

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.08.016

MBR超滤膜在工业园区废水处理中的应用

缪周伟¹, 白海龙^{2,3}, 周传庭¹, 邓建平⁴

(1. 上海市城市建设设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200125; 2. 清华大学 环境学院, 北京 100084; 3. 上海世浦泰新型膜材料股份有限公司, 上海 201599; 4. 上海世浦泰膜科技有限公司, 上海 201599)

摘要: 上海某工业园区污水处理厂设计总规模为 $5.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 采用“一厂双线”模式, 包括1条设计处理规模为 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的化工废水处理线和1条设计处理规模为 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的生活污水处理线, 其中工业废水处理线主体处理工艺MBR采用微滤膜。MBR技术改造采用超滤膜替代微滤膜, 改造后膜系统运行效率大幅提高。重点分析了改造前后运行膜通量、膜曝气能耗和膜清洗成本的变化情况, 运行数据表明, 采用超滤膜比微滤膜具有更高的可持续膜通量, 在运行膜通量为 $15 \sim 20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时, 跨膜压差可稳定在 10 kPa 以下, 远低于常规MBR微滤膜的跨膜压差, 且能够保证出水水质稳定优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准, 吨水曝气电耗降低约40%, 膜清洗成本降低约44%。

关键词: MBR; 超滤膜; 膜通量; 脉冲曝气

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)08-0097-06

Application of MBR Ultrafiltration Membrane in Wastewater Treatment of an Industrial Park

MIAO Zhou-wei¹, BAI Hai-long^{2,3}, ZHOU Chuan-ting¹, DENG Jian-ping⁴

(1. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute Group Co. Ltd., Shanghai 200125, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Shanghai Supratec Advanced Membrane Co. Ltd., Shanghai 201599, China; 4. Shanghai Supratec Membrane Technology Co. Ltd., Shanghai 201599, China)

Abstract: The wastewater treatment plant (WWTP) of an industrial park in Shanghai has a total design capacity of $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, and adopts “one factory dual line” mode with each capacity of $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, including one chemical wastewater treatment line and one domestic sewage treatment line. The main treatment process of the industrial line is MBR using microfiltration membrane. Ultrafiltration membrane is used to replace microfiltration membrane in MBR technical transformation, which significantly improves the operating efficiency of the membrane system. The changes of membrane flux, membrane aeration energy consumption, and membrane cleaning cost before and after the transformation are analyzed. The operating data show that MBR ultrafiltration membrane has a higher sustainable membrane flux than microfiltration membrane. When operating membrane flux is $15 \sim 20 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, transmembrane pressure (TMP) is stable below 10 kPa , which is much lower than that of conventional MBR microfiltration

membranes. The effluent quality index is better than level A criteria in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002). The aeration energy consumption per ton water is reduced by about 40%, and the membrane cleaning cost is reduced by about 44%.

Key words: MBR; ultrafiltration membrane; membrane flux; pulse aeration

膜生物反应器(MBR)是一种由膜分离技术与生物处理技术相结合的新型水处理技术,主要由生物反应器和膜组件组成,可用于MBR的膜类型有微滤膜(孔径 $\geq 0.1\ \mu\text{m}$)、超滤膜(孔径 $< 0.1\ \mu\text{m}$)。生物反应器主要降解有机物质,膜组件是MBR的核心构件。因MBR工艺具有出水水质好、流程短、占地面积小、抗水质冲击性强、产泥率低等优点^[1],已成为污水处理厂扩容和提标改造的主要技术手段,例如将原有二沉池等构筑物改造成MBR膜池,就可在无新增用地情况下同步实现扩容和提标的双重目标,特别是可将出水一级A标准提升至地表水准Ⅳ类标准。

目前,国内采用MBR工艺处理市政污水总规模已超过 $2\ 000\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$,应用范围涵盖新建项目和改造项目、地上和地理式污水处理厂。例如,2010年建成的广州市京溪污水处理厂是我国首座采用MBR工艺的全地理式市政污水处理厂,设计规模为 $10.0\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ ^[2]。2015年建成的北京市槐房污水处理厂是国内MBR单体处理规模最大的污水处理厂,设计规模为 $60\times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ ^[3]。

1 MBR膜应用现状及发展趋势

MBR被广泛应用于各类污水处理工程中,并取得了良好的处理效果,但在以往应用过程中也暴露出明显的缺点,例如膜运行能耗较高、膜使用寿命偏短等。有研究表明,MBR膜系统的运行能耗约占整个污水处理厂的50%~70%,而MBR膜系统最大能耗来自膜擦洗曝气环节,其能耗通常占MBR膜系统能耗的70%以上。运行电费与气水比成正比,行业内较多膜产品的曝气气水比为(8~12):1,约为好氧池曝气气水比的2倍。何晓卫^[4]在昆明某污水处理厂开展MBR工艺节能技术研究,发现MBR工艺污水处理厂能耗较高,其中88.1%来源于电耗,而电耗的63.0%用于鼓风曝气。此外,膜工艺的抗水量冲击负荷能力较差,由于膜的最大通量往往是一个定值,超过此数值后,跨膜压差(TMP)会急剧增大,引起严重的膜污染,出水水质也会变差,因此不

能通过更大的流量^[5]。

随着国内外膜材料和膜应用技术的发展,MBR膜的可持续膜通量、使用寿命、运行成本和耐污染性等指标都得到大幅提升。近年来,MBR膜孔径也呈现逐步减小的趋势,欧洲和北美地区MBR超滤膜逐步完成了对微滤膜的全面替代,国际主流的MBR产品也普遍采用孔径 $\leq 0.05\ \mu\text{m}$ 的超滤膜,例如威立雅的MBR膜孔径为 $0.04\ \mu\text{m}$,Koch和Supratec的MBR膜孔径均为 $0.03\ \mu\text{m}$ 。随着超滤膜的普及,欧美市场市政污水MBR膜的平均使用寿命从5年提升到12.5年。近年来,国内主流MBR膜产品膜孔径也呈逐步减小的趋势,例如碧水源MBR膜产品已经从第一代发展到第四代,膜孔径从最初的 $0.4\ \mu\text{m}$ 缩小到 $0.2\ \mu\text{m}$,直至最新第四代的 $0.1\ \mu\text{m}$ 。

膜孔径的大小,对于MBR可持续的膜通量至关重要,进而会影响膜化学清洗成本和膜寿命。膜孔径影响可持续膜通量的机理在于孔径大小决定了细菌进入膜孔内的概率。通常细菌的尺寸 $> 0.2\ \mu\text{m}$,在膜产水泵负压抽吸过程中,部分细菌尺寸会收缩至 $0.06\sim 0.08\ \mu\text{m}$,因此对于膜孔径较大的微滤膜,细菌会进入膜孔,在膜孔内繁殖甚至堵塞膜孔,即使化学清洗也不能完全清除,造成膜产生不可恢复的通量衰减,降低了膜使用寿命。而对于孔径不超过 $0.05\ \mu\text{m}$ 的小孔径超滤膜,细菌难以进入膜孔内部,只是在膜孔表面聚集,通过膜曝气和化学清洗可以去除,因此膜通量衰减慢、膜使用寿命长^[6]。此外,即使膜滤过程中膜表面会有滤饼层保护,对细菌等微生物有拦截作用,但在膜曝气和反洗过程中滤饼层易遭到破坏,出现膜表面裸露,对微滤膜而言这是细菌容易进入膜孔内的“窗口期”。

早期之所以MBR市场的膜产品以微滤膜为主,主要受制于当时的制膜水平,超滤膜的开孔率不高,因此膜通量低,缺少经济性。微滤膜由于膜孔径大,初期通量高,但问题在于细菌容易进入微滤膜膜孔,造成膜通量衰减和使用寿命缩短。随着高开孔率超滤膜进入市场,MBR膜的这一关键痛点问

题也得到解决。微滤膜和超滤膜电镜照片见图1。

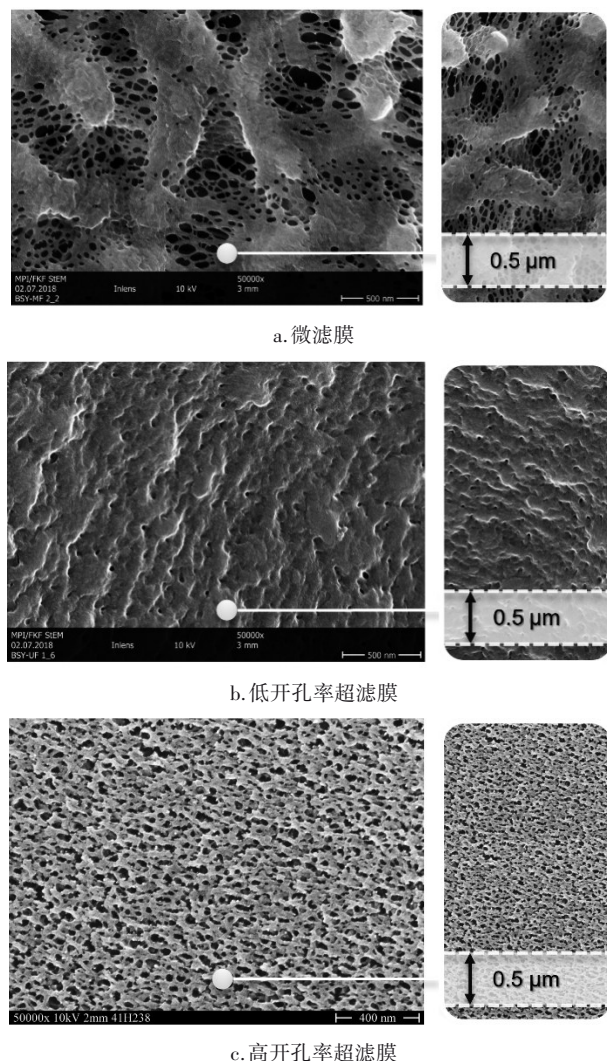


图1 微滤膜和超滤膜电镜照片

Fig.1 Electron microscopy of microfiltration membrane and ultrafiltration membrane

随着产品性能的提升,相应的标准和规范也在变化,《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)中处理生活污水的MBR设计平均膜通量提高到15~25 L/(m²·h),这意味着同样的污水处理量,膜的使用面积减少,即提高了膜应用效率,有助于降低MBR的建设成本。

在膜运行能耗方面,关键是如何减少膜擦洗的气水比,而膜擦洗气水比与膜擦洗的曝气形式、运行膜通量和膜组件装填密度等三个因素相关。随着节能脉冲曝气器代替传统的穿孔管曝气以及膜通量提高,近些年膜擦洗气水比也在大幅降低。目前,在一些新投产的市政生活污水MBR污水处理厂

项目中,国际一线品牌MBR产品的曝气气水比已低至3:1~4:1,国产一线品牌MBR产品的曝气气水比可达到5:1~6:1。在国家提出“双碳”目标的政策背景之下,节能降耗已成为污水处理厂建设的关注重点。根据中国膜工业协会标准《“领跑者”标准评价要求—膜生物反应器》(T/ZGM 004—2021, T/CSTE 0051—2021),MBR中空纤维膜推荐气水比≤6:1。

对于工业废水,由于膜通量的设计取值通常低于市政生活污水,因此,相同处理量时工业废水MBR的擦洗气水比会比市政生活污水高。

随着生态文明建设的不断推进,污水处理行业的标准不断提高,甚至出现了以地表水“Ⅳ类”或“准Ⅳ类”为排放标准的项目。在污水资源化的政策背景之下,传统污水处理厂也在向再生水厂发展,例如宜兴城市污水资源概念厂出水标准达到了COD<30 mg/L、TN<3 mg/L、TP<0.1 mg/L,经过处理再生的尾水除用于湿地外,部分还进一步深度处理到直饮水标准。MBR超滤膜若解决了运行成本高和通量易衰减的痛点,则具有较好的应用前景,可同步实现污水处理设施扩容、提标、污水资源化和溢流污染控制的多重目标。

结合上海某工业园区污水处理厂MBR膜更换项目,介绍了小孔径MBR超滤膜在该厂化工废水处理中的应用情况,并与所替换的微滤膜进行对比,重点分析运行膜通量、曝气能耗和膜清洗成本的变化情况,以期MBR超滤膜用于工业污水处理厂项目提供借鉴。

2 项目应用案例

2.1 项目背景

该工业园区污水处理厂现状总规模为5.0×10⁴ m³/d,分为独立运行的工业废水和生活污水两条工艺处理线,设计处理规模均为2.5×10⁴ m³/d,其中,工业废水处理线的来水主要为化工废水,处理工艺流程:废水→粗格栅→提升泵站→细格栅→精细格栅→初沉池→调节池→兼氧酸化池、沉淀池→AAO池→MBR→臭氧接触氧化→曝气生物滤池→消毒池→达标排放,设计出水水质满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准和《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)的一级标准,共23项指标。设计8条MBR膜池廊道,每条膜池装有8套MBR膜组器,共计64套膜组器。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

项目	COD/ (mg· L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg· L ⁻¹)	SS/ (mg· L ⁻¹)	氨氮/ (mg· L ⁻¹)	总氮/ (mg· L ⁻¹)	总磷/ (mg· L ⁻¹)	粪大肠菌群/ (个·L ⁻¹)
进水水质	500	350	400	45	70	8	
出水水质	≤50	≤10	≤10	≤5(8)	≤15	≤0.5	<10 ³

该工程于 2016 年建成并投入使用,工业线 2.5×10⁴ m³/d 的 MBR 膜原采用某国产一线品牌孔径为 0.1 μm 的微滤膜,运行 3 年多后又更换过一次原厂家的微滤膜,每次微滤膜更新后使用寿命只能维持 3 年多。2023 年初,该厂将原微滤膜更换为某国际一线膜品牌的孔径为 0.03 μm 的超滤膜,并对膜池的曝气风管加装风量流量计及上位机自控程序调整优化,以满足该厂的长效稳定运行要求。

2.2 膜更换方案

在更换超滤膜前,工业废水处理线的微滤膜已运行 3 年多,存在的主要问题是膜产水量下降,比设计规模减产 30% 以上,且运行 TMP 均达到 50 kPa 以上。

本次换膜采用一一替换方式,即换膜前后膜组器数量不变,并利用原有膜池安装导轨。由于新更换的超滤膜为国际一线品牌产品,开孔率高、孔径为 0.03 μm,膜通量比原微滤膜大,因此虽然膜组器数量保持不变,但更换新膜后单个膜组器的膜面积少于原微滤膜,超滤膜总的安装面积比原微滤膜减少 35%。

超滤膜运行 1 年后的数据与原微滤运行 1 年和 3 年后的数据对比见表 2。

表 2 换膜前后技术参数对比
Tab.2 Technical parameters before and after
membrane replacement

项目	原微滤膜 运行 1 年	原微滤膜 运行 3 年	超滤膜 运行 1 年
总处理量/(m ³ ·d ⁻¹)	25 000	25 000	25 000
膜池廊道数量/条	8	8	8
单廊道设计流量/(m ³ ·d ⁻¹)	3 125	3 125	3 125
单廊道膜组器数量/套	8	8	8
单套膜组器膜面积/m ²	1 600	1 600	1 040
单廊道膜面积/m ²	12 800	12 800	8 320
膜组器总数量/套	64	64	64
总膜面积/m ²	102 400	102 400	66 560

续表 2(Continued)

项目	原微滤膜 运行 1 年	原微滤膜 运行 3 年	超滤膜 运行 1 年
膜孔径/μm	0.1	0.1	0.03
膜材质	PVDF	PVDF	PVDF
膜丝拉伸强力/N	200	200	600
单廊道实际产水量/(m ³ ·h ⁻¹)	130	90	150
设计平均膜通量/(L·m ⁻² ·h ⁻¹)	10.17	10.17	15.65
实际运行膜通量/(L·m ⁻² ·h ⁻¹)	10.16	7.03	18.03
膜运行抽停时间/min	抽 9 停 1	抽 9 停 1	抽 9 停 1
运行 TMP/kPa	15~25	>50	<10
膜擦洗气水比	9:1~10:1	10:1~12:1	6:1~7:1*
膜池污泥浓度/(g·L ⁻¹)	12~15	12~15	12~15
离线清洗周期	1 次/6 个月	1 次/3 个月	1 次/a
注: *超滤膜的气水比需求不超过 6:1,但由于换膜后仍利用原有鼓风机,鼓风机已运行至可变频风量的下限,难以再调低风量,因此,实际运行气水比超出了产品实际所需气水比。			

2.3 运行效果分析

2.3.1 产水量和 TMP

工业废水处理线 MBR 系统换膜改造后,MBR 膜池单廊道曝气风量约 800~900 m³/h,估算气水比为 6:1~7:1,膜池 MLSS 为 12~15 g/L。

换膜前,工业废水处理线 MBR 系统每个膜池的平均产水量已不足 100 m³/h,且 TMP 均达到 50 kPa 以上,间隔 2~3 个月需进行一次离线清洗,平均处理能力不足 1.5×10⁴ m³/d。换膜改造后,工业废水处理线 MBR 系统每个膜池的产水量均能稳定达到 150 m³/h,且 TMP 稳定在 10 kPa 以内,运行 1 年尚未进行离线化学清洗,MBR 系统处理能力稳定达到甚至超过设计水量(2.5×10⁴ m³/d),保障了污水处理厂的稳定运行。

以连续监测的 7#、8#膜池廊道为例,膜池在更换安装完成并通水调试投运后 1 年多时间里,整体运行正常平稳,未进行离线恢复性化学清洗,处理水量、出水水质均满足设计要求。图 2 为 7#和 8#膜池运行过程中 TMP 和膜通量随时间的变化,可见随着实际进水流量的波动,MBR 超滤膜的瞬时通量为 15~20 L/(m²·h),即使在冬季膜池水温较低的情况下,TMP 也均稳定在 10 kPa 以下。

与初始运行数据相比,MBR 超滤膜连续运行 12 个月,其 TMP 波动变化整体较为平稳,没有发生明显增长现象,表明膜未发生污堵,运行状态良好。其余 1#~6#膜池投运后,虽然没有进行数据连续监

测,但抽样运行数据与7#、8#膜池廊道运行数据基本一致。

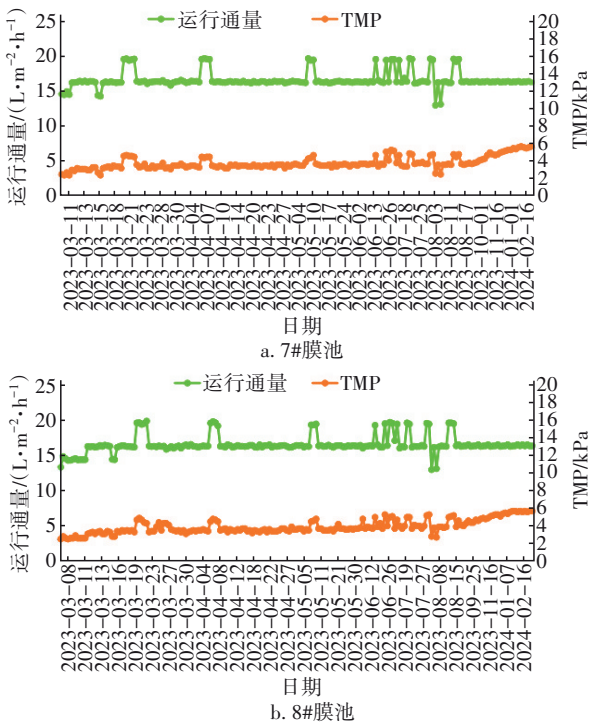


图2 7#、8#膜池TMP和膜通量随时间的变化

Fig.2 Variation of TMP and membrane flux with time for membrane tank 7# and 8#

2.3.2 能耗

MBR工艺最大能耗占比来自膜擦洗曝气环节,本次换膜改造后,每两个膜池廊道共用一个新安装的空气流量计以监测膜池的曝气风量强度,换膜改造前后产水量、曝气风量和气水比的对比如表2所示。由于本次改造仍利用原有鼓风机,鼓风机已运行至可变频风量的下限,难以再调低风量,因此实际运行气水比(6:1~7:1)超出了实际需要的气水比(5:1~6:1),与换膜前相比,气水比(吨水曝气能耗)降低约40%。

2.3.3 膜清洗成本

膜清洗成本是MBR工艺运行成本的重要组成部分,包括在线维护性清洗和离线恢复性清洗。换膜后,由于膜性能的改进和清洗药剂的优化,系统清洗周期延长,因此清洗成本显著降低。表3为换膜前后化学清洗药剂成本和人工劳务成本,换膜改造后次氯酸钠清洗(简称碱洗)用药量比换膜前节省约226.4 m³/a,因在线酸洗采用柠檬酸,其价格比盐酸高,核算总的清洗药剂成本费用,换膜后仅节

省约0.71万元/a,但离线清洗周期长,人工劳务费用节省约20.8万元/a,换膜改造后测算膜清洗可节省总的成本费用约21.51万元/a,降低约44%。

表3 换膜改造前后膜清洗成本分析

Tab.3 Analysis of the membrane cleaning cost before and after membrane replacement

项目		换膜改造前	换膜改造后
在线维护性清洗	碱洗用药量/(L·次 ⁻¹)	50(5%次氯酸钠溶液)	80(5%次氯酸钠溶液)
	酸洗用药量/(L·次 ⁻¹)	无	90(40%柠檬酸溶液)
	碱洗周期	1次/0.5 d	1次/1 d
	酸洗周期	无	1次/0.5 个月
	碱洗总用药量/(m³·a ⁻¹)	292.0	233.6
	酸洗总用药量/(m³·a ⁻¹)	无	17.28
离线恢复性清洗	一座膜池碱洗用药量/m³	6	3
	一座膜池酸洗用药量/m³	1.5(9%盐酸溶液)	1.0(40%柠檬酸溶液)
	碱洗周期	1次/3 个月	1次/a
	酸洗周期	1次/3 个月	1次/a
	碱洗总用药量/(m³·a ⁻¹)	192	24
	酸洗总用药量/(m³·a ⁻¹)	48(9%盐酸溶液)	8(40%柠檬酸溶液)
膜化学清洗药剂总用药量/(m³·a ⁻¹)		484(5%次氯酸钠溶液);48(9%盐酸溶液)	257.6(5%次氯酸钠溶液);25.28(40%柠檬酸溶液)
药剂费用/(万元·a ⁻¹)		23.42	22.71
人工劳务费用/(万元·a ⁻¹)		25.6	4.8
膜化学清洗总费用/(万元·a ⁻¹)		49.02	27.51

3 结论与建议

上海某工业园区污水处理厂MBR系统采用超滤膜改造后,污水处理能力由原来的不足1.5×10⁴ m³/d提高至设计处理能力2.5×10⁴ m³/d及以上,运行膜通量达到15~20 L/(m²·h)时,运行TMP也可稳定在10 kPa以下,离线化学清洗间隔也提高到1年以上,满足生产需求。在风机运行频率不变的情况下,气水比由原来的10:1~12:1降至6:1~7:1,核算吨水电耗降低约40%。化学清洗成本节省约21.51万元/a,相较于换膜前降低约44%。

改造设计和运行结果表明,相较于常规微滤膜,MBR超滤膜能够在保证水质稳定达标的情况

下,以较高的可持续膜通量运行且TMP较低,显著提高了系统的抗水量冲击性能。同时,MBR超滤膜又能降低气水比和离线恢复性清洗频次,实现节能降耗的目标,为MBR超滤膜工艺在污水处理厂提标改造工程的设计和运行提供了成功范例。在污水处理标准逐步提高和鼓励污水资源化利用的政策背景下,MBR超滤膜工艺因其出水水质好、流程短、占地面积小、抗水质冲击负荷强的优点以及可同步实现污水处理设施扩容、提标、污水资源化和溢流污染控制目标的特点,具有较好的应用前景,建议进一步开展相关应用研究。

参考文献:

- [1] 张静,唐贤春,陈洪斌. 倒置AAO-MBR处理黑水[J]. 环境工程学报,2016,10(7): 3657-3663.
ZHANG Jing, TANG Xianchun, CHEN Hongbin. Black water treatment with process of reversed AAO-MBR[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(7):3657-3663(in Chinese).
- [2] 陈贻龙. 地下式MBR工艺在广州京溪污水处理厂的应用[J]. 给水排水,2010, 36(7):51-54.
CHEN Yilong. Application of underground MBR in Guangzhou Jingxi wastewater treatment plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(7): 51-54 (in Chinese).
- [3] 温爱东,王海波,李振川,等. 大型地下式MBR工艺设计重难点分析[J]. 给水排水,2016,42(6): 27-30.
WEN Aidong, WANG Haibo, LI Zhenchuan, et al. Key and difficulty points design of a large scale underground MBR process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(6): 27-30(in Chinese).
- [4] 何晓卫. 典型MBR污水处理厂能耗与节能技术研究[D]. 广州:暨南大学,2015.
HE Xiaowei. Energy Consumption and Energy Saving Technology Research of Typical MBR Technology Wastewater Treatment Plant [D]. Guangzhou: Jinan University, 2015(in Chinese).
- [5] 胡松,阜崑,姜若茜,等. 地下式污水处理厂MBR膜污染分析及应对策略[J]. 给水排水,2021, 47(5): 45-51.
HU Song, FU Wei, JIANG Ruohan, et al. Analysis and countermeasures of MBR membrane pollution in underground wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(5): 45-51 (in Chinese).
- [6] 张显忠,程俊,徐波. 基于低碳节能的城镇污水处理厂MBR工艺设计要点[J]. 中国市政工程,2023(1): 36-40,92,93.
ZHANG Xianzhong, CHENG Jun, XU Bo. Key points of MBR process design for urban sewage treatment plants based on low carbon & energy conservation [J]. China Municipal Engineering, 2023 (1): 36-40, 92, 93 (in Chinese).

作者简介:缪周伟(1989-),男,上海人,博士,高级工程师,主要从事给水排水工程、水环境综合治理工程的设计与研究工作。

E-mail:zhwm_2008@126.com

作者简介:周传庭(1980-),男,辽宁辽阳人,博士,教授级高级工程师,主要从事给水排水工程、水环境综合治理工程的设计与研究工作。

E-mail:zhouchuanting@suedri.com

收稿日期:2024-03-05

修回日期:2024-04-15

(编辑:衣春敏)

推进城市节水,建设美丽城市