

文章编号: 1672-9897(2018)01-0033-10

doi: 10.11729/syltlx20170135

航空发动机地面试验激光燃烧诊断技术研究进展

胡志云*, 叶景峰, 张振荣, 王晟, 李国华, 邵珺, 陶波, 赵新艳, 方波浪

(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:为了研究湍流燃烧基础问题和改进实际燃烧装置性能, 基于激光的燃烧诊断技术已发展成为当前发动机湍流燃烧实验研究的主要测量工具。在已发展的激光燃烧诊断技术中, 每种技术都有其局限性和适用范围, 需要根据发动机模型燃烧室内部流场测量的要求和特点, 选择合适的激光诊断技术。在温度测量中, 相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)技术主要用于单点温度测量, 单脉冲CARS谱测温不确定度优于5%; 高时空分辨温度场的测量需要采用双色平面激光诱导荧光(PLIF)测温方法, 但其测温精度通常也会相应降低。在速度测量中, 粒子成像测速(PIV)技术适用于低速流场速度的精细测量, 羟基分子标记测速(HTV)技术适用于高温超声速甚至高超声速流场的速度测量, HTV测速不确定度可优于4%。在组分浓度测量中, 主要采用自发拉曼散射(Spontaneous Raman Scattering, SRS)和PLIF技术进行主要组分和中间反应物的浓度分布测量。本文对航空发动机湍流燃烧温度、速度、组分浓度等参量的高时空分辨测量所涉及的激光燃烧诊断技术的基本原理、研究现状和发展趋势进行综述。

关键词:燃烧诊断; 激光; 温度; 速度; 组分浓度; 航空发动机

中图分类号: O433 文献标识码: A

Development of laser combustion diagnostic techniques for ground aero-engine testing

Hu Zhiyun*, Ye Jingfeng, Zhang Zhenrong, Wang Sheng, Li Guohua,
Shao Jun, Tao Bo, Zhao Xinyan, Fang Bolang

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

Abstract: Laser-based diagnostic techniques have the characteristics of non-intrusiveness, high temporal-spatial resolution and abundant measurement information, and have been demonstrated as powerful and indispensable tools for the turbulent combustion research of various engine devices. This paper reviews the basic principle, research status and development trend of several laser spectroscopic techniques, which have been used successfully in the measurements of engine combustion. Since there is no single laser diagnostic technique that can be applied under all circumstances, the particular application must be carefully considered according to the type of combustion flow and measurement requirements. For the temperature measurements, Coherent Anti-stokes Raman Scattering (CARS), as a point-wise technique, yields the best accuracy of less than 5% uncertainty for single-shot measurements. And the two color Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF) technique may be employed to study temperature gradients or temperature fields but may lead to reduced absolute accuracy. For the velocity measurements, the Particle Image Velocimetry (PIV) technique is suitable for fine measurements of low-speed flow field, while the Hydroxyl Tagging Velocimetry (HTV) technique has been applied in high-temperature supersonic and even hypersonic flow fields with uncertainty less than 4%. In species concentration measurements, the Spontaneous Raman Scattering (SRS) and PLIF are used to measure the main components and the distribution of intermediate products, respectively. In terms of the high-temporal-spatial-resolution measurements of temperature, velocity and species concentrations in the

收稿日期: 2017-10-13; 修訂日期: 2017-12-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(91541203, 91641112)

* 通信作者 E-mail: huzhiyun@nint.ac.cn

引用格式: Hu Z Y, Ye J F, Zhang Z R, et al. Development of laser combustion diagnostic techniques for ground aero-engine testing. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2018, 32(1): 33-42. 胡志云, 叶景峰, 张振荣, 等. 航空发动机地面试验激光燃烧诊断技术研究进展. 实验流体力学, 2018, 32(1): 33-42.

aero-engine combustor, this paper reviews the basic principle, research status and development trend of relevant laser combustion diagnostic techniques.

Keywords: combustion diagnostics; laser; temperature; velocity; species concentrations; aero-engine

0 引言

航空涡轮/涡扇发动机和超燃冲压发动机等动力装置的燃烧效率、动力性能、瞬态响应性能和污染物排放控制等均与燃烧密切相关。由于发动机燃烧过程极其复杂,表现为强湍流与燃烧化学反应的强相互耦合,在对其湍流燃烧问题的探究中,流动和燃烧参量的测量非常重要。一方面,流动和燃烧参量(例如,速度、温度、组分浓度等)的高时空分辨测量是认识和理解发动机湍流与燃烧相互作用现象和规律的重要手段;另一方面,较完备的实验测量数据是发展含有燃烧化学反应的计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics,CFD)仿真软件的基础,高保真CFD仿真仍是先进发动机重要的预测设计方法。

激光燃烧诊断技术是以激光器件、光谱物理、光电探测、数据图像处理等为基础的非接触式测量技术,已发展成为当前湍流燃烧实验研究的主要测量工具。相较于传统的接触式测量手段,其具有如下优势:首先,激光诊断技术是非侵入式测量技术,对燃烧流场基本没有扰动,测量结果能更好地反映真实的燃烧过程;其次,激光诊断技术通常有很高的时空分辨力,其时间分辨力可以达到纳秒甚至飞秒量级,空间分辨力可以达到毫米甚至微米量级;第三,测量信息丰富,可获取燃料雾化、流动速度、燃烧场温度及组分浓度等各种信息,有利于较全面地了解燃烧过程;第四,一些技术能够用于燃烧流场参数的可视化测量,结合图像处理与图像显示等手段,可以模拟与显现燃烧场的各种变化特性。

由于航空发动机湍流燃烧的高度复杂性(宽的压强、温度、流速范围,复杂的燃烧组分,强湍流等)和试验台运行的恶劣试验环境(强振动、强声、强自发光和强电磁干扰等),激光燃烧诊断技术应用于发动机燃烧试验测量极具挑战性。例如,激光与煤油燃烧复杂组分相互作用会产生较为严重的光谱噪声干扰,使得高信噪比光谱图像的获取难度增大;分子吸收系数、分子跃迁及能量转移、发射谱精细结构及展宽系数、荧光淬灭等与压强密切相关,高压强下燃烧参数的高精度反演更趋复杂;湍流度下薄的火焰锋面、大的组分浓度和温度梯度分布,使得光谱分析和定量表征更为困难;试验台的恶劣试验环境会引起光路的失

调、激光频率的漂移、激光源和成像设备运行稳定性可靠性和变差等。特别是高压强和高超声速湍流燃烧场激光诊断技术仍是国际研究的前沿和挑战性问题,实验数据极度缺乏。

本文基于本课题组在激光燃烧诊断技术领域的研究工作,从航空发动机湍流燃烧场温度、速度、组分浓度等参量的高时空分辨定量测量,对相关的激光燃烧诊断技术基本原理、国内外研究现状进行介绍,并对存在的主要问题和发展趋势进行探讨。

1 湍流燃烧温度测量技术

1.1 相干反斯托克斯拉曼散射测温技术

相干反斯托克斯拉曼散射(Coherent Anti-Stokes Raman Scattering,CARS)技术^[1]是依据探测介质的拉曼位移选定窄带泵浦光束和宽带斯托克斯光束(约 100cm^{-1}),并以相位匹配方式聚焦到燃烧火焰区与探测介质相互作用,由三阶非线性效应产生共振CARS信号。因CARS信号的光谱线型轮廓依赖于温度,采用CARS实验光谱与理论光谱线型拟合的方法可实现温度的反演,其测温范围在 $300\sim 3000\text{K}$ 。由于航空发动机采用燃料和空气混合燃烧,燃烧流场中氮气含量丰富且氮气的CARS理论谱计算已十分成熟,因此通常选择氮气作为探测组分进行温度测量。CARS测温系统的激光源通常采用调Q-Nd:YAG二倍频激光器及其泵浦的染料激光器或OPO激光器,重复频率一般在 $10\sim 100\text{Hz}$,单脉冲CARS信号的时间分辨力在纳秒量级。为了实现高空间分辨力测量,通常采用折叠BOX CARS的相位匹配方式,其空间分辨力可达 $\Phi 0.1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 。但BOX CARS对入射激光的相位匹配角度要求极严格,其光路准直难度很大,需要极其精密的光学调节器件;另外,流场的高湍流度和发动机试验的强振动引起的相位匹配失调会导致BOX CARS信号的急剧衰减甚至消失。为减小相位匹配的失调和光路准直难度,采用非稳腔空间增强探测(Unstable-Resonator Spatially Enhanced Detection,USED) CARS相位匹配方式^[2]更为有利,其泵浦光束为环状光束,斯托克斯光束位于环状光束的中心且聚焦区域外不与泵浦光束重叠。USED CARS信号产生于泵浦光束和斯托克斯光束的共同聚焦区域,能获得接近BOX

CARS的空间分辨力,其光路准直变得相对容易,且流场折射率变化以及强振动引起的光束偏折的影响大大减小。

CARS为单点测温技术,在实际应用中也可通过探测点的扫描移动,借助图像重建算法,获得二维空间分布平均温度场信息^[3]。一些发动机试验台能够长时间运行,这为CARS扫描测量提供了可能。另外,对于短时(<30 s)运行发动机燃烧试验,若在相同来流条件和油气比条件下,实验重复性较好,也可通过多车次实验,采用探测点扫描测量获得平均温度空间分布信息^[4]。

CARS技术具有信号方向性好、不易受强光背景干扰、测温精度高等优点,至今仍是燃烧场温度高精度测量的主要工具^[5],已广泛用于宽压强范围的航空涡轮/涡扇发动机^[6-8]、内燃机^[9]、超燃冲压发动机^[10-11]、双模态冲压发动机^[12]等模型燃烧室流场温度的测量。图1是CARS技术在RQL气体涡轮燃烧室中应用的一个例子^[8],实验采用Jet-A燃料,燃烧室进口空气温度725K,燃烧室压强为0.70和1.03MPa。图1(a)标示了探测点的位置,图1(b)为由测量的各探测点的平均温度构建的温度场图像。

CARS技术的光路布局见文献[13],其光学系统较为复杂,对光束准直和调节要求极其精密。为使CARS系统能够满足发动机试验台恶劣试验环境测

试要求,本课题组在CARS测温技术研究基础上,研发了高集成度可移动式CARS测温系统,如图2所示,由信号产生模块、信号接收模块、光谱成像模块和数据采集控制模块等组成。其中,信号产生模块由调Q高功率Nd:YAG二倍频激光器、宽带染料激光器、激光传输光路等组成,信号接收模块由透镜组、滤光片、光纤和精密位移台等组成,光谱成像模块由摄谱仪和ICCD相机等组成,数据采集分析模块由同步装置、计算机和光谱分析软件等组成。可移动式CARS测温集成系统的测量重复频率10Hz,单脉冲时间分辨力约10ns,测量点空间分辨力约 $\Phi 0.1\text{mm} \times 3\text{mm}$,测温范围300~3000K。可移动式CARS测温系统采用模块化高集成度设计,使得系统光路易于调试,其在发动机现场运行有很高的稳定性;光学元件的支撑采用了抗振动设计,大大减小了强振动和强声等恶劣环境对测量的影响;采用探测点定位单元与信号接收单元的同步精密扫描设计,具备了探测点的空间扫描测量能力;设备控制和数据采集采用远程控制,保证了测试人员的安全。这些工程应用设计为精密CARS测温系统应用于航空发动机模型燃烧室地面燃烧试验测量奠定了基础。

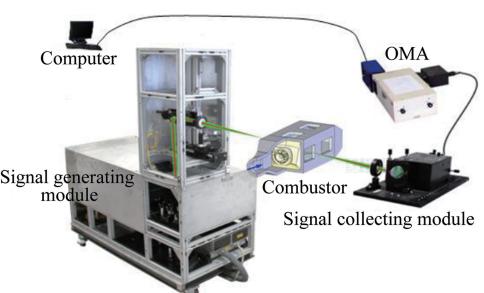


图2 自行研制的高集成度可移动式CARS测温系统示意图

Fig. 2 Schematic setup for the self-developed, high-integrated and mobile CARS system

研发的可移动式CARS测温系统已成功应用在航空涡轮/涡扇发动机和超燃冲压发动机的模型燃烧室内部及出口流场温度的测量。图3是以航空煤油为燃料的航空涡轮/涡扇发动机模型燃烧室内部流场测量的典型结果^[3]。CARS测量采用探测点空间扫描方式,测量平面位于主燃孔中心前10mm与喷嘴中心轴线垂直截面上,y为高度方向,z为宽度方向,o点为截面中心。相邻探测点间隔5mm,每个探测点测量时间19s,由每个探测点上测量的190个单脉冲CARS实验谱获得脉冲平均谱并计算该探测点的平均温度。在煤油复杂燃烧场中,激光作用下产生的随机噪声谱会叠加在单脉冲CARS谱上,使得单脉冲CARS谱信噪比变差,对CARS谱进行脉冲平均

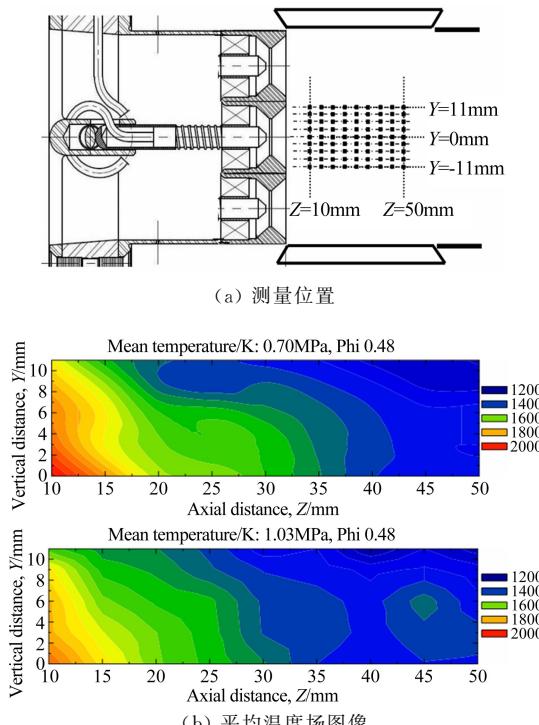
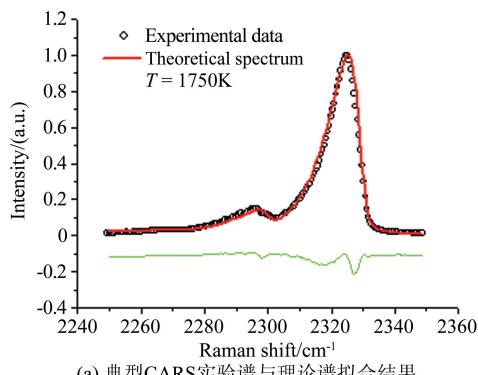


图1 RQL涡轮燃烧室中CARS测温结果^[8]

Fig. 1 The average temperature measurement results of a RQL model combustor stabilized at pressure of 0.70 and 1.03MPa^[8]

可有效消除随机噪声谱的影响,脉冲平均CARS实验谱的信噪比可达到CH₄/air预混火焰脉冲平均CARS谱^[1]的水平,图3(a)为脉冲平均CARS实验谱与理论谱拟合温度典型结果,测温不确定度优于3%。图3(b)是获得的平均温度场图像,能够清晰地显示燃烧高温区域以及温度的梯度分布,反映了上下主燃孔加热来流空气对主燃烧区域的约束。



(a) 典型CARS实验谱与理论谱拟合结果

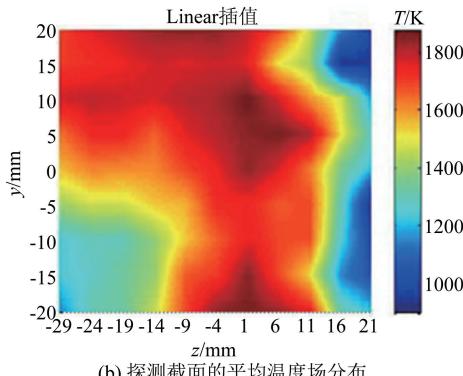


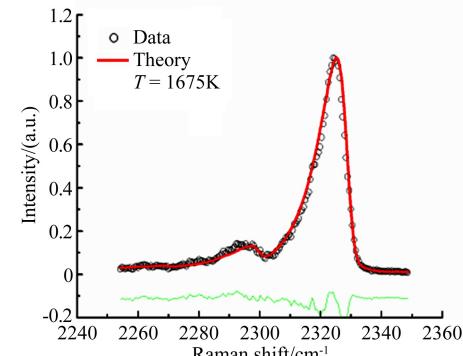
图3 航空发动机模型燃烧室内部流场平均温度测量结果^[3]

Fig. 3 The average temperature measurement results of an aero-engine model combustor^[3]

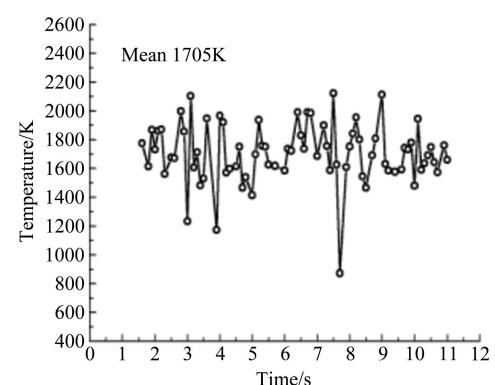
图4为Ma2.0预热来流条件下以氢气为燃料的超燃冲压发动机模型燃烧室出口温度随时间变化结果^[14],探测位置距燃烧室出口10mm、距燃烧室出口上沿12.5mm、宽度方向在流场中心,氢燃料从燃烧室上壁面喷嘴注入,燃烧时间约10s。在以氢气为燃料的超声速燃烧流场中获得的单脉冲CARS实验谱可达到CH₄/air预混火焰单脉冲CARS谱^[1]的水平,图4(a)是典型的高信噪比单脉冲CARS实验谱与理论谱拟合温度结果,测温不确定度优于5%。图4(b)中CARS测量温度平均值为1705K,CFD理论计算温度值为1723K。CARS测温结果不仅验证了CFD模型的合理性,而且还反映了燃烧过程的不稳定性。

在nsCARS技术中,产生共振CARS信号的同时会产生非共振四波混频信号,非共振信号的存在会降低CARS技术的测量精度和灵敏度^[15]。随着ps

和fs激光器技术的问世和发展成熟,超快光谱CARS技术发展很快,其主要的优点是可以有效抑制非共振背景的影响,提高测量精度,从而有利于应用到高压强环境燃料燃烧过程的研究。Roy和Gord等^[16]对ns、ps和fsCARS进行了系统性研究,他们采用脉宽为135ps的泵浦光和106ps的斯托克斯光,在探测光延迟为110ps的条件下,测量了氮的CARS谱,相对于nsCARS技术其非共振背景得到了有效抑制。他们采用脉宽80fs激光器,使探测光相对延迟2ps,实现300~2400K温度范围内测量精度达到1%~1.5%^[17];谱线和压强变化关系的研究证明了探测光相对泵浦光的几个ps的延迟,碰撞的影响可以忽略^[18]。ps和fsCARS能够有效抑制非共振背景对测温的影响,非常适合于高压强燃烧环境的测量,而且fsCARS很容易实现kHz甚至MHz的高重频测量,有利于发动机试验中流场温度脉动的监测。但由于ps和fs激光器极其精密复杂,对实验环境的要求极为苛刻,在发动机试验台上的应用需要进一步解决强振动环境下激光器运行的稳定性和可靠性问题。



(a) 典型单脉冲CARS实验谱与理论谱拟合结果



(b) 温度随时间变化结果

图4 超燃冲压发动机模型燃烧室出口流场温度测量结果^[14]

Fig. 4 The measured temperature versus time at the exit of scramjet engine^[14]

1.2 PLIF测温技术

平面激光诱导荧光(Planar Laser Induced Flu-

rescence, PLIF)技术^[19]通常基于探测组分能级的玻尔兹曼分布来反演温度,可用于火焰的二维温度场测量。湍流燃烧常采用双色 PLIF 测温方法,其基本原理是合理选择 2 束不同波长的激光片,使其在间隔极短的时间内(一般约数百纳秒,使得总粒子数在该时间段内来不及变化)顺序通过燃烧火焰的同一位置,利用不同转动能级的共振吸收将处于基态的组分分子激励到激发态,处于激发态的分子向下跃迁产生荧光,在足够低的激光功率密度下,荧光信号强度与激光功率密度成线性关系,且 2 束不同波长激光激发的荧光信号强度的比值反映了选定组分基态转动能级的分子数密度分布,因此可由探测到的 2 次激发的荧光信号强度的比值反演温度。温度的精确反演需要知道探测组分光谱信息及激发态能级能量再分布过程,由于激光将探测粒子泵浦至上能级后会经历自发辐射、碰撞能级转移、极化效应、淬灭等过程,而这一过程取决于具体的探测组分能级、化学成分组成以及压强等。采用 1 个已知温度火焰来标定 LIF 技术能够降低碰撞淬灭、饱和荧光和谱线叠加等因素引起的测温误差。双色 PLIF 测温技术需要 2 台 Nd: YAG 泵浦的染料激光器和 2 台用于信号探测的 ICCD 相机,为了提高温度的测量精度,还需要额外的 2 套相机系统实时监测激光强度空间分布和能量的抖动。

在燃烧场温度测量中,通常以 OH 作为激光作用介质,基于 OH 的双色 PLIF 方法已用在以氢气为燃料的超燃冲压发动机模型燃烧室二维温度场的可视化测量^[20],以及煤油为燃料的涡轮发动机燃烧室贫油燃烧区温度场测量^[21],如图 5 所示。OH 荧光需采用紫外激光进行激发,但紫外激光会同时激发煤油荧光,煤油荧光光谱范围覆盖了 OH 荧光光谱,难以从时间或光谱上加以区分,不适用于煤油富油燃烧区温度场的定量测量,如图 5(a)中黑色网格状区域。另外,由于 OH 复杂的能级结构,使得其荧光极易受碰撞淬灭的影响,压强分布不均匀或高压强湍流燃烧场温度的高精度测量仍十分困难。

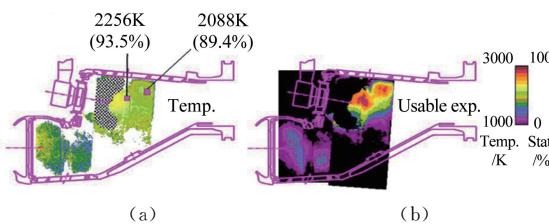


图 5 0.6 MPa 条件下发动机燃烧室温度场测量结果(a)和 CFD 计算结果(b)^[21]

Fig. 5 The measured temperature (a) and CFD computation results (b) in the 0.6 MPa engine combustor^[21]

为了消除碰撞淬灭等因素对荧光信号的影响, Kaminski 等人^[22]采用双色铜原子荧光(Two Line Atomic Fluorescence, TLAF)实现了 SI 发动机内温度场的测量。铜原子的注入方式是在发动机运行过程中将 InCl₃ 溶液撒播在燃烧室中, InCl₃ 在燃烧反应区分解产生丰富的铜原子,铜原子的注入量应控制在一定的范围内,以避免引起火焰冷却效应和铜原子的强吸收。TLAF 方法采用 410 和 451 nm 激光分别激发铜原子并产生荧光,由于 2 个荧光过程中的能级跃迁共享同一上能级,能够减小甚至消除由压强变化引起的荧光淬灭对温度测量的影响,其温度敏感范围在 800~2800 K,适用于宽压强范围燃烧反应区温度场测量;由于采用可见光激光进行激发,能够避免煤油荧光的干扰,适用于富油燃烧区的测量。Kaminski 等人对 1.4 MPa 高压 SI 发动机的测量采用了低功率激光,保证了荧光强度与激光功率的线性关系,获得了曲柄不同转动角度的平均温度场图像,测温精度约 14%,但单次荧光图像信噪比水平不高。Medwell 等^[23-24]提出并研究了非线性 TLAF(NTLAF)方法,采用较高功率激光进行激发,获得了高信噪比单脉冲荧光图像,常压火焰的单次荧光图像测温误差约 60 K,若采用带宽为 1.2 nm 的滤光片降低杂散光的干扰,测温误差可进一步降低,实验研究还表明碳烟所产生的干扰对测温结果没有明显影响。这些研究表明 NTLAF 技术有望发展成为宽工况发动机燃烧室复杂湍流燃烧温度场的高分辨、高精度诊断工具。

2 发动机内流场速度测量技术

对于发动机燃烧室速度场测量,相对成熟的是 PIV 技术,PIV 技术已广泛应用于亚声速和较低马赫数超声速流场速度场的精细测量。但 PIV 技术需要在流场中撒播微米级或亚微米级的微小颗粒作为示踪物,由于跟随性的局限,难以实现高马赫数或存在大梯度速度分布的流场测量,特别是在高温高超声速流场环境中,亚微米级颗粒易于积聚或烧熔,速度场的测量十分困难。

分子标记测速技术(Molecular Tagging Velocimetry, MTV)MTV 技术^[25]是以分子作为标记示踪的流场速度测量技术,它与 PIV 技术的测量原理类似,都是根据示踪物在已知时间间隔内跟随流场的移动距离计算流场的速度分布。所不同的是 PIV 技术采用质量较大的粒子作为示踪物,而 MTV 技术采用分子作为示踪物,能够克服 PIV 技术在超高速流动

尤其是含有强激波的流场中的示踪粒子跟随性问题。在 MTV 技术中, NO_2 、 N_2O 、 O_3 、磷光物质等作为示踪分子时, 由于其在燃烧场中可能分解或参与化学反应, 使得标记的图像信噪比大大降低, 因此主要用于低温流场速度的测量。振动激发态的 O_2 作为标记示踪分子的方法和飞秒激光电子激发 N_2 标记(Femtosecond Laser Electronic Excitation Tagging, FLEET)方法对激光源要求很高, 测量装置比较复杂, 应用仍局限于环境良好的实验室环境^[25]。

对于高温超声速甚至高超声速流场速度的测量, 羟基分子标记测速(Hydroxyl Tagging Velocimetry, HTV)技术^[26]是一种十分有前景的激光测速方法。HTV 速度测量技术利用 ArF 准分子激光器输出的 193nm 波长激光解离水(燃烧产物)产生的 OH 作为示踪标记线, 再用设定延迟时间的 OH-PLIF 激光片诱导 OH 产生荧光并显示 OH 示踪标记线位置, 基于时间-位移相关算法计算流场速度。HTV 测速采用分子作为示踪物, 不存在流场跟随性问题, 且解离产生 OH 的寿命在 ms 量级, 非常适合于高温超声速和高超声速流场速度的测量。HTV 测速方法能够和 PIV 测速方法很好互补, PIV 可用于航空涡轮发动机和内燃机燃烧室内流速较低的流场测量, HTV 用于超燃冲压发动机高温高超声速流场的测量更有优势。

在高温环境下, 193nm 光子的吸收截面比常温下可高 2 个量级(1500K 温度下, 水对 193nm 激光的吸收是常温下的约 500 倍)。因此, OH 作为标记物在高温甚至反应流场中具有很大优势, 并已经得到了较好的应用。Pitz 等人^[27]利用多线交叉网格 HTV 方法对超燃发动机燃烧室凹腔内 $Ma2.0$ 预热来流的速度分布进行了测量研究。Alexander 等^[28]利用 HTV 方法对 SR30 缩比型涡轮发动机和全尺寸 J85 涡轮发动机的尾流进行了速度测量, 得到了较好的速度图像。在分子标记方法中, 除了在实验上需要尽可能获得高信噪比的标记线图像, 数据处理方法也非常关键。Gendrich 等^[29]提出了交叉标记网格空间位置提取的直接相关算法, 位置提取精度达到了亚像素量级。Ramsey 等^[30]引入模板匹配的方法用于适应湍流场速度测量中标记线网格的扭曲变形, 进一步提高了湍流场中交叉标记网格空间位置的提取精度。

本课题组已发展了多线 HTV 测速方法, 并应用在超燃冲压发动机地面试验内流道速度分布的定量测量。实验测量方案如图 6 所示, 用于解离水产生 OH 标记线的为 1 台 ArF 准分子激光器, 它输出的波长 193nm 激光经微柱面透镜阵列整形和反射镜反

射后, 自下而上沿 y 方向穿过深紫外石英窗口进入燃烧室并在测量区域形成多条激光线, 激光线在测量区域的直径约 0.5mm。用于显示 OH 标记线的为 1 套 Nd: YAG 泵浦的可调谐染料激光器系统, 其发射的激励 OH 荧光的激光束经柱面透镜组后在主气流方向(x 方向)上展宽, 再经凸透镜将激光束压缩成为宽度约 50mm, 厚度约 0.2mm 激光片。通过调节, 使得该激光片在 x 方向与标记激光线处于同一平面内。ICCD 相机放置于燃烧室侧面, 镜头前加装滤光片用于滤除 OH 荧光之外的背景光干扰。依据发动机试验状态设定 ArF 激光器和 YAG 激光器的出光延迟时间。实验测量中, 超燃发动机采用 H_2/air 燃烧加热来流、凹腔内采用喷注煤油的方式组织燃烧, ArF 激光标记线穿过待测区域, 可获得标记线上速率分布, 其速度方向设定为沿气流主方向, 即 x 方向。由于 HTV 测速系统采用了良好的隔振设计, 试验台强振动以及内流道气体流动对标记线初始位置几乎不产生影响, 可在试验前拍摄标记线初始位置, 也可采用 2 台 ICCD 相机同时拍摄标记线初始位置和移动后的标记线位置。图 7 为超燃冲压发动机隔离段、燃烧室和出口 3 个不同马赫数来流条件下($Ma2.0, Ma2.5, Ma3.5$)标记线上速度分布的典型测量结果, 燃烧室采用三点喷油, $Ma2.0$ 和 $Ma2.5$ 三点喷油比例与 $Ma3.5$ 不同, 3 个马赫数来流条件下在燃料非剧烈反应区均能拍摄到清晰的标记线图像, 速度测量不确定度可优于 4%。但在燃料燃烧剧烈反应区域, 由于燃烧反应生成的高浓度 OH 也会被激光激发产生荧光, 使得拍摄的标记线不清晰, 导致标记线空间位置的精确提取变得困难。因光解离水生成 OH 与燃烧产生 OH 的能级分布不同, 选择更为适合的 OH 激励谱线抑制燃烧生成 OH 的荧光, 有利于提高标记线信噪比。若要获得 OH-PLIF

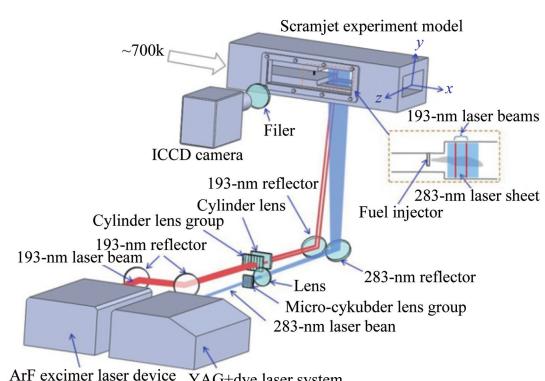


图 6 超燃冲压发动机模型燃烧室 HTV 速度测量方案
Fig. 6 The schematic setup for the velocity measurement of scramjet model combustor based on HTV technique

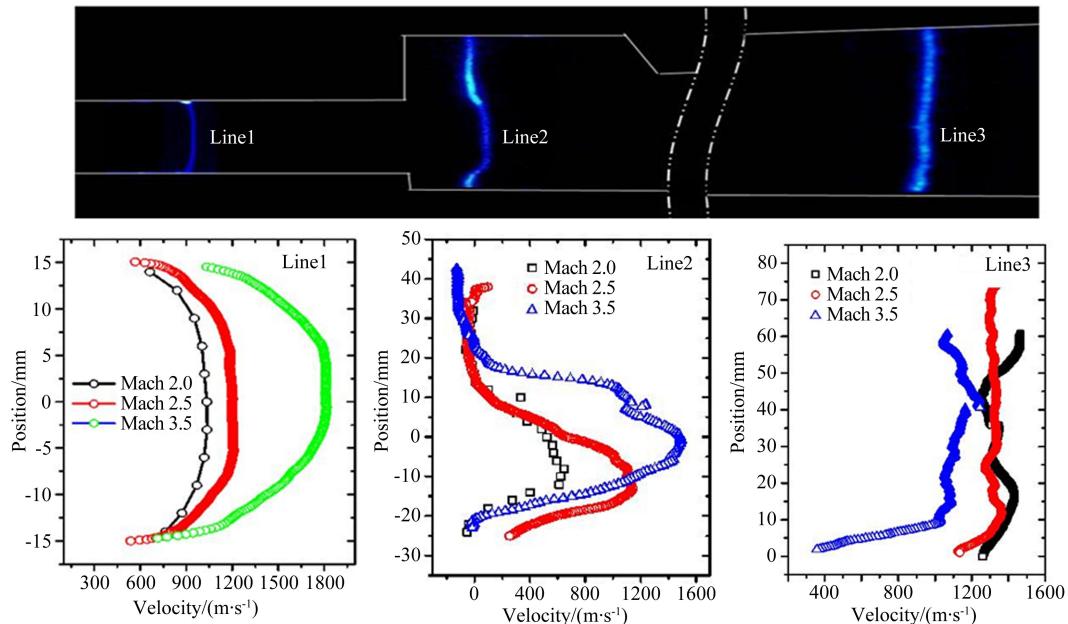


图 7 超燃冲压发动机隔离段(line1)、燃烧室(line2)及出口(line3) 3个马赫数下的速度分布测量结果

Fig. 7 The measured velocity distribution at three different Mach numbers in the scramjet model combustor

激光片截面内二维矢量速度数据,ArF 激光标记线需要采用多线网格交叉方式,依据网格点的移动计算速度的大小和方向。

3 发动机湍流燃烧组分浓度测量技术

3.1 自发拉曼散射技术

燃烧场主要组分浓度的测量常采用自发拉曼散射(Spontaneous Raman Scattering,SRS)技术。SRS 信号由激光与气体分子的非弹性散射过程产生,拉曼散射光与激励激光存在一定的频差,该频差与激励激光的波长无关,仅由散射分子的振转能级决定,且不同种类的分子振转能级往往各不相同。因此,采用高分辨光谱成像器件可同时拍摄燃烧场小分子燃料和主要燃烧产物的拉曼光谱,并依据各组分的拉曼散射截面及其光谱强度计算浓度^[31]。SRS 信号强度与照射激光频率的 4 次方成正比,由于 SRS 信号极弱(比瑞利散射信号小 3 个量级),为提高信号强度,实验测量一般采用短脉冲大功率紫外激光器。但是,燃料为煤油时,紫外激光很容易激发煤油产生强的荧光干扰,因此发动机燃烧室实验大多采用小分子燃料作为替代燃料开展研究工作。例如,Grady^[32]等人采用基于 248nm 可调谐 KrF 准分子激光的 SRS 方法测量了超燃冲压发动机燃烧室主要反应物和生成物浓度分布,实验采用 70% 的甲烷和 30% 氢气混合作为燃料。Wedr 等人^[33]采用基于 355nm 激光的 SRS 方法,测量了以天然气为燃料的高压燃气轮机燃烧场,

获得了激光传输线上主要反应物和生成物浓度一维分布定量结果,实验数据用于校验燃烧室内湍流燃烧过程的大涡模拟(Large Eddy Simulations, LES)。近年来,Locke 等人^[34]采用长脉冲大能量 532nm 激光代替紫外波长激光,对燃料为 JP-8 航空煤油的燃烧室进行测量,获得了探测区主要燃烧产物种类及其平均浓度数据,但单脉冲拉曼谱仍不能提取出定量信息。为实现航空发动机模型燃烧室主要组分浓度的一维分布测量,本课题组针对极弱自发拉曼散射信号探测问题以及商用光谱仪存在的 F 数大、光栅衍射效率低等不足,设计了 F 数约为 2 的大口径、短焦距的信号收集系统,采用 F 数约为 2 的大口径、非球面准直透镜组及高分辨分光元件研制了拉曼散射专用光谱仪,信号探测效率提高了 1 个量级。因 SRS 信号强度与激光频率的 4 次方成正比,与 532 和 355nm 激光相比,采用 266nm 激光可有效提高 SRS 信号强度。基于以上技术措施,获得了 3.0 MPa 压强下航空发动机模型燃烧室煤油燃烧场中已燃区域沿激光线的主要组分浓度分布,图 8 为测量的典型拉曼散射谱及主要组分浓度一维分布结果。实验中发现,即使探测区存在很少量的煤油,其与激光作用产生的荧光也足以淹没拉曼信号。这些研究为 SRS 方法更好地应用于发动机燃烧室测量提供了很好的借鉴,但如何抑制煤油等大分子碳氢燃料与激光作用产生的光谱噪声干扰并对极微弱拉曼光谱信号进行高效探测仍需深入研究。

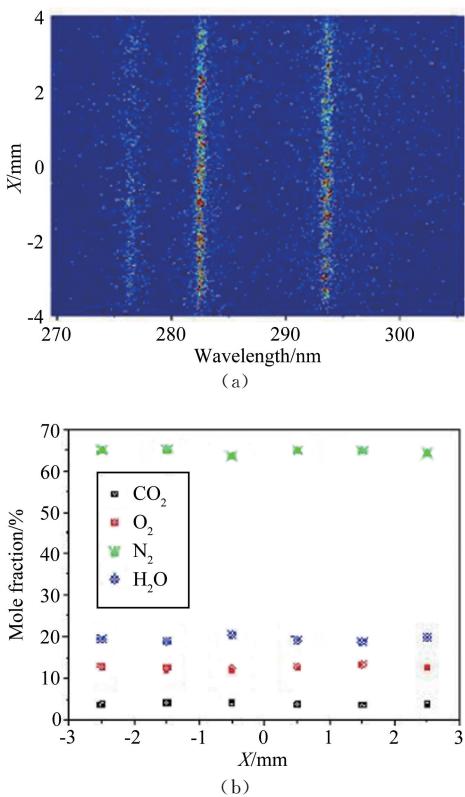


图 8 航空发动机典型拉曼散射谱(a)及主要组分浓度一维分布结果(b)

Fig. 8 Typical measured Raman spectrum (a) and measured one-dimensional distribution of major compositions (b) in the aero-engine combustor

3.2 多色 CARS 技术

CARS 技术也可用于火焰中 O₂、CO₂、H₂O、H₂ 等组分浓度的测量。相较于温度测量,组分浓度测量往往需要采用多色 CARS 技术同时获取 2 种以上组分的 CARS 谱。发展至今,多色 CARS 已出现 3 种方案^[35-37],其中一种方案采用双泵浦 CARS 方式,即以 1 台倍频 YAG 激光器和 1 台窄带染料激光器作为泵浦光源,而以 1 台宽带染料激光器作为斯托克斯光源,采用这种技术可同时测量 2 种成分的 CARS 光谱,且这 2 种成分 CARS 光谱中心的频率间隔可以通过窄带染料激光器的调谐改变,使得 2 种光谱可以在探测器上被同时接收。美国 NASA Langley 研究中心^[37]采用双泵浦 CARS 技术同时获得 N₂ 和 O₂ 或 N₂ 和 H₂ 的 CARS 谱,其中 N₂ 的 CARS 谱用于确定探测点的温度,图 9 为采用空间探测点扫描方式获得的超燃冲压模型燃烧室内部 H₂ 燃料燃烧流场不同剖面温度和 O₂ 浓度分布结果^[37]。

3.3 PLIF 技术

PLIF 技术适用于湍流燃烧中间反应物(OH/CH/CH₂O 等)浓度空间分布的测量。这些微量中间产物对燃烧化学反应进程十分关键,其空间分布的测量可以反映火焰的精细结构,确定燃烧反应发生的位

置,给出燃烧反应的释热量,甚至通过 2 种组分的浓度场可以对反应速率进行成像^[38]。Byrne 等^[39]采用 PLIF 方法测量了以氢气和乙烯为燃料的超燃冲压发动机燃烧室 OH 浓度分布,获得了湍流燃烧火焰结构,研究了不同压力下氢和乙烯燃烧现象及规律,并对 CFD 结果进行校验。Strakey 等人^[40]对(1~8) × 10⁵ Pa 压力下的涡轮燃烧室内 OH 和 CH 浓度分布进行了测量研究,起因于较长寿命 OH 的扩散,由 OH 荧光图像的浓度梯度分布能够获得火焰结构,但会丢失火焰前锋面的细节信息,火焰前锋面精细结构的测量需要借助寿命极短的 CH 的荧光图像。利用 PLIF 技术进行组分浓度空间分布测量必须考虑无辐射淬灭的影响,这需要详细了解淬灭受温度、压强和局部组分环境的影响,通过合理选择荧光激励线将淬灭效应的影响降到可接受的水平,此时才可以认为在可容忍的误差范围内组分浓度与荧光强度成正比^[41]。另外,在高压强、高超声速流动、强湍流度等极端条件下,高时空分辨荧光图像才能反映大梯度精细结构和多尺度涡系结构。

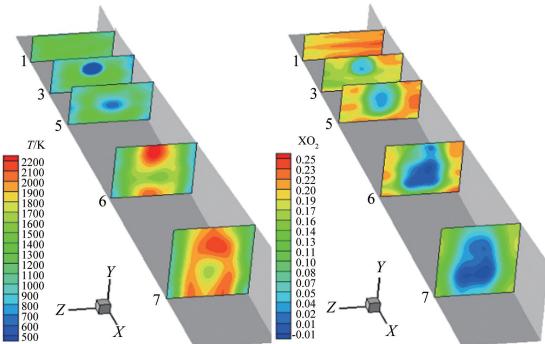


图 9 超燃发动机燃烧室 H₂ 燃料燃烧不同剖面温度(a)和 O₂ 浓度(b)分布结果^[37]

Fig. 9 The measured temperature (a) and O₂ concentration (b) distribution in the hydrogen fueled scramjet combustor^[37]

随着 kHz 以上高重频大功率激光器和高重频相机的发展,湍流燃烧多参数的高重频可视化测量日益受到关注。例如,Slabaugh 等人^[42]联合采用 5kHz 的 OH-PLIF 和 PIV 同时测量发动机模型燃烧室湍流燃烧火焰结构和速度场的演化过程,用于发展工业燃烧装置的 LES 计算软件。Sutton 等人^[43]基于 10kHz 的高重频二极管激光泵浦 Nd:YAG 激光器,对湍流火焰 OH 和 CH₂O 二维空间分布以及温度场等的快速演变进行可视化测量,这些工作有助于构建准确的湍流燃烧模型、提高发动机湍流燃烧的 CFD 仿真精度。由于高重频可视化测量技术使得火焰结构及湍流流动的快速演变过程能够被观测,这对于发动机点火、熄火以及燃烧不稳定性研究也非常重要。

4 结 论

激光燃烧诊断技术的开发和应用已是现代燃烧科学和应用技术发展的不可或缺的动力,在航空发动机湍流燃烧场的温度、速度、组分浓度等参数高时空分辨测量中已广泛应用,为湍流燃烧模型构建、CFD仿真验证、发动机燃烧室设计提供了丰富的实验数据。

在目前发展的激光燃烧诊断技术中,每种技术都有其局限性和适用范围,需要根据探测对象的要求和特点,选择合适的激光诊断技术。在航空发动机温度测量中,CARS技术能够实现单点温度的高精度测量,通过扫描方式测量探测截面内网格点温度,可获得二维空间分布平均温度场信息;高时空分辨温度场的测量需要采用双色PLIF测温方法,特别是基于铜原子的NTLAF方法有望发展成为宽压范围航空发动机煤油燃烧过程的瞬时温度场测量工具,PLIF方法的测温精度要低于CARS技术。在航空发动机速度测量中,PIV技术能够实现低速流场速度的精细测量,HTV技术能够用于高温超声速和高超声速流场的速度测量,2种技术可优势互补。在航空发动机组分测量中,SRS技术能够一次测量获得所有主要组分及其浓度,并能实现空间一维分布测量,但在煤油富油燃烧区的测量仍十分困难;双泵浦CARS技术有高的信号强度,但一般仅能同时获得2种组分的CARS谱,通常用于平均温度、O₂或H₂或CO₂等组分的平均浓度空间分布测量;OH、CH、CH₂O等微量中间反应物的浓度分布主要采用PLIF方法,能够对火焰结构进行定量表征,但组分浓度的定量测量仍极具挑战性。

参考文献:

- [1] 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.
Hu Z Y, Zhang Z R, Liu J R, et al. Temperature measurement in CH₄/air flame by single pulse USED CARS[J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(5): 610-612.
- [2] Davis L C, Marko K A, Romai L. Angular distribution of coherent Raman emission in degenerate four-wave mixing with pumping by a single diffraction coupled laser beam: configurations for high spatial resolution[J]. Applied Optics, 1981, 20(9): 1685-1690.
- [3] Hu Z Y, Liu J R, Ye J F, et al. Laser-based measurements of temperature, species and velocity in engine combustor[C]. Proceedings of SPIE, 2013.
- [4] Okojie R S, Danehy P M, Watkins A N, et al. An overview of NASA hypersonic experimental diagnostic and instrumentation technologies for ground and flight testing[R]. AIAA-2009-7279, 2009.
- [5] Steinberg A M, Arndt C M, Stopper U, et al. Diagnostic requirements for the development of low-emission, fuel-flexible gas turbine combustors[R]. AIAA-2012-0698, 2012.
- [6] Hassa C, Willert C, Fischer M, et al. Nonintrusive flowfield, temperature and species measurements on a generic aeroengine combustor at elevated pressure[C]. Proceedings of ASME Turbo Expo, Barcelona, Spain, GT2006-90213, 2006.
- [7] Thariyan M, Bhuiyan A, Meyer S, et al. Dual-pump coherent anti-stokes raman scattering system for temperature and species measurements in an optically accessible high-pressure gas turbine combustor facility[J]. Meas Sci Technol, 2011, 22: 015301.
- [8] Mathew P T, Aizaz H B, Sameer V N, et al. Dual-pump CARS and OH-PLIF measurements at elevated pressures in a gas turbine combustor facility[R]. AIAA-2010-4808, 2010.
- [9] Brackmann C, Bood J, Afzelius M, et al. Thermometry in internal combustion engines via dual-broadband rotational coherent anti-stokes raman spectroscopy[J]. Meas Sci Technol, 2004, 15: R13-R25.
- [10] Magnotti G, Cutler A D, P Danehy. Development of a dual-pump CARS system for measurements in a supersonic combustion free jet[R]. AIAA-2012-1193, 2012.
- [11] 赵建荣,杨仕润,俞刚. CARS在超音速燃烧研究中的应用[J]. 激光技术, 2000, 24(4): 207-212.
Zhao J R, Yang Sh R, Yu G. Study of supersonic combustion by CARS measurement technique[J]. Laser Technology, 2000, 24(4): 207-212.
- [12] Cutler A D, Magnotti G, Cantu L, et al. Dual-pump CARS measurements in the university of virginia's dual-mode scramjet: configuration "A"[R]. AIAA-2012-0114, 2012.
- [13] 李国华,胡志云,王晟,等. 基于相干反斯托克斯拉曼散射的二维温度场扫描测量[J]. 光学精密工程, 2016, 24(1): 14-19.
Li G H, Hu Z Y, Wang S, et al. 2D scanning CARS for temperature distribution measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(1): 14-19.
- [14] 张立荣,胡志云,叶景峰,等. 移动式CARS系统测量超声速燃烧室出口温度[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0408007.
Zhang L R, Hu Z Y, Ye J F, et al. Mobile CARS temperature measurements at exhaust of supersonic combustor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(4): 0408007.
- [15] Roy S, Meyer T R. Time-resolved dynamics of resonant and nonresonant broadband picosecond coherent anti-Stokes Raman scattering signals[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87: 264103.
- [16] Roy S, Gord J R, Patnaik A K. Recent advances in coherent anti-Stokes Raman scattering spectroscopy: fundamental developments and applications in reacting flows[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2010, 36: 280-306.
- [17] Roy S, Kulatilaka W D. Gas-phase single-shot thermometry at 1kHz using fs-CARS spectroscopy[J]. Optics Letters, 2009, 34(24): 3857-3859.
- [18] Kulatilaka W D, Roy S. Effects of O₂-CO₂ polarization beating on femtosecond coherent anti-Stokes Raman scattering (fs-CARS) spectroscopy of O₂[J]. Applied Physics B, 2011, 102: 141-147.
- [19] 关小伟,刘晶儒,黄梅生,等. PLIF法定量测量甲烷-空气火焰二维温度场分布[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(2): 173-176.

Guan X W, Liu J R, Huang M S, et al. Two-dimensional temperature field measurement in a methane-air flame by PLIF[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(2): 173-176.

[20] Palmer J L, Hanson R K. Temperature imaging in a supersonic free jet of combustion gases with two-line OH fluorescence[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(3): 485-499.

[21] Meier U E, Gabmann D W, Stricker W. LIF imaging and 2D temperature mapping in a model combustor at elevated pressure [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2000, 4: 403-414

[22] Kaminski C F, Engström J, Aldén M. Quasi-instantaneous two-dimensional temperature measurements in a spark ignition engine using 2-line atomic fluorescence[J]. *Proceedings of Combustion Institute*, 1998, 27: 85-93.

[23] Medwell P R, Chan Q N, Kalt A M, et al. Instantaneous temperature imaging of diffusion flames using two-line atomic fluorescence[J]. *Applied Spectroscopy*, 2010, 64: 173-176.

[24] Chan Q N, Medwell P R, Alwahabi Z T, et al. Assessment of interferences to nonlinear two-line atomic fluorescence (NT-LAF) in sooty flames[J]. *Applied Physics B*, 2011, 104(1): 189-198.

[25] 叶景峰, 胡志云, 刘晶儒, 等. 分子标记速度测量技术及应用研究进展[J]. *实验流体力学*, 2015, 29(3): 11-17.

Ye J F, Hu Z Y, Liu J R, et al. Development and application of molecular tagging velocimetry[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2015, 29(3): 11-17.

[26] Wehrmeyer J A, Ribarov L A, Oguss D A, et al. Flame flow tagging velocimetry with 193-nm H₂O photodissociation[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(22): 6912-6917.

[27] 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.

[28] Alexander A, Wehrmeyer J, Runge W, et al. Nonintrusive measurement of gas turbine exhaust velocity using hydroxyl tagging velocimetry[R]. AIAA-2008-3709, 2008.

[29] Gendrich C P, Koochesfahani M M. A spatial correlation technique for estimating velocity fields using molecular tagging velocimetry (MTV)[J]. *Experiments in Fluids*, 1996, 22(1): 67-77.

[30] Ramsey M, Pitz R. Template matching for improved accuracy in molecular tagging velocimetry[J]. *Experiments in Fluids*, 2011, 51(3): 811-819.

[31] 刘建胜, 刘晶儒, 张振荣, 等. 利用拉曼散射法测量燃烧场的温度及组分浓度[J]. *光学学报*, 2000, 20(9): 1263-1267.

Liu J S, Liu J R, Zhang Z R, et al. Raman scattering measurements for multi-species and temperature in combustion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(9): 1263-1267.

[32] Grady N R, Frankland J H, Pitz R W. UV Raman scattering measurements of supersonic reacting flow over a piloted, ramped cavity[R]. AIAA-2012-0614, 2012.

[33] Wedr L, Meier W, Kutne P, et al. Single-pulse 1D laser Raman scattering applied in a gas turbine model combustor at elevated pressure[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31: 3099-3106.

[34] Locke R J. Temperature and species measurements of combustion produced by a 9-point lean direct injector[R]. AIAA-2013-0562, 2013.

[35] Eckbreth A C, Anderson T J. Multi-color CARS for simultaneous measurements of multiple combustion species[C]. *SPIE-Laser Applications to Chemical Dynamics*, 1987.

[36] Lucht R P. Three-laser coherent anti-Stokes Raman scattering measurements of two species[J]. *Optics Letters*, 1987, 12(2): 78-80.

[37] Antcliff R R, Jarrett O J. Multispecies coherent anti-Stokes Raman scattering instrument for turbulent combustion[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1987, 58(11): 2075-2080.

[38] Paul P H, Najm H N. Planar laser-induced fluorescence imaging of flame heat release rate[C]. *Proc Combust Inst*, 1998.

[39] Byrne S O, Stotz I, Houwing A F P, et al. OH PLIF imaging of supersonic combustion using cavity injection[R]. AIAA-2005-3357, 2005.

[40] Strakey P A, Woodruff S D, Williams T C, et al. OH-PLIF measurements of high-pressure, hydrogen augmented premixed flames in the simval combustor[R]. AIAA-2007-980, 2007.

[41] Andresen P, Schluter H, Wolff D, et al. Identification and imaging of OH ($v''=0$) and O₂ ($v''=6$ or 7) in an automobile spark-ignition engine using a tunable KrF excimer laser[J]. *Appl Optics*, 1992, 31: 7684-7689.

[42] Slabaugh C D, Pratt A C, Lucht R P. Simultaneous 5 kHz OH-PLIF/PIV for the study of turbulent combustion at engine conditions[J]. *Appl Phys B*, 2015, 118: 109-130.

[43] Sutton J A, Lempert W R. Recent advances in high-energy, high-repetition rate diagnostics for PLIF, rayleigh and Raman scattering imaging in turbulent reacting flows[R]. AIAA 2011-361, 2011.

作者简介：



胡志云(1969-),男,河南浚县人,高级工程师。研究方向:燃烧流场激光诊断技术及应用研究。通信地址:陕西西安西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室(710024)。E-mail:huzhiyun@nint.ac.cn

(编辑:李金勇)