

煤化工工业废水处理系统 MBR、超滤及反渗透膜污染控制与使用寿命提升技术研究

赵忠福

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司煤制油分公司 宁夏回族自治区 银川 750411

摘要: 煤化工工业废水成分复杂,对MBR、超滤及反渗透膜处理过程干扰大,易引发膜污染。本文深入剖析废水特性对膜处理的影响,明确各膜污染成因,从预处理、运行参数优化、膜清洗、膜表面改性等方面提出污染控制技术。同时,围绕膜材料选型、系统运行工艺、日常维护保养及污染预防长效技术,探讨膜使用寿命提升策略。通过多维度技术措施,有效降低膜污染速率,延长膜使用寿命,保障煤化工废水处理系统稳定运行。

关键词: 煤化工工业废水;膜污染控制;膜使用寿命;处理技术;预防体系

引言: 煤化工工业作为能源化工领域重要组成部分,其废水处理至关重要。煤化工工业废水源于煤炭化学加工全流程,涵盖核心工艺与辅助环节,组分复杂多样且浓度偏高,有机污染物含难降解物质,无机污染物以氨氮、金属离子等为主。不同工艺环节废水水质差异大,整体水质波动显著。这些废水组分会对MBR、超滤及反渗透膜处理过程产生不同干扰,导致膜污染问题突出,影响处理效果与系统稳定运行,因此开展相关污染控制与使用寿命提升技术研究迫在眉睫。

1 煤化工工业废水特性分析

1.1 煤化工工业废水来源及组分特征

煤化工工业废水产生于煤炭化学加工转化全流程,覆盖煤的焦化、气化、液化及后续合成等核心工艺环节,还包含各工艺装置生产废水、合成废水、含油废水、气化废水、循环冷却水排水、厂区生活污水、地面冲洗水与设备清洗水等辅助产水类别^[1]。废水水质组分复杂、污染物浓度偏高,有机污染物多以溶解态存在,主要有木质素、稠环芳烃、蛋白质、类腐殖质及酚类、氰化物等难降解物质;无机污染物以氨氮、氟化物、硫化物和钙、镁、硅、磷等金属离子为主要组分。不同工艺产水水质差异明显,焦化、气化、合成、液化工序废水污染物负荷更高,循环冷却废水则具备高盐、高硬度、高碱度属性,整体水质波动幅度大,对后续膜处理工艺稳定运行造成明显影响。

1.2 废水组分对膜处理过程的影响

废水组分中的各类污染物均会对MBR、超滤及反渗透膜处理过程产生不同程度的干扰。溶解性有机物中,高芳香性大分子物质易被超滤膜优先截留,小分子蛋白类、脂类物质则会吸附沉积在膜表面,逐步形成有机污染层。

氨氮会促进膜生物污染,推动异养菌在膜面繁殖并形成生物膜,增加膜运行阻力,其代谢产物还会与钙、镁离子结合形成复合垢层。硫化物会与膜材料发生反应,导致膜面脱盐层脆化,引发局部腐蚀损伤。钙、镁、硅等离子易在膜面发生过饱和沉淀,形成致密无机垢层,堵塞膜孔并加剧膜的机械应力损伤。此外,预处理过程中氧化剂与有机物反应生成的隐性氧化物质,会缓慢侵蚀膜材料,导致膜性能逐步衰减,进一步影响膜处理过程的稳定运行。

2 MBR、超滤及反渗透膜污染成因

2.1 MBR膜污染成因

MBR膜污染主要源于膜与反应体系中各类物质的相互作用,污染过程呈现渐进式累积特征。膜生物反应器内活性污泥絮体结构不稳定时,易发生破碎并产生细小颗粒,这些颗粒会通过吸附作用附着在膜表面,逐步形成滤饼层,阻碍水的透过;活性污泥中的微生物代谢产生的胞外聚合物,含有多糖、蛋白质等黏性物质,会在膜表面形成凝胶层,显著增加膜过滤阻力^[2]。废水带入的悬浮性固体及胶体颗粒,因尺寸与膜孔结构匹配,易嵌入膜孔内部造成堵塞,难以通过常规清洗去除。膜运行过程中,污泥停留时间过长会导致微生物群落失衡,丝状菌过度繁殖并缠绕在膜表面,进一步加剧污染进程,同时膜面水力剪切力不足会降低污染物剥离效率,加速污染层形成与固化。

2.2 超滤膜污染成因

超滤膜污染以物理堵塞和吸附污染为主要形式,污染程度与膜孔径尺寸、废水组分密切相关。废水所含的胶体粒子、悬浮固体及大分子有机物,因粒径接近或大于超滤膜孔径,会被截留并沉积在膜表面,形成致密的

污染层,阻碍水分子透过,降低膜的通量;溶解性有机物中的疏水性组分易与超滤膜材料发生疏水相互作用,吸附在膜表面及膜孔内壁,改变膜的孔径结构与表面性质,影响膜的分离性能。超滤过程中,操作压力过高会导致部分细小污染物强行嵌入膜孔,造成不可逆堵塞;而操作压力过低则会使污染物在膜面停留时间延长,促进吸附与沉积。废水pH值波动会改变污染物表面电荷性质,导致污染物凝聚并附着在膜面,进一步加重污染。

2.3 反渗透膜污染成因

反渗透膜污染由有机污染、无机污染及生物污染共同作用形成,污染机制更为复杂且危害程度更高。有机污染物中,腐殖酸、富里酸等大分子物质易通过氢键、范德华力吸附在膜表面,形成有机污染层,不仅增加膜运行阻力,还会影响膜的脱盐性能,降低产水水质;无机污染物中,钙、镁离子与碳酸根、硫酸根离子结合,易在膜表面形成碳酸钙、硫酸钙等无机垢,随着运行时间延长逐步结晶生长,堵塞膜表面微孔并损伤膜的脱盐层。微生物在膜表面附着后,会利用废水中营养物质繁殖形成生物膜,生物膜代谢产生的黏液会包裹膜表面,同时微生物代谢产物会与无机离子结合,形成复合污染层,严重影响膜的正常运行。反渗透膜运行过程中,进水水质波动、膜表面粗糙度变化,都会加速各类污染物的吸附与沉积,导致膜污染逐步加重。

3 MBR、超滤及反渗透膜污染控制技术

3.1 预处理阶段污染控制技术

预处理是膜污染控制的关键环节,核心在于去除废水中易引发膜污染的各类污染物,为后续膜处理提供稳定水质环境^[3]。针对煤化工废水悬浮物、胶体颗粒及部分大分子有机物,可采用混凝沉淀工艺,通过投加无机絮凝剂、混凝剂破坏胶体稳定性,使细小颗粒凝聚形成絮体,经沉淀分离去除,有效降低废水的浊度和有机物含量;过滤工艺可进一步截留剩余悬浮物与胶体,选用石英砂、活性炭等滤料,降低废水浊度与有机物含量,减少膜表面滤饼层形成。针对废水中氨氮与硫化物,可采用吹脱工艺,通过曝气剥离水中溶解性氨氮与硫化物,降低这类物质对膜生物污染与化学损伤的影响。预处理过程中需控制进水pH值与温度,避免极端条件导致污染物性质改变,减少后续膜污染风险。

3.2 运行参数优化技术

运行参数优化通过合理调控膜处理过程中的操作条件,减少污染物与膜的相互作用,延缓污染进程。MBR运行中需合理控制污泥浓度,避免浓度过高导致膜面堵塞,同时调控曝气强度,提升膜面水力冲刷效果,促进

污染物剥离。一般情况下,MBR膜池内污泥浓度控制在3000-8000mg/L较为适宜,曝气强度在200-400m³/(m²·h),合理控制抽吸与间歇比,能有效减少膜污染。超滤运行过程中需控制进水浊度、SDI指数≤3、优化操作压力,维持适宜的跨膜压差,既保证处理效率,又防止压力过高造成污染物嵌入膜孔。反渗透运行中需严格控制进水流量与回收率,避免浓水侧污染物浓度过高引发结垢,同时调控进水温度,维持膜的最佳运行状态。通过动态调整运行参数,适配废水水质波动,可有效降低膜污染速率,保障膜处理系统稳定运行。

3.3 膜清洗技术

膜清洗技术通过物理或化学方法去除膜表面及膜孔内的污染物,恢复膜的过滤性能,是污染控制的重要手段。物理清洗采用高强度水力冲洗方式,通过反向冲洗、错流冲洗等操作,利用水流冲击力剥离膜表面疏松污染物,操作简单且不会损伤膜材料,能有效去除膜表面的部分污染物;化学清洗需根据污染类型选用适配清洗剂,针对有机污染可采用碱性清洗剂,分解膜表面有机污染物;针对无机垢污染可采用酸性清洗剂,溶解膜面无机沉淀;针对生物污染可投加杀菌剂,抑制微生物繁殖并去除生物膜。清洗过程中需控制清洗剂浓度、清洗浸泡时间与温度,避免过度清洗导致膜材料老化;清洗后需充分冲洗,防止清洗剂残留对膜造成二次损伤;同时建立清洗效果评估机制,以压差、通量、水质等指标闭环验证。

3.4 膜表面改性技术

膜表面改性技术通过改变膜的表面物理化学性质,降低污染物吸附与沉积能力,从源头减少膜污染。针对膜表面疏水性强、易吸附有机物的问题,可采用亲水性改性,通过接枝亲水性基团、涂覆亲水性涂层等方式,提升膜表面亲水性,减少有机污染物吸附,降低膜表面有机污染层的形成;针对膜表面电荷性质,可通过电荷改性调整膜表面电位,利用静电排斥作用阻止带相同电荷的污染物附着,减少膜表面污染物的积累。此外,可通过表面粗糙化改性,改变膜表面微观结构,减少污染物停留时间,同时提升膜面水力冲刷效果,促进污染物剥离。膜表面改性需兼顾膜的过滤性能与机械稳定性,确保改性后膜既能抵御污染,又能维持长期运行效率。

4 MBR、超滤及反渗透膜使用寿命提升技术

4.1 膜材料选型优化技术

膜材料选型优化是提升膜使用寿命的基础,核心是结合煤化工废水特性,筛选适配性强、耐污染、机械性能优异的膜材料^[4]。MBR膜选型需优先考虑耐污泥污染

与氧化腐蚀的材料,优先选用聚偏氟乙烯、聚醚砜等高分子材料,这类材料具有良好的机械强度与化学稳定性,可抵御活性污泥中微生物代谢产物的侵蚀,减少膜破损与性能衰减。超滤膜选型需结合废水胶体、大分子有机物含量,选用孔径分布均匀、孔隙率合理的膜材料,同时注重材料亲水性与抗污染能力,降低污染物吸附与堵塞概率。反渗透膜选型需聚焦脱盐层稳定性与耐化学性,优先选用聚酰胺复合膜,其脱盐层致密且耐酸碱性能良好,可抵御煤化工废水中各类污染物的侵蚀,延长膜的有效运行周期。选型过程中需结合废水水质波动特点,兼顾材料性价比与运行适配性,从源头降低膜损伤风险。

4.2 系统运行工艺优化技术

系统运行工艺优化通过调整膜处理系统整体运行模式,减少膜的运行负荷与损伤,实现使用寿命提升。MBR膜池系统需优化污泥停留时间与曝气方式,避免污泥过度积累导致膜面负荷过高,同时采用间歇曝气模式,利用曝气强度的周期性变化,增强膜面污染物剥离效果,减少膜面污染层固化,降低膜污染程度;超滤系统可引入错流过滤工艺,通过提升水流速度增加膜面剪切力,减少污染物沉积,同时优化过滤周期,设置合理的反洗和CEB加强反洗间隔,避免污染物长期附着膜面。反渗透系统需优化预处理与主体工艺的衔接,确保进水水质稳定,同时采用分段运行模式,合理分配各段膜组件负荷,避免局部膜组件因负荷过高出现过度污染与损伤。通过工艺参数的动态适配,平衡处理效率与膜损耗,实现膜使用寿命延长。

4.3 膜日常维护与保养技术

膜日常维护与保养是延缓膜老化、延长使用寿命的关键,需贯穿膜运行全周期。膜运行过程中需定期进行离线清洗,针对物理清洗无法去除的顽固污染物,采用适配的化学清洗剂进行深度清洗,清除膜孔内嵌入的污染物,恢复膜过滤性能,保证膜的正常运行;停机状态下需对膜进行保护处理,采用专用保护液浸泡膜组件,隔绝空气与污染物接触,防止膜材料氧化与干燥破损,延长膜的保存时间。日常需定期检查膜组件密封性能,及时更换老化密封件,避免出现泄漏导致膜组件局部损伤。同时需保持膜处理系统清洁,定期清理设备内部积泥与污染物,防止污染物二次污染膜组件,确保膜始终处于良

好运行状态。

4.4 膜污染预防长效技术

膜污染预防长效技术通过构建全流程污染防控体系,从源头减少污染发生,为膜使用寿命提升提供保障。建立废水水质在线监测系统,实时监控进水污染物浓度、pH值、温度等指标,一旦出现异常及时调整运行参数,避免污染物浓度骤升对膜造成冲击,减少膜污染的发生;持续优化预处理工艺,强化混凝、过滤、吹脱等环节的处理效果,进一步降低进水污染物含量,减少膜污染负荷^[5]。定期对膜组件进行性能检测,通过监测跨膜压差、产水通量等指标,预判膜污染趋势,提前采取清洗与维护措施,避免污染进一步发展。构建膜运行数据库,全维度记录运行数据、参数,清洗维护情况与膜性能变化,增加关键指标监测频次,建立污染趋势预警,制定膜系统标准化操作规程(SOP),实现规范化、精细化、长效化管控,从根本上延长膜的使用寿命。

结束语

煤化工工业废水处理中,MBR、超滤及反渗透膜污染控制与使用寿命提升是保障系统稳定运行的关键。通过明确膜污染成因,针对性地采取预处理、运行参数优化、膜清洗及表面改性等污染控制技术,可有效减少膜污染。同时,从膜材料选型、系统运行工艺、日常维护保养及构建长效预防体系等方面入手,能切实提升膜使用寿命。这些技术措施的综合应用,为煤化工工业废水处理提供了可靠的技术支撑,有助于推动行业可持续发展。

参考文献

- [1]姚晓波,李年峰,李瑞环,等.煤化工气体脱硫与酚胺废水协同处理工艺优化及工业应用[J].石油化工应用,2025,44(10):103-108.
- [2]孙钰林,刘凤洋,武斌斌,等.煤化工高盐废水处理系统运行与优化研究[J].工业水处理,2022,42(7):192-198.
- [3]郭剑浩,许华杰,等.煤化工废水处理系统反渗透膜污堵原因分析及解决措施[J].工业用水与废水,2024,55(1):60-64.
- [4]柳训鲲.煤化工废水处理自动化控制研究[J].当代化工研究,2023(8):74-76.
- [5]尹桂珍,张静,于倩,等.臭氧微气泡技术在工业废水处理中应用研究进展[J].应用化工,2021,50(z1):278-281.