文章编号:1674-2869(2024)05-0482-08

燃料油芳烃抽提的研究进展

陶 土[1,3],杨明科[2],康顺吉[*1,3],沈 陟[3],马 骏[3],沈喜洲[3]
1. 武汉工程大学邮电与信息工程学院,湖北 武汉 430074;
2. 石油化工科学研究院,北京 100083;
3. 武汉工程大学化工与制药学院,绿色化工过程教育部重点实验室(武汉工程大学),湖北 武汉 430205

摘 要:燃料油芳烃抽提技术水平的提升是实现石化行业“减油增化,减油增特”战略目标的重要措施,萃取剂和芳烃抽提原料化学组成是决定芳烃抽提效果的关键因素。在萃取剂方面,阐述了单一溶剂、复合溶剂、离子液体以及低共熔剂等萃取剂在芳烃抽提领域的研究进展,相较于传统的芳烃抽提溶剂,高效复合溶剂的开发是提升抽提效率的有效措施;在抽提原料化学组成方面,总结了不同燃料油芳烃抽提研究进展,为扩宽芳烃抽提原料来源,实现石化行业战略目标提供理论基础。通过对这两方面研究成果的综合分析和讨论,对炼化行业芳烃抽提技术进行了展望。

关键词:芳烃抽提;萃取剂;燃料油
中图分类号:TQ524 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202210014

Research progress in extraction of aromatics from fuel oil

TAO Tu[1,3], *YANG Mingke*[2], *KANG Shunji*[*1,3], *SHEN Zhi*[3], *MA Jun*[3], *SHEN Xizhou*[3]
1. College of Post and Telecommunication, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. Research Institute of Petroleum Processing, Beijing, 100083;
3. School of Chemical Engineering and Pharmacy, Key Laboratory for Green Chemical Process of Ministry of Education (Wuhan Institute of Technology), Wuhan, 430205, China

Abstract: The improvement of the technology of extracting aromatics from fuel oil is a crucial measure to achieve the petrochemical industry's strategic goal, which is to "reduce oil products while increasing the production of chemical materials and special high-value products". The extractants and the chemical composition of feedstock for aromatics extraction are key factors in determining the efficiency of aromatics extraction. In terms of extractants, the research progress in single solvents, compound solvents, ionic liquids, and deep eutectic solvents in the field of aromatics extraction was elaborated. Compared with traditional extraction solvents, the development of efficient compound solvents is an effective approach to improve extraction efficiency. Regarding the chemical composition of feedstock for aromatics extraction, the research progress in aromatics extraction from various fuel oils was summarized, providing a theoretical basis for expanding the source of feedstock for aromatics extraction and realizing the strategic goal of the petrochemical industry. Based on the comprehensive analysis and discussion of these research results, the prospect of aromatics extraction technology in the refining and chemical industry was presented.

Keywords: aromatics extraction; extractant; fuel oil

收稿日期:2022-10-14
基金项目:中石化石油化工科学研究院项目(36800000-24-ZC0699-0021)
作者简介:陶 土,硕士研究生。Email:1025694798@qq.com
***通信作者**:康顺吉,博士,副教授。Email:316174056@qq.com
引文格式:陶土,杨明科,康顺吉,等.燃料油芳烃抽提的研究进展[J].武汉工程大学学报,2024,46(5):482-489.

在环保要求日益提高和市场对苯甲苯及二甲苯（benzene，toluene and xylene，BTX）迫切需求的背景下，国Ⅵ车用汽油标准对汽油中苯及芳烃含量限值提出了更严格的要求[1-2]。随着汽油中苯及芳烃含量的降低，届时将有大量芳烃从汽油池中被挤出。值得注意的是，近年来我国石化产业逐渐暴露出低端产能过剩的问题，而化工新材料、专用化学品、功能化学品等高端产品则较为短缺，甚至大量依赖于进口[3]。在此背景下，石化行业提出了“减油增化，减油增特”战略，炼油企业须加快产业结构调整和升级的步伐以纾解困局。根据企业实际需求科学地布局产品结构，控制压减汽柴油产量，增产芳烃、乙烯等化工产品，为生产高附加值化学产品提供原料，芳烃抽提技术升级、拓宽抽提原料来源是实现“减油增化，减油增特”这一战略的重要途径[4-5]。在芳烃抽提技术中，萃取剂是决定抽提效率的关键因素之一，虽然芳烃抽提技术在国内外已经发展得比较成熟，但是仍然存在萃取剂选择性不高、剂油比大和能耗高等问题[6]。一般而言，萃取剂对芳烃的脱除率和选择性往往是一对相互矛盾的指标。因此，兼顾芳烃抽提脱除率和选择性的高效萃取剂的开发是发展燃料油芳烃抽提技术的关键之一。

另一方面，芳烃抽提原料化学组成的差异也是影响抽提效率的关键因素之一。不同来源的油品组成各不相同，汽油中不同碳数、不同结构的非芳组成对芳烃抽提效果存在一定的影响。对于不同的燃料油，芳烃抽提萃取剂需做相应的调整，以适应不同燃料油芳烃抽提的需要，为进一步拓宽芳烃抽提原料来源，促进“减油增化，减油增特”战略目标的实现提供基础。

因此，本文将从芳烃抽提萃取剂和不同抽提原料两个方面进行阐述，分析石化行业芳烃抽提技术的发展趋势，为实现“减油增化，减油增特”这一目标提供借鉴和参考。

1　芳烃抽提萃取剂

1.1　抽提芳烃的有机溶剂

溶剂的抽提能力是芳烃抽提技术的关键，目前工业应用的芳烃抽提萃取剂基本是单一有机萃取剂，主要是砜类溶剂、甘醇类及吡咯烷酮类等溶剂。常用于芳烃抽提的砜类溶剂主要是环丁砜（tetramethylene sulfone，SUL）和二甲基亚砜（dimethyl sulfoxide，DMSO）两种，其中环丁砜因其对芳烃具有较好的溶解能力、选择性高、溶剂损耗少、稳定性好、廉价无毒等特点，在众多的溶剂中芳烃抽提的综合能力强，作为主流萃取剂广泛应用于芳烃抽提。除此之外，还有其他类型的溶剂对燃料油中的芳烃也具有较好的抽提性能，如二甲基甲酰胺（dimethylformamide，DMF）、*N*-甲酰吗啉（*N*-formylmorpholine，NFM）等，但仍受限于脱除率不够理想、选择性较低、稳定性较差或者再生困难等问题而未得到广泛应用[7]。值得注意的是，单一溶剂的萃取效果往往存在一定的局限性。大量研究表明，复合溶剂通常可以增强单一溶剂的效果或弥补单一溶剂的不足，因此复合溶剂已成为研究关注的焦点[8]。复合萃取剂的研究，一般是根据不同萃取剂的抽提性能，通过复配取长补短以实现综合效果的平衡。但是，如果组成复合萃取剂的各溶剂理化性质和芳烃抽提性能差异较大，可能存在配伍性不好或在工业应用中性能不稳定等问题。常见有机溶剂和有机复配萃取剂的抽提效果汇总如表1所示。

1.2　抽提芳烃的离子液体

离子液体（lonic liquids，ILs）具有无毒、不可燃、蒸气压低、选择性高、热力学稳定性好及可设计等优点，被普遍认为是最有希望代替传统有机溶剂的“绿色溶剂”[24-25]。

1.2.1　咪唑盐离子液体　目前用于研究芳烃抽提的离子液体中，咪唑盐离子液体因其具有较高的选择性，已成为研究热点。咪唑盐离子液体的阳离子有咪唑盐离子（[xmim]），阴离子主要有双（三氟甲基磺酰亚胺）（$[NTf_2]$）离子、四氟硼酸根离子（$[BF_4]$）、六氟磷酸根离子（$[BF_6]$）、磺酸根离子（$[SO_3]$）及硫氰根离子（[SCN]）等[26-27]。

Al-Rashed等[28]合成了1-丁基-3-甲基咪唑六氟磷酸盐离子液体（$[Bmim][PF_6]$），路线如图1所示，并考察了其对不同模型油和模拟石脑油中苯、甲苯、邻二甲苯的萃取效果。结果表明，芳烃组分的萃取选择性随原料中芳烃含量的增加而减小，随着苯环上烷基的增加，离子液体对芳烃的萃取选择性和分配系数也均随之减小。离子液体加入质量为芳烃的10%时，$[Bmim][PF_6]$对模拟石脑油中三种芳烃的总选择系数可达19.6。

Yao等[29]设计合成两种基于咪唑的离子液体戊烷二咪唑双酰亚胺盐离子液体对于甲苯/正庚烷、苯/正己烷和苯/环己烷三个体系的芳烃萃取具有较高的选择性，并总结了一些离子液体的选择性和分配系数，如图2所示。

Guo等[30]研究采用SUL、$[EMIM][NTf_2]$和

表1 常用溶剂及复合萃取剂芳烃抽提效果对比

Tab. 1 Comparison of aromatics extraction effect of commonly used solvents and compound extractants

萃取溶剂	分离体系	条件	脱除率/%	选择性	文献
DMSO	甲苯+正己烯	293.15~303.16 K	–	2~6	[9]
SUL	煤基石脑油		64.23	–	[10]
SUL	重石脑油	333.15 K,质量比5∶1	–	95	[11]
碳酸乙烯酯	苯+正庚烷	303.15 K	–	23.68	[12]
1,4丁二醇	正庚烷+甲苯	298.15 K,101.33 kPa	–	9	[13]
糠醛(FURAL)	正庚烷+苯	298.15 K		14	[14]
NMP	正十二烷+甲苯+多环芳烃	298.15 K,101.6 kPa		15	[15]
NFM	正庚烷+苯	298.15 K		5.21	[16]
SUL	1-己烯+苯	303.15 K,101.33 kPa	–	7.9	[17]
碳酸丙烯酯(PC)+二甘醇(DEG)	模拟重整汽油	303.00 K	64.70	7.18	[18]
SUL-COS复合溶剂	重整汽油	160~175 ℃,质量比4.25∶1			[19]
NMP-DMF(体积比8∶2)	直馏石脑油		81.32	–	[20]
NMP-DMF(体积比9∶1)			–	14	
SUL+2-丙醇	石脑油		53.96	–	[21]
DMF+CY11	石脑油	303.15 K,101.33 kPa	–	6.07	[22]
DMSO+体积比10%MDF	煤基石脑油	多级萃取	85	9.96	[23]

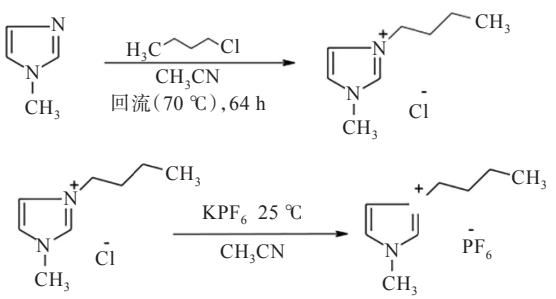
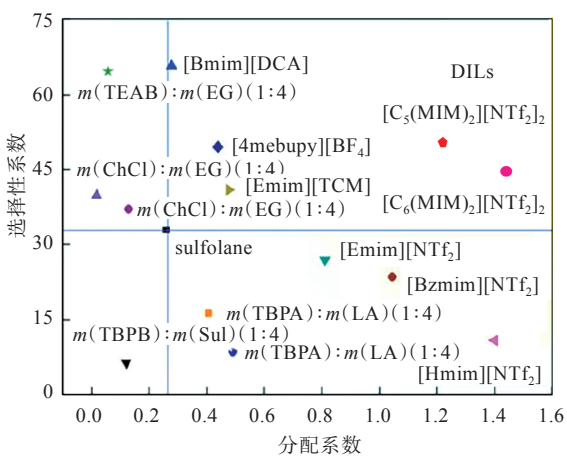


图1 [Bmim][PF_6]合成路线

Fig. 1 Synthetic route of [Bmim][PF_6]



注:m(TEAB):m(EG)=1:4,m(ChCl):m(EG)=1:4,m(ChCl):m(LA)=1:4,m(TBPB):m(Sul),m(TBPA):m(LA)=1:4,m(TEAC):m(LA)=1:4。

图2 各种离子液体分配系数和选择性系数

Fig. 2 Distribution coefficient and selectivity of various ionic liquids

[EMIM][$EtSO_4$]$_3$种萃取剂对(正己烷+苯)模型油进行萃取,并测定3种体系的液液平衡数据。实验结果表明,与芳烃抽提常用的溶剂SUL相比,[EMIM][$EtSO_4$]离子液体具有更高的选择性,最高可达67.72,有望成为SUL的替代品。

1.2.2 吡咯盐离子液体 在众多的离子液体中,除了咪唑盐离子液体之外,吡咯盐离子液也因其具有较高的选择性,在芳烃抽提中表现出较优的性能[31]。

Marcos团队[32-35]研究了1-乙基-4-甲基吡啶双酰亚胺([4empy][Tf_2N])和1-乙基-3-甲基咪唑二腈酰胺([emim][DCA])二元离子液体对(正庚烷+芳烃+[4empy][Tf_2N]+[emim][DCA])体系的萃取情况,离子液体结构如图3所示。当两种离子液体摩尔比为0.3时,在313.2 K和0.1 MPa的条件下,离子液体对苯/正庚烷的选择性为13.0~73.9,对乙苯+正庚烷的选择性为18.0~29.1。

Zhou等[36]分别采用1-丁基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐[Bmim][BF_4],N-丁基吡啶四氟硼酸盐[Bpy][BF_4]以及1-丁基-3-甲基硫氰盐[Bmim][SCN]作为萃取剂,结构如图4所示。考察了它们对环己烷中苯的萃取分离效果,综合考虑分配系数和选择性的结果表明,3种离子液体对(苯+环己烷)模型油分离效率的顺序为:[Bmim][BF_4]>[Bpy][BF_4]>[Bmim][SCN]。

不同离子液体对于不同体系模型油中的芳烃分离效果有较大差异,为了更直观地对比各离子

液体芳烃抽提效果的差异，如表2所示，对各离子液体的萃取效果进行了汇总。

尽管离子液体体现出了较好的芳烃抽提选择性，但研究主要局限于对单一烷烃组分中芳烃的萃取，对组分较为复杂的原料芳烃抽提的研究相对较少。此外，离子液体存在制备工艺复杂、合成

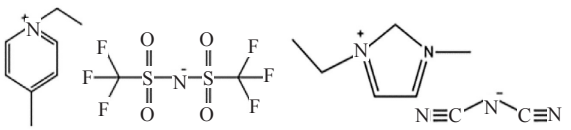
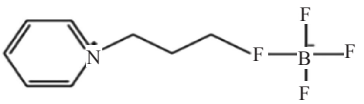


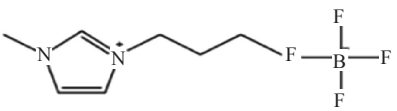
图3　[4empy][Tf_2N]和[emim][DCA]结构图

Fig. 3　Structure of [4empy][Tf_2N] and [DCA]

[Bpy][BF_4]



[Bmim][BF_4]



[Bmim][SCN]

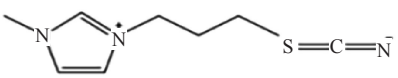


图4　3种离子液体的结构

Fig. 4　Structures of three ionic liquids

表2　不同离子液体芳烃抽提效果对比

Tab. 2　Comparison of aromatics extraction effect of different ionic liquids

离子液体	分离体系	条件	选择性	文献
[mmim][Tf_2N] [emim][Tf_2N] [bmim][Tf_2N] [hmim][Tf_2N]	正庚烷+甲苯	313.20 K，101.325 kPa	9.30~37.60 7.30~30.30 4.40~20.00 2.80~12.40	[27]
[Bmim][PF_6]	正己烷+苯 正庚烷+甲苯 正辛烷+二甲苯 模拟重整油	298.15 K，101.325 kPa	4.00~33.5 2.90~8.30 1.30~20.40 1.9~019.60	[28]
[C_5(MIM)$_2$][NTf_2]$_2$ [C6(MIM)$_2$][NTf_2]$_2$	正庚烷+甲苯	303.15 K 质量比1∶1	50.40 44.70	[29]
[EMIM][NTf_2] [EMIM][$EtSO_4$] [EMIM][$EtSO_4$] +[EMIM][NTf_2]（1:9）	正己烷+苯	303.15 K	5.92~40.61 16.58~67.72 11.56~35.91	[30]
[emim][CH_3SO_3] [emim][CF_3SO_3] [emim][CHF_2CO_3]	正庚烷+甲苯	313.20 K 101.325 kPa	22.00~79.70 14.50~42.90 16.80~53.80	[31]
[emim][TCM]+[emim][DCA] （8:2）	正庚烷+甲苯	313.20 K 101.325 kPa	46.60	[32]
[emim]$_2$[Co(SCN)$_4$] [bmim]$_2$[Co(SCN)$_4$]	正庚烷+甲苯	313.20 K	25.00~70.00 15.00~55.00	[33]
[emim][TCM]	正庚烷/甲苯	323.20~403.20 K 质量比（1~10）∶1	15.00~36.00	[34]
[4empy][Tf_2N]+[emim][DCA] （7:3）	正庚烷+苯 正庚烷+乙苯	313.20 K，101.325 kPa	13.00~73.90 18.00~29.10	[35]
[Bmim][BF_4] [Bpy][BF_4] [Bmim][SCN]	环己烷+苯	298.15 K，101.325 kPa	30.00~80.00 30.00~50.00 20.00~30.00	[36]
[4bmpy][TCM]	环己烷+苯	323.20 K，质量比10∶1	13.50	[37]
[C2C1im][TCM] [4-C4C1py][TCM]	正辛烷+苯	363.20 K，质量比10∶1	17.00 9.00	[38]

成本高等问题，目前尚未得到工业应用[39]。

1.3 抽提芳烃的低共熔溶剂

低共熔溶剂（deep eutectic solvents，DES）作为一种新型绿色溶剂在萃取领域表现出较好的性能，DES的设计具有结构、性质以及氢键供体和受体的组合可调等特点，因而被萃取领域所关注。作为一种新型离子液体，DES在芳烃抽提方面的应用具有巨大潜力[40-41]。

Bai等[42]采用3种DES作为分离苯和环己烷的溶剂。研究表明四丁基溴化铵（tetrabutylammonium bromide，TBAB）与乙酰丙酸（levulinic acid，LA）按混合比1∶2制备的DES能够使（苯+环己烷）体系分离的相对挥发度达4.76，并通过红外光谱研究其萃取蒸馏机理，认为乙酰丙酸与苯之间的氢键和π-π键可能有助于打破苯和环己烷形成的共沸物体系，有利于苯和环己烷的分离。

Ge等[43]研究采用四丁基溴化膦（tetrabutylphosphonium bromide，TBPB）和乙酰丙酸组成的深共晶溶剂分离轻循环油中的芳烃组分。结果表明，TBP^+阳离子和乙酰丙酸的羰基（—C=O）可能分别通过CH-π和π-π相互作用与四氢化萘的芳香环发生相互作用，如图5所示。

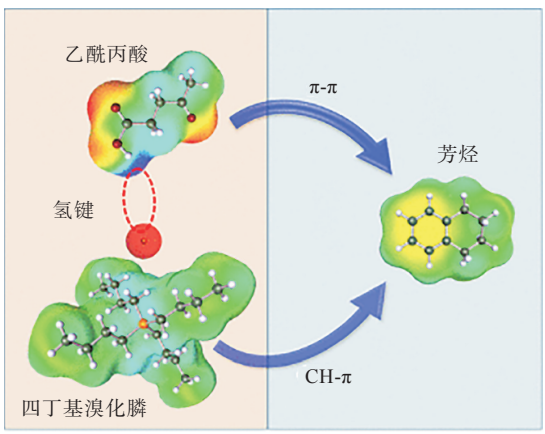


图5 DES与芳烃的相互作用

Fig. 5 Interaction between DES and aromatics

2 不同燃料油芳烃抽提的研究进展

从目前国内外的炼油行业来看，芳烃抽提的主要来源是重整汽油和加氢裂解汽油。传统的优质抽提原料来源是有限的，若能拓宽芳烃抽提的原料来源，则对进一步缩减汽油产量，增加芳烃产品有着更为重要的意义。然而，不同燃料油在生产工艺、组分分布及含量等方面均存在较大差异，因此充分了解燃料油的组成、化学性质，掌握不同化学组成对芳烃抽提效果的影响，对开发芳烃抽提高效萃取剂和新工艺具有重要指导意义[44-45]。

2.1 重整汽油芳烃的抽提

重整汽油芳烃抽提是石化生产中获得BTX资源的主要手段，工艺也较为成熟。在实际工业生产中，很多炼厂芳烃抽提工艺都是将重整汽油先预分馏为C_6或C_6～C_7组分，然后进入芳烃抽提装置，获得单苯或二苯产品[46]。

田龙胜等[47]研究开发了SUL-COS复合溶剂以及抽提蒸馏回收重整汽油中纯苯的SED新工艺，该工艺技术在年产150 kt工业装置上成功工业化。工业试验结果表明，重整汽油经SED抽提蒸馏新工艺抽提后，获得的苯产品纯度达99.95%。杨国强等[48]分析了中海油气（泰州）石化有限公司的40万t/a重整汽油芳烃抽提工艺装置运行工况。重整汽油经过SUL液液抽提后，苯和甲苯产品纯度均可达到99.99%以上。

2.2 裂解加氢汽油芳烃的抽提

乙烯裂解加氢汽油也是芳烃抽提装置的主要原料之一，其主要为C_5~C_{11}组分，其中含70%~80%芳烃，20%~30%环烷烃和链式烷烃，且以苯和甲苯为主，具有较高的回收价值[49]。

苏佳林等[50]以催化裂解汽油为研究对象，对其芳烃抽提工艺进行了模拟及优化。工艺优化结果表明，芳烃收率有所提高，综合能耗较原设计降低了7.08%，取得了较好的节能效果。Navarro等[51]采用离子液体[EMIN][TCM]通过萃取蒸馏方法开展从裂解汽油分离芳烃的研究，采用COSMO-based/AspenPlus方法对萃取精馏过程进行了严格的模拟，结果表明[EMIN][TCM]离子液体萃取精馏分离裂解汽油中BTX组分具有一定的应用前景。

2.3 石脑油芳烃的抽提

石脑油主要由C_5~C_{10}的链式烷烃、环烷烃和芳烃构成，这些组分均具有较高的回收价值，其中链式烷烃是较好的裂解原料，环烷烃是优质的重整原料，芳烃则是重要的基础化工原料[52]。魏丽娟等[53]发明了一种适用于低含量芳烃直馏石脑油的复合萃取剂，复合萃取剂是由DMSO、DMF和PC组成。芳烃含量较低的石脑油经过预分馏，萃取脱芳烃后抽余油和萃取富剂分别进入水洗塔和汽提塔，生产脱芳烃石脑油和芳烃产品。发明的新型复合萃取剂在合适的工艺条件下，对低含量芳烃石脑油进行脱芳烃，能够得到优质的乙烯裂解原料。

2.4 轻质循环油芳烃的抽提

轻循环油（light cycle oil，LCO）是密度相对较

轻的一类柴油，其中芳烃含量高达50%，因而LCO中的芳烃资源具有一定回收价值。毛安国等[54]以LCO作为原料，经高效处理将其转化为高辛烷值汽油或轻质芳烃，不仅能够解决劣质LCO的处理问题，还可以一定程度上提高汽油馏分的辛烷值或弥补轻质芳烃资源的不足，使炼厂产生良好的经济效益。史军军等[55]在分析掌握LCO中各组成数据的基础上，探讨了不同萃取剂对LCO中芳烃组分的萃取效果与萃取剂物性参数之间的关系。研究结果表明，不同萃取剂对芳烃萃取的选择性顺序为SUL>DMSO>FURAL> DMF>NMP> DMA。

2.5　重油深度催化裂解汽油芳烃的抽提

重油深度催化裂解（deep catalytic cracking，DCC）汽油其主要含有芳烃、环烷烃以及单烯烃和二烯烃等组分，目前主要作为汽油调和组分使用[56]。由于DCC石脑油中的环烷烃和烯烃含量较高，使得从DCC石脑油中分离芳烃具有一定的难度。因此，对于DCC石脑油，为了实现DCC石脑油中芳烃高效萃取分离，往往需要提高剂油比和返塔芳烃回流量，最终导致能耗较高且影响装置处理能力[55]。

李宏恩等[57]对DCC汽油组分性质进行了深入分析，开发了DCC汽油加氢生产芳烃抽提原料技术。运用该技术生产的汽油产品质量稳定，装置可长周期稳定运转。宁门翠等[58]指出DCC副产石脑油组分复杂，富含芳烃、环烷烃和二烯烃，若将DCC副产石脑油送至10万t/a苯抽提装置，通过复杂原料适应性改造，最终可获得合格的汽油和苯产品。

3　结　论

环保需求和车用汽油质量升级加快了“减油增化，减油增特”战略实施的进程，芳烃抽提是实现这一战略目标的主要手段。虽然芳烃抽提技术已经比较成熟，但仍有改进提升的空间，芳烃抽提技术升级的措施有以下几方面：

（1）综合考虑不同萃取剂的芳烃脱除率和选择性效果以及其工业应用的可行性，开发高效复合溶剂提高芳烃抽提性能，降低抽提的剂油比和能耗，将成为芳烃抽提优化的主要方向；

（2）优化抽提工艺也是提升芳烃抽提技术的有效途径，如降低抽提过程的剂油比、芳烃回流比及提高抽提原料处理量等；

（3）扩宽芳烃抽提原料来源也是提升芳烃抽提技术的目的之一，炼油工艺中较多馏分适合进行抽提以回收BTX。此外，还有部分馏分适合于进行催化重整，也相当于增加了芳烃抽提的原料量。

要实现“减油增化、减油增特”战略，需着眼于对整个炼油工艺，进行结构性优化，最终获得更多的BTX基础原料，为降低油品中的芳烃含量提供条件。

参考文献

[1] 屠庆华. 我国芳烃行业现状及发展趋势分析[J]. 化学工业，2020，38(4)：36-44.

[2] HABAKI H，YOSHIMURA Y，EGASHIRA R. Separation of aromatic components from light cycle oil by solvent extraction [J]. Separation Science & Technology，2019，54(7)：1159-1166.

[3] 费华伟，王婧，高振宇.2021年中国炼油工业发展状况与近期展望[J]. 国际石油经济，2022，30(4)：48-54，62.

[4] 吕子一，韩会君.“减油增化”目标下C_4资源的利用[J]. 炼油与化工，2021，32(4)：34-37.

[5] 王东锋. 蜡油加氢裂化装置柴油转化，减油增化方向探索与研究[J]. 中国石油和化工标准与质量，2022，42(10)：35-37.

[6] 陈利维，张天嵌. 芳烃抽提技术研究进展和应用现状[J]. 石油化工应用，2017，36(1)：7-10.

[7] LIU J X，JIANG Y Z，JIANG X，et al. Solvent extraction of superfine pulverized coal. Part 1. Composition of the extract [J]. Energy & Fuels，2020，34(10)：12260-12273.

[8] 李晶晶，杨柳，唐晓东，等. 脱芳复合萃取剂的研究进展[J]. 化工进展，2019，38(6)：2915-2921.

[9] 陈莹，刘昌见. 甲苯-正己烯-二甲基亚砜液-液平衡数据的测定与关联[J]. 化工学报，2013，64(3)：814-819.

[10] 苗正朋，沈紫薇，薛凤凤，等. 煤基石脑油脱芳萃取剂的几何构型优化[J]. 石油化工，2018，47(12)：1382-1389.

[11] 王云芳，袁倩，迟正伟. 环丁砜抽提重石脑油芳烃体系相平衡研究[J]. 高校化学工程学报，2014，28(3)：461-465.

[12] MOHSEN-NIA M，DOULABI F. Separation of aromatic hydrocarbons（toluene or benzene）from aliphatic hydrocarbon（n-heptane）by extraction with ethylene carbonate [J]. Journal of Chemical Thermodynamics，2010，42(10)：1281-1285.

[13] BRIJMOHAN N，MOODLEY K，NARASIGADU C. Ternary liquid-liquid equilibrium data for the n-heptane + toluene +（butane-1，4-diol or glycerol）systems at 298.2，313.2，and 333.2 K and 0.1 MPa [J]. Journal of Chemical & Engineering Data，2022，

67(4): 975-983.

[14] ARUNKUMAR U K, MOHAN R. Liquid-liquid equilibria measurement of systems involving alkanes (heptane and dodecane), aromatics (benzene or toluene) and furfural[J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2011, 56(3): 485-490.

[15] COTO B, SUÁREZ I, TENORIO M J, et al. Extraction of aromatic and polyaromatic compounds with NMP: experimental and model description[J]. Fluid Phase Equilibria, 2022, 554: 113293.

[16] CHEN D C, YE H Q, WU H. (Liqui + liquid) equilibria of three ternary systems: (heptane + benzene + *N*-formylmorpholine), (heptane + toluene+ *N*-formylmorpholine), (heptane + xylene + *N*-formylmorpholine) from T = (298.15 to 353.15) K[J]. The Journal of Chemical Thermodynamics, 2007, 39(8): 1182-1188.

[17] ZHANG Y H, GAO H R, WANG M X, et al. Research on the effect of the solvent structure and group on separation of 1-hexene, benzene, and thiophene[J]. Energy & Fuels, 2019, 33(6): 5162-5172.

[18] LABABIDI H M S, ALI S H, FAHIM M A. Optimization of aromatics extraction of naphtha reformate by propylene carbonate/diethylene glycol mixed solvent [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2006, 45(14): 5086-5097.

[19] 田龙胜, 唐文成. 重整汽油抽提蒸馏苯新工艺(SED)工业应用[J]. 石油化工, 2003(32): 298-300.

[20] 史云鹤, 李长明, 周金波. 离心萃取法优选直馏石脑油脱芳烃萃取剂[J]. 应用化工, 2015, 44(5): 899-902.

[21] MAHMOUDI J, LOTFOLLAHI M N. Extraction of benzene from a narrow cut of naphtha via liquid-liquid extraction using pure-sulfolane and 2-propanol-sulfolane-mixed solvents [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2010, 27(1): 214-217.

[22] 疏其朋, 李佳书, 李进龙. 石脑油液液萃取脱环烷烃和芳烃溶剂的筛选[J]. 石油化工, 2019, 48(4): 362-366.

[23] 薛凤凤, 李冬, 张琳娜, 等. 煤基石脑油萃取脱芳复合萃取剂[J]. 化工进展, 2017, 36(8): 2897-2902.

[24] DONG Y C, YANG Q C, LI Z W, et al. Extractive distillation of the benzene and acetonitrile mixture using an ionic liquid as the entrainer[J]. Green Energy & Environment, 2021, 6(3): 444-451.

[25] 叶文康, 方柳亚, 沈喜洲, 等. 离子液体在车用燃油萃取脱硫中的研究进展[J]. 武汉工程大学学报, 2021, 43(1): 1-11, 20.

[26] CANALES R I, BRENNECKE J F. Comparison of ionic liquids to conventional organic solvents for extraction of aromatics from aliphatics[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2016, 61(5): 1685-1699.

[27] SILVIA G, MARCOS L, JULIAN G. Liquid-liquid extraction of toluene from heptane using 1-alkyl-3-methylimidazolium bis (trifluoromethylsulfonyl) imide ionic liquids[J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2011, 56(1): 113-118.

[28] AL-RASHED O A, FAHIM M A, SHAABAN M. Prediction and measurement of phase equilibria for the extraction of BTX from naphtha reformate using BMIMPF6 ionic liquid[J]. Fluid Phase Equilibria, 2014, 363: 248-262.

[29] YAO C F, HOU Y C, WU W Z, et al. Imidazolium-based dicationic ionic liquids: highly efficient extractant for separating aromatics from aliphatics[J]. Green Chemistry, 2018, 20: 3101-3111.

[30] GUO Y C, SHI F M, SHU Q P, et al. Liquid-liquid equilibrium for n-hexane+benzene+sulfolane, +1-ethyl-3-methylimidazolium bis (trifluor+ omethylsulfonyl)imide ([EMIM][NTf_2]), +1-ethyl-3-methylimidazolium ethylsulfate ([EMIM][$EtSO_4$]) and + the mixtures of [EMIM][NTf_2] and [EMIM][$EtSO_4$][J]. Fluid Phase Equilibria, 2021, 529: 112882.

[31] GARCIA S, GARCIA J, LARRIBA M, et al. Sulfonate-based ionic liquids in the liquid-liquid extraction of aromatic hydrocarbons[J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2011, 56(7): 3188-3193.

[32] LARRIBA M, NAVARRO P, GARCÍA J, et al. Liquid-liquid extraction of toluene fromn-heptane by {[emim][TCM] + [emim][DCA] binary ionic liquid mixtures[J]. Fluid Phase Equilibria, 2014, 364: 48-54.

[33] LARRIBA M, NAVARRO P, DELGADO-MELLADO N, et al. Extraction of aromatic hydrocarbons from pyrolysis gasoline using tetrathiocyanatocobaltate-based ionic liquids: experimental study and simulation [J]. Fuel Processing Technology, 2017, 159: 96-110.

[34] NAVARRO P, LARRIBA M, et al. Experimental screening towards developing ionic liquid-based extractive distillation in the dearomatization of refinery streams [J]. Separation and Purification Technology, 2018, 201: 268-275.

[35] LARRIBA M, NAVARRO P, et al. Liquid-liquid extraction of btex from reformer gasoline using binary mixtures of [4empy][Tf2N] and [emim][DCA]

ionic liquids[J]. Energy & Fuels, 2014, 28: 6666-6676.

[36] ZHOU T, WANG Z Y, YE Y M, et al. Deep separation of benzene from cyclohexane by liquid extraction using ionic liquids as the solvent [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(15): 5559-5564.

[37] MIGUEL A, ANDRES C B, MARCOS L, et al. Enhanced separation of benzene and cyclohexane by homogeneous extractive distillation using ionic liquids as entrainers[J]. Separation and Purification Technology, 2020,240: 116583.

[38] AYUSO M, PALMA A M, LARRIBA M, et al. Experimental and CPA EoS description of the key components in the BTX separation from gasolines by extractive distillation with tricyanomethanide-based ionic liquids[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(33): 15058-15068.

[39] ALKHALDI K, AL-JIMAZ A S, ALTUWAIM M S. Liquid extraction of toluene from heptane, octane, or nonane using mixed ionic solvents of 1ethyl-3-methylimidazolium methylsulfate and 1hexyl-3-methylimi-dazolium chexafluorophosphate[J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2019, 64(1): 169-175.

[40] 徐环斐，彭建军，宋晓明，等. 低共熔溶剂的分子模拟研究进展[J]. 齐鲁工业大学学报，2019，33(5)：1-9.

[41] USMAN M A, FAGOROYE O K, AJAYI T O, et al. Ternary liquid-liquid equilibrium data for n-hexane-benzene-DES (choline chloride/ethylene glycol, choline chloride/glycerol, choline chloride/urea) at 303 K and 101.3 kPa [J]. Applied Petrochemical Research, 2020, 10(3): 125-137.

[42] BAI F, HUA C, LI J. Separation of benzene-cyclohexane azeotropes via extractive distillation using deep eutectic solvents as entrainers [J]. Processes, 2021, 9(2): 336-348.

[43] GE Z, CHENG H Y, ZHANG G J, et al. Mechanism of extractive separation of light cycle oil using a deep eutectic solvent composed of tetrabutylphosphon-ium bromide and levulinic acid [J]. Energy & Fuels, 2022, 36(4): 1854-1862.

[44] 唐晓东，杨谨，仝保田，等. 催化裂化柴油萃取脱芳烃技术研究[J]. 石油炼制与化工，2020，51(8)：12-18.

[45] 张宇豪，王永涛，陈丰，等. 清洁油品生产中溶剂萃取分离技术的研究进展[J]. 中国科学：化学，2018，48(4)：319-328.

[46] 杨俊，陈强宇，高晓燕. 提高连续重整装置三苯收率的技术措施[J]. 石化技术与应用，2020，38(6)：407-411.

[47] 田龙胜，何盛宝，唐文成，等. 重整汽油抽提蒸馏分离苯新工艺的开发与工业应用[J]. 石油炼制与化工，2003(9)：1-5.

[48] 杨国强，张卫琪，巩涛. 环丁砜液液抽提工艺在泰州石化芳烃抽提装置的应用[J]. 化学工程与装备，2018(10)：41-43.

[49] 刘超华，范渺. 以重整脱戊烷油与裂解加氢汽油为原料的芳烃抽提装置运转工况对比[J]. 石油炼制与化工，2021，52(1)：43-47.

[50] 苏佳林，董忠哲，郭鑫. 环丁砜芳烃抽提过程的模拟与优化[J]. 石油石化绿色低碳，2019，4(4)：26-31.

[51] NAVARRO P, DIOS-GARCIA I D, LARRIBA M, et al. Dearomatization of pyrolysis gasoline by extractive distillation with 1-ethyl-3-methylimidazolium tricyanomethanide [J]. Fuel Processing Technology, 2019, 195: 106156.

[52] 郭莹，杨晓红，田勇，等. 裂解原料芳烃抽提预处理技术的研究[J]. 石油化工，2014，43(3)：249-254.

[53] 魏丽娟，李永华，唐明，等. 一种适用于低含量芳烃直馏石脑油中芳烃脱除的复合萃取剂及其应用方法：CN202011345556.6[P]. 2021-03-26.

[54] 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.

[55] 史军军，葸雷，葛晓蓉. 催化裂化轻循环油萃取脱芳烃的溶剂选择[J]. 石油炼制与化工，2020，51(8)：1-6.

[56] 刘蕾，姚文君，赵新红，等. 催化裂化汽油清洁化技术研究进展[J]. 炼油与化工，2021，32(4)：1-5.

[57] 李宏恩，张登前，宋启凤，等. DCC汽油加氢生产芳烃抽提原料技术(NHTDC)的开发及应用[J]. 石油炼制与化工，2018，49(5)：12-15.

[58] 宁门翠，范凤鸣，陆平，等. 重油催化裂解副产石脑油资源利用的工艺研究[J]. 天然气化工(C1化学与化工)，2019，44(6)：93-97.

本文编辑：张　瑞