

# 用于超燃诊断的吸收光谱二维诊断技术

李飞 余西龙 曾徽 张少华 顾洪斌 张新宇

(中科院力学所, 高温气体动力学国家重点实验室, 北京海淀区 100190)

**摘要:** 可调谐二极管吸收光谱技术(TDLAS)可同时进行多组分、多参数测量, 其极强的环境适应性使其适于应用在直连式超燃试验台中。然而 TDLAS 是沿光程的积分测量, 为提高其空间分辨能力, 结合层析成像术(CT), 发展了基于 TDLAS 的二维断层成像术(TDLAT)。将 TDLAT 系统用于直连台燃烧室出口, 获得了静温/水蒸气浓度的动态二维分布信息。测量系统采用  $8 \times 8$  路正交光束, 4 个测量波长:  $7185.6\text{cm}^{-1}$ 、 $7444.3\text{cm}^{-1}$ 、 $6807.8\text{cm}^{-1}$  和  $7466.3\text{cm}^{-1}$ , 测量频率 2.5 kHz, 使用模拟退火算法(SA)进行数据重建。反演得到的展向温度和浓度分布, 能够用于分析燃烧展向燃烧区域分布和释热特征, 动态的二维参数分布数据还能用于判断燃烧展向振荡现象, 实验数据对超燃一维分析模型和 CFD 计算也可提供重要参考。

**关键词:** 可调谐二极管吸收光谱技术(TDLAS); 二维断层成像术(TDLAT); 温度分布

## 一、引言

可调谐二极管吸收光谱技术(TDLAS)可同时进行多组分、多参数(温度、浓度、速度)测量, 极强的环境适应性使其适于超燃试验台的应用, 已在准二维燃烧室的实验研究中发挥重要作用<sup>[1-4]</sup>。由于 TDLAS 是沿光程的积分测量, 其低空间分辨能力使其难以在三维燃烧室内应用, 无法获得气流参数的二维截面分布特征, 而这正是研究燃烧组织和释热分布特征的必备数据。如何提高 TDLAS 的空间分辨能力, 已成为该光谱技术研究的前沿问题之一。

TDLAS 结合层析成像术(CT)形成 TDLAT(Tunable Diode Laser Absorption Tomography), 是提高 TDLAS 空间分辨能力的主要途径。然而 TDLAT 的具体实现方式却有多种<sup>[5-11]</sup>, 概况起来可分为: 优化非正交光路+双波长/单波长吸收测量方法; 平行束/扇束+双波长吸收测量; 正交光路+超光谱光源, 亦被称为 HT(Hyperspectroscopy Tomography)方法<sup>[5]</sup>。前两种方法都需要大量的吸收光路(数十至数百), 这一方面增加了测量系统的复杂性, 减弱了其适用性; 另一方面, 多光束方法对于超燃直连台这种中小尺寸的复杂试验台, 存在光路架设空间不足, 壁面窗口奇缺的障碍。而第三种 TDLAS-HT 方法, 不存在上述问题, 是最具超燃应用潜力的 TDLAT 技术。

HT 技术主要是在弗吉尼亚理工大学 Lin Ma 研究小组和威斯康辛大学的 Scott.Sanders 研究小组的共同合作下发展的。他们使用的光源为傅里叶锁模光纤激光器, 该激光器可在数十 kHz 的频率下扫过约 30nm 波长范围。不过该激光器尚处于研发过程中, 价格昂贵, 且稳定性和线性度不如 TDLAS 技术常用的 DFB 激光器。此外, 由于光源的高频和扫描范围限制, 在谱线选择时, 可选谱线的低能级能量分布不够宽泛, 且频率扫描速率、探测器响应、采样频率等硬件参数的匹配问题, 导致该 HT 技术无法获得较优的谱线积分吸收率, 吸收数据的原始信噪比不如传统的 DFB-TDLAS。

基于现有 HT 技术的不足, 本文提出按照 HT 理念, 使用多个 DFB 激光分时耦合产生多(超)光谱光源, 实现 HT 硬件组成。在反演计算中, 仍使用模拟退火算法, 但发展适于少量光束、少量波长的重建程序。在具体实现中, 本文尝试使用  $8 \times 8$  正交光束、4 个优化选择的吸收波长, 构建 TDLAS-HT 系统, 成功应用于超燃直连台, 测得了燃烧室出口截面气流参数二维分布的动态信息。

## 二、TDLAT 系统简介

### 2.1 试验系统

谱线选择对于 HT 是极为重要的, 优化谱线选择能够最大限度的提高系统测量能力。本文使用的四个波长分别为  $7185$ ,  $7444$ ,  $6807$  和  $7466\text{cm}^{-1}$ , 其光谱参数见表 1 所示。之所以选择这四条谱线, 主要是基于两点考虑: 首先是这四条谱线的低能级能量都较高, 因此吸收不易收到空气湿度的影响, 且两两相距大于  $700\text{cm}^{-1}$ , 适于温度测量; 其次是这四条谱线在各自相似低能级能量范围的谱线群组中, 都属于最强吸收线。线强度  $S$  直接影响到吸收测量的信噪比, 对于本文的弱吸收工况是极为重要的。

光谱参数取自 HITRAN2008, 它是最新版本的 HITRAN 数据库, 其光谱参数较为精确。特别是本文主要使用的线强度参数, 精确度很高, 误差小于 2-5%, 且波长 1、2、3 的线强度已经过文献[12]等工作的验证, 因此光谱参数值得信赖。

表 1 本文使用的吸收波长及其光谱参数(取自 HITRAN2008)

波长	频率 $\nu_0$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	线强度 $S(296\text{K})$ ( $\text{atm}^{-1}\text{cm}^{-2}$ )	低能级能量 $E''$ ( $\text{cm}^{-1}$ )
1	7185.597	$1.97 \times 10^{-2}$	1045.058
2	7444.35+	$1.12 \times 10^{-3}$	1774.751
	7444.37		1806.670
3	6807.834	$1.02 \times 10^{-6}$	3319.448
4	7466.337	$1.24 \times 10^{-5}$	2660.945

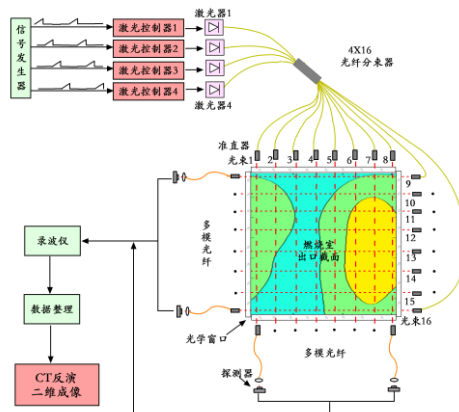


图 1 TDLAS-HT 层析成像术的超燃应用示意图

试验系统的示意图如图 1 所示, 信号发生器产生四路脉冲锯齿波, 锯齿波频率为  $10\text{kHz}$ , 两两相位差  $90^\circ$ , 分别控制四个激光控制器。这样激光器 1, 2, 3, 4 将分时出光, 两两激光不会叠加。这样的 4 个 DFB 系统, 组合而成重复频率为  $2.5\text{kHz}$  的多波

长(本文为4个,可增加)激光器,如此实现了HT方法的多谱光源。

合成光源由4X16光纤分路器分为16路,分别接到16个准直器上,如图1所示。光束1-8与光束9-16垂直,分别穿过燃烧室出口设定截面。光束间距为12mm,准直后光束直径小于1mm。穿过流场的16个光束,由收集器收集到多模光纤内,分别导到16个InGaAs光电探测器,转换为电压信号。所有的电压信号由录波仪存储,经过数据整理后,送入反演运算程序,重建流场的温度和水分压二维分布。

## 2.2 反演运算设计

借鉴W.W.Cai等人<sup>[13]</sup>的HT反演方法,本文也使用模拟退火算法进行重建。关于模拟退火算法的具体表述,可参阅文献<sup>[13]</sup>及其参考文献。重建程序的设计中,首先需构建需优化的目标函数,需从吸收原理分析,式-1为非均匀流场的吸收公式:

$$A_{\lambda_i} = \int_{L_1}^{L_2} S(T(l), \lambda_i) \cdot PX(l) \cdot dl \quad (\text{式-1})$$

A为波长为 $\lambda_i$ 谱线的积分吸收率,S为在沿光程某位置l处,温度为T时候,该谱线的线强度,PX为吸收组分的分压(本文为H<sub>2</sub>O)。

某位置L(对应光束编号),单线(某波长 $\lambda_i$ )的TDLAS吸收测量得到的为积分吸收率A。所有光束、所有波长的A的集合可记为吸收率的分布p。当根据假设分布T(x,y)和PX(x,y)计算得到的pc,与测量得到pm的相差最小时,理论上可将该假设分布认为是真实分布。因此,上述相差即为理想化的目标优化函数,由式-2中的DA表示:

$$DA(T, PX) = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (p_m(L_j, \lambda_i) - p_c(L_j, \lambda_i))^2 \quad (\text{式-2})$$

式中i和j分别为波长和光束的序号。

在实际运作中,需加入平滑度这一参数作为先验条件,以改善(式-2)这一病态问题的求解,平滑度常定义为:

$$R_T(T) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left( \frac{9}{8} T_{m,n} - \frac{1}{8} \sum_{k_1=m-1}^{m+1} \sum_{k_2=n-1}^{n+1} T_{k_1,k_2} \right)^2 \quad (\text{式-3a})$$

$$R_{PX}(PX) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left( \frac{9}{8} PX_{m,n} - \frac{1}{8} \sum_{k_1=m-1}^{m+1} \sum_{k_2=n-1}^{n+1} PX_{k_1,k_2} \right)^2 \quad (\text{式-3b})$$

于是待优化的目标函数可表述为(式-4):

$$F(T, PX) = DA(T, X) + \gamma_T R_T(T) + \gamma_{PX} R_{PX}(PX) \quad (\text{式-4})$$

式中, $\gamma_T$ 为温度平滑系数, $\gamma_{PX}$ 为分压平滑系数。

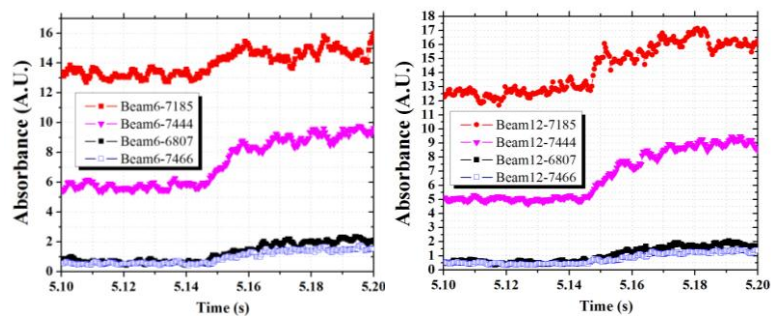
## 三、试验结果

以超燃应用为目的的TDLAS断层技术(TDLAS-HT),在设计、建设、验证完成后<sup>[14]</sup>,需要将其应用与超燃直连台中,证明其可行性,为超燃研究提供燃烧室二维参数分布信息。值得强调的是,超燃直连台的TDLAS-HT原始信号信噪比可与平面炉试验<sup>[14]</sup>中相当,因此,重建精度和空间分辨率与验证试验也相当。

该TDLAS-HT系统已在高超推进课题组的超燃直连台上进行了二十余次试验,获得了大量的数据。主要包括:(1)加热器稳态工作;(2)多路H<sub>2</sub>燃料点燃;(3)多路C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>燃料点火;(4)所有燃料稳定燃烧;(5)燃烧室熄火;(6)加热器关车前后;等特征时刻在不同工况下(供油方式),燃烧室出口静温、H<sub>2</sub>O浓度分布。上述结果可为燃烧室参数优

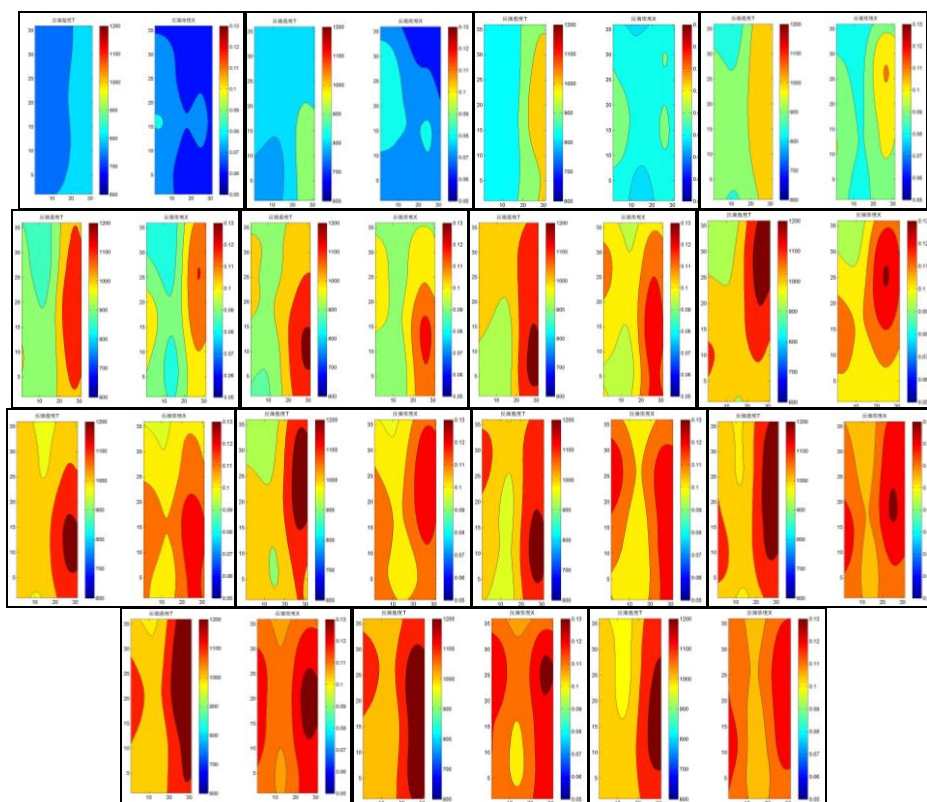
化提供重要依据。

为展示 TDLAS-HT 的超燃实验重建效果,以一组引导  $H_2$  点火过程的实验结果为例。图 2 为该工况下(燃烧室入口  $Ma3.0$ ), 两路(6 和 12)光路的吸收率原始结果。横坐标为时间(单位 s), 这是超燃试验台的标准时刻。 $H_2$  燃料阀门在 5.0s 时刻开启, 5.14s 燃烧开始, 5.20s 燃烧基本稳定。由图可见, 测量信噪比较好, 使用 16 个光路中所有 4 个波长的吸收率信息, 放入反演程序, 即可获得静温和水蒸气分布。



(a)光束 6 (b)光束 12

图 2 4 波长吸收率的时间变化曲线



共 15 幅图片, 对应不同时刻的静温和  $H_2O$  浓度分布, 从左至右, 从上至下的图片分别对应  $t=0, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44, 48, 52, 56ms$ , 其中  $t=0ms$  为“零”时刻, 对应图 2 中的  $time=5.14s$ (试验台时刻)

图 3  $H_2$  点火的断层测量显示(0.4ms 测量周期, 4ms 显示周期)

图 3 展示了  $H_2$  点火过程的重建结果。数据重建是逐帧进行，两帧间隔即为测量周期-0.4ms，图片数目过多，图 3 每 10 帧选择一张显示，两图间隔 4ms，主要是为了显示  $H_2$  点火过程的参数变化趋势。图中的左图为静温  $T$  分布，右图为  $H_2O$  分布。可见，从  $t=0ms$ (即图 2 中的 5.14s)至  $t=56ms$ (即图 2 中的 5.196s)，燃烧室出口截面的静温和水蒸气浓度变化明显。燃烧从一个角落开始( $t=4ms$ )，并蔓延到整个上壁面(分布图形的右边界)附近( $t=8ms$ )，此时刻下壁面附近的喷注  $H_2$  燃料也已点火。随时间发展，上下壁面附近燃烧逐渐增强，影响范围也都不断扩大( $t=8\sim t=52ms$ )。

从图中也能看出，燃烧核心区也在不断移动，这反映了燃烧室内展向方向的燃料和燃烧脉动，2.5kHz 的测量频率能够获得大尺度脉动信息，但无法展现微小尺度脉动。即便如此，TDLAS-HT 信息量已经非常丰富：(1)静温的截面分布能够显示燃烧影响范围，为优化燃料喷注压力提高定量信息；(2)截面静温和水蒸气浓度的平均值能够评估整体燃烧效率；(3)大尺度脉动能够评估燃烧稳定性。

## 四、总结

利用 4 个 DFB 激光器的分时控制，实现了多/超光谱产生，并基于此光源，构建正交束 TDLAS-HT 系统。成功应用于超燃直连台，获得燃烧室出口截面静温和水蒸气分压的二维动态分布。

该 TDLAS-HT 系统具有极强的适应能力，适于在超燃直连台上开展应用研究。并已获得了不同工况，不同时刻的气流静温和浓度信息。该系统的测量频率为 2.5kHz，使用光路总数 16，波长 4 个。该技术对于超燃基础研究具有重要意义，因为气流参数的展向分布此前无法获得，大量的截面量化静温和浓度，能为超燃的燃烧室设计和性能评估提供关键数据。同时，该方法的应用，能为 CFD 计算提供验证数据，也能为超声速燃烧机理研究，开辟新的试验道路。

## 参 考 文 献

- 1 Hanson RK, Applications of quantitative laser sensors to kinetics, propulsion and practical energy systems, Proc. Combust. Inst.,33:1-40,2011.
- 2 Griffiths AD and Houwing AFP. Diode laser absorption spectroscopy of water vapour in a scramjet combustor. Applied Optics, 44:6653-6659, 2005.
- 3 Liu X, Jeffries JB, Hanson RK, et al. Development of a tunable diode laser sensor for measurements of gas turbine exhaust temperature. Applied. Physics. B, 82:469-478, 2006.
- 4 Li F, Yu XL, Gu HB, et al. Simultaneous measurements of multiple flow parameters for scramjet characterization using tunable diode-laser sensors, Applied Optics. 50(36): 6697-6707, 2011.
- 5 Ma L, Cai WW, Caswell AW. Tomographic imaging of temperature and chemical species based on hyperspectral absorption spectroscopy. Optics Express, 17:8602-8613, 2009.
- 6 Carey SJ, McCann H, Winterbone DE, et al. Near infra-red absorption tomography for measurement of chemical species distribution. 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Buxton, Greater Manchester, April 14-17, 1999.
- 7 Tornaiainen ED, Gouldin FC, Hinz AK. Tomographic analysis of unsteady, reacting flows: numerical investigation. AIAA Journal, 36(7):1270-1278, 1998.

- 8 Bryner E and Diskin GS. Development of an infrared laser absorption tomography system for a scramjet combustor. AIAA 2006-3445.
- 9 Chad L, Tam CJ, Davis D, et al. Diode laser absorption tomography of 2D supersonic flow, AIAA 2007-5014.
- 10 李飞, 余西龙, 林鑫, 等. 基于 TDLAS 的层析成像技术 TDLAT, 力学学报, 已接收, 2013, (in Chinese).
- 11 李飞, 余西龙, 林鑫, 等. 基于 TDLAS 的层析成像技术, 第五届全国高超声速科技会议论文, 2012 年 11 月, 广西桂林, CSTAM 2012-B03-0300(in Chinese)
- 12 Liu X, Jeffries JB and Hanson RK. Measurements of spectral parameters of water-vapour transitions near 1388 and 1345 nm for accurate simulation of high-pressure absorption spectra. Meas. Sci. Technol., 18:1185 - 1194, 2007.
- 13 Cai WW, Ewing DJ, and Ma L. Application of simulated annealing for multispectral tomography. Computer Physics Communications. 179(4):250-255, 2008.
- 14 李飞, 曾徽, 余西龙, 等. 基于 TDLAS 的超光谱层析成像技术 HT, 第六届全国高超声速科技会议论文, 2013 年 12 月, 云南腾冲, CSTAM 2013-A50-E0036(in Chinese)