

# 双模态燃烧室隔离段预喷注预蒸发煤油的 火焰回传特性试验研究\*

席文雄, 洪延姬, 赵文涛, 刘 毅, 徐庆尧

(中国人民解放军装备学院 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

**摘 要:** 以超燃冲压发动机双模态模型燃烧室为研究对象, 对隔离段喷注条件下的预喷注、预蒸发煤油点火和火焰回传特性进行了试验研究。试验分别针对典型的启动工况和巡航工况气流特点, 对比了  $Ma_2$  和  $Ma_3$  两个工况下的边界层逆流火焰传播过程。试验结果表明, 相比于单边预喷注, 双边预喷注的燃料横向扩散能力增强, 增加了火焰在主流中回传形成热壅塞的风险; 相比于  $Ma_2$  工况的低总温来流条件,  $Ma_3$  条件下因气流总温高, 采用预喷注方式注入的煤油喷雾其蒸发形成的气态预混气更加充分, 更易形成逆流传播的火焰。

**关键词:** 点火; 预蒸发煤油; 火焰回传; 隔离段; 预喷注

中图分类号: V231.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2016) 11-2126-09

DOI: 10.13675/j. cnki. tjjs. 2016. 11. 017

## Experimental Investigation on Flashback of Pre-Vaporized Kerosene Pre-Injected in Isolator of a Dual-Mode Scramjet Combustor

XI Wen-xiong, HONG Yan-ji, ZHAO Wen-tao, LIU Yi, XU Qing-yao

(State key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Equipment Academy of PLA, Beijing 101416, China)

**Abstract:** The ignition and flashback characteristic was investigated experimentally in a dual-mode scramjet combustor in which the liquid kerosene was pre-injected and pre-vaporized in isolator. The flame flashback with boundary propagation upstream was compared between  $Ma_2$  and  $Ma_3$  corresponding to the typical initiation and cruise flight condition. Results indicated that the risk of flame flashback and combustion induced choke under dual-side pre-injection increased because of enhanced transverse fuel mixing in main-flow compared with single-side case. The gaseous kerosene mixture was more easily formed which helps the flame propagation upstream due to the higher total temperature of  $Ma_3$  condition.

**Key words:** Ignition; Pre-vaporized kerosene; Flashback; Isolator; Pre-injection

### 1 引 言

采用液态碳氢燃料的超燃冲压发动机燃烧室工作时需要经历燃料的喷注、雾化、混合、蒸发、点火、燃烧等阶段, 其中所涉及的燃烧流动过程异常复杂<sup>[1]</sup>。

为提高液态燃料的超声速稳定燃烧性能, 需要强化燃料的蒸发和混合性能。双模态超燃燃烧室常采用一种集喷注、混合、点火、火焰稳定于一体的凹腔燃烧室设计<sup>[1~3]</sup>, 但该种常规布局方案, 喷注位置与火焰稳定区域一体化设计, 燃料进入凹腔火焰驻留区

\* 收稿日期: 2015-12-01; 修订日期: 2016-03-04。

基金项目: 自然科学基金 (51606220) 和激光推进及其应用国家重点实验室开放课题基金联合资助。

作者简介: 席文雄, 男, 助理研究员, 博士, 研究领域为超燃冲压发动机燃烧过程、等离子体点火助燃。

E-mail: 13739076081@163.com

域前的雾化蒸发距离较短,两相态燃料的吸热作用易导致熄火<sup>[4]</sup>,特别是点火前凹腔低速回流区易被稠密的燃油喷雾覆盖,点火难度大<sup>[5,6]</sup>。对于达到热平衡状态的燃烧室可以利用壁面温度,通过燃料再生冷却过程中获得的能量使煤油汽化,来提高液态燃料的蒸发性能<sup>[7,8]</sup>。充分利用来流空气能量的方法是采用燃料预先喷注,延长停留时间,促进喷雾液滴的沿程蒸发,以此保证燃料进入火焰区域前形成气态预混状态<sup>[9]</sup>。预先喷注方式常被用于激波诱导燃烧冲压发动机设计,在飞行器前体喷注气态燃料以形成充分的预混气<sup>[10]</sup>。一般认为预混状态的可燃气更易形成逆流火焰传播<sup>[11]</sup>。预喷注预混燃烧应用的主要难题在于燃料的预着火控制<sup>[12,13]</sup>和火焰回传问题<sup>[14]</sup>。

针对超声速气流中形成气态燃料预混气可能导致火焰回传问题,目前已获得一些认识,燃烧放热导致边界层分离是形成逆流火焰传播的主要原因<sup>[15,16]</sup>,预燃激波诱导作用对气流局部参数的强化也可能促进火焰发生回传<sup>[17]</sup>,并进而可能发生由爆燃向爆轰转变的火焰加速现象<sup>[18]</sup>。液态燃料的预喷注预蒸发燃烧技术,作为一种先进燃烧组织技术常在航空发动机低污染燃烧室设计中用于控制火焰温度,降低污染排放<sup>[13]</sup>。对于采用液态燃料的双模态燃烧室,在隔离段内预喷注煤油进行燃烧组织的效果如何,对此尚无充分的试验数据支撑。

本文以超燃冲压发动机双模态模型燃烧室为研究对象,对隔离段喷注条件下的预喷注、预蒸发煤油燃烧的火焰回传特性进行试验测试。试验分别针对典型的启动工况和巡航工况的气流特点进行。

2 试验方法

2.1 试验条件

试验在中科院力学研究所直连式试验台上进行。图1为试验系统的现场结构布置图。试验段采用垂直方式安装,根据从下至上的气流方向,系统由加热器、喷管段、隔离段、开窗燃烧室、扩张段五部分构成。试验废气通过强排装置引至室外。该试验台配备了完善的测量控制系统和光学流场测量设备,具备气态燃料和液态燃料的同时供给与流量测量功

能,能够开展超声速气流中的燃料喷注、混合、点火、燃烧等方面的基础研究。

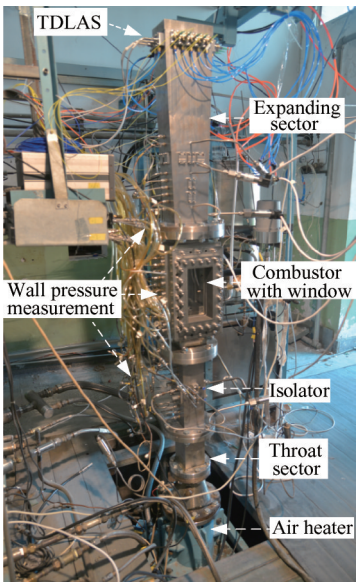


Fig. 1 Schematic of expanding combustor model

该试验台采用烧氢补氧方式对空气进行加热,可通过改变各工质的流量及其配比来实现加热空气总温、总压的宽范围调节。表1为本研究中选定的两类工况参数,分别对应于典型的超燃冲压发动机启动工况和巡航工况,可通过更换喷管实现燃烧室入口模拟 $Ma$ 数的切换。

本文点火燃烧试验在原试验系统的基础上,增设了等离子体点火和高能点火模块以及TDLAS测量模块。经测试,系统工作稳定,兼容性良好,各方面指标满足试验任务需求。

2.2 燃烧室构型

本文所设计燃烧室的三维结构简图如图2(a)所示。模型燃烧室由隔离段、开窗燃烧室、扩张段三部分组成。燃烧室采用模块化设计,其中喷注方式、凹腔结构、点火位置等影响点火和燃烧过程的关键结构参数可根据试验要求进行灵活更换。燃烧室的堵塞度可根据试验需要进行调节,可分别构成双边扩张型、单边扩张型、凹腔型燃烧室。图2(b)为用于试验的燃烧室内型面结构简图,图中实线为燃烧室壁面轮廓图,虚线表示通过更换壁面部件可实现的燃

Table 1 Typical condition of air heater simulated for  $Ma2$  and  $Ma3$

| Incoming velocity<br>$Ma$ | Total temperature<br>$T_0/K$ | Static temperature<br>$T_e/K$ | Total pressure<br>$p_0/MPa$ | Static pressure<br>$p_e/MPa$ | Mass of air<br>$M/(kg/s)$ |
|---------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------|
| 2                         | 890                          | 556                           | 0.69                        | 0.09                         | 1.82                      |
| 3                         | 1680                         | 702                           | 1.72                        | 0.04                         | 1.09                      |

烧室壁面轮廓。

隔离段长 370 mm,横截面尺寸 50mm×70 mm。在隔离段中部可设置上下对称的燃料喷注模块。隔离段沿程布置间距 25mm 的测压点。扩张段采用双面扩张设计,其中单边的扩张角度为 2°。扩张段全长 1100mm,在初始 350mm 位置均布间隔 25mm 的压力测点。

开窗燃烧段长 460mm,设置双面石英观察窗,用于点火过程的火焰动态过程高速摄影。开窗部位可设置用于火焰稳定的凹腔结构及其附属的燃料喷注孔。凹腔采用分体式结构设计,各组件可根据试验要求进行替换。

试验过程中采用了大深度的凹腔构型,凹腔深度为 30mm,长度 150mm,斜坡角度 45°。在凹腔底部可布置两处点火位置,分别距凹腔前沿距离为 50mm,110mm,可分别用于等离子体和高能半导体火花塞的安装。

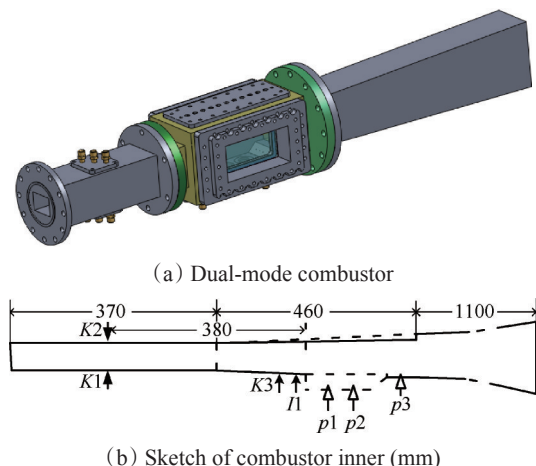


Fig. 2 Schematic of expanding combustor model

如图 3 所示的凹腔结构模块主要由四部分构成,分别为凹腔本体、前壁面喷注模块、斜坡面喷注模块、等离子体点火射流喷注模块。试验中根据试验目的可对凹腔部位进行封堵,以构成平板型燃烧结构。本文所采用的喷注位置点如图 2(b)所示。

试验中分别进行了等直型、扩张型、凹腔型三种燃烧室构型,分别代表了不同的燃烧室气流堵塞程度。试验过程中,煤油分别在 K1,K2,K3 三个位置进行喷注,喷注孔由横向排列的直径为 0.6mm 直孔组成。气态燃料在凹腔前方 15mm 的位置 I1 以 3mm 直径的直孔喷注。由于煤油孔加工存在一定误差,难以通过理论计算获得煤油的流量值范围。试验开始前通过流量标定试验,分别进行了各孔流量的单独标定。标定结果显示各喷注组件的流量流通能力基

本相同,保证了试验结果的一致性。

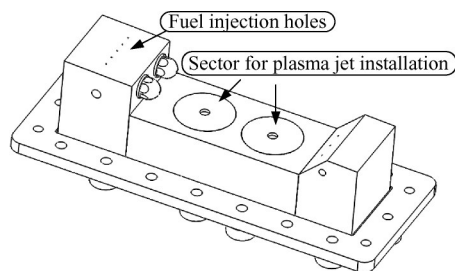


Fig. 3 Schematic of cavity constitution

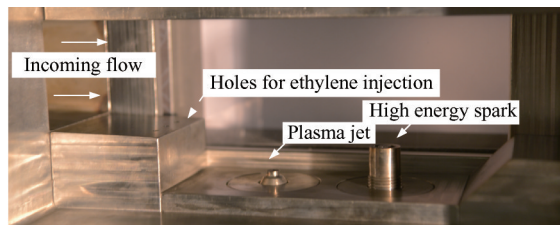
## 2.3 点火试验过程

为了提高试验效率,在一次试验时序过程中同时加入了气态、液态燃料的喷注动作,并设置了高能火花点火和等离子体射流的多次点火触发,降低了点火随机因素对试验结果的干扰,大大降低了试验调试成本。

高能火花采用半导体火花塞,采用频闪工作方式,工作频率为 100Hz,能量为 4J。等离子体射流器采用氩弧切割焊电源改装而成。图 4 为点火用的等离子体射流点火安装模块。等离子体采用高频起弧,起弧室内部起弧后的弧柱稳定保持,气流流过弧柱形成高温等离子体气,经喷嘴喷射进入燃烧室。工作气体采用空气,通过调节工作气的喷注压力对等离子体射流的功率进行控制。试验中通过调试,点火功率选定为 1kW。通过前期的初步试验<sup>[19]</sup>,并考虑燃烧室的背压特征,采用工作气压力 0.5MPa 作为基准工况。等离子体射流可在图 2



(a) Photograph of plasma plug



(b) Experimental installation of plasma plug within cavity

Fig. 4 Experimental installation for plasma ignition system

(b)所示的三个位置 $p_1, p_2, p_3$ 喷射,喷头缩进深度可调。这三个位置同时可用于半导体高能火花塞的安装。

图5为试验中采用的基准试验时序。在加热器有效参数时间范围内,采取先喷注气态燃料后喷注液态燃料的方式进行试验,并保证燃料的工作交互时间为1s,并在各自单独喷注的时间间隔内设置等离子体和高能火花点火。该试验时序可用于在一次试车过程中,同时考察液态燃料在两种电点火及其引导火焰点火方式下的火焰回传过程。

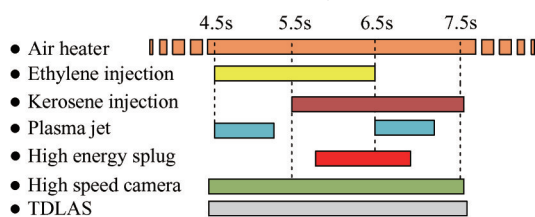


Fig. 5 Time sequence for ignition test

试验时序的全过程采用了TDLAS技术对扩张段出口的截面温度进行了测量。TDLAS采用 $3 \times 5$ 的点阵结构,安装图见图1所示。

## 2.4 试验列表

试验针对煤油喷注位置、喷注压力、点火位置、燃烧室构型等参数分别在 $Ma_2$ 和 $Ma_3$ 工况下进行了点火测试。共计进行了18次有效试验,表2、表3分别列出了试验过程的参数设置情况。

其中,A表示为带凹腔的燃烧室构型;B表示为单边扩张型燃烧室、C表示为双边扩张燃烧室构型,这三种燃烧室构型分别代表了三种不同的燃烧室截面气流扩张特征。PJ表示等离子体点火,HS表示半导体高能点火。 $p_1$ -PJ表示在 $p_1$ 位置安装等离子体点火,K1-3-4表示在K1位置采用3孔以4MPa喷注压力进行煤油喷注,I1-1-5表示在I1位置采用单孔以5MPa喷注压力进行乙烯喷注。表中所示的核算当量比是以来流空气总流量为基准核算的全局当量比。

在所进行的试验中,以基准试验时序为参考,每次试验中的时序有所调整,可以实现在单次试车过程中气态、液态燃料的强迫点火及其引导点火性能的考核。经试验结果统计,各个点火子过程在各次试车中的点火结果重复性较好,保证了点火结果的可信度。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 两种工况下的流场特征对比分析

不同工况的燃烧室来流条件代表着不同的点火

燃烧环境。图6为不同来流工况、不同燃烧室构型下点火前的燃烧室壁面静压分布曲线图。从图中看出, $Ma_2$ 气流条件下静压较高,相比于 $Ma_3$ 气流工况,有利于点火的进行。从扩张段的壁面压力分布趋势可以看出, $Ma_2$ 工况下加热空气进入燃烧室和扩张段后气流得到了充分的膨胀,静压沿程逐渐降低。对于 $Ma_3$ 气流,由于静压较低,气流进入扩张段后出现了较大的流向逆压梯度,形成了一定程度的流动分离。由于采用直连式设备进行点火燃烧模拟, $Ma_3$ 气流条件下静压较低,在扩张段出口位置处于过度膨胀状态,和实际飞行条件下发动机喷管状态存在一些区别,但该差别仅发生在扩张段处,对于下文中所要研究的隔离段火焰回传现象的条件模拟影响不大,燃烧室主流部分的参数特征和凹腔点火位置处的气流参数未受到出口气流影响。

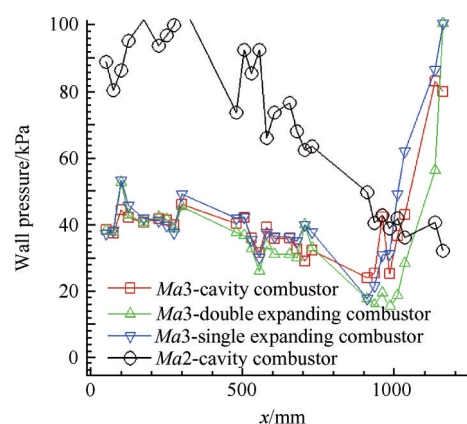


Fig. 6 Pressure distribution with different conditions and combustion shapes

试验发现,旨在提高 $Ma_2$ 条件下点火性能的大深度凹腔燃烧室构型,在 $Ma_3$ 工况下出现了点火和火焰稳定能力的下降,其原因在于 $Ma_3$ 气流条件下大深度凹腔带来的气流膨胀加速效应更加明显。图7对比了凹腔构型燃烧室在 $Ma_2$ 和 $Ma_3$ 气流条件下,乙烯点火过程中的典型壁面压力分布曲线图。从图中可以看出,随着点火成功,燃烧室内的压力出现抬升,在 $Ma_2$ 条件下,乙烯火焰的释热区主要集中在凹腔段。相比之下, $Ma_3$ 条件下的压力抬升点位于凹腔下游的扩张段区域,燃烧主要发生在下游扩张段的分离区内。这是因为在 $Ma_3$ 工况下采用同样的燃烧室结构,由于气流速度较快,点火燃烧的火焰延迟距离较长,其火焰位置也随之后移。结合高速火焰图像的观察,也表明在 $Ma_3$ 工况下凹腔内未出现火焰燃烧迹象。

**Table 2 List of experimental configuration under  $Ma2$  condition**

| Lists of<br>ignition test | Types of<br>combustor | Position of ignition<br>device | Scheme of injection          |                   |                   |
|---------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|
|                           |                       |                                | Position-number-pressure/MPa | Mass flow/(g/s)   | Equivalence ratio |
| 1 070101                  | A                     | $p1$ -PJ                       | $K3$ -10-2                   | $M_k=108$         | 0.83              |
| 2 070201                  | A                     | $p1$ -PJ & $p2$ -HS            | $K1$ -3-3                    | $M_k=22$          | 0.392             |
| 3 070202                  | A                     | $p1$ -HS & $p2$ -PJ            | $K1$ -3-4                    | $M_k=24$          | 0.511             |
|                           |                       |                                | $I1$ -1-5                    | $M_{C_2H_4}=36$   | 0.285             |
| 4 070203                  | A                     | $p1$ -HS & $p2$ -PJ            | $K1$ -3-4                    | $M_k=24$          | 0.347             |
| 5 070204                  | A                     | $p1$ -HP & $p2$ -PJ            | $K1$ -3-4                    | $M_k=24$          | 0.511             |
|                           |                       |                                | $I1$ -1-3                    | $M_{C_2H_4}=21.8$ | 0.171             |
| 6 070302                  | A                     | $p2$ -HS                       | $K1$ -3-4                    | $M_k=45$          | 0.344             |
|                           |                       |                                | $I1$ -3-3                    | $M_{C_2H_4}=21.8$ | 0.165             |
| 7 070303                  | A                     | $p1$ -HS & $p2$ -PJ            | $K1$ -3-5                    | $M_k=26$          | 0.2               |
|                           |                       |                                | $I1$ -3-3                    | $M_{C_2H_4}=22$   | 0.172             |
| 8 070601                  | A                     | $p1$ -HS & $p2$ -PJ            | $K1$ -3-4 $K3$ -3-4          | $M_k=50$          | 0.386             |
|                           |                       |                                | $I1$ -3-3                    | $M_{C_2H_4}=21.2$ | 0.166             |
| 9 070602                  | A                     | $p1$ -HS & $p2$ -PJ            | $K1$ -3-4 $K2$ -3-4          | $M_k=50$          | 0.389             |
|                           |                       |                                | $I1$ -3-4.5                  | $M_{C_2H_4}=31.4$ | 0.248             |

**Table 3 List of experimental configuration under  $Ma3$  condition**

| Lists of<br>ignition test | Types of<br>combustor | Position of ignition<br>device | Scheme of injection          |                   |                   |
|---------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|
|                           |                       |                                | Position-number-pressure/MPa | Mass flow/(g/s)   | Equivalence ratio |
| 1 070701                  | A                     | $p1$ -HS & $p2$ -PJ            | $K1$ -3-4 $K2$ -3-4          | $M_k=50$          | 0.646             |
|                           |                       |                                | $I1$ -3-3                    | $M_{C_2H_4}=22.5$ | 0.300             |
| 2 070702                  | A                     | $p1$ -HS & $p2$ -PJ            | $K1$ -3-4 $K2$ -3-4          | $M_k=50$          | 0.634             |
|                           |                       |                                | $I1$ -3-3                    | $M_{C_2H_4}=22.5$ | 0.289             |
| 3 070703                  | A                     | $p1$ -HS & $p2$ -PJ            | $K1$ -3-3 $K2$ -3-3          | $M_k=44$          | 0.560             |
|                           |                       |                                | $I1$ -3-5                    | $M_{C_2H_4}=34.9$ | 0.446             |
| 4 070704                  | A                     | $p1$ -PJ & $p2$ -HS            | $K1$ -3-3 $K3$ -3-3          | $M_k=44$          | 0.561             |
|                           |                       |                                | $I1$ -3-4                    | $M_{C_2H_4}=28.7$ | 0.367             |
| 5 070802                  | A                     | $p3$ -PJ                       | $K1$ -3-4 $K3$ -3-4          | $M_k=50$          | 0.640             |
|                           |                       |                                | $I1$ -3-5                    | $M_{C_2H_4}=35.4$ | 0.451             |
| 6 070901                  | C                     | $p3$ -PJ                       | $K1$ -3-4 $K2$ -3-4          | $M_k=50$          | 0.643             |
|                           |                       |                                | $I1$ -3-5                    | $M_{C_2H_4}=35.8$ | 0.454             |
| 7 070902                  | C                     | $p3$ -PJ                       | $K1$ -3-4 $K2$ -3-4          | $M_k=50$          | 0.636             |
|                           |                       |                                | $I1$ -3-5                    | $M_{C_2H_4}=36.2$ | 0.472             |
| 8 070904                  | B                     | $p3$ -PJ                       | $K1$ -3-4 $K2$ -3-4          | $M_k=50$          | 0.633             |
|                           |                       |                                | $I1$ -3-5                    | $M_{C_2H_4}=33.8$ | 0.425             |
| 9 071001                  | B                     | $p3$ -PJ                       | $K1$ -3-4 $K2$ -3-4          | $M_k=50$          | 0.632             |
|                           |                       |                                | $I1$ -3-5                    | $M_{C_2H_4}=35.1$ | 0.443             |

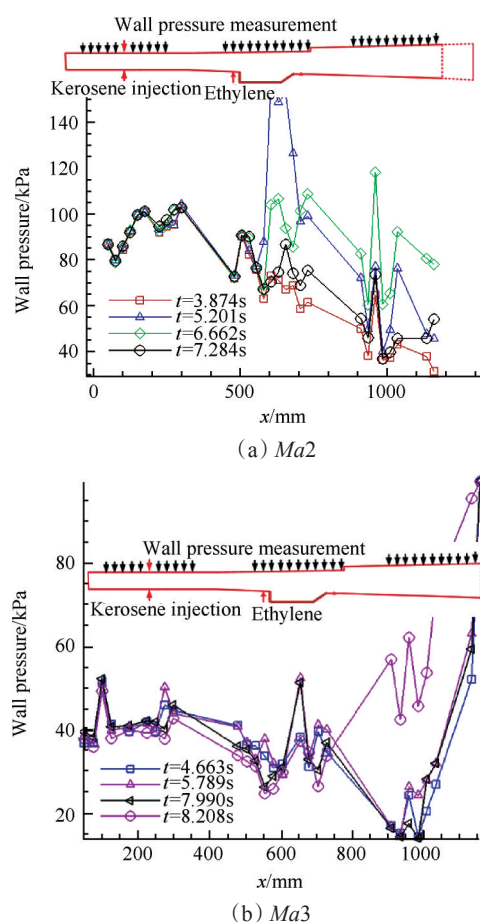


Fig. 7 Pressure distribution of ethylene combustion in cavity combustor under  $Ma_2$  and  $Ma_3$  condition

### 3.2 低总温 $Ma_2$ 工况试验结果分析

综合对  $Ma_2$  来流条件表 2 参数设置下的点火燃烧试验发现,在低总温条件下,即使采用本文所示的隔离段喷注方式,实现燃烧室的点火启动仍然是个难题。仅采用高能火花、等离子体射流这类局部能量激励的点火方式难以实现预蒸发煤油的直接点火,燃烧室的点火启动仍需借助引导点火方式,并保证一定的引导火焰强度。对比试验 070202, 070204, 070302 的单孔和三孔乙烯引导点火试验结果显示,单孔乙烯火焰覆盖面积窄,火焰强度弱,无法实现引导点火成功。在 K1 和 K3 位置共同喷注的条件下,如试验 070601 所示,近前方未充分蒸发的煤油将会对已存在的凹腔局部火焰产生冷却熄火作用。

在单边预蒸发煤油喷注情形下,如试验 070303 点火结果显示,点火成功后形成的煤油火焰主要以凹腔剪切层火焰的形态存在,不会发生沿凹腔上游边界层的火焰回传。图 8 为预蒸发煤油燃烧过程扩张段出口的 TDLAS 测量结果和火焰图像,表明在单边喷注条件下,燃料横向扩散距离有限,燃烧以单侧边区火焰的形式存在。同时壁面压力测量结果也显

示煤油燃烧位置集中于燃烧室的后段。

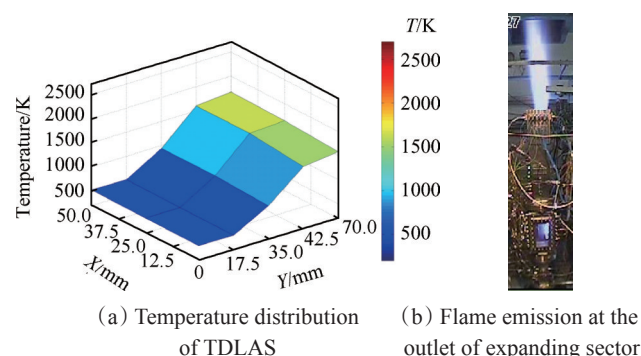


Fig. 8 Experimental results for single expanding combustor

图 9 为单边喷注预蒸发喷注条件下,点火试验过程中几类典型的稳态凹腔火焰结构类型。图 9(a) 为单孔乙烯喷注时的凹腔火焰稳定图像,由于单孔集中喷注,燃料展向混合程度受限,火焰强度较弱,无明显的预燃激波对火焰的诱导作用,火焰大部分区域集中在凹腔后端;图 9(b) 为三孔乙烯喷注时的稳定火焰结构,由于当量比提高,释热强度也随之加大,燃烧区域集中在剪切层区域,火焰随剪切层发展增长迅速,产生的预燃激波串在剪切层火焰面上产生明显的突起结构;图 9(c) 为乙烯与煤油在引导点火阶段的稳态火焰,由于综合燃料当量比增大,激波诱导的火焰突起点有所前移;图 9(d) 为煤油单独工作时的自稳定火焰结构,火焰的明亮区域大部分集中于凹腔后段,剪切层区域的火焰厚度发展缓慢。综合本文试验条件下的单边喷注火焰结构可以看出,在单边预喷注条件下,由于预蒸发煤油在横向上的扩散限制,火焰呈现出凹腔近前方喷注条件下类似的扩散型凹腔剪切层火焰结构。

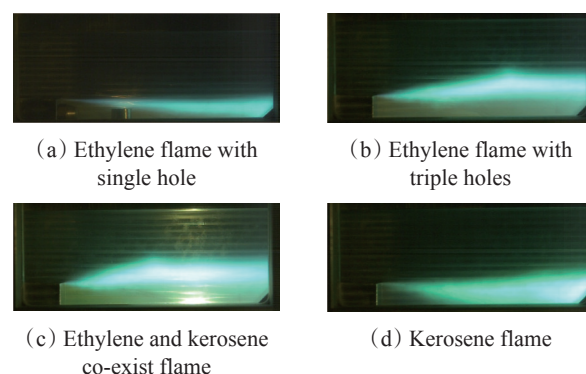


Fig. 9 Typical flame structure images within cavity

采用隔离段双边喷注能够提高燃料在燃烧室横向空间的扩散性能,提高燃料气的预混程度,火焰结构也将由此发生变化。试验 070602 采用隔离段双边

位置K1和K2处进行喷注,采用乙烯引导点火。试验结果显示,在该条件下,燃烧室能够实现成功点火,燃烧火焰出现在设置凹腔的单侧区域,并表现出与单边喷注时类似的火焰特征。所不同的是,相比于单边喷注,双边喷注条件下,一方面增加了燃料在燃烧室横向截面上的预混度,另一方面因双侧供油,增加了燃料的全局当量比,煤油火焰在燃烧室下游燃烧更剧烈,更容易引起边界层分离,增加了预混火焰的逆流传播的风险,并表现出强烈的火焰不稳定特征。图10为不稳定的逆流传播火焰发生时的凹腔局部火焰图像。从发生火焰回传前后的图像对比可见,火焰回传时,燃烧辐射发出火焰强光,燃烧释热过程加剧。该现象与压力波和燃烧流场之间的正反馈机制密切相关:燃烧释热导致下游逆压梯度形成边界层分离,边界层分离对气流的阻碍作用产生诱导激波串,诱导激波串波后的气流参数强化火焰逆流传播并加剧燃烧放热。由于气流的不稳定性,该现象表现出瞬时特性,在单次时序运行中时有发生,随机性很强,难以预测。

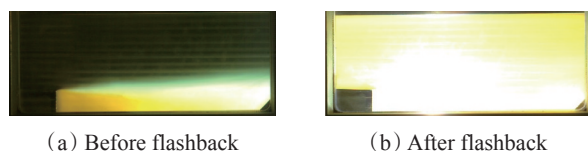


Fig. 10 Local cavity flame images when flash back

综合以上试验结果表明,在本文的研究条件下,通过在隔离段喷注的方式,能够在一定程度上通过提高煤油的预蒸发性能来改善喷雾煤油进入凹腔火焰区域时的点火燃烧性能。但是,预蒸发条件下,随着预混度的增加,增加了预混火焰回传导致燃烧振荡的风险。

### 3.3 高总温 $Ma_3$ 工况试验结果分析

相比于 $Ma_2$ 来流条件, $Ma_3$ 来流下空气总温较高,预喷注蒸发过程更加充分。通过试验发现,随着来流总温的提高,燃料预喷注条件下蒸发和混合性能进一步提升,煤油喷雾进入燃烧区域时,主要以气态预混煤油的形式存在。

试验070701,070702,070703,070704对凹腔构型下的燃烧室进行了点火试验。由于空气总流量减少至 $1.09\text{kg/s}$ ,相同的燃料喷注条件下,燃料总当量比增大。各次试验中均能实现乙烯火焰的建立,壁面压力显示燃烧位置靠后。试验发现,若维持喷注条件不变,仅改变空气来流条件,预喷注煤油的点火和火焰稳定性能无法由 $Ma_2$ 直接向 $Ma_3$ 条件外推。

在本文试验的参数条件下,预喷注煤油的引导点火存在一定困难。基于上节所述的两种工况下气流参数特点的分析,主要原因在于:(1) $Ma_3$ 条件下气流速度增加,乙烯燃烧火焰靠后,煤油火焰衔接位置主要在扩张段形成的边界层回流区内进行,乙烯火焰稳定区域较小,易被冷态煤油蒸气熄灭;(2) $Ma_3$ 条件下,凹腔区域的截面扩张会造成凹腔剪切层区域的主流气流出现一定的加速效应,气流拉伸率加大,火焰在凹腔剪切层的传播出现困难,火焰稳定能力下降,该特点可从下文所述的填平凹腔部位的扩张型燃烧室试验中得到进一步验证。

试验070703结果显示通过加大乙烯喷注压力和引导火焰强度,可实现煤油引导点火成功。图11为试验070703试验中 $Ma_3$ 来流条件下的凹腔燃烧室点火过程中的火焰逆流传播高速摄影图像。图中火焰图像为随机截取的典型火焰图,不代表一次完整的火焰传播过程的时间序列。与 $Ma_2$ 条件类似,在该工况下,火焰的逆流传播表现出较强的不稳定性特征,火焰在燃烧室上下游之间大幅振荡。所不同的是此时燃烧室未发生燃烧堵塞,燃烧仍以凹腔火焰的形式存在,具有明显的扩散火焰边界。

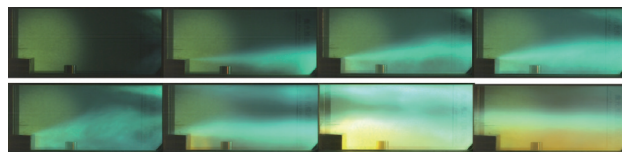


Fig. 11 Images of pre-vaporized kerosene flame upstream propagation

试验通过填平凹腔区域的办法对平板射流构型进行了点火研究,等离子体射流设置在燃烧室段和扩张段之间形成的突扩台阶处,台阶高度约为 $6\text{mm}$ 。试验发现,在同样的参数条件下,试验070802的单边扩张构型比试验090902的双边扩张构型更易实现乙烯引导点火的成功。由此可见,虽然设置凹腔能够在局部形成低速火焰,但是在 $Ma_3$ 条件下,设置凹腔处的燃烧室截面的扩张效应将使核心流部分产生加速,使得凹腔低速火焰跨越剪切层时因气流拉伸率过大,抑制火焰产生,因此设置大尺度的凹腔火焰稳定器并不一定能增强火焰稳定性能。

图12为试验071001试验中扩张型燃烧室在 $Ma_3$ 来流条件下点火过程中不同点火阶段的典型壁面压力分布曲线, $t=4.495\text{s}$ 为点火前, $t=4.663\text{s}$ 为乙烯引导火焰建立后, $t=5.722\text{s}$ 为煤油火焰建立阶段。此试验结果表明,采用扩张型燃烧室,在预蒸发喷注下,更

易导致火焰回传。

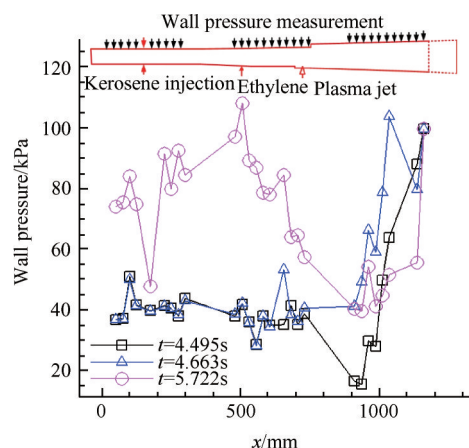


Fig. 12 Wall pressure distribution with various operation stages

图 13 所示为试验 071001 乙烯引导煤油点火导致的火焰回传图像。从中可以看出,采用隔离段双边喷油,煤油火焰从上下边界逆流向上传播。通过对图像时间序列的推算,火焰边界相对于燃烧室的前传发展速度值达 1500m/s,表现出爆轰火焰传播的速度特征。预蒸发煤油火焰回传现象发生时,火焰辐射图像为黄色,表现出与  $Ma_2$  气流壅塞时类似的火焰辐射强度特征。结合图 12 的压力分布结果,表明此时火焰回传至隔离段燃料喷口,并对隔离段流场产生干扰,在扩张段入口处出现了燃烧热壅塞。综上可知,在高总温工况下,预蒸发煤油更易导致预混火焰的回传而发生燃烧热壅塞。

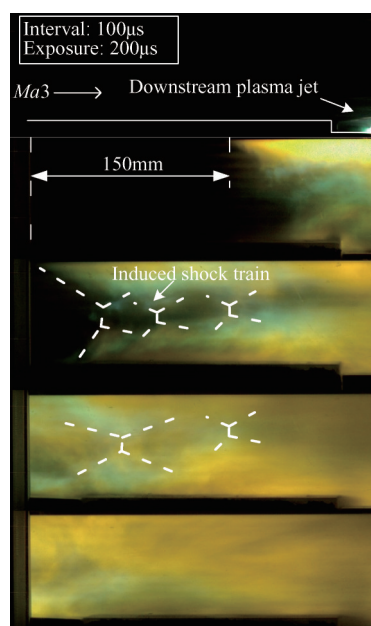


Fig. 13 Upstream propagation of premix flame along wall boundary

通过对  $Ma_2$  和  $Ma_3$  工况下的预蒸发煤油点火燃烧初步测试表明,通过提前喷注促进雾化煤油蒸发和混合的方法能够在一定程度上改善点火性能,但存在火焰回传、导致燃烧热壅塞发生的风险。下一步需采用更加丰富、精确的测量手段,对超声速条件下的扩散火焰和预混火焰的火焰结构及其传播过程开展更深入地对比研究,明晰两类火焰发生的条件边界。

## 4 结 论

通过本文研究,得到以下结论:

(1) 相比于单边预喷注,双边预喷注的燃料横向扩散能力增强,增加了火焰在主流中回传形成热壅塞的风险。

(2) 相比于  $Ma_2$  工况的低总温来流条件,  $Ma_3$  条件下因气流总温高,采用预喷注方式注入的煤油喷雾其蒸发形成的气态预混气更加充分,更易形成逆流传播的火焰。

(3)  $Ma_3$  工况下,扩张型燃烧室相比于凹腔型燃烧室导致火焰回传的风险更大,这是因为该条件下凹腔段的气流膨胀效应能在一定程度上阻碍火焰回传的发展。

**致 谢:**感谢中科院力学研究所范学军研究员、张泰昌副研究员为本文试验开展提供的便利试验条件和技术支持;感谢激光推进及其应用国家重点实验室光学诊断研究小组王广宇副研究员、饶伟助理研究员在 TDLAS 测量方面提供的帮助。

## 参考文献:

- [1] 孙明波. 超声速来流稳焰凹腔的流动及火焰稳定机制[D]. 长沙:国防科技大学, 2008.
- [2] Ben-Yakar A, Hanson R K. Cavity Flame-Holders for Ignition and Flame Stabilization in Scramjets: an Overview [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17 (4):869-878.
- [3] 丁 猛. 基于凹腔的超声速燃烧火焰稳定技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2005.
- [4] Aggarwal S K. A Review of Spray Ignition Phenomena: Present Status and Future Research[J]. *Progress in Energy and Combustor Science*, 1998, 24: 565-600.
- [5] 席文雄, 王振国, 李 庆, 等. 超声速气流中煤油喷雾的热射流强迫点火[J]. *航空动力学报*, 2012, 27 (11): 2436-2441.
- [6] 席文雄, 王振国, 刘卫东, 等. 超燃冲压发动机点火方案对比试验研究[J]. *推进技术*, 2013, 34(3): 383-389. (XI Wen-xiong, WANG Zhen-guo, LIU

- Wei-dong, et al. Experimental Comparison on the Scheme of Ignition in Dual-Mode Scramjet[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(3): 383-389.)
- [ 7 ] 俞 刚, 李建国, 赵 震, 等. 超声速模型燃烧室中气化煤油喷注研究[J]. 推进技术, 2005, 26(2): 97-100. (YU Gang, LI Jian-guo, ZHAO Zhen, et al. Investigation of Vaporized Kerosene Injection in a Supersonic Model Combustor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2005, 26(2): 97-100.)
- [ 8 ] Taichang Zhang, Jing Wang, Xuejun Fan. Combustion of Vaporized Kerosene in Supersonic Model Combustors with Dislocated Dual Cavities[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2014, 30(5).
- [ 9 ] Viacheslav A V, Yurii M S, Corin S. Review of Fuel Pre-Injection Studies in a High Speed Airflow [R]. *AIAA* 2006-1030.
- [ 10 ] Jean P S, Bernard P. Hypervelocity Fuel/Air Mixing in a Scramjet Inlet[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2004, 20(2).
- [ 11 ] Kurdyumov V, Fernandez-Tarrazo E, Truffaut J M, et al. Experimental and Numerical Study of Premixed Flame Flashback[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(1): 1275-1282.
- [ 12 ] 乔英杰, 毛荣海. 贫油预混预蒸发燃烧室回火现象的大涡模拟[J]. 航空学报, 2014, 35(6).
- [ 13 ] 张 群, 范 玮, 徐华胜, 等. 低排放航空燃气轮机燃烧技术[J]. 航空制造技术, 2013, 9.
- [ 14 ] Sislian J P, Martens R P, Schwartzentruber T E. Numerical Simulation of a Real Scramjet Flowfield [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(5).
- [ 15 ] Mathur T, Gruber M R, Jackson K, et al. Supersonic Combustion Experiments with a Cavity-Based Fuel Injector[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17(6): 1305-1312.
- [ 16 ] O'Byrne S, Stotz I, Neely A J, et al. OH PLIF Imaging of Supersonic Combustion Using Cavity Injection [R]. *AIAA* 2005-3357.
- [ 17 ] Choi J Y, Noh J, Byun J R, et al. Numerical Investigation of Combustion/Shock-Train Interactions in a Dual-Mode Scramjet Engine[R]. *AIAA* 2011-2395.
- [ 18 ] Ming-Bo Sun, Xing-Da Cui, Hong-Bo Wang, et al. Flame Flashback in a Supersonic Combustor Fueled by Ethylene with Cavity Flameholder[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2015, 31(3): 976-980.
- [ 19 ] 钟文丽, 席文雄, 段立伟, 等. 超声速气流点火助燃用等离子体火炬的试验研究[J]. 推进技术, 2015, 36(10): 1528-1532. (ZHONG Wen-li, XI Wen-xiong, DUAN Li-wei, et al. Experimental Investigation on Plasma Torch for Supersonic Flowfield Ignition and Combustion[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(10): 1528-1532.)

(编辑:朱立影)