

利用平面激光诱导荧光对旋流火焰 OH 自由基的定量研究

严浩^{1,2}, 张榛^{1,2}, 耿金越^{1,2}, 张少华³, 余西龙³

(1. 北京控制工程研究所, 100190, 北京; 2. 北京市高效能及绿色宇航推进工程技术中心, 100190, 北京;
3. 中国科学院力学研究所, 100190, 北京)

摘要: 为了获取非稳定火焰中 OH 瞬态粒子数密度分布, 提出了一种基于平面激光诱导荧光 (PLIF) 的免标定 OH 定量测量方法。该方法采用双向激光的实验设置采集 OH 荧光图像, 以获得激光沿程衰减的信息。提出了一种递归结构的算法并提取了激光的吸收系数分布, 极大降低了现有数据处理方法对光路准直精度和图像信噪比的苛刻要求。通过该方法对航空发动机旋流燃烧室模型的非预混贫燃火焰进行了研究, 得到 OH 自由基的瞬态空间分布。实验结果表明: 随着燃烧室内的流量增大, 火焰上游的氧燃混合程度增加, 湍流对燃烧反应的干扰程度增大, 火焰的结构也发生明显转变; 而在不同工况下, OH 粒子数密度的最大值均在 10^{16} cm^{-3} 量级。

关键词: 旋流火焰; OH 自由基; 激光诱导荧光; 定量测量

中图分类号: TK437 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/jxtxb202302004 **文章编号:** 0253-987X(2023)02-0031-08

Quantitative Investigation of OH Radical in Swirling Flame by Planar Laser-Induced Fluorescence

YAN Hao^{1,2}, ZHANG Zhen^{1,2}, GENG Jinyue^{1,2}, ZHANG Shaohua³, YU Xilong³

(1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Efficient and Green Aerospace Propulsion Technology, Beijing 100190, China; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;)

Abstract: In order to obtain the transient concentration distribution of OH in unstable flame, a calibration-free OH quantitative measurement method based on PLIF is proposed in this paper. This method uses a bidirectional laser set-up to acquire OH fluorescence images containing information about laser depletion along the path. A recursive structure algorithm is proposed to extract the absorption coefficient distribution of the laser, which greatly reduces the stringent requirements of existing data processing methods on optical alignment accuracy and image signal-to-noise ratio. With this method, a study on non-premixed lean-fuel flame of aeroengine swirl combustor model is carried out, and the transient spatial distribution of OH radical is obtained. The results show that as the flow rate increases in the combustion chamber, the oxygen-fuel mixing degree in the upstream of the flame and the disturbance degree of turbulence on the combustion reaction increase too, and the flame structure also changes significantly. However, the peak con-

收稿日期: 2022-05-25。 作者简介: 严浩(1988—), 男, 工程师; 张少华(通信作者), 女, 副研究员。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1837211)。

网络出版时间: 2022-08-30 网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220829.1950.004.html>

centration of OH is on the order of 10^{16} cm^{-3} at those tested operation points.

Keywords: swirling flame; OH radical; laser-induced fluorescence; quantitative measurement.

燃烧是航空、航天最重要的动力来源。实现高效稳定的燃烧是相关工程领域的研究重点。发动机燃烧室内的气流通常具有较大的流速,一方面有助于燃料与氧化剂的充分混合,另一方面由于燃烧与流动高度耦合,火焰会产生振荡,甚至出现吹熄、回火等现象而严重影响设备寿命^[1-3]。火焰的反应区含有大量的自由基,是研究、分析这些现象的重要依据。

对火焰中的自由基组分进行平面激光诱导荧光(PLIF)测量,可以定性地确定该组分的分布,进而促进燃烧反应模型、反应常数的研究^[4]。PLIF 技术发展的方向之一就是不同自由基组分的实施^[5-6]。在烷类和空气的火焰中,OH 自由基是最常用的荧光组分,广泛的分布在火焰的反应区 and 高温生成物中^[7-10]。CH 自由基出现在燃烧反应的初期,是燃烧的重要指示物,可以作为荧光组分标记^[11-12]。但是,由于该种组分在火焰中的密度极低,需适用特殊的激光器增强荧光信号^[13]。在甲烷/空气预混火焰中,气体在火焰锋面上游受热分解生成 CH_2O ,其激发谱线与 Nd:YAG 激光的三倍频输出(355 nm)正好重合^[14]。 CH_2O 可与 OH 搭配使用,研究火焰的预热区和反应区的结构^[15-18]。可与其他荧光组分共用一套染料激光系统,实现不同组分的同步测量^[15]。 CH_2O 、OH 粒子数密度的乘积可以很好地表示火焰的释热率分布^[16]。

PLIF 技术的挑战是实施定量的粒子数密度测量,而对于自由基,难以给出确定粒子数密度的气源实施粒子数密度-荧光强度的标定。为实现定量测量,一种方法是通过仿真计算,估算出火焰某一区域的 OH 粒子数密度,再通过比较 OH 荧光信号的强度得到其他区域的粒子数密度分布。Angelilli 等提出了一种更精确的映射模型,并在逆向喷流火焰中进行了验证^[19]。另一种方法是基于 LIF 激光共振吸收率计算 OH 粒子数密度^[20],其原理类似于激光吸收光谱技术。Versluis 提出了以两对向激光对流场进行 LIF 成像^[21],使用的激发光在空间上重合,抵消了光量子产率不均、荧光重吸收等现象对测量结果带来的影响。Yu 等通过精确测算激光的碰撞截面,改进数据处理方法进一步提高了该方法的精度^[22-23],并研究了不同气体对燃烧的影响^[24]。

然而在工程问题的研究中,PLIF 的定量测量依旧难以实现。发动机内部燃烧通常为非预混湍流火焰,不同区域的当量比不尽相同,流动强烈干扰了火焰锋面,自由基粒子数密度的数值模拟面临巨大挑战。而传统双向 PLIF 的定量测量技术,对荧光图像的噪声和光路重合情况十分敏感,在稍复杂的情况下不能提取到吸收率的分布,近年来应用较少。

本文介绍一种基于双向 PLIF 的 OH 粒子数密度定量测量方法,提出了新的激光吸收率计算方法,降低了对荧光图像信噪比和激光重合度的要求,使得 OH 粒子数密度定量测量在单次曝光条件下,以及在结构复杂的火焰中得以实施。本文方法在旋流燃烧室中得到了验证,获取了湍流火焰中 OH 粒子数密度的瞬态分布。

1 实验设置

1.1 旋流燃烧器与工况

本系列实验测量的旋流燃烧室为中心分级双旋流燃烧室,用于模拟典型的航空发动机燃烧室的燃烧方式。图 1 展示了该燃烧室的示意图,空气从燃烧器底端的充气室注入,在充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直径为 15 mm 的圆形喷管,外部旋流器连接一个内径为 17 mm、外径为 25 mm 的环形喷管。在两个喷管之间是环形文氏管,将燃料注入燃烧室。整个燃烧室由 4 块长方形石英窗片围成,形成边长为 85 mm 的正方形截面,高度为 110 mm。

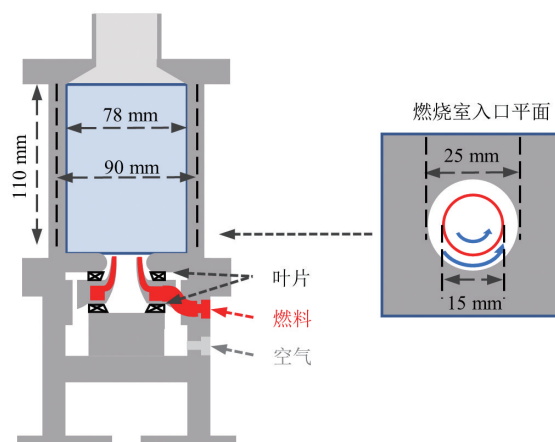


图 1 旋流燃烧室示意图

Fig. 1 Schematic of the combustor

实验的外部环境是室温常压,高压空气由甲烷气瓶与空气气瓶直接提供,两条气路的流量分别由相应的流量控制器进行调控。实验共有 5 个工况,如表 1 所示,甲烷、空气流量控制计的最大量程为 10、100 L/min。

表 1 实验工况

Table 1 Operation points of the experiment

工况	甲烷流量/(L·min ⁻¹)	全局当量比	雷诺数
1	1.5	0.75	1 300
2	3.0	0.75	2 500
3	4.5	0.75	3 800
4	6.0	0.75	5 000
5	5.2	0.65	5 000

1.2 光学仪器设置

光学诊断系统的主要设备是激光光源和 ICCD 相机、高速相机以及相关光学元件和时序控制设备,主要实验参数如表 2 所示。OH PLIF 测量所使用的激发光由可调谐染料激光器 (Precisionscan, Sirah) 产生,波长在 283~285 nm 区间,激光谱线宽约为 0.24 cm⁻¹,即 1.2 pm。整套激光器以 10 Hz 的固定重复频率工作,实验选取 OH 的 Q₁(7) 激发谱线,荧光信号由两台 ICCD 相机拍摄,均配备了 78 mm 紫外镜头,在测量区域具有约 90 mm 的正方形视场,镜头前放置了中心波长为 307 nm 的窄带滤波片。

表 2 光学参数

Table 2 Optical parameters of the experiment

参数	数值
激发跃迁	X ² Π—A ² Σ ⁺ (1,0)Q ₁ (7)
激光谱线宽度/cm ⁻¹	0.24
重复频率/Hz	10
滤光片中心波长/nm	307
观测区域面积/mm ²	900×900

对向 OH PLIF 的光路设置如图 2 所示,激光经过紫外分束镜(BS)分为两束激光。BS 的透射光束经过透镜组后形成平面光束,然后进入旋流器。BS 的反射光,从旋流器的另一侧经透镜组形成平面光束然后入射至旋流器 BS 与 M 的间距为 5 m。两束激光的延迟为 40 ns,总光程差约 13 m,单次测量过程在 100 ns 以内,远远小于被测火焰的运动周期(5 ms)。

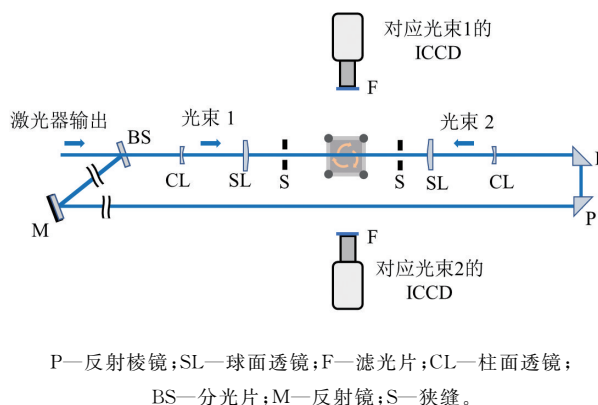


图 2 旋流火焰对向 OH PLIF 测量的光路设置

Fig. 2 The optical set-up for bi-directional OH PLIF measurement in the swirling flame

2 OH 定量测量方法

2.1 激光吸收率的计算

激光在吸收谱线附近的吸收系数为

$$k_{\nu} = N_1 B_{12} h \nu c Y(\nu) \quad (1)$$

式中: N_1 为处在能级 1 上的吸收组分的粒子数密度,即吸收组分在对应能级上的粒子数密度,与温度和吸收组分粒子数密度有关; B_{12} 为爱因斯坦吸收常数; h 为普朗克常数; ν 为光子的频率; c 为光速; $Y(\nu)$ 为吸收线型函数。

获得吸收率就可以代入数据库中的光谱参数,得到被测组分的粒子数密度。为了从 LIF 数据得到相对准确的吸收率分布,本研究采取了递归算法计算。激光沿程吸收算法的结构 I 如图 3 所示,本算法的输入量是分别由两束对向激光激发的 LIF 信号在 x 轴的分布, S_{l1} 是从左至右传播的激光的荧光信号强度, S_{l2} 是从右至左传播的激光的荧光信号强度。在这个算法中,首先将一维的数据分割成若干数据片段,然后再将每一片段分割成左右两部分,分别用下角标 l, r 表示。通过对比段荧光信号强度,可以确定激光能量分别在 l, r 段的衰减分数 α ,接下来将左右段的 LIF 数据 S_i 与衰减分数 α 分别传递给子程序进行递归计算。

激光沿程吸收算法的结构 II 如图 4 所示,在递归计算中,子程序同样将 LIF 数据片段分为 l, r 两部分,并通过对比两段的荧光数据将衰减分数分配给 l, r 段,再将 l, r 段的荧光数据 S_i 与衰减分数 α 继续传递给递归子程序。这样的递归过程不断进行下去,直到满足出口条件进入基层事例(base case)。

在基层事例中,根据荧光信号数据 S_i 将衰减分数分配给每一个像素,计算出吸收系数 $k(x)$ 的分布,然后逐层返回给上一层的函数。

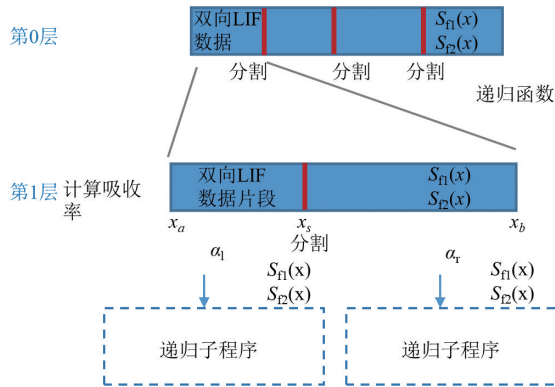


图 3 激光沿程吸收算法的结构 I

Fig. 3 Architecture of the recursion methods for laser absorption calculation I

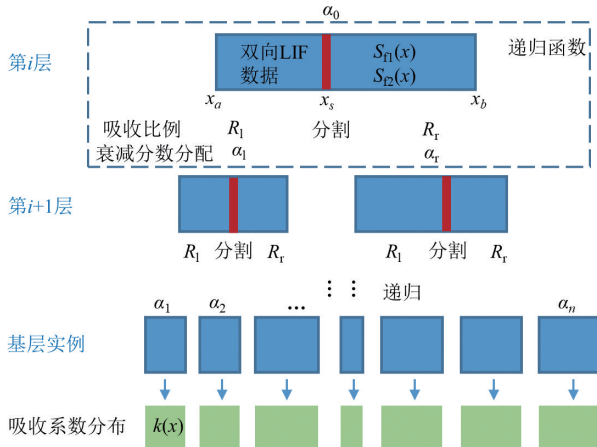


图 4 激光沿程吸收算法的结构 II

Fig. 4 Architecture of the recursion methods for laser absorption calculation II

递归算法是这个程序的主体架构。而其中关键的计算过程有分割过程,吸收分数计算与分配过程,以及出口判定过程。分割过程存在于在 1 级以及递归子程序中。首先对 LIF 信号分布 $S_{f1}(x)$ 、 $S_{f2}(x)$ 进行归一化,使得

$$\int_{x_a}^{x_b} S_{f1}(x) dx = 1 \quad (2)$$

$$\int_{x_a}^{x_b} S_{f2}(x) dx = 1 \quad (3)$$

式中: x_a 、 x_b 分别为输入信号的起点、终点。然后将

数据分为左右两段,分割的依据是

$$\int_{x_a}^{x_s} (S_{f1}(x) + S_{f2}(x)) dx = \int_{x_s}^{x_b} (S_{f1}(x) + S_{f2}(x)) dx \quad (4)$$

式中 x_s 为分割点。分割完成后,计算吸收分数。在第 1 级中,吸收分数 α_1 表达式为

$$\alpha_1 = \int_{x_s}^{x_b} (S_{f2}(x) - S_{f1}(x)) dx / \int_{x_s}^{x_b} S_{f2}(x) dx \quad (5)$$

相似地,右段吸收分数的表达式为

$$\alpha_r = \int_{x_a}^{x_s} (S_{f1}(x) - S_{f2}(x)) dx / \int_{x_a}^{x_s} S_{f1}(x) dx \quad (6)$$

在递归子程序中, α_1 、 α_r 计算式为

$$\alpha_1 + \alpha_r = \alpha \quad (7)$$

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_r} = \frac{\int_{x_s}^{x_b} (S_{f2}(x) - S_{f1}(x)) dx / \int_{x_s}^{x_b} S_{f2}(x) dx}{\int_{x_a}^{x_s} (S_{f1}(x) - S_{f2}(x)) dx / \int_{x_a}^{x_s} S_{f1}(x) dx} \quad (8)$$

式(5)~(8)均为近似表达式,可能出现误差,但根据式(4)对输入数据进行分割,能够保证近似的可靠性。在基层事例中,将 α 按照 $S_i(x)$ 的比例分配给每个像素,即满足

$$k(x) = \alpha S_i(x) / \int_{x_a}^{x_b} S_i(x) dx \quad (9)$$

对于递归子程序而言,还要规定出口条件。出口条件为数据段的像素数小于某一数值,或者 α_1 、 α_r 或者比例悬殊。

图 5 中展示了利用本方法对 3 个模拟算例的计算结果。这 3 个算例中,在流场中激光的衰减分别为 20%、50% 和 80%。在激光衰减为 20% 的算例中,计算结果与吸收系数的准确值相差无几。在激光衰减为 80% 的算例中,吸收系数的计算误差有

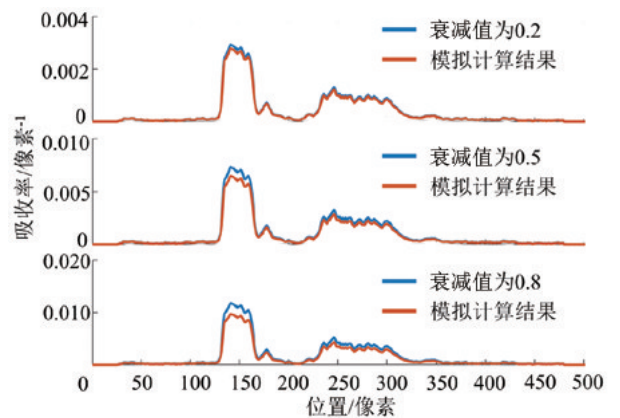


图 5 不同衰减下的激光吸收系数计算结果

Fig. 5 Calculated absorption coefficient under various total laser depletion

20%。在模拟计算中,这种误差主要产生于一级分割中,增加分割片段可以减小计算误差。图 6 中展示了一级分割中具有 2 个片段以及 4 个片段的计算结果。

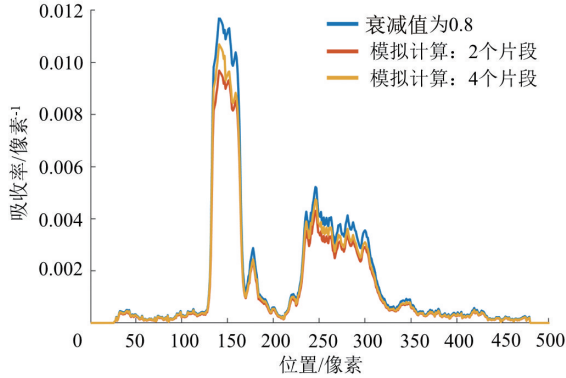


图 6 不同 1 级分段数下的激光吸收系数计算结果

Fig. 6 Calculated absorption coefficient with different number of fragments at level 1

2.2 激光吸收截面的确定

在双原子分子中,根据光谱参数计算指定吸收谱线对激光的总吸收截面,在 CGS 单位下的计算公式为^[25-26]

$$\sigma_{\text{total}} = \frac{\pi e^2}{m_e c^2} f_{v'v''} J' J'' \quad (10)$$

$$f_{v'v''} J' J'' = \frac{f_{v'v''}}{4} S_{J' J''} T_{J' J''} \quad (11)$$

式中: e 为电子电荷; m_e 为电子质量; $f_{v'v''} J' J''$ 为给定振-转跃迁下的分子振子强度; v 为振量子数; J 为角量子数,量子数的上角标'表示基态,上角标''表示激发态; $f_{v'v''}$ 为纯振动带跃迁(v' , v'')下的振子强度; $S_{J' J''}$ 为归一化的 Hönl-London 因子; $T_{J' J''}$ 为振转相互作用校正因子。对于 $Q_1(N'')$ 谱线, $J'' = N'' + 0.5$ 。计算 σ_{Total} 所需光谱参数的具体数值可通过 LIFBASE 软件获得(该数据库中的 Hönl-London 未归一化,带入公式前需要除以 $2J'' + 1$)。在计算 OH 粒子数密度时需要用到的参数 σ_0 的表达式为

$$\sigma_0 = \sigma_{\text{total}} Y(\nu_0) \quad (12)$$

式中: $Y(\nu)$ 为归一化的吸收谱线线型函数; ν_0 为激发谱线的中心频率。实际线型为多普勒加宽与碰撞加宽共同作用的结果,前者由温度决定,后者取决于各种组分的分压,可近似认为与燃烧的反应度相关。

常压下甲烷的层流火焰中 OH 吸收线型的实验研究表明,其数值在当量比为 0.7~1.4 的范围内,与火焰各处保持一致^[23]。研究表明,在不同温度、燃烧反应度下 OH LIF 的线宽可视为固定数值。

根据上述文献的谱线宽度数据以及 LIFBASE 的谱线参数,可得 $\text{OH}\gamma(1,0)$ 谱带中, $Q_1(7)$ 跃迁的峰值吸收截面的 σ_0 为 $1.87 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$,并假设其数值在被测火焰中保持不变。

3 OH 自由基的瞬态结构

本研究使用对向 OH PLIF 测量系统,拍摄了不同工况下火焰的分别来自两束激光的 OH PLIF 信号分布,其中工况 4 的荧光图像如图 7 所示,左侧图片的激发光束由左向右传播,右侧图片的激发光束从右至左传播。对于同一时刻,两张 PLIF 图像信号的数值有明显区别,激光入射方向一侧的信号强度较高,另一侧较低。

在计算过程中,为了兼顾纵向分辨率和程序对噪声的宽容度,对 PLIF 数据在纵向进行了多个像素的平均,步长为 8 个像素,工况 1 下的 OH 粒子数密度分布如图 8 所示,反应区的 OH 粒子数密度在 10^{16} cm^{-3} 量级,最高可以达到约 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。在较低流量下,燃料与空气未充分混合,火焰的反应区呈较宽的条状。

工况 4 下的 OH 粒子数密度分布如图 9 所示,可知 OH 的高粒子数密度薄层,峰值粒子数密度可达 $4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,燃料和空气在旋流的作用下达到充分混合,具有较高的火焰传播速度。在喷嘴两侧有较大面积的高粒子数密度 OH 团块,是湍流与火焰的强烈相互作用所致,粒子数密度约为 $3 \times 10^{16} \sim 4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。工况 5 的 OH 粒子数密度分布在图 10 中给出,在当量比降低的情况下,高粒子数密度 OH 团块的粒子数密度峰值随之降低。

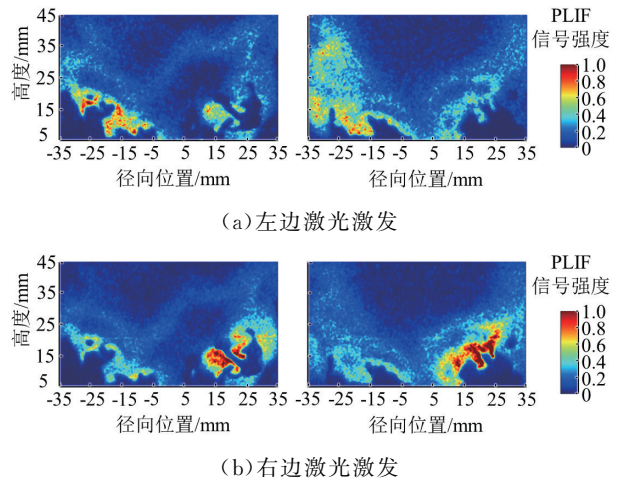


图 7 工况 4 下两个随机时刻的双向 OH PLIF 信号分布
Fig. 7 Distribution of bi-directional OH PLIF signal at two different times

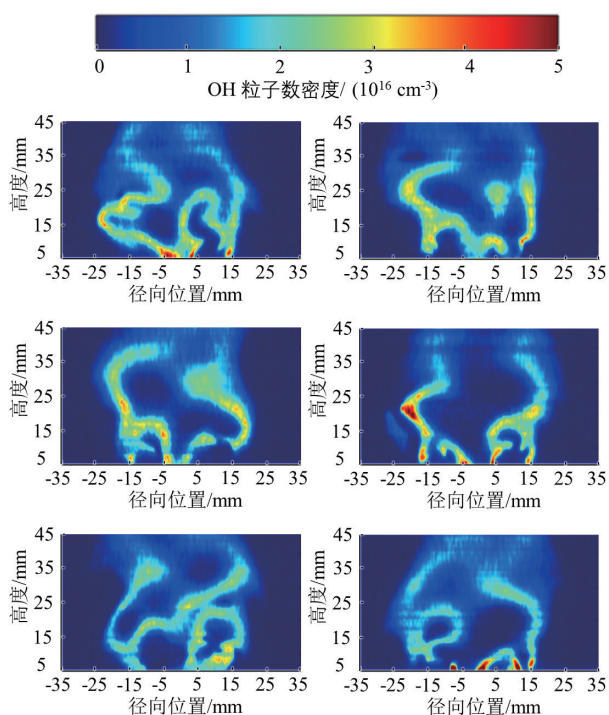


图 8 工况 1 下随机时刻 OH 粒子数密度瞬态分布
Fig. 8 The distribution of OH number density under OP 1 at different times

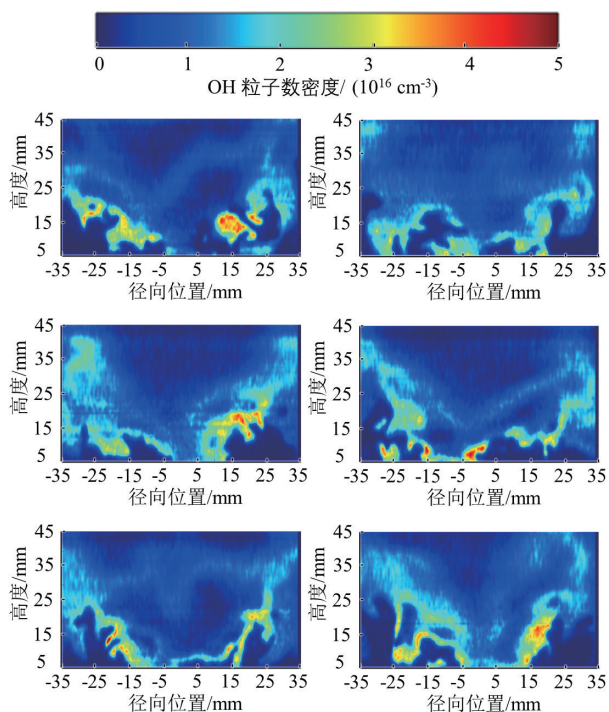


图 9 工况 4 下随机时刻 OH 粒子数密度瞬态分布
Fig. 9 The distribution of OH number density under OP 4 at different times

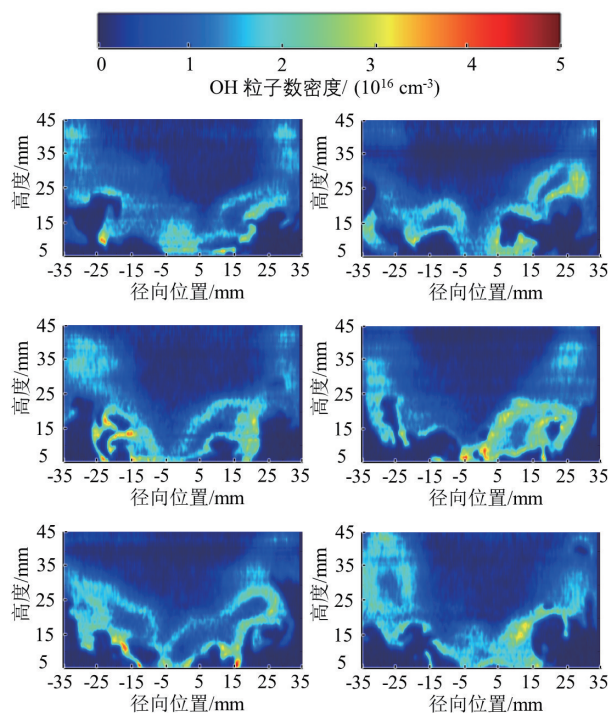


图 10 工况 5 下随机时刻 OH 粒子数密度瞬态分布
Fig. 10 The distribution of OH number density under OP 5 at different time

OH 粒子数密度的时均分布如图 11 所示,可知工况 2、3、4 的时均 OH 粒子数密度分布没有明显区别,说明达到一定数值后,流量的增加对火焰反应区的位置影响不大。随着当量比的降低,工况 5 火焰的 V 型夹角略微增大,反应区位置稍有下降。不同工况下的时均 OH PLIF 的图像如图 12 所示,OH 分布的左右翼中下部均明显强于其余部位的信号。另外,荧光信号的强度随燃烧室的高度有明显的衰减。在工况 2~5 下,高度超过 30 mm 的区域时均 PLIF 信号微弱,然而 OH 粒子数密度的峰值随高度并没有出现剧烈的衰减。根据 OH 粒子数密度于 OH PLIF 信号分布的区别,推测在 OH 粒子数密度较高的区域亦有较高的激发的光量子效率,影响 OH 荧光光量子效率的主要原因是碰撞猝灭。在空气甲烷火焰中,较强猝灭组分有 O_2 、 CH_4 、 CO 、 CO_2 和 H_2O ,其中以 H_2O 的猝灭效率最高。在 OH 粒子数密度较高的反应区,可能由于反应度较低, H_2O 生成较少,而 CH_4 已被分解,因此猝灭率较低,OH 的光量子效率较高,而随高度的增加,燃烧反应度提高, H_2O 生成较多,因此猝灭率高,OH 的光量子效率下降,最终表现为随着高度的提升,OH PLIF 信号衰减较为迅速,而 OH 粒子数密度的衰减相对缓慢。

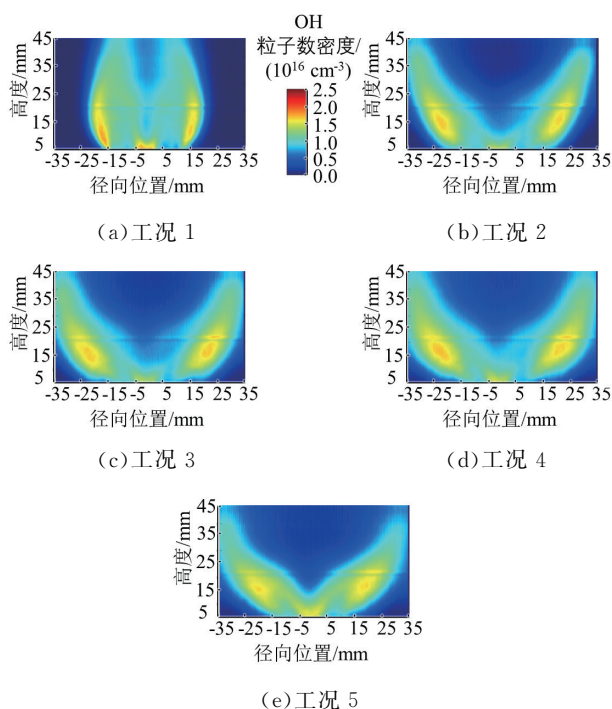


图 11 不同工况下的时均 OH 粒子数密度分布

Fig. 11 Averaged distribution of OH number density under different operation points

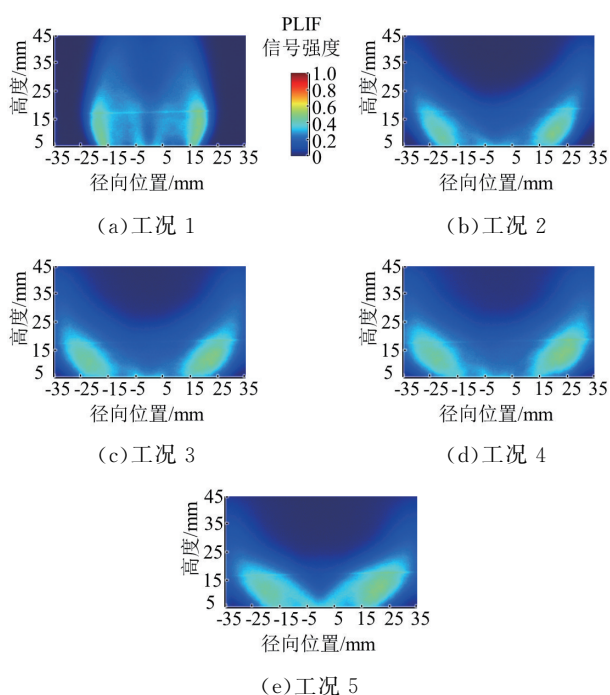


图 12 不同工况下的时均 OH PLIF 的图像

Fig. 12 Averaged OH PLIF images under different operation points

4 结 论

本研究利用激光吸收的原理,通过对向 OH

PLIF 对旋流火焰中 OH 进行了观测。提出了一种数据处理方法,极大降低了对 PLIF 成像质量和光路的要求,使得湍流火焰的瞬态 OH 粒子数密度分布测量得以实现。通过该方法获得了不同工况下,旋流火焰中瞬态的 OH 组分粒子数密度分布的信息。在湍流和过度流流域中,火焰形态发生明显变化,OH 分布也揭示出燃料与空气预混情况的改变。火焰反应区的 OH 粒子数密度均在 10^{16} cm^{-3} 量级,会随当量比的降低而下降。OH 的 PLIF 信号在燃烧器下游有较为明显的衰减,相比之下 OH 粒子数密度的衰减较小,可能是由于燃烧产物对 OH 荧光的猝灭导致的。

参考文献:

- [1] RENARD P H, THÉVENIN D, ROLON J C, et al. Dynamics of flame/vortex interactions [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2000, 26(3): 225-282.
- [2] 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.
- [3] CANDEL S, DUROX D, SCHULLER T, et al. Dynamics of swirling flames [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2014, 46(1): 147-173.
- [4] GIEZENDANNER R, KECK O, WEIGAND P, et al. Periodic combustion instabilities in a swirl burner studied by phase-locked planar laser-induced fluorescence [J]. Combustion Science and Technology, 2003, 175(4): 721-741.
- [5] ZHOU Bo. Advanced laser-based multi-scalar imaging for flame structure visualization towards a deepened understanding of premixed turbulent combustion [D]. Lund, Sweden: Lund University, 2015.
- [6] ZHOU Bo, LI Qing, HE Yong, et al. Visualization of multi-regime turbulent combustion in swirl-stabilized lean premixed flames [J]. Combustion and Flame, 2015, 162(7): 2954-2958.
- [7] HANSON R K, SEITZMAN J M, PAUL P H. Planar laser-fluorescence imaging of combustion gases [J]. Applied Physics, 1990, 50(6): 441-454.
- [8] BOXX I, STÖHR M, CARTER C, et al. Temporally resolved planar measurements of transient phenomena in a partially pre-mixed swirl flame in a gas turbine model combustor [J]. Combustion and Flame, 2010, 157(8): 1510-1525.
- [9] 张猛, 王金华, 谢永亮, 等. $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{air}$ 预混湍流火焰前锋面结构探测 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(11): 14-18.

- ZHANG Meng, WANG Jinhua, XIE Yongliang, et al. Measurement of flame front structure of turbulent premixed flames for $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{air}$ mixtures [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(11): 14-18.
- [10] 卫之龙, 王金华, 舒新建, 等. 合成气预混层流火焰结构的实验和数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(7): 34-40.
- WEI Zhilong, WANG Jinhua, SHU Xinjian, et al. Experimental and numerical study on structure of laminar premixed syngas-air-diluent flames [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(7): 34-40.
- [11] CATTOLICA R J, STEPOWSKI D, PUECHBERTY D, et al. Laser-induced fluorescence of the CH molecule in a low-pressure flame [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1984, 32(4): 363-370.
- [12] NGUYEN Q V, PAUL P H. The time evolution of a vortex-flame interaction observed via planar imaging of CH and OH [J]. Symposium (International) on Combustion, 1996, 26(1): 357-364.
- [13] LI Z S, KIEFER J, ZETTERBERG J, et al. Development of improved PLIF CH detection using an Alexandrite laser for single-shot investigation of turbulent and lean flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(1): 727-735.
- [14] BRACKMANN C, NYGREN J, BAI Xiao, et al. Laser-induced fluorescence of formaldehyde in combustion using third harmonic Nd: YAG laser excitation [J]. Spectrochimica Acta: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2003, 59(14): 3347-3356.
- [15] 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 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.
- [16] PAUL P H, NAJM H N. Planar laser-induced fluorescence imaging of flame heat release rate [J]. International Symposium on Combustion, 1998, 27(1): 43-50.
- [17] 朱家健, 赵国焱, 龙铁汉, 等. OH 和 CH_2O 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 Jiajian, ZHAO Guoyan, LONG Tiehan, et al. Simultaneous OH and CH_2O PLIF imaging of flame structures [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2016, 30(5): 55-60, 87.
- [18] 陈爽, LUKASZ J K, 翁武斌, 等. CH_4/Air 反扩散射流火焰多组分同步 PLIF 诊断 [J]. 实验流体力学, 2018, 32(1): 26-32.
- CHEN Shuang, LUKASZ J K, WENG Wubin, et al. Simultaneous multi-species PLIF diagnostic on CH_4 -air inverse diffusion jet flame [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2018, 32(1): 26-32.
- [19] ANGELILLI L, CIOTTOLI P P, MALPICA GALASSI R, et al. A new OH fluorescence signal-to-OH mole fraction conversion model formulation and calibration [C]//AIAA Scitech 2020 Forum. Reston, VA, USA: AIAA, 2020: AIAA 2020-1279.
- [20] 许星长, 伍宏环, 黄文林, 等. 正庚烷氧化基态 OH 基浓度时程吸收光谱诊断 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(9): 113-120, 140.
- XU Xingchang, WU Honghuan, HUANG Wenlin, et al. Laser absorption spectrum measurement of OH concentration time-histories in n-heptane oxidation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(9): 113-120, 140.
- [21] VERSLUIS M, GEORGIEV N, MARTINSSON L, et al. 2-D absolute OH concentration profiles in atmospheric flames using planar LIF in a bi-directional laser beam configuration [J]. Applied Physics, 1997, 65(3): 411-417.
- [22] 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, 2015, 24(11): 114204.
- [23] 杨振. 双向激光诱导荧光用于层流火焰中 OH 基浓度的测量研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [24] YANG Zhen, YU Xin, PENG Jiangbo, et al. Effects of N_2 , CO_2 and H_2O dilutions on temperature and concentration fields of OH in methane Bunsen flames by using PLIF thermometry and bi-directional PLIF [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 81: 209-222.
- [25] ANKETELL J, PERY-THORNE A. Oscillator strengths in the $^2\Sigma^+-^2\Pi$ band system of OH by the hook method [J]. Mathematical and Physical Sciences, 1967, 301(1466): 343-353.
- [26] MCGEE T J, MCILRATH T J. Absolute OH absorption cross sections (for lidar measurements) [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1984, 32(2): 179-184.

(编辑 赵炜 杜秀杰)