

文章编号:1000-8055(2011)01-0021-07

试验研究旋流数对燃烧室气动性能的影响

党新宪^{1,2}, 赵坚行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: 为了深入了解双级轴向旋流器的旋流数变化对模型环形燃烧室内气流结构与气动性能的影响, 采用粒子图像速度仪(PIV)对燃烧室内冷态和液雾燃烧流场进行测量, 试验研究在冷、热态情况下不同旋流数对模型燃烧室内回流区的尺寸、平均速度($\bar{u}$, $\bar{v}$)、脉动速度(u_{rms} , v_{rms})以及雷诺剪切应力 $\overline{u'v'}$ 分布的影响。研究表明:旋流数变化对燃烧室内冷、热态流场有着重要的影响;燃烧室在燃烧情况下所得的中心回流区长度要比冷态短,但回流区内速度、脉动速度 u_{rms} 增强。旋流数增大后,回流区内负速度减小,回流区宽度稍有缩小。在燃烧流场中,旋流数的变化对回流负速度的影响减弱。

关 键 词: 环形燃烧室; 双级轴向旋流器; 旋流数; 液雾燃烧流场; 粒子图像速度仪(PIV) 测量

中图分类号: V231.2

文献标识码: A

Experimental investigation on effects of swirl number on aerodynamic characteristics of combustor

DANG Xin-xian^{1,2}, ZHAO Jian-xing¹, XU Rong¹,

YAN Yin-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: To investigate the influence of different swirl numbers on flow structure and aerodynamic characteristics of the model annular combustor with double axial swirler, the isothermal and spray combusting flow fields of the model annular combustor with double axial swirler were measured by a particle image velocimetry (PIV) system. Effects of different swirl numbers on the formation of recirculation zone, profiles of ensemble-averaged velocities ($\bar{u}$, $\bar{v}$), fluctuating velocities (u_{rms} , v_{rms}) and Reynolds shear stress $\overline{u'v'}$ in the combustors were investigated experimentally. Results of the PIV show that influences of different swirl numbers on isothermal and reacting flow fields are considerable. The length of central recirculation zone of reacting flows is shorter than that of non-reacting flows. However, the recirculation velocity, fluctuating velocity and Reynolds shear stress of reacting flows are higher than those of non-reacting flows. The changes of length and recirculation velocity for the central recirculation zone decrease with increase in swirl number under reacting flows.

Key words: annular combustor; double axial swirler; swirl number;
spray combusting flow field;
PIV (particle image velocimetry) measurement

收稿日期:2009-12-03; 修订日期:2010-03-20

作者简介:党新宪(1974-),男,陕西扶风人,讲师,博士生,研究领域为航空发动机燃烧试验与计算。

为了提高航空发动机的燃烧效率及扩大其稳定工作范围,现代航空技术要求火焰筒头部具有良好的雾化特性及其合理的气流结构.旋流器是航空发动机燃烧室内的重要部件,它的工作性能好坏直接影响燃烧室的性能.旋流器的功用是:①在火焰筒头部产生的高速旋转射流形成低压区,从而生成中心回流区,以保证火焰稳定;②高速旋转射流,增加了气流与油滴的相对速度,改善了燃油雾化和混气形成;③旋流器既是火焰筒的进气装置,又是气动雾化喷嘴的空气流道,它为火焰筒头部提供适量的空气,以保证头部具有合适的余气系数.旋流器类型很多,其中双级旋流器是一种新型旋流器,由于它能保证良好的气动雾化性能和足够强的回流区,满足高温升大热负荷燃烧室头部设计等要求,因此常被一些先进发动机(如涡扇发动机 CFM56 和 F101,涡轴发动机 T700 等)燃烧室采用.旋流器的旋流数对燃烧室内气流结构及其流场有很大的影响,它不仅直接影响火焰筒内中心回流区的尺寸,而且还影响整个燃烧室的燃烧性能.因此,研究旋流数变化对燃烧室流场的影响极为重要.

关于旋流数对燃烧室流场的影响,国内外一些学者进行过一系列的研究,例如文献[1]试验和数值研究不同旋流叶片角度对叶片旋流器燃烧室流场的影响,并通过计算值与五孔探针所得试验数据比较验证不同湍流模型对模拟旋流流场的精度.文献[2]采用 PIV (particle image velocimetry) 测量双级轴向旋流器燃烧室流场,试验研究旋流叶片安装角对其冷态和油雾燃烧流场的影响.文献[3]利用相位多普勒粒子分析仪(PDPA)研究不同旋流数下突扩旋风筒内气粒两相湍流特性的变化规律;文献[4]采用试验和数值模拟的方法研究了不同旋流数下 NO 的生成规律以及不同旋流数对两相流场和两相湍流特性的影响.文献[5]数值和试验研究了旋流数和雷诺数变化对回流燃烧室冷态流场以及回流区尺寸的影响.

由于受火焰筒结构复杂及其高温湍流燃烧环境的限制,在不干扰燃烧室内部流场的情况下,测量燃烧室火焰筒内冷、热态流场极为困难.最初人们主要采用探针和热线风速仪进行流场测量,而这种接触式测量方法往往会对所测量的冷态和燃烧流场产生一定的干扰,同时由于火焰筒内温度高、气流速度大,增加了探针和热线布置的复杂性.近几十年来随着计算机、光学等相关领域中科学技术的迅速发展,出现了许多先进的非接触式

测量方法,如:激光多普勒测速仪(LDV),相位多普勒粒子分析仪(PDPA)和粒子图像速度仪(PIV)等.其中 LDV 和 PDPA 这两种测试方法,虽然都可以较准确地测量燃烧室内的流场,而且对被测流场没有干扰.但是由于其每次只能测量燃烧室内某一点的瞬时气流速度,使得测量燃烧室整个流场工作量很大.而 PIV 突破了单点测量技术的局限性,可在同一时刻记录下整个测量平面的有关信息,从而可以获得流动的瞬时速度场、脉动速度场和涡量场等,同时 PIV 还具有与单点测量仪器(如 LDV 等)相当的分辨率.因此 PIV 非常适合于测量湍流、旋流和回流等复杂的气流结构,目前 PIV 测试技术发展迅速,已被广泛应用于各种燃烧室流场测量.为此,国内外不少学者利用 PIV 测量对燃烧室流场进行了一系列研究.例如文献[6]用 PIV 试验测量了双级轴向旋流器燃烧室冷热态流场. Fureby 等^[7]对多级旋流器燃烧室流场进行了数值与试验研究,并把计算值与 PIV 和 LDV 测得的燃烧室冷态试验数据进行比较. Reddy 等^[8]用 PIV 测量突扩矩形燃烧室内回流区、速度场、涡量、雷诺剪切应力以及湍流强度的分布.文献[9]数值与试验研究旋流杯燃烧室流场,所得的计算结果与 PIV 测得的燃烧室冷、热态流场符合较好.

本文以装有双级轴向旋流器模型环形燃烧室为研究对象,利用粒子图像速度仪测量其冷热态流场,试验研究双级轴向旋流器的旋流数变化对该燃烧室气动性能的影响.

1 试验件

本试验所设计的双级轴向旋流器是由一级、二级旋流器及文氏管等部分组成,其组合结构如图 1 所示.其中内为一级旋流器,外为二级旋流器,两个旋流器旋转方向相反,二级旋流器和文氏

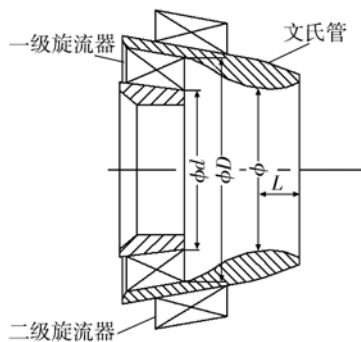


图 1 双级轴向旋流器组合图

Fig. 1 Double axial swirler assembly

管做成一体,但一级旋流器的叶片安装角 β 是可改变的。一级旋流器的主要几何参数如表 1 所示。试验中所用的双级轴向旋流器模型环形燃烧室是由突扩扩压器、火焰筒以及内外环冷却通道等^[10]组成,双级轴向旋流器装在火焰筒头部,通过更换不同一级旋流器来改变双级轴向旋流器的旋流数。

表 1 一级旋流器主要参数

Table 1 Main parameters of the primary swirler

一级旋流器	I	II	III
叶片安装角 $\beta/(\circ)$	40	34	45
旋流数 N_{sn}	0.995	0.779	1.231

2 试验系统

PIV 测量燃烧室流场试验流程如图 2 所示,由压气机提供的压缩空气经电加热器加热后依次进入前测量段、燃烧室试验件、PIV 测量段及排气罐。粒径为 $10\mu\text{m}$ 的示踪粒子 MgO ,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经净化后一起排到大气中。

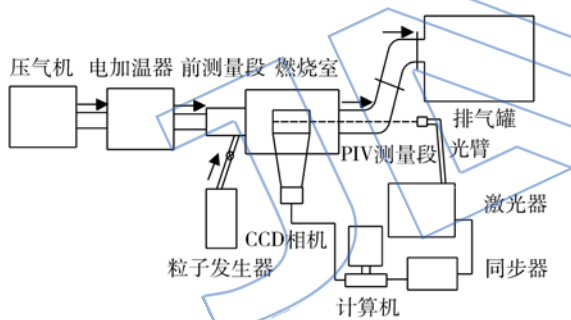


图 2 PIV 流场试验流程示意图

Fig. 2 Schematic of experiment chart for PIV measuring velocity field

本试验采用 PIV 测量燃烧室冷态流场。图像拍摄采用 PowerView 2M 分辨率为 $1600\text{ 像素} \times 1200\text{ 像素}$ 的 CCD(charge coupled device)相机,图像分析与显示则由安装 INSIGHT 6 软件的计算机完成。PIV 的片光源激光器将一束平面片光由光臂通过 PIV 测量段窗口从燃烧室出口射入,然后通过 CCD 相机从燃烧室侧面观察窗拍摄粒子图像。

冷态流场试验时,PIV 测量旋流器出口下游中心截面 $115\text{ mm} \times 84\text{ mm}$ 内流场,此时,旋流器中心径向位置 Y 为 0,旋流器出口的 X 为 0。热态流场试验时,为了减弱火焰发射光谱对 PIV 测量

的影响,在相机镜头前加装一块频率为 532 nm ,带宽为 5 nm 的滤光镜片屏蔽火焰强光对图像拍摄的干扰;与此同时,缩小相机光圈,加大激光器能量,提高信噪比,增强流场本身的信号。为了减少油锥表面油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;并把 PIV 测量范围缩小为 $84\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 截面内流场。此外,为了削弱高温燃气杂质和油粒直接撞击到石英玻璃上影响 CCD 相机拍摄,故在窗口前开设了一个冷却气缝,通过引入一股高速冷空气在此形成气膜,防止观测窗石英玻璃被污染。

3 试验结果与分析

通过 PIV 测量所得的图像经处理后可得瞬时速度 (u_i, v_i) 分布,再按下列关系式对试验数据进一步处理,可求得平均速度、脉动速度以及雷诺剪切应力分布:

径向和轴向的平均速度

$$\begin{aligned}\bar{u}(x, y) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i(x, y) \\ \bar{v}(x, y) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i(x, y)\end{aligned}\quad (1)$$

径向和轴向脉动速度均方根值

$$\begin{aligned}u_{\text{rms}} &= \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^2} \\ v_{\text{rms}} &= \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2}\end{aligned}\quad (2)$$

雷诺剪切应力

$$\overline{u'v'} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v}) \quad (3)$$

以上式中 $i=1, 2, 3, \dots, N$; u_i, v_i 分别为第 i 个瞬时的径向速度和轴向速度。

3.1 冷态流场

冷态流场试验进口气流参数分别为:温度 $T_{\text{in}}=500\text{ K}$,压力 $p_{\text{in}}=0.13\text{ MPa}$,PIV 测量所得的部分试验结果如图 3~图 9 所示。其中图 3 和图 4 分别为一级旋流器 III 和 I 时燃烧室内流线图及轴向速度 $\bar{u}$ 等值云图, x 和 y 分别表示轴向和径向位置,由图 3 和图 4 可知,从旋流器进入的气流和主燃孔射流相互作用,在火焰筒头部产生回流区,具有相当大穿透深度的火焰筒上下主燃孔射流迫使回流区截止在主燃孔所在位置的附近;在图中可通过速度为零的等值线范围看出回流区的大小。另外,又因从火焰筒进口前壁上许多小孔进入的气流与头部冷却隙缝气流相互作用形成角

落回流区.

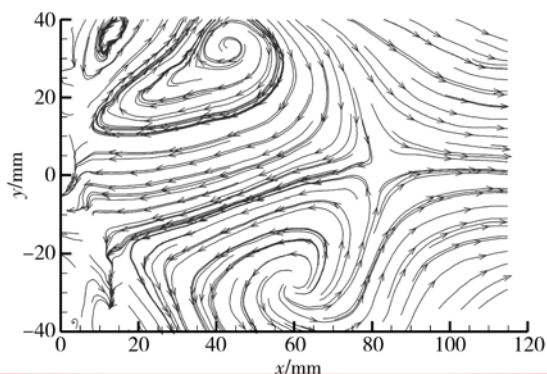


图3 旋流器Ⅲ时冷态流场流线图 ($T_{in}=500\text{ K}$)

Fig. 3 Streamlines diagram of combustor with swirler III for non-reacting flow ($T_{in}=500\text{ K}$)

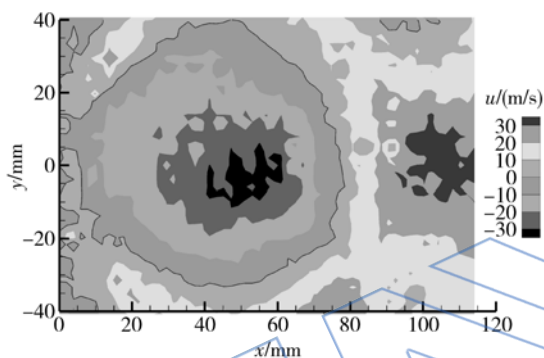


图4 旋流器Ⅰ时冷态速度 $\bar{u}$ 等值云图 ($T_{in}=500\text{ K}$)

Fig. 4 Velocity $\bar{u}$ color contours for non-reacting flow in combustor with swirler I ($T_{in}=500\text{ K}$)

图5为一级旋流器Ⅰ在冷态时离旋流器出口轴向距离分别为10, 30, 50, 70 mm和100 mm时旋流器中心截面上轴向速度 $\bar{u}$ 的径向分布. 由图可见, 轴向距离为10 mm处, 在旋流器中心 ($y=0$) 左右, 出现负速度 ($\bar{u}<0$) 区域, 即中心回流区; 在 $y=\pm 30\text{ mm}$ 及其附近, 因靠近旋流器喷出旋转气流锥面, 故该两处的轴向速度 $\bar{u}$ 较大. 随着离旋流器出口距离的增加, 回流区负速度也相应减小, 中心回流区宽度先增大, 然后逐渐缩小, 在 $x=70\text{ mm}$ 的截面上, 由于从主燃孔进入的气流的作用, 靠近火焰筒上下壁面的气流速度增加, 但是在旋流器中心 $y=0\text{ mm}$ 左右, 轴向速度 $\bar{u}$ 的负值已经很小, 说明在此截面上火焰筒内的回流区即将结束. 在 $x=100\text{ mm}$ 截面上可以看出, 由于此截面已离开回流区, 因此负速度区域消失, 主流速度均为正向, 又因主燃孔射流进入, $\bar{u}$ 速度再度增加.

图6为旋流器Ⅰ时燃烧室内径向速度 $\bar{v}$ 等值云图. 由图可知, 在轴向距离 $x=10\text{ mm}$ 处, 即在

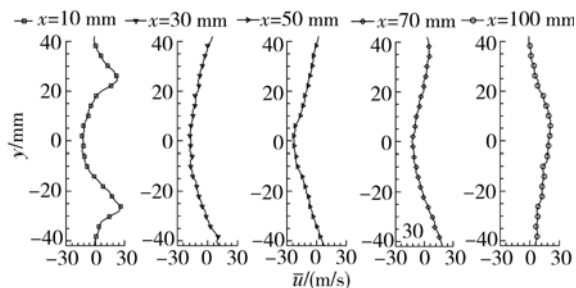


图5 旋流器Ⅰ时冷态速度 $\bar{u}$ 径向分布图 ($T_{in}=500\text{ K}$)

Fig. 5 Radial profiles of $\bar{u}$ velocity in the non-reacting flow for swirler I ($T_{in}=500\text{ K}$)

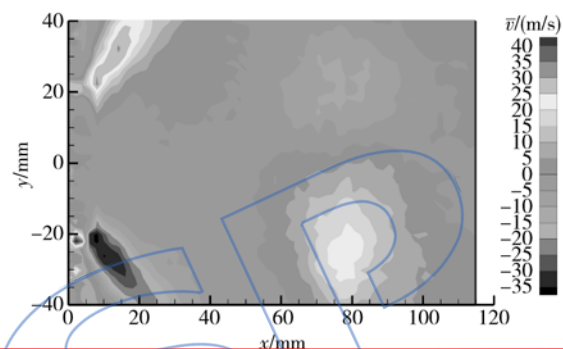


图6 旋流器Ⅰ时冷态流场 $\bar{v}$ 速度等值云图 ($T_{in}=500\text{ K}$)

Fig. 6 Velocity $\bar{v}$ color contours for non-reacting flow in combustor with swirler I ($T_{in}=500\text{ K}$)

旋流器出口处, 因靠近旋流器喷出旋转气流锥面, 故该处的径向速度 $\bar{v}$ 值较大, 速度出现一正、一负两个峰值, 但大小基本一样, 其位置与 $\bar{u}$ 速度分布图中 $x=10\text{ mm}$ 截面上两峰值基本一致.

在 $y=30\text{ mm}$ 左右, 气流从旋流器喷出后向上流动, 故该处 $\bar{v}$ 速度数值为正, 而在 $y=-30\text{ mm}$ 左右, 气流向下流动, 故该处 $\bar{v}$ 速度数值为负. 随着离旋流器出口距离的增加, 在 $x=30\text{ mm}$ 处, 虽然 $\bar{v}$ 速度依然是上正下负, 但是其数值上明显减少, 这是因为在截面上气流基本上是轴向速度的原因. 在 $x=50\text{ mm}$ 处, 气流 $\bar{v}$ 速度数值为零, 气流为轴向, 但是在 $x=70\text{ mm}$ 处, 因为在回流区的后缘, 形成上下涡心的两股气流在此汇合, 故上部气流向下, $\bar{v}$ 速度为负, 下部气流向上, $\bar{v}$ 速度为正. 在 $x=100\text{ mm}$ 处, 上下两股气流汇合后向后流动, 故 $\bar{v}$ 速度基本为零.

图7表示进口温度为500 K时不同旋流数对燃烧室中心回流区长度的影响. 由图可知, 在冷态情况下, 回流区长度Ⅲ号最大, Ⅱ号最短, 由此可见, 回流区长度随着旋流器叶片安装角(或旋流数)的增加而增大. 虽然Ⅲ号旋流器对应的回流区

轴向长度最大,但其回流区负速度有所下降,回流区宽度稍有减小.这是因为叶片安装角增大后,一级旋流器的压力损失和流动阻力增加,通过一级旋流器的空气流量减小,进而使得回流区中负速度减小,回流区宽度稍有缩小,这表明增大旋流数并不一定有利于燃烧室内组织燃烧.

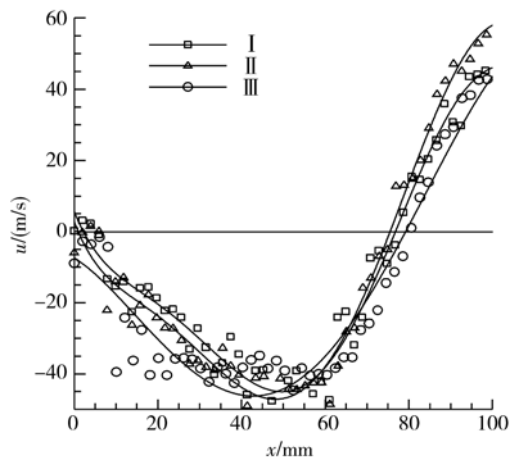


图7 不同旋流器对中心回流区长度的影响
(冷态, $T_{in}=500\text{ K}$)

Fig. 7 Effects of different swirlers on the lengths of central recirculation zone (cold, $T_{in}=500\text{ K}$)

图8为旋流器I时轴向脉动速度 u_{rms} 等值线图.由图中可明显看出,在流场内速度矢量变化大的区域,脉动速度明显比较高,而在靠近流场内上下两个涡的涡心以及火焰筒进口前壁面附近,轴向脉动速度非常小.

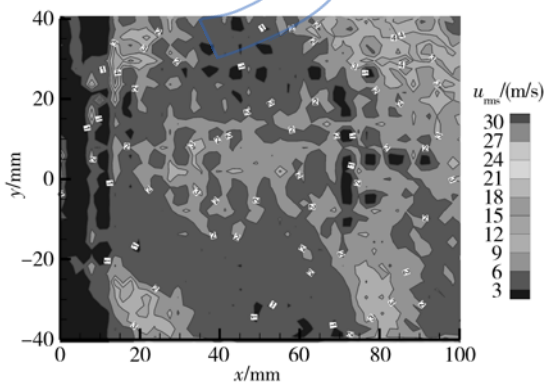


图8 旋流器I时脉动速度 u_{rms} 等值线图
(冷态, $T_{in}=500\text{ K}$)

Fig. 8 Fluctuating velocities u_{rms} color contours for swirler I (cold, $T_{in}=500\text{ K}$)

图9为离旋流器出口距离分别为10, 30, 50 mm和70 mm的旋流器中心截面上雷诺剪切应力 $\overline{u'v'}$ 的径向分布.由图可知,在距旋流器出口

10 mm 的截面上,由于该处为旋流器出口,旋流强度较大,速度波动较大,雷诺剪切应力 $\overline{u'v'}$ 变化较大,同时由于旋流器出口附近上下径向速度 $\bar{v}$ 方向相反,因此出现一个峰值和一个峰谷.在距出口30 mm和50 mm截面上,除了靠近火焰筒壁面附近受面影响 $\overline{u'v'}$ 变化较大外,雷诺剪切应力 $\overline{u'v'}$ 相对10 mm截面要小一些,且分布比较均匀,没有明显的峰值.但在70 mm截面上,雷诺剪切应力 $\overline{u'v'}$ 又出现较大的变化,这是由于此截面处于回流区的结束区域,上下两个涡的气流在此开始相汇而引起的.

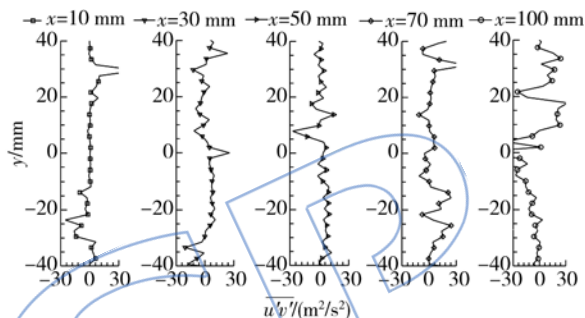


图9 旋流器I时 $\overline{u'v'}$ 径向分布图(冷态, $T_{in}=500\text{ K}$)
Fig. 9 Radial profiles of $\overline{u'v'}$ for swirler I (cold, $T_{in}=500\text{ K}$)

3.2 热态流场

热态流场试验时的进口气流参数分别为温度 $T_{in}=500\text{ K}$, 流量 $Q=0.24\text{ kg/s}$, 压力 $p_{in}=0.13\text{ MPa}$, 油气比 $f/a=0.01985$, 出口平均温度 1420 K , PIV 测量所得的部分试验结果如图10~图13所示.其中图10为热态时旋流器I燃烧室内轴向速度矢量分布图.与图4相比可知,热态流场气流结构与冷态基本相似,在旋流器出口附近都有明显的中心回流区,但热态回流区要比冷态短些^[11-12],而回流区内的负速度要比冷态稍大,引起

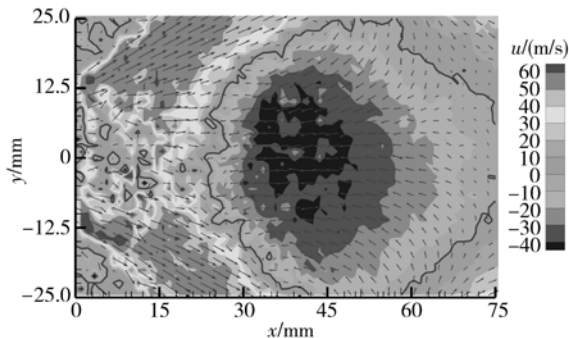


图10 旋流器I时速度矢量图(热态, $T_{in}=500\text{ K}$)
Fig. 10 Velocity vector distributions for swirler I (comb., $T_{in}=500\text{ K}$)

这些不同的主要原因可能是因燃烧使得主气流温度升高,膨胀加速,使回流负速度增大,负压力梯度加大,回流区长度减小.另外,从图10还可看到,从旋流器出口喷出的油雾锥和示踪粒子显示的回流区在热态流场中共存.油雾锥对激光产生屏蔽和干扰,使在旋流器出口附近,从PIV测量所得粒子的大小和速度可以看出,CCD相机捕捉到的大都是油滴而非示踪粒子,故显示的流场为油滴速度分布.但随着轴向距离增加,高温燃气对油滴加温,使其迅速蒸发成油蒸气,并与气流混合形成混气,此时PIV捕捉到颗粒为示踪粒子,测得燃烧室流场为气流速度场.

图11为旋流器I在燃烧情况下轴向脉动速度 u_{rms} 分布,与图8相比可知,冷热态流场内脉动速度的分布基本一致,在流场内靠近上下两个涡心的区域,轴向脉动速度小,而在旋流器射流气流以及回流区外缘附近,由于气流速度变化较大,出现了明显的速度脉动.另外对比冷热态流场内的气流的轴向脉动速度分布可以明显看出,热态流场内气流的脉动比冷态流场内气流的脉动强得多,分布范围也更广.

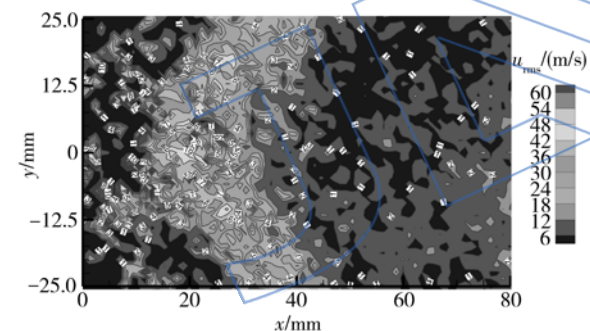


图11 旋流器I时脉动速度 u_{rms} 等值云图
(热态, $T_{in}=500\text{ K}$)

Fig. 11 Fluctuating velocities u_{rms} color contours for swirler I (comb., $T_{in}=500\text{ K}$)

图12为热态时不同旋流数对燃烧室中心回流区长度的影响.由图可知,不同旋流数对回流区长度有一定影响.但与冷态流场(见图7)相比,可认为在燃烧流场中旋流数变化对回流区长度的影响减弱.

图13为燃烧时离旋流器I出口轴向距离为40,50,60,70 mm和80 mm的旋流器中心截面上雷诺剪切应力 $\overline{u'v'}$ 的径向分布.图中各截面 $\overline{u'v'}$ 的分布规律大体上与图9相同,但由于燃气温度的升高,使整个流场中的脉动加强, $\overline{u'v'}$ 变化量

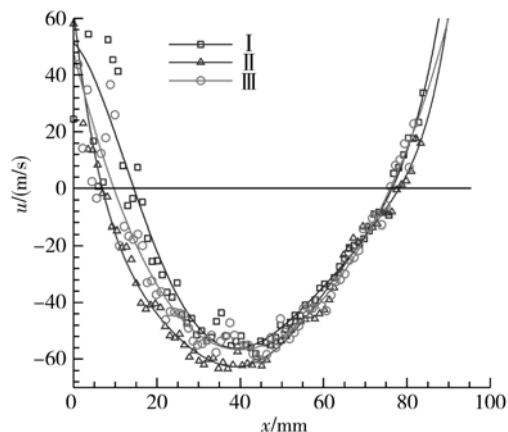


图12 不同旋流器对中心回流区长度的影响
(热态, $T_{in}=500\text{ K}$)

Fig. 12 Effects of different swirlers on the lengths of central recirculation zone (comb., $T_{in}=500\text{ K}$)

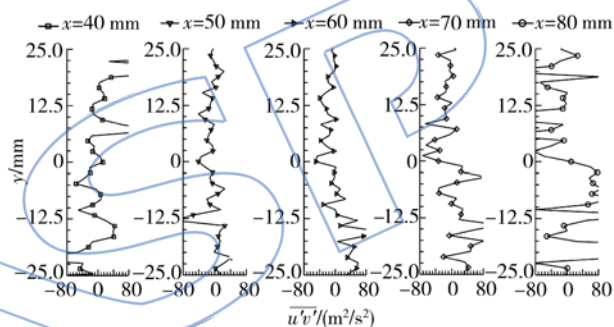


图13 旋流器I时 $\overline{u'v'}$ 径向分布图
(热态, $T_{in}=500\text{ K}$)

Fig. 13 Radial profiles of $\overline{u'v'}$ for swirler I
(comb., $T_{in}=500\text{ K}$)

增加.

4 结 论

在本文研究范围内,可得出如下结论:

1) 热态流场中心回流区轴向长度比冷态短,但回流区内的负速度要比冷态大,流场的脉动速度和雷诺剪切应力增强.

2) 燃烧室内回流区长度随着一级旋流器的旋流数增加而增大,但其回流区负速度有所下降,回流区宽度减小.

参考文献:

- [1] Thundil R, Ganesan V. Study on the effect of various parameters on flow development behind vane swirlers[J]. Inter. J. of Thermal Sciences, 2008, 47(9): 1204-1225.
- [2] Linck M, Gupta A K. Effect of swirl and combustion on flow dynamics in luminous kerosene spray flames[R]. AIAA 2003-1345, 2003.

- [3] 柳朝晖,郑楚光,王汉封.不同旋流数下湍流气粒两相流动特性的 PDPA 实验研究[J].化工学报,2001,52(6):490-494.
LIU Zhaohui, ZHENG Chuguang, WANG Hanfeng. Experimental study on turbulent dilute gas-particle flows of different swirling intensity[J]. Journal of Chemical and Engineering, 2001, 52(6): 490-494. (in Chinese)
- [4] 周力行,陈兴隆,张建.旋流数对湍流燃烧中 NO 生成影响的研究[J].工程热物理学报,2002,23(5):637-640.
ZHOU Lixing, CHEN Xinglong, ZHANG Jian. Studies on the effect of swirl on no formation in turbulent combustion [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23(5): 637-640. (in Chinese)
- [5] Reddy K S, Reddy D N. Experimental and numerical investigations of swirling flows in a reverse flow gas turbine combustor [R]. AIAA 2007-4219, 2007.
- [6] 党新宪,赵坚行,张欣,等.应用 PIV 技术测试双级旋流器燃烧室流场[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 the two-stage swirler combustor using PIV [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(7): 1470-1475. (in Chinese)
- [7] Fureby C, Gutmark E J. An experimental and computational study of a multi-swirl gas turbine combustor[J]. Proceeding of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 3107-3114.
- [8] Reddy A P, Chakravarthy S R. Swirler flow field characteristics in a sudden expansion combustor geometry using PIV[R]. AIAA 2005-217, 2005.
- [9] 徐榕,赵坚行,党新宪,等.数值与试验研究旋流杯燃烧室流场[J].工程热物理学报,2010,31(4):701-704.
XU Rong, ZHAO Jianxing, DANG Xinxian, et al. Numerical and experimental study of flow-fields in a swirl cup gas turbine combustor [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(4): 701-704. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] Gupta A K, Lilley D G, Syred N. Swirl flows [M]. Tunbridge Wells, England: Abacus Press, 1984.
- [12] Giridharan M C, Mongia H C, Jeng S M. Swirl cup modeling: Part III—Spray combustion in CFM-56 single cup flame tube[R]. AIAA 2003-0319, 2003.