

柴油乘用车燃用丁醇燃料道路工况气态物排放特性

楼狄明, 房亮, 胡志远, 谭丕强

(同济大学汽车学院, 上海 201804)

摘要: 基于 PEMS (performance and emission monitoring system) 车载排放测试方法, 在一辆柴油乘用车上分别燃用纯国Ⅳ柴油、正丁醇的体积分数分别为 10% 和 20% 的正丁醇和纯国Ⅳ柴油的混合燃料, 利用日本 Horiba 公司的 OBS-2200 车载气态排放物测试系统, 对车辆尾气进行直采. 通过对比不同道路类型下 3 种燃料气态排放物的排放因子, 分析柴油乘用车燃用丁醇柴油的车载实际道路排放特性. 试验结果表明, 柴油乘用车燃用丁醇柴油可以明显降低一氧化碳排放, 明显减小中高速工况下一氧化碳的峰值, 总碳氢排放会随丁醇掺入比例增加而增多; 二氧化碳的排放基本不变; 发动机参数及工况的改变对氮氧化物的排放影响不大.

关键词: 丁醇; 柴油乘用车; 气态物; 实际道路排放

中图分类号: U473.9

文献标志码: A

Characteristics of On-road Gas Emission from a Diesel PCV with Butanol-diesel Blends

LOU Diming, FANG Liang, HU Zhiyuan, TAN Piqiang

(College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on the performance and emission monitoring system (PEMS) on-board emission testing method, an on-board gas emission testing system made in Horiba of Japan was equipped, burning with the pure national Ⅳ diesel, 10% and 20% by volume butanol-diesel blends on a diesel passenger car vehicles (PCV). Compared with three different fuels' emission in different roads type, the characteristic of the on-road gas emission from a diesel PCV with butanol-diesel blends was analyzed with a reference to the different emission in different working conditions. The result shows that, a diesel PCV burning with the butanol-diesel blends can reduce the CO emission obviously, especially on the medium-high-velocity working condition; the total hydrocarbons (THC) emission increases with the increasing of the butanol concentration; the CO₂ emission remains basically unchanged; the NO_x emission

is influenced a little by the working condition and the engine parameters.

Key words: butanol; diesel passenger car vehicles (PCV); gas emission; on-road emission

面对日益严峻的排放法规限制, 先进、清洁、高效的柴油机技术逐渐受到世界各国的重视, 被认为是目前缓解能源危机和环境问题的有效可行的手段, 欧洲新购置车辆 50% 以上为柴油乘用车. 中国近两年频繁出现的“柴油荒”和柴油质量问题制约了中国先进柴油乘用车的推广及应用^[1]. 因此, 柴油替代燃料的发展迫在眉睫, 并要求替代燃料在减少石油消耗、安全和低成本的同时达到降低排放的作用^[2]. 生物丁醇作为第二代生物替代燃料, 完全符合上述对替代燃料的要求, 相比其他醇类, 其含氧量高、与柴油任意比例互溶、粘度大、热值高、十六烷值较高、气化潜热小、无毒、不易挥发、与橡胶等材料兼容性好, 因此为世界各国所青睐.

国内外针对丁醇的生产工艺^[3]、应用前景^[4]、适应性^[5]、可持续性、可替代性^[6], 以及丁醇柴油混合燃料的燃烧特性^[7-9]、发动机性能^[10-12]和排放特性^[13-15]等方面已经做了较多的工作, 有关车载实际道路气态物排放特性的研究还未见相关报道.

本文在柴油机燃用丁醇柴油混合燃料台架实验的基础上, 针对柴油乘用车分别燃用纯国Ⅳ柴油、正丁醇的体积分数分别为 10% 和 20% 的正丁醇和国Ⅳ柴油的混合燃料, 进行不同道路类型下的车载实际道路气态物排放特性的研究, 为丁醇作为柴油替代燃料的应用及推广提供理论依据.

1 试验设备、燃料及路线

1.1 试验设备

收稿日期: 2012-10-18

基金项目: 上海市科委科技攻关项目(10231201900)

第一作者: 楼狄明(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为发动机替代燃料与性能优化.

E-mail: loudiming@tongji.edu.cn

通讯作者: 房亮(1988—), 男, 硕士生, 主要研究方向为替代燃料发动机技术及优化. E-mail: fangliang1988@hotmail.com

试验在一辆符合国Ⅳ排放、装备有 1.9L 直列四缸电控泵喷嘴的高压直喷涡轮增压柴油机的柴油乘用车上进行。该车搭载了日本 HORIBA 公司的 OBS-2200 车载气态排放物测试仪,以及其他附属设施,通过车载排放测试系统(PEMS)对车辆尾气进行直采,将排气尾管通过 Pitot 管流量计直接连接到测量装置上,实时测量车辆排放的浓度和排气流量,从而得到气态物排放量^[16-17]。

1.2 试验燃油

试验使用硫质量分数不大于 $50 \times 10^{-6} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的城市车用 0 号清洁柴油(国Ⅳ柴油,简称 D100),正丁醇(简称 Bu100),以及按体积分数分别为 10% 和 20% 混合的丁醇柴油混合燃料 Bu10(10% 的正丁醇与 90% 的国Ⅳ柴油)和 Bu20(20% 的正丁醇与 80% 的国Ⅳ柴油)。其理化指标如表 1 所示。

表 1 试验用国Ⅳ柴油、丁醇柴油理化指标

Tab.1 The physical and chemical properties of the fuels used in the experiment

| 试验用油 | D100 | Bu10 | Bu20 | Bu100 |
|---|--------|--------|--------|--------|
| 密度(20℃)/(kg·m ⁻³) | 822 | 823 | 824 | 810 |
| 粘度(20℃)/(mm ² ·s ⁻¹) | 4.219 | 4.160 | 4.102 | 3.632 |
| 沸点/℃ | 181.1 | 174.8 | 168.4 | 117.7 |
| 硫质量分数/(10 ⁻⁶ mg·kg ⁻¹) | 15.0 | 13.5 | 12.0 | 4.7 |
| 总芳香烃质量分数/% | <4 | <4 | <3 | <1 |
| 含碳质量分数/% | 85.50 | 83.44 | 81.37 | 64.86 |
| 含氧质量分数/% | 0.58 | 2.68 | 4.79 | 21.62 |
| 低热值/(kJ·kg ⁻¹) | 38 040 | 37 190 | 36 340 | 29 540 |

1.3 试验方案

上海城市道路功能与分级体系面向规划、设计、建设与管理多个层次。内环以内的中心城区道路网被划分为主干道、次干道、快速路和支路,内环以外的郊区道路网保持与城区道路规划一致,也分为主干道、次干道和居民路,连接城区和郊区的道路为城郊高速路。同时为改善市区交通状况和加快不同区域间的沟通,兴建了许多跨江大桥^[18]。

试验路线全长 86.7 km,每种油品进行多次试验,每次试验历时 3 h 左右,起点和终点都设在同济大学嘉定校区,经过了以曹安公路为代表的郊区主干道(占 20%),以武宁路、周家嘴路和浦东南路为代表的市区主干道(占 15%),以余姚路为代表的市区次干道(占 6%),以南浦大桥为代表的跨江大桥(占 8%),以内环高架、南北高架和延安高架为代表的市区快速路(占 19%),以沪渝高速和沈海高速为代表的城郊高速路(占 26%),以博园路和绿苑路为代表的郊区次干道(占 6%),最大程度地包括了上海市所有典型道路。

车辆比功率(vehicle specific power, VSP)是由美国麻省理工学院的 José Luis Jiménez Palacios 提出的用于遥测数据分析的综合工况参数^[19],被美国环保局用作下一代流动源排放模型的一个核心参数。计算公式^[20]为

$$V_{SP} = v[1.1a + 9.81\arctan(\sin g) + 0.132] + 0.000302v^3$$

式中: V_{SP} 为比功率, $\text{kW} \cdot \text{t}^{-1}$; v 为车速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; a 为加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; g 为道路坡度。

2 试验结果及分析

2.1 道路试验工况特性

图 1 所示为不同道路类型下不同车速所占比例。从图 1 可知,市区主干道怠速工况所占比例最高,达到 40%;市区次干道、郊区主干道和郊区次干道怠速所占比例略低,都达到 15% 以上;三者速度基本处于低速(0~20 km·h⁻¹)和中低速(20~50 km·h⁻¹)区间。城郊高速路、市区快速路和跨江大桥的怠速比例较低,城郊高速路速度集中在中高速(50~80 km·h⁻¹)和高速(80 km·h⁻¹ 以上)区间;市区快速路和跨江大桥车速均集中在中低速和中高速区间。

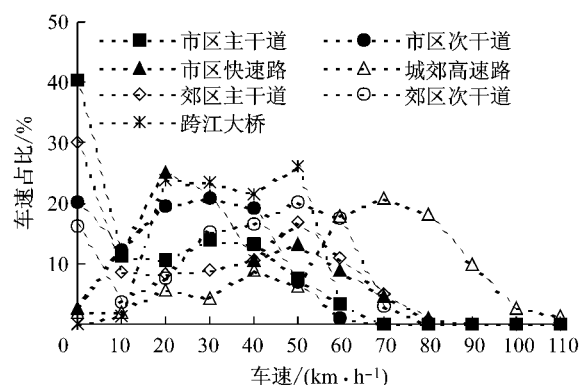


图 1 不同道路类型不同车速所占比例

Fig.1 The proportions of different velocities on different roads

图 2 所示为不同燃料在不同道路类型下的平均车速。从图 2 可知,试用的 3 种燃料在不同道路类型下,其平均速度基本接近。市区主干道平均车速最低,与市区次干道接近,都小于 20 km·h⁻¹,城郊高速路平均车速最高,郊区主、次干道平均车速都在 25 km·h⁻¹ 左右,市区快速路、跨江大桥平均车速达到 30 km·h⁻¹。

2.2 一氧化碳(CO)排放特性

图 3 所示为一氧化碳(CO)的车载实际道路排

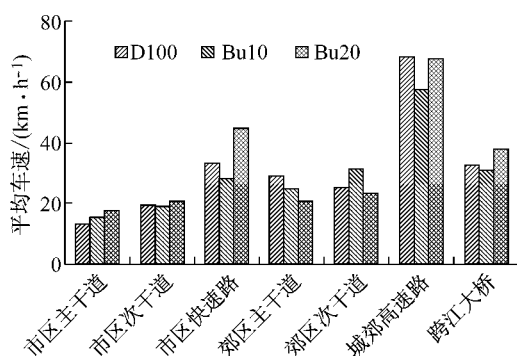


图2 不同燃料不同道路类型平均车速

Fig.2 The average velocity of different fuels on different roads

放特性. 从图 3a 可知, 不同道路类型下, Bu10 和 Bu20 的 CO 每公里排放因子较 D100 均明显降低, 尤其是在平均车速相对较低的道路, 如市区主、次干道和郊区主、次干道, 其 CO 排放降低最明显. 而且在不同道路类型下, Bu10 的 CO 每公里排放因子都要略高于 Bu20.

从图 3b 中可以看出, 在不同比功率下, D100 的 CO 每秒排放因子均高于 Bu10 和 Bu20, 且在比功率较高的时候, Bu10 和 Bu20 随丁醇比例升高对 CO 的减排效果越为明显.

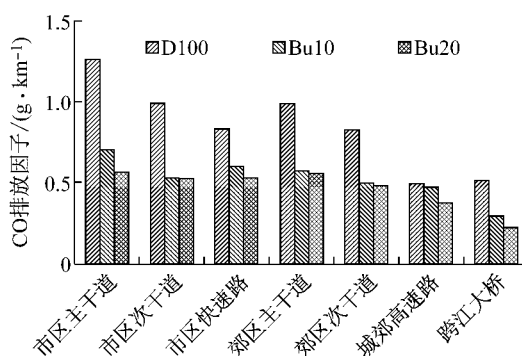
从图 3c 可知, 3 种燃料相比, Bu20 全程的 CO 每公里排放因子最低, D100 全程的 CO 每公里排放因子最高. Bu20 全程的 CO 每公里排放因子比 D100 低 45.3%, Bu10 全程的 CO 每公里排放因子比 D100 低 38.0%.

从 CO 的车载实际道路排放特性可知, Bu20 的 CO 排放因子均略低于 Bu10, 明显低于 D100. 这主要是由于丁醇具有较高的含氧量, 柴油中加入丁醇使得燃烧时氧含量增加, 燃烧更加充分, 同时由于两种燃料沸点不同而产生的微爆现象也使得燃烧喷雾更加细化, 改善了燃烧效果, 因此由于燃料不完全燃烧生成的 CO 就相对减少, 且随着丁醇掺混比例的增加, 丁醇柴油含氧量越高, 降低 CO 排放的效果越明显.

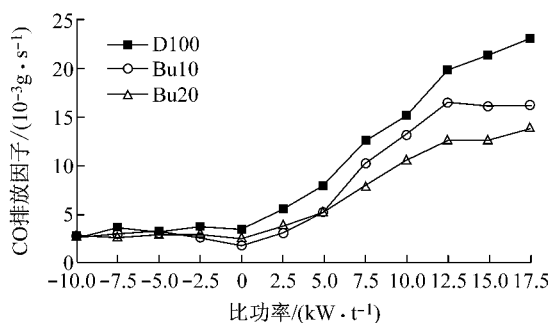
2.3 总碳氢(THC)排放特性

图 4 所示为总碳氢(THC)的车载实际道路排放特性. 从图 4a 可知, 在 7 种不同道路类型下, Bu20 的 THC 每公里排放因子略高于 Bu10, 且均高于 D100.

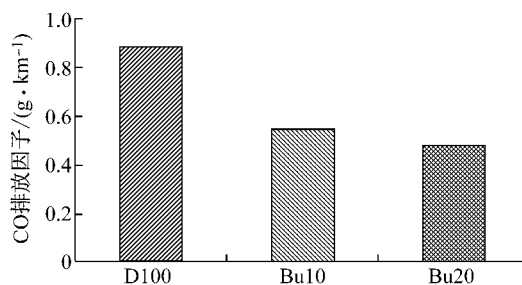
从图 4b 可知, 在不同比功率下, 与 D100 相比, Bu10 和 Bu20 的 THC 每秒排放因子均明显增加, 且随着丁醇的掺入比例提高, THC 排放升高越明显.



a 不同道路类型下 CO 的排放因子



b 不同比功率下 CO 的排放因子



c 试验全程 CO 的排放因子

图3 CO 的车载实际道路排放特性

Fig.3 The characteristics of CO on-road emission

当比功率 <0 时, 由于发动机的倒拖, 喷油量明显减少, 因此在这种工况下, Bu10 和 Bu20 的 THC 每秒排放因子没有明显增加, 而与 D100 相近.

从图 4c 可知, 随着丁醇掺混比例的增加, THC 的全程每公里排放因子逐渐增加, 即 Bu20 高于 Bu10 高于 D100. 与 D100 相比, Bu20 的 THC 全程每公里排放因子升高 55%, Bu10 升高 31%.

从 THC 的车载实际道路排放特性可知, 柴油中加入丁醇, 会使得 THC 的排放明显升高, 并且随丁醇掺混比例的增加, THC 排放升高越明显. 这主要是由于丁醇气化潜热较大, 且热值相比柴油较低, 因此丁醇柴油混合燃料燃烧时的温度就相对降低, 使得壁面淬熄的范围变大, 相应未燃总碳氢的排放增加.

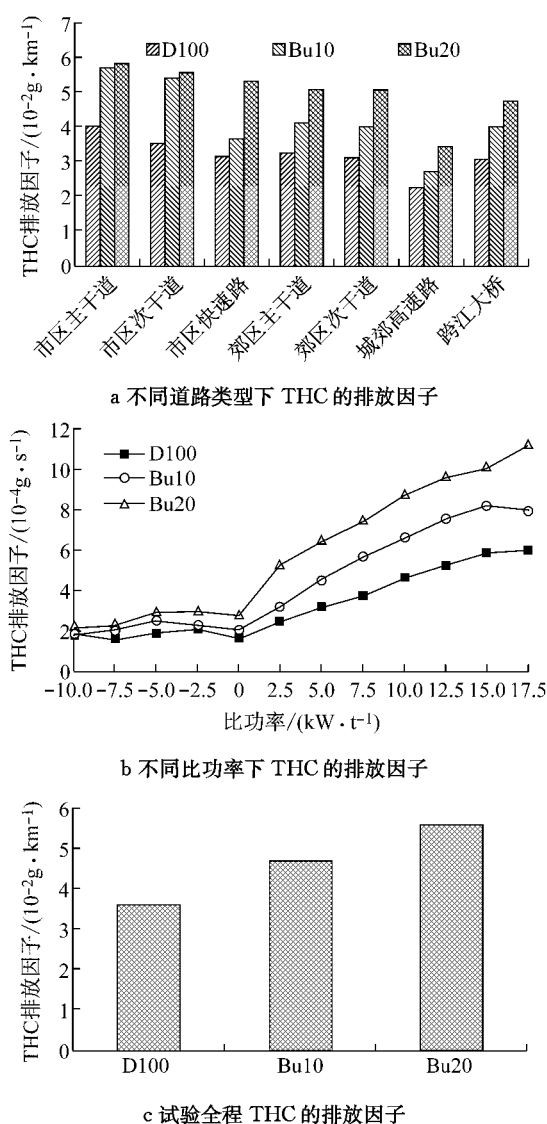


图4 THC的车载实际道路排放特性

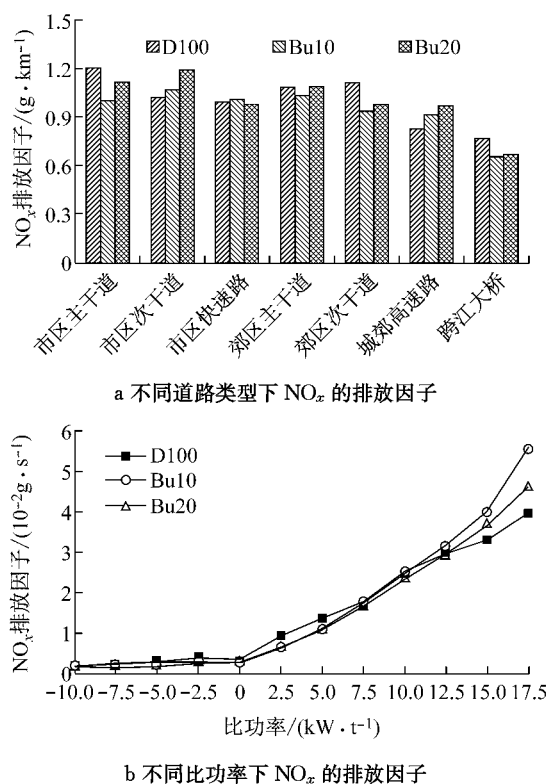
Fig.4 The characteristics of THC on-road emission

2.4 氮氧化物(NO_x)排放特性

图5所示为氮氧化物(NO_x)的车载实际道路排放特性.从图5a,5b可知,不同道路类型和不同比功率下,Bu10和Bu20的 NO_x 排放基本与D100相同.在比功率较大的工况下,Bu10和Bu20的 NO_x 每秒排放因子要略高于D100.在比功率较低的工况下,Bu10和Bu20的 NO_x 每秒排放因子要略低于D100.

从图5c可知,Bu10,Bu20和D100的 NO_x 全程每公里排放因子基本相同,均为 $0.97 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ 左右.从 NO_x 的车载实际道路排放特性可知,理论上丁醇的气化潜热相比柴油大且热值低,因此柴油中掺入一定比例丁醇会增大燃料的气化潜热并降低热值,进而会降低气缸内的燃烧温度,从而降低 NO_x 的排放;但是由于丁醇属于含氧燃料,其加入会使得

燃烧在一个相对富氧的环境中进行,因此又相应增加 NO_x 的排放.这两方面共同制约下,Bu10和Bu20的 NO_x 排放因子与D100相差不多.在较高功率密度下,单位时间内喷油量增加,发动机功率增加,燃烧温度上升,使得丁醇降低燃烧温度的作用不再明显,富氧的影响占上风,因此 NO_x 的每秒排放因子增加了.

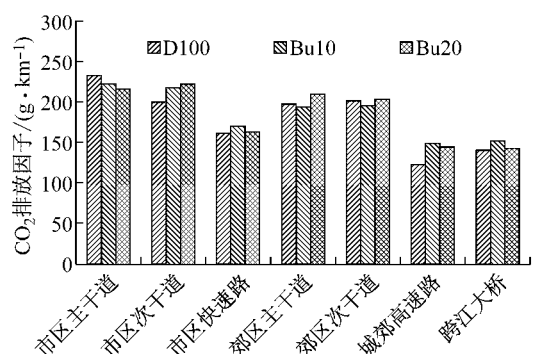
图5 NO_x 的车载实际道路排放特性Fig.5 The characteristics of NO_x on-road emission

2.5 二氧化碳(CO_2)排放特性

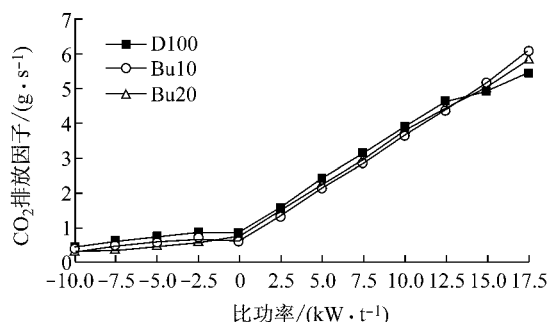
图6所示为二氧化碳(CO_2)的车载实际道路排放特性.从图6a可知,在不同道路类型下,Bu10和Bu20的 CO_2 每公里排放因子基本相同,且在大部分道路类型下,Bu10和Bu20的 CO_2 每公里排放因子都要略高于D100.

从图6b中可知,Bu10和Bu20的 CO_2 每秒排放因子与D100基本相同.在比功率较低的工况下,

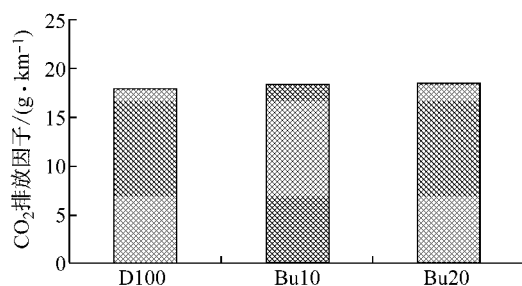
Bu20 的 CO_2 排放因子基本都低于 Bu10 且均低于 D100,而在比功率较高的工况下,Bu10 和 Bu20 的 CO_2 排放因子均高于 D100.这是由于在低功率密度的工况下,涡轮增压器不工作,丁醇柴油含氧,相当于通入了更多的空气,使得燃烧更加充分,发动机输出功率增加,因此单位时间 CO_2 排放因子减少;而在高功率密度的工况下,随着涡轮增压器的介入,丁醇柴油含氧优势不再明显,而喷油量的增加使丁醇柴油的低热值表现更明显,因此单位时间 CO_2 排放因子增加。



a 不同道路类型下 CO_2 的排放因子



b 不同比功率下 CO_2 的排放因子



c 试验全程 CO_2 的排放因子

图6 CO_2 的车载实际道路排放特性

Fig.6 The characteristics of CO_2 on-road emission

从图6c可知,Bu10和Bu20的全程 CO_2 每公里排放因子与D100基本相同,均略高于D100,且增幅比例都在3%以下。

从 CO_2 的车载实际道路排放特性可知,丁醇柴油混合燃料的使用使得柴油乘用车 CO_2 的排放略有

升高,但升高幅度很小,由此表明使用低比例丁醇柴油混合燃料对柴油乘用车的油耗影响很小.丁醇柴油含氧可以改善燃烧特性,使得燃烧更加充分,同时由于丁醇柴油的热值比纯柴油要低,因此又会影响单位体积燃料的最大输出功率。

3 结论

(1) 不同道路类型下的汽车运行工况不同,市区主干道和市区次干道的怠速工况较多,加速度工况变化较大;城郊高速路、市区快速路和跨江大桥怠速工况较少,加速度变化稳定;郊区主干道和郊区次干道怠速工况和加速度变化适中。

(2) 丁醇柴油混合燃料能够明显降低CO的排放,并且随丁醇比例增加,CO降低越明显.不同道路类型下,丁醇柴油混合燃料的CO排放均明显降低,市区主、次干道和郊区主、次干道CO排放降低最明显.在不同工况下,丁醇柴油混合燃料CO排放明显降低,且随丁醇比例增加而越明显.这是由于丁醇柴油含氧,同时燃烧有微爆效应,因此可以较好地改善燃烧,使得燃料燃烧更加充分。

(3) 丁醇柴油混合燃料的使用会明显提高THC的排放.不同道路类型、不同工况下,丁醇柴油混合燃料均会使得THC的排放增加,并且随丁醇比例的增加,THC增加越明显.这主要是由于丁醇的气化潜热较大,热值较低,使得燃烧温度降低,壁面淬熄范围变大,THC排放增加。

(4) 不同道路类型、不同工况下,丁醇柴油混合燃料对 NO_x 的排放影响较小.与燃用纯柴油相比,在较低功率密度工况下, NO_x 的排放略有减少,但是到了较高功率密度工况下, NO_x 的排放明显增加.因为丁醇柴油混合燃料的较低燃烧温度使得 NO_x 的排放减少,但丁醇富氧燃烧又使得 NO_x 的排放增加,两方面相互制约,因此 NO_x 的排放变化不大。

(5) 丁醇柴油混合燃料的使用会略微提高 CO_2 的排放.与燃用纯柴油相比,在较低功率密度工况下, CO_2 的排放略有减少,但是到了较高功率密度工况下, CO_2 的排放略微增加.这是由于丁醇柴油含氧,可以改善燃烧,提高效率,同时丁醇柴油热值相对较低,会略微提高燃油消耗率。

参考文献:

- [1] 杨晓莉. 2011年中国柴油表观消费量增加7.6%[DB/OL]. [2012-09-08]. <http://www.drcnet.com.cn/>.

- Diesel apparent consumption increased 7.6% of China in 2011 [DB/OL]. [2012-09-08]. <http://www.drcnet.com.cn/>.
- [2] 殷地亮. 替代燃料汽车的综合评价研究[D]. 北京: 北京交通大学土木建筑工程学院, 2007.
- YIN Diliang. Comprehensive evaluation research on alternative fuels of vehicle[D]. Beijing: School of Civil Engineering of Beijing Jiaotong University, 2007.
- [3] 顾阳, 蒋宇, 吴辉, 等. 生物丁醇制造技术现状和展望[J]. 生物工程学报, 2010, 26(7): 914.
- GU Yang, JIANG Yu, WU Hui, et al. Current status and prospects of biobutanol manufacturing technology[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2010, 26(7): 914.
- [4] 曾现军, 邓建, 孔华, 等. 丁醇作为车用替代燃料的研究进展[J]. 小型内燃机与摩托车, 2012, 41(1): 76.
- ZENG Xianjun, DENG Ji, KONG Hua, et al. The research progress of butanol as an alternative vehicle fuels[J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2012, 41(1): 76.
- [5] Weiskirch C, Kaack M, Blei I. et al. Alternative fuels for alternative and conventional diesel combustion systems [C]//SAE. Rosemont; SAE, 2008; 2008-01-2507.
- [6] Mate Zöldy, Andras Hollo, Artur Thernes. Butanol as a diesel extender option for internal combustion engines [C]//SAE. Detroit; SAE, 2010; 2010-01-0481.
- [7] 刘宇, 李君, 高莹. 生物柴油-柴油-丁醇燃料喷雾与燃烧过程可视化实验[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(7): 34.
- LIU Yu, LI Jun, GAO Ying. Optical investigation on spray and combustion by using biodiesel-diesel-butanol blend fuel [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2011, 41(7): 34.
- [8] Rakopoulos D C, Rakopoulos C D, Papagiannakis R G, et al. Combustion heat release analysis of ethanol or n-butanol diesel fuel blends in heavy-duty DI diesel engine [J]. Fuel, 2011, 90: 1855.
- [9] Rakopoulos C D, Rakopoulos D C, Giakoumis E G, et al. The combustion of n-butanol/diesel fuel blends and its cyclic variability in a direct injection diesel engine [J]. Journal of Power and Energy, 2011, 255: 289.
- [10] Valentino G, Corcione FE, Iannuzzi SE, et al. Experimental study on performance and emissions of a high speed diesel engine fuelled with n-butanol diesel blends under premixed low temperature combustion [J]. Fuel, 2012, 92(1): 295.
- [11] Rakopoulou D C, Rakopoulou C D, Giakoumis E G, et al. Effects of butanol-diesel fuel blends on the performance and emissions of a high-speed DI diesel engine [J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(10): 1989.
- [12] Ogsuzhan Dogsan, The influence of n-butanol/diesel fuel blends utilization on a small diesel engine performance and emissions [J]. Fuel, 2011, 90(7): 2467.
- [13] Sehmus Altun, Cengiz Oner, Fevzi Yasar, et al. Effect of n-butanol blending with a blend of diesel and biodiesel on performance and exhaust emissions of a diesel engine [J]. ACS Publications, 2011, 50: 9425.
- [14] Constantine D. Rakopoulos, Athanasios M. Dimaratos, Evangelos G. et al. Investigating the emissions during acceleration of a turbocharged diesel engine operating with biodiesel or n-butanol diesel fuel blends [J]. Energy, 2010, 35 (12): 5173.
- [15] Lin S L, Lee W J, Lee C 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(3): 364.
- [16] Carl Enfield, Joseph Bachman, Anthony Erb, et al. Evaluating real-world fuel economy on heavy-duty vehicles using a portable emissions measurement system [C/CD]//Commercial Vehicle Engineering Congress and Exhibition. Chicago; SAE, 2006.
- [17] 胡志远, 李金, 李文书, 等. 柴油轿车燃用不同替代燃料的排放特性研究[J]. 汽车技术, 2011(5): 23.
- HU Zhiyuan, LI Jin, LI Wenshu, et al. Emission characteristic analysis on a diesel vehicle with different alternative fuels[J]. Automobile Technology, 2011(5): 23.
- [18] 陈小鸿. 上海城市道路分级体系研究[J]. 城市交通, 2004(1): 39.
- CHEN Xiaohu. Classification architectural study of Shanghai's roads[J]. Urban Transport of China, 2004(1): 39.
- [19] Jose Luis Jimenez Palacios. Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing [D]. Cambridge; Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [20] Environmental Protection Agency of USA. Methodology for developing modal emission rates for EPA's multi-scale motor vehicle and equipment emission system[R]. Washington D C; EPA, 2002.