

# OH 与 CH<sub>2</sub>O 双组分平面激光诱导荧光对旋流燃烧室火焰结构与脉动特征的研究

严浩<sup>1,2</sup>, 张少华<sup>1</sup>, 余西龙<sup>1,2</sup>, 李飞<sup>1</sup>, 林鑫<sup>1</sup>

(1. 中国科学院力学研究所 高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049)

**摘 要:** 介绍了利用平面激光诱导荧光(PLIF)技术对航空发动机的旋流燃烧室模型在贫燃状态下工作特性的研究。通过对 OH 与 CH<sub>2</sub>O 双组分进行同步 PLIF 测量,获得了不同工况下燃烧室反应区以及预热区的瞬态结构信息。应用本征正交分解(POD)方法对 OH PLIF 的图像进行处理,得到了旋流火焰的主要脉动模态,并通过扩展本征正交分解(EPOD)方法计算出了相应 POD 模态的 CH<sub>2</sub>O 荧光信号分布。实验结果表明:随着燃烧室热功率的增大,火焰的整体结构、脉动模式均出现了明显的变化。在火焰高度增加的同时,轴向不稳定性逐渐增强,涡核旋进(PVC)的脉动特征相对减弱。在较大的热功率下,在燃烧室的外回流区(ERZ)出现未燃烧的燃料。

**关键词:** 燃烧室; 旋流火焰; 激光诱导荧光; 本征正交分解; 脉动模态

**中图分类号:** V231.2

**文献标志码:** A

## Flame structure and dynamics characters investigation by OH and CH<sub>2</sub>O planar laser-induced fluorescence in the swirl combustor

YAN Hao<sup>1,2</sup>, ZHANG Shaohua<sup>1</sup>, YU Xilong<sup>1,2</sup>, LI Fei<sup>1</sup>, LIN Xin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The swirl combustor model of aircraft engine under fuel-lean condition was characterized by planar laser-induced fluorescence (PLIF) technique. By taking PLIF measurements of OH and CH<sub>2</sub>O simultaneously, the transient structures of the reaction zone and preheat zone were investigated under various operation points. By applying proper orthogonal decomposition (POD) method to the OH PLIF data, the main dynamics modes of the swirling flame were extracted, and by applying extended proper orthogonal decomposition (EPOD) method, CH<sub>2</sub>O PLIF signal distribution for each POD mode was unveiled. The experimental results indicate that as the thermal power of the combustor increases, the time-

**收稿日期:** 2018-07-25

**基金项目:** 国家自然科学基金(11672359)

**作者简介:** 严浩(1988—),男,博士生,主要从事高温气流激光诊断技术的研究。

**引用格式:** 严浩,张少华,余西龙,等. OH 与 CH<sub>2</sub>O 双组分平面激光诱导荧光对旋流燃烧室火焰结构与脉动特征的研究[J]. 航空动力学报,2019,34(4):894-907. YAN Hao, ZHANG Shaohua, YU Xilong, et al. Flame structure and dynamics characters investigation by OH and CH<sub>2</sub>O planar laser-induced fluorescence in the swirl combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2019,34(4):894-907.

averaged structure and dynamics modes experience notable transitions. As the flame elevated, the flame exhibits stronger axial instability, while the deformation caused by precessing vortex core (PVC) is decreased. At relative high thermal power, unburnt fuel emerges in the external recirculation zone (ERZ).

**Key words:** combustor; swirling flame; laser-induced fluorescence; proper orthogonal decomposition; dynamics modes

鉴于当今的能源危机以及环境恶化等问题,提高效率和降低污染已成为航空发动机领域的重要课题。在航空发动机工作过程中,燃料需要在有限的空间内稳定充分地燃烧,因此,该领域大多采用将空气与燃料以旋流形式注入燃烧室的方法,在增强燃料与空气混合的同时,以压差形成稳定的点火区,从而实现快速稳定和高效的燃烧。但这一过程会使得燃烧与涡核旋进(precessing vortex core, PVC)以及湍流现象耦合<sup>[1]</sup>,导致火焰锋面发生严重形变,火焰局部会出现熄灭、复燃等现象,火焰整体则会出现吹熄、回火以及振荡等现象<sup>[2-3]</sup>,不但影响燃烧稳定性及效率,还会对航空发动机本身造成损害。因此,在航空发动机的设计和优化工作中,仅对燃烧室整体燃烧效率参数的测量已无法满足研究需要,而对燃烧室内部实时状态的掌握更为重要。

而目前能够实时监控航空发动机燃烧室状态,获取其高时空分辨信息的方法以非接触式的光学测量方法最为优越。在众多光学测量方法中,平面激光诱导荧光(planar laser-induced fluorescence, PLIF)技术利用片状激光光束激发火焰中某一截面的特定组分,并通过相机记录该组分荧光信号的二维分布,实现对火焰瞬态结构的测量。该技术在时间、空间的分辨能力以及化学组分的选择性上具有巨大的优势<sup>[4-5]</sup>,而且通过分析荧光数据可以实现对稳定流场多种参数的测量<sup>[6-9]</sup>,是对火焰等非均匀流场研究的重要手段。

然而,常用 PLIF 的组分选择性决定单束激光只能测量单组分的信息,这远远不能满足湍流燃烧研究中对多种信息同时获取的需求。因此目前流场诊断领域最显著的发展趋势是进行多种组分的同步测量<sup>[10-11]</sup>。在众多荧光组分中,OH 自由基是重要的燃烧指示物,而且由于它的寿命较长,在燃烧产物中处于超平衡(super-equilibrium)状态而有较高的体积分数<sup>[12]</sup>。因此,OH 自由基的分布能够体现火焰结构的主要信息,应用也最为广泛<sup>[5]</sup>。与 OH 自由基不同,另一种荧光组分

CH<sub>2</sub>O(甲醛)分子<sup>[13]</sup>是烷烃燃料与氧气分子受热分解后的产物,主要分布在火焰锋面上游的预热区<sup>[10]</sup>。通过对 CH<sub>2</sub>O 进行 PLIF 测量,可以显示出火焰中的未燃烧区域,对火焰结构以及燃烧效率的研究有很大帮助。近年来,国内学者也在应用 OH 与 CH<sub>2</sub>O 双组分的 PLIF 对层流火焰、射流火焰以及内燃机汽缸内的燃烧过程进行观测<sup>[14-16]</sup>,从时间以及空间上实现对燃烧过程以及火焰结构更完整的监测。

由上述工作可见,目前多组分 PLIF 的相关工作大多注重于火焰局部结构的直接观测,研究内容局限于荧光组分分布区域的厚度、火焰锋面的形变,或是各项参数的统计特征等。对于航空发动机而言,由于旋流火焰中存在 PVC 及受激振荡等现象,通过直接观测以及统计学手段难以发掘其中的拟序特征。本征正交分解(proper orthogonal decomposition, POD)方法能够抓住测量对象的主要脉动特征。使用该方法处理化学发光高速摄影能够分析出火焰的主要脉动模式<sup>[17-18]</sup>。另一方面,Boree 提出的扩展本征正交分解(extended proper orthogonal decomposition, EPOD)方法为多组分 PLIF 数据的分析提供了新的思路<sup>[19]</sup>。Duwig 和 Stohr 等分别展示了使用 EPOD 方法处理 PIV (particle image velocimetry)与 OH PLIF 数据,分别对层流火焰和旋流火焰的振荡进行了研究<sup>[20-21]</sup>。Stohr 等<sup>[21]</sup>的研究表明,旋流火焰中,OH PLIF 信号的分布与速度场有很强的相关性,通过火焰锋面的形变能够反映出 PIV 所显示的 PVC 特征。而旋流火焰中未燃烧区域与火焰模态的关系还未被充分研究,利用双组分 PLIF 技术可以填补这一空白。

本文展示了利用 OH 与 CH<sub>2</sub>O 双组分的 PLIF 同步测量技术对航空发动机燃烧室模型在贫燃条件下燃烧状况的研究。本次实验对热功率从 10 kW 至 35 kW 的工况进行了测量。双组分 PLIF 测量结果显示了燃烧室内旋流火焰的瞬态结构。为了对 PLIF 数据进行更有效的分析,本文还使用 POD 方法计算出火焰脉动过程中 OH

自由基分布的主要模态,讨论了不同 POD 模态表现的脉动特征,并使用 EPOD 方法计算出了 OH POD 模态对应的 CH<sub>2</sub>O 荧光信号分布,对旋流火焰的模态分析起到重要的补充和验证作用。

### 1 实验系统与方法

本实验通过双组分 PLIF 系统对旋流火焰中的 OH 与 CH<sub>2</sub>O 分布进行同步测量,实现对火焰结构的监测。实验系统的布局如图 1 所示。该系统分为两个主要部分:用于双组分 PLIF 测量的激光设备、成像设备以及相应的控制设备;用于产生旋流火焰的旋流燃烧室以及供气系统。

#### 1.1 双组分 PLIF 系统

双组分 PLIF 系统如图 1 所示。OH 组分的激发光源包括一台 Nd:YAG 激光器(Spectra-Physics,Quanta Pro)和由该激光器泵浦的染料激光器(Sirah,PrecisionScan)。Nd:YAG 激光器产生波长为 532 nm 的二倍频激光。染料激光器使用罗丹明 6G 染料,基频输出范围是 560~590 nm。染料激光器的频率转换单元(frequency conversion unit,FCU)将基频激光倍频至 283 nm 附近,输出能量为 20 mJ/pulse。激光器的波长可通过波长计(Highfinesse,LSA/2037)进行精确监测。本次实验使用的激发波长约为 283 nm,用

来激发 OH 自由基  $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi(1,0)$  激发带的 Q<sub>1</sub>(7)跃迁。

CH<sub>2</sub>O 组分的激发光源为一台工作在三倍频模式的 Nd:YAG 激光器。该激光器最大输出能量为 300 mJ/pulse,输出波长为 355 nm,位于 CH<sub>2</sub>O 分子的  $A^1A_2 \leftarrow X^1A_1 4_0^1$  激发谱带中。OH 与 CH<sub>2</sub>O 的激发光束在 P2 棱镜处汇合。其中 OH 的激发光束经该棱镜反射,CH<sub>2</sub>O 的激发光从棱镜边缘通过。两束光线以 0.2° 夹角逐渐靠近,经过焦距为 -75 mm 的柱透镜和焦距为 1 000 mm 的球面透镜后形成 100 mm 高的平面光束,并在测量区域中心重合。两个平面光束在整个测量区域中的距离在 1 mm 以内。

双组分的 PLIF 信号由两台 ICCD(intensified charge-coupled device)相机(Princeton Instrument,PI-MAX4)分别拍摄。两台 ICCD 均装备了紫外线可通过镜头,焦距为 78 mm。用于 OH 荧光拍摄的 ICCD 相机配备了中心透射波长为 307 nm,透射率为 15%,带宽为 10 nm 的滤波片,用来屏蔽 OH 荧光以外的信号。ICCD 相机门宽为 50 ns,增益为 95。而 CH<sub>2</sub>O PLIF 拍摄的 ICCD 相机配备了 400~800 nm 带通滤波片,用来降低波长为 355 nm 的激发光的接收。由于 CH<sub>2</sub>O 的荧光寿命较长,ICCD 相机门宽设为

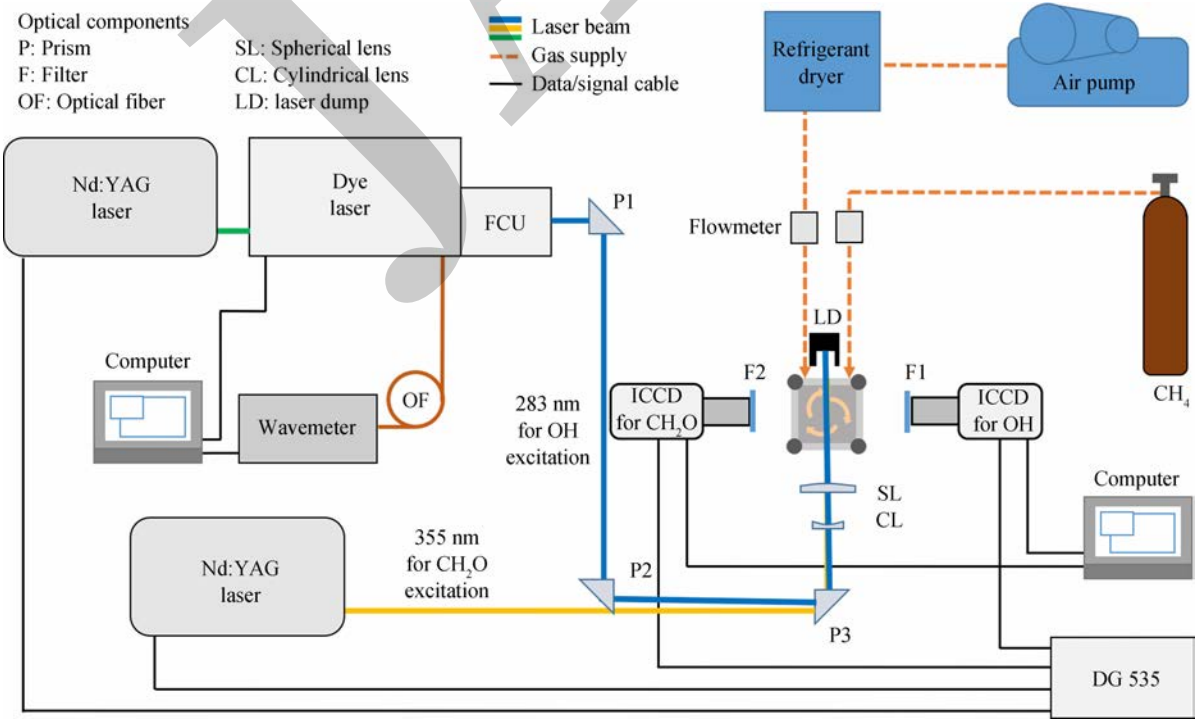


图 1 用于旋流火焰的 OH 和 CH<sub>2</sub>O 双组分 PLIF 实验装置示意图  
Fig. 1 Experimental set-up for OH and CH<sub>2</sub>O PLIF investigation in the swirling flame

100 ns,ICCD 相机拍摄相对于激光有 10 ns 的延迟,为了进一步降低 355nm 激发光的干扰。

本实验的时序控制由 DG 535 信号发生器完成。该台信号发生器以 10 Hz 的重复频率分别触发两台 Nd:YAG 激光器的 Lamp 和 Q-SW 和两台 ICCD 相机的快门。为避免两种组分的激发过程发生任何相互干扰,对两台 Nd:YAG 激光器的 Q-SW 设置了 200 ns 的时间间隔。由于待测旋流火焰的脉动周期约为 2 ms,可认为火焰的形态在 200 ns 内保持静止。

1.2 旋流燃烧室和旋流火焰

图 2 为旋流燃烧室的示意图,用于模拟典型的航空发动机燃烧室的工作状态。燃烧室底端是集气室,与空气气源相连。在集气室的上部有两个同心径向旋流器使注入的空气产生旋度。内部旋流器出口连接一个圆形喷管,外部旋流器连接一个环形喷管。在两个喷管之间是环形文氏管,甲烷由该管无旋地注入燃烧室。整个燃烧室由四块长方形石英窗片围成。窗片由位于正方形四个角的立柱固定。燃烧室的顶端是一个圆形碟片。在碟片中心是一个圆形排气口。实验环境是室温、常压。实验工况对应的热功率见表 1。实验所用的高压空气由空气压缩机提供,并经过冷干机干燥。甲烷气体由高压气瓶直接提供。两条气路的流量分别由相应的流量控制器(Bronkhorst, EL-flow select)进行调控。

在工作状态下,注入的燃料在内外双旋流的剪切作用下与空气充分混合。旋流使得燃烧室中轴附近压力较低,在压差的作用下形成轴向(X 向)流速为负的中心回流区(central recirculation zone,CRZ),起到了固定火焰的作用。对燃烧室

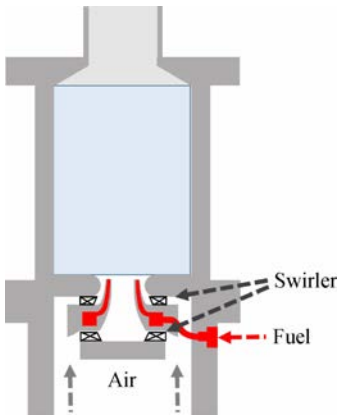


图 2 旋流燃烧室示意图  
Fig. 2 Schematic of the swirl combustor

表 1 旋流燃烧室实验工况  
Table 1 Operation points of the swirl combustor

| 工况 | 热功率/kW | 全局当量比 |
|----|--------|-------|
| 1  | 10     | 0.65  |
| 2  | 15     | 0.65  |
| 3  | 20     | 0.65  |
| 4  | 25     | 0.65  |
| 5  | 30     | 0.65  |
| 6  | 35     | 0.65  |

的数值研究采用 GRI 3.0 燃烧反应机理以及大涡模拟(large eddy simulation, LES)方法,在工况 1 下的时均 OH 摩尔分数、CH<sub>2</sub>O 摩尔分数以及温度的分布如图 3 所示,图中  $x$  为径向坐标, $y$  为轴向坐标。燃烧室的回流区边界由白色实线标出。数值模拟显示燃烧室中心存在心形 CRZ, OH 与 CH<sub>2</sub>O 在燃烧室下方呈 V 形分布,燃烧产

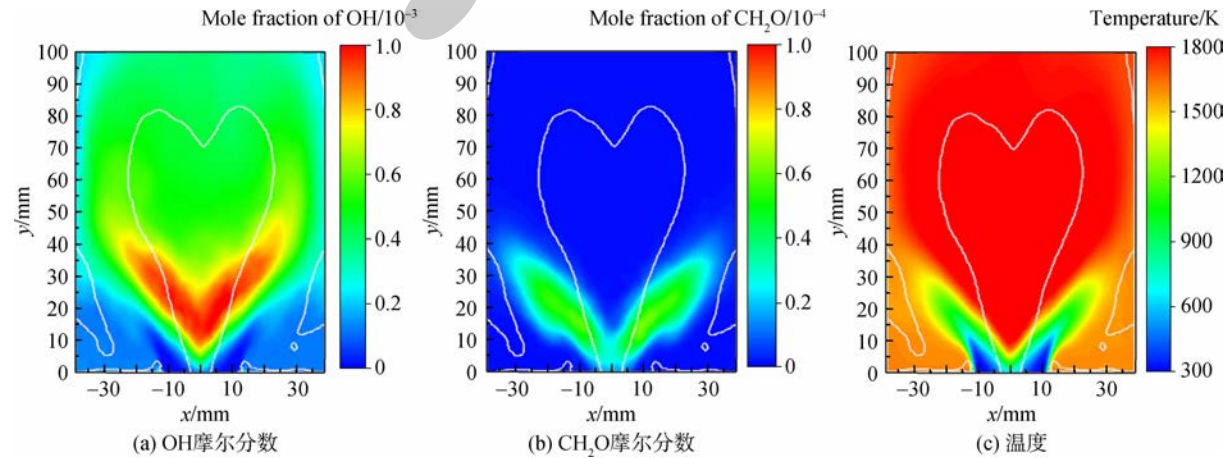


图 3 燃烧室在工况 1 下的 LES 结果  
Fig. 3 LES results of the combustor under operation point 1

物的温度约为 1800 K。由于燃烧室四周的约束，在壁面附近形成了外回流区(external recirculation zone, ERZ)。上述这些现象与 PLIF 测量结果相符合。

2 旋流燃烧场二维结构分布

2.1 旋流火焰的瞬态结构

本实验在不同工况下对模型燃烧室的旋流火焰进行 OH 与 CH<sub>2</sub>O 同步 PLIF 测量。PLIF 视场大小在图 4 中标出。图 5 展示了不同工况下单次 OH PLIF 的图像。火焰锋面的皱褶十分明显。火焰锋面在较大的涡作用下产生严重扭曲。从工况 1 的 PLIF 图像中可以看到这样的涡在火焰的两侧交替出现,是 PVC 结构的特征。在图中还可以看出在涡作用下,火焰锋面出现断裂从而出现孤立的 OH 荧光区域。在燃烧室的两侧,OH 向下方延伸,表明该区域为 ERZ。

CH<sub>2</sub>O 分子体积分数较低,测量结果信噪比较低,而且容易受到激光散射光的干扰<sup>[16]</sup>。由于

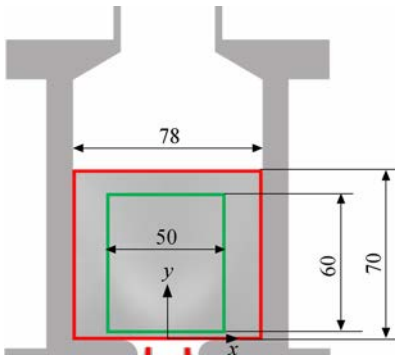


图 4 OH(红)和 CH<sub>2</sub>O(绿)PLIF 视场(单位:mm)  
Fig. 4 PLIF interrogated area for OH (red) and CH<sub>2</sub>O (green) (unit:mm)

旋流燃烧室采用封闭式结构,高能量的激光经散射以及窗片和金属立柱的反射后会对测量结果造成干扰。因此在对 CH<sub>2</sub>O 荧光的展示中只截取视场中心未受干扰的部分进行分析,观测区域如图 4 所示。图 6 展示了不同工况下双组分 PLIF 的同步测量结果。红色代表 OH PLIF 信号,绿色代表 CH<sub>2</sub>O PLIF 信号。通过对比可以看出,

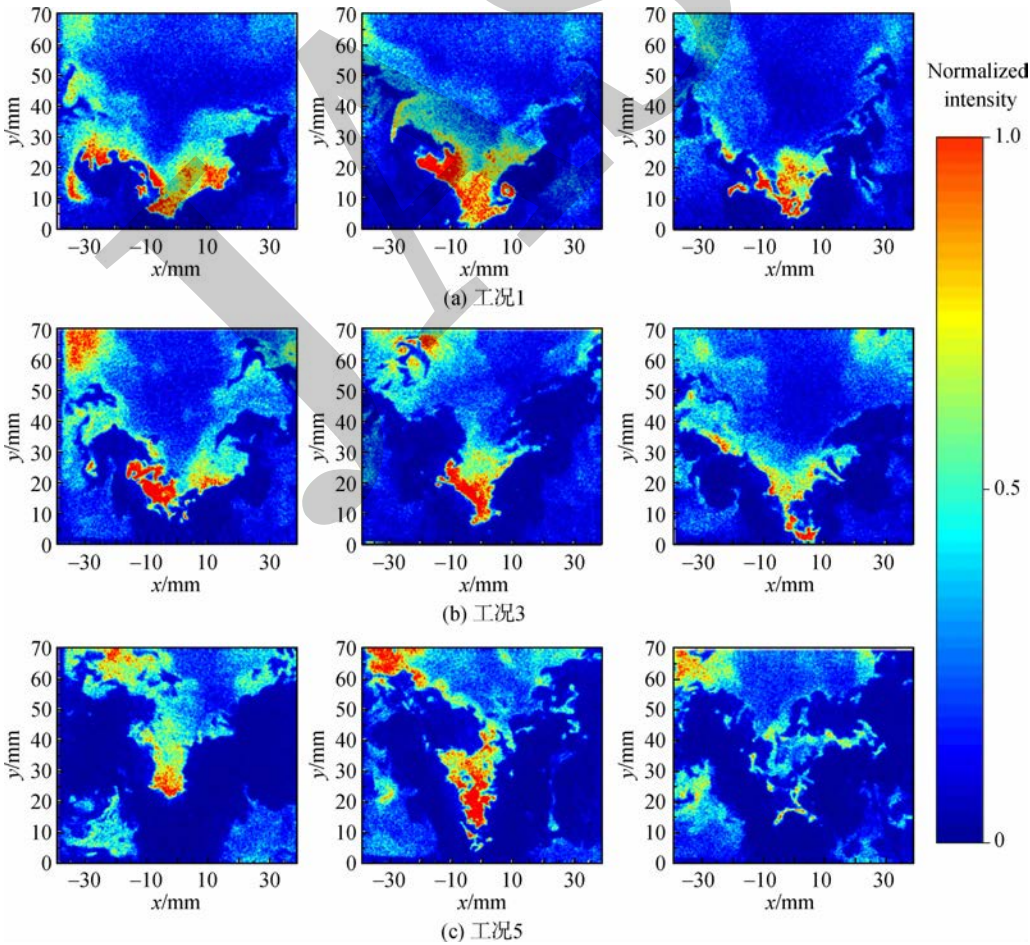


图 5 不同工况下的单幅 OH PLIF 的图像

Fig. 5 Single-shot OH PLIF images under different operation points

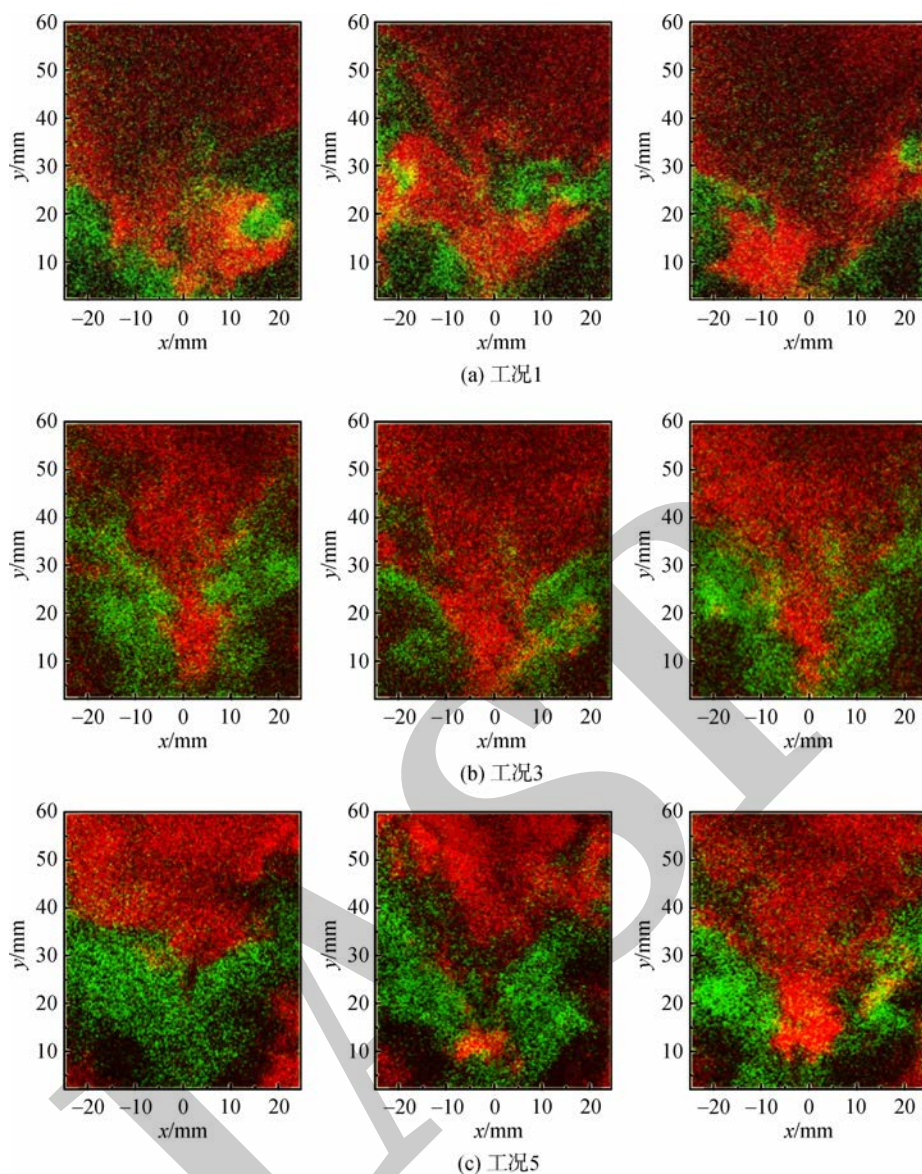


图6 不同工况下OH(红)和CH<sub>2</sub>O(绿)的同步PLIF图像。

Fig. 6 Simultaneous OH (red) and CH<sub>2</sub>O (green) PLIF images under different operation points

两种组分的分布有一定的互斥性。这是由于CH<sub>2</sub>O主要分布在火焰锋面上游的预热区,而OH分布在火焰锋面下游。与开放式预混旋流火焰中CH<sub>2</sub>O的薄层结构相比<sup>[22]</sup>,本旋流火焰中的CH<sub>2</sub>O分布更为广泛。由于封闭的燃烧室中ERZ的形成,注入的甲烷和空气在燃烧前与高温燃烧产物混合,形成更加宽阔的预热区。

## 2.2 旋流火焰时均结构的转变

图7与图8分别为各个工况下500张OH与CH<sub>2</sub>O PLIF图像时均结果。图9为这两种组分的时均对比图像。其中,工况1的PLIF时均结果在结构上与图3中LES结果吻合。在较低的热功率下,OH时均荧光信号分布呈V形,圆锥中心的信号较弱。随着热功率增大,火焰向下游移

动,OH分布区域位置上升明显,而CH<sub>2</sub>O分布区仅有较小幅度的上升。在高热功率工况下,燃烧室中心的OH荧光信号呈实心三角形,燃烧室下方两侧的ERZ信号逐渐增强。从图9显示的双组分PLIF信号时均结果可以看出,在工况1下,两种组分的平均荧光信号有明显的重叠,使得双组分时均图像呈现黄色。由于PVC导致的火焰径向脉动,在瞬态观测中两种组分在该区域交替出现,而在时均结果上发生重叠。随着热功率的增大,两种荧光信号分布区域有分离的趋势。图10绘制了燃烧室中轴线以及距离中轴线20 mm处两种荧光信号峰值的高度,可以看出从工况2(热功率为15 kW)至工况3(热功率为20 kW),OH PLIF的信号峰值位置有明

显的升高,而  $\text{CH}_2\text{O}$  信号峰值位置随工况的改变缓慢升高。

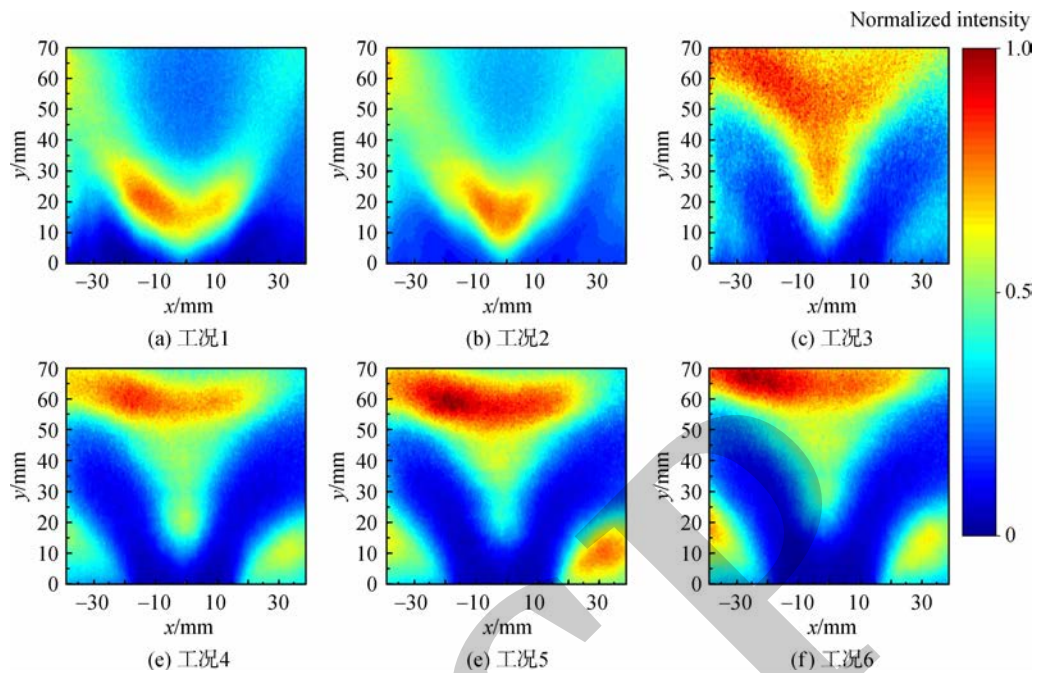


图 7 不同工况下的时均 OH PLIF 的图像

Fig. 7 Time-averaged OH PLIF images under different operation points

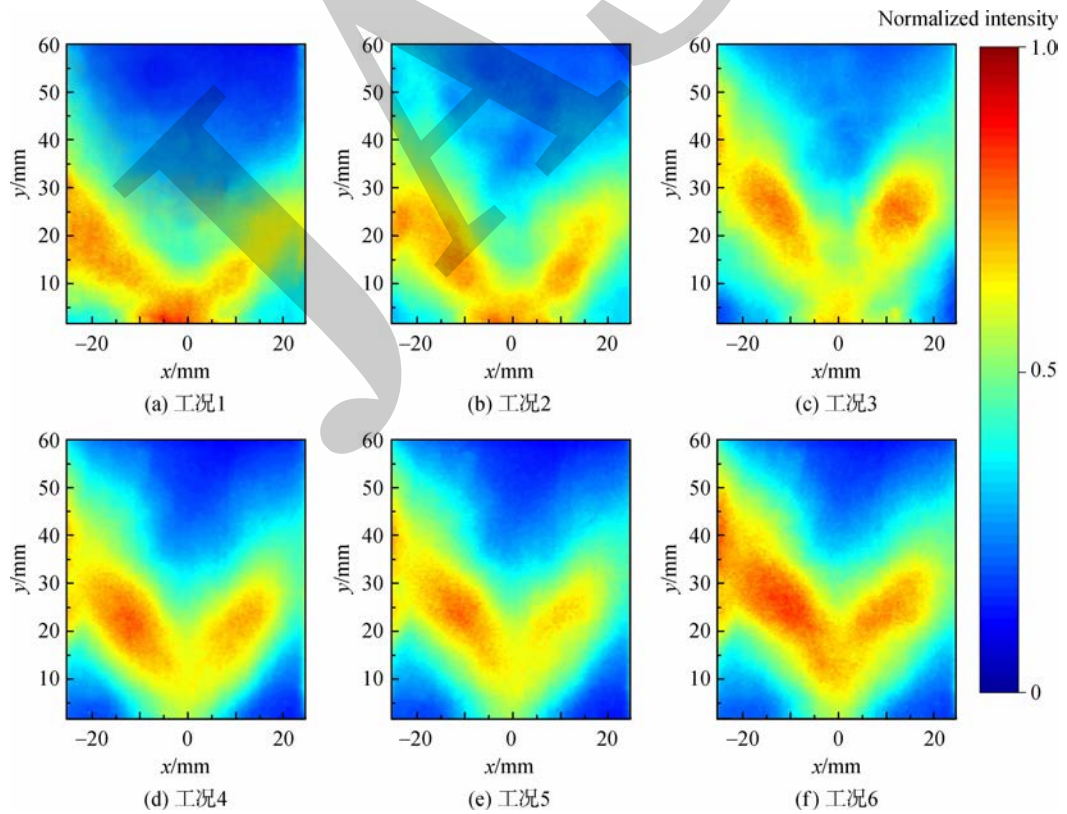


图 8 不同工况下的时均  $\text{CH}_2\text{O}$  PLIF 的图像

Fig. 8 Time-averaged  $\text{CH}_2\text{O}$  PLIF images under different operation points

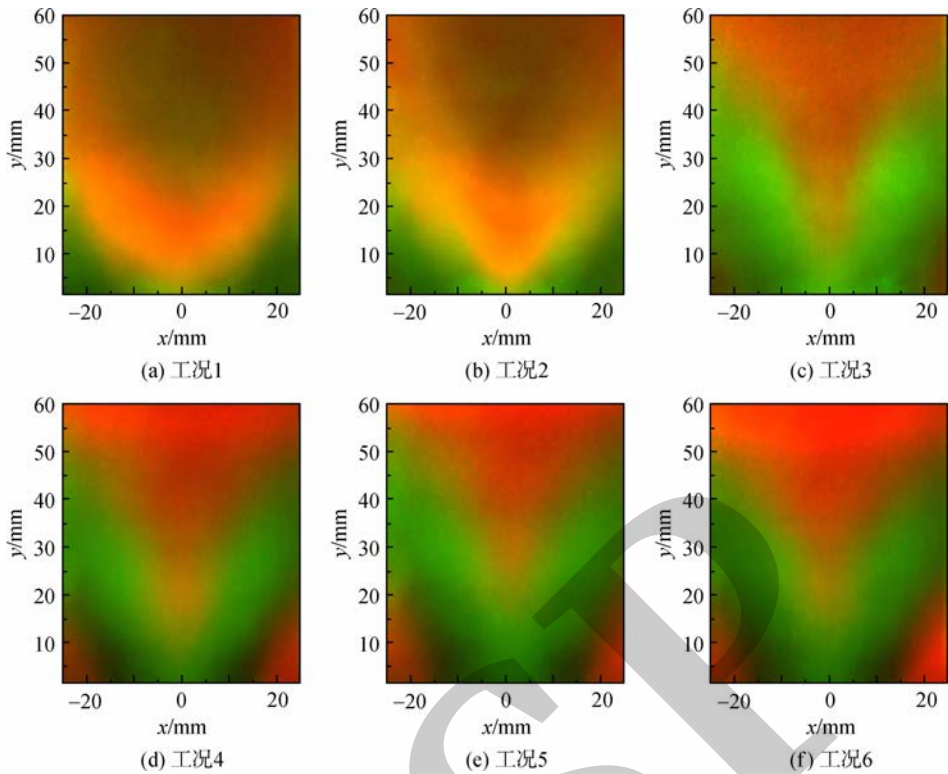


图 9 不同工况下的时均 OH(红)和 CH<sub>2</sub>O(绿)双组分 PLIF 的图像

Fig. 9 Time-averaged OH (red) and CH<sub>2</sub>O (green) PLIF images under different operation points

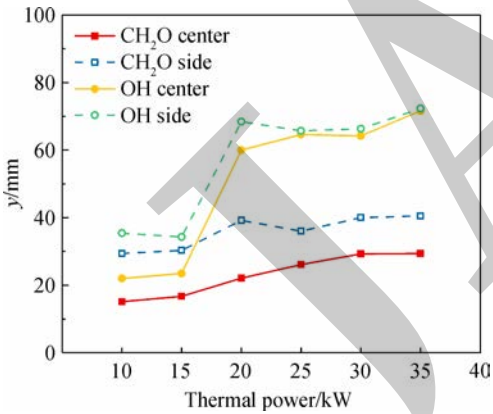


图 10 不同工况下的时均 OH 与 CH<sub>2</sub>O PLIF 信号峰值位置

Fig. 10 Peak position of the time-averaged OH and CH<sub>2</sub>O PLIF image under different operation points

3 旋流火焰的脉动模态分析

3.1 POD 与 EPOD 方法

本文使用 POD 方法对 OH 的 PLIF 图像进行处理,来获得旋流火焰的主要脉动模态,并通过 EPOD 方法计算出对应模态的 CH<sub>2</sub>O 分布。本小节对 POD 及 EPOD 方法的基本思想和计算过程进行简要的介绍。

对于一组包含  $N$  个数据的样本集  $\{u(\mathbf{X},$

$k)\}$ ,可以通过多种分解方法将其分解为以下形式:

$$u(\mathbf{X},k)=a_0(k)\phi_0(\mathbf{X})+\sum_{i=1}^Ma_i(k)\phi_i(\mathbf{X}) \quad (1)$$

其中  $\mathbf{X}$  为空间坐标, $k$  为样本序号, $a$  为模态的系数, $\phi$  为相互正交的模态, $M$  表示该组正交分解模态的总数,下标  $i$  为模态的序号,下标 0 表示模态 0。POD 方法是针对一组数据的脉动量计算出正交模态的数学处理方法。该方法构建模态最重要的原则是对低阶模态所含脉动能量的最大化。通过这样的方式,研究者通过少数低阶模态就能抓住研究对象的主要脉动特征。通常会规定它的模态 0 为整组数据的平均值,而系数  $a_0(k)=1$ 。值得注意的是,这样的模态 0 并不与其他模态保持正交。

本文使用的具体 POD 方法为 Sirovich 提出的快照(snapshot)算法<sup>[23]</sup>。该算法将 POD 分解过程转化成本征值问题,每个 POD 模态是所有输入样本的线性组合。

首先,将数据简单处理,得出该组数据的平均场和每一个样本的脉动场,即  $\tilde{u}(\mathbf{X},k)=u(\mathbf{X},k)-\phi_0(\mathbf{X})$ ,其中波浪线表示数据的脉动项。然后建立  $\mathbf{B}$  矩阵, $\mathbf{B}$  矩阵的每一个元素  $b_{jk}$  为第  $j$ 、 $k$  个样本的内积

$$b_{jk} = \langle \tilde{u}_j, \tilde{u}_k \rangle \tag{2}$$

然后解本征值问题：

$$\mathbf{B}\mathbf{v}_i = \lambda_i \mathbf{v}_i \tag{3}$$

对矩阵  $\mathbf{B}$  求本征向量  $\mathbf{v}_i$  即可得到计算每一个模态所需的样本权重  $v_{ik}$ , 本征值  $\lambda_i$  则表示该模态所含的脉动能量的贡献率。本征值  $\lambda_i$  应按数值大小降序排列。样本集  $\{u(\mathbf{X}, k)\}$  的 POD 模态的表达式为

$$\begin{cases} \phi_0(\mathbf{X}) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u(\mathbf{X}, k) \\ \phi_i(\mathbf{X}) = \frac{1}{N\lambda_i} \sum_{k=1}^N v_{ik} \tilde{u}(\mathbf{X}, k) \end{cases} \tag{4}$$

本系列实验的 OH 与 CH<sub>2</sub>O PLIF 同步进行, 需要将两种测量结合在一起做 POD 分析, 以研究不同组分 PLIF 图像的联系。因为 CH<sub>2</sub>O 组分的荧光信号弱, POD 分解效果不理想, 对 CH<sub>2</sub>O 的模态研究使用基于 OH PLIF 样本 EPOD 方法<sup>[19]</sup>。与 OH 模态对应的 CH<sub>2</sub>O 模态  $\phi_i$  由以下表达式给出：

$$\begin{cases} \psi_0(\mathbf{X}) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u_{\text{CH}_2\text{O}}(\mathbf{X}, k) \\ \psi_i(\mathbf{X}) = \frac{1}{N\lambda_i} \sum_{k=1}^N v_{ik} \tilde{u}_{\text{CH}_2\text{O}}(\mathbf{X}, k) \end{cases} \tag{5}$$

其中  $u_{\text{CH}_2\text{O}}(\mathbf{X}, k)$  为 CH<sub>2</sub>O PLIF 样本,  $v, \lambda$  均来自对 OH PLIF 样本 POD 分解过程计算的本征向

量以及本征值。这一过程相当于根据 OH PLIF 的模态将 CH<sub>2</sub>O PLIF 的数据进行归类和累加, 使原本信噪比较低的数据具有更大的分析价值。需要注意的是不同于直接解出的 POD 模态  $\phi_i$ , 扩展 POD 模态  $\psi_i$  不具有正交性质。

3.2 基于 PLIF 图像火焰模态分析

本次实验对不同工况分别采集了 500 组 OH 与 CH<sub>2</sub>O 双组分 PLIF 图像。在对每个工况进行的 OH PLIF 图像进行分解前, 首先对通过二维 FFT(fast Fourier transform)滤波对 ICCD 产生的斜纹状的读取噪声进行处理, 避免该结构对 POD 的干扰。随后使用中值滤波器对图像进行 3×3 邻域的滤波。

POD 与 EPOD 的模态 0 为 OH 与 CH<sub>2</sub>O PLIF 时均信号, 已在图 7、图 8 中给出。图 11 和图 12 分别展示了工况 1 下 OH PLIF 的 POD 模态和 CH<sub>2</sub>O PLIF 的 EPOD 模态。这些模态由伪彩色表示, 每个模态的黄绿色区域数值接近 0, 代表该模态在该区域对脉动的贡献很小。每个模态中红色、蓝色区域的数值的绝对值较大, 表示该模态在这个区域对脉动的贡献大。同一个模态可能同时包含红蓝色区域, 这个模态的特征是上述红、蓝两个区域信号呈现此消彼长的关系。图 13 展示了各个模态的能量谱。本组数据的 POD 模态能量收敛迅速, 第 10 个模态仅占总能量的 1%,

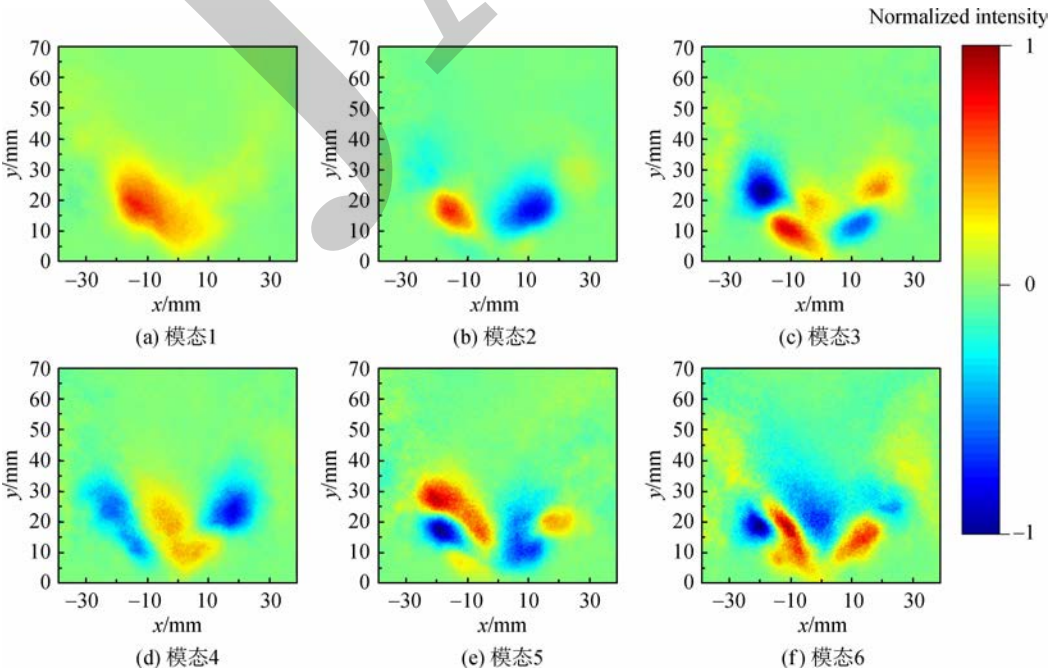


图 11 工况 1 下 OH PLIF 的 POD 模态  
Fig. 11 OH PLIF POD modes under operation point 1

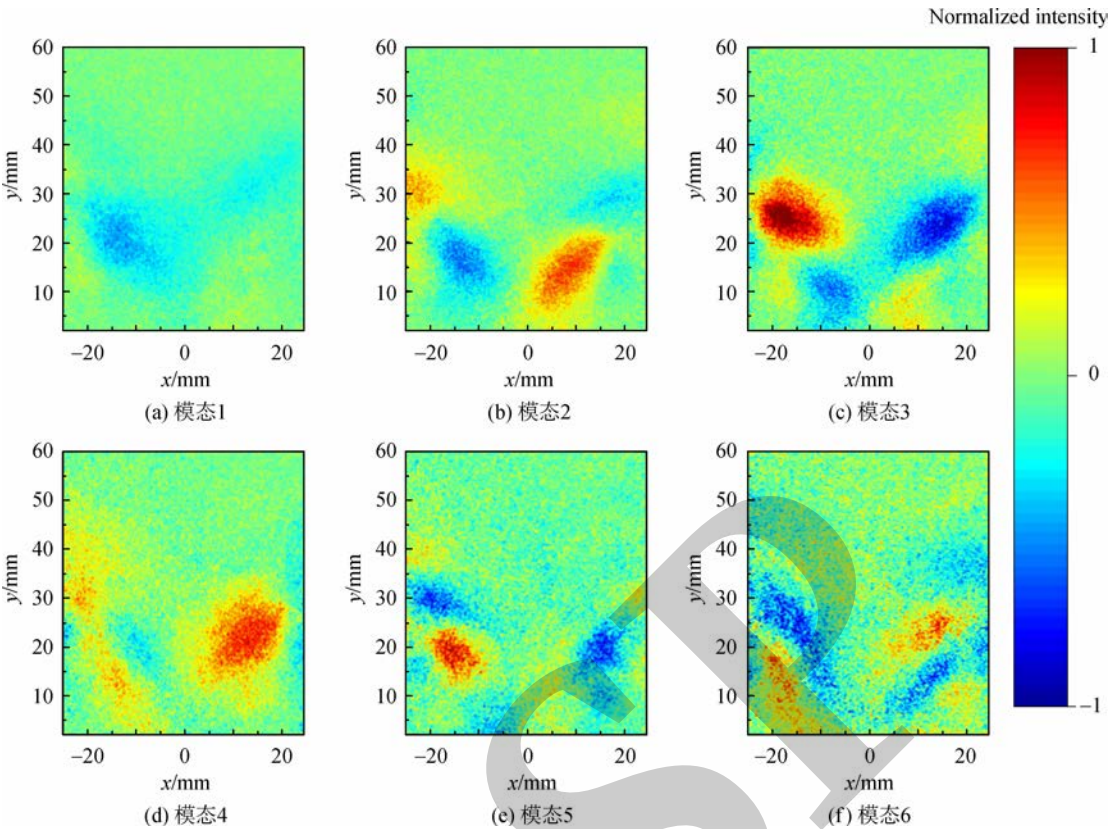


图 12 工况 1 下 CH<sub>2</sub>O PLIF 的 EPOD 模式  
Fig. 12 CH<sub>2</sub>O PLIF EPOD modes under operation point 1

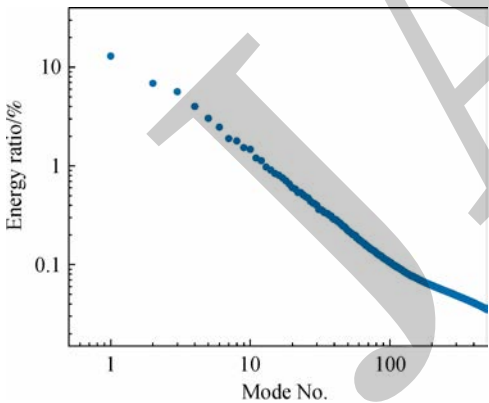


图 13 工况 1 下 OH PLIF POD 模式能量分布  
Fig. 13 Energy distribution of OH PLIF POD modes under operation point 1

说明 POD 分析能够掌握该火焰的主要特征。

从 OH PLIF 的 POD 模式中 can 提取到旋流火焰的脉动信息。模式 2、模式 3 展现出明显的反对称性；模式 2 是火焰左右两边的信号交替性变化，表现了火焰左右移动；模式 3 具有四极 (quadrupole) 特征，是相比模式 2 更高阶的脉动特征，表现了火焰的扭曲。这两个模式耦合在一起，显示出火焰下方摇摆的现象，共同表征了此类旋流火焰中 PVC 的特征。模式 4 与模式 6 具有

一定的轴对称性，表征了火焰反应区域在 CRZ 与外围交替出现的振荡模式。模式 1 表明了研究对象左半部的 OH PLIF 信号有较强的脉动。由于实验对象是轴对称的，该模式展现出非对称性，因此推测这个模式的成因较为复杂。对 OH PLIF 图像逐个观察，可以发现 OH 的信号分布偶尔会向上移动，显示出了轴向的不稳定性。旋流器出口微小的不对称性会导致轴向脉动与 PVC 耦合在一起，形成一个较强的混合模式。与此同时，模式 2 的左半支橙色区域面积比右半支蓝色区域的面积小，据推测是该模式的部分脉动特征被分解到模式 1 中的结果。

通过对比图 11 和图 12 中 OH 的 POD 模式与 CH<sub>2</sub>O 的 EPOD 模式可以看出两种组分的模式有明显的关联。首先，两种组分的模式具有相似性；模式 1 表征了燃烧室左下方信号强弱的脉动；模式 2 与模式 3 具有反对称结构；模式 4 相对中轴线有一定的对称性。其次，这两种组分相同区域模式的正负号相反。这反应了两种荧光在火焰中组分分布的互斥性。

3.3 火焰脉动模式随热功率的转变

图 7 和图 8 已经展示出火焰的时均结构随着

热功率的增加发生了明显的改变。下面对火焰脉动的模式进行讨论。图 14 和图 15 显示了工况 3 和工况 5 的 OH PLIF POD 模式,而所有实验工况(operation point,OP)对应的 POD 能量谱由图 16 给出。从工况 1 至工况 4,模式 1 的能量占比

逐渐增高,说明随着热功率的增大,火焰轴向不稳定性愈发明显;另一方面,随着火焰锥角的减小,PVC 导致的火焰径向( $x$  向)摆动变得不再明显。值得注意的是,在相似实验台热功率小的工况下,火焰的 PVC 的相干特征十分明显,以至于相关

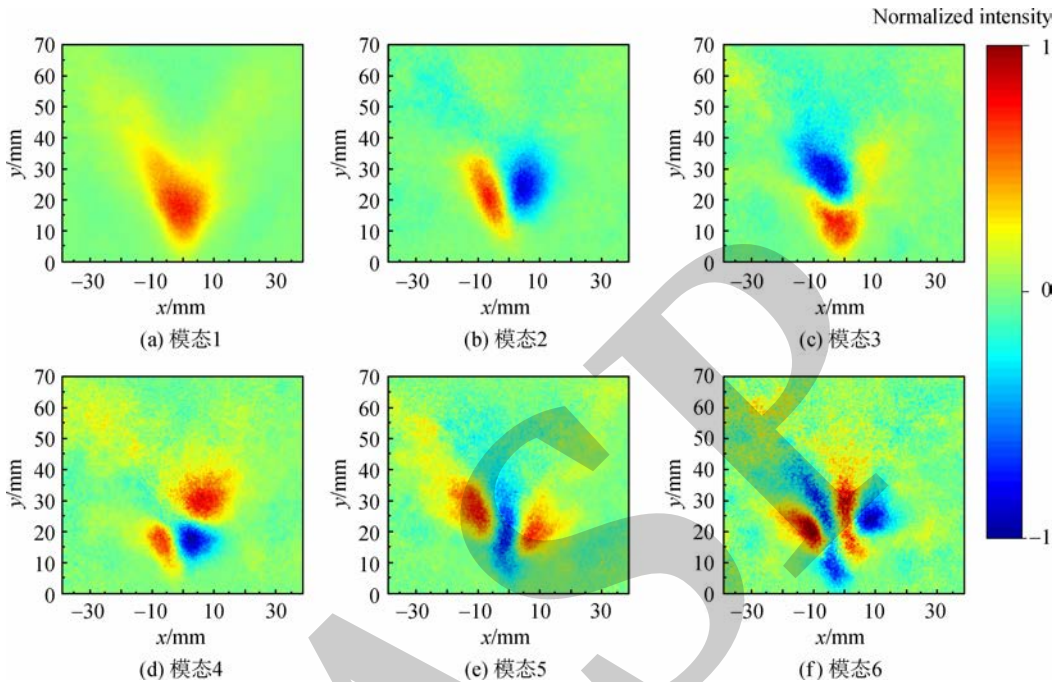


图 14 工况 3 下 OH PLIF 的 POD 模式

Fig. 14 POD modes of OH PLIF under operation point 3

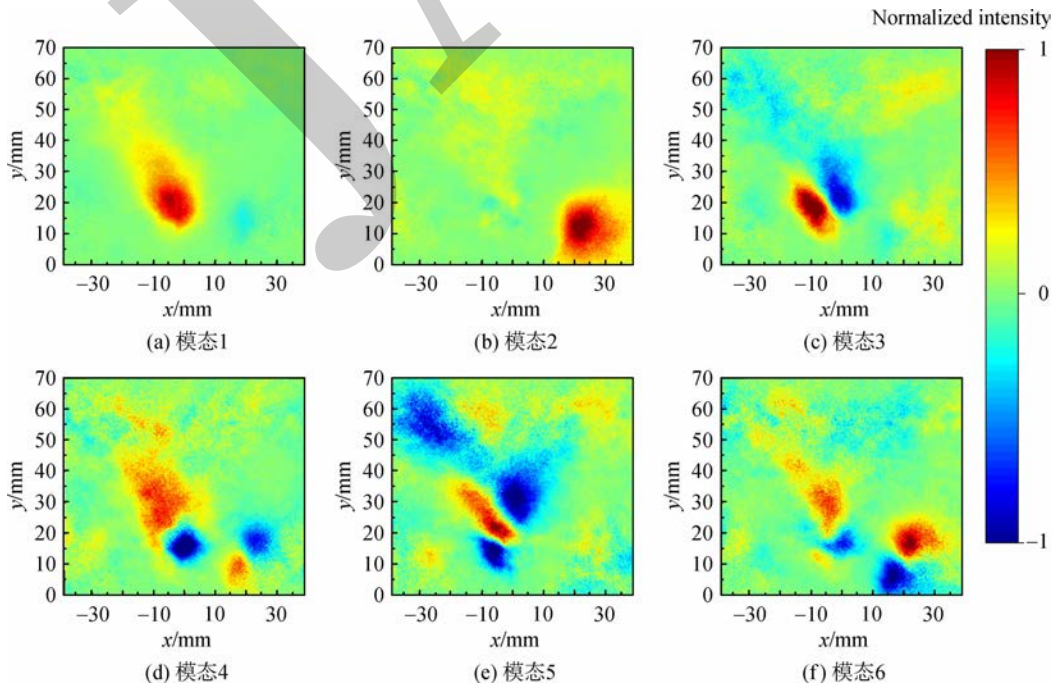


图 15 工况 5 下 OH PLIF 的 POD 模式

Fig. 15 POD modes of OH PLIF under operation point 5

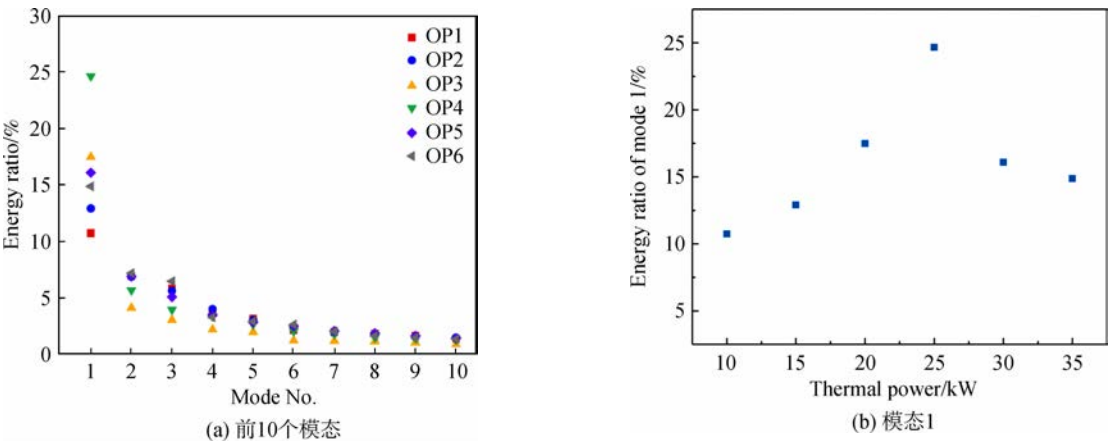


图 16 不同工况下 OH PLIF POD 模态能量分布

Fig. 16 Energy distribution of OH PLIF POD modes under different operation points

POD 模态可以用来表示火焰脉动的相位<sup>[21]</sup>。工况 5 下 OH POD 模态的对称性不再明显,与工况 4 相比,模态 1 的能量占比下降,此时火焰的次要模态从径向摆动转变为回流区的强弱变化转变,而且在工况 5 下,模态 2 不再体现火焰的径向摆动,而是体现单侧回流区的信号脉动,随着热功率进一步加大,右下方回流区的脉动能量也在加强。

图 17 和图 18 展示了工况 3 和工况 5 下 CH<sub>2</sub>O PLIF 的 EPOD 模态。从图中可以看出,

较大的热功率下,CH<sub>2</sub>O PLIF 的 EPOD 模态结构依然与 OH PLIF 的模态有明显关联。在这两个工况下,OH 的轴向(*y* 向)脉动与 CH<sub>2</sub>O 的径向(*x* 向)脉动是同时进行的。工况 5 的 POD 模态 2 是右下方回流区的 OH 荧光信号明暗脉动模式,对应的 CH<sub>2</sub>O EPOD 模态信号比其他模态弱,在右下方回流区,有负值区域,表现出当该区域 OH 荧光信号下降时,CH<sub>2</sub>O 信号升高,说明回流区存在未燃烧的燃料。在高热功率情况下,时

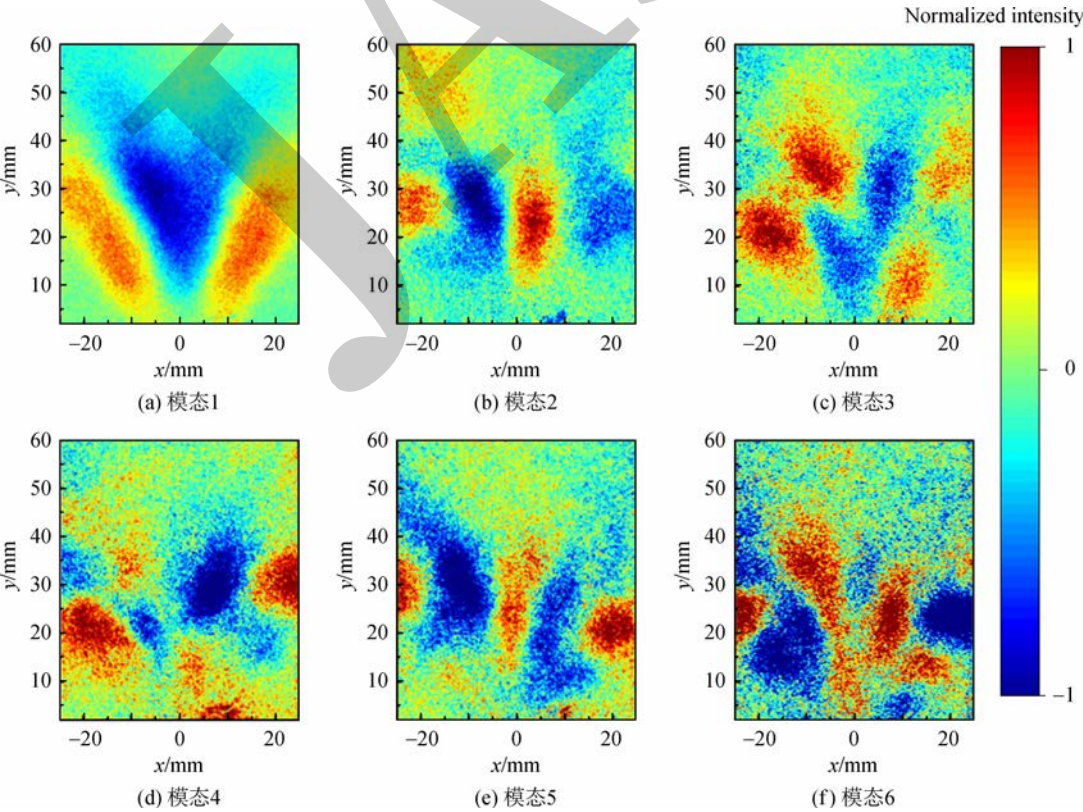


图 17 工况 3 下 CH<sub>2</sub>O PLIF 的 EPOD 模态

Fig. 17 CH<sub>2</sub>O PLIF EPOD modes under operation point 3

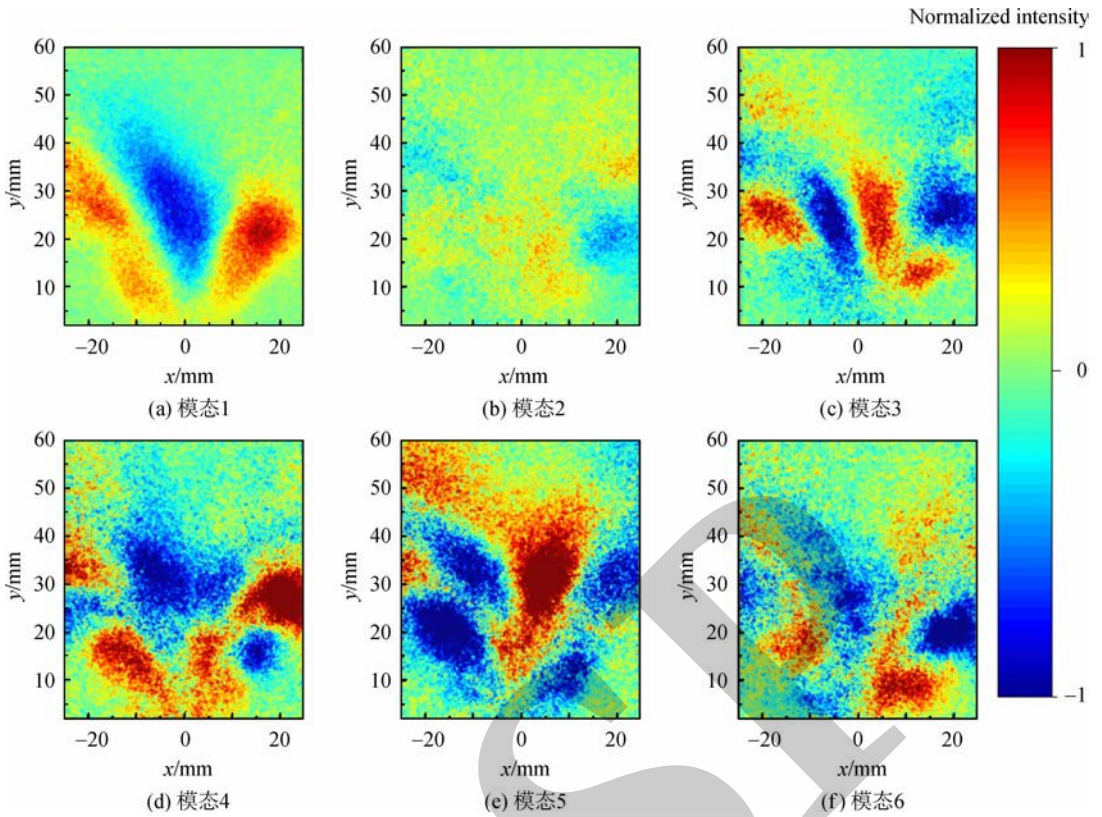


图 18 工况 5 下 CH<sub>2</sub>O PLIF 的 EPOD 模式

Fig. 18 CH<sub>2</sub>O PLIF EPOD modes under operation point 5

而发生的不充分燃烧导致燃烧室左下角的 OH 荧光信号有较强的脉动。

## 4 结 论

本文展示了通过 OH 与 CH<sub>2</sub>O 双组分 PLIF 技术对不同工况下航空发动机旋流燃烧室的研究。实验结果表明,通过这两种荧光组分的同步测量,能够很好地显示火焰的瞬态结构。测量结果显示出火焰锋面在燃烧室内具有严重的形变,出现明显的 PVC 特征,火焰出现了局部熄灭现象。由于燃料与回流的高温燃烧产物混合,CH<sub>2</sub>O 组分标志的预热区明显增厚。

实验结果表明通过 POD 方法对 PLIF 数据进行处理,可以有效地获得火焰的 PVC 及径向脉动特征。随着燃烧室热功率的增大,火焰模式的变化明显体现在 POD 模式中:在热功率较低的工况下,火焰中 OH PLIF 信号的脉动特征以 PVC 带来的下半部左右摇摆为主。随着热功率的增大,火焰 V 形夹角减小,轴向不稳定性逐渐增强,PVC 带来的火焰径向摇摆减弱,脉动的对称性逐渐减弱。EPOD 分析展示了 CH<sub>2</sub>O 组分的分布与 OH 有显著的关联,实现了对较弱信号的挖掘。在同一模式下,两者 PLIF 信号此消彼长,体

现了 OH 与 CH<sub>2</sub>O 在火焰中分布的互斥性。CH<sub>2</sub>O 的 EPOD 模式还对 OH PLIF 的 POD 分析起到了补充的作用。OH POD 模式显示在较大热功率的工况下,火焰在回流区的不稳定性也在增强,与此同时,EPOD 模式显示当回流区的 OH 信号减少时,CH<sub>2</sub>O 的信号上升,表明未经燃烧的混合物会出现在该区域。

POD 方法可以实现对湍流火焰结构的归类。虽然目前仅进行了 OH 与 CH<sub>2</sub>O 双组分的 PLIF 测量,使用 EPOD 方法有望将 NO PLIF、CH PLIF 等其他测量结果与 OH 的 POD 模式的进行关联,从而通过不同的双组分 PLIF 同时测量实现对燃烧室多种组分分布特征的研究。

## 参考文献:

[1] SYRED N. A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2006,32(2):93-161.

[2] RENARD P H, THEVENIN D, ROLON J C, et al. Dynamics of flame/vortex interactions[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2000,26(3):225-282.

[3] CANDEL S, DUROX D, SCHULLER T, et al. Dynamics of swirling flames[J]. Annual Review of Fluid Mechanics,

- 2013,46(1):147-161.
- [4] CROSLY D R, SMITH G P. Laser-induced fluorescence spectroscopy for combustion diagnostics[J]. *Optical Engineering*, 1983, 22(5): 545-553.
- [5] HANSON R K, SEITZMAN J M, PAUL P H. Planar laser-fluorescence imaging of combustion gases[J]. *Applied Physics B*, 1990, 50(6): 441-454.
- [6] KOHSE-HOINGHAUS K. Laser techniques for the quantitative detection of reactive intermediates in combustion systems[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1994, 20(3): 203-279.
- [7] YU Xin, YANG Zhen, PENG Jiangbo, et al. Quantitative measurements of one-dimensional OH absolute concentration profiles in a methane/air flat flame by bi-directional laser-induced fluorescence[J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(11): 114204. 1-114204. 10.
- [8] LEE T, BESSLER W G, KRONEMAYER H, et al. Quantitative temperature measurements in high-pressure flames with multiline NO-LIF thermometry[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(31): 6718-6728.
- [9] CATTOLICA R. OH rotational temperature from two-line laser-excited fluorescence[J]. *Applied Optics*, 1981, 20(7): 1156-1166.
- [10] LI Z S, LI B, SUN Z W, et al. Turbulence and combustion interaction: high resolution local flame front structure visualization using simultaneous single-shot PLIF imaging of CH, OH and CH<sub>2</sub>O in a piloted premixed jet flame[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(6): 1087-1096.
- [11] ZHOU B. Advanced laser-based multi-scalar imaging for flame structure visualization towards a deepened understanding of premixed turbulent combustion[D]. Lund, Sweden: Lund University, 2015.
- [12] WATSON K A, LYONS K M. Scalar and velocity field measurements in a lifted CH<sub>4</sub>-air diffusion flame[J]. *Combustion and Flame*, 1999, 117(1/2): 257-271.
- [13] MOHLMANN G R. Formaldehyde detection in air by laser-induced fluorescence[J]. *Applied Spectroscopy*, 1985, 39(1): 98-101.
- [14] 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.
- 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. (in Chinese)
- [15] 陈爽, LUKASZ J K, 翁武斌, 等. CH<sub>4</sub>/Air反扩散发射流火焰多组分同步 PLIF 诊断[J]. *实验流体力学*, 2018, 32(1): 27-32.
- CHEN Shuang, LUKASZ J K, WENG Wubin, et al. Simultaneous multi-species PLIF diagnostic on CH<sub>4</sub>-air inverse diffusion jet flame[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2018, 32(1): 27-32. (in Chinese)
- [16] 唐青龙, 耿超, 李明坤, 等. 激光诱导荧光法测量内燃机双燃料燃烧过程的甲醛和羟基[J]. *物理化学学报*, 2015, 31(12): 2269-2277.
- TANG Qinglong, GENG Chao, LI Mingkun, et al. Laser-induced fluorescence measurements of formaldehyde and OH radicals in dual-fuel combustion process in engine[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2015, 31(12): 2269-2277. (in Chinese)
- [17] IUDICIANI P, DUWIG C, HOSSEINI S M, et al. Proper orthogonal decomposition for experimental investigation of flame instabilities[J]. *AIAA Journal*, 2012, 50(9): 1843-1854.
- [18] 张弛, 王波, 邹鹏飞, 等. 同心旋流分层火焰的外激脉动特性统计学分析[J]. *航空动力学报*, 2017, 32(8): 1801-1808.
- ZHANG Chi, WANG Bo, ZOU Pengfei, et al. Statistical analysis on the forced dynamic of internally-staged-swirling stratified flame[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2017, 32(8): 1801-1808. (in Chinese)
- [19] BOREE J. Extended proper orthogonal decomposition: a tool to analyse correlated events in turbulent flows[J]. *Experiments in Fluids*, 2003, 35(2): 188-192.
- [20] DUWIG C, IUDICIANI P. Extended proper orthogonal decomposition for analysis of unsteady flames[J]. *Flow Turbulence Combustion*, 2010, 84(1): 25-47.
- [21] STOHR M, SADANANDAN R, MEIER W. Phase-resolved characterization of vortex-flame interaction in a turbulent swirl flame[J]. *Experiments in Fluids*, 2011, 51(4): 1153-1167.
- [22] ZHOU B, LI Q, HE Y, et al. Visualization of multi-regime turbulent combustion in swirl-stabilized lean premixed flames[J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(7): 2954-2958.
- [23] SIROVICH L. Turbulence and the dynamics of coherent structures; Part I coherent structures[J]. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1987, 45(3): 561-571.

(编辑: 陈越)