

基于膜分离技术的工业废水深度处理效能及膜污染控制研究

陈金德 卫梦依 李蕾蕾

浙江川宁环保科技有限公司 浙江 宁波 315000

摘要：本文探讨膜分离技术处理工业废水的效能及膜污染控制。分析不同膜技术对污染物的去除效能及评价指标，阐述膜污染形成机制、影响因素与表征方法。提出预处理优化、膜材料抗污染设计、运行参数调控等控制策略，并从膜材料性能改进、智能运行控制系统构建、膜分离工艺集成三方面提出优化方向，为工业废水深度处理提供参考。

关键词：膜分离技术；工业废水；处理效能；膜污染；控制策略

引言：工业废水成分复杂、处理难度大，传统方法难以满足深度处理需求。膜分离技术凭借高效分离特性，在工业废水处理领域应用广泛。该技术可有效截留各类污染物，实现水质净化与资源回收。膜污染问题限制了其长期稳定运行与处理效能提升。深入分析膜分离技术处理效能及膜污染控制策略，对推动工业废水处理技术发展、实现水资源可持续利用具有重要意义。

1 膜分离技术的工业废水深度处理效能分析

1.1 污染物去除效能

不同膜分离技术对各类污染物的去除能力各有侧重。超滤技术借助膜的筛分作用截留胶体颗粒与大分子有机物，其膜孔径可有效阻隔悬浮态污染物，使处理后水质在浊度控制上表现突出。纳滤技术结合电荷效应与筛分作用，对多价离子与小分子有机物展现出选择性分离能力，能针对性去除水中的硬度成分与部分溶解性有机物^[1]。反渗透技术依靠渗透压差驱动，对溶解性盐类及微量污染物具有强效去除作用，可大幅降低水中的总溶解固体含量。膜运行参数对去除效果的影响显著。操作压力升高会增强膜对污染物的截留动力，但超过一定范围可能导致膜孔压缩，反而影响分离效率。流速调整通过改变膜表面的水力条件发挥作用，适当提高流速可减少污染物在膜表面的沉积，维持较高的截留率。膜材料的亲疏水性也会影响去除效果，亲水性膜表面更易排斥有机物吸附，间接提升对有机污染物的去除能力。

1.2 处理效能的评价指标

评估膜分离技术处理效能需关注多项关键指标。污染物去除率反映对特定污染物的清除程度，是衡量处理效果的核心指标。水回收率体现水资源的利用效率，直接关系处理成本与节水效益。处理后水质达标程度则决

定出水的应用场景，需满足相应的再生水或排放标准。这些指标之间存在相互关联与制约。提高水回收率可能导致浓水侧污染物浓度升高，进而降低污染物去除率。追求过高的污染物去除率可能需要更严格的操作条件，增加能耗与膜负担。平衡各项指标需结合处理目标与实际需求，在保证出水水质达标的前提下，通过优化运行参数提升水回收率，形成经济与效能的协调。

1.3 处理过程的稳定性与持续性

膜分离系统在长期运行中性能会逐渐变化。水通量随运行时间呈现衰减趋势，初期衰减较快源于膜表面污染物的快速吸附，后期衰减趋缓与滤饼层形成后的稳定状态相关。污染物去除率的稳定性受多种因素影响，膜孔堵塞程度加剧会导致部分污染物穿透，使去除率出现波动。进水水质波动对系统运行干扰明显。污染物浓度突然升高会增加膜的截留负荷，导致短期内去除率下降。pH值波动可能改变污染物的存在形态，影响其与膜表面的相互作用，进而干扰分离效果。维持系统持续稳定运行需采取针对性措施，定期进行膜清洗以缓解通量衰减，设置水质调节单元缓冲进水波动，通过优化运行周期减少膜疲劳。

2 膜污染的形成机制与影响因素

2.1 膜污染的形成过程

膜污染的形成呈现渐进式发展特征。初始阶段，废水中的污染物通过分子间作用力吸附在膜表面，这一过程受膜表面化学性质与污染物特性影响，疏水性污染物易吸附在疏水膜表面，极性污染物则更易与带电荷的膜表面结合。随着运行时间延长，部分小分子污染物会渗入膜孔内部，当污染物尺寸与膜孔接近时，会造成膜孔堵塞，阻碍水分子通过^[2]。持续运行后，膜表面吸附的污

染物逐渐积累,形成具有一定厚度的滤饼层或凝胶层,这些层状结构会进一步增大水流阻力,加剧膜污染程度。不同类型污染物的污染特性存在差异。无机离子在特定pH条件下会发生化学反应,生成难溶性沉淀物附着在膜表面,形成坚硬的垢层。有机物中的腐殖质、蛋白质等成分会通过氢键、范德华力与膜表面结合,且有机物分子链可能相互缠绕,增强污染层的稳定性。微生物污染则是一个动态过程,微生物首先吸附在膜表面并繁殖,分泌的胞外聚合物会将微生物黏结成生物膜,生物膜不仅阻碍水通量,其代谢产物还可能腐蚀膜材料。

2.2 膜污染的表征方法

观察膜表面形貌变化可直观判断污染层结构。通过显微技术可观察污染层的厚度、致密程度及分布均匀性,污染初期膜表面呈现零散的污染物颗粒,严重污染时则形成连续的覆盖层。测量膜阻力变化能量化评估污染程度,膜阻力包括膜本身的固有阻力与污染层产生的附加阻力,附加阻力的增长速率可反映污染发展速度。分析污染物质成分可确定污染类型。采用化学分析方法识别污染物中的无机离子、有机物种类及微生物群落,据此判断是无机污染、有机污染还是生物污染,或多种污染的复合类型。这些表征方法结合使用,能全面掌握膜污染状况,为制定针对性的控制策略提供依据。

2.3 影响膜污染的关键因素

进水水质特性对膜污染影响显著。污染物组成决定污染类型,含高浓度钙离子的废水易引发无机污染,含大量溶解性有机物的废水则以有机污染为主。污染物浓度升高会增加与膜表面接触的概率,加速污染进程。粒径分布与膜孔尺寸的匹配程度影响污染形式,粒径大于膜孔的污染物易形成滤饼层,粒径接近膜孔的污染物则易造成堵塞。操作条件通过改变污染物迁移行为影响污染速率。操作压力过高会使更多污染物被压向膜表面,加剧浓差极化现象,促进污染层形成。流速过低时,膜表面的边界层厚度增加,污染物难以被水流带走,容易沉积。运行时间延长会使污染物积累量增加,污染程度随之加深。膜材料自身性质也与污染倾向相关。疏水性膜表面更易吸附疏水性有机物,亲水性膜则能减少此类吸附。膜表面电荷若与污染物电荷相反,会通过静电引力增强吸附作用,相同电荷则可产生排斥力减缓污染。膜的孔隙率、粗糙度等结构特征也会影响污染物的附着与积累。

3 膜污染控制技术与策略

3.1 预处理工艺优化

预处理工艺优化的核心是降低进入膜系统的污染负

荷。混凝处理通过向废水中投加混凝剂,使胶体及悬浮物质凝聚形成较大颗粒,经沉淀或过滤去除,减少此类物质在膜表面的吸附与沉积。吸附处理选用活性炭、树脂等吸附材料,通过表面孔隙结构吸附溶解性有机物,尤其是易造成膜污染的腐殖质、芳香族化合物等^[3]。氧化处理利用氧化剂的强氧化性破坏难降解污染物的分子结构,使其转化为易被后续工艺去除的物质,降低对膜材料的吸附能力。预处理工艺需与膜分离技术相匹配。超滤膜前的预处理应侧重去除悬浮颗粒与大分子有机物,避免膜孔堵塞;反渗透膜前的预处理需强化有机物与离子去除,防止浓差极化加剧。预处理过程中需避免引入新的污染物质,如混凝剂过量可能导致残留药剂在膜表面沉淀,吸附材料脱落可能造成膜孔堵塞,因此需严格控制预处理参数,确保其与膜系统的兼容性。

3.2 膜材料的抗污染设计

膜材料的抗污染设计从源头减少污染可能性。开发低表面能膜材料可降低污染物与膜表面的黏附力,疏水性污染物在低表面能表面更难附着,即使吸附也易被水流冲刷去除。不对称结构膜的表层孔径小且致密,支撑层孔径大且疏松,这种结构既保证分离性能,又能减少污染物在膜孔内的深层堵塞,同时支撑层的多孔结构利于污染物脱附。修饰膜表面电荷可增强对特定污染物的排斥作用。针对含阴离子污染物的废水,将膜表面修饰为负电荷,通过静电斥力减少污染物吸附;处理含阳离子污染物的废水则修饰为正电荷表面。在膜表面引入亲水性基团可提高膜的水润湿性,形成水化层阻碍污染物接近膜表面,进一步提升抗污染性能。这些设计需平衡抗污染性能与分离效能,避免过度修饰影响膜的截留效果。

3.3 膜运行参数调控

优化操作参数可有效缓解膜污染。操作压力需根据膜类型与废水特性合理设置,压力过高会加剧浓差极化,使污染物在膜表面快速积累;压力过低则会降低处理效率,需找到两者的平衡点。适当提高流速可增强膜表面的剪切力,将沉积的污染物及时带走,减少滤饼层形成,但流速过高会增加能耗与膜磨损,需结合实际情况调整。调整运行周期与停歇时间也能延缓污染。连续运行易导致污染物持续沉积,设置合理的停歇时间可让膜表面的水流状态恢复,减少污染物附着。反冲洗通过反向水流冲洗膜表面,去除疏松的滤饼层,反冲洗强度需适中,过强可能损伤膜材料,过弱则无法达到清洗效果。气洗利用气体气泡的扰动作用破坏膜表面的污染层,常与反冲洗结合使用,增强清洗效果。在线清洗方式的实施需与运行周期相适配,避免频繁清洗影响处理

效率。

3.4 膜清洗技术与维护

物理清洗适用于去除膜表面的疏松污染物。水力冲洗通过增大水流速度或改变水流方向,利用水的冲击力剥离表面污染物,操作简便且对膜材料损伤小,适合作为日常维护手段。海绵球清洗通过海绵球在膜管内的摩擦作用去除附着的污染物,适用于管状膜组件的清洗。物理清洗无法去除牢固吸附或嵌入膜孔的污染物,需配合化学清洗使用。化学清洗用于消解顽固性污染物。酸性清洗剂可溶解无机沉淀物,如碳酸钙、金属氧化物等;碱性清洗剂能去除有机污染物,如油脂、蛋白质等;氧化剂可分解生物膜及难降解有机物。化学清洗的浓度与时间需严格控制,浓度过高或时间过长会腐蚀膜材料,降低膜的使用寿命;浓度过低或时间过短则无法彻底清除污染物。清洗周期的确定需结合膜污染程度与运行状态。当膜通量下降到一定程度或运行压力升高到阈值时,需进行清洗。日常维护中需记录膜运行参数的变化,通过分析参数趋势判断污染发展情况,提前制定清洗计划。清洗后需检测膜性能的恢复程度,评估清洗效果,为后续清洗方案优化提供依据,确保膜系统长期稳定运行。

4 膜分离技术应用的优化方向

4.1 膜材料性能改进

膜材料性能改进聚焦提升抗污染性能与分离效能的平衡。表面接枝亲水性基团可在膜表面形成稳定的水化层,阻碍污染物分子与膜表面的直接接触,减少吸附污染。选择合适的接枝单体与接枝密度至关重要,接枝密度过低难以形成有效防护,过高则可能缩小膜孔孔径影响通透性能。优化膜孔结构需兼顾孔径大小与分布均匀性^[4]。合理的孔径设计可减少污染物在膜孔内的堵塞,孔径分布均匀能避免局部污染物过度聚集。在膜制备过程中调整成膜参数,可调控膜的孔隙率与孔道连通性,增强膜的抗堵塞能力。改性后的膜材料需同时满足分离精度要求,避免为追求抗污染性能牺牲对目标污染物的截留效果。

4.2 智能运行控制系统构建

智能运行控制系统依托传感技术与算法模型实现精准调控。传感器实时监测膜系统的运行参数,包括水通量、操作压力、进出口水质等,同时捕捉膜表面污染相关信号,如阻力变化、浊度波动等。算法模型对监测数

据进行分析,判断膜污染发展阶段与程度,自动生成操作参数调整方案。系统可根据污染趋势提前调整运行策略,污染初期适当提高流速增强剪切力,污染加剧时自动触发反冲洗或清洗程序。清洗时机的选择基于污染程度而非固定周期,既能保证清洗效果又能减少不必要的停机。这种动态调控模式可最大化膜系统的运行效率,延长膜的使用寿命,降低人工干预成本。

4.3 膜分离工艺集成

膜分离技术与其他处理工艺的集成可发挥协同作用。与高级氧化技术联用,高级氧化过程先分解部分难降解有机物,降低其对膜材料的吸附能力,同时氧化产物的分子量变小,更易通过膜分离去除,减轻膜污染负荷。膜分离则可截留未被氧化的污染物,确保出水水质。与生物处理技术结合时,生物处理单元通过微生物代谢降解大部分有机物,降低进入膜系统的有机物浓度,减少膜的有机污染。膜分离可截留活性污泥与微生物代谢产物,维持生物反应器内较高的生物量,提升生物处理效率。两种工艺的衔接需优化水力停留时间与污泥浓度,避免生物絮体过度积累造成膜堵塞,实现稳定运行。工艺集成还需考虑各单元的运行条件兼容性,确保整体系统高效协调。

结束语

膜分离技术为工业废水深度处理提供了有效手段,在污染物去除、水资源回用等方面展现出显著优势。但膜污染仍是制约其广泛应用的关键因素。通过预处理工艺优化、膜材料抗污染设计、运行参数调控及膜清洗维护等措施,可有效控制膜污染,提升处理效能。未来,随着膜材料性能改进、智能运行控制系统构建及膜分离工艺集成等优化方向的发展,膜分离技术将在工业废水处理领域发挥更大作用。

参考文献

- [1]周建琴.膜分离技术在工业废水处理工程中的应用研究[J].清洗世界,2025,41(01):120-122.
- [2]吴军霞.工业废水处理中膜分离技术的研究现状[J].石油化工应用,2023,42(10):1-4+13.
- [3]刘靖宇.膜分离技术在工业污水处理中的应用[J].江西建材,2021(12):308-310.
- [4]张卞阳,朱新华,周婧,等.膜分离技术在工业废水处理中的应用研究进展[J].当代化工研究,2024,(15):30-32.