

文章编号:1000-8055(2012)09-1921-07

航空直喷发动机缸内混合气形成的试验

胡春明^{1,2}, 李骥琦¹, 白洪林², 任立红¹, 董亮亮¹

(1. 天津大学 机械工程学院 内燃机研究所, 天津 300072;

2. 天津大学 机械工程学院 内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 基于航空活塞式基础样机的结构特点, 自主研制了单缸低压直喷全透明光学发动机, 并利用高速摄影对缸内混合气形成进行试验研究. 分析了不同燃烧室形状、燃油后喷时刻以及发动机转速等条件下低压直喷发动机缸内的混合气形成规律. 研究表明: 新设计的偏心碗型活塞顶面能够有效地引导燃油喷雾形成向燃烧室顶部卷吸的运动, 从而使得燃油液滴聚集在双侧火花塞附近; 燃油喷射时刻对混合气形成影响很大, 当进气门开度较小且活塞与上止点距离较为适中时喷射燃油, 混合气形成质量最好; 进气运动较强烈时, 发动机转速提高会加速燃油液滴的蒸发, 但同时活塞顶面对喷雾的引导作用被削弱, 混合气形成质量变差; 当进气运动变弱时, 发动机转速提高会增强活塞顶面对油束的作用, 即引导作用变强.

关 键 词: 光学发动机; 低压缸内直喷; 燃烧室形状; 高速摄影; 混合气形成

中图分类号: V249.122⁺.9; TK411.2

文献标志码: A

Experiment of in-cylinder mixture formation process low-pressure GDI engine

HU Chun-ming^{1,2}, LI Ji-qi¹, BAI Hong-lin²,
REN Li-hong¹, DONG Liang-liang¹(1. Tianjin Internal Combustion Engine Research Institute,
School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;2. State Key Laboratory of Engines, School of Mechanical Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A low pressure direct injection transparent optical engine bench was developed, and the in-cylinder mixture formation process was filmed. Different mixture formation patterns were analyzed in conditions of different combustion chamber geometries, fuel injection timings and engine speeds. The research results show that: guidance of the combustion chamber with decentralized cavity piston is better than that of the proto-engine's combustion chamber; fuel injection timing plays a key role in the mixture formation, and a good mixture formation can be obtained if choosing an injection timing when intake flow is not that strong and the piston moves in the middle position of the cylinder, when the intake flow is strong, an increased engine speed can accelerate the evaporation of the fuel droplets, but the guidance of the combustion chamber is weakened, which results in a bad mixture formation. On the contrary, when the intake flow is weak, higher engine speed can promote the effect of combustion chamber's guidance to the fuel plume.

收稿日期: 2011-10-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120921.1251.001.html>

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2008AA11A114); 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室自主课题

作者简介: 胡春明(1967—), 男, 河北衡水人, 研究员, 博士, 主要从事内燃机电控技术的应用研究. E-mail: cmhu@tju.edu.cn

Key words: optical engine bench; low-pressure direct injection; combustion chamber geometry; high-speed camera; in-cylinder mixture formation

目前,国内小型航空活塞式发动机均采用膜片式化油器供油系统,由于化油器通过喉管真空度以及机械方法计量燃油,所以不能满足发动机在爬升、巡航及俯冲等各种飞行工况条件下、各种环境条件下对可燃混合气最佳空燃比的需求^[1].而电控燃油喷射技术,包括气道喷射(PFI)与缸内直喷(GDI)可以提高燃油雾化品质,满足航空活塞式发动机的燃料适应性要求以及飞行过程中对动力的变化需求.特别是 GDI 技术能避免 PFI 造成的进气歧管油膜湿壁现象,提高发动机充气效率的同时,精确控制缸内混合气空燃比,并有效组织和控制燃烧过程,降低燃油消耗率,弥补了化油器和气道燃油喷射的不足.缸内直喷技术对改善航空活塞式发动机的混合气质量,提高燃料适应性以及燃烧效率,降低发动机燃油消耗具有很强的应用价值^[2].

发动机缸内直喷分为空气辅助低压喷射和高压喷射两种类型.英国 Ricardo 公司采用高压喷射系统开发了 Wolverine-3 小型航空活塞式发动机^[3];而澳大利亚 Orbital 公司研发的空气辅助低压直喷系统由于其具有燃油雾化颗粒小($D_{sm} = 6 \sim 10 \mu m$)、缸内分层质量高且燃烧稳定易控制等优点,已被应用于航空发动机的研究^[4-5].考虑到航空活塞式发动机对功质比的要求,以及直喷系统的技术难度,本文开展了基于空气辅助低压直喷系统的航空活塞式发动机缸内混合气形成的试验研究.

1 航空活塞式发动机直喷研究平台的建立

本文研究的基础样机为一款 4 缸对置式水冷航空活塞式发动机,具体参数参见表 1. 基于其燃烧室的结构特点,研究开发了全新的单缸透明光学发动机及其试验系统,开展不同的燃烧室形状、喷射策略以及发动机转速对缸内混合气形成的影响规律的试验研究与对比分析.

1.1 空气辅助低压缸内直喷特点

图 1 所示为空气辅助低压直喷系统燃油喷射和空气喷射的相位关系,TDC 表示活塞处于上止点.空气辅助喷射系统能实现燃油计量和喷射分

开进行,该系统具有燃油液滴雾化粒径小、贯穿距离受缸内环境压力影响较大、燃油微粒附近氧质量分数大,有助于可燃混合气初始引燃、对缸内混合气空燃比分布控制能力强等特点,确保缸内可燃混合气稳定燃烧^[5].

表 1 基础试验样机主要技术参数

Table 1 Main parameters of the prototype engine

参数	指标
缸径×冲程	79.5 mm×61 mm
缸数	4
气缸排列方式	水平对置
排量/L	1.23
压缩比	9.4
气门布置	2 气门/缸,挺杆驱动
点火方式	双火花塞
冷却方式	水冷

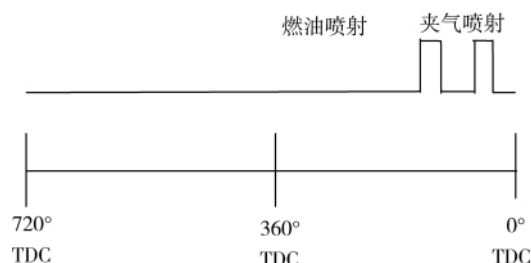


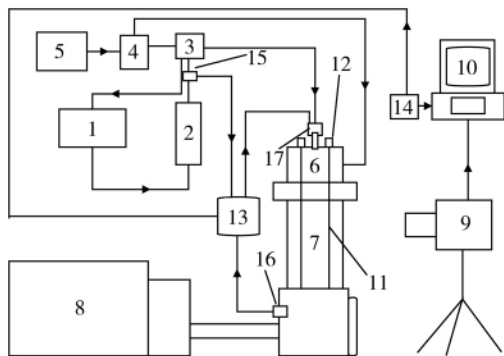
图 1 燃油喷射与空气喷射相位关系

Fig. 1 Fuel injection timing related with air-fuel injection timing

1.2 直喷光学发动机试验系统

图 2 为自主研发的航空单缸直喷透明光学发动机试验系统示意图,其中,空气辅助低压直喷系统包括空气供应系统、燃油泵系统、空气-燃油压差阀、燃油直喷喷嘴、ECU(发动机控制单元)、传感器等.光学发动机缸内混合气形成过程由 Photron Fastcam SA5 高速摄影机拍摄获得,试验所用拍摄频率为 2000 帧/s.

图 3 所示为台架系统实物图^[6-8].



1 油箱; 2 油泵; 3 泄压阀; 4 空气压力调节阀;
5 气泵; 6 缸头; 7 光学发动机; 8 测功机;
9 高速摄影机; 10 计算机; 11 挺杆; 12 摇臂;
13 电子控制单元; 14 CAN(控制局域网)卡;
15 油压传感器; 16 曲轴位置传感器;
17 空气辅助喷油器

图2 试验台架布局

Fig. 2 Layout of the test bench

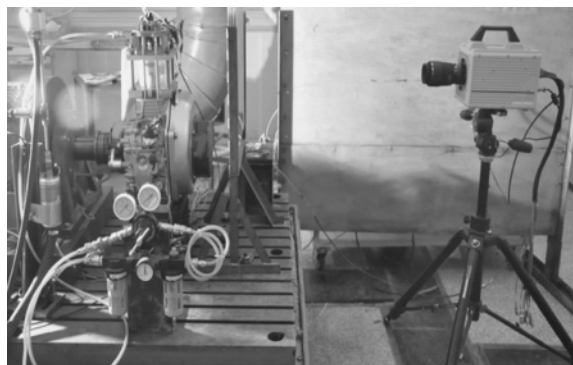


图3 试验台架系统

Fig. 3 Test bench system

2 试验方案

如前所述,基础样机为双火花塞点火模式,本次研究开发的直喷燃烧系统的优化目的是为了在两个火花塞附近形成稳定点火燃烧所需的混合气.为了研究直喷发动机缸内燃油-空气运动规律,采用光学发动机在倒拖模式下低速稳定运转,具体方案如下:

1) 低压直喷喷油策略为:喷油脉宽和喷气脉宽分别设定为 5 ms,喷油压力为 800 kPa,喷气压力为 650 kPa.这一工作条件下燃油喷嘴流量特性为 1408 mg/s;直喷喷嘴流量为 2701 mg/s.

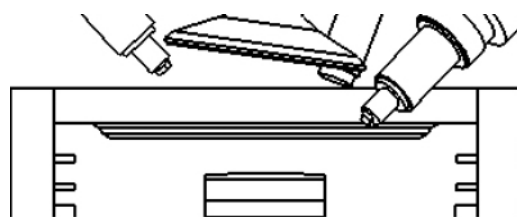
2) 图4所示为设计的由不同活塞顶部几何形状组成的低压直喷燃烧系统示意图.通过对比油束在不同燃烧室中的发展过程,研究燃烧室中

活塞顶部几何形状对混合气形成过程的影响.

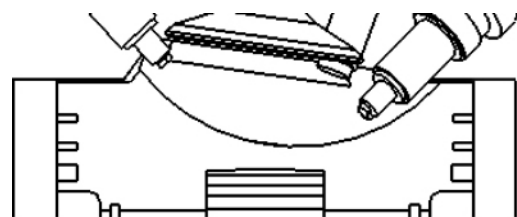
3) 在确定的燃烧室形状和发动机转速下,研究燃油后喷时刻的变化对缸内混合气形成过程的影响.

4) 在确定的燃烧室形状与燃油后喷时刻,分析不同发动机转速下混合气的发展规律.

为了方便对测试结果的对比分析,在以下试验分析中,将燃油后喷时刻(SOI)定义为 0 ms,文中所选相邻两幅照片的间隔为 1 ms(2 帧).



(a) 平顶浅凹坑型活塞燃烧室



(b) 偏心碗型活塞燃烧室

图4 不同燃烧系统示意图

Fig. 4 Comparison of different combustion systems

3 试验结果与分析

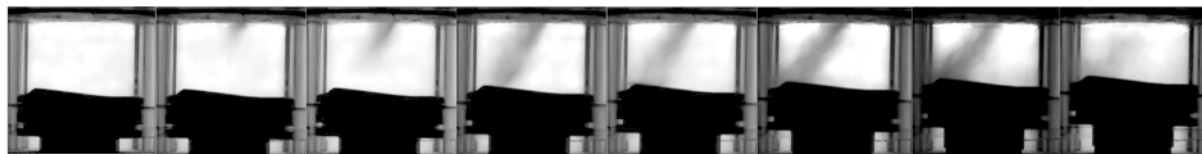
3.1 燃烧室形状对缸内混合气形成的影响

如前所述,本文研究涉及的低压直喷燃烧室包括平顶浅凹坑型、偏心碗型两种类型(图4所示).图5所示为直喷光学发动机在转速 600 r/min 及后喷时刻为 210°CA ATDC(上止点后 210°曲轴转角)条件下,直喷燃烧室中不同活塞顶部几何形状对缸内混合气形成过程的对比分析.

图5(a)为平顶浅凹坑型活塞的直喷燃烧室缸内喷雾的发展过程.由于空气辅助直喷燃油颗粒度很小,喷出的油束受活塞顶部形状引导作用较大.分析图中喷雾轨迹可以看出,喷出的油束撞击平顶活塞顶面后,油束运动发展方向呈自由扩散状,其中一部分油滴被引向发动机缸壁或附着在活塞顶面.这样容易造成湿壁,导致燃烧效率降低、UBHC(未燃烃)排放升高,同时破坏发动机润滑油膜^[9-12];随着活塞上行,油束与缸内空气混合发展变化不大.这些现象表明该型燃烧室因平顶



(a) 平顶浅凹坑型活塞燃烧室喷雾发展过程



(b) 偏心碗型活塞燃烧室喷雾发展过程

图 5 不同活塞顶部形状条件下缸内混合气形成对比

Fig. 5 Comparison of mixture formation in different piston top geometry

浅凹坑型活塞不能有效引导喷雾发展,混合气形成质量较差,同时发动机的性能表现也将受到限制。

图 5(b)为偏心碗型活塞的直喷燃烧室缸内喷雾的发展过程。如图所示,当油束前端撞击活塞顶面后分成两部分,其中一部分油雾沿活塞顶部与缸壁向燃烧室左上方形成顺时针涡状运动,另一部分燃油沿偏心碗型凹坑底面向右上方形成逆时针运动。随着活塞上行,这种卷吸运动将会越来越强烈,使得越来越多的燃油液滴被导向燃烧室顶部,从而聚集于两侧火花塞附近。因此,偏心碗型活塞燃烧室更容易将燃油液滴导向燃烧室顶部火花塞处,从而形成较浓的混合气;同时,壁面对油束有效的引导能够降低燃油湿壁现象,碗型凹坑能够限制火花塞附近的燃油液滴扩散,并控制燃烧初始阶段火焰传播^[12-13],这对于保证燃烧的稳定非常有利^[14]。

由以上分析可知:平顶浅凹坑型活塞对缸内混合气的引导作用会导致混合气发展质量变差;而偏心碗型活塞对油束的引导作用要优于前者,其更容易在双侧火花塞附近形成质量较高的混合气。在以下研究工作中采用偏心碗型活塞燃烧室。

3.2 后喷时刻对缸内混合气形成的影响

燃油后喷时刻(SOI)是决定缸内混合气发展过程的重要参数之一。不同的燃油喷射时刻下,油束与活塞的接触位置、活塞运动方向及缸内气流运动条件都不同,而壁面引导和缸内气流运动主要决定了混合气形成效果。因此,通过改变这一参数可以实现对缸内混合气质量分数分布以及开始点火时燃油蒸发量的控制,进而实现对缸内燃烧过程的控制^[15]。

图 6 所示为偏心碗型活塞的直喷燃烧室,在发动机 600 r/min 条件下不同燃油后喷时刻对缸内混合气形成的影响。燃油后喷时刻分别设定为 60°CA ATDC, 90°CA ATDC, 150°CA ATDC, 180°CA ATDC, 210°CA ATDC。

图 6(a)为后喷时刻 60°CA ATDC 时喷雾发展过程,图中显示,燃油束碰撞活塞后形成了顺时针方向的旋涡流动,沿活塞凹坑顶与左侧壁面向燃烧室顶部运动,最终燃油液滴较均匀的分布于汽缸中。而从图 6(b)与图 6(c)中可以看到,燃油束越过碗型凹坑撞击在活塞顶面左侧并被导向壁面,燃油液滴悬浮并聚集在汽缸左下角形成较浓混合气,很容易造成壁面和活塞顶的湿壁,并破坏润滑油膜并增加 UBHC 排放。主要原因很可能是在这两个时刻进气运动较为强烈,这对喷雾发展扰动较大;此外,这一喷射时刻活塞向下运动,油束反向运动动能较小。另外,燃油喷射也会相应影响进气流动,破坏进气道设计所能实现的缸内气流运动效果。

对比分析图 6(d)与图 6(e)可以看出,180°CA ATDC 与 210°CA ATDC 的喷油时刻下,喷雾发展情况较为理想,燃烧能实现油束的双侧导向。这主要是因为在这两个燃油喷射时刻下,进气门开度较小,进气流动较弱使得壁面对喷雾的引导受影响较小;同时,活塞上行到一个较为合适的位置,使得油束撞击在凹坑左侧壁面附近。由于空气辅助式喷射贯穿距离受环境压力影响较大,因此,当活塞接近上止点时喷射燃油有可能导致燃油喷射不完全、喷射贯穿距离过小。

3.3 发动机转速对混合气形成的影响

活塞运动速度的变化会使缸内气流运动强度

随着变化,发动机转速越高,缸内气流运动越强,而缸内气流运动对油束发展及混合气形成有着重要影响。

改变发动机转速(200, 400, 600 r/min),分别在 90°CA ATDC 与 210°CA ATDC 的后喷时刻下分析不同转速下混合气发展过程。

图7所示为后喷时刻 90°CA ATDC 时,在 200 r/min 和 600 r/min 的转速下缸内混合气发展过程。由对比可知,200 r/min 时活燃烧室对油束的引导作用要强于转速为 600 r/min 的情况,而后的燃油液滴蒸发速度比前者快,但混合气形成质量较差,如图中所示燃油液滴在汽缸左下角聚集容易湿壁。出现这一差异很可能是因为发动

机转速的升高加剧了缸内气流运动,而 90°CA ATDC 时进气门开度逐渐变大,燃油束发展受到强烈扰动,同时缸内较强的紊流运动加速了燃油液滴的蒸发。因此,600 r/min 时燃烧室形状对喷雾的引导被削弱了。

与图7相反,当喷油时刻为 210°CA ATDC 时,如图8所示,600 r/min 下燃烧室对油束的引导作用强于 200 r/min,混合气在缸内形成了向燃烧室顶部卷吸的流动,混合气形成质量较高。由于这一喷射时刻下进气门开度小,较弱的进气运动对喷雾扰动很弱,因此发动机速度的升高增强了燃烧室的导向作用。

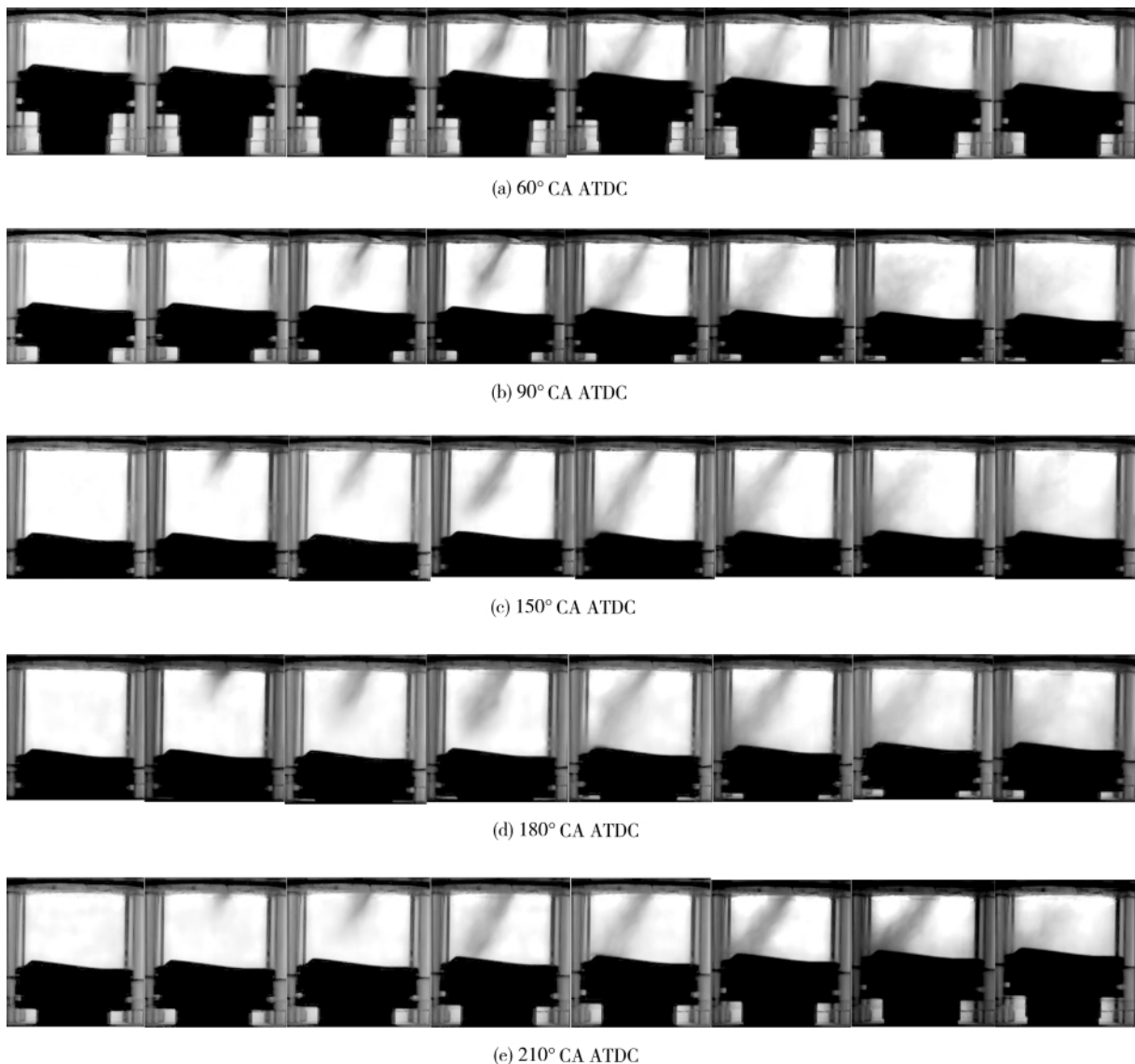
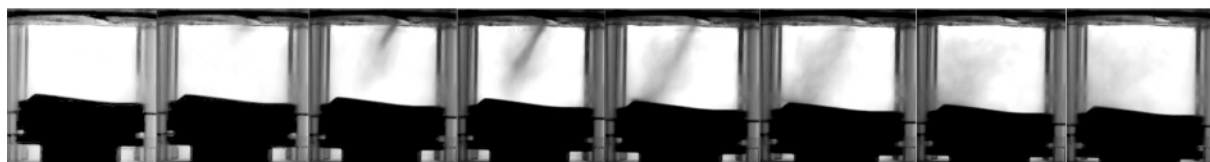


图6 相同转速 600 r/min 下不同喷射时刻混合气发展过程对比

Fig. 6 Comparison of mixture formation at different injection timing and the same engine speed



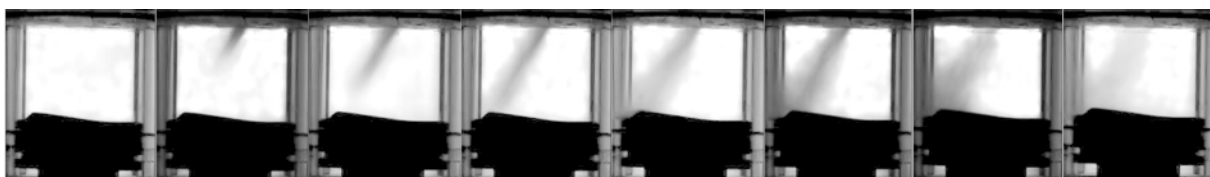
(a) 转速200 r/min, 燃油喷射时刻90°CA ATDC缸内混合气形成过程



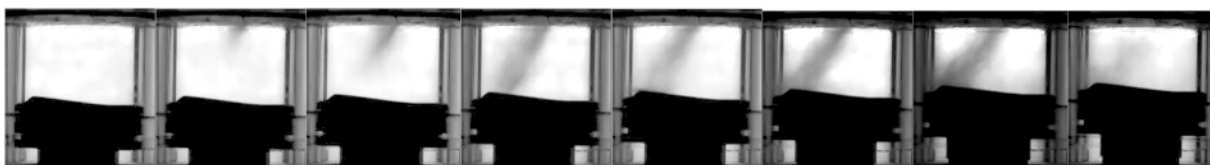
(b) 转速600 r/min, 燃油喷射时刻90°CA ATDC缸内混合气形成过程

图 7 喷射时刻 90°CA ATDC 不同转速缸内混合气形成对比

Fig. 7 Spray development comparison at different engine speeds but the same injection timing (90°CA ATDC)



(a) 转速200 r/min, 燃油喷射时刻210°CA ATDC缸内混合气形成过程



(b) 转速600 r/min, 燃油喷射时刻210°CA ATDC缸内混合气形成过程

图 8 喷射时刻为 210°CA ATDC 时不同转速缸内混合气形成对比

Fig. 8 Spray development comparison at different engine speed but the same injection timing (210°CA ATDC)

4 结 论

1) 结合航空活塞式发动机基础样机燃烧室的结构特点,研制开发了单缸低压直喷全透明光学发动机平台及测试系统,在倒拖状态下,利用高速摄影获取了低压直喷燃烧系统缸内混合气发展过程。

2) 相比平顶浅凹坑型活塞,偏心碗型活塞的直喷燃烧室设计能够更有效地引导燃油束的发展过程,更容易将燃油液滴导向燃烧室顶部双侧火花

塞附近。

3) 当进气运动较为强烈时喷射燃油,燃烧室对喷雾的引导作用被削弱,混合气形成质量变差,应避免进气门开度较大时喷射燃油;同时,活塞处在一个较为适中的位置对于混合气形成很有利。

4) 当进气门开度较大时,发动机转速提高会加速燃油液滴的蒸发,但同时燃烧室几何形状对喷雾的引导作用被削弱,混合气形成质量变差;但进气门开度较小时,发动机转速升高会增强燃烧室引导作用。

参考文献:

- [1] 李玉珍,赵阳旭,郭璐. 小型航空汽油发动机供油量的模糊控制[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(1): 89-92.
LI Yuzhen, ZHAO Yangxu, GUO Lu. Fussy control of fuel flow rate on small aviation gasoline engine[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(1): 89-92. (in Chinese)
- [2] 李玉珍,高丕周,马震. 电控汽油喷射改善小型无人机发动机性能的研究[J]. 航空学报, 2004, 25(3): 233-236.
LI Yuzhen, GAO Peizhou, MA Zhen. Research on the improvements of performance of mini-UAV's engine by electronic controlled gasoline injection[J]. Journal of Aeronautics, 2004, 25(3): 233-236. (in Chinese)
- [3] Corporation R. New UAV engine optimized for power, package, weight and noise [R]. Ricardo Software and CAE, 2010-02, 2010.
- [4] Cathcart G, Dikson G, Ahern S. The application of air-assist direct injection for spark-ignited heavy fuel 2-stroke and 4-stroke engines[R]. SAE Paper 2005-32-0065, 2005.
- [5] Cathcart G, Railton D. Improving robustness of spray guided DI combustion systems: the air-assisted approach [R]. SAE Paper 2001-53-60, 2001.
- [6] 王小青,黄一敏,杨一栋,等. 小型无人直升发动机控制系统设计[J]. 航空动力学报, 2007, 22(12): 2139-2142.
WANG Xiaoqing, HUANG Yiming, YANG Yidong, et al. Control system design for engine of a small size unmanned helicopter[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(12): 2139-2142. (in Chinese)
- [7] 张天宏,黄向华. 航空小型动力装置试验台测试系统[J]. 航空动力学报, 2001, 16(2): 189-192.
ZHANG Tianhong, HUANG Xianghua. A test system for mini aviation power unit[J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(2): 189-192. (in Chinese)
- [8] 曾国贵,廖智麟,阙兆成. 某型无人直升机活塞式电喷发动机转速控制设计及试验[J]. 航空动力学报, 2011, 26(6): 1384-1388.
ZENG Guogui, LIAO Zhilin, KAN Zhaocheng. Speed control design and test for piston EFI engine of unmanned helicopter[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(6): 1384-1388. (in Chinese)
- [9] Matsubara K, Shima Y, Okumi M, et al. Analysis of mixture formation process in a stoichiometric direct injection gasoline engine[R]. SAE Paper 2003-01-0066, 2003.
- [10] Kakuho A, Yamaguchi K, Hashizume Y, et al. A study of air-fuel mixture formation in direct-injection SI engines [R]. SAE Paper 2004-01-1946, 2004.
- [11] Stan C, Eichert H, Tröger R, et al. Concept for modeling and optimization of the mixture formation using gasoline direct injection in compact high speed engines[R]. SAE Paper 1999-01-2935, 1999.
- [12] Zhao F, Laia M C, Harrington D L. Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1999, 25(5): 437-562.
- [13] LI Yufeng, ZHAO Hua, Brouzos N, et al. Effect of injection timing on mixture and CAI combustion in a GDI engine with an air-assisted injector[R]. SAE Paper 2006-01-0206, 2006.
- [14] Kakuho A, Urushihara T, Itoh T, et al. Characteristics of mixture formation in a direct injection SI engine with optimized in-cylinder swirl air motion[R]. SAE Paper 1999-01-0505, 1999.
- [15] Cathcart G, Zavier C. Fundamental characteristics of an air-assisted direct injection combustion system as applied to 4-stroke automotive gasoline engines[R]. SAE Paper 2000-01-0256, 2000.