

低碳催化裂解技术下的丙烯增产综述

杨志濠, 马文硕, 陈梦鑫, 王敬贤, 田原宇*, 乔英云*

(中国石油大学(华东)化学化工学院, 山东 青岛 266580)

摘要:综述了 ZSM-5 分子筛在低碳催化裂解增产丙烯中的研究进展。通过结构、酸性和孔道调控,实现反应路径与丙烯选择性的优化;引入分级孔与金属负载以增强活性与稳定性。分析了烷烃与烯烃裂解机理差异及 β -裂解主导路径,探讨了副反应控制、短接触时间反应器及反应-分离一体化等强化策略。在双碳目标下,提出原料轻质化、电加热裂解及 CCUS 协同等低碳路径。指出催化剂失活与系统集成度不足等问题,并展望智能调控与闭环平台化发展方向。

关键词:丙烯;催化裂解;ZSM-5 分子筛;碳减排;绿色化工

中图分类号:TQ028;TQ424

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)10-0092-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.10.017

Catalytic cracking optimization for propylene yield in carbon-constrained scenarios

YANG Zhi-hao, MA Wen-shuo, CHEN Meng-xin, WANG Jing-xian, TIAN Yuan-yu*, QIAO Ying-yun*

(College of Chemistry and Chemical Engineering, China University of Petroleum (East China),

Qingdao 266580, China)

Abstract: This review summarizes advances in propylene-oriented catalytic cracking using ZSM-5 zeolite under low-carbon strategies. Structural, acidity, and pore regulation improve cracking selectivity and efficiency, while hierarchical pores and metal loading enhance activity and stability. The differences between alkane and olefin cracking and the β -scission pathway are discussed, along with process intensification via short-contact-time reactors and reaction-separation coupling. Under carbon-neutral goals, low-carbon pathways such as light feedstocks, electrically heated cracking, and CCUS integration are highlighted. Challenges in catalyst deactivation and system integration are identified, and future trends toward intelligent control and closed-loop optimization are outlined.

Key words: propylene; catalytic cracking; ZSM-5 zeolite; carbon emission reduction; green chemistry

丙烯(C_3H_6)是合成聚丙烯、丙烯腈及环氧丙烷等高附加值化学品的重要原料。近年来全球需求持续增长,预计 2030 年消费量将达 1.5 亿 t/a,较 2020 年增加逾 30%^[1]。目前工业生产主要依赖石脑油蒸气裂解和流化催化裂化(FCC)副产,其中蒸气裂解能耗高,碳排放大,不符合绿色化工与“双碳”目标要求。相比之下,催化裂解可在中低温下实现轻质烃高效转化,并通过调控催化剂结构与反应条件选择性生成丙烯和乙烯^[2]。ZSM-5 分子筛因具有规整微孔结构和可调酸性,在丙烯定向裂解中表现突出,是最常用的催化剂。其在 FCC 中作为助剂可显著提高丙烯产率并优化产品分布。近年来,研究者通过酸性调控、分级孔构建及金属负载等策略提升催化剂活性与稳定性^[3-5],并在反应-再生-分离一体化和短接触时间反应器等工艺强化方向取得进展。

然而,催化剂失活快、反应机理认知不足及系统集成度低仍是制约因素。为实现高效低碳丙烯生

产,研究逐渐转向 TCO 路径、CCUS 协同裂解、电加热反应及可再生能源耦合等低碳化新技术。因此,系统总结 ZSM-5 催化裂解增产丙烯的最新研究进展,对揭示结构-性能关系、优化反应路径及构建绿色化工体系具有重要意义。

1 ZSM-5 催化剂结构优化与性能调控

1.1 ZSM-5 分子筛结构特性与裂解优势

ZSM-5 分子筛是典型 MFI 型沸石,具有交错的 10 元环孔道和三维微孔骨架,赋予其优良的分子筛分与扩散能力^[6]。与 Y 型沸石相比,ZSM-5 兼具高热稳定性和可调酸性,在裂解中能有效抑制副反应,显著提升丙烯等轻烯烃选择性^[7]。其孔径约 0.55 nm,适配 $C_3 \sim C_5$ 烃分子,展现出突出的形状选择性效应。骨架铝的分布决定了 Brønsted 酸位点数量与强度,进而影响反应路径。若酸位过于集中,易形成积炭并缩短寿命;优化酸位点分布可提高活化效率并增强丙烯选择性^[8]。因此,结构与酸性的协

收稿日期:2025-11-28;修回日期:2026-08-11

作者简介:杨志濠(2002-),男,硕士,研究方向为轻质油品催化裂解,2003020124@s.upc.edu.cn;田原宇(1969-),男,博士,研究方向为含碳能源低碳化利用,通讯联系人,tianyy1008@126.com;乔英云(1969-),女,博士,教授,研究方向为碳基能源热化学转化与利用,通讯联系人,qiao_yingyun@126.com。

同调控成为 ZSM-5 提升抗结焦性与定向裂解性能的关键。

1.2 酸性调控策略与丙烯选择性关系

ZSM-5 的酸性来源于骨架铝,受 Si/Al 比调控。低 Si/Al 比虽可增强活性,却易诱发氢转移和芳构化副反应,降低丙烯收率^[3]。为实现平衡,研究者广泛采用磷改性、稀土修饰及多种后处理手段调控酸性。磷掺杂可钝化强 Brønsted 酸并提升水热稳定性,部分研究表明丙烯选择性提高超 10% 且积炭速率下降^[9-10]。稀土元素如 La、Ce 通过稳定骨架铝改善热稳定性和再生能力^[11]。此外,构建“核心强酸-壳层弱酸”结构,有助于抑制深度裂解和副反应,提升产物选择性^[12]。通过固相交换、定向生长和模板剂引导等合成策略,酸性调控已由“调量”走向“调构”,成为提升 ZSM-5 催化性能的重要途径。

1.3 孔结构调控与分子扩散路径设计

除酸性外,孔结构亦决定催化性能。ZSM-5 规整微孔虽具选择性,但限制了大分子扩散,易加快失活。构建分级孔结构(引入中孔或介孔)被证明可缩短传质路径、降低扩散阻力和积炭率,从而改善活性与再生性^[4]。例如,通过调节晶体尺寸与模板剂浓度,获得平均孔径约 7 nm 的分级 ZSM-5,在 C₄~C₇ 裂解中显著提升丙烯收率和抗失活性能^[13]。同时,晶体尺寸对扩散路径影响显著,纳米级 ZSM-5 因比表面积大、扩散距离短,可提高 C₃ 选择性,据报道晶粒控制在 200~300 nm 时效果尤为突出^[14]。总体而言,“分级化、短路径化、准定向化”孔道设计为 ZSM-5 性能优化提供了协同空间。

1.4 金属负载与协同催化路径开发

在结构和酸性调控之外,金属负载为 ZSM-5 裂解研究提供了新方向^[5]。贵金属如 Au、Pt 的引入可在低温下高效生成丙烯,并显著降低芳构化和积炭倾向。Wu 等^[15]将 Au 纳米颗粒负载于改性 ZSM-5 上,在 300~360℃ 即可获得 45.6% 丙烯选择性,同时抑制深裂与积炭,降低能耗并延长寿命。此外,Zn、Ga 等金属构建脱氢位点,扩展了其在重质烃裂解中的应用。该类双功能催化剂结合了 ZSM-5 的孔道选择性与金属组分的反应活性,表现出协同效应。金属负载策略不仅提高了催化剂在复杂环境下的稳定性,也为低碳高效烯烃生产提供了重要基础。

2 催化裂解路径与反应机理分析

2.1 烷烃与烯烃裂解路径对比

反应物结构直接决定裂解起始方式与产物分

布。如图 1 所示^[16],轻烷烃(如正丁烷、正己烷)多经“碳正离子-β 裂解”路径:在 Brønsted 酸位点质子化后形成碳正离子,继而 β—C—C 键断裂生成小烯烃及新碳正离子,引发链式裂解。该过程能垒高(180~220 kJ/mol),质子化为速率控制步骤^[16]。相比之下,烯烃因双键电子密度高,可与酸位点形成 π 复合物或羰离子中间体,活化能仅 120~160 kJ/mol,反应更易进行^[17]。ZSM-5 对 1-烯烃裂解尤具优势,表现为更高的丙烯选择性与速率。Wattanapaphawong 等^[18]比较 C₄~C₇ 烷烃与烯烃的裂解,发现烯烃起始温度更低,且随碳链增长,丙烯和乙烯选择性持续上升。

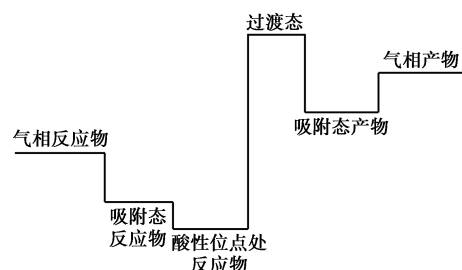


图 1 烷烃裂解势能示意图

由此可见,烯烃裂解在热力学和动力学上均优于烷烃。合理引入烯烃富集环节或采用脱氢-裂解耦合策略,有助于提升整体能效与丙烯产率。

2.2 丙烯生成的典型路径机制

丙烯的生成可由多个前体路径进入,如图 2 所示,主要包括:轻烃直接裂解(单体裂解),如正丁烷→丙烯+甲烷;烯烃裂解(链式反应),如 1-丁烯→丙烯+甲基自由基。

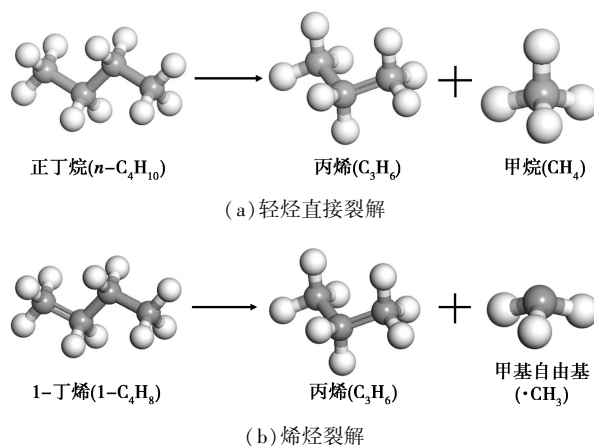


图 2 丙烯生成的主要反应路径示意图(球棍模型)

大分子碳骨架断裂(芳构化路径副产):非首选机制,但部分 FCC 中仍存在。

在多种机制中,β-裂解被广泛认为是实现高选

择性丙烯产出的关键,尤其在 ZSM-5 类催化剂体系中占据主导地位。其微孔限域效应抑制了深度裂解与二次反应,从而维持选择性。Guo 等^[17]通过 DFT 模拟揭示,1-烯烃裂解的 β -裂解路径能垒低且过渡态单一,具有明显的热力学优势。此外,不同取代基对烯烃前体的 C—C 键断裂活化能差异显著,如 1-丁烯与 2-丁烯的裂解性能差异直接影响丙烯收率^[19]。

综上,丙烯生成路径受前体结构、过渡态几何以及孔道环境多重制约,需通过微观动力学与多尺度调控实现高效裂解。

2.3 反应中间体与副反应路径控制

催化裂解中常伴随氢转移、芳构化和自由基链式裂解等副反应,导致烯烃收率下降与积碳增加。酸性过强或分布不均易促进氢转移,可通过磷修饰或构建“壳层弱酸-核心强酸”结构改善选择性并延长寿命^[12]。ZSM-5 的微孔环境在一定程度上抑制芳构化中间体生成,表现出较低芳烃率和更稳定的性能。

从系统角度看,副反应控制不仅依赖催化剂设计,还需结合操作条件与反应器优化,如温度、空速调节以及接触时间和热量分布控制。多维协同是提升选择性和碳效率的关键。

3 工艺流程优化与反应器系统设计

3.1 流化催化裂解(FCC)装置优化路径

流化催化裂解(FCC)是石油化工中应用最广的裂解技术,流程包括预热、裂解、催化剂再生和产物分离,依靠催化剂的高速循环实现高效转化。FCC 反应温度通常为 500~550℃,显著低于蒸气裂解的 800~850℃,因而具有能效优势^[20]。在工艺改进中,引入 ZSM-5 分子筛助剂是提升轻烯烃产率的关键。ZSM-5 因三维微孔和弱氢转移能力,可有效抑制烷基化、芳构化等副反应,使产物朝轻烯烃方向转化。研究表明,在 FCC 中加入约 25% ZSM-5 助剂可使丙烯产率提高近 3 倍,丁烯提高 60%,而汽油馏分下降 10%~15%^[21]。同时,该助剂还能抑制干气生成并改善碳效率。

反应器结构优化亦至关重要。变径流化床(VDFBR)通过床层直径差异调控催化剂-反应物接触时间,有效减少过度裂解和副产物^[22]。短接触时间反应器(SCTR)可将反应时间控制在亚秒级,显著降低热裂解副反应并提高丙烯选择性^[23]。

因此,FCC 优化应结合催化剂助剂和反应器设

计,构建“反应-再生-选择性调控”一体化体系,支撑低碳烯烃的高效生产。

3.2 反应-分离一体化路径探索

传统串联工艺中,裂解反应后再分离的方式在能效与流程控制上逐渐暴露不足。反应-分离一体化成为过程强化的前沿方向,其核心在于将催化反应与分离同步进行,以实现更高转化率和产物选择性。

膜反应器是典型方案之一。利用选择性膜材料对丙烯进行原位分离,可打破平衡限制并推动反应正向进行。在 ZSM-5 裂解体系中引入分子筛膜,可使丙烯收率提高 12%~20%,并抑制副反应^[24]。另一方案是吸附-反应耦合系统,借助 MOFs 或功能化多孔碳对丙烯进行动态捕集,避免二次反应并优化产物纯度^[25]。该策略适用于高烯烃浓度、分离难度大的体系,并能随反应进程调节吸附-解吸过程,实现反应与分离的协同。

虽然目前仍处于中试阶段,但反应-分离一体化在降低能耗、简化流程和提升目标产物纯度方面的潜力已得到验证。随着分离材料和智能控制技术发展,该路径有望成为新一代低碳烯烃制备的重要手段。

4 面向碳减排目标的路径集成与协同策略

4.1 双碳战略背景下的绿色化工转型需求

我国提出“2030 碳达峰、2060 碳中和”战略后,石化行业面临能耗高、排放强的转型压力。丙烯生产占行业碳排放约 7%,蒸气裂解的排放强度高达 2 t/t 丙烯^[1],减排潜力突出。应对之道在于构建以高选择性催化裂解为核心的绿色工艺体系,并结合节能反应器、过程强化与碳闭环路径,推动石化生产向低碳化、本质减碳演进。

4.2 原料优化与轻质化替代路径

原料选择对裂解碳效率影响显著。石脑油或 C₄+重馏分因碳链复杂、副反应多而碳排放偏高。轻质原料如 LPG、正丁烷、异丁烷等更易裂解,能降低能耗并提升丙烯产率。此外,可再生原料正获关注,如生物质热解气、合成气等高 H/C 比原料,可实现清洁烯烃制备;甲烷经重整生成的氢气亦可作为调节 H/C 比的辅助气源,改善反应热力学并提高碳利用率^[11]。进料端的碳捕集前移也是有效手段。通过 CO₂ 脱除^[26]或 C₂+重烃切割^[27],可避免无效碳源进入反应系统,从而提升整体碳效率。

4.3 低碳能源替代与热效率优化

裂解工艺需维持 500~600℃ 的高温,热源是能耗和碳排放的核心。近年来电加热裂解炉逐渐替代燃气供热,采用感应加热、微波辐射等非燃烧方式,既减少直接排放,又提升温控精度。示范项目显示,该技术可削减碳排放强度超 60%,并已进入 BASF、SABIC 等企业的工程验证阶段^[23]。

与此同时,常规热回收与热耦合优化仍具价值。中压蒸气回收、裂解废热锅炉结构改进等措施可回收余热。研究还提出分级反应床与变换换热器组合设计,在反应热输入与冷却脱除之间实现协同,进一步提升能效与工艺稳定性^[28]。

4.4 CCUS 与碳闭合路径耦合

碳捕集、利用与封存(CCUS)是石化过程减排的现实途径。催化剂再生尾气富含 CO₂,适合进行胺吸收或膜分离,具备良好效率与运行稳定性。矿化路径也在拓展,如与水泥窑尾气耦合,实现资源协同利用。

在碳利用方面,CO₂ 与氢气在 Ni 基催化剂上转化为 C₁ 中间体,可进一步进入 MTO 或 FTO 路径,实现碳资源深度再利用^[29]。另有研究探索在裂解中直接引入 CO₂ 作为轻度氧化剂,不仅提升放热程度,还可实现 CO₂ 原位利用,为“反应-减碳”一体化反应器提供新思路^[30]。

催化裂解系统若能在原料端、能源端与碳利用环节形成协同,可构建“碳闭合-能回收-过程优化”耦合的绿色工艺体系。在保障高效丙烯产出的同时显著降低排放,为“双碳”战略下石化行业的可持续发展提供技术支撑。

5 技术挑战与未来发展趋势

5.1 技术瓶颈与研究空白

尽管催化裂解技术在丙烯定向合成方面已取得显著进展,但其大规模应用仍存在多方面挑战。

(1) 催化剂稳定性不足。ZSM-5 虽具酸性与孔结构优势,但在高温和多次再生循环中易酸性退化、孔道堵塞甚至晶体崩解,寿命问题尚未解决。

(2) 反应机理认知不足。现有研究多集中于产率调控,而对中间体演化、界面协同作用缺乏系统研究,限制了精准调控能力。

(3) 选择性与能耗矛盾。提升丙烯选择性往往伴随能耗增加。例如电加热裂解虽可降低排放,但设备投资与运行成本过高,且芳构化等副反应仍难完全抑制。

(4) 系统集成度低。CCUS 与热回收单元多以外挂式存在,反应-再生-分离未能深度耦合,能量与碳流的协同效率不足。

因此,实现“高效-绿色-闭环”的裂解技术,需在催化剂、机理、过程强化与系统集成层面开展跨尺度优化。

5.2 未来发展趋势

在“双碳”战略和新技术推动下,催化裂解研究有望在以下方面突破。

(1) 多尺度构效关系集成。结合原位表征(如 FT-IR、TPD)与理论计算(DFT、MD),建立“结构-酸性-反应路径-选择性”关联网络,实现从设计到预测的理性化体系。

(2) 智能化反应调控。引入人工智能与机器学习,用于路径预测、反应器动态调节及副反应识别。深度神经网络可预测积炭临界点,辅助实时调控进料与再生节奏,保障系统稳定。

(3) 绿色能源耦合。探索电化学供能、光-热协同等低碳驱动,实现热流-质流-碳流一体优化,并逐步引入可再生能源,构建“清洁供能+精准催化”的平台化反应体系。

(4) 闭环化原料与产物设计。推动生物基原料、绿色氢源与可回收碳单元的协同利用,发展废碳资源转化路径,形成“低碳资源-平台化合物-功能产物”的闭合循环,最大限度降低碳足迹。

未来催化裂解的研究重点将由单一“丙烯产率最优化”转向“碳效率最大化、路径调控智能化与装置平台化”三元目标。通过材料科学、反应工程与数字智能的深度融合,催化裂解有望成长为下一代绿色化工的核心支撑技术。

6 结论

围绕 ZSM-5 分子筛的结构优化、酸性调控、裂解机理、反应器系统设计及低碳能源耦合等方面,总结了其在提升选择性与降低碳排放方面的潜力。文献表明,通过分级孔结构构建、酸位点精准调配、金属功能团引入及反应-分离-再生一体化,可有效改善产物分布与能碳效率。然而,该技术在催化剂稳定性、微观机理认知和系统集成等方面仍面临瓶颈,材料退化、反应路径复杂性以及智能调控缺乏,制约了工程化应用。未来,应重点推进多尺度构效关系建模、人工智能辅助反应调控、可再生能源驱动路径耦合及“原料-反应-排放”全链条闭环平台的构建。总体而言,催化裂解需从单一“丙烯高选择性”迈向

“碳效率最大化与智能路径调控”的综合目标,进而成为支撑绿色化工体系的核心技术。

参考文献

- [1] Xu Y, Zuo Y, Yang W, *et al.* Targeted catalytic cracking to olefins (TCO): Reaction mechanism, production scheme, and process perspectives[J]. *Engineering*, 2023, 30(11): 100–109.
- [2] Alipour S M. Recent advances in naphtha catalytic cracking by nano ZSM-5: A review[J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2016, 37(7): 671–680.
- [3] Lukyanov D B, Vazhnova T, Cherkasov N, *et al.* Insights into Brønsted acid sites in the zeolite mordenite[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2014, 118(41): 23918–23929.
- [4] Dong X, Shaikh S, Vittenet J R, *et al.* Fine tuning the diffusion length in hierarchical ZSM-5 to maximize the yield of propylene in catalytic cracking of hydrocarbons[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6(11): 15832–15840.
- [5] Tian P, Wei Y, Ye M, *et al.* Methanol to olefins (MTO): From fundamentals to commercialization[J]. *ACS Catalysis*, 2015, 5(3): 1922–1938.
- [6] Gholami Z, Gholami F, Tisler Z, *et al.* A review on production of light olefins via fluid catalytic cracking[J]. *Energies*, 2021, 14(4): 1089.
- [7] 赵云, 刘家旭, 熊光, 等. 磷改性纳米 HZSM-5 沸石水热稳定性及其对全馏分 FCC 汽油烯烃组分催化裂解反应的性能[J]. *催化学报*, 2017, 38(1): 138–145.
- [8] Alotibi M F, Alshammari B A, Alotaibi M H, *et al.* ZSM-5 zeolite-based additive in FCC process: A review on modifications for improving propylene production[J]. *Catal Surv Asia*, 2020, 24(1): 1–10.
- [9] Yang L, Ni N, Xing E, *et al.* Structure of hydrothermally stable acid sites and their catalytic role in P-modified ZSM-5 zeolite revealed by solid-state NMR spectroscopy[J]. *Inorganic Chemistry*, 2025, 64(3): 1352–1364.
- [10] Lv J, Hua Z, Ge T, *et al.* Phosphorus modified hierarchically structured ZSM-5 zeolites for enhanced hydrothermal stability and intensified propylene production from 1-butene cracking[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2017, 247: 31–37.
- [11] 肖霞, 王鹏, 潘昱彤, 等. 稀土改性 ZSM-5 分子筛在烃类催化裂解制低碳烯烃领域中的研究进展[J]. *沈阳师范大学学报: 自然科学版*, 2022, 40(2): 121–126.
- [12] Qureshi Z S, Siddiqui M A, Tanimu A, *et al.* Steam catalytic cracking of crude oil over novel hierarchical zeolite-containing mesoporous silica-alumina core-shell catalysts[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2022, 166: 105621.
- [13] 林正令. 催化裂解增产丙烯关键材料的研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.
- [14] 周建宏. 纳米 ZSM-5 沸石催化剂上 C₅–C₈ 混合烷烃芳构化反应的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [15] Wu L, Su H, Sun X, *et al.* Catalytic cracking for propylene production over Au catalyst supported by external surface-modified ZSM-5 zeolite[J]. *Catalysts*, 2022, 12(4): 418.
- [16] Swisher J A, Hansen N, Maesen T, *et al.* Theoretical simulation of n-alkane cracking on zeolites[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2010, 114(22): 10229–10239.
- [17] Guo Y H, Pu M, Wu J Y, *et al.* Theoretical study of the cracking mechanisms of linear α -olefins catalyzed by zeolites[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 254(2): 604–609.
- [18] Wattanapaphawong P, Reubroycharoen P, Mimura N, *et al.* Effect of carbon number on the production of propylene and ethylene by catalytic cracking of straight-chain alkanes over phosphorus-modified ZSM-5[J]. *Fuel Processing Technology*, 2020, 202: 106367.
- [19] Zuo Y, Ye L, Yang W, *et al.* Optimizing ethylene production through enhanced monomolecular β -scission in confined catalytic cracking of olefin[J]. *ACS Catalysis*, 2025, 15(3): 1576–1585.
- [20] 曹蓓. 催化裂化反应再生系统操作优化研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- [21] Zhao X, Roberie T G. ZSM-5 additive in fluid catalytic cracking. 1. effect of additive level and temperature on light olefins and gasoline olefins[J]. *Industrial & engineering chemistry research*, 1999, 38(10): 3847–3853.
- [22] 许友好, 何鸣元. 变径流化床反应器理论与实践[J]. *中国科学: 化学*, 2020, 50(2): 271–281.
- [23] Kenneth A W. Transient and steady-state phenomena in short-contact-time reactors for syngas and olefin production: Experiments and numerical simulations[D]. Minneapolis: University of Minnesota, 2006: 15–54.
- [24] Zhao J, Guo W, Liu G, *et al.* Cracking of n-dodecane during supercritical state on HZSM-5 membranes[J]. *Fuel Processing Technology*, 2010, 91(9): 1090–1097.
- [25] 谈朋, 李雪梅, 刘晓勤, 等. 基于柔性 MOFs 的磁响应复合材料及其丙烯酸吸附性能研究[J]. *化工学报*, 2025, 76(5): 2230–2240.
- [26] Suviranta R. Carbon capture integration to steam cracker furnaces: Techno-economic evaluation[D]. Lappeenranta: Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT, 2023.
- [27] Sahin B. Industrially relevant electrochemical reduction of CO₂ to C²⁺ compounds[D]. Munich: Technische Universität München, 2024.
- [28] Amghizar I, Dedeyne J N, Brown D J, *et al.* Sustainable innovations in steam cracking: CO₂ neutral olefin production[J]. *Reaction Chemistry & Engineering*, 2020, 5(2): 239–257.
- [29] Ra E C, Kim K Y, Kim E H, *et al.* Recycling carbon dioxide through catalytic hydrogenation: Recent key developments and perspectives[J]. *ACS Catalysis*, 2020, 10(19): 11318–11345.
- [30] Kosari M, Lim A M H, Shao Y, *et al.* Thermocatalytic CO₂ conversion by siliceous matter: A review[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2023, 11(4): 1593–1633. ■