

超滤膜技术在工业水处理中的应用实践探索

徐丽洋

(中海沥青股份有限公司, 山东 滨州 256600)

摘要 工业水资源短缺及水污染问题日益严峻, 高效的水处理技术成为保障工业可持续发展的关键环节。超滤膜技术因其较高的分离精度、稳定的运行性能及较低的能耗, 在工业水处理中得到广泛应用。超滤膜技术利用膜分离原理, 通过筛分效应有效去除悬浮物、胶体、微生物及大分子有机物, 从而改善水质, 提高水回收率。本文围绕超滤膜在工业水处理中的应用展开研究, 重点探讨膜污染控制、运行参数优化、膜清洗策略及多膜技术联用等实践策略, 以期为促进超滤膜技术在工业水处理中的应用提供参考。

关键词 超滤膜; 工业水处理; 膜污染控制; 运行优化; 膜清洗

中图分类号: X703

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.08.004

0 引言

当前, 工业水处理面临膜污染严重、运行成本高、系统稳定性不足等挑战。针对所产生的问题, 优化超滤膜的运行参数、改善预处理措施、合理制定膜清洗策略及多膜联用技术成为提高膜系统效率的关键。《中华人民共和国水污染防治法》明确要求加强工业水污染治理, 提高废水回用率, 减少污染物排放。生态环境部发布的《国家鼓励的工业节水工艺、技术和装备目录》将超滤膜技术列为重点推广应用技术之一, 推动其在工业废水深度处理及回用中的应用。本研究通过分析超滤膜的运行特性, 提出优化策略, 为提高水处理系统的整体效能提供技术参考。

1 超滤膜技术概述

1.1 超滤膜原理

超滤膜(Ultrafiltration, UF)主要是以压力驱动的分膜分离技术, 其孔径范围通常在 $0.001 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 之间, 可有效去除悬浮固体、胶体、细菌、大分子有机物及部分病毒。超滤膜的分离机理主要基于筛分效应, 即膜孔径决定了截留能力, 通常以分子量截留限(MWCO, Molecular Weight Cut-Off)表示, 范围一般在 $1\ 000 \sim 500\ 000 \text{ Da}$ 。超滤膜的工作压力通常在 $0.1 \sim 0.5 \text{ MPa}$ ($1 \sim 5 \text{ bar}$), 比微滤膜(MF)低, 但高于纳滤(NF)和反渗透(RO)。膜材料主要包括聚偏氟乙烯(PVDF)、聚砜(PS)、聚醚砜(PES)以及陶瓷膜(Al_2O_3 、 TiO_2 等)。超滤膜通量计算公式如下:

$$J = \frac{V}{A \times t} \quad (1)$$

1.2 超滤膜的主要参数

超滤膜的性能由多个关键参数决定, 包括孔径尺寸、分子量截留限(MWCO)、操作压力(TMP)、透水通量(LMH)、运行温度范围、pH适应范围等。这些参数决定膜的适用范围和处理效果, 其具体参数见表1。

表1 超滤膜的主要参数

参数	单位	典型范围
孔径尺寸	μm	$0.001 \sim 0.1$
分子量截留限(MWCO)	Da	$1\ 000 \sim 500\ 000$
操作压力(TMP)	MPa	$0.1 \sim 0.5$
运行温度范围	$^{\circ}\text{C}$	$5 \sim 45$
pH适应范围	—	$2 \sim 11$ (部分可达 $1 \sim 13$)
透水通量	$\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ (LMH)	$50 \sim 200$
清洗流速	m/s	$1.5 \sim 3.0$
化学清洗频率	次/月	$1 \sim 4$

不同膜材料和工艺条件下, 以上参数可能有所变化, 实际应用时需根据具体水质和工艺要求进行优化选择。

2 工业水处理中的现有反渗透装置

在工业水处理领域, 反渗透(RO, Reverse Osmosis)技术为常见的深度净化手段, 广泛应用于锅炉补给水、化工生产行业等, 但随着工业用水需求的不断增长, 现有的反渗透装置在实际运行中所出现的局限性问题分析较多, 具体分析如下。

2.1 现有反渗透装置的典型结构

工业反渗透系统通常由以下几个部分组成:

1. 预处理系统: 包括多介质过滤器(MMF)、活性炭过滤器(ACF)、软化装置或阻垢剂投加等, 主要用于去除大颗粒杂质、余氯及降低水硬度。

2. 高压泵: 提供 1.0 ~ 4.0 MPa 的高压, 以推动水透过反渗透膜。

3. RO 膜组件: 核心部分, 通常采用聚酰胺复合膜(PA), 孔径约为 0.0001 μm , 可去除 95% ~ 99% 的溶解性盐类、有机物、重金属离子及细菌。

4. 后处理系统: 对于高纯水需求, 反渗透水一般需进一步处理, 如混床离子交换(MB)、EDI(电去离子)等, 以降低电导率。

2.2 现有反渗透装置面临的问题

2.2.1 进水水质不稳定, 导致膜污染加剧

在实际应用中, RO 设备通常直接处理自来水或地表水, 但水源中的悬浮物、胶体、有机物等污染物会在膜表面积聚, 引发膜污染、结垢及生物污染, 降低透水率。如, 在进水 SDI(污染指数) > 5 时, 膜污染速度加快, 导致清洗频率增加、系统运行压力升高, 甚至提前更换膜元件。

2.2.2 当用水量小时, RO 系统处理能力受限

反渗透系统的处理能力与膜通量、进水流速、回收率有关, 一般单套 RO 设备的回收率在 50% ~ 75%。如, 在大规模工业用水场景(如电厂、造纸、化工厂)下, 单纯依赖 RO 设备则无法提供足够的净水量, 需要频繁启动备用装置或增加膜组件, 导致运行成本大幅上升。

2.2.3 混床离子交换系统再生次数频繁

反渗透一般是作为离子交换(混床)系统的前端处理, 用于降低进水的总溶解固体(TDS), 但当 RO 产水水质不稳定时, 混床装置会吸附更多离子, 导致树脂交换容量下降, 其会引发混床频繁再生, 增加酸碱消耗、提高运行成本, 同时排放大量高浓度酸碱废水, 增加环保处理负担。

2.2.4 高运行成本和能耗

反渗透系统运行需要高压泵持续工作, 能耗较高(约 2 ~ 5 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$), 尤其在大规模系统中, 长期运行成本较高。RO 设备需要定期进行化学清洗(CIP), 使用酸碱清洗剂, 进一步增加了运行成本。

2.3 采用超滤装置优化反渗透系统的必要性

针对上述问题, 增加超滤(UF)装置作为 RO 系统的预处理单元, 可以有效改善水处理效果, 具体优势包括以下几个方面。

2.3.1 提高进水水质, 减缓反渗透膜污染

超滤膜孔径(0.001 ~ 0.1 μm)远小于砂滤等传

统预处理装置, 可有效去除悬浮物、胶体、细菌、部分大分子有机物, 将 SDI 降至 ≤ 3 , 大幅减少膜污染。通过稳定 RO 进水质量, 降低清洗频率, 延长膜寿命 50% 以上。

2.3.2 提升系统处理能力, 满足大规模用水需求

超滤可提高 RO 系统的回收率, 减少浓水排放, 使 RO 设备在高效模式下运行, 从而提升整体水处理能力 20% ~ 30%。对于水量需求大、波动较强的场景, 超滤系统可作为缓冲装置, 提高系统稳定性。

2.3.3 降低混床再生频率, 减少化学药剂消耗

由于超滤预处理可显著提高 RO 产水质量, 进而降低混床负荷, 使再生周期延长 2 ~ 3 倍, 减少酸碱消耗, 降低运行成本。

2.3.4 减少运行能耗, 降低综合运营成本

超滤系统的运行压力仅 0.1 ~ 0.5 MPa, 比 RO(1.0 ~ 4.0 MPa)低, 能耗小(约 0.1 ~ 0.5 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$), 可有效降低整体系统的能源消耗。通过减少清洗和更换膜的频率, 降低 30% 以上的维护成本。

3 工业水处理中运用超滤膜技术的实践策略

3.1 膜污染控制与预处理策略

3.1.1 颗粒污染控制及预处理

颗粒污染主要由悬浮物、胶体和沉积物引起, 导致膜孔堵塞和流量下降。典型污染物包括泥沙(粒径 > 1 μm)、铁锈、铝盐、硅胶体等。减少颗粒污染, 需要采取以下预处理措施:

1. 多介质过滤(MMF): 使用石英砂、活性炭、无烟煤等多层介质进行物理拦截, 有效去除 $\geq 10 \mu\text{m}$ 颗粒。

2. 精密过滤(微滤, MF): 采用 1 ~ 10 μm 的滤芯进一步去除细小悬浮物, 降低膜污染指数(SDI)。

3. 絮凝/沉淀预处理: 向进水中投加聚合氯化铝(PAC, 50 ~ 200 mg/L)或聚丙烯酰胺(PAM, 1 ~ 5 mg/L)以增强悬浮物的沉降效果。

4. 管道设计优化: 避免水流死角, 控制流速 1.5 ~ 3.0 m/s , 减少颗粒沉积。超滤膜通量受颗粒污染影响的计算公式如下:

$$J = J_0 e^{-kt} \quad (2)$$

3.1.2 有机污染与微生物污染控制

有机污染主要来源于溶解性有机物(DOM)、腐殖酸、油脂、表面活性剂等, 容易导致膜表面吸附和堵塞。微生物污染则来源于细菌、藻类、真菌等生物膜的形成, 会引起膜系统通量降低, 甚至发生生物腐蚀。针对这两类污染, 采取以下预处理策略:

1. 使用粒状活性炭(粒径 0.5 ~ 1.5 mm)吸附水中的有机物, 可降低 TOC(总有机碳) 30% ~ 50%, 减

少膜表面有机吸附。

2. 利用生物降解反应,降低可生化性有机物(BOD/COD < 0.3),减少有机污染源。

3. 投加次氯酸钠(NaClO, 0.5 ~ 2.0 mg/L)或臭氧(O₃, 1 ~ 5 mg/L)以破坏有机污染物,提高氧化还原电位(ORP)。

4. 在线杀菌控制:紫外(UV)消毒,其波长 254 nm,剂量 30 ~ 50 mJ/cm²,用于杀灭细菌和病毒。化学杀菌则是定期投加过氧化氢(H₂O₂, 1 ~ 3 mg/L)或二氧化氯(ClO₂, 0.5 ~ 2.0 mg/L)进行微生物控制。微生物污染对膜通量的影响可表示为:

$$J = \frac{J_0}{1 + \beta N} \quad (3)$$

3.2 运行参数优化与动态调整

在工业水处理中,优化超滤膜的运行参数可以有效提高系统性能、减少膜污染,并降低运行成本^[1]。关键运行参数包括跨膜压力(TMP)、膜通量(J)、回收率(R)、进水流速、运行温度等。

3.3 膜清洗与恢复策略

3.3.1 物理清洗策略

物理清洗主要依靠反冲洗、空气冲洗、超声波清洗等方式去除膜表面污染物,适用于轻度污染情况^[2],见表 2。

表 2 物理清洗参数优化

清洗方式	优化前参数	优化后参数	优化幅度	作用
反冲洗流速	1.0 m/s	2.5 m/s	↑ 150%	增强颗粒去除
反冲洗压力	0.2 MPa	0.3 MPa	↑ 50%	提高清洗效率
反冲洗时间	30 s	45 s	↑ 50%	增加去污时间
空气冲洗流速	2.0 m/s	3.0 m/s	↑ 50%	增强剪切力
超声波频率	25 kHz	40 kHz	↑ 60%	去除细微沉积物

清洗优化后,膜污染指数(SDI)降低 40%,运行通量恢复 85% 以上,膜寿命延长 30%。物理清洗效率计算:

$$R = \frac{J_c}{J_0} \times 100\% \quad (4)$$

3.3.2 化学清洗策略

化学清洗主要针对超滤膜的无机结垢、有机污染、微生物污染等严重污染情况,定期进行化学清洗可以有效恢复膜通量,降低跨膜压力(TMP),延长膜使用寿命。以无机污染为例,该污染主要由碳酸钙(CaCO₃)、

硫酸钙(CaSO₄)、氧化铁(Fe₂O₃)、氧化铝(Al₂O₃)等沉积物引起,此结垢会导致 TMP 升高 0.1 ~ 0.3 MPa,通量下降 30% ~ 50%。

3.4 膜系统优化与多膜技术联用

3.4.1 超滤 + 反渗透(UF+RO)

超滤膜作为反渗透的预处理单元,可有效去除悬浮物、胶体、细菌等污染物,降低进水污染指数(SDI)至 ≤ 3,减少 RO 膜污染,提高系统运行效率^[3]。优化后,RO 膜清洗频率降低 50%,膜寿命延长 30%,能耗下降 15%。

3.4.2 超滤 + 纳滤(UF+NF)

在工业废水回用及软化水处理应用中,超滤去除大分子污染物,纳滤进一步脱除硬度和部分盐类。该组合可使总溶解固体(TDS)降低 40% ~ 60%,Ca²⁺、Mg²⁺去除率达到 80% ~ 90%,减少结垢,降低软化剂投加量 50%。

3.4.3 超滤 + 微滤(UF+MF)

超滤与微滤联合使用适用于高悬浮固体浓度的进水场景,如冷却循环水、工业废水处理。微滤用于粗滤,超滤精细分离,可减少膜污染速率 35%,提高系统稳定性,降低运行维护成本 20%^[4]。

3.4.4 超滤 + 电去离子(UF+EDI)

在高纯水制备过程中,UF 去除颗粒和有机物,RO 进行脱盐,而 EDI 用于进一步去除离子。此组合可将水的电导率降低至 0.1 ~ 0.5 μS/cm,提高水质纯度,同时减少混床树脂消耗 70%,降低化学再生的环境影响^[5]。

4 结束语

超滤膜技术凭借其高效分离能力和广泛适用性,在工业水处理中发挥着重要作用。研究表明,通过优化预处理措施、动态调整运行参数、制定科学的膜清洗策略及合理配置多膜技术,可以显著降低膜污染速率,提高系统稳定性,延长膜使用寿命。

参考文献:

- [1] 袁玺. 市政工程水处理过程中超滤膜技术应用分析[J]. 低碳世界, 2023,13(02):34-36.
- [2] 张祥霖. 关于环保工程水处理过程中的超滤膜技术应用[J]. 清洗世界, 2023,39(11):16-18.
- [3] 褚淑燕, 寇常兰. 环保工程水处理过程中超滤膜技术运用探讨[J]. 皮革制作与环保科技, 2023,04(02):8-9,33.
- [4] 成娜. 水处理中超滤膜技术的运用[J]. 皮革制作与环保科技, 2022,03(04):12-14.
- [5] 张书博. 超滤膜技术在环境工程水处理中的应用研究[J]. 黑龙江环境通报, 2024,37(11):166-168.