

# 带压燃烧场2D温度分布的激光吸收光谱 测量初步研究\*

周王峥<sup>1</sup>, 王珍珍<sup>1,2</sup>, 严俊杰<sup>1</sup>, 种道彤<sup>1</sup>,  
辻本一真<sup>2</sup>, 神本崇博<sup>2</sup>, 出口祥启<sup>1,2</sup>

(1. 西安交通大学 能源与动力工程学院 多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049;  
2. 德岛大学 大学院社会产业理工学研究部, 德岛县 德岛 770-8506)

**摘要:** 以实现冲压发动机等场合的高压燃烧流场诊断为目标, 采用可调谐半导体激光吸收光谱 (TDLAS) 技术对带压燃烧流场的温度诊断进行初步研究。使用一种光谱耦合的CT重构方法, 以误差平方和与零均值归一化互相关作为评价指标分析CT-TDLAS的重构精度。搭建带压燃烧腔温度分布测量的实验系统, 使用压力传感器和CCD相机记录带压点火燃烧过程变化; 使用调谐范围为1335~1375nm宽波段输出的半导体激光, 对燃烧腔内带压点火燃烧过程进行了时间分辨的二维温度分布重建。实验结果表明: CT-TDLAS具有较高的重构精度; 燃烧过程的压力变化趋势、火焰变化趋势及时间分辨二维温度分布变化趋势, 三者保持一致; 在带压条件下, CT-TDLAS可以实现高分辨率的时间分辨温度测量, 反应定量的温度分布变化信息, 为带压及进一步的高温高压燃烧流场的诊断提供帮助。

**关键词:** 带压燃烧场; 可调谐半导体激光吸收光谱; 计算机断层扫描; 二维温度分布; 时间分辨

中图分类号: O433.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2021) 09-2129-09

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.190849

## Preliminary Study on 2D Temperature Distribution in Pressure Combustion Field by Using Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy

ZHOU Wang-zheng<sup>1</sup>, WANG Zhen-zhen<sup>1,2</sup>, YAN Jun-jie<sup>1</sup>, CHONG Dao-tong<sup>1</sup>,  
TSUJIMOTO Kazuma<sup>2</sup>, KAMIMOTO Takahiro<sup>2</sup>, DEGUCHI Yoshihiro<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, School of Energy and Power Engineering,  
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University, Tokushima 770-8506, Japan)

**Abstract:** Aiming to achieve the combustion diagnosis of high pressure combustion field such as scramjet, Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) was used to develop preliminary research on the temperature diagnosis of combustion with pressure condition. A Computed Tomography (CT) algorithm according to

\* 收稿日期: 2019-12-10; 修订日期: 2020-03-24。

作者简介: 周王峥, 硕士生, 研究领域为可调谐半导体激光吸收光谱。

通讯作者: 王珍珍, 博士, 副教授, 研究领域为激光测试技术及电厂热工控制。

引用格式: 周王峥, 王珍珍, 严俊杰, 等. 带压燃烧场2D温度分布的激光吸收光谱测量初步研究[J]. 推进技术, 2021, 42(9): 2129-2137. (ZHOU Wang-zheng, WANG Zhen-zhen, YAN Jun-jie, et al. Preliminary Study on 2D Temperature Distribution in Pressure Combustion Field by Using Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(9):2129-2137.)

spectrum coupling was used to reconstruct two-dimensional temperature distribution. Using the sum of squared differences and the zero mean normalization cross correlation as the evaluation indicators which were able to analysis the reconstruction accuracy of CT-TDLAS. A pressure combustion chamber temperature distribution measurement experimental system was set up. With pressure sensor and CCD camera, the changing of the pressure and flame which contented combustion ignition process under pressure condition were recorded. Using wide-band tunable diode laser which can achieve 1335~1375nm output to reconstruct time-resolved two-dimensional temperature distribution. The experimental results show that CT-TDLAS has high reconstruction accuracy, the changing tendencies of pressure, flame and time-resolved two-dimensional temperature distribution result are similar, CT-TDLAS can achieve high-resolution time-resolved 2D temperature measurement and provide quantitative temperature distribution information to the research of combustion with pressure condition, which can give help to diagnosis of pressure combustion as well as further high temperature and high pressure combustion flow field.

**Key words:** Pressure combustion field; Tunable diode laser absorption spectroscopy; Computed tomography; Two-dimensional temperature distribution; Time-resolved

## 1 引言

高速气体在扩张管道内减速时,动能转换为压力势能。根据该原理,冲压发动机的进气段将高速气体转换为高压气体,高压气体在燃烧室与燃料混合燃烧,产生高温燃气,高温燃气经过喷管膨胀加速后,在喷口处形成巨大推力。在冲压发动机运行过程中,系统内温度、速度以及压力参数均发生剧烈变化,燃烧气流总温可达2800K,燃气气流马赫数一般在2以上<sup>[1]</sup>,相应压力可以轻松到达几十个大气压。这意味着冲压发动机内燃烧过程非常复杂,使用CFD等数值模拟和仿真手段还原燃烧流场缺乏准确性与时效性,这对分析燃烧状态、燃烧效率、优化燃烧器设计具有一定的局限性。冲压发动机内部的恶劣工况,导致直接准确测量冲压发动机温度等参数的方法极为有限。以温度参数为例,目前主要方法有铠装热电偶<sup>[2]</sup>、薄膜热电偶<sup>[3]</sup>、光电测量法<sup>[4]</sup>和辐射测量法<sup>[5]</sup>。使用热电偶测量需要对热电偶进行高工艺处理,并且测量结果受限于测点数量及位置分布。使用非接触式的光电测量和辐射测量方法具有低侵入性和低结构破坏性等优点。目前可调谐半导体吸收光谱技术(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)作为光电测量手段的一种,在燃烧流场温度测量领域具有非常广泛的应用<sup>[6-7]</sup>。TDLAS技术测量得到的光谱信息,与流场内温度和物质组分浓度相关,使用多路径的TDLAS光谱信息,结合计算机断层扫描成像技术(Computed Tomography, CT),可以实现气流测量截面二维温度与组分浓度分布的同时重建<sup>[8-10]</sup>。CT-TDLAS对测量

面的二维温度和组分浓度分布还可以实现时间分辨的重建<sup>[11]</sup>。同时TDLAS具有高灵敏性、高抗噪性、高重复频率及容易与通信光纤组件兼容等优点<sup>[12]</sup>,这对冲压发动机燃烧状态和燃烧效率优化有着非常重要的意义。

本文分析了CT-TDLAS重构二维温度分布的精度,设计搭建了一套带压燃烧腔温度分布测量实验系统。在腔体内部充入一定压力的混合燃气后,使用16路CT测量组件对带压燃气点火燃烧过程中的腔内某截面进行测量,并使用CT-TDLAS技术实现了该截面上时间分辨的二维温度分布重构,验证CT-TDLAS在带压场燃烧中还原时间分辨二维温度分布变化的可行性。

## 2 原理

### 2.1 CT-TDLAS原理

TDLAS技术的原理是利用可调谐半导体激光器产生扫描波长范围固定的激光,在测量的线性路径上被待测气体吸收能量,获得相应的吸收光谱。吸收光谱中包含了测量路径上气体浓度、温度和压力信息<sup>[13]</sup>。激光能量被吸收前后的关系,可以根据Beer Lambert定律表示为

$$A_{\lambda} = \ln\left(-I_{\lambda}/I_{\lambda,0}\right) = \sum_i \left( n_i L \sum_j S_{i,j}(T) G_{v_i,j}(n_i, T, p) \right) \quad (1)$$

式中 $I_{\lambda,0}$ 为无气体吸收时波长为 $\lambda$ 的激光强度; $I_{\lambda}$ 为被测量区域内气体吸收后波长为 $\lambda$ 的激光强度; $A_{\lambda}$ 为光谱积分吸收面积; $n_i$ 为被测气体 $i$ 的组分浓度; $S_{i,j}(T)$ 为气体 $i$ 中 $j$ 吸收线的谱线线强,线强与温度相关; $G_{v_i,j}$ 为线型函数 $G_{v_i,j}(n_i, T, p)$ ,包含了温度和压力

的影响;  $L$  为激光在测量区域内的吸收路径长度。

CT算法可根据多条交叉线性路径上的激光吸收, 重构得到测量区域的二维温度和浓度分布信息。假设在测量区域内总共布置了  $u$  条激光路径, 每个激光路径均被均分成  $w$  小段, 那么式(1)可以改写成式(2)形式

$$A_{\lambda} = \sum_w n_{u,w} L_{u,w} \alpha_{\lambda,w} = \sum_w n_{u,w} L_{u,w} S_{\lambda} (T_{u,w}) G_{V\lambda} (n_{u,w}, T_{u,w}, p) \quad (2)$$

由于测量区域内的温度分布和气体组分浓度分布均是连续变化的, 可以使用带有适应系数  $a_{k,l}, b_{k,l}$  的集合进行拟合多项式(3), (4)来表示测量区域内的温度分布和气体浓度分布。

$$T(x, y) = \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^k b_{k-l} x^{k-l} y^l = F_T(b_{k,l}) \quad (3)$$

$$n(x, y) = \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^k a_{k-l} x^{k-l} y^l = F_n(a_{k,l}) \quad (4)$$

将公式(3)和式(4)中所有测量点的温度和浓度信息代入到式(2)中, 可得到每条测量激光路径上的理论积分吸收面积, 且获得相应的理论吸收光谱图。理论光谱积分吸收面积如公式(5)所示。

$$\left( A_{\lambda,u} \right)_{\text{theory}} = \sum_w L_{u,w} F_n(a_{k,l}) S_{\lambda} (F_T(b_{k,l})) \cdot G_{V\lambda} (F_n(a_{k,l}), F_T(b_{k,l}), p) \quad (5)$$

如式(6)所示, 计算理论吸收光谱图和实验测量的吸收光谱图误差, 当所有激光路径上的误差平方和最小时, 此时最适应光谱所取的适应系数  $a_{k,l}, b_{k,l}$  的集合即为所求解, 并将其代入式(3)和式(4)中, 就可以得到测量区域内温度和浓度的二维分布信息。

$$\text{Error} = \sum_{\lambda,u} \left\{ \left( A_{\lambda,u} \right)_{\text{theory}} - \left( A_{\lambda,u} \right)_{\text{experiment}} \right\}^2 \quad (6)$$

## 2.2 宽波段波长激光扫描

TDLAS测量得到的吸收光谱的谱线形状和线型函数  $G_{V_i,j}$  有关。线型函数会受到压力参数的影响。在高温高压的测量条件下, 吸收光谱会发生严重的压力展宽。根据 HITRAN 数据库<sup>[14]</sup> 中水蒸汽在 1335~1375nm 波长内的理论谱线线强, 计算了温度为 1200K, 压力分别为 0.1MPa 和 2MPa 的理论光谱图, 如图 1(a), 图 1(b)所示。在图中可发现, 一些较弱的吸收线, 在压力为 0.1MPa 的低压条件下可被识别。但是在 2.0MPa 的压力条件下会由于线型展宽而难以区分。如在 1355nm 附近处有多条吸收度相似的谱线, 在 2.0MPa 的压力条件下, 会因为压力展宽而合并为一个吸收峰。这说明, 在压力较高的条件下, 需要增

加光谱图中特征吸收峰的数量, 提高最适应光谱的准确度, 进而提高 CT 重建精度。在本文研究中, 使用了扫描范围为 1335~1375nm 的宽波段调谐激光器测量了带压燃烧场的光谱信息。

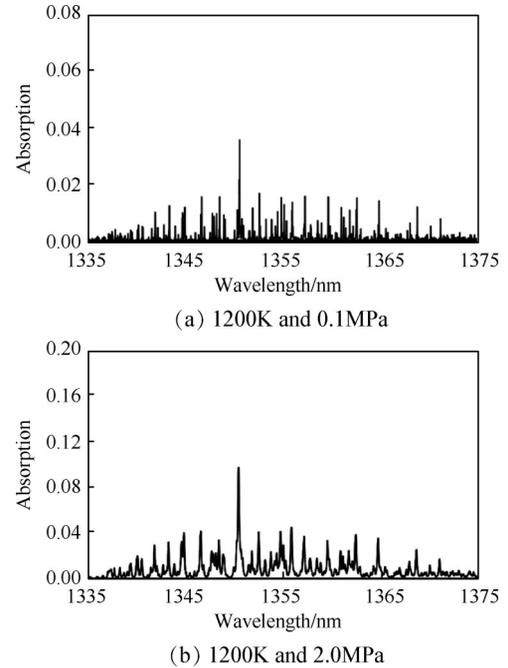


Fig. 1 Theoretical  $H_2O$  spectra in wavelength range from 1335nm to 1375nm

## 3 实验系统

本文搭建了如图 2(a)所示的定容带压燃烧腔实验系统。外腔式二极管激光器 (Santec, HSL-200-30-TD, 线宽:  $1.3\text{cm}^{-1}$ ) 经过波长调制后, 产生扫描频率为 30kHz, 扫描波长为 1335~1375nm 的激光。调制激光经过准直器 (Optzone, C-20-S-1-C-200-2-L-0.95-S) 进入测量区域。激光被燃烧流场内的水蒸汽吸收后, 由对应的光电二极管 (Hamamatsu Photonics, G12180-010A) 接收激光信号。在光电二极管内激光强度信号被转换为电信号。电信号被放大器 (Cosmowave, FP150MSA) 放大后, 直接由数字记录器 (HIOKI E.E. Co., Memory Highcoda HD Analog16) 以 20MHz 的采样频率记录。

准直器与光电二极管安置于 16 路 CT 测量组件 (Smart Laser & Plasma Systems Co., CT-TDLAS-16LP-HTPC-R70) 上。CT 测量组件分为上下盖板和中间安置的石英玻璃圆环, 其光路布置和内部结构如图 2(b)所示。石英玻璃圆环的连接处放置 O 型密封圈。在 16 路 CT 测量组件的上下盖板中刻有设计的光路通槽。为了避免光路通槽内空气对实验结果产

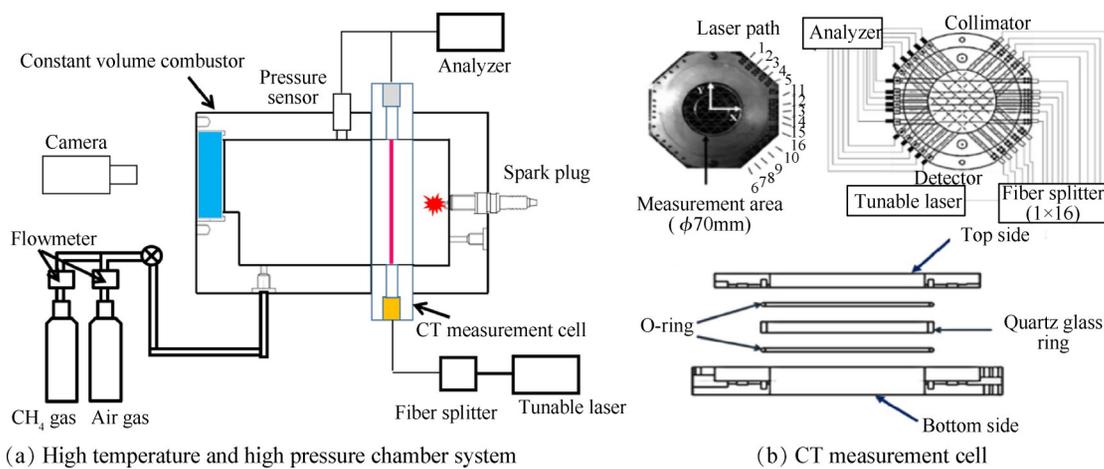


Fig. 2 Experiment system

生影响,在实验过程中,需要对16路CT测量组件持续通入氮气。

在带压燃烧腔实验系统中,带压燃烧腔为圆柱形,内部直径70mm,长度110mm,应力参数能够满足最大压力7MPa,最高温度2000K的燃烧实验。燃烧腔一端设置了带点火线圈(HITACHI, U0818-COIL)的火花塞(NGK, BKR5E-11)。距离火花塞32.5mm处设置了16路CT测量组件。距离16路CT测量组件37.5mm处设置了压力传感器(KELLER, PA-23)记录燃烧过程的压力变化。在燃烧测量的同时,使用CCD相机(Panasonic, HX-WA30-K)记录燃烧火焰变化。

本文分别进行了3组不同的实验,在标准温度和压力条件下,甲烷分别以 $1.8 \times 10^{-5} (\text{m}^3/\text{s})$ ,  $3.2 \times 10^{-5} (\text{m}^3/\text{s})$ ,  $5.0 \times 10^{-5} (\text{m}^3/\text{s})$ 的流量和流量为 $8.3 \times 10^{-5} (\text{m}^3/\text{s})$ 的空气通入带压燃烧腔内,使腔内的初始压力分别达到0.2MPa, 0.3MPa和0.4MPa,满足燃料与空气的混合反应物当量比为1。满足压力及当量比条件后,关闭进气,等待混合燃气1min实现热平衡,然后对点燃形成火焰的过程进行实验测量。实验条件如表1所示。

Table 1 Experiment conditions

Test No.	1	2	3
Initial pressure/MPa	0.2	0.3	0.4
CH <sub>4</sub> flow rate/(m <sup>3</sup> /s)	$1.8 \times 10^{-5}$	$3.2 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$
Air flow rate/(m <sup>3</sup> /s)	$8.3 \times 10^{-5}$		
Equivalence ratio	1		

## 4 结果与讨论

本文采用16路CT-TDLAS实验系统测量带压燃

烧场2D温度分布。首先对CT-TDLAS的测量精度进行分析。CT-TDLAS的测量精度指标分为两个部分:TDLAS测量精度和CT重建精度。验证TDLAS测量精度能够确保在CT-TDLAS测量中,每条激光路径上的吸收光谱所包含的温度信息是准确的。验证CT重建精度能够确保在CT-TDLAS测量中,温度场还原重建结果是准确的。

采用CT-TDLAS测量定容带压燃烧腔2D温度分布,将测量结果与实验系统中CCD相机拍摄火焰相片结果和压力传感器采集的压力信息结果进行对比,验证CT-TDLAS在带压条件下燃烧的时间分辨的温度分布结果测量的准确性。

### 4.1 TDLAS精度分析

本文采用直接吸收法测量激光的吸收光谱,并结合多项式拟合的光谱耦合方法进行CT重构计算。因此CT重构计算所采用的水蒸汽吸收光谱数据库需要满足对温度测量的高精度要求。但是由于激光器性能等实际环境因素的影响,通过HITRAN数据库的谱线强度及展宽系数计算获得的理论水蒸汽光谱与实际实验测量得到的实验水蒸汽光谱之间存在一定的误差。因此CT重构计算所采用的水蒸汽吸收光谱数据库需要满足高精度的温度测量要求。但是由于激光器性能等实际测量因素的影响,通过HITRAN数据库的谱线强度及展宽系数计算获得的理论水蒸汽光谱与实际实验测量得到的实验水蒸汽光谱之间存在一定的误差。因此本文使用热电偶和TDLAS分别对平焰燃烧器<sup>[15]</sup>和密闭高温腔<sup>[16]</sup>进行不同温度条件下的测量,根据热电偶的实验测量结果,建立修正后的水蒸汽光谱数据库。

高温腔系统中的密闭高温腔外部包有电加热丝及热电偶,可以测量并控制高温腔中的温度;高温腔

内部激光可穿过气体的线性光路长度为 102mm。在高温腔测量修正实验中,先使用氮气排出高温腔内的干扰水蒸汽,再在高温腔内通入已知水蒸汽体积分数的湿润空气。通过电加热丝加热高温腔,依据热电偶测量结果,测量并修正温度在 373~773K、压力 0.1~0.9MPa、不同实验条件下 1335~1375nm 波段范围的水蒸汽吸收光谱。

平焰燃烧器的喷嘴直径为 45mm。在 TDLAS 测量平面的相同高度,设置有铂铑铂热电偶,可测量燃烧火焰温度。在平焰燃烧器测量修正实验中,气体流量均在标准温度和压力条件下记录。甲烷流量为  $1.6 \times 10^{-5} \sim 2.7 \times 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s)}$ ,空气流量为  $1.6 \times 10^{-4} \sim 2.7 \times 10^{-4} \text{ (m}^3/\text{s)}$ 。通过调整甲烷/空气的混合燃气流量获得 1000~2000K 内不同的燃烧温度。在平焰燃烧器周围通有  $3.3 \times 10^{-2} \text{ (m}^3/\text{s)}$  的保护氮气,排除周围水蒸汽的干扰。根据热电偶的温度测量值,修正该温度区间内 1335~1375nm 波段的水蒸汽吸收光谱。

需要注意的是热电偶主要依靠对流和热传导的方式测量气体温度,高温条件下热辐射传递的热量无法被热电偶测量,因此在平焰燃烧器温度测量中需要考虑热辐射对热电偶测温结果的影响并对热电偶测量结果进行修正。结合修正后水蒸汽吸收光谱数据库,再对任意未知温度的高温腔及平焰燃烧器火焰分别使用热电偶和 TDLAS 进行温度测量,结果表明采用修正后的水蒸汽光谱数据库的 TDLAS 具有高精度的测温能力。

图 3 表示了平焰燃烧器燃烧温度为 1300K 和 1800K 的条件下,使用 TDLAS 测量的实验光谱图和根据修正后的光谱数据库计算的理论光谱图。图 4 中测点表示相同实验条件下,分别使用修正光谱数据库计算的 TDLAS 测温结果和修正后的热电偶测温结果。测点间拟合的趋势线斜率几乎为 1,说明相同实验条件下两种测量方式的测温误差极小。以上结果表明,使用修正后的光谱数据库能极大地减少误差,有效提高 TDLAS 测量温度的准确性。

#### 4.2 CT 精度分析

为了确保 CT 的重构精确性,必须在实验前先对 CT 重建精度进行分析。本文采用误差平方和 (Sum of squared difference, SSD) 和零均值归一化互

相关 (Zero mean normalization cross correlation, ZNCC) 作为评价指标。SSD 比较两幅图像中所有像素点灰度误差和的大小。在本文的研究中,为了便于直观地比较误差大小,将误差 SSD 修改为一个无量纲数值,即

$$E_{SSD} = \sqrt{\frac{\sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} \left\{ (T_{x,y})_{\text{original}} - (T_{x,y})_{\text{CT-TDLAS}} \right\}^2}{XY}} / T_R \quad (7)$$

式中  $X, Y$  为重构图像的横纵坐标方向像素格点数,  $T_R$  为最高温度。SSD 值越接近 0,说明 CT 重构结果和原始结果之间的误差越小,反之则越大。

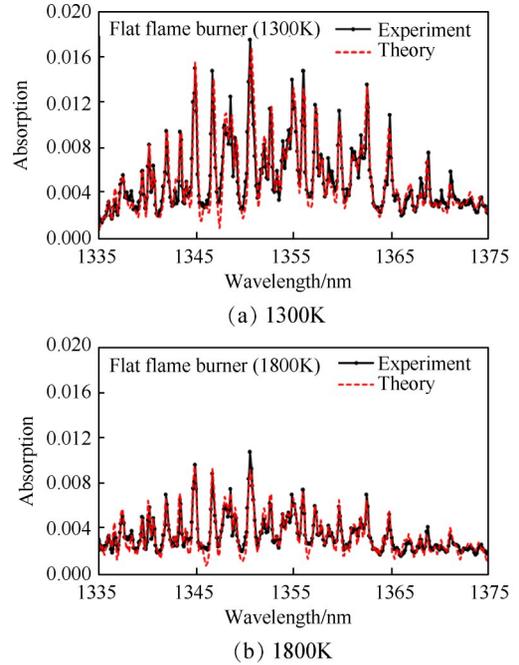


Fig. 3 Theoretical and experimental H<sub>2</sub>O absorption spectra with 1335~1375nm scanning range under different temperature

ZNCC 值可以消除在两幅相似图像对比过程中,由于像素点转化成灰度带来的信息失真所引起的灰度突变影响。因此,两图之间的 ZNCC 值越接近于 1,表示两者之间有着越高的相似性。在本文研究中,ZNCC 值越接近于 1,说明两者之间的燃烧模式越相近。误差 ZNCC 的计算式为

$$E_{ZNCC} = \frac{\sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} \left\{ (T_{x,y} - \bar{T})_{\text{original}} \times (T_{x,y} - \bar{T})_{\text{CT-TDLAS}} \right\}}{\sqrt{\sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} (T_{x,y} - \bar{T})_{\text{original}}^2 \times \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} (T_{x,y} - \bar{T})_{\text{CT-TDLAS}}^2}} \quad (8)$$

$$\bar{T} = \frac{\sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} T_{x,y}}{XY} \quad (9)$$

对图5(a)给出的高斯温度分布,使用CT-TDLAS进行温度重建,重建结果如图5(b)所示。CT重构温度图像的SSD值为0.00163,ZNCC值为0.990。并且CT重建的温度分布与假设的温度分布趋势基本一致。为了更加具体地展现假设结果与重构结果之间的差异,图5(c)表示 $Y=0$ 路径上,假设的温度分布曲线与重建温度的结果对比。可以发现,在 $X$ 位于 $-35\sim-5\text{mm}$ 和 $5\sim35\text{mm}$ 的区域内,重建的温度结果能很好地贴合假设结果,但是在 $X$ 位于 $-5\sim5\text{mm}$ 的中心区域,CT重建的温度结果低于假设值,存在一定的误差。这是因为中心区域的温度变化复杂,而测量光路在中心处的布置数量不够导致的。

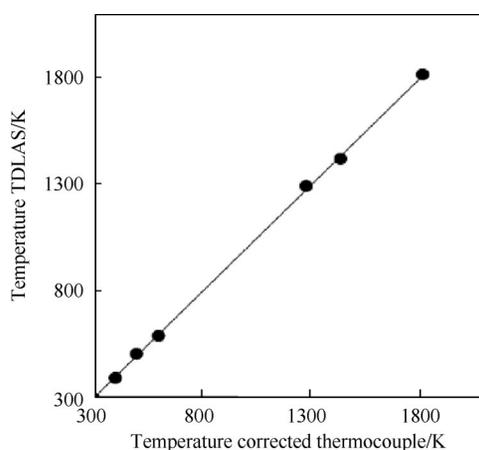


Fig. 4 Measurement results comparison between CT-TDLAS using corrected spectra data and temperature-corrected thermocouple

#### 4.3 带压燃烧场2D温度测量

本文对三组不同压力条件下的燃烧过程进行了实验测量。压力随时间变化曲线如图6所示。可以发

现在Test 2(初始压力0.3MPa)和Test 3(初始压力0.4MPa),在反应116ms的时间内,燃烧腔内的压力急剧增加并达到最值,而Test 1(初始压力0.2MPa)则在83ms的时间内,燃烧腔内压力就已经到达最值。这是因为第一组实验的初始压力较小,说明反应燃气的含量也更少,反应的时间更短。在三组实验的燃烧过程前半段,由于燃烧反应产生大量热量,根据理想气体状态方程,体积不变温度升高会导致压力增加。在后半段主要由于壁面导热等原因,腔内温度下降,导致腔内压力逐渐降低。本文使用CCD相机对三组燃烧实验的火焰变化过程进行了记录。如图7所示,在照片记录中,火焰先迅速变亮,再缓慢变暗,其变化趋势与压力变化趋势相符合。

对三组实验的燃烧过程使用CT算法重建时间分辨的二维温度分布。图8~图10展示了三组实验中测量截面在39ms,90ms和213ms三个时刻的温度分布。结果表明,CT-TDLAS可以实时重构定容燃烧腔内时间分辨火焰二维温度分布的变化。腔内的测量截面的位置距火花塞32.5mm,根据火焰的传播过程,测量截面处温度先升高后降低。在火焰点燃初期,测量截面的温度上升主要通过气体的传热以及热气体的膨胀。当火焰传过测量截面时,测量截面的温度达到最高。由于带压燃烧过程复杂,温度变化与压力变化、燃烧反应过程等都密切相关。

在CT-TDLAS的重构结果中,图8(a),图9(a),图10(a)结果显示,39ms时刻Test 1的测量截面温度远高于同时刻实验2和实验3测量截面温度。对该温度变化进行初步分析,在39ms时刻,根据图6所示压力变化曲线,Test 1,Test 2和Test 3中的腔内压力分别为0.59MPa,0.57MPa和0.78MPa。由于三组实验的初始压力不同及考虑到甲烷/空气当量比为1的燃烧总包反应过程,可以得知在39ms时刻腔内所

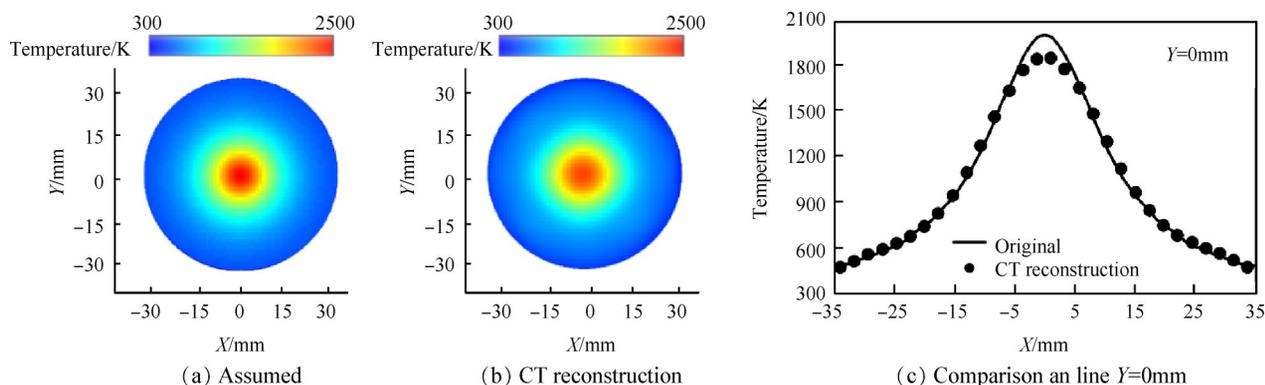


Fig. 5 Comparison between assumed and CT reconstruction temperature distribution

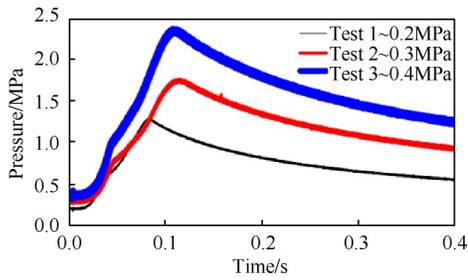


Fig. 6 Pressure changing curve in chamber

有气体的总摩尔分数比为 2:3:4。腔内燃烧时间为 ms 量级,该过程可认为绝热燃烧条件,同时假设腔内气体不可压缩,通过理想气体状态方程的近似计

算,Test 1 中腔内平均温度大约为 Test 3 中腔内平均温度的 1.5 倍,Test 2 和 Test 3 中腔内平均温度非常接近。该结果与 CT-TDLAS 重构温度分布结果基本一致。

参考 CCD 相机拍摄的火焰熄灭照片,其亮度变化趋势与 CT-TDLAS 重建的温度分布变化趋势一致,均表现为中间近似竖直狭长的较高温度区域,而左右两侧的温度率先下降。

对比 CT 重建的温度变化、腔内压力变化和 CCD 相机记录的火焰燃烧过程变化,三者变化趋势保持一致。实验结果表明,CT-TDLAS 可以精准地定量描

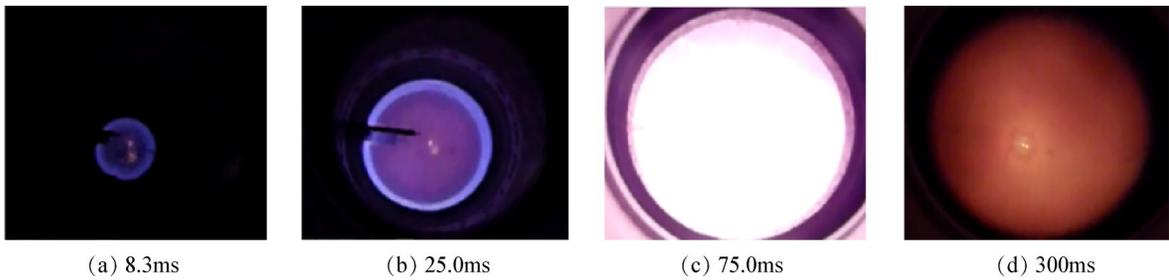


Fig. 7 Flame pictures changing using CCD camera

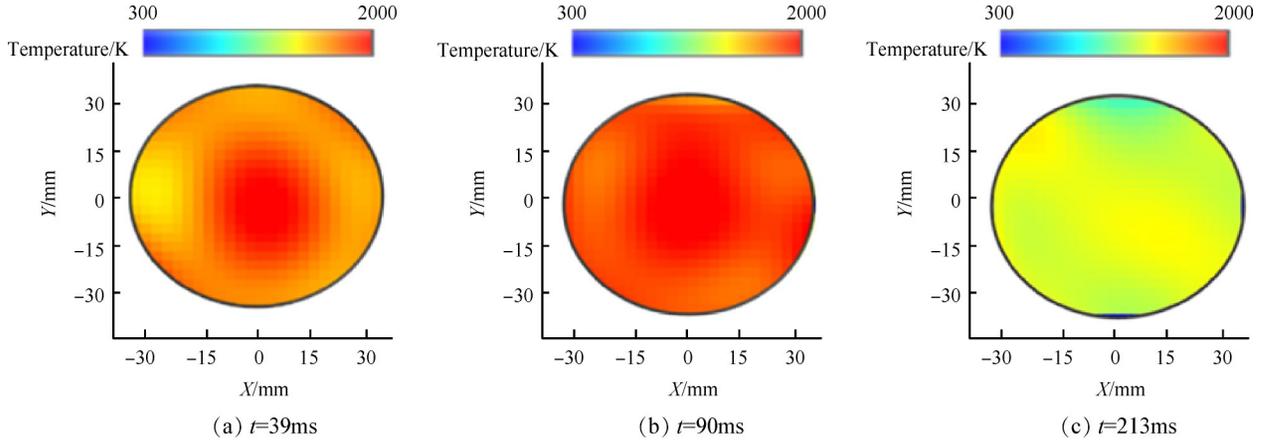


Fig. 8 Time-resolved 2D temperature distribution in test 1 with initial pressure of 0.2MPa using CT-TDLAS

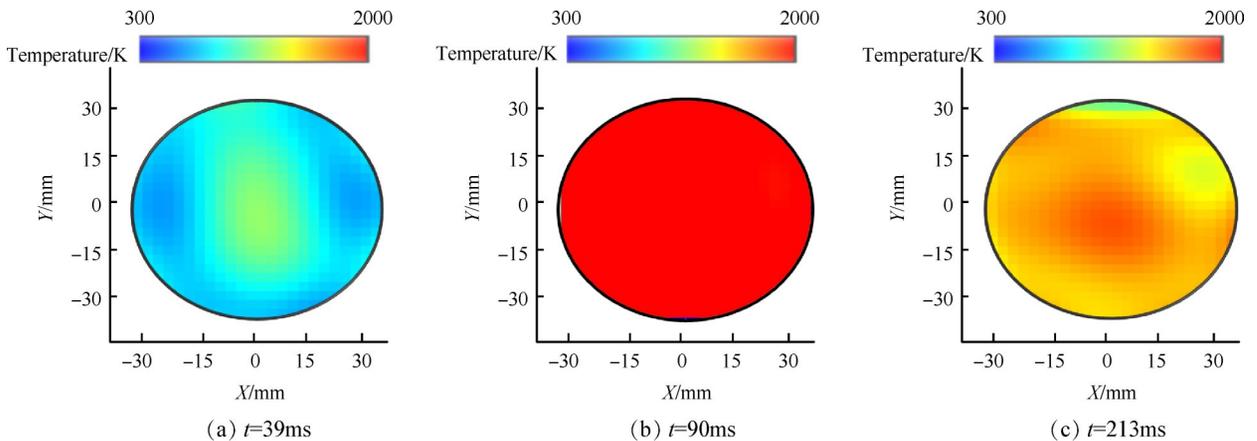


Fig. 9 Time-resolved 2D temperature distribution in test 2 with initial pressure of 0.3MPa using CT-TDLAS

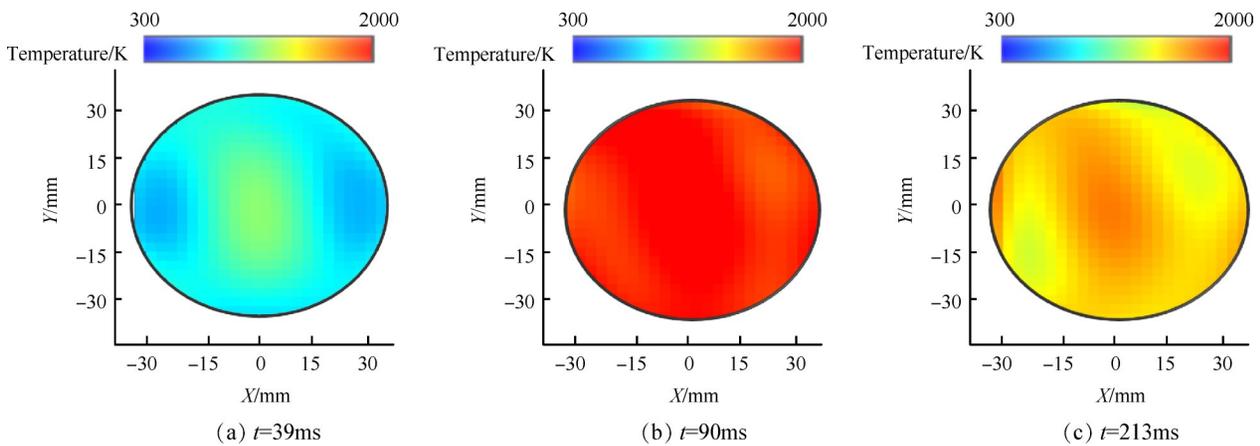


Fig. 10 Time-resolved 2D temperature distribution in test 3 with initial pressure of 0.4MPa using CT-TDLAS

述高压条件下,燃烧过程中温度场的实时动态变化。同时CT-TDLAS具有信号采集频率高达kHz的优势,可以实现1ms间隔的时间分辨测量。因此,针对发动机内出现的燃烧脉动等火焰燃烧动态变化,也可以实现温度信息变化重构<sup>[17]</sup>,满足实时测量的要求。这说明使用1335~1375nm波段处的水蒸汽吸收光谱,在重建带压燃烧流场温度分布方面具有较高的应用价值。

## 5 结论

本文搭建了带压燃烧腔温度测量实验系统,并在燃烧腔内进行了初始压力分别为0.2MPa,0.3MPa,0.4MPa,燃气当量比为1的燃烧实验。实验过程中使用CCD相机、CT-TDLAS测量系统和压力传感器记录了燃烧腔内的燃烧信息。结果表明:

(1)使用修正后的1335~1375nm的宽波段水蒸汽吸收光谱数据库,CT-TDLAS能够较好地对比带压燃烧流场实现间隔1ms的时间分辨二维温度分布重构。

(2)燃烧过程中,CCD相机拍摄的火焰燃烧过程、CT-TDLAS重建的时间分辨二维温度分布结果和压力传感器记录的压力变化过程,三者变化趋势保持一致。从而可以对火焰传播的时间过程做出初步判断。

(3)不同时刻三组初始压力下实验的温度分布对比结果和压力对比结果符合理想气体状态方程的近似计算,说明CT-TDLAS对带压燃烧场时间分辨的二维温度分布结果具有较高的准确性。

根据上述结果可知,CT-TDLAS对带压条件下的燃烧过程有较好的温度还原能力。在后续研究中,可以通过增加CT测量组件中激光路径布置数量,提高CT-TDLAS二维温度重建的准确度;设计CT测量

组件结构,实现燃烧场的三维温度分布重建。利用CT-TDLAS其kHz频率量级的信号采集优势,实现对复杂火焰及燃烧脉动的时间分辨重建,为冲压发动机等的高温高压燃烧过程及燃烧效率优化,提供新的测量技术方案。

## 参考文献

- [1] 金新航,马炳和,邱涛,等.超燃冲压发动机温度及热流测量技术研究进展[J].实验流体力学,2018,32(2):74-81.
- [2] Glass D E, Capriotti D P, Reimer T, et al. Testing of Refractory Composites for Scramjet Combustors[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2016, 32(6): 1550-1556.
- [3] 赵文雅,蒋洪川,陈寅之,等.金属基Pt/ITO薄膜热电偶的制备[J].测控技术,2013,32(4):23-25.
- [4] 许超,王辽,钟晨光,等.吸收光谱法冲压发动机隔离段来流质量的流量测量[J].光学精密工程,2018,26(8):58-65.
- [5] 胡建新,夏智勋,张龙,等.固体火箭冲压发动机补燃室燃烧过程显示[J].推进技术,2007,28(4):337-341. (HU Jian-xin, XIA Zhi-xun, ZHANG Long, et al. Combustion Process in Secondary Combustion Chamber of Ducted Rocket by High Speed Photography and Digital Image Processing [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2007, 28(4): 337-341.)
- [6] Bürkle, Sebastian, Dreizler A, et al. Experimental Comparison of a 2D Laminar Diffusion Flame under Oxy-Fuel and Air Atmosphere[J]. *Fuel*, 2018, 212: 302-308.
- [7] 刘晶儒,胡志云,张振荣,等.激光光谱技术在燃烧流场诊断中的应用[J].光学精密工程,2011,19(2):284-296.
- [8] 洪延姬,宋俊玲,饶伟,等.激光吸收光谱断层诊

- 断技术测量燃烧流场研究进展[J]. 实验流体力学, 2018, 32(1): 43-54.
- [ 9 ] Sun P S, Zhang Z R, Li Z, et al. A Study of Two Dimensional Tomography Reconstruction of Temperature and Gas Concentration in a Combustion Field Using TDLAS [J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(10).
- [10] Choi D W, Jeon M G, Cho G R, et al. Performance Improvements in Temperature Reconstructions of 2-D Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) [J]. *Journal of Thermal Science*, 2016, 25(1): 84-89.
- [11] Wang Z Z, Zhou W Z, Kamimoto T, et al. Two-Dimensional Temperature Measurement in a High-Temperature and High-Pressure Combustor Using Computed Tomography Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (CT-TDLAS) with a Wide-Scanning Laser at 1335-1375nm [J]. *Applied Spectroscopy*, 2020, 74(2): 210-222.
- [12] Wang Y, Wei, Liu T, et al. TDLAS Detection of Propane/Butane Gas Mixture by Using Reference Gas Absorption Cells and Partial Least Square (PLS) Approach [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(20): 8587-8596.
- [13] Kamimoto T, Deguchi Y, Shisawa Y, et al. Development of Fuel Composition Measurement Technology Using Laser Diagnostics [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 102: 596-603.
- [14] Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, et al. The HITRAN 2008 Molecular Spectroscopic Database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, 110(9/10): 533-572.
- [15] Kamimoto T, Deguchi Y, Kiyota Y. High Temperature Field Application of Two-Dimensional Temperature Measurement Technology Using CT Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2015, 46: 51-57.
- [16] Kamimoto T, Deguchi Y. 2D Temperature Detection Characteristics of Engine Exhaust Gases Using CT Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy [J]. *International Journal of Mechanical Systems Engineering*, 2015, 1: 109-116.
- [17] Deguchi Y, Kamimoto T, Kiyota Y. Time Resolved 2D Concentration and Temperature Measurement Using CT Tunable Laser Absorption Spectroscopy [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2015, 46: 315-318.

(编辑:张 贺)