

加氢生物柴油-乙醇-柴油在高压共轨柴油机上的燃烧与排放特性

左磊¹, 梅德清¹, 张登攀¹, 代圣超¹, 王军锋²

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 212013, 江苏镇江; 2. 江苏大学能源与动力工程学院, 212013, 江苏镇江)

摘要: 为了研究加氢生物柴油-乙醇-柴油三元燃料的燃烧和排放性能, 配制加氢生物柴油-柴油二元燃料 (PHC10、PHC20、PHC30) 和加氢生物柴油-乙醇-柴油三元燃料 (PHC5E5、PHC10E10、PHC15E15), 选取 1 800 r/min 时 25%、50%、75% 和 100% 负荷工况作为测试工况, 在高压共轨四缸柴油机上对各混合燃料进行燃烧试验研究。试验结果表明: 在 100% 负荷工况下, 与柴油相比, 二元燃料、三元燃料的着火时刻分别提前、滞后, 这是加氢生物柴油和乙醇的不同十六烷值影响的结果; 二元燃料的着火时刻提前, 着火延迟期内形成的可燃混合气数量较少, 而且加氢生物柴油的低热值较低、运动黏度较高, 在主燃烧阶段内的最大缸压和放热率峰值均低于柴油; 对于三元燃料, 初期燃烧放热可以有效降低乙醇的汽化潜热带来的不利影响, 而且乙醇挥发性能较好和氧含量较高, 使得三元燃料在主燃烧阶段内的最大缸压和放热率峰值均大于柴油。三元燃料的 HC 和 CO 排放均高于二元燃料, 二者的差异随着负荷的增大而减小; 混合燃料的 NO_x 排放受负荷影响较大, 在 25% 和 50% 负荷工况下, 三元燃料的 NO_x 排放低于二元燃料, 而在 75% 和 100% 负荷工况下呈现相反的趋势; 三元燃料的碳烟排放低于二元燃料。该研究可为加氢生物柴油-乙醇-柴油三元燃料在发动机上的应用提供基础数据。

关键词: 加氢生物柴油; 乙醇; 三元燃料; 高压共轨柴油机; 燃烧性能; 排放性能

中图分类号: TK421 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202009022 **文章编号:** 0253-987X(2020)09-0189-08



OSID 码

Combustion and Emission Performance of Hydrogenated Biodiesel-Ethanol-Diesel Blends in a Common Rail Diesel Engine

ZUO Lei¹, MEI Deqing¹, ZHANG Dengpan¹, DAI Shengchao¹, WANG Junfeng²

(1. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: Hydrogenated biodiesel-diesel binary blends (PHC10, PHC20, PHC30) and hydrogenated biodiesel-ethanol-diesel ternary blends (PHC5E5, PHC10E10, PHC15E15) were prepared to conduct the combustion and emissions research on a common rail diesel engine under the conditions of 25%, 50%, 75% and 100% loads at 1 800 r/min. It was revealed that the ignition timings of the binary blends and ternary blends were advanced and lagged respectively under 100% load, due to different cetane numbers of hydrogenated biodiesel and ethanol. Owing to the less combustible mixture in the ignition delay affected by the advance of ignition timing of binary blends, the smaller lower-heating value, and the higher kinematic viscosity of hydrogenated

收稿日期: 2020-02-15。 作者简介: 左磊(1994—),男,硕士生;梅德清(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51761145011,51876133)。

网络出版时间: 2020-05-08

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200507.1510.002.html>

biodiesel, the maximum cylinder pressure and heat release rate of the binary blends in the main combustion term were lower than those of diesel. The heat released from the initial combustion term could overcome the disadvantage of latent heat of vaporization of ethanol. Meanwhile, the good volatilization performance and higher oxygen content of ethanol could result in higher maximums of cylinder pressure and heat release rate for the ternary blends in the main combustion term compared with diesel. HC and CO emissions of the ternary blends were higher than those of the binary blends, and the differences decreased with the increase of load. NO_x emissions of the fuel blends were prone to be influenced by load. At 25% and 50% loads, NO_x emissions of the ternary blends were lower than those of the binary blends, opposite to the trend of NO_x emissions at 75% and 100% loads. The ternary blends exhibited lower smoke emissions than the binary blends. This study may provide useful data for the application of hydrogenated biodiesel-ethanol-diesel ternary blend in engines.

Keywords: hydrogenated biodiesel; ethanol; ternary blend; common rail diesel engine; combustion; emission

随着能源短缺和环境污染的日益加重,探索新型清洁能源已迫在眉睫,其中以生物柴油和乙醇为代表的生物燃料已成为国内外学者研究的重点。生物柴油作为一种可替代传统柴油的可再生燃料,具有含氧、闪点高、低温启动性能和润滑性能好、可生物降解、排放污染少、与柴油任意比例互溶等优点^[1-4]。然而,生物柴油含有大量不饱和脂肪酸甲酯,致使其氧化安定性较差,在存储过程中易生成过氧化物、醛类、酮类、酸类等物质,影响柴油机的燃烧排放性能^[5]。选择性加氢工艺可有效将生物柴油内的多不饱和脂肪酸甲酯转化为单不饱和脂肪酸甲酯及饱和脂肪酸甲酯,从而改善生物柴油的氧化安定性,但是会导致其低温性能的恶化,且其十六烷值会远高于柴油^[6]。乙醇具备较低的运动黏度和十六烷值,掺入适量的乙醇可以有效改善加氢生物柴油的低温性能,并调和其过高的十六烷值。此外,乙醇的低温蒸发性好、氧含量高,可促进加氢生物柴油形成均匀混合气,燃烧充分程度进一步提升。然而,乙醇与柴油的互溶性较差,需要助溶剂来实现两者的充分溶解^[7]。有研究证明,生物柴油具有极性基团和较长的碳链,可分别与乙醇的羟基和柴油中的烃物质结合,从而改善乙醇与柴油的溶解性能及混合燃料的稳定性能^[8-9],因此发展加氢生物柴油-乙醇-柴油三元燃料是切实可行的。

迄今为止,已有不少学者对生物柴油-乙醇-柴油三元燃料展开了应用研究。Pradelle 等研究了不同乙醇添加量对 B15 混合燃料(15%生物柴油+85%柴油,体积比)的密度、运动黏度、闪点、冷滤点、

腐蚀性、十六烷值、润滑性能、接触角和表面张力等性质的影响,得出了上述理化性质符合相关发动机用油标准的乙醇添加量范围^[10]。耿莉敏等对不同混合比例的生物柴油-乙醇-柴油混合燃料进行了发动机试验,发现混合燃料的最大缸压和瞬时放热率峰值受发动机工作负荷影响,在低负荷工况下高于柴油,在高负荷工况下则低于柴油;随着乙醇比例的增加, NO_x 、CO 和碳烟排放得到不同程度的降低,而 HC 排放逐渐上升^[11]。Khoobakht 等采用响应面法评估了生物柴油和乙醇含量对生物柴油-乙醇-柴油混合燃料的发动机性能影响,发现提高生物柴油或乙醇的比例会降低发动机的有效功率,并降低比油耗,而有效热效率随着生物柴油或乙醇的增加呈现不规则变化,适度掺入可以提升有效热效率,过量掺入则会降低有效热效率^[12]。然而,在以特定工作原理运行的动力机械上,各种燃料都有对应的优点和缺点,当前考虑燃料性能协同优化的加氢生物柴油-乙醇-柴油三元燃料的相关研究较少。目前仅查阅到关于加氢生物柴油-乙醇-柴油三元燃料的低温性能研究,发现掺入乙醇可以有效降低加氢生物柴油-柴油二元燃料的析晶点和析晶量^[13]。

本文配制不同体积比的加氢生物柴油-柴油二元燃料和加氢生物柴油-乙醇-柴油三元燃料,在高压共轨四缸柴油机上进行燃烧试验研究,比较二元燃料和三元燃料的缸内压力、瞬时放热率及 HC、CO、 NO_x 、碳烟排放规律,旨在通过优化燃料结构来改善燃烧和排放性能,探究生物燃料高效清洁应用的新途径。

1 材料与方法

1.1 试验燃料

试验所用燃料有 0 号柴油、加氢棉籽生物柴油(PHCME)及无水乙醇。以雷尼镍作为催化剂,异丙醇作为供氢体,水作为反应介质,在 85 ℃ 及功率为 180 W 和频率为 40 kHz 的超声波下对棉籽生物柴油(CME)进行选择性地加氢制备 PHCME。其中,CME 由棉籽油经酯交换工艺制得,以氢氧化钠作为催化剂,甲醇作为反应物质。加氢前后的棉籽生物柴油组分和理化性质分别如表 1 和表 2 所示。经过选择性加氢后,生物柴油内大部分的多不饱和成分

表 1 加氢前后棉籽生物柴油组分

组分	CME 质量	PHCME 质量
	分数/%	分数/%
肉豆蔻酸甲酯 C14:0	0.13	0.15
棕榈酸甲酯 C16:0	23.05	23.11
硬脂酸甲酯 C18:0	3.17	10.54
油酸甲酯 C18:1	21.47	43.80
亚油酸甲酯 C18:2	49.94	20.67
亚麻酸甲酯 C18:3	1.56	1.05
花生酸甲酯 C20:0	0.53	0.52
山嵛酸甲酯 C22:0	0.15	0.16

表 2 加氢前后棉籽生物柴油的理化性质

参数	数值	
	CME	PHCME
碘值	108.7	77.4
十六烷值	59.3	71.2
运动黏度/(mm ² ·s ⁻¹)	4.51	4.94
氧含量(质量分数)/%	11.10	11.06
低热值/(kJ·kg ⁻¹)	37 217	37 384
密度/(g·cm ⁻³)	0.871	0.883

表 3 加氢生物柴油混合燃料的配制方案及理化性质

标记	配制方案	十六烷值	运动黏度 /(mm ² ·s ⁻¹)	低热值 /(kJ·kg ⁻¹)	氧含量(质量 分数)/%	理论 空燃比
Diesel	100%柴油	52	4.22	42 500	0.00	14.29
PHC10	10%PHCME+90%柴油	54	4.29	41 988	1.16	14.11
PHC20	20%PHCME+80%柴油	56	4.36	41 477	2.31	13.94
PHC30	30%PHCME+70%柴油	58	4.44	40 965	3.45	13.76
PHC5E5	5%PHCME+5%乙醇+90%柴油	51	4.13	41 479	2.22	13.93
PHC10E10	10%PHCME+10%乙醇+80%柴油	50	4.03	40 458	4.45	13.58
PHC15E15	15%PHCME+15%乙醇+70%柴油	49	3.94	39 438	6.67	13.22

(亚油酸甲酯 C18:2、亚麻酸甲酯 C18:3)转化成单不饱和成分(油酸甲酯 C18:1)及饱和成分(硬脂酸甲酯 C18:0),生物柴油的十六烷值和运动黏度增大,而氧含量(质量分数)和低热值基本不变。

使用 NDJ-5S 旋转黏度计及其 60 r/min 的转子,测量燃料在 20 ℃ 下的运动黏度。具体测量步骤如下:将装有待测燃料的烧杯置于 20 ℃ 的恒温水浴锅内,待温度达到 20 ℃ 时将转子浸入燃料内,直至转子液面标志与液面相平,然后开始测量;测量 3 次并取平均值,记为动力黏度,除以密度得到运动黏度。

当燃料内各组分的含量及十六烷值已知时,其十六烷值由下式计算得出

$$V_{\text{CN}} = \sum_{i=1}^n x_i V_{\text{CN}i}$$

(1)

式中: V_{CN} 为待测燃料的十六烷值; x_i 为待测燃料内组分 i 的质量分数; $V_{\text{CN}i}$ 为待测燃料内组分 i 的十六烷值^[14]。

本文所研究的加氢生物柴油-乙醇-柴油三元燃料的配制方案及理化性质如表 3 所示。考虑到生物柴油、乙醇和柴油间的相溶性情况,采用相同体积比的生物柴油和乙醇替代二元燃料中的生物柴油部分,三元燃料 PHC5E5、PHC10E10 和 PHC15E15 分别对应二元燃料 PHC10、PHC20 和 PHC30。由表 3 可知,与二元燃料相比,三元燃料的十六烷值、运动黏度和低热值得到不同程度的降低,但其氧含量(质量分数)却有所升高。

1.2 试验装置及方案

试验发动机为某公司生产的 4B28V16 柴油机,其主要参数如表 4 所示。试验工况为 1 800 r/min 下的 25%、50%、75%和 100%负荷工况。使用燃烧分析仪采集 Diesel、PHC10、PHC20、PHC30、PHC5E5、PHC10E10 和 PHC15E15 在不同曲轴转角下的缸内压力,对 200 个连续工作循环的气缸压

力取平均值,并基于热力学第一定律计算瞬时放热率^[15]。使用 AVL735S 油耗仪记录各试验工况下的实际燃油消耗,并根据混合燃油的热值计算以柴油为参照的当量比油耗。使用 MEXA-7200D 排气分析仪测量 HC、CO 和 NO_x 气体排放,采用 AVL415S 滤纸式烟度计检测排气烟度。

表 4 4B28V16 柴油机主要技术参数

参数	数值或属性
型式	直列、水冷、四冲程、增压
燃烧室型式	直喷式
气缸数	4
气缸直径/mm	95
活塞行程/mm	100
活塞总排量/L	2.83
压缩比	17.5
标定功率/kW	75
标定转速/(r·min ⁻¹)	3 200
最大扭矩/(N·m)	250
最大扭矩转速范围/(r·min ⁻¹)	1 600~2 800

2 试验结果与分析

2.1 燃油经济性

鉴于柴油、加氢生物柴油和乙醇的热值各不相同,所研究的各加氢生物柴油-乙醇-柴油三元燃料的热值亦各不相同,因此以柴油为参考引入当量比油耗概念来评价混合燃料的经济性^[6]。当量比油耗的计算公式如下

$$b_{eq} = \frac{x_D H_{uD} + x_P H_{uP} + x_E H_{uE}}{H_{uD}} b_e \tag{2}$$

式中: b_{eq} 为混合燃料的当量比油耗; x_D 、 x_P 、 x_E 分别为柴油、加氢生物柴油、乙醇在混合燃料中的质量分数; H_{uD} 、 H_{uP} 、 H_{uE} 分别为柴油、加氢生物柴油、乙醇的低热值; b_e 为测得的混合燃料的比油耗。

在 $n=1\,800\text{ r/min}$ 时的不同负荷工况下,不同比例的加氢生物柴油、乙醇、柴油组成的二元燃料和三元燃料的当量比油耗如图 1 所示。在所有负荷工况下,各混合燃料的当量比油耗均高于柴油,这主要是因为加氢生物柴油和乙醇的低热值低于柴油,需要燃用更多的燃油来获得相同的功率输出。此外,生物柴油的运动黏度大,而选择性加氢工艺使之进一步增大,这会极大影响低负荷下混合燃料的雾化效果,不利于燃料的充分燃烧;乙醇的十六烷值低,且汽化潜热大,挥发过程需要吸收更多的热量,造成其

着火延迟期增大,影响发动机动力性能。这两者亦会增加混合燃料的当量比油耗。

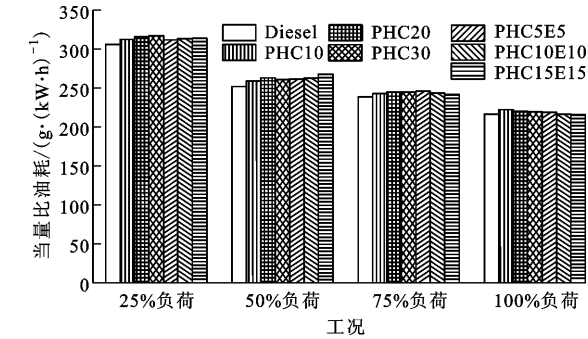


图 1 $n=1\,800\text{ r/min}$ 时不同负荷工况下各燃料的当量比油耗

不同负荷工况下三元燃料相对二元燃料的当量比油耗偏差如表 5 所示。可以发现,PHC15E15 与 PHC30 的当量比油耗在 50% 负荷工况下呈现最大正偏差 2.7%,在 100% 负荷工况下呈现最大负偏差 -1.9%。总体而言,三元燃料与二元燃料的当量比油耗较为接近,多数在 $\pm 2\%$ 范围内波动。这主要是由于乙醇在十六烷值、运动黏度和汽化潜热等方面对燃料特性的调和作用。低十六烷值、高汽化潜热的乙醇使混合燃料着火时刻滞后,但其低黏度属性却促进了燃料雾化,有利于形成均匀的混合气,促使燃烧更充分、快速。综合而言,三元燃料的当量比油耗与二元燃料相差不大。

表 5 三元燃料相对二元燃料的当量比油耗偏差

工况	当量比油耗偏差/%		
	PHC5E5- PHC10	PHC10E10- PHC20	PHC15E15- PHC30
25%负荷	-0.1	-0.8	-1.1
50%负荷	1.1	-0.1	2.7
75%负荷	1.3	-0.6	-1.2
100%负荷	-1.6	-1.7	-1.9

2.2 燃烧特性

2.2.1 缸内压力 图 2 为在 $1\,800\text{ r/min}$ 时 100% 负荷工况下燃用 Diesel、PHC10、PHC20、PHC30、PHC5E5、PHC10E10 和 PHC15E15 的缸内压力。由图可见,缸内压力呈现两个峰值,这是由于试验用发动机采用了两段喷射的喷油策略。在初期放热阶段内,各混合燃料的最大缸压均小于柴油;在主燃烧放热阶段内,二元燃料的最大缸压低于柴油,而三元燃料的最大缸压高于柴油。对于二元燃料,由于加氢生物柴油的十六烷值高于柴油,着火时刻提前,着

火延迟期内形成的可燃混合气减少,而且生物柴油的低热值低于柴油,以及其运动黏度高于柴油,因此二元燃料在初期放热阶段和主燃烧放热阶段内的最大缸压低于柴油。对于三元燃料,与柴油相比,乙醇的十六烷值低且汽化潜热大,掺入乙醇使得混合燃料的着火时刻延迟,尽管这增加了着火延迟期内的可燃混合气数量,但是混合燃料的低热值进一步降低,造成初期放热阶段内三元燃料的最大缸压低于柴油。由于乙醇的低热值低于柴油和加氢生物柴油,为了获得指定工况下的功率输出,需增加三元燃料的喷油量。尽管乙醇的汽化潜热大,但是初期燃烧放热有效改善了气缸的热力状态,而且乙醇具备较好的挥发性能和较高的氧含量,在促进形成均匀混合气的同时,还能提供更充足的氧氛围,因此三元燃料在主燃烧放热阶段内的最大缸压高于柴油。

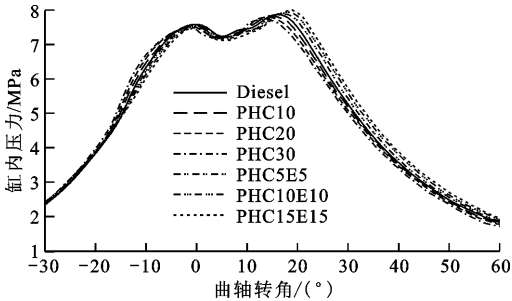


图2 $n=1\,800\text{ r/min}$ 时 100% 负荷工况下各燃料的缸内压力

2.2.2 瞬时放热率 图3为在1800 r/min时100%负荷工况下燃用Diesel、PHC10、PHC20、PHC30、PHC5E5、PHC10E10和PHC15E15的瞬时放热率。与柴油机的喷油策略相匹配,在燃烧初期出现一个较小的放热率峰,在主燃烧阶段出现一个较大的主放热率峰。从这两个放热阶段的始点可见,与柴油相比,二元燃料按PHC10、PHC20、PHC30的顺序着火时刻依次提前,而三元燃料按PHC5E5、PHC10E10、PHC15E15的顺序着火时刻略有滞后。这归因于燃料十六烷值的差异,与参照物柴油的十六烷值52相比,PHC10、PHC20和PHC30的十六烷值显著增加为54、56和58,而PHC5E5、PHC10E10和PHC15E15的十六烷值则小幅度下降为51、50和49。

在初期放热阶段,掺混加氢生物柴油的二元燃料容易着火,在着火延迟期内形成的可燃混合气较少,因而初始放热率峰提前且峰值略低于柴油;由于三元燃料的十六烷值略低于柴油,其初期燃烧放热率峰位置与柴油基本一致,峰值相较二元燃料更为

接近柴油。在主放热阶段,二元燃料的放热率峰规律与初始放热阶段一致,而三元燃料的放热率峰明显滞后,且峰值高于柴油。这是因为经过初期放热阶段燃烧,缸内温度有效提升,这在一定程度上克服了乙醇汽化潜热的不利影响,同时乙醇具备更好的挥发性能和更高的氧含量,使得三元燃料的燃烧更加充分,因此三元燃料在主燃烧放热阶段内的放热率峰值高于柴油。

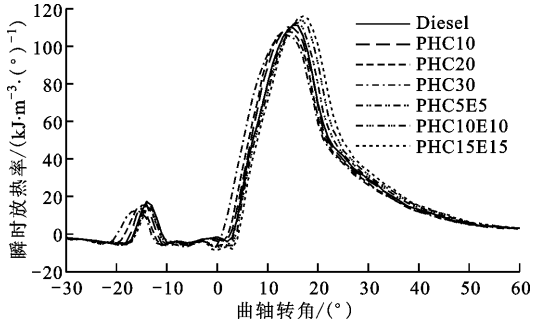


图3 $n=1\,800\text{ r/min}$ 时 100% 负荷工况下各燃料的瞬时放热率

2.3 排放特性

2.3.1 HC 排放 HC排放来源于喷注外围的过稀混合气,主要受油束雾化、缸内温度和过量空气系数的影响^[16]。图4为1800 r/min时不同负荷工况下燃用Diesel、PHC10、PHC20、PHC30、PHC5E5、PHC10E10和PHC15E15的HC排放特性。随着负荷增加,各燃料的HC排放均基本呈现下降趋势。这是由于随着负荷增加,循环供油量亦增加,过稀混合气得以抑制,同时缸内工作温度提高,从而实现降低HC排放的目的。掺入加氢生物柴油和乙醇极大地降低了HC排放,尤其是在25%负荷工况下,这主要是因为加氢生物柴油和乙醇的含氧属性补偿了缸内的过量空气系数,促使燃料完全燃烧。三元燃料的HC排放高于二元燃料,这主要归因于乙醇具有较高的汽化潜热、较低的十六烷值和较低的运动

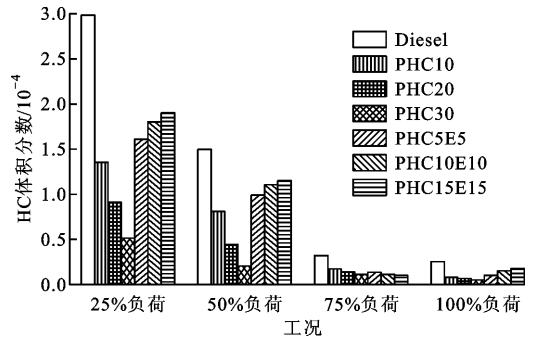


图4 $n=1\,800\text{ r/min}$ 时不同负荷工况下各燃料的HC排放特性

黏度。一方面,较高的汽化潜热使得燃料需要吸收更多的热量用于蒸发,导致缸内温度下降;另一方面,较低的十六烷值延迟了燃料的着火时刻,增加了着火难度,辅以较低的运动黏度,使得混合气形成的时间延长,致使形成更多的极稀混合气,从而导致更高的 HC 排放。随着加氢生物柴油比例增多,二元燃料的 HC 排放逐步降低;随着乙醇比例增多,三元燃料的 HC 排放逐渐上升。这两种趋势随着负荷增大而逐渐减缓,是由于大负荷工况下缸内温度较高,在富氧环境下能够促使未燃 HC 进一步燃烧,从而减小了各燃料在 HC 排放上的差异。

2.3.2 CO 排放 CO 是含碳燃料在燃烧过程中生成的中间产物,主要受缸内温度、混合气的氧含量和化学反应时间影响。 $n=1\ 800\ \text{r/min}$ 时 Diesel、PHC10、PHC20、PHC30、PHC5E5、PHC10E10 和 PHC15E15 在不同负荷工况下的 CO 排放特性如图 5 所示。CO 排放的特征与 HC 排放基本一致,随着负荷增加,各燃料的 CO 排放依旧呈现下降趋势,这归因于缸内温度的提升。在 25% 和 50% 负荷工况下,掺入加氢生物柴油可以极大地降低燃料的 CO 排放,这是因为加氢生物柴油的含氧属性提升了缸内环境的氧气浓度,促进中低负荷工况下的燃烧得以改善;在 75% 和 100% 负荷工况下,二元燃料与柴油的 CO 排放差异较小,这是由于此时的缸内温度较高,可促使部分 CO 进一步燃烧。掺入乙醇后,三元燃料在 25%、50% 和 75% 负荷工况下的 CO 排放急剧上升,尤其是在 75% 负荷工况下的 CO 排放高于柴油,这归因于乙醇较低的十六烷值、较低的运动黏度和较大的汽化潜热的综合影响,与三元燃料较高的 HC 排放的原因一致;在 100% 负荷工况下,三元燃料的 CO 排放与二元燃料相差不大,这是因为在高温富氧环境中,乙醇的运动黏度和汽化潜热对 CO 排放的不利影响被大幅度削弱。二元燃料的 CO 排放随着加氢生物柴油比例的增加而减少,而三元燃料的 CO 排放随着乙醇比例的增加而增加。这两种变化趋势随着负荷增加而逐渐平缓,原因在于大负荷工况下的缸内温度高。

2.3.3 NO_x 排放 柴油机 NO_x 排放主要是 NO , 其大部分来源于焰后高温区,由 Zeldovich 机理可知,高温富氧环境下燃烧时间过长,则会产生大量的 NO 排放^[16-17]。图 6 为 $1\ 800\ \text{r/min}$ 时不同负荷工况下燃用 Diesel、PHC10、PHC20、PHC30、PHC5E5、PHC10E10 和 PHC15E15 的 NO_x 排放特性。随着负荷增加, NO_x 排放逐步升高,且在 100% 负荷工况

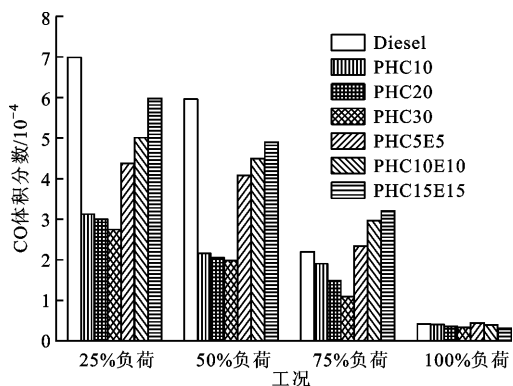


图 5 $n=1\ 800\ \text{r/min}$ 时不同负荷工况下各燃料的 CO 排放特性

下 NO_x 排放远远高于其他负荷工况。这归因于气缸内的工作温度,高温会极大地激发 NO_x 排放。与柴油相比,二元燃料表现出更高的 NO_x 排放,这是因为加氢生物柴油的含氧属性促进了更多 NO_x 排放。在 25% 和 50% 负荷工况下,三元燃料的 NO_x 排放均低于二元燃料;在 75% 和 100% 负荷工况下,三元燃料的 NO_x 排放则高于二元燃料。这是因为在中低负荷工况下,气缸内的温度较低,而乙醇具备较大的汽化潜热,可有效降低缸内温度,从而抑制了三元燃料的 NO_x 排放;在高负荷工况下,较高的缸内温度削弱了乙醇汽化潜热的影响,且乙醇具有最高的氧含量,致使三元燃料的 NO_x 排放高于二元燃料。随着加氢生物柴油或乙醇比例的增加,混合燃料的 NO_x 排放均逐步上升,主要原因在于燃料的氧含量不断提升。

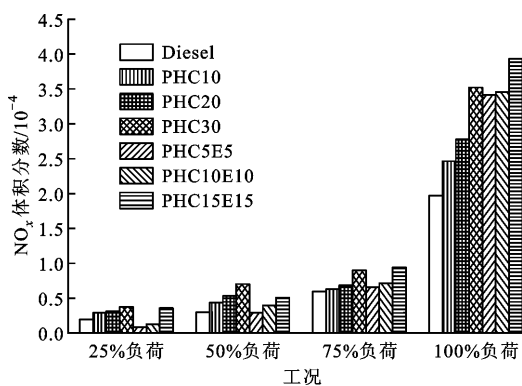


图 6 $n=1\ 800\ \text{r/min}$ 时不同负荷工况下各燃料的 NO_x 排放特性

2.3.4 碳烟排放 一般地,在高温缺氧的环境下,过浓的混合气易发生热裂解产生碳烟。图 7 为 $1\ 800\ \text{r/min}$ 时不同负荷工况下燃用 Diesel、PHC10、PHC20、PHC30、PHC5E5、PHC10E10 和 PHC15E15 的碳烟排放特性。研究表明,掺混醇类或酯类燃料可以

打破 NO_x 排放与碳烟排放的 trade-off 关系^[18],这与本文的研究结果一致。随着负荷增加,循环供油量增加,缸内过量空气系数降低,同时缸内工作温度上升,加剧了燃料在高温缺氧环境中的裂解,因而各燃料的碳烟排放逐步升高。在不同负荷工况下,各混合燃料的碳烟排放均低于柴油,这是由于混合燃料包含加氢生物柴油和乙醇含氧燃料,为燃料燃烧提供了富氧环境。此外,对于二元燃料,加氢生物柴油的十六烷值高,缩短了二元燃料的着火延迟期,降低了缸内的最高工作温度;三元燃料内乙醇的汽化潜热大,亦可降低缸内温度,同时其具备较好的挥发性能,可以促进形成更均匀的混合气。这从缸内温度、氧气浓度和混合气均匀度3个方面,有效抑制了混合燃料的碳烟排放。可以发现,三元燃料的碳烟排放均低于二元燃料。其中,在25%负荷工况下,二元燃料和三元燃料的碳烟排放相差不大,这说明在低温、氧气浓度充足的情况下,含氧燃料的碳烟排放较为稳定;在50%和75%负荷工况下,三元燃料的碳烟排放明显低于二元燃料,这是因为乙醇较大的汽化潜热,有效降低了中等负荷工况下的缸内温度,抑制了燃油的热裂解,从而降低了三元燃料的碳烟排放;100%负荷工况下三元燃料的较低碳烟排放归因于乙醇具有较高的氧含量。随着加氢生物柴油或乙醇比例的增加,混合燃料的碳烟排放逐步降低,原因在于加氢生物柴油和乙醇均含氧,且分别具备较高的十六烷值和汽化潜热,均可降低缸内温度。

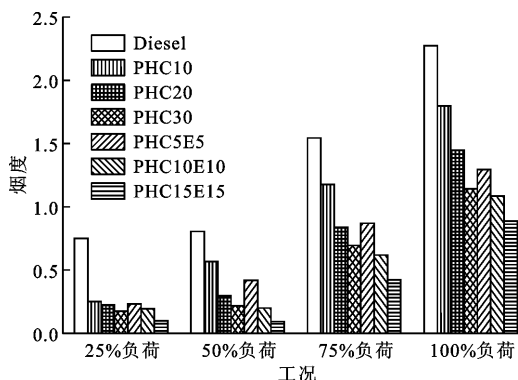


图7 $n=1800$ r/min 时不同负荷工况下各燃料的碳烟排放特性

3 结 论

(1) 由于加氢生物柴油和乙醇的低热值低于柴油,故各二元燃料和三元燃料的当量比油耗均高于柴油,而二元燃料和三元燃料的当量比油耗基本一致。

(2) 加氢生物柴油、乙醇的十六烷值分别高于、

低于柴油,使得100%负荷工况下的二元燃料、三元燃料的着火时刻分别早于、晚于柴油。由于二元燃料的着火时刻提前,着火延迟期内形成的可燃混合气减少,辅以生物柴油较低的低热值和较高的运动黏度,二元燃料在主燃烧阶段内的最大缸压和放热率峰值均低于柴油。基于初期燃烧放热及乙醇的挥发和含氧优势,三元燃料在主燃烧阶段内的最大缸压和放热率峰值均高于柴油。

(3) 三元燃料的 HC 和 CO 排放均高于二元燃料,随着负荷的增大,三元燃料与二元燃料间的排放差异逐渐减小;混合燃料的 NO_x 排放受负荷影响较大,在25%和50%负荷工况下,三元燃料的 NO_x 排放低于二元燃料,而在75%和100%负荷工况下呈现相反的趋势;在不同负荷下,三元燃料的碳烟排放均低于二元燃料。

参考文献:

- [1] NUMWONG N, THACHUANGTUMLE N, LU-ENG NARUEMITCHAI A. Partial hydrogenation of palm oil-derived biodiesel over Pd/C catalysts [J]. International Journal of Advances in Science Engineering and Technology, 2016, 4(3): 195-200.
- [2] KNOTHE G. Analysis of oxidized biodiesel by $^1\text{H-NMR}$ and effect of contact area with air [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2006, 108(6): 493-500.
- [3] MOSER B R, HAAS M J, WINKLER J K, et al. Evaluation of partially hydrogenated methyl esters of soybean oil as biodiesel [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2007, 109(1): 17-24.
- [4] 夏燕. 水环境下生物柴油催化转移加氢 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2011: 1.
- [5] PAPADOPOULOS C E, LAZARIDOU A, KOUTSOUMBA A, et al. Optimization of cotton seed biodiesel quality (critical properties) through modification of its FAME composition by highly selective homogeneous hydrogenation [J]. Bioresource Technology, 2010, 101: 1812-1819.
- [6] MEI D, ZUO L, ZHANG Q, et al. Assessment on combustion and emissions of diesel engine fueled with partially hydrogenated biodiesel [J]. Journal of Energy Engineering, 2020, 146(1): 04019038.
- [7] LIU H, HU B, JIN C. Effects of different alcohols additives on solubility of hydrous ethanol/diesel fuel blends [J]. Fuel, 2016, 184: 440-448.
- [8] 李立琳, 刘建英. 生物柴油在乙醇/柴油中溶解机理的研究 [J]. 河南工程学院学报(自然科学版), 2014, 26

- (2): 45-49.
- LI Lilin, LIU Jianying. Study on solubility mechanism of biodiesel in ethanol/diesel [J]. Journal of Henan Institute of Engineering (Natural Science Edition), 2014, 26(2): 45-49.
- [9] PINZI S, LÓPEZ I, LEIVA-CANDIA D E, et al. Castor oil enhanced effect on fuel ethanol-diesel fuel blend properties [J]. Applied Energy, 2018, 224: 409-416.
- [10] PRADELLE F, BRAGA S L, DE AGUIAR MARTINS A R F et al. Experimental assessment of some key physicochemical properties of diesel-biodiesel-ethanol (DBE) blends for use in compression ignition engines [J]. Fuel, 2019, 248: 241-253.
- [11] 耿莉敏, 程清波, 陈阳, 等. 生物柴油-柴油-乙醇混合燃料的燃烧与排放特性 [J]. 中国公路学报, 2018, 31(11): 236-243.
- GENG Limin, CHENG Qingbo, CHEN Yang, et al. Combustion and emission characteristics of biodiesel-diesel-ethanol fuel blends [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(11): 236-243.
- [12] KHOOBBAKHT G, KARIMI M, KHEIRALIPOUR K. Effects of biodiesel-ethanol-diesel blends on the performance indicators of a diesel engine: a study by response surface modeling [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 148: 1385-1394.
- [13] 左磊, 张起, 代圣超, 等. 应用热力学相平衡预测加氢生物柴油-乙醇-柴油三元燃料低温性能 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(11): 56-62.
- ZUO Lei, ZHANG Qi, DAI Shengchao, et al. Predicting the low temperature performance of hydrogenated biodiesel-ethanol-diesel ternary fuel blend based on thermodynamic phase equilibrium [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(11): 56-62.
- [14] 顾萌. 部分加氢生物柴油改善发动机燃烧与排放的试验研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2017: 28.
- [15] RAKOPOULOS C D, ANTONOPOULOS K A, RAKOPOULOS D C. Experimental heat release analysis and emissions of a HSDI diesel engine fueled with ethanol-diesel fuel blends [J]. Energy, 2007, 32(10): 1791-1808.
- [16] 刘圣华, 周龙保. 内燃机学 [M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2017: 112-113.
- [17] 默克京特 P, 泰希曼吕迪格. 内燃机原理: 上 工作原理、数值模拟与测量技术 [M]. 高宗英, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2019: 388-391.
- [18] RAKOPOULOS D C, RAKOPOULOS C D, KYRITSIS D C. Butanol or DEE blends with either straight vegetable oil or biodiesel excluding fossil fuel: comparative effects on diesel engine combustion attributes, cyclic variability and regulated emissions trade-off [J]. Energy, 2016, 115: 314-325.
- (编辑 荆树蓉)
-
- (上接第 179 页)
- [13] REN S Q, HE K M, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(6): 1137-1149.
- [14] DAI Jifeng, LI Yi, HE Kaiming, et al. R-FCN: object detection via region-based fully convolutional networks [EB/OL]. [2020-01-20]. <https://arxiv.org/abs/1605.06409>.
- [15] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: single shot multibox detector [C]// European Conference on Computer Vision. Cham, Germany: Springer, 2016: 21-37.
- [16] HUANG J, RATHOD V, SUN C, et al. Speed/accuracy trade-offs for modern convolutional object detectors [C]// 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 3296-3297.
- [17] REDMON J, FARHADI A. YOLOv3: an incremental improvement [EB/OL]. [2020-01-20]. <https://arxiv.org/abs/1804.02767>.
- [18] TURPIN M, MICHAEL N, KUMAR V. Trajectory design and control for aggressive formation flight with quadrotors [J]. Autonomous Robots, 2012, 33(1): 143-156.
- (编辑 陶晴)