

锅炉补给水处理工艺中反渗透膜污染成因及清洗策略研究

温治江 赵秋兰 贾宽波 曹宏芳 赵国明

内蒙古京能检修工程管理有限公司 内蒙古 013700

【摘要】：锅炉补给水处理中反渗透膜污染制约系统效能，其成因涉及原水水质、运行参数及膜组件特性，表现为无机结垢、有机吸附等多种类型。基于污染特性优化清洗技术，采用针对性化学清洗剂与物理清洗手段结合的策略，搭配精准操作参数调控。实践表明，该策略可高效恢复膜通量，延长组件寿命，降低运维成本，保障出水水质满足锅炉补给水要求，为系统稳定运行提供技术支撑。

【关键词】：反渗透膜；污染成因；清洗策略

DOI:10.12417/2811-0528.26.13.050

引言

锅炉补给水水质直接影响热力系统安全，反渗透技术是核心处理工艺，但膜污染问题频发，导致通量衰减、能耗增加。膜污染成因复杂，清洗不当易造成膜损伤，亟需科学的污染控制与清洗方案。结合污染形成机制优化清洗技术，实现针对性治理，对提升处理系统稳定性、降低运行成本具有重要现实意义，为锅炉补给水处理提供可靠保障。

1 锅炉补给水处理中反渗透膜污染的成因分析

锅炉补给水处理流程中，反渗透膜污染的形成与原水水质构成、系统运行参数及膜组件自身特性密切相关。原水所含的钙镁离子、硫酸盐等无机离子，在膜表面因浓差极化效应不断富集，当浓度超过溶度积时，会形成碳酸钙、硫酸钡等致密结垢，堵塞膜孔通道。同时，原水中的腐殖酸、单宁等天然有机物，以及微生物代谢产生的胞外聚合物，会通过范德华力、氢键作用吸附在膜表面，形成粘性有机污染层，不仅阻碍水分子渗透，还会为微生物滋生提供温床。此外，系统运行过程中，操作压力控制不当、回收率过高会加剧浓差极化程度，进一步促进污染物沉积；而预处理环节未能有效去除的悬浮颗粒、胶体物质，会在膜表面形成物理截留污染。膜组件长期使用后，表面粗糙度增加、亲水性下降，也会降低抗污染能力，使得各类污染物更易附着，最终导致膜污染的持续发展^[1]。

2 针对不同污染类型的反渗透膜清洗技术优化

针对不同污染类型的反渗透膜清洗技术优化需立足污染成因与特性，通过科学调控清洗方式、药剂配比及操作参数，实现污染物的高效剥离与膜性能的精准恢复。对于无机结垢污染，核心优化方向在于选择针对性的螯合剂与酸洗剂，结合结垢成分调整药剂浓度与反应条件。钙镁类碳酸盐结垢可采用低浓度盐酸、柠檬酸等酸性清洗剂，通过氢离子与结垢中的金属离子发生螯合反应，将难溶性盐转化为可溶性化合物，同时控

制清洗剂 pH 值在 2.0-3.0 之间，避免强酸对膜材质造成腐蚀。针对硫酸钡、氟化钙等难溶性无机结垢，需选用含 EDTA、氨基三亚甲基膦酸等成分的螯合型清洗剂，利用其强配位能力破坏结垢晶体结构，促使结垢从膜表面脱落，清洗过程中需保持一定的湍流状态，通过提升流速增强药剂与结垢的接触效率。

有机污染的清洗优化重点在于选用兼具渗透性与分解性的清洗剂，同时避免清洗剂对膜的亲水性造成破坏。天然有机物与胞外聚合物形成的污染层，可采用碱性清洗剂与表面活性剂复配体系，氢氧化钠与十二烷基苯磺酸钠的合理配比能有效降低污染层与膜表面的附着力，表面活性剂的乳化作用可将大分子有机物分解为小分子，便于被水流带走，清洗温度控制在 30-35℃ 时，能进一步提升有机污染物的溶解速率。对于顽固有机污染，可引入氧化性清洗剂如次氯酸钠，但需严格控制浓度在 0.1%-0.5% 之间，且清洗后需进行充分的中和与冲洗，防止残留氧化剂对膜造成氧化损伤，同时可搭配酶制剂如蛋白酶、脂肪酶，针对特定有机污染物实现靶向分解，提升清洗的特异性与效率^[2]。

微生物污染的清洗需兼顾杀菌与生物膜剥离，避免微生物残留导致污染复发。优先采用含氯消毒剂与季铵盐类化合物复配的清洗体系，次氯酸钠能有效杀灭膜表面的细菌、真菌等微生物，季铵盐类化合物则可破坏微生物细胞壁结构，促进生物膜的分解，清洗过程中需保证药剂与膜表面的接触时间不低于 30 分钟，确保杀菌效果充分发挥。对于已经形成的致密生物膜，可先采用柠檬酸等酸性清洗剂进行预处理，溶解生物膜中的无机杂质，再进行杀菌清洗，提升药剂的渗透能力。清洗后需通过无菌水冲洗，去除残留药剂与微生物代谢产物，同时可在清洗后投加少量抑菌剂，抑制短期内微生物的再次滋生。

物理清洗技术的优化需作为化学清洗的辅助与预处理手段，通过物理作用减少污染物附着，降低化学药剂的使用量。反洗工艺的优化重点在于调整反洗流速与反洗周期，根据膜污

染程度设定反洗流速为运行流速的1.5-2倍,利用水流的反向冲击力剥离膜表面的疏松污染物,反洗周期可控制在24-48小时一次,避免污染物过度沉积。空气擦洗技术可与反洗结合使用,通过通入压缩空气产生的气泡扰动,增强膜表面的剪切力,有效去除附着在膜表面的颗粒状与粘性污染物,空气擦洗的压力需控制在0.1-0.2MPa,防止压力过高对膜造成机械损伤。超声波清洗技术适用于污染程度较轻的膜组件,利用超声波的空化效应产生微小气泡,气泡破裂时释放的能量可破坏污染物与膜表面的结合力,清洗过程中需控制超声波频率在20-40kHz,功率密度为0.5-1.0W/cm²,避免高频超声波对膜结构造成破坏。

清洗操作参数的整体优化需实现各环节的协同配合,确保清洗效果与膜的安全性。清洗流速的优化需根据膜组件类型调整,卷式反渗透膜的清洗流速通常控制在1.0-1.5m/s,中空纤维膜则可适当提高至1.5-2.0m/s,合理的流速既能保证药剂在膜通道内的均匀分布,又能通过剪切力增强污染物剥离效果。清洗时间需根据污染程度灵活调整,轻度污染清洗时间控制在60-90分钟,中度至重度污染则需延长至120-180分钟,分阶段进行清洗,避免一次性长时间清洗导致膜性能衰减。清洗过程中的pH值调控需与清洗剂类型匹配,酸性清洗时pH值维持在2.0-3.0,碱性清洗时维持在10.0-11.0,通过精准调控pH值提升药剂活性,同时保护膜材质不受侵蚀。此外,清洗后的冲洗环节至关重要,需采用去离子水或反渗透产水进行冲洗,直至冲洗水的电导率、pH值恢复至正常水平,确保无清洗剂残留影响后续运行。

参考文献:

- [1] 张金.深化研究反渗透膜的污染成因及其清洗方法[J].中国设备工程,2025(16):124-126.
- [2] 张泽田.高盐废水零排放工艺中反渗透膜污染控制及清洗策略[J].清洗世界,2025,41(4):130-132.
- [3] 许敏.锅炉补给水系统中的反渗透膜清洗优化[J].能源新观察,2025(10):87-88.

3 反渗透膜污染控制与清洗策略的实践应用效果

反渗透膜污染控制与清洗策略的实践应用,需依托污染成因分析与针对性清洗技术,在实际锅炉补给水处理系统中形成闭环落地。通过优化预处理工艺,强化原水过滤与软化环节,降低进水中悬浮颗粒、胶体及无机离子浓度,从源头减少污染物向膜表面迁移的概率,使膜污染初始发生周期较传统工艺延长30%以上。针对运行过程中实时监测到的膜通量衰减、压差升高数据,精准匹配对应的清洗方案,无机结垢污染采用螯合型酸洗剂清洗后,膜通量可恢复至初始值的95%以上,有机污染经碱性复配清洗剂处理后,污染层剥离率达90%,微生物污染通过杀菌-剥离协同清洗,膜表面微生物菌落数降至10CFU/cm²以下。在长期运行中,结合定期维护性清洗与污染预警机制,合理调控清洗周期与药剂用量,避免过度清洗对膜造成的化学损伤,使膜组件使用寿命较未采用优化策略的系统延长1-2年,同时降低单位产水药剂消耗与能耗成本,处理系统连续稳定运行时间提升至8000小时以上,出水水质始终满足锅炉补给水的电导率 $\leq 0.1 \mu\text{S/cm}$ 、SiO₂ $\leq 20 \mu\text{g/L}$ 的严格要求,为热力系统安全高效运行提供稳定的水质保障^[3]。

4 结语

锅炉补给水处理中反渗透膜污染的治理需立足成因分析,通过针对性清洗技术优化与全程污染控制,实现膜性能的高效恢复与稳定维持。物理与化学清洗结合的策略,搭配精准参数调控,有效解决了不同类型污染问题。实践应用验证了该方案在延长膜寿命、降低能耗、保障出水水质方面的显著成效,为反渗透膜在锅炉补给水处理中的高效应用提供了可行路径,助力热力系统安全经济运行。