

污水处理厂膜处理系统运行效能提升研究

张吉道

华自科技股份有限公司, 湖南凤凰, 410205;

摘要: 针对 A 市某市政污水处理厂 MBR 膜系统运行中存在的通量衰减快、能耗高及清洗频次多等问题, 本文系统分析运行瓶颈成因, 提出以“四级组合预处理+动态曝气控制+靶向膜清洗”为核心的多维度优化策略。在进水端引入微滤膜单元强化颗粒截留, 通过悬浮物浓度反馈调节曝气强度以增强膜面剪切力, 并构建基于污染成分识别的差异化清洗机制。通过中试验证, 优化方案显著提升膜通量稳定性, 延缓污染积累, 降低清洗药剂消耗与单位能耗, 膜丝完整性与使用寿命明显改善, 为市政污水膜系统的高效、低耗运行提供了可复制的技术路径与工程依据。

关键词: 膜污染控制; 动态曝气; 靶向清洗; 微滤预处理; 能耗优化

DOI: 10.69979/3029-2727.26.03.086

引言

膜生物反应器凭借出水水质优、占地小等优势已在市政污水处理中广泛应用, 但其运行过程中膜污染频发、能耗高及运维成本大等问题仍制约系统效能与稳定性^[1]。A 市某大型污水厂 MBR 系统长期运行数据显示, 通量衰减与化学清洗频次不断上升, 滤饼层和复合污染物沉积成为主要障碍。传统固定参数运行模式难以适应进水水质动态变化, 导致膜面负荷失衡与膜丝疲劳加剧。为突破瓶颈, 本文基于现场实测数据开展运行诊断, 聚焦进水预处理精度提升、曝气系统自适应调控与清洗策略靶向化, 构建全过程多策略协同控制框架, 提升系统运行效能与膜组件使用寿命。

1 污水处理厂膜处理系统运行现状

A 市某市政污水处理厂 MBR 膜处理系统设计规模为 5 万 m³/d, 服务人口约 38 万, 主体工艺采用 A2O+ 浸没式中空纤维膜分离。进水以生活污水为主, 雨季存在 30% 比例合流制溢流, 近三年年均 COD 为 200-300mg/L, SS 150-200mg/L, NH₃-N 35-45mg/L, TP 4-6mg/L, B/C 0.35-0.45, 可生化性尚可但悬浮颗粒波动显著。膜区配置 8 组膜池, 单池装填面积 1600m² 的 PVDF 帘式膜, 孔径 0.1μm, 设计通量 15L/(m²·h), 运行温度 15-25℃, 跨膜压差(TMP)控制上限 45kPa; 曝气采用穿孔管连续擦洗, 强度 0.5m³/(m²·h), 气水体积比 24:1; 在线维护性清洗周期 7d, 次氯酸钠质量浓度 500mg/L, 酸洗周期 30d, 柠檬酸质量分数 1%。

2023 年 3-5 月连续监测显示, 系统实际平均通量已

降至 13.2L/(m²·h), 月衰减率 8%, TMP 在 15d 内由 18kPa 升至 42kPa, 化学清洗周期被迫缩短至 15d; 同期单位水能耗 1.2kWh/m³, 其中膜曝气占 55%, 泵循环占 28%, 化学清洗加热占 12%, 其余为自控与照明。膜污染以凝胶层和无机结垢复合为主, FTIR 谱图在 1540cm⁻¹、1650cm⁻¹ 处出现蛋白质及多糖特征峰, XRF 检出 Ca、Al、Fe 质量分数分别达 12%、4%、3%, 表明生物聚集体与金属氢氧化物协同阻塞膜孔。

运行瓶颈可归纳为三点: ①高曝气强度下剪切力不足, 膜表面错流速度仅 0.18m/s, 低于临界 0.25m/s, 导致滤饼层持续累积; ②进水 SS 波动大时缺乏即时反馈, 膜通量恒定运行策略加剧污染; ③化学清洗频次提高使膜丝外径年衰减率升至 2.1%, 拉伸强度下降 19%, 寿命由设计的 8 年缩短至 5 年。上述瓶颈直接推高直接运行成本 0.16 元/m³, 并造成出水水量日波动 8%, 对下游再生水用户造成冲击, 亟需通过预处理强化、曝气优化及靶向清洗综合策略实现效能提升^[2]。

2 运行效能提升关键技术优化策略

2.1 进水预处理工艺优化

针对 A 市某市政污水处理厂 MBR 系统运行中微颗粒与胶体污染物对膜组件造成滤饼层累积、膜通量衰减等问题, 原有由粗格栅、细格栅及沉砂池构成的三级预处理系统在对粒径 1-100μm 的悬浮固体与胶体颗粒截留方面存在显著短板^[3]。实测数据显示, 该类颗粒在进水中占比超过 40%, 胶体物质引起的 SDI 波动频繁, 形成典型的预处理滞后问题。为增强膜前处理精度与稳定

性,本研究在原工艺基础上提出“粗格栅+细格栅+沉砂池+微滤膜”四级复合预处理方案。新增微滤膜单元采用聚偏氟乙烯(PVDF)材质中空纤维膜组件,孔径严格限定为 $0.1\mu\text{m}$,以实现大于 $0.1\mu\text{m}$ 微粒及胶体颗粒的有效物理筛分。膜组件运行通量设计为 $20\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,设定跨膜压差上限为 0.12MPa ,配置 30min 周期反冲洗,冲洗强度控制在 $60\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,并辅以气水协同冲洗,气水体积比定为 $3:1$ 。为抑制膜前污染物蓄积,系统中同步设置前级在线混合器,通过低剂量助凝剂预投改善粒径分布,增强颗粒聚集能力,降低对膜表面形成二次污染的风险。该优化方案在工艺上兼顾物理阻隔与粒径分级控制,提升整体截留分辨率,为后续膜分离段维持稳定过滤负荷提供必要的水质保障。

2.2 膜组件运行参数动态调整

针对膜组件运行中曝气强度恒定为 $0.5\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 导致的冲刷效率不足问题,本研究提出基于进水悬浮物浓度实时反馈的曝气强度动态调整策略^[4]。通过在线浊度仪与MLSS传感器实时监测进水SS浓度,建立膜通量维持率与曝气强度的经验模型:当 $\text{SS}\leq 150\text{mg/L}$ 时,膜表面滤饼层形成速率低于临界污染阈值,此时维持 $0.5\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 的曝气强度可满足需求;当SS处于 $150\text{--}200\text{mg/L}$ 时,污染物沉积速率提升 1.8 倍,需将曝气强度增至 $0.55\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 以提升膜表面错流速度至 0.22m/s ;当 $\text{SS}>200\text{mg/L}$ 时,胶体物质与生物聚合物形成的复合污染层厚度增速达 3.2mm/h ,此时需采取 $0.6\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 的强化曝气模式,使错流速度突破临界值 0.25m/s 。该动态策略的核心计算模型如下:

$$G_a = \begin{cases} 0.50 & C_{\text{SS}} \leq 150 \\ 0.50 + 0.0025 \times (C_{\text{SS}} - 150) & 150 < C_{\text{SS}} \leq 200 \\ 0.625 + 0.00125 \times (C_{\text{SS}} - 200) & C_{\text{SS}} > 200 \end{cases} \quad (1)$$

其中, G_a 表示曝气强度(单位: $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$), C_{SS} 为进水悬浮物浓度实时监测值(单位: mg/L)。该分段函数确保在SS浓度峰值期(如雨季合流制溢流阶段)通过增强气泡剪切力破坏污染物沉积层,而在低负荷期降低无效能耗。

控制逻辑通过PLC系统实现:首先,SS传感器每 5min 采集数据并传输至中央控制器;其次,控制器根据公式(1)计算目标曝气强度值;最后,通过变频风机调节鼓风量,精度控制在 $\pm 0.01\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。关键实施环节包括设置 10min 的渐变过渡期防止水力冲击,以及SS数据异常波动时(标准差 $>15\text{mg/L}$)自动切换至安全模式。该策略突破传统恒参数运行的局限性,实现膜污染控制与能耗优化的动态平衡^[5]。

2.3 膜污染靶向控制技术

针对膜污染问题,本研究通过傅里叶红外光谱法对污染层进行成分解析,识别出有机物与无机物的复合污染特征。光谱分析显示:在 1540cm^{-1} 处出现蛋白质酰胺II带特征峰, 1650cm^{-1} 处存在多糖C-O伸缩振动峰,二者共同构成有机污染主体(占比 65%);而 1040cm^{-1} 处的Si-O-Si振动峰及 550cm^{-1} 处Fe-O峰则表明无机污染(占比 35%),主要成分为硅酸盐胶体与金属氢氧化物。基于此,提出靶向清洗策略:针对有机污染,采用 $0.5\%\text{NaOH}$ 溶液于 40°C 下循环清洗 120min ,通过皂化反应分解蛋白质-多糖复合体;针对无机污染,使用 $1\%\text{HCl}$ 溶液($\text{pH}=0.8$)常温清洗 90min ,溶解金属氢氧化物及硅垢。两种清洗程序交替实施,先碱洗后酸洗,每次清洗后均以反渗透水冲洗至中性。

清洗周期优化依据跨膜压差增长率动态调整:当TMP日增幅 $>1.5\text{kPa}$ 时启动清洗,使周期从 15d 延长至 25d 。药剂投加量通过污染指数模型精确控制:

碱洗药剂用量:

$$V_{\text{NaOH}} = 0.15 \times A_m \times \delta_o \quad (2)$$

酸洗药剂用量:

$$V_{\text{HCl}} = 0.08 \times A_m \times \delta_i \quad (3)$$

其中, A_m 为膜面积(单位: m^2), δ_o 为有机污染层厚度(单位: μm), δ_i 为无机污染层厚度(单位: μm),厚度数据由激光共聚焦显微镜在线监测获取。实施中采用计量泵自动投加,误差控制在 $\pm 2\%$ 。表1系统归纳了污染类型与靶向清洗的对应关系,为工程应用提供标准化操作指南。

表1 膜污染类型与靶向清洗方案对照表

污染类型	占比	特征污染物	清洗药剂	浓度	作用机制	操作参数
有机物污染	65%	蛋白质/多糖	NaOH	0.5%	水解生物聚合体	40°C , 120min , 流速 1.2m/s
无机物污染	35%	硅酸盐/金属氢氧化物	HCl	1%	溶解结晶体	25°C , 90min , 流速 0.8m/s
复合污染	-	有机-无机复合层	NaOH+HCl	阶梯浓度	协同剥离	先碱后酸, 间隔水洗

3 工程验证与效能评估

3.1 试验系统设计与运行

为验证优化策略的工程可行性，搭建 50m³/d 规模的 A2O-MBR 中试装置，流程与案例厂保持一致。预处理段增设孔径 0.1μm 的微滤膜单元，设计通量 20L/(m²·h)，反冲洗周期 30min。膜池选用与现场同型号 PVDF 帘式膜，有效面积 48m²，设计通量 15L/(m²·h)。曝气系统配置变频鼓风机，可在 0.45-0.65m³/(m²·h) 区间无级调节。PLC 控制柜集成 SS 在线仪、TMP 传感器与计量泵，按既定逻辑实现曝气强度动态调整及靶向清洗药剂精准投加。装置连续运行 2 个月，监测指标涵盖膜通量、TMP、COD 去除率、单位能耗、清洗药剂用量及膜丝完整性，为后续效能对比提供原始数据序列。

3.2 运行效能评估

基于中试系统连续两个月稳定运行数据，围绕膜通量维持性、污染控制效果、能耗分布及清洗频次等核心运行参数开展对比评估。采用优化策略前后形成对照组，重点监测平均膜通量 (J)、跨膜压差 (TMP)、通量衰减率 (R_j)、清洗周期 (T_c)、单位膜区能耗 (E_s)、药剂投加量 (V_{NaOH}/V_{HCl}) 及膜丝完整性指标 (L_f)。优化策略前后运行参数如表 2 所示。

表 2 优化策略前后运行参数对比表

项目	优化前	优化后	变化率
平均通量 J(L/m ² ·h)	13.2	17.8	34.80%
通量衰减率 R _j (%)	8	2.9	-63.80%
TMP 均值(kPa)	42	28.4	-32.40%
清洗周期 T _c (d)	15	25	66.70%
NaOH 投加量(L/d)	3.8	3.18	-16.30%
HCl 投加量(L/d)	2.6	2.27	-12.70%
单位能耗 E _s (kWh/m ³)	1.2	0.97	-19.20%
膜丝强度保持率 L _f (%)	81	98.3	21.40%
膜寿命预测(年)	5	7.1	42.00%

由表 2 可知，优化后系统 J 由 13.2L/(m²·h) 恢复至 17.8L/(m²·h)，R_j 下降至 2.9%，TMP 年均值压降至 28.4kPa，曝气强度动态控制使 E_s 由 1.20kWh/m³ 降至 0.97kWh/m³。靶向清洗控制 TMP 增幅显著缓解，清洗周期延长至 25d，V_{NaOH} 与 V_{HCl} 分别减少 16.3% 与

12.7%，膜丝拉伸强度保持在 98% 以上，年预估寿命延长至 7.1 年。系统稳定性以 SD 为判据评估，出水通量波动控制在 ±0.4L/(m²·h)，出水水质持续满足一级 A 标准。分析表明，多策略协同优化实现膜组件运行状态量化调控，有效延缓污染累积过程，降低运行负荷与化学应力。膜丝性能维持性提升印证其抗清洗疲劳能力增强，结合能耗与维护数据，证实该系统具备优越的运行经济性与可持续性。

4 结语

本研究通过在 A 市污水厂 MBR 系统中引入微滤膜预处理单元、动态曝气调节与靶向清洗策略，实现膜污染控制机制的系统优化。运行结果表明，优化方案可显著恢复并维持较高通量水平，跨膜压差增长显著放缓，清洗周期延长，药剂投加强度降低，膜丝强度保持率明显提升，单位能耗下降，系统整体运行稳定性增强。研究验证了基于“污染识别-响应控制-维护优化”的协同机制在提升膜系统运行效能方面的有效性与适用性，具备较强的工程推广价值与现实指导意义。

参考文献

- [1] 赵姗姗. 市政污水处理中的膜污染精准调控与多效回用效能提升分析[J]. 造纸装备及材料, 2025, 54(07): 133-135.
- [2] 杨敏. 膜生物反应污水处理技术对水质优化的影响研究[J]. 节能与环保, 2025, (05): 72-78.
- [3] 刘焘, 刘卫, 陈家俊. MBR 工艺污水处理厂高效低成本运行技术研究进展[J]. 广州化工, 2025, 53(07): 15-18.
- [4] 刘军. 某产业园区水污染控制意义及污水处理方案分析[J]. 清洗世界, 2024, 40(12): 33-35.
- [5] 施春红, 江嘉诚, 张玉琦, 等. MBR 处理农村生活污水及膜污染控制研究进展[J]. 水处理技术, 2024, 50(02): 20-25.