

超燃冲压发动机点火过程 10kHz PLIF 测量技术*

高 龙^{1,2}, 于 欣^{1,2}, 彭江波^{1,2}, 田 野³, 曹 振^{1,2}, 钟富宇³,
欧阳浩³, 张善春^{1,2}, 武国华^{1,2}, 袁 勋^{1,2}, 刘文备^{1,2}

1. 哈尔滨工业大学 航天学院 可调谐激光技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学 光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001;
3. 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: 应用自主研发的 10kHz OH-PLIF (Planar laser-induced fluorescence) 系统实现超燃冲压发动机点火过程的可视化。在直连式脉冲燃烧风洞上开展了超燃冲压发动机自点火、电火花和激光诱导等离子体三种点火方式的火焰结构演变过程 OH-PLIF 测试, 采集了时间间隔为 100 μ s 的高分辨率火焰图像, 进一步计算得到火焰 OH 基荧光强度和火焰面积的时间演化特性及火焰质心发展轨迹。研究发现: 三种点火方式的初始火核发展时间均小于 1ms; 点火过程中, 火焰均先沿凹腔壁面向下游传播, 在斜坡附近转向上游传播, 火焰质心运动速度为 100~450m/s; 相对其它两种点火过程, 自点火存在强烈振荡现象。研究表明, 高频 PLIF 技术是发动机点火过程可视化最有潜力的手段之一, 是发动机燃烧机理和设计方法研究的重要支撑。

关键词: 高频 PLIF 技术; 超燃冲压发动机; 点火; 火焰结构; 火焰质心

中图分类号: V235.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2022) 12-210739-06

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.210739

10kHz PLIF Measurement Technique for Scramjet Ignition

GAO Long^{1,2}, YU Xin^{1,2}, PENG Jiang-bo^{1,2}, TIAN Ye³, CAO Zhen^{1,2}, ZHONG Fu-yu³, OUYANG Hao³,
ZHANG Shan-chun^{1,2}, WU Guo-hua^{1,2}, YUAN Xun^{1,2}, LIU Wen-bei^{1,2}

1. National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Institute of Opt-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
3. Aerospace Technology Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: The visualization of scramjet ignition process is realized by using a self-developed 10kHz OH-PLIF (Planar laser-induced fluorescence) system. The OH-PLIF tests on flame structure evolution of three ignition schemes (autoignition, spark ignition and laser-induced plasma ignition) were carried out on a direct-connect supersonic combustion facility. During the experiment, high spatiotemporal resolution OH-PLIF images with a time interval of 100 μ s were obtained clearly. The time evolution characteristics of flame hydroxyl fluorescence intensity and flame area were obtained by PLIF image sequence. To describe the overall movement characteristics of the flame, the centroid trajectories of flame images were calculated. The study found that the development time of initial flame kernel of each ignition method was less than 1ms. In the ignition process, the flame propagated

* 收稿日期: 2021-10-20; 修订日期: 2022-03-10。

基金项目: 黑龙江省自然科学基金 (LH2021F028)。

作者简介: 高 龙, 博士生, 研究领域为高频 PLIF 技术及数据处理分析。

通讯作者: 彭江波, 博士, 研究员, 研究领域为激光光谱燃烧流场诊断技术。

引用格式: 高 龙, 于 欣, 彭江波, 等. 超燃冲压发动机点火过程 10kHz PLIF 测量技术[J]. 推进技术, 2022, 43(12): 210739. (GAO Long, YU Xin, PENG Jiang-bo, et al. 10kHz PLIF Measurement Technique for Scramjet Ignition[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(12): 210739.)

downstream along the cavity wall, then decelerated near the cavity ramp, and finally returned to the upstream. The velocities of flame centroid ranged from 100 to 450m/s. Compared with the results of spark ignition and laser ignition, the signal of autoignition process exhibited an intense oscillatory behavior. The results show that high-speed PLIF technique is one of the most potential methods of engine ignition process visualization. Moreover, it is an important support for the study of engine combustion mechanism and design.

Key words: High-speed PLIF technique; Scramjet; Ignition; Flame structure; Flame centroid

1 引言

作为未来最有发展前景的吸气式高超声速推进系统,超燃冲压发动机备受关注^[1-2]。可靠点火是超燃冲压发动机的核心关键技术,是各国的研究热点^[3]。点火过程具有流动及化学反应速度快的特点,湍流火焰运动规律极为复杂。为实现点火过程的准确测量,亟需发展能够在超短时间(<100ns)内“冻结”燃烧流场、实现高频火焰图像采集的测量技术,从而获取火焰初始发展过程,深入理解燃烧反应与流动耦合的机理。受限于激光技术的发展,目前国内对燃烧室内点火过程的光学观测研究大多是全光谱成像及CH*等基团的化学发光成像^[4],这些技术能够获取火焰的整体分布,由于存在曝光时间较长且对火焰进行空间展向积分的问题,因此未能揭示火焰内部的二维精细结构信息。

高频 PLIF 技术^[5]具有极高的时间分辨率(~ns)和空间分辨率(~ μm),近些年来得到迅猛发展,并被逐渐应用于旋流燃烧器^[6]以及超燃冲压发动机燃烧室^[7]的燃烧诊断中。2017年,Miller应用100kHz CH₂O-PLIF技术进行超燃冲压发动机火焰预热区点火时空演变过程的研究^[3]。OH基是一种广泛存在于火焰中的燃烧中间产物^[8-9],相比甲醛基(CH₂O),其更能反映火焰反应区 and 高温区结构的演化过程。而用于激发OH基的高频连续激光器单脉冲能量较低,导致获取的荧光信号微弱,因此难以获取有效的火焰图像。目前,中低频(<500Hz)的OH-PLIF技术已经在发动机燃烧室地面试验中得到广泛应用^[10],研究主要围绕火焰的持续燃烧过程展开^[7,11-12]。由于发动机内点火在亚毫秒时间内完成^[13],需要开发高重频测量系统,而目前也尚未见有报道利用高频OH-PLIF技术进行超燃冲压发动机点火过程的研究。本文自主研发了一套满足脉冲燃烧风洞发动机点火过程测试的10kHz PLIF测量系统,开展了自点火、电火花点火及激光诱导等离子体点火等三种点火方式的测试研究。

2 试验装置及点火方案

2.1 10kHz 高频 PLIF 测量系统

为了适应严苛的地面外场试验条件,对 PLIF 测试系统进行了特殊设计(见图1)。本系统由一体化激光器系统、片状光束系统、数据采集系统、时序控制系统等组成,系统单幅图像采集曝光时间小于100ns。一体化激光器系统具有可移动性、可拓展性、抗振动及电磁干扰等特点,能够在复杂极端条件下稳定运行。其中,固体激光器的串间隔50ms,串内重频为10kHz,脉冲串持续时间为3ms,对应串内包络30个子脉冲。染料激光器输出283.553nm的紫外激光,用来激发电火过程中火焰中OH基位于 $A^2\Sigma(v'=1) \leftarrow X^2\Pi(v''=0)$ 带处的 $Q_1(8)$ 转动线,此转动线具有较高的荧光信号信噪比,被广泛用来对高速燃烧流场进行激光诱导荧光成像^[11]。输出的紫外激光单脉冲能量大于2mJ,经过光束整形系统变换为宽度为18cm,厚度小于300 μm 的薄片形状光束。片状光束由下向上穿过燃烧室展向中央横截面并激发经过路径上的OH基。拍摄帧频为10kHz的高速ICMOS相机作为数据采集设备,其配备有紫外镜头以及WG305-UG11滤光片组,用于对火焰中片光覆盖区域的OH荧光信号进行捕获,同时能够滤除背景噪声,从而增强图像信噪比。

2.2 脉冲燃烧风洞试验台

试验是在中国空气动力研究与发展中心的1kg/s直连式脉冲燃烧风洞试验台(见图1)上进行。为了模拟马赫数5.5的飞行条件,富氧空气与氢气混合后经加热器产生高焓来流。气流的马赫数为2.5,总流量为2.89kg/s,总压为1.75MPa,总温为1350K。该模型由隔离段(长度为340mm)和燃烧室(长度为898mm)组成。燃烧室由一个二维凹腔和一个膨胀段构成。其中,凹腔能够对高速气流的燃烧起稳定作用^[14],其深度为28mm,长度为257mm,后壁角为43.6°;膨胀段前部长度为230mm,上壁倾角为1°,其后部长度为390mm,上壁倾角为3°。燃料喷管位于隔离段出口上游69mm处,其包含10个直径1.0mm,

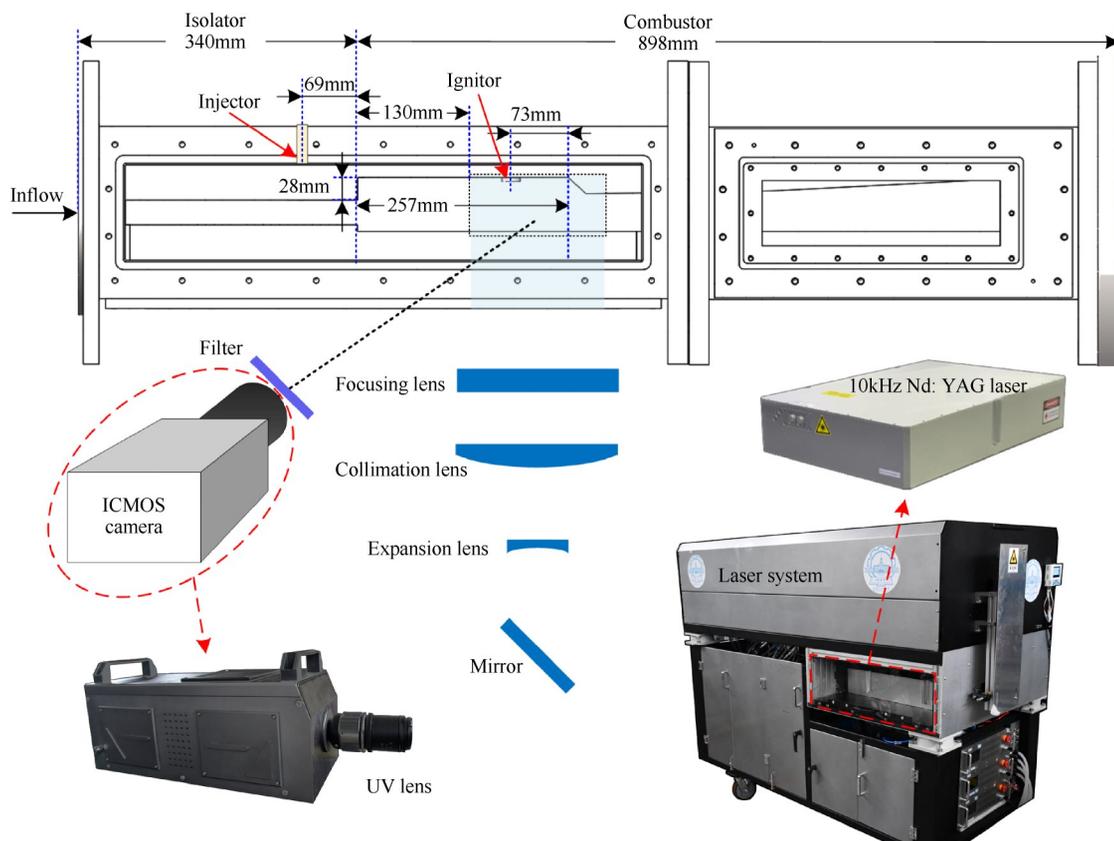


Fig. 1 Schematic diagram of test device

展向间隔 10mm 的喷孔,燃料喷射方向垂直于来流方向。试验中,温度为 305K 的燃料由喷嘴横向直接喷射到来流中。

2.3 点火方案

当前超燃冲压发动机中可重复的点火方式主要有自点火^[15]、电火花点火^[16]及激光诱导等离子体点火。自点火的实现需要热量和活性基团的积累,因此随机性较大,而电火花点火方式也具有较大的时间抖动特性。上述两种点火方式的开始时刻无法精确控制,同时点火位置也无法自由调节,因此亟需发展新型点火技术。激光诱导等离子体点火技术^[4,17-18]具有高精度时序控制特性、点火位置可控、可靠性与稳定性高等突出优势^[19],其原理是将高能量激光聚焦在特定位置产生极高能量密度,空气被击穿产生等离子体,引起局部热量及活性基团的积累,导致局部化学反应加速形成初始火核,进而将燃料引燃。本文基于上述三种点火方式,在超燃冲压发动机燃烧室中开展凹腔内点火过程试验研究。本文所用点火激光器的重复频率为 10Hz,激光脉冲宽度为 10ns。电火花点火器脉冲频率为 10Hz。试验中,自点火及激光点火使用的燃料为氢气,电火花点火使用的燃料为乙烯。

3 结果与讨论

在本文的三组试验中,分别获得了三种点火方式在瞬态点火过程中的 OH-PLIF 时间分辨图像序列,图像采样间隔为 100 μ s。对每组图像序列进行荧光强度总体归一化、阈值分割、边缘提取及伪彩图转换等图像预处理后,得到火焰的发展过程如图 2 所示。为了获取初始着火过程,电火花点火器和点火激光器均以单脉冲点火模式工作。点火是一种局部现象,燃料与氧化剂充分混合的区域会首先出现火核。由自点火图像序列(图 2(a))可以发现,0ms 时初始火核首先出现在凹腔下游的回流区,此处燃料逐渐达到较高的滞止温度,从而满足自点火条件。火焰由初始位置向来流的上游及下游传播,这与文献中数值模拟结果相似^[20]。在 0.1ms 时,斜坡附近可见强烈火焰,同时火焰继续沿壁面向上游发展,并在 0.3ms 时刻发展为全局火焰;在电火花点火试验中(图 2(b)),当火花出现后,微弱的火核先向下游发展且空间尺寸逐渐增大,在凹腔转角处回流区的驻留作用下,微弱火焰得以维持,在 0.5ms 时刻,出现了较为剧烈、结构清晰的火焰,随后发展为全局火焰;在激光点火试验中(图 2(c)),初始火核同时向上下游传

播,0.2ms时火焰发展到斜坡位置并紧贴凹腔壁面,随后火焰扩散至充满整个凹腔。

根据上述 PLIF 图像中仅能定性地描述火焰发展过程,不足以深刻阐明点火特性,需对火焰图像进一步处理和分析。通常用 PLIF 图像的总荧光强度来反映火焰燃烧的剧烈程度,用火焰面积表征火焰反应区的大小。合理设置阈值,保留 PLIF 图像中强度在阈值以上的像素作为火焰区域,此区域的面积定义为火焰面积^[21]。图 3 为三种点火方式下火焰面积及归一化总荧光信号强度随时间的变化曲线,OH 基荧光信号初次出现时记为 0 时刻。对于两种曲线,自点火都表现为剧烈振荡,火焰建立过程不稳定。自点火过程中火焰面积及荧光强度信号的振荡现象可能是由于局部燃料与空气配比的剧烈变化引起的。电火花点火的火焰面积增长最缓慢。从两种曲线来看自点火和激光点火具有相似趋势,荧光强度均先振荡增强,达到信号峰值后呈减弱趋势。电火花点火荧光强度单调上升到峰值后下降。自点火、电火花

点火和激光点火的初期火焰形成时间分别为 0.4ms, 0.7ms 以及 0.6ms。

火焰质心路径可以定量反映火焰整体的运动轨迹^[22]。荧光强度加权质心是当密度为荧光信号强度值(像素灰度值)时的图像重心,其坐标为

$$(x = \frac{\sum j \cdot P_{i,j}}{\sum P_{i,j}}, y = \frac{\sum i \cdot P_{i,j}}{\sum P_{i,j}}) \quad (1)$$

式中 i 和 j 分别为像素的横纵坐标, $P_{i,j}$ 为 (i,j) 处的荧光强度值。

将凹腔前沿所在横向位置定义为横坐标零点,下壁面所在水平面定义为纵坐标零点,由 PLIF 图像计算得到火焰出现后 0~0.4ms 时间范围内荧光强度加权质心的空间位置,结果如图 4 所示。可以看出,在三种点火方式下,火焰质心的运动轨迹具有一定的空间相似性,均由上壁面点火位置处开始发展,先向右侧移动,继而向左传播。上述现象揭示了燃烧室凹腔内点火过程的一般规律:在火焰发展初期,火核首先向燃烧室下游传播,在凹腔斜坡附近转而向

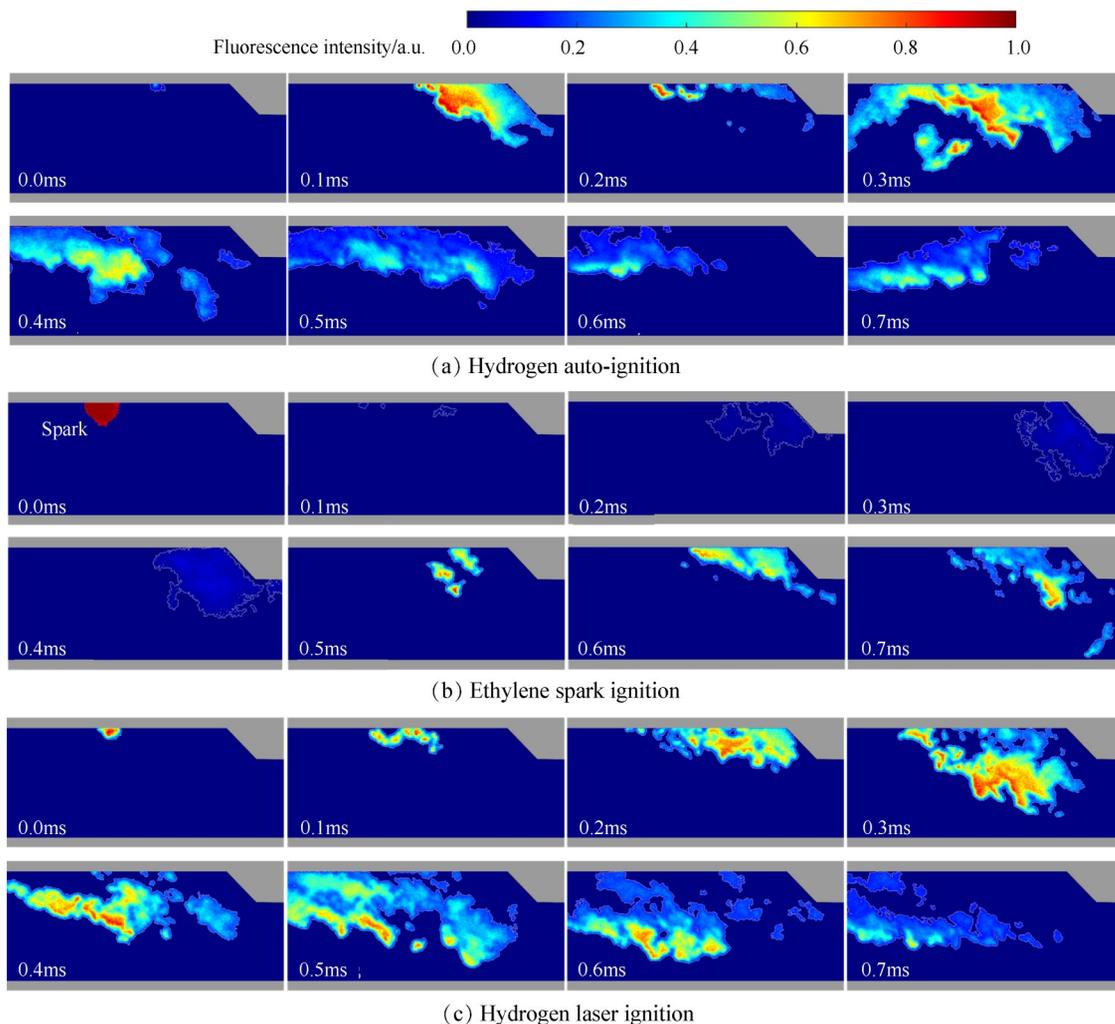
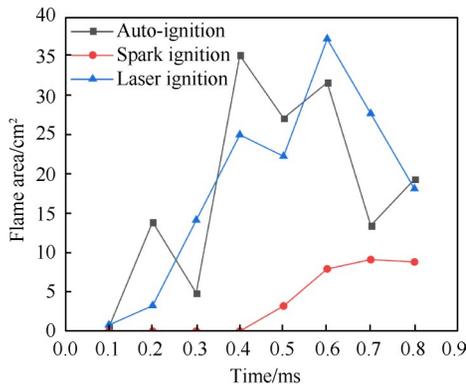
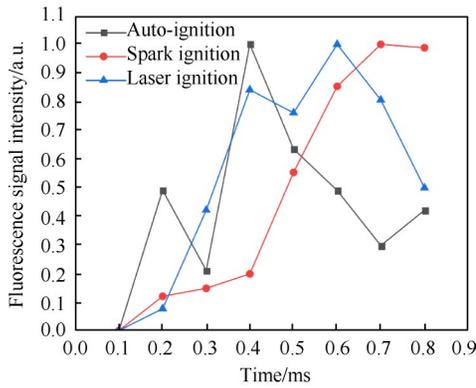


Fig. 2 PLIF images of ignition process



(a)



(b)

Fig. 3 Flame area and fluorescence signal intensity versus time

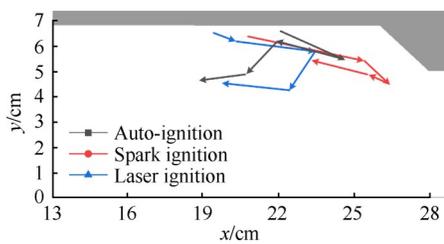


Fig. 4 Trajectory of flame centroid

上游传播,并逐渐发展形成全局火焰。火焰质心平均速度定义为连续两幅火焰图像中火焰质心位移量与图像采集间隔的比值,用来衡量火焰整体的发展速度。计算得到四个不同0.1ms时段内火焰质心的平均速度结果如图5所示。总体来看,火焰速度集中在100~450m/s内。点火初期,火焰速度剧烈变化(时段1和2),点火后期,火焰速度差异减小(时段3和4)。

由以上初步试验结果发现,利用10kHz高频PLIF成像可以捕捉到火焰精细结构的动态发展过程,局部火焰在亚毫秒时间内发展为全局火焰。根据PLIF图像能进一步得到点火时间特性、火焰质心运动轨迹以及火焰整体运动速度。后续可进一步研究点火过程燃烧反应与流动的相互作用,定量化火焰边缘

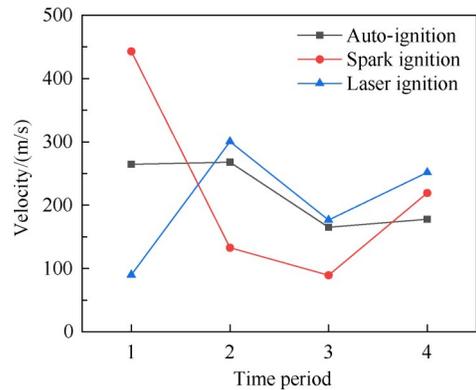


Fig. 5 Mean velocity in different periods

曲率^[23]等结构信息,从而将火焰形态与燃烧动力学建立联系。

4 结论

本文对超燃冲压发动机燃烧室内的点火过程进行了高频PLIF试验研究,得到以下结论:

(1)自主研发用于发动机点火过程高动态测试的10kHz高频PLIF系统,可提供点火过程的火焰结构演变信息,能够满足工程需求。

(2)成功获得时间间隔为100μs的火焰结构高分辨率图像,三种点火的初始火焰均在1ms内形成,且自点火具有最剧烈的点火振荡特性,自点火、电火花点火和激光点火的初期火焰分别在0.4ms,0.7ms及0.6ms建立起来。

(3)反演得到三种点火方式初始火焰发展的时空特性,即火焰质心的运动轨迹。根据火焰质心运动,可计算得到火焰整体运动速度为100~450m/s。

由于自点火和电火花的时序随机性,应用脉冲串模式PLIF系统较难准确采集到点火的完整发展过程。本研究中将激光点火与脉冲串工作模式高频PLIF技术进行结合,时序控制精度能够满足发动机测量的需求。后续研究需要进一步提高自点火和电火花点火测量过程的时序控制精度,并对不同点火方式下同种燃料的点火效果及特性进行对比。

致谢:感谢黑龙江省自然科学基金的资助。感谢中国空气动力研究与发展中心乐嘉陵院士在本文研究中给予的指导和支持、清华大学柳强教授提供的激光技术方面的支持。

参考文献

[1] Wang T, Li G, Yang Y, et al. Combustion Modes Periodical Transition in a Hydrogen-Fueled Scramjet Com-

- bustor with Rear-Wall-Expansion Cavity Flameholder [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(4): 3209-3215.
- [2] Ruan J L, Domingo P, Ribert G. Analysis of Combustion Modes in a Cavity Based Scramjet [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 215: 238-251.
- [3] Miller J D, Peltier S J, Slipchenko M N, et al. Investigation of Transient Ignition Processes in a Model Scramjet Pilot Cavity Using Simultaneous 100kHz Formaldehyde Planar Laser-Induced Fluorescence and CH^{*} Chemiluminescence Imaging [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(2): 2865-2872.
- [4] 蔡 尊, 朱家健, 孙明波, 等. 基于主动喷注方式的后缘突扩凹腔激光诱导等离子体点火实验研究 [J]. *推进技术*, 2019, 40(1): 115-122. (CAI Zun, ZHU Jia-jian, SUN Ming-bo, et al. Experimental Investigation on Laser-Induced Plasma Ignition Based on Direct Fueling Schemes in a Rear-Wall-Expansion Cavity [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(1): 115-122.)
- [5] Singla G, Scoufflaire P, Rolon J C, et al. OH Planar Laser-Induced Fluorescence and Emission Imaging in High Pressure LOx/Methane Flames [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23(3): 593-602.
- [6] Renaud A, Yokomori T, Tachibana S. Study of a Thermo-Acoustic Instability Triggering in a Low-Swirl Burner Using Simultaneous Time-Resolved Acetone and OH-PLIF [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(2): 2627-2633.
- [7] Wang Y H, Song W Y, Shi D Y. Experimental Study of Flame Stabilization in a Kerosene Fueled Scramjet Combustor [J]. *Acta Astronautica*, 2019, 157(4): 282-293.
- [8] Kapusta U J, Shuang C, Aldén M, et al. Structures of Inverse Jet Flames Stabilized on a Coaxial Burner [J]. *Energy*, 2020, 193: 116757.
- [9] Kim T Y, Choi S, Kim Y H, et al. Combustion Characteristics of Gaseous Inverse O₂/H₂ Coaxial Jet Flames in a Single-Element Model Combustor [J]. *Energy*, 2018, 155: 262-271.
- [10] Tian Y, Shi W, Zhong F, et al. Pilot Hydrogen Enhanced Combustion in an Ethylene-Fueled Scramjet Combustor at Mach 4 [J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(1): 015105.
- [11] Peng J B, Cao Z, Yu X, et al. Analysis of Combustion Instability of Hydrogen Fueled Scramjet Combustor on High-Speed OH-PLIF Measurements and Dynamic Mode Decomposition [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(23): 13108-13118.
- [12] Yang C B, Peng J B, Yu X, et al. Continuous 100Hz Planar Laser-Induced Fluorescence Applied to the Study of Combustion Processes [J]. *Spectroscopy Letters*, 2017, 50(5): 265-269.
- [13] Baccarella D, Lee G S, Liu Q, et al. Laser-Induced Plasma Ignition Experiments in a Direct-Connect Supersonic Combustor at Mach 3 [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2020, 36(5): 732-743.
- [14] Cai Z, Wang T, Sun M. Review of Cavity Ignition in Supersonic Flows [J]. *Acta Astronautica*, 2019, 165: 268-286.
- [15] Sung C J, Li J G, Yu G, et al. Chemical Kinetics and Self-Ignition in a Model Supersonic Hydrogen-Air Combustor [J]. *AIAA Journal*, 1999, 37(2): 208-214.
- [16] Denman Z J, Chan W Y K, Brieschenk S, et al. Ignition Experiments of Hydrocarbons in a Mach 8 Shape-Transitioning Scramjet Engine [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2016, 32(6): 1462-1471.
- [17] Hammack S D, Ombrello T M. Spatio-Temporal Evolution of Cavity Ignition in Supersonic Flow [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(3): 3845-3852.
- [18] Brieschenk S, O'Byrne S, Kleine H. Laser-Induced Plasma Ignition Experiments in a Scramjet Inlet [M]. *Orlando: 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2011.
- [19] 李晓晖. 甲烷/空气混合燃气激光诱导等离子体点火研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [20] Zhang Y L, Wang B, Zhang H Q. Ignition, Flame Propagation and Extinction in the Supersonic Mixing Layer Flow [J]. *Science China*, 2014, 57(11): 2256-2264.
- [21] Peng J B, Gao L, Yu X, et al. Combustion Oscillation Characteristics of a Supersonic Ethylene Jet Flame Using High-Speed Planar Laser-Induced Fluorescence and Dynamic Mode Decomposition [J]. *Energy*, 2022, 239: 122330.
- [22] Zhang R, Chen L, Wei H, et al. Optical Study on the Effects of the Hydrogen Injection Timing on Lean Combustion Characteristics Using a Natural Gas/Hydrogen Dual-Fuel Injected Spark-Ignition Engine [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(39): 20777-20789.
- [23] Geipel C M, Rockwell R D, Chelliah H K, et al. Flame Structure Characterization in a Dual-Mode Scramjet Using Hydroxyl Planar Laser-Induced Fluorescence [J]. *AIAA Journal*, 2021, 59(5): 1824-1835.

(编辑:刘萝威)