

# 餐厨废弃油脂生物柴油对船舶柴油机性能、 排放特性以及燃烧特性的影响

贺献忠,王欣,江国和,吴刚,楼海军

(上海海事大学商船学院,上海201306)

**摘要:**为探讨生物柴油应用于船舶柴油机的可行性,将餐厨废弃油脂生物柴油与柴油混合,在船舶柴油机上进行试验,测试其对船舶柴油机性能、排放特性和燃烧特性的影响。结果表明:生物柴油混合物的高黏度以及低热值会降低有效热效率,并导致燃油消耗率略有升高;由于生物柴油的高含氧量促进完全燃烧,相比于柴油,燃烧生物柴油混合物后,一氧化碳排放量最高下降17%,二氧化碳排放量最高下降5.1%,二氧化硫排放量最高下降41%,碳烟排放量最高下降36%;生物柴油过快的燃烧速率提高了气缸内的燃烧温度,以及高含氧量促进了氮氧化物的排放;生物柴油混合物燃烧时的缸内压力与柴油非常接近。餐厨废弃油脂生物柴油对船舶柴油机的性能、燃烧特性和排放特性均具有较好的表现,可以作为柴油的替代燃料用于船舶柴油机。

**关键词:**餐厨废弃油脂;生物柴油;船舶柴油机;性能;排放特性;燃烧特性

中图分类号:TK427;U677.2 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2022)11-0063-06

## Effects of waste cooking oil biodiesel on performance, emissions characteristic and combustion characteristic of marine diesel engine

HE Xianzhong, WANG Xin, JIANG Guohe, WU Gang, LOU Haijun

(Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** In order to discuss the feasibility of applying biodiesel to marine diesel engine, waste cooking oil biodiesel was mixed with diesel, and the test was carried out on marine diesel engine to investigate the effects of biodiesel on performance, emissions characteristic and combustion characteristic of marine diesel engine. The results showed that the high viscosity and low calorific value of the biodiesel mixture reduced the effective thermal efficiency and cause a slight increase in the fuel consumption rate. After burning the biodiesel mixture, the high oxygen content of biodiesel promoted complete combustion. Compared with diesel, carbon monoxide, carbon dioxide, sulfur dioxide and soot emissions were reduced by up to 17%, 5.1%, 41% and 36%, respectively. However, the excessively fast combustion rate of biodiesel increased the combustion temperature in the cylinder, and the high oxygen content promoted the emission of nitrogen oxides. The cylinder pressure of biodiesel was very close to that of diesel. Waste cooking oil biodiesel has good performance on performance, combustion characteristic and emissions characteristic of marine diesel engine, and it can be used as an alternative fuel to diesel for marine diesel engine.

**Key words:** waste cooking oil; biodiesel; marine diesel engine; performance; emissions characteristic; combustion characteristic

收稿日期:2021-08-27;修回日期:2022-06-06

基金项目:上海市科技计划(20DZ2252300);上海市科学技术委员会项目(18DZ1202902)

作者简介:贺献忠(1969),男,工程师,硕士,研究方向为船舶柴油机的振动与排放(E-mail)xzhe@shmtu.edu.cn。

通信作者:王欣,硕士(E-mail)sntcwx@163.com。

柴油机因热效率高而被广泛使用,但是其燃烧产生的废气对环境造成严重影响,其中大型远洋船舶排放的废气对海上空气影响严重,尤其是对沿海地区,为此国际海事组织进一步加强了对船舶排放

的限制。另外,世界石油储量分布不均衡,以至于许多地区不得不依赖其他地区的燃料。因此,有必要寻找、生产和使用可再生且减少温室气体排放的替代和可持续清洁燃料。

生物柴油的理化性质和柴油接近,其因具有原料丰富、可再生性以及更好的发动机性能和更少的温室气体排放等特点,成为研究热点<sup>[1-5]</sup>。Zhang等<sup>[6]</sup>采用4种以植物油为原料生产的生物柴油与柴油混合,并与柴油进行对比测试,认为生物柴油的排放特性与其混合比例的关系并不明确,在高负荷时生物柴油有效减少了一氧化碳(CO)和碳氢化合物的排放,但在低负荷下并不明显。Avsl等<sup>[7]</sup>使用橡胶籽油与甲醇制备生物柴油,并与柴油按不同比例混合得到生物柴油混合物,进行柴油机测试,结果显示,B10的制动比油耗几乎接近于传统柴油,并且有更好的排放水平,认为生物柴油可以作为常规柴油的可行替代物。Veera Raghavulu等<sup>[8]</sup>将菜籽油和蛇瓜油制备的生物柴油分别与柴油混合得到两种生物柴油混合物,进行柴油机测试,结果表明,菜籽油生物柴油混合物在柴油机性能及排放方面的表现均优于蛇瓜油生物柴油混合物,总体上两种生物柴油混合物的排放量均低于柴油。

生物柴油的主要原料为植物油,但是对于多数发展中国家,食用油脂仍依赖进口,因此不允许使用单一生产源<sup>[9]</sup>。生物柴油的原料来源、生产技术的多样性,导致不同发动机具有复杂多样的燃烧和排放特性。目前,我国主要使用餐厨废弃油脂来制备生物柴油,不仅降低了原料成本,还能防止“地沟油”流入餐桌,解决食品安全问题。但是,目前生物柴油的相关研究主要集中在车用柴油机上<sup>[10-13]</sup>,在船舶柴油机上的研究较少。本文将餐厨废弃油脂生物柴油与柴油混合,考察其作为替代燃料在船舶柴油机上应用的可行性,对比评估柴油和生物柴油混合物在相同负荷和转速下对柴油机性能、燃烧特性和排放特性的影响,以期生物柴油在船舶柴油机上的应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 试验燃油

柴油(D100),国六0#柴油;餐厨废弃油脂生物柴油,上海中器环保科技有限公司生产;将生物柴油与D100按一定体积比混合得到生物柴油混合物,分别为B5(5%生物柴油)、B10(10%生物柴油)和B15(15%生物柴油)。柴油和生物柴油混合物的理化性质见表1。

表1 柴油和生物柴油混合物的理化性质

项目	D100	B5	B10	B15
密度/(kg/m <sup>3</sup> )	825.2	827.2	829.6	831.8
运动黏度/(mm <sup>2</sup> /s)	2.604	2.679	2.750	2.775
总热值/(MJ/kg)	46.110	45.920	45.495	45.360
净热值/(MJ/kg)	43.015	42.880	42.545	42.445
闪点/°C	68.5	69.0	69.5	70.5
酸度/(mg/100 mL)	4.71	5.30	5.99	8.54
凝点/°C	-17	-17	-15	-14

### 1.1.2 试验设备

采用一台船舶推进柴油机进行测试。该柴油机的活塞行程为150 mm,气缸直径为135 mm,在额定转速1500 r/min时持续功率为162 kW。

### 1.2 试验方法

在船舶柴油机推进特性和负荷特性模式下进行试验,各试验点的转速和负荷如表2所示。在船舶柴油机稳定运行时,测试其性能指标及参数。其中:试验过程的废气排放(包括CO、CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、碳烟排放)以及尾气中的O<sub>2</sub>含量使用TESTO-350烟气分析仪观测。

表2 测试方案

推进特性		负荷特性	
转速/(r/min)	负荷/%	转速/(r/min)	负荷/%
945	25	1500	25
1200	50	1500	50
1365	75	1500	75
1450	90	1500	90
1500	100	1500	100

## 2 结果与分析

### 2.1 柴油机性能

#### 2.1.1 燃油消耗率(BSFC)

图1为柴油机燃烧时BSFC的变化。BSFC是评价柴油机燃用各种燃料性能的重要参数。由图1可知,在相同的发动机运行条件下,生物柴油混合物燃烧时需要消耗更多的燃油来释放与柴油相当的热量。相比于柴油,不同比例生物柴油混合物的BSFC均有所升高,并随着生物柴油占比的升高更加明显。生物柴油的含氧量高,但氧分子在燃烧过程中不产生热量,因此低热值是BSFC增加的关键因素。除此之外,黏度和密度对BSFC有重要影响,生物柴油较高的黏度降低其流动性,导致燃烧过程中雾化不良,并可能导致发动机低负荷运行时不完全燃烧或喷油器积炭。推进特性下,随负荷的增大柴油机转速不断提升,BSFC呈降低趋势。负荷特性下,柴油机转速保持不变,随负荷的逐步升高BSFC不断降低,在负荷为75%时达到最小值,之后变化很小。

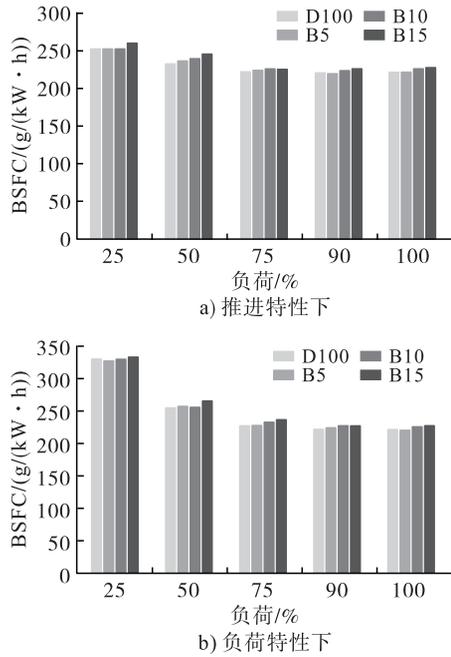


图1 生物柴油对燃油消耗率的影响

### 2.1.2 有效热效率(BTE)

图2为柴油机燃烧时BTE的变化。

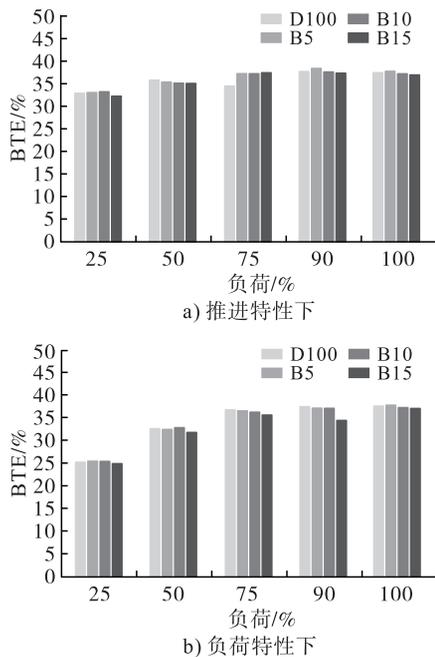


图2 生物柴油对有效热效率的影响

由图2可知,总体来看,生物柴油混合物的BTE曲线与柴油具有相同的趋势,均随着负荷的增大先升高后降低。这可能是由于涡轮增压器的能力有限以及高负荷下喷射的燃料较多,气缸的空燃比下降所致。相对于柴油,生物柴油混合物的BTE总体略有降低,但差距较小。实际上生物柴油的氧化性质有助于燃烧,但是试验用生物柴油混合物的黏度明显高于柴油,且燃烧过程中雾化不良和低热值会导致BTE降低。

## 2.2 排放特性

### 2.2.1 一氧化碳(CO)

图3为柴油机在不同工况下CO排放量变化。

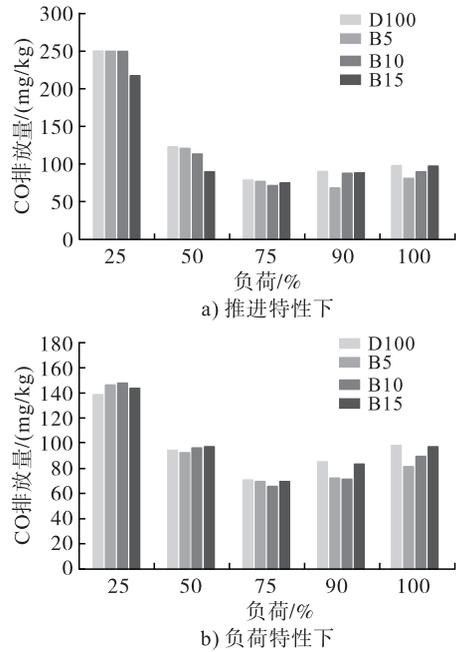


图3 生物柴油对CO排放量的影响

由图3a可知,推进特性下,低负荷时柴油机的转速较低,气缸温度低使得CO转化为CO<sub>2</sub>的速度较慢,之后负荷增大转速提升,柴油机气缸内温度升高,改善了燃油的雾化,降低了CO排放量,在负荷为75%时达到最低。B10和B15在高负荷下的CO排放量高于B5,这可能是由于两者黏度更高,雾化质量较差,降低了燃烧效率。

由图3b可知,在负荷特性下,随着柴油机负荷的升高CO排放量降低,在75%负荷下燃烧最好,CO氧化程度高,其排放量达到最小值,但随着负荷进一步升高,空燃比降低,气缸内氧气不足,CO排放量再次升高。在负荷特性下,B5、B10、B15的CO排放量相比于柴油整体平均下降6.1%、4.9%和2.5%。总试验测试过程中,不同工况下生物柴油混合物的CO排放量最高下降17%。此外,总体来看,生物柴油混合物的CO排放量相比柴油有所降低,主要原因是生物柴油含氧量高,相当于增加了空燃比,促进CO转化为CO<sub>2</sub>,另外,气缸内燃烧温度较高以及高十六烷值促进CO氧化。生物柴油的较高黏度会导致燃烧不良,为CO形成提供条件,但本研究结果显示其作用不明显。

### 2.2.2 二氧化碳(CO<sub>2</sub>)

图4为柴油机在不同工况下CO<sub>2</sub>排放量变化。由图4可知,随着负荷的升高燃油喷入量增加,大量CO氧化为CO<sub>2</sub>,CO<sub>2</sub>的排放量明显升高,之后在中

高负荷下增长缓慢。与柴油相比,生物柴油混合物的  $\text{CO}_2$  排放量减少,主要是由于生物柴油的增加提高了燃油密度,导致实际喷油始点提前,喷油和点火滞燃期短,加上生物柴油的高含氧量,使得燃烧过程更加完全,因此  $\text{CO}_2$  排放量有所降低。在推进特性下,B5、B10、B15 的  $\text{CO}_2$  排放量最高下降 3.3%、2.2%、5.1%,在负荷特性下,B5、B10、B15 的  $\text{CO}_2$  排放量最高下降 4.2%、1.8%、1.8%,与柴油基本相同。

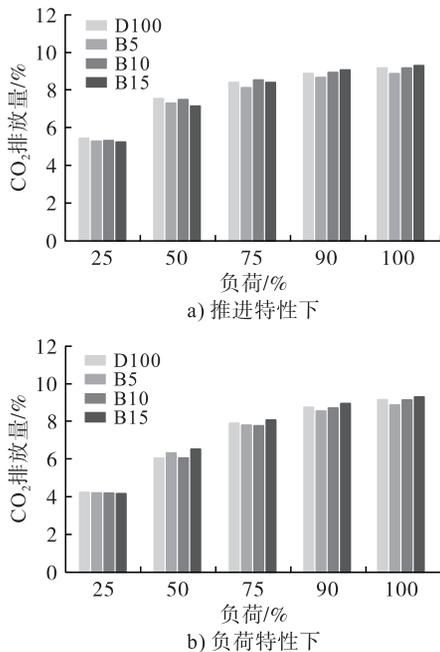


图4 生物柴油对  $\text{CO}_2$  排放量的影响

### 2.2.3 氮氧化物( $\text{NO}_x$ )

图5为柴油机在不同工况下  $\text{NO}_x$  排放量变化。由图5a可知, $\text{NO}_x$  排放量随着负荷的提升而增加,并在中高负荷时增长缓慢。随柴油机转速的增加,气缸内湍流增加,导致燃油与空气混合变得更快、更浓。在较高的转速下,反应时间减少,停留时间缩短,导致  $\text{NO}_x$  略有降低。由图5b可知, $\text{NO}_x$  排放量随着柴油机负荷升高而增加,并在中高负荷时缓慢增长。在低负荷下,因为气缸中有足够的氧气, $\text{NO}_x$  的形成主要取决于局部高温区,而不是燃油含氧量,随着负荷升高,气缸内温度和燃烧持续时间也逐渐增加, $\text{NO}_x$  排放量随之增加。

与柴油相比,总体来看生物柴油混合物的  $\text{NO}_x$  排放量增加。这是由于生物柴油的高含氧量、较高的绝热火焰温度和较高的气缸温度,促进  $\text{NO}_x$  的排放。另外,生物柴油比例的增加也会促进  $\text{NO}_x$  的排放。除此之外,较高的十六烷值和较短的点火延迟也有利于  $\text{NO}_x$  的生成。B5 和 B15 的  $\text{NO}_x$  排放量平均上升 1.7% 和 4.2%,B10 的  $\text{NO}_x$  排放量总体下降

3.2%。

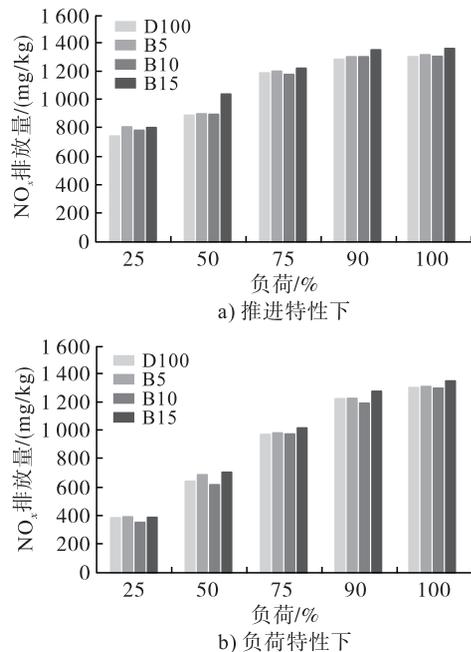
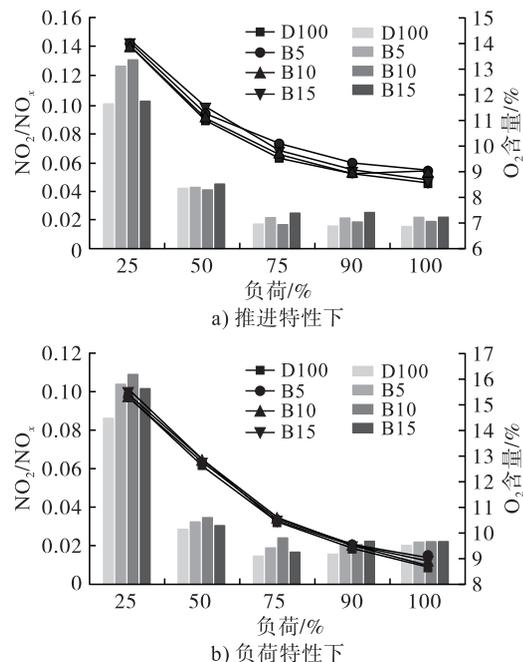


图5 生物柴油对  $\text{NO}_x$  排放量的影响

$\text{NO}_x$  主要由  $\text{NO}$  和  $\text{NO}_2$  组成,虽然  $\text{NO}_2$  通常只占  $\text{NO}_x$  的一小部分,但是  $\text{NO}_2$  是美国环境保护局规定的标准污染物之一, $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  影响臭氧的产生和空间分布。图6为柴油机在不同工况下  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  排放变化。



注:柱状图为  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ , 曲线图为  $\text{O}_2$  含量

图6 生物柴油对  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  排放的影响

由图6可知,随着负荷的升高  $\text{NO}_2$  所占比例不断下降。燃烧过程中  $\text{NO}$  和  $\text{NO}_2$  可以相互转化,在火焰区形成的  $\text{NO}$  可随后转化为  $\text{NO}_2$ ,并且大部分  $\text{NO}_2$  会转化回  $\text{NO}$ 。随着负荷升高燃烧速度加快, $\text{NO}$  没有足够时间被氧化为  $\text{NO}_2$ ,以及较冷区域减少

导致  $\text{NO}_2$  转化为  $\text{NO}$ , 因此  $\text{NO}_2$  比例下降。但与柴油相比, 燃烧生物柴油混合物更容易产生  $\text{NO}_2$ , 同时其尾气中的氧气含量高于柴油的, 说明生物柴油混合物的高含氧量促进了  $\text{NO}$  氧化产生  $\text{NO}_2$ 。

#### 2.2.4 二氧化硫 ( $\text{SO}_2$ )

图7为柴油机在不同工况下  $\text{SO}_2$  排放量变化。由图7可见, 随着负荷的升高, 燃烧更加完全,  $\text{SO}_2$  的排放量不断下降。在负荷特性下, 25% 及 50% 负荷时, 生物柴油混合物的排放量较柴油有所升高, 这是由于生物柴油的黏度较高, 雾化较差导致燃烧不充分。但整体上, 在船舶中引入生物柴油混合物会降低硫化物的排放, 生物柴油混合物的  $\text{SO}_2$  排放量相对于柴油最高降低 41%。但是本次试验使用的柴油为超低硫油, 混合生物柴油后的硫含量也极低, 最终结果显示 4 种燃油的  $\text{SO}_2$  排放量均较低, 不会对环境造成严重污染。

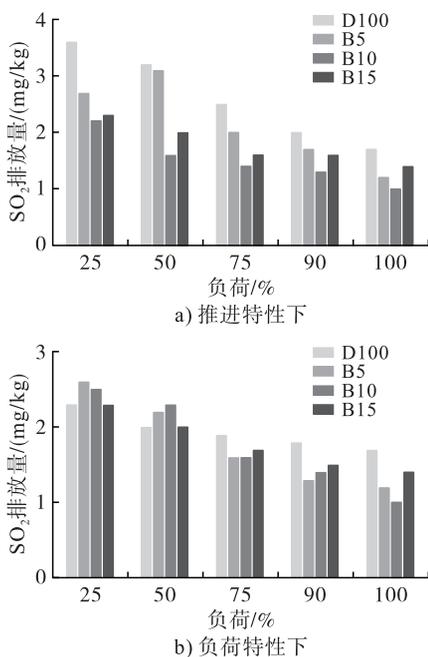


图7 生物柴油对  $\text{SO}_2$  排放量的影响

#### 2.2.5 碳烟 (Soot)

图8为柴油机在不同工况下 Soot 排放量变化。由图8a可知, 推进特性下, 25% 负荷时 Soot 排放量最小, 随着负荷升高, 在 50% 负荷时 Soot 排放量达到最大, 然后降低。在低负荷下, 气缸内温度低, 转速增加使燃料消耗增加, 进而导致 Soot 排放量增加。由图8b可知, 在负荷特性下, 总体上 Soot 排放量随着负荷的升高而增加。B15 的 Soot 排放量明显高于其他 3 种燃油, 但 B5 和 B10 的 Soot 排放量相比于柴油有明显降低, 所有工况下 B5 和 B10 的 Soot 排放量最多降低 36% 和 32%。这是由于生物柴油的高含氧量、燃烧持续时间长以及高燃烧温度会促

进 Soot 氧化, 但是 B15 的黏度最高导致其雾化质量差, 因此其 Soot 排放量有所上升。

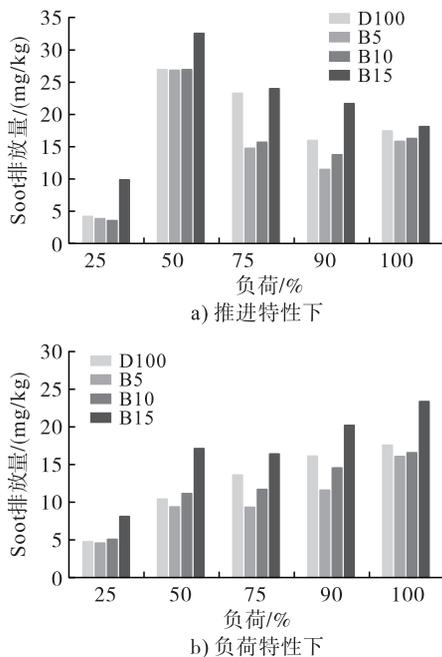


图8 生物柴油对 Soot 排放量的影响

#### 2.3 燃烧特性

缸内压力为燃烧室内燃油完全燃烧达到的净最大压力。图9为不同燃油的缸内压力随曲轴转角的变化曲线。

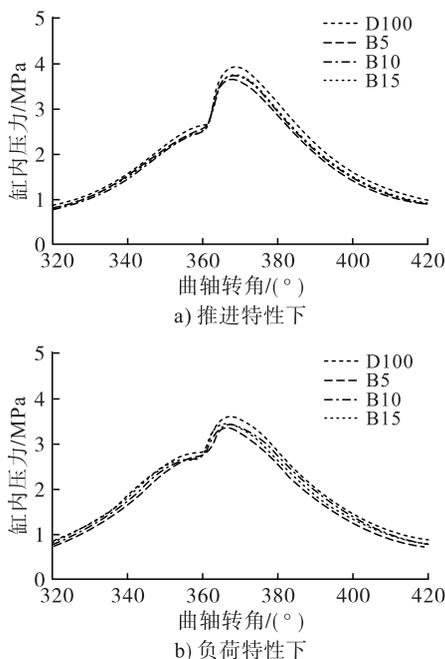


图9 柴油及生物柴油的缸内压力随曲轴转角的变化

由图9可见, 柴油的缸内压力略高于生物柴油混合物的缸内压力, 这主要是因为柴油的点火延迟期较长, 在点火延迟期内积聚的试验燃油经历快速燃烧, 从而使燃烧室内的压力升高。而生物柴油混合物在预混燃烧阶段燃烧的燃油量比柴油低, 但在

扩散阶段消耗的燃油量更多,生物柴油较高的体积模量导致燃油喷射过程速度较高和燃油的提前燃烧。同时,生物柴油更高的十六烷值提前了缸压峰值出现的位置,这是由于更高的密度导致喷射提前,以及更短的点火延迟导致提前燃烧。此外,尽管生物柴油的热值较低,但由于氧的存在,燃烧相对完全,燃烧温度也随之升高,导致更高的蒸发速率和更完全的燃烧,因此生物柴油混合物的缸内压力下降幅度较小。

### 3 结论

在推进特性和负荷特性下,生物柴油混合物的燃油消耗率均高于柴油的,有效热效率总体略有降低。燃烧生物柴油混合物时,柴油机的一氧化碳、二氧化碳、二氧化硫、碳烟排放量总体均低于柴油,但B15的黏度过高导致其碳烟排放量高于其他燃油。燃烧生物柴油混合物,柴油机的氮氧化物排放量高于柴油的, $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ 随负荷升高逐渐降低。餐厨废弃油脂生物柴油对船舶柴油机的性能、燃烧特性和排放特性均具有较好的表现,可以作为柴油的替代燃料用于船舶柴油机。

### 参考文献:

- [1] MOHD NOOR C W, NOOR M M, MAMAT R. Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: a review [J]. *Renew Sust Energ Rev*, 2018, 94: 127–142.
- [2] CHANG Y C, JIA M, LI Y P, et al. Development of a skeletal oxidation mechanism for biodiesel surrogate [J]. *Proc Combust Inst*, 2015, 35(3): 3037–3044.
- [3] MOAZENI F, CHEN Y C, ZHANG G. Enzymatic transesterification for biodiesel production from used cooking oil, a review [J]. *J Cleaner Prod*, 2019, 216: 117–128.
- [4] ANWAR M, RASUL M G, ASHWATH N. A pragmatic and critical analysis of engine emissions for biodiesel blended fuels [J/OL]. *Fuel*, 2020, 270: 117513 [2021–08–27]. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117513>.
- [5] 吴刚,江国和,杨智远,等. 船用柴油机燃用生物柴油排放与消烟机理[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2019, 40(3): 468–476.
- [6] ZHANG Z Q, E J Q, DENG Y W, et al. Effects of fatty acid methyl esters proportion on combustion and emission characteristics of a biodiesel fueled marine diesel engine [J]. *Energ Convers Manage*, 2018, 159: 244–253.
- [7] AVSL S B, SUBRAMANIAPILLAI N, KHADHAR MOHAMED M S B, et al. Effect of rubber seed oil biodiesel on engine performance and emission analysis [J/OL]. *Fuel*, 2021, 296: 120708 [2021–08–27]. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120708>.
- [8] VEERA RAGHAVULU K, UPPALAPATI S, NISHANTH KUMAR A, et al. Effect on performance and emission of canola oil and snake gourd oil biodiesel blended in fossil diesel – biodiesel blend [J]. *Mater Today: Proc*, 2021, 37: 1091–1095.
- [9] TAMILSELVAN P, NALLUSAMY N, RAIJKUMAR S. A comprehensive review on performance, combustion and emission characteristics of biodiesel fuelled diesel engines [J]. *Renew Sust Energ Rev*, 2017, 79: 1134–1159.
- [10] GAD M S, ISMAIL M A. Effect of waste cooking oil biodiesel blending with gasoline and kerosene on diesel engine performance, emissions and combustion characteristics [J]. *Process Saf Environ Prot*, 2021, 149: 1–10.
- [11] RASHEDUL H K, MASJUKI H H, KALAM M A, et al. Performance and emission of a CI engine using antioxidant treated biodiesel [J]. *J Clean Energy Technol*, 2017, 5(1): 7–11.
- [12] BAYINDIR H, LSIK M Z, ARGUNHAN Z, et al. Combustion, performance and emissions of a diesel power generator fueled with biodiesel – kerosene and biodiesel – kerosene – diesel blends [J]. *Energy*, 2017, 123: 241–251.
- [13] NAYAK S K, HOANG A T, NAYAK B, et al. Influence of fish oil and waste cooking oil as post mixed binary biodiesel blends on performance improvement and emission reduction in diesel engine [J/OL]. *Fuel*, 2021, 289: 119948 [2021–08–27]. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119948>.