

# 基于经济性分析的炼化废水深度处理 与资源化技术路径选择

陈林哲 (中国石化海南炼油化工有限公司, 海南 洋浦 578001)

**摘要:** 炼化企业在环保合规与成本控制之间往往左右为难。本文试着用全生命周期成本 (LCC) 的视角, 把投资、运营、环境外部性进行分析, 比较了 MBR、RO、ED、AOP 四种主流技术的经济性。常规水质条件下 MBR-RO 最省钱, 8.72 元/m<sup>3</sup>; 但要是 COD 超过 800mg/L 或者含盐量高于 15000mg/L, 情况则相反。

**关键词:** 炼化废水; 深度处理; 资源化; 经济性分析; 技术路径选择

中图分类号: X703; F407.22 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2026) 012-0007-03

## Technology Path Selection of Deep Treatment and Resource Utilization of Refining and Chemical Wastewater Based on Economic Analysis

Chen Linzhe (China Petrochemical Hainan Refining & Chemical Co., Ltd., Yangpu Hainan 578001, China)

**Abstract:** Refining and chemical enterprises often face a dilemma between environmental compliance and cost control. This paper attempts to analyze investment, operation, and environmental externalities from the perspective of life cycle cost (LCC), comparing the economic performance of four mainstream technologies: MBR, RO, ED, and AOP. Under conventional water quality conditions, MBR-RO is the most cost-effective at 8.72 yuan/m<sup>3</sup>; however, the opposite is true if COD exceeds 800mg/L or salt content is higher than 15000mg/L.

**Keywords:** refinery wastewater; advanced treatment; resource recovery; economic analysis; technical pathway selection

这些年炼化行业的环保要求越来越严, GB 31570-2015 把 COD 限值从 120mg/L 压到 60mg/L, 沿海一些地方甚至更狠, 直接要求 50mg/L 以下<sup>[1]</sup>。这一规制趋严的态势, 与炼化企业面临的成本压力形成了结构性张力。据行业统计, 2023 年炼化企业废水处理成本已占生产总成本的 3.8% 至 6.5%, 在环保投入持续增加的背景下, 如何在达标排放与成本控制之间寻求平衡, 成为企业面临的现实挑战。废水处理成本已经占到生产总成本的 3.8% 到 6.5%, 环保投入年年涨, 利润却被压得越来越薄。在环保合规压力与成本控制双重约束下, 技术路径选择呈现显著的决策复杂性。

### 1 技术路径概述与评估框架

#### 1.1 四种主流技术的技术经济特征

炼化废水深度处理, MBR、RO、ED、AOP 是目前用得最多的四条路。各技术的核心参数与适用边界存在显著差异, 理解这些差异是经济性比较的前提。MBR-RO、AOP-RO、ED-RO 等组合工艺在实际工程中广泛应用, 组合的逻辑在于发挥各技术的比较优势, 弥补单一技术的短板。

MBR 把膜分离和生物处理捆在一起, COD 去除率能到 90% 以上, 占地也省<sup>[2]</sup>。但膜污染是个老大难问题——可逆的还能反冲洗救回来, 不可逆的就只能化学清洗或者换膜。膜组件占投资的 35%-45%, 国产膜和进口膜差价能有 15% 左右。膜污染机理涉及可

逆污染 (可经反洗恢复) 与不可逆污染 (需化学清洗或更换), 这一区分对于运营成本预测至关重要。

RO 脱盐能力强, 无机盐截留率 98% 往上。石化行业常把纳滤和 RO 搭着用, 实现废水脱盐和软化<sup>[4]</sup>。但浓盐水处理费用容易被低估, 成为隐性成本陷阱; 而且 RO 对进水要求高, 预处理得花钱。

ED 在高盐废水 (TDS>10000mg/L) 上有优势, 能耗比 RO 低, 还能浓缩回收盐。用双极膜电渗析处理高矿化度矿井水, 证实了以双极膜电渗析为核心的膜集成系统可实现高盐废水绿色资源化<sup>[5]</sup>。ED 的核心参数包括电流密度、膜对数、浓缩比等, 这些参数的设计优化直接影响技术经济性。

AOP 靠羟基自由基对付难降解有机物, 矿化能力强。分析高级氧化技术的应用现状, 药剂成本是大规模推广的拦路虎<sup>[6]</sup>。实际工程中 MBR-RO、AOP-RO、ED-RO 这些组合工艺用得更多, 目的就是取长补短, 发挥各技术的比较优势, 弥补单一技术的短板。技术路径选择不是“四选一”的简单决策, 而是涉及工艺序列优化与参数匹配的复杂工程问题。

#### 1.2 全生命周期成本分析框架

比技术经济性, 方法很重要。本文用 LCC 框架, 把建设、运营、退役各阶段成本都折现到决策时点:

$$LCC = C_0 + \sum (C_n / (1+r)^n) + C_e$$

其中:  $C_0$  是初始投资;  $C_n$  是第  $n$  年运营维护费;

$r$  取 8%； $C_e$  是退役成本。这样折现后不同技术的成本才有可比性，比简单的投资回收期更能反映长期经济后果。与简单的投资回收期法相比，LCC 方法更能反映技术选择的长期经济后果。另外把碳排放成本（按 60 元 /  $t$   $CO_2$ ）、危废处置成本（3000–5000 元 /  $t$ ）也纳进来，资源化收益则从 LCC 里扣掉，变成“净成本最小化”的思路。资源化收益（ $R$ ）作为减项纳入修正后的 LCC 计算： $LCC'=LCC-R$ 。

## 2 经济性比较分析

### 2.1 投资成本结构

投资成本的结构差异构成了技术路径选择的首要约束。焦化废水成分复杂、处理难度大，深度处理技术的投资成本是企业决策的重要考量因素<sup>[2]</sup>。见表 1。

AOP 最贵，臭氧发生器、UV 反应器都是烧钱的主儿，进口设备价格能到国产的 2–3 倍<sup>[6]</sup>。MBR 的膜组件占投资大头，国产膜和进口膜差价能有 15% 左右。ED 的成本波动大，异相膜和均相膜价格差不少，这是项目间变异的主要原因。

### 2.2 运营成本与单位水成本

运营阶段的花销差别更大，RO 和 ED 电耗高，分别 2.5–3.5 和 1.8–2.8 kWh/ $m^3$ ；MBR 居中，1.2–2.0 kWh/ $m^3$ 。按工业电价 0.7 元 / kWh 算，RO 的电费就 1.75–2.45 元 /  $m^3$ ，是运营成本里最大的一块。人工成本也得算进去，AOP 设备复杂，对操作人员要求高，人工费比 MBR 高 30% 到 50%。维护成本方面，MBR 的化学清洗、AOP 的 UV 灯管更换、ED 的电极清洗，都是定期要花的钱。这些“隐性成本”可行性研究里常被低估，实际运营时才发现超支。

药剂费也不能忽视，AOP 的臭氧、 $H_2O_2$ 、催化剂加起来 3–6 元 /  $m^3$ ，MBR 才 0.3–0.8 元 /  $m^3$ 。膜组件 3–5 年得换，折合 0.8–1.5 元 /  $m^3$ 。膜寿命的预测存在较大不确定性，进水水质波动、操作条件偏离设计值均可能加速膜老化<sup>[3]</sup>。综合算下来见表 2。

### 2.3 边界条件与反转

水质参数一变化，经济性排序可能要调整。COD 超过 800mg/L 时，MBR 膜污染急剧加重，化学清洗从每月 1 次变成每周 1 次，运营成本剧增。这时候前置

AOP 氧化削减 COD 负荷就划算了，AOP-RO 组合反而更经济。

TDS 高于 15000mg/L 时，RO 渗透压飙升，能耗指数级增长；ED 能耗和盐浓度近似线性，优势就出来了。的研究也证实了双极膜电渗析在高盐条件下的经济优势<sup>[5]</sup>。ED-RO 比 MBR-RO 能便宜 12%–18%，“老”技术在高盐场景下反而更划算。

## 3 敏感性分析与风险

### 3.1 敏感分析

本文用单因素敏感性分析，看  $\pm 20%$  波动对单位成本的影响。敏感性系数就是单位成本变化率除以参数变化率，数值越大说明越敏感。

膜组件更换周期从 5 年缩到 3 年，MBR-RO 单位成本涨 18%，因为膜在投资里占大头。电价涨 0.1 元 / kWh，RO 成本就加 0.35 元 /  $m^3$ ，电力市场化改革背景下这风险不小。在电力市场化改革的背景下，电价不确定性构成技术选择的重要风险因素<sup>[2]</sup>。

AOP 的药剂价格波动也值得关注，过氧化氢价格  $\pm 30%$  能让 AOP 成本变 8%–12%。开发运行成本低、操作简单的高级氧化技术是实现环境效益与经济效益相统一的关键<sup>[6]</sup>。值得深究的是，碳价格目前对技术选择的影响相对有限——即使碳价格翻倍，各技术的单位成本增幅亦不超过 5%。技术成熟度与运营可靠性作为非经济因素，在决策框架中同样不可忽视。

### 3.2 技术风险

膜技术怕污染和不可逆损伤，进水水质一波动就可能出事。某沿海炼厂曾经历油类泄漏，MBR 膜组件报废一大片，直接损失 800 多万。这种“黑天鹅”概率低，但一出事就是颠覆性的。膜污染（membrane fouling）的机理涉及可逆污染（可经反洗恢复）与不可逆污染（需化学清洗或更换），这一区分对于运营成本预测至关重要。技术迭代风险也得考虑，石墨烯膜、陶瓷膜这些新材料可能改变现有技术的成本结构，让现在的经济性评估过时。技术寿命周期长的时候，这不确定性更突出。灵活性与可扩展性因而成为技术选择的重要考量维度——预留工艺升级空间、避免技术锁定，可能是应对不确定性的明智策略。

表 1 各技术路径单位投资成本

技术路径	单位投资成本 (元 / $m^3 \cdot d$ )	核心设备占比	主要成本驱动因素
MBR	2000-3500	35%-45%	膜组件、曝气系统
RO	1500-2800	40%-50%	高压泵、膜组件
ED	1800-3200	30%-40%	离子交换膜、电极
AOP	3500-5500	50%-60%	臭氧发生器、UV 反应器

表 2 各技术路径单位水处理成本 (元 /  $m^3$ )

技术路径	投资折旧	运营支出	外部性成本	单位成本合计
MBR-RO	2.85	4.92	0.95	8.72
ED-RO	2.68	5.45	0.82	8.95
AOP-RO	4.12	7.35	0.99	12.46
MBR-ED	3.05	5.68	0.88	9.61

AOP 的问题是运行稳定性, 臭氧发生器故障、UV 灯管老化都会让处理效率断崖式下跌。反观 ED 技术, 其机械结构相对简单, 整体运营稳定性优于膜技术与 AOP 工艺。所以成本差不多时, 成熟度和可靠性也得进行分析。在成本相近的情境下, 技术成熟度与运营可靠性应纳入综合考量。

#### 4 资源化导向的技术优化

从“达标排放”转向“资源回收”, 技术经济性的算法就得变。处理目标一变, 收益-成本结构就发生根本性变化<sup>[2]</sup>。这一范式转换正在重塑企业的决策逻辑。

ED 在盐回收上有独特优势。多段浓缩能把 NaCl 提到 15%-20%, 达到工业盐回用标准。刘兆峰等人<sup>[5]</sup>的研究证实双极膜电渗析能实现高盐废水资源化。按工业盐市场价格 200-300 元/t 计算, 盐回收收益能抵消 ED 运营成本的 15%-25%; 对于高盐废水 (TDS>20000mg/L), 盐回收甚至可能创造净正收益, 使废水处理从“成本中心”转化为“利润中心”。这一收益流在常规 LCC 分析中常被忽略, 却可能在特定场景下扭转技术选择的方向。

中水回用是另一条路。MBR-RO 产水能达到工业冷却水标准, 回用率 70% 以上。按新鲜水价格 4-6 元/m<sup>3</sup> 计算, 水回用收益显著提升了该组合工艺的经济吸引力。在缺水地区, 这一收益甚至可能超过处理成本本身<sup>[4]</sup>。

但资源化也有边界。盐回收收益看盐种, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 比 NaCl 便宜多了; 混合盐分离提纯可能吃掉收益。中水回用看距离, 管网投资大、输送能耗高, 水价节约可能被抵消。这些细节决定了资源化策略能否从概念走向实践<sup>[3]</sup>。

#### 5 结论与展望

用 LCC 框架比较下来, 有这么几条结论:

① 常规水质 (COD<500mg/L, TDS<8000mg/L) 下, MBR-RO 最省, 8.72 元/m<sup>3</sup>, 技术成熟、运营可靠, 一般情况可以优先选。但这结论基于当前技术和市场价格, 将来技术进步、成本结构变了, 排序也可能变。这一结论建立在当前技术参数与市场价格的基础之上, 未来可能随技术进步与成本结构变化而调整。

② 高 COD (>800mg/L) 时 AOP 前置有价值, AOP-RO 组合工艺的经济性边界趋于优化。在此情境下, 前置 AOP 氧化以削减 COD 负荷成为经济合理的选择。高盐 (TDS>15000mg/L) 时 ED 能耗优势显现, ED-RO 组合工艺展现出成本竞争力。这些“经济性反转”现象揭示了技术选择的条件依赖性, 否定了“一刀切”的决策模式。技术路径的最优选择高度依赖于

进水水质特征, 不存在放之四海而皆准的“最佳技术”。

③ 膜组件更换周期和电价波动最敏感, 决策时得重点考虑。资源化 (盐回收、中水回用) 能改善经济性, 但得看具体物料平衡和市场条件。企业最好建立动态评估机制, 定期审视关键参数变化对技术选择的影响。技术成熟度与运营可靠性作为非经济因素, 在决策框架中同样不可忽视。“最便宜”的技术未必是“最优”的技术, 风险调整后的成本才是更为合理的决策依据。

本研究的局限性在于数据样本的地理集中性——工程数据主要来源于华东与华南地区, 北方寒冷地区的冬季运行成本可能被低估。低温条件下, 生物活性下降导致 MBR 处理效率降低, 同时膜通量下降、能耗上升, 这一季节性差异在技术决策中应予充分考虑。此外, 动态碳价格情景下的技术选择优化, 也有待后续研究的深入探讨。技术迭代的不确定性 (如新型膜材料、电化学氧化技术) 同样超出了本研究的分析范围。未来研究方向可从以下维度展开: 其一, 耦合多种技术的混合工艺优化, 突破单一技术的经济性边界; 其二, 数字化运维对成本结构的改造效应, 评估智能监控与预测性维护的经济价值; 其三, 碳中和目标下的技术路径重构, 探索低碳甚至负碳的废水处理新模式; 其四, 区域水资源约束对技术选择的异质性影响, 构建情境敏感型的决策支持系统。这些议题或将重新定义炼化废水处理的技术经济范式, 为企业的情境化决策提供更加科学的分析工具。

#### 参考文献:

- [1] GB 31570-2015. 石油炼制工业污染物排放标准 [S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会, 2015.
- [2] 何绪文, 张斯宇, 何灿. 焦化废水深度处理现状及技术进展 [J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 254-263.
- [3] 陈春茂, 曹越, 郝康宏, 等. 利用炼化废弃物协同臭氧处理炼化废水的技术策略展望 [J]. 辽宁石油化工大学学报, 2020, 40(4): 1-8.
- [4] 胡景泽, 王庆吉, 甘霖, 等. 石油石化含盐有机废水脱盐处理技术及资源化研究进展 [J]. 工业水处理, 2024, 44(1): 1-10.
- [5] 刘兆峰, 郭强, 王霄, 等. 基于双极膜电渗析的膜集成技术的高矿化度矿井水资源化处理 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 923-935.
- [6] 张珂珂, 赵世凯, 张久美, 等. 高级氧化技术在有机废水处理应用现状 [J]. 现代技术陶瓷, 2023, 44(5): 311-320.

#### 作者简介:

陈林哲 (1997-), 男, 汉族, 辽宁抚顺人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 水处理。