

二冲程点燃式直喷重油发动机小负荷试验

魏民祥, 刘锐, 杨海青, 贝太学, 季昊成, 常诚

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 利用燃用轻柴油的二冲程点燃式空气辅助缸内直喷发动机,进行了转速为 3 000 r/min、节气门开度为 10%与 20%下的小负荷试验,研究了点火及喷油参数对发动机性能的影响。试验结果表明:当节气门开度较小时,采用上止点前 30°~40°点火提前角,饱和点火能量,稀混合气(过量空气系数大于 1.1)及适度提前混合物喷射结束时刻的策略能够充分改善发动机动力性和经济性。随着负荷增大,点火能量影响程度减小,采用适度推迟点火提前角,偏浓混合气(过量空气系数小于 1.0)及提前喷射结束时刻策略,增加燃油蒸发时间来充分发挥发动机动力性能,而采用饱和点火能量,偏稀混合气(过量空气系数大于 1.15)能够大幅度改善发动机经济性及 HC/CO 排放。

关 键 词: 小负荷; 二冲程; 重油发动机; 火花点火; 空气辅助直接喷射

中图分类号: V234; TK46

文献标志码: A

Partial load tests on a two-stroke spark ignition direct injection heavy fuel engine

WEI Minxiang, LIU Rui, YANG Haiqing,

BEI Taixue, JI Haocheng, CHANG Cheng

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The partial load tests at the engine speed of 3000 r/min and 10%, 20% throttle open positions were carried out on a two-stroke spark ignition diesel-fuelled engine with air-assisted direct injection, and the effects of ignition and injection parameters on the engine performance were investigated. The tests results indicated that, at the small throttle open position, applying the strategies of the ignition timing at 30°—40° crank angle before top dead center, the saturated ignition energy, the partial lean mixture (excess-air-ratio above 1.1) and the suitable injection timing can fully improve the engine power output and fuel economy. With the increase of engine load, the effects of the ignition energy reduced. Applying the strategies of the moderate delayed ignition timing, the partial rich mixture (excess-air-ratio below 1.0) and advancing the end of injection timing to increase the fuel evaporation time resulted in a remarkable engine power output. Furthermore, the fuel economy and HC/CO emissions of the engine improved greatly by the use of the saturated ignition energy and the partial lean mixture (excess-air-ratio above 1.15).

收稿日期: 2016-04-18

作者简介: 魏民祥(1963—),男,教授,博士,主要从事活塞发动机电子控制及信号测试等方面的研究。

E-mail: weimx@nuaa.edu.cn

通讯作者: 刘锐(1987—),男,助理研究员,博士,主要从事活塞发动机仿真计算与控制等方面的研究。E-mail: timothy@nuaa.edu.cn

引用格式: 魏民祥,刘锐,杨海青,等. 二冲程点燃式直喷重油发动机小负荷试验[J]. 航空动力学报,2017,32(12):2919-2926. WEI Minxiang, LIU Rui, YANG Haiqing, et al. Partial load tests on a two-stroke spark ignition direct injection heavy fuel engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(12): 2919-2926.

Key words: partial load; two-stroke; heavy fuel engine; spark ignition; air-assisted direct injection

二冲程点燃式发动机具有结构简单、质量少、成本低等优点,常用于小型无人机和摩托车等领域。重油燃料如航空煤油或轻柴油的闪点高,在管理、运输及使用安全性方面比汽油更有优势,因而点燃式重油发动机非常适用于军事领域。传统的二冲程发动机燃用重油时,在冷机下喷射出的燃油颗粒遇到冷壁面后会凝结成油膜,由于油膜蒸发缓慢造成难以在缸内形成着火所需的可燃混合气,导致发动机难以顺利启动^[1-5]。另外,采用进气道供油方式的二冲程发动机存在扫气损失及过后排气损失的问题,燃油经济性差、排放高,在小负荷时易失火。二冲程发动机直喷技术的应用近年来越来越受重视,直喷方式可以有效提高重油燃料雾化效果,在中小负荷工况下能有效避免扫气损失及过后排气损失,改善发动机的性能^[6]。

国外对点燃式重油活塞发动机的研究较多。Cathcart 等在二冲程和四冲程发动机上采用重油直喷技术,进行了不同工况的试验研究,得到了大量性能数据,但没有详细描述点火或喷油参数对重油发动机的影响规律^[6]。Padala 等研究了喷油参数对二冲程直喷汽油机性能的影响^[7]。Groenewegen 等研究了空气辅助气道喷射式发动机分别使用多种燃料时的动力及排放特性^[8-9]。Falkowski 等详细研究了不同点火参数及喷油参数对燃用航空煤油的二冲程直喷发动机在大负荷时燃烧性能的影响^[10]。国内有相关学者对夹气直喷及 FAI (free armature injection) 直喷汽油机进行了系统的研究^[11-12]。北京交通大学等学者通过数值模拟手段研究了点火参数及喷油参数对二冲程重油直喷发动机混合气形成及燃烧的影响^[13-17]。南京航空航天大学等学者对空气辅助二冲程直喷发动机的点火及喷油正时控制策略进行了初步研究^[18]。

本文基于低压空气辅助缸内直喷技术,结合双火花塞电感点火技术,以轻柴油作为燃料,将某二冲程气道电喷式原型汽油机改造为点燃式直喷重油发动机,并利用自行开发的发动机电控单元,对直喷重油发动机在小负荷工况的性能进行试验研究。

1 试验设备及方法

1.1 试验设备

表 1 给出了发动机的具体相关参数,图 1 为

点燃式重油发动机试验台架示意图,采用低压空气辅助缸内直喷方式供给燃油,燃油压力为 850 kPa,油气轨及喷嘴安装于发动机缸头上部,低压气源为空压机,气压为 650 kPa,测试系统包括测功机、尾气分析仪及数据采集仪等。

表 1 试验发动机参数
Table 1 Specifications of the test engine

参数	数值及详情
排量/cm ³	939
缸径/mm	76
行程/mm	69
压缩比	9.5
进气方式	簧片阀式
供油方式	空气辅助直接喷射
点火系统	电感点火

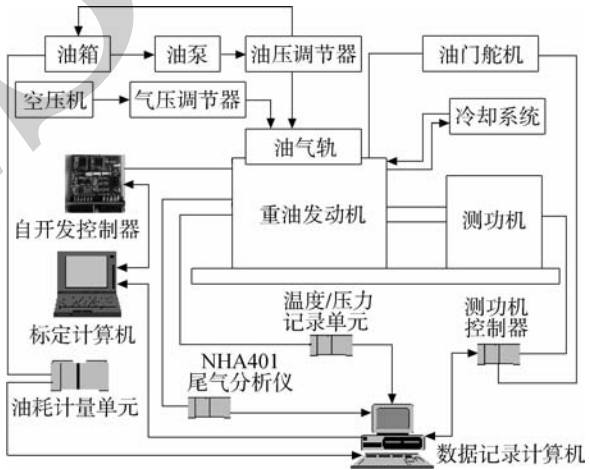


图 1 点燃式重油发动机试验台架示意图
Fig. 1 Test setup for spark ignition heavy fuel engine

1.2 试验方法

本文选择发动机转速为 3 000 r/min,节气门开度分别为 10%(工况 1)和 20%(工况 2)两个工况来开展试验。试验前,需要明确关键电控参数的在线调整方案,如图 2 为燃油喷射正时及点火正时示意图,包括喷射脉宽、油气喷射延迟时间、油气混合物喷射脉宽、油气混合物喷射结束时刻(θ_{in})、点火线圈初级充磁脉宽及点火提前角(θ_{ig})。为突出重点,试验主要围绕喷射脉宽、 θ_{in} 、充磁脉宽和 θ_{ig} 这些参数来进行,整个试验过程中将油气

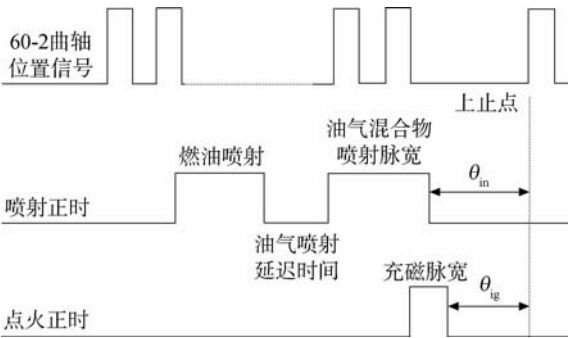


图 2 燃油喷射正时及点火正时示意图
Fig. 2 Sequence of fuel injection timing and ignition timing

喷射延迟时间设定为 1 ms,油气混合物喷射脉宽设定为 3 ms。

2 试验结果及分析

试验时,利用标定软件在线修改初级线圈充磁脉宽(τ_m)来调整点火能量,范围为 2~6 ms, θ_{ig} 的调整范围为上止点前 10°~40°。同样地,通过修改喷射脉宽来调整过量空气系数 α ,其范围为 0.9~1.15, θ_{in} 的调整范围为上止点前 40°~90°。

2.1 点火参数对发动机小负荷性能影响

在工况 1 条件下,将 θ_{in} 设为上止点前 50°,将喷油脉宽设为 1.1 ms, α 维持在 1.0 左右。如图 3、图 4 及图 5 给出了发动机功率输出及油耗性能数据。在相同充磁脉宽(τ_m)下,随着点火提前角的增大,发动机输出功率逐渐增大,燃油消耗率减小,排气温度逐渐降低。而在相同点火提前角下,随着充磁脉宽的增加,发动机功率增大,燃油经济性得到明显改善,尤其在点火提前角为上止点前 10°时,不同充磁脉宽下的功率变化最为显著。当点火提前角大于上止点前 30°时,功率差别很小。而不同于点火提前角,增大充磁脉宽提高了发动机

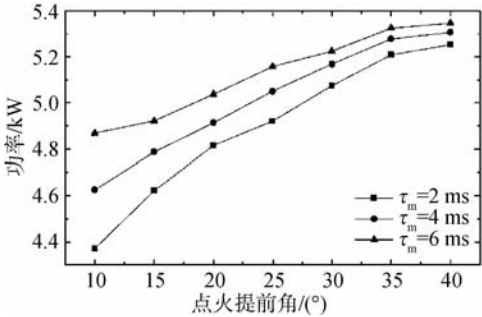


图 3 点火参数对发动机功率输出的影响(工况 1)
Fig. 3 Effects of ignition parameters on engine power output (test condition 1)

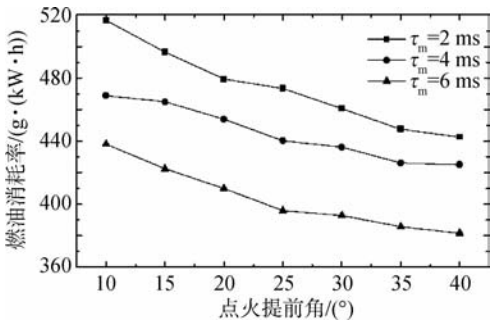


图 4 点火参数对燃油消耗率的影响(工况 1)
Fig. 4 Effects of ignition parameters on fuel consumption rate (test condition 1)

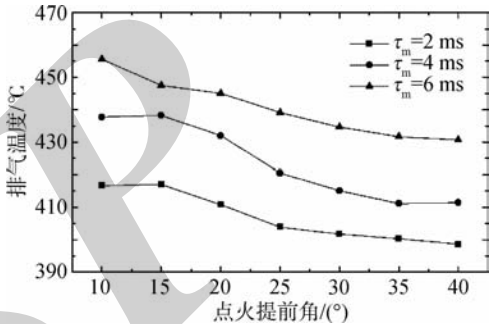


图 5 点火参数对排气温度的影响(工况 1)
Fig. 5 Effects of ignition parameters on exhaust gas temperature (test condition 1)

排气温度,从图 5 可以看出,充磁脉宽为 6 ms 时排气温度整体上比 2 ms 时的高出了将近 35 °C,显然这与发动机功率提升有着密不可分的关系。

图 6 与图 7 给出工况 1 下相应的排放变化规律,图中 φ 为体积分数。增大点火提前角使得 HC 排放逐渐降低,而 CO 排放在上止点前 30°之前增加较多,之后变化趋势区域平缓。值得注意的是,充磁脉宽在此工况下对发动机排放性能影响较大,在 2 ms 时 HC 体积分数(φ_{HC})最大值达到 8.3×10^{-4} ,而在 6 ms 时减小至 3.5×10^{-4} 。同时,提高点火能量能够有效降低 CO 排放量。此外,在点火提前角小于上止点前 25°,充磁脉宽为 2 ms 时,HC 及 CO 排放明显增大很多,主要在于为 2 ms 的充磁脉宽所产生的点火能量偏小,点燃重油混合气会变得困难,燃烧不完全,同时点火提前角变小时,后燃趋势增加,因此使得 HC 及 CO 排放增加明显。

在工况 2 条件下,将 θ_{in} 设为上止点前 50°,喷射脉宽设为 1.83 ms, α 维持在 0.95 左右。图 8、图 9 及图 10 给出了发动机功率输出及油耗变化规律。点火提前角增大至上止点前 30°之前,功率输出及燃油消耗率改善较大。在点火提前角为

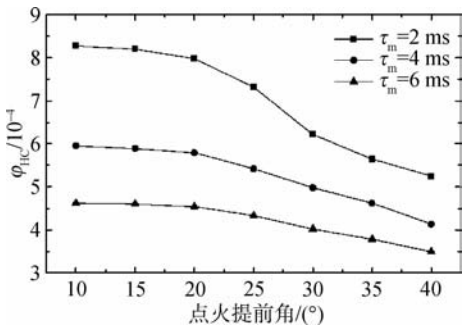


图 6 点火参数对 HC 排放的影响(工况 1)
Fig. 6 Effects of ignition parameters on HC emissions
(test condition 1)

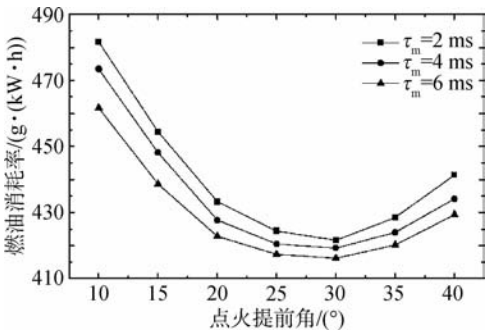


图 9 点火参数对燃油消耗率的影响(工况 2)
Fig. 9 Effects of ignition parameters on fuel
consumption rate (test condition 2)

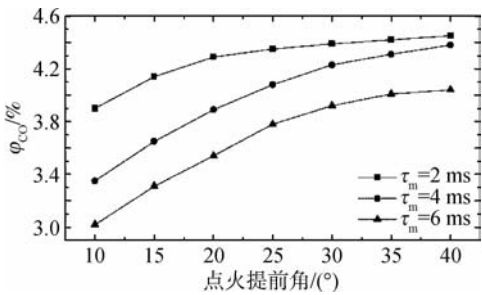


图 7 点火参数对 CO 排放的影响(工况 1)
Fig. 7 Effects of ignition parameters on CO emissions
(test condition 1)

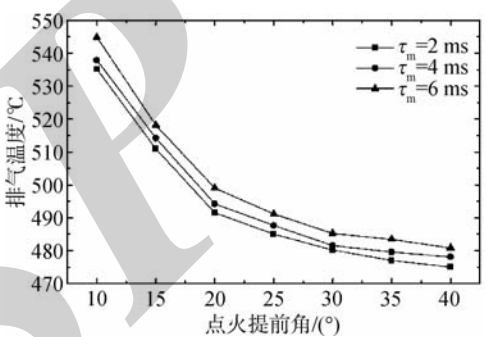


图 10 点火参数对排气温度的影响(工况 2)
Fig. 10 Effects of ignition parameters on exhaust gas
temperature (test condition 2)

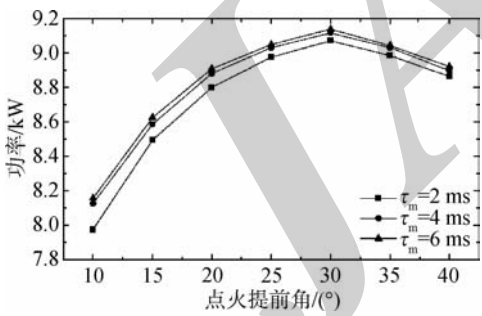


图 8 点火参数对发动机功率输出的影响(工况 2)
Fig. 8 Effects of ignition parameters on engine power
output (test condition 2)

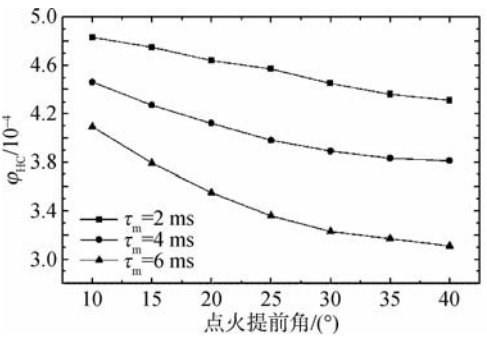


图 11 点火参数对 HC 排放的影响(工况 2)
Fig. 11 Effects of ignition parameters on HC
emissions (test condition 2)

上止点前 30°时功率出现最大值,燃油消耗率最低。当点火提前角大于上止点前 30°后,功率逐渐缓慢减小,消耗增加。当充磁脉宽由 2 ms 增大至 6 ms 过程中,发动机输出功率及排气温度均升高,燃油消耗率下降,但三者整体变化量均不大,主要在于发动机负荷增加后,燃烧产生热量增加,燃油雾化速度加快,对于点燃重油混合气更为有利。相对于工况 1,这也是排气温度随点火提前角的增大,其变化程度更加明显的主要原因。

图 11 与图 12 为工况 2 条件下的发动机排放

变化规律。显然,与工况 1 基本一致,增大点火提前角会降低 HC 排放量。CO 排放随着点火提前角增大呈逐步上升趋势,在点火提前角大于上止点前 30°后,其变化趋势趋于平缓。在充磁脉宽为 2 ms 时,HC 体积分数最大值为 4.8×10^{-4} ,而在 6 ms 时最小减至 3.1×10^{-4} 。此外,随着充磁脉宽的增大,CO 排放量整体上逐渐降低。

因此,在小负荷工况下,发动机节气门开度较

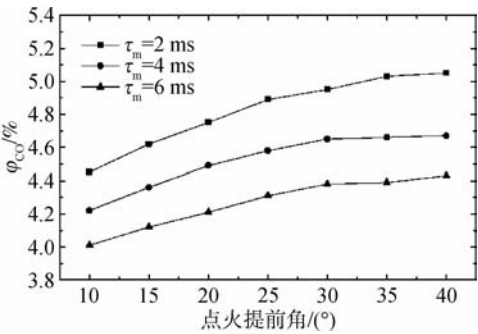


图 12 点火参数对 CO 排放的影响(工况 2)
Fig. 12 Effects of ignition parameters on CO emissions (test condition 2)

小时,采用上止点前 30°~40°点火提前角及饱和点火能量能够充分改善发动机动力性和燃油经济性。随着负荷增大,点火提前角不宜过大,点火能量可适度减小,而为兼顾 HC 及 CO 排放,点火能量可取较大值,点火提前角可取折衷值。

2.2 喷油参数对发动机小负荷性能影响

在工况条件 1 下,将充磁脉宽设定为 5 ms,将 θ_{ig} 设在上止点前 25°。图 13、图 14 及图 15 给出

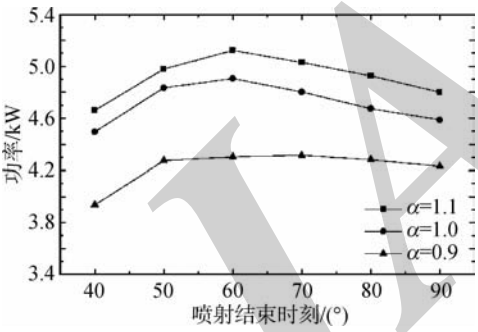


图 13 喷油参数对发动机功率输出的影响(工况 1)
Fig. 13 Effects of injection parameters on engine power output (test condition 1)

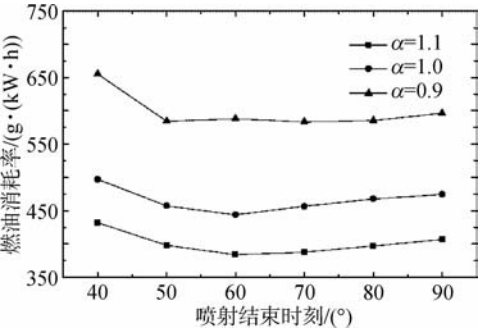


图 14 喷油参数对燃油消耗率的影响(工况 1)
Fig. 14 Effects of injection parameters on fuel consumption rate (test condition 1)

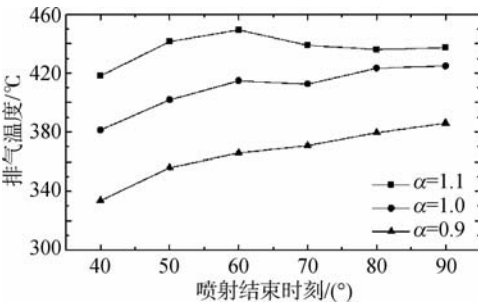


图 15 喷油参数对排气温度的影响(工况 1)
Fig. 15 Effects of injection parameters on exhaust gas temperature (test condition 1)

了工况 1 下发动机功率输出及油耗数据。在不同混合气过量空气系数条件下,随着喷射结束时刻提前至上止点前 60°后,混合气越浓,功率减小的幅度越平缓,喷射结束时刻适度提前有利于减小燃油消耗率,但提前量过大会在一定程度上增加因扫气带来的燃油损失。在相同的喷射时刻下,当混合气由浓变稀时,缸内燃烧更充分,输出功率增大,燃油消耗率降低,排气温度升高。

图 16 与图 17 为工况条件 1 下的发动机排放

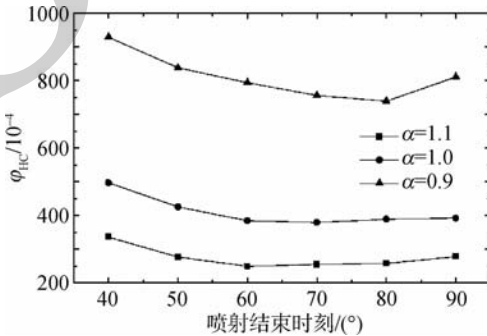


图 16 喷油参数对 HC 排放的影响(工况 1)
Fig. 16 Effects of injection parameters on HC emissions (test condition 1)

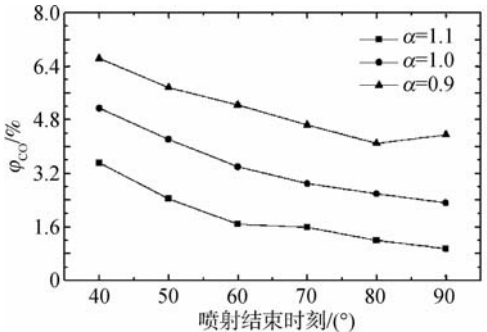


图 17 喷油参数对 CO 排放的影响(工况 1)
Fig. 17 Effects of injection parameters on CO emissions (test condition 1)

性能数据,提前喷射结束时刻,HC 及 CO 排放逐渐减小,在喷射结束时刻提前至上止点前 80°时,偏浓混合气下的 HC 及 CO 排放出现了上升。将过量空气系数由 0.9 增大至 1.1 时,HC 及 CO 排放大幅度下降,HC 体积分数最低值达到 2.54×10^{-4} ,CO 排放最低值达到 0.94%。

在工况 2 条件下,将 充磁脉宽设为 5 ms,将 θ_{18} 设在上止点前 25°。图 18、图 19 及图 20 给出了该工况下发动机功率输出及油耗数据。与试验工况 1 相比,较早的喷射结束时刻能够明显地改善发动机的性能。当喷射结束时刻提前至上止点前 80°之后,功率基本不再增加,燃油消耗率变化较小,排气温度在此发动机工况下对随喷射时刻变化不敏感。过量空气系数对发动机性能影响规律产生了明显的变化,当过量空气系数在 1.00 附近时,输出功率最大,并且当过量空气系数由 0.94 被调整至 1.15 时,燃油消耗率逐渐降低。

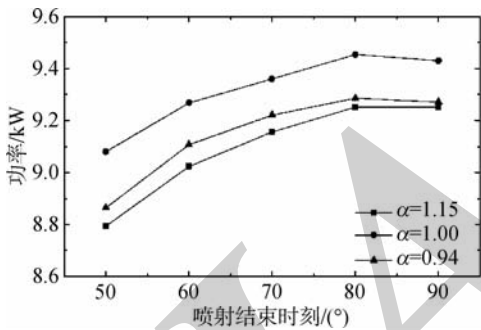


图 18 喷油参数对发动机功率输出的影响(工况 2)
Fig. 18 Effects of injection parameters on engine power output (test condition 2)

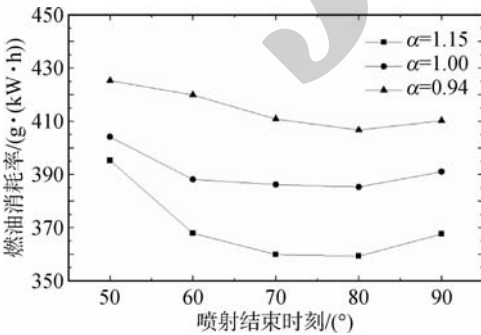


图 19 喷油参数对燃油消耗率的影响(工况 2)
Fig. 19 Effects of injection parameters on fuel consumption rate (test condition 2)

图 21 与图 22 给出了发动机排放性能数据。随着喷射结束时刻提前,HC 排放先减小后逐渐增加,CO 排放整体上出现增加,在喷射结束时刻

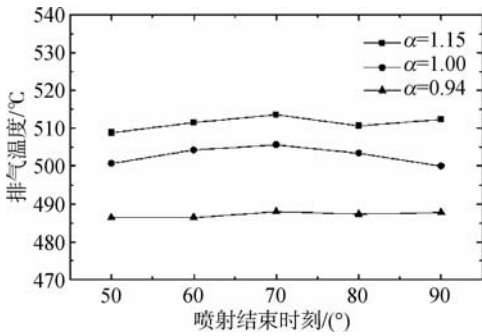


图 20 喷油参数对排气温度的影响(工况 2)
Fig. 20 Effects of injection parameters on exhaust gas temperature (test condition 2)

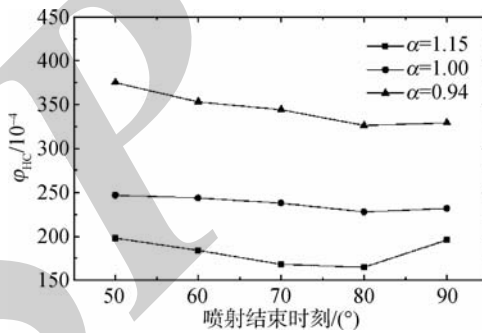


图 21 喷油参数对 HC 排放的影响(工况 2)
Fig. 21 Effects of injection parameters on HC emissions (test condition 2)

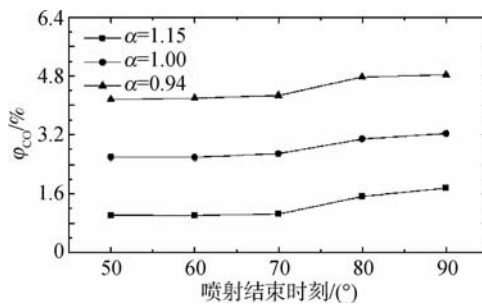


图 22 喷油参数对 CO 排放的影响(工况 2)
Fig. 22 Effects of injection parameters on CO emissions (test condition 2)

为上止点前 70°~80°内增幅较大。与工况 1 一致,偏稀混合气能够大幅度降低 HC 及 CO 排放。

因此,在小节气门开度下,采用偏稀的重油混合气和提前喷射结束时刻的策略可以改善直喷发动机的性能。当增大发动机节气门开度后,采用偏浓的重油混合气及进一步提前喷射结束时刻的策略,增加燃油蒸发时间,达到更多混合气能参与燃烧的目的,充分发挥发动机的动力性;而在混合物喷射结束时刻取折衷值时,偏稀的混合气能够

显著地降低直喷重油发动机的 HC 及 CO 排放。

3 结 论

对一台燃用轻柴油的二冲程点燃式空气辅助缸内直喷发动机进行了小负荷性能试验,分析了不同控制参数对发动机动力性、经济性及 HC/CO 排放特性的影响规律,获得结论如下:

1) 发动机节气门开度较小时,采用上止点前 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 点火提前角及饱和点火能量策略能够充分改善发动机动力性和燃油经济性。随着负荷增大,点火能量影响程度减小,可适度推迟点火提前角,而为兼顾 HC 及 CO 排放,点火能量应取较大值,点火提前角则取折衷值。

2) 发动机节气门开度较小时,采用偏稀的重油混合气,提前油气混合物喷射结束时刻的策略可以改善直喷发动机的性能。当增大发动机节气门开度后,采用偏浓的重油混合气及进一步提前喷射结束时刻的策略,增加燃油蒸发时间,达到更多混合气能参与燃烧的目的,充分发挥发动机的动力性;而采用偏稀的重油混合气,在混合物喷射结束时刻取折衷值时,能够显著地降低直喷重油发动机的 HC 及 CO 排放。

参考文献:

- [1] MORIKAWA K, TAKIMOTO H, KANEKO T, et al. A study of exhaust emission control for direct fuel injection two-stroke engine [R]. SAE Technical Paper 1999-01-3287, 1999.
- [2] HOUSTON R, BELL G, AHERN S. High specific power output direct injection 2-stroke engine applications [R]. SAE Technical Paper 2005-32-0066, 2005.
- [3] 王春丰, 魏民祥. 航空活塞发动机燃烧煤油冷起控制研究 [J]. 航空动力学报, 2012, 27(7): 1619-1624.
WANG Chunfeng, WEI Minxiang. Research on cold start fuel flow control of aero-piston engine burning kerosene [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(7): 1619-1624. (in Chinese)
- [4] PATRICK J, LAWRENCE W, JULIE E, et al. The feasibility of a kerosene fueled spark ignited two-stroke engine [R]. SAE Paper 911846, 1991.
- [5] SANCHEZ T F. Experimental study of a kerosene fuelled internal combustion engine [D]. Lausanne, Switzerland: Industrial Energy Systems Laboratory of the Federal Institute of Technology in Lausanne, 2008.
- [6] CATHCART G, DICKSON G, AHERN S. The application of air-assist direct injection for spark-ignited heavy fuel 2-stroke and 4-stroke engines [R]. SAE Technical Paper 2005-32-0065, 2005.
- [7] PADALA S, BANSAL A, RAMESH A. Studies on an air assisted gasoline direct injection system for a two-stroke engine [R]. SAE Technical Paper 2008-28-0048, 2008.
- [8] GROENEWEGER J R, LITKE P, WILSON C, et al. The performance and emissions effects of utilizing heavy fuels and biodiesel in a small spark ignition internal combustion engine [C] // Proceedings of the 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Orlando, Florida; American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011: 5807-5818.
- [9] GROENEWEGER J R, J, SIDHU S S, HOKE J L, et al. The performance and emissions effects of utilizing heavy fuels and algae based biodiesel in a port-fuel-injected small spark ignition internal combustion engine [C] // Proceedings of the 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, San Diego, California; American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011: 695-704.
- [10] FALKOWSKI D, ABATA D, CHO P. The performance of a spark-ignited stratified-charge two stroke engine operating on a kerosene based aviation fuel [R]. SAE Technical Paper 972737, 1997.
- [11] 陈昌巨, 严志勇, 周芳. 采用电控夹气喷射方法降低内燃机排放研究 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2003, 31(4): 45-47.
CHEN Changju, YAN Zhiyong, ZHOU Fang. Reducing pollutant emission by electronic air-forced fuel injection system [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2003, 31(4): 45-47. (in Chinese)
- [12] 蔡晓林. FAI 二冲程缸内直喷汽油机的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2005.
CAI Xiaolin. Study on FAI two-stroke DISI engine [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese)
- [13] 莫胜钧. 小型航空点燃式重油活塞发动机点火及火焰传播特性的模拟研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
MO Shengjun. Study on the ignition and flame propagation property of light-weight spark ignition heavy oil aero-engine [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [14] 莫胜钧. 重油预混层流点火特性的仿真分析 [J]. 内燃机与动力装置, 2012, 6(3): 30-33.
MO Shengjun. Simulation analysis on the premixed laminar ignition properties of heavy oil [J]. Internal Combustion Engine and Power Plant, 2012, 6(3): 30-33. (in Chinese)
- [15] 石允. 小型点燃式二冲程活塞重油发动机混合气形成的模拟研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
SHI Yun. Study on heavy-fuel mixture formation of light-weight spark-ignition two-stroke engine [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [16] 李长胜. 小型高速航空重油活塞发动机混合气形成及燃烧特性的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
LI Changsheng. Study on the mixture formation and combustion of light-weight, high-speed, heavy oil aeroengine

[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)

[17] 李苏琪. 点燃式重油发动机混合气形成与燃烧过程的研究 [D]. 北京:北京交通大学,2015.
LI Suqi. Study on mixture formation and combustion process of spark-ignition, heavy oil engine[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2015. (in Chinese)

[18] 王永伟,魏民祥,杨海青,等. 空气辅助缸内直喷发动机正时控制策略[J]. 航空动力学报,2014,29(12):2942-2947.
WANG Yongwei,WEI Mingxiang,YANG Haiqing,et al. Timing control strategies of air-assisted direct injection engine[J]. Journal of Aerospace Power,2014,29(12):2942-2947. (in Chinese)

(编辑:陈 越)