

石油化工工艺中催化剂的应用及经济性

李媛媛 孙蕊 黄美玉 (山东绿十字高邦职业安全咨询事务所有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要: 本文系统研究石油化工工艺中催化剂的应用及经济性。首先阐述催化剂的基本概念与作用机制, 深入分析其在催化裂化、催化重整、加氢等核心工艺中的应用特性, 明确不同工艺对催化剂性能的要求。通过构建涵盖成本、效益、技术指标的经济性评价体系, 运用层次分析法 (AHP) 和模糊综合评价法 (FCE) 确定权重并评估, 结合净现值 (NPV) 模型进行量化分析, 为石油化工企业选择催化剂、优化生产工艺提供理论与实践依据, 助力提升行业经济效益与可持续发展能力。

关键词: 石油化工; 催化剂; 催化工艺; 经济性评价

中图分类号: TQ426 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 021-0049-03

Application and economics of catalysts in petrochemical processes

Li Yuanyuan, Sun Rui, Huang Meiyu (Shandong Green Cross Gaobang Occupational Safety Consulting Firm Co., Ltd., Qingdao Shandong 266000, China)

Abstract: This paper systematically studies the application and economic efficiency of catalysts in petrochemical processes. Firstly, it expounds the basic concepts and action mechanisms of catalysts, deeply analyzes their application characteristics in core processes such as catalytic cracking, catalytic reforming, and hydrogenation, and clarifies the performance requirements of catalysts for different processes. By constructing an economic evaluation system covering cost, benefit, and technical indicators, using the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Fuzzy Comprehensive Evaluation Method (FCE) to determine weights and conduct evaluations, and combining with the Net Present Value (NPV) model for quantitative analysis, this paper provides theoretical and practical basis for petrochemical enterprises to select catalysts and optimize production processes, helping to enhance the economic benefits and sustainable development capabilities of the industry.

Keywords: Petrochemical industry; Catalyst; Catalytic process; Economic evaluation

近年来, 全球石油化工产业规模持续扩张, 我国作为石油化工大国, 产业发展迅速, 在国民经济中占据重要地位。石油化工产品广泛应用于能源、材料等多个领域, 深刻影响社会发展与民生。在石油化工生产中, 催化剂作为核心要素, 能显著降低反应活化能、加快反应速率, 对提升产品收率、优化工艺和降低成本至关重要。

数据显示, 超 90% 的石油化工产品生产依赖催化剂^[1]。不同类型催化剂在性能、成本和适用工艺上差异显著, 其选择与应用直接关系企业经济效益和市场竞争力。因此, 研究石油化工工艺中催化剂的应用及经济性, 对行业技术创新和可持续发展意义重大。

1 催化剂基本概念与作用机制

1.1 催化剂定义与分类

催化剂是一种能够改变化学反应速率, 而自身在反应前后质量和化学性质不发生改变的物质。根据存在形式和反应体系, 催化剂主要分为均相催化剂和多相催化剂。均相催化剂与反应物处于同一相态, 如在液相反应中溶解于反应物的酸碱催化剂, 其优点是活性中心均匀, 反应速率快, 但分离回收困难。多相催化剂与反应物处于不同相态, 常见的是固体催化剂用于气-固相或液-固相反应, 如石油化工中广泛使用

的分子筛催化剂, 其优势在于易于分离和重复使用, 在工业生产中应用更为广泛^[2]。

1.2 催化剂作用原理

催化剂通过降低反应活化能()来加快反应速率。根据阿累尼乌斯公式:

$$K = A_e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

其中, k 为反应速率常数, A 为指前因子, R 为气体常数, T 为温度, 在相同温度下, 活化能降低会使反应速率常数 k 显著增大。催化剂通过与反应物分子发生特异性吸附, 形成中间产物, 改变反应路径, 使反应沿着活化能更低的途径进行。例如, 在催化裂化反应中, 催化剂吸附重质烃分子, 使其在活性中心发生裂解反应, 生成轻质油品。

1.3 催化剂选择性的影响

催化剂的选择性决定了目标产物的收率和产品质量。高选择性催化剂能够使反应物优先发生目标反应, 减少副反应的发生。在催化重整工艺中, 钯-铼催化剂对环烷烃脱氢反应具有高选择性, 可有效提高芳烃产率; 在加氢工艺中, 加氢脱硫催化剂能选择性地脱除油品中的含硫化合物, 同时尽量减少其他组分的损失, 从而提升产品质量, 满足环保标准要求。

2 石油化工工艺中催化剂的应用分析

2.1 催化裂化工艺中的催化剂应用

2.1.1 催化裂化工艺原理及流程

催化裂化以减压馏分油、渣油等重质油为原料，在约 500℃ 高温及催化剂作用下，将大分子烃类裂解为轻质油品。其流程为：原料油加热至 350℃~400℃ 后，与 650℃~700℃ 的再生催化剂在提升管反应器内快速混合，1s~4s 内完成裂化反应。产物进入沉降器与催化剂分离，再经分馏塔分离为不同馏分。失活催化剂在再生器中通过烧焦恢复活性，实现循环利用^[3]。

2.1.2 FCC 催化剂的组成与性能特点

FCC 催化剂由 Y 型分子筛（20~40%）、基质（黏土等，40~60%）和粘结剂构成。Y 型分子筛的微孔结构和酸性中心可吸附大分子烃类并促进 C-C 键断裂；基质提供机械强度并容纳重金属；粘结剂保障催化剂高温流化稳定性。工业级 FCC 催化剂需满足活性指数 ≥ 65、比表面积 ≥ 180m²/g、磨损指数 ≤ 3.0% 等指标。

2.1.3 催化剂对轻质油品收率和质量的影响

催化剂活性与选择性直接影响轻质油品收率与质量。高活性催化剂可提升裂化速率，良好选择性能抑制副反应，优化产品品质。某企业采用新型超稳 Y 型分子筛催化剂后，汽油收率从 65.2% 升至 68.5%，液化气收率增加 2.3%；同时，汽油烯烃含量从 38% 降至 28%，辛烷值从 90.5 提升至 92.8，达到国 VI 排放标准。

2.2 催化重整工艺中的催化剂应用

2.2.1 催化重整工艺的目的与反应类型

催化重整以石脑油（C6~C11）为原料，通过环烷烃脱氢（占比 40~50%）、烷烃环化脱氢（占比 20~30%）、异构化（占比 20~30%）等反应，生产高辛

烷值汽油调和组分（辛烷值 ≥ 95）、芳烃（苯、甲苯、二甲苯，简称 BTX）及氢气。其中，环烷烃脱氢反应是芳烃的主要来源，异构化反应则通过将正构烷烃转化为异构烷烃提升汽油辛烷值。

2.2.2 铂-铼等贵金属催化剂的作用

铂-铼双金属催化剂（铂含量 0.2~0.3%，铼含量 0.1~0.2%）是催化重整的核心。铂作为活性中心，通过吸附氢气促进脱氢反应；铼能够抑制铂晶粒烧结，延长催化剂使用寿命；载体 γ -Al₂O₃ 表面的氯改性酸性中心则促进异构化反应。通过调控铂铼比例及氯含量（1.0~1.2%），可将芳烃产率提升至 35~45%。

2.2.3 催化剂使用寿命及再生性能对工艺的影响

催化剂积碳、氯流失及金属中毒是导致失活的主要原因。通过在线烧焦（空气流量控制在 15~20Nm³/h）、氯化更新（注入三氯乙烷，流量 0.5~1.0kg/h）等再生技术，部分炼化企业可将催化剂使用寿命从 2 年延长至 5 年，装置运行周期从 18 个月提升至 36 个月，每年节约催化剂更换成本约 2000 万元。

2.3 加氢工艺中的催化剂应用

2.3.1 加氢工艺原理

加氢工艺涵盖加氢精制和加氢裂化，通过氢气与催化剂协同作用，脱除油品中硫、氮、氧杂质及重金属，并饱和烯烃、芳烃。以加氢脱硫（HDS）为例，在 300℃~400℃、3MPa~8MPa 条件下，含硫化合物（如噻吩类）与氢气反应生成硫化氢，脱硫率可达 99% 以上，满足欧 VII 标准（硫含量 ≤ 10ppm）。

2.3.2 加氢催化剂的活性组分与载体

加氢催化剂通常以 Mo-Ni（活性组分含量 15~25%）或 Co-Mo（含量 12~20%）为活性中心，负载于 γ -Al₂O₃ 载体（比表面积 200~300m²/g）。活性组分经预硫化处理后形成金属硫化物，提高加氢活性；

表 1 石油化工催化剂经济性评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标
成本指标	催化剂采购成本	催化剂单价（万元/吨）、年采购量（吨）
	催化剂使用成本	年损耗率（%）、再生费用（万元/次）
	辅助成本	设备维护费（万元/年）、能耗成本（元/吨原料）
效益指标	产品质量效益	辛烷值提升（单位）、硫含量降低（ppm）
	产量效益	轻质油收率提高（%）、总产量增加（万吨/年）
技术指标	催化剂活性	反应速率提升倍数（%）
	催化剂选择性	目标产物选择性（%）
	催化剂稳定性	半衰期（月）、活性衰减率（%/月）

载体提供大比表面积以分散活性组分，增强机械强度。工业级加氢脱硫催化剂孔容 $\geq 0.4\text{cm}^3/\text{g}$ ，平均孔径8–12nm。

2.3.3 催化剂对加氢反应深度和产品质量的影响

采用新型Ni–Mo–W催化剂后，部分加氢裂化装置柴油十六烷值从48提升至53，硫含量从500ppm降至8ppm；同时，通过优化孔径分布，重石脑油收率提高5%，氢气消耗降低10%，实现产品质量与经济效益双提升。

3 石油化工催化剂的经济性评价体系构建

3.1 评价指标体系建立

本研究构建的石油化工催化剂经济性评价指标体系包括成本、效益和技术三大类指标（表1）。成本指标涵盖催化剂采购成本（单价、数量）、使用成本（损耗量、再生成本）和辅助成本（设备维护、能耗）；效益指标包括产品质量效益（纯度提升、杂质降低）和产量效益（收率提高、总产量增加）；技术指标反映催化剂活性、选择性和稳定性^[4]。

3.2 评价方法选择

采用层次分析法（AHP）确定指标权重。首先构建层次结构模型，将目标层（催化剂经济性评价）、准则层（成本、效益、技术指标）和指标层（具体三级指标）依次排列；然后通过专家打分法构建判断矩阵，计算各指标权重。运用模糊综合评价法（FCE）对催化剂经济性进行综合评价，将定性指标转化为定量评分，处理指标的模糊性和不确定性。

3.3 经济性评价模型构建

采用净现值（NPV）模型评估催化剂应用的经济性，公式为：

$$\text{NPV} = \sum_{t=0}^n \frac{(B-C)_t}{(1+r)^t}$$

其中，NPV为净现值，B为效益现金流（包含产品质量提升、产量增加带来的收益等），C为成本现金流（包含催化剂采购、使用及辅助成本等），t为年份，n为项目寿命期，r为折现率。当NPV>0时，表明该催化剂应用方案在经济上可行；NPV值越大，方案经济性越好^[5]。

4 石油化工催化剂应用与经济性提升策略

4.1 技术创新策略

加大研发投入，鼓励企业与科研机构合作，开发新型高性能催化剂。例如，针对催化裂化工艺，研发具有更高活性和选择性的纳米级分子筛催化剂，进一步提高轻质油收率和产品质量；在加氢工艺中，探索新型金属–载体相互作用机制，开发高活性、长寿命的加氢催化剂。同时，利用人工智能和机器学习技术，

加速催化剂设计与筛选过程，缩短研发周期。

4.2 优化管理策略

建立完善的催化剂全生命周期管理体系，从采购、使用、再生到报废进行精细化管理。在采购环节，综合考虑催化剂性能与价格，通过招标等方式选择优质供应商；使用过程中，实时监测催化剂活性、选择性等指标，根据变化及时调整工艺参数；再生阶段，优化再生工艺，提高再生效率和质量，延长催化剂使用寿命。此外，加强企业内部人员培训，提高操作人员对催化剂性能和使用要求的认识，减少因操作不当导致的催化剂失活。

4.3 经济协同策略

基于构建的经济性评价体系，企业在选择催化剂时，不仅要关注产品质量和产量提升带来的效益，还要综合考虑成本因素。通过对比不同催化剂应用方案的净现值（NPV）、投资回收期等指标，选择经济最优方案。同时，加强与上下游企业的合作，实现资源共享和协同发展，降低生产成本。

4.4 绿色发展策略

随着环保要求日益严格，开发环境友好型催化剂成为趋势。在烷基化工艺中，推广固体酸催化剂替代传统液体酸催化剂，减少废酸污染；在加氢工艺中，研发低能耗、低排放的加氢催化剂。此外，加强催化剂生产过程中的环保管理，降低生产环节的污染物排放，实现石油化工产业的绿色可持续发展。

5 结论与展望

本研究剖析了石油化工工艺中催化剂的应用特性，明确不同工艺对其性能要求。通过层次分析法、模糊综合评价法和净现值模型构建经济性评价体系，科学评估应用方案可行性，并提出提升策略助力企业增效。未来，催化剂研究将围绕新型环保催化剂开发、纳米与人工智能技术应用展开。同时，完善经济性评价体系，融入碳排放等因素建立动态模型，深化催化剂应用与工艺融合，推动行业可持续发展。

参考文献：

- [1] 张明. 石油化工催化剂技术进展与应用 [J]. 化工进展, 2022, 41(08):4183-4192.
- [2] 李华, 王勇. 多相催化剂在石油化工中的应用研究 [J]. 现代化工, 2021, 41(11):15-19.
- [3] 刘刚. 催化裂化工艺优化与催化剂性能提升研究 [J]. 石油炼制与化工, 2023, 54(03):45-51.
- [4] 陈红, 赵强. 化工催化剂经济性评价指标体系构建与应用 [J]. 化工管理, 2020, (27):89-91.
- [5] 周伟. 基于净现值模型的化工项目投资决策分析 [J]. 当代化工研究, 2022, (16):139-141.