

# 生物柴油的燃烧及排放特性研究

胡建功,王欲进

(太原学院 机械与电气工程系,太原 030032)

**摘要:**在一台四冲程直喷式柴油机上对比研究不同喷油策略对鱼油乙酯生物柴油混合燃料燃烧和排放特性的影响。发动机转速固定在 1 500 r/min,喷油正时分别在 21、24、27°CA BTDC 的不同负荷下,使用的 6 种燃料为柴油及 B20、B40、B60、B80、B100 的鱼油乙酯生物柴油混合燃料。结果表明:在不同喷油正时、不同负荷下,生物柴油与柴油相比,发动机的氮氧化物和碳烟排放最大降幅为 17.9% 和 55.38%;鱼油制取的生物柴油导致气缸压力峰值、放热率和最大压力升高率均低于柴油,碳氢化合物、一氧化碳排放降低。

**关键词:**生物柴油;燃烧;排放;喷油正时

**中图分类号:**TK421;TK6

**文献标识码:**A

**文章编号:**1003-7969(2018)10-0094-05

## Combustion and emissions characteristics of biodiesel

HU Jiangong, WANG Yujin

(Department of Mechanism and Electricity, Taiyuan University, Taiyuan 030032, China)

**Abstract:** The effects of different injection strategies on the combustion and emission characteristics of biodiesel from fish oil ethyl ester and its mixture were studied on a four-stroke DI diesel engine. When the engine speed was fixed at 1 500 r/min and the fuel injection timing was under different loads of 21, 24°CA BTDC and 27°CA BTDC respectively, the six fuels, including diesel and fish oil ethyl ester biodiesels of B20, B40, B60, B80 and B100 were used. The results showed that under the conditions of different fuel injection timings and loads, the largest declines in nitrogen oxides and soot emissions of the engine were 17.9% and 55.38%, respectively. Biodiesel from fish oil caused the cylinder pressure peak, exothermic rate and the maximum pressure rise rate lower than those for diesel fuel, and the HC and CO emissions reduced.

**Key words:** biodiesel; combustion; emission; injection timing

生物柴油是指植物油、动物油(如鱼油等)、废弃油脂或微生物油脂与甲醇或乙醇经转酯化而形成的脂肪酸甲酯或乙酯,是目前公认比较合适的发动机代用燃料<sup>[1-3]</sup>。生物柴油中所含的氧元素,一方面能够促进发动机的燃烧,优化发动机的燃烧过程,从而提升发动机的热效率,达到提升能源利用率的目的<sup>[4-5]</sup>;另一方面不改变发动机结构,生物柴油可以直接作为柴油机的燃料。鱼油是生物柴油的良好来源,鱼油可以来自鱼的肝脏、眼睛、鳍、头、尾巴等。

据统计,鱼制品剩余部分大都被鱼制品加工企业所抛弃并浪费。因此,充分利用现有的鱼制品,可减少环境污染和能源危机,提高企业经济效益。

使用鱼油制取的生物柴油,成为国内外学者研究柴油机性能和排放的重要手段。陆小明等<sup>[6]</sup>研究柴油机的性能与排放,结果表明,生物柴油预混和燃烧比例少,碳氢化合物(HC)和CO排放均降低,氮氧化物(NO<sub>x</sub>)增加,碳烟减少。蒋超宇等<sup>[3]</sup>研究发现,生物柴油混合燃料的发动机动力性下降,碳烟排放低于纯柴油。喷油正时的推迟也会对柴油机的燃烧和排放性能产生影响<sup>[7]</sup>,导致氮氧化物排放增加<sup>[8-9]</sup>。Vilela等<sup>[10]</sup>通过对制备生物柴油的鱼油酸值进行分析,得出用鱼油生产的生物柴油生产效率在68%~90%。Godiganur等<sup>[11]</sup>将鱼油甲酯和柴油

收稿日期:2018-01-17;修回日期:2018-06-12

基金项目:山西省青年科技研究基金项目(201701D221148)

作者简介:胡建功(1984),男,讲师,硕士,研究方向为发动机代用燃料与排放控制技术(E-mail)472172315@qq.com。

混合在一起,测试柴油机的性能和排放特性,试验结果表明,柴油机的燃烧性能没有太大偏差,但是主要有害物质 CO 和 HC 明显减少,NO<sub>x</sub> 反而升高。Jayasinghe等<sup>[12]</sup>得出结论,在固定的柴油发动机中加入粗鱼油制取的生物柴油,排放效果明显改善。

综上所述,生物柴油的试验研究已经非常成熟,但是对鱼油乙酯的试验国内却没有相关研究。本文以鱼油乙酯生物柴油和柴油混合燃料,喷油正时分别在 21、24、27°CA BTDC 时,研究不同负荷条件下,

使用鱼油乙酯和柴油混合燃料对发动机排放和燃烧特性进行分析,为鱼油乙酯生物柴油的推广应用提供试验和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

以鱼油作为原料制备的鱼油乙酯,使用碱催化法进行制取<sup>[13]</sup>,转化率为 96.5%。试验所用柴油和生物柴油混合燃料的理化特性如表 1 所示。

表 1 柴油和生物柴油混合燃料的理化特性

项目	柴油	B100	B80	B60	B40	B20
密度/(kg/m <sup>3</sup> )	850	885	879	869	860	852
黏度(40℃)/(mm <sup>2</sup> /s)	3.05	4.74	4.52	4.36	4.22	4.11
热值/(kJ/kg)	42 800	40 057	40 517	40 973	41 388	41 844
闪点/℃	56	114	98	79	63	44
燃点/℃	63	125	107	90	72	52
十六烷值	52.0	52.6	53.5	54.7	56.2	57.5

注: B100、B80、B60、B40、B20 分别表示混合燃料中生物柴油的体积分数分别为 100%、80%、60%、40% 和 20%。

### 1.2 试验方法

试验样机采用四冲程风冷式发动机,发动机转速固定。发动机台架测试系统如图 1 所示。

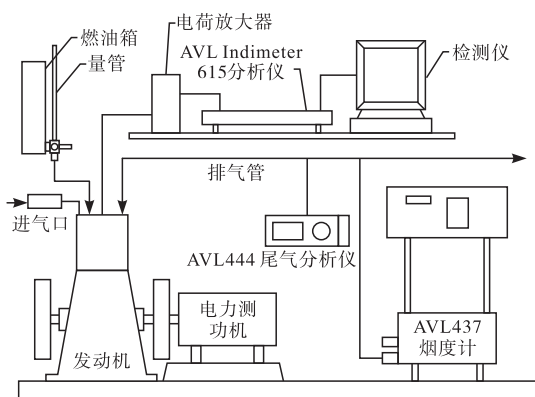


图 1 发动机台架测试系统图

台架试验中,发动机和电力测功机直接耦合,由电力测功机对发动机直接制动。试验开始阶段,发动机使用柴油并预热 10 min。采用 AVL444 尾气分析仪测定排放废气中 CO、NO<sub>x</sub>、HC 及碳烟排放,测量精度分别为 0.01%、10<sup>-6</sup>、10<sup>-6</sup> 及 0.001 BSN,采用 AVL Indimeter 615 分析仪测量气缸压力和曲轴转角,发动机的参数如表 2 所示。柴油机的结构和参数不发生任何变动,根据国 IV 阶段法规要求,参照新欧洲循环驾驶(NEDC)测试循环中,工况所占比重较大的是中、低速,因此发动机转速固定为 1 500 r/min,可变载荷 25%、50%、75% 和 100% 4 个工况下进行试验测试,将不同比例的 B20、B40、B60、B80 和 B100 作为发动机燃料。每次测试重复

3 次,取其平均值,以确保数据的准确性。

表 2 试验样机技术参数

项目	指标
型式	直列四缸,直喷式发动机
冷却类型	风冷
燃烧室	ω 形
标定功率/kW	72
缸径/mm	87.5
行程/mm	114
压缩比	17.5
喷油正时/°CA BTDC	24
喷油器开启压力/MPa	18

## 2 结果与分析

### 2.1 燃烧参数

#### 2.1.1 气缸压力分析

图 2 为 3 种喷油正时下的气缸压力曲线。生物柴油的十六烷值高于柴油,滞燃期缩短,预混合气较差,降低燃烧速度,因此生物柴油的气缸压力低于柴油<sup>[13]</sup>。从图 2 可以看出,在 21、24°CA BTDC 和 27°CA BTDC 喷油时刻,柴油的压力峰值分别为 7.0、7.4 MPa 和 7.8 MPa, B100 的压力峰值分别为 6.4、6.7 MPa 和 7.4 MPa,降低幅度为 8.6%、9.4% 和 5.1%。随着生物柴油比例的增加,气缸压力峰值逐渐降低,滞燃期和燃烧持续期逐渐缩短,气缸容积增大,使燃料空气混合不均匀,从而降低发动机的燃烧性能。

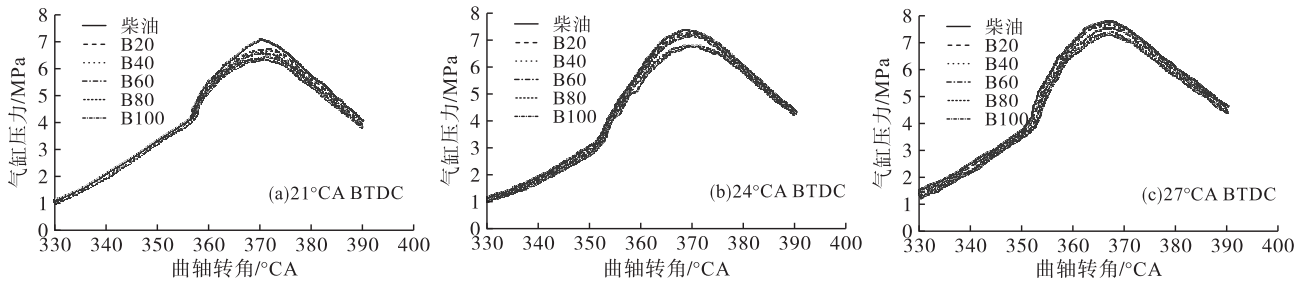


图2 不同喷油正时下6种燃料的气缸压力曲线

2.1.2 放热率分析

图3为3种喷油正时下缸内放热率曲线。从图3可以看出,由于生物柴油中芳香烃含量较少,生物柴油的热值低于柴油,燃烧B100的瞬时放热率峰值较柴油最大降低幅度为23.07%,燃烧过程中瞬时放热率对应的曲轴转角基本相同,因此随着生物柴油比例的增加,放热率峰值逐渐降低,这也是使用生物柴油发动机动性下降的主要原因。喷油正时

的推迟导致气化现象,缸内混合气吸热温度降低,在开始燃烧时进行放热,温度升高。预混燃烧释放的热量最高的是柴油,依次为B20、B40、B60、B80和B100,这是由于生物柴油比例的增加,混合燃料的密度和黏度升高,使得燃气混合的雾化变差,从而推迟燃烧并降低放热率。随着喷油正时的推迟,混合燃料的燃烧放热时刻有所推迟,同时着火发生位置远离上止点的位置。

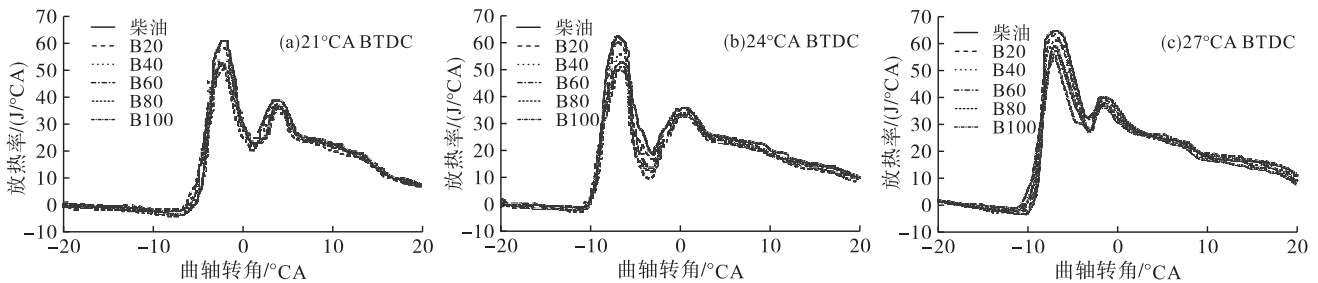


图3 不同喷油正时下6种燃料的缸内放热率曲线

2.1.3 最大压力升高率(MPRR)分析

图4为3种喷油正时下6种燃料的最大压力升高率曲线。从图4可以看出,随着喷油正时的推迟,所有燃料的最大压力升高率都有所降低,而且生物柴油混合燃料对喷油正时的敏感度稍逊于柴油。以B20生物柴油为例,负荷从0%~100%,图4a中压力从0.5 MPa/°CA升到0.87 MPa/°CA;图4b中压

力从0.4 MPa/°CA升到0.62 MPa/°CA;图4c中压力从0.28 MPa/°CA升到0.54 MPa/°CA;喷油时刻提前,滞燃期延长,在着火前形成更多的预混合气,混合气在急燃期迅速燃烧,缸内压力增大,因此最大压力升高率升高。但是,随着喷油正时的推迟,降低了生物柴油混合燃料的最大压力升高率,从而降低发动机的噪声和振动。

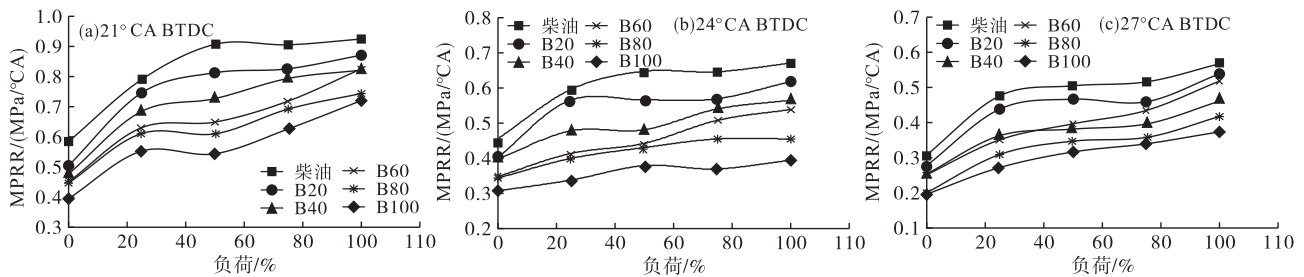


图4 不同喷油正时下6种燃料的最大压力升高率

2.2 燃烧排放特性

2.2.1 碳氢化合物排放

图5为3种喷油正时下发动机碳氢化合物的排放。随着乙酯中氧含量增加,芳香烃含量逐渐减少,生物柴油在混合燃料中比例的增加,碳氢化合物排放逐渐降低,燃烧得以改善。从图5可以看出,发动

机负荷为25%,在21、24 °CA BTDC和27 °CA BTDC喷油时刻,柴油的碳氢化合物排放分别为0.30、0.33 g/(kW·h)和0.34 g/(kW·h),B100的碳氢化合物排放分别为0.21、0.22 g/(kW·h)和0.25 g/(kW·h),碳氢化合物依次降低幅度为30.00%、33.33%和26.47%;低负荷区间,由于燃料混合不

均匀,空燃比大,温度较低,部分燃料直接以废气排出,因此碳氢化合物排放较高。

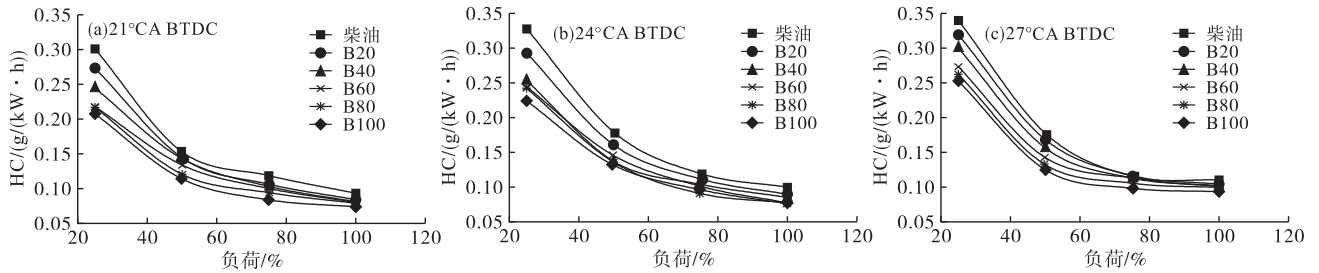


图5 不同喷油正时下6种燃料的HC排放

### 2.2.2 氮氧化物的排放

图6为3种喷油正时下6种燃料的氮氧化物排放。3种不同喷油正时下,发动机的氮氧化物排放随着负荷的增大呈单调下降趋势。燃烧开始前燃料混合均匀,预混燃烧阶段充分燃烧放出较高的热量,高温富氧下导致氮氧化物排放较高。使用燃料为柴油的氮氧化物排放高于生物柴油,发动机负荷从

25%提高到100%时,分别在21、24°CA BTDC和27°CA BTDC喷油时刻,柴油的氮氧化物降低幅度分别为16.0%、16.6%和17.9%,随着生物柴油比例的增大,氮氧化物反而降低,这是由于生物柴油热值逐渐降低,运动黏度升高,导致降低预混燃烧,并造成低峰值温度。

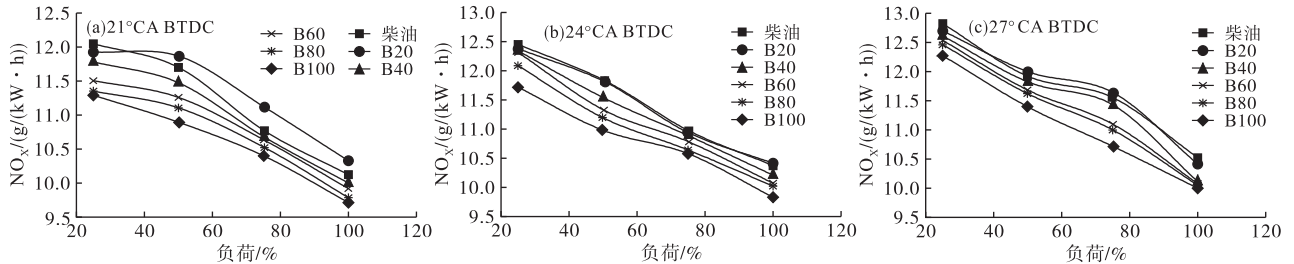


图6 不同喷油正时下6种燃料的NOx排放

### 2.2.3 一氧化碳的排放

气缸内生成的一氧化碳主要是由于不能充分燃烧所导致,化学反应中一氧化碳氧化成二氧化碳受燃烧温度和过量空气系数的影响较大。图7为3种喷油正时下6种燃料的一氧化碳排放。从图7可以看出,柴油一氧化碳排放始终高于生物柴油,主要原因是生物柴油含氧量高,燃料的滞燃期缩短,活塞和

气缸之间的混合气减少,一氧化碳排放减小。同时随着生物柴油比例的增加,生物柴油中的含氧量促进不完全燃烧产物的氧化反应,减少一氧化碳的排放。发动机负荷从25%提高到100%时,21、24°CA BTDC和27°CA BTDC喷油时刻,生物柴油相对于柴油CO排放最大降低幅度分别是45.0%、34.2%和30.0%。

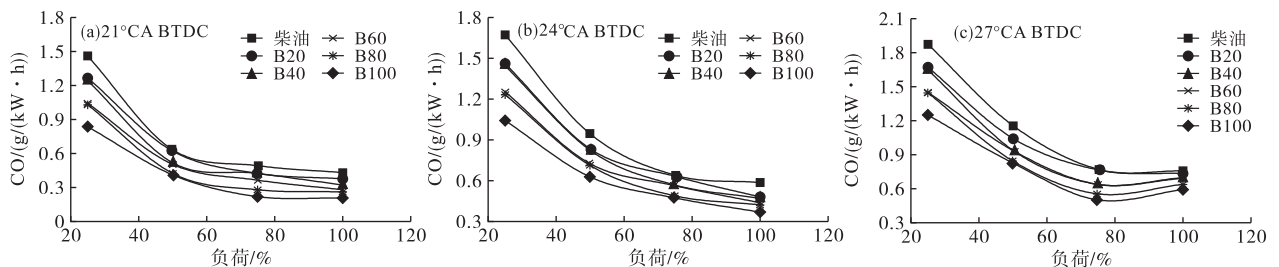


图7 不同喷油正时下6种燃料的CO排放

### 2.2.4 碳烟的排放

图8为3种喷油正时下碳烟的排放。发动机的碳烟主要是由于高温和缺氧而产生,气缸燃烧局部高温区域浓度增加,生成碳烟量增加。随着发动机负荷的提高,后燃时间延长,使得排放物因氧化时间不足而缺乏充分燃烧,导致碳烟排放升高。从图8可以看出,生物柴油的碳烟排放低于柴油,并且随着

生物柴油比例的增加而降低。发动机负荷从0提高到100%时,在21、24°CA BTDC和27°CA BTDC喷油时刻,生物柴油相对于柴油碳烟最大降低幅度46.67%、52.11%和55.38%,说明喷油正时的推迟,预混燃烧阶段延长,生物柴油中的氧原子起到助燃的作用,改善了燃烧室内喷雾核心区域的缺氧燃烧状况,提高燃烧效果,从而降低碳烟排放。



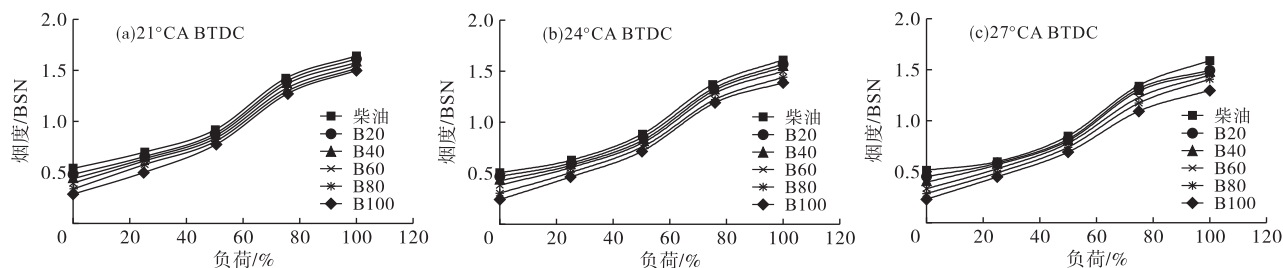


图8 不同喷油正时下6种燃料的碳烟排放

### 3 结论

(1)随着生物柴油比例的增加,发动机的峰值压力和放热率峰值也逐渐降低,滞燃期和燃烧持续期逐渐缩短。在21、24°C CA BTDC和27°C CA BTDC 3种喷油时刻下,柴油的峰值压力分别是7.0、7.4 MPa和7.8 MPa,生物柴油的峰值压力分别是6.4、6.7 MPa和7.4 MPa,降低幅度分别为8.6%、9.4%和5.1%。喷油正时的推迟降低着火延迟,导致燃料混合均匀变差,放热率峰值降低。

(2)随着喷油时刻的推迟,降低生物柴油混合燃料最大压力升高率,从而降低发动机的振动和噪声。

(3)在3种不同喷油正时,发动机在不同的负荷下,生物柴油相对于柴油,碳烟的排放最大降幅分别为46.67%、52.11%和55.38%;生物柴油比例的增加会降低碳氢化合物、氮氧化物和一氧化碳的排放,因此使用鱼油乙酯生物柴油有助于改善柴油机的排放性能。

(4)鱼油制备的生物柴油与石化柴油比较,具有优良的环保特性,燃烧基本和柴油相似,柴油机不需要改变结构,可充分利用水产品加工废弃资源,但是生物柴油较石化柴油动力性低,不能彻底替代石化柴油。针对鱼油乙酯生物柴油具有的腐蚀性,因此在柴油机中与生物柴油接触的部件需进行专门设计。

#### 参考文献:

[1] 谭丕强,赵坚勇,胡志远,等. 燃料特性对车用柴油机有害排放的影响[J]. 燃料化学学报,2013(3):347-355.  
 [2] GATTAMANENI R. Combustion and emission characteristics of diesel engine fuelled with rice bran oil methyl ester and its diesel blends[J]. Therm Sci, 2008,12(1):139-150.  
 [3] 蒋超宇,王伟超,杨学平. 混合燃料中生物柴油掺混比例对发动机性能影响的研究[J]. 中国油脂,2017,42

(12):62-65.

[4] 宋捷. 生物柴油混合燃料混合比车载监测方法研究[D]. 长春:吉林大学,2011.  
 [5] 刘少华. 柴油机燃用BED多组份燃料的燃烧过程研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2013.  
 [6] 陆小明,葛蕴珊,韩秀坤,等. 柴油机燃用生物柴油及柴油的燃烧分析与排放特性[J]. 燃烧科学与技术,2007,13(3):204-208.  
 [7] KIPLIMO R, TOMITA E, KAWAHARA N, et al. Effects of spray impingement, injection parameters, and EGR on the combustion and emission characteristics of a PCCI diesel engine [J]. Appl Therm Eng,2012,37:165-175.  
 [8] IMENAN S, ASHRAFUR RAHMAN S M, MASJUKI H H, et al. Effect of dynamic injection pressure on performance, emission and combustion characteristics of a compression ignition engine [J]. Renew Sust Energ Rev, 2015, 52: 1205-1211.  
 [9] LABECKI L, GANIPPA L C. Effects of injection parameters and EGR on combustion and emission characteristics of rapeseed oil and its blends in diesel engines [J]. Fuel, 2012,98:15-28.  
 [10] VILELA L, MATA T M, CAETANO N S. Biodiesel production from fish oil with high acidity [C] //Third international symposium on energy from biomass and waste. Italy. Venice: CISA, Environmental Sanitary Engineering Centre, 2010: 1-14.  
 [11] GODIGANUR S, MURTHY C S, REDDY R P. Performance and emission characteristics of a Kirloskar HA394 diesel engine operated on fish oil methyl esters [J]. Renew Energy, 2010, 35(2):355-359.  
 [12] JAYASINGHE P, HAWBOLDT K. A review of bio-oils from waste biomass: focus on fish processing waste [J]. Renew Sust Energ Rev, 2012, 16(1):798-821.  
 [13] 黄昭明. 生物柴油发动机燃烧和排放的数值模拟[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版),2016,33(3):266-271.