

文章编号:1000-8055(2009)11-2501-05

超燃冲压发动机双凹腔燃烧室氢气 燃烧流场分析

刘娟, 潘余, 刘卫东, 王振国

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 长沙 410073)

摘 要: 为了比较超燃冲压发动机中双凹腔燃烧室相对于单凹腔燃烧室在促进燃烧方面的优势, 运用高速摄影仪拍摄了氢气当量比为 0.07 时燃烧室中的火焰情况, 结合数值仿真结果, 得出如下结论: 小当量比情况下氢气燃烧很稳定, 燃烧区域主要集中于前凹腔的剪切层和该凹腔所围成的三角区以及该凹腔下游壁面位置, 燃料喷口周围没有火焰; 无论是串联凹腔燃烧室还是并联凹腔燃烧室, 相同条件下燃烧时壁面压力均比单凹腔燃烧室高, 串联凹腔之间的回流区为燃烧提供了有利的条件; 在一定范围内, 串联凹腔之间的距离越近, 燃烧放热越集中, 壁面压力越高。

关 键 词: 超燃冲压发动机; 双凹腔燃烧室; 高速摄影; 壁面压力

中图分类号: V235.21

文献标识码: A

Analysis of the hydrogen combustion field in scramjet dual-cavity combustor

LIU Juan, PAN Yu, LIU Wei-dong, WANG Zhen-guo

(College of Aerospace and Material Engineering,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to compare dual-cavity combustor with single-cavity combustor on enhancing the combustion, high-speed photography was employed to investigate hydrogen flame structure when fuel equivalence ratio is 0.07 in scramjet. The results show that, hydrogen flame is stable under small fuel equivalence ratio; the combustion region of upstream-cavity near the orifice is a triangular zone formed by the cavity and its shear layer, and another stable zone is beside the downstream wall, while there is no obvious flame around the injection exit; under the same incoming situation, the wall pressure of single cavity combustor is lower than that of combustors with cavities in parallel and cavities in tandem; and the recirculation zone with slow velocity and high pressure between cavities in tandem is good for the process of combustion; for cavities in tandem, the nearer the cavities' distance is, the higher the wall pressure and more concentrated the heat released from combustion is.

Key words: scramjet; dual-cavity combustor; high-speed photography; wall pressure

超燃冲压发动机的研究手段包括试验和数值仿真两种方法, 传统的试验手段是应用传感器测量试验参数, 但是传感器只能进行单点测量, 不能够描述整个流场的变化; 流动显示技术弥补了这

方面的不足, 它的使用使得流动传输过程可视化。近代流动显示技术兴起于上世纪 80 年代初期, 以含有计算机辅助技术为标志, 以定量、瞬态、无接触、快速显示与测量为目标, 代表性的有 PIV

收稿日期: 2008-10-29; 修订日期: 2009-03-06

作者简介: 刘娟(1983-), 女, 河南信阳人, 博士生, 研究领域为高超声速推进技术。E-mail: janny_liu123@163.com

(particle imaging velocimetry), PLIF (planar lasre-induced fluorescence) 等. 李一兴^[1] 利用 PDA (particle dynamics analysis) 和高速摄影仪研究了单水滴的在不同空气速度和水滴孔径下的运动规律, 拍摄速度为 500 帧/s; 钱耀义^[2] 仅仅用高速摄影仪拍摄了柴油机中喷雾的贯穿情况, 拍摄速度为 13 500 帧/s. 本文运用高速摄影仪拍摄了超燃冲压发动机中双凹腔燃烧室内的火焰情况.

凹腔是超燃冲压发动机中关键性的部件, 起到增强混合和稳定火焰的作用. 在单凹腔研究方面, Ben-Yaker^[3] 综合了以前研究的成果, 系统地论述了凹腔增强混合, 稳定燃烧机理; 在多凹腔研究方面, 李大鹏^[4] 对多凹腔燃烧室内煤油燃烧流动过程的研究表明, 多凹腔构型在点火、火焰稳定以及净推力方面都有较高的性能; Holmes^[5] 对不同长深比的三个凹腔进行组合, 得出前后布置的两个凹腔更有利于混合. 尽管如此, 以前的研究都将目光放在燃烧室的整体性能上, 而很少有对凹腔局部构件及其之间的关系进行过研究, 本文在文献[6]提出的双凹腔燃烧室构型基础上, 针对燃烧室中的双凹腔部件, 运用试验手段及仿真方法, 再现了双凹腔及其周围氢气燃烧流场结构, 并对其进行分析.

1 试验设备及试验方法

试验是在国防科技大学 D-3 直连式试验台上进行的, 该实验台主要包括燃料供应系统、测控系统、模型发动机以及传感器等部分. 试验所用到的 Photron FASTCAM-ultima APX 高速数字摄影仪, 它由镜头、摄像头和处理器组成, 采用高灵敏度 CMOS (complementary metal oxide semiconductor) 非增强型图像传感器, 最高摄影速度达到 120 000 帧/s, 两帧间隔时间 8.3 μs, 最小快门时间也可达到 1/120 000 s, 本文所采用的拍摄速度是 2 000 帧/s.

图 1 给出了试验时序, 在加热器稳定工作以后, 打开氢气阀门并触发高速摄影仪, 待氢气燃烧稳定后喷出煤油, 试验结束后关闭加热器. 试验采用氢气引燃煤油的点火方案, 氢气的喷射压力为 2.0 MPa, 流量为 6.2 g/s, 燃料当量比为 0.07, 氢气单独燃烧的时间有 500 ms, 试验中没有再加背景光. 由于所要研究的是氢气燃烧时的火焰情况, 因此只关心 Δt_2 时段内的火焰图片.

本文研究的是双凹腔燃烧室, 文献[6]将双凹

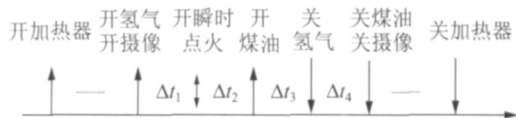


图 1 试验时序

Fig 1 Experimental scheduling

腔燃烧室进行了详细地划分 (如图 2), 与电路中的连接方式相类似, 将超燃冲压发动机双凹腔燃烧室划分为并联凹腔燃烧室和串联凹腔燃烧室. 本文着重研究的燃烧室内部构型如表 1 所示.

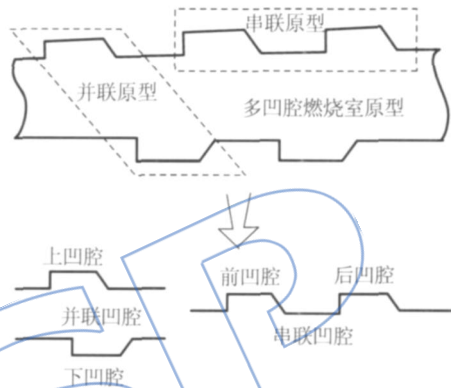


图 2 多凹腔燃烧室模型示意图

Fig 2 Sketch map of multi-cavity combustor

表 1 燃烧室构型分类

Table 1 Different sorts of combustor configuration

单凹腔 燃烧室	串联凹腔燃烧室		并联凹腔 燃烧室
	构型 I	构型 II	
燃烧室内 只有一个 凹腔	燃烧室内前 后布置两个 凹腔, 两凹 腔前沿相距 135 mm	燃烧室内前 后布置两个 凹腔, 两凹 腔前沿相距 200 mm	燃烧室上下 壁面各布置 两个凹腔

2 结果分析

2.1 单凹腔燃烧室氢气燃烧流场分析

从试验中发现, 小当量比的氢气燃烧很稳定, 火焰位置基本不变, 图 3 给出了单凹腔燃烧室氢气燃烧时的火焰图片, 氢气燃烧时的火焰主要集中在两个区域: 凹腔剪切层 ① 与凹腔后壁 ② 所围成的三角区域内, 以及凹腔下游区 ③, 燃料喷口周围没有火焰. 燃烧主要是在壁面附近进行, 主流中分布的较少, 这与初始时燃料的分布有关, 如图 4 所示, 气体燃料的穿透度较低, 贴着壁面. 下面对这两个稳定区域进行解释, 前者是由于凹腔内低速高压的环境为燃烧进行提供了天然的场所, 由

于剪切层的撞击,凹腔后壁的压力更高,因此燃料在此处更容易燃烧,凹腔前沿附近燃料的当量比过大,火焰不是很明显;后者是因为该位置有比较充足且当量比合适的燃料,同时凹腔内燃烧产生的自由基、没有燃烧完全的可燃混合物以及燃烧产物随着凹腔内的回流被带到下游,在当地合适的温度压力条件下,重新着火,同时壁面附近流动速度较低,有利于燃烧进行。

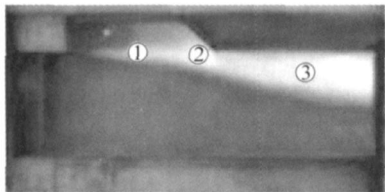


图 3 单凹腔氢气燃烧火焰结构
Fig. 3 Hydrogen flame structure in single-cavity combustor

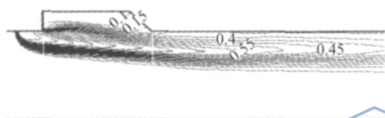


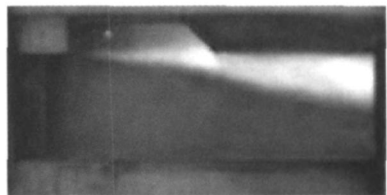
图 4 冷试时氢气浓度分布(单位: mol/m³)
Fig. 4 Hydrogen distribution in cold flow (unit: mol/m³)

2.2 串联凹腔燃烧室氢气燃烧流场分析

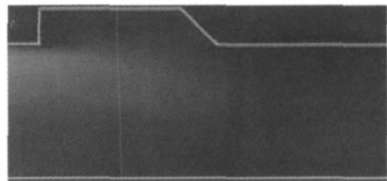
图 5 给出了串联凹腔燃烧室构型 I 氢气燃烧时的火焰结构,前凹腔周围的火焰结构与单凹腔情形下相同,后凹腔附近的火焰主要分布在主流当中,凹腔内部很少。图 6 给出了计算结果中水的质量百分数含量,由图可见,产物也分布在燃烧室主流道以及前凹腔内,后凹腔中没有产物存在。图 7 给出了氢气稳定燃烧时串联凹腔和单凹腔壁面压力分布,测压点的位置在燃烧室上壁面中心处,图中可以看出,前凹腔位置及其上游壁面压力相吻合,从前凹腔下游开始串联凹腔布置时压力有所提高,燃烧室出口测压点处压力差达到了 36.7%。在来流条件一致的情况下,壁面压力高意味着燃烧释放了更多的热量,可见凹腔串联使得燃料燃烧的更加充分,促进燃烧的进行。

为了比较凹腔之间的距离对燃烧带来的影响,将两凹腔之间的距离增大到 200 mm (即构型 II),图 8 给出了串联凹腔燃烧室构型 I、II 时氢气稳定燃烧的壁面压力分布,过了前凹腔后沿,构型 I 的压力高于构型 II 时的壁面压力,燃烧室出

口处的测压点压力差达到了 28.1%,可见两凹腔距离越短,壁面压力越大。构型 II 燃烧室出口测压点处的压力比单凹腔时也高出了 6.7%。



(a) 前凹腔



(b) 后凹腔

图 5 串联凹腔同一时刻氢气火焰分布
Fig. 5 Flame structure in combustor with cavities in tandem

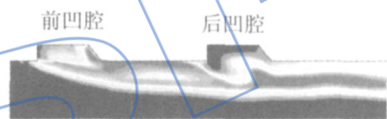


图 6 构型 I 燃烧室燃烧产物 H₂O 分布
Fig. 6 Distribution of H₂O in configuration I combustor

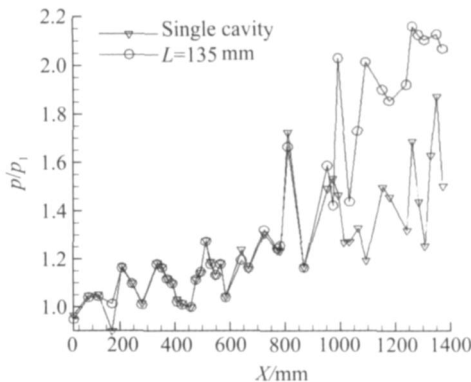


图 7 串联凹腔与单凹腔壁面压力
Fig. 7 Comparison of wall pressure between dual-cavity and single cavity combustor

下面来分析短距离时壁面压力更高的原因:图 9 和图 10 分别给出了两种情况下两凹腔之间等直段的速度矢量。长距离时,等直段内的回流区结构更大,沿逆流方向到达了前凹腔后沿,横向方向到达了流道中心处。短距离时,等直段内的回流区更小,在后凹腔前沿处。等直段的回流区速度低,压力高,是燃烧的主要场所。长距离时,燃烧的

范围大,在燃料当量比一样的条件,燃烧释热对单位面积壁面加热量就变小,使得壁面压力较短距离时更低.图 9 和图 10 也能够解释串联凹腔比单凹腔燃烧更充分的原因,与单凹腔相比较,串联凹腔之间存在大面积的回流区,回流区低速高压的环境有利于燃烧的进行,同时回流区又不断地将新鲜的燃料卷吸过来,使得新鲜燃料或者燃烧不完全的燃料进一步燃烧,提高了燃烧效率.

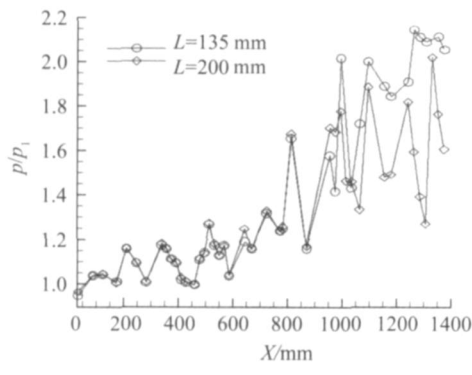


图 8 相对距离对壁面压力影响
Fig. 8 Influence of relative distance on wall pressure

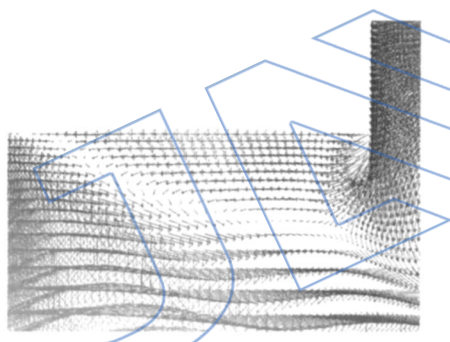


图 9 构型 I 燃烧室等直段速度矢量
Fig. 9 Velocity vector in I combustor

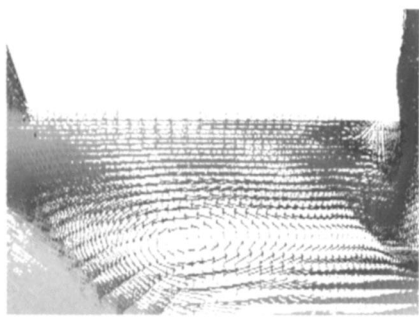


图 10 构型 II 燃烧室等直段速度矢量
Fig. 10 Velocity vector in II combustor

2.3 并联凹腔燃烧室氢气燃烧流场分析

对于双凹腔的另一种布置方案——并联凹腔而言,其氢气燃烧情况与单凹腔基本相同.如图

11 所示,氢气火焰主要分布在上凹腔内,下凹腔不存在火焰,这是由于氢气横向射流的穿透度低,下凹腔内不存在燃料(如图 12 所示).

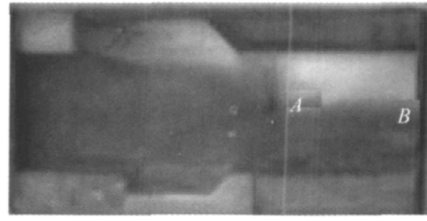


图 11 并联凹腔燃烧室氢气燃烧火焰结构
Fig. 11 Hydrogen flame in combustor with cavities in parallel

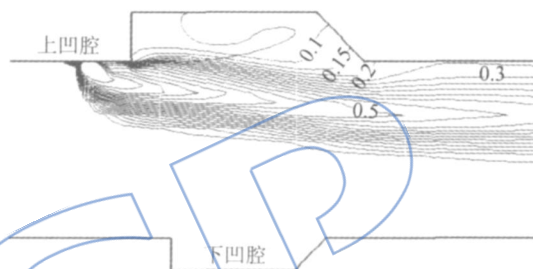


图 12 氢气浓度分布(单位: mol/m³)
Fig. 12 Hydrogen distribution (unit: mol/m³)

与单凹腔燃烧情况所不同的是凹腔下游 A, B 两处有火焰增强的现象(图 11),是因为该处有下游凹腔前沿激波和撞击激波射入,过了激波入射的位置,火焰的亮度又恢复到激波入射之前的强度.图 13 给出了单个凹腔和并联凹腔氢气稳定燃烧时的壁面压力分布,由图可见,在上凹腔位置及其上游壁面压力吻合的很好,过了上凹腔位置并联凹腔的上壁面压力有微弱的提高,测压点平均压力差在 11.1 %左右,与凹腔串联相类似,凹腔并联时燃料燃烧进行的更充分,壁面压力更高.

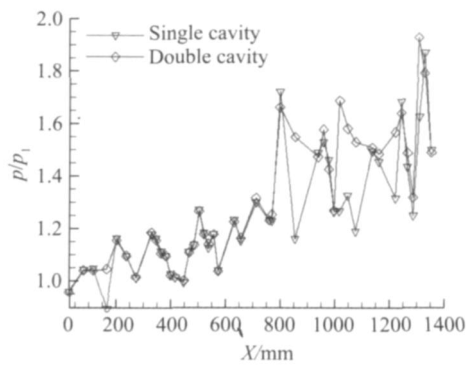


图 13 并联凹腔与单凹腔燃烧室壁面压力
Fig. 13 Comparison of wall pressure between dual/ single cavity combustor

3 结 论

本文利用高速摄影仪,以小当量比的氢气为研究对象,通过对氢气燃烧具体情况的分析,揭示了双凹腔相对于单凹腔在促进燃烧方面的优势,同时利用仿真结果解释了其中的原因.所得结论如下:

1) 氢气在试验条件下(小当量比)燃烧稳定,氢气稳定燃烧区域集中在剪切层和凹腔围成的三角区域以及燃烧室下游贴近壁面处,燃料喷口周围没有火焰;

2) 串联凹腔之间低速高压的回流区为燃料燃烧提供了有利的条件,在相同试验条件下,串联凹腔燃烧室的壁面压力比单凹腔要高;

3) 在一定范围内,串联凹腔之间的距离越短,放热越集中,壁面压力越高;

4) 在其它参数保持不变的情况下,燃烧时并联凹腔燃烧室上壁面压力比单凹腔要高.

参考文献:

[1] 李一兴,王玉璋,翁史烈,等. 高速摄影仪研究单水滴运动的实验初探[J]. 应用激光, 2006, 26(4): 247-250.

LI Yixing, WANG Yuzhang, WENG Shilie, et al. Preliminary exploration of single droplet motion with high speed photography metrical system[J]. Applied Laser, 2006, 26(4): 247-250. (in Chinese)

[2] 钱耀义,李云清,于秀敏. 小型直喷式柴油机喷雾特性的试验研究[J]. 内燃机学报, 2001, 19(2): 97-101.

QIAN Yaoyi, LI Yunqing, YU Xiumin. Experimental investigation of spray characteristic in diesel engine[J]. Transaction of CSICE, 2001, 19(2): 97-101. (in Chinese)

[3] Ben-Yaker A, Hanson R K. Cavity flameholders for ignition and flame stabilization in scramjets: review and experimental study[R]. AIAA 98-35018, 1998.

[4] 李大鹏. 煤油双模态冲压发动机燃烧室工作过程研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.

LI Dapeng. Study of kerosene fueled dual-mode ramjet combustor operation process[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)

[5] Holmes S G, Landrum D B. Experimental investigation of the heat transfer to tandem cavities[R]. AIAA 95-0631, 1995.

[6] 潘余. 多凹腔超燃冲压发动机燃烧室中流动与燃烧研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.

PAN Yu. Research on the combustion and flow process in the scramjet multi-cavity combustor[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)