

【航空科学与工程研究】

基于 PLIF 的甲烷/空气富燃层流 半预混半扩散火焰试验研究

苗 磊, 马洪安, 付淑青, 宫俊波

(沈阳航空航天大学 航空发动机学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘 要:为获得高当量比甲烷预混燃烧特性,利用平面激光诱导荧光技术研究本生灯甲烷/空气富燃层流预混火焰中氢氧自由基(OH)和一氧化氮(NO)的分布。结果表明:OH 主要分布在火焰扩散层锋面两侧,火焰顶端基本无 OH 分布;当量比 $\varphi < 1.31$ 和 $\varphi \geq 1.31$ 时本生灯富燃预混火焰外部扩散层分别以 0.5 s 和 0.4 s 为一个周期不断收缩膨胀;层流燃烧速度随当量比增加而减少,当 $\varphi = 1.10$ 时为最大燃烧速度 33 cm/s,当 $\varphi > 1.50$ 时,层流燃烧速度基本保持不变,维持在 15 cm/s 左右;在火焰顶端存在强烈的负拉伸作用,负拉伸率的绝对值随着当量比的增加先减小后增加,其中火焰拉伸率是影响层流燃烧速度测量误差的主要因素;对立体火焰结构研究发现, $\varphi = 1.54$ 时在火焰扩散层内部发生局部熄火现象;对火焰中 NO 的分布研究发现,NO 主要分布在火焰内锥外部的扩散层,工程应用时应尽量减少火焰扩散燃烧区域的分布,以降低 NO 的排放。

关键词:平面激光诱导荧光;本生灯;氢氧自由基;一氧化氮

中图分类号: TK 16 **文献标识码:** A **DOI:**10.13486/j.cnki.1673-2618.2023.04.001

随着全球社会经济的快速发展,航空事业带来大量的污染问题,诸如 CO_2 、 NO_x 、CO、HC 和 SO_x 等污染物排放愈发严重^[1-2]。预混燃烧技术可大大降低污染物排放,因而被广泛应用^[3-6]。因此,深入研究预混火焰反应区结构,可为燃烧室设计与优化提供帮助与指导。

平面激光诱导荧光(PLIF)技术具有非扰动、实时原位测量、组分选择性强、灵敏度好、时空分辨率高等优点,在燃烧场分析与研究方面得到广泛应用。该技术能够通过测量燃烧重要中间产物,诸如 OH、CH 和 CH_2O 等进行荧光成像,来获取瞬时燃料混合与燃烧特征等重要信息^[7-10]。冯耀勋等^[11]利用 OH-PLIF 技术在狭缝火焰试验台上测量了不同壁面条件下壁面附近处火焰中 OH 浓度分布,结果表明,熄火间距主要由壁面附近 OH 浓度的下降趋势决定。Tanahashi 等^[12]建立了 CH-PLIF、OH-PLIF 和立体粒子图像测速(PIV)同步测量系统,研究了湍流预混火焰的局部火焰结构,结果表明,火焰前沿的最小曲率半径与 Kolmogorov 尺度一致。Gounder 等^[13]通过 3 kHz 的 PIV 和 OH-PLIF 同步测量系统,对燃气轮机燃烧室中的湍流-化学相互作用的影响进行了研究,结果表明,火焰形状和长度随着内涡流级燃料百分比变

收稿日期:2023-03-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51676132)

第一作者简介:苗 磊(1999—),男,辽宁铁岭人,硕士研究生,主要从事航空发动机燃烧室头部油气分布研究。

E-mail:2733416045@qq.com

通信作者简介:马洪安(1980—),男,河南内黄人,副教授,博士,主要从事航空发动机燃烧过程与排放物生成的实验与数值研究。E-mail:mahongan_sy@163.com

化而发生变化。Sun 等^[14]通过 CH₂O-PLIF、OH-PLIF 和高速纹影成像技术,获得了声激发湍流预混火焰的瞬时火焰结构和火焰曲率。Jin 等^[15]采用 OH-PLIF 技术对 CO/H₂/空气预混物进行层流本生灯火焰试验,深入研究了优先扩散和火焰曲率对火焰结构和层流火焰燃烧速度的影响,结果表明,随着燃料混合物中 H₂ 占比的增加,优先扩散和火焰曲率的影响均有所增加。因 PLIF 技术的局限性,只能获得测量平面上的信息,不能获得测量面外的信息,掩盖了火焰在空间上的变化。为此,李红等^[16]利用 PLIF 技术同步测量了甲烷/空气预混湍流火焰中的 OH 和甲醛(CH₂O)荧光信号,并通过二维火焰图像及火焰参数建立了三维火焰模型;Zhang 等^[17]通过在本生灯甲烷/空气燃烧器上的二维 PLIF 测量结果,估算了三维火焰面密度和燃料消耗率。目前单独 OH 所反映出的火焰燃烧化学反应规律已经不能完全满足实际需要。一氧化氮(NO)作为一种重要的燃烧污染物,其生成机制研究对减少环境污染具有重要意义。通过对现有单一组分 OH-PLIF 测量装置进行功能扩展研发,在不增加激光器和探测器的情况下,应用平面激光诱导荧光技术测量火焰中 NH 和 NO 的分布,Rodofla 等^[18]提出了一种在本生灯火焰测量中确定层流火焰速度的新方法。

目前的研究大多基于贫燃预混燃烧,而对于富燃预混燃烧鲜有研究。作为世界上公认能大幅度降低燃烧室污染排放的富油燃烧/快速淬/贫油燃烧(Rich-Burn/Quick-Quench/Lean-Burn, RQL)燃烧技术,其关键点之一在富燃区即 R 区(化学当量比为 1.2~1.8)的优化^[19-20]。且目前大多的燃烧室内部都不是单纯的预混燃烧,都是预混和扩散混合的燃烧状态。因此,有必要对富燃下预混火焰的内反应区(预混燃烧)与外反应区(扩散燃烧)的结构特征与周期等燃烧特性进行深入分析和研究。

本文以本生灯火焰为研究对象,首先基于 OH-PLIF 技术,系统研究了本生灯富燃预混火焰瞬态和时均图像,分析其燃烧化学反应规律;然后通过平移本生灯位置,获得本生灯火焰内外反应区不同截面的 OH 分布信息,进而推导出本生灯火焰在空间上的变化情况;最后基于 NO-PLIF 技术获得本生灯火焰中心截面上 NO 的分布情况,研究 NO 的生成规律。

1 试验方法

1.1 试验系统

预混火焰 OH-PLIF 激光探测试验系统主要由四部分组成,分别为激光器系统、光路系统、本生灯燃烧器系统和控制及信号采集系统,如图 1 所示。

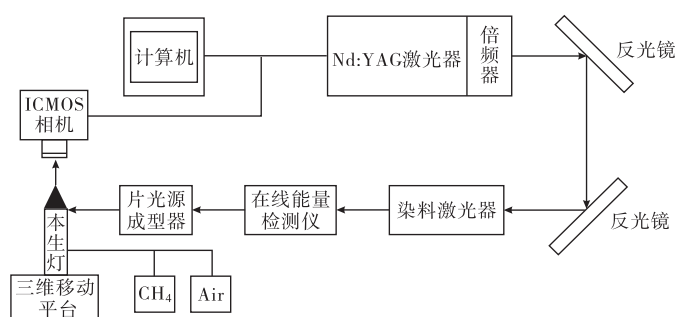


图 1 OH-PLIF 激光探测试验系统

激光器系统包括 Nd:YAG 泵浦激光器(Q-smart850,其最大能量可达 420 mJ)和染料激光器(Cobra-Stretch,Sirah Lasertechnik)及倍频器。由泵浦源产生 1024 nm 的激光,经倍频和两次反射后,通过染料激光器调谐出特定波长和能量密度的激光。其中 OH 的荧光激发波长为 283~284 nm,采用 Rhodamine 6G 染料得到;NO 的激发波长为 226 nm 左右,采用 Coumarin 2 染料得到。光路系统包括反光镜和片光源成型器,其作用是引导光路并将一维点状激光整形为二维平面激光。本生灯燃烧器系统由本生灯、三维位移工作台、甲烷和空气气瓶及高精度气体流量计等组成。本生灯固定在可调位移工作台上,通过调节旋

钮来实现本生灯位置的精确移动。控制及信号采集系统包括计算机、像增强型 CMOS 相机、OH 滤光片 (290~320 nm) 以及 NO 滤光片 (230~260 nm)。

1.2 数据处理

为保证数据采集的正确性,所有采集数据均进行背景校正。时均化处理时使用每个特定工况下 10 s 中 100 张图像的平均值。OH-PLIF 图片通过 Matlab 去除掉 OH 荧光强度最低的像素点(黑色背景)进行提取边界处理,使火焰结构更加清晰。

1.3 试验工况

高当量比预混燃烧试验工况如表 1 所示。值得注意的是,当调节甲烷流量,使混合气当量比接近于 1 或小于 1 时,因雷诺数小于 250,火焰传播速度大于来流速度,火焰面回溯至本生灯底部,即出现回火现象。因此,在贫预混燃烧组织中,火焰筒头部结构、旋流器和挡(隔)板等设计过程中,应避免低速、涡流等结构,保证足够大的预混气流速度,防止出现回火等危险状态。

表 1 不同当量比下试验工况

甲烷流量/(L·min ⁻¹)	空气流量/(L·min ⁻¹)	ϕ	甲烷流量/(L·min ⁻¹)	空气流量/(L·min ⁻¹)	ϕ
0.45	4.00	1.07	0.60	4.00	1.43
0.50	4.00	1.19	0.65	4.00	1.54
0.55	4.00	1.31	0.70	4.00	1.67

1.4 OH-PLIF 激发波长选取

为了确定 OH 的最佳激发波长,通常需找到对温度不敏感的 Q1(8) 激发线,由 LIFBASE 结果可知 Q1(8) 线波长为 283.636 nm^[21]。本试验在 283~284 nm 以 0.005 nm 的步长进行扫谱,结果如图 2 所示。发现图 2 所示的扫谱结果,在 283.635 nm 波长附近存在 OH 荧光强度峰值,输入波长为 283.636 nm 时可获得清晰的 OH-PLIF 图像,确定试验设备与 LIFBASE 很好地匹配。因此选取 283.636 nm 作为本次试验测量 OH 时的激发波长。同时为了更大面积更准确地获取 OH 荧光信号,将单脉冲激光能量密度调至较高能量状态,约 18 mJ 左右。相比于 OH-PLIF、NO-PLIF 测量难度较大,测量得到的 NO 易受高温影响,导致测量结果信噪比较低。本试验在 226~227 nm 以 0.005 nm 的步长进行扫谱,扫谱结果如图 3 所示。激发波长为 226.035 nm 时探测到的 NO 荧光信号相对最强。激光能量密度调至 4 mJ 左右,此时 Nd:YAG 泵浦激光器已接近满功率输出。

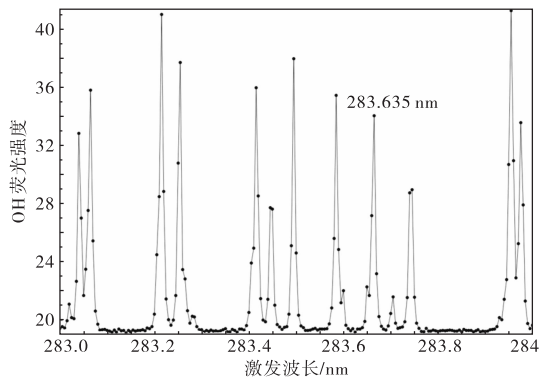


图 2 OH-PLIF 扫谱结果

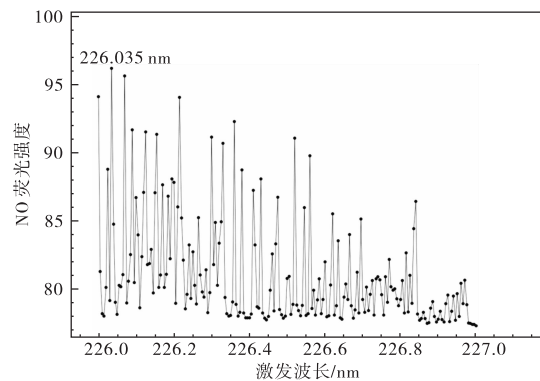


图 3 NO-PLIF 扫谱结果

2 试验结果与分析

2.1 瞬态 OH 分布分析

OH 存在于燃料大面积燃烧的产物区,可很好表征火焰反应区的结构特征。图 4 为 $\phi=1.07$ 时 1 s 内

火焰的瞬态 OH-PLIF 图像,其中图 4(a)~(j)分别代表开始拍摄第 0.1 s、0.2 s、0.3 s、0.4 s、0.5 s、0.6 s、0.7 s、0.8 s、0.9 s、1.0 s 时的瞬态图像。根据 1 s 内测量结果分析可知, $\varphi=1.07$ 时火焰结构每 0.5 s 为一个变化周期。

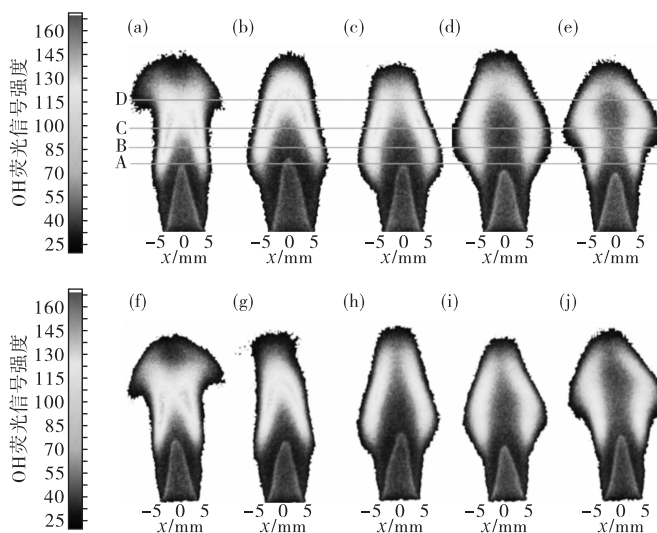


图 4 OH-PLIF 瞬态分布图

由图 4 可以看出,富燃状态下的火焰结构为半预混半扩散特征,即内层为预混火焰存在预混火焰锥,燃烧中间产物及未燃燃料通过内锥火焰面后,与外界的氧气发生化学反应导致外层为扩散火焰状态。外部扩散层火焰锋面由于化学反应的进行内部氧气含量减少,使得混合气被压缩,从而导致氧化剂与燃料的密度更大反应更剧烈。压缩到一定程度氧化剂基本被完全消耗,此时温度较高导致混合气四周膨胀进而获得足够的氧化剂。因此火焰锋面不断收缩膨胀,且收缩时 OH 浓度较高,火焰内锥(即预热区)受扩散层收缩膨胀影响,有轻微波动。

综合 10 s 内所有当量比下 OH-PLIF 瞬态测量结果得到, $\varphi < 1.31$ 时火焰结构近似为 0.5 s 一个变化周期,变化规律与 $\varphi=1.07$ 时基本一致; $\varphi \geq 1.31$ 时火焰结构近似为 0.4 s 一个变化周期,不存在图 4(c) 所示情况,其余变化规律基本一致。分析认为,当 $\varphi \geq 1.31$ 时,在 $T+0.2$ s 之前引入空气量足够多,燃烧化学反应较迅速,使得倒“V”型火焰迅速上升展开。根据其火焰结构形态,本文将 $\varphi \geq 1.31$ 时 0.3 s 和 0.4 s 时的结果与 $\varphi < 1.31$ 时 0.4 s 和 0.5 s 时的结果进行对比分析。

图 4 中所示的四条线分别表征不同火焰结构最宽位置所对应的高度,自上往下数 D、C、B 依次代表图 4(a)、图 4(e)、图 4(d)中火焰最宽位置所示高度,A 代表图 4(b)和图 4(c)中火焰最宽位置所示高度。其中线 A 与线 B、C、D 之间的距离分别约为 6.5 mm、9.0 mm、13.5 mm。在一个变化周期内,不同当量比下四条线的高度基本一致,其火焰最大宽度随时间的变化规律如图 5 所示。

由图 5 看出,所有当量比下火焰最大宽度随时间的变化规律基本一致,即最大宽度随时间先减小后增加再减小。这与火焰的收缩扩散运动有关,0.1 s 时火焰收缩到极限,中间燃烧最剧烈,上一个周期所产生的大量 OH 由于升力积聚在火焰顶部,因此此时火焰在顶部最宽。0.2 s 时火焰开始膨胀,此时由于氧化剂的不足,燃烧偏弱,OH 在预混锥附近刚开始产生,从而导致火焰最宽位置处于火焰预混锥尖高度处,且宽度最小。0.2~0.4 s 时由

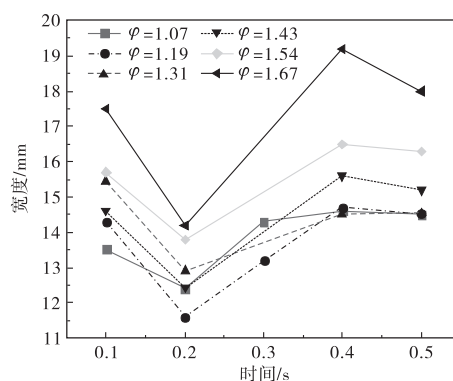


图 5 火焰最大宽度随时间变化规律

于空气量的卷入,火焰进一步膨胀,燃烧化学反应加剧,最宽位置逐步向上移动。在 0.4 s 时最大宽度达到顶峰,由于此时内部存储的空气量最大,且先前燃烧反应产生的 OH 基本积聚在此。0.4~0.5 s 时因火焰中间位置开始发生燃烧化学反应,内部空气氧化剂含量减少,使得最宽位置随着 OH 进一步向上移动。

2.2 OH 时均分布特征

图 6 为不同当量比下本生灯火焰的 OH-PLIF 时均图像,图 6(a)~(f)分别代表 $\varphi=1.07\sim 1.67$ 时的图像。

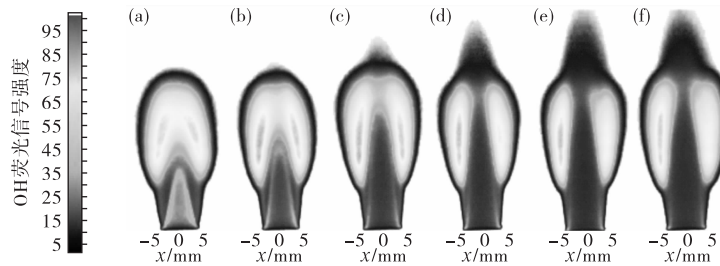


图 6 不同当量比下本生灯火焰的 OH-PLIF 时均图

从图 6 看出,不同当量比下 OH 的分布存在很大差异。 $\varphi=1.07$ 时,OH 主要分布在两个区域,外扩散燃烧区和火焰内锥边缘。分析认为,因为预混气气流向上流动和火焰卷吸效应导致燃料在预混锥附近与氧气发生剧烈的燃烧化学反应,产生大量 OH。火焰内锥为预混燃料初步反应区域,火焰内锥内部氧气含量相对燃料浓度较少,燃烧化学反应难以进行,导致 OH 主要集中在内锥边缘。随着当量比的增加,所需空气量增加,甲烷主要倾向于发生裂解反应,而氧化反应逐步减少,火焰内锥 OH 明显减少,OH 逐渐向外部扩散,因此内锥火焰尖部远离本生灯出口,内锥升高。高当量比时,燃料完全燃烧必须由火焰卷吸大量外部的氧化剂参与反应,故富燃状态下主要的燃烧反应发生在外扩散燃烧区域。

针对图 6 中的火焰结构,可以认为火焰内锥处的当量比为混合当量比,火焰最外围当量比为稀燃极限 0.5,多余的燃料需与外部空气发生反应。假定火焰内锥为标准圆锥体,预混气卷进的空气量高度可认为与预混锥高度基本一致,则预混气卷进的空气体积如表 2 所示。

表 2 不同当量比下卷进的空气量

φ	火焰最宽位置/mm	距离本生灯高度/mm	空气体积/mm ³	φ	火焰最宽位置/mm	距离本生灯高度/mm	空气体积/mm ³
1.07	12.15	13.5	3 805.12	1.43	12.21	34.0	9 660.34
1.19	12.62	15.0	4 485.72	1.54	12.88	42.0	12 953.47
1.31	14.98	22.0	8 624.64	1.67	14.42	44.0	16 220.81

由表 2 看出,预混气卷进的空气体积随着当量比的升高而增加。结合图 5、图 6 发现, $\varphi=1.54$ 和 1.67 时卷进空气量提升较大,导致火焰最大宽度明显提升。

2.3 层流燃烧速度与拉伸率分析

本生燃烧器测量火焰层流燃烧速度基于以下假设:所有的预混气体通过火焰和燃烧器边缘没有热损失,并且整个火焰表面的燃烧速度是恒定的。本文采用火焰面积法计算层流预混火焰的层流燃烧速度,即层流燃烧速度为火焰锋面混合气体总流量与火焰锋面表面积

$$u_0 = 1000 \times \frac{q_v}{\pi r \sqrt{r^2 + h^2}}。$$

式中: u_0 为火焰层流燃烧速度(cm/s), h 为火焰内锥高度(cm), r 为喷口半径(cm), q_v 为混合气体的体积流量(L/s)。

在分析火焰层流燃烧速度时,测量误差主要由气体总流量误差 δ_Q 和内锥高度测量误差 δ_h 造成,其中预混气体总流量误差 δ_Q 由甲烷流量计误差 δ_{CH_4} ($\pm 2\%$)和空气流量计误差 δ_{Air} ($\pm 2\%$)决定,内锥高度测量误差 δ_h 主要由相机分辨率和图像处理方法造成的,通过对火焰内锥顶端边界最大梯度点的相邻点进行计算,得出误差约为 5.5%。根据公式 $\delta_Q = \sqrt{\delta_{CH_4}^2 + \delta_{Air}^2 + \delta_h^2}$ 可求得层流燃烧速度的误差约为 6.2%。

图 7 给出了当量比与层流燃烧速度的关系。当 $\varphi > 1.00$ 时,随着当量比的增加,层流燃烧速度逐渐降低。 $\varphi > 1.43$ 后变化较小,由于扩散效应较大,火焰内锥高度升高幅度较小,火焰结构随 φ 变化较小。且在 $\varphi = 1.67$ 时已基本到达甲烷爆炸极限的上限,以往相关研究鲜有涉及如此大的当量比条件,可见通过本生灯测量层流燃烧速度可安全地获得爆炸极限结果。本文试验结果与文献[22-24]的对比结果如图 7 所示。其中文献[22-23]采用了传统的定容弹法测量火焰的层流燃烧速度,文献[24]采用了本生灯纹影法测量火焰的层流燃烧速度,在相同的常温常压工况下,测量结果变化趋势基本一致,表明此测量层流燃烧速度方法有一定的实用价值。分析采用本生灯法测量层流燃烧速度主要的影响因素可能由火焰内锥尖端所受到的拉伸率造成,导致与其他方法测量得到的结果存在一定偏差。

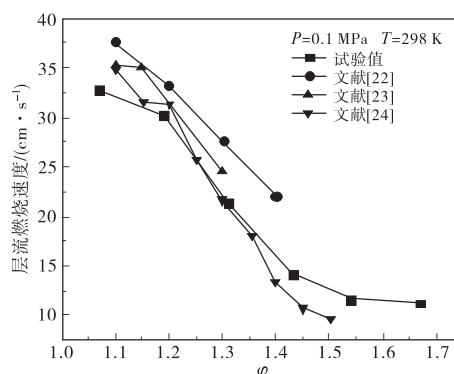


图 7 当量比与层流燃烧速度关系

拉伸率是与火焰局部燃烧特性密切相关的重要基础参数,本生灯火焰面可认为是一个稳定的火焰面。火焰拉伸率可由公式 $k = -n \cdot \nabla \times (v_s \times n)$ 进行计算。式中: k 为直管本生火焰的火焰拉伸率, n 为火焰面上的法向量, ∇ 为火焰前锋面梯度, v_s 为未燃混合气流速(m/s)。由文献[25]的研究可知,火焰拉伸率 k 由表征流场不均匀性的 k_s 和表征火焰前锋面曲率影响的 k_c 组成,其中 k_c 主导着拉伸率 k 在锋面顶端附近的变化规律,将本生灯的火焰前锋面用多项式 $y = f(x)$ 表示,则在顶端附近的火焰拉伸率

$$k \approx k_c = \frac{\frac{d^2 f(x)}{dx^2}}{[\{\frac{df(x)}{dx}\}^2 + 1]^{3/2}} \frac{v - u \frac{df(x)}{dx}}{[\{\frac{df(x)}{dx}\}^2 + 1]^{1/2}} \quad (1)$$

式中: $(d^2 f(x)/dx^2)/[\{df(x)/dx\}^2 + 1]^{3/2}$ 为火焰前锋面上某点的曲率,即为 $1/R_f$,其中 R_f 是指内锥的特定位置的曲率半径(cm)。假定火焰内锥为一个均匀的圆锥体,并结合文献[13]推导出的火焰拉伸率 k 的计算过程,带入公式(1),最终可以推导出 $k = \frac{u(\sin \alpha - \tan \alpha)}{[1 + (\tan \alpha)^2]^{1/2}} \cdot \frac{3}{x}$ 。式中: α 为火焰锥的半角, x 为该位置到管子中心的距离(cm), u 为本生灯出口处每个点的流速(cm/s),其本生灯出口处速度的空间分布为

$$u = u_0 \left(\frac{a^2 - x^2}{a^2} \right) \quad (2)$$

式中: u_0 为管中心的入口流速(cm/s), a 为管半径(cm),其中 $u_0 = 1000 \times 2Q/\pi a^2$, Q 为混合气体的体积流量(L/s)。

表 3 展示了不同当量比下火焰锥的半角大小。

表 3 不同当量比下火焰锥半角

φ	火焰锥半角 $\alpha/(\circ)$	φ	火焰锥半角 $\alpha/(\circ)$	φ	火焰锥半角 $\alpha/(\circ)$
1.07	13.11	1.31	10.37	1.43	11.48
1.19	10.59	1.43	11.48	1.67	13.46

结合图 6 可以发现随着火焰扩散效应的增加,火焰锥角先收缩,并且收缩幅度逐渐缩小,随着扩散效应进一步增强,火焰锥角在顶端发生膨胀,膨胀速率逐渐增加。

图 8 为公式(2)计算得到不同当量比与拉伸率之间的关系。由图 8 可以看出,在火焰内锥顶端存在强烈的负拉伸率,火焰负拉伸率绝对值大小与火焰锥角的大小存在很强的正相关,可见火焰拉伸率主要受火焰锥角的影响,即当量比为 1.31 时负拉伸率绝对值最小。结合图 7 可以解释,由于 $\varphi=1.31$ 时负拉伸率绝对值最小,拉伸率的影响最小,导致试验结果与其他方法所得结果最接近; $\varphi<1.31$ 时拉伸率使得层流燃烧速度偏小, $\varphi=1.07$ 时影响最大; $\varphi>1.31$ 时由于扩散效应和拉伸率的影响,导致试验结果偏大, $\varphi=1.67$ 时影响最大。因此对于本生灯富燃燃烧,高拉伸速率降低了火焰顶端的 OH 分布,从而使火焰尖端更接近熄火状态,对层流燃烧速度的测量有很大影响。

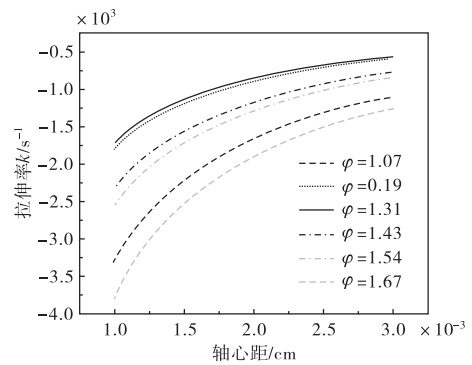


图 8 火焰拉伸率随轴心距变化

2.4 本生灯立体火焰结构分析

在工况不变的情况下,预混层流火焰燃烧状态较稳定,即可假定在较短时间内的本生灯火焰为同一火焰。试验时将本生灯固定在三维移动平台上,首先调整激光片光在火焰中心截面,然后逐步调节本生灯位置,使其远离 ICMOS,每次移动 1.5 mm(0~9.0 mm),得到不同截面上的本生灯切片 OH-PLIF 图像。

图 9 给出了 $\varphi=1.31$ 时不同位置处的 OH 分布,图 9(a)~(g) 分别代表本生灯移动 0 mm、1.5 mm、3.0 mm、4.5 mm、6.0 mm、7.5 mm、9.0 mm 时所拍摄的时均图像。

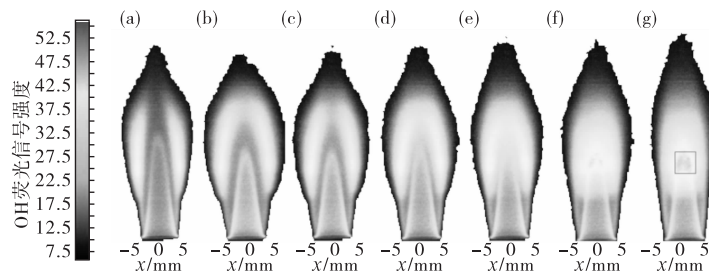


图 9 $\varphi=1.31$ 时本生灯火焰不同截面处 OH 分布图

由图 9 可以看出距离中截面 1.5 mm 时,火焰内锥高度明显降低,4.5 mm 后的火焰内锥高度基本保持不变,这进一步证明了火焰曲率导致火焰内锥顶端 OH 分布较低。移动本生灯位置导致用以激发火焰内锥顶端的激光能量较低,使得相机更难以捕捉图像中火焰内锥顶端稀少的 OH,从而图像中火焰内锥的结构发生变化。因此 1.5 mm 时的火焰内锥基本呈现为在中间位置处时火焰腰部的 OH 分布。

火焰外焰上 OH 最强的位置逐渐向内靠拢,直至两侧融合到中间位置。这与火焰内锥宽度和管口半径有关,表明 4.5 mm 后激光片光基本用于激发火焰的扩散层。取距离中截面 9.0 mm 的火焰 OH 信号最强位置,即 $\varphi=1.31$ 时图 9(g) 方框处,选中一块 2.5 mm×2.5 mm 的区域,对此区域内像素点的 OH 荧光强度值进行平均,获得其 OH 信号强度的平均值。固定此高度,分别对 $\varphi=1.54$ 与 $\varphi=1.31$ 时不同截面上的本生灯火焰片进行测量,图 10 为该区域内平均信号强度随截面位置的变化关系。

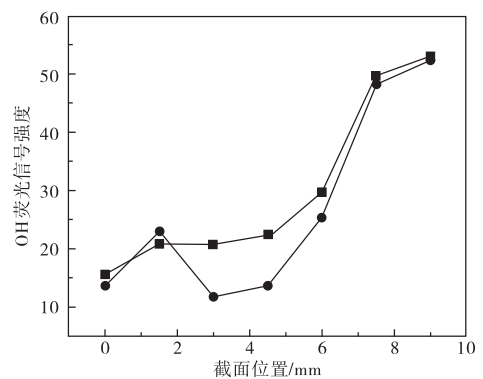


图 10 信号强度与位置的变化关系

从图 10 可以看出,当量比不同的荧光强度变化基本一致。1.5 mm 时强度增加是由于此时捕获火焰内锥边缘上的荧光信号更多。3.0~4.5 mm 时荧光强度较低,由于此处为内锥与外焰的夹层,OH 信号

强度较低,且 $\varphi=1.54$ 时强度减小幅度较大。OH 在此区域处相对浓度迅速下降,而其他位置处基本不变的结果,可认为在此处发生了局部熄火,称 $\varphi=1.54$ 为局部熄火当量比。在距离 4.5~7.5 mm 时 OH 浓度明显提升,7.5~9.0 mm 时变化幅度较小,这是因为 7.5 mm 时已经到达扩散火焰外焰边缘,9.0 mm 时捕捉了一些火焰外的 OH。

2.5 预混火焰 NO 分布

$\varphi=1.07$ 时的本生灯火焰的 NO-PLIF 时均化及瞬态测量结果如图 11 所示。图 11(B)瞬时图(a)~(e)分别表示在拍摄到的第 0.1 s、0.2 s、0.3 s、0.4 s、0.5 s 时的瞬时 NO 分布图像。

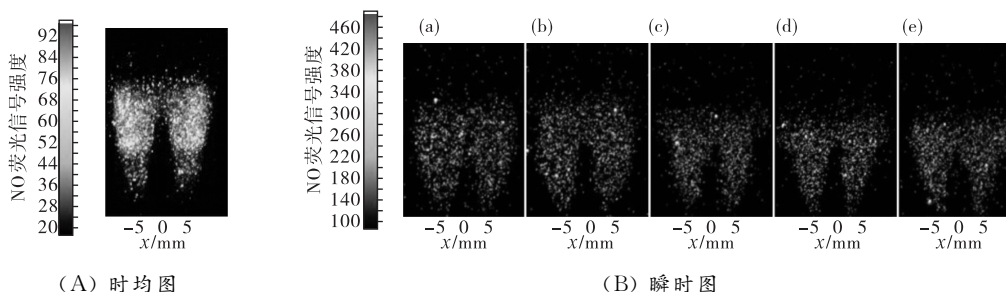


图 11 0.5 s 内 NO-PLIF 时均及瞬态分布

由图 11(A)时均图可以看出,火焰顶部基本无 NO 分布,这是由于顶部主要处于中间产物后燃及熄火阶段,这与 OH 分布情况类似。NO 主要分布在火焰内锥两侧。结合图 6 可知,NO 主要分布在扩散火焰锋面处,预混锥内基本没有 NO 分布。由于 NO 一般存在于高温区,所以可以通过 NO 分布分析出本生灯火焰的温度分布情况,即火焰内锥处温度较低,扩散火焰锋面处温度较高反应较剧烈。在工程应用时应尽可能减小扩散火焰区的分布,从而减少 NO 的产生。从图 11(B)瞬时图(a)~(e)可以看出,NO 与 OH 存在一样的外部扩散层收缩膨胀现象,但不是很明显,表明 NO 基本产生在预混锥附近,燃烧化学反应基本在这个位置进行,且 NO 更易发散到火焰外部。

3 结论

(1)基于 OH-PLIF 的测量结果表明,OH 主要分布在火焰扩散层锋面两侧,火焰顶端基本无 OH 分布。对瞬态火焰结构的研究发现,当 $\varphi < 1.31$ 和 $\varphi \geq 1.31$ 时,火焰结构多分别为 0.5 s 和 0.4 s 一个变化周期。火焰外部扩散层最大宽度随时间先减小后增加再减小。随着当量比的增加,火焰内锥逐渐升高,火焰内部 OH 逐渐减少,逐步向扩散火焰结构发展。层流燃烧速度随着当量比的增加逐渐降低,当 $\varphi > 1.5$ 以后,层流火焰传播速度基本保持不变,约 11 cm/s。火焰内锥顶端存在强烈的负拉伸作用,对层流燃烧速度的准确测量有很大影响。其中负拉伸绝对值的最大值随着当量比的增加先减小后增加, $\varphi=1.31$ 左右时拉伸率的影响最小。(2)不同当量比下火焰在空间上的变化趋势大致相同,火焰内锥边缘和扩散层边缘的 OH 的浓度较大。并当 $\varphi=1.54$ 时在火焰扩散层内部发生局部熄火现象。(3)基于 NO-PLIF 的测量结果表明 NO 基本分布在火焰的外部扩散层。拓展了传统通过单一 OH 研究本生灯火焰结构的研究方法,该方法未来可应用于各种火焰结构的分析当中,并且为 NO 产生机理和燃烧反应动力学模型的研究提供帮助。

参考文献:

[1] LEE D S, PITARI G, GREWE V, et al. Transport impacts on atmosphere and climate; aviation[J]. Atmospheric environment, 2010, 44(37):4678-4734.
 [2] 张弛,林宇震,徐华胜,等.民用航空发动机低排放燃烧室技术发展现状及水平[J].航空学报,2014,

35(2):332-350.

- [3] 陈菲儿. 航空煤油及其关键单体组分的贫油预混燃烧稳定性研究[D]. 上海:上海交通大学,2020.
- [4] 要晋龙,徐青,鄢平华,等. 旋流驻涡燃烧室预混燃烧流动特性数值分析[J]. 航空兵器,2020,27(5):63-68.
- [5] TANAKA K,NISHIDA K,AKIZUKI W. Gas turbine combustor technology contributing to environmental conservation[J]. Mitsubishi heavy industries technical review,2009,46(2):6-12.
- [6] DHANUKA S K,TEMME J E,DRISCOLL J. Unsteady aspects of lean premixed prevaporized gas turbine combustors:flame interactions[J]. Journal of propulsion and power,2011,27(3):631-641.
- [7] MEIER W,BOXX I,STHR M,et al. Laser-based investigations in gas turbine model combustors [J]. Experiments in fluids,2010,49:865-882.
- [8] SJHOLM J,ROSELL J,Li B,et al. Simultaneous visualization of OH,CH,CH₂O and toluene PLIF in a methane jet flame with varying degrees of turbulence[J]. Proceedings of the combustion institute,2013,34(1):1475-1482.
- [9] GABET K N,PATTON R A,JIANG N,et al. High-speed CH₂O PLIF imaging in turbulent flames using a pulse burst laser system[J]. Applied physics B:lasers and optics,2012,106(3):569-575.
- [10] 朱家健,万明昱,吴戈,等. 激光诱导荧光技术燃烧诊断的研究进展[J]. 中国激光,2021,48(4):0401005.
- [11] 冯耀勋,郑晓峰. 基于 PLIF 技术测试壁面附近处火焰中 OH 活性分布的研究[J]. 热能动力工程,2017,32(11):19-25.
- [12] TANAHASHI M,MURAKAMI S,CHOI G M,et al. Simultaneous CH-OH PLIF and stereoscopic PIV measurements of turbulent premixed flames[J]. Proceedings of the combustion institute,2005,30(1):1665-1672.
- [13] GOUNDER J D,BOXX I,KUTNE P,et al. Simultaneous PIV/OH-PLIF measurement in a gas turbine model combustor at 5 bar and 3 kHz acquisition rate[C]//DLR-interner Workshop DIV10-Diagnostik in Verbrennung,2014.
- [14] SUN Y,SUN M,ZHU J,et al. PLIF measurements of instantaneous flame structures and curvature of an acoustically excited turbulent premixed flame[J]. Aerospace science and technology,2020,104:105950.
- [15] JIN F,TANG C,WU J,et al. Effect of preferential diffusion and flame stretch on flame structure and laminar burning velocity of syngas Bunsen flame using OH-PLIF[J]. International journal of hydrogen energy,2014,39(23):12187-12193.
- [16] 李红,李博,高强,等. OH/CH₂O 基于 PLIF 测量得到的火焰面密度比较研究[J]. 燃烧科学与技术,2018,24(6):523-527.
- [17] ZHANG M,WANG J,JIN W,et al. Estimation of 3D flame surface density and global fuel consumption rate from 2D PLIF images of turbulent premixed flame[J]. Combustion and flame,2015,162(5):2087-2097.
- [18] RODOLFO C R,ZHONG S H,XU L L,et al. Structure and laminar flame speed of an ammonia/methane/air premixed flame under varying pressure and equivalence ratio[J]. Energy and fuels,2021,35(9):7179-7192.
- [19] 陈坚,李建中,翟维阔,等. 富油燃烧/快速淬熄/贫油燃烧(RQL)燃烧室燃烧中间组分及火焰结构特征研究[J]. 推进技术,2018,39(11):2539-2547.

- [20] CHEN J, LI J, YUAN L, et al. Flow and flame characteristics of a RP-3 fuelled high temperature rise combustor based on RQL[J]. *Fuel*, 2019, 235: 1159-1171.
- [21] LUQUE J, CROSLLEY D R. LIFBASE: database and spectral simulation program (version 1. 5) [R]. SRI International Report MP 99-009, 1999.
- [22] LIU Y, WANG J, GU W, et al. Effects of CH₄ mixing on the laminar burning velocity and markstein length of RP-3/air premixed flame[J]. *Fuel*, 2021, 289: 119761.
- [23] LOWRY W, VRIES J D, KREJCI M, et al. Laminar flame speed measurements and modeling of pure alkanes and alkane blends at elevated pressures[J]. *Journal of engineering for gas turbines and power*, 2011, 133(9): 091501.
- [24] 相龙凯, 牙宇晨, 聂晓康, 等. 本生灯法结合纹影技术测量甲烷/空气层流燃烧速度及流场分析[J]. *实验流体力学*, 2020, 34(1): 25-32.
- [25] 王金华, 俞森彬, 卫之龙, 等. 合成气预混层流本生灯火焰顶端开口机理研究[J]. *工程热物理学报*, 2015, 36(8): 1841-1845.

Experimental Study on CH₄/Air Rich Laminar Premixed Flame Based on PLIF

MIAO Lei, MA Hongan, FU Shuqing, GONG Junbo

(School of Aeroengine, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: In order to obtain high equivalent ratio CH₄ premixed combustion characteristics, the distribution of OH radical and NO in the premixed flame of CH₄/air rich laminar flow of Bunsen burner are studied by using planar laser induced fluorescence technique. The results show that OH radical is mainly distributed on both sides of the flame diffusion layer front, and there is basically no OH radical distribution at the top of the flame. The external diffusion layer of the Bunsen burner rich premixed flame shrinks and expands with a cycle of 0.5 s and 0.4 s respectively when the equivalent ratio $\varphi < 1.31$ and $\varphi \geq 1.31$; laminar burning velocity decreases with the increase of the equivalent ratio, when $\varphi = 1.1$ for the maximum burning speed of 33 cm/s, when $\varphi > 1.5$, and laminar burning velocity basically remains the same, maintaining at about 15 cm/s. There is a strong negative stretching effect at the top of the flame, and the absolute value of the negative stretching rate decreases first and then increases with the increase of the equivalent ratio, and flame stretch ratio is the main factor affecting the measurement error of laminar combustion velocity. The study of the three-dimensional flame structure finds that local flameout occurs inside the flame diffusion layer at $\varphi = 1.54$; and the study of the distribution of NO in the flame finds that NO is mainly distributed in the diffusion layer outside the inner cone of the flame. During engineering application, the distribution of flame diffusion and combustion area should be minimized to reduce NO emission.

Keywords: planar laser induced fluorescence; bunsen lamp; OH radical; nitric oxide

(责任编辑:唐立平)