

# Pt 负载于不同载体对蓖麻籽油加氢催化制备生物航油的影响

马敏, 陈玉保, 庄诗韵, 兰青, 刘莹, 徐锐

(云南师范大学 能源与环境科学学院, 昆明 650500)

**摘要:**以蓖麻籽油为原料,在 Pt 负载于不同载体构建的系列催化剂催化作用下,在高温高压反应釜中开展一步加氢催化制备生物航油研究。采用等体积浸渍法制备了 Pt 基系列催化剂,探究了氢压、反应时间、反应转速、反应温度对催化反应效果的影响。结果表明,加氢催化制备生物航油的最佳反应条件为:氢压 4 MPa,反应时间 7 h,催化剂 Pt/SAPO-11、Pt/ZSM-23 反应转速均为 1 100 r/min,催化剂 Pt/SBA-15 反应转速为 1 000 r/min,催化剂 Pt/SAPO-11 和 Pt/ZSM-23 反应温度均为 360 °C,催化剂 Pt/SBA-15 反应温度为 340 °C。在最佳条件下,催化剂 Pt/SAPO-11 的转化率为 90.79%, $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃选择性为 45.86%, $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃异构率为 9.87%;催化剂 Pt/ZSM-23 的转化率为 91.04%, $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃选择性为 56.98%, $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃异构率为 12.11%;催化剂 Pt/SBA-15 的转化率为 46.26%, $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃选择性为 12.85%, $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃异构率为 4.83%。实验表明,Pt/ZSM-23 的 3 项指标均优于 Pt/SAPO-11 和 Pt/SBA-15,其更适合用于催化制备生物航油。

**关键词:**生物航油;蓖麻籽油;载体;催化剂;一步加氢

中图分类号:TQ645;TK6

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2022)07-0056-06

## Catalytic hydrogenation of castor oil to prepare bio-aviation kerosene by Pt loaded on different carriers

MA Min, CHEN Yubao, ZHUANG Shiyun, LAN Qing, LIU Ying, XU Rui  
(School of Energy and Environmental Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

**Abstract:** Using castor oil as a raw material, under the action of a series of catalysts constructed with Pt loaded on different carriers, the one step catalytic hydrogenation to prepare bio-aviation kerosene in a high-temperature and high-pressure reactor was researched. The Pt-based series catalysts were prepared by equal volume impregnation. The influences of hydrogen pressure, reaction temperature, reaction time, and stirring speed on the catalytic effect were explored. The results showed that the optimal preparation conditions of bio-aviation kerosene were obtained as follows: hydrogen pressure 4 MPa, reaction time 7 h, stirring speed 1 100 r/min for Pt/SAPO-11 and Pt/ZSM-23, 1 000 r/min for Pt/SBA-15, reaction temperature 360 °C for Pt/SAPO-11 and Pt/ZSM-23, and 340 °C for Pt/SBA-

收稿日期:2021-05-26;修回日期:2022-02-26

基金项目:云南省基础研究计划重点项目(2019FA004);云南省烟草化学重点实验室项目(2019539200340163);云南省国际科技合作专项(202003AF140001);昆明市国际(对外)科技合作基地(GHJD-2020026)

作者简介:马敏(1996),女,硕士研究生,研究方向为农业和生物质能源(E-mail)961266072@qq.com。

通信作者:陈玉保,博士生导师(E-mail)c20072007@163.com。

15. Under the optimal conditions, the conversion rate, selectivity of  $C_8 - C_{16}$  alkanes and isomerization rate of  $C_8 - C_{16}$  alkanes of Pt/SAPO-11 were 90.79%, 45.86% and 9.87% respectively; the conversion rate, selectivity of  $C_8 - C_{16}$  alkanes and isomerization rate of  $C_8 - C_{16}$  alkanes of Pt/ZSM-23 were 91.04%, 56.98%, and 12.11%, respectively; the conversion rate, selectivity of  $C_8 - C_{16}$  alkanes and isomerization

rate of C<sub>8</sub> - C<sub>16</sub> alkanes of Pt/SBA - 15 were 46.26% , 12.85% and 4.83% , respectively. The research indicated that the three indexes of Pt/ZSM - 23 were superior to Pt/SAPO - 11 and Pt/SBA - 15 , and it was more suitable for the preparation of bio - aviation kerosene.

**Key words:** bio - aviation kerosene; castor oil; carrier; catalyst; one step hydrogenation

目前,越来越多的能源和环境问题亟待解决<sup>[1]</sup>。航空生物燃料是动植物油脂等原料经过催化反应转化得到的环境清洁型生物燃料<sup>[2]</sup>。大量研究证明,用植物油催化制备的航空生物燃料与航空煤油的性质、成分(航空煤油的主要成分为 C<sub>8</sub> ~ C<sub>16</sub>的烷烃、环烷烃和芳香烃)接近<sup>[3-4]</sup>,经过优化可直接替代航空煤油<sup>[5]</sup>。王从新等<sup>[6]</sup>研究表明,选择 Pt/SAPO - 11 为催化剂,在温度 370 ~ 410 °C、压力 2 ~ 4 MPa、空速 0.8 ~ 1.2 h<sup>-1</sup>条件下反应,得到以直链烷烃、烯烃为主的混合物,其与航空煤油的成分十分相近。如今,以动植物油脂为原料进行一步加氢制备航空生物燃料是解决能源与环境问题的重要方法之一<sup>[7]</sup>。航空生物燃料的大力推广应用还需优化和改进工艺路线,降低生产成本,减少资源浪费<sup>[8]</sup>。在全球范围内已有多家航空公司进行了航空生物燃料研究测试与实际试飞实验,都开始积极探索更优化的航空生物燃料制备技术<sup>[9-11]</sup>。研究表明,以动植物油脂加氢催化制备航空生物燃料具有很大的研究空间<sup>[12]</sup>。其中,蓖麻籽油由于组分简单、杂质少、产量大,是制备生物航油的重要原料之一<sup>[13]</sup>,且蓖麻籽油基航空生物燃料对于环境十分友好<sup>[14]</sup>。蓖麻籽油经催化加氢脱氧可得到替代化石燃料的生物航油<sup>[15]</sup>,而目前还需进一步研究最佳工艺参数<sup>[16]</sup>。

在贵金属负载型的催化剂中,在一定范围内负载量相同的情况下,负载金属 Pt 的催化剂的催化活性是最好的<sup>[17]</sup>。SAPO - 11 分子筛的孔道结构和酸性对烷烃加氢脱氧和异构化的效果较好<sup>[18]</sup>;ZSM - 23 分子筛是一种中孔、高硅分子筛,由于其孔道结构较为独特,骨架拓扑结构中同时包括五元环、六元环和十元环,由十元环组成的一维孔道为互不交联的平行孔道,具有 MTT 拓扑结构框架<sup>[19]</sup>,因此其在许多催化反应中选择性和催化活性较高;SBA - 15 分子筛比表面积大,具有易于修饰的内表面、稳定的骨架结构、高度有序的六边形直孔结构,孔壁较厚,孔径可以连续调节,具有良好的结构性能<sup>[20]</sup>。

本实验将 Pt 负载在上述 3 种载体,并以其为催化剂,在高温高压反应釜中催化蓖麻籽油加氢制备

生物航油,通过单因素实验优化催化加氢反应条件,以为生物航油生产应用提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

蓖麻籽油(分析纯),西陇科学股份有限公司;SAPO - 11 分子筛、ZSM - 23 分子筛、SBA - 15 分子筛,先丰纳米有限公司;氢气(纯度 99.99%);硝酸四氨合铂(分析纯),昆明贵研催化剂股份有限公司。

WCGF - 100mL 高温高压反应釜;Clarus 680 - SQ8T GC - MS 联用仪,美国 Perkin Elmer 公司;DF - 101S 集热式恒温磁力搅拌器;SHZ - D(III)循环水式真空泵;DZKW - D - 6 电热恒温水浴锅;FA224 电子分析天平;SX - 5 - 1 马弗炉;GZX - 9146MBE 烘箱。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 蓖麻籽油脱胶

称取 50 g 蓖麻籽油,水浴加热到 70 °C,加入 2% (1 g)质量分数为 45% 的柠檬酸溶液,于 70 °C 搅拌(转速 250 r/min)30 min;然后称取蓖麻籽油质量 3% (1.5 g)的去离子水和 0.6% (0.3 g)的乙醇胺同时加入蓖麻籽油中,在 70 °C 下搅拌(转速 250 r/min)40 min;反应结束后,离心分离(1 100 r/min, 10 min),上层液再经过分子过滤膜脱水干燥,得到脱胶蓖麻籽油。

#### 1.2.2 Pt 基系列催化剂的制备

采用等体积浸渍法制备 Pt 基系列催化剂。分别在 10 g SAPO - 11 分子筛、ZSM - 23 分子筛、SBA - 15 分子筛中加入 2 mL 质量浓度为 0.5 g/100 mL 的硝酸四氨合铂溶液,充分搅拌后在室温下浸渍一夜,然后在 80 °C 烘箱内干燥 12 h,再在 380 °C 马弗炉内煅烧 4 h,取出、冷却、研磨,制得不同载体的 Pt 负载型催化剂。

#### 1.2.3 一步加氢制备生物航油

实验所用高温高压反应釜主要由磁力搅拌装置、加热装置、进出气管道、釜体等部分组成,其中釜体体积为 100 mL,反应温度由温度控制仪控制。称取 0.5 g 催化剂放入釜体,将氢气通过进气管通入釜体内,开始进行预处理,以排除釜体内空气。预处

理结束后,向釜体内加入 1 g 脱胶蓖麻籽油和 30 mL 正己烷,在一定氢压、反应转速、反应温度下反应一定时间,反应结束后待冷却,将产物取出反应釜体,进行离心处理(1 100 r/min, 10 min),取上层液即得生物航油。

#### 1.2.4 蓖麻籽油脂肪酸组成测定

参照 GB 5009.168—2016 测定蓖麻籽油脂肪酸组成。

#### 1.2.5 产物的 GC-MS 分析及评价指标计算

参照文献[21]的方法,对产物进行 GC-MS 分析。GC 条件:进样口温度 200 °C;升温程序为起始温度 80 °C,保持 2 min,以 10 °C/min 的速度升至 280 °C,保持 3 min;载气流速 1.5 mL/min。MS 条件:电子轰击离子源,电子能量 70 eV,传输线温度 280 °C,离子源温度 250 °C,质量扫描范围( $m/z$ ) 32~500。

转化率、 $C_8 \sim C_{16}$  烷烃选择性和  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃异构率的计算按式(1)~式(3)进行。

$$X_1 = (A_0 - A_1) / A_0 \times 100\% \quad (1)$$

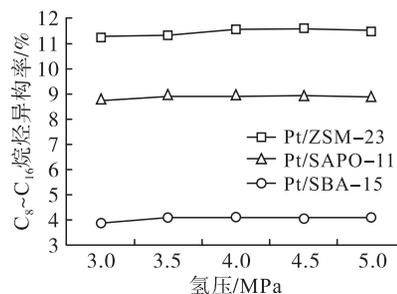
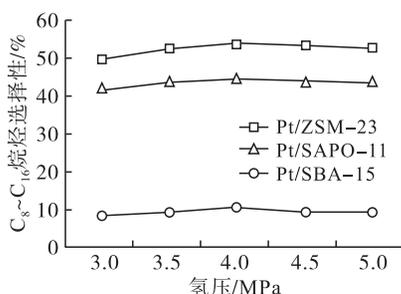
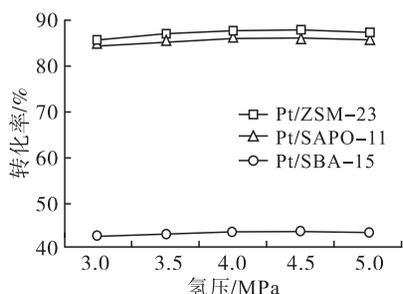


图 1 氢压对反应效果的影响

由图 1 可知,从转化率来看,3 种催化剂的转化率随氢压的增加均呈先上升后下降的趋势。催化剂 Pt/ZSM-23 和 Pt/SBA-15 的转化率在氢压 4.5 MPa 时达到最大,而催化剂 Pt/SAPO-11 的转化率在氢压 4 MPa 时达到最大。氢压对转化率的影响主要是在加氢脱氧阶段,该阶段的实现主要通过 3 种途径:直接加氢脱羧,直接加氢脱氧,直接加氢脱羰。从消耗氢气的角度来看,加氢脱羧消耗最少,加氢脱氧消耗最多。因此,当氢压较低时,转化阶段主要是靠脱羧或者脱羰的形式,断链提供的能量不够高,因此转化率不高,随氢压增加加氢脱氧则可以提高转化率,当氢压过大时,由于底物一定转化率不再增加。由图 1 还可知,3 种催化剂的  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃选择性和  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃异构率均随氢压的增加先上升后下降, $C_8 \sim C_{16}$  烷烃选择性均在氢压 4 MPa 时达到最大。这可能是因为随着氢压增大,更多的氢气进入分子筛内部,与金属活性位点更充分地接触从而使

式中: $X_1$  为转化率; $A_0$  和  $A_1$  分别为脱胶蓖麻籽油和产物的总峰面积。

$$X_2 = \sum A_2 / A_1 \times 100\% \quad (2)$$

式中: $X_2$  为  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃选择性; $\sum A_2$  为  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃组分峰面积之和。

$$X_3 = \sum A_3 / \sum A_2 \times 100\% \quad (3)$$

式中: $X_3$  为  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃异构率; $\sum A_3$  为  $C_8 \sim C_{16}$  异构烷烃组分峰面积之和。

## 2 结果与分析

### 2.1 蓖麻籽油的脂肪酸组成

脱胶蓖麻籽油中主要脂肪酸组成为蓖麻酸 91.23%、亚麻酸 0.40%、亚油酸 3.22%、油酸 2.79%、硬脂酸 0.61%、棕榈酸 0.65%、其他 1.06%。

### 2.2 生物航油制备单因素实验

#### 2.2.1 氢压对反应效果的影响

在反应转速 800 r/min,反应温度 320 °C,反应时间 4 h,氢压分别为 3、3.5、4、4.5、5 MPa 条件下,探究氢压对 Pt/SAPO-11、Pt/ZSM-23 和 Pt/SBA-15 催化剂催化反应效果的影响,结果如图 1 所示。

反应物得到更充分的反应,使得  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃选择性提高;而  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃异构率主要取决于分子筛的酸性活性位点,因此  $C_8 \sim C_{16}$  异构率随选择性增加有所提升但不明显。由于转化率和  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃异构率在氢压 4.5 MPa 和 4 MPa 时数据相差很小,而最重要的  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃选择性在氢压 4 MPa 时最大,因此选择氢压为 4 MPa。在此条件下,催化剂 Pt/SAPO-11 的转化率为 86.15%, $C_8 \sim C_{16}$  烷烃选择性为 43.64%, $C_8 \sim C_{16}$  烷烃异构率为 8.94%;催化剂 Pt/ZSM-23 的转化率为 87.68%, $C_8 \sim C_{16}$  烷烃选择性为 52.96%, $C_8 \sim C_{16}$  烷烃异构率为 11.60%;催化剂 Pt/SBA-15 的转化率为 43.96%, $C_8 \sim C_{16}$  烷烃选择性为 10.86%, $C_8 \sim C_{16}$  烷烃异构率为 4.14%。可见,催化剂 Pt/ZSM-23 明显优于催化剂 Pt/SAPO-11 和 Pt/SBA-15。

#### 2.2.2 反应时间对反应效果的影响

在反应转速 800 r/min,反应温度 320 °C,氢压

4 MPa,反应时间分别为4、5、6、7、8 h条件下,探究反应时间对 Pt/SAPO-11、Pt/ZSM-23 和 Pt/

SBA-15 催化剂催化反应效果的影响,结果如图2所示。

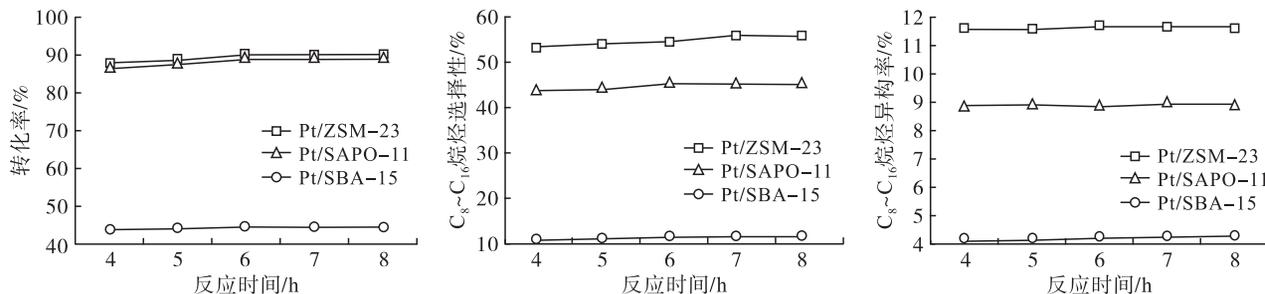


图2 反应时间对反应效果的影响

从图2可以看出:3种催化剂的转化率均随反应时间的延长先上升后趋于平缓,且均在反应时间6 h时达到最大;3种催化剂的 $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃选择性和 $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃异构率随反应时间的延长缓慢上升后保持不变或轻微下降,3种催化剂的 $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃选择性和 $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃异构率基本均在反应时间7 h时达到最大。 $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃选择性和 $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃异构率在反应时间6 h后转化率几乎不变的情况下还能有些许的上升,可能是因为当加氢脱氧过程完成后才进行裂化异构化反应,因此裂化异构化反应在转化完成后继续进行。因此,考虑 $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃选择性和 $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃异构率,选择反应时间为7 h。在此条件下,催化剂 Pt/SAPO-11 的转化率为88.53%, $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃选择性为44.97%, $C_8 \sim C_{16}$ 烷

烃异构率为8.94%;催化剂 Pt/ZSM-23 的转化率为89.88%, $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃选择性为55.67%, $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃异构率为11.68%;催化剂 Pt/SBA-15 的转化率为44.65%, $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃选择性为11.54%, $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃异构率为4.25%。可见,催化剂 Pt/ZSM-23 优于催化剂 Pt/SAPO-11 和 Pt/SBA-15。

### 2.2.3 反应转速对反应效果的影响

反应转速可以控制催化剂与反应原料的接触时间和接触程度,从而影响整个催化反应的效果。在反应温度320℃,反应时间7 h,氢压4 MPa,反应转速分别为800、900、1 000、1 100、1 200 r/min条件下,探究反应转速对 Pt/SAPO-11、Pt/ZSM-23 和 Pt/SBA-15 催化剂催化反应效果的影响,结果如图3所示。

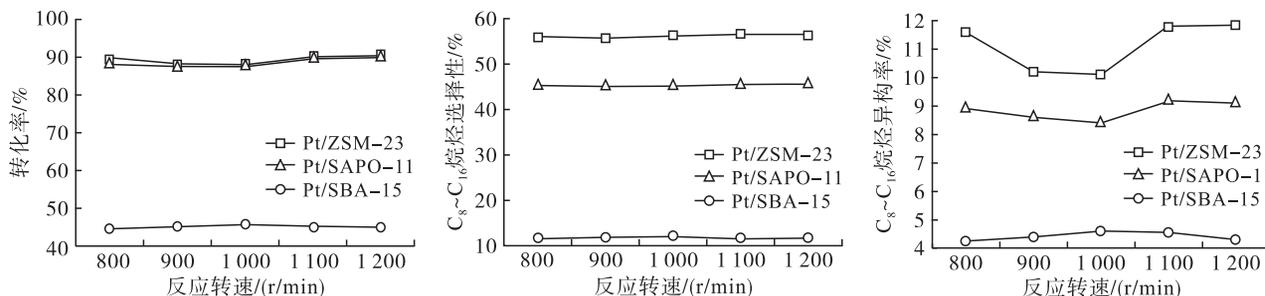


图3 反应转速对反应效果的影响

从图3可以看出:催化剂 Pt/SAPO-11 和 Pt/ZSM-23 的转化率, $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃选择性和 $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃异构率均随着反应转速的增加先下降后上升再趋于平稳,在反应转速1 100 r/min时达到最大;而催化剂 Pt/SBA-15 的转化率、 $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃选择性和 $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃异构率随着反应转速的增加先上升后下降,在反应转速1 000 r/min时达到最大。分析其原因可能是因为分子筛的结构不同所致,SAPO-11 和 ZSM-23 分子筛的密度比 SBA-15 的大,当反应转速较低时,SAPO-11 和 ZSM-23 分子筛较重,和蓖麻籽油有速度差从而能够有更多的接触,随着反应转速的增加,分子筛与蓖麻籽油的速度差减

小,接触时间缩短从而转化率、 $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃选择性和 $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃异构率都有所下降,当反应转速增加到1 000 r/min以上时,速度差减小,分子筛与蓖麻籽油可能处于相对静止状态,此时分子筛与蓖麻籽油能够充分接触从而使转化率、 $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃选择性和 $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃异构率增加。SBA-15 分子筛由于本身密度较小,更容易在低反应转速的状态下与蓖麻籽油达到相对静止状态从而其转化率、 $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃选择性和 $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃异构率从低反应转速开始增加到达最大,然后由于反应转速过高导致蓖麻籽油与催化剂不能充分接触从而使转化率、 $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃选择性和 $C_8 \sim C_{16}$ 烷烃异构率下降。因此,催化剂

Pt/SAPO-11、Pt/ZSM-23 催化反应时选择反应转速为 1 100 r/min, 而 Pt/SBA-15 催化反应时选择反应转速为 1 000 r/min。在此条件下, 催化剂 Pt/SAPO-11 的转化率为 89.93%,  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃选择性为 45.23%,  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃异构率为 9.21%; 催化剂 Pt/ZSM-23 的转化率为 90.14%,  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃选择性为 56.15%,  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃异构率为 11.90%; 催化剂 Pt/SBA-15 的转化率为 45.85%,  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃选择性为 12.17%,  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃异构率为 4.60%。

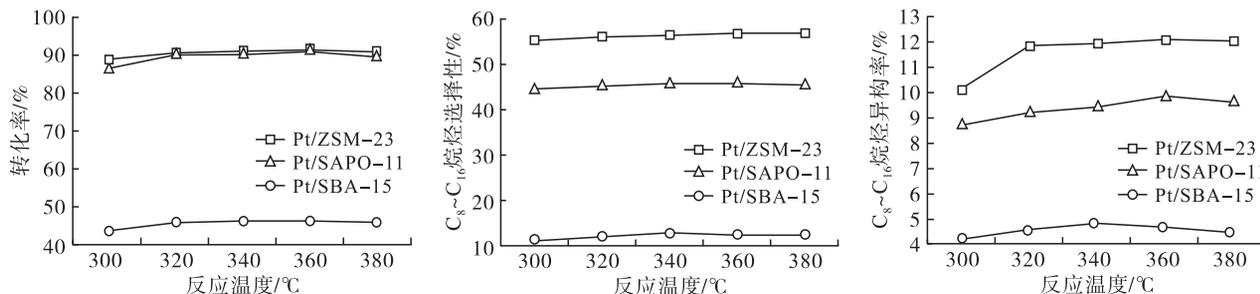


图4 反应温度对反应效果的影响

从图4可以看出,3种催化剂的转化率、 $C_8 \sim C_{16}$  烷烃选择性和  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃异构率随反应温度的升高均先上升后下降。催化剂 Pt/SAPO-11 和 Pt/ZSM-23 的转化率、 $C_8 \sim C_{16}$  烷烃选择性和  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃异构率在反应温度 360 °C 时最大, 而催化剂 Pt/SBA-15 的3个指标在反应温度 340 °C 时最大。反应温度较低时, 反应活化能不足, 而反应温度过高容易导致长链分子继续裂解而使产物中  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃选择性下降, 并且过高的温度还会使部分烷烃结焦而堵塞分子筛从而导致转化率、 $C_8 \sim C_{16}$  烷烃选择性和  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃异构率均下降。因此, 催化剂 Pt/SAPO-11 和 Pt/ZSM-23 催化反应时选择反应温度为 360 °C, 而催化剂 Pt/SBA-15 催化反应时选择反应温度为 340 °C。在此条件下, 催化剂 Pt/SAPO-11 的转化率为 90.79%,  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃选择性为 45.86%,  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃异构率为 9.87%; Pt/ZSM-23 转化率为 91.04%,  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃选择性为 56.98%,  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃异构率为 12.11%; Pt/SBA-15 转化率为 46.26%,  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃选择性为 12.85%,  $C_8 \sim C_{16}$  烷烃异构率为 4.83%。可见, 催化剂 Pt/ZSM-23 优于催化剂 Pt/SAPO-11 和 Pt/SBA-15。

### 3 结论

以蓖麻籽油为原料, 加氢催化制备生物航油的最佳反应条件为: 氢压 4 MPa, 反应时间 7 h, 催化剂 Pt/SAPO-11、Pt/ZSM-23 反应转速均为 1 100 r/min, 催化剂 Pt/SBA-15 反应转速为 1 000 r/min, 催化剂 Pt/SAPO-11 和 Pt/ZSM-23 反应温度均为 360 °C, 催

可见, 催化剂 Pt/ZSM-23 优于催化剂 Pt/SAPO-11 和 Pt/SBA-15。

#### 2.2.4 反应温度对反应效果的影响

在反应时间 7 h, 氢压 4 MPa, 催化剂 Pt/SAPO-11、Pt/ZSM-23 反应转速 1 100 r/min, 催化剂 Pt/SBA-15 反应转速 1 000 r/min, 反应温度分别为 300、320、340、360、380 °C 条件下, 探究反应温度对 Pt/SAPO-11、Pt/ZSM-23 和 Pt/SBA-15 催化剂催化反应效果的影响, 结果如图4所示。

化剂 Pt/SBA-15 反应温度为 340 °C。在最佳反应条件下, 催化剂 Pt/ZSM-23 的3项指标(转化率、 $C_8 \sim C_{16}$  烷烃选择性、 $C_8 \sim C_{16}$  烷烃异构率)均优于催化剂 Pt/SAPO-11 和 Pt/SBA-15, 说明催化剂 Pt/ZSM-23 更适合用于催化制备生物航油。

#### 参考文献:

- [1] 程岩岩, 隋光辉, 陈志敏, 等. 催化酯化升级生物质油[J]. 高等学校化学学报, 2018, 39(12): 2746-2751.
- [2] 张爱华, 唐娟, 赖鹏英, 等. 光皮桉木油热解产物催化加氢制备生物燃料[J]. 林产化学与工业, 2020, 40(5): 43-49.
- [3] YU Y K, ZHANG J L, CHEN C W, et al. Effects of calcination temperature on physicochemical property and activity of  $CuSO_4/TiO_2$  ammonia-selective catalytic reduction catalysts[J]. J Environ Sci, 2020, 91(5): 237-245.
- [4] 谭启航, 曹阳, 李进.  $MO_2N/Zr-MCM-41$  新型催化剂的制备、表征及其麻疯树油加氢脱氧的催化性能[J]. 燃料化学学报, 2018, 46(11): 1323-1331.
- [5] 赵光辉, 姜伟, 牛欣宇, 等. 航空生物燃料制备技术及应用前景[J]. 中外能源, 2014, 19(8): 30-34.
- [6] 王从新, 刘千河, 刘雪斌, 等. 反应条件对 Pt/SAPO-11 催化油脂一步加氢制异构烷烃的影响[J]. 催化学报, 2013, 34(6): 1128-1138.
- [7] 王慧琴, 段永亮, 张静, 等. 航空煤油生产技术发展现状[J]. 合成材料老化与应用, 2021, 50(1): 128-132.
- [8] 张玉玺. 生物航空煤油的发展现状[J]. 当代化工, 2013, 42(9): 1316-1318.
- [9] 孙晓英, 刘祥, 赵雪冰, 等. 航空生物燃料制备技术及其应用研究进展[J]. 生物工程学报, 2013, 29(3): 285-298.

(下转第75页)

- acetylcholine synthesis in dissociated cell cultures of the rat septal nucleus [J]. *J Neurochem*, 1992, 59:236-244.
- [3] CAMPBELL P N, WORK T S. Fractionation of the nitrogenous water-soluble constituents of liver. 1. The isolation of glycerylphosphorylethanolamine and the taurine [J]. *Biochem J*, 1952, 50 (4): 449-454.
- [4] ANSELL G B, NORMAN J M. Glycerylphosphoryl-ethanolamine in rat brain [J]. *Biochem J*, 1953, 55(5): 768-774.
- [5] FLORIO T, BAJETTO A, THELLUNG S, et al. Prolonged treatment with  $\alpha$ -glycerylphosphorylethanolamine facilitates the acquisition of an active avoidance behavior and selectively increases neuronal signal transduction in rats [J]. *Aging Clin Exp Res*, 1999, 11(5):335-342.
- [6] DANIELE S, DA POZZO E, IOFRIDA C, et al. Human neural stem cell aging is counteracted by  $\alpha$ -glycerylphosphorylethanolamine [J]. *ACS Chem Neurosci*, 2016, 7:952-963.
- [7] DANIELE S, MANGANO G, DURANDO L, et al. The nootropic drug  $\alpha$ -glyceryl-phosphoryl-ethanolamine exerts neuroprotective effects in human hippocampal cells [J]. *Int J Mol Sci*, 2020, 21(3):1-11.
- [8] ANSELL G B, NORMAN J M. Observations on the acetal-phospholipids of brain tissue [J]. *J Neurochem*, 1956, 1 (1): 32-41.
- [9] PIETRUSZKO R, GRAY G M. The products of mild alkaline and mild acid hydrolysis of plasmalogens [J]. *Biochim Biophys Acta*, 1962, 56: 232-239.
- [10] LPDI R. Pharmaceutical compositions for the treatment of cerebral psycho-organic syndromes: US4918062 [P]. 1990-04-17.
- [11] GIOVANNI T. Process for the preparation of *L*- $\alpha$ -glycerylphosphorylcholine, *L*- $\alpha$ -glycerylphosphorylethanolamine from crude and/or deoleated lecithins: EP86830282.9[P]. 1990-08-16.
- [12] 张康逸, 康志敏, 范运乾, 等. 水相体系酶法制备甘油磷脂酰乙醇胺的研究 [J]. *中国油脂*, 2013, 38 (8): 58-61.
- [13] MAHANTA N, GUPTA A, KHARE S K. Production of protease and lipase by solvent tolerant *Pseudomonas aeruginosa* PseA in solid-state fermentation using *Jatropha curcas* seed cake as substrate [J]. *Bioresour Technol*, 2008, 99: 1729-1735.
- [14] ZHANG K Y, WANG X G, LIU Y F. Purification of *L*- $\alpha$ -glycerylphosphorylcholine from the enzyme reaction solutions by resin column chromatography [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2012, 89(6): 1155-1163.
- [15] LIU X L, DU L X, LU F P, et al. Purification and characterization of a novel fibrinolytic enzyme from *Rhizopus chinensis* 12[J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2005, 67(2): 209-214.
- [16] TSAI S W, CHANG C S. Kinetics of enzymatic hydrolysis of lipids in biphasic organic-aqueous system [J]. *J Chem Technol Biotechnol*, 1993, 57:147-154.
- [17] SHEELU G, KAVITHA G, FADNAVIS N W. Efficient immobilization of Lecitase in gelatin hydrogel and degumming of rice bran oil using a spinning basket reactor [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2008, 85:739-748.
- [18] RAHMAN R, BAHARUM S N, BASRI M, et al. High-yield purification of an organic solvent-tolerant lipase from *Pseudomonas* sp. strain S5 [J]. *Anal Biochem*, 2005, 341(2):267-274.
- 
- (上接第60页)
- [10] 秦曼曼, 孙仁金, 李喆, 等. 生物航空煤油发展问题及对策研究[J]. *现代化工*, 2019, 39(11): 1-4.
- [11] 刘广瑞, 颜蓓蓓, 陈冠益. 航空生物燃料制备技术综述及展望[J]. *生物质化学工程*, 2012, 46(3): 45-48.
- [12] 刘宇, 谭涓, 刘靖, 等. Pt/ZSM-35 催化长链正构生物烷烃加氢裂化/异构化制航空煤油[J]. *化工进展*, 2020, 39(12):5086-5094.
- [13] 王祎涵, 安虹, 刘畅, 等. 磷钨酸催化蓖麻油制备生物柴油研究[J]. *煤炭与化工*, 2018, 41(12): 116-119.
- [14] 孙振钧, 吕丽媛, 伍玉鹏. 蓖麻产业发展:从种植到利用[J]. *中国农业大学学报*, 2012, 17(6):204-214.
- [15] 王皓, 宋爱萍, 闫杰. 我国航空煤油市场发展态势及生产企业应对策略[J]. *石油规划设计*, 2017, 28(6): 1-3, 51.
- [16] 翟明路, 段浩楠, 蒲彦锋, 等. 脂肪酸(酯)脱氧制备生物燃料研究现状[J]. *化学研究*, 2020, 31(3): 196-205.
- [17] 马严富. Pt 单原子催化剂配位结构调控与催化加氢性能研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2020.
- [18] MENG Y, WANG H Y, SUN N, et al. Hierarchical SAPO-11 molecular sieve for *n*-alkane hydroisomerization synthesized by directing agent method [J]. *China Petroleum Process Petrochem Technol*, 2020, 22(4): 85-92.
- [19] 陈玉晶. ZSM-23 分子筛合成、改性及负载铂催化剂加氢异构性能[D]. 辽宁大连:大连理工大学, 2019.
- [20] 刘宁, 刘水林, 李爱阳, 等. 不同金属氧化物在 SBA-15 表面分散度对其性能的影响[J]. *化学工程*, 2021, 49(1):12-17.
- [21] 杨顺平. 制备航空煤油的非食用植物油预处理研究[D]. 昆明:云南师范大学, 2016.