

利用 Prins 缩合反应降 FCC 汽油中烯烃研究

赵德志^{1,2,3}, 安高军², 鲁长波², 熊春华², 商红岩³

(1. 天津大学机械工程学院, 天津 300072; 2. 中国人民解放军 62025 部队, 北京 102300;

3. 中国石油大学(华东)理学院, 山东青岛 266580)

摘要:通过 1-己烯和三聚甲醛模拟体系考察 Prins 缩合反应降烯烃的性能, 比较大孔阳离子交换树脂 Amberlyst-35、DFHS-6、分子筛 H-Y 和负载型离子液体 BsMIMHSO₄/sg 的催化活性, 选择 Amberlyst-35 为该反应的催化剂, 研究甲醛来源、催化剂用量、1-己烯/三聚甲醛物质的量配比、反应温度、反应压力以及反应时间对反应的影响。结果表明: 最佳工艺条件为催化剂用量为原料的 4%, 1-己烯/三聚甲醛物质的量配比为 1 : 1.5, 反应温度 105 °C, 反应压力 1.5 MPa, 反应时间 4 h; 在最佳工艺条件下, 用质量比为 1 : 7 的三聚甲醛与 FCC 汽油反应, 可使 FCC 汽油中烯烃质量分数从 25.1% 降至 12.2%, 且反应后产品的辛烷值略有下降。

关键词:Prins 反应; 含氧化合物; 降烯烃; 汽油

中图分类号:TQ 519 **文献标志码:**A

引用格式:赵德志, 安高军, 鲁长波, 等. 利用 Prins 缩合反应降 FCC 汽油中烯烃研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(2):158-163.

ZHAO Dezhi, AN Gaojun, LU Changbo, et al. Research of olefin reduction by Prins condensation for FCC gasoline[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020, 44(2):158-163.

Research of olefin reduction by Prins condensation for FCC gasoline

ZHAO Dezhi^{1,2,3}, AN Gaojun², LU Changbo², XIONG Chunhua², SHANG Hongyan³

(1. School of Mechanical Engineering in Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Chinese People's Liberation Army 62025 Unit, Beijing 102300, China;

3. College of Science in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: The performance of olefin reduction by Prins condensation was investigated using 1-hexene and triformal as the model system. The catalytic activity of macropore cation exchange resins Amberlyst-35, DFHS-6, zeolite H-Y, and supported ionic liquid BsMIMHSO₄/sg were compared, through which the Amberlyst-35 was selected. And the influences of formaldehyde origin, catalyst amount, 1-hexene triformal molar ratio, reaction temperature, reaction pressure and reaction time on the reaction were investigated. The results show that the optimal conditions are as follows: $w(\text{catalyst}) : w(\text{raw material}) = 4\%$, $n(1\text{-hexene}) : n(\text{triformal}) = 1 : 1.5$, the reaction temperature of 105 °C, the reaction pressure of 1.5 MPa, the reaction time of 4 h. Under these conditions, the olefin mass fraction in gasoline is reduced from 25.1% to 12.2% (by mass) with triformal FCC Gasoline mass ratio of 1 : 7, and the gasoline octane number is declined to a small extent.

Keywords:Prins reaction; oxygenated compounds; olefin reduction; gasoline

中国成品汽油中催化裂化(FCC)汽油质量占比约为 80%, 存在硫、烯烃含量高的问题^[1]。烯烃稳定性差, 易氧化生胶堵塞喷嘴, 且挥发性强, 光化学

反应活性高, 易形成光化学烟雾破坏大气臭氧层^[2]。因此降低 FCC 汽油中硫、烯烃含量和提高辛烷值是提高汽油品质的关键^[3-4]。轻汽油醚化技术

收稿日期:2019-09-22

基金项目:山东省自然科学基金青年基金项目(ZR2019QB024)

作者简介:赵德志(1980-), 男, 实验师, 博士, 研究方向为工业催化。E-mail: zhaodezhi@upc.edu.cn。

通信作者:商红岩(1964-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为工业催化。E-mail: catagroupsh@163.com。

是将 $C_3 \sim C_7$ 异构烯烃与甲醇反应转化为醚类化合物,可有效降低汽油中的烯烃含量,同时提高辛烷值,如 UOP 公司的 Ethermax 工艺^[5]、Neste 公司的 NExTAME 技术^[6]、CDTECH 公司的 CDEthers 技术^[7]以及齐鲁石化的 CATAFRAC 技术^[8]、抚顺石化的轻汽油醚化工艺^[9]、中国石油研究院的 LNE^[10-11]等。然而甲醇仅能与异构烯烃发生反应,直链烯烃需经异构化再醚化,提高了投资操作成本。甲醛可与烯烃在酸性条件下 Prins 缩合反应生成含氧杂环、醇类等含氧化合物^[12]。该含氧化合物自带含氧基,可明显改善发动机中汽油的燃烧性能,在降低汽油中烯烃含量的同时减少尾气中烟度、 NO_x 和 HC 等排放污染^[13-14]。笔者选用 1-己烯作为探针分子,考察催化剂类型、甲醛形式、烯醛物质的量配比、反应温度、催化剂用量、反应时间等对 Prins 缩合反应的影响,确定最优反应条件。在最优条件下,开展 FCC 汽油实际体系中 Prins 缩合反应降烯烃的研究。

1 实验

1.1 试剂和仪器

试剂:1-己烯(质量分数为 99%),工业级,上海阿拉丁生化科技有限公司;三聚甲醛(质量分数大于 99.5%),工业级,上海博景化工有限公司;多聚甲醛(质量分数大于 94%),工业级,塞拉尼斯(南京)化工有限公司;盐酸(AR)、氢氧化钠(AR),国药集团化学试剂有限公司;大孔强酸性阳离子交换树脂 Amberlyst-35,江阴市南大合成化学有限公司;大孔强酸性阳离子交换树脂 DFHS-6,贵州东方红升新能源有限公司;BsMImHSO₄/sg 负载型离子液体,制备过程依据文献[15]-[16]。取某厂全馏分 FCC 汽油,密度(20℃)为 0.741 g/m³,其烷烃、环烷烃、芳烃、烯烃质量分数分别为 36.1%、7.3%、29.6%、25.1%;研究法辛烷值(RO_N)为 92.9。

仪器:FYXD 高压反应釜,大连通产高压釜容器有限责任公司;Bruker AVANCE III 400MHz 超导核磁共振波谱仪,瑞士 Bruker 公司;Clarus 680-SQ8 GC-MS 气质联用仪,美国 PerkinElmer 公司;Agilent7820A 气相色谱仪,美国 Agilent 公司。

1.2 Prins 缩合反应

1-己烯和三聚甲醛的缩合反应在高压反应釜中进行。将一定比例的 1-己烯、三聚甲醛和催化剂加入高压反应釜中,密封,用 N₂ 置换釜内气体 3 次后,在预定温度、压力和搅拌速度下反应,确定 Prins 缩合反应最优反应条件。反应结束后,产物用核磁

共振波谱仪和气质联用仪进行定性分析,用气相色谱仪进行定量分析。采用化学滴定法测定产物中未反应的三聚甲醛,条件如下:将 50 mL 1 mol/L 的 Na₂SO₃ 溶液加入 100 mL 锥形瓶中,滴加 2 滴百里香酚酞指示剂,后加入 1 g 反应产物,充分搅拌,溶液将呈淡蓝色,再用 1 mol/L 的硫酸溶液滴定至无色。

1.3 FCC 汽油降烯烃的反应评价

以某炼油厂 FCC 汽油和三聚甲醛为原料,在高压反应釜中对 Prins 缩合反应降烯烃性能进行评价。将一定比例的 FCC 汽油、三聚甲醛和催化剂加入高压反应釜中,在上述最佳反应条件下反应一段时间后,取上层有机相进行分析。

2 结果分析

2.1 Prins 缩合反应条件

2.1.1 催化剂类型的影响

在 1-己烯/三聚甲醛物质的量配比为 1:2、反应温度 100℃、反应压力 1.5 MPa、反应时间 4 h、转速 400 r/min、催化剂用量 3% 的条件下,考察催化剂类型对 Prins 缩合反应的影响,结果如表 1 所示。由表 1 可知,催化剂类型对催化性能有显著的影响。在相同的反应条件下,大孔强酸性阳离子交换树脂 Amberlyst-35 的反应效果最好,1-己烯和三聚甲醛转化率分别为 42.1% 和 95.6%,含氧杂环和醇类收率分别为 17.9% 和 18.2%,负载型离子液体催化剂次之,而 H-Y 分子筛上几乎不反应。这主要是因为 1-己烯与三聚甲醛反应是典型的酸催化反应,所以催化剂酸性强弱直接影响催化性能。负载型离子液体(~2.5 nm)和 H-Y 分子筛(~1 nm)的孔径小于大孔树脂类催化剂(~30 nm),不利于反应原料的接触和产物的及时扩散,且含酸量较低,因此催化效果较差。故选催化效果最好的 Amberlyst-35 为 Prins 缩合反应的催化剂。

表 1 催化剂类型对 1-己烯与三聚甲醛缩合反应的影响

Table 1 Effect of types of catalysts on reactions of 1-hexene with triformol

催化剂	1-己烯转化率/%	甲醛转化率/%	含氧杂环收率/%	醇类收率/%
DFHS-6	30.5	88.4	8.3	16.7
Amberlyst-35	42.1	95.6	17.9	18.2
H-Y	1.5	4.7	0.3	0.8
BsMIMHSO ₄ /sg	4.5	15.6	1.2	2.3

2.1.2 甲醛来源的影响

在烯醛物质的量配比为 1:2、反应温度 100

℃、反应压力 1.5 MPa、反应时间 4 h、转速 400 r/min、Amberlyst-35 催化剂用量 3% 的条件下,考察甲醛来源对 Prins 缩合反应的影响,结果如表 2 所示。由表 2 可知,甲醛的来源不同,原料转化率和产物收率也不同。在相同反应条件下,三聚甲醛和 1-己烯的反应效果最好,多聚甲醛次之,甲醛水溶液和 1-己烯几乎不发生反应。这是因为甲醛水溶液中甲醛的浓度低,1-己烯与甲醛单体接触比较困难,所以几乎不发生反应;而多聚甲醛的聚合度较高,难以解聚,因此反应效果差。另外,三聚甲醛毒性较小,运输安全,是清洁的甲醛来源。故选用三聚甲醛为甲醛来源。

表 2 甲醛来源对 1-己烯与三聚甲醛缩合反应的影响

Table 2 Effect of formaldehyde raw material on reactions of 1-hexene with triformol

甲醛来源	1-己烯转化率/%	甲醛转化率/%	含氧杂环收率/%	醇类收率/%
甲醛水溶液	1.7	2.8	0.3	0.7
多聚甲醛	27.4	71.1	10.5	11.4
三聚甲醛	42.1	95.6	17.9	18.2

2.1.3 催化剂用量的影响

在 1-己烯/三聚甲醛物质的量配比为 1:2、反应温度 100 ℃、反应压力 1.5 MPa、反应时间 4 h、转速 400 r/min 的条件下,考察催化剂用量对 Prins 缩合反应的影响,结果如图 1 所示。

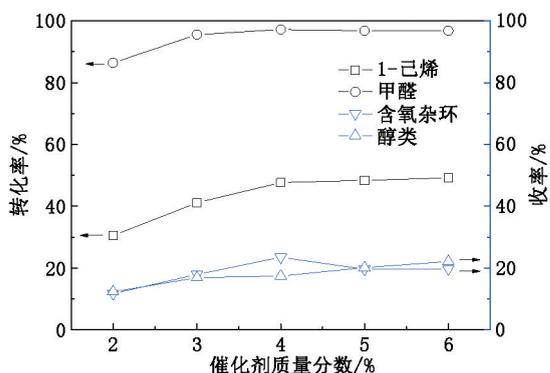


图 1 催化剂用量对 1-己烯与三聚甲醛缩合反应的影响

Fig.1 Effect of catalyst amount on reactions of 1-hexene with triformol

由图 1 可知,当催化剂质量分数从 2% 增至 4% 时,1-己烯转化率和三聚甲醛转化率分别从 30.5% 和 86.4% 增至 47.7% 和 97.2%,含氧杂环和醇类收率分别为从 11.7% 和 12.3% 增至 23.5% 和 17.4%,继续增加催化剂用量,原料转化率和产物收率基本保持不变。1-己烯与甲醛反应是典型的酸催化反应,反应体系中 H^+ 随着催化剂用量增加而增多,增加了 H^+ 与甲醛单体的接触几率,促进了反应

平衡向正方向移动,有利于原料的转化和产物的生成。当催化剂用量增加至一定程度时, H^+ 浓度对反应的影响变小,因此转化率和产率基本不变。根据图 1 综合考虑,选取适宜的催化剂用量为原料总质量的 4%。

2.1.4 原料配比的影响

甲醛对人体危害很大,且产品中过量的甲醛易结晶析出,堵塞油路。因此用 Prins 缩合反应降烯烃的同时,也需关注甲醛的转化率。在反应温度 100 ℃、反应压力 1.5 MPa、反应时间 4 h、转速 400 r/min、Amberlyst-35 催化剂用量 4% 的条件下,考察 1-己烯/三聚甲醛物质的量配比对 Prins 缩合反应的影响,结果如图 2 所示。由图 2 可知,随着原料物质的量配比的增加,1-己烯转化率和产物收率逐渐下降,而三聚甲醛在原料物质的量配比增至 1:1.5 时完全转化。值得注意的是,在原料物质的量配比为 1:2 时,产物中含氧杂环的收率高于醇类,随着原料物质的量配比增至 1:1 时,醇类的收率开始高于含氧杂环。这说明溶液中甲醛单体的浓度影响产物的分布。考虑到残留甲醛的危害,选择 1-己烯/三聚甲醛物质的量配比为 1:1.5 为宜。

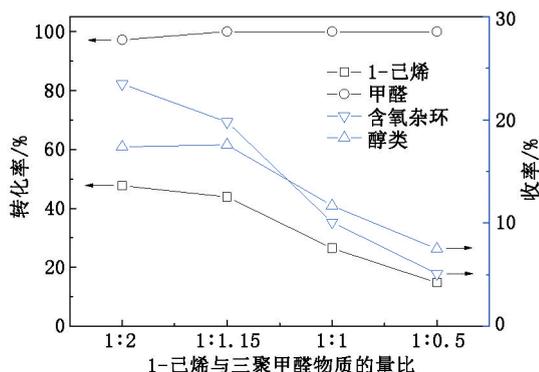


图 2 原料配比对 1-己烯与三聚甲醛缩合反应的影响

Fig.2 Effect of 1-hexene triformol ratio on reactions of 1-hexene with triformol

2.1.5 反应温度的影响

在 1-己烯/三聚甲醛物质的量配比为 1:1.5、反应压力 1.5 MPa、反应时间 4 h、转速 400 r/min、Amberlyst-35 催化剂用量 4% 的条件下,考察反应温度对 Prins 缩合反应的影响,结果如图 3 所示。由图 3 可知,随着温度的升高,1-己烯转化率和产物收率先增大后减小,并在 105 ℃ 时达到最大值;甲醛转化率逐渐增加,在 100 ℃ 时完全反应。另外,在温度 95 ℃ 时溶液中存在少量未反应的三聚甲醛固体。产生上述现象是因为在 95 ℃ 时三聚甲醛的解聚速率较慢,导致反应结束后仍有少量三聚甲醛未反应;

随着反应温度的升高,三聚甲醛的解聚速率增快,生成更多的三聚甲醛单体与 H^+ 反应,使原料转化率和产物收率增加;当温度高于 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 时,实验发现反应后溶液由淡黄色变为棕黄色,Amberlyst-35 催化剂(适宜使用温度 $70\sim 110\text{ }^\circ\text{C}$)可能有部分分解,从而导致原料转化率和产物产率下降。故选取反应温度为 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 。

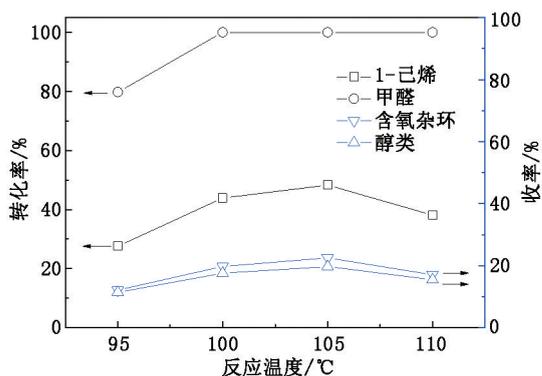


图3 反应温度对1-己烯与三聚甲醛缩合反应的影响

Fig.3 Effect of reaction temperature on reactions of 1-hexene with triformal

2.1.6 反应压力的影响

在1-己烯/三聚甲醛物质的量配比为 $1:1.5$ 、反应温度 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 、反应时间 4 h 、转速 400 r/min 、Amberlyst-35 催化剂用量 4% 的条件下,考察反应压力对 Prins 缩合反应的影响,结果如图4所示。由图4可知,随着反应压力的增加,原料转化率和产物收率基本没有变化。这是因为该反应在液相中进行反应,初始压力对该反应的影响较小。故选取反应压力为 1.5 MPa 。

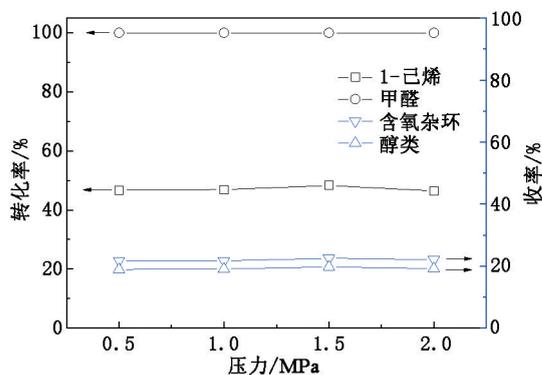


图4 反应压力对1-己烯与三聚甲醛缩合反应的影响

Fig.4 Effect of reaction pressure on reactions of 1-hexene with triformal

2.1.7 反应时间的影响

在1-己烯/三聚甲醛物质的量配比为 $1:1.5$ 、反应温度 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 、反应压力 1.5 MPa 、转速 400 r/

min 、Amberlyst-35 催化剂用量 4% 的条件下,考察反应时间对 Prins 缩合反应的影响,结果如图5所示。由图5可知,随着反应时间的延长,原料转化率和产物收率明显增加,并在 4 h 时三聚甲醛完全转化,继续延长反应时间,1-己烯转化率和产物收率基本不变,说明该反应在 4 h 内基本达到平衡。故选取最佳反应时间为 4 h 。

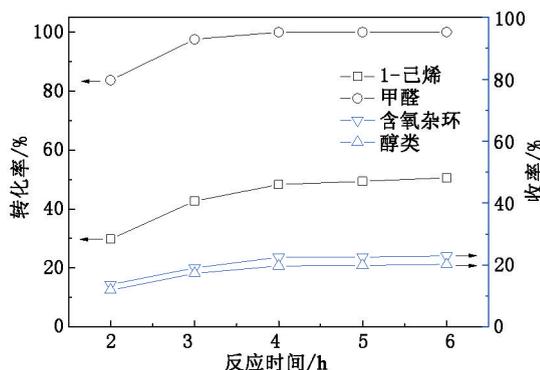


图5 反应时间对1-己烯与三聚甲醛缩合反应的影响

Fig.5 Effect of reaction time on reactions of 1-hexene with triformal

2.2 Prins 缩合反应降 FCC 汽油烯烃性能

在三聚甲醛/FCC 汽油质量比为 $1:7$ 、Amberlyst-35 催化剂用量为 4% 、反应温度为 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 、反应压力为 1.5 MPa 、反应时间为 4 h 、转速为 400 r/min 条件下,对 Prins 反应降 FCC 汽油中烯烃的性能进行考察。反应结束后,烯烃和三聚甲醛转化率分别为 44.3% 和 100% ,含氧杂环和醇类收率分别为 19.8% 和 18.1% 。表3为 FCC 汽油反应前后的组成变化。由表3可知,Prins 缩合反应后 FCC 汽油组成发生了显著变化,烯烃质量分数由原料的 25.1% 降至 12.2% ,生成质量分数分别为 10% 和 9.2% 的含氧杂环和醇类,而烷烃、芳烃和环烷烃含量有所降低,这是因为三聚甲醛参与反应导致产物质量增加。另外,反应后研究法辛烷值(RON)值仅损失 0.4 个单位。由表4可知,反应前后 FCC 汽油中烯烃组分均以 $C_4\sim C_7$ 为主,其他碳数烯烃含量较低。反应后 FCC 汽油中低碳数 $C_3\sim C_7$ 烯烃含量明显下降,而高碳数 $C_8\sim C_{10}$ 烯烃未见明显下降,说明 Amberlyst-35 催化 Prins 缩合反应对低碳数烯烃表现出比高碳数烯烃更高的选择性转化性能,同时生成低碳数的反应产物。这与陈静等^[17]发表的实验结果一致,表明 FCC 汽油中烯烃的碳数是影响 Prins 缩合反应降烯烃效率的因素之一。

根据反应产物及其含量分布,分析 Prins 反应降

FCC汽油中烯烃的反应机制主要有2种途径。首先,甲醛在质子酸作用下生成碳正离子,后与烯烃的碳碳双键反应生成含有羟基的碳正离子,接着发生2个反应:①在甲醛过量的情况下,容易生成含氧杂

环;②在烯烃过量的情况下,含有羟基的碳正离子脱去氢离子,生成醇类化合物。这与图2中含氧杂环/醇类比值随1-己烯/三聚甲醛配比增加而减少是一致的。

表3 Prins反应前后FCC汽油组分质量分数和RON

Table 3 Composition of FCC gasoline and its RON before and after Prins reaction

项目	烷烃/%	烯烃/%	环烷烃/%	芳烃/%	含氧杂环/%	醇类/%	RON
原料	36.1	25.1	7.3	29.6	—	—	92.9
产品	32.1	12.2	6.5	26.7	10.4	9.2	92.5

表4 Prins反应前后FCC汽油中烯烃组分质量分数

Table 4 Composition of olefins in FCC gasoline before and after Prins reaction

烯烃碳数	原料/%	产品/%	转化率/%
C ₃	0.2	0	100
C ₄	3.9	1.2	69
C ₅	9.4	4.1	56
C ₆	5.9	2.8	53
C ₇	2.7	1.5	44
C ₈	1.7	1.4	18
C ₉	0.9	0.8	11
C ₁₀	0.4	0.4	0

综上所述,与当前加氢^[18]、异构化^[19]、烷基化^[20]、芳构化^[21]等降烯烃改质技术相比,Prins缩合反应工艺技术简单,且反应温度较低,可发展为一种清洁汽油生产的实用化新技术。

3 结论

(1)用烯烃和甲醛的Prins缩合反应降FCC汽油中烯烃时,大孔强酸性阳离子交换树脂Amberlyst-35的催化性能最好,在温和的操作条件下降烯烃效果显著,同时含氧杂环和醇类收率也明显提高,产物的研究法辛烷值(RON)基本保持不变,可实现既降烯烃又不损失辛烷值的目的。

(2)烯烃和甲醛的Prins缩合反应中甲醛解聚速率是影响其产物分布的主要原因,而FCC汽油中烯烃的碳数分布是影响降烯烃效率的因素之一。

参考文献:

- [1] 孙方宪,温世昌,李新,等.催化汽油醚化装置主要节能技术探讨[J].石油与天然气化工,2013,42(1):11-14.
SUN Fangxian, WEN Shichang, LI Xin, et al. Energy saving technology on FCC gasoline etherification unit [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2013, 42(1): 11-14.
- [2] 袁裕霞,杨朝合,山红红,等.汽油在不同碳含量半再

生催化剂上的降烯烃规律研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2006,30(3):109-112.

YUAN Yuxia, YANG Chaohe, SHAN Honghong, et al. Study on olefins reduction of gasoline on FCC semi-regenerated catalysts with different coke content [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(3): 109-112.

[3] 刘笑,高静洁,罗辉. FCC汽油加氢脱硫工艺研究进展[J].当代化工,2011,40(4):383-387.

LIU Xiao, GAO Jingjie, LUO Hui. Research progress in hydrodesulfurization process of FCC gasoline [J]. Contemporary Chemical Industry, 2011, 40(4): 383-387.

[4] 冀德坤,李术元,丁福臣,等. ZSM-5/MCM-41复合分子筛汽油降烯烃反应条件考察[J].石油炼制与化工,2011,42(1):53-59.

JI Dekun, LI Shuyuan, DING Fuchen, et al. An investigation in the reaction conditions of gasoline olefin reduction over ZSM-5/MCM-41 composite molecular sieve [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2011, 42(1): 53-59.

[5] 孙恩顺.利用C₅馏分生产TAME的现状与展望[J].化工科技,1999,7(3):13-17.

SUN Enshun. The development and prospect of TAME from C₅ fraction [J]. Science & Technology in Chemical Industry, 1999, 7(3): 13-17.

[6] GNATIUS J, JARVELIN H, LINDQVIST P. Use TAME and heavier ethers to improve gasoline properties [J]. Hydrocarbon Process, 1995, 74(2): 51-53.

[7] 孙守华,孟祥东,周洪涛,等.催化裂化轻汽油催化蒸馏醚化技术的工业应用[J].现代化工,2014,34(12):128-130.

SUN Shouhua, MENG Xiangdong, ZHOU Hongtao, et al. Commercial application of CDEthers technology for FCC light gasoline [J]. Modern Chemical Industry, 2014, 34(12): 128-130.

[8] 王天普,王迎春,王伟,等.轻汽油醚化技术在FCC汽油改质中的作用[J].石油炼制与化工,2001,32(8):64-66.

- WANG Tianpu, WANG Yingchun, WANG Wei, et al. Upgrading FCC naphtha by etherification [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2001, 32(8): 64-66.
- [9] 车延超,刘春岩,曹祖宾. 催化裂化汽油降烯烃改质技术进展[J]. 当代化工, 2003, 32(3): 152-155.
- CHE Yanchao, LIU Chunyan, CAO Zhubin. Progress in decreasing olefins of FCC gasoline modification [J]. Contemporary Chemical Industry, 2003, 32(3): 152-155.
- [10] 王超,王定博,戴伟. 催化裂化汽油降烯烃研究进展[J]. 化工进展, 2005, 24(9): 971-975.
- WANG Chao, WANG Dingbo, DAI Wei. Research progress of reducing olefins in FCC gasoline [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2005, 24(9): 971-975.
- [11] 李长明,张松显,孔祥冰,等. 催化裂化轻汽油醚化(LNE)系列工艺技术的工业应用[J]. 石油炼制与化工, 2016, 47(9): 13-17.
- LI Changming, ZHANG Songxian, KONG Xiangbing, et al. Industrial application of etherification technologies for FCC light naphtha [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2016, 47(9): 13-17.
- [12] 夏洋峰,姜翠玉,安高军,等. Prins 缩合反应合成 4-丁基-1,3-二氧六环的研究[J]. 化学研究与应用, 2017, 29(8): 1111-1115.
- XIA Yangfeng, JIANG Cuiyu, AN Gaojun, et al. Synthesis of 4-butyl-1, 3-dioxane by Prins condensation [J]. Chemical Research and Application, 2017, 29(8): 1111-1115.
- [13] NAYAK S K, PATTANAİK B P. Experimental investigation on performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with mahua biodiesel using additive [J]. Energy Procedia, 2014, 54: 569-579.
- [14] 李跟宝,周龙保. 柴油机燃用二甲醚/柴油混合燃料时的特性研究[J]. 内燃机工程, 2010, 31(1): 13-16.
- LI Genbao, ZHOU Longbao. Research on operation characteristics of compression ignition engine fueled with dimethyl-ether/diesel blend [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010, 31(1): 13-16.
- [15] LIU J M, WANG F, LI ZH, et al. Novel guanidinium zwitterions and derived ionic liquids: physicochemical properties and DFT theoretical studies [J]. Structural Chemistry, 2011, 22(5): 1119-1130.
- [16] 高腾,宋河远,陈静. 负载型离子液体催化芳香烯和甲醛的 Prins 缩合反应[J]. 分子催化, 2016, 30(3): 199-206.
- GAO Teng, SONG Heyuan, CHEN Jing. Supported ionic liquid as novel catalyst for the prins reaction of olefins and formaldehyde [J]. Journal of Molecular Catalysis, 2016, 30(3): 199-206.
- [17] 宋河远,唐中华,陈静. 功能化酸性离子液体催化甲醛与烯烃的 Prins 缩合反应[J]. 分子催化, 2008, 22(2): 403-407.
- SONG Heyuan, TANG Zhonghua, CHEN Jing. Prins condensation of formaldehyde with alkene using functional acid ionic liquid as catalyst [J]. Journal of Molecular Catalysis, 2008, 22(2): 403-407.
- [18] 赵航,曹祖斌,韩冬云,等. 催化裂化汽油加氢脱硫降烯烃技术[J]. 当代化工, 2015, 44(5): 1090-1093.
- ZHAO Hang, CAO Zubin, HAN Dongyun, et al. FCC gasoline hydrodesulfurization and olefin reduction technologies [J]. Contemporary Chemical Industry, 2015, 44(5): 1090-1093.
- [19] 冀德坤,李术元,丁福臣,等. MCM-22/MCM-41 与 ZSM-5/MCM-41 复合分子筛汽油降烯烃性能的对比如分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(3): 140-145.
- JI Dekun, LI Shuyuan, DING Fuchen, et al. Comparison and analysis on gasoline olefin reduction performance of MCM-22/MCM-41 and ZSM-5/MCM-41 composite molecular sieves [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34(3): 140-145.
- [20] 叶天旭,张在龙,杨衡,等. 室温离子液体对催化裂化汽油的降烯烃性能研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006, 30(4): 112-114.
- YE Tianxu, ZHANG Zailong, YANG Heng, et al. Performance of reducing olefin of FCC gasoline in lab ionic liquid systems [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(4): 112-114.
- [21] 时立辉,冀德坤,刘洪涛,等. 改性复合分子筛的 FCC 汽油降烯烃性能研究[J]. 工业催化, 2012, 20(6): 36-40.
- SHI Lihui, JI Dekun, LIU Hongtao, et al. Olefins reducing performance of modified composite molecular sieves for FCC gasoline [J]. Industrial Catalysis, 2012, 20(6): 36-40.

(编辑 刘为清)