

文章编号: 1000-8055(2008)08-1370-05

双旋流器单头部模型燃烧室冷态流场试验

韩启祥, 许铁军, 黄 健

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 利用 PIV (Particle image velocimetry) 技术对双轴向反旋流器、单头部、矩形模型燃烧室内的冷态流场进行了试验研究. 分析了燃烧室的纵向截面、横向截面上的流场结构以及旋流器参数对回流区尺寸的影响. 研究表明: 双旋流燃烧室的流场为不规则的结构, 中心轴上下两个涡不对称, 各主燃孔气流穿透深度也不相同, 流场中存在流向涡; 减小一级旋流器流通面积、旋流数, 或增大二级旋流器的旋流数, 可增大回流区的尺寸, 而增大二级旋流器流通面积, 回流区的尺寸会减小.

关 键 词: 旋流器; 燃烧室; 流场; 回流区; 激光测量

中图分类号: V231. 2

文献标识码: A

Experimental study of flow field of a model combustor with two swirlers

HAN Qi-xiang, XU Tie-jun, HUANG Jian

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The flow field of a model combustor with double axial swirlers was studied experimentally using particle image velocimetry (PIV) technology in this paper. The flow field structure of side and end view velocity profile of the combustor and the effect of swirler parameters on recirculation zone were analyzed. It is concluded that the flow field structure in the combustor is irregular with two non-axisymmetrical eddies on the central axis, the jets from the primary holes pass at different depth, and streamwise vortex exists in the flow field. The recirculation zone could be expanded with the reduction of cross area and swirl number of primary swirler, or the increase of swirl number of secondary swirler, meanwhile, the recirculation zone could be diminished with the increase of cross area of secondary swirler.

Key words: swirler; combustor; flow field; recirculation zone; laser diagnostics

旋流器是航空发动机燃烧室内组织燃烧的一个重要部件, 为了适应现代先进航空发动机要求而设计的高温升、大热负荷燃烧室, 一般采用双级或三级旋流器结构. 对于双旋流燃烧室而言, 一级旋流器主要起着助燃油雾化的作用, 二级旋流器的主要作用则是在燃烧室头部形成回流区, 以稳定火焰. 旋流器与文氏管、套筒等构成了旋流杯 (Swirl-cup) 结构, 有关旋流杯后的流场特性国外

已经做了不少的研究^[1-4], 但这些研究通常是在自由射流或者筒形通道内进行的, 没有模拟燃烧室的主燃孔、掺混孔的进气流, 也没有燃烧室头部的冷却气流, 这与燃烧室内的真实流动状况有很大的差别, 研究结果应用于燃烧室的设计有一定的局限性. 国内文献[5]采用 PDA 技术研究了主燃孔对旋流杯下游流场的影响, 与 PIV 技术不同, PDA 采用逐点测量, 缺乏整个流场结构的整体印象.

收稿日期: 2007-07-24; 修订日期: 2007-12-25

作者简介: 韩启祥(1968 -), 男, 江苏兴化人, 副教授, 博士, 主要从事航空发动机燃烧室及脉冲爆震发动机等方面的研究.

本文根据环形燃烧室结构特征设计了单头部的矩形燃烧室模型,比较真实地模拟了燃烧室的冷却以及主燃孔与掺混进气,并充分考虑了相邻头部可能带来的影响.在此模型燃烧室上,通过 PIV 系统研究了燃烧室内的流场以及旋流器参数对流场的影响规律.

1 试验模型与试验方法

试验系统如图 1 所示.空气流由一台高压头风机提供,经稳压段、前测量段后流入模型燃烧室.在前测量段上安装有总压耙、静压孔及水银温度计,模型燃烧室的进气参数为:进口温度 300 K,进口总压 0.106 5 MPa,进口气流的马赫数约 0.29.

采用一台二维粒子图像测速仪 (PIV) 测量燃烧室头部流场,PIV 的片光源激光器将一束平面光从燃烧室出口射入,然后通过一台高速像机从燃烧室侧面记录粒子图像,试验中对每个工况连续记录 20 张图像,并取其中相近似的 5 张图像进行算术平均,最后获得一个平均的稳态流场.试验采用的粒子通过粒子发生器从风机的进口供入.

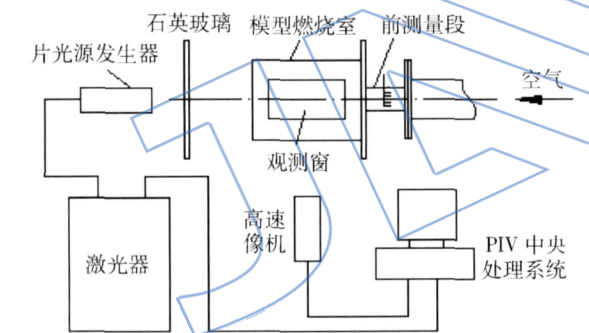


图 1 试验系统
Fig. 1 Schematic of test facility

试验采用的模型燃烧室为矩形结构,如图 2 所示,其中一、二级旋流器均为轴向旋流器,且旋转方向相反.为了确定旋流器结构参数对流场的影响,试验中采用 5 种一级旋流器及 5 种二级旋流器,并进行了 9 种组合,如表 1 所示,其中编号 1 为基准件组合,表中 S_1, S_2, A_1, A_2 分别为一、二级旋流器的旋流数与出口面积.

模型燃烧室的主燃孔位于中心纵向截面上,火焰筒上下壁面上各有一个,孔中心位于同一横向截面上.考虑到实际燃烧室中相邻的主燃孔进气对流场结构的影响,在主燃孔两侧各开了一个流通面积为主燃孔一半的小孔,如图 2 所示.掺混孔的结构与主燃孔相似.

试验分别测量了燃烧室中心纵向截面及主燃孔位置上的横向截面的流场,测量位置及测量区域如图 3,4 所示.测量横向截面流场时,片光源从燃烧室侧面的主燃孔中心截面射入,高速摄影机在燃烧室出口进行拍摄.

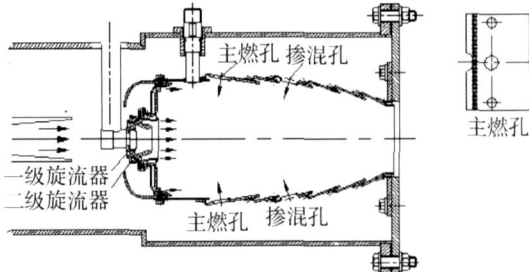


图 2 模型燃烧室
Fig. 2 Model combustor

表 1 旋流器参数变化表
Table 1 Parameters of swirler

状态号	S/S_1	A/A_1	S/S_2	A/A_2
1	1	1	1	1
2	1	1.2	1	1
3	1	0.8	1	1
4	0.783	1	1	1
5	1.237	1	1	1
6	1	1	1	1.2
7	1	1	1	0.8
8	1	1	0.8	1
9	1	1	1.22	1

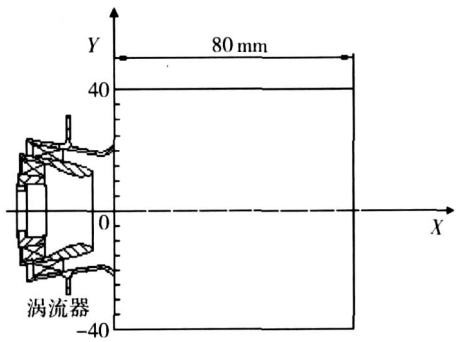


图 3 纵向测量截面
Fig. 3 Side-view measure section

2 试验结果与分析

图 5 为模型燃烧室中心纵向截面速度分布.如图所示,气流的旋转运动,在旋流器中心轴线的

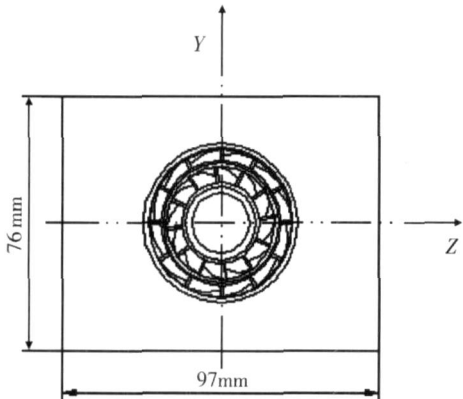


图 4 横向测量截面

Fig. 4 End-view measure section

上下各形成一个涡,另外由于射流通道的突扩,在燃烧室的下角存在一个小涡,同理燃烧室的上角也应存在一个涡,但因为测量区域的制约而未在图中出现.由气流旋转形成的两个涡是回流区的重要组成,也是组织燃烧的核心.由图可知两个涡的大小明显不同,其中下面的涡较大,上面的涡较小,另外两个涡的位置也不对称.图 6 为该截面上的回流区结构图,图中给出了两个涡的涡心位置.

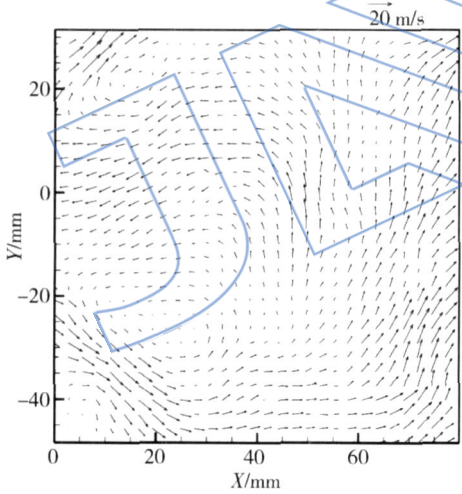


图 5 中心纵向截面速度分布(状态 1)

Fig. 5 Velocity field in X-Y plane (No. 1)

由图 5、图 6 可知,模型燃烧室的回流区是不规则的结构,这与理论上回流区是一个规则的椭圆形结构明显不相同.造成这种不规则结构的原因可能是多方面的:①头部的冷却气流的影响在燃烧室上下壁面附近各有一个头部冷却气流出口,如果冷却气流上下不对称,会造成燃烧室上下两个角附近的涡不对称,进而影响到回流区的不对称;②受到主燃孔气流的影响,从主燃孔出来的气流一部分将进入回流区,这部分气流对回流区结构产生很大的影响,如果上下主燃孔气流的入

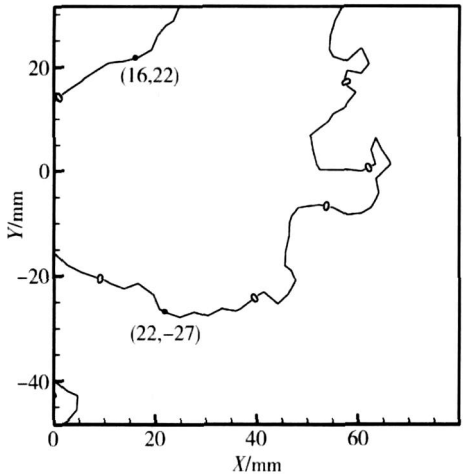


图 6 中心纵向截面回流区结构(状态 1)

Fig. 6 Recirculation zone in X-Y plane (No. 1)

射角、流量、速度等存在区别,将会导致回流区不规则;③旋流杯的各部件在结构或安装上的不对称,也会造成回流区的不规则;④从流体力学理论来看,完全对称的涡稳定性差,因此回流区的不规则是其自身稳定的需要.

图 7 为主燃孔横截面速度分布图.尽管模型燃烧室内的气流流动是一种典型的三维结构,但依然可以从主燃孔横截面速度分布图确定主燃孔气流的一些流动规律.由图 7 可以看出,4 个主燃孔进气流动规律是完全不同的,图中右下角的主燃孔气流的穿透深度明显高于其它 3 个主燃孔,从主燃孔出来的气流存在整体向右流动的趋势.图 8 给出了 4 个主燃孔出口气流的流线图,图中更清晰表明了 4 个主燃孔气流的流动规律,另外在图 8 中还显示了流向涡的存在.

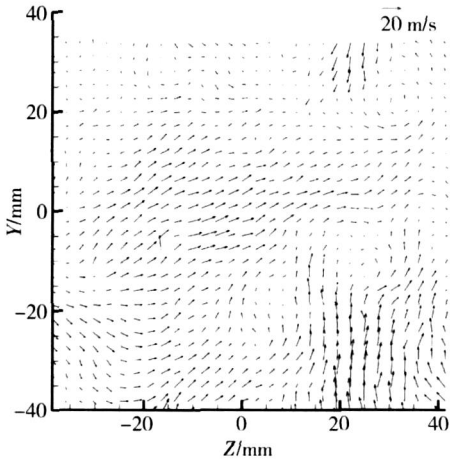


图 7 主燃孔横截面速度分布(状态 1)

Fig. 7 Velocity field located at primary holes section (No. 1)

在主燃孔横截面上显示的主燃孔进气规律的

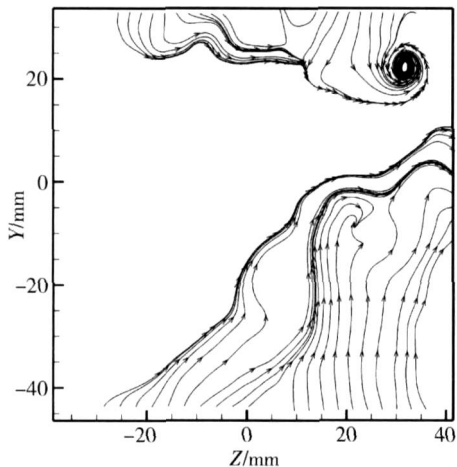


图 8 主燃孔横截面流线图(状态 1)

Fig. 8 Streamline profile located at primary holes section (No. 1)

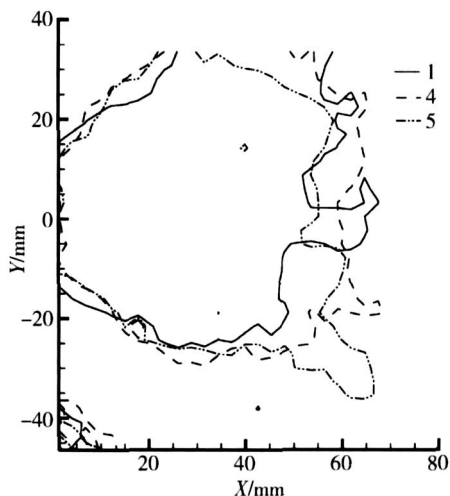


图 10 一级旋流器旋流数对回流区尺寸的影响

Fig. 10 Effect of primary swirler number on recirculation zone

不同,以及流向涡的存在,这可能与回流区的不规则有关.由于回流区的不规则,造成主燃孔出口区域压力场的不规则,从而影响了各个主燃孔的进气规律.

回流区的不规则、主燃孔进气规律的不同以及流向涡的存在,这些均说明了双旋流燃烧室流场的复杂性,同时从组织燃烧的角度看,这些因素有利于燃油与空气、燃气与新鲜气流的掺混,因此对燃烧室的组织燃烧以及燃烧的稳定性和有利.

图 9 为一级旋流器出口面积变化时回流区尺寸的变化情况.图中状态 1 为基准件,状态 2 在状态 1 的基础上一级旋流器出口面积增大了 20 %,状态 3 在状态 1 的基础上一级旋流器出口面积减小了 20 %.图 10 为一级旋流器旋流数变化时回流区尺寸的变化情况.在状态 1 的基础上,状态 4 一级旋流器的旋流数减小了 22 %,状态 5 增大了 24 %.

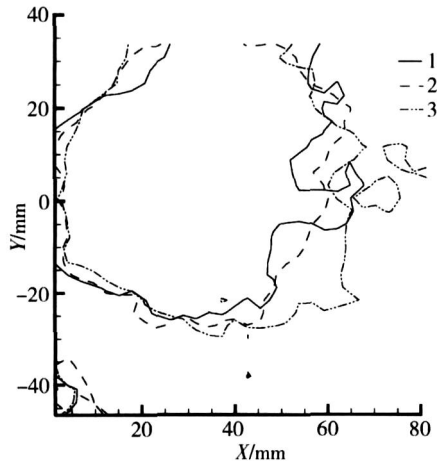


图 9 一级旋流器出口面积对回流区尺寸的影响

Fig. 9 Effect of primary swirler's outer area on recirculation zone

由图 9、图 10 可知,在基准件的基础上,当一级旋流器的出口面积减小或旋流数减小时,回流区有增大的趋势,而一级旋流器的出口面积增大或旋流数增大时,回流区尺寸的变化不明显.尽管一级旋流在双旋流燃烧室内的主要作用是助燃油雾化,但一级旋流的流动特性发生变化时对二级旋流本身或流动环境带来了一定的影响,从而影响了回流区的尺寸.在模型燃烧室中,双旋流采用反向旋转流动模式,一级旋流对二级旋流的旋转角动量起削弱的作用,因此当一级旋流器旋流数减小时,二级旋流的旋转角动量将得到加强,回流区有增大的趋势,而一级旋流器的出口面积减小时,一级旋流的流量将减小,对二级旋流的旋转角动量削弱作用减小,这也有利于回流区的增长.反之当一级旋流器的出口面积或旋流数增大时,回流区应有减小的趋势,但事实上这种变化并不明显,这说明一级旋流器的结构参数对回流区尺寸的影响是非线性的.造成这种现象的原因是因为在燃烧室内影响二级旋流的还有头部冷却气流、主燃孔射流等,当一级旋流参数发生变化时,这些影响因素也可能发生变化,从而影响了回流区的尺寸.

图 11 为二级旋流器出口面积变化时回流区尺寸的变化情况.图中状态 6 在状态 1 的基础上一级旋流器出口面积增大 20 %,状态 7 减小 20 %.如图所示,总体来看,二级旋流器出口面积变化对回流区的影响不大,当二级旋流器出口面积增大时,回流区尺寸有减小的趋势.由于二级旋流器出口面积增大是通过减小旋流器的内径来实现的,

使得一级、二级旋流靠得更近,增强了一级旋流对二级旋流的影响,从而使回流区的尺寸减小。

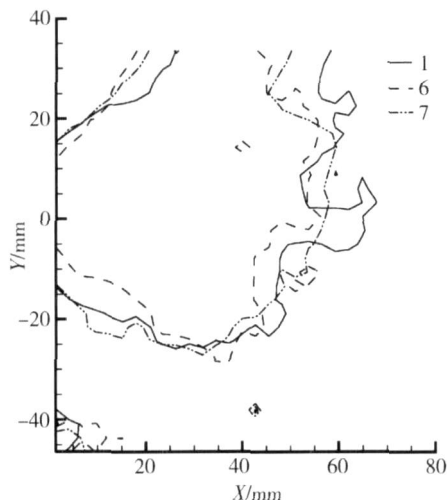


图 11 二级旋流器出口面积对回流区尺度的影响

Fig. 11 Effect of secondary swirler outer area on recirculation zone

图 12 为二级旋流器旋流数变化时回流区尺寸的变化情况。图中状态 8 在状态 1 的基础上二级旋流器的旋流数减小 20%, 状态 9 增大了 22%。如图所示, 当二级旋流器旋流数增大时, 回流区尺寸有增大的趋势, 但受主燃孔射流的影响, 回流区的增大区域被挤压在中心轴线附近。当二级旋流的旋流数减小时, 回流区有减小的趋势, 且

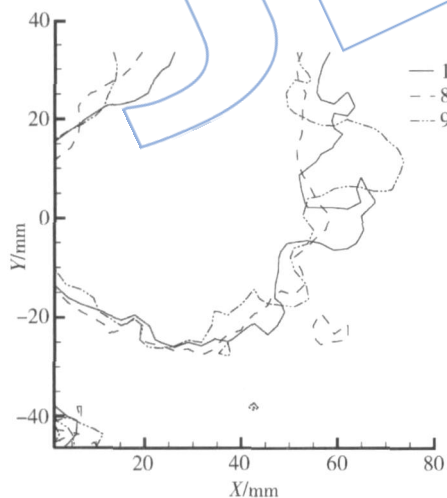


图 12 二级旋流器旋流数对回流区尺度的影响

Fig. 12 Effect of secondary swirler number on recirculation zone

在轴线方向这种变化趋势比较明显。由此可见, 当二级旋流器的旋流数增大到一定值后, 回流区的增长受到主燃孔进气的影响, 回流区增长的区域将被限制在中心轴线附近, 而减小二级旋流器的旋流数, 回流区的整体尺寸均有可能减小。

3 结 论

通过双旋流模型燃烧室的流场试验及结果分析, 可以得出以下结论:

1) 双旋流燃烧室流场是复杂的三维结构, 在纵向截面上, 中心轴线上下存在一对不对称的涡, 回流区是不规则结构; 在横向截面上, 存在流向涡。

2) 减小一级旋流器流通面积或减小一级旋流器旋流数, 回流区尺寸有增大的趋势, 而增大一级旋流器流通面积或增大一级旋流器旋流数, 对回流区尺寸的影响较小。

3) 增大二级旋流器流通面积, 回流区尺寸有减小的趋势; 减小旋流器流通面积对回流区尺寸的影响较小。

4) 增大二级旋流器旋流数, 回流区尺寸有增大的趋势, 这种趋势会受主燃孔射流的制约。

参考文献:

- [1] Woodmansee M A. Experimental flow field characterization of a combustor swirl cup[R]. AIAA 2002-2864.
- [2] Brossard C. Effect of swirl injector design and other important parameters on gas turbine combustion[R]. AIAA 2000-3122.
- [3] Grinstein F F, Young T R. Computational and experimental analysis of the flow dynamics in a multi-swirler combustor[R]. AIAA 2002-1006.
- [4] LI Gouqiang, Angie S, Lambolez O. Experimental study of velocity flow field for a multiple swirl spray combustor[R]. AIAA 2002-0618.
- [5] 郎洪俭, 郭志辉, 黄勇. 主燃孔对旋流杯下游流场的影响[J]. 推进技术, 2006, 27(2): 110-113.
LANG Hongjian, GUO Zhihui, HUANG Yong. Effect of primary holes on the velocity profiles downstream of a swirl cup[J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(2): 110-113. (in Chinese)