

基于激光吸收光谱技术测量瞬态超声速流场温度

陶波 叶景峰 赵新艳 张立荣 胡志云 叶锡生

(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 710024)

摘要 燃烧过程的准确、实时诊断对研究燃烧机理、提高燃烧效率、降低污染物排放等至关重要。简要介绍了可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术的测温原理,通过选择水在 1397 nm 附近的两条邻近吸收线,运用多功能数据采集卡对二极管激光器进行控制和信号采集,实现了 TDLAS 技术波长扫描直接吸收法对瞬态超声速流场温度的测量,获得了瞬态超声速流场温度随喷流时间的演化过程,测量重复频率为 1 kHz。

关键词 测量;温度测量;吸收光谱;可调谐二极管激光;超声速流场

中图分类号 O433; TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1215002

Temperature Measurement of Instantaneous Supersonic Flow Based on Absorption Spectroscopy Technology

Tao Bo Ye Jingfeng Zhao Xinyan Zhang Lirong Hu Zhiyun Ye Xisheng

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

Abstract Accurate and real-time diagnostics of combustion process is critical to understand combustion mechanism, improve combustion efficiency and reduce the production of pollutants. The thermometry of tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) technique is briefly introduced. Two adjacent water lines near 1397.75 nm are selected, and the TDLAS measurement system is established by using a multifunctional data acquisition (DAQ) card for signal processing and diode laser control. The measurements are performed on the instantaneous supersonic flow, the measure repetition frequency is 1 kHz, and the temperature of the evolution of supersonic flow is acquired.

Key words measurement; temperature measurement; absorption spectroscopy; tunable diode laser; supersonic flow

OCIS codes 120.1740; 300.1030; 280.1740; 300.6260; 280.6780

1 引言

超声速燃烧流场温度的测量对研究燃烧点火过程、了解流场结构以及数值仿真平台研发和验证等方面具有重要意义。作为非侵入式基于激光的燃烧流场诊断技术,由于对燃烧场几乎没有扰动,测量结果能更好地反映真实的燃烧环境,因而受到国内外研究单位的重视,并得到快速发展^[1]。相对于其他激光诊断技术,可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术具有测量系统小巧紧凑、高测量重复频率(达千赫兹以上)的优势,其一方面可用于燃烧场温度、组分浓度(H₂O, O₂, CO₂, CH₄ 和 CO 等)、流场速度等路径积分值的测量^[2,3];另一方面可通

过断层成像的方式实现对燃烧场温度、组分浓度二维分布的测量^[4,5]。近年来,美国政府对开拓这项技术非常重视,美国空军研究实验室、美国宇航局(NASA)高超声速飞行计划等把 TDLAS 技术作为重点资助对象^[6,7],以期能够制成小型光学传感器,安装于空天飞行器上,用于飞行试验中发动机燃烧流场参数的实时在线监测^[8]。

目前国内的 TDLAS 测温技术研究主要是基于稳态燃烧场,例如:Cai 等^[9]采用水在 7079.2 cm⁻¹与 7079.9 cm⁻¹处两条邻近吸收线实现了对稳态燃烧炉温度的测量;Yu 等^[10]利用多线拟合的方式实现了对稳态燃烧炉一维温度分布的测量;王健等^[11]

收稿日期: 2011-08-02; 收到修改稿日期: 2011-09-14

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1009-01)资助课题。

作者简介: 陶波(1986—),男,研究实习员,主要从事燃烧流场激光诊断技术方面的研究。E-mail: nktaobo@yeah.net

利用氧气在 13164 cm^{-1} 附近的两条吸收线实现了对高温管式炉温度的测量。本文选择两条位于单台二极管激光器波长扫描范围内的邻近水吸收线^[12,13],运用 TDLAS 技术波长扫描直接吸收法实现了对高温瞬态超声速流场温度的测量,获得了超声速流场温度随喷流时间的变化关系。

2 测量原理

TDLAS 技术波长扫描直接吸收法是通过扫描选定的吸收线,利用获得的吸收峰实现对吸收介质相关参数的测量,其主要优点是测量原理相对简单、物理意义明确、无需额外的标定。燃烧场温度的测量一般是通过双线法,即选择两条对温度有不同依赖关系的吸收谱线,利用其谱线强度比值是温度的单值函数来反演出燃烧场温度。根据比尔-朗伯定理,经过燃烧场后的激光光强 I 与入射的激光光强 I_0 之间的关系为

$$I = I_0 \exp[-PXS(T)\phi(\nu)L], \quad (1)$$

式中 P 为气体的压强; X 为吸收组分的摩尔分数; $S(T)$ 为吸收谱线的强度; $\phi(\nu)$ 为吸收谱线的线型函数; L 为激光在吸收介质中的传播路程。将(1)式整理并对频率积分得

$$PXS(T)L = \int_{-\infty}^{+\infty} \ln(I_0/I) d\nu, \quad (2)$$

(2)式的右侧即为波长扫描直接吸收法测得的物理量,记为 A 。则两条吸收线的 A 值之比为

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{PXS_1(T)L}{PXS_2(T)L} = \frac{S_1(T)}{S_2(T)}, \quad (3)$$

运用谱线的强度 $S(T)$ 表达式^[12,13]可以得到双线法测温计算公式为

$$T = \frac{\frac{hc}{k}(E_2' - E_1')}{\ln \frac{A_1}{A_2} + \ln \frac{S_2(T_0)}{S_1(T_0)} + \frac{hc}{k} \frac{(E_2' - E_1')}{T_0}}, \quad (4)$$

式中 $S(T_0)$ 是在参考温度 T_0 下的谱线强度, h 是普朗克常量, c 是光速, k 是玻尔兹曼常量, E_1' 、 E_2' 分别是两条吸收谱线的下能级能量。

3 实验研究

3.1 实验系统简介

实验中的瞬态超声速流场是通过封闭容器内燃烧气体突然释放并流经超声速喷管的方式产生的^[14],喷管出口尺寸 $30\text{ mm} \times 40\text{ mm}$,出口马赫数约为 2,温度为 $1000 \sim 2000\text{ K}$,超声速喷流持续时间大

于 10 ms 。图 1 为 TDLAS 测量系统示意图,主要由可调谐二极管激光器及其控制器(NLK1E5EAAA)、光纤准直器(F240APC)、高速率探测器(DET50B)以及带有数据采集卡的计算机组成。

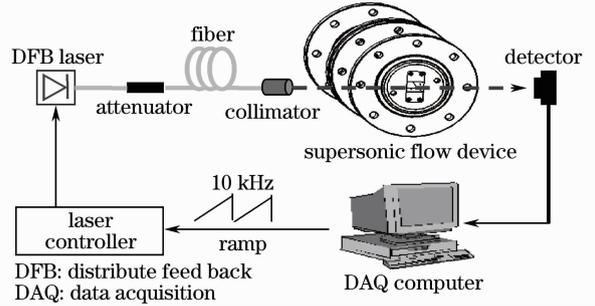


图 1 TDLAS 测量系统示意图

Fig. 1 Schematic of the TDLAS measurement system

实验时首先通过光纤衰减器将输出的激光调节至合适的光强,经光纤准直器准直后(光斑直径约 1.4 mm ,发散角 1.2 mrad)单次穿过待测区域(位于喷口中心,距喷管出口约 15 mm)。然后通过高速率探测器测量激光经过燃烧场后的光强变化情况,并将其转化为电信号输入到装有数据采集卡的计算机中,通过计算机进行光谱运算和测量结果显示。

针对瞬态超声速流场具有持续时间短(约百毫秒,其中超声速流持续时间约 10 ms)的特点,测量系统的具体参数设置为:1)二极管激光器的波长扫描速率设置为 10 kHz ,以使每毫秒获得 10 个测量数据,满足反映瞬态超声速流场变化细节的需要。2)数据采集卡的采样率设置为 10 兆采样点每秒,以使每个扫描周期有 1000 个数据点,保证基线拟合精度;采样长度设置为 2 兆采样点,以使采集时间为 200 ms ,保证能够测量整个喷流过程。3)为保证数据采集和脉冲超声速流场之间的同步,采用脉冲发生器(DG535)同步触发数据采集和超声速流场点火装置。

3.2 实验结果及分析

图 2(a)为超声速流场喷出前后探测器测量到的光强信号,可以看出超声速流场是在数据采集开始之后约 3 ms 时喷出的,流场喷出瞬间的激波以及超声速流对光强信号几乎没有干扰。流场喷出之后的光强信号略有下降,这是燃烧流场对激光散射以及非共振吸收造成的。由于所选择的两条水吸收线在常温情况下吸收非常弱^[12,13],因此在 3 ms 之前,高温流场尚未喷出,测量的仅为空气中的吸收信号,每个扫描周期内没有出现吸收凹陷,如图 2(b)所示;在 3 ms 之后,由于存在高温燃烧流场,在每个扫

描周期内出现吸收凹陷,如图 2(c)所示。

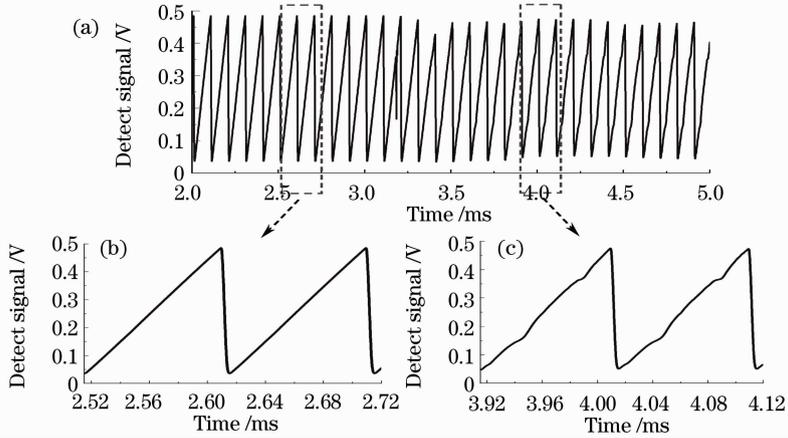


图 2 超声速流场喷出前后测量到的光强信号

Fig. 2 Detected signal before and after supersonic flow erupt

采用对每 10 个扫描周期取平均,即测量重复频率为 1 kHz,图 3 为实验获得的典型吸收峰信号,图中的虚线为采用 Voigt 函数双峰拟合的结果。图 4 为温度测量结果,在 0~25 ms 之间(超声速流在该时间段内)温度从 1800 K 迅速下降至 1000 K,25 ms 之后(非超声速流)温度处于 800~1000 K,整个高温流场持续时间约 175 ms,该测量结果与实验室 CARS 技术测量值相符^[1]。

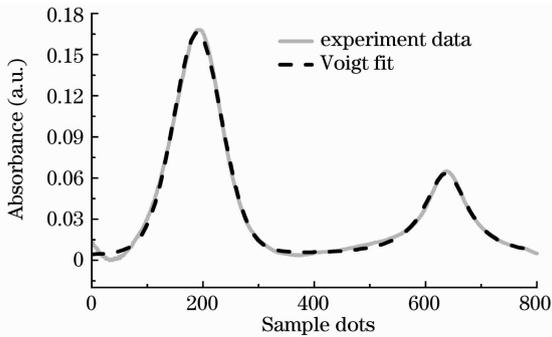


图 3 实验测量的典型吸收峰信号

Fig. 3 Typical measured lineshape signal

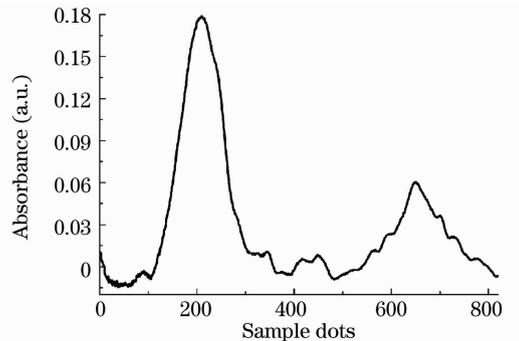


图 5 金属颗粒的散射导致吸收峰发生畸变

Fig. 5 Aberrant lineshape due to metallic granule scattering

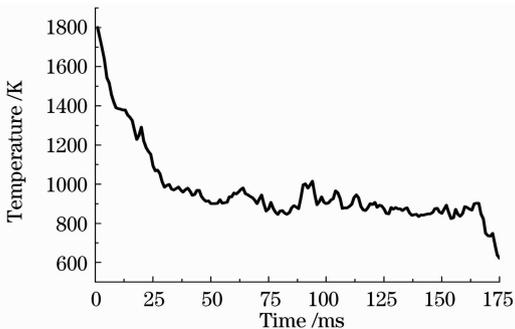


图 4 瞬态超声速流场温度测量结果

Fig. 4 Temperature measurement result of instantaneous supersonic flow

图 4 中的温度测量数据在某些位置存在一定的毛刺,这是由于实验中的超声速流场含有固体散射颗粒。图 5 为通过某些单次光强信号计算的吸收峰(未进行 10 个周期取平均),图中吸收峰的畸变是由于固体颗粒散射造成的。对于散射颗粒较少的燃烧流场来说,可以通过采用多周期取平均以及利用 Voigt 函数对吸收峰进行拟合的方法来降低散射对 TDLAS 测量的影响。

4 结 论

采用 TDLAS 技术波长扫描直接吸收法测量了瞬态超声速燃烧流场的温度,获得了测量重复频率为 1 kHz 的温度结果。实验结果表明:1) TDLAS 技术具有测量系统简单紧凑、抗干扰能力强、数据处理快速等优势,可用于研制集成化的燃烧场温度传感器;2) TDLAS 技术采用连续激光,可以实现高重复频率的测量,能够满足反映超声速流场变化细节的需要;3)燃烧场中的散射颗粒会对 TDLAS 测量

技术造成干扰,对于散射较少的燃烧流场,可以采用多周期取平均以及合适的数据处理方法来降低散射的干扰。

参 考 文 献

- 1 Hu Zhiyun, Liu Jingru, Zhang Zhenrong *et al.*. The research progress of laser combustion diagnostics techniques and applications[J]. *Engineering Sciences*, 2009, **11**(11): 45~50
胡志云, 刘晶儒, 张振荣等. 激光燃烧诊断技术及应用研究进展[J]. *中国工程科学*, 2009, **11**(11): 45~50
- 2 Yang Bin, He Guoqiang, Liu Peijin *et al.*. TDLAS-based measurements of parameters for incoming flow hot-firing test of air-breathing rocket engine[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0508006
杨斌, 何国强, 刘佩进等. 利用 TDLAS 技术开展吸气式发动机来流热试实验参数测量[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0508006
- 3 D. F. Davidson, Z. K. Hong, G. L. Pilla *et al.*. Multi-species measurements behind reflected shock waves in hydrocarbons using laser absorption[C]. Orlando: 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2010, AIAA-2010-198
- 4 K. J. Daun. Infrared species limited data tomography through Tikhonov reconstruction [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 2010, **111**(1): 105~115
- 5 E. Bryner, M. G. Sharma, C. P. Goyne *et al.*. Tunable diode laser absorption technique development for determination of spatial resolved water concentration and temperature [C]. Orlando: 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2010, AIAA-2010-299
- 6 R. S. Okojie, P. M. Danehy, A. N. Watkins *et al.*. An overview of NASA hypersonic experimental diagnostic and instrumentation technologies for ground and flight testing[C]. Denver: 16th AIAA DLR/DGLR International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, 2009, AIAA-2009-7279
- 7 K. R. Jackson, M. R. Gruber, T. F. Barhorst. The HIFiRE flight 2 experiment: an overview and status update[C]. Denver: 45th AIAA ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Ethilit, 2009, AIAA-2009-5029
- 8 A. Sappey, L. Sutherland, D. Owenby *et al.*. Flight-Ready TDLAS Combustion Sensor for Hypersonics[C]. Denver: 16th AIAA/DLR/DGLR International Space planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, 2009, AIAA-2009-7234
- 9 Cai Tingdong, Jia Hui, Wang Guishi *et al.*. A sensor for measurements of temperature and water concentration using a single tunable laser near 1.4 μm [J]. *Sens. Actuat. A: Phys.*, 2009, **152**(1): 5~12
- 10 Yu Xilong, Li Fei, Chen Lihong *et al.*. Spatial resolved temperature measurement based on absorption spectroscopy using a single tunable diode laser[J]. *Acta Mech. Sin.*, 2010, **26**(1): 147~149
- 11 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
王健, 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
- 12 Bo Tao, Xisheng Ye, Zhiyun Hu *et al.*. On-line measurement of temperature and water vapor in CH_4/air premixed flame using near-infrared diode laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(11): 1098~1101
- 13 Tao Bo, Hu Zhiyun, Zhang Lirong *et al.*. On-line measurement of combustion temperature based on laser absorption spectroscopy [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, **5**(6): 438~444
陶波, 胡志云, 张立荣等. 基于激光吸收光谱技术在线测量燃烧场温度研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2010, **5**(6): 438~444
- 14 Ye Jingfeng, Hu Zhiyun, Zhang Zhenrong *et al.*. Velocity measurement of gas flow field by hydroxyl tagging velocimetry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2191~2196
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

栏目编辑:李文喆