

激光吸收光谱流场诊断技术应用研究与进展

阚瑞峰*, 夏晖晖, 许振宇, 姚路, 阮俊, 范雪丽

中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 可调谐激光吸收光谱(TDLAS)技术作为一种先进的光谱检测手段已经被广泛应用于燃烧流场和风洞环境的过程诊断中,它可以实现流场温度、组分浓度、气流速度等多参数的在线精确测量。介绍了 TDLAS 技术的基本原理及其在流场参数测量领域的发展历程,总结了近几年来在超燃冲压发动机、航空涡轮发动机以及超声速风洞等流场参数测量方面所开展的 TDLAS 应用实例,着重介绍了在实验室和外场环境中就流速的高精度测量、燃烧场温度和组分的连续监测、场分布的准确反演所做的研究工作。同时概述了激光吸收光谱流场诊断技术的发展水平、目前已经取得的最新研究进展以及还存在的相关问题,最后展望了 TDLAS 技术在流场诊断领域的应用前景和未来的发展趋势。

关键词 吸收光谱; 流场诊断; 流速; 温度; 浓度; 场分布

中图分类号 O433.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0911005

Research and Progress of Flow Field Diagnosis Based on Laser Absorption Spectroscopy

Kan Ruifeng*, Xia Huihui, Xu Zhenyu, Yao Lu, Ruan Jun, Fan Xueli

Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS), as an advanced spectral detection method, has been widely used in the process diagnosis of combustion flow field and wind tunnel environment. It can realize multiple parameters accurate online measurement, such as flow field temperature, species concentration, and airflow velocity. This review introduces the basic principle of TDLAS and its development history in the field of flow field parameter measurement, summarizes the TDLAS flow field application examples in recent years such as scramjet engines, aviation turbine engines and supersonic wind tunnels, mainly focusing on high-precision measurement of flow velocity, continuous monitoring of combustion temperature and species, accurate inversion of field distribution in laboratory and outfield. The development level of laser absorption spectroscopy flow field diagnostic technology, and the latest research progress and related problems that still exist are summarized at the same time. Finally, the application prospect and future trend of TDLAS technology in flow field diagnosis area are anticipated.

Key words absorption spectrum; flow field diagnosis; flow velocity; temperature; concentration; field distribution

OCIS codes 140.3600;300.1030; 300.6260; 300.6340

1 引 言

近年来,随着我国清洁燃烧的政策需求和国防军工事业的不断发展,一方面,工业燃烧产生的大量有毒有害气体需要进行现场监测以达到污染排放控制和环境保护的目的^[1-3];另一方面,超声速飞行器

和高低温风洞等军工装备的研制牵涉到复杂的湍流燃烧和空气动力学模拟试验^[4-5],因此迫切需要高效可靠的流场诊断技术对燃烧过程^[6]、发动机性能^[7]以及风洞工作状态^[8]等做出测量评估。相对于热电偶、气动探针、热线风速仪等传统的接触式流场测量手段,光学诊断方法具有测量信息丰富、响应速度

收稿日期: 2018-04-02; 修回日期: 2018-04-13; 录用日期: 2018-04-28

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0804900,2016YFC0302300)

* E-mail: kanruifeng@aiofm.ac.cn

快、不干扰原始流场等优点^[9-11]。目前,流场诊断中常见的光学测量方法主要有:激光诱导荧光(LIF)法^[12-14]、瑞利散射(RS)法^[15-17]、相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)法^[18-19]、粒子图像测速(PIV)法^[20-21]和可调谐激光吸收光谱(TDLAS)法。其中,TDLAS技术具有非侵入性、灵敏度高、响应速度快、测量结构简单和抗干扰能力强等诸多优点,可以实现流场多参数的实时在线高精度测量,已经成为流场诊断领域中一种非常重要的检测方法。

TDLAS技术起源于20世纪70年代,由于缺乏坚实耐用的激光器,发展一直较为缓慢^[22]。直到90年代,随着通信行业的发展,单模运转、窄线宽、寿命长、价格低廉的分布式反馈激光器(DFB),波分复用技术和光纤耦合器件相继出现,TDLAS技术因此获得了广泛的应用^[6,23-24]。在流场诊断中,TDLAS技术通常以H₂O、CO₂、CO、O₂等气体组分为探针,通过测量温度、浓度、流速和质量流量等关键流场参数^[25-29],可以实现发动机燃烧模型验证、燃烧效率评估、推阻力计算和风洞来流品质鉴定等。此外,将该技术与近红外波段半导体激光器和光纤器件结合起来,还可以集成小型化TDLAS测量系统,实现发动机流场参数天地一致性验证试验^[30-32]。目前,TDLAS技术已经广泛应用于喷气发动机燃烧室羽流^[33]、航空发动机进气道/燃烧室^[34]、超燃冲压发动机隔离段/燃烧室^[35-37]、汽化炉^[38]等燃烧设备的流场测量中。

本文将重点介绍TDLAS技术的研究进展及其在流场诊断中的应用,内容以中国科学院安徽光学精密机械研究所(简称中科院安徽光机所)近年来的研究工作为主,主要包括流速的高精度测量、燃烧流场温度和组分的连续监测、场分布的准确反演,同时也简要介绍了国内外其他相关单位近年来的研究概况,最后就TDLAS技术在中红外光谱检测、场分布高分辨率重建、高温高压光谱反演、低温风洞露点测量等最新研究动态和焦点问题做出讨论和展望。

2 基本理论

TDLAS技术以分子吸收光谱理论为基础,当一束频率为 ν [cm⁻¹]、强度为 I_0 的激光穿过待测流场后,如果激光频率与气体分子的跃迁频率相同,光被吸收并发生光强衰减效应,对于某一种组分的单一吸收来说,入射光强 I_0 和透射光强 I_t 满足 Beer-Lambert 定律^[39]:

$$I_t(\nu) = I_0(\nu) \exp\left\{-\int_0^L P(l)X(l)S_\nu[T(l)]\phi(\nu)dl\right\}, \quad (1)$$

式中: $P(l)$ [atm](1 atm=1.01325×10⁵ Pa), $X(l)$ 和 $T(l)$ [K]分别代表吸收气体在探测位置 l 处的总静压,摩尔分数和温度; L [cm]是吸收光程长度; $\phi(\nu)$ 是归一化的分子吸收线型函数^[39],因此 $\int_{-\infty}^{\infty} \phi(\nu)d\nu=1$;线强 S_ν [cm⁻²·atm⁻¹]表征气体分子对光波的吸收强弱^[40],对于特定的吸收谱线,线强只与温度有关:

$$S_\nu(T) = S_\nu(T_0) \frac{T_0}{T} \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \frac{\exp(-hcE''_\nu/kT)}{\exp(-hcE''_\nu/kT_0)} \cdot \frac{1 - \exp(-h\nu/kT)}{1 - \exp(-h\nu/kT_0)}, \quad (2)$$

式中: $S_\nu(T_0)$ 是参考温度 T_0 (通常为室温296 K)下被测吸收谱线的线强; $Q(T)$ 和 $Q(T_0)$ 分别为被测气体在温度 T 和 T_0 下的配分函数^[41]; h [J·s]是普朗克常数; c [cm/s]为光速; k [J/K]为玻尔兹曼常数; E''_ν [cm⁻¹]为跃迁吸收谱线的低态能级值。对于近红外吸收来说,(2)式中最后一项的值近似为1,通常可以忽略不计^[42]。当气体介质各向均匀时,根据(1)式,定义积分吸光度为

$$A_\nu = \int \ln[I_0(\nu)/I_t(\nu)]d\nu =$$

$$\int_0^L P(l)X(l)S_\nu[T(l)]dl = PXS_\nu(T)L. \quad (3)$$

(3)式中的积分吸光度可以通过光谱线型拟合得到,这里定义吸收系数为压强、浓度和线强的乘积,即 $a_\nu = PXS_\nu(T)$,此时积分吸光度也可表示为吸收系数 a_ν 和光程 L 的乘积:

$$A_\nu = a_\nu L. \quad (4)$$

TDLAS技术根据加载到激光器上扫描信号的不同可以划分为直接吸收(DAS)和波长调制(WMS)两种方案。DAS技术^[43-47]获得的是气体的绝对吸收信息,无需标定,相对简单,适用于强吸收;而WMS技术^[48-52]检测灵敏度较高,分为标定^[53-55]和免标定^[56-59]两种方式,测量原理相对复杂,适用于弱吸收。在DAS测量中,锯齿扫描信号加载到激光器控制模块中,此时窄线宽波长可调谐的激光扫描过一条完整的气体分子吸收线获得直接吸收信号,经过基线扣除、波长标定、线型拟合即可反演出目标分子的积分吸光度、中心频率、展宽等光谱信息^[60]。当激光波长扫描到相同组分具有不同低态能级值的两条吸收谱线时,流场温度可由这两条谱线的积分吸光度之比求出,称之为双线测温法,与高斯展宽法

获得的平动温度不同,该方法获得的是气体的振转温度。一旦温度测量出来,在已知压强和光程的情况下,组分浓度可以通过(3)式确定。

WMS 测量中^[61],激光器控制模块被同时加载低频锯齿扫描信号和频率为 f 的高频正弦调制,此时激光器的输出频率可以表示为

$$\nu(t) = \bar{\nu}(t) + a \cos(\omega t), \quad (5)$$

式中: $\bar{\nu}(t)$ [cm^{-1}]为锯齿波对应的激光器的中心波长; ω 为正弦波的角频率($\omega = 2\pi f$); a [cm^{-1}]为调制深度。在频率被调制的同时,也伴随着激光器的强度调制,激光器的输出光强可表示为

$$I_0(t) = \bar{I}_0[1 + i_0 \cos(\omega t + \varphi_1) + i_2 \cos(2\omega t + \varphi_2)], \quad (6)$$

式中: $I_0(t)$ 为激光器的初始光强; \bar{I}_0 为激光器中心频率处的平均光强; i_0 、 i_2 分别为被 \bar{I}_0 归一化的线性和非线性强度调制幅度; φ_1 、 φ_2 分别是对应的线性和非线性强度调制与频率调制的相位差。这里只考虑了前两阶强度响应项,这些参数均依赖于激光器的调制参数及其频率和光强响应特性。经过调制的激光穿越待测流场后,激光强度同样会因为气体吸收而发生衰减,通过解调透过率谱得到的谐波信号与气体浓度有关。常用的 WMS 技术是基于标定的处理方法,通常选择经 $1f$ 归一化的 $2f$ 信号(WMS- $2f/1f$)用于流场参数反演,这有利于消除光强抖动以及其他噪声或损耗对测量信号的影响,归一化处理后并且扣除背景的 WMS- $2f/1f$ 可以表示为

$$S_{2f/1f} = \sqrt{\left(\frac{X_{2f}}{R_{1f}} - \frac{X_{2f}^0}{R_{1f}^0}\right)^2 + \left(\frac{Y_{2f}}{R_{1f}} - \frac{Y_{2f}^0}{R_{1f}^0}\right)^2}. \quad (7)$$

在常压环境、小调制深度下,强度调制的非线性部分可以忽略^[61]。又由于强度调制和频率调制的反相关系, φ_1 可以近似为 π 。对于波长调制技术常用的弱吸收环境($PXS(T)\phi(\nu)L \leq 0.05$),此时 WMS- $2f/1f$ 信号中心频率 ν_0 处的峰值可以近似表示为^[59]

$$S_{2f/1f} \approx -\frac{1}{i_0} \cdot \frac{S(T)PXL}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} \phi(\nu_0 + a \cos \theta) \cdot \cos(2\theta) d\theta, \quad (8)$$

根据(8)式并利用精确光谱参数可建立双吸收线 $2f/1f$ 信号峰值之比随温度的变化关系,再根据实际测量的比值反推气体特性参数(T, X),该标定方

法在常压、弱吸收、小调制深度的假设条件下成立。

免标定的波长调制技术通常考虑处理 $2f/1f$ 信号的整体谱线,即将(7)式看作是积分吸光度、吸收线型和调制参数的函数^[59]:

$$S_{2f/1f} = \sqrt{\left(\frac{X_{2f}}{R_{1f}} - \frac{X_{2f}^0}{R_{1f}^0}\right)^2 + \left(\frac{Y_{2f}}{R_{1f}} - \frac{Y_{2f}^0}{R_{1f}^0}\right)^2} = f(A, \phi, \text{laser modulation}). \quad (9)$$

选择合适的光强和调制频率模型,结合 Beer-Lambert 定律模拟出调制吸收信号,对模拟的 $1f$ 归一化的 $2f$ 信号和相应的测量信号进行 Levenberg-Marquardt 拟合,最终输出与吸收光谱信息有关的拟合参数。WMS 免标定处理方法没有应用前提的限制,具有更强的测量稳定性和普遍适用性。

将 TDLAS 技术与多普勒频移原理结合起来,可以实现超声速流场的气流速度测量^[62-63],当气流流速在激光传输方向上存在速度分量时,运动的气体分子接收到的光子表观频率与实际激光发生频率之间有一定偏移,二者的频率之差即为多普勒频移,流速和多普勒频移满足:

$$u = \frac{\Delta\nu}{\nu_0} \frac{c}{\cos \theta}, \quad (10)$$

式中: θ 是激光光束和与流速垂直方向的夹角; $\Delta\nu$ 是实验中测量得到的目标吸收谱线多普勒频移; ν_0 是吸收谱线中心频率。实际应用中,通常使用与流速方向成不同夹角的两束激光,并且两光束关于垂直气流的方向呈左右对称,利用两光束谱线中心频差来测量流速。

3 国内外研究现状

从 20 世纪 70 年代末期到现在,美国斯坦福大学的 Hanson 等人在 TDLAS 燃烧流场诊断领域做了大量的开创性研究工作,并取得了丰硕的成果,内容涵盖了实验室高温光谱参数标定^[64]、光谱反演算法研究^[58]、燃烧环境现场测量诊断^[65]等方面。在这期间,国内外有关研究机构也相继开展了 TDLAS 流场诊断研究,所涉及的应用环境和侧重点也越来越多,这进一步推动了激光吸收光谱技术在流场测量领域的发展。国外研究机构如斯坦福大学、弗吉尼亚大学、弗吉尼亚理工大学、曼彻斯特大学、美国空军实验室以及 Zolo 科技公司在 TDLAS 流场诊断方面开展了大量的工作,工程应用和方法理论研究水平一直处于国际领先地位。根据文献的报道,这些单位测量对象包括气体温度、浓度、流速、

压强、场分布、质量流量等,测量设备包括发动机、内燃机、汽轮机、风洞、燃烧炉等,测量目标气体分子包括 H_2O 、 O_2 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 等,应用领域包括燃烧效率评估、清洁燃烧控制、燃烧系统贫油熄火探测、化学动力学研究、发动机推力计算、飞行器传感器设计和试验等,研究较为全面深入。例如:2007年,斯坦福大学 Kent H. Lyle 等^[66]在美国东哈特福德的 Pratt 和 Whitney 涡扇航空发动机地面测试实验中进行了进气道空气质量流量的测量;美国 2011 年进行的高超声速飞行 HIFiRE2 试验准备中,Zolo 科技公司的研究人员利用吸收层析技术设计了发动机燃烧室出口水蒸气温度、浓度分布测量框架^[33];2013年,Ma 等^[67]采用超光谱方法对实际航空推进发动机 General Electric J85 尾喷口气流进行测量,同时重建温度和水汽浓度分布;2013年斯坦福大学 Christopher 等^[56]使用 1392 nm 和 1343 nm 两个 DFB 激光器,利用免标定的波长调制技术测量了膨胀管超声速气流的流速、流场温度、组分浓度以及线型展宽参数。

与国外相比,国内在 TDLAS 流场测量方面的研究起步较晚,直到 2005 年左右才陆续有单位开展 TDLAS 燃烧测量,研究机构主要有中科院安徽光机所、中国科学院力学研究所、浙江大学、北京航空航天大学、天津大学、装备学院、西北工业大学、西北核技术研究所等。目前呈现出跟进快速、涌现式推进发展的态势,也取得了一些研究成果,例如:2011年,西北工业大学的杨斌等^[68]使用两个 DFB 激光器,利用时分复用技术,进行了火箭基组合动力循环(RBCC)直连式地面台架模拟来流的温度、 H_2O 和流速测量;装备学院洪延姬课题组^[69]采用直接吸收和波长调制方法,测量了超声速直连台隔离段内气流温度、组分浓度、速度和质量流量,并开展了燃烧场二维分布重建研究,并于 2017 年基于光谱拟合法研究了燃烧场气体参数测量方法^[70];2015年北京航空航天大学徐立军课题组^[71]使用两个 DFB 激光器,扫描中心频率为 7185.6 cm^{-1} 和 7444.36 cm^{-1} 的水汽吸收线,设计了一套二维层析重建测量系统,利用改进的 Landweber 算法测量了燃烧场二维分布。总体来说,目前国内 TDLAS 流场诊断应用取得了阶段性的研究成果,相关单位研制的测量设备已经具备有效的工程实践能力,随着半导体器件和光谱技术的进一步发展,我国非接触激光吸收光谱流场诊断技术必将逐步取代传统的测量手段,最终

推动流场测量技术的进步。

4 流场诊断应用研究

中科院安徽光机所在前期 TDLAS 环境检测应用研究的基础上^{[-[30,32,72-75]]},自 2009 年开始在国内率先开展了发动机/风洞流场参数的 TDLAS 诊断测量研究。下面根据流场测量内容的不同介绍近几年来所开展的一些 TDLAS 实验室和工程应用研究实例。

4.1 高速气流速度测量

气流流速是高速流场的重要参数之一,它的准确测量对于空气动力学理论研究和工程设计验证试验至关重要,此外,高速流场的流速测量也是推进系统中推力和质量流量计算的前提。目前,TDLAS 技术在风洞、发动机进气道以及燃烧室出口流速测量方面已经引起国内外研究机构的重视,基于多普勒效应和激光吸收光谱技术,选取燃烧产物之一的 H_2O 分子位于 1391.7 nm 中心波长处的单根吸收谱线,利用自行搭建的双光路测量系统和直接吸收光谱法对火箭撬固体推进剂装药燃烧羽流流速进行了静态测量^[62],图 1 为双光路流速测量系统和多普勒频差示意图,其中试验中的两光束夹角为 90° ,光束交叉点距离发动机出口 30 cm。实验室研制了紧凑型 TDLAS 流速测量样机,采用锂电池供电,响应时间达到 30 ms,质量 2 kg,功耗小于 5 W,在线进行光谱数据处理反演流速,测量结果存储在板载 Flash 中,试验结束后经由主控芯片将数据读出。

图 2 为火箭撬静止状态和滑行状态下固体推进剂装药燃烧羽流流速测量结果,其中静态条件下测得的是改性双基推进剂装药的羽流流速,该结果与同时测到的发动机工作压强进行了对比。从图中可见,二者变化趋势一致,流速在某时刻瞬间达到 1100 m/s,然后在 0.33~0.88 s 的时间段内缓慢下降,整个点火过程平均流速为 1057.5 m/s。由于流速测量位置位于发动机出口后 30 cm 处,而压强变化曲线直接反映的是发动机内部情况,故流速响应滞后于压强变化。火箭撬滑行状态下,在撬上搭载 TDLAS 样机,进行动态测量实验,前 2 s 先由助推火箭将火箭撬加速至 240 m/s,然后发动机开始工作,流速上升至稳定区,平均流速为 1249.8 m/s,0.5 s 后推进剂装药燃烧结束,流速降至助推末段的 240 m/s。上述静态试验证明了 TDLAS 系统可有效获取固体推进剂装药燃烧羽流流速,并且能够用于随发动机飞行的动态羽流流速测量。

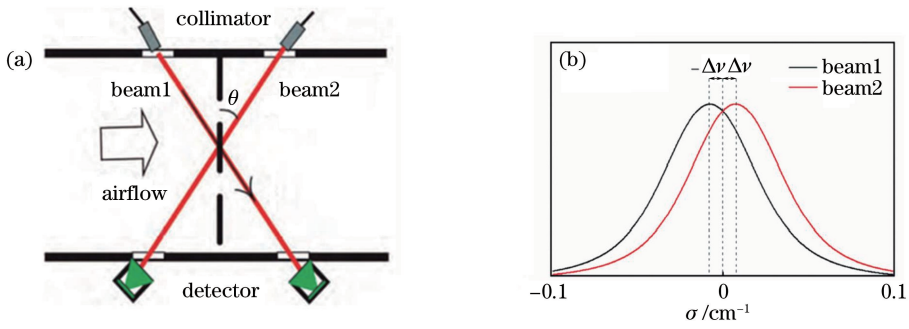


图 1 (a) 双光路流速测量系统示意图; (b) 双光束频差示意图

Fig. 1 (a) Velocity measurement system schematic of double path; (b) double beam frequency difference diagram

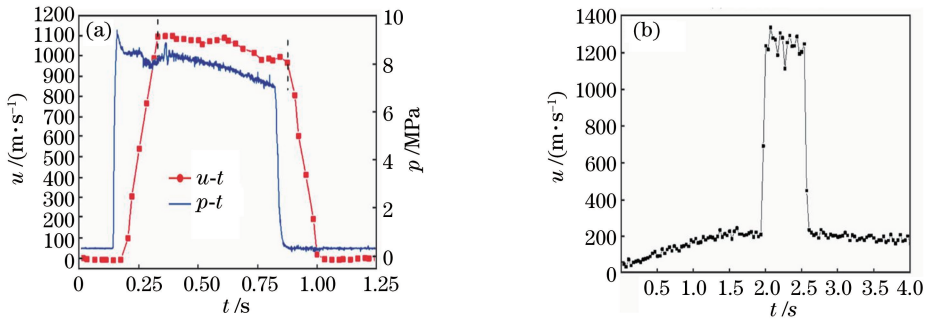


图 2 (a) 火箭撬静止状态发动机燃烧羽流流速和压力传感器压强测量结果; (b) 火箭撬滑行状态发动机燃烧羽流流速测量结果
Fig. 2 (a) Change in plume velocity and pressure in the combustion chamber with time when the rocket pry is stationary;
(b) velocity measurement results when the rocket pry is sliding

风洞是空气动力学研究中最重要工具,它能够有效控制和复现气流状态,在航空航天领域中发挥着不可替代的作用。基于 TDLAS 技术选择近红外 1381 nm 附近的 H₂O 分子吸收谱线 (7242.37 cm⁻¹),研制了小型化流速测量靶,并用于超声速气流速度测定^[76],测量对象是燃烧加热超声速风洞不同位置处高速流场。测量靶的平面结构示意图如图 3(a)所示,包括两个非等长楔形臂和连接它们的结构件,GRIN 透镜用来进行光束准直,M1 和 M2 是平面反射镜,楔形臂的内壁上开有一些压力平衡孔,用于臂内部无障碍的空气流动,臂内部的静态气流和两臂之间的气流具有相同的压强,并且臂内部探

测结果(通过光电探测器 PD)被用作频率参考。

实验风洞直径为 60 cm,内部气流测试状态是马赫数 Ma 为 6.5,总温为 1700 K,总压为 7.2 MPa,上述条件下产生的理论流速值为 1974 m/s,高速气流稳定时间超过 300 ms。测量过程中,真空室内的光纤和线缆放入备用线槽中,并通过法兰连接到腔室外的 TDLAS 电子学系统,以免高速流动吹风造成损坏。图 3(b)给出 TDLAS 传感器测量的同时高速纹影设备记录的纹影图像,可以看出楔形臂之间的气流几乎不受激波的影响。因此,该设计系统测量得到的参数可以很好地反映风洞目标区域的实际流场情况。

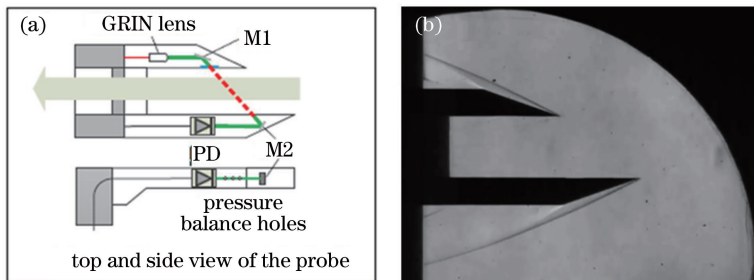
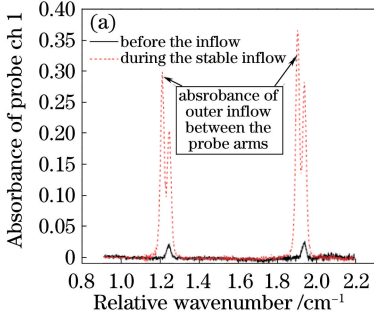


图 3 (a) 流速测量靶内部结构示意图; (b) 实验过程中的高速纹影图

Fig. 3 (a) Internal structure of flow velocity measurement instrument; (b) high-speed schlieren picture during the experiment

以多路信号采集中的 ch1 通道测量结果为例, 实验中采集到典型的吸光度曲线如图 4(a)所示, 可以看到吸收峰中心位置在高速气流稳定流入期间发生变化, 楔形臂之间和臂内部的吸收峰产生了明显的分离, 由于光程长短的差异导致吸收强弱不同, 两个



峰高度不等。利用测量的光谱信号和多普勒频移原理, 可以计算出高超声速风洞气流速度, 如图 4(b)所示, 图中虚线为理论计算的流速数值, 实线为 TDLAS 连续测量结果, 气流稳定后的流速保持在 2050 m/s 附近, 相对于理论值, 测量偏差在 4% 以内。

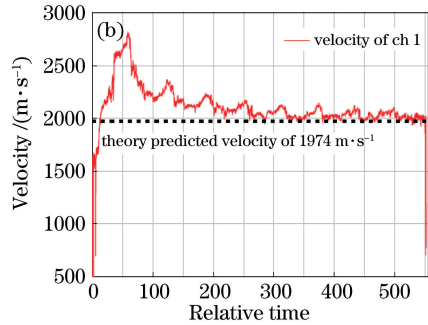


图 4 (a)吸收光谱多普勒频移信号; (b) ch1 通道流速连续测量结果

Fig. 4 (a) Absorption spectrum Doppler shift signal; (b) ch1 channel flow velocity continuous measurement result

除了上述工程试验的现场 TDLAS 流速测量应用, 还在实验室 Ma 为 2.2 的小型风洞上开展了波长调制法流速测量方法研究^[29]和超声速气流中氧气质量流量测量实验^[28], 上述工作丰富了 TDLAS 技术的检测手段和应用范围, 也为台架和飞行试验奠定了实验室研究基础。

4.2 发动机燃烧温度和组分测量

高温高压极端燃烧环境下的流场参数如温度、浓度和压力的 TDLAS 准确测量以高精度的特征光谱参数为基础, 目前公开的光谱数据库在更高和更低温度下的光谱数据误差较大, 难以满足航空航天技术的应用需求。为此在实验室基于三段式高温管式炉研究了碳氢燃料燃烧主要产物 H_2O 、 CO_2 、 CO 气体的高温光谱特性^[77-79], 以 CO_2 分子的测量结果为例, 实验中选择 CO_2 在 $2.0 \mu m$ 附近的两条吸收线作为测量谱线, 结合高温管式炉, 记录了 700~1300 K 温度范围内 CO_2 的 5006.978 cm^{-1} 和 5007.787 cm^{-1} 两条吸收谱线的高温光谱数据^[77]。经多峰 Voigt 光谱线型拟合, 不同温度下的吸光度拟合曲线和同等条件下根据 HITEMP 数据库模拟计算得到的吸光度曲线如图 5 所示。从图中可以看出, 实验测量结果与模拟计算结果的趋势和特征较为符合, 但各温度下实验测量吸光度和吸收线半峰全宽均小于模拟值, 这进一步表明了数据库光谱参数的不准确性。实验中获得 CO_2 高温光谱参数包括谱线强度、自加宽系数、空气加宽系数和温度依赖系数, 其中谱线强度直接关系到温度和组分浓度的计算, 加宽系数和温度依赖系数直接影响压力展

宽的计算, 因此精确的光谱参数标定有利于燃烧环境中气体浓度的准确测量和目标分子精确光谱数据库的补充、完善和建立。

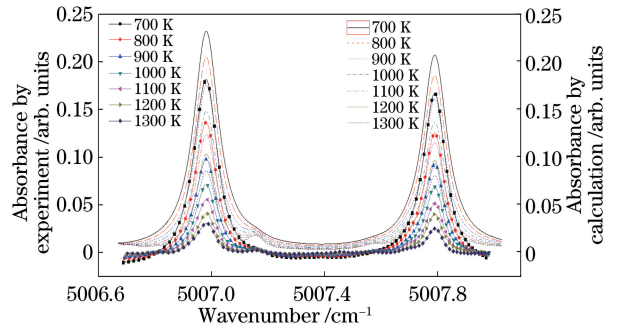
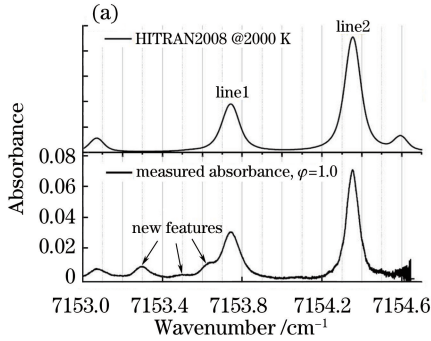


图 5 温度 700~1300 K 时 CO_2 分子的吸光度曲线

Fig. 5 Absorbance curves of CO_2 molecules at temperature from 700 K to 1300 K

实际测量时以 H_2O 分子在 1398 nm 附近的两条吸收线 $7153.722 \text{ cm}^{-1}/7153.748 \text{ cm}^{-1}$ 和 7154.354 cm^{-1} 作为测温谱线, 研究了直接吸收光谱技术温度在线测量方法^[80]。其中 7153.722 cm^{-1} 和 7153.748 cm^{-1} 这两根线具有相同的低态能级值, 即有相同的温度响应特性, 看作一条谱线处理不会对温度反演产生影响。利用实验室已有的高温光谱研究平台首先建立了所选吸收线的精确光谱数据库, 然后在 CH_4/Air 预混平焰炉上进行两条谱线的直接吸收光谱测量, 平焰炉出口尺寸为 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$, 通过流量计设置获得不同燃烧当量比状态, 实验测试当量比范围为 0.7~1.0。图 6(a) 给出当量比 $\varphi = 1$ 时, 平焰炉上测量吸光度和利用 HITRAN08 模拟得到的 H_2O 吸光度, 结果显示吸

收线 7153.7 cm^{-1} 在长波一侧出现了 HITRAN08 数据库中未给出的“热带”吸收, HITEMP 中在该波长处给出了对应的吸收线。对高温下表现出来的“热带”吸收做光谱修正处理, 然后在平焰炉不同当量比状态下进行连续测温实验, 如图 6(b) 所示。图



中温度的理论计算结果为按当量比计算的达到平衡态的绝热温度, 实验中状态 1 空气流量控制结果未达到设定值, 实际当量比略高于 1.0。测量值与理论值的偏差来源于线强不确定度、测量位置差异、热传递和辐射损耗等。

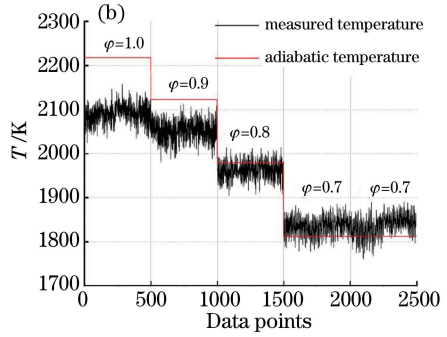


图 6 (a) 所选 H_2O 分子吸收光谱; (b) 平焰炉温度测量结果

Fig. 6 (a) Selected H_2O absorption spectra; (b) temperature measurement result of flat flame burner

在实验室光谱模型建立和温度测量验证后, 基于直接吸收光谱技术研制了 TDLAS 燃烧流场诊断系统, 其中包括激光器驱动、任意扫描信号生成和弱信号放大等电子学模块, 同时加入波长锁定和自动增益控制功能。该系统先后在超燃冲压发动机以及航空发动机台架试验中进行了多次测量, 获得了大量可靠的实验结果, 下面分别举例介绍。

图 7 是利用 TDLAS 技术在超燃冲压发动机台架试验中在线测量得到的从加热器工作、发动机点火到停车整个过程的温度数据和激光强度信号变化曲线, 从图中可以看出, 发动机点火瞬间, 燃烧室出口温度迅速升高到 1600 K 左右, 直到发动机工况改变, 温度下降到 1550 K 附近, 整个点火过程中激光光强保持稳定。在多次试验中, 系统各模块工作正常, 测量结果中温度变化位置和发动机燃烧当量比改变时刻吻合较好, 验证了 TDLAS 测温系统的有效性和准确性。

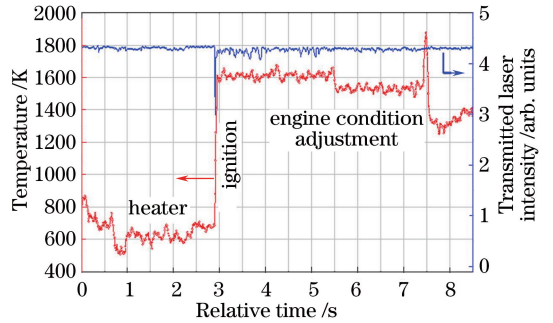


图 7 超燃冲压发动机典型工况下温度与激光信号强度
Fig. 7 Temperature and laser signal intensity under typical operating conditions of the scramjet engine

当前 TDLAS 技术在超燃领域应用较为成熟, 但在航空发动机燃烧流场测量方面应用较少。为此在冲压发动机流场参数测量基础上, 开展了航空发动机中压环境下 ($1\text{ atm} < P < 5\text{ atm}$) 温度测量方法研究^[61], 以航空发动机单头部高温升模型燃烧室为试验对象, 在其矩形出口截面上布置 8 条正交测量光路(水平方向 3 条, 垂直方向 5 条), 基于直接吸收光谱法, 利用研发的 TDLAS 流场诊断系统对燃烧室出口不同位置处的单光路视线 H_2O 浓度和燃气温度进行测量。图 8 中左边是试验件模型图和现场装配图, 右边是某状态下试验件出口温度和浓度变

化曲线, 图中数据是对温度数据输出频率为 14 Hz 的各光路的数据按秒平均后的结果, 可见, 该状态下 8 条光路的测量值均差别较大。由此可以看出, 试验件燃烧室出口温度分布具有明显的非均匀性。

由于 TDLAS 系统具有结构紧凑、便携性高、抗干扰能力强等优点, 在实验室集成了小型化温度测量系统^[31], 体积为 $30\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 10\text{ cm}$, 重量小于 5 kg, 功耗小于 10 W, 该系统可在发动机地面试验条件下稳定工作, 给未来随发动机飞行的小型化传感器系统设计提供参考。

4.3 燃烧场分布反演

由于 TDLAS 是一种视线测量(LOS)技术, 它所测量得到的温度、浓度、压力等流场参数其实是沿路径积分的平均值, 仅依靠单一路径上的测量平均值不能得到流场的内部信息和空间分布特点。然而由于化学反应、流动混合、相位变化、热传递以及流动边界层等效应的存在, 实际的流场具有明显的非

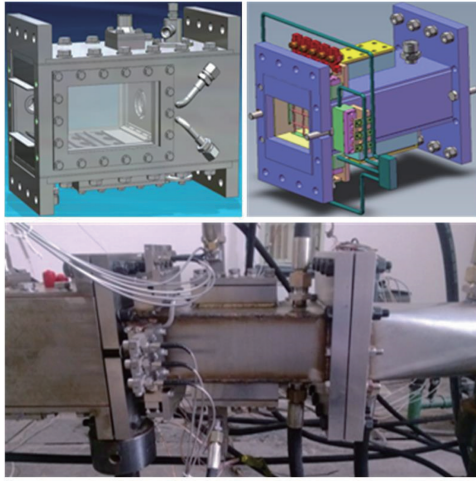


图 8 航空发动机单头部燃烧室模型与 TDLAS 温度浓度测量结果

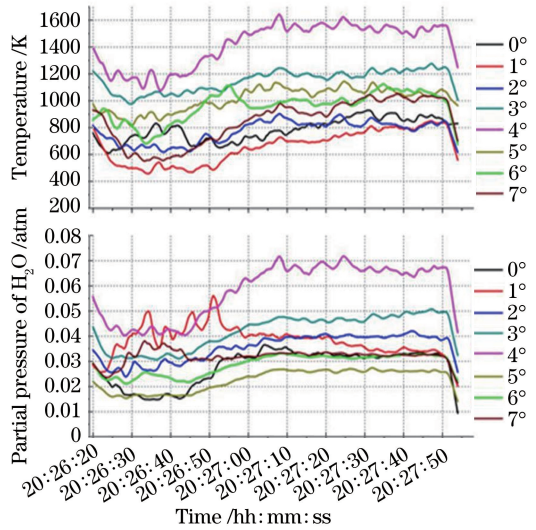


Fig. 8 Aero engine combustion chamber model and temperature concentration measurement results by TDLAS

均匀性,因此研究基于 TDLAS 技术的非均匀燃烧场温度和浓度空间反演方法具有重要意义。

目前,燃烧场的空间分布反演分为一维和二维两种测量方案。流场一维非均匀性研究基于单光路多吸收线扫描 TDLAS 系统,该方法实验装置简单,可以实现激光传输路径上温度一维概率分布测量,但是无法获得燃烧截面空间不同像素点处的温度浓度数据;流场二维非均匀参数测量需要将 TDLAS 技术与计算机层析(CT)算法结合起来,称为 TDLAT 技术。TDLAT 技术的基本原理是根据不同角度下光线经过待测流场后的衰减激光信号,结合 CT 算法得到被测流场的场分布图像。CT 重建技术主要依赖于两类反演算法。一类是变换法,以滤波反投影(FBP)算法^[82]和阿贝尔(Abel)变换法^[83]为代表,FBP 算法具有重建速度快、重建精度高的优点,但是它要求投影数据完备,而且对数据噪声的忍耐性比较差, Abel 变换法主要适用于轴对称场分布的重建。另一类是级数展开法,是目前工程应用中最常用的重建算法类型,主要包括代数迭代算法(ART)^[84-85]、Landweber 迭代算法^[71]、最大熵重建算法(ME)^[86]和最大似然估计法^[87]。此外, Ma 等^[67,88]还提出一种模拟退火算法。第二类算法在少投影或不完全投影时依然能获得较好的重建结果^[89]。

根据发动机测量项目需求,分别研究了廓线拟合法和温度离散化法的非均匀流场一维分布测量原理^[90],在实验室平焰炉上获得了理想的测量结果。同时重点研究了二维场分布反演算法,通过在燃烧

设备出口布置多条交织光路,在实验室圆形平焰炉和外场发动机出口都进行了场分布图像的重建测量。下面着重介绍燃烧流场二维分布测量的具体应用实例。

以 ART 算法为例,在实验室进行仿真模拟研究^[85],依据相关文献在传统 ART 算法中加入自适应修正的迭代松弛因子、非负限定和平滑准则等先验信息,有效地提高了重建准确性和稳定性。当燃烧环境中温度场二维分布重建出来后,浓度可以由(4)式求解,然而温度重建结果一般要优于浓度重建结果,尤其对于浓度分布相对均匀的燃烧流场,这种方法计算出来的浓度场在边缘区域会产生震荡抖动,严重影响重建精度。为此提出针对目标组分浓度图像重建的分布迭代全局优化方法,当重建得到温度矩阵 T 之后,线强 $S(T)$ 可以相应求得,对于网格 (m, n) ,定义一个新的权重因子:

$$L'_{\nu_i, i, (m, n)} = P \cdot L_{\nu_i, i, (m, n)} \cdot S_{\nu_i}(T_{(m, n)}), \quad (11)$$

式中: P 为压强; $L_{\nu_i, i, (m, n)}$ 是吸收线 ν_i 在第 i 条射线线下 (m, n) 网格处产生的几何截距; $S_{\nu_i}(T_{(m, n)})$ 是相应的线强值,所以此时的吸光度方程(3)可以表示为

$$A = X \cdot L'. \quad (12)$$

在投影数据即积分吸光度 A 和权重因子 L' 已知的情况下, (12)式是一个关于浓度 X 的线性方程, 联立所有测量光路下的双吸收线吸光度方程构成线性方程组, 再结合迭代算法直接重建浓度, 将大大提高重建精度。图 9 是利用传统方法和改进方法对水汽浓度场分布进行模拟重建的结果示意图, 重建区域的空间分辨率为 20×20 , 投影光束有 300 条。

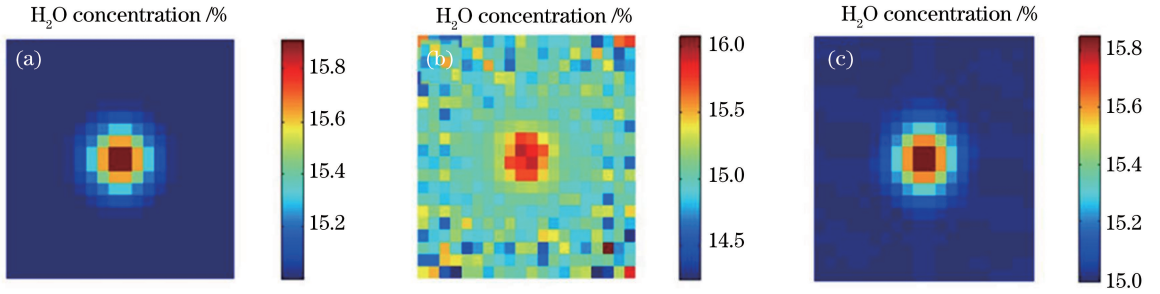


图 9 浓度分布模拟重建。(a)原始浓度分布;(b)传统方法浓度重建结果;(c)分布迭代全局优化法浓度重建结果

Fig. 9 Concentration distribution simulation reconstruction. (a) Original concentration distribution;

(b) concentration reconstruction results by traditional method; (c) concentration reconstruction results by two-step global optimization algorithm

燃烧场分布的实验室测量中^[84], McKenna 平焰炉的炉面直径是 60 mm, 设置 CH₄ 和 Air 预混气体燃烧的当量比为 1.0。在实验室搭建一套二维燃烧流场测量装置, 光束平面位于炉面上方 1 cm 的高度处, 多个自聚焦透镜固定于方形测量框架上, 如图 10 所示。由于炉面直径较小, 单一视角下布置的光线数目会受到很大限制, 这里提出一种光束插空布

局的方式, 经分束器分束的 11 条光路分为 X 方向的 6 条和 Y 方向的 5 条共两组光束, 当这 11 条光路完成投影数据采集后, 借用旋转台将方形框架沿逆时针方向旋转 90°, 旋转后的光束与旋转前的光束恰好组成 11×11 的正交投影布局结构。图 10(b) 中的虚线和实线分别代表旋转前后的激光束, 前后两次采集到的激光衰减信号用于燃烧场分布重建。

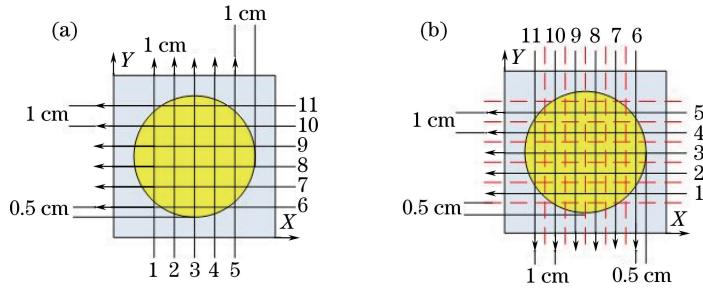


图 10 插空光束布局几何结构示意图。(a)旋转前;(b)逆时针旋转 90°后

Fig. 10 Interpolation beam layout geometry diagram. (a) Without rotation; (b) with an anticlockwise rotation of 90°

实验中所选择的两条测温谱线是 7154.354 cm⁻¹ 和 7467.769 cm⁻¹, 分别利用中心波长为 1398 nm 和 1339 nm 的两个 DFB 激光器通过扫描频率为 1 kHz 的时分复用电路实现吸收线的同时检测, 激光时分复用信号一路经过标准具进行波长标

定, 另一路经过分束器再穿越到待测燃烧流场, 进行吸收光谱探测, 实验过程中的积分吸光度数据由直接吸收光谱的在线 Voigt 拟合得到。将 22 路激光测量光路共 44 个投影数据导入迭代算法程序, 可以同时重建出温度和水汽浓度分布图像, 如图 11 所示, 从图

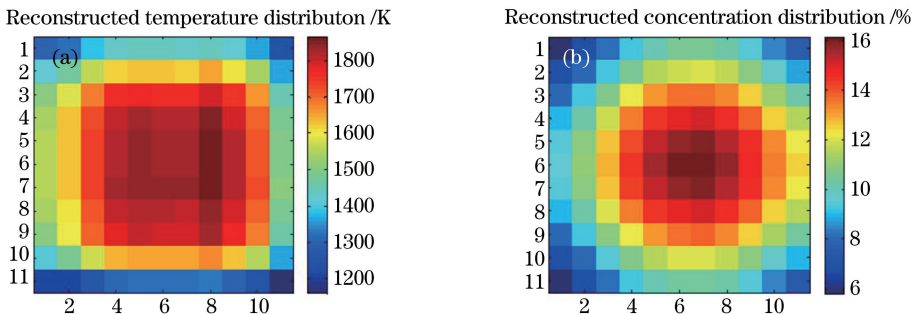


图 11 平焰炉温度和水汽浓度场分布重建结果

Fig. 11 Temperature and vapor concentration distribution reconstruction results of flat flame furnace

中可以看出,平焰炉炉面温度和水汽浓度分布不均匀,且都呈现出中心高、边缘低的特点。

在现场应用方面,利用集成的 TDLAS 系统在涡扇发动机上进行喷管出口温度场分布测量。为便于实施测量,采用独立于发动机的整体框架结构,完成激光发射与接收,激光器和探测器安装在固定的位置。图 12(a)所示为尾喷管出口结构示

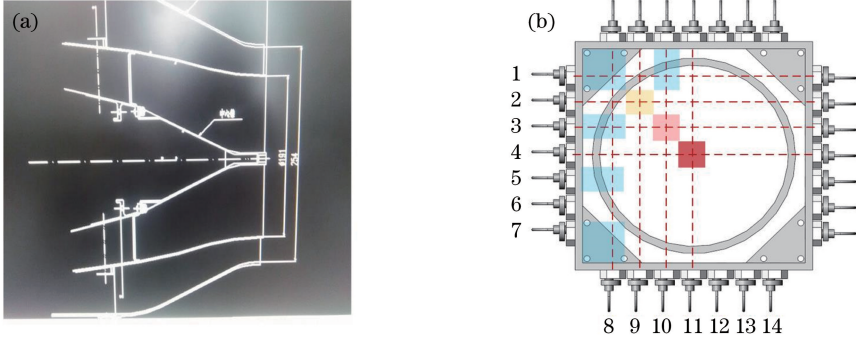
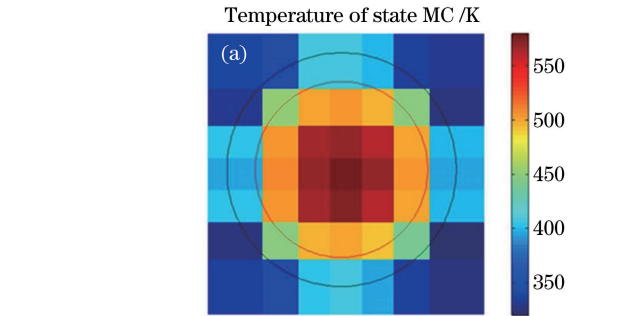


图 12 涡扇发动机尾喷管出口示意图(a)和方形 TDLAS 测量框架图(b)
Fig. 12 Schematic diagram of turbofan engine nozzle outlet (a) and squared TDLAS measuring frame diagram (b)

TDLAS 主机系统对发动机从开车到停车共 4 个状态的燃烧流场进行了测量,利用每条光路测量的路径积分吸收结果,结合迭代层析算法,重建出 7×7 分辨率下每一个网格的温度值。本实验中重建区域包含发动机外涵道,即发动机出口外围,根据这种几何结构,尝试非均等奇异网格划分,如图 12(b)

意图,图 12(b)为正方形测量框架,测量光路保持与尾喷管出口平面平行并且框架中心与出口平面中心重合。考虑到发动机尾喷管可能存在的气流扩张效应,框架尺寸设计为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,且水平方向和垂直方向各布置 7 条光路,每一路激光经准直后从框架一侧发射穿过测量区域,被对面探测器直接接收。



所示。以发动机慢车状态下温度场分布测量为例,图 13 给出直接温度重建绘图以及经二维三次样条差值后的高分辨温度场图像,图中小圈和大圈分别是以测量框中心为原点,内外涵道自身尺寸为半径作圆,从图中可见重建结果与发动机几何构型基本一致。

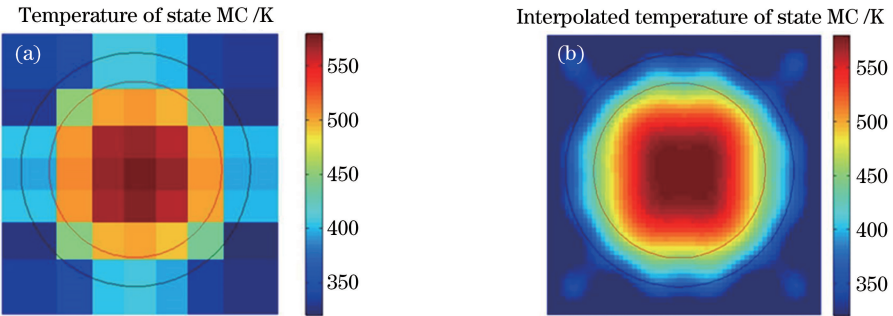


图 13 慢车状态直接重建温度网格(a)和差值后结果(b)

Fig. 13 Directly reconstructed image of local grid (a) and interpolation processing result (b) of state MC

场分布的准确反演与流场复杂程度、重建算法、光路布局、吸收谱线都有关系,目前在数值仿真模拟和实验室验证方面已经开展了多角度投影下的场分布重建、不同重建算法的比较研究、复杂燃烧流场的实验室构建等工作,在发动机场分布试验研究方面,主要以正交光路布局的测量方式为主,后期将进一步优化测量方案,研究稳定可靠的重建算法,拓展新的场分布测量应用。

4.4 最新研究成果

露点,也称为露点温度,它是目标环境中的水汽含量和压力不变的条件下,冷却到饱和而凝结为液态水或结霜时的温度,用于表征气体中水蒸气的含量。大型飞行器飞行时处于高雷诺数状态,极低含量的水汽就会极大地影响气流的粘性力,进而对雷诺数产生重要影响,因此大型低温高雷诺数风洞中水蒸气露点温度的精确测量对雷诺数与马赫数精确

模拟具有不可或缺的作用,而传统的露点检测设备具有响应速度慢、易受干扰、环境耐受力差等缺点,研究将 TDLAS 技术应用于低温风洞环境中露点温度的测量,这对于低温风洞结冰预警、降温除湿操作和空气动力学研究具有重要意义。

在激光光谱应用研究的基础上,利用实验室已

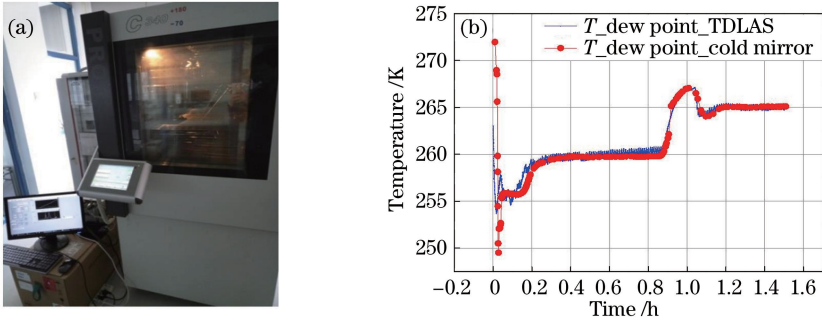


图 14 (a)安徽省气象局标准温湿度箱;(b) TDLAS 与冷镜露点仪测量对比

Fig. 14 (a) Standard temperature and humidity box of Anhui Meteorological Bureau; (b) comparison of TDLAS and cold mirror dew point meters

5 总结和展望

半导体器件的出现和现代电子技术的进步使得 TDLAS 流场测量技术取得了飞速的发展,并在实验室和地面台架试验中得到了广泛的应用,为燃烧控制和发动机性能评估等提供了直接测量数据参考,已经成为流场诊断领域中的一项基本工具。

目前 TDLAS 技术的发展主要围绕以下焦点问题进行:高压环境下光谱展宽问题;复杂非均匀流场高空间分辨率二维测量问题;发动机燃烧反应中低浓度组分的中红外光谱高灵敏检测问题;飞行试验中 TDLAS 传感器的稳定性、可靠性问题等。针对上述科学和技术问题,一些新的研究进展和成果相继出现:波长调制高次谐波归一化处理为高压光谱的测量提供了思路^[91-92];超光谱层析算法的提出解决了重建质量依赖投影光束角度和数目的难题,但同时也对宽范围光谱扫描连续光源提出了强烈的需求^[93-94];高性能中红外激光器的大量投入使用,将为低浓度燃烧产物高灵敏检测和多相流监测创造条件^[95-97];国际高超 HIFiRE 项目中初步开展的 TDLAS 传感器随飞测试,为后续超声速飞行器飞行试验中发动机状态的监测和控制奠定了基础^[33,98]。此外,新的应用领域也逐渐被人们发掘,例如 4.4 节中提到中科院安徽光机所已经在研究将 TDLAS 技术拓展到超低温风洞环境中露点温度的测量中,这将有效提高露点检测的响应时间、精确度

有的低温光谱标定装置和激光波长,搭建 TDLAS 系统研究露点测量原理,并在安徽省气象局标准温湿度箱中进行露点温度测量。同时与冷镜露点仪进行初步对比,如图 14 所示,测量结果相互偏差小于 3 K,验证了激光露点仪研制的可行性,为低温风洞环境下超低露点的检测奠定了实验基础。

和灵敏度等。

为满足我国新型发动机研制、风洞建设和清洁燃烧中流场测量的需求,发展先进可靠的非接触诊断技术势在必行,目前已有的激光吸收光谱技术是保证流场参数精确测量的重要条件,但还需要进一步完善和优化,最终形成权威规范的光学诊断方法体系,有效促进我国军工装备的设计研发水平。

参 考 文 献

- [1] Xu M H, Yan R, Zheng C G, *et al.* Status of trace element emission in a coal combustion process: a review[J]. *Fuel Processing Technology*, 2004, 85(2/3): 215-237.
- [2] Fu G. Study on the emission characteristic of polycyclic aromatic hydrocarbons from coal combustion [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
傅钢. 煤燃烧过程中多环芳烃类有机污染物排放特性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- [3] Wang F, Xiao J F, Wang W, *et al.* Influence of combustion on pollutant discharge of gas turbines[J]. *Thermal Power Generation*, 2015, 44(5): 26-29.
王峰, 肖俊峰, 王伟, 等. 燃气轮机燃烧过程中污染物排放影响规律研究[J]. *热力发电*, 2015, 44(5): 26-29.
- [4] Flack R D. Fundamentals of jet propulsion with applications [M]. London: Cambridge University Press, 2005.
- [5] Mohamed A, Rosier B, Henry D, *et al.* Tunable

- diode laser measurements on nitric oxide in a hypersonic wind tunnel[J]. *AIAA Journal*, 1996, 34(3): 494-499.
- [6] Arimoto H, Takeuchi N, Mukaihara S, *et al.* Applicability of tdlas gas detection technique to combustion control and emission monitoring under harsh environment [J]. *International Journal of Technology*, 2011, 2(1): 1-9.
- [7] Hiers R, MacKinnon H. Validation of stream thrust probes for direct-connect turbine engine testing[C]// 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Fort Lauderdale, Florida, 11-14 July, 2004: 3547.
- [8] Chen Y, Chen C. Rectification control points selection method of triangle mesh in optical pressure measurement of wind-tunnel test [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(8): 085108.
- [9] Ehn A, Zhu J J, Li X S, *et al.* Advanced laser-based techniques for gas-phase diagnostics in combustion and aerospace engineering[J]. *Applied Spectroscopy*, 2017, 71(3): 341-366.
- [10] Zheng L J, Li P, Qin R F, *et al.* Research situation and developing tendency for optical measurement technology of gas density [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(8): 24-32.
郑龙江, 李鹏, 秦瑞峰, 等. 气体浓度检测光学技术的研究现状和发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(8): 24-32.
- [11] Zhuang F C, Li M L, Zhao Y X, *et al.* Combustion diagnosis technology based on spectroscopy measurements [J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2002, 13(4): 32-36.
庄逢辰, 李麦亮, 赵永学, 等. 基于光谱测量的燃烧诊断技术[J]. *装备指挥技术学院学报*, 2002, 13(4): 32-36.
- [12] Kaldvee B, Brackmann C, Ehn A, *et al.* Development of new laser-based concepts for diagnostic challenges in combustion research [C]// *Applications of Lasers for Sensing and Free Space Communications*, Paris, France, 2013. LTh3B.
- [13] Seitzman J M, Kychakoff G, Hanson R K. Instantaneous temperature field measurements using planar laser-induced fluorescence[J]. *Optics Letters*, 1985, 10(9): 439-441.
- [14] Yoo J, Mitchell D, Davidson D F, *et al.* Planar laser-induced fluorescence imaging in shock tube flows[J]. *Experiments in Fluids*, 2010, 49(4): 751-759.
- [15] Barlow R S, Wang G H, Anselmo-Filho P, *et al.* Application of Raman/Rayleigh/LIF diagnostics in turbulent stratified flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(1): 945-953.
- [16] Limbach C M, Miles R B. Rayleigh scattering measurements of heating and gas perturbations accompanying femtosecond laser tagging[J]. *AIAA Journal*, 2017, 55(1): 112-120.
- [17] Miles R B, Lempert W R, Forkey J N. Laser rayleigh scattering [J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, 12(5): R33-R51.
- [18] Cheng J X, Xie X S. Coherent anti-stokes Raman scattering microscopy: instrumentation, theory, and applications[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2004, 108(3): 827-840.
- [19] Roy S, Gord J R, Patnaik A K. Recent advances in coherent anti-Stokes Raman scattering spectroscopy: fundamental developments and applications in reacting flows [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010, 36(2): 280-306.
- [20] Yan F, Rinoshika A. Application of high-speed PIV and image processing to measuring particle velocity and concentration in a horizontal pneumatic conveying with dune model[J]. *Powder Technology*, 2011, 208(1): 158-165.
- [21] Wang H L, Wang Y. Micro-PIV: a new development of particle image velocimetry [J]. *Advances in Mechanics*, 2005, 35(1): 77-90.
王昊利, 王元. Micro-PIV 技术-粒子图像测速技术的新进展[J]. *力学进展*, 2005, 35(1): 77-90.
- [22] Werle P. A review of recent advances in semiconductor laser based gas monitors [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 1998, 54(2): 197-236.
- [23] Hanson R K, Jeffries J B. Advances in laser-based sensors for propulsion systems [C]. 24th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, Portland, Oregon, June 2004. AIAA 2004-2476.
- [24] Zeller W, Naehle L, Fuchs P, *et al.* DFB lasers between 760 nm and 16 μm for sensing applications [J]. *Sensors*, 2010, 10(4): 2492-2510.
- [25] Allen M G. Diode laser absorption sensors for gas-dynamic and combustion flows [J]. *Measurement Science and Technology*, 1998, 9(4): 545-562.
- [26] Schultz I A, Goldenstein C S, Jeffries J B, *et al.* Spatially-resolved TDLAS measurements of temperature, H_2O column density, and velocity in a direct-connect scramjet combustor [C]. 52nd Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum, National Harbor, Maryland, 2014. AIAA 2014-1241.
- [27] Chen X, Kan R F, Yang C G, *et al.* Precise

- measurement of air pressure using tunable diode laser absorption spectroscopy technology [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2015, 26(4): 719-723.
- 陈祥, 阚瑞峰, 杨晨光, 等. 基于 TDLAS 技术的空气气压精确测量[J]. *光电子·激光*, 2015, 26(4): 719-723.
- [28] Jia L Q, Liu W Q, Kan R F, *et al.* Oxygen mass flow detection method in supersonic flow based on TDLAS[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(7): 0730001.
- 贾良权, 刘文清, 阚瑞峰, 等. 采用 TDLAS 的超音速气流中氧气质量流量检测法[J]. *光子学报*, 2015, 44(7): 0730001.
- [29] Jia L Q, Liu W Q, Kan R F, *et al.* Study on oxygen velocity measurement in wind tunnel by wavelength modulation- TDLAS technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(7): 0715001.
- 贾良权, 刘文清, 阚瑞峰, 等. 波长调制-TDLAS 技术测量风洞中氧气流速方法研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0715001.
- [30] Yao L, Li H, Liu W Q, *et al.* Development of a rapid response miniaturized CO₂ monitoring system based on TDLAS [C] // National Conference on Environmental Optics, Hefei, Anhui, 2012.
- 姚路, 李晗, 刘文清, 等. 一种基于 TDLAS 的快速响应小型化 CO₂ 监测系统的研制[C] // 全国环境光学学术会议, 安徽, 合肥, 2012.
- [31] Yao L, Liu W Q, Kan R F, *et al.* Research and development of a compact TDLAS system to measure scramjet combustion temperature [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2015, 29(1): 71-76.
- 姚路, 刘文清, 阚瑞峰, 等. 小型化 TDLAS 发动机测温系统的研究及进展[J]. *实验流体力学*, 2015, 29(1): 71-76.
- [32] Yao L, Liu W Q, Liu J G, *et al.* Measurements of CO₂ concentration profile in troposphere based on balloon-borne TDLAS system[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(10): 2787-2791.
- 姚路, 刘文清, 刘建国, 等. 球载 TD LAS 的对流层 CO₂ 浓度廓线探测[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(10): 2787-2791.
- [33] Jackson K, Gruber M, Buccellato S. HIFiRE flight 2 project overview and status update 2011 [C] // 17th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. 11-14 April, 2011, San Francisco, California, 2011: 2202.
- [34] Bain, James R P. Near infrared tunable diode laser spectroscopy for aero engine related applications[D]. Glasgow: University of Strathclyde, 2012.
- [35] Brown M, Barone D, Barhorst T, *et al.* TDLAS-based measurements of temperature, pressure, and velocity in the isolator of an axisymmetric scramjet [C] // 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Nashville, TN, 2013. AIAA 2013-6989.
- [36] Guo J X, Liu W H, Xu Z Y, *et al.* TDLAS-based measurements of temperature and velocity in the combustor of scramjet[C] // Proceedings of 6th Asia Propulsion and Power International Conference, Xi'an, Beijing: China Engineering Thermophysics Society, 2012.
- [37] Li F, Yu X L, Gu H, *et al.* Simultaneous measurements of multiple flow parameters for scramjet characterization using tunable diode-laser sensors[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(36): 6697-6707.
- [38] Sappay A D, Masterson P, Huelson E, *et al.* Results of closed-loop coal-fired boiler operation using a TDLAS sensor and smart process control software [J]. *Combustion Science and Technology*, 2011, 183(11): 1282-1295.
- [39] Zhang Y W. Molecular spectroscopy [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 1988.
- 张允武. 分子光谱学[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1988.
- [40] Li H. Near-infrared diode laser absorption spectroscopy with applications to reactive systems and combustion control [D]. Palo Alto: Stanford University, 2007.
- [41] Rothman L S, Gordon I E, Babikov Y, *et al.* The HITRAN2012 molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2013, 130(11): 4-50.
- [42] Xu Z Y. Research on temperature measurement and 2D distribution for transient combustion process by infrared absorption spectroscopy [D]. Hefei: University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
- 许振宇. 瞬态燃烧过程红外激光光谱温度场测量与重构方法研究[D]. 合肥: 中国科学院大学, 2012.
- [43] Lins B, Zinn P, Engelbrecht R, *et al.* Simulation-based comparison of noise effects in wavelength modulation spectroscopy and direct absorption TDLAS[J]. *Applied Physics B*, 2010, 100(2): 367-376.
- [44] Nagali V, Chou S I, Baer D S, *et al.* Tunable diode-laser absorption measurements of methane at elevated temperatures[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(21): 4026.
- [45] Tang Y Y, Liu W Q, Kan R F, *et al.* Direct absorption measurement of ambient nitric oxide based

- on room-temperature pulsed quantum cascade laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7656: 76565F
- [46] Duan J H, Jin X, Wang G Y, *et al.* Measurement of gas pressure based on direct absorption spectroscopy [J]. *Physics Experimentation*, 2016, 36(4): 7-11.
段金虎, 金星, 王广宇, 等. 基于直接吸收光谱测量气体的压强[J]. *物理实验*, 2016, 36(4): 7-11.
- [47] Yang B, Pan K W, Yang H N, *et al.* Discussion on the application of combustion diagnostics by wavelength scanning direct absorption spectrometry [J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2015(5): 445-449.
杨斌, 潘科玮, 杨荟楠, 等. 波长扫描直接吸收光谱法燃烧诊断技术适用情况讨论[J]. *上海理工大学学报*, 2015(5): 445-449.
- [48] Cai T, Wang G, Jia H, *et al.* Temperature and water concentration measurements in combustion gases using a DFB diode laser at 1.4 μm [J]. *Laser Physics*, 2008, 18(10): 1133-1142.
- [49] He Q, Dang P, Liu Z, *et al.* TDLAS-WMS based near-infrared methane sensor system using hollow-core photonic crystal fiber as gas-chamber [J]. *Optical & Quantum Electronics*, 2017, 49(3): 115.
- [50] Liu J T C, Jeffries J B, Hanson R K. Wavelength modulation absorption spectroscopy with 2f detection using multiplexed diode lasers for rapid temperature measurements in gaseous flows[J]. *Applied Physics B*, 2004, 78(3/4): 503-511.
- [51] Qu D S, Wang G Y, Pan H, *et al.* Wavelength-modulation spectroscopy for measurements of gas pressure, temperature and H₂O concentration in high-temperature environment [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(5): 1339-1344.
屈东胜, 王广宇, 潘虎, 等. 利用波长调制光谱技术测量高温环境中的气体压强、温度和 H₂O 组分浓度 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(5): 1339-1344.
- [52] Qu S M, Wang M, Li N, *et al.* Mid-infrared trace CH₄ detector based on TDLAS-WMS [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(10): 3174-3178.
曲世敏, 王明, 李楠, 等. 基于 TDLAS-WMS 的中红外痕量 CH₄ 检测仪 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(10): 3174-3178.
- [53] Wei M, Liu J G, Kan R F, *et al.* Open-path detection of atmospheric CH₄ and N₂O based on quantum cascade laser [C] // *Optical Instrumentation for Energy and Environmental Applications 2014*, Canberra, Australia, 2014. Eth3A.3
- [54] He J F, Kan R F, Xu Z Y, *et al.* Derivative spectrum and concentration inversion algorithm of tunable diode laser absorption spectroscopy oxygen measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0430003.
何俊峰, 阚瑞峰, 许振宇, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱氧气测量中的导数光谱处理与浓度反演算法研究 [J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0430003.
- [55] Wei M, Liu J G, Kan R F, *et al.* Study on detection of greenhouse gases based on quantum cascade laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1230003.
魏敏, 刘建国, 阚瑞峰, 等. 基于量子级联激光器的温室气体测量方法研究 [J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1230003.
- [56] Goldenstein C S, Strand C L, Schultz I A, *et al.* Fitting of calibration-free scanned-wavelength-modulation spectroscopy spectra for determination of gas properties and absorption lineshapes [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(3): 356-367.
- [57] Qu Z C, Ghorbani R, Valiev D, *et al.* Calibration-free scanned wavelength modulation spectroscopy: application to H₂O and temperature sensing in flames [J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 16492.
- [58] Sun K, Chao X, Sur R, *et al.* Analysis of calibration-free wavelength-scanned wavelength modulation spectroscopy for practical gas sensing using tunable diode lasers [J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(12): 125203.
- [59] Wei M, Kan R F, Chen B, *et al.* Calibration-free wavelength modulation spectroscopy for gas concentration measurements using a quantum cascade laser [J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(5): 149.
- [60] Krishna Y, O' Byrne S. Tunable diode laser absorption spectroscopy as a flow diagnostic tool: a review [J]. *Journal of the Indian Institute of Science*, 2016, 96(1): 17-28.
- [61] Rieker G B, Jeffries J B, Hanson R K. Calibration-free wavelength-modulation spectroscopy for measurements of gas temperature and concentration in harsh environments [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(29): 5546-5560.
- [62] Yao L, Yao D L, Yi J H, *et al.* Measurement Method of Plume Velocity for Solid Propellant Charge Based on TDLAS [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2016, 39(5): 35-39.
姚路, 姚德龙, 仪建华, 等. 基于 TDLAS 的固体推进剂装药羽流流速测量方法 [J]. *火炸药学报*, 2016, 39(5): 35-39.
- [63] Zhang L, Liu J G, Kan R F, *et al.* High velocity airflow measurement method based on tunable semiconductor laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(3): 034214.
张亮, 刘建国, 阚瑞峰, 等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的高速气流流速测量方法研究 [J]. *物*

- 理学报, 2012, 61(3): 034214.
- [64] Liu X, Hanson R K. A line-of sight absorption of H₂O vapor gas temperature sensing in uniform and nonuniform flows [D]. Palo Alto: Stanford University, 2006.
- [65] Hanson R K. Advances in tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) for measurements of gas properties in combustion systems[C]//CLEO: Science and Innovations. Optical Society of America, 2015: STh4O. 1.
- [66] Lyle K H, Jeffries J B, Hanson R K, *et al.* Diode-laser sensor for air-mass flux 2: nonuniform flow modeling and seroengine tests [J]. AIAA Journal, 2007, 45(9): 2213-2223.
- [67] Ma L, Li X S, Sanders S T, *et al.* 50-kHz-rate 2D imaging of temperature and H₂O concentration at the exhaust plane of a J85 engine using hyperspectral tomography [J]. Optics Express, 2013, 21 (1): 1152-1162.
- [68] Yang B, He G Q, Liu P J, *et al.* TDLAS-based measurements of parameters for incoming flow hot-firing test of air-breathing rocket engine [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(5): 0508006.
杨斌, 何国强, 刘佩进, 等. 利用 TDLAS 技术开展吸气式发动机来流热试实验参数测量 [J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0508006.
- [69] Song J L, Hong Y J, Wang G Y, *et al.* Measurement of supersonic flow parameters using laser absorption spectroscopy [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(11): 3510-3515.
宋俊玲, 洪延姬, 王广宇, 等. 基于激光吸收光谱技术的超声速气流参数测量 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(11): 3510-3515.
- [70] Qu D S, 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): 1230001.
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): 1230001.
- [71] Liu C, Xu L, Chen J, *et al.* Development of a fan-beam TDLAS-based tomographic sensor for rapid imaging of temperature and gas concentration [J]. Optics Express, 2015, 23(17): 22494-22511.
- [72] Chen D, Liu W Q, Zhang Y J, *et al.* Successive measurement of atmospheric ammonia in urban area of Beiiing using open-path TDLAS system [J]. Optical technique, 2007, 33(2): 311-314.
陈东, 刘文清, 张玉钧, 等. 开放光程 TDLAS 系统对北京城区 NH₃ 浓度的连续检测 [J]. 光学技术, 2007, 33(2): 311-314.
- [73] Kan R F, Liu W Q, Zhang Y J, *et al.* High sensitive laser absorption spectrometer using in greenhouse gas monitoring [C] // The 17th Laser Conference Proceedings, Mianyang, Sichuan, 2005.
阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧, 等. 高灵敏激光光谱温室气态监测仪性能测试 [C] // 第十七届激光学术会议论文集, 四川, 绵阳, 2005.
- [74] Shu X W, Zhang Y J, Kan R F, *et al.* An investigation of temperature compensation of hcl gas online monitoring based on TDLAS method [J]. Spectroscopy and Spectrai Analysis, 2010, 30 (5): 1352-1356.
束小文, 张玉钧, 阚瑞峰, 等. 基于 TDLAS 技术的 HCl 气体在线探测温度补偿方法研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(5): 1352-1356.
- [75] Yao L, Liu W Q, Liu J G, *et al.* Research on open-path detection for atmospheric trace gas CO based on TDLAS [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42 (2): 0215003.
姚路, 刘文清, 刘建国, 等. 基于 TDLAS 的长光程环境大气痕量 CO 监测方法研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0215003.
- [76] Xu Z Y, Kan R F, Ruan J, *et al.* A tunable diode laser absorption based velocity sensor for local field in hypersonic flows [C] // Optics and Photonics for Energy and the Environment, 2016.
- [77] Chen J Y, Liu J G, He Y B, *et al.* Study of CO₂ spectroscopic parameters at high temperature near 2.0 μm [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62 (22): 224206.
陈玖英, 刘建国, 何亚柏, 等. 2.0 μm 处 CO₂ 高温谱线参数测量研究 [J]. 物理学报, 2013, 62(22): 224206.
- [78] Nie W, Kan R F, Xu Z Y, *et al.* Measurements of line strengths for some lines of ammonia in 6611-6618 cm⁻¹ [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66 (5): 054207.
聂伟, 阚瑞峰, 许振宇, 等. 6611-6618 cm⁻¹ 之间氨气光谱线强的测量 [J]. 物理学报, 2017, 66(5): 054207.
- [79] Nie W, Kan R F, Xu Z Y, *et al.* Measuring spectral parameters of water vapor at low temperature based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(20): 204204.
聂伟, 阚瑞峰, 许振宇, 等. 基于 TDLAS 技术的水汽低温吸收光谱参数测量 [J]. 物理学报, 2017, 66 (20): 204204.
- [80] Xu Z Y, Liu W Q, Liu J G, *et al.* Temperature measurements based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61 (23): 234204.

- 许振宇, 刘文清, 刘建国, 等. 基于可调谐半导体激光器吸收光谱的温度测量方法研究[J]. 物理学报, 2012, 61(23): 234204.
- [81] Dai B, Ruan J, Xu Z Y, *et al.* Measurement of combustor exit temperature field based on tunable diode laser absorption spectroscopy technology [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2015, 28(4): 49-56.
- 戴斌, 阮俊, 许振宇, 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.
- [82] Martin E, Goynes C, Diskin G. Analysis of a tomography technique for a scramjet wind tunnel[J]. International Journal of Hypersonics, 2010, 1(3): 173-180.
- [83] Villarreal R, Varghese P L. Frequency-resolved absorption tomography with tunable diode lasers[J]. Applied Optics, 2005, 44(31): 6786.
- [84] Xia H H, Kan R F, Xu Z Y, *et al.* Two-step tomographic reconstructions of temperature and species concentration in a flame based on laser absorption measurements with a rotation platform [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 90: 10-18.
- [85] Xia H H, Kan R F, Liu J G, *et al.* Analysis of algebraic reconstruction technique for accurate imaging of gas temperature and concentration based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Chinese Physics B, 2016, 25(6): 064205.
- [86] Bryner E, Diskin G S, Goynes C P, *et al.* Development of an infrared laser absorption tomography system for a scramjet combustor [C] // 25th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, San Francisco, California, 2006. AIAA 2006-3445.
- [87] Llacer J, Meng J D. Matrix-based image reconstruction methods for tomography [C] // Nuclear Science Symposium, Orlando, FL, USA, 31 Oct. 1984.
- [88] Ma L, Cai W W, Caswell A W, *et al.* Tomographic imaging of temperature and chemical species based on hyperspectral absorption spectroscopy [J]. Optics Express, 2009, 17(10): 8602-8613.
- [89] Peng D, Jin Y, Zhai C. Reconstruction algorithms for 2D temperature field based on TDLAS [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1111002.
- 彭冬, 金熠, 翟超. 基于 TDLAS 的二维温度场重建算法[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1111002.
- [90] Zhang G L, Liu J G, Xu Z Y, *et al.* Characterization of temperature non-uniformity over a premixed CH₄-air flame based on line-of-sight TDLAS [J]. Applied Physics B, 2016, 122(1): 3.
- [91] Sun K, Chao X, Sur R, *et al.* Wavelength modulation diode laser absorption spectroscopy for high-pressure gas sensing [J]. Applied Physics B, 2013, 110(4): 497-508.
- [92] Sun K, Sur R, Jeffries J B, *et al.* Application of wavelength-scanned wavelength-modulation spectroscopy H₂O absorption measurements in an engineering-scale high-pressure coal gasifier [J]. Applied Physics B, 2014, 117(1): 411-421.
- [93] An X L, Kraetschmer T, Takami K, *et al.* Validation of temperature imaging by H₂O absorption spectroscopy using hyperspectral tomography in controlled experiments [J]. Applied Optics, 2011, 50(4): A29-A37.
- [94] Kaminski C F. A tomographic technique for the simultaneous imaging of temperature, chemical species, and pressure in reactive flows using absorption spectroscopy with frequency-agile lasers [J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(3): 034101.
- [95] Dong L, Tittel F K, Li C, *et al.* Compact TDLAS based sensor design using interband cascade lasers for mid-IR trace gas sensing [J]. Optics Express, 2016, 24(6): A528-A535.
- [96] Li C, Dong L, Zheng C, *et al.* Compact TDLAS based optical sensor for ppb-level ethane detection by use of a 3.34 μm room-temperature CW interband cascade laser [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 232: 188-194.
- [97] Spearrin R M, Goldenstein C S, Schultz I A, *et al.* Simultaneous sensing of temperature, CO, and CO₂ in a scramjet combustor using quantum cascade laser absorption spectroscopy [J]. Applied Physics B, 2014, 117(2): 689-698.
- [98] Sappay A, McCormick P, Masterson P, *et al.* Development of a flight-worthy TDLAS-based oxygen sensor for HIFiRE-1 [C]. 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Denver, Colorado, 2009. AIAA 2009-4971.