

生物柴油发动机燃烧特性与超细颗粒物排放特性

方 文^{1,2}, 苏 欣¹, 马文晓¹, 徐孟龙¹, 李海鸽^{1,3}, 滑海宁¹

(1. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064; 2. 四川交通职业技术学院 汽车工程系, 四川 成都 611130;
3. 西安汽车科技职业学院, 陕西 西安 710060)

摘 要:为了研究柴油机燃用生物柴油的超细颗粒物排放,在一台高压共轨柴油机上进行了试验研究,利用缸压传感器、电荷放大器和燃烧分析仪组成的动态燃烧测试系统测录缸内压力,并计算瞬时燃烧放热率;利用 SMPS-3936 气溶胶粒径谱仪测录超细颗粒物排放数浓度及粒径分布。研究表明:与柴油相比,1 400 r/min、平均有效压力 $p_{me} \leq 0.48$ MPa 时,生物柴油峰值燃烧压力基本相当,二次喷射导致峰值放热率增加,1 400 r/min、 $p_{me} > 0.48$ MPa 时,生物柴油峰值燃烧压力、峰值放热率均较低;在全负荷范围内,生物柴油的快速燃烧期基本相当或略有延长,但后燃期大幅度缩短,因此生物柴油燃烧持续期明显缩短,放热更加集中;1 400 r/min、 $p_{me} \leq 0.48$ MPa 时,生物柴油有效热效率降低,1 400 r/min、 $p_{me} > 0.48$ MPa 时,生物柴油有效热效率提高,且提高幅度随负荷的增加而增加。与柴油相比,1 400 r/min、 $p_{me} = 0.16$ MPa 时,生物柴油超细颗粒物排放数浓度略高,1 400 r/min、 $p_{me} \geq 0.32$ MPa 时,生物柴油超细颗粒物排放数浓度明显降低;在全负荷范围内,生物柴油超细颗粒物排放数浓度及体积浓度中值直径、平均直径、几何平均直径均明显降低。应用生物柴油对降低柴油机超细颗粒物排放具有重要意义。

关键词:汽车工程;生物柴油;高压共轨;燃烧特性;超细颗粒物

中图分类号:U464.173

文献标志码:A

Combustion and ultrafine particle emissions of biodiesel engine

FANG Wen^{1,2}, SU Xin¹, MA Wen-xiao¹, XU Meng-long¹, LI Hai-ge^{1,3}, HUA Hai-ning¹

(1. School of Automobile, Chang'an university, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Department of Automotive Engineering, Sichuan Vocational and Technical College of Communications, Chengdu 611130, Sichuan, China;
3. Xi'an Automotive Technology Vocational College, Xi'an 710060, Shaanxi, China)

Abstract: To study the ultrafine particle emission of diesel engine fueled with biodiesel, experiments were performed on a high pressure common rail diesel engine. A dynamic combustion test system including in-cylinder pressure sensor, charge amplifier, and combustion analyzer was used to measure the in-cylinder pressure. Subsequently, the instantaneous heat release ratio was calculated. SMPS-3936 particle size spectrometer was used to measure the concentrations of ultrafine particles and diameter distribution. The results show that the peak combustion pressure of biodiesel is almost identical to that of diesel, and the peak heat release rate increases owing to the double injection when the mean effective pressure $p_{me} \leq 0.48$ MPa at 1 400 r/min. The peak combustion pressure and peak heat release rate of biodiesel decrease when $p_{me} > 0.48$ MPa at

1 400 r/min. In the whole load range, the rapid combustion phase of biodiesel is nearly identical or only slightly more prolonged. However, the later combustion phase decreases in a pronounced manner, and consequently, the combustion duration of biodiesel decreases markedly, resulting in a concentrated heat release. The effective thermal efficiency of biodiesel decreases when $p_{me} < 0.48$ MPa, although it increases when $p_{me} > 0.48$ MPa, and the increment improves with the engine load. The number concentration of biodiesel ultrafine particles is slightly higher than that of diesel when $p_{me} = 0.16$ MPa at 1 400 r/min, and it is distinctly lower when $p_{me} \geq 0.32$ MPa. In the complete load range, the median diameter, mean diameter, and geometric mean diameter of biodiesel decrease significantly. Biodiesel application greatly helps in reducing the ultrafine particle emission of diesel engines. 5 tabs, 6 figs, 21 refs.

Key words: automotive engineering; biodiesel; common rail; combustion characteristics; ultrafine particle

0 引言

2016 年末,中国民用汽车保有量 19 440 万辆(包括三轮汽车和低速货车 881 万辆),比 2015 年末增长 12.8%^[1]。随着汽车保有量的急剧增长,能源紧缺与环境污染问题日益严重^[2-5]。近年来,汽车尾气对雾霾产生的影响日益显著。雾霾以粒径 0.003~100 μm 的多种成分混合物的形式存在,其粒子径因发生源而不同,在大气中的动态也因粒子径而不同,且在区域性和时间性上变化很大^[6]。气溶胶是由固体颗粒、液体颗粒或液体及固体颗粒悬浮于气体介质中形成的均匀分散体系。气溶胶中存在着大量的可吸入颗粒物,即空气动力学直径不超过 10 μm 的微粒。小于 5 μm 的微粒可直接进入肺部使人致病,0.01~0.1 μm 粒径的微粒有 50% 会沉积在肺中造成肺部硬化;通常将粒径小于 0.1 μm 的微粒称为超细颗粒物或纳米颗粒物^[7]。浙江大学呼吸疾病研究所、呼吸疾病国家重点实验室首次阐明了超细颗粒物诱导气道炎症和黏液高分泌的一种新机理,超细颗粒含有大量无机碳、重金属等,很难被细胞自噬降解,增加了哮喘、慢阻肺和肺癌等呼吸道疾病的发病率和病死率^[8]。因此,雾霾中的气溶胶,尤其是超细颗粒物对人体健康危害极大。

2017 年,国务院政府工作报告中鼓励使用清洁能源汽车。除新能源汽车(电动汽车),天然气、醇类、醚类及生物质等清洁能源都具有特定的应用领域和一定的发展空间。生物柴油是一种清洁含氧代用燃料,其理化性质与柴油接近,一般以一定比例与柴油掺混使用^[9-10]。大多数生物柴油主要组分为棕榈酸甲酯($\text{C}_{17}\text{H}_{34}\text{O}_2$, C16:0)、硬脂酸甲酯($\text{C}_{19}\text{H}_{38}\text{O}_2$, C18:0)、油酸甲酯($\text{C}_{19}\text{H}_{36}\text{O}_2$, C18:1)、亚油酸甲

酯($\text{C}_{19}\text{H}_{34}\text{O}_2$, C18:2)和亚麻酸甲酯($\text{C}_{19}\text{H}_{32}\text{O}_2$, C18:3)五种^[11-12],其十六烷值分别为 86、101、59、38 和 23^[12]。不同原料生物柴油 5 种物质含量及相对比例决定了其十六烷值大小,进而对其着火特性、绝热火焰温度、 NO_x 和颗粒物排放产生重要影响;生物柴油含氧,可以通过 OH 来氧化碳烟或者直接氧化芳烃(PAHs)前驱物来降低碳烟排放^[13-16]。餐饮废油生物柴油具有社会、经济、环境效益高的特点^[17-21],其回收利用对替代矿物柴油、发展绿色循环经济具有重要意义。试验数据和模拟结果表明,饱和度与氧含量是影响生物柴油发动机碳烟排放的主要因素^[16]。

目前,关于生物柴油超细颗粒物排放数浓度的相关研究较少。鉴于餐饮废油作为生物柴油原料的优越性和超细颗粒物的极大危害性,本文以餐饮废油生物柴油为研究对象,基于燃烧过程分析,对比研究高压共轨柴油机燃用生物柴油与超细颗粒物排放特性。本文研究对车用生物质能利用、汽车污染物排放控制、大气环境污染控制具有重要意义。

1 试验条件

1.1 发动机及测试仪器

试验在直列式、四冲程、电控、高压共轨 YC6G270-30 型柴油机上进行。其与测试仪器连接如图 1 所示。发动机主要参数如表 1 所示。试验使用洛阳凯迈生产的 CW260 电涡流测功机,可以自动测取发动机输出的有效功率、有效扭矩、燃油消耗率等多项有效性能指标,测试最大功率为 260 kW、最大扭矩为 1 395 N·m、最高允许转速为 7 500 r/min。原机 1 400 r/min 下控制策略为:40% 负荷率以下为 2 次喷射(预喷+主喷),高于 40% 负荷率为 1 次喷射。

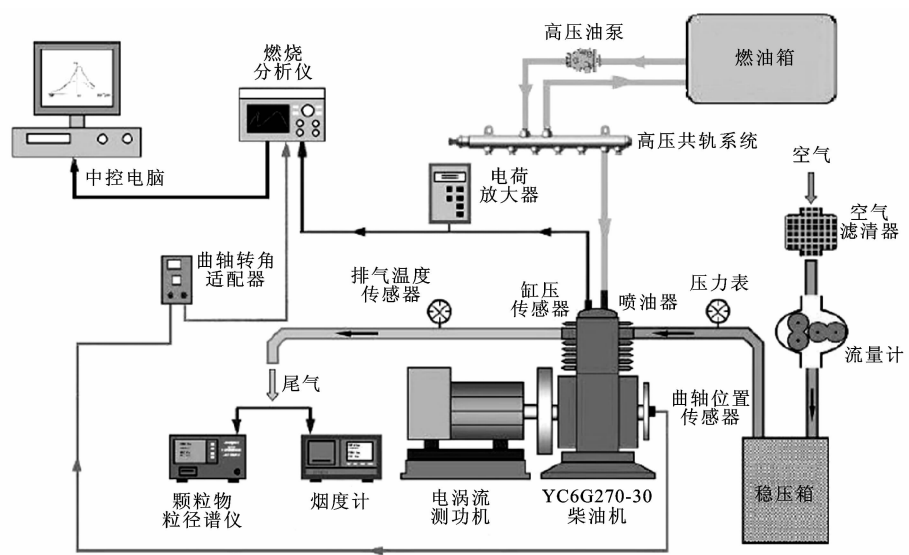


图 1 发动机与测试仪器
Fig. 1 Engine and test instruments

表 1 试验发动机参数
Tab. 1 Parameters of test engine

参数	参数值
燃料喷射系统	高压共轨
缸径、行程/mm	112、132
发动机排量/L	7.8
压缩比	17.5
额定功率/(kW@r·min ⁻¹)	199@2200
额定扭矩/(N·m@r·min ⁻¹)	1080@1400~1600

气溶胶粒径分布测量采用美国 TSI 公司生产的 SMPS-3936 气溶胶粒径谱仪。SMPS-3936 由 3 个部分组成:静电分级器、凝结核粒子计数器和微机软件系统。其中,静电分级器由撞击器、中和器和微分迁移率分级器组成。静电分级器对气溶胶进行粒径分级,凝结核粒子计数器测量气溶胶数量浓度,微机软件系统对整个测量过程进行控制和操作。SMPS-3936 气溶胶粒径谱仪的测量原理是采用电迁移技术测量粒径大小和分布;其主要部件是由 2 个同心圆筒组成的微分迁移率分级器,微分迁移率分级器是利用带电微粒在电场中因物理作用发生偏转,来筛分各粒径的微粒。SMPS-3936 系统具有快捷、分辨率高、粒径范围宽等特点,其主要参数如表 2 所示。

1.2 试验燃料

试验用燃料为 0# 商品柴油(D100)和餐饮废油制生物柴油(BD100)。BD100 生产厂家为陕西汉中春光油脂厂,其主要理化特性如表 3 所示。

1.3 试验工况

试验在最大扭矩点 1 400~1 600 r/min 范围内

选择 1 400 r/min 下,10.8%、21.8%、32.5%、55.0%、66.0%、76.8%、87.1%、100% 负荷率进行颗粒物排放特性测试,并计算其特征参数。即 0.16、0.32、0.48 MPa 平均有效压力 p_{me} 代表小负荷;0.81、0.97、1.13 MPa 代表中等负荷;1.30 MPa 与 1.47 MPa 分别代表大负荷与满负荷。

表 2 SMPS-3936 气溶胶粒径谱仪主要参数
Tab. 2 Main parameters of SMPS-3936 aerosol diameter spectrometer

参数	测量范围
粒径范围/ μm	0.03~1.00
最大颗粒物浓度/(个· cm^{-3})	10^8
最高分辨率/通道	162
测量周期/s	60~600
操作温度/ $^{\circ}\text{C}$	10~35
操作压强/kPa	100 ± 20

表 3 试验燃料主要理化指标
Tab. 3 Main properties of test fuels

理化指标	柴油	生物柴油
密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0.838	0.866
20 $^{\circ}\text{C}$ 运动黏度($\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	3.36	6.01
质量低热值/($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	44.15	39.39
十六烷值	49	53
冷滤点/ $^{\circ}\text{C}$	-6	-3
凝点/ $^{\circ}\text{C}$	-10	-6
初馏点/ $^{\circ}\text{C}$	198	310

2 结果与分析

2.1 不同工况生物柴油燃烧特性

图 2 分别为柴油机燃用 BD100 和 D100 在 1 400 r/min 下小负荷、中等负荷、中高负荷、大负荷

的缸内压力曲线。由图 2 可以看出:在小负荷时,燃用 BD100 的峰值燃烧压力与 D100 近乎一致,没有明显变化,但是在中等、大负荷时,BD100 的峰值燃烧压力基本略低于 D100。

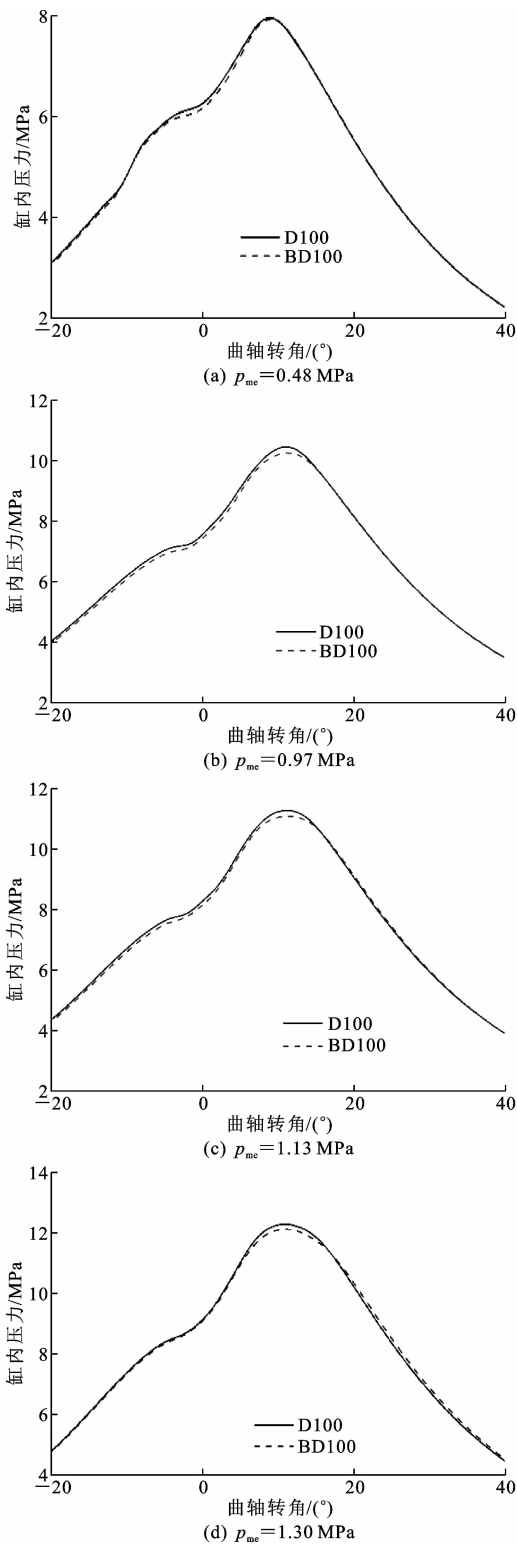


图 2 生物柴油发动机缸内压力

Fig. 2 Incylinder pressures of biodiesel engine

图 3 分别为柴油机燃用 BD100 和 D100 在

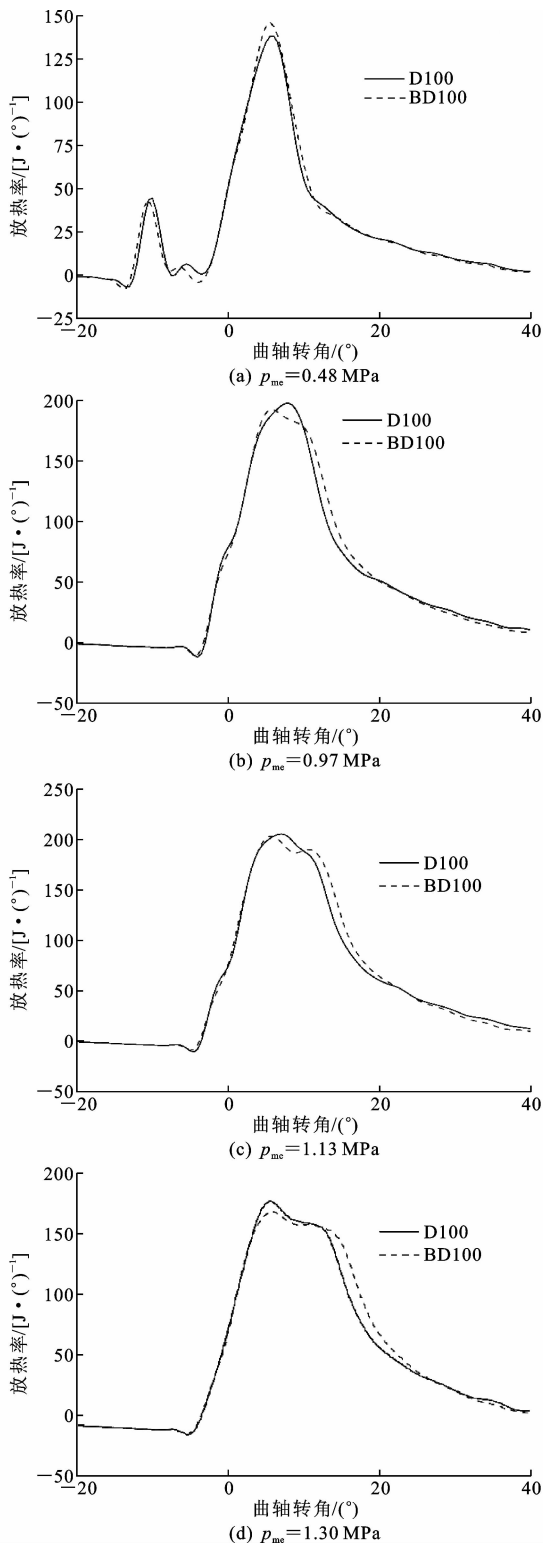


图 3 生物柴油发动机瞬时燃烧放热率

Fig. 3 Instantaneous heat release rates of biodiesel engine

1 400 r/min 下小负荷、中等负荷、中高负荷、大负荷的瞬时燃烧放热率曲线。由图 3 可以看出:①在小负荷时,燃油喷射为 2 次喷射,对应预喷阶段和主喷阶段,而在中等、大负荷下为单次喷射;②小负荷时生物柴油十六烷值高,导致预喷阶段放热提前,中

等、大负荷下, BD100 和 D100 的燃烧始点几乎一致, 缸内热力状态提高导致十六烷值对燃烧始点的影响弱化; ③小负荷时, BD100 的最大放热率比 D100 略高, 是因为 BD100 氧含量高, 预喷阶段产生更多的活性自由基, 加快燃烧速度使峰值放热率比 D100 提高; ④中等、大负荷时, BD100 的峰值瞬时放热率比 D100 略低, 是因为 BD100 黏度高、蒸发差、可燃混合气雾化质量差, 引起初期燃烧速度降低, 最大瞬时燃烧放热率降低; ⑤中等、大负荷时, 在上止点后 20°曲轴转角左右 BD100 放热率低于 D100, 表明 BD100 放热较 D100 集中, 初期 BD100 燃烧速度低, 但产生大量的活性自由基, 加快了后期燃烧速度。

本文将累计放热量达到总放热量的 10%、50%、90% 所对应的曲轴转角分别定义为 CA10、CA50、CA90。其中: CA50~CA10 对应的曲轴转角为快速燃烧期; CA90~CA50 对应的曲轴转角为后燃期; CA90~CA10 对应的曲轴转角为燃烧持续期。原机 1 400 r/min 下控制策略为: 40% 负荷率以下为 2 次喷射(预喷+主喷), 高于 40% 负荷率为 1 次喷射。由表 4 可知: 小负荷时, BD100 比 D100 快速燃烧期稍短, 对应的曲轴转角小 0.1°, 这主要因为小负荷和部分负荷下, BD100 含氧高, 燃烧过程中产生的活性自由基比柴油多, 加快燃烧速度, 使快速燃烧期略有缩短; 而初期燃烧产生大量的活性自由基, 又加快了后燃期燃烧, 其后燃期也相应缩短。中等、大负荷下, 柴油机为单次喷射, BD100 由于黏度大, 蒸发差, 可燃混合气体雾化不良, 导致初期燃烧速度变慢, 快速燃烧期延长; 而初期燃烧产生的大量活性自由基影响后燃期燃烧, BD100 后燃期相应缩短, BD100 燃烧持续期较 D100 明显缩短。

2.2 生物柴油有效热效率

图 4 为生物柴油发动机 1 400 r/min 负荷特性下的有效燃油消耗率和有效热效率。由图 4 可以看出: 在小负荷时(p_{me} 为 0.16、0.32 MPa), 缸内温度和压力低, 热力状态差。生物柴油黏度高、表面张力大、蒸发差导致其雾化质量和混合气均匀性较差, 因此其有效热效率低于柴油。随着负荷的增加, 缸内热力状态明显提高, 生物柴油蒸发差、黏度高的负面影响相对弱化。小负荷时燃料滞燃期长且喷油持续期短, 预混燃烧比例高, 扩散燃烧比例小。随着负荷的增加, 扩散燃烧比例增加, 生物柴油含氧加快了扩散燃烧速度, 缩短燃烧持续期, 放热更加集中, 其有效热效率高于柴油($p_{me} \geq 0.48$ MPa)。

表 4 转速 1 400 r/min 燃料燃烧阶段
Tab. 4 Combustion phases of test fuels at 1 400 r/min

p_{me}	燃油	CA50~ CA10/(°)	CA90~ CA50/(°)	CA90~ CA10/(°)
0.16	D100	4.6	11.7	16.3
	BD100	4.5	11.3	15.7
0.32	D100	4.9	13.9	18.9
	BD100	4.8	12.5	17.3
0.48	D100	5.4	15.3	20.6
	BD100	5.3	14.4	19.6
0.81	D100	6.8	17.7	24.5
	BD100	6.8	15.1	21.9
0.97	D100	7.3	17.4	24.6
	BD100	7.4	15.4	22.7
1.13	D100	7.8	17.3	25.0
	BD100	8.0	14.7	22.7
1.30	D100	8.6	16.7	25.2
	BD100	9.0	14.6	23.5

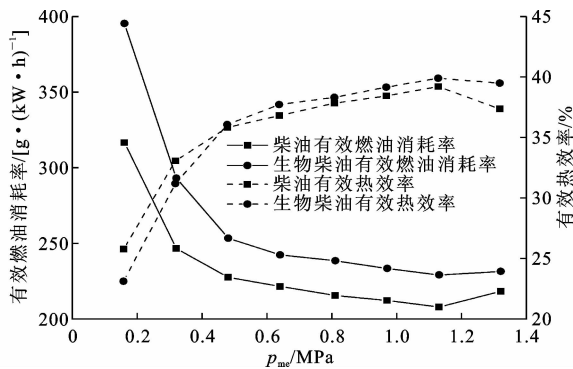


图 4 生物柴油发动机有效热效率
Fig. 4 Brake thermal efficiencies of biodiesel engine

2.3 不同工况超细颗粒物排放特性

2.3.1 超细颗粒物分布

图 5 为不同工况生物柴油与柴油 Sub-220 nm 超细颗粒物排放数浓度分布。本文将颗粒物划分为成核模态粒子, 即颗粒物粒子直径 $D < 50$ nm; 埃根模态粒子, 即 $50 \text{ nm} \leq D < 100$ nm; 积聚模态粒子, 即 $100 \text{ nm} \leq D < 220$ nm。本文的研究对象为 $D < 220$ nm 的颗粒物, 简称 Sub-220 nm 颗粒物。发动机转速及负荷为 1 400 r/min、0.16 MPa 时, 负荷率为 12.5%, 过量空气系数为 5.01, 柴油与生物柴油 10~220 nm 粒径范围颗粒物(总测试颗粒物 TTP)排放数浓度呈双峰分布, 峰值超细颗粒物排放数浓度粒径分别为 76.4、17.5 nm。1 400 r/min、0.48 MPa 时, 过量空气系数为 2.63, 柴油颗粒物排放数浓度呈单峰分布, 生物柴油颗粒物排放数浓度呈双峰分布, 峰值粒径分别为 79.1、23.3 nm。

1 400 r/min, 发动机负荷大于 0.48 MPa 时, 2 种燃料颗粒物排放数浓度均呈单峰分布, 且生物柴油峰值粒径远小于柴油。

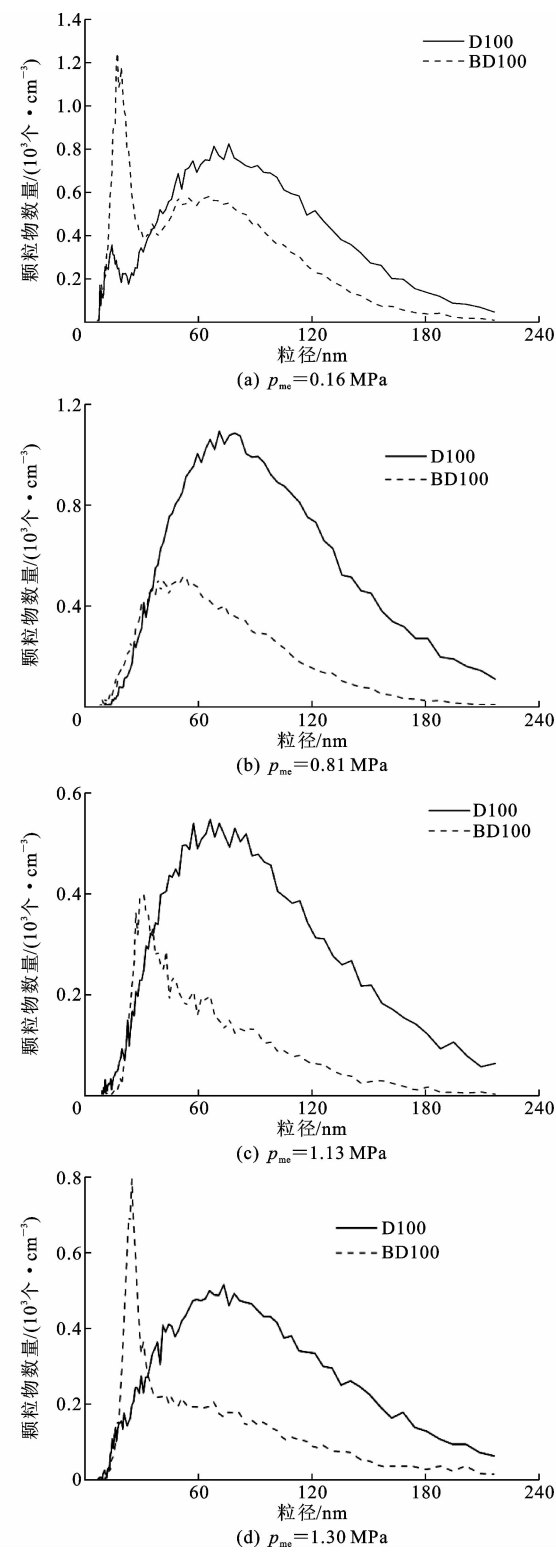


图5 不同 P_{me} 下的 Sub-220 nm 超细颗粒物排放数浓度分布
Fig. 5 Distributions of sub-220 nm ultrafine particle emissions under different P_{me}

2.3.2 不同工况超细颗粒物特征直径

表 5 为生物柴油与柴油在不同工况下超细颗粒物排放数浓度及体积浓度特征直径。由表 5 可以看出: 1 400 r/min 下, 在小、中等、高负荷时, BD100 的数浓度及体积浓度中值直径、平均直径、几何平均直径均明显小于 D100。这与生物柴油燃烧持续期缩短, 放热集中, 热效率提高有关。

表 5 生物柴油与柴油特征直径
Tab. 5 Characteristics diameters of biodiesel and diesel nm

指标	燃料	超细颗粒物数浓度参数			超细颗粒物体积浓度参数		
		中值直径	平均直径	几何平均直径	中值直径	平均直径	几何平均直径
0.16 MPa (小负荷)	D100	58.3	65.1	50.8	129.3	130.5	122.5
	BD100	27.6	42.9	32.7	110.9	113.9	105.2
0.81 MPa (中等负荷)	D100	70.9	78.9	69.2	135.7	136.4	128.3
	BD100	48.2	55.7	47.8	107.2	110.7	102.1
1.28 MPa (大负荷)	D100	62.2	71.2	59.0	139.9	138.6	130.0
	BD100	30.8	45.9	37.4	128.0	129.0	117.4

2.3.3 超细颗粒物排放数浓度

图 6 为 1 400、2 000 r/min 下, 发动机燃用 BD100 和 D100 的 Sub-220nm 超细颗粒物排放数浓度负荷特性。由图 6 可知: 转速 1 400 r/min 下, 随着负荷的增加, Sub-220 nm 超细颗粒物排放数浓度先增加后减小, 其中 BD100 和 D100 在 $p_{me}=0.48$ MPa 时, 达到最大值, 分别为 5.43×10^4 、 6.18×10^4 个/cm³。BD100 的 Sub-220 nm 超细颗粒物排放数浓度在小负荷时较 D100 高, 在中等、高负荷明显较 D100 低。由燃烧特性研究可以得出, BD100 燃烧持续期明显较 D100 低, 放热更加集中, 有利于提高热效率, 因此, Sub-220 nm 超细颗粒物排放数浓度明显降低。转速 2 000 r/min 下, BD100 超细颗粒物排放数浓度在整个负荷范围内较 D100 低, 这是因为转速升高, 缸内气流运动加强, 改善了混合气的形成质量, BD100 含氧的优势得以充分发挥, 超细颗粒物排放数浓度明显降低。

3 结 语

(1) 小负荷预喷时生物柴油峰值燃烧压力接近柴油, 中等、高负荷时, 峰值燃烧压力低于柴油; p_{me} 低于 0.48 MPa 时, 喷射策略为预喷+主喷, 生物柴油的快速燃烧期与柴油基本相当, 峰值放热率增加, 后燃期明显缩短; p_{me} 高于 0.48 MPa 时, 喷射策略为 1 次喷射, 生物柴油的快速燃烧期较柴油延长, 峰值放热率降低, 但是扩散燃烧强度增加, 生物柴油后燃期大幅度缩短。生物柴油燃烧持续期在整个负荷

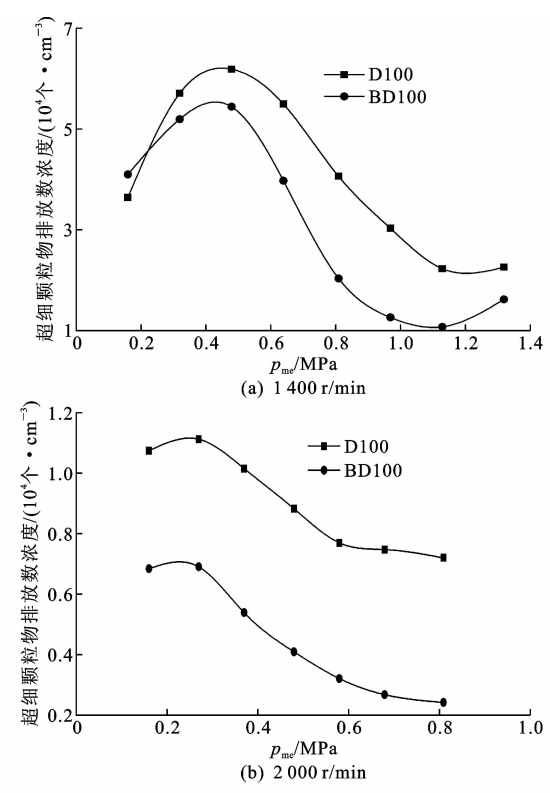


图 6 不同转速下的 Sub-220 nm 超细颗粒物排放数浓度
Fig. 6 Number concentrations of sub-220 nm ultrafine particles under different engine speeds

范围内较柴油缩短,表明生物柴油放热更加集中,有利于中等、高负荷下发动机热效率的提高。

(2)生物柴油超细颗粒物排放数浓度及体积浓度中值直径、平均直径、几何平均直径均明显小于柴油。生物柴油超细颗粒物排放数浓度在小负荷时较柴油高,在中等、高负荷时较柴油明显降低;转速升高,生物柴油超细颗粒物排放数浓度在整个负荷范围内均明显低于柴油。

(3)柴油机燃用生物柴油可以显著降低超细颗粒物排放数浓度,有利于控制其排放对雾霾的高贡献率。

参考文献:

References:

[1] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国 2016 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2017-02-28)[2018-03-02]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201702/t20170228_1467424.html.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. People's Republic of China 2016 statistical

bulletin of national economic and social development. (2017-02-28)[2018-03-02]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201702/t20170228_1467424.html.

[2] 孙 林. 汽车相关能源、环境和交通政策研究-混合 CGE 模型的构建与应用[M]. 上海:上海社会科学院出版社,2011.
SUN Lin. Automobile-related energy, environment and transportation policy research: Construction and application of a hybrid CGE model[M]. Shanghai: Shanghai Academy of Social Sciences Press,2011.

[3] 王海良,秦振华. 乘用车燃料消耗量标准推进中国节能与新能源汽车的发展[J]. 交通节能与环保,2017, 13(1):1-6.
WANG Hai-liang, QIN Zhen-hua. Fuel consumption regulation for passenger cars promotes the development of energy saving and new energy vehicles in China [J]. Energy Conservation & Environmental Protection in Transportation,2017,13(1):1-6.

[4] HE Miao, ZHOU Jin-sheng, LIU Ling. A study of supporting legal policies for improving China's new energy automobile industry based on environmental benefits equilibrium-enlightenment from the environmental subsidies of Germany legal system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42 (29): 18699-18708.

[5] CHEN Si-bo. Selling the environment:Green marketing discourse in China's automobile advertising[J]. Discourse,Context & Media,2016,12:11-19.

[6] 布 和. 论大气雾霾的产生机理及防治对策[J]. 环境工程,2016,34(增 1):572-576.
BU He. Discussion on formation mechanism and control methods of haze[J]. Environmental Engineering, 2016,34(S1):572-576.

[7] 张元勋,杨传俊,陆文忠,等. 室内气溶胶纳米颗粒物的粒径分布特征[J]. 中国科学院研究生院学报, 2007,24(5):705-709.
ZHANG Yuan-xun, YANG Chuan-jun, LU Wen-zhong, et al. Charaterizing of the size distribution of indoor airborne nanoparticle[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2007, 24 (5): 705-709.

[8] CHEN Zhi-hua, WU Yin-fang. Autophagy is essential for ultrafine particle-induced inflammation and mucus hyper production in airway epithelium[J]. Autoph-

- agy, 2016, 12(2): 297-311.
- [9] ALDAWODY M F, BHATTI S K. Experimental and computational investigations for combustion, performance and emission parameters of a diesel engine fueled with soybean biodiesel-diesel blends[J]. *Energy Procedia*, 2014, 52: 421-430.
- [10] LESNIK L, BILUS I. The effect of rapeseed oil biodiesel fuel on combustion, performance, and the emission formation process within a heavy-duty DI diesel engine[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 109: 140-152.
- [11] HWEBINET O, PITZ W J, WESTBROOK C K. Detailed chemical kinetic mechanism for the oxidation of biodiesel fuels blend surrogate[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(5): 893-908.
- [12] WESTBROOK C K, NAIK C V, HERBINET O, et al. Detailed chemical kinetic reaction mechanisms for soy and rapeseed biodiesel fuels [J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158(4): 742-755.
- [13] PRABU S S, ASOKAN M A, ROY R, et al. Performance, combustion and emission characteristics of diesel engine fuelled with waste cooking oil bio-diesel/diesel blends with additives[J]. *Energy*, 2017, 122: 638-648.
- [14] HAJJARI M, TABATABAEI M, AGHBASHLO M, et al. A review on the prospects of sustainable biodiesel production: A global scenario with an emphasis on waste-oil biodiesel utilization[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 72: 445-464.
- [15] MOECKE E H S, FELLER R, SANTOS H A D, et al. Biodiesel production from waste cooking oil for use as fuel in artisanal fishing boats: Integrating environmental, economic and social aspects[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 135: 679-688.
- [16] WANG Zhi, LI Li, WANG Jian-xin, et al. Effect of biodiesel saturation on soot formation in diesel engines[J]. *Fuel*, 2016, 175: 240-248.
- [17] HE Bang-quan. Advances in emission characteristics of diesel engines using different biodiesel fuels[J]. *Renew Sustainable Energy Reviews*, 2016, 60: 570-86.
- [18] MAHMUDUL H M, HAGOS F Y, MAMAT R, et al. Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines—A review[J]. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 2017, 72: 497-509.
- [19] PATEL R L, SANKHAVARA C D. Biodiesel production from Karanja oil and its use in diesel engine: A review[J]. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 2017, 71: 464-74.
- [20] E J Q, PHAM M, ZHAO D, et al. Effect of different technologies on combustion and emissions of the diesel engine fueled with biodiesel: A review[J]. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80: 620-47.
- [21] WEI L, CHEUNG C S, NING Z. Influence of waste cooking oil biodiesel on combustion, unregulated gaseous emissions and particulate emissions of a direct-injection diesel engine[J]. *Energy*, 2017, 127: 175-85.