

浅谈污水处理站中 MBR 污水处理工艺的设计

张瑜

新疆有色冶金设计研究院有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: MBR污水处理工艺结合了膜分离与生物处理技术,通过特定膜组件实现高效固液分离和污染物降解,提升污水处理效能。设计时要考虑膜组件和生物反应器核心参数,运行中需防控膜污染,制定物理、化学清洗策略,并设计自动化控制系统保障稳定运行。在能效优化方面,可通过精确曝气控制和余热回收降低能耗。MBR工艺出水水质优良,可用于绿化灌溉、工业回用等,污泥则可通过厌氧消化和磷结晶技术实现磷回收,提升资源利用率和环境经济效益。

关键词: MBR技术;污水处理工程;设计优化

引言: 在环境污染日益严峻、水资源愈发紧缺的当下,高效且可持续的污水处理技术成为关键。膜生物反应器(MBR)工艺应运而生,它将膜分离技术与生物处理技术深度融合,凭借高效固液分离与污染物降解能力,在污水处理领域备受关注。MBR工艺不仅在设计上需精心考量膜组件与生物反应器的诸多核心参数,运行中也要做好膜污染防控与自动化控制。其能效优化与资源化利用方向,更是为提升工艺经济性与环境效益提供了新的思路。

1 MBR污水处理工艺概述

1.1 工艺定义与核心原理

膜生物反应器是膜分离技术与生物处理技术深度耦合形成的污水处理工艺,核心目标是实现污水中固液分离与污染物降解的高效协同。该工艺通过特定膜组件替代传统沉淀单元,完成对活性污泥中微生物及各类悬浮物的精准截留,这一设计能够有效延长污泥龄,同时显著提高生物反应器内部的污泥浓度。污泥浓度的提升可增强微生物与污水中污染物的接触反应效率,强化有机物的分解转化,同时为脱氮除磷相关微生物的生长繁殖提供更有利的环境条件,进而全面提升整体污水处理效能,保障出水水质的稳定性与达标率。

1.2 工艺分类与适用场景

膜生物反应器主要依据膜组件与生物反应器的组合形式进行分类,核心分为分置式与一体式两种类型。分置式工艺的核心特征是膜组件与生物反应器相互独立设置,运行过程中需借助循环泵的动力驱动混合液在两者之间循环流动,确保反应与分离过程的有序衔接。一体式工艺则将膜组件直接置于生物反应器内部,产水过程依靠真空泵形成的负压或重力作用驱动,无需额外的循环动力设备^[1]。分置式工艺因运行稳定性强、抗冲击负荷

能力突出,适用于高浓度工业废水处理场景;一体式工艺具有占地面积小、能耗水平低、运行维护简便等优势,更适配生活污水处理以及中小规模工业废水处理需求。

2 MBR工艺设计核心参数与优化策略

2.1 膜组件设计关键参数

2.1.1 膜材料选择

膜材料选择是膜组件设计的核心基础环节,直接决定膜组件的运行稳定性、长期处理效能及使用寿命,是保障整个膜生物反应器工艺系统可靠运行的前提条件。聚偏氟乙烯与聚四氟乙烯凭借优异的抗污染性能、良好的化学稳定性以及较高的机械强度,成为当前膜组件设计中的主流优选材料。两种材料在性能与应用适配性上存在明确的差异化特性,其中聚四氟乙烯的抗污染能力更为突出,能够在成分复杂、污染物种类多样的水质环境中长时间维持稳定的过滤性能,有效抵御各类胶体、微生物及有机物对膜表面的附着与孔道堵塞。但受限于材料自身特性及制备工艺的复杂性,其生产成本与后续运维成本相对较高,这一特性决定了其更适用于处理难度较大、水质波动剧烈的废水处理场景。而聚偏氟乙烯则因在抗污染性能、机械强度与成本之间实现了良好的均衡性,在多数常规废水处理场景中得到广泛应用,能够满足一般处理需求下的稳定性与经济性要求。

2.1.2 膜孔径与截留分子量

膜孔径与截留分子量是决定膜组件分离效能的关键核心参数,直接影响污水中污染物的去除效果、处理出水水质以及膜污染的防控水平。微滤膜与超滤膜是膜生物反应器工艺中应用最为广泛的两类膜产品,二者的孔径范围存在明显差异,微滤膜孔径处于相对较大的区间,超滤膜孔径则更为细小,对应的截留分子量范围也随之呈现显著差异,进而导致两者的分离精度与适用场景有

所不同。在设计过程中,需基于进水水质的详细特性分析,精准匹配进水悬浮物的浓度水平、颗粒粒径分布以及各类污染物的分子量分布情况,以此科学确定膜孔径与截留分子量这两项关键参数。合理的参数设置能够确保对目标污染物实现高效精准的截留,同时有效避免因膜孔过小导致的污染物快速堵塞问题,或因截留范围过宽引发的过度截留现象,从而保障膜组件长期稳定运行,持续维持高效的过滤效能与出水水质稳定性。

2.1.3 膜组件结构与间距

膜组件结构与间距设计需综合兼顾过滤效率提升、运行过程稳定性及后续清洗维护便利性三大核心目标,不同结构类型的膜组件基于其自身构造特点,有着差异化的设计要求与参数标准。对于中空纤维膜组件而言,保证足够的膜丝间距是设计关键,通过合理设定膜丝间距,不仅可以有效减少膜丝之间截留污染物的堆积与缠绕现象,降低膜丝间的污染堵塞风险,还能保障曝气气流能够均匀穿透膜丝间隙,提升曝气对膜表面的冲刷效果,进一步减缓膜污染进程。平板膜组件的间距则可适当缩小,以此提高单位反应器空间内的膜面积利用率,提升整体处理负荷^[2]。但需在清洗效率与空间利用率之间寻求最佳平衡,确保在有限的反应器空间内实现高效过滤的同时,为后续物理清洗与化学清洗工作提供充足的操作空间,便于将膜表面及组件间隙的污染物彻底清除,保障清洗效果与膜性能恢复。

2.2 生物反应器设计要点

2.2.1 反应器类型选择

反应器类型选择需紧密结合进水水质状况、污染物组成特性及核心处理目标,通过不同生物处理工艺与膜生物反应器的科学耦合设计,构建功能精准适配的组合处理系统,确保实现预期的污染去除效能。常用的耦合工艺包括厌氧缺氧好氧工艺、序批式反应器工艺及氧化沟工艺等,各类工艺在污染物去除方向、运行控制灵活性、抗冲击负荷能力等方面各具独特优势,适用于不同的水质条件与处理需求。其中,厌氧缺氧好氧与膜生物反应器组合工艺因具备高效的同步脱氮除磷能力,能够在单一处理系统中通过不同功能区域的协同作用,同时实现有机污染物、氮素及磷素的高效去除,无需额外增设独立的脱氮或除磷处理单元,不仅简化了处理流程,还提升了运行稳定性,降低了运维复杂度,因此成为市政污水处理领域的主流优选方案。

2.2.2 污泥浓度与负荷控制

污泥浓度与负荷控制是生物反应器设计的核心内容,直接影响微生物的代谢活性、生物降解效能以及膜污染

的防控效果,对工艺整体运行质量至关重要。膜生物反应器工艺的污泥浓度相较于传统污水处理工艺有显著提升,能够达到更高的浓度水平,高污泥浓度可大幅增加微生物与污染物的接触反应概率,强化生物降解效能,同时有助于富集生长周期较长的功能微生物^[3]。在设计过程中,需通过污泥龄与容积负荷的协同调控实现工艺优化,合理的污泥龄设置能够为各类功能微生物提供充足的生长繁殖时间,促进微生物群落的富集与稳定,提升微生物群落的整体代谢活性;容积负荷的精准控制则可有效平衡有机物降解效率与膜污染风险,避免因负荷过高导致污泥膨胀、微生物活性抑制下降,或因污泥絮体破碎引发膜污染加剧等问题,保障工艺长期稳定运行。

2.2.3 曝气系统设计

曝气系统设计需同时满足微生物代谢需氧与膜污染防控的双重核心需求,是保障生物反应器高效稳定运行的关键核心环节,其设计合理性直接影响生化反应效率、膜组件寿命及运行能耗。曝气量的确定需精准匹配微生物需氧量与膜表面冲刷需求,一方面要确保为微生物代谢提供充足且稳定的氧气供应,保障有机污染物降解及脱氮除磷等生化反应的顺利高效进行;另一方面需通过曝气产生的连续气流实现对膜表面的持续冲刷,减少污染物在膜表面的附着、沉积与结垢,延缓膜污染进程。当采用微孔曝气器时,需结合反应器容积、水质负荷及膜组件布置情况合理控制气水比,在保证曝气效能的同时实现能耗的优化平衡;同时需重点优化穿孔管的布局设计,通过科学设定穿孔间距与布置方式,提升曝气的均匀性,有效避免反应器内出现曝气死角,减少反应器底部污泥的沉积堆积,进一步提升反应器整体处理效能与运行稳定性。

3 MBR工艺运行控制与维护管理

3.1 膜污染防控与清洗策略

膜污染防控是保障MBR工艺稳定运行的关键环节,其核心在于明确污染机制并建立精准的监测体系。膜污染的产生主要源于胶体物质微生物以及无机物在膜表面的沉积与附着,这些物质会逐渐堵塞膜孔、增加过滤阻力,进而影响工艺处理效率。在工艺设计阶段需配套完善的在线监测系统,重点监测跨膜压差与膜通量两项核心指标。通过实时追踪指标变化,当出现跨膜压差突然升高或膜通量明显衰减等异常情况时,可及时发出污染预警,为后续防控措施的实施争取时间。清洗策略需根据污染程度与类型科学制定,分为物理清洗与化学清洗两类^[4]。物理清洗以物理剥离和冲刷为核心原理,主要包括反冲洗与空气擦洗两种方式,通过定期操作可有效去

除膜表面附着的松散污染物,建议运行频率控制在每两至四小时一次。化学清洗则针对物理清洗难以去除的顽固性污染,需依据污染成分选择适配的化学药剂,去除有机物污染可选用碱性药剂,去除无机垢可选用酸性药剂,杀菌消毒则可选用氧化性药剂,清洗周期需结合水质状况与污染程度设定,通常为每一至三个月一次。

3.2 自动化控制系统设计

自动化控制系统设计是提升MBR工艺运行稳定性、降低人工干预强度的核心支撑,其核心在于构建精准的过程控制逻辑与可靠的联动保护机制。过程控制逻辑通过核心控制单元实现对关键运行参数的自动调节,涵盖曝气量的动态适配、抽吸泵的启停调控以及反冲洗周期的智能设定等核心环节。通过预设的程序算法,系统可根据实时监测的水质、水量以及设备运行状态,自动优化各项参数,例如通过调控抽吸泵的运行与停止周期,平衡过滤效率与膜保护需求,有效降低膜污染的发展速率。联动保护机制的设计旨在保障设备安全与工艺稳定,核心是建立关键设备间的协同控制逻辑。风机与抽吸泵的联动控制是重要组成部分,当风机停止运行导致曝气中断时,系统可自动触发抽吸泵停止指令,避免膜组件在缺氧状态下持续运行造成损伤。借助压力监测设备设定跨膜压差上限阈值,当监测值超过阈值时,系统立即触发报警信号,并同步停止抽吸泵运行,实现对膜组件与设备的双重保护,防止因过度污染或压力过高引发故障。

4 MBR工艺能效优化与资源化利用

4.1 能耗优化路径

能耗优化是提升MBR工艺经济性的核心方向,重点围绕曝气系统能耗降低与余热回收利用两大关键路径推进。曝气系统是MBR工艺的主要能耗单元,降低曝气能耗需依托精确曝气控制与曝气设备优化的协同作用。精确曝气控制通过实时监测反应池内溶解氧浓度,动态调节曝气强度,将溶解氧维持在适宜范围,避免因过度曝气造成的能耗浪费,同时保障微生物代谢所需的氧气供应。曝气器优化则通过选用高效曝气设备,提升氧气传递效率,减少单位氧气供应所需的能耗,合理选用优化后的曝气设备可实现曝气能耗的显著降低。结合MBR工艺运行过程中膜池的高温特性,设计配套的热交换系统

实现余热回收利用是另一重要节能路径。

4.2 出水资源化方向

MBR工艺凭借高效的固液分离能力,出水水质优良,为资源化利用提供了有利基础,主要分为出水中水回用与污泥磷回收两大方向。在中水资源化方面,MBR工艺出水的悬浮物与化学需氧量指标可稳定控制在较低水平,水质清澈稳定,无需额外复杂处理即可直接回用于绿化灌溉、道路冲洗等非饮用场景,有效替代新鲜水资源。若需拓展回用范围,通过纳滤或反渗透等深度处理技术进一步去除水中的溶解性盐类、微量污染物等,可使出水水质达到工业生产用水标准,实现工业领域的循环复用。在磷资源回收方面,MBR工艺产生的污泥具有较高的含磷量,具备显著的磷回收潜力。通过采用污泥厌氧消化技术分解污泥中的有机物,同时结合磷结晶技术,将污泥中以各种形态存在的磷转化为稳定的磷酸盐结晶,实现磷资源的高效回收,既降低了污泥处置压力,又实现了污染物向资源的转化,提升了工艺的环境与经济效益。

结束语:MBR污水处理工艺作为一项创新且高效的污水处理技术,在提升水质、保障出水稳定性方面展现出显著优势。通过合理设计膜组件与生物反应器核心参数,精准把控运行控制要点,能够有效应对膜污染等问题,确保工艺稳定运行。而能耗优化与资源化利用的探索,进一步挖掘了其经济与环境效益潜力。未来,随着技术的持续创新与完善,MBR工艺有望在更广泛的污水处理场景中发挥关键作用,为解决水资源短缺与环境污染问题提供坚实有力的技术支撑。

参考文献:

- [1]膜曝气生物膜反应器处理低碳氮比市政污水的同步脱氮除碳研究[D].江兴.广州大学,2022
- [2]膜生物膜反应器污水脱氮同步沼气脱硫效能研究[D].千森,2022.
- [3]官晓梅,陈文平,赵学峰.多级AO+MBR工艺在污水处理厂高排放标准提标改造中的应用[J].中国资源综合利用,2025,43(03):275-277.
- [4]田海成,杨曦凯,李清旭等.MBR工艺在老城区污水处理厂提标扩容改造工程中的应用[J].工业用水与废水,2025,56(01):80-85.