

# 废油催化再生的研究进展

熊昆<sup>1\*</sup>, 周琳<sup>2</sup>, 张贤明<sup>1</sup>, 蒋光明<sup>1</sup>, 吕晓书<sup>1</sup>

(1. 重庆工商大学, 废油资源化技术与装备教育部工程研究中心, 催化与功能有机分子重庆市重点实验室, 重庆 400067; 2. 成都广播电视大学, 四川 成都 610051)

**摘要:**从废油再生新工艺中的催化脱色技术、催化裂化技术、催化加氢精制技术等方面阐述了国内外科研前沿领域在催化剂、工艺、反应机理方面的进展, 并对废油转化再生技术的深入研究进行了相关的展望。

**关键词:**废油; 催化脱色; 催化裂化; 催化加氢精制

**中图分类号:**TE992.4; O643.38

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2016)03-0053-05

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.03.013

## Research progresses of catalytic regeneration of waste oils

XIONG Kun<sup>1\*</sup>, ZHOU Lin<sup>2</sup>, ZHANG Xian-ming<sup>1</sup>, JIANG Guang-ming<sup>1</sup>, LV Xiao-shu<sup>1</sup>

(1. Engineering Research Center for Waste Oil Recovery Technology and Equipment of Ministry of Education, Chongqing Key Laboratory of Catalysis & Functional Organic Molecule, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China; 2. Chengdu Radio & TV University, Sichuan 610051, China)

**Abstract:** The development of the catalytic conversion of waste oils, including the relevant catalysts, techniques and mechanisms, is reviewed. The new techniques for catalytic regeneration of waste oils such as catalytic decolorization, catalytic cracking and catalytic hydrotreating are highlighted. Some discussions and suggestions are also proposed with respect to further investigation of the techniques for waste oil regeneration.

**Key words:** waste oil; catalytic decolorization; catalytic cracking; catalytic hydrotreating

## 1 废油再生概述

随着国民经济的日益增长, 人类对各类油脂的需求大量增加, 形成的废弃油脂也随之不断增加。工业废油作为可供人类利用的资源, 如果将其直接排放或燃烧, 将会造成资源浪费, 并产生环境污染。近年来, 随着石油价格上涨及环保意识增强, 废油资源化利用有了较快的发展, 而且国家也制定了相应的回收及处理标准<sup>[1]</sup>。中国环保燃油集团有限公司采取高效催化剂进行裂解制柴油, 收率可达80%; 瑞丰邦达(武汉)科技有限公司选择两级催化回流装置对废润滑油、废旧轮胎、废塑料等原料进行处理加工, 获得符合国家标准<sup>[2]</sup>的0#柴油。而对于餐饮废油, 具有明显的废物与资源两重性, 发展餐饮废油资源化利用技术也是非常重要的。这不仅能缓解我国能源需求持续增长的压力, 维持生态系统碳平衡, 取得良好的环境经济效益, 还能改变餐厨废油流回餐桌这一扭曲现象, 解决其带来的食品安全、废油污染等问题<sup>[3]</sup>。

传统废油再生技术主要以蒸馏、热裂解、吸附-

萃取为主, 它们存在用酸量大、二次污染物排放量大、再生产品品质不理想、附加值低等问题, 因而研究新型技术与工艺, 合理再生废弃油脂, 避免环境污染, 提高再生产品品质, 才能扩大资源利用, 符合可持续发展战略思想。表1是各类废油再生技术的对比情况。由于关于物理再生技术的介绍及关注较多, 因此, 本文中将从废弃油再生新工艺中的催化脱色技术、催化裂化技术、催化加氢精制技术等方面介绍国内外在催化剂、工艺、反应机理方面的研究进展及主要问题, 并针对废油催化再生技术的开发提出建议和展望。

表1 废油再生技术对比情况

技术	优势	不足
真空净油技术	快速脱除水分、气体和杂质	操作烦琐、对裂化程度深的废油净化不彻底
溶剂、吸附剂萃取技术	对目标物可选择性分离, 操作简便、能耗低	溶剂有毒且溶剂、吸附剂用量大, 使用多次后难以恢复, 形成二次污染
膜分离技术	反应温度(40℃)、压力(0.1 MPa)较低, 可提高再生油的流动性、闪点	膜成本高, 容易破损, 易被大颗粒污染物堵塞

收稿日期: 2015-11-06; 修回日期: 2015-12-29

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1500625); 教育部平台科技资助项目(fyk201501)

作者简介: 熊昆(1986-), 男, 博士, 讲师, 主要从事纳米材料控制合成与废油催化转化的研究, 通讯联系人, 023-62768317, kunxiong312@gmail.com。

续表

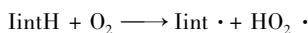
技术	优势	不足
热裂解技术	通用性强,对各类废油都可进行处理;设备体系简单;产生具有较大潜力的燃油产品	反应温度高(1000℃),时间长;裂解无选择性;容易产生致癌性多环芳烃副产物
酯交换技术	可选择性生产目标脂肪酸,副产物(甘油)能转移成乙醇、聚甘油作为燃料添加剂	消耗大量酒精;产物抗氧化性差,储存周期短
催化反应技术	再生油回收率高,无二次污染;再生油脱色效果好,稳定性好;反应温度适中、速度快、选择性高、应用范围广	设备成本高

## 2 废油催化再生技术

### 2.1 催化脱色技术

新油在使用过程中易受工作环境影响,从而造成油品性质发生变化。其外观现象可以表现在颜色变化,如润滑油从透明的黄色液体逐渐变为不透明的黑色液体。一些学者通过研究发现,这是由于外界因素造成烃类化合物发生复杂的自由基链式反应,产生了以酸类、皂类、芳香烃类、胶质、沥青质类化合物为代表的劣化有色物质,因而使油品的性质和颜色发生变化,其反应机理为:

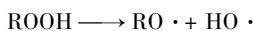
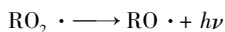
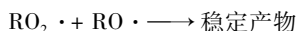
链初始反应:



链传递反应:



链终止反应:



式中, IintH 是引发剂;  $\text{HO}_2 \cdot$  和  $\text{RO}_2 \cdot$  是过氧化物自由基;  $\text{R} \cdot$  是烃自由基;  $\text{ROOH}$  是过氧化物;  $\text{RO}_2 \cdot$  是激发态酮。

尽管选择吸附法、絮凝脱色法等物理方法可将废油中的劣化极性物和芳香烃等有色污染物吸附聚集,去除废油中有色物,然而这些有色物仅仅是从废

油中分离出来,它们依然附着在吸附剂上,或与絮凝剂形成二次污染物。更重要的是,脱色再生得到的油品容易返色。因此,这类物理脱色方法不能彻底解决问题。近年来,利用现有技术结合催化剂加氢脱色复合技术再生废油成为研究热点,已受到大家的广泛关注。究其原因,其实质是利用催化剂进行加氢反应,即废油中成色官能团与氢气发生反应,生成相应的加氢化合物,不仅从源头上去除了废油中的杂质,还改变了油品的性质,因而彻底实现了油品的脱色。

在欧洲应用的 Kleen 工艺将蒸馏和催化加氢技术联合使用,以 Ni/Mo 催化剂为加氢催化剂,对废润滑油进行再生处理。这种技术可以明显将废润滑油中的多环芳烃除去,从而获得品质理想的基础油、燃料油及沥青油;由 Viscolube 公司自主研发的 REVIVOIL 工艺能有效脱除废润滑油中的各类劣化产物,对废润滑油有很好的脱色效果,反应后得到的残渣还可用作沥青调和组分或重质燃料,整个工艺无二次污染物排放,对环境无污染,且该工艺的润滑油再生回收率可达到 72.63%,沥青收率可达 12%<sup>[4]</sup>。刘建银等<sup>[5]</sup>首先对废润滑油进行过滤、脱水、真空蒸馏处理,然后进行催化加氢反应,因此再生油品色度 < 2.0,脱色效果显著。冯全等<sup>[6]</sup>选择常压和减压蒸馏模式对废润滑油进行预处理,再以 Ni-Mo 担载  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  的 FDS-1 型加氢催化剂对预处理后的废润滑油进行催化加氢反应,产生的再生油呈浅黄色,色度为 2.9。谢丽等<sup>[7]</sup>采用先吸附后催化加氢的联用脱色技术,可以对重烷基苯精馏釜底产物进行有效脱色,提高产品质量。

### 2.2 催化裂化技术

由于有些废油不可能再生成国家达标的油品,如混有残渣燃料油的废油或餐饮废油,即使通过良好的精制,所制取的再生油仍然不会达标。将这些废油通过催化裂化为燃油,不仅可以实现资源利用最大化,还能够提高产品附加值。图 1 为废润滑油催化裂解制取燃料油工艺流程图。

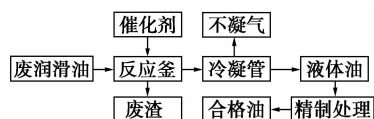


图 1 废润滑油催化裂解制取燃料油工艺流程

裂化技术通常是指将大分子碳氢化合物催化裂

解为小分子产物。早期催化裂化的催化剂有酸催化剂(如  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{AlCl}_3$ )和碱催化剂(如  $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{NaOH}$ )<sup>[8-9]</sup>;目前常用的催化剂主要是过渡金属负载型、分子筛型(如 HZSM-5、HUSY、HBeta)<sup>[10-11]</sup>和介孔硅铝酸盐型<sup>[12]</sup>。Bhaskar 等<sup>[13]</sup>利用铁基催化剂对废润滑油进行催化裂解。研究表明,  $\text{Fe}/\text{SiO}_2$  可以裂解废油中碳原子高达 40 的碳氢化合物, 获得高品质燃油。Sinag 等<sup>[14]</sup>发现, 载体性质也对催化裂解具有明显的影响, 其中以  $\text{SiO}_2$  担载的 Ni 催化废润滑油裂解, 产生的燃油含有更少量的芳香烃化合物, 而使用 HZSM-5 催化剂则获得更多的脂肪烃化合物。

Balat<sup>[15]</sup>采用催化裂解法从废润滑油中炼制出近似汽油燃料(gasoline-like fuel, GLF)。通过优化条件, 最高出油率可达到 92.5%, 所制燃油比汽油辛烷值高, 闪点略低于汽油。Arpa 等<sup>[16]</sup>研究了  $\text{NaCO}_3$ 、沸石和  $\text{CaO}$  催化剂对所制燃油密度、黏度、闪点、硫含量、热值和馏出温度的影响。在  $\text{CaO}$  质量分数为 2% 时含硫量达到最低, 此时所制燃油的馏出温度最接近柴油。Permsubscul 等<sup>[17]</sup>使用硫化钨催化剂对废润滑油催化裂解制取液体燃料。研究表明, 石脑油转化率最高可达 20.6%。在同样条件下, 煤油、轻质柴油、柴油、残渣、煤气和固体的转化率分别为 9.04%、15.61%、5.00%、23.30%、25.58% 和 0.87%, 液体产品主要由  $\text{C}_7 \sim \text{C}_{15}$  的正烷烃、 $\text{C}_7 \sim \text{C}_9$  的支链烷烃、甲苯、乙苯、二甲苯等芳香烃组成。

对于餐饮废油, 其催化裂化过程中不仅有常规的催化裂化反应, 还有脱水、脱羧、脱酮反应等。中国石油大学(华东)已经在工业装置上进行了减压蜡油掺炼餐厨废油催化裂化试验研究, 结果表明, 液化石油气(LPG)中的丙烯质量分数提高了 1.88%, 汽、柴油的大部分性质均能满足标准要求。Twaiq 等<sup>[18]</sup>选择不同孔径的 HZSM-5、HBeta 和 HUSY 分子筛催化转化棕榈油。作者比较 3 种分子筛发现, HZSM-5 抗积炭能力最好, HBeta 次之。酸性较强、孔结构与孔体积较独特的 HZSM-5 更倾向于生成汽油组分的烃类, 尤其是芳烃中的苯和甲苯; HUSY 有利于生成煤油和柴油组分, 而 HBeta 则产生较少的柴油组分。当提高 HZSM-5 中的  $\text{Si}/\text{Al}$  比, 汽油和煤油的产率会上升, 而气相产物和柴油的产率则会下降, 同时芳烃也会下降<sup>[19]</sup>。图 2<sup>[20]</sup>是 HZSM-5

分子筛催化油酸转化为绿色烃类产品的反应路径, 由此可以看出, 分子筛催化裂化的主要产物是直链型和环状烷烃与烯烃、醛、酮、羧酸、水和气态产物。产物组分多、积炭严重、含氧组分高阻碍了其直接应用为液态燃料<sup>[21]</sup>。因此, 研究者们还需要继续探索高选择性的催化剂。

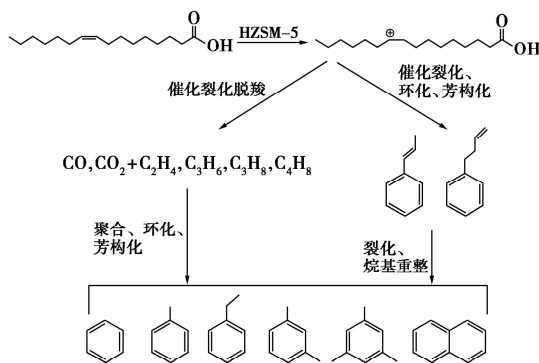


图 2 HZSM-5 分子筛催化油酸转化为绿色烃类产品的反应路径

### 2.3 催化加氢精制技术

催化加氢精制不同于催化裂化, 在反应过程中不会明显将原料裂解成低分子质量物质, 也是石油化工精炼中非常重要的工艺过程。近年来, 催化加氢精制在废油再生中也得到了广泛应用。通过加氢处理既可以对废油中的非理想组分进行脱除, 也可以将一些非理想组分转化为理想组分, 从而改变油品的基本性质, 获得需求的产品。由于废油不同于原油, 其中含有水分、杂质、添加剂等, 因而一般与其他净化技术结合运用, 如 HyLube 的蒸馏-加氢精制流程, 该工艺处理后的废润滑油可以达到高质量基础油的标准, 收率可达到 70%; 抚顺石油化工研究院采用自主研发的吸附剂联用加氢催化剂对废润滑油进行处理, 其回收率 85%<sup>[22]</sup>。中国石化<sup>[23]</sup>采用自主开发的硫化态金属催化剂对食用油等多种原料进行了加氢处理, 所得精制油的收率为 77% ~ 89%。这类油品的密度、闪点、冰点和沸程满足生物航煤 ASTM D 7566—11 标准要求。

加氢过程是一个气-液-固三相复杂的反应体系, 既有在催化剂表面上进行的反应, 又有催化剂颗粒间进行的热反应; 既有液-固反应, 又有气-固反应, 且催化反应包括 HDS、HDM、HDN 和加氢饱和等多种反应(图 3<sup>[24]</sup>)。

典型的加氢催化剂主要有 Ni、Co、W、Mo 等过渡金属及其合金、硫化物等。Pasadakis 等<sup>[25]</sup>评价了

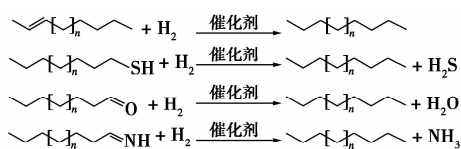


图 3 典型催化加氢反应

一系列载体 ( $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{ZrO}_2$ 、YSZ) 负载的 Ni/Mo、Co/Mo、Ni/W、Co/W 催化剂应用于废润滑油的加氢处理工艺。他们的研究重点集中于利用最少量的氢气脱除废油中的硫和芳香烃。其中,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  负载的 NiMo 催化剂具有最好的催化性能, 但耗氢量也最高; 而  $\text{ZrO}_2$  负载的催化剂加氢性能也不差, 但耗氢量明显少得多。Muntean 等<sup>[26]</sup> 采用原子层沉积和满孔浸渍法制得 Pd/ $\text{SiO}_2$ / $\text{AlO}_3$  催化剂, 将其与典型的 NiMo 或 CoMo 催化剂进行对比, 研究发现, Pd/ $\text{SiO}_2$ / $\text{AlO}_3$  对废润滑油进行加氢精制的温度明显降低; 核磁共振光谱表明, 原子层沉积制得的 Pd/ $\text{SiO}_2$ / $\text{AlO}_3$  具有更好的催化活性和选择性。Tiwari 等<sup>[27]</sup> 将介孔 Ni-W/ $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 Ni-Mo/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  2 类催化剂应用于废大豆油和精炼厂油的混合油, 其中, Ni-W/ $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  具有更好的催化裂化选择性, 可获得更多的煤油段产品; 而 Ni-Mo/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  的催化裂化能力较弱, 更适合进行加氢精制, 有利于将废油转化成内燃机油。Zhang 等<sup>[28]</sup> 采用水热合成法制得纳米结构的 CoMoS 催化剂, 并应用于餐饮废油的加氢精制再生工艺研究中。结果显示, 加氢脱羰基化 (HDC) 的活性是加氢脱氧 (HDO) 反应的 3 倍, 然而由于 CoMoS 中的硫在反应过程中逐渐损失, 导致催化剂的 HDC 失活较快。通过动力学模型研究表明, 餐饮废油中的脂肪酸通过形成醛/醇类中

表 2 负载型和非负载型催化剂加氢比较

油品	催化剂	加氢		裂化/聚合/	异构化率/
		温度/ $^{\circ}\text{C}$	$\text{C}_{18}/\text{C}_{17}$ 产率/%		
硬脂酸油	CoMoS/ $\text{Al}_2\text{O}_3$	250	1.7~2.0	14.1	—
	CoMoS/ $\text{Al}_2\text{O}_3$	250	1.7~2.0	80.6	—
菜籽油	CoMoS/ $\text{Al}_2\text{O}_3$	360	2.1	100	1.2/1.4 13.4
向日葵油	CoMoS/ $\text{Al}_2\text{O}_3$	300~450	1.0~2.3	100	2~22/ - 4~12
餐饮废油	CoMoS/ $\text{B}_2\text{O}_3$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$	35	1.5~3.0	—	—
	NiMoS/ $\text{B}_2\text{O}_3$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$	350	1.5~4.0	99.0	4.3 7.5
	CoMoS	375	0.6	65.0	11.1/7.9 <0.1

间物种, 进而最终获得  $\text{C}_{18}$  碳氢化合物。若选择具有路易斯酸的载体担载 CoMoS, 则可以选择性进行加氢脱氧反应, 获得高质量的生物柴油 (表 2<sup>[28]</sup>)。

### 3 废油资源化利用前景展望

综上所述, 随着化石能源日益短缺、全球环境问题的凸显以及废油资源化利用技术研究的推进, 传统再生工艺逐渐被淘汰, 催化加氢再生废油技术已经越来越受到各国重视。无论是工业废油还是餐厨废油, 它们含有水分、杂质、添加剂等非理想组分, 成分复杂多样, 从而导致其资源化利用方向的不确定性。因此, 除了针对不同性质的废油研制不同类型的催化剂之外, 还可以考虑将一些新兴处理技术与催化加氢相结合, 提高再生收率和产品附加值, 实现废油资源最大化利用。结合近几年废油再生技术的研究进展, 未来的重点研究发展趋势大体可归纳如下。

(1) 废油基础特性分析与监控。除了对废油及再生油进行常规的理化指标分析外, 还需要利用现代分析测试仪器 (GC-MS、HPLC-MS、ICP-MS、FT-IR、NMR、XRD、SEM、TEM、XPS 等) 对生产过程中每一阶段的产物及杂质进行分析研究, 搞清楚各组成成分、含量、物理化学性质以及可能存在的形成历程, 建立完善的分析测试方法, 为实现废油高效再生提供理论指导。

(2) 研制高性能、低成本的催化剂及制备技术。催化剂的主要研发方向是提高催化剂的活性、稳定性和机械强度, 减少催化剂用量和延长开工周期, 保证产品稳定。目前, 针对废油催化加氢, 许多催化剂都是选择催化原油的催化剂。尽管原油和废油具有许多相似点, 但是由于废油成分更加复杂, 组成不连续, 因而需要开发更适合废油催化加氢的催化剂。加氢催化剂的发展方向有: ①构建不同结构、形貌的催化剂; ②活性组分-载体一体化技术开发; ③抑制结焦技术; ④降低催化剂的生产成本和用量。

(3) 开展组合协同工艺技术, 提高废油转化效率。催化加氢工艺可与催化裂化、脱沥青质、胶质、馏分油加氢裂化、加氢处理或部分氧化制氢等工艺进行耦合, 通过整体优化、组合优化、工艺流程优化、产品方案优化及能量利用优化, 进一步提高废油资源的利用效率。

(4) 改进工艺流程, 上下游装置一体化。合理

选择分子蒸馏、膜处理、微波热解等装置与催化装置联合,共用循环,设置级间分离器,提高杂质脱除率和转化率,降低装置投资和操作费用,减少能耗。

(5) 选择性生产生物柴油和生物航煤。废油不同于原油,成分复杂、组成不连续,因此可以考虑通过催化裂化工艺裁剪废油,缩短油脂的碳链,并考虑拼接技术,在一个反应器里有效耦合碳数较低的进行脱氢过程和碳数较高的进行加氢反应,从而实现生物柴油和生物柴油段烃类化合物的生产。

### 参考文献

- [1] 谷庆宝,王禹,高丰,等. 废润滑油再生利用的现状与面临的问题[J]. 中国资源综合利用,2003,(7):11-16.
- [2] 尹英遂,冯明,黄卫星. 废润滑油再生分子蒸馏窄分技术应用研究[J]. 现代化工,2010,30(2):66-69.
- [3] 王鹏照,刘熠斌,杨朝合. 我国餐厨废油资源化利用现状及展望[J]. 化工进展,2014,33(4):1022-1029.
- [4] Kupareva A, Maki-Arvela P, Yu Murzin D. Technology for re-refining used lube oils applied in Europe: A review[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2013, 88(10):1780-1793.
- [5] 刘建锟,张忠清,杨涛,等. 废润滑油的再生工艺研究[J]. 当代化工,2013,39(5):490-492.
- [6] 冯全,王玉秋,吴桐. 废润滑油加氢再生工艺研究[J]. 石化技术与应用,2014,32(5):408-411.
- [7] 谢丽,赵敏,周政,等. 重烷基苯精馏釜底产物的脱色工艺研究[J]. 石油炼制与化工,2010,41(8):11-15.
- [8] Leung A, Boocock D G B, Konar S K. Pathway for the catalytic conversion of carboxylic acids to hydrocarbons over activated alumina[J]. Energy Fuels, 1995, 9:913-920.
- [9] Idem R O, Katikaneni S P R, Bakhshi N N. Catalytic conversion of canola oil to fuels and chemicals: Roles of catalyst acidity, basicity and shape selectivity on product distribution[J]. Fuel Processing Technology, 1997, 51:101-125.
- [10] Renzo F D, Fajula F. Introduction to molecular sieves: Trends of evolution of the zeolite community[J]. Studies in Surface Science and Catalysis, 2005, 157:1-12.
- [11] Twaiq F A, Zabidi N A M, Bhatia S. Catalytic conversion of palm oil to hydrocarbons: Performance of various zeolite catalysts[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1999, 38:3230-3237.
- [12] Katikaneni S P R, Adjaye J D, Bakhshi N N. Performance of aluminophosphate molecular sieve catalysts for production of hydrocarbons from wood-derived and vegetable oils[J]. Energy Fuels, 1995, 9:1065-1078.
- [13] Bhaskar T, Uddin M, Muto A, et al. Recycling of waste lubricant oil into chemical feedstock or fuel oil over supported iron oxide catalysts[J]. Fuel, 2004, 83(1):9-15.
- [14] Sinag A, Gulbay S, Uskan B, et al. Production and characterization of pyrolytic oils by pyrolysis of waste machinery oil[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 173:420-426.
- [15] Balat M. Diesel-like fuel obtained by catalytic pyrolysis of waste engine oil[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2008, 26(3):197-208.
- [16] Arpa O, Yumrutasm R, Demirbas A. Production of diesel-like fuel from waste engine oil by pyrolytic distillation[J]. Applied Energy, 2010, 87(1):122-127.
- [17] Permsubscul A, Vitidsant T, Damronglerd S. Catalytic cracking reaction of used lubricating oil to liquid fuels catalyzed by sulfated zirconia[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2007, 24(1):37-43.
- [18] Twaiq F A, Zabidi N A M, Bhatia S. Catalytic conversion of palm oil to hydrocarbons: Performance of various zeolite catalysts[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1999, 38:3230-3237.
- [19] Twaiq F A, Mohamad A R, Bhatia S. Performance of composite catalysts in palm oil cracking for the production of liquid fuels and chemicals[J]. Fuel Processing Technology, 2004, 85:1283-1300.
- [20] Benson T J, Hernandez R, White M G, et al. Research article heterogeneous cracking of an unsaturated fatty acid and reaction intermediates on HZSM-5 catalyst[J]. Clean, 2008, 36:652-656.
- [21] Degnan T F. Applications of zeolites in petroleum refining[J]. Topical in Catalysis, 2000, 13:349-356.
- [22] 熊道陵,杨金鑫,张团结,等. 废润滑油再生工艺的研究进展[J]. 化工进展,2014,33(10):2778-2784.
- [23] 聂红,孟祥堃,张哲民,等. 适应多种原料的生物航煤生产技术的开发[J]. 中国科学:化学,2014,44(1):46-54.
- [24] Lam S S, Liew R K, Jusoh A, et al. Progress in waste oil to sustainable energy, with emphasis on pyrolysis techniques[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53:741-753.
- [25] Pasadakis N, Yiokari C, Varotsis N, et al. Characterization of hydro-treating catalysts using the principal component analysis[J]. Applied Catalysis A: General, 2001, 207:333-341.
- [26] Muntean J V, Libera J A, Snyder S W, et al. Quantitative nuclear magnetic resonance spectroscopy as a tool to evaluate chemical modification of deep hydrotreated recycled lube oils[J]. Energy Fuels, 2013, 27, 133-137.
- [27] Tiwari R, Rana B S, Kumar R, et al. Hydrotreating and hydrocracking catalysts for processing of waste soya-oil and refinery-oil mixtures[J]. Catalysis Communications, 2011, 12:559-562.
- [28] Zhang H, Lin H, Wang W, et al. Hydroprocessing of waste cooking oil over a dispersed nano catalyst: Kinetics study and temperature effect[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2014, 150/151:238-248. ■