

国 V 柴油机燃用柴油/生物柴油排放性能试验*

楼狄明 孔德立 强 蓓 胡志远 谭丕强 周 毅

(同济大学汽车学院, 上海 201804)

摘要: 在满足国 V 排放标准的柴油机上进行燃用国 V 柴油混合不同比例餐饮废油制生物柴油的试验, 探究柴油机的常规排放变化与生物柴油理化特性的相关性。试验结果表明, 掺混生物柴油之后, 生物柴油的高含氧量使柴油机 NO_x 排放量有所升高, 但整体升幅不大, 不同混合比例生物柴油的 NO_x 排放量均与高温燃域高度相关, 并可拟合为 R^2 大于 0.97 的对数函数曲线; THC 和 CO 排放量下降, 与生物柴油高含氧量相关, 对于不同混合比例的生物柴油, THC 和 CO 排放都与燃烧持续期高度相关, 均可以与之拟合为 R^2 大于 0.96 的幂函数曲线; 总颗粒数和核态颗粒数升高, 聚集态颗粒数下降, 核态颗粒数上升, 与生物柴油粘度、硫含量高相关, 聚集态颗粒数下降与生物柴油的高含氧量相关。

关键词: 国 V 柴油机 生物柴油 排放

中图分类号: TK464 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)09-0025-06

引言

生物柴油与石化柴油各种理化性质相似, 可以在不改变发动机结构的情况下直接作为燃料使用。生物柴油可来源于大豆、菜籽等农作物, 也可由餐饮废油制得。国内外学者对柴油机燃用生物柴油的性能和排放特性进行了大量试验研究^[1-10], 研究表明: 燃用生物柴油后, 柴油机除 NO_x 排放水平有所升高外, THC 、 CO 等气体的排放水平均有所下降。

目前国内外对生物柴油性能和排放的研究大多是在低于国 V 排放水平的发动机上进行的, 同时对常规排放与生物柴油的理化性质的相关性研究较少。因此在一定的研究基础上^[11-14], 本文在某台国 V 共轨柴油机上进行燃烧国 V 柴油混合不同比例餐饮废油制生物柴油的性能和排放试验, 分析混合燃料理化性质对柴油机的常规气态物排放的影响, 探究生物柴油在国 V 柴油机上的使用性能。

1 试验系统和方案

1.1 试验柴油机及测试设备

试验发动机是一台满足国 V 排放标准的直列 6 缸、电控高压共轨、废气涡轮增压中冷柴油机。试验中发动机排气测点在 SCR 之前, 表 1 所示为柴油机的主要技术参数。

表 1 试验样机主要技术参数

Tab.1 Specifications of diesel

参数	数值
缸径/mm	114
行程/mm	144
压缩比	17.3
排量/L	8.82
怠速转速/(r·min ⁻¹)	700
标定功率(转速)/kW	184/(2 200 r/min)
最大转矩(转速)/(N·m)	1 000/(1 400 r/min)

试验中由 AVL PUMA 发动机全自动电涡流测功机控制发动机的转速-转矩运行范围。使用的主要测试设备包括 3090 EEPS 粒径仪、AVL735 动态油耗仪和 AVL-PEUS 多组分排放仪, 该仪器采用 FTIR 方法测量多种气体成分^[15]。图 1 所示为试验测试系统原理图。

1.2 燃料的理化性质

使用不同混合比的国 V 柴油和餐饮废油制生物柴油进行发动机台架试验。将国 V 柴油与生物柴油混合后的油样分别命名为 D100、BD5、BD10、BD20、BD50 和 BD100, 其中生物柴油体积比例分别为 0%、5%、10%、20%、50%、100%。

表 2 所示为国 V 柴油和生物柴油油样的主要技术指标。从表中数据可以清楚看出, 生物柴油的理化性质与国 V 柴油相似, 不同点在于, 与国 V 柴油相比, 生物柴油的密度升高 7%, 粘度为 6.0 (高于柴油

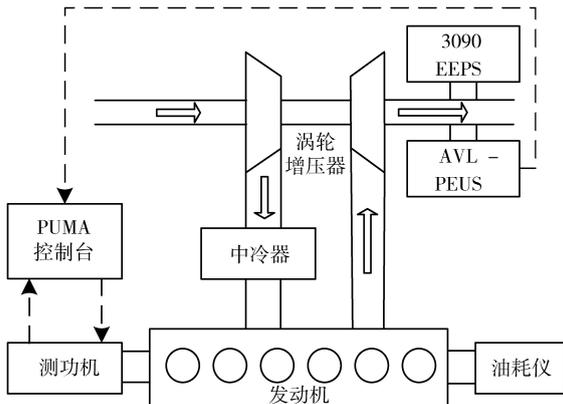


图1 柴油机试验系统原理图

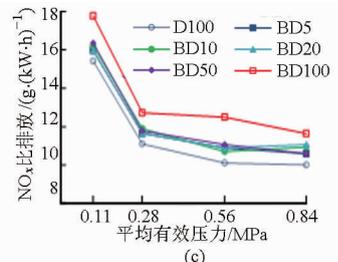
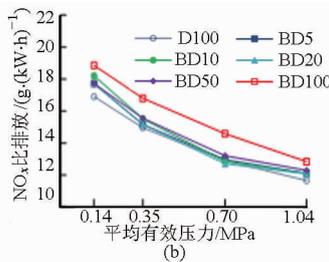
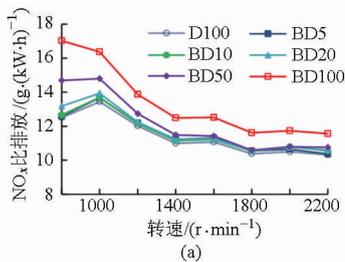
Fig.1 Test system of diesel

33%,使得生物柴油雾化和挥发性能较差),十六烷值升高2%,低热值降低9%,硫含量明显高于国V柴油。国V柴油与之前国标的柴油相比,最明显的改善是硫含量非常低,同时国V柴油还含有0.4%的氧。

表2 油样的理化特性参数

Tab.2 Fuel properties

参数	D100	BD5	BD10	BD20	BD50	BD100
密度(20℃)/(kg·m ⁻³)	821.9	824.7	827.4	832.7	849.6	877.3
粘度(20℃)/(mm ² ·s ⁻¹)	4.5	4.6	4.7	4.9	5.3	6.0
闪点/℃	92.0	93.0	94.0	96.0	>100	>100
十六烷值	52.3	52.4	52.4	52.5	52.9	53.4
低热值/(MJ·kg ⁻¹)	43.96	43.75	43.68	43.58	41.89	39.82
C质量分数/%	86.1	85.6	85.1	84.1	81.1	76.0
O质量比/%	0.4	0.9	1.5	2.6	6.0	11.6
S质量比/(mg·kg ⁻¹)	<1	7.6	9.8	14.0	26.8	48.0

图2 NO_x的排放特性曲线Fig.2 Emission characteristics of NO_x

(a) 外特性 (b) 1400 r/min (c) 2200 r/min

成的主要因素是缸内的含氧量,又因为低速时进入气缸内的空气较少,因此生物柴油的高含氧量使得低速时(800~1200 r/min)NO_x升幅较大;高速时进入气缸内的空气量增加,空燃比升高使得生物柴油的含氧量影响降低,NO_x升幅不大。低负荷时,一方面由于生物柴油粘度高于纯柴油,会促使生物柴油的雾化和缸内混合气混合质量较差,NO_x比排放应低于D100,但同时生物柴油的高含氧量又会促使NO_x排放的升高,从图2b、2c可以看出综合作用之后低负荷时NO_x比排放升高,说明含氧量影响较大;高负荷时,缸内混合气的浓度过高,局部缺氧严

1.3 试验方案

试验中对国V柴油和5种生物柴油混合燃料先后进行外特性和负荷特性试验。外特性下,转速范围从800 r/min到2200 r/min,以200 r/min为固定的间隔;负荷特性下,在最大扭矩转速1400 r/min和额定功率转速2200 r/min下,分别对负荷比10%、25%、50%、75%进行测试^[12]。采集发动机性能和排放数据,分析掺烧生物柴油对国V柴油机常规排放的影响。

2 试验结果与分析

2.1 生物柴油对NO_x排放的影响

图2所示为不同比例混合的柴油-生物柴油NO_x比排放随发动机转速 n 和平均有效压力 p_{me} 的变化曲线。NO_x排放量随转速升高先升后降,随平均有效压力升高而下降。

NO_x的形成条件是高温、富氧和燃烧持续期。主要来源是参与燃烧的空气中的氮气,而柴油本身含氮量很低,燃油NO_x排放可以忽略,主要考虑的是扩展泽尔多维奇机理的热NO_x。从图2可以看出,当生物柴油的混合比例低于50%时,NO_x比排放与D100相比没有明显的变化。而BD100的NO_x升幅明显,外特性和1400 r/min、2200 r/min负荷特性下BD100相比D100的平均升幅分别为17.5%和11.8%、17.2%。低速时缸内温度较低,影响NO_x形

重,会抑制NO_x的生成,因此含氧量的作用成为主导因素,此时生物柴油的NO_x比排放高于D100。

图3为不同掺混比的生物柴油在1400 r/min各平均有效压力下的NO_x比排放和含氧量散点图,为探究NO_x比排放与含氧量的相关性强弱,标出平均有效压力下的NO_x平均排放值,并画趋势线,与含氧量水平进行对比。不难发现,在1400 r/min时随着生物柴油配比的升高NO_x排放水平有所提高,但与氧含量的升幅相比不明显。说明生物柴油自身的含氧量对NO_x排放升高有一定的影响,但影响幅度不大。

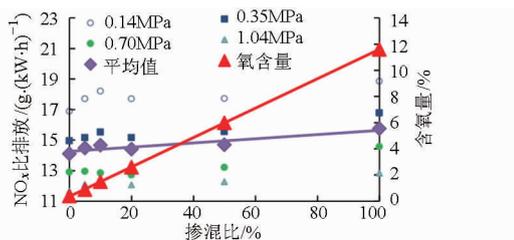


图3 1400 r/min 不同掺混比 NO_x 比排放与含氧量曲线

Fig. 3 NO_x emission and oxygen content of all fuels at 1400 r/min

探究高温和反应时间对 NO_x 排放的影响。定义燃烧室中温度高于 1500 K 的曲轴转角范围为高温燃域。表 3 中列出不同比例生物柴油 1400 r/min 时的高温燃域。随负荷的增大,高温燃域范围增大。平均有效压力相同时,各燃料高温燃域范围差异不大。计算高温燃域与 NO_x 比排放之间的 Pearson 相关系数,D100、BD5、BD10、BD20、BD50 和 BD100 的相关系数分别为 -0.95、-0.91、-0.90、-0.90、-0.93 和 -0.97。当 Pearson 相关系数绝对值大于 0.8 时说明两种变量之间极强相关,故由此可知高温燃域与 NO_x 排放之间极强相关。

表3 1400 r/min 高温燃域

Tab.3 High temperature combustion range

p _{me} /MPa	at 1400 r/min						°CA
	D100	BD5	BD10	BD20	BD50	BD100	
0.14	13	13	12	12	12	12	
0.35	37	37	37	38	38	37	
0.70	89	88	86	87	85	85	
1.04	167	164	164	163	160	157	

图4为1400 r/min时不同配比生物柴油不同高温燃域下对应的 NO_x 比排放散点图,通过回归分析,可以发现每种配比下二者之间都存在着某种对数函数关系,在图中做出 D100 和 BD100 的回归曲线,其确定性系数 R² 分别为 0.997 9 和 0.989 1, R² 越大 x(高温燃域)对 y(NO_x 比排放)的解释能力就越强。经过计算分析,燃烧持续期和滞燃期与 NO_x 同样有较强的相关性,由于 NO_x 的生成主要集中在后燃期,此处仅给出高温燃域与 NO_x 排放的相关性

分析。

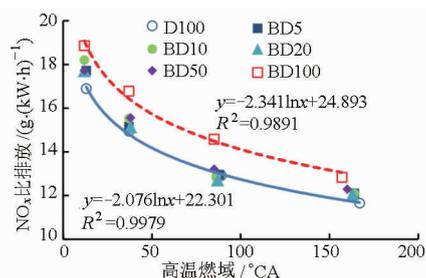


图4 1400 r/min 高温燃域与 NO_x 比排放回归分析

Fig.4 Analysis of regression between high temperature combustion range and NO_x emission at 1400 r/min

2.2 生物柴油对 THC 排放的影响

图5所示为不同比例混合的柴油-生物柴油总碳氢(THC)排放特性曲线。从图5可以看出,不同混合比例的生物柴油 THC 排放在外特性和负荷特性下有相同的变化趋势。在 ESC 工况下测得 THC 比排放均低于 0.07 g/(kW·h),低于国V排放标准 THC 排放限值。

发动机排放物中的 THC 主要包括无氧碳氢和有氧碳氢,其生成的主要原因包括混合气过浓、混合气过稀、燃烧温度过低以及反应时间过短等,另外发动机活塞和缸套间隙内的未燃喷油以及壁面淬熄效应等也是影响 THC 排放的重要因素。从图5可以看出,外特性下随着转速升高 THC 排放升高,生物柴油 THC 排放水平低于 D100,这与生物柴油十六烷值和含氧量高有关。负荷特性下,1400 r/min 低负荷时生物柴油的 THC 比排放高于 D100,虽然生物柴油的高十六烷值和高含氧量有利于降低 THC 的生成,但此时缸内温度和压力较小,生物柴油的高粘度使混合燃料的雾化质量差,未燃 THC 排放升高成了主导因素;1400 r/min 高负荷与 2200 r/min 负荷特性下生物柴油的 THC 排放低于 D100,且随混合比例的升高降幅增大,大负荷下缸内喷油量增加,混合气局部过浓会导致发动机的 THC 排放上升,此时,生物柴油的高十六烷值可以改善着火延迟,提高缸内燃烧稳定性,以及生物柴油的高含氧量有利于缸内未燃 THC 和裂解 THC 排放的下降,而且此时

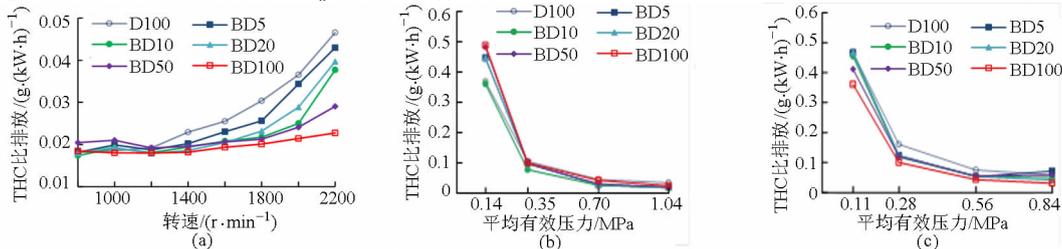


图5 THC 的排放特性曲线

Fig.5 Emission characteristics of THC

(a) 外特性 (b) 1400 r/min (c) 2200 r/min

缸内温度和压力较高,燃油雾化质量受粘度的影响不再明显,各因素综合影响下不同混合比例的生物柴油 THC 排放均低于 D100。此外生物柴油主要由直链脂肪酸甲酯的碳链组成,基本不含芳香烃,有利于燃烧的完全进行,从而显著减少 HC 排放。

表 4 所示为 2 200 r/min 负荷特性下不同混合比例生物柴油的燃烧持续期。随着负荷的增大,燃烧持续期升高。D100、BD5、BD10、BD20、BD50 和 BD100 的燃烧持续期与 THC 排放之间的相关系数 P 值分别为 -0.90 、 -0.87 、 -0.85 、 -0.87 、 -0.90 和 -0.89 ,说明二者之间存在极强的相关性。图 6 为 2 200 r/min 时不同燃烧持续期对应的 THC 比排放散点图。通过回归分析可以发现,燃烧持续期与 THC 比排放之间都存在着某种幂函数关系,在图中分别做出 D100 和 BD100 的回归曲线,其确定性系数 R^2 均约为 0.978。这表明燃烧持续期对 THC 比排放有很强的影响。

表 4 2 200 r/min 各燃烧持续期

Tab. 4 Combustion duration of all fuels at 2 200 r/min

p_{me}/MPa	D100	BD5	BD10	BD20	BD50	BD100
0.11	32	30	30	30	30	31
0.28	37	36	35	35	36	36
0.56	45	44	44	44	41	41
0.84	47	47	48	47	45	45

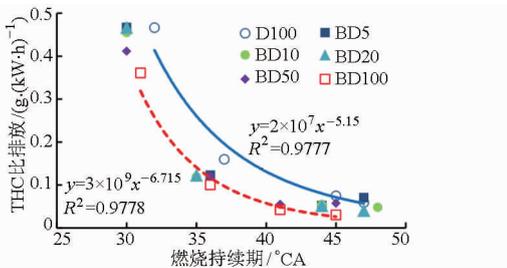


图 6 2 200 r/min 燃烧持续期与 THC 比排放回归分析

Fig. 6 Analysis of regression between combustion duration and THC emission at 2 200 r/min

2.3 生物柴油对 CO 排放的影响

图 7 所示为不同比例混合的柴油-生物柴油 CO

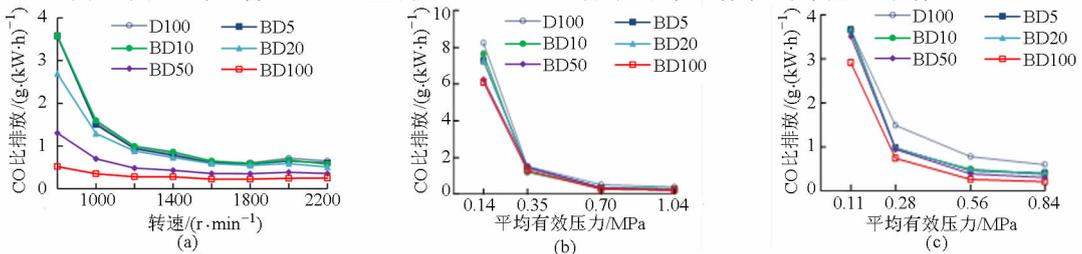


图 7 CO 的排放特性曲线

Fig. 7 Emission characteristics of CO

(a) 外特性 (b) 1 400 r/min (c) 2 200 r/min

的排放特性曲线。不同比例混合的生物柴油与 D100 的 CO 排放量在外特性和负荷特性下均具有一致的趋势,随着转速和负荷的增大 CO 排放量均降低。

CO 是发动机缸内燃烧过程生成的主要中间产物,其主要生成条件除了燃料的不完全燃烧之外,还包括高温下 CO_2 的分解以及还原反应。从图 7 可以看出,不同混合比例的生物柴油 CO 排放水平低于 D100,且随着生物柴油掺混比例的升高降幅增大。外特性下,低速时(800~1 400 r/min)不同混合比例生物柴油相对 D100 的降幅较大,BD20、BD50 和 BD100 相对于 D100 的排放降幅分别为 15%、56% 和 75%。低速时进气量较少,缸内空燃比较低,燃烧质量较差,不完全燃烧产生较多的 CO,而生物柴油的高含氧量一方面有利于改善缸内燃烧质量,另一方面有利于抑制燃烧生成的 CO_2 的再次还原。另外生物柴油十六烷值较高,着火性能的改善进一步降低了 CO 的排放量。高速时不同混合比例生物柴油相对于 D100 的 CO 排放量降幅低于低速时,BD20、BD50 和 BD100 相对于 D100 的排放降幅分别为 13%、44% 和 64%。主要原因是高速时缸内进气量增加,生物柴油的含氧量对燃烧的改善不再明显。负荷特性下 CO 的排放量先减小后趋于稳定不变,同一负荷下的 CO 排放量随着生物柴油配比的升高而减小。高负荷时生物柴油的高含氧量可以抑制 CO_2 的还原反应,降低 CO 排放量,低负荷时十六烷值高改善燃烧质量,降低 CO 排放量。

探究 2 200 r/min 时燃烧持续期与 CO 比排放的相关性。经计算,D100、BD5、BD10、BD20、BD50、BD100 的燃烧持续期与 CO 比排放之间的相关系数 P 值分别为 -0.93 、 -0.89 、 -0.85 、 -0.86 、 -0.91 、 -0.89 ,二者之间的相关性极强。图 8 为 2 200 r/min 时不同混合比例生物柴油不同燃烧持续期对应的 CO 比排放散点图,进一步进行回归分析,可以确定燃烧持续期与 CO 比排放之间都存在着某种幂函数关系,在图中作出 D100 和 BD100 的

回归曲线, 确定性系数 R^2 分别为 0.9804 和 0.9658。这表明燃烧持续期对各种燃料的 CO 比排放有很强的影响。

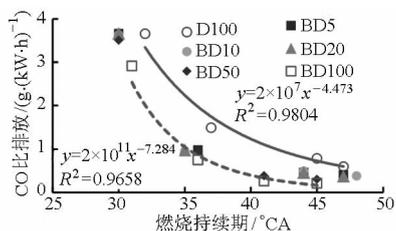


图8 2200 r/min 燃烧持续期与 CO 比排放回归分析

Fig. 8 Analysis of regression between combustion duration and CO emission at 2200 r/min

2.4 生物柴油对颗粒物排放的影响

图9所示为外特性下不同比例混合的柴油-生物柴油颗粒物总数量、核态颗粒数和聚集态颗粒数的变化曲线。随着转速升高, 不同混合比例的生物柴油3种颗粒数浓度都上升。随着生物柴油掺混比例的增加, 总颗粒数和核态颗粒数以及高转速时的

聚集态颗粒数都呈先上升后下降的趋势。总颗粒数在 BD50 处达到峰值, BD100 为谷值。从图 9b、9c 可以看出, 生物柴油的核态颗粒数与 D100 相比变化幅度明显高于聚集态颗粒物浓度的变化幅度。由此可见, 生物柴油影响柴油机颗粒物排放水平主要体现在对核态颗粒物排放的影响。低速时生物柴油粘度高会造成缸内雾化效果不好, 燃烧不充分, 从而增加有机可溶成分 SOF 的排放, 同时生物柴油的高含氧量也有利于降低聚集态颗粒物的排放, 从而降低核态颗粒物被吸附的可能。高速时生物柴油十六烷值高, 缸内燃烧质量好, 减少聚集态颗粒物的排放。另外, 生物柴油的硫含量高于 D100, 因此柴油机燃用生物柴油时产生的 SO_2 高于纯柴油, SO_2 被氧化之后形成的硫酸盐类小颗粒是核态颗粒物的产生因素之一。即核态颗粒数上升与生物柴油粘度高以及硫含量高相关, 聚集态颗粒数下降与生物柴油的高含氧量相关。

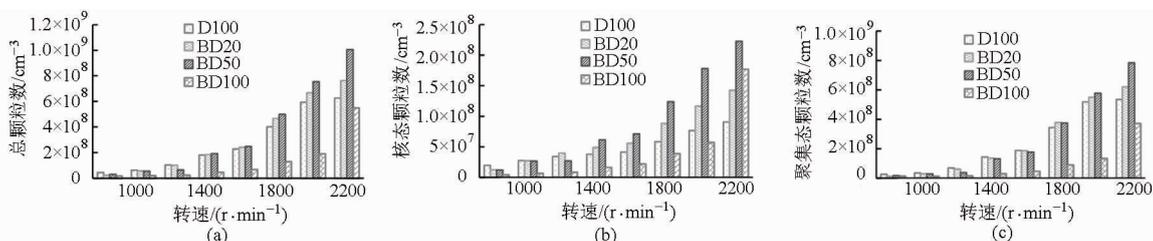


图9 外特性下颗粒数浓度的排放特性

Fig. 9 Particle number concentration at full-load characteristics

(a) 总颗粒数 (b) 核态颗粒数 (c) 聚集态颗粒数

3 结论

(1) 生物柴油的理化性质与国V柴油基本相似, 其密度、粘度、闪点、十六烷值略有升高, 低热值有所下降, 硫含量明显高于国V柴油。

(2) 生物柴油的高含氧量使柴油机 NO_x 比排放有所升高, 但整体升幅不大。6种燃料的 NO_x 比排放均与高温燃域高度相关, 二者之间可以拟合为 R^2 大于 0.97 的对数函数曲线。

(3) 随着生物柴油混合比例升高, THC 和 CO 排放降幅增大, 这与生物柴油含氧量相关。对每种燃料, THC 和 CO 都与燃烧持续期高度相关。与燃烧持续期均可以拟合为 R^2 高于 0.96 的幂函数曲线。

(4) 与纯柴油相比, 柴油机燃用生物柴油后总颗粒数浓度和核态颗粒数浓度有所升高, 而聚集态颗粒数浓度有所下降。核态颗粒数上升与生物柴油粘度高以及硫含量高相关, 聚集态颗粒数下降与生物柴油的高含氧量相关。

参考文献

- 刘双喜, 邵忠英, 高俊华, 等. 柴油机燃用不同比例棉籽生物柴油的试验[J]. 内燃机学报, 2011, 29(2): 119-124. Liu Shuangxi, Shao Zhongying, Gao Junhua, et al. Experiment on diesel engine fueled with different cottonseed bio-diesel blends [J]. Transactions of CSICE, 2011, 29(2): 119-124. (in Chinese)
- 陆小明, 葛蕴珊, 韩秀坤, 等. 柴油机燃用生物柴油及柴油的燃烧分析与排放特性[J]. 燃烧科学与技术, 2007, 13(3): 204-208. Lu Xiaoming, Ge Yunshan, Han Xiukun, et al. Combustion analysis and emission characteristics of a DI diesel engine fueled with biodiesel and diesel fuel [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2007, 13(3): 204-208. (in Chinese)
- George Karavalakis, Stamoulis Stourmas, Evangelos Bakeas. Effects of diesel/biodiesel blends on regulated and unregulated pollutants from a passenger vehicle operated over the European and the Athens driving cycles [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(10): 1745-1752.
- Marina Kousoulidou, Georgios Fontaras, Zissis Samaras, et al. Biodiesel blend effects on common-rail diesel combustion and

- emissions[J]. Fuel, 2010, 89(11): 3442–3449.
- 5 Karavalakis G, Alvanou F, Stournas S, et al. Regulated and unregulated emissions of a light duty vehicle operated on diesel/palm-based methyl ester blends over NEDC and a non-legislated driving cycle[J]. Fuel, 2009, 88(6): 1078–1085.
 - 6 Guido A L Lenaers. Emission and fuel consumption comparison of three light duty vehicles fuelled with diesel, pure plant oil and a biodiesel mix[C]. SAE Paper 2011–24–0103, 2011.
 - 7 Fattah I M R, Masjuki H H, Liaquat A M, et al. Impact of various biodiesel fuels obtained from edible and non-edible oils on engine exhaust gas and noise emissions[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 18: 552–567.
 - 8 Abu-Jrai A, Yamin Jehad A, Al-Muhtaseb Ala'a H, et al. Combustion characteristics and engine emissions of a diesel engine fueled with diesel and treated waste cooking oil blends[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 172(1): 129–136.
 - 9 Xue Jinlin, Grift T E, Hansen A C. Effect of biodiesel on engine performances and emissions[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(2): 1098–1116.
 - 10 张旭升, 王海滨, 赵晖, 等. 共轨柴油机燃用生物柴油限制与非限制排放特性[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 1–6.
Zhang Xusheng, Wang Haibin, Zhao Hui, et al. Characteristics of regulated and unregulated emissions of biodiesel blends in a common rail diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 1–6. (in Chinese)
 - 11 谭丕强, 胡志远, 楼狄明, 等. 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 emissions of IDI turbocharged diesel engines fuelled with biodiesel fuels[J]. Transactions of CSICE, 2006, 24(2): 110–115. (in Chinese)
 - 12 楼狄明, 石健, 赵杰, 等. 共轨柴油机燃用不同配比生物柴油的性能与排放特性[J]. 内燃机工程, 2009, 30(6): 21–30.
Lou Diming, Shi Jian, Zhao Jie, et al. Performance and emission characteristics of a common rail diesel engine fuelled with different proportion bio-diesel blends[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2009, 30(6): 21–30. (in Chinese)
 - 13 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(6): 22–26. (in Chinese)
 - 14 胡志远, 孙晓清, 谭丕强, 等. 共轨柴油机燃用麻疯树制生物柴油的性能及排放特性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊1): 308–312.
Hu Zhiyuan, Sun Xiaqing, Tan Piqiang, et al. Performance and emission characteristics of common rail engine fueled with jatropha based biodiesel blends[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(Supp. 1): 308–312. (in Chinese)
 - 15 强蕃. 国 V 排放生物柴油专用发动机的性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2013: 19–22.

Emission Experiment on a Chinese V Diesel Engine Fueled with Diesel/Biodiesel

Lou Diming Kong Deli Qiang Qiang Hu Zhiyuan Tan Piqiang Zhou Yi
(School of Automobile, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: An experimental study was carried on a Chinese V diesel engine fueled with Chinese V diesel blended with waste cooking oil biodiesel. The correlation between the characteristics of biodiesel and regulated emissions was investigated. The result shows that when fueled with blended fuel, higher oxygen content of the blended fuel led to higher NO_x emission, but the increased extent was not obvious. NO_x emission of all fuel was highly correlated with high temperature combustion field and R^2 of their logarithmic function fitting curve was more than 0.97. Higher oxygen content of blend fuels led to lower THC and CO emissions. THC and CO emissions were highly correlated with combustion duration and R^2 of their power function fitting curve was more than 0.96. The total particle number and nuclei mode particle number were higher, and the accumulation mode particle number was lower. Higher nuclei mode particle number was related to higher viscosity and sulfur content, and lower accumulation mode particle number was related to higher oxygen content.

Key words: Chinese V emission standard Diesel engine Biodiesel Emissions