

重整碳九芳烃生产均三甲苯技术研究进展

许磊^{1,2*}, 赵亮², 徐亚荣¹, 魏书梅¹, 樊金龙¹

(1. 中国石油乌鲁木齐石化公司, 新疆 乌鲁木齐 830019;

2. 中国石油大学(北京)重质油全国重点实验室, 北京 102249)

摘要:分析了重整碳九芳烃的利用现状, 均三甲苯的市场情况和生产难点, 并对偏三甲苯异构化、C₉芳烃催化烷基化、萃取精馏 3 种生产均三甲苯的工艺进行了详细分析, 系统总结了各工艺的研究成果, 分析各自的特点并提出改进的方向。针对 C₉重芳烃的组成特点, 提出选择性脱烷基+精馏生产均三甲苯的技术途径, 为均三甲苯的生产提供新的思路。

关键词:碳九芳烃; 均三甲苯; 异构化; 烷基化; 萃取精馏; 选择性脱烷基

中图分类号: TQ028

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)08-0072-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.08.014

Recent advances in mesitylene production from reformed C₉ aromatics

XU Lei^{1,2*}, ZHAO Liang², XU Ya-rong¹, WEI Shu-mei¹, FAN Jin-long¹

(1. PetroChina Urumqi Petrochemical Company, Urumqi 830019, China;

2. State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: This review examines the current utilization of reformed C₉ aromatics and the market situation together with key production challenges of mesitylene. Three representative processes for mesitylene production are discussed in detail: 1,2,4-trimethylbenzene isomerization, catalytic alkylation of C₉ aromatics, and extractive distillation. By systematically summarizing recent research advances, this review compares the technical features of these processes, highlights their respective advantages and limitations, and proposes targeted directions for process improvement. Considering the complex composition of C₉ heavy aromatics, a novel route involving selective dealkylation followed by precision fractionation is proposed. This approach provides a promising alternative for efficient and cost-effective mesitylene production.

Key words: C₉ aromatics; mesitylene; isomerization; alkylation; extractive distillation; selective dealkylation

重整装置在生产重整汽油和三苯(BTX)的同时产生了大量的碳九重芳烃(约占重整进料量的 30%~40%), 这些碳九重芳烃主要用于生产 BTX 轻质芳烃或汽油等大宗商品, 在当前汽油和轻质芳烃市场渐趋饱和的情势下, 需要为重整碳九芳烃的利用寻找新的更好出路。这些重芳烃中含有大量的三甲苯资源, 均三甲苯、偏三甲苯都是重要的精细化工中间体, 以它们为基础可制得偏苯三甲酸、均苯三酸酐^[1]等多种精细化工产品, 尤其是均三甲苯附加值高, 市场应用广阔, 若将碳九芳烃生产均三甲苯等特色芳烃产品, 则能提升资源利用价值^[2], 对于重整芳烃资源的差异化特色化利用具有重要意义。

1 均三甲苯的生产难点及市场

重整碳九芳烃中三甲苯含量高, 硫、微量烯烃等杂质含量很低, 是生产均三甲苯的理想原料, 尽管如此, 碳九芳烃组分复杂, 分离十分困难, 其 9 种同分异构体间沸点十分接近(表 1), 甲乙苯与均三甲苯的沸点差都在 3℃ 以内, 邻甲乙苯与均三甲苯的沸点仅差 0.4℃, 通过精馏的方法几乎不可能分离^[3],

表 1 重整碳九芳烃的组成及物性

组分	质量分数/%	沸点/℃	熔点/℃
轻组分	3.09	<145.0	
正丙苯	1.11	159.2	-99.4
异丙苯	0.28	152.4	-95.0
间甲乙苯	6.22	161.3	-95.6
对甲乙苯	2.86	162.0	-62.2
均三甲苯	13.10	164.7	-45.0
邻甲乙苯	2.42	165.1	-17.0
偏三甲苯	43.84	168.0	-43.9
连三甲苯	7.24	176.1	-25.6
茚满	0.48	178.0	-51.4
C ₁₀ 以上	19.84	>180.0	

项目	重整碳九芳烃
外观	透明液体, 无机械杂质
ω(总芳烃)/%	≥99%
馏程/℃	
IBP	157
50%	166
FBP	218
密度(20℃)/(g·cm ⁻³)	873.8
色度/铂-钴色号	5
硫含量/(mg·kg ⁻¹)	<0.5
溴指数/[mg·(100 g) ⁻¹]	<50

收稿日期: 2025-10-09; 修回日期: 2026-06-03

基金项目: 中国石油科学技术开发项目(2023ZS45)

作者简介: 许磊(1987-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为芳烃技术开发, 通讯联系人, xulei1ws@petrochina.com.cn。

因此要得到产品均三甲苯(纯度 $\geq 98\%$),必须克服甲乙苯的干扰,均三甲苯的工业生产也主要受制于此。

近年来,利用 C_9 重芳烃生产均三甲苯、偏三甲苯的路线日益受到关注^[4]。国内对均三甲苯需求

量目前大约为 10 万 t/a,市场规模在快速扩大,国内已建和在建的均三甲苯生产企业主要有南京宏顺石化、湖北南炼新材料公司、成都宏鼎石化等,产能也从千吨级向万吨级规模跃进(表 2)。

表 2 国内主要的均三甲苯生产企业及拟建项目

状态	生产厂商	原料	技术路线	产能
已投产	南京宏顺石化	偏三甲苯	异构化+精馏	1000 t/a 均三甲苯
	廊坊天大石油化工厂	偏三甲苯	异构化+精馏	2500 t/a 均三甲苯
	锦州石化精细化工厂	C_9 重芳烃	烷基化+精馏	2000 t/a 均三甲苯
	湖北南炼新材料公司	C_9 重芳烃	偏三甲苯异构化+精馏	3.6 万 t/a 偏三甲苯、10000 t/a 均三甲苯
在建或拟建	成都宏鼎	C_9 重芳烃	萃取精馏	3.6 万 t/a 偏三甲苯、8000 t/a 均三甲苯
	兰州石化	偏三甲苯	异构化+精馏	5000 t/a 均三甲苯
	江苏华伦化工	C_9 重芳烃	异构化+精馏	10000 t/a 偏三甲苯、5000 t/a 均三甲苯

2 均三甲苯的生产工艺

目前,均三甲苯的工业生产方法主要有异构化工艺、烷基化工艺和萃取精馏工艺。

2.1 异构化工艺

原理是先从碳九芳烃中提纯出高纯偏三甲苯,再将高纯偏三甲苯通过异构化反应生成均三甲苯,再精馏分离得到均三甲苯产品。该工艺由南京炼油厂和天津大学于 20 世纪 90 年代合作开发,经过了多次的技术改造,已逐渐成熟,是目前生产均三甲苯

的主流技术。

唐卫东^[5]详细报道了南京炼油厂偏三甲苯异构化制取均三甲苯生产线的改造情况,原工艺存在流程不合理、精馏达不到预期、催化剂寿命短等问题,公司于 2002 年进行了大的改造,改造后的工艺路线如图 1 所示。改造后,进料处理量比原系统提高 1 倍,反应器床层温度比之前下降 60℃,均三甲苯生产能力提高了 58%,产品纯度也由之前的 97.9%提高到 98.9%,生产成本比之前降低了 23%,综合经济效益显著。

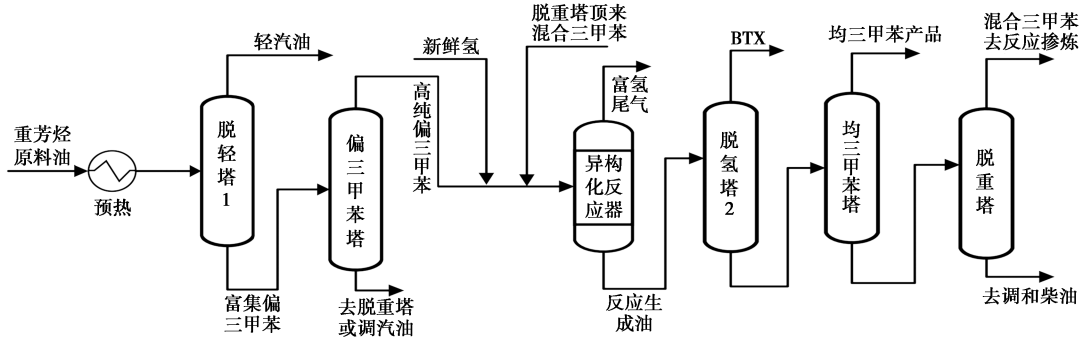


图 1 南京炼油厂偏三甲苯异构化生产均三甲苯改造后工艺路线

除工业装置外,对异构化工艺的研究也有大量报道,表 3 总结了异构化工艺制均三甲苯的研

究成果。

王燕等^[12]以氢型丝光沸石(HM)为催化剂载

表 3 异构化制备均三甲苯技术研究成果总结

原料	反应类型	催化剂	反应温度/℃	压力/MPa	空速/h ⁻¹	是否临氢	偏三甲苯转化率/%	均三甲苯收率/%
偏三甲苯 ^[6]	异构化	4% Cu/HM	295	1.2	1.00	氢油比 4.8	42.86	32.74
偏三甲苯 ^[7]	异构化	HCM-22	310	3.0	0.80	非临氢	37.57	23.78
偏三甲 ^[8]	异构化	ZSM-5	350	0.8	5.28	氢油比 5	32.81	20.81
偏三甲苯 ^[9]	异构化	多级孔 ZSM-5	450	0.8	5.28	氢油比 5	35.18	21.52
偏三甲苯 ^[10]	异构化	Ag-ZSM-5	280	1.6	1.00	氢油比 5	33.80	24.90
C_9 芳烃 ^[11]	异构化	Ni-Mo/H β	285	1.3	1.00	氢油比 5	41.15	20.54

体,采用 Ni 和 Mo 作为金属组分进行改良,用改良后的 Ni-Mo/HM 催化剂异构化偏三甲苯制取均三甲苯,制备的 0.5% Ni-1.25% Mo/HM 催化剂能获得最大的均三甲苯收率达 23.10%。刘瑞^[13]系统研究了临氢与非临氢催化剂及工艺,以 6% Cu/HMOR 为临氢催化剂,在反应温度 295℃、反应压力 1.2 MPa、质量空速 0.8 h⁻¹、氢油比 8 的条件下,偏三甲苯的转化率达 42.64%,均三甲苯的选择性和收率为 58.67%和 25.02%,临氢条件能有效提高催化剂的抗积炭能力,同时也造成了较大的能耗;张鹏飞等^[14]采用 M-2 型复合丝光沸石催化剂,在非临氢的条件下将偏三甲苯异构化制取均三甲苯,在反应温度 310~320℃、压力 1.5~2.0 MPa、空速 1.0~1.5 h⁻¹的条件下,偏三甲苯的转化率达 39%,均三甲苯的选择性达 66.29%,催化剂在运行 400 h 后仍具有良好的催化活性,偏三甲苯可循环利用。

目前,对异构化工艺的研究主要集中在催化剂载体、金属改性、临氢与非临氢工艺方面。总体上,异构化工艺以高纯偏三甲苯为原料,避免了原料中甲乙苯对三甲苯分离的干扰,且副反应较少,精馏分离技术也日渐成熟,使得该工艺在均三甲苯生产中占主导,但原料成本较高,且原料中含有的大量均三甲苯无法利用,均三甲苯的收率较低。该工艺的改进方向是进一步优化催化剂及工艺,开发兼具三甲苯异构化和甲乙苯脱除功能的催化剂,或将异构化工艺与其他工艺结合,扩大原料适用性,降低原料成本;同时减少 C₈、C₁₀+芳烃等副产物的生成,提高均三甲苯收率;同时进一步优化精馏分离技术,降低分离成本和能耗。

2.2 烷基化工艺

该工艺以 C₉ 混合芳烃为原料,利用分子结构的不同,通过烷基化反应,选择性将甲乙苯等干扰物转化成高沸物,从而实现分离并获得高纯均三甲苯。锦州石化精细化工有限公司于 2004 年进行了该工艺的首次工业试验,整个工艺分为均三甲苯富集、烷基化反应、水洗和精馏 4 个部分^[15],工艺流程如图 2 所示。

对原料先预分馏得到均三甲苯富集液,然后以丙烯作烷基化剂,AlCl₃、H₂SO₄ 作催化剂,将甲乙苯等转化为高沸点组分,随后精馏分离得到高纯的均三甲苯,主要工艺参数见表 4。

在装置运行过程中,针对丙烯单耗高、均三甲苯收率低、催化剂失活快等缺陷,锦州石化精细化工有限公司进行较大的改造^[16]:改造富集塔分布器和填

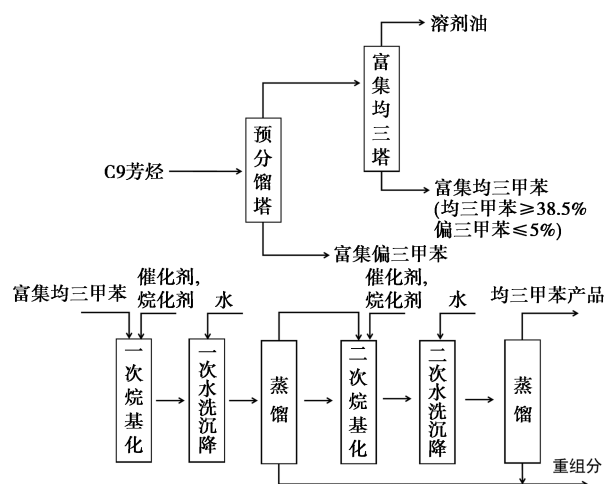


图 2 锦州石化 C₉ 芳烃催化烷基化生产均三甲苯工艺流程

表 4 催化烷基化工艺参数

项目	一次烷基化	二次烷基化
均三馏分/t	1.8±0.2	1.8±0.2
丙烯耗量/m ³	200±20	200±20
AlCl ₃ /kg	9±1	9±1
反应温度/℃	50±5	50±5
丙烯压力/MPa	0.2~0.3	0.2~0.3
均三/C ₉ /%	≥75	≥98.5

料将富集液中均三甲苯质量分数从 35% 提高至 38% 以上;增加二次蒸馏塔的塔板和填料并改变进料口位置,可提高均三甲苯收率至 71%;加装丙烯脱水设施,可降低催化剂的损耗。经过一系列优化,产品质量明显提高,均三甲苯产品质量分数≥99%,装置运行平稳。

然而,该工艺反应流程长,烷基化剂成本高,催化体系对设备腐蚀严重,大量的偏三甲苯、甲乙苯等转化成重组分,产品经济性较差;但烷基化路线作为重要的技术方向,相关研究报道不少,表 5 总结了烷基化工艺制取均三甲苯的研究成果。

田文彦^[21]以丙烯作烷基化剂,C₉ 芳烃混合物为原料,三氯化铝作催化剂,通过 2 次烷基化(温度 35~40℃),2 次精馏可获得质量分数 98.5% 的均三甲苯产品,总收率可达 90%。张卫江等^[22]以异丁烯作烷基化剂,C₉ 芳烃精馏后的富集均三甲苯馏分为原料,三氯化铝为催化剂,通过 2 次烷基化,2 次精馏,能得到质量分数大于 98.5% 的均三甲苯,但烷基化过程中使用的催化剂三氯化铝容易水解生成盐酸,会对设备造成腐蚀,并对环境造成破坏。

表 5 烷基化制备均三甲苯技术研究成果总结

原料	烷基化剂	催化剂	反应温度/℃	催化剂添加量/%	反应效果
富集均三甲苯液 ^[17]	丙烯、抽余油、异丁烯	AlCl ₃	55~65	3	均三甲苯纯度 99.45%,均三甲苯蒸馏收率>97%
富集均三甲苯 ^[18]	MTBE 尾气	AlCl ₃	50	8	均三甲苯纯度>98.5%
C ₉ 芳烃 ^[19]	氯代叔丁烷	AlCl ₃	20	4	均三甲苯纯度>98%,收率>75%
C ₈ 或 C ₉ 芳烃 ^[20]	甲醇	ZSM-5	320~400	0.2~3.5	均三甲苯纯度>98.5%

目前,烷基化工艺的研究主要集中在低成本烷基化剂的筛选、催化剂的复配、流程缩短等方面,以期进一步降低成本,减少设备腐蚀,但目前的研究显示,单纯采用烷基化工艺生产均三甲苯已难有竞争力,可尝试与异构化等工艺结合,利用烷基化反应脱甲乙苯干扰物的功能,对异构化工艺的原料、反应末期产品等进行处理,以弥补异构化工艺的不足。

2.3 萃取精馏工艺

萃取精馏工艺是选用合适的萃取剂,增大甲乙苯与均三甲苯之间的相对挥发度,从而提纯均三甲苯。美国 ESSO&R 公司于多年前开发了萃取精馏工艺^[23],以邻苯二甲酸二甲酯或其他芳香族多羧酸酯作萃取剂,对 C₉ 芳烃进行萃取蒸馏,把间、对甲乙苯,均三与邻甲乙苯分开。在萃取剂存在下,间、对甲乙苯/均三甲苯的相对挥发度增加 6%~11%。相对挥发度和工艺流程如表 6 和图 3 所示。

萃取精馏技术是物理精馏过程,不改变物料组成,避免了化学反应的一些弊端,广受关注和研究,表 7 总结了萃取精馏工艺制均三甲苯的研究成果。

表 6 萃取精馏溶剂及相对挥发度

溶剂	间对甲乙苯/ 邻甲乙苯 相对挥发度	均三甲苯/ 邻甲乙苯 相对挥发度	对甲乙苯/ 均三甲苯 相对挥发度
无溶剂	1.06	1.009	
均四甲酸正四丙酯	1.18	1.120	
无溶剂时			1.058
邻苯二甲酸二甲酯			1.125

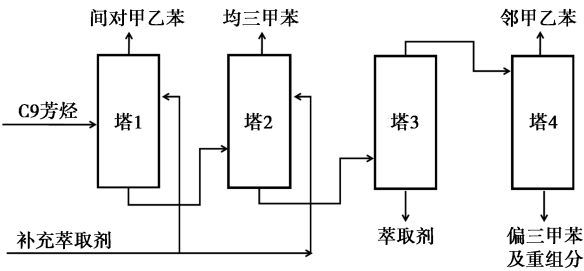


图 3 美国 ESSO&R 公司开发的萃取精馏
工艺流程

表 7 萃取精馏工艺制均三甲苯的研究成果

原料	萃取剂	温度/℃	剂油比	回流比	效果
均三甲苯和邻甲乙苯混合物 ^[24]	DBP+环丁砜+醋酸钠	68~78	9	3	均三甲苯纯度>99.5%,和单一萃取剂相比,能耗降低 19.63%
C ₉ 芳烃 ^[25]	S05		8	25	均三甲苯纯度>98%
均三甲苯和邻甲乙苯混合物 ^[26]	1,3,5-三氯苯+2,6-二甲苯酚	塔顶 100~150 塔底 140~180	2~12	1.4~5	均三甲苯收率>96%,纯度>99%
含均三和甲乙苯的富集馏分 ^[27]	N-甲基-2-吡咯烷酮	塔顶 150~170 塔底 190~220	3~8	2~5	均三甲苯纯度≥98.5%,均三甲苯收率≥93%

任海伦等^[24]测定了 DMP、DBP、环丁砜、醋酸钠 4 种萃取剂对均三甲苯和邻甲乙苯的相对挥发度,得出最佳的复合萃取剂为 68% DBP+28% 环丁砜+4.7% 醋酸钠,剂油比为 9~10,理论板数为 65,回流比在 3 左右,进料温度在 68~78℃ 是最佳工艺条件,和单一萃取剂 DBP 相比,为达到相同分离效果,塔釜温度可降低 30℃,溶剂比减少 3,理论板数减少

15 块,萃取精馏塔能耗降低 19.63%。冯海强等^[25]对 C₉ 芳烃分离均三甲苯进行了萃取精馏试验和模拟计算,选出含氮类有机化合物 S05 作为萃取剂,与常用邻苯二甲酸酯类、环丁砜萃取剂相比具有沸点低、黏度小、稳定性高的优点。结果表明,在理论板数为 66、回流比为 20~25、剂油质量比为 8 的条件下,萃取精馏塔顶均三甲苯摩尔分数为 98.2%。

近年来,随着萃取精馏技术的提升,萃取精馏生产均三甲苯的工艺技术也在加快工业应用,成都宏

鼎石化拟采用该路线进行国内首次应用,工艺流程如图 4 所示^[28]。

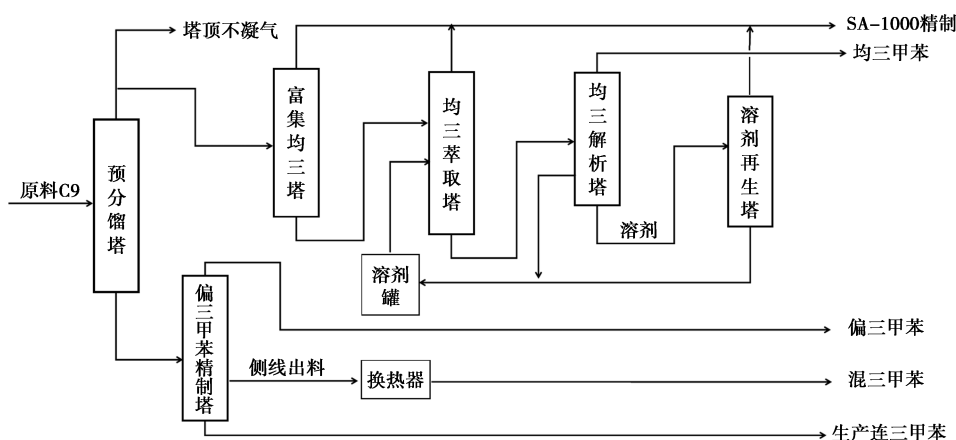


图 4 成都宏鼎石化 C_9 芳烃萃取精馏工艺

均三甲苯生产单元包括富集均三塔、均三萃取精馏塔、均三解析塔以及溶剂再生塔 4 座塔器。 C_9 原料经预分馏后,塔顶的轻组分在富集均三塔内提浓,得到富集均三甲苯,富集均三甲苯在均三萃取塔内依靠溶剂与各组分溶解度的差别实现组分的分离,萃取剂和均三甲苯再进入均三解析塔,实现溶剂与均三甲苯的分离,均三解析塔塔顶得到高纯均三甲苯产品,塔底为循环溶剂,为了保持溶剂的溶解能力和纯度,需要对溶剂进行不定期的提纯和再生。

近年来,随着分子炼油理念的深入实施和芳烃资源的特色化利用,萃取精馏工艺将继续被广泛研究,在 C_9 芳烃分离方面,萃取精馏工艺能够充分利用原料中的均三甲苯,与偏三甲苯异构化工艺相比显著降低了原料成本,同时也避免了烷基化工艺丙烯消耗大、设备腐蚀严重、重组分多等问题,具有较好的应用前景,该工艺改进和优化的方向主要是高效低成本萃取剂的筛选,以及流程的优化和能量回收,同时对分离出的甲乙苯、连三甲苯富集组分等进行后续高效利用,以提升产品的整体价值。

2.4 选择性脱烷基工艺

针对制均三甲苯生产的瓶颈难题和现有工艺存在的不足,本研究团队提出选择性脱烷基的新技术路线^[29],该路线以 C_9 重芳烃为原料,利用甲乙苯、丙苯和三甲苯在分子结构和反应特性上的差异,选用合适的催化材料和工艺条件,将甲乙苯、丙苯通过高选择性脱烷基反应转化为甲苯、苯等轻质芳烃,同时最大程度保留三甲苯,大幅消除甲乙苯的干扰,反应后邻甲乙苯的含量降至 0.1% 以下,三甲苯损失

小,反应产物能够通过精馏工艺分离得到高纯的均三甲苯。该工艺充分利用 C_9 芳烃原料中的三甲苯资源,通过高效反应+精馏的路线,生产高纯均三甲苯,显著降低均三甲苯的生产成本,提高 C_9 芳烃资源的价值,为炼厂 C_9 芳烃资源的高值利用和特色芳烃产品开发提供了新的途径。

3 结语与展望

当前,重整 C_9 芳烃的利用主要有 4 种途径:一是作为高辛烷值的汽油调和组分,二是进行轻质化或与甲苯歧化来生成轻质芳烃,三是用作高沸点芳烃溶剂油,四是生产精细化工产品。汽油、BTX、芳烃溶剂油等市场逐渐趋向饱和,将重整 C_9 芳烃生产均三甲苯、偏三甲苯、均四甲苯等精细化工产品,是实现 C_9 芳烃资源差异化、高值化利用的有效途径。

目前,均三甲苯的生产成本较高,限制了其下游的应用,尽管偏三甲苯异构化、 C_9 芳烃烷基化、萃取精馏这 3 种工艺各有特点,但仍存在流程长、成本高等不足,需开发高效低成本的均三甲苯生产工艺,根据文章所述,利用甲乙苯和三甲苯反应特性的差异,通过选择性脱烷基反应+精馏的途径获得高纯度的均三甲苯,为均三甲苯的生产和 C_9 重芳烃的分离提供了新的思路。

同时,炼厂重整重芳烃由于调和汽油的需要,通常需要切割成 C_9 芳烃和 C_{10} +重芳烃,随着汽油的减产和向化工材料的转变,这部分重芳烃将越来越作为生产化工产品的原料,应及早研究重整 C_9 +芳烃的分离和利用,重整 C_9 +芳烃中,带长侧链的芳烃会对甲基芳烃的分离造成严重干扰,如何消除长

侧链芳烃的干扰是重整 C₉+芳烃分离和利用的关键,可通过馏分富集、高效反应、精馏结晶等组合工艺,消除干扰,优化流程,最终获得高值特色的芳烃产品。

参考文献

- [1] 宋彬彬,刘海涛.重整 C₉ 芳烃制取偏三甲苯、均三甲苯的技术与产品市场[J].化学工业,2016,34(3):36-39.
- [2] Lim D, Jang J, Kim T, *et al.* Selective hydrodealkylation of C₉+ aromatics to benzene, toluene, and xylenes (BTX) over a Pt/H-ZSM-5 catalyst[J]. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2015, 407: 147-151.
- [3] Syed A A, Kehinde E, Sulaiman S A, *et al.* Kinetics of dealkylation-transalkylation of C₉ alkyl-aromatics over zeolites of different structures[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2013, 91: 2601-2616.
- [4] 任慧勇,杨卫兰,张蓓.中国重整 C₉+重芳烃分离和利用机会分析[J].现代化工,2020,40(8):11-14,20.
- [5] 唐卫东.异构化工艺生产均三甲苯技术的改进[J].石油炼制与化工,2004,35(3):22-25.
- [6] 王治琦.分子筛催化偏三甲苯临氢异构化制均三甲苯[D].大连:大连理工大学,2024.
- [7] 刘瑞,谭涓,刘靖,等.富介孔分子筛催化剂催化偏三甲苯非临氢异构化[J].石油学报:石油加工,2024,40(6):1516-1527.
- [8] 宋金锐,梁亚凝,张燕挺,等.两步变温合成纳米堆积 ZSM-5 分子筛及其催化性能[J].石油学报:石油加工,2025,41(2):489-497.
- [9] 张红智.多级孔 ZSM-5 分子筛的合成及偏三甲苯异构化催化性能研究[D].太原:太原理工大学,2023.
- [10] 王福善,杨俊明,张霖,等.偏三甲苯异构化制均三甲苯用 Ag 改性 HZSM-5 催化剂性能[J].石化技术与应用,2023,41(6):433-436,464.
- [11] 王瑞云.催化剂 Ni-Mo/NaOH-H β 的制备及均三甲苯的精制研究[D].南京:南京师范大学,2022.
- [12] 王燕,王明,张旭斌,等.Ni-Mo/HM 上偏三甲苯异构化性能研究[J].化学工业与工程,2016,33(1):35-39.
- [13] 刘瑞.高性能偏三甲苯临氢/非临氢异构化制均三甲苯催化剂的制备与改性研究[D].大连:大连理工大学,2023.
- [14] 张鹏飞,王聪,池红卫,等.偏三甲苯非临氢异构化制均三甲苯工艺的研究[J].石油化工,2005,34(5):441-444.
- [15] 刘平.对一次烷基化法制均三甲苯中烷基化剂和催化剂的研究[J].化工技术与开发,2010,39(4):15-16.
- [16] 刘杰,刘岗.C₉ 芳烃催化烷基化法生产高纯度均三甲苯过程与技术改造[J].化工技术与开发,2004,(6):48-49.
- [17] 郭兰芬.不同烷化剂对均三甲苯分离的影响[J].上海化工,2011,36(11):5-8.
- [18] 赵东.利用 MTBE 尾气从 C₉ 芳烃中制备高纯均三甲苯[D].天津:天津大学,2005.
- [19] 肖文.重整 C₉ 芳烃中提取高纯度均三甲苯[D].湘潭:湘潭大学,2010.
- [20] 曹正国,荆晓平,王福,等.C₈ 芳烃烷基化-异构化联产均三甲苯、均四甲苯的方法:CN 113045379[P].2023-09-22.
- [21] 田文彦.用 C₉ 芳烃混合物制取高纯度均三甲苯[J].辽宁工学院学报,2001,21(3):55-57.
- [22] 张卫江,李汝贤,张雪梅,等.一种采用丙烯和异丁烯联合烷基化法生产高纯均三甲苯的方法:CN 1775714[P].2006-05-24.
- [23] Amir E M, William R E. Separation of C₉ aromatic hydrocarbons: US 3220933[P].1964-04-06.
- [24] 任海伦,王启超,房峰,等.复合萃取剂加盐萃取精馏分离高纯均三甲苯工艺研究[J].石油化工技术与经济,2023,39(6):23-28.
- [25] 冯海强,傅吉全.萃取精馏分离均三甲苯的实验和模拟[J].石油化工,2011,40(2):157-160.
- [26] 任海伦,房峰,张强,等.一种利用复合溶剂从重整碳九中分离高纯均三甲苯的方法:CN 115557825[P].2023-01-03.
- [27] 冯海强,朱跃辉,高继东,等.一种萃取精馏分离均三甲苯的方法:CN 103121908[P].2015-03-11.
- [28] 尤学民,曹兵,李佳林,等.一种用于对碳九芳烃混合物进行分离的方法及装置:CN 112250536[P].2025-03-25.
- [29] 徐亚荣,许磊,樊金龙,等.碳九重芳烃生产均三甲苯的方法:CN 120025222[P].2025-05-23.■

(上接第 71 页)

- [24] Liao P, Zhang W, Zhang J, *et al.* Efficient purification of ethene by an ethane-trapping metal-organic framework[J]. Nature Communications, 2015, 6(1):8697.
- [25] Li L, Lin R, Krishna R, *et al.* Ethane/ethylene separation in a metal-organic framework with iron-peroxo sites[J]. Science, 2018, 362(6413):443-446.
- [26] Lin R, Wu H, Li L, *et al.* Boosting ethane/ethylene separation with in isorecticular ultramicroporous metal-organic frameworks[J]. Journal of the American Chemical Society, 2018, 140(40):12940-12946.
- [27] Pei J, Wang J, Shao K, *et al.* Engineering microporous ethane-trapping metal-organic frameworks for boosting ethane/ethylene separation[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2020, 8(7):3613-3620.
- [28] Gucuyener C, van den Bergh J, Gascon J, *et al.* Ethane/ethene separation turned on its head: Selective ethane adsorption on the metal-organic framework ZIF-7 through a gate-opening mechanism[J]. Journal of the American Chemical Society, 2010, 132(50):17704-17706.
- [29] Wang S, Shivanna M, Zheng S, *et al.* Ethane/ethylene separations in flexible diamondoid coordination networks via an ethane-induced gate-opening mechanism[J]. Journal of the American Chemical Society, 2024, 146(6):4153-4161.
- [30] Zhang L, Yu B, Wang M, *et al.* Ethane triggered gate-opening in a flexible-robust metal-organic framework for ultra-high purity ethylene purification[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2025, 64(7):e202418853.■