

文章编号: 1001-2486(2009)04-0098-04

超声速流中凹腔交错布置流场研究*

潘余, 刘卫东, 王振国

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 利用高速摄影仪和纹影仪, 对超声速流中两凹腔火焰稳定器交错布置的流场结构进行了实验研究。结果表明, 凹腔间相互作用主要体现为激波的相互作用, 两凹腔间波系相互作用, 使各自流场结构发生变化; 两相同短凹腔或长凹腔交错布置, 凹腔各自波系增强; 短凹腔和长凹腔交错布置, 各自波系都减弱。

关键词: 超声速燃烧冲压发动机; 凹腔; 纹影; 激波相互干扰

中图分类号: V235.12 **文献标识码:** A

Interaction Between Interleaved Installation Cavities
in Supersonic Flow

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

(College of Aerospace and Material engineering, National Univ. of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Interaction between two interleaved installation cavities in supersonic flow was experimentally investigated with high speed camera and schlieren system. Results revealed that shock interaction was main affection between two cavities, shock interaction between two cavities lead to the change of cavities flowfield; double cavities with same length range (short or long) will strengthen the compression shock or expansion shock; different length cavities combine will decrease the flow strength.

Key words: scramjet; cavity; schlieren; shock interaction

吸气式超燃冲压发动机日渐显出其在军事和航空航天中应用的重要性, 受到世界各国的广泛关注。然而, 由于发动机内流速为超声速, 受发动机长度和燃料着火延迟等因素的影响, 很难在发动机内实现火焰稳定和高效地组织燃烧。在探索火焰稳定的过程中, 研究者们提出了很多火焰稳定方案^[1], 凹腔火焰稳定器由于其总压损失和阻力相对较小、凹腔内低速回流区能为点火和火焰稳定提供条件, 并且 CIAM 通过飞行演示对其火焰稳定能力和高效组织燃烧能力进行了验证^[5], 而得到广泛的关注^[2-4]。但是, 已有的结果几乎都集中于对单个凹腔流场结构研究, 而 CIAM 飞行演示用发动机燃烧室内交错布置了三个凹腔火焰稳定器。与采用单凹腔相比, 这种装有多个凹腔的燃烧室内流场将如何发生变化, 对超声速燃烧点火和火焰稳定有何帮助? 从目前来看, 未见任何公开发表的文献进行报道。因此, 对超声速条件下组合布置凹腔下的流场结构, 利用高速摄影仪和纹影仪进行了实验研究。

1 实验设备与条件

实验安装情况如图 1 所示, 实验系统由喷管、超声速流动管道和凹腔组成。二维结构喷管入口连接常温下高压空气储罐; 喷管出口尺寸为 $54.5\text{mm} \times 75\text{mm}$ ($H \times W$), 出口马赫数 $M = 2.64$, 静压 $P = 25.8\text{kPa}$, 静温 $T = 125\text{K}$ 。受实验条件的限制, 喷管出口至实验段之间通过长 678mm 的方形等直管道进行连接, 这增厚了实验段来流边界层, 同时也模拟了实际发动机隔离段的影响。凹腔为方形二维结构, 宽 75mm 、深度为 D 、长为 L 、后沿角为 A , 其中 L 为实际凹腔长度与凹腔深度的比值, 如 D10L3A45 表示凹腔深为 10mm 、长深比为 3、后沿角为 45° 。实验中依次在上凹腔 (up cavity) 位置安装平板、D10L3A45、D15L5A45 和 D10L7A18 凹腔, 在下凹腔位置 (down cavity) 安装 D10L5A45、D10L7A30 和 D10L8A18 凹腔,

* 收稿日期: 2009-04-01

基金项目: 国家高技术基金资助项目

作者简介: 潘余 (1980-), 男, 博士。

上/下凹腔前壁流向相距 23mm。实验段两侧壁面采用耐高温、高透光率的石英玻璃,窗口大小为 190mm × 95mm。

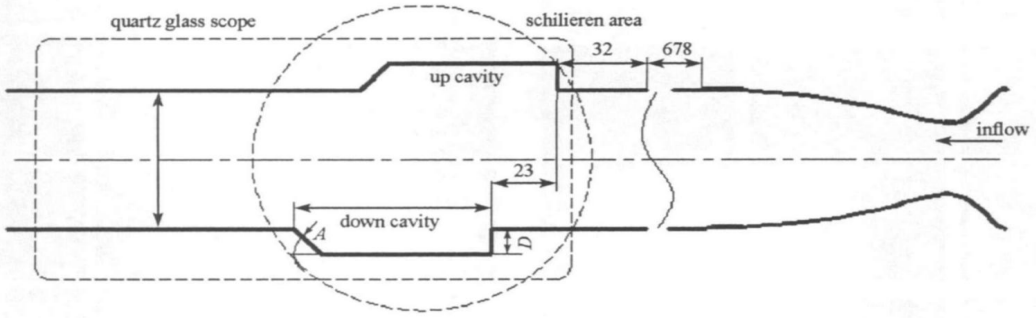


图 1 实验设备系统简图

Fig. 1 Experimental set-up of two cavities interleaved installation

采用纹影仪和高速摄影仪组合成一套高速纹影系统,纹影仪可采用碘钨灯光源和脉冲激光光源,受光源强度和光产生方式的影响,所得图像的单帧曝光时间分别为 1ms 和 8ns。同一实验内容均采用水平刀口对两种光源进行流场纹影拍摄,在不同曝光时间尺度上观察凹腔间相互作用。数值仿真采用了广为使用的商业软件 Fluent6.2, 结合标准的 $k-\omega$ 湍流模型、绝热壁面条件和耦合隐式格式进行二维 RANS 定常求解。

2 结果与讨论

图 2 为典型的两凹腔交错布置流场纹影结构,其中上凹腔为 D10L3A45,下凹腔为 D10L5A45;图中 (a) 为曝光时间 8ns 的结果, (b) 为曝光时间 1ms 的结果。可以看出,两种时间尺度上所获得的流场结构基本相同,但是曝光时间为 8ns 的图像较曝光时间为 1ms 的图像更接近于瞬态结构,它清楚地显示出主流的强湍流性、凹腔内部的回流结构(vortex)、凹腔自由剪切层(free shear layer),以及上凹腔前沿激波(compression shock)与下凹腔后沿再附激波(reattach shock)等内流场结构。在曝光时间为 1ms 的图像中,由于实验件加工误差导致壁面不平整而出现了一些流场中不应有的波系结构,在下文的每张图中这些波系结构的位置完全相同。

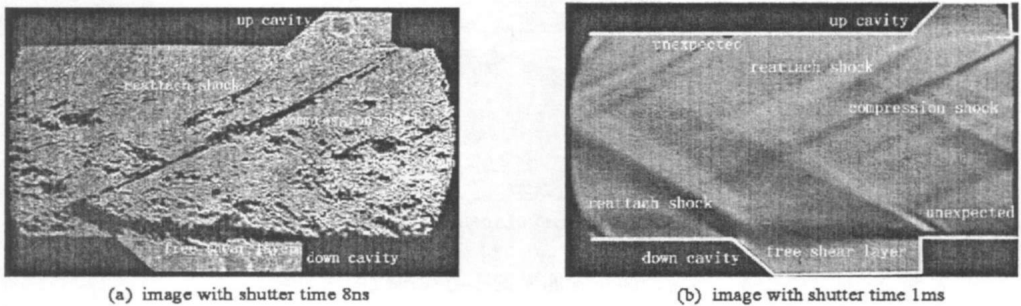


图 2 典型双凹腔流场结构

Fig. 2 Typical double cavities in supersonic flow

图 3 和图 4 为曝光时间分别为 8ns 和 1ms 时两凹腔交错布置的流场纹影图像。其中同一行内表示上凹腔相同,同一列表示下凹腔相同。可以看出两种曝光时间下流场结构基本相同,曝光时间为 8ns 的图像显示的波系更清楚。两种图像相互对照,共同显示出组合凹腔的流场结构。

图 5 为与实验条件相对应的数值仿真结果,流场分布与实验所得结果基本相同,并对纹影图像未能完全反映出的流场结构进行了补充。

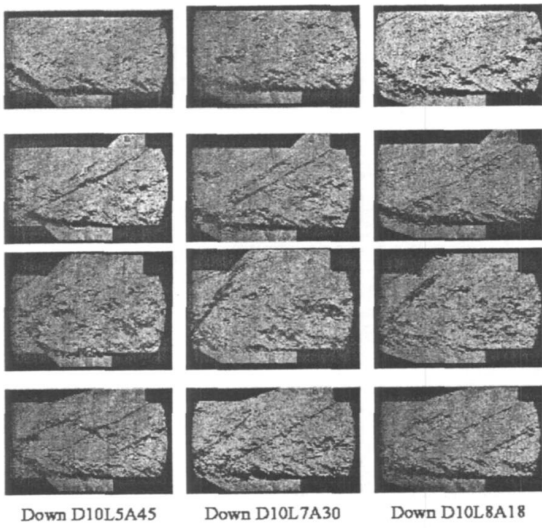


图3 不同凹腔布置时曝光时间为8ns的流场纹影
Fig. 3 Schlieren image of shutter time 8ns

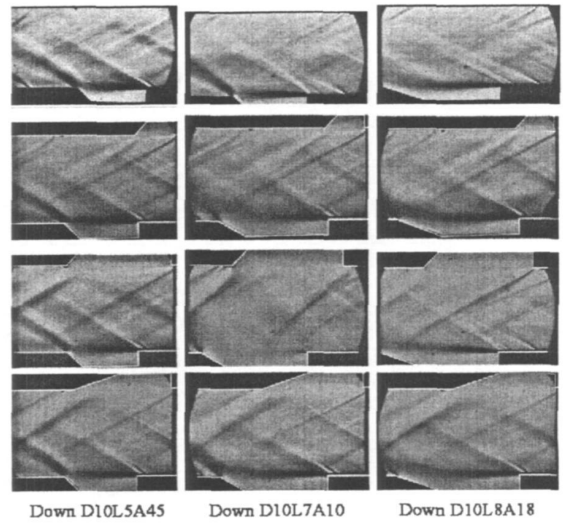


图4 不同凹腔布置时曝光时间为1ms的流场纹影
Fig. 4 Schlieren image of shutter time 1ms

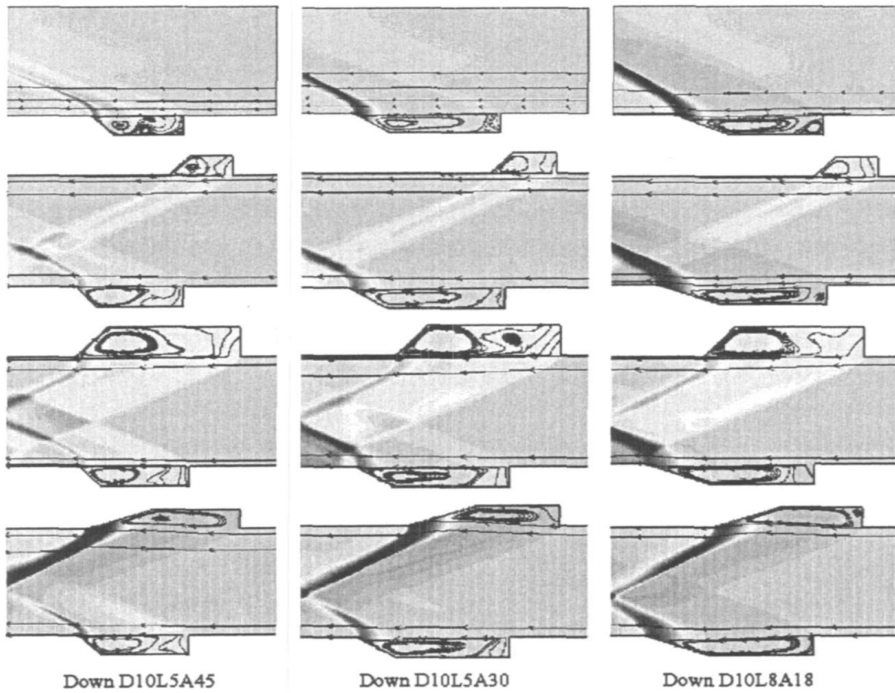


图5 不同凹腔布置的流场压力和流线的仿真结果

Fig. 5 The pressure contour and streamline of the flowfield simulated by numerical method

图3~图5中上凹腔纵向依次为平板、D10L3A45、D15L5A45和D10L7A18凹腔,综合比较可以看出:

(1) 凹腔流场结构。当 $L \geq 7$ (长凹腔) 时,凹腔前沿均形成膨胀波,凹腔自由剪切层发展距离长,剪切层更多地偏向凹腔内部,凹腔后沿再附激波较强;当 $L \leq 5$ (短凹腔) 时,凹腔前沿形成激波,凹腔内部压力较高。

(2) 上/下凹腔结构的匹配。上凹腔 D15L5A45 凹腔深度大,来流在凹腔内部滞止程度大,凹腔内部压力高,凹腔前沿形成激波,与之组合的下凹腔内部压力也得到了提高。例如,下凹腔 D10L5A45 凹腔前沿压缩波增强,下凹腔 D10L8A18 前沿膨胀波减弱。上凹腔为 D10L7A18 时,凹腔前沿形成膨胀波,下凹腔为 D10L5A45 时,上凹腔前沿膨胀波减弱;而下凹腔为 D10L8A18 时,凹腔前沿膨胀波进一步加强。

从上可以看出, 超声速流中相对布置凹腔间相互作用表现为单个凹腔流场特征的组合, 即上/下凹腔前沿均应形成激波时, 二者组合后各自激波进一步增强, 凹腔内部压力提高; 上/下凹腔前沿均应形成膨胀波时, 二者组合后使内流道扩大, 膨胀波进一步增强, 凹腔内部压力更低; 上/下凹腔前沿分别应形成膨胀波和激波时, 二者共同作用使各自波系减弱, 流场结构受对流动影响较大的凹腔主导, 有可能凹腔前沿膨胀波会变为压缩波, 或者由压缩波变为膨胀波。

(3) 上/下凹腔间波系相互干扰。上/下凹腔后沿激波相交, 形成强激波系, 使得流道内部速度降低压力提高。上凹腔 D10L3A45 和 D15L5A45 前沿激波与下凹腔 D10L5A45 前沿激波相交, 使各自激波得到增强, 流道内压力升高。上/下凹腔均为长凹腔时, 凹腔前沿均形成膨胀波, 流道内压力降低。在当前的两凹腔距离下, 所有上凹腔前沿波系撞击在下凹腔自由剪切层上或者是再附激波上, 使流动湍流度从撞击点开始增强, 这增强了主流的混合特性^[6]。

(4) 上/下凹腔流场结构的变化。对比单凹腔与组合凹腔流场结构, 凹腔交错布置组合后, 凹腔流场结构基本未发生变化, 只是凹腔内部流线发生了细微变化。例如, 上/下凹腔分别为 D15L5A45 和 D10L7A30 时, 上凹腔内部流线由一个靠近凹腔后沿的大回流涡, 发展为一个大的回流涡和一个内部小涡; 下凹腔内部流线由一个大回流涡逐步变为双涡结构。

3 结 论

(1) 在来流马赫数 2.64、静压 25.8kPa 和静温 125K 条件下, 对超声速流中两凹腔交错的超声速流场结构进行了高速纹影拍摄, 对两种时间尺度的纹影图像比较表明, 组合凹腔内流场存在复杂的相干波系结构;

(2) 与单凹腔对比, 受相对布置凹腔波系入射在自由剪切层的影响, 凹腔剪切层流动湍流度加大;

(3) 长凹腔和短凹腔上下交错布置, 短凹腔前沿激波减弱, 长凹腔前沿膨胀波减弱, 后沿激波增强;

(4) 两短凹腔上下交错布置, 凹腔前/后沿波系相互增强, 流经两凹腔后的主流压力升高; 两长凹腔上下交错布置, 凹腔前沿膨胀波增强, 凹腔内部压力降低, 两凹腔后沿激波相交形成强激波, 流经两凹腔的主流压力下降。

参 考 文 献:

- [1] Cain T, Walton C. Review of Experiments on Ignition and Flameholding in Supersonic Flow[R]. AIAA 2002-3877, 2002.
- [2] Ben-Yakar A, Hanson R K. Cavity Flame-holders for Ignition and Flame Stabilization in Scramjets: An Overview[J]. JPP, 2001, 14(4): 869-877.
- [3] 刘欧子, 胡玉立, 蔡元虎, 等. 超声速燃烧凹槽火焰稳定器的研究动态[J]. 推进技术, 2003, 24(3).
- [4] Gruber M R, Baurle R A, Mathur T, et al. Fundamental Studies of Cavity-based Flameholder Concepts for Supersonic Combustors[R]. AIAA 99-2248, 1999.
- [5] Vinogradov V, Kobigsky S A, Petrov M D. Experimental Investigation of Kerosene Fuel Combustion in Supersonic Flow[J]. J. of propulsion and power, 1991, 11(1): 130-134.
- [6] Nedungadi A, Lewis M J. A Numerical Study of Fuel Mixing Enhancement Using an Oblique Shock/Vortex Interaction[R]. AIAA 96-2920, 1996.