

文章编号 1004-924X(2016)01-0014-06

基于相干反斯托克斯拉曼散射的二维温度场扫描测量

李国华*, 胡志云, 王 晟, 张振荣, 叶景峰

(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:开展了基于相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)技术的二维温度场扫描测量研究。通过同步扫描测量点及信号接收端的方式,实验测量了甲烷/空气预混火焰水平截面离散点的温度,并插值重建了二维温度场;用同步扫描法调节测量点与火焰的位置,实现了在扫描过程中对火焰同一空间位置的温度测量,排除了火焰空间分布不均匀性对扫描测温结果的附加影响。最后分析了提出的扫描 CARS 测量系统在实验设定状态下的扫描测温 A 类不确定度。结果显示:在扫描测量同一空间位置的实验中,测得该点平均温度为 2 074 K;测温 A 类不确定度优于 21 K。本研究量化了扫描 CARS 温度测量系统的不确定度,提高了扫描温度测量结果的可信度,为后续稳态火焰温度分布高精度测量、计算流体动力学(CFD)模拟验证及燃烧基本问题研究奠定了实验基础。

关键词:温度分布测量;测温不确定度;相干反斯托克斯拉曼散射(CARS);二维扫描;二维线性插值

中图分类号:O433;TB942 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162401.0014

2D scanning CARS for temperature distribution measurement

LI Guo-hua*, HU Zhi-yun, WANG Sheng, ZHANG Zhen-rong, YE Jing-feng

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

* Corresponding author, E-mail: liguohua@nint.ac.cn

Abstract: A 2D temperature field scanning measurement method in a combustion flow based on Coherent Anti-stokes Raman Scattering (CARS) was explored for temperature distribution measurements. By synchronized scanning incidence lasers and exit CARS signals, the temperatures of discrete points for methane/air premixed flame in a horizontal section were measured and a 2D temperature field was reconstructed by using 2D linear interpolation. The temperatures of the flame in the same space position in scanning processing was measured with synchronizing scanning method, by which the additional effect of flame space distribution in homogeneity on scanning measuring temperature was removed. Finally, the measuring uncertainty of the scanning CARS system was analyzed in a given experimental state. The experimental results for scanning measuring the same space position show the average temperature in the point is 2 074 K, meanwhile, the measuring uncertainty of the scanning CARS system is accounted below 21 K at the same experimental condition. In conclusion, the research quantizes the measuring uncertainty of the scanning CARS system, improves the reliability of results of scanning temperature measurement and provides an experimental foundation for the high precision measurement of flame temperature distribution, simulation validation of Computational Fluid Dynamics(CFD) and the investigation of flame problems.

收稿日期:2015-08-12;**修订日期:**2015-09-30.

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室基金资助项目(No. SKLLIM1410)

Key words: temperature distribution measurement; thermometry uncertainty; Coherent Anti-stokes Raman Scattering(CARS); 2D scanning; 2D linear interpolation

1 引言

燃烧流场温度参数的精细测量,尤其是高精度温度分布测量,对发动机燃烧室设计、流体动力学计算模型的建立以及数值仿真软件的验证十分重要^[1-2]。鉴于热电偶等接触式测量方式对流场的干扰,利用黑体辐射谱进行温度场反演等非接触测温方式得到发展^[3],但由于其空间分辨率不足,高时空分辨的激光测温技术成为了该领域的研究重点。

目前,应用较广的激光测温技术包括相干反斯托克斯拉曼散射(Coherent anti-Stokes Raman Scattering,CARS)测温技术^[4-7]、激光诱导荧光(Laser-induced Fluorescence,LIF)测温技术^[8]及瑞利散射(Rayleigh Scattering,RS)测温技术^[9]。其中,CARS测温技术具有信号强、抗干扰、收集效率高等优点,且通过拟合光谱线形得出温度,测温精度较高,特别适用于较复杂燃烧场温度的测量。按照相位匹配方式,CARS测量分为共线CARS和交叉CARS(BOX-CARS)^[10-12]。共线匹配方式下,CARS信号与泵浦光共线传输,实验光路简单;但是沿光束传播方向的空间分辨率较低(几十毫米),而且温度梯度较大情况下,高温区信号易受周围低温区信号干扰,温度越低,CARS信号越强。BOX-CARS技术的空间分辨率可达到毫米量级;但是光路相对复杂,且相位匹配效率易受环境影响,CARS信号强度的波动较大,因此该技术在复杂燃烧场中的应用受到限制。近年来,非稳腔空间增强CARS^[13-16](USED CARS)技术得到了发展,该技术采用三维相位匹配构造,具有类似BOX-CARS的高空间分辨率,同时实验光路具有与共线CARS类似的易准直性。作为线性测量技术,LIF及RS温度测量技术的实验光路简便,在二维温度场测量方面具有优势,尤其在瞬态非稳定燃烧场中可以实现对瞬态二维温度场的同时测量;但是这两项技术易受到复杂流场所带来的猝灭干扰及散射截面参数的影响^[17-20],温度测量精度难以保证,不适用于测温精度要求较高的场合。

在针对稳态燃烧场的温度分布测量中,扫描CARS技术得到发展,若干基于BOX-CARS及

USED-CARS的扫描测量实验^[21-22]已有报道。但已报道的扫描测量结果均未明确给出扫描过程对测量精度的影响,而在CARS测量过程中,CARS的信号强度对光路相位匹配效率敏感,易受光路变化的影响。因此,本文采用USED-CARS机制建立了二维扫描CARS测量系统,扫描获得了预混火焰水平截面的温度分布,并分析了本扫描CARS测量系统在实验设定状态下的测量不确定度。

2 实验原理

CARS测量技术利用四波混频这一非线性光学现象,将泵浦光与斯托克斯光作用于测量介质产生CARS光信号。在泵浦光波长选定条件下,针对所测分子的拉曼频移选择合适的斯托克斯光以实现能级共振产生较强的CARS信号。信号强度与激光光强和分子数密度呈如式(1)所示的非线性关系:

$$I_{\text{CARS}} = \frac{1}{n_1^2 n_2 n_3} \left(\frac{4\pi\omega_3}{c^2} \right)^2 |x^{(3)}|^2 I_1^2 I_2 Z^2 \frac{\sin(\Delta K Z/2)}{\Delta K/2} \quad (1)$$

式中: n_1, n_2, n_3 分别为泵浦光、斯托克斯光和CARS光折射率, I_1 为泵浦光强度, I_2 为斯托克斯光强度, Z 为有效作用区长度, ω_3 为CARS信号角频率, $x^{(3)}$ 为三阶非线性极化率, ΔK 为波矢失配大小, c 为光速。CARS的信号强度与三阶非线性极化率 $x^{(3)}$ 的模平方成正比, $x^{(3)}$ 通常包括被测介质的温度、组分、浓度等信息,决定了CARS光谱的线型轮廓,采用CARS光谱线型拟合法可实现燃烧场温度和组分浓度的测量。

3 实验设备及方法

CARS测量系统由Nd:YAG激光器、染料激光器、信号采集分析及相应的测量外光路组成,重复频率为10 Hz。CARS系统使用USED-CARS相位匹配机制,实验设备及光路组成详见参考文献[15]。系统的空间分辨率约为 $0.1 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ ^[14-15],实验测量对象为甲烷空气预混平面燃烧炉,气体流速由质量流量计控制,实验中甲烷、空气的流量分别为2.5 L/min和

25 L/min。在文献[15]光路的基础上,本实验增加了扫描机构(图 1 虚线框内部分),最终光路结构如图 1 所示。实验所用 4 台同型号高精度位移台 TS_1 、 TS_2 、 TS_3 、 TS_4 ,具有较高的同步性及稳定性。由 T_y 信号控制 TS_1 、 TS_3 沿 y 方向同步运动,实现反射镜 M_6 、合束透镜 L_3 、测量区域及信

号收集单元(包括收集透镜 L_4 、滤光片、耦合透镜 FC 及光纤头)在 y 方向的同步扫描;由 T_x 信号控制 TS_2 、 TS_4 沿 x 方向同步运动,实现合束透镜 L_3 、测量区域及信号收集单元在 x 方向的同步扫描。通过对 T_x 、 T_y 信号的控制实现温度场的二维扫描测量。

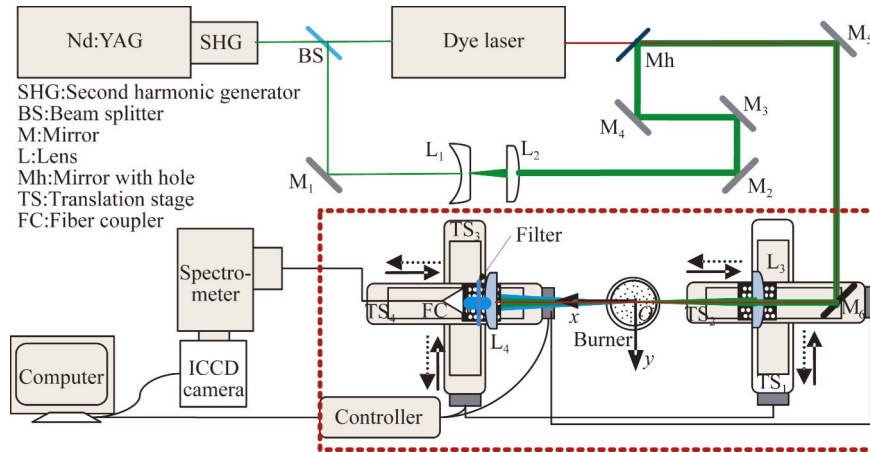


图 1 扫描 CARS 实验光路图

Fig. 1 Experiment setup of CARS for 2D scan

由于 CARS 信号强度对相位匹配异常敏感,而相位匹配取决于光路精度,扫描过程会带来 CARS 信号强度的变化甚至是最终测量温度的偏差。为评价扫描所引入的测量不确定度,实验测量了扫描过程中信号强度及拟合温度的变化。忽略位移台的系统误差及控制信号的时序误差,扫描测量中 CARS 信号的稳定性取决于光路的搭建精度。在扫描不确定度评价测量时,为消除火焰空间分布不均匀性的影响,改进的实验光路如图 2 所示。燃烧炉与合束透镜 L_3 置于同一平板,固定于 TS_2 滑块上,扫描过程中测量点始终为火焰中同一位置。火焰不稳定性的影响则通过高精度流速控制及多次测量取平均值(300 次/30 s)消除。

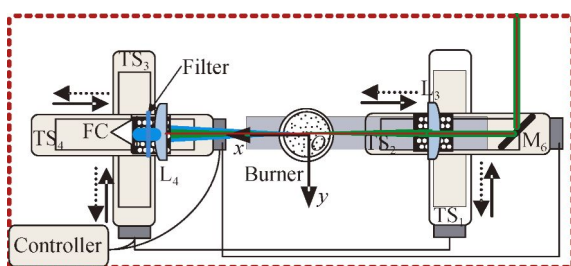


图 2 CARS 扫描不确定度分析光路

Fig. 2 Experiment setup of CARS for uncertainty analysis

4 实验结果与讨论

4.1 水平截面温度分布测量

综合考虑平面燃烧炉甲烷/空气预混火焰的温度梯度及 USED-CARS 的空间分辨率,令火焰中心区域的采样间隔为 3 mm,温度梯度较大的部分火焰边界区域的扫描间隔为 1.5 mm。扫描测量面距炉面 15 mm,在 y 向每一坐标处施行 x 方向扫描,在每一点耗时 30 s 并获得 300 幅实验数据,得到沿光束传播方向燃烧炉的温度空间分布,然后进行 y 方向扫描,覆盖完整的火焰水平截面。实验测量点分布及得到的离散数据点如图 3 所示。

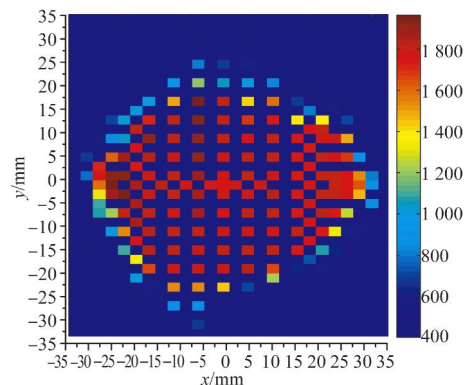


图 3 扫描测量离散点温度

Fig. 3 Temperature distribution of discrete points

利用离散点数据重建温度场的方法有很多^[23-26],考虑到燃烧炉预混火焰温度分布的连续性 & 数据处理速度,这里选用二维线性插值法对离散数据进行重建,重建后火焰温度的二维分布如图 4 所示。

由于 CARS 技术的纵向、横向分辨率存在差异,离散点测温结果显示高温区域沿 x 方向有所扩展。本实验中,合束透镜焦距为 300 mm,参考早期文献^[14-15],其纵向分辨率约为 4 mm(x 方向),横向分辨率约为 0.1 mm(y 方向),因此 y 方向的测量结果更为接近真实温度分布。另一方面,与离散点温度分布相比,重建后温度分布能够更直观地反映出燃烧炉高温区域内的温度差异,体现出温度场重建技术的作用。

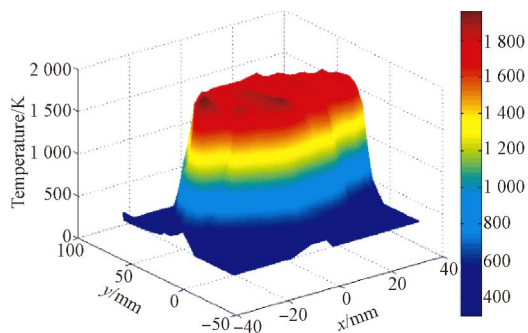


图 4 线性插值后重建的温度场

Fig. 4 Temperature distribution after 2D linear interpolation

4.2 测量不确定度分析

本文所用燃烧炉为平面预混标定燃烧炉,在特定状态下的温度结果可以参考系统说明书中 PREMIX 的模拟结果。在该状态下拟合温度结果为 2 054 K。为分析扫描测量过程额外引入的不确定度,将系统按照图 2 所示光路进行改造,在扫描状态下测量火焰同一空间点的温度,测量点的水平方向位于炉面中心,垂直方向距炉面为 15 mm,扫描步长为 1 cm,每一位置扫描 300 次取平均获得信号谱。通过分析扫描过程中火焰同一位置处的温度变化,来获得扫描测温系统的 A 类不确定度。扫描状态下 CARS 光谱信号强度及温度拟合结果如图 5 所示。

图 5 中 CARS 信号强度表明扫描过程对 CARS 信号强度的影响较大,信号强度最大为 15 000 个数据点,而最小只有 5 000 个数据点,此强度波动来源于接受端光纤束(芯径 100 μm)与 CARS 信号的位移偏差所导致的耦合效率波动。图 5 中温度拟合结果表明,扫描过程中温度拟合结果基本保持不变,且与 CARS 信号强度无显著的相关性,这反映出 CARS 技术作为一种频域测量技术的强抗干扰能力。进一步分析该测量点处 11 组 CARS 谱温度的拟合结果,得出拟合温度均值为 2 074 K,测量结果的标准偏差为 20.6 K。在该实验设定状态下,扫描 CARS 系统的 A 类相对不确定度优于 1%。

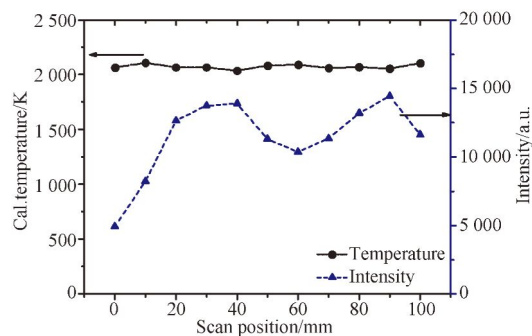


图 5 扫描过程中 CARS 信号强度及温度拟合结果

Fig. 5 Variations of signal intensity and temperature during scanning

5 结 论

本文基于 USED-CARS 技术,利用同步扫描方式实现了预混平面燃烧火焰水平横截面的温度分布测量,并通过实验测量了扫描过程对 CARS 信号强度及温度拟合结果的影响。分析结果表明,在该实验状态下扫描 CARS 系统的测温 A 类不确定度优于 21 K。本研究量化了扫描 CARS 温度测量系统的不确定度,提高了扫描温度测量结果的可信度,为后续稳态火焰温度分布的高精度测量、CFD 模拟验证及燃烧基本问题的研究奠定了实验基础;同时相关的实验技术及实验方法对其它扫描测量实验也具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] BARLOW R S. Laser diagnostics and their interplay with computations to understand turbulent combustion [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(1): 49-75.
- [2] DOCQUIER N, CANDEL S. Combustion control and sensors: a review [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2002, 28(2): 107-150.
- [3] 蔡红星, 胡馨月, 李昌立, 等. 强激光毁伤过程的热辐射谱测量[J]. *中国光学*, 2012, 5(3): 277-282.
CAI H X, HU X Y, LI CH L, *et al.*. Thermal radiation spectral measurement of intense laser damage [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 277-282. (in Chinese)
- [4] 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(2): 280-306.
- [5] 胡志云, 刘晶儒, 关小伟, 等. 燃烧场参数的激光诊断技术研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2002, 14(5): 702-706.
HU ZH Y, LIU J R, GUAN X W, *et al.*. Study on laser diagnostics applied to combustion and flame [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2002, 14(5): 702-706. (in Chinese)
- [6] 李麦亮, 赵永学, 耿辉, 等. CARS 在发动机燃烧场温度和压力测量中的应用研究 [J]. *宇航学报*, 2001, 22(5): 56-61.
LI M L, ZHAO Y X, GENG H, *et al.*. Research on application of cars in temperature and pressure measurement of rocket engine combustion [J]. *Journal of Astronautics*, 2001, 22(5): 56-61. (in Chinese)
- [7] 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. (in Chinese)
- [8] 王晟, 张振荣, 邵珺, 等. 瞬态流场定量测量中平面激光诱导荧光图像的降噪 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(7): 1858-1864.
WANG SH, ZHANG ZH R, SHAO J, *et al.*. Denoising of PLIF images for flow parameter measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1858-1864. (in Chinese)
- [9] 王晟, 刘晶儒, 胡志云, 等. 用于燃烧场诊断的分子滤波瑞利散射技术 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2): 445-451.
WANG SH, LIU J R, HU ZH Y, *et al.*. Development of filtered Rayleigh scattering for combustion diagnostic application [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 445-451. (in Chinese)
- [10] ECKBRETH A C. BOXCARS: crossed-beam phase matched CARS generation in gases [J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(7): 421.
- [11] 张振荣, 刘晶儒, 黄梅生, 等. 单脉冲 BOXCARS 技术在瞬态燃烧场测温中的应用 [J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(12): 1171-1174.
ZHANG ZH R, LIU J R, HUANG M SH, *et al.*. Single pulse BOXCARS applied to measure temperature of transient combustion [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2003, 15(12): 1171-1174. (in Chinese)
- [12] 张振荣, 胡志云, 黄梅生, 等. BOXCARS 测量燃烧场的温度 [J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(4): 323-325.
ZHANG ZH R, HU ZH Y, HUANG M SH, *et al.*. Measurement of temperature in a combustion field by BOXCARS [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2003, 15(4): 323-325. (in Chinese)
- [13] ECKBRETH A C, DOBBS G M, STTUFFLE-BEAM J M, *et al.*. CARS temperature and species measurements in augmented jet engine exhausts [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(9): 1328.
- [14] 赵建荣, 杨仕润, 俞刚. 环形泵浦相位匹配 CARS 技术的匹配方式和空间分辨率的实验研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 1998, 391: 12-17.
ZHAO J R, YANG SH R, YU G. Investigation of phase-matching and spatial resolution on annular-pump CARS [J]. *Laser & Optronics Progress*, 1998, 391: 12-17. (in Chinese)
- [15] 张立荣, 胡志云, 张振荣, 等. 一维非稳腔空间增强探测 CARS 技术对稳态燃烧场温度的测量 [J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(12): 2035-2038.
ZHANG L R, HU ZH Y, ZHANG ZH R, *et al.*. Temperature measurement in stable combustion field with one-dimensional USED CARS [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2006, 18(12): 2035-2038. (in Chinese)
- [16] HU ZH Y, LIU J R, ZHANG ZH R, *et al.*. Single-pulse CARS spectra in solid propellant combustion at atmosphere pressure [J]. *Chinese Optics Letters*, 2003, 1(7): 395-397.

- [17] WIMLEY W C, WHITE S H. Determining the membrane topology of peptides by fluorescence quenching [J]. *Biochemistry*, 2000, 39 (1): 161-170.
- [18] ZENG H L, DUROCHER G. Analysis of fluorescence quenching in some antioxidants from nonlinear stern-volmer plots [J]. *Journal of Luminescence*, 1995, 63(1-2): 75-84.
- [19] SNEEP M, UBACHS W. Direct measurement of the Rayleigh scattering cross section in various gases [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2005, 92(3): 293-310.
- [20] SUTTON J A, DRISCOLL J F. Rayleigh scattering cross sections of combustion species at 266, 355, and 532 nm for thermometry applications [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(22): 2620-2622.
- [21] CUTLER A D, DANEHY P M, SPRINGER R R, *et al.*. CARS Thermometry in a Supersonic Combustor for CFD Code Validation [R]. AIAA-2002-0743.
- [22] MONTELLO A, NISHIHARA M, RICH J W, *et al.*. Picosecond USED-CARS for Simultaneous Rotational / Translational and Vibrational Temperature Measurement of Nitrogen in a Nonequilibrium Mach 5 Flow [R]. AIAA-2012-0239.
- [23] 颜华,李欣,王善辉. 基于最小二乘法和克里金插值的三维温度场重建[J]. *沈阳工业大学学报*, 2014,36(3): 303-307.
- YAN H, LI X, WANG SH H. Reconstruction of three-dimensional temperature field based on least-square method and Kriging interpolation [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2014,36(3): 303-307. (in Chinese)
- [24] 王兴刚,黄群星,刘冬,等. 对称与非对称碳氢火焰温度场重建实验研究[J]. *能源工程*, 2010(3): 7-11.
- WANG X G, HUANG Q X, LIU D, *et al.*. Experimental study on temperature distribution in axisymmetric and asymmetric laminar flame [J]. *Energy Engineering*, 2010(3): 7-11. (in Chinese)
- [25] 何建东,汪亚明,郑俊褒. 基于自由火焰图像的三维温度场重建方法研究[J]. *工业控制计算机*, 2013,26(3): 75-77.
- HE J D, WANG Y M, ZHENG J B. Reconstruction of three dimensional temperature distribution based on free flames images [J]. *Industrial Control Computer*, 2013,26(3): 75-77. (in Chinese)
- [26] 王东风,刘千. 面向燃烧优化的电站锅炉炉膛参数光谱测量与场重建[J]. *动力工程学报*, 2014, 34(8): 599-605.
- WANG D F, LIU Q. Combustion optimization-oriented spectral measurement and field reconstruction of furnace parameters for power station boilers [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2014, 34(8): 599-605. (in Chinese)

作者简介:



李国华(1985—),男,甘肃武威人,硕士,工程师,2007年、2010年于国防科学技术大学分别获得学士、硕士学位,主要从事燃烧流场激光诊断技术的研究。E-mail:liguohua@nint. ac. cn



胡志云(1969—),男,河南人,博士研究生,高级工程师,1993年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1998年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: ninthzy@163. com