

## 超声速燃烧火焰放热区结构 CH-PLIF 成像技术\*

梁剑寒<sup>1</sup>, 李 韵<sup>1</sup>, 孙明波<sup>1</sup>, 吴 戈<sup>1</sup>, 朱家健<sup>1</sup>, 高 强<sup>2</sup>, 李 博<sup>2</sup>

(1. 国防科技大学 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 湖南长沙 410073;

2. 天津大学 内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:**超燃冲压发动机是吸气式高超声速飞行器的关键部件之一,超燃冲压发动机燃烧室内火焰结构的研究对揭示超声速燃烧的稳焰机理具有重要意义。利用平面激光诱导荧光(Planar Laser-Induced Fluorescence, PLIF)技术测量了超声速燃烧直连式试验台燃烧过程中重要自由基 CH 的二维分布,实现了超声速燃烧火焰放热区结构的可视化。在开敞空间的低速射流火焰炉中使用甲烷/空气预混火焰对 CH-PLIF 技术进行了初步验证和系统优化,再利用 CH-PLIF 技术在凹腔稳焰的超燃直连台上实现了超声速燃烧火焰放热区结构的二维可视化,并与 OH-PLIF 和 CH 自发辐射测量结果进行了对比。实验结果表明,在开敞空间的低速射流预混火焰中,火焰放热区会发生扭曲、褶皱和分裂等现象,随着雷诺数的增大,火焰锋面褶皱程度更加显著;在凹腔稳焰的超声速燃烧中,火焰放热区高度褶皱和破碎,放热区结构的厚度为 0.5 ~ 6.5 mm,同时也存在放热区的分裂与剥离等现象。CH-PLIF 技术能够以较高的空间分辨率更准确地呈现凹腔超声速火焰放热区的结构,其在凹腔稳焰的超声速燃烧诊断中具有重要的应用价值。

**关键词:**CH-PLIF; 超声速燃烧; 火焰结构; 放热区; 激光诱导荧光; 湍流火焰

**中图分类号:**V231.2; O433.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2019)01-027-07

## CH-PLIF imaging of flame heat-release structures in supersonic combustion

LIANG Jianhan<sup>1</sup>, LI Yun<sup>1</sup>, SUN Mingbo<sup>1</sup>, WU Ge<sup>1</sup>, ZHU Jiajian<sup>1</sup>, GAO Qiang<sup>2</sup>, LI Bo<sup>2</sup>

(1. Science and Technology on Scramjet Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Scramjet engine is one of the most important components of air-breathing hypersonic vehicles, and the research on flame structures in the combustion chamber of scramjet engines plays a significant role in studying the mechanism of flame stabilization of the supersonic combustion. Two-dimensional distributions of CH were measured at a direct connect test facility using the PLIF (planar laser-induced fluorescence) technique to visualize the flame heat-release structures in a cavity-stabilized scramjet combustor. Verification and optimization of the CH-PLIF technique were conducted in a methane/air premixed low-speed flame generated by a jet flame burner. Two-dimensional distributions of flame heat-release structures in the scramjet combustor were achieved by using the CH-PLIF technique. OH-PLIF images and CH chemiluminescence images were also performed in the scramjet combustor to compare these images with the CH-PLIF images. Experimental results show that the heat-release zones of the low-speed premixed jet flames can become distorted, wrinkled and separated. The heat-release zones are highly wrinkled with the increasing Reynolds numbers. The heat-release zones with a thickness of 0.5 ~ 6.5 mm in the cavity-stabilized scramjet combustor become highly distorted and wrinkled, and the separation of the heat-release zones can be observed. It is found that the CH-PLIF technique is able to visualize the heat-release zones in cavity-stabilized scramjet combustors and can play a promising role in understanding cavity stabilization mechanisms of the supersonic combustion.

**Keywords:** CH-PLIF; supersonic combustion; flame structure; heat-release zone; laser-induced fluorescence; turbulent flame

高超声速飞行器因其速度快、突防能力强的特点,具有广阔的军事应用前景<sup>[1]</sup>。吸气式高超声速飞行器中,超燃冲压发动机作为可靠的推进方式,其研究备受关注,但也充满着艰巨的挑

战<sup>[2]</sup>。究其原因,超燃冲压发动机净推力获取困难,推力主要依靠超声速燃烧提供的能量产生,必须高效利用。超燃冲压发动机中的超声速燃烧现象涉及湍流、激波、边界层、化学反应等多种现象

\* 收稿日期:2018-03-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51606217,91741205)

作者简介:梁剑寒(1972—),男,湖北黄梅人,教授,博士,博士生导师, E-mail: jhleon@vip.sina.com;

朱家健(通信作者),男,讲师,博士, E-mail: jizhu@nudt.edu.cn

的耦合,机理十分复杂<sup>[3]</sup>。因此,超声速燃烧现象成为当今高超声速研究的热点。在超声速燃烧现象研究中,对火焰结构的研究有助于揭示超声速燃烧稳焰机理和改进超燃冲压发动机设计。合理的燃烧诊断技术不仅能够稳态燃烧中实现高精度测量,更能够应用于复杂瞬态燃烧诊断<sup>[4]</sup>。平面激光诱导荧光(Planar Laser-Induced Fluorescence, PLIF)技术具有非侵入式、实时原位测量、高时空分辨、可用于耐高温高压环境等独特优势,其在火焰结构的可视化中具有重要应用<sup>[5]</sup>。

PLIF 技术通过对燃烧过程中产生的重要中间产物或者自由基(如  $\text{CH}_2\text{O}$ 、OH 和 CH 等)进行高分辨率二维成像,从而实现火焰结构的可视化。 $\text{CH}_2\text{O}$  常用于标示火焰预热区结构,OH 用于标示火焰反应区的结构,CH 则用于标示火焰放热区的结构。PLIF 在研究开敞空间的低速射流火焰结构方面应用广泛。胡志云等<sup>[6]</sup>利用 OH-PLIF 获得稳定燃烧场的二维 OH 分布,并分析了激光区域内的二维温度场分布。赵建荣<sup>[7]</sup>、李麦亮<sup>[8]</sup>等利用 OH-PLIF 测量了多种平面火焰炉的火焰结构,探索了 PLIF 理论与实验方法,并利用了 PLIF 实现了湍流火焰结构成像。翁武斌等<sup>[9]</sup>使用 OH-PLIF 技术研究甲烷空气预混射流火焰,探究在不同出口雷诺数与不同氮气稀释比例下的 OH 分布及火焰锋面结构。Zhou 等<sup>[10-11]</sup>使用 CH/ $\text{CH}_2\text{O}$ /OH-PLIF 与 HCO/ $\text{CH}_2\text{O}$ /OH-PLIF 成像火焰炉中湍流预混火焰的预热区与反应区等精细结构,探究了各产物与自由基的分布和相互渗透情况。朱家健等<sup>[12]</sup>使用  $\text{CH}_2\text{O}$ /OH-PLIF 同时成像甲烷/空气部分预混火焰结构,探索火焰分区分裂规律。

在超燃冲压发动机直连式试验台中开展 PLIF 实验时会受到封闭空间内壁面反射强、试验台运行时间短、难以在线优化光学系统等因素的影响。这使 PLIF 技术诊断超声速燃烧的火焰结构时比开敞空间低速射流火焰更加困难。因此,在超声速燃烧诊断中,PLIF 技术常用于诊断相对较易测量的 OH 和  $\text{CH}_2\text{O}$ 。耿辉等<sup>[13]</sup>使用 OH-PLIF 技术探究超声速燃烧火焰结构与凹腔稳焰作用。范周琴等<sup>[14]</sup>使用 OH-PLIF 技术探究喷注当量比、喷注位置、凹腔构型等对超燃火焰分布的影响。李麦亮等<sup>[15]</sup>使用 OH-PLIF 技术研究凹腔中不同长深比、凹腔后缘倾角和不同燃料喷注方案对超燃火焰结构的影响。Chen 等<sup>[16]</sup>使用 OH 双色 PLIF 技术实现了对超声速燃烧火焰温度分

布的测量。Rasmussen 等<sup>[17]</sup>使用  $\text{CH}_2\text{O}$ /OH-PLIF 方法成像凹腔超声速燃烧,并探究喷注位置对凹腔稳焰效果的影响。

CH 基在碳氢燃料的燃烧反应中起重要作用。与 OH 和  $\text{CH}_2\text{O}$  不同,CH 是仅存在于放热区中的重要组分,其分布区域可以认为是火焰锋面所在区域,具有分布集中、存在时间短、扩散影响小等优点,对于研究细微的火焰结构与火焰反应机理具有重要意义。但是,由于 CH 基活性强、分布窄、寿命短、CH 荧光效率低、易受杂散光干扰等特点,给 CH 基的 PLIF 测量(尤其是在超声速燃烧环境中的测量)带来极大的挑战。目前,国内外利用 CH-PLIF 测量超声速燃烧火焰结构的研究非常少,只有 Micka 等<sup>[18]</sup>有过初步成果。Micka<sup>[18]</sup>使用 CH-PLIF 技术得到凹腔超声速燃烧的火焰结构图像,得到两种凹腔稳焰下火焰的细微结构。但是,Micka 等在 CH-PLIF 实验研究中使用传统的染料激光器,该激光器在 CH 的激发波段(390.3 nm)能量较低,荧光信号相对较弱。

本文基于可调谐 Alexanderite 固体激光器进行超声速燃烧火焰结构 CH-PLIF 成像技术研究,探究使用 CH-PLIF 成像凹腔稳焰的超声速燃烧火焰放热区结构的方法。先利用单组分 CH 基成像技术研究甲烷/空气湍流预混火焰锋面结构进行验证,再对凹腔超声速燃烧火焰结构进行成像,得到初步的超燃火焰放热区结构。

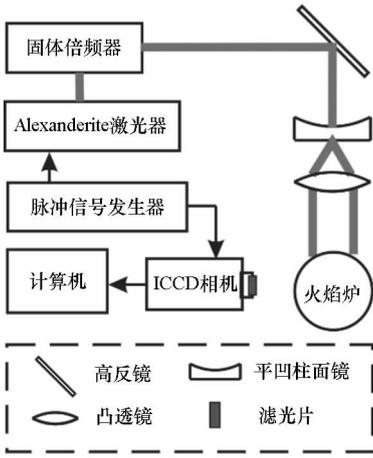
## 1 实验方法

本文在开展 CH-PLIF 实验时,先在开敞空间低速射流火焰中进行 CH-PLIF 技术的初步技术验证和系统优化,再在超燃直连式试验台利用 CH-PLIF、OH-PLIF 与 CH 自发辐射技术成像火焰预热区的结构。下文从光学诊断系统、火焰炉系统、超燃系统及图像处理方法四个方面介绍实验方法。

### 1.1 光学诊断系统

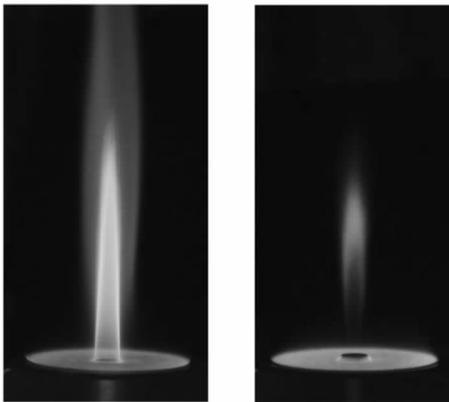
CH-PLIF 系统示意如图 1(a)所示,可调谐 Alexanderite 固体激光器(101PAL, Light Age)产生波长为 774 nm 的激光后,经由固体倍频器进行二倍频,输出波长约 387 nm 的激光,单脉冲激光能量为 15 mJ,频率为 10 Hz,脉宽为 100 ns。激光光束通过高反镜,进入凹柱镜( $f = -40$  cm)进行扩束,再经凸透镜( $f = 130$  cm)聚焦为片状激光,照射在燃具中央。激发出荧光后,荧光信号由 ICCD 相机(PI-MAX I, Princeton Instruments)采集,ICCD 相机曝光时间为 100 ns。接收进入计算机

进行处理。ICCD 相机和 Alexanderite 激光器的时序由脉冲信号发生器 (DG535) 进行同步控制。为了消除杂散光对 PLIF 信号的干扰,在 ICCD 相机镜头 (Nikkor 50 mm,  $f/1.4$ ) 前加上窄带滤光片 IF431。



(a) 射流火焰炉实验中 PLIF 测量光路图

(a) Optical arrangements for PLIF measurement in the jet flame burner



(b) 低雷诺数火焰

(b) Flame in a small Reynolds number

(c) 高雷诺数火焰

(c) Flame in a large Reynolds number

图 1 射流火焰炉实验中 PLIF 实验装置示意图及火焰图片

Fig. 1 Schematic of the PLIF experimental setup in the jet flame burner and flame photos

为了与 CH-PLIF 实验结果进行对比,在光学诊断实验部分还开展了 OH-PLIF 实验和高速摄影实验。在 OH-PLIF 实验中采用 Nd:YAG 泵浦的染料激光器 (Cobra Stretch-G-2400, Sirah), 波长为 283 nm, 能量为 12 mJ, 频率为 30 Hz。OH-PLIF 系统采用的相机镜头为 Nikkor 紫外镜头, 采用的滤光片为 IF310, 滤光片中心波长为 431 nm, 半宽为 10 nm。其他实验装置与 CH-PLIF 实验所用装置相似。在高速摄影实验中, 采用帧频为

50 kHz 的高速相机 (Photron Fastcam SA-5) 拍摄火焰的图像, 相机镜头 (Nikkor 50 mm,  $f/1.4$ ) 上安装 CH 滤波片 (IF431), 相机的曝光时间为 18  $\mu\text{s}$ 。

## 1.2 火焰炉系统

开敞空间低速射流火焰炉采用协流-射流火焰炉, 在协流和射流中通入甲烷和空气预混气体产生射流火焰和协流火焰。协流火焰用于防止周围冷空气对射流火焰的影响, 协流火焰的当量比为 0.9, 防止过量燃料对中心射流火焰的影响。中心射流火焰的当量比、流速等可通过流量计进行调节和控制。开敞空间低速射流火焰炉 CH-PLIF 实验中采用低雷诺数与高雷诺数两种不同工况 (如表 1 所示), 中心射流火焰的当量比都为 1.15, 流速分别为 6 m/s 和 85 m/s, 雷诺数分别为 2800 和 27 300。低雷诺数工况下, 喷孔直径为 8 mm, 高雷诺数工况下, 在 8 mm 喷孔上加装直径为 1.5 mm 的不锈钢喷嘴, 中心射流由喷嘴喷出。两种工况协流层内径都为 61 mm。典型的低雷诺数火焰和高雷诺数火焰图片如图 1(b)、图 1(c) 所示。

表 1 火焰炉射流实验工况

Tab. 1 Flow conditions in a jet flame burner

工况	当量比 $\phi$	射流速度/(m/s)	雷诺数 $Re$
低雷诺数	1.15	6	2800
高雷诺数	1.15	85	27 300

## 1.3 超燃系统

CH-PLIF 实验在国防科技大学 1 kg/s 超燃直连式实验台上开展。超燃直连式实验台由隔离段、带光学观察窗口的燃烧室和扩展段等部分组成。超声速燃烧实验使用空气加热器保证来流能够达到实际高超声速飞行工况, 模拟超声速燃烧入口的总焓。空气加热器使用空气、氧气、酒精三组元混合燃烧的方法产生符合要求的模拟气流, 正常点火工作后, 超声速来流总温为 1530 K, 总压为 2.6 MPa, 马赫数为 2.92。加热器工作之后, 产生的模拟来流进入燃烧室入口。加热器与来流工况如表 2 所示。

实验光路示意如图 2 所示, 其中带光学观察窗口的燃烧室为凹腔超声速燃烧实验段部分。凹腔长 48 mm, 深 12 mm, 后缘倾角 45°, 后缘高 12 mm, 在凹腔上游 10 mm 处设置燃料喷注孔, 喷注燃料为乙烯。凹腔底壁安装电

子火花塞用于点火。扩张段扩张角为  $2.25^\circ$ 。光路基本与火焰炉实验保持一致,所不同的是由于凹腔在风洞中所处位置特殊,采取三个高反镜使激光进入凹柱面镜扩束,再进入凸透镜转化为片状激光,从燃烧室顶部石英玻璃窗口照射在凹腔中部约 24 mm 处。

表 2 凹腔超声速燃烧实验段工况

Tab.2 Flow conditions in a cavity-stabilized scramjet combustor

空气加热器		喷管出口(超声速燃烧室入口)				
总温/ K	1530	马赫数	2.92			
总压/ MPa	2.6	喷注时间/ ms	1200			
空气流 量/(g/s)	779	当量比	0.50			
氧气流 量/(g/s)	189	组分	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
乙烯流 量/(g/s)	53.6	质量分数/ %	23.3	5.9	9.6	61.2

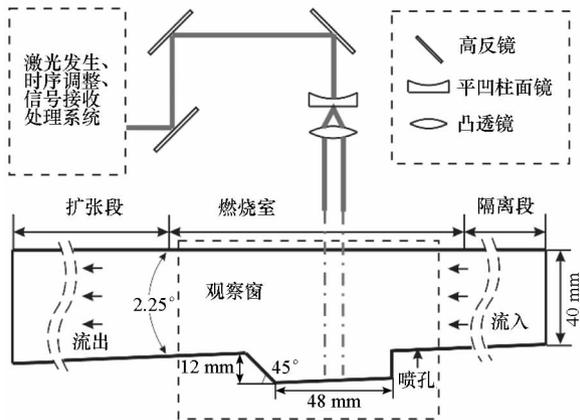


图 2 凹腔稳焰超燃系统结构和 PLIF 实验装置示意图

Fig 2 Schematic of the configuration of the cavity-stabilized scramjet system and the PLIF experimental setup

### 1.4 图像处理办法

为了更加清晰地观察火焰结构,需要对 CH-PLIF 原始图像进行后处理,图像处理办法包括滤波及尺寸调整等步骤。

在滤波的图像处理中,首先利用原始图像减去背景图像去除背景噪声。此时仍可能残留较大的激光范围外的较强自发辐射荧光信号点,因此使用 MATLAB 中“腐蚀”与“膨胀”的操作,抓取

火焰锋面的形状并将大噪点滤去。其次依据 P-M 扩散方程<sup>[19]</sup>进行非线性扩散滤波,引入方差计算非线性扩散系数函数,可以有效完成脉冲噪声的消除并且保护图像的边缘特征。之后再进行中值滤波操作,进一步滤去噪声。

滤波后利用二维标尺对图像进行尺寸与位置校正。火焰炉与凹腔标尺图像均为 1024 像素 × 1024 像素的图像,对应尺度关系,可得火焰炉图像中 1 像素约为 0.03 mm。截取图像中火焰区域,并根据对应标尺得到火焰结构的尺度信息。

## 2 结果与讨论

### 2.1 火焰炉实验

低雷诺数下甲烷和空气预混射流火焰 CH-PLIF 图像如图 3 所示。CH 常用于标示火焰的放热区。低雷诺数条件下,火焰放热区结构呈现明显的分区。由文献[8]可知,CH 基所包裹的区域为 CH<sub>2</sub>O 标示的火焰预热区,CH 外侧区域为 OH 标示的火焰反应区。预热区与反应区接触边界为火焰锋面,即 CH 分布区域。

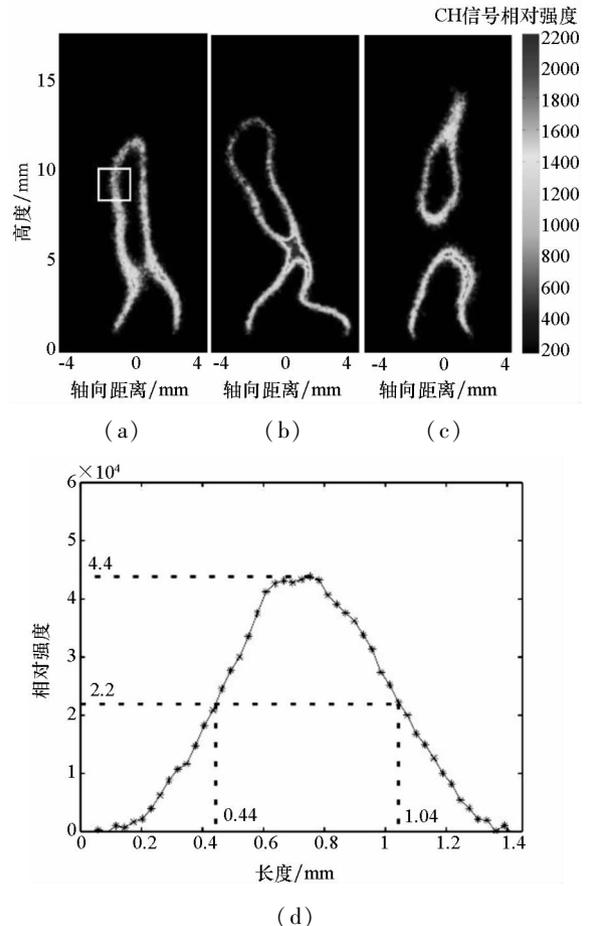


图 3 低雷诺数下湍流预混火焰 CH-PLIF 图像  
Fig.3 CH-PLIF images of a premixed jet flame under low Reynolds number

如图3所示,在低雷诺数下,火焰锋面仍然较规则,没有明显的褶皱等现象,整体结构类似于层流预混火焰。图3(a)中,锋面还未交错,放热区呈现腰部变窄的长条形。图3(b)中,两侧锋面结合但还未使得上下放热区分离。图3(c)中的放热区已经分裂成两个小放热区,其中上部放热区呈现椭圆形,并且火焰锋面有被拉长的趋势,下部预热区则呈现柱形。产生这些现象的原因是大规模的湍流使火焰锋面产生扭曲,增大火焰锋面的面积的同时,使得火焰分裂成多个放热区。截取图3(a)中所示方框中的火焰锋面并由信号强度分布的半高宽估计宽度,结果如图3(d)所示。由实验前所拍摄标尺与图像像素长度对应关系,估算出火焰锋面的厚度约为0.6 mm。

如图4所示,高雷诺数条件下,火焰中的CH轮廓比起低雷诺数时更加破碎,火焰锋面褶皱程度增强。由图4可以看出,在火焰锋面褶皱程度增大的同时,锋面局部区域发生多处合并,形成多个分离的局部放热区域。图3和图4的CH-PLIF实验图像表明,随着雷诺数的进一步增大,湍流对火焰放热区结构的影响更加显著,使得火焰锋面的扭曲程度增强,火焰放热区的形态发生剧烈变化。这两种工况的对比说明了雷诺数对湍流火焰放热区结构的重要影响,并且表明CH-PLIF技术可以清晰捕捉复杂的火焰放热区分布及其细微结构的变化,能够为下一步凹腔中的超声速燃烧火焰结构的研究提供有力的工具。

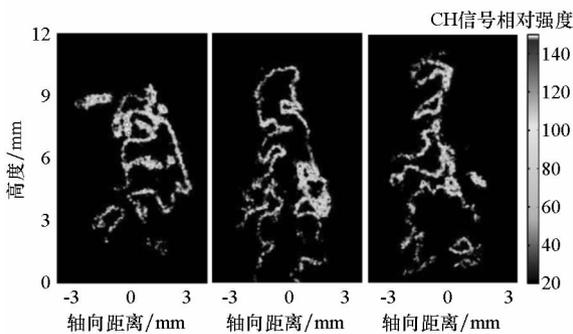


图4 高雷诺数下湍流预混火焰 CH-PLIF 图像  
Fig 4 CH-PLIF images of a premixed jet flame under high Reynolds number

## 2.2 超声速燃烧火焰结构 CH-PLIF 成像

凹腔稳焰的超声速燃烧火焰结构 CH-PLIF 图像如图5所示。在图5所示图像中,使用白线标示出 CH-PLIF 信号的分布区域,即白线所标示区域的内侧为 CH-PLIF 信号,外侧为 CH 自发辐射区域。需要特别指出的是本文在进行 CH-PLIF 实验时,ICCD 相机的曝光时间设置为 100 ns。在

开敞空间的火焰炉中进行 CH-PLIF 成像时,ICCD 采用 100 ns 的曝光时间并没有观察到 CH 的自发辐射信号,但是 CH 自发辐射信号却出现在凹腔稳焰的超声速燃烧火焰中。Micka 等<sup>[18]</sup>的 CH-PLIF 实验也观察到类似的实验现象。这可能是由超燃冲压发动机燃烧室内 CH 自发辐射信号路径积分的效应较强而造成的。

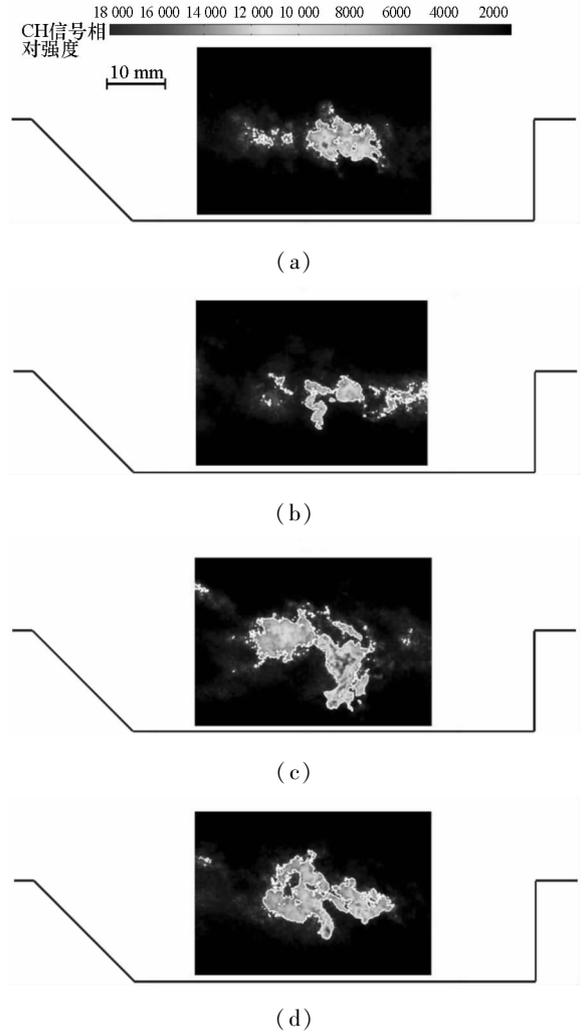


图5 凹腔超声速燃烧 CH-PLIF 图像( $\phi=0.50$ ,  $Ma=2.92$ )  
Fig 5 CH-PLIF image in a cavity-stabilized scramjet combustor ( $\phi=0.50$ ,  $Ma=2.92$ )

在 CH-PLIF 实验过程中,为了提高激光的激发效率,激光片(约 15 mm)只照射在凹腔正中间区域。由图5可以看出,图像中的 CH 分布总体呈现连续层状,放热层厚度约为 0.5 ~ 6.5 mm。由于 PLIF 图像显示的是火焰传播至主流下游处的图像,因此放热区显得更加褶皱也更厚,部分区域还出现了 CH 基处于近似孤立的簇丛而非薄层中的现象,如图5(b)所示。由图5(c)可以认为放热区正好处于向下游传播的湍流结构中,湍流使得放热区发生高度褶皱。

使用 CH 自发辐射也可以显示 CH 激发态的

分布,进而在一定程度上反映火焰放热区的分布。图 6(a)为凹腔稳焰的超声速燃烧中火焰 CH 自发辐射的测量结果。与图 5 所示的 CH-PLIF 图像相比,图 6(a)中呈现的 CH 自发辐射图像为路径积分的结果,没有空间分辨能力,不能反映出火焰放热区某些分离、破碎的结构。OH-PLIF 技术也常用于呈现火焰反应区结构,如图 6(b)所示。OH-PLIF 图像虽然具有空间分辨率,但由于 OH 存在时间比 CH 长,更易扩散,分布范围比放热区更大,不能显示精确细致的火焰锋面结构,因此使用 OH-PLIF 成像火焰结构将导致火焰锋面的结构判断失真。对比图 5 与图 6 可知,使用 CH-PLIF 可以更准确地呈现火焰放热区的结构。

通过火焰炉火焰结构与凹腔稳焰的超声速火焰结构的 CH-PLIF 成像,可以看出 CH-PLIF 技术在探究凹腔超声速燃烧火焰放热区结构时具有重要的应用价值。在进行实验优化与改进后,CH-PLIF 将具有全流域成像火焰放热区细微结构的能力,这对于深入研究凹腔中超声速燃烧稳焰机理具有重要意义。

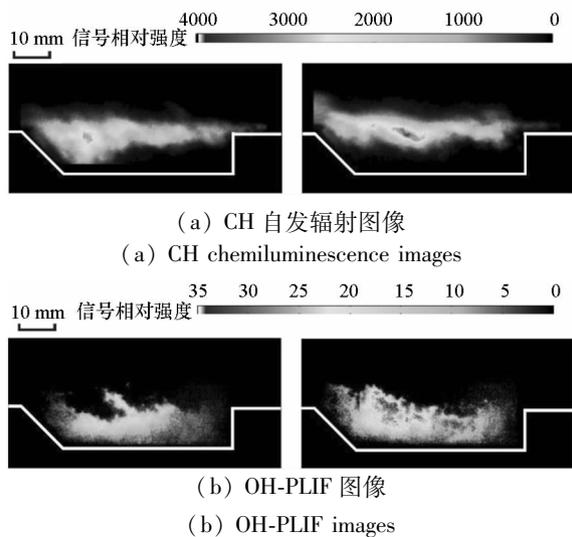


图 6 凹腔 CH 自发辐射与 OH-PLIF 火焰结构成像  
( $\phi = 0.50$ ,  $Ma = 2.92$ )

Fig 6 CH spontaneous emission images and OH-PLIF images in a cavity-stabilized scramjet combustor  
( $\phi = 0.50$ ,  $Ma = 2.92$ )

### 3 结论

利用 CH-PLIF 技术实现了超声速燃烧火焰放热区结构的可视化。首先使用 CH-PLIF 技术对低速条件下的火焰炉燃烧进行技术验证和系统优化,得到清晰的火焰结构并进行分析,然后通过 CH-PLIF 获得凹腔稳焰的超声速燃烧火焰结构,分析了火焰放热区的分布。

实验结果表明,在开敞空间的火焰炉中,火焰放热区由于湍流影响会发生扭曲、褶皱和分裂等现象,随着雷诺数的增大,火焰锋面褶皱程度更加显著。在凹腔稳焰的超声速燃烧中,火焰放热区高度褶皱和破碎,放热区结构的厚度为 0.5 ~ 6.5 mm,同时也存在放热区的分裂与剥离等现象。

由 CH-PLIF 图像与 OH-PLIF 图像、CH 自发辐射图像的比较可知,CH-PLIF 技术能够以较高的空间分辨率更准确地呈现凹腔超声速火焰放热区的结构,其在凹腔稳焰的超声速燃烧诊断中具有更大的优越性和重要的应用价值。

### 参考文献 (References)

- [1] 赵彪. 高超声速飞行器技术发展研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.  
ZHAO Biao. Research on the development of hypersonic vehicle technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [2] 王振国, 梁剑寒, 丁猛, 等. 高超声速飞行器动力系统研究进展 [J]. 力学进展, 2009, 39(6): 716-739.  
WANG Zhenguo, LIANG Jianhan, DING Meng, et al. A review on hypersonic airbreathing propulsion system [J]. Advances in Mechanics, 2009, 39(6): 716-739. (in Chinese)
- [3] 俞刚, 范学军. 超声速燃烧与高超声速推进 [J]. 力学进展, 2013, 43(5): 449-472.  
YU Gang, FAN Xuejun. Supersonic combustion and hypersonic propulsion [J]. Advances in Mechanics, 2013, 43(5): 449-472. (in Chinese)
- [4] 刘晶儒, 胡志云, 张振荣, 等. 激光光谱技术在燃烧流场诊断中的应用 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 284-296.  
LIU Jingru, HU Zhiyun, ZHANG Zhenrong, et al. Laser spectroscopy applied to combustion diagnostics [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(2): 284-296. (in Chinese)
- [5] Eckbreth A C. Laser diagnostics for combustion temperature species [M]. Gordon & Breach Publishers, 1988.
- [6] 胡志云, 刘晶儒, 关小伟, 等. 燃烧场参数的激光诊断技术研究 [J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(5): 702-706.  
HU Zhiyun, LIU Jingru, GUAN Xiaowei, et al. Study on laser diagnostics applied to combustion and flame [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(5): 702-706. (in Chinese)
- [7] 赵建荣, 陈立红, 俞刚, 等. 显示 OH 浓度分布图像的平面激光诱导荧光技术 [J]. 光学技术, 2000, 26(5): 429-431, 434.  
ZHAO Jianrong, CHEN Lihong, YU Gang, et al. Planar laser induced fluorescence of OH concentration distribution imaging [J]. Optical Technique, 2000, 26(5): 429-431, 434. (in Chinese)
- [8] 李麦亮, 周进, 耿辉, 等. 测量火焰中氢氧基分布的激光诱导荧光技术 [J]. 国防科技大学学报, 2003, 25(3): 10-13, 23.  
LI Mailiang, ZHOU Jin, GENG Hui, et al. Laser induced

- fluorescence technology for measurements of OH distribution in flames [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2003, 25(3): 10–13, 23. (in Chinese)
- [9] 翁武斌, 王智化, 何勇, 等. 甲烷湍流射流火焰锋面结构的激光 PLIF 测量 [J]. *工程热物理学报*, 2014(11): 2308–2312.
- WENG Wubin, WANG Zhihua, HE Yong, et al. The methane turbulent jet flame front structure measurement with PLIF technique [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014(11): 2308–2312. (in Chinese)
- [10] Zhou B, Brackmann C, Li Z, et al. Simultaneous multi-species and temperature visualization of premixed flames in the distributed reaction zone regime [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(2): 1409–1416.
- [11] Zhou B. Advanced laser-based multi-scalar imaging for flame structure visualization towards a deepened understanding of premixed turbulent combustion [D]. USA: Lund University, 2015.
- [12] 朱家健, 赵国焱, 龙铁汉, 等. OH 和 CH<sub>2</sub>O 平面激光诱导荧光同时成像火焰结构 [J]. *实验流体力学*, 2016, 30(5): 55–60, 87.
- ZHU Jiajian, ZHAO Guoyan, LONG Tiehan, et al. Simultaneous OH and CH<sub>2</sub>O PLIF imaging of flame structures [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2016, 30(5): 55–60, 87. (in Chinese)
- [13] 耿辉, 翟振辰, 桑艳, 等. 利用 OH-PLIF 技术显示超声速燃烧的火焰结构 [J]. *国防科技大学学报*, 2006, 28(2): 1–6.
- GENG Hui, ZHAI Zhenchen, SANG Yan, et al. Reveal the flame structure of supersonic combustion using OH-PLIF technology [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2006, 28(2): 1–6. (in Chinese)
- [14] 范周琴, 刘卫东, 林志勇, 等. 凹腔喷射超声速燃烧火焰结构实验研究 [J]. *推进技术*, 2013, 34(1): 62–68.
- FAN Zhouqin, LIU Weidong, LIN Zhiyong, et al. Experimental investigation on supersonic combustion flame structure with cavity injectors [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(1): 62–68. (in Chinese)
- [15] 李麦亮, 周进, 耿辉, 等. 平面激光诱导荧光技术在超声速燃烧中的应用 [J]. *推进技术*, 2004, 25(4): 381–384.
- LI Mailiang, ZHOU Jin, GENG Hui, et al. Application of PLIF in research on supersonic combustion [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(4): 381–384. (in Chinese)
- [16] Chen S, Su T, Yang F, et al. Calibration method for 2D instantaneous OH-PLIF temperature measurements in flame [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(5): 65–68.
- [17] Rasmussen C C, Dhanuka S K, Driscoll J F. Visualization of flameholding mechanisms in a supersonic combustor using PLIF [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(2): 2505–2512.
- [18] Micka D J, Driscoll J F. Reaction zone imaging in a dual-mode scramjet combustor using CH-PLIF [C]//*Proceedings of the AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2008.
- [19] 钱伟新, 刘瑞根, 王婉丽. 边缘保持的各向异性扩散滤波方法 [C]//*全国信号与信息处理联合学术会议*, 2005.
- QIAN Weixin, LIU Ruigen, WANG Wanli. A method of anisotropic diffusion filtering with edges-preserving [C]//*Proceedings of National Joint Academic Conference on Signal and Information Processing F*, 2005. (in Chinese)