膜生物反应器在污水处理厂提标改造中的效能评估

冯　敏

内蒙古碧蓝环境科技有限公司　内蒙古鄂尔多斯　017000

摘　要：随着环保要求的日益严格，污水处理厂提标改造成为必然趋势。膜生物反应器（MBR）作为一种高效的污水处理技术，在提标改造项目中得到广泛应用。本文深入分析了膜生物反应器的工作原理和特点，从水质净化效果、运行稳定性、占地面积等多方面对其在污水处理厂提标改造中的效能进行了全面评估，并结合实际案例探讨了其应用情况和优势，旨在为污水处理厂提标改造项目的科学决策和高效运行提供参考。

关键词：膜生物反应器；污水处理厂；提标改造；效能评估

引言

污水处理厂的出水水质对环境和生态安全至关重要。随着排放标准提升，现有处理厂需改造。传统工艺在去除某些污染物上有限制，而膜生物反应器（MBR）技术结合了膜分离和生物处理，具有高效水质、小占地、易管理等优势，在提标改造中显示出巨大潜力。科学评估 MBR 效能，对选择改造工艺、提升效率和环境效益至关重要。

1 膜生物反应器技术原理与特点

1.1 技术原理

膜生物反应器主要由生物处理单元和膜分离单元组成。在生物处理单元中，微生物利用污水中的有机物、氮、磷等污染物作为营养源进行新陈代谢，将其分解转化为二氧化碳、水和微生物自身细胞物质。膜分离单元则通过超滤或微滤膜对生物处理后的混合液进行固液分离，截留活性污泥和大分子有机物等，使处理后的水透过膜得到净化。膜的孔径通常在 0.01 – 0.4μm 之间，能够有效阻挡细菌、病毒、胶体以及悬浮固体等污染物，从而保证出水水质的稳定性和可靠性。

1.2 技术特点

出水水质优良：由于膜的高效截留作用，MBR（膜生物反应器）技术能够有效去除污水中的悬浮物、有机物、氮、磷以及病原微生物等，出水水质可达到甚至优于地表水Ⅳ类标准，能够满足多种回用需求，如城市杂用水、景观补水等。这种先进的污水处理技术，不仅保证了水质的高标准，而且在环境保护和水资源循环利用方面发挥着重要作用。

占地面积小：MBR 工艺的污泥浓度较高，一般可达到 8 – 12g/L，相比传统活性污泥法，其生物处理单元的容积负荷大大提高，因此占地面积可减少 30% – 50%。这对于土地资源紧张的城市污水处理厂提标改造项目具有重要意义。通过采用 MBR 技术，可以有效缓解城市土地资源的压力，同时为城市污水处理提供了一种高效、集约的解决方案。

运行稳定性高：膜的截留作用使活性污泥不会随出水流失，保证了生物处理系统中微生物的浓度和种类相对稳定，对水质、水量冲击负荷的适应能力较强。同时，MBR 工艺可以实现水力停留时间（HRT）和污泥停留时间（SRT）的完全分离，有利于微生物的生长和代谢，进一步提高了系统的运行稳定性。这种技术的高稳定性确保了污水处理过程的连续性和可靠性，为城市污水处理提供了坚实的技术保障。

剩余污泥产量少：在 MBR 系统中，由于污泥停留时间较长，微生物对有机物的分解更加彻底，同时膜的截留作用使微生物能够在反应器内充分生长和繁殖，因此剩余污泥产量相比传统工艺可减少 30% – 50%，降低了污泥处理和处置的成本。这不仅减少了污泥处理的环境影响，而且在经济上也具有显著的优势，为污水处理厂的运营成本控制提供了有效的途径。

2 膜生物反应器在污水处理厂提标改造中的效能评估

2.1 水质净化效能

有机物去除效果：MBR 对有机物具有高效的去除能力。在实际运行中，其对化学需氧量（COD）的去除率通常可达到 90% 以上，对生化需氧量（BOD_5）的去除率更是高达 95% 以上。这主要得益于生物处理单元中微生物对有机物的分解代谢以及膜分离单元对未降解有机物和微生物代谢

产物的截留作用。例如，在某污水处理厂提标改造项目中，采用 MBR 工艺后，进水 COD 浓度为 400 – 500mg/L，出水 COD 浓度稳定在 30mg/L 以下，去除率达到 94% 以上。

氮、磷去除效果：对于氮的去除，MBR 工艺通过硝化和反硝化作用实现。在好氧条件下，氨氮被硝化细菌氧化为硝态氮；在缺氧条件下，反硝化细菌利用有机物将硝态氮还原为氮气排出系统。MBR 工艺能够有效控制硝化和反硝化过程的条件，对总氮（TN）的去除率一般可达到 60% – 80%。对于磷的去除，MBR 可以通过生物除磷和化学除磷相结合的方式。生物除磷依靠聚磷菌在厌氧和好氧条件下对磷的过量摄取和释放来实现，化学除磷则通过投加化学药剂（如铁盐、铝盐等）与磷酸根离子反应生成沉淀去除。在实际应用中，MBR 对总磷（TP）的去除率可达到 85% – 95%。如某污水处理厂原工艺对 TN 和 TP 的去除率分别为 40% 和 60% 左右，采用 MBR 提标改造后，TN 去除率提升至 75%，TP 去除率达到 90%，出水 TN 和 TP 浓度均满足更严格的排放标准。

悬浮物和微生物去除效果：膜的物理截留作用使得 MBR 对悬浮物的去除率几乎达到 100%，出水悬浮物浓度可控制在 5mg/L 以下。同时，MBR 对细菌、病毒等微生物也具有良好的去除效果，能够有效降低出水的微生物风险。研究表明，MBR 对大肠杆菌的去除率可达 99.9% 以上，对噬菌体等病毒的去除率也在 90% 以上，大大提高了出水的生物安全性。

2.2 运行稳定性效能

抗冲击负荷能力：污水处理厂进水水质和水量往往具有较大的波动性。MBR 由于其较高的污泥浓度和独特的运行方式，对水质、水量冲击负荷具有较强的适应能力。当进水水质突然恶化或水量大幅增加时，MBR 系统中的微生物能够在短时间内调整代谢活动，利用膜的截留作用维持系统内微生物的浓度和活性，从而保证出水水质的稳定。例如，在某污水处理厂遭遇暴雨期间，进水水量瞬间增加了 50%，但采用 MBR 工艺的系统通过自动调节曝气强度和膜通量等参数，出水水质仍能保持在达标范围内。

设备可靠性：MBR 系统中的膜组件、曝气系统、水泵等设备经过多年的发展和改进，其可靠性得到了显著提高。目前市场上的主流膜组件使用寿命一般可达到 5 – 8 年，部分优质产品甚至可达到 10 年以上。同时，通过合理的设备选型、安装调试以及日常维护管理，可以有效降低设备故障率，确保系统的长期稳定运行。在一些采用 MBR 工艺的污水处理厂中，通过建立完善的设备巡检制度和应急预案，设备平均无故障运行时间可达 3000 小时以上。

2.3 占地面积效能

如前所述，MBR 工艺由于其较高的污泥浓度和容积负荷，在实现相同处理效果的情况下，其生物处理单元的占地面积相比传统活性污泥法可大幅减少。这在污水处理厂提标改造项目中，对于那些受场地限制无法进行大规模扩建的厂区尤为重要。例如，某城市中心区的污水处理厂，在进行提标改造时，由于周边土地资源紧张，采用 MBR 工艺替换原有的传统活性污泥法工艺，在不增加厂区占地面积的前提下，将处理规模从 5 万吨 / 日提升至 8 万吨 / 日，同时出水水质达到了更高的标准。

2.4 污泥处理效能

MBR 工艺产生的剩余污泥量少，且污泥性质稳定，有利于后续的污泥处理和处置。相比传统工艺，MBR 减少了污泥处理的规模和成本。同时，由于 MBR 系统中的污泥停留时间长，微生物对有机物的分解更彻底，污泥中的有害物质含量相对较低，降低了污泥对环境的潜在风险。在污泥处置方面，MBR 产生的污泥可以采用更简单的处理方式，如直接脱水后进行填埋或焚烧，进一步简化了污泥处理流程。

3 膜生物反应器在污水处理厂提标改造中的应用案例分析

3.1 案例背景

某污水处理厂建于 20 世纪 90 年代，原设计处理规模为 10 万吨 / 日，采用传统活性污泥法工艺，出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB 18918 – 2002）的一级 B 标准。随着城市的发展和环保要求的提高，该污水处理厂需要进行提标改造，将出水水质提升至一级 A 标准，并将处理规模扩大至 15 万吨 / 日。

3.2 改造方案

经过技术经济比较，该污水处理厂最终选择采用膜生物反应器（MBR）工艺进行提标改造。在原有生物处理池的基础上，进行了适当的改造和扩建，增加了膜池、膜组件及相关配套设备。同时，对进水预处理系统和污泥处理系统也进行了相应的升级改造。

3.3 运行效果

水质达标情况：改造完成并稳定运行后，该污水处理

厂的出水水质得到了显著提升。COD、BOD_5、TN、TP、悬浮物等各项指标均稳定达到一级 A 标准。其中，COD 平均出水浓度为 35mg/L，去除率达到 92%；BOD_5 平均出水浓度为 6mg/L，去除率达到 97%；TN 平均出水浓度为 12mg/L，去除率达到 70%；TP 平均出水浓度为 0.4mg/L，去除率达到 92%；悬浮物浓度小于 5mg/L。

运行稳定性：在运行过程中，MBR 系统表现出了良好的稳定性。即使在进水水质和水量出现较大波动的情况下，系统仍能通过自动控制系统及时调整运行参数，保证出水水质的稳定达标。设备故障率低，膜组件运行状况良好，经过两年的运行，膜通量衰减在合理范围内，未出现大规模的膜污染现象。

经济效益：虽然 MBR 工艺的建设投资相比传统工艺有所增加，但从长期运行成本来看，由于其出水水质优良，可实现部分中水回用，节约了水资源费用。同时，剩余污泥产量的减少降低了污泥处理成本。经测算，该污水处理厂在提标改造后，通过中水回用和污泥处理成本的降低，每年可节省运行费用约 500 万元，具有良好的经济效益。

4 结论

膜生物反应器作为一种先进的污水处理技术，在污水处理厂提标改造中展现出了显著的效能优势。其在水质净化、运行稳定性、占地面积和污泥处理等方面的出色表现，能够有效满足日益严格的污水处理排放标准和城市发展的需求。通过实际案例分析也证明了 MBR 工艺在污水处理厂提标改造中的可行性和有效性。然而，MBR 技术在应用过程中也面临着膜污染、建设投资和运行成本较高以及技术管理要求高的挑战。通过采取优化预处理工艺、合理选择膜组件和运行参数、加强操作人员培训等相应的对策，可以有效克服这些问题，充分发挥 MBR 技术的优势。随着技术的不断进步和完善，膜生物反应器在污水处理厂提标改造领域将具有更广阔的应用前景，为改善水环境质量和推动水资源可持续利用做出更大的贡献。在未来的研究中，可以进一步探索 MBR 与其他新型污水处理技术的组合应用，以及如何进一步降低 MBR 的建设和运行成本，提高其在不同地区和不同规模污水处理厂提标改造中的适用性。同时，加强对 MBR 运行过程中膜污染机理和控制方法的研究，不断提升 MBR 系统的运行稳定性和可靠性。

参考文献：

[1] 吴雨霏 , 于勇 . 厌氧膜生物反应器（AnMBR）膜污染控制及组合工艺研究与讨论 [J]. 工业微生物 ,2024,54(06):56–59.

[2] 张文豪 . 膜生物反应器技术在化工污水处理中的应用 [J]. 化工管理 ,2024,(32):71–74.

[3] 丘好华 . 膜生物反应器处理技术在污水处理中的应用 [J]. 环境与发展 ,2024,36(05):92–96.

[4] 邵为 . 膜生物反应器污水处理技术分析 [J]. 皮革制作与环保科技 ,2024,5(19):24–26.