

膜生物反应器在市政污水处理中的应用现状与发展趋势

吴淑顺

中远海运博鳌有限公司博鳌亚洲论坛大酒店 海南 琼海 571400

摘要：膜生物反应器（MBR）作为市政污水处理领域的关键技术，通过整合膜分离与生物处理工艺，实现了出水水质提升、占地面积缩减及运行稳定性增强。本文系统梳理了MBR的技术原理与分类，分析了其在市政污水处理中的工程应用规模、典型案例及技术优势，指出MBR在污染物去除效率、抗冲击负荷能力及资源化利用方面的显著成效。同时，针对膜污染控制、运行成本优化及智能化管理等技术瓶颈，探讨了新型膜材料研发、工艺创新及系统集成等发展方向。研究表明，MBR技术已成为推动市政污水处理行业绿色转型的核心驱动力，未来需通过技术创新与产业协同实现规模化应用与可持续发展。

关键词：膜生物反应器；市政污水处理；膜污染控制；智能化运行；资源化利用

1 引言

随着城市化进程加速，市政污水排放量持续攀升，传统活性污泥法因占地面积大、出水水质不稳定等问题难以满足高标准排放需求。膜生物反应器（Membrane Bioreactor, MBR）通过将膜分离技术与生物处理工艺深度融合，实现了固液分离与生物降解的协同优化，成为市政污水处理领域的技术革新方向。截至2025年，中国MBR工程应用规模已突破2000万m³/d，占全球市场份额的60%以上，技术成熟度与市场占有率均居世界前列。本文从技术原理、应用现状、挑战分析及发展趋势四个维度，系统探讨MBR在市政污水处理中的实践路径与未来方向。

2 膜生物反应器技术原理与分类

2.1 技术原理

MBR的核心在于利用微滤（MF）或超滤（UF）膜的高效截留特性，替代传统二沉池实现泥水分离。其运行机制包含三个关键环节：（1）生物降解单元：通过厌氧、缺氧、好氧等反应池的组合，利用微生物代谢作用去除有机物、氮磷等污染物。例如，A²/O-MBR工艺通过缺氧池反硝化与好氧池硝化的耦合，实现总氮（TN）去除率达75%以上。（2）膜分离单元：膜组件以浸没式或外置式布置，通过负压抽吸或错流过滤实现清水与污泥的分离。中空纤维膜因通量高、能耗低，成为市政污水处理的主流膜型。（3）污泥循环系统：通过回流泵将浓缩污泥返回生物反应池，维持高污泥浓度（MLSS ≥ 8g/L），显著提升容积负荷与抗冲击能力。

2.2 技术分类

根据膜组件与生物反应器的空间关系，MBR可分为分置式与浸没式两大类。分置式MBR中，膜组件独立于

生物反应器，通过循环泵实现泥水混合液的错流过滤。这种布置方式便于膜的清洗与更换，但需消耗较高能量驱动循环泵，导致吨水电耗较高^[1]。例如，北京某工业园区采用分置式MBR处理高浓度有机废水，尽管膜通量稳定，但吨水电耗达0.8kWh，增加了运行成本。相比之下，浸没式MBR将膜组件直接浸没于生物反应池，通过负压抽吸产水，省去了循环泵环节，能耗较分置式降低30%-50%，且占地面积更小，成为市政污水处理的主流构型。上海白龙港污水处理厂采用浸没式MBR工艺，处理规模达20万m³/d，出水COD ≤ 30mg/L、NH₃-N ≤ 1.5mg/L，充分体现了该技术的优势。

3 MBR在市政污水处理中的应用现状

3.1 工程应用规模与分布

截至2025年，中国已建成大型MBR市政污水处理工程近300座，其中超大型工程（处理规模 ≥ 10万m³/d）达41座，总处理规模超1000万m³/d。从地域分布来看，京津冀、长三角、珠三角等经济发达、人口密集地区占比达78%，与区域水环境治理需求高度相关。例如，北京密云污水处理厂（4.5万m³/d）采用A²/O-MBR工艺，出水直接回用于城市景观补水，有效缓解了区域水资源短缺问题；广州京溪污水处理厂（10万m³/d）通过MBR+反渗透（RO）组合工艺，将污水转化为高品质再生水，资源化利用率达60%，为城市可持续发展提供了重要支撑。

3.2 典型工艺流程

市政污水处理中，MBR工艺通常与预处理、深度处理单元组合，形成多级屏障体系，确保出水水质稳定达标。预处理单元通过格栅、沉砂池去除大颗粒悬浮物，降低膜污染风险。例如，广州京溪污水处理厂采用“粗格栅+细格栅+旋流沉砂池”组合工艺，悬浮物去除率达

90%以上，为后续MBR处理创造了良好条件。生物处理单元根据出水标准选择A²/O、SBR或氧化沟等工艺，实现有机物与氮磷的深度去除。上海白龙港污水处理厂采用“A²/O-MBR+反渗透（RO）”工艺，不仅满足了《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB18918-2002）一级A标准，还实现了污水资源化利用。深度处理单元通过臭氧氧化、活性炭吸附或消毒等手段，进一步去除微量污染物，提升出水安全性。深圳光明污水处理厂采用“MBR+紫外消毒”工艺，粪大肠菌群数≤100CFU/L，出水可直接用于城市绿化灌溉，展现了MBR技术在资源化利用方面的潜力。

3.3 技术优势与经济性

MBR技术凭借其独特的设计理念与运行机制，在市政污水处理中展现出显著优势。首先，出水水质优异，对SS、COD、NH₃-N的去除率分别达99%、90%、95%以上，出水可稳定达到一级A标准，满足城市景观、绿化、工业冷却等回用需求。其次，占地面积节省，MBR工艺容积负荷高达2.0-3.0kgCOD/(m³·d)，是传统工艺的2-3倍。以10万m³/d规模为例，MBR厂区占地面积较传统工艺减少40%-60%，有效缓解了城市土地资源紧张问题^[2]。MBR技术大幅减少占地面积，一因污泥浓度高，MLVSS达8000-12000，单位体积微生物多、处理能力强，小空间高效处理污水；二因膜过滤可直接固液分离，无需二沉池，节省土地资源。再次，运行稳定性强，通过SRT与HRT的解耦，MBR可耐受进水水质波动（COD波动范围±30%），且剩余污泥产量减少20%-30%，降低了污泥处置成本。此外，MBR技术可有效避免污泥膨胀。传统活性污泥法因丝状菌过度生长易致污泥膨胀，影响出水水质和系统运行；MBR技术靠膜物理截留微生物，避免污泥流失膨胀，保障系统稳定。然而，MBR技术也面临一定的经济性挑战。

4 MBR技术应用中的核心挑战

4.1 膜污染控制难题

膜污染是制约MBR大规模应用的关键瓶颈，其形成机制复杂多样，主要包括有机物吸附、无机物结垢与生物污染。有机物吸附方面，胞外聚合物（EPS）与溶解性微生物产物（SMP）在膜表面沉积，形成凝胶层，导致跨膜压差（TMP）上升，膜通量下降。例如，京溪污水处理厂运行2年后，膜通量下降至初始值的60%，需通过化学清洗恢复性能。无机物结垢方面，Ca²⁺、Mg²⁺与CO₃²⁻、SO₄²⁻结合生成碳酸钙、硫酸钙等沉淀，堵塞膜孔，降低膜渗透性能。研究表明，硬度高于150mg/L的进水需通过化学软化预处理，以减轻无机物结垢风险。生

物污染方面，丝状菌与细菌在膜表面形成生物膜，进一步加剧膜污染。广州大坦沙污水处理厂采用“间歇曝气+反冲洗”策略，通过破坏生物膜结构，延长生物污染周期至3个月，但仍需定期进行化学清洗。

4.2 运行成本优化

MBR运行成本中，膜更换与能耗占比达60%-70%，成为制约技术经济性的主要因素。以中空纤维膜为例，其使用寿命为3-5年，更换成本为80-120元/m²，高昂的膜更换费用增加了长期运行成本。此外，分置式MBR吨水电耗达0.6-0.8kWh，较传统工艺高40%，主要源于循环泵的能量消耗。尽管浸没式MBR通过优化设计降低了能耗，但整体运行成本仍高于传统工艺，需通过技术创新与工艺优化进一步降低成本。

4.3 智能化管理滞后

现有MBR系统多依赖人工经验调控，缺乏实时监测与自适应控制能力，导致运行效率低下。例如，污泥浓度、溶解氧（DO）等关键参数需每日取样分析，难以实现动态优化。此外，膜污染预警与清洗策略制定缺乏科学依据，往往依赖操作人员经验，易导致过度清洗或清洗不足，影响膜使用寿命与系统稳定性。因此，提升MBR系统的智能化管理水平，实现运行参数的实时监测与动态调控，是当前技术发展的重要方向。

5 MBR技术发展趋势与展望

5.1 膜材料创新与功能化

针对膜污染问题，新型抗污染膜材料的研发成为关键。通过纳米改性、表面接枝等技术，可显著提升膜的亲水性与抗污染性能。例如，聚偏氟乙烯（PVDF）膜经TiO₂纳米粒子修饰后，表面粗糙度降低，亲水性增强，抗污染性能提升40%，有效延长了膜的使用寿命。此外，复合膜结构的优化也是重要方向。研发中空纤维膜与平板膜的复合结构，可兼顾通量与机械强度，满足不同应用场景需求^[3]。日本三菱公司开发的“PVDF中空纤维+PTFE平板”复合膜，通过结构创新提升了膜的抗冲击性能，使用寿命延长至8年。功能化膜的应用则为MBR技术开辟了新路径。开发具有催化降解、抗菌特性的智能膜，可实现污染物的原位去除与膜的自清洁。例如，负载Fe₃O₄的磁性膜可通过外加磁场实现快速再生，降低化学清洗频率，减少运行成本。

5.2 工艺创新与系统集成

降低MBR运行能耗是工艺创新的重要目标。研发气升式、重力驱动型MBR，可减少曝气与循环能耗，提升系统能效。荷兰X-Flow公司开发的“无泵MBR”系统，通过优化流体力学设计，利用重力驱动实现泥水分离，

吨水电耗降至0.3kWh，较传统工艺降低50%以上。耦合工艺的开发则进一步拓展了MBR的应用范围。将MBR与人工湿地、膜蒸馏等技术结合，可实现污水梯级利用与资源化。例如，“MBR+人工湿地”工艺在农村污水处理中，通过生物降解与生态净化的协同作用，总氮去除率提升至85%，运行成本降低至0.5元/m³，展现了良好的环境与经济效益。模块化与标准化设计是推动MBR规模化应用的关键。推广集装箱式MBR设备，可实现快速部署与灵活扩容，满足不同规模污水处理需求。

5.3 智能化与数字化管理

物联网（IoT）技术集成，为MBR系统智能化管理提供支撑。合理布设传感器（如压力传感器等），可实时监测跨膜压差（TMP）等关键参数。跨膜压差反映膜污染程度，压力传感器精确获取数据，可科学确定膜组件清洗周期，分析其化学清洗后的恢复性，还能精准确定恢复性清洗周期，保障膜组件高效维护，结合大数据分析实现故障预警与运行优化。例如，苏伊士环境开发的“SmartMBR”系统，可提前72小时预测膜污染风险，指导操作人员及时采取清洗措施，避免膜性能急剧下降。人工智能（AI）技术的引入，则进一步提升了MBR系统的自适应控制能力。利用机器学习算法动态调整曝气量、反冲洗周期等运行参数，可实现系统能效最大化。清华大学团队开发的“AI-MBR”模型，通过实时优化运行策略，使吨水电耗降低15%，膜寿命延长20%，显著提升了技术经济性^[4]。数字孪生技术的应用，则为MBR系统全生命周期管理提供了新工具。构建MBR工艺的虚拟镜像，通过仿真模拟优化运行策略，可减少现场试验成本，提升决策科学性。西门子推出的“MindSphere”平台，已成功应用于多个MBR项目，实现了系统运行状态的实时监控与远程调控。

5.4 政策与市场驱动

在“双碳”目标导向下，MBR技术通过污水资源化

与节能降耗，成为碳减排的重要手段。例如，MBR技术通过优化运行过程降低能耗，每立方米MBR出水回用可减少CO₂排放0.6kg，符合国家绿色发展战略。政策层面，推动《膜生物反应器工程技术规范》（GB/T50452-2017）等标准的修订，明确膜性能、出水水质等关键指标，为技术规范化应用提供了依据。市场机制创新方面，探索PPP模式、绿色债券等融资渠道，可降低MBR项目投资门槛，吸引社会资本参与。例如，北京排水集团通过发行绿色债券，融资10亿元用于MBR工艺升级，加速了技术推广步伐。

结语

膜生物反应器凭借其高效、稳定、紧凑的技术优势，已成为市政污水处理领域的主流解决方案。面对膜污染控制、成本优化等挑战，未来需通过材料创新、工艺集成与智能化管理实现技术突破。随着“双碳”战略的深入实施与数字技术的融合应用，MBR技术将向低碳化、智能化、资源化方向演进，为全球水环境治理与可持续发展提供核心支撑。

参考文献

- [1]蔡彬.膜生物反应器在市政污水处理中的应用[J].城市道桥与防洪,2022,(06):140-143+19.
- [2]晏章华.膜生物反应器/反渗透联合工艺处理回收市政污水探索构架[J].工程建设与设计,2019,(17):120-121.
- [3]卢明皓,吴妮,潘劭凡,等.基于膜生物反应器(MBR)的污水处理技术优化与效能提升研究[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会,重庆建筑编辑部,重庆市建筑协会.智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(二).西安净水分理有限责任公司;西安市清远中水有限公司,2025:812-815.
- [4]汪浏志,赵频,宋伟龙,等.面向城市污水高标准排放的多元耦合膜生物反应器运行性能研究[J].水处理技术,2025,51(02):128-133.