

文章编号:1671-8879(2015)02-0152-07

乙醚生物柴油混合燃料发动机的燃烧和排放特性

彭小红¹, 杨 璐², 陈 昊², 刘增强²

(1. 陕西交通职业技术学院 汽车工程系, 陕西 西安 710018; 2. 长安大学 交通新能源开发、应用与汽车节能陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要:为了研究添加乙醚对生物柴油性能的影响,在 1 台单缸柴油机上对 BD100 生物柴油、D2.5 (乙醚体积分数为 2.5%)与 D5(乙醚体积分数为 5%)3 种燃料的燃烧与排放特性进行了对比试验研究。研究表明:与 BD100 相比, D2.5 与 D5 的燃烧始点在 1 500 r/min 时几乎相同,在 1 800 r/min 时略有延迟;峰值燃烧压力及峰值燃烧放热率增加,但对应的曲轴转角完全相同;第 2 峰值燃烧放热率明显降低,从而减少了燃烧过程的后燃量;燃烧放热率型心对应曲轴转角靠近上止点,提高了循环定容度,有利于提高有效热效率;有效燃油消耗率明显降低且有效热效率明显提高;1 800 r/min 负荷特性下,碳烟排放分别平均下降了 20.78%与 39.59%;1 800 r/min 负荷特性下,CO 排放分别平均降低了 27.82%与 47.14%;1 800 r/min 负荷特性下,NO_x 排放分别平均增加 3.41%与 7.73%;HC 排放没有明显规律。研究结果表明添加乙醚可以改善生物柴油的燃烧和排放特征。

关键词:汽车工程;乙醚;生物柴油;燃烧压力;放热率;排放

中图分类号:U411

文献标志码:A

Combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with mixture of biodiesel and diethyl ether

PENG Xiao-hong¹, YANG Lu², CHEN Hao², LIU Zeng-qiang²

(1. Department of Automobile Engineering, Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an 710018, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Development and Application for New Transportation Energy in Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To study the influence of diethyl ether on performances of biodiesel, this paper did combustion and emission experiments of mixture fuels with different volume ratio biodiesel and diethyl ether on a single cylinder diesel engine. Results indicate that compared with BD100, combustion of D2.5 and D5 starts almost at the same time at 1 500 r/min and starts a little later at 1 800 r/min; peak combustion pressure and peak heat release ratio increase and corresponding crank angles are completely the same; the second peak heat release ratio obviously decreases and thus reduces the quantities of after-combustion; the corresponding crank angle of core center of heat release ratio moves toward the TDC and increases the constant volume degree, which is helpful for improving the effective thermal efficiency; effective fuel consumption clearly decreases

收稿日期:2014-11-10

基金项目:陕西省自然科学基金青年人才项目(2014JQ7268);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014G1221022, 2013G1221018, 2013G3224019)。

作者简介:彭小红(1977-),女,江西泰和人,副教授,工学硕士,E-mail:xiaohongpengcau@163.com。

and the effective thermal efficiency increases; at 1 800 r/min, smoke emissions respectively and averagely decrease 20.78% and 39.59%; CO emissions respectively and averagely decrease 27.82% and 47.14%; NO_x emissions respectively and averagely increase 3.41% and 7.73%; HC emissions show no regulations. The results prove that adding diethyl ether can improve the combustion and emission of biodiesel. 4 tabs, 6 figs, 17 refs.

Key words: automobile engineering; diethyl ether; biodiesel; combustion pressure; heat release ratio; emission

0 引言

2011年化石能源在全球能源消费中的比例高达87.1%,其中石油占33.1%的份额,天然气和煤的份额分别为23.7%和30.3%^[1]。一方面,化石能源在不断枯竭;另一方面,使用化石能源会产生大量温室气体(主要是CO₂,少量CH₄、N₂O及HFCs),是气候变化的主要原因,严重威胁全球的生态环境^[2]。生物燃料是指燃料乙醇和生物柴油,在整个生命周期内的碳排放明显低于化石燃料,是对环境友好的清洁替代燃料^[3-5]。美国和巴西已经广泛地使用燃料乙醇和生物柴油作为车用燃料^[6-7]。

生物柴油是指以油料作物、野生油料作物和工程微藻等水生植物油脂,以及动物油脂、废餐饮油等为原料油通过酯交换工艺制成的甲酯或乙酯燃料^[8-11]。生物柴油具有来源广泛、物理性能与化石柴油接近、环境友好等优点,在中国得到了深入研究与初步应用^[12]。至今已有3代生物柴油原料,第1代为可食用性油脂,比如大豆油、棕榈油以及菜籽油等,由于威胁食品安全与占用耕地等社会与环境问题已经被限制发展^[13];第2代为非食用性油脂,比如从黄连木、麻疯树等作物中提取的油脂,在中国第2代生物柴油原料由政府统一规划建设原料林基地;第3代为工程微藻,具有产油率高、资源丰富(可充分利用盐碱地或海水进行大量培养)、可与治污和环保相结合(如利用污水培养微藻可以净化水体)、可减少生物柴油生产对淡水及耕地的依赖、光合效率高(高于植物2~3倍,有利于吸收CO₂并将其转化为生物质)等优点,被认为是解决气候变暖问题的根本性方法与实现能源可持续发展的最佳生物柴油原料^[14-17]。在中国,第1代与第2代原料都有小规模的生产与应用,而第3代生物柴油处于研究与中试阶段。

目前,国内外关于生物柴油的研究已经非常全面、深入。主要研究内容集中在以下几点:①柴油机燃用不同原料制成的生物柴油及其与柴油混合燃料

的燃烧特性、排放特性、动力性与经济性;②不同原料生物柴油的化学组分;③生物柴油及其与柴油混合燃料的喷雾特性;④生物柴油及其与柴油混合燃料的理化性质。理化性质的研究表明:使用纯生物柴油的主要问题是其粘度高且低温流动性差(凝点高)。比如大豆油甲酯与棕榈油甲酯的凝点分别为-4℃与12℃^[13];40℃运动粘度分别为4.08与4.71。标准状态下乙醚的自燃温度为160℃,远低于柴油的250℃与生物柴油的363℃,燃油自燃温度越低越容易着火;乙醚的凝点为-116.3℃,不存在低温流动性的问题。柴油机常用冷启动液的主要成分是乙醚,采取喷入启动液辅助启动措施,就保证了在较低温度下燃料可顺利着火,在乙醚中掺入轻质烃而制成的启动液,可以改善用纯乙醚启动柴油机时发动机工作粗暴的现象,使柴油机在启动时工作较柔和。同时乙醚本身具有高质量低热值,为36.84 MJ/kg,高于乙醇26.8 MJ/kg。因此,本文拟以菜籽油生物柴油为原料,添加不同比例的乙醚,在解决生物柴油低温流动性等问题的基础上,研究柴油机燃用不同比例乙醚生物柴油混合燃料的燃烧与排放特性。

1 试验条件

1.1 试验装置与测试仪器

试验用单缸柴油机为ZH1105W型,其主要参数为:气缸直径105 mm,活塞行程115 mm,压缩比为16.5,标定功率为11.03 kW,供油提前角为上止点前22°。排放测试系统包括AVL公司生产的AVL Digas4000排气分析仪、AVL Dismoke4000部分流不透光烟度计,选择消光系数K(m⁻¹)表示烟度值。燃烧动态测试系统包括CB566燃烧分析仪、奇石乐压力传感器、电荷放大器、光电传感器及曲轴转角发生器,测录发动机的燃烧压力并计算其放热率。采用日本小野公司生产的TP-244流量传感器和DF-313数字流量计测量30 s燃油流量,计算有效燃油消耗率,并得到有效热效率。下页图1为试验发动机台架布置示意图。

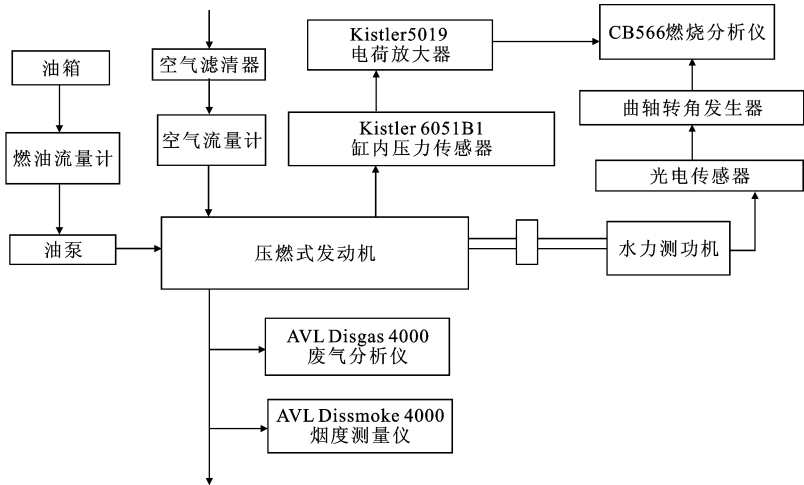


图 1 发动机台架布置示意
Fig. 1 Arrangement of engine test bench

1.2 试验燃料

试验用生物柴油为陕西汉中春光油脂厂以菜籽油为原料生产的。试验用乙醚是一种分析级试剂(纯度 99.7%)。表 1 为生物柴油、乙醚的主要理化特性。乙醚中的氧含量为 21.6%,高于生物柴油的氧含量。本文将纯生物柴油记为 BD100,将乙醚体积分数分别为 2.5%与 5%的生物柴油乙醚混合燃料分别记为 D2.5 与 D5。

表 1 燃料的理化特性
Tab. 1 Properties of fuels

性 质	生物柴油	乙醚
密度/(g·mL ⁻¹)	0.870	0.715
蒸发潜热值/(kJ·kg ⁻¹)	200	350
低热值/(kJ·kg ⁻¹)	39 128	36 840
十六烷值	52.9	53.0
40℃下的运动粘度/(mm ² ·s ⁻¹)	7.8	
理论空燃比	12.5	
闪点/℃	166	-40
沸点/℃	330	34.6
自燃温度/℃	363	160
氧含量/(wt%)	10.0	21.6
碳含量/(wt%)	78.0	64.9
氢含量/(wt%)	12.0	13.5

2 结果与讨论

2.1 排放特性

下页图 2(a)为 1 800 r/min 下碳烟排放负荷特性,由图 2(a)可得如下结论。

(1)与 BD100 相比,D2.5 与 D5 的碳烟排放分别下降 20.78%与 39.59%。高温缺氧环境中碳烟容易形成。一方面,随着乙醚添加比例的增加,混合燃料的氧含量增加,有助于燃料完全燃烧;同时燃料

在燃烧过程中自给氧,从而改善了油束局部缺氧的状况;另一方面,乙醚极易挥发,加上混合燃料粘度降低,进一步改善了雾化质量,同样改善了局部浓混合区缺氧的状况。

(2)负荷越高,D2.5 与 D5 的碳烟排放降低的幅度越大。这是由于负荷增加,循环喷油量增加,喷油持续期增加,后燃量增加,缺氧情况强化,而乙醚的加入在加快燃烧速度的同时改善了局部缺氧的情况,因此碳烟降低幅度增加。

图 2(b)为 1 800 r/min 下 NO_x 排放负荷特性。与 BD100 相比,D2.5 与 D5 的 NO_x 排放分别增加 3.41%与 7.73%。NO_x 的排放量由氧含量、绝热火焰温度及雾化质量共同决定。一方面,乙醚的汽化潜热为 351 kJ/kg,高于生物柴油的 200 kJ/kg,D2.5 与 D5 喷入气缸后汽化吸热量增加,使燃烧温度有降低的趋势;另一方面,乙醚质量低热值较高、含氧量高,加快了燃烧速度并使燃烧更加完全,提高了单位时间内的放热量,导致了燃烧温度的增加。此外乙醚粘度低且极易汽化,改善了燃料的雾化质量,使燃烧更加完全,有利于提高燃烧温度。试验结果显示了乙醚促使燃烧温度增加的趋势相对强化,导致 NO_x 排放略有增加。

图 2(c)为 1 800 r/min 下 HC 排放负荷特性。柴油机燃油停留在燃烧室中的时间比汽油机短很多,因而受壁面冷激效应、狭隙效应、油膜吸附、沉积物吸附的影响很小,其未燃 HC 主要由燃烧过程产生,且其绝对排放量很低。与 BD100 相比,D2.5 与 D5 的 HC 排放没有明显的变化规律,且 3 种燃料的排放绝对值很低。

图 2(d)为 1 800r/min 下 CO 排放负荷特性。

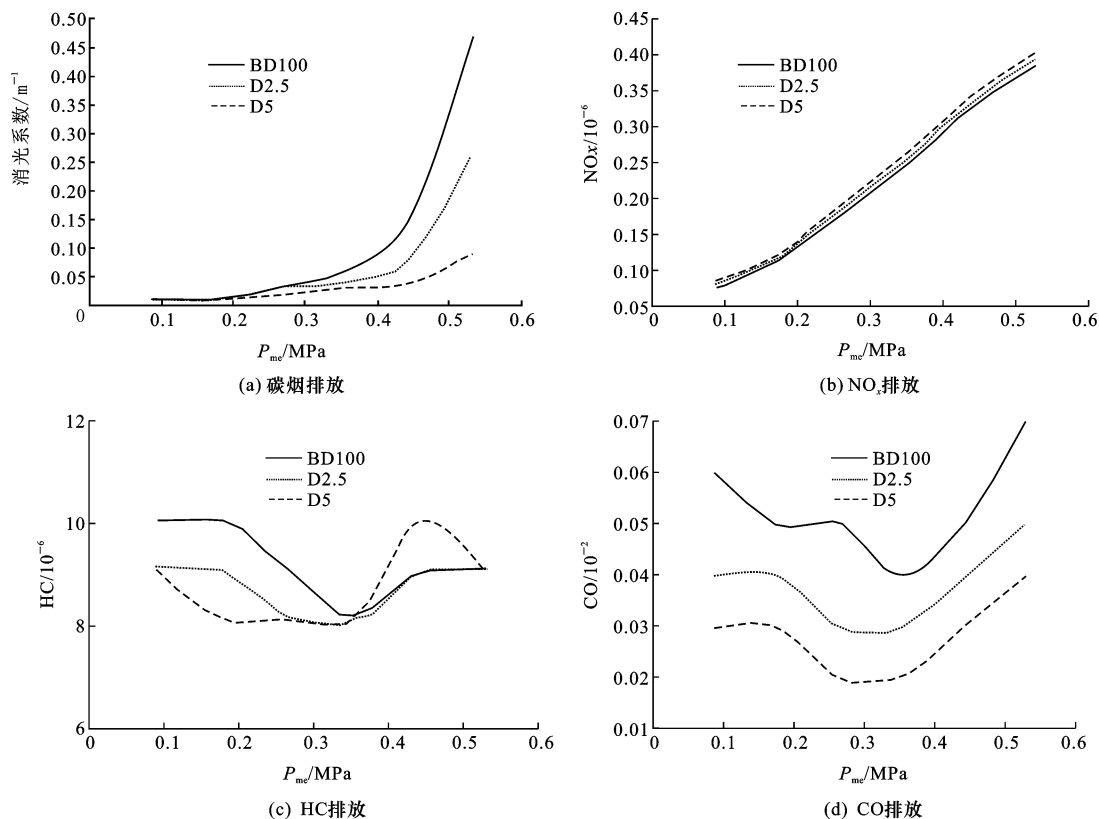


图2 1800 r/min 负荷特性排放对比曲线

Fig.2 Emissions comparison at 1800 r/min

(1)与BD100相比,D2.5与D5的CO排放分别降低27.82%与47.14%。乙醚含氧量高使燃烧更加完全,不完全燃烧产物CO明显降低。

(2)CO是燃料在燃烧过程中生成的重要的中间产物,其排放量要比汽油机低得多,只有在负荷很大接近冒烟界限时才急剧增加。虽然D2.5与D5的CO降低幅度很大,但是3种燃料的CO排放绝对值均很低。

2.2 燃烧特性

2.2.1 燃烧压力

下页图3为不同工况下生物柴油与2种比例生物柴油乙醚混合燃料的燃烧压力对比曲线。下页表2为不同工况3种燃料的峰值燃烧压力及其对应曲轴转角的数据。可得如下结论。

(1)1500 r/min时,3种燃料燃烧开始点几乎重合;与BD100相比,1800 r/min时,D2.5与D5的燃烧始点向远离上止点的方向略有延迟。一方面菜籽油制生物柴油的十六烷值为52.9,而乙醚的十六烷值为53,说明3种燃料的着火性相当;另一方面乙醚的汽化潜热为350 kJ/kg,高于生物柴油的200 kJ/kg,D2.5与D5燃料喷入气缸后吸热量高,导致燃烧有延迟的趋势。

(2)与BD100相比,同一工况下D2.5与D5的峰值燃烧压力增加,而且随着乙醚添加比例的增加而增加。①乙醚的氧含量(质量分数)为21.6%,远高于生物柴油的10%,不但加快了燃烧速度,这使燃烧更加完全,有利于提高燃烧压力;②乙醚的质量低热值为36.8 MJ/kg,远高于传统助燃剂乙醇的26.8 MJ/kg,接近于纯生物柴油的38.1 MJ/kg,因此乙醚的高热值和高氧含量使得峰值燃烧压力增加;③燃烧始点的延迟使得着火延迟期内形成的可燃混合气数量增加,同时乙醚的高挥发性使得着火延迟期内燃料混合更加充分,从而提高了峰值燃烧压力。

(3)与BD100相比,同一工况下3种燃料的峰值燃烧压力对应曲轴转角完全一致。这种现象同样是由乙醚含氧量高加快了燃烧速度,虽然燃烧始点略有延迟,但峰值燃烧压力同时出现。

小负荷时,发动机残余废气的温度和缸壁温度较低,导致在燃料喷射时整个气缸内的热力状态较差,不利于燃料的完全燃烧。掺混乙醚可以有效地改善小负荷工况时气缸内的燃烧状况,有利于燃烧热效率的提高。

2.2.2 燃烧放热规律

下页表3为不同工况下3种燃料的峰值燃烧放

表 2 不同工况峰值燃烧压力及其对应角度

Tab.2 Peak combustion pressure and corresponding angles under different conditions

转速/(r·min ⁻¹)	平均有效压力 <i>P_{me}</i> /MPa	BD100		D2.5		D5	
		峰值压力/MPa	对应角度/℃A	峰值压力/MPa	对应角度/℃A	峰值压力/MPa	对应角度/℃A
1 500	0.177	6.228	7	6.281	7	6.355	7
1 800	0.177	6.189	8	6.218	8	6.253	8
1 500	0.531	8.146	9	8.190	9	8.283	9
1 800	0.531	7.915	8	7.986	8	8.046	8

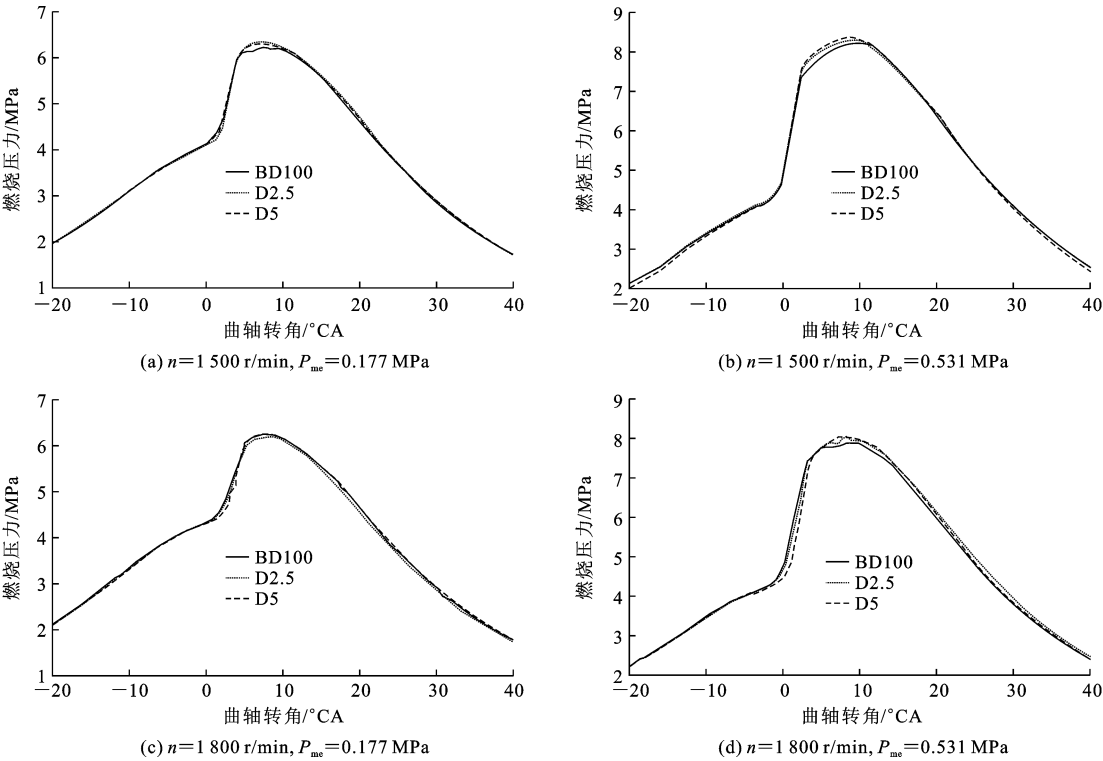


图 3 不同工况下 3 种燃料的燃烧压力曲线

Fig.3 Combustion curves of fuels under different conditions

表 3 不同工况峰值瞬时燃烧放热率及其对应角度

Tab.3 Peak heat release ratio and corresponding angles under different conditions

转速/(r·min ⁻¹)	平均有效压力 <i>P_{me}</i> /MPa	BD100		D2.5		D5	
		峰值放热率/ (kJ·(℃A) ⁻¹)	对应角 度/℃A	峰值放热率/ (kJ·(℃A) ⁻¹)	对应角 度/℃A	峰值放热率/ (kJ·(℃A) ⁻¹)	对应角 度/℃A
1 500	0.177	0.195	3	0.205	3	0.207	3
1 800	0.177	0.165	3	0.170	3	0.174	3
1 500	0.531	0.252	1	0.298	1	0.286	1
1 800	0.531	0.231	1	0.269	1	0.272	1

表 4 不同工况瞬时燃烧放热率第 2 峰值

Tab.4 Second peak heat release ratio under different conditions

转速/(r·min ⁻¹)	平均有效压力 <i>P_{me}</i> /MPa	BD100 第 2 峰值/(kJ·(℃A) ⁻¹)	D2.5 第 2 峰值/(kJ·(℃A) ⁻¹)	D5 第 2 峰值/(kJ·(℃A) ⁻¹)
1 500	0.177	0.068	0.062	0.057
1 800	0.177	0.063	0.059	0.052
1 500	0.531	0.094	0.088	0.085
1 800	0.531	0.090	0.083	0.081

热率及其对应曲轴转角的数据;表4为不同工况下3种燃料的第2峰值燃烧放热率。

(1)与BD100相比,同一工况下D2.5与D5的峰值瞬时燃烧放热率增加,且随着乙醚添加比例的增加而增加。乙醚含氧量高加快了燃烧速度,加上乙醚本身热值接近于生物柴油,单位时间内的放热量提高,导致峰值燃烧放热率增加。

(2)与BD100相比,同一工况下3种燃料的峰值燃烧放热率对应曲轴转角完全一致,原因同上。

(3)随着负荷的增加,峰值燃烧放热率对应曲轴转角向靠近上止点的方向移动,这是由于负荷增加导致滞燃期缩短,放热重心提前导致峰值放热率位置靠近上止点。

(4)柴油机瞬时燃烧放热率曲线有“双峰”现象。与BD100相比,同一工况下D2.5与D5的峰值瞬时燃烧放热率增加,但第2峰值放热率降低,且随着乙醚添加比例的增加而降低。一方面,由于乙醚挥发性好改善了雾化质量、并在滞燃期内使混合气更加均匀,有利于燃烧更加完全;另一方面,乙醚含氧量高加快了燃烧速度,两方面的因素表明乙醚的加入有效地减少了燃烧过程的后燃量,导致第2峰值燃烧放热率降低。此外,第2峰值放热率对应曲轴转角没有明显规律。

采用瞬时燃烧放热率曲线型心对应的曲轴转角来衡量燃料的循环等容度^[8],计算式为

$$CA_{\text{center}} = \frac{H\varphi d\varphi}{Hd\varphi} \quad (1)$$

式中: H 为放热率; φ 为放热率对应的曲轴转角。

该角度表示燃烧放热率面积的重心距离上止点的相对位置。对应的曲轴转角越小表明燃烧放热重心越靠近上止点,燃烧过程定容度越好,有利于提高有效热效率;相反则燃烧定容度越差,热效率越低。燃烧放热率曲线型心对应曲轴转角的计算结果如图4所示。由图4可以看出:与BD100相比,1800 r/min时,D2.5与D5的燃烧放热重心靠近上止点,且随着乙醚添加比例的增加,放热重心越靠近上止点,说明乙醚的加入提高了燃烧过程的定容度,从而有利于燃料的完全燃烧,并提高有效热效率。具体的有效热效率指标需要实际测录油耗、计算出有效燃油消耗率,结合燃料低热值计算得到,计算式为

$$\eta_e = \frac{3.6}{b_e h_u} \times 10^6 \quad (2)$$

式中: η_e 为有效热效率; b_e 为有效燃油消耗率; h_u 为燃料质量低热值。

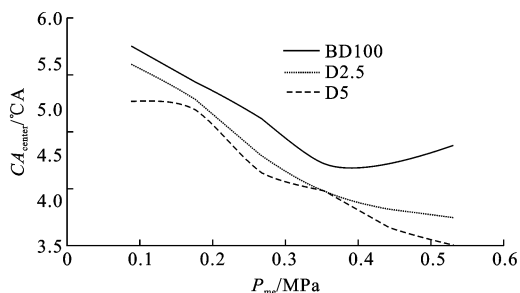


图4 放热率曲线型心对应曲轴转角

Fig. 4 Crank angles of centroids of heat release ratio curves

2.2.3 经济性

图5、图6分别为1800 r/min下3种燃料有效燃油消耗率与有效热效率对比曲线。可以看出:与BD100相比,D2.5与D5的有效燃油消耗率降低,且随乙醚添加比例的增加而降低;有效热效率明显提高。乙醚的高挥发性加快了空气与燃料的混合速度,乙醚的高含氧量加快了燃烧速度,两方面的因素有利于燃料的完全燃烧,改善了燃烧过程,提高了燃烧效率。

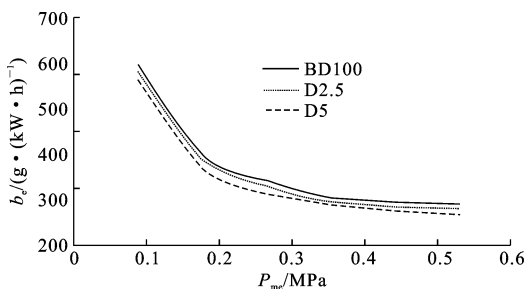


图5 有效燃油消耗率对比

Fig. 5 Comparison of effective fuel consumption

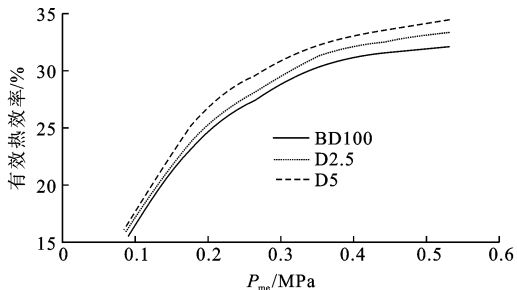


图6 有效热效率对比

Fig. 6 Comparison of effective thermal efficiency

3 结 语

(1)生物柴油是一种清洁的可再生能源,已经在中国得到了一定规模的应用。生物柴油的粘度高和低温流动性差的特性限制了其进一步的发展与应用。作为柴油机冷启动液的主要组成部分,乙醚具有氧含量较高、挥发性好、低温流动性好的特点。在

此前提下,将乙醚以低体积比例与生物柴油形成混合燃料,对燃烧与排放过程均有明显的改善。

(2)生物柴油乙醚混合燃料可以在柴油机上直接使用。在燃烧方面可以加快燃烧速度,使燃烧更加完全;在排放方面体现出极佳的降烟效果,同时可以降低 CO 排放,但是 NO_x 排放略有增加,HC 排放基本不变;在经济性方面可以有效地降低燃油消耗率,并显著提高有效热效率。

(3)乙醚既可以作为柴油机冷启动液的组成部分,也可以作为掺混燃料在柴油机上使用,且不需要对柴油机做结构上的改变。研究结果对生物柴油的应用与推广具有重要的意义。

(4)生物柴油乙醚混合燃料中乙醚体积比例达到 10%时,会出现气阻现象。下一步将找到不会发生气阻条件下的乙醚最大添加量,研究其燃烧与排放特征。还将开展乙醚燃烧化学反应动力学机理的研究,对其燃烧产物进行鉴定,完善乙醚做为燃料的基础研究。

参考文献:

References:

- [1] BP P L C. BP statistical review of world energy[R]. London;BP P L C,2012.
- [2] Atabani A E, Silitonga A S, Badruddin I A, et al. A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2012,16(4):2070-2093.
- [3] Lozada I, Islas J, Grande G. Environmental and economic feasibility of palm oil biodiesel in the Mexican transportation sector[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2010,14(1):486-492.
- [4] Sánchez J A G, Martínez J M L, Martín J L, et al. Comparison of life cycle energy consumption and GHG emissions of natural gas, biodiesel and diesel buses of the Madrid transportation system[J]. Energy,2012,47(1):174-198.
- [5] Wang Z X, Calderon M M, Lu Y. Lifecycle assessment of the economic, environmental and energy performance of Jatropha curcas L. biodiesel in China[J]. Biomass and Bioenergy,2011,35(7):2893-2902.
- [6] Yan X Y, Crookes R J. Reduction potentials of energy demand and GHG emissions in China's road transport sector[J]. Energy Policy,2009,37(2):658-668.
- [7] Ong H C, Mahlia T M I, Masjuki H A. A review on energy pattern and policy for transportation sector in Malaysia[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2012,16(1):532-542.
- [8] 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 fueled with biodiesel-ethanol-water micro-emulsion-fuel[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering,2010,31(1):21-26. (in Chinese)
- [9] Qi D H, Chen H, Matthews R D, et al. Combustion and emission characteristics of ethanol-biodiesel-water micro-emulsions used in a direct injection compression ignition engine[J]. Fuel,2010,89(5):958-964.
- [10] Qi D H, Chen H, Lee C F, et al. Experimental studies of a naturally aspirated, DI diesel engine fuelled with ethanol-biodiesel-water microemulsions [J]. Energy Fuels,2010,24(1):652-663.
- [11] Xue J L, Grift T E, Hansen A C. Effect of biodiesel on engine performances and emissions[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2011,15(2):1098-1116.
- [12] 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)
- [13] Lin L, Zhou C S, Vittayapadung S, et al. Opportunities and challenges for biodiesel fuel[J]. Applied Energy,2011,88(4):1020-1031.
- [14] Demirbas A. Biodiesel from oilgae, biofixation of carbon dioxide by microalgae: a solution to pollution problems[J]. Applied Energy,2011,88(10):3541-3547.
- [15] Sorguven E, Ozilgen M. Thermodynamic assessment of algal biodiesel utilization[J]. Renewable Energy,2010,35(9):1956-1966.
- [16] Pruvost J, Vooren G, Gouic B, et al. Systematic investigation of biomass and lipid productivity by microalgae in photobioreactors for biodiesel application[J]. Bioresource Technology,2011,102(1):150-158.
- [17] Roleda M Y, Slocumbe S P, Leakey R J G, et al. Effects of temperature and nutrient regimes on biomass and lipid production by six oleaginous microalgae in batch culture employing a two-phase cultivation strategy[J]. Bioresource Technology,2013,129(1):439-449.