

流通面积比对旋流杯油雾速度场的影响

刘 涛, 李文高, 卢克乾
(中国航空发动机集团有限公司 湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 设计了 3 种不同一二级流通面积比的旋流杯试验件,在气压自模区工况下,运用粒子图像测速仪(PIV)对其出口油雾速度场进行测量,研究了不同流通面积比对旋流杯出口油雾速度场的影响,分析了油雾速度场的结构及其速度分布的变化规律。结果表明:随着一二级流通面积比的增加,旋流杯出口油雾速度场呈现出回流区面积和回流区长度逐渐变小、回流速度逐渐变大、出口射流张角逐渐减小的趋势。此外,从径向速度沿径向分布可以看出,随着流通面积比的增加油雾速度场的抗偏斜能力具有增强的趋势。

关 键 词: 旋流杯; 流通面积比; 粒子图像测速仪(PIV); 油雾速度场; 中心回流区

中图分类号: V231.3 **文献标志码:** A

Effect of flowing area ratio on the spray velocity field of a swirl cup

LIU Tao, LI Wengao, LU Keqian
(Hunan Aviation Powerplant Research Institute,
Aero Engine (Group) Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: Swirl cups with three different flowing area ratios were designed. The spray velocity fields of the swirl cups were firstly studied by particle image velocity (PIV) under self-stimulated condition of air pressure. The effects of the flowing area ratio on the spray velocity field and the distributions of velocity were studied and analyzed, respectively. The results shows that the area and length of central recirculation zone gradually become smaller and shorter, and the recirculated velocity of central recirculation zone and the angle of spray are tended to be higher and smaller with the increase of the flowing area ratios. In addition, it can be seen that the capacity of anti-deviation increases with the increase of flowing ratios according to the radial distribution of spray velocity.

Key words: swirl cup; flowing area ratio; particle image velocity (PIV); spray velocity field; central recirculation zone

旋流杯作为航空发动机燃烧室关键组件之一,它决定着燃油雾化与掺混、点火性能、燃烧稳定性能、出口温度场品质等诸多方面^[1]。为了更好的了解其出口流场特征和规律,国内外学者开

展了大量的相关研究。Wang、Ateshkadi 等对双级旋流杯进行了一系列试验研究^[2-4],包括套筒出口形式、文氏管的有无以及几何缩放比等对流场的影响;Raj 等^[5]研究了旋流杯的叶片角度对流

收稿日期:2016-02-29
作者简介:刘涛(1989—),男,工程师,硕士,主要从事发动机燃烧室流场试验研究。

引用格式:刘涛,李文高,卢克乾. 流通面积比对旋流杯油雾速度场的影响[J]. 航空动力学报,2017,32(10):2338-2343. LIU Tao, LI Wengao, LU Keqian. Effect of flowing area ratio on the spray velocity field of a swirl cup[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(10): 2338-2343.

场的影响;Fu 等^[6-7]对双级反向旋流器出口流场特征进行了研究,并考虑了限制域对旋流器出口流场的影响。文献[8-10]利用激光多普勒技术(LDA)对同向和反向旋转的双级径向旋流杯的流场、喷雾场、以及热态流场进行了研究。以往研究大都集中于空气速度场,而在油雾速度场研究方面非常有限,且大都局限于单点测量。通常,旋流杯主要由旋向相反的一二级旋流器、文氏管、喷嘴以及出口套筒等构成,如图 1 所示,由两级旋流共同决定了出口流场。鉴于此,本文设计了不同一二级流通面积比的旋流杯试验件,对其出口油雾速度场进行研究。分析一二级流通面积比对油雾速度场的影响。

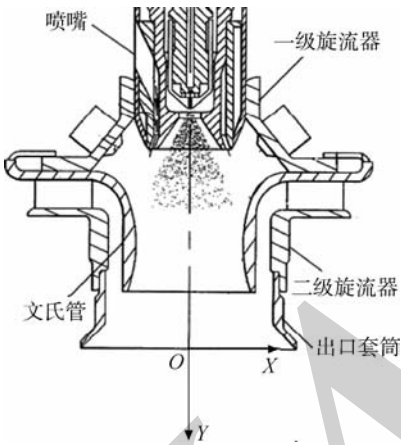


图 1 旋流杯示意图
Fig.1 Sketch of the swirl cup

粒子图像测速仪(PIV)是近年来发展起来的崭新的激光测量技术,它能够实现非接触、瞬态、平面流场的测量,广泛应用于各种复杂流动速度场的测量^[11-13]。在待测流场中置入示踪粒子,用测得的示踪粒子的速度代表相应位置处流体的速度^[14]。考虑到 PIV 在速度场结构测量方面比以往的单点测量有很大优势,国内外很多学者已经直接将其运用于液态雾滴粒子速度场的测量。文献[15-18]利用 PIV 对高压喷嘴出口水雾速度场进行了测量。Presser 等^[19]采用 PIV 对流经圆柱形障碍物的湍流水雾的速度场进行了研究,Richard 等^[20]运用 PIV 研究了水雾和液池火的相互作用。文献[21-23]采用 PIV 对柴油机喷雾速度场进行了测量并获得了喷雾速度场结构及速度分布等信息。鉴于此,本文采用 PIV 对旋流杯出口油雾速度场进行测量,分析一二级流通面积比对出口油雾速度场的影响,为今后燃烧室的设计提

供支持。

1 试验系统与试验件

1.1 试验系统

试验采用 Lavision 公司生产的 PIV 激光测量设备对旋流杯出口油雾速度场进行测量,试验系统由激光器、导光臂、CCD(charge coupled device)相机、透镜组、计算机、燃油系统、空气系统等组成,主要组成示意图如图 2 所示。其中试验所用激光器为双脉冲 Nd:YAG 激光器,单脉冲最大能量为 200 mJ,1 064 nm 激光束经过倍频器后变为 532 nm 激光束再经导光臂传输到激光发射端,最终由柱面透镜组将柱状激光变为片状激光照亮流场中待测区域。试验所用 CCD 相机动态范围为 14 bit,分辨率为 2 048 pix×2 048 pix,最小跨帧时间 200 ns。激光与 CCD 相机同步运作由计算机通过同步控制器来完成。试验采用的燃油是 3 号喷气燃料。PIV 通常用于测量空气流场,用测得的示踪粒子的速度代替相应位置处空气的速度,而将 PIV 用于测量油雾速度场相对而言具有一些优势,燃油粒子作为被测对象的同时又可作为示踪粒子,无需另外加入示踪粒子,不存在粒子跟随性的问题,可使测量更加准确,同时也真正实现了非接触式测量^[19]。但也存在一些问题,由于 PIV 测量结果倾向于大粒子^[15],因此要尽量避免旋流杯出口中心线位置附近有大粒子出现,调试时油压有一定要求,油压不能过低,否则燃油雾化不好,油压也不能过大,否则将导致油雾粒子浓度过大,使粒子像发生重叠,不利于互相关计算,可以通过调节油压使燃油粒子浓度在合适范围内。在出口射流主体处尽量避免产生激光散斑现象,虽然 PIV 对激光散斑也能够进行处理计算^[15],但是其速度值通常偏小。片状激光在通过

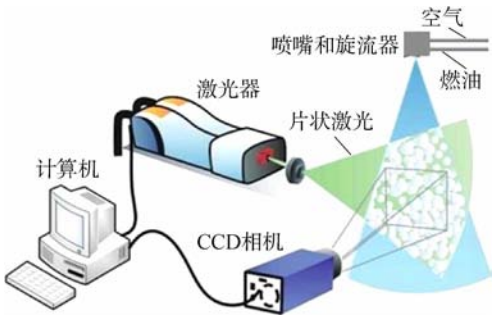


图 2 油雾速度场测量示意图
Fig.2 Sketch of the measurement of spray velocity field

较浓的测量区域时会产生明显衰减,使测量结果误差增大,可通过适当增加激光强度解决。此外,通过布置光路挡板及配合调试激光强度、CCD 相机光圈等参数减少背景噪声、散射光等对测量结果的影响。

1.2 试验件

试验采用的旋流杯由旋向相反的一二级旋流器、文氏管、离心喷嘴、出口套筒等组成。旋流器出口中心设为坐标原点(图 1)。通过前期调试,选取气压自模区工况进行油雾速度场试验,试验时粒子原始图片如图 3 所示。试验结果中的坐标均进行无量纲化,图中 D 为旋流杯出口套筒内径。

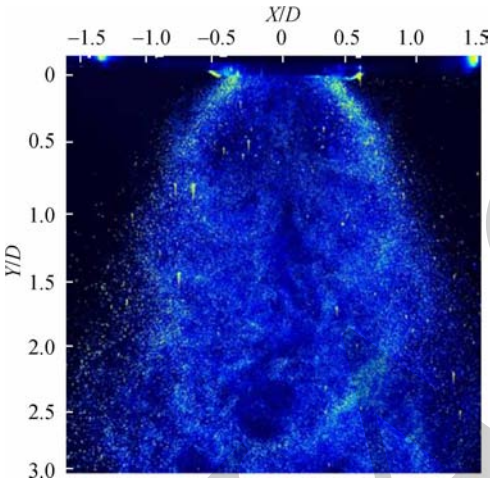


图 3 油雾粒子原始图片
Fig. 3 Original image of the fuel droplet

考虑到油雾粒子粒径分布均匀时 PIV 测量结果较为准确,而当油雾场中油滴粒径分布不均匀时,PIV 测量结果倾向于大粒子,可能会对测量结果产生影响,为此,本文采用 PDPA (phase doppler particle analyzer)测量了距旋流杯出口不同轴向位置处油滴索太尔平均直径(Sauter mean diameter,SMD)沿径向分布(如图 4),从图中可以看出,距旋流杯出口越近,油滴 SMD 分布越不均匀。因此,本文选取在距旋流杯出口 $Y/D=0.2$ 处进行 PIV 与 PDPA 速度对比性试验(如图 5)以评估 PIV 测量误差,从图中可以看出,由于燃油雾化较为均匀,PIV 相对于 PDPA 而言,误差在 8%左右,这个误差在研究速度场结构及其变化规律方面是可以接受的。

本文通过改变一级旋流器斜切孔孔径以获得不同方案的一二级流通面积比。试验方案如表 1 所示。测量截面为 XOY 平面(如图 1)。

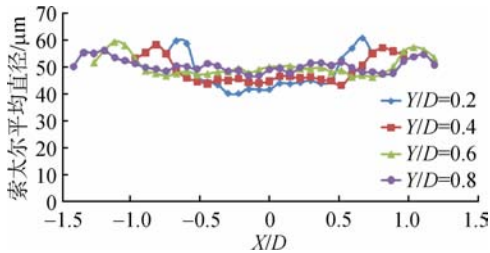


图 4 不同轴向位置处 SMD 沿径向分布
Fig. 4 SMD radial distribution at different axial locations

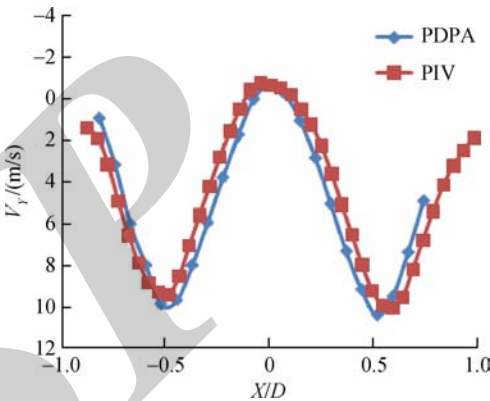


图 5 $Y/D=0.2$ 处轴向速度分布
Fig. 5 Axial velocity profiles at $Y/D=0.2$

表 1 试验方案及参数
Table 1 Experimental schemes and parameters

方案	一二级流通 面积比	空气进出口 压差/kPa	油压/MPa	温度
1	0.50			
2	0.79	1	0.3	常温
3	1.13			

2 试验结果与分析

2.1 轴向速度分布云图

图 6 是旋流杯出口 XOY 截面的轴向速度分布云图,其速度大小可通过颜色标尺进行读取,从结果可以看出随着一二级流通面积比的增加,旋流杯出口油雾速度场呈现出回流区面积逐渐减小、回流速度逐渐增大的趋势。这是由于随着一级旋流器流通面积的不断增大,使得一级旋流器出口旋流对二级旋流器出口旋流的削弱作用逐渐增强,旋流杯出口旋流的切向速度沿轴向衰减逐渐变快,在相同的轴向位置处轴向逆压梯度逐渐增大的缘故导致的。此外,随着一二级流通面积

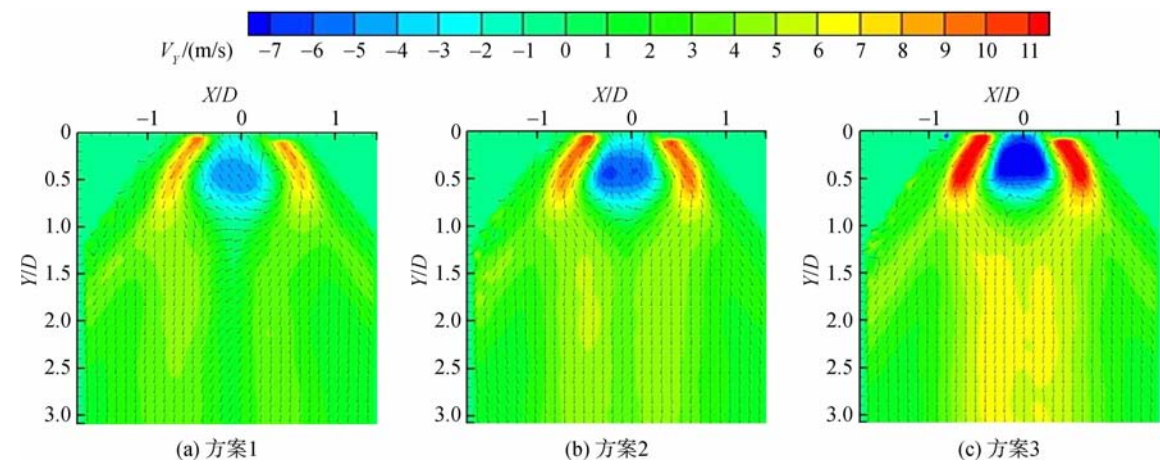


图 6 轴向速度分布云图
Fig. 6 Axial velocity distribution contours

比的增加,旋流杯出口射流主体的轴向速度逐渐增大,出口射流张角逐渐变小。

2.2 不同的速度分量沿径向分布

图 7 是不同轴向位置处轴向速度分布,结果表明随着轴向距离的增加,各方案的顺流速度和回流速度均逐渐减小。在 $Y/D=0.8$ 处,方案 3 的速度值均大于零,表明回流区已经消失。在 $Y/D=0.2\sim0.4$ 时,方案 3 回流速度值最大而方案 1 回流速度值最小,而在 $Y/D=0.6\sim0.8$ 时两者刚好相反,说明在相同轴向位置处方案 3 的轴向速度梯度最大,而方案 1 的速度梯度最小,表明随着流通面积比的增加出口回流区的轴向逆压梯度逐渐增大。

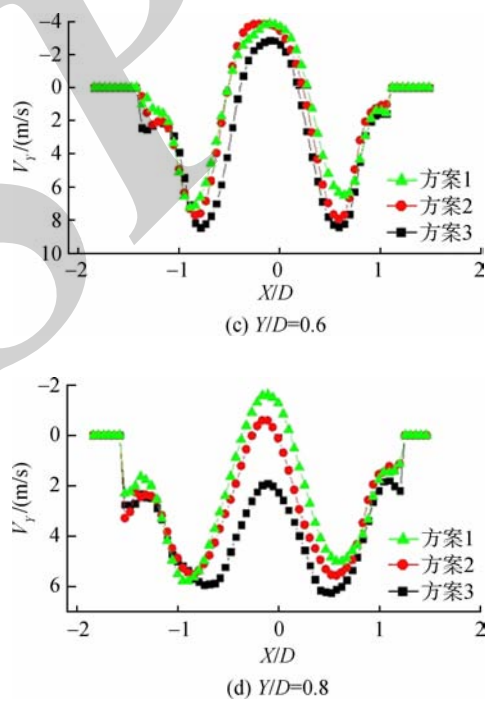
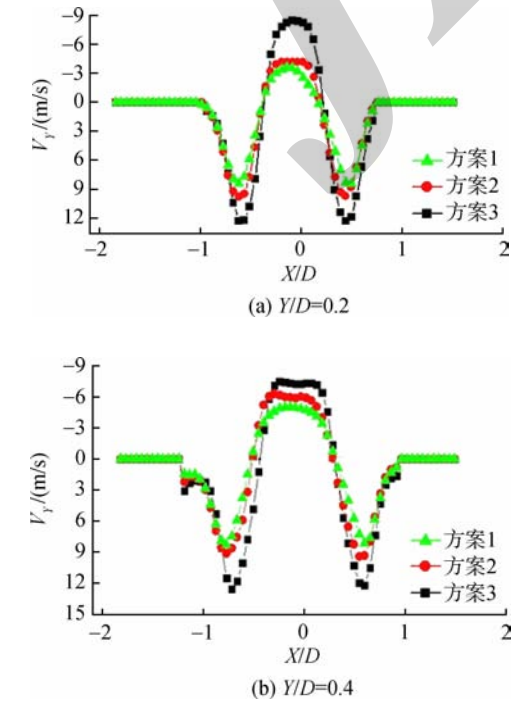


图 7 不同轴向位置处轴向速度分布
Fig. 7 Axial velocity profiles at different axial locations

图 8 是不同轴向位置处径向速度分布,可以看出随着轴向距离的增加,径向速度逐渐减小并趋于平缓。在同一轴向位置处,随着气量比的增加,径向速度越大。在 $Y/D\geq 0.4$ 时,各方案在 $X/D=0$ 处均为负值,这是由于中心回流区径向速度分量向负方向偏斜导致的。在 $Y/D=0.6\sim0.8$ 处,随着流通面积比的增加径向零值速度逐渐靠近横坐标轴零值位置,表明一二级流通面积比越大中心回流区偏斜程度越小,抗干扰能力越强。

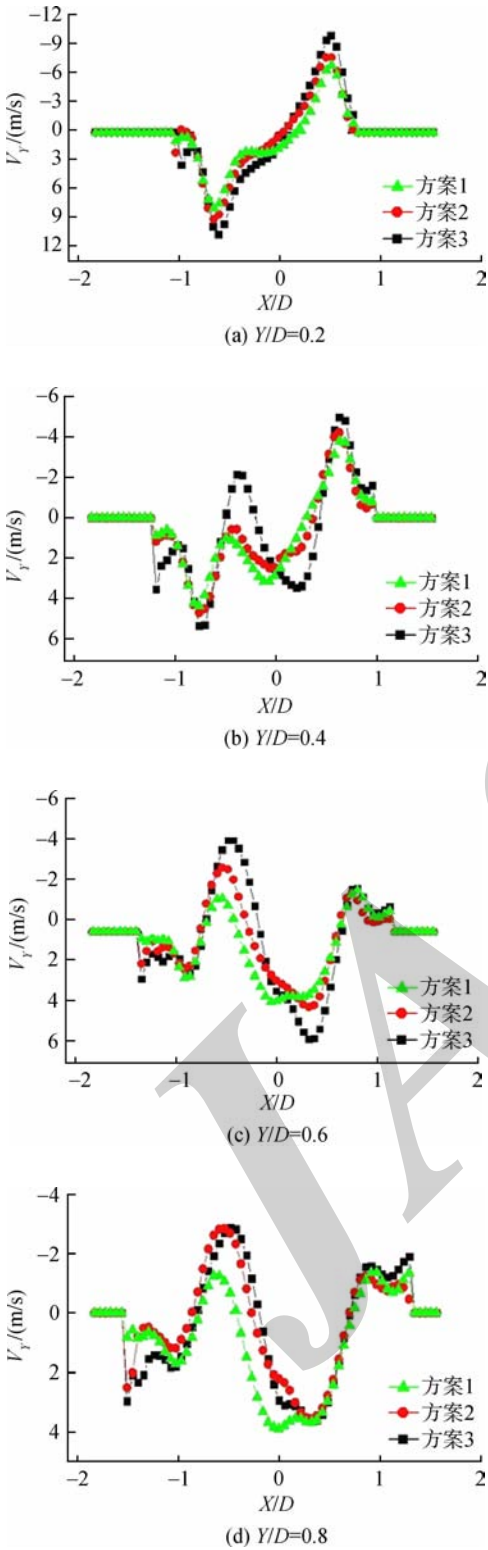


图 8 不同轴向位置处径向速度分布

Fig. 8 Radial velocity profiles at different axial locations

2.3 中心线轴向速度分布

图 9 是各方案中心线轴向速度分布,结果显示随着轴向距离的增加,各方案的轴向速度先达到负向最大,而后逐渐变为正向并趋于平稳,在同一轴向位置处,一二级流通面积比越大轴向速度

值越大,并且轴向零值速度位置也越靠近旋流杯出口,表明随着流通面积比的增加回流区的长度在逐渐缩短。

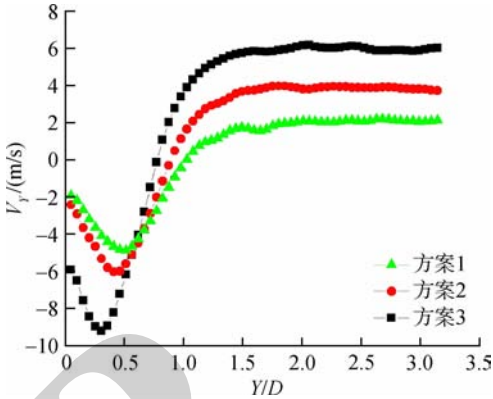


图 9 中心线轴向速度分布

Fig. 9 Axial velocity profiles along centerline

3 结 论

本文设计了不同一二级流通面积比的旋流杯试验件。尝试采用 PIV 对其油雾速度场进行测量,经过前期调试,选择在气压自模区工况下进行试验,分析了油雾速度场的结构及其速度分布的变化规律,结果表明:

- 1) 随着一二级流通面积比的增加,旋流杯出口油雾速度场呈现出回流区面积变小、回流速度增强、回流区长度变短的趋势,回流区长度变短对缩短燃烧室的长度尺寸是有利的,这一点是设计者要慎重考虑的。
- 2) 随着一二级流通面积比的增加,旋流杯出口油雾速度场呈现出射流张角变小,抗偏斜能力增强的趋势。

参考文献:

[1] SYRED N,BEER J M. Combustion in swirling flows;a review[J]. Combustion and Flame,1974,23(2):143-201.
[2] WANG H Y,MCDONELL V G,SAMUELSEN S. Influence of hardware design on the flow field structures and the patterns of droplet dispersion;Part I mean quantities [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1995,117(2):282-289.
[3] ATESHKADI A,MCDONELL V G,SAMUELSEN G S. Effect of mixer geometry on fuel spray distribution, emission and stability[R]. AIAA 98-0247,1998.
[4] WANG H Y,MCDONELL V G,SOWA W A,et al. Scaling of the two phase flow downstream of a gas turbine combustor swirl cup;Part I mean quantities[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,1993,115(3):

- 453-460.
- [5] RAJ R T K, GANESAN V. Study on the effect of various parameters on flow development behind vane swirlers[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2008, 47(9): 1204-1225.
- [6] FU Y, CAI J, JENG S M, et al. Characteristics of the swirling generated by a counter-rotating swirler[R]. *AIAA-2007-5690*, 2007.
- [7] FU Y, CAI J, JENG S M, et al. Confinement effect on the swirling flow of a counter-rotating swirl cup[R]. *ASME Paper 2005-GT-68622*, 2005.
- [8] SEOL W S, HAN Y M, LEE D S. Flow and spray characteristics of a lean fuel injection module with radial swirlers[R]. *ASME Paper 2000-GT-0118*, 2000.
- [9] MEHTA J, SHIN H, WISLER D. Mean velocity and turbulent flow-field characteristics inside an advanced combustor swirl cup[R]. *AIAA 89-0215*, 1989.
- [10] MERKLE K, BIICHER H, ZARZALIS N, et al. Influence of co and counter swirl on lean stability limits of an airblast nozzle[R]. *ASME Paper 2003-GT-38004*, 2003.
- [11] REDDY A P, SUJITH R, CHAKRAVART S R. Swirler flow field characteristics in a sudden expansion combustor geometry using PIV[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(4): 800-808.
- [12] KUCUKGOKOGLAN S, AROUSSI A. Isothermal swirling burner flow measurements[R]. *Göttingen, Germany: Particle Image Velocimetry 2001, PIV'01 Paper 1074*, 2001.
- [13] PRUVOST J, LEGRAND J, LEGENTILHOMME P, et al. Particle image velocimetry investigation of the flow-field of a 3D turbulent annular swirling decaying flow induced by means of a tangential inlet[J]. *Experiments in Fluids*, 2000, 29(3): 291-301.
- [14] ADRIAN R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1991, 23(1): 261-304.
- [15] HUSTED B P, PETERSSON P, LUND I, et al. Comparison of PIV and PDA droplet velocity measurement techniques on two high-pressure water mist nozzles[J]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44(8): 1030-1045.
- [16] SANTANGELO P E. Characterization of high-pressure water-mist sprays: experimental analysis of droplet size and dispersion[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010, 34(8): 1353-1366.
- [17] WIDMANN J F, SHEPPARD D T, LUEPTOW R M. Non-intrusive measurements in fire sprinkler sprays[J]. *Fire Technology*, 2001, 37(4): 297-315.
- [18] SHEPPARD D T, LUEPTOW R M. Characterization of fire sprinkler sprays using particle image velocimetry[J]. *Atomization and Sprays*, 2005, 15(3): 341-362.
- [19] PRESSER C, PAPADOPOULOS G, WIDMANN J F. PIV measurements of water mist transport in a homogeneous turbulent flow past an obstacle[J]. *Fire Safety Journal*, 2006, 41(8): 580-604.
- [20] RICHARD J, SUSSET A, VANTELON J P. Velocity measurements by particle image velocimetry using a direct intercorrelation algorithm: application to the interaction between a water mist and a liquid pool fire[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2002, 972(1): 229-234.
- [21] 白冰, 刘福水, 马云龙, 等. 利用 PIV 技术对柴油机高压喷雾流场的可视化研究[J]. *北京理工大学学报*, 2010, 30(4): 395-399.
- BAI Bing, LIU Fushui, MA Yunlong, et al. Visibilization research in the flow field of high pressure diesel spray by PIV technique[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, 30(4): 395-399. (in Chinese)
- [22] 孙柏刚, 张大鹏, 冯旺聪. 高压共轨燃油喷雾 PIV 测试方法及结果分析[J]. *北京理工大学学报*, 2006, 26(7): 574-576.
- SUN Baigang, ZHANG Dapeng, FENG Wangcong. Particle image velocimetry test methods for high pressure common rail spray and results of analysis[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2006, 26(7): 574-576. (in Chinese)
- [23] 孙柏刚, 冯旺聪, 李向荣, 等. 燃油喷雾 PIV 测试方法研究[J]. *车用发动机*, 2004(4): 43-45.
- SUN Baigang, FENG Wangcong, LI Xiangrong, et al. The PIV measurement system of fuel spray[J]. *Vehicle Engine*, 2004(4): 43-45. (in Chinese)

(编辑:叶 青)