

# 绿色催化技术在炼油化工节能降耗中的应用与经济性分析

钱 堃 洪芙蓉 (中海石油宁波大榭石化有限公司, 浙江 宁波 315000)

**摘要:** 绿色催化技术可是炼油化工行业节能降耗的核心底气, 它能把反应路径捋得更顺, 少耗点能、少产生些废料, 还能让资源利用更充分。这篇文章专门盯着催化裂化装置, 仔细说说绿色催化剂的实际用法——比如能创造低温、低压这种温和的反应条件, 还能让目标产物的选择性更强; 它不光能帮企业降低运营成本, 还能减轻对环境的影响, 这种一举两得的效果, 能给行业绿色转型提供实实在在的参考。正因为这样, 文章围绕绿色催化技术在炼化行业节能降耗的应用场景和经济性做了系统研究, 希望能给行业发展带来有用的借鉴。

**关键词:** 绿色催化技术; 炼油化工; 节能降耗; 应用要点; 经济性分析

**中图分类号:** TE624.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 003-0074-03

## Application and economic analysis of green catalytic technology in energy saving and consumption reduction of refining and chemical industry

Qian kun HongFurong(CNOOC Ningbo Da Xie Petrochemical Co., Ltd.Ningbo Zhejiang 315000, China)

**Abstract:** Green catalytic technology is the core of energy saving and consumption reduction in refining and chemical industry, which can smooth the reaction path, consume less energy, produce less waste and make full use of resources. This article focuses on the catalytic cracking unit, and talks about the practical use of green catalyst in detail—for example, it can create mild reaction conditions such as low temperature and low pressure, and make the target product more selective; It can not only help enterprises reduce operating costs, but also reduce the impact on the environment. This effect of killing two birds with one stone can provide a real reference for the green transformation of the industry. Because of this, this paper systematically studies the application scenarios and economy of green catalytic technology in refining and chemical industry, hoping to bring useful reference to the development of the industry.

**Key words:** green catalytic technology; Refining and chemical industry; Energy saving and consumption reduction; Key points of application; Economic analysis

当前炼化行业正面临碳排放强度偏高、能源资源约束越来越紧的严峻挑战, 技术创新已经成为绿色低碳转型的必经之路。绿色催化技术通过设计高效稳定、可循环利用的催化体系, 优化反应工况参数, 精准调控分子转化路径, 早已成为破解行业高能耗、高污染难题的关键手段。在这样的背景下, 本文打算系统解析该技术在催化裂化等核心装置中的节能降耗原理, 同时开展经济性评估, 为行业高质量发展寻找可行的路径。

### 1 绿色催化技术的相关概述

绿色催化技术说白了, 就是在化学反应过程中, 靠设计和使用高效催化剂, 让反应能在温和条件(低温、低压)下进行; 这样既能降低能耗、减少废物排放, 还能提高目标产物的选择性, 是种挺先进的技术模式。和传统催化技术比起来, 它的核心优势主要有三点: 一是效率高, 在低温低压环境下依然能保持高催化活性, 能明显加快反应速度; 二是选择性强, 能精准对接特定反应, 有效减少副反应发生, 让目标产物的收率更高; 三是够环保可持续, 要么用可再生资源来制备催化剂, 要么开发可循环的催化体系, 尽量降低对环境的影响。在炼化行业往绿色转型的过程中, 绿色

催化技术被公认为关键突破口。随着《石化化工重点行业严格能效约束推动节能降碳行动方案(2021-2025年)》的深入推进, 到2025年, 炼油、乙烯等行业里, 达到标杆水平的产能得占到相当规模, 碳排放强度也必须有明显下降。而绿色催化技术通过优化反应路径、降低能耗、减少废物排放, 正一步步推动整个行业稳步朝着绿色低碳、可持续发展的方向走。

### 2 催化裂化装置节能降耗的挑战与需求

催化裂化装置是炼油企业的核心枢纽, 同时也是能耗和碳排放的主要源头。现在原油越来越重、质量也越来越差, 催化裂化装置的节能降耗工作正面临不少严峻挑战, 具体体现在这几个方面: 装置的能耗主要集中在反应器再生系统、分馏系统和动力供应系统这三大核心环节; 反应器再生系统算得上是能耗核心, 催化剂再生时的烧焦过程要消耗大量燃料, 这部分能耗在装置总能耗里占了不小的份额; 分馏系统得完成油气冷凝冷却和精馏工况维持, 也是个不能忽视的能耗单元; 动力供应系统的能耗, 则主要来自风机、富气压缩机以及各类机泵运行时的电能消耗。

碳排放方面, 催化裂化装置是炼油厂碳排放网络里的关键节点, 它的碳排放量在全厂总排放量中占比

很突出；这主要是因为反应-再生系统的核心工艺中，催化剂烧焦会产生大量二氧化碳。再加上加工的原料越来越重、越来越劣质，催化剂结焦的倾向也越来越强，进一步推高了碳排放强度；叠加装置综合能耗一直降不下来的现状，让它成了炼油厂实现碳减排目标时必须重点攻克的核心环节。

原料适应性是催化裂化装置面临的关键难题。现在原油越来越重、质量也越来越差，里面的重金属、硫、氮还有残炭含量都大幅上升，这直接导致催化剂中毒失效的速度变快，焦炭的产生量也跟着增加，严重影响了装置的处理效率和运行周期；同时原料性质老波动，对工艺操作的稳定性也提出了更高要求。为了保证热平衡和产品分布符合标准，往往得依赖特定品质的原油，或者额外增加预处理的成本，这也进一步降低了装置应对复杂原料结构的灵活适配能力。

在污染物控制方面，催化裂化装置的烟气里含有二氧化硫、氮氧化物和颗粒物等污染物，末端治理设施运行起来要消耗大量能源，这就间接增加了装置的能耗和运营成本。而且环保法规越来越严格，污染物排放的控制标准也在不断提高，装置现在既要节能降耗，又得做到达标排放，两者之间的平衡压力变得越来越突出。

### 3 绿色催化技术在催化裂化装置中的具体应用

#### 3.1 催化剂创新与反应优化

绿色催化技术在催化裂化装置里的核心应用，主要集中在催化剂配方创新上。通过对分子筛进行改性、优化基质结构，再加上精准调控活性金属组分，既能系统性提升反应效率，又能同步降低能耗和排放。比如用高活性介孔 Y 沸石做活性组分，能让催化剂的介孔体积大幅增加，催化活性也明显提高，这样一来，重油大分子在孔道里的扩散和裂化效果更好；不仅汽油收率有所提升，焦炭产率还能相对下降。另外，研发富含 B 酸的中大孔硅铝载体材料，成功让载体的 B/L 酸比例超过 1，强化了 B 酸主导的理想裂化反应，在提高原料转化率的同时，也进一步降低了焦炭产率。这种偏向绿色的催化剂设计，不用改动核心工艺装置，从源头就能实现减少焦炭、降低碳排放的目标。

金属催化剂的创新应用效果也很显著，引入稀土和双金属协同体系就能让反应效率大幅提升。比如用铈、镧等稀土金属，搭配镍、铂等金属对 ZMQ-1 分子筛进行改性，控制金属总负载量在合理范围，就能优化酸性中心分布，把重质大分子的裂化温度降低几十摄氏度；还有把 Pt-Ru 双金属合金纳米颗粒（粒径 3.5-4.0nm）负载在 H-ZSM-5 分子筛上的体系，借助电子转移效应减少末端 C-C 键断裂，让低碳烯烃的选

择性明显提高，同时减少甲烷生成。这类催化剂通过精准调控金属活性位，在提升轻质油收率的同时，也让能耗和焦炭产率大幅降低。

#### 3.2 反应路径优化与过程强化

绿色催化技术通过反应路径优化推动催化裂化过程节能降耗，核心逻辑在于依托专用催化剂与反应工程创新，实现重质烃分子裂化选择性的精准调控。例如，变径流化床技术通过分区反应设计，第一区完成重油大分子初步裂解，第二区注入甲醇等含氧化合物促进烯烃深度转化，使丙烯产率提升至 21% 以上，同时将反应生焦量降低 2.49 个百分点；冷再生剂循环技术通过优化剂油比与反应温度参数，实现单位原料能耗降低 11.6 千克标油/t，同步使烟气中氮氧化物、硫氧化物浓度削减 30%-40%。此外，中孔分子筛催化剂的应用可显著抑制氢转移等副反应，使低碳烯烃选择性提升 15% 以上，在降低反应热负荷的同时，达成碳元素的高效定向转化。

#### 3.3 过程强化与系统优化

绿色催化技术对催化裂化装置的过程强化，核心是通过反应器创新和工艺优化两条路径实现的。比如快速流化床反应器，靠着独特的内部结构设计，打造出“拟全浓相、拟均速、拟均一温度”的反应环境，传质传热效率显著提升；不仅让丙烯产率大幅提高，还能把稀相温度降低约 20℃，助燃剂用量也能大幅减少。另外，应用提升管后部直连技术，能缩短油气停留时间，有效抑制二次反应，让干气产率降低一些，轻油收率也会跟着提升；再搭配冷热催化剂混合器精准调控再生催化剂温度，还能灵活调整反应苛刻度，持续降低能耗。

在系统优化方面，绿色催化技术以热量集成和能量梯级利用为核心，构建基于夹点分析的优化换热网络，让工艺物流和公用工程系统深度融合。实际应用中，会回收催化裂化反应器出口约 500℃ 的高温油气显热，用来预热进料或者产生中压蒸汽；同时利用分馏塔一中段 250-300℃ 的油流，给稳定塔、解析塔的再沸器提供热源，替代部分 1.0MPa 蒸汽，减少装置蒸汽用量。此外，通过 90-110℃ 的低温热循环水系统，回收塔顶油气的冷凝潜热，用来预热锅炉给水或者区域供热；再结合热泵技术提升低温余热品位，驱动精馏塔操作。让反应过程中的高品位热能，依次用于发电、产生蒸汽、工艺加热和低温供热，实现能源质量和效率的协同优化。

#### 3.4 污染物控制与资源化

污染物控制与资源化的核心逻辑，是依托先进绿色化学与催化技术，在末端治理工业生产有害物质的

同时,将其转化为高附加值资源,达成环境效益与经济效益的协同共赢。针对高浓度有机废水,催化湿空气氧化(CWAO)技术在180-320℃、0.5-20MPa工况下,借助Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等催化剂将有机污染物高效降解为CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O,对废水中氨氮(NH<sub>3</sub>)的脱除率超99%,残留有机组分可进一步转化为燃料或化工原料。废气治理领域,选择性催化还原(SCR)技术采用V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>催化剂体系,在300-400℃条件下将烟气中NO<sub>x</sub>还原为氮气,脱除率超过95%,同时副产硫酸铵等化学品。固体废弃物处理方面,通过水热转化或“绿电”催化技术(如光伏/风电驱动的电解过程),可将聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)废塑料转化为甲酸和氢气,每吨PET约产0.5t甲酸;同时实现二氧化碳资源化转化为甲酸燃料,构建碳资源循环利用体系。此外,针对氯苯等含卤素有机物,Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>催化剂催化的加氢脱氯技术可在温和条件下实现99.95%的脱氯效率,生成可回用的环己烷等产物。

#### 4 绿色催化技术在催化裂化装置中的应用前景

##### 4.1 分子炼油技术

分子炼油技术和绿色催化技术深度融合,是催化裂化装置走向高端化、绿色化的核心驱动力。这项技术靠AI大模型,能对原油里数万种分子做精准表征,还能模拟反应路径,搭建起分子级的反应网络,让催化裂化过程实现精准调控。比如集成了中孔ZSM-5分子筛的靶向催化体系,就能显著提高低碳烯烃的选择性,让丙烯产率有明显增幅,同时还能把焦炭产率降下来一些。未来,把数字孪生和实时优化系统融合进去,还能进一步智能调优反应温度、压力这些参数;既让装置能耗明显降低,又能灵活切换乙烯、丙烯这类目标产品的生产方案,给催化裂化装置朝着“碳中和”目标迈进提供核心支撑。

##### 4.2 智能催化优化

智能催化优化是绿色催化技术在催化裂化装置里实现精准智控的核心方向,它通过深度融合人工智能、数字孪生和多物理场耦合模拟,构建出“数据+机理”的混合驱动模型。这项技术能根据实时感知到的原料性质、反应温度、压力以及催化剂活性等参数,用深度学习算法动态优化操作条件;既能精准预测产物收率,比如让汽油收率提升一点,还能智能调控能耗。未来,随着大语言模型和强化学习技术的融入,智能系统还能提前预警结焦趋势,自主规避非计划停车;推动催化裂化装置从“经验驱动”变成“自主优化”的模式,最终实现装置长周期、低碳化的高效运行。

##### 4.3 生物化学协同催化

生物-化学协同催化给催化裂化装置的绿色升级

开辟了全新路径,它的核心逻辑就是把化学催化剂的高效裂解能力,和生物酶的高选择性转化优势结合起来。比如用仿生策略设计的人工酶(像EPO6),区域选择性和对映选择性都特别高,性能比传统化学催化好不少;而经过工程化改造的毕赤酵母,能把化学催化产生的中间体(比如二羟基丙酮),几乎全部定向转化成L-乳酸这类高值化学品。未来,搭建起“化学裂解-生物精制”的耦合流程,有望在温和条件下(比如不超过100℃、常压),让重油分子高效转化成生物基平台化合物;同时还能明显降低能耗,减少焦炭生成,推动炼化过程一步步朝着低碳化、精细化的方向发展。

##### 4.4 多功能集成催化

多功能集成催化是绿色催化技术在催化裂化装置中的关键发展方向,其核心逻辑在于将加氢、裂化、异构化等多元活性中心整合于单一催化剂体系,依托微孔-介孔协同的等级孔道结构,实现重油大分子的精准定向转化。例如,集成加氢功能的催化体系可在裂化反应同步进行时,使汽油烯烃含量降低5-10个百分点,同时实现20%-30%的原位脱硫效果,有效精简后续精制工艺流程。未来,通过精准调控活性位点的空间排布与酸性特征,有望在单一反应器内达成重油高效裂化、产品清洁化与焦炭选择性抑制的协同效应,推动炼化过程向低能耗、低排放的集成化模式转型。

#### 5 结束语

综上所述,绿色催化技术的实践应用不仅显著降低了炼化过程的能耗与污染物排放,更通过提升产品附加值创造了长期经济收益。未来,需要进一步深化催化剂创新与智能化工艺的深度融合,推进生物质原料替代及二氧化碳资源化利用,在“双碳”目标引领下实现环境效益与经济效益的协同提升,为炼油化工行业的可持续发展注入持续动能。

##### 参考文献:

- [1] 戴厚良,陈建峰,袁晴棠,刘佩成.我国化工石化产业绿色低碳转型发展研究[J].中国工程科学,2024,26(06):223-232.
- [2] 何盛宝.依靠科技创新支撑我国石化产业绿色低碳转型发展[J].当代石油石化,2024,32(09):1-10.
- [3] 王铃,黄丽敏,韩宇,韩伟,程薇,程钰丹.全球石油化工行业发展趋势及我国对策建议[J].中外能源,2024,29(09):1-8.
- [4] 李大东.我国炼油工业转型发展的技术策略[J].石油炼制与化工,2024,55(01):7-17.
- [5] 夏广.石油化工工艺中的催化剂研究与应用[J].现代盐化工,2023,50(06):28-31.