

柴油机燃用柴油-丙烷混合燃料的性能与排放研究

马志豪^{1,2}, 黄佐华¹, 李冲霄¹, 王锡斌¹, 苗海燕¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 河南科技大学车辆与动力工程学院, 471003, 洛阳)

摘要: 利用高压氮气将丙烷在常温下液化,按不同比例与柴油进行充分而均匀的混合,制成柴油-丙烷混合燃料.在直喷式柴油机上开展了燃用柴油-丙烷混合燃料时的发动机性能和排放特性研究.研究表明:与燃用柴油相比,燃用柴油-丙烷混合燃料时,在整条曲线上,有效热效率随混合燃料中丙烷比例的增加而增加,平均由31.6%增加至33.7%;有效燃料消耗率随混合燃料中丙烷比例的增加而降低,平均由268.3 g/(kW·h)降低至248.6 g/(kW·h);CO、HC和碳烟排放随混合燃料中丙烷比例的增加而降低,CO排放平均由0.059%降至0.046%,HC排放平均由 45×10^{-6} 降至 21.8×10^{-6} ,碳烟排放平均由 1.057 m^{-1} 降至 0.364 m^{-1} ;NO_x排放随混合燃料中丙烷比例的增加而增加,平均由 730×10^{-6} 增至 $1\,226 \times 10^{-6}$.

关键词: 丙烷;柴油;混合燃料;发动机;排放

中图分类号: TK411.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)09-1083-04

Performance and Emission of Diesel Engine Operating on Diesel-Propane Blends

Ma Zhihao^{1,2}, Huang Zuohua¹, Li Chongxiao¹, Wang Xibin¹, Miao Haiyan¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. College of Vehicle & Motive Power Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: High pressure nitrogen was used to liquefy propane under the normal temperature obtaining the sufficient and uniform mixing of propane and diesel with different proportions. Engine performance and emissions were investigated in a direct-injection diesel engine with diesel fuel and the diesel-propane blends. The results show that when the proportion of propane in the blends increases from 0 to 14%, the effective thermal efficiency increases from 31.6% to 33.7%, the brake specific fuel consumption decreases from 268.3 g/(kW·h) to 248.6 g/(kW·h), the CO emission falls from 0.059% to 0.046%, the HC emission descends from 45×10^{-6} to 21.8×10^{-6} , and the smoke emission goes down from 1.057 m^{-1} to 0.364 m^{-1} , however the NO_x emission rises from 730×10^{-6} to $1\,226 \times 10^{-6}$.

Keywords: propane; diesel; blend; engine; emission

节约能源和环境保护问题已成为当今世界面临的两大主题.柴油机以其良好的经济性而广泛应用于动力装置中.柴油机的碳烟排放一直是柴油机需要重点解决的关键问题,采用高压喷射和改善喷雾

质量可以实现降低碳烟排放的目的.在改善喷雾质量方面,许多学者开展了大量研究工作,如采用柴油乳化^[1]、利用燃料的闪急沸腾喷射^[2-3]、使用含氧燃料^[4]和混合燃料^[5],以及采用双燃料发动机^[6]等.其

收稿日期: 2006-12-19. 作者简介: 马志豪(1965~),男,在职博士生,副教授;黄佐华(联系人),男,教授,博士生导师.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50576070);优秀国家重点实验室基金资助项目(50323001);国家自然科学基金委创新研究群体科学基金资助项目(50521604).

中,将气体燃料溶入液体燃料来达到改善雾化和燃烧的研究已开展了一些工作. Solomon 等人^[7]把空气溶入液体燃料中来研究其喷雾和燃烧特性. Senda^[8]、黄震^[9]、Kawa^[10]以及 Shiga^[11]等人研究了液化 CO₂ 溶入柴油后的闪急沸腾喷射. Gemci 等人^[12]开展了正十六烷与正丁烷混合燃料的闪急沸腾雾化研究,发现混合燃料中少量的正丁烷可以显著改善正十六烷/正丁烷混合燃料的雾化质量. 张俊强等人^[13-14]开展了甲烷溶入柴油中的喷雾特性以及发动机燃烧特性的研究,也证实了溶气柴油可以改善燃料的喷雾效果. 由于目前溶气燃料在发动机上的研究并不多见,所以有必要进行柴油溶气后发动机性能和排放特性的研究. 由于丙烷比甲烷更容易溶入柴油,因此本研究选择丙烷作为气体燃料,在高压下溶入柴油中并开展发动机性能和排放的研究工作.

1 燃料的主要理化性能

表1给出了柴油和丙烷的理化特性,其中对喷雾和燃烧影响最大的是燃料的沸点和十六烷值. 丙烷的沸点远低于柴油,当喷入发动机气缸内时会气化,有助于改善混合燃料的雾化质量. 丙烷的十六烷值低,与柴油混合后将降低混合燃料的十六烷值,使着火滞燃期增加.

表1 柴油和丙烷的理化特性

特性	柴油	丙烷
分子式	C _x H _y	C ₃ H ₈
相对分子质量/g	190~220	44.1
密度/g·cm ⁻³	831	489(液), 21.7(气)
低热值/MJ·kg ⁻¹	44	46.33
汽化潜热/MJ·kg ⁻¹	260	426
自燃温度/K	523	763
沸点/°C	180~370	-42
十六烷值	45	很低
空燃当量比	14.6	15.6
w(C)/%	86	81.8
w(H)/%	14	18.2

2 试验装备及运转工况

所用发动机为单缸水冷直喷式 ω 型燃烧室,缸径和冲程分别为 100 mm 和 115 mm,压缩比为 18,喷油嘴孔径和喷孔数分别为 0.32 mm 和 4. NO_x 的浓度由 Horiba MEXA-720 排放分析仪测量,CO 和 HC 的浓度由 Horiba MEXA-554J Series 排气分析仪测量,烟度由 AVL Dismoke 4000 不透光烟度计测量.

柴油溶入丙烷混合燃料的制备:将一定量的柴

油加入高压容器内,用高压氮气先将丙烷液化,再将其压入装有柴油的高压容器. 根据需要,可以按不同的比例加入柴油和丙烷. 用氮气将高压容器内的压力调整到 2 MPa(此时环境温度为 20 °C)使丙烷保持液态,以便与柴油充分混合. 本研究制备了丙烷质量分数分别为 0、6%、14%和 25%(分别用 P0、P6、P14 和 P25 表示)的 4 种丙烷/柴油混合燃料. 试验时供给发动机燃料的压力维持在 1.5 MPa 以上,以保证丙烷仍为液态. 在试验过程中发现,使用 P25 燃料时,由于燃料供给系统发生气阻,使得发动机根本无法启动,所以仅对前 3 种燃料进行了试验研究. 测试工况见表 2.

表2 发动机运转工况

转速 $n/r \cdot \min^{-1}$	平均有效压力 p_{me}/MPa
2 200	0.58
2 000	0.61
1 800	0.64
1 600	0.65
1 400	0.70
1 200	0.69
1 000	0.67

3 试验结果及分析

衡量发动机经济性能的另一指标是有效热效率 η_{et} . 丙烷-柴油混合燃料有效热效率的计算公式为

$$\eta_{et} = \frac{3.6 \times 10^3 P_e}{H_{ud}B(1-\omega_1) + H_{up}B\omega_1} = \frac{3.6 \times 10^6}{[H_{ud}(1-\omega_1) + H_{up}\omega_1]b_e}$$

式中: P_e 为发动机的有效功率, kW; H_{ud} 为柴油的低热值, 此处取 42 500 kJ·kg⁻¹; H_{up} 为丙烷的低热值, 此处取 46 330 kJ·kg⁻¹; B 为混合燃料的小时消耗量, kg·h⁻¹; ω_1 为混合燃料中丙烷的质量分数; b_e 为发动机有效燃料消耗率, g·(kW·h)⁻¹.

图 1 和图 2 分别是燃用混合燃料时发动机的有效热效率和有效燃料消耗率随发动机转速的变化关系. 可以看出:有效热效率随混合燃料中丙烷含量的增加而增加,但增加的幅度逐渐减小;有效燃料消耗率随混合燃料中丙烷含量的增加而下降. 柴油中溶入丙烷后,使混合燃料的密度、黏度和表面张力降低,使喷雾油滴尺寸减小并且更易破碎,同时具有良好挥发性的丙烷会使喷雾产生闪急沸腾现象,从而促进了燃料的雾化、蒸发和与空气混合,使滞燃期内形成的可燃混合气数量增加,导致燃烧过程中预混合燃烧比例增大,发动机的燃油经济性得到提高.

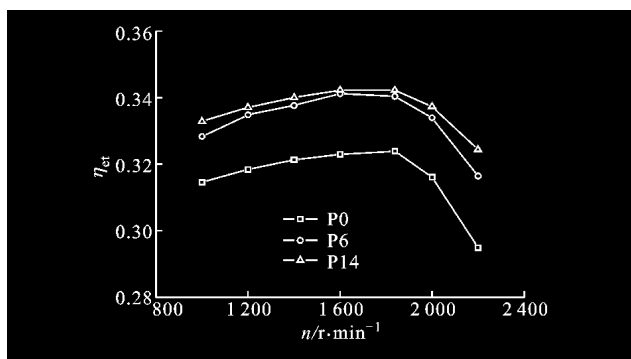


图1 有效热效率与转速的关系

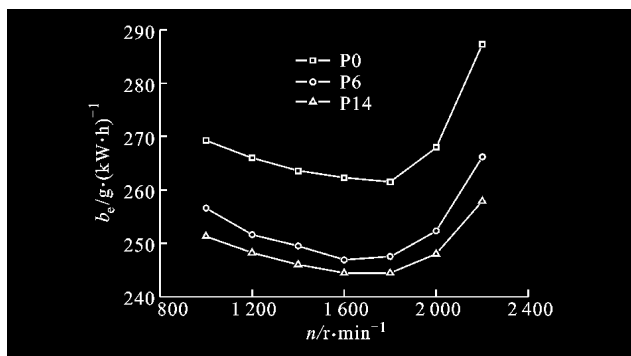


图2 有效燃料消耗率与转速的关系

图3是混合燃料 NO_x 排放随转速的变化关系。可以看出, NO_x 的排放随丙烷掺入量的增加而增加。 NO_x 的生成条件是富氧、高温及高温下的持续时间。预混合燃烧是形成 NO_x 的主要阶段, 因为此时缸内处于富氧和高温状态, 满足了生成 NO_x 的条件。柴油掺混丙烷后, 因雾化质量改善, 预混燃烧比例增加, 导致 NO_x 排放量增加。高转速下由于充气效率降低(混合气变浓)和高温停留时间缩短, NO_x 排放下降。柴油中溶入丙烷后, 使预混合燃烧比例增加, 从而增加了 NO_x 的排放。

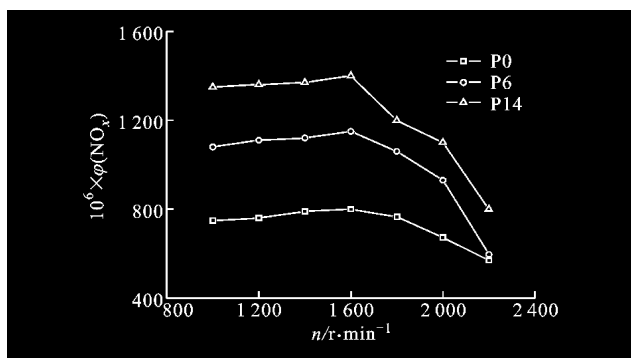
图3 NO_x 排放与转速的关系

图4是混合燃料 CO 排放随转速的变化关系。可以看出: 转速在 $1400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 以上时, CO 排放随转速的变化平缓; 转速在 $1400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 以下时, 随着转速的降低, CO 排放急剧升高, 这是因为低转速下发动机充气效率低, 缸内涡流强度低, 混合气过量空气系数下降, 燃油-空气混合质量下降, CO 排放量增加。高转速下, 尽管过量空气系数有所降低, 但涡流强度大,

燃油-空气混合能力提高, 此外高速下膨胀和排气过程中的较高温度也促使 CO 的进一步氧化。由图还可看出, CO 排放随柴油中溶入丙烷量的增加而下降。丙烷的加入使预混合燃烧所消耗的燃料量增加, 扩散燃烧所消耗的燃料量减少。另外, 丙烷中碳的质量分数是 0.82, 而柴油是 0.87, 丙烷中氢的质量分数是 0.18, 而柴油是 0.13, 因此丙烷含量越高, 燃料的含碳量相对于柴油来讲就越少。混合燃料在缸内燃烧时的温度较高, 这对 CO 的后氧化有利, 最终使 CO 排放量随丙烷掺混量的增加而下降。

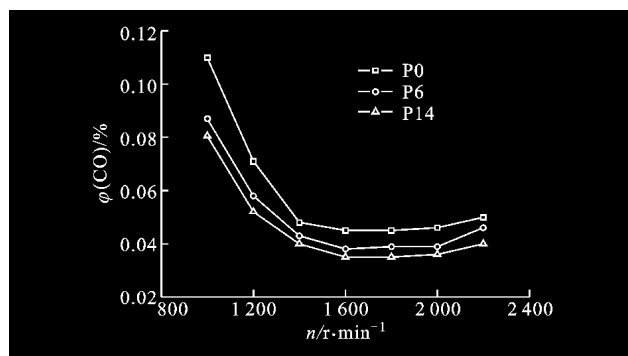


图4 CO 排放与转速的关系

图5是混合燃料 HC 排放与转速的变化关系, 可以看出 HC 排放随丙烷含量的增加而增加。3 种燃料的 HC 排放均在转速为 $1400 \sim 1600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的范围内最低。在柴油机中, 燃料的喷射雾化、蒸发及其与空气的混合对 HC 排放的影响最大, 而丙烷的加入促进了燃料的雾化、蒸发和与空气的混合, 过浓混合气区域减小, 同时丙烷掺混后预混合燃烧量的增加使缸内混合燃料燃烧时温度升高, 有利于 HC 的后氧化。混合气的过稀或过浓都会产生大量的 HC。由于转速低于 $1400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 和高于 $1600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时充气效率下降, 混合气过量空气系数下降, 因而使得 HC 排放增加。

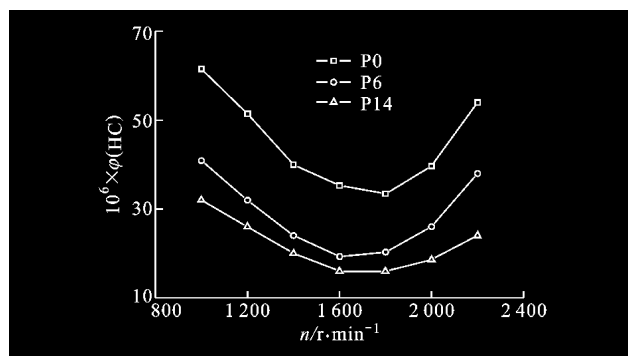


图5 HC 排放与转速的关系

图6是用消光系数 K (单位为 m^{-1}) 来表示的混合燃料碳烟排放与转速的变化关系。可以看出, 柴油中溶入丙烷对碳烟排放的影响非常显著。扩散燃烧

成为产生碳烟的重要阶段,因为此时缸内氧气量相对较低,燃料又处在高温燃气中,极易生成碳烟.柴油中溶入丙烷后使预混合燃烧的比例增加,扩散燃烧的比例相对减少.同时,丙烷加入后减少了柴油的消耗量,从而减少了混合燃料中硫和芳香烃的比例.此外,丙烷-柴油混合燃料的表面张力、密度和黏度均小于纯柴油,丙烷喷入燃烧室后,会发生闪急沸腾现象而迅速气化,提高了混合燃料的雾化质量.这些都对降低碳烟排放有积极作用.

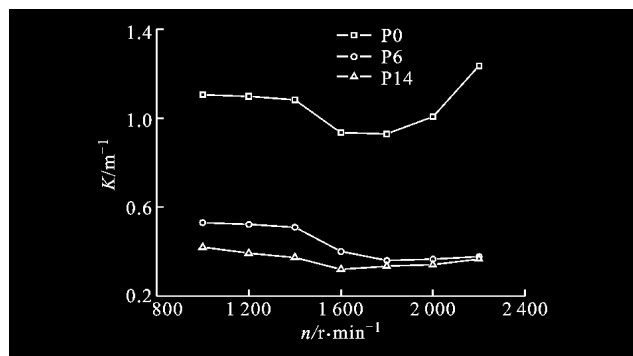


图6 碳烟排放与转速的关系

4 结 论

本文开展柴油机燃用柴油和柴油-丙烷混合燃料的性能和排放研究,获得的结论如下:

(1)有效热效率随混合燃料中丙烷含量的增加而提高,有效燃料消耗率随混合燃料中丙烷含量的增加而降低;

(2)CO、HC 和碳烟排放随混合燃料中丙烷含量的增加而降低,NO_x 排放随混合燃料中丙烷含量的增加而增加;

(3)燃用丙烷质量分数为 14% 的柴油-丙烷混合燃料时,发动机的 NO_x 排放量大幅增加,而动力性以及 CO、HC 和碳烟排放性能并没有大幅提高,所以丙烷的质量分数控制在 14% 以内为宜.

参考文献:

- [1] Armasa O, Ballesterosa R, Martosb F J, et al. Characterization of light diesel engine pollutant emissions using water-emulsified fuel[J]. *Fuel*, 2005, 84(7/8): 1011-1018.
- [2] Rajshekhar D O, James F S. An experimental and analytical study of flash boiling fuel injection, SAE technical paper 830590[R]. Washington: SAE Inc., 1983.
- [3] Park B S, Lee S Y. An experimental investigation of the flash atomization mechanism [J]. *Atomization and Sprays*, 1994, 4(2):159-179.
- [4] Huang Zuohua, Wang Hewu, Chen Hongyan. Study on combustion characteristics of compression ignition engine fueled with dimethyl ether [J]. *Journal of Automobile Engineering*, 2000, 213 (D3):647-652.
- [5] Huang Zuohua, Jiang Deming, Zeng Ke. Combustion characteristics and heat release analysis of a compression ignition engine fueled with diesel-dimethyl carbonate blends [J]. *Journal of Automobile Engineering*, 2003, 217(D7): 595-606.
- [6] Papagiannakis R G, Hountalas D T. Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine operated with pilot diesel fuel and natural gas [J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45(18/19): 2971-2987.
- [7] Solomon A S P, Chen L D, Faeth G M. Investigation of spray characteristics for flashing injection of fuels containing dissolved air and superheated fuels, NASA contractor report 3563 [R]. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 1982.
- [8] Senda J, Hashimoto K, Ifuku Y, et al. CO₂ mixed fuel combustion system for reduction of NO and soot emission in diesel engine, SAE technical paper 970319 [R]. Washington: SAE Inc., 1997.
- [9] Huang Zuohua, Shao Y M, Shiga S. Atomization behavior of fuel containing dissolved gas [J]. *Atomization and Sprays*, 1994, 4(2):123-133.
- [10] Kawa B, Senda J, Fujimoto H. Analysis of vaporization process in liquefied CO₂ mixed fuel by use of flash spray model [C]//Proceedings of the 7th Symposium (ILASS-Japan) on Atomization. Gunma, Japan: Japan Society of Atomization, 1998:337-342.
- [11] Shiga S, Kichikawa Y, Nakamura H. Effect of CO₂ dissolution on the spray characteristics of biomass fuel [C]//Proceedings of the 10th Symposium (ILASS-Japan) on Atomization. Gunma, Japan: Japan Society of Atomization, 2001:131-134.
- [12] Gemci T, Yakut K, Chigier H T C. Experimental study of flashing atomization of binary hydrogen liquids [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2004, 30(4):395-417.
- [13] Zhang Junqiang, Jiang Deming, Huang Zuohua, et al. Experimental study on flashing atomization of methane/liquid fuel binary mixtures [J]. *Energy and Fuels*, 2005, 19(4):1403-1412.
- [14] Zhang Junqiang, Jiang Deming, Huang Zuohua, et al. Performance and emission of direct injection diesel engine fuelled with diesel containing dissolving methane [J]. *Energy and Fuels*, 2006, 20(2):264-272.

(编辑 荆树蓉)