

文章编号: 1000-5013(2011)06-0657-06

功能化季铵盐离子液体在制备生物柴油中的应用

孙亚飞, 林金清, 左霜, 方国阳

(华侨大学 材料科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 合成 6 种 SO_3H -功能化的季铵盐离子液体, 红外光谱和核磁共振光谱表征表明, 离子液体的结构符合其理论特点. 热稳定性分析表明, 所合成的离子液体的热稳定性良好, 分解温度都在 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 以上. 将 6 种 SO_3H -功能化的季铵盐离子液体用于三油酸甘油酯与甲醇酯交换制备生物柴油的反应中, 比较不同离子液体的催化活性, 并以 $[n\text{-But}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}][p\text{-CH}_3(\text{C}_6\text{H}_4)\text{SO}_3]$ 作催化剂, 考察反应时间、离子液体用量、醇油摩尔比对酯交换反应的影响. 结果表明: 在反应温度为 $65\text{ }^\circ\text{C}$ 、醇油比为 $12:1$, 以及离子液体质量分数为 7% 的条件下反应时间 24 h , 生物柴油产率最高, 可达 92.04% .

关键词: 生物柴油; 季铵盐; 离子液体; 功能化; $[n\text{-But}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}][p\text{-CH}_3(\text{C}_6\text{H}_4)\text{SO}_3]$; 酯交换

中图分类号: TE 667

文献标志码: A

生物柴油是以短链的醇类和动植物油脂为原料, 经过催化反应而制得的长链脂肪酸甲酯类物质^[1], 其主要制备方法是酯交换法^[2]. 离子液体是一种新型的环境友好型溶剂和液体催化剂, 其结构和酸性具有可调性, 能溶解许多有机和无机物, 易于循环利用^[3-4]. 2002 年, Cole 等^[5]在咪唑盐阳离子上引入磺酸基, 首次合成了具有较强 Brønsted 酸性的功能化离子液体, 并用作酯化、重排等反应体系的溶剂和催化剂. 吴芹等^[6]分别对带 SO_3H -功能化的咪唑、吡啶型离子液体催化棉籽油制备生物柴油进行研究, 发现该类离子液体均能够有效地催化酯交换反应. 易伍浪等^[7]采用吡啶磺酸类离子液体作催化剂, 研究了不同工艺条件下催化废油脂制备生物柴油, 产率最高可以达到 86.8% . Ghiaci 等^[8]制备了 8 种苯并咪唑磺酸类离子液体, 以菜籽油和乙醇为原料合成生物柴油, 最高收率可以达到 95.1% . Zhang 等^[9]将功能化离子液体用于催化酯化反应制备生物柴油, 制备了 7 种咪唑丙烷磺酸硫酸氢盐离子液体, 并用于油酸与乙醇的酯化反应, 脂肪酸甲酯收率最高可达 96.5% . Dong 等^[10]制备了 3 种不同侧链的二胺双磺酸基功能化离子液体, 并用于废油脂和乙醇的酯交换反应中, 生物柴油的收率可以达到 $93\%\sim 96\%$. 本文在文献[11]基础上, 合成 6 种 SO_3H -功能化季铵盐离子液体并研究其催化性能和工艺影响规律.

1 实验部分

1.1 主要试剂与仪器

三乙胺(纯度 $\geq 99\%$), 丙酮(纯度 $\geq 99\%$), 无水乙醇、甲醇、乙酸乙酯(分析纯), 三油酸甘油酯(化学纯), 国药集团化学试剂有限公司; 1,3-丙基磺酸内酯、三正丁胺(纯度 $\geq 99\%$), 甲磺酸(纯度 99.0%), 对甲苯磺酸(分析纯), 上海晶纯试剂有限公司; 三正辛胺(纯度 $\geq 98\%$), 上海君创生物科技有限公司; 硫酸(纯度为 98%), 上海三鹰化学试剂有限公司; 磷酸(纯度为 85%), 汕头市西陇化工厂.

Agilent 6890 型气相色谱仪, 配备 N 6890 色谱数据工作站, 美国安捷伦科技有限公司; HJ-3 型磁力搅拌器, 江苏常州国华电器有限公司; DZF 6050 型真空干燥箱, 上海精宏实业有限公司; DMA 4500

收稿日期: 2011-04-25

通信作者: 林金清(1963-), 男, 教授, 主要从事离子液体热力学及其应用的研究. E-mail: linlab@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(20776057)

型密度仪,奥地利 Anton Paar 有限公司;EN 1001 型旋转蒸发仪,日本日本东京理化器械株式会社;SDT 2960 型热重分析仪,美国 TA 公司;Nexus 傅里叶型红外光谱仪,KBr 为参比,配有变温附件和 DTGs 检测器,美国 Nicolet 公司;Sartorius BS110S 型电子天平,北京赛多利斯天平有限公司;Bruker 400 MHz 核磁共振仪。

1.2 离子液体的制备

以乙酸乙酯作溶剂,将三正丁胺(或三乙胺、三正辛胺)和等物质量的烷基磺酸内酯在三口烧瓶中混合,于 50 ℃下搅拌 3 d,得到白色固体,提纯,真空干燥,制得两性离子 $R^+(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3^-$ (R 为三正丁基、三乙基或三正辛基)。此固体易溶于水而不溶于丙酮等有机溶剂,在空气中极易吸潮。

将制得的两性离子与等物质量的对甲苯磺酸(磷酸、硫酸或甲磺酸)在三口烧瓶中混合,在 50 ℃下搅拌反应 3 h,直至固体全部消失,保温 2 h。反应完毕后,将产物转入单口瓶中,在 60 ℃下减压旋转蒸馏,除去大部分溶剂;减压蒸馏完成后,放入真空干燥箱(60 ℃)中干燥过夜。所合成的离子液体在室温下呈黄色透明粘稠状液体。实验共制备了 6 种不同碳链长度及不同阴离子种类的离子液体,分别是 $[\text{R}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}]\text{HSO}_4$, R 为 $(\text{CH}_2)_3$, $(\text{CH}_2)_4$, $(\text{CH}_2)_8$; $[(\text{C}_4\text{H}_9)_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}]\text{X}$, X 为 H_2PO_4 , HSO_4 , CH_3SO_3 , $p\text{-(C}_6\text{H}_4\text{)}\text{SO}_3$ 。

1.3 生物柴油制备

季铵盐离子液体催化酯交换反应是在带有磁力加热搅拌的恒温油浴的三口烧瓶中(常压下)进行的。先将油浴加热至实验所设置的温度,在三口烧瓶中加入一定量甲醇和离子液体,溶解后再按一定原料摩尔比加入三油酸甘油酯,冷凝回流。反应数小时后停止加热、搅拌,然后取出混合物置于分液漏斗中静置分层,上层为离子液体相(离子液体、甲醇及甘油混合物),下层为产物及原料油的混合相。分离后分别对上下层进行气相色谱检测。

1.4 产物分析

用气相色谱法来测定反应产物中生物柴油的含量。采用外标法对油酸甲酯进行定量分析,Agilent 6890 型色谱仪检测条件:DX 30 色谱柱(30 m×0.25 mm×0.15 μm),FID 检测器,高纯 H_2 作燃气,压缩空气助燃,高纯 N_2 作载气,柱温 380 ℃,进样器温度 400 ℃,检测器温度 400 ℃,分流比 20:1,进样量为 1 μL。检测方法为初始温度 50 ℃,保留 2 min,再以 50 ℃·min⁻¹升温 2 min,最后以 20 ℃·min⁻¹升温至 380 ℃并保留 2 min,检测时间为 17.5 min。

2 离子液体的表征

2.1 红外光谱分析

所有样品在进行测定前都经过干燥处理,以 $[n\text{-But}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}][p\text{-CH}_3(\text{C}_6\text{H}_4)\text{SO}_3]$ 为例,其红外光谱图(FT-IR)如图 1 所示。从图 1 可知,实验结果均符合离子液体的理论结构特点。

2.2 核磁共振分析

以 $[n\text{-But}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}][p\text{-CH}_3(\text{C}_6\text{H}_4)\text{SO}_3]$ 为例,其核磁共振(NMR)谱图如图 2 所示。图 2 的 ^1H NMR(400 MHz, D_2O)表征结果:样品的化学位移 δ 分别为 3.26(t,6H),1.85~1.90(m,6H),1.25(m,6H),0.80~0.85(t,12H),1.54(t,6H),1.81~1.84(m,2H),3.52~3.60(m,2H),2.0(s,—OH),7.59(d,2H),7.26(d,2H)。而 ^{13}C NMR(150 MHz, D_2O)的表征结果: $\delta=57.6,30.0,21.1,13.7,57.3,26.0,13.7,126.2,130.5,141.5,20.9$ 。

比较两者的实验结果可知,C 和 H 的数量与理论值一致,且没有明显的杂质峰,说明所合成的产物是目标离子液体,而且纯度较高。

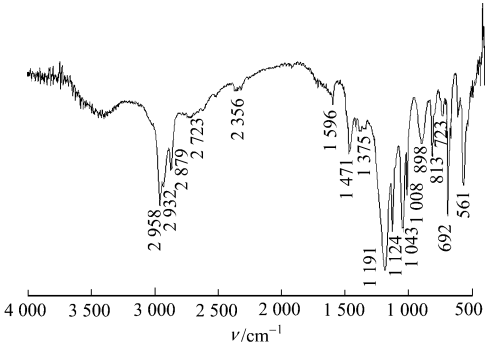


图 1 $[n\text{-But}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}][p\text{-CH}_3(\text{C}_6\text{H}_4)\text{SO}_3]$ 的红外光谱图
Fig. 1 Infrared spectrum of $[n\text{-But}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}][p\text{-CH}_3(\text{C}_6\text{H}_4)\text{SO}_3]$

2.3 热稳定性分析

以流量为 $100\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的 N_2 做保护气, 升温速率为 $10\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$, 升温区间为室温至 $500\text{ }^\circ\text{C}$, 试样质量为 15 mg , 6 种离子液体的热重分析结果如图 3 所示。由图 3 可知: 6 种离子液体的分解温度都在 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 以上; 离子液体在发生分解之前都有 10% 左右的失重。

比较不同离子液体的分解峰可以看出: 阳离子都为 $[\textit{n}\text{-But}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}]^+$ 时, 阴离子为 $[\textit{p}\text{-CH}_3(\text{C}_6\text{H}_4)\text{SO}_3]^-$ 的离子液体分解温度最高, $[\text{CH}_3\text{SO}_3]^-$ 、 HSO_4^- 依次降低, 阴离子为 H_2PO_4^- 时分解温度最低。说明阴离子为有机酸时, 比无机酸时的离子液体分解温度要高, 阴离子为 HSO_4^- 时分解温度比 H_2PO_4^- 要高。此外, 通过比较阴离子都为 HSO_4^- 时离子液体的分解温度可以看出, 烷基侧链为乙基时最高, 丁基最低, 辛基居中, 说明分解温度与侧链长短并不存在明显的规律。

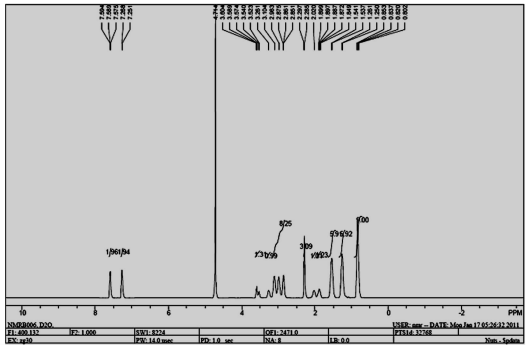


图 2 $[\textit{n}\text{-But}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}][\textit{p}\text{-CH}_3(\text{C}_6\text{H}_4)\text{SO}_3]$ 的 ^1H NMR 谱图

Fig. 2 ^1H NMR spectroscopy of $[\textit{n}\text{-But}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}][\textit{p}\text{-CH}_3(\text{C}_6\text{H}_4)\text{SO}_3]$

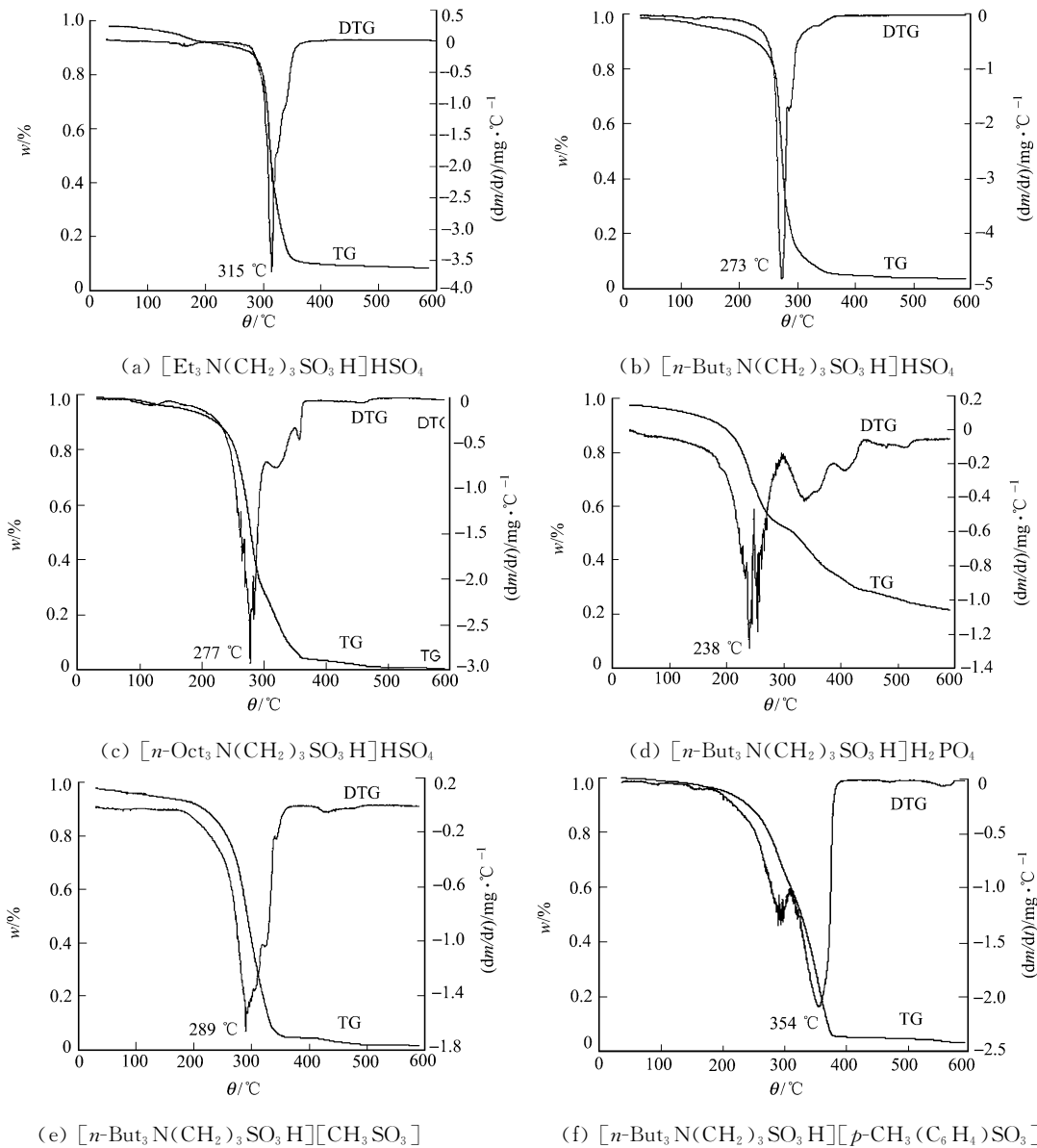


图 3 不同离子液体样品的热重分析曲线

Fig. 3 Thermal gravity analysis curves of the different ionic liquids samples

3 酯交换反应的影响因素分析

3.1 离子液体种类

在 65℃、醇(甲醇)油(三油酸甘油酯)比为 12:1、离子液体质量分数为 3% 的条件下,分别用合成的 6 种离子液体催化酯交换反应 16 h,考察不同离子液体对生物柴油产率(η)的影响,结果如表 1 所示.从表 1 可以得到以下 3 点结论.

(1) 有 2 种有机酸型季铵盐离子液体催化效果较好,产率分别达到 69.41% 和 77.42%,而 4 种无机酸型离子液体的催化效果则低很多,其中以 $[n\text{-Out}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}]\text{HSO}_4$ 的催化效果最好.说明催化效果受阴离子影响较大.

(2) 当阳离子都为 $[n\text{-But}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}]^+$ 时,磷酸季铵盐离子液体、硫酸季铵盐离子液体、甲磺酸季铵盐离子液体、对甲苯磺酸季铵盐离子液体催化的生物柴油产率依次增加.这进一步说明,有机酸型季铵盐离子液体的催化效果比无机酸型好.究其原因可能是,有机酸型离子液体的酸性较无机酸型强,其酸催化活性更高.

(3) 当阴离子都为 HSO_4^- 时,对比不同阳离子的离子液体催化的生物柴油产率可知,随着阳离子侧链的增长,催化活性增强.这可能是由于随阳离子烷基侧链的增长,离子液体对促进甘油酯在甲醇中的溶解度的增溶作用增强,从而提高了反应速率.

表 1 不同离子液体催化的生物柴油产率
Tab. 1 Biodiesel yield with different ionic liquid catalyst

离子液体	$\eta/\%$	离子液体	$\eta/\%$
$[\text{Et}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}]\text{HSO}_4$	20.73	$[n\text{-But}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}]\text{H}_2\text{PO}_4$	13.47
$[n\text{-But}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}]\text{HSO}_4$	22.78	$[n\text{-But}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}][\text{CH}_3\text{SO}_3]$	69.41
$[n\text{-Out}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}]\text{HSO}_4$	25.53	$[n\text{-But}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}][p\text{-CH}_3(\text{C}_6\text{H}_4)\text{SO}_3]$	77.42

3.2 反应时间

采用 $[n\text{-But}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}][p\text{-CH}_3(\text{C}_6\text{H}_4)\text{SO}_3]$ 为催化剂,在反应温度为 65℃、醇油比为 12:1、离子液体质量分数为 3% 的条件下,考察不同反应时间(t)对生物柴油产率的影响,结果如图 4 所示.从图 4 可以看出:在一定范围内,随着时间的延长,生物柴油产率增加.从 8~16 h,生物柴油产率明显增加;16 h 以后,生物柴油产率的增加幅度较小.

3.3 醇油比

采用 $[n\text{-But}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}][p\text{-CH}_3(\text{C}_6\text{H}_4)\text{SO}_3]$ 为催化剂,在反应时间为 24 h、反应温度为 65℃、离子液体质量分数为 3% 的条件下,考察不同醇油比($n(\text{醇}):n(\text{油})$)对生物柴油产率的影响,结果如图 5 所示.

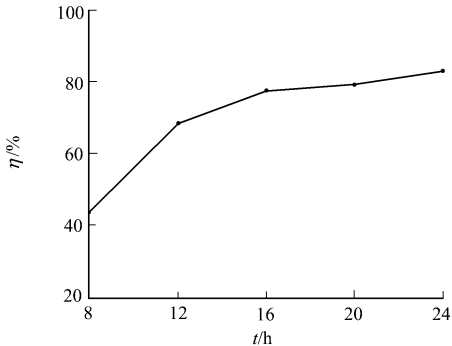


图 4 反应时间对生物柴油产率的影响
Fig. 4 Influences of reaction time to biodiesel yield

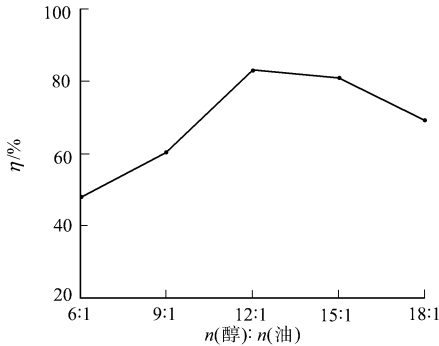


图 5 醇油比对生物柴油产率的影响
Fig. 5 Influences of ratio of alcohol and oil to biodiesel yield

从图 5 可以看出:在一定范围内,随着醇油比的加大,产率先增后降.即从醇油比在 6:1~12:1 之间,生物柴油产率迅速增加;而当醇油比为 12:1 时,产率最高;但在醇油比超过 12:1 后,产率有所下降.甲醇与三油酸甘油酯进行酯交换反应的理论摩尔比为 3:1,但该反应为可逆反应,理论上过量的甲

醇有利于平衡反应向生成生物柴油的方向移动,而且有利于酸催化剂的电离,使催化效率提高.然而,甲醇增加过量,离子液体将会被过度稀释,其催化能力降低.因此,醇油比存在一个最佳值.

3.4 离子液体用量

采用 $[n\text{-But}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}][p\text{-CH}_3(\text{C}_6\text{H}_4)\text{SO}_3]$ 为催化剂,在反应时间为 24 h、反应温度为 65 ℃、醇油比为 12 : 1 的条件下,考察不同离子液体质量分数(w)对生物柴油产率的影响,如图 6 所示.

从图 6 可以看出:离子液体质量分数从 1%增加到 3%时,生物柴油产率迅速增加;当离子液体质量分数超过 3%时,产率增加幅度不大;而当离子液体质量分数为 7%时,其产率最高,可达 92.04%.由此可见,功能化季铵盐离子液体的催化效果与咪唑或吡啶类功能化离子液体基本相当.

3.5 离子液体稳定性

离子液体的循环使用效率是降低催化剂成本的关键,因此考察离子液体的循环使用次数(N)尤为重要.酯交换反应完成后,萃取分离得到离子液体相,再经过旋转蒸发用于下次实验.

以 $[n\text{-But}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}][p\text{-CH}_3(\text{C}_6\text{H}_4)\text{SO}_3]$ 为催化剂,在反应时间为 24 h、反应温度为 65 ℃、醇油比 12 : 1、离子液体质量分数 7%的条件下,考察离子液体稳定性和循环使用性能,如图 7 所示.

由图 7 可见:随着 $[n\text{-But}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}][p\text{-CH}_3(\text{C}_6\text{H}_4)\text{SO}_3]$ 循环使用次数的增加,催化剂的活性不断降低.甘油的沸点为 290 ℃,与离子液体的分解温度 300 ℃接近,减压蒸馏条件比较苛刻,较难直接得到离子液体.文中旋转蒸发只能除去亲水相中未反应完的甲醇,而酯交换反应中的副产物甘油并未除去,甘油的存在势必影响反应向正反应方向进行,当甘油积累到一定量时,使酯交换产率明显降低.从能耗方面考虑,实际工业生产中当甘油积累到一定的量时,可以再通过更高程度的减压蒸馏的方式除去,以保证离子液体的催化效果.

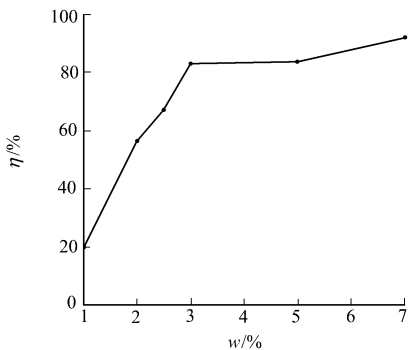


图 6 离子液体用量对生物柴油产率的影响

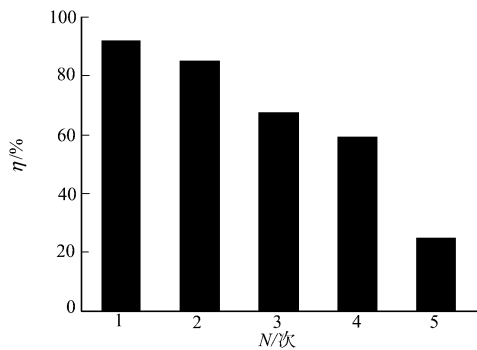


图 7 离子液体的循环使用性能

Fig. 6 Influences of ionic liquid amount to biodiesel yield

Fig. 7 Recycling performance of ionic liquid

4 结论

(1) 合成了 6 种原料成本相对较低的 SO_3H -功能化季铵盐离子液体,其红外和核磁共振表征表明,离子液体的结构符合其理论特点,合成方法是可行的.

(2) 所合成的离子液体的热稳定性良好,分解温度都在 200 ℃以上.阴离子为有机酸时比无机酸时的离子液体分解温度要高,阴离子为 HSO_4^- 时分解温度比 H_2PO_4^- 要高;分解温度与阳离子侧链长短并不存在明显的规律,其中 $[n\text{-But}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}][p\text{-CH}_3(\text{C}_6\text{H}_4)\text{SO}_3]$ 离子液体的分解温度最高.

(3) SO_3^- 功能化的季铵盐离子液体对酯交换反应具有较高的催化活性,有机酸型离子液体催化活性明显优于无机酸型.当阳离子为 $[n\text{-But}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}]^+$ 时,阴离子为 $[p\text{-CH}_3(\text{C}_6\text{H}_4)\text{SO}_3]^-$ 的离子液体的催化活性最高, $[\text{CH}_3\text{SO}_3]^-$, HSO_4^- , H_2PO_4^- 型依次降低;当阴离子都为 HSO_4^- 时,随着阳离子侧链的增长,催化活性增强,其中 $[n\text{-Out}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}][\text{HSO}_4]$ 的催化活性最高.

(4) 合成的 6 种离子液体中, $[n\text{-But}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}][p\text{-CH}_3(\text{C}_6\text{H}_4)\text{SO}_3]$ 离子液体的催化活性最高,其催化效果与咪唑或吡啶类离子液体相当.

(5) 采用 $[n\text{-But}_3\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{SO}_3\text{H}][p\text{-CH}_3(\text{C}_6\text{H}_4)\text{SO}_3]$ 离子液体为催化剂,考察反应时间、离子液体用量、醇油摩尔比对酯交换反应的影响.结果表明:在反应温度 65 ℃、醇油比 12 : 1,离子液体质量

分数 7%,反应时间 24 h 的条件下,酯交换制备生物柴油的产率最高,可达 92.04%.

参考文献:

[1] QUICK G R. Oil seeds as energy crops in oil crops of the world[M]. New York:McGraw-Hill Publishing Co,1989.

[2] SCHWAD A W,BIOEBY M O,FREEDMAN B. Preparation and puppetries of diesel fuels from vegetable oils[J]. Fuel,1987,66(10):1732-1739.

[3] YANG Cheng-yuan,DENG Xin,FANG Zhen,et al. Selection of high-oil yield seed sources of *Jatropha curcas* L. for biodiesel production[J]. Biofuels1,2010,1(5):705-717

[4] 李永红. 绿色溶剂:离子液体及其应用[J]. 化学工程师,2006,131(8):27-29.

[5] COLE A C,JENSEN J L,NTAI I,et al. Novel bronsted acidic ionic liquids and their use as dual solvent-catalysts [J]. J Am Chem Soc,2002,124(21):5962-5963.

[6] 吴芹,陈和,韩明汉,等. 高活性离子液体催化棉籽油酯交换制备生物柴油[J]. 催化学报,2006,27(4):294-296.

[7] 易伍浪,韩明汉,吴芹,等. Brønsted 酸离子液体催化废油脂制备生物柴油[J]. 过程工程学报,2007,7(6):1144-1148.

[8] GHIACI M,AGHABARARI B,HABIBOLLAHI S,et al. Highly efficient Brønsted acid ionic liquid-based catalysts for biodiesel synthesis from vegetable oils[J]. Bioresource Technology,2011,1(2):1200-1204.

[9] ZHANG Lei,XIAN Mo,HE Yu-cai,et al. A Brønsted acidic ionic liquid as an efficient and environmentally benign catalyst for biodiesel synthesis from free fatty acids and alcohols[J]. J Bioresource Technology,2009,100(19):4368-4373.

[10] DONG Fang,YANG Jin-ming,JIAO Chang-mei,et al. Dicationic ionic liquids as environmentally benign catalysts for biodiesel synthesis[J]. ACS Catal,2011,1(1):42-47.

[11] 孙亚飞,林金清,左霜,等. SO₃H—功能化季铵盐离子液体催化酯交换制备生物柴油[J]. 过程工程学报,2011,11(1):153-157.

Application of Synthesis Biodiesel by Functional
Qauternary Ammonium Ionic Liquid

SUN Ya-fei, LIN Jin-qing, ZUO Shuang, FANG Guo-yang

(College of Materials Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: 6 kinds of SO₃H— quaternary ammonium ionic liquids were prepared. Their IR and NMR spectra showed that the structure were in accordance with the theory. Besides the TG curves showed that they were stable and all the decomposition temperature were above 200 ℃. Biodiesel was synthesized with triolein and methanol catalyzed by the 6 kinds of ionic liquids prepared. The effects of reaction time, mole ratio of methanol to oil and ionic liquids dosage on catalytic activity were investigated. Under the congditions of the mass fraction of ionic liquid 7%, mole ratio of methanol to oil 12 : 1, temperature 65 ℃ and reaction time 24 h, the ionic liquid [*n*-But₃N(CH₂)₃SO₃H][*p*-CH₃(C₆H₄)SO₃]showed the best catalytic activity and the yield of fatty aid methyl ester reached 92.04%.

Keywords: biodiesel; quaternary ammonium; ionic liquid; functional; [*n*-But₃N(CH₂)₃SO₃H][*p*-CH₃(C₆H₄)SO₃]; transesterification

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 熊兴泉)