

文章编号:1000-8055(2016)02-0377-06

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2016.02.016

超声速气流中的斜激波诱导自点火

席文雄^{1,2}, 孙明波², 李 庆²

- (1. 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;
2. 国防科学技术大学 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 长沙 410073)

摘 要: 在来流马赫数为 2.5 的条件下对氢气和乙烯燃料的斜激波诱导自点火过程进行了试验研究. 采用纹影和高速摄影获得了自点火初始火核的形成和发展过程. 试验考察了不同的来流总温、喷注条件、凹腔长度、斜激波强度等因素对自点火过程和点火边界的影响. 研究结果表明:入射斜激波能够提高气流的局部参数起到强化自点火的作用. 凹腔内形成的低速回流区有助于初始火核形成后的火核逆流传播,并起到防止初始火核因气流振荡而吹脱的稳定源作用. 增加喷注压力、增加凹腔长度、提高来流总温有助于自点火的发生.

关 键 词: 自点火; 超声速气流; 初始火核形成; 凹腔; 斜激波

中图分类号: V233.3

文献标志码: A

Self-ignition in supersonic flow induced by oblique shock wave

XI Wen-xiong^{1,2}, SUN Ming-bo², LI Qing²

- (1. State Key Laboratory of Laser Propulsion and Application, Equipment Academy, the Chinese People's Liberation Army, Beijing 101416, China;
2. Science and Technology on Scramjet Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Hydrogen and ethylene self-ignition induced by oblique shock wave were investigated experimentally with incoming Mach number of 2.5. The process of initial flame kernel generation and evolvment was observed with schlieren photography and high speed camera system. The effects of total incoming temperature, fuel injection conditions, cavity length and oblique shock wave intensity on the process of self-ignition and self-ignition boundary were studied experimentally. Results reveal that the performance of self-ignition can be improved by the enhanced effect of incident oblique shock wave on local flow-field. The low speed circulation zone created in cavity is beneficial to the upstream spreading of initial flame kernel, and acts as a function of flame-holding for preventing the blow-away of formed flame caused by flow oscillation. Self-ignition can be extended by increasing the injection pressure, cavity length and total incoming temperature.

Key words: self-ignition; supersonic flow; initial flame kernel; cavity; oblique shock wave

火焰传播机制和自点火机制是用于解释超声速燃烧现象的两大理论基础. 围绕超声速燃烧的

火焰稳定问题,研究者开展了广泛的研究^[1-5]. 经典燃烧理论认为,根据是否需要外部能量激励,初

收稿日期:2015-07-21

基金项目:国家自然科学基金(11102230);激光推进及其应用国家重点实验室开放课题基金

作者简介:席文雄(1984—),男,江西高安人,助理研究员,博士,研究领域为超燃冲压发动机燃烧过程、火箭发动机系统设计.

始火核的生成机制可分为强迫点火和自点火^[6-9]. 强迫点火依靠高温热源向可燃混气的对流扩散过程传递能量, 初始火核以火焰锋传播的形式产生, 主要用火焰传播速度来描述. 自点火依靠可燃混气自身能量的积累, 经过一定的化学诱导时间后自发产生初始火核, 主要以点火延迟时间来表征^[10-11]. 对于低速气流中的扩散燃烧火焰, 来流总温决定了这两种点火机制对火焰稳定过程的影响^[7]. 而对于超燃冲压发动机, 燃烧室内部流场结构非常复杂^[12-13], 除了低速气流中的火焰传播特征外, 存在多种火焰特征, 如激波诱导下的火焰, 低速回流区、边界层区内的亚声速火焰, 凹腔剪切层、燃料剪切层区域的大涡夹带火焰等^[14-16]. 目前仍难以对这些火焰特征进行有效分辨^[17-18].

本文在超声速气流条件下, 对氢气和乙烯燃料在斜激波诱导下的自点火过程进行试验研究, 获得了不同影响因素作用下的自点火初始火核传播特征及其自点火边界. 试验结果将有助于进一步认识超声速气流条件下的点火和火焰稳定机理.

1 试验系统和方法

1.1 试验系统

图 1 所示为用于点火试验的超声速燃烧直连式系统结构示意图. 系统主要由试验台系统、燃料供应系统、测控系统等几部分构成. 空气经过在加热器内燃烧氧气和酒精的方式加热形成, 可通过配比空气、酒精、氧气三组元的流量配比实现总温的调节和控制. 形成的高温气流通过喷管加速至所需要的气流参数. 本文研究中来流马赫数 Ma 设计为 2.5, 气流流量为 1 kg/s. 在燃烧室和喷管

之间设置隔离段, 用于隔离燃烧反压对喷管工作的干扰.

1.2 模型燃烧室

自点火的发生与燃料的点火延迟时间和燃料在燃烧室内的停留时间密切相关. 为促进燃料的自点火, 可通过改善局部气流参数以缩短点火延迟时间或降低来流速度的方式实现. 本文研究中相对应的两种技术措施为: ①通过在主流中设置斜劈, 形成斜激波, 波后的气流温度和压力上升, 缩短燃料的点火延迟时间; ②通过设置凹腔, 形成低速回流区, 燃料通过卷吸进入凹腔, 增加燃料在燃烧室内的停留时间. 图 2 为用于点火的等直型燃烧室结构示意图. 壁面设置开窗玻璃, 用于观察燃烧室内的火焰发展过程. 凹腔与斜劈可根据试验需要进行灵活更换. 本文研究中采用的斜劈角度为 18° , 凹腔采用了长深比 L/D 分别为 3, 5, 7 的 3 种构型. 气态燃料可分别在距凹腔前沿 10, 30 mm 两个位置进行横向喷注. 燃料在燃烧室内的有效输运距离分别为 150 mm 和 170 mm. 在燃料喷注点前方附近设置压力传感器, 用于获取点火过程中的燃烧室压力响应.

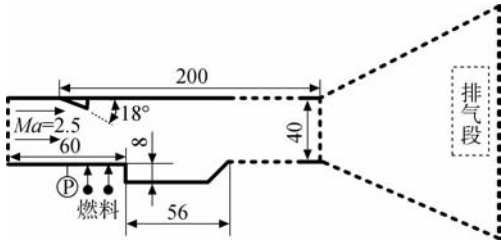


图 2 等直型燃烧室结构简图(单位:mm)

Fig. 2 Sketch of straight combustor (unit:mm)

2 试验结果及分析

2.1 氢气的初始火核发展过程

试验研究发现, 在燃料输运距离为 170 mm 的燃烧室通流条件下, 若未采取任何点火强化措施, 燃料停留时间小于点火延迟时间, 难以实现氢气的自点火. 设置斜劈和凹腔对于缩短点火延迟时间, 促进自点火火核的形成和稳定具有重要影响.

图 3 为总温为 1480 K 的来流条件下氢气的自点火过程的纹影动态图, 图像曝光时间为 50 μ s. 图 4 所示为相应条件下的初始火核形成和发展过程高速摄影图像. 由于氢气的火焰辐射能力

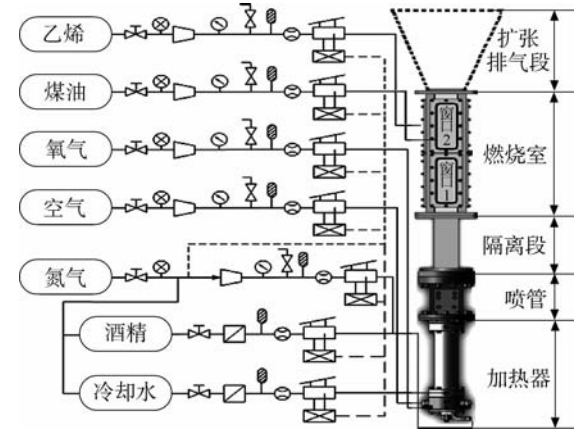


图 1 点火试验台系统示意图

Fig. 1 Sketch of ignition experiment system

较弱,图中的火焰分布经过了对比度、亮度调节等常规图像增强技术处理,图像曝光时间为 $330\ \mu\text{s}$. 氢气在凹腔前方 $30\ \text{mm}$ 处通过 $\phi 2\ \text{mm}$ 的圆形喷孔以 $1.5\ \text{MPa}$ 压力横向喷注. 图 3(a)为自点火起始时刻,时间间隔 Δt 为 $0.4\ \text{ms}$,可以看出点火初始时候主通道中存在着各种复杂的波系结构,主要包括燃料喷流与主流相互作用下产生的弓形激波,斜劈产生的入射斜激波及其膨胀波与各种激波交汇在燃烧室壁面和凹腔剪切层区域反射相交产生的马赫盘结构. 在这些波系的作用下,气流静温、静压提高,为缩短燃料的自点火延迟时间提供了良好的气流条件. 燃料喷入燃烧室后随着与主流的不断掺混,温度和压力不断上升,在下游某一位置达到自点火条件,形成自点火的初始火核.

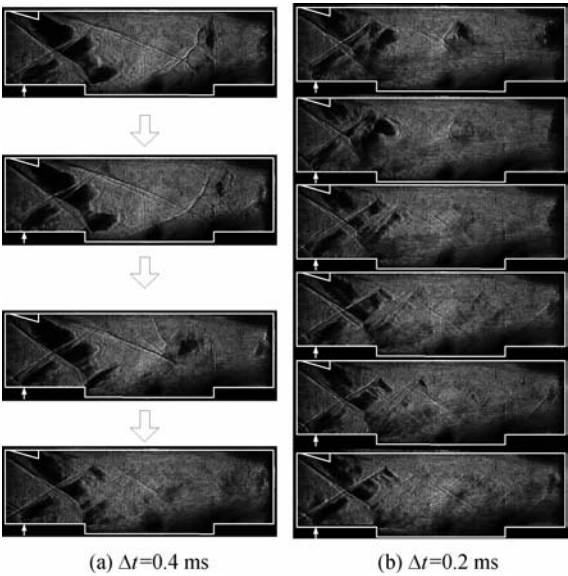


图 3 氢气自点火纹影动态图

Fig. 3 Schlieren evolution photography of hydrogen self-ignition

如图 4 所示,自点火的初始火核产生于凹腔后壁面的滞止区域附近. 之后,放热过程不断加剧,火焰不断向上游扩展,在燃烧室主流中逐渐形成预燃激波串结构,如图 3(b)所示. 在预燃激波串的作用下,燃烧室气流主流速度降低,更有利于火焰的传播和发展. 从图 4 可以观察到激波干扰作用下,在火焰面上形成的突起结构.

为了获取较短曝光时间、较高空间分辨率下的火焰发展图像,在来流高温空气中添加一氧化钛纳米粒子用于增强氢气火焰的辐射能力. 图 5 所示为曝光时间为 $83\ \mu\text{s}$ 时不同凹腔长度下的自点火初始火核自发光火焰图像. 氢气的喷前距离为 $10\ \text{mm}$. 从图中看出,气流中散播的一氧化钛粒

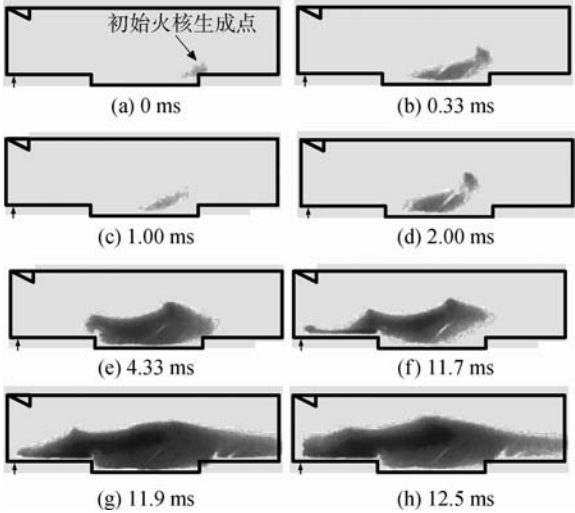


图 4 氢气自点火初始火核形成发展过程的高速摄影图
Fig. 4 Photography of initial flame kernel generation and evolution of hydrogen self-ignition by high speed camera

子受氢气火焰的高温加热作用辐射能力得以加强,适用于低辐射氢气火焰的示踪. 图 5(a)和图 5(b)的图像时间间隔 Δt 为 $83\ \mu\text{s}$,图 5(c)的图像时间间隔标示在图上. 对比图 4 的初始火核出现位置可以看出燃料的停留时间是自点火发生的关键作用因素,缩短喷前距离的情况下,点火初始火核的发生位置也随之后移至凹腔下游.

与此同时,从不同长深比凹腔的自点火过程可以看出,凹腔长度对于缩短自点火初始火核的点火延迟时间作用不明显,自点火初始火核的形成位置随着凹腔长短的变化不显著. 但是,凹腔长度对于初始火核形成后的火焰传播过程的影响却很大. 凹腔内形成的大面积的低速回流区域有利于初始火核的逆流传播,较长的凹腔长度缩短了初始火核与低速火焰传播区域之间的距离,形成点火火焰发展的过渡时间大幅缩短.

2.2 乙烯的初始火核发展过程

相比于氢气,在相同的条件下乙烯的点火延迟时间较长,火焰传播速度较低,实现自点火需要更高的来流总温条件. 图 6 所示为总温为 $1590\ \text{K}$ 的来流条件下乙烯自点火初始火核发展过程. 图像时间间隔 Δt 为 $83\ \mu\text{s}$. 从图中可以看出,乙烯的自点火初始火核起始于激波波后,并随着主流向下游输运. 形成的初始火核点无法驻定,随着气流的波动而呈现随机性特点,难以形成稳定的火核源. 图 6 的第 5 张图像显示,此时依靠燃烧放热形成的边界层发生分离,火焰逆传进入凹腔,火焰充满整个凹腔后形成了持续稳定的火焰结构.

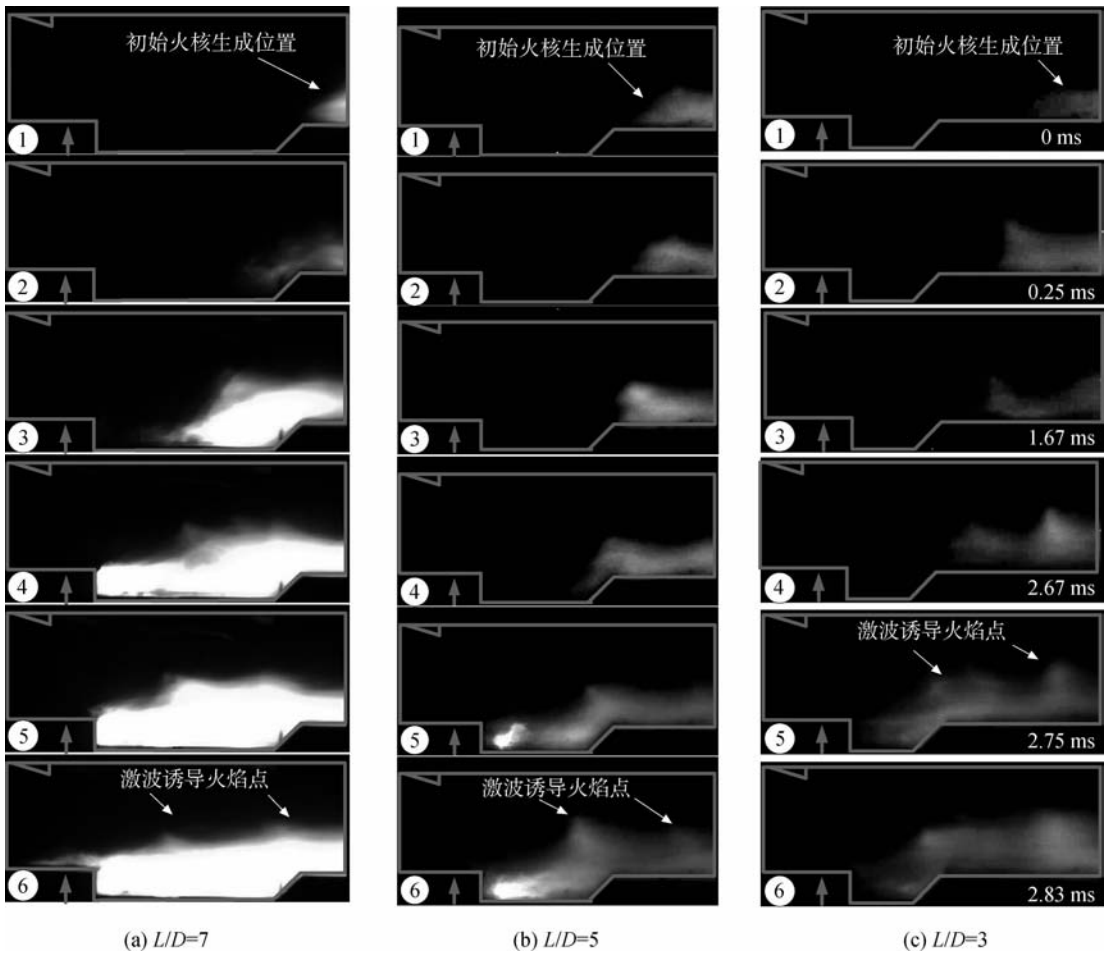


图 5 不同凹腔长度下的氢气自点火初始火核发展过程

Fig. 5 Initial flame kernel evolution of hydrogen self-ignition with various cavity lengths

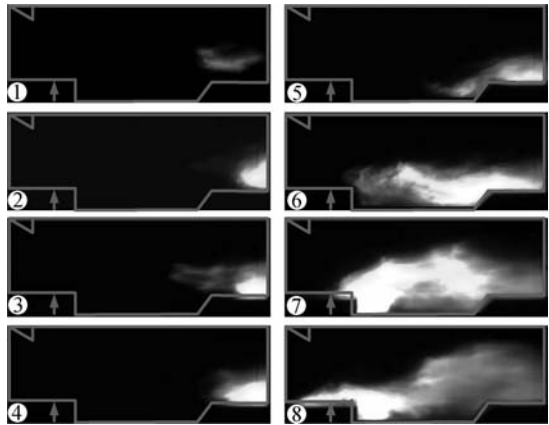


图 6 斜劈凹腔条件下乙烯火核发展过程

Fig. 6 Ethylene flame kernel evolution with combination of ramp and cavity

为了对比分析凹腔在自点火初始火核建立过程中的作用,图 7 显示了斜劈平板组合条件下的乙烯自点火过程. 由于没有凹腔提供的点火源作用,所形成的自点火火核难以稳定. 燃烧室压力呈现出整体的周期性振荡. 图 8 所示为燃烧室压力

响应曲线,图 8 中 p_c 为加热器室压, p_{en} 为凹腔前沿测点压力, $p_{C_2H_4}$ 为乙炔喷注压力. 从图中可看出燃烧室呈现出整体性的低频燃烧振荡过程. 由此可认为凹腔的作用主要体现在,为初始火核的形成提供驻定的火焰源,起到火焰稳定的作用,可用于抑制来流气流不稳定而导致的点火源脱火

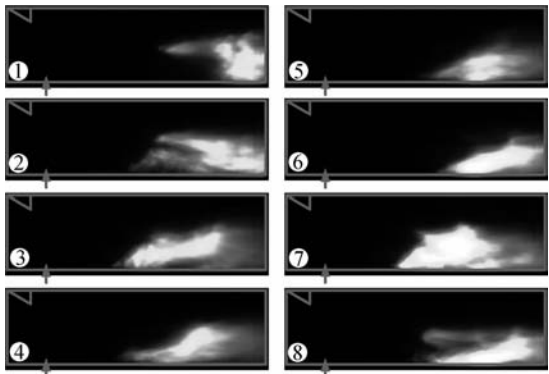


图 7 斜劈平板条件下乙烯火核发展过程

Fig. 7 Ethylene flame kernel evolution with combination of ramp and flat

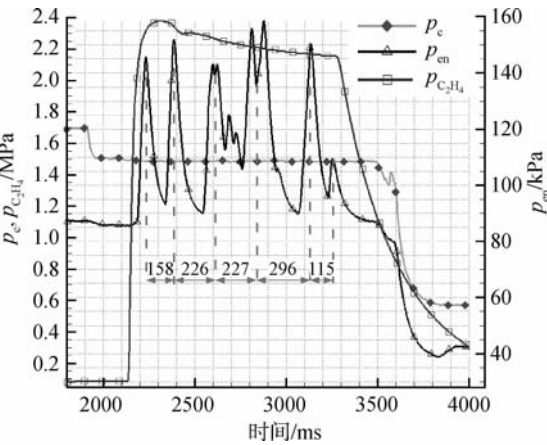


图 8 斜劈平板条件下乙烯自点火的燃烧室压力响应特征
Fig. 8 Response characteristic of combustor pressure by ethylene self-ignition with combination of ramp and flat

现象.

2.3 自点火边界及其影响因素分析

根据火焰图像结果,点火过程中存在 3 种试验情形:一为自点火成功的情形,即形成初始火核并经火焰传播建立自持燃烧;二为自点火失败的情形,无法形成自点火火核;三为介于前两者之间的情形,即能形成初始火核但无法建立稳定燃烧.

图 9 所示为氢气在斜劈凹腔燃烧室构型下的点火边界试验结果.从图中看出较长的凹腔长度和喷注压力有利于自点火的发生.这是因为,较长的凹腔长度扩展了流向上的低速区域大小,缩短了初始火核与低速火焰传播区域之间的距离,有利于形成的初始火核向上游传播,以建立自持火焰.随着喷注压力的加大,加剧了燃料与主流的混合过程,混合距离缩短,有利于混合条件的形成.

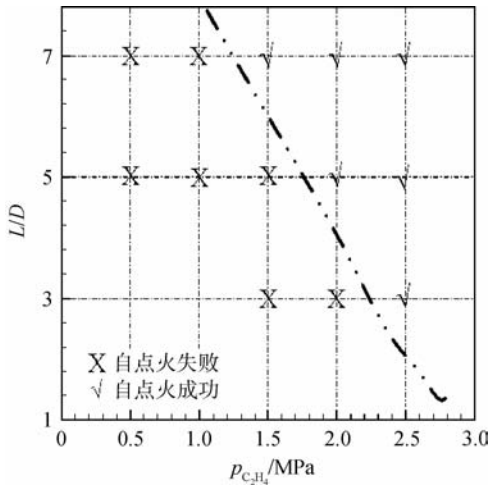


图 9 氢气自点火工作范围

Fig. 9 Self-ignition boundary of hydrogen

同时,大的喷注压力对主流的干扰也有利于通过主流条件的改变来缩短燃料的点火延迟时间.

图 10 为乙烯在斜劈凹腔燃烧室条件下的可实现自点火的温度范围.从图中可以看出,能够实现自点火的区域集中于坐标图的右上角.这是因为足够高的喷注压力一方面增强了射流与主流的相互作用过程,喷前诱导激波对流场的干扰有利于燃料的混合;另一方面,较高的当量比燃料燃烧形成的预燃激波串强度增强,有利于燃烧反馈的建立.

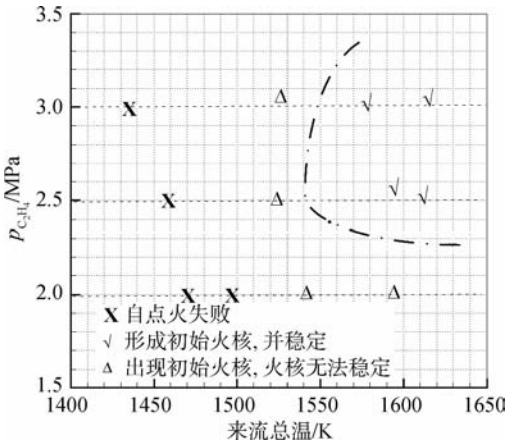


图 10 乙烯自点火工作范围

Fig. 10 Self-ignition boundary of ethylene

3 结 论

通过对氢气、乙烯两种燃料在超声速气流条件下的斜激波诱导自点火火核传播过程及其点火边界的研究表明:

- 1) 通过引入足够强度的入射斜激波作用于气流局部位置,可起到促进自点火火核生成的作用.
- 2) 凹腔的长深比在延长燃料的停留时间上对自点火的发生与否作用不明显,凹腔的作用主要体现在为形成的自点火火核提供驻留环境以稳定火焰,较长的凹腔长度缩短了初始火核与低速火焰传播区域之间的距离,缩短点火火焰建立的过渡时间.
- 3) 来流总温和喷注压力是判断能否实现自点火的关键因素.提高来流总温有助于缩短燃料的点火延迟时间,提高喷注压力有助于形成下游良好的燃料预混条件.点火边界图谱表明高的总温条件和喷注压力利于自点火火核的产生.

参考文献:

[1] 袁生学.论超声速燃烧[J].中国科学:A 辑,1998,28(8):

735-742.

[2] 丁猛. 基于凹腔的超声速燃烧火焰稳定技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2005.

DING Meng. Research on the flame holding based on cavity in supersonic combustion[D]. Changsha: National University of Defense Technology,2005. (in Chinese)

[3] 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:国防科学技术大学,2008.

SUN Mingbo. Flow and flameholding mechanisms of cavity flameholders in supersonic flows[D]. Changsha: National University of Defense Technology,2008. (in Chinese)

[4] Sun M B, Wang Z G, Liang J H, et al. Flame characteristics in a supersonic combustor with hydrogen injection upstream of a cavity flameholder[J]. Journal of Propulsion and Power,2008,24(4):688-696.

[5] 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.

[6] Aggarwal S K. A review of spray ignition phenomena; present status and future research[J]. Progress in Energy and Combustor Science,1998,24(6):565-600.

[7] Mastorakos E. Ignition of turbulent non-premixed flames [J]. Progress in Energy and Combustion Science,2009,35 (1):57-97.

[8] 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.

XI Wenxiong, WANG Zhenguo, LI Qing, et al. Forced ignition of kerosene spray in supersonic flowfield with hot gas injection[J]. Journal of Aerospace Power,2012,27(11): 2436-2441. (in Chinese)

[9] 丁猛,余勇,梁剑寒,等. 碳氢燃料超燃冲压发动机点火技术试验[J]. 推进技术,2004,25(6):566-569.

DING Meng, YU Yong, LIANG Jianhan. Experimental investigation of ignition technology in liquid hydrocarbon fueled scramjet combustor[J]. Journal of Propulsion Technology,2004,25(6):566-569. (in Chinese)

[10] Mitani T, Kouchi T. Flame structures and combustion efficiency computed for a Mach 6 scramjet engine[J]. Combustion and Flame,2005,142(3):187-196.

[11] 潘余,刘卫东,梁剑寒,等. 模型超燃冲压发动机内着火过程分析[J]. 力学学报,2009,41(4):455-462.

PAN Yu, LIU Weidong, LIANG Jianhan, et al. On the ignition process in a model scramjet combustor[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2009, 41 (4):455-462. (in Chinese)

[12] Noh J, Choi J Y. Numerical simulation of auto-ignition of ethylene in a scramjet combustor with air throttling[R]. AIAA 2010-7036,2010.

[13] Ben-Yakar A. Experimental investigation of mixing and ignition of transverse jets in supersonic crossflows[D]. Palo Alto, US; Stanford University,2000.

[14] Micka D J, Driscoll J F. Dual-mode combustion of a jet in cross-flow with cavity flameholder[R]. AIAA-2008-1062,2008.

[15] Micka D J, Driscoll J F. Reaction zone imaging in a dual-mode scramjet combustor using CH-PLIF [R]. AIAA-2008-5071,2008.

[16] Micka D J, Driscoll J F. Stratified jet flames in a heated (1390 K) air cross-flow with auto ignition[J]. Combustion and Flame,2012,159(3):1205-1214.

[17] O'Byrne S, Stotz I, Neely A J, et al. OH PLIF imaging of supersonic combustion using cavity injection[R]. AIAA-2005-3357,2005.

[18] Ben-Yakar A, Hanson R K. Experimental investigation of flame-holding capability of hydrogen transverse jet in supersonic cross-flow [J]. Symposium (International) on Combustion,1998,27(2):2173-2180.

(编辑:陈 越)