

文章编号:1000-8055(2009)07-1470-06

应用 PIV 技术测试模型环形燃烧室流场

党新宪^{1,2}, 赵坚行¹, 张欣¹, 徐榕¹, 颜应文¹, 刘勇¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 中国人民解放军 94580 部队 航理室, 蚌埠 233000)

摘 要: 采用粒子图像测速仪(PIV)测量带双级旋流器模型环形燃烧室内冷态和燃烧流场,试验研究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,试验结果表明: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;另外随着进口气流温度增加,燃烧室冷态和燃烧流场的回流区长度都稍有减少。

关 键 词: 燃烧; 双旋流器; 火焰筒; 燃烧室流场测量; 粒子图像测速技术测量

中图分类号: V231.2

文献标识码: A

Measurements of the flow fields in a model annular combustor using particle image velocimetry

DANG Xin-xian^{1,2}, ZHAO Jian-xing¹, ZHANG Xin¹,
XU Rong¹, YAN Ying-wen¹, LIU Yong¹

(1. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Department of Flight Theory Education,
The Chinese People's Liberation Army Unit 94580, Bengbu 233000, China)

Abstract: The cold and combustion flow fields were measured by particle imaging velocimetry (PIV) in a model annular combustor with the dual-stage swirler. Influences of different inlet temperatures on generations of re-circulation zone and distributions of gas velocities were investigated experimentally in the non-reacting and reacting flow fields. Experimental data shows the lengths of re-circulation zone of combustion flows are shorter than that of cold flows, and reacting fluctuating velocities are larger than non-reacting fluctuating velocities. In addition, the length of re-circulation zone decreases slightly with the increase of the inlet temperature in the non-reacting and reacting flow fields.

Key words: combustion; two-stage swirler; combustor liner;

combustor flow field measure; particle imaging velocimetry (PIV) measurement

燃烧室是航空发动机的核心部件之一,深入了解燃烧室特别是火焰筒内速度分布与变化规律对研究燃烧室内混气形成及燃烧过程都有重要的意义.由于受火焰筒内气流结构复杂及其高温湍流燃烧环境的限制,使得在不干扰燃烧室内部流

场的情况下,测量火焰筒内冷、热态速度场极为困难.

粒子图像测速仪 (particle image velocimetry,简称 PIV) 是一种非接触式的流场测量技术.由于它具有不干扰测量的流场、较高的精度和空

收稿日期:2008-07-04; 修订日期:2008-11-05

作者简介:党新宪(1974-),男,陕西扶风人,博士生,主要研究方向为燃烧试验与计算.

间分辨率、能测瞬时速度场,并对整个流场上全部速度矢量进行描述等优点,使其在燃烧室火焰筒内流场的研究中被广泛应用。

国内外一些学者对利用 PIV 测量燃烧室流场方法进行了一系列研究。例如文献[1]用 PIV 试验测量了旋流燃烧室内湍流流动,得到了燃烧室火焰筒内气流速度分布。Kady 等人^[2]利用 PIV 测量燃气轮机燃烧室内气流结构,试验研究不同主燃孔位置及其流量对燃烧室头部流场的影响;Pandu 等人^[3]利用 PIV 测量突扩燃烧室回流区尺寸、速度场,以及涡量、雷诺剪切应力与湍流强度的分布,并对中心回流区和角落回流区的特征进行了分析;文献[4]对用 PIV 测量扩散燃烧流场的方法进行了研究。文献[5]对不同 Re 下的甲烷/空气扩散火焰的流场进行了 PIV 测量,并对湍流结构和雷诺应力进行了分析。但是目前国内使用 PIV 测量燃烧室流场大都是冷态流场,或者是结构简单的燃烧室内气体燃料燃烧流场,对于形状复杂的燃烧室火焰筒内煤油/空气的燃烧流场 PIV 测量则较少。

为了提高航空发动机的燃烧效率及扩大其稳定工作范围,要求火焰筒头部具有良好的雾化特性并形成良好的气流结构。目前常采用多级旋流器流场匹配技术来满足航空发动机对燃烧室高性能的要求,为此,燃烧室头部旋流器的级数从单级发展到双级、三级。其中双级旋流器是一种新型旋流器,由于它能改善燃烧室火焰稳定性和燃油雾化质量,加强紊流混合,降低排气污染,因此常被一些先进发动机燃烧室采用。对于双旋流器燃烧室内旋流器尺寸和主燃孔等尺寸变化对燃烧性能的影响,国内外也做了一些研究,文献[6]研究了不同油气比下双旋流器几何参数以及主燃孔布局变化对燃烧室燃烧性能的影响。文献[7-8]研究了不同主燃孔对燃烧室流场和出口 NO_x 分布的影响。本文利用 PIV 对带双级旋流器的模型燃烧室内冷态流场和煤油/空气燃烧流场进行测量,揭示模型燃烧室内冷热态流场的变化规律。

1 试验设备和试验件

本试验所用美国 TSI 公司生产的二维粒子图像测速仪(PIV)主要由系统控制、流动成像、图像拍摄和图像分析与显示部分构成。系统控制由同步器完成,通过 INSIGHT6 软件编程,为包括图像跨帧在内的系统组件提供准确的控制和激活信号,保证它们准确同步运行。图像拍摄采用

PowerView2M 分辨率为 $1\,600 \times 1\,200$ 像素的 CCD(charge coupled device)相机,以 12 bit 灰度方式识别示踪粒子,最大采集速度为 32 帧/s,最小跨帧时间为 200 ns。

试验中示踪粒子采用了平均直径为 $10\mu\text{m}$ 的轻质 MgO 。该粒子的比表面积较大且密度较小,具有良好的散射性与跟随性,能比较真实地反映燃烧室内部的流场。除此之外,轻质 MgO 粒子的熔点温度可达 $2\,800\text{ }^\circ\text{C}$,而燃烧室内的燃气温度低于 $2\,000\text{ }^\circ\text{C}$,因此在冷、热态试验中均可采用该种粒子,从而保证了冷、热态试验的一致性。

本文研究试验件为图 1 所示的模型环形燃烧室,它由二级突扩扩压器、火焰筒以及内外环冷却通道等部分组成。扩压器前面部分为前置扩压器,后面是突扩段,火焰筒头部装有一个双级轴向旋流器、燃油喷嘴和点火用的电嘴,火焰筒上下壁面上开有若干个主燃孔、掺混孔以及多排气膜冷却孔。

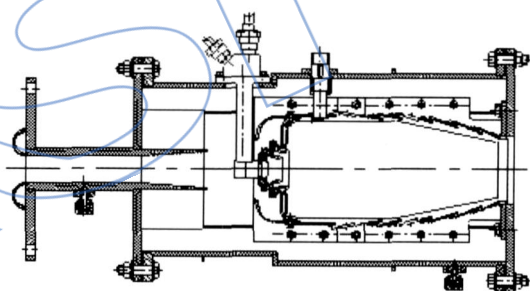


图 1 试验燃烧室结构图

Fig. 1 Configuration of experimental combustor

2 试验过程

由压气机提供的压缩空气流入前测量段,气流在前测量段经过压力与温度测量后进入试验件,经过前置扩压器,气流分成三路。一路从前端经旋流器和头部冷却孔进入火焰筒内;另两路分别流入内外环突扩腔后进入内外环冷却通道,再通过火焰筒壁面上的主燃孔、掺混孔以及各排气膜冷却孔进入火焰筒内,以提供燃烧以及冷却所需的空气。燃烧时燃油通过离心喷嘴喷入燃烧室头部与空气混合形成可燃混气,由电嘴点火使其燃烧,生成燃气。

PIV 测量燃烧室内流场试验系统如图 2 所示,测量用的示踪粒子轻质 MgO 被一股小流量的压缩空气从粒子发生器输入燃烧室内,经 PIV 测量后,并随着燃烧室内空气流或燃气流一起流入排气罐,最后排到大气中。

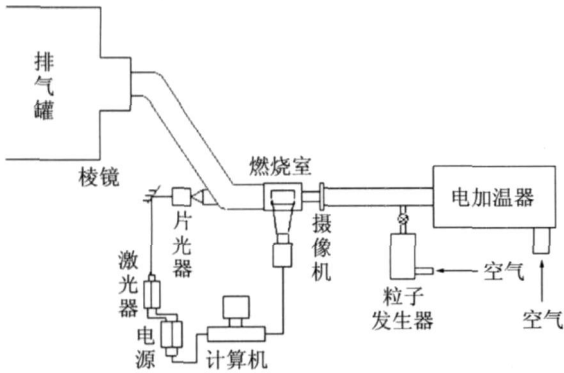


图 2 PIV 测量流场试验系统图

Fig. 2 Schematic diagram of PIV measuring flow fields

PIV 片光源激光器由光臂射出的一束平面光从 PIV 测量窗口射入燃烧室内(如图 3),然后通过一台高速相机从燃烧室侧面记录粒子图像。

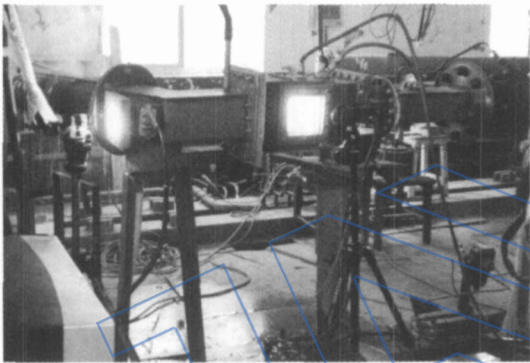


图 3 PIV 测量流场试验装置

Fig. 3 Experimental instrumentation of PIV measuring flow field

根据试验件观测窗的大小,PIV 测量旋流器中心出口 xy 平面 $115\text{ mm} \times 84\text{ mm}$ 范围内的流场, y 为 42 mm 时的截面为燃烧室的中心截面, x 为 0 mm 时对应于旋流器的出口截面.对于煤油/空气的燃烧流场 PIV 测量,为了防止燃烧火焰发光对测量结果的影响,采用平均通过频率为 532 nm ,带宽为 5 nm 的红外截至滤光片对火焰强光的影响进行屏蔽,为了减小喷嘴后油锥表面油珠颗粒散射激光对测量结果的影响,试验过程中采用二次对焦技术,燃烧流场试验测量了旋流器出口 $84\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 范围内的流场, y 为 25 mm 时的截面为燃烧室的中心截面, x 为 0 mm 时对应于旋流器的出口截面.在燃烧试验时,为了防止高温燃气(1800 K)烧坏燃烧室出口连接段,燃烧室出口后连接段采用夹层水套冷却.同时为了减少高温燃气对 PIV 激光入口石英玻璃的冲击,在窗口前开设了一个冷却气缝,通过引入外部高速气流

在此形成一道气帘,保护石英玻璃.

3 试验结果

本试验的进气温度 T_{in} 分别为 300 K 和 500 K ,进口流量 0.24 kg/s ,压力为 0.13 MPa ,燃烧时所用的燃料为煤油,进口油气比为 0.01985 ,用 PIV 测量冷、热态流场,部分的试验结果如图 4~图 12 所示.其中图 4 和图 5 分别表示 T_{in} 为 500 K 和 300 K 时冷态流场的速度矢量分布图.由图可知,气体从旋流器流出后,在火焰筒头部产生高速旋转射流,形成低压的中心回流区,可作为稳定燃烧的点火源.另外从火焰筒上下壁面的主燃孔进入燃烧室的气流具有相当大的穿透深度,与主气流进行混合.又因火焰筒结构及头部孔隙进气的影响,在火焰筒头部的上下方还有明显的角落旋涡.

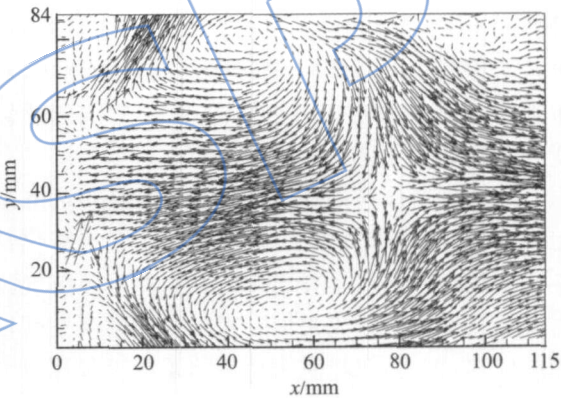


图 4 燃烧室内速度矢量分布 ($T_{in}=500\text{ K}$, 冷态)
Fig. 4 Velocity vector distributions of combustor ($T_{in}=500\text{ K}$, cold)

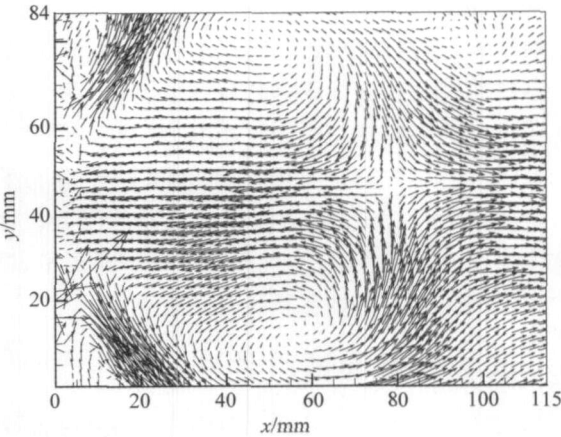


图 5 燃烧室内速度矢量分布 ($T_{in}=300\text{ K}$, 冷态)
Fig. 5 Velocity vector distributions of combustor ($T_{in}=300\text{ K}$, cold)

图 6 和图 7 分别为进气温度 500 K 时燃烧流

场的速度矢量分布和流线图,与冷态情况一样,在火焰筒的头部产生中心回流区,在上下方角落处也有小旋涡存在.与图 4 和图 5 的冷态流场相比,其中心回流区内的负速度要大些,回流区尺寸也有所缩小^[9],但是旋涡的对称性增强.这是因燃烧流场中热量释放和气相扩散^[10],促使逆压力梯度减少,最终导致回流长度的缩短.

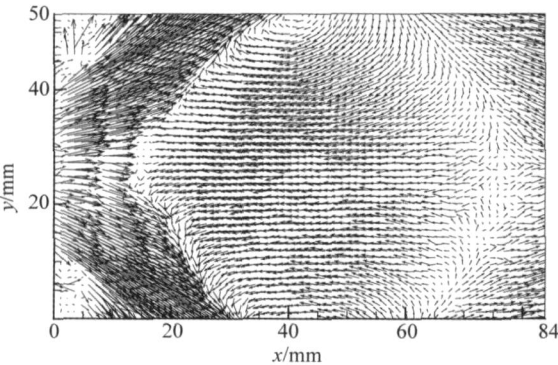


图 6 燃烧室内速度矢量分布 ($T_{in}=500\text{ K}$, 燃烧)
Fig. 6 Velocity vector distributions of combustor ($T_{in}=500\text{ K}$, combustion)

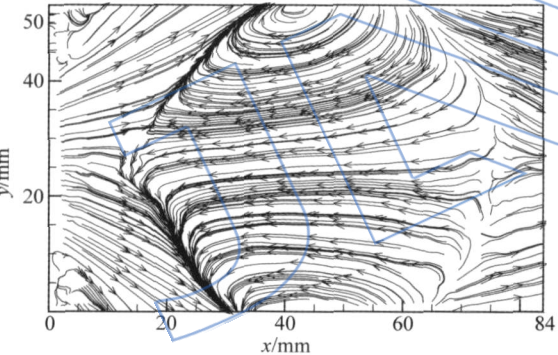


图 7 燃烧室内流线图 ($T_{in}=500\text{ K}$, 燃烧)
Fig. 7 Streamline plots of combustor ($T_{in}=500\text{ K}$, combustion)

另外,由图 6、图 7 可以明显看到,因喷嘴喷出的油雾锥的屏蔽、干扰以及燃烧火焰的作用,直接影响了 PIV 对燃烧流场测量,后者可通过在相机镜头前加装滤光片削弱或基本消除火焰对 PIV 测量的影响;但因油雾锥是由许多还来不及蒸发的油滴组成的,这些油滴尺寸(平均直径 $40\sim 50\text{ }\mu\text{m}$)要比示踪粒子大得多,它们对激光的散射能力较强,因此前者的作用使 CCD 相机在旋流器出口附近捕捉到的大都是油滴而非示踪粒子,测量结果中所显示的旋流器出口附近速度场是油滴速度分布,而不是气流速度分布.但随着轴向距离增加,油滴迅速蒸发成油蒸气,并与气流混合形成混

气,此时 PIV 才能捕捉到示踪粒子,测得燃烧室燃烧流场.从图中可以清楚的看到,油雾锥面与示踪粒子交界面.

在试验中,虽然可通过增加相机拍摄分辨率减少燃油喷雾锥的影响,但因为 CCD 相机的分辨率是一定的,故本试验通过缩小测量区域来增加分辨率,即增加每个测量点所占像素点,所以燃烧流场测量的范围要比冷态流场小.目前只能减弱油雾锥对流场测量的影响,要完全消除其影响还有一定的困难,这也是利用 PIV 测量液态燃料的燃烧流场要比气体燃料的燃烧流场难度大的主要原因之一.

图 8 为不同进气温度时冷态速度流场和进气温度为 500 K 、油气比为 0.01985 时煤油/空气燃烧速度流场中沿旋流器出口中心轴线上轴向速度 u 的分布图.由图可知,进气温度 500 K 时冷态流场的回流区比进气温度 300 K 的流场回流区缩短,但要比进气温度 500 K 时燃烧流场的回流区稍长些,燃烧流场中回流负速度要比冷态大.这可能是因燃烧使主气流膨胀,轴向速度 u 增大,回流负速度也增大引起的.不同进气温度时冷、燃烧流场回流区长度变化如表 1 所示.

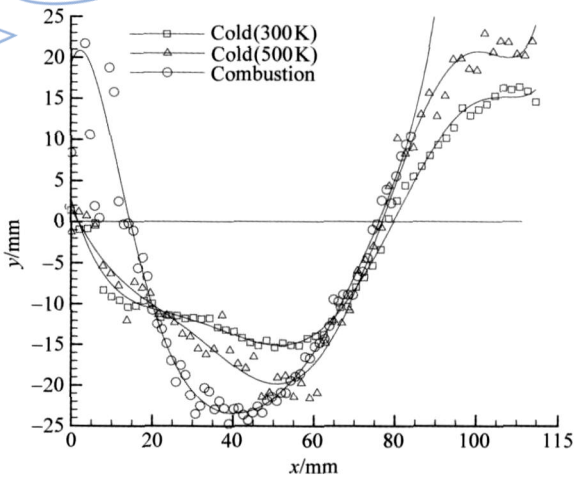


图 8 中心截面上轴向速度 u 的轴向分布图
Fig. 8 Axial profiles of u velocity at the central plane

表 1 不同进气温度时回流区长度

Table 1 Lengths of recirculation zone with different inlet temperature		
进气温度/ K	油气比	回流区长度/ mm
300	0	79
500	0	76
300	0.01985	74
500	0.01985	71

图 9 为进气温度 500 K 时冷态流场离旋流器出口轴向距离为 10, 30, 50, 70 mm 和 100 mm 的旋流器中心截面上轴向速度 u 的径向分布. 由图 9 可见, 在轴向距离为 10 mm 处, 旋流器中心 $y = 42$ mm 左右, 出现负速度区域, 即中心回流区; 在 $y = 70$ mm 和 $y = 10$ mm 附近, 因靠近旋流器喷出旋转气流锥面, 故该两处的轴向速度较大.

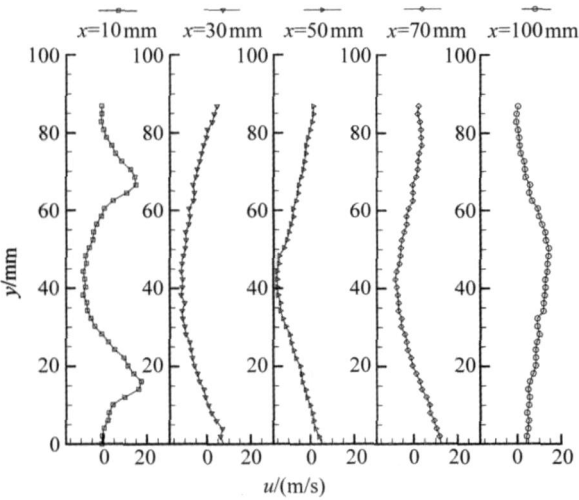


图 9 离旋流器出口不同轴向距离的 u 速度径向分布图 (冷态)

Fig. 9 Radial profiles of u velocity at different axial locations from the swirler exit (cold)

随着离旋流器出口距离的增加, 回流的负速度也相应减小, 中心回流区宽度先增大, 然后逐渐缩小, 在 $x = 70$ mm 截面上, 由于从主燃孔射流进入, 靠近火焰筒上下壁面处气流速度增加, 但是在旋流器中心 $y = 42$ mm 左右, 轴向速度 u 的负值已经很小, 说明在此截面上回流区即将结束. 在 $x = 100$ mm 截面上可以看出, 由于此截面已离开回流区, 此时主流速度均为正向, 加之主燃孔射流进入, 因流量增加, 使 u 速度加大.

图 10 为进气温度 500 K, 油气比为 0. 01985 时燃烧流场离旋流器出口轴向距离为 40, 50, 60, 70 mm 和 80 mm 的旋流器中心截面上轴向速度 u 的径向分布. 由图可以看出燃烧流场中回流区的形成、发展和结束过程与冷态基本相似, 但是因油雾锥的屏蔽作用, 燃烧流场回流区的起始点较难确定, 但是回流区末端约在离旋流器出口 $x = 70$ mm 位置上, 与图 9 相比, 燃烧流场的回流区长度略小于冷态. 对比图 9 与图 10 各相应的轴向位置上的轴向速度分布可知, 燃烧流场回流区内回流负速度要比冷态大.

图 11 为进气温度 300 K 时冷态流场离旋流

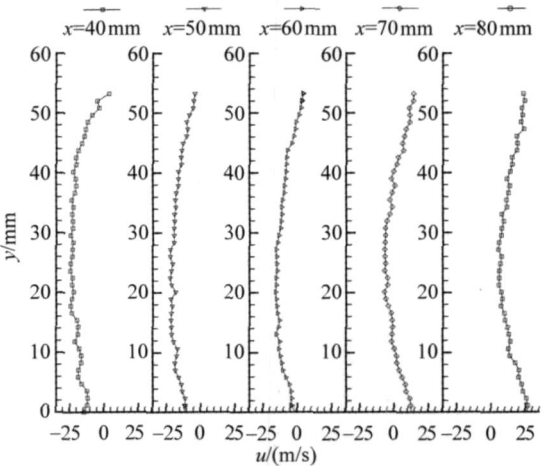


图10 离旋流器出口不同轴向距离的 u 速度径向分布图 ($T_{in} = 500$ K, 燃烧)

Fig. 10 Radial profiles of u velocity at different axial locations from the swirler exit ($T_{in} = 500$ K, combustion)

器出口轴向距离为 10, 30, 50, 70 mm 和 100 mm 的旋流器中心截面上轴向脉动速度的径向分布. 图 12 为进气温度 300 K, 油气比为 0. 01985 时燃烧流场离旋流器出口轴向距离为 40, 50, 60, 70 mm 和 80 mm 的旋流器中心截面上轴向脉动速度的径向分布.

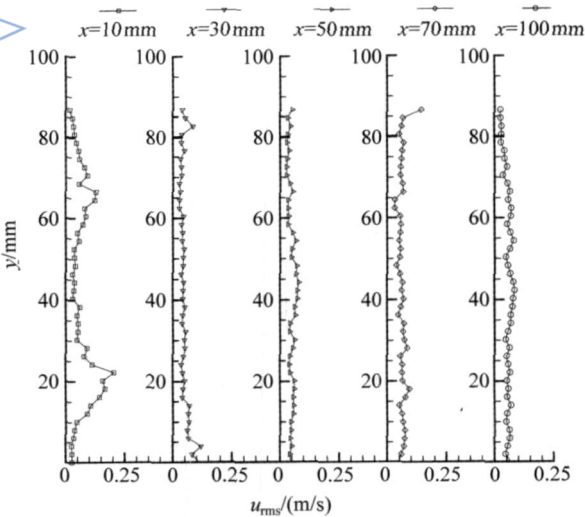


图 11 离旋流器出口不同轴向距离的轴向脉动速度 u_{rms} 径向分布图 ($T_{in} = 300$ K, 冷态)

Fig. 11 Radial profiles of u_m fluctuation velocity at different axial locations from the swirler exit ($T_{in} = 300$ K, cold)

为了更好的反映流场中速度脉动值的分布和变化, 采用无量纲 u_{rms}/u_m 来表示轴向脉动速度, u_m 为旋流器文氏管喉道处截面平均速度.

$$u_m = \frac{0.17 q_m}{S_p} \quad S = \frac{\pi}{4} D^2$$

其中 q_m 为进气流量, 0.17 为旋流器进气流量占总进气流量的百分比, ρ 为进气密度, S 为文氏管喉道截面面积, D 为喉道直径。

从图 11 可以看出, 在距旋流器出口 10 mm 的截面上, 轴向脉动速度 u_{rms}/u_m 出现两个峰值, 这是由于该处为旋流器出口, 旋流强度较大, 速度波动较大的缘故。在距出口 30, 50, 70 mm 和 100 mm 这几个截面上, 轴向脉动速度 u_{rms}/u_m 相对 10 mm 截面要小一些, 且分布比较均匀, 没有明显的峰值。图 12 中各截面轴向脉动速度 u_{rms}/u_m 的分布大体上与图 11 相同, 但由于燃气温度的升高, 使整个流场中的脉动加强, 轴向脉动速度 u_{rms} 有所增加。可以看到, 与冷态流场相比, 燃烧流场轴向脉动速度 u_{rms}/u_m 的分布要混乱一些, 且脉动值有明显的增加。这主要是由于燃烧使流场中气流湍流度增加, 从而使气流湍流动能加大引起的。

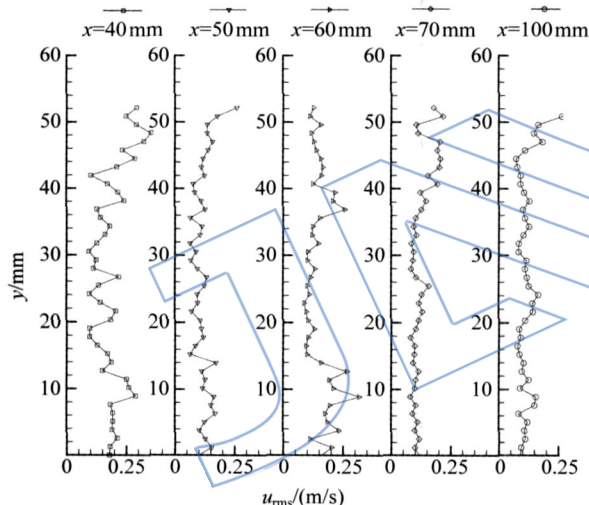


图 12 离旋流器出口不同轴向距离的轴向脉动速度 u_{rms} 径向分布图 ($T_{in} = 300\text{ K}$, 燃烧)

Fig. 12 Radial profiles of u_m fluctuation velocity at different axial locations from the swirler exit ($T_{in} = 300\text{ K}$, combustion)

4 结 论

1) 在同一试验件和进口试验条件下, 燃烧流场的回流区和冷态相比有所不同, 燃烧时火焰筒内的回流区长度比冷态稍短些, 但回流区内回流负速度要比冷态大, 旋流的对称性增强;

2) 无论是冷态或燃烧流场, 增加进气温度后, 回流区长度都有所减小, 这主要是由于提高进气温度, 使气体粘性增加, 使逆压力梯度减少, 从而导致回流区长度的减小;

3) 由于燃烧使流场中气流各参数如密度、成分、温度等发生了变化, 从而引起了湍流度加强, 脉动速度加大, 故燃烧流场中轴向脉动速度比冷态有所增加。

参考文献:

- [1] 程勇, 汪军. 旋流燃烧室内湍流流动的 PIV 实验研究[J]. 上海理工大学学报, 2004, 26(5): 454-456.
CHEN Yong, WANG Jun. Experiment study on the turbulent flow in a swirl combustion chamber by using particle image velocimetry[J]. J. University of Shanghai for Science and Technology, 2004, 26(5): 454-456. (in Chinese)
- [2] Elkady A, Jeng S M, Mongia H. The influence of primary air jets on flow and pollutant emissions characteristics within a model gas turbine combustor[R]. AIAA 2006-544, 2006.
- [3] Pandu A, Reddy R, Sujith R I, et al. Swirler flow field characteristics in a sudden expansion combustor geometry using PIV[R]. AIAA Paper 217-227, 2005.
- [4] 杨浩林, 赵黛青, 杨卫斌. 扩散燃烧流场的 PIV 测试方法探讨[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(z2): 233-236.
YANG Haolin, ZHAO Daiqing, YANG Weibin. Application of PIV system to the diffusion combustion flow field [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(z2): 233-236. (in Chinese)
- [5] Odal A, Watson K A, Roberts W, et al. Turbulence filter and POD analysis for velocity fields in lifted CH₄-air diffusion flames[J]. Flow Turbulence and Combustion, 2003, 70(1-4): 21-41.
- [6] 党新宪, 赵坚行, 吉洪湖. 试验研究双旋流器头部燃烧室几何参数对燃烧性能的影响[J]. 航空动力学报, 2007, 22(10): 1639-1645.
DANG Xinxian, ZHAO Jianxing, JI Honghu. Experimental study of effects of geometric parameters on combustion performance of dual-stage swirler combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(10): 1639-1645. (in Chinese)
- [7] 党新宪, 赵坚行, 吉洪湖. 主燃孔对双旋流燃烧室流场的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(1): 26-31.
DANG Xinxian, ZHAO Jianxing, JI Honghu. Effects of primary holes on flow fields of dual swirl combustor[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 40(1): 26-31. (in Chinese)
- [8] 党新宪, 赵坚行, 吉洪湖. 双旋流器燃烧室 NO_x 生成研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(3): 430-435.
DANG Xinxian, ZHAO Jianxing, JI Honghu. A study on NO_x formation for double swirler combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(3): 430-435. (in Chinese)
- [9] Gupta A K, Lilley D G. Swirl flows[M]. England: Abacus Press, 1984.
- [10] 彭云辉, 林宇震, 许全宏, 等. 双旋流空气雾化喷嘴喷雾、流动和燃烧性能[J]. 航空学报, 2008, 29(1): 1-14.
PENG Yunhui, LIN Yuzhen, XU Quanhong, et al. Atomization, aerodynamics and combustion performance of swirl cup [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(1): 1-14. (in Chinese)