

# 燃用掺混小比例生物柴油对船舶柴油机性能的影响

张哲<sup>1</sup>, 江国和<sup>1</sup>, 陈优金<sup>2</sup>, 吴刚<sup>1</sup>

(1. 上海海事大学 商船学院, 上海 201306; 2. 中交上海航道局有限公司, 上海 200002)

**摘要:**为探究生物柴油在船舶柴油机上的适用性,基于六缸中速柴油机试验台架,在不同负荷推进特性工况下,对燃用0#柴油、B10生物柴油柴油机的动力性能、经济性能、振动特性和缸内燃烧特性进行对比分析。结果发现:与0#柴油相比,燃用B10生物柴油柴油机的输出功率和耗油量基本不变,耗油率有所升高,但随着负荷的升高有所改善,燃用B10生物柴油使得在25%负荷工况下的柴油机缸盖振动烈度下降,50%、75%、90%、100%负荷工况下的柴油机缸盖振动烈度稍有上升,不同负荷工况下的机体振动烈度均下降;从振动功率谱密度可以看出,两种燃油在不同负荷下低频段的振动响应相似,但高频段处振动响应存在差异;对两种燃油的缸内压力和压力升高率曲线的分析可知,燃用B10生物柴油可以使缸内压力峰值和最大压力升高率升高,燃烧反应速度加快。综上,B10生物柴油在不同负荷工况下动力性能、经济性能、振动特性和缸内燃烧特性方面均表现良好,在船舶柴油机上具有较好的应用前景。

**关键词:**生物柴油;柴油机;振动;燃烧

中图分类号:U677.2;TK427

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2023)02-0070-05

## Effects of performance of marine diesel engine by combustion mixing a small proportion of biodiesel

ZHANG Zhe<sup>1</sup>, JIANG Guohe<sup>1</sup>, CHEN Youjin<sup>2</sup>, WU Gang<sup>1</sup>

(1. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2. China Communications Construction Company Shanghai Dredging Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

**Abstract:** In order to explore the applicability of biodiesel on marine diesel engine, based on a six-cylinder medium-speed diesel engine test bench, under different load propulsion characteristics, the power performance, economic performance, vibration characteristics and combustion characteristics in-cylinder of diesel engine burning 0# diesel and B10 biodiesel were analyzed and compared. The results showed that compared with 0# diesel, the output power and fuel consumption of diesel engine burning B10 biodiesel remained basically unchanged, and the fuel consumption rate increased but improved as the load increased. B10 biodiesel made the vibration intensity of the cylinder head of the diesel engine at 25% load decreased, and the vibration intensity of the cylinder head of the diesel engine at 50%, 75%, 90% and 100% load increased slightly, and the vibration intensity of the engine body decreased under different load conditions. It could be seen from the vibration power spectrum density that the vibration response of the two fuels in the low frequency band under different loads was similar, but there was a difference in the vibration response in the high frequency band. The analysis of the pressure in-cylinder and pressure rise rate curves of the two fuels showed that the combustion of B10 biodiesel could increase the peak pressure and maximum pressure increase rate in the cylinder, which accelerated the combustion reaction speed. In summary, B10 biodiesel performs well in terms of power performance, economic power performance, vibration

收稿日期:2021-12-24;修回日期:2022-09-11

基金项目:上海市科技计划项目(20DZ2252300)

作者简介:张哲(1998),男,在读硕士,研究方向为船舶新能源与节能减排技术(E-mail)1553519249@qq.com。

characteristics and combustion characteristics in-cylinder under different load conditions, and has good application prospect on marine diesel engines.

**Key words:** biodiesel; diesel engine; vibration; combustion

环境污染和气候变化被认为是 21 世纪人类面临的主要问题之一,替代传统化石燃料的新能源燃料受到人们的广泛关注和重视。生物柴油是一种以餐饮废油、动物脂肪和植物油为原料制备而成的可再生能源<sup>[1-3]</sup>,具有高氧含量、高十六烷值,能够有效降低 SO<sub>x</sub>、碳氢化合物(THC)、碳烟等有害气体的排放等优点<sup>[4]</sup>。随着国际海事组织日益严格的排放法规以及传统化石燃料的紧缺,探究生物柴油在船用柴油机上的适应性很有必要,但由于生物柴油中的酸性物质、水分等杂质将导致发动机的腐蚀磨损,影响其寿命,因此小比例掺混生物柴油在发动机上的应用成为研究热点。生物柴油来源的不同、制备方法的多样性以及发动机类型的差异都会导致柴油机的燃烧、排放性能和振动特性不同,目前相关研究人员对于发动机燃用生物柴油在燃烧和排放性能方面的研究较为广泛,但对于振动特性方面少有涉及,而且研究对象主要集中在车用发动机上<sup>[5-6]</sup>。张美娟等<sup>[7]</sup>发现随着生物柴油掺混比例的增大,缸内最大爆发压力和放热率峰值逐渐增大,并且放热始点稍有后移;Çalik<sup>[8]</sup>发现使用生物柴油代替传统柴油可以提高发动机的燃烧效率,并且降低点火延迟时间,从而降低了发动机的振动;陈韬等<sup>[9]</sup>发现车用发动机掺混生物柴油能减少柴油机 THC、CO 和 PM 排放,但 NO<sub>x</sub> 排放有所增加。

本文基于内河船舶柴油机试验台架,选取推进特性下 5 个典型工况点,以传统化石柴油为对照,考察了由餐厨废弃油脂制备的生物柴油在动力性能、经济性能、振动特性和缸内燃烧特性方面对船用柴油机的影响,以期探究相似功率的船舶柴油机燃烧生物柴油的燃烧、振动特性提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

0#柴油和 B10 生物柴油(由柴油和纯生物柴油按体积比 9:1 调制而成)理化指标如表 1 所示。

表 1 燃料的理化指标

| 理化参数                           | 0#柴油  | B10 生物柴油 |
|--------------------------------|-------|----------|
| 密度(20℃)/(kg/m <sup>3</sup> )   | 820.7 | 826.9    |
| 运动黏度(40℃)/(mm <sup>2</sup> /s) | 3.8   | 4.6      |
| 闪点(闭口)/℃                       | 65.0  | 67.0     |
| 凝点/℃                           | -8.0  | -8.0     |
| 十六烷值                           | 52.3  | 52.4     |
| 低热值/(MJ/kg)                    | 43.12 | 42.59    |
| 氧含量/%                          | 0.27  | 1.26     |
| 碳含量/%                          | 86.02 | 85.19    |
| 氢含量/%                          | 13.70 | 13.55    |

试验采用 6135 六缸四冲程船用柴油机,试验柴油机主要参数见表 2。

表 2 试验柴油机的主要参数

| 项目           | 参数                  |
|--------------|---------------------|
| 发动机型号        | G128Zca             |
| 气缸数          | 6                   |
| 缸径/行程/mm     | 135/150             |
| 活塞总排量/L      | 12.88               |
| 压缩比          | 17                  |
| 额定功率/kW      | 184                 |
| 额定转速/(r/min) | 1 500               |
| 额定扭矩/Nm      | 1 000               |
| 外形尺寸/mm      | 1 433 × 797 × 1 236 |

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 柴油机性能指标的测定

以 0#柴油、B10 生物柴油两种油品为燃料,选取柴油机推进特性的典型工况点(负荷为 25%、50%、75%、90%、100%)下进行试验,各工况点下所对应的柴油机转速如表 3 所示。通过燃油消耗计量仪、水力测功器和转速传感器分别采集耗油量、柴油机扭矩和转速,再通过计算机运算得到耗油率与功率;柴油机的主要激振源由燃料的燃烧冲击和活塞的侧向敲击两部分组成,是最能代表燃烧过程的激振源<sup>[10]</sup>,通过三向振动加速度传感器分别采集承受燃烧冲击的缸盖垂向和承受活塞侧推力的机体横向的振动加速度信号,采样频率为 10 kHz,以振动加速度均方根值和功率谱密度来分析振动特性;通过曲轴转角传感器和压力传感器采集上止点信号和缸压信号,得到缸内压力和压力升高率来分析缸内燃烧特性,其中压力升高率与机体振动相关,待发动机稳定工作后进行数据采集,采集时间 10 s。

表 3 推进特性工况点柴油机参数

| 负荷/%       | 25  | 50    | 75    | 90    | 100   |
|------------|-----|-------|-------|-------|-------|
| 转速/(r/min) | 945 | 1 200 | 1 365 | 1 450 | 1 500 |

#### 1.2.2 振动加速度均方根值的计算

振动加速度均方根值用以表征机器的振动烈度,按公式(1)进行计算。

$$a_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (1)$$

式中: $a_{\text{rms}}$ 为振动加速度均方根值, m/s<sup>2</sup>;  $a(t)$ 为振动加速度随时间变化的函数;  $T$ 为测量周期, s。

#### 1.2.3 功率谱密度的计算

按公式(2)对振动加速度信号进行均方离散 FFT 计算得到功率谱密度,用来反映振动在各频率范围内的能量大小<sup>[11]</sup>。为了减少信号的泄漏,对信

号使用汉宁窗加窗,窗函数之间的重叠系数设置为1/2。在绘制功率谱密度图时,为了能够更加明显地观察各油品的情况和缩短计算的时间,将FFT分析点数设置为256。

$$D_{ps} = \frac{|\text{FFT}(W_l \times x_i, f)|^2}{L} \times \frac{1}{\Delta f} \quad (2)$$

式中: $D_{ps}$ 为功率谱密度; $x_i$ 为时域振动加速度信号; $W_l$ 为加窗函数; $L$ 为采样点数; $\Delta f$ 为频率间隔; $f$ 为频率。

## 2 结果与分析

### 2.1 动力性能及经济性能

图1为推进特性下0#柴油和B10生物柴油在不同负荷工况的功率对比结果。

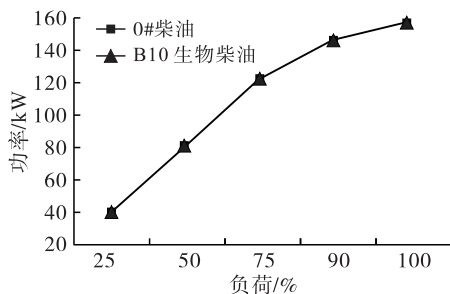


图1 0#柴油、B10生物柴油动力性能对比

由图1可看出,在5种负荷下,燃用两种油品的柴油机输出功率基本一致,说明B10生物柴油在动力性能方面具有良好的可替代性。

图2为推进特性下0#柴油和B10生物柴油在不同负荷工况的耗油率、耗油量对比结果。

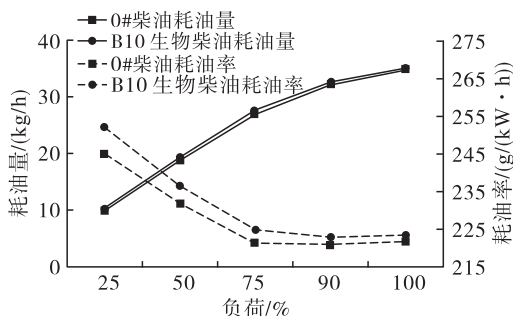


图2 0#柴油、B10生物柴油经济性能对比

由图2可看出,燃用两种燃油的耗油量均随负荷的提高而增加,且同一负荷工况下燃用两种燃油的耗油量差距很小。燃用0#柴油、B10生物柴油的耗油率随负荷增加而降低,在较高负荷工况下,耗油率下降趋势减缓。在同一负荷工况下,燃用0#柴油的耗油率均低于燃用B10生物柴油的。虽然B10生物柴油的高氧含量特性能起到助燃效果,但B10生物柴油的低热值(42.59 MJ/kg)小于0#柴油的低热值(43.12 MJ/kg),较低的低热值可能影响耗油

率<sup>[12]</sup>。另外,随着负荷的增加,燃用B10生物柴油的耗油率越接近于0#柴油的,这主要是因为低负荷工况下,B10生物柴油的高黏度特性会导致燃油雾化效果下降,使得燃烧不良,但随着负荷的升高,单位时间内喷油量增加,会提高缸内环境温度,使得B10生物柴油的高黏度特性得到缓解<sup>[13]</sup>。

### 2.2 振动特性

图3为在5种不同推进特性工况下,燃用0#柴油与B10生物柴油缸盖垂向和机体横向两个测点处的振动加速度均方根值。

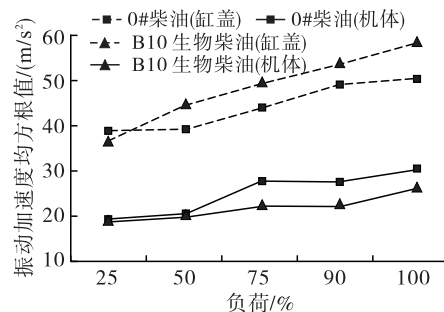


图3 不同推进特性工况下缸盖、机体测点处的振动加速度均方根值

由图3可看出,随着负荷的增大,燃用0#柴油和B10生物柴油在缸盖和机体处的振动加速度均方根值不断提高。在缸盖测点处,负荷为25%时,燃用B10生物柴油的振动加速度均方根值小于0#柴油的,前者比后者低6.02%;负荷为50%、75%、90%、100%时,燃用B10生物柴油的振动加速度均方根值大于0#柴油的,分别高11.22%、12.05%、9.06%、15.78%。在低负荷工况下,燃烧室内有足够的空气与雾化的燃油混合,B10生物柴油的低热值特性导致其燃烧过程相较于0#柴油更加平缓;在高负荷工况下,柴油机在一个工作循环下喷油量上升,相比0#柴油,B10生物柴油的富氧特性能够起到助燃作用,使得缸内压力上升速度更快,另外,在高温条件下B10生物柴油的氧化安定性更差,容易引起压力波动,从而导致燃用B10生物柴油在缸盖测点处的振动加速度均方根值更大。在5种负荷下,燃用B10生物柴油机体测点处的振动加速度均方根值均小于燃用0#柴油的,且在75%、90%、100%的负荷工况下,两者振动加速度均方根值差较25%、50%负荷工况下增大,说明燃用B10生物柴油可以降低机体测点处的振动烈度,尤其在中高负荷工况下,有利于柴油机振动的改善,提高柴油机使用寿命和人体舒适度。

为了进一步研究发动机平稳运转过程中不同油品在同一负荷工况下的振动能量情况,对振动信号

进行功率谱密度分析<sup>[14]</sup>。图4、图5分别为燃油0# 缸盖、机体测点处的振动信号功率谱密度。柴油、B10 生物柴油在不同推进特性工况下柴油机

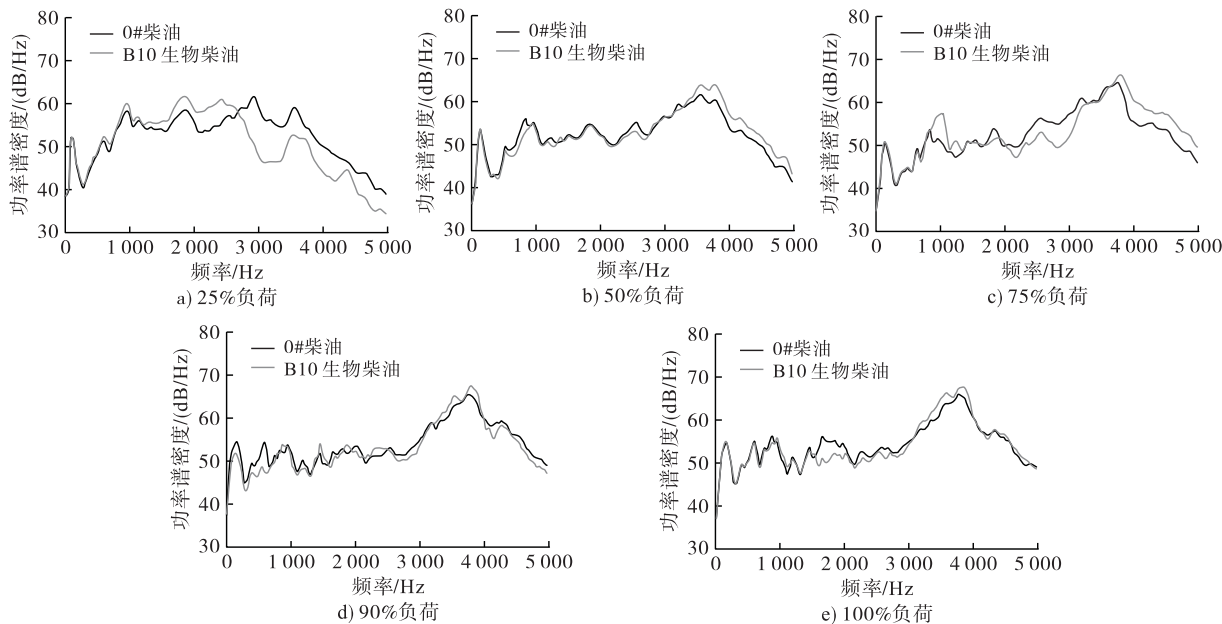


图4 不同推进特性工况下缸盖测点处的功率谱密度

由图4可看出,柴油机燃用两种油品的功率谱密度存在差异,说明燃烧掺混生物柴油会对柴油机的整体振动频率分布造成影响。在前1 000 Hz的低频段处,5种负荷下的功率谱密度曲线基本重合,说明燃用B10生物柴油和0#柴油在柴油机低频段处的振动响应相似,该频段振动响应主要是由活塞往复运动的惯性力、不同冲程下机械部件的固有运动等柴油机固有特性引起<sup>[15]</sup>;在1 000~5 000 Hz的高频段处,25%低负荷工况下,0#柴油的功率谱密

度曲线整体稍高于B10生物柴油的,说明低负荷工况下燃烧B10生物柴油产生的振动响应稍低于0#柴油;50%、75%、90%、100%中高负荷工况下,0#柴油的功率谱密度曲线整体稍低于B10生物柴油的,说明中高负荷工况下燃烧B10生物柴油产生的振动响应均稍高于0#柴油。燃烧冲击、进排气阀落座冲击、缸内气流冲击和环境变化都会影响高频段的功率谱密度分布,使得高频振动响应产生变化。

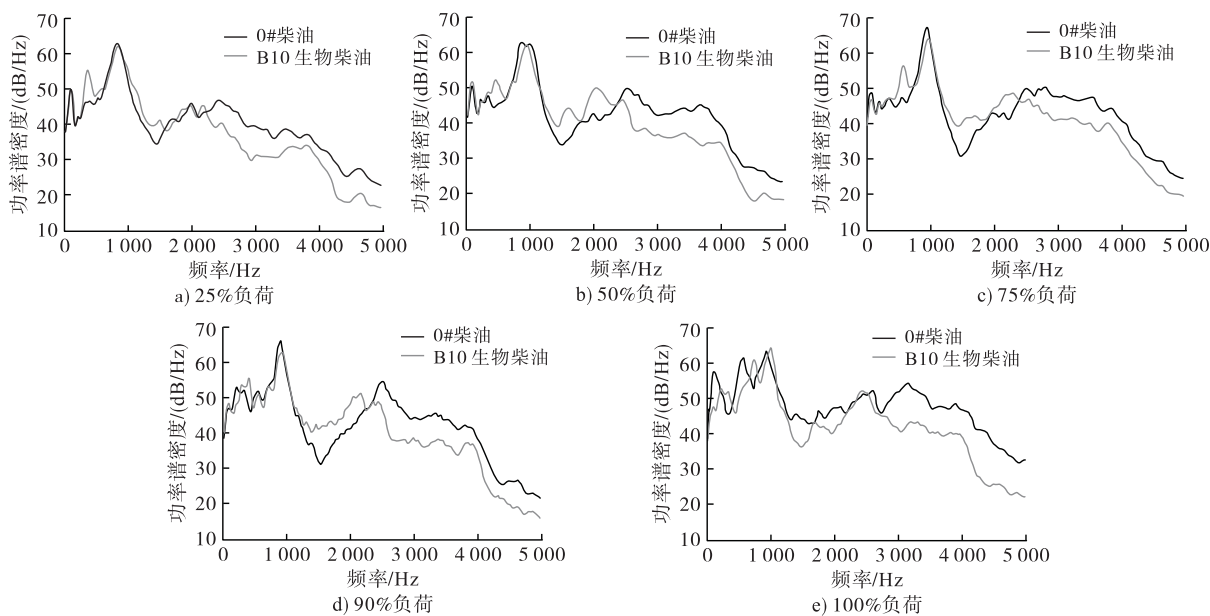


图5 不同推进特性工况下机体测点处的功率谱密度

由图5可看出,机体测点处的功率谱密度以低频为主,不同负荷工况下功率谱密度的峰值所对应

的频率都在900 Hz左右,0~1 000 Hz范围内功率谱密度曲线基本重合,说明燃烧B10生物柴油和0#

柴油在柴油机低频段处的振动响应相似。在 1 000 ~ 5 000 Hz 的高频段处,不同负荷工况下燃用 0#柴油的功率谱密度整体均高于燃用 B10 生物柴油的,说明燃烧 B10 生物柴油可以降低机体的高频振动,这可能与两种燃料的氧含量不同有关,较高氧含量可以使燃烧过程更加平顺。

### 2.3 缸内燃烧特性

为进一步了解柴油机缸内的燃烧情况,对缸内压力传感器和曲轴转角传感器采集到的信号进行分析,绘制压力、压力升高率曲线,并对曲线进行平滑处理。图 6 为在 50% 负荷工况下两种燃油的缸内压力和压力升高率曲线。

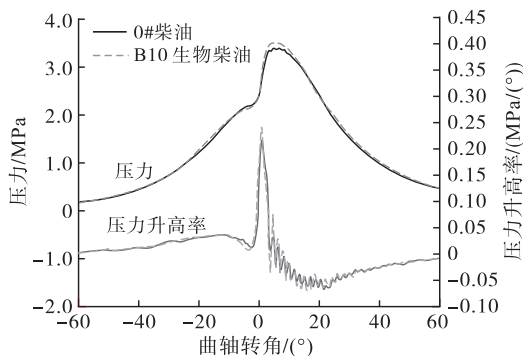


图 6 50%负荷工况下两种燃油的缸内压力、压力升高率曲线

由图 6 可看出,燃用 B10 生物柴油的缸内压力曲线和压力升高率曲线均稍高于燃用 0#柴油的,这与两种油品的氧含量差异有关,B10 生物柴油作为高含氧燃料,着火相对容易,燃烧反应速度略高于 0#柴油,因此其最大缸内压力和最大压力升高率也略大<sup>[16]</sup>。

### 3 结论

为了探究内河船舶柴油机燃用掺混小比例生物柴油(B10 生物柴油)和 0#柴油的性能差异,在六缸四冲程船用柴油机上进行 5 种推进特性工况下的试验。结果表明:①燃用 B10 生物柴油,柴油机的输出功率和耗油量与燃用 0#柴油相差不大,耗油率有所升高,但随着负荷的升高有所改善。②与 0#柴油相比,燃用 B10 生物柴油在 25% 低负荷工况下的柴油机缸盖处振动烈度下降,其中,低频段振动响应相似,高频段振动响应有少许减弱;燃用 B10 生物柴油在 50%、75%、90%、100% 中高负荷工况下柴油机缸盖处振动烈度上升,其中,低频段振动响应相似,高频段振动响应有少许增强;在不同负荷工况下燃用 B10 生物柴油都可降低柴油机机体的振动烈度,其中,低频段振动响应基本一致,高频段的振动响应有所下降。③燃用 B10 生物柴油可以提高缸内压力峰值和最大压力升高率,有利于提高燃料的燃烧效率。综上,在不同负荷工况下,B10 生物柴油在动

力性能、经济性能、振动特性和缸内燃烧特性方面均表现良好,在船舶柴油机上具有较好的适用性。

### 参考文献:

- [1] SHAHIR S A, MASJUKI H H, KALAM M A, et al. Performance and emission assessment of diesel - biodiesel - ethanol/bioethanol blend as a fuel in diesel engines: a review[J]. *Renew Sust Energy Rev*, 2015, 48: 62 - 78.
- [2] 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.
- [3] 冯以卓,张瑞亮,杨甜甜,等. 压燃式发动机燃用 F - T 柴油/生物柴油混合燃料的燃烧及振动特性研究[J]. *可再生能源*, 2018, 36(3): 334 - 339.
- [4] MOHD NOOR C W, NOORA M M, MAMAT R. Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: a review[J]. *Renew Sust Energy Rev*, 2018, 94: 127 - 142.
- [5] KAINAR P,王铁. 柴油机燃用 0#柴油、F - T 柴油、生物柴油的燃烧和排放差异分析[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(8): 203 - 208.
- [6] 李莉,王建昕,肖建华,等. 车用柴油机燃用棕榈生物柴油的颗粒物排放特性研究[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(10): 2458 - 2465.
- [7] 张美娟,李游,吴旭东,等. 柴油机燃用 F - T 柴油/生物柴油混合燃料的燃烧及排放特性[J]. *中国农机化学报*, 2022, 43(9): 109 - 115.
- [8] ÇALIK A. Determination of vibration characteristics of a compression ignition engine operated by hydrogen enriched diesel and biodiesel fuels[J]. *Fuel*, 2018, 230: 355 - 358.
- [9] 陈韬,谢辉,吴志新,等. 车用柴油机燃用生物柴油的排放特性[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(11): 5972 - 5977.
- [10] 杨甜甜. 基于振动信号时频分析的柴油机缸内燃烧状态监测研究[D]. 太原:太原理工大学, 2019.
- [11] 吴刚,江国和,楼海军,等. DICI 发动机燃用生物柴油振动特性研究[J]. *中国油脂*, 2019, 44(1): 148 - 152.
- [12] HOW H G, MASJUKI H H, KALAM M A, et al. An investigation of the engine performance, emissions and combustion characteristics of coconut biodiesel in a high - pressure common - rail diesel engine[J]. *Energy*, 2014, 69: 749 - 759.
- [13] ASOKAN M A, SENTHUR PRABU S, BADE P K K, et al. Performance, combustion and emission characteristics of juliflora biodiesel fuelled DI diesel engine[J]. *Energy*, 2019, 173: 883 - 892.
- [14] 曹龙汉. 柴油机智能化故障诊断技术研究[D]. 重庆:重庆大学, 2001.
- [15] 胡田天. 基于振动信号的柴油代用燃料燃烧特性分析[D]. 太原:太原理工大学, 2020.
- [16] 郑尊清,钟小凡,刘海峰,等. 生物柴油/DMF 混合燃料对柴油机低温燃烧的影响[J]. *燃烧科学与技术*, 2017, 23(2): 104 - 110.