

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107354

冲压发动机羽流温度 TDLAS 在线测量系统*

邱聪聪¹, 曹亮², 陈晓龙³, 杨斌¹, 刘佩进²

(1. 上海理工大学能源与动力工程学院 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室 上海 200093;
2. 西北工业大学燃烧、热结构与内流场重点实验室 西安 710072; 3. 上海航天动力技术研究所 上海 201109)

摘要:为实现碳氢燃料冲压发动机羽流温度在线测量,以 H₂O 分子为目标组分,通过分子光谱仿真计算优选(7 444.352+7 444.371) cm⁻¹-(7 185.586 5+7 185.597 3) cm⁻¹ 谱线对,采用扫描波长直接吸收光谱-时分复用(SDAS-TDM)策略设计了用于碳氢燃料冲压发动机羽流参数测量的可调谐半导体激光器吸收光谱(TDLAS)系统,并利用预混平面火焰炉验证了该系统测温精度,结果显示采用此系统对预混平面火焰炉高度 1 cm 处火焰温度测量结果与标准参考值相对偏差均在 15% 之内。在此基础上,将该系统应用于碳氢燃料冲压发动机羽流参数测量,通过交替调制 1 392 nm 与 1 343 nm 半导体激光器,测量调制激光经待测区域后的光强衰减信号,获得 H₂O 分子在(7 444.352+7 444.371) cm⁻¹ 和(7 185.597+7 185.597 3) cm⁻¹ 谱线吸收光谱,通过双线技术实现了发动机羽流温度在线测量,为碳氢燃料冲压发动机燃烧组织与性能评估提供重要参考。

关键词: 燃烧诊断;可调谐半导体激光器吸收光谱;温度测量;碳氢燃料冲压发动机;光谱学

中图分类号: TH811 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

TDLAS online measurement system for plume temperature of ramjet engine

Qiu Congcong¹, Cao Liang², Chen Xiaolong³, Yang Bin¹, Liu Peijin²

(1. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Science and Technology on Combustion, Internal Flow and Thermo-Structure Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
3. Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: In order to realize the online measurement of hydrocarbon fuel ramjet engine plume temperature, the spectral line pair of (7 444.352+7 444.371) cm⁻¹~(7 185.586 5+7 185.597 3) cm⁻¹ was optimally selected through molecular spectral simulation taking H₂O molecular as the target composition, and tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) system was designed to measure the parameters of hydrocarbon fuel ramjet engine plume using scanned-wavelength direct absorption spectroscopy-time division multiplexing (SDAS-TDM) strategy. Moreover, the temperature measurement accuracy of this system was verified by premixed flat-flamed burner. The results show that the relative deviations between the measured flame temperature at the height of 1cm of the premixed flat-flamed burner using this system and the standard reference value are all within 15%. On this basis, the system was applied to measure the parameters of the hydrocarbon fuel ramjet engine plume. Through alternately modulating of 1 392 nm and 1 343 nm diode lasers, the intensity attenuation signal of the modulated laser passing through the measuring zone was measured, the H₂O molecule absorption spectrums at (7 444.352+7 444.371) cm⁻¹ and (7 185.586 5+7 185.597 3) cm⁻¹ lines were obtained. The online temperature measurement of the hydrocarbon fuel ramjet engine plume was realized with two-line technique, which provides important references for the combustion organization and performance evaluation of hydrocarbon fuel ramjet engine.

Keywords: combustion diagnosis; tunable diode laser absorption spectroscopy; temperature measurement; hydrocarbon fuel ramjet engine; spectroscopy

收稿日期:2020-01-09 Received Date: 2020-01-09

* 基金项目:国家自然科学基金(51806144)、上海市自然科学基金(20ZR1455200)项目资助

0 引言

冲压发动机通过进气道实现来流减速增压,有效利用空气中的氧气作氧化剂。相较于燃气涡轮结构,具有结构简单、大比冲、高速飞行等特点,广泛应用于在导弹等超音速飞行器^[1-3]。羽流参数对了解冲压发动机工作状态与燃烧性能具有重要的价值,其中,羽流温度是表征发动机燃料燃烧效率的重要表征参数之一,其准确测量是冲压发动机试验与性能评估的关键^[4-6]。然而在冲压发动机试验过程中,高速来流从进入进气道后组织燃烧到离开尾喷管时间极短,温度通常超过热电偶等接触式测量方法测温上限,并且具有非稳态、强振动等特点,这对羽流温度的测量提出了更高要求。

随着激光技术与光谱学的发展,红外测温方法、相干反斯托克斯拉曼光谱技术(coherent anti-stokes raman spectroscopy, CARS)、平面激光诱导荧光光谱技术(planar laser induced fluorescence, PLIF)和可调谐半导体激光器吸收光谱技术(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)等光学诊断技术广泛应用于发动机燃烧温度测量^[7-9],促进研究人员开展回流区、边界层、火焰前锋和超音速流等复杂问题研究,从而推动认识复杂燃烧现象。其中,红外测温方法由于发动机燃气红外辐射强度不仅与燃气温度相关,还受到 H₂O、CO₂、碳烟等组分浓度较大影响,在发动机燃气温度测量误差较大。CARS 技术主要广泛运用于单点测量稳态燃烧流场,时间分辨率低(约为 1~30 Hz),高分辨率单脉冲测量手段研究非常少。在研究发动机点火、关机等瞬时流场参数时,会出现信号差且信噪比低等问题,且发动机试验环境压强变化波动大对最终测量 CARS 光谱有较大影响^[10]。PLIF 技术可以实现超声速燃烧火焰放热区结构的二维可视化,但自由基活性强、分布窄、寿命短、荧光效率低,易受杂散光干扰,给自由基的 PLIF 测量尤其是在超声速燃烧环境中测量带来了重大的挑战^[11]。TDLAS 技术通过控制器改变温度和电流快速调制半导体激光器,使激光波长调制到特定组分吸收频段,实现对吸收光谱进行快速扫描,通过测量激光被待测区域中目标吸收分子吸收程度获得流场参数,因其时间响应快,可有效测量出参数极短时间内的变化^[12-14]。半导体激光器的工作波长范围内分布了 H₂O、O₂、CO₂ 等分子吸收光谱,而 H₂O、O₂、CO₂ 作为碳氢燃料重要的反应物和生成物,能够很好的表征燃烧的位置、时间和程度,而且能够很好反应燃烧效率、燃烧程度等性能参数。并且半导体激光器由于其窄线宽的特点,适合开展高分辨分子光谱研究,能够实现多分子的温度、组分浓度等多参数测量。以碳氢燃料燃烧产物作为目标吸收分子,通过测量冲压发动机出口羽流光强衰减信号获得吸收光谱,可实现碳氢燃料冲压

发动机羽流温度在线测量^[15]。

斯坦福大学 Wehe 等^[16]研制探针式 TDLAS 传感器(大小约为 2~18 cm)实现超燃冲压发动机中的温度、流速和水蒸气浓度同时测量。弗吉尼亚大学 Busa 等^[17]结合层析成像技术采用 TDLAT (tunable diode laser absorption tomography) 技术实现了超声速燃烧风洞出口的温度及水蒸气浓度的二维分布测量。航天工程大学屈东胜等^[18]利用波长调制 TDLAS 技术实现燃烧场内气体温度、压强和 H₂O 浓度测量。安徽光学精密机械研究所戴斌等^[19]以航空发动机高温燃烧室为对象,采用 TDLAT 技术结合多光路正交布网方式,实现发动机出口 H₂O 浓度和流场温度二维分布重建。西北核技术研究所陶波等^[20]利用 TDLAS 二次谐波免标定测温原理,在直连式超燃冲压发动机试验台进行温度测量,并利用电控平移台扫描的方式实现了发动机出口段与扩张段温度随空间变化的测量。中国科学院力学研究所李飞等^[21]基于 TDLAT 技术获得了直连式冲压燃烧室出口温度动态二维分布。因此,TDLAS 技术在碳氢燃料冲压发动机燃烧诊断中具有广泛的应用前景。

本文针对冲压发动机羽流温度测量,设计了可实现温度实时在线、非接触测量的扫描波长时分复用直接吸收光谱技术系统,并将选择的谱线对进行光谱仿真分析,并利用平面预混火焰炉对 TDLAS 系统进行初步验证准确性,再根据双线测温原理获得羽流温度。

1 测量原理

TDLAS 技术基于 Beer-Lambert 定律,如图 1 所示,TDLAS 技术利用半导体激光器波长随注入电流变化而变化的特性,通过控制器调制半导体激光器产生与目标分子吸收峰相近波数 ν (cm⁻¹) 下的入射光强 I_i ,经过一定吸收光程的待测区域,与目标分子某一跃迁产生共振时,入射光被吸收而能量衰减,透射光强 I_t 被光电探测器接收,根据获得的吸收光谱求解流场参数。入射光强与透射光强满足 Beer-Lambert 定律:

$$\frac{I_t}{I_i} = \exp(-k_\nu \cdot L) = \exp(-P \cdot X \cdot S(T) \cdot \Phi \cdot L) \quad (1)$$

式中: P 为气体总压,单位:atm; k_ν 为光谱吸收系数,单位:cm⁻¹; L 为激光吸收路径光程,单位:cm,定义 $\alpha_\nu = k_\nu \cdot L$ 为光谱吸收率; X 为吸收组分摩尔浓度; Φ 为归一化的线型函数,单位:cm,且满足 $\int \Phi d\nu = 1$,对于燃烧环境,通常采用 Voigt 线型函数; $S(T)$ 为谱线强度,是关于温度 T 的函数,单位:K。

定义积分吸收率 A 为:

$$A = \int \alpha_\nu d\nu = P \cdot X_{abs} \cdot S(T) \cdot L \quad (2)$$

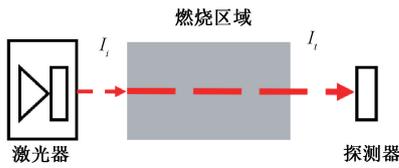


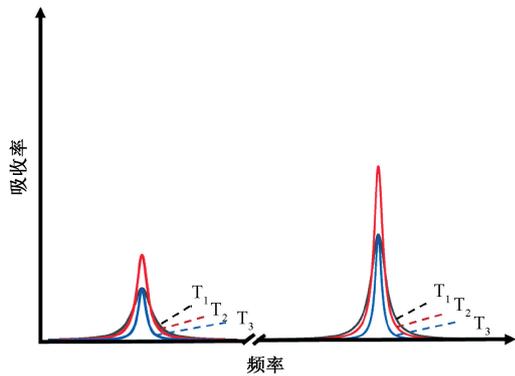
图1 吸收光谱技术原理

Fig. 1 Principle of absorption spectroscopy

TDLAS 测温通常采用双线技术,利用双激光器获取双谱线吸收光谱,根据双线积分吸收率 A 的比值获得温度,可有效消除环境光程等影响。根据式(2)可知,双线积分吸收率的比值 R 为:

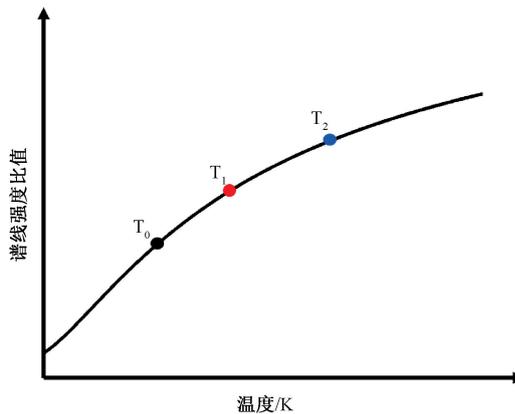
$$R = \frac{A_1}{A_2} = \frac{S_1(T)}{S_2(T)} = f(T) \quad (3)$$

因此,双线积分吸收率的比值 R 是温度 T 的单值函数。双线技术测量得到的吸收光谱如图 2(a) 所示,通过如图 2(b) 所示的双线谱线强度比与温度的对应关系便可获得温度。



(a) 吸收率随频率变化关系

(a) Changing relationship of absorptivity vs. frequency



(b) 谱线强度比值随温度变化关系

(b) Changing relationship of spectral line intensity ratios vs. temperature

图2 双线 DAS 技术测温原理

Fig. 2 Temperature measurement principle of two line DAS technique

2 TDLAS 测量系统设计与验证

TDLAS 技术采用分布反馈式 (distributed feedback, DFB) 半导体激光器作为激光光源,该激光器具有可利用光纤远程传输与控制,快速调制与高可靠性等优点,其工作波长为近红外波段 (1.2~2.0 μm),该波段内分布着丰富的 H_2O 分子吸收谱线。因此,选择 H_2O 作为 TDLAS 测量系统目标吸收组分。

2.1 双线谱线对的选择

根据双线测温原理,设计 TDLAS 测量系统选取 $(7\,444.352+7\,444.371)-(7\,185.586\,5+7\,185.597\,3)\text{ cm}^{-1}$ 谱线对。基于 HITRAN 2016 光谱数据库^[22],对典型工况 (压强 $p=1\text{ atm}$,温度 $T=1\,000\text{ K}$, H_2O 组分浓度 $X=0.1$,光程 $L=12\text{ cm}$) 进行分子光谱仿真,如图 3 所示。可见在典型工况下,该谱线对吸收光谱呈现较强的孤立吸收峰特征,适合采用扫描波长方法获得 H_2O 吸收光谱。

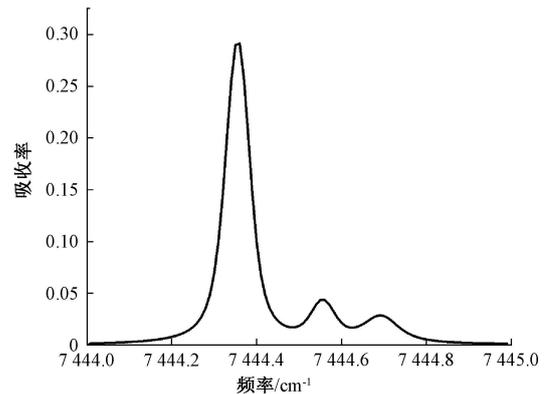
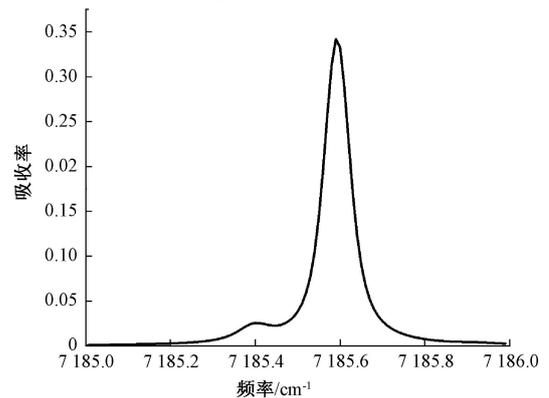
(a) 7 444.352+7 444.371 cm^{-1} 处的理论吸收光谱(a) Theoretical absorption spectrum at 7 444.352+7 444.371 cm^{-1} line(b) 7 185.586+7 185.597 cm^{-1} 处的理论吸收光谱(b) Theoretical absorption spectrum at 7 185.586+7 185.597 cm^{-1} line

图3 典型工况下的理论吸收光谱

Fig. 3 Theoretical absorption spectrums in typical condition

因此,基于 HITRAN 2016 光谱数据库开展 $(7\,444.352+7\,444.371)-(7\,185.586\,5+7\,185.597\,3)\text{ cm}^{-1}$

双线谱线强度及其比值随温度变化计算,如图 4 所示,采用三阶多项式拟合,获得双线谱线强度比与温度的对应关系:

$$T = 1\,284 \times R^3 - 1\,390 \times R^2 + 1\,553 \times R + 213.1 \quad (4)$$

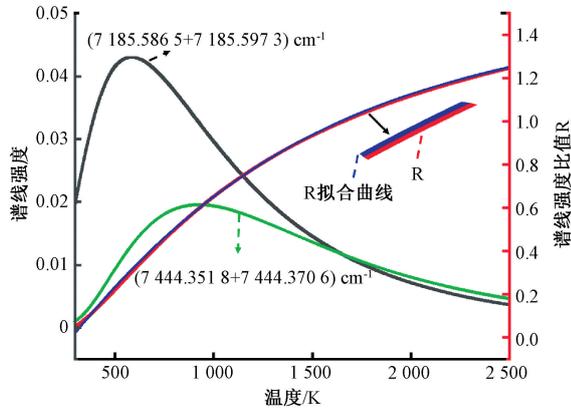


图 4 双线谱线强度及其比值随温度变化关系
Fig. 4 Changing relationship of temperature vs. two-line intensity and its ratio

2.2 冲压发动机羽流参数测量系统设计

为了能够开展冲压发动机羽流温度在线测量,采用扫描波长直接吸收光谱-时分复用(scanned-wavelength direct absorption spectroscopy-time division multiplexing, SDAS-TDM)策略设计的 TDLAS 系统如图 5 所示。由双通道信号发生器(Tektonix AFG3022B)产生相位差为 180°的锯齿波(通道 1:0~3 V,频率为 1 kHz;通道 2:0~6 V,频率为 1 kHz),交替调制 2 个激光控制器(ILXLightwave Inc LDC-3900;CH1:33.8°C,0 mA;CH2:29.4°C,0 mA)输出电流,从而控制 2 个 DFB 半导体激光器(通道 1:1 343 nm;通道 2:1 392 nm,NTT Electronics Corporation)。半导体激光器输出的两路激光由耦合器耦合一路再经由一分二的分束器分成两路,一路激光经准直器输出至自由光谱范围为 1.5 GHz 标准具,用于获得调制周期内激光频率随时间的变化,另一路激光经待测区域被光电探测器接收(InGaAs,Φ2 mm)接收,最后两路都经由信号采集系统(采样频率为 5 000 kHz)采集。

3 TDLAS 测量系统测温验证

3.1 预混平面火焰炉测温验证实验

预混平面火焰炉是通常采用的标准高温燃烧装置,可通过改变燃气当量比和流量获得不同温度的平面均匀火焰,可用于 TDLAS 测温验证。本文采用 LaVision-1108903 型 McKenna 预混平面火焰炉^[23],通过高精度流量控制器控制甲烷和空气流量,甲烷和空气在炉体内部

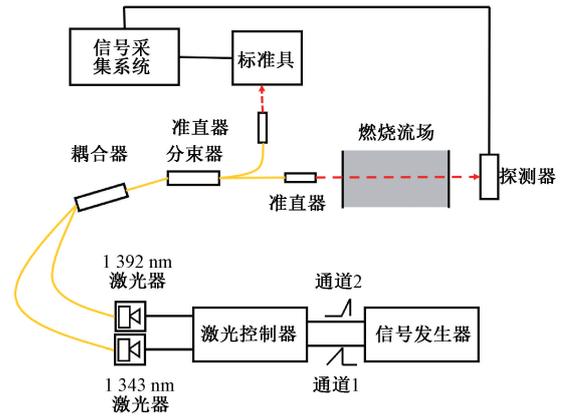


图 5 冲压发动机羽流温度 TDLAS 测量系统
Fig. 5 TDLAS measurement system for plume temperature of ramjet engine

混合均匀,在蜂窝铜材料炉面上形成预混平面火焰。实验选取如表 1 所示的 5 组甲烷和空气流量工况开展,利用设计的 TDLAS 系统测量预混平面火焰炉高度 1 cm 处火焰温度以验证其测温精度。

3.2 典型实验数据处理过程

选取 CH₄ 流量为 2.10 L/min、空气流量为 22.0 L/min 工况作为典型工况进行处理。典型调制周期内探测器与标准具信号如图 6 所示。为了获得相应吸收光谱,采用零吸收基线拟合法,选取三角调制信号中两侧未吸收信号,采用三次多项式拟合得到零吸收基线。根据式(1)计算得到相应吸收光谱,如图 7 所示。其中,时间与激光频率的转换是基于标准具干涉条纹信号采用五阶多项式拟合获得的关系式转换。此外,由于该工况下吸收光谱通常符合 Voigt 线型机制,因此,图 7 所示的吸收光谱为采用 Voigt 线型函数拟合后的结果。在此基础上,根据式(3)获得双线积分吸收率比值 R 为 0.86,再根据式(4)得到火焰温度为 1 337.3 K。

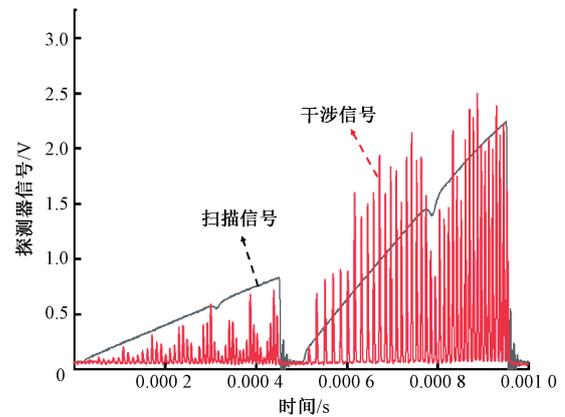
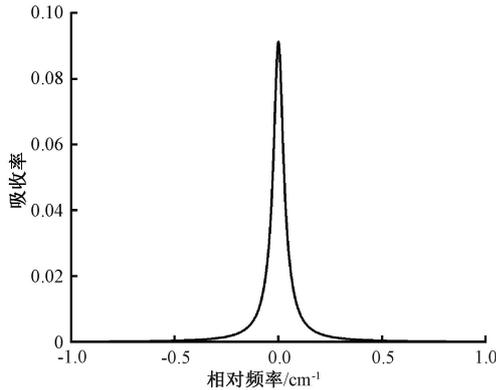
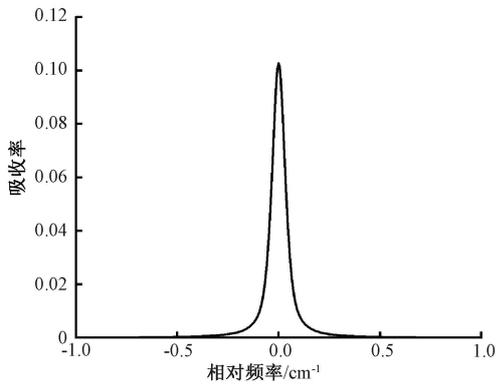


图 6 典型工况的探测器信号和干涉信号
Fig. 6 Detector signal and interference signal in typical working condition



(a) 7 444.352+7 444.371 cm^{-1} 谱线吸收光谱
(a) Absorption spectrum at 7 444.352+7 444.371 cm^{-1} line



(b) 7 185.586 5+7 185.597 3 cm^{-1} 谱线吸收光谱
(b) Absorption spectrum at 7 185.586 5+7 185.597 3 cm^{-1} line

图7 预混平面火焰典型工况双线吸收光谱

Fig. 7 Two-line absorption spectrum of the premixed flat-flamed burner in typical working condition

3.3 测量结果对比分析

取5组实验工况,利用该 TDLAS 系统开展甲烷预混平面火焰温度测量,以参考文献[23]热电偶测温结果及利用 Gaseq 程序化学热力计算温度结果作为标准参考值,三者比较如表1所示。可见该 TDLAS 系统测温结果与热电偶测量结果及化学热力计算结果相对偏差均在15%之内,验证了该系统对火焰测温的精度。

表1 预混平面火焰 TDLAS 测温精度

Table 1 Temperature measurement accuracy of the premixed flat-flame with TDLAS

编号	CH ₄ 流量/ (L·min ⁻¹)	空气 流量/ (L·min ⁻¹)	TDLAS 测温值/ K	参考文献[23]		Gaseq 程序	
				测量结果/K	相对偏差/%	计算结果/K	相对偏差/%
1	1.3	14.0	1 120.3	1 011.5	10.7	1 088.4	2.9
2	1.5	15.0	1 213.6	1 148.6	5.7	1 342.1	9.6
3	1.6	17.0	1 238.6	1 319.1	6.1	1 345.2	7.9
4	2.1	22.0	1 337.3	1 332.9	0.3	1 467.3	8.9
5	2.6	28.0	1 346.9	1 396.8	3.6	1 534.4	12.2

4 冲压发动机羽流参数测量实验

4.1 碳氢燃料冲压发动机试验系统与实验工况

本文利用设计的 TDLAS 系统开展碳氢燃料冲压发动机羽流温度测量。如图8所示,该碳氢燃料冲压发动机由隔离段、支板火箭、凹腔、第一段燃烧室、第二段燃烧室构成,支板火箭位于流道中央,二次燃料自位于隔离段下游壁面均布的小孔喷注。TDLAS 测量系统设置于发动机出口附近。

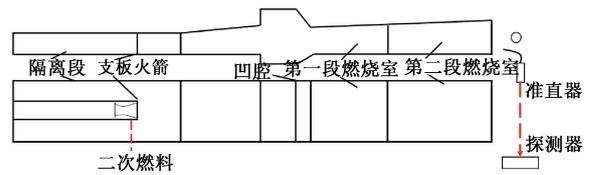


图8 冲压发动机

Fig. 8 Ramjet engine

该碳氢燃料发动机实验时序如9所示,其中,来流系统启动时刻(A)作为实验时间零点,B时刻(1.2 s)支板火箭开始工作,C时刻(2.5 s)喷注二次燃料,D时刻(4.7 s)二次燃料停止喷注,此时支板火箭停止工作,E时刻(7.7 s)来流系统停止工作,实验结束。

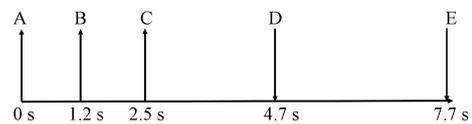


图9 冲压发动机实验时序图

Fig. 9 Experiment time sequence diagram of ramjet engine

4.2 典型实验数据处理过程

选取支板火箭工作时段内2.50~2.60 s时间段作为典型数据进行分析,2.500~2.501 s调制周期探测器信号如图10所示,可见,支板火箭工作后,燃料燃烧产生的H₂O进入羽流,探测器信号出现明显吸收,但由于流场密度导致光路偏斜、燃烧辐射与颗粒散射衰减等影响,信号出现较大波动,特别是对于吸收两侧的零吸收信号,这给零吸收基线拟合造成较大误差。因此,为了消除这类随机信号干扰,对实验数据采用100 ms时间段(100个扫描周期)时均处理,获得2.50~2.60 s时间段探测器时均信号,如图11所示,可见探测器信号的信噪比有了大幅改善,但降低了测量的时间分辨力。

按照前述处理过程,选取三角调制信号中两侧未吸收信号,采用三次多项式拟合得到零吸收基线。根据

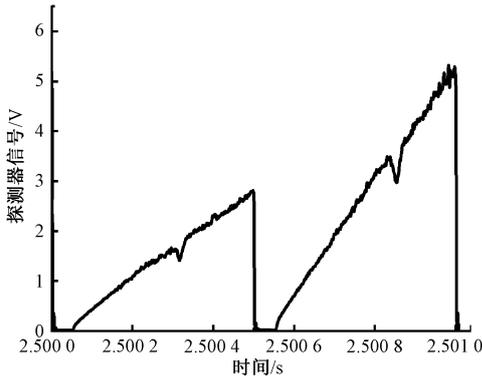


图 10 典型扫描波长周期内的探测器信号

Fig. 10 The detector signal in a typical scanned wavelength period

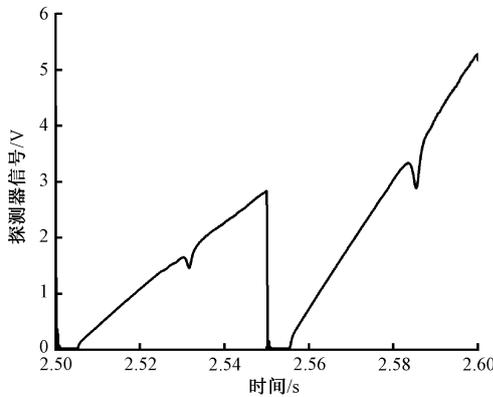
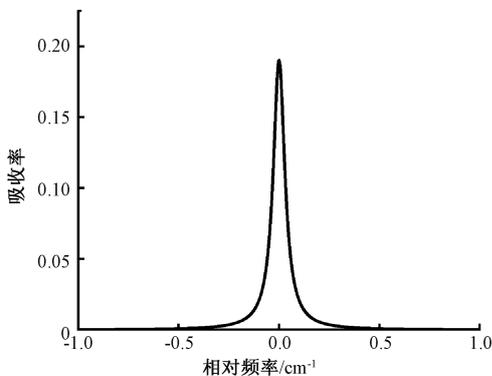


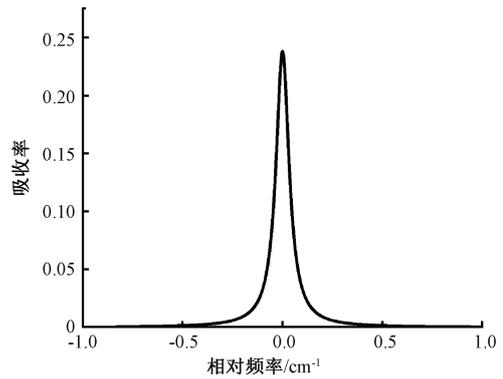
图 11 典型时均处理的探测器信号

Fig. 11 Typical time-averaging processed detector signal

式(1)计算得到相应吸收光谱,并利用 Voigt 线型函数拟合获得 $(7\ 444.352+7\ 444.371)\ \text{cm}^{-1}$ 和 $(7\ 185.597+7\ 185.597\ 3)\ \text{cm}^{-1}$ 谱线吸收光谱,如图 12 所示。根据双线测温技术原理,由式(3)、(4)获得温度测量结果 969.5 K。



(a) 7 444.352+7 444.371 cm^{-1} 谱线吸收光谱
(a) Absorption spectrum at 7 444.352+7 444.371 cm^{-1} line



(b) 7 185.586 5+7 185.597 3 cm^{-1} 谱线吸收光谱
(b) Absorption spectrum at 7 185.586 5+7 185.597 3 cm^{-1} line

图 12 典型时刻双线吸收光谱

Fig. 12 Two-line absorption spectrums at typical moment

4.3 冲压发动机羽流温度测量结果与分析

在冲压发动机试验过程中,有效试验时间段为 B 时刻(1.2 s)-D 时刻(4.7 s),选取该时间段探测器信号进行分析,测量结果如图 13 所示。可见,B 时刻(1.2 s)支板火箭开始工作,燃料燃烧产生的 H_2O 进入羽流,羽流温度为 649.5 K。C 时刻(2.5 s)喷注二次燃料,二次燃料燃烧,羽流温度进一步提高,至 D 时刻(4.7 s)时间段,羽流温度为 1 482.9 K。可见,本文设计的 TDLAS 测量系统能够实现冲压发动机羽流温度在线测量,从而为碳氢燃料冲压发动机燃烧组织与性能评估提供重要参考。

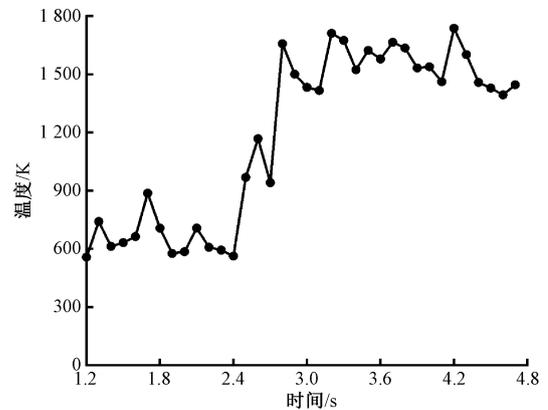


图 13 冲压发动机羽流温度测量结果

Fig. 13 Measurement results of plume temperature of ramjet engine

5 结 论

本文以 H_2O 分子为目标组分,通过分子光谱仿真计算优选 $(7\ 444.352+7\ 444.371)\ \text{cm}^{-1}$ - $(7\ 185.586\ 5+7\ 185.597\ 3)\ \text{cm}^{-1}$ 谱线对,采用 SDAS-TDM 策略设计了

用于碳氢燃料冲压发动机羽流参数测量的 TDLAS 系统, 并利用预混平面火焰炉验证了该系统测温精度, 结果显示采用此系统对预混平面火焰炉高度 1 cm 处火焰温度测量结果与标准参考值相对偏差均在 15% 之内。将设计的 TDLAS 测量系统应用于碳氢燃料冲压发动机羽流参数测量, 通过交替调制 1 392 nm 与 1 343 nm 半导体激光器, 测量调制激光经待测区域后的光强衰减信号, 获得 H_2O 分子在 $(7\,444.352+7\,444.371)\text{ cm}^{-1}$ 和 $(7\,185.597+7\,185.5973)\text{ cm}^{-1}$ 谱线吸收光谱, 通过双线技术实现了发动机羽流温度在线测量, 为碳氢燃料冲压发动机燃烧组织与性能评估提供重要参考。

参考文献

- [1] 袁春飞, 仇小杰. 超燃冲压发动机研究现状及控制系统关键技术[J]. 航空发动机, 2016, 42(4): 1-7.
YUAN CH F, QIU X J. Research status and key technologies of control system for scramjet [J]. Aeroengine, 2016, 42(4): 1-7.
- [2] 李朗, 陈国平, 张伟. 超燃冲压发动机燃烧流场及火焰稳定初步研究[J]. 应用力学学报, 2016, 33(2): 208-214.
LI L, CHEN G P, ZHANG W. Preliminary study on combustion flow field and flame stability of scramjet[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2016, 33(2): 208-214.
- [3] 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.
JIN X H, MA B H, QIU T, et al. Temperature and heat flux measurement technologies in scramjet[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2018, 32(2): 74-81.
- [4] 付蒙, 张海洲, 殷建锋, 等. 高速推进系统温度测量技术发展现状[J]. 推进技术, 2020, 41(9): 2130-2142.
FU M, ZHANG H ZH, YIN J F, et al. Development status of temperature measurement technology for high speed propulsion system [J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(9): 2130-2142.
- [5] 屈东胜, 樊宏杰, 刘连伟, 等. 基于近红外光谱的超声速燃烧场气体参数测量研究[J]. 光学学报, 2020, 40(3): 198-205.
QU D SH, FAN H J, LIU L W, et al. Measurement of gas parameters in supersonic combustion field based on near-infrared spectroscopy [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(3): 198-205.
- [6] 杨斌, 潘科玮, 黄斌, 等. 利用 TDLAS 技术开展碳氢燃料高速燃气参数测量[J]. 推进技术, 2015, 36(8): 1236-1241.
YANG B, PAN K W, HUANG B, et al. Measurements of high-speed hydrocarbon fuel combustion gas using TDLAS [J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(8): 1236-1241.
- [7] 吴戈, 李韵, 万明昱, 等. 平面激光诱导荧光技术在超声速燃烧火焰结构可视化中的应用[J]. 实验流体力学, 2020, 34(3): 70-77.
WU G, LI Y, WANG M G, et al. Visualization of flame structure in supersonic combustion by planar laser induced fluorescence technique [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2020, 34(3): 70-77.
- [8] 晏至辉, 肖保国, 何繁, 等. 煤油燃料超燃发动机燃烧室温度测量与计算分析[J]. 航空动力学报, 2019, 34(3): 521-528.
YAN ZH H, XIAO B G, HE C, et al. Temperature measurement and calculation analysis in a kerosene-fueled scramjet combustor [J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(3): 521-528.
- [9] 王海青, 林伟, 仝毅恒, 等. 基于激光的燃烧场温度诊断方法综述[J]. 气体物理, 2020, 5(1): 42-55.
WANG H Q, LIN W, TONG Y H, et al. Review of laser-based temperature diagnosis methods for combustion field [J]. Physics of Gases, 2020, 5(1): 42-55.
- [10] 杨文斌, 齐新华, 王林森, 等. 基于 CARS 技术的超燃冲压发动机点火过程温度测量[J]. 气体物理, 2020, 5(2): 8-13.
YANG W B, QI X H, WANG L S, et al. Temperature measurement based on CARS in scramjet ignition process [J]. Physics of Gases, 2020, 5(2): 8-13.
- [11] 梁剑寒, 李韵, 孙明波, 等. 超声速燃烧火焰放热区结构 CH-PLIF 成像技术[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(1): 27-33.
LIANG J H, LI Y, SUN M B, et al. CH-PLIF imaging of flame heat-release structures in supersonic combustion [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(1): 27-33.
- [12] 周王峥, 王珍珍, 严俊杰, 等. CT-TDLAS 测量燃烧火焰二维温度分布[J]. 光子学报, 2019, 48(12): 53-61.
ZHOU W ZH, WANG ZH ZH, Y J J, et al. Measurement of 2D temperature distribution of flame using CT-TDLAS [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(12): 53-61.
- [13] 殷可为, 胥頔, 张龙, 等. TDLAS 技术用于燃烧场气体温度和浓度重建研究[J]. 光电工程, 2016, 43(12): 20-27.
YIN K W, XU D, ZHANG L, et al. 2D reconstruction for gas temperature and concentration based on

- TDLAS[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(12): 20-27.
- [14] 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.
CHEN Y J, QIU SH, XU L J. Experimental investigation on absorption line selection in temperature measurement from tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 31(12): 1948-1952.
- [15] 李春圆, 王中宇, 常海涛, 等. 可调谐半导体激光吸收光谱测温谱线选择[J]. *计测技术*, 2019, 39(6): 13-19.
LI CH Y, WANG ZH Y, CHANG H T, et al. Tunable diode laser absorption spectroscopy temperature measurement line selection [J]. *Measuring Technology*, 2019, 39(6): 13-19.
- [16] WEHE S D, BAER D S, HANSON R K. Diode laser sensor for velocity measurements in hypervelocity flows[J]. *AIAA Journal*, 1999, 37(8): 1013-1015.
- [17] BUSA K, BRYNER E, MCDANIEL J, et al. Demonstration of capability of water flux measurement in a scramjet combustor using tunable diode laser absorption tomography and stereoscopic PIV [C]. *AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum & Aerospace Exposition*, 2011.
- [18] 屈东胜, 洪延姬, 王广宇, 等. 基于光谱拟合的燃烧场气体参数测量方法研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(12): 349-356.
QU D SH, HONG Y J, WANG G Y, et al. Measurement method for gas parameters in combustion flow based on spectroscopy fitting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 349-356.
- [19] 戴斌, 阮俊, 阚瑞峰, 等. 基于 TDLAS 技术的燃烧室出口温度场测量[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2015, 28(4): 49-56.
DAI B, RUAN J, KAN R F, et al. Measurement of combustor exit temperature field based on tunable diode laser absorption [J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2015, 28(4): 49-56.
- [20] 陶波, 王晟, 胡志云, 等. TDLAS 技术二次谐波法测量发动机温度[J]. *实验流体力学*, 2015, 29(2): 68-72.
TAO B, WANG SH, HU ZH Y, et al. Engine temperature measurement based on TDLAS second harmonic technique [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2015, 29(2): 68-72.
- [21] 李飞, 余西龙, 林鑫, 等. 基于 TDLAS 的层析成像技术 TDLAT [J]. *力学学报*, 2014, 46(1): 54-59.
LI F, YU X L, LIN X, et al. Tomography technology based on TDLAT [J]. *Chinese Journal of Mechanics*, 2014, 46(1): 54-59.
- [22] GORDON I E, ROTHMAN L S, HILL C, et al. The HITRAN 2016 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, 203: 3-69.
- [23] 杨斌. 用于 RBCC 参数测量的近红外 TDLAS 技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2013.
YANG B. Research on near-infrared TDLAS technology for RBCC parameter measurement [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2013.

作者简介



邱聪聪, 2019 年于南京工程学院获得学士学位, 现为上海理工大学硕士研究生, 主要研究方向为激光光谱燃烧诊断。

E-mail: 193750137@st.usst.edu.cn

Qiu Congcong received his B. Sc. degree from Nanjing Institute of Technology in 2019.

Now, he is a master student in University of Shanghai for Science and Technology. His main research interest includes laser spectroscopy combustion diagnostics.



杨斌 (通信作者), 2007 年于西北工业大学获得学士学位, 2013 年于西北工业大学获得博士学位, 现为上海理工大学副教授, 主要研究方向为多相流与燃烧在线测量方法。

E-mail: yangbin@usst.edu.cn

Yang Bin (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2007 and Ph. D. degree in 2013 both from Northwestern Polytechnical University. Now, he is an associate professor in University of Shanghai for Science and Technology. His main research interest includes online measurement methods for multi-phase flow and combustion.