

## 直喷汽油机喷油器射流显微放大特性研究\*

何邦全 张俊恺

(天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 在定容弹试验台上,利用高速相机和长距显微镜相结合的方法,研究了不同喷油压力和环境背压下单孔直喷汽油机喷油器射流的显微放大特性。结果表明,汽油射流表面会形成表面波,而且表面波的波长发展具有随机性。间断产生的表面波通常从射流向外摆动的切线处剥离后形成密集的微小液滴群,形成径向分叉的雾化结构。随着喷油压力的升高,射流表面波波长变短,表面波频率提高,导致射流破碎加剧,形成的液滴直径减小。此外,喷油压力及环境背压的升高使射流中相邻径向雾化分支之间的距离缩短。

**关键词:** 汽油 喷雾 显微放大 表面波

**中图分类号:** TK417+.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)06-0032-06

## 引言

燃油破碎与雾化对于直喷发动机的性能起着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。随着科学技术的不断进步,光学诊断技术已经普遍应用于直喷发动机的喷雾测试中。燃油从喷油器喷出后,一部分液态燃油在喷孔出口附近破碎成细小的液滴,而大部分燃油则在射流不断发展的过程中从液核中破碎,并形成液滴<sup>[2]</sup>。因此,燃油的破碎通常受到喷孔几何形状<sup>[3]</sup>、喷孔内的空化现象<sup>[4]</sup>、液态燃油内部湍流<sup>[5]</sup>和射流周围空气动力学<sup>[6]</sup>等因素的共同影响。此外,燃油的表面张力及液态油滴的动能同样也会影响射流的发展和破碎<sup>[7]</sup>。但是由于影响燃油破碎与雾化的因素较多,目前人们还没有对其影响机理达成共识。因此有必要对喷雾场内不同位置燃油的微观结构进行更细致的研究。

目前,国内对于喷雾的放大研究尚处于起步阶段,对于射流及其表面波的研究多侧重于理论计算,尚未考虑射流形态对喷雾整体结构的影响<sup>[8-9]</sup>。为了更全面地认识喷孔出口处燃油的流动特性,本文利用长工作距离显微镜和高速相机相结合的方法,根据显微放大的喷雾局部图像,从相对微观的角度,分析孔式直喷汽油喷油器的喷雾特性,为燃料破碎雾化模型的建立提供基础数据。

## 1 试验装置及方法

直喷汽油喷油器显微放大喷雾试验装置如图1

所示,主要包括定容弹、燃料供给系统、单孔直喷汽油喷油器、控制用计算机、同步触发控制电路、氙灯、高速相机、长工作距离显微镜和定容弹背压调节系统等。

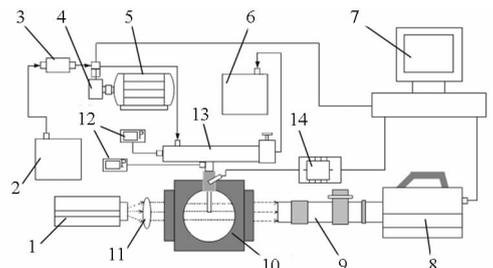


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup

1. 氙灯 2. 供油油箱 3. 低压油泵 4. 高压油泵 5. 电动机
6. 回油油箱 7. 计算机 8. 高速相机 9. 长工作距离显微镜
10. 定容弹 11. 凸透镜 12. 压力表 13. 高压油轨 14. 喷油器驱动电路

供油系统由低压油路和高压油路组成。高压汽油泵由电动机拖动,并将低压燃油加压后送入高压油轨中。试验中通过调节安装于高压共轨上的溢压阀控制喷油压力。高压共轨中的高压燃油在经过溢压阀泄出时压力迅速下降,燃料中的轻质馏分极易挥发,长时间使用后初始燃油中的轻质馏分减少,势必影响试验燃料的馏程,从而影响汽油的喷雾特性。因此,从溢压阀泄出的燃油不再循环使用。

试验所用喷油器为6孔直喷汽油喷油器。为了方便显微放大测量,利用金属修补剂堵住喷油器的

5个喷孔,仅留下1个垂直向下的喷孔进行试验研究。喷孔直径为0.23 mm。

Photron Fastcam SA5型高速相机最高拍摄频率为1M帧/s,相机最大分辨率为1024像素×1024像素。

长工作距离显微镜由Infinity Model K2/SC单筒镜组、CF-2物镜、TR二倍镜筒等组成。该镜组工作距离为138~209 mm,景深为0.03~0.06 mm,放大倍数为2.72~4.58倍。试验得到图像中每个像素的实际长度为6.71 μm。

为了减小喷油过程中喷雾图像的随机误差,对每一个试验点进行了10次拍摄。利用自编的Matlab图像处理程序,对在单个喷油过程中所得到的每幅图像进行处理。分析时采用喷油后(ASOI, After start of injection)的计时方式,即将记录到第1幅燃油喷出图像的前一幅图像的时刻定义为ASOI为0 μs。

利用Matlab程序去掉每张图像的背景,并用直方图判断出背景的阈值,再将喷雾图像转换为灰度图。在此基础上,去掉图像中孤立的油滴后,利用最大灰度变化率提取喷雾边界,用于计算射流表面波的特征参数。

本文所选择的图像拍摄位置如图2所示。拍摄区域中心分别在喷油器喷孔出口下方10、20和30 mm处。在同一水平高度选择了几个相邻的拍摄位置。图中用方框标记出了实际拍摄的位置。为了叙述方便,拍摄位置从喷雾轴线向右依次记为1、2、3、4。由于离喷雾轴心越远,油滴的分布密度越低,失去了统计意义,因此本文未进行讨论。

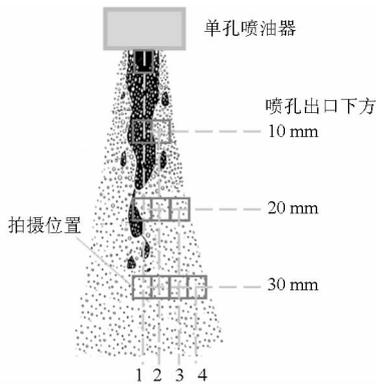


图2 喷雾场内不同拍摄点位置分布

Fig. 2 Arrangement of photographic points in spray field

## 2 喷射压力对射流表面波的影响

燃油喷出后,受KH(Kelvin-Helmholtz)不稳定性的影响,在射流表面上会产生表面波。射流表面波的某一分量 $\eta$ 可表示为<sup>[10-11]</sup>

$$\eta = \eta_0 e^{ikz + \omega t} \quad (1)$$

式中  $\eta_0$ ——初始扰动波振幅

$z$ ——射流轴向坐标

$k$ ——振动波数  $\omega$ ——振动频率

式(1)描述了表面波振幅随时间和空间的变化规律。由于射流表面波震动方向的不规则,而且振幅很小,常规的测量方法容易加大表面波振幅的测量误差,因此,难以进行定量的研究。但是利用显微放大技术,可以提高射流表面图像中表面波长度和方向的辨识能力。因此,本文利用该技术对射流表面波波长进行量化分析。

图3给出了喷油压力为5 MPa,背压为0.1 MPa时在喷雾稳定阶段拍摄到的一张图片。利用自编的Matlab图像处理程序,识别出油束左右两侧的边界,并利用最小二乘法将油束边界拟合为两条直线。通过识别各个表面波的波峰位置,并沿油束边界直线方向计算相邻两个波峰之间的距离和各个波峰离边界直线的距离得到波长。图中示出了油束的左侧波峰所在位置。

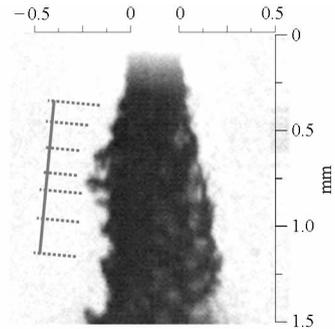


图3 射流表面波图像参数定义

Fig. 3 Definition of jet surface wave

通过图像测量软件得到,图3中表面波的波长自上而下依次为110、160、130、110、140和180 nm。为计算方便,定义图像中喷孔左、右两侧边界为坐标零点,喷孔右侧边缘向右侧为正,喷孔左侧边缘出口向左为负。

图4和图5给出了从喷油压力为1 MPa,背压为0.1 MPa下的2个喷油过程中选取出的表面波增长和衰减的试验结果。可见,图4a左侧的方框内有3个排列较紧密的表面波波峰。再过10 μs后,这些表面波的波长都明显增大,如图4b方框内所示。自上而下测得的表面波波长由4a图中的100 μm和120 μm分别发展成为图4b中的210 μm和150 μm。

而在图5a方框内射流表面波由5个波峰减少为图5b方框内的4个波峰。其中,图5a中表面波波长从上到下依次为110、145、120和70 μm。再过10 μs后,图5b中的波长从上到下依次为130、130和170 μm。由于在图5中最下面的一个波的运动

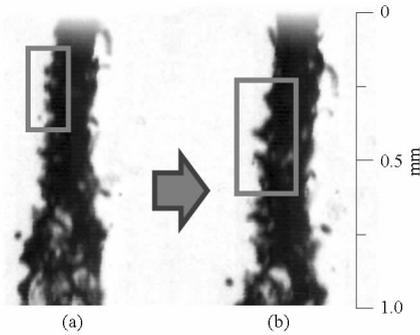


图4 射流表面波波长增长

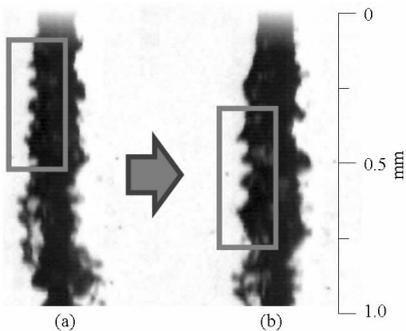
Fig. 4 Increase of wavelength of surface waves with time  
(a) 射流参考图像 (b) 10 μs后射流图像

图5 射流表面波波长衰减

Fig. 5 Decrease of wavelength of surface waves with time  
(a) 射流参考图像 (b) 10 μs后射流图像

速度慢于其后面的一个波,所以它被后面的波追上而合并成一个较大的波。对比图4和图5发现,不同喷油过程中表面波的波长发展具有随机性。

从图4和图5还可以看到,汽油射流两侧的表面波并不是对称的。同时,在一次喷油过程中,射流上表面波是断续产生的。高速射流通常是左右摆动向外喷出,并且表面波大多在向外摆动的一侧产生。这是因为向外摆动的射流表面更容易受周围空气影响而产生KH不稳定。高速射流会在周围环境中诱导强烈的气体运动,从而使燃油剥离开。此外,在射流喷射过程中,表面波振幅不断增加,加速了燃油的破碎和雾化。

为了分析表面波的特征,对射流波动的频率进行了计算,计算公式<sup>[12]</sup>为

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (2)$$

式中  $f$ ——射流表面波连续产生时波的频率  
 $v$ ——表面波速度  $\lambda$ ——表面波波长

计算时,用射流速度代替表面波运动速度。射流速度是在相同条件下通过测量射流贯穿度计算得到。喷油压力为1 MPa时,射流速度为37 m/s,连续射流表面波频率为260 kHz;喷油压力为5 MPa时,射流速度为60 m/s,连续射流表面波频率为430 kHz。

受光源光强和高速相机最小曝光时间长度的限

制,清晰的射流表面波图像只能在喷油压力小于等于5 MPa的条件下得到。图6对比了喷油压力分别为1 MPa和5 MPa时,射流表面波波长及表面波产生频率的计算结果。可见,随着喷油压力的提高,射流表面波的波长略有减小。喷油压力为1 MPa时平均波长为144 μm,5 MPa时平均波长为139 μm。由于射流破碎产生油滴的直径与燃油射流表面波振幅或射流形成的油丝直径呈正比<sup>[13]</sup>,因此随着喷油压力的提高,射流破碎将会产生直径更小的液滴。喷射压力的提高导致射流表面波长越短,促进了表面波的形成和破碎,这是射流具有更大的湍动能所引起的<sup>[14]</sup>。

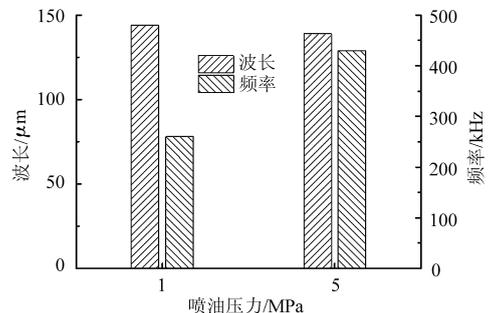


图6 不同喷油压力下射流平均波长及表面波频率

Fig. 6 Average wavelength and frequency of surface waves at various injection pressures

### 3 喷雾形态特性

图7为ASOI为1 500 μs,喷油器出口下方喷雾不同位置处的局部放大图像。该图的位置与图2所示的试验拍摄点一一对应。此时图像拍摄频率为100 k帧/s,曝光时间为0.368 μs,图像大小为128像素×376像素。

由图7a可见,在喷油压力5 MPa,背压0.1 MPa时,喷油器喷孔出口下方10 mm处区域1内,燃油经过初次破碎后形成带状燃油,并且分布的区域较为集中。带状燃油在与空气相互作用的过程中不断被拉长变细而形成油丝。这与文献[15]所得结论一致。一部分油丝在空气阻力和燃油表面张力的作用下断裂成为直径较大的液滴。大液滴受到环境气体的作用产生RT(Rayleigh-Taylor)不稳定,经二次破碎后形成直径更小的液滴。

在图7a喷孔出口下方20 mm的区域1内,带状燃油大量减少,几乎消失,但是直径较大的燃油仍然集中在喷雾的中心区域。在喷油器喷孔下方30 mm处,直径较大的液滴分布更加分散,数量也有了明显地下降。在射流的不同水平位置下,外侧区域雾化效果更好,液滴直径明显小于内侧区域。受到射流破碎方式的影响,2、3和4区域内的液滴大部分都

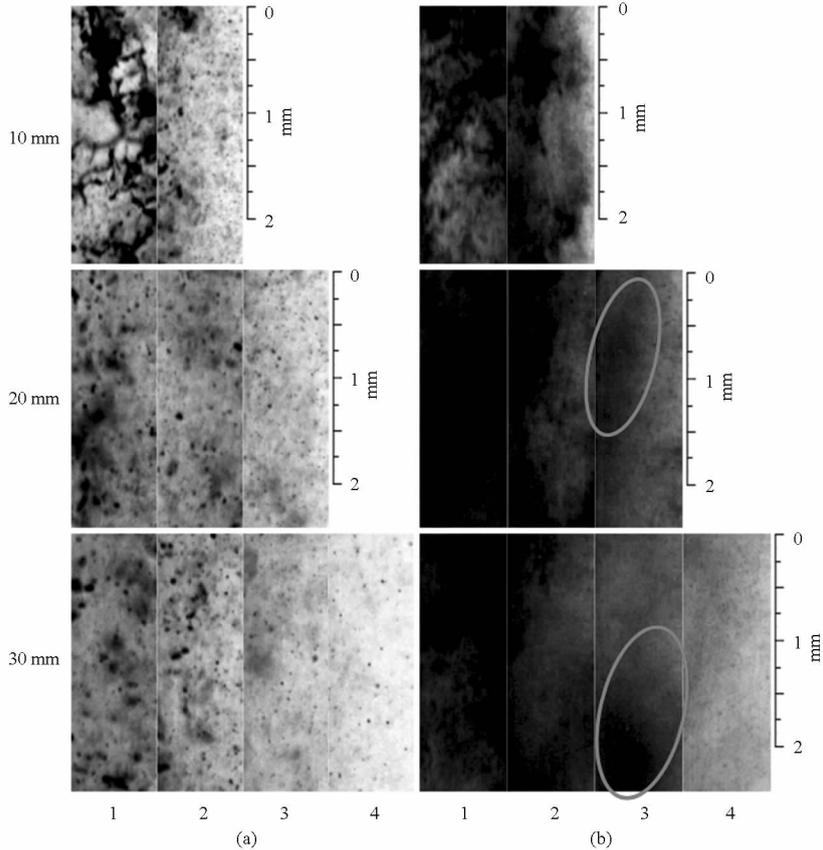


图7 背压0.1 MPa下,不同喷油压力的喷雾图像

Fig. 7 Spray images at ambient pressure of 0.1 MPa and various injection pressure

(a) 喷油压力5 MPa (b) 喷油压力15 MPa

是由射流表面剥离产生的,因此具有较小的直径,而在区域1内主要是未完全破碎的带状燃油、油丝及较大液滴。此外,破碎产生的大部分液滴主要为向下运动,而直径较小的液滴则更容易受到空气卷吸而形成向外的速度分量,且空间分布广泛。而直径较大的液滴不易受空气的影响,因此运动方向比较一致,并且更加集中于喷雾的轴线附近。

对比图7b中喷油压力为15 MPa和图7a中喷油压力为5 MPa下的喷雾图可以发现,高喷油压力下液态燃油与空气相互作用强烈,丝状液态燃油更容易被剥离,因此形成的油丝更细更短。射流破碎后产生的液滴直径也越小。高喷油压力下,卷吸作用增强,燃油密集聚集,喷油器下方不同高度的区域1内很难分辨出带状燃油形态。但射流在这些区域内已经不是一个完整的液核,而是破碎成为较大的燃油团块或是带状的燃油。此外,在区域2和3内,也可以观察到密集的小直径液滴(已在图中用圆圈标出)。从前面的讨论知,高喷油压力下射流形成的表面波波长更小,破碎产生的液滴直径与表面波的波长呈正比,这表明此时射流破碎产生的液滴直径更小。高喷油压力下射流表面波频率提高,破碎产生的液滴数量增加也导致了图像中液滴的密集分

布。

图8给出了背压为0.1 MPa,不同喷油压力下,利用纹影方法拍摄得到同一单孔喷油器在ASOI为2.2 ms时的全场喷雾图像。可以看到,在喷油压力分别为5 MPa和15 MPa时单束喷雾外侧出现了沿径向分支的结构,形成了类似于“鱼骨”的喷雾结构。图7b椭圆内液滴分布密集,处于图8中“鱼骨”结构的径向分支处。这是因为,高速燃油喷出后,受到KH不稳定性的影响产生了图3中的表面波。在喷油过程中,在射流表面上形成的连续表面波振幅不断变大,在气液交界面剪切力和表面张力的共同作用下,突出的表面波从射流表面剥离,形成较大液滴。破碎后形成的液滴具有一定径向向外运动速度。较大的液滴继续破碎,从而产生质量小的液滴,在射流周围卷吸气流和空气阻力的共同作用下,密集分布的小液滴群在喷雾周围形成了沿斜上方分布的径向分支。小液滴群间隔产生,即形成了喷雾“鱼骨”结构。在喷雾径向分支上,越靠外侧的液滴直径越小,向下的速度分量越小。同时,类似于射流喷出时的摆动,喷雾的径向分支同样出现在喷雾向外扭动的切线上。增大喷油压力,就增强了燃油与周围空气的相互作用,液滴直径更小且分布更

加密集,喷雾径向分支更加清晰,因此图 8b 中的燃油分支结构比图 8a 更加明显。

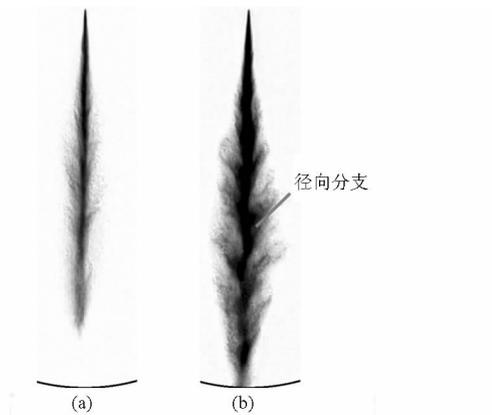


图 8 背压为 0.1 MPa,不同喷油压力下宏观喷雾图像  
Fig. 8 Microscopic images of sprays at backpressure of 0.1 MPa and various injection pressures  
(a) 喷油压力 5 MPa (b) 喷油压力 15 MPa

为便于对比,利用图像测量软件对喷油压力分别为 10 MPa 和 15 MPa 下喷雾中 2 个相邻径向分支中点间的距离进行了测量,得到的平均距离如图 9a 所示。可以看出,喷雾径向分支之间的距离远大于射流的波长。从图 9b 可以看出,随着环境背压的升高,稳定状态下的喷雾径向分支的间距变小。这是因为高背压下周围空气的阻力大,阻碍了油束向下的发展,使得其在相同时间内的运动距离缩小。随着喷油压力的提高,射流与环境气体相对速度增大相互作用增强,表面波的波长变小且表面波产生频率增加,因此导致射流破碎更加剧烈,径向分支间距减小。

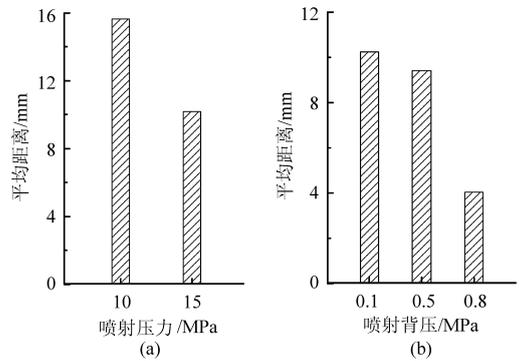


图 9 喷油压力、喷射背压对喷雾结构径向分支间距的影响

Fig. 9 Effect of ambient pressure and injection pressure on distance between two adjacent radial branches of spray  
(a) 背压 0.1 MPa (b) 喷油压力 15 MPa

## 4 结论

(1) 实际喷油过程中射流两侧的表面波是不对称的,且同一侧的表面波不连续。射流表面波波长是随机变化的;射流表面间断地出现表面波,它的径向分支通常出现在喷雾向外弯曲侧。

(2) 随着喷油压力的提高,射流表面波的波长略有减小,但是射流表面波的频率却大大提高,同时燃油破碎更剧烈,并产生直径更小的油滴群。

(3) 随着喷射压力和喷油背压的提高,射流摆动频率增加,射流中相邻两个径向分支间隔距离变小。喷油压力提高产生的密集液滴群是喷雾“鱼骨”分支结构的主要组成。

## 参 考 文 献

- Zhao F, Lai M C, Harrington D L. Automotive spark-ignition direct injection gasoline engines [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1999, 25(5): 437-562.
- 解茂昭. 内燃机计算燃烧学 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1995: 86-87.
- Han J S, Lu P H, Xie X B, et al. Investigation of diesel spray primary break-up and development for different nozzle geometries [C]. SAE Paper 2002-01-2775, 2002.
- Fath A, Fettes C, Leipertz A. Investigation of the diesel spray break-up close to the nozzle at different injection conditions [C]// The Fourth International Symposium COMIDIA 98, 1998: 429-434.
- Lai M C, Zheng Y, Xie X B, et al. Characterization of the near-field spray and internal flow of single-hole and multi-hole sac nozzles using phase contrast X-ray imaging and CFD [C]. SAE Paper 2011-01-0681, 2011.
- Ishikawa N, Niimura K. Analysis of diesel spray structure using magnified photography and PIV [C]. SAE Paper 960770, 1996.
- Esmail M, Kawahara N, Tomita E, et al. Direct microscopic image and measurement of the atomization process of a port fuel injector [J]. Measurement Science & Technology, 2010, 21(7): 075403.
- 杜青, 包铁成, 郭津. 加热条件下液体射流不稳定性的高通滤波研究 [J]. 农业机械学报, 2006, 37(4): 30-34.  
Du Qing, Bao Tiecheng, Guo Jin. Experimental study on thermo-instability of liquid jets using optical high-pass filter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(4): 30-34. (in Chinese)
- 王晓英, 王军锋, 支良泽. 荷电液体射流破碎长度理论与实验 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 93-96.  
Wang Xiaoying, Wang Junfeng, Zhi Liangze. Theory and experiment on jet breakup length of charged liquid [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 93-96. (in Chinese)
- Reitz R D, Bracco F V. Mechanism of atomization of a liquid jet [J]. Physics of Fluids, 1982, 25(10): 1730-1742.
- Wu K J, Reitz R D, Bracco F V. Measurements of drop size at the spray edge near the nozzle in atomizing liquid jets [J]. Physics of Fluids, 1986, 29(4): 941-951.

- 12 Heimgärtner C, Leipertz A. Investigation of the primary spray breakup close to the nozzle of a common-rail high pressure diesel injection system [C]. SAE Paper 2000-01-1799, 2000.
- 13 Brusiani F, Bianchi G M, Tiberi A I. Primary breakup model for turbulent liquid jet based on ligament evolution [C]. SAE Paper 2012-01-0460, 2012.
- 14 Mayer W, Laurien E, Khalifa E, et al. On the surface deformation of a liquid jet ejected from semi-turbulent pipe flow [C] // ICLASS-Europe 2003, 9th International Conference on Liquid Atomization and Spray System Sorrento, 2003.
- 15 Bae C, Yu J, Kang J, et al. Effect of nozzle geometry on the common-rail diesel spray [C]. SAE Paper 2002-01-1625, 2002.

## Characterization of Gasoline Jets from a Single-hole Direct Injection Injector by Means of Microscopic Magnification

He Bangquan Zhang Tankai

(State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The characteristics of the gasoline jets from a single-hole direct injection injector were investigated by means of a long-distance microscope and a high-speed digital camera at various injection pressures and backpressures. The results showed that the surface waves were formed along the surface of the gasoline jets, and developed randomly with time. Discontinued surface waves usually broke up at the places where the direction of jet changed and formed dense small droplets. With the increase of injection pressure, the wavelength of the surface wave shortened and their frequencies rose, which promoted the breakup of jets. The distance between two adjacent radial branches of a jet decreased with increasing fuel injection pressure and backpressure.

**Key words:** Gasoline Spray Microscopic magnification Surface wave

(上接第 24 页)

## Cascade Angle Optimization of Hydraulic Retarder Based on Flow Field Characteristics

Li Xuesong<sup>1</sup> Liu Chunbao<sup>2</sup> Cheng Xiusheng<sup>1</sup> Miao Liying<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China

2. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In order to improve the braking torque coefficient, the numerical simulation of 3D transient multiphase flow was performed to the turbulent flow in Hydraulic Retarder. By the analysis of internal flow field characteristics, both the flow separation phenomenon in the work flow channel and the vortex generated in the chord surface went against the output of the braking torque. To solve this problem, considering correlation between the structural parameters of hydraulic retarder, numerical analysis based on multi-parameter flow field was performed, and the blade cascade parameters were optimized. The results showed that, the method through the analysis of the multi-parameter flow field to optimize blade cascade parameters was reasonable. When the blade angle and chamfer angle were optimized, the vortex and the flow separation phenomenon in the flow channel of impeller disappeared and the braking torque coefficient increased by 6%.

**Key words:** Hydraulic retarder Flow field characteristics Correlation Cascade optimization