

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.09.004

高压涡旋喷油器喷雾撞壁机理研究*

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】 为了研究直喷式汽油机高压涡旋喷油器喷雾撞壁机理,测量了撞壁喷雾的高度、喷雾半径及喷雾远端速度,分析了不同喷射压力、环境背压、喷嘴到壁面的距离、壁面倾角等因素对撞壁喷雾的影响。随着喷射压力、喷嘴到壁面的距离及壁面倾角的增加,喷雾的贯穿距离增大;环境背压的增大导致喷雾的贯穿距离减小。较高的喷射压力和较低的环境背压增大了撞壁燃油与壁面的接触面积,在壁面上形成的薄膜加速了燃油的蒸发。由经验公式计算得到的撞壁喷雾贯穿距离与试验测量值在一定范围内具有一致性,为燃烧室的设计、进气道形式的选取、喷油器和火花塞的布局提供了试验依据。

关键词: 汽油缸内直喷 高压涡旋喷油器 喷雾撞壁 机理

中图分类号: TK411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)09-0018-04

Spray Impingement Characteristic of GDI High-pressure Swirl Injector

Li Bo Li Yunqing Wang Defu

(Academy of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract

The characteristics of gasoline spray after wall impingement from a high-pressure gasoline direct injection injector were investigated. To examine the effects of various factors on the impingement development, experiments were conducted at different injection pressures, ambient pressures, wall distances and angles. The impinging spray development, spray height, spray radius, and spray growth rate were measured. Experimental results show that the spray penetration increases with the increase of injection pressure, wall distance and angle. The penetration decreases with the increase of ambient pressure. High injection pressure and low ambient pressure increased the fuel contact area and accelerated the evaporation. The predicted penetrations with the empirical equations in all cases agree with measurements, to a certain extent.

Key words Gasoline direct injection, High-pressure swirl injector, Spray impingement, Mechanism

引言

汽油缸内直喷技术在提高汽油机燃油经济性、降低污染物排放等方面具有潜在的优势,通过分层充量稀燃技术可以降低燃油消耗,即在火花塞附近形成具有理论空燃比或稍浓的混合气,而在燃烧室的剩余部分充满了纯空气或燃烧循环产物稀释了的空气^[1-3]。由于燃烧室空间几何形状、液滴尺寸和

喷雾贯穿速度等因素的影响,发生在活塞顶、气缸壁的喷雾撞壁现象几乎不可避免。喷雾撞壁加强了燃油的升温 and 蒸发,随着喷射压力的提高,油膜厚度减小;油膜的二次雾化引起蒸发速率下降,部分燃油脱离了主要燃烧阶段,喷雾撞壁角度和撞壁位置也是混合物形成的重要因素^[4-5]。

为了进一步研究喷雾撞壁现象。本文结合汽油高压喷雾可视化系统研究燃油喷射压力、环境背压、

收稿日期: 2010-03-18 修回日期: 2010-05-27

* 国家自然科学基金资助项目(50376003)

作者简介: 李波, 博士生, 主要从事液体燃料燃烧、三维流动, 进排气系流动和电控系统研究, E-mail: mnlslb@ae.buaa.edu.cn

壁面倾角、喷嘴距壁面的距离、燃油撞壁位置等因素对撞壁喷雾的影响,通过经验公式预测撞壁喷雾的发展,并与试验结果进行比较,为燃烧室的设计、火花塞和喷油器的布局、进气道形式、喷油时刻的确定提供试验依据。

1 试验装置

1.1 喷雾撞壁可视化装置

试验所用的喷油器是三菱公司的 GDI 喷油器,图 1 为该喷油器及内部结构图。喷孔直径 0.5 mm。

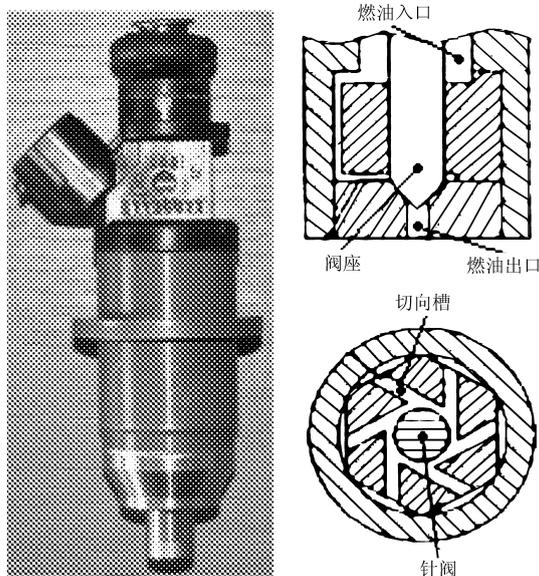


图 1 GDI 喷油器及其内部结构图

Fig. 1 Structure of GDI injector

图 2 为喷雾可视化系统。高压氮气将燃油加压到喷油器端,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装有高压压缩混合气的气瓶相连,压力容器承压 1.5 MPa。经过研磨的、可调整角度和高度的壁板安装在容器内部。光源为镝灯,功率为 1 800 W。喷油信号由 ST Microelectronics L9707 模块控制,输出的 5 V TTL 电平用于同步触发

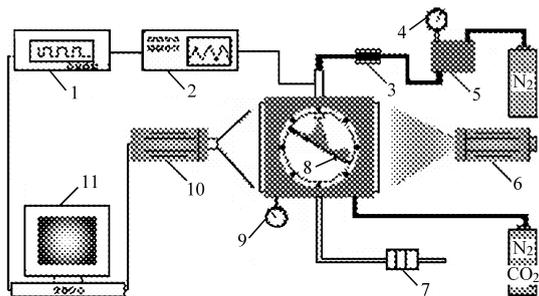


图 2 燃油喷射系统可视化装置

Fig. 2 Spray visualization of fuel injection system

1. 信号延迟发生器 2. 喷油驱动 3. 过滤器 4. 压力传感器
5. 油箱 6. 光源 7. 真空泵 8. 壁板 9. 高速摄像装置 10. 图像采集 11. 计算机

高速摄像机 (Phantom 公司生产),分辨率为 512×512 ,采样频率为 10 000 帧/s。

1.2 撞壁喷雾试验条件

表 1 为喷雾撞壁试验条件,试验在环境温度且无空气扰动的情況下完成。

表 1 喷雾撞壁试验条件

Tab. 1 Experiment conditions of spray impingement

参数	数值
喷油压力 p_{inj}/MPa	4, 5, 6, 7, 8
环境背压 p_{amb}/MPa	0.05 ~ 1.2
壁面距离 L/mm	30, 40, 50, 60
壁面倾角 $\theta/(\text{°})$	0, 30, 45, 60

2 喷雾撞壁参数

为了描述撞壁后喷雾的发展,引入撞壁喷雾高度 H 和喷雾半径 R 两参数,图 3 为垂直壁面的喷雾撞壁,图 4 为倾斜壁面的喷雾撞壁。喷雾半径 R 指撞壁后喷雾射流沿着壁面方向的贯穿距离,喷雾高度 H 指垂直于壁面方向的贯穿距离, L 为从喷嘴到壁面的距离, θ 为壁面倾角。

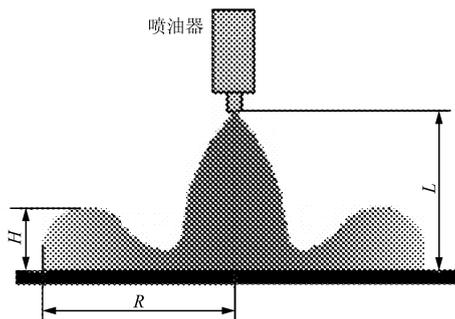


图 3 垂直壁面的撞壁喷雾

Fig. 3 Vertical spray impingement

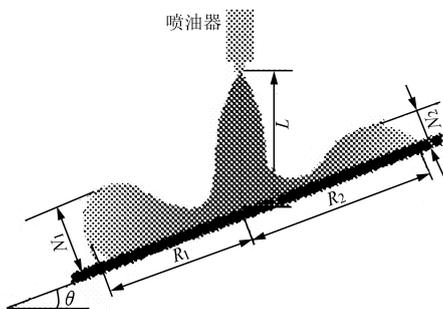


图 4 倾斜壁面的撞壁喷雾

Fig. 4 Inclination spray impingement

引入喷雾撞壁贯穿距离 $L_{penetration}$ 来描述喷雾的发展,喷雾撞壁贯穿距离在 dt 时间内可表述为

$$dL_{penetration} = \sqrt{(dR)^2 + (dH)^2} \quad (1)$$

因此,撞壁喷雾的贯穿距离为

$$L_{penetration} = \int_0^t \sqrt{(dR)^2 + (dH)^2} dt \quad (2)$$

3 结果和分析

3.1 垂直喷雾撞壁发展过程

图5为在不同喷射压力、环境背压下的喷雾撞壁发展过程,壁面距离 L 为50 mm,壁面倾角 θ 为 0° 。

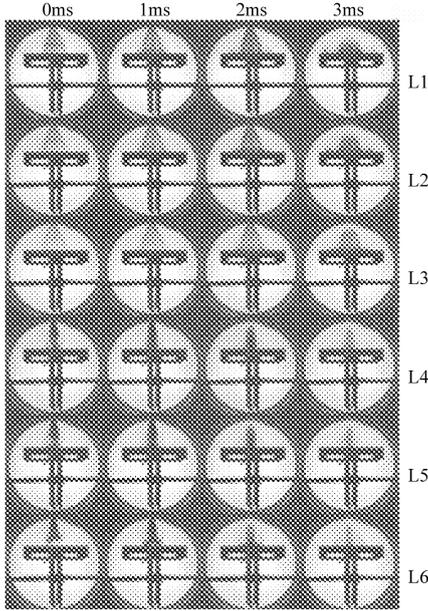


图5 垂直喷雾撞壁发展过程($\theta = 0^\circ$)

Fig. 5 Vertical spray impingement development

L1: $p_{inj} = 8.0 \text{ MPa}$, $p_{amb} = 0.1 \text{ MPa}$

L2: $p_{inj} = 6.0 \text{ MPa}$, $p_{amb} = 0.1 \text{ MPa}$

L3: $p_{inj} = 4.0 \text{ MPa}$, $p_{amb} = 0.1 \text{ MPa}$

L4: $p_{inj} = 8.0 \text{ MPa}$, $p_{amb} = 1.0 \text{ MPa}$

L5: $p_{inj} = 6.0 \text{ MPa}$, $p_{amb} = 1.0 \text{ MPa}$

L6: $p_{inj} = 4.0 \text{ MPa}$, $p_{amb} = 1.0 \text{ MPa}$

喷雾撞壁的同时,油膜在壁面上快速形成,连续的喷雾使得后续的动量附加在先前形成的油膜上,因此,液滴在壁面上快速飞溅。在壁面上垂直于喷嘴位置的油膜变得较薄,光滑且具有很小摩擦阻力的壁面是形成这种现象的原因。由于喷雾射流和环境气体的相互作用,在高背压条件下形成明显的喷雾撞壁涡旋结构,涡旋结构成为降低撞壁喷雾远端发展速度的因素。随着喷射压力的提高,撞壁喷雾的喷雾高度、喷雾半径、喷雾远端的速度及涡旋强度增大。在低背压环境下,喷雾为中空锥形态,因此在壁面上形成的油膜较薄且与壁面有较大的接触面积,加快了液滴的蒸发、扩散。随着背压的增大,喷雾展示出紧凑的形态,撞壁后的油膜较厚且分布在较小的范围内,不利于液滴的蒸发、扩散。

图6说明了在环境背压为 0.1 MPa 下,随着壁面距离的增加,撞壁喷雾高度递减。喷雾高度在 2.2 ms 达到最大值,然后开始降低,这是由于燃油

喷雾与环境气体相互作用后,液滴动量减小并伴随蒸发、扩散。

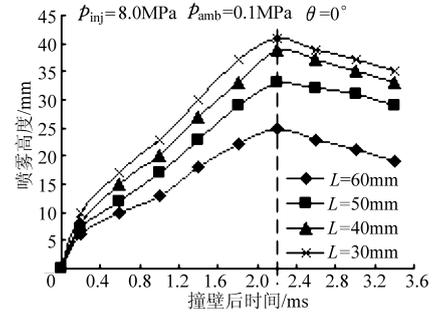


图6 壁面距离对撞壁喷雾高度的影响

Fig. 6 Influence of wall distance on spray height

图7表明撞壁喷雾半径随壁面距离的增大而增大,但是喷雾远端速度降低。低背压下喷雾呈现出空锥形态,液滴与壁面有较大的接触面积,易于快速蒸发、扩散。

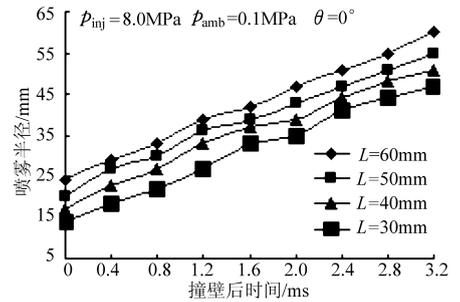


图7 壁面距离对撞壁喷雾半径的影响

Fig. 7 Influence of wall distance on spray radius

3.2 倾斜喷雾撞壁发展过程

图8为在不同喷射压力、环境背压下的喷雾撞壁发展过程,壁面距离 L 为 30 mm ,壁面倾角 θ 为 30° 。壁面倾角为 45° 和 60° 的喷雾撞壁发展与之类似。由于撞壁喷雾在沿壁面向上方向的贯穿距离较小,因此,这里仅考虑撞壁喷雾沿倾斜壁面向下的喷雾发展^[6]。随着壁面倾角的增大,撞壁喷雾贯穿距离增大,表明了增加的壁面倾角减小了撞壁对喷雾发展的影响,更多的喷雾动量沿壁面向下发展。

在高背压环境下,撞壁喷雾高度、喷雾半径和喷雾远端速度较在低背压环境下小。强烈涡旋结构在撞壁早期比较明显,从而使得喷雾射流沿壁面的发展速度较低。相对于壁面倾角 θ 为 0° ,来自液滴拖曳及壁面摩擦的影响较小。高背压环境对撞壁喷雾发展的阻力作用明显。

3.3 自由喷雾和撞壁喷雾的发展速度

将撞壁喷雾发展分为自由喷雾(从喷嘴到壁面段)和撞壁喷雾(从喷雾最初撞壁到撞壁结束段)。引入撞壁时间 t_w 作为两段喷雾的转折点。

图9表明喷雾远端速度自撞壁点处开始递减,较小的壁面距离伴随较短的撞壁时间。

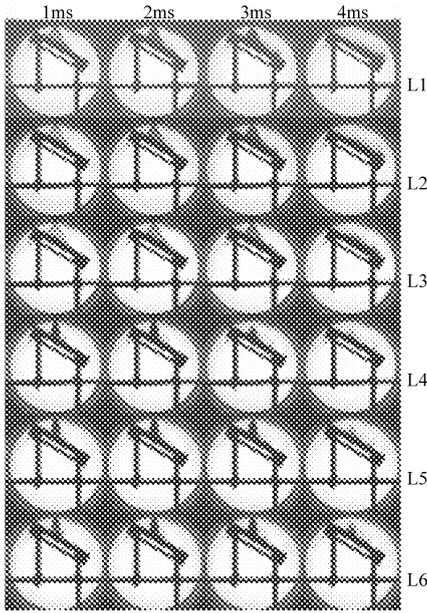


图 8 喷雾撞壁发展过程 ($\theta = 30^\circ$)

Fig. 8 Spray impingement development ($\theta = 30^\circ$)

- L1: $p_{inj} = 8.0 \text{ MPa}$, $p_{amb} = 0.1 \text{ MPa}$
- L2: $p_{inj} = 6.0 \text{ MPa}$, $p_{amb} = 0.1 \text{ MPa}$
- L3: $p_{inj} = 4.0 \text{ MPa}$, $p_{amb} = 0.1 \text{ MPa}$
- L4: $p_{inj} = 8.0 \text{ MPa}$, $p_{amb} = 1.0 \text{ MPa}$
- L5: $p_{inj} = 6.0 \text{ MPa}$, $p_{amb} = 1.0 \text{ MPa}$
- L6: $p_{inj} = 4.0 \text{ MPa}$, $p_{amb} = 1.0 \text{ MPa}$

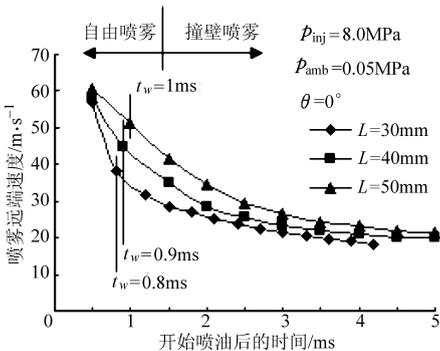


图 9 壁面距离对撞壁喷雾速度的影响
Fig. 9 Influence of wall distance on velocity

根据式(2),测得 t 时刻的喷雾高度 H 和喷雾半径 R ,即可得到撞壁喷雾的贯穿距离,因此,喷雾远端速度为撞壁喷雾贯穿距离与时间的比值。

图 10 表明在低背压条件下,由于环境气体对喷雾动量的反作用力较小,喷雾撞壁时刻较早。

3.4 喷雾撞壁贯穿距离计算值和测量值对比

喷雾撞壁经验公式为^[7]

$$L_{\text{penetration}} = B \sqrt{t_{\text{asoil}} - t_w} + L \quad (3)$$

$$B = (56.1 - 0.36L - 0.39\phi + 0.0033L\phi) \left(\frac{1.5}{p_{\text{amb}}} \right)^{1/4} \quad (4)$$

$$\phi = 90 - \theta \quad (5)$$

式中 B ——撞壁常数

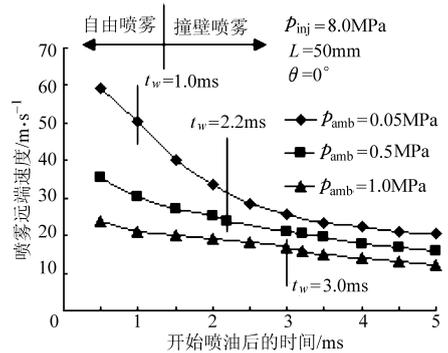


图 10 环境背压对撞壁喷雾发展速度的影响
Fig. 10 Influence of ambient pressure on velocity

t_{asoil} ——开始喷油时刻

文献[7]指出,式(3)对于汽油喷雾撞壁同样具有一定的适用性。

图 11、12 分别为不同撞壁距离和壁面倾角条件下,喷雾贯穿距离的试验值和计算值对比。

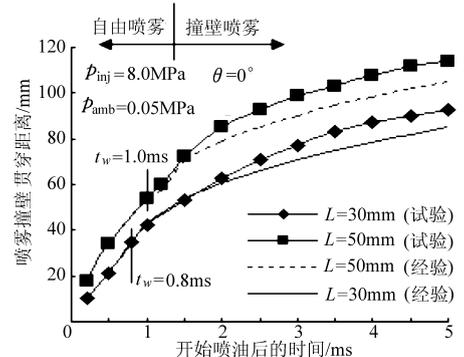


图 11 不同撞壁距离下喷雾撞壁贯穿距离的对比
Fig. 11 Influence of distance on penetration

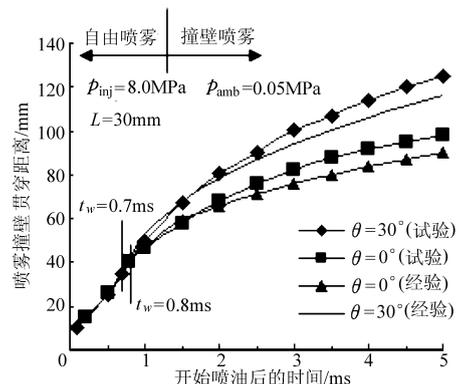


图 12 不同壁面倾角下喷雾撞壁贯穿距离的对比
Fig. 12 Influence of inclination on penetration

由对比可知,经验公式计算的结果与实际测量值接近,但计算的喷雾撞壁贯穿距离较试验测量值小,这是由于经验公式仅考虑了壁面距离、环境背压和壁面倾角对喷雾撞壁贯穿距离的影响,忽略了喷射压力的影响,而以撞壁时间 t_w 代替喷射压力对喷雾撞壁贯穿距离的影响,即撞壁时间与喷射压力存在函数关系,因为较高的喷射压力伴随较短的撞壁时间。
(下转第 43 页)

- 11(2):47~50.
- 13 方生,陈秀玲.浅层地下咸水利用和改造的研究[J].河北水利科技,1996,20(2):6~11.
Fang Sheng, Chen Xiuling. Study of both utilization and reconstructive about shallow layer underground saline water[J]. Hebei Technology of Hydraulics, 1996, 20(2):6~11. (in Chinese)
- 14 张永波,王秀兰.表层盐化土壤区咸水灌溉试验研究[J].土壤学报,1997,34(1):53~59.
Zhang Yongbo, Wang Xiulan. Experimental investigation of saline water irrigation at surface layer salification soil region[J]. Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(1):53~59. (in Chinese)
- 15 郭会荣,靳孟贵,高云福.冬小麦田咸水灌溉与土壤盐分调控试验[J].地质科技情报,2002,21(1):61~65.
Guo Huirong, Jin Menggui, Gao Yunfu. Experiments on irrigation with brackish groundwater and management of soil salt in winter wheat fields[J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21(1):61~65. (in Chinese)
- 16 毛振强,宇振容,马永良.微咸水灌溉对土壤盐分及冬小麦和夏玉米产量的影响[J].中国农业大学学报,2003,8(增刊):20~25.
Mao Zhenqiang, Yu Zhenrong, Ma Yongliang. Influence of brackish water on the soil salt regime and yield of winter wheat and summer maize[J]. Journal of China Agricultural University, 2003, 8(Supp.):20~25. (in Chinese)
- 17 杨林林,杨培岭,任树梅,等.土壤浸提液电导率与再生水灌溉土壤化学性质关系的通径分析[J].中国农村水力水电,2006(11):5~8.
- 18 申献辰.天然水化学[M].北京:中国环境科学出版社,1994:279.
- 19 吴忠东,王全九.入渗水矿化度对土壤入渗特征和离子迁移特性的影响[J].农业机械学报,2010,41(7):64~69,75.
Wu Zhongdong, Wang Quanjiu. Effect on both soil infiltration characteristics and ion mobility features by mineralization degree of infiltration water[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7):64~69,75. (in Chinese)

(上接第21页)

4 结论

(1)在较高的喷射压力、较小的壁面距离和较大的壁面倾角下,撞壁喷雾具有较大的贯穿距离;而随着环境背压的增大,喷雾高度和喷雾半径减小。较高的喷射压力和较低环境背压增大了燃油撞壁的接触面积,加速了喷雾的发展;而较大的环境背压降

低了喷雾动量。

(2)较低背压下形成的喷雾具有较大的中空锥结构,撞壁后所形成的油膜较薄且分布在较大面积,有利于燃油液滴的蒸发、扩散,而在较大的背压下刚好相反。

(3)高背压下形成的涡流强度较低背压下大,从而增大了撞壁喷雾的高度,减小了喷雾半径和喷雾远端速度。

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 [C]. SAE Paper 970627, 1997.
- 2 李本正,刘圣华,刘杰,等.甲醇缸内直喷发动机均质燃烧特性研究[J].农业机械学报,2010,41(4):16~19.
Li Benzhen, Liu Shenghua, Liu Jie, et al. Experiment on homogeneous charge combustion characteristics of direct-injection methanol engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4):16~19. (in Chinese)
- 3 胡怀礼,张武高,金永星,等.斯特林发动机喷雾特性试验研究[J].农业机械学报,2010,41(2):10~16.
Hu Huaili, Zhang Wugao, Jin Yongxing, et al. Experimental study on fuel spray characteristics of stirling engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2):10~16. (in Chinese)
- 4 Nouri J M, Hamid M A, Yan Y. Spray characterization of a piezo pintle-type for gasoline direct injection engines [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2007, 85: 012037.
- 5 Sakane N, Hamamoto Y, Sumimoto T. Behavior of diesel spray impinge on a wall [J]. JSME Int. J., 1987, 54(503):1 861~1 865.
- 6 Lee C H, Lee K H. Experimental study on macroscopic spray characteristics after impingement in a slit-type GDI injector [J]. International Journal of Automotive Technology, 2008, 9(3): 373~380.
- 7 Ebara T, Amagar K, Ari M. Movement and structure of diesel spray impinging on an inclined wall [C]. SAE Paper 970046, 1997.