

偏心对双级旋流器出口流场影响试验

胡好生, 蒋尧, 卢克乾, 胡建

(中国航空工业集团公司 中国航空动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 为了研究双级旋流器在不同偏心量下的冷态流场变化, 设计了4种偏心量(分别为0, 0.5, 1.0, 1.7 mm 偏心)的双级旋流器试验件, 并采用粒子图像测速仪(PIV), 测量了不同偏心量下流场。试验结果表明: 0.5 mm 偏心下的流场较无偏心下变化较小, 但当偏心量大于0.5 mm 时, 双级旋流器出口下游规则的双涡结构变得不对称, 并且中心回流区变窄, 流场与无偏心下相比差别较大; 偏心对双级旋流器出口下游径向速度分布影响较大, 在双级旋流器出口 $X/D=0.5$ 轴向位置附近, 当偏心量大于0.5 mm 时气流径向速度分量变为正向峰值。

关 键 词: 双级旋流器; 偏心; 粒子图像测速仪; 冷态流场; 双涡结构

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Experiment on effect of misalignment on outlet flow field of double-swirler

HU Hao-sheng, JIANG Yao, LU Ke-qian, HU Jian

(China Aviation Powerplant Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: In order to study the flow field characteristics downstream a double-swirler outlet, four double-swirler configurations with different misaligned dimensions (0, 0.5, 1.0, 1.7 mm) were designed. The no-reacting flow field of different misaligned dimensions was obtained by PIV. Experimental result shows that there is no significant difference in the flow field between misaligned dimension of 0 mm and 0.5 mm. In the configurations of misaligned dimension larger than 0.5 mm, the double-vortex construction and the central recirculation zone downstream the double-swirler outlet become asymmetrical and narrow respectively. The flow field shows obvious deviation from the one of 0 mm misaligned dimension. Misalignment has a pronounced influence on the radial velocity profile downstream the double-swirler outlet. The radial velocity around the axial location of $X/D=0.5$ is converted into peak and positive value when misaligned dimension is larger than 0.5 mm.

Key words: double-swirler; misalignment; particle imaging velocimetry(PIV); no-reacting flow field; double-vortex construction

为了提高航空发动机燃烧室的燃烧效率、燃烧稳定性以及点火性能, 先进燃烧室一般采用旋流器作为燃烧室头部的进气装置。旋流器产生的旋涡能形成中心回流区, 回流能在逆流和顺流之间形成的剪切层中增加额外的湍流度, 用于稳定燃烧室中的火焰^[1]。为了探索旋流器的性能, 国内

外采用多种方法对双级旋流器进行了大量试验研究。文献[2-4]对燃油喷嘴与旋流器匹配后的燃油雾化和油雾分布特性做了大量研究, 试验研究了燃油喷嘴与旋流器之间的偏心对油雾场的影响; 文献[5-7]研究了进口空气温度、旋流器出口边界等对旋流器出口下游流场和喷雾特性的影响, 研

究了旋流器出口下游限制和非限制结构的湍流强度和平均流场;文献[8]采用激光多普勒速度测量仪(LDV)试验研究了旋流器叶片角度对燃油浓度场和速度场的影响;文献[9]采用 PIV 测量突扩结构的 3-D 旋流流动的湍流速度脉动,观察到诸如角落回流区(CRZ)、螺旋进动区(PVC)和中心回流区(CTRZ)的旋流流动特性;文献[10]研究了不同进口气流温度对其冷态和燃烧流场内回流区的形成以及气流速度分布的影响,得出燃烧室燃烧流场内回流区长度要比冷态流场短,燃烧流场的脉动速度明显大于冷态流场的脉动速度的结论;文献[11]试验研究了限制结构对反向旋转径向旋流器冷态流场旋流特性的影响,同时还研究了进口雷诺数对流场的影响;文献[12]详细介绍了旋流器的设计方法,给出了旋流器设计的相关准则;文献[13-15]采用 PIV 对燃烧室内的紊流流场和旋流器出口流场特性进行了详细研究;文献[16-18]试验研究了加工及装配误差对喷嘴不均匀度的影响,结果表明喷嘴和旋流器的径向偏心对喷雾形态影响很大。

双级旋流器一般都固定在火焰筒头部,燃油喷嘴则安装在燃烧室的机匣上,燃油喷嘴需要伸入到双级旋流器中,为方便燃油喷嘴的安装,双级旋流器一般都设计成可以径向活动,如图 1 所示。由于受到加工精度以及工作状态下火焰筒与机匣之间的不均匀膨胀的影响,双级旋流器的一级旋流器和二级旋流器之间不可避免会出现不同心(下文简称偏心)的现象。

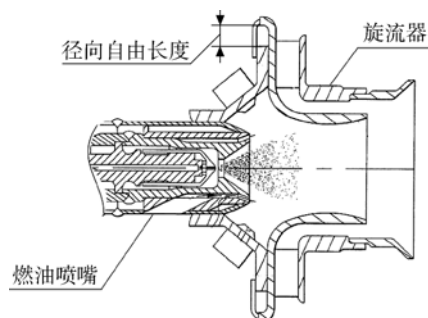


图 1 双级旋流器示意图

Fig. 1 Schematic in double-swirler

国内外研究偏心对旋流器出口流场影响的文献不多,大部分对旋流器的研究都是基于一级、二级旋流器之间无偏心下的流场分析以及不同结构尺寸旋流器对出口流场的影响。本文研究双级旋流器在不同偏心量下的出口流场变化,为航空发动机燃烧室旋流器的设计以及应用提供参考。

1 试验方案

1.1 试验件及试验设备

旋流器试验装置包括进口稳压筒、双级反向旋流器组件、旋流器安装座以及出口有机玻璃圆筒,见图 2。安装座及偏心垫片结构见图 3。试验装置结构与尺寸见表 1。

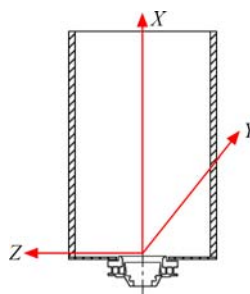


图 2 旋流器试验装置示意图

Fig. 2 Schematic in swirler experimental facility



图 3 安装座及偏心垫片结构

Fig. 3 Fixing base and misalignment gasket

表 1 试验装置的结构与尺寸

Table 1 Dimensions and parameters of experimental facility

试验装置	结构与尺寸
一级	10 个周向均布斜切孔,旋流数为 1.645
二级	8 个径向叶片,旋流数为 0.658
组合	一级、二级流量比为 0.263,旋流数为 0.389
进口	长度为 150 mm,直径为 105 mm
出口	长度为 200 mm,直径为 90 mm

旋流器是通过旋流器安装座固定,一级、二级旋流器之间通过偏心垫片定位。二级旋流器与一级旋流器接触面有一个台阶,偏心垫片内径与一级旋流器配合,偏心垫片外径与台阶内径配合,这样可以通过选用不同偏心尺寸的垫片控制偏心的大小,同时利用旋流器安装座上螺栓顶住一级旋流器的前端面,二级旋流器顶住安装座端面,实现轴向固定。

坐标系及偏心方向规定:采用笛卡儿坐标系,满足右手准则,坐标原点设置在旋流器出口平面中心,X轴设在进出口圆筒的中心线上,Z轴设置

在偏心方向上,一级旋流器相对于二级旋流器的偏心方向为 Z 轴的正方向。

采用德国 LaVision 公司的粒子图像测量仪,主要包括激光发生器、照相机、同步控制系统、计算机等组成,见图 4,其中激光器为双腔 YAG 激光器,单个脉冲的最大能量为 200 mJ,最高脉冲频率为 15 Hz,照相机分辨率为 2048 像素 $\times$ 2048 像素,曝光时间间隔为 $3\mu\text{s}$,速度测量精度为 3%。

试验时需要配置示踪粒子发生器,本试验采用植物油作为示踪粒子,示踪粒子粒径为 $1\sim 5\mu\text{m}$ 。

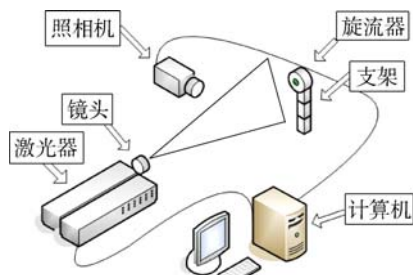


图 4 PIV 试验装置图

Fig. 4 Experimental facility of PIV

1.2 试验方案及参数

试验件方案以及试验参数见表 2,试验件出口通大气。每个试验件测量 6 个截面,分别是旋流器出口轴向位置 $X/D=0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25$ 截面和过中心线的 $Y-Z$ 纵截面。 D 为旋流器出口外直径。

表 2 试验方案及参数

Table 2 Experimental configurations and parameters

方案	偏心量/mm	进口总温	进出口压差/Pa
1	0	室温	5500
2	0.5		
3	1.0		
4	1.7		

2 试验结果与分析

2.1 纵截面轴向速度和径向速度分布

纵截面轴向速度(V_x)云图和径向速度(V_z)云图如图 5 和图 6 所示。由图 5 可以看出,偏心量

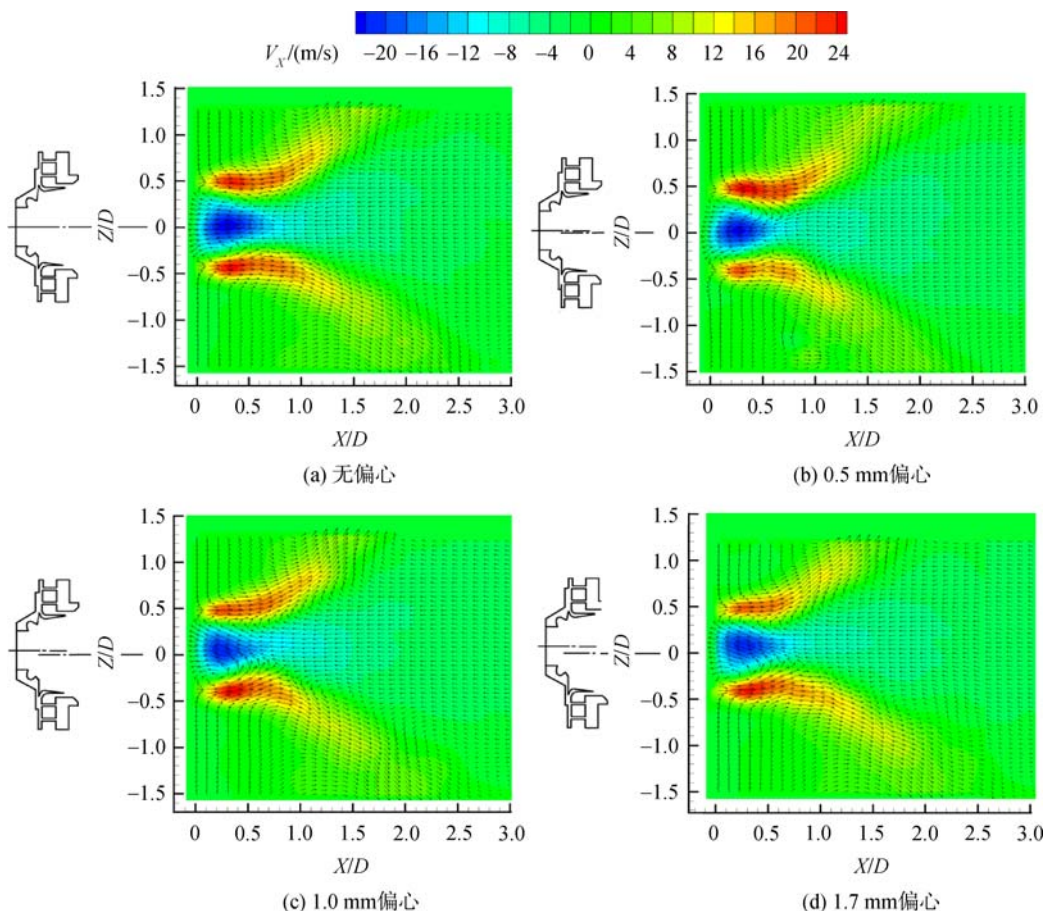


图 5 纵截面轴向速度云图

Fig. 5 Axial velocity contours at cross-section plane

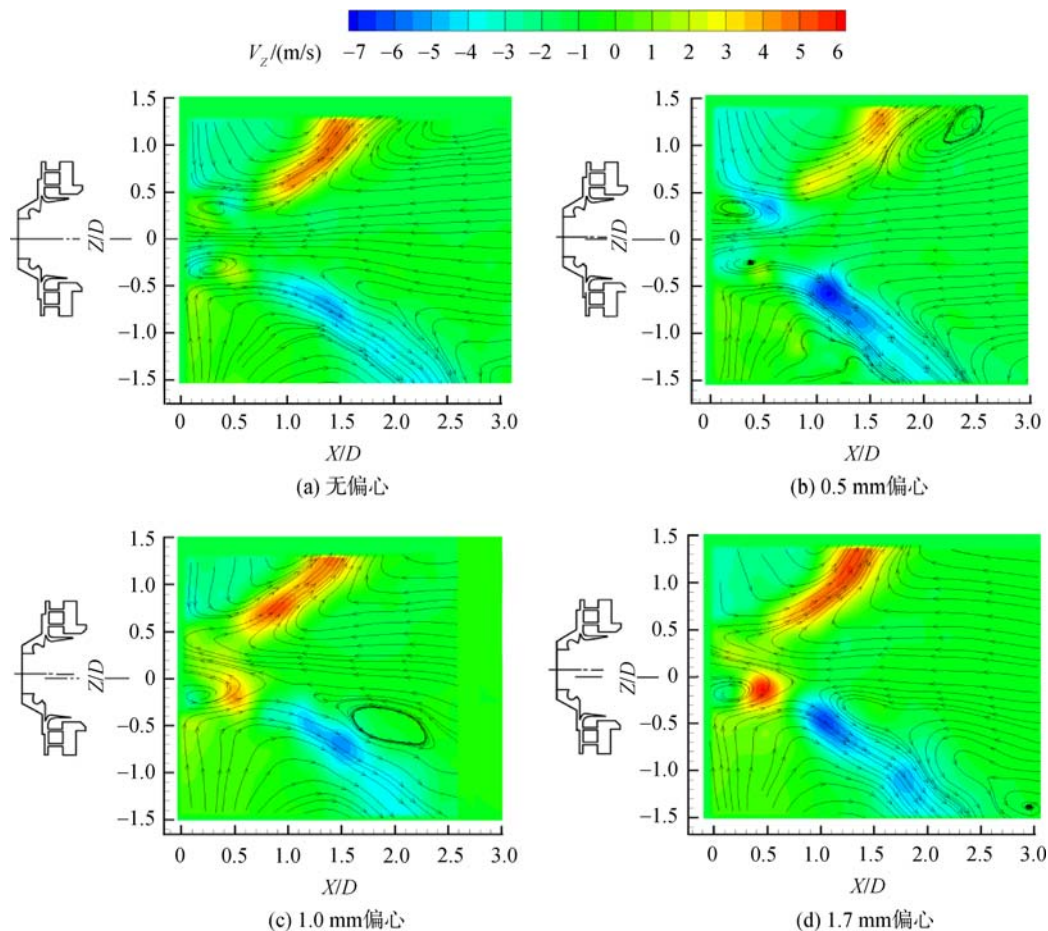


图6 纵截面径向速度云图

Fig. 6 Radial velocity contours at cross-section plane

的增加使得径向高度 $Z/D < 0$ 侧出口射流对下游的影响范围较 $Z/D > 0$ 侧更广,同时偏心量的增加使得中心回流区向 $+Z$ 侧移动,中心回流区收窄变长.速度矢量图显示随着偏心量的增加,中心线附近的流场向 $Z/D > 0$ 侧偏斜,在大偏心下 $Z/D > 0$ 侧射流形成的旋涡消失.

从图6也可以看出,随着偏心量的增加,在轴向位置 $X/D=0.50 \sim 0.75$ 之间产生了正向的径向速度区域.从流场图的PIV试验结果可以看出,无偏心下和0.5 mm偏心下的流场基本一致,旋流器出口处的两个眼状旋涡对称,而在1.0 mm和1.7 mm偏心下 $Z/D > 0$ 侧(偏心一侧)的旋涡消失,并且随着偏心量的增加,出口下游流线往 $+Z$ 方向偏转.

2.2 中心线轴向速度分布和径向速度分布

图7为旋流器出口下游中心线轴向速度和径向速度分布.从轴向速度分布图中可以看出,4种偏心下轴向速度分布吻合度较高,中心线轴向速度并不随偏心量的变化而变化.在旋流器出口下游 $X/D=0.25$ 处轴向速度出现负向峰值,说明

$Z/D=0.25$ 附近回流速度最大.从径向速度分布图中可以看出旋流器出口下游中心线径向速度随着偏心量的增加而增加.在无偏心 and 0.5 mm 偏心下并没有出现径向正向速度峰值,但在1.0 mm 偏心 and 1.7 mm 偏心下出现了正向速度峰值.出口中心线附近的径向速度方向对出口的眼状旋涡影响很大,且速度方向指向一侧的眼状旋涡的大小受到抑制.在旋流器出口下游 $X/D > 1.0$ 的区域,4种方案下的径向速度都近似为零,说明偏心对旋流器出口中心线径向速度分布的影响范围为 $X/D=0 \sim 1.0$.

2.3 不同轴向位置横截面速度分量沿径向分布

图8和图9为 X/D 从0.25到1.25的5个轴向位置处轴向速度和径向速度的分布.从图8可以看出,4种方案在 $X/D=0.25$ 处的轴向速度分布吻合较好,说明旋流器出口处的轴向速度分布并未受到偏心的影响.在如图8所示的其余4个轴向位置处,4种方案下两侧的轴向速度剖面形态一致,吻合度较高,说明偏心对轴向速度影响较小.4种方案的所有轴向位置处,中心线附近的

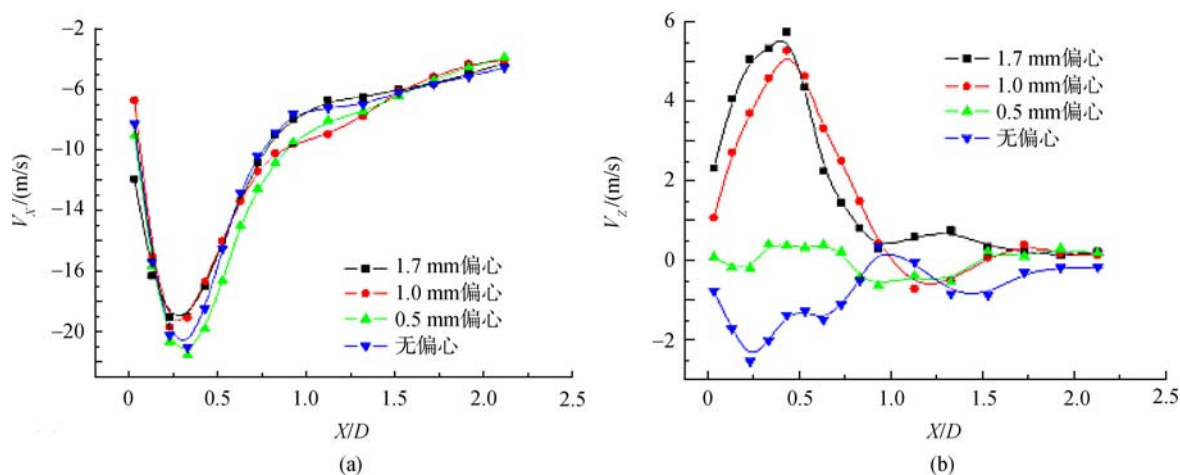


图7 中心线轴向速度及径向速度分布

Fig. 7 Axial and radial velocity profiles along centerline

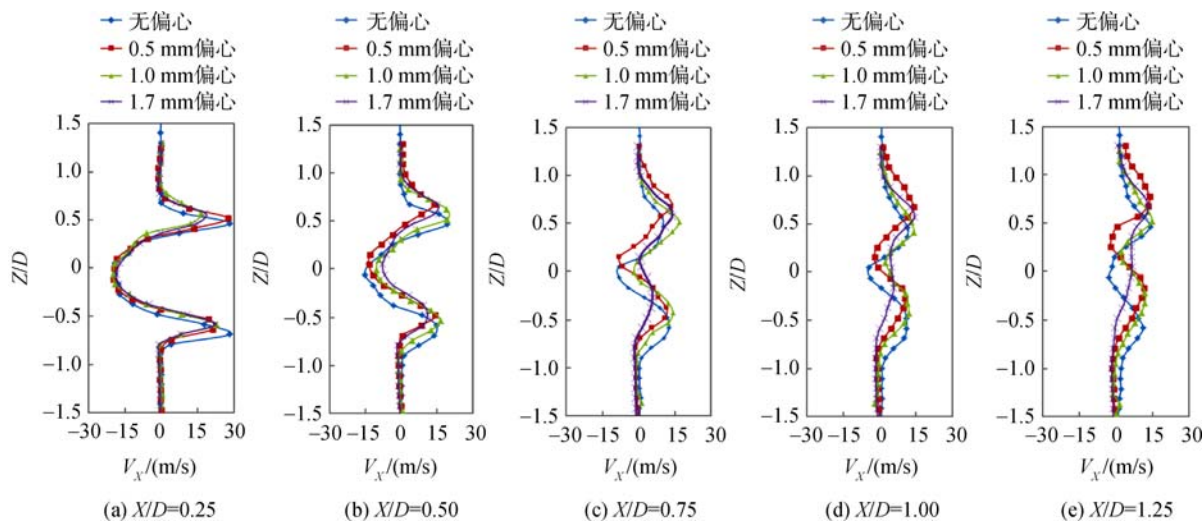


图8 旋流器出口下游不同轴向位置的轴向速度分布图

Fig. 8 Axial velocity profiles at different axial locations downstream the double-swirler outlet

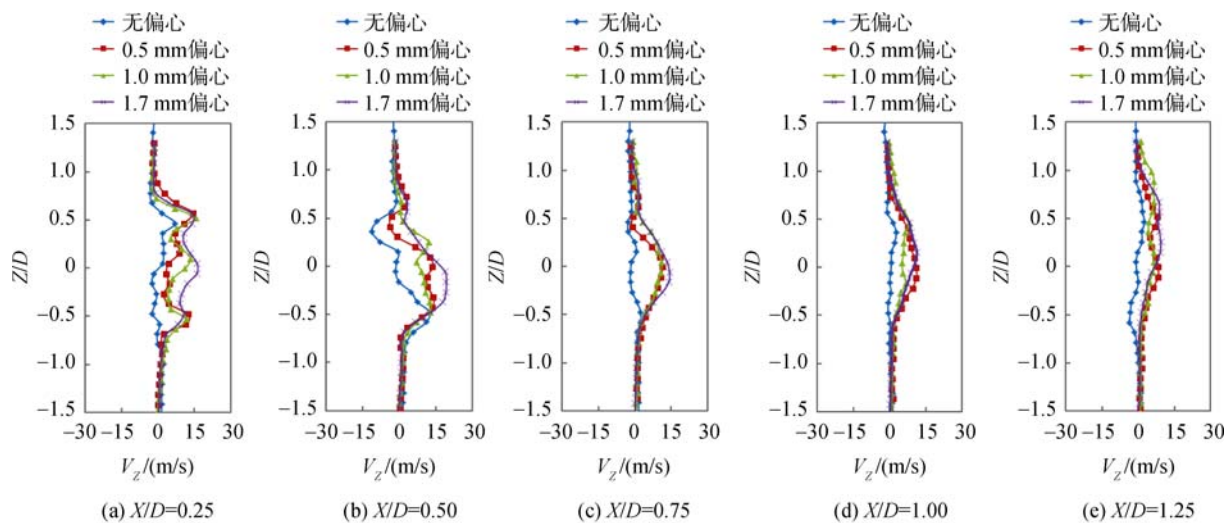


图9 旋流器出口下游不同轴向位置的径向速度分布图

Fig. 9 Radial velocity profiles at different axial locations downstream the double-swirler outlet

负向速度峰值一致. 随着气流往下游流动, 无论是正向峰值还是负向峰值都明显降低, 整个轴向速度分布趋于平缓. 总的来说偏心的引入并没有使轴向速度分布出现畸变. 从图9中可以看出, 偏心对5个轴向位置的径向速度分布影响较大, 特别是在 $X/D=0.25$ 和 $X/D=0.50$ 轴向位置处, 4种方案下流场变化较大. $X/D=0.75, 1.00, 1.25$ 处4种方案下随着偏心量的增加, 径向速度分布近似地沿横轴正向平移. 随着气流往下游流动, 上下两侧的峰值降低, 径向速度分布趋于平缓. 4种

方案的径向速度分布差别大, 特别是在靠近旋流器出口处.

图10为不同偏心量下旋流器出口下游轴向位置速度幅值云图. 从图中可以看出, 偏心对各个截面的速度幅值云图分布影响不大, 产生的旋涡中心并没有随偏心的增加而发生偏斜. 从一级旋流器出来的8股射流在 $X/D=0.75$ 后逐渐消失, 到 $X/D=1.25$ 全部消失, 这说明射流在 $X/D=0.75 \sim 1.25$ 之间逐渐与外界流场混合均匀.

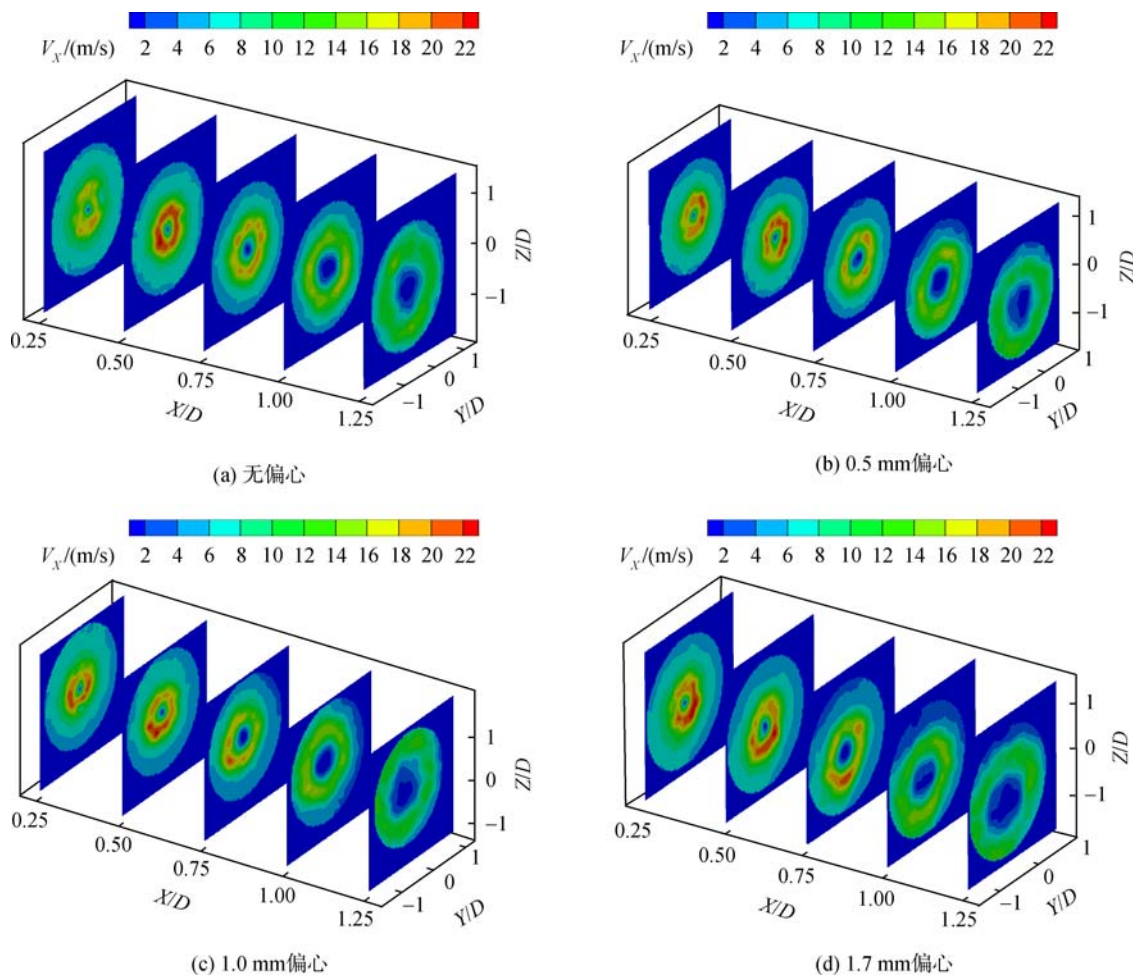


图10 旋流器出口下游轴向位置速度幅值云图

Fig. 10 Axial velocity magnitude contours at different axial locations downstream the double-swirler outlet

3 结 论

本文针对双级旋流器的偏心对其出口流场的影响进行了试验研究, 得到了如下结论:

- 1) 偏心一侧的射流对下游的影响范围明显较另一侧窄, 随着偏心量的增加 $Z/D < 0$ 侧的射流向 $Z/D > 0$ 侧倾斜, 同时使中心回流区收窄变长.
- 2) 旋流器出口中心线上的轴向速度分布受

偏心量的影响较小, 在旋流器出口下游 $X/D=0.25$ 处产生负向峰值. 在大偏心下, 中心线的径向速度分布在旋流器出口下游 $X/D=0.50$ 处产生正向峰值.

- 3) 旋流器出口下游的5个轴向位置处的轴向速度分布受偏心的影响较小, 且越靠近旋流器出口, 速度分布吻合度越高. 而径向速度分布受偏心的影响较大, 特别是离旋流器出口最近的两个

截面处,4种偏心方案下差异最大。

4) 无偏心下和0.5 mm 偏心下的流场基本一致,旋流器出口处的两个眼状旋涡对称;偏心量大于0.5 mm 时,随着偏心量的增加, $Z/D > 0$ 侧的旋涡逐渐消失, $Z/D < 0$ 侧的旋涡扩大。

参考文献:

- [1] Nikjooy M, Mongia H C, Samuelsen G S, et al. A numerical and experimental study of confined swirling jets [R]. AIAA 89-2898, 1989.
- [2] Lefebvre A H. Gas turbine combustion[M]. 3th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2010.
- [3] McDonell V G, Arellao L, Lee S W, et al. Effect of hardware alignment of fuel distribution and combustion performance for a production engine fuel injection assembly [R]. Naples, Italy; 26th International Symposium on Combustion, 1996.
- [4] Ateshkadi A, McDonell V G, Samuelsen G S. Effect of hardware geometry on gas and drop behavior in a radial mixer spray [R]. Pittsburgh, PA, USA; 27th International Symposium on Combustion, 1998.
- [5] Jeng S M, Flohre N M, Mongia H C. Air temperature effects on non-reacting spray characteristics issued from a counter-rotating swirler [R]. AIAA-2005-355, 2005.
- [6] FU Yongqiang, CAI Jun, Jeng S M, et al. Confinement effects on the swirling flow of a counter-rotating swirl cup [R]. ASME Paper GT2005-68622, 2005.
- [7] CAI Jun, FU Yongqiang, Flohre N M, et al. Experimental study on coherent structures of a counter-rotating multi-swirler cup [R]. AIAA-2007-5674, 2007.
- [8] Turek L J, Dawson R W, Chaos M, et al. An investigation of the effect of swirl vane angle on fuel concentration and velocity fields in gas turbine mixers [R]. ASME Paper GT2005-68152, 2005.
- [9] Reddy A P, Sujith R I, Chakravarthy S R. Swirler flow field characteristic in a sudden expansion combustor geometry [R]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22, (4): 800-808.
- [10] 党新宪, 赵坚行, 张欣, 等. 应用 PIV 技术测试模型环形燃烧室流场[J]. 航空动力学报, 2009, 24(7): 1470-1475.
DANG Xinxian, ZHAO Jianxing, ZHANG Xin, et al. Measurements of the flow fields in a model annular combustor using particle image velocimetry [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(7): 1470-1475. (in Chinese)
- [11] FU Yongqiang, CAI Jun, Jeng S M. Characteristics of the swirling flow generated by a counter-rotating swirler [R]. AIAA-2007-5690, 2007.
- [12] 林宇震, 许全宏, 刘高恩. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [13] Syred N, Beer J M. Combustion in swirling flows: a review [J]. Combustion and Flame, 1974, 143-201.
- [14] Adrian S, Hollis D, Carrote J. PIV Measurements of combustor turbulence fields [R]. ASME Paper GT2007-28050, 2007.
- [15] Ramos J I, Somert H T. Swirling flow in a research combustor [R]. AIAA Journal, 1985, 23(2): 241-248.
- [16] Rosfjord T J, Russell S. Nozzle design and manufacturing influences on fuel spray circumferential uniformity [J]. Journal of Propulsion and Power, 1989, 5(2): 144-150.
- [17] Rosfjord T J, Eckerle W A. Aerating fuel nozzle design influence on airflow features [J]. Journal of Propulsion and Power, 1991, 7(6): 849-856.
- [18] Cohen J M, Rosfjord T J. Influences on the sprays formed by high-shear fuel nozzle/swirler assemblies [J]. Journal of Propulsion and Power, 1993, 9(1): 16-27.