

市政原水超滤工艺膜污染成因解析及在线清洗运行优化研究

梁旻昊 郭慧宁 于成意

北京城市排水集团有限责任公司 北京 100044

摘 要: 针对市政原水超滤系统长期运行中膜污染频发、清洗效率低、膜组件损耗快等问题,本文系统解析有机、无机、微生物复合污染的成因与耦合演化机制,探究水质、运行参数及清洗工艺对污染的影响规律。通过多组试验优化水力与化学清洗参数,构建分季节差异化清洗模式与闭环调控体系。结果表明,优化工艺可大幅提升膜通量与TMP恢复率,降低运行能耗与膜损耗,可为同类工程提供技术参考。

关键词: 市政原水超滤工艺;膜污染成因;在线清洗运行优化

引言: 超滤技术广泛应用于市政原水处理领域,是反渗透系统预处理的核心工艺。但原水水质季节波动、污染物组分复杂,叠加运行与清洗工艺不合理等问题,易引发膜面复合污染,造成跨膜压差攀升、膜通量衰减、化学清洗周期缩短等问题,严重制约系统稳定运行与膜组件使用寿命。为解决工程痛点,本文全面剖析膜污染机制,优化在线清洗工艺与运行参数,旨在提升系统运行效能、降低运维成本。

1 市政原水超滤工艺运行及膜污染基础特征分析

1.1 市政原水超滤系统工艺概况

(1) 本系统采用浸没式 PVDF 中空纤维超滤膜组件,截留分子量 100kDa,以错流过滤方式实现固液分离,产水用于后续反渗透系统补水。(2) 原水经取水头部、格栅及沉砂池后,进入自清洗过滤器,再经超滤膜池过滤,产水进入清水池;运行通量维持 $20 \sim 30 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,过滤周期 $30 \sim 60 \text{ min}$,反冲洗间隔 30 min ,反冲时间 $1 \sim 2 \text{ min}$,气洗强度 $60 \sim 80 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 。(3) 预处理设置混凝及次氯酸钠投加,混凝剂投加量 $2 \sim 4 \text{ mg/L}$ (以 Fe^{3+} 计),助凝剂 $0.1 \sim 0.3 \text{ mg/L}$,有效降低胶体及有机物负荷,同时抑制微生物滋生,稳定超滤进水水质。

1.2 市政原水水质特征及污染物组分分析

(1) 年度监测显示:浊度 $0.5 \sim 5.0 \text{ NTU}$, $\text{SDI}_{15} 2.5 \sim 5.5$,温度 $4 \sim 30^\circ\text{C}$, $\text{pH} 7.0 \sim 8.2$, $\text{TDS} 200 \sim 600 \text{ mg/L}$,呈现明显的季节波动。(2) 夏季藻类爆发期叶绿素 a 达 $15 \sim 30 \mu\text{g/L}$,伴随蛋白质、多糖等代谢物增加;大分子有机物 ($\text{MW} > 30 \text{ kDa}$) 占比约 $30\% \sim 40\%$,其中腐殖酸类占 DOM 总量 $25\% \sim 40\%$,是膜污染重要前体物。(3) 无机污染物以铁、锰、钙、硅为主,

$\text{Fe}^{2+}/\text{Mn}^{2+}$ 含量分别为 $0.3 \sim 1.5 \text{ mg/L}$ 和 $0.1 \sim 0.5 \text{ mg/L}$, Ca^{2+} 浓度 $30 \sim 80 \text{ mg/L}$,碳酸盐碱度 $80 \sim 150 \text{ mg/L}$ (以 CaCO_3 计),胶体颗粒平均粒径 $0.1 \sim 5 \mu\text{m}$,具有结垢与污染协同效应。

1.3 超滤膜污染基础类型与表征方法

(1) 有机污染由腐殖酸、多糖及蛋白质通过疏水和静电作用吸附形成;无机污染以金属氢氧化物和碳酸盐结垢为主;微生物污染表现为胞外聚合物 (EPS) 介导的生物膜形成,三者交互叠加构成复合污染。(2) 水力反洗可去除的可逆污染占总阻力 $50\% \sim 70\%$,不可逆污染需化学清洗 (如柠檬酸、次氯酸钠) 恢复;通常以跨膜压差 (TMP) 上升速率区分,当 TMP 恢复率 $< 80\%$ 时判定为不可逆污染^[1]。(3) 日常监测 TMP 和膜通量变化,结合 SEM/EDS 观察膜面形貌及元素组成,FTIR 分析官能团特征,接触角测定亲疏水性变化,为污染机理分析提供基础数据支撑。

2 市政原水超滤膜污染核心成因及影响机制解析

2.1 原水水质对膜污染的驱动机制

(1) 市政原水中溶解性有机物以腐殖质、多糖及蛋白质为主。小分子有机物 ($< 10 \text{ kDa}$) 进入膜孔内部,通过疏水及氢键作用吸附于孔壁,造成不可逆的孔内狭窄化;大分子有机物 ($> 100 \text{ kDa}$) 则被膜面截留,快速形成高比阻的凝胶滤饼层,该层水力可逆性较差,初期通量衰减贡献率达 60% 以上。(2) 铁/锰氧化物胶体及硅酸盐颗粒在膜表面沉积,形成疏松初始层,随后碳酸钙等难溶盐在碱性微环境下结晶析出,嵌入胶体层孔隙中,使滤饼结构致密化,水力阻力增大,且酸洗过程中胶体溶解易引发局部剥落,加重膜表面不均匀磨

损。(3)原水中微生物在膜面附着后,利用营养物质进行增殖,并大量分泌胞外聚合物,形成富含多糖和蛋白质的生物膜。生物膜成熟后呈现粘弹性,对内层污染物形成“保护罩”,使水力清洗效率下降,且老化生物膜脱落后残存细胞碎片进一步堵塞膜孔。

2.2 工艺运行参数对膜污染的影响规律

(1)当运行通量低于临界通量时,膜表面剪切力可抑制颗粒沉积,污染速率缓慢;一旦通量超过临界值,颗粒向膜面迁移速度急剧加快,TMP呈指数上升。研究表明,通量提高30%,污染速率可增加2倍以上,且高压运行下滤饼压缩性增强,比阻显著增大。(2)低温进水使水的粘度上升,扩散系数下降,有机污染物在膜面富集浓度提高,滤饼层含水率降低、密实度增加,导致清洗难度增大。流速升高可削减滤饼厚度,但过高的水流剪切力会造成滤饼破碎,碎片重新分布后易嵌入膜孔,加剧深层堵塞。(3)系统停运期间,溶解氧及营养物质供给不足引起微生物衰亡,释放的有机物及生物碎片粘附于膜面,形成顽固污染层。频繁启停使不可逆污染逐次累积,膜比通量年衰减率较连续运行工况高出40%,大幅缩短化学清洗周期^[2]。

2.3 在线清洗工艺缺陷诱发的次生污染分析

(1)水力反冲洗流量不足或时间过短时,仅能去除表面松散杂质,膜孔内及滤饼深层污染物残留率超过30%;反洗水水质较差或含氯量不足时,还会引入新的微生物种源,导致次生生物污染。(2)酸洗主要用于去除无机结垢,碱洗针对有机及生物污染,两者独立使用时均存在清洗死角。若酸洗后未充分漂洗即进行碱洗,酸碱中和反应产生盐类结晶,反而加重膜孔堵塞。清洗药剂浓度过高不仅损伤膜表面分离层,还使老化膜表面粗糙度增大,为后续污染物提供更多附着位点。(3)固定清洗周期未考虑原水水质波动,当污染高峰期来临时清洗频率不足,深层不可逆污染逐次叠加,单次清洗恢复率从80%以上逐次递减至60%,形成“污染-清洗-加速污染”恶性循环,大幅缩短膜使用寿命。

2.4 膜污染耦合作用及演化规律

(1)有机物与无机胶体并非独立作用,而是形成相互促进的复合污染:有机物在膜面先形成粘性凝胶层,增强对无机颗粒的捕获能力,无机盐结晶又使凝胶层脱水收缩、结构致密化,两者协同使得滤饼层比阻较单一污染提高2~3个数量级^[3]。(2)短期内形成的松散滤饼污染经水力反洗可有效去除,但在多次“运行-清洗”循环后,残留污染物在膜面及孔内发生老化、脱水、结

晶转化,逐步演变为化学清洗也难以去除的不可逆层,其转化速率与进水有机负荷和清洗效率密切相关。(3)膜污染演化呈现“缓增-稳定-突跃”三阶段特征:初期TMP缓慢上升,污染物均匀沉积;中期污染与水力冲刷接近动态平衡,TMP相对平稳;末期滤饼层局部失稳脱落,引发污染物重新分布,TMP日升幅骤增3~5倍,系统需及时采取深度化学清洗或更换膜组件。

3 市政原水超滤系统在线清洗工艺及运行参数优化研究

3.1 现有在线清洗工艺运行现状及问题剖析

(1)系统采用“气水联合反冲洗+定期化学清洗”模式。水力参数:反洗流量50~80L/(m²·h),时长1.5~2.0min,气洗强度60~100Nm³/h,周期30~40min。化学清洗每30~45天一次,流程为碱洗(NaClO 200~300mg/L,浸泡4~6h)后酸洗(柠檬酸0.5%~1.0%,浸泡2~4h),辅以间歇曝气。该工艺在常规工况下可维持基本产水需求。(2)现有清洗对不同污染去除存在短板。水力清洗对松散滤饼层及可逆污染去除率70%~80%,但对膜孔内吸附性有机物、嵌入胶体及老化生物膜剥离不足。碱洗对有机及微生物污染效果较好,但对碳酸盐垢及金属氧化物几乎无效;酸洗可去除无机垢,但难分散生物凝胶层。有机-无机复合污染下,单一清洗顺序存在死角,TMP恢复率仅65%~75%。(3)工程中清洗能耗与膜损耗突出。水力清洗过频(<20min)致自用水率升高3%~5%;化学清洗药剂成本约0.12~0.18元/m³,NaClO反复接触加速PVDF膜氧化老化,断丝率年增2%~4%。清洗后出水余氯0.3~0.8mg/L,pH6.5~8.5,波动较大,对后续RO系统进水稳定性造成不利影响。

3.2 在线清洗关键参数优化试验设计

(1)水力清洗优化采用单因素轮换试验,考察气洗强度(40、60、80、100、120Nm³/h)、反洗流量(40、60、80、100、120L/(m²·h))、反洗时长(0.5、1.0、1.5、2.0、3.0min)及清洗间隔(15、30、45、60min)对TMP恢复率及通量衰减速率的影响,确定各因素最佳取值及影响显著性排序。(2)化学清洗优化包括药剂筛选与组合流程优化:碱洗药剂对比NaClO、NaOH及复合配方,浓度梯度100、200、300、500mg/L,pH设10、11、12;酸洗药剂对比柠檬酸、草酸及盐酸,浓度梯度0.3%、0.5%、1.0%、2.0%;浸泡时间设2、4、6、10h;清洗顺序设碱-酸、酸-碱、碱-酸-碱三种模式。采用静态膜片浸泡与小型膜组件动态清洗结合,以通量恢复率及膜表面损伤程度为综合评判指标^[4]。(3)采用正交

试验设计优化清洗周期,选取原水浊度、SDI、运行通量及污染速率($\Delta\text{TMP}/\text{d}$)为影响因素,每因素设三水平,以年化学清洗次数最少及平均 TMP 最低为优化目标,建立清洗周期与工况条件的匹配模型,确定不同水质工况下的最佳清洗频率。

3.3 优化后在线清洗工艺效果验证与分析

(1) 优化后水力清洗(气洗强度 $100\text{Nm}^3/\text{h}$ 、反洗流量 $80\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、反洗时长 1.5min 、间隔 30min)使 TMP 恢复率达 $78\%\sim 85\%$,较优化前提升 $10\sim 15$ 个百分点。优化化学清洗方案($\text{NaClO}300\text{mg}/\text{L}+\text{NaOHpH}=11.5$ 浸泡 4h ,再以柠檬酸 1.0% 浸泡 2h ,最后 $\text{NaClO}200\text{mg}/\text{L}$ 后处理)使膜通量恢复至初始值的 $92\%\sim 96\%$,TMP 恢复率达 90% 以上。(2) 优化工艺对三类污染去除效能全面提升:碱洗对 TOC 去除率由 65% 提升至 88% ,多糖及蛋白质去除率分别达 90% 和 85% ;酸洗对钙、铁、锰等无机元素去除率由 70% 提升至 93% ;三步组合清洗对膜表面 ATP 去除率达 95% 以上,有效抑制生物膜再生。(3) 优化后化学清洗周期延长至 $50\sim 65$ 天,年清洗次数减少 $4\sim 6$ 次,药剂消耗降低约 20% ,吨水清洗成本降至 $0.08\sim 0.10$ 元/ m^3 。膜断丝率年增幅由 $2\%\sim 4\%$ 降至 1.0% 以下,膜寿命预计延长 $1.5\sim 2.0$ 年,系统能耗降低约 12% 。

3.4 市政原水超滤系统最优运行调控方案构建

(1) 建立三套差异化清洗运行模式:丰水期(高浊、高有机负荷)采用“强化水力擦洗+短周期碱洗”,间隔 $25\sim 30$ 天;枯水期(低温低浊)采用“常规水力清洗+适度延长化学周期”,间隔 $50\sim 60$ 天;藻类暴发期增设“预氧化+强化碱洗”($\text{NaClO}500\text{mg}/\text{L}+$ 浸泡 6h),针对性应对高生物污染风险。(2) 构建基于在线监测的污染预判与精准清洗联动策略:以 TMP 日增长速率及比通量衰减率为预警核心指标,当 $\Delta\text{TMP} \geq$

$0.8\text{kPa}/\text{d}$ 持续 3 天时触发水力强化清洗,当 SF 累计衰减 $\geq 30\%$ 或 $\Delta\text{TMP} \geq 2.5\text{kPa}/\text{d}$ 时触发化学清洗。耦合原水浊度、 UV_{254} 、温度等在线数据,实现“水质预警→污染识别→清洗决策→效果评估”闭环联动调控^[5]。(3) 搭建涵盖“日常水力清洗→预警强化清洗→周期性化学清洗→年度深度维护”四层级标准化运行参数体系,明确各级清洗的触发条件、操作参数、效果评估指标(TMP 恢复率 $\geq 90\%$ 、产水率 $\geq 92\%$)及记录要求。该体系经验证产水率稳定在 $92\%\sim 95\%$,TMP 年平均增长率控制在 $0.15\text{kPa}/\text{d}$ 以内,可为同类型市政超滤系统提供可复制的工程化运行规范。

结束语

本文明晰了市政原水超滤膜复合污染的耦合作用与三阶段演化规律,完成了在线清洗工艺参数系统性优化,建立了适配不同水质工况的标准化运行调控体系。优化方案有效提升了污染去除效率,延长了化学清洗周期与膜组件寿命,降低了系统能耗与运维成本。研究成果解决了传统清洗工艺的短板问题,工况适配性强,具备良好的工程推广价值与应用前景。

参考文献

- [1] 李萌,王健,张勇.市政地表水超滤系统膜污染特征及成因机制研究[J].中国给水排水,2023,39(11):102-108.
- [2] 周昊,刘宏宇.市政水厂超滤膜在线清洗工艺优化与运行效能分析[J].给水排水,2024,50(06):45-50.
- [3] 陈曦,赵鑫.低温市政原水超滤膜复合污染特性及清洗策略优化[J].环境工程学报,2022,16(08):2652-2660.
- [4] 黄凯,吴俊.超滤系统在线清洗参数对膜污染控制的影响规律[J].工业水处理,2023,43(09):156-161.
- [5] 马宇轩.市政原水超滤工艺不可逆膜污染成因及在线清洗优化研究[J].水处理技术,2025,51(04):112-117.