

## 凹腔燃烧截面波系及温度场同步显示研究\*

岳茂雄, 田野, 张弯洲, 钟富宇, 乐嘉陵

(中国空气动力研究与发展中心 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 凹腔作为超声速燃烧室的典型构型, 对燃烧状态下的相关物理量进行准确诊断, 有利于定量分析和研究超声速燃烧的机理。相对此前采用激光纹影等通程积分密度场显示方法, 研究设计了一套锐聚焦深度<1mm的激光聚焦纹影, 用于显示凹腔截面的燃烧流场波系结构, 同时, 利用羟基平面激光诱导荧光(OH-PLIF)和聚焦纹影同步诊断同一截面的温度场和密度场。试验结果表明, 所显示截面内的波系结构清晰, 得到了更多流场细节, 同时也标记出了该截面内氢气燃烧状态, 二者具有较好的一致性。该同步诊断结果可以更好地了解剪切层在燃烧室的运动和发展轨迹、以及不同参数的氢气喷射对剪切层和燃烧状态的影响等。获取同一截面的波系结构和燃烧状况同步数据, 对于研究燃料喷射以及凹腔燃烧等具有一定的参考价值。

**关键词:** 超燃冲压发动机; 燃烧室; 剪切层; 流场; 聚焦纹影

中图分类号: V235.21 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2021) 09-2022-06

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.200502

## Simultaneous Visualization of Cross Section Wave System and Temperature Field in Cavity Combustion

YUE Mao-xiong, TIAN Ye, ZHANG Wan-zhou, ZHONG Fu-yu, LE Jia-ling

(Science and Technology on Scramjet Laboratory, CARDC, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** Cavity is a typical configuration of supersonic combustor, it is beneficial to the basic research and analysis on the mechanism of supersonic combustion, through accurately diagnosing the relevant physical parameters in the combustion state. Compared to the previous method of full path integral for density field diagnose, such as laser schlieren, a set of laser focused schlieren with the sharp focus depth less than 1mm was designed, which was used to visualize the wave system structure of combustion cross section of cavity, meanwhile the temperature field and density field for the same section were diagnosed simultaneously by focused schlieren and OH-PLIF. The experimental results showed that the wave structure in the cross-section was clear, and more details such as the hydrogen combustion state were obtained also, and the two results have a good consistency. The joint results are helpful for better understanding of the movement and development of the shear layer, the effects of hydrogen injection with different parameters on shear layer and combustion state. To obtain the synchronous information of both the wave structure and the combustion state for the same cross section has certain reference value for fuel injection and cavity combustion research.

**Key words:** Scramjet; Combustor; Shear layer; Flow field; Focused schlieren

\* 收稿日期: 2020-07-09; 修订日期: 2020-09-11。

基金项目: 国家自然科学基金(51706237; 91641126)。

作者简介: 岳茂雄, 硕士, 高级工程师, 研究领域为光学测量。

通讯作者: 张弯洲, 博士, 副研究员, 研究领域为冲压发动机技术。

引用格式: 岳茂雄, 田野, 张弯洲, 等. 凹腔燃烧截面波系及温度场同步显示研究[J]. 推进技术, 2021, 42(9):2022-2027. (YUE Mao-xiong, TIAN Ye, ZHANG Wan-zhou, et al. Simultaneous Visualization of Cross Section Wave System and Temperature Field in Cavity Combustion[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(9):2022-2027.)

## 1 引言

在超燃冲压发动机燃烧室研究中,针对凹腔构型和燃料加注对燃烧影响的研究较多,常采用数值计算结合试验研究凹腔构型对于凹腔区域流动的影响,燃料喷射和来流在凹腔中相互作用对火焰稳定性的影响<sup>[1-4]</sup>。Davis等<sup>[5]</sup>结合反应搅拌器模型和数值计算对超声速燃烧室中的凹腔提供设计指南;Zhang等<sup>[6-7]</sup>研究了凹腔振荡模式的振荡产生机理;刘娟等<sup>[8]</sup>对超声速双凹腔燃烧室的氢气燃烧流场进行了研究;乐嘉陵和田野等<sup>[9-11]</sup>则研究了空气节流对冲压发动机火焰的影响。这些试验研究中,对于燃烧场的流场显示,通常采用纹影仪进行波系拍摄,有些研究还结合了火焰直接拍摄等方法;Elizabeth等<sup>[12]</sup>和Matthew<sup>[13]</sup>采用了激光纹影显示燃烧场和燃烧边界。上述研究中采用的密度场变化显示方法都是通程积分方法,为了准确显示凹腔流场情况,一些研究采用了聚焦纹影显示发动机隔离段和燃烧室的流场截面<sup>[14-15]</sup>。为了进一步揭示燃烧场与波系结构的关系,Adela Ben-Yakar等<sup>[16]</sup>采用了小口径的OH-PLIF和纹影同步显示氢气燃料的燃烧场。中国空气动力研究与发展中心岳茂雄等<sup>[17]</sup>采用纹影方法和PLIF方法对较大视场的燃烧场波系结构和燃烧场温度场进行了同步显示。

前期研究沿用了部分上述方法,并且采用了激光纹影和频率为10Hz的PLIF对某模型的燃烧场进行了同步显示<sup>[17]</sup>。但是激光纹影得到的是沿光路的积分结果,不能完全和PLIF片光所在的截面进行对应,而且采用的PLIF出光频率较低,对于稳定时间只有约400ms的脉冲试验燃烧场来说,得到的有效结果较少,不能很好地将密度场和温度场进行空间和时间对应。

本文在前期诊断方法的基础上,对燃烧场同一截面开展了温度场和密度场的同步显示探索研究。流场波系结构采用聚焦纹影进行显示,其锐聚焦深度理论上 $<1\text{mm}$ ,聚焦截面垂直于光轴,并与PLIF片光基本重合。PLIF采用500Hz的高频率激光器,得到了更多的显示结果。通过同步触发信号对PLIF和聚焦纹影相机进行精密同步控制,实现特定流场截面的同步显示。

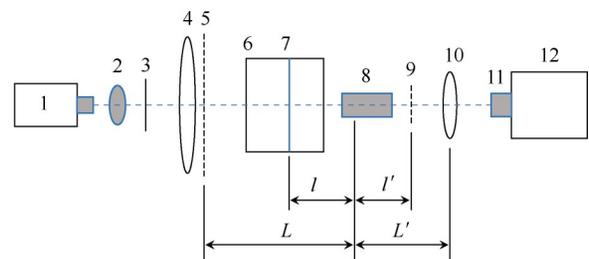
## 2 流场诊断及试验系统

透射式聚焦纹影显示截面内流场是该研究的重点,针对现场条件设计了一套锐聚焦深度(Sharp fo-

cus depth,  $D_s$ ) $<1\text{mm}$ 的透射式聚焦纹影装置;同时对PLIF布局进行优化,以满足同步显示的光路总体布局。

### 2.1 聚焦纹影工作原理及测量方案设计

聚焦纹影相当于多光源和多刀口的纹影布局,通过传递函数分析,该方法具有沿光轴层析显示的功能,透射式聚焦纹影基本布局如图1所示。图中 $L$ 为源格栅物距, $L'$ 为源格栅像距, $l$ 为流场截面物距, $l'$ 为流场截面像距。聚焦纹影的设计需根据现场条件和指标进行全方位考虑,其工作原理为:连续激光器发出的光线经过发散透镜发散,并经散射器进一步发散匀化,菲涅尔透镜将发散光线汇聚照明源格栅和试验流场,源格栅被成像透镜成像,制作源格栅像的共轭反相像得到刀口栅,并精确放置到源格栅像位置,流场某显示截面被成像透镜成像到场镜上,场镜将光线汇聚,并被高速相机记录。



1) Continuous laser; 2) Divergence lens; 3) Diffuser; 4) Fresnel lens; 5) Source grid; 6) Test section; 7) Focusing section; 8) Imaging lens; 9) Cut-off grid; 10) Field lens; 11) Camera lens; 12) High-speed camera

Fig. 1 Basic layout of focusing schlieren

源格栅相当于多狭缝光源,流场无扰动时流场成像为均匀照明,流场如果存在产生密度梯度的扰动时,光线偏离原路径在刀口栅处或遮挡或通过,形成不均匀的流场图像,这就是流场的聚焦纹影图像,通过调节刀口栅切割量时,就能得到不同灵敏度和灰度的显示结果。

透射式聚焦纹影的设计,需要得到较小的锐聚焦深度和较小的非锐聚焦深度(Unsharp focus depth,  $D_u$ )。 $D_s$ 表征对流场的聚焦切片厚度, $D_u$ 表征叠加在图像中的、对成像信息有一定影响的非锐聚焦深度。同时,结合现场条件限制,兼顾表征图像清晰度的混合线对数 $\varphi$ 和表征灵敏度的能探测流场引起的最小偏转角 $\varepsilon_{\min}$ 。根据现场条件和试验模型,设计的透射式聚焦纹影主要参数见表1。

### 2.2 OH-PLIF方法

平面激光诱导荧光(Planar laser induced fluorescence,简称PLIF)是将分子或自由基微观运动可视化

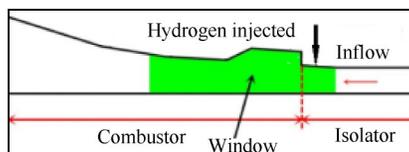
**Table 1** Parameter of focusing schlieren

Parameter	Value	Concept
$\Phi/\text{mm}$	150	Aperture of imaging lens
$f/\text{mm}$	200	Focus length of imaging lens
$L/\text{m}$	1.2	Object distance of source grid
$L'/\text{mm}$	240	Image distance of source grid
$l/\text{mm}$	410	Object distance of focused section
$l'/\text{mm}$	390	Image distance of focusing section
$m$	0.95	Flow-field magnification
$M$	0.2	Source grid magnification
$(A+B)/\text{mm}$	5+5	Source grid constant
$(b+a)/\text{mm}$	1+1	Cut-off grid constant
$(D_s)/\text{mm}$	0.92	Sharp focus depth
$(D_U)/\text{mm}$	10.93	Unsharp focus depth
$\varphi$	14.4	Number pairs of lines blended
$\varepsilon_{\min}/(^{\circ})$	1.04	Minimum deflection angle(50%)

的技术,是一种完全非接触光学测量方法,在燃烧诊断研究方面用得较多,往往利用燃烧产物或者燃烧中间产物与燃烧化学反应的关系,间接诊断燃烧状况。研究利用氢气燃烧的中间产物羟基(OH)的浓度和燃烧反应正相关的关系,诊断流场的燃烧状况,得到火焰结构的二维信息。Nd:YAG激光器发出的激光,经倍频和精细调谐为需要的激光波长,整形成片光照明燃烧场,火焰中的OH自由基受激发跃迁到上能级后处于不稳定状态,会发射出特定波长的荧光回到基态,通过OH基滤光片滤光后,像增强器高速相机接收荧光信号,软件处理后就得到了燃烧过程中火焰不同位置的OH荧光强度。荧光强度与浓度成正比,以此得到被测对象的温度场。

### 2.3 试验模型

采用如图2所示的凹腔模型,凹腔前壁为直角,凹腔后缘壁具有的一定角度。在来流方向凹腔外上壁面采用多孔喷氢,凹腔中后部上壁面安装点火器。

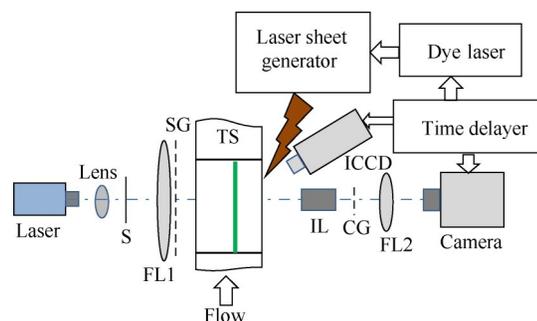
**Fig. 2** Experimental model

PLIF片光边界包含在聚焦纹影边界之内,探测的截面相同,为垂直于光轴并通过其中一个点火头的截面。试验在中国空气动力研究与发展中心的3kg/s直连式脉动燃烧设备上开展,来流马赫数为 $Ma=$

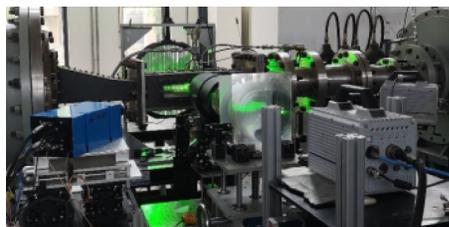
2,采用不同当量的氢气喷射方式,喷射压强分别为1.5MPa和4MPa。

### 2.4 光学布局

试验中聚焦纹影和PLIF的总体布局如图3所示。PLIF的片光从试验段下面的石英窗口入射照明试验截面,片光厚度优于1mm,垂直于光轴,平行于来流。在该平面放置参照物,根据设计距离,布置聚焦纹影光路。纹影光路布置完成后,在片光截面(同时也是聚焦纹影显示截面)上,放置一个网格标定板,PLIF相机对标定板采集后保存,将标定板移除。布局好的光路图如图4所示。

**Fig. 3** Experimental optical layout

S: Scatterer; FL: Fresnel lens; SG: Source grid; TS: Test section; CG: Cut-off grid; IL: image

**Fig. 4** Optical path layout

试验过程中,由测控室结合设备启动时间给出一个信号,经过精密延时器延时,触发PLIF所使用的500Hz激光器出光,同时给ICCD相机和高速相机触发信号,高速相机设置的采集频率是ICCD采集频率的整数倍。激光器出光信号被反馈到控制室以便比对,确定出光准确时间。

## 3 试验结果

### 3.1 试验图片预处理

对于PLIF图像,由于与诊断截面存在一定的角度,必须借助试验前保存的标定板图像进行校正,经过图像处理得到PLIF结果。对于聚焦纹影图像,由于成像透镜的像差使得源格栅像和预先制作的刀口栅并不严格对应,聚焦纹影得到的图像往往不均匀,同时源格栅像也可能叠加在流场像中,需要采集无扰

动流场截面的静态图片,得到聚焦纹影显示图片结果后,然后将这些有扰图片和静态图片进行减除处理。

### 3.2 波系结构显示及对比

图5为071506车次得到的燃烧状态下的聚焦纹影和同状态下的阴影、差分干涉的显示结果对比。该车次氢气喷射压力为1.5MPa,当量比为0.1。图5(a)和(b)为阴影和差分干涉显示结果,是积分效应,能够体现剪切层的轨迹,但是细节不明显,阴影图呈现的是流场密度变化的二阶导数。在复杂的燃烧区域里,表现为近似噪点图,仅能从噪点结构区分剪切层的分布。差分干涉显示的密度场变化量通常较小,在剪切层中心区域,由于通程密度变化较大,条纹较密,已经呈现为黑色的色带了。图5(c)展示的聚焦纹影结果在这方面表现出了它的优越性,不但反映了该截面内来流预混的轨迹,也清楚地显示了该截面内来流与其它波系相互作用后的情况,剪切层在凹腔的中下游该截面内呈现明显的离散状。同时由于氢气喷射压力相对较小,剪切层也更加靠近凹腔,不如高压喷射状况时,剪切层会被推离得更加远离凹腔。

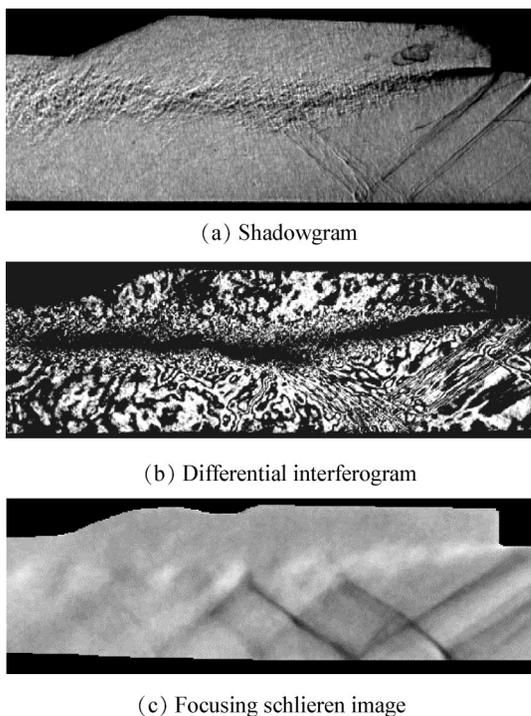


Fig. 5 Visualization comparison of combustion state

071505车次试验中,喷氢压力为4MPa,当量比为0.3,聚焦纹影的显示冷流波系结果和数值仿真结果进行了对比,如图6所示。

图6(b)为聚焦纹影显示结果的冷流流场,在设

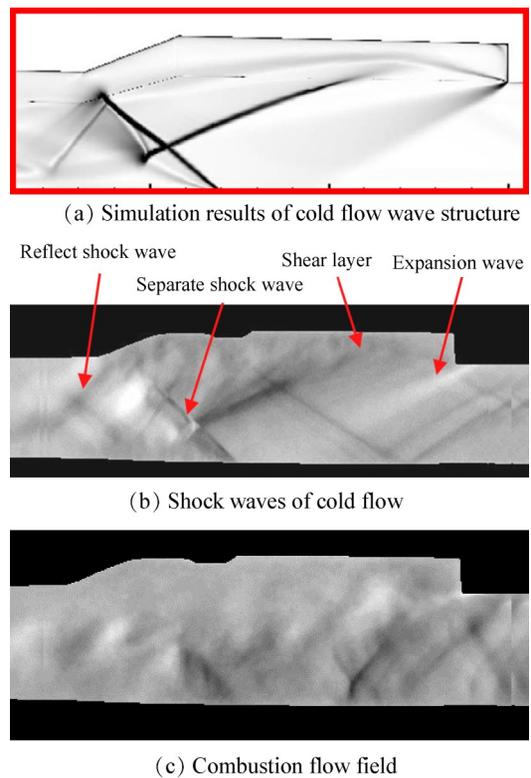


Fig. 6 Results of focusing schlieren for shot 071505

备起动后,由于来流稳定性问题,在燃烧室内会形成较小幅度振荡的相对稳定的激波,波系结构清晰,与图6(a)所示的相同参数下的仿真结果基本吻合(不考虑模型接缝产生的杂波),但是聚焦纹影将剪切层在该截面内的不均匀性很好地显示出来了。凹腔前台阶的扩张效应,使得在凹腔拐角处产生膨胀波系,由于试验前抽真空,凹腔下部的剪切层由于密度和速度差,迅速偏向凹腔内部,撞击凹腔上壁面形成一道压缩斜激波,斜激波与下壁面边界层相互作用,形成分离激波,分离激波之后为分离区。分离激波与凹腔上壁面作用后,形成反射波,随着时间的推移,这些激波波系会产生一个幅度较小的振荡,波系的总体情况改变不大。研究采用凹腔外喷氢,从聚焦纹影显示结果(图6(c))可以观察到,氢气喷流改变了剪切层进入凹腔的形态,抬高了剪切层,使得剪切层不再进入凹腔内部,抑制了剪切层与后台阶的碰撞,燃烧主要在凹腔外部存在。喷氢点火燃烧后,燃烧产生的压力使得凹腔下游的斜激波逐渐被推出燃烧室。在燃烧的过程中,整个凹腔伴随着燃烧的发展,出现振荡。

### 3.3 PLIF和聚焦纹影同步显示结果

在试验中对垂直于光轴的凹腔截面采用聚焦纹影和PLIF同步诊断,同时,为了对比,还进行了火焰直拍,针对071505车次试验,得到的结果图7所示,

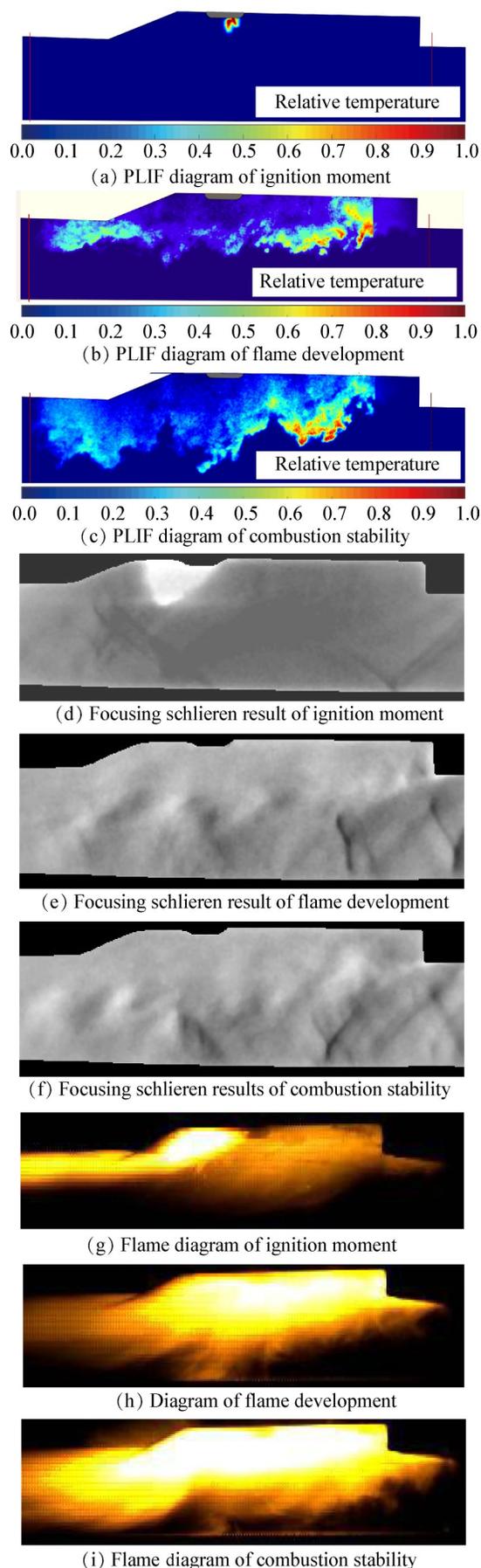


Fig. 7 Results of PLIF/focused schlieren/flame for shot 071505

分别是凹腔在点火/火焰发展/火焰稳定状态下的 OH-PLIF 结果、聚焦纹影结果和火焰直拍结果。由于羟基是氢气燃烧的中间产物,其浓度越高,荧光越强,表征的温度也越高,PLIF 的标定较为困难,这里采用归一化处理,最低温度表征为 0,最高温度表征为 1,并用颜色从蓝到深红进行相对温度的标识。

通过比较可以看到,无论在哪个状态,由于火焰直拍的曝光时间较长(0.5ms),而且它是积分效应,得到的结果都不如聚焦纹影和 PLIF 显示结果更为准确,相对于 PLIF,直拍火焰弥散的区域更大。

从点火后的动图可以看到,点火器点火后,火焰是向上下同时传播的,并在凹腔直角内形成回旋;对于 PLIF 结果,火焰在发展阶段,火焰主体在凹腔内振荡,而在火焰稳定后,火焰的范围扩散更为广泛,远超出了凹腔的范围;通过对比结果表明,波系波动的范围相对火焰波动的范围较小,主要是剪切混合层的范围扩展了,从而导致火焰的扩展。从燃烧区域看,剪切层内氢气与空气混合并点火燃烧,燃烧也主要分布在靠近凹腔的剪切层内;剪切层是预混最为充分的区域,从 PLIF 图中可以看到,燃烧最为剧烈的区域也在预混最为充分的区域,特别是在凹腔的前端更是如此。

为了考察聚焦纹影和 PLIF 对凹腔同截面同步显示的对应关系,将同时刻的聚焦纹影图像和 PLIF 图像进行合成,也就是将燃烧截面内表征相对温度结果的 PLIF 图中高于最低温度的区域进行提取,放入聚焦纹影波系图中,如图 8 所示,图 8 中颜色和图 7 的颜色表征的意义相同。在聚焦纹影呈现的混合轨迹及形态与 PLIF 燃烧产生的温度场分布是基本一致的,燃烧区域的形态与波系形态也基本一致。但是

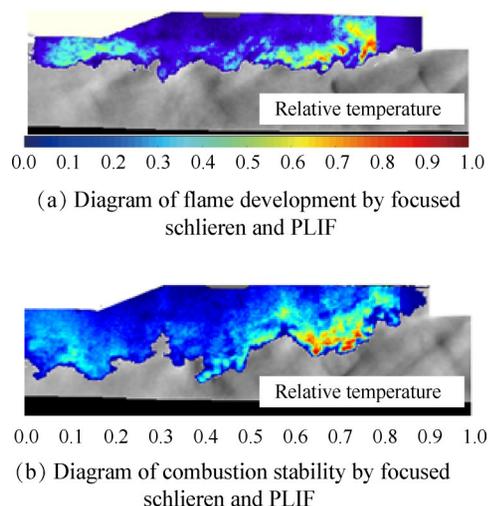


Fig. 8 Diagram of focused schlieren and PLIF for shot 071505

燃烧是一个三维效应,同截面波系结构不可能完全反映该截面内的燃烧形态,但是可以根据波系产生的混合层和燃烧状态建立一个近似的对应关系。

需要说明的是,凹腔内的燃烧状态,本身就是一个振荡状态,燃烧形态变化较多,显示结果只是呈现了某种试验条件下较为主要的一种形态。

## 4 结 论

通过凹腔燃烧截面波系及温度场同步显示方法的研究和验证,得到以下结论:

(1)通过设计锐聚焦深度 $<1\text{mm}$ 的聚焦纹影装置,对凹腔内燃烧流场某截面开展了流场诊断测量,相对于常规纹影、阴影和差分干涉的诊断结果,聚焦纹影结果可以更加清晰地观察到剪切层的轨迹和形态细节。

(2)PLIF/聚焦纹影对同一截面上的同步诊断结果表明:OH-PLIF分布呈现的燃烧边界、燃烧状态与波系结构呈现的预混层轨迹、预混充分程度,存在一定的对应关系。该测量结果,有利于分析不同马赫数来流和凹腔相互作用后的波系、氢气喷射参数等对燃烧状态的影响。该同步测量方法是研究燃烧场一个较好的非接触测量思路。

凹腔燃烧流场是一个瞬态湍流场,目前所用的测量帧频还不能很好地揭示相关的运行发展规律。下一步需采用更高帧频( $>10\text{kHz}$ )的PLIF测量燃烧场,并在波系和温度场同步诊断的同时加入该截面的燃料分布显示,用于研究燃料喷射轨迹和预混特性,进一步支撑对燃烧流场的精细化测量和详细机理研究。

致 谢:感谢国家自然科学基金的资助。

## 参考文献

- [ 1 ] 邢建文,乐嘉陵.火焰面模型在超燃冲压发动机数值模拟中的应用[J].实验流体力学,2008(2):40-45.
- [ 2 ] 迟鸿伟,魏志军,李 彪,等.台阶和凹腔在固体燃料超燃冲压发动机内自点火性能对比[J].固体火箭技术,2014(5):628-639.
- [ 3 ] 王西耀.超燃冲压发动机定常流动数值研究[D].绵阳:中国空气动力研究与发展中心,2012.
- [ 4 ] Samimy M, Debiassi M, Caraballo E. Development of Closed Loop Control for Cavity Flows[R]. AIAA 2003-4258.
- [ 5 ] Davis D L, Bowersoc R D W. Stirred Reactor Analysis of Cavity Flame Holders of Scramjets[R]. AIAA 97-3274.
- [ 6 ] Zhang X, Edwards J A. An Investigation of Supersonic Oscillatory Cavity Flows Driven by Thick Shear Layers[J]. Aeronautical Journal, 1990, 94(12): 355-364.
- [ 7 ] Adela B Y, Ronald K H. Cavity Flame-Holder for Ignition and Flame Stabilization in Scramjets: An Overview[J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 17(4).
- [ 8 ] 刘 娟,潘 余,刘卫东,等.超燃发动机双凹腔燃烧室氢气燃烧流场研究[J].航空动力学报,2009,24(1):55-59.
- [ 9 ] 乐嘉陵,田野,杨顺华,等.脉冲燃烧风洞中空气节流对煤油燃料超燃冲压发动机火焰稳定影响研究[J].推进技术,2018,39(10):2160-2170.(LE Jia-ling, TIAN Ye, YANG Shun-hua, et al. Study on Flame Stabilization in a Kerosene Fueled Scramjet Combustor with Air Throttling in a Pulse Combustion Wind Tunnel[J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(10): 2160-2170.)
- [ 10 ] 田野,杨顺华,乐嘉陵,等.空气节流对乙烯燃料超燃冲压发动机流场结构影响研究[J].推进技术,2015,36(4):481-487.(TIAN Ye, YANG Shun-hua, LE Jia-ling, et al. Study on Flow Structure of an Ethylene-Fueled Scramjet Combustor with Air Throttling[J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(4): 481-487.)
- [ 11 ] 田野,乐嘉陵,杨顺华,等.空气节流对超燃燃烧室起动点火影响的数值研究[J].航空动力学报,2013,28(7):1495-1502.
- [ 12 ] Elizabeth T J, Pavan B, Narsai B J C. Schlieren Imaging of the combustion of Chassical and High Regression Rate Hybrid Rocket Fuels[R]. AIAA 2014-3849.
- [ 13 ] Matthew L F. Experimental Study of Shock Train/Combustion Coupling and Flame Dynamics in a Heated Supersonic Flow [D]. Michigan: University of Michigan, 2012: 25-32.
- [ 14 ] Toshinori K. Focusing-Schlieren Visualization in Direct Connect Dual Mode Scramjet[R]. AIAA 2012-5834.
- [ 15 ] Jonathan S G, Kenneth H Y. Application of Focusing Schlieren Deflecto Metry to an Isolator Shock Train[R]. AIAA 2015-1486.
- [ 16 ] Adela B Y, Michel K, Christopher M, et al. Hypersonic Combustion and Mixing Studies Using Simultaneous OH-PLIF and Schlieren Imaging[R]. AIAA 98-0940.
- [ 17 ] 岳茂雄,苏 铁,杨顺华,等.燃烧场波系显示及燃烧区域诊断研究[J].红外与激光工程,2017,46(2).

(编辑:史亚红)