

基于膜生物反应技术处理环境工程污水

丁志亚

上海环境保护有限公司 上海 200000

摘要: 在全球水资源匮乏与水环境污染治理双重压力日益加剧的当下,环境工程污水处理技术正经历着从传统“被动治理”向现代“资源回收”的深刻范式转型。本文深入剖析了MBR技术的内在机理、系统构成及工程应用优势,系统阐述了针对环境工程污水特性的膜材料选择策略、反应器优化设计、操作条件精细控制以及膜污染全生命周期防控体系。研究表明,MBR技术不仅在固液分离效率、容积负荷及自动化程度上具有压倒性优势,更在实现污水“零排放”与资源化利用方面展现出不可替代的战略价值。尽管面临膜成本与污染控制的挑战,但随着材料科学与智能控制技术的进步,MBR必将在未来的水环境治理中占据统治地位。

关键词: 膜生物反应器(MBR);环境工程;污水处理;膜污染控制;资源化利用;固液分离

引言

水作为生命之源和工业之血,它的可持续利用已经成为人类社会过程中的关键性瓶颈。在城市化进程狂飙突进和工业化生产深度渗透的大背景下,环境工程污水组成越来越复杂,出现了高浓度有机废水、难降解工业废水和垃圾渗滤液这些“硬骨头”现象。传统活性污泥法虽然近百年来一直是治水主角,但是其内在缺点是二沉池泥水分离效率不高,占地面积较大,剩余污泥产量高,容易产生污泥膨胀,已经很难达到越来越苛刻的排放标准和水资源回收需求。在这样的背景之下,膜生物反应器(MBR)技术应势而出,它采用膜组件替代了传统工艺中的二沉池,通过物理截留和生物降解的协同效应,构建了一个高效、紧凑、智能的水处理生态系统。

一、膜生物反应技术原理与系统构成

(一) 技术原理

膜生物反应是膜分离技术和生物处理技术相结合的污水处理新技术,它的基本原理是通过膜高效分离作用将生物反应器中的活性污泥及大分子有机物拦截于反应器内部,使得生物反应器内部保持高浓度污泥,以提高生物处理效率。同时,膜分离作用也能有效去除污水中的悬浮物、胶体物质、细菌及病毒,显著提高出水水质。

在膜生物反应的技术应用中,生物处理的核心步骤是通过微生物的代谢活动,将污水里的有机物质转化为二氧化碳和水等无机物。MBR技术采用微滤或超滤膜组件作为核心分离设备,通过膜的高效物理截留作用,将活性污泥及大分子有机物拦截于反应器内部,使得生物

反应器内部保持高浓度污泥,显著提高生物处理效率。同时该膜分离作用能有效去除污水中的悬浮物、胶体物质、细菌及病毒,出水水质显著提升,达到高标准排放或回用要求。

(二) 系统分类与结构

膜生物反应技术按膜组件和生物反应器结合模式可分为分置式及一体式。

分置式膜生物反应系统将膜组件和生物反应器隔开布置,生物反应器内混合液由泵送至膜组件实现固液分离。该系统具有膜组件便于清洗与更换、膜抗污染能力强等优点;缺点为能耗大、占地面积大。

一体式膜生物反应系统直接将膜组件置于生物反应器中,利用生物反应器中曝气作用使膜表面实现错流过滤以达到固液分离目的。该系统具有能耗低、占地少等优点;不足之处在于膜组件清洗更换难度较大,膜抗污染能力较弱。

膜生物反应系统包括生物反应器、膜组件、曝气系统、回流系统和控制系统。生物反应器作为微生物代谢活动场所,膜组件作为固液分离关键设备,曝气系统提供微生物所需溶解氧,回流系统对生物反应器中污泥浓度进行维持,控制系统对系统运行参数进行监控与调整。

二、膜生物反应技术的优势

(一) 占地面积小

现代都市和工业园区寸土寸金,土地成本常常成为项目是否可行的一个关键因素。MBR技术集二沉池、砂滤池乃至消毒池等功能于一体,使工艺流程大大压缩。由于反应器内允许维持极高的污泥浓度(10-20 g/L,甚至可

达50 g/L), 微生物降解有机物的速率呈指数级提升, 所需的生化池容积仅为传统活性污泥法的1/3至1/2。对改造工程来说, 即使不需要建造新的巨大池体, 也只需利用原沉淀池的空间即可完成更新。这一“高密度、小体积”的特质, 让它成为了土地资源稀缺地区的首选解决方案。

(二) 固液分离高效

在传统的二沉池中, 出水通常会包含一定量的悬浮物(SS), 并且这些悬浮物会因污泥膨胀而产生较大的波动。而MBR利用微滤/超滤膜的物理截留, 其孔径远小于细菌与病毒的尺寸, 使得出水浊度极低(通常<5 NTU, 甚至接近零), SS几乎被完全剔除。这一优质出水, 不但感官澄澈透明, 而且从根源上阻断了病原微生物扩散途径。更有甚者, 有效截留使硝化细菌这类生长较慢的功能菌群在体系中富集并充分增殖, 达到深度硝化反硝化的目的, 在氨氮和总氮的去除方面, 其效果明显超越了传统处理工艺。处理后的出水质量可以直接达到冲厕、绿化和景观补水等再生水的标准, 并且在经过反渗透(RO)双膜法处理后, 其水质甚至可以达到工业超纯水的标准。

(三) 剩余污泥产量少

在环境工程项目中, 处理污泥的费用通常占运营成本的30%~40%, 并且存在二次污染的风险。MBR系统通常在低负荷、长泥龄(SRT可达30天以上)下运行, 微生物处于内源呼吸阶段, 自身氧化分解程度高。从理论上讲, MBR剩余污泥产量仅为传统工艺的三分之一, 即便在理想情况下也能实现“近零排放”。这样既大大降低了污泥浓缩、脱水及外运处置成本, 又减少了污泥运输可能带来的环境风险, 满足了循环经济减量化原理。

(四) 抗冲击负荷能力强

工业废水通常存在水质水量起伏较大、毒性物质含量较高等问题。MBR系统中高浓度活性污泥就像一个“缓冲池”, 可以稀释进水中有毒有害物质并保持微生物数量稳定。在进水COD或氨氮浓度骤升的情况下, 巨大的生物量可以迅速通过吸附和降解作用将其消化, 确保出水水质稳定。另外, 在膜高效截留作用下, 即使出现污泥丝状菌膨胀, 也不会像传统工艺一样引起出水SS激增, 该系统仍可保持其基本处理功能。这种强鲁棒性(Robustness)使其成为食品、制药和印染等高浓度难降解有机废水处理的有力手段。

三、膜生物反应技术处理环境工程污水主要方法

(一) 膜材料的选择

在膜生物反应技术应用于环境工程污水处理过程中, 膜材料选取是一个至关重要的环节, 需要综合考虑亲水

性、孔隙率、截留分子量和抗污染能力。聚偏氟乙烯(PVDF)膜以其优异的化学稳定性、机械强度及抗污染能力等优点, 已成为当前使用最为普遍的膜材料。尽管聚氯乙烯(PVC)膜的成本相对较低, 但其在化学稳定性和抗污染方面的表现并不理想。聚乙烯(PE)膜具有柔韧性好、抗冲击性能好等特点, 但孔隙率小、截留分子量大。聚醚砜(PES)膜具有较高的亲水性和孔隙率, 但其机械强度和抗污染能力相对较弱。聚丙烯腈(PAN)膜具有很好的亲水性和抗污染能力, 但其化学稳定性相对较差。聚丙烯(PP)膜价格经济, 但亲水性及抗污染能力较为欠缺。陶瓷膜具有较好的化学稳定性、机械强度以及抗污染能力, 但价格昂贵且制备过程复杂。除上述高分子材料及无机材料膜外, 膜材料的选用还要综合考虑污水水质、处理要求及运行成本。如果污水含有大量悬浮物及胶体物质, 则应选用抗污染能力较强的膜材料; 在处理要求较高、出水水质要求较严的情况下, 需要选用截留分子量较低、分离效率高的膜材料; 考虑到运行成本, 又应在确保处理效果的基础上选用价格适中、寿命长的膜材料, 才能达到膜生物反应技术高效、经济的污水处理效果。

(二) 反应器设计

反应器设计作为膜生物反应技术在环境工程污水处理中至关重要的一环, 涉及多个方面的考量。在设计时, 应保证工业反应器内混合参数尽量与中试一致, 以便复现中试过程成果。合理地进行热平衡与传热设计可以提高反应效率, 避免温度过高或过低的情况, 同时也需要根据反应条件及反应物性质等因素选用适当的材料制作反应器, 综合考虑反应物的腐蚀性、温度及压力, 以保证系统的安全性及稳定性。

从操作上看, 反应物加入应遵循化学反应速率、亲和力和力等条件, 并按照先后顺序及配比加入, 搅拌、混合可以促进反应物之间的接触及质量传递, 在设计中需要综合考虑搅拌器的种类、位置及转速, 以确保反应物的均匀混合。停留时间是反应器中气体反应物停留时间的长短, 设计合理可以保证物料获得均匀的停留时间, 从而提高反应效率及产品质量, 反应器的设计应当方便调节其停留时长, 以适应各种不同的化学反应。温度、压力的控制也非常重要, 其变化将对反应速率、产物选择性等产生影响, 需进行实时监控与调节, 以保持最佳工作状态。

为了优化内部结构, 我们可以根据实际的操作环境进行动态模拟, 预估各种操作参数对流体动力学的影响, 并设计出高效的内部部件, 例如搅拌桨和分布器等, 综

合考虑力学、热力学、化学动力学等各种因素，使内构件及整体结构实现协同优化。利用尖端的计算流体动力学模拟方法，能够准确预测反应器内流体的流动特性，从而提高混合效率，减少死区，增强传质和传热效果，并进一步提高反应速率和最终产品的质量。

（三）操作条件控制

在MBR膜生物反应技术的操作条件控制中，污泥浓度、溶解氧浓度、水力停留时间（HRT）以及污泥停留时间（SRT）是关键参数，具体如下：

（1）污泥浓度：MBR系统允许维持较高的污泥浓度，一般在10–20 g/L，甚至可达50 g/L。较高的污泥浓度可以提高生物处理效率，增强系统对污染物的去除能力。但过高的污泥浓度也可能导致膜污染加剧，因此需要根据实际情况合理控制污泥浓度，通过定期排泥等方式维持适宜的污泥量。

（2）溶解氧浓度：溶解氧是微生物进行好氧代谢的必要条件。在MBR系统中，应保证足够的溶解氧浓度，以满足微生物对氧气的需求，促进有机物的降解和硝化反应的进行。一般来说，好氧区的溶解氧浓度应维持在2–4 mg/L。可以通过调节曝气量来控制溶解氧浓度，同时要注意避免过度曝气导致能耗增加和膜表面剪切力过大，加速膜的老化。

（3）水力停留时间（HRT）：HRT是指污水在反应器内的平均停留时间，它影响着污染物的去除效果和反应器的处理能力。较长的HRT可以使污水与微生物充分接触，提高污染物的去除率，但会降低反应器的处理能力，增加占地面积和建设成本。因此，需要根据污水的水质、水量和处理要求，合理确定HRT。对于高浓度有机废水，HRT可能需要适当延长；而对于低浓度污水，HRT可以适当缩短。

（4）污泥停留时间（SRT）：SRT是指污泥在反应器内的平均停留时间，它对系统的污泥产量、微生物种群结构和处理效果有重要影响。较长的SRT可以使微生物处于内源呼吸阶段，自身氧化分解程度高，从而减少剩余污泥的产量。同时，长SRT有利于硝化细菌等生长缓慢的功能菌群的富集和增殖，提高系统的脱氮能力。但过长的SRT也可能导致污泥老化，降低生物活性。一般来说，MBR系统的SRT可达30天以上，具体应根据实际情况进行调整。

（四）膜污染防治

膜污染防治对确保膜生物反应技术有效运行具有重要意义。膜污染产生的原因比较复杂，可造成膜通量的降低、运行成本的上升，甚至影响系统的正常运行，涉

及物理、化学及生物各方面的污染问题。为预防和控制膜污染，可以采取多种措施。在预处理中，采用砂滤和袋式过滤两种物理过滤方法除去粒径较大的杂质，以降低膜系统的处理压力；通过离子交换和纳滤的方法进行除硬预处理，以降低进水硬度和结垢物质；采用氧化、沉淀或吸附工艺来控制超滤进水中铁、锰、硅等胶体物质的浓度，以避免膜表面污堵层的形成。优化操作条件也非常重要，对污泥浓度、溶解氧浓度、水力停留时间以及污泥停留时间进行合理控制，以降低膜污染的发生率。也可以采用调酸处理的方法来降低pH值、降低碳酸钙和其他盐类的溶解度、减缓结垢速率等。

膜材料改性可以改善其亲水性，增强抗污染能力。定期的化学清洗同样不可缺少，对于已被吸附的有机物，需用碱性清洗剂或氧化剂进行周期性清洗以恢复膜通量；通过电荷相互作用、调节pH使膜表面和有机物均带负电、采用静电排斥来降低污染等方法。另外，强化膜组件维护与管理、定期检查生物膜系统内污染物的含量与类型、及时发现并处理存在的问题等都是十分关键的。

结论

膜生物反应技术应用于环境工程污水处理具有显著优势，能够对污水进行高效处理，具备占地面积小、固液分离效率高、剩余污泥生成量低、抗冲击负荷能力高等突出特点。然而，在实际使用过程中仍存在膜污染严重、能耗大、膜组件价格昂贵等问题。通过合理选用膜材料、优化反应器设计、准确控制运行条件以及有效预防和治理膜污染，可以促进技术性能和稳定性的改善。今后需要不断研发创新以降低成本、提高效益，从而推动膜生物反应技术在污水处理领域更加广泛的应用，助力水污染问题的解决。

参考文献

- [1] 张浩, 武贵远. 基于膜生物反应技术处理环境工程污水[J]. 工程建设与设计, 2024(20): 67–69.
- [2] 李智娟. 膜生物反应技术在环境工程污水处理中的运用[J]. 中国新技术新产品, 2017(7): 2.
- [3] 杨炎锋. 膜生物反应技术在环境工程污水处理中的应用分析[J]. 建筑建材装饰, 2016, 000(013): 174–174.
- [4] 陆蛟. 膜生物反应技术在环境工程污水处理中的应用[J]. 建筑工程技术与设计, 2017(23).
- [5] 张永勇. 膜生物反应技术在环境工程污水处理中的应用[J]. 低碳世界, 2017(24): 2.