

凹腔双驻涡稳焰冷态流场初步研究*

邢 菲¹, 孟祥泰¹, 李继保², 樊未军¹

(1 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083

2 沈阳发动机设计研究所, 辽宁 沈阳 110015)

摘 要: 驻涡燃烧室凹腔内流场对其燃烧性能有重要的影响, 为了找出凹腔流场的特性, 使用数值和实验两种手段对凹腔内双驻涡稳焰冷态流场进行了初步研究。研究表明: 在主流速度和凹腔前壁面吹气速度一定的情况下存在一个最佳的后壁面吹气速度使得凹腔内的流场稳定, 以满足先进燃烧室所期望的条件。研究成果初步确定了凹腔双驻涡稳焰冷态流场特征, 并为开展热态研究打下基础。

关键词: 驻涡; 凹腔; 流动分布; 数值仿真

中图分类号: V235.11

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2008) 02-0135-04

Elementary study on cool flow field of double vortex in cavity for flame stabilization

XING Fei¹, MENG Xiang-tai¹, LI Jibao², FAN Wei-jun¹

(1. Coll. of Energy and Power Engineering Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics Beijing 100083 China

2. Shenyang Aeroengine Research Inst., Shenyang 110015, China)

Abstract The flow pattern inside the cavity is a critical aspect of TVC performance. To improve the retention of unmixed fuel in the cavity, a double-vortex is studied for the cavity with PIV measurements and CFD. The results show that there is an optimal value for the afterwall air speed with fixed speed of main air and forewall air to intensify stability of the double trapped-vortex.

Key words Trapped vortex; Cavity; Flow distribution; Numerical simulation

1 引 言

当流体流经一个凹腔时, 腔内会产生一个或多个驻涡, 而燃料在驻涡中燃烧具有很好的燃烧特性, 能得到高的燃烧效率、低的贫油吹熄比并且发现凹腔壁面的吹气能起到加强驻涡的作用^[1,2]。近期美国的研究工作显示如果采取在凹腔前壁面底部喷入燃油, 后壁面中部吹气, 凹腔内会产生两个驻涡, 靠主流的驻涡用于主燃, 另一个凹腔底部的驻涡用于稳定的点火, 能够使得凹腔驻涡取得更好的燃烧效果, 其流场结构如图 1 所示^[3]。

目前国外对于这样一种结构的研究已经有了很多的成果, 早期集中于单涡情况下涡的稳定性与流场

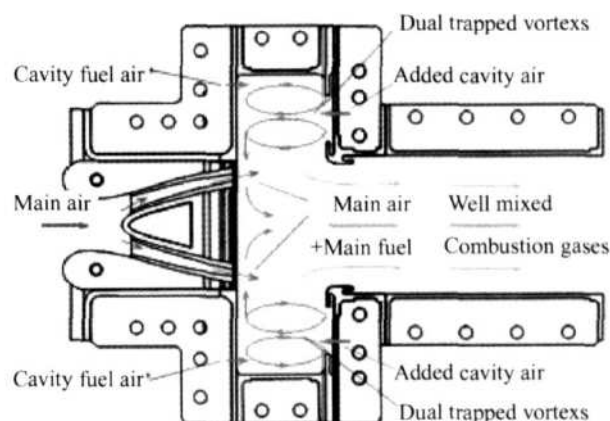


Fig 1 Structure of TVC with double trapped vortex

几何参数之间的关系^[1], 近期大多集中于燃烧现象

* 收稿日期: 2006-12-11; 修订日期: 2007-09-17。

作者简介: 邢 菲 (1980—), 男, 博士生, 研究领域为加力燃烧室供油装置的冷却及驻涡燃烧的设计与性能。

Email: effie@sjp.buaa.edu.cn

的过程及分析^[3,4],但对于图1所示的双涡凹腔内流场结构与具体的凹腔内部吹气速度之间的关系尚未进行深入的研究。本文的工作就是通过数值和实验方法来研究凹腔在冷态下这两个涡的稳定性与凹腔内部吹气速度之间的关系,并且进一步分析双驻涡结构的流场对于驻涡燃烧室的燃烧性能将会有什么样的影响。

2 研究模型

2.1 实验模型

为了研究的方便以及考虑到驻涡燃烧室自身结构的对称性,本文研究模型限于图1模型沿中心对称的下半部分。且研究中凹腔底部喷射不考虑喷射燃油的情况,换为吹入空气以观察其对凹腔内流场的影响。基于引言所述的讨论,借鉴国外的研究成果,本文采用如图1的二维研究模型。图2中凹腔内为研究的主要区域,试验模型的此部分区域的照片如图3。

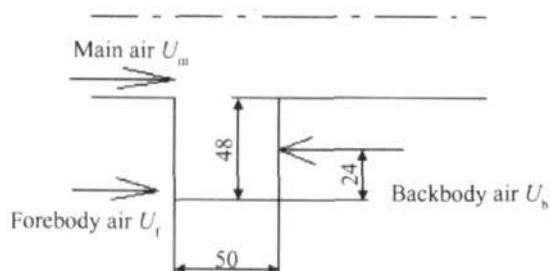


Fig. 2 Model of cavity of trapped vortex combustor

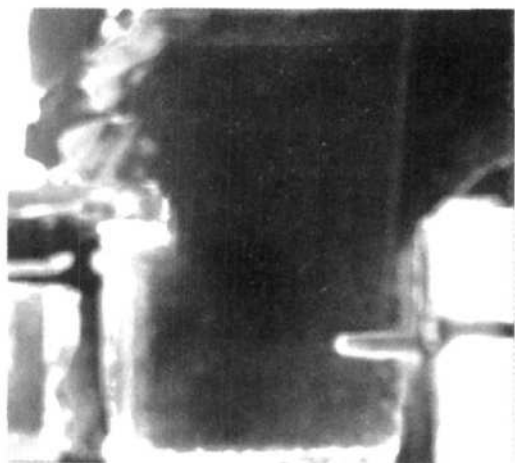


Fig. 3 Photo of the cavity in the model

为与文献[1,3]中外研究结果对照,本文所研究凹腔模型设计长度为50 mm,高度为48 mm,靠近主流进气口为前壁面,前壁面从底部吹气,远离主流进气口的后壁面则从壁面中部吹气,吹气位置距离凹腔底部24 mm,两个吹气口宽度均为1 mm。本文利

用PV (particle-image velocimetry)对于这样一个双涡凹腔模型进行流场测量工作。

2.2 数值方法

本文利用CFDACE软件计算如图3的规则矩形凹腔内的流场,其具体采用的方法如下:(1)采用二维直角坐标系;(2)采用不可压N-S方程;(3)采用标准的 $k-\epsilon$ 模型;(4)近壁面采用标准壁面函数法。计算采用的几何结构与实验模型相同。

对称轴、出口、固定壁面边界的处理:对称轴边界比较容易处理。根据对称定义,没有任何流量穿过该边界。因此,该处的径向速度为0,其它应变量的径向梯度和各个应变量的输运系数都等于0。由于出口位于下游足够远的地方,可以假定出口边界处流动已经充分发展,那么除轴向速度外的其它各个应变量的轴向梯度都等于0。

由粘性流动分析可知,固定壁面处采用无滑移条件。温度定为300 K,静压设为大气压。

3 结果与分析

图4为数值模拟不同的前壁面吹气速度 U_f 和后壁面吹气速度 U_b 下凹腔的流矢图,所取条件为主流速度 $U_m = 20 \text{ m/s}$ 凹腔长度 L 与凹腔前壁高 d_f 之比为 $50/48 = 1.04$ 。

图5图6和图7分别为利用PV测量所得凹腔的流矢图或者流线图。其中 x, y 分别代表凹腔的高度和长度(mm),图例为速度场的值,单位为 m/s 。

由数值模拟图4(a)、(d)、(e)分别与实验所得的结果图5图6和图7对照看来,PV试验结果与数值计算结果符合的较好,数值模拟比较真实的反映了凹腔中的实际流场。流场图中值得注意的特点有:(1)在主流、前后壁面均有吹气情况下,凹腔存在两个涡。(2)从实验和数值分析所得到的流矢图看来,前后壁面吹气在凹腔底部能产生一个较稳定的驻涡,燃料在此燃烧能作为一个稳定的点火源。(3)由实验测得的流矢图可以看出,凹腔上部的驻涡中气流速度较大,这是由于后壁面的吹气加强了上部驻涡的强度。(4)上部驻涡随着主流的卷吸作用会使得主流燃料和空气掺混剧烈,有助于燃烧。

图4(a)、(b)为只有后壁面中部吹气的情况,由流矢图我们明显可以看出,当凹腔后壁面吹气较小时,凹腔内只有一个单驻涡,后壁面吹气从涡的中部吹入,这时吹气削弱了涡的稳定性,然而随着吹气速度的加强,单涡被吹气截断为两个涡,这种流场情况

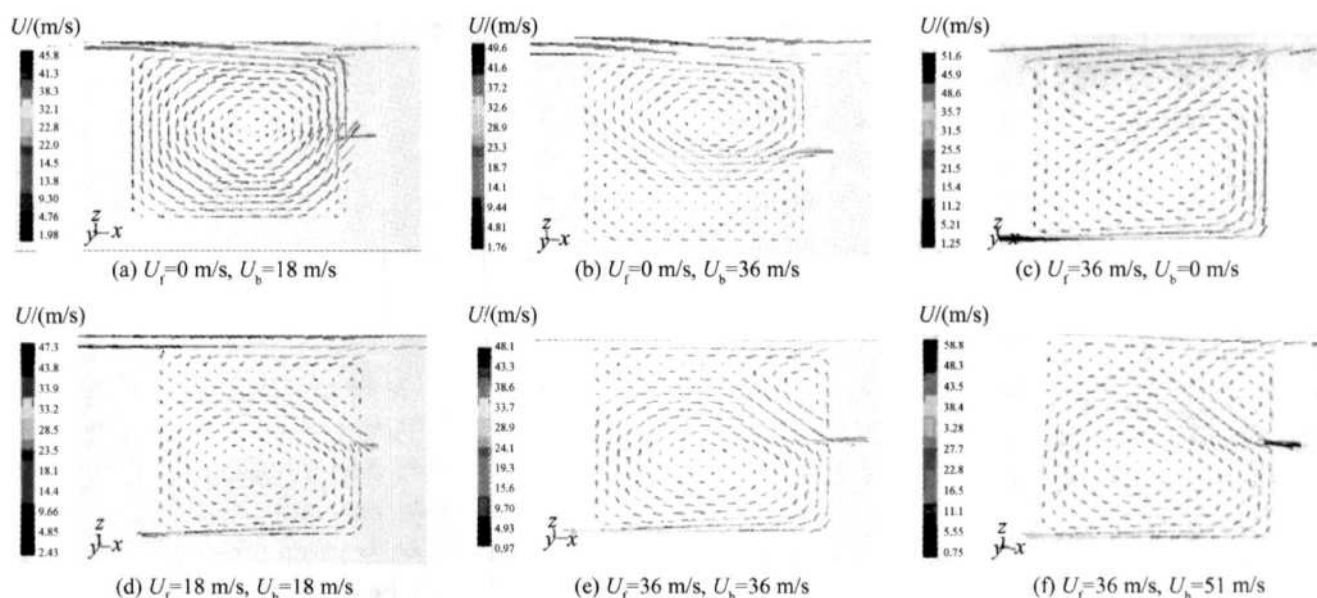


Fig 4 Flow field of CFD at different U_t and U_b value when $U_m = 20 \text{ m/s}$

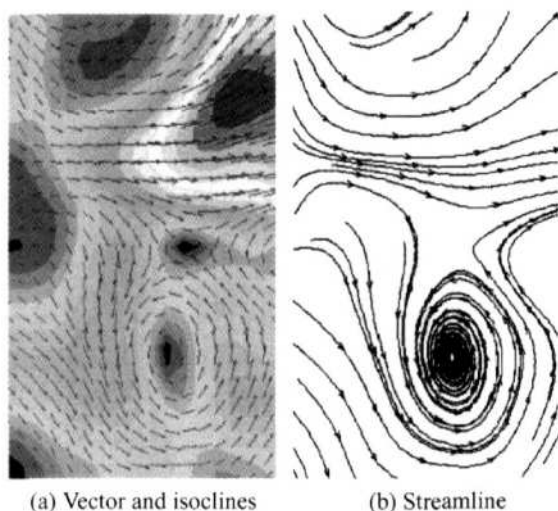


Fig. 5 Flow field of PIV when $U_m = 20 \text{ m/s}$,
 $U_t = 0 \text{ m/s}$, $U_b = 18 \text{ m/s}$

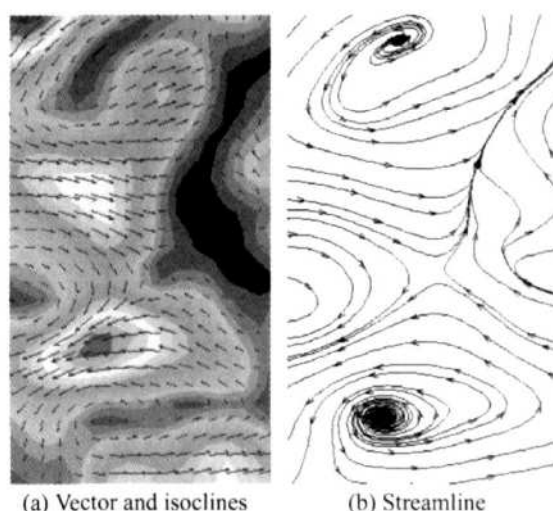


Fig 7 Flow field of PIV when $U_m = 20 \text{ m/s}$
and $U_t = U_b = 36 \text{ m/s}$

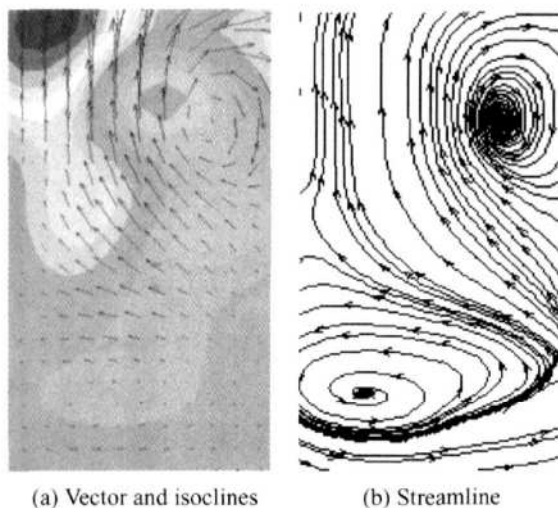


Fig. 6 Flow field of PIV when $U_m = 20 \text{ m/s}$,
 $U_t = U_b = 18 \text{ m/s}$

在文献[1, 3]中有所论述。从图 4(a)、(b)可看出这两个涡上强下弱。

图 4(c)为只有前壁面底部吹气的情况, 由于主流驻涡方向为顺时针, 底部吹气却给了驻涡一个逆时针的流动, 进而凹腔内产生了两个涡, 这样的两个方向相反的涡必然是相互削弱的。由图可以看出两个涡交界处流线模糊, 此时两个涡均处于不稳定状态, 这样的流场显然不能够保证燃烧的稳定。这些现象并没有在相关文献[5~7]中有所描述。

图 4(c)、(d)、(e)、(f)分别为 $U_m = 20 \text{ m/s}$ 时不同前后体速度的流矢图。 $U_b = 18 \text{ m/s}$ 时, 对比 $U_b = 0 \text{ m/s}$ 上下两个涡都得到加强, 涡心向着前壁面移动, 涡的边界面变得明显, 凹腔内的流场特性明显好于

$U_b = 0$ 的情况,这是由于后壁面吹气的引入,与主流和前壁面产生的两个涡在速度方向上都能够很好的配合,使得主流驻涡顺时针方向流动加强而下部的前壁面吹气驻涡逆时针方向加强。对比所模拟的全部四种情况,可以看出 $U_b = 36 \text{ m/s}$ 时凹腔下部驻涡涡心居中、涡形状好且与上部涡的边界清晰,这时驻涡的稳定性要好于 $U_b = 18 \text{ m/s}$ 的情况。然而当 U_b 增大到 51 m/s 时,由于后壁面吹气挤压作用太大,下部驻涡涡心被挤向前壁面,驻涡流线不光滑,产生了变形,这时候下部驻涡的稳定性反而不如 $U_b = 36 \text{ m/s}$ 的情况,不利于燃料在此稳定燃烧而作为可靠的点火源。所以在 U_b 较小 (18 m/s)和 U_b 较大 (51 m/s)时凹腔内的流场均不如 $U_b = 36 \text{ m/s}$ 时凹腔内流场稳定,也即均不利于燃烧。由于本文所研究的前后壁面开口大小相同,吹气速度的大小也就意味着吹气动量的大小,所以上述讨论表明本文研究模型在保证一定吹气速度大小的情况下,后壁面吹气速度、动量与前壁面吹气速度、动量相当时能够取得比较有利的流场特性。

基于以上讨论,可以看出:确定几何条件下,主流速度和前壁面吹气速度都保持一定时,后壁面吹气存在一个最佳速度值或者说动量值使得两个驻涡均保持稳定,在这种情况下可以利用凹腔下部驻涡作为一个稳定的点火源,而上部驻涡与主流掺混以保证燃烧稳定性,从而满足先进燃烧室所期望的条件^[13],大于或小于这样一个值都会给凹腔内的流场带来不稳定的影响。在本文所述的几何条件和主流速度 $U_m = 20 \text{ m/s}$ 前壁面吹气速度 $U_f = 36 \text{ m/s}$ 的状况下, $U_b = 36 \text{ m/s}$ 比较接近这个条件。

4 结 论

利用凹腔前后壁面吹气以获得提高燃烧性能的

方法中,在主流速度和凹腔前壁面底部吹气速度一定的情况下,存在有凹腔后壁面中部的吹气最佳速度,使得凹腔下部产生稳定的回流区形成稳定的点火源,而凹腔上部也产生一个驻涡与主流掺混从而得到参考文献[13]中所述的先进燃烧室所期望的条件。

参考文献:

- [1] Hsu K Y, Goss L P, Trump D D, et al Performance of a trapped-vortex combustor[R]. AIAA 95-0810
- [2] Katta V R, Roquemore W M. Study on trapped-vortex combustor-effect of injection on dynamics of non-reacting and reacting flows in a cavity[R]. AIAA 97-3256
- [3] Burnus D L, Johnson A W, Roquemore W M, et al Performance assessment of a prototype trapped vortex combustor concept for gas turbine application[R]. ASME 2001-GT-0087.
- [4] Mancilla Paulo C, Pitchaiah Chakka Sumanta Acharya Performance of a trapped vortex spray combustor[R]. ASME 2001-GT-0058
- [5] Katta V R, Roquemore W M. Numerical studies on trapped-vortex concepts for stable combustion[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power Transactions of the ASME, 1998, 120(1): 60~68
- [6] Kamrath N M, Ahuja GAK K, Chamber F W. Prediction and measurement of flows over cavities[R]. AIAA 87-0166
- [7] Christopher Stone, Suresh Menon. Simulation of fuel-air mixing and combustion in a trapped-vortex combustor [R]. AIAA 2000-0478

(编辑:梅 瑛)