

文章编号: 1000-8055(2009)07-1482-06

驻涡燃烧室主流对凹腔涡流动的影响

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

摘 要: 利用粒子图像测速仪(PIV)对矩形模型驻涡燃烧室冷态流场进行了测试, 分析了驻涡燃烧室主流速度及结构变化对凹腔内涡流动的影响. 实验结果表明, 主流速度对凹腔内涡的大小、形状、涡心位置影响不大, 旋涡强度及凹腔回流量随速度增大而增大. 主流无稳定器时凹腔内涡心基本居中; 主流加入稳定器后, 凹腔中心剖面涡较大, 涡心偏向后方, 稳定器剖面涡较小, 涡心偏向前方. 实验结果为开展热态研究打下基础.

关 键 词: 驻涡燃烧室; 凹腔; 主流; 粒子图像测速仪

中图分类号: V235.11 **文献标识码:** A

Impact of mainstream on the vortex flow of cavity in trapped vortex combustor

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

(School of Jet Propulsion,

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

Abstract: Particle image velocimetry (PIV) was used to experimentally study the cold flow field of a model rectangular trapped vortex combustor (TVC) in this paper. The influence of mainstream velocity and mainstream structure (with or without flame stabilizer) on the behavior of vortex in the cavity was analyzed. It shows that the dimension and shape of vortex, location of vortex center are not sensitive to mainstream velocity. But the swirling strength and circulation mass flow rate in cavity increase with mainstream velocity. The vortex center is located in the center of cavity without stabilizer. The vortex center moves backward at the symmetry section, but moves forward at the stabilizer section. The result can provide references for TVC design and performance optimization.

Key words: trapped vortex combustor; cavity; mainstream; particle image velocimetry (PIV)

从 1995 年 Hsu 等^[1]提出驻涡燃烧室(trapped vortex combustor, 简称 TVC)概念至今, 驻涡燃烧室经过了十几年的发展. 研究表明, 驻涡燃烧室的火焰稳定范围宽、燃烧效率高、污染排放低、流阻损失小, 是一种有希望的新型燃烧室, 目前国内外正在加快研究. 分析和实验表明, TVC 燃烧室具有良好的燃烧性能需要两个重要的方面相配合^[2]: 第一, 在主流附近必须产生稳定的驻涡区, 如果驻涡区(或者称之为凹腔区)设计的好, 涡将

会很稳定且不易产生脱落; 第二, 从驻涡(或凹腔)区到主流区传输和掺混热量, 这个一般通过使用支体或撑杆连接到主流区来实现. 可见在驻涡燃烧室中, 主流区与凹腔区的相互关系至关重要, 主流的速度以及主流撑杆(或称之为主流的稳定器)的设计对凹腔涡的形成有重要的影响. 以往的研究中更多的关注于凹腔的结构形式以及凹腔供油位置的优化, 对于主流对凹腔的涡形成影响研究较少涉及.

收稿日期: 2008-11-13; 修订日期: 2009-01-12

基金项目: 航空科学基金(2006ZB51021)

作者简介: 李瑞明(1979-), 女, 黑龙江鹤岗人, 博士生, 研究领域为航空发动机燃烧室.

本文在国内外研究的基础上,设计了模型驻涡燃烧室,利用粒子图像测速仪(PIV)技术对其冷态流场进行测量,观察并分析了不同主流速度以及增加主流稳定器后凹腔内涡的形状、涡心位置、涡旋强度以及回流量等的变化,为 TVC 燃烧室设计和性能优化提供参考依据。

1 实验件结构及研究内容

1.1 二元模型驻涡燃烧室试验器结构设计

根据国内外文献及数值模拟优化结果,设计典型的二元模型驻涡燃烧室试验器结构如图 1 所示。燃烧室进口 $D_1=80\text{mm}$,扩压器出口 $D_2=100\text{mm}$,主路进口 $D_3=100\text{mm}$,凹腔前壁高 $D_4=40\text{mm}$,凹腔后壁高 $D_5=35\text{mm}$,凹腔宽 $L=60\text{mm}$,燃烧室出口 $D_6=110\text{mm}$,二元燃烧室展向宽为 140mm 。气体(进口速度 V_0)经扩压器减速扩压后进入主燃区和环腔,主流头部径向布置稳定器,起到从凹腔区到主流区传焰和稳定燃烧的作用。

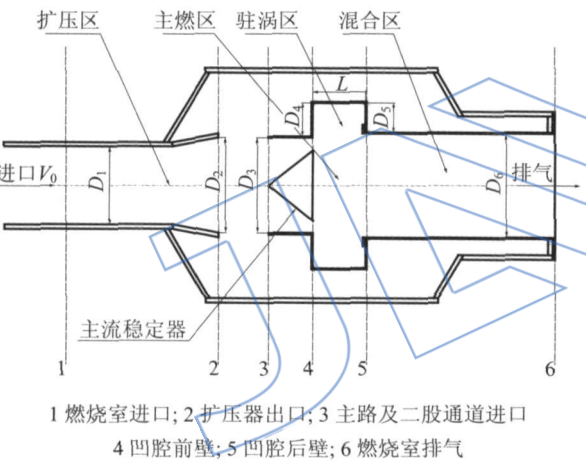


图 1 二元模型驻涡燃烧室试验器结构简图
Fig. 1 Structural diagram of two dimensional model of TVC

1.2 PIV 实验件结构

PIV 实验件根据所设计的二元模型驻涡燃烧室试验器进行简化,由于其上下是对称结构,所以本次实验沿其中心线取一半进行,尺寸与其完全相同,实验件结构及测量剖面如图 2 所示。

由于研究冷态流场中凹腔涡与主流的关系,为了孤立因素,供油装置、二股通道掺混孔及凹腔冷却孔均忽略简化,稳定器简化为两支槽宽 30mm 、顶高 36mm 的 V 型稳定器。为了进行 PIV 测量,试验器的后段全部为透光的有机玻璃组成。来流由压气站气源供气,经管道阀门调节保证模拟进气要求,进口速度由实验前段进口测量截面

总静压测量控制(分别由三点总压探针和壁面静压测取)。

1.3 实验内容及测量区域

本实验在常温常压下进行,实验进口速度范围:进口 $Ma=0.06\sim 0.24$ 。研究来流速度变化及主流有稳定器与无稳定器时对凹腔流动的影响。

由于主要关注凹腔内的涡的情况,为了方便,视场的坐标系 XOY 的坐标原点 O 取在凹腔前壁与主流相交点,测量区域为凹腔内部,如图 2 所示。主流有稳定器时测量剖面为剖面 I (中心无稳定器剖面)与剖面 II (有稳定器剖面);主流无稳定器时测量剖面仅为剖面 I (中心剖面)。

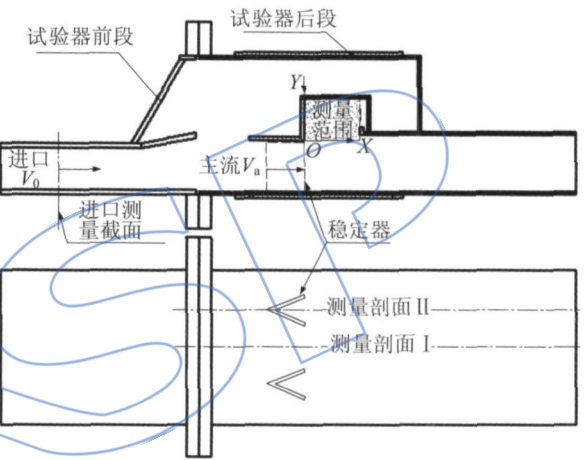


图 2 实验件结构及测量剖面图
Fig. 2 Structure of test rig and measurement section

2 PIV 测量装置及实验系统布置

本实验测量采用美国 TSI 公司的二维 PIV 系统。该系统包括脉冲激光器,PIV 专用跨帧 CCD(电荷耦合器件图像传感器)相机,高速数据接口板,同步器和数据处理系统。所使用的摄像机分辨率为 1280×1024 像素。每秒钟拍摄 3.75 对单次曝光照片,每一个位置拍摄 130 对单次曝光图片。

实验系统布置如图 3 所示,由粒子发生器、高压气源、实验段及 PIV 测量采集系统组成。片状激光源由实验器后段底部分别沿测量剖面 I 和 II 垂直向上(Y 向)射入,PIV 摄像头由侧向(Z 向)拍摄测量范围照片。

本实验采用丙三醇(甘油)作为示踪粒子,利用粒子发生器将丙三醇加热雾化,在实验前段较远处(1.4m)送入进气管道,以保证粒子到达拍摄截面时已均匀混合,并且粒子入口有分流阀门,可根据实验工况调节粒子量,以达到较佳拍摄效果。

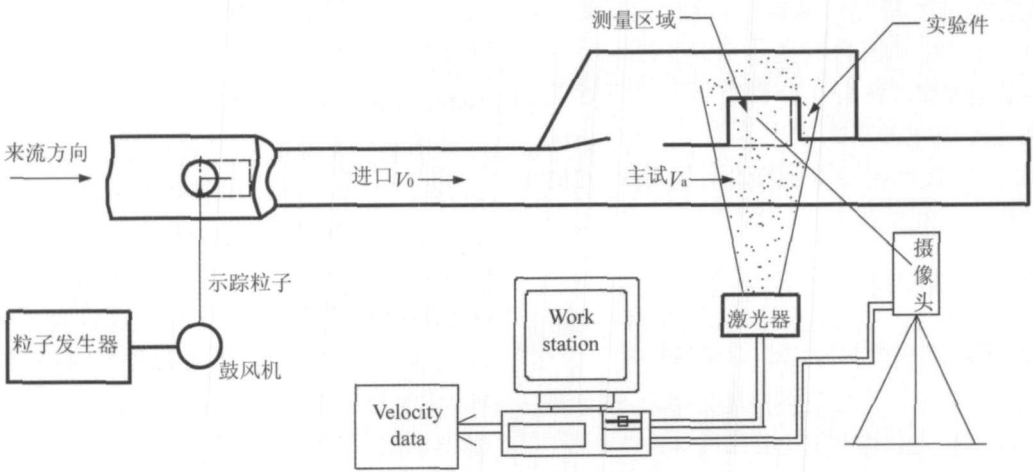


图 3 实验设备示意图

Fig. 3 Schematic of experimental equipment

在来流速度达到预定要求且粒子量合适时进行拍摄,并录取数据。

3 实验结果与分析

实验采用 Insight 软件分析视频和照相图像以获得速度场。对于涡的识别可以用涡量或旋涡强度的方法^[3]。涡量的定义为 $\omega = \nabla \times \mathbf{u}$ 。涡量方法虽然能识别出流场中的涡核,但是同时也把流场中所有的剪切运动表现了出来。因此涡量图整体显得比较嘈杂,很难用来识别流场中的涡结构。而旋涡强度方法由于其本身已排除了剪切作用的影响,因而能较好地识别出涡结构。旋涡强度 (swirling strength) 是局部速度梯度张量

$\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix}$ 的特征值的虚部。本文对速度场求出局

部速度梯度张量的特征值,取其虚部,即可得出旋涡强度场,可以更清晰的分析涡的结构。

3.1 主流无稳定器时进口速度对凹腔涡的影响

图 4 和图 5 给出了主流无稳定器时,来流速度为 23 m/s 与 74 m/s 的速度流线图与旋涡强度图,图 4(a) 涡心位置为 (32, 24), 图 4(b) 涡心位置 (33, 23)。由图 4 可见在这两个工况下,凹腔内均形成一个稳定的驻涡,涡的形状规矩,涡心基本居于凹腔中心位置。进口速度变化对涡的形状、涡心位置影响不大。主流气体流经凹腔后体附近速度方向改变,被卷吸进入凹腔,因此对比图 4 与图 5 可见,靠近凹腔后体处气流速度梯度变化较大,旋涡强度较大,使得凹腔内形成旋涡。且主流进口速度越大,旋涡强度越大,涡旋转越快,这将有利于燃料的快速、均匀掺混。

由此可见,速度在很大范围内,凹腔内都会形

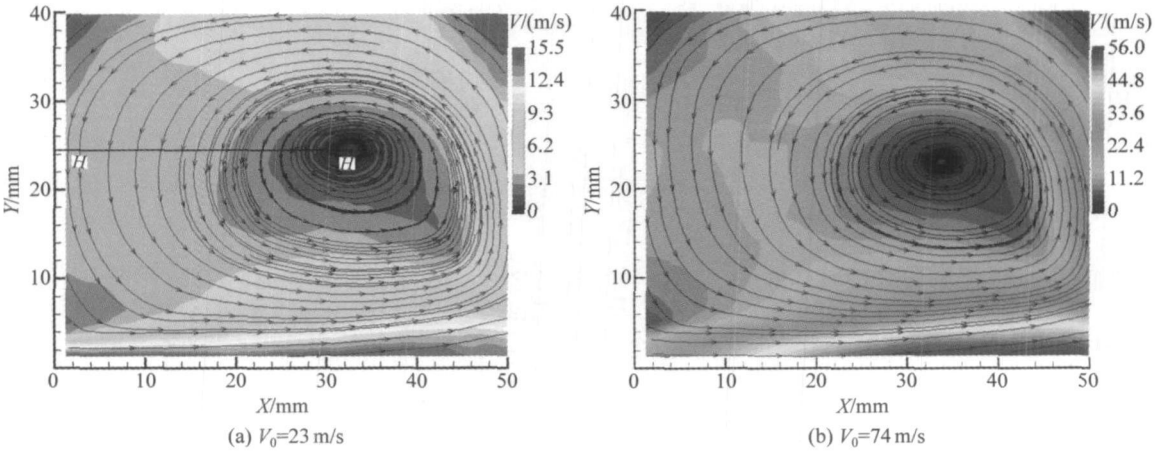


图 4 主流无稳定器速度流线图 (I 剖面)

Fig. 4 Velocity field without stabilizer (section I)

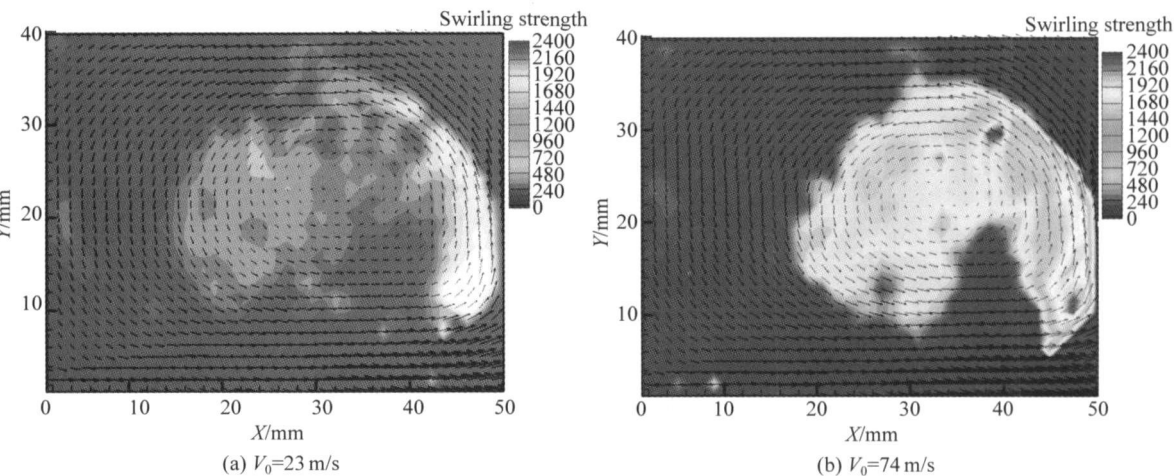


图 5 主流无稳定器旋涡强度图 (I 剖面)
Fig. 4 Swirling strength field without stabilizer (section I)

成一个稳定的驻涡, 且主流速度的变化对此驻涡的形状、大小、涡心位置影响不大, 主流速度越大涡越强, 驻涡燃烧室如果设计合理, 对于高速进口同样适合.

3.2 主流有稳定器对凹腔涡的影响

图 6 和图 7 给出主流有稳定器时 I 和 II 剖面的速度流线图. 图 6(a) 涡心位置为 (42, 28), 图 6(b) 涡心位置 (42, 27); 图 7(a) 涡心位置为 (15, 19), 图 7(b) 涡心位置 (14, 18). 由图可见, 主流有稳定器时, 无论剖面 I (对比图 6(a) 与 (b)) 还是剖面 II (对比图 7(a) 与 (b)), 进口速度变化对凹腔涡的形状、大小、涡心位置影响均不大.

主流加上稳定器后对凹腔涡影响较大, 从图 6 可以看出在 I 剖面因稳定器堵塞影响, 此剖面主流速度较大, 涡心偏向右上方.

在 II 剖面(图 7)凹腔涡心偏向左下方, 涡较

小, 容易向下脱落. 因为此剖面主流前方有径向稳定器, 在此剖面主流会形成低速回流区, 主流的速度较低, 流量较少, 所以容易引导凹腔内的气体向主流低速区运动, 涡会顺着脱落. 这样有助于凹腔内的物质、热量等与主流进行掺混.

主流加入稳定器后, 会产生三维效应, 中心剖面(I 剖面)的气体可能会向 II 剖面流动, 本次实验无法测出.

3.3 进口速度对凹腔内回流量的影响

在驻涡燃烧室中, 凹腔内的旋涡不断的生成、发展、脱落, 由于旋涡脱落的周期很短, 在本次实验中无法准确捕捉到, 但是最终在时均场中达到动态平衡, 可见一个稳定流动的旋涡. 可以定义凹腔内不断绕涡心旋转的物质量为凹腔的回流量. 回流量的多少对燃油供给有重要影响^[4], 燃油供入凹腔, 燃烧在腔内进行, 为了获取合适的当量

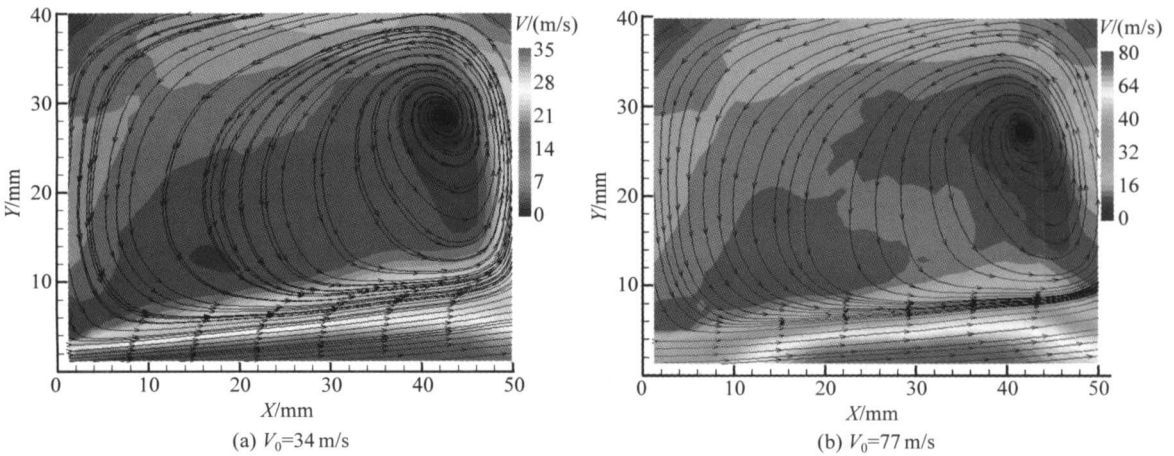


图 6 主流有稳定器速度流线图 (I 剖面)
Fig. 6 Velocity field with stabilizer (section I)

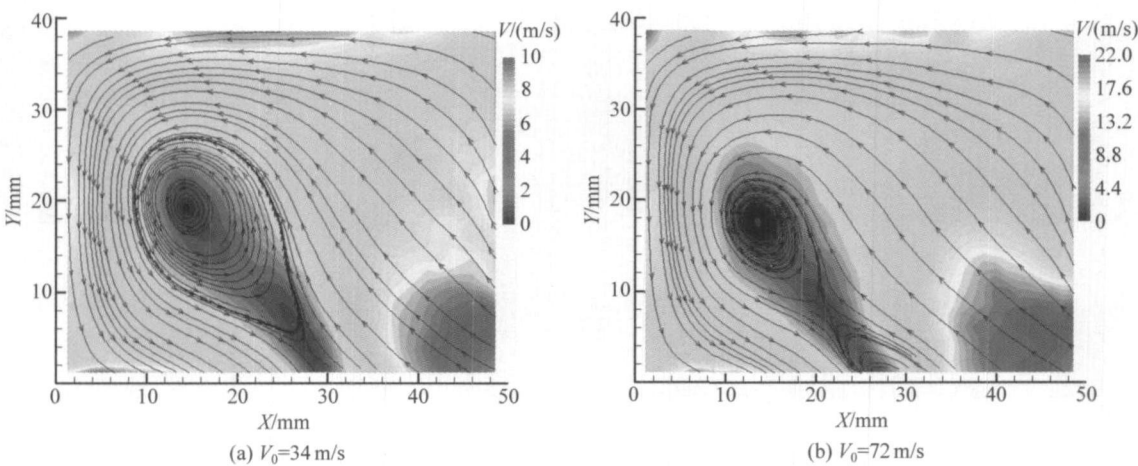


图 7 主流有稳定器速度流线图 (Ⅱ剖面)

Fig. 7 Velocity field with stabilizer (section II)

比,燃油供给量的多少取决于凹腔内的空气量,本次实验为了孤立因素,凹腔没有其他进气孔,凹腔内气量也就是回流量,与主流速度有着密切的关系,本文统计出不同来流速度下凹腔剖面回流量的多少,以期对不同工况下的供油设计提供参考依据。

对二维流场计算通过某截面流量时,假设在周向单位长度上的流动是均匀的,周向长度取1. 本文找出凹腔各测量剖面涡心位置(X_c, Y_c),将通过如图 4(a) 所示的 H - H 截面的流量定义为凹腔测量剖面的回流量 $\dot{m}_h$, 计算公式为

$$\dot{m}_h = \rho_b A = \rho \times \bar{V}_y \times X_c \times 1$$

式中 $\bar{V}_y$ 为 H - H 截面上 y 方向速度分量的平均值。

图 8 给出了不同结构下进口速度与凹腔各剖面回流量的关系图。

由图 8 可见,不管主流有无稳定器,在一定速度范围内,凹腔内的回流量与进口速度基本成线性关系,凹腔回流量随进口速度的增大而增大. 以主流无稳定器的结构作为基准,在主流加入稳定器后,与基准相比在同样进口速度下,Ⅱ剖面因处于稳定器后方主流速度很低(从图 7 可以看出),回流量明显降低. Ⅰ剖面因稳定器堵塞影响,主流速度很大(从图 6 可以看出),理论上回流量应该大大增大,然而实际上比基准略有增大. 可能的原因有两个:一是主流加入稳定器后周向运动的三维效应加大,而二维 PIV 无法测出三维效应,无法统计其影响;二是可能主流速度增大到一定程度时,主流经过凹腔时间加快,卷吸进入凹腔的物质无法随之大量增加. 这一点期待更多的实验或计算数据验证。

4 结 论

本文利用 PIV 对矩形驻涡燃烧室实验器的冷态流场进行了测试,研究了主流速度及结构变化对凹腔内涡流动的影响. 进口速度变化在 $Ma=0.06\sim0.24$ 之间,主流结构方案分为主流无稳定器与主流有径向稳定器两种. 通过对凹腔内涡的形状、大小、涡心位置、涡旋强度以及回流量等的变化分析,得出一些结论:

- 1) 所设计的矩形驻涡燃烧室无论主流有无稳定器,在实验范围的进口速度下,凹腔内均能形成驻涡;结构一定时,来流速度变化对凹腔内涡的形状、大小、涡心位置影响不大,这说明驻涡燃烧室如果设计合理,凹腔不仅可以稳焰,而且稳定性好,对速度变化不敏感,高速来流条件依然可以适用.
- 2) 来流速度增大,旋涡强度随之增大,涡旋

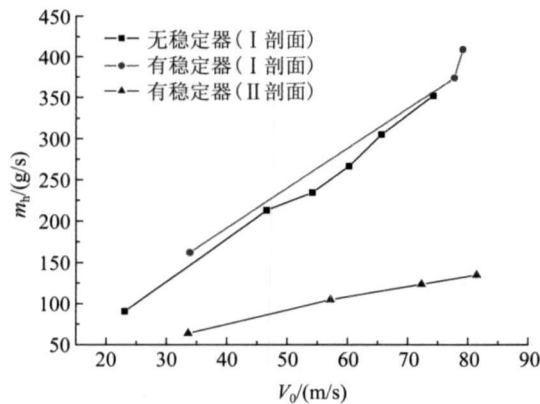


图 8 进口速度与凹腔剖面回流量关系图

Fig. 8 Variation of circulation mass flow rate with inlet velocity

转速度加快, 将会有利于供入凹腔的燃料快速掺混均匀.

3) 主流无稳定器时, 涡的形状比较规矩, 涡心基本居中. 主流加入稳定器后, 在剖面 I, 因稳定器的堵塞, 此剖面主流速度很高, 凹腔内的低压区被挤向后方, 故涡心偏向右上方; 在剖面 II 因主流形成低速回流区, 凹腔内的涡较小, 涡心偏向左下方, 且容易向下脱落, 这将有助于凹腔内的物质与主流进行掺混, 有助于传焰.

4) 在实验速度范围内, 凹腔内各剖面的回流量与进口速度基本成线性关系, 进口速度越大, 凹腔内回流量越大, 相同速度下主流加入稳定器后

凹腔内总回流量要少于主流无稳定器的. 回流量的统计对供油设计提供一定的参考依据.

参考文献:

[1] Hsu K Y, Goss L P, Trump D D, et al. Performance of a trapped vortex combustor[R]. AIAA No. 95 0810

[2] Ryan G E, Robert C S, Joseph T W. Ultra low NO_x advanced vortex combustor[R]. GT 2006 90319

[3] Adrian J, Christensen K T, Liu Z C. Analysis and interpretation of instantaneous turbulent velocity fields [J]. Experiments in Fluids, 2000, 29: 275 290.

[4] Sturgess G J, Hsu K Y. Entrainment of mainstream flow in a trapped vortex combustor[R]. AIAA No. 97 0261

