

# 全生命周期视角下煤制油废水零排放系统的能耗与成本评估

邢思聪 (神华工程技术有限公司安徽分公司, 安徽 合肥 230000)

**摘要:** 为了构建能够反映煤制油废水零排放系统在全生命周期中成本结构的系统化分析框架, 本研究以工艺链拆解、能耗路径表达与成本构成分层建模为核心方法, 对蒸发结晶、膜分离、预处理及浓盐资源化等关键环节的能量需求与成本负荷进行了系统梳理。研究通过生命周期阶段划分, 将建设—运行—维护—终端处置过程纳入统一视角, 使成本的形成逻辑、能耗的占比结构、资源化环节的经济作用得到更清晰的表达。结果形成的分析图谱显示, 蒸发单元对总成本贡献度较高, 其热能消耗、设备稳定性与运行波动构成了长期经济压力; 膜分离与预处理单元虽能降低蒸发负荷, 但化学品依赖与替换频率在生命周期中引入持续支出; 资源化产物的质量稳定性与应用路径对终端成本具有明显调节作用。

**关键词:** 煤制油废水; 零排放; 全生命周期评价; 能耗结构; 成本评估

**中图分类号:** X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 001-0082-03

## Energy Consumption and Cost Assessment of Zero-Discharge Coal-to-Liquids Wastewater Systems from a Life Cycle Perspective

Xing Sicong (Shenhua Engineering & Technology Co., Ltd., Anhui Branch, Hefei Anhui 230000, China)

**Abstract:** In order to construct a systematic analytical framework that can reflect the cost structure of a zero-discharge coal-to-liquid wastewater system throughout its life cycle, this study uses process chain decomposition, energy consumption pathway representation, and hierarchical modeling of cost composition as its core methods to systematically review the energy demands and cost burdens of key processes such as evaporation crystallization, membrane separation, pretreatment, and concentrated brine resource utilization. By dividing the life cycle into stages, the study incorporates construction, operation, maintenance, and end-of-life disposal processes into a unified perspective, providing a clearer expression of the logic of cost formation, the proportion of energy consumption, and the economic role of resource utilization processes. The resulting analytical mapping shows that the evaporation unit contributes significantly to total cost, with its thermal energy consumption, equipment stability, and operational fluctuations imposing long-term economic pressure. Although membrane separation and pretreatment units can reduce the evaporation load, their dependence on chemicals and replacement frequency introduce ongoing expenditures throughout the life cycle. The quality stability and application pathways of resource-derived products have a significant moderating effect on end-of-life costs.

**Keywords:** coal-to-liquid wastewater; zero discharge; life cycle assessment; energy consumption structure; cost evaluation

近年来, 我国煤制油化工行业发展迅速, 发展煤制油化工对于缓解中国石油、天然气等优质能源的供求矛盾、保障国家能源安全、促进国民经济发展具有重要作用<sup>[1]</sup>。其中, 煤制油产业链在废水管理方面面临高盐度、高硬度与复杂有机组分叠加的结构特征, 使零排放成为行业关键节点。由于零排放系统涉及多级蒸发、浓盐资源化、膜浓缩及预处理环节, 能耗集中、运行成本高、设备折旧重叠, 使其经济表现常呈现跨阶段差异。传统经济测算方法难以捕捉系统的动态成本变化, 尤其在建设阶段与运行阶段之间, 成本形成机制存在显著差异。因此, 以全生命周期为分析轴线, 将能耗流、物质流与经济流统一表达, 能够揭示系统成本的动态结构, 为优化零排放系统提供更科学的决策依据。

### 1 零排放系统生命周期结构与成本形成机制

#### 1.1 生命周期阶段划分与成本边界界定

零排放系统的成本结构呈现阶段分化特征, 各阶段的功能定位不同, 引入的经济负荷也存在差异。建设期的成本主要由设备购置、土建工程与工艺集成构成, 蒸发器、膜组件、预处理装置与场站基础设施在这一阶段集中投入, 使固定成本成为主要支出来源。在运行期, 成本来源开始转向能量输入、药剂补充与设备运行稳定性维护, 其中蒸汽、电力与化学品消耗构成长期成本负荷。

运行期的特点在于周期性支出持续累积, 形成影响全生命周期表现的主导因素。维护期涉及组件更换、膜材料更新、蒸发器除垢与在线校准等工作, 其成本波动取决于设备衰减速率与运转强度。终端处置阶段

的成本则由废弃膜组件、结晶残渣及部分不可资源化物质的安全处置构成，其支出虽不连续出现，却会在生命周期末端集中体现<sup>[2]</sup>。在不同阶段设定成本边界，可使系统在经济建模时具备清晰的成本归属，使后续能耗结构评估能够围绕阶段性负荷展开。

### 1.2 工艺链特征对能耗结构与成本路径的影响逻辑

零排放系统的能耗来源呈现明显的工艺链依赖性，其中蒸发链对整体能量需求的贡献占据核心地位。蒸发装置以相变分离为基础，其能耗集中在热量输入、传热效率维持与循环泵送，使热能负荷成为驱动成本曲线变化的重要因素。膜分离链在压力驱动下运行，能耗以电力消耗为主，并伴随周期性的化学清洗与膜衰减投入，使其长期支出呈现逐步积累的趋势。资源化链在处理高盐浓液时需要配置固液分离、物相调整与产品稳定化设备，能耗结构相较蒸发链较低，但其成本则受到产品纯度、设备连续性与分离效率影响。

### 1.3 废水性质参数与系统成本敏感性关系

废水性质是影响零排放系统能耗强度的重要变量，参数变化会显著影响设备负荷并直接改变成本分布。高盐度废水在蒸发阶段形成的沸点升高效应，会使蒸汽需求量上升，同时加速蒸发器的结垢速率，引发清洗频率增加，造成运行费用与维护费用同步提升。硬度参数的增加会促进膜表面积垢，缩短膜组件使用周期，使替换成本在生命周期中占比扩大。高有机负荷废水在预处理阶段需要增加混凝、氧化与生化处理投入，导致化学品消耗与污泥处理成本提升；另外，有机组分可能在蒸发过程中发生焦化，使换热效率下降，使能源利用率偏离设计值，在成本预测中形成不确定性区间。不同参数间的组合效应会进一步放大系统成本波动，使零排放系统在面对水质变化时表现出高度敏感性<sup>[3]</sup>。因此，在成本评估中引入水质参数的敏感性分析，可帮助构建更稳健的经济模型，使经营者能够提前识别成本峰值风险并对工艺结构进行适应性调整。

## 2 多单元工艺的能耗拆解方法与成本评估模型

### 2.1 蒸发与深度浓缩环节的能耗—成本拆解模型

蒸发与深度浓缩单元在零排放系统中承担相变分离任务，其能耗结构呈现高度集中的热力学特征。加热蒸汽的供给量取决于进水盐度、沸点升高效应与传热面结垢速度，使蒸发负荷在运行周期中呈现明显波动。蒸发器的换热效率下降会导致热能补偿量持续增加，使蒸汽成本在运行阶段成为稳定的支出来源。设备折旧成本则与蒸发器材质、换热管寿命及循环负荷相关，特别是在高硬度、高硅环境下，其结构磨损速度可能加快，使折旧呈现阶段性跃升。深度浓缩段在

高盐母液条件下运行时，循环泵的能耗显著升高，使电力负荷在蒸发链成本结构中的占比上升。操作波动带来的成本不确定性也需要纳入评估，包括进水水质变化引起的沸点偏移、压力调整与除垢计划频率变化，使该单元的成本模型具有动态性<sup>[4]</sup>。

### 2.2 预处理体系的辅助能耗与成本平衡机制

预处理体系以调节废水可处理性为目标，其能耗特征分布相对分散，但在整个系统中发挥关键的负荷调节作用。软化与除硬单元通过离子交换、化学沉淀或碳酸盐调节，使下游设备承受的结垢压力降低，减少蒸发器与膜系统的能耗峰值，使后续单元的长期运行成本更为平稳。混凝与沉降环节通过化学品投加与搅拌设备运行完成固液分离，其能耗由搅拌机负荷、投加系统能耗与污泥处理工序构成。尽管预处理能耗整体较低，但其对下游负荷的削峰作用会在系统级成本评估中形成放大效应，使其在全生命周期的经济贡献具有隐藏性质。

## 3 资源化路径的成本调节功能与经济性评价

### 3.1 浓盐水资源化产品的成本抵消能力

浓盐水的资源化利用在零排放系统中具有结构性的经济调节作用，其核心在于通过物相分离与产物利用，使部分处理成本转化为可回收价值。高盐母液经无机盐分离后可获得多种低杂质含量的产品，如氯化钠、硫酸钠或复合盐类，其稳定性取决于蒸发深度、初始水质与分离流程的精准度。产品纯度越高，其在化工、建材或工业填料领域的可进入性越强，从而在成本结构中形成明确的抵消通道。母液的深度利用可通过蒸发—结晶耦合、选择性析晶或离子调控形成新的资源化路径，使原本难以处理的高盐浓液转化为具备市场属性的固体产物。资源化产物的价值并非固定，而是由区域需求、产业链配套程度与产品等级决定，其经济作用会在系统运行周期中呈现波动<sup>[5]</sup>。

### 3.2 不同资源化路线下的生命周期成本差异

资源化路线的差异会在生命周期中形成完全不同的成本轨迹，其成本差异主要来源于处理深度、设备组合方式、能源供给结构与产物应用方向。浅层资源化路径关注部分无机盐的回收，工艺链短、能耗强度相对较低，但产品附加值有限，使其抵消能力偏弱。深层资源化路径则依赖更完整的分盐、结晶与纯化流程，对能量、化学品与设备稳定性提出更高要求，使运行成本与维护成本同时增加。产品应用方向对成本表现具有关键影响，当产品能够进入高品质市场时，其经济回收能力显著高于用于低技术含量填料场景的路径，使生命周期成本呈现截然不同的走向。处理规模则直接影响设备折旧成本与单位能耗水平，大规模

系统更容易形成规模效应,使单位处置成本下降,而小规模系统受限于负荷波动、设备利用率不足,单位成本可能显著提升。不同资源化组合在生命周期内形成的成本差异,说明资源化路线不仅是技术选择问题,更是影响经济性的核心变量。

### 3.3 资源化过程中的环境负荷成本与替代效益

资源化过程不仅提供经济收益,同时能够削减环境负荷,使环境成本在系统中得以重新分配。高盐母液若不进行资源化,将在终端处置阶段引入显著的环境压力,包括储存、固化与潜在渗漏风险,使防渗系统、监测系统与长期管理形成持续成本。而资源化路径能够减少终端残渣体量,使环境管理费用在生命周期中呈现下降趋势。材料替代效益体现在资源化产物能够替代部分天然矿物材料,使开采需求减少,从而减少其相关的能耗与环境治理负担。替代效益在成本模型中体现为“外部成本的内部化逆向影响”,即资源化产物的使用使系统在全生命周期内减少了来自外部环境的间接支出。为了将环境负荷与经济收益有效纳入综合成本评价,需要构建具有量化能力的评估框架,包括环境损害系数、替代价值系数与资源效益加权表达,使资源化路径在经济性评价中具备更全面的解释力。

## 4 系统优化策略与生命周期成本控制路径

### 4.1 热能回收效率提升与蒸发体系负荷调节策略

蒸发单元在零排放系统的能耗结构中占据极高比例,热能回收效率的提升直接影响单位处理成本的高低。换热网络的设计若缺乏匹配性,就会导致蒸汽品位利用不充分、二次蒸汽回收力度偏弱、冷热物流温差偏离最佳区间,使运行负荷被迫提高。通过重新构建换热矩阵并引入多效蒸发布局,可使蒸汽的利用路径更加紧凑,从而形成低压蒸汽梯级利用、二次蒸汽跨单元回流的模式,使热量在系统内多轮循环。

蒸发比例调整关系到热量分布与设备负载,当母液盐度波动时,蒸发深度应通过实时负荷模型进行调节,以避免高盐段蒸发导致传热衰减或蒸发器表面结垢速率升高。负荷调节涉及进料浓度预测、蒸发温差控制、结垢形成速率判定等多维参数,使优化过程呈现动态性<sup>[6]</sup>。

### 4.2 生命周期成本最小化的多目标优化模型

在零排放系统中,能耗、折旧、资源化收益与环境成本均具有独立的变化路径,使成本评估呈现多维特征。多目标优化模型的构建旨在使不同目标之间的矛盾在数学空间内得到协调。能耗目标关注电力、蒸汽与循环水的消耗曲线,其变化受到进水水质、工艺组合与设备状态的影响。折旧目标与设备投资、使用寿命及负荷波动紧密相关,当系统压力分布不均或维护节奏异常时,折

旧成本会在时间轴上重新排列。资源化收益依赖盐分分离的纯度、结晶量稳定性与产品市场需求,使其在生命周期中的增长幅度具有不确定性。

环境成本涉及废渣量、残液成分与排放削减效益,需要构建具有时间尺度的量化指标<sup>[7]</sup>。多目标模型通过权重设定、蒙特卡洛模拟或非线性规划工具,使这些变量在迭代过程中逐步收敛,使单位处理成本维持在相对平衡的区间。

## 5 结语

煤制油废水零排放系统作为高度耦合的多单元工艺体系,其经济压力由能耗、折旧、资源化收益与环境负荷共同塑造。研究以全生命周期视角为主线,将建设阶段、运行阶段与处置阶段的成本结构统一表达,使成本形成路径得到清晰刻画。分析表明,蒸发单元仍然是能耗峰值所在,并在生命周期中承担了显著的成本支出,其影响因素包括热能回收效率、设备稳定性与蒸发负荷波动。膜分离单元在降低蒸发压力方面发挥重要作用,但化学清洗频率、膜衰减速率及运行压力对成本形成具有持续影响。预处理系统在整体成本结构中具有“前置调节”作用,其优化程度直接影响下游能耗。资源化路径是系统成本改善的关键变量,其收益能够在一定范围内抵消运行成本,并影响生命周期经济结构的可持续性。综合来看,构建以能耗—成本耦合关系为核心的优化策略,可为行业实现零排放目标提供工程路径,同时为未来工艺迭代、设备升级与资源化布局提供理论基础。随着能源结构转型与资源化技术成熟度提高,煤制油废水零排放系统的生命周期成本有望进一步降低,形成更具竞争力的可持续发展路线。

### 参考文献:

- [1] 魏江波. 煤制油废水零排放实践与探索 [J]. 工业用水与废水, 2011,42(05):70-75.
- [2] 张延斌. 现代煤制油化工生产废水零排放的探索与实践 [J]. 科技创新导报, 2017,14(22):122-124.
- [3] 王伟. 煤直接液化项目污水零排放工艺应用与探讨 [J]. 煤化工, 2019,47(02):54-57.
- [4] 马海龙, 孙治江. 现代煤制油煤化工生产废水零排放的探索和实践分析 [J]. 清洗世界, 2022,38(01):46-48.
- [5] 石永胜, 胥经辉. 煤制油废水零排放实践与探索 [J]. 石化技术, 2016,23(02):146.
- [6] 吴秀章. 现代煤制油化工生产废水零排放的探索与实践 [J]. 现代化工, 2015,35(04):10-16+18.
- [7] 朱玲, 冯相昭, 孔佳雯. 基于生命周期评价 LCA 的煤制油生产过程分析 [J]. 洁净煤技术, 2018,24(02): 119-126.