

微生物燃料电池耦合膜生物反应器处理生活污水的效能优化与机制探究

李松华 黄海滨

杭州中储环保科技有限公司 浙江 杭州 311100

摘要：本文聚焦于微生物燃料电池（MFC）耦合膜生物反应器（MBR）处理生活污水这一前沿技术。首先阐述了该耦合技术的研究背景与意义，指出其在污水处理与能源回收方面的双重优势。接着深入分析了影响其处理效能的关键因素，包括电极材料、微生物群落、膜组件特性等。在此基础上，探讨了效能优化的策略，如电极改进、运行参数调控等。同时，从电化学、生物学和流体力学等多学科角度探究了耦合系统的处理机制，旨在为该技术的进一步发展和实际应用提供理论支持与实践指导。

关键词：微生物燃料电池；膜生物反应器；生活污水；效能优化；机制探究

1 引言

城市化加速、人口增长使生活污水排放量剧增，传统处理方法能耗高、污泥产量大、效率有限，且忽视能源回收。微生物燃料电池（MFC）能耗低、污泥少，能转化有机物为电能；膜生物反应器（MBR）出水水质好、占地小、易自动化。二者耦合的MFC-MBR系统有望高效处理污水并回收能源，但目前尚处研究阶段，效能和机制不明。该技术对环境可减少污染、降低污泥影响；能源上能回收电能；学术上能丰富相关理论体系，提供新思路方法。

2 MFC-MBR 技术的基本原理与系统构成

2.1 基本原理

2.1.1 MFC原理

MFC是利用产电微生物作为生物催化剂，在阳极室将污水中的有机物氧化分解，产生电子和质子。电子通过微生物细胞膜上的电子传递链传递到阳极电极，再通过外电路到达阴极电极；质子则通过质子交换膜迁移到阴极室^[1]。在阴极室，电子、质子和电子受体（如氧气）发生还原反应，完成电化学过程，从而产生电流。其基本反应式如下：

阳极反应： $C_6H_{12}O_6 + 6H_2O \rightarrow 6CO_2 + 24H^+ + 24e^-$

阴极反应： $6O_2 + 24H^+ + 24e^- \rightarrow 12H_2O$

总反应： $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$

2.1.2 MBR原理

MBR是利用膜的高效分离作用，将生物反应器中的活性污泥和大分子有机物截留，实现泥水分离。与传统生物处理工艺相比，MBR省去了二沉池，提高了生物反应器的污泥浓度，增强了对污染物的去除能力，同时保证了出水水质的稳定。

2.1.3 MFC-MBR耦合原理

MFC-MBR系统将MFC的阳极室与MBR的生物反应器相结合，利用MBR中的微生物在降解有机物的同时产生电子，通过MFC的电极系统将化学能转化为电能。同时，MBR的膜组件对污水进行深度处理，进一步提高出水水质。膜的存在还可以减少阳极室中微生物的流失，维持较高的生物量，有利于提高MFC的产电性能和污水处理效果。

2.2 系统构成

MFC-MBR系统主要由阳极室、阴极室、膜组件、外电路和质子交换膜（部分系统可不设）构成。阳极室是微生物氧化分解有机物产电子场所，填充导电材料作电极与载体并接种微生物；阴极室是电子受体还原反应处，常用铂碳等电极，以氧气等为受体；膜组件是MBR核心，用于泥水分离，常用PVDF等膜材料，有中空纤维膜等形式；外电路连接阴阳极使电子流动形成电流，可连电阻评估产电性能；质子交换膜分隔两室，部分系统可不设，靠其他方式实现质子迁移。

3 影响 MFC-MBR 处理生活污水效能的关键因素

3.1 电极材料

电极材料是MFC-MBR系统关键，影响微生物附着、电子传递效率和产电性能。①阳极材料：理想阳极材料应导电性好、生物相容、化学稳定、比表面积大。碳毡孔隙丰富，利于生物膜形成；石墨颗粒导电性高；碳纳米管、石墨烯等新型材料受关注，碳纳米管修饰阳极可提高产电和污水处理效果。②阴极材料：影响电子受体还原反应速率。铂碳电极催化活性高但资源稀缺、价格贵，限制应用。非贵金属催化剂如铁、钴、镍等金属及其氧化物、碳基催化剂受关注，氮掺杂碳纳米管成本低

且催化性能与铂碳电极相近。

3.2 微生物群落

微生物群落是MFC-MBR系统实现有机物降解和产电的核心,其种类、数量和活性影响系统处理效能和产电性能。①产电微生物:能将有机物氧化产生的电子传递到阳极,如希瓦氏菌、地杆菌等,有特殊电子传递机制^[2]。优化培养和驯化策略可提高其丰度和活性。②其他功能微生物:如硝化细菌、反硝化细菌、聚磷菌等参与氮、磷去除,其相互作用和协同关系影响系统整体效能。调控运行条件可促进其生长代谢,提高氮、磷去除效率。

3.3 膜组件特性

膜组件特性对MBR分离性能和系统稳定运行起关键作用。①膜材料:不同膜材料化学性质和表面结构不同,截留和抗污染能力有差异。如PVDF膜化学稳定性好但易污染,PE膜抗污染好但机械强度稍弱,选择时需综合考虑。②膜孔径:影响膜截留能力和通量。小孔径截留效果好但通量低、能耗高,大孔径通量高但可能影响出水水质,需根据需求选择。③膜污染:是MBR主要问题,导致通量下降、压差升高、成本和能耗增加。主要由微生物、有机物和无机物等在膜表面吸附、沉积和生长形成。可通过优化运行参数、采用清洗策略和开发抗污染材料控制。

3.4 运行参数

①水力停留时间(HRT):影响微生物对有机物降解程度和系统处理效能。长HRT提高出水水质但增加成本,短HRT可能导致降解不充分,需根据污水性质和处理要求选择。②污泥停留时间(SRT):影响微生物生长代谢和污泥产量。长SRT利于硝化细菌生长,提高氮去除效率但增加污泥产量和成本,短SRT减少污泥产量但可能影响处理效能,需综合优化。③溶解氧(DO)浓度:影响微生物代谢和系统产电性能。阳极室低DO利于产电微生物厌氧呼吸,阴极室需充足DO促进还原反应,还会影响氮去除效率,需合理曝气控制。④外电阻:影响系统输出电压、电流和功率密度。当外电阻等于MFC内阻时输出功率最大,调节外电阻可优化产电性能,还会影响微生物代谢和污水处理效果。

4 MFC-MBR 处理生活污水效能的优化策略

4.1 电极优化

4.1.1 电极材料改性

通过对电极材料进行改性处理,可以提高其导电性、生物相容性和催化活性。例如,采用化学沉积、电化学沉积等方法在阳极电极表面沉积金属纳米颗粒(如金、银、铂等),可以增强微生物与电极之间的电子传

递效率,提高MFC的产电性能。对阴极电极进行氮掺杂、硫掺杂等处理,可以改变电极表面的电子结构,提高其对电子受体的催化还原能力。

4.1.2 电极结构优化

优化电极的结构可以增加电极的比表面积,提高微生物的附着量和反应活性位点。例如,采用三维多孔结构的电极材料,如三维石墨烯泡沫、三维碳纳米管阵列等,能够为微生物提供更加丰富的生长空间,促进生物膜的形成和发展。同时,合理的电极间距设计可以减少溶液内阻,提高系统的输出功率。

4.2 微生物群落调控

4.2.1 微生物接种与驯化

通过接种特定的产电微生物或功能微生物,可以快速构建具有高效处理效能和产电性能的微生物群落。例如,接种希瓦氏菌和地杆菌等产电微生物可以提高MFC的产电能力;接种硝化细菌和反硝化细菌可以增强系统的脱氮性能。同时,对微生物进行驯化处理,使其逐渐适应污水的水质特点和系统的运行条件,提高微生物的活性和稳定性。

4.2.2 添加电子穿梭体

电子穿梭体可以在产电微生物和电极之间传递电子,提高电子传递效率。常见的电子穿梭体包括核黄素、蒽醌-2,6-二磺酸(AQDS)等。向MFC-MBR系统中添加适量的电子穿梭体,可以促进产电微生物的电子传递,提高MFC的产电性能。同时,电子穿梭体还可能对微生物的代谢过程产生一定的影响,进而影响污水处理效果。

4.3 膜组件改进

4.3.1 开发新型膜材料

研发具有良好抗污染性能、高通量和长使用寿命的新型膜材料是解决膜污染问题的关键。例如,开发具有自清洁功能的膜材料,如光催化膜、电化学膜等,可以利用光或电的作用分解膜表面的污染物,实现膜的自清洁^[3]。同时,研究新型纳米复合膜材料,将纳米材料与统膜材料相结合,提高膜的分离性能和抗污染能力。

4.3.2 优化膜组件结构

优化膜组件的结构可以提高膜的填充密度和利用效率,减少膜组件的占地面积。例如,采用新型的中空纤维膜排列方式或平板膜的组装结构,提高膜组件的单位体积膜面积。同时,改进膜组件的进水方式和出水方式,优化水流分布,减少膜表面的浓差极化现象,降低膜污染的风险。

4.4 运行参数优化

4.4.1 多参数协同优化

MFC-MBR系统的运行参数之间相互关联、相互影响,因此需要进行多参数协同优化。采用响应面法、正交试验法等实验设计方法,系统地研究不同运行参数之间的交互作用对系统处理效能和产电性能的影响,确定最佳的运行参数组合。例如,通过同时调节HRT、SRT和DO浓度等参数,实现系统对有机物、氮、磷的高效去除和电能的最大化回收。

4.4.2 智能控制系统开发

开发智能控制系统可以实时监测系统的运行状态和出水水质,根据预设的目标自动调整运行参数,实现系统的优化运行。例如,利用传感器实时监测污水的水质参数(如COD、氨氮、TP等)、系统的电化学参数(如电压、电流、功率等)和膜组件的运行参数(如跨膜压差、膜通量等),通过智能算法分析这些数据,自动调节曝气量、进水流速、外电阻等运行参数,确保系统始终处于最佳运行状态。

5 MFC-MBR 处理生活污水的机制探究

5.1 电化学机制

5.1.1 电子传递机制

MFC-MBR系统中的电子传递是一个复杂的过程,涉及微生物细胞内的电子传递链、细胞外电子传递机制以及电极与微生物之间的电子转移。产电微生物通过细胞膜上的细胞色素c、导电菌毛等将细胞内代谢产生的电子传递到细胞外,然后通过电子穿梭体或直接与电极接触将电子传递到阳极电极。在阴极电极,电子、质子和电子受体发生还原反应,完成电化学循环。深入研究电子传递机制,有助于揭示MFC的产电原理,为提高产电性能提供理论依据。

5.1.2 电场对微生物代谢的影响

MFC-MBR系统在运行过程中会产生一定的电场,电场会对微生物的代谢过程产生影响。研究表明,适当的电场强度可以刺激微生物的生长和代谢活性,促进有机物的降解和电子的产生。例如,电场可以影响微生物细胞膜的通透性,改变细胞内的离子浓度和酶活性,从而调节微生物的代谢途径。同时,电场还可能对微生物的群落结构产生选择作用,促进产电微生物的生长和富集。

5.2 生物学机制

5.2.1 微生物群落演替规律

在MFC-MBR系统的启动和运行过程中,微生物群落会发生演替。通过分子生物学技术(如高通量测序、荧光定量PCR等)对系统中的微生物群落结构进行分析,可以揭示微生物群落的演替规律及其与环境因素和系统性能之间的关系。例如,在系统启动初期,可能以一些快

速生长的异养微生物为主,随着系统的运行,产电微生物和功能微生物(如硝化细菌、反硝化细菌等)的相对丰度逐渐增加,形成相对稳定的微生物群落结构。了解微生物群落的演替规律有助于优化系统的启动和运行管理。

5.2.2 微生物-膜相互作用机制

在MFC-MBR系统中,微生物与膜之间存在着复杂的相互作用。微生物可以在膜表面附着生长形成生物膜,生物膜的形成既会影响膜的分离性能,导致膜污染,又可能对污水中的污染物具有一定的降解作用。同时,膜的选择性透过性也会影响微生物的生存环境和代谢活动。研究微生物-膜相互作用机制,有助于深入理解膜污染的形成机理,开发有效的膜污染控制策略。

5.3 流体力学机制

5.3.1 污水流动特性

不合理流道设计会使污水现流动死角,部分区域污染物难与微生物充分接触,降低有机物降解效率,如阳极室进水不均会影响微生物活性。优化流道结构可让污水流动更均匀,提高传质效率与污染物去除能力。污水在膜组件附近流动状态影响膜污染,层流易加速膜污染,适当湍流可减少沉积。调整曝气强度等可优化膜附近流体状态,控制膜污染、延长膜寿命。

5.3.2 气泡作用机制

MFC-MBR系统中,曝气气泡为阴极室电子受体提供传输载体,还影响流体力学特性。气泡上升形成气升式循环,促进污水混合传质与物质交换,利于系统稳定运行。气泡与膜表面相互作用影响膜污染,破裂产生的剪切力可清洁膜,但气泡过大或曝气不均会破坏膜结构、增加污染风险。需优化曝气参数,发挥积极作用、减少负面影响。

结语:MFC-MBR技术是新兴的污水处理与能源回收技术,优势独特、潜力巨大。深入分析关键影响因素并采取电极优化、微生物调控等策略,可提升处理效能与产电性能;多学科探究处理机制,能为技术发展提供理论支撑。虽在实验室和小规模中试有进展,但大规模应用面临成本、稳定性等挑战。未来,随材料创新等趋势推动,该技术有望广泛应用,为解决水资源和污染问题提供高效可持续方案。

参考文献

- [1]王辛.微生物燃料电池在污水处理中的应用研究进展[J].辽宁化工,2024,53(06):865-867+871.
- [2]李贞,喻早艳,温晴,等.微生物燃料电池在污水处理中的应用[J].江西化工,2022,38(03):10-14.
- [3]景瑞瑛,王思昊,王健,等.微生物燃料电池对膜生物反应器系统节能降耗的影响[J].节能与环保,2024,(11):46-54.