

文章编号: 0253-2239(2009)08-2191-06

OH 分子示踪法用于气态流场速度测量

叶景峰 胡志云 张振荣 刘晶儒 王 晟 黄梅生 张立荣 赵新艳

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要 研制了一套单线羟基(OH)分子标记示踪流场速度测量系统, OH 分子标记线由 193 nm 波长脉冲氟化氩(ArF)准分子激光束解离流场中的水分子产生, 利用脉冲染料激光倍频的约 282 nm 激光片显示 OH 分子荧光图像, 由获得的两个时间关联的 OH 分子标记线位置图像计算流场的速度分布。研究了空气和火焰中 193 nm 波长激光解离水产生的 OH 分子寿命, 实现了常温空气流场和高温超音速流场速度分布的测量, 并对测量结果进行了分析讨论。

关键词 光学测量; 激光诊断; 速度测量; OH 分子示踪速度测量方法; 超音速流场

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2191

Velocity Measurement of Gas Flow Field by Hydroxyl Tagging Velocimetry

Ye Jingfeng Hu Zhiyun Zhang Zhenrong Liu Jingru Wang Sheng
Huang Meisheng Zhang Lirong Zhao Xinyan

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

Abstract A single-line hydroxyl tagging velocimetric system for gas flow is constructed. Hydroxyl tagging line is generated through the photodissociation of H_2O molecules in flow by a 193 nm pulsed ArF excimer laser beam. A laser sheet from a pulsed frequency-doubled dye laser operating at 282 nm is used to reveal the OH tagging line through fluorescence. Two time consecutive images are acquired to calculate the velocity distribution of flow field. The lifetime of OH photoproducts photo-dissociated by 193 nm laser in air and flame are studied. The velocity measurement for room-temperature air flow and high-temperature supersonic flow are carried out, and the basic analysis and discussion of experimental results are performed.

Key words optical measurement; laser diagnostic; velocity measurement; hydroxyl tagging velocimetry; supersonic flow field

1 引 言

高速气态流场尤其是超音速高温燃烧流场中的速度分布是一个关键信息, 精确地测量速度分布对了解流场结构、对流场进行准确的数值模拟等具有重要意义。无接触的激光测量方法在气态流场速度测量中具有对流场无扰动的独特优势, 因此激光速度测量方法在流场测量中近些年得到了迅速发展。常用的方法可大致分为两类: 第一类是基于多普勒频移的测量方法^[1], 利用目标与观察者之间的多普勒频移效应, 通过测量频移的方法推算目标速度; 第

二类是基于时间飞行距离(TOF)的速度测量方法, 就是利用 $v=d/t$, 测量目标在时间 t 内行进的距离 d , 就可算出目标的速度。这类方法原理简单, 并且更容易实现二维速度场分布测量, 受到了较广泛研究, 发展了如粒子成像速度测量(Particle image velocimetry, PIV)^[2,3]、分子示踪速度测量(Molecular tagging velocimetry, MTV)^[4,5]等技术, 并逐步应用到实际流场的速度测量实验中。国内对流场速度测量技术也进行了较深入的研究^[6~10], 但对高速高温流场速度测量方面尚没有有效方法。OH 分子示踪速度测量技术(HTV)是 MTV 技术

收稿日期: 2008-08-29; 收到修改稿日期: 2008-12-08

作者简介: 叶景峰(1979—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事激光燃烧诊断方面的研究工作。E-mail: leafey1979@163.com

中的一种,具有无需注入种子微粒、可应用于常温/高温流场、测速范围宽等优点。

相对于其它几种流场速度测量技术,HTV 技术在高温反应流场中的应用具有独特优势,因此在超音速燃烧等流场的诊断中有很好的应用前景。近二十年来,HTV 技术由单线测量发展为多线测量^[11,12],并逐渐应用到高/低温的实际流场速度场测量中^[13~15]。本文利用氟化氩(ArF)准分子激光解离流场中的水分子产生 OH 分子作为流场标记,用平面激光诱导荧光技术显示标记图像,建立了一套单线 OH 分子标记示踪流场速度测量系统,并应用到声速约 2 mach(680 m/s),温度约 1500 K 的高温超音速流场速度测量中。

2 原理

HTV 利用光解离的方法将流场中的水(H₂O)解离成 OH 自由基作为标记分子,然后通过平面激光诱导荧光(PLIF)技术对 OH 分子进行跟踪显示,从而得到流场的速度信息。可以被形象地描述为两个过程:“写”和“读”。如图 1 所示,“写”激光解离流场中的 H₂O 分子产生 OH 自由基作为标记分子,经过一定时间延迟后,通过 PLIF 技术的“读”过程显示这些标记分子的分布图像,比较不同时刻标记分子的位置从而得到流场的速度信息。

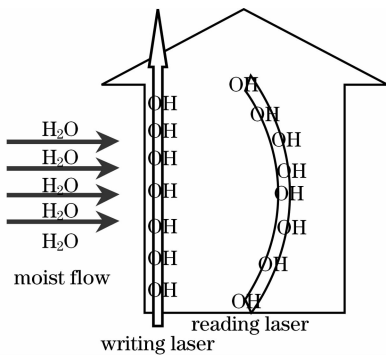


图 1 羟基分子示踪速度测量示意图

Fig. 1 The schematic diagram of hydroxyl tagging velocimetry

光解离 H₂O 产生 OH 分子过程如图 2 所示,处于基态 X¹A₁ 的 H₂O 分子吸收光子后跃迁至激发态 A¹B₁,并迅速分解产生 X²Π 态的 OH 分子。H₂O 的基态 X¹A₁ 和第一激发态 A¹B₁ 之间的能级宽度为 53800 cm⁻¹(对应的光波长 185 nm),所以实验应选择波长尽量短的激光光源。HTV 技术最初使用 248 nm 的氟化氩(KrF)准分子激光作为解离激光^[10],H₂O 分子对 248 nm 激光光子吸收过程为双

光子过程,需要较强的激光功率密度,因此造成激光解离线长度较短,应用不方便。现在常用的“写”激光为波长 193 nm 的 ArF 准分子激光,虽然波长 193 nm 激光光子能量(51813 cm⁻¹)对于 H₂O 分子的能级宽度并不足够短,但是在高温环境下,一部分 H₂O 分子处于基态的振动激发态上,导致基态至第一激发态之间的能级宽度变窄,大大增加了对于波长 193 nm 激光的吸收截面。所以在高温环境下,使用波长 193 nm 激光作为“写”激光足以满足实验要求。

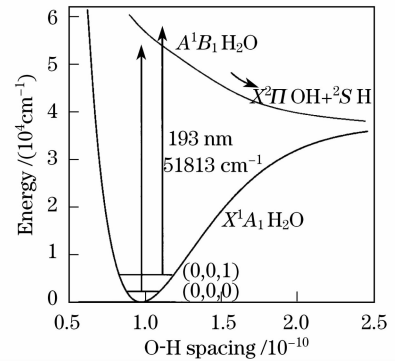


图 2 H₂O 能级图

Fig. 2 H₂O energy-level diagram^[12]

PLIF 是一种较成熟的激光测量技术。如图 3 所示。X²Π 态的 OH 分子通过共振吸收相应能量的光子以后,跃迁至 A²Σ⁺ 态,然后在向下跃迁的同时辐射荧光,利用图像拍摄系统记录荧光图像就可以显示流场中 OH 分子的浓度分布。在 HTV 技术中,PLIF 作为“读”过程,用来显示“写”过程中产生的 OH 分子。

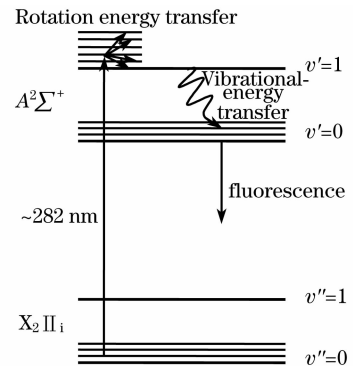


图 3 OH 分子平面激光诱导荧光过程示意图

(约 282 nm 光抽运)

Fig. 3 The schematic diagram of PLIF of OH when pumped at 282 nm

在常温环境下,虽然 H₂O 分子对 193 nm 激光的吸收截面比高温情况下小的多。但是在“读”过程中选用较强的荧光抽运线,比如 OH(A²Σ⁺)←OH/(X²Π)+hν_λ=282 nm (1←0)或 OH(A²Σ⁺)←OH

$(X^2\Pi) + h\nu_\lambda = 308 \text{ nm}(0 \leftarrow 0)$, 用来弥补“写”过程 OH 分子浓度较低的不足, 同样可满足实验需求。

3 实验系统

如图 4 所示, 单线 HTV 实验系统主要由 ArF 准分子激光器、PLIF 系统、同步控制系统及测量对象组成。

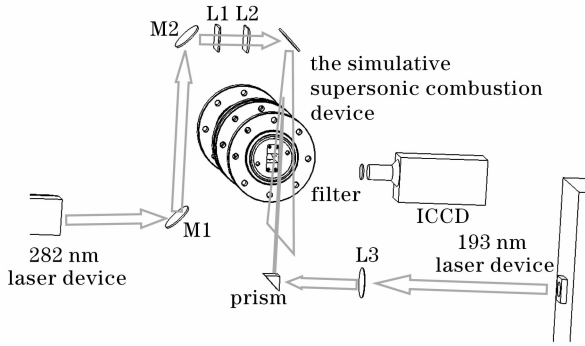


图 4 单线羟基分子示踪速度测量实验系统示意图

Fig. 4 The schematic diagram of single-line HTV experimental system

ArF 准分子激光器输出波长 193 nm 激光, 单脉冲能量约 120 mJ, 脉冲宽度约 25 ns。193 nm 激光经过透镜 L3 ($f = 500 \text{ mm}$) 聚焦后形成激光线作为“写”过程的激励激光, 激光线的直径约 0.5 mm。

PLIF 系统的 282 nm 激光由 YAG 激光器、可调谐染料激光器和相应的倍频器共同产生, 脉冲宽度约 8 ns, 单脉冲能量约 7 mJ。282 nm 激光经过反射镜 M1、M2、M3 和柱面透镜 L1 ($f = 150 \text{ mm}$)、L2 ($f = 1000 \text{ mm}$) 整形后形成宽度约 50 mm, 厚度约 0.1 mm 的激光片。通过精确调节, 使 282 nm 激光片和 193 nm 激光线严格共面, 并且使激光片处于测量对象喷流的通过轴线的竖直面内。实验时, 利用可调谐染料激光器将输出激光调谐至 283.011 nm, 对应于 OH 分子的 $Q_1(6)$ 共振吸收线, 用于产生 OH 分子荧光。带门控开关的 ICCD 用来进行 PLIF 的图像采集, 门开关开启时间 50 ns, CCD 分辨率 640×480 , 镜头前放置 UG5 和 WG305 滤光片用来过滤荧光。

为了验证 HTV 技术在低高温流场中的应用效果, 实验中分别选择利用压缩空气和简易喷嘴形成的高温稳定喷流和小型脉冲高温超音速流场模拟装置产生的高温超音速喷流作为测量对象。小型脉冲高温超音速流场模拟装置采用封闭燃烧气体突然释放并流经超音速喷管的方式产生超音速高温流场, 设计流速 2 mach (680 m/s), 脉冲持续时间大于

10 ms, 喷管出口尺寸 $30 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 。测量在喷管出口 80 mm 处的自由空气中进行。

同步系统用于控制“写”和“读”过程的时间延迟以及与脉冲喷流装置的同步。

4 实验结果及分析

4.1 193 nm 激光解离 H_2O 产生的 OH 分子寿命

光解离 H_2O 产生的 OH 分子寿命的长短决定着 HTV 技术的速度测量范围。实验利用测量 OH 分子荧光强度的方法测量了常温和甲烷/空气火焰 ($\Phi = 1$) 环境中 OH 分子的寿命。测量得到的 PLIF 信号强度随“写”激光和“读”激光之间的延迟时间的变化关系以及相应的信号噪声比如图 5 所示。忽略 PLIF 系统的测量不稳定性, 可认为测量得到的荧光强度的变化是由 OH 分子浓度变化引起的。可见, 193 nm 激光解离 H_2O 产生的 OH 分子浓度随时间延迟的增加逐渐减少。在常温空气中, 由于 H_2O 分子含量较低, 而且大部分处于基态, 对 193 nm 激光光子吸收相对较少。因此光解离 H_2O 产生的 OH 分子浓度较低且随时间的增加而迅速降低, 30 μs 后降至大约初始时刻的约 20%, 信号噪声比降至 10, 而在甲烷空气火焰中 (约 1900 K), 100 μs 后 OH 分子

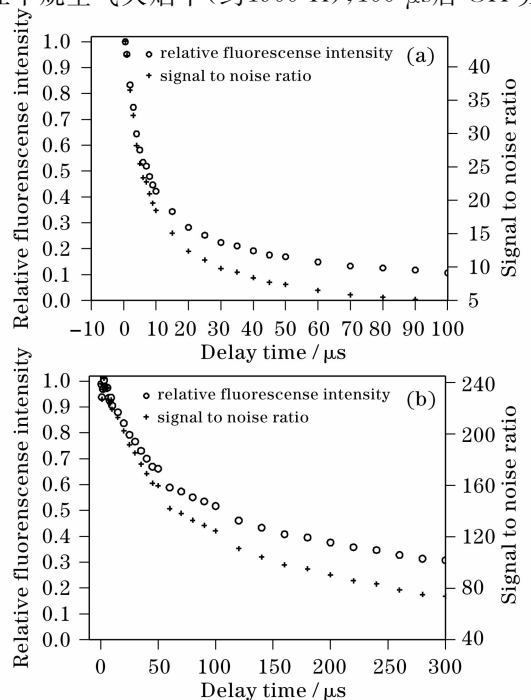


图 5 常温空气 (a) 和甲烷/空气火焰 ($\Phi = 1$) (b) 环境中光解离 H_2O 产生的 OH 分子寿命

Fig. 5 The lifetime of OH by photodissociation of H_2O under air (a) and CH_4/air flame ($\Phi = 1$) (b) environment

浓度降至大约初始时刻的约 50%，此时信号噪声比约为 120。可知，在常温空气环境中，小于 $30 \mu\text{s}$ 的时间延迟是可用的，假设相机视场调至每 10 个像素对应空间 1 mm ，CCD 上移动 5 个像素可分辨的情况下，则 HTV 技术可以测到的最低速率约为 15 m/s 。而在火焰环境中，由于 OH 分子寿命很长，测速范围更大。当然，时间延迟很长时，由于光解离产生的 OH 分子向周围环境中的扩散，使“写”过程产生的标记变得模糊，从而增加测量结果的不确定度。

4.2 流场速度分量测量

4.2.1 常温气流流速测量

依上述分析，HTV 技术应用于常温流场的速度测量时，受到 H_2O 分子对 193 nm 光子吸收截面较小以及光解离产生的 OH 分子浓度随时间下降较快等因素的影响，信号强度相对较弱。但在合理调整实验参数的情况下，仍然能得到较好的实验结果。

实验利用常温压缩气体和简易喷嘴形成的气流进行了单线 HTV 速度测量，喷嘴入口压力约 0.5 MPa ，出口处为自由空气，气流温度约 300 K ，相对湿度约 40%。图 6 为典型的单线 HTV 测量图像（50 次平均），图中箭头位置为气流位置，在“写”“读”之间的时间间隔 $5 \mu\text{s}$ 的条件下，由 193 nm 激光解离空气中的 H_2O 产生的 OH 分子在气流的带动下向前移动，由于气流的自由扩散形成圆弧状变形。测量 OH 标记线移动的最大位移约 0.6 mm ，从而可以得到气流在该处沿喷嘴轴线方向的速率约为 120 m/s 。

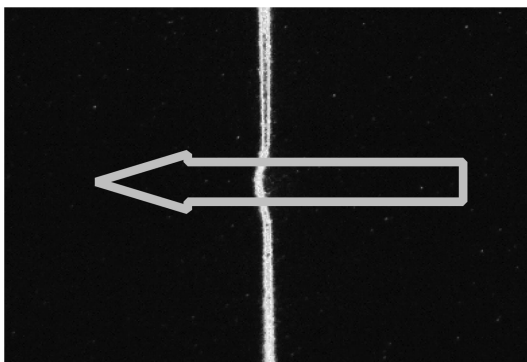


图 6 常温空气流动的单线羟基分子示踪速度测量
Fig. 6 The single-line HTV image of room temperature flow

4.2.2 脉冲高温超音速气流流速测量

实验对小型脉冲高温超音速流场模拟装置模拟装置产生的高温超音速喷流沿轴线方向速度进行了测量。图 7 为测量的单线 HTV 典型图像。气流从右至左流动，图 7(a)、(b) 分别对应于测量位置距离喷流出口 80 mm 和 100 mm 。一定的延迟时间后，

OH 荧光沿喷流方向产生了明显的位移，而且明显地分为两个区域：中心区域对应于喷流位置（喷流出口宽度如图中箭头所示），上下两侧区域为喷流扩散的区域。根据图 7 计算得到的 OH 分子标记线上的速度分布如图 8 所示，图 8(a)、(b) 分别对应于图 7(a)、(b)。图中给出的速度为喷流沿轴线方向的速度分量，箭头方向为速度分量方向。可以看到，在不同的测量位置，沿 OH 标记线上流场的速度有较大的差异，这是由于超音速喷流进入空气中后形成膨胀波、压缩波交替出现的流场，造成流场速度在空间位置上的巨大变化^[16]造成的。图 7(a) 中，测量位置处于喷流的膨胀区域，流场速度高，中心处速度约为 2400 m/s ，而图 7(b) 的测量位置处于喷流的压缩区，流场密度、温度高但速度很低，中心处速度仅为约 420 m/s 。而测量图像中上下两侧区域为喷流扩散区域，无压缩波、膨胀波存在，所以在不同位置上速度差别不大，但是受周围环境的影响，显得有些杂乱。

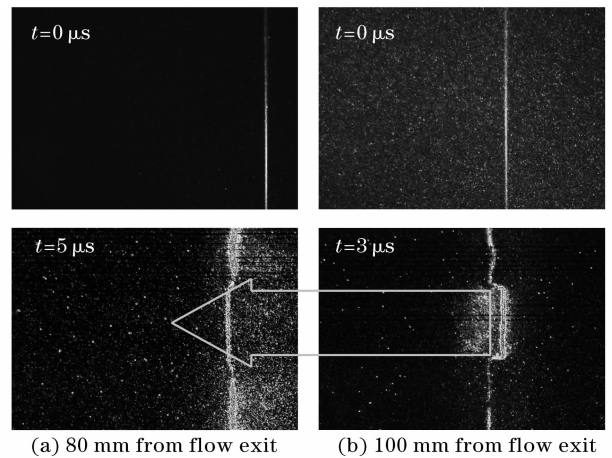


图 7 高温流动的单线羟基分子示踪速度测量图像
Fig. 7 The single-line HTV images of high-temperature flow

4.2.3 不确定性分析

根据速率 v 的计算公式 $v = d/t$ ，HTV 技术的测量不确定度主要来自于位移量 d 和时间间隔 t 的测量：

$$\Delta v/v = \sqrt{\Delta d^2/d^2 + \Delta t^2/t^2}. \quad (1)$$

(1) 式为测量不确定度的计算公式，其中 Δv 、 Δd 、 Δt 分别代表 v 、 d 、 t 的不确定度。实验中 Δt 由脉冲信号发生器和激光器触抖动产生，时间抖动约 10 ns 。 Δd 主要来自测量 d 时 OH 荧光中心位置的确定和图像记录 CCD 的空间分辨率（已知约 0.1 mm ）。光解离 H_2O 产生的 OH 分子荧光在初始位置是比较锐利的线（与聚焦的 193 nm 激光线对

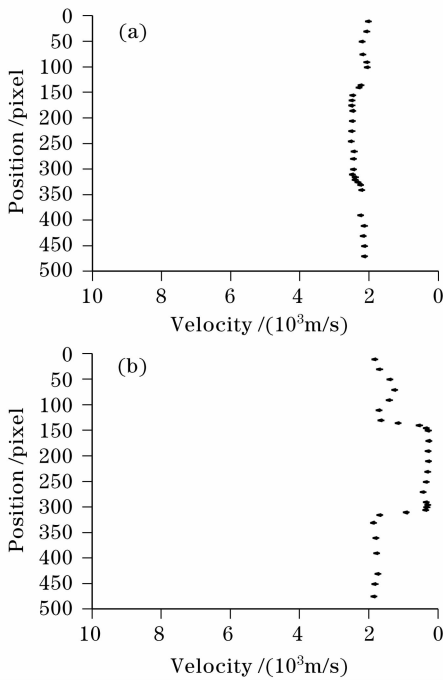


图8 速度分布计算结果

Fig. 8 The calculated velocity distribution results

应),中心位置比较明确,但随着 OH 分子在流场中的迅速扩散,OH 标记线在变宽的同时,中心位置也变得模糊不清,如图 9 所示。图 9 为图 7(a)中心位置 OH 分子荧光在初始位置和移动后位置的沿宽度方向的强度分布。另外,OH 分子标记线宽度也即对应于 193 nm 激光线宽度对其中心位置的确定也带来一定的影响,标记线宽度越宽,确定中心位置越困难。通常的数据处理方法是先粗略选取标记线的中心位置进行速度计算,然后根据经验给出测量的不确定度,文献[12]以标记线宽度的 1/10 作为位移测量的不确定度。则根据(1)式,即可得到图 7(a)中速度的测量不确定度约为 2%,图 7(b)中速度的测量不确定度约为 10%。

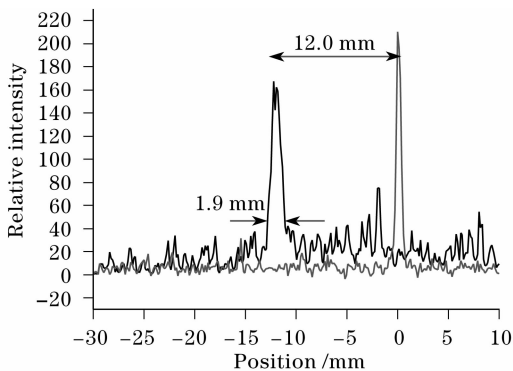


图9 OH标志线位置示意

Fig. 9 OH tagged line position

通过以上分析可知,对于 HTV 技术,流场速率

越高测量不确定度越小。流场速率确定的情况下,增加位移量 d 可以提高测量精度,但是另一方面,增加 d 必然同时要增加 t ,使 OH 分子扩散更加严重,使测量不确定度降低,而且对速率随时间变化很大的流场不适合。

5 结 论

利用测量 OH 分子荧光强度的方法测量了常温和甲烷/空气火焰环境中 193nm 光解离 H_2O 产生的 OH 分子寿命。在 193 nm 激光能量密度 4.8×10^4 mJ/cm² 的条件下,得到 OH 分子浓度在常温空气(相对湿度约 40%)环境中,30 μ s 后降至大约初始时刻的 20%,信号噪声比降至 10;而在甲烷/空气火焰中(约 1900 K),100 μ s 后 OH 分子浓度降至大约初始时刻的 50%,信号噪声比约为 120。说明 HTV 技术可以应用在较大范围的速度测量中。对常温空气喷流沿轴线方向的速率测量表明,在低温环境中,HTV 技术可以得到较好的应用。对高温超音速喷流在不同空间位置沿轴线方向速率进行了测量实验,结果说明喷流在不同空间位置速率差异很大,与空气动力学理论是符合的。对高温超音速喷流流速测量结果的不确定度分析表明,测量实验中两次不同速率(约 2400 m/s,约 420 m/s)的测量不确定度分别为约 2%和约 10%。

参 考 文 献

- 1 L. M. Robert, S. R. Michael, P. J. Thomas. Advances in planar Doppler velocimetry for large-scale wind tunnels [C]. AIAA-2004-2474, 24th Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, 2004
- 2 F. Scarano, B. W. van Oudheusden. Planar velocity measurements of a two-dimensional compressible wake[J]. *Exp. Fluids*, 2003, **34**(3): 430~441
- 3 C. T. Smith, C. P. Goynes, R. H. Krauss *et al.*. Development of a three-component particle image velocimetry technique for a scramjet combustor[C]. AIAA-2005-4104, 41th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2005
- 4 D. G. Bohl, M. M. Koochesfahani. Molecular tagging velocimetry measurements of axial flow in a concentrated vortex core[J]. *Phys. Fluids*, 2004, **16**(11): 4185~4191
- 5 R. B. Miles, J. Grinstead, R. H. Kohl *et al.*. The RELIEF flow tagging technique and its application in engine testing facilities and for helium-air mixing studies [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2000, **11**(9): 1272~1281
- 6 Song Baoan, Zhao Weijiang, Ren Deming *et al.*. Velocity measurement of hard target in angle-tuned Doppler wind Lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 787~791
宋宝安, 赵卫疆, 任德明等. 角度调谐的多普勒激光雷达硬目标转速测量[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 787~791
- 7 Zhou Jianguang, Zang Shusheng, Weng Shilie *et al.*. PIV application in the measurement of diffusion combustion flow field [J]. *J. Combust. Sci. Technol.*, 2005, **11**(1): 92~95

- 周见广, 臧述升, 翁史烈等. 扩散燃烧流场测量的 PIV 应用研究[J]. 燃烧科学与技术, 2005, **11**(1): 92~95
- 8 Wang Jian, Huang Wei, Gu Haitao *et al.*. Gas temperature measurement with tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1639~1642
- 王建, 黄伟, 顾海涛等. 可调谐二极管激光吸收光谱法测量气体温度[J]. 光学学报. 2007, **27**(9): 1639~1642
- 9 Li Ning, Yan Jianhua, Wang Fei *et al.*. Effect of linewidth on measurement of CO₂ by wavelength modulation absorption spectrometry using tunable diode laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1567~1572
- 李宁, 严建华, 王飞等. 光谱线宽对可调谐激光调制吸收光谱技术测量 CO₂ 浓度的影响[J]. 中国激光. 2008, **35**(10): 1567~1572
- 10 Zhao Weijiang, Su Liping, Ren Deming *et al.*. Measurement on the angular scattering properties of wake bubbles[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 744~747
- 赵卫疆, 苏丽萍, 任德明等. 尾流气泡激光散射的测量[J]. 中国激光, 2008, **35**(5): 744~747
- 11 J. A. Shirley, L. R. Boedeker. Non-intrusive space shuttle main engine nozzle exit diagnostics[C]. AIAA-1988-3038, 24th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1988
- 12 L. A. Ribarov, J. A. Wehrmeyer, R. W. Pitzl *et al.*. Hydroxyl tagging velocimetry (HTV) in experimental air flows [J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **74**: 175~183
- 13 J. A. Wehrmeyer, L. A. Ribarov, D. A. Oguss. Flame flow tagging velocimetry with 193-nm H₂O photodissociation [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(22): 6912~6917
- 14 R. W. Pitz, M. D. Lahr, Z. W. Douglas *et al.*. Hydroxyl tagging velocimetry in a supersonic flow over a cavity[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(31): 6692~6700
- 15 L. A. Ribarov, Hu Shengteng, J. A. Wehrmeyer *et al.*. Hydroxyl tagging velocimetry method optimization: signal intensity and spectroscopy [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(31): 6616~6626
- 16 Wang Xinyue. *Gas Dynamics Basic* [M]. Xi'an: Northwest Polytechnical University Press, 2006:143~144
- 王新月. 气体动力学基础[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2006:143~144