

文章编号: 1000-8055(2010)08-1723-05

往复式汽油直喷发动机燃油喷雾特性研究

李 波, 李云清, 王德福

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 通过试验研究了高压燃油喷射系统和涡旋喷油器的喷雾特性, 在不同喷射压力、背压压力和燃油持续期条件下, 利用高速摄像机对喷入定体积容器的雾态燃油进行了喷雾贯穿距离、喷雾锥角、喷雾远端燃油发展速度和液滴特性等参数的测量. 试验结果表明在低背压压力下, 喷雾呈现出空锥、较大范围的分布形态, 有利于实现燃油与空气的均质混合; 然而在高背压条件下, 喷雾呈现出紧凑密集分布形态, 有利于实现燃油与空气的分层混合. 获得的贯穿距离经验公式与试验测量值在一定范围内是一致的. 低背压条件下, 涡旋形态出现在喷雾的远端, 而在高背压条件下, 涡旋形态出现在喷雾的中部.

关 键 词: 燃油喷雾特性; 汽油直喷; 往复式发动机; 高压燃油喷射; 经验公式

中图分类号: TK412; TK417

文献标识码: A

Study on fuel spray characteristics of gasoline direct injection reciprocating engine

LI Bo, LI Yun qing, WANG De fu

(School of Transportation Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to reveal the influences of high pressure fuel injection system on the performance including fuel consumption and exhaust emissions of gasoline direct injection (GDI) engines, the spray characteristics of high pressure swirl type of GDI injector were investigated experimentally and numerically. The experimental analyses had been carried out that the fuel injection into a constant volume chamber within different ambient pressures was visualized by high speed complementary metal oxide semiconductor (CMOS) camera. The spray development, spray penetration, spray cone angle, spray tip velocity and droplet characteristics were measured at various injection pressure, ambient back pressure and at different injection durations. Experimental results show that under the low back pressure ambient conditions, the spray comes out a hollow cone with wide spray angle and initial spray slug at the tip which meet the mixing control concept of homogenous mixture preparation, while the spray exhibits a solid compact cone under high back pressure which satisfy the stratified mixture preparation concept. An obtained empirical equation for spray penetration is validated by experimental results. Vortexes in the opposite direction exist in the rear part of the spray under low back pressure ambient conditions while the vortexes form in the middle part under high ambient pressure ambient conditions.

Key words: fuel spray characteristics; gasoline direct injection; reciprocating engine; high pressure fuel injection; empirical equation

收稿日期: 2010-03-10; 修订日期: 2010-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(50376003)

作者简介: 李波(1976-), 男, 内蒙古赤峰人, 博士生, 主要从事燃烧、三维流动模拟、进排气系统流动和电控系统开发等方面研究.

汽油直喷技术在提高燃油经济性及降低污染物排放等方面具有潜在的优势. 污染物的来源直接与燃烧过程相关, 而燃烧过程首要取决于缸内燃油的雾化、蒸发及与周围气体的混合程度. 由于控制伴有物理和化学反应的燃烧过程是复杂的且难于实现, 因此, 控制预燃现象, 如燃油和气体的流动、雾化、扩散及点火成为控制燃烧的有效途径^[1-4]. 燃油喷射系统作为发动机的关键部件, 其所形成的燃油雾化结构及其稳定性在混合气的准备和后续的燃烧过程中起着关键的决定性作用. 发动机处于部分负荷条件时, 为了获得较高的燃油经济性, 在压缩冲程后期喷入燃油, 快速地将燃油和空气的混合气向火花塞处传递, 在极短的时间间隔内实现燃油液滴的蒸发、扩散, 此时的喷雾形态趋于紧凑. 为了获得高的输出功率, 燃油在进气冲程早期喷入以便在相对较长的时间内形成均质混合气, 此时的燃油分布在较大的空间且需要避免与壁面发生碰撞即获得相对较小的贯穿距离^[5-8].

国内对汽油直喷式往复(活塞)发动机喷雾的研究较少, 深刻认识燃油喷雾的发展可以为燃烧室的设计、喷油时刻的确定、喷油器和火花塞的相对位置、进气道结构设计等提供参考. 本文通过试验和数值模拟联合的方法, 在不同喷射压力和环境背压、不同喷射持续期条件下, 对喷入定容室的燃油进行了研究.

1 试验装置

试验所用的喷油器是国外某型直喷式喷油器, 具有涡旋、单孔、空锥喷雾特性, 底部装有微型 SAC 喷嘴, 喷孔直径为 0.5 mm. 图 1 为所用喷油器及其内部结构图.

图 2 为高压燃油喷雾可视化系统. 高压压缩的氮气将燃油加压后传递到喷油器端, 最大喷油压力为 15 MPa, 两端装有石英玻璃的定体积压力容器与另一装有高压压缩混合气(氮气占 93.75%, CO₂ 占 6.25%, 混合后的分子质量与空气相当)的气瓶相连, 该压力容器的承压设计极限为 1.5 MPa. 喷油信号由 ST Microelectronics L9707 模块控制, 输出的 5V TTL (transistor-transistor logic) 电平用于同步触发高速摄像机 (Phantom 公司生产), 分辨率 512 pixel × 512 pixel, 采样频率 10 000 帧/s.

试验喷油压力分别为 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0 MPa, 背压范围 0.05~1.2 MPa, 所有试验在

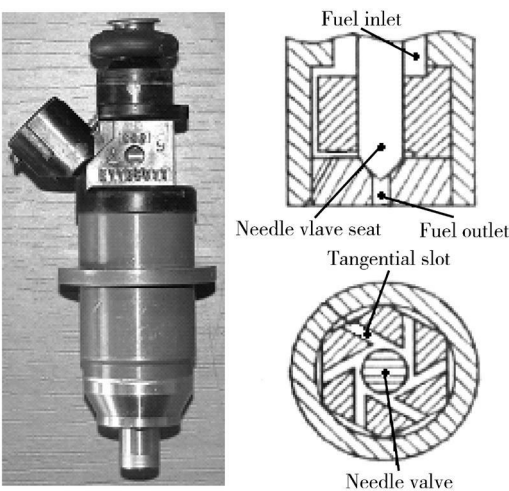


图 1 喷油器及其内部结构图
Fig. 1 Injector and its internal structure

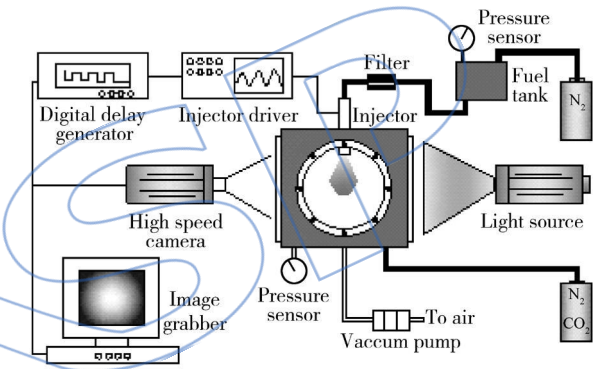


图 2 燃油喷射系统可视化装置
Fig. 2 Visualization device of fuel injection system

环境温度且无空气扰动的情況下完成.

2 喷雾图像处理

典型的用于定量研究喷雾特性的方法是图像均一化. 然而, 在研究大量图像时会占用相当长的时间, 同时需要稳定的、可重复的条件^[9]. 本文基于 Matlab 软件开发了一套图像处理方法用于获得喷雾特性的定量化研究. 图 3 为图像处理流程图.

3 结果和分析

3.1 喷雾射流参数定义

图 4 为高压燃油喷射形态, 在喷雾发展分析中, 定义贯穿距离为从喷嘴出口至射流发展顶端, 喷雾锥角为与燃油外围相切的两条直线间的夹角, 不考虑喷雾射流外围的湍流褶皱.

3.2 喷油压力对喷雾发展的影响

图 5 展示了不同喷射压力下, 同一背压 1.2

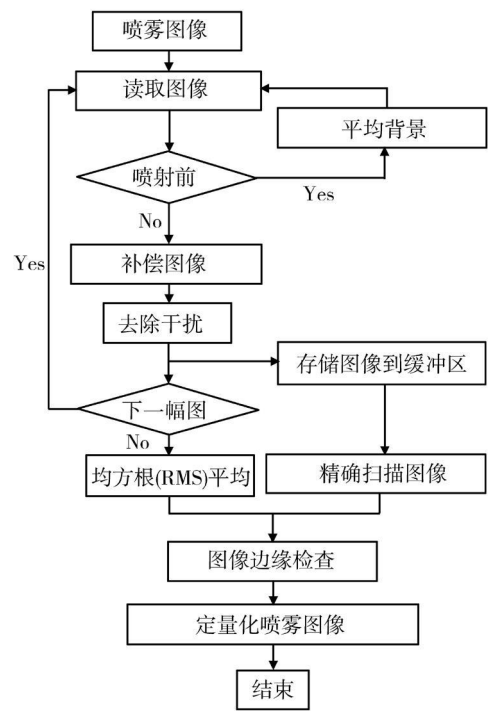


图 3 图像处理流程图
Fig. 3 Image processing flow chart

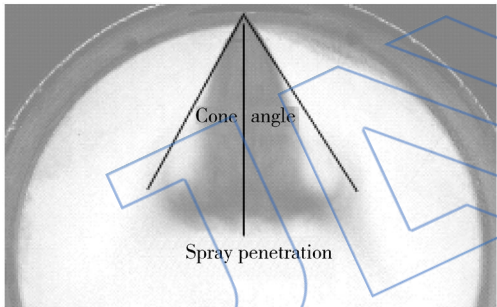


图 4 喷雾射流参数定义
Fig. 4 Spray jet parameter definition

MPa 下喷雾的发展历程。

喷雾射流自喷嘴喷出后迅速向下发展, 同时射流向两边扩散, 射流外围由于和环境气体相互作用而产生湍流褶皱。喷雾射流在发展过程中, 锥角基本不变, 在发展到最大贯穿距离 2/3 后, 由于射流动量在与环境气体的相互作用中减弱, 射流在横向上开始出现收缩, 同时射流外围湍流褶皱增强。射流上部外围比较平滑, 下部由于射流与环境气体的相互作用, 外围有较强的褶皱。在较高的背压条件下, 喷雾呈现出紧凑密集形态, 选择合适的喷油压力对发动机性能将会产生较大的影响, 尤其在部分负荷工况下, 燃油在压缩后期喷入, 避免燃油与壁面发生碰撞^[910]。

类似于涡旋的结构在 0. 8ms 时刻出现, 随着

喷雾的发展, 涡旋结构开始破碎且变得混乱, 文献 [8] 对该涡旋结构进行了详细阐述。图 6 为不同背压条件下涡旋结构的对比, 喷射压力为 8. 0MPa。

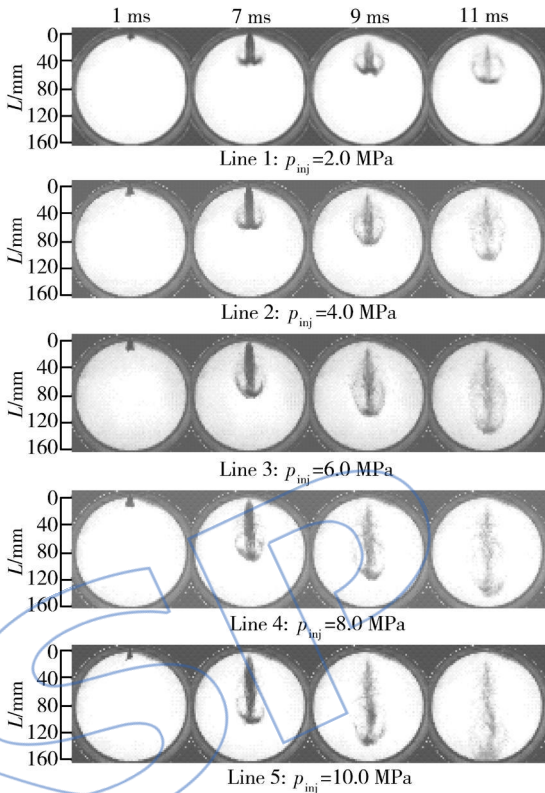


图 5 喷雾发展历程(背压 1. 2 MPa)
Fig. 5 Spray development (back pressure 1. 2 MPa)

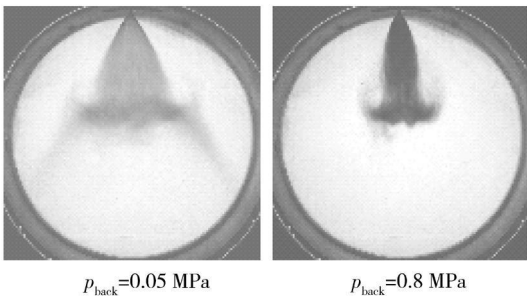


图 6 不同环境背压下的涡旋结构
Fig. 6 Vortex structure at different back pressures

在低背压下, 所形成的涡旋结构分布在较大的空间, 同时伴有相对较多的环境气体进入喷雾发展本身, 尤其在发动机高负荷工况下, 燃油在进气初期喷入, 易于形成均质混合气。而在高环境背压条件下, 喷雾所形成涡旋分布在较小的空间, 环境气体与燃油液滴在喷雾发展过程中的不同时刻具有不同的混合状态, 发动机在部分负荷工况下, 燃油在压缩冲程阶段喷入, 易于形成分层混合气^[1+12]。

图 7 为背压为 1.2 MPa, 不同喷射压力下喷雾贯穿距离随时间的关系。

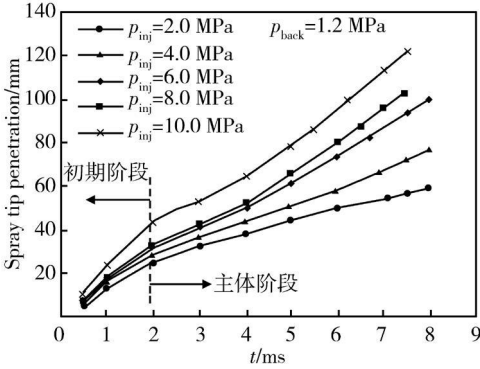


图 7 喷射压力对喷雾贯穿距离的影响
Fig. 7 Influence of injection pressure on spray penetration

由图 7 可以看出, 喷雾射流的发展分为初期阶段和主体阶段, 在射流发展初期, 射流贯穿距离随时间增加很快, 在射流主体阶段, 贯穿距离随时间呈线性增加, 但贯穿距离增加速度比射流发展初期小. 随着喷射压力的提高, 燃油密度增加, 射流动量增大, 贯穿距离相应地增大. 喷射压力从 2 MPa 提高到 6 MPa 时, 射流贯穿距离增大 1.6 倍, 继续增大喷射压力时, 介质气体对射流的阻力作用增大, 射流贯穿距离的增加幅度减小, 喷射压力为 6.0 MPa 和 8.0 MPa 时, 贯穿距离相差不大.

图 8 为不同喷射压力下喷雾射流锥角随时间发展的关系. 同一喷射压力下, 射流锥角基本不变. 射流锥角随着喷射压力的提高减小. 喷射压力提高, 射流动量增加, 贯穿距离增大, 射流集中向前发展, 横向发展的能力减弱, 射流锥角减小.

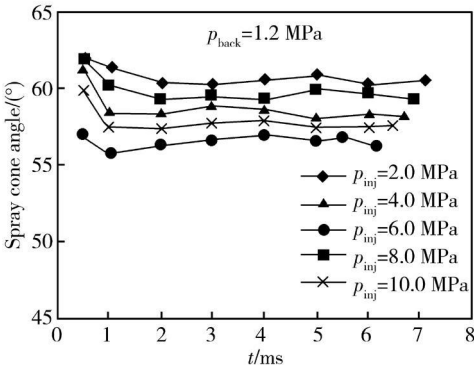


图 8 喷射压力对喷雾锥角的影响
Fig. 8 Influence of injection pressure on cone angle

3.3 环境背压对喷雾发展的影响

图 9 为不同环境背压下射流贯穿距离随时间的关系. 由图可知, 射流发展很明显的分为初期阶段和主体阶段. 在射流发展初期阶段, 射流贯穿距离随时间快速增加, 在射流主体阶段, 贯穿距离随时间呈线性增加. 随着环境背压的增加, 环境气体对射流的阻力增加, 射流贯穿距离减小.

段和主体阶段. 在射流发展初期阶段, 射流贯穿距离随时间快速增加, 在射流主体阶段, 贯穿距离随时间呈线性增加. 随着环境背压的增加, 环境气体对射流的阻力增加, 射流贯穿距离减小.

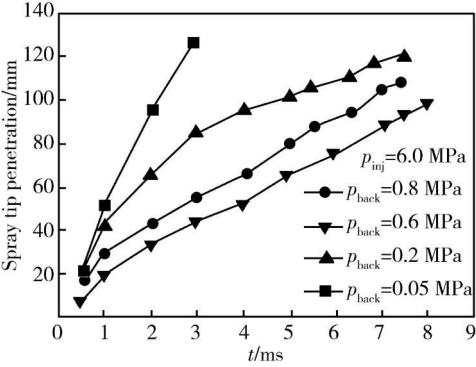


图 9 环境背压对喷雾贯穿距离的影响
Fig. 9 Influence of back pressure on spray penetration

图 10 为不同背压下射流锥角随时间的关系. 由图可知, 射流发展过程中, 射流锥角变化不大. 随着环境背压的增加, 环境气体对射流阻力增加, 射流锥角增加.

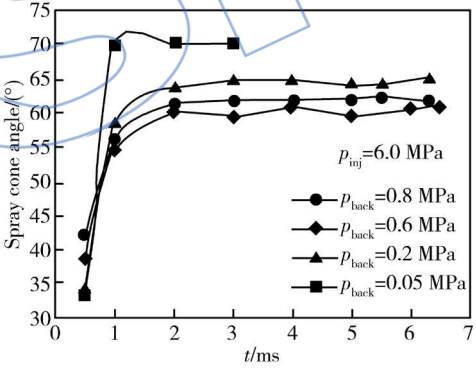


图 10 环境背压对喷雾锥角的影响
Fig. 10 Influence of back pressure on spray cone angle

图 11 展示了喷射压力为 8.0 MPa, 不同环境背压下喷雾形态随时间发展的历程. 在低背压条件下, 喷雾呈现出中空锥的形态且分布在较大的空间里, 适用于在发动机高负荷情况下, 燃油在进气冲程初期喷入缸内, 易于形成均质混合气. 随着背压的增大, 喷雾呈现出密集紧凑的形态且分布在较小的空间里, 在发动机中低负荷情况下, 燃油在压缩冲程后期喷入, 具有较小的贯穿距离, 在火花塞处形成较浓的混合气, 远端则形成较稀的混合气.

3.4 喷雾贯穿距离的经验公式计算值与试验值对比

通过大量的试验数据获得了下面的喷雾贯穿

距离公式:

$$L = 0.028 \left(\frac{\Delta p}{\rho} \right)^{0.25} t^{0.5} \quad t \in (0, 6) \text{ ms}$$

其中 L 为喷雾贯穿距离, Δp 为喷射压力与环境背压的差值, ρ 为环境气体密度, t 为喷射时间.

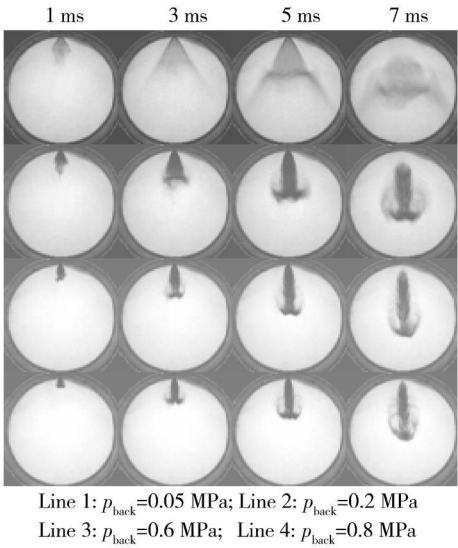


图 11 不同环境背压条件下的喷雾发展历程
Fig. 11 Influence of back pressure on spray

图 12 显示了在环境背压为 1.2 MPa, 不同喷射压力下由经验公式计算得到的喷雾贯穿距离和试验测量值的对比. 喷油时间在 0~ 6 ms 范围内, 取得了两者的一致性, 同时证实了喷射压力和环境背压对喷雾贯穿距离的影响.

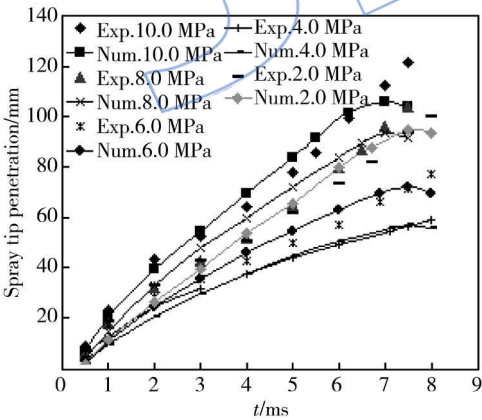


图 12 喷雾贯穿距离试验值和计算值的对比
Fig. 12 Comparison of spray penetration between experiment and simulation

4 结 论

通过联合试验和数值模拟计算的方法, 研究了高压燃油喷射系统及燃油喷雾特性, 结论如下:

- 1) 喷雾射流发展分为两个阶段, 射流初期阶段和射流主体阶段. 射流初期阶段, 射流贯穿距离随时间快速增加; 主体阶段, 射流贯穿距离随时间呈线性增加.
- 2) 射流发展过程中射流锥角基本保持不变. 随着喷射压力的提高, 射流贯穿距离和体积增加, 射流锥角减小. 随着环境背压的增加, 射流贯穿距离和射流体积减小, 射流锥角增加.
- 3) 获得的喷雾贯穿距离公式 $L = 0.028 \left(\frac{\Delta p}{\rho} \right)^{0.25} t^{0.5}$, 在一定范围内与试验数据取得了一致性.

参考文献:

[1] Zhao F, Lai M C, Harrington D L. A review of mixture preparation and combustion control strategies for spark ignited direct injected gasoline engines[R]. SAE Paper No. 970627, 1997.

[2] WANG Xibin, GAO Jian, JIANG Deming, et al. Spray characteristics of high pressure swirl injector fueled with methanol and ethanol [J]. Energy and Fuels, 2005, 19(6) : 2394-2401.

[3] Tomoda T, Sasaki S, Sawada D, et al. Development of direct injection gasoline engine study of stratified mixture formation[R]. SAE Paper No. 970539, 1997.

[4] Fraidl G K, Ploik W F, Wirth M. Gasoline direct injection: Actual trends and future strategies for injection and combustion systems[R]. SAE Paper No. 960465, 1996.

[5] Kano M, Saito K, Basaki M, et al. Analysis of mixture formation of direct injection gasoline engine[R]. SAE Paper No. 980157, 1998.

[6] AVL LIST GmbH. AVL HYDSIM [M]. Austria: AVL LIST GmbH, 2009.

[7] Sung W P, Hyung J K. Numerical and experimental analysis of spray atomization characteristics of a GDI injector [J]. KSME International Journal, 2003, 17(3) : 449-456.

[8] Sazhin S S, Kaplanski F, Feng G, et al. A fuel spray induced vortex ring [J]. Fuel, 2001, 80(13) : 1871-1883.

[9] Kuwahara K, Ando H. Diagnostics of in-cylinder flow, mixing and combustion in gasoline engines [J]. Meas. Sci. Technol., 2000, 11(6) : 95-111.

[10] Panao M R O, Moreira A L N. Experimental study of the flow regimes resulting from the impact of an intermittent gasoline spray [J]. Experiments in Fluids, 2004, 37(6) : 834-855.

[11] Im K S, Lai M C, Tacina R R. A parametric spray study of the swirl/venturi injectors [J]. AIAA 98-3269, 1998.

[12] Chen S K, Lefebvre A H. Factors influencing the effective spray cone angle of pressure swirl atomizers [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1992, 114(1) : 97-113.