

工业废水提标改造中高效预处理与深度处理工艺组合设计及应用

廖兆美

广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ME.2025110056

摘 要： 工业废水污染物复杂，传统处理工艺有局限。提标改造需协同运用预处理与深度处理，物化与生物预处理分别从优化工艺参数、调控菌群结构强化，深度处理通过膜工艺设计、膜技术耦合、氧化技术创新实现。还应采用多目标优化、全流程模拟验证，规范绘制 PFD 与构建三维模型。实际案例证明其可行且经济，未来可开发智能系统与新型材料优化。

关 键 词： 工业废水提标改造；预处理与深度处理；工艺组合设计

Design and Application of Efficient Pre treatment and Deep Treatment Process Combination in Industrial Wastewater Upgrading and Transformation

Liao Zhaomei

Foshan, Guangdong 528000

Abstract： Industrial wastewater pollutants are complex, and traditional treatment processes have limitations. Upgrading and transformation require the collaborative use of pretreatment and deep treatment. Physical and biological pretreatment optimize process parameters and strengthen bacterial community structure, while deep treatment is achieved through membrane process design, membrane technology coupling, and oxidation technology innovation. Multi objective optimization and full process simulation verification should also be adopted to standardize the drawing of PFD and the construction of 3D models. Practical cases have proven that it is feasible and economical, and in the future, intelligent systems and new material optimization can be developed.

Keywords： upgrading and transformation of industrial wastewater; preprocessing and deep processing; process combination design

引言

随着环保要求的日益严格，工业废水处理面临更高挑战。《“十四五”节能减排综合工作方案》于2021年10月颁布，强调工业领域节能减排，推动工业废水处理提标改造。工业废水中复杂污染物给处理带来困难，传统工艺局限性凸显。高效预处理与深度处理协同运用成为关键，从物化与生物预处理技术优化，到深度处理工艺组合设计，如超滤 - 反渗透、膜分离技术耦合等，再到多目标优化与全流程模拟验证，以及工艺图纸绘制与模型构建，多方面保障处理效果。实际案例证明其可行性与经济性，未来仍需通过智能化与新材料研发进一步提升处理水平。

一、工业废水处理工艺需求分析

（一）工业废水特性与提标挑战

工业废水通常含有高浓度的 COD、盐分以及毒性有机物等复杂污染物。高浓度 COD 意味着水中存在大量可被化学氧化剂氧化的物质，这不仅会消耗水体中的溶解氧，还会对水生生物造成危害。较高的盐分则可能改变水体的渗透压，影响后续生物处理单元微生物的活性^[1]。毒性有机物如重金属离子、持久性有机污染物等，不仅难以生物降解，还会在生物体内富集，最终危害人体健康。

在当前排放标准日益严格的背景下，传统处理工艺暴露出局限性。传统工艺对于复杂污染物的去除效率有限，难以使处理后的水质满足提标后的排放要求。例如，常规的生物处理工艺在面对高盐分、高毒性有机物时，微生物活性易受抑制，导致处理效果不佳。而且传统工艺可能存在占地面积大、运行成本高的问题，无法适应工业废水处理高效、经济的需求。

（二）预处理与深度处理协同必要性

工业废水中污染物成分复杂，单一处理工艺难以实现达标排放。预处理单元对后续工艺起到重要的保护作用，它能去除或降

低废水中的悬浮物、大颗粒杂质及部分易处理的污染物，减轻后续深度处理工艺的负荷，防止堵塞、结垢等问题，保障深度处理设备稳定运行^[2]。而深度处理则对微量污染物有良好的去除效果，可将预处理后残留的难以降解的有机物、重金属离子等进一步去除，使废水达到更高的排放标准。二者相互补充，预处理为深度处理创造有利条件，深度处理弥补预处理对微量污染物去除的不足，只有将高效预处理与深度处理协同运用，才能实现工业废水提标改造的目标，确保处理后的废水满足日益严格的环保要求。

二、高效预处理核心技术研究

（一）物化预处理技术优化

在工业废水提标改造中，物化预处理技术的优化对提升处理效果至关重要。针对重金属和悬浮物的预处理，需对比选微电解 - Fenton、混凝沉淀、气浮等工艺的设计参数进行优化。微电解 - Fenton 工艺通过精准调控反应的 pH 值、反应时间、铁碳比等参数，能有效提高对重金属的去除率，打破其稳定结构并促使沉淀分离。混凝沉淀工艺中，絮凝剂的种类与投加量、反应搅拌强度及沉淀时间等参数优化，可强化悬浮物的凝聚沉降。气浮工艺则通过调整气泡大小、气液比、浮选时间等，增强对悬浮物及部分重金属的浮选去除能力。通过系统优化这些工艺的设计参数^[3]，可实现高效的物化预处理，为后续深度处理奠定良好基础。

（二）生物预处理强化路径

生物预处理强化路径主要聚焦于水解酸化 - UASB 工艺中菌群结构的调控，以此提升工业废水的可生化性并削减有机负荷。在水解酸化阶段，通过优化水力停留时间、温度和 pH 值等运行参数，为水解发酵细菌创造适宜的生存环境，促进复杂有机物分解为小分子物质，增强废水可生化性。在后续 UASB 阶段，着重培养产甲烷菌等优势菌群，利用合适的接种物和逐步提高有机负荷的方式，引导菌群结构向高效降解有机物的方向发展^[4]。这种菌群结构的精准调控，不仅能提高水解酸化 - UASB 工艺对工业废水的处理效率，还能增强系统的稳定性，为后续深度处理减轻负担，实现工业废水提标改造中的高效预处理目标。

三、深度处理工艺组合设计体系

（一）膜分离技术耦合应用

1. 超滤 - 反渗透工艺设计

在工业废水提标改造的深度处理工艺组合设计体系中，超滤 - 反渗透工艺设计极为关键。基于废水水质特征选择适宜膜组件，比如针对含较多胶体、大分子有机物的工业废水，选用截留分子量适配的超滤膜组件。通量计算需综合考虑废水性质、操作压力、温度等因素，运用相关公式准确测算，确保处理效率与能耗的平衡。为防控膜污染，在预处理阶段强化对悬浮物、有机物等去除，运行中定期进行化学清洗与物理冲洗。通过科学的膜组件选型、通量计算与污染防控措施，能有效提升超滤 - 反渗透工艺处理效果，实现工业废水稳定达标排放^[5]。

2. 电驱动膜系统集成

在工业废水提标改造的深度处理工艺组合设计体系中，膜分离技术耦合应用里的电驱动膜系统集成颇为关键。离子交换膜与电渗析协同脱盐工艺作为电驱动膜系统集成的重要部分，构建其能量消耗模型意义重大^[6]。该模型可精准评估系统运行时的能量损耗，助力优化工艺参数。例如，通过模型分析不同离子交换膜的性能参数以及电渗析操作条件，如电压、电流密度、流速等对能量消耗的影响，从而找到最佳的参数组合，在保障高效脱盐的同时，降低能量消耗，提升电驱动膜系统集成的整体效率，为工业废水提标改造提供经济且高效的深度处理工艺。

（二）高级氧化技术组合创新

1. 臭氧催化氧化系统

在工业废水提标改造的深度处理工艺组合设计体系中，臭氧催化氧化系统的高级氧化技术组合创新意义重大。设计多相催化剂床层结构，通过合理规划催化剂的分布与排列，可有效提升臭氧与废水的接触面积和反应效率，促使臭氧更高效地分解产生羟基自由基，增强氧化能力。同时，搭配气液传质强化装置，能够优化臭氧在废水中的传质过程，克服气液传质阻力，使臭氧快速且充分地分散于废水中，保障氧化反应均匀、高效进行。多相催化剂床层结构与气液传质强化装置的协同运作，大幅提高了臭氧催化氧化系统对工业废水中难降解有机物的去除能力，助力工业废水提标改造目标的实现^[7]。

2. 光电协同氧化装置

在工业废水提标改造的深度处理工艺组合设计体系中，光电协同氧化装置是高级氧化技术组合创新的关键部分。开发的 TiO₂ 纳米管阵列电极与紫外光源的协同降解反应器具有独特优势。TiO₂ 纳米管阵列电极具备较大的比表面积，能有效增加光催化活性位点，提升光催化效率^[8]。与紫外光源协同作用时，紫外光照激发 TiO₂ 纳米管阵列电极产生电子 - 空穴对，空穴具有强氧化性，可将吸附在电极表面的有机污染物氧化分解，电子则参与还原反应，加速污染物的去除。这种光电协同氧化装置通过二者的高效配合，显著增强了对工业废水中难降解有机污染物的去除能力，为工业废水深度处理达标排放提供了有力的技术支持。

四、工程设计与实施验证

（一）工艺组合方案决策模型

1. 多目标优化方法

多目标优化方法旨在综合考虑多个相互冲突的目标，以寻求最优的工艺组合方案。在工业废水提标改造中，这些目标可能包括处理效果、成本、环境影响等。通过构建多目标函数，将各个目标转化为数学表达式，如处理后水质满足排放标准的程度、建设与运行成本、对周边生态环境的潜在影响等^[9]。运用智能算法，如遗传算法、粒子群算法等对多目标函数进行求解，搜索帕累托最优解集。该解集代表了在不同目标之间权衡的最优方案，工程师可根据实际需求和偏好，从帕累托最优解集中选择最适合的工艺组合，实现工业废水提标改造中高效预处理与深度处理工

艺的合理设计与应用，兼顾技术、经济与环境效益。

2. 全流程模拟验证

在工业废水提标改造的工艺组合方案决策模型构建后，通过全流程模拟验证来进一步确保方案的可行性与有效性。采用 BioWin/STOAT 软件进行污染物去除率与能耗的动态模拟，以此评估不同工艺组合在实际运行中的表现。该软件能够模拟工业废水处理的全流程，精准呈现各处理环节对污染物的去除效果，以及整个过程所消耗的能源情况。借助模拟结果，可以直观地对比不同工艺组合在污染物去除和能耗方面的差异，进而优化工艺组合方案。通过全流程模拟验证，为工业废水提标改造的实际工程设计提供可靠依据，确保所选定的高效预处理与深度处理工艺组合，既能高效去除污染物达到提标要求，又能实现能耗的合理控制，为后续工程实施奠定坚实基础^[10]。

（二）实际工程案例解析

1. 化工园区废水处理项目

在某化工园区废水处理项目中，处理规模为 15000m³/d，主要处理含高浓度 COD、悬浮物及部分重金属离子的工业废水。进水 COD 为 450 - 600mg/L，悬浮物 120 - 180mg/L，总氮 40 - 60mg/L，总磷 6 - 10mg/L，盐分约 1.2 - 1.8g/L，pH 范围 6.5 - 8.0。该项目采用预处理 - 深度处理组合工艺以实现废水提标改造，目标是使出水 COD < 50mg/L。预处理阶段通过高效沉淀与气浮组合工艺去除废水中的悬浮物和部分大分子有机物。具体操作包括投加混凝剂与助凝剂，搅拌 15 - 20 分钟，沉淀或气浮处理 30 分钟，可去除约 70 - 80% 的悬浮物和 25 - 30% 的 COD，同时对部分重金属实现有效沉淀，降低后续处理单元负荷。生物预处理阶段采用水解酸化 - UASB 工艺，通过调控水力停留时间、温度及 pH 值，优化产甲烷菌等优势菌群生长，使水解酸化阶段 COD 去除约 20%，UASB 阶段进一步去除 35% COD，显著提高废水可生化性，为深度处理创造良好条件。深度处理阶段运用超滤 - 反渗透膜技术及高级氧化技术组合。超滤可有效去除废水中大分子有机物和胶体杂质，使 COD 进一步降低约 15 - 20%。反渗透单元进一步去除溶解性有机物和盐分，确保出水 COD 稳定维持在 45 - 50mg/L，总溶解固体降至 500mg/L 以下。高级氧化技术包括臭氧催化氧化与光电协同氧化，可进一步去除残留难降解有机

物，使出水质量长期稳定达标。经过实际运行验证，该组合工艺展现出良好的处理效果，预处理与深度处理环节协同作用显著，整体 COD 去除率达到 92 - 95%，悬浮物去除率约 90%，总氮与总磷分别降低约 45 - 50% 和 60 - 70%，成功实现达标排放。该案例表明，预处理 - 深度处理组合工艺在化工园区废水提标改造中具有高度的可行性和工程应用价值，为工业废水提标改造提供了可复制的实践范例。

2. 经济性对比分析

在工业废水提标改造的实际工程案例中，对高效预处理与深度处理工艺组合设计进行了详细的经济性核算。结果显示，采用预处理 - 深度处理组合工艺后，吨水处理成本由常规工艺的 12 元/吨降低至 8.5 元/吨，降低幅度约 29%。成本下降主要来源于药剂使用量的优化、沉淀气浮及膜系统能耗的合理控制，以及生物预处理对深度处理负荷的减轻，从而降低了整体运行成本。同时，项目初期投资为 1800 万元，通过对每吨水处理成本降低及稳定运行效益计算，投资回收周期约为 3.5 年。表明虽然组合工艺前期投入较大，但因运行成本显著降低，可在合理周期内收回投资，为企业带来经济收益。该分析证明，高效预处理与深度处理工艺组合在经济性上不仅具有明显优势，同时兼顾了技术可行性与环境效益，为工业废水提标改造提供了切实可行的解决方案。

五、总结

在工业废水提标改造进程里，高效预处理与深度处理工艺的组合设计展现出显著的协同增效作用。预处理工艺有效去除大颗粒、悬浮物及部分易处理污染物，为后续深度处理减轻负担，深度处理则进一步削减难降解物质，使出水水质满足更高标准。两者相互配合，不仅提升处理效率与出水质量，还降低处理成本。然而，随着环保要求提升，仍有优化空间。未来可着重开发智能化控制系统，通过实时监测废水水质、水量变化，精准调控各处理环节参数，实现处理过程自动化、智能化。同时，加强新型高效处理材料研发，不断优化工艺组合，持续提升工业废水提标改造效果，助力工业可持续发展。

参考文献

- [1] 栾鑫宇. 典型电镀废水处理工艺提标改造及应用效能研究 [D]. 广州大学, 2021.
- [2] 刘亦珍. Unitank+ 高效沉淀 + BAF 在污水处理厂提标改造中的应用与评价 [D]. 江苏大学, 2021.
- [3] 黎楠杰. 江西某城镇生活污水厂提标改造工艺设计方案优化及运行效果研究 [D]. 南昌大学, 2021.
- [4] 朱韩依. 超高磷工业废水组合处理工艺研究 [D]. 兰州交通大学, 2021.
- [5] 凌长超. 医药化工园区污水处理厂提标工艺研究及应用 [D]. 南昌大学, 2023.
- [6] 杨开研. 深度处理工艺在炼油污水水质提标改造中的应用 [J]. 炼油技术与工程, 2021, 51(04): 69-72.
- [7] 邱杰. 臭氧催化氧化 + BAF 工艺在污水处理提标改造中的设计与应用 [J]. 绿色科技, 2021, 23(10): 126-128.
- [8] 王玲玲, 耿洪钊. 海滨污水厂提标改造工程水处理工艺设计 [J]. 中国科技投资, 2021, (16): 134+146.
- [9] 魏爱书, 牛晓君. MABR 工艺在污水处理站提标改造中的应用 [J]. 环境工程学报, 2021, 15(06): 2174-2180.
- [10] 潘振. 广西某乡镇污水处理厂提标改造工程设计 [J]. 节能, 2023, 42(06): 80-82.