

# 废食用油生物柴油的制备及其掺烧时的动力与排放特性

葛蕴珊<sup>1</sup>, 陆小明<sup>1,2</sup>, 高力平<sup>1</sup>, 韩秀坤<sup>1</sup>, 冀星<sup>3</sup>

(1. 北京理工大学机械与车辆工程学院 北京 100081; 2. 集美大学机械工程学院, 厦门 361021; 3. 石油大学化工学院 北京 102200)

**摘要:**为了查明生物柴油对环境的影响以及废食用油制备的生物柴油对发动机性能和排放特性的影响,研究了生物柴油环境生命周期评价及其对环境的影响以及废食用油生物柴油的生产工艺流程,即甲醇与废食用油在催化剂作用下发生酯交换反应生产出生物柴油.所制备的生物柴油和柴油,按 20%和 50%掺混后在 2 台车用增压直喷式柴油机上进行了台架动力和排放特性的测试.试验结果表明,与柴油相比,掺混燃料的动力性和油耗率分别约有 3%的下降和 8%的上升,烟度、HC、CO 和 PM 排放降低幅度最大分别达 65%、11%、33%和 15%,而 NO<sub>x</sub> 排放有不同程度的上升.本研究表明,发动机燃用低比例的生物柴油掺混燃料,在发动机不作任何改动和调整时,可以在经济性、动力性和排放等方面取得令人满意的综合结果.

**关键词:**生物柴油;废食用油;生命周期;柴油机;排放

中图分类号:X382.1 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2005)03-0012-04

## Preparation of Biodiesel from Waste Edible Oils and Performance and Exhaust Emissions of Engines Fueled with Blends of the Biodiesel

GE Yun-shan<sup>1</sup>, LU Xiao-ming<sup>1</sup>, GAO Li-ping<sup>1</sup>, HAN Xiur-kun<sup>1</sup>, JI Xing<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. School of Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China; 3. School of Chemical Engineering, Petroleum University, Beijing 102200, China)

**Abstract:** The purpose of this study is to evaluate the effect of biodiesel on environment and to investigate the effect of the biodiesel made of waste edible oils on the performance and emissions of engines. Life cycle assessment (LCA) of biodiesel and diesel was introduced and the results of the LCA of both the fuels were given. The technological process of biodiesel production from waste edible oils, which is called transesterification of waste oils and methanol catalyzed with NaOH, was presented. Two turbocharged DI engines fueled with different proportions of biodiesel and diesel, namely, B50 (50% biodiesel + 50% diesel) and B20 (20% biodiesel + 80% diesel), were chosen to conduct performance and emission tests on a dynamometer. The results of the study indicate that there was a slight increase in fuel consumption by 8% and a drop in power by 3% with the blends of biodiesel, compared with diesel, and that the best improvements in emissions of smoke, HC, CO and PM were 65%, 11%, 33% and 13% respectively, but NO<sub>x</sub> emission was increased. The study also shows that it is satisfied to fuel engines with the low proportion blends of the biodiesel, without modifying engines, in performance and emissions.

**Key words:** biodiesel; waste edible oils; life cycle assessment; diesel engines; emissions

生物柴油是一种不含硫的代用燃料,生物柴油替代石油燃料使用,由硫化物产生的“酸雨”危害问题将得以改善.此外,生物柴油无毒,具有高的生物降解率,其短期生物降解率高达 90%以上<sup>[1]</sup>,所以可大大减轻意外泄漏时对环境的污染及影响.

从废食用油中制取生物柴油具有较高的经济效益并且还有较高的社会效益.国外早在 20 世纪 80 年代初就有生物柴油方面研究的报道.近 10 年来,国外学者对各种生物柴油(包括废食用油生物柴油)从发动机动力性、经济性、排放以及可靠性等方面进行了广泛而深入的研究.与矿物柴油相比,发动机燃用生物柴油,其烟度、HC、CO 和 PM 等排放下降,但

NO<sub>x</sub> 则有不同程度的上升<sup>[2~4]</sup>.

国内对生物柴油在发动机上的应用研究与国外相比差距较大<sup>[5~8]</sup>,对废食用油制取的生物柴油在发动机上的应用研究鲜见报道.本研究试图考察和研究生物柴油对环境的影响、废食用油制取生物柴油的方法以及废食用油制取的生物柴油发动机动力性和排放特性.从实际应用和无需改动或调整发动机角度出发,本研究采用废食用油制取的生物柴油

收稿日期:2004-06-18; 修订日期:2004-09-06  
基金项目:国家“十五”科技攻关计划项目(2003BA408B13);北京理工大学校内基础研究基金项目(200303E06).  
作者简介:葛蕴珊(1965~),男,工学博士,教授,主要研究方向为内燃机燃烧与排放、噪声与振动控制.

与柴油的掺混燃料来进行车用柴油机性能包括排放特性的研究。

### 1 生物柴油对环境的影响

评价一种燃料对环境的影响一般用生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA/ISO 14040/43)法。该方法是基于从燃料开始生产直到它完全氧化的全过程。例如对于菜籽生物柴油而言,包括农业(种植)、运输(菜籽到榨油厂和菜籽油到化工厂)、加工(酯化)、销售、贮存和最终使用等环节,来评估能耗与CO<sub>2</sub>及其它污染物的排放量。各国研究者在生物柴油环境生命周期评价方面已做了许多工作<sup>[9~11]</sup>。表1示出了生命周期评价法的能耗对比。能耗对比一般是以每生产1MJ燃料的总能耗和效率表示。由表1可见,2种燃料之总能耗与效率基本相近,但生物柴油的石油能消耗仅为0.311MJ,远低于柴油。由表2可知,温室气体CO<sub>2</sub>排放量B20和B100较柴油分别降低15.66%和78.45%。除了NO<sub>x</sub>外,生物柴油的其它污染物均有不同程度的下降。值得注意的是SO<sub>x</sub>的排放,虽然,发动机排气管中有害物硫排放极低,但在生物柴油生命周期中由于使用了甲醇、蒸汽和其它动力,SO<sub>x</sub>的排放只比柴油降低不到10%。

表1 不同燃料生命周期能耗的对比<sup>[12]</sup>/MJ

Table 1 Energy consumption comparison of different fuels life cycle<sup>[12]</sup>/MJ

燃料种类	每生产1MJ的 能耗	效率/%	每生产1MJ的 石油能消耗
柴油	1.2007	83.28	1.199
(大豆)生物柴油	1.2414	80.55	0.311

表2 不同燃料生命周期排放物的对比<sup>[9]</sup>/g·(kw·h)<sup>-1</sup>

Table 2 Emission comparison of different fuels life cycle<sup>[9]</sup>/g·(kw·h)<sup>-1</sup>

污染物	柴油	B20	B100
CH <sub>4</sub>	0.151318	0.150539	0.147422
NO <sub>x</sub>	3.736386	3.836156	4.235251
CO	0.947278	0.881914	0.620465
HC	0.185794	0.171285	0.113253
苯	3.16E-05	2.56E-05	1.37E-06
甲醛	0.000424	0.000342	1.85E-05
PM	0.159924	0.149558	0.108096
SO <sub>x</sub>	0.691046	0.679948	0.635554
CO <sub>2</sub>	472.4232	398.4416	101.7895

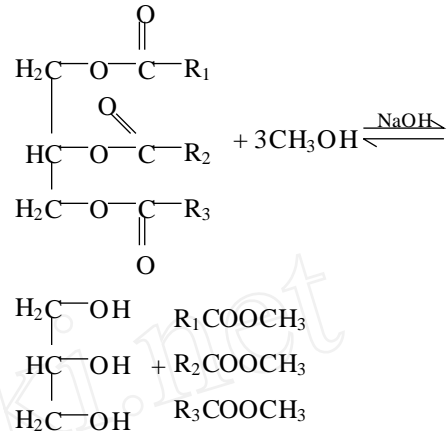
表2中原数据单位是g·(bhp·h)<sup>-1</sup>,已转换。

### 2 生物柴油的制备

#### 2.1 实验室生产原理

在NaOH的催化下,甲醇和废食用油的甘油三酯发生酯交换反应,得到脂肪酸甲酯和甘油。反应方

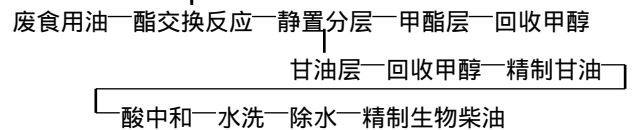
程式如下:



R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>是脂肪酸的烷基,可以相同也可以不同。

#### 2.2 实验室生产流程

流程: 甲醇 + 氢氧化钠



酸中和 — 水洗 — 脱水 — 精制生物柴油

实验室生产采用的具体反应条件: 催化剂NaOH的用量为废食用油的1%, 醇油摩尔比6:1, 反应温度为60℃, 反应时间为1h。但有几点值得注意: 为了获得高的脂交换率需要加有机溶剂; 当甲醇达到某个值时, 酯酶会失活; 反应时间较长。

对所制得的生物柴油进行检测分析, 其主要指标符合DIN 51.606标准。主要性能指标见表3。

表3 生物柴油和基准燃料主要特性指标

Table 3 Main Properties of test fuels

项目	生物柴油	0号柴油	低硫柴油
硫含量/%	0.0039	<0.035 <sup>1)</sup>	0.01
密度/kg·m <sup>-3</sup>	879.7	841.3	799.5
十六烷值	50.3	>45	51
低热值/MJ·kg <sup>-1</sup>	36.9	42	44

1) 北京公交车用优质柴油含硫量较低。

### 3 生物柴油发动机的性能试验

#### 3.1 发动机参数

本研究采用的发动机是2种进口车用发动机A和发动机B, 具体技术参数见表4。发动机未做任何改动和调整。

#### 3.2 试验方法、步骤及主要仪器

按“压燃式发动机和装用压燃式发动机的车辆排气污染物排放限值及测试方法(GB17691-2001)”规定的测量方法进行试验。A型发动机燃用0号柴油和B20; B型发动机燃用低硫柴油和B50。另外, 2台发动机还做了外特性试验。发动机排放物NO<sub>x</sub>、

HC、CO、PM 和烟度等用标准方法检测,其中 PM 按分流式稀释取样测量系统测量. 试验用主要仪器和设备有: 排气分析仪(Beckman)、烟度计 GSM-101(日)和微粒取样系统(BGI)

表 4 发动机主要技术参数  
Table 4 Specifications of engines

发动机	A. V 型增压中冷	B. 直列式增压中冷
气缸数	6	6
缸径/冲程/mm	132/145	104/113
排量/L	11.91	5.759
压缩比	17.0	17.0
额定功率/kW	300(2100r/min)	122/(2400r/min)
最大扭矩/N·m	1909(1200r/min)	550/(1600r/min)

### 4 试验结果与分析

#### 4.1 动力性和经济性的比较

图 1~3 分别示出了 2 台发动机燃用不同燃料的经济性和动力性的对比. 由图 1 可知,燃用 B50 发动机的扭矩在 1 000~2 400r/min 范围内普遍较柴油的低,最大降幅达 2.6%;而油耗率较柴油则上升了 3.6%~8.3%. 造成生物柴油发动机燃油消耗率上升和动力性能下降的原因是生物柴油燃料热值较柴油低,因此,在油泵齿条位置相同的条件下,喷入燃烧室的燃油燃烧放出的热较少.

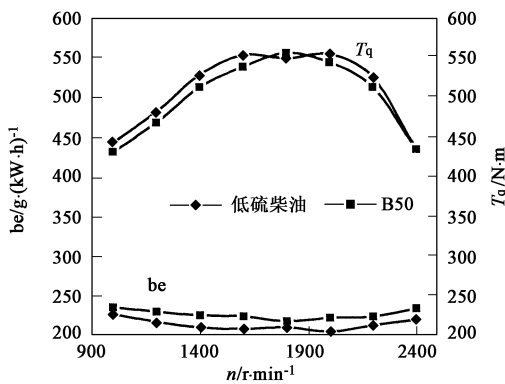


图 1 发动机 B 外特性扭矩和油耗率对比  
Fig. 1 Torque and fuel consumption comparison of speed characteristic at full load of engine B

由图 2 中发动机 B 1 700r/min 负荷特性曲线可知,除了最小负荷处外,燃用 B50 耗油率上升了 4.2%~8.6%;而发动机 A,如图 3 所示,在 2 100r/min 负荷范围内燃用 B20 时,耗油率上升不到 3%. 因此,B20 掺烧对发动机的经济性和动力性影响很小.

#### 4.2 排放特性的比较

图 4~6 示出了发动机 B 燃用低硫柴油和 B50 外特性的排放对比.

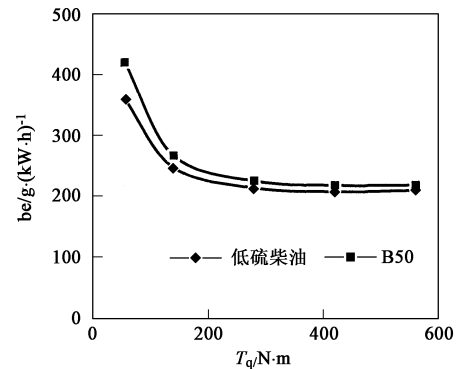


图 2 发动机 B 1700r/min 负荷特性油耗率对比  
Fig. 2 Fuel consumption comparison of load characteristic of engine B at 1 700r·min<sup>-1</sup>

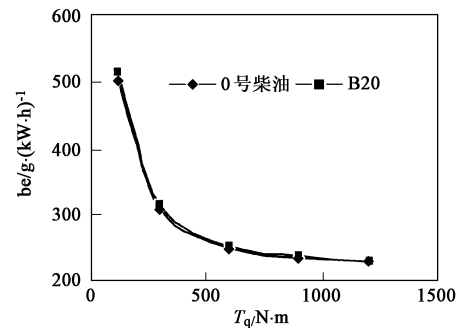


图 3 发动机 A 2100r/min 负荷特性油耗率对比  
Fig. 3 Fuel consumption comparison of load characteristic of engine A at 2100r·min<sup>-1</sup>

从图 4 可以看出,在整个外特性范围内燃用 B50 发动机 HC 排放较柴油有大幅度的降低,降幅达 25%~33%,特别是在低速区,HC 排放降低显著,这表明含氧的生物柴油燃料可以有效地改善柴油机的低速燃烧过程. 而 NO<sub>x</sub> 排放有不同程度的上升,达 3%~10%,其中有一点增加了 44%. 图 5 表示 2 种燃料发动机 B 外特性 CO 排放的排放差别不大. 但从表 5 的 13-工况法试验结果看,发动机 B CO 下降 11%;而发动机 A 13-工况法的 CO 排放下降约 8%. 由此可见,这对于频繁变工况的车用发动机,燃用生物柴油更有利于 CO 排放总量的降低. 图 6 示出了发动机 B 外特性烟度的对比. 由图 6 可见,烟度下降幅度非常显著,达 36%~65%,在低速区烟度的降低尤为突出,因此,燃用生物柴油可以有效地降低柴油机低速大负荷的烟度. 从表 5 中数据来看,燃用 B50 的发动机 B 13-工况 NO<sub>x</sub> 增加 27%,燃用 B20 的发动机 A 则增加 7%.

从表 5 可以看出,生物柴油发动机 PM 排放降低明显. 与 0 号柴油相比,燃用 B20 发动机 A 的 PM 排放降低了 13%;燃用 B50 发动机 B PM 排放较低

硫柴油降低了 12%。表 5 中, 燃用 B20 发动机 A 的 HC 排放结果反而高于柴油。这是因为柴油机的 HC 生成机理复杂以及 HC 排放量很小, 所以在生物柴油掺混比例较低时容易产生结果波动, 需将进一步对此做深入的试验和研究。

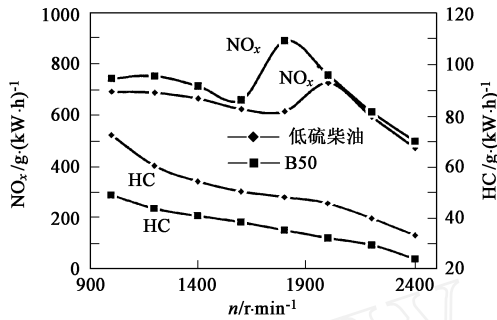


图 4 发动机 B 外特性 NO<sub>x</sub> 和 HC 对比

Fig. 4 NO<sub>x</sub> and HC comparison of speed characteristic at full load of engine B

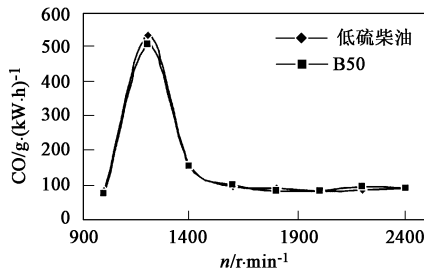


图 5 发动机 B 外特性 CO 的对比

Fig. 5 CO Comparison of speed characteristic at full load of engine B

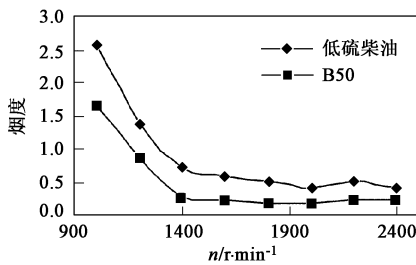


图 6 发动机 B 外特性烟度的对比

Fig. 6 Smoke comparison of speed characteristic at full load of engine B

表 5 按国家标准 GB17691-2001(13-工况法)测量的排气污染物对比/g·(kW·h)<sup>-1</sup>

发动机	燃料	CO	HC	NO <sub>x</sub>	PM
A 型	0 号柴油	1.57	0.14	3.80	0.23
	B20	1.45	0.15	4.06	0.20
B 型	0 号低硫柴油	0.82	0.17	4.85	0.17
	B50	0.73	0.12	6.18	0.15

## 5 结论

(1) 发动机燃用废食用油制备的 B20 和 B50 时, 发动机的油耗率和动力均有不同程度的上升和下降, 但幅度不大, 分别约 8% 和 3%。

(2) 按国标 GB17691-2001 法测量, 燃用 B20 和 B50 时, 发动机微粒 PM 分别下降 13% 和 12%; CO 排放分别降低 8% 和 11%; NO<sub>x</sub> 排放分别上升 7% 和 27%。燃用 B50, HC 排放下降 29%。燃用 B20 时 HC 排放增加的结果有待进一步查明。

(3) 按外特性试验, 发动机烟度下降 36% ~ 65%; HC 下降 25% ~ 33%; CO 排放差别不大, 而 NO<sub>x</sub> 排放有不同程度的上升。

### 参考文献:

- [1] Körbitz W. Biodiesel Production in Europe and North America, an Encouraging Prospect [J]. Renewable Energy, 1999, 16: 1078 ~ 1083.
- [2] Dorado M P, Ballesteros E, Arnal J M, et al. Exhaust emissions from a diesel engine fueled with transesterified waste olive oil[J]. Fuel, 2003, 82: 1311 ~ 1315.
- [3] Yukio Akasaka, Teruo Suzuki, Yoshihito Sakurai. Exhaust Emissions of a DI Diesel Engine Fueled with Blends of Biodiesel and Low Sulfur Diesel Fuel. SAE 972998.
- [4] Robert J Last, Michael Krüger, Manfred Dürholz. Emissions and Performance Characteristics of a 4-Stroke, Direct Injected Diesel Engine Fueled with Blends of Biodiesel and Low Sulfur Diesel Fuel SAE 950054.
- [5] 葛蕴珊, 李晓, 吴思进, 等. 餐饮废油制生物柴油的排放特性研究[J]. 北京理工大学学报, 2004, (4): 290 ~ 293.
- [6] 葛蕴珊, 信建民, 吴思进. 增压柴油机燃用生物柴油的排放特性研究[J]. 燃烧科学与技术, 2004, (2): 125 ~ 129.
- [7] 银南, 江清阳, 孙平, 等. 柴油机燃用生物柴油的排放特性研究[J]. 内燃机学报, 2003, (6): 423 ~ 427.
- [8] 袁文华, 龚金科, 苏明华, 等. 生物柴油的研制[J]. 邵阳学院学报(自然科学版), 2004, (1): 61 ~ 63.
- [9] Sheehan John, Vince Camobreco, James Duffield, et al. Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus [R]. National Renewable Energy Laboratory, 1617 Cole Boulevard golden, CO80125, US, 1998.
- [10] Lester B Lave, MacLean H, Lankey R, Joshi S, McMichael F, Horvath A, Hendrickson C. Life Cycle Inventories of Conventional and Alternative Automobile Fuel/ Propulsion Systems: Summary and Conclusions [A]. SAE Total Life Cycle Conference and Exposition [C]. Detroit, Michigan, 2000. 1504 ~ 1513.
- [11] 张包钊, 郭凤华. 低污染可再生生物柴油的商业化进展[J]. 能源工程, 2002, (1): 35 ~ 39.
- [12] Schramm J, Foldager I, Olsen N. Emissions from a Diesel Vehicle Operated on Alternative Fuels in Copenhagen [A]. Fall 1999 SAE Fuels & Lubricants Meeting papers [C]. Warrendale, PA, USA 1999. 3603 ~ 3611.
- [13] 刘治中, 许世海, 姚如杰. 液体燃料的性质及应用 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2000. 346 ~ 348
- [15] 何学良, 詹永厚, 李疏松. 内燃机燃料 [M]. 北京: 中国石化出版社, 1999. 428 ~ 429.