

# 柴油机生物柴油-甲醇混合燃料燃烧与排放特性

袁华智<sup>1,2</sup>, 朱 铭<sup>3</sup>, 李阳阳<sup>1</sup>, 李亚鹏<sup>1</sup>, 赵福磊<sup>1</sup>

(1. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 杂志社,  
陕西 西安 710064; 3. 厦门金龙旅行车有限公司, 福建 厦门 631026)

**摘 要:** 分别在 100 mL 生物柴油(M0 燃料)中添加 10 mL 甲醇、20 mL 甲醇与 12 mL 油酸, 经过相关处理后形成新的微乳化燃料 M10 燃料与 M20 燃料。以台架试验与排放分析法为基础, 当发动机转速点为 1 500 r/min、平均有效压力分别为 0.088 9、0.177 0、0.266 0、0.354 0、0.443 0、0.531 0 MPa 时, 分别对 3 种燃料的燃烧特性与排放特性进行了试验研究。试验结果表明: 与 M0 燃料相比, M10 燃料与 M20 燃料的滞燃期延长, 燃烧持续期缩短, 3 种燃料的最大滞燃期分别为 6°、7°、8°; M10 燃料与 M20 燃料的峰值压力、峰值压力升高率以及峰值燃烧放热率均增大, 3 种燃料的最大峰值压力升高率分别为 1.236、1.377、1.280 MPa/(°), 3 种燃料的最大峰值燃烧放热率分别为 0.280、0.281、0.297 kJ/(°); M10 燃料与 M20 燃料的 HC、CO 与碳烟排放均降低; NO<sub>x</sub> 排放没有明显变化。

**关键词:** 汽车工程; 生物柴油; 甲醇; 混合燃料; 燃烧特性; 排放特性

**中图分类号:** U473.1 **文献标志码:** A

## Combustion and emission characteristics of blended fuel of biodiesel and methanol for diesel engine

YUAN Hua-zhi<sup>1,2</sup>, ZHU Ming<sup>3</sup>, LI Yang-yang<sup>1</sup>, LI Ya-peng<sup>1</sup>, ZHAO Fu-lei<sup>1</sup>

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;  
2. Magazines Company, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;  
3. Xiamen Golden Dragon Bus Co Ltd, Xiamen 361026, Fujian, China)

**Abstract:** 10 mL methanol, 20 mL methanol and 12 mL oleic were added into 100 mL biodiesel (M0 fuel) respectively, and M10 and M20 micro-emulsified fuels were developed after processing. Based on the bench experiment and emission analysis, when the engine speed was 1 500 r/min and the average effective pressures were 0.088 9, 0.177 0, 0.266 0, 0.354 0, 0.443 0 and 0.5310 MPa respectively, the experiments for combustion and emission characteristics of those three fuels were carried out. Experiment results show that compared with M0, the combustion delay periods of M10 and M20 are longer, the combustion durations are shorter, and the maximum combustion delay periods of those three fuels are 6°, 7° and 8° respectively. The peak pressures, the increasing rates of peak pressures and the exothermic rates of peak combustions for M10 and M20 increase, the maximum increasing rates of peak pressures for those three fuels are 1.236, 1.377

and 1.280 MPa/(°) respectively, and the maximum exothermic rates of peak combustions for those three fuels are 0.280, 0.281 and 0.297 kJ/(°) respectively. The HC emissions, CO emissions, smoke intensity emissions of M10 and M20 decrease, but there are no significant change of the  $\text{NO}_x$  emissions of M10 and M20. 4 tabs, 5 figs, 14 refs.

**Key words:** automotive engineering; biodiesel; methanol; blended fuel; combustion characteristic; emission characteristic

## 0 引言

石油资源的日益紧缺加快了柴油机替代燃料的开发与应用。在中国,二甲醚、液化石油气、生物柴油与醇类等柴油机优良替代燃料形成了多元化区域性发展态势。现行的生物柴油,大多是以(野生)油料作物、动植物油脂以及废餐饮油等为基础原料油,通过诸如酯交换的相关工艺制成的燃料,以其来源广泛、物理性能与柴油相近、环境友好以及可直接在柴油机上燃用等优点,得到了广泛关注、深入研究与初步应用。

作为柴油机替代燃料,生物柴油应用的主要问题是其酸值较高且粘度大。因此,目前国内外均采用低体积比例生物柴油与柴油掺混使用,通常生物柴油体积比例不超过 20%,从某种程度上降低了生物柴油的替代性。陈昊等在单缸直喷式柴油机上,对生物柴油和生物柴油-乙醇-水微乳化燃料的燃烧特性、经济性和排放进行了试验,研究发现,与生物柴油相比,生物柴油-乙醇-水微乳化燃料的放热率曲线后移,燃烧更加完全,放热更加集中<sup>[1-2]</sup>;楼狄明等分析了在共轨柴油机上燃烧生物柴油、石化柴油的相关特性指标,比较了不同生物柴油配比对发动机功率、排放以及燃油消耗率的影响<sup>[3]</sup>;耿莉敏等用 0# 柴油与大豆毛油制成的生物柴油配成 10 种不同掺混比的混合燃料,测定了混合燃料的兼容性、密度、闪点、馏程、运动粘度、酸值、凝点和冷滤点等指标,研究结果表明,生物柴油与 0# 柴油具有良好的兼容性,其混合燃料的密度、闪点、蒸馏温度、运动粘度和酸值随生物柴油掺混比的增大而增大,但生物柴油的凝点和冷滤点偏高<sup>[4]</sup>;胡志远等以帕萨特柴油轿车为试验样车,使用排气颗粒数量及粒径分析仪,分别对 5%、10%、20%和 50%的沪 IV 柴油-生物柴油混合燃料、纯生物柴油的模式颗粒排放特性进行了试验研究<sup>[5]</sup>;王海龙等进行了生物柴油-柴油发动机的放热率仿真计算研究,并基于 AVL BOOST 发动机工作过程仿真软件与 DL190-12 柴油机的实

物结构测量参数,对每循环供油量、平均机械损失等参数进行测算,建立了生物柴油-柴油发动机的工作过程模型<sup>[6]</sup>;郑金明等将桐油生物柴油和地沟油生物柴油按体积比 1:1 混合,评价其对生物柴油品质的影响,研究了抗氧化剂 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)对混合生物柴油氧化安定性及其他性能的影响,并考察了混合生物柴油加速氧化后的过氧化值和粘度<sup>[7]</sup>;马林才等研究了船用生物柴油的部分理化指标,如表面张力和粘度对橡胶件及铜片的影响,结果表明,船用生物柴油的掺混比例取 0~20%时较为合适<sup>[8]</sup>;马志义等为了研究怠速工况下甲醇汽油中的非常规污染物甲醛的排放特性,在比亚迪 F3 出租车上进行测试低怠速与高怠速的甲醛排放情况,研究结果表明,与 93# 汽油相比,在 0℃与 2℃时,M15 燃料及 M25 燃料的甲醛排放相差不大,M85 燃料的甲醛排放明显增加,所有燃料在低怠速与高怠速时甲醛排放一致<sup>[9]</sup>;Atkinson 等应用神经网络方法分析了生物柴油-柴油发动机燃烧性能、排放预测与故障诊断,分析比较了不同生物柴油对比对发动机功率、燃油消耗率以及排放的影响<sup>[10-13]</sup>。

本文在分析生物柴油特点的基础上,通过掺入一定比例的甲醇,经相关处理后,形成生物柴油-甲醇混合燃料,分析了混合燃料的动力特性、经济特性以及排放特性,并与纯生物柴油的燃烧和排放特性进行了对比研究,旨在为生物柴油替代柴油提供一定的理论基础和试验依据。

## 1 试验条件

### 1.1 试验设备

本文试验主要是在柴油发动机 ZH1105W 上完成的,发动机参数见下页表 1。

在本文试验中,废气排放与碳烟排放的测量均采用 AVL Digas4000 发动机排气分析仪,选择消光系数  $K(\text{m}^{-1})$  表示烟度值,燃油消耗量采用 TP-244 流量传感器和 DF-313 数字流量计进行测量。

表 1 发动机参数

Tab. 1 Engine parameters

型号	ZH1105W
类型	单缸四冲程直喷式
排量/L	0.996
缸径/mm	105
行程/mm	115
连杆长度/mm	185
吸气方式	自然吸气
冷却方式	水冷
燃烧室形状	ω 型
压缩比	16.5
标定功率/kW	11.03
转速/(r·min <sup>-1</sup> )	2 000
供油提前角/°C	22±2
喷油压力/MPa	18.60±0.49

1.2 燃料制备

在本文试验中,选取陕西春光油脂有限公司生产的生物柴油,记为 M0 燃料,通过互溶性试验发现 2 点:①在没有添加任何添加剂的情况下,100 mL 的 M0 燃料可以与 10 mL 甲醇直接形成微乳化燃料,其中当甲醇少于 7 mL 时可以直接形成,当 M0 燃料超过 7 mL 时,需要手动搅拌且当 M0 燃料的剂量越接近 10 mL 时,搅拌时间越长;②在添加油酸的情况下,100 mL M0 燃料可以与 20 mL 甲醇直接形成微乳化燃料。每 100 mL M0 燃料添加 10 mL 甲醇形成的微乳化燃料记为 M10 燃料,每 100 mL M0 燃料添加 20 mL 甲醇(同时添加 12mL 油酸)形成的微乳化燃料记为 M20 燃料<sup>[14]</sup>。微乳化燃料组分理化指标见表 2。

1.3 测试方法与台架布置

在试验中,为方便计算,选择的发动机转速为 1 500 r/min,平均有效压力点分别为 0.088 9、0.177 0、0.266 0、0.354 0、0.443 0、0.531 0 MPa。台

表 2 理化指标

Tab. 2 Physical and chemical indexes

分类	0# 柴油	生物柴油	甲醇	油酸
密度/(g·mL <sup>-1</sup> )	0.84	0.87	0.79	0.89
汽化潜热/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	250	200	1 109	200
质量低热值/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	42 500	38 812	19 674	38 650
十六烷值	46	52	3~5	
40℃ 运动粘度/(mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	3.11	7.80	0.59	
理论空燃比/(kg·kg <sup>-1</sup> )	14.50	12.50	6.47	
闪点/°CA	78	166	11	

架布置与试验仪器的连接见图 1,只是连接示意,不区分具体的位置。

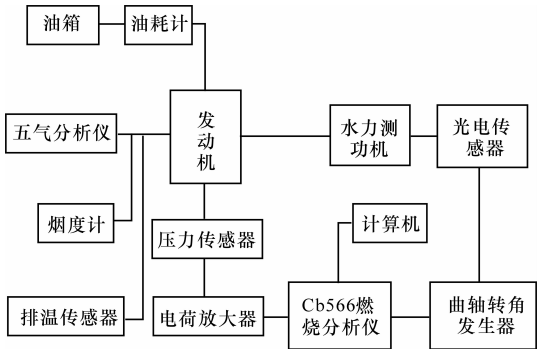


图 1 台架布置  
Fig. 1 Bench layout

2 燃烧特性

当发动机转速为 1 500 r/min 时,生物柴油(M0)、2 种甲醇混合燃料(M10、M20)的燃烧始点、终点及滞燃期见表 3。从表 3 中可以看出,在各种工况下,与 M0 燃料相比,M10 燃料与 M20 燃料的滞燃期长,这是由于甲醇汽化吸热使燃烧滞后;各种燃料的滞燃期随负荷增大而减小,这是因为负荷增大使得气缸内热力状态增大;与 M0 燃料相比,M10 燃料与 M20 燃料燃烧滞后,且燃烧提前结束,燃烧

表 3 燃烧点与滞燃期

Tab. 3 Combustion points and combustion delay periods

平均有效压力/MPa	M0			M10			M20		
	燃烧始点/(°)	燃烧终点/(°)	滞燃期/(°)	燃烧始点/(°)	燃烧终点/(°)	滞燃期/(°)	燃烧始点/(°)	燃烧终点/(°)	滞燃期/(°)
0.088 9	-17	29	5	-15	27	7	-14	26	8
0.177 0	-16	27	6	-15	27	7	-14	27	8
0.266 0	-17	30	5	-16	29	6	-15	28	7
0.354 0	-17	31	5	-16	30	6	-15	29	7
0.443 0	-17	32	5	-17	28	5	-16	24	6
0.531 0	-18	34	4	-17	31	5	-16	30	6

持续期减小,放热更为集中,有利于燃料燃烧完全,这是由于甲醇使混合燃料的含氧量增大,加快了燃烧速度。

当发动机转速为 1 500 r/min 时,生物柴油(M0)、2 种甲醇混合燃料(M10、M20)的燃烧特征参

数见下页表 4。从表 4 可以看出,与 M0 燃料相比,M10 燃料与 M20 燃料的峰值压力、峰值压力升高率与峰值放热率较高,且随甲醇比例的增大而增大。这主要是因为 M10 燃料与 M20 燃料的滞燃期过长,导致形成的混合气数量较多,且 M10 燃料与 M20

表 4 燃烧特征参数  
Tab. 4 Combustion parameters

平均有效 压力/MPa	M0			M10			M20		
	峰值压 力/MPa	峰值压力升高 率/(MPa·(°) <sup>-1</sup> )	峰值燃烧放热 率/(kJ·(°) <sup>-1</sup> )	峰值压 力/MPa	峰值压力升高 率/(MPa·(°) <sup>-1</sup> )	峰值燃烧放热 率/(kJ·(°) <sup>-1</sup> )	峰值压 力/MPa	峰值压力升高 率/(MPa·(°) <sup>-1</sup> )	峰值燃烧放热 率/(kJ·(°) <sup>-1</sup> )
0.089 0	5.786	0.593	0.145	5.789	0.604	0.149	5.923	0.614	0.153
0.177 0	6.187	0.748	0.175	6.237	0.774	0.175	6.435	0.872	0.180
0.266 0	6.809	1.043	0.245	6.834	1.020	0.248	6.897	1.077	0.260
0.354 0	7.049	1.106	0.245	7.168	1.107	0.237	7.380	1.123	0.234
0.443 0	7.277	1.236	0.280	7.769	1.230	0.281	7.861	1.280	0.285
0.531 0	8.041	1.121	0.241	8.122	1.377	0.250	8.146	1.084	0.297

燃料的氧含量明显较高,这也导致 M10 燃料与 M20 燃料的峰值压力、峰值压力升高率与峰值放热率明显增大。

3 排放特性

当发动机转速为 1 500 r/min 时,3 种燃料的 HC 与 CO 排放曲线分别如图 2、图 3 所示。从图 2、图 3 中可以看出,与 M0 燃料相比,M10 燃料与 M20 燃料的 HC 与 CO 排放明显降低。这是由于 M10 燃料与 M20 燃料的高含氧量引起充分燃烧所致。

当发动机转速为 1 500 r/min 时,烟度排放曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看出,与 M0 燃料相比,M10 燃料与 M20 燃料的烟度排放明显降低,且随着甲醇添加比例的增大而降低。这是由于甲醇的含氧量高,使得燃烧更加充分。

当发动机转速为 1 500 r/min 时,NO<sub>x</sub> 排放曲线如图 5 所示。从图 5 中可以看出,与 M0 燃料相比,M10 燃料与 M20 燃料的 NO<sub>x</sub> 排放没有明显的变化。这是因为 NO<sub>x</sub> 排放由氧含量与火焰温度共同决定,一方面,甲醇汽化吸热降低了燃烧温度,使 NO<sub>x</sub> 有降低的趋势;另一方面,高含氧量的甲醇使 M10 燃料与 M20 燃料的含氧量增大,满足富氧的条件,有利于 NO<sub>x</sub> 的形成。两方面相反作用,使得 NO<sub>x</sub> 排放没有明显的变化。

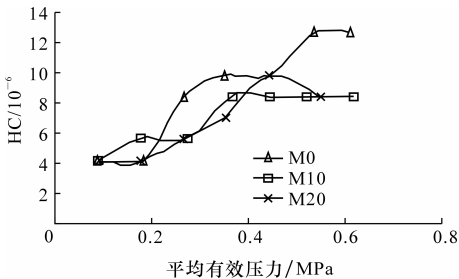


图 2 HC 排放  
Fig. 2 HC emissions

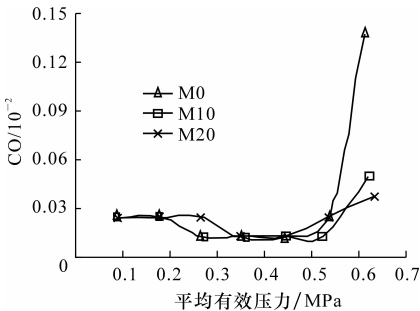


图 3 CO 排放  
Fig. 3 CO emissions

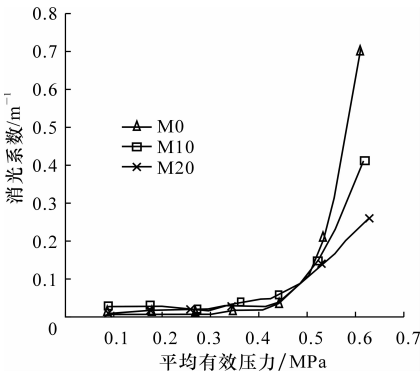


图 4 碳烟排放  
Fig. 4 Smoke intensity emissions

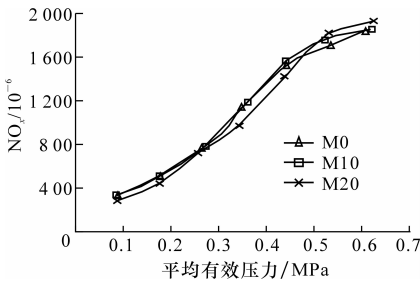


图 5 NO<sub>x</sub> 排放  
Fig. 5 NO<sub>x</sub> emissions

4 结 语

- (1)生物柴油可以与甲醇形成微乳化燃料,加入
- (2)M10 燃料与 M20 燃料的不完全燃烧产物

油酸后可以进一步增加甲醇添加量;与生物柴油相比,加入甲醇可以推迟燃烧,且使燃烧提前结束,放热更加集中,有利于燃烧完全。

HC与CO排放以及烟度均降低,而 $\text{NO}_x$ 排放没有明显的变化。

(3)生物柴油甲醇混合燃料的研究,将进一步推动柴油机替代燃料的发展与应用。

## 参考文献:

## References:

- [1] 陈昊,祁东辉,边耀璋. 柴油机燃用生物柴油-乙醇-水微乳化燃料性能研究[J]. 内燃机工程, 2010, 31(1): 21-26.  
CHEN Hao, QI Dong-hui, BIAN Yao-zhang. Study on performance of diesel engine fuelled with biodiesel-ethanol-water micro-emulsion fuel[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010, 31(1): 21-26. (in Chinese)
- [2] 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.  
CHEN Hao, QI Dong-hui, BIAN Yao-zhang. Influence of spray performance on combustion and emission characteristics of biodiesel[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(1): 40-43. (in Chinese)
- [3] 楼狄明,石健,赵杰,等. 共轨柴油机燃用不同配比生物柴油的性能与排放特性[J]. 内燃机工程, 2009, 30(6): 21-25.  
LOU Di-ming, SHI Jian, ZHAO Jie, et al. Performance and emission characteristics of a common rail diesel engine fuelled with different proportion biodiesel blend[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2009, 30(6): 21-25. (in Chinese)
- [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] 胡志远,林建军,谭丕强,等. 柴油轿车燃用生物柴油的模式颗粒排放特性[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2012, 40(6): 937-941.  
HU Zhi-yuan, LIN Jian-jun, TAN Pi-qiang, et al. NEDC particle number and size emission characters of a diesel car fueled with biodiesel blends in laboratory[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(6): 937-941. (in Chinese)
- [6] 王海龙,彭美春,吴晓伟. 生物柴油-柴油发动机放热规律模拟计算研究[J]. 小型内燃机与摩托车, 2012, 41(1): 39-42, 47.  
WANG Hai-long, PENG Mei-chun, WU Xiao-wei. Research of biodiesel-diesel engine performance simulation calculation[J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2012, 41(1): 39-42, 47. (in Chinese)
- [7] 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.  
ZHENG Jin-ming, LIU Hui, SU Ling-yan, et al. Performance improvement of blends of tung oil-waste oil based biodiesel[J]. Environmental Science and Technology, 2012, 35(2): 30-33. (in Chinese)
- [8] 马林才,周志国,夏良耀,等. 船用生物柴油的理化指标及台架试验研究[J]. 江苏科技大学学报:自然科学版, 2012, 26(2): 154-158.  
MA Lin-cai, ZHOU Zhi-guo, XIA Liang-yao, et al. Experimental investigation of the physical and chemical properties and bench test of the marine biodiesel[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2012, 26(2): 154-158. (in Chinese)
- [9] 马志义,陈昊,李阳阳,等. 怠速工况下甲醇汽油甲醛排放特性研究[J]. 环境科技, 2012, 25(3): 72-74.  
MA Zhi-yi, CHEN Hao, LI Yang-yang, et al. Research on formaldehyde emission characteristics of methanol gasoline in idle speed condition[J]. Environmental Science and Technology, 2012, 25(3): 72-74. (in Chinese)
- [10] Atkinson C M, Long T W, Hanzevack E L. Virtual sensing: a neural network-based intelligent performance and emissions prediction system for on-board diagnostics and engine control[C]// SAE. Electronic Engine Controls 1998: Diagnostics and Controls. Detroit: SAE, 1998: 1-12.
- [11] Beroun S, Martins J. The development of gas (CNG, LPG and  $\text{H}_2$ ) engines for buses and trucks and their emission and cycle variability characteristics [C]// SAE. SAE 2001 World Congress on Transportation Systems. Detroit: SAE, 2001: 1-9.
- [12] Ubong E U, Dimitrov B. A statistical approach in studying the air/fuel ratio variation based on oxygen sensors' signals[J]. Transactions of CSICE, 2008, 26(1): 11-23.
- [13] 袁华智,蹇小平,张春化,等. 传感器故障对天然气发动机性能和排放的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2010, 30(2): 96-100.  
YUAN Hua-zhi, JIAN Xiao-ping, ZHANG Chun-hua, et al. Influence of failures of natural gas engine sensors on engine's performance and emission[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(2): 96-100. (in Chinese)
- [14] 陈昊. 生物柴油/柴油混合燃料及生物柴油掺水微乳化燃料性能研究[D]. 西安:长安大学, 2008.  
CHEN Hao. Study on performances of biodiesel/diesel mixture and biodiesel-water micro-emulsion fuel [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)