

文章编号 1004-924X(2024)09-1307-13

基于 5 kHz 平面激光诱导荧光的 射流火焰局部熄火时空特性分析

高 龙, 彭江波*, 于 欣, 杨超博, 曹 振, 袁 勋, 刘文备
(哈尔滨工业大学 航天学院 光电技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150006)

摘要: 基于高频光学测量手段研究射流火焰局部熄火的分布特性, 对于分析燃烧场不稳定性机理有重要意义。建立 5 kHz 的平面激光诱导荧光测量系统, 对高速射流火焰开展实验研究, 并获得火焰结构的动态发展过程; 将双边滤波、竖直滑窗局部自适应阈值等图像处理方法引入平面激光诱导荧光图像的预处理, 在局部断裂结构数量特征的基础上, 提取局部断裂结构长度和空间位置等特征; 基于上述特征深入解析局部熄火的时空分布特性, 进一步完善高频平面激光诱导荧光诊断与分析方法。研究表明: 双边滤波算法处理后, 图像峰值信噪比为 34.3 dB, 结构相似度为 0.93, 噪声水平显著降低, 获得了较好的去噪效果; 使用竖直滑窗局部自适应方法进行图像分割的 F1 分数达到 93.30%; 断裂结构累计数量随时间线性增加, 当射流马赫数由 0.5 增至 1.6 时, 单侧图像断裂结构的每秒累计数量从 790.7 增至 9 217.2, 并且局部熄火频率与射流马赫数呈指数关系; 断裂结构主要分布区域为火焰臂及上侧中央燃料区。本研究进一步拓展了高频平面激光诱导荧光技术的应用能力, 证明了高频平面激光诱导荧光技术用于局部熄火时空分布特性研究的可行性。

关键词: 激光诱导荧光; 光谱诊断; 高速射流火焰; OH 基; 局部熄火; 图像特征

中图分类号: TN249; TK16 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243209.1307

Spatiotemporal distribution characteristics analysis of local flameout in jet flames based on 5 kHz planar laser-induced fluorescence

GAO Long, PENG Jiangbo*, YU Xin, YANG Chaobo, CAO Zhen, YUAN Xun, LIU Wenbei

(Institute of Opto-electronics, School of Astronautics, Harbin Institute of Technology,
Harbin 150006, China)

* Corresponding author, E-mail: pengjiangbo@hit.edu.cn

Abstract: Studying the distribution characteristics of local flameout using high-speed optical measurement methods is crucial for understanding jet flame instability mechanisms. Initially, a planar laser-induced fluorescence (PLIF) measurement system operating at 5 kHz is set up. An experimental study on high-speed jet flames is conducted with OH-PLIF to monitor the dynamic development of the flame structure. Image processing techniques like bilateral filtering and local adaptive thresholding with vertical sliding windows are then applied to preprocess PLIF images. Innovative features such as the length and spatial location of local fracture structures are extracted. Subsequently, the temporal and spatial distribution characteristics of

收稿日期: 2023-11-01; 修订日期: 2023-12-08.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 62175053); 黑龙江省自然科学基金资助项目 (No. LH2021F028)

local flameouts are analyzed, enhancing the high-speed PLIF diagnostic and analytical methods. Results indicate that the bilateral filtering algorithm significantly improves image quality, achieving a peak signal-to-noise ratio of 34.3 dB and a structural similarity index of 0.93. The algorithm effectively reduces noise levels. The F1 score for the adaptive image segmentation method using vertical sliding windows reaches 93.30%. Moreover, the count of fractured structures linearly increases over time. As the jet Mach number rises from 0.5 to 1.6, the number of fractured structures per second in the unilateral image jumps from 790.7 to 9 217.2, showing an exponential relationship with the jet Mach number. Predominant areas for fracture structures include the flame arms and the upper central fuel zone. This research validates the effectiveness of high-speed PLIF technology in assessing the spatial and temporal distribution of local flameout, broadening its potential applications.

Key words: laser-induced fluorescence; spectral diagnostics; high-speed jet flame; OH radical; local flameout; image feature

1 引言

近年来,激光光谱技术^[1]获得高速发展并应用于燃烧流场诊断研究中。其中,平面激光诱导荧光(Planar Laser-induced Fluorescence, PLIF)技术具有高时空分辨率、高灵敏性、二维空间测量等优势。其基本原理是:整形成薄片状的激光穿过燃烧流场的特定区域,选择性激发特定示踪粒子并产生荧光,采集荧光信号并进行数据分析,可以获取燃烧流场的温度^[2]、组分^[3]和火焰结构^[4]等信息。火焰温度、组分浓度的定量测量需要考虑具体的燃烧环境,燃气轮机、冲压发动机等实际燃烧系统的内部多为湍流燃烧形式,流动条件复杂,物理参量的变化梯度大,很难实现定量测量,因此,PLIF 技术常用于燃烧场结构的瞬态可视化或动态发展过程可视化^[5-7]。

高速流动环境中的火焰稳定性是动力推进系统研究的重点问题,在毫秒时间尺度实现燃料/空气掺混、引燃和火焰稳定面临挑战^[8]。在实际燃烧室内部,由于受到有限边界、火焰稳定装置等因素的影响,燃烧流场特性复杂。为了消除复杂因素的影响,澳大利亚悉尼大学^[9]和美国桑迪亚实验室^[10]等设计了具有简单边界条件的射流燃烧器模型,并开展了一系列研究。射流火焰中普遍存在局部熄火现象,它是湍流和化学反应相互作用的表现。通过实验测量精确描述局部

熄火现象,对于研究复杂燃烧流场的不稳定性具有重要意义^[11]。然而,自发辐射成像和全光谱成像等方法的可视化结果是燃烧场经过空间积分后的整体轮廓,无法获得与局部熄火有关的内部结构信息。PLIF 技术能够对特定空间进行切片成像,从而有效测量局部熄火现象。

近年来,燃烧场中局部熄火现象的演化行为成为研究热点^[12]。高频 PLIF 技术的短间隔采样特性使这一研究成为可能^[13]。2011 年,Juddoo 等使用 5 kHz 的 PLIF 技术研究了射流火焰中表征局部熄火的断裂结构的动态演变过程^[14],在燃料喷注速度低于 80 m/s 时,5 kHz 的 PLIF 系统能够在多帧图像中连续追踪单个微小断裂结构的发展过程,并在此基础上得到断裂结构的演化速度。该研究还分析了结构数量与结构演化速度之间的关系。然而,在更高速(如超声速)射流条件下,局部断裂结构时空演化更快,在常规脉冲激光器重复频率有限(5~10 kHz)的条件下,难以捕捉断裂结构的连续演变过程。此外,由于图像处理与分析方法还不完善,研究目前主要关注高速射流火焰 PLIF 图像中断裂结构的数量统计信息^[15],很少涉及空间分布信息。为了更深入理解高速射流火焰的局部燃烧不稳定性,为燃烧系统的设计和优化提供参考,有必要进一步开展局部熄火现象的空间分布特性(如熄火程度和熄火位置)的研究。

本文建立了5 kHz高频OH-PLIF实验系统,并测量了不同喷注速度(马赫数为0.5~1.6)条件下的高速射流火焰,获得了具有200 μs 时间间隔和高空间分辨率的OH基PLIF图像;针对射流火焰特性设计了图像预处理方法,引入双边滤波去噪方法和竖直滑窗局部阈值图像分割方法,成功提取了火焰局部断裂结构的特征参数;对断裂结构特征进行统计量化分析,在数量特征的基础上,获得局部熄火空间尺度及空间位置等特征随燃料射流速度的变化规律。上述研究充分发

挥了高频PLIF技术的优势,并且完善了射流火焰中局部熄火现象的诊断与分析方法。

2 实验及原理

2.1 5 kHz OH-PLIF 实验系统

射流火焰高频OH-PLIF实验系统如图1所示,主要包括紫外激光器系统、光束整形系统、荧光图像采集与时序控制系统,以及同轴射流燃烧器系统等。

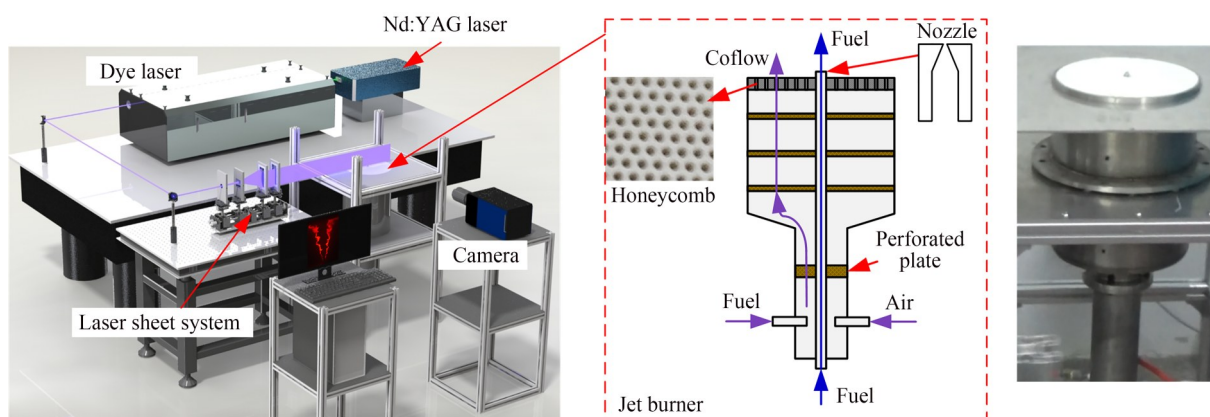


图1 射流火焰OH-PLIF实验装置

Fig. 1 OH-PLIF experimental setup of jet flame

紫外激光器系统由Nd:YAG固体激光器、可调谐染料激光器及倍频模块组成,其工作频率为5 kHz。其中,Nd:YAG激光器(Edgewave)经过二倍频后输出532 nm激光;染料激光器(Sirah Credo)使用罗丹明6G染料的无水乙醇溶液作为工作物质,罗丹明6G的吸收带为450~600 nm,荧光发射带为510~700 nm,激光可调谐波段为564~607 nm。染料激光器的分光系统由光栅和反射镜组成。将激光器系统输出波长调谐到283.553 nm,其对应OH基 $A^2\Sigma^+(v'=1) \leftarrow X^2\Pi(v''=0)$ 带的 $Q_1(8)$ 转动激发线。该转动跃迁玻尔兹曼分数对温度变化不敏感,且能获得高信噪比的荧光信号。

Nd:YAG固体激光器产生1 064 nm激光,经倍频模块作用输出532 nm激光;532 nm激光耦合进入染料激光器,激发工作物质实现上下能级粒子数反转,产生受激辐射光;受激辐射光经望远镜系统扩束后射向闪耀光栅,精密电机将闪耀

光栅转到特定角度,获得能稳定振荡的567.106 nm激光;然后,经倍频模块作用输出283.553 nm紫外激光,平均功率为1.3 W。光束整形系统将紫外激光束变换为有效高度为8~9 cm,厚度小于0.4 mm的片光,片光穿过燃烧器中轴线并激发路径上的OH基。

高帧频ICMOS相机由像增强器及高速CMOS面阵探测器组成。微通道板像增强器将微弱荧光信号进行倍增并显示在荧光屏上,面阵探测器采集荧光屏信号并输出图像。为保证与激光器同步,相机帧频同样设置为5 kHz。相机镜头由Coastal Optic生产,在紫外波段具有高透过率,其焦距 $f=105\text{ mm}$,光圈为 $f/4.5$ 。对视场进行尺寸标定得到空间分辨率为 $89\text{ }\mu\text{m}/\text{pixel}$,竖直方向有效视场高度为8 cm,为褶皱、局部熄火、旋涡等微小特征结构的动态成像提供条件。此外,为实现荧光信号的高信噪比采集,需要依据荧光谱带确定探测方案。根据LIFBASE光谱仿

真软件的计算结果,OH基(0,0)荧光谱带的峰值信号强度约为(1,0)带的3倍,因此选择探测(0,0)带荧光,其主要波段为 (310 ± 10) nm。为了尽可能降低激光杂散光和背景辐射的影响,在相机镜头前安装UG11(Schott)带通滤光片和WG305(Semrock)长通滤光片,该滤光片组在310 nm附近的透过率约为70%。通过DG645数字信号发生器控制系统时序,为了降低OH基的自发辐射干扰,采用快门选通方式对探测区域的光子进行时域滤波,像增强器的曝光时间设置为30 ns。

2.2 同轴射流燃烧器系统

同轴射流燃烧器的中心处为直径1 mm的空心圆锥形喷嘴,外环为伴流燃料通路,安装有多孔蜂窝板。燃烧器中央喷嘴能够产生出口流速可调的高速射流,通过压力阀门可改变主流喷注流速。燃烧器主流(或中央射流)和伴流的燃料均为乙烯。热伴流能为中央主流提供稳定的热量来源和氧化剂,起到稳定主流火焰和促进燃烧的作用。伴流气体为乙烯/空气预混气,燃料和空气均由燃烧室底部向上扩散,由多孔板进行扰动和混合,并在蜂窝板表面燃烧,伴流流速约为2 m/s。伴流火焰的乙烯和空气流量由质量流量控制器(Sevenstar D07系列)调节,调节精度为满量程的2%。

实验设计了不同射流速度的燃烧工况。为了描述射流速度,引入一个无量纲数——马赫数(Mach number, Ma),其数值等于气流运动速度与当地声速的比值。根据流体力学基本理论,燃料喷口内气体的流动可以简化为理想气体的一维稳态等熵流动问题。根据连续性方程和动量方程得到:

$$(M_a^2 - 1) \frac{dV}{V} = \frac{dA}{A}, \quad (1)$$

其中: M_a 为马赫数, V 为体积, A 为喷嘴截面积。

亚声速气流经过收缩喷口后体积膨胀并加速,而超声速气流体积压缩并减速,无论喷口上游气体是亚声速还是超声速,在收缩型喷嘴出口马赫数只能稳定为1。收缩喷嘴内外压强满足以下关系^[16]:

$$\frac{P_0}{P_1} = \left[1 + \frac{(k-1)M_a^2}{2} \right]^{\frac{k}{k-1}}, \quad (2)$$

其中: P_0 是喷注压力, P_1 是大气压, k 是绝热常数,

对于乙烯, $k=1.233$ 。

当马赫数为1.0时,由式(2)计算得到喷注压力为 1.8×10^5 Pa。当大于 1.8×10^5 Pa的气体通过喷嘴时,气流逐渐加速运动到喷口出口平面处并达到当地声速。通过调节喷注压力,可在喷嘴出口下游获得不同流速的乙烯射流,喷注压力大于 1.8×10^5 Pa,能获得初始流速大于声速的气流;而喷注压力小于 1.8×10^5 Pa,能获得初始流速小于声速的气流。

伴流火焰为中央主流提供稳定的点火源,实验中保持伴流乙烯流量为9.0 L/min,空气流量为200 L/min,当量比为0.64,经化学动力学计算热伴流温度为1892 K。由式(2)确定了马赫数分别为0.5,1.0,1.3,1.5和1.6的5种射流火焰工况。燃烧器喷嘴出口平面处的乙烯气体参数见表1。射流速度定义为出口平面处的平均体速度。所有工况条件下,乙烯的滞止温度均为277 K,当地声速为313 m/s。

表1 射流燃烧器主流的燃烧工况

Tab. 1 Combustion conditions of main jet

工况	喷注压力 $P/10^5$ Pa	马赫数	射流速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	1.2	0.5	172
2	1.8	1.0	313
3	2.6	1.3	407
4	3.4	1.5	470
5	4.2	1.6	501

3 PLIF 图像局部熄火特征处理

3.1 PLIF 图像预处理

滤光片能过滤掉绝大多数激光散射光和其他背景辐射,但原始PLIF图像中仍包含一定噪声;因此需要进行图像预处理,一方面可以消除噪声、简化数据量,另一方面可以增强关心的火焰区域,便于后续图像结构特征的提取。

图像中的低频信息与灰度值缓慢变化的图像区域有关,如燃烧场中相对均匀的燃烧区域;而高频信息与灰度值的迅速变化区域有关,如噪声、边缘、褶皱和纹理等。本文选择频域滤波

算法实现图像降噪。常用的高斯低通滤波器的优点是过渡平滑,不会产生振铃效应,但其仅考虑了位置信息对中心像素的影响,未考虑周围像素值信息,因此在消除噪声时可能损坏边缘等细节。为了改善高斯低通滤波器的上述问题,Kunal等提出双边滤波算法^[17]。该算法同样基于加权平均思路,区别是在计算像素间欧氏距离的基础上,还考虑到灰度值变化的影响,通过在原始高斯核函数上乘以保持边缘的核函数,实现降噪和保边的目的。

对原始 PLIF 图像进行灰度拉伸,以增强对比度,然后分别用高斯低通滤波、双边滤波算法进行处理,并转换为伪彩图,如图2所示。从主观角度评价滤波效果,可发现高斯低通滤波器会导致火焰边缘变模糊;而双边滤波算法处理后有效去除了绝大多数噪点,同时保留了锐利的边缘细节。

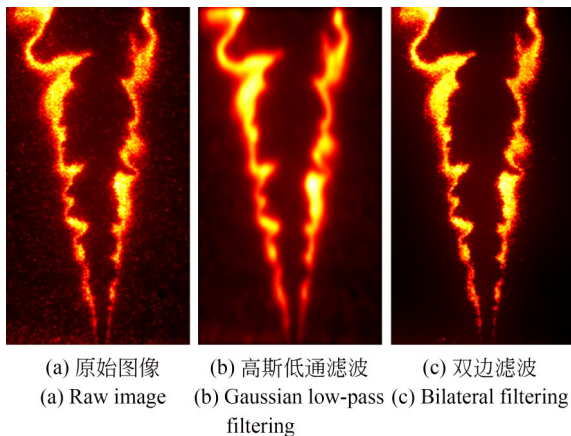


图2 原始图像与降噪结果

Fig. 2 Raw image and denoising results

为了从客观角度衡量图像质量,引入峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)和结构相似度(SSIM)评价指标。

3.1.1 峰值信噪比

PSNR是一种衡量图像质量的指标,其值越大表明处理后的图像质量越高。首先介绍处理前后两图像的均方误差(Mean Square Error, MSE):

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [P(x, y) - Q(x, y)]^2, \quad (3)$$

其中: M 和 N 分别代表图像的行、列数, $P(x, y)$ 和

$Q(x, y)$ 分别代表原图像和处理后的图像。MSE能表征处理前后图像的差异性,在此基础上给出峰值信噪比为^[18]:

$$PSNR = 10 \lg \left(\frac{I_{\max}^2}{MSE} \right), \quad (4)$$

其中: $I_{\max}$ 为图像矩阵数据类型的最大值,即动态范围。对于8位深度的灰度图像, $I_{\max}$ 为255;对于归一化到 $[0, 1]$ 的灰度图像, $I_{\max}$ 为1。

3.1.2 结构相似度指标

SSIM用来评估处理后的图像与原图间的相似性^[19]。SSIM值越接近1,表示图像质量越好、损失越少。SSIM的原始形式复杂且参数较多,本文采用它的一种特殊形式^[19]:

$$SSIM(P, Q) = \frac{(2\mu_P \mu_Q + C_1)(2\sigma_{PQ} + C_2)}{(\mu_P^2 + \mu_Q^2 + C_1)(\sigma_P^2 + \sigma_Q^2 + C_2)}, \quad (5)$$

其中: μ_P 和 μ_Q 分别为原图像和处理后图像的局部均值, σ_P , σ_Q 和 σ_{PQ} 分别为原图像标准差、处理后图像标准差及二者协方差, C_1 和 C_2 分别为亮度项和对比度项的正则化常数。这里 C_1 取 10^{-4} , C_2 取 9×10^{-4} 。

除了PSNR和SSIM,为了衡量滤波算法对背景噪声的滤除效果,本文还分别计算了滤波前、后图像中相同背景区域内的噪声均值。通过计算上述指标,得到高斯低通滤波和双边滤波算法处理的图像PSNR值分别为28.0 dB和34.3 dB,SSIM值分别为0.84和0.93。原始图像噪声均值为0.06,经高斯低通滤波和双边滤波处理后,噪声均值分别为0.06和0.03。高斯低通滤波对背景颗粒噪声仅模糊化处理,去噪效果不佳,而双边滤波则能显著抑制噪声水平。上述结果说明,双边滤波算法的降噪效果更优,图像质量较好、失真更少,与主观感受保持一致,因此,选择双边滤波作为射流火焰PLIF图像的降噪方法。

最大类间方差法等全局阈值法在燃烧场图像分割领域得到了广泛的应用^[20-21],此类方法非常适用于灰度直方图有明显双峰特征的图像。然而,射流火焰PLIF图像的灰度直方图无明显的双峰特征,全局阈值法的分割效果有限;此外,全局阈值方法无法克服PLIF图像中灰度变化梯度大的问题,会导致射流火焰图像分割结果中缺

失火焰根部。在图像处理领域,为了解决灰度分布不均匀、变化梯度大的问题,通常采用局部自适应阈值法。该方法根据像素所在邻域的像素值的分布特征来确定局部阈值,其优点是每个像素处的阈值非固定,对于背景不均匀的图像通常具有比全局阈值更好的分割效果。常用的局部自适应阈值法有均值法、中值法及高斯均值法等。

综合考虑 PLIF 图像中信号和背景的特点,本文提出一种基于竖直滑窗的图像自适应阈值法。该方法将自适应阈值法中的局部滑窗思想与最大类间方差法进行结合,其原理如图 3 所示。首先,设置宽度与图像相等,高度为 h 的滑窗,滑窗从图像最下端开始竖直向上滑动,每次滑动步长为 s ,满足 $s < h$;在每次窗口停留的位置,均利用最大类间方差法计算滑窗内的阈值并进行记录,直到遍历完整幅图像;将上述记录的阈值列向量按行平铺,并利用插值算法生成与火焰图像尺寸一致的阈值栅格图像;将火焰图像与阈值栅格图像对应位置的像素进行对比,小于阈值的赋值为 0,否则赋值为 1。

合理设置滑动窗口的高度和滑动步长,使用竖直滑窗自适应阈值法处理测试图像,并与其他几种常用的局部自适应阈值法进行比较,分别从

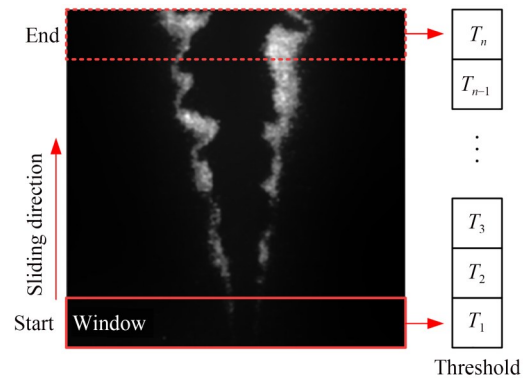


图 3 竖直滑窗阈值法原理

Fig. 3 Principle for vertical sliding window threshold method

主观和客观角度进行对比和分析,结果如图 4 所示。均值自适应法提取的火焰区域结构较细,火焰内部有部分空洞,紧贴火焰区域噪声较少,而远离火焰区域出现许多噪声;中值自适应法提取的火焰结构较为破碎,其二值图包含大量背景噪声;高斯均值自适应法的图像分割结果具有明显改善,火焰结构较完整,相比于均值自适应法的噪点数量进一步降低;对于本文提出的竖直滑窗法,火焰整体结构完整,并且背景噪声数量最少。综上所述,中值法的提取效果最差,均值法效果一般,高斯均值法的效果有所改善,而竖直滑窗法效果最佳。

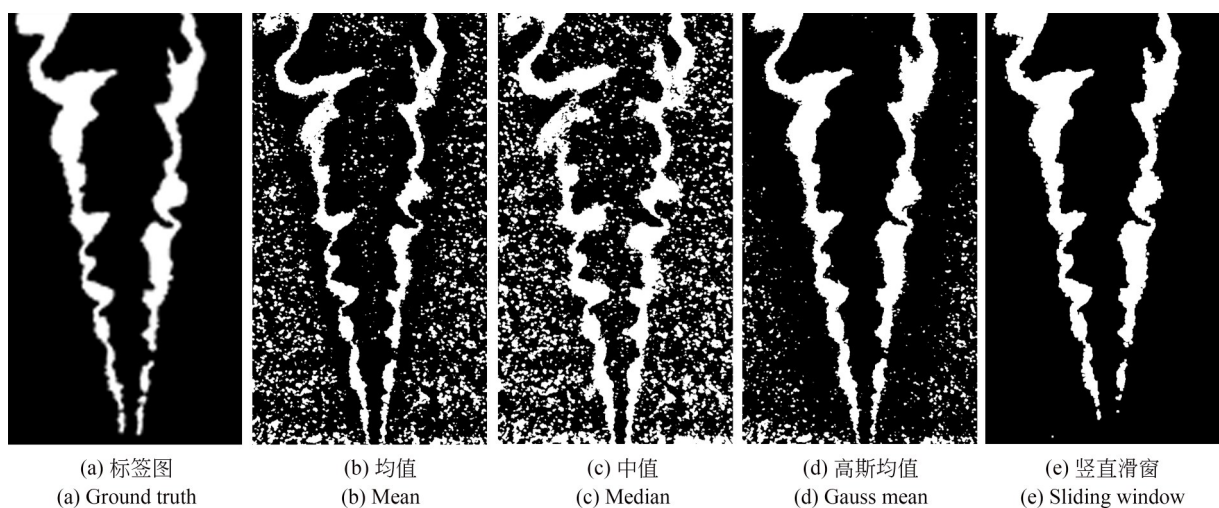


图 4 不同局部自适应阈值法的二值图

Fig. 4 Binary images of different local adaptive threshold methods

火焰 PLIF 图像的火焰/背景区域分割可以看作二分类问题,因此,可以用混淆矩阵评估图像分割算法的性能。混淆矩阵是一个二维矩阵,用于对比图像分割算法预测结果与真实标签之间的差异。PLIF 图像分割的混淆矩阵见表 2。

表 2 PLIF 图像分割混淆矩阵

Tab. 2 Confusion matrix of PLIF image segmentation

标签图	分割结果	
	火焰	背景
火焰	TP	FN
背景	FP	TN

通常,对角线上的值表示正确分类的像素数量,非对角线上的值表示错误分类的像素数量。要生成图像分割混淆矩阵,需要有真实标签图以及分割算法预测的对应像素信息。真实标签图由阈值法结合人工细致标注。为了降低像素级标注的难度,本文先用最大类间方差法处理滤波后的 PLIF 图像,获得粗分割的初始二值图。在粗分割基础上,将初始二值图设置一定的透明度显示,并叠加在原始 PLIF 伪彩图上,将二者对照,对二值图辅以人工精修,生成标签图。使用标签图作为图像分割效果的评判基准,然后将计算结果与标签图进行比较,统计各类别的像素数量,最终生成混淆矩阵。引入图像分割领域的客观评价指标,分别是精确率(Precision, P)、召回率(Recall, R)和 F1 分数(F1-score, F_1),F1 分数为精确率和召回率的调和平均数。上述指标的计算公式为^[22]:

$$\begin{aligned} P &= \frac{TP}{TP + FP} \\ R &= \frac{TP}{TP + FN} \\ F_1 &= 2 \frac{P \times R}{P + R} \end{aligned} \quad (6)$$

基于上述客观评价指标对常用的局部自适应阈值法的火焰区域分割效果进行比较,结果见表 3。在这 4 种方法中,均值法和中值法的 F1 分数均不理想,均值法的精确率比中值法高 13% 左右,中值法的召回率比均值法高 10% 左右;高斯均值法提取的二值图中噪声较少,因此其精确率

表 3 自适应阈值法的分割效果比较

Tab. 3 Comparison of image segmentation performance of adaptive threshold methods (%)

自适应阈值法	精确率	召回率	F1 分数
均值	51.39	75.15	61.04
中值	38.13	85.92	52.82
高斯均值	71.92	94.57	81.70
竖直滑窗	90.81	95.92	93.30

高于前两者,其召回率为 94.57%,说明绝大多数火焰区域被提取出来;竖直滑窗法的数据指标均保持最高水平,F1 分数为 93.30%,高于其他 3 种局部自适应阈值法,说明该方法的综合分割性能最佳。

由于均值、中值及高斯均值这 3 种局部自适应阈值法的滑窗均为正方形,并依次按行、列遍历和运算。因此,在无火焰信号的邻域内,上述 3 种方法会导致局部阈值过小,产生分割误差。PLIF 图像中的射流火焰沿流向分布,使用竖直滑窗自适应阈值可保证在喷嘴上方任意高度时,滑窗内均包含火焰信号,可以有效避免窗口内阈值过小的问题。竖直滑窗法输出的二值图中仍然保留少量孤立的散点噪声,可通过形态学运算消除。

提取火焰局部熄火特征前,首先需要确定火焰区域边界。边缘检测算法是边界提取的基础,通常采用一阶导数和二阶导数来检测目标边缘。常用的边缘检测算子有 Prewitt, Sobel, Canny 和 Laplace 等。Canny 算子是一种经典且成熟的边缘检测算法,它不仅可以检测边缘,还可以对边缘进行细化和连接,得到更准确的结果。Canny 算子通过高斯滤波、计算梯度、非极大值抑制和双阈值处理等步骤实现边缘检测,所产生的边缘较细,仅有一个像素,没有强弱之分,准确性较高。本文利用 Canny 算子处理二值图来提取火焰区域边缘。

3.2 断裂结构特征提取

OH-PLIF 技术为研究局部熄火现象提供了高精度、大视场的可视化手段,但 PLIF 图像的数据处理和信息挖掘仍面临挑战:高频 PLIF 图像数据量大,人工统计图像中的断裂结构数量、长度和位置等特征是低效和费时的。因此,需要开发能自动化提取局部断裂结构的方法。

本文通过自行设计的算法批量提取 PLIF 图像中的断裂结构。理想情况下,射流火焰为对称分布,方便起见,这里仅处理一侧图像区域。每幅图像中断裂结构特征参数的提取步骤如下:

(1)对原始 PLIF 灰度图像裁剪,仅保留左侧;

(2)对图像进行双边滤波、二值化、形态学闭运算、Canny 算子提取边缘等操作;

(3)基于二值图统计连通域的数量,如果连通域数量 N 大于 1,则记录断裂结构数量为 $N-1$ 并运行步骤(4),否则断裂结构数量 N 记为 0,并处理下一幅图像;

(4)为了获得断裂结构的空问信息,遍历图像中两相邻连通域边界上的像素,直到检索到相邻连通域上曼哈顿距离最近的两个像素,作为当前断裂结构的两个端点,记录两端点坐标。继续在当前图像遍历并记录所有断裂结构的端点坐标;

(5)计算并记录步骤(4)中每个断裂结构两端点的中心点坐标,用来表示断裂结构的位置;

(6)计算并记录步骤(4)中每个断裂结构两端点的欧氏距离,经尺寸换算得到断裂结构的实际物理长度;

(7)对所有图像按步骤(1)到(6)循环运算。

图像处理结果如图 5 所示,为了增强显示效果,灰度图像均已转为伪彩图。在原始 PLIF 图像中可见 2 处熄火位置,经过双边滤波处理滤除了多数背景噪声,剩余的少量噪点可以通过形态学闭操作进行去除。为了从背景中突出展示火焰区域,用白色像素标记 Canny 算子提取的边缘。两处完整提取的断裂结构用箭头标识。图 5(d)为程序自动标记的局部断裂结构,红色线段为相邻连通区域间的最短路径,线段长度代表断裂结构的空问尺度,线段中心坐标表示断裂结构的空问位置。

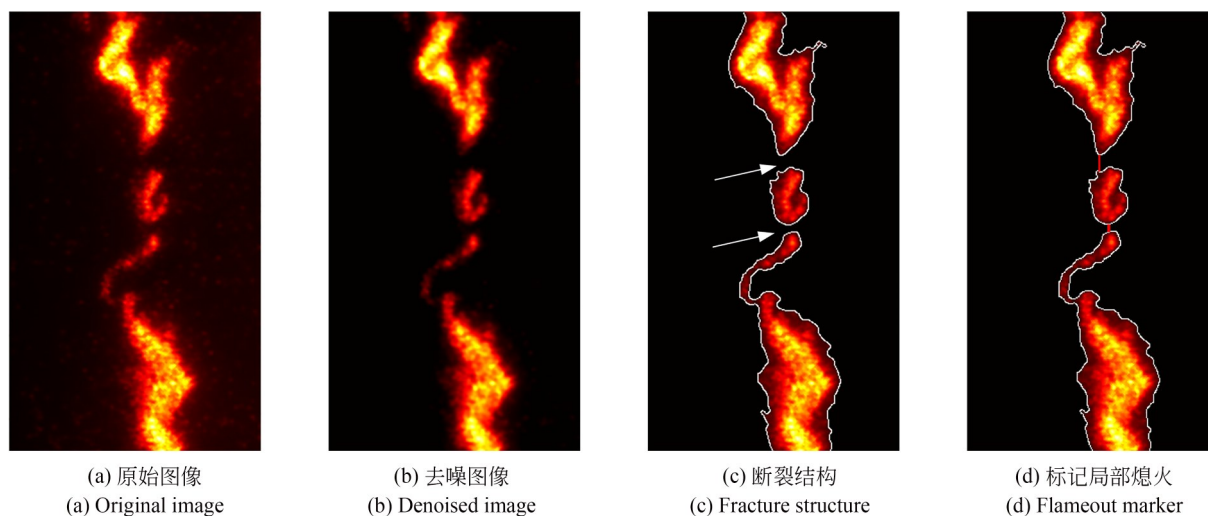


图 5 断裂结构图像处理结果

Fig. 5 Image processing result of breaks

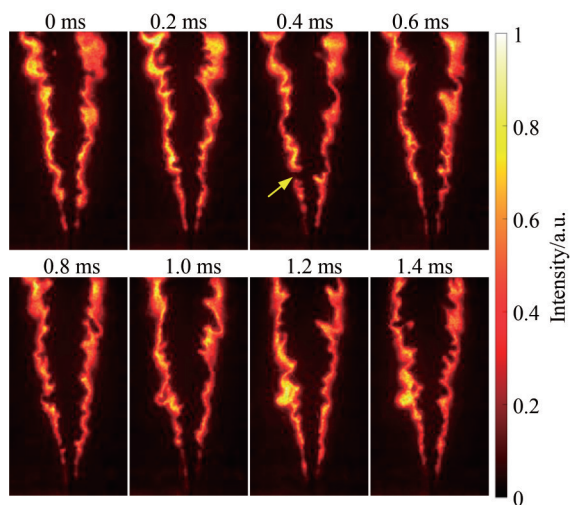
4 实验结果与分析

4.1 射流火焰 OH-PLIF 图像时间序列

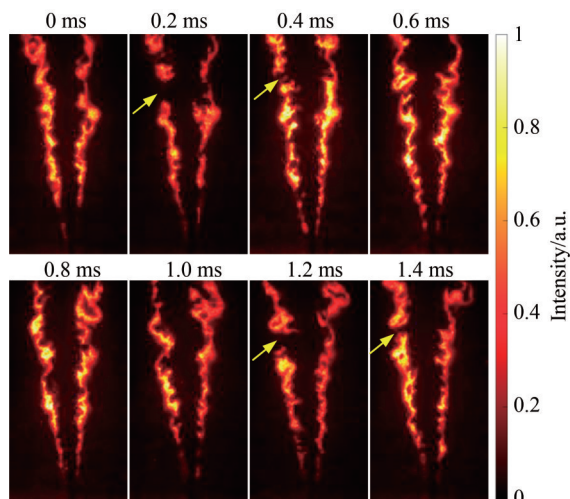
基于 5 kHz OH-PLIF 系统对不同主流喷注速度下的射流火焰进行成像实验,获得射流火焰的动态发展过程。对实验获取的射流火焰 PLIF 图像数据进行预处理,马赫数为 1.0 和 1.6 条件下的图像序列如图 6 所示。相邻两帧图像的采集

间隔为 0.2 ms,荧光信号强度与伪彩色的映射关系显示在图像右侧。燃料喷嘴出口位于图像底端的中央位置,火焰由下向上发展,火焰两臂中间空腔区域充满未燃乙烯,而火焰臂外侧为空气,在乙烯和空气掺混后的区域中发生燃烧化学反应。

在马赫数为 1.0 的射流喷注速度下,图像序列中可发现局部断裂结构,表示火焰中出现了局



(a) 马赫数为1.0
(a) Mach number of 1.0



(b) 马赫数为1.6
(b) Mach number of 1.6

图6 射流火焰的OH-PLIF图像序列

Fig. 6 Selected time-lapse images for ethylene jet flame

部熄火现象;随燃料流速加快,火焰褶皱程度更剧烈,火焰结构更加分散和破碎。上述PLIF图像序列中出现的频繁局部断裂(或空洞)和重新连接分别对应局部熄火及复燃现象。根据图像序列可定性发现,在最大流速(马赫数为1.6)条件下,射流火焰PLIF图像中的断裂程度最大,断裂结构出现的频率最高。随着中心射流气体和伴流之间速度差的增加,燃烧场局部应变率会随气体雷诺数的增加而增加,这直接导致火焰褶皱加剧和过度拉伸,进而导致局部断裂。瞬时标量耗散率与湍流非预混火焰的局部熄火有直接关

系^[23],高速射流火焰比低速射流火焰更加不稳定,可能会引起燃烧场中显著的局部不稳定现象。

射流火焰的不稳定性与流动条件有密切联系。一方面,剪切层产生的旋涡在增强湍流、促进燃料与空气的混合中起着重要作用,有利于保持火焰稳定性;另一方面,过于剧烈的旋涡和湍流又会导致火焰局部熄火现象。使用5 kHz高速PLIF技术对射流火焰进行时间分辨成像,能有效识别火焰内部结构的变化特性,对于理解火焰结构的动态发展过程和燃烧场稳定机制非常重要。

4.2 局部熄火的时间分布特性

对一侧PLIF图像序列中提取的断裂结构数量随时间进行累加计算,结果如图7所示。当中央射流马赫数为0.5和1.0时,断裂结构的累计数量随时间缓慢增加。马赫数为0.5的火焰局部熄火数量随时间均匀增加,二者表现为正比例关系,线性拟合的数学关系式为:

$$N_t = 790.7t, \quad (7)$$

其中: N_t 为熄火现象的累计数量, t 为实验观测时间。函数拟合优度 $R^2=0.999$ 。

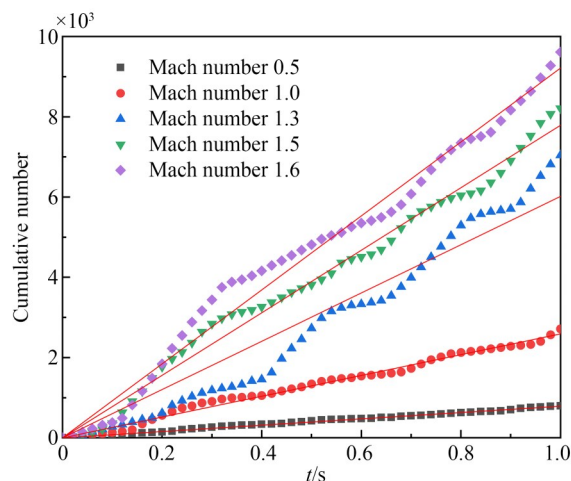


图7 断裂结构累计数量与时间的关系

Fig. 7 Cumulative number of breaks versus time

随射流速度加快,射流火焰中的断裂结构累计数量随时间迅速增加。根据连续观测结果,增长曲线的斜率呈现一定波动性,并且斜率波动性随流速的增加而增大,同样说明马赫数增加引起火焰稳定性降低。由图7还可发现,高流速时的

断裂累计数量的斜率随时间有较大波动性,但累计数量随时间仍满足线性关系。马赫数为 1.0, 1.3, 1.5 和 1.6 时,拟合正比例函数的斜率分别为 2 592.6, 6 017.9, 7 791.2 和 9 217.2, 并且拟合优度 R^2 均大于 0.98。由此可知,主流燃料的喷注特性会显著影响射流火焰结构特征的时间分布特性,随流速加快,断裂结构数量的波动性增强。

为了研究射流火焰 PLIF 图像中断裂结构在单位时间内的累计数量(即熄火频率)与中央射流速度的关系,将二者数据进行函数拟合,拟合曲线如图 8 所示。数学关系表达式为:

$$N = -1\,459.24 + 7\,536.04 M_a, \quad (8)$$

其中: N 为单位时间内断裂结构的累计数量或熄火频率, M_a 为马赫数,拟合 R^2 值为 0.984。二者的高度相关性说明燃料喷注速度会显著影响局部熄火频率。事实上,熄火频率不会无限增加,当射流马赫数增大到一定程度时,会发生全局火焰的吹熄现象。

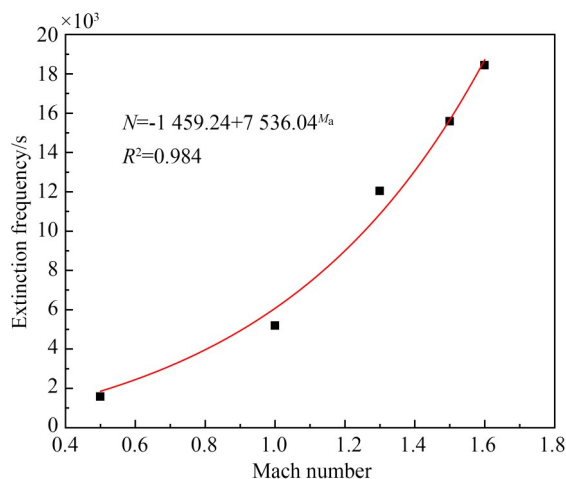


图 8 熄火频率与射流马赫数的关系

Fig. 8 Correlation between flameout frequency and jet Mach number

4.3 局部熄火的空间分布特性

射流火焰中燃料喷注速度的改变能引起局部流动条件和燃料空气配比的变化。它对局部熄火的影响体现在多方面,除了上文所述的断裂结构数量外,还体现在断裂结构的空间分布特性上。根据断裂结构的端点坐标计算出每幅图像中断裂结构的总长度,进一步根据断裂结构数量

得到图像中断裂结构的平均长度,其概率分布如图 9 所示。

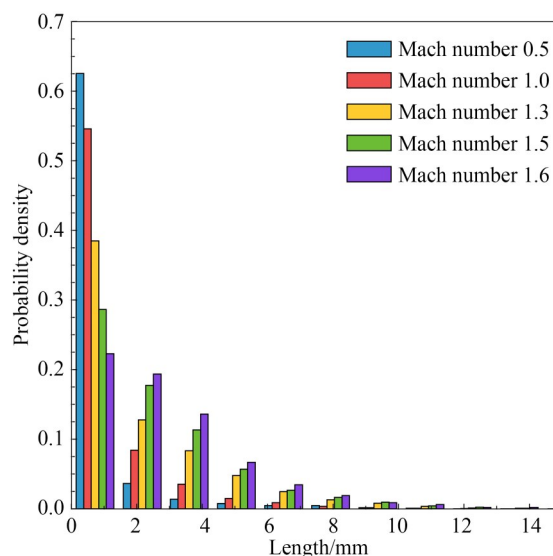


图 9 断裂结构平均长度分布的直方图

Fig. 9 Histograms of mean length of breaks

由图 9 发现,随射流马赫数增加,断裂结构的平均长度呈整体增加趋势,断裂结构长度的概率密度峰值向右偏移,且峰值的概率密度降低。上述结果说明,燃料喷注速度较低时,射流燃烧较稳定,火焰受流动拉伸作用较弱,因此火焰发生局部断裂熄火的概率较低,并且断裂程度波动性小,断裂结构长度数据的分布较集中;由于流速提高和流场湍流程度增加,局部火焰的稳定性降低,这导致局部熄火程度更显著,在图像上体现为断裂结构的尺度增加。对燃烧场中局部熄火现象进行提取和量化分析,可发挥高频 PLIF 技术对燃烧场内部结构可视化的优势,能避免自发辐射等成像技术中存在的空间积分效应的影响。同时,断裂结构分析可量化实验条件对燃烧场的影响,有利于探究火焰不稳定性机理,校验计算流体力学的仿真模型。

局部断裂结构的分布可以指示局部熄火发生的位置,进一步加深对燃烧不稳定性机理的认识。本文使用断裂结构的中心点坐标代表整个熄火断裂结构的分布位置。计算了 2 s 图像采集时间内 5 种喷注条件下 PLIF 图像中的断裂结构中点坐标,并绘制散点图,结果如图 10 所示,

坐标系原点为喷嘴出口的中心位置。根据散点密度可以定性分析局部熄火在不同位置处发生的概率。当燃料喷射流速度增大时,断裂结构的空分布更加密集。此现象表明,随流速加快,局部熄火频率增加。此外,在任何射流喷注速度条件下,最频繁发生局部熄火的区域位于喷嘴出口上方附

近,这是由于该区域内气体流速快,火焰更容易受到剧烈拉伸作用而发生断裂。当喷注马赫数为0.5时,断裂结构最密集区域位于轴向0.5~1 cm高度内,随着主流喷注速度加快,断裂结构最密集的位置逐渐抬升,当马赫数为1.6时,断裂结构最密集区域位于轴向1~2 cm高度内。

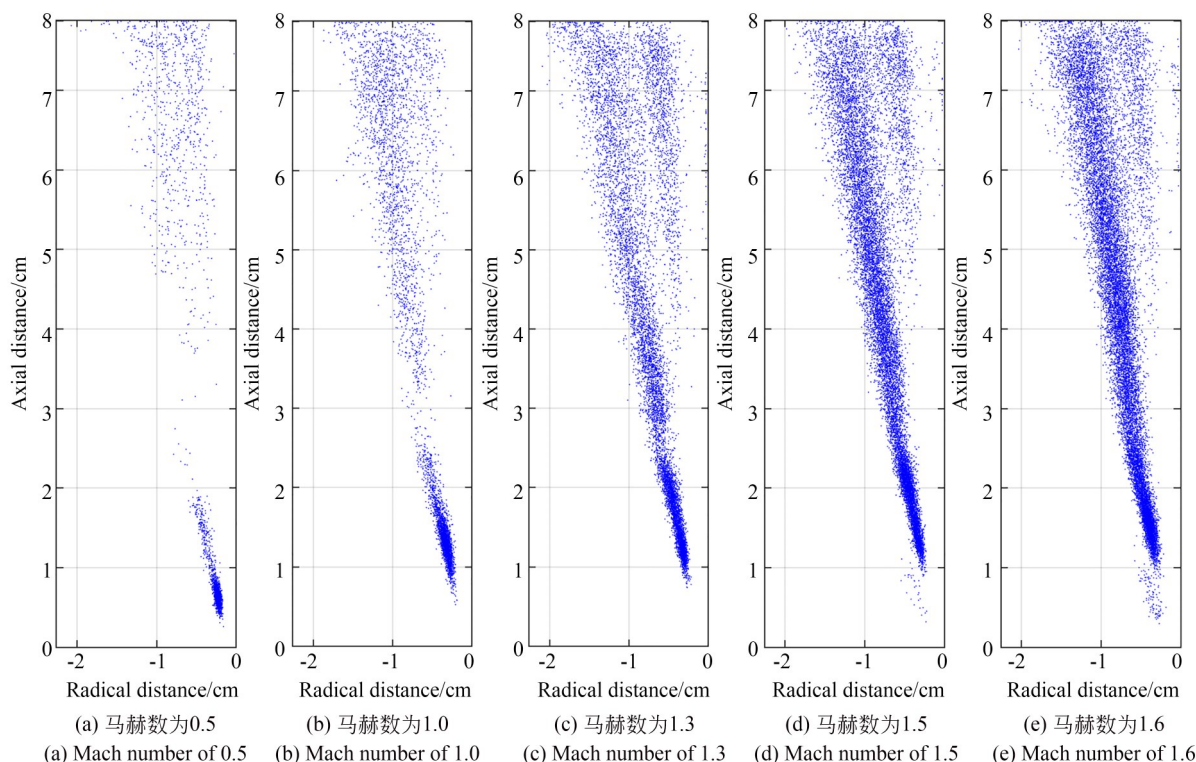


图10 不同喷注条件下局部熄火的空间位置

Fig. 10 Spatial position of local flameout under different injection conditions

由图10还发现,在图像轴向4~8 cm高度内,断裂结构的散点可分为左右纵向排列的两簇,在高马赫数时($M=1.6$)此现象更加明显。其中,左侧一簇的空间规模较大,几乎分布于整个纵向空间,并且散点分布更加密集。这一簇表示发生在火焰臂上的局部熄火事件;而右侧一簇的空间规模较小,仅出现在图像上半区域,并且散点分布较为稀疏。推测这一簇出现的原因是:在湍流作用下,旋涡从火焰臂内侧脱落并向下游扩散,到达富含燃料的空腔中,因缺乏氧化剂而熄灭。上述基于高频PLIF技术获取的局部熄火现象的空间分布规律,可以用来校验CFD仿真结果,对于理解燃烧不稳定性机理有重要意义。

5 结 论

本文对主流喷注马赫数为0.5~1.6的乙烯同轴高速射流火焰进行了5 kHz OH-PLIF实验研究,引入双边滤波和竖直滑窗局部自适应阈值法对射流火焰PLIF图像进行预处理,将火焰区域从背景中提取出来。在数量特征的基础上提取了局部断裂结构的长度和位置特征,并针对局部熄火特征的时间和空间分布特性进行数据统计分析。结果表明:射流火焰PLIF图像经高斯低通滤波和双边滤波处理后,峰值信噪比分别为28.0 dB和34.3 dB,结构相似度分别为0.84和0.93,噪声均值分别为0.06和0.03,双边滤波算法的降噪效果更优;提出了基于竖直

滑窗的局部自适应火焰区域提取法,图像分割的 F1 分数达到 93.30%,优于传统局部自适应阈值法;断裂结构累计数量随时间线性增加,主流喷注马赫数由 0.5 增加到 1.6 时,单侧图像中断裂结构的单位时间累计数量由 790.7 增加为 9 217.2。数据拟合关系表明,断裂结构在单位时间内的累计数量与射流马赫数存在 R^2 为 0.984 的指数关系;断裂结构的主要分布区域为

整个火焰臂及中央燃料区上侧。上述研究结果全面揭示了射流火焰中局部熄火事件的时空分布特性,拓展了高频 PLIF 技术在复杂燃烧场中的应用能力。目前仅研究了射流火焰中心剖面的局部熄火特征,而湍流燃烧具有典型的三维特性,后续可通过振镜系统对燃烧场内部多个平面进行快速扫描成像,从而表征局部熄火现象的三维空间分布特性。

参考文献:

- [1] 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 J R, HU ZH Y, ZHANG ZH R, *et al.* Laser spectroscopy applied to combustion diagnostics[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 284-296. (in Chinese)
- [2] EINECKE S, SCHULZ C, SICK V. Measurement of temperature, fuel concentration and equivalence ratio fields using tracer LIF in IC engine combustion[J]. *Applied Physics B*, 2000, 71(5): 717-723.
- [3] ANGELILLI L, CIOTTOLI P P, GUIBERTI T F, *et al.* A method to convert stand-alone OH fluorescence images into OH mole fraction[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(1): 1771-1778.
- [4] KAPUSTA Ł J, SHUANG C, ALDÉN M, *et al.* Structures of inverse jet flames stabilized on a coaxial burner[J]. *Energy*, 2020, 193: 116757.
- [5] 高龙,于欣,彭江波,等. 超燃冲压发动机点火过程 10 kHz PLIF 测量技术[J]. 推进技术, 2022, 43(12): 366-371.
GAO L, YU X, PENG J B, *et al.* 10 kHz PLIF measurement technique for scramjet ignition[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(12): 366-371. (in Chinese)
- [6] TIAN Y, SHI W, GUO M M, *et al.* Investigation of combustion characteristics in a hydrogen-fueled scramjet combustor[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 186: 486-495.
- [7] MA L, LEI Q C, CAPIL T, *et al.* Direct comparison of two-dimensional and three-dimensional laser-induced fluorescence measurements on highly turbulent flames[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(2): 267-270.
- [8] TIAN Y, GUO M M, RAN W, *et al.* Experimental investigation of effects of pulsed injection on flow structure and flame development in a kerosene-fueled scramjet with pilot hydrogen[J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(5).
- [9] MASRI A R, DIBBLE R W, BARLOW R S. The structure of turbulent nonpremixed flames revealed by Raman-Rayleigh-LIF measurements[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1996, 22(4): 307-362.
- [10] BARLOW R S, FRANK J H. Effects of turbulence on species mass fractions in methane/air jet flames[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1998, 27(1): 1087-1095.
- [11] 朱文中,杨渐志,陈靖,等. 湍流扩散火焰局部熄火现象的大涡模拟研究[J]. 推进技术, 2015, 36(6): 808-815.
ZHU W ZH, YANG J ZH, CHEN J, *et al.* Large eddy simulation of local extinction of turbulent non-premixed flame[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(6): 808-815. (in Chinese)
- [12] PRASAD V N, JUDDOO M, MASRI A R, *et al.* Investigation of extinction and re-ignition in piloted turbulent non-premixed methane-air flames using LES and high-speed OH-LIF[J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2013, 17(3): 483-503.
- [13] HULT J, MEIER U, MEIER W, *et al.* Experimental analysis of local flame extinction in a turbulent jet diffusion flame by high repetition 2-D laser techniques and multi-scalar measurements[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(1): 701-709.
- [14] JUDDOO M, MASRI A R. High-speed OH-PLIF imaging of extinction and re-ignition in non-premixed flames with various levels of oxygenation

- [J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158 (5): 902-914.
- [15] 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.
- [16] 周文祥, 黄金泉, 周人治. 拉瓦尔喷管计算模型的改进及其整机仿真验证[J]. *航空动力学报*, 2009, 24(11): 2601-2606.
- ZHOU W X, HUANG J Q, ZHOU R ZH. Improvement of Laval nozzle calculation model and simulative verification in aero-engine performance calculation [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(11): 2601-2606. (in Chinese)
- [17] CHAUDHURY K N, SAGE D, UNSER M. Fast O (1) bilateral filtering using trigonometric range kernels [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(12): 3376-3382.
- [18] 佟雨兵, 张其善, 祁云平. 基于PSNR与SSIM联合的图像质量评价模型[J]. *中国图象图形学报*, 2006, 11(12): 1758-1763.
- TONG Y B, ZHANG Q SH, QI Y P. Image quality assessing by combining PSNR with SSIM [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2006, 11 (12): 1758-1763. (in Chinese)
- [19] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, *et al.* Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.
- [20] MÜLLER S H R, BÖHM B, GLEIBNER M, *et al.* Analysis of the temporal flame kernel development in an optically accessible IC engine using high-speed OH-PLIF [J]. *Applied Physics B*, 2010, 100(3): 447-452.
- [21] ZHANG R, CHEN L, WEI H Q, *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.
- [22] 许叶彤, 耿信哲, 赵伟强, 等. 基于CNN-Transformer混合结构的遥感影像变化检测模型[J]. *计算机与现代化*, 2023(7): 79-85.
- XU Y T, GENG X ZH, ZHAO W Q, *et al.* A remote sensing image change detection model based on CNN-transformer hybrid structure[J]. *Computer and Modernization*, 2023(7): 79-85. (in Chinese)
- [23] SUTTON J A, DRISCOLL J F. Imaging of local flame extinction due to the interaction of scalar dissipation layers and the stoichiometric contour in turbulent non-premixed flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(1): 1487-1495.

作者简介:



高 龙(1993—),男,山东龙口人,博士研究生,2016年、2018年于哈尔滨工业大学分别获得学士和硕士学位,主要研究方向为高频PLIF燃烧流场诊断技术及数据处理分析。E-mail: gao858236211@163.com

通讯作者:



彭江波(1981—),男,重庆人,博士,研究员,2004年于哈尔滨理工大学获得学士学位,2006年、2012年于哈尔滨工业大学分别获得硕士和博士学位,主要研究领域为激光光谱燃烧流场诊断技术。E-mail: pengjiangbo@hit.edu.cn