

煤制烯烃分离工艺技术路径选择的经济性评价模型构建与实证研究

何 忠 (国能新疆化工有限公司, 新疆 乌鲁木齐 831400)

摘 要: 本文聚焦煤制烯烃分离工艺技术路径选择的经济性, 先梳理顺序分离法、前脱乙烷工艺、前脱丙烷工艺的原理与特征, 再构建“目标层-准则层-指标层”三级评价指标体系, 结合层次分析法确定权重, 进而搭建多维度耦合评价模型。以某 60 万 t/a CTO 项目为实证对象, 测算三种工艺的绝对与相对效益指标。结果表明, 前脱乙烷工艺经济性最优, NPV 达 18.2 亿元、IRR13.8%, 综合得分 82.5 分, 为同类项目工艺选择提供科学依据。

关键词: 煤制烯烃; 分离工艺; 经济性评价

中图分类号: TQ221.2

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 031-0010-03

Construction and Empirical Study of Economic Evaluation Model for Technological Path Selection of Coal to Olefin Separation Process

He Zhong (CHN Energy Xinjiang Chemical Co., Ltd., Urumqi Xinjiang 831400, China)

Abstract: This article focuses on the economic feasibility of selecting the technology path for coal to olefin separation. Firstly, the principles and characteristics of sequential separation method, pre ethane removal process, and pre propane removal process are sorted out. Then, a three-level evaluation index system of “target layer criterion layer index layer” is constructed, and the weights are determined by combining the Analytic Hierarchy Process. Finally, a multi-dimensional coupled evaluation model is built. Using a 600000 ton/year CTO project as the empirical object, calculate the absolute and relative benefit indicators of three processes. The results showed that the pre ethane removal process had the best economic efficiency, with a NPV of 1.82 billion yuan IRR13.8%, The comprehensive score is 82.5 points, providing scientific basis for process selection in similar projects.

Keywords: coal to olefin; Separation process; Economic evaluation

1 煤制烯烃分离工艺技术路径梳理与对比

1.1 主流分离工艺技术原理与流程

作为传统工艺, 依组分沸点“先轻后重”分离。粗烯烃先入脱甲烷塔 (-160°C 至 -150°C 、 2.0MPa 至 2.5MPa) 脱甲烷、氢气; 塔底物料入脱乙烷塔分乙烷-乙烯与丙烷-丙烯- C_4^+ ; 前者经乙烯精馏塔得乙烯 (乙烷可回用), 后者入脱丙烷塔, 再经丙烯精馏塔得丙烯, C_4^+ 作副产品。其优势是流程成熟、稳定性高, 技术积累与运维资源丰富; 但需低温操作致制冷能耗高, 多塔设计使设备多、占地大、投资高, 高甲烷原料下经济性差。改良自顺序分离法, 优先分离 C_2 及以下轻组分。粗烯烃入前脱乙烷塔 (-70°C 至 -60°C 、 2.5MPa 至 3.0MPa), 塔顶 C_2 混合物脱甲烷后提纯乙烯, 塔底 C_3 混合物经脱丙烷塔、丙烯精馏塔得丙烯。该工艺降低脱甲烷塔负荷与温度, 制冷能耗降 15%-20%, 设备减 10%-15%、投资降低, 对 C_2 含量适应性强, 是国内新建项目主流选择。粗烯烃入前脱丙烷塔 (20°C 至 30°C 、 1.0MPa 至 1.5MPa), 塔底 C_3 混合物经脱丁烷塔、丙烯精馏塔得丙烯, 塔顶 C_2 混合物提纯乙

烯。其能耗最低 (较前脱乙烷降 10%-15%), 低压操作降设备成本; 但仅适用于 $\text{C}_3 \geq 40\%$ 、 $\text{C}_4^+ \leq 15\%$ 的 MTO 装置, CTO 装置中分离效率低, 原料波动超 $\pm 5\%$ 易现“液泛、漏液”, 稳定性弱。

1.2 技术路径关键特征对比

技术特征上, 顺序分离法稳定性最优 (波动容忍度 $\pm 8\%$)、复杂度最高; 前脱乙烷工艺兼顾稳定 ($\pm 6\%$) 与复杂度, 温度适中; 前脱丙烷工艺复杂度最低、稳定性最差 ($\pm 3\%$), 依赖原料组分。经济特征上, 顺序分离法单位投资约 2800 元/t、能耗 280kg 标煤/t; 前脱乙烷工艺投资 2500 元/t、能耗 230kg 标煤/t; 前脱丙烷工艺投资 2200 元/t、能耗 190kg 标煤/t, 但 CTO 装置中收率较前脱乙烷低 3%-5%。环境特征上, 碳排放依次为 1.8、1.5、1.2t CO_2 /t 烯烃, 顺序分离法废水固废多, 治理成本是前脱丙烷工艺 1.5 倍。综上, 顺序分离法适用于原料波动大、稳定性要求高的老旧装置改造; 前脱乙烷工艺适用于 40-80 万 t/a、原料均衡的新建 CTO/MTO 项目; 前脱丙烷工艺仅适用于高 C_3 、组分稳定的大型 MTO 项目。

2 煤制烯烃分离工艺经济性评价指标体系构建

2.1 指标体系设计原则

2.1.1 系统性原则

指标体系既要投资、运营、能耗、产品、环境等方面应全部包含,相互联系为有机整体,又要避免由于个别指标的缺失而出现评价片面的情况,如果评价中仅仅考虑投资成本而不重视能耗成本,可能会出现短期内投资低而运营中能耗成本偏高,从而导致长期效益较低的项目。

2.1.2 科学性原则

指标的定义和计算应遵循相应行业的定义和经济理论逻辑,保证其数据来源可核查性和逻辑性,如指标“单位产品投资”的定义不能简单地直接等于投资总金额,而应明确定义为分离系统的投资总额除以烯烃产能,“产品收率”的定义不能取乙烯产品收率而应定义为乙烯和丙烯综合收率,以此避免出现指标统计口径的问题。

2.1.3 可操作性原则

指标体系中选择的数据为指标体系便于进行统计和计算的参数,不宜用“环境友好度”等定性数据来表示指标的内涵,指标的选择还应尽量控制在 10 ~ 15 个主要指标之内,以保证评价全面且便于计算。

2.2 评价指标体系框架

基于上述原则,形成以“目标层-准则层-指标层”结构的“3 层 4 准 12 指标”评估指标框架。其中,目标层为煤制烯烃分离工艺技术路径经济性综合评价,运用多指标评估以测算和判断不同技术路径的经济可行性与优劣排序。

准则层为投资成本、运营成本、能耗水平、产品收率、环境影响 5 个方面的分析维度,是影响分离工艺全生命周期的 5 大主要经济影响因子。指标层针对各个准则层下的 12 项具体细化指标进行深入剖析,其中,投资成本准则层具体包括单位产品投资(元/吨烯烃)和投资回收期(年),代表项目的初期投资成本、资金回流期长短;运营成本准则层包括单位产品运营成本(元/吨烯烃)、原料单耗(吨原料/吨烯烃)、人工成本(万元/年),代表项目日运营的经济成本压力大小;能耗水平准则层包括单位产品综合能耗(kg 标煤/吨烯烃)、电力单耗(kWh/吨烯烃),代表项目能源消耗所带来的长期经济性影响;产品收率准则层包括乙烯收率(%)、丙烯收率(%)、综合收率(%),代表项目目标产品的提取效率;环境影响准则层包括单位产品碳排放强度(吨 CO₂/吨烯烃)、环境治理成本(万元/年),代表项目环境成本对效益的反抵消作用。

2.3 指标权重确定方法

指标的权重基于对指标判别矩阵通过 AHP 与专家评分法求得,从主观经验与客观数据两个角度兼顾。先组织由包括煤制烯烃企业技术总工、设计院工艺总工、高校教授、行业协会研究员组成专家组,采用 1—9 标度法(1 同等重要、9 极端重要)两两对各项准则层、指标层重要性进行判断,并构建判断矩阵。

判断矩阵一致性检验得到一致性指数 CI 和一致性比率 CR 值,CI<0.1 即被认为通过,不再继续迭代。如在准则层中,投资成本和运营成本的标度为 3(投资较重要),运营成本与能耗水平的标度为 2(重要程度相等),经计算得到 CI=0.042,CR=0.038<0.1,满足要求。

最后对判断矩阵进行特征根计算得到准则层各层的权重,投资成本的权重最大(0.32),次为运营成本(0.25)、能耗水平(0.20),产品收率(0.15)与环境影响(0.08)权重偏小;对指标层进行特征根计算,得到单位产品投资(0.18)、单位产品运营成本(0.15)、单位产品综合能耗(0.12)权重最大,占比较大(45%),是影响经济性评价的主要指标。

3 煤制烯烃分离工艺经济性评价模型构建

3.1 模型构建思路与假设

模型遵循“数据输入-指标计算-综合评分-结果排序”流程,先收集投资、成本等基础数据,经行业基准参数标准化后算指标得分,结合权重得综合得分,按得分排序(得分越高经济性越优)。为保证合理性与可比性,设多项假设:以 60 万 t/a 项目为基准,40 万 t、80 万 t 项目规模系数分别为 0.85、1.15;原料煤价 800 元/t、乙烯 8500 元/t、丙烯 8200 元/t,价格波动用价格系数调整;项目计算期 15 年(含 2 年建设期),基准收益率 8%,残值率 5%;企业所得税 25%,享“三免三减半”优惠;电力、蒸汽分别按 0.1229kg 标煤/kWh、0.1286kg 标煤/kg 折算为综合能耗。

3.2 核心评价模型

绝对效益指标含净现值(NPV)、投资回收期(PBP)、内部收益率(IRR)。NPV 按分离系统投资(单位产品投资×产能×规模系数)、年运营成本(单位运营成本×产能+人工+环境成本)、年产品收益(产销值-原料成本)计算,折现净现金流量得 NPV(NPV>0 可行);静态 PBP 为分离投资÷年均净现金流,动态 PBP 需折现后插值计算;IRR 为使 NPV=0 的折现率(高于 8% 可行)。相对效益指标通过极值法标准化(正向指标:(实际值-最小值)/(最大值-最小值)×100,负向反之),再加权求和得综合得分,用于排序。

3.3 模型参数校准与验证

参数校准选取3家不同工艺企业2021–2023年数据,调整偏差参数:顺序分离法单位投资因国产化率差异,从2800元/t校准为2920元/t;前脱乙烷工艺能耗因负荷率,从230kg标煤/t修正为243kg;前脱丙烷工艺收率因原料纯度,从88%修正为86.8%。以40万t/a MTO项目验证,实际分离投资7.6亿元、能耗195kg标煤/t等,模型计算值偏差均<2%(如NPV偏差1.6%、IRR偏差1.8%),满足行业≤5%的精度要求,模型可靠。

4 实证研究:某煤制烯烃项目分离工艺技术路径选择

本次实证研究以某新建年产60万t煤制烯烃项目为对象,该项目采用CTO工艺路线,其粗烯烃原料中C₂含量为35%、C₃含量28%、C₄⁺含量18%、甲烷含量19%,通过前文构建的经济性评价模型,对顺序分离法、前脱乙烷工艺、前脱丙烷工艺三种主流技术路径展开系统评价,为项目工艺选择提供量化依据。

4.1 实证项目基础数据

实证项目的算例数据采用项目可行性研究报告和行业调研的数据,3种工艺的代表性参数均已知。顺序分离法单位产品投资2920元/t烯烃,单位产品运行费用1200元/t烯烃,工人费用2800万元/年,单位综合能耗280kg标煤/t烯烃,电量能耗850kWh/t烯烃,乙稀回收率34%,丙烯回收率26%,综合回收率60%,单位产品二氧化碳强度1.8t CO₂/t烯烃,环境治理费用1500万元/年。前脱乙烷工艺单位产品投资2500元/t烯烃,单位产品运行费用1050元/t烯烃,工人费用2400万元/年,单位综合能耗243kg标煤/t烯烃,电量能耗720kWh/t烯烃,乙稀回收率36%,丙烯回收率27%,综合回收率63%,单位产品二氧化碳强度1.5t CO₂/t烯烃,环境治理费用1200万元/年。前脱丙烷工艺由于项目是CTO路线,粗烯烃中的C₃的含量低,收率大幅降低,因此,单位产品投资2200元/t烯烃,单位产品运行费用980元/t烯烃,工人费用2100万元/年,单位综合能耗193kg标煤/t烯烃,电量能耗600kWh/t烯烃,乙稀回收率30%,丙烯回收率25%,综合回收率55%,单位产品二氧化碳强度1.2t CO₂/t烯烃,环境治理费用1000万元/年。

4.2 相对效益指标测算

相对效益指标测算通过指标标准化与权重耦合完成,首先确定各指标在三种工艺中的最大值与最小值,单位产品投资最大值2920元/t、最小值2200元/t,单位产品运营成本最大值1200元/t、最小值980元/t,单位综合能耗最大值280kg标煤/t、最小值193kg标

煤/t,综合收率最大值63%、最小值55%,IRR最大值13.8%、最小值8.2%。随后计算各指标标准化得分,以前脱乙烷工艺为例,单位产品投资标准化得分约58.3分,综合收率与IRR标准化得分均为100分。最后结合指标权重加权计算综合得分,前脱乙烷工艺综合得分约82.5分,顺序分离法约56.3分,前脱丙烷工艺约61.8分。

4.3 实证结果分析

在绝对效益指标方面,前脱乙烷工艺的NPV和IRR水平都是最高的,静态PBP最低,其相对效果明显优于其余两种分离路径;而前脱丙烷工艺虽然投资额和运营成本都最低,但受其大幅度降低的收率影响,其NPV和IRR也是最低的,仅仅略高于基准收益率;顺序分离法由于其投资和能耗水平太高而被认为不具有较好的经济性。而在相对效益指标方面,则是前脱乙烷法的相对效果远高于顺序分离法和前脱丙烷法的,原因在于该法在上述最重要的投资、能耗节约和产品收率等指标上都表现得比较优越,并且其结果与项目CTO路线的原料情况基本能够吻合。因此,考虑到经济效益的绝对效应和相对效应均处于很好的技术适应水平,60万t/a CTO项目的分离技术路径选择为前脱乙烷工艺。而同样地,这种从分离路径、工艺和设备选择到分离技术路径的选择均有效符合我国CTO项目的建设现状。

5 结论

通过分析发现采用3种分离工艺条件不同,顺序分离法应用于原料不平衡的老装置,前脱丙烷工艺只适于高C₃超大型MTO项目,前脱乙烷工艺最适合40~80万t/a均衡原料的新装置。建好的指标体系和耦合模型计算偏差<2%,可靠度高。该研究可用于煤制烯烃项目工艺选择的量化手段,为用能单位控制成本、效益最大化,引导产业绿色发展。

参考文献:

- [1] 李俊.煤制油费托合成产物烯烃分离工艺研究[J].山西化工,2017,37(04):28-30+63.
- [2] 李靠昆.煤制烯烃项目节能策略的探究[J].现代化工,2017,37(07):6-9.
- [3] 张云涛.烯烃分离装置工艺流程及其优化[J].山西化工,2017,37(03):63-65.
- [4] 刘建荣.煤制烯烃项目烯烃分离装置工艺流程优化研究[J].中国石油石化,2016,(21):103-105.
- [5] 曹博雅,田涛.煤制烯烃行业烯烃分离尾气回收技术[J].化工管理,2022(15):54-56.
- [6] 胡竞民,张亚婷.基于层次分析法的煤化工项目技术经济评价模型研究[J].洁净煤技术,2020,26(04):192-198.