

甲醇-调合生物柴油燃烧及排放微粒粒径分布特性试验

杜家益¹, 李俊¹, 张登攀¹, 赵小明¹, 吴培振¹, 袁银男²

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013; 2. 苏州大学能源学院, 苏州 215006)

摘要: 为了探究调合生物柴油掺烧甲醇对柴油机燃烧特性及微粒粒径分布的影响, 该文利用燃烧分析仪及 EEPS 3090 型微粒粒径测试系统研究了柴油机燃用甲醇-调合生物柴油微乳化燃料的燃烧过程及微粒数量浓度分布特性。试验结果表明, 与燃用调合生物柴油相比, 柴油机掺烧甲醇后缸内燃烧压力、压力升高率以及放热率曲线均后移, 压力升高率峰值及放热率峰值均增加; 当柴油机处于低负荷时, 排气中的微粒粒径均处于 6~22 nm 之间, 呈现核态; 在高负荷时, 微粒粒径处于 6~275 nm 之间, 主要呈现积聚态, 且数量浓度呈单峰正态分布。随着甲醇添加比例的增加, 核态微粒比例上升, 积聚态微粒比例下降, 且排气中微粒的总数下降。研究结果为甲醇-生物柴油混合燃料的燃烧及微粒排放控制提供了参考。

关键词: 柴油机; 燃烧; 排放控制; 甲醇; 生物柴油; 微乳化; 微粒粒径分布

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.011

中图分类号: TK421

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-12-0075-06

杜家益, 李俊, 张登攀, 赵小明, 吴培振, 袁银男. 甲醇-调合生物柴油燃烧及排放微粒粒径分布特性试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 75-80. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.011 http://www.tcsae.org

Du Jiayi, Li Jun, Zhang Dengpan, Zhao Xiaoming, Wu Peizhen, Yuan Yinnan. Experiments on combustion and emission particulate size distribution characteristics of diesel engine fuelled with methanol-blending biodiesel fuel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(12): 75-80. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.011 http://www.tcsae.org

0 引言

与汽油机相比, 柴油机热效率高且节油 30%, 但柴油机的微粒排放较为严重, 是汽油机的几十倍。柴油机的微粒粒径一般小于 0.3 μm , 可长期悬浮在大气中不沉降, 深入人体肺部造成机械性超负荷, 此外碳粒还会吸附硫酸盐及多种有机物, 其中包含的多环芳香烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 具有一定的致癌作用, 进一步加大对人体的危害^[1]。较早的排放法规只限制了颗粒物 (particulate matter, PM) 的质量^[2], 而近来的相关规定将 PM 的数量也纳入了污染物控制项目, 故人们又对 PM 的粒径分布特性展开了相关研究^[3-5]。

甲醇和柴油掺烧可以改善柴油机微粒排放高的问题, 但甲醇与柴油的性质差别比较大, 两者难以互溶^[1], 而通过添加助溶剂能够形成甲醇柴油微乳化燃料。Huang Zuohua 等^[6]通过添加助溶剂形成一种稳定的柴油-甲醇混合燃料, 并对其性能展开研究。结果表明, 甲醇的加入, 使得发动机的热效率增加。Mustafa Canakci 等^[7]针对不同甲醇掺烧比例对甲醇-柴油组合燃烧过程的影响进行了研究, 结果表明, 发动机缸内最大燃烧压力和放热率峰值随着甲醇含量的增加而升高。王利军等^[8]研究了高比例甲

醇/柴油双燃料的排放特性, 结果表明, 虽然 HC 和 CO 排放含量有所上升, 但 NO_x 和碳烟大幅降低。王晓燕等^[9]利用电子低压冲击仪对甲醇柴油和柴油的排放微粒粒径分布特性进行了研究, 结果表明甲醇柴油排放的微粒体积浓度小于柴油, 在核态范围内, 微粒数量浓度呈下降趋势, 且微粒的数量浓度随转速增大而增加。

目前, 国内外对甲醇掺烧柴油的研究较多, 取得了一系列成果, 但对甲醇掺烧生物柴油的研究还相对较少, 尤其是针对排气中的超细微颗粒的粒径分布研究更是不多。生物柴油作为一种绿色环保可再生能源, 能够改善发动机的排放特性^[10-14], 且有助于甲醇柴油微乳化溶液的形成^[15-18]。本文利用常用的乳化剂正丁醇制成甲醇-调合生物柴油微乳化燃料, 以示功图为基础, 对混合燃料的燃烧特性进行了研究分析。同时, 利用 EEPS 3090 微粒粒径分析仪, 考察了发动机不同负荷稳态工况下燃用微乳化燃料的微粒粒径分布特性, 以期对柴油机燃用甲醇-生物柴油混合燃料的燃烧与排放控制提供参考。

1 试验燃料

试验首先配制了 B20 调合生物柴油 (生物柴油和柴油的体积分数分别为 20% 和 80%)。经过理论分析及试验对比, 选定正丁醇为主要乳化剂, 将 B20 与甲醇按一定比例混合, 用玻璃棒轻轻搅拌, 即可制得澄清透明均一的甲醇-调合生物柴油微乳化燃料。3 种不同甲醇掺混比例的微乳化燃料分别为 B20M5 (B20 和甲醇所占体积分数分别为 95% 和 5%)、B20M10 (B20 和甲醇所占体

收稿日期: 2015-09-17 修订日期: 2016-03-17

基金项目: 江苏省高校自然科学研究项目 (13KJA470001, 15KJA470002); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)。

作者简介: 杜家益, 男, 江苏镇江人, 副教授, 主要从事代用燃料的性能研究。镇江 江苏大学汽车与交通工程学院, 212013。Email: jydu@ujs.edu.cn

积分数分别为 90%和 10%) 和 B20M15 (B20 和甲醇所占体积分数分别为 85%和 15%)。燃料的密度采用上海昌吉地质仪器有限公司 SYD-1884 石油产品密度试验器测量,黏度选用上海恒平科学仪器公司生产的 NDJ-5S 数字旋转黏度计进行测量,仪器测量精度为 0.1 mPa·s;混合燃料的低热值、十六烷值及含氧量等参数,试验测量较为复杂,采用公式估算能够快速得到物性参数的结果。常用的估算模型有 Kay 混合法则。式(1)为 Kay 混合法则的计算方法。试验燃料的理化特性如表 1 所示。

$$\varphi = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \varphi_i \tag{1}$$

式中 φ 为混合燃料的特性参数; x_i 为第 i 种物质的质量分数; φ_i 为第 i 种物质的特性参数; n 是组分的数目。

表 1 燃料的主要理化特性
Table 1 Physicochemical properties of fuels

名称 Name	密度 Density(20℃)/ (kg·m ⁻³)	运动黏度 Viscosity(20℃)/ (mPa·s)	十六烷值 Cetane number	低热值 Low heat value/ (MJ·kg ⁻¹)	含氧量 Oxygen content/%
甲醇 Methanol	796	0.6	3	19.7	50
B20	832	4.6	47.1	42.1	2.32
B20M5	830	4.4	44.2	40.9	5
B20M10	827	4.2	40.9	39.6	7.84
B20M15	825	3.9	37.5	38.4	10.61

注: B20 中生物柴油和柴油的体积分数分别为 20%和 80%; B20M5 中 B20 和甲醇所占体积分数分别为 95%和 5%; B20M10 中 B20 和甲醇所占体积分数分别为 90%和 10%; B20M15 中 B20 和甲醇所占体积分数分别为 85%和 15%。

Note: B20 consists of 20% biodiesel and 80% diesel in volume fraction; B20M5 consists of 95% B20 and 5% methanol in volume fraction; B20M10 consists of 90% B20 and 10% methanol in volume fraction; B20M15 consists of 85% B20 and 15% methanol in volume fraction.

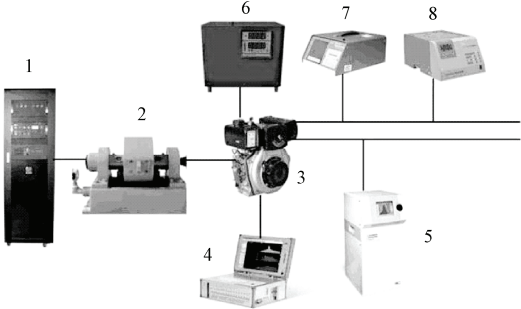
2 试验设备及方案

2.1 试验设备

试验采用四冲程、自然吸气、风冷直喷式非道路用柴油机 186FA, 主要技术参数见表 2。主要测试设备有杭州中成有限公司生产的 CWF25D 电涡流测功器, 额定功率为 25 kW, 额定转矩为 120 N/m, 额定转速为 2 000 r/min, 许用转速为 10 000 r/min; 浙江遂昌恒力公司生产的 EST 内燃机测试系统; 奥地利 DEWETRON 公司生产的 EWE-2010 DAQ 缸内燃烧压力采集系统, 该系统拥有 16 个采样通道及 0.2 ℃A 采样频率的编码器; 美国 TSI 公司生产的 EEPS 3090 型发动机排气粒径测试仪, 测量范围为 5.6~560 nm。图 1 为台架测试系统结构简图。

表 2 发动机主要技术参数
Table 2 Test engine specifications

名称 Name	数值 Value	名称 Name	数值 Value
气缸直径 Cylinder diameter/mm	86	标定功率 Rated power/kW	5.7
活塞行程 Piston stroke/mm	72	标定转速 Rated speed/(r·min ⁻¹)	3 000
压缩比 Compression ratio	19:1	最大转矩 Peak torque/(N·m)	20
发动机排量 Displacement/L	0.418	最大转矩转速 Peak torque speed/(r·min ⁻¹)	1 800



1. 内燃机测试系统 2. 测功机 3. 柴油机 4. 燃烧分析仪 5. 粒径分析仪
6. 油耗仪 7. 尾气分析仪 8. 烟度计
1. IC Engine test system 2. Dynamometer 3. Diesel engine 4. Combustion
analyzer 5. Exhaust Emission Particle Sizer 6. Fuel consumption monitor
7. Exhaust analyzer 8. Smokemeter

图 1 台架测试系统结构简图

Fig.1 Structure diagram of bench test system

2.2 试验方案

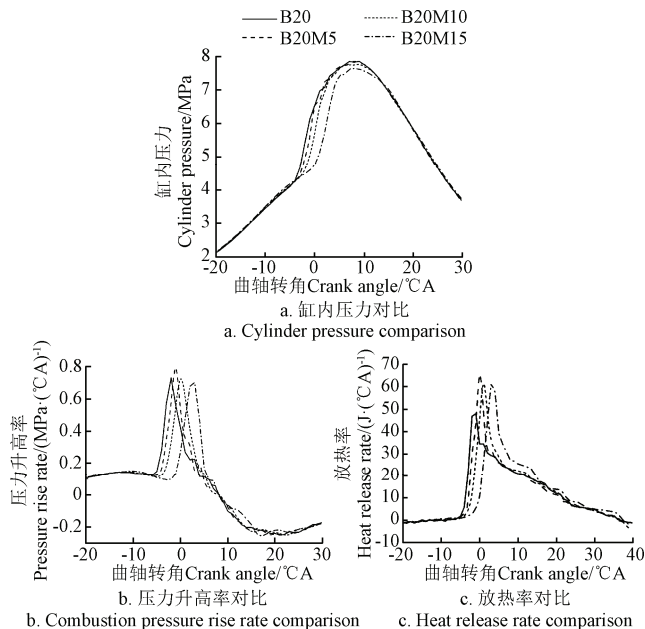
试验时 186FA 柴油机的结构参数和供油提前角不作调整, 试验燃料为 B20, B20M5, B20M10 及 B20M15。转速选定最大扭矩转速 1 800 r/min, 采集全负荷工况下的燃烧压力, 基于燃烧示功图的分析, 考察甲醇掺混比对缸内压力、压力升高率、放热规律和滞燃期的影响, 研究柴油机燃用不同混合燃料的燃烧特性。发动机转速 1 800 r/min, 负荷为 25%和 100%, 测量发动机燃用 4 种不同燃料的排气微粒数量, 探讨调合生物柴油中掺烧甲醇对发动机微粒粒径分布的影响。

3 燃烧特性分析

3.1 示功图

图 2a 和图 2b 分别为最大扭矩转速 1 800 r/min, 全负荷工况时, 柴油机燃用 B20、B20M5、B20M10 和 B20M15 4 种不同燃料的燃烧压力曲线和压力升高率曲线。由图 2a 与 2b 可知: 1) 与 B20 相比, B20M5、B20M10 及 B20M15 3 种掺醇燃料的燃烧压力曲线和压力升高率曲线显著后移, 其中 B20M15 峰值燃烧压力对应的曲轴转角相比 B20、B20M5 及 B20M10 3 种燃料分别滞后了约 2、1 和 1℃A, 着火延迟期明显延后, 这是因为一方面甲醇的汽化潜热大, 进入气缸后需吸收大量热量, 导致燃烧推迟; 另外一方面由于 B20M15 的甲醇添加比例最大, 导致十六烷值相比 B20、B20M5 及 B20M10 分别降低了 20.38%、15.16%和 8.31%, 而十六烷值越低, 燃料的滞燃期越长, 从而 B20M15 的着火最晚。2) B20、B20M5、B20M10 和 B20M15 的峰值燃烧压力分别为 7.86、7.87、7.79 及 7.65 MPa, 且 B20M15 数值最小; B20、B20M5、B20M10 和 B20M15 的最大压力升高率分别为 0.73、0.79、0.80 及 0.70 MPa/(℃A), B20M5、B20M10 的最大压力升高率比 B20 高, B20M10 的增幅最大达到 9.6%, B20M15 的最大压力升高率最小。这是因为一方面掺醇燃料的滞燃期较长, 从而在着火前形成的可燃气数量较多; 另一方面, 甲醇与调合生物柴油在乳化剂的作用下形成“油包醇”型小颗粒微乳液, 燃料进入气缸后吸热产生“微爆”效应, 使得掺醇燃料与空气形成较

为均匀的混合气, 雾化变好; 此外, 加上掺醇燃料的自供氧起到了助燃作用, 所以燃料燃烧更加完全, 从而峰值燃烧压力和最大压力升高率提高^[19-20]; 但由于 B20M15 中所掺混的甲醇及乳化剂正丁醇较多, 使得混合燃料的热值过低, 导致峰值燃烧压力和最大压力升高率较其他 3 种燃料有所降低。



注: B20 中生物柴油和柴油的体积分数分别为 20% 和 80%; B20M5 中 B20 和甲醇所占体积分数分别为 95% 和 5%; B20M10 中 B20 和甲醇所占体积分数分别为 90% 和 10%; B20M15 中 B20 和甲醇所占体积分数分别为 85% 和 15%, 下同。

Note: B20 consists of 20% biodiesel and 80% diesel in volume fraction; B20M5 consists of 95% B20 and 5% methanol in volume fraction; B20M10 consists of 90% B20 and 10% methanol in volume fraction; B20M15 consists of 85% B20 and 15% methanol in volume fraction, the same as below.

图 2 不同比例燃料燃烧特性对比 ($n=1800 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 100% 负荷)

Fig.2 Combustion characteristics comparison of different proportion fuels ($n=1800 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 100% load)

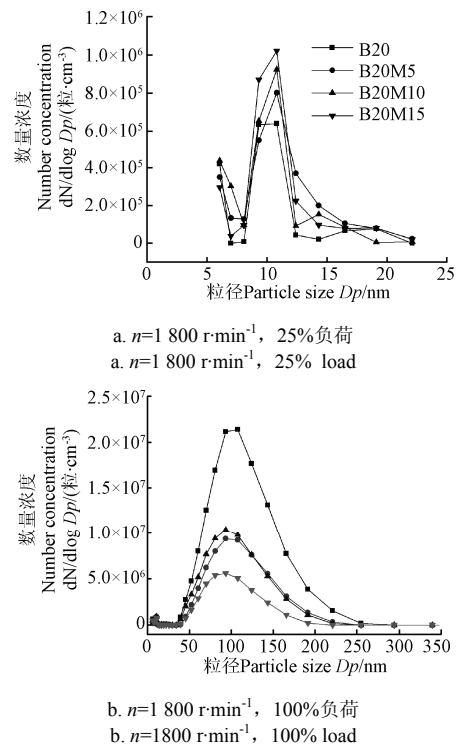
3.2 燃烧放热率

图 2c 为最大扭矩转速 $1800 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 全负荷工况时, 柴油机燃用 B20、B20M5、B20M10 及 B20M15 4 种不同燃料的瞬时燃烧放热率曲线。由图 2c 可以看出: 1) 与 B20 相比, B20M5、B20M10 与 B20M15 3 种掺醇混合燃料的瞬时放热率曲线明显后移, 混合燃料中甲醇的含量越高, 着火推迟越大, 这是因为甲醇汽化吸热使得缸内温度降低, 着火延迟期变长, 从而致使燃烧始点推迟, 瞬时燃烧放热率峰值所对应的曲轴转角滞后; 2) B20、B20M5、B20M10 和 B20M15 的瞬时燃烧放热率峰值分别为 48.12 、 65.75 、 69.23 及 $61.78 \text{ J}/(\text{°CA})$, 3 种掺醇燃料的瞬时放热率峰值均明显高于 B20, 其中 B20M10 的增幅最大达到 43.9% , 但 B20M15 的峰值较 B20M5 和 B20M10 都低。这是因为甲醇的汽化潜热大, 良好的挥发性加快了燃料与空气的混合速率, 使得滞燃期内的可形成的混合气增多, 加上甲醇的含氧量高, 亦能够加快放热速率; 另一方面, 当甲醇与调合生物柴油掺混比例较小时 (B20M5、B20M10), 对燃料的燃烧促进作用较为明显,

放热率峰值升高较大, 但当甲醇的比例较大时 (B20M15), 由于混合燃料的热值降低较多, 反而导致放热率峰值有所降低^[21], 所以, 混合燃料中的甲醇掺混比例不宜过高。

4 微粒粒径分析

图 3a 为最大扭矩转速 $1800 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 25% 负荷工况下, 柴油机燃用 B20、B20M5、B20M10 及 B20M15 4 种不同燃料的微粒粒径数量浓度分布。由图 3a 可知, 在这种工况下微粒粒径数量浓度分布曲线大致呈“峰—谷”状, 峰值处于 6 和 11 nm 附近, 谷值处于 7 和 $14 \sim 22 \text{ nm}$ 附近, 排气中绝大多数微粒粒径处于 $6 \sim 22 \text{ nm}$ 之间。柴油机排气微粒按照其粒径大小分布情况, 主要可以分为普通微粒 (粒径大于 100 nm) 及超细微粒 (粒径小于 100 nm) 两类。其中超细微粒又可以分为粒径小于 50 nm 的核态及粒径在 $50 \sim 1000 \text{ nm}$ 的积聚态 2 种^[22-24]。因此, 该工况下的 4 种燃料排气中的微粒形态均为核态。



注: n 为最大扭矩转速, 下同。

Note: n is peak torque speed, the same as below.

图 3 不同比例燃料微粒粒径数量浓度分布

Fig.3 Particle diameter number concentration distribution of different proportion fuels

图 3b 为最大扭矩转速 $1800 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 100% 负荷时, 柴油机燃用 B20、B20M5、B20M10 及 B20M15 4 种不同燃料的微粒粒径数量浓度分布。由图 3b 可知, 4 种燃料的微粒粒径数量浓度呈单峰正态分布。峰值处于 100 nm 附近, 排气中的微粒粒径绝大多数处于 $6 \sim 275 \text{ nm}$ 之间。随着负荷的增加, 核态微粒比例减少, 逐渐向积聚态转化。这是因为负荷的增加使得缸内温度和排气温度增加, 不利于挥发性物质的凝结, 高温也使得形成的初级粒子较快氧化, 所以核态微粒会减少^[9]。

图 4a 为 4 种燃料在最大扭矩转速 1 800 r/min, 25% 负荷工况下的微粒数量浓度总数。由图 4a 可知, 在这种工况下, B20、B20M5、B20M10 与 B20M15 的核态微粒总数依次递增。这是因为小负荷时, 空燃比较大, 燃料被稀释, 缸内燃烧温度较低, 燃烧残余的 HC 增多, 多环芳香烃 PAHs 等高分子含量增加, 有利于核态微粒的生成^[25]。而由于微乳化燃料中均掺有甲醇, 汽化潜热较大, 吸收缸内热量, 导致缸内温度进一步降低, 气缸壁面淬熄, 加大了 HC 的生成, 所以 3 种掺醇燃料的核态微粒数量比 B20 生物柴油多。

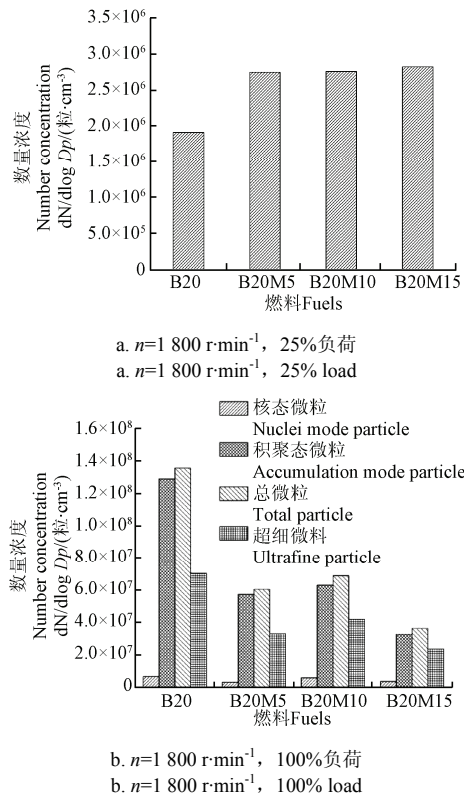


图 4 不同粒径段微粒数量浓度总数

Fig.4 Different diameter size section of particle number concentration sum

图 4b 为 4 种燃料在最大扭矩转速 1 800 r/min, 100% 负荷下不同粒径段微粒数量浓度总数。将粒径在 100 nm 以下的各粒径段微粒数量之和定义为超细微粒总数, 实际测量所得的粒径段微粒数量之和定义为微粒总数。由图 4b 可知, B20 的核态微粒数、积聚态微粒数及微粒总数均是最高。其中积聚态总数分别是 B20M5、B20M10 和 B20M15 的 2.45 倍、2.05 倍和 3.47 倍, 总微粒数量是其 2.26 倍、1.98 倍和 3.77 倍, 这是由于大负荷下高温缺氧导致的积聚态微粒排放增加, 而由于 B20M5、B20M10 和 B20M15 3 种掺醇燃料的含氧量比调合生物柴油均高, 且甲醇的汽化潜热大, 降低了缸内燃烧温度, 所以数量相对 B20 较少。随着甲醇添加比例的提高, 燃料的挥发性越好, 在滞燃期内形成的混合气越多, 微粒吸附周围气态 HC 的量越大, 因此其可溶性有机物 (soluble organic matter, SOF) 比例越多, 从而导致 B20M10 的核态及积聚

态微粒相比 B20M5 要多, 进而总微粒数量也就增加^[26]。但由于 B20M15 中甲醇的添加比例较大, 所需添加剂正丁醇也增多, 因此核态微粒及小粒径积聚态微粒数量降低, 从而使得总微粒数量也减少。这是因为丁醇分子内含有羟基, 能够有效降低 PAHs 先驱体饱和和 HC 碎片的生成, 导致 PAHs 等有机物形成的二次核态微粒减少^[25]。

图 5 为 4 种燃料在最大扭矩转速 1 800 r/min, 100% 负荷工况下不同粒径段微粒占总微粒的比例。核态微粒比例定义为核态微粒总数占微粒总数之比, 积聚态微粒比例定义为积聚态微粒总数占微粒总数之比, 超细微粒比例定义为超细微粒总数占微粒总数之比^[27]。由图 5 可知, 随着燃料中甲醇的比例增加, 核态微粒比例逐渐增加, 积聚态微粒减小。相对于调合生物柴油, 微乳化燃料中的含氧量越高, 超细微粒所占比例递增, 所以甲醇的掺混比例也不宜过高。

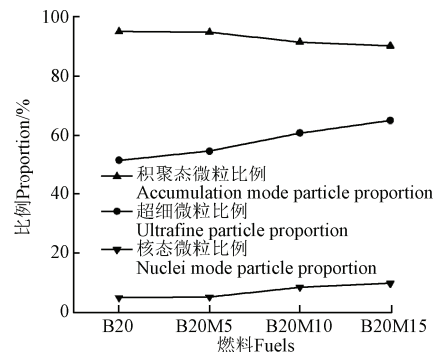


图 5 不同粒径段微粒占总微粒比例 ($n=1\ 800\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, 100% 负荷)

Fig.5 Different particle size section accounted for proportion of total particle ($n=1\ 800\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, 100% load)

5 结 论

1) 与 B20 调合生物柴油相比, 当甲醇掺混比例不超过 15% 时, 峰值燃烧压力降低 0~0.2 MPa, 其对应的曲轴转角滞后 1~2 °CA; 峰值压力升高率及峰值放热率均增加, 增幅最大分别达到 9.6% 和 43.9%。

2) 在低负荷工况下, 掺烧甲醇后微粒总数明显增加; 4 种燃料的排气微粒均呈现核态, 粒径主要集中在 6~22 nm 之间, 峰值处于 6 和 11 nm 附近, 微粒粒径数量分布随甲醇的掺混比增加而增加。

3) 在高负荷工况下, 排气中的微粒由核态逐渐向积聚态转化, 粒径数量浓度绝大多数处于 6~275 nm 之间, 呈单峰正态分布, 峰值位于 100 nm 附近。随着甲醇比例提高, 核态微粒及超细微粒比例上升, 积聚态微粒比例下降, 微粒总数呈总体下降趋势。

[参 考 文 献]

- [1] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 212~219.
 - [2] 谭丕强, 胡志远, 楼狄明. 车用发动机燃用生物柴油的颗粒数量排放[J]. 汽车安全与节能学报, 2010, 1(1): 83~88.
- Tan Piqiang, Hu Zhiyuan, Lou Diming. Particle number emission from a vehicle diesel engine with biodiesel fuel[J].

- Journal of Automotive Safety and Energy, 2010, 1(1): 83—88. (in Chinese with English abstract)
- [3] Khatri N J, Johnson J H. Physical size distribution characterization of diesel particulate matter and the study of the coagulation process[C]//SAE Paper, 780788; 1978: 512—515.
- [4] 赖春杰, 孙万臣, 李国良, 等. 生物柴油混合燃料对车用高压共轨柴油机微粒排放粒度分布的影响[J]. 汽车工程学报, 2011, 1(1): 53—59.
- Lai Chunjie, Sun Wanchen, Li Guoliang, et al. Effect of biodiesel blended fuel on particulate matter size distribution in common-rail diesel engine emission[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2011, 1(1): 53—59. (in Chinese with English abstract)
- [5] Burtscher H. Physical characterization of particulate emissions from diesel engines: A review[J]. Journal of Aerosol Science, 2005, 36(7): 896—932.
- [6] Huang Zuohua, Lu Hongbing, Jiang Deming, et al. Study on combustion characteristics of a DI diesel engine operating on diesel/methanol blends[J]. Transaction of CSICE, 2003, 21(6): 401—410.
- [7] Canakci M, Sayin C, Ozsezen A N, et al. Effect of injection pressure on the combustion, performance, and emission characteristics of a diesel engine fueled with methanol-blended diesel fuel[J]. Energy & Fuels, 2009, 23(6): 2908—2920.
- [8] 王利军, 刘圣华. 高比例甲醇柴油双燃料发动机燃烧与排放特性的研究[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(1): 14—17.
- Wang Lijun, Liu Shenghua. Combustion and emission characteristics of a DI engine operating on high proportion of methanol diesel dual fuel[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(1): 14—17. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王晓燕, 李芳, 葛蕴珊, 等. 甲醇柴油与生物柴油微粒排放粒径分布特性[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 7—12.
- Wang Xiaoyan, Li Fang, Ge Yunshan, et al. Particle size distribution of particulate matter emission from the diesel engine burning methanol-diesel fuel and biodiesel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 7—12. (in Chinese with English abstract)
- [10] 梅德清, 孙平, 袁银南, 等. 柴油机燃用生物柴油的排放特性研究[J]. 内燃机学报, 2006, 24(4): 331—335.
- Mei Deqing, Sun Ping, Yuan Yinnan, et al. Investigation on exhaust emission characteristics of compression ignition engine fuelled with bio-diesel[J]. Transactions of CSICE, 2006, 24(4): 331—335. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李博, 楼狄明, 谭丕强, 等. 发动机燃用生物柴油的常规和非常规排放特性[J]. 内燃机工程, 2009, 30(5): 22—26.
- Li Bo, Lou Diming, Tan Piqiang, et al. Regulated and non-regulated emission characteristics of an engine fuelled with bio-diesel[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2009, 30(5): 22—26. (in Chinese with English abstract)
- [12] 谭丕强, 胡志远, 楼狄明. 非直喷式增压柴油机燃用生物柴油的性能与排放特性[J]. 内燃机学报, 2006, 24(2): 110—115.
- Tan Piqiang, Hu Zhiyuan, Lou Diming, et al. Performance and emission of IDI turbocharged diesel engines fuelled with biodiesel fuels[J]. Transactions of CSICE, 2006, 24(2): 110—115. (in Chinese with English abstract)
- [13] Senatore A, Cardone M, Buono D, et al. Performances and emissions optimization of a CR diesel engine fuelled with biodiesel[C]//SAE Paper, 2006-01-0235; 2006: 122—131.
- [14] Patterson J, Hassan M. G, Clarke A, et al. Experimental study of DI diesel engine performance using three different biodiesel fuels[C]//SAE Paper, 2006-01-0234; 2006: 85—94.
- [15] 周庆辉, 纪威. 甲醇柴油微乳液三相图的研究[C]//中国内燃机学会特种发动机分会四届一次学术交流会. 中国内燃机学会特种发动机分会四届一次学术交流论文集. 北京: 中国内燃机学会, 2006: 19—24.
- Zhou Qinghui, Ji Wei. Study of phase behavior of methanol-diesel micro-emulsion[C]//The First Time of the Fourth Session Academic Exchange Meeting of Special Type Engine Sub-society of CSISE. The Symposium of First Time of the Fourth Session Academic Exchange Meeting of Special Type Engine Sub-society of CSISE. Beijing: Chinese Society for Internal Combustion Engines, 2006: 19—24. (in Chinese with English abstract)
- [16] 周庆辉, 纪威, 符太军. 柴油机燃用甲醇-生物柴油-柴油微乳化燃料的试验研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2007, 34(3): 4—6.
- Zhou Qinghui, Ji Wei, Fu Taijun. Experiment study on diesel engine of methanol-biodiesel-diesel micro-emulsion[J]. Tractor & Farm Transporter, 2007, 34(3): 4—6. (in Chinese with English abstract)
- [17] 周庆辉, 孙建民, 朱爱华, 等. 利用生物柴油制取甲醇柴油微乳液的试验研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2009, 36(4): 69—70.
- Zhou Qinghui, Sun Jianmin, Zhu Aihua, et al. Test study on preparation of methanol-diesel micro-emulsion by bio-diesel[J]. Tractor & Farm Transporter, 2009, 36(4): 69—70. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李亚鹏. 柴油机燃用生物柴油-柴油-甲醇微乳化燃料性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2013: 16—20.
- Li Yapeng. Study on Performances of Diesel Engine Fuelled with Biodiesel-diesel-methanol Micro-emulsion Fuels[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013: 16—20. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王忠, 李仁春, 张登攀, 等. 甲醇/柴油双燃料发动机燃烧过程分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 78—83.
- Wang Zhong, Li Renchun, Zhang Dengpan, et al. Combustion process analysis of methanol/diesel dual fuel engine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(8): 78—83. (in Chinese with English abstract)
- [20] 赵洋, 王忠, 李瑞娜, 等. 柴油机燃用甲醇/柴油燃烧与排放特性试验研究[J]. 农机化研究, 2015, 37(2): 236—239.
- Zhao Yang, Wang Zhong, Li Ruina, et al. Study on combustion and emission characteristics of diesel engine using methanol/diesel blends[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(2): 236—239. (in Chinese with English abstract)
- [21] 纪威, 符太军, 姚亚光, 等. 柴油机燃用乙醇-柴油-生物柴油混合燃料的试验[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 180—185.
- Ji Wei, Fu Taijun, Yao Yaguang, et al. Experimental study on diesel engine burning ethanol-diesel-biodiesel blend fuel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(3): 180—185. (in Chinese with English abstract)

- [22] Kyeong O L, Zhu Jinyu, Stephen C, et al. Sizes, graphitic structures and fractal geometry of light-duty diesel engine particulates[C]//SAE Paper, 2003-01-3169; 2003: 163—172.
- [23] 刘双喜, 宁智, 付娟, 等. 柴油机排气微粒冷却演变特性的实验研究[J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1193—1197.
Liu Shuangxi, Ning Zhi, Fu Juan, et al. Evolution characteristics of diesel particles under cooling condition[J]. Environmental Science, 2007, 28(6): 1193—1197. (in Chinese with English abstract)
- [24] Kittelson D, Arnold M, Watts W, et al. Review of diesel particulate matter sampling methods[R]. Minnesota: University of Minnesota, 1999.
- [25] 楼狄明, 徐宁, 范文佳, 等. 国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 526—532.
Lou Diming, Xu Ning, Fan Wenjia, et al. Particulate distribution characteristics of Chinese Phase V diesel engine based on butanol-diesel blends[J]. Environmental Science, 2014, 35(2): 526—532. (in Chinese with English abstract)
- [26] 赖春杰. 高压共轨柴油机超细微颗粒排放特性分析[D]. 长春: 吉林大学, 2012: 53—59.
Lai Chunjie. The Properties of Ultrafine Particulate Emission in Common-rail Diesel Engine[D]. Changchun: Jilin University, 2012: 53—59. (in Chinese with English abstract)
- [27] 王晓丹, 孙万臣, 李国良, 等. 柴油理化特性对高压共轨柴油机微粒粒度分布的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 31—36.
Wang Xiaodan, Sun Wanchen, Li Guoliang, et al. Effect of diesel physical and chemical properties on particle size distribution in common-rail diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 31—36. (in Chinese with English abstract)

Experiments on combustion and emission particulate size distribution characteristics of diesel engine fuelled with methanol-blending biodiesel fuel

Du Jiayi¹, Li Jun¹, Zhang Dengpan¹, Zhao Xiaoming¹, Wu Peizhen¹, Yuan Yinnan²

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

2. School of Energy, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: Compared to gasoline engine, the thermal efficiency of diesel engine is higher and the 30% fuel efficiency can be achieved, but the particle emission is very serious. Particles which contain soluble organic fraction (SOF), soot and inorganic salt are mainly the result of incomplete combustion or pyrolysis of fossil fuels and other organic materials. According to the particle size distribution, the exhaust particles include ordinary particles (with size more than 100 nm) and ultrafine particles (with size less than 100 nm). And ultrafine particles include nuclei mode particles (with size less than 50 nm) and accumulation mode particles (with size between 50 and 100 nm). Numerous studies have shown that the particles are harmful to human and environment, and they may cause cancer and other diseases. Formerly, the emission regulations only restricted the PM (particulate matter) mass concentration, but recently a series of policies have included the limitation of particulate number concentration. The particle emission of diesel engine has gradually been paid extensive attention by many researchers. Burning diesel mixed with methanol could improve combustion and reduce the emissions of particles, but the physicochemical properties of diesel and methanol are greatly different, and they are mutually immiscible. Generally, forming micro-emulsion fuels by mixing them with cosolvent is the most efficient way. At present, a series of achievements have been gained at home and abroad, but the researches about using the mixture of methanol and biodiesel are still few, especially about the size distribution of fine particles. As a kind of green renewable energy, biodiesel can improve the emission characteristics of engine; also, it could contribute to the formation of methanol-blending biodiesel micro-emulsion fuel. With the use of combustion analyzer and Engine Exhaust Particle Sizer 3090 spectrometer, the combustion process and the particulate number concentration distribution characteristics were studied with a diesel engine fuelled with methanol-blending biodiesel micro-emulsion fuel. Results showed that compared to the engine fuelled with blending biodiesel B20 (20% biodiesel and 80% diesel in volume fraction), the in-cylinder pressure, pressure rise rate and heat release rate curves for the engine fuelled with methanol-blending biodiesel micro-emulsion fuel were obviously retarded, and the maximum pressure rise rate and heat release rate increased; the particle presented nuclei mode and the size was mostly between 6 and 22 nm at low load, and the total number of nuclei mode particles showed that the B20 fuel was the most, followed by B20M5 (95% B20 and 5% methanol in volume fraction), B20M10 (90% B20 and 10% methanol in volume fraction) and B20M15 (85% B20 and 15% methanol in volume fraction) in order; at high load, the particulate number concentration distribution was unimodal with the size between 6 and 275 nm, the particle morphology was accumulation mode, and the peak of particulate size distribution was around 100 nm. The total particle numbers of nuclei mode particles, accumulation mode particles and all particles for B20 were the most. The total number of accumulation mode particles for B20 was 2.45 times that of B20M5, 2.05 times that of B20M10, and 3.47 times that of B20M15. And the total number of all particles was 2.26, 1.98 and 3.77 times that of B20M5, B20M10 and B20M15 respectively. With the increase of methanol fraction, the percentage of nuclei mode particles rose and the percentage of accumulation mode particles decreased, and the sum of exhaust particle declined. Relative to blending biodiesel, the more oxygen the micro-emulsion fuels contained, the more proportion the ultrafine particles occupied. So, the mixing proportion of methanol should not be too high. The research provides a reference for the combustion and the particle emission control of methanol-biodiesel blending fuel.

Keywords: diesel engines; combustion; emission control; methanol; biodiesel; micro-emulsified; particle size distribution