

可调空间分辨 USEDCARS 技术研究

张振荣, 李国华, 胡志云, 王 晟, 叶景峰, 陶 波, 邵 珺, 方波浪

西北核技术研究院激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024

摘 要 相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)技术是一种非常重要的燃烧诊断技术,该技术具有非常强的抗干扰能力和非常高的测量精度。但空间分辨力不足会使 CARS 技术产生很强的空间平均效应,引起成 CARS 光谱畸变,进而造成 CARS 光谱分析困难,无法通过 CARS 光谱反演燃烧场参数。针对非稳腔空间增强探测 CARS(USEDCARS)技术存在的空间分辨不足以及空间分辨力不易改变的特点,分析了影响 USEDCARS 技术测量空间分辨力的各种因素,采用一组轴棱锥对 USEDCARS 系统中的泵浦激光进行环状光束整形,并通过调节轴棱锥之间的距离获得了不同直径的环状光束,在此基础上,建立了空间分辨可调 USEDCARS 诊断系统。开展了空间分辨力分析实验,获得了 CARS 信号强度随空间位置的分布数据,以 CARS 信号总强度 95% 包含的空间区域代表 CARS 的纵向空间分辨力,以此计算得到了 CARS 系统空间分辨力为 1.7~6.5 mm 连续可调。其中,高分辨力情况,达到了现有 BOXCARS 技术的空间分辨力。利用所建立的空间分辨可调 USEDCARS 诊断系统测量了酒精/空气预混火焰温度参数,获得了不同空间分辨条件下的 CARS 光谱。空间分辨力为 1.7 mm 时,获得了高质量 CARS 光谱,通过光谱拟合给出了所测火焰的温度信息。分辨力分别为 4.9 和 6.5 mm 时获得了较强的 CARS 信号,但存在光谱畸变。结果显示,空间分辨力对 CARS 信号的强度和空间平均效应有很大地影响,提高测量的空间分辨力可以有效消除空间平均效应,获得准确的 CARS 光谱,增强光谱拟合精度,同时空间分辨可调的特性使该系统能够更好地适应不同实验条件下的诊断工作。

关键词 相干反斯托克斯拉曼散射; 空间分辨力; 轴棱锥; 环状光束

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)01-0001-04

引 言

相干反斯托克斯拉曼散射(Coherent anti-Stokes Raman scattering, CARS)是一种四波混频的非线性光学效应。CARS 用于燃烧流场诊断时具有非常高的温度测量精度,同时还具有很强的抗干扰能力,已经成为各种燃烧流场温度和组分测量的重要工具^[1-2],虽然该技术已经产生并发展了半个世纪,但相关技术创新仍不断进行^[3-4]。

时空分辨力是衡量光谱诊断技术的重要指标。CARS 信号强度与所测分子数密度的平方成正比,在气体压力不变条件下,分子数密度与介质的温度成反比,当所探测的空间区域内存在温度梯度时,低温、高温 CARS 信号光谱相互叠加,产生空间平均效应^[5-6],会造成 CARS 光谱畸变,增加拟合难度和测量不确定度。由于低温 CARS 信号远强于高温条件下的 CARS 信号,因此低空间分辨条件下 CARS 信号通常表现出低温特性。此外,根据 CARS 理论,CARS 信号强度

还与探测区域长度的平方成正比,高空间分辨力对应低的 CARS 信号强度,以及低的单脉冲光谱信噪比,进而造成测量结果不确定度的增加,或是为了提高信噪比进行多脉冲平均从而导致测量时间分辨力的下降。对于空间分布均匀燃烧流场,适当降低空间分辨,有利于增强信号强度,提高单脉冲光谱的信噪比,从而实现高的时间分辨力和更高的测量精度。但现有 CARS 诊断系统不具有空间分辨力调节能力,要改变测量系统的空间分辨力,需要重新调节光路,甚至需要更换部分光学元器件。

按照相位匹配方式的不同,CARS 技术可分为共线 CARS、交叉光束 CARS(BOXCARS)和非稳腔空间增强探测(Unstable-resonator spatially enhanced detection) CARS(USEDCARS)三类。其中,共线 CARS 技术由于空间分辨力很低,已经很少使用;BOXCARS 通过泵浦光、探测光和斯托克斯光相互交叉设置,大大提高了探测的空间分辨力,使其纵向空间分辨力达到了约 1~2 mm^[7-9],甚至优于 1 mm^[10-11]。但 BOXCARS 在大幅提高空间分辨力的同时也增

收稿日期: 2019-11-17, 修订日期: 2020-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(91541203, 91641112), 国家重点实验室基金项目(SKLLIM1608)资助

作者简介: 张振荣, 1974 年生, 西北核技术研究院激光与物质相互作用国家重点实验室副研究员 e-mail: zhangzhenrong@nint.ac.cn

加了对光学系统和实验环境的要求。要使聚焦后的三束激光精确地交汇于测量点,需要极为精密的光学调节机构,而且在光路优化调节已经完成的情况下,由于测试环境中气体温度和密度的变化导致的折射率变化、实验环境中的振动等都会使光束传播路线发生偏移导致相位失配。这会使得 CARS 信号强度减弱甚至消失。

与 BOXCARS 相比,USED CARS 具有易于调节,对振动、扰动不敏感等优点,但 USED CARS 技术的空间分辨力相对较低。当测量温度梯度较大的燃烧流场时,会产生光谱畸变效应,造成温度测量不确定度增大甚至难以进行光谱拟合等不足。文献[12-13]比较分析了 USED CARS 和 BOXCARS 技术的优缺点,认为 BOXCARS 技术能够提供高的空间分辨力,但相位匹配效率较低,并对振动和气动因素敏感,而 USED CARS 技术易于准直,具有较高的相位匹配效率,并对振动等环境因素不敏感等,更适合应用于实际的大型工业燃烧装置。

造成现有 USED CARS 技术测量空间分辨力低的主要原因在于环形泵浦光的产生方式。现有 USED CARS 环形泵浦光采用空间滤波方式产生^[13],这种方式主要有两方面的缺点:首先,会造成激光能量损失,特别是当泵浦激光为高斯光束时,其中心最强的区域被空间滤波方式遮挡,造成激光能量较大的损失;其次,采用空间滤波方式产生的环状光束中心孔半径较小,对应探测区域泵浦光与 Stokes 光之间的夹角很小,使激光的相互作用区域较长,测量的空间分辨力降低。

本文采用一种新的方式对泵浦激光进行了环状光束整形,有效减小了泵浦激光的能量损失,同时还可以通过调节环状光束的直径实现诊断系统测量空间分辨力的连续调节。有效解决了现有 USED CARS 技术泵浦激光能量损失、空间分辨力低且不易调节等不足,使 USED CARS 诊断系统能够更好地适应不同的诊断需求。

1 实验部分

采用一组石英轴棱锥对泵浦激光进行整形,产生所需的环状光束。如图 1 所示,轴棱锥的直径 50 mm,锥角为 156°,通光面镀增透膜,透过率大于 99%。两块轴棱锥严格共轴放置,轴棱锥之间的距离可连续精确调节。激光沿轴线入射至轴棱锥组,形成空心环形光束,通过调节两个轴棱锥之间的距离可以获得不同尺寸的环状光束。

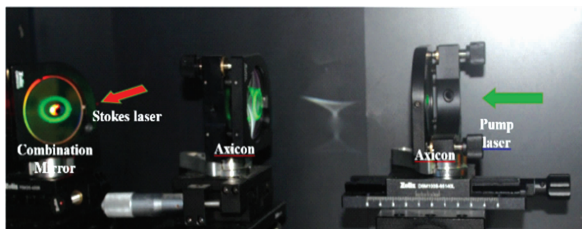


图 1 泵浦激光环状光束整形
Fig. 1 Pump laser beam shaping system

所建立的 USED CARS 系统如图 2 所示,包括: Nd : YAG 激光器(Q-smart850, 6 ns, 532 nm, 10 Hz), 宽带染料激光器(波长 607 nm, 光谱宽度约 190 cm^{-1}), 光谱仪(Andor SR-500i, 2 400 lines $\cdot \text{mm}^{-1}$, 焦距 500 mm), 光谱信号采集用相机为 ICCD(Andor iStar)。YAG 激光器输出二倍频 532 nm 激光能量约 280 mJ, 其中约 70% 的能量用于泵浦宽带染料激光器, 产生所需的 607 nm 宽带 Stokes 激光, 30% 的能量用作泵浦激光。泵浦激光由轴棱锥进行光束整形产生环状光束, 并通过调节锥镜之间的距离实现环状光束直径的连续调节。实验中, 泵浦光环状光束半径的调节范围为 3~9 mm。

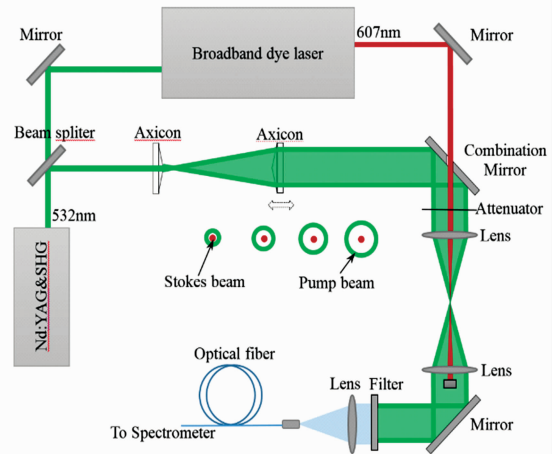


图 2 可调空间分辨 USED CARS 系统
Fig. 2 Spatial resolution adjustable USED CARS system

环状泵浦光经中心有一个 45° 斜孔的反射镜反射, 孔的直径为 6 mm, Stokes 光穿过反射镜的中心孔, 并与环状泵浦光共轴传播, 再由焦距为 200 mm 的透镜聚焦于探测点, 与介质相互作用产生相应的 CARS 信号, 透镜与反射镜之间设置有衰减片, 用于合束后激光能量的调节。

探测点上光束的横向尺寸约为 0.1 mm。纵向分辨力测量方法如图 3 所示。测量分辨力时将激光能量衰减至约 0.5 mJ。在探测点处放置厚度为 0.1 mm 的石英玻璃片, 激光作用在玻璃片上, 产生相应的非共振 CARS 信号。沿激光传输方向移动玻璃片, 同时记录不同位置 CARS 信号的强度, 获得 CARS 信号强度的空间分布曲线, 并以此计算 CARS 系统的纵向空间分辨力。

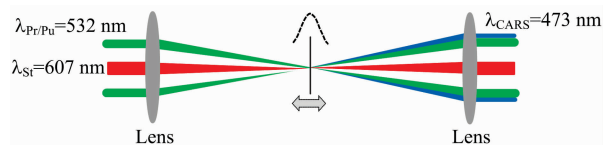


图 3 USED CARS 纵向空间分辨力测量
Fig. 3 Schematic diagram of USED CARS longitudinal spatial resolution measurement

2 结果与讨论

2.1 空间分辨力测量结果

通过调节轴棱锥之间的距离, 获得不同半径的环状泵浦光束, 并分别测量相应的纵向空间分辨力。图 4 给出了环状光束半径分别为 3, 4, 6, 8 和 9 mm 情况下得到的 CARS 信号强度随空间位置变化曲线。数据拟合结果显示, 信号强度在空间上呈近高斯分布^[12]。

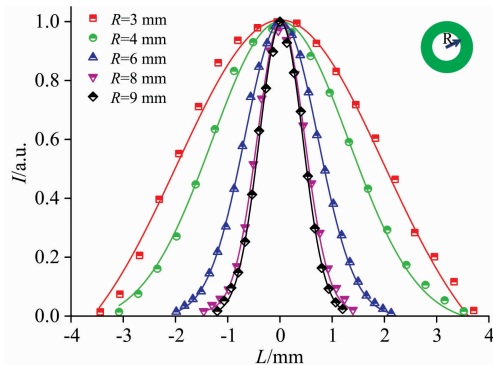


图 4 不同分辨条件下 CARS 信号强度空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of CARS signals intensity under different resolution

根据图 4 所得 CARS 强度随空间位置的分布数据, 并取 CARS 信号总强度 95% 的空间区域代表 CARS 的纵向空间分辨力区域强度, 以此计算得到相应的 CARS 纵向空间分辨力, 如图 5 所示。泵浦光内环半径为 3 mm, 对应的空间分辨力为 6.5 mm, 这与 USEDCARS 常用实验参数接近, 而且传统 USEDCARS 技术中还存在约 50% 的泵浦激光能量损失。通过增加两个轴棱锥之间的距离, 增大环状光束半径, 当环状光束半径达到 9 mm 时, 测量得到的空间分辨力为 1.7 mm, 这一数据与大多数 BOXCARS 的空间分辨力相当, 可以满足非均匀燃烧场对测量空间分辨力的需求。

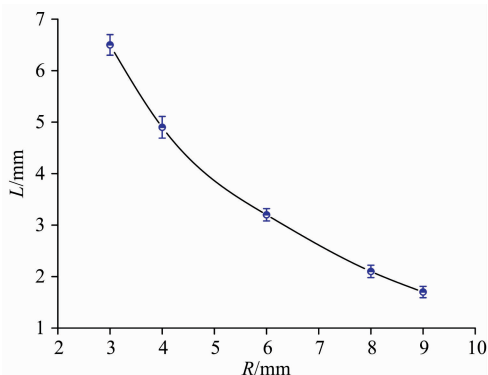


图 5 不同泵浦光环状光束半径对应空间分辨力
Fig. 5 Spatial resolution with different annular pump laser beam radius

2.2 火焰中 CARS 光谱测量

利用所建立的可调空间分辨 USEDCARS 技术测量了酒

精/空气预混火焰温度参数。其中酒精通过雾化并与空气进行预混, 空气流量为 $10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 化学配比 $\varphi=0.9$ 。火焰形状呈近似三角形, 测量点位于火焰中心距炉面高度 25 mm 处。通过调节 USEDCARS 测量系统的空间分辨力, 获得了纵向分辨力分别为 6.5, 4.9 和 1.7 mm 时的单脉冲 CARS 光谱, 如图 6 所示。图中不同空间分辨力对应的 CARS 光谱强度各不相同, 空间分辨力与信号强度呈现强烈的负相关。信号强度主要由作用区的长度与测量区域内所测 N_2 的分子数密度及其分布决定, 由于所测区域存在较大的温度梯度, 所以低分辨条件下的 CARS 信号出现了严重的光谱畸变, 并表现出明显的低温特性。高空间分辨条件下获得的 CARS 光谱与理论光谱符合的较好, 根据拟合结果可以给出测量点的温度为 1 912 K。

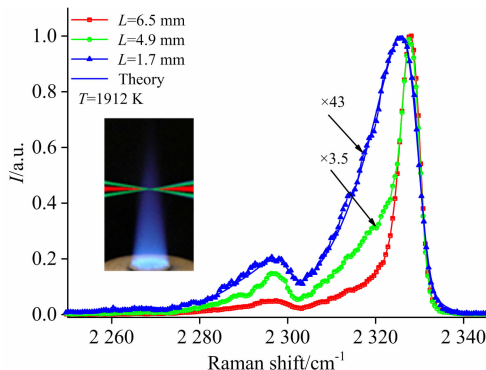


图 6 不同空间分辨条件下的 CARS 光谱
Fig. 6 CARS spectra with different spatial resolution conditions

与传统 USEDCARS 系统相比, 采用轴棱锥实现泵浦激光环状光束整形没有激光能量损失, 同时, 还可以通过调节两个轴棱锥之间的距离, 改变泵浦光环状光束的直径, 从而实现测量空间分辨力的连续调节。空间参数分布均匀或温度梯度较低的燃烧场, 对诊断系统的空间分辨力要求较低, 可通过减小轴棱锥之间的距离, 缩小泵浦光环状光束直径, 从而降低测量空间分辨力, 以获得高的单脉冲信号强度和信噪比, 提高探测的时间分辨力; 对于温度梯度较大的燃烧场, 则可通过增加轴棱锥之间的距离, 扩大泵浦光环状光束直径, 提高空间分辨力, 消除空间平均效应的影响。

3 结论

利用了 USEDCARS 相位匹配效率高、环境适应性好的优点, 并在此基础上建立了一种可调空间分辨 USEDCARS 诊断系统。通过一组轴棱锥将泵浦激光光束整形为环状光束, 并通过调节轴棱锥之间的距离改变环状泵浦光束直径, 从而获得不同的空间分辨力, 实现了空间分辨力在 1.7~6.5 mm 的连续可调。其中, 高空间分辨状态, 达到了 BOXCARS 技术的空间分辨力, 后续还将通过系统整体优化, 进一步提高测量的空间分辨力。同时, 空间分辨力连续可调特性使所建立的 USEDCARS 系统能够更好地适应各种不同燃烧流场的测量需求。

References

- [1] Han D, Satija A, Kim J, et al. *Combustion and Flame*, 2017, 181: 239.
- [2] Cutler A D, Gallo E C A, Cantu L M L, et al. *Combustion and Flame*, 2018, 189: 92.
- [3] Porquez J G, Cole R A, Tabarabgao J T, et al. *Optics Letter*, 2017, 42(12): 2255.
- [4] Stauffer H U, Rahman K A, Slipchenko M N, et al. *Optics Letter*, 2018, 43(20): 4911.
- [5] Gao Y, Seeger T, Leipertz A. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35: 3715.
- [6] Kulatilaka W D, Stauffer H U, Gord J R, et al. *Optics Letter*, 2011, 36(21): 4182.
- [7] Geigle K P, Köhler M, O'Loughlin W, et al. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35: 3373.
- [8] Hosseinnia A, Nordström E, Bood J. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36: 4461.
- [9] Smirnov V V, Kostitsa S A, Kobtsev V D, et al. *Combustion and Flame*, 2015, 162: 3554.
- [10] Dennis C N, Slabaugh C D, Boxx I G, et al. *Combustion and Flame*, 2016, 173: 441.
- [11] Nordström E, Olofsson N, Simonsson J, et al. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35: 3707.
- [12] Singh J P, Yueh F Y. *Combustion and Flame*, 1992, 89: 77.
- [13] Montello A, Nishihara M, Rich J W, et al. *AIAA Journal*, 2012, 50(6): 1367.

Research on Spatial Resolution Adjustable USEDCARS Technology

ZHANG Zhen-rong, LI Guo-hua, HU Zhi-yun, WANG Sheng, YE Jing-feng, TAO Bo, SHAO Jun, FANG Bo-lang
Northwest Institute of Nuclear Technology, State Key Laboratory of Laser Interaction With Matter, Xi'an 710024, China

Abstract Coherent anti-Stokes Raman scattering (CARS) is a very important combustion diagnostic technique, for its high accuracy and strong anti-interference ability in combustion field parameter measurement. But when there is a temperature gradient in the detected spatial region, spectra superposition of low and high temperature CARS signal result in spatial average effects which will cause CARS spectral distortion. As a result, it is difficult to analyze the CARS spectrum, and the combustion field parameters cannot be retrieved from the CARS spectrum. In Unstable-resonator Spatially Enhanced Detection CARS (USEDCARS), the lower spatial resolution has limited the application of CARS in flow with a high temperature gradient. Various factors affecting the spatial resolution of the technology were analyzed. The circular beam shaping of the pump laser was carried out by using the axicon group, and ring-shaped pump beam with different diameters was obtained by adjusting the distance between the axicons. Then a USEDCARS diagnostic system with the adjustable spatial resolution was established, and the spatial resolution of the USEDCARS was measured, the distribution of CARS signal strength with the spatial position was obtained. Taking spatial region over 95% of the total CARS intensity to represent the longitudinal spatial resolution, the spatial resolution of the system can be adjusted continuously from 1.7 to 6.5 mm. At the highest spatial resolution state, the spatial resolution achieves the level of BOXCARS technology. The temperature of an alcohol/air premixed flame was measured using the established USEDCARS system. Single-pulse CARS spectra with different longitudinal resolutions were obtained. The high-quality CAR spectrum was achieved when the measured spatial resolution was 1.7 mm, and the flame temperature was indicated by the spectral fitting. When the spatial measurement resolution was 4.9 or 6.5 mm, the CARS signal intensity was very strong, but the CARS spectra were distorted. The results show, the spatial resolution has a large impact on the intensity and spatial average effects of CARS signals, the spatial averaging effect can be reduced by improving the spatial resolution, the continuously adjustable spatial resolution enables the USEDCARS system to better adapt to various combustion flow fields.

Keywords Coherent anti-Stokes Raman scattering; Spatial resolution; Axicon; Annular beam

(Received Nov. 17, 2019; accepted Apr. 9, 2020)