

正丁烷/空气射流火焰热释放率与火焰面厚度的平面激光诱导荧光测试

金川^{1,2}, 蒋利桥^{1*}, 李凡¹, 李星¹, 汪小慧¹

¹中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640;

²中国科学技术大学纳米学院, 江苏 苏州 215123

摘要 基于平面激光诱导荧光(PLIF)技术,在常温常压下对富燃料正丁烷/空气同轴射流预混火焰结构及热释放率(HRR)特性进行了实验研究。通过火焰轴截面的 OH-PLIF 与 CH₂O-PLIF 二维测量以及[OH]×[CH₂O]归一化乘积获得热释放率分布特性,计算得到火焰面厚度值,并与火焰自发光 CH* 自由基表征的热释放率分布与火焰厚度值进行比较。结果表明:火焰中热释放率区域位于 CH₂O 与 OH 自由基峰值之间,基于 PLIF 测量得到的热释放率区间比 CH* 自发光区域稍小;燃料当量比对热释放率峰值位置和分布区域有较大的影响,但低雷诺数下预混气初始流速对热释放率分布的影响较小;根据 OH 自由基与 CH₂O 峰值位置间距得到的火焰面厚度值明显大于利用 CH* 自发光和[OH]×[CH₂O]得到热释放率的半峰全宽。

关键词 测量;平面激光诱导荧光;热释放率;火焰面厚度;射流预混火焰;正丁烷

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1304001

1 引言

激光诱导荧光(LIF)技术是一种基于光谱学的燃烧诊断技术,其原理是待测物质吸收特定波长激光后向上能级跃迁,随后向下能级跃迁过程的自发辐射产生荧光,通过探测荧光信号可获得待测物质组分、浓度与温度分布等信息。LIF 技术具有非接触、多组分测量与高时空分辨率的特点,现已成为燃烧诊断的重要技术之一^[1-4]。平面激光诱导荧光(PLIF)技术能够实现燃烧场关键参量的二维分布成像测量,如 OH-PLIF^[5]和 CH₂O-PLIF^[6]诊断测量能够探测和揭示火焰面结构,在层流、湍流火焰及发动机的实验研究中有着广泛的应用^[7-8]。大量的燃烧场 OH-PLIF 和 CH₂O-PLIF 成像测试结果表明^[9-12],OH 自由基分布在高温氧化反应区及火焰锋面燃烧后区域,而 CH₂O 主要分布在火焰锋面前的低温氧化反应区或预热区,二者具有空间互补的特性。

热释放率(HRR)是燃烧过程中的重要参数之一,放热区的结构可视化(二维或三维成像)和热释放率的精细测量对深刻理解层流和湍流燃烧过程非常重要。热释放率可以通过高温火焰中激发态物种(如 OH* 和 CH*)的化学发光(CL)测量^[13-14],尽管化学发光测量

火焰热释放率方法相对简单,但自发光信号在视线光路累积的测量特性并不能完全真实地反映火焰面中的局部热释放率^[15]。PLIF 技术可用于火焰锋面局部热释放率的高分辨率测量, Najm 等^[16]率先提出火焰中的 HCO 自由基是一种优秀热释放率标识物,并在层流预混火焰中进行 HCO-PLIF 测量,验证了 HCO 自由基分布和热释放率的高度相关性。然而,火焰中 HCO 自由基含量极低,导致荧光信号弱,HCO-PLIF 在高信噪比条件下的测量难度较大。考虑到 HCO 自由基是 OH 自由基和 CH₂O 反应的直接产物(CH₂O+OH→HCO+H₂O),因此,基于 OH-PLIF 和 CH₂O-PLIF 测量得到的[OH]×[CH₂O](其中[·]表示摩尔浓度)信号值可用来表征热释放率这一重要参数^[17]。国内外学者在基于 PLIF 技术燃烧场热释放率测量方面开展了众多工作,如 Röder 等^[18]在甲烷/氢气/空气火焰中测量了由[OH]×[CH₂O]信号值表征的热释放率,并与 OH* 自发光信号值表征的发热率结果进行对比,发现 OH* 自发光与[OH]×[CH₂O]信号值表征的热释放率的关联性不强;Vena 等^[19]对异辛烷 V 型射流火焰开展[OH]×[CH₂O]表征热释放率测量,得出火焰局部当量比梯度变化对热

收稿日期: 2021-09-06; 修回日期: 2021-11-05; 录用日期: 2021-11-22

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0127500)、广东省科技计划项目(2016A040403095)

通信作者: *jianglq@ms.giec.ac.cn

释放率影响大的结论; Lü 等^[20]在甲烷射流火焰中开展了 $[\text{OH}] \times [\text{CH}_2\text{O}]$ 信号值表征热释放率的测量,发现射流喷嘴出口雷诺数对 OH 自由基、 CH_2O 及发热率分布均有较大的影响。

此外,火焰面厚度在火焰传播动力学理论中有着重要的意义^[21],理论分析与计算认为常压下碳氢燃料火焰厚度仅在亚毫米量级。然而基于自发光与激光的火焰面厚度测量没有受到足够的重视,导致火焰面厚度的量化实验测量数据非常缺乏,需要进一步探讨火焰面厚度测量方法与技术。

目前,国内外对基于 PLIF 技术的火焰热释放率测量集中在湍流火焰,且燃料以甲烷等低碳燃料为主。由于正丁烷的氧化反应过程与大分子燃料接近,可以将正丁烷作为研究大分子碳氢燃料燃烧特性的基础燃料^[22],同时,正丁烷具有易液化的特点,被认为是微小能源动力系统的适用燃料^[23],而既往研究主要是针对正丁烷氧化反应机理及点火延迟、燃烧速度等基础特性^[24-25],鲜有基于 PLIF 测试的正丁烷射流火焰结构可视化实验,特别是火焰热释放率与火焰面厚度特性的研究。因此,本文利用 OH 自由基和 CH_2O 双组分 PLIF 成像技术研究 n- $\text{C}_4\text{H}_{10}/\text{Air}$ 同轴射流层流预混火焰的热释放率与火焰面厚度特性,

并与基于 CH^* 化学发光方法的测量结果进行对比,为进一步认识正丁烷的燃烧特性提供量化实验数据。

2 实验方法

2.1 实验系统

实验系统如图 1 所示,分为燃烧装置与光学测量两部分。本实验使用同轴射流燃烧器产生正丁烷/空气层流预混火焰(Bunsen 火焰)。燃烧器件流气体出口的多孔板直径为 60 mm,中心燃料喷嘴的内径为 4.5 mm,为方便激光测试,中心喷嘴出口截面高于伴流出口截面 5 mm。实验中,伴流气体为干空气,中心射流喷嘴里的气体为正丁烷/空气混合气,纯度为 99.9%的正丁烷和空气分别由质量流量计(GE50A, MKS 公司)和质量流量计(F-201CV, Bronkhorst 公司)控制,质量流量计通过湿式气体流量计(SQB-2, Langli Instrument 公司)标定。正丁烷和空气混合气体的当量比 Φ 设置为 1.1~1.5,预混气喷嘴出口平均速度 $U_{\text{mix}} = 1.6 \text{ m/s}, 1.8 \text{ m/s}$ 和 2.0 m/s ,选取代表性实验工况结果数据进行比较分析,如表 1 所示。预混气体的初始温度为 298 K,所有实验均在一个标准大气压下进行。

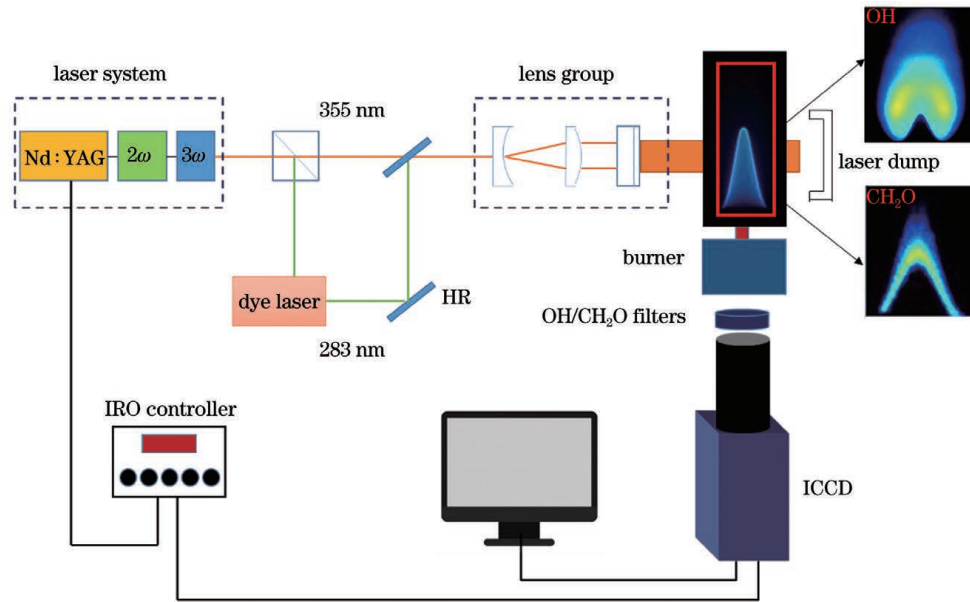


图 1 同轴射流火焰平面激光诱导荧光(OH-PLIF 和 CH_2O -PLIF)测量系统示意图

Fig. 1 Schematic of coflow jet flame measured by planar laser induced fluorescence (OH-PLIF and CH_2O -PLIF) technology

表 1 同轴射流火焰实验工况参数

Table 1 Experimental parameters of coflow jet flames

Case number	n-butane flow rate, $Q_F / (\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	Air flow rate $Q_{\text{Air}} / (\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	Inflow velocity $U_{\text{mix}} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	Equivalence ratio Φ	Reynolds number Re
1	0.053	1.474	1.6	1.1	497
2	0.059	1.658	1.8	1.1	558
3	0.065	1.843	2.0	1.1	620
4	0.077	1.831	2.0	1.3	628
5	0.088	1.820	2.0	1.5	636

2.2 光学诊断方法与数据后处理

PLIF 的激光系统由频率为 10 Hz、脉宽为 10 ns 的 Nd:YAG 激光器 (Quanta-Ray Pro-230, Spectra Physics 公司) 和泵浦染料激光器 (PrecisionScan-G-30, Sirah 公司) 组成。与本课题组的前期实验^[26] 相同, 本实验通过调节激发波长(波长扫描), 记录荧光信号, 并比较荧光信号总强度, 获得产生最大荧光信号的激发波长, 确定 OH-PLIF 激发波长为 283.6 nm 附近的 A-X(1,0) 电子能级跃迁带中的 $Q_1(8)$ 谱线被激发, CH_2O 在 355 nm 附近的 A-X 4_0^1 电子带内被激发。在 OH-PLIF 工作模式下, 首先将 Nd:YAG 激光器产生的 1064 nm 激光三倍频到 355 nm, 并用作染料激光器的泵浦光源; 然后, 使用 355 nm 的激光激发染料池中的染料 (Coumarin 153) 来产生 566 nm 激光, 并射入放大级染料盒; 最后将 566 nm 激光通过染料激光器的频率转换单元 (FCU) 双倍频到 283 nm 附近, 输出能量约为 6.5 mJ/pulse。在 CH_2O -PLIF 工作模式下, 将 Nd:YAG 激光器三倍频输出的 355 nm 激光直接作为激发光即可获得高能量的脉冲输出, 能量大约为 260 mJ/pulse。上述 OH 自由基和 CH_2O 激发波长光源已被广泛应用于碳氢火焰燃烧诊断中^[18-19]。片状光束的整形系统如图 1 的棱镜组合所示, 由一片凹柱镜和两片凸透镜组成, 激光经过光束整形系统后形成激光片, 穿过火焰轴对称截面, 实验中将 OH-PLIF 与 CH_2O -PLIF 测量激光光源调整到同一轴截面位置。

荧光探测系统由 ICCD (Imager Pro X 4M, LaVision 公司) 相机 (1024 pixel × 1024 pixel)、紫外透镜 (Rayfact PF 10545MF-UV, 105 mm, $f/4.5$, Nikon 公司) 和滤波片组成, 分别使用中心波长为 306 nm、带宽为 10 nm 的带通滤波片 (VZ13-0390, LaVision 公司) 探测 OH 自由基荧光信号, 并利用波长为 390 nm 的长通滤波片 (VZ13-0470, LaVision 公司) 检测 CH_2O 荧光信号。实验中产生的荧光信号透过滤波片后被 ICCD 相机采集, 最后传输到计算机进行后续数据图像处理, IRO 控制器触发 ICCD 相机并实现与激光脉冲同步。ICCD 相机拍摄延时为 120 ns, 门宽为 100 ns, 增益为 70, 拍摄频率为 10 Hz, 通过置于待测火焰片光位置的标尺成像, 确定了相机空间分辨率约为 70 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 。每组工况下拍摄 100 幅图像, 对信号强度值进行平均后输出图像, 在一定程度上提高了荧光信号的信噪比。需要指出的是, 所研究的正丁烷/空气同轴射流预混火焰均为层流稳态火焰, 其中间产物的组分浓度和二维结构分布可认为是不随时间变化的, 因此, 实验中 OH-PLIF 与 CH_2O -PLIF 测量是独立实施而非实时瞬态同步进行的。

除了重复多次拍摄 PLIF 信号图像外, 还采集了相同条件下没有激光介入时的背景噪声, 以此消除背景噪声 (包含火焰自发光信号) 对荧光信号的干扰。此

外, 采用紫外波长光作为激发光源, 火焰多环芳烃 PAHs 组分产生的荧光信号将形成干扰。虽然本实验的对象是正丁烷富燃料火焰, 但其当量比在 1.1~1.6 范围内, 实验中没有观测到黄色火焰, 但生成了少量炭烟, 可能存在少量小分子 PAHs (2~3 个环状结构)。在 283 nm 激发光源下, 小分子产生的荧光信号波长在 350~400 nm 范围内, OH 自由基滤波片可以避开该部分荧光信号的干扰, 而在 355 nm 激发光源下, 只有大分子 PAHs (大于 3 个环状结构) 被激发^[27-28], 因此, 本实验中 PAHs 荧光信号对测量结果的影响很小。在采集到原始 OH-PLIF 与 CH_2O -PLIF 信号图像及其背景图像后, 经过 LaVision 公司 Davis 数据软件平均处理并导出数据文件, 然后在 MATLAB 软件中通过自编程序进行数据后处理。首先通过裁减和设定阈值运算选取火焰有效区域 (ROI) 的尺寸为 30 mm × 40 mm, 并将 OH 自由基和 CH_2O 图像进行配准; 然后计算得到 $[OH] \times [CH_2O]$ 归一化值, 并利用经过平滑降噪处理的图像来标示热释放率的分布。与此同时, 分别采用数码相机和 ICCD 结合 CH^+ 滤波片对火焰形态进行直接拍照, CH^+ 窄带滤波片 (430FS10-50, Andover 公司) 的透光范围为 (430 ± 10) nm。

3 结果与讨论

3.1 火焰形貌、OH-PLIF 与 CH_2O -PLIF 测量

图 2 显示了 5 种工况下用相机直接拍摄、 CH^+ 化学发光、OH-PLIF 和 CH_2O -PLIF 火焰的形貌。当 $\Phi=1.1$, U_{mix} 分别为 1.6 m/s、1.8 m/s 和 2.0 m/s 时, 对应的层流同轴射流火焰结构呈锥形, 火焰高度逐渐增加; 固定 $U_{\text{mix}}=2.0$ m/s, 当量比由 1.1 增加到 1.3 和 1.5 时, 火焰高度增加, 且颜色由蓝向绿转变, 这是因为富燃工况下 C2 组分增加。当量比较大时, 火焰顶部不再闭合, 而是出现开口现象, 结构呈现“八字形”, 即顶部产生 open-tip 现象^[29], 且当量比越大, 该现象越明显。这是因为富燃料的正丁烷/空气火焰 (有效 Lewis 数 $Le < 1$) 顶部大的拉伸导致火焰局部熄灭, 随着当量比增大, 混合气层流燃烧速度降低, 火焰变高, 拉伸率也变大, 顶部熄灭效果更显著。图 2(b)、(f) 所示的火焰 CH^+ 化学发光轮廓和相机直接拍摄的结构十分相似, 红色区域表示 CH^+ 浓度相对较高, 其他颜色区域的浓度较低, CH^+ 主要存在火焰锋面且厚度非常薄。随着当量比增大, CH^+ 自发光信号减弱。

图 2(c)、(g)、(d)、(f) 显示了正丁烷/空气层流预混火焰的 OH-PLIF 和 CH_2O -PLIF 二维结构分布, 红色和黄色区域的荧光信号强度较高, 相对浓度较大, 其他颜色区域的信号强度较弱。可以看到, OH-PLIF 信号强度远远高于 CH_2O -PLIF 信号强度, 其峰值信号强度比率大约是 17.5。此外, OH-PLIF 信号的高强度值位置对称分布在距离火焰中心轴线一定位置的两

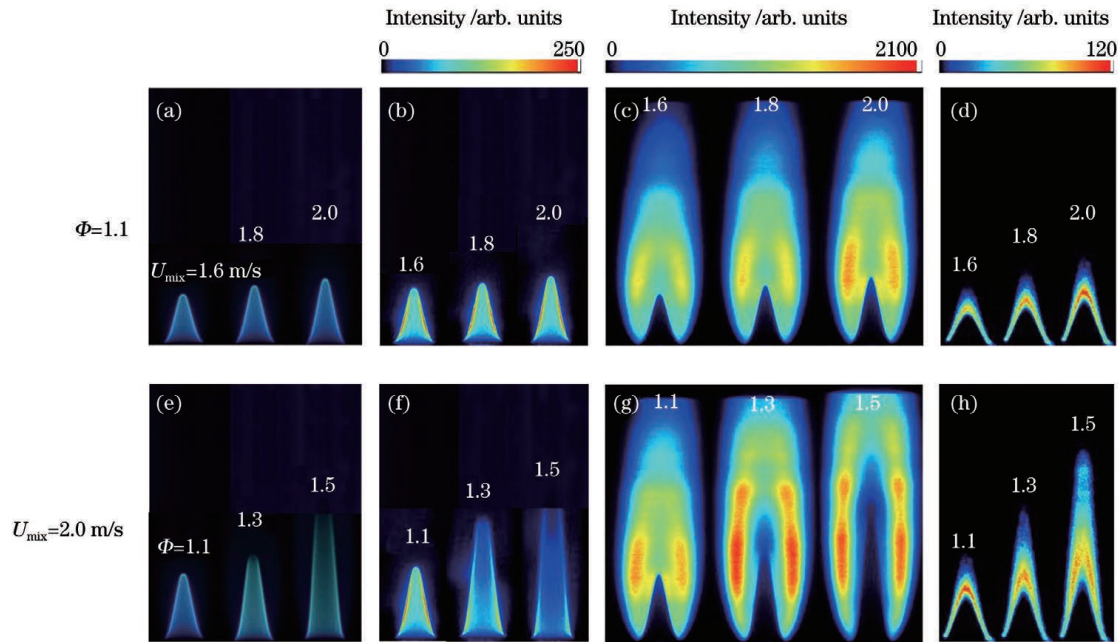


图 2 不同测量条件下得到的正丁烷/空气同轴射流火焰形貌与结构特征。(a)(e)可见光;(b)(f)CH^{*}自发光;(c)(g)OH-PLIF;(d)(h)CH₂O-PLIF

Fig. 2 Morphologies and structure characteristics of n-butane/air coflow jet flames under different conditions. (a)(e) Visible light; (b)(f) CH^{*} chemiluminescence; (c)(g) OH-PLIF; (d)(h) CH₂O-PLIF

侧,而轴线上 OH 自由基荧光信号较弱,同时燃烧后反应区也一直存在 OH 自由基,整体上导致 OH 自由基信号范围较宽。从图 2 的 OH-PLIF 图像看到,当 $\Phi = 1.3$ 和 1.5 时,open-tip 特征非常明显,火焰内圆锥顶部区域 OH 自由基荧光信号相比 $\Phi = 1.1$ 时迅速减小,并在火焰两侧形成两条信号很强且对称的 OH 自由基分布带。在火焰下游更远距离处,温度降低以及环境气体稀释效应导致 OH-PLIF 信号强度降低。

CH₂O 是一种重要的燃烧中间体且出现在碳氢燃料燃烧主反应区之前的冷焰区域内,因此,CH₂O 在靠近喷嘴出口火焰侧的预热区或低温氧化区形成,探测到的 CH₂O-PLIF 信号出现在一个较薄的区域,且峰值位置始终位于轴线上。 $\Phi = 1.1$ 时,不同速度下 CH₂O 分布为一个窄带区域,但随着当量比增大,轴线上 CH₂O 分布区域显著拉长,特别是在 open-tip 区域一直存在 CH₂O,这表明 open-tip 现象只是高温氧化反应终止,而低温氧化反应却在继续进行。此外,从图 2 还可以看出,若将 OH 自由基荧光信号的内侧边界作为火焰前沿锋面,则 OH-PLIF 图片表征的火焰锋面轮廓与 CH^{*} 自由基信号图片的火焰轮廓的外侧形状大致相同,表明这几个组分在一定程度上可以用来标识火焰面特征。

3.2 [OH]×[CH₂O]表征的热释放率

当 $\Phi = 1.1$, $U_{\text{mix}} = 1.6 \text{ m/s}$ 和 2.0 m/s 时,基于 $[\text{OH}] \times [\text{CH}_2\text{O}]$ 处理得到的热释放率二维分布如图 3 所示,其中 H_{AB} 为火焰距离燃烧器出口的高度。可以看出,热释放率在一个类似 CH₂O 分布的窄区间

内,图 3(g)、(h)显示热释放率整体上介于 OH 自由基荧光信号和 CH₂O 荧光信号之间,OH 自由基荧光信号分布在热释放率的上方,而 CH₂O 荧光信号分布在热释放率下方区域,但热释放率与 CH₂O 荧光信号分布有较多的重叠。该分布特性与文献[30]利用层流对冲富燃料丙烷/空气火焰 PLIF 测量的 $[\text{OH}] \times [\text{CH}_2\text{O}]$ 热释放率分布特征一致,也与其他燃料湍流火焰的发热率 $[\text{OH}] \times [\text{CH}_2\text{O}]$ 分布类似^[15,18-19,31]。此外,热释放率分布形态和 CH₂O 分布相似,随着流速加快,热释放率区间稍微增大且重叠区域增多。

3.3 与 CH^{*} 表征的热释放率对比

CH^{*} 化学发光是预混火焰中常用的整体热释放率表征指标,因此将 $[\text{OH}] \times [\text{CH}_2\text{O}]$ 获取的热释放率与 CH^{*} 表征的热释放率直接进行对比分析具有实际意义。热释放率的峰值位置和峰值强度分布是判断燃烧状态的重要参数,为便于直接比较,对 3 种图像火焰锋面法线方向数据进行提取。图 4 为 $\Phi = 1.1$, $U_{\text{mix}} = 2.0 \text{ m/s}$ 时数据线提取位置示意图,红线所处提取位置为垂直于火焰锋面轮廓的法线方向,与层流火焰传播速度和热扩散方向保持在同一直线上,火焰锋面内锥角为 26° 。

图 5 显示了火焰 OH 自由基、CH₂O、CH^{*} 以及热释放率归一化强度沿提取的法线方向的分布情况。可以看出,在实验工况条件下,热释放率和 CH^{*} 的峰值位置基本重合且位于 OH 自由基和 CH₂O 之间,均呈单峰分布,这符合预混火焰的预热区、放热区和高温反应区结构特征,表明通过 OH 自由基和 CH₂O 图像像素乘积来表征热释放率的有效性及良好的跟随性。固

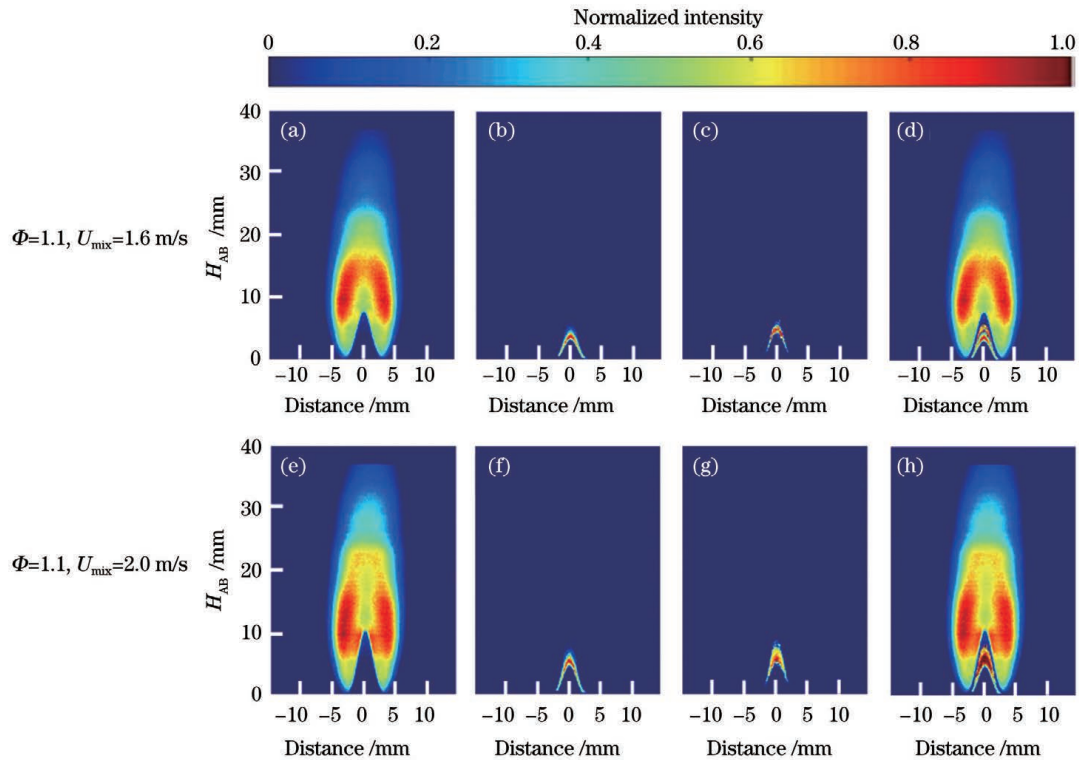


图 3 火焰的 OH 自由基、CH₂O 和热释放率的空间分布。(a)(e)OH-PLIF;(b)(f)CH₂O-PLIF;(c)(g)[OH]×[CH₂O];(d)(h)堆叠图

Fig. 3 Spatial distribution of OH radical, CH₂O, and heat release rate in flame. (a) (e) OH-PLIF; (b) (f) CH₂O-PLIF; (c) (g) [OH]×[CH₂O]; (d) (h) overlay

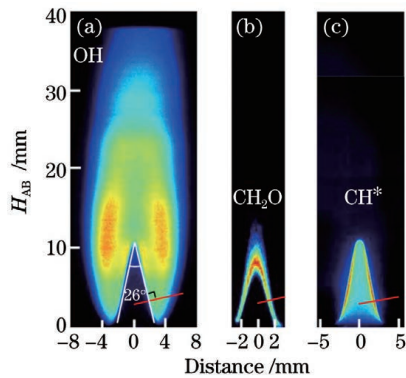


图 4 火焰锋面法线方向数据提取位置示意图。(a) OH-PLIF;(b)CH₂O-PLIF;(c)CH* 自发光

Fig. 4 Schematic of extraction data location of flame front in normal direction. (a) OH-PLIF; (b) CH₂O-PLIF; (c) CH* chemiluminescence

定 $\Phi=1.1$ 、改变预混气体流速时,提取位置的 OH 自由基、CH₂O、[OH]×[CH₂O]和 CH* 的峰值位置和轮廓变化很小。这与 Lü 等^[20]对甲烷空气射流火焰的测量结果明显不同,在湍流火焰测量的 [OH]×[CH₂O]表征热释放率位置受喷射气流的影响比较大,主要是因为火焰形态发生大的变化,导致 OH 与 CH₂O 的分布均发生较大的变化,从而引起热释放率位置分布发生改变。而本实验中在流速变化的情况下,火焰锋面结构基本不变,因此总体结构受流速的影响较小。固定 $U_{\text{mix}}=2.0$ m/s,且增大当量比时,OH、

CH₂O、[OH]×[CH₂O]和 CH* 的峰值位置和轮廓均发生了明显变化,表现为 CH₂O 在法线沿程分布变宽,预热时间变长,OH 自由基到达峰值强度位置靠后,同时,[OH]×[CH₂O]和 CH* 轮廓变宽且整体向外移动,也就是说热释放率向 OH 自由基分布侧移动。出现这些现象的原因是富燃状态下当量比增加会导致燃料过剩、燃烧更加不充分,燃烧速度变慢使得火焰反应区拉长。文献[32]以甲烷/空气层流火焰为对象,对比了基于 PLIF 的 [OH]×[CH₂O]和 [H]×[CH₂O]表征发热率测量结果,认为 [OH]×[CH₂O]表征的热释放率对当量比变化更敏感。本研究进一步揭示了 OH 峰值位置随当量比的增大显著外移是主要原因,同时 CH₂O 变宽也影响热释放率的分布。

3.4 火焰面厚度特征

根据上述 OH、CH₂O、CH* 测量数据,可进一步比较基于 3 种火焰面厚度表征方法所得测量结果的差异。方法一是根据燃料氧化反应发生区域宽度来测量,此时火焰面厚度为沿着火焰锋面法线方向上高温反应区 OH 自由基峰值强度最大值处与低温反应区 CH₂O 峰值强度最大值处的距离之差,用 $\delta_{\text{OH}_{\text{peak}}-\text{CH}_2\text{O}_{\text{peak}}}$ 表示;方法二是通过 CH* 化学发光强度峰值的半峰全宽(FWHM)来表示^[19],由于 CH* 峰值强度呈单峰分布,半峰全宽的含义是指在法线方向上归一化强度两次等于 0.5 处的距离之差,如图 6 所示;方法三是通过归一化 [OH]×[CH₂O]热释放率的半峰全宽来表示。

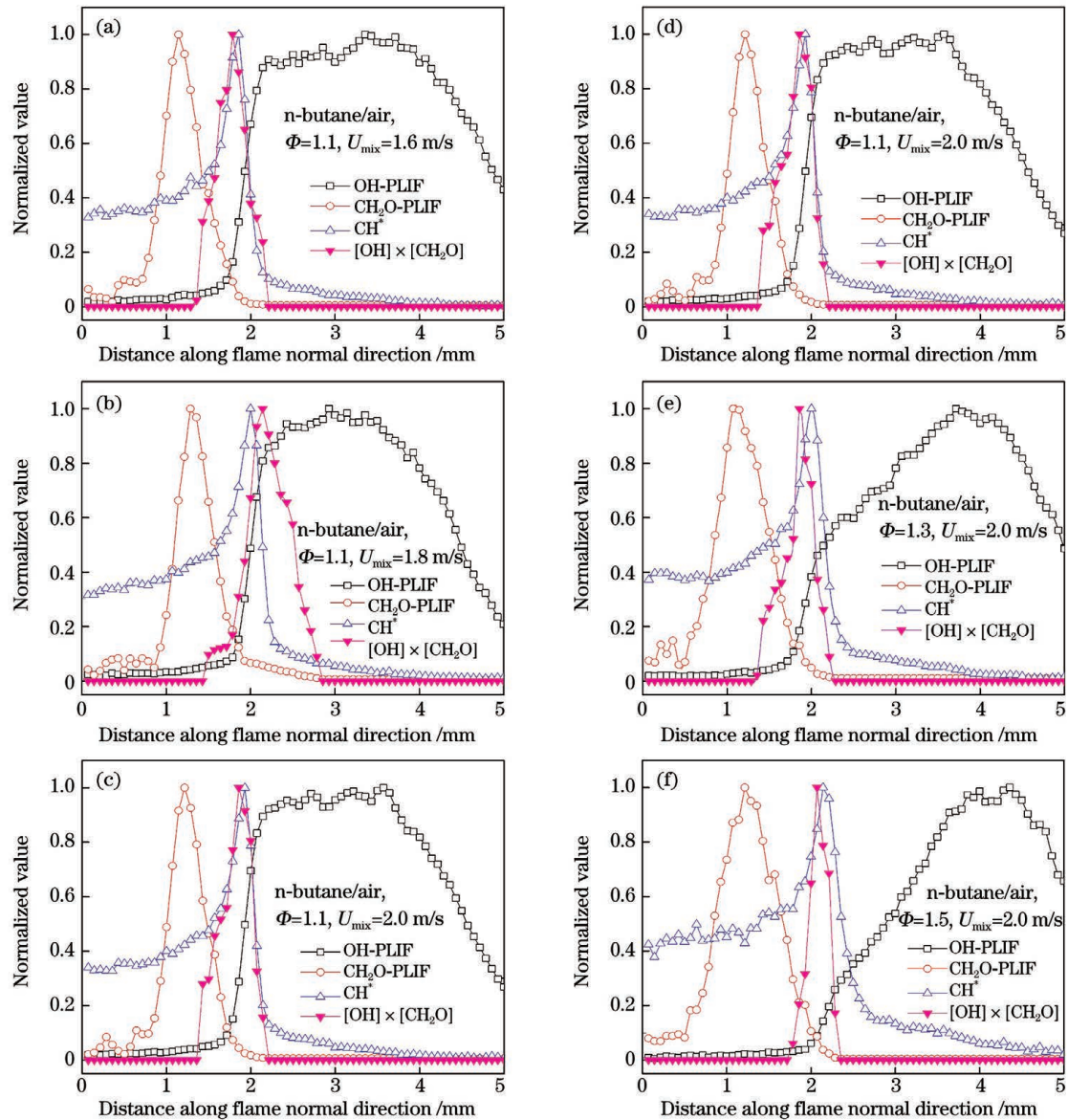


图 5 不同工况下火焰锋面法线方向上 OH、CH₂O、CH^{*} 和热释放率分布比较。(a) $U_{\text{mix}}=1.6$ m/s、(b) $U_{\text{mix}}=1.8$ m/s、(c) $U_{\text{mix}}=2.0$ m/s @ $\Phi=1.1$ ；(d) $\Phi=1.1$ 、(e) $\Phi=1.3$ 、(f) $\Phi=1.5$ @ $U_{\text{mix}}=2.0$ m/s

Fig. 5 Comparison of OH, CH₂O, CH^{*}, and heat release rate distribution along flame normal direction under different combustion conditions. (a) $U_{\text{mix}}=1.6$ m/s, (b) $U_{\text{mix}}=1.8$ m/s, (c) $U_{\text{mix}}=2.0$ m/s @ $\Phi=1.1$; (d) $\Phi=1.1$, (e) $\Phi=1.3$, (f) $\Phi=1.5$ @ $U_{\text{mix}}=2.0$ m/s

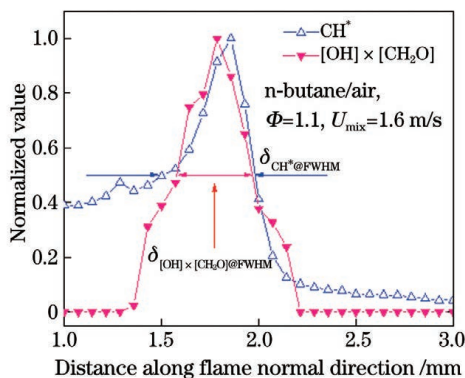


图 6 归一化 CH^{*} 和 [OH] × [CH₂O] 信号半峰全宽表征的火焰面厚度

Fig. 6 Flame thickness indicated by normalized CH^{*} and [OH] × [CH₂O] with full width half maximum

3 种方法得到的火焰面厚度结果如图 7 所示。可以看到,通过低温和高温反应区界定的火焰面厚度为 1.5~3.5 mm,明显大于 CH^{*} 自发光信号的半峰全宽和 [OH] × [CH₂O] 热释放率的半峰全宽,而 CH^{*} 自发光信号的半峰全宽和 [OH] × [CH₂O] 热释放率半峰全宽表示的火焰面厚度与理论计算值比较吻合。火焰面厚度对流速变化不敏感,但随着当量比的增加显著增大。当 $\Phi=1.1$ 时,基于 CH^{*} 自发光和 [OH] × [CH₂O] 热释放率半峰全宽得到的火焰面厚度为 0.5 mm 左右,但随着当量比的增大,利用 CH^{*} 自发光信号半峰全宽得到的火焰面厚度相应增加,而利用 [OH] × [CH₂O] 热释放率半峰全宽得到的火焰面厚度却减少,呈现相反的变化趋势,原因如下:一方面

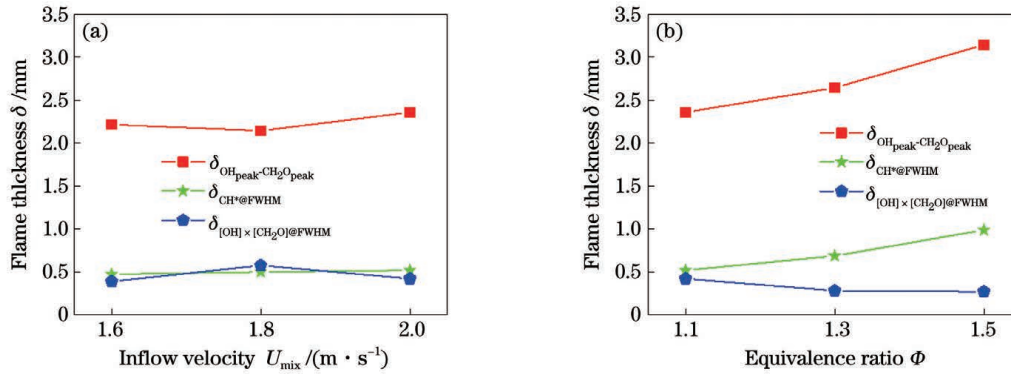


图 7 三种提取方法下火焰面厚度数据的比较。(a) $\Phi = 1.1$; (b) $U_{mix} = 2.0$ m/s

Fig. 7 Comparison of flame thickness under three extraction methods. (a) $\Phi = 1.1$; (b) $U_{mix} = 2.0$ m/s

CH* 自发光信号是火焰光路累积信号, 测量结果会比实际火焰面厚度偏大; 另一方面, 高当量比下, OH-PLIF 峰值与 CH₂O-PLIF 峰值间距拉大, 导致 [OH] × [CH₂O] 信号值偏小, 影响其半峰全宽值。

4 结 论

通过化学发光与平面激光诱导荧光技术 (OH-PLIF 和 CH₂O-PLIF) 对层流正丁烷/空气同轴射流火焰进行测量, 分析比较了利用 CH* 自发光与 PLIF 像素乘积 [OH] × [CH₂O] 表征火焰热释放率和火焰面厚度的特性。研究表明: 1) 当量比为 1.1~1.6 的正丁烷/空气层流射流火焰中 OH 自由基分布在锥形火焰前锋面外侧, OH-PLIF 能够清晰地显示由扩散热不稳定导致的火焰顶部出现 open-tip 现象, 但该区域却存在较强的 CH₂O-PLIF 信号, 表明该高温熄火区仍然存在强烈的低温氧化反应。2) 正丁烷火焰 [OH] × [CH₂O] 表征的热释放率轮廓和 CH₂O-PLIF 信号分布相似, 整体上位于 OH 自由基与 CH₂O 荧光信号之间, 但与 CH₂O 荧光信号分布存在重叠。火焰锋面 [OH] × [CH₂O] 表征热释放率和 CH* 的峰值位置基本重合, 低雷诺数下对喷嘴流速变化不敏感, 但对当量比变化敏感, 是由 OH-PLIF 信号随当量比增加明显外移导致的。3) 根据燃料氧化反应发生区域宽度测量得到的火焰面厚度值在 1.5~3.5 mm 范围内, 基于 CH* 自发光和 [OH] × [CH₂O] 热释放率半峰全宽的范围为 0.3~1 mm, 后者更接近燃烧理论计算值, 相对比较合理。

参 考 文 献

- [1] 朱家健, 万明罡, 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.
Zhu J J, Wan M G, Wu G, et al. Research progress of laser-induced fluorescence technology in combustion diagnostics[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401005.
- [2] Aldén M, Bood J, Li Z S, et al. Visualization and understanding of combustion processes using spatially and temporally resolved laser diagnostic techniques[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 69-97.
- [3] 邵珺, 叶景峰, 王晟, 等. 燃烧流场羟基示踪测速的噪声去除方

- 法[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0309001.
- Shao J, Ye J F, Wang S, et al. Background noise suppress method for hydroxyl tagging velocimetry in combustion flow field[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0309001.
- [4] 方波浪, 胡志云, 陶波, 等. 非线性双线原子荧光技术的标定新方法[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1112001.
Fang B L, Hu Z Y, Tao B, et al. New calibration method for nonlinear two-line atomic fluorescence[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1112001.
- [5] Heffernen J J, Hartsfield C R, Reeder M F, et al. Horizontally issuing diffusion flames characterized by OH-PLIF and visualizations[J]. International Journal of Spray and Combustion Dynamics, 2014, 6(1): 35-66.
- [6] 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, 2012, 106(3): 569-575.
- [7] 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 CH₂O in a piloted premixed jet flame[J]. Combustion and Flame, 2010, 157(6): 1087-1096.
- [8] 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中的甲醛和羟基[J]. 物理化学学报, 2015, 31(12): 2269-2277.
Tang Q L, Geng C, Li M K, 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.
- [9] Shimura M, Ueda T, Choi G M, et al. Simultaneous dual-plane CH PLIF, single-plane OH PLIF and dual-plane stereoscopic PIV measurements in methane-air turbulent premixed flames[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 775-782.
- [10] 朱家健, 赵国焱, 龙铁汉, 等. OH 和 CH₂O 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 J J, Zhao G Y, Long T H, et al. Simultaneous OH and CH₂O PLIF imaging of flame structures[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2016, 30(5): 55-60, 87.
- [11] Zhou B, Brackmann C, Li Z S, 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.
- [12] Jiang N, Hsu P S, Grib S W, et al. Simultaneous high-speed imaging of temperature, heat-release rate, and multi-species concentrations in turbulent jet flames[J]. Optics Express, 2019, 27(12): 17017-17026.
- [13] Lawn C J. Distributions of instantaneous heat release by the cross-correlation of chemiluminescent emissions[J]. Combustion and Flame, 2000, 123(1/2): 227-240.
- [14] Hardalupas Y, Orain M. Local measurements of the time-dependent heat release rate and equivalence ratio using

- chemiluminescent emission from a flame [J]. *Combustion and Flame*, 2004, 139(3): 188-207.
- [15] Ayoola B O, Balachandran R, Frank J H, et al. Spatially resolved heat release rate measurements in turbulent premixed flames [J]. *Combustion and Flame*, 2006, 144(1/2): 1-16.
- [16] Najm H N, Paul P H, Mueller C J, et al. On the adequacy of certain experimental observables as measurements of flame burning rate [J]. *Combustion and Flame*, 1998, 113(3): 312-332.
- [17] Paul P H, Najm H N. Planar laser-induced fluorescence imaging of flame heat release rate [J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1998, 27(1): 43-50.
- [18] Röder M, Dreier T, Schulz C. Simultaneous measurement of localized heat-release with OH/CH₂O-LIF imaging and spatially integrated OH chemiluminescence in turbulent swirl flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(2): 3549-3556.
- [19] Vena P C, Deschamps B, Guo H S, et al. Effects of stratification on locally lean, near-stoichiometric, and rich iso-octane/air turbulent V-flames [J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(11): 4231-4240.
- [20] Lü L, Tan J G, Zhu J J. Visualization of the heat release zone of highly turbulent premixed jet flames [J]. *Acta Astronautica*, 2017, 139: 258-265.
- [21] Matalon M. Flame dynamics [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(1): 57-82.
- [22] Prince J C, Treviño C, Williams F A. A reduced reaction mechanism for the combustion of n-butane [J]. *Combustion and Flame*, 2017, 175: 27-33.
- [23] Zhou G Z, Jiang L Q, Gu C, et al. Experimental investigation on ignition and combustion characteristics of n-butane/air mixtures by glow plug in miniature chamber [J]. *Fuel*, 2020, 274: 117857.
- [24] Healy D, Donato N S, Aul C J, et al. N-butane: ignition delay measurements at high pressure and detailed chemical kinetic simulations [J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(8): 1526-1539.
- [25] 李凡, 霍杰鹏, 蒋利桥, 等. 正丁烷燃料中低温氧化的骨架反应机理 [J]. *工程热物理学报*, 2020, 41(3): 748-757. Li F, Huo J P, Jiang L Q, et al. A skeletal mechanism for low-to-mediate temperature oxidation of n-butane [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2020, 41(3): 748-757.
- [26] Jiang L Q, Gu C, Zhou G Z, et al. Cellular instabilities of n-butane/air flat flames probing by PLIF-OH and PLIF-CH₂O laser diagnosis [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2020, 118: 110155.
- [27] Zhang Y R, Xiao B, Li Y P, et al. LIF diagnostics for selective and quantitative measurement of PAHs in laminar premixed flames [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 222: 5-17.
- [28] 张健夫, 陈玲红, 余佳涵, 等. 丙烷扩散火焰中多环芳烃的激光诱导荧光测量研究 [J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0411002. Zhang J F, Chen L H, Yu J H, et al. Detection of polycyclic aromatic hydrocarbons in diffusion flame of propane by laser induced fluorescence [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0411002.
- [29] Law C K, Ishizuka S, Cho P. On the opening of premixed Bunsen flame tips [J]. *Combustion Science and Technology*, 1982, 28(3/4): 89-96.
- [30] Fayoux A, Zähringer K, Gicquel O, et al. Experimental and numerical determination of heat release in counterflow premixed laminar flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(1): 251-257.
- [31] Kariuki J, Dowlut A, Yuan R, et al. Heat release imaging in turbulent premixed methane-air flames close to blow-off [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(2): 1443-1450.
- [32] Mulla I A, Dowlut A, Hussain T, et al. Heat release rate estimation in laminar premixed flames using laser-induced fluorescence of CH₂O and H-atom [J]. *Combustion and Flame*, 2016, 165: 373-383.

Heat Release Rate and Flame Thickness of n-butane/Air Jet Flame Measured by Planar Laser-Induced Fluorescence Technology

Jin Chuan^{1,2}, Jiang Liqiao^{1*}, Li Fan¹, Li Xing¹, Wang Xiaohan¹

¹ Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China;

² Nano Science and Technology Institute, University of Science and Technology of China, Suzhou 215123, Jiangsu, China

Abstract

Objective Planar laser-induced fluorescence (PLIF) technology is commonly used for flame structure diagnosis. For instance, OH hydroxyl (OH radical) and formaldehyde (CH₂O) groups in different flames have been extensively measured using the PLIF technology. Generally, the OH radical and CH₂O mainly exist in high- and low-temperature oxidation zones of carbon fuel flames, respectively. The heat release rate (HRR) of flames can also be measured indirectly by calculating [OH] × [CH₂O] after obtaining the OH-PLIF and CH₂O-PLIF images. However, most previous studies have focused on the HRR distribution measurement in turbulent flames with light fuels (e.g., methane) based on the PLIF technology and the measurement of flame thickness has received limited attention. In this study, the PLIF technology is used to measure the HRR and flame thickness of n-butane/air laminar flames under varied equivalence ratios and inlet flow velocities. Moreover, the obtained results are compared with those based on CH^{*} chemiluminescence imaging. Because the oxidation reaction process of n-butane is similar to that of some large molecular hydrocarbon fuels, the findings of this study can provide quantitatively experimental data for further understanding the combustion characteristics of n-butane and large molecular hydrocarbon fuels.

Methods In the experiment, a coflow burner is used to generate n-butane/air jet flames for optical diagnosis. The inner diameter of the burner center tube for supplying n-butane/air mixtures is 4.5 mm, and the diameter of the sintered bronze

plug plate of the burner for supplying the accompanying air is 60 mm. The equivalence ratios of the mixtures are 1.1–1.5. The mixture flow velocity is varied from 1.6 to 2.0 m/s with the Reynolds number $Re = 497\text{--}636$. The PLIF technology (LaVision Inc.) is employed to measure the flame structure. The OH-PLIF and CH_2O -PLIF measurements are performed using excitation wavelengths near 283 and 355 nm, respectively (~ 6.5 and 260 mJ/pulse, respectively, @ 10 Hz). All fluorescence signals are measured using an ICCD camera equipped with a UV lens and filters. The detected wavelengths of the OH and CH_2O fluorescence signals are ± 310 and > 390 nm, respectively, in the visible light wavelength range. Moreover, a digital camera and the ICCD combined with the CH^* filter are used to record the flames in the visible wavelength range and CH^* chemiluminescence, respectively. In data processing, 100 images of OH-PLIF and CH_2O -PLIF fluorescence signals are averaged and exported using the DaVis software by subtracting the background. Using the MATLAB program, the normalized $[\text{OH}] \times [\text{CH}_2\text{O}]$ images are obtained to represent the HRR distribution. Finally, the HRR and flame thickness of the n-butane/air coflow jet flames obtained using the aforementioned optical measurement methods are analyzed.

Results and Discussions Based on the CH^* chemiluminescence imaging, the OH-PLIF and CH_2O -PLIF images can clearly indicate the flamefront structure. At mixture equivalence ratios of 1.3 and 1.5, the open-tip structure of n-butane/air jet flames appears owing to the thermal diffusive instability. However, in the CH_2O -PLIF images, no such open-tip structure is observed (Fig. 2). The HRR position marked by $[\text{OH}] \times [\text{CH}_2\text{O}]$ is observed between the OH-PLIF and CH_2O -PLIF fluorescence signals. Furthermore, the HRR distribution profile of OH is similar to that of CH_2O and the HRR distribution of OH fairly overlaps with that of CH_2O . With increasing mixture flow velocity, the overlap zone between the HRR distributions of OH and CH_2O increases (Fig. 3). In the normal flamefront direction, the HRR distribution represented by $[\text{OH}] \times [\text{CH}_2\text{O}]$ and CH^* shows a single-peak-value curve. Moreover, the peak-value positions of $[\text{OH}] \times [\text{CH}_2\text{O}]$ and CH^* are consistent (Fig. 5). This confirms that the $[\text{OH}] \times [\text{CH}_2\text{O}]$ distribution measured using the PLIF technology can be used to indicate the HRR of n-butane flames. The thicknesses of the flames defined by the distance between the peak values of CH_2O (low-temperature reaction) and OH (high-temperature reaction) are 1.5–3.5 mm, considerably larger than the full width at half maximum (FWHM) of HRR in the CH^* and $[\text{OH}] \times [\text{CH}_2\text{O}]$ images. The flame thicknesses are 0.3–1.0 mm using CH^* and $[\text{OH}] \times [\text{CH}_2\text{O}]$, consistent with the theoretical results (Fig. 7).

Conclusions Based on the PLIF and chemiluminescence imaging technologies, the structure of the n-butane/air coflow jet flames is measured under normal temperature and pressure conditions. The HRR distribution is obtained by calculating $[\text{OH}] \times [\text{CH}_2\text{O}]$ based on the OH-PLIF and CH_2O -PLIF images in the axis section, and the thickness of flames is obtained. The OH-PLIF images clearly show the open-tip structure at the top of the flame caused by the thermal diffusive instability. However, a strong CH_2O -PLIF signal is detected in the area, indicating a strong low-temperature oxidation reaction. The HRR distribution in the flame is located between the peaks of CH_2O and OH radical distributions, and the HRR distribution zone obtained using PLIF is slightly narrower than that obtained using the CH^* chemiluminescence imaging. The equivalent ratio considerably influences the peak-value position of the HRR, while a weak influence of the flow rate is observed under low Reynolds number conditions. This is because the OH-PLIF signal shows a considerable shift with an increase in the mixture equivalence ratio. The flame thickness obtained based on the distance between the OH radical and CH_2O peak value positions is obviously greater than the FWHM of the HRR in the $[\text{OH}] \times [\text{CH}_2\text{O}]$ and CH^* chemiluminescence images.

Key words measurement; planar laser induced fluorescence; heat release rate; flame thickness; jet premixed flame; n-butane