

## 基于 TA-LIF 的射流火焰温度场测量

周星宇, 郑晨旭, 黄伟明, 徐文江  
(厦门大学航空航天学院, 厦门 361000)

**摘要:** 针对燃烧火焰二维温度场的定量测量, 设计开发了一种利用改进的热力辅助激光诱导荧光方法 (TA-LIF, thermally assisted laser induced fluorescence) 的系统, 获得了射流火焰的二维温度场, 进一步构建了三维平均温度场。实验中仅使用单一波段的激光激发羟基 (OH) 分子, 利用激发态羟基分子的振动能级跃迁激发两个波段的荧光信号。引入单相机双光路系统, 实现单波长激发、单相机双波段采集的荧光探测, 有效降低了实验成本并简化了操作。利用此方法对射流火焰进行测量, 通过与热电偶的测温结果对比, 验证了该方法的可靠性, 并清晰地揭示了射流火焰温度在不同区域的分布差异。同时, 通过对射流火焰的三维平均温度场进行构建, 进一步展示了该技术在近稳态温度场测量中的潜力, TA-LIF 方法为复杂燃烧系统的温度测量提供了新的技术手段。

**关键词:** 热力辅助激光诱导荧光; 射流火焰; 多维温度场

中图分类号: TK16

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2025)06-0659-12

## Measurement of Jet Flame Temperature Field Based on TA-LIF

Zhou Xingyu, Zheng Chenxu, Huang Weiming, Xu Wenjiang  
(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361000, China)

**Abstract:** For the quantitative measurement of the two-dimensional temperature field of a combustion flame, a system using an improved thermally assisted laser induced fluorescence (TA-LIF, thermally assisted laser induced fluorescence) method is designed and developed to obtain the two-dimensional temperature field of the jet flame. The three-dimensional average temperature field is further constructed. In the experiment, hydroxyl (OH) molecules are excited by laser in a single band, and the fluorescence signals in two bands are then excited by the vibrational energy level transition of the excited hydroxyl molecules. A single camera dual optical path system is introduced to achieve fluorescence detection with single wavelength excitation and single camera dual band acquisition, which effectively reduces the experimental cost and simplifies the operation. This method is used to measure the jet flame, its reliability is verified through comparison with the thermocouple temperature measurements, and the difference in jet flame temperature distribution in different regions is clearly revealed. At the same time, through the construction of the three-dimensional average temperature field of the jet flame, the potential of the technology in the near-steady state temperature field measurement is further demonstrated. TA-LIF method provides a new technical means for the temperature measurement of complex combustion systems.

收稿日期: 2025-02-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (5247060814, 52006184); 两机重大专项资助项目 (2019-III-0022-0066).

作者简介: 周星宇 (2002—), 男, 硕士研究生, 34720231151540@stu.xmu.edu.cn.

通信作者: 徐文江, 男, 博士, 副教授, wjxu@xmu.edu.cn.

**Keywords:** thermally assisted laser induced fluorescence; jet flame; multi-dimensional temperature field

燃烧室内部的温度分布是评估燃烧室性能的关键指标,在设计诸如涡轮等热端部件时,必须予以充分考虑.进行燃烧室内部温度场的测量研究,有助于深入理解燃烧的基本原理,包括燃料的燃烧效率、污染物的形成机制以及热能的传递过程.目前,计算流体动力学(CFD)和大涡模拟(LES)等数值模拟技术在研究燃烧室的温度场方面已被广泛应用<sup>[1-3]</sup>.然而,化学反应的非平衡效应以及湍流与燃烧之间的复杂相互作用尚未被完全理解<sup>[4-5]</sup>,导致数值模拟技术在完全再现燃烧室内部真实的燃烧流场特性方面存在局限.此外,由于真实燃烧室的空间结构复杂,许多实验测温技术难以应用,关键的流场数据也难以直接获取.

自20世纪80年代以来,激光诱导荧光(laser induced fluorescence, LIF)测温技术,作为一种先进的非接触式激光诊断方法,在燃烧科学领域受到了广泛关注.早期研究者通过双线法成功实现了对火焰温度的精确测量<sup>[6]</sup>,从而证明了LIF测温技术的巨大潜力.随着研究的深入,LIF技术不断得到优化,其测温精度和可靠性也逐步提高,并已被广泛应用于各种火焰温度的测量.例如,在燃气轮机模型燃烧室的研究中,LIF技术揭示了周期性燃烧的不稳定性<sup>[7]</sup>.在甲烷-空气射流火焰的研究中,热力辅助LIF技术为二维温度场的准确测量提供了新的途径.此外,LIF技术在煤油燃烧等领域也得到了应用,实现了对煤油分布和火焰结构的定量测量<sup>[8]</sup>,为理解湍流燃烧过程提供了宝贵的数据.LIF测温技术以其高精度和非接触式的特性,在燃烧温度测量方面展现出独特的优势.

热力辅助激光诱导法(thermally assisted laser induced fluorescence, TA-LIF)作为LIF测温方法的一种,能够实现对燃烧流场的二维温度场的实时定量测量<sup>[9-13]</sup>.然而,传统的热力辅助激光诱导方法通常需要两台相机进行信号收集,这不仅成本高昂,操作复杂,而且由于效率不高导致测量技术精度有限,更多地局限于对稳态火焰的研究,对动态变化湍流火焰的研究相对较少.笔者对传统的热力辅助荧光诱导方法进行了改进,实现了单波长激发、单相机双波段采集的TA-LIF测温技术,应用于射流火焰的研究,获取了其二维温度场,从而验证了改进方法的可行性和有效性.在此基础上,将进一步展开基于激光空间位置扫描的三维测温方法研究.

## 1 实验设计及实验原理

### 1.1 TA-LIF测温原理

热力辅助荧光技术利用分子碰撞导致的振动(vibrational energy transfer, VET)和转动能级跃迁(rotational energy transfer, RET)来测量温度.通过精确量化能级转移速率,该技术能够建立振动能级分布与温度的直接关系,进而通过荧光信号精确反映能级分布变化并测量温度.通过对比计算出的振动能级分布与实验荧光信号,可以得出精确的温度值.

现阶段的热力辅助激光诱导荧光方法大部分采用两类基本模型:一类是简化模型<sup>[14]</sup>.该模型聚焦于几个振动能级之间的VET过程<sup>[9]</sup>;二是更为复杂的详细模型<sup>[13]</sup>,这个模型全面考虑了全部能级VET和RET的分子数演化速率方程,又称之为速率方程模型,基于此模型原理,Dulin等<sup>[15]</sup>开展了二维温度场测量,采用了Bülter等<sup>[16]</sup>开发的LASKIN程序,获得了两个波段的荧光信号强度之比随温度变化的曲线.本文参考文献中的模型编写了Matlab计算程序,全面考虑的OH自由基在基态和激发态电子能级的VET/RET,改进了原LASKIN程序中的VET/RET随着转动能级的分布规律.特别是基态X能级中的VET/RET对于被激发的特定振转能级的分子补充,对于荧光信号的强度有较大的影响.

因此,本文中的温度定量测量是使用优化了OH得到的温度曲线进行温度场计算.由于实验中的噪声和荧光信号不均匀问题,LIF技术直接测得的温度数据与真实值有偏差.为解决此问题,将热电偶数据作为标定标准,并选取修正系数1.6来调整荧光信号强度比值,从而提高二维温度场的测量精准度.最终,本文中选用的荧光信号强度比值随温度变化修正前后曲线如图1所示.

### 1.2 TA-LIF测温实验系统

射流火焰激光光路系统如图2红色虚线框所示,由固体激光器、染料激光器、反射镜、整体透镜等器材组成.泵浦光源为倍频Nd:Yag固体激光器,其发射频率为10 Hz,输出波长为532 nm的绿光进入Sirah染料激光器,与其内部的染料池发生反应产生荧光并经其内部的频率转换单元和光栅转变成特定波长的紫外光,其波长为308.983 nm,能量大小约为2.5 mJ.接着经转换得到的紫光经过FM3和FM4反

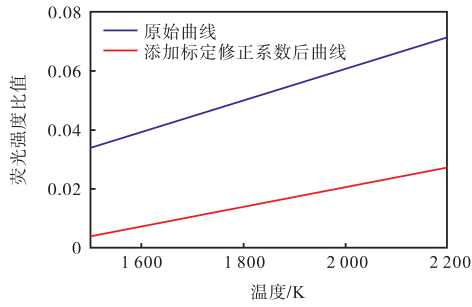


图1 修正前后荧光强度比值随温度的变化

Fig.1 Figure showing the ratio of fluorescence intensity before and after correction as a function of temperature

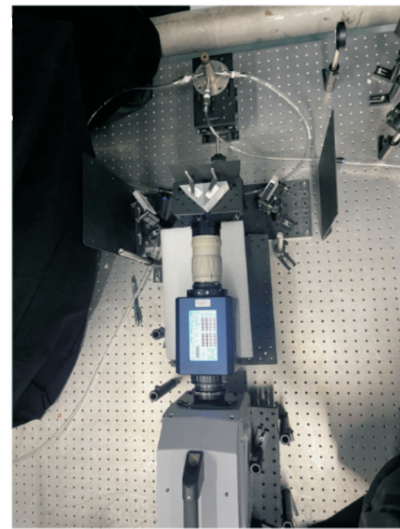
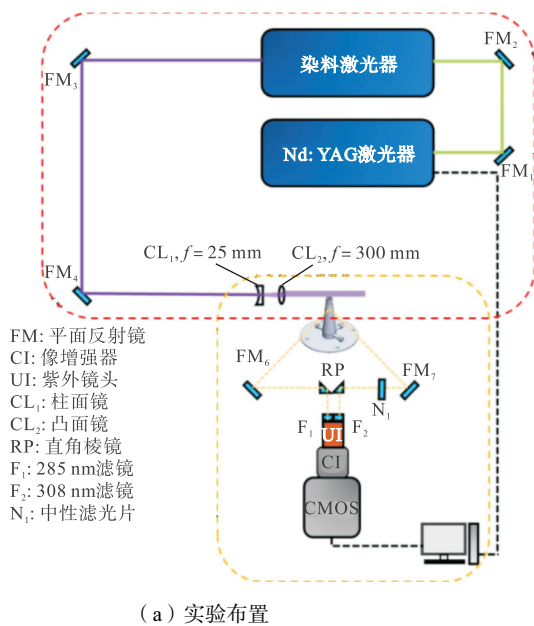


图2 基于热力辅助荧光法测量射流火焰温度场示意

Fig.2 Schematic diagram of temperature field measurement of jet flame based on thermally assisted fluorescence method

传统热力辅助荧光测温法为测量流场的温度需要使用两台相机同时收集到两个不同波段的荧光信号, 成本高且操作复杂. 本文研究改进了这一技术, 提出了一种单相机双光路信号收集系统来探测荧光信号, 实现了只用一台相机便能在一个画幅里收集到同一时刻的两个不同波段的荧光信号. 单相机双光路荧光信号收集系统如图 2 黄色虚线框所示, 由双光路光学镜组、相机、像增强器、镜头、电脑等器材组成. 双光路光学镜组包括两块平面反射镜和两块直角反射镜和特定规格的滤镜. 相机正对着燃烧器, 两块平面反射镜分别对称地位于所述相机到燃烧器所组成的中心轴线左右两侧以反射来自测量流场发生荧光反应所产生的全波段的荧光信号, 直角反射镜同样对称地位于中心轴线上以分别将两种所述荧光信号波段反射至相机. 在相机的镜头前安装有定制的高效率 Semrock 滤镜环, 该滤镜分别透过 (0, 0) 和

射镜穿过由  $f = -25 \text{ mm}$  和  $f = 300 \text{ mm}$  凹凸透镜组成的整形透镜组, 将激光从原本直径约  $4 \text{ mm}$  的矩形紫外光整形成长度为  $60 \text{ mm}$ 、厚度约为  $0.5 \text{ mm}$  的片状激光, 以获得能量密度更大的激光, 来保证达到足以产生荧光信号的激光能量密度. 该片状光最后以垂直于燃烧器出口平面方向, 从燃烧器主燃孔正中心入射. 值得注意的是, 图 2 中并未布置激光能量监测装置, 其原因在于本实验中仅使用一个激光器波长激发, 产生的双波段荧光信号来源于同样的激光能量, 其荧光信号主要与局部的温度和  $\text{OH}$  分子数密度相关, 激光能量带来的影响是相同的. 从这角度来看, TA-LIF 也进一步简化了试验的硬件要求.

(1, 0) 荧光信号的矩形滤镜, 各占滤镜环的一半, 可以过滤出全波段荧光信号中的  $\text{A}^2\Sigma^+ \leftarrow \text{X}^2\Pi_i(0, 0)$  和 (1, 0) 的荧光信号. 同时, 由于 (0, 0) 波段荧光信号远强于 (1, 0) 波段荧光信号, 为获取到足够强的 (1, 0) 波段的荧光信号且同时满足 (0, 0) 波段的荧光信号在相机系统的阈值内, 需要在 (0, 0) 波段的荧光信号那一侧添加中性滤波片, 降低全波段信号强度, 后期处理数据时再进行处理, 还原成原本信号强度.

本文中的射流火焰测温实验研究对象为  $\text{CH}_4/\text{空气}$  热伴流预混射流火焰, 其燃烧器为参考悉尼大学所设计的稳定火焰燃烧器<sup>[14]</sup>, 其实物和模型图如图 3(a) 和 (b) 所示, 内部结构如图 3(c) 所示, 内含一个主燃气路和两个伴流气路, 燃烧器出口由一个直径  $d = 7.9 \text{ mm}$  主燃气孔和多个均匀分布在  $d = 18.2 \text{ mm}$  燃烧器圆环外壁内的均匀小孔组成. 该燃烧器可以在较高的  $Re$  下维持较大尺度的火焰, 从而研究湍流

和化学反应的相互作用。

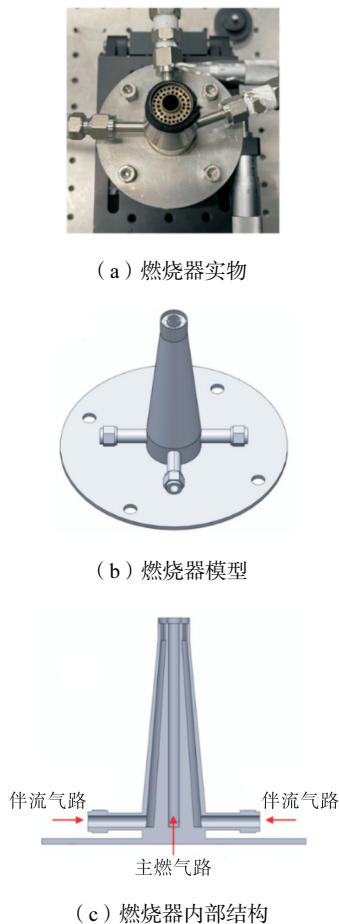


图 3 燃烧器实物、燃烧器模型和燃烧器内部结构

Fig.3 Burner object, burner model, and burner internal structure

### 1.3 实验数据处理方法

在 MATLAB 中, 读取图片后会将图片转换为一个二维矩阵(对于灰度图)或三维矩阵(对于彩色图)。这个矩阵中的每一个元素, 就代表了对应像素点的强度值, 具体数值范围取决于图像的数据类型, 本文实验中使用 16 位图像呈现结果。从相机所拍摄的图像到计算得到最终的温度场处理过程较为复杂, 如图 4 所示为射流火焰实验拍摄得到的 OH-PLIF 图像的处理流程图, 能够直观地看到数据处理的具体流程。其流程主要为对原始图像进行裁剪预处理, 接着对其进行均匀化和畸变矫正处理, 最后将处理得到的图像进行二维温度场计算得到具体的温度场。图 4 中前 3 行的双画幅图片中, 左边为 (1, 0) 波段, 右边为 (0, 0) 波段。相对而言 (0, 0) 波段由于是共振激发其荧光信号通常是 (1, 0) 的几十倍, 图 4 展示的信号量级相当的结果是通过上节所述的滤镜组合优化调整后的结果。保持两个波段信号量级相当的优势在于可以更好地整体调控激光强度, 采集相机的灵敏度等参数,

从而获得合适的荧光信号强度。

在双光路信号收集系统中, 由于相机和反射镜的角度设置以及光线传播的特性, 成像过程中每个像素点的感光度可能会不一致。这种不一致性在需要精确测量高精度荧光信号的应用中尤为突出。亮度的不均匀性会对图像分析造成干扰, 并影响二维温度场计算的精确度。因此, 必须通过后期数据处理来校正这种不均匀性, 以恢复图像的真实亮度。实验中先使用一块均匀发光的 LED 面板, 确保了图片中每个区域的亮度一致性, 燃烧拍摄一张具有均匀亮度的 LED 发光板的参考图片, 如图 5(a) 所示。亮度均匀化处理的基本策略用这张图片作为评估并校正相机和光路成像系统对不同像素点响应的参照。然后, 利用这张参考图片调整荧光信号图像的亮度, 使其更准确地反映实际的亮度分布。从图 5(b) 中均匀亮度 LED 发光板图片在  $y = 280$  位置的强度曲线可以看出, 曲线并非完全均匀。这表明双光路系统由于硬件限制, 不可避免地会在两侧产生较强的信号强度, 而在中间区域产生较弱的信号强度。这种硬件特性需要在图像处理过程中予以考虑, 以确保最终结果的准确性。

图 6 是射流火焰平均图像经过亮度均匀化处理

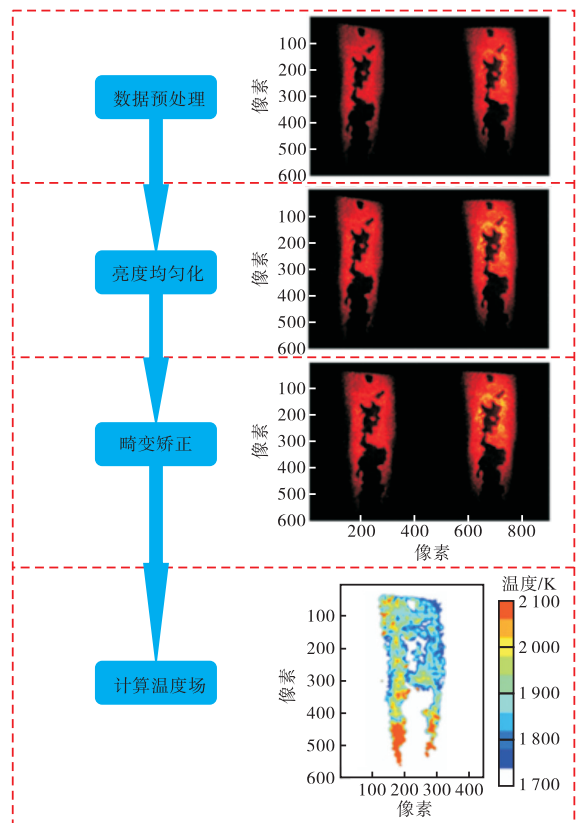


图 4 OH-PLIF 信号图像处理流程

Fig.4 Flowchart of OH-PLIF signal image processing

前后对比图,在未经处理前(图 6(a))可以看出荧光信号图像靠边侧区域更亮,经处理后,如图 6(b)所示,平衡了这一亮度不均匀现象.均匀化效果还可以从强度曲线对比中得到直观体现,在经过亮度均匀化处理后,强度曲线会显示出更加平滑一致的趋势,如图 6(c)和(d)的两个最大亮度数值可以看出,右半侧荧光信号图像的两个波峰在处理前波峰强度数值约

为 800 和 1100,占比为 72.7%,处理后波峰强度数值约为 1100 和 1200,占比为 91.2%,更接近一致.通过上述过程,可以有效地对双光路成像系统硬件限制产生的亮度不均匀问题进行校正,从而得到更为准确的真实荧光信号亮度分布的图像,能够极大地提高后续温度计算的准确性.

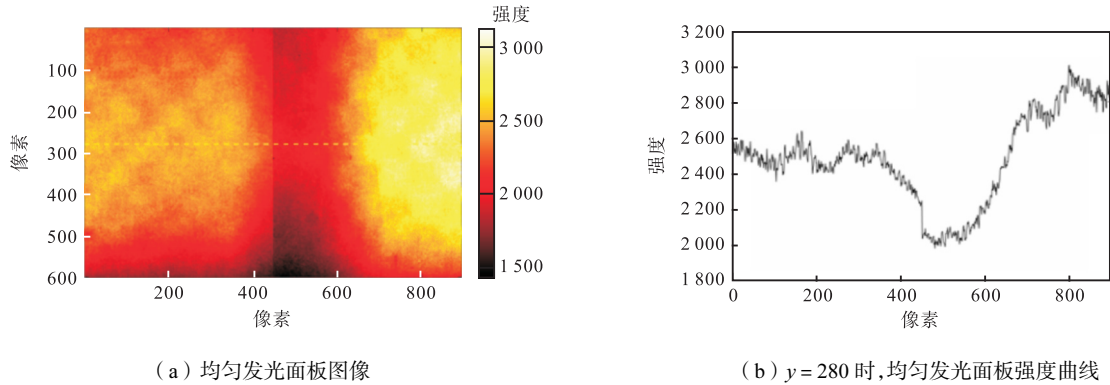


图 5 均匀发光面板图像和像素行  $y=280$  时均匀发光面板强度曲线

Fig.5 Image of a uniform luminous panel, Intensity curve of the uniform luminous panel at  $y=280$

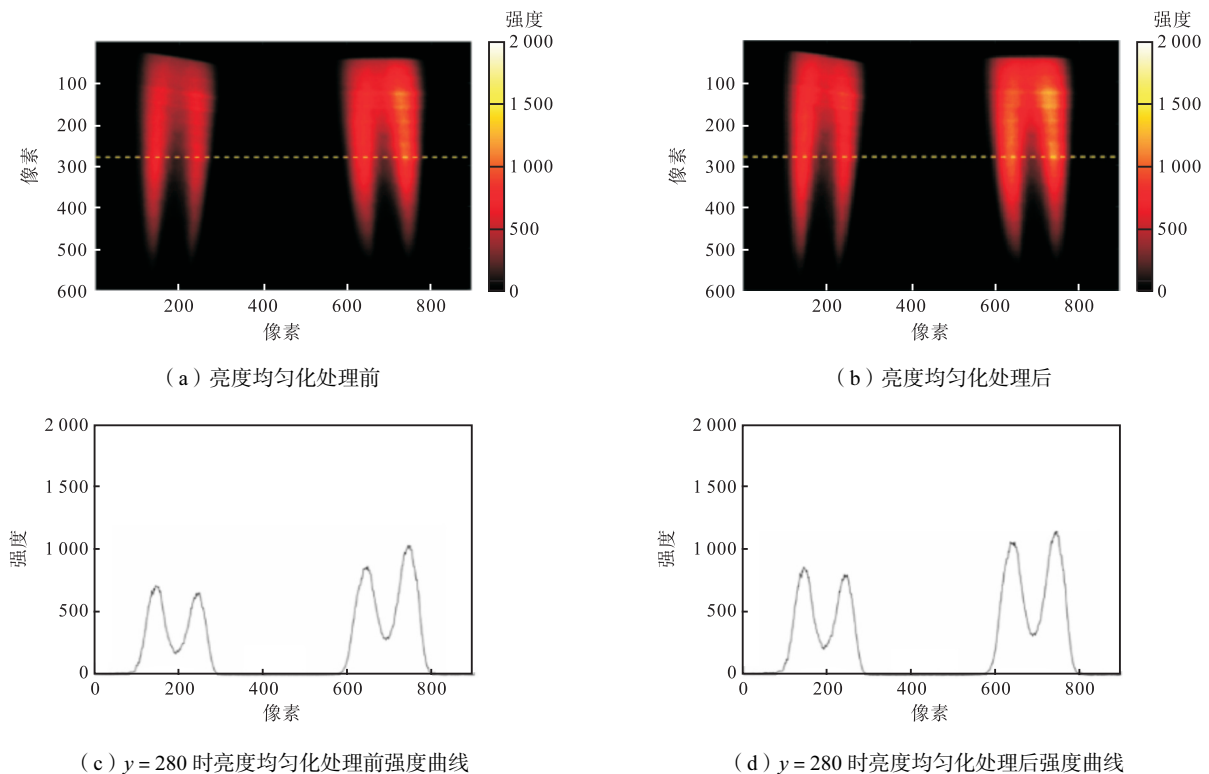


图 6 射流火焰平均图像

Fig.6 Average image of the jet flame

在计算温度场前需要先进行畸变矫正,畸变矫正是图像处理中一种常见而重要的技术.主要针对由于成像系统固有的物理性质导致的图像畸变进行校正,使得最终的图像更加真实地反映被摄物体的形状和特征,从而提高后续二维温度场计算的准确性.畸变矫正前的火焰荧光信号图像往往会展现出一些不

自然的变形,如直线弯曲(桶形或枕形畸变)、图像边缘拉伸或压缩等,这些畸变会干扰对火焰真实形态的识别和分析.通过畸变矫正处理,可以有效地纠正这些畸变,使得火焰图像的几何形状更接近实际情况.本次处理采用了 Matlab 软件中的相关函数来进行镜头畸变矫正和视角偏移矫正,具体步骤为首先通

过 Matlab 中的 `undistortImage` 函数对镜头畸变进行矫正. 接着使用 `imwarp` 函数进行视角偏移的畸变矫正, 即计算斜视的标定板到理想正视标定板的仿射变换. 消除畸变后的图像需要进行平移对齐. 由于双光路不可能完全对称, 后续的比值温度计算需要准确对齐的图像. 对齐过程中, 采用 MATLAB 中的 `xcorr` 函数求出左右两幅图像的相关性, 选择相关性最大的点

作为平移参数. 在本例中, 平移参数为 (65, 71), 即将左右图像按此参数进行平移对齐, 标定板畸变矫正前后图像和平移过程如图 7 和图 8 所示, 由图形看出平移过后火焰荧光信号图像基本对齐, 相似性较畸变矫正前有显著提升, 为后续的温度计算提供了可靠的基础.

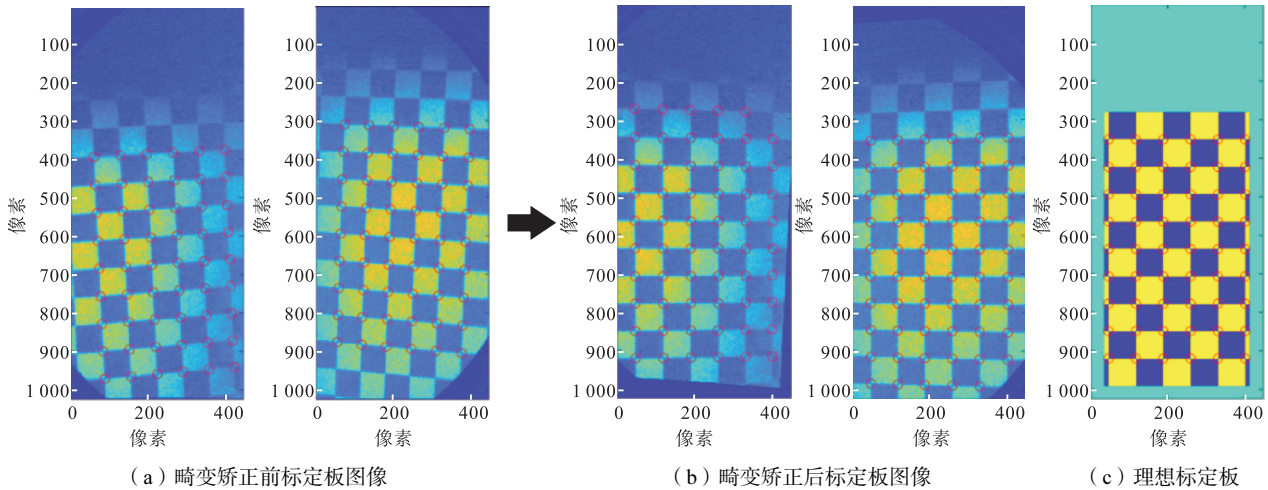


图 7 畸变矫正前标定板图像, 畸变矫正后标定板图像和理想标定板

Fig.7 Image of the calibration board before distortion correction, Image of the calibration board after distortion correction, Ideal calibration board

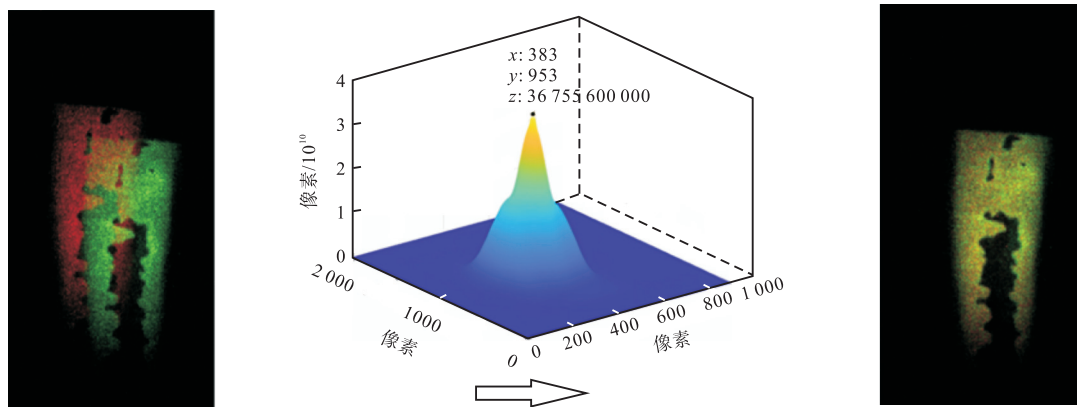


图 8 畸变处理中图像平移过程示意

Fig.8 Schematic diagram of the image translation process during distortion correction

## 2 数据处理与结果讨论

### 2.1 射流火焰二维温度场结果及分析

图 9 是当量比为  $\phi = 0.952$  时连续多帧的射流火焰 OH-PLIF 信号图像, 利用双光路系统所拍摄的每帧图像左侧为  $A^2 \Sigma^+ \leftarrow X^2 \Pi i(1, 0)$  波段荧光信号图像, 右侧为  $(0, 0)$  波段荧光信号图像. 由于  $(0, 0)$  波段荧光信号本身就远强于  $(1, 0)$  波段荧光信号, 即使在光路系统中在  $(0, 0)$  光路放置了透过率 2.2% 的中性滤波片, 其信号强度也略强于  $(1, 0)$  波段信号强

度. 通过在荧光信号过强的  $(0, 0)$  光路一侧放置滤镜, 来降低较强波段的信号强度, 使得  $(0, 0)$  和  $(1, 0)$  两个波段的信号强度更为接近, 同时调整像增强器增益, 优化荧光信号强度, 避免过曝, 以提高二维温度计算的精度. 由于激光器的出光频率为 10 Hz, 因此每帧间隔时间为 0.1 s, 火焰的动态变化在 10 Hz 的频率下无法完全捕捉和呈现, 拍摄到的火焰图像无法实时计算出流场的动态特征. 然而, 虽然不能实时计算流场特征, 但通过对多帧图像的分析, 仍然可以获取有关火焰的重要信息.

从连续多帧的 OH-PLIF 荧光信号图像可以清晰

看出火焰中 OH 自由基的分布, OH 基于火焰锋面开始产生, 且主要集中于两侧燃料的反应区内, 借助 OH 基的分布可明显看到火焰锋面形状. 从图 10 的平均信号图像和强度曲线图可看出 OH 基对称分布于火焰两侧, 燃料在火焰中焰区域反应最为剧烈, 产生大量 OH 基, 最大浓度集中于火焰两翼, 并随着燃料反应的减弱和外侧空气的掺混逐渐向两侧降低.

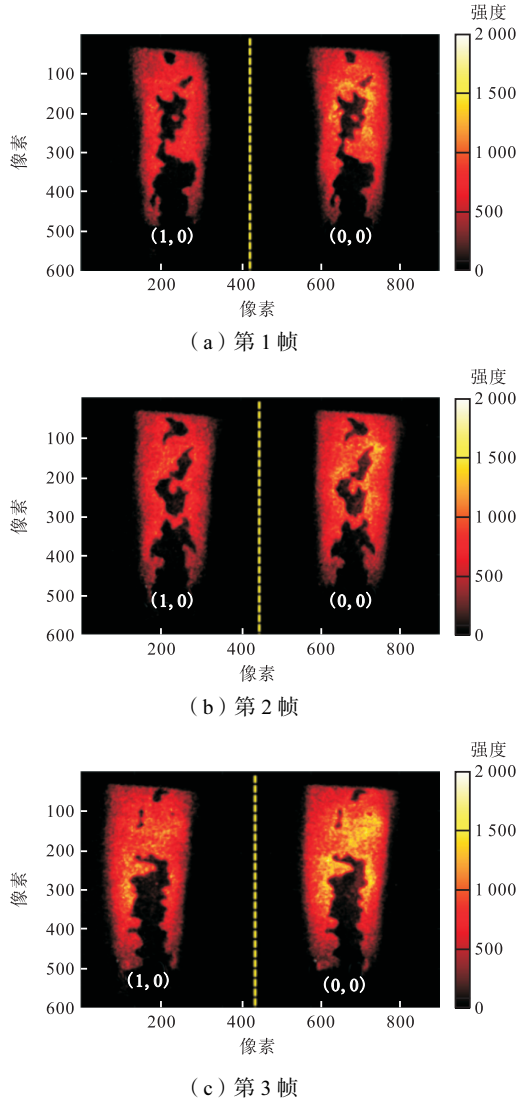
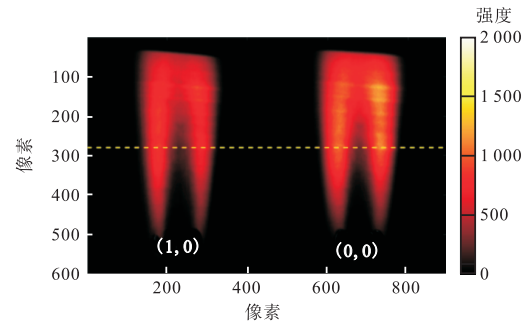


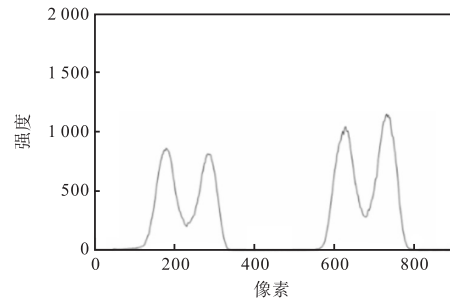
图9 当量比为  $\Phi = 0.952$  时, 间隔 0.1 s 连续 3 帧射流火焰 OH-PLIF 信号图像

Fig.9 When the equivalence ratio is  $\Phi = 0.952$ , the OH-PLIF signal images of the jet flame captured at intervals of 0.1 s for three consecutive frames

图 11 是热电偶和 PLIF 测温结果对比曲线图, 其荧光信号强度比值与温度关系曲线为图 1 添加修正系数后曲线图, 由图中曲线可看出这种修正虽然不能使两种测量方法得到的绝对温度完全一致, 但可以确保它们在相对趋势上的一致性, 即在不同空间位置的温度高低变化趋势是相同的, 由此可看出热力辅助激光诱导测温方法的可行性.



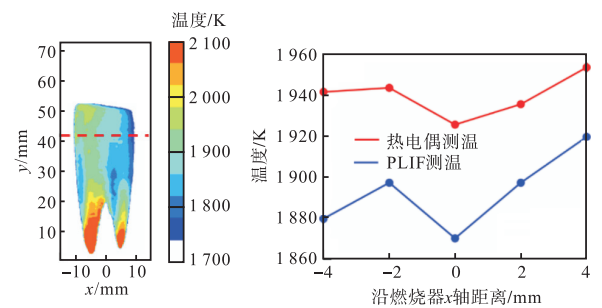
(a) 射流火焰 OH-PLIF 平均信号图像



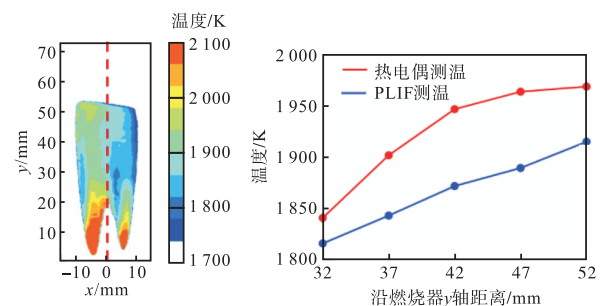
(b)  $y = 280$  时 OH-PLIF 平均信号图像的强度曲线

图 10 当量比为  $\Phi = 0.952$  时, 射流火焰 OH-PLIF 平均信号图像和  $y = 280$  时 OH-PLIF 平均信号图像的强度曲线

Fig.10 When the equivalence ratio is  $\Phi = 0.952$ , average OH-PLIF signal image of the jet flame, intensity curve of the average OH-PLIF signal image at  $y = 280$



(a)  $y = 42$  mm 时热电偶和 PLIF 测温对比曲线



(b)  $x = 0$  mm 时热电偶和 PLIF 测温对比曲线

图 11  $y = 42$  mm 以及  $x = 0$  mm 时, 热电偶和 PLIF 测温对比曲线

Fig.11 Comparison of temperature measurement curves between thermocouples and PLIF at  $y = 42$  mm and PLIF at  $x = 0$  mm

图 12(a)展示了连续 3 帧瞬时温度场,可以看到不同时刻下射流火焰每个区域的温度变化,具有高空间分辨率和时间分辨率. 每帧瞬时温度场均存在一定差异,这是由于火焰燃烧反应区的结构在随着时间不断进行快速动态的变化,单帧图像往往难以全面反映火焰的真实工况,为了获得更准确、稳定的火焰特征,通常需要对多张图像进行平均叠加处理. 这种方法可以有效减少随机误差和瞬时变化带来的干扰,从

而更真实地反映出火焰的整体状况和特征.

将 400 帧瞬时温度场进行平均叠加处理得到的平均温度场如图 12(b)所示,可以看出射流火焰温度分布在不同区域有明显的差异. 火焰的两翼温度较高,由温度曲线图可以更为直观地看出两翼所在位置具有明显的波峰,而边缘部分温度较低,显示出一种略带对称性的温度分布模式,计算出来的二维温度场总体符合真实射流火焰的分布情况.

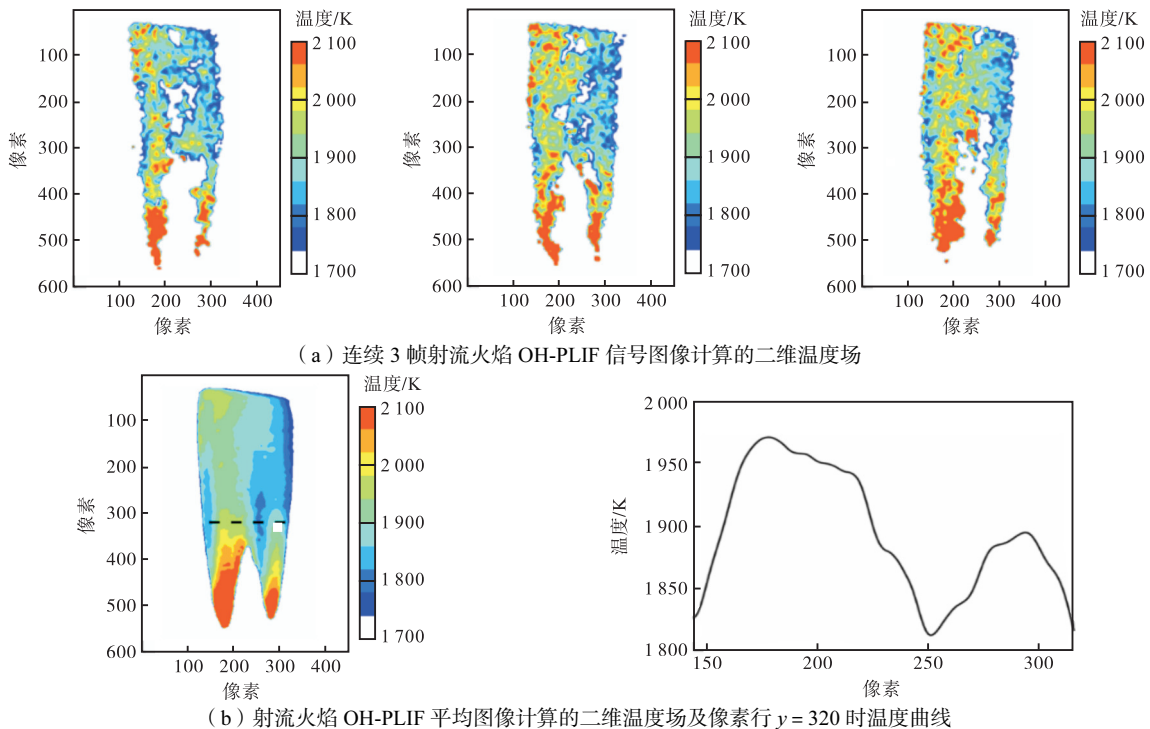


图 12 连续 3 帧射流火焰 OH-PLIF 信号图像计算的二维温度场和射流火焰 OH-PLIF 平均图像计算的二维温度场及像素行  $y = 320$  时温度曲线

Fig.12 Two-dimensional temperature fields calculated from three consecutive frames of OH-PLIF signal images of jet flame, two-dimensional temperature fields calculated from the average OH-PLIF image of jet flames, and the temperature curve at pixel row  $y = 320$

### 2.2 射流火焰三维温度场结果及分析

实际的燃烧流场总是三维分布的,为了构建射流火焰 OH-PLIF 荧光信号的三维结构,需拍摄到不同位置切面的荧光信号图像. 通过精确控制位移台(精度达到 0.01 mm)来调节燃烧器及火焰所处的空间位置,将燃烧器沿着垂直于激光入射面的方向进行移动,保持激光相机固定不动,以拍摄火焰不同位置的 OH-PLIF 图像(见图 13). 本节实验按照 1 mm 的间距对燃烧器的位置进行调整,并开始于最中间位置,向两侧移动,总共进行了 17 组位置调整. 通过这种实验操作方式,能够覆盖火焰结构的整个空间范围,以获取到火焰在不同位置上的信息. 每个位置调整都保证了火焰的特定切面能够被完整地收集到,从而提供了全面的数据基础并获得火焰中心、边缘和过渡区域的 PLIF 图像,确保了对火焰结构的全面了解,

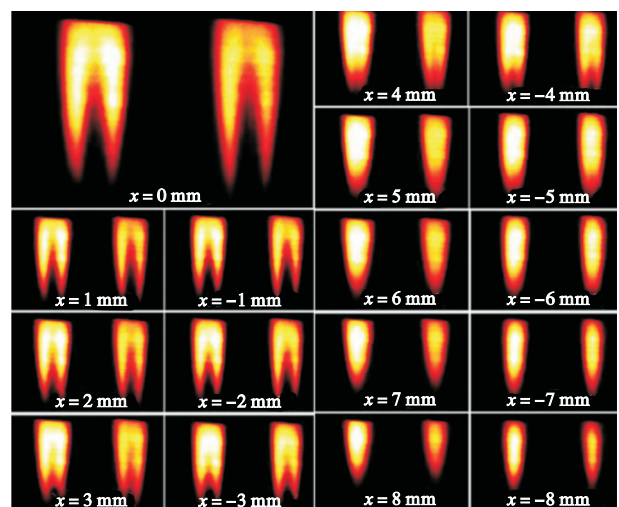


图 13 不同切面的射流火焰 OH-PLIF 平均荧光信号图像  
Fig.13 OH-PLIF average fluorescence signal images of jet flame at different cross-sections

并为进一步的研究和分析提供了充足的数据依据。

图 14 是不同切面的射流火焰 OH-PLIF 平均的荧光信号图像,当  $x = 0 \text{ mm}$  时激光入射面位于射流火焰正中央,因为此位置激光穿过射流火焰的面积最大,此时所拍摄到射流火焰 OH-PLIF 信号图像面积也最大.随着燃烧器不断移动,激光入射面不断偏移火焰中央,所穿过的射流火焰面积不断减小,其拍摄到的荧光信号图像也随之减小,且其荧光信号图像沿中央具有对称性.

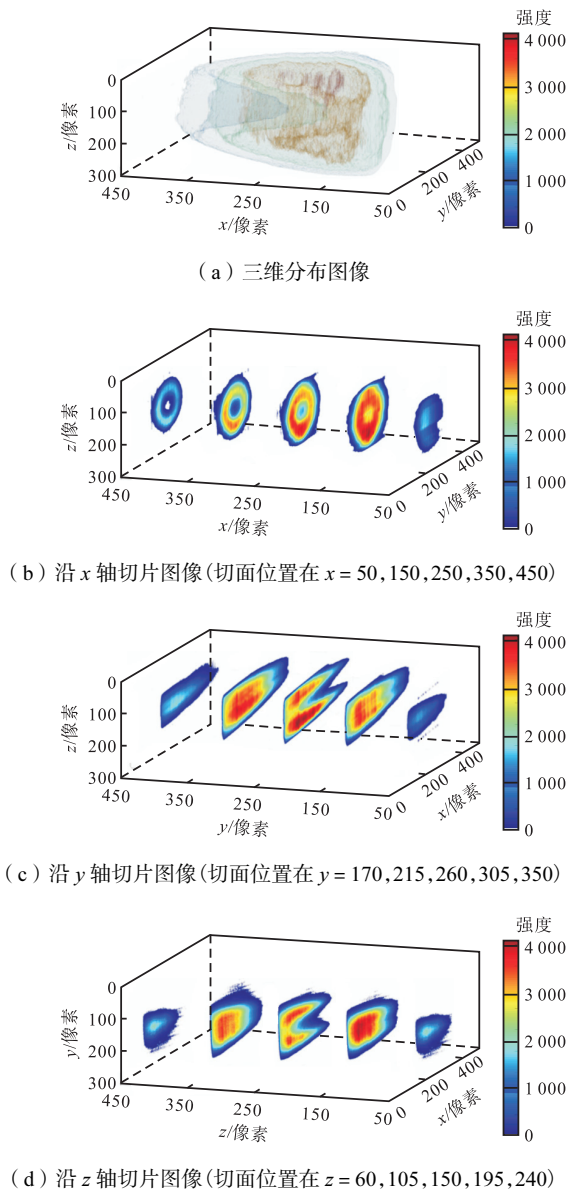


图 14 构建的射流火焰  $(1, 0)$  波段 OH-PLIF 荧光信号三维分布图像及沿  $x$ 、 $y$  轴和  $z$  轴切片图像

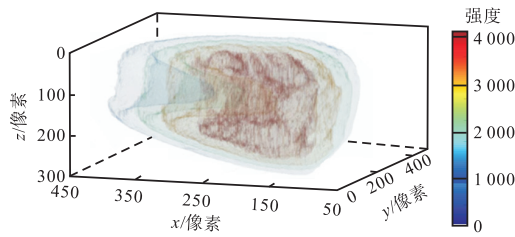
Fig.14 The constructed  $(1, 0)$  band OH-PLIF fluorescence signal of the jet flame three-dimensional distribution image, cross-sectional image along the  $x$ -axis, the  $y$ -axis and the  $z$ -axis

为了能够得到射流火焰三维的 OH-PLIF 荧光信号图像,可通过代码计算火焰在不同位置的二维切片

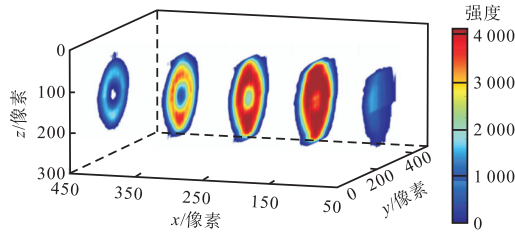
图像.通过读取每张二维切片图像后,将其存储到一个三维数组中的对应位置,根据上文所获得的图像信息,火焰实际  $1 \text{ mm}$  距离对应图像 16 个像素,根据这一关系可以确定其切片图像对应三维数组中的具体位置.接着使用 Matlab 中插值函数的代码实现三维结构构建算法,将二维图像信息构建成三维结构,并设置了 jet 颜色映射,以便于观察和区分荧光信号图像的不同信号强度区域.在显示切片图像时,使用了函数 imagesc 将三维数组中的特定切片以二维灰度图像的形式呈现,并对图像进行了颜色轴范围和颜色条的设置,以确保显示效果清晰和直观.此外,还展示了多个切片图像,分别显示了火焰在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向上的切片,以全面展示火焰的形态和分布.最后,利用 isosurface 函数在三维空间中绘制了火焰的表面,通过选择特定的阈值来控制显示的细节.这样的三维可视化结果能够更直观地理解火焰的立体结构和空间分布.

图 14 和图 15 是展示了射流火焰在  $(1, 0)$  和  $(0, 0)$  波段的 OH-PLIF 荧光信号的三维分布图像以及沿各个轴的切片图像.从图中可以清晰地观察到三维荧光信号图像展现了射流火焰的空间曲线形状,整体结构呈现出上端较粗、下端较窄的圆柱形,与真实火焰结构相近.内部空腔的存在可以归因于射流火焰的结构性质,导致火焰内焰的 OH 基含量较少.沿着  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三轴分别对三维荧光信号图像进行切片,其切片图像呈现出较好的对称性.在中央区域,荧光信号最强,随着向两侧逐渐减弱.这一变化规律与二维切片荧光信号图像的表现一致,进一步验证了结果的准确性,这些观察结果揭示了射流火焰的荧光信号三维分布特征.

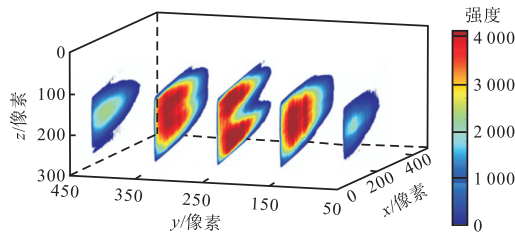
图 16 是不同切片位置的射流火焰平均温度场,由图 16 可看出高温区域主要集中于火焰的两翼,这些区域显示出最高的温度测量值,标志着火焰在这些区域的燃烧最为剧烈,随着中央区域往外温度逐渐降低,形成了明显的温度梯度,直至到达火焰的外围区域.而在外围冷却区域,由于与周围介质的热交换,火焰温度进一步降低,燃烧反应基本结束,且沿着中轴线对称分布的射流火焰平均温度场表现出一种轴对称性质.在射流火焰的三维温度场立体图像中,可以观察到温度随空间位置的变化情况.为了更直观地观察射流火焰三维温度场,将三维温度场沿着  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴进行了切面展示.例如,沿着  $x$  轴切面揭示了火焰温度在火焰射流方向上的变化情况,此切面温度场呈现一个圆形状,随着高度的增加面积先扩大后逐渐缩小,圆形火焰切面温度场呈现出中心区域温度较



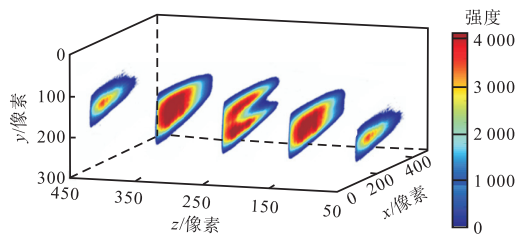
(a) 三维分布图像



(b) 沿 x 轴切片图像(切面位置在  $x = 50, 150, 250, 350, 450$ )



(c) 沿 y 轴切片图像(切面位置在  $y = 170, 215, 260, 305, 350$ )



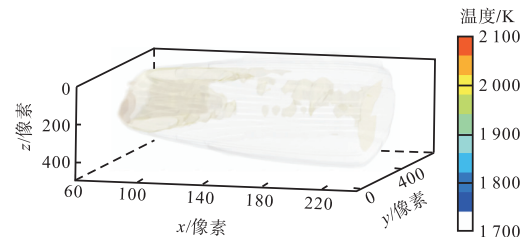
(d) 沿 z 轴切片图像(切面位置在  $z = 60, 105, 150, 195, 240$ )

图 15 构建出来的射流火焰  $(0, 0)$  波段 OH-PLIF 荧光信号三维分布图像及沿 x 轴、y 轴和 z 轴切片图像

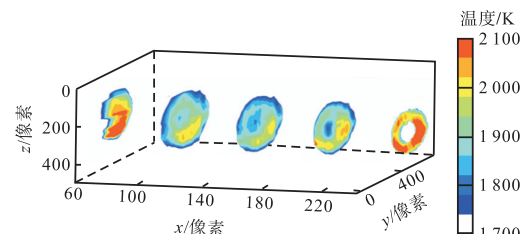
Fig.15 The constructed  $(0, 0)$  band OH-PLIF fluorescence signal of the jet flame Three-dimensional distribution image, Cross-sectional image along the x-axis, the y-axis and the z-axis

低, 环绕在中心区域的中环区域温度较高, 而外环区域温度再次下降的特征, 这种温度分布形态形成了一个明显的温度梯度, 从火焰中心向外辐射. 这种逐渐变化的温度分布反映了火焰内部燃烧过程和热传导的复杂性, 中心区域温度较低可能原因是氧气和燃料的相对缺乏, 而中环区域温度较高与燃料和氧气的混合燃烧有关, 外环区域温度再次下降主要是受到环境气体对流和扩散的影响.

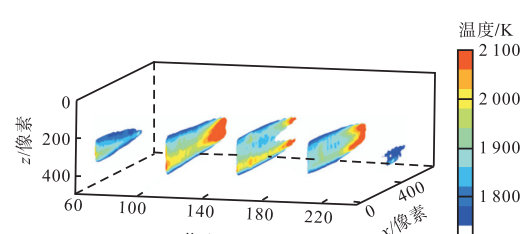
图 17 是构建出来的三维温度分布图像中央 xz 轴切面的二维温度场和其与热电偶测量结果对比曲线图. 在构建得到的三维温度场中, 选择了一个与原



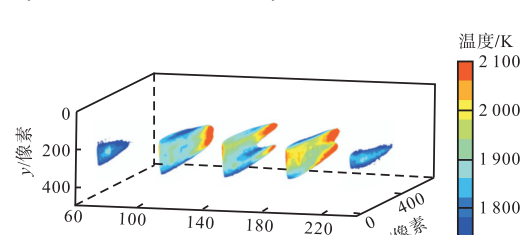
(a) 三维分布图像



(b) 沿 x 轴切片图像(切面位置在  $x = 50, 150, 250, 350, 450$ )



(c) 沿 y 轴切片图像(切面位置在  $y = 170, 215, 260, 305, 350$ )



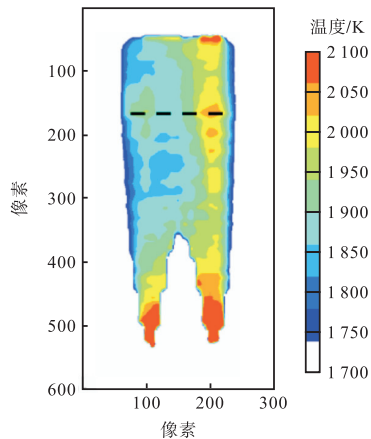
(d) 沿 z 轴切片图像(切面位置在  $z = 70, 110, 150, 190, 230$ )

图 16 射流火焰平均温度场三维分布图像, 沿 x 轴、y 轴和 z 轴切片图像

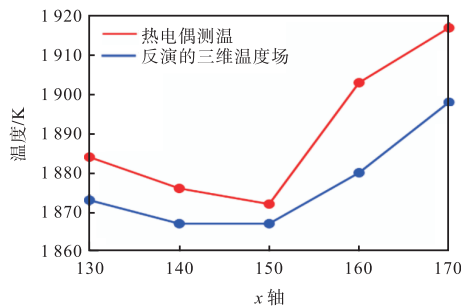
Fig.16 Average temperature field of the jet flame Three-dimensional distribution image, Cross-sectional image along the x-axis the y-axis and the z-axis

先二维温度场如图 17 测量切面垂直的截面进行进一步的分析, 这种选择允许从完全不同的角度来观察火焰的温度特性, 从而验证三维温度场的准确性. 此温度切面与热电偶在相应位置的测温结果进行对比, 同样发现两者在趋势上一致, 但在温度曲线的陡峭程度上依旧存在差异. 这种趋势上的一致性再次验证了热力辅助荧光测温方法的可靠性, 即便是在从不同角度和维度进行测量时, 所获得的温度信息都与传统的热电偶测量结果在趋势上保持一致, 至于曲线陡峭程度的差异, 这可能归因于两种测量方法本身的特性差异或是系统测量系统的微小误差, 这需要进一步的研

究来深入探讨.



(a) 射流火焰三维温度分布图像中央  $xz$  轴切面的二维温度场



(b) 热电偶和温度场测温结果随  $x$  轴对比曲线

图 17 射流火焰三维温度分布图像中央  $xz$  轴切面的二维温度场及  $y = 185$  时热电偶和温度场测温结果随  $x$  轴对比曲线

Fig.17 Two-dimensional temperature field of the jet flame's three-dimensional temperature distribution image at the central  $xz$ -plane, Comparison curve of thermocouple and temperature field measurement results at  $y = 185$  for the temperature field in along the  $x$ -axis

### 3 结 论

(1) 本研究对传统的热力辅助激光诱导荧光 (LIF) 方法进行了深入探索, 通过引入创新的单相机双光路信号收集系统, 不仅显著降低了实验成本, 还简化了操作流程. 这一系统采用独特的光学配置, 能够使单台相机同步捕捉两个不同波段的荧光信号, 为燃烧流场的二维温度场测量提供了一种既经济又高效的解决方案. 将这一改进方法应用于射流火焰的实验中, 成功地获取了其二维温度场, 并通过与热电偶测温结果的对比分析, 验证了该方法在测量稳态火焰温度场方面的高可靠性.

(2) 通过多个不同切面位置的二维温度场, 得到了射流火焰的三维温度场分布图像, 并将其与热电偶测温结果进行了对比分析, 进一步确认了测量结果的

准确性.

展望未来, 笔者计划进一步探索该技术在不同燃烧条件下的应用, 并致力于提高测量精度. 这将有助于我们更深入地理解燃烧过程的内在机制, 为燃烧技术的创新和发展提供坚实的科学依据和技术支持.

### 参考文献:

- [1] Graça M, Duarte A, Coelho P J, et al. Numerical simulation of a reversed flow small-scale combustor[J]. *Fuel Processing Technology*, 2013, 107: 126-137.
- [2] Gupta S, Arghode V K. Investigation of a reverse-cross flow combustor with varying fuel injection momentum [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2019, 10: 232-244.
- [3] Undapalli S, Srinivasan S, Menon S. LES of premixed and non-premixed combustion in a stagnation point reverse flow combustor[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(1): 1537-1544.
- [4] 姜宗林. 关于吸气式高超声速推进技术研究的思考 [J]. *力学进展*, 2009, 39(4): 398-405. Jiang Zonglin. Reasoning on development of air-breathing hypersonic propulsion technology[J]. *Advances in Mechanics*, 2009, 39(4): 398-405 (in Chinese).
- [5] Yuan S. On supersonic combustion[J]. *Science in China (Series A: Mathematics)*, 1999, 42: 171-179.
- [6] Lucht R P, Laurendeau N M, Sweeney D W. Temperature measurement by two-line laser-saturated OH fluorescence in flames[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(20): 3729-3735.
- [7] Malbois P, Salaün E, Rossow B, et al. Quantitative measurements of fuel distribution and flame structure in a lean-premixed aero-engine injection system by kerosene/OH-PLIF measurements under high-pressure conditions[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(4): 5215-5222.
- [8] Starner S H, Bilger R W. Characteristics of a piloted diffusion flame designed for study of combustion turbulence interactions[J]. *Combustion and Flame*, 1985, 61(1): 29-38.
- [9] Crosley D R, Smith G P. Vibrational energy transfer in laser-excited  $A^2\Sigma^+$  OH as a flame thermometer[J]. *Applied Optics*, 1980, 19(4): 517-520.
- [10] Dyer M J, Crosley D R. Two-dimensional measurements of OH concentration and temperature in reactive flows[R]. United States, 1984.

- [11] Copeland C, Friedman J, Renksizbulut M. Planar temperature imaging using thermally assisted laser induced fluorescence of OH in a methane-air flame[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007, 31(3): 221-236.
- [12] Joklik R G. OH Vibrational thermally-assisted laser induced fluorescence temperature measurements in flames[J]. *Combustion Science and Technology*, 1993, 87(1-6): 109-125.
- [13] Kienle R, Lee M P, Kohse-Höinghaus K. A detailed rate equation model for the simulation of energy transfer in OH laser-induced fluorescence[J]. *Applied Physics B*, 1996, 62: 583-599.
- [14] Chan C, Daily J W. Measurement of temperature in flames using laser induced fluorescence spectroscopy of OH[J]. *Applied Optics*, 1980, 19(12): 1963-1968.
- [15] Dulin V, Sharaborin D, Tolstoguzov R, et al. Assessment of single-shot temperature measurements by thermally-assisted OH PLIF using excitation in the  $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi(1-0)$  band[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(1): 1877-1883.
- [16] Bülter A, Lenhard U, Rahmann U, et al. LASKIN: Efficient simulation of spectra affected by energy transfer[C]//*Laser Applications to Chemical and Environmental Analysis*. Annapolis, Maryland, USA, 2004: Paper TuE4.