

文章编号 1004-924X(2019)07-1417-09

## 交叉标记显示的羟基标记速度矢量测量

叶景峰<sup>1,2\*</sup>, 李国华<sup>2</sup>, 邵 珺<sup>2</sup>, 胡志云<sup>2</sup>, 陶 波<sup>1,2</sup>, 方波浪<sup>2</sup>, 宋文艳<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072;

2. 西北核技术研究院 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

**摘要:**针对流场二维速度矢量分布测量的需求,提出了利用交叉标记显示的光路设置实现羟基分子标记示踪速度矢量的方法。该技术中通过将标记激光束和显示激光片交叉布置,在激光片平面内形成交叉标记点用于流场示踪。与传统的交叉网格实现速度矢量测量的方式相比,该方法简化了实验光路,有利于在恶劣环境中的应用,并且得到的标记为近似圆点,标记位置的识别更加方便。通过对交叉标记显示产生的标记点图像的位置进行模拟识别运算,获得了影响标记点位置识别精度的因素和规律。利用单标记点实验设置,获得了射流火焰流场速度矢量及其浮动值,结果显示在存在火焰 OH 背景干扰的情况下,速度测量不确定度小于 2.2 m/s;利用柱面透镜阵列,实现了  $3 \times 20$  个标记点的速度矢量分布测量。研究结果表明了交叉标记显示方法进行分子标记速度测量的可行性。

**关键词:**激光诊断;速度矢量测量;羟基分子标记示踪;交叉标记显示

**中图分类号:** TN249; TK16 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192707.1417

## Velocity vector measurements by hydroxyl tagging velocimetry based on crossed tagging and displaying

YE Jing-feng<sup>1,2\*</sup>, LI Guo-hua<sup>2</sup>, SHAO Jun<sup>2</sup>, HU Zhi-yun<sup>2</sup>,  
TAO Bo<sup>1,2</sup>, FANG Bo-lang<sup>2</sup>, SONG Wen-yan<sup>1</sup>

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter,

Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

\* Corresponding author, E-mail: leafey1979@163.com

**Abstract:** To measure the two-dimensional velocity vector distribution of the flow field, a method of crossed tagging and displaying to conduct velocity vector measurement based on hydroxyl tagging velocimetry was developed. In this technique, the tagging laser beam and the displaying laser sheet are intersected to form tagging spots for flow tracing. Compared with the traditional cross-grid method to realize velocity vector measurement, this method uses a simplified experimental light path, which is advantageous to application in harsh environments. Moreover, the tagging spots are approximate dots, which are more convenient for identifying the tagging positions. Through the simulated tagging spot images, precise values of the signal noise ratio, spot size, and tagging shape were obtained. The

收稿日期:2019-03-06;修订日期:2019-04-17.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 91641112, No. 91541203)

velocity and fluctuation in a jet flame were obtained by a single tagging spot, and the velocity uncertainty can reach 2.2 m/s while an OH background is present in the flame. By using a cylindrical lens group to shape the tagging laser beam into multiple lines,  $3 \times 20$  tagging spots were formed to measure the velocity vector distribution in the jet flame.

**Key words:** laser diagnostics; velocity vector measurement; hydroxyl tagging velocimetry; crossed tagging and displaying

## 1 引言

分子标记速度测量技术(Molecular Tagging Velocimetry, MTV)是一种利用分子作为标记示踪的流场速度测量技术<sup>[1]</sup>,通常使用脉冲激光与流场中的某些分子作用改变其特性作为流场标记,然后对这些特定分子进行显示并观测它们的位置,通过计算单位时间内它们在流场中的位移得到流场速度。由于以分子进行标记示踪,MTV技术可以认为是对流场的直接测量,与需注入颗粒的流场示踪技术相比,在大速度梯度流场中没有示踪颗粒跟随性问题,因此其速度测量精度高,已用于多种流场特性的研究<sup>[2-9]</sup>。羟基(OH)分子标记示踪测速(Hydroxyl Tagging Velocimetry, HTV)技术<sup>[10-11]</sup>是 MTV 的一种,它利用激光解离流场中的水生成 OH 作为流场标记,然后利用平面激光诱导荧光(Planar Laser Induced Fluorescence, PLIF)技术对这些 OH 进行显示,获得它们的位置图像进而进行流场速度计算。HTV 技术无需注入任何种子,并且在高温情况下,水对解离激光的吸收截面大,生成的 OH 寿命长,因此 HTV 技术更适合用于高温环境,在高速高温的流场研究中具有特殊的优势<sup>[12-17]</sup>。

几乎所有的 MTV 技术都是采用脉冲激光与流场的作用产生标记分子,因此产生的标记分子分布在激光束上。对于使用激光片对标记分子进行显示的 MTV 技术,例如利用 PLIF 光片显示 OH 标记分子的 HTV 技术,通常将标记激光束和显示激光片调整到同一平面内,在该平面内观测标记线跟随流场的移动情况。采用单条或平行的几条标记线时<sup>[17-19]</sup>,将标记线垂直于流场的主流方向入射到流场中,可以沿标记线得到流场在主流方向上的速度分量。为了得到流场的二维速度矢量信息,较常采用的方法是将标记激光束交叉入射到流场中,并使得交叉激光束形成的

网格、显示激光片处于同一平面内,通过跟踪标记激光束交叉点的位置变化实现对该处流场的二维速度矢量测量。这种方法在 MTV 技术中应用较为普遍<sup>[20-21]</sup>,但是标记激光需从两个不同的方向入射,所需的光路整形结构比较复杂,并且对标记激光网格和显示激光片的共面要求也很高,因此较难应用于光学窗口尺寸受到限制、运行环境也比较恶劣的发动机试验环境中。

本文基于 HTV 技术,研究了二维速度矢量分布测量的另一种光路布局方式,即将标记激光束穿过显示激光片形成交点,在显示激光片的作用下,显示的是标记线与显示激光片的交点,用这些点作为流场标记,即可示踪得到显示激光片平面内流场的速度矢量。本文对该方法产生的标记点特性、标记点位置的识别精度等进行了实验研究,并对射流火焰速度进行了测量分析。

## 2 二维 HTV 速度矢量测量

常用的 HTV 标记图样如图 1 所示(彩图见期刊电子版)。图 1(a)中标记激光被整形成一条近似直线,垂直于流动轴向入射到待测流场中,在激光束上产生 OH 标记(图中黑色直线)。在延迟时间  $t_d$  后,利用显示激光片得到移动后的标记图像(灰色线)。比较标记线移动前后的位置,得到沿标记线上各点的位移  $d$ ,进而得到流场轴向的速度分量  $u_x$ 。

图 1(b)中标记激光被整形成两组标记线,并将它们在显示激光片平面内交叉入射到待测流场中,两组标记线交叉形成标记网格。这些网格的交叉点被当做标记点,跟踪显示这些标记点跟随流场的移动情况,即可得到流场的速度矢量分布。

本文设计了另外一种二维速度矢量分布测量的标记方法,其方案如图 2 所示。将标记激光整形为一组激光线(图中示意了 3 条)与显示激光片交叉入射到待测流场中,本文称之为交叉标记显

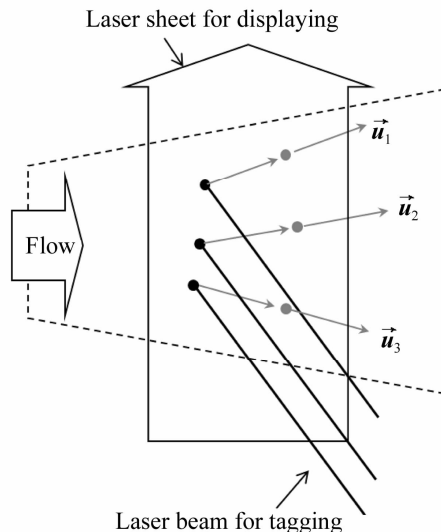
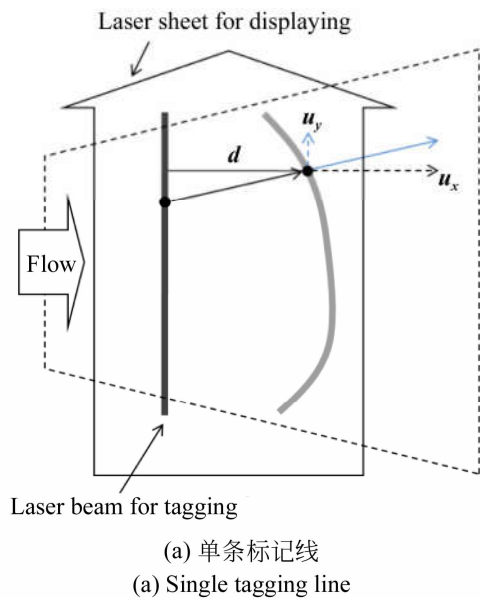


图 2 交叉标记显示方式示意

Fig. 2 Sketch of crossed tagging and displaying

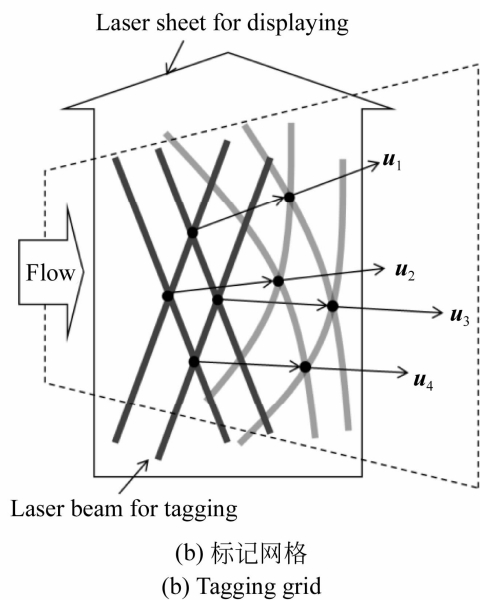


图 1 标记线和标记网格示意

Fig. 1 Sketch of tagging line and grid

示方法。虽然 OH 标记在激光线上产生,但是只有与显示激光片重叠处的 OH 标记被显示出来。因此,显示出一组标记点,跟踪这些点的移动,即可得到流场在显示激光平面内这些点处的二维速度矢量。与交叉网格方式相比,利用这种方式的有益之处有:整形光路简单,且不要求标记激光与显示激光片共面,一方面在有强振动干扰的发动机试验环境更容易得到有效信号;另一方面,当待测流场存在第三维速度分量时,标记信号不至于移出显示平面。这种方式得到的标记近似为圆点,与网格交叉点比,标记位置的识别更加方便。

当然,利用这种方式会损失标记激光的利用率,比如同样将标记激光整形为  $n$  条激光线( $n$  为

偶数),利用交叉网格的方式可以得到  $n^2/4$  个标记点;而利用垂直交叉显示方法则得到  $n$  个标记点,当  $n > 4$  时,得到的标记点数目相对较少。

### 3 实验装置

交叉标记显示 HTV 实验装置如图 3 所示。标记激光为一台 ArF 准分子激光器,其输出激光波长为 193 nm,脉冲宽度约为 20 ns,出口单脉冲能量约为 60 mJ,由于传输衰减,到达测量区的能量约为 20 mJ。其输出光斑为 20 mm×8 mm 的矩形,经过两个相互垂直放置的柱面透镜组整形形成一组激光线入射到流场待测区。在实验中,根据需要更换不同参数的柱面透镜组,或替换为圆透镜,用于获得不同数目的标记点。PLIF 光源系统由 Nd:YAG 激光器泵浦的可调谐染料激光器和倍频器组成,其输出激光调谐到 OH 的  $A \leftarrow X(1,0)$  跃迁的共振吸收线(约为 283 nm)上,用于激励 OH 产生荧光辐射。该激光器系统输出的激光脉冲宽度约为 8 ns,线宽为  $0.05 \text{ cm}^{-1}$ ,单脉冲能量约为 10 mJ。经过微柱面透镜阵列和柱面透镜后,在测量区形成宽约 50 mm,厚约 0.5 mm 的激光片。一个  $1\ 024 \times 1\ 024$  像素的带像增强的 CCD(ICCD)相机放置在激光片一侧,通过一个焦距为 105 mm 的紫外镜头成像,成像倍率为 18.35 pixel/mm。相机开门时间设置为 20 ns。相机镜头前的滤光片为中心波长 320 nm,通带半宽 20 nm 的带通滤光片,用于滤除显示激

光及其它散射光干扰。系统的同步控制装置主要为一台 DG645 数字信号发生器,它输出三路脉冲方波信号,分别触发标记激光、显示激光和相机工作,使得标记激光在  $t_0$  时刻出光,而显示激光和相机在  $t_d$  时刻工作,整个实验装置的重复频率为 10 Hz。

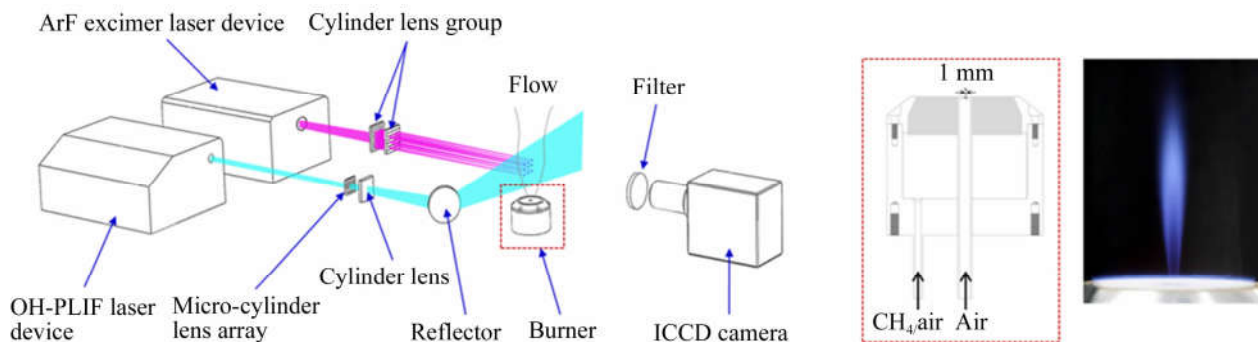


图 3 交叉标记显示 HTV 实验装置示意图

Fig. 3 Sketch of crossed tagging and displaying experimental setup

## 4 结果与分析

### 4.1 标记点位置识别

在 HTV 速度测量中,标记位置的精确识别是速度测量的关键,其识别精度与标记图像特征和采用的数据处理方法密切相关。借鉴网格标记采用的数据处理方法<sup>[22]</sup>,本文采用模板相关运算的方法进行标记位置识别。具体分为以下几个步骤:(1)根据得到的标记圆点尺寸及形状特征构造一个图像模板;(2)利用这个图像模板与实验得到的图像进行相关运算,得到相关函数;(3)对相关函数进行二维多项式拟合,得到相关峰的精确位置,即得到标记点的位置信息。影响标记点位置识别精度的因素主要有三个:图像信噪比、标记点尺寸和标记点形状。考虑标记点形状因素的原因是 ArF 准分子激光器出口光斑为矩形,并且两个方向发散角略有不同,聚焦后光束截面近似为椭圆形。为了考察这几个因素对标记位置识别的影响,分别对标记图像信噪比、尺寸和椭圆长宽比对标记位置识别精度的影响进行了模拟计算。

对于信噪比和标记点尺寸的影响,用一个高斯分布的圆点作为模拟图像,并在图像上添加不同强度的随机噪声,利用上述标记位置识别方法

实验流场由一个中间带孔的平面 McKenna 预混燃烧炉提供。平面炉面直径为 60 mm,中心孔直径为 1 mm,用于提供射流流场。实验时气体参数如下:预混平面炉燃烧气体为  $\text{CH}_4/\text{air}$  预混气体, $\text{CH}_4$  流量为 2.53 L/min,air 流量为 24.2 L/min;中心孔通空气,流量为 10 L/min。

进行位置计算。模拟图像的信噪比定义为信号峰值与四倍噪声标准差  $\sigma_N$  的比,即处于  $(-2\sigma_N, 2\sigma_N)$  的噪声分布,对应于正态分布 95% 的区间。图 4 给出了不同尺寸标记点位置识别误差随信噪比的变化。可以看到,在标记点尺寸在 4~18 像素,随着尺寸的增加,位置的识别精度趋于稳定;在图像信噪比大于 6(此时识别误差约为 0.07 像素)以后,识别误差基本趋于稳定,最小可以达到 0.03 像素。

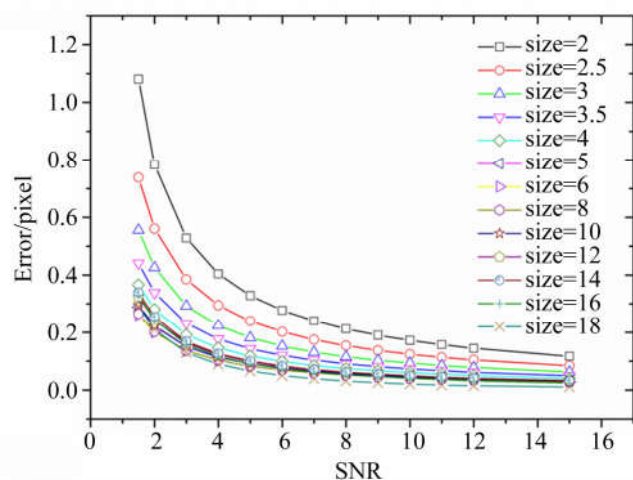


图 4 图像信噪比和标记点尺寸对标记位置识别的影响

Fig. 4 Effect of image SNR and spot size on extraction of tagging spot position

对于标记点形状的影响,将模拟标记点设置为椭圆形,固定椭圆形长轴方向尺寸为 10 个像素,改变短轴方向尺寸,对不同信噪比的模拟图像标记位置的识别误差进行了计算,结果如图 5 所示。由图表明,椭圆的长短轴比大于 0.5, SNR=5 时,标记位置的识别误差可小于 0.08 像素。

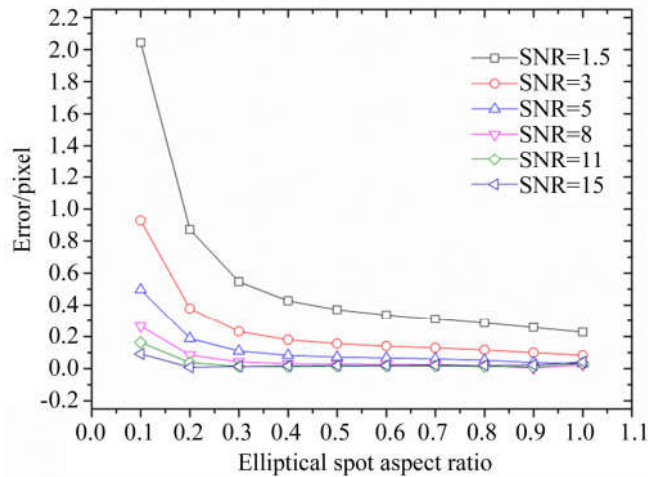


图 5 椭圆形标记点短长轴比对标记位置识别的影响

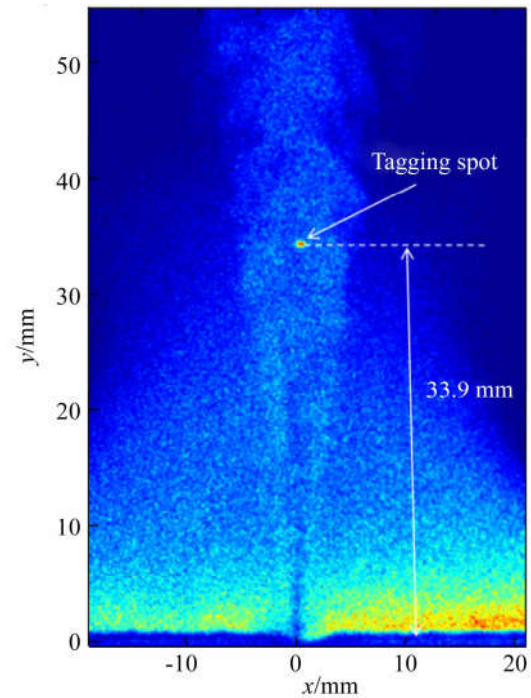
Fig. 5 Effect of elliptical spot aspect ratio on extraction of tagging spot position

综合以上结果得出,在标记图像信噪比 6 以上,标记点尺寸不小于 4 像素,椭圆长短轴比大于 0.5 的条件下,标记点位置的识别误差可以控制在 0.08 像素以下。当相机放大倍率大于 10 pixel/mm,时间间隔  $t_d = 10 \mu\text{s}$  时,标记点位置识别带来的速度测量不确定度小于 0.8 m/s。

#### 4.2 单个标记点速度测量结果及分析

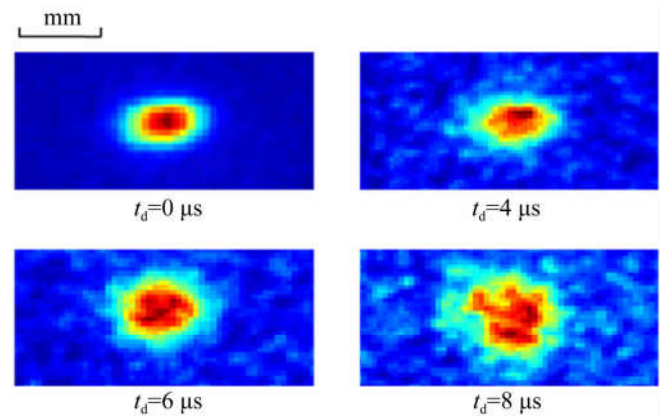
本文首先采用单个标记点的方式开展了速度测量实验尝试,实验装置中将图 4 中的柱面透镜组更换为焦距为 50 mm 的圆凸透镜。流场中得到的单帧标记点图像如图 6 所示,其中图 6(a)显示了标记点在流场中的位置,图 6(b)给出了不同  $t_d$  下放大的标记点图像。由于流场测量区域存在一些化学反应产生的 OH,因此标记信号受到一定的干扰。图 6(b)中  $t_d = 0 \mu\text{s}$  时刻的图像为标记基准图像,即未跟随流场移动的标记图像。由于其位置不受流场影响,因此采用 100 幅平均的方式得到信噪比较好的图像(SNR 约为 13);其它 3 幅图像为不同时刻标记点的单脉冲图像,图像 SNR 在 2~4 之间。初始标记点大小约为  $18 \times 12$  像素(约  $1.0 \text{ mm} \times 0.7 \text{ mm}$ ),由于 OH 标记在流

场中的扩散和湮灭,其尺寸随时间逐渐变大且强度下降。标记点高度距离炉面约 33.9 mm。



(a) 流场中标记点位置

(a) Position of tagging spot in flow



(b) 不同延迟时刻标记点图像

(b) Tagging spot images at different delay time

图 6 火焰流场中的标记点图像

Fig. 6 Single tagging spot images in flame

对于实际的测量流场,测量不确定度受标记图像特征、信噪比等因素的影响,难以标定速度测量的不确定度,本文通过分析实际图像特征,并结合模拟计算的方法对测量不确定度进行分析。根据分子标记技术的测量原理,其速度测量的不确定度主要来自于标记图像移动距离  $d$  的测量不确定度和时间间隔  $t_d$  的测量不确定度。由于本文采用的时间同步控制精度在皮秒量级,而  $t_d$  设置在微秒量级,因此  $t_d$  带来的不确定度较小不进行

考虑。按照本文采用的模板相关的数据处理方法,  $d$  的测量不确定度来源包括标记基准位置识别和标记位置识别带来的不确定度。根据上文的模拟分析, 它们主要受标记点的信噪比、尺寸及形状的影响。这几个标记点参量虽然可以根据实验图像进行确定, 但由于实验图像中的干扰噪声主要来自于燃烧场中的 OH 荧光, 其特征与模拟图像添加的随机噪声有差别, 因此本文利用实验图像中的 OH 荧光背景作为噪声添加到模拟的标记图像中, 进一步分析此类背景干扰对标记点位置识别的影响, 模拟的标记图像按照图 6 实验图像中标记点的尺寸和形状给定。得到的信噪比对标记点位置识别的影响如图 7 所示, 其结果比模拟的随机噪声对标记点位置识别的影响要大, 尤其是在信噪比低的区域更为显著。因此, 利用实验得到的标记图像特征并结合图 7 结果, 即分析得到本文中速度测量结果的不确定度。

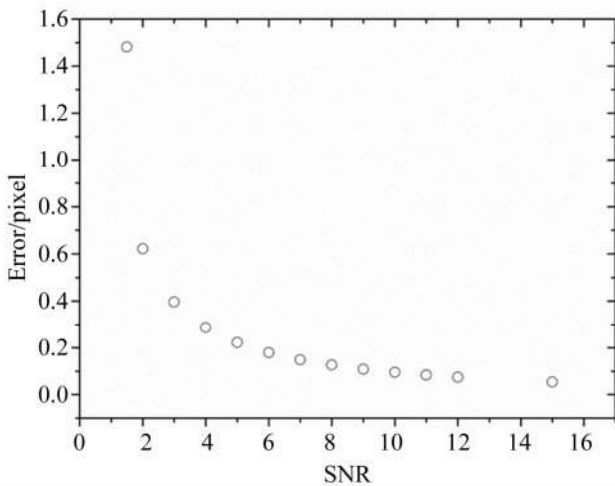


图 7 OH 荧光背景对标记点位置识别的影响

Fig. 7 Effect of OH background on extraction of tagging spot position

利用实验获得的标记点图像, 计算了测量点处流场的速度如图 8 所示。为了比较不同延迟时间的测量效果, 给出了  $t_d = 4, 6, 8, 10 \mu\text{s}$  4 个延迟时间的结果。图中小方块为测量时间内根据 100 幅速度测量结果得到的速度大小的平均值, 圆圈为利用瞬时速度结果统计得到的速度变化的 RMS 值, 它反映了测量点处流场的湍流变化。根据速度的计算公式,  $t_d$  越大, 则相对测量不确定度越小, 但实际情况中随着延迟时间的增加, OH 标记会在流场扩散并湮灭, 造成信号信噪比下降。

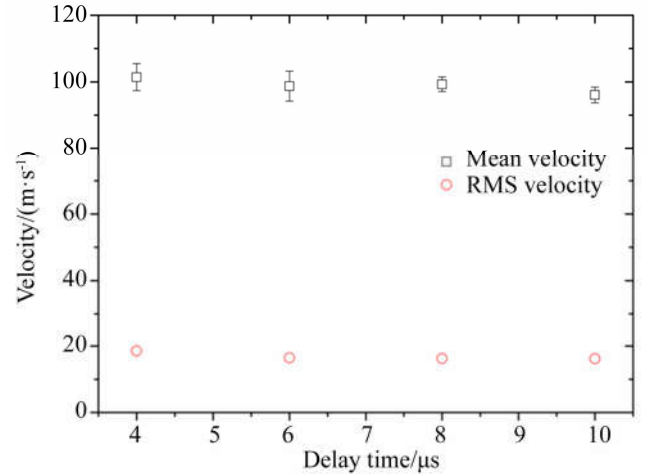


图 8 不同延迟时间下速度测量结果

Fig. 8 Velocity measurement results at different delay time

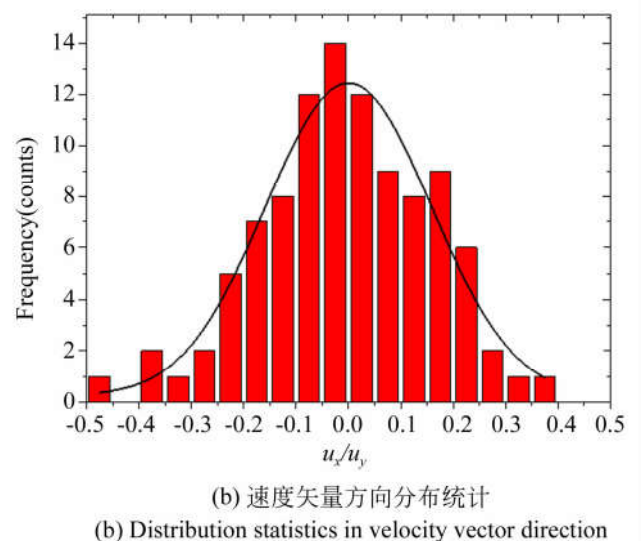
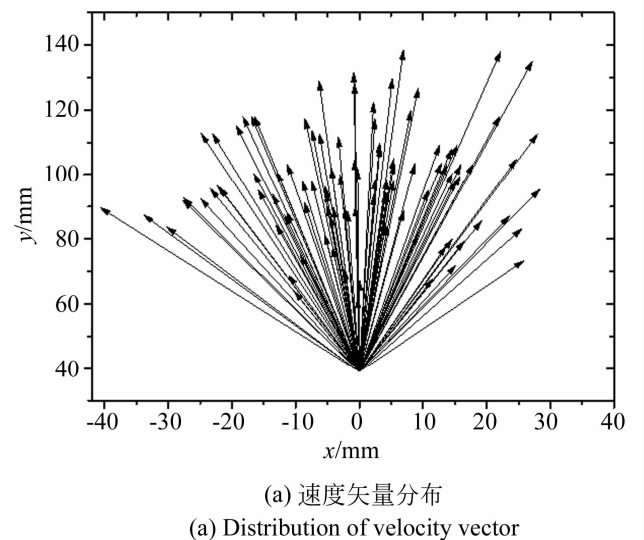


图 9 标记点速度矢量 ( $t_d = 8 \mu\text{s}$ )

Fig. 9 Velocity vector on one tagging spot ( $t_d = 8 \mu\text{s}$ )

图 8 中 4 组测量数据显示,  $t_d = 8 \mu\text{s}$  时速度测量不确定度最小(小于  $2.2 \text{ m/s}$ )。

图 9(a)给出了  $t_d = 8 \mu\text{s}$  时得到的速度矢量, 10 s 时间内得到的 100 帧结果显示了湍流场引起的测量点处速度矢量的变化。图 9(b)中用速度在  $x$  和  $y$  方向的分量的比值  $u_x/u_y$  代表速度矢量方向, 给出了速度矢量方向的分布区间, 可见在该流动情况下, 大部分的速度矢量(86.5%)分布在  $u_x/u_y = \pm 0.32$  的范围内。

#### 4.3 多标记点速度矢量测量

利用两个不同参数的柱面透镜组对标记激光进行光束整形, 柱面透镜组(1)由 20 个尺寸为  $1 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  的小柱面透镜组成, 焦距为  $300 \text{ mm}$ ; 柱面透镜组(2)由 5 个尺寸为  $4 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  的小柱面透镜组成, 焦距为  $500 \text{ mm}$ 。利用该整形装置获得了  $3 \times 20$  个标记点, 每个标记点的初始尺寸约为  $16 \text{ pixel} \times 12 \text{ pixel}$ 。受到测量流场横向尺寸的限制, 测量实验时有效的标记点有

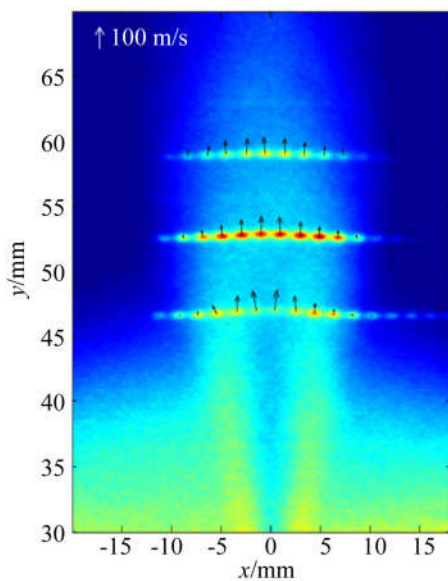


图 10 多标记点速度矢量测量结果

Fig. 10 Results of multi-points velocity vectors

$3 \times 10$  个左右。选择时间延迟  $t_d = 4 \mu\text{s}$ , 得到的标记图像(100 幅平均)及速度矢量分布如图 10 所示, 标记点平均图像的信噪比大于 18。可以看到, 利用交叉标记显示的方法, 可以很方便地在流场中获得多个标记点, 并实现流场二维速度矢量分布的测量。但要获得更多的标记点, 在激光输出能量一定的情况下, 分到每个点上的标记激光能量会很弱, 进而造成标记图像信噪比的下降。通过提高激光器的输出能量, 或者减小激光传输衰减的方式, 可以增加标记点数量。

## 5 结 论

本文研究了交叉标记显示方法实现流场二维速度矢量分布测量的 HTV 技术, 该方法整形光路简单, 有利于在强振动干扰的发动机试验环境获得有效信号, 而且标记为近似圆点, 标记位置的识别更加方便。通过模拟标记点图像, 研究获得了影响标记点位置识别精度的因素和规律, 得到在添加随机噪声干扰的情况下, 当  $\text{SNR} \geq 6$  时, 速度测量不确定度小于  $0.8 \text{ m/s}$ 。通过射流火焰测量实验验证了该方法的可行性, 由于受到流场中背景 OH 的干扰, 射流火焰中速度测量的不确定度略高于模拟分析结果。几组不同延迟时间的测量结果显示,  $t_d = 8 \mu\text{s}$  时速度测量的不确定度最小(小于  $2.2 \text{ m/s}$ )。通过分析单脉冲的速度测量数据得到了测量位置的速度 RMS 值, 这有助于对湍流特性的分析。利用柱面透镜阵列实现了  $3 \times 20$  个标记点的速度矢量分布测量, 结果表明, 交叉标记显示的 HTV 方法进行二维速度矢量分布测量是可行的。

#### 参考文献:

- [1] KOCHESFAHANI M. Molecular Tagging Velocimetry (MTV)-Progress and applications[R]. AIAA. 2013DOI:10.2514/6.1999-3786.
- [2] 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.

- [3] PAN F, SÁNCHEZ-GONZÁLEZ R, MCILVOY M H, *et al.*. Simultaneous three-dimensional velocimetry and thermometry in gaseous flows using the stereoscopic vibrationally excited nitric oxide moni-

- toring technique[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1376-1379.
- [4] SI HADJ MOHAND H, FREZZOTTI A, BRANDNER J J, *et al.*. Molecular tagging velocimetry by direct phosphorescence in gas microflows: Correction of Taylor dispersion[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 83: 177-190.
- [5] CHEN F, LIU H, LI H, *et al.*. An experimental investigation with molecular tagging technique on the spray flow ejected from an air-blast nozzle[R]. AIAA 2016-3251.
- [6] ZHANG S H, YU X L, YAN H, *et al.*. Molecular tagging velocimetry of NH fluorescence in a high-enthalpy rarefied gas flow[J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(4): 122.
- [7] BALLA R J. Iodine tagging velocimetry in a Mach 10 wake[J]. *AIAA Journal*, 2013, 51(7): 1783-1786.
- [8] HSU A, NORTH S, SRINIVASAN R, *et al.*. Two-component molecular tagging velocimetry utilizing NO fluorescence lifetime and NO<sub>2</sub> photodissociation techniques in an underexpanded jet flow-field[C]//39th AIAA Fluid Dynamics Conference, San Antonio, Texas, Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [9] ELBAZ A M, PITZ R W. N<sub>2</sub>O molecular tagging velocimetry[J]. *Applied Physics B*, 2012, 106(4): 961-969.
- [10] 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.
- [11] 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 ZH Y, ZHANG ZH R, *et al.*. Velocity measurement of gas flow field by hydroxyl tagging velocimetry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8): 2191-2196. (in Chinese)
- [12] ALEXANDER A, WEHRMEYER J, RUNGE W, *et al.*. Nonintrusive measurement of gas turbine exhaust velocity using hydroxyl tagging velocimetry[R]. AIAA 2008-3709.
- [13] PITZ R W, LAHR M D, DOUGLAS Z W, *et al.*. Hydroxyl tagging velocimetry in a supersonic flow over a cavity[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(31): 6692-6700.
- [14] PERKINS A N, RAMSEY M, STRICKLAND D J, *et al.*. Dual-pulse hydroxyl tagging velocimetry (HTV) in jet engine exhausts[R]. AIAA 2009-5108.
- [15] RAMSEY M C, PITZ R W, JENKINS T P, *et al.*. Planar 2D velocity measurements in the cap shock pattern of a thrust optimized rocket nozzle [J]. *Shock Waves*, 2012, 22(1): 39-46.
- [16] PENRKINS A N, RAMSEY M C, PITZ R W, *et al.*. Investigation of a bow shock in a shock tube flow facility using hydroxyl tagging velocimetry (HTV)[R]. AIAA 2011-1092.
- [17] 叶景峰, 邵珺, 李国华, 等. 羟基分子标记示踪速度测量中的强振动干扰抑制[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(7): 1689-1696.
- YE J F, SHAO J, LI G H, *et al.*. Vibration disturbance suppression in velocity measurements by hydroxyl tagging velocimetry[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(7): 1689-1696. (in Chinese)
- [18] HSU A G, SRINIVASAN R, BOWERSOX R D W, *et al.*. Molecular tagging using vibrationally excited nitric oxide in an underexpanded jet flow-field[J]. *AIAA Journal*, 2009, 47(11): 2597-2604.
- [19] DANEHY P M, O' S, BYRNE, HOUWING A F P, *et al.*. Flow-tagging velocimetry for hypersonic flows using fluorescence of nitric oxide[J]. *AIAA Journal*, 2003, 41(2): 263-271.
- [20] BATHEL B F, DANEHY P M, INMAN J A, *et al.*. Multiple velocity profile measurements in hypersonic flows using sequentially-imaged fluorescence tagging[C]// AIAA 2010-1404, 2010: 1-17.
- [21] GENDRICH C P, KOCHESFAHANI M M, NOCERA D G. Molecular tagging velocimetry and other novel applications of a new phosphorescent supramolecule[J]. *Experiments in Fluids*, 1997, 23(5): 361-372.
- [22] RIBAROV L A, WEHRMEYER J A, HU S, *et al.*. Multiline hydroxyl tagging velocimetry measurements in reacting and nonreacting experimental

flows[J]. *Experiments in Fluids*, 2004, 37(1): 65-74.

[23] RAMSEY M C, PITZ R W. Template matching

for improved accuracy in molecular tagging velocimetry[J]. *Experiments in Fluids*, 2011, 51(3): 811-819.

#### 作者简介:



叶景峰(1979—),男,博士研究生,副研究员,2001年、2004年于国防科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事激光光谱应用技术的研究。E-mail: leafey1979@163.com

#### 导师简介:



宋文艳(1967—),女,天津人,教授,1987年于南京航空学院获得学士学位,1992年、2004年于西北工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事航空涡轮发动机和超音速燃烧冲压发动机理论、实验和测量技术的研究。E-mail: wenyan\_song@nwpu.edu.cn