

环保设备新技术应用研究探讨

樊光霞

中检评价技术有限公司 陕西 西安 710000

摘要:在我国生态环境保护力度持续加大、水环境治理标准不断提升的背景下,传统污水处理设备已难以满足高效、低耗、集约化的处理需求。膜生物反应器(MBR)作为融合膜分离技术与生物处理技术的新型环保设备,凭借其出水水质优、占地面积小、污泥产量低等核心优势,在城镇污水处理、工业废水治理、再生水回用等领域得到广泛应用。本文以水处理领域MBR环保设备为研究对象,深入剖析其技术原理、核心结构,系统探讨新型MBR技术的创新点与应用现状,结合实际工程案例分析其应用成效,指出当前MBR设备应用中存在的膜污染、能耗偏高、运维成本高等问题,并提出针对性优化策略,最后展望MBR设备新技术的发展趋势,旨在为MBR设备的技术升级与规模化推广应用提供理论参考与实践借鉴,推动水处理环保设备行业向智能化、绿色化、高效化方向发展。

关键词:环保设备;水处理;膜生物反应器;新技术;膜污染;工程应用

一、引言

随着工业化、城镇化进程的快速推进,水环境污染问题日益突出,水资源短缺与水质恶化已成为制约我国经济社会可持续发展的重要因素。污水处理作为水环境治理的核心环节,对改善水体质量、实现水资源循环利用具有关键意义。传统活性污泥法污水处理设备存在占地面积大、处理效率低、出水水质不稳定、污泥处置难度大等弊端,难以适配当前严苛的污水排放标准与节水减排要求。^[1]在此背景下,新型环保设备的研发与应用成为水处理行业的发展重点。膜生物反应器(Membrane Bioreactor, MBR)是将膜分离技术与生物反应器有机结合的高效水处理设备,其通过膜组件的高效截留作用,替代传统工艺中的二沉池,实现污泥与处理出水的高效分离,大幅提升生物反应器内的微生物浓度,强化污染物降解能力。近年来,随着膜材料技术、膜污染控制技术、智能运维技术的不断突破,MBR设备的性能持续优化,应用场景不断拓展,已成为水处理环保设备领域的研究热点与应用主流。基于此,本文聚焦MBR设备,深入探讨其新技术应用与发展前景,对提升水处理效率、推动环保设备技术革新具有重要的现实意义。

二、MBR水处理设备核心技术概述

(一) MBR设备基本原理

MBR设备主要由生物反应器、膜组件、曝气系统、抽吸系统、自控系统等部分构成,其工作原理是将污水引入生物反应器内,通过反应器内活性污泥中的微生物对污水中的有机物、氨氮、总磷等污染物进行生物降解与转化;同时,膜组件通过物理截留作用,将生物反应器内的活性污泥、大分子有机物、悬浮颗粒等物质截留

在反应器内,仅允许水分子、小分子无机物等透过膜孔形成处理出水。^[2]与传统污水处理工艺相比,MBR设备通过膜的高效截留,彻底解决了传统工艺中污泥流失、固液分离不彻底的问题,能够将微生物完全截留在生物反应器内,使反应器内污泥浓度(MLSS)达到8-12g/L,远高于传统工艺的2-4g/L,显著延长了污泥龄(SRT),有利于硝化细菌、聚磷菌等特效微生物的富集生长,大幅提升了脱氮除磷与难降解有机物的处理效果,确保出水水质稳定达到一级A排放标准及再生水水质标准。

(二) MBR设备的分类与核心优势

1. 设备分类:根据膜组件与生物反应器的组合方式,MBR设备可分为一体式(浸没式)MBR、分置式MBR和复合式MBR三类。一体式MBR将膜组件直接浸设在生物反应器的混合液中,通过抽吸泵负压抽吸出水,具有结构紧凑、能耗较低、占地面积小的特点,是目前应用最广泛的类型;分置式MBR将膜组件与生物反应器分开设置,通过循环泵将混合液输送至膜组件进行过滤,运行稳定性高、膜清洗方便,适用于高浓度工业废水处理;复合式MBR在生物反应器内投加活性炭、陶粒等填料,形成生物膜-活性污泥复合体系,进一步提升系统抗冲击负荷能力,适配水质波动大的复杂污水处理场景。

2. 核心优势:一是出水水质优异,膜组件截留效率可达99%以上,出水悬浮物(SS)接近零,浊度低,可直接作为再生水回用;二是占地面积小,无需设置二沉池、砂滤池等构筑物,占地面积仅为传统工艺的1/3-1/2,适合用地紧张的城市区域与工业园区;三是污泥产量低,高污泥龄使微生物处于内源呼吸阶段,剩余污泥产量较传统工艺减少50%以上,降低污泥处置成本与环境风险;

四是运维便捷,设备集成化、模块化程度高,可实现全自动控制。

三、MBR设备新技术创新与应用现状

(一) 新型膜材料技术创新

膜材料是MBR设备的核心部件,其性能直接决定设备的处理效果与使用寿命。传统MBR膜材料多采用聚偏氟乙烯(PVDF)、聚氯乙烯(PVC)等材质,存在易污染、亲水性差、机械强度低等问题。近年来,新型膜材料技术不断突破,推动MBR设备性能大幅提升。

1. 改性膜材料:通过表面改性、共混改性等技术,对传统PVDF膜进行优化,在膜表面引入亲水基团、抗菌基团,提升膜的亲水性与抗污染性能。例如,纳米二氧化钛、石墨烯氧化物改性PVDF膜,可有效降低膜表面粗糙度,减少污染物附着,膜通量衰减速率降低30%以上,膜清洗周期延长至60-90天,大幅提升膜的使用寿命。

2. 高性能新型膜材料

聚四氟乙烯(PTFE)膜、中空纤维复合膜等新型膜材料逐步应用于MBR设备,PTFE膜具有优异的化学稳定性、抗污染性与耐腐蚀性,可在强酸、强碱、高盐废水环境中稳定运行,机械强度高,使用寿命可达8-10年,远高于传统PVDF膜的3-5年;中空纤维复合膜采用双层结构,外层为致密分离层,内层为支撑层,兼顾高膜通量与高截留效率,处理效率提升20%以上。

(二) 膜污染控制新技术:膜污染是制约MBR设备规模化应用的核心难题,污染物在膜表面吸附、沉积,会导致膜通量下降、跨膜压差升高,增加能耗与运维成本。近年来,新型膜污染控制技术的研发与应用,有效缓解了膜污染问题。

1. 智能曝气控制技术

传统MBR设备采用恒定曝气模式,曝气强度高易造成能源浪费,过低则无法有效冲刷膜表面。智能曝气控制技术通过在线监测膜组件跨膜压差(TMP)、溶解氧(DO)、污泥浓度等参数,利用AI算法动态调整曝气强度与曝气频率,实现“按需曝气”。在上海某工业园区MBR污水处理项目中,采用该技术后,膜表面污染物冲刷效果提升40%,膜污染速率显著降低,年均能耗下降18.5%。^[3]

2. 生物协同控污技术

在MBR反应器内投加生物填料、特效微生物菌剂,形成生物协同处理体系。生物填料可吸附部分污染物,减少膜表面污染负荷;特效微生物菌剂可降解膜表面的粘性污染物,抑制微生物胞外聚合物(EPS)分泌。复合式MBR设备结合该技术,膜污染周期延长至90-120天,化学清洗频率减少60%,有效降低膜污染带来的运维压力。

3. 在线清洗与离线清洗优化技术

研发新型低毒、高效膜清洗剂,采用在线脉冲清洗、间歇式化学清洗相结合的方式,替代传统频繁化学清洗工艺。在线脉冲清洗通过定期向膜组件注入少量清洗剂,配合曝气冲刷,实时清除膜表面轻度污染物;离线清洗采用分步清洗工艺,先物理冲洗,再低浓度化学清洗,减少清洗剂对膜材料的损伤,延长膜使用寿命。

(三) 智能化与节能化新技术

1. 智能监控与运维技术

基于物联网、大数据、云计算技术的MBR智能运维系统,可实时监测设备运行参数、水质指标、膜组件状态,实现故障自动预警、自动清洗、流量调节等功能。管理人员可通过移动端、电脑端远程监控设备运行状态,及时调整运行参数,实现无人值守运维。浙江某农村生活污水MBR处理项目,采用智能监控系统后,运维效率提升50%,设备故障发生率降低70%,大幅降低人工运维成本。

2. 节能降耗技术

针对MBR设备曝气能耗、抽吸能耗偏高的问题,研发低能耗曝气装置、变频抽吸泵、太阳能供电系统等节能技术。太阳能-MBR一体化设备,利用太阳能光伏板为设备供电,可满足30%以上的用电需求,适用于偏远农村、山区等无电网覆盖区域;变频抽吸系统根据膜通量实时调整抽吸功率,较传统定频系统降低抽吸能耗25%以上。

(四) MBR设备新技术应用场景

1. 城镇污水处理厂提标改造

在城镇污水处理厂提标改造工程中,MBR设备凭借高效处理性能,成为替代传统工艺的首选设备。昆明市第十水质净化厂采用改良A²/O-MBR组合工艺进行提标改造,处理规模10万m³/d,改造后出水COD ≤ 30mg/L、氨氮 ≤ 1.5mg/L、总磷 ≤ 0.3mg/L,稳定达到一级A排放标准,出水回用至滇池生态补水,实现水资源循环利用,总占地面积减少28%,剩余污泥产量降低40%。

2. 工业废水处理

在制药、化工、食品加工等高浓度有机废水处理领域,新型MBR设备展现出优异的适配性。泰州医药高新区高浓度制药废水处理项目,采用EGSB-MBR深度处理工艺,处理规模2万m³/d,进水COD浓度8000-15000mg/L,经处理后出水COD ≤ 80mg/L,脱氮除磷效果达标,系统抗冲击负荷能力强,可应对进水水质大幅波动,解决了传统工艺难以处理难降解有机物的难题。

四、MBR设备应用存在的问题

(一) 膜污染问题仍未彻底解决

尽管新型膜污染控制技术不断应用,但膜污染仍是MBR设备运行的核心痛点。在高浓度废水、复杂水质处理场景中,微生物胞外聚合物、悬浮颗粒、胶体物质易在膜表面形成致密污染层,单纯依靠曝气冲刷、在线清洗难以彻底清除,长期运行会导致膜通量持续下降,需频繁进行化学清洗,不仅增加运维成本,还会缩短膜组件使用寿命。

(二) 初期投资与运维成本偏高

MBR设备核心膜组件、智能控制系统价格较高,初期设备投资较传统活性污泥法高出30%-50%;同时,膜组件需定期更换,加上清洗剂、能耗、人工运维等费用,长期运维成本偏高。对于经济欠发达地区、中小型污水处理项目,较高的成本成为制约MBR设备推广应用的重要因素。

(三) 能耗水平有待进一步降低

曝气系统是MBR设备的主要能耗单元,占总能耗的60%-70%。虽然智能曝气技术可降低部分能耗,但为保证膜冲刷效果,仍需维持较高的曝气强度,整体能耗较传统工艺高出10%-20%。在能源成本不断上涨的背景下,高能耗问题增加了设备运行负担,不符合绿色低碳环保设备的发展要求。^[4]

(四) 专业运维人才短缺

MBR设备集成化、智能化程度高,运行维护需要专业技术人员掌握膜组件维护、自控系统操作、故障排查等技能。目前,基层环保运维人员专业水平不足,对新型MBR设备的运维技术掌握不够,易因操作不当导致设备故障、膜污染加剧等问题,影响设备稳定运行。^[5]

五、MBR设备优化发展对策

(一) 深化膜污染控制技术研发

持续推进抗污染膜材料研发,重点开发纳米复合膜、仿生膜、抗菌膜等新型膜材料,从源头提升膜的抗污染性能;创新膜污染控制工艺,研发物理-生物-化学协同控污技术,结合超声清洗、电场辅助抗污染等新型技术,进一步降低膜污染速率;建立膜污染预警模型,通过大数据分析膜污染发展趋势,实现提前干预,减少膜污染对设备运行的影响。

(二) 降低设备投资与运维成本

推动膜材料国产化、规模化生产,降低膜组件生产成本,打破国外技术垄断,减少设备初期投资;优化MBR设备结构设计,提升设备集成度,简化工艺流程,降低工程建设成本;延长膜组件使用寿命,优化清洗工艺,减少膜更换频率,降低运维费用;推广设备租赁、第三方运维模式,减轻项目方资金压力,推动MBR设备在中小型项目中的应用。

(三) 推进节能技术集成应用

整合低能耗曝气、变频控制、余热回收、太阳能/风能供电等节能技术,构建绿色低碳MBR设备体系;优化工艺参数,通过调整污泥浓度、水力停留时间、气水比等参数,在保证处理效果的前提下,降低曝气与抽吸能耗;研发MBR与厌氧处理、人工湿地等工艺的耦合技术,利用厌氧工艺降低好氧能耗。

结束语

未来,随着国家对水环境治理力度的持续加大、水资源循环利用需求的不断提升,MBR设备将朝着绿色低碳、智能数字、集成模块、资源多功能的方向发展,成为水处理环保设备行业的主流技术。相关企业、科研机构应加大技术研发投入,突破核心技术瓶颈,优化设备性能,降低成本,加强人才培养,推动MBR设备新技术的规模化、规范化应用,助力我国水环境质量改善与水资源可持续利用,为生态环境保护事业提供有力的技术支撑。

参考文献

- [1]中华人民共和国生态环境部.城镇污水处理厂污染物排放标准(GB18918-2002)[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [2]黄青松.膜生物反应技术在环境工程污水处理中的应用实例分析[J].造纸装备及材料,2025,49(78):123-125.
- [3]黄勇.新型膜生物反应器(MBR)技术在水处理中的应用研究[J].水处理技术,2024,50(3):89-93.
- [4]黄丽.MBR膜污染控制技术研究进展与工程应用[J].环境工程,2024,42(5):67-71.
- [5]黄伟.智能化MBR污水处理设备的研发与应用[J].环保科技,2025,31(2):45-48.