

烯烃催化裂解技术的研究现状与未来展望

陈小军（国能新疆化工有限公司，新疆 乌鲁木齐 831401）

摘要：在全球炼化产业深度调整与碳约束持续加严的双重驱动下，烯烃催化裂解技术正加速从实验探索迈向产业部署。本文聚焦该技术在中国语境下的经济适配性、产业化路径及未来发展逻辑，系统梳理其装置演进、催化剂创新、与传统路线（蒸汽裂解、PDH、MTO）之间的经济对比，强调其在碳价机制、原料多元化与化工园区协同下的系统优势。催化裂解不仅具备良好的成本结构与政策耦合潜力，更在构建低碳高效烯烃产业体系中展现出结构性增益价值。

关键词：催化裂解；轻质烯烃；丙烯；碳资产

中图分类号：TE624.41 文献标识码：A

文章编号：1674-5167（2025）028-0007-03

Research status and future prospect of olefin catalytic cracking technology

Chen Xiaojun (Guoneng Xinjiang Chemical Co., Ltd., Urumqi Xinjiang 831401, China)

Abstract: Driven by the global refining industry's profound restructuring and escalating carbon constraints, olefin catalytic cracking technology is rapidly transitioning from laboratory exploration to industrial deployment. This study examines the economic viability, industrial pathways, and future development logic of this technology within China's context. It systematically analyzes the evolution of catalytic units, catalyst innovations, and economic comparisons with traditional routes (steam cracking, PDH, MTO), while highlighting its systemic advantages under carbon pricing mechanisms, feedstock diversification, and synergistic operations within chemical industrial parks. Catalytic cracking not only demonstrates favorable cost structures and policy alignment potential but also reveals structural value-added benefits in building a low-carbon, high-efficiency olefin industry system.

Key words: catalytic cracking; light olefin; propylene; carbon assets

烯烃，尤其乙烯与丙烯，是现代化工产业链的基石产品。然而，当前全球主流的蒸汽裂解工艺正面临能耗高、碳排放重、装置刚性大等结构性掣肘。在资源错配与碳规制日益强化的背景下，传统工艺路径的边际收益不断压缩，催化裂解以其低温运行、可调产品谱与原料适应性强等特征，成为全球产业转型中的关键突破口。近年来，催化裂解不仅在技术维度上取得突破，更在经济性、融资友好度和园区协同价值方面释放出强烈信号。本文将探讨该技术体系的结构价值与未来演进方向，为政策制定与企业布局提供决策依据。

1 烯烃市场格局与供需趋势

1.1 全球与中国烯烃市场概况

2024年，全球乙烯产能触及2.39亿t，产能扩张仍在延续，但新增装置集中于北美、中东等原料低价区，导致全球平均开工率回落至84.5%。在此格局下，中国以年产3493.4万t稳居全球首位，产业规模已跃至“转型关口”。尽管多个央企预测2030年国内总产能或突破8000万t，但边际收益递减与需求天花板开始显现。

在此背景下，“单纯扩大”已难维系原有投资逻辑，原料适应性与产品结构调控能力成为竞争焦点。催化裂解以其装置灵活性和丙烯/乙烯比可调性，在

传统路径之外形成差异化竞争，逐渐进入主流化工投资考量。

1.2 丙烯短缺与产业链重塑

丙烯正由传统“副产”跃升为产业链利润焦点。2024年全球新增产能建设明显滞后，而消费侧受汽车内饰、包装膜材等中高端制品拉动，形成阶段性缺口，尤其东南亚与南亚市场供应波动显著。国内虽实现97%的自给率，但过度依赖丙烷脱氢（PDH）和甲醇制烯烃（MTO）等高能耗路径，使得供给韧性不足。叠加丙烷进口关税与碳价上涨，PDH工艺的经济性已被边缘化。部分炼厂开始以催化裂解技术处理重馏分，推动丙烯从油品中“抽利”，重构汽油—丙烯—聚丙烯（PP）价值链，有效抬升吨产品的边际收益率，并减轻炼油板块结构性过剩的压力。

1.3 碳约束对供需结构的深远影响

2024年底，全国碳排放权市场价格升至97.49元/t，较年初上涨逾两成。在此定价水平下，以蒸汽裂解为代表的高碳工艺，其单吨烯烃碳成本约176元，逐步逼近盈利下限。而催化裂解凭借中温操作和反应选择性优化，使碳强度控制在1.1t左右，仅需支出109元，形成每吨67元的“碳盈余”。

随着广东、上海等地将炼化企业纳入差异化配额管理，越来越多企业将低碳指标作为工艺选型的关键

门槛。催化裂解不再仅是能效优化工具，更成为面向政策合规、市场减碳和投资估值的战略支点，其应用意愿随碳价上涨曲线同步上扬，潜在市场规模随之被重新定价。

2 烯烃催化裂解技术发展现状与产业进展

2.1 技术路径演进与代表方案

烯烃催化裂解技术的发展路径呈现出从“副产提取”向“目标转化”的跃迁趋势，技术范式不断迭代，产业定位逐步上移。最初以催化裂化提烯（DCC）为代表的改进型流化床装置，主要通过提升裂化深度以增加丙烯产率，在维持汽油收率的同时实现副产升级。而后期以催化裂解制烯烃（OCC）与原油催化转化（RTC）为核心的专用路线，则借助催化剂—反应器耦合设计，推动整个反应体系在选择性、能效与碳效率之间寻找动态最优解。例如，中石化 OCC 路线通过“多段提升管 + 层级热耦合”的集成工艺，实现了 C4-C6 组分定向裂解转化为丙烯与乙烯，丙烯 / 乙烯比可调至 2.4，有效避开传统工艺结构性缺陷。与其并行，KBR 提出的 K-COT (Kinetic Cracking of Olefins Technology) 路线，则采用轻质烷烃进料，通过中孔催化剂实现精准控制碳键断裂模式，赋予产物谱高度灵活性。路径的演进并非单一趋利，更隐含全球资源结构与排放约束的深度博弈，未来发展必然呈现区域差异化与工艺模块化并行趋势。

2.2 催化剂体系的进展及其对产物经济性的影响

催化剂设计是催化裂解工艺的性能上限，也是其经济性释放的内核载体。当前主流方案围绕 ZSM-5 分子筛展开，聚焦于酸性调控、孔道结构优化与金属助剂引入等多重维度，推动“轻烯烃高选择性 + 副反应低活性”的协同控制机制建立。例如，片层状 ZSM-5 结构大幅缩短扩散路径，使中间产物二次裂解概率下降 30% 以上，直接提升乙烯与丙烯的收率与纯度；而磷掺杂修饰的酸性分布调整方案则有效抑制焦炭沉积与脱铝损耗，使催化剂活性周期提升超过 40%，降低单位产品的更换与再生成本。更具战略意义的是，含银或镧等助剂的引入为“脱氢 - 裂解”双功能路线提供工艺平台，使原料适应性从 C4-C10 拓展至 C12 以上，为未来原油直裂工艺（COTC）提供可行支撑。这类技术进展不仅是产率提升的技术路径，更是构建差异化盈利模式的核心支点，是打破成本与碳负荷对冲关系的重要变量。

2.3 中国催化裂解产业化进程

中国催化裂解技术的发展已逐步从试验装置走向产业级落地，具备规模化复制与技术输出能力。在过去几年内，DCC 与 OCC 类装置累计新建或改扩建项

目超过 18 套，涵盖沙特阿美（福建合资）、泰国 PTT 化工项目等多个海外输出案例，显现出本土工艺包的市场竞争力。例如，恒力石化依托自有芳烃一体化平台，实施催化裂解单元对接新材料中游，实现芳构化石脑油用于聚烯烃弹性体（POE）前驱体供应，有效提升整体装置毛利率 6% 以上。

另一方面，以浙江石化为代表的企业推进“原油直接催化转化”试验装置投运，在中低硫原油条件下实现烯烃收率超过 48%，为 COTC 模式的落地积累关键数据。催化裂解作为“高端低碳工艺”被纳入多地“先进化工技术鼓励目录”，预示未来在碳市场与产业基金支持下，将具备更强的融资与扩张弹性。在“双碳”逻辑与产品结构转型的双重压力下，其产业化进程既是市场选择的结果，也是政策引导下的路径演化。

3 催化裂解的经济性评估

3.1 投资成本与运营成本对比分析

从投资结构看，催化裂解装置在单位产能上的资本支出远低于传统蒸汽裂解，主要得益于其工艺条件温和、设备构造简化，反应温度区间通常控制在 650 - 750°C，无需大规模裂解炉系统与深冷分离链条。以 KCOT (Kinetic Cracking of Olefins Technology) 为例，其典型资本支出控制在 550 - 750 美元 /t 烯烃，相较于蒸汽裂解动辄 1000 美元以上的 CAPEX，节省幅度近三分之一。

运营成本层面，催化裂解在能耗、催化剂更换周期及 CO₂ 处理费用等方面的优势亦逐步凸显。尤其在碳排放定价日趋刚性的背景下，单位烯烃碳减排量可达 0.5t，对应节支 35 美元 /t 产品，为其带来“非显性红利”。资本轻量化、运营灵活性与碳规避能力的综合体现，使其在新建项目与老装置改造中获得较高的经济接受度。

3.2 与蒸汽裂解在不同市场场景下的盈利能力比较

催化裂解与蒸汽裂解的经济优劣并非一锤定音，而是随原料结构、产品结构及外部价格信号不断动态切换。蒸汽裂解在轻质原料充裕、对乙烯需求为主的地区如北美、俄罗斯具备成本优势；而在中重质油资源主导、丙烯需求扩张且碳约束显性化的市场，如中国、印度，催化裂解的适配性更强。其丙烯 / 乙烯比可调至 2.5 左右，尤其契合聚丙烯（PP）产业链高毛利周期，如 2024 年 PP 与石脑油之间的价差维持在 272 美元 /t，高于 HDPE 的“盈利警戒线” 296 美元 /t。在这种价差结构下，催化裂解可动态偏向丙烯方向调节出品构成，提升利润捕捉能力。同时，其副产高芳烃石脑油、C4 混烯等亦可转投高端化工品路线，强化装置整体盈收弹性。

3.3 与其他替代技术（如 PDH、MTO）的经济适配性

催化裂解的经济适应性优势，在资源结构复杂或产品灵活性要求高的场景中表现尤为突出。与以丙烷脱氢（PDH）为代表的专向丙烯技术相比，催化裂解具备原料多元、产品谱广的特征，能够在丙烷成本倒挂或丙烯过剩时期迅速切换至乙烯或芳烃方向，避免装置“单品依赖”风险。而相较甲醇制烯烃（MTO）这类煤基路线，其碳强度与能耗优势更显著，后者在当前碳交易机制加严背景下，面临较高外部化成本。PDH 与 MTO 多数为单一产物输出，虽在局部资源禀赋条件下具备成本竞争力，却难以形成上下游协同；而催化裂解装置则天然具备与炼厂、芳烃装置耦合的空间，在“化工岛”模式下可实现效益叠加，从而构建出具备结构弹性的长期盈利模型。

4 未来发展趋势与市场前景

4.1 技术商业化的关键挑战与政策推动路径

尽管催化裂解在能耗、碳强度和装置灵活性方面具备显著优势，但其商业化路径仍面临催化剂生命周期不稳定、反应热管理难度大及下游产品匹配不足等关键瓶颈。一方面，催化剂失活速率与裂解深度存在天然张力，产业界仍缺乏长期运行数据支撑稳定评估；另一方面，装置热耦合结构复杂，导致投资人在缺乏量产案例下对其规模效应与风险敞口持保留态度。在此背景下，政策的引导与保障作用不容忽视。国内“绿色低碳工艺目录”及“绿色制造体系建设指南”已将催化裂解纳入推荐方向，部分地方财政与碳基金为其提供前期贴息支持。同时，“碳资产化”趋势下，其每吨产品可节约碳支出 60 - 80 元的经济优势开始被项目融资机构认可，激活了企业技改投资意愿。可预见的是，未来催化裂解的商业推广将依赖于“政策 - 金融 - 园区”三位一体的协同推动逻辑，而非单一技术指标的最优化。

4.2 新能源电热耦合催化裂解的经济潜力

催化裂解本身所需热能相较蒸汽裂解已显著降低，而将其进一步与电加热方式融合，则为“零碳能源—低碳化工”构建了直接通路。在操作温度控制在 600℃ 以内的前提下，微波、电阻或感应加热不仅可实现热源精准供给，还能抑制局部过热所引起的副反应及焦炭积聚，提升装置稳定性。经济测算显示，当工业用绿电成本下探至 0.25 元/kWh（即约 40 美元/MWh）时，电热耦合裂解的单位轻烯烃生产成本（LCOE）将低于 700 美元/t，较蒸汽裂解有 8 - 10% 的成本压降优势，且不再依赖传统燃料。电热平台天然适配风光波动电，可作为“消纳型负荷”嵌入新能源基地，有效降低区域弃电率。这类热源结构的改变

不仅是降本手段，更是顺应能源结构转型、重塑化工能耗边界的必要跃迁，其落地时间窗口预计在 2027 - 2030 年间逐步打开。

4.3 与化工园区耦合的系统性收益

催化裂解的经济优势并非孤立体现，更在于其与园区系统协同下形成的资源耦合与价值延伸效应。在典型一体化化工园区中，其原料端可直接承接炼油装置的重整尾油、轻蜡油或 FCC 副产 C4-C10，实现原料闭环；产品端则可与下游聚烯烃装置共享丙烯、乙烯与石脑油，降低物流与库存成本。据测算，若催化裂解单元建于已有炼化平台上，其单位产能投资可再降低 10 - 15%，设备利用率提高 12% 以上，且催化剂更换与反应器检修可与园区计划停工期协同排布，显著降低运营中断风险。协同后的能量回收系统（如高温烟气余热）可用于蒸汽供应或换热网络，有效提升园区整体热效率。从财务视角审视，这种模式具备稳定现金流、较低杠杆风险和较高 ESG 评分，极具吸引力。当前中东与华东部分试点项目已显现此类耦合效益，验证其在“技术经济性 + 系统资源化”双重维度上的可行性与可复制性。

5 结语

催化裂解技术的快速演进，已不再是技术替代逻辑下的边缘选项，而是在能耗压力、碳排成本、丙烯短缺与产业一体化趋势驱动下，逐步确立其在全球烯烃产业链中的战略地位。从 DCC 到 OCC、再到原油直裂 COTC 路线，其路径拓展和产业集成能力不断强化。其与电热、园区、碳资产的高契合度，使其具备穿越油价与碳价周期的内在韧性。展望 2030 年后，催化裂解有望成为化工绿色转型中的关键锚点，其系统性经济价值仍有待进一步释放，值得学界与产业界持续关注和深度挖掘。

参考文献：

- [1] 潘丽鑫, 潘宇, 赵彦辉, 等. 低碳烯烃制备技术研究进展 [J]. 石油化工技术与经济, 2023, 39(4):42-45.
- [2] 侯凯军, 高金森, 马安, 等. 重油催化裂解制低碳烯烃工艺技术研究进展 [J]. 应用化工, 2022, 51(11):3278-3284.
- [3] 唐婷莹, 郑红霞, 陈曼桥, 等. 原油催化裂解制烯烃技术研究 [J]. 山东化工, 2024, 53(15):88-91.
- [4] 乔瑞琪, 龚剑洪, 魏晓丽. 催化裂解制低碳烯烃技术研究进展 [J]. 石油学报(石油加工), 2024, 40(6):1667-1676.
- [5] 滕加伟, 任丽萍. 烯烃催化裂解技术应用前景广阔 [J]. 中国石化, 2024(7):57-59.