

工业废水处理中生物膜反应器的优化应用策略研究

潘晓梁¹ 王 衡² 柏 磊³

1. 杭州中环环保工程有限公司 浙江杭州 310020

2. 浙江卓锦环保科技股份有限公司 浙江杭州 310000

3. 湖北鑫嘉鸿诚环保科技有限公司 湖北武汉 430070

摘 要：工业废水的复杂性和高污染特性使得其处理成为环境保护领域的重要课题。生物膜反应器（Biofilm Reactor）因其高效的污染物降解能力、良好的耐冲击负荷性以及较低的污泥产量，在工业废水处理中得到了广泛应用。然而，在实际运行中，生物膜反应器仍面临诸多技术挑战，如生物膜老化、传质效率受限、膜污染问题等，影响了其处理效果与长期稳定性。为提高生物膜反应器的应用效率，优化生物膜载体材料、调整反应器结构、优化运行参数以及结合其他污水处理技术成为关键优化方向。本文系统探讨了生物膜反应器在工业废水处理中的应用现状、存在的问题以及优化策略，以期为提高工业废水治理效率提供科学依据和技术支持。

关键词：工业废水处理；生物膜反应器；优化策略；污染物降解；膜污染控制

随着工业化进程加速，大量高浓度有机污染物、重金属离子等难降解物质被排放，严重威胁生态系统和人类健康。传统污水处理技术在应对复杂工业废水时常遇到效果不稳定、成本高、二次污染等问题。相比之下，生物膜反应器因其丰富的生物相、强耐冲击负荷和高效降解污染物的特点，成为工业废水处理的有效技术。该技术依赖于生物膜的形成，将微生物富集在载体表面，通过生物降解去除废水中的污染物。然而，长期运行过程中，生物膜老化、传质受限和膜污染问题仍制约其效率和水质稳定性。因此，优化其应用策略，以提高处理效率和运行稳定性，对于实现工业废水的高效处理具有重要意义。

一、生物膜反应器在工业废水处理中的应用现状

1. 生物膜反应器的基本原理与类型

生物膜反应器是一种基于微生物固着生长原理的污水处理技术。微生物通过附着在载体表面形成生物膜，在生长和代谢过程中降解废水中的有机污染物^[1]。该反应器依赖生物膜内的微生物群落协同作用，实现污染物的高效去除。生物膜的形成包括吸附、定殖、生长、成熟和脱落等阶段，稳定的生物膜结构对处理效果至关重要。

生物膜反应器可分为多种类型，包括固定床生物膜反应器（FBBR）、流化床生物膜反应器（MBBR）和膜生物反应器（MBR）等。固定床生物膜反应器利用填料作为微生物载体，使废水在固定填料表面流动，适用于高浓度有机废水的处理。流化床生物膜反应器通过使载体处于流化状态，提高传质效率和降解能力。膜生物反应器结合了生物降解和膜分离技术，提高了污染物去除率，

并能有效截留微生物，实现高效稳定的废水处理。

2. 工业废水的特点及生物膜反应器的适用性

工业废水因生产工艺的不同，其污染物成分复杂，包括高浓度有机物、重金属、油脂、悬浮物及高盐度等。这些污染物的存在增加了废水处理的难度，传统处理方法难以满足环保排放标准。生物膜反应器凭借其良好的微生物固定能力和较强的抗冲击负荷能力，适用于处理各类工业废水。

对于高浓度有机污染物废水，如食品加工、造纸和制药行业的废水，生物膜反应器能够有效降解有机物，减少COD和BOD含量。对于含重金属废水，如电镀、矿业和电子制造行业的废水，生物膜可吸附和降解部分重金属，提高水质净化效果。此外，针对高盐度废水，如海产品加工和化工行业排放的废水，生物膜反应器的特殊菌群可适应高盐环境，提高处理效率。

3. 生物膜反应器在不同工业领域的应用案例

生物膜反应器已广泛应用于多个工业领域。在食品加工行业，该技术可高效去除有机物和悬浮固体，降低废水的排放污染负荷。在石化行业，生物膜反应器能够降解石油类污染物，提高废水的可生化性。在制药行业，由于药物废水成分复杂且毒性较高，生物膜反应器可通过微生物降解特定药物残留，减少环境污染。在电子制造行业，该技术被用于处理含氨氮及重金属废水，提高废水达标排放率。

生物膜反应器在工业废水处理中的应用已取得良好成效，但仍需针对不同废水类型进行针对性优化，以提

高处理效率和运行稳定性。

二、生物膜反应器在工业废水处理中的主要问题

1. 生物膜老化与脱落问题

生物膜的稳定性对反应器的处理效率至关重要。在长期运行过程中,生物膜会经历不断的生长、成熟和衰老。当生物膜厚度过大或活性降低时,内部缺氧、底层微生物活性下降,导致生物膜老化。老化的生物膜容易脱落,造成悬浮固体浓度上升,影响出水水质。脱落的生物膜可能堵塞后续处理单元,增加运行维护难度。

影响生物膜老化的因素包括载体表面特性、流体剪切力以及污染物浓度。表面粗糙度低或附着力不足的载体容易导致生物膜不稳定,增加脱落风险。在高水力剪切力环境下,生物膜可能过早脱落,影响微生物群落的稳定性。污染物负荷过高或变化剧烈时,微生物代谢状态波动较大,加剧生物膜更新和脱落过程。

2. 传质效率受限

生物膜反应器的污染物降解依赖于溶解氧和基质向生物膜内部的扩散^[2]。较厚的生物膜可能导致氧气和有机物无法有效进入深层微生物区,使内部厌氧或缺氧状态加剧,降低污染物去除效率。特别是在高浓度有机废水处理过程中,微生物代谢速率较快,氧气需求量大,传质限制可能成为影响系统性能的关键因素。

载体填料的选择和优化对传质效率具有重要影响。孔隙率较低或结构过密的填料会阻碍废水流动,使污染物和氧气难以充分接触微生物群落,降低降解能力。此外,水流流态不均匀可能造成局部区域传质不足,影响整体反应器性能。

3. 膜污染问题

膜污染是膜生物反应器(MBR)运行中的主要挑战,影响出水质量和系统稳定性。污染物和微生物代谢产物在膜表面沉积,导致膜通量下降,运行阻力增加。膜污染的形成主要受微生物代谢产物、溶解性有机物及颗粒污染物的影响。微生物分泌的胞外聚合物(EPS)和溶解性微生物产物(SMP)易在膜表面聚集,使膜孔堵塞,降低透水性。

运行条件对膜污染的影响较大。高污染负荷和过长的水力停留时间可能导致污泥絮体破碎,增加膜污染风险。膜清洗和维护不当也会加剧污染积累,使膜寿命缩短。有效的膜污染控制措施包括优化曝气方式、降低EPS和SMP的产生、提高污泥沉降性能,以及定期采用物理或化学方法清洗膜组件。

4. 运行参数控制难度大

生物膜反应器的优化运行需要精确控制水力负荷、

有机负荷、溶解氧浓度等参数,以保证微生物活性和污染物去除效果。在实际应用中,工业废水水质波动较大,污染物成分复杂,导致系统运行参数难以长期保持稳定。

水力停留时间过长可能引起生物膜过度生长,加剧传质受限和脱落问题,而停留时间过短则可能降低降解效率。溶解氧供应不足会导致厌氧微生物大量繁殖,影响生物膜结构稳定性。有机负荷过高可能造成微生物中毒或抑制作用,使系统性能下降。运行管理的复杂性要求建立精细化监测和控制机制,以提高反应器稳定性和处理效果。

三、生物膜反应器优化应用策略

1. 载体材料的优化

生物膜的稳定性与载体材料密切相关,合理选择和优化载体材料可以提高生物膜的形成效率和稳定性^[3]。常见的载体材料包括塑料、陶瓷、泡沫材料等,每种材料的表面特性对微生物的附着和生长有着不同影响。载体材料的表面粗糙度、孔隙率和亲水性决定了微生物的附着能力。为了提高生物膜的生物降解能力,载体材料的表面应具有较好的亲水性和适宜的表面结构,以增强微生物的附着力。

近年来,复合材料和功能化材料在生物膜反应器中的应用逐渐增多。例如,通过将纳米材料、改性多孔材料或涂层技术应用于载体上,可以显著提高载体的比表面积和孔隙结构,促进微生物的均匀分布,增强传质效率。改性材料能够有效减少生物膜老化和脱落,提高系统的稳定性和处理能力。

2. 优化反应器结构与操作模式

反应器的结构和操作模式直接影响水流分布、溶解氧传输以及生物膜的生长。为了提高生物膜反应器的处理效果,优化反应器设计至关重要。例如,采用多级反应器设计可以有效降低生物膜厚度,减少传质受限问题,同时增强废水与微生物的接触,提高处理效率。

此外,反应器的操作模式,如液体的循环流动模式和进水的分布方式,也会影响生物膜的稳定性和反应效率。通过调整水流的速度和方向,可以优化微生物的代谢条件,避免死区的形成,提高生物膜的负荷承载能力。操作模式的优化不仅能够提高生物膜反应器的污染物降解能力,还能降低能耗,提高经济效益。

3. 运行参数的优化控制

精准控制生物膜反应器的运行参数,如水力停留时间(HRT)、溶解氧浓度、温度、pH值和有机负荷,对于提高反应器的处理效果具有重要意义。水力停留时间的设置直接影响生物膜的生长和污染物的降解速率。过

长或过短的停留时间都不利于反应器的稳定运行,需要根据废水的污染物浓度和流量进行优化调节。

溶解氧浓度是控制微生物代谢活动的关键因素,适宜的溶解氧水平能够促进好氧微生物的繁殖,增强有机物的降解能力。在高浓度有机废水处理中,氧气传输的效率可能成为限制因子,采用高效曝气装置或气泡增强技术可以改善溶解氧的传递效果,提升处理能力。

对于有机负荷的控制,需要根据实际废水的特性进行动态调节,避免高负荷条件下微生物的抑制或过载。温度和pH值的波动也会影响微生物的活性,适宜的环境条件有助于优化微生物群落的功能和稳定性。通过实时监测和智能调控系统,可以提高系统的运行效率,降低维护成本。

4.膜污染的防治与控制

膜污染是影响膜生物反应器长期稳定运行的重要因素。有效的膜污染控制措施对于保证反应器的出水质量和延长膜寿命至关重要。减少膜污染的策略包括优化反应器的运行条件、定期清洗膜组件、控制膜表面的污染物积累。

优化曝气方式和反应器内部流态是有效防止膜污染的关键手段。通过均匀分布气泡,能够减少废水中悬浮物和污染物在膜表面堆积,从而保持膜表面的自清洁效果,降低膜的污染速率。此外,膜表面材料的改性处理和抗污染涂层的应用,也能显著增强膜的抗污染性能,减少污染物的附着,延长膜的使用寿命。这些优化措施结合起来,不仅提高了反应器的处理效率,还有效延缓了膜污染的发生,确保系统的长期稳定运行。

定期的物理清洗和化学清洗是控制膜污染的常规方法。物理清洗通过反向冲洗或超声波清洗去除膜表面的松散污染物,而化学清洗则利用酸、碱或氧化剂分解附着物质,恢复膜的通量。清洗频率和清洗剂的选择应根据废水的成分和膜污染情况进行合理调整,以提高清洗效率并减少膜损伤。

优化膜生物反应器的运行方式和加强膜污染的防治措施,有助于提高系统的稳定性和长期运行效果,确保生物膜反应器在工业废水处理中实现高效、可持续的污染物去除。

四、生物膜反应器优化策略的应用效果与前景

1.优化策略的应用效果

通过对生物膜反应器的优化策略实施,能够显著提高废水处理的效果和运行稳定性^[4]。载体材料的优化提升了微生物的附着力和生长稳定性,减少了生物膜的老化和脱落现象,使得反应器能够在较长时间内保持高效

运行。优化后的反应器结构和操作模式促进了水流的均匀分布和溶解氧的有效传输,进而提高了污染物降解速率,尤其是在处理高浓度有机废水时,优化措施能够显著降低传质受限的问题。

同时,运行参数的精准控制能够根据废水水质变化进行实时调节,从而保证反应器在不同工作条件下的最佳运行状态,减少了能耗和维护成本。膜污染的有效控制通过采用优化的曝气模式、膜表面改性和定期清洗等手段,大大延长了膜的使用寿命,减少了系统停机时间,提升了生物膜反应器的经济性和可持续性。

2.前景展望

随着工业废水排放标准日益严格,生物膜反应器在水处理领域的应用前景广阔。随着新型高效载体材料的不断研发和应用,反应器的处理能力和稳定性有望得到进一步提升。未来,结合智能监控系统与大数据技术,可以实现对生物膜反应器的精确管理与优化操作,进一步提高处理效率和系统可靠性。

在膜污染控制方面,膜材料的创新和改性技术将成为提升膜生物反应器性能的关键。随着膜材料耐污染性和耐久性的提高,膜生物反应器将更加适应复杂的废水处理需求,减少频繁的清洗和更换。

总结

生物膜反应器作为一种高效的水处理技术,已在工业废水处理领域中展现出强大的潜力。通过对载体材料、反应器结构和运行参数的优化,生物膜反应器能够显著提升污染物的去除率和系统的稳定性。随着新材料和智能化技术的发展,生物膜反应器的性能将进一步得到提升。然而,膜污染和反应器稳定性仍然是亟待解决的问题。未来,随着技术的不断进步和创新,生物膜反应器在高浓度废水处理和膜污染控制等方面的应用将更为广泛,推动水处理技术向更加高效、环保的方向发展。

参考文献

- [1] 邓芊.特定工业废水处理中生物膜反应器的优化与应用研究[J].黑龙江环境通报,2024,37(10):12-14.
- [2] 顾军,赵敏燕,栾燕,等.膜生物反应器及其在工业废水处理中的应用[J].化工设计通讯,2024,50(08):134-136.
- [3] 薄娜娜,延晓惠,程连明,等.纺织工业废水处理技术应用及研究进展[J].纺织报告,2023,42(04):25-27.
- [4] 谭军,许海军,韦晓燕,等.印染废水深度处理及回收技术现状与发展[J].化工管理,2019,(35):71-72.