

# 基于 TDLAS 的层析成像技术 TDLAT<sup>1)</sup>

李飞\*, 余西龙<sup>\*,2)</sup>, 林鑫<sup>\*,+</sup>, 张少华\*, 张新宇\*

\* (中国科学院力学研究所, 高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190)

+ (北京理工大学, 光电学院, 北京 100081)

**摘要:** 可调谐二极管吸收光谱技术(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)已成为超声速燃烧的重要测量手段之一。为提高其空间分辨能力, 需发展基于 TDLAS, 结合层析成像术(CT)的二维断层成像术(Tunable Diode Laser Absorption Tomography, TDLAT)。本文设计了一套基于 6 平行光束-旋转测量的新型 TDLAT 系统, 吸收波长为  $7185.6 \text{ cm}^{-1}$  和  $7444.3 \text{ cm}^{-1}$  双线, 采用分时-直接吸收探测策略。重建中, 使用代数重建算法(ART), 先分别反演计算两吸收线的吸收率和吸收比分布, 再获得温度和浓度分布。利用该系统, 在  $\text{CH}_4/\text{Air}$  预混平面燃烧炉上开展初步验证试验。结果表明, TDLAT 系统可以反演出温度和浓度分布特征, 反演的温度分布结果与热电偶测量值吻合较好。进一步改进该系统, 可用于超燃直连台中, 测量燃烧室出口气流的温度和组分浓度分布。

**关键词:** TDLAS, TDLAT, 温度分布, 层析成像

**中图分类号:** V231.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.6052/11-2062/CJ.2013.05.012

## 引 言

可调谐二极管吸收光谱技术(TDLAS), 可以同时进行多组分、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 是沿光程积分测量, 其低空间分辨能力使其难以应用于三维燃烧室, 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诊断的必备数据。为了提高吸收测量的空间分辨能力, 国际上出现了结合计算层析术(CT)和 TDLAS 技术的 TDLAT(Tunable Diode Laser Absorption Tomography)技术<sup>[5-9]</sup>。

目前的 TDLAT 技术可粗略分为三类, 第一类为正交光路+超光谱光源, 亦被称为 HT(Hyperspectroscopy Tomography)技术, 该方法设计新颖、试验系统较为简单、具有极高的时间分辨率, 但其空间分辨率稍低, 超谱光源成本较高, 反演过程对算法的要求较高。总体说来该方法尚处于发展中, 这部分工作以弗吉尼亚理工大学 Lin Ma 研究小组为代表<sup>[5]</sup>; 第二类为优化非正交光路+双波长/单波长吸收方案<sup>[6]</sup>, 该技术接近于新型医学 CT 技术, 有较长发展历史, 且反演算法多样。其缺点是实验系统复杂, 使用起来较困难, 这部分工作以

康奈尔大学 Frederick Gouldin 研究小组为代表<sup>[7]</sup>; 第三类为平行束/扇束+双波长吸收测量, 它是 TDLAS 与早期医学 CT 技术的结合, 试验系统较为简单, 空间分辨率高, 但时间分辨率很低。这部分工作以弗吉尼亚大学 James McDaniel 研究小组为代表<sup>[8]</sup>, 他们的 TDLAT 系统已初步应用于美国空军实验室的双模态超燃模型发动机中, 但具体的温度重建能力和试验台的反演结果尚未见报道。

总的来说, TDLAT 技术仍处于技术发展阶段, 特别是针对超燃应用, 需要从 TDLAT 系统设计入手, 选择和优化实验方案及反演算法。本文为 TDLAT 技术的初步探索, 以 6 平行光路+旋转测量为实验方案, 代数迭代(ART)算法为反演算法, 建设 TDLAT 系统, 并在平面炉上开展验证性实验, 评估温度重建精度。该工作将为用于超燃的吸收层析术奠定基础。

## 1 TDLAT 系统简介

### 1.1 试验系统

正如引言所述, TDLAT 有多种设计方法, 如平行束+旋转测量方案、扇束+旋转测量方案、正交束+多波长方案、非正交+非旋转优化设计方案等。在这些系统设计中, 若综合考虑成本和难易程度, 平

2013-03-11 收到第 1 稿, 2013-04-03 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金(11002148, 90816015) 资助项目

2) E-mail: xlyu@imech.ac.cn

行束+旋转测量方案是最佳选择。而且它可在单组试验中得到足够多的数据，可用于验证不同方程数的重建精度，这对于 TDLAT 的初步探索非常重要。基于这些考虑，本文以平行束+旋转测量为设计方案，构建了一套 TDLAT 系统，图 1 为该系统的平面炉应用示意图。

吸收测量方案为双波长 (7185.6cm<sup>-1</sup>、7444.3cm<sup>-1</sup>)、4kHz-分时直接探测<sup>[4]</sup>。如图 1 所示，单模光纤耦合两激光后由分束器分成 6 个光路，6 个准直器准直激光，在距平面炉上方 6 mm 高度的水平平面内，形成间隔 12 mm 的 6 个平行光束。光束由 6 个接收器接收并由多模光纤引到 6 个 InGaAs 探测器分别进行测量，最后由数字示波器同时记录所有电压信号。

试验中，所有的准直器和接收器固定于一个电动旋转台上，旋转台匀速旋转某一设定角度(大于 180°)，带动 6 个测量光路扫过整个待测截面，这一过程称为一个测量周期，在本次试验中约为 3 秒。激光控制器、电动旋转台和数字示波器均由同一信号源触发，于是在数据处理中，每一光路的吸收率随时间的变化曲线可以转换为随旋转角度的变化曲线。经整理后的大量吸收率数据形成反演方程组，用于温度和浓度场的二维重建运算。

## 1.2 反演算法

ART(Algebraic Reconstruction Technique)是一种有代表性的代数迭代算法。相对于滤波反投影方法，它运算效率低，但对于噪声数据的反演精度要高<sup>[10]</sup>。在实际操作中，ART 算法在迭代开始之前一般先设置一个初始值，再以行为操作对象进行逐步迭代。其具体单步迭代公式为：

$$A_j^{(i,t)} = A_j^{(i,t-1)} + w_{i,j} \frac{P_i - \sum_{k=1}^N w_{i,k} A_k^{(i,t-1)}}{\sum_{k=1}^N w_{i,k}^2} \quad (\text{式-1})$$

式中， $A$  为单元格的吸收率， $P$  为投影(每个光路对应的总吸收率)， $A_j^{(i,t)}$  为在第  $t$  轮迭代中，对方程组的第  $i$  行(某光路)进行迭代所得到的第  $j$  个像素值(吸收率)。 $w_{i,j}$  为系数矩阵的第  $i$  行，第  $j$  列。

针对本研究的平行束旋转测量方案，光束数目和旋转角度数目的增加能够有效的提高 ART 重建精度<sup>[11]</sup>。然而由于硬件条件所限，平行光束数目难以大幅增加，仅能适当增加旋转角度数目。本文的反演运算中，平行光束数为 6，旋转角度数为 90。

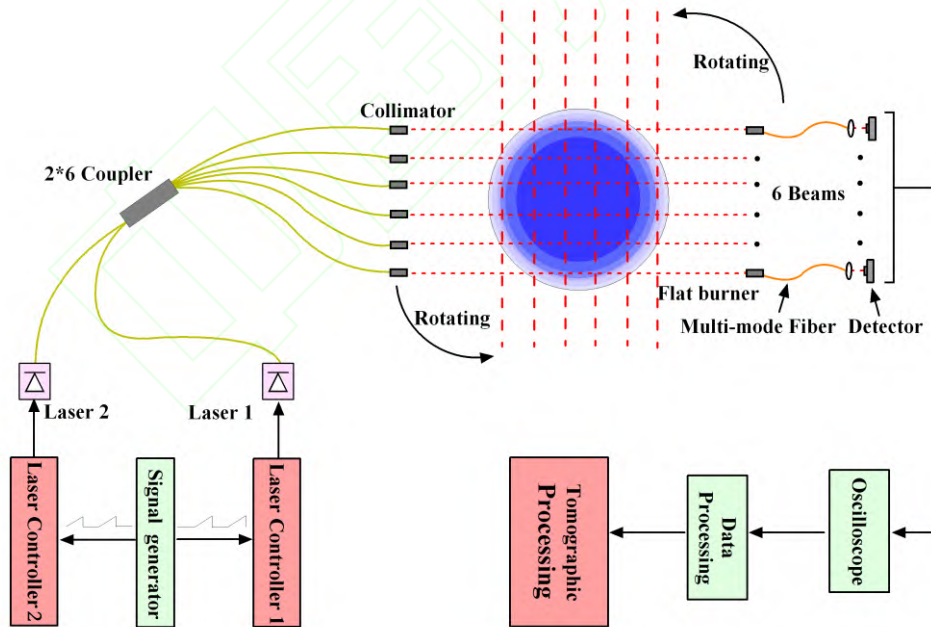


图 1 TDLAT 平面炉验证试验示意图

Fig.1 Schematic of TDLAT system for CH<sub>4</sub>/Air flat burner

## 2 数据处理

### 2.1 数据处理方法

试验中，探测器得到的是光强对应的电压信号。在线积分 TDLAS 的数据处理中，利用该电信号可

以提取双线的积分吸收率,进而获得吸收比、温度和水蒸气分压<sup>[4]</sup>。在 TDLAT 中,用来重建温度和浓度的数据也是吸收率,但它既可以是积分吸收率,也可以是峰值最大吸收率。

1) 利用积分吸收率:当信噪比一般时,需要利用 Voigt 线型进行拟合后,再求和获得积分吸收率,这与 TDLAS 的数据处理方法相同。然而由于气流参数的沿光程不均匀性,吸收线型会出现扭曲<sup>[12]</sup>,这种拟合积分的方法会带来一定误差;若信噪比足够高时,可对基线拟合后的吸收线型进行直接求和,获得积分吸收率。

2) 利用峰值吸收率:利用峰值最大吸收率列出吸收方程时,需以温度和浓度为反演变量。吸收方程组为病态、非线性方程组,需利用模拟退火等算法进行重建<sup>[13]</sup>,且每次迭代均需计算吸收线型。更为重要的是,重建精度严重受制于吸收线型的计算精度,而由于燃烧尾气中 CO<sub>2</sub>、CO、CH<sub>4</sub> 等组分对特定 H<sub>2</sub>O 谱线的加宽常数未知,因此这种方法需要大量的标定试验。

在本文的平面炉验证试验中,谱线的峰值吸收率小于 10%,信噪比一般,因此仍使用 Voigt 线型拟合的方法获得积分吸收率<sup>[4]</sup>。

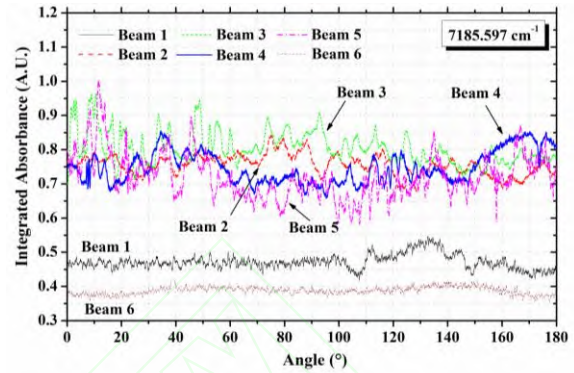
数据处理的基本过程为:(1)利用编写的 Matlab 数据处理程序,对每个波长扫描周期(250 us)内的 7185 和 7444 双线,分别进行基线拟合,Voigt 线型拟合,计算积分吸收率;(2)获得 6 个光路的双线积分吸收率随时间变化曲线;(3)利用电动旋转台反馈回来的时间/空间(角度)信息,获得双线积分吸收率随旋转角度的变化曲线;(4)划分网格(高温区网格范围 60×60 mm,高温区网格数 10×10,外延环境网格 2×2,参与反演的总网格数 12×12),利用吸收率-角度曲线,列出吸收方程组;(5)利用 ART 算法分别重建 7185 和 7444 的吸收率分布;(6)计算每个网格的吸收比;(7)计算每个网格的温度和水蒸气分压。

## 2.2 积分吸收率结果

平面炉试验中,TDLAT 光路的旋转中心与平面炉的中心并非重合,两者有约 2cm 的距离。因此,光束与高温燃气的重合区域(有效吸收长度)会随旋转角度改变,从而导致积分吸收率随着角度变化。

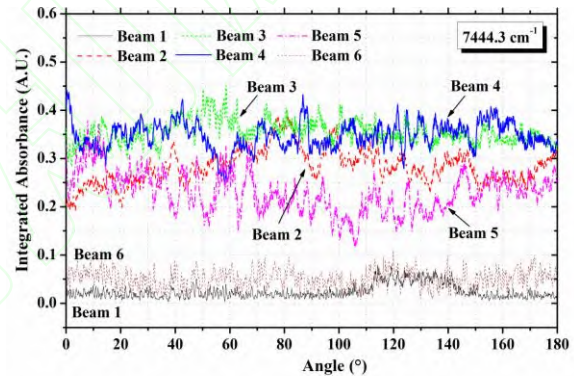
图 2 为 6 个光束的双线积分吸收率随旋转角度的变化曲线,(a)图对应 7185.6 cm<sup>-1</sup> 谱线,(b)图对应 7444.3 cm<sup>-1</sup> 谱线。光束 1 和 6 距离炉面中心最远,仅穿越少量的含水燃气区域(见图 1),因此两线的吸

收率明显较低。光束 3 和 4 的高温区域吸收长度最长,因此其 7444 线的积分吸收率也最大(见图 2(b))。相较于光束 3 和 4,光束 2 和 5 穿过的炉面高温区较少,但它们穿过的低温区相对较大,且 7185 线为低温吸收线,因此这两光束的 7185 线吸收率并未明显弱于光束 3 和 4(见图 2(a))。



(a) 7185.6 cm<sup>-1</sup> 吸收线

(a) 7185.6 cm<sup>-1</sup> absorption line



(b) 7444.3 cm<sup>-1</sup> 吸收线

(a) 7444.3 cm<sup>-1</sup> absorption line

图 2 积分吸收率随旋转角度的变化图

Fig.2 Integrated absorbance versus angle

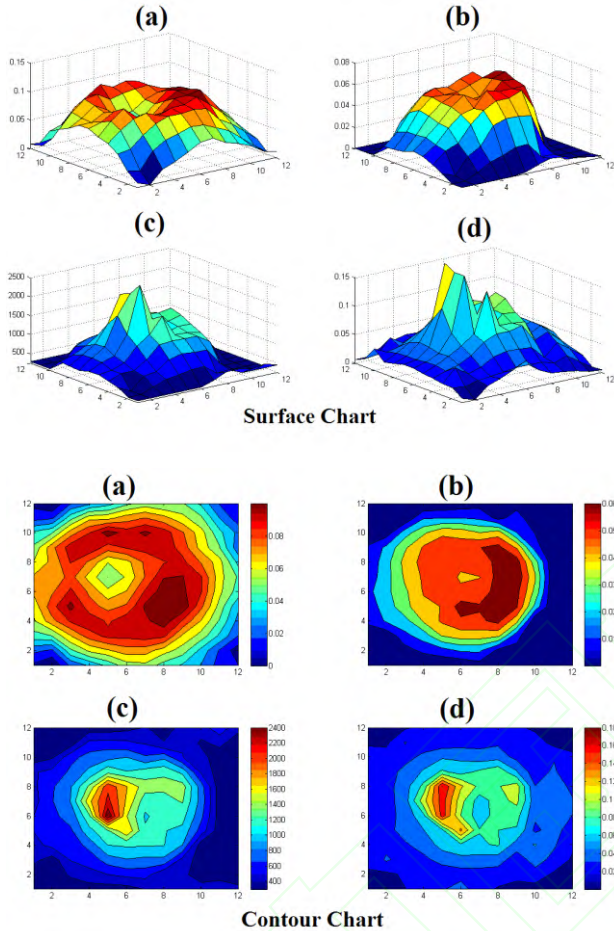
值得注意的是,在部分旋转角度下,光束刚好切向穿过高温区的边缘,此处的温度和水蒸气浓度在网格内(6 mm)剧烈变化,从而引起较大的吸收率脉动,如图 2(a)中光束 5。而图 2(b)中的光束 6 脉动,则是由于吸收率太小(小于 1%),信噪比过低引起的较大拟合误差。

## 3 重建结果

平面炉反演结果如图 3 所示,图中用曲面图和云图两种绘图方式展示了重建后的(a)7185 线的吸收率分布、(b) 7444 线吸收率分布、(c)温度分布和(d)水蒸气分压分布。

由图 3(a)和(b)可见,两线的吸收率均在网格中

部较大，而在边缘处较小，这正反映了炉面的圆形火焰区。在网格边缘处，7444 线的吸收率已接近于零值，而 7185 线的吸收率仍较大，这是由于后者在室温空气中的吸收所致。在网格中心位置，两条吸收线均有局部低吸收率区，这对应着炉面中心的局部极高温区域。

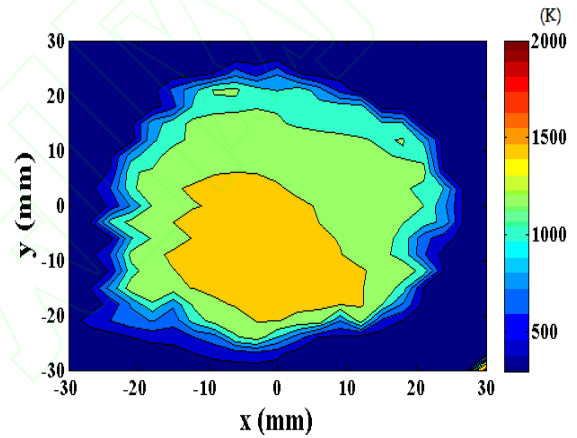


(a)7185 线吸收率重建; (b)7444 线吸收率重建;  
 (c)温度场重建;(d)水蒸气分压重建  
 (a)Absorbance of 7185 line;(b) Absorbance of 7444 line;(c)Temperature;(d)Water partial pressure  
 图3 平面炉-TDLAT 的反演效果

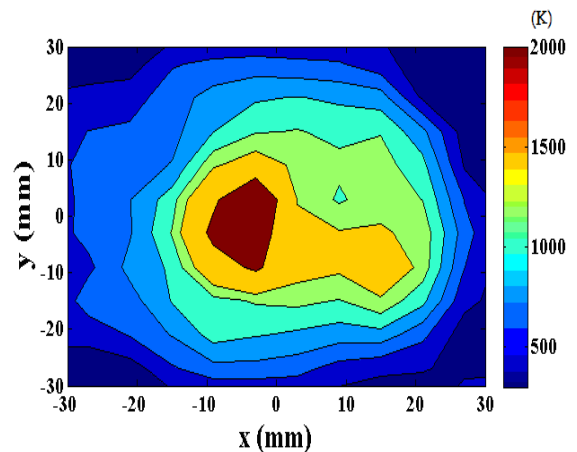
Fig.3 Reconstruction results of flat burner exp.

由图 3(c)和(d)可见，温度场与浓度场(水分压)都反映了炉火的圆形结构，且炉中心的温度高于边缘。但在温度和浓度结果中，中心偏左的位置均出现了局部极大值：温度极大值大于 2200 K，水蒸气分压的极大值超过 0.2 atm。该极大值与物理可能值不符，应为投影值测量噪声引起的局部极值。它出现的主要原因是本文所用的双线的低能级能量不够高，在极高温下的吸收率过低，于是在高温条件下，较小的反演误差可能会引起较大的温度和浓度重建误差，详细的重建误差分析可见下一小节。

吸收率和浓度的重建难以验证，而温度重建精度可用热电偶测温进行评估。在试验中，在与 TDLAT 相同的测量截面上，利用 B 型热电偶结合电动位移机构，逐点测量火焰温度，最终获得炉面上方的火焰二维分布情况。图 4 为温度重建与热电偶结果的对比图。图 4(a)为热电偶结果，炉面温度分布的主要特征为近似圆形分布，且左下方有局部高温区。图 4(b)为 TDLAT 的重建温度分布，对比热电偶结果，TDLAT 能够获得炉温的主要特征：可以反映火焰为近似圆形分布，并且能够捕获局部高温区的位置。重建与热电偶结果的最主要不同是，在火焰边缘处，实际的温度变化梯度要远大于重建结果。这是由于平行光路有限(6 路)，反演网格间距较大(6 mm)所致，网格密度无法反映炉面高低温间的大梯度区。



(a)热电偶测温  
 (a)temperature distribution measured by thermocouple



(b)TDLAT 重建温度分布  
 (b)Reconstructed temperature distribution

图4 温度重建与热电偶测温的对比云图  
 Fig.4 Comparison of reconstructed and measured temperature

## 4 初步误差评估

为定量评估温度的重建效果,提取图 4(a)和(b)中沿  $x=0$  mm 的温度分布可绘制为图 5。如图 5 所示,在核心流的大部分区域,重建温度和热电偶测量温度相差很小,但在高温区的边缘处,两者差距较大。

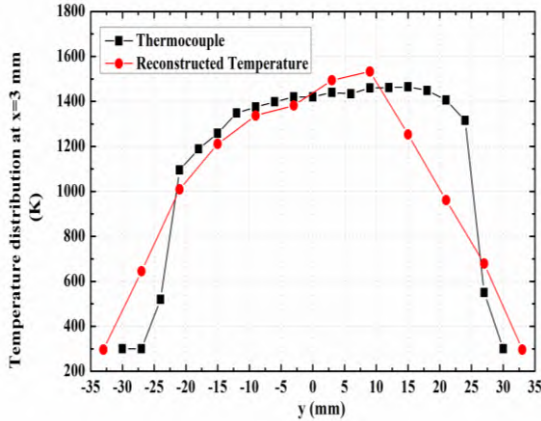


图 5 沿着  $x=0$ mm 的温度重建与热电偶测温的对比  
Fig.5 Comparison of reconstructed and measured temperature at  $x=0$  mm

本文的 TDLAT 系统使用 ART 反演算法,它是在分别求解两条吸收线的吸收率  $A$  之后,再求解每个网格上双线的积分吸收比。于是可进行粗略的误差评估,若吸收率存在 5% 的测量误差,可引起最大 10.5% 的吸收比误差。在 1500K 温度下,该误差最大可带来 16% 的温度测量误差。因此,在 TDLAT 应用中,吸收率的测量误差决定着其最终的温度重建精度。

利用图 4,可以对温度重建结果进行初步的整体误差评估。定义相对误差  $e_r$  为:

$$e_r = \frac{(T_r - T_m)}{T_m} \times 100\% \quad (\text{式-2})$$

式中,  $T_r$  为重建温度,  $T_m$  为热电偶测量温度。

对每一个网格进行相对误差运算,可得到相对误差的分布云图,见图 6。如图所示,相对误差分布特征是,低温区的相对误差很大,最大值大于 150%,而高温区内的相对误差很小,多为 10-20%。因此高温区的反演精度远高于四周的低温区。这是由于低温区的水蒸气含量很小(约 1%),两谱线的吸收率都很低,因此原始数据处理中引入的吸收率测量误差要远大于高温区。对图 6 进行处理分析可知,核心区域(高温区)的平均反演精度约为 17%,此值

可视为该初步 TDLAT 系统的温度重建精度。

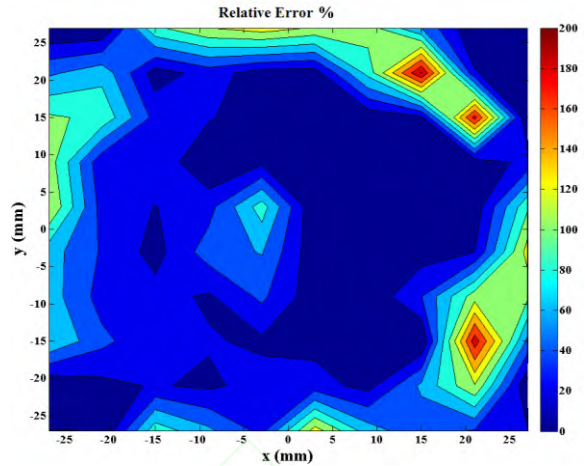


图 6 温度重建相对误差云图  
Fig.6 Relative-error distribution of temperature reconstruction

## 5 结论及讨论

本文对 TDLAT 技术开展试验研究,首先设计建设一套基于 6 平行光束+旋转测量的 TDLAT 系统,用代数迭代算法 ART 实现对二维温度和浓度分布重建。利用该系统在  $\text{CH}_4/\text{Air}$  平面火焰炉上进行初步试验验证,获得了炉面上方  $60 \times 60$  mm 空间范围内的温度和水蒸气浓度分布。反演结果能够反映炉面温度的主要特征,可以区分高温与低温区,并且能够分辨局部极高温区域。与热电偶测温的对比分析显示, TDLAT 的温度重建精度约为 17%。

理论上讲,通过多光路 TDLAS 测量和某一合适的反演算法,均可实现对温度和浓度分布的二维重建。然而从国际上已发表的 TDLAT 的工作来看,研究多集中于理论分析和算法选择上。在实验研究中,尚有还有很多难题需要处理,比如信噪比、吸收率误差、定位误差、先决条件的使用等等。只有克服这些问题,并根据实际情况设计不同的 TDLAT 系统,选择、优化反演算法,才能使之满足复杂试验台的应用需求。本文仅是开启 TDLAT 超燃应用的初步工作,在方案设计、算法选择、数据处理、反演运算和精度评估等多个方面都还需要更为深入细致的研究,我们将在下一步中逐步开展。

### 参考文献

1. Hanson RK, Applications of quantitative laser sensors to kinetics, propulsion and practical energy systems, Proc. Combust. Inst. 2011,33:1-40
2. Griffiths AD and Houwing AFP. Diode laser absorption spectroscopy of water vapour in a scramjet combustor. Applied Optics.2005,44:6653-6659

- 
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*, 2006, 82: 469 - 478
  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*. 2011. 50(36): 6697-6707.
  5. Ma L, Cai WW, Caswell AW. Tomographic imaging of temperature and chemical species based on hyperspectral absorption spectroscopy. *Optics Express*, 2009, 17: 8602-8613.
  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*, 1998, 36(7): 1270-1278.
  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. Gordon R, Bender R, and Herman GT. Algebraic Reconstruction Techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy and X-ray photography. *Journal of Theoretical Biology*. 1970, 29(3): 471-481.
  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. Li F, Yu XL, Cai WW, et al. Uncertainty in velocity measurement based on diode-laser absorption in non-uniform flows. *Applied Optics*, 2012, 51(20): 4788-4797.
  13. Cai WW, Ewing DJ, and Ma L. Application of simulated annealing for multispectral tomography. *Computer Physics Communications*. 2008. 179(4): 250-255

## PARALLEL-BEAM TOMOGRAPHY BASED ON TDLAS<sup>1)</sup>

Li Fei<sup>\*</sup>, Yu Xilong<sup>\*,2)</sup>, Lin Xin<sup>\*,+</sup>, Zhang Shaohua<sup>\*</sup>, Zhang Xinyu<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> (State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, CAS, 100190 Beijing, China)

<sup>+</sup> (School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, 10081 Beijing, China)

**Abstract:** Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) has been one of the most powerful techniques for combustion diagnostics in high speed flow. In order to improve its spatial resolution, a new method called TDLAT (Tunable Diode Laser Absorption Tomography) has been developed combining with Computed Tomography (CT). This study reports a TDLAT system composed of six parallel beams and a motorized rotation stage. Two water vapor absorption lines,  $7185.6\text{ cm}^{-1}$  and  $7444.3\text{ cm}^{-1}$ , were utilized in each beam. Temperature and concentration distribution can be deduced after the reconstruction of absorbance of the line-pair using Algebraic Reconstruction Technique (ART). A verification experiment was performed using a premixed  $\text{CH}_4/\text{Air}$  flat burner. Comparing with thermocouple measurement, the good temperature reconstruction indicates that this TDLAT can capture the primary characteristic of this flame. More researches about TDLAT are undergoing. The future improved TDLAT system will be used to measure the temperature and concentration distribution in a scramjet facility.

**Key words:** Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS), Tunable Diode Laser Absorption Tomography (TDLAT), temperature distribution, tomography