

任天昊, 曹婧, 李佟, 等. 大型全地下式 MBR 系统抗污染及清洗方式探索与实践[J]. 净水技术, 2025, 44(5): 131-137, 215.

REN T H, CAO J, LI T, et al. Exploration and practice of anti-pollution and cleaning solutions for large underground MBR system[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(5): 131-137, 215.

大型全地下式 MBR 系统抗污染及清洗方式探索与实践

任天昊, 曹婧*, 李佟, 郭俊温, 刘凡

(北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100083)

摘要 【目的】膜污染是膜生物反应器(MBR)系统运行的重要限制条件,膜清洗是抑制膜污染和提高产水能力的主要手段。文章旨在提高膜池清洗质量及运行稳定性,降低清洗成本。【方法】文章以北京某大型全地下 MBR 再生水厂为例,分析导致该再生水厂膜组器污堵及透水率下降的主要因素,针对曝气管堵塞、膜组器板结、无机污染、有机污染等常见污染情况,对原有清洗参数及步骤进行优化改进,并开发出一系列新型清洗维护手段。【结果】进行曝气系统自清洗操作后,曝气管堵塞情况有明显缓解,日衰减速率由 $18.30 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{MPa})$ 减少为 $6.25 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{MPa})$,曝气均匀度及抗板结效果显著提升。在进行在线除泥清洗后,膜池板结情况明显缓解,平均透水率能够恢复 20% 以上,且清洗前透水率越高,恢复效果越明显。氯洗程序优化后,在保证清洗效果的基础上,次氯酸钠可节约 15% 以上;搭建药剂循环系统,不仅能够实现清洗药剂的回收利用以及清洗成本的大幅节约,并且能够有效减少残余药剂对生化系统的冲击。【结论】文章提出的膜抗污染策略及清洗方式能够有效提高膜池运行过程中抗污染能力,提高膜池运行稳定性,对同类型再生水厂降低膜池清洗维护成本、提高 MBR 系统精细化管理水平有一定借鉴意义。

关键词 膜生物反应器 膜污染 化学清洗 精细化管理 药剂循环

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)05-0131-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.05.014

Exploration and Practice of Anti-Pollution and Cleaning Solutions for Large Underground MBR System

REN Tianhao, CAO Jing*, LI Tong, GUO Junwen, LIU Fan

(Beijing Drainage Group Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract [Objective] Membrane fouling is an important limiting condition for the operation of membrane bio-reactor (MBR) systems, and membrane cleaning is the main means to suppress membrane fouling and improve water production capacity. This article aims to improve the quality and operational stability of membrane tank cleaning, and reduce cleaning costs. [Methods] This paper took a large-scale fully underground MBR reclaimed wastewater treatment plant (WWTP) in Beijing as an example to analyze the main factors leading to membrane module fouling and permeability decline in reclaimed WWTP. In response to common fouling conditions such as clogging of aeration pipes, membrane module compaction, inorganic fouling, and organic fouling, the original cleaning parameters and procedures were optimized and improved. Additionally, a series of novel cleaning and maintenance techniques were developed. [Results] After conducting the self-cleaning operation of the aeration system the blockage of the aeration pipe was significantly alleviated, and the daily decay rate decreased from $18.30 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{MPa})$ to $6.25 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{MPa})$, while both aeration uniformity and anti-compaction performance were notably improved. After conducting online sludge removal cleaning, the compaction situation of the membrane tank was significantly alleviated, and the average permeability rate could be restored to more than 20%. The higher the water permeability rate before cleaning, the more obvious the recovery effect was. After optimizing the chlorine washing program, based on ensuring the cleaning effect, sodium hypochlorite could be saved by more than 15%. Building a chemical circulation system could achieve significant savings in cleaning agents. The establishment of a chemical circulation system not only

[收稿日期] 2024-01-09

[作者简介] 任天昊(1992—),男,工程师,硕士研究生,主要从事市政污水处理厂运行管理的工作,E-mail:13141230248@163.com。

[通信作者] 曹婧(1983—),女,工程师,硕士研究生,主要从事大型污水处理厂再生水处理、污泥处理处置的工作,E-mail:caojing@bdc.cn。

enabled the recycling of cleaning agents and significantly reduces cleaning costs, but also effectively mitigated the impact of residual chemicals on the biological treatment system. [Conclusion] The membrane fouling control strategies and cleaning method proposed in this study can effectively enhance the anti-fouling capacity and operational stability of the membrane tanks. These approaches provide valuable references for similar reclaimed WWTPs to reduce membrane tank cleaning and maintenance costs, as well as improve the refined management level of MBR systems.

Keywords membrane bioreactor(MBR) membrane fouling chemical cleaning refined management chemicals cycle

《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》(简称“十四五”规划)指出,要统筹城市地上地下空间利用,增加绿化节点和公共开敞空间的发展方向。结合再生水厂所在区域城市规划、地区更新和建设需求,满足污水处理、再生水回用、城市高质量发展等一系列要求,因地制宜建设地下供排水厂成为一种较好的技术选择^[1]。

近几年城市地下污水处理厂呈现爆发式增长,根据相关调查报告显示,全国 50% 以上的地理式污水处理厂采用厌氧/缺氧/好氧(AAO)或其改良工艺作为污水处理的主要工艺,超过 25% 的地理式污水处理厂采用膜生物反应器(MBR)工艺作为深度处理工艺。以“AAO+MBR”为主要处理工艺的污水处理厂,具有出水水质稳定、占地面积小、抗冲击负荷能力强、自动化程度高的特点^[2]。但无论是地理式还是地上 MBR 再生水厂,膜污染问题一直是其运行过程中需要面临的主要问题^[3-5]。

常见的膜污染类型包括有机污染和无机污染,

形成原因主要是污泥中的有机物质或污水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等无机物质在膜丝表面形成累积堵塞膜孔^[6-7]。膜组器常见的清洗维护方式主要包括物理清洗和化学清洗。物理清洗主要包括曝气擦洗、离线吊装冲洗、旋转膜组件清洗等方式,化学清洗主要利用酸性或碱性的化学药剂去除膜表面或孔内的污染物^[8-10]。但常规清洗方法存在清洗成本高、清洗质量不稳定、对不同膜污染类型清洗方式针对性不强等一系列问题,不利于水厂开展降本增效或精细化管理工作。

相比于地上 MBR 再生水厂,地理式 MBR 再生水厂由于存在环境密闭及湿热的问题,对通风除臭系统要求更高,需要对全部池体进行密封处理,进而带来了吊装检查工作量大、观测不直接、自控系统要求高、清洗成本高等一系列问题。

北京市某全地下 MBR 再生水厂(以下简称:某再生水厂)投产于 2016 年,处理规模为 $6 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$,主体工艺采用“AAO+MBR”工艺(图 1),设计出水水质满足《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB11/890—2012)B 标准的相关要求。

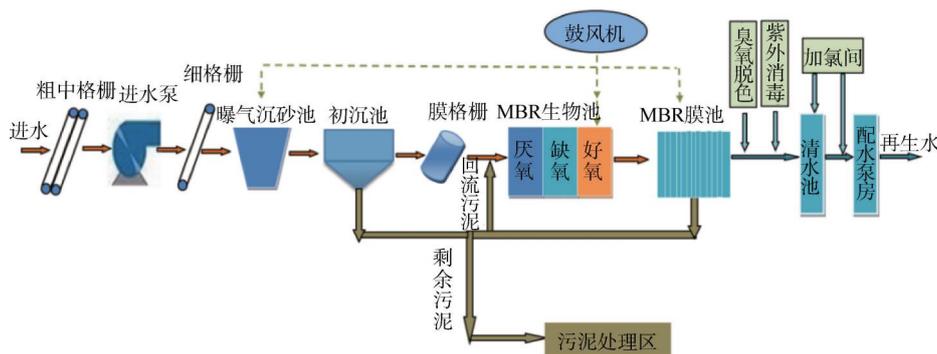


图 1 某再生水厂工艺流程

Fig. 1 Process Flow of a Reclaimed WWTP

由于各系列投产时间不一致,该再生水厂 MBR 系统同时存在 5 种不同年份、2 种曝气形式的膜组器,各系列膜池运行情况均有一定差别。且各膜池存在曝气系统堵塞、有机污染、无机污染等多种复杂

情况,不同形式、年份、衰减速度的膜组器清洗方式存在差异,难以实现运行管理精细化。且超大型地下 MBR 再生水厂由于规模效应,工况复杂程度进一步提升,给运行管理带来巨大挑战。

本文从优化 MBR 系统运行、减少膜组器板结、提高清洗质量、降低运行成本的角度出发,开展某大型全地下再生水厂 MBR 系统抗污染方法探索与实践工作,提出了针对曝气管路堵塞、膜丝板结、恢复性清洗(RC)成本高等一系列问题的处理手段,可为同类型 MBR 工艺提供参考。

1 研究对象及方法

1.1 研究对象

本文研究对象为北京市某 60 万 m³ 全地下 MBR 再生水厂的 MBR 系统。膜池整体为全地埋式

设计,池顶用不透明玻璃钢盖板覆盖,分为 A、B、C、D 4 个系列,单系列处理规模为 15 万 m³/d。膜丝采用聚偏氟乙烯(PVDF)材质的中空纤维膜,平均孔径为 0.08 μm。曝气方式主要采用大气泡曝气方式来延缓膜污染,气体从底部穿孔曝气管释放后被上方大气泡装置收集,以将连续气流转换为脉冲/间歇式的累积一定气量的非常短时间的释放,从而形成高强度的擦洗气流,对膜丝表面形成剪切冲刷,以维持膜系统的稳定运行通量。该水厂 MBR 系统设计参数如表 1 所示。

表 1 MBR 系统主要设计参数
Tab. 1 Main Design Parameters of MBR System

项目	规格/型号	数量	总数	备注
膜系列	-	4	4	15 万(m ³ ·系列)/d,合计 60 万 m ³ /d
膜池	36.2 m×6.1 m×4.0 m	20 座/系列	80 个	产能为 250~430 (m ³ ·膜池)/h
膜组器	-	16 台/膜池	1 280 台	额定运行流量为 24.8 m ³ /h
膜组件	SMM-1520	50 片/膜组器	64 000 片	运行通量为 16.0 L/(m ² ·h)

1.2 现阶段运行工况

由于规模庞大且为全地埋式设计,该再生水厂日常运行过程中所面临的清洗、维护、检查等

工作难度较小规模再生水厂呈倍增加。该再生水厂每年要进行大量清洗工作,具体如表 2 所示。

表 2 膜池清洗情况
Tab. 2 Cleaning Situation of Membrane Tank

功能设计说明		清洗台次
离线吊装清洗	将膜组器吊至清洗平台人工水力冲洗	2 560 台/年
维护性清洗(MC)	200~300 mg/L 次氯酸钠,3 min 加药,2 min 静置,5 min 空曝,循环 3 次	9 760 次/年
RC	氯洗:质量浓度为 1 000~3 000 mg/L 的次氯酸钠	320 次/年
	酸洗:质量分数为 1.0%~1.5% 的柠檬酸	160 次/年

因此,如何提高运行稳定性、降低维护及清洗频次,对于 MBR 系统高效、稳定运行显得尤为重要。

2 结果与讨论

2.1 曝气系统堵塞问题研究

目前,许多再生水厂膜池曝气系统采用穿孔曝气管形式,通过曝气管上均匀分布的 5 mm 左右的曝气孔对膜丝均匀曝气。在调查过程中发现,再生水厂在实际运行过程中为获得更好的出水水质,MBR 系统经常在较高污泥浓度环境下运行,容易发生活性污泥堵塞曝气管路的情况。当曝气管路堵塞时,气体无法作用在膜片表面,导致膜板结速率加快,透水率快速衰减。通常,大部分再生水厂通过开展离线吊装冲洗来进行曝气管路疏通,该方法不仅会产生高额的人工成本,同时在吊装冲洗过程中会

造成膜丝断裂,严重时影响出水水质。

为降低日常运行过程中曝气管堵塞的频率,实现对堵塞曝气管的原位恢复,某再生水厂在现有系统的基础上开发出曝气系统自清洗(AC)功能(图 2)。膜池在曝气过程中,曝气管内充满空气,停止曝气关闭曝气阀门,管路内由于气压的作用仍存在空气。泄压阀的作用是通过打破曝气管气密性将曝气管内空气释放,使管外的污水进入曝气管内实现对曝气管的水力冲洗。重新关闭泄压阀、打开曝气阀门,曝气风机输送空气重新将曝气管内的污水排出,如此反复进行 10~20 次,从而实现曝气管堵塞位置的清洗。

某再生水厂将 AC 清洗纳入膜池日常维护中,根据污泥浓度情况每 5~10 d 进行 1 轮 AC 清洗,曝

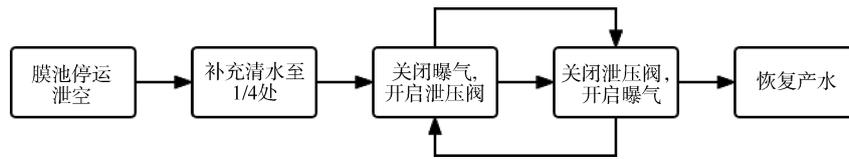


图 2 AC 步骤

Fig. 2 AC Steps

气管堵塞情况有明显缓解。如图 3 所示,在进行 AC 清洗后膜池曝气管堵塞数量明显减少,从清洗前的 18 处左右的堵塞数量基本减少为 0 处;进行 AC 清洗操作后,膜池运行稳定性显著提升,如图 4 所示,日衰减速率由 $18.30 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{MPa})$ 减少为 $6.25 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{MPa})$ 。

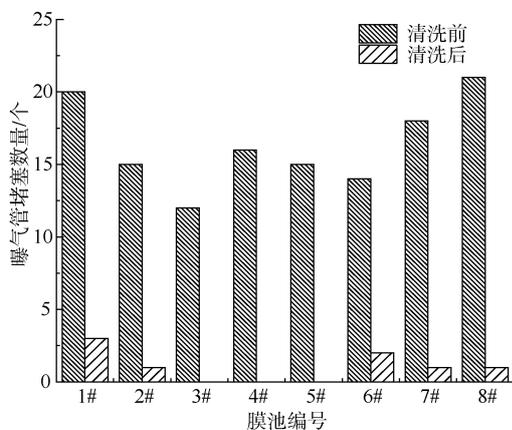


图 3 AC 清洗前后曝气管清洗效果

Fig. 3 Recovery Effect of Aeration Pipe before and after AC

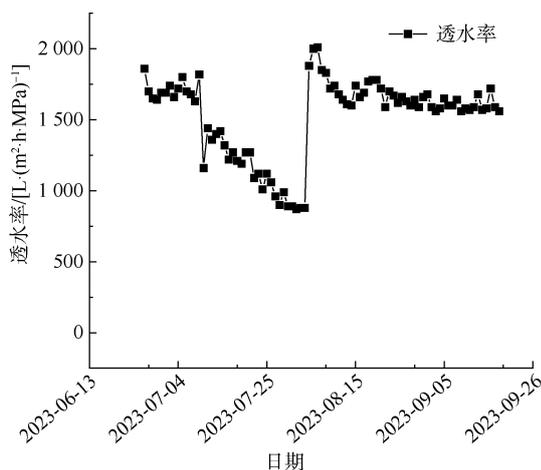


图 4 AC 清洗前后膜池透水率变化情况

Fig. 4 Change of Membrane Tank Permeability before and after AC

2.2 板结膜组器在线除泥功能研究

由于活性污泥胞外聚合物具有一定的黏性,MBR 系统在运行过程中活性污泥会在膜片表面逐渐积累,

随着运行时间的增加而形成污泥板结情况,导致过水能力下降^[11]。在进行化学清洗前,通常需通过人工离线吊装冲洗去除膜片表面的板结污泥,以保证良好的化学清洗效果。但频繁的离线吊装冲洗不仅会造成人工成本的增加,反复吊装及冲洗过程也会造成膜丝断裂,缩短膜丝使用寿命或影响出水水质。

通过对不同年份膜丝检测发现,随着运行时间的延长,膜丝的机械强度呈现逐年下降趋势,膜丝表面亲水性能也逐年下降(表 3)。机械强度下降导致膜丝在离线吊装清洗过程中更易发生膜丝断裂现象,导致出水浑浊度和出水 TP 升高。因此,在保证膜池良好清洗效果和过水能力前提下,应采取一定的措施减少离线吊装和人工冲洗频次,避免膜丝大量断裂。

表 3 不同使用期的膜性能检测结果

Tab. 3 Test Results of Membrane Performance in Different Service Period

膜丝	使用时长/年	断裂力/N	接触角/(°)
1 号膜丝	1	6.74	76.9
2 号膜丝	2	6.65	77.6
3 号膜丝	3	6.26	79.44
4 号膜丝	4	5.04	82.4

某再生水厂通过大量现场试验,在现有 MC 功能基础上开发出 1 种原位去除膜丝表面板结污泥的手段,即在线除泥清洗(DC)。其过程为膜池停运后利用反洗泵将质量浓度为 $300 \sim 500 \text{ mg/L}$ 的次氯酸钠打入膜丝内部,使药剂从内部透过膜丝表面微孔与表面板结污泥接触(图 5)。次氯酸钠在与膜丝表面污泥接触后,可以使活性污泥失活或黏性降低^[12],通过 $24 \sim 72 \text{ h}$ 曝气抖动的方式可以使板结污泥加速从膜丝表面脱落,达到原位去除膜丝表面板结污泥的效果。

在经过一段时间的运行之后,膜丝表面形成板结污泥层及絮状物,且随着运行时间延长板结情况逐渐加剧。在经过 24 h DC 后,膜丝表面板结污泥及絮状物基本得到去除。

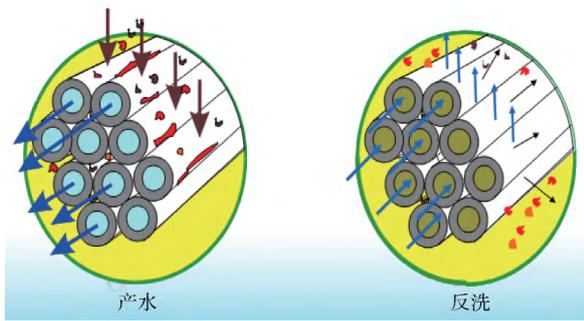


图5 产水和反洗过程

Fig. 5 Water Production and Backwashing Process

在进行 DC 后,膜池透水率也有较为明显的提升效果。如图 6 所示,某再生水厂选取了不同透水率的 10 座膜池为研究对象,在进行 DC 后,膜池平均透水率能够恢复 20% 以上,且清洗前透水率越高,恢复效果越明显,清洗前透水率为 1 000 L/(m²·h·MPa) 左右的膜池,在进行 DC 清洗后恢复比例约在 30%。主要原因是在膜丝板结初期,活性污泥未在膜丝表面形成牢固附着层,胞外聚合物(EPS)、蛋白等大分

子有机物也未彻底堵塞膜丝表面微孔,在进行 DC 后透水率可以得到较为明显的恢复。

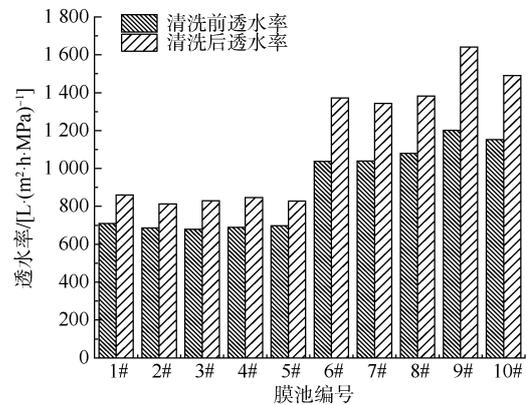


图6 DC 前后膜池透水率变化

Fig. 6 Permeability Change before and after DC

2.3 RC 优化

图 7 为某再生水厂原有的氯洗步序,曝气主要是为了将氯洗过程中松动的污泥去除,静置是避免曝气时间过长导致生物泡沫溢出。

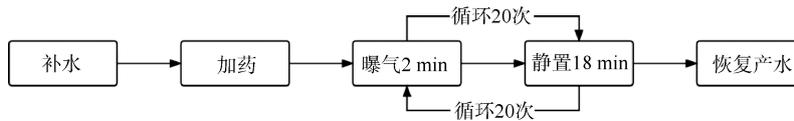


图7 原 RC 清洗步序

Fig. 7 Original RC Steps

在实际清洗过程中发现,曝气会造成次氯酸钠溶液中的有效氯吹脱,不仅造成药剂浪费,而且会加剧现场腐蚀及臭气问题。某再生水厂分别测试静置和曝气状态下,次氯酸钠药剂 pH 变化,结果如表 4 所示。

表 4 曝气对次氯酸钠的影响

Tab. 4 Effect of Aeration on Sodium Hypochlorite

反应时间/h	静置	曝气
0	pH 值=11.2	pH 值=11.24
12	pH 值=10.75	pH 值=9.74

为避免曝气造成的次氯酸钠浪费,同时保证良好的有机污染物清洗效果。在原有氯洗前增加“AC+DC”清洗,疏通曝气管路并通过 DC 清洗去除膜丝表面板结污泥,为氯洗做准备。并将原有氯洗过程修改为“加药后曝气 5 min,静置 10 h”(图 8),在保证药剂混合均匀的前提下,缩短了曝气时间,减少了药剂浪费,提高了清洗质量。

选择清洗前平均透水率为 800 L/(m²·h·MPa) 左右的膜池进行对比试验,次氯酸钠质量浓度为 2 000 mg/L,清洗时间为 10 h。从清洗结果来看(图 9),

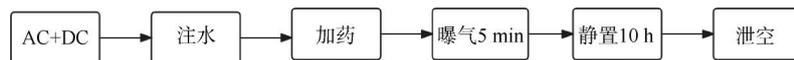


图8 优化后 RC 清洗步序

Fig. 8 Optimized RC Steps

氯洗优化前,膜池氯洗后平均透水率恢复至 1 570 L/(m²·h·MPa),提升幅度为 96%。氯洗优化后,膜池氯洗后平均透水率恢复至 1 790 L/(m²·h·MPa),提升幅度为 119%。主要是由于优化后减少了清洗

过程中次氯酸钠的吹脱(图 10),使得次氯酸钠更多地作用于膜丝表面的有机污染物,提高了污染物去除效果。

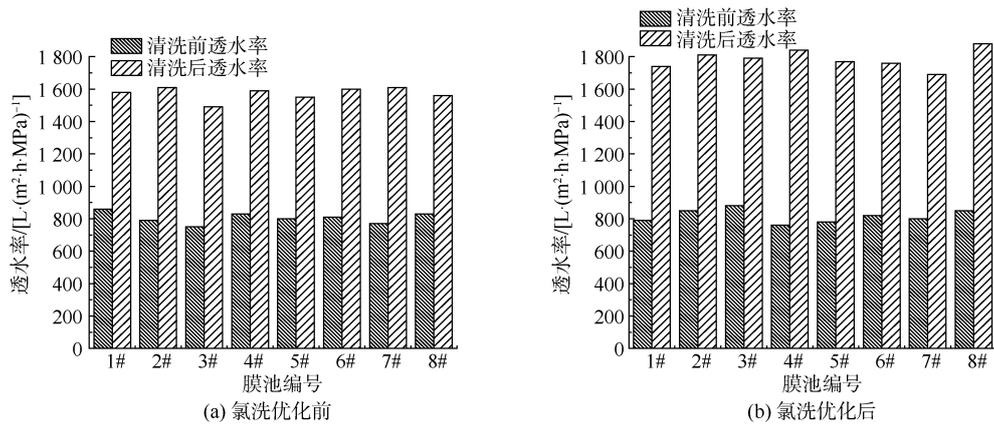


图9 优化前后清洗效果

Fig. 9 Cleaning Effect before and after Optimization

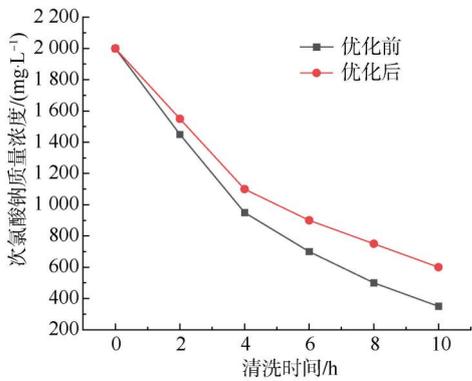


图10 清洗过程中次氯酸钠浓度变化

Fig. 10 Changes of Sodium Hypochlorite Concentration during Cleaning Process

2.4 膜药剂循环平台搭建

某再生水厂 MBR 系统为全埋式布设,膜组器数量多达 1 280 台,未设置离线清洗池,所有 RC 只能原位进行。清洗后膜池洗脱液中仍残余一定浓度的药剂,经检测,氯洗结束后次氯酸钠残余质量浓度为

为 400~600 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,柠檬酸残余质量分数约为 0.4%。残余药剂直接排放至生物池,造成大量的药剂浪费,导致清洗成本的升高。

为避免药剂浪费、降低清洗成本,该再生水厂利用现况管路进行改造(图 11)。改造方式:新增 1 条主管 1,与各个膜池的泄空管相连,并在连接管 3 上新增 1 个手阀 6。在膜池泄空管止回阀 2 后端新增 1 个手阀 4,将手阀 4 和止回阀 2 间的管线与新增主管 1 相连,并在连接管 2 上新增手阀 5。药剂循环方式:膜池进行 RC 后,打开泄空泵、气动阀 2、止回阀 2 和手阀 5,关闭手阀 4,再开启将要进行 RC 清洗膜池的手阀 6。通过泄空泵将药剂溶液流入泄空管,经过气动阀 2、手阀 3、止回阀 2 和手阀 5 后流入连接管 2,进而转入主管 1,经由连接管 3 和手阀 6 进入下一个膜池,完成药剂溶液重复利用并转运的过程。

药剂循环系统改造完成后,为测试循环药剂的清洗效果,某再生水厂选取 4 座待清洗膜池,开展

某水厂膜池RC清洗药剂转运管线改造示意图

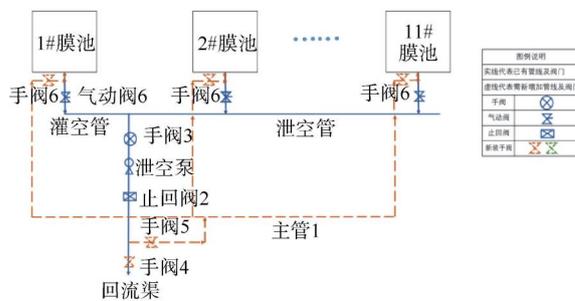


图11 药剂循环系统

Fig. 11 System of Chemicals Circulation

RC 工作。其中,1#、2#膜池采用 1 500 mg/L 次氯酸钠+1.5%柠檬酸的方式进行 RC,3#、4#膜池通过药剂循环系统分别接收 1#、2#膜池洗脱液并补充一定量的药剂至初始浓度后进行 RC,测试结果如图 12 所示。从测试结果来看,4 座膜池在 RC 结束后,均能恢复至 1 700 L/(m²·h·MPa)以上,3#、4#膜池也并没有受到洗脱液的影响出现清洗质量下降的情况。综合评估后,每年可节约次氯酸钠成本约为 45 万元,柠檬酸成本约为 150 万元,在保证清洗质量的前提下大大降低了膜池清洗成本。

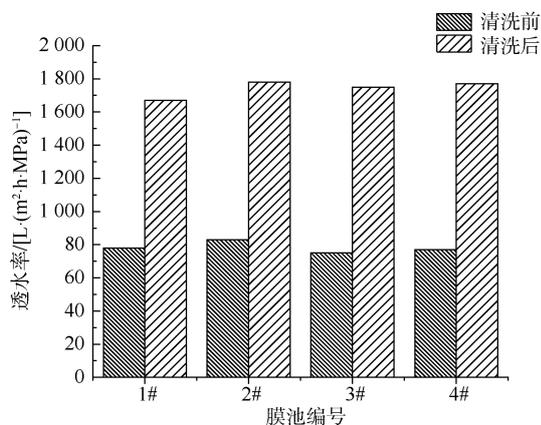


图 12 清洗效果对比

Fig. 12 Comparison of Cleaning Effects

3 结论

(1) 本文所采用的“AC+DC+RC”相结合的清洗维护方式,在一定程度上解决了 MBR 系统运行过程中常见的膜污染问题,提高了运行稳定性。进行 AC 清洗以后,曝气管堵塞数量明显减少,膜池运行稳定性显著提升,日衰减速率由 18.30 L/(m²·h·MPa)减少为 6.25 L/(m²·h·MPa)。在进行 DC 后,膜池平均透水率能够恢复 20%以上,且清洗前透水率越高,恢复效果越明显,清洗前透水率为 1 000 L/(m²·h·MPa)左右的膜池,在进行 DC 清洗后恢复比例约为 30%。

(2) 原有氯洗过程存在药剂浪费情况。将氯洗过程修改为“加药后曝气 5 min,静置 10 h”,在保证药剂混合均匀的前提下,减少了因曝气产生的药剂浪费。搭建药剂循环利用系统,能够实现膜清洗残余药剂的回收利用,大大降低了清洗成本。

(3) 膜清洗维护对于污水厂运行管理而言是一项细致且重要的工作,膜清洗参数、方式的选择不仅影响着膜清洗效果,同时也极大程度上决定了 MBR 系统的运行维护成本和膜寿命。污水厂运行管理人

员应结合自身实际生产运行情况,有针对性地制定膜清洗维护标准,及时根据工况变化调整运行及清洗参数,在延缓膜污堵、保证正常产能的情况下,降低运行维护成本,并延长膜使用寿命。

参考文献

[1] 张韵,冯硕,王洋,等.城市地下给排水厂现况与发展趋势探讨[J].给水排水,2023,59(3):39-46,59.
ZHANG Y, FENG S, WANG Y, et al. Present status and development tendency of underground water and wastewater treatment plants[J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 59(3): 39-46, 59.

[2] XIAO K, LIANG S, WANG X M, et al. Current state and challenges of full-scale membrane bioreactor applications: A critical review[J]. Bioresource Technology, 2019, 271: 473-481. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.09.061.

[3] 杨春雪,施春红,张喜玲.膜生物反应器处理农村生活污水研究进展[J].水处理技术,2020,46(8):1-5.
YANG C X, SHI C H, ZHANG X L. Research progress of membrane bioreactor in rural domestic sewage treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(8): 1-5.

[4] 吴梦菲.膜生物反应器(MBR)非典型工况下膜污染的机制及控制研究[D].金华:浙江师范大学,2022.
WU M F. Mechanism and control of membrane fouling in membrane bioreactor under abnormal conditions [D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2022.

[5] ASLM M, CHARFI A, LESAGE G, et al. Membrane bioreactors for wastewater treatment: A review of mechanical cleaning by scouring agents to control membrane fouling [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 307: 897-913. DOI: 10.1016/j.cej.2016.08.14.

[6] 袁野,罗玲,陆柳鲜,等.MBR膜污染缓解与处理技术[J].应用化工,2021,50(10):2834-2839,2846.
YUAN Y, LUO L, LU L X, et al. MBR membrane pollution mitigation and treatment technology [J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(10): 2834-2839, 2846.

[7] 戴金金,牛承鑫,潘阳,等.厌氧膜生物反应器污泥处理与膜污染控制研究进展[J].环境化学,2020,39(8):2154-2165.
DAI J J, NIU C X, PAN Y, et al. Overview of anaerobic membrane bioreactors sludge treatment and membrane fouling control strategies[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(8): 2154-2165.

[8] 高放,马林,霍涛,等.膜生物反应器污染及防控方法研究进展[J].环境工程,2020,38(3):69-75.
GAO F, MA L, HUO T, et al. Research progress on characterization and control of fouling and in membrane bioreactors [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(3): 69-75.

(下转第 215 页)

483.
YANG J H, ZHANG Y W, FU G H, et al. Study on influencing factors of soil nutrient content by Mehlich 3 leaching [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2023, 13 (5): 475–483.
- [29] SANTIAGO P, MORENO Y, FERRÚS M A J H. Identification of viable *Helicobacter pylori* in drinking water supplies by cultural and molecular techniques [J]. Helicobacter, 2015, 20 (4): 252–259.
- [30] 李聪聪, 余以刚, 邱杨, 等. PMA-qPCR 方法快速检测活性 *E. coli* O157:H7 [J]. 食品科学, 2012, 33(22): 217–220.
LI C C, YU Y G, QIU Y, et al. Rapid detection of live *E. coli* O157:H7 by PMA-qPCR method [J]. Food Science, 2012, 33 (22): 217–220.
- [31] HOLM W V, GHESQUIÈRE J, BOON N, et al. A viability quantitative PCR dilemma: Are longer amplicons better? [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2021, 87 (5): e0265320. DOI: 10.1128/aem.02653–20.
- [32] CODONY F, DINH-THANH M, AGUSTÍ G. Key factors for removing bias in viability PCR-based methods: A review [J]. Current Microbiology, 2020, 77(4): 682–687.
- [33] LI H, XIN H, LI S F. Multiplex PMA-qPCR assay with internal amplification control for simultaneous detection of Viable *Legionella pneumophila*, *Salmonella typhimurium*, and *Staphylococcus aureus* in environmental waters [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(24): 14249–14256.

(上接第 137 页)

- [9] QILIN L, MENACHEM E. Organic fouling and chemical cleaning of nanofiltration membranes: Measurements and mechanisms [J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(17): 4683–4693.
- [10] 孙剑宇. 膜生物反应器城市污水处理工艺优化运行与节能降耗研究 [D]. 北京: 清华大学, 2016.
SUN J Y. Energy saving and operation optimization of membrane bioreactors for municipal wastewater treatment [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [11] WANG Z W, MA J X, TANG C Y, et al. Membrane cleaning in membrane bioreactors: A review [J]. Journal of Membrane Science, 2014, 468: 276–307.
- [12] 马旭蛟. A/O/A-MBR 工艺处理低 C/N 污水与膜污染初步研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
MA X J. The Preliminary study on low C/N wastewater treatment and membrane fouling of A/O/A-MBR process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.