

地沟油生物柴油在发动机上的应用现状和发展趋势

李丽萍,何金戈

(海南大学机电工程学院,海口 570228)

摘要:通过对地沟油生物柴油的制备工艺、燃料特性、动力性、经济性、燃烧排放特性、使用现状以及发展前景进行综合分析,认为利用地沟油制备生物柴油具有良好的可再生性、具有与石化柴油相当的动力性、具有优于石化柴油的排放性,是实现地沟油资源化利用的有效途径。但是地沟油生物柴油在实际车用中仍有几个关键问题需要解决:制备过程不完善,黏度过高,燃烧排放中 NO_x 排放增加。解决上述问题有利于真正实现地沟油的经济效益、环境效益与社会效益。

关键词:地沟油生物柴油;石化柴油;代用燃料;发动机

中图分类号:TQ645;TK63

文献标志码:A

文章编号:1003-7969(2014)08-0052-05

Application status and development trend of cooking oil biodiesel in engine

LI Liping, HE Jing

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: The production techniques, fuel characteristics, dynamical and economical performances as well as emission characteristics, current situation of application and development prospect of cooking oil biodiesel were comprehensively analyzed. The results showed that cooking oil biodiesel had good renewability, comparative dynamical performance and better emission characteristics than fossil diesel, which was an effective way to achieve the recycling of cooking oil. However, several key problems needed to be solved in the application of cooking oil biodiesel in the car: unperfected preparation process, high viscosity, increasing emission of NO_x while burning. Solving above problems was beneficial to truly achieve the economic benefit, environmental benefit and social benefit of cooking oil.

Key words: cooking oil biodiesel; fossil diesel; alternative fuel; engine

地沟油是人们对各类餐饮废油提炼的劣质油的统称,一般包括泔水油、煎炸废油、食品以及相关企业的废弃油脂等^[1]。我国地沟油产量很大,约占食用油消费总量的20.0%~30.0%^[2],地沟油中的有毒有害物质会引起头痛、失眠、乏力、消化不良、肝区不适、贫血等症状,导致人体体重减轻和儿童发育障碍,严重者还可能出现中毒性肝病,诱发胃癌、肾癌及乳腺、卵巢、小肠等部位癌症^[2-3]。如果将地沟油

直接作为废弃物排放会造成环境污染,1 kg地沟油能使约15 000 m²水面富营养化^[4]。因此,为地沟油资源化利用找到合理的出路,是地沟油处理研究中亟待解决的问题。

目前,以动植物油脂为原料制备生物柴油的价格偏高,限制了生物柴油工业化的推广应用^[5]。而地沟油来源广泛,廉价易得,经过酯交换处理能够完全满足替代燃油的性能^[6]。以地沟油为原料制备生物柴油,一方面,充分实现了地沟油资源化利用,很大程度上降低了生物柴油的生产成本,促进了生物柴油的发展;另一方面,能有效防止地沟油进入食物链,损害人体健康,同时,也避免了地沟油污染水体环境。

为了进一步分析地沟油生物柴油与石化柴油的

收稿日期:2014-04-11

基金项目:海南省自然科学基金(512118)

作者简介:李丽萍(1992),女,在读本科,研究方向为汽车新型燃料(E-mail)lipingli@163.com。

通信作者:何金戈,副教授(E-mail)he.jing@163.com。

优劣,本文从地沟油生物柴油的制备工艺、燃料特性、动力性、经济性、燃烧排放特性、当前车用发动机中亟需解决的关键问题以及发展前景进行了综合全面的分析与研究。

1 地沟油生物柴油的制备工艺

目前,制备地沟油生物柴油主要采用酯交换法,包括酸催化法、碱催化法、酶催化法和无催化剂生产法^[2]。

酸催化法一般用路易斯酸(Lewis acids)和布朗斯台德酸(Bronsted acids)作为催化剂生产地沟油生物柴油,也有一些研究者在酯交换反应中使用无机酸(如硫酸、磷酸、磺化酸和盐酸等)直接和地沟油混合制备地沟油生物柴油。酸催化法的优点是酸催化剂和游离脂肪酸独立且不需要预处理过程,这使酸催化在游离脂肪酸含量超过2%的地沟油制备生物柴油的过程中成为更优的选择^[7]。

碱催化法采用的催化剂一般为NaOH、KOH、CH₃ONa、有机胺等。碱催化剂价格便宜且容易获取,但是碱催化过程能量消耗高,设备成本有所增加,另外,碱催化剂对原料中的水和游离脂肪酸非常敏感。在酯交换反应过程中,碱催化剂可以与原料中的游离脂肪酸反应生成皂,减弱了碱催化剂的活性^[8],导致脂肪酸甲酯产量减少。同时,甘油难以从脂肪酸甲酯中分离,产物黏度的增加和乳化剂的形成,在后续净化和脂肪酸甲酯回收中产生许多问题^[9]。

酶催化法利用脂肪酶将地沟油中的游离脂肪酸转化为脂肪酸甲酯。这种方法的优点很多^[10],如反应无副产物、产物容易转移、脂肪酶可重复利用且没有分离步骤、操作温度较低等。但是,脂肪酶的价格过于昂贵,脂肪酶对甘油的吸附以及反应时间长等因素^[11]大大限制了酶催化法制备地沟油生物柴油的工业化进程。

无催化剂生产法不需要催化剂,若要在相对较短时间内实现完全转化,需要高温和高压条件,这就急剧增加了设备和生产的成本,因此在实际应用过程中不适合大规模生产。

2 地沟油生物柴油的燃料特性

十六烷值(CN)是衡量柴油燃烧性能的重要指标。CN过低,燃料发火困难,发动机工作粗暴,CN过高,发动机冒黑烟,油耗增大,功率下降^[12]。地沟油生物柴油的主要成分是C16:0、C18:0、C18:1、C18:2等脂肪酸甲酯,CN与脂肪酸甲酯的碳链长度和双键数目有关。大量研究^[13-14]表明,地沟油生物柴油的CN随碳链长度的增加而增加,随双键数目的增加而减少。

黏度是衡量燃烧流动性能及雾化性能的重要指标。黏度过低,供油量减小,油压降低,发动机功率下降;黏度过大,流动性差,雾化困难,燃料燃烧受阻严重。相关研究^[15]表明,黏度随着碳链长度的增加而增大。地沟油生物柴油的碳链长度一般为14~20个碳原子,石化柴油为8~10个碳原子,因此地沟油生物柴油的黏度比石化柴油稍高,其低温流动性差^[16]。郑金明等^[16]发现将桐油生物柴油与地沟油生物柴油混合可以提高地沟油生物柴油的低温流动性。另外,酯化反应也能降低地沟油生物柴油的黏度,试验表明^[17],酯化反应后地沟油生物柴油的黏度从40 mm²/s下降到5 mm²/s。

热值是地沟油生物柴油应用于发动机的基本衡量指标,关系到发动机的动力性能,反映燃料的燃烧特性,热值越大,燃料完全燃烧时放出的热量越多。地沟油生物柴油属于含氧燃料,分子中含氧使地沟油生物柴油的热值降低10%左右,在燃烧过程中存在自供氧效应,减少了局部富氧与缺氧的概率,燃烧更均匀,提高了燃烧效率、热效率、刹车燃油消耗率及制动热效率^[18]。

氧化安定性与油品密切相关。地沟油生物柴油的氧化安定性较差,常温储存3个月以上,其过氧化值明显增大,油品品质下降,会出现发动机燃油滤清器堵塞、喷嘴结胶、燃烧室积炭、金属部件腐蚀、橡胶件和塑料件老化变脆等不良现象,干扰正常燃烧^[19]。有效的抗氧化剂能够抑制地沟油生物柴油中过氧化物的生成,从而提高其抗氧化性。文利柏等^[20]在抗氧化剂对地沟油生物柴油氧化安定性的影响研究中发现,在不加入任何抗氧化剂的条件下,地沟油生物柴油的氧化诱导期远小于EN 1424标准要求,BHT、PGA、CTA、V_E等抗氧化剂对地沟油生物柴油的氧化有一定抑制作用。

3 地沟油生物柴油在发动机上的应用

3.1 动力性

地沟油生物柴油的低热值略低于石化柴油,密度高于石化柴油,又因为地沟油生物柴油是含氧燃料,空燃比低于石化柴油,直接应用在发动机上,在体积循环供油量不变时,功率比燃用石化柴油略低^[21]。王钰等^[22]在地沟油生物柴油对发动机动力性试验中发现,燃用地沟油生物柴油后,柴油机的动力性浮动幅度为-0.45%~2.33%。楼狄明等^[23]发现燃用地沟油生物柴油时发动机的功率相对于石化柴油有小幅下降,降幅在2%左右。

3.2 经济性

与石化柴油相比,地沟油生物柴油较低的低热

值,使其有效燃油消耗率较低,燃用地沟油生物柴油时的油耗将略高于石化柴油^[24]。王钰等^[22]通过燃用地沟油生物柴油发现,燃油消耗增加了0.99%~4.59%,但实际上地沟油生物柴油的综合经济性能优于石化柴油。李军等^[25]运用GT-Power发动机仿真软件分析地沟油的燃烧特性,仿真结果表明,发动机燃用地沟油生物柴油时燃油消耗率比燃用石化柴油时增加了25%~30%。Opond等^[26]通过试验发现地沟油生物柴油的平均油耗为0.3804 kg/(kW·h),略高于石化柴油的0.3396 kg/(kW·h)。

3.3 燃烧排放特性

地沟油生物柴油与石化柴油的理化特性不同,因此地沟油生物柴油的燃烧特性与石化柴油有所区别,燃烧排放特性也有差异。与石化柴油类似,地沟油生物柴油的主要有害排放物包括CO、HC、PM(碳烟颗粒物)、NO_x。国内外大量研究^[27-28]表明,地沟油生物柴油在燃烧排放特性方面优于石化柴油,燃用地沟油生物柴油时,CO、HC和PM排放显著减少,但NO_x的排放略有增加。

3.3.1 CO、HC的排放

CO、HC排放产生的主要原因为燃烧过程中,燃料与空气混合不均匀,局部氧气过浓或过稀,导致混合气燃烧不完全。燃用地沟油生物柴油时,由于地沟油生物柴油黏度高、含氧量大,着火后有自供氧效应,缓解了燃油喷雾中高浓度区域的缺氧状况,燃烧性能好,促进了燃烧过程以及燃烧相位的提前,所以发动机燃烧地沟油生物柴油有利于降低CO、HC的排放。Meng等^[29]将B20、B50混合燃料(分别含20%、50%的地沟油生物柴油)在发动机中进行燃烧,试验结果表明,CO、HC分别下降了18.6%、26.7%。

3.3.2 PM的排放

PM是柴油机排放的主要污染物之一。PM主要是由于碳氢燃料不完全燃烧而产生的,一般来说,碳氢化合物生成PM由易到难的顺序为芳香烃>炔烃>烯烃>烷烃>醇>醚。地沟油生物柴油是含氧燃料,所以在燃烧过程中碳烟的裂解倾向减少,不易生成PM。而且,地沟油生物柴油较低的空燃比等因素也被认为能降低PM排放。洪瑶等^[24]通过对比试验分析了地沟油生物柴油与石化柴油的燃烧排放特性,试验结果表明,燃用地沟油生物柴油时,PM的排放下降了39.0%。

3.3.3 NO_x的排放

高温、富氧、较长的燃烧持续时间是产生NO_x排放的主要原因,其中高温是主要因素。地沟油生物

柴油的十六烷值高,着火延迟期短,着火后自供氧效应使得助燃作用显著,燃烧温度升高。另外,地沟油生物柴油的弹性模量较大,喷油时刻提前,由喷雾特性和燃烧特性分析,地沟油生物柴油在气缸内滞留时间长于石化柴油^[21],对比石化柴油燃烧过程,地沟油生物柴油在燃烧过程中形成了高温、富氧、较长的燃烧持续时间的条件,导致NO_x排放的增加。直喷式柴油机燃用含脂肪酸甲酯的燃料时,NO_x排放随脂肪酸甲酯含量的增加而升高,PM明显降低^[30],也有学者^[18]利用地沟油生物柴油与低硫石化柴油混合,燃烧含19.6%、39.4%、59.4%、79.6%的地沟油生物柴油(分别对应2%、4%、6%、8%的含氧量),试验结果表明,NO_x的排放增加。

3.4 车用发动机应用中亟需解决的关键问题

尽管地沟油生物柴油可以在发动机不做较大调整下直接应用,但是由于地沟油生物柴油是饱和脂肪酸甲酯和不饱和脂肪酸甲酯的混合物,与石化柴油有显著差异,目前地沟油生物柴油在实际车用中仍存在以下几个问题。

3.4.1 制备过程不完善

地沟油生物柴油的制备过程中,甲醇过多会导致生物柴油的闪点降低,同时还会增大橡胶试件的溶胀性,对酶反应活性及稳定性也存在负面影响。研究表明,硫、磷超标会对发动机产生影响并污染环境^[22]。虽然地沟油生物柴油中的硫含量很低,但是其酸值偏高,容易造成铜片腐蚀。地沟油生物柴油中的磷能够破坏汽车排放控制系统的催化转换器,造成催化剂中毒^[31]。因此,必须严格控制反应过程中甲醇、硫、磷的含量。

3.4.2 黏度过高

良好的雾化质量对于改善发动机动力性、经济性和排放性有重要意义。相关研究表明,可以通过以下几个途径降低地沟油生物柴油的黏度,从而改善雾化质量。

(1)向地沟油生物柴油中加入抗氧化剂。抗氧化剂的加入能够减轻地沟油生物柴油由于过氧化作用引起的黏度升高的问题。郑金明等^[16]通过研究抗氧化剂TBHQ(特丁基对苯二酚)、BHT(二叔丁基对甲酚)和BHA(丁基羟基茴香醚)对桐油-地沟油混合生物柴油氧化稳定性的影响发现,TBHQ抗氧化效果明显优于BHT和BHA,TBHQ能够延长混合生物柴油的氧化诱导时间且对混合生物柴油其他性能影响较小,TBHQ的加入可以减轻混合生物柴油由于过氧化作用引起的黏度升高问题。

(2)改变地沟油生物柴油与石化柴油的掺混比

例。地沟油生物柴油的黏度比石化柴油高,改变地沟油生物柴油与石化柴油的掺混比例可以降低地沟油生物柴油的黏度。张勇^[32]通过试验发现地沟油生物柴油与0[#]柴油按B20调和后,地沟油生物柴油的黏度降低,低温流动性也得到了改善。

(3)向地沟油生物柴油中加入甲醇、乙醇形成混合燃料。由于醇类燃料具有较高的含氧量和较大的汽化潜热,在汽化过程中吸收大量的热,气缸内温度下降,在一定程度上抑制了NO_x的生成。候令川等^[33]分析了地沟油生物柴油掺混甲醇对柴油机性能的影响,发现随着甲醇掺混比例的提高,地沟油生物柴油的黏度和十六烷值逐渐接近于石化柴油,含氧量由11%减少至4.9%。纪威等^[34]发现乙醇与地沟油生物柴油混合可以降低地沟油生物柴油的黏度,改善雾化性能。

(4)利用酯交换反应可以降低地沟油生物柴油的黏度。Zayed等^[35]在地沟油转化为生物柴油的酯交换反应中发现,地沟油生物柴油的黏度为5.86 mm²/s,相比于石化柴油,黏度下降了69.5%。

3.4.3 燃烧排放中NO_x排放增加

大量试验表明,地沟油生物柴油作为替代燃料应用在发动机上时,油耗以及NO_x的排放稍有增加,寻求有效方法提高燃烧效率及热效率,降低比油耗,改善排放效果对地沟油生物柴油在发动机上的应用有重要意义。

(1)在地沟油生物柴油中加入一定比例的水或石化柴油生成乳化地沟油生物柴油。陈镇等^[36]对比分析了微乳化地沟油生物柴油、0[#]柴油、地沟油生物柴油在柴油机燃烧时的排放特性,结果表明,一定含水量的微乳化地沟油生物柴油可以有效降低PM和NO_x的排放。Yasufumi等^[37]发现乳化地沟油生物柴油(30%水+70%地沟油生物柴油)能有效减少NO_x的排放,NO_x排放从1 100 mg/kg下降到400 mg/kg。Ikura等^[38]也发现地沟油生物柴油与石化柴油乳化能够降低其黏度。

(2)采用生物柴油添加剂(如抗氧化、防腐蚀、抗凝结等添加剂)。国外研究了金属基添加剂对有害废气排放减少的作用,其中镁基和钼基添加剂可以有效降低地沟油生物柴油燃烧时有害废气的排放,特别是NO_x排放的减少^[19]。

(3)将二甲醚与地沟油生物柴油混合。二甲醚具有比地沟油生物柴油更高的十六烷值,着火性能优良,使得气缸内的最高燃烧压力和最高燃烧温度下降,另外,二甲醚较大的汽化潜热也有助于降低缸内温度,抑制NO_x的排放。黄华^[39]在燃用二甲醚与地沟油生物柴油混合燃料(DME20)试验中发现,在10 kW负荷下,NO_x的排放下降26%左右。

(4)将地沟油生物柴油应用于HCCI燃烧模式和PCCI燃烧模式中。相关研究表明,柴油机在HCCI和PCCI范围内工作,可以减少NO_x与PM的排放。Ryan等^[40]对HCCI区域的燃烧作了介绍,采用低温富氧燃料燃烧技术对降低柴油机PM排放非常明显。

4 地沟油生物柴油的发展前景

与石化柴油相比,地沟油生物柴油不含导致环境污染的芳香族烷烃,含硫量低,含氧量高,点火性能好,燃烧时排烟少,一氧化碳的排放与石化柴油相比减少约10%。并且,地沟油价格低廉,资源充足,在生产技术上是可行的,经济竞争能力强,因此本研究认为地沟油生物柴油是当前石油资源日渐枯竭形势下最有前途、最有希望的替代燃料。利用地沟油制备生物柴油不仅实现了废物综合利用,也提供了一个高效、环境友好的能源。同时,地沟油的加工工艺和燃料特性决定了地沟油生物柴油未来的研究方向。

(1)由于地沟油成分复杂,纯度低,杂质多,导致地沟油生物柴油制备工艺的多样性和不确定性,因此应对地沟油进行预精制,加大科研投入,寻找更高效的催化剂以缩短反应时间,寻求地沟油生物柴油最优的制备工艺,包括简化工艺条件、工艺流程等。此外,新型反应器、新工艺的开发以及利用过程强化技术提高地沟油的转化率也是制备地沟油生物柴油未来的研究方向。

(2)加强对地沟油生物柴油燃烧特性的研究以及新型柴油机的开发设计。地沟油作为未来能源的替代油,来源、精炼程度、加工工艺、掺混比例、发动机的类型等都会影响生物柴油的燃烧特性。尽管大量试验表明,燃烧地沟油生物柴油不需要对原有的柴油发动机的结构以及燃料供给系统进行特殊改造,但是,本研究认为,高效的增压空气冷却、优化喷油器的喷射系统、新型柴油机的开发设计将会更有利于发挥地沟油生物柴油燃烧特性,提高其动力性和经济性。

参考文献:

- [1] 李臣,周洪星,石骏,等. 地沟油的特点及其危害[J]. 农产品加工,2010(6):69-70.
- [2] 杨静,朱毅,于新,等. 地沟油检测技术及资源化利用研究进展[J]. 中国食品学报,2013,13(6):185-190.
- [3] 张璇,余汉豪,单习章,等. 餐饮废油脂有害成分及特征指标研究[J]. 广州环境科学,2004,19(4):29-31.
- [4] 王翠云,康玲芬,蔡文春,等. 城市废弃油脂的综合利用及管理[J]. 辽宁城乡环境科技,2010(10):41-43.
- [5] 符太军,纪威,姚亚光,等. 地沟油制取生物柴油的试验研究[J]. 能源技术,2005,26(3):106-108.
- [6] 岳金方,左春丽,黄琴. 地沟油制备生物柴油的研究进展

- [J]. 广州化工, 2010, 38(12): 84-85.
- [7] LEPPER H, FRIESENHAGEN L. Process for the production of fatty acid esters of short - chain aliphatic alcohols from fats and/or oils containing free fatty acid: US, 4608202 [P]. 1986-08-28.
- [8] DEMIRBAS A. Biodiesel from waste cooking oil via base - catalytic and super - critical methanol transesterification [J]. *Energy Conv Manage*, 2009, 50(4): 923-927.
- [9] LIU Keshun. Preparation of fatty acid methyl esters for gas chromatographic analysis of lipids in biological materials [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 1994, 71(11): 1179-1187.
- [10] ROBLES M, GONZALEZ M P, ESTEBAN - CERDAN L, et al. Biocatalysis: towards ever greener biodiesel production [J]. *Biotechnol Adv*, 2009, 27(4): 398-408.
- [11] TALUKDE M M R, DAS P, FANG T S, et al. Enhanced enzymatic transesterification of palm oil to biodiesel [J]. *Biochem Eng J*, 2011, 55(2): 119-122.
- [12] 方利国, 林璟. 脂肪酸甲酯对生物柴油的十六烷值影响的研究 [J]. *化工新型材料*, 2008, 36(11): 94-96.
- [13] GERHARD K, ANDREW C, THOMAS W, et al. Cetane numbers of branched and straight - chain fatty esters determined in an ignition quality tester [J]. *Fuel*, 2003, 82: 971-975.
- [14] HARRINGTON K J. Chemical and physical properties of vegetable oil esters and their effect on diesel fuel performance [J]. *Biomass*, 1986, 9(1): 1-17.
- [15] DEMIRBA A. Fuel properties and calculation of high heating values of vegetable oils [J]. *Fuel*, 1998, 77: 1117-1120.
- [16] 郑金明, 刘慧, 苏玲燕, 等. 桐油 - 地沟油生物柴油混合燃料性能改善研究 [J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(2): 30-33.
- [17] ABUHABAYA A, FIELDHOUSE J, BROWN R. The effects of using bio - diesel as fuel on compression ignition (CI) engine and its production from vegetable oils [C]. 2011 International Conference on Environmental, Biomedical and Biotechnology, 2011: 41-46.
- [18] DI Yage, CHEUNG C S, HUANG Zuohua. Experimental investigation on regulated and unregulated emissions of a diesel engine fueled with biodiesel from waste cooking oil [J]. *Sci Total Environ*, 2009, 407: 835-846.
- [19] 胡以怀, 张华武, 杨少波, 等. 生物柴油在船用发动机上的应用探讨 [J]. *中国航海*, 2010, 33(3): 39-41.
- [20] 文利柏, 章欢, 王运, 等. 抗氧化剂对生物柴油氧化安定性的影响研究 [J]. *中国油脂*, 2010, 35(3): 43-45.
- [21] 陈昊, 祁东辉, 边耀璋. 喷雾特性对生物柴油燃烧和排放特性的影响 [J]. *交通运输工程学报*, 2009, 9(1): 40-43.
- [22] 王钰, 孙海洋, 王芳, 等. 酶催化地沟油生产的生物柴油的性能研究 [J]. *北京化工大学学报: 自然科学版*, 2007, 34(增刊 II): 111-113.
- [23] 楼狄明, 沈航泉, 胡志远, 等. 基于不同原料生物柴油混合燃料的发动机性能研究 [J]. *内燃机工程*, 2011, 32(1): 29-33.
- [24] 洪瑶, 陈文伟, 林美秀, 等. 地沟油生物柴油组成与燃烧排放特性研究 [J]. *广东化工*, 2010, 37(10): 18, 32.
- [25] 李军, 刘彪, 郭超, 等. 柴油发动机地沟油燃烧与排放特性仿真试验 [J]. *山东内燃机*, 2012(4): 31-34.
- [26] OPOND O, RAPHEAL N. Evaluation of transesterified waste vegetable oil for use as biodiesel fuel [D]. Nakuru: Egerton University, 2010.
- [27] XUE Jinlin. Combustion characteristics, engine performances and emissions of waste edible oil biodiesel in diesel engine [J]. *Renew Sust Energy Rev*, 2013, 23: 350-365.
- [28] ABDUL M, JON H, VAN G. The effect of biodiesel oxidation on engine performance and emissions [J]. *Biomass Bioenergy*, 2001(20): 317-325.
- [29] MENG X M, CHEN G Y, WANG Y H. Biodiesel production from waste cooking oil via alkali catalyst and its engine test [J]. *Fuel Processing Technol*, 2008, 89: 851-857.
- [30] 司利增, 边耀璋, 蔡永江. 柴油机燃用生物柴油的特性 [J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2006, 26(5): 83-85.
- [31] 张志沛. 汽车发动机原理 [M]. 辽宁 大连: 大连海运学院出版社, 2003.
- [32] 张勇. 利用地沟油制备生物柴油 [J]. *中国油脂*, 2008, 33(11): 48-50.
- [33] 侯令川, 王忠, 安玉光, 等. 柴油机燃用甲醇 - 生物柴油混合燃料的性能与排放研究 [J]. *车用发动机*, 2011(1): 30-33.
- [34] 纪威, 符太军, 周庄辉, 等. 柴油机燃用乙醇 - 柴油 - 生物柴油混合燃料的试验研究 [J]. *农业工程学报*, 2007, 23(3): 180-185.
- [35] ZAYED A H, JEHAD Y. Parametric study of the alkali catalyzed transesterification of waste frying oil for biodiesel production [J]. *Energy Conv Manage*, 2014, 79: 246-254.
- [36] 陈镇, 孙平, 石中光, 等. 柴油机燃用微乳化生物柴油的性能和排放研究 [J]. *小型内燃机与摩托车*, 2008, 37(2): 64-67.
- [37] YASUFUMI Y, MASUYUKI O, HIROYO T. Reduce of NO_x, smoke, and BSFC in a diesel engine fueled by biodiesel emulsion with used frying oil [C]//SAE Technical Paper 1999-01-3598, 1999.
- [38] IKURA M, STANCIULESCU M, HOGAN E. Emulsification of pyrolysis derived bio - oil in diesel fuel [J]. *Biomass Bioenergy*, 2003, 24(3): 221-232.
- [39] 黄华. 二甲醚 - 生物柴油混合燃料对柴油机性能与排放影响的试验研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2007.
- [40] RYAN T W, CALLAHAN T J. Homogeneous charge compression ignition of diesel fuel [C]//SAE Technical Paper 961160, 1996.