

陈泽滨, 张颖瑜, 唐霞. 某污水厂 MBR 膜超年限运行的关键因素评估[J]. 净水技术, 2026, 45(1): 93–100.

CHEN Z B, ZHANG Y Y, TANG X. Assessment of key factors for exceeding-service-life operation of MBR membrane in a WWTP [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(1): 93–100.

## 某污水厂 MBR 膜超年限运行的关键因素评估

陈泽滨\*, 张颖瑜, 唐 霞

(广州市净水有限公司, 广东广州 510630)

**摘要** 【目的】 膜生物反应器(MBR)工艺因其出水水质好和占地面积小等优点在城镇污水处理领域(尤其是地下污水处理厂)应用广泛,但膜材质固有缺陷引发的长期运行问题(高断丝率、膜通量衰减、出水水质波动),成为制约 MBR 发展的首要影响因素,且导致其工艺投资及运行成本均较高。【方法】 华南地区某市政污水厂 MBR 运营人员通过优化工艺调控策略,将设计寿命为 5 年的中空纤维超滤膜的实际运行寿命延长至 10 年,且该批 MBR 出水水质优于一级 A 标准,并未出现明显的截留效能下降问题。本文结合污水厂的运营管理经验及相关数据分析,针对 MBR 工艺的高能耗、高运营成本及持续增长的不可逆污染问题,实施多项延长膜使用寿命的优化提升措施,如控制污泥浓度、改进曝气方式以及优化膜清洗方式。【结果】 保持较低的膜池污泥质量浓度(6~9 g/L)、适量的脉冲曝气[曝气 10 s 停 20 s, 瞬时曝气量为 5.0 m<sup>3</sup>/(h·片), 平均值为 1.8 m<sup>3</sup>/(h·片)(实际工况)]、及时有效的恢复性清洗,既能实现 MBR 超长使用寿命,又能节能降耗,优化后的膜池曝气电耗从 2014 年的 0.19 kW·h/m<sup>3</sup> 降为 2020 年的 0.11 kW·h/m<sup>3</sup>。【结论】 本文深入总结实现 MBR 膜超长使用寿命的关键因素,分析污水厂运行调控策略及成效,可为城镇污水处理厂 MBR 膜运行维护提供借鉴案例。

**关键词** 膜生物反应器(MBR) 膜使用寿命 运行维护 断丝率 超年限使用

**中图分类号:** TU992    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1009-0177(2026)01-0093-08

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.01.011

## Assessment of Key Factors for Exceeding-Service-Life Operation of MBR Membrane in a WWTP

CHEN Zebin\*, ZHANG Yingyu, TANG Xia

(Guangzhou Sewage Purification Co., Ltd., Guangzhou 510630, China)

**Abstract** [Objective] Benefiting from excellent effluent quality and compact footprint, membrane bioreactor (MBR) process is widely used in municipal wastewater treatment, especially in underground wastewater treatment plants (WWTPs). However, issues such as high breakage rate of membrane fibers, declining membrane flux over long-term operation, and fluctuations in effluent quality, which is primarily due to membrane material properties, have constrained the broader application of MBR technology and led to high investment and operation costs. [Methods] A municipal WWTP successfully extended the service lifespan of hollow-fiber ultrafiltration membranes from the designed 5 years to 10 years through optimized process control strategies. Throughout this period, the effluent was well below the standard of class one grade A without significant deterioration of rejection capability. Based on operational experience and data analysis of WWTPs, this paper implemented multiple measures for extending the service lifespan, including controlling sludge concentration, improving aeration method, and optimizing membrane cleaning mode, to mitigate high energy consumption, operational costs, and accumulating irreversible membrane fouling. [Results] Low sludge mass concentration (6–9 g/L) in membrane tank, appropriate pulse aeration intensity (aeration for 10 s and stop for 20 s, with an instantaneous intensity of 5.0 m<sup>3</sup>/h per sheet, and an average value of 1.8 m<sup>3</sup>/h per sheet, at actual working condition), timely and effective maintenance and recovery cleaning, significantly extended membrane service lifespan while reducing energy consumption. The electricity consumption for aeration in membrane tank decreased from 0.19 kW·h/m<sup>3</sup> in 2014 to 0.11 kW·h/m<sup>3</sup> in 2020 via optimizing operation parameters.

[收稿日期] 2025-09-15

[基金项目] 广州市科技计划项目(2023B03J1334)

[通信作者] 陈泽滨(1989—),男,工程师,主要从事污水处理运营管理及 MBR 膜工艺控制等工作,E-mail:270180705@qq.com。

**[Conclusion]** This paper summarizes the critical factors enabling over-service lifespan of MBR and analyzes operational strategies and outcomes of WWTP, providing a valuable reference for the operation and maintenance of MBR process in municipal WWTPs.

**Keywords** membrane bioreactor (MBR) membrane service life operation and maintenance fiber breakage rate exceeding service-life

耦合活性污泥生化降解与高效微/超滤膜泥水分离的膜生物反应器(MBR)工艺因其占地面积小、出水水质好、剩余污泥产量低等优点在市政污水处理领域应用广泛<sup>[1]</sup>,特别是在现有污水厂扩容提标改造和城市中心区地下污水厂新建方面。MBR 工艺的投资和运营成本均高于传统活性污泥工艺,且随使用时间增长膜性能会逐渐下降,出现断丝率上升、膜通量下降等问题<sup>[2]</sup>,极大影响污水厂产能,严重的甚至影响出水水质。因此,分析研究延长 MBR 膜寿命的运行维护策略、影响 MBR 膜寿命的关键因素,有助于实现 MBR 膜长期高效、低耗、安全运行。

本文以某污水厂稳定运行 10 年的 MBR 膜作为

案例,总结曝气冲刷、污泥浓度调控、清洗等膜组件运行维护经验,深入分析膜超年限运行后对污水厂稳定生产带来的影响,探讨现阶段采用 MBR 工艺的优劣势及 MBR 系统改造的可行方向。

## 1 污水处理厂现状

该污水处理厂位于华南地区,占地面积为 1.68 hm<sup>2</sup>,全地埋式设计,主体工艺采用厌氧-缺氧-好氧(AAO)+MBR,设计处理量为 100 000 m<sup>3</sup>/d,于 2010 年 6 月正式投产。其中膜组件为聚偏氟乙烯(PVDF)材质中空纤维帘式膜,名义孔径为 0.1 μm,设计膜通量为 14.5 L/(m<sup>2</sup>·h),单片膜表面积为 22 m<sup>2</sup>,共 17 600 片膜,原设计膜使用寿命为 5 年。该污水厂工艺流程如图 1 所示。

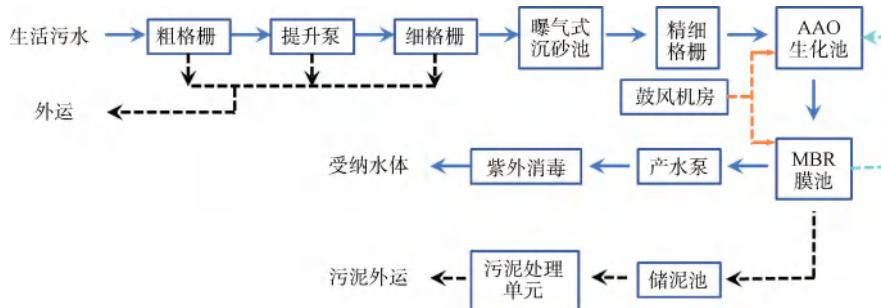


图 1 污水厂工艺流程

Fig. 1 Process Flow of the WWTP

出水水质稳定达标排放,是评判污水厂运行效果的重要指标,该污水厂出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准,该污水厂设计进出水水质如表 1 所示。

表 1 设计进出水水质  
Tab. 1 Designed Influent and Effluent Quality

项目	五日生化需氧量(BOD <sub>5</sub> )	化学需氧量(COD)	SS	氨氮	TN	TP
进水/(mg·L <sup>-1</sup> )	160	270	220	30	35	4.5
出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	10	40	10	5	15	0.5

## 2 影响 MBR 膜寿命的关键因素

随着 MBR 膜运行时间延长,膜丝不可避免地会产生污染<sup>[3]</sup>,其中可逆污染可以通过曝气擦洗和化

该污水厂由于 MBR 工艺的高污泥浓度、高曝气及强制固液分离效果,再加上及时有效的运行维护管理,运行近 10 年来,出水总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮、悬浮物(SS)等指标均优于一级 A 标准(表 2),出水水质始终保持良好。

学清洗(如次氯酸钠、氢氧化钠、柠檬酸及草酸等)进行去除,但不可逆污染则会堵塞膜孔,造成膜实际通量下降,最后导致污水厂产能下降<sup>[2,4-5]</sup>。因此,

表 2 实际处理水量与进出水水质  
Tab. 2 Practical Treated Water Capacity and Influent/Effluent Quality

年份	年度处理水量/m <sup>3</sup>	日均处理水量/m <sup>3</sup>	BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )		COD/(mg·L <sup>-1</sup> )		氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )		TN/(mg·L <sup>-1</sup> )		TP/(mg·L <sup>-1</sup> )		SS/(mg·L <sup>-1</sup> )	
			进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水
2011 年	2 469.21 万	6.76 万	88.80	1.76	167.00	11.53	25.30	0.64	28.30	12.55	3.53	0.23	118.00	1.42
2012 年	2 340.70 万	6.39 万	70.80	1.90	134.00	9.82	23.10	0.77	25.70	11.77	3.92	0.23	84.00	0.90
2013 年	2 499.21 万	7.24 万	74.62	1.20	142.46	9.37	23.55	0.63	26.89	11.27	2.69	0.27	97.95	0.93
2014 年	2 859.97 万	7.84 万	73.09	1.20	141.35	9.29	24.92	0.98	27.44	9.98	2.70	0.27	88.95	0.58
2015 年	3 111.55 万	8.52 万	81.23	1.22	158.14	9.03	23.80	1.16	27.03	10.02	2.76	0.24	109.91	0.53
2016 年	3 219.45 万	8.80 万	87.60	1.15	178.94	7.99	19.37	0.92	22.83	9.66	2.66	0.20	121.23	0.70
2017 年	3 193.75 万	8.86 万	91.82	1.14	183.92	8.22	24.29	0.90	27.48	9.47	2.79	0.19	126.04	0.63
2018 年	3 191.61 万	8.74 万	67.30	1.30	149.00	10.35	22.30	0.93	26.50	9.51	2.60	0.16	81.90	0.64
2019 年	3 517.33 万	9.64 万	67.06	1.10	167.34	8.72	19.96	0.72	24.81	8.80	2.43	0.14	90.99	0.58
2020 年	3 381.91 万	9.24 万	111.17	1.18	201.33	9.21	20.17	0.54	26.48	8.79	2.52	0.22	128.23	2.32

如何及时判断膜污染程度,并制定相应的调整措施,优化清洗方案,尽量减缓膜污染,更好地恢复膜通量是影响膜使用寿命的重要因素。

膜组件的污染程度一般根据膜丝纯水通量检测进行判断,但该检测方法仅适用于实验室,大型膜组件的水通量检测在生产线上一般不易实现。因此,在实际生产中,可采用膜组实时透水率[即单位时间、单位膜面积的通量/跨膜压差,单位为 L/(m<sup>2</sup>·h·MPa)]的数值来表征膜组的产水难易程度,即膜丝污染程度。在保持膜组同样产水量情况下,污染越重的膜组,跨膜压差越高,透水率数值则越低,而且此数值随产水量变化而变化,可以较好地表征各膜组实时工况。

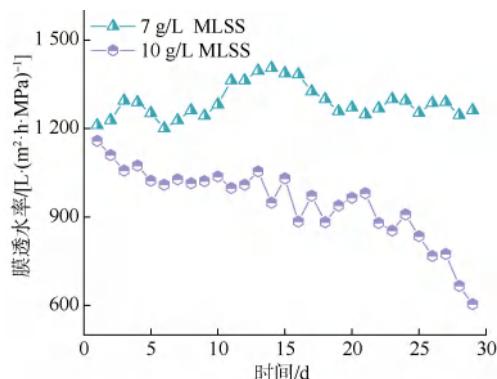
## 2.1 污泥浓度对运行效果的影响

相比其他工艺,MBR 工艺污泥浓度较高,但在保证出水水质的情况下,如何控制合适的污泥浓度也是保证膜正常运行的一个重要因素。关春雨等<sup>[6]</sup>提出中空纤维膜宜以较低的污泥浓度运行,有利于减缓膜丝污染<sup>[7]</sup>。因膜组进行泥水分离时,活性污泥浓度越高,混合液中的污泥絮体、胶体和溶解性有机物等污染物也越多。膜组在产水时,形成的滤饼层以及小分子溶质堵塞会造成膜丝污染、膜组的跨膜压差增大、膜透水率下降。

选取污水厂在 2016 年 2 月与 2017 年 2 月的运行数据进行对比,2016 年 2 月膜池回流比为 280%~300%,采用连续曝气方式,曝气量为 2.6 m<sup>3</sup>/(h·片)(实际工况,下同),西线各膜组产水量为 9.99 万~

11.25 万 t,污泥质量浓度为 6 207 mg/L,东线各膜组产水量为 8.92 万~10.6 万 t,污泥质量浓度为 7 046 mg/L;2017 年 2 月膜池回流比为 280%~300%,采用连续曝气方式,曝气量为 2.6 m<sup>3</sup>/(h·片),西线各膜组产水量为 9.64 万~11.65 万 t,污泥质量浓度为 10 541 mg/L,东线各膜组产水量为 8.17 万~9.98 万 t,污泥质量浓度为 11 352 mg/L。

如图 2 所示,相比低污泥浓度组,高污泥浓度膜组透水率衰减速率显著加快。污泥浓度越高,池内污染物质越多,加速了膜丝表面滤饼层的形成,也增加了溶质分子进入膜孔、堵塞膜孔的几率,从而使膜污染程度加重,直接导致膜的透水率下降。



注:MLSS 为混合液悬浮固体。

图 2 不同污泥浓度下膜透水率的变化

Fig. 2 Changes of Membrane Permeability Rate under Different Sludge Concentrations

## 2.2 曝气方式对运行效果的影响

在膜池中,适量曝气不仅为污泥供氧,提高污染

物去除率,还能通过上升的气泡及产生的紊动水流擦洗膜丝表面,清除沉积在膜丝表面的污泥<sup>[1,8]</sup>。但曝气过度时又会导致污泥絮体解体,释放大量小颗粒和溶解性有机物,从而加速膜污染。脉冲曝气是通过定时调整各膜组曝气闸门开关,从而间歇性产生大流量出气的曝气方式,与连续小气量的曝气方式相比,该曝气模式不仅可节省曝气总量,还能提高膜丝表面的冲刷强度,更易剥离膜丝表面的沉积污泥<sup>[8-10]</sup>。因此,脉冲曝气被视为相对理想的曝气方式<sup>[11-12]</sup>。

为验证脉冲曝气的效果,该污水厂选取 12 组膜组开展曝气方式对比试验,其中 4 个膜组作为试验组,采用脉冲曝气,即曝气 10 s 停 20 s,瞬时曝气量(即瞬时冲刷膜片的气量)为  $5.0 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{片})$ ,平均曝气量(即总曝气量与总膜片的比值)为  $1.8 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{片})$ ;8 个膜组作为对照组,采用连续曝气,即持续小气量

曝气,平均曝气量为  $2.6 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{片})$ 。试验期间,采用固定的产水模式(产水 9 min,停 1 min)、统一的在线维护性清洗(MC)频次(48 h/次)、固定的单条膜组产水量( $220 \text{ m}^3/\text{h}$ ),并严格控制污泥质量浓度( $6\,000 \sim 7\,000 \text{ mg/L}$ )及膜池回流比( $280\% \sim 300\%$ ),固定以上工况因素后,以各膜组完成清洗后刚开始运行时的膜透水率(即膜通量/跨膜压差)为起点,记录透水率下降至  $800 \text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{MPa})$  的时间为透水率维持天数,比较试验组和对照组透水率数据下降趋势,分析 2 种曝气方式对膜过滤性能的影响。

试验结果如图 3 所示,相比连续曝气,脉冲曝气可有效减缓透水率的衰减速度,延长膜组件工作周期。因此,采用脉冲曝气方式效果更佳,不仅节约曝气量,而且能增强冲刷力度,减缓膜堵塞及污染速率,更能降低化学清洗的频率,延长膜的使用寿命。

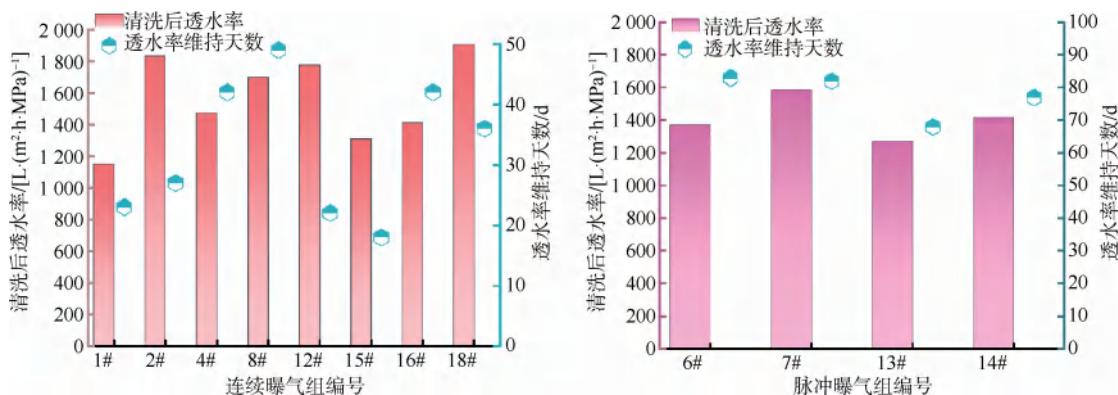


图 3 在 2 种曝气模式下膜组件透水率变化平均值

Fig. 3 Average Values of Membrane Permeability Rates Variation under Two Aeration Modes

### 2.3 MBR 化学清洗方式对运行效果的影响

化学清洗是清除膜污染,恢复膜过滤性能的有效方法<sup>[13]</sup>。化学清洗主要分为 MC 与离线恢复性清洗(RC)2 种方式。日常的曝气带来的空气擦洗及固定频次的 MC,能有效去除膜丝表面沉积的滤饼层,减缓膜透水率衰减速度。随着膜孔堵塞、凝胶层沉积和生物膜形成等污染的加剧,膜过滤阻力逐渐增大,膜透水率逐渐下降至警戒值时,需要采用 RC 以恢复膜性能。尤章超等<sup>[14]</sup>试验发现:针对长期运行的 MBR 膜,改进优化清洗方案,采用草酸二次清洗,对膜丝表面污染物去除更彻底,且不会对膜丝结构造成损伤。为此,该污水厂在运行过程中,也开展了恢复性清洗药剂搭配方式对清洗效果的影响研究。

在前期研究中发现,第 9 年开始,受膜丝板结与不可逆污染程度的加剧,单次 RC( $2\,000 \text{ mg/L}$  次氯酸钠+1% 柠檬酸)对膜丝透水率恢复效果较为有限,如图 4 所示,污水厂通过积极尝试,分次使用低质量浓度( $600 \sim 800 \text{ mg/L}$ )次氯酸钠+高质量浓度( $2\,000 \text{ mg/L}$ )次氯酸钠+柠檬酸(质量分数为 1%)浸泡,去除积泥情况有明显改善,不仅提升清洗后膜透水率恢复率,还使 MBR 膜系统 2019 年日均产水量较 2018 年提升 10%。

### 2.4 断丝率对出水水质影响

如图 5 所示,在 MBR 膜使用寿命末期,由于人工清洗频次增加、膜丝抗拉伸性能变差,断丝率增长较快,2019 年初平均断丝率为 7.1%,已处于较高水平。

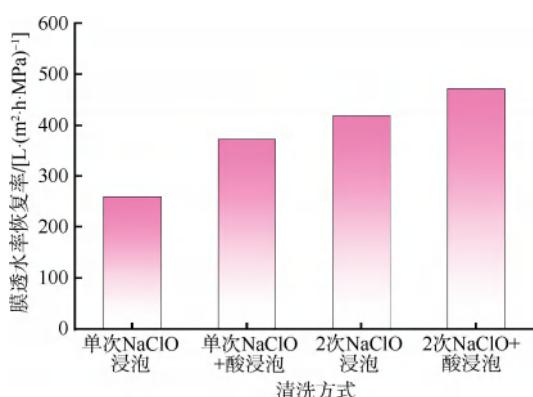


图 4 不同清洗方式处理后透水率的恢复量对比

Fig. 4 Comparison of Recovery Amount of Membrane Permeability Rate after Different Cleaning Methods

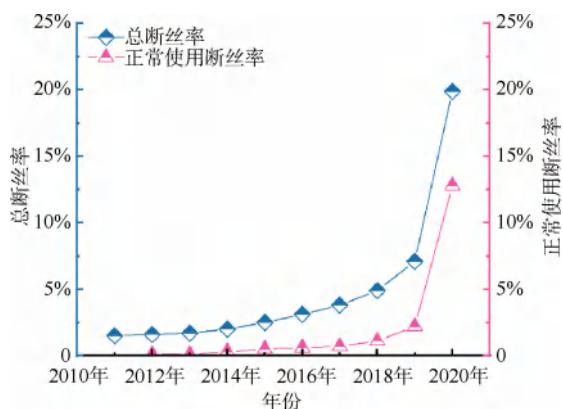


图 5 MBR 膜断丝率增长趋势

Fig. 5 Increasing Trend of Fiber Breakage Rate of Membranes

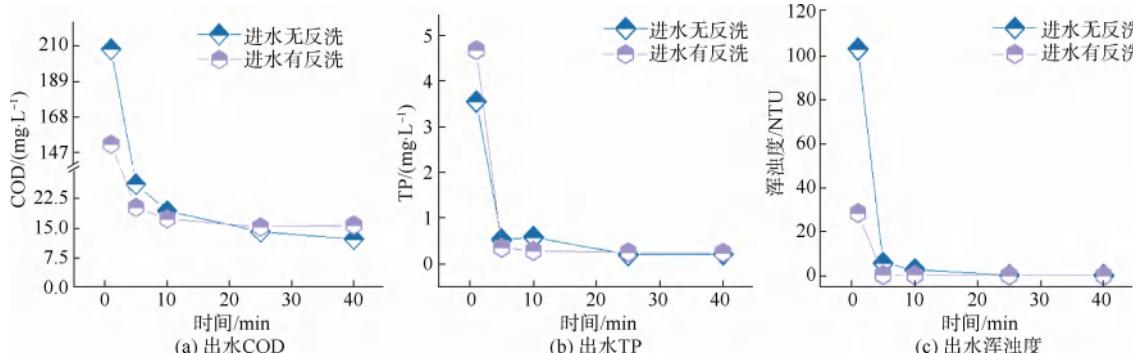


图 6 反冲洗对膜组出水 COD、TP 和浑浊度的影响

Fig. 6 Influence of Backwashing on COD, TP and Turbidity of Effluent from the Membrane Group

## 2.5 不可逆污染对膜通量影响

自 2013 年开始, 该污水厂每年剪取污染膜丝进行清洗方案小试, 尝试不同浓度、不同药剂浸泡效果, 如图 7 所示, 在 2019 年, 膜丝经浸泡

受断丝率增长影响, 该污水厂自 2019 年对膜组进行 RC 后发现, 在恢复正常产水的前 10 min 内, 对出水水质影响较大。原因在于正常运行期间, 膜丝断丝部位会被较大的污泥絮体堵塞封闭, 污泥无法通过断丝进入产水管道, 此时膜组出水水质受断丝影响较小。但膜组在药剂浸泡作用下, 再加上曝气抖动膜丝, 造成封闭堵塞断丝部位的污泥松脱, 进而使药液及细小的污泥颗粒通过断丝进入膜丝内部, 汇入膜组件的产水管。因此, 膜组清洗后恢复产水时, 将部分药液及污泥颗粒带入产水总管, 从而影响总出水 TP、COD 及浑浊度。为此, 通过多次试验, 该污水厂在膜组恢复性清洗完成后, 增加 1 次清水 MC 操作, 可减少膜丝内部残留的药液及污泥颗粒对出水的影响。

试验结果如图 6 所示, 膜丝内残留的药剂与污泥颗粒对该膜组出水 COD、TP 及浑浊度的影响主要在产水开始的 30 min 内。在产水开始的前 5 min, COD、TP、浑浊度 3 项指标均处于高值, 受残留污泥颗粒与药液影响较为严重。后续通过完成药剂浸泡后增加清水 MC 环节, 出水水质明显优于无清水 MC 组, 证明增加的清水 MC 可有效将产水管道及膜丝中残留的药液与污泥颗粒反向冲出膜丝, 避免在膜组产水初期带出药液与污泥颗粒造成出水水质超标。而随着产水进行, 污泥颗粒迅速堵塞断丝部位, 因此在产水后 5~30 min 内, 出水水质也随之迅速改善。

后的透水率只达到 2013 年膜丝透水率的 42%, 2020 年更是降至 30%, 证明随着 MBR 膜使用时间延长, 不可逆污染积累带来的膜丝性能与产能的明显下降。

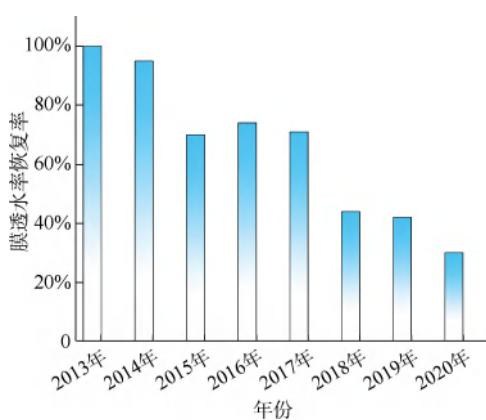


图 7 膜清洗后的清水透水率恢复率

Fig. 7 Recovery Rate of Clear Water Permeability Rate after Membrane Cleaning

### 3 经济效益分析

#### 3.1 MBR 膜池能耗情况分析

为减缓 MBR 膜丝表面污染物积聚,保证膜丝通量,需辅以大气流冲刷,由此也带来较高的运营成本<sup>[4]</sup>。目前,国内 MBR 工艺污水厂电耗为 0.5~0.8 kW·h/m<sup>3</sup>,其中鼓风机曝气占比为 40%以上<sup>[15~16]</sup>。该污水厂自 2014 年完善用电记录以来,实际生产中全厂整体电耗为 0.47~0.55 kW·h/m<sup>3</sup>。由于该污水厂既采用 MBR 工艺,又是全地埋式设计,因此各单元电耗中,鼓风机曝气及污水提升用电量占比较大<sup>[17]</sup>。如图 8 所示,2014 年,鼓风机用电量(包含生化池及膜池鼓风机)约占总用电量的 42.5%,进水一级提升用电量平均占 15.9%。

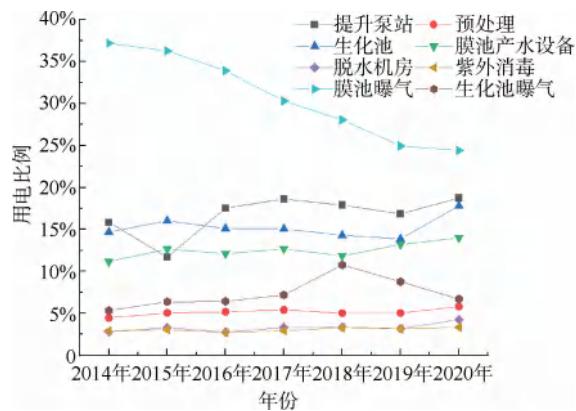


图 8 各主要工艺单元用电比例

Fig. 8 Electricity Consumption Ratios of Each Main Process Unit

该污水厂在实际运行中,通过不断完善 MBR 运行参数,优化曝气方式,不断降低曝气能耗,如图 9 所示,膜池吹扫风曝气能耗从 2014 年的

0.19 kW·h/m<sup>3</sup> 降为 2020 年的 0.11 kW·h/m<sup>3</sup>,MBR 系统曝气能耗所占的比例也由 2014 年的 37.2% 降为 2020 年 24.4%。

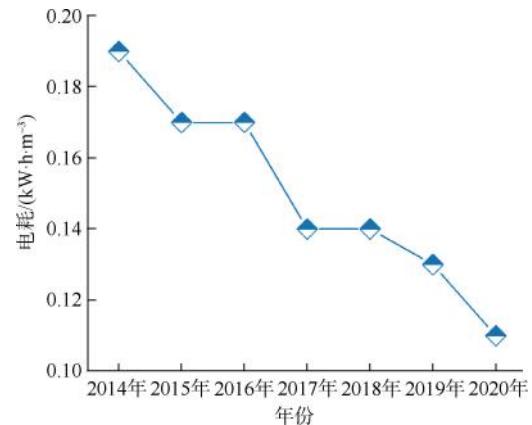


图 9 膜池曝气电耗变化

Fig. 9 Change of Electricity Consumption for Membrane Aeration

#### 3.2 对运营成本控制的影响

MBR 膜日常运行过程中,化学清洗是有效减缓膜丝污染的重要措施<sup>[18~22]</sup>,该厂在日常的膜清洗维护中,MC 主要采用低浓度次氯酸钠(有效氯质量浓度为 200~300 mg/L,持续时间为 20 min/组),清洗频次为 48~72 h/次;RC 主要通过高浓度次氯酸钠(有效氯质量浓度为 1 000~3 000 mg/L,持续时间为 16 h)及柠檬酸(控制 pH 值为 2~3,持续时间为 16~24 h)浸泡清洗,清洗间隔为 2~3 月<sup>[23]</sup>。

该污水厂在 MBR 膜寿命第 8 年,由于膜丝表面不可逆污染的积累、断丝率升高,为保证污水厂设计处理能力,只能缩短化学清洗的间隔时间,其中 MC 清洗间隔缩短至 24 h,RC 清洗间隔缩短为 1 月。这也导致化学清洗用药量急剧增加,增加该污水厂用药成本,如表 3 所示,按 2019 年药剂采购合同价估算(次氯酸钠约为 650 元/t,氢氧化钠约为 1 100 元/t,柠檬酸约为 5 000 元/t),2018 年洗膜药剂费用最高,即 0.052 0 元/m<sup>3</sup>,相当于 2013 年用药成本的 3 倍多。

因此,对于污水厂运营方来说,若 MBR 膜持续使用至超出厂家设定的使用年限后,不可逆污染的逐渐累积,造成的膜性能改变,断丝率上升,膜通量下降<sup>[24]</sup>,势必会影响污水厂出水水质及处理能力。而按 MBR 膜使用寿命年限进行膜更换,则需要花费高达数千万的采购费用,如何权衡水质、水量安全与

表 3 历年洗膜药耗与成本

Tab. 3 Chemicals Consumption and Cost of Membrane

Chemical Cleaning over the Years

年份	洗膜药剂药耗/(g·m <sup>-3</sup> )			折算用药成本/(元·m <sup>-3</sup> )
	次氯酸钠	氢氧化钠	柠檬酸	
2012 年	17.729	5.566		0.017 6
2013 年	12.936	2.387	0.960	0.015 8
2014 年	24.102	2.786	0.684	0.022 1
2015 年	27.733	1.459	0.360	0.021 4
2016 年	22.169	0.329	0.382	0.016 7
2017 年	35.316	1.356	0.409	0.026 5
2018 年	73.505	0.065	0.832	0.052 0
2019 年	53.442	0.043	0.937	0.039 5

膜定期更换投入的关系,是采用 MBR 工艺前需重点考量的核心问题。

## 4 结论

膜的价格及其寿命是制约 MBR 工艺大规模应用的核心因素,因此如何进一步优化 MBR 膜运行条件及清洗方式,减缓膜丝的污染,分析 MBR 膜超年限运行所带来的不确定因素,对后续污水厂新建或提标改造选用 MBR 工艺具有十分重要的指导意义。本文通过对某污水厂稳定运行 10 年的 MBR 膜及其维护经验进行探讨,总结经验如下。

(1) 采用脉冲曝气,可以有效减缓膜透水率下降速率,延长膜的有效使用时间,同时也达到节省能耗(包括电耗和药耗)的效果。

(2) 保持较低的污泥浓度、适量的曝气量是减缓膜丝污染的关键因素。同时膜组件的间歇运行也能起到较好地松弛膜丝、防止滤饼层积累的作用。

(3) 重视膜丝的清洗方式及时机,特别是在膜组件满负荷或超负荷运行过后,须及时进行 MC 或 RC。同时要重视膜丝取样分析,特别是污染物成分、膜丝抗拉伸强度等指标,对后续膜维护提供准确数据支撑。

(4) 要定期核算膜丝断丝率,当断丝率增长到一定程度时,需要注意完善 RC 后的操作,避免产水时带出膜丝内部残留的药剂与污泥颗粒,从而影响出水水质。

(5) MBR 膜使用超过年限后,会因不可逆污染积累、断丝率上升等影响污水厂出水水质与处理水量,未来的 MBR 膜改进方向应该在如何继续延长允许使用年限或废旧膜重生利用方面。

## 参考文献

- [ 1 ] 郝晓地, 陈峤, 李季, 等. MBR 工艺全球应用现状及趋势分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(20): 7-12.  
HAO X D, CHEN Q, LI J, et al. Status and trend of MBR process application in the world[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(20): 7-12.
- [ 2 ] 沈昊, 郭晓燕, 柴萍, 等. MBR 膜生物污染的生物控制方法研究进展[J]. 水处理技术, 2016, 42(12): 12-18.  
SHEN H, GUO X Y, CHAI P, et al. Recent progress in biological control strategies of membrane biofouling in membrane bioreactors (MBRs)[J]. Technology of Water Treatment, 2016, 42(12): 12-18.
- [ 3 ] 李莹, 刘强, 陈卫, 等. 胞外聚合物与膜污染的相关关系研究进展[J]. 中国给水排水, 2021, 37(12): 25-30.  
LI Y, LIU Q, CHEN W, et al. Advances of correlation between extracellular polymers and membrane fouling[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(12): 25-30.
- [ 4 ] 王郑伟, 刘广波, 陈泽滨, 等. 广州市某净水厂 MBR 膜丝检测及清洗优化[J]. 中国给水排水, 2024, 40(3): 89-94.  
WANG Z W, LIU G B, CHEN Z B, et al. Detection of MBR membrane in a sewage purification plant in Guangzhou and its cleaning optimization[J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(3): 89-94.
- [ 5 ] 胡婧婷, 张春波, 周诗宇, 等. NaClO 原位清洗对膜生物反应器生物膜污染影响研究进展[J]. 化学通报, 2022, 85(8): 961-965.  
HU J T, ZHANG C B, ZHOU S Y, et al. Research progress in the influence of the NaClO in-situ cleaning on biofouling in membrane bioreactor[J]. Chemistry, 2022, 85(8): 961-965.
- [ 6 ] 关春雨, 杭世珺, 史骏, 等. MBR 中平板膜和中空纤维膜的运行特性对比研究[J]. 给水排水, 2015, 41(12): 35-39, 40.  
GUAN C Y, HANG S J, SHI J, et al. Comparison study on operation characteristics between flat sheet membrane and hollow fiber membrane in MBR process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(12): 35-39, 40.
- [ 7 ] 林静芳, 张新颖, 张莉敏, 等. MBR 工程长期运行中的膜清洗效果和膜性能变化[J]. 中国给水排水, 2022, 38(3): 67-73.  
LIN J F, ZHANG X Y, ZHANG L M, et al. Membrane cleaning effect and membrane performance change in MBR projects during long-term operation[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(3): 67-73.
- [ 8 ] 林传松, 莫兴斌. 污水处理工程中 AAOA+MBR 膜技术的应用研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(17): 22-24.  
LIN C S, MO X B. Research on the application of AAOA+MBR membrane technology in wastewater treatment engineering [J]. Leather Manufacture and Environmental Technology, 2024, 5

- (17) : 22–24.
- [ 9 ] 薛涛, 张彩云, 孙大阳, 等. 振动 MBR 结合精确曝气与回流强化脱氮除磷[J]. 水处理技术, 2024, 50(10) : 109–114.  
XUE T, ZHANG C Y, SUN D Y, et al. Improving nitrogen and phosphorus removal by vibrating MBR with precise aeration and recirculation [ J ]. Technology of Water Treatment, 2024, 50 (10) : 109–114.
- [ 10 ] 薛涛, 关欢欢, 陈春生, 等. 机械振动与曝气吹扫 MBR 工程两年运行效果对比[J]. 环境工程, 2025, 43(6) : 105–114.  
XUE T, GUAN H H, CHEN C S, et al. Comparison of 2-year operational performance of mechanical vibration and air sparging in an MBR system [ J ]. Environmental Engineering, 2025, 43 (6) : 105–114.
- [ 11 ] 孙剑宇, 雷霆, 梁鹏, 等. 脉冲曝气在大型膜生物反应器工程中的应用与优化[J]. 中国给水排水, 2021, 37(9) : 100–104.  
SUN J Y, LEI T, LIANG P, et al. Application and optimization of pulse aeration in large-scale membrane bioreactor [ J ]. China Water & Wastewater, 2021, 37(9) : 100–104.
- [ 12 ] 刘茜, 崔洪升, 刘世德, 等. 膜生物反应器(MBR)工艺污水厂的全流程节能降耗[J]. 中国给水排水, 2016, 32(6) : 99–102.  
LIU X, CUI H S, LIU S D, et al. Energy saving and consumption reduction of MBR in WWTP [ J ], China Water & Wastewater, 2016, 32(6) : 99–102.
- [ 13 ] 匡科, 孙伟, 董嘉豪, 等. 城镇净水厂 A<sup>2</sup>OA-MBR 工艺关键膜污染组分识别及清洗[J]. 膜科学与技术, 2025, 45(2) : 162–172.  
KUANG K, SUN W, DONG J H, et al. Identification and cleaning of key membrane fouling components for A<sup>2</sup>OA-MBR in sewage purification plant [ J ]. Membrane Science and Technology, 2025, 45(2) : 162–172.
- [ 14 ] 尤章超, 王德兵, 王巧英, 等. MBR 污水处理工艺长期运行中的膜强化清洗方式[J]. 净水技术, 2022, 41(2) : 75–80.  
YOU Z C, WANG D B, WANG Q Y, et al. Enhanced membrane cleaning method of MBR wastewater treatment process during long-term operation [ J ]. Water Purification Technology, 2022, 41(2) : 75–80.
- [ 15 ] 王志伟, 戴若彬, 张星冉, 等. 膜法污水处理技术研究应用动态与未来可持续发展思考[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(3) : 86–103.  
WANG Z W, DAI R B, ZHANG X R, et al. Recent advances and overview on sustainable development of membrane-based wastewater treatment technology [ J ]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(3) : 86–103.
- [ 16 ] 蒋岚岚, 张万里, 冯成军. 膜生物反应器工艺应用争议问题分析及改进建议[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(12) : 96–100.  
JIANG L L, ZHANG W L, FENG C J. Analysis of the main controversy and improvements in the application of MBR technology [ J ]. Environmental Pollution and Control, 2015, 37 (12) : 96–100.
- [ 17 ] 贺栋才, 杨婧, 蒋彬, 等. 成都合作污水处理厂三期工程 MP-MBR 工艺设计[J]. 中国给水排水, 2022, 38(16) : 57–60.  
HE D C, YANG J, JIANG B, et al. MP-MBR process design of Chengdu Hezuo wastewater treatment plant phase III project [ J ]. China Water & Wastewater, 2022, 38(16) : 57–60.
- [ 18 ] 田海成, 杨曦凯, 焦文海, 等. AAOA+MBR 工艺用于济南东客站地下污水处理厂[J]. 中国给水排水, 2023, 39(22) : 78–83.  
TIAN H C, YANG X K, JIAO W H, et al. Application of AAOA-MBR process in Jinan Dongkezhan underground wastewater treatment plant [ J ]. China Water & Wastewater, 2023, 39(22) : 78–83.
- [ 19 ] 田海成, 杨红红, 焦文海, 等. AAO+MBR 组合工艺各工段设计要点[J]. 中国给水排水, 2023, 39(6) : 71–77.  
TIAN H C, YANG H H, JIAO W H, et al. Key points for each section design of AAO and MBR combined process [ J ]. China Water & Wastewater, 2023, 39(6) : 71–77.
- [ 20 ] 任诚, 毛云飞, 周科帆, 等. AAO+MBR 系统的稳定低耗运行研究[J]. 中国给水排水, 2023, 39(5) : 67–73.  
REN C, MAO Y F, ZHOU K F, et al. Stable operation of AAO+MBR system with low consumption [ J ]. China Water & Wastewater, 2023, 39(5) : 67–73.
- [ 21 ] 李易寰, 董玉明, 高芳. AAOA-MBR 工艺在污水厂提标扩建中的应用[J]. 中国给水排水, 2022, 38(18) : 114–119.  
LI Y H, DONG Y M, GAO F. Application of AAOA-MBR process in sewage treatment plant upgrading and expansion [ J ]. China Water & Wastewater, 2022, 38(18) : 114–119.
- [ 22 ] 韩佩君, 余军, 胡新立, 等. AAO+MBR 工艺在高标准污水厂节地设计中的应用[J]. 中国给水排水, 2024, 40(16) : 65–70.  
HAN P J, YU J, HU X L, et al. Utilization of AAO + MBR process for land saving design of a wastewater treatment plant with high discharge standard [ J ]. China Water & Wastewater, 2024, 40(16) : 65–70.
- [ 23 ] 王磊, 陆峰, 孙许平, 等. A<sup>3</sup>O+MBR 工艺生活污水处理厂节能降耗措施[J]. 中国给水排水, 2024, 40(20) : 83–88.  
WANG L, LU F, SUN X P, et al. Energy saving and consumption reduction measures in A<sup>3</sup>O and MBR domestic sewage treatment plant [ J ]. China Water & Wastewater, 2024, 40(20) : 83–88.
- [ 24 ] 张轩, 王莹, 文亚萍, 等. MBR 处理市政污水的膜清洗方法及污染特性研究[J]. 四川环境, 2023, 42(4) : 16–22.  
ZHANG X, WANG Y, WEN Y P, et al. Study on the membrane cleaning process and pollution characteristics of MBR for municipal wastewater treatment [ J ]. Sichuan Environment, 2023, 42(4) : 16–22.