境效益和经济效益。在社会效益方面,BFM工艺通过提升生化处理效率,实现用地集约,是城市污水处理用地从增量扩张到存量挖潜关键转变的核心,推动了城市精细化更新建设。在环境效益方面,BFM工艺适用范围广泛,既可以用于处理市政污水、工业废水、农村污水,还可以用于黑臭水体、饮用水原水等微污染水的治理,能够实现高标准排放,改善水环境,实现城市水污染综合治理。在经济效益方面,BFM工艺实现了协同减污降碳,是集约型低碳污水处理工艺。

6 结语

《水处理生物膜速净工艺(BFM)技术规程》(T/SDEPI 031—2022)是我国首部基于纯膜MBBR的高效率污水生物处理设计标准,对推动污水处理实现集约化、低碳化具有重要意义。BFM工艺适用范围广且出水水质好,污水处理占地较传统工艺节约70%以上,为城市精细化更新建设、实现“双碳”目标提供了一种新的污水处理工艺选择。该标准的制定、颁布和实施填补了我国纯膜MBBR技术领域的空白,推动了污水处理实现技术集约、用地集约、成本集约。今后需进一步做好该标准的宣贯和培训,加强落地推广工作,充分发挥标准的规范和引领作用。

参考文献:

[1] 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).

[2] 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).

[3] 郑志佳,吴迪,张晶晶,等. 两级后置纯膜MBBR的反硝化性能研究[J]. 环境工程, 2019, 37(9):68-73. ZHENG Zhijia, WU Di, ZHANG Jingjing, *et al.* Denitrification performance of a two-stage post-MBBR [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(9): 68-73 (in Chinese).

[4] 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).

[5] 肖宁,唐国卿,周家中,等. 纯膜MBBR+A/O双泥系统用于制药废水脱氮工程[J]. 中国给水排水, 2022, 38(14):93-98.

XIAO Ning, TANG Guoqing, ZHOU Jiazhong, *et al.* Application of pure MBBR and A/O double sludge system in pharmaceutical wastewater denitrification project [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(14): 93-98 (in Chinese).

[6] 陈祥瑞,杜强强,韩文杰,等. 基于纯膜MBBR的紧凑型污水处理BFM中试基质转化特性[J]. 环境工程学报, 2021, 15(11): 3741-3756.

CHEN Xiangrui, DU Qiangqiang, HAN Wenjie, *et al.* Pilot test on the treatment of medium-concentration domestic sewage in northern China by BFM process based on pure MBBR [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(11): 3741-3756 (in Chinese).

[7] 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 Jiazong, 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).
- [8] 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]. 中国给水排水, 2023, 39(18): 126-132.
- ZHOU Jiazong, HAN Wenjie, SONG Pingzhou, *et al.* BFM process design and operation analysis of an Intensive WWTP in North China [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(18): 126-132 (in Chinese).
- [9] 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 Jiazong, 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).
- [10] 李志伟, 赵治东, 祁学玲, 等. MBBR在西藏某污水厂低温环境的应用效果分析[J]. 工业水处理, 2023, 43(8): 185-192.
- LI Zhiwei, ZHAO Zhidong, QI Xueling, *et al.* Application analysis of MBBR in a wastewater treatment plant of Tibet with low temperature [J]. *Industrial Water Treatment*, 2023, 43(8): 185-192 (in Chinese).
- [11] 张亚莉, 霍克影, 周坤, 等. 悬浮载体有效比表面积的生物法测定研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(3): 29-34.
- ZHANG Yali, HUO Keying, ZHOU Kun, *et al.* Determination of effective specific surface area of suspended carrier by bioassay method [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(3): 29-34 (in Chinese).
- [12] 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).
- [13] 韩文杰, 周家中, 刘妍, 等. 实际氧转移效率测定方法探讨及工程验证[J]. 给水排水, 2022, 48(2): 25-32.
- HAN Wenjie, ZHOU Jiazong, LIU Yan, *et al.* Discussion on the measurement method of actual oxygen transfer efficiency and engineering verification [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48(2): 25-32 (in Chinese).
- [14] 王少康, 程方, 郭兴芳, 等. 磁粉在磁加载混凝深度除磷中的作用机理分析[J]. 环境工程学报, 2019, 13(2): 302-309.
- WANG Shaokang, CHENG Fang, GUO Xingfang, *et al.* Mechanism analysis of magnetic powder function in deep phosphorus removal by magnetic coagulation [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13(2): 302-309 (in Chinese).
- [15] 杨忠启, 周家中, 韩文杰, 等. 基于纯膜MBBR的CANON工艺稳定运行及抗冲击性分析[J]. 环境工程, 2021, 39(8): 15-24, 33.
- YANG Zhongqi, ZHOU Jiazong, HAN Wenjie, *et al.* Stable operation and impact resistance of CANON process based on pure MBBR [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(8): 15-24, 33 (in Chinese).
- [16] 狄斐, 隋倩雯, 陈彦霖, 等. 基于厌氧氨氧化的城镇生活污水深度脱氮工艺研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(1): 83-91.
- DI Fei, SUI Qianwen, CHEN Yanlin, *et al.* Advanced nitrogen removal based on Anammox process treating municipal wastewater [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(1): 83-91 (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,主要从事生物脱氮技术开发与应用工作。

E-mail:zhoujiazongby@163.com

收稿日期:2023-04-13

修回日期:2025-01-22

(编辑:丁彩娟)