

推进特性试验下生物乳化柴油对柴油机性能的影响

范韵楚, 余 凯, 刘 宇, 金志伟, 朱成玮, 肖 进

(上海交通大学动力机械及工程教育部重点实验室, 上海 200210)

摘 要: 在柴油机上进行柴油、三种生物乳化柴油(E10、E15 和 E20)和生物柴油的推进特性试验, 就其燃烧特性、动力性、经济性、及常规排放特性进行对比。试验结果显示:高转速时,生物乳化柴油的缸内燃烧压力和放热率略低于柴油,缸内燃烧温度有所降低;动力性相比柴油略有下降,仅 E10 的燃油消耗率比柴油低,B100 最高;烟度和 NO_x 排放均有显著降低,且随水和丁醇掺混比例增加而降低;CO 和 HC 排放与柴油基本无差别,整体增加不多。表明:生物乳化柴油作为替代燃料能保证柴油机运行的稳定性,可同时降低柴油机的烟度和 NO_x 排放,具有良好的环境效益和经济效益。

关键词: 生物乳化柴油;推进特性;试验;排放;经济性

中图分类号:TK421⁺.5 文献标识码:A 文章编号:1001-4357(2019)01-0016-06

The Effect of Bio-Emulsified Diesel on Diesel Engine Performance Under the Propulsion Characteristic Test

Fan Yunchu, Yu Kai, Liu Yu, Jin Zhiwei, Zhu Chengwei, Xiao Jin

(Ministry of Education Key Laboratory of Power Machinery and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200210)

Abstract: Diesel fuel, three kinds of bio-emulsified diesel (E10, E15, E20) and biodiesel were tested on a diesel engine under the propulsion characteristic condition. The combustion characteristic, power, economic, and emission characteristics of these five fuels were compared with each other. The results show that at full load, the combustion pressure and heat release rate of bio-emulsified diesels are slightly lower than that of diesel and the combustion temperature in the cylinder decreases, the power performance has a slight decrease compared with diesel. Only E10 has a lower fuel consumption rate than diesel, and B100 is the highest. NO_x emission and the smoke value decreased significantly as the mixing proportion of water and butanol increased. The CO and HC emissions of bio-emulsified diesels are basically indistinguishable from diesel, and the overall increase is not much. It can be concluded that as an alternative fuel, bio-emulsified diesel can guarantee the stability of diesel engine, and meanwhile reduce the smoke and NO_x emission, which has good environmental and economic benefits.

Key words: bio-emulsified diesel; propulsion characteristic; test; emissions; economic performance

0 引 言

柴油机因其热效率高、经济性好、可靠性高等优点被广泛应用于汽车、船舶、工程机械等领域^[1]。

但随着石油资源的日益紧缺和生态环境的不断恶化,传统柴油机的应用遇到了很多难题。如何在不改变现有柴油机结构的条件下,有效降低燃料消耗和减少污染物排放成为当前研究的重点之一。

收稿日期: 2018-05-11; 修回日期: 2018-08-07

基金项目: 上海市科学技术委员会项目“生物乳化柴油在船用柴油机上的应用研究”(16DE1203100)。

作者简介: 范韵楚(1994-),女,硕士在读,主要研究方向为内燃机替代燃料的燃烧、排放及抗爆性, fanyunchu@sjtu.edu.com。

生物柴油因来源广泛、物理性能与柴油相近、环保、可直接在柴油机上燃用等优点，可被用作柴油的替代燃料。我国每年餐厨废油产量达 250 多万吨，以其为原料生产生物柴油不仅可消除地沟油重返餐桌的食品安全隐患，同时也有利于解决我国的能源紧缺问题。

近年来，有研究人员在内燃机上进行了大量生物柴油的燃烧特性试验，结果表明：在柴油机上燃用生物柴油或掺烧生物柴油可以降低 HC、CO 和烟度排放，但 NO_x 排放依然高居不下^[2,4]。

早在 1913 年，剑桥大学的 Hopkinson 教授提出：将柴油与水及一定量的乳化剂按一定比例混合可制得乳化柴油。国内外不少学者进行了大量乳化柴油的试验，结果表明：燃用乳化柴油可以显著降低 NO_x、碳烟等的排放，改善排放特性^[5]。

丁醇因其亲水性好、热值和十六烷值高、蒸汽压低和较好的混溶性等优点，成为一种理想的生物燃料。近年来，大量研究表明：丁醇作为添加剂可降低烟度、CO 和 NO_x 的排放^[6]。

本研究在前人关于乳化柴油燃烧机理的研究基础上，将以餐厨废弃油为原料制成的生物柴油、乳化剂、水、丁醇和柴油混合，形成 5 种不同配比的乳化柴油，并在柴油机上进行对比试验，研究柴油机燃用乳化柴油的性能和排放；在保证稳定运行的基础上，寻求提高经济性、改善排放特性的方法。

1 试验条件与内容

1.1 试验燃料

本试验所用燃料均由上海纽孚尔能源技术有限公司制备并提供。试验油品分别为柴油（D）、生物柴油（B100）、生物乳化柴油 E10、E15、E20。柴油（D）为国五柴油；生物柴油（B100）以动植物脂肪和餐厨废弃油为原料制备；生物乳化柴油 E10、E15、E20 以柴油为原料，按不同的质量分数掺混水、乳化剂、丁醇、生物柴油制备而成，并根据燃料中除去柴油部分的质量分数分别记为 E10、E15、E20。各种燃油的组成成分及部分特性见表 1、2。

表 1 燃油油品组分

油品	D	B100	E10	E15	E20
D	100%	0	90%	85%	80%
B100	0	100%	4%	5%	6%
水	0	0	4%	6%	8%
丁醇	0	0	0.5%	1%	2%
乳化剂	0	0	1.5%	3%	4%

表 2 燃油油品特性

油品	D	B100	E10	E15	E20
净热值/ (MJ · kg ⁻¹)	42.79	38.41	39.465	39.385	39.295
运动黏度 (20℃) / (mm ² · s ⁻¹)	3.938	7.216	5.658	5.721	6.026
密度 (20℃) / (kg · m ⁻³)	833.5	876.3	840.2	840.9	843.0

1.2 试验装置

本实验用柴油机为潍柴动力股份有限公司生产的 WP6.240 柴油机。试验中对柴油机未做任何改动。该型柴油机具体技术参数见表 3。

表 3 试验用柴油机技术参数

型式	直列、水冷、四冲程、增压 中冷、直喷 2 气门、 湿式气缸套
缸数－缸径×行程/ (mm×mm)	6-105×120
压缩比	18:1
总排量/L	6.23
额定功率/kW	132
额定转速/ (r · min ⁻¹)	2 300
最大扭矩/ (N · m)	650
最大扭矩转速/ (r · min ⁻¹)	1 400 ~ 1 600
发动机最高允许转速/ (r · min ⁻¹)	2 472
发火顺序	1-5-3-6-2-4
起动方式	电起动
喷射系统	电控高压共轨
排气温度/℃	≤550

1.3 试验工况

船用主机推进特性试验按照标准 ISO8178 的 E3 模式进行。按柴油机额定转速 $n_{rated} = 2\,300$ (r · min⁻¹) 处的最大输出功率 $P_{e,max}$ 来确定 E3 模式各工况点的输出功率；再计算出柴油机转速分别为 63% n_{rated} 、80% n_{rated} 、91% n_{rated} 、100% n_{rated} 时的推进特性工况，如表 4；进而分别测定燃用柴油、生物柴油、生物乳化柴油（E10、E15、E20）时的油耗，及尾气中的 NO_x、烟度、HC、CO 含量，从而比较燃用柴油和生物乳化柴油性能上存在的差别。

表 4 E3 模式的转速、功率和加权因子

E3 模式	1	2	3	4
功率	100%	75%	50%	25%
功率/kW	132	99	66	33
转速	100%	91%	80%	63%
转速/ (r · min ⁻¹)	2 300	2 093	1 840	1 449
加权因子	0.2	0.5	0.15	0.15

2 试验结果

2.1 燃烧特性

2.1.1 缸压

图1为5种燃油在推进特性试验下的缸压曲线。从图中可以看出:5种燃油的最大缸压都出现在上止点后10°CA附近,其中B100的缸压峰值最低,其他4种燃料的缸压曲线非常接近,柴油的缸压峰值最大。因生物柴油的热值低且黏度高,雾化质量差,因此缸压峰值最小。而生物乳化柴油中的水在燃烧过程中产生微爆作用,改善了燃料的雾化和混合效果,促进了燃烧进程,从而使缸压升高。

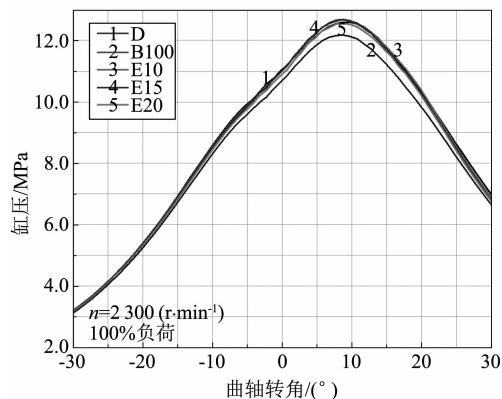


图1 2300 (r·min⁻¹)、100%负荷下的缸压曲线

2.1.2 放热率

图2为5种燃油在推进特性试验下的放热率曲线。本试验中柴油机的5个工况都设定了预喷,主喷时刻是上止点前3.15°CA,预-主喷间隔为15°CA。放热率曲线显示:E10的放热率峰值最高;E15、E20的与E10的接近;柴油的比E10的低约2.8%,B100的放热率峰值最低。

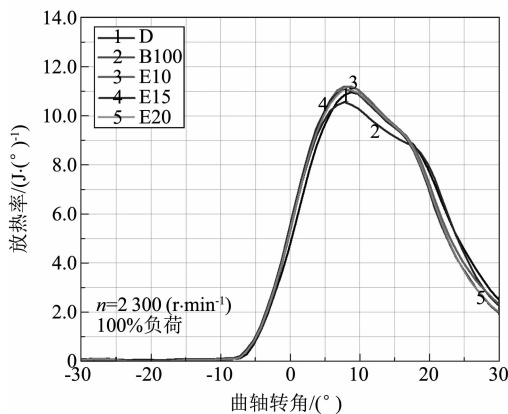


图2 2300 (r·min⁻¹)、100%负荷下的放热率曲线

2.1.3 缸内燃烧温度

用计算得到的缸内气体平均温度来表征缸内燃

烧温度,取燃烧分析仪中100个循环的平均值代表各工况下的缸内燃烧温度。图3为5种燃油在推进特性试验下的缸内燃烧温度曲线。可以明显看出:B100的燃烧温度最高,生物乳化柴油的燃烧温度低于柴油,且随水和丁醇掺混比例增大而降低。因生物乳化柴油中含有水和丁醇,一方面水的汽化潜热大,蒸发时吸收的热量多,因此会降低燃烧温度;另一方面丁醇的热值较柴油低,饱和蒸气压高,也会降低燃烧温度。

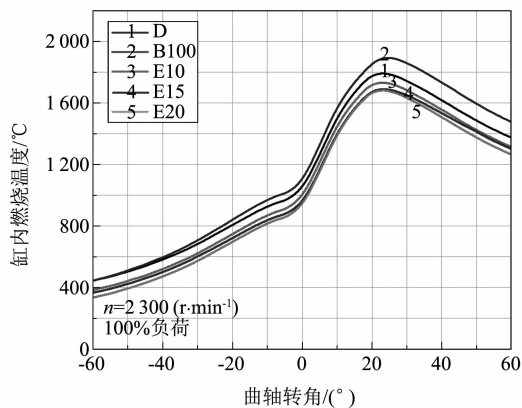


图3 2300 (r·min⁻¹)、100%负荷下的缸内燃烧温度曲线

2.2 动力性

图4为5种燃油在推进特性试验下的有效功率曲线。与柴油相比:E10、E15、E20和B100的输出功率都略有降低,但在中低负荷时与柴油的相差不大。其中:B100最低,在 $n=2300$ (r·min⁻¹)时较柴油降低了9.09%;E10、E15和E20较柴油依次降低2.27%、7.31%和8.21%。根据燃油热值(表2),因E10、E15、E20和B100的热值均低于柴油,因此相同工况下生物乳化柴油的输出功率低于柴油。

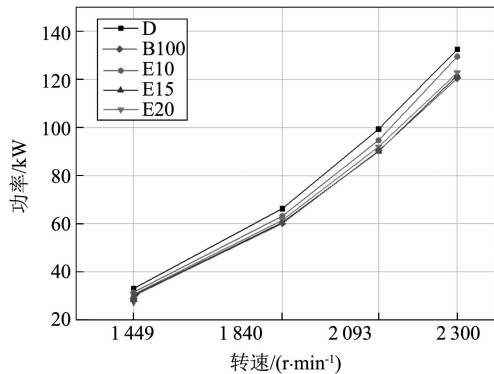


图4 推进特性试验下的有效功率

2.3 经济性

图5是5种燃油在推进特性试验下的有效燃油

消耗率 (BSFC)。图 6 为加权平均后的 BSFC。从图 5 中可以看出: 随转速的增大, 5 种燃油的 BSFC 均呈先降低后升高的趋势, 其中 B100 的 BSFC 最高, E10 的最低。与柴油相比, 在 $n = 2\,300 \text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$ 时, E15、E20 和 B100 的加权平均 BSFC 分别上升 1.46%、5.34%、9.65%; E10 的 BSFC 比柴油的略微降低, 加权平均降低 1.65%。表明生物乳化柴油的 BSFC 有随水和丁醇掺混比例增大而上升的趋势。

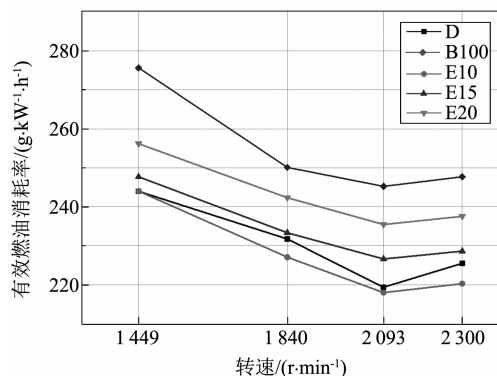


图 5 推进特性试验下的有效燃油消耗率

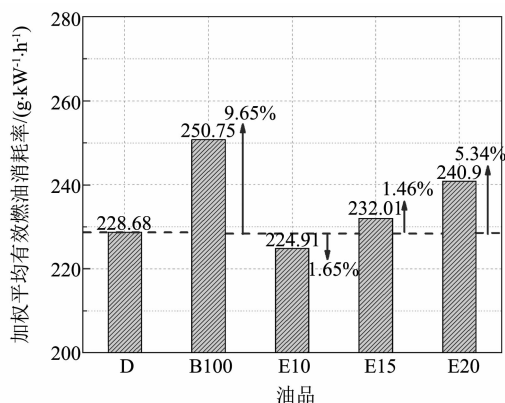


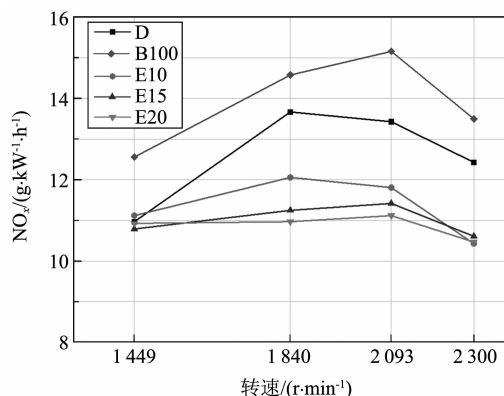
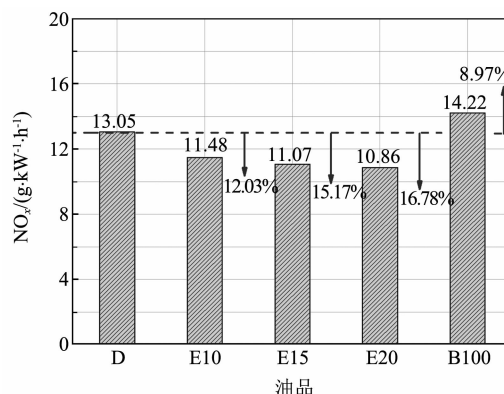
图 6 推进特性试验下的加权平均有效燃油消耗率

2.4 排放特性

2.4.1 NO_x

图 7 为 5 种燃油在推进特性试验下的 NO_x 排放, 图 8 为加权平均后的 NO_x 排放。从图 7 中可以看出: 5 种燃油的 NO_x 排放均随转速升高呈先增加后减小的趋势; 除 B100 外, 生物乳化柴油的 NO_x 排放均在各工况下均低于柴油。因生物柴油 B100 是含氧燃料, 在燃烧过程中起到了助燃作用, 燃烧温度高, 在柴油机结构不改变的情况下, 燃烧时的富氧会导致 NO_x 排放增加^[7]。与柴油相比, E10、E15 和 E20 的加权平均 NO_x 排放依次降低 12.03%、15.17%、16.78%。掺混水和丁醇后, 生物乳化柴油的 NO_x 排放都有所降低, 且随掺混

比例的增大降低得越多。一方面, 水的汽化潜热值高, 在燃烧过程中汽化吸热, 从而降低缸内燃烧温度, 因此能够有效降低 NO_x 排放量; 另一方面, 丁醇热值低, 饱和蒸气压高, 亦能降低柴油机的缸内温度, 进而降低 NO_x 排放量。

图 7 推进特性试验下的 NO_x 排放图 8 加权平均后的 NO_x 排放

2.4.2 烟度

图 9 是 5 种燃油在推进特性试验下的烟度排放, 图 10 为加权平均后的烟度排放。从图中可以看出: 随着转速的升高, 烟度排放也逐渐增加, 在中高速时, 烟度排放急剧增加; 其中 B100 最低, 加权烟度较柴油降低 80.73%。一方面是因为生物柴油中芳香烃含量较少, 因此烟度降低^[8]; 另一方面是生物柴油高温富氧条件下燃烧强化的结果。E10、E15、E20 的加权烟度排放较柴油依次降低 48.88%、66.48%、76.82%, 也即, 随着生物乳化柴油中掺混水、生物柴油、丁醇及乳化剂比例的增大, 烟度排放降低显著。因掺混丁醇后, 燃油氧含量增加, 改善了燃烧性能, 碳烟降低; 掺混水后, 产生了微爆作用, 火焰温度降低, 雾化质量改善, 燃烧优化, 碳烟排放降低^[9]。低转速时生物乳化柴油烟度降低较柴油的不明显, 主要是因为低转速时乳化生物柴油燃烧较差。

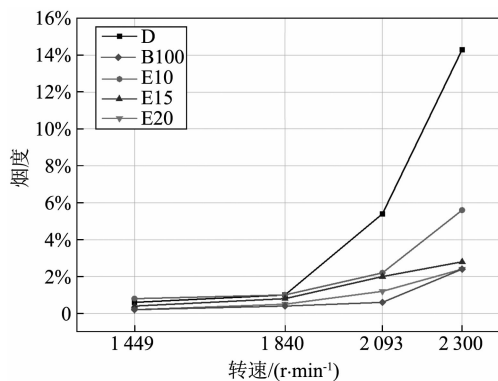


图 9 推进特性试验下的烟度排放

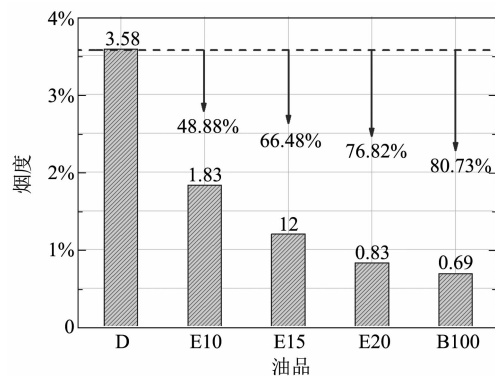


图 10 加权平均后的烟度排放

2.4.3 HC

图 11 是 5 种燃油在推进特性试验下的 HC 排放，图 12 为加权平均后的 HC 排放。从图中可以看出：与柴油相比，B100 的 HC 排放降低，E10、E15 和 E20 的 HC 排放均在柴油之上。E10、E15 和 E20 的 HC 排放量虽增加，但由于柴油机燃烧过程中 HC 的排放已很低，虽然增加的相对量很大，但绝对含量仍然非常小，故可以忽略乳化生物柴油和柴油 HC 排放对环境的影响。

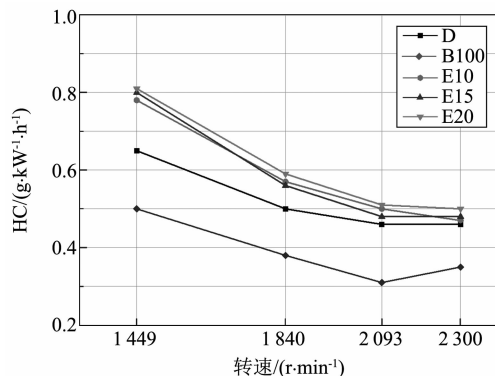


图 11 推进特性试验下的柴油机 HC 排放

2.4.4 CO

图 13 是推进特性试验下 5 种燃油的 CO 排放，图 14 为加权平均后的 CO 排放。5 种燃油的 CO 排

放量均随转速的增大呈先减少后增加的趋势。在低转速时，掺混的水和丁醇含量越大，缸内燃烧温度越低，不完全燃烧产生的 CO 越多；随着转速增大，缸内燃烧温度增大，CO 排放减少，但高转速时混合气过浓，促使 CO 生成。由图 14 可以看出，它们的加权平均值并无太大差别。

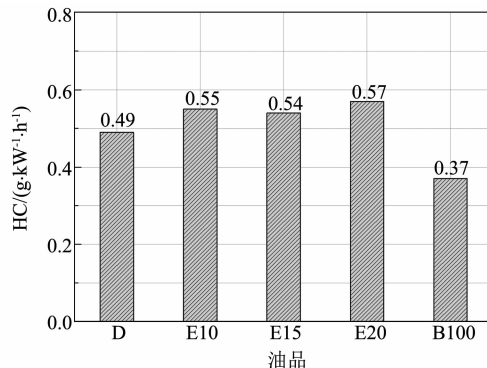


图 12 加权平均后的 HC 排放

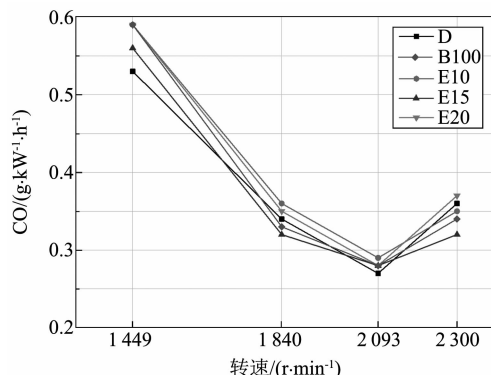


图 13 推进特性试验下的 CO 排放

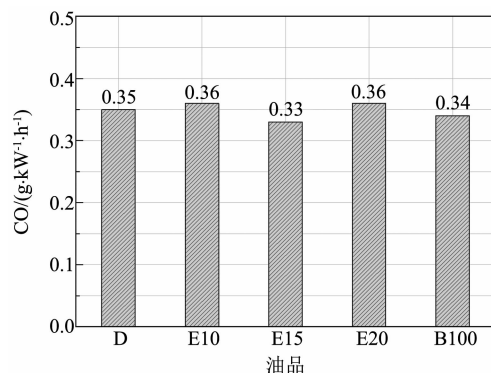


图 14 加权平均后的 CO 排放

3 结论

1) 燃烧特性：满负荷下，B100 的缸压和放热率曲线均最低，乳化生物柴油的缸压与柴油相差不大，放热率曲线随着水、丁醇、B100 和乳化剂掺混比例的增大而降低，且都在柴油之上。 $n = 2300$

($r \cdot \min^{-1}$) 时, 生物柴油的燃烧温度最高, 柴油次之, 生物乳化柴油的燃烧温度随水和丁醇掺混比例增大而降低。

2) 动力性: 生物乳化柴油和生物柴油的动力性较柴油均有所降低, 且掺混比例越大, 动力性越差。

3) 经济性: B100 最高, 生物乳化柴油的经济性随水、丁醇和乳化剂掺混比例增大而降低, 其中仅 E10 的燃油消耗率比柴油低。

4) 排放性: 与柴油相比, 生物乳化柴油的烟度和 NO_x 排放均有显著降低, 且当水和丁醇掺混比例增大时, 两者降低得越多。E10、E15 和 E20 的加权平均 NO_x 排放量较柴油依次降低 12.03%、15.17% 和 16.78%; 加权平均烟度降低 48.88%、66.48% 和 76.82%。生物乳化柴油的 CO 排放与柴油基本上无差别, HC 排放整体增加不多。

本文研究的生物乳化柴油作为替代燃料能保证柴油机运行的稳定性, 动力性和经济性 with 柴油差别不大。此外生物乳化柴油可以同时降低柴油机的烟度和 NO_x 排放, 具有良好的环境效益。

致谢

本研究来自于上海市科学技术委员会项目“生物乳化柴油在船用柴油机上的应用研究”(16DZ1203100); 还受到上海纽孚尔能源技术有限公司的大力支持。在此, 对上海市科学技术委员会和上海纽孚尔能源技术有限公司表示衷心感谢。

参考文献

- [1] ROY M M, WANG W, BUJOLD J. Biodiesel production and comparison of emissions of a DI diesel engine fueled by biodiesel-diesel and canola oil-diesel blends at high idling operations [J]. *Applied Energy*, 2013, 106 (11): 198-208.
- [2] BUYUKKAYA E. Effects of biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics [J]. *Fuel*, 2010, 89 (10): 3099-3105.
- [3] 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 (11): 1311-1315.
- [4] DEMIRBAS A. Political, economic and environmental impacts of biofuels: A review [J]. *Applied Energy*, 2009, 86 (11): S108-S117.
- [5] MUBARAK M, SENTHIL KUMAR M. An experimental study on waste cooking oil and its emulsions as diesel engine fuel [C]. *International Conference on Advances in Engineering, Science and Management*. IEEE, 2012: 61-66.
- [6] ARMAS O, GARCIA-CONTRERAS R, RAMOS Á. Pollutant emissions from engine starting with ethanol and butanol diesel blends [J]. *Fuel Process Technology*, 2012; 100 (0): 63e72.
- [7] LIU S H, LIN Y C, HSU K H. emissions of regulated Pollutants and PAHs from waste-cooking-oil biodiesel-fuelled heavy-duty diesel engine with catalyzer [J]. *Aerosol & Air Quality Research*, 2012, 12 (2): 218-227.
- [8] RYAN T W, ERWIN J. Diesel fuel composition effects on ignition and emissions [C]. *International Fuels & Lubricants Meeting & Exposition*. 1993.
- [9] STEPHEN B. LEVENSOHN. Reduction in emissions of nitrogen oxides, particulate matter, and polycyclic aromatic hydrocarbon by adding water-containing butanol into a diesel-fueled engine generator [J]. *Fuel*, 2012, 93 (1): 364-372.