

# 光学学报

## 基于羟基标记的速度、温度同时测量技术

叶景峰<sup>1\*</sup>, 李国华<sup>1</sup>, 邵珺<sup>1\*\*</sup>, 张振荣<sup>1</sup>, 王晟<sup>1</sup>, 胡志云<sup>2</sup>, 陶蒙蒙<sup>1</sup>

<sup>1</sup>西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710028;

<sup>2</sup>上海交通大学四川研究院, 四川 成都 610200

**摘要** 基于羟基标记示踪速度测量技术,研究了基于该技术中激光光解水产生的 $\text{OH}^-$ 进行温度测量的双色平面激光诱导荧光(PLIF)方法和荧光强度测温方法,进而开发了一种新的速度、温度同时测量技术,并在电加热流场及超燃冲压发动机流场进行了测量验证。在室温至 900 K 的温度范围内,与热电偶温度测量结果比,基于光解 $\text{OH}^-$ 的双色 PLIF 温度测量的平均标准偏差为 12.1 K,基于光解 $\text{OH}^-$ 荧光强度的温度测量最大偏差为 16.8 K,速度测量不确定度在 1% 以内。在超燃冲压发动机流场中,利用 CARS 温度测量数据作为温度测量标定点,获得了标记线上温度、速度的同时测量结果,其中所得温度与 CARS 温度测量结果的最大偏差为 44 K。

**关键词** 测量; 速度温度同时测量; 羟基示踪; 光解离; 激光诊断

中图分类号 TN249;TK16

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230982

### 1 引言

流体动力学与化学反应动力学的耦合是湍流燃烧研究的难点之一,尤其对于实际发动机湍流燃烧过程中复杂的化学物理相互作用机理的理解和阐明,往往需要两个或更多物理量的同时测量结果,而温度和速度是其中两个关键参数。多种激光燃烧诊断技术已在燃烧研究中得到广泛应用,比如相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)<sup>[1-3]</sup>和可调谐半导体吸收光谱(TDLAS)<sup>[4-5]</sup>技术被用于温度测量,自发拉曼散射(SVRS)<sup>[6-7]</sup>技术被用于主要组分浓度测量,粒子成像测速(PIV)<sup>[8]</sup>和分子标记测速(MTV)<sup>[9]</sup>技术被用于流场速度测量,平面激光诱导荧光(PLIF)<sup>[10-11]</sup>技术被用于流场成像等。同时,研究人员也在致力于燃烧场多参数联合测量技术的研究,其中对于温度、速度两个关键参数的同时测量,主要通过两种途径实现。一是利用多技术联合,比如:Most等<sup>[12]</sup>采用PIV联合过滤瑞利散射(FRS)的方法,实现了甲烷/空气湍流火焰的速度和温度分布同时测量;Dogariu等<sup>[13]</sup>利用相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)和飞秒激光电子激发标记(FLEET)技术的组合,开展了Mach18高速风洞流场的速度和温度测量;张斌等<sup>[14]</sup>结合光偏折层析测温方法与粒子图像测速方法,开展了旋流火焰三维温度场与速度场的同时测量。二是利用测量技术本身的特点,开发拓展多参数测量功能,比如:Hu等<sup>[15]</sup>基于

MTV技术开发了基于分子标记的速度、温度同时测量技术并对圆柱体绕流、液滴场进行测量等;Edwards等<sup>[16]</sup>在开发FLEET速度测量技术的同时,利用标记信号光谱得到分子转动能级布居,同时得到流场的温度信息;Zhou等<sup>[17]</sup>基于温度敏感染料分子的PLIF技术开展了多相流温度与速度的同时测量研究。

羟基分子标记测速(HTV)技术<sup>[18]</sup>是利用激光与流场中的水分子相互作用解离产生 $\text{OH}^-$ (下文将HTV技术中激光解离水产生的 $\text{OH}^-$ 记为 $\text{OH}_p$ )作为流场标记分子,并利用平面激光诱导荧光显示不同时刻的 $\text{OH}_p$ 位置的一种速度测量技术。它不需要额外向流场注入示踪粒子,无粒子跟随性问题,且 $\text{OH}_p$ 标记分子在高温环境中寿命长,在高温高速流动的速度测量中具有优势,已经较广泛地用于超燃冲压发动机流场、超音速风洞内流场、旋转爆震流场等的速度测量<sup>[19-22]</sup>。本课题组在HTV技术研究的基础上,提出一种利用 $\text{OH}_p$ 标记分子的温度测量技术,开发了基于 $\text{OH}_p$ 的双色PLIF和 $\text{OH}_p$ 荧光强度的测温方法,实现了流场温度和速度的同时测量。本文从技术原理、测量装置以及高温流场中的温度速度测量验证等方面对该技术的进展进行总结。

### 2 测量原理

HTV技术的速度测量原理可参见文献[18,23],本文不再赘述。实现速度、温度同时测量的重点是基

收稿日期: 2023-05-23; 修回日期: 2023-06-18; 录用日期: 2023-07-04; 网络首发日期: 2023-08-02

基金项目: 国家自然科学基金(91641112)、激光与物质相互作用国家重点实验室基础课题(SKLLIM1808)

通信作者: \*yejingfeng@nint.ac.cn; \*\*shaojun@nint.ac.cn

于 OH<sub>p</sub> 实现温度测量。本文研究了两种实现温度测量的途径：一是双线 PLIF 温度测量方法，在 HTV 技术显示 OH<sub>p</sub> 标记图像使用的 PLIF 装置的基础上，再增加一套 PLIF 装置，通过双色 PLIF 方式实现温度测量；二是 OH<sub>p</sub> 荧光强度测温方法，通过分析 OH<sub>p</sub> 荧光强度与温度之间的关系，选择合适的荧光激励谱线，使得荧光强度在待测对象的温度范围内随温度单调变化，从而利用荧光强度实现对温度的反演。

### 2.1 OH<sub>p</sub> 双色 PLIF 测温方法

OH-PLIF 双色测温方法是一种传统的基于燃烧化学反应产生的 OH<sup>-</sup> 进行二维温度场测量的方法，它采用两束波长不同的激光在短时间内相继激发温度响应差别较大的 OH<sup>-</sup> 的两个转动能级跃迁  $i \rightarrow i'$ 、 $j \rightarrow j'$ ，根据式(1)可由荧光强度比得到燃烧场温度。

$$R = \frac{S_{i'}}{S_j} = \frac{(I_i B_{ii'} \phi_i \eta)_i}{(I_j B_{jj'} \phi_j \eta)_j} \cdot \frac{2J_i + 1}{2J_j + 1} \cdot \exp\left(-\frac{E_i - E_j}{kT}\right) = C_R \exp\left(\frac{-\Delta E_{ij}}{kT}\right), \quad (1)$$

式中： $S_{i'}$  为基态  $i$  的能级激励荧光强度； $I$  为激光强度； $B_{ii'}$  为从能级  $i$  到能级  $i'$  的爱因斯坦吸收系数； $\phi_i$  为激励  $i$  能级时的荧光量子产率； $\eta_i$  为激励  $i$  能级时的系统探测效率； $J_i$ 、 $E_i$  分别为  $i$  能级的转动量子数和基态能级能量； $k$  为玻尔兹曼常数；参量  $C_R$  通常为一常量，一般通过实验标定获取； $\Delta E_{ij}$  为能级  $i$ 、 $j$  的能量差。

温度测量不确定度系统误差可分为两类：测量设备的硬件误差及测量技术的理论及实验方法误差。硬件误差主要包括激光器引入的激励线波长漂移、解离及激励能量抖动误差和相机引入的散射背景、相机暗噪声及单帧散粒噪声误差；实验方法误差主要包括双线标定及猝灭影响引入的误差，分别表现在荧光强度测量及温度反演两个过程中。

荧光强度与激励线和吸收线重合度、荧光激励激光能量、相机接收效率等直接相关，其中波长漂移、激光能量抖动均会导致最终测量结果的变化，对温度测量产生 1%~3% 的影响，且可通过实验方法进行修正，而在荧光测量过程中叠加在荧光图像上的散粒噪声对温度测量的影响最大且难以扣除，仅由散粒噪声导致的相邻像素点强度差异可达到 10%，成为温度测量不确定度的主要来源。对多幅图像取平均值可较好地抑制随机噪声的影响，但仅适用于稳定流场的测量，在瞬态流场测量中需要使用空间滤波、区域取均值的方式控制散粒噪声的影响，例如以降低空间分辨能力为代价，对 10 pixel×10 pixel 范围取均值，则均值散粒噪声影响下降至未平均时的 1/10。

在双线 PLIF 温度测量时需进行温度反演系数的标定，在与测量对象状态相近的温度为  $T_0$  的火焰中标定时获得荧光强度比  $R_0$ ，则荧光强度比为  $R$  时的待测流场温度  $T$  可由  $R_0$ 、 $T_0$  表示：

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{k \ln(R/R_0)}{\Delta E_{ij}}. \quad (2)$$

标定过程中，标定误差主要来源于对标定火焰温度和荧光强度比的提取。标定火焰通常由标准燃烧器提供，其温度可由来流配比计算得出或者由其他温度测量方法检测，例如由修正后的热电偶数据或测温精度较高的 CARS 测量给出，而荧光强度比可通过多幅图像数据平均结合空间平均的方式进行准确提取。

由于 HTV 技术中 OH<sub>p</sub> 来自激光对水分子的解离，其能级布居必须符合热平衡状态才可用于温度测量。根据光解离理论，193 nm 激光与水作用产生 OH<sub>p</sub> 部分处于转动高能态，在激光作用的过程中必然处于非平衡状态，在激光作用约 20 ns 后，通过能级转移达到平衡状态，并通过热交换使其温度与周围环境趋于一致。为了获得 OH<sub>p</sub> 能级布居平衡延时时间，选择 OH<sup>-</sup> 离子 Q<sub>1</sub> 系列 [Q<sub>1</sub>( $i$ ),  $i=1, 5, 10$ ] 作为荧光激励线进行荧光强度分析。通过改变荧光激励和激光解离之间的延迟时间，得到各激励线下荧光强度随延迟时间的变化，如图 1 所示。可以看到，在延迟时间大于 500 ns 以后，各基态能级粒子数随总粒子数等比例变化，此时 OH<sub>p</sub> 已与周围环境达到热平衡状态，可用作流场温度测量的探针分子。利用 HTV 技术进行速度测量时，荧光激励和激光解离之间的延迟时间通常设置在  $\mu$ s 量级：对于流速约为 1000 m/s 的流场，其延迟时间通常设为 1~2  $\mu$ s；对于流速约为 100 m/s 的流场，其延迟时间通常设为 10  $\mu$ s 左右。因此，利用 OH<sub>p</sub> 进行流场速度、温度同时测量是可行的，且其温度测量可用于非反应流场中，这就拓宽了双色 OH-PLIF 测温技术的应用范围。

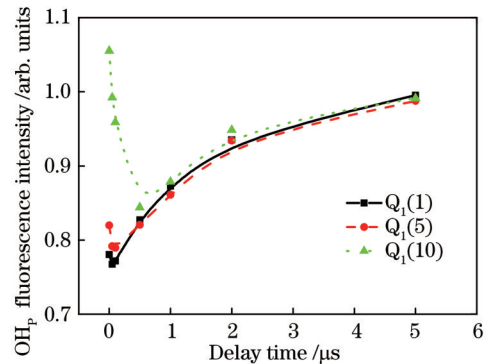


图 1 燃烧流场 Q<sub>1</sub> 系列几条跃迁线激励下 OH<sub>p</sub> 荧光强度随延迟时间的变化

Fig. 1 Changes of OH<sub>p</sub> fluorescence intensity with delay time excited by several transition lines of Q<sub>1</sub> series in combustion flow field

### 2.2 OH<sub>p</sub> 荧光强度测温方法

193 nm 激光与水分子作用的 OH<sub>p</sub> 产额可表示为

$$n_{OH} = \sum_i \frac{f_i n_{H_2O} \sigma_i E_0 \lambda}{hcA}, \quad (3)$$

式中:  $n_{\text{H}_2\text{O}}$  为水分子数;  $f_i$  为水分子在  $i$  振动态上的布居分数;  $\sigma_i$  为  $i$  振动态水的吸收截面;  $E_0$  为入射激光能量;  $\lambda$  为解离激光波长;  $h$  为普朗克常数;  $c$  为真空中的光速;  $A$  为光束截面积。  $f_i$  是温度的函数, 在热平衡条件下符合玻尔兹曼分布规律, 图 2 给出了在 500~2500 K 温度范围内, 利用式 (3) 模拟的  $\text{OH}_p$  粒子数 ( $n_{\text{OH}_p}$ ) 随温度的变化。温度的升高使得更多的水分子布居在高的振动能级上, 在波长为 193 nm 的激光作用下更有利于发生解离<sup>[18]</sup>,  $\text{OH}_p$  产额随温度的升高而增加。

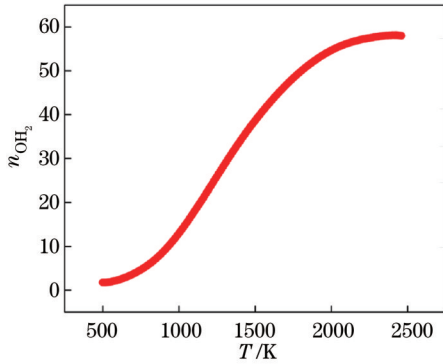


图 2  $\text{OH}_p$  产额随温度的变化  
Fig. 2 Variation of  $\text{OH}_p$  yield with temperature

当利用激光诱导荧光对  $\text{OH}_p$  进行显示时, 选择某一荧光激励线进行激励, 荧光强度  $S_j$  可表示为

$$S_j = C_s n_{\text{OH}_p} \exp(-E_j/kT) / \sum \exp(-E_j/kT), \quad (4)$$

式中:  $C_s$  为标定系数。综合式 (3), 可得

$$S_j = \frac{C_s \sum_i \frac{f_i n_{\text{H}_2\text{O}} \sigma_i E_0 \lambda}{hcA} \exp[-E_j/(kT)]}{\sum \exp[-E_j/(kT)]}. \quad (5)$$

因此, 选择某一荧光激励线激发  $\text{OH}_p$  产生的荧光强度随温度的变化一方面与  $\text{OH}_p$  产额和温度的关系有关, 另一方面与所选择的荧光激励线强度和温度的关系有关。若选择合适的荧光激励线, 使得在期望的温度范围内  $\text{OH}_p$  荧光强度与温度呈单调关系, 则在流场中水分子分布相对均匀的情况下, 可通过其荧光强度来反映流场温度分布。图 3 所示为 500~2500 K 温度范围内, 选择荧光激励线  $P_1(1\sim5)$  时,  $\text{OH}_p$  荧光强度随温度的变化情况。可以看到, 对于图 3 中的几条激励线, 在 700~2500 K 范围内荧光强度随着温度的增加而单调增大, 其中  $P_1(4)$  和  $P_1(5)$  在 500~2500 K 温度范围内, 其荧光强度均随温度的增加而单调增大。由此可见, 选择合适的荧光激励线, 可利用  $\text{OH}_p$  荧光强度对温度进行反演。在不同的测量环境和实验设置条件下, 由于流场中水分子分布、所使用的激光强度、相机参数、测量背景等影响因素不同, 实际测量环境中  $\text{OH}_p$  荧光强度随温度的变化关系会有所改变, 但这些因素带来的变化是

线性的, 因此只需要在两个已知温度点对测量系统进行标定, 就可得到实际测量环境中  $\text{OH}_p$  荧光强度与温度的对应关系曲线, 进而对其他温度值进行反演。标定温度可通过其他温度测量技术(如 CARS 测温技术)获得。

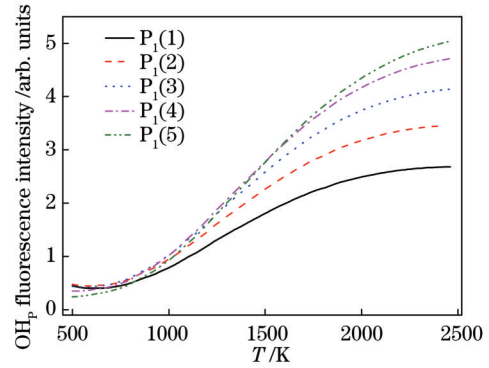


图 3  $\text{OH}_p$  荧光强度随温度的变化  
Fig. 3 Changes of  $\text{OH}_p$  fluorescence intensity with temperature

### 3 实验装置

基于  $\text{OH}_p$  的温度、速度同时测量实验装置如图 4 所示, 主要由解离激光装置 ArF 准分子激光器、两套 PLIF 光源装置、两台 ICCD 相机及辅助的波长计、光路系统组成。将 ArF 准分子激光器输出的激光整形为一条激光线垂直入射到流场中作为标记激光线, 两套染料激光器倍频输出组成双色  $\text{OH}$ -PLIF 激励光源, 双波长荧光激励激光通过偏振合束, 随后通过微透镜阵列整形为均匀片状光束, 该荧光激励激光片入射到流场后与解离激光共面传播, 实现对  $\text{OH}_p$  的双跃迁线激励荧光强度测量。两台 ICCD 相机垂直于光片放置, 分别拍摄两组 PLIF 光源所激发的  $\text{OH}_p$  荧光图像; 在相机前安装 Semrock FF02-320/40 带通滤光片, 以滤除杂散光干扰。使用时序控制器分别控制 ArF 准分子激光器、两套 PLIF 光源和两台 ICCD 相机的工作时刻。ArF 激光器率先工作, 延时  $t_d$  后两套 PLIF 光源装置分别出光, ICCD 相机与荧光激励光近乎同步进行荧光拍摄。为避免荧光激励激光之间的相互干扰, 两套 PLIF 系统的时间间隔为 50 ns, 相机门宽为 20 ns。ArF 准分子激光器的能量设置为 20 mJ/pulse, 能量密度约为  $2 \text{ mJ} \cdot \text{mm}^{-2}$ ; PLIF 激励激光能量为 5 mJ/pulse, 能量密度约为  $200 \mu\text{J} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。

将一台电加热流场模拟装置用于模拟高温非反应流场, 其示意图见图 5, 通过电加热器实现对气体的加热和温度控制, 通过气体流量计控制气流组分和流速。通过气体管路上安装的加湿器给流场中加入一定量的水分子。装置出口气体温度为 300~900 K, 通过改变出口处结构(将泡沫铜更换为不同直管)以及气体流量, 气流速度可在 0~300 m/s 范围调节。

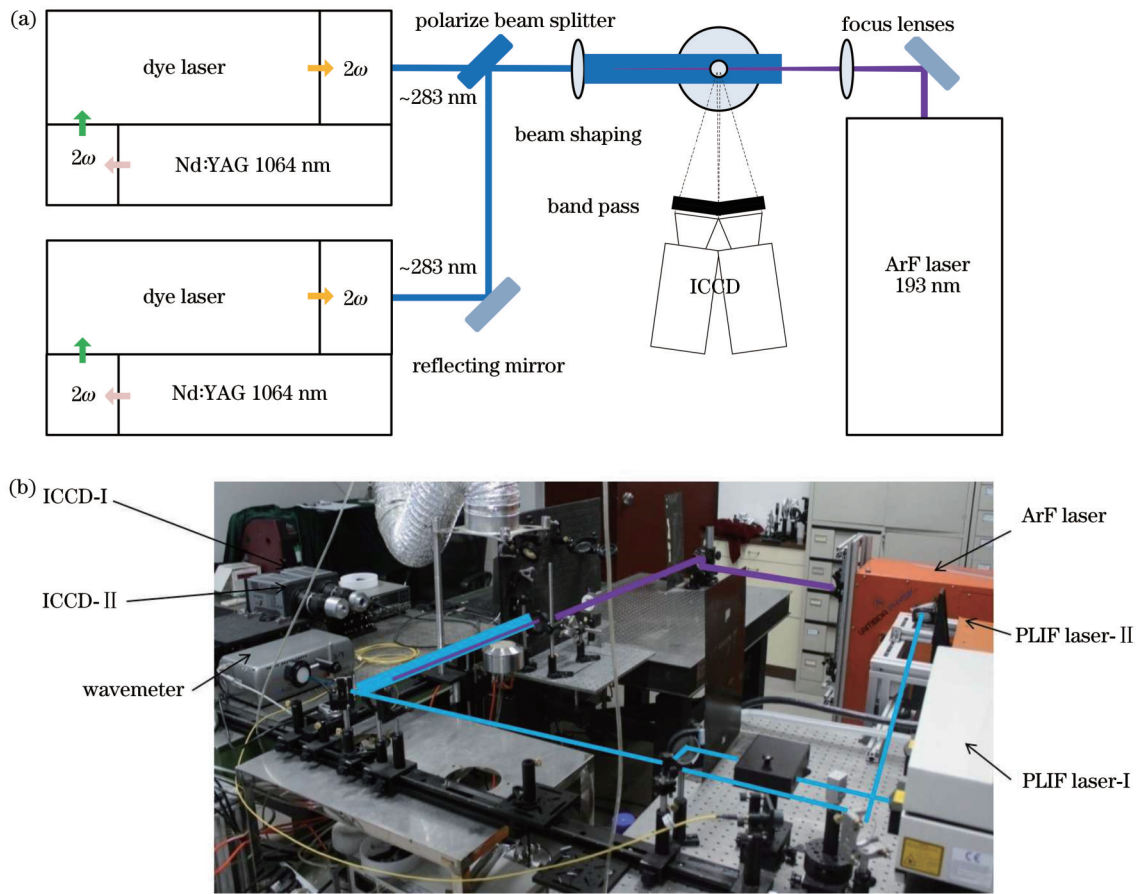


图 4 基于  $\text{OH}_p$  的温度、速度同时测量示意图及装置图。(a) 示意图; (b) 装置图  
 Fig. 4 Simultaneous temperature and velocity measurement diagram and device diagram based on  $\text{OH}_p$ . (a) Schematic drawing; (b) installation drawing

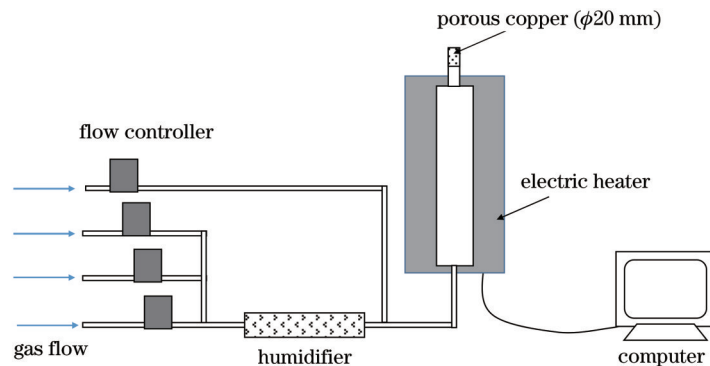


图 5 电加热流场模拟装置  
 Fig. 5 Electric heating flow field simulator

## 4 速度温度同时测量验证

### 4.1 基于双色 $\text{OH}_p$ -PLIF 测温的速度、温度同时测量

综合考虑测温双线温度敏感性差异及荧光信号信噪比,选择  $P_1(4)/P_1(1)$  激励线开展温度测量验证,  $t_d$  设置为  $10 \mu\text{s}$ <sup>[24-25]</sup>。调节气体流量使得流场处于稳定的层流状态,调节电加热器功率来获得不同的温度场,利用热电偶实时测量流场中心区温度,利用双色  $\text{OH}_p$ -PLIF 测量相同空间位置的流场温度,以热电偶测量的

623 K 温度点对 PLIF 测量结果进行标定,得到其他温度点结果,二者测量结果对比<sup>[25]</sup>如图 6 所示,其中黑色方块为热电偶测量结果,红色菱形块为双色  $\text{OH}_p$ -PLIF 测温结果。可以看到,二者符合得较好,在 873 K 热电偶温度处偏差最大,为 25.1 K,在验证的温度范围内平均标准偏差为 12.1 K。

在相同的实验设置下开展速度、温度的同时测量验证,图 7 给出了流场中心温度为 800 K 时的实验结果,其中图 7(a)、(b)分别为由激励线  $P_1(1)$  和  $P_1(4)$  得

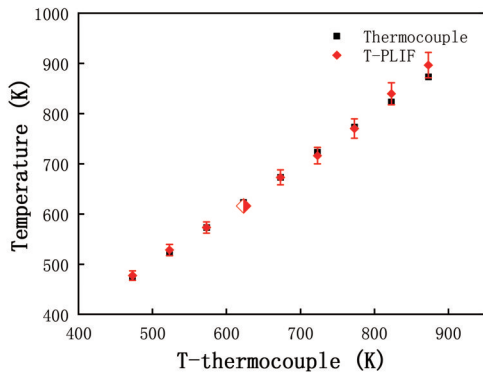


图 6 双线  $\text{OH}_p$ -PLIF 与热电偶测温结果对比<sup>[25]</sup>

Fig. 6 Comparison of temperature measurement results between two-line  $\text{OH}_p$ -PLIF and thermocouple<sup>[25]</sup>

到的荧光图像(100幅图像的平均值),由双色 PLIF 温度反演方法获得的温度分布图像如图 7(c)所示。对

流场中心温度相对稳定的区域进行温度统计,图 7(c)绿色框内  $0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$  区域的温度统计不确定度约为 9%。进一步通过识别图 7(a)中标记线相对于初始位置(图中两侧水平的标记线区域)的变化,用于计算流场速度,流场中轴线位置的流速为  $260\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,标记位置识别方法可参见文献[25-27]。对初始位置标记线识别结果进行分析,得到标记线识别不确定度约为 0.1 pixel,进而得到流场中心位置的速度测量不确定度优于 1%。图 7(d)为图 7(a)中标记线位置处双线  $\text{OH}_p$ -PLIF 的温度、速度同时测量结果。

通过改变解离激光  $d$  和 PLIF 激光的延时时间  $t_d$  设置,可获得不同高度位置流场的速度和温度。图 8 给出了  $t_d$  分别为 1、2、5、10、20、30、40  $\mu\text{s}$  时得到的标记线图像及温度速度测量结果,随高度的增加,温度呈近 e 指数衰减,而流场中心的速度呈现先增加后降低的趋势。

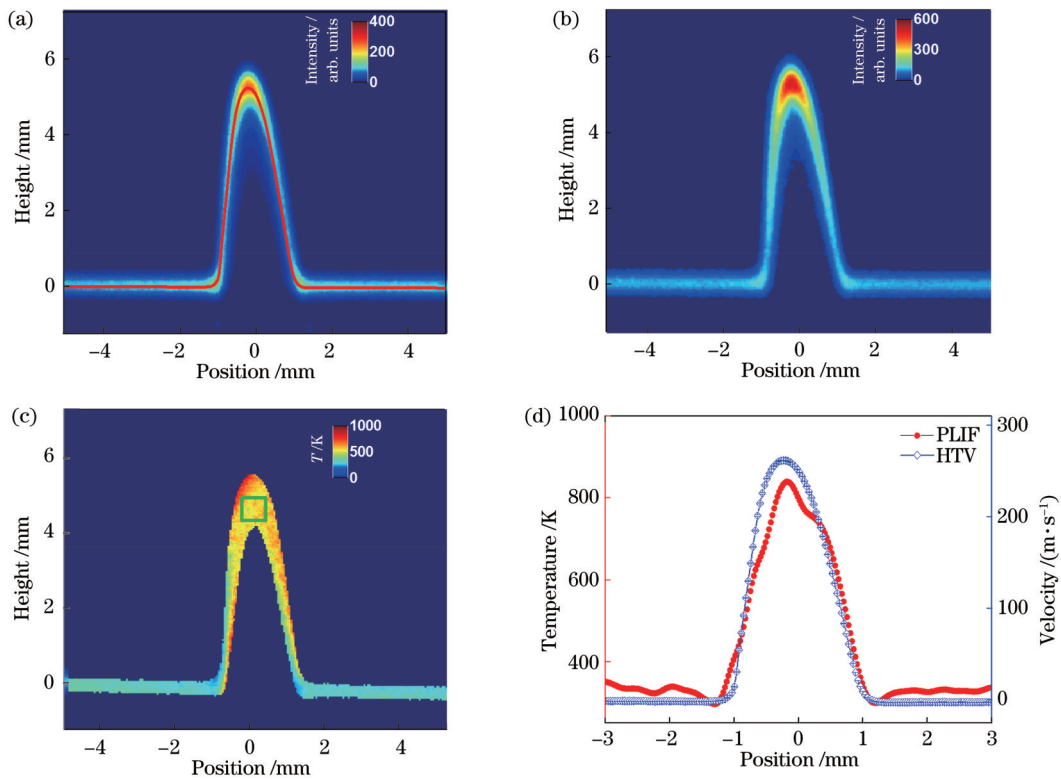


图 7 基于双线  $\text{OH}_p$ -PLIF 的温度、速度同时测量典型结果。(a)速度测量结果;(b) PLIF 实验图像;(c)温度测量结果;(d)速度、温度同时显示结果

Fig. 7 Typical results of simultaneous measurement of temperature and velocity based on two-line  $\text{OH}_p$ -PLIF. (a) Velocity measurement results; (b) PLIF experimental image; (c) temperature measurement results; (d) velocity and temperature simultaneous display results

#### 4.2 基于 $\text{OH}_p$ 荧光强度的速度温度同时测量

按照前文对  $\text{OH}_p$  荧光强度与温度之间的关系,选择  $P_1(4)$  激励线荧光进行分析。取热电偶给出的 523 K 和 773 K 作为温度标定,得到该实验中荧光强度与温度的关系 ( $F-T$ ),并以此计算得到不同荧光强度下的流场温度。图 9 给出了通过该方法得到的温度与热电偶测量温度的对比<sup>[28]</sup>,其中蓝色实心三角为利

用  $\text{OH}_p$  荧光强度反演得到的温度,红色空心圆圈为热电偶测得的温度结果,二者具有良好的一致性,其中在 573 K 热电偶温度处偏差最大,为 16.8 K。对图 7(b)中标记线图像进行速度和温度反演,结果如图 10 所示。由于在射流的周围区域的水分子分布与射流内部存在明显差别,因此图 10 中的温度测量结果与图 7(d)所示的测温结果在射流周围处存在差异,这也说明了

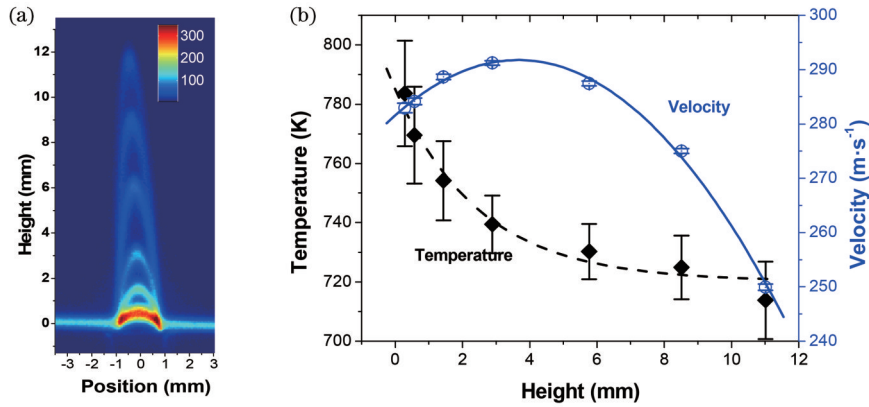


图 8 流场不同高度处温度速度测量结果<sup>[25]</sup>。(a)温度速度实验图像;(b)测量结果

Fig. 8 Temperature and velocity measurements at different heights of flow field<sup>[25]</sup>. (a) Temperature and velocity experimental image; (b) measurement results

利用 OH<sub>p</sub> 荧光强度进行温度测量仅适用于水分子分布较为均匀的流场。

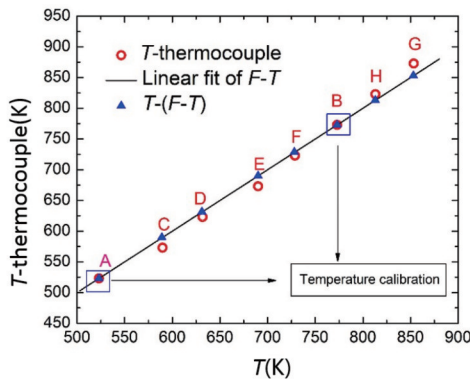


图 9  $F-T$  曲线测得温度与热电偶测得温度对比<sup>[28]</sup>

Fig. 9 Comparison of temperature measured by  $F-T$  curve with that measured by thermocouple<sup>[28]</sup>

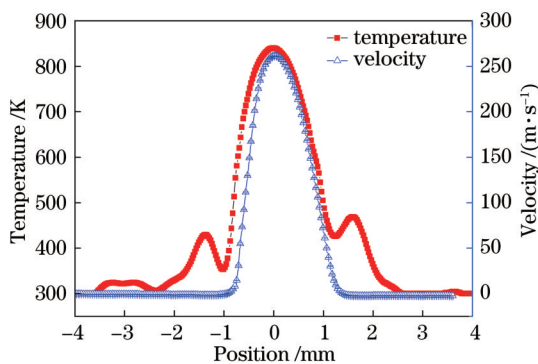


图 10 基于 OH<sub>p</sub> 荧光强度的温度速度测量结果

Fig. 10 Temperature and velocity measurement results based on OH<sub>p</sub> fluorescence intensity

由于利用 OH<sub>p</sub> 荧光强度可以在不增加系统复杂度(不需要其他的温度标定技术)的情况下同时获得流场速度和温度,因此结合 HTV 技术在超燃冲压发动机流场中的速度测量应用,通过对标记强度进行分析,同时获得了发动机内流场的速度、温度信息。图 11

(a)所示为在某超燃冲压发动机燃烧室凹腔处得到的单帧标记荧光图像,两条标记线(左边为线 1,右边为线 2)垂直流场轴线方向穿过流场。利用这两条标记线的空间位置,即可计算出流场沿标记线的速度分布,如图 11(b)所示。按照上述基于 OH<sub>p</sub> 荧光强度的温度反演方法,利用 CARS 技术同时测量标记线 1 上两个位置的温度测量值 670 K 和 1030 K 对标记线荧光强度和温度的关系,得到该环境下的对应关系。反演的流场沿两条标记线的温度分布结果如图 11(b)所示,其中圆圈点为 CARS 技术测量的温度点。从 CARS 测温结果的对比可以看到,在这种实验环境中,利用标记荧光强度反演的温度与 CARS 测温结果具有较好的一致性,几个测量点中的最大温度偏差为 44 K,出现在速度较高且温度较低的位置,图 11(a)显示该位置标记信号强度较弱,因此在温度反演时引入了相对较大的测量误差。

## 5 结 论

HTV 技术是一种适用于高温高速流场的分子标记速度测量技术。基于 HTV 技术中激光解离水产生的 OH<sub>p</sub>,研究了双色 OH<sub>p</sub>-PLIF 温度测量方法和基于 OH<sub>p</sub> 荧光强度的温度测量方法,进而实现了温度、速度的同时测量。其中双色 OH<sub>p</sub>-PLIF 温度测量方法需要对单个温度测点进行标定,基于 OH<sub>p</sub> 荧光强度的温度测量方法需要对两个温度测点进行标定。通过对电加热流场温度、速度的测量验证,在室温至 900 K 的温度范围,与热电偶温度测量结果相比,双色 OH<sub>p</sub>-PLIF 温度测量的平均标准偏差为 12.1 K,基于 OH<sub>p</sub> 荧光强度的温度测量最大偏差为 16.8 K,速度测量不确定度在 1% 以内。利用所研究的温度、速度测量技术在超燃冲压发动机流场进行速度测量,利用 CARS 温度测量数据作为温度测量标定点,获得了标记线上温度、速度的同时测量结果,温度测量结果与 CARS 温度测量结果的最大偏差为 44 K。本工作拓展了 HTV 技术的功

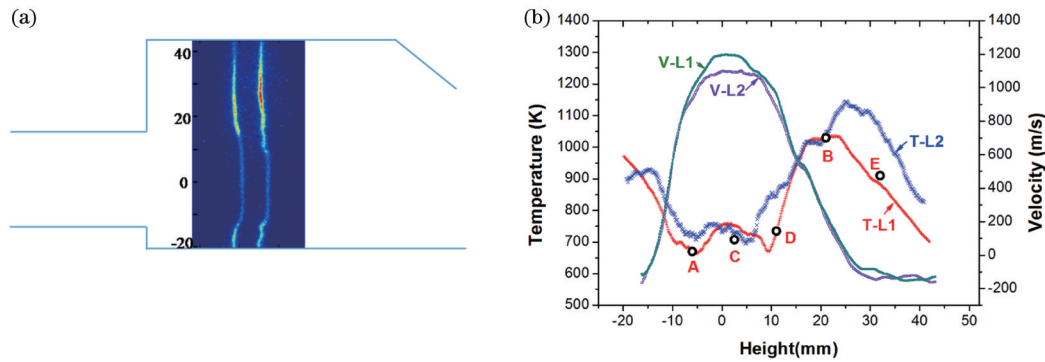


图 11 超燃冲压发动机流场中温度、速度同时测量结果<sup>[26]</sup>。(a)实验图像;(b)测量结果

Fig. 11 Simultaneous measurements of temperature and velocity in the flow field of a supersonic ramjet<sup>[26]</sup>. (a) Experimental image; (b) measurement results

能,为高速高温流场的温度、速度同时测量提供了新的方案。

### 参 考 文 献

- [1] 刘晶儒, 胡志云, 叶景峰, 等. 喷气发动机湍流燃烧场激光定量诊断技术研究进展[J]. 推进技术, 2022, 43(3): 210216.  
Liu J R, Hu Z Y, Ye J F, et al. Development of laser-based quantitative diagnostic techniques for turbulent combustion flow field of jet-engines[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(3): 210216.
- [2] 杨文斌, 齐新华, 李猛, 等. 超燃冲压发动机燃烧室出口温度场分布 CARS 测量[J]. 推进技术, 2022, 43(9): 210190.  
Yang W B, Qi X H, Li M, et al. Outlet temperature measurements of scramjet combustor using coherent anti-stokes Raman scattering[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(9): 210190.
- [3] Satija A, Lucht R P. Development of a combined pure rotational and vibrational coherent anti-Stokes Raman scattering system[J]. Optics Letters, 2013, 38(8): 1340-1342.
- [4] 阚瑞峰, 夏晖晖, 许振宇, 等. 激光吸收光谱流场诊断技术应用研究与进展[J]. 中国激光, 2018, 45(9): 0911005.  
Kan R F, Xia H H, Xu Z Y, et al. Research and progress of flow field diagnosis based on laser absorption spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 0911005.
- [5] 徐毓阳, 余锦, 貂泽强, 等. 腔衰荡吸收光谱技术的研究进展及典型应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1900001.  
Xu Y Y, Yu J, Mo Z Q, et al. Advances in cavity ring-down absorption spectroscopy research and typical applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1900001.
- [6] Dieter K, Koschnick K, Lill J, et al. Development of a Raman spectrometer for the characterization of gaseous hydrocarbons at high temperatures[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2022, 277: 107978.
- [7] 张振荣, 李国华, 叶景峰, 等. 利用拉曼散射法在线测量航空发动机燃烧场主要组分[J]. 现代应用物理, 2016, 7(4): 040303.  
Zhang Z R, Li G H, Ye J F, et al. The online measuring of the major species in aeroengine combustor using Raman scattering method[J]. Modern Applied Physics, 2016, 7(4): 040303.
- [8] 刘洪, 陈方, 励孝杰, 等. 高速复杂流动 PIV 技术研究实践与挑战[J]. 实验流体力学, 2016, 30(1): 28-42.  
Liu H, Chen F, Li X J, et al. Practices and challenges on PIV technology in high speed complex flows[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2016, 30(1): 28-42.
- [9] Li F B, Zhang H B, Bai B F. A review of molecular tagging measurement technique[J]. Measurement, 2021, 171: 108790.
- [10] 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.
- [11] 金川, 蒋利桥, 李凡, 等. 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[J]. 中国激光, 2022, 49(13): 1304001.  
Jin C, Jiang L Q, Li F, et al. Heat release rate and flame thickness of n-butane/air jet flame measured by planar laser-induced fluorescence technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(13): 1304001.
- [12] Most D, Leipertz A. Simultaneous two-dimensional flow velocity and gas temperature measurements by use of a combined particle image velocimetry and filtered Rayleigh scattering technique[J]. Applied Optics, 2001, 40(30): 5379-5387.
- [13] Dogariu A, Dogariu L E, Smith M S, et al. Velocity and temperature measurements in Mach 18 nitrogen flow at tunnel 9 [C]/Proceedings of the AIAA Scitech 2021 Forum, January 19-21, 2021, Virtual Event. Virginia: AIAA Press, 2021: 0020.
- [14] 张斌, 肖立辉, 侯俊庆, 等. 旋流火焰三维温度场与速度场的同时激光测量[J]. 中国激光, 2021, 48(3): 0304002.  
Zhang B, Xiao L H, Hou J Q, et al. Simultaneous laser measurement of three-dimensional temperature and velocity fields in swirling flame[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(3): 0304002.
- [15] Hu H, Koochesfahani M M. Molecular tagging velocimetry and thermometry and its application to the wake of a heated circular cylinder[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(6): 1269-1281.
- [16] Edwards M R, Dogariu A, Miles R B. Simultaneous temperature and velocity measurements in air with femtosecond laser tagging[J]. AIAA Journal, 2015, 53(8): 2280-2288.
- [17] Zhou J N, Yang W B, Zhou Q A, et al. Simultaneous 2D temperature and velocity measurement using a one-color-camera PLIF method combined with a physically constrained temperature tagging method[J]. Applied Optics, 2022, 61(28): 8204-8211.
- [18] Wehrmeyer J A, Ribarov L A, Oguss D A, et al. Flame flow tagging velocimetry with 193-nm H<sub>2</sub>O photodissociation[J]. Applied Optics, 1999, 38(33): 6912-6917.
- [19] Perkins A N, Ramsey M, Pitz R, et al. Investigation of a bow shock in a shock tube flow facility using hydroxyl tagging velocimetry (HTV) [C]/49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, January 4-7, 2011, Orlando, Florida. Virginia: AIAA Press, 2011: 1092.
- [20] Ye J F, Shi D Y, Song W Y, et al. Investigation of turbulence flow characteristics in a dual-mode scramjet combustor using

- hydroxyl tagging velocimetry[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 157: 276-281.
- [21] Jenkins T P, Pullen M, Pitz R W, et al. Hydroxyl tagging velocimetry demonstration in an augmented spark igniter[C]// *Proceedings of the AIAA SCITECH 2022 Forum*, January 3-7, 2022, San Diego, CA & Virtual. Virginia: AIAA Press, 2022: 1167.
- [22] Webb A M, Athmanathan V, Fisher J, et al. Megahertz-rate femtosecond laser activation and sensing of hydroxyl for velocimetry in a rotating detonation combustor exhaust[C]// *Proceedings of the AIAA SCITECH 2022 Forum*, January 3-7, 2022, San Diego, CA & Virtual. Virginia: AIAA Press, 2022: 2372.
- [23] 叶景峰, 胡志云, 张振荣, 等. OH 分子示踪法用于气态流场速度测量[J]. *光学学报*, 2009, 29(8): 2191-2196.  
Ye J F, Hu Z Y, Zhang Z R, et al. Velocity measurement of gas flow field by hydroxyl tagging velocimetry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8): 2191-2196.
- [24] Li G H, Zhang Z R, Ye J F, et al. Planar laser-induced fluorescence thermometry in moderate-temperature flow using OH from photo-dissociation of water vapor[J]. *Experiments in Fluids*, 2021, 62(3): 1-7.
- [25] Li G H, Ye J F, Zhang Z R, et al. Velocimetry and thermometry in intermediate temperature flow using planar laser-induced fluorescence of OH from photo-dissociation of H<sub>2</sub>O[J]. *Experiments in Fluids*, 2020, 61(8): 1-6.
- [26] 邵珺, 叶景峰, 胡志云, 等. 一种提高超燃流场羟基示踪速度测量中信号提取能力的方法[J]. *光子学报*, 2019, 48(9): 0912007.  
Shao J, Ye J F, Hu Z Y, et al. Method to improve signal extraction capability of hydroxyl tagging velocimetry in supersonic combustion flow field[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(9): 0912007.
- [27] Shao J, Wu J Z, Ye J F, et al. Noise suppression method for hydroxyl tagging velocimetry based on generative adversarial networks[J]. *AIP Advances*, 2022, 12(11): 115202.
- [28] Shao J, Li J Y, Li G H, et al. Temperature measurement based on fluorescence intensity in hydroxyl tagging velocimetry (HTV) [J]. *AIP Advances*, 2020, 10(10): 105326.

## Simultaneous Temperature and Velocity Measurement Technique Based on Hydroxyl Tagging

Ye Jingfeng<sup>1\*</sup>, Li Guohua<sup>1</sup>, Shao Jun<sup>1\*\*</sup>, Zhang Zhenrong<sup>1</sup>, Wang Sheng<sup>1</sup>, Hu Zhiyun<sup>2</sup>,  
Tao Mengmeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710028, Shannxi, China;

<sup>2</sup>Shanghai Jiao Tong University Sichuan Research Institute, Chengdu 610200, Sichuan, China

### Abstract

**Objective** The simultaneous measurement of temperature and velocity plays an important role in research on turbulent combustion which is a complex problem coupled of fluid dynamics and chemical reaction dynamics. With the rapid development of laser combustion diagnosis technology, researchers have studied many schemes of simultaneous measurement of multi-parameters, such as temperature and velocity, by means of multi-technology combination and extending the multi-parameter measurement function of measurement technology. The principle of hydroxyl tagging velocimetry (HTV) is to dissociate with water molecules in the flow by lasers which produce ion OH<sup>-</sup> as tagging particles (OH<sub>p</sub>). Combined with the technique, plane laser-induced fluorescence (PLIF), OH<sub>p</sub> can be displayed in certain positions at different time. It is unnecessary to inject extra tracer particles into the flow field without a particle-following problem. OH<sub>p</sub>, the tagging molecule, is of long life in a high-temperature environment, which has the advantage of measuring velocity in flow with high temperature and velocity. The technique has been widely applied to obtain the velocity of various flows such as super-combustion ramjet engines. The technique of temperature acquiring through double-color PLIF and fluorescence intensity of OH<sub>p</sub> is configured based on OH<sub>p</sub> on the basis of HTV, making it possible to accomplish simultaneous measurement of temperature and velocity of flows. In this paper, the principle and the configuration of the set-up are fully illustrated, while an experiment to verify the technique used in the flow of temperature is conducted.

**Methods** The key to simultaneously measuring velocity and temperature based on HTV is how to realize temperature measurement based on OH<sub>p</sub>. In this paper, two methods of temperature measurement are studied, one of which is the two-line PLIF temperature measurement method. On the basis of the PLIF device used to display the image of OH<sub>p</sub> in HTV technology, another set of PLIF devices is added to build the double-color PLIF, realizing the temperature measurement. The variation of OH<sub>p</sub> fluorescence intensity with laser dissociation and fluorescence excitation time delay under different excitation lines (Fig. 1) is obtained by experiments. It can be concluded that OH<sub>p</sub> has reached the state of thermal equilibrium with the surrounding environment when the delay time is more than 500 ns, and OH<sub>p</sub> can be used as a probe to monitor temperatures in the flow. It is proven to be probable that temperature and velocity can be simultaneously acquired



by  $\text{OH}_p$ . The other method is using  $\text{OH}_p$  fluorescence intensity to measure temperature. Analyzing the relationship among  $\text{OH}_p$  fluorescence intensity, temperature, and intensity of fluorescence is monotonically changeable as the temperature of the objects changes when appropriate fluorescence excitation is selected (Fig. 3). Therefore, temperature can be observed by fluorescence intensity.

**Results and Discussions** The simultaneous measurement of velocity and temperature is tested and verified in the electric heating flow field and the flow field of the super-combustion ramjet engine. Compared with results obtained by thermocouple, in the range from room temperature to 900 K, the average standard deviation of temperature measurement based on PLIF is 12.1 K (Fig. 6). The maximum deviation of temperature measurement based on photolysis  $\text{OH}_p$  fluorescence intensity is 16.8 K, with the uncertainty of velocity measurement less than 1% (Fig. 10). In the flow of super-combustion ramjet engine, data of temperature measured by CARS serve as baseline to acquire the results of temperature and velocity on the tagging line simultaneously. The maximum deviation between them is 44 K (Fig. 11).

**Conclusions** In this paper, simultaneous measurement of velocity and temperature based on HTV technology is presented, which extends the function of HTV technology and provides a new scheme for simultaneous measurement of temperature and velocity in flow fields with high speed and high temperature.

**Key words** measurements; simultaneous measurements of temperature and velocity;  $\text{OH}^-$  tagging; photodissociation; laser diagnostics