

基于 PIV 技术对三级旋流杯燃烧室流场的测量

王成军, 江 平, 辛 欣, 陈保东, 陈科华
(沈阳航空航天大学 航空航天工程学部, 沈阳 110136)

摘 要: 参照单级旋流器设计方法, 设计 4 种三级旋流杯中不同叶片数和叶片安装角第三级旋流器, 采用 particle image velocity (PIV) 技术对三级旋流杯燃烧室流场进行研究. 研究表明: 随着第三级旋流器叶片安装角和叶片数的增加, 主燃区的轴向速度逐渐变小, 使得主燃孔射流作用增强; 在同样叶片数情况下, 增大第三级旋流器叶片安装角, 使旋流强度增强; 对于第三级旋流器不同安装角、第三级旋流器叶片数增加都使轴向速度变化趋于平缓, 使燃烧室内主流受主燃孔射流扰动影响较小, 流动更平缓.

关 键 词: 航空发动机; 燃烧室; 三级旋流杯; 粒子成像速度仪; 流场

中图分类号: V231.2⁺3

文献标志码: A

Measurement of triple-stage swirler cup combustor flow field based on PIV technology

WANG Cheng-jun, JIANG Ping, XIN Xin,
CHEN Bao-dong, CHEN Ke-hua

(Faculty of Aerospace Engineering,
Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: With reference to single-stage swirler design method, four kinds of third stage swirler of different blade numbers and installation angles in triple-stage swirler cup were designed. Triple-stage swirler cup combustor flow field was studied through the particle image velocity (PIV) technology. The experimental results show that with the increase of the third stage swirler blade number and installation angle, the axial velocity in main combustion zone decreases gradually, enhancing the effect of main combustion hole jet. Under the same blade number condition, the third stage swirler vortex intensity is boosted with the increase of the third stage swirl blade installation angle. For different third stage swirler blade installation angles, the flat trend of axial velocity increases with the increase of the third stage swirler blade number, making the effect of combustor flow disturbance decreases by main combustion hole jet and the mainstream flow more smoothly.

Key words: aero-engine; combustor; triple-stage swirler cup; particle image velocity; flow field

旋流器是促进航空发动机燃气混合、稳定火焰必不可少的燃烧室组件. 在航空发动机设计中, 需要减少燃烧室冒烟并增加其稳定工作范围, 旋流器级数也从单级发展到双级, 甚至达到三

级^[1-3]. 其中, 三级旋流杯是一种新型旋流器, 由于其具有较好的气动雾化性能, 可促进燃气混合, 增强火焰稳定性, 提高燃油雾化质量. Wang, Ateshkadi 等人^[4-7]以 GE 公司的 CFM56 旋流杯为研究

收稿日期: 2013-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(51476106)

作者简介: 王成军(1967—), 男, 辽宁沈阳人, 副教授, 博士, 主要从事航空发动机燃烧技术的研究.

对象,对影响其流场的各种结构及参数如套筒出口形式、文氏管、几何缩放比例、喷雾锥角等进行了一系列研究,还试验研究了不同三级旋流器参数和结构对燃烧室出口 CO 和 NO_x 排放的影响规律. Li 等人^[8]在冷态条件下用 PIV 技术测量了不同三级环形旋流器速度场,研究不同进口流量、旋流器几何结构、混合管长度对主燃区流场的影响规律. 袁怡祥、林宇震、刘伟等人^[9-12]比较深入地研究了旋流器旋向对燃烧室内部流场的影响,并用 phase Dopple particle analyzer(PDPA)对带有双级和三级旋流器的燃烧室头部喷雾场和速度场进行了测量,还对带有三级旋流器的单头部燃烧室性能进行试验研究. 吴振宇^[13]数值模拟研究了三级旋流器的各种参数对燃烧室性能的影响.

PIV 技术是近十几年发展起来用于流场测量的一种全新技术,它以非接触方式测量瞬态流场,测量精度高,对流体的流动几乎没有影响,可以对整个流场成像并详细地展现整个流场的速度矢量,在测量湍流场中得到广泛应用^[14].

通过查阅相关文献,对三级旋流杯设计工作中应当重点关注的若干问题进行分析之后,在参照单级旋流器的设计方法设计出几种三级旋流杯中不同参数的第三级旋流器的燃烧室,利用 PIV 技术对三级旋流杯燃烧室流动特性进行一定的探讨研究.

1 试验系统及试验件

1.1 试验系统组成

PIV 试验是在自主设计加工的小型风洞综合试验台上进行的. 该试验台主要由 PIV 系统、三级旋流杯燃烧室试验件、流量计、风机、粒子净化器等构件组成. 从风机引入的空气先进入扩压器,通过安装在扩压器上的流量计测得气流流量,然后进入燃烧室,再通过三级旋流杯流向 PIV 测量区域,最后从燃烧室出口流入粒子净化器,最终气体由粒子净化器经过净化处理后排出至大气环境,如图 1 所示.

1.2 PIV 系统组成

试验所用的二维 PIV 系统由美国 TSI 公司生产,它的最大测量区域为 500 mm×500 mm,测量精度为 0.2%. 其基本组成部件有:计算机及相关的软件、同步控制器、Nd:YAG 双脉冲激光器及激光导光臂、charge coupled device (CCD) 相机、光学组件等. 各组件间连接方式如图 2 所示.

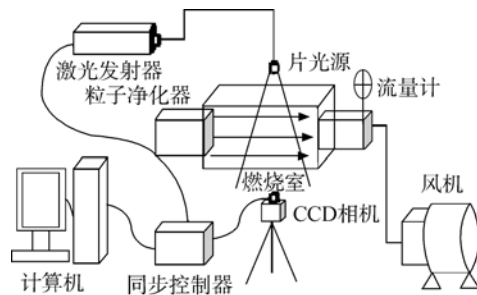


图 1 试验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment system



图 2 PIV 系统组成图

Fig. 2 Diagram of PIV system

本套 PIV 系统的激光由 Nd:YAG 双脉冲激光器发出,单个脉冲最高能量为 200 mJ,脉冲频率为 10 Hz,脉冲激光波长为 532 nm. 光学组件由焦距为 500 mm 的球面镜和焦距为 -25 mm 的柱面镜组成,通过激光照射可形成 2 mm 厚的片光. 同时配置了长为 1.8 m,7 关节的激光导光臂,能将片光高效、安全且灵活地传送到所需位置. CCD 相机最小跨帧时间为 200 ns,其分辨率为 2048 像素×2048 像素,最大帧速为 30 帧/s,带有防强光保护功能,保证在所有模式下都是 12 位灰度图像输出,并配有传递较高的 64 位数据采集板. 同步控制器时间分辨率为 1 ns,它负责精确地接收外部触发信号以协调各部件的工作时序. PIV 技术使用 Insight 3G 分析软件,其图像分析系统是建立于示踪粒子图像位移算法,集成了本征正交分解工具箱,具有立体标定优化技术,可以对激光发出的片光和标定靶盘因不重合度而带来的系统误差进行自动修正,具有连续宏处理功能,可以对速度场进行高精度时空分析.

1.3 燃烧室试验件

为便于进行 PIV 试验,整个燃烧室由透明的有机玻璃材料制成,省略了一些较小的外形结构,

如火焰筒壁气膜冷却孔,省略了燃油喷嘴,忽略了一些设计倒角,并设计成矩形试验件,试件宽度足够大,以避免两侧壁对旋流的影响,主要由扩压器、燃烧室机匣、火焰筒和三级旋流杯4部分组成,在火焰筒上下壁面均匀分布着主燃孔和掺混孔,加工好的燃烧室试验件实体如图3所示。

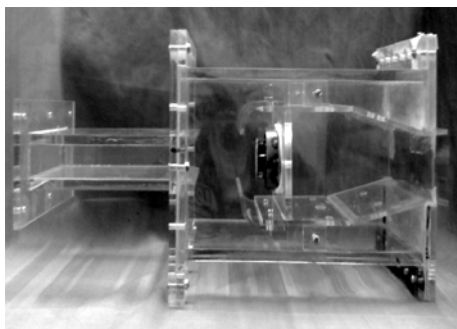


图3 燃烧室结构图

Fig. 3 Diagram of combustor structure

1.4 三级旋流杯试验件

所研究的三级旋流杯主要由第一、二、三级旋流器,文氏管,内外套筒等部件构成,结构如图4所示。

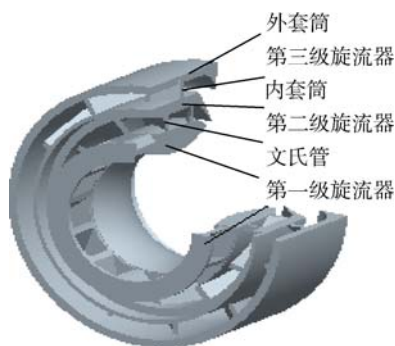


图4 三级旋流杯结构图

Fig. 4 Structure diagram of triple-stage swirler cup

采用第一级径向旋流器与第二、三级轴向旋流器相组合的结构设计方案,参照轴向、径向旋流器参数设计方法,通过旋流数、流阻系数计算得到叶片安装角和旋流器气体通道面积,进而得到各级旋流器内外径、叶片数和叶片宽度等参数^[15-18],根据设计的各级旋流器之间流量比0.16:0.36:0.48,计算得到各级旋流器的内外半径:第一级旋流器内、外半径分别为15,20 mm,第二级旋流器内、外半径分别为20,24 mm,第三级旋流器内、外半径分别为27,32 mm;第一、二级旋流器的叶片安装角/叶片数分别为42°/12片、48°/12片,而第三级旋流器则为34°/12片和38°/12片两种。

2 示踪粒子的布撒

2.1 示踪粒子布撒方式

示踪粒子在流场中的布撒技术在PIV技术应用中是极其重要的,也是进行PIV试验时的一个关键环节,它将改变示踪粒子在流场中的运动情况,对同一被测流场,若采取不同的示踪粒子布撒方式,将直接影响被测流场的真实性、准确性和可靠性。示踪粒子布撒有两种常用的方式:①在试验系统局部位置向被测流场均匀布撒示踪粒子,这种方式主要用在边界层流场测量和复杂流动中;②在全流场中均匀布撒示踪粒子或在局部流场中均匀布撒示踪粒子,这也是现今PIV试验中最普遍使用的。

出于对示踪粒子布撒的方便性和简易性,本次PIV试验示踪粒子布撒选择在全流场中均匀布撒,直接由风机进风向试验段全流场均匀布撒示踪粒子。这样布撒示踪粒子可增加其与空气的接触时间,从而增加示踪粒子加速时间,使其速度更能接近空气速度,并能与空气充分混合,进入试验区后的示踪粒子更均匀,跟随性也更好。

2.2 示踪粒子布撒浓度

在PIV试验中,除了流场中示踪粒子布撒均匀外,对示踪粒子布撒浓度也有严格要求。若流场中示踪粒子浓度太高,则通过CCD相机拍摄得不到单个示踪粒子图像,而是一个个小的示踪粒子群散斑图像,通过互相关计算后,测得流场中高浓度示踪粒子的速度矢量精度不高;若流场中示踪粒子浓度过低,则在查询区内没有足够多的示踪粒子数进行互相关计算。

通过数次PIV试验,对流场中示踪粒子布撒浓度积累了一些经验,若能在得到的流场图像中清楚地辨别出大量均匀分布的示踪粒子,则表明示踪粒子的浓度满足试验的需求,最终会得到高精度的测量结果。

2.3 示踪粒子选择

为了减小示踪粒子对PIV试验结果的影响,以满足示踪粒子跟随性和散光性的需要,选出适合的PIV试验示踪粒子是十分重要的。考虑到示踪粒子的经济性,在本次试验选取平均粒径为80 μm的铝粉、面粉、淀粉以及铝粉/面粉混合物4种示踪粒子作为研究对象,并进行了示踪粒子性能测试试验,其试验结果如图5所示。图中横坐标X为燃烧室轴向;纵坐标Y为燃烧室高度方向;V为速度。

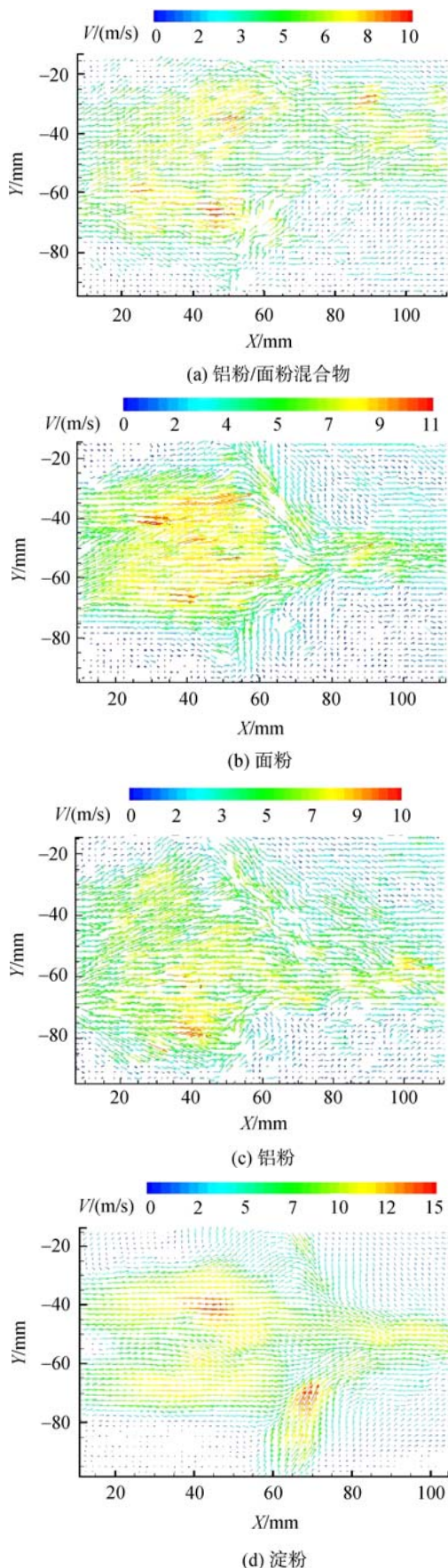


图5 不同示踪粒子下的燃烧室流场速度矢量图

Fig. 5 Diagram of combustor flow field velocity vector under different tracer particles

从图5中可以看出,从三级旋流杯出来两股速度较大的气流,基本上是关于中心对称的,而且主燃孔的射流也比较明显,使得气流径向有一定收缩.4种示踪粒子的跟随性好坏程度为淀粉>铝粉/面粉混合物>面粉>铝粉,这是因为铝粉粒子在相同粒径下其质量更大,使得示踪粒子加速度小,速度跟不上空气速度,导致后面示踪粒子数很少,下部射流不明显,也使得示踪粒子分布不均匀,光散射较大,接收信号噪声较大,有效数据较少;使用面粉时,由于其密度相对较小,加速度大,空气对其加速时间长,使其速度大,导致后面示踪粒子较多,使得射流作用不明显;使用铝粉/面粉混合物时,射流作用相对面粉时有所加强,但由于两种不同密度示踪粒子混合,使得上下流场速度分布不均匀,杂乱无章;使用淀粉时,上下流场分布比较均匀,射流作用也很明显,表明该示踪粒子具有很好的跟随性,所拍摄到的图像清晰度好,经数据处理得到的流场效果比较好.综合考虑示踪粒子的经济性、跟随性、散光性和布撒的简易性,选用淀粉作为该次PIV试验的示踪粒子.

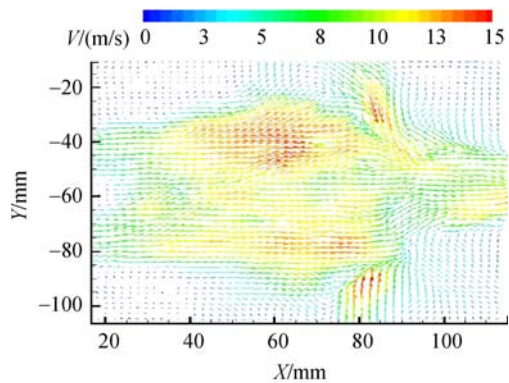
3 试验结果及分析

试验是在室温 17°C 、常压下进行的,通过燃烧室进口流量计测得空气速度为 12 m/s ,试验研究了4种不同三级旋流杯燃烧室的气动性能,4种三级旋流杯第三级旋流器的叶片安装角度/叶片数分别为 $34^{\circ}/12$ 片、 $34^{\circ}/15$ 片、 $38^{\circ}/12$ 片和 $38^{\circ}/15$ 片.

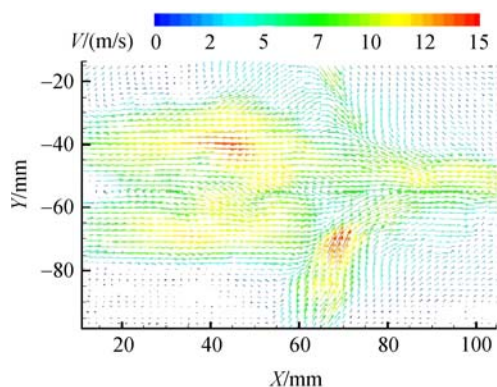
3.1 三级旋流杯出口与主燃孔区域速度分析

试验测得燃烧室内部三级旋流杯与主燃孔射流相互作用流场的速度矢量和流线,如图6、图7所示.

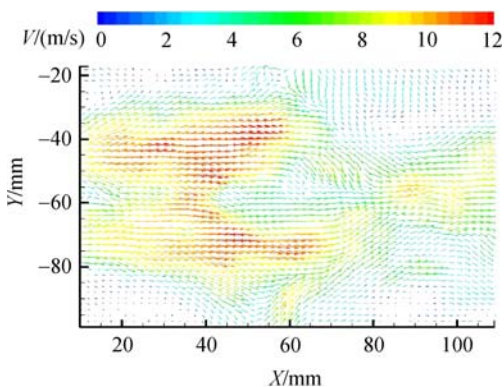
图6为不同三级旋流杯燃烧室流场速度矢量图,从中可以看出4种不同三级旋流杯燃烧室内整个速度场分布比较对称,燃烧室内部的最大轴向速度主要分布在三级旋流杯出口和主燃孔区域,由于主燃孔射流影响,使得三级旋流杯出口气流在碰上主燃孔的射流后速度方向发生改变,分流形成两路:一路气流碰上主燃孔射流,速度方向逆转并在火焰筒附近形成了旋涡,出现两个小的回流区;而另一路气流与主燃孔射流汇合后,气流向径向收缩,迎风面积变小,向燃烧室下游流去.从速度矢量图中也可以看出,随着第三级旋流器叶片安装角的增加,从三级旋流杯出口到主燃孔区域的速度矢量明显减少,而且最大速度矢量也



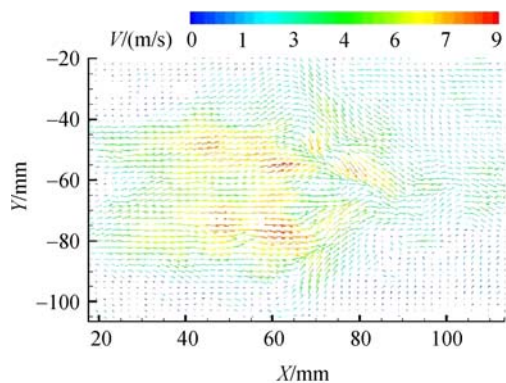
(a) 34°/12片



(b) 34°/15片



(c) 38°/12片

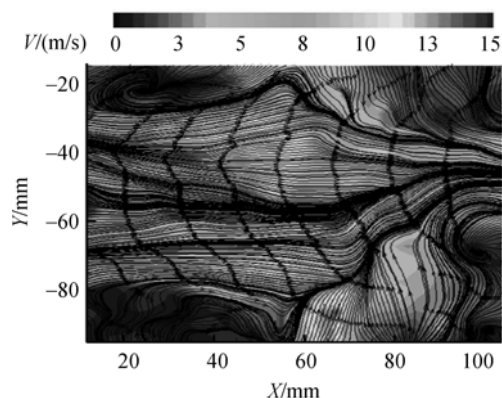


(d) 38°/15片

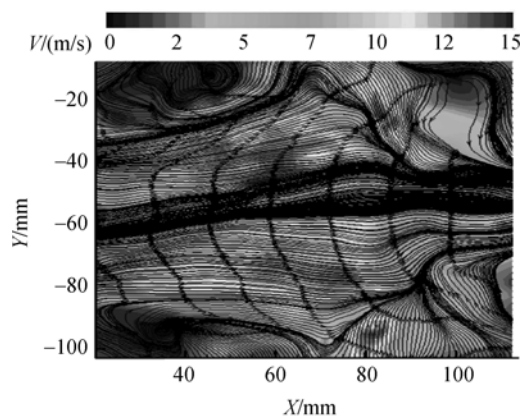
图6 不同三级旋流杯燃烧室流场速度矢量图
Fig. 6 Diagram of different triple-stage swirler cup combustor flow field velocity vector

有所减少,说明随着叶片安装角的增加,三级旋流杯对气流的旋转作用加剧,使得主燃区的轴向速度有所降低,主燃区的轴向速度值大小为 $34^\circ/12$ 片 $> 34^\circ/15$ 片 $> 38^\circ/12$ 片 $> 38^\circ/15$ 片。随着叶片数的增加,主燃孔射流作用越来越明显,使得三级旋流杯出口气流在主燃孔后径向收缩范围更大,以更小的迎风面积流出燃烧室。

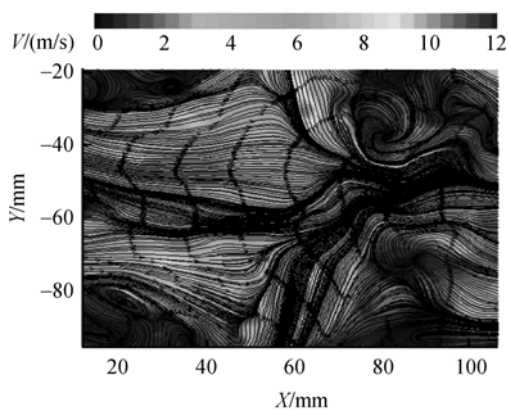
图7为不同三级旋流杯燃烧室流场速度流线图,从中可以看出,4种三级旋流杯燃烧室内流动形态相似,燃烧室火焰筒头部的角涡区较小,整体



(a) 34°/12片



(b) 34°/15片



(c) 38°/12片

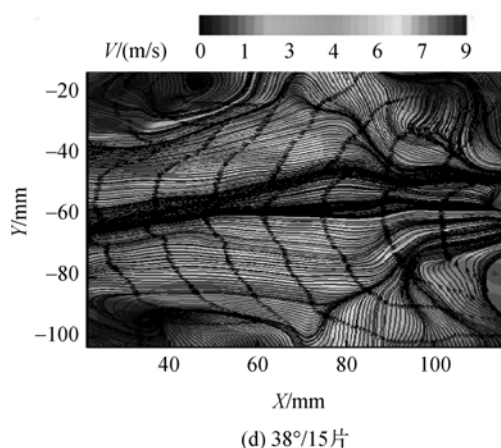


图7 不同三级旋流杯燃烧室流场速度流线图

Fig. 7 Diagram of different triple-stage swirler cup combustor flow field velocity streamlines

流场内的速度分布也比较对称,经过主燃孔的射流作用,主流径向都有收缩.其中38°/15片主燃孔射流作用最强,射流深度最深,使得主流在径向收缩趋势最大.而从34°/12片和34°/15片以及从38°/12片和38°/15片流线图看出,随着第三级旋流器叶片安装角和叶片数增加,三级旋流杯出口的轴向速度逐渐降低,主要表现在速度矢量减少,主燃孔射流作用更强,这是由于随着叶片安装角的增加,旋流器旋流数增加所引起的.在主燃孔区域后,随着燃烧室主流与主燃孔射流逐渐相互掺混,其射流作用对主流的影响也逐渐减弱;另一方面,由于相互掺混作用不同,其后所形成涡强度也不同.

3.2 燃烧室轴向速度分析

从图8燃烧室轴线速度分布图中可以看出,在三级旋流杯出口截面位置,各轴向速度曲线基本成对称状,变化趋势相当,但轴向速度梯度较大,速度曲线出现了明显的拐点,说明整个三级旋流杯出口截面上轴向速度很不平均,差别较大,这是因为只有三级旋流杯套筒和文氏管内有空气流过,靠近火焰筒壁面轴向速度值为负,说明气体逆向流动,这是因为三级旋流杯出口气流与主燃孔射流相互影响,使得有回流产生,存在小的回流区.随着第三级旋流器叶片安装角的增加,三级旋流杯出口最大轴向速度有增加的趋势,其中38°/12片的最大轴向速度约为11 m/s,而38°/15片的最大轴向速度约为4 m/s,这是由于在相同叶片安装角情况下,随着第三级旋流器叶片数的增加,气流在三级旋流杯内旋转加剧,同时气体的摩擦损失也会增加,从而导致轴向速度减小.对于12

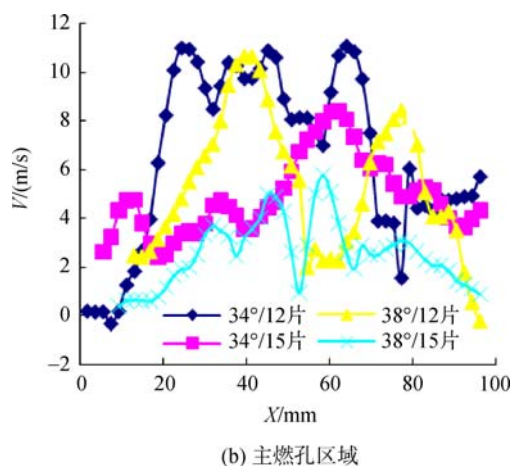
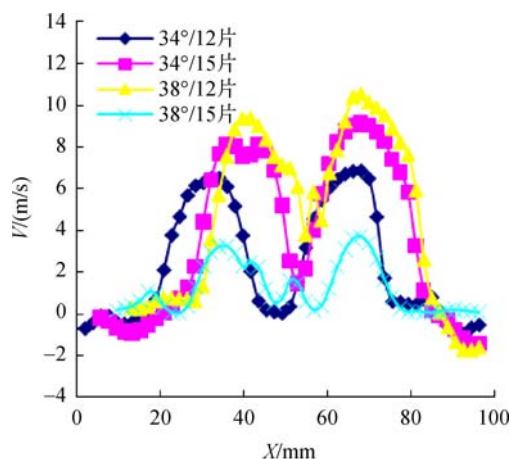


图8 燃烧室轴向速度分布

Fig. 8 Distribution of combustor axial velocity

片片,当叶片安装角增大,出口最大轴向速度增大;对于15片叶片,叶片安装角增大,出口最大轴向速度减小,这说明随着叶片安装角增大,叶片多了以后,造成切向速度增加,增加了流动阻力.

在主燃孔区域附近,可以看出叶片数增加时,34°和38°三级旋流杯燃烧室主燃孔区域轴向速度都有所减小,34°/12片最大轴向速度约为11 m/s,34°/15片最大轴向速度约为8 m/s;38°/12片最大轴向速度约为10.5 m/s,38°/15片最大轴向速度约为6 m/s.15片叶片的第三级旋流器轴向速度变化呈现平缓的趋势,波动幅度较小,而12片叶片的第三级旋流器轴向速度在此区域波动幅度较明显,速度梯度较大,说明15片叶片三级旋流杯燃烧室内主流受主燃孔射流扰动影响较小,流动更平缓.但是轴向速度分布曲线相对中心不对称,而且各曲线的形状和趋势差别较大,这主要是由于试验是在常温和常压下进行的,使得

气流经过三级旋流器后到达主燃孔处轴向速度衰减较快;另一方面由于主燃孔射流混合作用及三级旋流器加工精度不够造成的。

3.3 燃烧室径向速度分析

从图9燃烧室径向速度分布图中可以看出,各截面径向速度曲线的变化趋势基本相同,一定程度上关于燃烧室中心对称。三级旋流杯出口截面处,径向速度分布比较均匀且径向速度梯度相对较小,最大径向速度约为2 m/s,这是因为在三级旋流杯出口,气流主要进行轴向运动,导致径向速度较小。在主燃孔区域,燃烧室径向速度稍大,最大径向速度约为15 m/s,随着叶片安装角和叶片数的增加,径向速度减小,局部径向速度梯度很大,原因是由于此位置处于射流的核心区域。

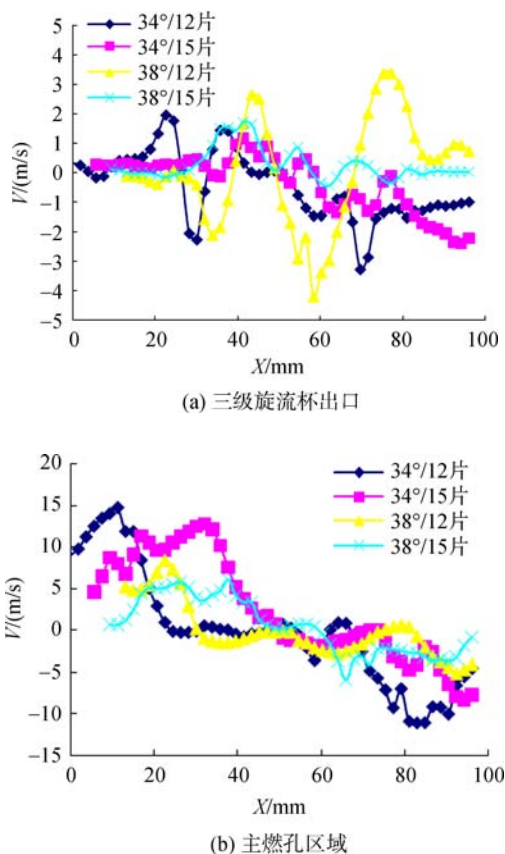


图9 燃烧室径向速度分布

Fig. 9 Distribution of combustor radial velocity

4 结 论

采用PIV技术对不同三级旋流杯燃烧室的流动特性进行了研究,得到的主要结论如下:

1) 随着第三级旋流器叶片安装角和叶片数的增加,主燃区的轴向速度变小,但主燃孔射流作用增强,射流深度增加,使得主流在径向收缩趋势

最大。

2) 在同样叶片数情况下,增大第三级旋流器叶片安装角,增强了旋流器旋流作用,造成旋流数增加。从组织燃烧和缩短火焰长度角度,增大叶片安装角更加合理。

3) 对于第三级旋流器不同的叶片安装角,第三级旋流器叶片数的增加使轴向速度变化趋于平缓,说明了34°/15片和38°/15片燃烧室内主流受主燃孔射流扰动影响较小,流动更加平缓。

4) 由于试验是在常温和常压条件下进行的,试验中选择的示踪粒子粒径还比较大,示踪粒子存在着跟随性误差,造成试验数据有一定偏差;如果在高压情况下,将改善示踪粒子跟随性,提高测量精度。

参考文献:

- [1] Bahr D W. Technology for the design of high temperature rise combustor[R]. AIAA 85-1292, 1985.
- [2] 胡正义. 航空发动机设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.
- [3] Kastl J A, Herberling P V, Matulatis J M. Low NO_x combustor development[R]. NASA/CR-2005-213326, 2005.
- [4] Wang H Y, McDonell V G, Samuelsen G 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.
- [5] Ateshkadi A, McDonell V G, Samuelsen G S. Effect of mixer geometry on fuel spray distribution, emission and stability[R]. AIAA 98-0247, 1998.
- [6] Wang H Y, McDonell V G, Sowa W A. 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.
- [7] Wang H Y, McDonell V G, Samuelsen G S. The influence of spray angle on the continuous and discrete phase flow field downstream in an engine combustor swirl cup[R]. AIAA 92-3231, 1992.
- [8] Li G, Gutmark E J. Combustion characteristics of a multi-swirl spray combustor[R]. AIAA-2003-0489, 2003.
- [9] 袁怡祥, 林宇震, 刘高恩. 三旋流器头部燃烧室拓宽燃烧稳定工作范围的研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(1): 142-147.
- [10] YUAN Yixiang, LIN Yuzhen, LIU Gaoen. Combustor dome design with three swirlers for widening the operation stability range[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(1): 142-147. (in Chinese)
- [10] 林宇震, 刘高恩, 王华芳. 反向与同向双旋流器流场的试验研究[J]. 航空动力学报, 1995, 10(4): 108-110.
- LIN Yuzhen, LIU Gaoen, WANG Huafang. Experimental

- study of the opposite and same dual-stage swirler flow distribution[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1995, 10(4): 108-110. (in Chinese)
- [11] 刘伟,林宇震,刘高恩. 低压条件下复合式多级旋流杯燃烧室燃烧效率研究[J]. *航空动力学报*, 2004, 19(5): 650-655.
LIU Wei, LIN Yuzhen, LIU Gaoen. Research of combustion efficiency of combustors using hybrid airblast atomizer under low pressure[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2004, 19(5): 650-655. (in Chinese)
- [12] 袁怡祥,林宇震,刘高恩. 旋流杯燃烧室头部流与喷雾对贫油熄火的影响[J]. *航空动力学报*, 2004, 19(3): 332-337.
YUAN Yixiang, LIN Yuzhen, LIU Gaoen. The effect of flow field and fuel spray of combustor with swirl cup on lean blowout limit at idle condition[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2004, 19(3): 332-337. (in Chinese)
- [13] 吴振宇. 带有三级旋流器燃烧室的数值研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2010.
WU Zhenyu. Numerical study of combustion with triple swirlers[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2010. (in Chinese)
- [14] 范洁川. 近代流动显示技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [15] Lefebvre A H. Gas turbine combustion[M]. London: Taylor & Francis Press, 1999.
- [16] 党新宪,赵坚行,吉洪湖. 试验研究双旋流头部燃烧室几何参数对燃烧性能的研究[J]. *航空动力学报*, 2007, 22(10): 1640-1645.
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): 1640-1645. (in Chinese)
- [17] 焦树建. 径向旋流器的设计方法及其燃烧特[J]. *燃气轮机技术*, 1994, 7(4): 33-42.
JIAO Shujian. Design method and combustion character of radial swirler[J]. *Gas Turbine Technology*, 1994, 7(4): 33-42. (in Chinese)
- [18] Grinstein F F, Young T R, Li G. Computational and experimental analysis of the flow dynamics in a multi-swirler combustor[R]. AIAA-2002-1006, 2002.