

化工煤制烯烃废水零排放工艺的生命周期评价 及技术经济论述

张雪晨（南京工大环境科技有限公司，江苏 南京 210000）

摘要：煤制烯烃废水零排放工艺通过生化处理、膜处理和蒸发结晶三个单元实现水资源回用和盐分回收，显著降低了对环境的多重影响。生命周期评价结果表明，蒸发结晶单元对全球变暖潜力的贡献最大，占32%，优化能耗管理可降低整体排放12%至15%。经济分析揭示，该工艺运行费用占总成本的60%，平均处理成本为2.47美元/吨，蒸汽和电力消耗是主要开支。研究提出通过引入高效能设备和模块化设计提升系统效率，并在化学品优化和余热回收方面提出改进建议。

关键词：煤制烯烃；零排放；生命周期评价；环境影响；经济分析

Abstract: The zero discharge process of coal to olefin wastewater achieves water resource reuse and salt recovery through three units: biochemical treatment, membrane treatment, and evaporation crystallization, significantly reducing multiple impacts on the environment. The life cycle assessment results indicate that the evaporative crystallization unit contributes the most to global warming potential, accounting for 32%. Optimizing energy management can reduce overall emissions by 12% to 15%. Economic analysis reveals that the operating cost of this process accounts for 60% of the total cost, with an average processing cost of \$2.47 per ton, and steam and electricity consumption are the main expenses. The study proposes to improve system efficiency by introducing high-performance equipment and modular design, and provides improvement suggestions in chemical optimization and waste heat recovery.

Keywords: coal to olefin; Zero emissions; Life cycle assessment; Environmental impact; economic analysis

0 引言

乙烯作为全球化工产品中的佼佼者，不仅在国际市场上拥有巨大的产量，同时在石油化工行业中占据至关重要的地位。据统计，乙烯及其产品的生产和消费占石油化工总产量的75%以上。特别是在中国，2020年乙烯产量达到2160万吨，较2016年增长了21.27%，显示出其在国民经济中的重要角色。然而，随着乙烯产业的快速发展，相关的环境问题也日益突出，特别是煤化工领域所产生的废水处理问题成为制约行业可持续发展的关键因素。据报道，甲醇制烯烃（MTO）技术在生产煤基低碳烯烃过程中的耗水量是传统石油裂解方法的4至6倍，每生产1t烯烃需要26t~32t淡水。因此，煤制烯烃工艺排放废水的有效处理不仅是技术上的挑战，同时也是环境保护与资源合理利用的必然要求。

在中国西北部水资源稀缺的地区，煤化工厂的集中建设对当地生态环境的压力尤为显著。生态环境部已针对加强西部地区环境影响评价工作发出通知，要求煤化工企业坚持水资源的可持续发展原则。因此，

研究和推广零排放技术，提高废水的回用效率，不仅可以减少对淡水资源的依赖，还能降低环境污染，对实现煤化工行业的绿色发展具有重要意义。

1 方法与分析框架

1.1 工艺流程说明

本研究提出了一套针对煤制烯烃废水的完整零排放处理方案，包括生化处理、膜分离和蒸发结晶三个关键阶段（流程见图1）。在生化处理阶段，废水首先进入调节池进行均质化和预处理，然后在A/O反应器中通过微生物作用降解有机物，接着通过沉淀池完成固液分离。处理过的废水汇入中间池，随后通过曝气生物滤池（BAF）进一步去除有机污染物，最后流向盐水池，准备进入下一处理阶段。

废水在膜分离单元中首先经过多级高效预处理，包括化学软化澄清、过滤和超滤，有效移除悬浮颗粒和降低浊度，二级钠床则显著降低水中硬度。这一预处理步骤旨在降低反渗透系统进水的硬度、碱性和有机物浓度，确保膜系统稳定运行并延长使用寿命。

最终，反渗透处理后的水被输送到蒸发结晶系统，

通过一系列工艺实现水分蒸发和盐分离。系统内设有脱气塔，用于去除溶解氧、二氧化碳和其他不凝气体，以提高蒸发结晶的效率。结合机械蒸汽再压缩技术，该系统既实现了水资源的循环利用，也实现了盐分的有效固化与分离。

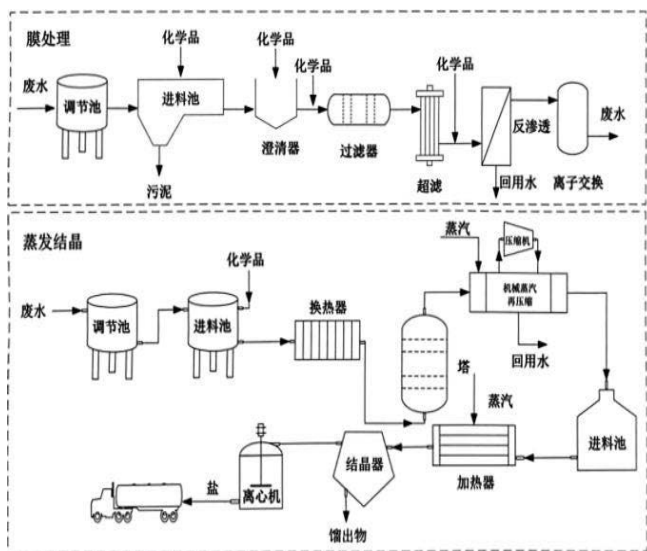


图1 工艺流程图

1.2 生命周期评价 (LCA) 方法

1.2.1 CO₂ 排放及其分析

生命周期评价将 CO₂ 排放作为衡量煤制烯烃废水零排放工艺对全球变暖影响的主要指标。通过对 CO₂、CH₄ 和 N₂O 等温室气体的排放进行量化，采用特定的全球变暖潜能因子 (GWP) 计算了各处理单元的 CO₂ 当量排放。结果显示，蒸发结晶阶段的 CO₂ 当量排放占比最高，约为 32%，其主要来源是高温蒸发过程中对蒸汽和电力的消耗。膜处理阶段的排放量较低，占比约 14%，排放主要由水泵运行和辅助设备的能耗引起。

研究采用了公式 $CO_{2-eq} = \sum \sum E_i C F_j$ ，其中 E 代表温室气体的排放量，CF 为相应的 GWP 因子，用以将不同气体的排放统一转换为 CO₂ 当量。这一方法覆盖了工艺的全生命周期，从原材料获取到废水处理完成，全面评估了各单元对气候变化的贡献。通过对物料和能量流的进一步分析发现，能源类型、设备效率和处理规模是影响排放的主要因素。优化热能回收系统、降低高能耗环节的运行强度能够将总排放降低约 12% 至 15%。

1.2.2 环境影响类别

本研究对环境影响类别进行了全面评估，包括全

球变暖潜力 (GWP)、酸化潜势 (AP)、富营养化潜势 (EP)、非生物资源耗竭潜势 (ADP) 和光化学臭氧生成潜势 (POCP)，并进一步分析了与人类健康相关的两类影响，即人类毒性潜力 (HTP) 和无毒潜力 (HNTP)。全球变暖潜力的结果表明，煤制烯烃废水零排放工艺的每吨废水处理过程产生 1,401.316 kg CO_{2-eq}。酸化潜势主要由蒸发结晶阶段逸散的酸性气体引发，而富营养化潜势则集中体现于生化处理阶段，由氮磷化合物的潜在排放所致。

在健康影响方面，挥发性有机物和粉尘排放被认为是空气质量恶化的主要来源，可能对人类健康造成显著影响。研究基于 CML Basel 2001 方法，将这些环境负荷的潜在影响量化为具体的环境绩效指标。这一方法不仅覆盖了排放物对生态系统和自然资源的多层次影响，还提供了识别改进方向的依据。优化化学品使用方案、改进设备密闭性有助于降低这些负面影响，从而提升废水处理系统的整体环境绩效。

1.3 技术经济分析框架

1.3.1 平均成本与资本成本

平均成本是衡量废水零排放工艺经济性的核心指标，反映了处理每吨废水的经济投入。研究计算表明，煤制烯烃废水零排放的平均成本为 2.65 美元/吨，受到处理规模、工艺效率和设备寿命的显著影响。资本成本主要包括设备购置、基础设施建设和相关工程费用，占总成本的 40% 至 50%。其中，蒸发结晶装置和膜分离设备的投入最大，其运行寿命和能耗效率直接影响长期经济效益。通过引入模块化设计与国产化设备，资本成本可显著降低，从而提升工艺的整体经济可行性。

1.3.2 化学品、电费与热能成本

化学品、电力和热能成本构成了废水零排放工艺的主要运行费用。化学品成本主要集中于预处理和蒸发结晶阶段，包括药剂使用和沉淀剂的添加，占总运行费用的 15%。电费则与膜处理和蒸发设备的能耗密切相关，其比例约为 35%。热能成本在蒸发结晶过程中最为突出，对高温蒸汽的依赖使其占总费用的 30%。研究显示，通过优化化学品配方和引入高效能设备，可以降低化学品和能源成本。同时，将低品位余热回收用于供能可显著减少蒸汽需求。

1.3.3 运维成本与生命周期成本核算

运维成本涵盖日常运行、设备维护、人工费用等多个方面，直接影响系统的经济可持续性。数据显

示, 运维成本约占总费用的 20%, 设备检修和替换费用占较大比重。生命周期成本核算综合了初始投资、运行成本和外部环境成本, 研究发现其外部成本占比为 7.68%。基于这种分析框架, 制定合理的维护计划、延长设备使用寿命成为降低运维成本的有效手段。此外, 外部环境成本的减少依赖于降低污染排放和资源消耗, 优化后的零排放工艺在环境和经济两方面均展现了提升空间。

2 结果与讨论

2.1 生命周期环境影响评价

2.1.1 各处理单元的环境性能比较

不同处理单元在生命周期环境影响中的贡献差异显著。蒸发结晶单元对全球变暖潜力的贡献最高, 占比约 32%, 其主要原因是高能耗设备运行带来的 CO₂ 排放。膜处理阶段的全球变暖潜力较低, 仅占总排放的 14%, 能源需求主要集中在水泵和辅助设备上。生化处理阶段的酸化潜势较高, 占比达 27%, 与废水处理过程中产生的酸性气体密切相关。富营养化潜势则在生化处理和预处理阶段表现显著, 占总影响的 30%, 源于氮磷化合物可能泄漏对水体的潜在污染。

2.1.2 零排放工艺对环境影响的降低作用

与传统废水处理系统相比, 零排放工艺显著减少了多项环境负荷。全球变暖潜力降低约 23%, 相当于每吨废水减少 320 kg CO_{2-eq} 排放。酸化潜势下降 15%, 主要得益于蒸发结晶过程中逸散气体的有效控制。富营养化潜势降低 18%, 得益于高效的氮磷污染物去除系统。非生物资源耗竭潜势减少 12%, 源于蒸发结晶阶段对回收盐的充分利用。研究表明, 采用零排放技术可以在资源回收的同时有效减轻环境负担。

2.2 经济分析结果

经济分析显示, 零排放工艺的总成本分布中运行费用占比达到 60%, 资本投资占比为 35%, 剩余部分为维护费用。化学品成本占运行费用的 20%, 主要用于预处理和膜分离阶段。蒸发结晶设备的高能耗使其占电力费用的 40%, 热能消耗费用占运行总费用的 32%。数据显示, 每吨水的处理成本为 2.47 美元, 其中能源相关费用是影响成本的最主要因素。对比其他技术, 零排放工艺的生命周期外部成本降低了 5.4%, 体现了其环境经济效益的综合优势。

2.3 技术优化建议

技术优化建议集中在降低能耗、提升资源回收效率和改进工艺稳定性三个方面。引入高效能换热设备

和智能化控制系统可以减少热能浪费, 预计能耗下降幅度可达 8% 至 12%。对于蒸发结晶阶段, 采用多效蒸发技术结合余热回收系统能够显著降低蒸汽需求, 回收利用率提高 10%。在化学品使用环节, 优化絮凝剂和助剂配比将减少药剂用量, 化学品成本可下降 5% 左右。研究建议采用模块化设计以便灵活调整工艺规模, 从而提高适应性。这些优化措施为进一步减少运行费用和环境负担提供了明确的方向, 同时增强了工艺的长期可持续性。

3 结论

煤制烯烃废水零排放工艺通过系统性的技术整合, 展示了在环境影响和经济性之间取得平衡的可能性。研究表明, 优化热能利用和设备效率能够显著降低生命周期环境负担, 同时减少运行成本。针对高能耗单元, 改进蒸发结晶技术和余热回收系统不仅提升了资源回收率, 也有效控制了温室气体排放。化学品配比优化和模块化设计则进一步增强了工艺的灵活性与适应性。这些技术策略的应用验证了零排放工艺在复杂工业废水处理中具有高效、可行的特点, 为煤化工领域的废水管理提供了清晰的技术路径与实践依据。

参考文献:

- [1] 徐海丰. 2021 年世界乙烯行业发展状况与趋势 [J]. 国际石油经济, 2022, 30(04): 55-62.
- [2] 张雅军. 煤化工废水回用工艺膜前预处理方法的实验研究 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2023.
- [3] 王晓萌. 大型煤制烯烃企业污水零排放方案 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(24): 136-138.
- [4] 刘文, 满强强. 煤化工废水处理及资源化利用研究现状 [J]. 石化技术, 2023, 30(11): 110-112.
- [5] 侯业祥. 煤制烯烃中废水处理工艺概述 [J]. 内蒙古石油化工, 2021, 47(09): 52-54.
- [6] 黄光法. 煤化工废水处理存在的技术问题与解决思路探讨 [J]. 城市建设理论研究, 2021(11): 121-123.
- [7] 贾健波. 煤制烯烃废水零排放工艺的生命周期评价及技术经济分析 [J]. 山东化工, 2023, 52(2): 112-116.
- [8] 林琳. 煤化工废水处理零排放存在的问题及对策 [J]. 福建化工, 2022(5): 256-257.
- [9] 张志宝. 煤化工高盐废水处理工艺的研究及优化运行 [J]. 清洗世界, 2022, 38(12): 26-28.
- [10] 苗淳, 陈欣, 陈威. 高浓度煤化工废水的处理新技术研究 [J]. 工程技术, (2021)11: 158-160.