

芳烃生产技术的最新研究与发展趋势

郭蓉*, 王智峰, 侯凯军, 高永福, 陈鹏, 汪毅

(中国石油石油化工研究院兰州化工研究中心, 甘肃兰州 730060)

摘要:系统梳理芳烃生产技术进展, 聚焦绿色化与多元化工艺对石油基路线的革新, 解析各类工艺原理、催化剂研发及工业化水平。未来传统工艺需持续优化, 但发展重心应转向以下 2 方面: 一方面是绿色化工艺——降低石油依赖、实现碳循环利用, 需突破成本与稳定性瓶颈; 另一方面是多元化技术路径——耦合生物质转化、合成气芳构化、煤/页岩油升级及废塑料/CO₂ 资源化技术, 提升非石油基原料利用率。规模化应用亟需攻克催化剂稳定性与过程经济性瓶颈, 通过多原料协同优化支撑能源转型与碳中和目标。

关键词:芳烃技术; 绿色化多元化生产技术; 多技术耦合; 降低石油依赖

中图分类号: TQ015; TQ021.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)05-0060-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.05.011

Recent advances and development trends in aromatic hydrocarbon production technology

GUO Rong*, WANG Zhi-feng, HOU Kai-jun, GAO Yong-fu, CHEN Peng, WANG Yi

(Lanzhou Petrochemical Research Center, Petrochemical Research Institute, PetroChina, Lanzhou 730060, China)

Abstract: This review systematically examines technological advancements in aromatic hydrocarbon production, with a particular focus on the complementary and innovative role of green and diversified processes in relation to the conventional petroleum-based route. For each type of process, the fundamental principles, reaction mechanisms, catalyst development progress, and current level of industrial implementation are elucidated in detail. Looking forward, while continuous optimization of traditional processes remains necessary, the strategic emphasis should shift towards: Green processes-aiming to reduce petroleum dependence and enable carbon recycling/utilization, whose large-scale deployment urgently requires overcoming cost and stability bottlenecks; and Diversified technological pathways-achieving efficient utilization of non-petroleum feedstocks through the coupling of multiple technologies including biomass catalytic conversion, syngas aromatization, coal/oil shale upgrading, and waste plastic/CO₂ valorization. The scalable development of these pathways necessitates breakthroughs in catalyst stability and process economics, ultimately propelling the transformation of the energy structure and supporting carbon neutrality goals through multi-feedstock synergy optimization.

Key words: aromatic hydrocarbon production technology; green and diversified production technologies; technology integration; reducing petroleum dependence

芳烃(如苯、甲苯、二甲苯等)是石化工业的核心基础原料,广泛应用于塑料、纤维、医药等领域。随着全球“双碳”目标推进,传统石油基芳烃生产面临环保压力,而新兴技术如二氧化碳(CO₂)制芳烃、生物基制芳烃等技术为行业绿色转型提供了新路径。本文中结合最新研究进展,从传统石油基生产技术持续优化及绿色、多元化产业发展现状等方面综述了芳烃技术的研究进展。

1 传统石油基生产技术持续优化

催化重整、轻烃芳构化、裂解汽油加氢、甲苯歧化、烷基化转移等传统技术仍是当前芳烃生产的主流^[1]。

1.1 催化重整技术

催化重整是将石脑油转化为富含芳烃的生成油并副产氢气的关键工艺,核心反应包括环烷烃脱氢、

烷烃脱氢环化等,依赖双功能催化剂(金属功能与酸性功能结合)^[2]。催化剂历经铂基单金属、铂铈双金属、ZSM-5 分子筛改性等阶段,如 Mg、Zn 改性的 ZSM-5/ZSM-11 共结晶分子筛可提升稳定性, Ni 基分子筛催化剂能增强抗积炭能力^[3]。

催化重整是芳烃生产的支柱,全球约 38% 的苯和 87% 的二甲苯源于该技术,工艺分为固定床半再生式和移动床连续再生式, UOP、IFP 公司处于领先地位。在超低压连续重整技术领域,洛阳工程公司联合石科院等单位开发的 280 万 t/a 超低压连续重整工艺包,创新采用绿色再生循环气吸附脱氯工艺,有效解决了设备腐蚀和废碱液排放问题。在催化重整工艺模拟优化方面,湖南石化“基于分子工程的连续催化重整工艺模拟与优化研究”项目达到国际领先水平,研发出行业首套全流程分子级模拟优化

收稿日期: 2025-07-11; 修回日期: 2026-03-20

作者简介: 郭蓉(1998-), 女, 硕士, 助理工程师, 研究方向为石油炼制、反应器结构优化与过程强化数值模拟, 通讯联系人, guorong646@petrochina.com.cn。

系统,实现了理论模型指导生产,显著提升了“三苯”产率并实现节能降耗。

1.2 裂解汽油加氢技术

裂解汽油是乙烯副产物(占乙烯产量50%~80%),富含芳烃前驱体但杂质多,经两段加氢可转化为高附加值芳烃:一段低温液相加氢常用Pd基催化剂(如Pd/Al₂O₃)脱除双烯烃,二段高温气相加氢常用Co-Mo/Al₂O₃或Ni-Mo/Al₂O₃催化剂深度脱硫、脱单烯烃^[4]。

工业应用中,中海油研发的THFS-2加氢精制催化剂在陕西延长石油20万t/a装置中表现优异,产品硫氮<1.0 μg/g、溴价<0.5 g/100 g,远超芳烃抽提进料要求;B型二段加氢催化剂在TL公司C₉/C₁₀馏分装置中优势显著,其TiO₂-Al₂O₃复合载体可抵抗原料中聚二甲基硅氧烷分解产生的硅杂质,避免孔道堵塞,解决了传统催化剂快速失活问题^[5]。

1.3 轻烃芳构化技术

轻烃芳构化以液化气、抽余油等低碳烃为原料生产BTX,副产氢气及乙烯原料(乙烷、丙烷),能拓展芳烃来源、提高资源利用率,在芳烯联产企业中优势突出。催化剂以ZSM-5分子筛为核心,经Pt、Zn、Ga等金属改性提升活性与选择性,通过调控酸强度(优化L酸与B酸比例)增强稳定性^[6]。工业工艺持续创新,BP-UOP的Cyclar工艺以丙烷、丁烷为原料,采用连续再生技术生产芳烃;国内中石油的C₄临氢芳构化技术(LAG)可高效利用C₄资源生产高辛烷值汽油组分;乌石化开发轻烃耦合甲醇芳构化技术,通过反应耦合降低积炭率,提升催化剂稳定性。

1.4 甲苯歧化技术

甲苯歧化通过甲基转移生成苯和二甲苯,分传统歧化(如Tatoray工艺,产平衡型二甲苯)和选择性歧化(用择形催化剂高产对二甲苯)。催化剂方面,Tatoray工艺用硅铝催化剂,甲苯转化率30%~35%;中石化SD-01催化剂为改性ZSM-5,转化率29%~31%,对二甲苯选择性89%~93%;HAT系列催化剂低氢耗、高收率,应用于国内20余套装置。工业应用中,Tatoray工艺在全球超50套装置运行^[7];中石化S-TDT技术解决大型化问题,能耗与产品质量优于同类技术,许可国内外多家企业,为芳烃产业降本增效提供支撑。

传统石油基制芳烃工艺能耗高、碳排放量大且依赖进口原油;甲苯甲醇烷基化技术虽能利用廉价甲醇,但催化剂寿命短、废水处理难;轻烃芳构化技术中催化剂积炭失活快,产物选择性低(液收仅

50%~60%)。基于以上不足及国家“双碳”目标和地方产业规划,芳烃技术逐渐向绿色低碳化、原料多元化方向发展,通过不断创新与探索出现了二氧化碳制芳烃、生物基制芳烃、甲醇制芳烃及合成气制芳烃等技术。

2 二氧化碳制芳烃技术

CO₂制芳烃技术作为一种具有重要战略意义的非石油路线合成途径,近年来受到了广泛关注。CO₂加氢制芳烃是一个涉及多步反应的过程,主要分为改性费托合成和甲醇介导2条路线^[8]。2条路线的关键步骤不同:前者是CO₂转化为CO(逆水煤气反应),后者则是CO₂加氢制甲醇以及甲醇转化为芳烃。

2.1 催化剂研究

CO₂制芳烃过程需要开发高效的二氧化碳加氢催化剂,其中活性金属、分子筛结构和酸性以及活性组分接触度均对催化性能有一定的影响。在活性金属方面,焦佳鹏等^[9]发现Fe基催化剂因对水煤气变换反应(RWGS)和费托合成(FTS)过程的催化能力成为CO₂-FTS过程的首选,但存在对C₅~C₁₁碳氢化合物选择性不足的问题。高鹏^[8]发现Zn基催化剂在CO₂加氢制甲醇中应用广泛,与HZSM-5组成的串联催化剂可实现CO₂的直接芳构化。焦春学^[10]研究表明In₂O₃催化剂表面经活化后产生大量氧空位,在CO₂加氢制甲醇及芳烃中表现出一定的优势。除了金属离子影响,分子筛的酸性分布和结构特性对芳烃的选择性与催化剂的稳定性起着至关重要的作用。适量的酸性强度与密度可以为醇类和烯烃中间体的反应提供活性位点,但酸性过强会导致积炭或加氢生成烷烃。HZSM-5独特的孔结构为择形催化提供空间限制作用,孔径与轻质芳烃分子动力学直径相当,提高了目标产物的选择性,同时抑制了焦炭大分子前体的生成^[10]。此外,不同活性组分之间的接触距离对催化剂的稳定性和活性有重要作用。此外,该学者还考察了不同晶型In₂O₃与HZSM-5分子筛2活性组分间的接触距离对催化性能的影响,结果表明,当2组分的活性位点之间更接近时,In₂O₃金属氧化物迁移到分子筛中的In物种对分子筛的酸性具有毒害作用,导致CO₂转化率降低。

2.2 研究成果与应用前景

刘中民团队(中科院大连化物所)提出利用CO₂与烷烃耦合制备芳烃的新方法^[11],以酸性分子筛为催化剂,该反应芳烃选择性可达80%。研究证

实部分 CO_2 的碳原子直接进入了芳烃产物,为 CO_2 大规模资源化利用提供了有效途径。

该团队与神华煤制油合作开发的自主技术“石脑油二氧化碳耦合制芳烃”,利用 CO_2 调节石脑油与芳烃的 C/H 平衡,显著提高芳烃选择性,并建成千吨级中试装置。另外,大连化物所李灿团队基于 ZnZrO 固溶体催化 CO_2 加氢制甲醇的研究,构建了 ZnZrO/ZSM-5 串联催化剂体系。催化剂组分间的有效协同是该体系的核心优势,成功实现了 CO_2 高选择性转化制芳烃,芳烃选择性可达 73%~78%, CO_2 单程转化率为 14%。工业试验方面世界首套万吨级二氧化碳制芳烃工业试验项目—内蒙古久泰馨远新材料有限公司万吨级二氧化碳制芳烃项目正在加速推进。该项目采用清华大学自主研发的二氧化碳、合成气一步法制芳烃工艺技术,以二氧化碳和氢气为原料,省去了甲醇合成步骤。

3 生物基制芳烃技术

生物质主要由纤维素(40%~50%)、半纤维素(20%~30%)和木质素(10%~25%)组成。木质素是唯一富含芳香环的组分,其催化转化技术成为研究核心,与石油基芳烃相比,生物基芳烃制备可减少 CO_2 排放,契合低碳经济需求。其中热解为生物质转化主流技术,木质素催化热解制芳烃主要分为热解解聚和催化转化 2 个阶段。

3.1 催化剂研究

学者们对催化剂的研究主要集中在硅铝比优化、酸性位点精准调控以及多级孔体系构建几个方面。HZSM-5 的硅铝比(Si/Al)决定酸性强度,万震等^[12]研究发现低硅铝比(如 25)可提供更多 B 酸位点,提升脱氧效率 20%,使芳烃产率从硅铝比 210 时的 17.82%增至 25 时的 63.72%,但过度酸(Si/Al<20)会加速多环芳香烃(PAHCs)缩聚,使积炭速率增加 30%。负载过渡金属(Co、Zn、Ga 等)能调控 ZSM-5 酸性及孔道性质。在孔道结构创新方面,韩娅婷^[13]以稻谷壳为模板的生物模板法制备多级孔,构建大孔(10~100 μm)-介孔(5~20 nm)-微孔(0.55 nm)分级结构,比表面积达 346 m^2/g ,苯吸附量较商业催化剂提升 25%,甲醇制芳烃液烃收率 60 h 后仍达 17%。熊建云^[14]开发了由碱性氧化物(如 CaO)和酸性分子筛组成的双级催化系统。其中, CaO 负责预处理生物质,脱除甲氧基酚等大分子含氧中间体;酸性分子筛则催化剩余小分子的芳构化反应。以蛋壳基 CaO 与 HZSM-5 的组合为例,该

协同体系通过脱甲氧基和捕获 CO_2 ,成功将芳烃相对含量提升至 80.14%,并显著降低了催化剂的积炭速率。

3.2 研究成果与应用前景

生物基芳烃制备技术的工业应用正逐步发展,部分技术已展现出良好的应用前景,不过在规模化应用方面仍面临一些挑战。美国 Anellotech 公司开发的 Biomass to AromaticTM 工艺是极具发展潜力的生物质热解制芳烃工艺。该工艺以植物秸秆、废木材等非粮生物质为原料,通过 CFPTM(催化快速热解)技术生产芳烃。工艺流程主要为干燥粉碎的生物质原料与粉状 ZSM-5 催化剂在循环流化床反应器(600 $^{\circ}\text{C}$, 0.1~0.4 MPa)中快速转化为芳烃。其工艺设备与石油炼化装置类似,可依托现有炼化装置改造,催化剂成本较低,副产物(焦炭、水、气体、烯烃等)可有效利用,能源经济性良好。BioForming 工艺(美国 Virent/威斯康星大学)通过耦合生物质水解与催化加氢,实现了从 100%可再生植物糖制备 PX,但迄今未见大规模工业化的详细报道。生物基芳烃制备技术虽取得进展,但工业应用仍面临挑战:一是催化剂易积碳失活(如热解工艺中),影响效率并推高成本^[15];二是生物质原料供应不稳定且成分性质差异大,影响生产稳定性和产品质量;三是整体生产成本仍较高,需进一步降低以实现广泛应用。

4 甲醇制芳烃技术

甲醇制芳烃(MTA)技术是一个重要的催化转化过程,核心目标是将甲醇转化为高附加值的 BTX 等芳烃,该反应通常在改性沸石分子筛(尤其是 ZSM-5)催化剂上进行,涉及复杂的反应网络^[16],是实现煤炭高效清洁转化、缓解芳烃需求压力的重要途径。甲醇制芳烃的核心研究内容围绕催化剂开发、工艺工程化等内容展开。

4.1 催化剂研究

在 MTA 反应中,ZSM-5 的核心地位源于“结构-酸性”的协同优势。十元环孔道在尺寸上适配芳烃生成,三维孔道促进扩散,而表面酸性的可调变性则决定了反应的选择性。具体而言,强酸位主导烯烃的环化过程,弱酸位则驱动氢转移反应,两者共同决定了产物的最终分布。为了提升反应性能,研究人员进行了大量改性策略与性能优化方面的研究,如设计双功能催化剂、金属改性、非金属改性、形貌与结构调控等。尽管 ZSM-5 分子筛自身显示芳构化活性,但负载脱氢组分形成的分子筛基双功能催化

剂,由于金属位点促进环烷烃脱氢生成芳烃,分子筛酸位点催化烯烃聚合与环化,总芳烃收率优于单功能的分子筛催化剂,脱氢组分负载显著增强了分子筛催化剂的甲醇芳构化活性。Zn、Ga、Ag、Ni、Cu、Pd和 Mo_2C 等是甲醇芳构化催化剂中重要的脱氢组分;ZSM-5、ZSM-11和MCM-22等沸石分子筛则是常用的芳构化活性组分。赵英龙等^[17]的研究显示,相较于传统H-ZSM-5,合成的Zn-ZSM-5催化剂在甲醇制芳烃反应中表现出优异的选择性与稳定性。非金属改性方面主要采用P、B、Si以及胺处理,通过调变酸强度与分布,减少强酸位以抑制积炭,同时提高水热稳定性。最后还可以通过合成纳米分子筛、构建介孔结构以及控制晶粒尺寸等手段,改善催化剂的扩散性能,减少积炭,提高稳定性。孙翠娟等^[18]以氢氧化四丙胺为模板剂,采用水热合成法分别合成出ZSM-5和SAPO-34晶体,在SAPO-34的合成前驱体中加入适量的ZSM-5,晶化合成出性能较好的SAPO-34/ZSM-5复合分子筛。从催化剂内部表征分析结果可以看出,介孔及中孔数量较多,表面酸性适中,综合了2种分子筛的优点。惠燕^[19]结合二次水热生长法与蒸气辅助固相转化技术,制备了包覆型ZSM-5催化剂,通过调控酸密度分布(尤其是形成内外密度差异),旨在优化甲醇制芳烃性能。

4.2 研究成果与应用前景

甲醇制芳烃工艺以固定床和流化床为主。固定床工艺催化剂固定,常分段操作(如两段式),操作简单但分离复杂、能耗高;催化剂寿命长但需分段更换。Mobil公司早期ZSM-5固定床一段法曾获约30%芳烃收率。山西煤化所开发的两段式固定床工艺性能突出:甲醇完全转化、芳烃选择性83%、液相烃收率31%、催化剂寿命长,指标优于国内^[20]。流化床工艺催化剂处于流动状态,实现连续反应与再生,活性稳定,自动化程度高且操作弹性大,适于百万吨级大规模生产^[21]。2013年,清华大学在陕西榆林投用的流化床甲醇制芳烃(FMTA)自主技术示范装置取得显著成效——催化剂连续运行443 h,液相芳烃选择性高于90%,全流程芳烃收率达74.47%^[22]。甲醇制芳烃技术在发展过程中面临着一些挑战,如ZSM-5分子筛催化剂存在易积炭、活性组分流失、金属烧结等问题,影响催化剂的活性和使用寿命。此外,从经济角度看,在低油价形势下,该技术与石油制芳烃相比,经济性较差,竞争力有待提高。未来,甲醇制芳烃技术的研究重点将集中在催化剂的进一步优化和创新上,包括开发更高性能

的催化剂,提高对二甲苯的选择性和总芳烃收率,同时增强催化剂的稳定性和抗积炭能力^[23]。在工艺方面,需要深入研究反应机理,优化反应条件,开发更先进的反应工艺,以提高生产效率和降低成本。同时,需加强工艺协同(如串联甲苯甲醇甲基化制二甲苯),以提高二甲苯收率,增加经济效益。

5 合成气制芳烃技术

合成气制芳烃是煤/天然气化工的重要方向,通过非石油路线生产高价值芳烃。技术路线主要分为“间接法”(甲醇中间体)和“直接法”(一步转化),间接法技术成熟,但流程长、能耗高;间接路线流程短,理论效率高,但催化剂设计复杂,选择性调控难。目前,工业上间接技术仍占主导,但研究者们致力于开发性能优良的双功能催化剂,直接法具有很大的发展潜力。

5.1 催化剂体系

合成气制芳烃催化剂的核心是双功能体系,其整合金属氧化物与分子筛,通过协同作用达成高效转化。金属氧化物的作用是活化CO和 H_2 生成甲醇、烯烃等中间体,常见的金属氧化物组分有镧基氧化物(如Zn-ZrO₂)、铁基氧化物(如Na-Zn-Fe₅C₂)、铬基氧化物(如Cr₂O₃/ZSM-5)等。王野团队开发的Zn-ZrO₂/H-ZSM-5催化剂,通过氧空位活化CO,在340℃、 $\text{H}_2/\text{CO}=2.7/2.0$ MPa条件下,CO转化率20%,芳烃选择性80%,且稳定1 000 h以上。该团队提出“CO自促进芳构化”机理,通过纳米级间距提升产率。汤兴蕾^[24]设计的镧锌钼氧化物(摩尔比50:1.1:0.8)与H-ZSM-5耦合,芳烃时空产率达0.069 5 g/(g·h),轻质芳烃占比82.5%。刘大鹏^[25]以FeMn-HZSM-5作为模型催化剂,HZSM-5分子筛与Fe基费托合成催化剂质量比为1,探究反应条件[593 K,1.0 MPa,2 220 mL/(g·h), $\text{H}_2/\text{CO}=1.0$]对催化活性、芳烃选择性(总烃)及芳烃分布的影响。发现CO转化率达到69.9%,液相中芳烃的含量为94.6%。马丁课题组将Na-Zn-Fe₅C₂与多级孔H-ZSM-5耦合,在340℃、2.0 MPa下,CO转化率88.8%,芳烃选择性51%,单程收率33%。中国石化与中科大团队开发的Cr₂O₃/ZSM-5定向分布催化剂,利用ZSM-5孔道各向异性,在395℃、7.0 MPa下,CO转化率49.4%,芳烃选择性高且抑制C₁+芳烃生成。

分子筛在催化体系中的作用是提供酸性位点,促进烯烃低聚、环化及芳构化反应。在反应过程中

通常通过金属氧化物改性、分子筛改性及耦合方式与配比优化来提升分子筛的反应性能。金属氧化物改性的手段主要有掺杂与固溶体形成及定向分布与界面效应等。杨成等^[26]研究氧化锆催化剂时发现,单斜相 ZrO_2 比四方相更有利于 CO 转化,小粒径(9 nm)、高酸量的 ZrO_2 活性高,而大晶粒 ZrO_2 酸性位密度高,芳烃选择性更高。周伟^[27]通过金属元素掺杂调控 ZrO_2 氧化物的加氢性能。研究表明,引入少量 Mo 可赋予其适中的加氢能力,在显著提升催化剂活性的同时,有效抑制了甲醇及烯烃中间体的过度加氢,从而维持了高芳烃选择性。对双功能催化剂分子筛改性的常见方法有形貌与酸性调控以及孔道结构优化。张保连等^[28]采用外延生长方法制备出核壳结构分子筛 ZSM-5@Silicalite-1,结构为惰性 Silicalite-1 壳层均匀包覆在 ZSM-5 的外表面,调控了分子筛酸性质,特别是降低了外表面酸性,有利于改善芳烃分布,这是因为惰性 Silicalite-1 壳层均匀包覆在 ZSM-5 的外表面,调控了分子筛酸性质,有利于改善芳烃分布。汤兴蕾^[24]使用不同模板剂制备了片状(TPAOH)、短圆柱状、十字交叉状(TBPH)的 H-ZSM-5 分子筛。耦合 Zr:Zn:Mo = 50:1.1:0.8 的金属氧化物后,片状 H-ZSM-5(TPAOH)表现出最高的 CO 转化率(23.0%),十字交叉状 H-ZSM-5(TBPH)的芳烃选择性最优(80.4%)。同时还发现研磨混合的催化剂耦合方式较双床层耦合更高效,例如 ZrO_2 -ZnO-MoO₃ 与 H-ZSM-5 研磨混合后,芳烃时空产率达 0.069 5 g/(g·h),且 100 h 内性能稳定。

5.2 研究成果与应用前景

魏飞团队开发的 FMTP/FMTA 技术已通过万吨级工业验证。新一代 FSTA 技术采用低氢碳比合成气直接制芳烃,在提升原子经济性的同时,实现了煤化工原料-产品链的整合,形成显著的系统集成优势。团队开发的新型催化剂,在 250~400℃ 和 2~5 MPa 下,通过芳烃池的引入打破原有 ASF 分布的限制,CO 转化率大幅提高,总芳烃的烃基选择性达 83.3%。与久泰集团就流化合成气一步法制芳烃(FSTA)成套技术开发达成合作意向,内蒙古久泰馨远新材料有限公司二氧化碳/合成气制芳烃工业试验项目于 2022 年 6 月 5 日开工建设,总投资 2.75 亿元。利用高效 α -烯烃催化剂 FeZnNa(Na-Zn-Fe₅C₂),马丁与樊卫斌团队^[29]通过耦合改性介孔 HZSM-5,实现了合成气经烯烃中间体直接制芳烃。优化条件(340℃, 2 MPa)下,芳烃占烃产物 51%(轻

质为主),CH₄ 选择性 10%,CO₂ 选择性 27%,芳烃收率 33%,时空收率 16.8 g/(g·h),具备优异工业前景。

6 结论与展望

当前芳烃技术已形成“传统工艺优化与绿色技术突破并行”的发展格局。传统石油基路线通过催化剂升级(如 Pt-Re 双金属、改性 ZSM-5 分子筛)和工艺集成(如逆流连续重整、单塔吸附分离),实现了能耗降低与效率提升。新兴绿色技术中,CO₂ 制芳烃通过 ZnZrO/ZSM-5 等双功能催化剂实现芳烃选择性超 80%,久泰能源万吨级示范项目即将落地;生物基芳烃依托木质素催化转化,美国 Anellotech 工艺产率达 40%,但催化剂积炭与原料预处理成本仍需突破;甲醇制芳烃(MTA)通过流化床工艺(如清华大学 FMTA 技术)实现芳烃收率 74.8%,合成气制芳烃则借助双功能催化剂体系(如 Zn-ZrO₂/H-ZSM-5)平衡 CO 转化率与芳烃选择性。整体而言,芳烃技术正从单一石油依赖向“碳资源多元化利用”转型,绿色工艺的中试与工业化示范加速推进。

技术上需要突破的有首先优化催化剂性能,聚焦抗积碳、长寿命催化剂设计,如通过多级孔 ZSM-5 分子筛调变酸性位点分布,或引入过渡金属(Zn、Ga)优化脱氢-芳构化协同效应,解决生物基与甲醇制芳烃中的催化剂失活问题。然后推动 CO₂ 与废塑料/生物质的耦合转化,如大连化物所“聚烯烃-CO₂ 共芳构化”技术,实现碳资源闭环利用;开发合成气一步法芳构化与费托-芳构化串联工艺,平衡转化率与选择性;最后向智能化与数字化方向发展,借鉴第三代芳烃技术的数字化控制经验,构建反应-分离-能耗协同优化模型,提升工艺稳定性与低碳化水平。

新兴技术向产业化发展主要面临的挑战有:生物基芳烃需突破原料预处理(如木质素高效解聚)与规模化生产瓶颈,降低催化剂成本;CO₂ 制芳烃需优化绿氢耦合,将单吨芳烃成本降至传统路线的 70%以下。合成气制芳烃中双功能催化剂的界面效应调控、流化床工艺的放大稳定性(如 FMTA 技术催化剂寿命提升至 1 000 h 以上)仍是工业化关键。

参考文献

- [1] 慕彦君,宋倩倩,付凯妹,等.芳烃生产技术进展及产业发展建议[J].石化技术与应用,2021,39(5):371-377.
- [2] 徐祥龙.CO₂ 加氢制芳烃铁基双功能催化剂设计及反应机制研

- 究[D].南京:东南大学,2022.
- [3] 任雪宇.ZSM-5的孔道和活性位构筑及其催化褐煤挥发分制芳烃机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.
- [4] 胡俊利,王高杰.不同汽油馏分加工路线选择[J].广州化工,2023,51(16):27-30.
- [5] 王培民.C₉/C₁₀工业加氢B型催化剂与对比剂失活研究[J].当代化工,2023,52(3):638-643.
- [6] 倪婉萍.铈/镓改性ZSM-5催化甲醇制芳烃[D].大连:大连理工大学,2022.
- [7] 易天立,王琦,桂薇.催化裂解制低碳烯烃工艺及催化剂研究进展[J].石化技术与应用,2024,42(4):306-313.
- [8] 高鹏.CO₂加氢制芳烃的金属改性UiO-66/HZSM-5串联催化剂的构筑[D].兰州:西北师范大学,2023.
- [9] 焦佳鹏,田海峰,何环环,等.CO/CO₂加氢制芳烃的研究进展[J].化工进展,2021,40(1):205-220.
- [10] 焦春学.In基催化材料在CO₂加氢制芳烃反应中的性能研究[D].兰州:西北师范大学,2024.
- [11] Wei C C, Zhang W N, Yang K, *et al.* An efficient way to use CO₂ as chemical feedstock by coupling with alkanes[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2023, 47: 138-149.
- [12] 万震,王绍庆,李志合,等.HZSM-5分子筛催化木质素热解制芳烃研究进展[J].化工进展,2024,43(S1):517-532.
- [13] 韩娅婷.稻壳壳为模板制备多级孔ZSM-5及其甲醇制芳烃性能研究[D].太原:太原理工大学,2023.
- [14] 熊建云.蛋壳基氧化钙与HZSM-5双级催化热解玉米芯制备芳烃的研究[D].南昌:南昌大学,2024.
- [15] 周欢.多级孔ZSM-5分子筛催化生物质热解制备芳烃研究[D].杭州:浙江大学,2022.
- [16] 王丽丽.甲醇制芳烃工艺经济性分析[J].山西化工,2021,41(4):99-101.
- [17] 赵英龙,刘民,李俊杰,等.晶种导向合成不同厚度Zn-ZSM-5用于甲醇制芳烃反应[J].石油学报:石油加工,2021,37(2):269-280.
- [18] 孙翠娟,李玉平,王艳悦,等.ZSM-5/SAPO-34复合分子筛的合成及甲醇制烯烃催化性能[J].天然气化工:C1化学与化工,2015,40(2):1-4,9.
- [19] 惠燕.包覆型ZSM-5构筑及其甲醇制芳烃反应性能[D].太原:太原理工大学,2022.
- [20] 李晗.甲醇制芳烃反应过程中ZSM-5催化剂的结构演变及性能优化[D].太原:太原理工大学,2021.
- [21] 杨凡,徐瑞,贾显枝,等.甲醇芳构化技术研究进展[J].天然气化工:C1化学与化工,2021,46(4):14-20,26.
- [22] 陈诗瑶,申峻,王玉高,等.甲醇制芳烃的工艺流程模拟及换热网络优化[J].洁净煤技术,2022,28(1):129-137.
- [23] 马东.合成气经含氧中间体路线直接制芳烃Zr/H-ZSM5双功能催化剂研究[D].济南:齐鲁工业大学,2023.
- [24] 汤兴蕾.金属氧化物/沸石分子筛双功能催化剂上合成气催化转化制芳烃的研究[D].厦门:厦门大学,2022.
- [25] 刘大鹏.合成气直接催化转化制芳烃[D].无锡:江南大学,2018.
- [26] 杨成,张成华,许健,等.氧化锆催化合成气直接转化制芳烃[J].燃料化学学报,2016,44(7):837-844.
- [27] 周伟.接力催化在合成气直接制芳烃及C²⁺含氧化合物中的应用研究[D].厦门:厦门大学,2021.
- [28] 张保连,刘畅,刘苏,等.ZnCr₂O₄/ZSM-5@Silicalite-1优化CO₂一步法加氢制芳烃反应选择性[J].无机化学学报,2023,39(12):2339-2348.
- [29] Zhao B, Zhai P, Wang P F, *et al.* Direct transformation of syngas to aromatics over Na-Zn-Fe₃C₂ and hierarchical HZSM-5 tandem catalysts[J]. Chem, 2017, 3(2):323-333. ■
-
- (上接第59页)
- [5] 李玉龙,谢洪燕,苏海涛,等.草酰胺生产工艺技术研究进展[J].山东化工,2022,51(20):80-82.
- [6] 王庆.草酸二甲酯高值衍生品合成研究[D].沈阳:沈阳化工大学,2023.
- [7] 卓泽凡,刘长有.一种利用合成氨-联产碳酸氢铵工艺生产草酰胺的方法:CN 2019106101780[P].2019-09-24.
- [8] Uchiumi S, Ataka K, Matsuzaki T. Oxidative reactions by a palladium alkyl nitrite system[J]. Journal of Organometallic Chemistry, 1999, 576(1):279-289.
- [9] Tomohik Y, Yukio I, Genji I, *et al.* Process for producing oxamide: US 6348626B1[P].2002-02-19.
- [10] 陈贻盾.一种合成草酰胺连续工艺:CN 102267921A[P].2011-12-07.
- [11] 李扬,朱小学,王科.一种黄磷尾气净化连续合成草酰胺的装置和方法:CN 104610087B[P].2017-01-18.
- [12] 吴晓金,吴维果,毛洪堂,等.一种连续气相合成草酰胺的方法:CN 103288666B[P].2015-07-15.
- [13] 贾金洁,周伟,沈林.一种连续生成草酰胺的方法:CN 110862331B[P].2021-05-11.
- [14] 张蒙恩,李庆华,张伟利.一种草酰胺用连续生产装置:CN 216192002U[P].2022-04-05.
- [15] 王保明,李玉江,张辉平,等.一种草酸二甲酯制备草酰胺的方法:CN 111153823B[P].2023-05-26.
- [16] 杨晋平,韩涛,王保明,等.一种用于连续高效制备草酰胺的装置及方法:CN 115715962A[P].2023-02-28.
- [17] 石磊,宋晓玲,周军,等.一种温和条件下高纯草酰胺高效的生产方法:CN 116396179A[P].2023-07-07.
- [18] 姚元根,乔路阳,周张锋.一种酯氨交换法联产草酰胺和氨基甲酸酯的工艺方法:CN 105367439A[P].2016-03-02.
- [19] Shang B B, Qiao L Y, Zhang F Z, *et al.* Modified basicity from ZnO-CaO synergy for the synthesis of oxamide[J]. Chemistry Select, 2022, 7:e202203211.
- [20] 姚元根,乔路阳,周张锋.一种联产碳酸二甲酯和草酰胺的工艺方法:CN 106674013B[P].2019-06-18.
- [21] 李跃辉,常宇钰.一种草酰胺的制备方法:CN 110041218B[P].2022-04-05.
- [22] 李丽,贾文欣,徐昊,等.缓释肥类型及其运筹方式对弱筋小麦产量及品质的影响[J].麦类作物学报,2024,44(6):758-769.
- [23] 卜东升,王立军,张涛,等.缓释氮肥草酰胺对新疆南疆滴灌棉田养分和产量的影响[J].中国棉花,2014,41(12):17-19.
- [24] 邓仕俊.缓释肥在水稻生产上应用试验示范[J].上海农业科技,2023,(5):119-121.
- [25] 康传宏,周久娜,郭继香.超分子量聚丙烯酰胺的合成方法综述[J].应用化工,2022,51(11):3310-3313.
- [26] Zhu Y Y, Niu Y, Niu Y N, *et al.* Recent advances in the synthesis and applications of phosphoramides[J]. Organic & Biomolecular Chemistry, 2021, 19(47):10296-10313. ■