

引用格式: 乔瑞琪, 龚剑洪, 魏晓丽, 等. 流化催化裂化技术研究现状与工业应用[J]. 石油化工高等学校学报, 2025, 38(2):1-9.
QIAO Ruiqi, GONG Jianhong, WEI Xiaoli, et al. Research Progress and Commercial Applications of Fluid Catalytic Cracking (FCC) Technology[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2025, 38(2):1-9.

流化催化裂化技术研究现状与工业应用

乔瑞琪¹, 龚剑洪¹, 魏晓丽¹, 曹东学²

(1. 中国石化石油化工科学研究院有限公司, 北京 100083; 2. 中国石油化工股份有限公司 炼油事业部, 北京 100728)

摘 要: 作为重油轻质化的核心, 催化裂化装置一直是我国石油化工企业经济效益的主要支柱。介绍了国内催化裂化技术的发展历程, 并依据目标产物的不同, 从油品生产技术、多产低碳烯烃技术、产品结构调整技术等 3 个方面, 综述了国内催化裂化技术的发展现状; 总结了不同催化裂化技术的设计思路、主要特点及工业应用效果, 重点对比了不同技术所使用的反应器型式与催化剂类型的异同; 探讨了催化裂化技术在提升油品质量及满足市场需求, 提高低碳烯烃、BTX(苯、甲苯、二甲苯)等基础化工原料产率及选择性等方面开展的研究工作, 为企业高质量发展提供了可选的技术方案。原料重质化多样化、产品质量优质化、产品结构灵活化、生产过程清洁化等仍是今后催化裂化技术的研究重点。

关键词: 催化裂化; 催化裂解; 汽油; 柴油; 低碳烯烃

中图分类号: TE624 **文献标志码:** A **doi:**10.12422/j.issn.1006-396X.2025.02.001

Research Progress and Commercial Applications of Fluid Catalytic Cracking (FCC) Technology

QIAO Ruiqi¹, GONG Jianhong¹, WEI Xiaoli¹, CAO Dongxue²

(1. SINOPEC Research Institute of Petroleum Processing Co., Ltd., Beijing 100083, China;
2. SINOPEC Petroleum Refinery Department, Beijing 100728, China)

Abstract: As the core of heavy oil upgrading, fluid catalytic cracking(FCC) units have long been the main pillar of economic benefits for petrochemical enterprises in China. This paper reviews the development history of domestic FCC technology and summarizes the current status of FCC technology from three perspectives based on target products: Oil production technology, light olefin maximization technology, and product structure adjustment technology. It emphasizes summarizing the design concepts, main characteristics and commercial application of different FCC technologies, with a particular focus on comparing the differences in reactor types and catalyst. Additionally, research efforts aimed at improving oil quality to meet market demands, enhancing the yields of low-carbon olefins, BTX(benzene, toluene, xylene), and other basic chemical raw materials, as well as optimizing their selectivities, are discussed, providing viable technical solutions for high-quality enterprise development. Future research priorities for FCC technology include feedstock heavy and diversified processing, product quality improvement, flexible product structure adjustment, and cleaner production processes.

Keywords: Fluid catalytic cracking; Deep catalytic cracking; Gasoline; Diesel; Low carbon olefins

催化裂化是现代炼化企业最重要的原油二次加工过程之一, 通过化学反应将重质油转化为汽油、柴油等, 是重质原料轻质化的主要工艺技术^[1-3]。催化裂化的研究最早可以追溯到 19 世纪 90 年代, 其中对催化裂化技术发展具有奠基作用的成果, 是 20 世纪 20 年代由法国工程师 E. HOUDRY 提出的

采用固体酸性催化剂的催化裂化工艺技术。我国催化裂化技术开发与先进国家起步较晚, 第一套催化裂化装置于 1958 年投产, 由前苏联设计, 采用固定床工艺; 第一套自主设计的催化裂化装置采用的是密相流化床工艺, 于 1965 年投产; 第一套采用提升管的催化裂化装置, 于 1974 年在玉门炼油厂开

收稿日期: 2025-02-27 修回日期: 2025-03-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFA1501204); 中国石油化工股份有限公司科技开发项目(124069)。

第一作者: 乔瑞琪(1994-), 女, 硕士, 助理研究员, 从事石油炼制技术方面的研究; E-mail: qiaoruiqi.ripp@sinopec.com。

通信作者: 曹东学(1967-), 男, 博士, 正高级工程师, 从事石油加工技术等方面的研究; E-mail: caodx@sinopec.com。

车成功^[4]。

历经近 60 年的发展,我国催化裂化技术已经形成了一套比较完整的理论体系,积累了丰富的经验,为适应原料劣质化,实现油品质量升级、炼油向化工转型等,催化裂化技术不断进步,开发出了各种适应不同需求的系列催化裂化技术^[5]。本文重点介绍了生产油品、多产低碳烯烃和产品结构调整的催化裂化技术的主要特点、工业应用情况及应用效果,可为企业高质量发展提供可选的技术方案。

1 生产油品的催化裂化技术

催化裂化装置是我国汽油、柴油生产的关键装置,催化汽油、柴油分别约占我国汽油、柴油池总量的 70%、30%^[2,6]。同时,随着汽车工业的发展和环境保护要求的提高,对油品质量提出了更高的要求,我国清洁汽油的发展经历了高标号化、无铅化、降烯烃、低硫化、限制芳烃和苯含量等阶段,这些要求对催化裂化技术的发展提出了不同的挑战。随着化工原料需求的增长,催化裂化装置在生产汽油的同时,兼顾生产了丙烯等化工原料,推动了催化裂化技术的不断革新和进步。依据目标产物的不同,生产油品的催化裂化技术可分为提高汽油质量与产率技术、生产汽油兼产低碳烯烃的技术和多产柴油或船用燃料油等其他燃料油的技术 3 种类型。

1.1 提高汽油质量与产率的催化裂化技术

随着世界各国清洁汽油低硫、低烯烃的发展趋势,催化裂化汽油如何在降低汽油烯烃含量的同时,保持汽油辛烷值稳定是当时催化裂化工艺面临的紧迫而艰巨的任务,为此多产异构烷烃的串联变径提升管催化裂化(MIP)技术应运而生^[7-8]。MIP 技术由中国石化石油化工科学研究院(简称石科院)开发,其核心在于变径提升管反应系统:以裂化和转化两个反应区为基础,创新性地发明并应用双反应区的串联变径提升管反应系统,在第二反应区采用低反应温度、长停留时间强化异构化和汽油烯烃的氢转移反应,降低汽油烯烃含量,提高汽油产品质量。

MIP 技术于 2002 年首次在中国石化高桥分公司进行工业应用。结果表明,与空白标定相比,汽油烯烃体积分数降低 5.7 个百分点,汽油的研究法辛烷值(ROK)增加 1.3 个单位,实现了降低汽油烯烃含量的同时,提高汽油辛烷值的目标^[9]。图 1 为 MIP 反应器简图。

1.2 生产汽油兼产低碳烯烃的催化裂化技术

近年来,随着我国石化行业的迅速发展,乙烯、

丙烯等化工原料需求亦迅速增长,市场需求的变化要求催化裂化装置在满足汽油生产的同时,提高化工原料的产率。石油化工科研工作者通过不同的技术手段,实现了催化裂化生产汽油兼产低碳烯烃的目标,其中主要技术包括生产汽油组成满足欧Ⅲ排放标准并增产丙烯(MIP-CGP)技术、灵活多效催化裂化(FDFCC)技术、两段提升管催化裂化(TSRFCC)技术。

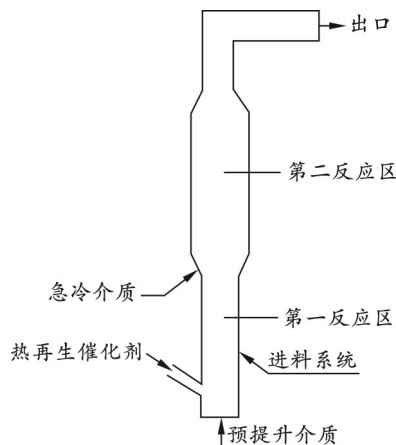


图 1 MIP 反应器简图

Fig.1 Schematic diagram of the reactor of MIP process

石科院的 MIP-CGP 技术是基于 MIP 的串联变径双反应区提升管反应器进行开发的^[10],其技术核心在于适当提高操作条件的苛刻度,提高一反温度,降低二反空速,开发与之相匹配的专用催化剂,在生产高品质清洁汽油的同时,大幅度提高丙烯产率。MIP-CGP 技术于 2004 年首次在中国石化九江石化 1.0 Mt/a 催化裂化装置上进行工业试验^[11],反应转化率提高 9.02 个百分点,汽油收率提高 1.44 个百分点,汽油烯烃质量分数降低 25.90 个百分点,丙烯收率提高 2.63 个百分点,经济效益和社会效益显著。

FDFCC-Ⅲ技术由中国石化洛阳石油化工工程公司(简称洛阳院)开发^[12-13],其技术核心在于采用双提升管反应器,重油裂化与汽油改质反应在不同的反应器内进行,并分别匹配与反应相适应的操作条件;同时,该技术通过将汽油提升管内的部分待生催化剂与再生剂混合后,输送到重油提升管反应器,实现催化剂混合降温、低温接触、大剂油质量比的操作。FDFCC-Ⅲ技术在新海石化实施工业应用,与单提升管操作相比,丙烯收率增加 4.83 个百分点,汽油烯烃质量分数降低 18.50 个百分点^[14],汽油 RON 增加 2.9 个单位。

中国石油大学(华东)开发了 TSRFCC 技术,其核心之处在于采用双提升管反应器;与 FDFCC-Ⅲ技术不同之处在于,其一段提升管和二段提升管均

直接使用再生剂,提高催化剂整体活性,催化裂化反应分两段进行,但总反应时间缩短^[15-17]。当采用生产汽油兼产低碳烯烃的模式进行操作时,TSRFCC技术对反应的苛刻度会适当提高,并与专用催化剂配合,丙烯产率可以提高2~5个百分点^[16]。

同时,为了进一步拓展催化裂化装置对原料的适应性,提高其“吃渣”的能力,石科院开发了最大化生产异构烯烃(MIO)技术、最大化生产液化气和汽油(MGG)技术以及常压渣油最大化生产液化气和汽油(ARGG)技术。其中,MIO技术的核心在于采用了三段反应区串联的新型反应系统,在生产汽油的同时,最大量生产异构烯烃,并开发了与之相匹配的催化材料与催化剂,该技术操作条件缓和,反应接触时间较短^[18]。MIO技术工业试验结果表明,在掺入渣油22.43%(质量分数)的情况下,异丁烯和异戊烯总产率提高到8.85%,同时可获得高辛烷值汽油^[19]。MGG技术以蜡油或掺炼部分减压渣油,或掺炼部分焦化蜡油等为原料,采用具有特殊反应性能的RMG催化剂^[20]。工业试验结果表明,在反应温度为510~540℃的条件下,液化气收率可达25%~40%,汽油收率为40%~55%,汽油RON提高3~4个单位^[21]。ARGG技术则是以常压渣油为原料,采用具有较高重油转化和抗重金属能力的专用催化剂RAG^[22]。工业试验结果表明,在反应温度为510~520℃的条件下,丙烯产率提高到9%~11%,液化气中丙烯质量分数提高到35%~40%^[23]。

1.3 其他燃料油的催化裂化技术

为了满足市场对柴油、船用燃料油等其他燃料油的需求,石油化工科研工作者在现有技术基础上,不断推陈出新,以市场需求为导向,开发市场所需的催化裂化技术,为催化裂化技术的发展提供了不竭动力。

石科院开发的多产丙烯和低硫燃料油组分的催化裂化与加氢脱硫(MFP)技术为催化裂化与加氢的组合技术,主要用于生产低硫燃料油组分,兼产丙烯、丁烯等低碳烯烃^[24]。MFP技术基于限域催化理论研究,采用所开发的新型中孔分子筛制备了催化裂化催化剂,结合新型变径流化床反应器,可大幅降低干气产率,实现碳氢资源的高效利用,使原料中的多环芳烃最大程度地保留在燃料油组分中。该技术于2021年在中国石化青岛石油化工有限责任公司进行了工业标定。结果表明,在现有催化裂化装置改动较小的情况下,丙烯产率由6.16%增加到12.17%,丙烯产率增幅约100%,异丁烯产

率增幅约230%,燃料油组分产率可达到28.73%^[25]。

同时,石科院开发的催化裂化多产液化气和柴油(MGD)技术是在国内油品市场柴油短缺、汽油过剩的时代背景下诞生的^[26],可以在提高汽油产品质量的同时,多产柴油和液化气,其技术核心在于提升管反应器按照原料的轻重开设3个进料口,并根据不同轻重原料所需的反应深度,匹配不同的反应操作条件,形成不同的反应区。MGD技术在中国石化广州分公司进行了工业应用,汽油收率降低8.68个百分点,柴油收率增加4.54个百分点,技术应用成效显著^[27]。

国外催化裂化技术起步较早,主要包括UOP的FCC技术、KBR的Orthoflow技术等。与国外催化裂化技术相比,国内催化裂化技术对降低汽油烯烃含量作用效果明显,且产品结构可灵活调整,在生产汽油的同时,可兼产丙烯等化工料。同时,国内催化裂化技术仍存在一定差距,如国内催化裂化技术雾化蒸汽用量(质量分数)约5%,比UOP的FCC技术雾化蒸汽用量高约2个百分点,且UOP目前已开发了催化裂化技术专用的Unisim Design模型软件,而国内暂无相应配套软件。

2 多产低碳烯烃的催化裂解技术

随着全球石油化工市场对乙烯、丙烯以及丁烯等基础化工原料需求的增长,在催化裂化技术的基础上开发新技术,利用较重原油中的有效组分,在提高重油的利用率及价值的同时,满足我国日益增长的化工原料需求量,成为我国石油化工科研人员的重点。石科院在国际上率先实现了多产低碳烯烃的催化裂解技术的工业应用^[5,18,28],在当前炼油行业产能过剩和“双碳”背景下,越来越多的企业在寻求从炼油向化工的转型,催化裂解技术成为构建炼油-化工一体化的重要桥梁,为炼油向化工转型做出了重要贡献^[29]。

催化裂解技术的革新,其核心在于从催化裂解反应过程机理的研究与再认识出发,对反应器结构、催化剂配方及工艺参数匹配等多方面不断进行创新,提高催化裂解过程中乙烯、丙烯等低碳烯烃产率,提高反应选择性,降低反应过程能耗,提高技术原料适应性。

2.1 催化裂解催化剂的研发

催化裂解催化剂类型不同,其发生的主要反应机理亦不同,主要分为正碳离子反应机理、负碳离子反应机理和自由基反应机理3大类。其中,以正碳离子反应机理为核心的典型代表是石科院开发的深度催化裂解(DCC)技术,该技术从烃类催化裂

化生成丙烯的正碳离子反应研究出发,基于 ZSM-5 分子筛具有高丙烯选择性的特殊孔道结构,首次实现了重油催化裂解生产丙烯的技术应用^[30]。DCC 技术的核心在于采用含改性择形沸石催化剂和提升管加密相流化床反应器,加上与之匹配的反应条件,在高反应温度、低烃分压、高剂油质量比和长停留时间下操作,实现高选择性生成丙烯的化学反应过程^[31]。大庆中蓝石化有限公司 DCC 装置以大庆常压渣油和部分燃料油的混合油为原料,在反应温度为 530 ℃、剂油质量比为 8、蒸汽与原料质量比为 0.13 的操作条件下,采用了油浆全回炼的生产方案。结果表明,与 FCC 装置相比,DCC 装置的液化气收率增加 10.85 个百分点,丙烯收率增加 5.33 个百分点,且汽油 RON 增加 5.4 个单位,可以作为炼厂非常优质的调合产品出厂^[32]。

以负碳离子反应机理为核心的典型代表为中国海洋石油集团有限公司开发的原油(重油)直接制化学品(DPC)技术,其核心在于使用高水热稳定性介孔催化材料和反应性与理化性质双可调的碱催化剂增产低碳烯烃^[33]。该技术在中海油惠州石化有限公司进行了技术标定^[34]。结果表明,以直馏重蜡油为原料时,与空白标定相比,乙烯收率提高 0.19 个百分点,丙烯收率提高 0.98 个百分点,碳四烯烃收率提高 1.17 个百分点。

以自由基和正碳离子双重反应机理为核心的典型代表为石科院开发的催化热裂解(CPP)技术,该技术将重质原料油最大限度地转化为乙烯,并兼产丙烯^[35]。其技术核心在于采用高苛刻度的反应操作条件及专用的催化剂:约 600~650 ℃ 的高反应温度可提高自由基反应比例,高的剂油质量比可提供较多的活性中心,专用的 CEP 催化剂可实现正碳离子和自由基双反应的发生。CPP 技术可采用 3 种模式进行操作:多产丙烯、多产乙烯及兼顾乙烯和丙烯生产^[36]。在沈阳化工集团沈阳石蜡化工有限公司开展的 CPP 工业试验结果表明,在兼顾乙烯、丙烯生产时,其单程收率分别为 14.84% 和 22.21%^[37]。

2.2 催化裂解反应器结构创新

除催化剂外,反应器的结构设计与研发亦是催化裂解技术的核心。国内催化裂解技术的反应器型式可分为单提升管反应器、提升管加密相流化床反应器、双提升管反应器、双提升管加密相流化床反应器和快速床反应器等多种类型。

在实现重油催化裂解生产丙烯首次工业应用的 DCC 技术中,DCC-II 型采用的是提升管反应器,该反应器具有较高的丙烯产率和丁烯收率,可降低

干气和焦炭的产率;DCC-I 型采用的是提升管加密相流化床反应器,也具有较高的丙烯产率。中国石化济南分公司以减压蜡油掺脱沥青油为原料,分别开展了 DCC-I 型和 DCC-II 型工业试验。结果表明,在反应温度别为 564、530 ℃ 的条件下,其丙烯产率分别为 19.2%、14.4%,乙烯产率分别为 5.3%、1.8%,丁烯产率分别为 13.2%、11.4%^[38]。

采用双提升管反应器的技术为中国石油大学(华东)开发的两段提升管催化裂化多产丙烯(TMP)技术,该技术在 TSRFCC 技术的基础上研发,第一提升管用于裂解重油并回炼 C₄ 组分,第二提升管用于轻汽油和回炼油裂解反应^[39]。其工业试验以大庆常压渣油为原料,在第一提升管和第二提升管的出口温度分别为 500~510 ℃、520~530 ℃ 的条件下,丙烯收率可达到 19.64%^[40]。

为了进一步降低催化裂解反应过程中干气与焦炭的产率,提高低碳烯烃的选择性,石科院开发了增强型催化裂解(DCC-plus)技术,其在 DCC-I 型提升管加密相流化床反应器的基础上,增加了第二提升管,即双提升管+密相流化床反应器,实现了不同反应区反应温度的协调控制;在满足一次裂化与二次裂化反应条件需求的同时,可适当降低第一提升管反应器出口温度和入口油、剂混合温度^[41]。中海油东方石化有限责任公司的 DCC-plus 装置以常压渣油为原料,丙烯收率可达到 18.20%^[42-43]。中海油宁波大榭石化的 DCC-plus 装置以常压渣油掺混加氢裂化尾油为原料,丙烯产率可达 21.55%^[41]。图 2 为 DCC-plus 装置流程示意图。

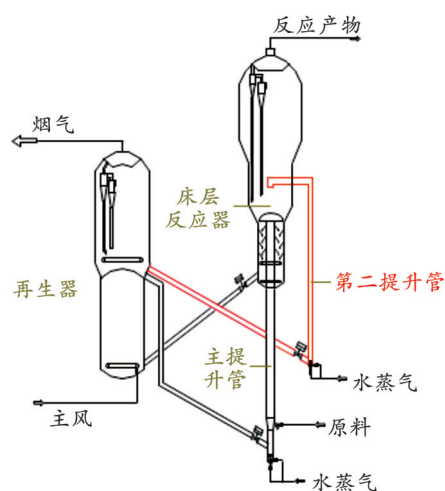


图 2 DCC-plus 装置流程示意图^[41]

Fig.2 Schematic diagram of the DCC-plus process^[41]

另一采用双提升管+密相流化床反应器的技术为石科院开发的重油选择性催化裂解多产丙烯(MCP)技术,其与 DCC-plus 技术的主要区别在于

密相流化床反应器的设计位置不同, MCP技术将第一提升管内的重油一次裂解反应转变为选择性裂解模式^[44], 并结合第三反应区的 C_4 /石脑油齐聚再裂化反应, 将重油原料最大限度地转化生成丙烯。第一套 MCP 工业示范装置以苏北常压渣油为原料, 采用 MCP 技术后丙烯和异丁烯收率分别提高 8.09 个百分点和 2.52 个百分点, 焦炭收率降低 2.03 个百分点^[45]。

DCC 工艺对劣重质原料裂解反应选择性较差, 为了克服这一缺点, 石科院开发了一种具有特殊结构的快速床反应器, 并形成了新型重油高效催化裂解(RTC)技术, 其反应器简图如图 3 所示^[46]。该反应器的特点: 采用了特殊结构的快速床反应器, 可实现“拟浓相、拟均温、拟匀速”的技术特征; 原料适应性更广, “吃渣”能力更强, 特别适用于中间基加氢渣油。RTC 技术独特的反应器结构设计使反应器内催化剂颗粒含量明显提高, 并采用抑制低碳烯烃再转化的工程措施, 可提高催化裂解反应的选择性, 丙烯收率和选择性明显增加。RTC 技术在中国石化安庆分公司进行了工业试验。结果表明, 在掺渣量(质量分数)为 50% 的条件下, 与 DCC 技术相比, 通过 RTC 技术改造后, 双烯收率明显增加, 其中乙烯收率增加 0.49 个百分点, 丙烯收率增加 2.56 个百分点, 焦炭收率降低 0.56 个百分点, 且汽油中烯烃体积分数降低 18.9 个百分点, 汽油 RON 增加 0.4 个单位, 汽油性质得到明显改善^[47]。同时, 中国石化安庆分公司建成了首套采用 RTC 技术的 3.0 Mt/a 重油催化裂解装置, 自 2023 年 6 月开车至今平稳运行^[48]。

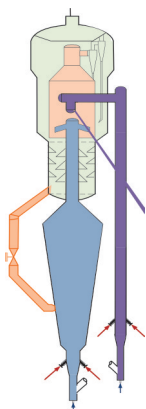


图3 RTC反应器简图

Fig.3 Schematic diagram of the RTC reactor

国外多产低碳烯烃的催化裂解技术主要包括 Axens 的 HS-FCC 技术、KBR 的 MAXOFIN 技术、UOP 的 PetroFCC 技术和 Lummus 的 I-FCC 技术等, 主要的反应器型式包括单提升管、双提升管、下

行床等, 与国内催化裂解技术的反应器型式基本一致, 且催化剂均是以 ZSM-5 为代表的择型分子筛催化剂。与国外催化裂解技术相比, 国内催化裂解技术可加工更重的原料, 如 RTC 技术工业试验掺渣比(质量分数)达到 50%, 且丙烯产率较高; 同时, 国内催化裂解在降低雾化蒸汽比例、降低反应能耗等方面需要进一步开展研究工作。

3 产品结构调整的催化裂化技术

随着我国经济结构的调整, 中国市场成品油终端消费放缓, 且成品油消费结构发生巨大变化, 其突出表现是消费柴汽比不断变化, 2005 年我国消费柴汽比达到历史最高点(2.3:1.0), 近年来持续降低^[49], 预计会逐渐降低至 0.6~1.0^[50]。为了降低催化裂化柴油的产率, 石油化工科研工作者从催化柴油的结构特点出发, 研究了催化柴油的催化裂化反应规律, 开发了将催化柴油转化为汽油及 BTX 等轻质芳烃的催化裂化与加氢工艺等的组合技术, 该技术在低柴汽比需求的时代背景下具有较高的市场应用价值。

3.1 LTAG 技术

轻循环油(LCO)选择性加氢-催化裂化生产高辛烷值汽油或轻质芳烃(LTAG)技术由石科院研发。该技术通过向催化裂化 LCO 中的多环芳烃定向加氢, 设计加氢 LCO 催化裂化转化区或单独的反应器, 并优化匹配催化裂化工艺参数与专用催化剂, 将 LCO 转化为高辛烷值汽油或芳烃, 不仅能解决汽柴油质量升级中劣质 LCO 的出路问题, 也能解决高辛烷值汽油不足的问题, 具有汽油选择性高、辛烷值高、氢耗低的特点^[51-52]。LTAG 技术分为模式 I 和模式 II, 前者是加氢 LCO 单独催化裂化生产模式, 后者是加氢 LCO 与重油分层顺序进料生产模式^[53]。

LTAG 技术于 2017 年 1 月在中国石化荆门分公司应用^[54], 采用 LTAG 模式 I, 在加氢化学氢耗为 2.3% 时, 加氢 LCO 催化裂化一次通过转化率达 70% 以上, 汽油选择性接近 80%, 汽油收率达 47.88%, 汽油烯烃质量分数降低 24.08 个百分点, 芳烃质量分数增加 15.57 个百分点, 汽油 RON 提高 2.2 个单位。中国石化石家庄炼化分公司采用 LTAG 模式 II^[55], LCO 收率降低 20.31 个百分点, 汽油收率增加 16.08 个百分点, 同时汽油烯烃体积分数降低 4.10 个百分点, 汽油 RON 增加 0.6 个单位。

3.2 第二代 LTAG 技术

在 LTAG 技术的基础上, 石科院开发了第二代 LTAG 技术^[56], 旨在降低 LCO 加氢过程的氢耗, 并提高催化汽油辛烷值。该技术对 LCO 进行轻、重馏

分切割,轻 LCO 馏分直接返回到催化裂化装置回炼,重 LCO 馏分先定向加氢后催化裂化。二代 LTAG 技术于 2019 年在中国石化上海石化的 3.5 Mt/a 催化裂化装置和 3.9 Mt/a 渣油加氢装置上进行工业标定^[57]。结果表明,加氢装置的氢耗降低 22.7%,汽油与液化气表观选择性为 88.00%,汽油的 RON 与 MON 分别提高 0.6 和 0.7 个单位。

3.3 LTA 技术

为了进一步缓解国内芳烃供求矛盾,充分利用 LCO 中的芳烃资源,石科院在 LTAG 技术的基础上,开发了 LCO 选择性加氢-催化裂化组合生产轻质芳烃(LTA)技术。该技术的主要创新点在于强化 LCO 中重质单环芳烃的转化,从 LCO 烃类分子水平认识出发,分析加氢与催化反应过程中的关键组分,开发加氢专用催化剂和催化裂化专有工艺技术,实现最大化将 LCO 中的重质单环芳烃转化为轻质芳烃。LTA 技术优势在于:LCO 加氢氢耗低,单程氢耗为 2.0%~2.5%;加氢 LCO 催化裂化一次通过转化率高(>70%);采用重芳烃轻质化耦合技术,轻质芳烃产率达 30% 以上。该技术于 2018 年在扬子石化实现首次工业应用^[58],总氢耗为 3.6%,C₆~C₈ 芳烃收率为 23.91%,汽油收率为 64.53%,汽油 RON 为 98.4,加工 LCO 经济效益为 311.52 元/t。

4 总结与展望

近 60 年来,我国催化裂化技术经历从无到有,从跟踪模仿到自主创新,取得了长足的进步,是我国炼油工业的核心技术,对于提高石油资源利用

率、生产高附加值产品以及满足市场需求等具有举足轻重的地位。纵观我国催化裂化技术的发展,主要有以下启发:

1)面向国家重大需求、坚持市场导向是提高催化裂化技术市场竞争力和创新生命力的核心;从汽油质量迭代升级,到满足低碳烯烃和轻质芳烃等化工原料市场需求等,催化裂化技术经受住了市场的考验,成功突破了各种阻碍,对企业营收和经济效益提升起到了重要作用。

2)强化基础研究是催化裂化技术实现突破的根本;从催化裂化反应机理出发,从分子角度剖析催化裂化反应规律,研究催化裂化反应化学,解析哪些是需要强化的反应,哪些是需要抑制的反应,从而有针对性地对催化裂化技术进行优化和改进,才能实现催化裂化技术的再提升。

3)多学科交叉融合是催化裂化技术成功用于工业实践的关键;将催化裂化反应的化学与反应工程、流态化工程等相融合,打破学科壁垒,在催化裂化技术开发过程中解决反应器变径、催化剂在反应器内的流动方式、传质与反应之间的关系等问题,推动催化裂化新技术不只停留在实验室的研究,而是成为可以真正实现工业化应用的技术。

同时,面对复杂多变的国际形势和市场需求,催化裂化技术在原料重质化劣质化、产品质量优质化、产品结构灵活化、生产过程清洁化等方面,仍面临诸多问题和挑战,需要持续做好技术攻关和储备,加强科技对炼化企业高质量发展的促进作用。

参 考 文 献

- [1] 徐春明,杨朝合.石油炼制工程[M].4版.北京:石油工业出版社,2009.
- [2] 杨朝合,陈小博,李春义,等.催化裂化技术面临的挑战与机遇[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(6):171-177.
YANG Z H, CHEN X B, LI C Y, et al. Challenges and opportunities of fluid catalytic cracking technology[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(6): 171-177.
- [3] 陈俊武,卢捍卫.催化裂化在炼油厂中的地位和作用展望——催化裂化仍将发挥主要作用[J].石油学报(石油加工),2003,19(1):1-11.
CHEN J W, LU H W. Prospects of status and role of FCC in refinery—FCC will continue to play a leading role in petroleum refining industry[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2003, 19(1): 1-11.
- [4] 陈俊武,许友好.催化裂化工艺与工程[M].3版.北京:中国石化出版社,2015.
- [5] 朱根权,汪燮卿.重质油制轻烯烃的催化裂化家族工艺开发回顾及展望[J].石油炼制与化工,2021,52(10):10-17.
ZHU G Q, WANG X Q. Review and forecast on development of light olefins production with heavy feedstocks via FCC family processes[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2021, 52(10): 10-17.
- [6] 郭春奎,范景新,臧甲忠,等.柴油高值化综合利用技术发展现状及分析[J].化工进展,2018,37(11):4205-4213.
GUO C L, FAN J X, ZANG J Z, et al. Development of high-value utilization technologies of diesel[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(11): 4205-4213.
- [7] 许友好,王维,鲁波娜,等.中国炼油创新技术 MIP 的开发策略及启示[J].化工进展,2023,42(9):4465-4470.
XU Y H, WANG W, LU B N, et al. China's oil refining innovation: MIP development strategy and enlightenment[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(9): 4465-4470.

- [8] 许友好.我国催化裂化工艺技术进展[J].中国科学(化学),2014,44(1):13-24.
XU Y H.Advance in China fluid catalytic cracking(FCC) process[J].Scientia Sinica(Chimica),2014,44(1):13-24.
- [9] 龚剑洪,胡跃梁,蒋文斌,等.MIP工艺技术专用催化剂CR022的工业应用[J].石油炼制与化工,2004,35(5):8-11.
GONG J H, HU Y L, JIANG W B, et al. Commercial application of catalyst CR022 for MIP process [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2004, 35(5): 8-11.
- [10] 乔立功.MIP工艺工程技术的进展[J].炼油技术与工程,2015,45(6):7-11.
QIAO L G.Development of MIP process engineering[J].Petroleum Refinery Engineering, 2015, 45(6): 7-11.
- [11] 杨健,谢晓东,蔡智.增产丙烯、多产异构化烷烃的清洁汽油生产技术(MIP-CGP)在催化裂化装置上的应用[J].中外能源,2006,11(3):54-60.
YANG J, XIE X D, CAI Z.Application of the MIP-CGP technology in FCC units[J].Sino-Global Energy, 2006, 11(3): 54-60.
- [12] 孟凡东,黄延召,王龙廷,等.低温接触/大剂油比的催化裂化技术[J].石油炼制与化工,2011,42(6):34-39.
MENG F D, HUANG Y Z, WANG L Y, et al. FCC process development based on low temperature contact and high catalyst/oil ratio operation[J].Petroleum Processing and Petrochemicals, 2011, 42(6): 34-39.
- [13] 常剑,孟凡东,王龙廷,等.催化裂化低温接触大剂/油比技术理念与实践[J].石油学报(石油加工),2011,27(3):367-375.
CHANG J, MENG F D, WANG L Y, et al. Theory and practice of low temperature contact and high ratio of catalyst to oil in FCC process[J].Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2011, 27(3): 367-375.
- [14] 赵赞立,孟凡东,段少魏,等.FDFCC-Ⅲ工艺的先进性及工业应用[J].炼油与化工,2020,31(6):29-32.
ZHAO Z L, MENG F D, DUAN S W, et al. The advancement and industrial application of FDFCC-Ⅲ technology [J]. Refining and Chemical Industry, 2020, 31(6): 29-32.
- [15] 韦勇,赵飞,张喜文,等.两段提升管催化裂化技术在长庆石化的应用[J].石化技术,2007,14(1):27-30.
WEI Y, ZHAO F, ZHANG X W, et al. Application of two-stage riser catalytic cracking technology in Changqing petrochemical company[J].Petrochemical Industry Technology, 2007, 14(1): 27-30.
- [16] 杨朝合,山红红,张建芳.两段提升管催化裂化系列技术[J].炼油技术与工程,2005,35(3):28-33.
YANG Z H, SHAN H H, ZHANG J F. Two-stage riser FCC technologies [J]. Petroleum Refinery Engineering, 2005, 35(3): 28-33.
- [17] 禄军让,聂普选,王益民,等.浅析两段提升管催化裂化技术及应用效果[J].中国设备工程,2012(9):47-50.
LU J R, NIE P X, WANG Y M, et al. A brief analysis of two-stage riser catalytic cracking technology and its application effects [J]. China Plant Engineering, 2012(9): 47-50.
- [18] 汪燮卿,陈祖庇,蒋福康.重质油生产轻烯烃的FCC家族工艺比较[J].炼油设计,1995,25(6):15-18.
WANG X Q, CHEN Z B, JIANG F K. Comparison of FCC family process for light olefins production from heavy oils [J]. Petroleum Design, 1995, 25(6): 15-18.
- [19] 刘怀元.MIO技术的工业应用[J].石油炼制与化工,1998,29(8):12-15.
LIU H Y. Commercial application of MIO technology [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 1998, 29(8): 12-15.
- [20] 霍永清,王亚民,汪燮卿,等.多产液化气和高辛烷值汽油MGG工艺技术[J].石油炼制与化工,1993,24(5):41-52.
HUO Y Q, WANG Y M, WANG X Q, et al. A novel catalytic conversion process for maximum LPG plus gasoline production (MGG) [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 1993, 24(5): 41-52.
- [21] 张永连,邢颖春,钟乐桑,等.MGG工艺的工业试验[J].炼油设计,1993,23(3):4-9.
ZHANG Y L, XING Y C, ZHONG L S, et al. Commercial test of MGG process [J]. Petroleum Design, 1993, 23(3): 4-9.
- [22] 钟乐桑,霍永清,王均华,等.常压渣油多产液化气和汽油(ARGG)工艺技术[J].石油炼制与化工,1995,26(6):15-19.
ZHONG L S, HUO Y Q, WANG J H, et al. ARGG process for maximum gas plus gasoline production from atmospheric residue [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 1995, 26(6): 15-19.
- [23] 潘罗其,颜刚,邱中红,等.ARGG装置增产丙烯技术的工业应用[J].石油炼制与化工,2006,37(1):27-30.
PAN L Q, YAN G, QIU Z H, et al. Measures for increasing propylene yield in ARGG unit [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2006, 37(1): 27-30.
- [24] 于福东,宋亦伟,白旭辉,等.催化裂化装置应用MFP技术的工业试验[J].石油炼制与化工,2022,53(7):18-22.
YU F D, SONG Y W, BAI X H, et al. Industrial test of MFP technology in FCC unit [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2022, 53(7): 18-22.
- [25] 宋亦伟,赵勇.MFP技术在重油催化裂化装置中的工业应用研究[J].现代化工,2022,42(9):227-230.
SONG Y W, ZHAO Y. Industrial application of MFP technology in heavy oil catalytic cracking unit [J]. Modern Chemical Industry, 2022, 42(9): 227-230.
- [26] 陈祖庇,张久顺,钟乐桑,等.MGD工艺技术的特点[J].石油炼制与化工,2002,33(3):21-25.

- CHEN Z B, ZHANG J S, ZHONG L S, et al. The main features of MGD technology [J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2002, 33(3): 21-25.
- [27] 胡勇仁, 彭永强, 张执刚, 等. 催化裂化多产液化气 and 柴油技术在广石化的工业应用[J]. *石油炼制与化工*, 2001, 32(12): 16-20.
- HU Y R, PENG Y Q, ZHANG Z G, et al. Industrial application of maximizing gas and diesel technology in FCCU [J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2001, 32(12): 16-20.
- [28] 汪燮卿, 舒兴田. 重质油裂解制轻烯烃[M]. 北京: 中国石化出版社, 2015.
- [29] 许日. 基于催化裂化家族技术发展新型炼化一体化[J]. *化学研究与应用*, 2024, 36(9): 1961-1967.
- XU R. Integration of new type of oil refining and chemical production based on fluid catalytic cracking family series technology [J]. *Chemical Research and Application*, 2024, 36(9): 1961-1967.
- [30] 谢朝钢, 施文元, 蒋福康, 等. II 型催化裂解制取异丁烯和异戊烯的研究及其工业应用[J]. *石油炼制与化工*, 1995, 26(5): 1-6.
- XIE Z G, SHI W Y, JIANG F K, et al. Research and development of deep catalytic cracking (type II) for isobutylene and isoamylene production [J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 1995, 26(5): 1-6.
- [31] 王巍, 谢朝钢. 催化裂解(DCC)新技术的开发与应用[J]. *石油化工技术经济*, 2005, 21(1): 8-13.
- WANG W, XIE Z G. Development and application of DCC new technology [J]. *Techno-Economics in Petrochemicals*, 2005, 21(1): 8-13.
- [32] 邢立强. 增产丙烯技术 DCC 工艺应用[J]. *齐齐哈尔大学学报(自然科学版)*, 2010, 26(4): 72-75.
- XING L Q. Study on deep catalytic cracking (DCC) process [J]. *Journal of Qiqihar University (Natural Science Edition)*, 2010, 26(4): 72-75.
- [33] 吴青. 富产化学品的绿色高效石油碱催化新技术[J]. *石油炼制与化工*, 2024, 55(1): 189-201.
- WU Q. Base catalytic technology for low carbon and efficient petroleum processing with enhanced chemical production [J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2024, 55(1): 189-201.
- [34] 贺安新, 侯利国, 靳凤英, 等. 原油(重油)直接制化学品(DPC)技术在惠州石化的工业应用[J]. *炼油技术与工程*, 2023, 53(4): 34-38.
- HE A X, HOU L G, JIN F Y, et al. Industrial application of direct petroleum to chemicals (DPC) technology in Huizhou petrochemical company [J]. *Petroleum Refinery Engineering*, 2023, 53(4): 34-38.
- [35] 谢朝钢, 潘仁南. 重油催化热裂解制取乙烯和丙烯的研究[J]. *石油炼制与化工*, 1994, 25, 25(6): 30-34.
- XIE Z G, PAN R N. Studies on producing ethylene and propylene from heavy hydrocarbons by catalytic pyrolysis process [J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 1994, 25(6): 30-34.
- [36] 谢朝钢, 汪燮卿, 郭志雄, 等. 催化热裂解(CPP)制取烯烃技术的开发及其工业试验[J]. *石油炼制与化工*, 2001, 32(12): 7-10.
- XIE Z G, WANG X Q, GUO Z X, et al. CPP technology for olefin production and its commercial trial [J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2001, 32(12): 7-10.
- [37] 王大壮, 王鹤洲, 谢朝钢, 等. 重油催化热裂解(CPP)制烯烃成套技术的工业应用[J]. *石油炼制与化工*, 2013, 44(1): 56-59.
- WANG D Z, WANG H Z, XIE Z G, et al. Commercial trial of CPP complete technology for producing light olefins from heavy feedstock [J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2013, 44(1): 56-59.
- [38] 王巍, 谢朝钢. 催化裂解(DCC)新技术的开发与应用[J]. *石油化工技术经济*, 2005, 21(1): 8-13.
- WANG W, XIE Z G. Development and application of DCC new technology [J]. *Techno-Economics in Petrochemicals*, 2005, 21(1): 8-13.
- [39] 李晓红. 两段提升管催化裂化多产丙烯(TMP)技术应用基础研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2007.
- [40] 李春义, 徐占武, 姜国骅, 等. 两段提升管催化裂解多产丙烯技术的工业试验[J]. *石化技术与应用*, 2008, 26(5): 436-441.
- LI C Y, XU Z W, JIANG G H, et al. Commercial test of two-stage riser catalytic cracking of heavy oil for maximizing propylene yield [J]. *Petrochemical Technology & Application*, 2008, 26(5): 436-441.
- [41] 马文明, 成晓洁, 朱根权, 等. DCC-plus 技术及其产品灵活性[J]. *石油学报(石油加工)*, 2019, 35(2): 217-223.
- MA W M, CHENG X J, ZHU G Q, et al. DCC-plus process and flexibility of its products [J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2019, 35(2): 217-223.
- [42] 蔡建崇, 万涛. 增强型催化裂解技术(DCC-PLUS)的工业应用[J]. *石油炼制与化工*, 2019, 50(11): 16-20.
- CAI J C, WAN T. Industrial application of DCC-PLUS technology [J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2019, 50(11): 16-20.
- [43] 谢朝钢. DCC 工艺技术灵活性及其在化工型炼油厂的应用[J]. *石油炼制与化工*, 2022, 53(7): 1-5.
- XIE Z G. Flexibility of DCC technology and its commercial application in chemical-type refinery [J]. *Petroleum Processing*

- and Petrochemicals, 2022, 53(7): 1-5.
- [44] 谢朝钢, 魏晓丽, 龙军. 重油催化裂解制取丙烯的分子反应化学[J]. 石油学报(石油加工), 2015, 31(2): 307-314.
XIE Z G, WEI X L, LONG J. Molecular reaction chemistry of heavy oil catalytic cracking to propylene[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2015, 31(2): 307-314.
- [45] 谢朝钢, 高永灿, 姚日远, 等. MCP重油选择性裂解工艺技术的开发及其工业试验[J]. 石油炼制与化工, 2014, 45(11): 65-69.
XIE Z G, GAO Y C, YAO R Y, et al. Development of selective catalytic cracking technology for maximizing catalytic propylene and its commercial application[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2014, 45(11): 65-69.
- [46] 张策, 张执刚, 龚剑洪, 等. 重油高效催化裂解(RTC)技术试验研究[J]. 石油炼制与化工, 2021, 52(8): 12-16.
ZHANG C, ZHANG Z G, GONG J H, et al. Experimental study of residuum to chemicals(RTC) technology[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2021, 52(8): 12-16.
- [47] 龚剑洪, 吴雷, 马青青, 等. 新型高效重油催化裂解(RTC)技术的工业应用[J]. 石油炼制与化工, 2021, 52(7): 1-5.
GONG J H, WU L, MA Q Q, et al. Commercial application of novel deep catalytic cracking technology for resid to chemicals(RTC)[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2021, 52(7): 1-5.
- [48] 焦瑞. 世界首套RTC工艺重油催化裂解装置全面开车起步[J]. 炼油技术与工程, 2023, 53(7): 24.
JIAO R. The world's first heavy oil catalytic cracking unit using the RTC process has been fully started up[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2023, 53(7): 24.
- [49] 常鑫. 中国成品油消费现状及趋势分析[J]. 炼油与化工, 2022, 33(3): 1-4.
CHANG X. Analysis on current situation and trend of China's refined oil consumption[J]. Refining and Chemical Industry, 2022, 33(3): 1-4.
- [50] 曹正凯, 姚斌, 李鹏, 等. 压减柴汽比的炼油产品结构调整措施[J]. 广东化工, 2022, 49(9): 48-49.
CAO Z K, YAO B, LI P, et al. Measure conclusion of decreasing ratio of diesel and gasoline for refinery[J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(9): 48-49.
- [51] 龚剑洪, 龙军, 毛安国, 等. LCO加氢-催化组合生产高辛烷值汽油或轻质芳烃技术(LTAG)的开发[J]. 石油学报(石油加工), 2016, 32(5): 867-874.
GONG J H, LONG J, MAO A G, et al. Development of the LTAG technology for LCO to produce higher RON naphtha and light aromatics[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2016, 32(5): 867-874.
- [52] 王鹏, 严加松, 于善青, 等. LTAG工艺专用催化剂SLG-1的研发与应用[J]. 石油炼制与化工, 2018, 49(12): 1-5.
WANG P, YAN J S, YU S Q, et al. Development and application of SLG-1 catalyst for LTAG technology[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2018, 49(12): 1-5.
- [53] 毛安国, 龚剑洪, 唐津莲, 等. 催化裂化轻循环油生产高辛烷值汽油或轻质芳烃(LTAG)技术关键及实践[J]. 石油与天然气化工, 2020, 49(3): 1-7.
MAO A G, GONG J H, TANG J L, et al. Technical key and practice of producing high octane number gasoline or light aromatics (LTAG) from FCC light cycle oil[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2020, 49(3): 1-7.
- [54] 彭建宁. RTS和LTAG技术在柴国Ⅵ质量升级中的工业应用[J]. 石油石化绿色低碳, 2020, 5(2): 15-20.
PENG J N. Industrial application of RTS and LTAG in state-Ⅵ diesel fuel upgrading[J]. Energy Conservation and Emission Reduction in Petroleum and Petrochemical Industry, 2020, 5(2): 15-20.
- [55] 龚剑洪, 毛安国, 刘晓欣, 等. 催化裂化轻循环油加氢-催化裂化组合生产高辛烷值汽油或轻质芳烃(LTAG)技术[J]. 石油炼制与化工, 2016, 47(9): 1-5.
GONG J H, MAO A G, LIU X X, et al. LTAG technology for producing high octane number gasoline and light aromatics[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2016, 47(9): 1-5.
- [56] 唐津莲, 龚剑洪, 习远兵, 等. 第二代LTAG技术开发[J]. 石油学报(石油加工), 2022, 38(2): 227-233.
TANG J L, GONG J H, XI Y B, et al. Development and industrial application of second-generation LTAG technology[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2022, 38(2): 227-233.
- [57] 唐津莲, 龚剑洪, 彭轶, 等. 第二代LTAG技术的工业应用[J]. 石油炼制与化工, 2021, 52(2): 1-6.
TANG J L, GONG J H, PENG Y, et al. Industrial application of second-generation LTAG technology[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2021, 52(2): 1-6.
- [58] 袁起民, 毛安国, 龚剑洪, 等. LCO选择性加氢-催化裂化组合生产轻质芳烃(LTA)技术工业实践[J]. 石油炼制与化工, 2020, 51(12): 1-5.
YUAN Q M, MAO A G, GONG J H, et al. Industrial practice of LTA technology for converting LCO to light aromatics[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2020, 51(12): 1-5.

(编辑 闫玉玲)