

性能与排放

新型生物乳化柴油在柴油机上的 ESC 试验研究

金志伟¹, 刘宇¹, 余凯¹, 肖进¹, 乔信起¹, 白雪梅²

(1. 上海交通大学 动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200240; 2. 神华集团, 上海 200240)

摘要: 在高压共轨电控柴油机上分别燃用柴油(D)、甲酯(B100)和生物乳化柴油(EB10、EB15和EB20), 进行ESC十三工况稳态测试循环试验, 研究了生物乳化柴油中水和丁醇含量对发动机燃烧、动力性、经济性和排放的影响。结果表明: 5种油品中EB10的放热率峰值最大; 随着生物乳化柴油中丁醇和水掺混比例的增大, 其滞燃期延长, 燃烧持续期缩短; EB10的有效热效率高于柴油, 燃油消耗率低于柴油, EB15和EB20与之相反。NO_x、PM排放及烟度随水和丁醇掺混比例增大而降低, HC和CO排放都有上升趋势但很微小; EB10、EB15和EB20的HC排放略高于柴油, CO排放低于柴油。

关键词: 生物乳化柴油; ESC试验; 性能; 排放

中图分类号: TK423.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2019)04-0005-08

The ESC Test of New Emulsified Biodiesel on Diesel Engine

Jin Zhiwei¹, Liu Yu¹, Yu Kai¹, Xiao Jin¹, Qiao Xinqi¹, Bai Xuemei²

(1. Key Laboratory Power Machinery & Engineering of State Education Ministry, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240; 2. Shenhua Group, Shanghai 200240)

Abstract: Diesel (D), methyl (B100) and emulsified biodiesel (EB10、EB15 and EB20) were tested according to European Steady-State Cycle (ESC) test on a high-pressure common rail diesel engine. The effect of emulsified biodiesel with different water and butanol fractions on the characteristics of combustion, power performance, fuel economy and emission performance of the engine were investigated. The results show that the peak of heat release rate of EB10 is the highest, with the increase of water and butanol fractions in emulsified biodiesel, ignition delay increases, combustion duration decreases. The effective thermal efficiency of EB10 is higher than that of diesel and its BSFC is lower than that of diesel, but EB10 and EB15 have the opposite effect. NO_x, PM and smoke decrease with increasing water and butanol content. HC and CO emissions raise but only raise a little. EB10, EB15 and EB20 have slightly higher HC emissions than diesel, and CO is lower.

Key words: emulsified biodiesel; ESC test; performance; emission

0 引言

能源危机和环境污染是当今社会关注的焦点问题, 因此, 有必要开发替代能源以及发展清洁能源。同时, 随着我国居民生活水平的不断提高, 餐

饮业大力发展, 全国城镇每年产生的餐厨废油约400万吨, 并以每年10%左右的速度增长^[1]。

利用餐厨废油提炼生物油, 作为传统汽柴油的替代燃料是缓解能源短缺、减轻城市环保压力行之有效的办法。但很多研究表明: 餐厨废油存在黏度

收稿日期: 2018-12-10; 修回日期: 2018-12-21

基金项目: 国家自然科学基金(91741122); 上海市科学技术委员会项目(16DZ1203100)。

作者简介: 金志伟(1991-), 男, 硕士生, 主要研究方向为电控柴油机的排放与控制, jinzhiwei1204@163.com。

高^[2]、对发动机材料有较大腐蚀性^[3,4]、低温条件下存储困难（固化）以及 NO_x ^[5,6] 排放高等缺点。

为满足柴油机燃油稳定性要求，克服生物油的缺点，可以将柴油和生物油按一定比例混合使用，但其 NO_x 排放仍较高。因此，国内外学者提出了生物柴油加水乳化，利用水的蒸发与微爆降低缸内温度和改善可燃混合气质量，从而降低 NO_x 排放^[7]。武汉理工大学李向晖等^[8]的研究表明：乳化柴油的滞燃期较长，最高燃烧压力高，当量燃油消耗率比柴油略低， NO_x 和碳烟排放随掺水比例增大而降低。海南大学周海杰等^[9]的研究表明：微乳化柴油的有效热效率在各负荷下都高于柴油；高负荷时微乳化柴油的 PM 和 NO_x 排放显著低于柴油，但低负荷时 HC 和 CO 排放比柴油高。清华大学龚景松等^[10]的研究发现：柴油掺混生物柴油乳化后能同时降低 NO_x 和碳烟排放，CO 的增加非常微小。Ahmad MuhsinIthnin 等^[11]研究了水乳化柴油的燃烧和排放特性，结果表明：乳化柴油缸内燃烧压力、放热率随掺混比例（最大 20%）增大而增大；所有乳化柴油的 NO_x 和 PM 排放都显著降低。John Kennedy Mwangi 等^[12]对丁醇/微藻类生物柴油/柴油混合燃油的排放指标进行了相关研究，结果表明：当 2% 生物柴油掺入柴油后， NO_x 排放增加约 2%，但掺入 10% ~ 20% 丁醇和 0.5% 水后， NO_x 排放降低约 12% ~ 28%。

以餐厨废油合成的生物油加水、丁醇、乳化剂和国 V 柴油混合制成新型生物乳化柴油。其中丁醇的优点是腐蚀性低，亲水性好，与柴油混溶性好，作为含氧添加剂还可降低 PM 和 NO_x 排放。本文在一台不做任何改动的高压共轨电控柴油机上，按 ESC（European Steady-State Cycle）试验方法进行试验，以研究燃用该种新型生物乳化柴油的柴油机的燃烧性能、动力性、经济性和排放特性。

1 试验装置和方法

1.1 试验发动机及测试设备

试验柴油机具体技术参数见表 1。

表 1 柴油机主要技术参数

发动机型式	直列 6 缸，高压共轨，废气涡轮增压
缸径 × 行程	105 × 120
总排量/L	6.23
额定功率/kW	134
额定转速/ (r · min ⁻¹)	2 300
最大扭矩 (N · m)	650
压缩比	18:1

主要试验设备：奕科机电公司 CE-52HA 型电涡流测功机；Horiba 公司 MEXA7000 型气体排放分析仪；D2T 公司 OSIRIS Revolution II 型燃烧分析仪；湘仪动力公司 CF050M319N6BZMZZZ 型智能油耗仪；锐宏电子 DISMOKE4000 型不透光烟度计；Combustion 公司 DMS500 型快速颗粒分析仪等。

1.2 试验燃料及方法

试验燃料由上海纽孚尔能源技术有限公司提供，包括国 V 柴油、生物甲酯和生物乳化柴油共 5 种不同配方。B100 表示生物甲酯；按照配方的不同将生物乳化柴油分别表示为 EB10、EB15 和 EB20，其中 EB10 表示以 90% 质量分数的国 V 柴油为基础油，加入 10% 质量分数的甲酯、水、丁醇和乳化剂；EB15 和 EB20 以此类推。具体燃料成分及燃料理化参数的测量结果见表 2、表 3。

表 2 燃料成分

燃料	成分（质量分数%）				
	国 V 柴油	生物甲酯	水	丁醇	乳化剂
柴油（D）	100	0	0	0	0
B100	0	100	0	0	0
EB10	90	4	4	0.5	1.5
EB15	85	5	6	1	3
EB20	80	6	8	2	4

表 3 燃料理化特性

燃料	净热值/ (MJ · kg ⁻¹)	运动黏度 (20℃) / (mm ² · s ⁻¹)	密度 (20℃) / (kg · m ⁻³)
柴油（D）	42.79	3.938	833.5
B100	38.41	7.216	876.3
EB10	39.465	5.658	840.2
EB15	39.385	5.721	840.9
EB20	39.295	6.026	843.0

1.3 试验方法

试验方法为 ESC 方法，十三工况点的选择及试验工况顺序、试验时间、加权系数等参数均按 GB17691-2005 规定进行。以柴油为例，其十三工况点如表 4。

B100、EB10、EB15 和 EB20 十三工况点的转速按照柴油转速选取，负荷按照各燃油在该转速下所能达到的最大负荷取相应的百分数。

采用氨气-选择性催化还原 (NH₃-SCR) 的方法优化 NO_x 排放。根据反应机理的不同，试验中采用两种方案：NH₃ 与 NO_x 的体积流量比分别为 1:1 和 0.8:1。

表 4 柴油发动机 ESC 循环十三工况

工况号	发动机转速/($r \cdot \min^{-1}$)	负荷	加权系数
1	750 (怠速)	—	0.15
2	1 441	100%	0.08
3	1 765	50%	0.10
4	1 765	75%	0.10
5	1 441	50%	0.05
6	1 441	75%	0.05
7	1 441	25%	0.05
8	1 765	100%	0.09
9	1 765	25%	0.10
10	2 089	100%	0.08
11	2 089	25%	0.05
12	2 089	75%	0.05
13	2 089	50%	0.05

2 试验结果及分析

2.1 燃烧特性

图 1 为转速 2 089 ($r \cdot \min^{-1}$), 负荷分别为 25%、50%、75% 和 100% 时的缸内压力和放热率曲线。缸压曲线的基本趋势是 $D > \text{生物乳化柴油} > B100$ 。25% 和 50% 负荷时, 五种燃料的缸压曲线差别较大, 此时缸压曲线的顺序基本符合燃料热值的顺序。负荷增大到 75% 和 100% 时, 燃料间缸压曲线的差异变小, 大负荷工况下, 生物乳化柴油的微爆效应^[13]及 B100 含氧特性改善浓混合气的燃烧, 从而弥补低热值的不足。放热率方面, 25% 负荷时, 各燃料放热率峰值没有明显差异, 其他负荷工况下都是 B100 最小; 柴油的放热率峰值稍大于 EB15 和 EB20, 但非常接近, 略小于 EB10。EB10 滞燃期长, 预混燃烧比例大, 所以放热率峰值高。虽然 EB15 和 EB20 预混燃烧比例也比柴油大, 但是其热值低, 故放热率峰值与柴油差别不大。

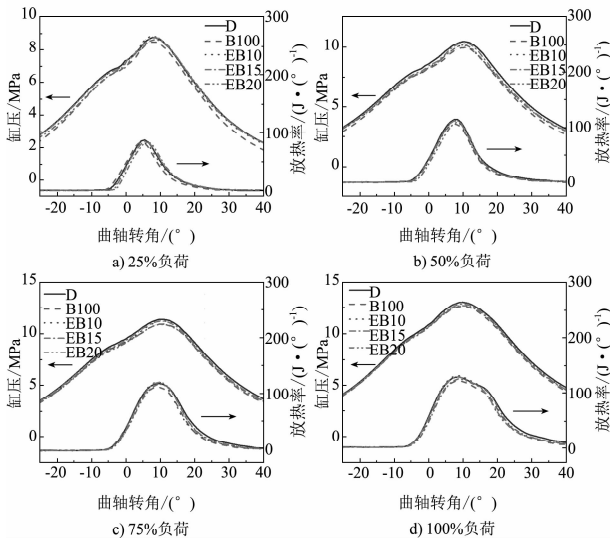


图 1 缸压和放热率 (2 089 ($r \cdot \min^{-1}$))

图 2 和图 3 分别为 2 089 ($r \cdot \min^{-1}$) 转速下五种燃料的滞燃期 (定义为从开始喷油到放出热量的 10% 所对应的曲轴转角) 和燃烧持续期 (定义为放出热量的 10% 和 90% 之间的曲轴转角)。可以看出: 滞燃期和燃烧持续期都随负荷的增大而增大。负荷增大, 每循环喷入缸内的燃料增多, 一方面喷射脉宽增大导致燃烧持续期增大; 另一方面拉长了燃油的物理 - 化学准备阶段, 导致滞燃期变长。具体滞燃期, $EB20 > EB15 > EB10 > D > B100$, 主要是因为 B100 的十六烷值较高, 随着生物乳化柴油中掺混比例的增大, 十六烷值逐渐降低。随着负荷的增大, 各燃料滞燃期差异缩小, 原因是此时缸内温度、压力较高, 削弱了十六烷值对滞燃期的影响。各生物乳化柴油的燃烧持续期差别不大, 但都比柴油的小。这是因为前者滞燃期长, 形成更多的可燃混合气, 预混燃烧比例增大。在中高负荷时, 各燃料的燃烧持续期差异变大, 生物乳化柴油微爆效应改善燃烧是其中的一个主要原因。

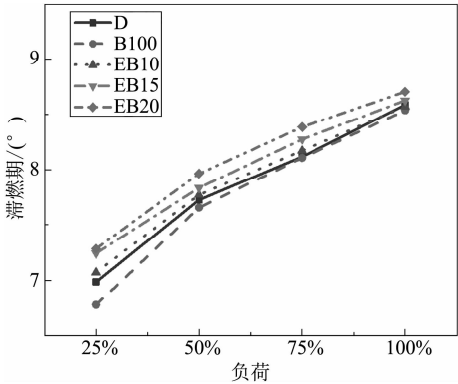


图 2 燃烧滞燃期 (2 089 ($r \cdot \min^{-1}$))

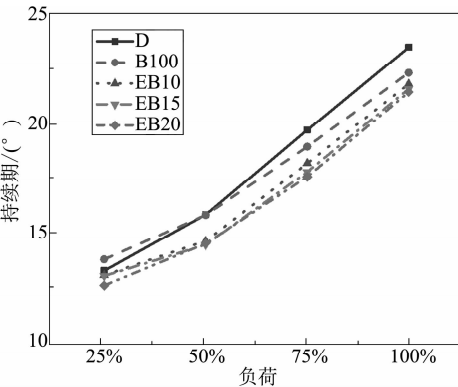


图 3 燃烧持续期 (2 089 ($r \cdot \min^{-1}$))

2.2 动力性

图 4 为发动机在十三个工况点燃用不同燃料的输出功率对比, 其中工况点 2、8 和 10 分别是低、中、高转速下所能达到的最大输出功率。可以看到: 燃用柴油时的功率最大; 与柴油相比, EB10、

EB15、EB20 和 B100 所能达到的最大功率分别下降了 3.39%、4.21%、6.28% 和 8.48%。生物乳化柴油和 B100 的净热值比柴油低,燃烧单位质量的生物乳化柴油和 B100 所释放的热量少,导致其最大功率降低。但在工况点 3、4、7 和 9 出现了 EB10 的功率与柴油持平,甚至超过柴油功率的情况。发动机的输出功率不仅受燃料热值影响,也受热效率的影响,生物乳化柴油中的油包水结构产生的微爆效应,使油气混合更均匀,改善了燃烧过程,提高了热效率,从而输出功率更大。

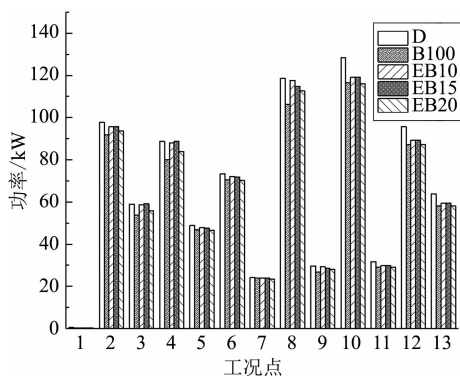


图4 十三工况点功率

2.3 经济性

图5为ESC测试下的加权平均燃油消耗率和有效热效率。相对于柴油, B100的有效热效率降低了8.42%,有效燃油消耗率增加了8.05%。B100的运动黏度是柴油的1.8倍,运动黏度较高,燃料喷射雾化效果相对较差,燃烧不充分。同时B100的十六烷值比柴油的高,滞燃期短,预混燃烧减少,燃烧等容度降低^[14]。以上两点综合作用导致B100的有效热效率低于柴油的。EB10与B100相反:微爆效应^[15-16]使燃油雾化质量提高,同时燃烧中缺氧区域还存在水煤气反应,减小了排烟损失和不完全燃烧损失^[17];此外,丁醇十六烷值低、黏度低、挥发性强,在一定程度上弥补了甲酯的缺点,从而改善和加快了滞燃期混合气的形成,燃烧持续期缩短,燃烧等容度高,从而使EB10有效热效率提高。但水和丁醇的汽化潜热大,随着生物乳化油中水和丁醇掺混比例的增大,燃烧温度降低,有效热效率逐渐下降。

图6为1765 ($r \cdot \min^{-1}$) 转速下,各燃油在不同负荷时的有效热效率。低、高转速的趋势与中转速的一致。可以看到:EB10的有效热效率最高,这与动力性试验中工况点3、4和9中EB10的功率趋势一致。中、高负荷时各燃油有效热效率的差别比低负荷时大。中、高负荷时,燃油喷射压力

大,燃烧温度高,在一定程度上削弱了甲酯的负面影响;而微爆效应提高有效热效率的作用得到增强,故各燃油的有效热效率差别变大。

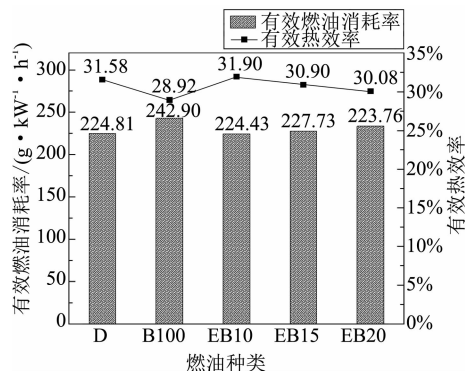


图5 加权燃油消耗率和有效热效率

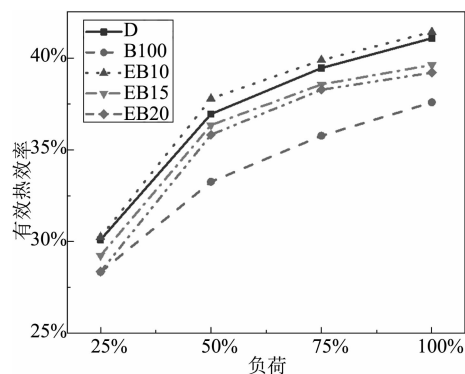


图6 有效热效率 (1765 ($r \cdot \min^{-1}$))

2.4 排放特性

2.4.1 NO_x 排放

不同燃油的 NO_x 十三工况加权比排放如图7所示。可见B100的 NO_x 排放最高。与柴油相比,随着生物乳化柴油中水和丁醇掺混比例的增大,EB10、EB15和EB20的 NO_x 排放分别下降了2.78%、6.76%和14.55%。高温、富氧和足够的反应时间是 NO_x 生成的必要条件。B100含氧量高,形成的富氧区域多,燃烧温度高,所以 NO_x 排放大幅升高。生物乳化柴油的 NO_x 排放逐渐降低有多个因素影响:1) 水在高温环境下被离子化,生成OH自由基,该过程中部分氧原子被消耗,局部富氧区减少^[18];2) 水和丁醇蒸发吸热使缸内温度降低(如图8所示);3) EB10、EB15和EB20的运动黏度逐渐增大,燃油喷射贯穿距增大,减少了燃烧室边缘部分的富氧区域比例;4) 微爆效应可促进均匀可燃混合气形成,减少富氧区,改善燃烧质量,抑制 NO_x 的生成。

高温可促进 NO_x 的生成,但对比图8和图9可发现:工况点2、4、6、8、10和12排气温度高, NO_x 排放却较低;相反,排气温度较低的工况

点 9、11, NO_x 排放却很高。其原因是：前者都是高负荷工况，此时缸内混合气较浓，缺氧对 NO_x 生成的抑制效果大于高温的促进效果；而后者属于低负荷点，空燃比大，富氧环境的促进作用超过温度降低的抑制作用。

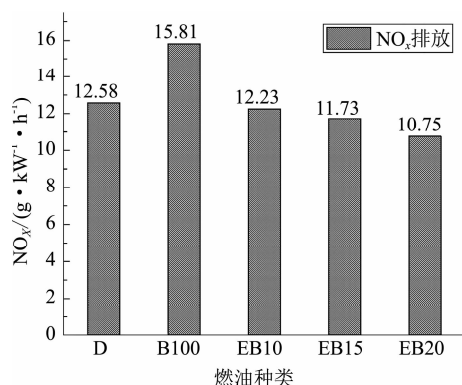
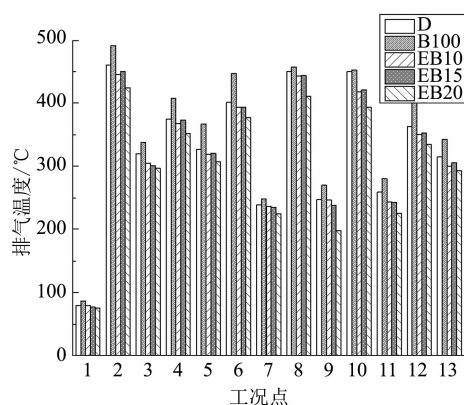
图7 NO_x 的加权比排放

图8 十三工况点排气温度

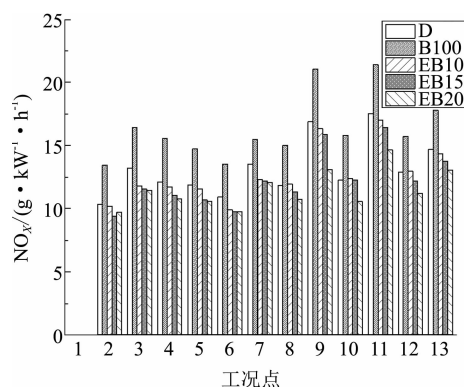
图9 十三工况点 NO_x 比排放

图10是经过SCR优化前后的 NO_x 比排放对比。从图中可见：经过SCR优化处理之后，EB10、EB15和EB20的 NO_x 排放大幅降低，且低于国V规定的 NO_x 限值。同时发现：体积流量比为1:1时 NO_x 转化率较高。这是因为SCR装置前有前置DOC，经过DOC后NO转变成 NO_2 ，低温快速SCR

反应增多^[19]。

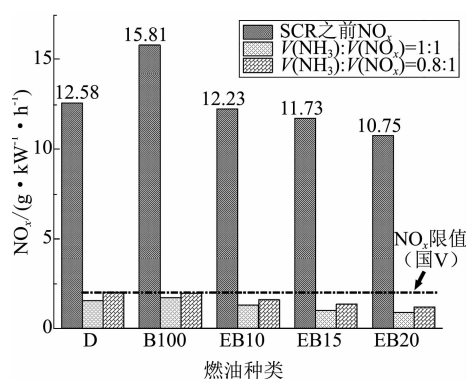


图10 SCR 优化效果

2.4.2 烟度和PM

图11为不同燃料的加权平均烟度值。B100、EB10、EB15和EB20的加权烟度值相对于柴油分别下降了56.42%、38.55%、52.51%和65.92%。B100含氧量高，芳香烃等高分子烃含量比柴油少，其自供氧能力可减少缸内过浓混合气的比例，使燃烧更充分；高分子烃含量少可减少过浓区燃料裂解的发生，从而降低烟度。随着水和丁醇掺混比例增大，生物乳化柴油烟度值逐渐降低。分析认为：1) 水和丁醇的汽化潜热大，使燃烧温度降低（如图8所示），从而降低了燃料中碳氢化合物高温裂解比例和先导物PAHs的生成^[20]。2) 微爆效应可有效改善混合质量，此外，水在高温时释放的氧与高温裂解产生的碳结合，减少了碳烟的生成。水在燃烧过程中还会参与化学反应，生成H、O、HO等活性物质，燃料高温裂解的产物可以被这些活性物质部分氧化^[21]。3) 丁醇和水的比例增大使生物乳化柴油的十六烷值降低，滞燃期变长，降低了扩散燃烧比例^[22]，有利于碳烟排放的降低。

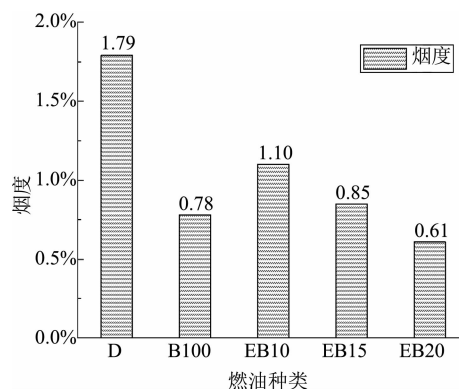


图11 加权烟度

图12所示为各工况点的烟度值。可见各燃油的烟度值与图11中加权烟度值的变化趋势基本一致。低负荷工况点1、7、9、11的烟度非常低。一

方面,低负荷时空燃比大,缺氧燃烧减少;另一方面,柴油机采用电控高压共轨系统供油,混合气的混合质量较高,从而大大降低了烟度值。满负荷工况点2、8、10的烟度值处于较高水平。满负荷时空燃比小,燃烧温度高,高温缺氧区域增多,导致烟度值增大。

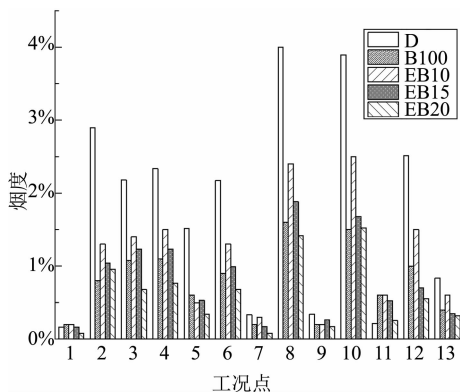


图12 十三工况点烟度

图13为 $1441\text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$ 下,50%和75%负荷时的颗粒物粒径分布规律。柴油的PM排放最高,B100最低。这是由于B100富氧,燃烧温度高的结果。生物乳化柴油的PM排放低于柴油,且随丁醇和水掺混比例增大而降低。掺混丁醇,燃料自含氧量增大,燃烧强化;水含量增大,微爆效应促使可燃混合气形成,燃烧优化,PM排放降低。

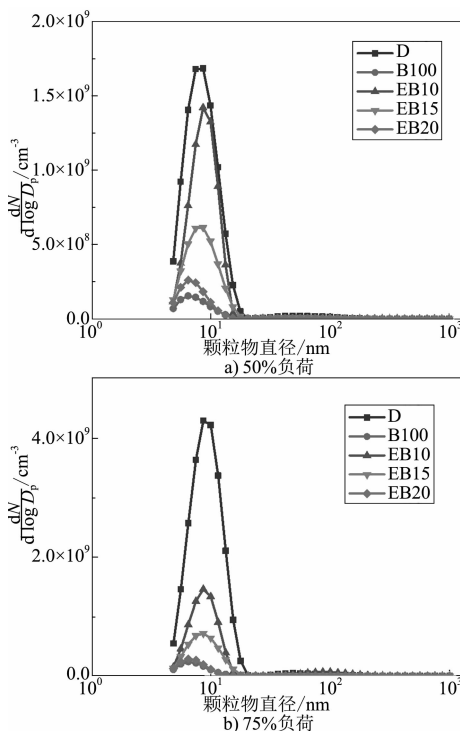


图13 颗粒物粒径分布 ($1441\text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$)

2.4.3 HC和CO排放

图14和图15分别为HC和CO的加权比排放。相对于柴油:B100的HC排放降幅较大,达到38.30%;EB10、EB15和EB20的HC排放分别增加了10.64%、12.76%和17.02%。生物乳化柴油间的HC排放相差甚微。B100的CO排放相比柴油降低了20.51%,EB10、EB15和EB20的CO排放相对于柴油分别下降了15.38%、15.38%和12.82%。

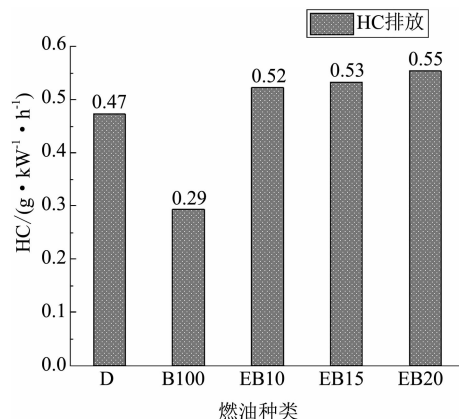


图14 HC的加权比排放

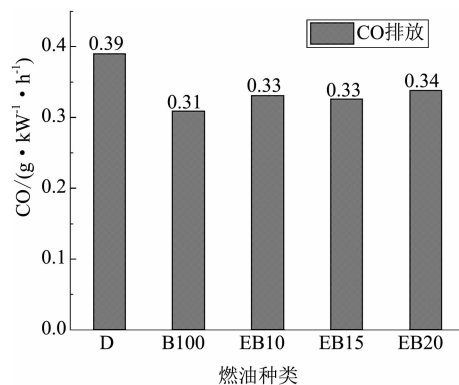


图15 CO的加权比排放

B100含氧,可助燃,有利于降低HC和CO排放。EB10、EB15和EB20的运动黏度和密度比柴油大,且依次升高,因此喷射贯穿距大。未作任何改动的发动机燃用喷射贯穿距较大的生物乳化柴油时,燃料与燃烧室壁面以及活塞凹坑碰撞的概率增大。碰壁燃油雾化效果差,导致未燃或未完全燃烧的HC增多。此外,水和丁醇汽化潜热大,生物乳化柴油燃烧持续期短,HC的氧化时间减少,共同作用导致生物乳化柴油HC排放升高。虽然促使HC排放升高的因素促进CO的生成,但是生物乳化柴油的微爆效应使可燃混合气混合更均匀,降低了缺氧燃烧比例;丁醇和甲酯的高含氧量促进CO的充分氧化,降低了CO排放。

图 16 和图 17 分别为十三工况各点 HC 和 CO 的比排放。中 (工况点 3、5、13)、低 (工况点 7、9、11) 负荷时, HC 和 CO 的比排放偏大, 并且同一工况点不同燃料之间的排放差别也较大。这是因为中、低负荷时, 燃烧温度降低, 而生物乳化柴油的燃烧温度较柴油更低, 温度降低对 HC 和 CO 生成的促进作用大于微爆效应的抑制作用时, 生物乳化柴油与柴油在中低负荷 HC 和 CO 的排放差别被放大。例如和柴油相比, EB20 的 CO 排放较低, 但在工况点 7、9、11, EB20 的 CO 比排放却高于柴油的 CO 比排放。

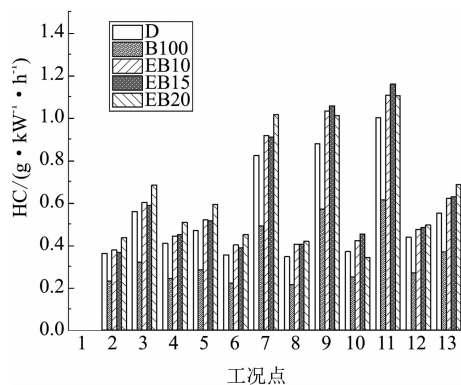


图 16 十三工况点 HC 比排放

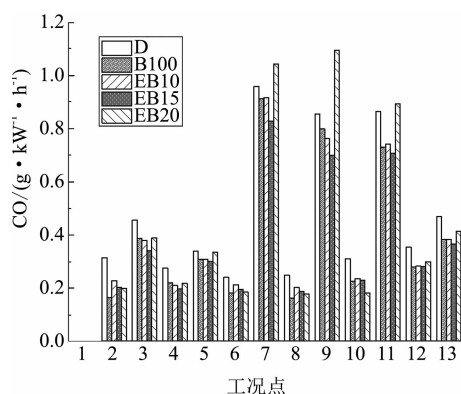


图 17 十三工况点 CO 比排放

3 结论

(1) 25% 负荷时, 各燃料放热率峰值没有明显差异, 其他负荷工况下均是 B100 最小。EB10 和 EB15 的放热率峰值基本相等且大于 EB20。滞燃期方面, $EB20 > EB15 > EB10 > D > B100$ 。生物乳化柴油之间的燃烧持续期差别不大, 但都比柴油小。

(2) 相对柴油, EB10 的有效燃油消耗率降低 0.17%, 有效热效率升高了 1.01%。随着生物乳化柴油中水和丁醇掺混比例的增大, 有效热效率逐渐降低, 燃油消耗率逐渐升高。

(3) 生物乳化柴油能有效降低 NO_x 、PM 排放及烟度。水和丁醇含量越大, NO_x 、PM 和烟度下降越多。如加 SCR 处理, NO_x 排放可以满足国 V 排放标准。生物乳化柴油的 HC 排放高于柴油和 B100, CO 排放相对于柴油分别下降了 15.38%、15.38% 和 12.82%。

(4) 添加剂水和丁醇, 整体上有利于降低生物乳化柴油的排放; 且 EB10 的动力性和经济性也得到了一定提高, 达到的综合效果最佳。

致谢

该研究来自上海市科学技术委员会项目 (16DZ1203100), 并受到上海纽孚尔能源技术有限公司的大力支持。在此, 表示衷心感谢。

参考文献

- [1] 中国环境网. 餐厨废油分析 [EB/OL]. http://www.cenews.com.cn/zfzj_3479/201803/t20180320_868734.html.
- [2] WADUMESTHRIGE K, ARA M, SALLEY S O, et al. Investigation of lubricity characteristics of biodiesel in petroleum and synthetic Fuel [J]. Energy & Fuels, 2009, 23 (4): 2229-2234.
- [3] KAVITHA C, VIJAYASARATHI P. An overview of corrosion performance of automotive metals in biodiesel [J]. 2015, 6 (4): 457.
- [4] 周映. 生物柴油对柴油机燃油系统橡胶, 金属, 塑料的性能影响研究 [D]. 上海: 同济大学, 2009: 875-879.
- [5] TAMILSELVAN P, NALLUSAMY N, RAJKUMAR S. A comprehensive review on performance, combustion and emission characteristics of biodiesel fuelled diesel engines [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 79: 1134-1159.
- [6] SOM S, LONGMAN D E. Numerical study comparing the combustion and emission characteristics of biodiesel to petrodiesel [J]. Energy & Fuels, 2011, 25 (4): 1373-1386.
- [7] WANG Y C, QAITAIHE, WU D Y. Recent experiential advances in combustion and micro-explosion of emulsified oil [J]. Energy Research & Utilization, 2002 (1): 7-10.
- [8] 李向晖, 王忠俊, 陈恩博. 2135G 船用柴油机燃用掺水乳化油试验分析 [J]. 船海工程, 2016, 45 (4): 126-130.
- [9] 周海杰. 微乳化柴油的制备及其发动机负荷特性研究 [D]. 海口: 海南大学, 2017.
- [10] 龚景松, 王超, 张波, 等. 柴油掺混生物柴油的乳化

- 油对柴油机性能的影响 [J]. 内燃机, 2006 (3): 49-51.
- [11] ITHNIN A M, AHMAD M A, BAKAR M A A, et al. Combustion performance and emission analysis of diesel engine fuelled with water-in-diesel emulsion fuel made from low-grade diesel fuel [J]. Energy Conversion & Management, 2015, 90: 375-382.
- [12] MWANGI J K, LEE W J, TSAI J H, et al. Emission reductions of nitrogen oxides, particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons by using microalgae biodiesel, butanol and water in diesel engine [J]. Aerosol & Air Quality Research, 2015, 15 (3): 901-914.
- [13] SHINJO J, XIA J, GANIPPA L C, et al. Physics of puffing and microexplosion of emulsion fuel droplets [J]. Physics of Fluids, 2014, 26 (10): 385.
- [14] SANTOS T B, FERREIRA V P, TORRES E A, et al. Energy analysis and exhaust emissions of a stationary engine fueled with diesel-biodiesel blends at variable loads [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering, 2017, 39 (8): 1-11.
- [15] DEBNATH B K, SAHA U K, SAHOO N. A comprehensive review on the application of emulsions as an alternative fuel for diesel engines [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 42 (42): 196-211.
- [16] HASANNUDDIN A K, WIRA J Y, SRITHAR R, et al. Effect of emulsion fuel on engine emissions – A review [J]. Clean Technologies & Environmental Policy, 2015, 5 (1): 1-16.
- [17] 王世忠. 柴油机燃用掺水乳化油的试验研究与机理分析 [J]. 内燃机学报, 1990 (3): 290.
- [18] 王小琛, 汪映, 陈振斌, 等. 发动机燃用水乳化柴油的研究进展 [J]. 车用发动机, 2018 (1): 1-9.
- [19] 管斌, 周校平, 林赫, 等. NH_3 - SCR 法降低柴油机 NO_x 排放的研究进展 [J]. 车用发动机, 2007 (5): 1-8.
- [20] LIN S L, LEE W J, LEE C F F, et al. Reduction in emissions of nitrogen oxides, particulate matter, and polycyclic aromatic hydrocarbon by adding water-containing butanol into a diesel-fueled engine generator [J]. Fuel, 2012, 93 (1): 364-372.
- [21] 黄亚继, 仲兆平, 金保昇, 等. 生物质油/柴油乳化油的稳定性与燃烧试验研究 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2010, 40 (4): 794-799.
- [22] 龚志伟, 成晓北, 李帅, 等. 柴油中掺混丁醇和大豆生物柴油的燃烧和排放性能 [C]. APC 联合学术年会, 2015.

现代重工扩大 HIMSEN 双燃料发动机范围

现代重工 (HHI) 在 2019 年 CIMAC 大会上宣布, 该公司 HIMSEN 双燃料发动机家族将新增一款更大功率的发动机——H54DFV 双燃料发动机。该机设计缸径为 540 mm, 行程为 600 mm, 转速为 600 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$), 最大输出功率为 26 400 kW。现代重工还宣布, 这款新的双燃料发动机将以单级和两级涡轮增压器配置的形式提供。

自 2015 年以来 H54DFV 双燃料发动机的研制工作已经完成, 型式认证试验预计在 2019 年第四季度进行。市场营销即将开始, 预计 2021 年将交付首台产品发动机。

该发动机将配备具有极端米勒循环的双阀正时系统。据介绍这种配置将大幅降低氮氧化物排放, 同时降低噪声和振动。较之以前推出的发动机, H54DFV 双燃料发动机的最大气缸压力增加了大约 30%。H54DFV 双燃料发动机有 6 缸直列机和 12 ~ 18 缸 V 型机配置。由于该发动机在转速为 600 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$) 时的单缸功率为 1 470 kW, 因此在最大持续功率时, 该发动机的输出功率范围为 8 820 ~ 26 460 kW。为确保在燃气模式时燃烧稳定和高效运行, H54DFV 双燃料发动机优化了微喷引燃系统和燃烧室设计。

现代重工已经销售了 11 500 多台 HIMSEN 发动机, 占据 20% 的全球中速机市场份额。

在 2019 年 CIMAC 大会上, 现代重工还推出了一款新的缸径为 320 mm 的传统发动机——H32CV 发动机。该发动机的缸径为 320 mm, 行程为 450 mm, 转速为 720/750 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)。

2019 年 3 月, 该发动机在韩国船级社、DNV · GL 船级社、美国船级社、法国船级社、日本船级社和英国劳氏船级社代表的共同见证下完成了型式认证试验。

该机优化了重量和体积, 功率密度提高了 20%; 升级了燃烧系统; 进气压力提高; 增强米勒正时; 将可变气门正时与进/排气阀正时相结合。

现代重工计划于 2019 年第四季度开始开发双燃料变型机 H32CV 和 H32DF。

(李积轩 编译)