

生物膜法在市政工程生活污水处理中的应用研究

郑予宁

中国中元国际工程有限公司 100089

DOI: 10.32629/ems.v8i9.22157

[摘要] 针对市政生活污水处理系统能耗高、污泥产生量大、对水质波动适应性弱等问题，为提升城镇污水处理提质增效的实际成效，本文对生物膜法的技术原理与核心特性展开系统性研究，重点围绕市政工程应用场景，梳理 MBBR、BAF、MABR 等生物膜工艺的应用优势与运行机制。结合市政生活污水水量波动幅度大、污染物浓度处于中等水平、氮磷超标问题突出的水质特征，分析生物膜法在污染物降解、脱氮除磷、抗冲击负荷等维度的技术优势，总结当前工程应用中存在的填料老化、膜层堵塞、低温运行效率偏低等问题。针对性提出填料优化、工艺耦合、智能调控等改进思路，为市政生活污水处理工程的工艺选型、升级改造及高效运维提供技术参考，助力城镇水环境治理向精细化、低碳化方向发展。

[关键词] 生物膜法；市政工程；生活污水处理；脱氮除磷；工艺优化

引言

生物膜法作为新型生物处理技术，依托载体附着微生物膜降解污染物，具备生物量高、污泥产量低、运行稳定等显著优势，已在市政污水处理领域广泛应用^[3-5]。国外相关研究起步较早：20 世纪 80 年代挪威开发 MBBR 移动床生物膜工艺，法国完成 BAF 曝气生物滤池研发，欧美国家针对 MABR 膜曝气生物膜反应器开展大量基础研究。国内自 20 世纪 90 年代引入相关工艺，现已大量用于污水厂提标改造工程^[4]。

现有文献多聚焦单一工艺性能探究，缺少 MBBR、BAF、MABR 三类工艺的横向对比，针对工程运行痛点的机理解读及可落地优化方案的系统总结仍有待完善^[3-5]。本文结合市政生活污水的水质水量特征，深入探究生物膜法的作用机理、工艺及工程应用效果，剖析实际应用短板并提出优化方案，为市政污水处理工程的技术革新与高效应用提供理论与实践支撑。

1 生物膜法核心技术原理与工艺特性

1.1 技术基本原理

生物膜法是依托附着型微生物群落实现污水净化的生物处理技术，核心在于借助反应器内装填的各类载体填料，为细菌、真菌、原生动物等微生物提供附着生长的界面。微生物在载体表面持续吸附、增殖与代谢，逐步形成结构稳定的生物膜；当污水流过载体表面时，通过吸附、氧化分解、硝化-反硝化等生化反应去除水中 COD、氨氮、总氮、总磷等污染物^[3,4]。

生物膜的结构分层明确：表层好氧微生物降解有机污染物、完成硝化反应；内层因氧扩散受限形成缺氧、厌氧区域，

可实现反硝化脱氮。受氧气扩散限制，内层难以长期维持严格厌氧环境，而聚磷菌需稳定交替的厌氧-好氧条件完成释磷与吸磷代谢，致使其在菌群竞争中处于劣势——这是生物膜体系生物除磷效果不理想的内在原因。

生物膜的生长与更替具有动态平衡特点：新生生物膜附着力强、代谢活性高；老化生物膜在水流冲刷作用下自行脱落，载体表面重新滋生新膜，无需人工频繁排泥调控，能够长期维持稳定的处理效果，契合市政污水连续化、规模化处理的工程需求^[3,4]。

1.2 核心工艺特性

与传统活性污泥法相比，生物膜法在市政污水处理领域应用时拥有四大核心优势^[3-5]：

第一，生物量浓度更高。依托载体附着的微生物密度远高于活性污泥体系，单位容积的处理负荷更大，能有效缩小构筑物占地面积，适配城镇土地资源紧张的工程项目场景。

第二，污泥产量更少。生物膜生态系统食物链更长，微生物内源呼吸更充分，产生的剩余污泥量明显低于传统工艺^[4,5]，能大幅减少污泥处置成本和运维压力。

第三，抗冲击负荷能力更强。丰富的微生物种群可适应污水污染物浓度、水量的波动，避免出水水质突变^[3]。

第四，运维更简便。不需要频繁调节污泥浓度、回流比等参数，设备故障率低，适合市政污水处理厂长期常态化运行^[5]。

2 市政污水处理生物膜工艺及工程应用

2.1 MBBR 移动床生物膜反应器工艺

MBBR 工艺是在传统生物膜法基础上优化改良的新型工

艺，核心采用悬浮轻质填料作为微生物载体，填料随水流、曝气自由浮动，实现污水、微生物、氧气的充分接触，解决了固定填料易堵塞、传质效率低的问题。该工艺可单独使用，也可与 A²/O、SBR 等传统工艺耦合，形成泥膜共生处理体系，是市政污水厂提标改造的常用工艺^[3,4]。

工程实践：相关研究表明，MBBR 工艺对市政生活污水中 COD、氨氮的去除效果良好，出水水质能够稳定满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB18918-2002）一级 A 标准要求^[1,3]。该工艺不需要设置污泥回流系统，占地面积较小，改造工程量低，适合老旧市政污水厂升级扩容；悬浮填料可灵活增减，能适配城镇人口增长带来的污水量增加需求。不足之处在于，高负荷运行时容易出现填料堆积、局部曝气不足，对整体处理效果产生影响^[3,4]。

2.2 BAF 曝气生物滤池工艺

BAF 曝气生物滤池是将生物氧化与固液分离整合在一起的集成化生物膜工艺，采用陶粒、石英砂等刚性多孔填料作为载体。该工艺采用上向流或下向流曝气模式，污水流经滤层时借助生物膜降解污染物，同时滤层截留悬浮杂质，无需单独设置二沉池，极大简化了工艺流程^[3,5]。

该工艺结构紧凑、处理效率高、启动速度快，低温环境下仍能维持较高微生物活性，可缓解北方城镇冬季污水处理效能下滑的问题。BAF 工艺对 SS、氨氮的去除优势显著，出水清澈且水质稳定，适配中小型市政污水处理工程及污水深度处理场景^[6]。不足之处在于滤层容易截留杂质而堵塞，需定期开展反冲洗运维，运维频次高于 MBBR 工艺，长期运行能耗相对偏高^[3]。

2.3 MABR 膜曝气生物膜反应器工艺

MABR 工艺属于新型低碳生物膜处理技术，以透气膜作为载体，采用无泡曝气运行模式，氧气透过膜壁渗透到生物膜内部，实现氧气与污水的高效传质。该工艺构建出“膜内好氧、膜外缺氧”的分层微环境，能够同步开展硝化、反硝化反应，实现一步法深度脱氮，碳源消耗低，低碳节能优势突出^[2]。

在市政低浓度生活污水处理领域，MABR 工艺的总氮去除率和能耗表现优于传统工艺，污泥产量极低，适合新建低碳型市政污水处理厂^[2]。目前该工艺国产化应用正逐步成熟，但设备造价偏高，对运行调控精度要求较高，大规模推广应用仍存在一定限制^[2]。

2.4 生物膜工艺综合对比

表 1 市政污水生物膜工艺对比

工艺	载体类型	核心优势	主要短板	适用场景
MBBR	悬浮轻质填料	改造工程量小，运维简单，兼容性强	高负荷易填料堆积，曝气不均	老旧污水厂提标扩容
BAF	陶粒、石英砂	占地小，启动快，低温适应性好	滤层易堵塞，反冲洗能耗高	中小型污水厂、深度处理
MABR	透气高分子膜组件	氧利用率高，脱氮效果好，污泥极低	造价高，调控要求高	新建低碳示范项目

3 生物膜法市政工程应用现存问题

3.1 生物膜老化与堵塞问题突出

在长期连续运行过程中，载体表面的生物膜会出现过度增厚、老化脱落不均匀的情况。过厚的生物膜会使内层微生物缺氧失活，降低污染物降解效率；老化的膜碎片悬浮在水中，导致出水 SS 浓度升高^[3,4]。BAF 工艺的滤层孔隙容易被污水中的悬浮物、老化生物膜堵塞，造成滤池水头损失变大、曝气不均。频繁反冲洗不仅增加运维能耗，还会破坏生物膜稳定性，导致短期内出水水质波动^[3]。

3.2 低温环境处理效能衰减

温度是影响生物膜微生物活性的核心因素。我国北方城镇冬季水温偏低，低温环境会显著抑制硝化、反硝化微生物的代谢速率，降低生物膜的增殖与更新效率。相关实践表明，低温条件下生物膜法对氮素的去除效率会出现不同程度的衰

减，出水氮素指标难以稳定达标，低温适配性不足是限制生物膜法在北方市政工程中应用的主要短板^[3-5]。

3.3 工艺运维与调控体系不完善

大部分市政污水厂在生物膜工艺运维中仍采用传统活性污泥法的调控模式，未结合生物膜自身生长特性搭建专属调控体系。曝气强度、水力停留时间、填料填充率等参数调控不够合理，容易出现生物膜生长过快或过慢、传质效率不达标等问题^[4,5]。同时，填料长时间运行后容易出现磨损、老化、挂膜失效等情况，人工巡检存在滞后性，往往导致系统处理效能逐步降低^[3]。

3.4 脱氮除磷深度处理能力受限

常规生物膜工艺对有机污染物的去除效果较好，但在深度脱氮除磷方面仍有不足。市政生活污水碳氮比较低，内源反硝化所需碳源不足，总氮难以彻底去除^[3,4]。此外，生物膜

体系内聚磷微生物富集量有限，除磷效果稳定性不足，难以稳定达到一级A排放标准（ $TP \leq 0.5 \text{ mg/L}$ ），还需搭配化学除磷工艺，增加了工程运维成本^[3,5]。

4 生物膜法市政污水处理应用优化策略

4.1 优化载体填料，改善膜层生长状态

针对性挑选改性复合填料替换传统普通填料，通过扩大比表面积、提高孔隙率优化微生物附着环境，推动均匀挂膜。采用分级填料配比模式，依据反应器不同区域的功能差异搭配不同规格、材质的填料，实现分区精准处理^[4]。定期通过水力冲刷、精准曝气调控将生物膜厚度控制在合理区间，及时剥离老化膜层，维持生物膜高活性。针对BAF工艺优化反冲洗制度，采用气-水联合分段反冲洗，在保障堵塞清理效果的同时降低对新生生物膜的破坏^[3]。此外，可选用亲水性、抗污染性能更优的新型高分子改性填料，从源头缓解膜层板结与堵塞问题。

4.2 优化工艺耦合，提升低温适配性

针对低温处理效能衰减问题，采用生物膜法与活性污泥法耦合模式，构建泥膜共生复合体系，提升微生物种群丰富度，增强低温环境代谢活性^[3,4]。冬季低温时段适当延长水力停留时间、微调曝气强度，保障氧气传质效率；同时可通过保温改造、进水预热等辅助措施稳定反应器水温。推广MABR低碳工艺，依托其高效传质优势弱化低温对污染物降解的负面影响，保障冬季出水水质稳定达标^[2]。同时可针对性驯化耐低温功能菌群，通过阶段性低温梯度培养提升生物膜内硝化菌、反硝化菌的低温耐受能力。

4.3 构建智能运维调控体系

结合市政污水水质水量波动规律，搭建生物膜工艺专属的智能调控系统，实时监测进水COD、氨氮、水温、溶解氧等核心指标，动态调整曝气强度、水力停留时间等参数，实现精准化运维^[5]。建立填料定期检测更换机制，及时替换磨损、失效填料，保障系统生物量稳定。强化运维人员专业培训，普及生物膜生长规律与工艺调控要点，降低人为运维失误引发的水质波动风险。引入大数据算法与在线监测设备，对生物膜生长厚度、菌群活性进行实时预判，提前预警堵塞、脱膜、菌群失活等隐患，搭建数字化运维台账，形成标准化运维体系^[4,5]。

4.4 强化深度脱氮除磷改造

针对低碳氮比的市政污水，通过外加缓释碳源、分段进

水方式为反硝化过程补充碳源，提升深度脱氮效果^[3]。优化生物膜反应器厌氧-缺氧-好氧分区结构，富集聚磷菌、硝化菌等功能微生物，强化生物除磷能力。结合工程实际配套轻量化化学除磷装置，实现生物处理与化学处理协同增效，稳定控制出水总磷指标^[3,5]。精准把控碳源投加量和投加点位，避免投加过量带来的二次污染及运行成本浪费，提高碳源利用效率。同时优化分区水流流态，避免短流、死角等问题，延长污水与功能生物膜的接触反应时间，进一步强化低浓度氮磷污染物的去除效果^[4]。

5 结语

生物膜法凭借低能耗、低污泥产量、高稳定性、抗冲击负荷能力强的独特优势，十分适配市政生活污水的规模化、常态化处理需求，是当前城镇污水处理提质增效、低碳改造的核心技术之一。本文针对MBBR、BAF、MABR三类生物膜工艺的工程应用特性展开研究，明确了不同工艺的适配场景与应用优势，同时梳理了膜层堵塞、低温效能不足、深度处理受限等突出问题。通过填料优化、工艺耦合、智能运维、脱氮除磷强化等优化策略，能够有效提升生物膜法处理市政污水的效能。未来应持续推进生物膜工艺的国产化升级与智能化迭代，攻克低温、低碳氮比污水处理短板，进一步提升技术经济性与适配性，为城镇水环境治理、污水资源化利用提供坚实的技术支撑。

【参考文献】

- [1] 成原东. 膜法水处理技术在城市生活污水深度处理中的应用研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(14): 8-10.
- [2] 王愉涵. 膜法水处理工艺在生活污水处理中的应用研究[J/OL]. 中国科技期刊数据库工业A, 2025(4): 90-93.
- [3] 孙圳, 张静娴. 生物膜法在市政污水处理中的应用研究[J]. 花炮科技与市场, 2026, 33(4): 179-181.
- [4] 程磊, 张玉生. 生物膜法在市政污水处理中的应用研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(5): 99-101, 105.
- [5] 漆轩. 生物膜法在市政污水处理中的应用研究[J]. 智能城市, 2021, 7(22): 108-109.
- [6] 国家环境保护总局. GB18918-2002 城镇污水处理厂污染物排放标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

作者简介：郑予宁，女，出生年月：1991年11月7日，职称：中级工程师，学历：本科。