

# 柴油机燃用混合含氧燃料的燃烧与排放

朱一德<sup>1,2</sup>,梅德清<sup>1</sup>,吴 焜<sup>1</sup>,张永涛<sup>1</sup>

(1. 江苏大学 汽车与交通工程学院,江苏 镇江 212013; 2. 江苏省交通技师学院 汽车系,江苏 镇江 212006)

**摘 要:**为协同推广使用不同生物质来源的乙醇和生物柴油,研究了不同混合比下乙醇-柴油-生物柴油混合含氧燃料的经济性、动力性与排放特性,为混合含氧燃料的推广应用提供理论和试验依据。研究表明:以柴油为参照,柴油机燃用 3 种混合燃料时的缸内压力均略有降低,EBD<sub>1</sub>(80%柴油+20%生物柴油)峰值压力出现位置提前约 1 °CA,乙醇的加入使 EBD<sub>2</sub>(70%柴油+20%生物柴油+10%乙醇)和 EBD<sub>3</sub>(55%柴油+20%生物柴油+25%乙醇)压力峰值略有滞后;3 种混合燃料对应放热率曲线峰值均低于纯柴油。随生物柴油以及乙醇掺混比例的增加,混合燃料的放热率峰值呈现不同程度的下降;随混合燃料含氧量的增加,HC 和 CO 排放均有不同程度的降低,烟度排放下降趋势明显,而 NO<sub>x</sub> 排放则略有增加。

**关键词:**汽车工程;柴油机;混合含氧燃料;燃烧;排放

中图分类号:TK421

文献标志码:A

## Combustion and emission of oxygenated fuel blends used in diesel engine

ZHU Yi-de<sup>1,2</sup>, MEI De-qing<sup>1</sup>, WU Han<sup>1</sup>, ZHANG Yong-tao<sup>1</sup>

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China;

2. Department of Automobile, Jiangsu Jiaotong College, Zhenjiang 212006, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to synergistically boost applications of ethanol and biodiesel from biomass, the economy, power and emissions of the ethanol-diesel-biodiesel blends in different proportions were investigated to provide theoretical and experimental basis for the promotion and application of mixed oxygenated fuels. The results show that cylinder pressures of three fuel blends are slightly lower than that of neat diesel. The corresponding crank angle of peak pressure in cylinder of EBD<sub>1</sub> (80% diesel+20% biodiesel) is about 1 °CA in advance. The addition of ethanol makes the pressure peak of EBD<sub>2</sub> (70% diesel+20% biodiesel+10% ethanol) and EBD<sub>3</sub> (55% diesel+20% biodiesel+25% ethanol) slightly delayed. The heat release peaks of three fuel blends are lower than that of neat diesel with the increase of biodiesel and ethanol in fuel blends, the heat release heats all decline in different degrees. With the increase of oxygen content in fuel blends, both HC and CO emissions decline in different degrees, and smoke emissions also decrease apparently, while NO<sub>x</sub> emission increase slightly. 3 tabs, 6 figs, 13 refs.

**Key words:** automotive engineering; diesel engine; oxygenated fuel blends; combustion; emission

# 0 引 言

随着能源危机的日益加剧,人们对环境问题日益重视,越来越希望寻求一种可再生的清洁能源来取代现在普遍使用的石化燃料。生物质燃料特别是生物柴油和乙醇,近年来受到较大的关注。乙醇可以从粮食和农作物中提取,生物柴油是由各种脂肪酸与甲醇进行酯化反应的产物。但由于受技术、价格、使用习惯等多方面原因的影响,生物柴油和乙醇一般采取掺烧的方式,很少单独在发动机上燃用。

乙醇含氧量较高,并且粘度较低,但理化特性与柴油相差较大,大比例掺烧必须添加助溶剂以保证混合燃料不分层<sup>[1-3]</sup>;生物柴油理化特性与柴油相近,可以以任意比例在柴油中掺烧,但由于粘度较大,燃油的雾化质量不好<sup>[4-5]</sup>。针对生物柴油与乙醇各自的优缺点,Jha 等国外学者提出乙醇-生物柴油-柴油三元混合燃料(EBD),使得生物柴油和乙醇互补,形成理化特性优良的混合燃料<sup>[6-8]</sup>。混合比合适的 EBD 混合燃料无需添加其他助溶剂,能保持均匀混合、不分层、稳定性好,同时燃料的粘度也适中,成为理化特性优良的混合含氧燃料<sup>[9]</sup>。张学敏等在柴油机上进行了不同混合比例的乙醇-生物柴油-柴油混合燃料燃烧及排放性能的试验研究,结果表明含氧燃料成分的不同对混合燃料折合油耗率影响较小,但对燃烧和排放的影响重大<sup>[10-11]</sup>。

由于生物柴油和乙醇具有各自不同的分子结构和含氧官能团,导致混合燃料的理化性质和燃烧特性均区别于柴油,而探究燃料含氧官能团对柴油机燃烧和排放影响,推动生物质乙醇和生物柴油的联合协调应用,具备一定学术价值及现实应用意义。为此,本文以柴油为参照,研究柴油机燃用不同混合比例的乙醇-柴油-生物柴油混合燃料的燃油经济性、动力性与排放特性,为混合含氧燃料的推广应用提供理论和试验依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 试验燃油配制

由于乙醇、生物柴油以及柴油混合的先后顺序会影响混合燃料的溶合效果,根据相应的实践经验,采取如下配制方法:①在室温下,用烧杯取相应体积的生物柴油,而后向其中加入所需体积分量的乙醇,并用玻璃棒搅拌混合均匀;②将混合均匀的乙醇、生物柴油样品加入到合适量的柴油中,并用电动搅拌机进行搅拌,直至混合液澄清为止。按照如上所述操作顺序,依次配备试验所需的燃料,并经试验测量或

计算得到各混合燃料的理化性质,其中,EBD<sub>1</sub> 为 80%柴油+20%生物柴油;EBD<sub>2</sub> 为 70%柴油+20%生物柴油+10%乙醇;EBD<sub>3</sub> 为 55%柴油+20%生物柴油+25%乙醇。如表 1 所示。

表 1 混合燃料的理化特性

Tab. 1 Physicochemical properties of various fuel blends

理化特性	柴油	EBD <sub>1</sub>	EBD <sub>2</sub>	EBD <sub>3</sub>
含氧量/%	0	2.100	5.400	10.400
密度/(g·mL <sup>-1</sup> )	0.835	0.844	0.840	0.833
粘度/(mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	3.400	3.580	3.360	3.030
低热值/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	42.500	41.650	39.620	36.970
十六烷值	45.000	47.000	43.300	37.750

## 1.2 试验装置及参数

试验选用样机为 186FA 单缸风冷柴油机,其主要技术参数见表 2,主要测试设备见表 3。在不改变柴油机结构形式和供油提前角,仅微调供油量实现原机功率的基础上,选取标定功率转速 3 000 r/min 下 100%、75%、50%、25% 这 4 个负荷作为工况,进行柴油机燃用 4 种燃料的燃烧和排放特性试验研究。其中,仅对 100% 负荷工况的缸内燃烧压力和放热率进行比较分析,研究不同燃料的燃烧和排放性能差异。在完成柴油燃料的相关试验后,开始新燃料测试前,为消除前一次油品对后面试验结果的影响,需将发动机以新燃油品种稳定运行一段时间,将存滞于管路中的燃油消耗完毕。

表 2 试验柴油机的主要参数

Tab. 2 Specifications of diesel engine

项 目	指标
发动机类型	单缸、风冷四冲程
燃烧室类型	直喷式
标定功率/kW	4.8
转速/(r·min <sup>-1</sup> )	3 000
压缩比	18.5
缸径/mm	86
行程/mm	72
气缸排量/L	0.418
连杆长度/mm	117.5
喷油泵	BF1Q70Y01
喷油器	PB55P04

表 3 试验所用的设备仪器

Tab. 3 Main equipments for experiment

名 称	型号	产地
测功机	CWF7.5 kW 电力测功机	中国
压力传感器	Kistler 6215A	瑞士 Kistler 公司
油耗仪	中成 MCS-960	中国
烟度计	AVL 415S 烟度计	奥地利
排气分析系统	Horiba MEXA 7200D 排气分析仪	日本
燃烧分析系统	DEWE-2010 燃烧分析仪	瑞士

## 2 试验结果

### 2.1 混合含氧燃料的燃油经济性

燃油消耗率是衡量发动机经济性的重要指标,由于混合燃料中含有热值较柴油低的乙醇、生物柴油等,因此原有的关于柴油的油耗评价体系不再适用。这里需引入当量燃油消耗率的概念,当量燃油消耗率是指单位有效功率的能量消耗量,其是按照混合燃料的质量低热值换算得到的,表达式如下

$$b_e = \frac{H_{uD}X_D + H_{uE}X_E + H_{uB}X_B}{H_{uD}} b_i \quad (1)$$

式中: $b_e$  为当量燃油消耗率; $b_i$  为燃油消耗率( $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ ); $X_D$ 、 $X_E$ 、 $X_B$  分别为混合燃料中柴油、乙醇、生物柴油所占的质量百分比; $H_{uD}$ 、 $H_{uE}$ 、 $H_{uB}$  分别为柴油、乙醇、生物柴油的低热值。

图1为柴油机燃用4种燃料的当量燃油消耗率随负荷的变化情况。

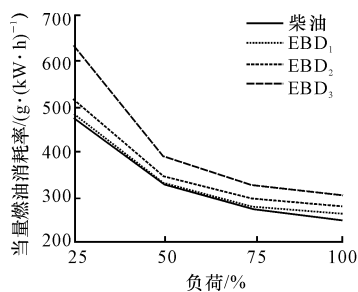


图1 不同燃料的燃油经济性

Fig. 1 Economy of various fuel blends

与普通柴油相比,混合燃料 EBD<sub>1</sub> 和 EBD<sub>2</sub> 当量燃油消耗率与柴油相差不大,随着乙醇掺混比例增大,混合燃料当量燃油消耗率增加。EBD<sub>3</sub> 燃料的当量燃油消耗率随负荷变化趋势较为明显,这主要是燃料粘度、含氧量和着火能力综合作用的结果。在低负荷下,柴油机缸内温度和压力相对较低,乙醇较高的气化潜热以及生物柴油的高粘度,两者均会影响混合气的雾化以及燃烧的完全程度。而在中高负荷下,因乙醇气化潜热以及生物柴油高粘度导致的混合燃料雾化和燃烧恶化影响降低,外加混合燃料的含氧优势,促使燃烧更迅速完善,当量燃油消耗率也随之下降。

### 2.2 混合含氧燃料的燃烧特性

柴油机燃用4种燃料在转速  $n=3\,000\text{ r/min}$ 、平均有效压力  $p_{me}=0.46\text{ MPa}$  工况下对应的缸内压力和瞬时放热规律如图2所示。从图2(a)可以看出,与发动机燃用柴油相比较,EBD<sub>1</sub> 的缸内压力峰值为  $6.5\text{ MPa}$ ,较燃用纯柴油时略低,且最大爆发压力提前约  $1^\circ\text{CA}$  出现。这主要是由于生物柴油的十六烷值较高,使着火时刻提前,随之 EBD<sub>1</sub> 燃料的

峰值压力亦提前出现。同一负荷下,柴油机燃用 EBD<sub>2</sub>、EBD<sub>3</sub> 的峰值压力分别为  $6.48$ 、 $6.46\text{ MPa}$ ,相应均有所下降。此外,发动机燃用 EBD<sub>2</sub> 和 EBD<sub>3</sub> 时,由于乙醇的十六烷值低且气化潜热大,使得混合燃料的十六烷值降低,着火延迟期相对延长,因而出现图示缸内压力曲线向后偏移的趋势。

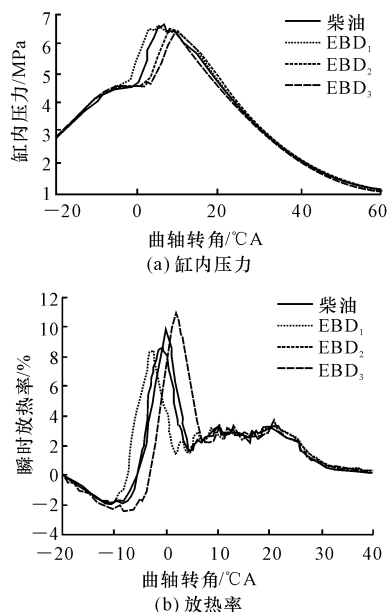


图2 标定工况下缸内压力和放热率

Fig. 2 Cylinder pressures and heat release rates under the rated condition

图2(b)为标定工况下4种燃料的瞬时放热率曲线。放热率峰值位置是指最大放热率对应的曲轴转角,取决于燃料的滞燃期,而放热率峰值的大小和预混合燃烧比例相关<sup>[11]</sup>。从图2(b)放热率曲线可以看出,EBD<sub>1</sub> 着火延迟期短,放热率峰值较柴油低,且出现位置提前,因生物柴油较高的十六烷值使着火时刻提前,生物柴油较高的粘度限制了缸内混合气的形成速度,在较短的滞燃期内形成的可燃混合气量较少,因而放热率峰值略有降低,同时预混燃烧较早结束使燃烧放热率峰值位置提前<sup>[12]</sup>。随乙醇的掺混,EBD<sub>2</sub> 和 EBD<sub>3</sub> 出现着火延迟,放热率峰值对应曲轴转角也有推迟。

### 2.3 混合含氧燃料的排放特性

下页图3为4种燃料在不同负荷下的碳烟排放特性,图中烟度单位FSN的定义见《烟度长标准》(GB 9804—88)。碳烟形成的主要原因在于燃烧室内局部混合气过浓引起的不完全燃烧。由图可以看出3种混合含氧燃料的烟度排放均低于柴油的烟度值。EBD<sub>1</sub> 为柴油与生物柴油的混合燃料,一方面生物柴油可以改善过浓混合气区的缺氧燃烧;另一方面,生物柴油较高的十六烷值可缩短扩散燃烧持续期,使燃

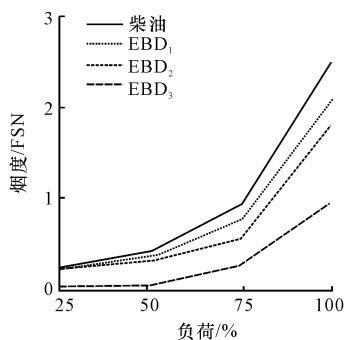


图3 不同燃料的烟度排放

Fig. 3 Smoke emissions of various fuel blends

油高温裂解倾向降低,因而其烟度排放总体略低于柴油<sup>[13]</sup>。EBD<sub>2</sub> 和 EBD<sub>3</sub> 混合燃料中含有乙醇,乙醇的沸点较低,乙醇在缸内比柴油更容易蒸发雾化,更有利于燃料与空气的混合,从而降低了碳烟的排放。

图4为发动机燃用不同燃料的NO<sub>x</sub>排放, $\varphi_{NO_x}$ 为NO<sub>x</sub>的体积分数。可以看出相比于纯柴油,各混合燃料的NO<sub>x</sub>排放均有不同程度的上升。混合含氧燃料中,乙醇使预混合燃烧比例增加,生物柴油使缸内可燃混合气中参与化学反应的活性氧量上升,因而各混合燃料的NO<sub>x</sub>排放增加。但当乙醇的掺混比例过大,沸点较低的乙醇快速蒸发吸收缸内的热量,一定程度上导致缸内温度降低,抑制NO<sub>x</sub>排放的过多增加,因而EBD<sub>2</sub>的NO<sub>x</sub>的排放比EBD<sub>1</sub>低。在较小负荷下,缸内温度较低,此时温度是影响NO<sub>x</sub>生成的主导因素,燃料含氧量对柴油机燃烧产生NO<sub>x</sub>影响不大,因而柴油机燃用3种燃料的NO<sub>x</sub>排放与柴油差别不是很明显。在中高负荷下,由于缸内温度较高,此时燃料含氧量成为决定NO<sub>x</sub>生成的主要因素,由含氧燃料乙醇及生物柴油提供的更多的氧,导致缸内参与化学反应的活性氧量上升,促进了NO<sub>x</sub>的产生,因而3种混合燃料的NO<sub>x</sub>排放比纯柴油明显增加。

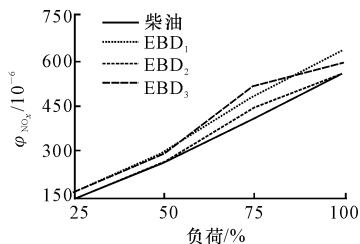
图4 不同燃料的NO<sub>x</sub>排放Fig. 4 NO<sub>x</sub> emissions of various fuel blends

图5为发动机燃用4种燃料的CO排放, $\varphi_{CO}$ 为CO的体积分数。CO是燃料燃烧不完全的产物,其形成主要受缸内燃烧温度和混合气中氧浓度大小的影响。在各负荷工况下,EBD<sub>1</sub>的CO排放比普通柴油的CO排放要低,主要是由于EBD<sub>1</sub>混合燃料中生物柴油的氧在

一定程度上增加了混合气氧的氛围,改善了燃烧过程。小比例添加乙醇和生物柴油,混合气中增加的活性氧可以促使未燃烧的产物继续氧化,因而EBD<sub>2</sub>的CO排放较柴油低。随着添加比例的增加,柴油机燃用EBD<sub>3</sub>混合燃料时,呈现出在低负荷时CO排放较柴油的高,而在全负荷下两者大致相当。原因如下:在低负荷下缸内温度较低,在大比例掺混时,乙醇较高的气化潜热进一步降低缸内燃烧温度,使CO进一步氧化的进程被抑制,使得中低负荷下CO排放相对于纯柴油略有上升。而在高负荷下,由于缸内温度上升,乙醇汽化导致缸内温度降低的作用弱化且燃料自供的氧又能促进燃料燃烧,一定程度上促使燃烧充分,因而柴油机燃用混合含氧燃料EBD<sub>3</sub>呈现出图中在高负荷工况下CO排放有所降低的趋势。

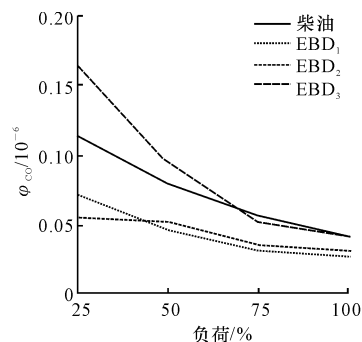


图5 不同燃料的CO排放

Fig. 5 CO emissions of various fuel blends

图6为不同负荷下4种燃料的HC排放, $\varphi_{HC}$ 为HC的体积分数。发动机燃用EBD<sub>1</sub>时,因为生物柴油是含氧燃料,增加了混合气中氧氛围,使燃烧更为完全;再者生物柴油较高十六烷值使着火延迟期缩短,混合气形成阶段由于时间尺度缩短而使得着火稀限区域减少,HC排放降低幅度较大。混合燃料EBD<sub>2</sub>中乙醇的加入使得HC排放介于EBD<sub>1</sub>和柴油之间,因乙醇具有较高汽化潜热,在汽化过程中吸收较多热量,使得缸内温度进一步降低;加之乙醇沸腾汽化容易形成着火稀限区域,且因乙醇的添加导致着火延迟期变长,形成更多的稀限区域,因而随着乙醇添加比例的增大HC排放增加。

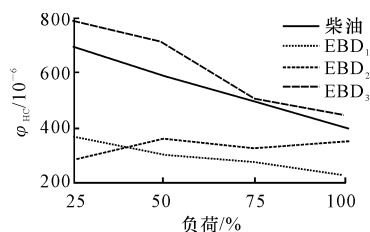


图6 不同燃料的HC排放

Fig. 6 HC emissions of various fuel blends

### 3 结 语

(1) 与普通柴油相比,混合燃料 EBD<sub>1</sub> 和 EBD<sub>2</sub> 当量燃油消耗率与柴油相差不大,随着乙醇掺混比例增大,混合燃料含氧量增加,混合燃料当量燃油消耗率增加。

(2) 在标定点工况下,与以柴油作为发动机工作燃料相比较,EBD<sub>1</sub> 的缸内压力略有降低,且峰值压力提前约 1 °CA 出现,EBD<sub>2</sub>、EBD<sub>3</sub> 的峰值压力亦有所下降;EBD<sub>1</sub> 着火时刻提前,但 EBD<sub>2</sub> 和 EBD<sub>3</sub> 着火时刻略晚;放热率峰值也按 EBD<sub>1</sub>、柴油、EBD<sub>2</sub> 和 EBD<sub>3</sub> 的顺序出现,且逐步增加。

(3) 混合含氧燃料的碳烟排放均较柴油机燃用纯柴油时低,且随燃料中含氧量的增加,烟度排放呈现较为明显的下降趋势。在大负荷工况下,与燃用柴油相比,发动机燃用 3 种含氧燃料总体表现为 NO<sub>x</sub> 排放增加,而表征不完全燃烧产物的 HC、CO 均有不同程度的下降。

(4) 考虑不同含氧结构及其燃料理化特性,对乙醇-生物柴油-柴油混合体系的燃料燃烧过程及排放产物特性进行研究,可为不同生物质来源的乙醇和生物柴油的协同推广使用奠定基础。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] Kowalewicz A. Eco-diesel engine fuelled with rapeseed oil methyl ester and ethanol-part 1: efficiency and emission[J]. Journal of Engineering, 2005, 219 (5):715-723.
- [2] De Caro P S. Interest of combining an additive with diesel-ethanol blends for use in diesel engine[J]. Fuel, 2002, 80(4):565-574.
- [3] He B Q, Wang J X, Shuai S J. Homogeneous charge combustion and emission of ethanol ignited by pilot diesel on diesel engines [J]. SAE Paper 2004-01-0094.
- [4] 耿莉敏,董元虎,边耀璋,等. 生物柴油与轻柴油混合燃料的理化特性[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2008, 28(3):88-91.  
GENG Li-min, DONG Yuan-hu, BIAN Yao-zhang, et al. Physical and chemical properties of biodiesel and light diesel mixed fuel[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(3):88-91. (in Chinese)
- [5] 陈 昊,杨 璐,李 江,等. 生物柴油可压缩性计算及其对燃烧与排放的影响[J]. 中国公路学报, 2014, 27(3):116-121.  
CHEN Hao, YANG Lu, LI Jiang, et al. Compressibility calculation of bio-diesel and its influence on com-

- bustion and emission[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(3):116-121. (in Chinese)
- [6] Jha S K, Fernando S, Columbus E, et al. A comparative study of exhaust emissions using diesel-biodiesel-ethanol blends in new and used engines[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(2):375-381.
- [7] McCormick R L, Parish R. Technical barriers to the use of ethanol in diesel fuel [R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2001.
- [8] Prommes K, Apanee L, Samai J I. Solubility of a diesel-biodiesel-ethanol blend, its fuel properties, and its emission characteristics from diesel engine[J]. Fuel, 2007, 86(7/8):1053-1061.
- [9] 雷基林,申立中,毕玉华,等. 乙醇生物柴油柴油混合燃料对柴油机性能和排放的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(11):6, 21-25.  
LEI Ji-lin, SHEN Li-zhong, BI Yu-hua, et al. Impact of combustion of BED blend fuel on diesel engine performance and emissions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43 (11):6, 21-25. (in Chinese)
- [10] 张学敏,袁 博,谭建伟,等. 柴油机燃用乙醇-生物柴油-柴油的醛酮类排放物研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(7):13-18.  
ZHANG Xue-min, QIU Bo, TAN Jian-wei, et al. Carbonyl compounds emission from engine fueled with ethanol-biodiesel-diesel [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43 (7):13-18. (in Chinese)
- [11] Yao Z, Wei H, Perugu H, et al. Sensitivity analysis of project level MOVES running emission rates for light and heavy duty vehicles [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1 (2):81-96.
- [12] 袁银南,张 恬,梅德清,等. 直喷式柴油机燃用生物柴油燃烧特性的研究[J]. 内燃机学报, 2007, 25(1):43-46.  
YUAN Yin-nan, ZHANG Tian, MEI De-qing, et al. Investigation on combustion characteristics of direct injection diesel engine fuelled with biodiesel [J]. Transactions of Csice, 2007, 25 (1): 43-46. (in Chinese)
- [13] 何 超,葛蕴珊,韩秀坤,等. 直喷式柴油机燃用生物柴油的燃烧特性[J]. 内燃机工程, 2007, 28(6):7-10, 15.  
HE Chao, GE Yun-shan, HAN Xiu-kun, et al. Combustion characteristics of direct injection diesel engine fueled with biodiesel[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2007, 28 (6): 7-10, 15. (in Chinese)

