

文章编号: 1000-8055(2009)01-0055-05

超燃冲压发动机支板喷射燃料的燃烧过程试验

刘世杰, 潘 余, 刘卫东

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 长沙 410073)

摘 要: 利用高速摄影和高速纹影对超燃冲压发动机支板喷注燃料的燃烧流动过程进行了试验研究, 结果表明: 燃料喷注器与火焰稳定器之间的相对位置, 对流场的火焰结构和发动机性能有较大的影响, 支板侧喷较尾喷方案具有更好的燃烧效果. 燃烧与流动强烈耦合, 燃烧放热使得燃烧室压力升高, 改变了上游来流流场结构, 流场结构的改变同时又影响到了燃料的喷注、扩散和混合过程.

关 键 词: 超燃冲压发动机; 支板; 燃料喷注; 燃烧流动过程

中图分类号: V235. 213

文献标识码: A

Experimental study on the combustion and flow process in a scramjet with strut injector

LIU Shi-jie, PAN Yu, LIU Wei-dong

(Institute of Aerospace and Material engineering,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Experimental studies on the combustion and flow process in a scramjet combustor with strut fuel injector were presented. The results show that, the relative position of the fuel injector (strut) and flame holder (cavity) has great influence on the flame structure and scramjet performance. The combustion efficiency of fuel injected from the side of strut is better than from strut end. Combustion and flow process interact with each other intensively. Due to the quantity of heat released from combustion, the flow structure changes greatly, consequently, the fuel injection, diffusion and mixing with air are affected.

Key words: scramjet; strut; fuel injection; combustion and flow process.

燃料与空气的混合是超燃冲压发动机的一项关键技术. 由于发动机燃烧室中来流速度高、动量大, 燃料相对动量小, 导致燃料穿透度较低. 而支板燃料喷注方式可以很方便的把燃料带进主流, 对于大尺度流道燃烧室显得尤为必要.

从 20 世纪 70 年代中期美国 Langley 研究中心^[1]首次提出支板概念至今, 对于支板增强混合^[2-3]、稳定火焰^[4]以及阻力特性^[5]的研究已取得了很大进展, 分别提出了具有较好增强混合能力的带尾部交错几何结构的支板构型^[6]和稳定火焰

能力较强的多级支板^[7-8], 另外, 超燃冲压发动机的热试车结果也表明: 支板改善燃烧性能所带来的推力要大于其所产生的阻力^[9]. 但目前这些研究主要是以带支板的燃烧室为对象, 对整个发动机的工作性能进行了分析, 对燃烧室内部的支板喷射燃烧机理研究较少.

本文在空气流量 2.0 kg/s 的直连式试验台上, 利用高速摄影和高速纹影相结合的方法对支板燃料喷注燃烧流场进行了观测, 揭示了内部燃烧流场的特点.

收稿日期: 2007-12-29; 修订日期: 2008-03-12

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划

作者简介: 刘世杰(1983-), 男, 河南汝阳人, 博士生, 研究领域为高超声速推进技术.

1 试验设备和模型

该试验台主要由试验台架、空气加热器、模型发动机、点火器、各种管路供应系统和测量系统组成。试验模拟了飞行高度 24 km, 飞行马赫数 5.5 这一典型飞行弹道点, 空气加热器的出口参数为: 静压 $p = 76 \text{ kPa}$, 静温 $T = 724 \text{ K}$, 总压 $p_0 = 1.65 \text{ MPa}$, 氧气质量百分含量 $Y_{O_2} = 23.3 \%$ 。

试验所用的等截面燃烧室全长 1 408 mm, 进、出口面积均为 $54.5 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ 。整个燃烧室由隔离段、观测段和延长段组成, 其中观测段内的试验件安装如图 1 所示。支板安装于燃烧室上游, 凹腔安装于距支板较远的下游处, 常温液体燃料煤油通过支板加入流场。为使煤油着火, 凹腔前布置有诱导点火氢气, 点火成功后关闭氢气。试验过程中可通过前/后观察窗口对流场火焰结构进行观测, 还可对支板附近区域进行纹影拍摄。



图1 燃烧室内部安装示意图

Fig.1 Schematic diagram of the combustor model

分别进行了支板垂直安装和水平安装的燃烧试验研究, 支板尾喷安装方式如图 2 所示。在这两种安装情况下还分别进行了垂直于面 $abcd$ 和垂直于面 ef 的燃料侧向喷注。在垂直和水平安装方式下, 喷孔距下壁面的距离分别为 15 mm 和 27.25 mm, 为与支板燃料喷注进行比较, 在支板安装位置进行了壁面垂直煤油喷注。下文标记方便, 将壁面垂直喷射、垂直尾喷、垂直侧喷、水平尾喷、水平侧喷等喷注方式分别记为 InjM1, InjM2, InjM3, InjM4, InjM5。各喷注方式下喷孔距壁面的距离不同, 而超燃冲压发动机中燃料的喷注穿透度非常有限, 其流场分布十分依赖于它的喷注方式, 因此这些试验方案的细微差别将会给燃烧流场带来很大的影响。图 3 是试验控制时序。

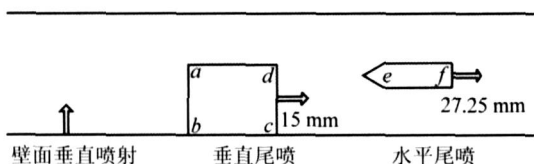


图2 不同燃料喷注方式安装示意图

Fig.2 Schematic diagram of different injection methods

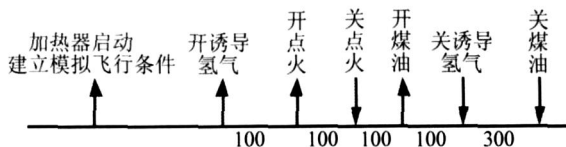


图3 试验控制时序

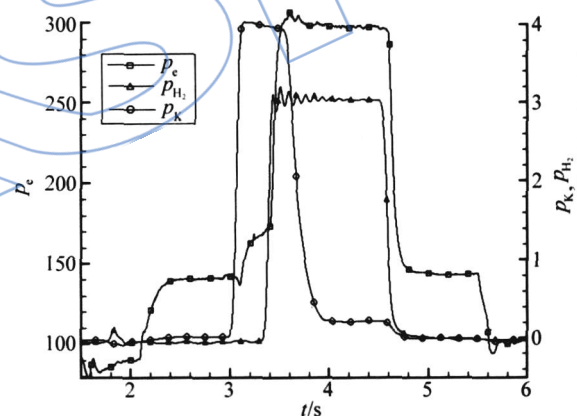
Fig.3 Experiment program

2 结果与讨论

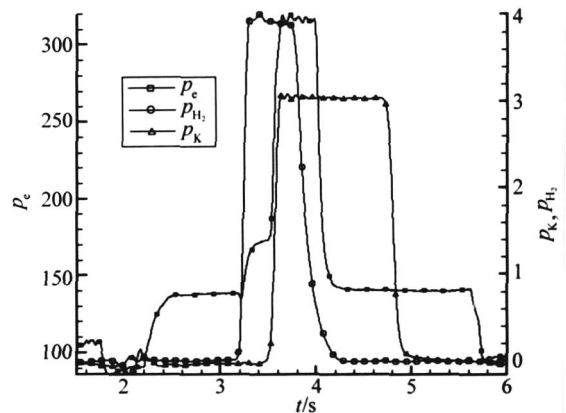
2.1 试验过程

发动机出口压力 (p_e)、氢气 (p_{H_2}) 和煤油 (p_K) 的喷前压力对比如图 4 所示。由图可知, 火花塞点火后氢气即实现了燃烧, 但由于当量比较低, p_e 虽有提升但升高幅度不大; 煤油阀门开启后, 喷入流场的煤油立刻被氢气火焰引燃, 燃烧释放出大量的热量, p_e 也随之大幅度攀升, 各喷注方式下的流场都表现出类似的变化过程。但由于燃料喷注方式不同, 各流场又表现出自己的特点来:

1) 在水平侧喷情况下, 氢气阀门关闭后, 发



(a) 水平侧喷(InjM5)



(b) 垂直侧喷(InjM3)

图4 氢气、煤油喷前压力与出口压力对比图

Fig.4 Comparison between the hydrogen/ kerosene injection pressure and combustor exit pressure

动机出口压力并没有下降,煤油实现了稳定的单独燃烧.壁面喷油方式表现出类似的性质.

2) 在垂直支板侧喷情况下,关闭氢气阀门后,由于阀门的后效作用,在一段时间内流场还有少量诱导氢气喷入,燃烧持续了一段时间,但煤油单独燃烧并不能维持.垂直支板尾喷流场也表现出了类似的性质.下文所提到的垂直安装方式下煤油单独燃烧并不是严格意义上的单独燃烧,而是指阀门关闭后的后效氢气与煤油共同燃烧的那段时间.

3) 在支板水平尾喷情况下,煤油甚至没有被诱导氢气点燃,氢油共燃都没能实现.分析认为,诱导氢气主要是在下壁面的凹腔内进行燃烧的,而支板尾喷情况下燃料的扩散效果不好,特别是展向分布范围非常小,集中于流场中心线附近,使得下游凹腔内没有煤油燃料扩散进来,诱导氢气火焰不能与煤油相接触,因此煤油没能被引燃.

由此看来,支板燃料侧喷方案较尾喷具有更好的燃烧效果;当把燃料喷入主流时,必须考虑其扩散程度与火焰稳定器之间相互关系的问题.

2.2 燃烧流场分析

燃料分布与火焰稳定器的相对位置很大程度上影响了燃烧流场的火焰分布.由图 5 和图 6 可知,在氢油共燃和煤油单独燃烧情况下,各喷注方式下的流场火焰分布都表现出明显不同的特性:

1) 水平安装侧喷方式下,由于支板位于流场中心线上,其作用下的燃料分布在燃烧室主流,因此无论在何种燃烧状态下,其火焰总是充满整个流道的.

2) 壁面垂直喷射方式下,喷孔位于下壁面,而超声速来流中燃料的穿透度较低,导致燃料的流场分布是贴近下壁面的.安装于下壁面的凹腔内有较多的煤油分布,再加上凹腔提供了非常有利的燃烧环境,因此无论在何种燃烧状态下,凹腔内部的燃烧都进行得非常剧烈,但流道的上半部分很少有燃烧火焰存在.即使在下游反压较高,引起火焰逆流前传瞬间(图 7),火焰也仅覆盖了流道的下半部分,与水平侧喷燃烧流场有很大的差别.

3) 垂直安装方式下,喷孔位于前两种喷油位置之间,即靠近下壁面又跟下壁面存在一定的距离,因此其流场就表现出不同于上两种的特性.总体来说,其火焰分布与壁面喷油方式的非常类似,都是以凹腔为依托的半流道式分布.但由于喷孔位置与下壁面有一定的距离,导致位于下壁面的

凹腔内煤油燃料分布较少,而凹腔剪切层内燃料分布较多,因此与壁面喷油方式相比其凹腔内部火焰亮度较弱,而凹腔剪切层处的火焰较亮.特别

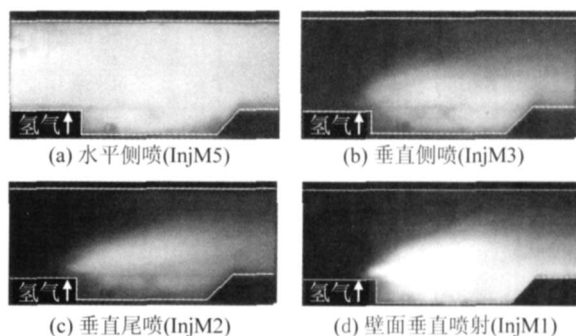


图 5 各燃料喷注方式下氢气煤油共燃时火焰比较

Fig. 5 Hydrogen/ kerosene combustion flame distribution of different fuel injection methods

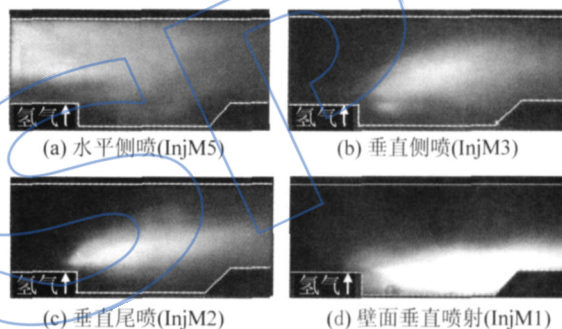


图 6 各燃料喷注方式下煤油单独燃烧时火焰比较

Fig. 6 Kerosene combustion flame distribution of different fuel injection methods

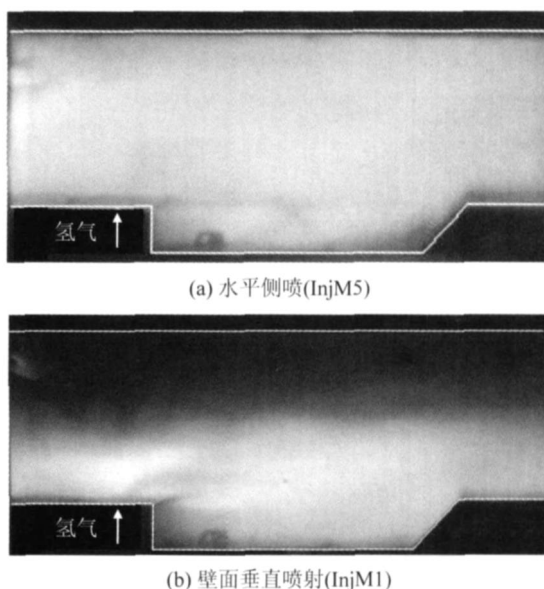


图 7 火焰前传瞬间流场火焰分布图

Fig. 7 Flame distribution while the combustion zone propagating upwind

是在诱导氢气阀门关闭后,凹腔内部几乎没有明显的火焰存在,导致煤油单独燃烧不能稳定进行。

在所进行的对比试验中,每次试验燃料当量比相当,并且燃料都进行了较为完全的燃烧,因此各次试验的壁面压力分布并没有很大的差别。虽然水平侧喷情况下的火焰分布充满整个流道,燃烧进行得较为剧烈,但由图4可知,其发动机出口压力较低。分析认为,水平侧喷时的燃烧是在燃烧室主流中进行的,发生区域较大。主流流速快,燃料从燃烧到离开在燃烧室中停留的时间短,总的释热量小;而其它的喷注方式燃料分布都靠近下壁面,下壁面凹腔内的回流区可起到延迟火焰的作用,使得燃料火团能够在燃烧室中停留更长时间,总的放热量较大,所以出口压力较高。可见要取得更好的燃烧室性能,必须考虑燃料喷注方式与火焰稳定器之间相互配合的问题^[10]。

2.3 燃烧对燃料喷注的影响

燃烧放热引起燃烧室压力的升高会极大地改变整个流场的状况。而在非预混燃烧流场中,燃料的喷注、扩散和混合过程都是在燃烧室内进行的,因此燃烧过程将会影响到燃料的流场分布。

图8所示为壁面垂直喷注方式下的瞬时流场纹影示意图,冷流时的流场状况如图8(a)所示,此时的流场结构非常简单,仅存在煤油垂直喷射所引起的弓形激波。燃料的穿透度也十分有限,贴着下壁面向下游发展。燃烧时的流场状况分别如图8(b)、(c)和(d)所示,燃料燃烧使得流场结构发生了巨大的改变。随着燃料的燃烧,燃烧室下游压力逐渐升高,壁面处的逆压梯度使得上壁面边界层发生分离,分离区压缩来流在流场中形成了明显的强激波;下壁面燃料垂直喷射引起的分离区进一步扩大,分离区前的压缩激波逆流前传并得到了增强。经过该激波后的来流,压力升高流速降低,并且流动方向也向着主流侧偏转,所有这些因素都使得此时的燃料穿透度大幅度提高,流场燃料分布较冷流时发生了很大改变。

图9所示为垂直侧喷安装方式下的流场纹影情况,其中图9(a)和(b)分别为无燃料喷射和燃料侧喷时的冷流流场状况。无燃料喷射时流场结构较为简单,仅包含支板压缩来流激波和支板导致的壁面边界层分离所引起的激波,燃料侧喷没有改变冷流时的流场结构,流场特征基本保持不变。图9(c)和(d)所示为燃烧状态时的流场情况,由前面的分析知,此时流场下游火焰较接近主流,

燃烧放热使来流受到压缩,流场中出现了激波串,支板前的压缩激波也明显脱体。燃烧室温度的提高使得煤油的蒸发距离缩短,展向分布范围也有所好转。燃烧流场具有一定的不稳定性,各时刻流场状况差异显著。

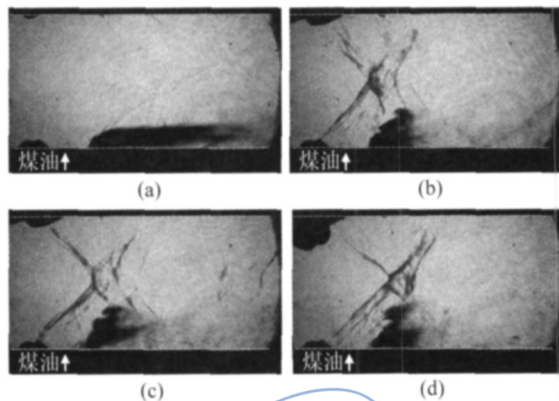


图8 壁面垂直喷射安装方式下流场瞬时纹影图

Fig.8 Instantaneous schlieren images of InjM1

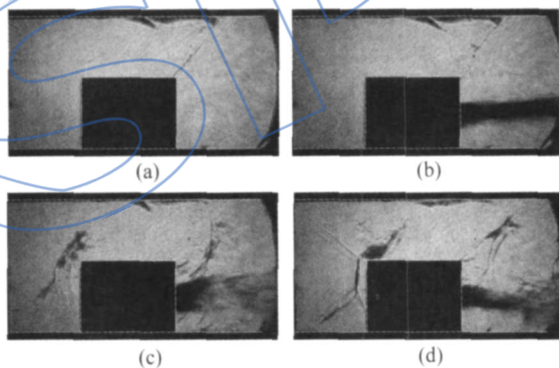


图9 垂直侧喷安装方式下流场瞬时纹影图

Fig.9 Instantaneous schlieren images of InjM3

3 结 论

试验得到的主要结论如下:

- 1) 燃料的喷注方式对超声速燃烧流场的火焰分布有着很大的影响,支板侧喷方案较尾喷具有更好的燃烧效果;
- 2) 若要取得更好的燃烧室性能,必须考虑燃料的注入方式与火焰稳定器之间相互配合的问题;
- 3) 燃烧流动强烈耦合,燃烧引起流场结构的变化会极大地改变燃料的喷注、扩散和混合过程。

参考文献:

- [1] Rogers R C, Capriotti D P, Guy R W. Experimental supersonic combustion research at NASA Langley [R]. AIAA-98-2506.
- [2] Semenov V L. The possibility investigation of strut fuel feed system use in scramjet combustors on results of tests

- with hydrocarbon fuel [R]. AD A-332687,1997.
- [3] Vinogradov V A , Shikhman Y M , Albegov R V ,et al. A-bout possibility of effective methane combustion in high speed subsonic airflow [R]. AIAA-2002-5206.
- [4] Denis B S R , Kau H P , Rist D. Flame stabilization in supersonic combustion [R]. AIAA-2002-5224.
- [5] 苏义. 支板超声速混合增强机理及其阻力特性研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2006.
- SU Yi. Investigations of supersonic mixing enhancement technology and drag of strut [D]. Changsha: National University of Defence Technology,2006. (in Chinese)
- [6] Sunami T, Nishioka M. Supersonic mixing and combustion control using streamwise vortices [R]. AIAA-98-3271.
- [7] Sunami T, Magre P. Experimental study of strut injections in a supersonic combustor using OH-PLIF [R]. AIAA 2005-3304.
- [8] Desikan S I N , Kurian J. Mixing studies in supersonic flow employing strut based hypermixers [R]. AIAA 2005-3643.
- [9] 余勇,丁猛,刘卫东. 煤油超音速燃烧的试验研究[J]. 国防科技大学学报,2004,26(1):1-4.
- YU Yong,DING Meng,LIU Weidong. Experimental study of supersonic combustion of kerosene [J]. Journal of National University of Defence Technology,2004,26(1):1-4. (in Chinese)
- [10] 陈立红,顾洪斌,张新宇. 支板凹腔一体化超燃冲压发动机实验研究 [J]. 工程热物理学报,2007,28(4):717-719.
- CHEN Lihong, GU Hongbin, ZHANG Xinyu. Experimental study on scramjet with cavity/ strut configuration [J]. Journal of Engineering Thermophysics,2007,28(4):717-719. (in Chinese)