

国 V 公交车燃用生物柴油的实际道路排放特性研究

楼狄明, 朱 刚, 胡志远, 谭丕强

(同济大学汽车学院, 上海 201804)

摘 要: 采用 OBS-2200 车载排放测试系统及 ELPI 电子低压冲击仪, 对国 V 公交车燃用不同比例生物柴油的实际道路排放特性进行了研究。燃料分别为国 V 纯柴油及其与纯生物柴油按一定体积比例调和后的混合燃料。研究表明: 实际道路排放随车速的跟随性良好, 且基本随车速增大而增加。随着调和比例的升高, CO、THC 排放降低, CO₂、NO_x 排放升高。PN 及 PM 排放均降低, PN 对数数量浓度分布峰值区域由小粒径中高速范围向小粒径中低速范围移动, 极低值区域由大粒径中低速范围扩大到大粒径全速范围; PM 对数质量浓度分布呈双峰带分布, 分别在 0.1~0.2 μm 及大于约 6 μm 的范围内, 随调和比例升高, 前者逐步缩小, 后者由中高速范围移向中低速范围, 但两波峰的粒径范围位置没有发生明显偏移。

关键词: 国 V 公交车; 生物柴油; 实际道路; 排放

中图分类号: TK421⁺.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2017)02-0001-07

Study on On-Road Emission Characteristics of a China-V Bus Fueled with Biodiesel

Lou Diming, Zhu Gang, Hu Zhiyuan, Tan Piqiang

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804)

Abstract: On-road emission characteristics of a China-V diesel bus fueled with different proportions of biodiesel was studied by using OBS-2200 on board emission test system and electrical low pressure impactor (ELPI). The fuels were China-V pure diesel and blends of varied proportions of biodiesel with diesel. The research results show that on board emission has good following performance with the bus speed, and basically both emissions increase when bus speed increases. With the increasing of biodiesel content, CO and THC emissions decrease, but CO₂ and NO_x emissions increase. PN (particulate number) and PM (particulate mass) emissions both decrease as well. Meanwhile PN concentration peak moves from medium-light speed towards medium-low speed when the particle diameter is small. The lowest PN concentration appears when the particle diameter is large and covers the whole speed range instead of within the medium-low speed range. The size distribution of PM concentration is bimodal. One is between 0.1 and 0.2 μm, and the other is about larger than 6 μm. When biodiesel mixture ratio increases, the first peak contracts and the latter moves from medium-light speed towards medium-low speed and the posts of both peaks do not move obviously.

Key words: China-V bus; biodiesel; on-road; emission

收稿日期: 2016-11-23

基金项目: 本项研究工作得到上海市科学技术委员会资助, 资助课题编号为 16DZ1203001。

作者简介: 楼狄明(1963-), 男, 教授, 主要研究方向为汽车发动机现代化设计、发动机代用燃料与排放控制技术、柴油机混合动力技术等, E-mail: loudiming@tongji.edu.cn。

0 引言

环境污染及食品安全是当下社会的热点问题,已引起广泛关注。其中汽车尾气污染及地沟油回流餐桌问题又是重中之重。一种行之有效的方法就是将废弃餐厨油脂进行统一回收并制成生物柴油,用作公交车燃料。基于此方案及相关项目,展开生物柴油在公交车实际道路应用的排放特性研究是非常有必要的^[1,2]。

生物柴油作为一种含氧的清洁燃料,可由菜籽油、大豆油、餐厨废弃油、动物油等可再生油脂通过酯交换工艺加工而成,又称脂肪酸甲酯。这种燃料不仅是一种可再生的能源,而且可以进行生物降解,是一种绿色的清洁燃料;其有十六烷值高、芳香烃含量低、富含分子内氧,但热值相对有所降低的特点^[3-7]。

目前,国内外学者对生物柴油的排放特性开展了一系列研究。在台架方面,国内楼狄明等^[8-11]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厨废油制生物柴油的试验。发现: NO_x 排放有所升高, THC 和 CO 排放下降,这与生物柴油含氧量高有关;总颗粒数和核态颗粒物数量升高,聚集态颗粒物数量下降,核态颗粒数升高与生物柴油黏度高、硫含量高有关,聚集态颗粒数下降与生物柴油的高含氧量有关。国外方面, Silvana Di Iorio 等^[12]采用颗粒粒径测试仪 EEPS 等试验仪器,对一台排放量为 1 L 的满足欧 IV 排放标准的三缸高压共轨直喷原型机,燃用纯柴油和体积比为 20% 的油菜籽甲基酯-柴油混合燃料 B20 的颗粒物排放特性进行了试验研究。试验结果表明:在 $1\,400\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 和 $2\,000\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 下颗粒物排放较纯柴油的没有明显的变化,而在 $3\,400\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 高转速下则升高;B20 排放颗粒整体变小,在中低转速下 PN 降低,但在高转速下却升高;气态污染物方面, NO_x 没有降低,而 HC 只有在 $3\,400\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 高转速下才有所降低。Federico Millo 等^[13]对一台最新一代满足欧 V 排放标准的 1.2 L 直列四缸轿车柴油机燃用生物柴油的性能和排放特征进行了台架试验研究。研究显示:低负荷时,CO 和 HC 排放较燃用柴油时均有明显下降,而在中高负荷时仅有轻微下降; NO_x 有一定增长,烟度有所下降。

在车载方面,国内楼狄明等^[14]对国 IV 柴油公交车燃用纯柴油 D100 和生物柴油混合燃料的颗粒物排放进行了研究。结果表明:随调和比例升高,

聚集态颗粒物排放下降显著,核态颗粒物排放变化不大,数量呈双峰分布,颗粒物几何平均粒径变小。谭丕强^[15]等对国 IV 公交车燃用生物柴油的城郊结合综合实际道路排放特性进行了研究。发现:纯生物柴油 B100 的 CO、THC 排放最低, NO_x 排放高于纯柴油的, B20 的 CO_2 排放低于纯柴油的,而 B100 的则高于纯柴油的。郭佳栋等^[16]对北京多辆不同技术路线的国 V 公交车进行了实际道路排放特性研究。发现:国 V 柴油公交车的 CO 和 THC 排放很低;但在车速较低时,发动机负荷和排气温较低,无法满足 SCR 系统工作要求,因此 NO_x 排放很高;车速提高后,SCR 系统效率提高,有效降低了 NO_x 排放。国外, Mark Tinsdale 等^[17]对一台装有满足欧 IV 排放标准的高压共轨柴油发动机的乘用车燃用纯柴油 D100 和不同比例生物柴油 B5、B10、B30 (均为体积比) 的颗粒物及气态物排放特性进行了转鼓试验研究。研究表明: B30 较之 D100,总 PN 排放下降了 16%,聚集态颗粒物 PN 下降了 24%,几何平均粒径下降 18%,PM 下降 32%。

该领域的一系列研究还可见参考文献 [18-23]。但在国内,对国 V 公交车燃用生物柴油的实际道路排放研究相对较少,本文研究内容便着重于此。

1 研究方案

1.1 试验装置

试验车辆为上海市在用国 V 柴油公交车,基本参数见表 1。气态物检测设备为日本 HORIBA 公司的 OBS-2200 车载排放检测系统,该系统能对 CO、 CO_2 、THC、 NO_x 和排气流量等进行连续检测并记录。OBS-2200 用加热型不分光红外分析仪 (NDIR) 测量 CO 和 CO_2 ;用氢火焰离子分析仪 (FID) 检测 THC;用化学发光分析仪 (CLD) 测量 NO_x 浓度;排气流量则采用 Pitot 管流量计测量。颗粒物检测设备为芬兰 DEKATI 公司的电子低压冲击仪 ELPI,通过 DEKATI DI-2000 射流稀释器进行稀释。其检测的粒径通道为 12 级,最大的粒径检测范围达到 $7\ \text{nm} \sim 10\ \mu\text{m}$ 。两台检测设备的采样频率同步,为 1 Hz。公交车工况由 GPS 记录。

1.2 试验燃料

除了国 V 纯柴油 (D100),试验所用生物柴油为国 V 纯柴油与纯生物柴油 (B100) 按照一定比例调和后的生物柴油混合燃料 B5、B10 和 B20 (生物柴油体积比分别为 5%、10% 和 20%)。试

验燃料的主要理化指标如表 2 所示。

表 1 试验车辆主要技术参数

排放水平	国 V 标准
制造年月	2014-04
整备质量/kg	11 900
(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	11 995×2 530×3 150
进气方式	增压中冷
发动机排量/L	8.820
(额定功率/转速)/(kW/(r·min ⁻¹))	192/2 300
(最大扭矩/转速)/((N·m)/(r·min ⁻¹))	1 100/1 400

表 2 试验燃料的主要理化指标

试验燃料	D100	B5	B10	B20
密度(20℃)/(kg·m ⁻³)	813.6	821.9	823.5	836.9
十六烷值	50.8	51.5	53.5	54.1
低热值/(MJ·kg ⁻¹)	38.04	37.78	37.52	37.01
硫含量/(mg·kg ⁻¹)	1.4	3.8	3.9	9.9
运动黏度(20℃)/(mm ² ·s ⁻¹)	3.591	3.630	4.926	4.610
90% 馏出温度/℃	350.2	348.8	346.1	344.8

1.3 试验工况

选择了综合性的城郊结合路段，对每种燃料的排放分别进行超过 1 500 s 以上的稳态及自由瞬态工况的采集。

2 试验结果与分析

2.1 试验工况及排放跟随性

图 1 为试验公交车的全路况速度特性、CO₂ 及颗粒物总数量浓度排放特性。前 1 500 s 从怠速 0 至 60 (km·h⁻¹) 的每个工况点检测 60 s，共完成两组稳态测试。后 1 500 s 由驾驶员按照正常的驾驶习惯进行瞬态自由工况的测试。对比可见，CO₂ 及颗粒物排在高速和加速工况下都有明显的上升，说明呈正相关。排放对车速工况有良好的跟随性。分析其他气态物排放并综合分析公交车燃用四种燃料的情况，均得到了一致的结论。

2.2 气态物排放

2.2.1 CO 排放

图 2 给出了 CO 稳态排放率随车速的变化规律。在 0~50 (km·h⁻¹) 范围内，公交车燃用四种燃料的 CO 排放率大致呈持续增长的趋势；但速度超过 50 (km·h⁻¹) 后，则呈现不同幅度的下降。CO 主要是由于燃料的不完全燃烧而产生的，在稳态工况下喷油加速、加浓对造成燃烧相对缺氧影响较小，CO 排放增加可能主要是因为单位时间内工作循环增加所致；而在大于 50 (km·h⁻¹) 的高速工况时，工作循环相对稳定且温度较高，利

于燃烧，进而降低了 CO 排放。四种燃料的 CO 排放规律基本一致。

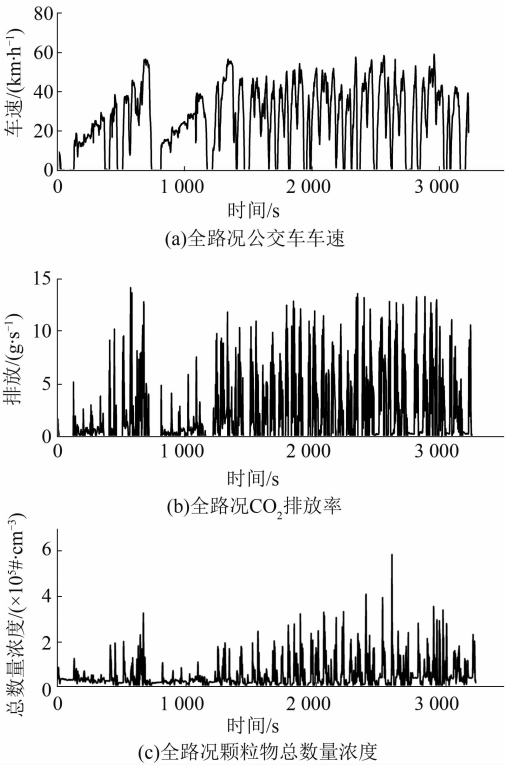


图 1 全路况实际道路排放特性

比较四种燃料的 CO 排放可知：生物柴油的 CO 排放总体上低于纯柴油，且降低幅度随生物柴油调和比例升高而增大。这主要是因为生物柴油含有分子内氧，有助于局部区域 CO 的氧化。分析发现在 30~50 (km·h⁻¹) 的中高速度范围内降幅较明显。而在 20~40 (km·h⁻¹) 的常用速度区间，与纯柴油的相比较，B5、B10、B20 的 CO 排放率分别降低了 11.54%、11.56%、10.38%，9.13%、19.37%、13.68%，19.81%、30.62%、20.93%。B10、B20 的 CO 排放率降幅较明显。

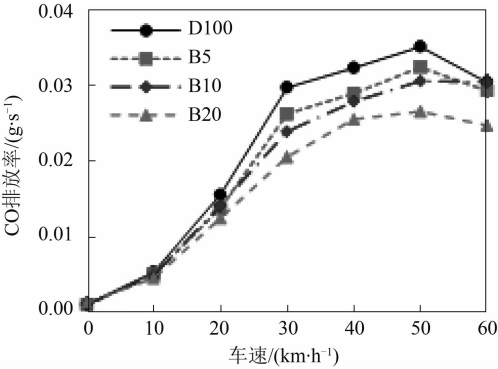


图 2 CO 稳态排放率随车速的变化规律

图 3 给出了 CO 的瞬态排放率随机动车比功率 (VSP) 的变化规律。在 -15~-4 (kW·t⁻¹) 范

围内, CO 排放率呈小幅下降趋势, 其中 -4 ($\text{kW} \cdot \text{t}^{-1}$) 工况点的排放为全工况最低; 在 $-4 \sim 0$ ($\text{kW} \cdot \text{t}^{-1}$) 的小范围内呈先增大后减小的趋势; 在 $0 \sim 15$ ($\text{kW} \cdot \text{t}^{-1}$) 范围内也呈现先增大后减小的趋势, 其中 0 ($\text{kW} \cdot \text{t}^{-1}$) 工况点排放为该范围最低, 6 ($\text{kW} \cdot \text{t}^{-1}$) 工况点排放为全工况最高。生物柴油的 CO 排放总体低于纯柴油, 且降幅随调和比例升高而增大, 与稳态排放结果一致。

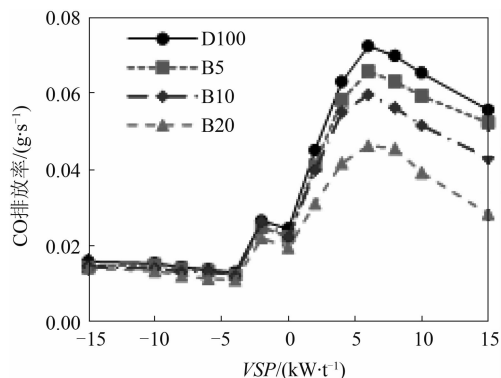


图 3 CO 瞬态排放率随 VSP 的变化规律

2.2.2 CO₂ 排放

图 4 给出了 CO₂ 稳态排放率随车速的变化规律。随车速的增大, CO₂ 排放率大致呈线性增长的趋势, 单位时间内工作循环的增加可能是主要原因。四种燃料的 CO₂ 排放规律基本一致。

比较四种燃料的 CO₂ 排放可知: 生物柴油的 CO₂ 排放总体高于纯柴油的, 且增幅随调和比例升高而增大。这可能是因为生物柴油低热值较低, 输出相同功率需要消耗更多的燃料。在 $20 \sim 40$ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$) 的常用速度区间, 与纯柴油的相比较, B5、B10、B20 的 CO₂ 排放率分别升高了 0.74%、3.35%、3.48%, 6.03%、5.23%、4.49%, 9.13%、9.00%、6.31%。

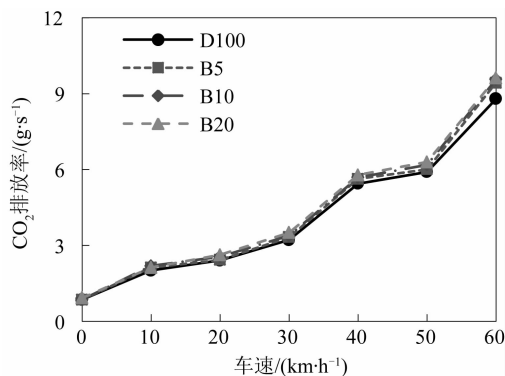


图 4 CO₂ 稳态排放率随车速的变化规律

图 5 给出了 CO₂ 瞬态排放率随 VSP 的变化规律。在 $-15 \sim -2$ ($\text{kW} \cdot \text{t}^{-1}$) 范围内, CO₂ 排放

率呈先减小后增大再减小的小幅波动变化规律, 其中 -8 ($\text{kW} \cdot \text{t}^{-1}$) 工况点排放为全工况最低; 在 $-2 \sim 15$ ($\text{kW} \cdot \text{t}^{-1}$) 范围内呈明显的先增大后减小趋势, 其中 10 ($\text{kW} \cdot \text{t}^{-1}$) 工况点排放为全工况最高。生物柴油的 CO₂ 排放总体高于纯柴油的, 且增幅随调和比例升高而增大, 在高 VSP 工况更为明显。

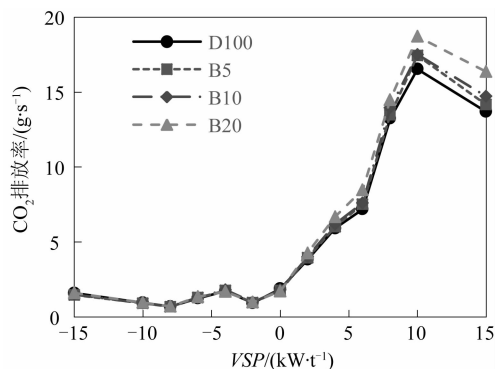


图 5 CO₂ 瞬态排放率随 VSP 的变化规律

2.2.3 THC 排放

图 6 给出了 THC 稳态排放率随车速的变化规律。随车速增大 THC 排放率大致呈线性增长的趋势。随着单位时间内工作循环的增加, 单个循环的混合气形成和燃烧时间均变短, 而不完全燃烧会导致碳氢排放增加。四种燃料的 THC 排放规律基本一致。

比较四种燃料的 THC 排放可知: 生物柴油的 THC 排放总体低于纯柴油的, 且降低幅度随生物柴油调和比例升高而增大, 这也与生物柴油含有分子内氧有关。在 $20 \sim 40$ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$) 的常用速度区间, 与纯柴油的相比较, B5、B10、B20 的 THC 排放率分别降低了 2.66%、5.93%、9.09%, 0.28%、6.21%、5.13%, 14.75%、8.15%、17.21%。

图 7 给出了 THC 瞬态排放率随 VSP 的变化规律。在 $-15 \sim -6$ ($\text{kW} \cdot \text{t}^{-1}$) 范围内, THC 排放率呈先增大后减小的趋势, 其中 -15 和 -6 ($\text{kW} \cdot \text{t}^{-1}$) 工况点均是全工况的极低排放点; 在 $-6 \sim 15$ ($\text{kW} \cdot \text{t}^{-1}$) 的范围内呈先增大后减小的趋势, 其中 10 ($\text{kW} \cdot \text{t}^{-1}$) 工况点排放为全工况 THC 排放的最高点。生物柴油的 THC 排放总体低于纯柴油, 且降幅随生物柴油调和比例升高而增大。

2.2.4 NO_x 排放

图 8 给出了 NO_x 稳态排放率随车速的变化规律。在 $0 \sim 40$ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$) 范围内公交车燃用四种燃料的 NO_x 排放大致呈持续增长的趋势。但速度

超过 $40 (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$ 后, 则呈现不同幅度的下降。 NO_x 产生的主要因素包括高温、高压及其持续时间, 还有多余的氧气。当速度小于 $40 (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$ 时, NO_x 排放增加的可能原因是发动机单位时间内工作循环增加。而大于 $40 (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$ 后, 虽然单位时间内工作循环进一步增加, 但高温高压持续时间变短, 且高速时喷油量增加, 导致局部氧气相对减少, 这均可能导致 NO_x 排放的下降。四种燃料的 NO_x 排放规律基本一致。

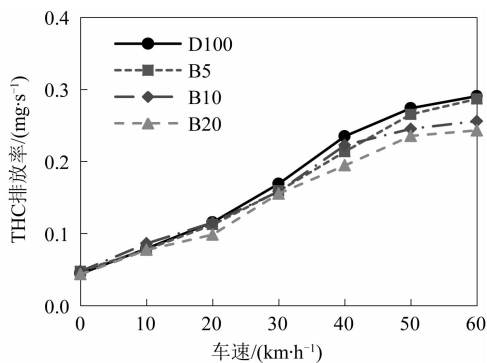


图 6 THC 稳态排放率随车速的变化规律

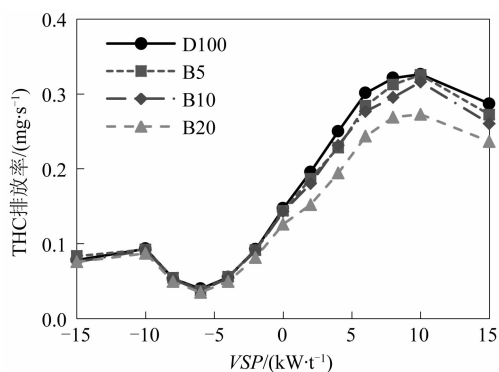


图 7 THC 瞬态排放率随 VSP 的变化规律

比较四种燃料的 NO_x 排放可知: 生物柴油的 NO_x 排放总体高于纯柴油的, 且增幅随生物柴油调和比例升高而增大。这主要是因为生物柴油含有分子内氧。在 $20 \sim 40 (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$ 的常用速度区间, 与纯柴油的相比较: B5、B10、B20 的 NO_x 排放率分别升高了 -3.42% 、 1.15% 、 5.21% , 0.04% 、 4.59% 、 7.11% , -2.97% 、 12.69% 、 9.86% 。增幅最大为 $60 (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$ 车速下燃用 B20 的情况, 增幅约为 16.40% 。

图 9 给出了 NO_x 瞬态排放率随 VSP 的变化规律。在 $-15 \sim 0 (\text{kW} \cdot \text{t}^{-1})$ 范围内, NO_x 排放率呈先减小后增大再减小的小幅波动变化规律, 其中 $-8 (\text{kW} \cdot \text{t}^{-1})$ 工况点排放为全工况排放的最低点; 在 $0 \sim 15 (\text{kW} \cdot \text{t}^{-1})$ 的范围内呈先增大后减

小的趋势, 其中 $10 (\text{kW} \cdot \text{t}^{-1})$ 工况点排放为全工况排放的最高点。生物柴油的 NO_x 排放总体高于纯柴油的, 且增幅随生物柴油调和比例升高而增大。在 $15 (\text{kW} \cdot \text{t}^{-1})$ 工况点差异最明显。

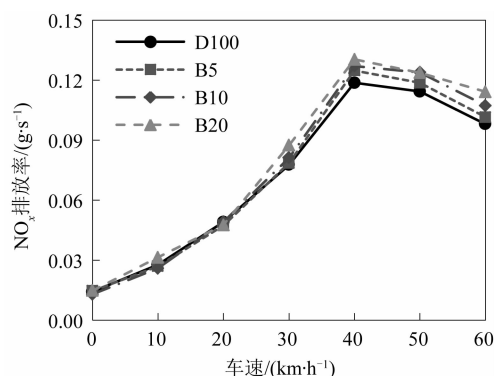


图 8 NO_x 稳态排放率随车速的变化规律

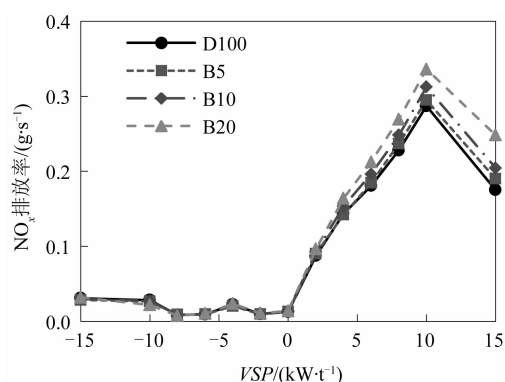


图 9 NO_x 瞬态排放率随 VSP 变化规律

2.3 颗粒物排放

2.3.1 PN 及 PM 稳态排放

图 10、11 给出了颗粒物数量 (PN) 及颗粒物质量 (PM) 稳态排放率随车速的变化规律。公交车燃用四种燃料的 PN 及 PM 排放大致呈增长的趋势。随着车速的增加, 单位时间内发动机工作循环数增加是总体原因; 此外, 随着喷油量的不断增加, 局部空燃比减小, 同时, 温度不断上升, 均可能导致核态颗粒物排放的增加。增加的未燃碳氢物质吸附于碳颗粒上, 也增加了聚集态颗粒物排放。四种燃料的 PN 和 PM 排放规律基本一致。

比较四种燃料的 PN 及 PM 排放可知: 生物柴油的 PN 及 PM 排放总体均低于纯柴油的, 且降低幅度随生物柴油调和比例升高而增大。这主要是由于生物柴油富含内氧及较高的十六烷值均有助于燃烧, 减少了 PN 及 PM 排放。在 $20 \sim 40 \text{ km/h}$ 的常用速度区间, 与纯柴油的相比较: B5、B10、B20 的 PN 排放率分别降低了 50.47% 、 25.07% 、 24.37% , 66.42% 、 53.79% 、 36.56% , 75.74% 、

63.45%、66.09%；PM 排放率降低 29.95%、16.70%、14.72%，38.41%、26.05%、14.85%，51.66%、46.23%、40.85%。

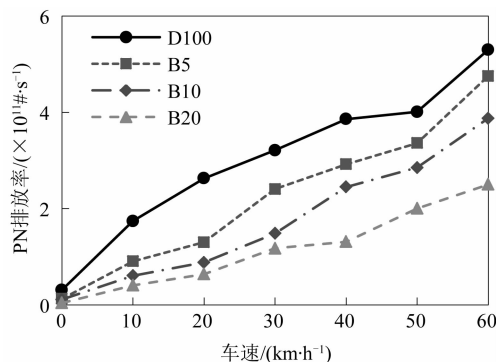


图 10 PN 稳态排放率随车速的变化规律

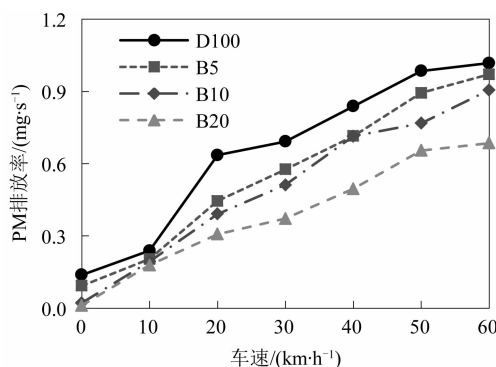


图 11 PM 稳态排放率随车速的变化规律

2.3.2 PN 数量浓度粒径分布

图 12 为四种燃料的颗粒物对数数量浓度随车速变化的粒径分布等高线图。在各车速下，PN 数浓度分布大多随粒径的增大而减小。总体上，等高线向左移动，表明随生物柴油调和比例升高，高数量浓度区域逐渐减小，而数浓度波峰向小粒径方向移动。

比较各图可知，在小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的范围内出现数浓度峰值区域，随生物柴油调和比例升高至 10%，峰值区缩小至较小范围，该范围平均速度约为 $30 (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$ ，平均粒径约为 $0.6 \mu\text{m}$ ；在调和比例达到 20% 后，该峰值范围消失。 $0.1 \mu\text{m}$ 以下的范围包括了核态颗粒物及聚集态颗粒物，相关研究^[10]表明：这主要是因为生物柴油在 $0.08 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 粒径范围内的聚集态颗粒物排放有明显下降所致。由于 ELPI 通道数限制，不能更具体地描绘该范围粒径分布。在 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ 的范围内，分布主要沿粒径方向分层展开，变化不明显，数浓度仅随调和比例升高整体下降。在大于 $1 \mu\text{m}$ 的大粒径范围内，出现数浓度极低值区域。纯柴油的数浓度极低值区域出现在大粒径低速范围；燃用 B5 后则出

现在大粒径高速范围；燃用 B20 后，数浓度在整个速度范围内出现了明显的下降。这主要是因为生物柴油富氧，烧结小颗粒减少，进一步减少了粒径为 $1 \mu\text{m}$ 以上的大颗粒的凝结。

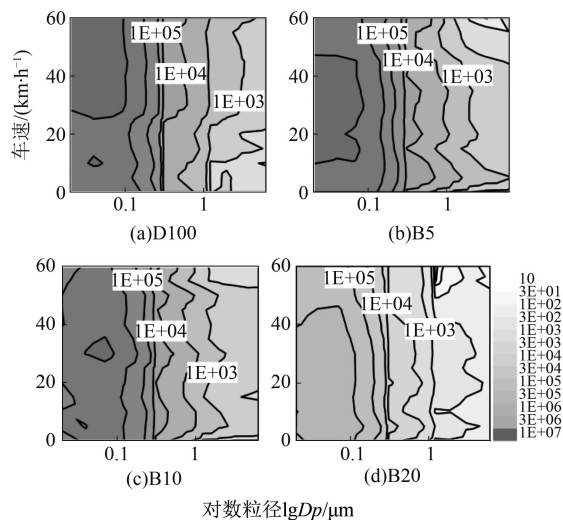


图 12 PN 颗粒物对数数量浓度粒径分布等高线图

2.3.3 PM 质量浓度粒径分布

图 13 为四种燃料的颗粒物对数质量浓度随车速变化的粒径分布等高线图。在各车速下，四种燃料的 PM 颗粒物质量浓度均呈双峰带分布，一峰处在约 $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 范围内，另一峰处在约大于 $6 \mu\text{m}$ 的小范围内，其他范围内大多随粒径增大呈上升的分布趋势。总体上，等高线向右移动，表明随着生物柴油调和比例升高，高质量浓度区域逐渐减小。

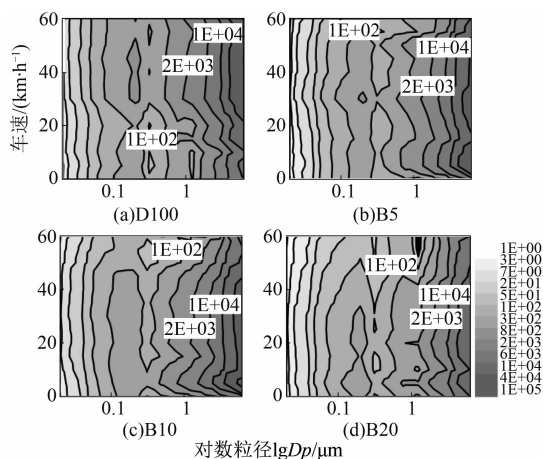


图 13 PM 颗粒物对数质量浓度粒径分布等高线图

比较各图可知，在小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的范围内，质量浓度分布主要沿粒径方向分层展开，变化不明显，质量浓度仅随调和比例升高整体下降。在 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ 的范围内，纯柴油的质量浓度出现波峰带，并且在 $30 \sim 50 (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$ 的范围内出现波峰。

燃用 B5 后, 该波峰带缩小到平均粒径约为 $0.2 \mu\text{m}$, 平均速度约为 $30 (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$ 的极小范围内; 燃用 B10 后, 该波峰消失; 燃用 B20 后, 量级较次的波峰区域进一步缩小, 体现在粒径范围进一步缩小, 以及速度范围减小到低于 $30 (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$ 的范围内, 但波峰区域的粒径范围没有明显的移动。在大于 $1 \mu\text{m}$ 的范围内, 质量浓度峰值区域从高速范围移向低速范围, 且整体有小幅减少, 该波峰区域的粒径范围也没有明显偏移。综上分析可知: PN 数量浓度整体下降, 而 PM 质量浓度的下降与此有关。

3 结 论

(1) 气态物及颗粒物排放对车速变化有良好的跟随性, 且呈正相关。

(2) CO 稳态排放率大体呈先增大后减小的趋势; 随着生物柴油比例升高, CO 排放率相对降低; $20 \sim 40 (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$ 常用速度区间, 较纯柴油, B5、B10、B20 的 CO 排放率平均下降分别为 11.16%、14.06%、23.79%; 其 VSP 瞬态排放率在 $-4 \sim 6 (\text{km} \cdot \text{t}^{-1})$ 工况点分别达到最小和最大值。CO₂ 稳态排放率大体呈线性增加的趋势; 随着生物柴油比例升高, CO₂ 排放率相对升高; 在 $20 \sim 40 (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$ 常用速度区间, 较纯柴油, B5、B10、B20 的 CO 排放率平均升高分别为 2.53%、5.25%、8.15%; 其 VSP 瞬态排放率在 $-8 \sim 10 (\text{km} \cdot \text{t}^{-1})$ 工况点分别达到最小和最大值。THC 稳态排放率大体呈线性增加的趋势; 随着生物柴油比例升高, THC 排放率相对降低; 在 $20 \sim 40 (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$ 常用速度区间, 较纯柴油, B5、B10、B20 的 THC 排放率平均下降分别为 5.89%、3.88%、13.37%; 其 VSP 瞬态排放率在 -15 和 $-4 (\text{km} \cdot \text{t}^{-1})$ 工况点达到极小值, 在 $10 (\text{km} \cdot \text{t}^{-1})$ 工况点达到最大值。NO_x 稳态排放率大体呈先增大后减小的趋势; 随着生物柴油比例升高, NO_x 排放率相对升高; 在 $20 \sim 40 (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$ 常用速度区间, 较纯柴油, B5、B10、B20 的 NO_x 排放率平均升高分别为 0.98%、3.91%、6.53%; 其 VSP 瞬态排放率在 -8 和 $10 (\text{km} \cdot \text{t}^{-1})$ 工况点分别达到最小和最大值。

(3) PN 及 PM 稳态排放率大体呈增长趋势; 随着生物柴油比例升高, PN 及 PM 排放率均相对降低; 在 $20 \sim 40 (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$ 常用速度区间, 较纯柴油: B5、B10、B20 的 PN 排放率平均下降分别为 33.31%、52.26%、68.43%, PM 排放率平

均下降分别为 20.46%、26.44%、46.25%; 随着生物柴油比例的升高, PN 数量浓度分布等高线左移, 小粒径范围内的该峰值区域逐渐减小, 中粒径范围内分布变化不明显, 大粒径范围内, 极低值区域从低速扩展到全速度范围; PM 质量浓度分布呈双峰带分布, 一峰处在 $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 范围内, 另一峰处在约大于 $6 \mu\text{m}$ 范围内。

参考文献

- [1] 王永强, 谢红兵, 常新耀, 等. 生物柴油的应用现状及发展趋势 [J]. 河南科技学院学报: 自然科学版, 2010, 38 (4): 79-83.
- [2] MACHACON H T C, SHIGA S, KARASAWA T, et al. Performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with coconut oil-diesel fuel blend [J]. Biomass & Bioenergy, 2001, 20 (1): 63-69.
- [3] 胡志远, 谭丕强, 楼狄明, 等. 生物柴油-柴油混合燃料的理化特性研究 [J]. 内燃机, 2006 (3): 39-42.
- [4] 马林才, 周志国, 季永青. 生物柴油-柴油混合燃料的理化及排放特性研究 [J]. 燃料化学学报, 2011, 39 (8): 600-605.
- [5] 仲兆平, 姜小祥, Naoko, 等. 生物油/生物柴油混合燃料的热稳定性 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2011, 41 (1): 129-133.
- [6] CHANG S L, PARK S W, Sang I K. An experimental study on the atomization and combustion characteristics of biodiesel-blended fuels [J]. Energy & Fuels, 2005, 19 (5): 2201-2208.
- [7] HUBER M L, LEMMON E W, KAZAKOV A, et al. Model for the thermodynamic properties of a biodiesel fuel [J]. Energy Fuels, 2009, 23 (7): 3790-3797.
- [8] 楼狄明, 孔德立, 强蕾, 等. 国V柴油机燃用柴油/生物柴油排放性能试验 [J]. 农业机械学报, 2014, 45 (9): 25-30.
- [9] 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): 21-25.
- [10] 张涛, 楼狄明, 孔德立, 等. 生物柴油在国V排放重型车用柴油机上的燃烧试验 [J]. 车用发动机, 2013 (6): 20-24.
- [11] 袁银南, 张恬, 梅德清, 等. 柴油机燃用生物柴油燃烧与排放 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2006, 27 (3): 216-219.
- [12] IOTIO S D, MAGNO A, MANCARUSO E, et al. Effect of diesel/RME blend on particle emissions from a diesel engine for quadricycle vehicle [J]. Biodiesel, 2014 (1).

数对比及余热回收效果如表 3 所示。

根据表 3 可以看出,各工况下,动力涡轮对排气余热均能进行适量回收。100% 工况时,动力涡轮回收最大功率 134.6 kW,占柴油机功率的 3.19%,此时系统总功率提升 1.02%,流量比为 8.55。50% 低工况下,系统总功率要低于柴油机本机功率,系统回收比为 -0.32%,使得动力涡轮复合船舶柴油机余热回收系统失去意义。所以,动力涡轮的使用应在柴油机中高工况下切入,才能发挥动力涡轮复合系统余热回收的作用。

表 3 联合优化后的系统性能对比

功率	50%	75%	85%	100%
原机模型功率/kW	2 154	3 125	3 612	4 221
动力涡轮功率/kW	28.93	82.16	98.69	134.6
系统功率/kW	2 085	3 131	3 629	4 264
动力涡轮回收比	1.34%	2.63%	2.73%	3.19%
系统回收比	-0.32%	0.19%	0.47%	1.02%
流量比	8.53%	8.55%	9.33%	8.55%

4 结 论

本文对船舶柴油机复合动力涡轮进行了联合优化匹配,以同时考虑柴油机系统功率、动力涡轮功率、涡轮增压器喘振裕度全面择优的方式,确定的最优匹配点为:增压涡轮喷嘴环当量直径 134 mm、动力涡轮喷嘴环当量直径 41 mm。此时,额定工况

下,动力涡轮有最大功率为 134.6 kW,占柴油机功率的 3.19%,系统总功率提升 1.02%,流量比为 8.55%。即经动力涡轮与增压涡轮的联合优化匹配,中高工况下柴油机复合动力涡轮系统的总功率较原系统有明显提高,动力涡轮回收部分排气余热,输出较多功率,同时能够满足保证柴油机稳定运行的喘振裕度的要求。

参考文献

- [1] SHU G Q, LIANG Y C, WEI H, et al. A review of waste heat recovery on two-stroke IC engine aboard ships [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2013, 19 (1): 385-401.
- [2] LII CS, DEPCIK C. Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery [J]. Applied Thermal Engineering. 2013, 51 (S1-2): 711-722.
- [3] WENG C C, HUANG M J. A simulation study of automotive waste heat recovery using a thermoelectric power generator [J]. International Journal of Thermal Sciences. 2013, 71 (3): 302-309.
- [4] DESIRIDIS A, JYE A E T S, RAJOO S. Effects of mechanical compounding on a turbocharged diesel engine [C]. SAE International. 2013 (01): 0103.
- [5] 宋宾阳. 内燃机余热利用涡轮复合系统性能研究 [D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [13] MILLO F, MALLAMO F, VLACHOS T, et al. Experimental investigation on the effects on performance and emissions of an automotive Euro 5 diesel engine fuelled with B30 from RME and HVO [J]. Alternative Fuels, 2013.
- [14] 楼狄明, 陈峰, 胡志远, 等. 公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性 [J]. 环境科学, 2013, 34 (10): 3749-3754.
- [15] 谭丕强, 李洁, 胡志远, 等. 柴油公交车燃用不同替代燃料的排放特性 [J]. 交通运输工程学报, 2013, 13 (4): 67-73.
- [16] 郭佳栋, 葛蕴珊, 谭建伟, 等. 国 V 公交车实际道路排放特性研究 [J]. 汽车工程, 2015, (1): 120-124.
- [17] TINSDALE M, PRICE P, CHEN R. The impact of biodiesel on particle number, size and mass emissions from a Euro4 diesel vehicle [C]. SAE International Journal of Engines, 2010, (1): 597-608.
- [18] 葛蕴珊, 李晓, 吴思进, 等. 餐厨废油制生物柴油的排放特性 [J]. 北京理工大学学报, 2004, 24 (4): 290-293.
- [19] 陆小明, 葛蕴珊, 吴思进. 生物柴油应用试验研究 [J]. 汽车技术, 2006 (12): 31-33.
- [20] 胡志远, 谭丕强, 楼狄明, 等. 在用柴油公交车燃用生物柴油的试验研究 [J]. 汽车技术, 2009 (10): 47-50.
- [21] GIAKOURIS E G, RAKOPOULOS C D, DIMARATOS A M, et al. Exhaust emissions of diesel engines operating under transient conditions with biodiesel fuel blends [J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2012, 38 (5): 691-715.
- [22] GIECHASKIEL B, MARICP M, NTZIACHRISTOS L, et al. Review of motor vehicle particulate emissions sampling and measurement: from smoke and filter mass to particle number [J]. Journal of Aerosol Science, 2014, 67 (1): 48-86.
- [23] KOUSOULIDOU M, NTZIACHRISTOS L, FONTARAS G, et al. Impact of biodiesel application at various blending ratios on passenger cars of different fueling technologies [J]. Fuel, 2013, 98: 88-94.

(上接第 7 页)