

# 基于激光吸收光谱技术的火焰温度二维检测研究\*

杨 涛, 李志扬, 倪红军

(南通大学 机械工程学院, 江苏南通 226019)

**摘 要:** 为了实现燃烧场温度的高精度测量, 将可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS)与计算层析技术(CT)进行结合建立了TDLAT温度测量系统。选用中心波长为1 388 nm和1 343 nm的DFB激光器, 在10 kHz的扫描频率下利用32光路CT测量单元对三喷口燃烧器的甲烷预混火焰进行吸光度测量, 并对激光吸收结果进行了二维重建。结果表明:  $\Phi 10$ 与 $\Phi 8$ 喷口中心温度基本一致, 温度最高超过1 700 K,  $\Phi 6$ 喷口中心温度相对较低, 约为1 500 K, 且火焰面积较小。将重建结果与热电偶结果对比显示, 两者温度分布基本吻合, 验证了TDLAT技术应用于火焰温度二维测温的可行性与准确性。

**关键词:** 计算机断层扫描; 可调谐半导体激光吸收光谱; 温度; 二维检测

**中图分类号:** TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2021)01-0022-05

## Research on 2D Measurement of Flame Temperature Based on TDLAS Technology

YANG Tao, LI Zhiyang, NI Hongjun

(School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong Jiangsu 226019, CHN)

**Abstract:** In order to achieve high-precision measurement of combustion field temperature, the TDLAT temperature measurement system was established by combining tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) and computed tomography (CT). Using DFB lasers with center wavelengths of 1 388 nm and 1 343 nm, under the scanning frequency of 10 kHz, the 64-path CT measurement unit was used to measure the absorbance of the methane premixed flame of the three-jet burner, and the laser absorption results were reconstructed in 2D. The results show that: the temperature of  $\Phi 10$  and  $\Phi 8$  jet was basically the same. The maximum temperature could exceed 1 700 K. The temperature of the  $\Phi 6$  jet center was relatively low, about 1 500 K, and the flame area was small. Comparing the reconstruction results with the thermocouple results, the temperature distribution of the two was basically the same, and the TDLAT technology had higher accuracy and resolution. The feasibility and accuracy of TDLAT technology applied to flame temperature 2D temperature measurement was thus verified.

收稿日期: 2020-09-21

\* 基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD), 江苏省重点研发计划(产业前瞻与共性关键技术)项目(BE2018093), 南通市应用研究计划项目(JC2019060)

作者简介: 杨 涛(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光检测方面的研究; (E-mail: 15851307271@163.com)

李志扬(1965—), 男, 教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事机械加工及装备制造研究;

倪红军(1965—), 男, 教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事新能源材料及装备研究。

**Key words:** computed tomography; tunable semiconductor laser spectrum; temperature; 2D-measurement

## 引言

燃烧场的温度测量一直是燃烧诊断中的重要组成部分,对燃烧场进行高精度的温度测量有助于了解燃烧场的信息,提高内燃机、发动机等设备的工作效率,从而减少燃料消耗实现节能减排<sup>[1]</sup>。目前热电偶等传统的接触式测量方式不仅存在精度低、响应速度慢等问题,而且接触燃烧场会对燃烧场产生一定的影响,无法获得设备最接近工作状态下的燃烧场。上世纪80年代,美国科学家Hinkly和Reid等首次提出了可调谐激光吸收光谱技术并将其应用于气体化学反应的成分检测中<sup>[2]</sup>。可调谐半导体激光光谱(TDLAS)作为一种新型的非接触式测量技术,具有灵敏度高、测量精确、抗干扰性强以及响应速度极快等优点,逐渐应用于气体检测<sup>[3]</sup>以及燃烧器、内燃机和发动机等的燃烧诊断当中<sup>[4-6]</sup>。然而传统的TDLAS技术是一种视线测量技术,只能获得一维路径积分,视线上的平均气体温度与组分浓度,无法真实反映燃烧场各区域准确的二维分布情况<sup>[7-8]</sup>。针对传统TDLAS技术的不足,研究人员展开了大量的研究。Emmerman等<sup>[9]</sup>最早通过将TDLAS技术与计算机层析成像技术结合起来开发了TDLAT技术,并对甲烷浓度的二维分布进行了测量。此后TDLAT技术不断发展,可以通过CT算法从吸光度重建出火焰温度、组分浓度等火焰流场参数的空间分布<sup>[10]</sup>。林鑫等<sup>[11]</sup>对旋流火焰燃烧温度场进行了二维吸收光谱诊断,采用13×13路正交光路分布(空间分辨率7 mm)实现了旋流燃烧器不同高度燃烧截面二维温度场的动态分布测量。Kasyutich等<sup>[12]</sup>搭建了可调谐激光吸收层析成像传感器系统,利用55光路激光对待测区域进行了吸收光谱测量并重建了温度场分布,重建结果与热电偶温度验证基本一致。Liu等<sup>[13]</sup>利用波长为7 185.597 cm<sup>-1</sup>和7 446.36 cm<sup>-1</sup>的激光对甲烷火焰进行测量得到了甲烷火焰温度分布与H<sub>2</sub>O浓度场。

但将CT技术与TDLAS技术结合起来的二维温度分布检测研究目前仍存在图像分辨率较低、吸收光谱重建精度不足等问题。针对目前研究中的不足,基于激光吸收光谱技术采用直接吸收法进行双谱线测温,设计了非全正交式的32光路激光系

统,对甲烷火焰燃烧场进行了多角度的吸收光谱扫描测量。通过迭代算法对火焰截面的二维温度分布进行了重建,获得了高分辨率、高精度的燃烧场温度分布图像。

## 1 基本原理

### 1.1 TDLAS基本原理

TDLAS技术的基本定理为Beer-Lambert定律。图1所示Beer-Lambert定律为当激光透过吸收介质时,由于中间介质对特定波长激光的吸收,透射光的强度会降低,而透射光的强度与中间介质的温度、浓度有关。

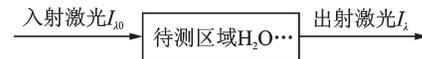


图1 Beer-Lambert定律

Fig.1 Beer-Lambert law

通过比较透射前后激光的强度计算出介质对于激光的吸光度,从而计算出中间介质的温度浓度信息。光路上的吸光度由公式(1)表示:

$$I_a/I_0 = \exp\{-A_\lambda\} = \exp\left\{-\sum_i(n_i\alpha_iL)\right\} = \exp\left\{-\sum_i(n_iL\sum_j s_{ij}(T)G_{\nu_{ij}})\right\} \quad (1)$$

其中 $A_\lambda$ 是吸光度, $I_a$ 和 $I_0$ 分别为入射光强和透射光强, $n_i$ 是组分 $i$ 的分子数密度, $\alpha_i$ 是组分 $i$ 的消光系数, $L$ 是光程长度, $s_{i,j}(T)$ 是组分 $i$ 在 $j$ 跃迁处的吸收线强度, $T$ 是温度。 $G_{\nu_{ij}}$ 是吸收线展宽函数,通常用Voigt函数表示。每个吸收线的强度具有温度依赖性,并且可以通过测量具有不同温度依赖性的多条吸收线来确定温度和浓度。对同种气体可以使用双线测温法,将光路上的两条不同吸收谱线的线强值相除消掉配分函数,得到不同吸收谱线强度的比值 $R$ 。温度 $T$ 计算公式如公式(2)所示:

$$T = \frac{\frac{hc}{K}(E_2'' - E_1'')}{\ln(R) + \ln\left[\frac{S_2(T_0)}{S_1(T_0)}\right] + \frac{hc}{K}\frac{(E_2'' - E_1'')}{T_0}} \quad (2)$$

其中, $S(T_0)$ 是在参考温度 $T_0$ 下的吸收线强, $E''$ 为低跃迁能态能量,通过Hitran光谱数据库查询可以得

知,  $h$  为普朗克常量,  $K$  为玻尔兹曼常数,  $c$  为光速。

## 1.2 TDLAT 基本原理

传统 CT 技术是通过使用 X 射线扫描目标区域并使用计算机分析结果来重建目标横截面的技术。将 CT 技术与 TDLAS 技术结合的 TDLAT 技术利用激光对待测区域进行多角度扫描, 检测物质对特定波长激光的吸光度, 再根据吸光度利用 CT 算法进行二维温度重建。实验时激光穿过目标区域时, 穿过介质的激光被部分吸收并衰减, 通过对目标进行多角度测量取得多组数据, 最后通过计算机进行处理来重建出目标区域的图像信息。图 2 显示了 CT 分析网格形状。

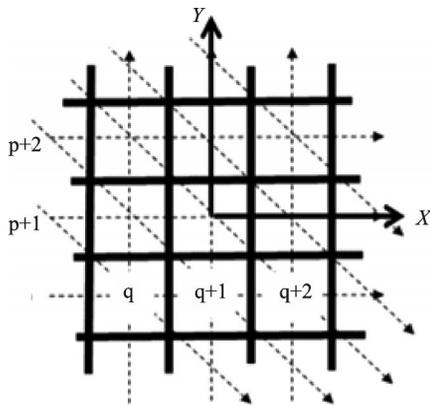


图 2 CT 分析网格  
Fig.2 CT analysis grid

当几束激光束穿过包含目标气体的测量区域时, 每个激光路径的积分吸收率与吸收剂温度和沿该路径的浓度分布相关, 如公式(3)所示:

$$A_{\lambda,p} = \sum_q n_q \alpha_{\lambda,q} L_{p,q} \quad (3)$$

其中  $A_{\lambda,p}$  是在激光路径  $p$  处的吸光度,  $n_q$  是在网格  $q$  处的分子数密度,  $\alpha_{\lambda,q}$  是网格  $q$  中波长为  $\lambda$  的光谱的吸收系数,  $L_{p,q}$  是在  $p$  方向上穿过网格  $q$  的路径长度。在本研究中, 使用等式(2)进行图像重建获得二维浓度分布。同时, 为了稳定和改进上述 CT 分析方法, 采用了一种利用多项式逼近 CT 分析网格上的温度/浓度分布并获得多项式系数的方法。通过使用这种方法, 可以稳定 CT 分析并提高准确性。

## 2 实验方法

### 2.1 实验系统

实验系统如图 3 所示, 主要由 CT 激光测量系

统、燃烧系统和供气系统三部分组成。甲烷燃烧生成的产物为水和二氧化碳, 通过 Hitran 数据库查询到  $H_2O$  在近红外 780 nm~2 526 nm 波段有大量吸收, 根据谱线选择原则<sup>[14-16]</sup>并结合实验室激光器性能选用中心波长为 1 343 nm 和 1 388 nm 波长 DFB 激光器作为激光源进行双谱线测温。实验采用 32 光路 TDLAT 系统对甲烷火焰进行了二维温度测量, CT 测量单元激光路径如图 4 所示。CT 系统包括激光器(NTT, NLK1E5GAAA, 1 387 nm~1 389 nm; NLK1B5EAAA, 1 342~1 344 nm)、激光驱动器(NTT, 2ch DFB-LD Driver)、光纤分束器(SP32-CT-1.3\_1.7\_2.0)、光纤线(B198036, B198002)、激光准直器(ETSC, C-1300-2000-KM11)、光电二极管(Hamamatsu Photonics, G8370-01)、增幅器(AP-32ch-10 Mhz-20 db-101M50)计算机和存储器(Hio-ki 8861)。供气系统主要由甲烷、氧气、氮气、空气压缩机和流量计组成。燃烧系统主要由三喷口燃烧器和升降实验台组成。

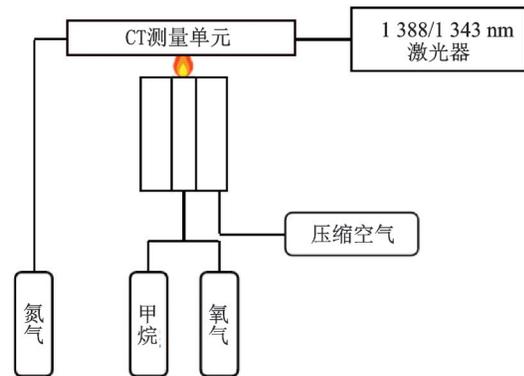


图 3 实验系统简图  
Fig.3 Schematic of experiment system

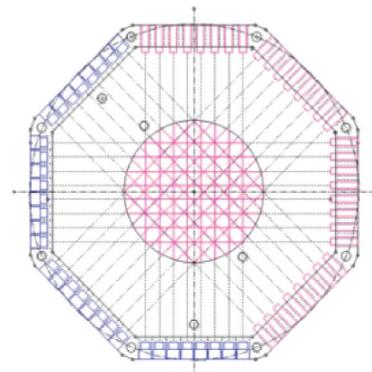


图 4 CT 单元激光路径分布  
Fig.4 Laser path distribution of CT cell

### 2.2 火焰温度二维检测

实验时, 条件为在 1 atm, 室温 28 °C 条件下, 将

0.6 L/min 甲烷和 3 L/min 空气预混合后通入燃烧器燃烧。CT 测量单元通入 2 L/min 氮气以排除周围空气,燃烧器周围通入 15 L/min 的压缩空气稳定燃烧火焰。两台 DFB 激光分别发出激光(1388 nm 和 1343 nm),经激光驱动器调制耦合后通过光纤分束器分为 32 路激光,随后通过准直仪及 CT 测量组件穿过待测区域后,每束激光由相应光电二极管接受转换为电信号,测量记录时长为 1 s,最短可选择 50 ms。经增幅器放大后存入存储器中。实验中,通过升降试验台调节测量组件与燃烧器喷口的相对高度为 5 mm,进行了火焰截面的温度分布测量。同时使用 B 型热电偶(Anbesmt D100  $\mu\text{m}$ )在火焰截面处进行热电偶测量来进行数据比对。

### 3 结果和讨论

利用 32 路 TDLAT 系统对火焰在距离燃烧器顶端 5 mm 处的火焰截面进行了温度测量,激光 AC 信号记录时长为 1 s。通过对比入射光光强与出射光光强计算不同位置 32 条谱线吸收数据。图 5 所示为单路激光吸收光度与激光路径,激光传播路径穿过  $\Phi 8$  与  $\Phi 10$  喷口,光谱吸收峰强度达到 0.11。

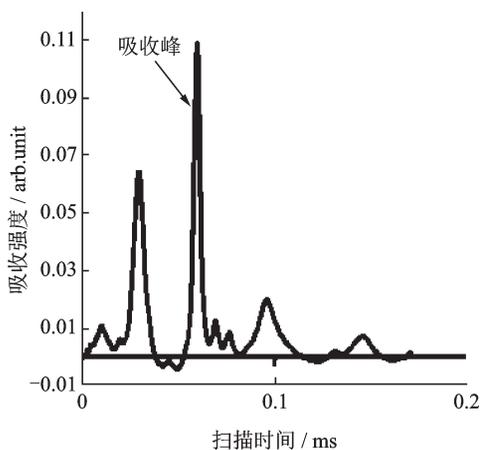


图 5 单路激光吸收强度

Fig.5 Absorption intensity of the laser

通过 CT 算法对 32 条激光吸收光谱进行处理,重建了二维温度场,最终获得了高分辨率的甲烷火焰温度二维分布图像。图 6 中的 CT 重建结果显示  $\Phi 10$  与  $\Phi 8$  喷口中心温度基本一致,温度最高超过 1 700 K,  $\Phi 6$  喷口中心温度相对较低,约为 1 500 K,且火焰面积较小。实验同时利用热电偶对检测截面进行  $21 \times 21$  点的热电偶检测,热电偶检测点间距为 2 mm,图 7 中显示的热电偶检测温度分布与 CT

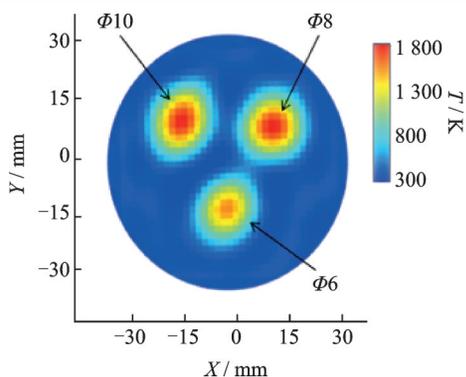


图 6 TDLAT 检测温度分布

Fig.6 TDLAT detection results

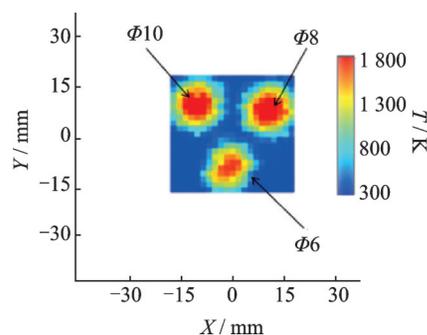


图 7 热电偶检测温度分布

Fig.7 Thermocouple detection results

重建结果基本一致。

为了验证 TDLAT 重建温度分布的准确性,选择了  $Y=10 \text{ cm}$  和  $Y=-10 \text{ cm}$  的位置,将 TDLAT 重建结果与热电偶测量结果进行对比。图 8 和图 9 为  $Y=10 \text{ cm}$  和  $Y=-10 \text{ cm}$  位置处 TDLAS 重建结果与热电偶分布,两者温度趋势基本一致,1 300 K 温度下重建结果与热电偶结果非常接近,误差不超过 3%,1 300 K 以上重建结果误差高于 1 300 K 以下区域,最大误差约 12%。重建结果与热电偶结果之间存在一定偏差主要是由于火焰场的不稳定性以及热电偶测量受到热辐射影响:实验过程中喷口位

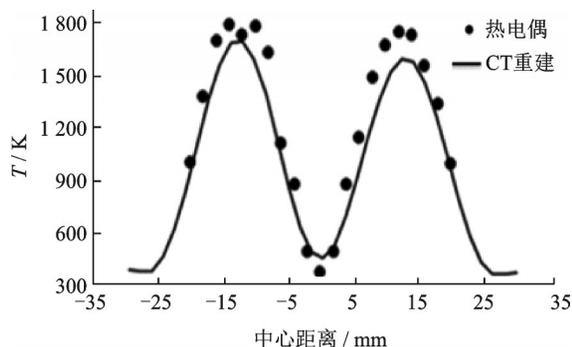


图 8  $Y=10 \text{ cm}$  时重建结果与热电偶测量温度分布

Fig.8 Results of TDLAT and thermocouple at  $Y=10 \text{ cm}$

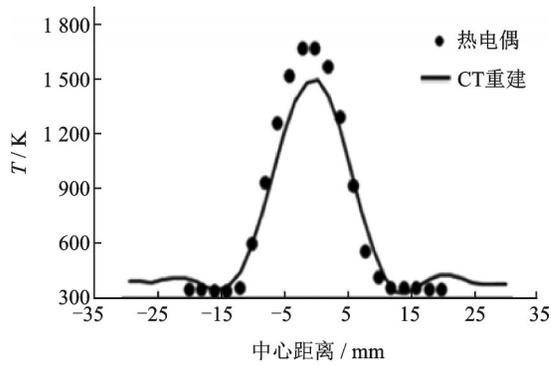


图9  $Y = -10$  cm时重建结果与热电偶测量温度分布

Fig.9 Results of TDLAT and thermocouple at  $Y = -10$  cm

置高温区火焰外形本身较不稳定,热电偶测量作为一种接触式测温方法进行测量时也会对高温区燃烧场的稳定性造成影响,导致高温区热电偶测量误差较大。并且热电偶在测量时会受到热辐射影响,温度较低时热辐射强度较低可忽略不计,温度升高时热辐射效应增强会影响热电偶的检测精度。其次 Voigt 函数在重构过程中也会产生一定误差,导致重建结果会略微偏大或偏小。研究表明, TDLAT 具有较高的温度准确度与测量速度,并且作为一种非接触式测量无需侵入燃烧场,不会对燃烧场产生影响。在燃烧诊断的在线测量中有着非常大的优势。

## 4 结 论

文章对激光吸收光谱二维测温进行了研究,采用直接吸收法进行双谱线测温,搭建了非全正交式 32 光路 TDLAT 系统对三口燃烧器火焰的吸收光谱进行了检测,通过吸光度重建了甲烷火焰二维温度分布。结果显示  $H_2O$  对 1 388 nm 和 1 343 nm 激光具有较好的吸收性能。将 CT 重构结果和热电偶测量结果进行对比显示, 1 300 K 以上重建结果相较于热电偶结果略低, 1 300 K 以下重建结果与热电偶结果基本一致。TDLAT 重建图像具有更高的分辨率,反映燃烧场的温度分布情况更加直观精准。并且与热电偶相比, TDLAT 有着更快的测量速度,最快仅 50 ms 即可完成光谱吸收信号检测,利用 TD-

LAT 技术进行二维温度分布检测所需时间远低于利用热电偶进行多点测量。TDLAT 的高精度、高速度以及高分辨率等优点对于在线燃烧诊断有着非常大的意义。

## 参 考 文 献

- [1] 王锡辉,陈厚涛,朱晓星,等.基于模糊C均值聚类的电站锅炉燃烧在线诊断[J].热力发电,2019,48(09):77-82.
- [2] Hinkley E D. High-resolution infrared spectroscopy with a tunable diode laser [J]. Applied Physics Letters, 1970, 16(9): 351-354.
- [3] 张可可,齐勇,付晓,等.基于TDLAS一次谐波的二氧化碳温度测量[J].光电子技术,2014,34(04):300-303,+307+312.
- [4] 王海青,林伟,全毅恒,等.基于激光的燃烧场温度诊断方法综述[J].气体物理,2020,5(01):42-55.
- [5] Deguchi Y. Industrial applications of laser diagnostics [M]. New York, CRS Press: Taylor & Francis, 2012:186-191.
- [6] 金义,孙福双,张宸阁,等.调谐激光吸收光谱技术在燃煤电厂中的应用及展望[J].激光杂志,2020,41(04):8-17.
- [7] 马天.基于TDLAS吸收光谱法测量高温气体温度[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [8] 李飞,余西龙,陈立红,等.TDLAS测量甲烷/空气预混平面火焰温度和 $H_2O$ 浓度[J].实验流体力学,2009,23(02):40-44.
- [9] Emmerman P J, Goulard R, Santoro R J, et al. Multiangular absorption diagnostics of a turbulent argon-methane jet[J]. Journal of Energy, 1980, 4(2):70-77.
- [10] 张国勇,王国情,黄燕,等.基于TDLAS的同轴扩散火焰温度与 $CO_2$ 浓度测量[J].内燃机与配件,2018(12):87-92.
- [11] 林鑫,李飞,王宽亮,等.旋流火焰燃烧温度场二维吸收光谱诊断[J].气体物理,2019,4(02):55-61.
- [12] Kasyutich V L, Martin P A. Towards a two-dimensional concentration and temperature laser absorption tomography sensor system[J]. Applied Physics B, 2011, 102(1):149-162.
- [13] Liu C, Xu L, Member S, et al. Reconstruction of axisymmetric temperature and gas concentration distributions by combining fan-beam TDLAS with onion-peeling deconvolution [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2014, 63(12):3067-3075.
- [14] Xin Z. Diode laser absorption sensors for combustion control[J]. Papers in Regional Science, 2005, 84(2):183-199.
- [15] 陈亚婧,邱爽,徐立军.多谱线TDLAS测温中谱线选择的实验研究[J].电子测量与仪器学报,2017,31(12):1948-1952.
- [16] 刘国耀,沈德明,陈俊杰,等.TDLAS燃烧气体温度测量吸收谱线对的选择[J].激光与红外,2015,45(09):1034-1039.