

文章编号: 1001-3806(2012)01-0064-03

一种提高羟基分子示踪速率测量精度的方法

叶景峰 胡志云 张振荣 王 晟 刘晶儒

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室 西安 710024)

摘要: 为了尽量减小羟基(OH)分子示踪流场速率测量误差、提高测量精度,利用OH分子标记线沿宽度方向的强度分布近似为高斯函数的特征,用高斯函数对实验测量数据进行了拟合,用拟合数据的峰值位置作为OH分子标记线的中心位置,并以此作为测量基准位置,对典型的OH分子示踪速率测量数据进行了处理。结果表明,采用这一数据处理方法,可使流场速率计算精度明显提高。

关键词: 测量与计量;羟基分子示踪速率测量精度;数据拟合;流场速率

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.01.017

A method for improving precision of hydroxyl tagging velocimetry

YE Jing-feng, HU Zhi-yun, ZHANG Zhen-rong, WANG Sheng, LIU Jing-ru

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: In order to increase the velocity measurement precision of hydroxyl tagging velocimetry (HTV), experimental data were fitted with Gaussian function because the intensity of the tagging lines is in Gaussian distribution along width direction. Then the fitted peak position was regarded as the center position of the tagging lines. Finally with the center position as reference position, typical measurement data for hydroxyl tagging velocity were processed. The results show that the precision of velocity can be improved distinctly by means of this algorithm.

Key words: measurement and metrology; hydroxyl tagging velocimetry measurement precision; data fit; flow velocity

引言

在对超音速流场的研究过程中,精确地测量流场速率分布对研究流场特性具有非常重要的意义。非接触式的激光测量技术具有对流场无干扰、时空分辨率高等优势,在流场速率测量中扮演着重要的角色^[1-2]。羟基(OH)分子示踪速率(hydroxyl tagging velocimetry, HTV)测量技术是一种基于激光的流场速率测量方法^[3-4]。它利用光解离的方法将流场中的水分解成OH自由基作为标记分子,然后通过平面激光诱导荧光(planar laser induced fluorescence, PLIF)技术对标记分子进行跟踪显示,通过两幅时间关联的标记分子图像,计算得到流场的速率分布。HTV具有如下技术特点^[3-6]:(1)速率测量原理简单,测量结果直观明了;(2)无需注入种子微粒,避免了种子微粒与流场的跟随性问题;(3)在高温情况下,光解离水更加容易,而且解离产生的OH寿命更长,更适合应用于高温反应

流场的速率测量中。因此,HTV技术近些年得到了较快的发展,并已应用于一些实际流场的速率测量中^[7-10]。

由于OH分子标记线具有一定的宽度,所以单线HTV技术在测量标记线移动距离时,必须在标记线宽度方向上选取测量基准位置进行流场速率计算,通常的做法是粗略选择标记线宽度方向上的中心位置作为基准^[4],但这样加入了过多的人为因素,难免引入误差。本文中研究了一种选取标记线中心位置的方法:利用标记线沿宽度方向的强度分布近似为高斯函数的特征,用高斯函数对实验测量数据进行拟合,用拟合数据的峰值位置作为标记线的中心位置,并以此作为测量基准位置,使流场速率计算精度得到明显提高。

1 HTV技术原理及数据处理方法简介

HTV技术进行速率测量可以形象地被描述为两个过程“写”和“读”。利用光解离水的方法在流场中“写”入OH标记分子,然后用PLIF技术“读”出标记分子在不同时刻的位置,从而计算流场的速率,详细的技术原理见参考文献[3]~参考文献[7],本文中不再赘述。

单线HTV技术在流场中“写”入的是OH分子标

作者简介:叶景峰(1979-),男,硕士,现主要从事燃烧流场激光诊断技术的研究。

E-mail: leafey1979@163.com

收稿日期:2011-05-03;收到修改稿日期:2011-06-07

记线。图 1 为高温超音速流场(温度约为 1000K, $Ma \approx 2$) 在自由空间膨胀时的典型 HTV 图像。初始线是实验前静止空气中标记线荧光图像, 由于是 50 次测量的平均结果, 因此图像显得清晰锐利, 实验中以此位置作为标记线移动的初始位置; 终止线是在相对于初始线延迟时间 t_d , 标记线移动后的图像, 由于 OH 分子在流场中的扩散, 并且是单次测量的结果, 所以图像显得模糊、不很规则。但无论是初始线还是终止线都具有不可忽略的宽度(初始线约 1mm, 终止线约 2mm)。

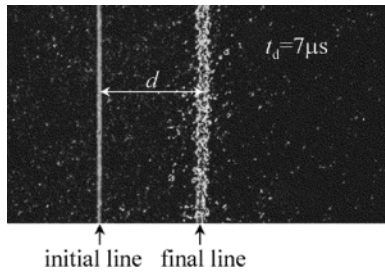


Fig. 1 Typical single line HTV image

流场速率是通过测量标记线移动后位置和初始位置之间的距离 d , 然后除以标记线移动时间 t_d 得到的。如图 1 所示的实验结果, 要计算流场速率, 必须在两条有宽度的线上选择合适的基准进行距离 d 的测量。但即使是初始线图像, 宽度也有 1mm 左右, 移动后图像不仅更宽, 而且模糊、不规则, 那么如何选择合理的测量基准点就成为影响速率计算精度的问题。通常的处理方法是先粗略选取标记线的中心位置进行速率计算, 然后根据经验给出测量的不确定度, 参考文献 [4]

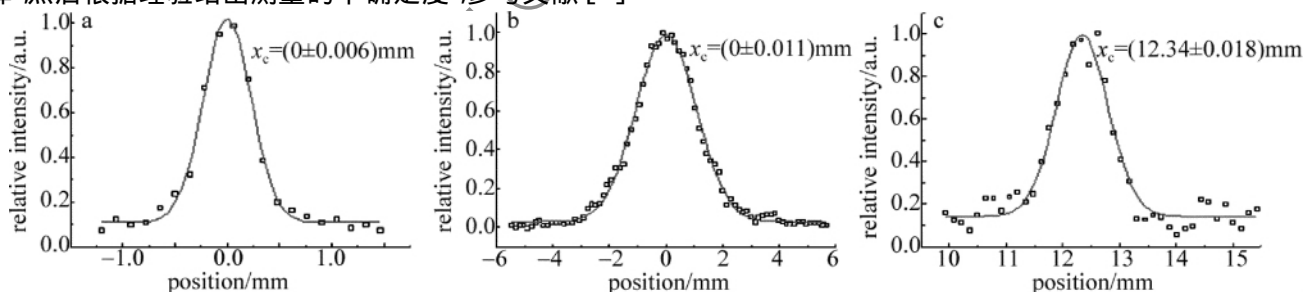


Fig. 2 Fitting data of tagging line by Gaussian function

本是正确的。

单线 HTV 流场速率测量中, 重点关注的是标记线的精确位置, 而根据以上所述, 可以将拟合得到的函数峰值位置 x_c 作为标记线的中心位置, 即测量移动距离 d 时的基准位置, 这要比盲目选取基准位置科学得多。

为了进一步提高终止标记线位置的确定精度, 利用低通滤波的方法对标记线图像进行了降噪处理, 旨在滤掉图像中明显的噪声。对图 1 进行处理, 结果如图 3 所示, 可以看到, 通过降噪处理后, 标记线图像强度分布光滑度得到明显提高。

图 4 为对图像进行降噪处理后得到的终止标记线沿宽度方向的强度分布以及利用高斯函数进行拟合得

中以标记线宽度的 1/10 作为位移 d 测量的不确定度。但是这样的处理方法加入了更多人为的因素, 必然会降低速率计算精度, 而且以标记线宽度的 1/10 作为位移 d 测量的不确定度也没有很好的科学根据。

2 基于函数拟合的数据处理方法

众所周知, 通常的激光光束沿宽度方向的强度分布近似为高斯函数, 因此可以设想, 由这样的激光光束在流场中解离水产生的 OH 分子在宽度方向的浓度分布也近似为高斯函数, 进一步可推想, 这些 OH 分子经过平面激光诱导辐射出的荧光强度分布沿宽度方向也应为高斯函数。为了验证这一想法, 对多次实验中的初始标记线、扩散后初始标记线和终止标记线沿宽度方向的信号强度分布进行了总结分析, 结果如图 2 所示。图 2a ~ 图 2c 分别对应于初始标记线、扩散 100 μ s 后初始标记线和终止标记线, 图中空心方块为实验数据点, 实线为利用函数:

$$y = y_0 + A \exp \left[-2 \left(\frac{x - x_c}{\omega} \right)^2 \right] \quad (1)$$

拟合得到的曲线。式中 x_c 为函数峰值位置, A 和 ω 为拟合参量。可以看出, 初始标记线以及扩散后初始标记线拟合曲线和实验数据符合得很好, 终止标记线由于移动过程中受流场干扰等因素影响, 实验数据略显零乱, 但整体还基本保持高斯分布形状, 拟合得到的函数峰值位置误差不大。因此, 可以证明, 以上的设想基

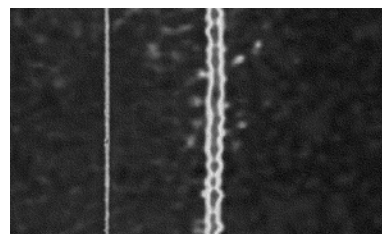


Fig. 3 Image after reducing noise in Fig. 1

得到的曲线, 对应于图 2c, x_c 的拟合精度比降噪处理前提高了近 1 倍。

根据图 4 的拟合计算结果, 得到 (12.32 ± 0.010) mm, 可以计算得到流场该处的速率约为 (1760 ± 1.4) m/s。如果采用前面提到的用标记线宽度的 1/10 作为位移测

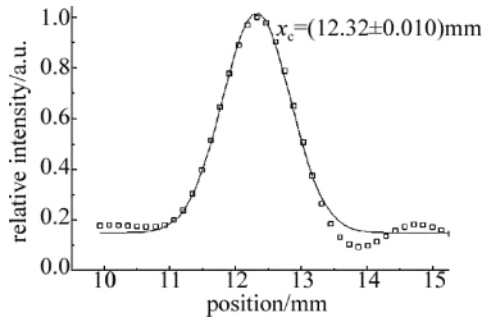


Fig. 4 Fitting data after reducing noise in Fig. 2c

量的不确定度,那么得到的速率误差约为 11.4m/s,比使用函数拟合方法高近一个量级。

当然,由于流场的不均匀性造成终止标记线上不同位置处的 OH 荧光强度分布情况不尽相同,部分位置的分布受流场扰动大一些, x_c 拟合误差要大一些,而部分位置受流场扰动要小一些,相应的拟合误差就要小一些。同时,如果 t_d 过大,也会造成标记线受流场扰动程度增大,降低速率测量精度,这也给 HTV 技术进行速率测量时 t_d 的选取提供了一定的参考意见。

3 结论

利用 OH 分子标记线荧光强度沿宽度方向的分布近似为高斯函数的特征,提出了单线 HTV 技术测量流场速率时的一种较科学的数据处理方法——利用高斯函数对数据进行拟合得到标记线的中心位置。通过对实验数据的处理分析对比,验证了该方法的可行性。利用该方法得到的流场速率结果精度比传统方法有明显的提高。

参 考 文 献

- [1] LI C T, CHANG K C, WANG M R. PIV measurements of turbulent flow in planar mixing layer[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2009, 33(3): 527-537.
- [2] WANG Z K, BI J M, ZHOU X, *et al.* Investigation on dual-beam Doppler speedometer based on CO₂ lasers [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2): 183-185 (in Chinese).
- [3] SHIRLEY J A, BOEDEKER L R. Non-intrusive space shuttle main engine nozzle exit diagnostics [C]//24th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Boston, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1988: 3038.
- [4] WEHRMEYER J A, RIBAROV L A, OGUSS D A. Flame flow tagging velocimetry with 193nm H₂O photodissociation[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(22): 6912-6917.
- [5] RIBAROV L A, WEHRMEYER J A, PITZ R W, *et al.* Hydroxyl tagging velocimetry (HTV) in experimental air flows [J]. *Applied Physics* 2002, B74(2): 175-183.
- [6] RIBAROV L A, HU S T, WEHRMEYER J A, *et al.* Hydroxyl tagging velocimetry method optimization: signal intensity and spectroscopy [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(31): 6616-6626.
- [7] 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.
- [8] YE J F, HU Z Y, ZHANG Z R, *et al.* High temperature instantaneous supersonic flow measurement using hydroxyl tagging velocimetry [J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2009, 21(9): 1310-1314 (in Chinese).
- [9] ALEXANDER A, WEHRMEYER J, RUNGE W, *et al.* Nonintrusive measurement of gas turbine exhaust velocity using hydroxyl tagging velocimetry [C]//26th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference. Seattle, Washington, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics 2008: 3709.
- [10] PERKINS A N, RAMSEY M, STRICKLAND D J, *et al.* Dual-pulse hydroxyl tagging velocimetry (HTV) in jet engine exhausts [C]//45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Denver, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009: 5108.

[1] LI C T, CHANG K C, WANG M R. PIV measurements of turbulent