

[引用格式] 罗逸飞,高占斌,李高晓彤,等. 柴油机燃用双生物柴油混合燃料的燃烧排放性能[J]. 集美大学学报(自然科学版),2026,31(2):200-209. DOI:10.19715/j.jmuzr.2026.02.07.

柴油机燃用双生物柴油混合燃料的燃烧排放性能

罗逸飞¹, 高占斌^{1,2,3}, 李高晓彤¹, 钟 一¹, 肖 阳¹, 刘贺荣¹

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021;
3. 福建省能源材料科学与技术创新实验室 (IKKEM), 福建 厦门 361102)

[摘要] 以酯基生物柴油 (biodiesel, BDO) 作为原料, 经连续加氢脱氧—异构等一系列工艺处理, 制得烃基生物柴油 (hydrocarbon-based biodiesel, HVO), 用其配置 D90B5H5 (90% 柴油 + 5% BDO + 5% HVO)、D80B10H10 (80% 柴油 + 10% BDO + 10% HVO) 和 D70B15H15 (70% 柴油 + 15% BDO + 15% HVO) 三组双生物柴油混合燃料, 并以柴油作为参照, 在 TBD234V6 型柴油机上进行燃烧试验, 探究混合燃料对其燃烧过程和排放性能的影响。研究表明: 1) 柴油机燃用混合燃料时的当量燃油消耗率随双生物柴油掺混比例的增大而降低, 在额定工况下, 柴油机燃用 D90B5H5、D80B10H10 和 D70H15B15 的当量燃油消耗率比燃用柴油分别降低了 1.0%、2.1% 和 2.6%。在不同负荷工况下, 尽管混合燃料热值较柴油低, 但其内在的含氧属性和高十六烷值更利于燃烧。2) 在燃料特性的综合影响下, 与燃用柴油相比, 燃用 D70B15H15 的最高爆发压力在 25%、50%、75% 和 100% 负荷工况下分别提高了 0.8%、1.3%、1.5% 和 1.9%, 瞬时放热峰值时刻也有所提前。3) 在额定工况下, 与柴油相比, 燃用 D70B15H15 的 CO、HC 和碳烟排放量分别降低了 11.0%、9.3% 和 14.2%, NO_x 排放量上升了 7.2%。综上, 燃用双生物柴油混合燃料能提高燃料品质, 改善柴油机的燃烧和排放性能。

[关键词] 柴油发动机; 双生物柴油; 燃烧特性; 排放性能

[中图分类号] U 671.99 [文章编号] 1007-7405(2026)02-0200-10 DOI:10.19715/j.jmuzr.2026.02.07

Performance of Diesel Engine Fueled by Dual Biodiesel Blended Fuel

LUO Yifei¹, GAO Zhanbin^{1,2,3}, LI Gaoxiaotong¹, ZHONG Yi¹, XIAO Yang¹, LIU Herong¹

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering, Xiamen 361021, China;

3. Innovation Laboratory for Sciences and Technologies of Energy Materials of Fujian Province (IKKEM), Xiamen 361102, China)

Abstract: In this paper, ester-based biodiesel (BDO) was used as raw material, and a series of processes such as continuous hydrodeoxygenation-isomerization were carried out to obtain hydrocarbon-based biodiesel (HVO). Three groups of dual-biodiesel blended fuels, D90B5H5 (90% diesel + 5% BDO + 5% HVO), D80B10H10 (80% diesel + 10% BDO + 10% HVO) and D70B15H15 (70% diesel + 15% BDO + 15% HVO) were prepared respectively. Diesel was used as a reference, and combustion tests were carried out on a TBD234V6 diesel engine to explore the effects of the mixed fuels on its combustion process and emission per-

[收稿日期] 2025-02-15

[基金项目] 省部重点实验室开放课题 (嘉庚科函 [2022] 9 号-1)

[通信作者] 高占斌, 博士, 教授, 从事内燃机性能、清洁燃烧、增压、节能与减排技术研究。

formance. The results show that the equivalent fuel consumption of diesel engines using mixed fuels decreases with the increase of the proportion of dual-biodiesel blending. Under rated conditions, the equivalent fuel consumption of diesel engines using D90B5H5, D80B10H10 and D70H15B15 is reduced by 1.0%, 2.1% and 2.6% respectively compared with that of diesel. Under various load conditions, although the calorific value of the mixed fuel is lower than that of diesel, its inherent oxygen content and high cetane number are more conducive to combustion. Under the comprehensive influence of fuel characteristics, compared with diesel, the maximum explosion pressure of D70B15H15 increased by 0.8%, 1.3%, 1.5% and 1.9% at 25%, 50%, 75% and 100% load conditions respectively, and the instantaneous heat release peak time was also advanced. Under rated conditions, compared with diesel, the CO, HC and soot emissions of D70B15H15 were reduced by 11.0%, 9.3% and 14.2% respectively, and the NO_x emissions increased by 7.2%. In summary, the use of dual-biodiesel blended fuel can improve the fuel quality and the combustion and emission performance of diesel engines.

Keywords: diesel engine; dual biodiesel; combustion characteristics; emission performance

0 引言

生物柴油是一种环保且可再生的替代燃料^[1]。它不仅能够有效减少温室气体排放,还能降低对化石燃料的依赖,促进能源结构的优化^[2]。然而,生物柴油的成本高于传统柴油,这成为制约其发展的一个重要因素^[3]。近年来,双生物柴油混合燃料的研究逐渐兴起,研究发现,将不同来源的生物柴油进行混合,可优化其燃烧性能和降低排放。如, Siraj 等^[4]研究了燃用麻风树、卡兰贾、马华和印楝四种生物柴油配置的双生物柴油混合燃料对直喷式柴油机性能的影响,发现混合燃料的空燃比、制动热效率、机械效率和容积效率等性能参数比柴油低,而制动比能耗和排气温度比柴油高,此外,混合燃料的 CO₂、HC 和 NO_x排放量均高于柴油,但 CO 排放量低于柴油。Saranan 等^[5]研究了可变压缩比柴油机燃用油菜籽和马华生物柴油混合燃料(BL)的性能和排放特性,发现 BL20 性能最佳,能显著降低 CO、HC 和碳烟的排放,但会增加 NO_x 的排放。

尽管已有许多学者对双生物柴油混合燃料进行了积极探索,但目前的研究大多是围绕由酯交换法生产的酯基生物柴油(biodiesel, BDO)而展开的,而关于将烃基生物柴油(hydrocarbon-based biodiesel, HVO)作为混合燃料的研究还较少见。烃基生物柴油是通过加氢衍生可再生柴油或加氢植物油的方法制成的生物柴油,具有更高的十六烷值和热值,这意味着掺烧烃基生物柴油对发动机的动力性能有积极的影响^[6]。虽然 HVO 性能优异,但其生产过程需要复杂的加氢处理技术,导致其生产成本高于 BDO,此时混合使用 BDO 可降低燃料成本。且 HVO 对原料的依赖性较强,导致其供应可能受限且价格波动大,而 BDO 的原料来源更广泛,混合使用 BDO 可减少对单一原料的依赖。此外,目前全球的 HVO 产能仍处于增长阶段,还无法完全代替 BDO,混合使用 BDO 可缓解供应压力。

综上所述,混合燃用柴油、BDO 与 HVO 是一种兼顾性能、生产成本、供应稳定性及环保目标的掺混燃烧策略。为进一步探究双生物柴油混合燃料对柴油机性能的影响,本文以柴油作为参考,配置不同体积比的 BDO-HVO-D 混合燃料,在增压中冷型

柴油机上进行试验研究，探讨不同配比的混合燃料对发动机经济性能、燃烧特性及排放性能的影响。

1 试验燃料及台架

1.1 试验燃料

本试验所用双生物柴油混合燃料是由国 V0#柴油、酯基生物柴油和烃基生物柴油按体积百分比混合而成。其中：柴油购自中石化中海船舶燃料供应有限公司；酯基生物柴油主要成分为脂肪酸甲酯，是在生产过程中采用酯交换法，将油脂中的脂肪酸甘油三酯与甲醇、乙醇发生酯化反应制备得到；烃基生物柴油是以 BDO 作为生产原材料，经加氢脱氧后得到主要成分为直链烷烃的 HVO，再经临氢异构技术处理，使 HVO 中的大部分直链烷烃转化为异构烷烃制备得到。两种生物柴油的制备技术路线如图 1 所示，理化性质如表 1 所示。

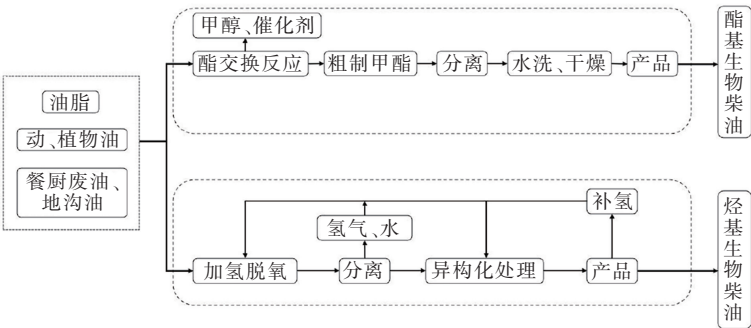


图 1 生物柴油的制备流程图

Fig.1 Preparation process diagram of biodiesel

表 1 两种生物柴油的理化性质

Tab.1 Physicochemical properties of two types of biodiesel

理化性质	BDO	HVO
十六烷值	55.8	64.0
密度(20℃)/(kg·m ⁻³)	879.0	775.6
低热值/(MJ·kg ⁻¹)	38.5	43.6
运动黏度/(mm ² ·s ⁻¹)	4.3	2.5
含氧量/%	11	0

本文主要研究在不同负荷工况下，燃用不同配比的双生物柴油混合燃料对柴油机燃烧特性和排放性能的影响，同时设置一组纯柴油试验作为对比。由于柴油、BDO 和 HVO 均为烃类或酯类的衍生物，三者分子极性相近，所以在常温下具有良好的互溶性，无需添加助溶剂即可直接掺混，形成均一稳定的混合溶液。混合燃料的配置方案和理化性质如表 2 所示。

表 2 双生物柴油混合燃料的配置方案及理化性质

Tab.2 Configuration scheme and physicochemical properties of dual biodiesel blended fuel

混合燃料	掺混比例(体积分数)	十六烷值	密度(20℃) /(kg·m ⁻³)	运动黏度 /(mm ² ·s ⁻¹)	低热值 /(MJ·kg ⁻¹)	含氧量/%
D100	100% 柴油	54.00	814.00	4.930	42.05	0.00
D90B5H5	90% 柴油 + 5% BDO + 5% HVO	54.59	815.33	4.777	41.95	0.55
D80B10H10	80% 柴油 + 10% BDO + 10% HVO	55.18	816.66	4.624	41.85	1.10
D70B15H15	70% 柴油 + 15% BDO + 15% HVO	55.77	817.99	4.471	41.75	1.65

1.2 试验台架及方案

试验所用柴油机为河柴重工生产的TBD234V6 型柴油机, 其主要参数如表3 所示。本试验使用 KiBox2 燃烧分析仪测得实时的缸压-放热率, 数据采样间隔为 0.1° (CA), 对连续采样的 22 个工作循环求平均值。使用 HZB2000 型油耗测量仪, 实时记录各负荷下的燃油消耗; 使用 Testo350 烟气分析仪测量各排放气体浓度值; 使用 AVL439 不透光烟度计测量废气中颗粒物含量。试验台架如图 2 所示。

本文基于 TBD234V6 型柴油机, 依据 ISO8178 标准开展负荷特性试验研究, 按额定工况时最大输出功率的 25%、50%、75% 和 100% 分别确定各负荷工况点的输出功率, 依据 $P_e = Cn^3$ 和 $T_{tq} = 9550(P_e/n)$ 计算各负荷点对应的柴油机转速、扭矩。其中: P_e 为柴油机的有效功率; C 为常数; n 为柴油机的转速; T_{tq} 为扭矩。具体试验工况如表 4 所示。

表 3 TBD234V6 型柴油机性能参数

Tab.3 Performance parameters of TBD234V6 diesel engine

编号	名称	技术参数
1	机型	四冲程、直喷、水冷
2	(缸径×冲程)/(mm×mm)	128×140
3	气缸排列	V 型夹角 60°
4	总排量/L	10.8
5	压缩比	15:1
6	标定转速/(r·min ⁻¹)	1500
7	标定扭矩/(N·m)	1184
8	标定功率/kW	186
9	供油提前角/(°)	25

表 4 负荷特性试验方案设计

Tab.4 Design of test plan for load characteristic

负荷/%	转速/(r·min ⁻¹)	扭矩/(N·m)	功率/kW
25	1500	296	46.5
50	1500	592	93.0
75	1500	888	139.5
100	1500	1184	186.0

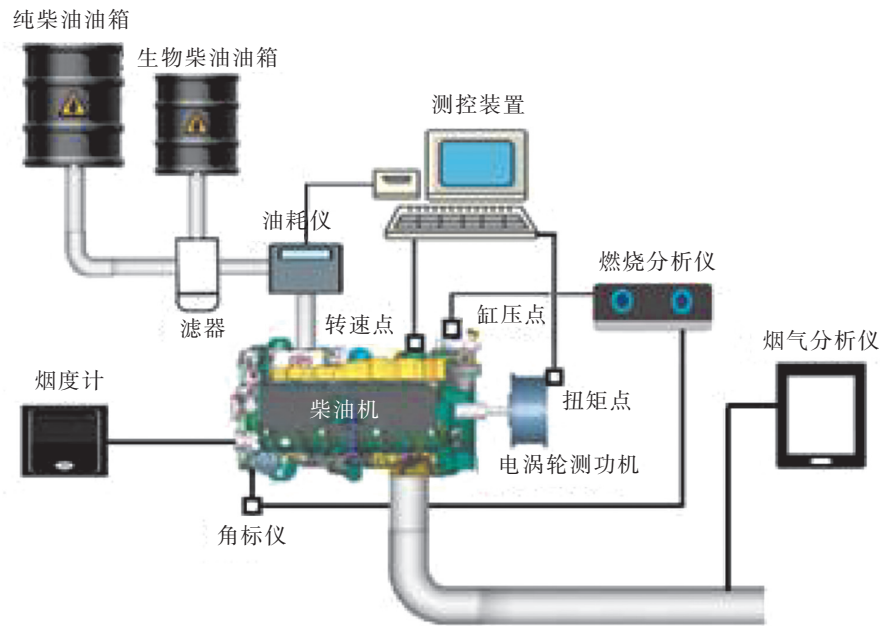


图 2 试验台架示意图
Fig.2 Schematic diagram of test bench

2 试验结果与分析

2.1 燃油经济性分析

燃油消耗率是表征柴油机经济性能的重要指标。由于三种试验燃料是由双生物柴油和柴油按不同体积比混合而成，三者的密度和热值都不相同，因此本文以纯柴油低热值为基准的当量燃油消耗率，分析燃用不同掺混比例的混合燃料对柴油机经济性能的影响。当量燃油消耗率的定义式^[7]为：

$$b_e = \frac{H_{uD}X_D + H_{uB}X_B + H_{uH}X_H}{H_{uD}} \cdot b_i。$$

其中： b_e 为混合燃料的当量燃油消耗率； H_{uD} 、 H_{uB} 和 H_{uH} 分别为纯柴油、酯基生物柴油和烃基生物柴油的低热值； X_D 、 X_B 和 X_H 分别为柴油、酯基生物柴油和烃基生物柴油在混合燃料中的体积分数； b_i 为油耗仪测得的实际燃油消耗率。

图 3 为柴油机在各负荷下掺烧不同比例双生物柴油对当量燃油消耗率的影响。由图 3 可知：在相同负荷下，柴油机燃用混合燃料时的当量燃油消耗率随双生物柴油掺混比例的增大而降低；在额定工况下，与燃用柴油相比，柴油 机 燃 用 D90B5H5、D80B10H10 和 D70H15B15 的当量燃油消耗率分别降低了 1.0%、2.1% 和 2.6%。主要原因在于随着掺混比例的增加，混合燃料的十六烷值升高，使得着火时刻提前，滞燃期缩短，缸内燃烧得到改善，燃烧效率得到提升，对降低当量燃油消耗率起到了积极的作用^[8]。此外，BDO 和 HVO 的运动黏度较低，且随着双生物柴油掺混比例的增大，混合燃料的整体黏度进一步降低，雾化质量得到提高，燃料燃烧更加充分，从而降低整体的当量燃油消耗率^[9]。

2.2 燃烧特性分析

图 4 为各负荷下掺烧不同比例双生物柴油对缸压-放热率的影响。由图 4 可知，4 种负荷下燃用双生物柴油混合燃料的着火时刻均有所提前。这是因为生物柴油的高十六烷值改善了混合燃料的着火性能，使其在气缸内率先燃烧并建立起压力^[10]。由图 4 还可知：4 种负荷下掺烧双生物柴油时的缸内最高爆发压力均比燃用柴油高，并且随着掺混比例和负荷的增大而升高；与燃用柴油相比，柴油机燃用 D70B15H15 时的最高爆发压力在 25%、50%、75% 和 100% 负荷时分别提高了 0.8%、1.3%、1.5% 和 1.9%。这主要是因为热值会影响缸内燃烧^[11]，D70B15H15 的热值较柴油低，燃用混合燃料释放的

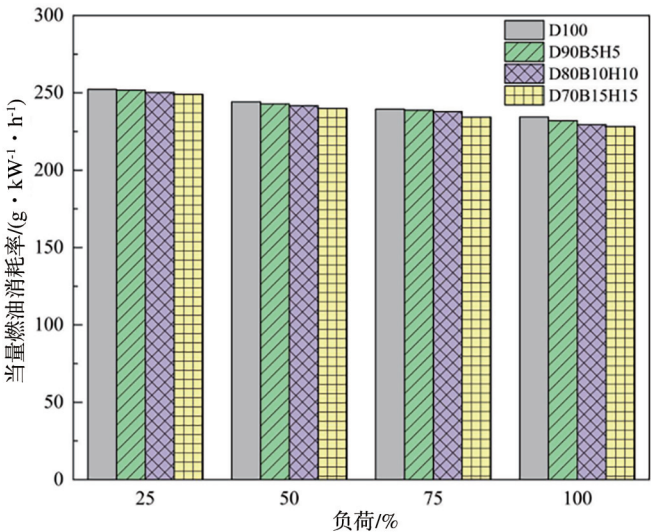


图 3 掺烧不同比例双生物柴油对当量燃油消耗率的影响
Fig.3 The effect of mixing different proportions of dual biodiesel on equivalent fuel consumption rate

总能量小于燃用柴油释放的总能量, 但 D70B15H15 的高十六烷值和低黏度特性在初期燃烧时就有效改善了气缸状态, 部分抵消了热值较低对燃烧带来的不利影响^[12]。且随着负荷的增加, 过量空气系数下降, 气缸内空燃比降低, 此时混合燃料中的 BDO 因其内在的含氧属性^[13], 能有效改善气缸内燃烧状态, 进一步削弱了热值较低的不利影响, 因此缸内最高爆发压力升幅增大。

由图 4 可看出, 随着负荷的增加, 柴油机掺烧双生物柴油的放热率呈现出典型的双峰放热状态, 这表现出了明显的预混合燃烧和扩散燃烧的特征^[14], 瞬时放热率峰值时的曲轴转角明显提前。与燃用柴油相比, 燃用 D70B15H15 时, 25%、50%、75%、100% 负荷下柴油机的瞬时放热峰值时的提前角分别提前了 0.8°、1.1°、1.5°和 1.9°。这主要是因为: 一方面, 混合燃料的高十六烷值使燃料的着火性能得到改善, 着火延迟期缩短, 燃烧始点提前; 另一方面, BDO 和 HVO 的黏度较柴油低, 掺烧两种生物柴油降低了混合燃料的黏度, 使燃料在气缸内雾化的效果更好, 着火更容易, 因此, 瞬时放热率峰值提前出现^[15]。

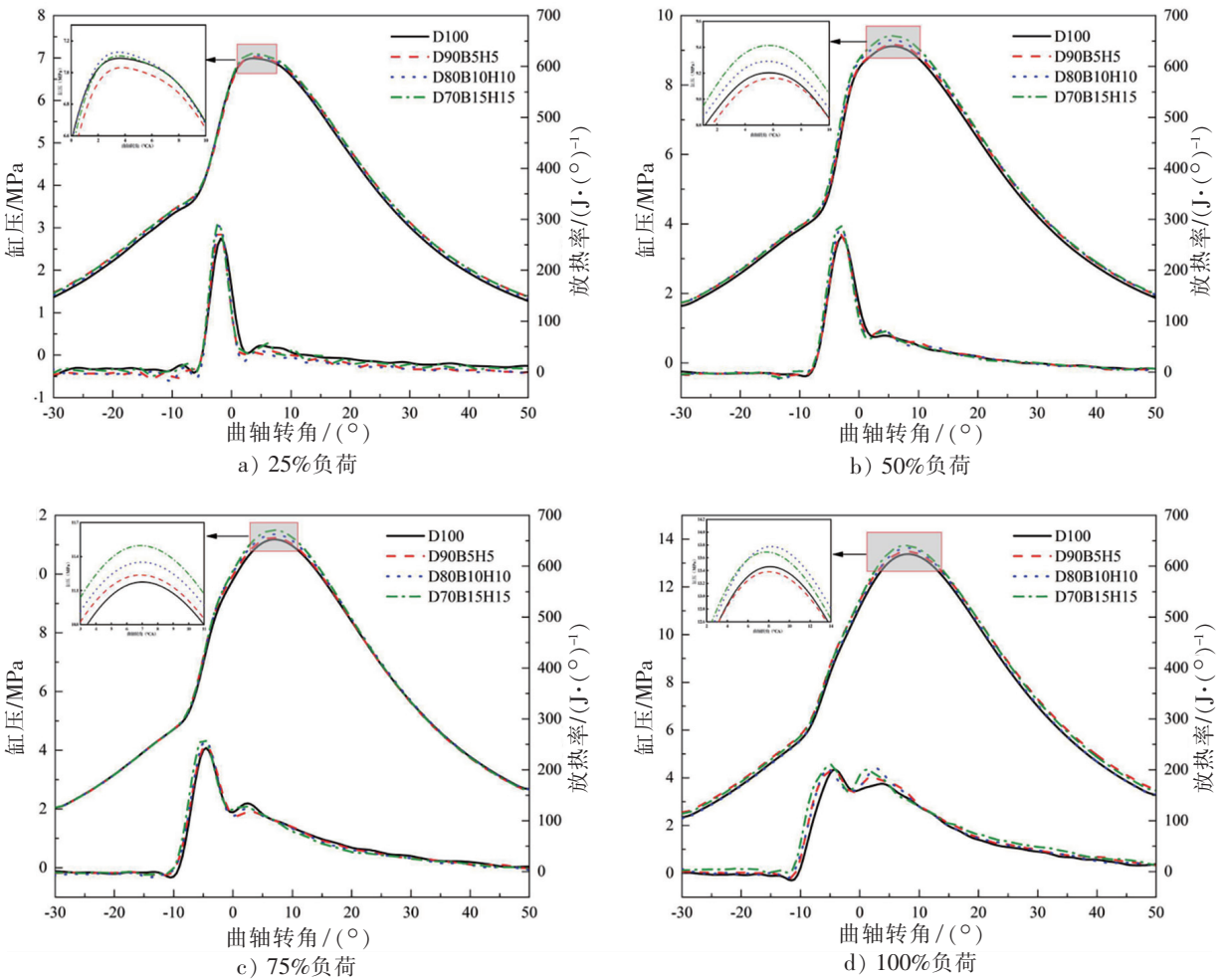


图 4 掺烧不同比例双生物柴油对缸压-放热率的影响
Fig.4 The effect of mixing different proportions of dual biodiesel on cylinder pressure-heat release rate

2.3 排放特性分析

2.3.1 CO 排放

图 5 为柴油机在负荷特性各工况下掺烧不同配比双生物柴油的 CO 排放曲线。由图 5 可知，随着负荷的增加，柴油机的 CO 排放量呈不断上升的趋势。这是因为在 25% 负荷工况下，燃料的混合气稀薄，增加了火焰淬熄的发生率^[16]，此时 CO 生成量相对较高，但由于燃料喷射量少，所以总排放量较低，随着负荷的不断增加，循环喷油量不断增加，空燃比随之降低^[17]，缸内氧浓度不断下降，不利于 CO 的氧化和燃烧，因此 CO 排放量不断增加。

与燃用纯柴油相比，柴油机燃用 D70B15H15 时，在 25% 和 50% 负荷下 CO 的排放量分别升高了 7.0% 和 7.8%，而在 75% 和 100% 负荷下 CO 的排放量分别降低了 8.5% 和 11.0%。在中低负荷时，CO 的排放量随着双生物柴油掺混比例的增大而上升，这主要是因为 BDO 的热值较低，掺混比例越高时，混合燃料的热值越低，释放的热量就越少，不利于 CO 的氧化和燃烧，且混合燃料十六烷值较高，滞燃期缩短，产生的预混合可燃气体减少，使得低负荷时燃烧不够充分，导致 CO 排放量增加^[18]。柴油机在高负荷时，随着双生物柴油掺混比例的增大，CO 的排放量逐渐降低。这是因为：混合燃料整体黏度较柴油更低，从而使燃料在气缸内的雾化效果更好，对燃料的完全燃烧起到了促进作用，抑制了 CO 的生成^[19]；此外，高负荷时气缸内空燃比降低，此时 BDO 作为含氧燃料，能缓解混合燃料与空气局部混合的缺氧状态，且高负荷下缸内温度较高，高温富氧区增多，混合燃料在高负荷燃烧时促进了 CO 的氧化反应效果，进而降低了掺烧双生物柴油的 CO 排放量。

2.3.2 HC 排放

图 6 为柴油机在 4 种工况下掺烧不同配比双生物柴油的 HC 排放曲线。由图 6 可知，柴油机燃用不同配比双生物柴油混合燃料的 HC 排放量随着负荷的增加而逐渐降低。这主要是由于在较低

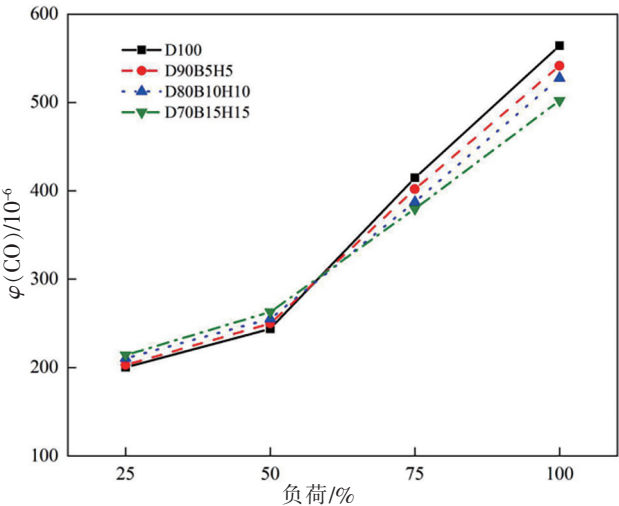


图 5 掺烧不同配比双生物柴油的 CO 排放曲线
Fig.5 CO emission curve of firing dual biodiesel with different proportions

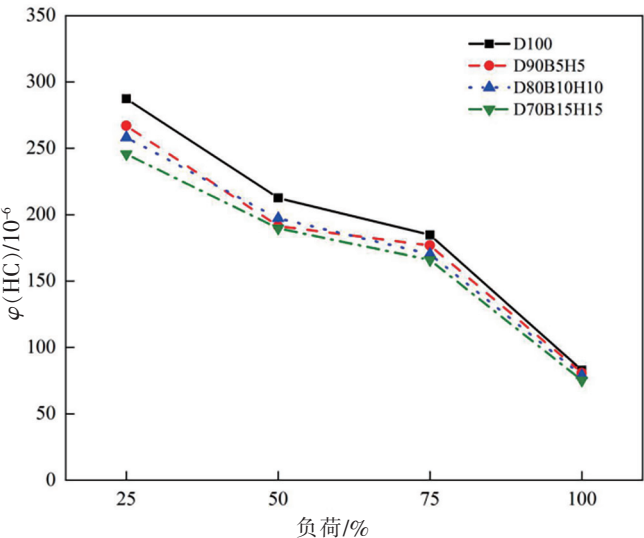


图 6 掺烧不同配比双生物柴油的 HC 排放曲线
Fig.6 HC emission curve of co firing dual biodiesel with different proportions

负荷时, 循环喷油量较少, 缸内会出现较多的混合气过稀区域, 且缸内温度较低不易燃烧, 因而造成 HC 排放浓度的增加; 随着负荷的增大, 每循环供油量增加使缸内混合气过稀区域减少, 且缸内燃烧温度较高, 对 HC 的氧化作用增强, 同时壁面局部淬熄区域减少, 所以 HC 的浓度降低^[20]。

混合燃料在各负荷下的 HC 排放均优于柴油。与燃用纯柴油相比, 柴油机在 25%、50%、75%、100% 负荷工况下燃用 D70B15H15 时, HC 排放量分别降低了 14.5%、10.7%、10.2% 和 9.3%。随着负荷的升高, 柴油与混合燃料的 HC 排放水平趋于平缓, 这主要是因为缸内温度在大负荷时较高, 减小了各混合燃料之间的 HC 排放差异。

HC 排放量随着双生物柴油掺混比例的增大而降低。一方面, 混合燃料具有较高的十六烷值, 能使滞燃期缩短, 着火时刻提前, 并减少着火稀限 HC 源的形成时间; 另一方面, 混合燃料中 BDO 的含氧属性可以减少缸内局部缺氧区域, 促进未燃 HC 化合物的氧化和燃烧, 降低 HC 的生成速率。二者共同作用最终使得 HC 的排放量降低。

2.3.3 NO_x 排放

图 7 为柴油机在各负荷工况下掺烧不同配比双生物柴油的 NO_x 排放曲线。由图 7 可知, 随着负荷的增加, 柴油机燃用各混合燃料的 NO_x 排放量呈先上升后下降的趋势。出现这种情况的主要原因是: 低负荷工况下缸内温度较低, 而生成 NO_x 的氧化反应需要在高温下进行, 所以 NO_x 生成量较少^[21]; 随着负荷逐渐升高到 75%, 缸内温度上升明显, NO_x 生成量也随之增加; 而当负荷达到 100% 工况时, 尽管缸内温度得到进一步提高, 但高负荷下循环喷油量较大, 需要更多的氧来进行燃烧, 缸内氧浓度降低, 制约了 NO_x 的生成, 使得 NO_x 排放量降低。

与燃用纯柴油相比, 柴油机燃用 D70B15H15 的 NO_x 排放量在 25% 和 50% 负荷工况下分别降低了 10.8% 和 7.0%。这是因为此时缸内温度对 NO_x 排放起主导作用, 而柴油的热值比混合燃料高, 使其在气缸内燃烧时释放的热量更多, 缸内温度随之上升, 为 NO_x 的生成提供了高温环境, 导致 NO_x 排放量增加。

相比于燃用纯柴油, 柴油机燃用 D70B15H15 的 NO_x 排放量在 75% 和 100% 负荷下分别升高了 4.2% 和 7.2%。出现这种情况是因为高负荷时气缸内温度升高, 而混合燃料的高十六烷值特性会使其着火时刻提前, 滞燃期缩短, 延长混合气在高温下的滞留时间, 加之混合燃料为含氧燃料, 二者共同作用使得气缸内高温富氧区域增加, 最终导致 NO_x 排放量随着双生物柴油掺混比的增加而上升^[22]。

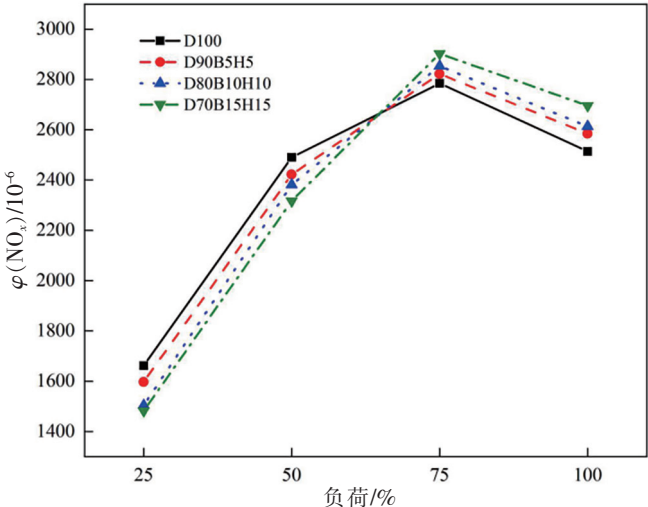


图 7 掺烧不同配比双生物柴油的 NO_x 排放曲线
Fig.7 NO_x emission curve of co firing dual biodiesel with different proportions

2.3.4 碳烟排放

图 8 为柴油机在各负荷工况下掺烧不同配比双生物柴油的碳烟（soot）排放曲线。由图 8 可知，柴油机燃用各混合燃料的碳烟排放量随着负荷的增加而上升。这是因为：在低负荷时缸内氧气浓度充足，能有效抑制颗粒前驱物质的生成，降低碳烟排放^[23]；随着负荷的提高，缸内燃烧温度上升，过量空气系数下降，使得空燃比减少；此外，高负荷下随着喷油量的增加，缸内混合气均匀性降低，导致气缸内高温缺氧区域增加，最终使得碳烟排放量增加^[24]。

与柴油相比，双生物柴油混合燃料的碳烟排放量更低，且随着 BDO 和 HVO 掺混比例的增加，碳烟排放量进一步降低。25%、50%、75%、100% 负荷下柴油机掺烧 D70B15H15 的碳烟排放量比燃用柴油分别降低了 56.2%、36.5%、21.0% 和 14.2%。这主要是因为：混合燃料具有较高的十六烷值和较短的滞燃期，使着火延迟期缩短，进而使着火点提前，从而减少火焰浮起长度，一定程度上降低了碳烟的生成量；此外，混合燃料中不含芳香烃的 HVO 也能减少碳烟前驱物的生成^[25]；并且，HVO 几乎不含硫，硫原子虽然不直接参与碳烟的合成，但会通过氧化附着在碳烟颗粒上，增加颗粒的大小和质量^[26]。因此，混合燃料的低硫特性亦有助于降低碳烟的排放量，导致碳烟排放量随着双生物柴油掺混比的增加而下降。

3 结论

1) 各负荷工况下，受到混合燃料高十六烷值和低黏度特性影响，与燃用柴油相比，柴油机燃用混合燃料时的当量燃油消耗率随双生物柴油掺混比例的增大而降低。

2) 混合燃料的热值较柴油低，但其高十六烷值和低黏度特性在初期燃烧时就能有效改善气缸状态，部分抵消了热值较低对燃烧带来的不利影响，高负荷时其内在的含氧属性也能有效改善气缸内燃烧状态，进一步削弱其热值较低的不利影响。各负荷工况下，燃用双生物柴油混合燃料的最大爆发压力升高，瞬时放热峰值也有所提前。

3) 在额定工况下，双生物柴油混合燃料能显著降低 CO、HC 和碳烟（soot）排放量，但因其高十六烷值和含氧特性，NO_x 排放量略有升高。

综合来看，双生物柴油混合燃料能改善柴油机的燃烧和排放性能。

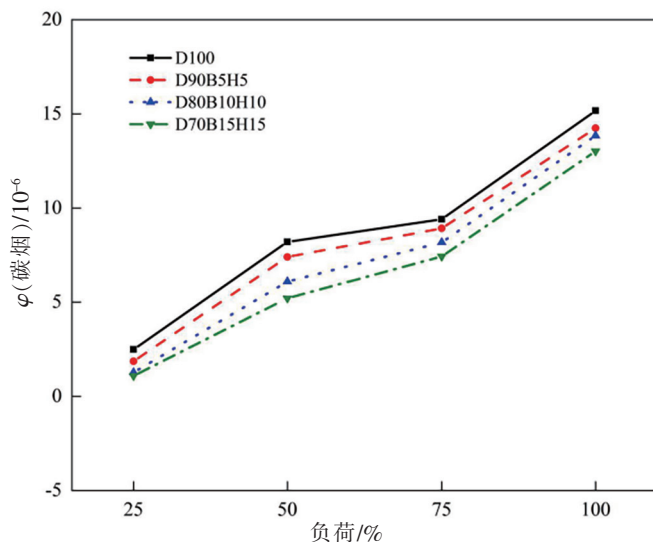


图 8 掺烧不同配比双生物柴油的碳烟排放曲线
Fig.8 Soot emission curve of co firing dual biodiesel with different proportions

[参 考 文 献]

[1] STOHR M, RUOFF S, RAUCH B, et al. Experimental study of droplet vaporization for conventional and renewable transportation fuels: effects of physical properties and chemical composition[J]. Fuel, 2024, 356: 129535.

- [2] 郑梓若. “双碳”背景下促进我国生物柴油产业发展的财税政策研究[J]. 税务研究, 2024(8): 127-132.
- [3] 赵中锦. 生物柴油缓蚀剂与抗氧化剂协同作用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.
- [4] SIRAJ S, KUMAR R D, KISHOR K. Experimental investigation for evaluating the performance and emission characteristics of DICl engine fueled with dual biodiesel-diesel blends of Jatropha, Karanja, Mahua, and Neem[J]. Energy, 2022, 238 (PB): 121787.
- [5] SARAVANAN A, MURUGAN M, REDDY S M, et al. Performance and emission characteristics of variable compression ratio CI engine fueled with dual biodiesel blends of Rapeseed and Mahua[J]. Fuel, 2020; 263: 116751.
- [6] 展亮. 汽油/加氢催化生物柴油压燃式发动机燃烧与排放性能优化研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
- [7] 朱德灿, 吴晗, 肖鹏, 等. 含氧燃料对柴油机高原工作特性影响[J]. 内燃机学报, 2023, 41(2): 97-105.
- [8] 黄粉莲, 余超杰, 万明定, 等. 不同海拔条件下甲醇替代率和主喷正时对甲醇/柴油 RCCI 发动机性能的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(5): 71-81.
- [9] 张丹, 祁东辉, 刘助春, 等. 柴油机燃用菜籽油-柴油混合燃料的试验研究[J]. 可再生能源, 2023, 41(6): 725-730.
- [10] CHEN J, LIU Q, HUANG Y, et al. An optical study on spray and combustion characteristics of ethanol/hydrogenated catalytic biodiesel blends in a constant volume combustion chamber[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2024, 49: 102448.
- [11] 吴刚, 江国和, 楼海军, 等. DICl 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] KOLLI K V, GADEPALLI S, BARMA D J, et al. Establishment of lower exhaust emissions by using EGR coupled low heat loss diesel engine with fuel blends of microalgae biodiesel-oxygenated additive DEE-antioxidant DPPD[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2019, 13: 100401.
- [13] 丁晓亮, 林磊, 杨鹤, 等. 模拟高原环境下柴油添加剂及含氧组分对发动机性能的影响[J]. 石油炼制与化工, 2024, 55(12): 119-126.
- [14] 张文岐. 基于模糊控制理论柴油机燃烧过程控制方法的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [15] 张丹, 祁东辉, 刘助春, 等. 柴油机燃用菜籽油-柴油混合燃料的试验研究[J]. 可再生能源, 2023, 41(6): 725-730.
- [16] KOU H, HU W, LI T, et al. Effects of injection timing on combustion and mixture formation of a methand direct injection engine equipped with a small volume passive pre-chamber[J]. Fuel, 2025, 384: 133910.
- [17] 魏肖, 鲍久圣, 谭飞, 等. 矿用防爆柴油机瞬态工况特性及参数优化[J]. 工矿自动化, 2022, 48(2): 138-146.
- [18] 曲兴年, 周明胜, 李岩, 等. DOC 及 POC 对柴油机污染物 CO 和 HC 的影响[J]. 内燃机与配件, 2023(1): 36-38.
- [19] 高占斌, 唐铭沂, 毛进, 等. 混合草酸酯与柴油共混燃料燃烧及排放特性的试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(10): 1983-1990.
- [20] 汪恒. 甲醇/F-T 柴油混合燃料柴油机的燃烧与排放特性[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- [21] 刘昀洋, 赵韵, 尤佳俊, 等. 合成气/氮氧化物的氧化特性实验与反应动力学研究[J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(2): 73-83.
- [22] 尹川. 喷油参数与 EGR 率对不同含氧燃料燃烧及排放特性影响研究[D]. 成都: 西华大学, 2023.
- [23] 杜磊. 生物柴油引燃预混氢燃料发动机的模拟仿真研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [24] 赵亚峰, 朱建军, 王柯莹, 等. 喷油正时对点燃式 M100 甲醇发动机燃烧和排放性能的影响[J]. 可再生能源, 2025, 43(1): 17-26.
- [25] APICELLA B, CIAJOLO A, TREGROSSI A, et al. HRTEM and EELS investigations of flame-formed soot nanostructure[J]. Fuel, 2018, 225: 218-224.
- [26] 毛进, 唐铭沂, 蔡浩, 等. 掺混生物柴油对 STC 柴油机最佳切换点的影响[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2023, 28(2): 156-162.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 郑青榕)