

文章编号: 1000-8055(2007)06-0888-05

凹腔驻涡模型燃烧室内涡的演化发展

樊未军, 孔昭健, 邢 菲, 甘志文, 杨茂林
(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘 要: 使用大涡模拟对凹腔内双驻涡冷态流场进行了分析研究. 结果发现, 在主流、前后壁面射流的情况下, 凹腔在某些特定几何条件下会产生准周期生成和破碎的驻涡, 同时研究了凹腔内准周期驻涡的生成发展的过程, 得到了影响凹腔内涡演化的新结果.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 驻涡; 凹腔; 大涡模拟; 稳焰

中图分类号: V235. 11

文献标识码: A

Vortexes evolvement and development in the model of trapped vortex combustor

FAN Wei-jun, KONG Zhao-jian, XING Fei, GAN Zhi-wen, YANG Mao-lin
(School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The large-eddy simulation (LES) has been used to described the computational simulation of the dual vortexes. The results indicate that in the case of primary airflow, fore-cavity and back-cavity flow injection, the vortexes could create in the cavity for some geometry conditions. The progress of trapped vortex development in the cavity is also investigated, the new result that influences the evolvement of vortexes in the cavity is obtained.

Key words: aerospace propulsion system; aerospace propulsion system; trapped vortex; cavity; large-eddy simulation (LES); flame holder

近年来人们发现当流体流经一个凹腔时, 由于粘性作用, 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、低的贫油吹熄边界、较少的总压损失等, 并且发现凹腔壁面的吹气能起到加强驻涡的作用^[1]. 近期国外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, 靠近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, 如图 1^[2-3].

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几何参数之间的关系^[4-5], 近期大多集中于燃烧现象的过程及分析^[6-9], 但对于图 1 所示的双涡凹腔内流场结构与具体的凹腔几何结构、内部吹气速度之间的关系, 特别是对于与燃烧的稳定性有着重要影响的涡产生、发展、破碎的非定常变化机制尚未有深入的研究. 本文的工作就是通过大涡模拟数值方法自编程序来研究凹腔在冷态下这涡的稳定性与凹腔内部吹气速度之间的关系, 并且进一步分析这种关系对于燃烧将会有什么样的影响.

收稿日期: 2006-05-22; 修订日期: 2006-10-18

作者简介: 樊未军(1965-), 男, 山西原平人, 副教授, 博士, 主要从事航空发动机燃烧室的研究.

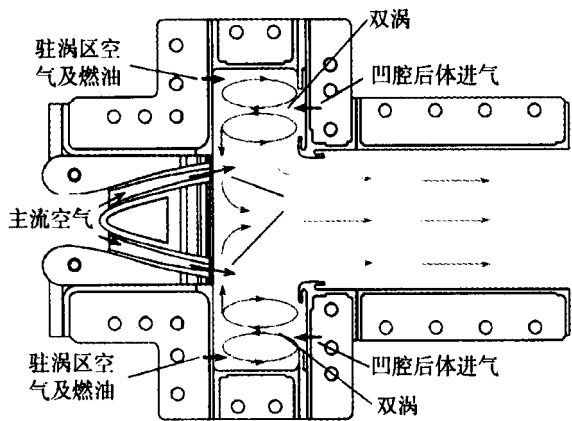


图 1 双涡驻涡燃烧室结构图

Fig. 1 Structure of trapped vortex combustor with dual trapped vortex

1 几何模型

在直角坐标系下的交错网格上,用 SIMPLER 方法,在 Pentium2.6 GHz 的个人微型计算机上,本文对凹腔内的非定常不可压缩流进行了大涡模拟,以下是数值计算研究模型.

图 2 是本文所模拟的凹腔流场的几何模型^[1],在一个直通道存在主流进气 U_m ,在通道中前部存在一个凹腔,在凹腔的前壁面底部存在一股底部吹气 U_f ,后壁面中部存在一股中部吹气 U_b ,这个凹腔内部的流场特性是我们的主要研究对象.本文所研究的内容主要是通过改变如下几个物理量来研究凹腔流场特性:主流进气速度大小 U_m 、后壁面吹气速度大小 U_f 、前壁面吹气速度

大小 U_b 、前壁面高度 h_1 、后壁面高度 h_2 、后壁面吹气位置 L 、后壁面吹气量,或者说后壁面吹气宽度、凹腔宽度 d 等.其他物理量取为通道长度 250 mm,凹腔前通道宽度 35 mm,凹腔前壁面位于通道入口 40 mm 处,计算时采用时间步长 $\Delta t = 0.5 \times 10^{-5}$ s 输出一组结果.

2 数值方法

本文采用大涡模拟手段、通过 C++ 语言编程计算如图 2 这样一个规则凹腔内的流场,其具体采用的方法如下:

- (1) 采用二维直角坐标系;
- (2) 采用滤波后不可压 N-S 方程

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \mu_r) \bar{S}_{ij}] \quad (2)$$

- (3) 亚格子模型采用 SMA GORINSKY 模型;
- (4) 采用 SIMPLER 多重网格算法;
- (5) 对进出口、固定壁面边界处理:进口采用等速条件,出口采用流动充分发展假定,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

3.1 凹腔驻涡大涡模拟的一组典型结果

对不同几何条件的凹腔模拟发现,只有在特

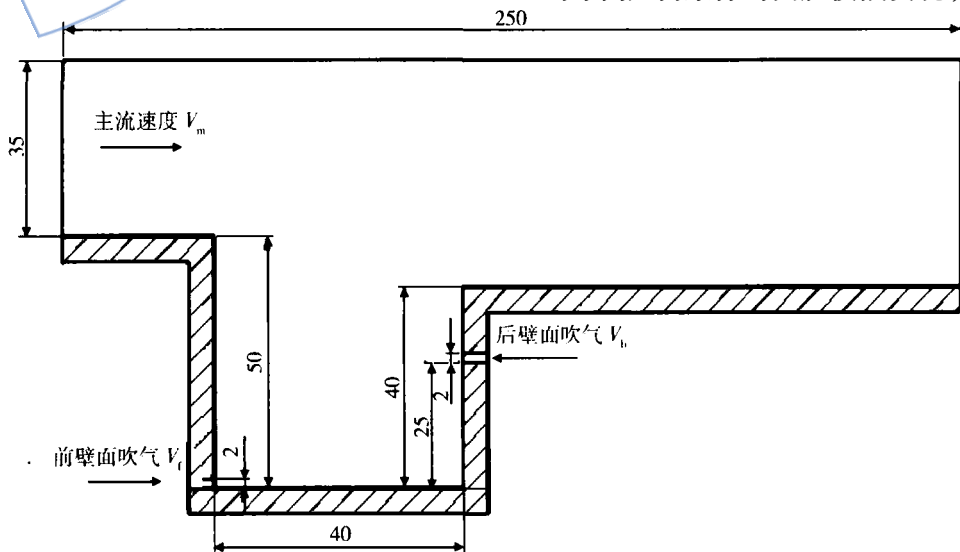


图 2 计算模型示意图

Fig. 2 Sketch of computation model

殊条件下凹腔内才有驻涡产生. 对于某一能产生驻涡的具体条件如下模型: 主流速度 $U_m = 40 \text{ m/s}$; 后壁面吹气 $U_b = 50 \text{ m/s}$, 吹气位置距离凹腔底部 25 mm , 吹气开口宽度 2 mm ; 前壁面吹气 $U_f = 50 \text{ m/s}$, 吹气位置距离凹腔底部 0 , 吹气开口宽度 2 mm ; 凹腔宽度 40 mm , 前壁面高 50 mm , 后壁面高 40 mm , 是一个台阶形的凹腔. 能够得到一组典型的凹腔内湍流非定常演化过程.

从模拟中可以看到, 凹腔内湍流流动演化过程可以分为两个阶段. 第一阶段是驻涡流场的建立阶段, 对应于从理想无粘流动初场开始到稳定阶段, 该阶段实际上描述了初场效应被输运出计算域的过程, 对应 $t = 0$ 到 $t = 30$ 这段时间, 其中 t 为时间步长, 图 3 为 $t = 1$ 及 $t = 15$ 两个时刻的凹腔内流场图.

$t = 1$ 时刻代表了凹腔刚加上吹气时的初场, 直观上仅在吹气入口和凹腔上方台阶角处存在较明显涡量, 前后壁面射流和主流卷起了数个大小

不规则的初级拟序涡结构, 随着时间推进, 这样的结构不断生成与合并, 形成数个不规则涡. 模拟中凹腔上部分我们能观察到, 入射流带着这数个不规则涡射到凹腔前壁面, 撞击前壁面, 接着由于壁面和下部气流的挤压作用改为向上运动, 然后由于主流的压迫与卷吸, 回头向后壁面反向运动, 在后壁面处一部破碎消失. 对于凹腔底部的前壁面射流, 能够观察到随着射流进入卷起一个较为明显的涡, 由于凹腔底部的封闭性, 底部射流不能够进入凹腔的右下角这一部分死区, 随着右下角压力的逐渐增大, 底部射流被迫向上方运动, 由于后壁面中部射流的作用回头向前壁面运动, 形成一个湍流涡, 这样的湍流涡十分不稳定, 随着射流卷吸接着向前壁面运动缩小消亡, 消亡的同时射流又卷起了新的涡, 在模拟中凹腔下部一直存在多个涡破碎消亡的情况, 而右下台阶角流场变化不大, 但由于射流卷吸有不稳定的扰动, 使台阶角处的流场也有些波动. 在这个阶段, 对于主流流经凹

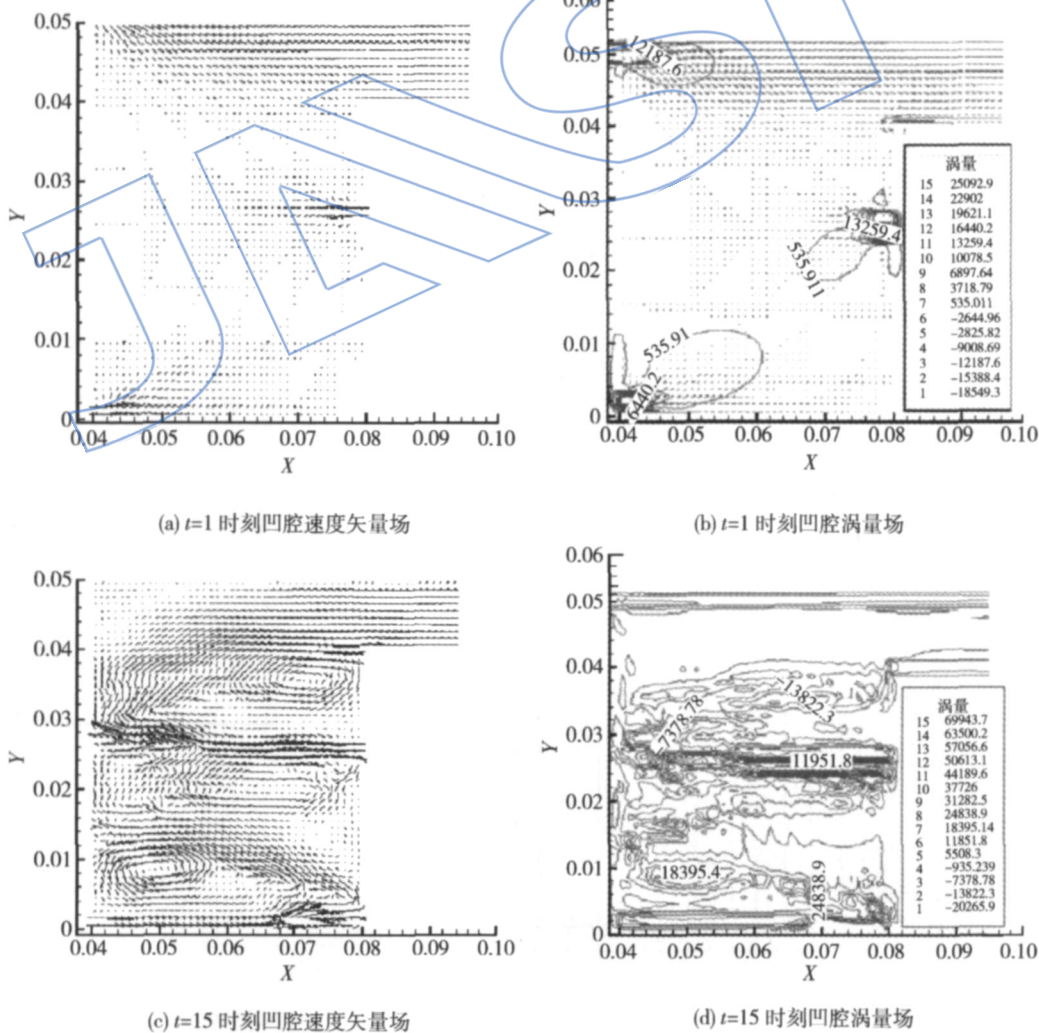


图 3 发展段初场凹腔内流场

Fig. 3 Field of flow in the cavity in the beginning

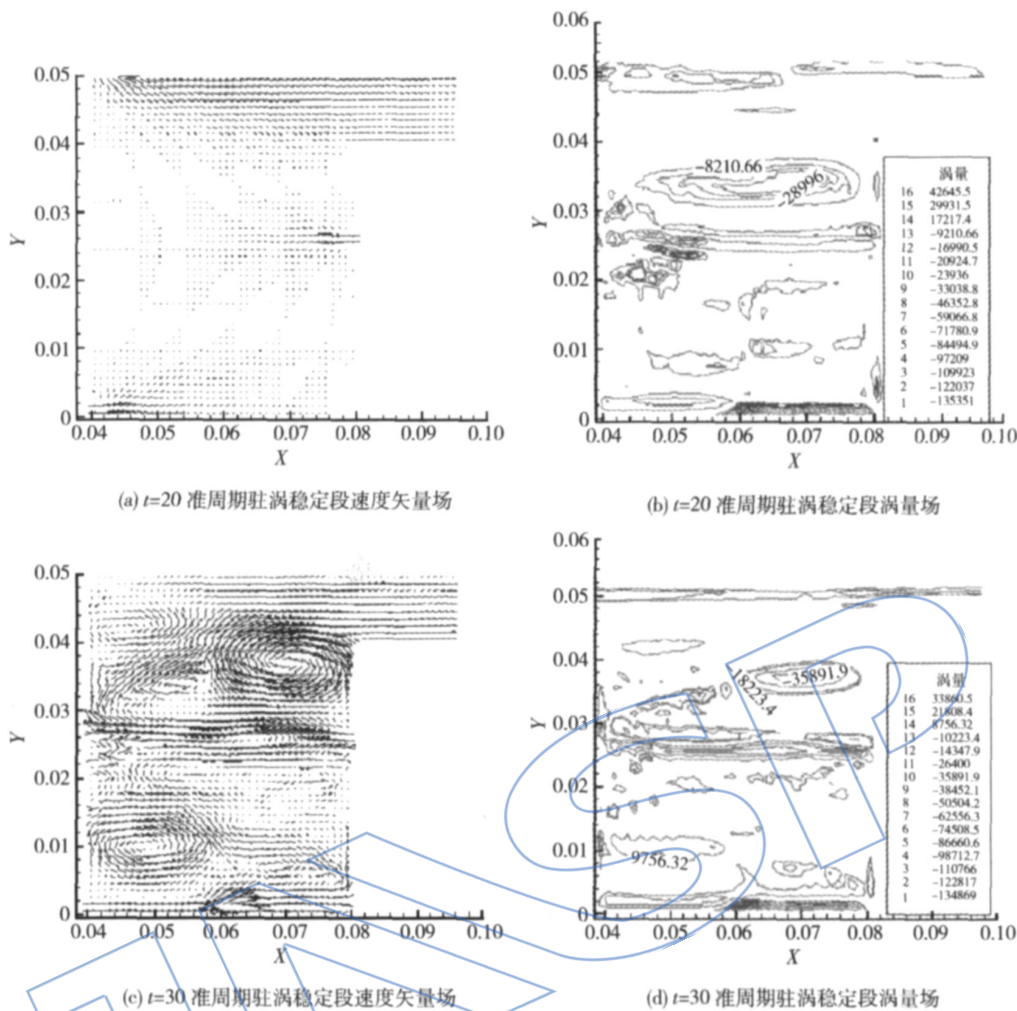


图 4 准周期段凹腔内流场图

Fig. 4 Field of flow in the cavity in periods

腔的气体,亦会卷起一个涡,但是相对强度较小被合并入后壁面射流卷起的大涡,故凹腔内主要是前后壁面射流产生的不稳定漩涡。在 $t=15$ 时,在后壁面上方已经由后壁面中部射流和主流影响形成一个小漩涡,此漩涡正在发展阶段,驻留于后壁面且不断增强,而前壁面下部射流也在凹腔下部卷起一个漩涡,此漩涡不停向前壁面运动,不断破碎缩小直到消失,如上图 3。在 $t=20$ 时刻,前壁面由于后壁面中部射流的作用又生成一个小漩涡,这个漩涡不停的向后壁面运动,与先前形成的驻涡合并,并且破坏了先前驻涡的稳定结构,引起合并涡的直接破碎并且消失,合并破碎的同时又有新的涡卷起增强,而凹腔下部也有由于射流卷起的新的漩涡产生并且向前壁面运动消亡。到 $t=30$ 时刻,凹腔中射流产生的第一个初级涡,亦即起动涡,已经完全消失,输运出凹腔,也可以看到产生的每一个小漩涡的存在周期很短,也就在大

约 5 个时间步长左右,之后便合并或者破碎消亡了。第 1 阶段的模拟同时也表明,本文采用的壁面条件,成功地克服了边界条件可能产生的非物理真实的反射作用,能够允许凹腔驻涡的拟序结构自由地合并、发展、消亡。

从 $t=31$ 开始,模拟进入第 2 阶段,亦即湍流拟序结构准周期的演变发展阶段。模拟表明:在确定的几何和物理条件下,凹腔内湍流在经历初始的发展阶段以后,将处于一种准周期的发展阶段,凹腔内的射流和主流共同作用下,不断卷起新的小漩涡,漩涡不断发展、破碎然后消亡,这样的小漩涡在消失以前,大概能存在 5~10 个时间步长,这个准周期过程在计算中表现的非常清楚。值得注意的是,我们观察到凹腔内漩涡在不断合并破碎的过程中某时间段凹腔内会处于一种相对稳定状态,这时几个小漩涡合并成一个大的涡并得到加强,在这种状态下,涡能够稳定维持较长的时

间,即驻涡.在图4代表的驻涡准周期发展阶段里能够观察到这种驻涡的形成、发展和破碎,模拟中驻涡形成段大约20时间步长,发展稳定段大约20时间步长,破碎消失段大约15时间步长.

从图4代表的准周期阶段我们能观察到驻涡产生发展的过程,在准周期过程中,漩涡不断的生成、消失,在合并的过程中,几个漩涡合并为一个相对大的漩涡,一般这个相对大的漩涡不能保持稳定,会迅速破碎.然而由于后壁面吹气与漩涡底部气流速度方向相同,特定情况下后壁面的射流正好与漩涡底部重合或者贴近,射流将加强漩涡的转动涡量,漩涡得到增强,这时形成驻涡.模拟还显示,驻涡很难一直增强下去,到了某个时刻驻涡由于自身的变化脱离了后壁面的射流,这时后壁面射流无法加强驻涡,驻涡便逐渐消失直到消亡,然后准周期过程重复发生.

对于驻涡燃烧室来说,当凹腔内存在这样一个驻涡的时候,燃烧能够稳定的进行,涡的破碎能够引燃主流内的燃气,这样一种状态对于驻涡燃烧室有着特殊的意义^[2].

本文还研究了后壁面吹气温度对驻涡的影响,在其他条件不变的情况下对后壁面吹气速度分别取为25,50,75 m/s进行模拟.通过计算结果发现,在3种情况下,凹腔在主流和后壁面射流间都有稳定的驻涡存在.在后壁面吹气速度100 m/s内,我们得出结论:驻涡的稳定性存在时间长短是随着后壁面吹气速度增大而增大的,也就是说驻涡的稳定性随着后壁面吹气增强而增强.

3.2 大涡模拟凹腔驻涡的小结

对于本文所述凹腔内的驻涡来说,大涡模拟凹腔内驻涡变化过程的几点主要结论如下:

(1) 凹腔驻涡的流场变化过程可以大致的分为两个阶段,驻涡发展段及稳定段,发展段凹腔内流场变化剧烈,流场不规则,存在多个小涡合并、破碎等现象,就本文的几何物理条件下,这一阶段大致维持30时间步长,即 $30 \times 0.5 \times 10^{-5} = 6 \times 10^{-5}$ s左右.然后凹腔内流场就进入驻涡稳定段,这个阶段凹腔将维持一个准周期存在的驻涡,不断产生脱落再产生,准周期时间长短与几何物理条件有着重要关系,本文前述条件下大致在35时间步长左右.

(2) 对于驻涡燃烧室来说,凹腔内的稳定驻

涡对燃烧有着重要的影响,驻涡稳定带来凹腔内好的燃烧效果,驻涡的脱落能引燃主流内的燃气,从而得到好的贫油吹熄边界,然而要维持一个相对稳定的驻涡需要强的外部条件,怎样增强驻涡的稳定性和强度将在下一步工作中展开.

4 结 论

本文通过大涡模拟方法模拟了驻涡燃烧室冷态流场,合理再现了驻涡的生成、破碎脱落的拟序过程,证实了特定几何物理条件的凹腔在存在主流、前后壁面射流时有准周期驻涡存在,探讨了这样的驻涡随时间变化发展的规律,为以后进一步开展驻涡燃烧室研究做了一些基础的工作.

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] Burrus 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.
- [3] Mancilla P C, Chaka P, Acharya S. Performance of a trapped vortex spray combustor[R]. ASME 2001-GT-0058.
- [4] 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.
- [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] Komerath N M, Ahuja G K, Chambers F W. Prediction and measurement of flows over cavities[R]. AIAA-87-0166.
- [7] Christopher S, Suresh M. Simulation of fuel-air mixing and combustion in a trapped-vortex combustor[R]. AIAA-2000-0478.
- [8] 樊未军, 易琪, 严明, 等. 驻涡燃烧室凹腔双涡结构研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 66-70.
FAN Weijun, YI Qi, YAN Ming, et al. A study of double vortex structure in the trapped vortex combustor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 66-70.
- [9] 樊未军, 严明, 易琪, 等. 富油/快速淬熄/贫油驻涡燃烧室低 NO_x 排放[J]. 推进技术, 2006, 127(1): 88-91.
FAN Weijun, YAN Ming, YI Qi, et al. Low NO_x emission of rich-burn, quick-mix, lean-burn trapped vortex combustor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 127(1): 88-91.