

集团公司科学技术奖申报成果公示材料

成果名称：宽馏分油高效裂解催化材料“孔道-酸域”梯级协同设计与应用基础

推荐年度：2025 年度

推荐单位：中国石油天然气股份有限公司石油化工研究院

推荐奖项类别及等级：基础研究二等奖

主要完成人：孙志国、王刚、张忠东、刘家旭、孟凡芳、汪毅、郭成玉、侯凯军

主要完成单位：

中国石油天然气股份有限公司石油化工研究院

中国石油大学（北京）

大连理工大学

推荐意见：

随着炼化业务转型升级速度不断加快，石脑油、柴油与重质油组成的宽馏分油催化裂解，是炼化企业实现“基础+高端”产业升级的优选举措。其核心科学问题在于：宽馏分油存在“小分子难裂解、大分子易结焦”技术难题，如何通过深入解析 C-C 键定向裂解，指导关键催化材料的设计与应用，实现宽馏分油向低碳烯烃的高效转化。

本项目阐明了烃类裂解平衡极限与氢离子转移反应路径调控的理论基础，并首次建立了实时-原位-动态跟踪低碳烯烃催化转化的新方法。基于此，首创“孔道-酸域”梯级协同的低碳烯烃选择性强化材料设计体系，攻克了宽馏分油裂解中 C-C 键定向裂解与氢离子转移抑制的核心科学难题，解决了“小分子难裂解、大分子易结焦”共性技术瓶颈，成功制备了中国石油首例宽馏分油专用催化裂解催化剂，完成了工业转化，为炼化产业升级提供了关键技术支撑。

本项目发表学术论文 15 篇，出版专著 1 部，获授权发明专利 5 件。项目团队受邀在美国化学会年会、中日韩炼油技术研讨会、全国分子筛学术大会等具有影响力的学术平台作主旨报告 10 余场次，研究成果的科学价值与技术先进性获得行业高度认可。

鉴于本项目研究成果对推动国内催化裂解产业发展的科学价值，特推荐申报 2025 年度集团公司基础研究二等奖。

项目简介：

研究背景和总体思路：

在“双碳”战略目标驱动下，中国石化的燃料型炼厂亟需向油化一体化深度转型，以实现高效、清洁生产化学品。催化裂解技术作为连接炼油与化工的核心纽带，是重质油高效转化为低碳烯烃的关键发展方向。然而，催化裂解原料馏分范围宽、结构复杂多样、分子键能差异显著，在单一反应器场景下存在“小分子难裂解、大分子易结焦”的技术难题。为解决此技术难题，本项目聚焦于如何针对石油烃分子的尺寸与结构特性，创制先进催化材料，深度促进宽馏分油及中间产物 C-C 键的差异性裂解，向低碳烯烃的高效、高选择性并行转化，并有效抑制焦炭生成。

与传统催化裂化不同，催化裂解以最大化低碳烯烃收率为目标，要求深度促进原料及中间产物的“并行”转化。为此，本项目从深入研究宽馏分油催化裂解反应过程 C-C 键断裂的基础科学问题出发，设计了择形裂解的高稳定性 ZSM-5 分子筛、大分子预裂解的强酸性 Y 分子筛系列孔道-酸域梯级协同催化材料，提高了其稳定性、活性和选择性，指导了核心裂解催化剂的设计与应用。

主要科技突破点：

本项目主要科技突破点包括以下三个方面：

突破点 1：阐明了烃类裂解平衡极限与氢离子转移反应路径调控的理论基础。本项目创新性地建立了烃类有序催化裂解反应平衡限度判据与速率耦合调控强化低碳烯烃选择性的方法，明确了实际低碳烯烃收率与热力学平衡时存在约 30% 的差距，发现小孔径、低酸密度的催化材料可以动力学调控裂解与氢转移等副反应的反应速率，促进 C-C 键定向裂解，减少近 90% 的氢转移反应，从而控制低价值甲烷生成，提高低碳烯烃选择性 30% 以上，深化了对烃分子有序裂解路径调控与副反应抑制的科学认识，为精准设计高丙烯选择性催化剂提供了核心理论支撑。

突破点 2：首次建立了实时-原位-动态跟踪低碳烯烃催化转化的新方法。针对生成的低碳烯烃容易发生二次转化副反应，导致收率难以最大化的问题，本项目创新发明了双光束 FT-IR 光谱，首次应用于低碳烯烃转化的原位表征中。与单光束红外光谱相比，双光束 FT-IR 光谱能够排除热发射光谱和气相分子吸收光谱

干扰，原位捕获反应中间体。对丙烯在 ZSM-5 上催化转化的反应历程进行实时、原位观测，观察到了丙烯在 ZSM-5 表面 Brönsted 酸中心上经历了吸附、活化、聚合、环化、氢转移/脱氢等反应步骤生成芳烃的过程，明确了宽馏分油高效催化裂解需要抑制低碳烯烃的芳构化等副反应，为催化材料的研制提供了理论指导。

突破点 3：创新提出了关键催化材料“孔道-酸域”梯级协同催化机制。基于科学理论认识，首创“孔道-酸域”梯级协同的低碳烯烃选择性强化材料设计体系：开发高稳定性 ZSM-5 分子筛(择形裂解主导)、创制强酸性 Y 分子筛(大分子预裂解核心)，攻克了宽馏分油裂解中 C-C 键定向裂解与氢离子转移抑制的核心科学难题，解决了宽馏分油催化裂解工业场景中“小分子难裂解、大分子易结焦”共性技术瓶颈。工业试验结果表明：丙烯产率突破性提升 1.57 个百分点，为炼厂最大化生产高价值化学品提供了变革性技术支撑。

成果价值：

本项目在宽馏分油催化裂解制低碳烯烃领域取得了一系列技术成果，发表相关论文 15 篇，出版专著 1 部，他引次数超过 150 次，国内外学术会议报告近 10 次，扩大了中石油在催化裂解领域的学术影响力，获得以中国石油为第一权利人的授权专利 5 件，建立了完备的知识产权体系，为技术推广奠定基础。本项目在催化裂解基础理论领域实现重要突破，其技术在工业应用中效果显著，3 次入选石油化工研究院十大科技进展，为炼化企业高效生产低碳烯烃、实现转型升级提供了科技支撑，对保障国家能源安全与石化产业高质量发展具有重大战略意义。

知识产权：

(1) 已授权发明专

序号	专利号	专利名称	专利权人	发明人	完成单位	授权日期	来源项目名称	计划任务书编号	法律状态	所支持创新点	国别(地区)
1	ZL 2020 1 06831 50.2	一种无铵盐制备 REY 分子筛的方法	中国石油天然气股份有限公司、中国石油大学(北京)	孙志国，高雄厚，张忠东，邢昕，王剑，刘其武，郭成玉，王骞，张兆前，郭广娟，于宏悦	中国石油天然气股份有限公司	2024.8.27	炼油向化工转型升级技术研究开发	2019A-18 09	授权	创新点 3	中国
2	ZL202 111493 696.2	一种从原油直接生产基础化学品的组合加工方法	中国石油天然气股份有限公司	张忠东，王刚，高雄厚，党法璐，孟凡芳，何盛宝，孙志国，张兆前，王剑，侯凯军	中国石油天然气股份有限公司;中国石油大学（北京）	2024.5.24	炼油向化工转型升级技术研究开发	2019A-18 09	授权	创新点 3	中国
3	ZL202 1 114913 97.5	一种从原油直接生产低碳烯烃兼产轻质芳烃的加工方法	中国石油天然气股份有限公司	王刚，张忠东，党法璐，高雄厚，孟凡芳，孙志国，何盛宝，张兆前，王剑，樊江涛	中国石油天然气股份有限公司;中国石油大学（北京）	2024.5.24	炼油向化工转型升级技术研究开发	2019A-18 09	授权	创新点 3	中国
4	ZL2021 10945 997.8	一种费托合成油的催化转化方法	中国石油天然气股份有限公司	孟凡芳，张忠东，王智峰，高雄厚，刘超伟，高永福，孙志国，刘涛，孙雪芹，刘其武	中国石油天然气股份有限公司	2024.4.30	炼油向化工转型升级技术研究开发	2019A-18 09	授权	创新点 3	中国
5	ZL2015	一种控制分	中国石油	张忠东，柳召永，	中国石油	2020.5.8	多产异构烯烃	2014B-24	授权	创新点 3	中国

	11025 239.5	馏塔塔底液 位和反应苛 刻度的方法	天然气股 份有限公 司	杨朝合, 王艳飞, 曹庚振, 郭琚, 王 震, 刘涛, 汪毅, 樊红超, 王辰晨, 赵连鸿	天然气股 份有限公 司		的高辛烷值 FCC 催化剂研 制与工业应用	09			
--	----------------	-------------------------	-------------------	---	-------------------	--	-----------------------------	----	--	--	--

(2) 已授权实用新型专利 (按重要程度排列)

序号	专利号	专利名称	专利权人	发明人	授权日期	法律状态	所支持创新点	国别(地区)

(3) 已授权外观设计专利 (按重要程度排列)

序号	专利号	专利名称	专利权人	设计人	授权日期	法律状态	所支持创新点	国别(地区)

(4) 已登记计算机软件著作权 (按重要程度排列)

序号	登记号	计算机软件著作权名称	著作权人	完成日	所支持创新点

(5) 已认定技术秘密 (按重要程度排列)

序号	登记号	技术秘密名称	权利人	登记日期	认定部门	所支持创新点

(6) 已颁布标准 (国际标准、国家标准、行业标准、集团公司标准、所属企业标准)

序 号	级别	标准名称	标准号	起草单位	起草人	发布时间	发布机关	所支持创新点

--	--	--	--	--	--	--	--	--

(7) 发表论文及专著

① 代表性论文

序号	核心期刊学术论文名称	发表刊物	影响因子	发表时间	全部作者	候选人排名	SCI 他引次数	他引总次数
1	Construction of an operando dual-beam Fourier-transform infrared spectrometer and its application in the observation of isobutene reactions over nano-sized HZSM-5 zeolite	Chinese Journal of Catalysis	17.7	2017 年	Jiaxu Liu, Jilei Wang, Wei Zhou, Cuilan Miao, Guang Xiong, Qin Xin, Hongchen Guo	1	12	12
2	Enhancing hydrothermal stability of nano-sized HZSM-5 zeolite by phosphorus modification for olefin catalytic cracking of full-range FCC gasoline	Chinese Journal of Catalysis	17.7	2017 年	Yun Zhao, Jiaxu Liu, Guang Xiong, Hongchen Guo	2	21	22
3	Fischer-Tropsch wax catalytic cracking for the production of low olefin and high octane number gasoline: Experiment and molecular level kinetic modeling study	Fuel	7.5	2021 年	Mei Yang, Linzhou Zhang, Gang Wang, Zhengyu Chen, Jiannian Han, Chengdi Gao, Jinsen Gao	3	20	20
4	Elucidating the structure-performance relationship of typical commercial zeolites in catalytic cracking of low-density polyethylene	Catalysis Today	5.3	2022 年	Yi Wang, Yonghui Zhang, Hongchao Fan, Pingping Wu, Meng Liu, Xinli Li, Jun Yang, Chaowei Liu, Peng Bai, Zifeng Yan	1	26	26

5	Aerosol-assisted synthesis of nano-sized ZSM-5 aggregates	RSC Advances	4.6	2016 年	Guang Xiong, Jinpeng Yin, Jiaxu Liu, Xiyan Liu, Zhendong Guo, Liping Liu	3	1	1
6	Prediction of molecular distribution and temperature profile of FCC process through molecular-level kinetic modeling	Chemical Engineering Science	4.3	2022 年	Zhengyu Chen, Gang Wang, Suoqi Zhao, Linzhou Zhang	2	14	14
7	Transient Brønsted Acid Sites in Propene Aromatization over Zn-Modified HZSM-5 Detected by Operando Dual-Beam FTIR	The Journal of Physical Chemistry C	3.2	2019 年	Jiaxu Liu, Long Lin, Jilei Wang, Wei Zhou, Cuilan Miao, Chunyan Liu, Ning He, Qin Xin, Hongchen Guo	1	11	11
8	A Comparison on the Hydrothermal Stability of Nano-sized H-ZSM-5 Zeolite Modified by Ammonium Dihydrogen Phosphate and Trimethylphosphate	Catalysis Letters	2.6	2019 年	Yun Zhao, Jiaxu Liu, Ning He, Chunyan Liu, Hongchen Guo	2	0	0
9	十二烷基硫酸钠对原位晶化制备小晶粒 NaY 的影响	物理化学学报	13.5	2015 年	孙志国, 高雄厚, 马建泰, 张莉, 刘宏海, 王宝杰	1	0	11
10	分子筛类型对正戊烷催化裂解反应性能的影响	石油学报(石油加工)	2.6	2022 年	刘美佳, 王刚, 许顺年, 张忠东, 高雄厚	2	0	9
11	碳五烷烃裂解制低碳烯烃反应性能的分析	化工学报	2.0	2021 年	刘美佳, 王刚, 张忠东, 许顺年, 王皓, 党法璐, 何盛宝.	2	0	2
12	多产丙烯助剂对 LB-5 催化剂催化裂解制低碳烯烃性能的影响	应用化工	2.0	2015 年	侯凯军, 李荻, 张艳惠, 王智峰, 田爱珍, 张海涛	1	0	2
13	C5 烃催化裂解过程中氢转移反应的研究	燃料化学学报	1.9	2021 年	刘美佳, 王刚, 张忠东, 田爱珍	2	0	8

14	不同硅铝比 ZSM-5 分子筛的合成及其在丁烯催化裂解中的应用	石油化工	1.0	2016 年	李兆飞, 郭成玉, 王骞, 刘其武, 邢昕, 胡云峰	2	0	17
15	剂油比调变方式对 DCR 装置评价的研究	化学工程	0.6	2019 年	孟凡芳, 孙雪芹, 姜健, 王智峰, 侯凯军, 高永福	1	0	2

② 代表性专著

序号	著作名称	出版社	出版时间	全部作者	候选人排名	sci 他引频次	他引总频次
1	催化裂化技术进展文集	兰州大学出版社	2017 年	张忠东、高雄厚	1	0	0

主要完成人：

项目排名	姓名	性别	出生年月	工作单位	对本项目技术创造性贡献
1	孙志国	男	1980. 05	石油化工研究院	负责项目方案的制定与实施，提出了研发思路和技术路线，负责和参与具有梯级孔分布的高稳定 ZSM-5、高酸性 Y 分子筛等关键材料开发，以及高性能宽馏分油催化裂解制低碳烯烃催化剂开发。对创新点 1、2、3 做出贡献，占工作量 90%。
2	王刚	男	1975. 02	中国石油大学（北京）	参与项目方案的制定与实施，提出了研发思路和技术路线，提出了对烃类裂解平衡极限与氢离子转移反应路径调控认识，参与了催化裂解先进催化材料和催化剂的研制开发。对创新点 1，3 做出贡献，占工作量 80%。
3	张忠东	男	1965. 11	石油化工研究院	曾负责项目的总体思路和方案设计，提出了对催化裂解氢转移反应路径认识，对高活性稳定性 ZSM-5 分子筛、高硅铝比 Y 型分子筛改性及制备，对高性能催化裂解催化剂的研发思路、技术突破方向和技术路线，参与了催化裂解先进催化材料和催化剂的研制开发。对创新点 1~3 做出贡献，占工作量 70%。
4	刘家旭	男	1984. 03	大连理工大学	参与项目方案的实施，提出了实时-原位-动态跟踪低碳烯烃催化转化的新方法，参加具有梯级孔分布的高稳定 ZSM-5、高酸性 Y 分子筛等关键材料的开发。对创新点 2、3 做出贡献，占工作量 50%。
5	孟凡芳	女	1987. 12	石油化工研究院	参与项目方案的实施，参与催化材料遴选、催化剂制备工艺的研究，负责 ACE 装置评价催化剂的裂解反应性能。对创新点 3 做出贡献。占工作量 40%。
6	汪毅	男	1979. 10	石油化工研究院	参与项目方案的实施，参与催化材料和催化剂制备工艺的放大研究。对创新点 2 和 3 做出贡献。占工作量 30%。
7	郭成玉	女	1987. 07	石油化工研究院	参与项目方案的实施，参与催化材料和催化剂制备研究，研究不同硅铝比 ZSM-5 在丁烯催化裂解反应中的性能。对创新点 2 和 3 做出贡献。占工作量 30%。
8	侯凯军	男	1982. 10	石油化工研究院	参与项目方案的实施，参与催化材料及催化剂的分析评价工作。对创新点 1、3 作出了贡献，占工作量的 30%。

