

KOH/铝柱撑膨润土催化麻疯树油酯交换 反应制备生物柴油

蒋文艳^{1,2}, 魏光涛², 张琳叶², 李仲民², 李志业²

(1. 广西农业科学院 农产品质量安全与检测技术研究所, 南宁 530007; 2. 广西大学 化学化工学院, 南宁 530004)

摘要:采用等体积浸渍法制备得到 KOH/铝柱撑膨润土固体催化剂, 催化麻疯树油酯交换制备生物柴油, 探讨 KOH 负载量和酯交换反应条件对生物柴油转化率的影响及催化剂再生性能, 并对催化剂进行 SEM、XRD 表征。结果表明: KOH/铝柱撑膨润土催化剂中最佳 KOH 负载量为 15%; 最佳麻疯树油酯交换条件为反应温度 75 °C、催化剂用量 7%、反应时间 3 h、醇油摩尔比 25:1。在最佳条件下, 生物柴油转化率为 99.2%; 再生处理的催化剂催化酯交换反应, 生物柴油转化率高达 98%; 铝柱撑膨润土经由等体积浸渍 KOH 处理后, 颗粒粒径明显减小, 排列更加紧密, 其表面附着有鳞片状物质, 催化剂具有较大的层间距, d_{001} 层间距为 11.9 nm。

关键词: KOH/铝柱撑膨润土; 麻疯树油; 酯交换反应; 生物柴油

中图分类号: TQ645; TK63

文献标识码: A

文章编号: 1003-7969(2018)03-0100-06

Preparation of biodiesel by transesterification of *Jatropha* oil catalyzed by KOH/Al – pillared bentonite

JIANG Wenyan^{1,2}, WEI Guangtao², ZHANG Linye², LI Zhongmin², LI Zhiye²

(1. Agro – products Quality Safety and Testing Technology Research Institute,

Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China; 2. School of Chemistry and

Chemical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: KOH/Al – pillared bentonite catalyst was prepared by the method of incipient wetness impregnation. Biodiesel was produced by transesterification of *Jatropha* oil catalyzed by KOH/Al – pillared bentonite. The influences of KOH loading amount and transesterification reaction conditions on the conversion rate of biodiesel and regenerability of the catalyst were studied. KOH/Al – pillared bentonite catalyst was characterized by scanning electron microscopy (SEM) and X – ray diffraction (XRD). The results showed that the optimal KOH loading amount was 15% for the preparation of KOH/Al – pillared bentonite catalyst. The optimal transesterification conditions of *Jatropha* oil were obtained as follows: reaction temperature 75 °C, catalyst dosage 7%, reaction time 3 h, and molar ratio of methanol to oil 25:1. Under these conditions, the conversion rate of biodiesel was 99.2%. The regenerated catalyst was used to catalyze the transesterification of *Jatropha* oil, and the conversion rate of biodiesel was 98%. KOH/Al – pillared bentonite catalyst owned small particle size and compact particle arrangement, and the sheet – shape objects were loaded on the catalyst. KOH/Al – pillared bentonite catalyst had large layer spacing, and the layer spacing of d_{001} was 11.9 nm.

Key words: KOH/Al – pillared bentonite; *Jatropha* oil; transesterification; biodiesel

收稿日期: 2017-05-17; 修回日期: 2017-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21366003, 21667004); 广西自然科学基金项目 (2015GXNSFB139031)

作者简介: 蒋文艳 (1991), 女, 研究实习员, 硕士, 主要从事农产品质量安全与检测工作 (E-mail) 790234720@qq.com。

通信作者: 张琳叶, 副教授, 博士 (E-mail) yezi@gxu.edu.cn。

麻疯树籽含油率高、经济价值高, 并且以麻疯树籽为原料制备的生物柴油与石化柴油的相容性好, 因此以麻疯树油为原料制备生物柴油已经成为国内

外研究热点^[1-3]。

目前,生物柴油生产的常用方法是甲醇与油脂的酯交换法,包括碱催化法和酸催化法^[4-5]。NaOH、KOH、甲醇钠是常用的均相碱催化剂,具有催化速率快、生物柴油转化率高的优点;均相碱催化剂的缺点是重复使用困难,催化剂难以与产物分离,且对参与反应的原料纯度要求较高。而非均相碱催化剂不但能克服催化剂与产物分离困难的问题,而且可以经过再生后重复使用,减少催化剂资源的浪费^[6]。非均相固体碱催化剂主要包括:水滑石、类水滑石固体碱、金属、碱土金属氧化物、负载型固体碱^[7-8]。目前,非均相固体碱催化剂的应用已成为生物柴油制备方法的研究热点^[9-11]。本文以铝柱撑膨润土为载体,采用等体积浸渍的方将活性组分KOH固载到铝柱撑膨润土上,制备得到非均相碱催化剂,将该固体催化剂催化麻疯树油的酯交换反应,研究KOH负载量及酯交换反应条件对生物柴油转化率的影响,并对催化剂进行SEM、XRD表征,以期为膨润土的高端利用以及膨润土基复合材料催化麻疯树油酯交换制备生物柴油的工业化应用提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

麻疯树油,购自南宁某生物能源科技有限公司,平均酸值(KOH)为15.74 mg/g,平均皂化值(KOH)为164.90 mg/g,经降酸处理后的麻疯树油,平均酸值(KOH)为0.61 mg/g,平均相对分子质量为984。

膨润土,化学纯;甲醇、丙三醇、NaCl、KOH、无水Na₂SO₄、NaOH、CuSO₄·5H₂O、AlCl₃·6H₂O等,均为分析纯。

JA2003 电子分析天平,80-2 电动离心机,BG-01 超声波清洗机,DF-101S 集热式恒温磁力搅拌器,DHG 型恒温干燥箱,SX-2-4-10A 马弗炉,200 目分样筛,722N 型可见分光光度计,200 mL 水热反应釜,UltimaIV X-射线衍射仪,S-3400N 扫描电镜。

1.2 实验方法

1.2.1 固体催化剂的制备

量取一定浓度的AlCl₃溶液置于1 000 mL烧杯中,边搅拌边缓慢滴加一定浓度的NaOH溶液,Al³⁺与OH⁻的摩尔比控制为1:2.4,在水浴温度80℃下连续搅拌3 h,得到聚合羟基铝柱化剂。将膨润土和蒸馏水混合于烧杯中,控制土与水的比例,得到质量分数为1%的膨润土悬浮液。往1%的膨润土悬浮

液中不断滴加聚合羟基铝柱化剂,每克土对应的Al³⁺为10 mmol,在80℃下不断搅拌反应3 h。待交联反应完全后,将混合液体静置分层,滤去上层澄清液。蒸馏水洗涤土样2~3次后,置于105℃的恒温干燥箱中烘干,再经400℃煅烧3 h后,取出土样并研磨至过200目筛,得到铝柱撑膨润土。采用等体积浸渍法,将所需浸渍质量的KOH与铝柱撑膨润土在浸渍所需等体积水量下充分混匀,浸渍2 h后放入105℃恒温干燥箱中烘干,用研钵研磨,并过200目的标准筛,得到催化剂KOH/铝柱撑膨润土。

1.2.2 酯交换反应

称取15 g经预酯化的麻疯树油(预酯化工艺参照文献[12]方法)、一定量的甲醇以及一定量的KOH/铝柱撑膨润土,一并加入到水热反应釜中进行酯交换反应。待反应完全后,通过甘油铜分光光度法测定酯交换制备生物柴油的甘油含量计算生物柴油转化率^[13-14],计算公式如下:

$$\text{生物柴油转化率} = m_{\text{实}}/m_{\text{理}} \times 100\%$$

式中: $m_{\text{实}}$ 为酯交换反应实际甘油产量,g; $m_{\text{理}}$ 为麻疯树油完全反应所生成的理论甘油产量,g。

1.2.3 固体催化剂的表征

通过扫描电子显微镜(样品经喷金处理,加速电压为20 kV)获得固体催化剂的SEM照片;利用X-射线衍射仪(Cu靶,操作电压40 kV,操作电流40 mA,扫描速率8(°)/min,扫描范围5°~80°),记录固体催化剂的XRD谱图。

2 结果与讨论

2.1 KOH负载量对生物柴油转化率的影响

在反应温度75℃、催化剂用量7%、反应时间3 h、醇油摩尔比12:1条件下,改变KOH负载量,考察其对生物柴油转化率的影响,实验结果如图1所示。

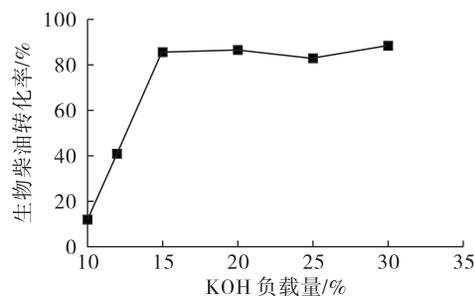


图1 KOH负载量对生物柴油转化率的影响

从图1可知,当KOH负载量为10%~15%时,随着KOH负载量的增加,生物柴油转化率显著提高,从12.0%提高到85.9%。分析原因是KOH负载量逐渐增加,分散在铝柱撑膨润土载体表面的

KOH 活性组分不断接近饱和,所以催化剂的催化活性不断增强,生物柴油转化率也随之提高。当 KOH 负载量从 15% 增加到 30%,其对催化麻疯树油的酯交换反应几乎不影响。这主要是因为活性组分 KOH 负载量继续增大,过多的 KOH 在铝柱撑膨润土载体上形成多层分散,催化剂和反应物的接触面基本不变,因而生物柴油转化率基本不变。因此,选择最佳 KOH 负载量为 15%。

2.2 酯交换反应制备麻疯树油生物柴油的单因素实验

2.2.1 反应温度对生物柴油转化率的影响

在 KOH 负载量 15%、催化剂用量 7%、反应时间 3 h、醇油摩尔比 12:1 条件下,改变反应温度,考察其对生物柴油转化率的影响,实验结果如图 2 所示。

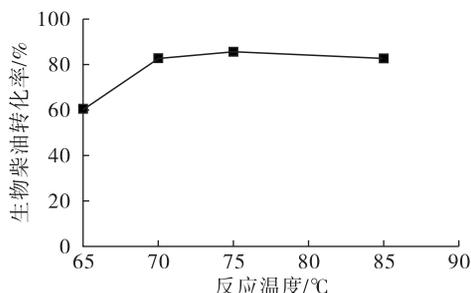


图 2 反应温度对生物柴油转化率的影响

从图 2 可知,当反应温度从 65 °C 上升至 75 °C,生物柴油转化率显著提高,在 75 °C 达到最大,为 85.9%,比 65 °C 时高 25.1 个百分点。当反应温度继续上升到 85 °C 时,生物柴油转化率下降到 82.9%。这主要是由于酯交换反应是可逆反应,反应温度的升高会促进可逆反应朝着正反应方向进行,加快液相反应物与固相催化剂之间的催化反应速率,减小非均相反应体系的传质阻力,65 ~ 75 °C 范围内,生物柴油转化率逐渐提高。反应温度上升到 85 °C 时,水热反应釜中的液态甲醇大量转变成气相甲醇,而参与反应的主要为液态甲醇,液态甲醇含量的降低不但会减慢反应速率而且会导致酯交换反应朝着负反应方向进行,从而降低生物柴油转化率。因此,选择最佳反应温度为 75 °C。

2.2.2 催化剂用量对生物柴油转化率的影响

在 KOH 负载量 15%、反应温度 75 °C、反应时间 3 h、醇油摩尔比 12:1 条件下,改变催化剂用量,考察其对生物柴油转化率的影响,实验结果如图 3 所示。

从图 3 可知,随着催化剂用量从 3% 增加到 7%,生物柴油转化率逐渐升高,从 46.6% 增大到 85.9%。在催化剂用量逐渐增大到 7% 过程中,KOH/铝柱撑

膨润土提供的反应活性位逐渐增多,在催化剂用量为 7% 时达到饱和。催化剂用量的增加,其表面吸附的甲醇量也随之增加,促进甲醇与麻疯树油之间的酯交换反应,因此生物柴油转化率也随之提高。而当催化剂用量大于 7% 后,催化剂中过量的活性组分 KOH 会使反应体系发生皂化反应,并且反应体系黏度变大增加传质阻力,从而使生物柴油转化率降低。因此,选择最佳催化剂用量为 7%。

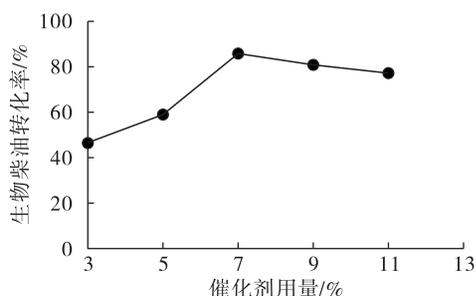


图 3 催化剂用量对生物柴油转化率的影响

2.2.3 反应时间对生物柴油转化率的影响

在 KOH 负载量 15%、反应温度 75 °C、催化剂用量 7%、醇油摩尔比 12:1 条件下,改变反应时间,考察其对生物柴油转化率的影响,实验结果如图 4 所示。

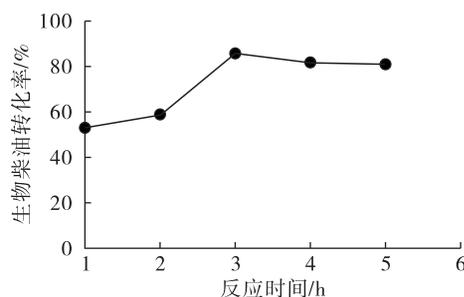


图 4 反应时间对生物柴油转化率的影响

从图 4 可知,当反应时间在 1 ~ 3 h 范围内,生物柴油转化率呈上升趋势,在反应时间为 3 h 时,生物柴油转化率达到最大,为 85.9%,比反应 1 h 的生物柴油转化率高 33.1 个百分点,当反应时间延长到 5 h,生物柴油的转化率从 85.9% 降低到 81.0%。这主要是因为酯交换反应是可逆反应,初始时,催化剂催化麻疯树油与甲醇之间的反应速率较快,生物柴油转化率不断提高;当麻疯树油与甲醇之间的反应不断接近平衡点时,反应速率减慢并趋于稳定,生物柴油转化率也趋于平衡。因此,选择最佳反应时间为 3 h。

2.2.4 醇油摩尔比对生物柴油转化率的影响

在 KOH 负载量 15%、反应温度 75 °C、催化剂用量 7%、反应时间 3 h 条件下,改变醇油摩尔比,

考察其对生物柴油转化率的影响,实验结果如图5所示。

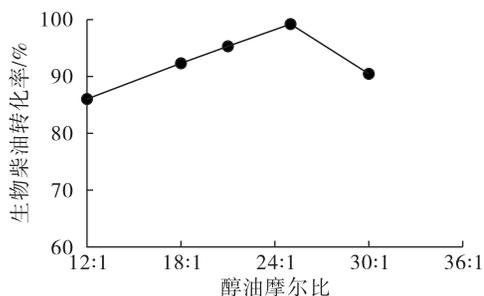


图5 醇油摩尔比对生物柴油转化率的影响

从图5可知,在醇油摩尔比12:1~25:1的范围内,生物柴油转化率逐渐上升,从85.9%提高到最大99.2%,当醇油摩尔比为30:1时,生物柴油转化率下降。分析原因是该酯交换反应是在麻疯树油、甲醇以及KOH/铝柱撑膨润土固体催化剂构成的三相体系中发生的,催化剂通过吸附反应体系中的液态甲醇而产生活性物质 CH_3O^- 来促进酯交换反应的快速进行^[15]。醇油摩尔比的增大意味着液态甲醇浓度的增大,因此会增大催化剂对液态甲醇的吸附推动力,促进酯交换反应的进行;当醇油摩尔比为25:1时,催化剂吸附液态甲醇的量已达到饱和,因而生物柴油转化率达到最大。当醇油摩尔比为30:1时,反应体系中液态甲醇量过多会增加溶液极性,并且降低麻疯树油的含量,从而减慢反应速率,导致生物柴油转化率有所下降。因此,选择最佳醇油摩尔比为25:1。

2.3 对比实验

为了解不同种催化剂在酯交换反应中的催化性能,对铝柱撑膨润土、KOH和KOH/铝柱撑膨润土3种催化剂催化麻疯树油的能力进行了对比实验。用KOH负载量为15%的KOH/铝柱撑膨润土、铝柱撑膨润土(与KOH/铝柱撑膨润土中铝柱撑膨润土含量相等)以及KOH(与KOH/铝柱撑膨润土中KOH含量相等)作催化剂,分别催化预酯化后的麻疯树油进行酯交换反应,在预酯化后麻疯树油15g、反应温度75℃、催化剂用量7%、反应时间3h和醇油摩尔比25:1的反应条件下,考察3种催化剂对麻疯树油酯交换反应的催化效果,实验结果如表1所示。

表1 不同催化剂对生物柴油转化率的影响

催化剂	生物柴油转化率/%
铝柱撑膨润土	4.8
KOH	24.7
KOH/铝柱撑膨润土	99.2

从表1可知,KOH和铝柱撑膨润土催化麻疯树油的酯交换反应制备生物柴油,其转化率分别为24.7%和4.8%,两种催化剂的催化活性不高。而铝柱撑膨润土通过负载活性组分KOH后,用于催化麻疯树油和甲醇之间的酯交换反应,生物柴油转化率达到99.2%,表现出优越的催化性能。这表明铝柱撑膨润土作为载体具有较大比表面积,活性组分KOH能够均匀地分散到铝柱撑膨润土的表面,促进酯交换反应在KOH/铝柱撑膨润土的催化作用下充分进行。

2.4 催化剂再生

收集使用过一次的KOH/铝柱撑膨润土固体催化剂,将吸附在催化剂表面的油脂类物质用二氯甲烷清洗掉,并将催化剂在3000 r/min的速度下离心5 min后置于105℃的干燥箱中烘干,取出土样研磨至过200目筛,得到备用土样。

以此土样作为酯交换反应的催化剂,以预酯化的麻疯树油作为原料,在单因素优化的条件下,即预酯化麻疯树油15g、反应温度75℃、催化剂用量7%、反应时间3h和醇油摩尔比25:1的条件下进行酯交换反应制备生物柴油,反应结束后,收集油样经分析得知,与首次制备所得的KOH/铝柱撑膨润土催化剂相比,使用过一次的催化剂对麻疯树油与甲醇之间的酯交换反应催化效果明显降低,生物柴油转化率仅15%,这主要归因于使用过一次的KOH/铝柱撑膨润土固体催化剂中的活性组分KOH在洗涤干燥的过程中大量损失,大大削弱了该催化剂的活性。在400℃的马弗炉中焙烧此土样,并且重新负载KOH活性组分达到负载量15%,进而得到再生处理后的催化剂,使用该催化剂在单因素优化的条件下进行酯交换反应,生物柴油转化率高达98%。这表明铝柱撑膨润土在酯交换过程中基本保持了其原有的结构,在重新负载活性组分KOH后,能够恢复催化剂最初的催化活性。

2.5 催化剂的表征

2.5.1 SEM分析

图6中 a_1 、 a_2 分别为铝柱撑膨润土放大5000倍和10000倍的SEM图, b_1 、 b_2 分别为KOH/铝柱撑膨润土放大5000倍和10000倍的SEM图。

从图6可知,铝柱撑膨润土的颗粒大小不一,粒径分布不均匀,且颗粒表面粗糙。对比发现,铝柱撑膨润土经由等体积浸渍KOH处理后,颗粒粒径明显减小,排列更加紧密,另外其表面附着有鳞片状物质。

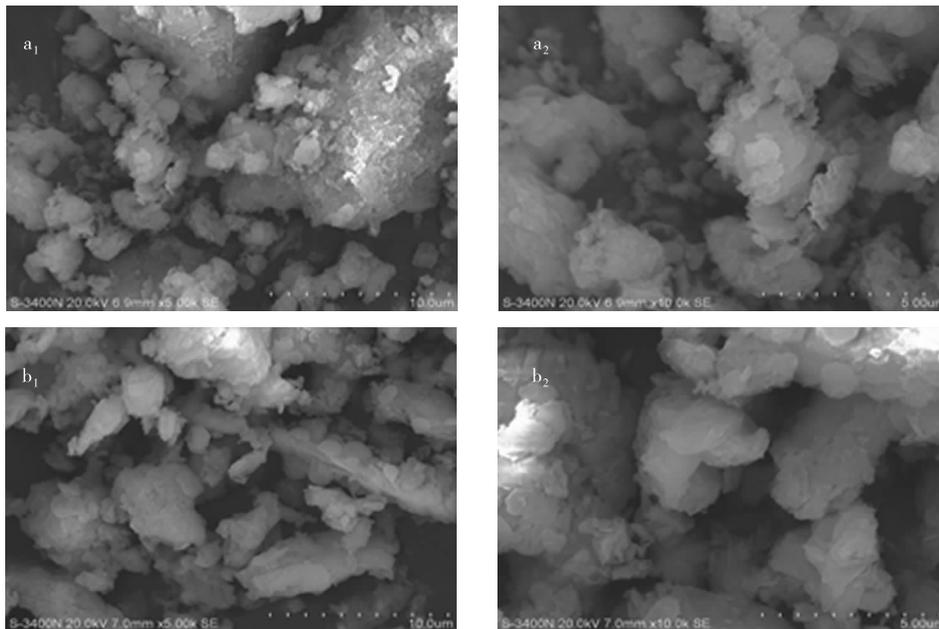


图6 铝柱撑膨润土(a)与KOH/铝柱撑膨润土(b)的电镜图

2.5.2 XRD 分析

膨润土、铝柱撑膨润土与KOH/铝柱撑膨润土的XRD谱图见图7~图9。

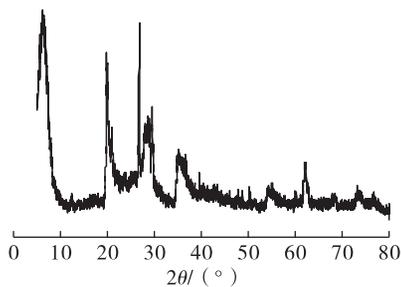


图7 膨润土的XRD谱图

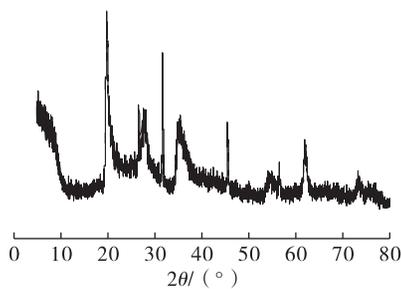


图8 铝柱撑膨润土的XRD谱图

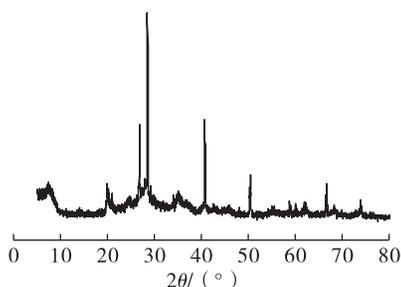


图9 KOH/铝柱撑膨润土的XRD谱图

从图7和图8可知,铝柱撑膨润土的XRD谱图在 $2\theta = 31.7^\circ$ 、 45.4° 、 56.6° 处出现了 Al_2O_3 的衍射峰,膨润土XRD谱图出现了较强的001衍射峰,层间距 d_{001} 为12.8 nm($2\theta = 6.900^\circ$),而铝柱撑膨润土在此处的衍射峰消失,这可能是由于在铝柱撑过程中,膨润土原有的层间结构坍塌,片层发生错位或剥离。观察图9发现,KOH/铝柱撑膨润土在 $2\theta = 19.8^\circ$ 、 31.7° 、 35.1° 、 45.4° 、 62.0° 等处没有出现明显的衍射峰,但是在 $2\theta = 28.3^\circ$ 、 40.6° 、 50.3° 、 66.5° 处有衍射峰出现,这与六方钾霞石(KAlSi_3O_8)特征峰的出峰位置基本吻合,另外KOH/铝柱撑膨润土在 $2\theta = 7.439^\circ$ 出现了衍射峰,由此可以得知所制备催化剂层间距 d_{001} 为11.9 nm。

3 结论

(1)KOH/铝柱撑膨润土催化剂中的最佳KOH负载量为15%。麻疯树油酯交换反应最佳条件为反应温度 75°C 、催化剂用量7%、反应时间3 h、醇油摩尔比25:1。在最佳反应条件下催化麻疯树油制备生物柴油的转化率为99.2%,而用KOH或铝柱撑膨润土作为催化剂催化预酯化麻疯树油制备生物柴油,生物柴油转化率分别为24.7%和4.8%。

(2)在 400°C 的马弗炉中焙烧失活土样,并且重新负载15%KOH,得到再生处理后的催化剂,使用该催化剂进行酯交换反应,生物柴油转化率高达98%。表明铝柱撑膨润土在酯交换过程中基本保持了其原有的结构,在重新负载活性组分KOH后,能够恢复催化剂最初的催化活性。

(下转第109页)

- [2] 黄韵迪,李法社,涂滇,等. 离子色谱法测定生物柴油中阳离子含量的研究[J]. 昆明理工大学学报,2016,41(6):16-19.
- [3] RIZWAZNUL I M, MASJUKI H H, KALAM M A. Effect of antioxidants on oxidation stability of biodiesel derived from vegetable and animal based feedstocks [J]. Renew Sust Energy Rev, 2014, 30: 356-370.
- [4] ZHOU J, XIONG Y, XU S S. Evaluation of the oxidation stability of biodiesel stabilized with antioxidants using the PetroOXY method[J]. Fuel, 2016, 184: 808-814.
- [5] VERMA P, SHARMA M P, DWIVEDI G. Evaluation and enhancement of cold flow properties of palm oil and its biodiesel[J]. Energy Report, 2016, 2: 8-13.
- [6] 黄东升,吕鹏梅,程玉峰,等. 棕榈油生物柴油的低温流动性能及其改善研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(3): 391-395.
- [7] 李法社. 小桐子生物柴油的超临界两步法制备及其抗氧化耐低温性的研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2011.
- [8] 李法社. 小桐子生物柴油制备的试验研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2008.
- [9] CARVALHO A L D, CARDOSO E A, ROCHO G O D, et al. Carboxylic acid emissions from soybean biodiesel oxidation in the EN14112 (Rancimat) stability test[J]. Fuel, 2016, 173: 29-36.
- [10] SILVA P H R, GONCALVES V L C, MOTA C J A. Glycerol acetals as anti-freezing additives for biodiesel[J]. Bioresour Technol, 2010, 101(15): 62-65.
- [11] 路海来,高建文,张衡. Parr6200量热仪维护保养及常见故障分析[J]. 煤质技术, 2014(3): 39-43.
- [12] AGARWALI A K, KHURANA D. Long-term storage oxidation stability of Karanja biodiesel with the use of antioxidants [J]. Fuel Process Technol, 2013, 106: 447-452.
- [13] 苏成帅,李法社,李明,等. 10种抗氧化剂在生物柴油中的抗氧化和油溶性能研究[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(5): 53-57.
- [14] 申加旭,李法社,王华各,等. 生物柴油调和燃料理论热值比对分析[J]. 中国油脂, 2017, 42(11): 45-48, 69.
- [15] 陈寅杰. 蓖麻油基生物柴油的改性及其乳化柴油的研究[D]. 太原:中北大学, 2011: 25-30.

(上接第104页)

(3)通过SEM和XRD表征可得,铝柱撑膨润土经由等体积浸渍KOH处理后,颗粒粒径明显减小,排列更加紧密,其表面附着有鳞片状物质,在衍射角 $2\theta=28.3^\circ$ 、 40.6° 、 50.3° 、 66.5° 处出现了与六方钾霞石($KAlSi_3O_8$)的特征峰吻合的衍射峰,KOH/铝柱撑膨润土层间距较大, d_{001} 为11.9 nm。

参考文献:

- [1] ATABANI A E, SILITONGA A S, BADRUDDIN I A, et al. A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics[J]. Renew Sust Energy Rev, 2012, 16(4): 2070-2093.
- [2] 李志业,夏帆,张琳叶,等. 麻疯树油化学法制备生物柴油的研究进展[J]. 中国科技论文, 2013, 8(3): 219-224.
- [3] 李志业. 高酸值麻疯树油预酯化及酯交换制备生物柴油[D]. 南宁:广西大学, 2013.
- [4] ABBASZADEH A, GHOBADIAN B, OMIDKHAH M R, et al. Current biodiesel production technologies: a comparative review[J]. Energy Convers Manage, 2012, 63: 138-148.
- [5] ZHANG L Y, WANG Y Z, WEI G T, et al. Biodiesel preparation from *Jatropha* oil catalyzed by KF/Red mud catalyst [J]. Energy Source Part A, 2016, 38(12): 1713-1720.
- [6] ZHANG Y, DUBÉ M A, MCLEAN D D, et al. Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment[J]. Bioresour Technol, 2003, 89(1): 1-16.
- [7] 周松,张玉涛,何映霞,等. 负载型固体碱催化制备生物柴油重复性能比较[J]. 中国油脂, 2017, 42(9): 121-125.
- [8] 陈杰博,苏金为,祁建民,等. 纳米固体碱CaO-ZrO₂催化红麻籽油制备生物柴油[J]. 应用化学, 2011, 28(3): 267-271.
- [9] 潘丽爽,曹栋,丁敏. 固体碱氢氧化钡的制备及催化蓖麻油酯交换制备生物柴油的研究[J]. 中国油脂, 2017, 42(5): 103-107.
- [10] ISTADI I, PRASETYO S A, NUGROHO T S. Characterization of K₂O/CaO-ZnO catalyst for transesterification of soybean oil to biodiesel[J]. Procedia Environ Sci, 2015, 23: 394-399.
- [11] NASREEN S, LIU H, KHAN R, et al. Transesterification of soybean oil catalyzed by Sr-doped cinder[J]. Energy Convers Manage, 2015, 95: 272-280.
- [12] 张琳叶,李志业,魏光涛,等. 高酸值麻疯树籽油制备生物柴油的杂多酸催化预酯化研究[J]. 中国油脂, 2014, 39(2): 63-66.
- [13] 邹华生,李剑,陈文标. 甘油铜分光光度法和HPLC测定生物柴油转化率的比较研究[J]. 中国油脂, 2011, 36(9): 82-84.
- [14] 阎杰,丘泰球. 甘油铜比色法测定甘油含量的研究[J]. 中国油脂, 2004, 29(1): 40-43.
- [15] DOSSIN T F, REYNIERS M F, MARIN G B. Kinetics of heterogeneously MgO-catalyzed transesterification [J]. Appl Catal B: Environ, 2006, 61: 35-45.