

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.16.017

# MBBR和MBR工艺的污水处理效果与碳排放分析

黄青<sup>1</sup>, 杨平<sup>1</sup>, 杨忠启<sup>2,3</sup>, 马潇然<sup>4</sup>, 周家中<sup>2,3</sup>, 吴迪<sup>2,3</sup>

(1. 青岛首创瑞海水务有限公司, 山东 青岛 266031; 2. 青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266510; 3. 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; 4. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082)

**摘要:** 北方某污水处理厂设计处理规模为 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,出水要求达到地表水准IV类标准,分别采用泥膜复合MBBR(S-MBBR)和MBR工艺进行提标改造和新建。从工艺流程、运行效果、药耗能耗、维护控制以及低碳运行等方面分析了两种工艺的实际应用情况。结果表明,两种工艺处理能力相当,均可以稳定达到设计出水标准,S-MBBR抗水量冲击优势更加显著,平均进水负荷率为119%;两种工艺电/药费用分别为0.469、0.626元/ $\text{m}^3$ ,MBR运行费用更高,主要体现在膜池的运行维护方面;两种工艺的低碳运行评价等级分别为二级和三级,电耗为主要碳排放贡献源,占比约为55%;S-MBBR需要可靠的设计和支撑,对工艺厂家要求更高;MBR工艺运行费用更高,但也较S-MBBR省地。纯膜MBBR有望在占地上达到与MBR相当水平,且可进一步降低运行费用和碳排放量,但技术难度更高。

**关键词:** MBBR; MBR; 膜污染; 能耗; 碳排放

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)16-0099-06

## Analysis on the Engineering Effect and Carbon Emission of MBBR and MBR Processes for Treating Sewage

HUANG Qing<sup>1</sup>, YANG Ping<sup>1</sup>, YANG Zhong-qi<sup>2,3</sup>, MA Xiao-ran<sup>4</sup>, ZHOU Jia-zhong<sup>2,3</sup>, WU Di<sup>2,3</sup>

(1. Qingdao Capital Ruihai Water Co. Ltd., Qingdao 266031, China; 2. Qingdao SPRING Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266510, China; 3. Qingdao Key Laboratory of Green and Low Carbon Biofilm and Water Environment Restoration, Qingdao SPRING Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266510, China; 4. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100082, China)

**Abstract:** The designed treatment capacity of a wastewater treatment plant (WWTP) in north China is  $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , the effluent reaches level quasi-IV criteria of *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002). The core processes are upgraded and constructed by sludge-biofilm composite MBBR (S-MBBR) and MBR process. The actual application of the two processes is analyzed from the aspects of process flow, operation effect, chemical agent and energy consumption, maintenance control and low-carbon operation. The results show that the treatment capacities of the two processes are

基金项目: 泰山产业领军人才工程专项

通信作者: 杨忠启 E-mail: yangzq20@126.com

equivalent, both can stably reach the designed effluent standard. S-MBBR has more significant advantages in influent load impact resistance, and the average influent load rate is 119%. The chemical agent and electricity costs of the two processes are 0.469 yuan/m<sup>3</sup> and 0.626 yuan/m<sup>3</sup>, respectively, and the MBR operation cost is higher mainly due to the operation and maintenance of the membrane tank. The low carbon operation evaluation grades of the two processes are level II and level III respectively. Electricity consumption is the main carbon emission contributor, accounting for about 55%. S-MBBR needs reliable design and equipment support with higher requirements for process manufacturers, while MBR process has higher operation cost with less footprint. Pure MBBR is expected to reach the same level of footprint as MBR, and further reduce operating cost and carbon emission, but it is more technically difficult.

**Key words:** MBBR; MBR; membrane fouling; energy consumption; carbon emission

2021 年 MBBR 和 MBR 工艺作为应用广泛且运行可靠的工艺被同时纳入《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)。作为典型的集约型污水生化处理工艺,两种工艺提高生化处理能力的方式不同,MBR 可使生化池生物量提升至原来的 2~3 倍,通过提高污泥浓度强化处理能力;MBBR 通过悬浮载体的投加,在提高系统内生物量的同时,微生物部分形态由悬浮态变为附着态,功能菌相对丰度和处理能力得以提升。两种工艺各有特色,在国内市政污水领域的应用体量均已超过 2 000×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,解决了污水处理厂新/改/扩建面临的缺地难题,在集约

型污水处理中发挥了重要作用<sup>[1-2]</sup>。

以北方某污水处理厂为例,分析 MBBR 和 MBR 的工艺特征、运行效果及碳排放情况,以期为行业内工艺选择提供借鉴。

### 1 污水处理厂概况

该项目设计处理水量为 30×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,进、出水水质见表 1,出水执行地表水Ⅳ类标准,并排入接纳河流上游,实现生态补水。一期、二期和三期提标改造均采用泥膜复合 MBBR 工艺(即 S-MBBR),设计水量为 20×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d;四期新建采用 MBR 工艺,设计水量为 10×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d。工艺流程见图 1。

表 1 2021 年北方某污水处理厂进、出水水质

Tab.1 Influent and effluent quality of a sewage treatment plant in north China in 2021 mg·L<sup>-1</sup>

项目	COD	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP	SS
设计进水	900	430	58	80	13	750
设计出水	30	6	1.5(2)	15	0.3	10
实际进水	465.33±195.09	233.45±112.04	32.31±10.28	54.66±15.96	7.44±2.94	401.23±189.27
S-MBBR 出水	17.81±4.65	2.63±0.55	0.47±0.27	10.71±1.93	0.14±0.05	7.59±0.96
MBR 出水	14.65±4.45	2.32±0.49	0.46±0.38	8.65±2.77	0.13±0.11	5.06±1.01

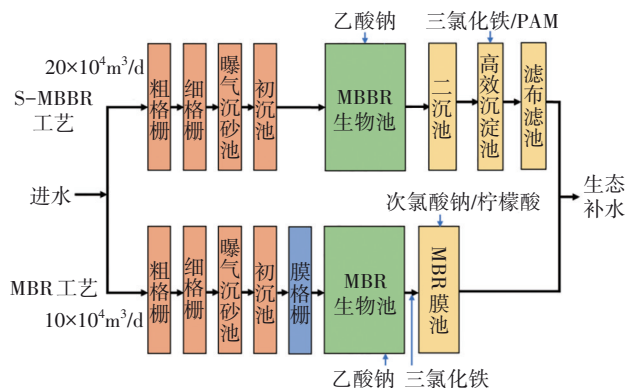


图 1 污水处理工艺流程

Fig.1 Process flow diagram of sewage treatment

MBR 工艺对预处理的要求更高,新增了膜格栅,其设计栅间距为 1 mm,以进一步去除细小毛发及纤维物质等,减少对后端膜组件的污染和损伤;膜池设计污泥浓度为 10 g/L,生化池设计 HRT 为 17 h;MBR 通过膜池实现固液分离,占地较二沉池小,且工艺末端无需再设置深度处理单元。S-MBBR 对预处理无特殊要求;生化段将悬浮载体投加于好氧区,以强化硝化效果,缺氧池未投加悬浮载体,充分发挥活性污泥的反硝化作用,好氧区悬浮载体填充率为 46%,采用 SPR-III 型悬浮载体,有效比表面积> 800 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>,生化池设计 HRT 为 21.6 h;S-MBBR 仍需

二沉池,后端仍采用传统的深度处理实现对SS和TP的深度去除。

对比S-MBBR和MBR工艺流程可知,MBR更加简洁,流程短;S-MBBR能够充分利旧,不改变主体工艺及流程,预处理和深度处理均为提标改造前设施。因S-MBBR为改造部分,改造过程中维持原有的HRT,故HRT偏高;若进一步在缺氧区投加悬浮载体,可进一步降低HRT。两种工艺在生化部分均能大幅降低HRT且相差不多,但固液分离部分MBR工艺优势显著。

## 2 运行效果与分析

选取该污水厂2021年数据分析两种工艺的运行效果。进水样品取自进水泵站,S-MBBR出水样品取自滤布滤池之后,MBR出水样品取自膜池之后。

污水处理厂进水水质波动较大,增加了出水稳定达标的难度,但两种工艺均能实现稳定达标,没有显著性差异。两种工艺实际运行水量负荷率不同,S-MBBR实际运行HRT为18.15h,MBR实际运行HRT为19.54h。从处理效果看,MBR对COD的处理效果更优,较S-MBBR多去除3.2mg/L,而出水BOD<sub>5</sub>效果相当,两种工艺对有机物的去除均较为彻底,MBR更高的污泥浓度有利于对难降解有机物的去除<sup>[3]</sup>。两种工艺均利用活性污泥反硝化进行脱氮,虽然MBR较S-MBBR多去除了2.1mg/L的TN,但由于其碳源投加量更大,所以两系统TN去除效果基本相同。S-MBBR出水NH<sub>3</sub>-N、TN及TP标准差更低,显示出更加稳定的处理效果;MBR较好的膜过滤作用,保障了较低的出水SS浓度。

该污水处理厂生化池冬季水温低至8~11℃,根据批次试验测定,活性污泥硝化负荷为0.018kgNH<sub>3</sub>-N/(kgMLSS·d),悬浮载体生物膜表面硝化负荷为0.371gNH<sub>3</sub>-N/(m<sup>2</sup>·d)。MBR工艺通过提升污泥浓度的方式实现了整体处理性能的提升,而S-MBBR工艺则通过投加悬浮载体形成生物膜的方式,弥补了与MBR的污泥浓度差距。此外,分别取S-MBBR生化池活性污泥、悬浮载体生物膜及MBR生化池活性污泥进行高通量测序分析。MBR活性污泥硝化菌相对丰度为0.6%,S-MBBR活性污泥硝化菌相对丰度为0.64%,而S-MBBR生物膜硝化菌相对丰度达到了12.15%,S-MBBR生物膜能够实现

硝化菌的高效富集<sup>[4]</sup>。

两种工艺在抗水量冲击能力上存在较大差异。图2为2021年两种工艺运行水量负荷率的变化。

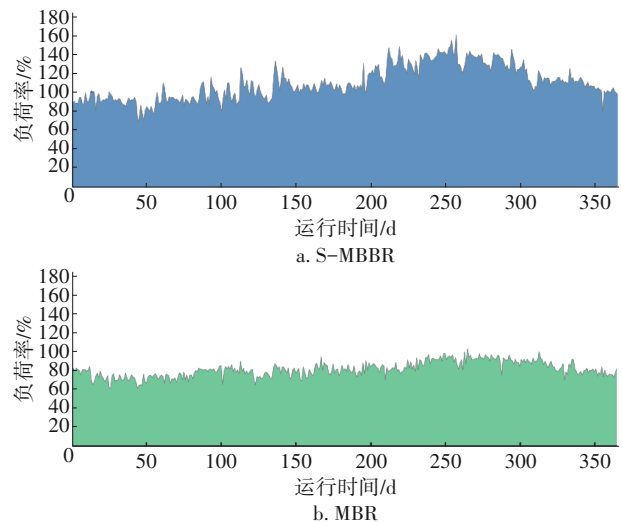


图2 S-MBBR与MBR的进水负荷率

Fig.2 Influent load rate of S-MBBR and MBR

S-MBBR运行水量为 $(21.93 \pm 3.59) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,一年内有244d超过设计运行水量,最大值为 $32.17 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,负荷率达到161%,平均运行水量负荷率达到119%。MBR运行水量为 $(8.43 \pm 0.84) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,最大值为 $10.68 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,平均负荷率为87%。由于MBR末端膜组件的膜通量一定,因此其水量较为恒定,抗水量冲击性能较差。在面临进水量冲击时,S-MBBR几乎承担了全部的增量部分,保障了污水处理厂的正常运行以及总出水水质稳定达标。

## 3 药剂与能耗分析

在药剂消耗方面,S-MBBR使用的药剂包括乙酸钠、三氯化铁及PAM等,用于反硝化脱氮及化学除磷;MBR使用的药剂包括乙酸钠、三氯化铁、次氯酸钠及柠檬酸等,用于反硝化脱氮、化学除磷及膜组件清洗。两种工艺的药剂日均消耗量见表2。MBR的乙酸钠投加量高于S-MBBR,进一步核算多投加的乙酸钠可去除约2mg/L的TN,与S-MBBR和MBR出水TN差值接近,表明两者出水TN差异主要由碳源投加量不同所致。MBR的三氯化铁投加量高于S-MBBR,这主要与MBR泥龄较长导致其生化除磷效果稍弱有关。根据三氯化铁使用量进行核算,S-MBBR化学除磷占比为32.33%,MBR化学除磷占比为36.79%。S-MBBR虽然通过投加生物膜



可实现双泥龄系统<sup>[5]</sup>,有利于生物除磷,但实际由于进水有机物浓度较低,在控制上优先进行反硝化脱

氮,因此用于生物除磷的有机物浓度相对较低,导致生物除磷效果相对较弱。

表2 S-MBBR与MBR药剂日均消耗对比

Tab.2 Comparison of daily chemical dosage between S-MBBR and MBR process

项 目		乙酸钠	三氯化铁	PAM	次氯酸钠	柠檬酸
药剂含量/%		25	40	固粉	10	30
S-MBBR工艺	日消耗量/(t·d <sup>-1</sup> )	17.53	19.85	0.20		
	药剂浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	79.92	90.52	0.9		
MBR工艺	日消耗量/(t·d <sup>-1</sup> )	11.11	8.70		4.45	0.05
	药剂浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	131.81	103.15		52.78	0.6

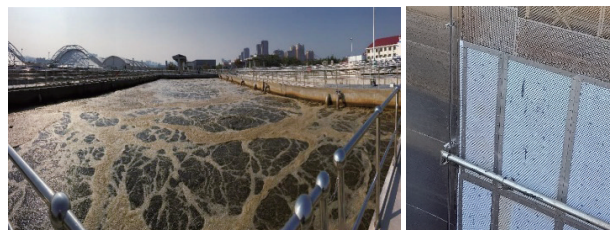
在电耗方面,S-MBBR电耗为0.494 kW·h/m<sup>3</sup>,其中生化池曝气能耗为0.235 kW·h/m<sup>3</sup>,占比为47.00%;MBR电耗为0.616 kW·h/m<sup>3</sup>,其中生化池曝气能耗为0.290 kW·h/m<sup>3</sup>,占比为46.86%,S-MBBR对硝化菌的高效富集能力降低了曝气能耗。MBR为了维持膜通量,膜池的能耗较高,本项目均值为0.204 kW·h/m<sup>3</sup>,占比为33.26%,且膜组件使用不足两年,随着膜通量的降低,膜池的能耗有进一步升高的趋势。由于S-MBBR进水量波动大,曝气能耗与进水量关系密切,当S-MBBR进水负荷率低于100%时,曝气能耗为0.304 kW·h/m<sup>3</sup>;进水负荷率为100%~125%时,曝气能耗为0.219 kW·h/m<sup>3</sup>;进水负荷率>125%时,曝气能耗为0.169 kW·h/m<sup>3</sup>,与水量呈负相关关系,说明S-MBBR在面临进水负荷冲击时可充分发挥生物膜硝化潜力,不需大幅提升曝气量即可实现污染物去除。

综合电/药消耗,S-MBBR电/药费用均值为0.469元/m<sup>3</sup>,而MBR电/药费用均值为0.626元/m<sup>3</sup>,其中MBR工艺不含换膜成本。

#### 4 维护与控制

S-MBBR悬浮载体的良好流化是保证工艺稳定运行的核心要素<sup>[6]</sup>,若控制不佳,则可能出现悬浮载体流化差、局部堆积现象,从而影响处理效果。尤其是在末端出水拦网处,一旦悬浮载体堆积,则可能造成拦网过水能力降低,从而在拦网前后产生液位差,造成悬浮载体冒漏。同时S-MBBR也应关注拦网的磨损,随着长时间的运行,悬浮载体、进水泥砂等与拦网的不断摩擦,传统不锈钢筛网易被磨薄,甚至磨破,导致悬浮载体泄漏,影响深度处理运行。目前,已有在拦网前后增加液位计的方式,通过自控系统上传至智慧水务平台,实现智慧化控制;同时,安装更换了复合材质的拦网,磨损指数大

大降低,保障了S-MBBR无忧运行。图3展示了S-MBBR良好的流化状态与复合材质拦网。S-MBBR后端仍有二沉池、高效沉淀池、滤池等深度处理单元,在实际运行过程中尤其是水量冲击下,应关注其固液分离性能,防止跑泥。



a. 流化状态

b. 复合材质拦网

图3 S-MBBR工艺流化状态与复合材质拦网

Fig.3 Fluidization condition of S-MBBR process and composite material interception screen

MBR运行稳定主要在于膜组件。保障膜组件的膜通量是维持MBR正常运行的关键,除了在正常运行过程中通过曝气进行冲洗外,还需要根据跨膜压差对膜组件进行定期的特殊清洗(见图4)。实际运行当跨膜压差>35 kPa时需进行清洗。清洗频次与方式主要与进水水质和膜污染程度有关,在线清洗包括碱洗和酸洗,碱洗时采用次氯酸钠,每周一次,酸洗时采用柠檬酸,每半年一次,离线拆片清洗一年一次。除化学清洗外,还采用水/气反冲洗、膜表面曝气冲刷等物理方式进行膜组件的清洗。膜污染程度与膜组件的清洗频率和MBR工艺的能耗药耗息息相关,而膜污染程度除与水质有关外,还与运行温度有很大关系,冬季低温情况下膜清洗频次要稍高于夏季,低温对于膜本身的结构并没有影响,膜孔径不会受到低温的影响,但膜污染程度会加重,主要受到污水黏度提升、微生物EPS提高等因素的影响。此外,MBR除磷药剂(三氯化铁)投加于

生化池内,而投加除磷药剂后会使黏度较高的水和凝胶层包裹在膜丝表面,加速污染层的生长,也遏制了水力剪切对污染层的脱除作用,提高了膜污染程度<sup>[7]</sup>。因此在运行中应根据实际运行情况调整清洗频次和清洗程度,保证系统良好运行。



图4 MBR工艺膜组件清洗

Fig.4 Membrane assembly cleaning of MBR process

### 5 污水处理厂低碳运行评价

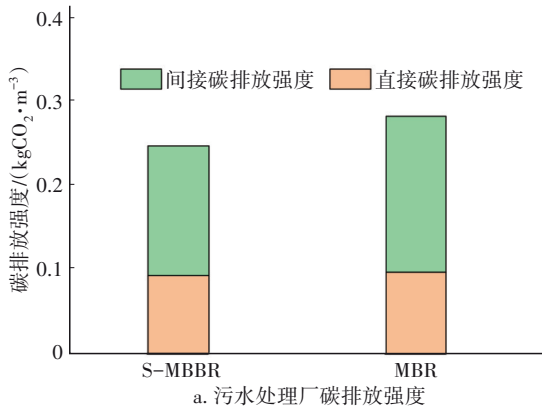
污水处理厂进行科学、高效的碳减排,对实现减污降碳,促进生态环保产业绿色低碳发展具有重要意义。根据《污水处理厂低碳运行评价技术规范》(T/CAEPI 49—2022)碳排放强度核算方法,并综合考虑对TN去除率、处理规模、耗氧污染物削减量、出水排放标准及臭气控制程度等进行修正后核算两种工艺的低碳运行评价总分,修正系数见表3。

表3 碳排放强度计算修正系数取值

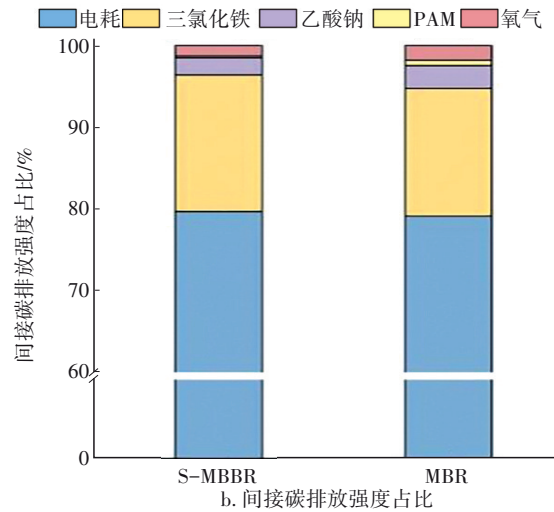
Tab.3 Value of correction coefficient for carbon emission intensity calculation

项目	S-MBBR	MBR
总氮去除率修正系数	0.300	0.300
处理规模修正系数	1.083	1.029
耗氧污染物削减量修正系数	0.404	0.402
出水排放标准修正系数	0.640	0.640
臭气控制程度修正系数	0.950	0.950

S-MBBR和MBR碳排放强度如图5所示。



a. 污水处理厂碳排放强度



b. 间接碳排放强度占比

图5 S-MBBR和MBR碳排放强度

Fig.5 Carbon emission intensity of S-MBBR and MBR

S-MBBR碳排放强度修正前为 $0.882 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ ,修正后为 $0.291 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ ,结合低碳行为核算低碳运行评价总分为78.75,评价为二级;MBR碳排放强度修正前为 $1.045 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ ,修正后为 $0.335 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ ,结合低碳行为核算低碳运行评价总分为72.62,评价为三级。综合对比来看,S-MBBR运行碳排放强度更低,更符合低碳理念。

由图5(a)可知,两种工艺的直接碳排放强度基本一致,分别为 $0.093$ 、 $0.097 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ ,直接碳排放强度与污水处理过程中 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$ 和 $\text{CO}_2$ 的直接排放量有关,主要受进、出水水质和处理水量的影响。两者差异主要体现在间接碳排放强度,主要与运行电耗与药耗有关。MBR碳排放强度较高的原因主要在于膜池运行维护增加了能耗与药耗。由图5(b)可知,运行电耗在间接碳排放强度的计算中占比达到80%左右,约占总碳排放强度的55%,药耗约占总碳排放强度的7%~10%。蒋富海等<sup>[8]</sup>核算了10座污水处理厂的碳排放量,结果表明,在污水处理厂的碳排放贡献源中,电耗占比最大,约占31%~64%,药耗次之,约占6%~19%,与本项目结果类似。周政等<sup>[9]</sup>对7座污水处理厂的研究同样表明,电耗导致的间接排放是最大的碳排放源,平均占比为49.43%,且AAO-MBR工艺较AAO工艺显著增加了电耗碳排放占比,达到60%。因此,污水厂实现低碳运行,关键在于降低电/药消耗。一方面是控制优化,可通过增加智慧水务管理系统,实现电/药的精准控制;另一方面是工艺优化,可通过采用新工艺

如厌氧氨氧化、同步硝化反硝化等实现电/药消耗的降低,进而整体上降低污水处理厂碳排放强度。

## 6 结论与展望

北方某污水处理厂在相同进水水质条件下,S-MBBR和MBR出水均能稳定达到地表水Ⅳ类标准,但S-MBBR的抗水量冲击能力更强,平均运行水量负荷率达到119%,如遇汛期可处理更多污水。S-MBBR电/药费用为0.469元/m<sup>3</sup>,较MBR的电/药费用(0.626元/m<sup>3</sup>)更低,运行更加经济。根据《污水处理厂低碳运行评价技术规范》(T/CAEPI 49—2022),S-MBBR、MBR低碳运行评价等级分别为二级和三级,S-MBBR更具低碳潜力。S-MBBR运行过程中应关注悬浮载体的流化和拦截,需要可靠的设计和支撑,对工艺厂家要求更高;MBR则应关注简化膜组件的清洗、维护和更换,降低能耗和药耗。在工艺流程方面,MBR更加简洁,流程短;S-MBBR能够充分利用旧,不改变主体工艺及流程。目前已有基于纯膜MBBR的全流程配套工艺,不仅实现了流程的简化,其占地效果也能与MBR媲美,可为污水处理厂的新/改/扩建提供新的选择方案。

### 参考文献:

- [1] 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).
- [2] 张姣,肖康,梁帅,等. 膜技术在中国市政污水处理与再生中的应用现状与未来挑战[J]. 环境工程,2022,40(3):1-6,153.  
ZHANG Jiao, XIAO Kang, LIANG Shuai, *et al.* Membrane technologies for municipal wastewater treatment and reclamation in China: application and challenges [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(3):1-6,153(in Chinese).
- [3] 李亮,胡筱敏,于鑫,等. MBR在废水处理中的应用及生物强化研究进展[J]. 环境保护科学,2017,43(2):24-29.  
LI Liang, HU Xiaomin, YU Xin, *et al.* Application and bioaugmentation of MBR in wastewater treatment: an overview [J]. Environmental Protection Science, 2017, 43(2):24-29(in Chinese).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] 周家中,韩文杰,吴迪,等. MBBR工艺应用于市政污水处理的系列解决方案探讨[J]. 中国给水排水,2023,39(12):1-12.  
ZHOU Jiazhong, HAN Wenjie, WU Di, *et al.* Discussion on series solutions of MBBR process applied to municipal sewage treatment [J]. China Water & Wastewater,2023,39(12):1-12(in Chinese).
- [7] 杨阳. 基于MUCT-MBR工艺污水处理厂提标改造的研究[D]. 成都:西华大学,2020:51-52.  
YANG Yang. Study on Upgrading of Sewage Treatment Plant Based on MUCT-MBR Process [D]. Chengdu: Xihua University,2020:51-52 (in Chinese).
- [8] 蒋富海,王琴,张显忠,等. 城镇污水治理与温室气体的协同减排双控研究[J]. 中国市政工程,2022(5):42-47.  
JIANG Fuhai, WANG Qin, ZHANG Xianzhong, *et al.* Study on the dual control of urban sewage treatment & greenhouse gas collaborative emission reduction [J]. China Municipal Engineering, 2022(5):42-47(in Chinese).
- [9] 周政,李怀波,王燕,等. 低碳氮比进水AAO污水处理厂低碳运行[J]. 中国环境科学,2022,42(11):5088-5099.  
ZHOU Zheng, LI Huaibo, WANG Yan, *et al.* Research on low-carbon operation mode in AAO-based wastewater treatment plants with low C/N influent [J]. China Environmental Science, 2022, 42(11):5088-5099(in Chinese).

作者简介:黄青(1976—),男,山东青岛人,本科,高级工程师,研究方向为污水处理工艺。

E-mail:hqyb@163.com

收稿日期:2020-07-26

修回日期:2020-08-24

(编辑:衣春敏)