

AAO+MBR 工艺在污水处理中的应用与效果评估

文 / 项文琪 武汉市政工程设计研究院有限责任公司
 严道静 武汉市政工程设计研究院有限责任公司
 付琪轩 武汉市政工程设计研究院有限责任公司

摘要：随着城市化进程的加速和环境保护要求的提高，污水处理技术亟需向高效、节能和占地小的方向发展。本文以武汉市某地下污水处理厂为研究对象，系统评估了 AAO+MBR 工艺在污水处理中的应用效果。研究表明，该工艺对 COD_{Cr}、氨氮和总磷的去除效率分别超过 87.5%、95% 和 90%，出水水质达到地表水 IV 类标准，表现出对有机污染物降解和营养盐去除的良好能力。然而，总氮的去除效率受温度和碳源的影响显著，在 10%-37% 间波动，需通过工艺优化进一步稳定及提升。在经济效益方面，该工艺单位水量电耗约 0.48kWh/m³，低于传统工艺水平，通过智慧管控平台实现了能耗优化和运行效率提升。同时，地下式布局缓解了城市用地紧张问题，为土地资源综合利用和城市生态发展提供了有力支持。

关键词：AAO; MBR; 污水处理

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.08.095

引言

随着城市化进程的加速和环保要求的日益提高，污水处理面临排放标准严、处理效率要求高和土地资源紧张等多重挑战，传统污水处理技术已经难以满足当前污水处理的要求。在此背景下，作为一种集成化、高效化的先进处理工艺，厌氧-缺氧-好氧 (Anaerobic-Anoxic-Oxic, AAO) 与膜生物反应器 (Membrane Bio-Reactor, MBR) 技术的组合工艺为现代污水处理提供了创新性解决方案。

一、项目概况

(一) 规模

武汉市某地下污水处理厂是一座全地下式污水处理设施，设计处理规模达到每日 10 万立方米，服务区域覆盖 18.4 平方公里，惠及约 87 万城市居民。该污水处理厂采用 AAO+MBR 工艺，针对城市用地紧张及日益严格的出水水质要求进行专项设计，致力于在有限的空间内实现高效运行。处理后的尾水主要排入下游明渠，用作生态补水水源。出水水质除总氮、SS 指标按国家《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准要求外，其余指标均按《地表水环境质量标准》中 IV 类水质严格执行。

(二) 设计工艺与运行参数

1. 工艺流程

该地下污水处理厂的设计工艺以预处理、AAO 生物池和 MBR 膜池为主体，形成了高度集成化的污水处理流程，如图 1 所示。预处理阶段设置细格栅和曝气沉砂池，用于去除大颗粒杂质和砂石，降低后续处理负荷，避免设备损伤。随后，污水进入 AAO 生物池，依次经历厌氧、缺氧和好氧三个功能区，充分利用微生物代谢过程降解有机污染物，去除氨氮和总氮。厌氧区通过释放磷酸盐，

为后续的聚磷菌吸收创造条件；缺氧区利用硝酸盐和亚硝酸盐进行反硝化反应，降低总氮浓度；好氧区则利用充氧环境加速有机物分解，并进一步净化氨氮和悬浮固体。处理后的水进入 MBR 膜池，通过中空纤维膜进行高效固液分离，实现水质的进一步提升^[1]。

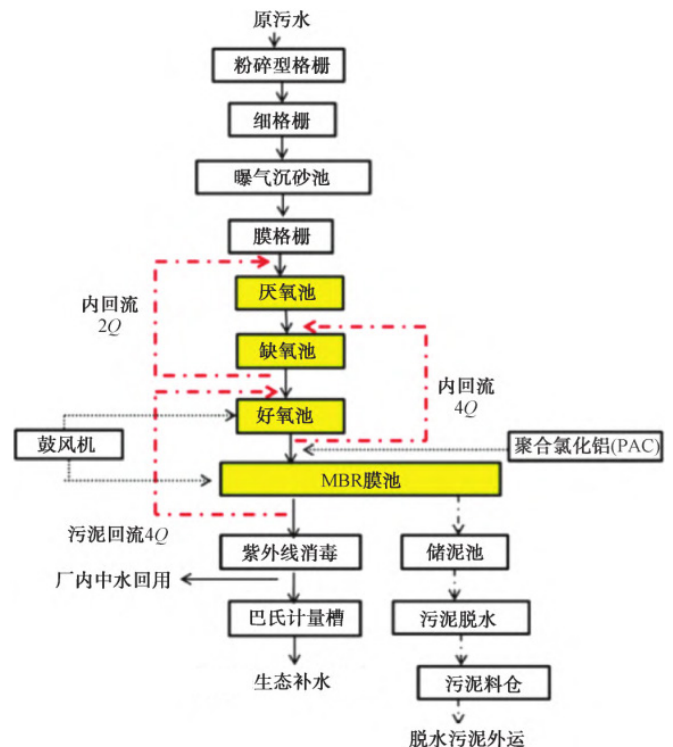


图 1 工艺流程图

2. 设计与运行参数

(1) 生物池 MLSS、泥龄等核心指标

在地下污水处理厂在设计和运行过程中，生物池的核心参数包括混合液悬浮固体浓度 (Mixed Liquor Suspended Solid, MLSS) 和泥龄，直接关系到工艺的处

理效率和运行稳定性。设计阶段，生物池的 MLSS 范围被设定为 5000 至 8000 毫克每升，以维持高浓度的活性污泥，提高有机污染物的降解效率，同时增强系统对水质波动的适应能力。运行过程中，根据进水水质的变化和季节性温度的影响，对 MLSS 进行动态调整，通常在冬季适当提高，以应对微生物活性下降的挑战。泥龄设计为 12 天，保证了系统中硝化细菌等慢生长微生物的稳定繁殖，使氨氮和总氮的去除效率得到充分发挥。通过优化回流比和溶解氧浓度，进一步提升了反硝化效果。泥龄的控制既避免了污泥老化导致的处理效率下降，也有效减少了膜污染的风险，为 MBR 膜池的高效运行提供了良好的前置条件^[2]。

(2) 膜池运行压力、膜通量控制

在地下污水处理厂在膜池运行过程中，压力和膜通量的控制是关键环节，直接影响到膜的分离效率和运行寿命。膜池的设计运行压力控制在 0.05 兆帕以内，通过精确调节进水泵和膜通量，保持膜的稳定操作状态。过高的压力会增加膜污染的风险，加速膜孔堵塞，降低过滤效果，而过低的压力则可能影响透水速率，导致系统处理能力下降。为实现长期高效运行，膜通量的设计平均值为 17.5 升每平方米每小时，根据实际运行情况，膜通量会在 12.5 至 22 升每平方米每小时之间动态调整。运行中，通量控制需要结合水质特性、污染物浓度和季节性变化等因素，避免膜表面积累过多污染物。膜池的运行周期设计为 9 分钟产水、1 分钟停歇，停歇期间进行反洗，保证通量恢复到初始状态。这种控制方式不仅降低了清洗频率，也减少了运行成本^[3]。

二、AAO+MBR 工艺在污水处理中的具体应用

(一) 工艺流程解析

1. AAO 模块：厌氧 - 缺氧 - 好氧段的作用

在 AAO 工艺中，厌氧、缺氧和好氧三个功能段紧密衔接，各自发挥独特作用，共同实现对污染物的高效去除。厌氧段主要依赖厌氧微生物的代谢作用，在无氧环境中通过释放磷酸盐为聚磷菌的磷吸收过程创造条件，同时启动有机物的初步分解，为后续的反硝化和硝化过程提供底物和碳源。进入缺氧段后，反硝化细菌利用硝酸盐和亚硝酸盐作为电子受体，将氮转化为氮气从水体中去除，同时进一步消耗有机碳源，降低污水中的氮含量。缺氧段的反硝化过程需要通过回流系统引入硝化液，并对溶解氧浓度进行严格控制，避免氧气浓度过高抑制反硝化细菌的活性。好氧段则通过充足的曝气为硝化细菌和其他好氧微生物提供氧气支持，氧化分解有机污染物，将氨氮转化为硝酸盐和亚硝酸盐，同时去除部分悬浮固体和溶解性有机物。

2. MBR 模块：高效膜分离的运行机制

MBR 模块通过高效膜分离技术实现了污水的深度净

化，其运行机制依赖于膜分离单元的固液分离能力，将传统活性污泥法与膜技术有机结合，显著提升了出水水质和系统稳定性。在运行过程中，污水经过前端 AAO 处理后进入膜池，膜组件通过微米级或亚微米级的孔径将悬浮物、胶体颗粒和微生物截留，同时允许水分子及溶解性污染物通过，从而实现固液分离。膜的选择和运行条件直接决定了系统的处理能力和运行寿命。为维持膜组件的高效性，运行中通过精确控制跨膜压差，使其始终保持在设计范围内，避免膜污染加剧或处理效率下降。MBR 模块中膜表面的污染控制尤为关键，通过间歇式运行和反洗技术减少污染物在膜表面的累积，同时结合气水联合冲刷进一步降低膜堵塞风险。膜池的设计还强化了污泥浓度的控制，较高的 MLSS 浓度不仅增强了生物处理的负荷能力，也提高了抗水质波动的适应性。

(二) 工艺控制要点

1. 溶解氧、回流比、污泥负荷优化

在 AAO+MBR 工艺的运行中，溶解氧、回流比和污泥负荷的优化是确保系统稳定性和高效性的关键。溶解氧的控制贯穿于缺氧、好氧段以及膜池的运行中。在缺氧段，溶解氧浓度应维持在较低水平，避免抑制反硝化细菌的活性，同时保证硝酸盐的还原效率。在好氧段，溶解氧的浓度需要根据进水负荷动态调整，既要为硝化反应提供充足氧气，也要避免氧气过量造成能源浪费和碳源消耗的不平衡。膜池中则通过气水比调节溶解氧浓度，不仅提升膜组件的冲刷效果，还能延缓膜污染的发生。

回流比的调整对污染物的去除起到平衡作用。缺氧区至厌氧区的回流比通常设定在 100% 至 200% 之间，用于回收聚磷菌释放的磷酸盐，提高厌氧段的磷吸收效率。好氧区至缺氧区的回流比则控制在 300% 至 400%，以强化反硝化过程，减少总氮排放负荷。膜池至好氧区的回流比也应在 300% 至 400% 范围内，通过提升液体的循环效率增强系统抗冲击能力。

污泥负荷的优化则需综合考虑进水水质、系统设计参数和运行状态。生化池的污泥负荷直接影响微生物活性和泥龄的控制，而膜池中相对较高的污泥浓度则增强了生物降解效率。运行中通过在线监测进水负荷和生物池 MLSS 浓度，合理调整进水流量与污泥回流量，实现处理效率与能源消耗的动态平衡，从而保障系统的稳定运行和出水达标。

2. 运行中膜污染的防控措施

在 AAO+MBR 工艺的运行中，膜污染的防控是维持膜池稳定运行和延长膜组件使用寿命的关键环节。膜污染主要包括有机污染、无机结垢和生物污染，每种类型的污染对膜性能的影响都需通过针对性的措施加以控制。运行中，通过精准调节进水水质和预处理效果，减少悬浮固体、油脂和胶体物质进入膜池，降低有机污染的发

生概率。采用气水联合冲刷技术,利用气泡对膜表面的物理冲刷作用减少污染物的沉积,特别是在高 MLSS 浓度下,这种方法能有效减缓跨膜压差的上升趋势^[4]。

为了控制无机结垢的形成,在系统运行过程中需对进水的硬度和 pH 值进行实时监控,定期投加适量的抗结垢剂以阻止钙镁离子在膜表面形成沉积层。同时,合理的反洗程序是维持膜性能的核心措施。通过设定固定的反洗周期和适宜的反洗压力,及时清除附着在膜表面的污染物,恢复膜的过滤能力。对于生物污染,可以通过间歇性投加杀菌剂抑制微生物的生长,特别是在膜表面易积累的区域,通过短周期高频次的清洗模式,减少生物膜的形成。

三、AAO+MBR 工艺在污水处理中的应用效果评估

(一) 处理效率

AAO+MBR 工艺在污水处理中的 COD_{Cr} 去除效率表现出色,能够达到 87.5% 以上,这得益于 AAO 模块对有机污染物的有效降解与 MBR 模块的高效固液分离。厌氧和缺氧段通过微生物的代谢作用将大分子有机物分解为小分子有机物,好氧段则进一步氧化这些分解产物,使出水中 COD_{Cr} 浓度显著降低。TP 去除效率高于 90%,主要依赖于厌氧段中聚磷菌释放磷酸盐的作用,随后在好氧环境中通过磷酸盐的吸收完成除磷过程,再结合 MBR 膜的高效分离,确保了出水中总磷含量达标。氨氮的去除率超过 95%,源于硝化细菌的活性能够在好氧段得到充分发挥,将氨氮迅速氧化为硝酸盐和亚硝酸盐,随后在缺氧段通过反硝化过程实现脱氮。TN 去除率表现相对不稳定,受温度和碳源的制约较大,在适宜的温度和充足的碳源条件下,TN 去除效率可达 37%,但在低温或碳源不足时效率可能降至 10%。

(二) 经济效益与能耗分析

AAO+MBR 工艺在经济效益和能耗控制方面表现突出,单位水量的电耗约为 0.48 kWh/m³,与传统工艺相比处于较低水平,体现了工艺设计与运行管理的高效性。该电耗水平得益于多方面优化,包括进水采用自流方式减少提升能耗、AAO 工艺对污染物的预处理效果,以及 MBR 模块的高效运行。MBR 系统的电耗占比为 28%,主要来自曝气和产水泵的运行。通过优化膜通量和曝气方式,降低了气水比和跨膜压差,同时维持了膜组件的高效性,这种控制方式在减少能耗的同时延长了膜的使用寿命。智慧管控平台在节能降耗中发挥了重要作用,通过实时监控水质、水量和设备状态,精准调节运行参数,提高了资源利用效率。平台实现了能耗优化策略的动态调整,削减了不必要的能源浪费。在处理水量达到设计能力 70% 时,该系统通过智慧调控节省了约 15% 的能耗。

(三) 环境与社会效益

1. 提升生态补水能力

污水经过系统处理后,出水水质达到《地表水环境

质量标准》中的准 IV 类水质要求,其中氨氮、COD_{Cr}、总磷等关键指标实现了深度净化。这种高质量的处理水可以直接作为生态补水的主要来源,为河道、湖泊等水体提供清洁且稳定的水源供应,有效改善水体生态环境。在实际应用中,处理后的尾水通过明渠排放,补充到周边生态系统中,不仅增加了水体的自净能力,还缓解了区域内水资源紧缺的压力。同时,该工艺的低污染排放特性减轻了水体富营养化的风险,为保护水生生物栖息地提供了有力保障。

2. 对缓解城市用地紧张的作用

AAO+MBR 工艺通过高效集成化设计和空间利用优化,成功降低了污水处理设施的占地需求。传统污水处理工艺需要大面积土地用于布置沉淀池、曝气池和污泥处理单元,而 AAO+MBR 工艺将生化处理与膜分离技术有机结合,极大地提高了系统的处理效率,使每单位土地的污水处理能力显著提升。此外,该工艺的模块化设计允许设备和功能单元在地下布置,这一创新布局方式在城市中心或用地资源紧张区域尤为适用。地下式污水处理设施不仅释放了地面空间,还为城市绿化、景观建设以及其他基础设施发展创造了条件。

通过减少占地需求,AAO+MBR 工艺在优化城市土地资源配置方面起到了关键作用,为高密度城市提供了高效、可持续的污水处理解决方案。其地上部分可用于生态绿地或公众休闲空间,为城市居民创造更宜居的生活环境。与传统模式相比,这种高效用地策略还降低了土地征用和拆迁成本,为城市综合发展规划提供了更大灵活性,同时在实现经济效益的同时兼顾了社会价值。

结语

综上所述,AAO+MBR 工艺以其高效、节能、占地小等特点,为现代污水处理提供了可行的解决方案。在未来推广中,应结合不同规模污水处理厂的实际需求,进一步强化智慧管理系统的融合,优化工艺参数,提升处理效率,为实现污水处理的绿色、低碳和可持续发展奠定基础。

参考文献

- [1] 吴建琴. 某污水处理厂基于 AAO 工艺下 AOA 运行模式节能降耗探讨 [J]. 山西化工, 2024, 44(12): 193-194+197.
- [2] 马洪亮, 哈静. 生化+MBR 在膜法有机污水处理中的应用研究 [J]. 山西化工, 2024, 44(12): 222-224.
- [3] 陆漾, 沈怡. 改良 AAO 工艺精细化脱氮控制技术在某污水处理厂的应用 [J]. 净水技术, 2024, 43(12): 119-127.
- [4] 曾达林. MBR 技术在处理企业生活污水中的应用及案例分析 [J]. 工业微生物, 2024, 54(06): 160-163.

作者简介: 项文琪 (1990.03--), 男, 汉, 湖北省武汉人, 硕士研究生, 中级工程师, 研究方向: 水处理工艺研究及市政给排水设计。