

腔增强吸收光谱氧气组分浓度测量装置及实验研究

宋俊玲¹, 饶伟^{1*}, 王林妍¹, 朱晓辉², 王殿恺¹, 冯高平¹

(1. 航天工程大学空间高效能推进技术及应用全国重点实验室, 北京 101416;

2. 63810部队, 海南文昌 571300)

摘要: 高性能的氧气探测装置可以实现对发动机内部氧气浓度、速度等参数的实时在线监测, 确保发动机处于最优的工作状态。在超燃冲压发动机、航空发动机等发动机流场测试中, 高温高压高速复杂的流场环境和有限的测量空间给高性能流场诊断带来挑战。研制了基于腔增强吸收光谱的氧气组分浓度测量装置, 装置采用嵌入式光学探头结构, 并在发射端和接收端设计了用于系统光路调节与对准的多向调节装置, 便于工程实验。实验结果表明: 在静态环境下系统测量氧气的组分浓度为(20.846±0.97)%, 测量值与参考值保持了较好的一致性; 在激波管实验中, 由于激波管工作时的振动和气流冲击影响了系统对氧气浓度的测量精度, 测量系统捕获到正激波到达前、正激波经过反射激波未到达和反射激波经过三种状态, 测量结果与理论预测结果趋势相吻合。

关键词: 腔增强吸收光谱; 氧气组分浓度; 光学探头; 激波管测量

中图分类号: TN247; O433

文献标识码: A

Cavity-enhance absorption spectroscopy for the measurement of Oxygen concentration

SONG Jun-Ling¹, RAO Wei^{1*}, WANG Lin-Yan¹, ZHU Xiao-Hui², WANG Dian-Kai¹, FENG Gao-Ping¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Space Propulsion, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

2. Troops 63810, Wenchang 571300, China)

Abstract: A high-performance oxygen detection system enables real-time online monitoring of critical parameters such as oxygen concentration and flow velocity inside the engine, thereby ensuring optimal operational performance. In flow field testing for engines such as scramjets and aircraft engines, the complex environment—characterized by high temperatures, high pressures, high velocities, and limited measurement space—poses significant challenges to high-performance flow field diagnostics. To address these challenges, an oxygen concentration measurement device based on cavity-enhanced absorption spectroscopy (CEAS) was developed. The system incorporates an embedded optical probe structure and is equipped with multi-directional alignment stages at both the transmitter and receiver ends, enabling straightforward optical path adjustment and alignment for practical engineering applications. Experimental results indicate that, under static conditions, the system measured an oxygen concentration of (20.846±0.97%), showing good agreement with the reference value. In shock tube experiments, although vibrations and airflow disturbances during operation affected measurement accuracy, the system successfully captured three distinct states: before the arrival of the incident shock wave, after the incident shock wave passed but before the reflected shock wave arrived, and after the reflected shock wave passed. The measured trends in oxygen concentration align well with theoretical predictions.

Key words: cavity-enhanced absorption spectroscopy, Oxygen concentration, optical probe, shock tube experiment

引言

氧气探测具有需求多样性、应用范围广的特

点, 如汽车尾气检测、活力电厂燃烧控制、空间站舱内环境监测等。在航空航天领域, 发动机主要依靠

收稿日期: 2024-12-20, 修回日期: 2025-02-20

Received date: 2024-12-20, Revised date: 2025-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(62175260), 国家重点实验室基金(SKLLPA-202208)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62175260), the State Key Laboratory of Laser Propulsion & Applications (SKLLPA-202208)

作者简介 (Biography): 宋俊玲(1985—), 女, 吉林通化人, 副研究员, 博士学位, 主要研究领域为发动机燃烧流场光学测量. E-mail: songjl@hgd.edu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: raowei-2002@163.com

化石燃料作为推进剂,高性能的氧气探测装置可以实现对发动机内部氧气浓度、速度和压力的实时在线监测,确保发动机处于最优工作状态区间。当前的氧气探测仪如电化学氧气分析仪、顺磁式氧气分析仪等由于其相应速率慢、侵入式测量等原因无法直接应用于高温高压发动机复杂流场氧气的测量。

利用吸收光谱方法对发动机进气道、燃烧室出口 H_2O 、 CO 、 CO_2 等气体温度、浓度测量已有研究^[1-4]。在超燃冲压发动机中,进气道氧气质量流量测量可以为评估发动机性能提供参考。但由于进气道尺寸较小,采用单路径的吸收光谱方法测量信号的信噪比低,此外由于 O_2 吸收谱线强度很弱,在高温下氧分子的吸收随着温度的升高进一步减弱。腔增强吸收光谱技术(CEAS 技术)^[5,6]利用两片镀介质膜高反透镜,构建光学谐振腔,使入射光线在光学腔内多次反射以增加有效吸收光程,该技术具有灵敏度高、检测极限低等优点,可以实现对痕量或弱吸收气体的高灵敏度测量。当前,腔增强吸收光谱技术被广泛用于大气检测^[7,8,9]、呼吸气体检测等方面^[10-11]。1998年,Engeln等^[12]首次实现了CEAS技术在气体分子浓度检测方面的应用,文中虽然没有给出气体组分浓度的具体数值,但是证明了该方法对弱吸收和痕量气体浓度检测的适用性。O'Keefe等^[13]将CEAS技术与连续波窄带宽激光器结合起来,使光更容易耦合到高精度光学腔中。2014年,Sun等^[14]首次将CEAS技术引入到激波管内化学组分分析,采用近红外激光器对激波管中的 C_2H_2 分子进行高灵敏度和快速响应的浓度测量。在 $20 \mu\text{s}$ 的时间分辨率下,906 K 的检测极限为 75.8 ppm,验证了该技术在高温、振动环境中应用的可行性;此后,利用该方法,还实现了对 CO 亚 ppm 级别的浓度测量^[15]。梁帅西等^[16]在机载平台上搭载非相干宽带腔增强测量系统,测量了对流层 NO_2 的轮廓特征。超星等^[17]提出了基于腔增强吸收光谱方法气体传感器的光场建模方法,该方法可以有效预测不同腔结构和激光特性下的传感器性能。王宣等^[18]将波长调制光谱与腔增强吸收光谱相结合测量了 CO 体积分,系统的探测极限为 138×10^{-9} 。饶伟等^[19]利用离轴积分腔吸收光谱测量了平面火焰炉 CO 浓度,测量噪声等效灵敏度为 $3.67 \times 10^{-7} \text{cm}^{-1} \text{Hz}^{-1}$ 。

本文研制了一套适用于激波管的腔增强吸收光谱测量 O_2 测量装置,系统结合可调谐半导体激光吸收光谱方法(TDLAS)测量 H_2O 的温度,利用 760 nm

光源测量 O_2 的组分浓度,系统测量正激波到达前、正激波经过但反射激波未到达和反射激波经过 3 种状态下气体组分浓度变化,系统时间分辨率为 $200 \mu\text{s}$,氧气浓度测量结果与理论预测结果相吻合。

1 基本原理

当一束激光穿过流场,激光频率与流场气体分子的共振频率相同时,激光能量被吸收,根据 Beer-Lambert 定律,激光衰减的表达式为:

$$\frac{I_t}{I_0} = \exp(-\alpha_v) = \exp[-PS(T)\phi(\nu)\chi L], \quad (1)$$

其中 I_0 为入射光强, I_t 为透射光强, α 为光谱吸收率, P 为气体总压, χ 为待测气体组分浓度, $S(T)$ 为所用谱线 ν 在温度 T 时的谱线强度, L 为激光束穿过被测流场的吸收长度, $\phi(\nu)$ 为线型函数,在整个频域上的积分值为 1,公式(1)可以改写为

$$A = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_v d\nu = P\chi S(T)L, \quad (2)$$

其中 A 为积分吸收面积。

腔增强吸收光谱系统是由两个具有高反射率的镜片组成,激光在腔内多次反射,设两个高反镜的反射率为 R , 镜片之间的距离为 L_c 。使用窄线宽连续激光扫描穿过吸收介质,通过透射光强的时间积分得到吸收信号。吸收时的透射光强与无吸收光强之比为:

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{(1-R^2)e^{-kL_c}}{1-R^2e^{-2kL_c}}, \quad (3)$$

其中吸收系数 k 的表达式可以写为:

$$k = \frac{1}{L_c} \left| \ln \left\{ \frac{1}{2R^2} \left[\sqrt{4R^2 + \frac{I_0^2}{I_t^2}(1-R^2)^2} - \frac{I_0}{I_t}(1-R^2) \right] \right\} \right| \quad (4)$$

当腔镜反射率较高,吸收很弱时(如 $kL_c < 0.05$), $\exp(-kL_c) \approx 1 - kL_c = 1 - \alpha$, 上式可变为:

$$\begin{aligned} \frac{I_t}{I_0} &= \frac{(1-R)(1+R)(1-\alpha)}{(1-R+R\alpha)(1+R-R\alpha)} \\ &= \frac{1-R}{1-R+R\alpha} - \frac{(1-R)\alpha}{(1-R+R\alpha)(1+R-R\alpha)} \\ &= \frac{1-R}{1-R+R\alpha} - \frac{1-R}{1-R+R\alpha} \frac{\alpha}{2} \end{aligned} \quad (5)$$

等号后面的第二项与第一项相比为小量,上式进一步简化为:

$$\frac{I_1}{I_0} = \frac{1-R}{1-R+R\alpha} \quad , \quad (6)$$

$$= \frac{1}{1+G\alpha}$$

其中 $G=R/(1-R)$ 。如果吸收进一步变弱,以致于 $GkL_c \ll 1$ 时,结合公式(1)、(2)和(6),腔增强吸收光谱的吸收可表示为:

$$A = -\ln\left(\frac{I_1}{I_0}\right) = \ln(1+G\alpha) = G\alpha \quad . \quad (7)$$

腔提供了线性吸收信号增益, G 也因此称为腔增益,且只与腔镜的反射率有关。实际应用时,由于定制厂家提供的反射率数值不够精确,需要对反射率进行标定。

2 腔镜反射率标定

根据公式(2)可知,在测量环境温度、压力、组分浓度相同时,积分吸光度 A 与吸收长度 L 为线性关系。设计吸收长度已知的长光程池,同时测量长光程池和积分腔的积分吸光度,得到积分腔等效吸收光程 L_{ICOS} ,确定吸收光程增益倍数 G ,即:

$$\frac{A_{\text{long}}}{A_{\text{ICOS}}} = \frac{L_{\text{long}}}{L_{\text{ICOS}}} = \frac{L_{\text{long}}}{G \cdot L_c} \quad , \quad (8)$$

$$G = \frac{A_{\text{ICOS}}}{A_{\text{long}}} \cdot \frac{L_{\text{long}}}{L_c} \quad , \quad (9)$$

其中 L_{long} 为长光程吸收池吸收光程, A_{long} 为长光程池吸光度, A_{ICOS} 为积分腔吸光度。

腔镜反射率即为:

$$R = \frac{G}{G+1} \quad . \quad (10)$$

搭建腔镜反射率标定测量系统如图1所示,实验选用 Nanoplus 公司生产的 761 nmDFB 激光器,氧

气吸收谱线中心波长在 $13\,146.58\text{ cm}^{-1}$ 处。激光通过两个分束器分别入射至积分腔、400 cm 长距离吸收池以及标准具(Thorlabs, SA200-12A),由各分系统后的探测器(Thorlabs, PDA36A-EC)接收透射光强并通过数据采集卡(NI, PCI-6115)保存在计算机中。通过手动平移台调节积分腔腔长分别为 13 cm、14 cm、15 cm、16 cm、17 cm,并确保激光离轴入射。两个镀膜腔镜的尺寸为 $\phi 25.4\text{ mm}$,曲率半径为 $-1\,000\text{ mm}$;聚焦透镜同样采用镀增透膜处理,焦距 $f=50\text{ mm}$ 。

实验温度为 300 K,信号发生器输出电压为 500 mVPP,设置频率为 1 kHz 的三角波信号对激光器输出波长进行扫描,数据采集卡采样率为 10 MHz,每个腔长采集 10 组吸收信号数据,每组数据平均 50 次后,作为该长度下的测量值。图2为 1 kHz 扫描下氧气吸收谱线测量的长程池、积分腔和参考信号。

利用 HITRAN 分子数据库^[20]中提供的氧气 $13\,146.58\text{ cm}^{-1}$ 谱线的信息,其中吸收谱线强度 $S(296\text{ K}) = 2.12 \times 10^{-4}\text{ cm}^{-2}\text{ atm}^{-1}$,下态能级 $E'' = 128.3979\text{ cm}^{-1}$ 。采用 Galatry 线型函数对吸收信号进行拟合,长程池和积分腔拟合结果及残差如图3所示,从图中可知,积分腔的吸收峰值约为长光程参考池的3倍,二者拟合后的残差值在 0.003 以内。

实验中长光程吸收池采集了 50 组吸收信号,吸光度经过 50 次平均后为 $A_{\text{long}} = 0.0161$,标准差 $\sigma = 1.88 \times 10^{-4}$ 。根据不同长度下积分腔吸光度 A_{ICOS} 和增益 G 的结果如图4所示,吸光度 A_{ICOS} 随着腔长增大而均匀增加,证明积分腔在腔长增大过程中保持稳定

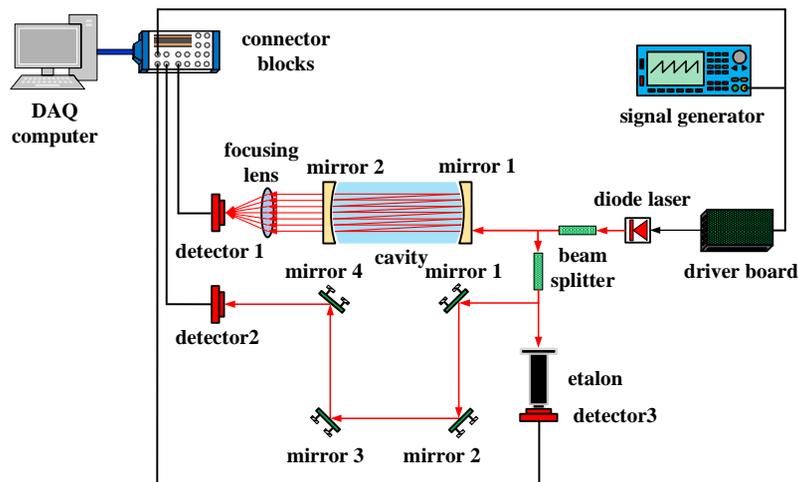


图1 腔镜反射率标定测量系统示意图

Fig. 1 Schematic illustration of mirror reflectance calibration measurement system

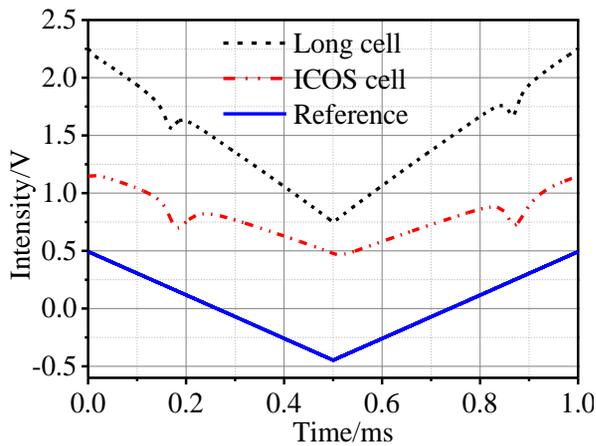


图2 中心波长为 13146.58cm^{-1} 氧气吸收谱线, 1kHz 扫描时长光程池和积分腔吸收测量信号

Fig. 2 The absorption measurement signals of 13146.58cm^{-1} O_2 absorption line in long reference cell and integrated cavity at 1kHz scans

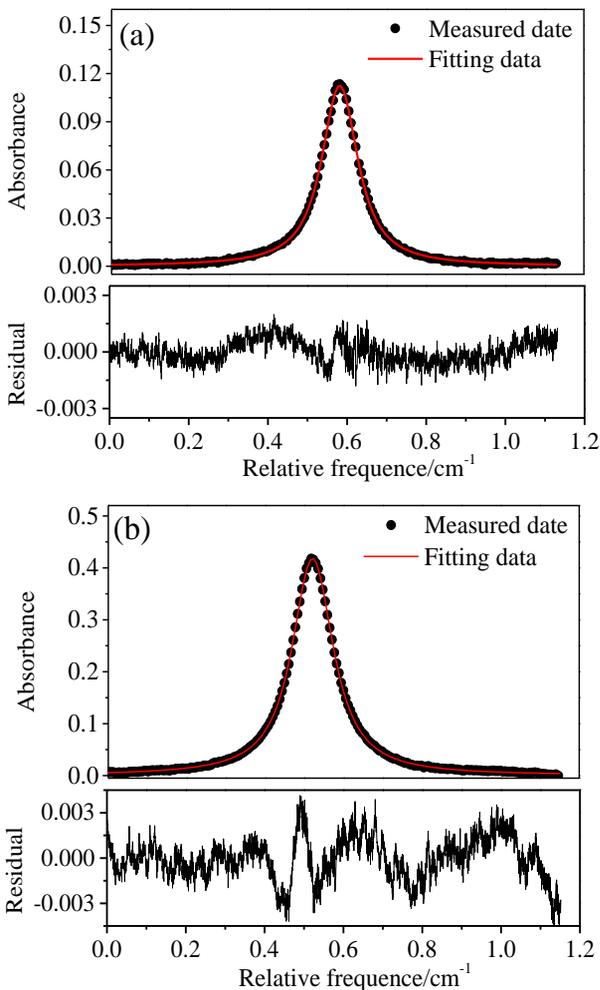


图3 氧气吸收谱线:(a)长光程池拟合结果与残差值;(b)积分腔拟合结果与残差值

Fig.3 O_2 absorption fitting results and residuals in (a) long reference cell; (b) integrated cavity

状态,等效吸收光程与实际腔长保持等比例关系。每一个腔长条件下,吸光度测量值波动幅度低,标准差较小。图4中光程增益倍数平均值 $\bar{G}=84.80\pm 0.39$, 可得到标定过后的腔镜反射率 $R^*=98.83\%$ 。设 2σ 为积分吸光度测量的极限值,计算在温度为 300 K, 气体静压为 1 atm, 积分腔长度为 6.5 cm 时, 氧气组分浓度的探测极限为 0.006 9。

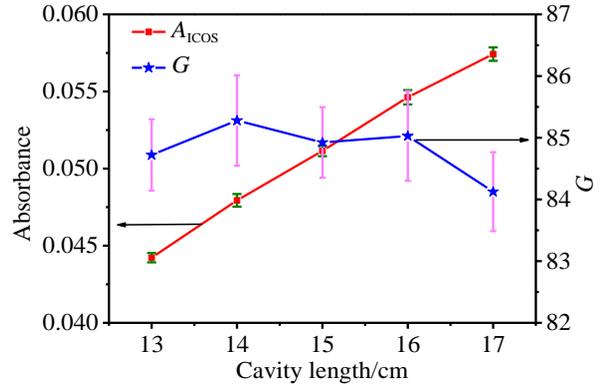


图4 吸光度 A_{ICOS} 和增益倍数 G 在不同腔长下的测量结果

Fig. 4 The measurement results of absorbance A_{ICOS} and gain factor G at different cavity lengths

3 激波管及光学测量装置

激波管为方形管体设计,同时由驱动段(驱动部分)、夹膜段、破膜机构以及被驱动段(被驱动部分)构成。其中,驱动段总长 6 m,被驱动段总长 6.4 m。破膜机构可分别采用手动针刺破膜与被动破膜方式。激波管装置结构示意图如图5所示。激波管各管体由阴阳面法兰连接,并配有密封圈以保证管体的气密性。

图6为激波管实验系统实物图,其中包含了激波管实验平台和光学测量装置。图7为波管被驱动段测量实验装置示意图。激波管驱动段使用高纯氦气和空气的混合气体进行充高压操作,被驱动段使用空气。实验时,按照设定的工况,直接对驱动段填充高纯氦气直到设定压力,被驱动段则使用真空泵进行抽气处理直到设定的压力状态下。手动破膜之后,PCB 压力测量系统记录下激波经过对应传感器位置处的电压信号,根据电压信号相邻跃升点的时间差,再结合相邻探测器之间的实际安装距离,推算出激波速度。传感器安装测量装置和信号输出与采集装置共同构成了光学测量装置,对被驱动段内气体的光谱吸收信号进行采集与存储。

供气系统由高压气瓶组、导气管、压力表等组

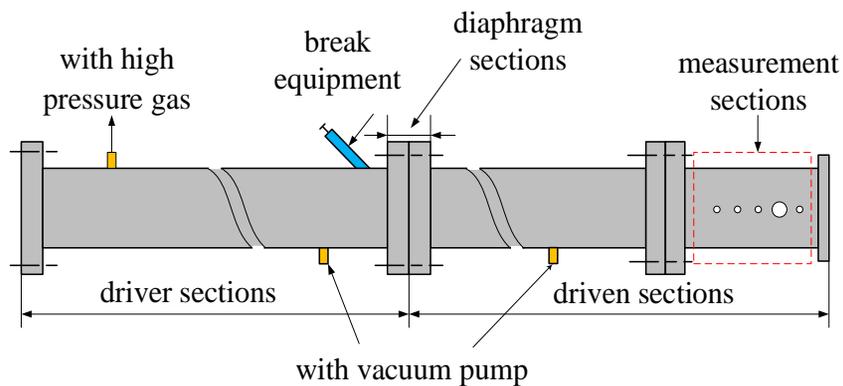


图5 激波管结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of shock tube structure

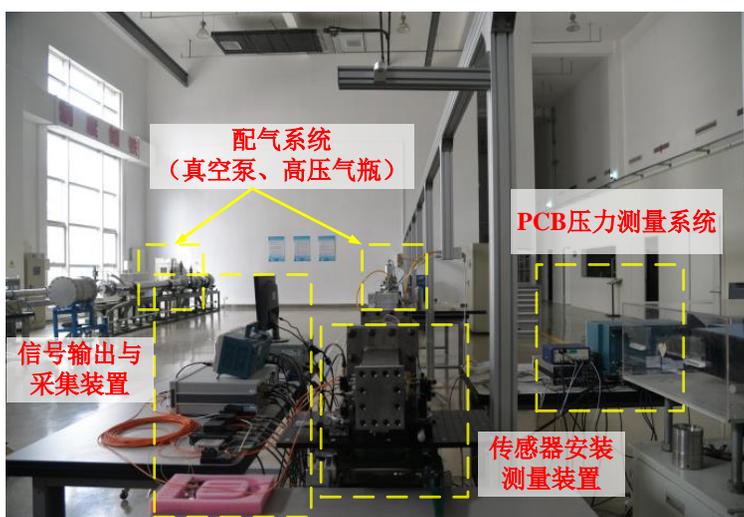


图6 激波管实验系统照片

Fig. 6 Photograph of shock tube experimental system

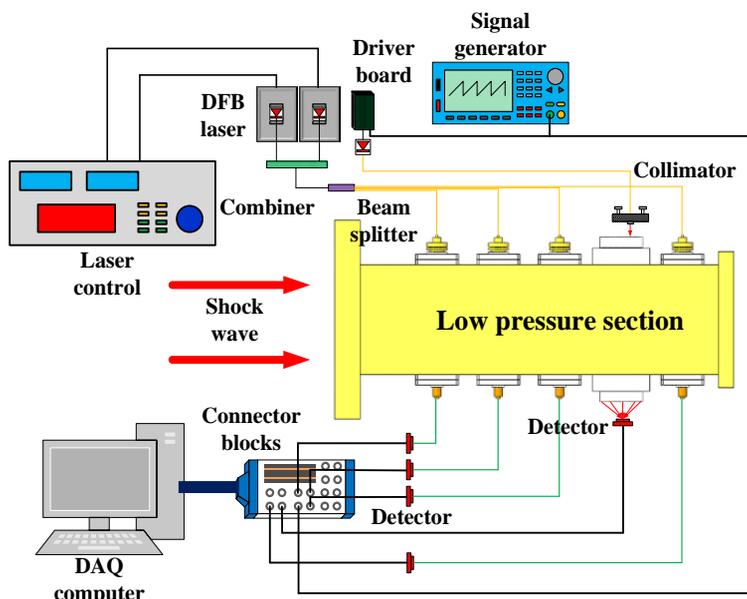


图7 激波管光学测量装置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of optical measurement device for shock tube

成。本文使用灌装有高纯 He 的高压气瓶,可以提供最高达 20 atm 的高压。被驱动段不进行充气处理,使用空气作为填充介质。配气时,驱动段和被驱动段均可以通过两级真空泵单独或同时进行抽气处理。

为准确计算被驱动段入射和反射激波速度,实验采用 3 个 PCB 压力传感器和高采样率、高灵敏度示波器作为测量装置。每个 PCB 压力传感器的间距为 3 cm,为避免对激波管内流场造成流动干扰,每个 PCB 传感器前端与激波管内壁面齐平。实验中,当激波到来,PCB 接收到压力传感信号,并通过信号调节器传送给示波器,示波器将压力信号显示并存储。

图 8 给出了不同光学探头在激波管被驱动段的安装相对位置示意图,其中试验段有 4 个测量孔,分别安装了 3 路 H₂O 光学探头,和 1 路 CEAS 探头,分布如图,探头间距为 60 mm。由于采集卡采样通道数有限,H₂O 的吸收信号只采集了后 3 路。最后一个 PCB 传感器距离第 1 路 H₂O 传感器的距离为 250 mm,最

后一路 H₂O 传感器距离试验段尾端为 35 mm。

设计了 TDLAS 和 CEAS 光学测量装置如图 9 所示。CEAS 光学测量装置采用嵌入式的激光探头,发射端和接收端均包含内外套筒两个部件,其中外套筒为同一尺寸,内套筒则根据接发收端光学镜片数量而略有差别。内套筒通过四个紧固螺丝与外套筒连接,并留有通孔作为激光的入射口和出射口。在发射端,高反透镜与四氟垫圈安装在内外套筒之间;在接收端,高反透镜与聚焦透镜之间设计有厚 7 mm 的四氟垫圈,以防止两块光学镜片之间发生接触而降低光学性能,聚焦透镜与内套筒之间也设计有四氟垫圈起缓冲作用。外套筒前端内侧设计有 45° 斜坡面,使其与高反透镜反射端面外径倒角贴合,起到定位阻止作用,两者用真空胶粘合,进行密封处理。安装时外套筒内侧与激波管内壁平齐,积分腔两个反射镜之间的间距为 65 mm。

为解决 CEAS 测量装置光路对准问题,搭建了如图 10 所示的光路。在发射端,激光准直器安装在多向可调节镜架上,并通过连杆与手动平移台连

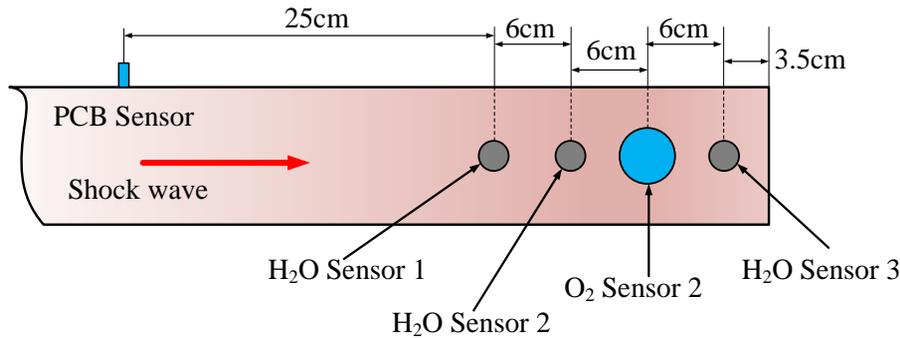


图 8 光学探头安装相对位置示意图

Fig. 8 Schematic Diagram of the Relative Position of Optical Probe Installation

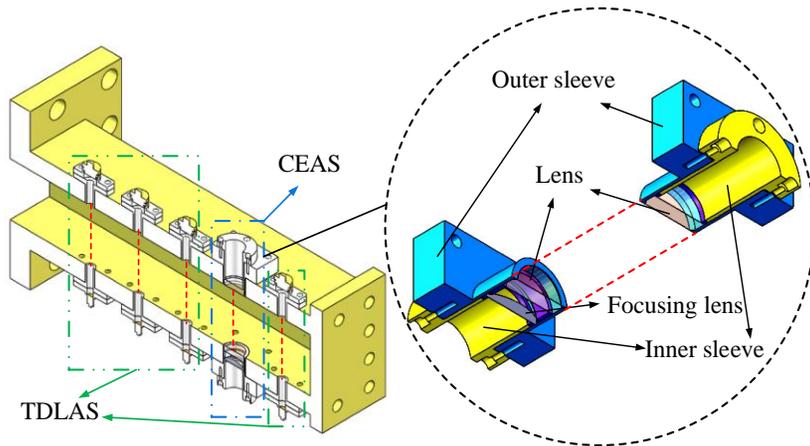


图 9 CEAS 和 TDLAS 测量装置装配效果图

Fig. 9 Illustration of the assembly of CEAS and TDLAS measurement devices

接,多向可调节镜架保证入射光线在一定角度范围内进行调节,也可进行微小的上下和左右平移调节,手动平移台则提供较为精准的横向移动,调节激光的离轴入射距离;在接收端,光电探测器通过连杆与手动平移台连接,通过调节连杆高度和手动平移台前后平移距离,使光电探测器光敏面在聚焦透镜交点处,以便获得最佳探测位置。两套手动平移台均与光学面包板连接,并用螺栓将光学面包板与激波管管体固连。

4 实验结果与讨论

4.1 静态氧气浓度测量结果

激波管实验中,被测流场一般处于高温、高压、高速、强振等复杂环境下,为了确保实验测量结果的准确性,实验中必须保证测量光线的时刻对准。实验选用 Nanoplus 公司生产的 761 nmDFB 激光器,氧气吸收谱线中心波长在 $13\,146.58\text{ cm}^{-1}$ 处,通过驱动板对激光器进行电流和温度设定,同时信号发生器输出电压为 500 mVPP,频率为 2 kHz 的三角波信号对氧气激光器输出光谱进行线型扫描,激光通过光纤与准直器相连,并离轴入射至激波管中,并由接收端处的光电探测器 (Thorlabs, PDA36A-EC) 接收; H_2O 的吸收光谱测量选用 NEL 公司的中心波长为 1 341 nm 和 1 391 nm 的 DFB 激光器。使用激光控制器对其进行参数设定,两条激光首先通过合束器,再经由一个 1×4 的分束器通过单模光纤安装在激波管的 TDLAS 光学测量窗口激光发射端位置上,激光穿过待测流场后通过连接在接收端的多模光

纤,并分别由相应的光电探测器 (Thorlabs, PDA36A-EC) 接收;所有光电探测器接收到的光强信号通过 BNC 线与数据采集卡 (NI, PCI-6115) 采集并存储至工控机。

实验在被驱动段中进行,通过真空泵对被驱动段进行抽气处理,每隔 10 000 Pa 通过气阀控制抽气过程,待压力表读数稳定后,进行数据采集。实验共采集了 11 组数据,环境温度 $T=296\text{ K}$,氧气浓度测量仪测得氧气组分浓度 $X=20.9\%$ 。信号发生器对激光器加载 500 mVPP 电压,扫描频率为 500 Hz。将测量结果进行 10 次平均。

氧气吸光度和组分浓度随压力变化如图 11 所示。吸光度 A 随压力 P 升高而逐渐增大,每次增加量较为均匀,吸光度 A 与压力 P [atm] 之间的关系近似为 $A=0.021\,2P+0.000\,2$,由关系式计算得到 $P=0.089\,1$ 时,吸光度 $A=0.002\,1$ 。图中氧气组分浓度测量值为 $(20.846\pm 0.97)\%$ 。

根据第 2 节结果积分吸光度测量极限值 2σ 为 3.76×10^{-4} ,当温度为 296 K,发射端与接收端距离为 65 mm 时,静压为 0.357 atm,氧气吸收谱线中心波长为 $13\,146.58\text{ cm}^{-1}$ 时,采用直接吸收方法氧气组分浓度测量极限为 0.76,采用腔增强吸收光谱方法时氧气浓度的测量极限 0.009 0。在激波管被驱动段中使用 CEAS 测量装置,可以有效增加氧气吸收长度,解决了在狭窄空间测量条件下,氧气吸收信号弱的问题,为激波管破膜实验奠定了基础。

4.2 破膜实验

实验在驱动段初始充入压力 $P_4=10\text{ atm}$,被驱动

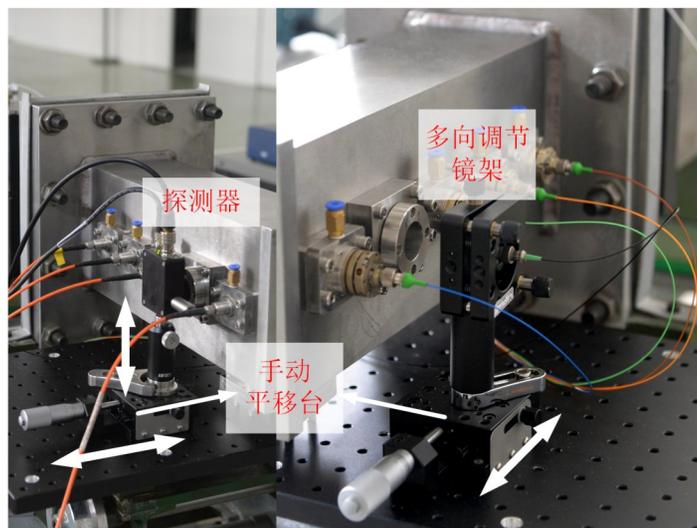


图 10 CEAS 激光发射和接收探头安装照片

Fig. 10 Photographs of the installation of CEAS laser emission and reception probes

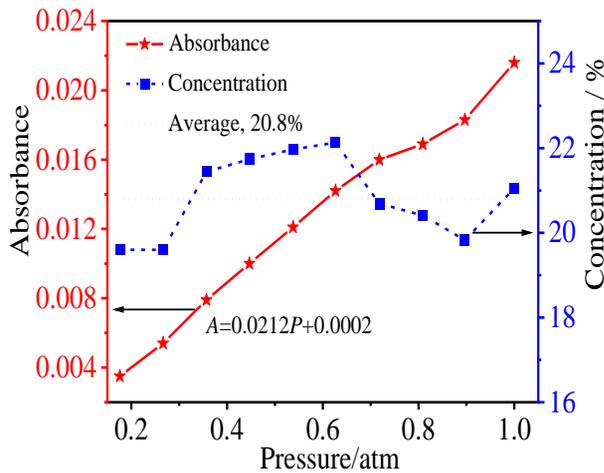


图 11 氧气吸光度和组分浓度随压力变化曲线图

Fig. 11 Curves of Oxygen absorbance and concentration variation with pressure

段压力 $P_1=33$ kPa 的条件下采用手动破膜方式进行。实验对氧气激光器采用 2 kHz 的三角波信号进行扫描处理,对 H_2O 的激光器采用 5 kHz 的锯齿波信号进行扫描处理,同时采用了波分复用方法,时间分辨率达到 200 μ s。

首先通过两级真空泵将被驱动段抽气至 33kPa,关闭被驱动段气阀,并同时关闭被驱动段真空计(避免驱动段加压的过程中膜片被压破而产生的激波对真空计造成损坏),然后通过配气柱和高压气瓶将高纯氮气充入至驱动段,并使压力维持在 10 atm,紧接着将示波器设置成待触发状态,做好手动破膜准备。在破膜前约 1 s 开始进行吸收信号采集工作,记录下实验数据。

在激波管理理想模型中,忽略热传导效应、边界层效应、入射激波衰减等因素。在破膜瞬间激波管驱动段的高压气体将产生一道向后方驱动段传播的中心稀疏波;同时产生一道向被驱动段传播的入射激波,在入射激波作用下,被驱动段气体被迅速加热。入射激波在到达被驱动段端面后将反射回来,形成的反射激波使被驱动段的气体被进一步加热,气体温度继续升高。设 1 区为被驱动段初始状态,2 区为激波与接触面之间的区域,3 区是接触面和稀疏波之间的区域,4 区为驱动段的初始状态,5 区为反射激波后的区域。为获得实验过程中激波前后不同区域的压力与温度,在被驱动段压力 P_1 已知的情况下,仍需知道激波的马赫数 M_s ,才能根据

公式求得 2 区和 5 区的压力与温度。通过 PCB 压力传感器信号的跃迁捕捉激波通过的相对时间,再由三个传感器之间的距离,计算得到激波速度,并最终得到激波马赫数 M_s 。三个传感器之间的间隔为 0.3 m。

图 12 为示波器采集到的 3 路 PCB 传感器信号。图中,正激波到达 1 到 3 号 PCB 传感器的时间分别为 0 ms,0.398 2 ms,0.800 7 ms,可以计算出正激波从 1 号传播到 2 号的传播速度为 $V_{in1}=753.39$ m/s,从 2 号传播到 3 号的传播速度为 $V_{in2}=745.34$ m/s,两个间隔距离内,正激波速度计算值比较接近,可以作平均处理作为计算用激波速度,因此正激波速度为 $V_{in}=749.37$ m/s,1 区的温度为 $T_1=296$ K,声速为 344 m/s,计算得到马赫数 $M_s=2.18$ 。

反射激波一次到达 3 到 1 号 PCB 传感器的时间分别为 2.6707 ms,3.5315 ms,4.3140 ms,计算得到的反射激波从 3 号到 2 号的传播速度为 $V_{back1}=348.47$ m/s,反射激波相当于正激波速度有明显降低。但是反射激波从 2 号到 1 号的传播速度为 $V_{back2}=383.39$ m/s,数值明显大于 V_{back1} ,初步分析为由于正激波向被驱动段传播时带来的扰动气流提前触发了 1 号 PCB 传感器,同时,1 号传感器距离光学测量装置处较远,其速度测量值已不具有参考价值,因此采用 V_{back1} 作为反射激波速度。

根据流体力学方程,计算激波前后 2 区和 5 区气体状态变化^[21]:

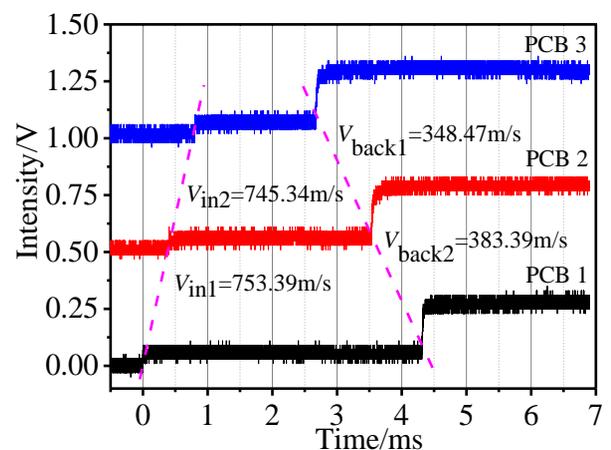


图 12 示波器采集的 3 路 PCB 传感器信号图

Fig. 12 3-channel PCB sensor signals captured by the oscilloscope

$$\begin{aligned} \frac{P_2}{P_1} &= \frac{2\gamma_1}{\gamma_1 + 1} M_s^2 - \frac{\gamma_1 - 1}{\gamma_1 + 1} \\ \frac{T_2}{T_1} &= \left[\frac{2\gamma_1 M_s^2 - (\gamma_1 - 1)}{\gamma_1 + 1} \right] \left[\frac{2 + (\gamma_1 - 1) M_s^2}{(\gamma_1 + 1) M_s^2} \right] \\ \frac{P_5}{P_1} &= \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{P_5}{P_2} = \frac{[2\gamma_1 M_s^2 - (\gamma_1 - 1)] [(3\gamma_1 - 1) M_s^2 - 2(\gamma_1 - 1)]}{(\gamma_1 + 1) [(\gamma_1 - 1) M_s^2 + 2]} \quad , \quad (11) \\ \frac{T_5}{T_1} &= \frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{T_5}{T_2} = \frac{[2(\gamma_1 - 1) M_s^2 - (\gamma_1 - 3)] [(3\gamma_1 - 1) M_s^2 - 2(\gamma_1 - 1)]}{(\gamma_1 + 1)^2 M_s^2} \end{aligned}$$

其中 γ 为被驱动段气体绝热指数,对空气来说 $\gamma_1=1.4$ 。计算 2 区和 5 区的压力与温度为 $P_2=1.758$ atm, $P_5=6.492$ atm, $T_2=538.97$ K, $T_5=833.19$ K。

激波传输过后,激波管内气体有明显的升温升压过程,因此水的光谱吸收具有明显增强,据此可以判断激波首次到达传感探头的时间。探测器获取的原始光强信号如图 13 所示。以 1 号 H_2O 传感器首次获取到明显吸收的扫描周期的起点为 0 时刻,图中显示了 1 200 μs ,共 3 个扫描周期的探测信号。激波经过探头的时刻会对探头的光信号传输和接收产生扰动,在探测信号中表现为强度的瞬间跳变,从图中的信号中可以明显的看出这种强度跳变,可以将其看作激波到达探头时刻的标志信号,图中标示出明显强度跳变位置所标志的激波传输时刻。

从正激波进入试验段到反射激波出试验段的这 1200 μs 时间内,CEAS 装置共测量了 3 个周期的扫描信号,分别对应正激波到达 CEAS 装置之前、正激波经过 CEAS 装置但反射激波未到达、反射激波经过 CEAS 装置之后三种状态。

图 14 显示了正激波到达 CEAS 装置之前氧气吸

收光谱原始光强信号和吸光度信号。

入射激波到达前,流场处于低压状态,图 14(b) 的吸收谱线与图 15(b)、图 16(b) 相比谱线线宽较窄。通过线型拟合计算得到正激波到达之前氧气吸光度 $A_1=0.0076$,计算得到此时的氧气组分浓度计算值 $X_{abs1}=22.4\%$,与静态氧气浓度值 20.8% 之间的相对误差 $\Delta_1=7.69\%$ 。分析其原因主要是激波管工作时抖动导致积分腔镜的抖动,进而导致吸收信号的变形,影响积分吸光度的计算和氧气浓度的测量精度。

图 15 显示了正激波到达 CEAS 装置之后、反射激波未到达之前氧气吸收光谱原始光强信号和吸光度信号。

通过线型拟合计算得到正激波到达之后、反射激波到达之前氧气吸光度 $A_2=0.0190$,计算得到此时的氧气组分浓度计算值 $X_{abs2}=27.02\%$,在激波到达之后,氧气的吸光度和组分浓度计算都出现了较大偏差,计算得到的组分浓度明显大于参考值,同时也大于激波未到来之前的计算值。

分析其原因,在图 15(a) 中,氧气谱线吸收峰右侧明显出现不正常抖动,图中画圈区域,使得利用

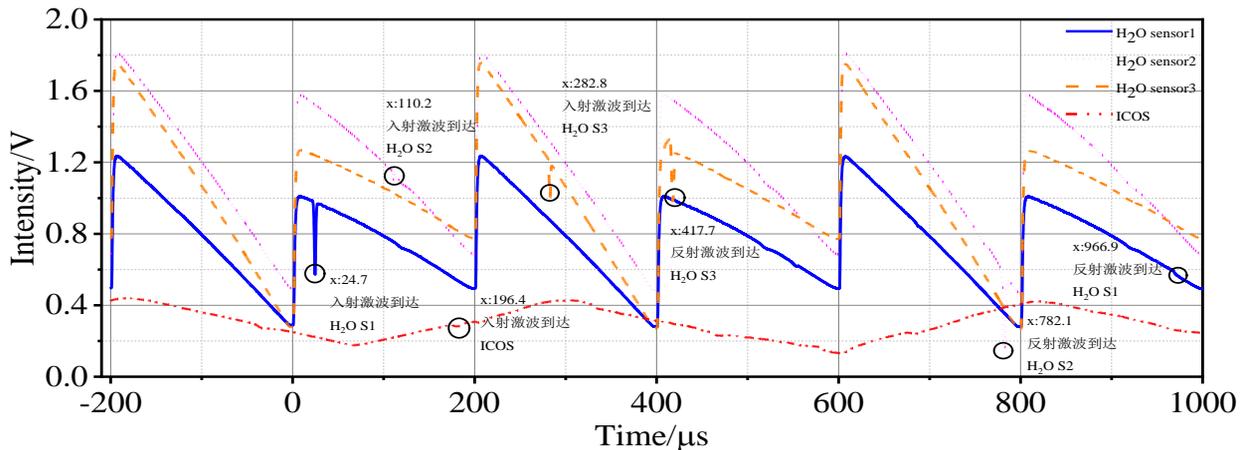


图 13 O_2 和 H_2O 吸收信号随时间变化曲线

Fig. 13 The curves of absorption signals of O_2 and H_2O with time

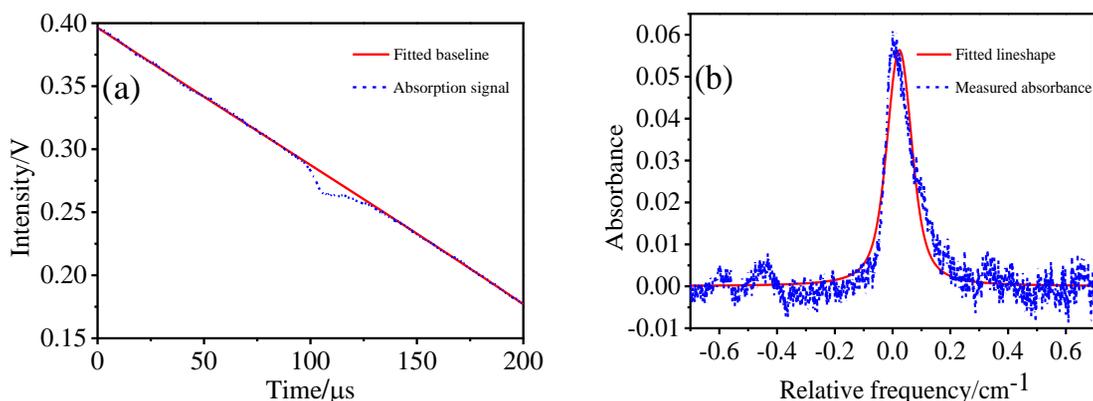


图 14 入射激波到达 CEAS 装置之前:(a)原始光强信号;(b)吸光度信号

Fig. 14 Before the incident shock wave reaches the CEAS device, (a) Original signal ;(b) Absorbance signal

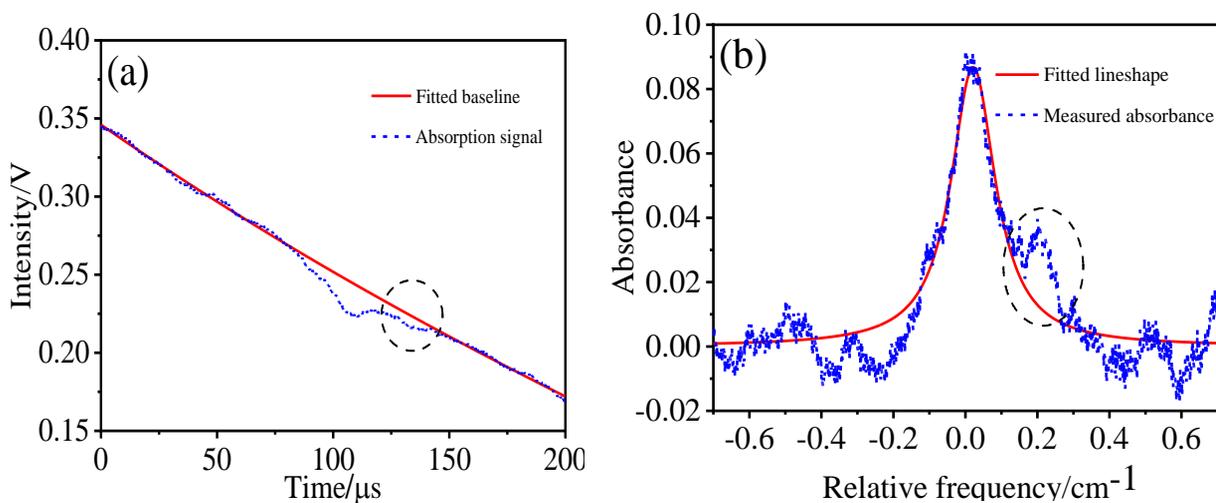


图 15 入射激波到达 CEAS 装置之后:(a)原始光强信号;(b)吸光度信号

Fig. 15 After the incident shock wave reaches the CEAS device: (a) original signal; (b) absorbance signal

线型拟合时出现较大偏差,导致吸光度拟合计算值偏大,在图 15(b)中,拟合函数基线与原始测量信号也出现了较大偏差。理论上这一阶段氧气浓度与静态时氧气浓度一致,偏差较大的原因是一是正激波过后,压力突然增大、气流冲击影响了积分腔腔长的变化,影响了系统的稳定性;二是气体温度升高,计算氧气浓度时,利用的是激波管理论计算的温度结果,温度计算结果与真实值之间存在差异,导致了浓度计算偏差。

图 16 显示了反射激波到达 CEAS 装置之后氧气吸收光谱原始光强信号和吸光度信号。

通过线型拟合计算得到反射激波到达之后氧气吸光度 $A_3=0.0125$, 计算得到此时的氧气组分浓度计算值 $X_{\text{abs}3}=10.75\%$ 。反射激波过后,随着驱动

段高压气体(主要为氦气)逐渐与被驱动段低压气体(主要为空气)混合,此时的氧气组分浓度应低于激波未到来之前的值。此时利用 CEAS 测量装置测得的氧气组分浓度小于未破膜之前氧气浓度实测值,与实际情况相符合。

从整个实验结果来看,在静态过程中,氧气组分浓度测量值与参考值保持了较好的一致性;在动态过程中,在正激波到达之后、反射激波将要到达之前,测量段内压力升高,吸收信号出现抖动,导致积分吸收面积拟合偏大,氧气浓度测量值偏高;在反射激波过后测得氧气组分浓度下降,与实际规律相符合。为了降低激波管工作过程中振动对 CEAS 测量装置的影响,一方面改进探头结构设计,增强器稳定性,尤其是反射镜和聚焦透镜等光学原件的

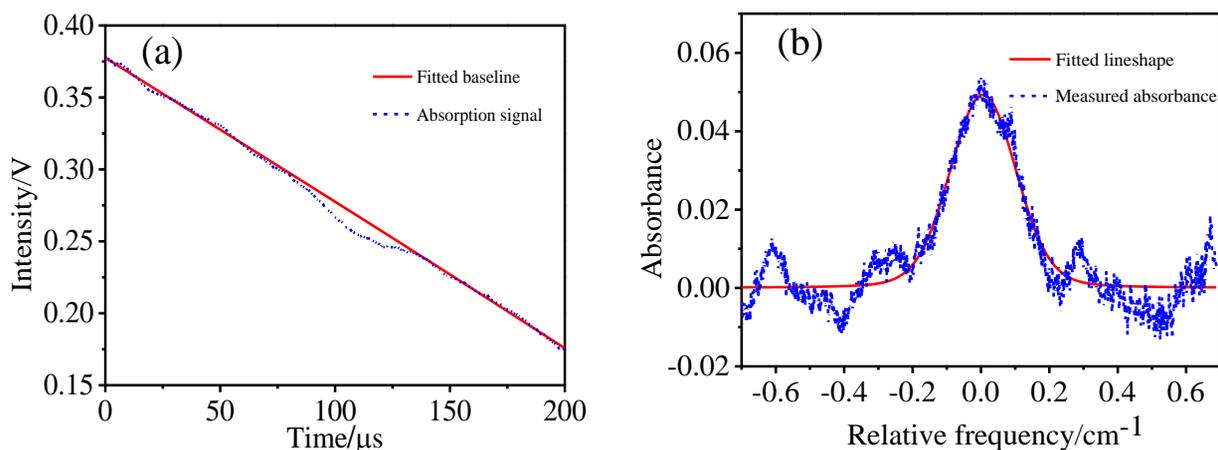


图 16 反射激波到达 CEAS 装置之后:(a)原始光强信号;(b)吸光度信号

Fig. 16 After the reflected shock wave reaches the CEAS device, (a) Original signal ;(b) Absorbance signal

紧固,比如增加垫圈、锁紧装置、涂高温红胶等方式,确保其与激波管同步抖动,减弱高温高压冲击下光学件抖动引起的吸收谱线的变形;另一方面,从数据处理角度对测量结果进行修正,比如抖动过程中明显的干涉噪声。

5 结论

研制了一套基于腔增强吸收光谱技术测量技术的氧气测量装置,该系统采用嵌入式光学探头结构,便于在发动机工程实验中应用。发射端的激光准直器安装在多向调节镜架上,接收端的光电探测器通过连杆与手动平移台相连接,便于系统光路的调节与对准。实验结果表明,在静态环境下系统测量氧气的组分浓度为 $(20.846 \pm 0.97)\%$;在激波管实验中,系统测量捕获到正激波到达前、正激波经过但反射激波未到达以及反射激波经过 3 种状态下氧气浓度的变化。系统时间分辨率为 $200 \mu\text{s}$,氧气浓度测量结果与理论预测结果相吻合,验证了该装置在复杂流场环境下的适用性。

尽管在动态测量过程中,由于激波管工作时的振动和气流冲击,导致积分腔腔长变化引起吸收信号变形,影响了氧气浓度的测量精度,但通过改进探头结构设计和数据处理方法,可以有效降低这些影响。未来工作将进一步优化系统稳定性,提升在高温、高压、高速流场环境中的测量精度和可靠性。

References

[1] LYLE K H, JEFFRIES J B, HANSON R K. Diode-Laser Sensor for Air-Mass Flux 1: Design and Wind Tunnel Validation [J]. *Aiaa J*, 2007, 45(9): 2204-12.

[2] SCHULTZ I A, GOLDENSTEIN C S, MITCHELL SPEARIN R, et al. Multispecies Midinfrared Absorption Measurements in a Hydrocarbon-Fueled Scramjet Combustor [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2014, 30 (6) : 1595-604.

[3] BUSA K M, RICE B E, MCDANIEL J C, et al. Scramjet Combustion Efficiency Measurement via Tomographic Absorption Spectroscopy and Particle Image Velocimetry [J]. *Aiaa J*, 2016, 54(8) : 2463-71.

[4] RAO Wei, SONG Jun-ling, FENG Gao-ping, et al. Analysis of Kerosene Combustion with Pilot Hydrogen in Scramjet Based on Tomography Absorption Spectroscopy [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(3) : 210195. (饶伟, 宋俊玲, 冯高平, 等. 基于激光吸收光谱层析技术的超燃冲压发动机氢气引导煤油燃烧过程分析 [J]. 推进技术), 2022, 43(3) : 210195.

[5] CHAO Xing, HU Zhen, ZHU Ning. Research and Application Progress of Cavity-enhanced Absorption Spectroscopy (Invited) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52 (3) : 0352102 (超星, 胡臻, 朱宁. 腔增强吸收光谱技术研究与应用进展(特邀)[J]. 光子学报), 2023, 52(3):0352102

[6] REN Y, YAN C, XU J. Development and prospects of enhanced absorption spectroscopy [J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(6) : 1273-92 (任颐杰, 颜昌翔, 徐嘉蔚. 增强吸收光谱技术的研究进展及展望 [J]. 中国光学(中英文)), 2023, 16(06) : 1273-92.

[7] BAER D S, PAUL J B, GUPTA M, et al. Sensitive absorption measurements in the near-infrared region using off-axis integrated-cavity-output spectroscopy [J]. *Applied Physics B*, 2002, 75(2) : 261-5.

[8] CHEN Dong-yang, ZHOU Li, YANG Fu-mo, WANG Wei-gang, GE Mao-fa. Application Progress of Cavity-Enhanced Absorption Spectroscopy (CEAS) in Atmospheric Environment Research. *SPECTROSCOPY AND SPECTRAL ANALYSIS*, 2021, 41(09) : 2688-2695. (陈东阳, 周力, 杨复沫, 等. 腔增强吸收光谱技术在大气环境研究中的应用进展 [J]. 光谱学与光谱分析),

- 2021, 41(09): 2688–95.
- [9] DONG L. Research on polluted gas detection based on cavity enhanced absorption spectroscopy [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2007: 111–120.
(董磊. 基于腔增强吸收光谱的污染气体检测研究 [D]. 太原: 山西大学, 2007: 111–120).
- [10] HAN L, XIA H, PANG T, et al. Frequency stabilization of quantum cascade laser for spectroscopic CO₂ isotope analysis [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 91: 37–45.
- [11] GIANELLA M, RITCHIE G. Cavity-Enhanced Near-Infrared Laser Absorption Spectrometer for the Measurement of Acetonitrile in Breath [J]. *Analytical chemistry*, 2015, 87(13): 6881–9.
- [12] ENGELN R, BERDEN G, PEETERS R, et al. Cavity enhanced absorption and cavity enhanced magnetic rotation spectroscopy [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1998, 69(11): 3763–9.
- [13] O'KEEFE A. Integrated cavity output analysis of ultra-weak absorption [J]. *Chemical Physics Letters*, 1998, 293(5): 331–6.
- [14] SUN K, WANG S, SUR R, et al. Sensitive and rapid laser diagnostic for shock tube kinetics studies using cavity-enhanced absorption spectroscopy [J]. *Optics express*, 2014, 22 8: 9291–300.
- [15] SUN K, WANG S, SUR R, et al. Time-resolved in situ detection of CO in a shock tube using cavity-enhanced absorption spectroscopy with a quantum-cascade laser near 4.6 μm [J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 24599–65.
- [16] LIANG S, QIN M, DUAN J, et al. Airborne cavity enhanced absorption spectroscopy for high time resolution measurements of atmospheric NO₂ [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2017, 66(9): 090704.
(梁帅西, 秦敏, 段俊, 等. 机载腔增强吸收光谱系统应用于大气 NO₂ 空间高时间分辨率测量 [J]. *物理学报*), 2017, 66(9): 090704.
- [17] CHAO X, SHEN G, SUN K, et al. Cavity-enhanced absorption spectroscopy for shocktubes: Design and optimization [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(2): 1345–53.
- [18] WANG X, GAO G, LONG F, et al. CO Volume Fraction Measurement Based on Wavelength Modulated Cavity-Enhanced Absorption Spectroscopy [J].
(王宣, 高光珍, 龙芳宇, 等. 基于波长调制腔增强吸收光谱技术的 CO 体积分数测量 [J]. *中国激光*). 2023, 50(13): 229–36.
- [19] LOU Deng-cheng, RAO Wei, SONG Jun-ling, et al. Research of Carbon Monoxide Concentration Measurement in Combustion Field by Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(12): 3678–3684.
(娄登程, 饶伟, 宋俊玲, 等. 基于离轴积分腔输出光谱的燃烧场 CO 浓度测量研究 [J]. *光谱学与光谱分析*), 2022, 42(12): 3678–84.
- [20] GORDON I E, ROTHMAN L S, HARGREAVES R J, et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2022, 277: 107949.
- [21] Luo T. *Mechanics of Fluids* [M]. Beijing, China Machine Press. 2008: 233–239.
罗惕乾 *流体力学* [M]. 北京: 机械工业出版社. 2008: 233–239.