

文章编号: 1000-8055(2009)10-2272-05

驻涡燃烧室凹腔供油位置对流场影响的 PIV 实验

刘河霞, 刘玉英, 李瑞明, 杨茂林
(北京航空航天大学 能源与动力学院, 北京 100191)

摘 要: 采用 PIV (particle image velocimetry) 技术, 对凹腔供油位置不同时凹腔内的冷态流场进行对比研究. 通过分析不同来流速度对腔内涡的形成及其稳定性的影响, 从而研究不同供油位置对涡稳定的影响. 实验表明, 供油位置在凹腔前体, 油气掺混孔处的射流对涡有破坏, 供油位置在凹腔后体, 油气掺混孔处射流对涡没有破坏作用, 在不考虑供油方式等因素的情况下, 凹腔后体供油优于凹腔前体供油. 研究结论可为该驻涡燃烧室进一步的热态燃烧性能实验研究提供依据.

关 键 词: 供油位置; 速度场; 涡; 粒子成像测速仪

中图分类号: V231

文献标识码: A

Experimental study on the influence of fuel supply position of concave cavity on the flow field in trapped vortex combustor by PIV

LIU He-xia, LIU Yu-ying, LI Rui-ming, YANG Mao-lin

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The flow field of cavity with fuel supply injection located at the forebody and afterbody in trapped vortex combustor (TVC) was studied using particle image velocimetry (PIV) testing technology. In order to study the influence of fuel supply position on the formation of vortex and vortex stability, different incoming flow velocities and fuel supply locations were analyzed. The results show that, when the fuel supply position is located at the forebody of cavity, the jet flow of fuel supply has certain damage to vortex, and when the fuel supply injection is located at the afterbody of cavity, the jet flow of fuel supply has no damage to vortex. These results provide the fundamental proof for the further studies on the combustion properties of this TVC test rig.

Key words: fuel supply position; velocity field; vortex; particle image velocimetry

驻涡燃烧室^[1]是一种结构简单、紧凑的燃烧室, 其采用了一种与传统燃烧室不同的燃烧组织方式. 燃烧室分为驻涡区和主燃区两个部分, 其中驻涡区主要用来稳定火焰, 主燃区主要用来提供动力. 驻涡区采用凹腔建立稳定的回流区. 国内外的研究表明驻涡燃烧室具有以下优点^[1-4]: ①吹

熄、高空再点火边界比目前所使用的技术(传统的旋流器稳定燃烧室)宽 50%; ②NO_x 排放低于 1996 年 ICAO(国际民航组织)标准 40%~60%; ③燃烧效率不小于 99% 的可控制范围比传统燃烧室宽 40%. 美国驻涡燃烧室到目前为止已经经过了四代的发展.

收稿日期: 2008 10 11; 修订日期: 2009 01-05

基金项目: 航空科学基金(2006ZB51021)

作者简介: 刘河霞(1984-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士生, 主要从事驻涡燃烧室性能研究.

驻涡燃烧室凹腔供油位置一直是驻涡燃烧室发展中面临的许多关键技术问题之一. 美国第一、第二代驻涡燃烧室都是采用凹腔后体供油形成单涡来稳定火焰的, 第三代驻涡燃烧室针对液体燃料的喷射位置有三种设计方案(双涡、单涡、带冷却单涡), 如图 1 所示^[1]. 美国第四代驻涡燃烧室采用第三代的双涡设计方案. 我国近年来也开展了一些有关驻涡燃烧室的跟踪研究, 并得到了有关凹腔内流场以及燃烧性能等方面的初步结论^[2,4,5]. 但是, 以往对凹腔供油、供气进行的一些研究, 多是由单独系统人为调控供给的. 在实际应用时, 供油位置要考虑整个燃烧室的结构及体积等, 并且如果没有专门的进气调控系统, 则凹腔的进气是由凹腔进气结构、二股通道流动以及主流流动和卷吸决定的. 凹腔流场结构及流量分配与供油、进气位置, 二股通道流动及凹腔结构是密不可分的. 因此, 本文根据实际应用的需要, 借鉴带冷却单涡的设计方案, 设计了一套二维矩形驻涡燃烧室模型, 分别采用凹腔前体和凹腔后体供油, 利用 PIV (particle image velocimetry) 技术测试所设计的供油位置对凹腔内流场的影响. 通过本文的研究为后续相关驻涡燃烧性能的研究与改进提供依据.

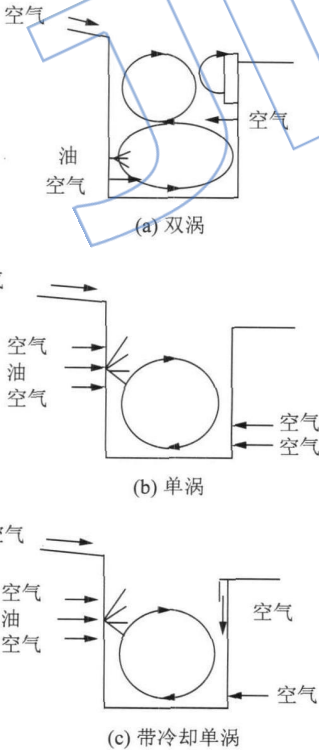


图 1 液态燃料与空气喷射位置的设计方案

Fig. 1 Liquid fuel and air injection location schemes

1 测量原理及实验模型

1.1 测量原理

本实验采用美国 TSI 公司的 PIV 进行测量. 利用两台 Nd: YAG(掺钕钇铝石榴石) 激光器作为光源, 激光器的工作频率为 10 Hz, 可见光波长为 532 nm, 每个脉冲能量为 200 mJ, 脉冲宽度为 9 ns. 激光束通过柱面镜和球面镜形成片光源. 采用互/自相关 CCD(电荷耦合器件) 作为图像记录系统, 分辨率为 1280 像素 × 1024 像素, 采集速度 30 帧/s, 每两帧图像之间的最小时间间隔约为 20 s. 同步器是 PIV 系统的时间和脉冲控制部分, 能设置激光的工作方式(双脉冲式)、CCD 的工作方式、脉冲的延迟时间和双脉冲的时间间隔等. 分析软件采用 INSIGHT 6. 1, 该软件用于分析视频或照相图像以获得二维速度场, 可以实时显示获得的图像数据, 在线显示速度矢量场, 并对获取的数据进行分析. 测量设备及原理图如图 2 所示.

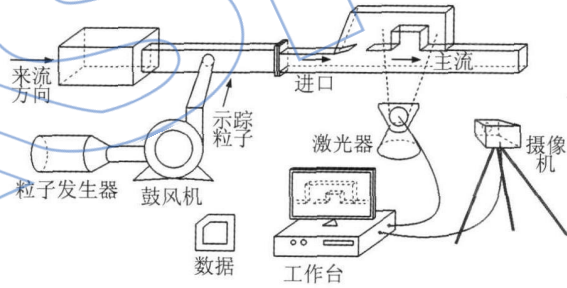


图 2 实验设备示意图

Fig. 2 Schematic of experimental equipment

1.2 实验模型

实验采用二维矩形驻涡燃烧室, 由于对称性, 实验件仅为驻涡燃烧室的一半, 其在 XOY 平面上的剖面图如图 3 所示. 本模型是采用有机玻璃加工制成的, 由于模型的部分边角有反光作用, 所以 PIV 测量装置不能测量到凹腔内靠近凹腔内壁部分的流场状态, 所以图中虚线区域为实验的测量区域, 模型的坐标设置如图 3 所示. 本模型的基本结构是根据美国第二代到第四代以及低污染驻涡燃烧室的吹气结构以及气量分配而设计的, 凹腔的供油位置是根据文献[6]的供油方式设计的. 模型总体长为 361 mm, 来流入口高 129 mm, 主流入口高 50 mm, 主流出口高 55 mm, 凹腔前体高 40 mm, 凹腔长 60 mm, 凹腔后体高 32 mm, 凹腔各冷却孔的孔宽为 2 mm. 凹腔的油气掺混孔为

两个对称分布的直径为 10 mm 的圆孔, 如图 4 所示, 凹腔前墙、后墙的油气掺混孔中心与凹腔底的距离分别为 30 mm, 11 mm.

在实验过程中, 当供油位置在凹腔前体时, 就将凹腔后体的油气掺混孔密封, 反之, 则将凹腔前体的油气掺混孔密封.

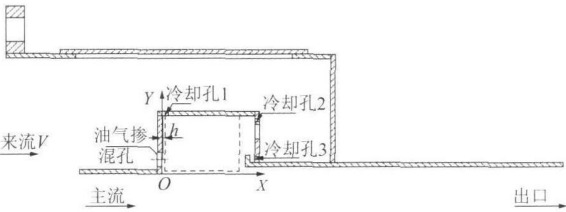


图 3 二维模型驻涡燃烧室剖面图
Fig. 3 Sketch of the two-dimensional model of trapped vortex combustor (TVC)

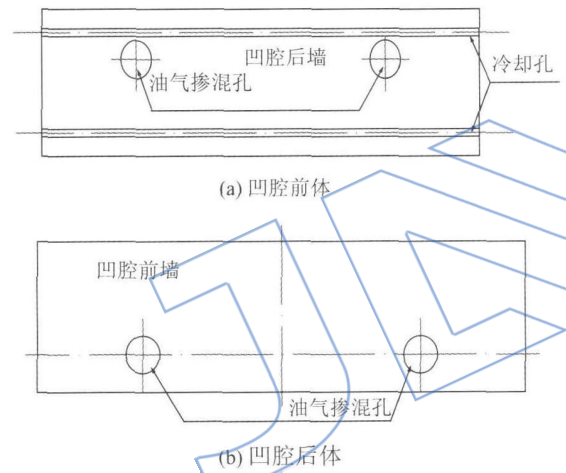


图 4 凹腔前体和后体示意图
Fig. 4 Sketch of the cavity forebody and afterbody

2 实验结果及分析

2.1 供油位置位于凹腔前体

图 5~ 图 8 是供油位置在凹腔前体时, 油气掺混孔的中心截面上平均速度等值线图. 图像采用 IN SIGHT6.1 软件互相关分析瞬态速度场后得到, 查询区域采用 64 像素 $\times$ 64 像素, 可以清晰地看出粒子的运动情况. 来流分流后不断喷入主通道和凹腔中, 从凹腔的油气掺混孔和冷却孔进入流场中的射流与周围介质发生动量和质量交换, 卷吸附近介质随射流一同流动, 也有部分主流被卷吸到凹腔中, 流速不断均化. 可以观察到射流边界层上的卷吸和涡结构的产生.

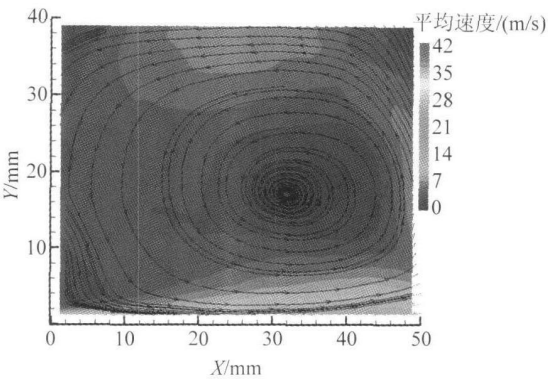


图 5 $V=23\text{ m/s}$ 时的速度等值线图
Fig. 5 Speed contour of $V=23\text{ m/s}$

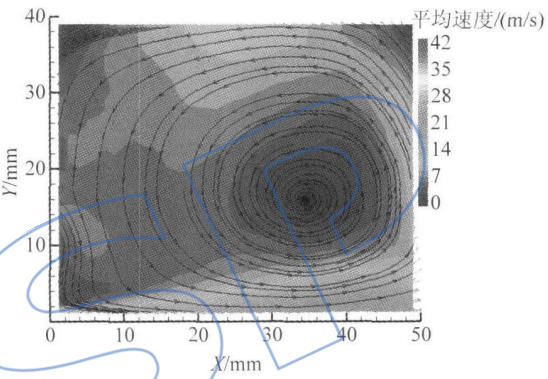


图 6 $V=49\text{ m/s}$ 时的速度等值线图
Fig. 6 Speed contour of $V=49\text{ m/s}$

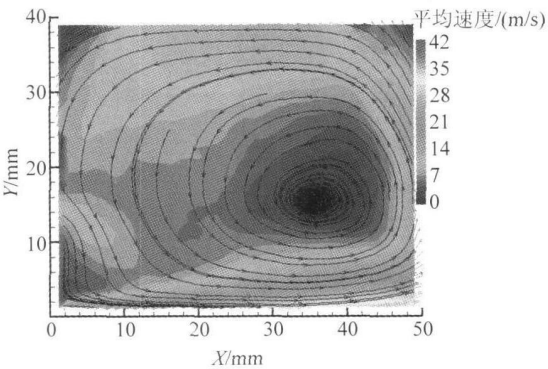


图 7 $V=61\text{ m/s}$ 时的速度等值线图
Fig. 7 Speed contour of $V=61\text{ m/s}$

图 5~ 图 8 的来流速度 V 分别为 23, 49, 61, 76 m/s. 可以看出, 当来流速度增加时, 凹腔中各部分的气流速度也在增加, 但是凹腔中气流速度的增加值较来流速度的增加值小, 这说明进入凹腔的气体流量占总流量的百分比较小. 从图中还可以看出, 凹腔左上部有速度不变的区域, 显然这部分涡强较小, 不利于涡稳定, 这主要是因为冷却孔 1 处于背压位置, 内外的压强差相对较小, 从冷却孔 1 进入的射流量相对较小造成的. 所以

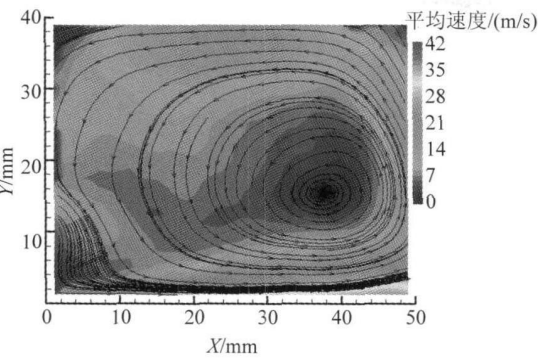


图 8 $V=76\text{ m/s}$ 时的速度等值线图

Fig. 8 Speed contour of $V=76\text{ m/s}$

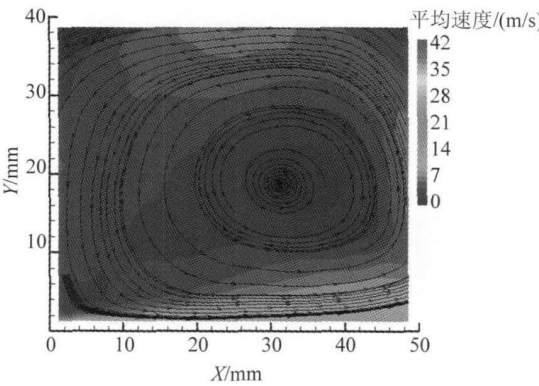


图 9 $V=25\text{ m/s}$ 时的速度等值线图

Fig. 9 Speed contour of $V=25\text{ m/s}$

为了加强涡稳定, 应该采取措施加强冷却孔 1 的射流量, 例如增加孔宽等.

涡强是指局部速度梯度张量特征值的虚部, 也就是说单位径向距离内的速度梯度越大, 涡强就越大, 涡就越稳定. 从图 5~ 图 8 的速度等值线图中可以看出, 随着来流速度的增加, 凹腔内涡强越大, 涡越稳定, 这也说明了驻涡燃烧室在高速状态下更利于火焰稳定. 所以驻涡燃烧室是发动机燃烧室向高速发展过程中不可或缺的研究内容.

图 5~ 图 8 的涡心坐标分别是 $(31.92, 16.93)$, $(34.46, 16.04)$, $(35.52, 15.47)$, $(37.80, 15.47)$, 而凹腔的总体长为 60 mm , 高为 40 mm . 可以看出, 当来流速度较小时, 涡心较接近于凹腔中心, 随着来流速度的增加, 涡心就越靠近凹腔后体和主流. 这里最大的来流速度只有 76 m/s , 而在实际应用中要比其还高, 所以如果采用这种结构, 那么涡心可能更靠近凹腔后体和主流.

2.2 供油位置位于凹腔后体

图 9~ 图 12 是供油位置在凹腔后体时, 油气掺混孔的中心截面上平均速度等值线图, 处理方法同 2.1 节. 与凹腔前体供油一样, 来流分流后不断喷入主流通道和凹腔中, 从凹腔的油气掺混孔和冷却孔进入流场中的射流与周围介质发生动量和质量交换, 卷吸附近介质随射流一同流动, 也有部分主流被卷吸到凹腔中, 流速不断均化. 可以观察到射流边界层上的卷吸和涡结构的产生.

图 9~ 图 12 的来流速度 V 分别为 $25, 42, 57, 66\text{ m/s}$. 当供油在凹腔后体时, 油气掺混孔靠近凹腔底, 油气掺混孔的射流对涡没有破坏作用, 所以随着来流速度的变化, 凹腔油气掺混孔和冷却孔进入的射流带动周围介质都能形成充满整个凹腔的稳定的大涡, 气流分布相对均匀, 瞬态时也没有

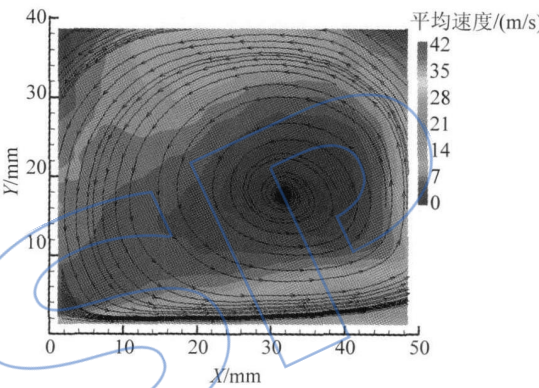


图 10 $V=42\text{ m/s}$ 时的速度等值线图

Fig. 10 Speed contour of $V=42\text{ m/s}$

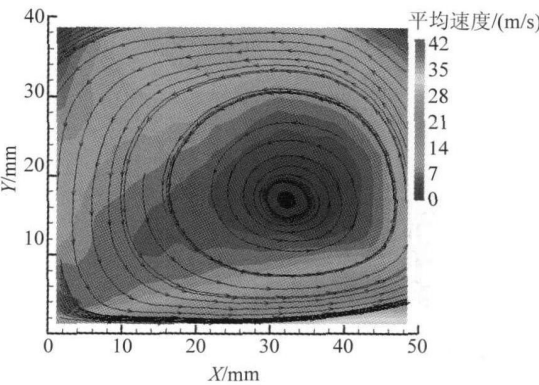


图 11 $V=57\text{ m/s}$ 时的速度等值线图

Fig. 11 Speed contour of $V=57\text{ m/s}$

出现几个涡的现象. 瞬态时, 来流速度越大, 从主流到凹腔的卷吸量就越大, 进入凹腔的总流量越多, 并且涡越稳定. 所以, 在不考虑供油方式等其它因素的情况下, 凹腔后体供油对涡没有破坏作用.

图 9~ 图 12 的涡心坐标分别是 $(31.31, 19.06)$, $(31.77, 17.74)$, $(32.08, 16.89)$, $(31.60, 16.70)$, 凹腔的总体长为 60 mm , 高为 40 mm . 可以看出, 涡心较凹腔前体供油更接近于凹腔中心,

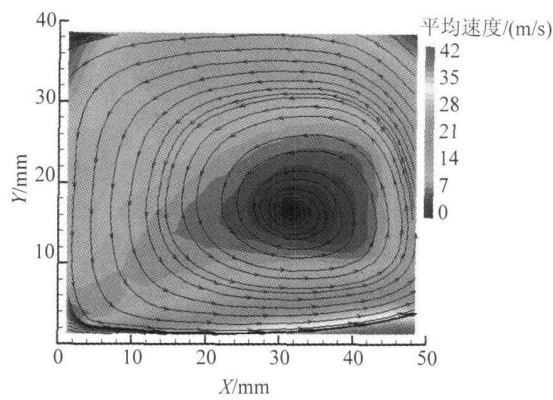


图 12 $V=66\text{ m/s}$ 时的速度等值线图
Fig. 12 Speed contour of $V=66\text{ m/s}$

随着来流速度的增加, 涡心向凹腔后体和主流靠近, 但是当速度达到 66 m/s 时, 涡心又向凹腔前体偏移, 这可能是由于当来流速度较低时, 由凹腔底的冷却孔进入的射流量对涡的作用大于油气掺混孔处射流量对涡的作用, 而当来流速度增加到一定值时, 凹腔后体油气掺混孔的射流对涡的作用就会大于凹腔底冷却孔处射流量对涡的作用。

3 结 论

PIV 技术超越了传统的流场显示技术, 能大量提供定性信息及关于流场结构的定量信息, 利用 PIV 技术研究了可行的不同的凹腔供油位置, 以及相同的供油位置不同的来流速度时, 凹腔中的流场状态, 可以得出以下结论:

1) 来流速度越大, 从主流进入凹腔的卷吸量越大, 涡越稳定, 气流分布越均匀。但是采用凹腔前体供油时, 来流速度越大, 油气掺混孔的射流对涡的破坏作用越大, 所以在不考虑供油方式等其它因素的情况下, 凹腔后体供油优于凹腔前体供油。如果考虑其它因素而选择采用凹腔前体供油时, 就要尽量使得油气掺混孔的射流对涡的破坏作用小, 而又能实现良好的掺混点火燃烧, 这就有待于进一步研究凹腔前体油气掺混孔与底墙的距离对涡的影响。

2) 当采用凹腔前体供油时, 来流速度越大, 涡心越偏向凹腔后体和主流。当采用凹腔后体供油时, 来流速度越大, 涡心越偏向主流。当来流速度较低时, 随着来流速度的增加涡心偏向凹腔后体, 当速度增加到一定值时, 涡心又会向凹腔前体靠近。

参考文献:

[1] Roquemore W M, Shouse D, Burrus D, et al. Trapped vortex combustor concept for gas turbine engines [R]. AIAA 2001-0483, 2001.

[2] 许金生, 何小民. 油气方案影响驻涡燃烧室燃烧性能的研究[C]//中国航空学会第六届动力年会论文集. 南京: 中国航空学会, 2006.

XU Jinsheng, HE Xiaomin. Experiments study on combustion performance of TVC with different fuelair matching forms[C]//Proceedings of the Sixth Dynamic Symposium of Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. Nanjin: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)

[3] Burrus D L, Johnson A W. Fuel injector bar for gas turbine engine combustor having trapped vortex cavity: United States, 6295801.3[P]. 2001-10-02.

[4] 刘河霞, 杨茂林, 刘玉英, 等. 模型驻涡燃烧室二维冷态流场数值模拟[C]//中国航空学会第一届航空发动机数值仿真与数字化设计学术交流会议论文集. 北京: 中国航空学会, 2008.

LIU Hexia, YANG Maolin, LIU Yuying, et al. Numerical simulation on two dimensional fluid of model trapped vortex combustor[C]//Proceedings of the First Aero Engine Symposium on Numerical Simulation and Digital Design of Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. Beijing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)

[5] 孔昭健, 樊未军, 易琪, 等. 采用蒸发管供油的驻涡燃烧室点火及贫油熄火特性[J]. 航空动力学报, 2007, 22(7): 1132-1137.

KONG Zhaojian, FAN Weijun, YI Qi, et al. Ignition and lean blow out performance of trapped vortex combustor with evaporating tubes fuel injection[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(7): 1132-1137. (in Chinese)