

# 直喷汽油机自由一撞壁喷雾可视化台架开发及试验

范钱旺, 李理光, 陈以川, 石 堃

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

**摘要:** 介绍了直喷汽油机可视化喷雾及其撞壁实验装置与控制系统,详细阐述了高压供油系统的设计、直喷汽油机喷油器驱动模式以及喷雾控制系统.基于该可视化装置研究了不同喷油压力和环境压力下喷雾贯穿距与喷雾锥角的变化、不同环境压力下喷雾发展与燃油浓度的变化以及不同撞壁角度和距离下喷雾撞壁特性.试验结果表明,随着喷油压力增加,喷雾贯穿距与喷雾锥角均增大;随着环境压力增加,喷雾贯穿距减小而喷雾锥角增大.此外,75°撞壁角度较60°撞壁角度更加有利于撞壁后喷雾发展和燃油雾化.开发的可视化喷雾及其撞壁试验装置与控制系统能够可靠而稳定地运行.

**关键词:** 直喷汽油机; 定容弹; 喷雾特性; 喷雾撞壁; 控制系统

中图分类号: TK 411

文献标识码: A

## Experiment and Development of Visualization Setup of Free-impinging Spray for GDI Engine

FAN Qianwang, LI Liguang, CHEN Yichuan, SHI Kun

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

**Abstract:** The visualization setup and control system of spray and wall-impingement for gasoline direct injection (GDI) engines is presented. The design of high pressure fuel supplying system, the driving mode of GDI engine injector and spray control system were demonstrated in detail. Besides, the spray penetrations and spray cone angles under different injection pressure and ambient pressure conditions, the spray development and fuel concentration change under different ambient pressure conditions and spray wall-impingement characteristics under different impingement angle and impingement distance conditions, were investigated by employing the visualization setup. The experimental results

show that the spray tip penetration and spray cone angle increase with the increasing of the injection pressure; the spray tip penetration decreases with the increasing ambient pressure, but the spray cone angle increases. In addition, compared to the impingement angle with 60°, the impingement angle with 75° is more favorable to spray development and atomization. Thus the developed visualization setup and control system of spray and wall-impingement can work reliably and steadily.

**Key words:** gasoline direct injection; constant volume bomb; spray characteristics; spray wall-impingement; control system

直喷汽油机的喷雾特性是影响燃烧和排放优劣的关键因素之一<sup>[1]</sup>.此外,缸内直喷喷雾撞壁也是混合气形成的关键要素.因此,研究喷雾及其撞壁特性对发动机燃烧优化有着至关重要的作用.近年来,国内外学者对发动机的喷雾及其撞壁特性进行了大量的研究. Seoksu Moon 等<sup>[2]</sup>在稳态气流实验台研究了喷雾与气流相互作用影响以及采用米氏散射技术(Mie scattering images)和相位多普勒(PDA)测量技术研究了喷雾特性.研究结果表明,气流方式(airflow pattern)对喷雾油滴尺寸分布有着重要影响.

Aleiferis 等<sup>[3]</sup>研究了汽油机和汽油-乙醇掺混燃油的喷雾及燃烧特性.研究结果表明,与汽油相比, E85 混合燃料的喷雾发展受温度与压力的影响更小.西安交通大学 Gao Jian 等<sup>[4]</sup>采用高速纹影摄影技术研究了不同掺混比汽油-乙醇(25%, 50%, 75%和 100%乙醇)混合燃料在不同背压下的喷雾特性.研究结果表明,不同掺混比的汽油-乙醇混合燃料喷雾形态变化不明显,但是在环境压力下随着乙醇量

收稿日期: 2010-08-29

基金项目: 吉利-同济汽车研究院合作项目(1709253018)

第一作者: 范钱旺(1982—)男,博士生,主要研究方向为汽油机缸内直喷技术. E-mail: fanqianwang@126.com

通讯作者: 李理光(1962—)教授,工学博士,博士生导师,主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制,清洁代用燃料,混合动力汽车的动力系统. E-mail: liguang@tongji.edu.cn



平衡原理提供高压燃油,气/油缸截面比约为 7:1, 喷油压力主要依靠高压氮气建立,供油系统设计的最大允许计算供油压力可达 25 MPa. 其中,高压氮气压力采用压力调节阀控制,通过气体压力表读出; 高压燃油压力通过高压油路中液体压力表读出且通过油压传感器校验.

高速摄影仪采用了美国 VRI 公司的 Phantom V7.3 系列高速摄像机,该相机采用最新的 14 位, 800×600 像素 SR-CMOS 传感器,最大分辨率下,每秒可拍 6 688 幅图像,最小分辨率下,每秒可拍 500 000 幅图像.

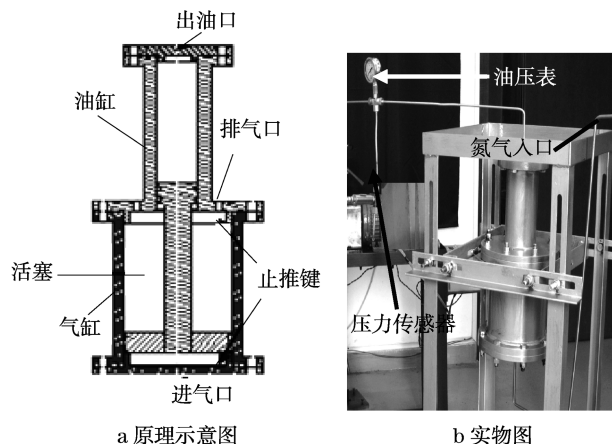


图 4 高压供油系统

Fig.4 High pressure fuel-supplying system

试验时,高速摄影仪采用采样频率为 25 000 帧·s<sup>-1</sup>,分辨率 320×320. 由于每秒钟高速摄影仪拍摄 25 000 张喷雾图片,因此需要对图像进行自动计算处理结果. 采用 Matlab 编写了喷雾图像处理软件计算每张图片喷雾贯穿距、喷雾锥角、喷雾前锋速度、喷雾投影面积以及喷雾燃油浓度并且以 Excel 文件格式保存在文本文件中. 喷雾后处理软件界面如图 5 所示.

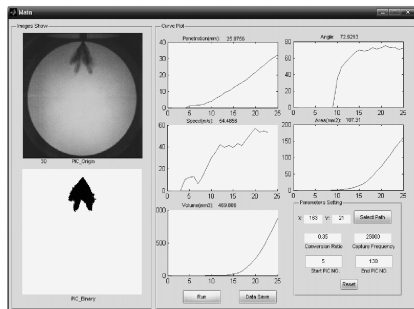


图 5 喷雾后处理软件界面

Fig.5 Spray post-processing procedure interface

## 1.2 喷油器驱动模式及控制系统

本电控系统是基于 InfineonXC167CI 评估板<sup>[9]</sup>完成的. 图 6 为喷雾电控系统的硬件构成框图. 电控单元由微控制器模块、输出信号处理模块、电源模块和通讯模块几部分构成. 其中,输出信号模块是将 ECU 给出的控制信号,通过功率放大电路放大,驱动喷油器. 微控制器模块是以 InfineonXC167CI 单片机为核心构成的最小用户系统. 通讯模块主要包括与 PC 机的通讯接口电路,以实现上下位机的通讯.

该实验采用的直喷喷油器属于电流驱动型. 这种喷油器通常为了加快喷油器的开启速度,喷油器开启初期需给电磁线圈较高的电流脉冲,驱使针阀迅速开启,之后再降电流至较小的维持针阀开启的电流值,以便实现电磁线圈中以较小电流保证高速电磁阀处于最大开启位置. 因此,本实验采用了峰值/维持式的驱动模式实现该喷油器的驱动.

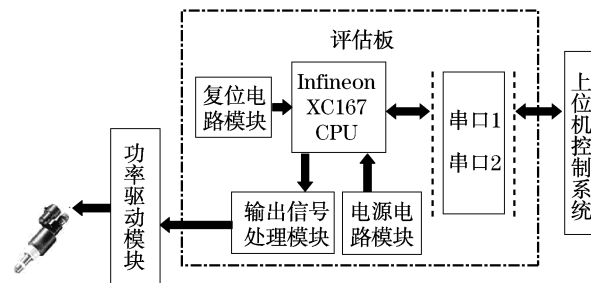


图 6 硬件控制系统示意图

Fig.6 Scheme of hardware control system

基于 InfineonXC167CI 评估板采用了脉冲宽度调制(pulse width modulation,PWM)的方法,即利用捕获比较单元 CC2 产生 PWM 波,将喷油脉宽分为两段,第一个最高峰值是喷油器开启脉宽,随后一系列小方波则维持喷油器处于开启状态,即处于进入高频的通断状态. 具体喷油器驱动信号如图 7 所示. 另外,采用了面向计算机测控领域的虚拟仪器软件平台 Labview7.1<sup>[10]</sup>编写上位机喷雾程序控制界面,该定容可视化装置喷雾控制界面如图 8 所示. 该控制界面可以控制喷雾触发、喷油脉宽、喷油器开启维持电压、喷油器开启通电时间以及高频通断的频率以及检测喷油压力和单片机与上位机之间的通讯值. 试验中由上位机控制程序界面上的布尔开关执行喷射触发信号,单片机在接收到如图 7 中所示上面的 PWM 触发信号后,经过功率驱动模块触发喷油器电磁阀开启喷油器,按照设定的喷油脉宽喷射. 单片机控制流程见图 9.

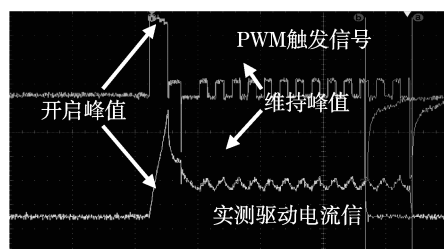


图 7 直喷汽油机喷油器驱动信号波形  
Fig.7 Driving signal wave pattern of GDI engine injector



图 8 直喷喷油器喷雾实验控制系统界面  
Fig.8 Testing control interface of GDI injector

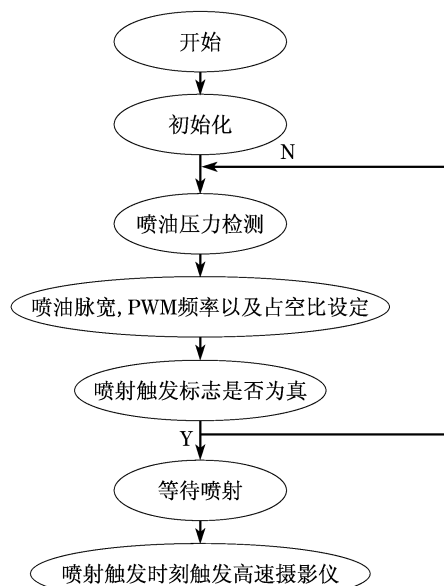


图 9 单片机控制流程  
Fig.9 PC control flowchart

## 2 喷雾实验结果分析

图 10 给出了喷油压力 9 MPa, 环境压力  $P_{\text{amb}}$  为 0.1 和 0.6 MPa, 环境温度 25℃ 条件下, 喷雾随时间的发展过程. 由图 10 可知, 在环境压力为 0.1 MPa 时, 喷雾快速地向运动, 同时喷雾在较大的区域内破碎; 随着环境压力增加, 喷雾运动的发展则呈减小

趋势, 喷雾破碎也明显减少; 主要原因是环境压力增大, 导致环境气体密度增加, 进而喷雾前进方向的阻力也增加的缘故. 此外, 喷雾燃油浓度随着环境压力增加而变浓. 主要原因还是环境压力增加导致环境密度增加而雾化变差所致.

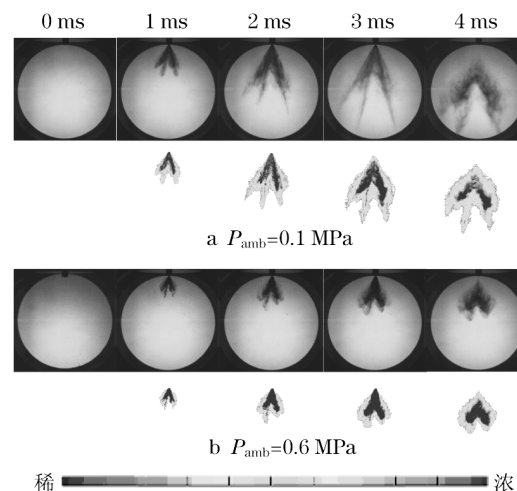


图 10 不同环境压力下喷雾发展 (缩放比例 5:1)  
Fig.10 Spray histories under different ambient pressure conditions (scaling 5:1)

图 11 和图 12 分别给出了不同喷油压力和环境压力下喷雾贯穿距的变化. 由图 11 结果可知, 随着喷油压力增加, 喷雾贯穿距也增大; 并且随着喷雾发展直至喷油开始后约 3 ms 时, 喷雾贯穿距趋于一致. 这主要是由于喷油压力增加导致喷雾液滴粒径减小, 改善了燃油雾化效果所致. 另外, 随着喷油压力增大, 喷油压力对喷雾贯穿距增大的幅度有所减小. 由图 12 结果可知, 随着环境压力的增加, 喷雾贯穿距依次减小, 这主要是由于环境压力增加致使环境气体密度增加, 喷雾运动受到阻力增加所致. 另外, 环境压力增加对喷雾贯穿距的影响远大于喷油压力.

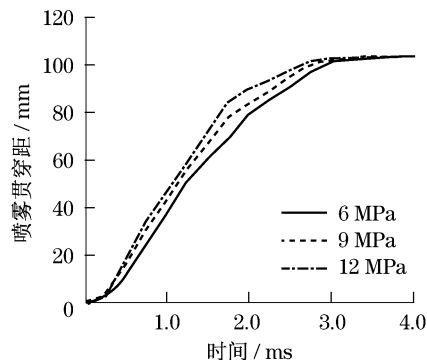


图 11 不同喷油压力下喷雾贯穿距的变化  
Fig.11 Change of spray tip penetration under different injection pressure conditions

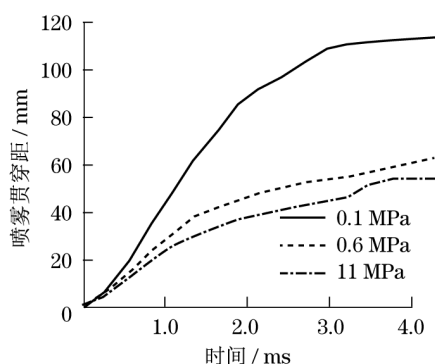


图 12 不同环境压力下喷雾贯穿距的变化

Fig. 12 Change of spray tip penetration under different ambient pressure conditions

图 13 和图 14 给出了不同喷油压力和环境压力下喷雾锥角的变化. 由图 13 结果可知, 随着喷油压力增加, 喷雾锥角也增大; 而喷雾初始锥角则差异较小. 此外, 随着喷雾发展, 喷雾锥角呈现出减小趋势, 主要是由于燃油从高压喷嘴中不断被喷射出来, 后续的燃油不断地补充到先前被喷射出的燃油中, 提高了喷雾运动速度, 则燃油更快地向前运动, 致使油束变细, 锥角逐渐略有减小. 由图 14 结果可知, 环境压力增加喷雾圆锥角也相应增大, 但是随着环境压力的增大, 喷雾圆锥角增加幅度逐渐减小. 此外, 环境压力对喷雾圆锥角的影响较喷油压力更加显著.

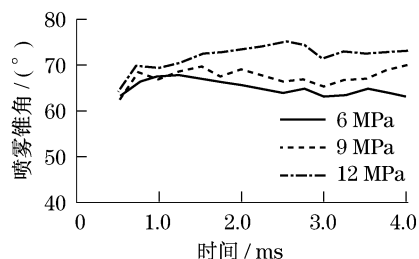


图 13 不同喷油压力下喷雾锥角的变化

Fig. 13 Change of spray cone angle under different injection pressure conditions

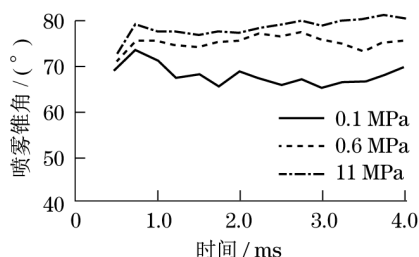


图 14 不同环境压力下喷雾锥角的变化

Fig. 14 Change of spray cone angle under different ambient pressure conditions

### 3 喷雾撞壁实验结果分析

图 15 给出了喷油压力 9 MPa, 环境压力 0.1 MPa, 撞壁距离 26.1 mm, 环境温度 25℃ 的条件下, 喷雾撞壁角度 ( $\alpha = 60^\circ, 75^\circ$ ) (定义为喷油器轴线与活塞顶面的夹角) 对喷雾撞壁过程及喷雾浓度变化的影响. 由图 15 结果可知, 随着喷雾撞壁角度的增大, 喷雾撞壁后的形态和发展均发生了显著变化. 当撞壁角度为  $60^\circ$  时, 喷雾撞壁后趋向于定容可视化装置左侧扩散. 相比较而言, 撞壁角度为  $75^\circ$  时, 燃油撞壁后的发展以及燃油雾化情况较好. 由此可以推出, 喷雾撞壁角度对喷雾撞壁过程有着重要的影响, 喷雾撞壁角度存在最佳值.

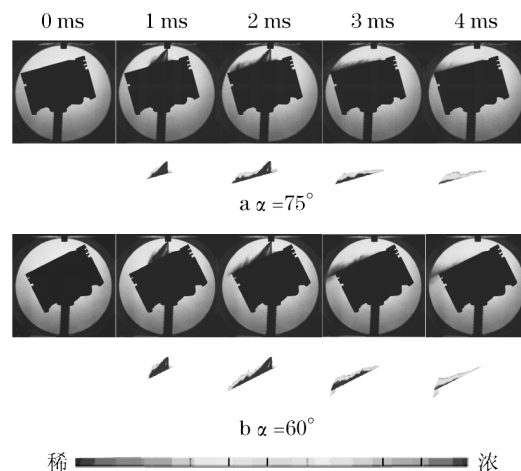


图 15 不同撞壁角度下的撞壁喷雾发展 (缩放比例 5 : 1)

Fig. 15 Impinging spray histories under different impinging angle conditions (scaling 5 : 1)

图 16 给出了喷油压力 9 MPa, 环境压力 0.1 MPa, 撞壁角度  $60^\circ$ , 环境温度 25℃ 的条件下, 喷雾撞壁距离 ( $D = 26.1, 47.1$  mm) (定义为活塞顶面与喷油器轴线垂直时, 喷油器喷嘴至活塞顶面的距离) 对喷雾撞壁过程及喷雾浓度变化的影响. 由图 16 结果可知, 相对于撞壁距离 26.1 mm 而言, 撞壁距离为 47.1 mm 时, 大量燃油在撞壁前或撞壁后趋向于活塞与定容可视化装置之间的间隙扩散. 由此可以推出, 在发动机缸内也可能会有较多燃油进入气缸与活塞之间的间隙, 因此喷油定时是形成优良混合气形成的关键参数之一. 另外, 不同油撞壁距离对喷雾浓度的变化也有重要影响. 由图中结果可以推出, 撞壁距离太大, 进入活塞与气缸壁之间间隙的燃油浓度越浓, 燃油雾化越差.

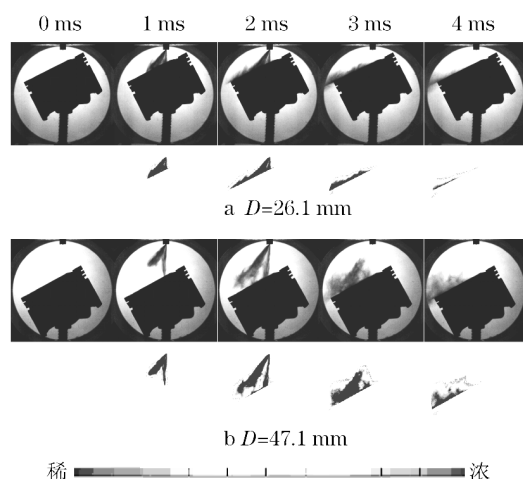


图 16 不同撞壁距离下的撞壁喷雾发展(缩放比例 5:1)

Fig.16 Impinging spray histories under impinging distance conditions (scaling 5:1)

## 4 结论

(1) 基于该可视化装置研究得出,随着喷油压力增加,喷雾贯穿距与喷雾锥角均增大.随着环境压力增加,喷雾贯穿距减小而喷雾锥角增加.

(2) 随着环境压力增加,喷雾运动的发展则呈减小趋势,喷雾破碎也明显减少;喷雾燃油浓度变浓.

(3) 撞壁角度和撞壁距离是喷雾撞壁过程的关键参数.撞壁角度为  $75^\circ$  时较撞壁角度为  $60^\circ$  时,撞壁后喷雾发展更佳,燃油雾化更好.较大撞壁距离可能导致较多燃油进去气缸间隙,不利于发动机燃烧与排放.

(4) 本实验开发的直喷汽油机可视化喷雾及其撞壁实验装置与控制系统可以可靠稳定地进行喷雾及其撞壁实验研究.

**致谢** 感谢吉利-同济汽车研究院项目资助;感谢高原博士在控制方面给予的支持与帮助.

## 参考文献:

- [1] Zhao Fuquan, Harrington D L, Lai Mingchia. Automotive gasoline direct-injection engines [M]. Warrendale: SAE International, 2002.
- [2] Moon Seoksu, Bae Choonsik, Choi Jaejoon, et al. The influence of airflow on fuel spray characteristics from a slit injector[J]. Fuel, 2007, 86(3): 400.
- [3] Aleiferis P G, Serras-Pereira J, van Romunde Z, et al. Mechanisms of spray formation and combustion from a multi-hole injector with E85 and gasoline[J]. Combustion and Flame, 2010, 157(1): 735.
- [4] GAO Jian, JIANG Deming, HUANG Zuohua. Spray properties of alternative fuels: a comparative analysis of ethanol-gasoline blends and gasoline[J]. Fuel, 2007, 86: 1645.
- [5] Yoo J, Kim S, Zhao F Q, et al. Characterization of direct injection gasoline sprays in different ambient and wall impingement conditions [C] // SAE 1998 World Congress & exhibition. [S.l.]: SAE, 1998. 982702.
- [6] Takaaki S, Naotaka S, Yukinobu A, et al. Spatial distribution of droplet diameter of wall-impinging-spray for direct injection gasoline engines [C] // SAE 1998 World Congress & exhibition. [S.l.]: SAE, 2003. 2003-01-0063.
- [7] 高原, 李理光, 吴志军, 等. 高背压大可视化场的喷雾试验定容弹及其控制系统开发[J]. 内燃机工程, 2009, 30(4): 57.  
GAO Yuan, LI Liguang, WU Zhijun, et al. Development of a spray experiment constant volume bomb with wide visualization and high back pressure and its control system [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2009, 30(4): 57.
- [8] 成大先. 机械设计手册——液压传动[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.  
CHEN Daxian. Mechanical design manual—fluid driver [M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2004.
- [9] 吴志红, 朱元, 王光宇. 英飞凌 16 位单片机 XC164CS 的原理与基础应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 2006.  
WU Zhihong, ZHU Yuan, WANG Guangyu. Infineon XC164CS principle and foundation [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2006.
- [10] 邓焱, 王磊. Lab View 7.1 测试技术与仪器应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.  
DENG Yan, WANG Lei. Lab view 7.1 testing techniques and instrument measurement [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2004.