

# 移动式 CARS 系统测量超声速燃烧室出口温度

张立荣 胡志云 叶景峰 邵 珺 张振荣 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, 陕西 西安 710024)

**摘要** 发动机测试现场的实验环境普遍存在强振动、高噪声等干扰条件, 常规的用于光学实验室的激光诊断测量系统庞大、复杂且易受干扰, 无法直接应用到这样的恶劣环境中。通过模块化设计和有针对性的抗振动设计, 研制了一台可用于发动机现场测试、体积相对较小、结构紧凑的集成化相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)诊断系统。测温实验前测量了发动机测试过程中的振动结果, 分析了振动来源和特点, 有针对性地采取了减振措施, 进一步降低了振动对集成化系统的干扰。利用集成化 CARS 系统测量了超声速燃烧室出口喷流的温度, 获得了单脉冲 CARS 温度拟合结果和温度随时间的变化。测量结果显示不稳定燃烧状态下的温度抖动范围大于稳定燃烧状态, 但平均温度低于稳定燃烧状态, 表明不稳定燃烧的效率相对较低。

**关键词** 测量; 燃烧诊断; 温度; 相干反斯托克斯拉曼散射; 燃烧; 振动

中图分类号 TN249, TK16

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201340.0408007

## Mobile CARS Temperature Measurements at Exhaust of Supersonic Combustor

Zhang Lirong Hu Zhiyun Ye Jingfeng Shao Jun Zhang Zhenrong Liu Jingru

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

**Abstract** The environment of engine test is usually accompanied with strong vibration and intense noise. The laboratorial laser combustion diagnostic systems can not be directly used in the harsh environment of engine test. Through modularization and anti-vibrating engineering designs, an integrated mobile coherent anti-Stokes Raman scattering (CARS) system is developed, which can be used in the engine test. To analyze the sources and characteristics of vibrations, the vibrations in the engine test are measured. Some de-vibrating techniques are utilized accordingly, and vibrations on the mobile CARS system decrease effectively. Employing the mobile CARS system, single pulse CARS measurements and temperature evolution on a model supersonic engine combustor are obtained. According to the results, temperature range of unstable combustion is higher than that of stable combustion, but the mean temperature is lower, indicating that the efficiency of unstable combustion is lower.

**Key words** measurement; combustion diagnostics; temperature; coherent anti-Stokes Raman scattering; combustion; vibration

**OCIS codes** 120.1740; 120.6780; 300.6230; 300.6450

## 1 引言

相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)技术是一种非接触式的光学诊断方法, 不会对流场产生干扰, 可用于测量燃烧流场温度<sup>[1~12]</sup>、组分浓度<sup>[7,8,10,11]</sup>等重要参数信息。由于其相干特性, 信号具有类激光特点, 几乎可以全部接收, 可以获得高时空分辨率、高精度测量结果。CARS 技术目前已经被广泛应用

到超燃冲压发动机<sup>[3,6,8,11]</sup>、航空涡轮发动机<sup>[7,9,10]</sup>和内燃机<sup>[4]</sup>等流场的温度和相对组分浓度测量中, 对计算流体动力学(CFD)理论模型的验证和发动机的设计与改进均具有重要应用价值。CARS 技术虽然具有较高的测试精度, 但是实验系统十分精密复杂, 包括激光器、摄谱仪、增强型电荷耦合器件(ICCD)相机、同步控制装置以及众多光学元器件, 很容易受

收稿日期: 2012-11-21; 收到修改稿日期: 2013-01-10

作者简介: 张立荣(1980—), 男, 本科, 助理研究员, 主要从事激光燃烧诊断技术方面的研究。E-mail: oreelue@163.com

到发动机测试现场存在的强振动、高噪声等因素的干扰,因此几乎不可能把在一般光学实验室搭建的CARS测量系统直接应用到发动机测试现场。必须对CARS实验系统进行集成化、小型化设计以及有针对性的隔振、抗振、增加稳定性等设计才能适应发动机现场测试的需要。

本文研制了一台可移动的集成化CARS诊断系统。根据发动机测试现场的振动测量结果采取了进一步的隔振措施,利用集成化CARS系统测量了发动机燃烧室出口喷流的温度。

## 2 实验系统

采用的温度测量系统是一台可移动的集成化CARS诊断系统,该系统是为了应对发动机现场测试专门研制的,采用模块化设计,便于移动和现场布局,具有较好的抗振动能力,能够远距离运输,通过简单的调试即可快速恢复系统测量性能。系统光束匹配采用非稳腔空间增强探测(USED)CARS的相位匹配方式,环状的532 nm抽运光和与其共轴的607 nm斯托克斯光经过透镜聚焦,可自动满足相位匹配条件。根据功能划分,该系统由激光发射模块、信号接收模块、光谱成像模块以及采集控制模块等四部分组成。

激光发射模块是系统的主体,采用了双层立体框架结构,模块尺寸1300 mm(长)×650 mm(宽)×(850±25) mm(高),由下层的YAG激光器和置于上层的一台宽带染料激光器和延时补偿、激光扩束、相位匹配等CARS外光路组成,光路系统结构如图1所示。YAG激光器输出二倍频532 nm的激光,经过分束和反射传输到第二层。光束1作为抽

运光进入染料激光器,产生607 nm的宽带激光;光束2作为CARS的抽运光经过M7~M10的延时补偿与607 nm激光同步,通过激光扩束和带孔镜M12反射成内径6 mm的环状光束。607 nm激光经M15反射,由M12的小孔中心通过,与532 nm激光保持共轴。该模块输出满足相位匹配条件的CARS光束,由透镜聚焦于探测区域。图中的两块棱镜用于调节激光发射模块的出光高度,用来适应不同的发动机测试台架和调节测量位置的高度。

混频产生的CARS信号进入信号接收模块,CARS信号收集透镜将接收到的光转换为平行光束,滤波片组过滤掉607 nm激光、532 nm激光和其他杂散光,CARS信号聚焦透镜将CARS信号聚焦到接收光纤上,接收光纤采用多维调整架固定,可精确调整光纤位置,最大限度接收CARS信号。

CARS信号由光纤传输到光谱成像模块,由摄谱仪分光并成像到ICCD相机上。ICCD相机将信号图像经光纤传输至由计算机、数据采集/处理软件和同步装置组成的采集控制模块。

由于常见的商业光学调整架结构复杂,采用的拉簧调节机构容易受振动干扰发生偏移,且无法长时间保持调整位置,如果大量采用商业光学调整架,光学系统的稳定性就会大大降低。因此专门设计了一种固定镜架结构(图2),具有较好的抗振动能力和光学稳定性。通过分析光学系统结构,用固定镜架代替了大部分商业光学调整架,图1中M4、M5、M10~M12以及M15等需要调整的关键位置采用了稳定性相对较好的光学调整架,光学系统的稳定性和易维护性都得到提高。

该测量系统单点测量的空间分辨率可达到 $\Phi 0.1 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ,时间分辨率可达到10 ns;运行重复频率10 Hz。

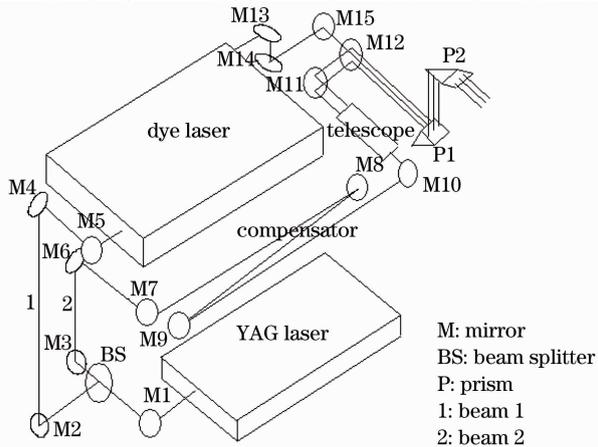


图1 激光发射模块结构示意图  
Fig.1 Sketch map of laser module

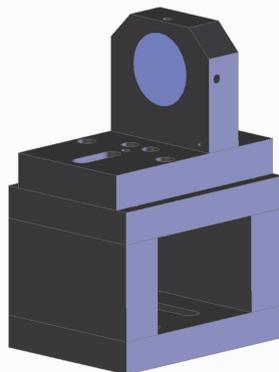


图2 固定镜架结构  
Fig.2 Rigid mirror mount

实验测量对象为一台超燃发动机燃烧室模型，来流气体预热时间约为 5 min，燃料点火后燃烧运行时间约为 10 s，来流速度为  $2Ma$ 。氢燃料由位于燃烧室内上壁面的喷嘴注入。

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 振动测量结果及减振措施

为了尽量降低发动机运行状态下产生的强振动可能对集成化设备产生的干扰，采用精密测振装置

在超燃冲压发动机试车台现场进行了振动加速度测试实验，根据测量结果为光学系统采取了进一步的隔离减振措施。

分别测量了地面、激光发射装置外部隔振光学平台表面、激光发射装置内部平台的振动加速度，分析振动的主要来源。图 3 是在发动机出口没有任何隔离装置时的振动测量结果，结果表明振动主要来源不是来自地面，而是实验中的超声速气流对测量设备的扰动。

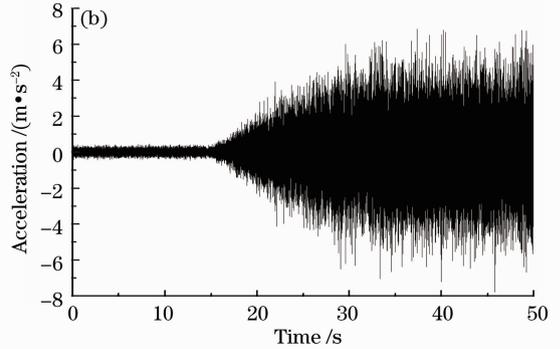
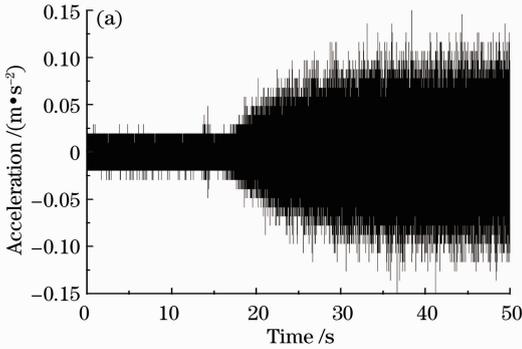


图 3 发动机出口未加隔离措施时的振动测量结果。(a) 地面加速度；(b) 激光发射装置内部加速度

Fig. 3 Vibration measurement results at the combustor exhaust without isolation. (a) Acceleration from ground; (b) acceleration inside the laser module

为减小超声速气流的扰动，在发动机燃烧室出口安装了导流管(Delivery tube)，如图 4 所示，能够对超声速气流起到一定的约束作用。图 5 为安装导流管后激光发射装置内外的振动加速度测量结果，测试结果表明激光发射装置内部振动加速度减小约 3/4。如果实验大厅内的导流管全部密封，超声速气流经导流管射到室外，气流扰动能够得到更好的抑制。

发动机实验振动测试结果表明实验现场振动主要来自开放的超声速气流对设备的扰动。开展 CARS 系统诊断实验时，可采取在发动机出口安装

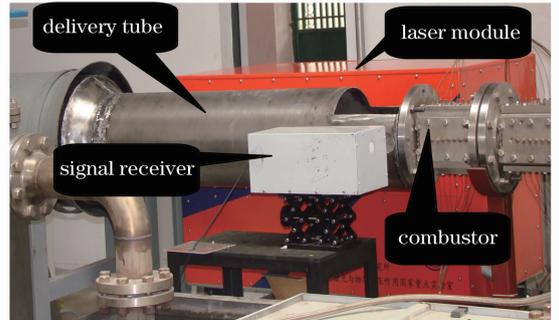


图 4 发动机实验 CARS 诊断现场布局

Fig. 4 Layout of mobile CARS system in engine test

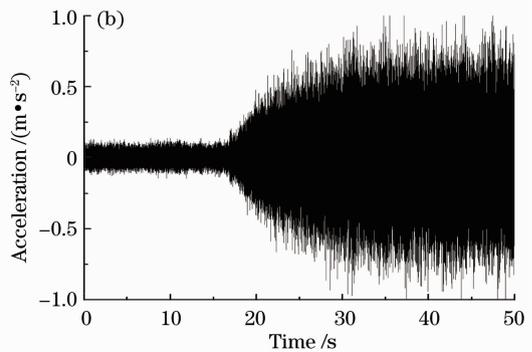
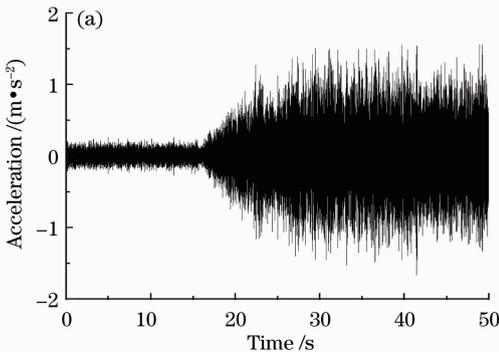


图 5 发动机出口加导流管后的振动测量结果。(a) 激光发射装置内部加速度；(b) 激光发射装置外部平台上加速度  
Fig. 5 Vibration measurement results at the combustor exhaust with delivery tube. (a) Acceleration inside the laser module; (b) acceleration on the platform laser module placed

导流管,超声速气流经导流管引射到室外的方式有效抑制振动影响;也可以对 CARS 系统激光发射装置、信号接收装置和光谱采集装置进行隔离防护,同样能有效抑制超声速气流扰动的影响。

### 3.2 温度测量结果

利用集成化 CARS 诊断系统分别针对发动机不稳定燃烧状态和稳定燃烧状态进行了燃烧室出口流场的温度测量实验。发动机燃烧室出口如图 6 所示,CARS 测温的探测点位于燃烧室出口外 10 mm,中轴线正上方,距离出口上壁面 12.5 mm,示意图如图 7 所示。

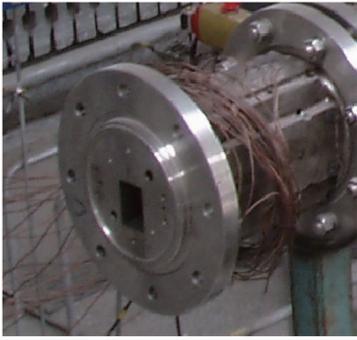


图 6 发动机燃烧室出口照片  
Fig. 6 Outlet of engine combustor

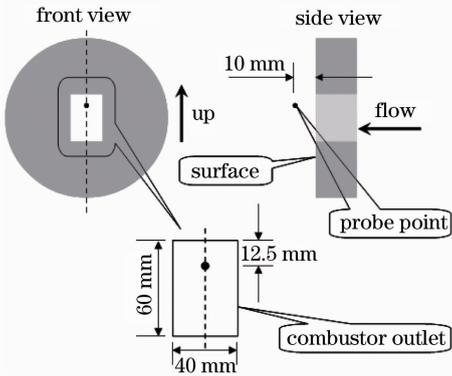


图 7 CARS 测量点位置示意图  
Fig. 7 CARS probe point

图 8 为发动机不稳定燃烧状态下,时刻为 13.6 s 的单脉冲 CARS 温度拟合结果,拟合得到的温度为 1548 K,实验谱与理论谱吻合得很好。图 9 为发动机稳定燃烧状态下,时刻为 10.5 s 的单脉冲温度拟合结果,拟合得到的温度为 1747 K,实验谱与理论谱吻合得较好。

由于 CARS 测温的不确定度由 CARS 实验谱信噪比的大小决定,通过与文献[12]中的标定燃烧炉预混火焰中测量的单脉冲 CARS 谱测量结果(图 10)比较,这里测量的单脉冲 CARS 谱信噪比水平与 CARS 测温不确定度水平基本一致。

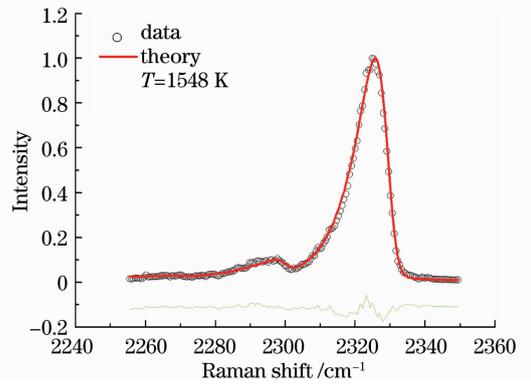


图 8 不稳定燃烧状态的单脉冲温度拟合结果(13.6 s)  
Fig. 8 Fitting result of single pulse CARS spectra of unstable combustion (13.6 s)

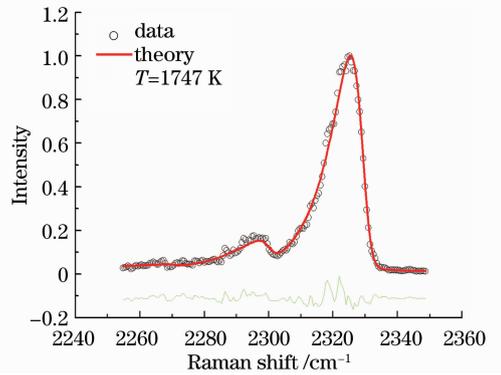


图 9 稳定燃烧状态的单脉冲温度拟合结果(10.5 s)  
Fig. 9 Fitting result of single pulse CARS spectra of stable combustion (10.5 s)

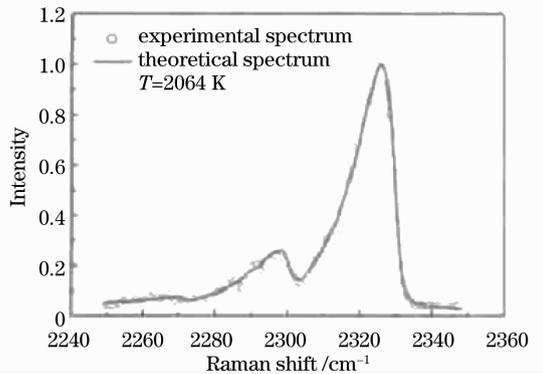


图 10 单脉冲 N<sub>2</sub> CARS 谱拟合结果<sup>[12]</sup>  
Fig. 10 Comparison of theoretical and experimental single shot N<sub>2</sub> CARS spectra<sup>[12]</sup>

实验测量了燃烧过程中温度随时间的变化情况,图 11 为不稳定燃烧状态下温度随时间的变化结果,平均温度为 1412 K,温度变化范围在 800 K 以内;图 12 为稳定燃烧状态下温度随时间的变化结果,获得的平均温度为 1705 K,而温度变化范围在 600 K 以内。稳定燃烧状态的效率高于不稳定燃烧状态的效率。

## 参 考 文 献

- 1 F. Grisch, P. Bouchardy, W. Clauss. CARS thermometry in high pressure rocket combustors [J]. *Aerospace Sci. & Technol.*, 2003, **7**(4): 317~330
  - 2 S. P. Kearney, T. W. Grasser. CARS thermometry in a 2-m-diameter methanol pool fire [C]. 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2007. AIAA-2007-872
  - 3 S. A. Tedder, P. M. Danehy, G. Magnotti *et al.*. CARS temperature measurements in a combustion-heated supersonic jet [C]. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2009. AIAA-2009-524
  - 4 D. Ball, H. S. T. Driver, R. J. Hutcheon *et al.*. Coherent anti-Stokes Raman spectroscopy temperature measurements in an internal combustion engine [J]. *Opt. Eng.*, 1994, **33** (9): 2870~2874
  - 5 V. I. Fabelinsky, V. V. Smirnov, O. M. Stel'makh *et al.*. New approach to single-shot CARS thermometry of high-pressure, high-temperature hydrocarbon flames [J]. *J. Raman Spectroscopy*, 2007, **38**(8): 989~993
  - 6 S. O'Byrne, P. M. Danehy, A. D. Cutler. Dual-pump CARS thermometry and species concentration measurements in a supersonic combustor [C]. 42th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2004. AIAA-2004-710
  - 7 S. Roy, T. R. Meyer, R. P. Lucht *et al.*. Single-shot thermometry and multiple-species measurements using dual-pump, dual-broadband CARS in a liquid-fueled CFM56 combustor [C]. 42th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2004. AIAA-2004-711
  - 8 S. O'Byrne, P. M. Danehy, S. A. Tedder *et al.*. Dual-pump coherent anti-Stokes Raman scattering measurements in a supersonic combustor [J]. *AIAA Journal*, 2007, **45** (4): 922~933
  - 9 M. P. Thariyan, A. H. Bhuiyan, S. V. Naik *et al.*. Dual-pump CARS measurements in a gas turbine combustor facility using the NASA 9-point lean direct injector [C]. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2010. AIAA-2010-1401
  - 10 M. P. Thariyan, V. Ananthanarayanan, A. H. Bhuiyan *et al.*. Dual-pump CARS temperature and major species concentration measurements in laminar counterflow flames and in a gas turbine combustor facility [C]. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2009. AIAA-2009-1442
  - 11 S. A. Tedder, S. O'Byrne, P. M. Danehy *et al.*. CARS temperature and species concentration measurements in a supersonic combustor with normal injection [C]. 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2005. AIAA-2005-616
  - 12 Hu Zhiyun, Zhang Zhenrong, Liu Jingru *et al.*. Temperature measurement in CH<sub>4</sub>/air flame by single pulse USED CARS [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5): 610~612
- 胡志云, 张振荣, 刘晶儒等. 用单次脉冲非稳腔空间增强探测 CARS 技术测量火焰温度 [J]. *中国激光*, 2004, **31** (5): 610~612

栏目编辑: 何卓铭

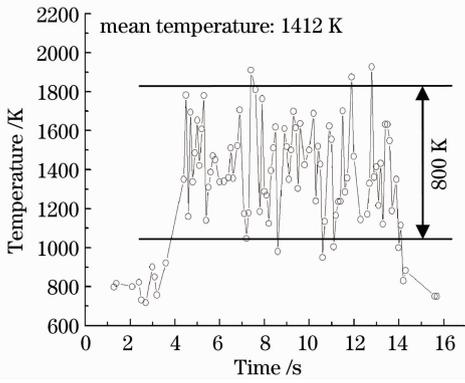


图 11 不稳定燃烧状态下温度随时间的变化

Fig. 11 Temperature evolution of unstable combustion

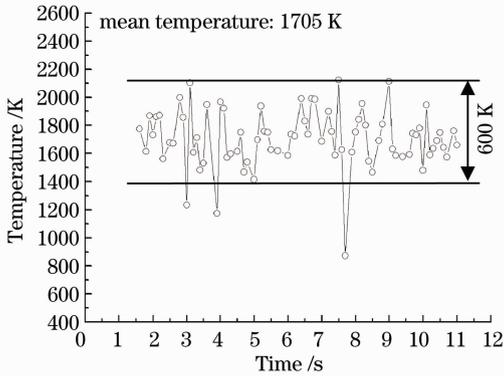


图 12 稳定燃烧状态下温度随时间的变化

Fig. 12 Temperature evolution of stable combustion

## 4 结 论

1) 针对发动机测试现场强振动、高噪声的恶劣条件,研制了一台集成化 CARS 诊断系统。基于发动机测试现场的振动测量结果,采取了有针对性的隔振措施,最大限度地降低了超声速气流对 CARS 诊断系统的干扰。

2) 利用集成化 CARS 诊断系统在一台超燃发动机模型燃烧室出口处获得了较高信噪比的单脉冲氮气 CARS 实验谱,通过与理论谱拟合确定了温度。分别测量了两种燃烧状态单一时刻的温度和温度随时间的变化情况。发动机稳定燃烧状态的温度和燃烧效率均高于不稳定燃烧状态。

3) 研制的集成化 CARS 诊断系统具有较好的抗振性能,能够适应发动机测试现场条件,可应用于发动机燃烧室流场参数测量。