

氢气引导乙烯火焰非定常燃烧过程

邓维鑫, 李 季, 张冬青, 田 野

(中国空气动力研究与发展中心 空天技术研究所, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 基于脉冲燃烧直连式试验台, 开展了超燃冲压发动机氢气引导乙烯火焰的非定常燃烧过程研究。燃烧室入口条件为马赫数 2、总温 950 K 和总压 1.0 MPa。试验过程分为 4 个阶段: 冷流、引导氢气单独燃烧、引导氢气点燃乙烯、乙烯单独燃烧。基于高频壁面压力测量和火焰荧光高速摄影, 获得了代表性测点的压力时间曲线及燃烧室内火焰发展历程, 提取了压力平均值、振荡幅度和频率、着火时间及反应位置等重要信息, 分析了不同燃烧阶段的非定常特性。试验结果表明: 在氢气单独燃烧阶段, 非定常特性源于凹槽后斜坡区域氢气反应强度的变化。在氢气点燃乙烯阶段, 非定常特性由氢气和乙烯火焰的“交接”引起。在乙烯单独燃烧阶段, 非定常特性由燃烧和超声速流动之间的耦合引起。

关 键 词: 超燃冲压发动机; 火焰; 非定常; 燃烧; 超声速; 流动

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Unsteady combustion process of ethylene flame with pilot hydrogen

DENG Weixin, LI Ji, ZHANG Dongqing, TIAN Ye

(Aerospace Technology Institute,

China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: Unsteady supersonic combustion process of hydrogen piloted ethylene flame in a scramjet combustor was carried out based on a direct-connected facility. The results were obtained under the inflow conditions of Mach number 2, total temperature 950 K and total pressure 1.0 MPa respectively. Ambient ethylene was used as the main fuel and ignited by pilot hydrogen. The whole experimental process could be divided into four periods: cold flow without combustion, hydrogen combustion alone, ethylene igniting by hydrogen, ethylene combustion alone. The curves of wall pressure with time and combustion development processes at five important locations in the combustor were gained through high frequency pressure transducers and flame photographs. Some insight information, including the wall pressure average value, oscillation extent and frequency, ignition time and location, were picked out. Then the unsteady combustion characteristics in different periods were analyzed and discussed. The unsteadiness came from the change of acting intensity at cavity aft-step in period of hydrogen combustion alone. The transfer between hydrogen and ethylene produced unsteady combustion in period of ethylene igniting by hydrogen. In period of ethylene combustion alone, the unsteadiness emerged from the coupling of flow and combustion.

Keywords: scramjet; flame; unsteady; combustion; supersonic; flow

超燃冲压发动机是未来吸气式推进系统的核心部件之一^[1], 为了发展能够在大气层中持续高超声速飞行的吸气式推进系统, 有必要研究超燃

冲压发动机燃烧室中复杂的流动、混合和燃烧过程^[2]。长期以来, 超声速燃烧的研究主要集中于点火和火焰稳定^[3-5], 随着研究工作逐渐深入, 燃

收稿日期: 2021-08-08

基金项目: 智强基金; 国家自然科学基金青年基金(11902337, 51706237)

作者简介: 邓维鑫(1983—), 男, 副研究员, 博士, 研究领域为高超声速推进技术。E-mail: dengweixin21@aliyun.com

引用格式: 邓维鑫, 李季, 张冬青, 等. 氢气引导乙烯火焰非定常燃烧过程[J]. 航空动力学报, 2023, 38(1): 79-85. DENG Weixin, LI Ji, ZHANG Dongqing, et al. Unsteady combustion process of ethylene flame with pilot hydrogen[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(1): 79-85.

烧室中的非稳态燃烧过程成为了一个新的研究热点。

Ma 等通过试验发现在安装气动斜坡燃料喷孔和一个凹腔的超燃冲压发动机燃烧室中存在燃烧振荡,对于液态 JP-7 燃料,其振荡频率为 100~160 Hz,对于气态乙烯燃料,其振荡频率为 300~360 Hz^[6]。随后的准一维模型分析结果表明,产生流动振荡的机制是燃料喷孔和火焰区之间的声学-对流相互作用。Li 等对 Ma 等试验中的流动发展和燃烧动力学进行了理论和数值研究,火焰区的释热和燃料喷注混合之间的耦合被认为是引起非稳态燃烧的主要原因^[7]。Lin 等研究了乙烯燃料超燃冲压发动机燃烧室中的热声不稳定,结果表明火焰区的非稳态燃烧与预燃激波和燃料混合之间的相互作用是潜在的机制。激波与火焰之间的闭环反馈决定了振荡频率的下限,而喷孔与火焰之间的闭环反馈决定了频率上限^[8-9]。Micka 观察到了凹腔和射流尾迹之间的火焰振荡^[10],这种非稳态燃烧没有一个固定的频率,没有与任何声学模态耦合,该文指出上游的自点火促进了火焰传播并控制火焰振荡频率。Wang 和 Sun 等认为,燃料在凹腔上游喷注时将产生一个当量比足够高的良好预混区,此时在燃烧室中能够形成一种爆燃转爆轰类型的低频非稳态燃烧^[11-12]。

目前,关于超燃冲压发动机燃烧室中的非稳态超声速燃烧过程的研究尚不充分,本文基于深入理解超燃冲压发动机燃烧室中的非稳态超声速燃烧过程的研究需求,在直连式试验台开展了氢气引导乙烯火焰的非定常燃烧过程研究,从壁面压力和火焰图像两方面分析了不同的燃烧阶段中振荡产生的机制和原因,试验结果可望为进一步的数值模拟和发动机控制模型研究提供若干依据。

1 试验设备

1.1 脉冲燃烧试验台

试验用的直连式脉冲燃烧试验台前期已开展大量的基础研究,详细设备介绍可参考文献[13-18]。主要的子系统包括:气源系统、富氧空气供应系统、氢气供应系统、燃烧加热器、设备喷管和真空箱。该风洞利用氢气与富氧空气燃烧来获得试验来流。试验来流的氧气摩尔分数与大气一致,保持为 0.21。加热器内的燃烧稳定后,氢气燃烧产生的高温气体就通过二元设备喷管加速到设计

的马赫数。该设备目前配有马赫数为 2、2.6 和 3 的喷管,可以模拟飞行马赫数为 4~6.5 的来流条件。本文的试验来流模拟飞行马赫数为 6.5 条件,燃烧室入口气体的马赫数(Ma)、总压(p_t)和摩尔分数气体(x)参数如表 1 所示。

表 1 燃烧室入口气流参数

Table 1 Gas parameters at combustor entry

Ma	p_t/MPa	T_t/K	$x_{\text{H}_2\text{O}}/\%$	$x_{\text{O}_2}/\%$	$x_{\text{N}_2}/\%$
3	2.7	1 850	30	21	49

来流总温通过铂铑合金 B 型热电偶测量。来流总压由壁面静压和马赫数通过瑞利皮托管方程计算得到。加热器的比热比和燃烧效率分别是 1.36 和 0.85。加热器里的氢气和富氧空气通过各自流道的喉道面积和压力计算得到。

1.2 试验模型

试验模型几何尺寸如图 1 所示,主要部件包括:热沉式等直隔离段、矩形燃烧室、凹槽稳焰器、垂直壁面的注油孔以及扩张内喷管。隔离段入口垂向高度为 50 mm,展向宽度为 100 mm,隔离段长为 415 mm,模型总长为 1 700 mm。凹槽位于带扩张的上壁面,凹槽深度固定为 30 mm,长度为 300 mm,长深比为 10。燃料为引导氢气(H_2)和常温气态乙烯(C_2H_4)。基于 CFD 结果,共设计了 6 处注油位置。每处注油位置各有 12 个注油小孔,展向均匀分布,注油小孔的直径为 1.0 mm。

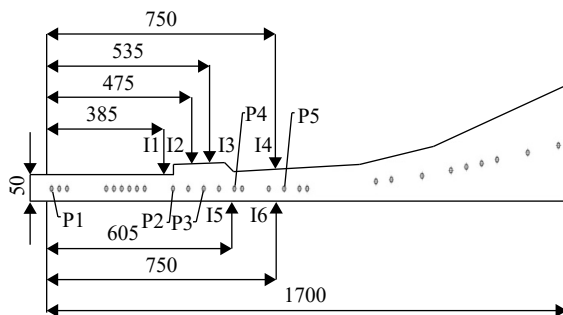


图 1 燃烧室流道及压力测点位置示意图(单位:mm)

Fig. 1 Combustor flowpath and locations of pressure taps (unit: mm)

第 1 油位位于凹槽上游 30 mm 处,流向坐标为 385 mm。第 2 油位位于凹槽中部,流向坐标为 475 mm,引导氢气从该油位注入。第 3 和第 6 油位、第 4 和第 6 油位的流向坐标分别相同,位于凹槽出口和扩张段中部。氢气和乙烯的流量通过各自的喷注压力、密度和喉道面积计算得到。

1.3 测量系统

非定常点火和燃烧的动态过程通过壁面压力测量获得。测量系统包括: 放大器、记录器、控制机和 128 通道的压力扫描系统。压力传感器用于监控整个设备及模型的压力状态。压力传感器的位置如图 1 所示, P1~P5 是 5 个具有代表性的测点, 后文将重点分析该 5 个测点的压力时间历程。根据被测压力的不同, 在设备和燃烧室中选取了 3 种量程的传感器, 分别是 0.3、0.7 MPa 和 15 MPa, 传感器精度为量程的 0.2%。压力采样频率为 10 kHz。

采用高速摄影来获得流场结构, 相机记录火焰发出的可见光, 拍摄频率为 5 000 帧/s。相机拍摄到的火焰亮度是燃烧室展向积分的结果, 可定性地表征燃烧过程的非定常性质。

1.4 试验过程

试验采用引导氢气来点燃乙烯, 需要注意的是, 本文所述试验是多次重复性试验的典型结果, 火焰图像和压力数据经过了校核, 可以作为该工况下氢气引导乙烯火焰非定常燃烧过程的基准数据。然而, 由于燃烧本身是非定常的, 具体的频率和幅值数据在不同的车次中会有所变化, 因此本文给出的频率都是某一范围, 目的是体现本文研究条件下燃烧的主要特征。试验时序如图 2 所示, 测试系统开始工作的时间定义为时间初始时刻。试验来流在 85 ms 逐渐稳定, 引导氢气和乙烯在 160 ms 时同时喷注, 由于氢气的密度低于乙烯, 所以氢气进入燃烧室的时间会早于乙烯。试验过程可以分为 4 个阶段: 冷流阶段、氢气单独燃烧阶段、氢气点燃乙烯阶段、乙烯单独燃烧阶段。

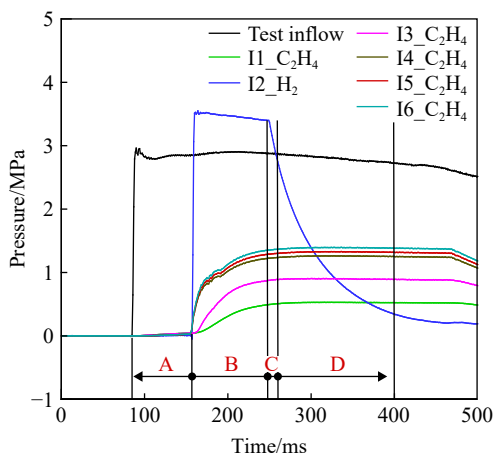


图2 试验时序

Fig. 2 Test time procedure

段。各油位的氢气和乙烯的流量独立控制。本文中各油位的燃料当量比是固定的, 乙烯在各油位的当量比分别为 0.04、0.07、0.2、0.1 和 0.1。引导氢气的当量比为 0.06。

2 结果与讨论

2.1 氢气单独燃烧阶段

稳定的风洞试验来流在 $T=85$ ms 时刻建立, 氢气供应管路的开关电磁阀在 $T=160$ ms 时刻打开, 由于阀门完全打开并填充管路需要一定的时间, 氢气从油位 I2 注入燃烧室的时刻约为 217.8 ms。氢气随即发生自燃(图 3(a)), 火焰首先在油位 I2 处产生, 并沿着凹槽内的回流区向整个凹槽扩张, 在 $T=225.0$ ms 时刻氢气火焰充满了整个凹槽(图 3(b)~图 3(e))。从火焰的荧光强度判断, 剧烈的燃烧反应主要发生在以油位 I2 为中心的低速回流区内。氢气火焰不能从凹槽扩展到主流当中, 整个流道仍然呈现出超声速的流动特征。

对比图 3(e)和图 3(f)的火焰荧光强度可见, 该阶段燃烧不稳定性主要由于凹槽后斜坡附近氢气燃烧反应强度随时间的周期性变化引起。



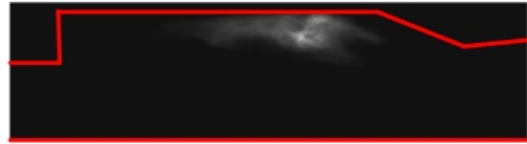
(a) $T=217.8$ ms



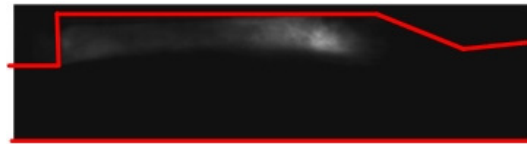
(b) $T=218.0$ ms



(c) $T=220.3$ ms



(d) $T=224.0$ ms



(e) $T=225.0$ ms

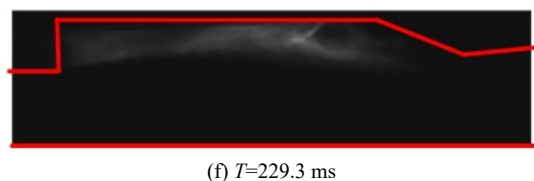


图 3 氢气单独燃烧阶段火焰高速摄影图像

Fig. 3 High speed photos of hydrogen flame in period of hydrogen combustion alone

压力测点 P1~P5 在该阶段的压力时间图像如图 4 所示。氢气单独燃烧阶段内燃烧室壁面压力的时间平均值如图 5 所示(图中横坐标 X 为流向方向坐标)。燃烧室内壁面压力时间平均值最高约为 0.25 MPa。隔离段内的压力测点 P1 在整个氢气单独燃烧阶段内并未感受到燃烧引起的压力扰动, 压力振荡幅度小于 1%。凹槽区域内的压力测点 P2~P4 及凹槽下游测点 P5 有小幅度的压力振荡, 振荡幅度约为 6%, 振荡频率约为 150~250 Hz。

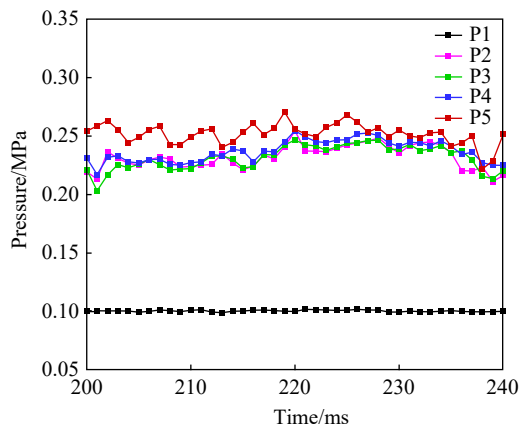


图 4 氢气单独燃烧阶段 5 个压力测点的时间历程

Fig. 4 Pressures with time at the five locations in period of hydrogen combustion alone

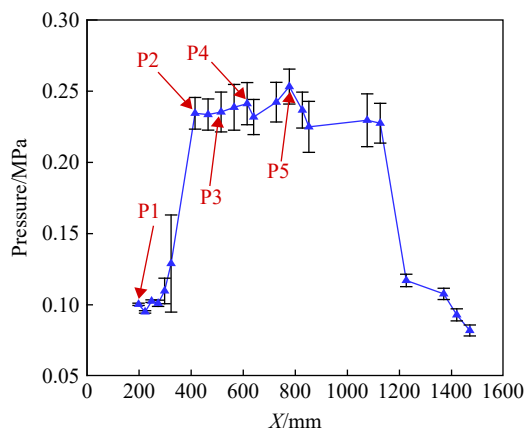


图 5 氢气单独燃烧阶段壁面平均压力

Fig. 5 Average wall pressure in period of hydrogen combustion alone

2.2 氢气点燃乙烯阶段

乙烯供应管路的开关电磁阀在 $T=160$ ms 时刻打开, 乙烯从油位 I1、I3、I4、I5 和 I6 同时注入, 乙烯开关电磁阀完全打开并填充管路后, 乙烯到达燃烧室的时刻约为 $T=245.0$ ms。凹槽内的氢气火焰被油位 I3 注入的乙烯淬灭, 但油位 I1 注入的乙烯在 $T=255.6$ ms 时刻被凹槽与超声速主流之间的剪切层内的氢气火焰点燃, 燃烧后产生的高温活性离子在凹槽后斜坡聚焦, 为乙烯的大规模着火积累了能量(图 6(a))。在 $T=260.0$ ms 时刻, 氢气供应管路的开关电磁阀关闭, 燃烧室内的氢气逐渐减少, 乙烯火焰独立发展, 燃烧区域从剪切层逐渐发展到凹槽后斜坡, 凹槽后斜坡区域发生强烈燃烧(图 6(b)~图 6(c))。乙烯火焰持续向流道中心发展, 直至 $T=280.0$ ms 充满整个流道(图 6(d))。

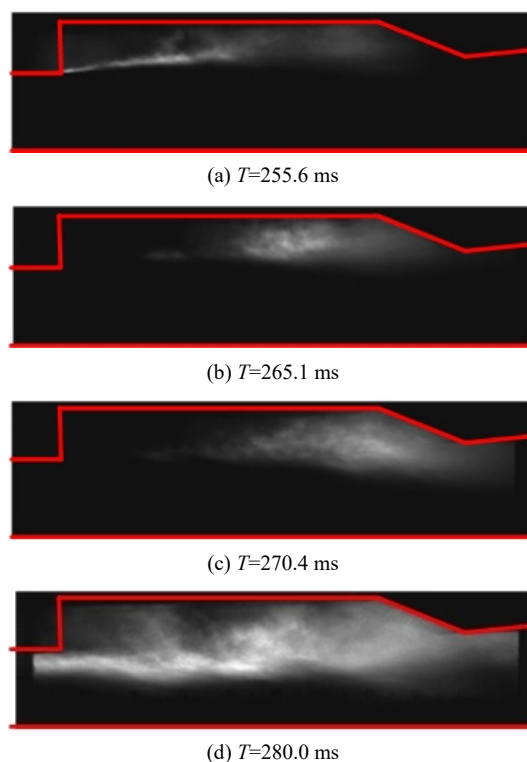


图 6 氢气点燃乙烯阶段火焰高速摄影图像

Fig. 6 High speed photos of hydrogen and ethylene flame in period of ethylene igniting by hydrogen

该阶段燃烧的不稳定性主要由于氢气和乙烯火焰的“交接”引起, 具体表现为火焰中心区域流向位置的改变以及燃烧反应强度的逐渐增大。从图 7 所示的 5 个重要测点的壁面压力可以看出, 在该阶段的初始时刻, 由于仅有氢气燃烧, P1~P5 各个测点的压力均较为平稳。随着乙烯逐渐被氢

气火焰点燃, 燃烧反应区域和强度发生变化, P2~P5 等测点的压力从 $T=246.0\text{ ms}$ 开始显著上升, 在 $T=255.0\text{ ms}$ 后逐渐达到较高水平, 并伴有较大幅度的脉动。P1 测点位于隔离段中部, 燃烧引起的反压通过隔离段内的亚声速边界层逐渐前传, 在 $T=256.0\text{ ms}$ 时刻传递到 P1 测点, 该位置的压力急剧升高, 并且有大幅度的脉动。在乙烯被点燃后, 燃烧不稳定性变得更加显著, P1 的压力振荡频率为 $100\sim 200\text{ Hz}$, P2~P5 的压力振荡频率为 $250\sim 350\text{ Hz}$, 该振荡频率与文献 [6] 给出的乙烯燃烧振荡频率 360 Hz 的结果较为吻合。

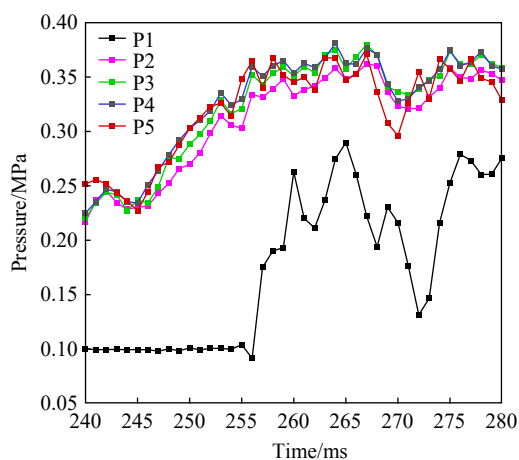


图7 氢气点燃乙烯阶段5个压力测点的时间历程

Fig. 7 Pressures with time at the five locations in period of ethylene igniting by hydrogen

氢气对乙烯点火阶段的壁面压力时间平均值如图8所示, 燃烧室壁面压力较纯氢气燃烧有较大提高, 压力峰值约为 0.32 MPa 。隔离段内各测点的壁面压力波动较大, 表明隔离段内存在明显

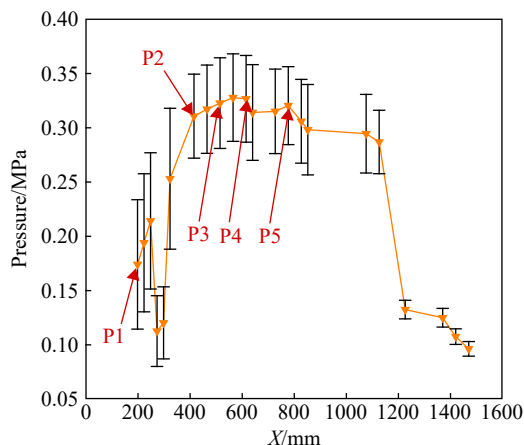


图8 氢气点燃乙烯阶段壁面平均压力

Fig. 8 Average wall pressure in period of ethylene igniting by hydrogen

的激波串结构, 并且各点的压力脉动幅度较大, P1 测点的压力脉动幅度达到了 34% 。从流向坐标(X)在 $415\sim 1100\text{ mm}$ 区域几乎是典型的等压燃烧模式, 与文献 [19] 所述的典型超声速燃烧室压力分布模型较为符合。P2~P5 各点的压力振荡幅度较为一致, 约为 12% 。

2.3 乙烯单独燃烧阶段

氢气供应管路的开关电磁阀在 $T=260\text{ ms}$ 时刻关闭, 燃烧室内的氢气逐渐减少, 乙烯单独燃烧。在此阶段, 燃烧不稳定性主要是由于燃烧和超声速流动之间的耦合引起的, 主要体现为凹槽内反应强度、反应区域(火焰形状)以及下壁面乙烯着火位置的周期性变化, 如图9所示。燃烧与流动的耦合机制可以分为3个相位, 具体描述如下:

1) 第1相位。油位 I1 和 I3 注入的乙烯在凹槽回流区内富集, 与试验来流混合, 当混合到接近化学恰当比时, 在凹槽内及凹槽下游油位 I4 处发生剧烈的化学反应, 释放出的高温燃气和活性离子向燃烧室中心流动, 并点燃下壁面的常温气态乙烯, 下壁面乙烯的着火点位于油位 I5 处, 流道内发生剧烈燃烧, 在光学观察窗内可以看到清晰的下壁面火焰。该相位图像如图9(a)、图9(b)所示, 状态持续至图9(c)进入第2相位, 持续时间约 0.6 ms 。

2) 第2相位。由于凹槽内发生了剧烈的燃烧反应, 凹槽内压力和温度升高, 凹槽与超声速主流之间的剪切层被燃烧反应物向主流中心压迫, 通过剪切层进入凹槽的氧化剂逐渐减少, 凹槽内的当地当量比向极度富油方向发展。当凹槽内的氧化剂被乙烯耗尽后, 凹槽内燃烧反应减弱, 火焰分裂为前后两部分, 向燃烧室中心提供的高温燃气和活性离子减少, 下壁面乙烯的着火位置向下游移动, 光学观察窗内不再能够观察到下壁面火焰。该相位图像如图9(c)、图9(d)和图9(e)所示, 状态持续至图9(f)进入第3相位, 状态持续时间约 1.3 ms 。

3) 第3相位。随着凹槽内反应减弱, 凹槽与超声速主流之间的剪切层从主流中心向凹槽贴近, 由于凹槽内压力温度的下降, 通过剪切层进入凹槽的氧化剂逐渐增加, 当地当量比由富油逐渐趋向化学恰当比, 燃烧反应重新开始变得剧烈, 分裂的两部分火焰合二为一, 下壁面乙烯的着火位置再次回到上游, 光学观察窗内再次观察到下壁面火焰, 剧烈的燃烧持续至凹槽内氧化剂再一次耗尽, 流动和燃烧的耦合再次进入第1相位。该

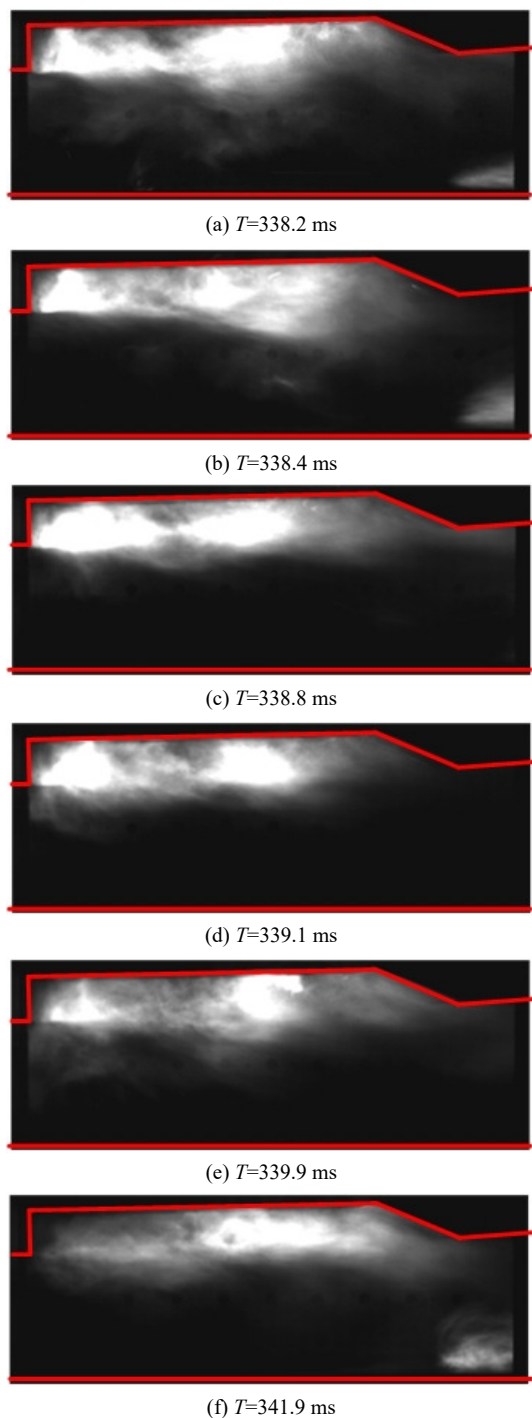


图 9 乙烯单独燃烧阶段火焰高速摄影图像

Fig. 9 High speed photos of ethylene flame in period of ethylene combustion alone

相位图像如图 9(f) 所示。3 个相位的完整周期时长约为 3.7 ms, 即频率为 270 Hz。

从图 10 所示的 5 个测点的壁面压力时间图像来看, P1 测点感受到了明显的压力扰动, 表明氢气关闭后乙烯能够独立稳定燃烧, 并且释放了足够的热量来维持隔离段内的激波串结构。P1 测点的压力值出现大幅度脉动, 压力最小值为

0.1 MPa, 与未受到扰动时的来流静压相等, 表明激波串结构周期性地扰动 P1 测点, 进一步证实了上文所述的燃烧与流动的耦合机制。P2~P5 测点的压力保持在 0.30~0.35 MPa 之间, 与氢气和乙烯共同燃烧的压力水平相当, 表明在凹槽区域乙烯燃烧仍然维持了较高的释热强度。单纯乙烯燃烧时, 各个测点振荡频率略有下降, P1 测点的压力振荡频率为 100~150 Hz, P2~P5 的压力振荡频率为 200~300 Hz, 该数据与前文通过火焰图像给出的振荡频率 270 Hz 能够互相验证。图 11 所示的壁面压力时间平均值表明, 各个测点中 P1 的压力脉动幅度最大, 约为 50%。P2~P5 各点振荡幅度较氢气和乙烯共同燃烧时有所降低, 各点压力脉动幅度约为 9%。

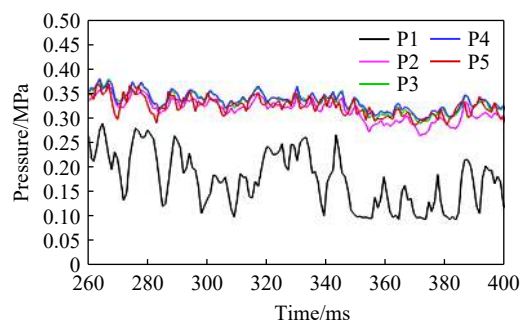


图 10 乙烯单独燃烧阶段 5 个压力测点的时间历程

Fig. 10 Pressures with time at the five locations in period of ethylene combustion alone

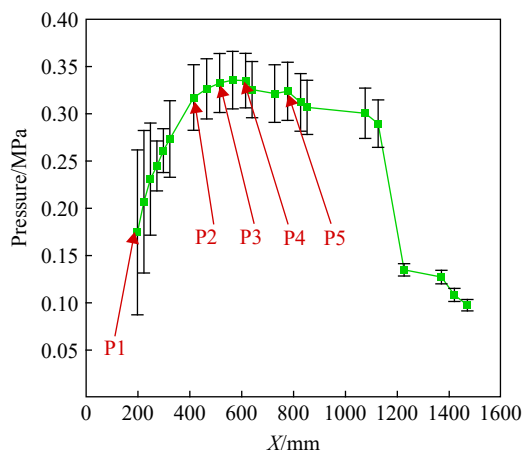


图 11 乙烯单独燃烧阶段壁面平均压力

Fig. 11 Average wall pressure in period of ethylene combustion alone

3 结 论

基于脉冲燃烧直连式试验台开展了超声速非定常燃烧过程研究, 试验过程可分为 4 个阶段: 冷流阶段、氢气单独燃烧阶段、氢气点燃乙烯阶段、

乙烯单独燃烧阶段。基于高频壁面压力测量和火焰荧光高速摄影方法, 获得了代表性测点的压力时间曲线以及燃烧室内火焰发展历程, 提取了压力平均值、脉动幅度和着火时间、反应位置等重要信息。根据压力脉动和火焰图像分析了不同燃烧阶段的非定常特性。试验结果表明, 不同燃烧阶段的非定常特性来源不同。在氢气单独燃烧阶段, 非定常特性来源于凹槽后斜坡区域氢气反应强度的变化。在氢气点燃乙烯阶段, 非定常特性由氢气和乙烯火焰的“交接”引起, 表现为火焰中心区域流向位置改变、燃烧反应强度逐渐增大。在乙烯单独燃烧阶段, 非定常特性由燃烧和超声速流动之间的耦合引起, 体现为凹槽内反应强度、反应区域以及下壁面乙烯着火位置的周期性变化。

致谢

中国空气动力研究与发展中心乐嘉陵院士、杨顺华研究员、张弯洲副研究员对本文试验研究工作提供了重要帮助, 在此诚挚感谢!

参考文献:

- [1] SUN Mingbo, GONG Chen, ZHANG Shunping, et al. Spark ignition process in a scramjet combustor fueled by hydrogen and equipped with multi-cavities at mach 4 flight condition[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, 43: 90-96.
- [2] SUN Mingbo, LEI Jing, WU Haiyan, et al. Flow patterns and mixing characteristics of gaseous fuel multiple injections in a non-reacting supersonic combustor[J]. *Heat Mass Transfer*, 2011, 47: 1499-1516.
- [3] MATHUR T, GRUBER M, JACKSON K, et al. Super combustion experiments with a cavity-based fuel injector[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17(6): 1305-1312.
- [4] SUN Mingbo, WANG Hongbo, BAI Xuesong, et al. Flame stabilization in a supersonic combustor with hydrogen injection upstream of cavity flameholders: experiments and simulations[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2011, 225: 1351-1365.
- [5] LI Xiaopeng, LIU Weidong, PAN Yu, et al. Characterization of ignition transient processes in kerosene-fueled model scramjet engine by dual-pulse laser-induced plasma [J]. *Acta Astronautica*, 2018, 114: 23-29.
- [6] MA Fuhua, LI Jian, YANG V, et al. Thermoacoustic flow instability in a scramjet combustor[R]. AIAA 2005-3824, 2005.
- [7] LI Jian, MA Fuhua, YANG V, et al. A comprehensive study of combustion oscillations in a hydrocarbon-fueled scramjet engine[R]. AIAA 2007-836, 2007.
- [8] LIN Kuocheng, JACKSON K, BEHDADNIA R, et al. Acoustic characterization of an ethylene-fueled scramjet combustor with a recessed cavity flameholder[R]. AIAA 2007-5382, 2007.
- [9] LIN Kuocheng, JACKSON K, BEHDADNIA R, et al. Acoustic characterization of an ethylene-fueled scramjet combustor with a cavity flameholder[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, 26(6): 1161-1169.
- [10] MICKA D J. Combustion stabilization, structure, and spreading in a laboratory dual-mode scramjet combustor[D]. Michigan, US: University of Michigan, 2010.
- [11] WANG Zhenguo, SUN Mingbo, WANG Hongbo, et al. Mixing-related low frequency oscillation of combustion in an ethylene-fueled supersonic combustor[EB/OL]. [2021-12-13]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2014.09.005>.
- [12] SUN Mingbo, CUI Xingda, WANG Hongbo, 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.
- [13] 邓维鑫, 乐嘉陵, 杨顺华, 等. 注油方式对超燃冲压发动机燃烧性能的影响[J]. *航空动力学报*, 2013, 28(7): 1449-1457. DENG Weixin, LE Jialing, YANG Shunhua, et al. Effect of fueling scheme on scramjet combustion performance[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28(7): 1449-1457. (in Chinese)
- [14] TIAN Ye, XIAO Baoguo, ZHANG Shunping, et al. Experimental and computational study on combustion performance of a kerosene fueled dual-mode scramjet engine[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2015, 46: 451-458.
- [15] TIAN Ye, YANG Shunhua, LE Jialing, et al. Numerical study on effect of air throttling on combustion mode formation and transition in a dual-mode scramjet combustor[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2016, 52: 173-180.
- [16] TIAN Ye, YANG Shunhua, LE Jialing, et al. Study on flame stabilization of a hydrogen and kerosene fueled combustor[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2016, 59: 183-188.
- [17] DENG Weixin, YANG Shunhua, LE Jialing, et al. Experimental research of air-throttling ignition for scramjet at Ma 6.5[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, 30(3): 932-938.
- [18] SHI Wen, TIAN Ye, ZHANG Wanzhou, et al. Experimental investigation on flame stabilization of a kerosene-fueled scramjet combustor with pilot hydrogen[J]. *Journal of Zhejiang University: Science A (Applied Physics and Engineering)*, 2020, 21(8): 663-672.
- [19] WILLIAM H H, DAVID T P, DANIEL H D, et al. Hypersonic air-breathing propulsion[M]. Washington DC: AIAA, 1994: 333-334.

(编辑: 陈 越)