

文章编号:1671-8879(2016)02-0105-07

# 直喷式柴油机燃用生物柴油-正丁醇混合 燃料时的性能与排放

黄勇成,田 威,王井山,吴川州

(西安交通大学 能源与动力工程学院,陕西 西安 710049)

**摘 要:**为了研究掺入正丁醇对柴油机燃用生物柴油时性能与排放的影响,测量了正丁醇质量分数分别为 0、10%、20%和 30%的生物柴油-正丁醇混合燃料的理化特性,并通过发动机台架试验,研究了混合燃料的燃烧与排放特性。研究表明:生物柴油-正丁醇混合燃料的密度、粘度、表面张力、十六烷值和低热值随着正丁醇比例的增加而减小,掺入 30%正丁醇时,其粘度可减小 39.3%;随着正丁醇比例的增加,混合燃料的喷油延迟角、滞燃期和预混燃烧放热率峰值增加,而缸内燃烧温度和压力峰值降低,燃烧持续期缩短,有效热效率增加;与柴油相比,生物柴油的碳烟、CO 和 HC 排放较低,NO<sub>x</sub> 排放较高;随着正丁醇比例的增加,混合燃料的 NO<sub>x</sub>、碳烟和 CO 排放降低,HC 排放升高,掺入 10%正丁醇时 NO<sub>x</sub> 排放低于柴油。

**关键词:**汽车工程;柴油机;生物柴油;正丁醇;混合燃料;燃烧特性

**中图分类号:**TK421.2

**文献标志码:**A

## Performance and emissions of a direct injection diesel engine operating on biodiesel-n-butanol blends

HUANG Yong-cheng, TIAN Wei, WANG Jing-shan, WU Chuan-zhou

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to study the effect of n-butanol addition to biodiesel on engine performance and emissions, the physical and chemical properties of biodiesel-n-butanol blends with 0, 10%, 20% and 30% n-butanol by mass fraction were evaluated. Then the combustion and emission characteristics of the biodiesel-n-butanol blends were investigated by the engine dais experiment. The results show that the density, viscosity, surface tension, cetane number and lower heating value of the biodiesel-n-butanol blends decrease with the increase of n-butanol mass fraction, and the viscosity of the blends with 30% n-butanol can be reduced by 39.3%. For the biodiesel-n-butanol blends, the fuel injection delay, ignition delay and peak heat release rate increase, the maximum in-cylinder pressure and combustion temperature decrease, the combustion duration shortens and the effective thermal efficiency increases with the increase of n-butanol content in the blends. Smoke, CO and HC emissions of biodiesel are lower, while NO<sub>x</sub> emissions are higher than those of diesel. NO<sub>x</sub>, smoke and CO emissions of the blends reduce, but HC emissions

收稿日期:2015-08-10

基金项目:国家自然科学基金项目(50776069);陕西省自然科学基金项目(2015JM5236)

作者简介:黄勇成(1973-),男,湖北鄂州人,副教授,工学博士,E-mail:huangyc@mail.xjtu.edu.cn。

increase with the increase of n-butanol content.  $\text{NO}_x$  emissions of the blends with 10% n-butanol are lower than diesel. 1 tab, 9 figs, 20 refs.

**Key words:** automobile engineering; diesel engine; biodiesel; n-butanol; fuel blend; combustion characteristic

## 0 引言

石油资源的急剧消耗及其燃烧引起的环境问题促使学者们寻找环境友好可再生的清洁替代燃料,其中,含氧燃料(尤其是生物柴油和醇类)因其可再生性以及低排放得到了人们的青睐。生物柴油可由油菜、大豆、蓖麻等油料作物或动物脂肪通过酯化过程合成,是一种可再生能源<sup>[1-2]</sup>。与柴油相比,它具有较高的含氧量和十六烷值,可以使发动机燃烧与排放状况得到改善,同时,它的低热值与柴油相差不大,适合在柴油机上使用。但是由于生物柴油的粘度较大,雾化状况和冷起动机性能较差,因而单独使用会降低发动机寿命<sup>[3-8]</sup>。生物柴油中加入醇类,可以降低其粘度,改善其雾化,其中正丁醇相对于甲醇和乙醇具有十六烷值和低热值高等优点,在生物柴油中掺入粘度较低的正丁醇可以大幅降低燃油的粘度,从而改善其雾化和冷起动机性能<sup>[9-13]</sup>。

基于掺入正丁醇可以有效改善生物柴油的理化特性,国内外进行了不同比例的生物柴油-正丁醇混合燃料的研究<sup>[14-17]</sup>。Otaka 等研究了柴油机燃用生物柴油-正丁醇时的燃烧特性,发现随着正丁醇比例的增加,碳烟排放减少,而 CO 和 HC 排放增加<sup>[18]</sup>;尧命发等研究了正丁醇/生物柴油高预混压燃的燃烧和排放特性,认为正丁醇比例为 80%~85%时,较早的生物柴油喷射时刻可以获得较高的热效率(47%以上)、低的  $\text{NO}_x$  和碳烟排放<sup>[19]</sup>;Sukjit 等研究了掺氢对柴油机燃用生物柴油-正丁醇的影响,指出掺氢可以有效降低 CO 和 PM 排放,但会增加  $\text{NO}_x$  的排放, $\text{NO}_x$  的排放可以通过 EGR 得到有效的控制<sup>[20]</sup>。

基于此,本文首先对不同质量分数的生物柴油-正丁醇混合燃料的理化特性进行研究,然后在直喷式柴油机上研究其燃烧和排放特性,以期得到正丁醇含量对混合燃料的燃烧特性、经济性以及排放性能的影响,并与 0<sup>#</sup> 柴油进行了对比。这些工作为现实应用提供了理论支持。

## 1 燃料物理特性和发动机试验装置

### 1.1 试验装置

试验用发动机为 TY1100 型单缸直喷式柴油

机,该发动机的缸径为 100 mm,行程为 115 mm,燃烧室为  $\omega$  型,压缩比为 18,标定转速为 2 300 r/min,标定功率为 11 kW。台架试验中保持发动机的参数不变,在最大转矩转速 1 600 r/min 和高速 2 000 r/min 的不同负荷下对比研究以上 5 种燃料的燃烧与排放特性。试验中采用瑞士 KISTLER 公司生产的压力传感器、电荷放大器、角标器以及自制的针阀升程传感器,并利用日本横河动态测试仪测量和记录示功图和喷油器针阀升程;采用 AVL DiSmoke 4000 型不透光烟度计测量排气烟度,并用消光系数大小表征碳烟浓度的高低;采用 HORIBA MEXA-720  $\text{NO}_x$  尾气分析仪测量排气中的  $\text{NO}_x$ ,并采用 HORIBA MEXA-554 尾气分析仪测量 CO 和 HC。

### 1.2 燃料物理特性

生物柴油和正丁醇能以任意比例互溶,试验制备了 3 种比例的生物柴油-正丁醇混合燃料,其中正丁醇的质量分数分别为 10%、20%和 30%,剩余为生物柴油,分别标记为 BD90N10、BD80N20 和 BD70N30。试验用燃料除了以上 3 种混合燃料外还包括 D(0<sup>#</sup> 柴油)、BD(生物柴油)。下页表 1 给出了这 5 种燃料的理化特性,其中  $\omega(\text{C})$ 、 $\omega(\text{H})$ 、 $\omega(\text{O})$  分别表示燃料中 C、H、O 的质量分数。表中燃料密度是根据《原油和液体-石油产品密度实验室测定法》(GB/T 1884—2000),利用 SY-05 型石油比重计测得;粘度是根据《粘度测量方法》(GB/T 10247—2008)中的毛细管法,利用 SYD-265D-I 型石油产品运动粘度计测得;表面张力则是根据《表面活性剂、表面张力的测定》(GB/T 22237—2008),利用德国 KRUSS 全自动表面界面张力仪 K100C 测得;低热值依照《石油产品热值测定法》(GB/T 384—1981),利用 SXHW-2 型恒温式数显量热仪对各燃料的弹热(高热值)进行测量,然后根据燃料的 C/H/O 比例计算得到低热值。

由表 1 可以看出:生物柴油的密度、粘度、表面张力比柴油的高,尤其是其粘度接近柴油所允许的上限。随着正丁醇掺入比例的增加,生物柴油-正丁醇混合燃料的密度、粘度、表面张力、十六烷值和低热值逐渐减小。与 BD 相比,BD90N10、BD80N20 和 BD70N30 的密度分别减小 1.0%、1.9%和 2.7%,

表 1 生物柴油-正丁醇混合燃料的理化特性参数

Tab. 1 Physical and chemical properties parameters of biodiesel-n-butanol blends

燃料	密度(20 ℃)/ (g·cm <sup>-3</sup> )	粘度(20 ℃)/ (mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	表面张力(12.5 ℃)/ (mN·m <sup>-1</sup> )	十六烷值	低热值/ (MJ·kg <sup>-1</sup> )	ω(C)/%	ω(H)/%	ω(O)/%
D	0.831 2	3.404 6	29.106	49.0	42.500	87.00	13.00	0.00
BD	0.866 0	7.542 0	30.393	56.0	38.400	78.00	12.00	10.00
BD90N10	0.857 6	5.418 0	30.057	52.9	37.868	76.69	12.15	11.16
BD80N20	0.850 0	5.344 0	28.931	49.8	37.335	75.38	12.30	12.32
BD70N30	0.842 3	4.576 0	28.223	46.7	36.803	74.07	12.71	13.22

粘度分别减小 28.2%、29.1%和 39.3%，表面张力分别减小 1.1%、4.8%和 7.1%，这是由于正丁醇的密度、粘度和表面张力均低于生物柴油造成的。BD80N20 的十六烷值与 0<sup>#</sup> 柴油相当。此外，由于正丁醇的含氧量高于生物柴油的含氧量，所以混合燃料的含氧量随着正丁醇质量分数的增加而增加。

2 试验结果与分析

滞燃期定义为从喷油始点(即喷油器针阀升起的瞬间)到燃烧始点(即瞬时放热率由负变正时)对应的曲轴转角;燃烧持续期定义为从燃烧始点至燃料完全燃烧之间的曲轴转角。

2.1 燃烧特性分析

图 1 给出了在相同供油提前角下,转速  $n = 1\,600\text{ r/min}$ 、平均有效压力  $p_{me} = 0.7\text{ MPa}$  时,发动机燃用不同燃料喷油器针阀升程曲线的对比。由图可以看出,生物柴油及其与正丁醇 3 种混合燃料的喷油始点比柴油提前;与生物柴油相比,随着正丁醇比例的增加,混合燃料的喷油始点逐渐推迟,即喷油延迟角逐渐增大。这是因为混合燃料的密度随着正丁醇比例的增加而减小,因而其可压缩性也随之变大,压力波在其中的传播速度随之变小,于是高压波由出油阀端传播到喷油嘴所需的时间随之变长,所以混合燃料的喷油始点随着正丁醇比例增加而推迟。

图 2 为转速  $n$  为  $1\,600\text{ r/min}$  和  $2\,000\text{ r/min}$  时,生物柴油-正丁醇混合燃料滞燃期随正丁醇质量分数的变化趋势。由图可知,在相同工况下,生物柴油的滞燃期比 0<sup>#</sup> 柴油的短,与生物柴油相比,生物柴油-正丁醇混合燃料的滞燃期随着正丁醇质量分数的增加而逐渐变长,这主要是由于正丁醇十六烷值较低,混合燃料的十六烷值随着正丁醇质量分数的增加而降低,着火性能变差。当正丁醇质量分数增至 20%时,混合燃料滞燃期与 0<sup>#</sup> 柴油的相当。

下页图 3 为转速  $n = 1\,600\text{ r/min}$ 、平均有效压力  $p_{me} = 0.70\text{ MPa}$  工况下,压力升高率( $d p/d\varphi$ )和瞬时放热率( $d Q_b/d\varphi$ )曲线随正丁醇质量分数的变

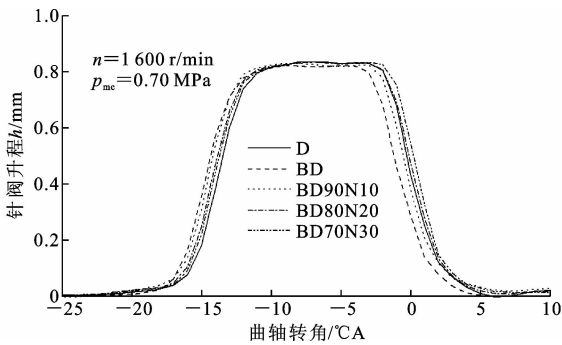


图 1 不同正丁醇质量分数下喷油器针阀升程曲轴转角  
Fig. 1 Relationship of fuel injector needle valve lift with different n-butanol mass fractions

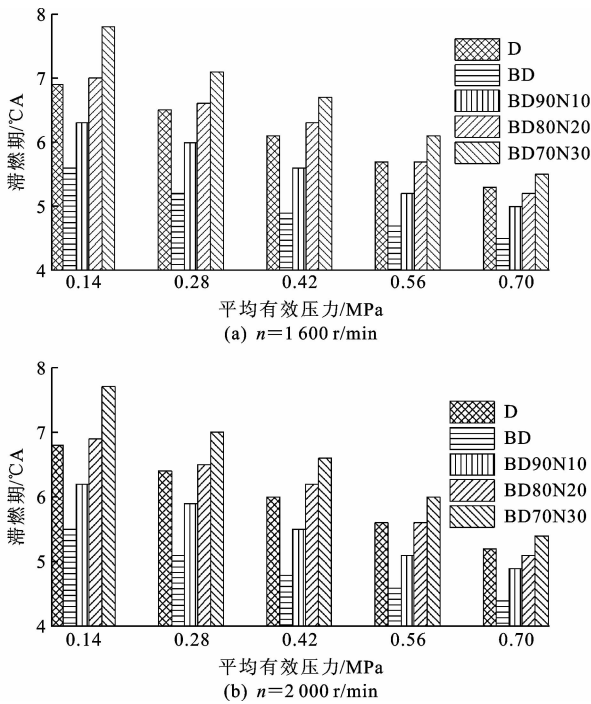


图 2 滞燃期随正丁醇质量分数的变化趋势  
Fig. 2 Variation trend of ignition delay with n-butanol mass fraction

化趋势。由图可知,与生物柴油相比,随着生物柴油中掺入的正丁醇比例增加,生物柴油-正丁醇混合燃料的燃烧始点和燃烧相位逐渐推迟。这是由于随着正丁醇比例增加,混合燃料的滞燃期延长,当正丁醇

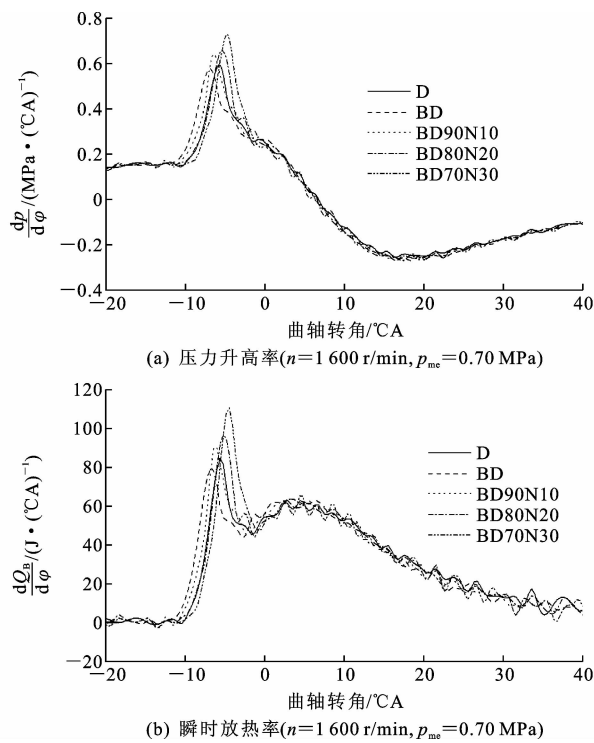


图3 不同正丁醇质量分数下压力升高率、瞬时放热率与曲轴转角的变化趋势

Fig. 3 Variation trend of pressure rise rate and instantaneous heat release rate with different n-butanol mass fractions

质量分数为 20% 时,混合燃料的燃烧始点与 0# 柴油较为接近。

由图 3 还可以看出,与生物柴油相比,生物柴油-正丁醇混合燃料的预混燃烧放热率峰值随着正丁醇质量分数的增加而增加。这是因为随着正丁醇质量分数的增加,混合燃料的滞燃期逐渐延长,于是滞燃期内喷入缸内的燃油增加,再加上生物柴油中掺入正丁醇后可以降低燃油的粘度、表面张力和沸点,从而改善燃油的雾化、加快了混合气形成,使滞燃期内形成的预混合气量增加,因而随着正丁醇质量分数的增加,预混燃烧放热率峰值逐渐增大。与柴油相比,生物柴油的预混燃烧放热率峰值较低,而混合燃料的预混燃烧放热率峰值较柴油的高。此外,压力升高率峰值变化规律与预混燃烧放热率峰值相同。

图 4 为转速  $n$  为 1 600 r/min 和 2 000 r/min 时,生物柴油-正丁醇混合燃料燃烧持续期随正丁醇质量分数的变化趋势。由图可以看出,与生物柴油相比,混合燃料的燃烧持续期随着正丁醇质量分数的增加而缩短。这是因为正丁醇的粘度较小、沸点较低,随着正丁醇掺入量的增加,混合燃料的雾化和蒸发混合得到改善,而且正丁醇的含氧量高于生物柴油,进一步缓解了局部缺氧,从而加快了燃烧过

程,缩短了燃烧持续期,因而尽管随着正丁醇质量分数的增加,生物柴油-正丁醇混合燃料的燃烧始点推迟、喷油持续期增加(因为混合燃料单位体积包含能量比生物柴油少),但其燃烧终点基本与柴油相同(图 3)。由图 4 还可以看出,与柴油相比,生物柴油的燃烧持续期较长,而混合燃料的燃烧持续期较柴油的短,因此生物柴油中掺入正丁醇可以加快燃烧,缩短燃烧持续期。

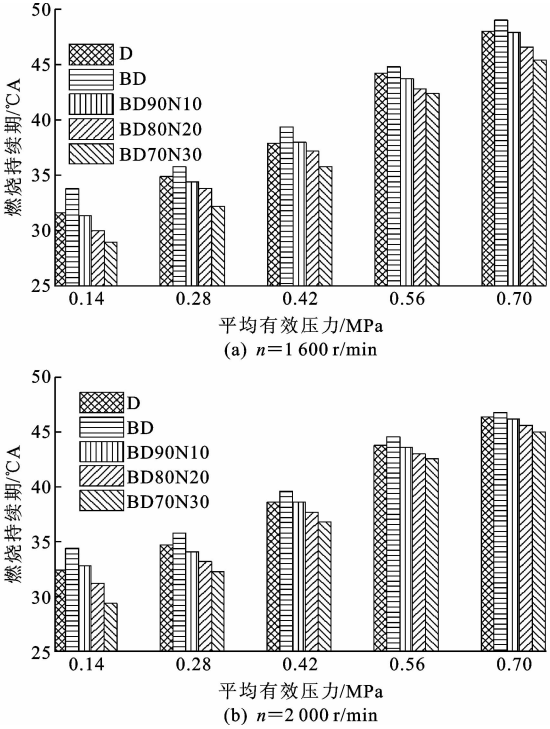


图4 燃烧持续期随正丁醇质量分数的变化趋势  
Fig. 4 Variation trend of combustion duration with n-butanol mass fraction

下页图 5 描述了转速  $n=1\ 600\ \text{r/min}$ 、平均有效压力  $p_{me}=0.70\ \text{MPa}$  工况下,缸内压力和燃烧温度随正丁醇质量分数的变化趋势。从图中可以看出,生物柴油的缸内最高燃烧温度和最高燃烧压力均高于 0# 柴油,但随着生物柴油中掺入正丁醇质量分数的增大,混合燃料的缸内最高燃烧温度和最高燃烧压力逐渐降低。这可以解释为,虽然混合燃料的预混燃烧放热量随着正丁醇比例增加而增加(图 3),但是一方面由于正丁醇的气化潜热较高,其蒸发会消耗一部分热量;另一方面,随着混合燃料中正丁醇比例增加,滞燃期逐渐延长,燃烧相位推迟。由图 5 还可以看出,混合燃料的缸内最高燃烧温度和压力仍高于 0# 柴油。

2.2 经济性分析

下页图 6 为发动机在转速  $n=1\ 600\ \text{r/min}$  时,燃料的燃油经济性以及有效热效率随正丁醇质量分

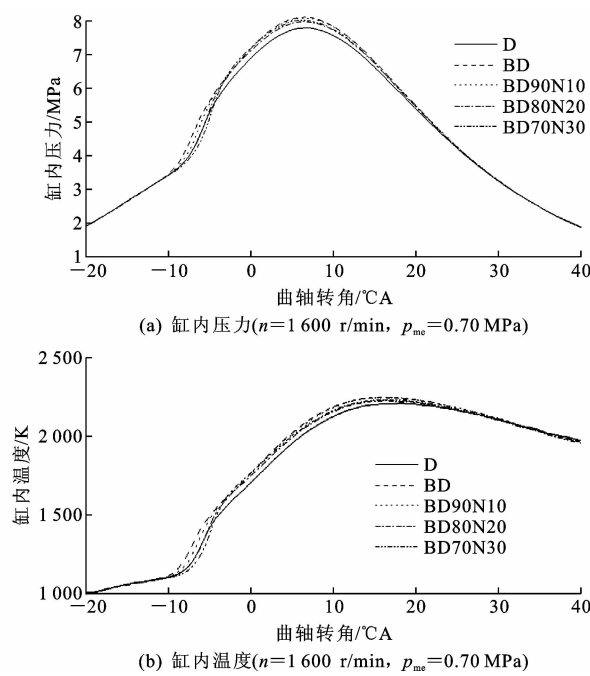


图 5 不同正丁醇质量分数下缸内压力、缸内温度随曲轴转角的变化趋势

Fig. 5 Variation trend of in-cylinder pressure and combustion temperature with different n-butanol mass fractions

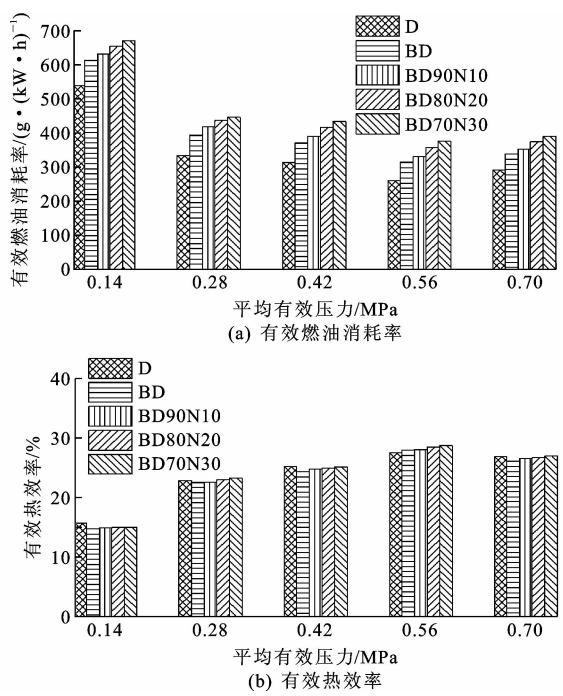


图 6 燃油经济性随正丁醇质量分数的变化趋势

Fig. 6 Variation trend of fuel economy with n-butanol mass fraction

数的变化趋势。有效热效率的计算公式为

$$\eta_{et} = 3.6 \times 10^6 / H_u b_e \times 100\% \quad (1)$$

式中: $b_e$  为有效燃油消耗率( $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ); $H_u$  为燃料低热值( $\text{MJ}/\text{kg}$ )。

4 种混合油和 0<sup>#</sup> 柴油的低热值见表 1。由图 6 可看出,随着正丁醇掺入量的增加,混合燃料有效燃油消耗率逐渐增大,而有效热效率略有上升。这是因为:正丁醇的低热值比生物柴油低,因而随着其掺入量的增大,混合燃料的低热值降低,油耗增大,正丁醇的粘度和沸点均低于生物柴油;同时正丁醇有更高的含氧量,正丁醇的加入不但可以改善生物柴油的喷雾与蒸发状况,还可使燃料燃烧更充分并缩短燃烧持续期,因而正丁醇的掺入使混合燃料的热效率有所上升。由图 6 还可看出,与柴油相比,生物柴油的热效率略低,而混合燃料的热效率与柴油的差别不大。

### 2.3 排放特性分析

图 7 为转速  $n$  为 1 600 r/min 和 2 000 r/min 时, $\text{NO}_x$  排放随正丁醇质量分数的变化趋势。由图 7 可知,相同工况下,生物柴油的  $\text{NO}_x$  排放较 0<sup>#</sup> 柴油的高,这是由生物柴油的含氧量比柴油大,最高燃烧温度也高于柴油共同作用的结果;与生物柴油相比,混合燃料的  $\text{NO}_x$  排放随着正丁醇质量分数的增加而逐渐减少。这主要是由于在生物柴油中掺入正丁醇后,尽管燃料的含氧量有所增加,但此时混合燃料的最高燃烧温度降低,高温持续时间变短,燃烧温度起决定性作用,从而使  $\text{NO}_x$  排放减小。除个别工况外,生物柴油中掺入 10% 的正丁醇就可使其  $\text{NO}_x$

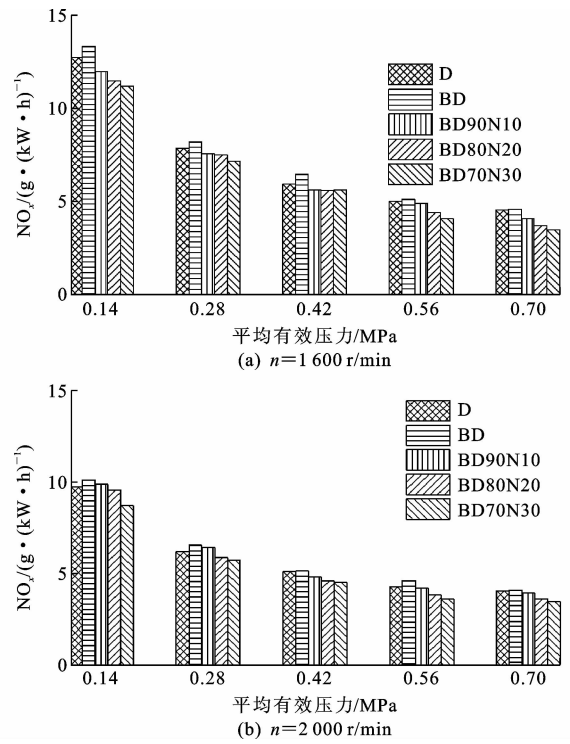


图 7  $\text{NO}_x$  排放随生物柴油和正丁醇质量分数的变化趋势

Fig. 7 Variation trend of  $\text{NO}_x$  emissions with n-butanol mass fraction

排放低于柴油。

图 8 为转速  $n$  为 1 600 r/min 和 2 000 r/min 时, 碳烟排放随正丁醇质量分数的变化趋势。随着正丁醇质量分数的增大, 生物柴油-正丁醇混合燃料的碳烟排放逐渐减少。这主要是因为: 碳烟的生成条件是高温和缺氧, 生物柴油-正丁醇混合燃料的高含氧量可以改善局部缺氧, 从而降低浓混合气区的碳烟生成; 其次, 生物柴油中掺入正丁醇后, 燃料的密度、粘度和表面张力减小, 改善了雾化特性, 减少了形成过浓区的可能性, 也起到了抑制碳烟生成的作用。

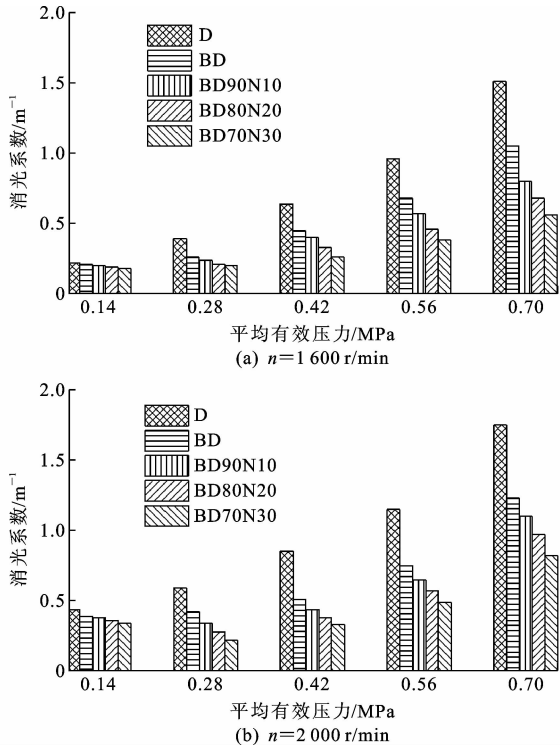


图 8 碳烟排放随生物柴油和正丁醇质量分数的变化趋势

Fig. 8 Variation trend of smoke emissions with n-butanol mass fraction

图 9 为转速  $n=1\ 600\ \text{r/min}$  时, HC、CO 排放随正丁醇质量分数的变化趋势。相同工况下, 生物柴油的 HC 和 CO 排放低于 0<sup>#</sup> 柴油; 随着正丁醇含量的增加, 混合燃料的 HC 排放逐渐升高, CO 排放逐渐减少。这主要是因为: 生物柴油中掺入正丁醇后, 燃料的密度、粘度和表面张力减小, 改善了雾化特性, 减少了形成过浓区和碰壁的可能性, 使 HC 生成量减少, 但同时缸内燃烧温度降低, 不利于 HC 的后期氧化。两因素相互作用使得混合燃料的 HC 排放随着正丁醇含量的增加逐渐升高; 而柴油机的 CO 排放主要源自局部缺氧区域, 生物柴油和正丁醇本身含有氧, 且生物柴油-正丁醇混合燃料的含氧量随着正丁醇质量分数的增加而增加, 因而可以缓解局部缺氧, 使燃烧更完全, 减少 CO 生成, 这在大

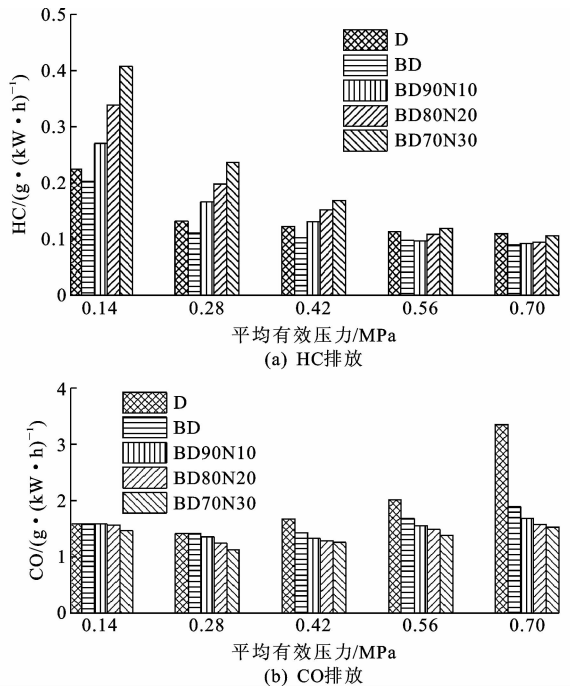


图 9 HC、CO 排放随正丁醇质量分数的变化趋势

Fig. 9 Variation trend of HC and CO emissions with n-butanol mass fraction

负荷时更明显。

### 3 结 语

(1) 生物柴油的密度、粘度、表面张力比 0<sup>#</sup> 柴油高, 尤其是其粘度接近 0<sup>#</sup> 柴油所允许的上限; 生物柴油-正丁醇混合燃料的密度、粘度、表面张力、十六烷值和低热值随着正丁醇比例的增加逐渐减小, 其中生物柴油中掺入 30% 正丁醇时其粘度可减小 39.3%。

(2) 随着正丁醇比例的增加, 生物柴油-正丁醇混合燃料的喷油延迟角逐渐增大, 但混合燃料的喷油延迟角仍小于 0<sup>#</sup> 柴油。生物柴油的滞燃期比 0<sup>#</sup> 柴油短, 而混合燃料的滞燃期随着正丁醇比例的增加而逐渐变长, 正丁醇比例为 20% 的混合燃料的滞燃期与 0<sup>#</sup> 柴油相当。

(3) 随着正丁醇比例的增加, 生物柴油-正丁醇混合燃料的预混燃烧放热率峰值和压力升高率峰值逐渐增加, 而缸内最高燃烧温度和最高压力逐渐降低, 燃烧持续期逐渐缩短, 有效热效率逐渐增加。

(4) 与 0<sup>#</sup> 柴油相比, 生物柴油的碳烟、CO 和 HC 排放较低, NO<sub>x</sub> 排放较高。随着正丁醇比例的增加, 混合燃料的 NO<sub>x</sub>、碳烟和 CO 排放逐渐降低, HC 排放逐渐升高, 而且掺入 10% 的丁醇就可使其 NO<sub>x</sub> 排放低于柴油。

(5) 研究发动机结构参数对柴油机燃用生物柴

油-正丁醇混合燃料的影响,进一步优化混合燃料发动机的燃烧与排放,是下一步的研究工作。

## 参考文献:

## References:

- [1] 何邦全,王建昕,阎小光. 柴油机含氧燃料的研究进展[J]. 农业机械学报, 2003, 34(1): 134-138.  
HE Bang-quan, WANG Jian-xin, YAN Xiao-guang. Review of the progress in oxygented fuels for diesel engines[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2003, 34(1): 134-138. (in Chinese)
- [2] 董亚琴,安高军,熊春华,等. 含氧柴油的性能研究[J]. 石油化工安全环保技术, 2013, 29(5): 43-46.  
DONG Ya-qin, AN Gao-jun, XIONG Chun-hua, et al. Research on the performance of oxygenated diesel[J]. Petrochemical Safety and Environmental Protection Technology, 2013, 29(5): 43-46. (in Chinese)
- [3] AGARWAL A K. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2007, 33(3): 233-271.
- [4] MEHTA R N, CHAKRABORTY M, MAHANTA P, et al. Evaluation of fuel properties of butanol-biodiesel-diesel blends and their impact on engine performance and emissions[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010, 49(16): 7660-7665.
- [5] KINOSHITA E, HAMASAKI K, IMABAYASHI R. Diesel combustion characteristics of biodiesel with 1-butanol[J]. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2012, 5(1): 558-565.
- [6] LEBEDEVAS S, LEBEDEVA G, SENDZIKIENE E, et al. Investigation of the performance and emission characteristics of biodiesel fuel containing butanol under the conditions of diesel engine operation[J]. Energy Fuels, 2010, 24(8): 4503-4509.
- [7] LIU H F, LEE C F, HUO M, et al. Combustion characteristics and soot distributions of neat butanol and neat soybean biodiesel[J]. Energy Fuels, 2011, 25(7): 3192-3203.
- [8] LIU H F, LEE C F, HUO M, et al. Comparison of ethanol and butanol as additives in soybean biodiesel using a constant volume combustion chamber[J]. Energy Fuels, 2011, 25(4): 1837-1846.
- [9] DOĞAN O. The influence of n-butanol/diesel fuel blends utilization on a small diesel engine performance and emissions[J]. Fuel, 2011, 90(7): 2467-2472.
- [10] LAPUERTA M, ARMAS O, HERREROS J M. Emissions from a diesel-bioethanol blend in an automotive diesel engine[J]. Fuel, 2008, 87(1): 25-31.
- [11] LU X C, YANG J G, ZHANG W G, et al. Effect of cetane number improver on heat release rate and emissions of high speed diesel fueled with ethanol-diesel blend fuel [J]. Fuel, 2004, 83(14/15): 2013-2020.
- [12] SAYIN C, OZSEZEN A N, CANAKCI M. The influence of operating parameters on the performance and emissions of a DI diesel engine using methanol-blended-diesel fuel[J]. Fuel, 2009, 89(7): 1407-1414.
- [13] VIOLETA M, KIRIL K, IRINA K. Possibilities for improving the cold flow properties of biodiesel fuel by blending with butanol[J]. Renewable Energy, 2015, 75(3): 805-807.
- [14] NADIR Y, FRANCISCO M V, KYLE B. Effect of biodiesel-butanol fuel blends on emissions and performance characteristics of a diesel engine[J]. Fuel, 2014, 135(11): 46-50.
- [15] RAKOPOULOS C D, DIMARATOS A M, GIAKOURIS E G. Study of turbocharged diesel engine operation, pollutant emissions and combustion noise radiation during starting with bio-diesel or n-butanol diesel fuel blends [J]. Applied Energy, 2011, 88(11): 3905-3916.
- [16] ZHANG Z H, BALASUBRAMANIAN R. Influence of butanol addition to diesel-biodiesel blend on engine performance and particulate emissions of a stationary diesel engine [J]. Applied Energy, 2014, 119(4): 530-536.
- [17] RAKOPOULOS D C. Combustion and emissions of cottonseed oil and its bio-diesel in blends with either n-butanol or diethyl ether in HSDI diesel engine[J]. Fuel, 2013, 105(3): 603-613.
- [18] OTAKA T, FUSHIMI K, KINOSHITA E, et al. Diesel combustion characteristics of palm oil methyl ester with 1-butanol[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers; part B, 2010, 76(766): 996-1003.
- [19] 尧命发, 庞阔, 谷静波, 等. 正丁醇/生物柴油高预混压燃燃烧及排放特性的试验[J]. 内燃机学报, 2013, 31(3): 193-199.  
YAO Ming-fa, PANG Kuo, GU Jing-bo, et al. Experiment on combustion and emission characteristics of n-butanol/biodiesel dual fuel HPCC[J]. Transactions of Csice, 2013, 31(3): 193-199. (in Chinese)
- [20] SUKJIT E, HERREROS J M, DRARN K D, et al. Effect of hydrogen on butanol-biodiesel blends in compression ignition engines[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(3): 1624-1635.