

1-己烯萃取精馏脱烷烃杂质的萃取剂选择

杨正伟, 崔格瑞, 孙启文*

(上海兖矿能源科技研发有限公司, 煤液化气化及高效低碳利用全国重点实验室, 上海 201203)

摘要:采用 UNIFAC 热力学模型, 利用 PRO II 模拟中的 Flash 模板, 对 1-己烯萃取精馏脱烷烃杂质的萃取剂进行了筛选, 确定出了 *N,N*-二甲基甲酰胺 (DMF)、二甲亚砜 (DMSO)、1-甲基-2-吡咯烷酮 (NMP) 3 种溶剂对烷烃/烯烃相对挥发度有明显提高。采用实验室小型精馏装置, 对初选出的 3 种溶剂进行了实验验证。结果表明, 在塔板数 30 块, 溶剂比 9, 回流比 2 的条件下, DMF、DMSO、NMP 分别能将 1-己烯中的烷烃含量由 2.7071% 脱除到 0.32%、0.33% 和 0.49%, 相同条件下, 实验与模拟吻合良好。综合分离效果、溶剂的夹带、毒性和稳定性, 最佳萃取剂 DMSO。

关键词:萃取剂; 萃取精馏; 1-己烯; 烷烃; 模拟

中图分类号: TQ028.3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)11-0237-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.11.040

Selection of extractant for extractive distillation of 1-hexene to remove alkane impurities

YANG Zheng-wei, CUI Ge-rui, SUN Qi-wen*

(State Key Laboratory for Liquefaction, Gasification and Efficient Low Carbon Utilization of Coal, Shanghai Yankuang Energy Technology R&D Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract: The extractants for the extractive distillation of 1-hexene to remove alkane impurities are screened out through using the UNIFAC thermodynamic model and the Flash template in PROII simulation software. It is determined that *N,N*-dimethylformamide (DMF), dimethyl sulfoxide (DMSO) and 1-methyl-2-pyrrolidone (NMP) increase the relative volatility of alkanes to alkenes significantly. Experimental verification on these three solvents are performed by using a small-scale distillation apparatus in the laboratory. Results show that the alkanes content in 1-hexene can be reduced from 2.7071% to 0.32%, 0.33%, and 0.49%, respectively by DMF, DMSO, and NMP under the conditions that the column has 30 trays, the solvent ratio is 9, and the reflux ratio is 2. Under the same conditions, the experiment and simulation results are in good agreement each other. DMSO is the optimal extractant through considering the comprehensive separation effect, solvent entrainment, toxicity, and stability.

Key words: extractant; extractive distillation; 1-hexene; alkanes; simulation

1-己烯是生产高性能的高密度聚乙烯 (HDPE) 和线性低密度聚乙烯 (LLDPE) 的重要共聚单体, 也是生产香料、染料、增塑剂、表面活性剂、脂肪醇等精细化学品的重要原料^[1-3]。1-己烯的生产有乙烯齐聚法和抽提法^[3-4], 其中, 抽提法由南非 Sasol 公司以费托合成油为原料抽提开发, 并实现工业化生产, 与齐聚法相比具有生产成本优势。近年来, 随着国内煤制油工业装置投产, 对 α 烯烃 (尤其是 1-己烯、1-辛烯) 的抽提逐渐成为煤制油产物分离研究的热点。

从费托合成油中分离 1-己烯时, 需要经过窄馏分切割、脱氧化合物、醚化、精密精馏^[5-8], 得到 1-己烯粗产品, 再对其进行进一步精制提纯, 分离聚合级 1-己烯产品。1-己烯粗产品中含有少量烷烃和异

构烯烃杂质, 其中烷烃杂质包括 2-甲基戊烷、3-甲基戊烷、正己烷等, 虽然这些组分与 1-己烯不形成共沸物, 但沸点差小, 用普通精馏法无法有效分离, 为了得到高纯度的 1-己烯产品, 需要开发特殊的分离方法将其精制脱除。

烷烃分离主要有膜分离法^[9-11]、吸附法^[12-14]、萃取精馏法^[15-21], 膜分离法受选择性和膜材料限制, 目前尚处于实验研究阶段; 吸附法对轻质油中烷烃分离已有工业示范, 但不适合富烯烃物料中少量烷烃的脱除; 溶剂萃取精馏法对单碳烷烃具有分离效率高、流程简单、易工业应用等优点, 适合本文中的低烷烃含量的烷烃混合物的分离体系。萃取精馏分离烷烃的关键是萃取剂的开发和选择, 萃取剂决定分离难易程度和过程能耗。本文

收稿日期: 2025-02-24; 修回日期: 2025-09-17

基金项目: 山东省重点研发计划项目 (2024CXPT069)

作者简介: 杨正伟 (1980-), 男, 硕士, 工程师, 从事化工分离研究, 021-61620108, yetech@ye-tech.com; 孙启文 (1958-), 博士, 研究员, 从事煤间接液化及新型煤化工研究, 通讯联系人, 021-61620108, yetech@ye-tech.com。

中根据费托合成油抽提 1-己烯粗产品的组成,采用计算机模拟的方法,对萃取精馏脱 2-甲基戊烷、3-甲基戊烷、正己烷等烷烃杂质的萃取剂进行初选,再对初选的萃取剂进一步实验验证和优选,确定适合本体系的最佳萃取剂。

1 实验部分

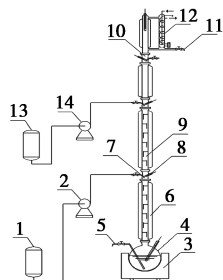
1.1 原料及试剂

实验原料:根据费托合成分离 1-己烯得到的粗产品组成,购买 1-己烯、2-甲基戊烷、3-甲基戊烷、正己烷等试剂配制而成,其中 2-甲基戊烷含量 0.4%,3-甲基戊烷含量 1.82%,正己烷含量 0.49%,三者之和为 2.7%,1-己烯含量为 95.1%,异构烷烃 2.2%。

2-甲基戊烷、3-甲基戊烷、正己烷、1-己烯等试剂都购买于国药化学试剂,纯度 $\geq 99\%$;萃取剂 NMP 购买于国药化学试剂,纯度 $\geq 99.5\%$ 。

1.2 实验装置

小型萃取精馏实验装置见图 1。



1— C_6 原料槽;2—进料泵;3—电加热套;4—圆底烧瓶;
5—塔底出料口;6—保温层;7—进料口;8—测温口;9—塔柱;
10—玻璃连接管;11—塔顶出料口;12—冷凝器;
13—溶剂槽;14—溶剂泵

图 1 萃取精馏塔实验装置

实验萃取精馏塔为玻璃填料塔,内装 1.5 m 高 3 mm 三角螺旋填料,塔柱由多段内径为 35 mm 的玻璃塔节串联而成,每两段塔节之间用带测温口和进料口的玻璃管连接,塔高度可以根据塔板数高低的需要灵活增减,塔柱设有真空保温夹层,再采用玻璃丝布管保温。

1.3 分析方法

原料和分离产物采用气相色谱外标法分析,色谱定量分析方法:气相色谱 Agilent GC6890;色谱柱:Agilent 19091s-001,最高温度 325℃;色谱柱型号 HP-PONA,规格为 50.0 m \times 200 μ m \times 0.5 μ m;FID 检测器; H_2 40 mL/min,空气 450 mL/min,尾吹(N_2)

45.0 mL/min,分流比为 100:1;进样温度为 250℃,采用程序升温,初温为 35℃,升温速率为 2℃/min,终温为 200℃。

1.4 分离方法

由于烯烃的碳碳双键与周围的 C—H 键形成的超共轭效应导致电子偏向双键,使得烯烃的极性比烷烃大,根据这一特点,选择醇、胺、砜、烷酮、吗啉类等强极性溶剂,采用萃取精馏的方法对 1-己烯物料中的烷烃杂质进行精制脱除研究。以 PRO II 模拟计算平台,选择合适的热力学模型,研究加入溶剂对不同烷烃与烯烃的相对挥发度的影响,初选出几种效果好的萃取剂,然后搭建精馏实验装置,对初选出的几种溶剂进行实验验证,确定出适合物料体系的最佳萃取剂。

在萃取精馏过程中,烷烃与溶剂作用比烯烃弱,塔顶采出为富烷烃混合物,塔釜得到溶剂+1-己烯混合物。本文中的目的是精制脱除富 1-己烯物料中的烷烃组分,塔顶以烷烃与烯烃含量之比(以下简称烷烯比)为指标;塔釜以扣除萃取剂后的烷烃含量作为指标。

2 结果与讨论

2.1 热力学模型及萃取剂选择

2.1.1 热力学模型

UNIFAC(the universal functional activity coefficient method)方法是基于“基团贡献”概念(the group contribution concept)的 ASOG 模型(the analytical solution of groups model),计算活度系数的热力学方法,假设 2 个分子之间的相互作用是基团相互作用的函数。其可以将成百上千种的需要计算的化合物,抽象成类别更少的基团从而简化热力学计算。

使用 UNIFAC 方法进行萃取精馏模拟计算时,相关组分基团结构组成如表 1 所示。

表 1 精馏组分基团结构组成

组分名称	基团 1		基团 2		基团 3	
	编号	数量	编号	数量	编号	数量
2-甲基戊烷	900	3	901	2	902	1
3-甲基戊烷	900	3	901	2	902	1
正己烷	1100	1	901	3	900	1
1-己烯	900	2	901	4		
<i>N,N</i> -二甲基甲酰胺	2499	1				
甲酰胺	1888	1				
二甲亚砜	2477	1				
<i>N</i> -甲基-2-吡咯烷酮	2500	1				
乙腈	1644	1				

表 1 基团的具体结构采用 PRO/II 软件中“ijk”形式以编码形式表示。

使用 UNIFAC 方法多组分混合物的计算需要对活度系数进行计算。活度系数的公式分为组合部分和剩余部分:

$$\ln \gamma_i = \ln \gamma_i^C + \ln \gamma_i^R \quad (1)$$

组合部分活度系数的计算与 UNIQUAC 公式 (the Universal Quasi-chemical Equation) 组合部分采用相似的计算公式:

$$\ln \gamma_i^C = \ln(\Phi_i/x_i) + 1 - \Phi_i/x_i - (Z/2)q_i[\ln(\Phi_i/\theta_i) + 1 - \Phi_i/\theta_i] \quad (2)$$

其涉及基团的体积参数、面积参数等,参数如表 2。

表 2 萃取精馏各基团结构参数

类型	基团	ijk 形式	面积	体积
饱和烃	90	900	0.848	0.9011
		901	0.540	0.6744
		902	0.228	0.4469
不饱和烃	110	1100	1.176	1.3454
乙腈	140	1644	1.724	1.8701
甲酰胺	40	1888	1.644	1.6783
二甲亚砜	247	2477	2.472	2.8266
N,N-二甲基甲酰胺	46	2499	2.736	3.0856
N-甲基-2-吡咯烷酮	250	2500	3.200	3.9810

剩余部分的计算则采用以下公式:

$$\ln \gamma_i^R = \sum_{k=1}^{NK} v_k^i (\ln \Gamma_k^i - \ln \Gamma_k^i) \quad (3)$$

其具体计算涉及基团间的相互作用,参数如表 3 所示。

表 3 萃取精馏基团间的二元交互参数

基团 N	基团 M	交互参数(M,N)	交互参数(N,M)
90	110	86.02	-35.360
90	140	597.00	24.820
90	40	390.90	27.970
90	247	526.50	50.490
90	46	485.30	-31.950
90	250	220.30	13.890
110	140	336.90	-40.620
110	40	200.20	9.755
110	247	179.00	64.070
110	46	-70.45	249.000
110	250	86.46	-16.110
140	46	-151.50	150.600
247	46	-97.71	136.600

2.1.2 萃取剂筛选

根据烷烯烃的极性差异,以 PRO II 模拟平台,选择 UNIF 热力学方程,利用 PRO II 中的 Flash 模块得到的气液平衡数据,依据相对挥发度计算公式(4):

$$\alpha = (y_1/x_1)/(y_2/x_2) = [y_1(1-x_1)]/[x_1(1-y_1)] \quad (4)$$

计算不同溶剂体系下 2-甲基戊烷、三甲基戊烷、正己烷与 1-己烯的相对挥发度,对萃取剂进行初选,确定出对烷烯烃相对挥发度有明显提高的溶剂。在物料进料为常压,溶剂质量比 1:1,气相分离率 0.1 的条件下,计算出的相对挥发度如表 4 所示。

表 4 不同溶剂萃取精馏分离结果

溶剂	沸点/℃	相对挥发度		
		α_{11}	α_{21}	α_{31}
无		1.17	1.06	0.90
三甘醇	288.4	1.29	1.17	0.98
四甘醇	329.6	1.31	1.19	0.99
N,N-二甲基甲酰胺	152.0	1.81	1.58	1.34
甲酰胺	219.9	1.11	1.16	1.21
乙酰胺	221.2	1.09	1.16	1.07
N-甲基甲酰胺	199.5	1.10	1.16	1.08
乙醇胺	170.0	1.23	1.12	0.93
二甲亚砜	190.9	1.74	1.58	1.33
N-甲基-2-吡咯烷酮	204.3	1.55	1.42	1.09
碳酸丙烯酯	241.7	1.46	1.33	1.13
N-甲酰吗啉	240.0	1.10	1.18	1.14
乙酰丙酸	256.9	1.10	1.19	1.08
乙腈	81.6	1.10	1.20	1.34
吡啶	115.3	1.10	1.18	0.86
糠醛	161.7	1.10	1.18	0.88

注: α_{11} 、 α_{21} 、 α_{31} 分别为不同溶剂下 2-甲基戊烷、3-甲基戊烷、正己烷与 1-己烯的相对挥发度。

未加溶剂时,2-甲基-戊烷、3-甲基戊烷、正己烷与 1-己烯的相对挥发度分别为 1.17、1.06、0.90,3 种烷烃与 1-己烯的相对挥发度都接近于 1。加入表 1 中的 15 种溶剂后,N,N-二甲基甲酰胺(DMF)、二甲亚砜(DMSO)、N-甲基-2-吡咯烷酮(NMP)和碳酸丙烯酯(PC)等溶剂对 3 种烷烃的相对挥发度有明显提高。4 种溶剂的烷/烯相对挥发度从高到低的顺序依次为:DMF>DMSO>NMP>PC,4 种溶剂中,PC 相对挥发度最低,分离效率低,沸点最高,精馏塔釜操作温度高,不适合本文中的高烯烃含量

的原料体系。DMF、DMSO 和 NMP 3 种溶剂相对挥发度相差不大,沸点适中,且都有良好的稳定性,因此,选择这 3 种溶剂进一步进行实验筛选,考察分离的效果。

2.2 实验验证

对模拟初选出的 DMF、DMSO 和 NMP 3 种溶剂,在小型精馏塔上,用富 1-己烯物料进行萃取精馏脱烷烃实验验证。经测定,1 m 填料的理论板数约为 20 块,填料高度为 1.5 m,精馏塔的塔板数约为 30 块,原料从塔中间位置进料,溶剂从塔顶回流口进料,溶剂质量比为 9,回流比 2,在相同的条件下,对 3 种溶剂的萃取精馏效果进行了实验考察,并与同样条件模拟分离结果进行对比,结果见表 5。

表 5 实验与模拟分离对比

溶剂	组分名称	实验		模拟	
		塔顶	塔釜	塔顶	塔釜
DMF	2-甲基戊烷	13.05	0.00	13.20	0.00
	3-甲基戊烷	57.56	0.01	57.67	0.01
	正己烷	9.40	0.02	9.15	0.02
	1-己烯	19.26	9.47	19.13	9.48
	其他烃	0.67	0.19	0.74	0.23
	萃取剂	0.06	90.31	0.11	90.27
DMSO	2-甲基戊烷	13.18	0.00	13.25	0.00
	3-甲基戊烷	57.25	0.01	57.37	0.01
	正己烷	9.05	0.02	8.99	0.03
	1-己烯	19.75	9.45	19.72	9.48
	其他烃	0.77	0.20	0.59	0.21
	萃取剂	0.00	90.32	0.08	90.27
NMP	2-甲基戊烷	13.10	0.00	13.17	0.00
	3-甲基戊烷	55.71	0.02	55.74	0.01
	正己烷	6.12	0.03	6.07	0.03
	1-己烯	24.22	9.43	24.27	9.47
	其他烃	0.85	0.02	0.75	0.22
	萃取剂	0.00	90.50	0.00	90.27

由表 5 的实验结果可知,以 DMF 为萃取剂,塔顶烷烃含量为 80.02%,1-己烯含量为 19.26%,烷烯比由原料的 0.028 提高到 4.02,塔釜烷烃含量为 0.031%,1-己烯含量 9.47%,扣除萃取剂 DMF 后,烷烃含量由进料的 2.71% 降到 0.32%。以 DMSO 为萃取剂,塔顶烷烃含量为 79.48%,1-己烯 19.75%,烷烯比为 3.87;塔釜烷烃含量为 0.032%,1-己烯含量 9.45%,扣除萃取剂 DMSO 后,烷烃含

量由进料的 2.71% 降到 0.33%。以 NMP 为萃取剂,塔顶烷烃含量为 74.93%,1-己烯 24.22%,烷烯比为 2.99;塔釜烷烃含量为 0.046%,1-己烯含量 9.43%,扣除萃取剂 NMP 后,烷烃含量由进料的 2.71% 降到 0.49%。可见,3 种溶剂对 1-己烯中的烷烃杂质都有较好的脱除效果,实验 DMF 分离效果最优,DMSO 其次,但与 DMF 接近;NMP 的分离效果在 3 者中最差,这与模拟计算的各溶剂对烷烯烃的相对挥发度大小顺序一致。

DMF 虽然分离指标比 DMSO 略优,但沸点低,塔顶有微量溶剂夹带,在精馏塔的溶剂进料上端需设计更高塔板来回收溶剂,另外 DMF 的毒性比 DMSO 大,且在储存、使用和废弃物处理中也容易分解,而 DMSO 相对较为稳定,不易被氧化和分解。因此最优的萃取剂选择 DMSO。相同条件下,3 种溶剂的实验与模拟的塔顶塔釜各关键组分含量接近,大多组分的实验与模拟误差在 5% 以内,表明模拟能可靠地用于该塔的基础设计。

3 结论

(1) 以 UNIFAC 模型对多种溶剂进行了 1-己烯脱己烷杂质的萃取剂筛选,初选出了 DMF、DMSO、NMP 3 种烷烯烃相对挥发度最高的溶剂。

(2) 实验验证了 DMF、DMSO、NMP 3 种溶剂的萃取精馏分离效果,在塔板数 30 块,回流比 2、溶剂比 9 的条件下,3 种溶剂分别能将 1-己烯中的烷烃由 2.71% 脱除到 0.32%、0.33% 和 0.49%,综合溶剂的分离效果、毒性、稳定性,确定出最佳溶剂为 DMSO。

(3) 相同条件下,实验与模拟分离结果接近,PRO II 模拟能可靠地用于该塔的基础设计。

(4) 研究结果可有效解决 1-己烯中 2-甲基戊烷、3-甲基戊烷、正己烷等杂质的精制脱除问题,对费托合成油分离出聚合级 1-己烯有重要意义。

参考文献

- [1] 钱伯章.国内外高端共聚单体开发技术及发展趋势分析(上)[J].上海化工,2015,40(12):31-35.
- [2] 郭鹏,徐耀辉,吕明福,等.1-己烯共聚 LLDPE 的研究及开发进展[J].合成树脂及塑料,2013,30(6):62-67.
- [3] 祁彦平,栗同林,郭贵贵. α -烯烃的生产工艺及应用[J].石化技术,2008,15(1):53-57.
- [4] 刘素丽,袁炜,罗春桃. α -烯烃的生产及应用[J].合成材料老化与应用,2016,45(3):132-135.

(下转第 245 页)

全焊接板换整个板片束全部采用本体材料焊接而成,不采用任何非金属密封材料,因而有较高的耐温、耐压性能。其具有类似板式换热器的波纹板结构,同时采用更为先进的全焊接工艺密封,无垫片设计,加上多种金属及合金材料的选择,确保全焊式换热器适用于更大温度范围以及更高设计压力的工艺场合。板壳式换热器作为全焊接板式换热器的一种崭新形式,在两相换热领域具有更高换热效率,尤其在冷流体气化工况表现突出。

降膜换热器的结构由器体、器帽、器底3部分组成,器帽中有物料布液盘和分配板。布液装置可以根据降膜换热器的尺寸和需求设计成多管束分配器形式,以实现均匀分布物料。降膜换热器多用于降膜蒸发,过程是将料液自降膜蒸发器加热室上管箱加入,经液体分布及成膜装置,均匀分配到各换热管内,在重力和真空诱导及气流作用下,呈均匀膜状自上而下流动。流动过程中,被壳程加热介质加热气化,产生的蒸气与液相共同进入蒸发器的分离室,气液充分分离。

降膜换热器优点是维修和清洗方便,传热面积大、气化率高、操作弹性大。目前降膜式换热器广泛用于水或有机溶液的蒸发浓缩过程以及废液处理工段,而在胺法碳捕集工艺中涉及到富液气化的贫富液换热器也可以考虑降膜换热形式,但该领域的应

用目前还在研究阶段,尚未实现工业应用。

5 结论

化学吸收法二氧化碳捕集工艺流程中,吸收剂的选择至关重要,吸收剂的性能决定了能耗剂耗水平。而根据吸收剂的性能特点进行流程优化尤其是贫富液自换热流程的优化可以进一步节能降耗。对于不同试剂选用不同贫富液换热流程的同时,还需要根据每段换热特点匹配选择相适应的换热器形式,才能达到预期节能目标。

参考文献

- [1] 徐小峰.通往《巴黎协定》之路[J].气象科技进展,2024,14(5):2-8.
- [2] 胡山鹰,金涌,张臻烨.发展新质生产力实现碳中和[J/OL].发电技术,2024.DOI:10.12096/j.2096-4528.pgt.24222.
- [3] 张道伟,李利军,谢振威,等.石油行业碳捕集技术[M].北京:石油工业出版社,2023:1-6,57-58.
- [4] 魏青,张振涛,王瑞祥,等.醇胺法碳捕集技术的研究进展[J].环境工程技术学报,2025,15(1):90-99.
- [5] 中国石油天然气集团有限公司,中国昆仑工程有限公司.一种二氧化碳捕集系统及二氧化碳处理系统:CN ZL202320948879.7[P].2023-08-18.
- [6] 李强.CO₂化学吸收系统高效全焊接板式换热器研究[D].杭州:浙江大学,2021.■
- [7] 孙启文,杨正伟,张宗森.一种从费托合成油品中分离含氧化合物和1-己烯的方法:CN 201610226865.9[P].2016-04-13.
- [8] 孙启文,杨正伟,张宗森.一种从碳氢混合物料中分离提纯1-己烯的方法:CN 201410062062.5[P].2014-02-24.
- [9] 杨正伟,孙启文.萃取精馏脱高温费托合成C₆馏分中的含氧化合物[J].石油化工,2016,45(4):402-407.
- [10] 孙启文,杨正伟,张宗森.一种从碳氢(氧)混合物料中分离提纯1-辛烯的方法:CN 201310303047.0[P].2013-07-15.
- [11] 孙汝柳.促进传递膜在烯烃/烷烃分离中的应用进展[J].石油化工,2017,46(3):376-383.
- [12] 徐志康,刘振梅,戴清文.基于溶解-扩散机理的聚合物膜分离烯烃/烷烃的研究进展[J].石油化工,2002,31(2):135-140.
- [13] Yoshino M, Satoshi N S, Kita H, et al. Olefin/paraffin separation performance of carbonized membranes derived from an asymmetric hollow fiber membrane of 6FDA/BPDA-DDBT copolyimide[J]. Journal of Membrane Science,2003,215(1/2):169-183.
- [14] 孙振海,李滨,郭春叁,等.介孔二氧化硅合成及其吸附分离性能研究[J].无机盐工业,2021,53(7):68-72.
- [15] 赵闯,李彝,范景新,等.多孔材料烷烃/烯烃分离技术的研究[J].无机盐工业,2019,51(8):79-82.
- [16] 赵闯,苏文利,臧甲忠,等.两种AgX改性吸附剂的烷烃/烯烃的分离技术[J].无机盐工业,2019,51(7):100-103.
- [17] 李阳,屈一新,王际东.费托合成油C₆馏分中提取烯烃的工艺优化模拟[J].北京服装学院学报:自然科学版,2019,39(3):59-65.
- [18] Li R L, Xing H B, Yang Q W, et al. Selective extraction of 1-hexene against n-hexane in ionic liquids with or without silver salt[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,2012,51(25):8588-8597.
- [19] 李如龙.离子液体在乙烯/乙烷、1-己烯/正己烷分离中的应用基础研究[D].杭州:浙江大学,2012.
- [20] Zhu L, Li F F, Zhu J Q, et al. Liquid-liquid equilibria of ternary systems of 1-hexene/hexane and extraction solvents[J]. Chemical Papers,2016,70(5):585-593.
- [21] Wang Y, Hao W Y, Jacquemin J, et al. Enhancing liquid-phase olefin-paraffin separations using novel silver-based ionic liquids[J]. Journal of Chemical & Engineering Data,2015,60(1):28-36.
- [22] 于睿,韩学芹,张凡龙,等.离子液体作为正己烷/1-己烯精馏萃取剂的实验研究[J].山东化工,2022,51(22):6-8.
- [23] 李虎,张自生,陈久州,等.新型银基低共熔溶剂制备及其在1-己烯/正己烷分离中的应用[J].化工学报,2021,72(8):4204-4214.■

(上接第240页)