

超燃燃烧室气流参数诊断¹⁾

李 飞 余西龙²⁾ 顾洪斌 李 智 陈立红 张新宇

(高温气体动力学国家重点实验室, 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要 基于可调谐二极管激光器吸收光谱技术, 利用 7185.597 cm^{-1} , $7444.35\text{ cm}^{-1} + 7444.37\text{ cm}^{-1}$ (重合吸收线) 两条 H_2O 吸收线, 采用分时扫描-直接探测策略组建多光路吸收测量系统, 在 4 kHz 的测量频率下, 定量测量了燃烧室气流的静温、水蒸气浓度和流向速度. 利用位移机构, 在以 C_2H_4 为燃料的超燃直连式试验台中, 在单次试验中同时诊断燃烧室内某截面和燃烧室出口的多气流参数的截面分布. 利用燃烧室出口截面的水蒸气浓度分布, 并结合壁面静压计算燃烧效率; 利用燃烧室出口截面的静温和速度分布, 获得出口气流马赫数分布; 利用凹腔后部某截面的温度和水蒸气浓度分布, 判读了凹腔附近流场特征.

关键词 可调谐二极管吸收光谱技术, 温度分布, 速度分布, 超声速燃烧, 燃烧效率

中图分类号: V231.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0459-1879(2011)06-1061-07

引 言

超燃冲压发动机的核心的问题之一是燃烧室设计. 燃烧室要解决的主要问题是在有限的空间(米级)和时间(毫秒级)内, 以高的热效率和较小的压力损失将化学能最大限度地转化为热能. 进行燃烧室设计首先需要精确诊断燃烧效率, 而为了合理组织燃烧, 需要获悉燃烧结构(流向/截面分布), 这些信息的获知仅凭壁面压力、温度测量是远远不够的, 急需有效可靠的新型测量技术^[1-2].

过去的 20 年间, 随着半导体激光器技术的发展, 可调谐二极管吸收光谱测量技术(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)得到了长足的进步. 它具有非侵入性、抗干扰性强、多参数同时测量、高时间响应和高测量精度等优点^[3]. 近年来已经被成功应用于超燃地面试验中^[4-8]. Griffiths 等^[4]首次将该技术应用于脉冲式超燃设备的燃烧室出口温度测量. Liu 等^[5]在燃烧室出口截面的 8 个不同高度同时测量尾气温度和水蒸气分压. Rieker 等^[6]利用燃烧室出口的温度测量结果成功捕捉了超燃的燃烧振荡现象. Chadwick 等^[7]使用分时直接探测策略和多达 16 路的吸收光束, 研究了隔离段内的激波串结构. Gruber 等^[8]利用 9 个测量光束, 得到了燃烧室出口静温的大致截面分布, 并结合激光

诱导荧光(PLIF)和 CFD 结果, 分析了燃烧状况. 这些试验的成功开展, 验证了 TDLAS 技术用于超燃设备的可行性和可靠性. 然而针对超燃燃烧诊断, 以上工作存在 3 点不足: (1) 测量多集中于气流静温和水蒸气分压测量, 没有获得高温气流的速度信息; (2) 只研究了燃烧室出口气流信息, 没有获得燃烧区(凹腔附近)的气流参数, 而这些信息对于燃烧特征判读是十分有益的; (3) 截面的高度方向上, 少数几个测量光束的空间分辨能力远远不能满足超燃研究的需要.

针对以上问题, 本文利用 TDLAS 技术, 在以乙烯为燃料的超燃直连台上开展燃烧室气流参数诊断研究. 同时定量测量了燃烧室出口的静温、水蒸气浓度和速度; 测量了燃烧室内气流的静温和水蒸气分压; 并利用位移机构实现了燃烧室出口和凹腔后部某截面的气流参数截面分布测量. 根据测量结果, 分析了燃烧效率和凹腔附近的流场特征.

1 原理简介和谱线选择

在吸收测量中, 激光辐射强度和透射强度被精心测定. 气体吸收量依赖于能吸收这特定波长的粒子数目(低能态粒子数). 而处于低能态的粒子数是由气体静温和浓度决定的. 当一束频率为 ν 的激光通过流场, 其出射光强和入射光强满足 Beer-Lambert

2010-11-05 收到第 1 稿, 2011-06-27 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金资助项目(90816015, 11002148).

2) E-mail: xlyu@imech.ac.cn

关系式

$$(I/I_0)_v = \exp(-K_v \times L) \quad (1)$$

其中, I_0 为入射光强, I 为出射光强, K_v 为吸收率, L 为吸收长度. 其中吸收率 K_v 是静压 P , 水蒸气组分浓度 X_{H_2O} (以水蒸气吸收组分为例), 吸收谱线强度 $S(T)$, 线型函数 $\phi(\nu)$ 的函数

$$K_v = PX_{H_2O}S(T)\phi(\nu) \quad (2)$$

选取两个吸收线型列出两个吸收方程解出 T 和 X_{H_2O} 这两个未知数. 两条吸收线的积分吸收比 R 可表示为

$$R = \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_1} PX_{H_2O}LS_1(T)\phi_1(\nu - \nu_{01})d\nu}{\int_{\nu_2}^{\nu_2} PX_{H_2O}LS_2(T)\phi_2(\nu - \nu_{02})d\nu} = \frac{S_1(T)}{S_2(T)} = \frac{S_1(T_0)}{S_2(T_0)} \exp \left[- \left(\frac{hc}{k} \right) (E''_1 - E''_2) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (3)$$

它是 T 的单值函数, 通过测量积分吸收比定出温度, 进而由式 (2) 可以得到组分浓度.

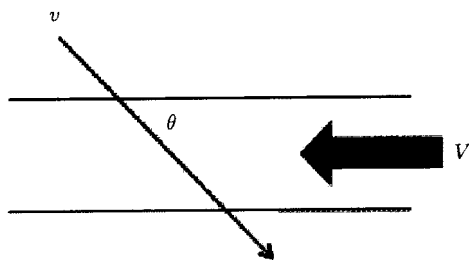


图 1 TDLAS 速度测量原理示意图

Fig.1 Velocity measurement principium of TDLAS

如果光束倾斜穿过一个流速为 V 的气流, 运动的吸收组分分子将使吸收线型产生整体移动——多普勒频移

$$\Delta\nu_{Doppler} = \frac{V}{c} \nu_0 \cos \theta \quad (4)$$

其中 c 为光速, ν_0 为吸收线的中心频率, θ 为光传输方向与气流速度的夹角. 通过测量谱线峰值位置的频率偏移量及光束与气流方向的夹角即可以获得待测流场的流速. 因此, 一个设计合理的 TDLAS 测量系统可以同时得到气流的平均温度、组分浓度、速度等多种参数信息 [9].

吸收系统的建立中, 谱线的选择是至关重要的. 根据待测气流参数范围, 本文选择了 7185.597 cm^{-1} , 7444.35 cm^{-1} 和 7444.37 cm^{-1} 3 条吸收线, 由于两条 7444 cm^{-1} 谱线近似重合, 且它们的低能级能量

十分接近, 因此将它们的叠加作为一条吸收谱线应用. 几条谱线的光谱参数见表 1 (根据光谱数据库 Hitran2004).

表 1 本文所用吸收线的光谱参数 (取自 Hitran2004)

Table 1 Spectroscopy parameters of the three water vapor transitions used in this study (based on Hitran2004)

Frequency/ cm^{-1}	Line strength at 1000 K/ $(\times 10^5 \text{ Pa}\cdot\text{cm}^{-2})$	Low-state energy/ cm^{-1}
7185.597	0.0298	1045.058
7444.35	0.0099	1774.751
7444.37	0.0118	1806.670

图 2 为两条吸收线的线强度随着温度的变化曲线; 图 3 为两线积分吸收比 R 随着温度的变化曲线, 所用光谱参数都是取自光谱数据库 Hitran2004.

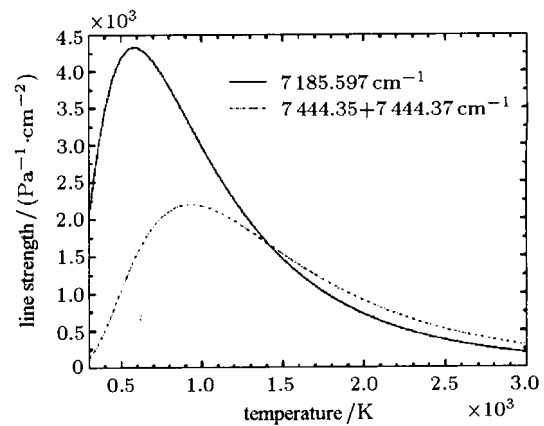


图 2 两吸收线的线强度随温度的变化

Fig.2 Line strenghen of selected water vapor absorption lines versus temperature

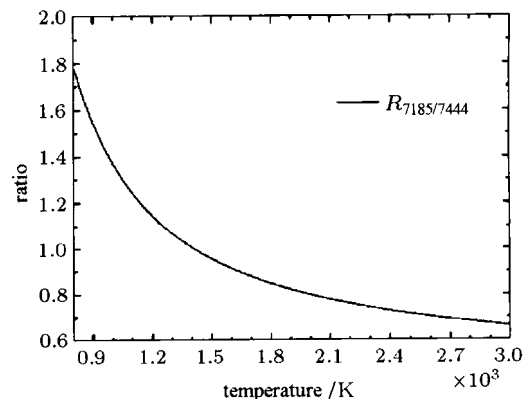


图 3 积分吸收比 R 随温度的变化

Fig.3 Temperature dependence of selected line pair strenghen ratio

由图可见两吸收线在 400~2500 K 都有较大的线强度，且两线的积分吸收比 R 在 2500 K 以下的宽温度范围内有合适的斜率(见图 3)，因此认为所选谱线在本实验待测温度范围内(800~2500 K)有很高的测温灵敏度。从线强度图可以看出， 7444 cm^{-1} 谱线在室温下吸收极弱，因此该线不易受到空气中水蒸气的干扰，而 7185.597 cm^{-1} 在低温下的线强度稍大，但与高温下线强度的比值也在 5 倍以内，由于直联台试验中水蒸气含量很高，空气中水蒸气含量较小，因此空气中水蒸气对该线的影响不是太大，但不能忽略，在光路布置和试验中要予以重视。

2 实验系统构成

试验在本实验室超声速燃烧直联台上进行，燃烧

室模型为新型双模态燃烧室结构，模型为单边膨胀模型，凹腔安装于膨胀壁面(上壁面)，燃料为 C_2H_4 ，单边喷注，喷孔位于凹腔前。其燃烧室入口处的内流道横截面 $40\text{ mm}\times 85\text{ mm}$ ，直联台喷管马赫数 $Ma = 1.8$ ，气流总温 900 K，总压 1.0 MPa，流量 1.7 kg/s。

图 4 为超燃直联台的多光路吸收光谱测量系统示意图。使用两台近红外激光器分别对应 7185.597 cm^{-1} 和 7444.3 cm^{-1} 两激光器的输出激光耦合进一个 2×5 的光纤分路器，输出的 5 路光纤，第一路用于通过 F-P 干涉仪，实时标定激光波长变化，另外 4 路利用光纤准直器输出形成 4 路自由光路通过燃烧室模型的两侧窗口后，由多模光纤收集后由探测器探测、示波器记录。

4 束光路的位置和角度见图 5 所示，光路 1 和

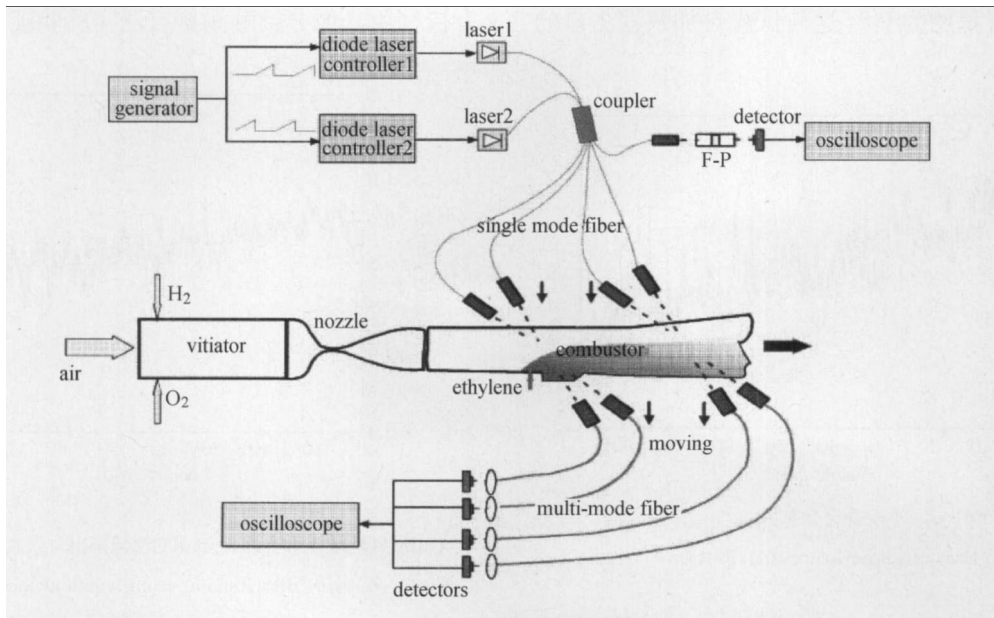


图 4 超燃直联台多光路吸收光谱测量系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of the multiplexed diode laser sensor system for combustion diagnostics in scramjet

光路 2 位于燃烧室出口处，与气流流向方向分别夹角 22.5° (当地截面为对称面)，两光路可分别测量燃烧室出口的静温和水蒸气分压，两光路吸收峰的频移可以推算燃烧室出口气流速度；光路 3 和光路 4 位于燃烧室内，光路 3 垂直于侧壁窗口，而光路 4 前向倾斜 30° ，光路 3 位于凹腔后部，可探测燃烧剧烈区域的气流温度和水蒸气分压，而光路 4 平均了整个凹腔范围(图 5 内的 3 条虚线代表凹腔范围)，同时两光路吸收峰频移可以推算凹腔附近的平均速度。

本燃烧室为准二维燃烧室，气体参数在光线方向上近似均一，但在高度方向上，分布很不均匀，因此使用单线测量无法满足整体性能评估的要求。为

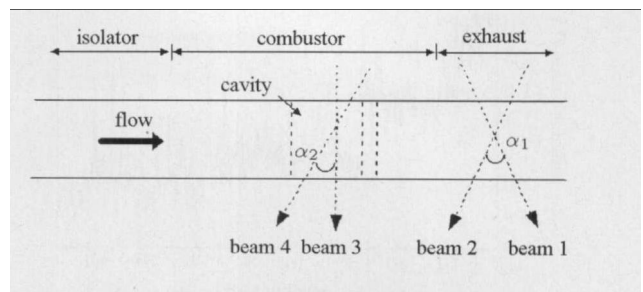


图 5 激光光路布置图(俯视图)

Fig.5 Schematic diagram of laser beams arrangement (planform)

了测量整个截面的气流参数，使用位移机构沿着横截面从下向上扫描测量，得到两个待测截面的气流

静温、水蒸气分压和速度分布. 平移台移动速度约 50 mm/s, 可在有效实验时间内, 扫过待测区域的整个截面.

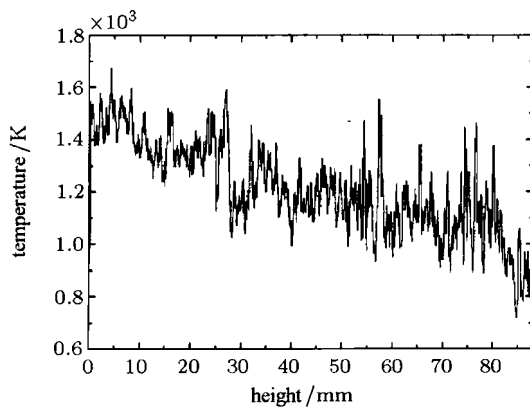
3 实验结果及分析

3.1 燃烧室出口气流参数

图 6 为光路 1 测得的燃烧室出口气流静温和水蒸气分压随截面高度的分布结果. 横坐标零点为上壁面(凹腔一侧), 该测量截面高度 88 mm. 由图可见, 温度和水蒸气分压由下壁面向上逐渐增加. 上壁面附近温度和水蒸气分压都为最大值, 该处气流静温约为 1500 K, 水蒸气分压约为 2×10^4 Pa, 而下壁面附近 (80~88 mm) 静温 850 K, 水蒸气分压 8.8×10^3 Pa, 结合该处壁面静压 9.7×10^4 Pa 可知下壁面的附近的气流水蒸气含量约为 9%, 这与试验台加热器出口的

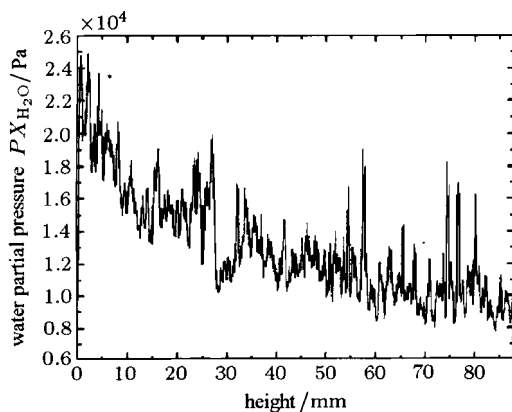
水蒸气浓度很接近, 说明下壁面附近未发生燃烧, 但由其静温可知燃烧释热已影响到下壁面. 结合静温和水蒸气分压分布可知, 剧烈燃烧的发生范围为 1~35 mm 范围. 且温度和水蒸气分压的多个较大幅度的变化反映了燃烧的脉动.

图 7 为吸收峰值频移测得的燃烧室出口气流速度分布, 整个截面的速度范围为 710~920 m/s, 速度分布近似线性, 在上壁面扩张角处实现最大速度. 根据气流静温和速度分布, 再结合燃烧后气体的组成成分可得到燃烧室出口气流 Ma 数的截面分布, 见图 8 所示, 平均 Ma 数约为 1.25. 整个截面的 Ma 数近似不变, 由于测量截面已处于燃烧室出口后的扩张段, 如此低的气流 Ma 数反映了该实验条件下燃烧室内的气流主流很可能是亚声速. 这一结论还有待利用其他非接触测量方法实验验证.



(a) 静温分布

(a) Static temperature distribution



(b) 水蒸气分压分布

(b) Water vapor partial pressure distribution

图 6 光路 1 测量的燃烧室出口气流参数分布

Fig.6 Distribution along vertical location at the combustor exit (beam1 results)

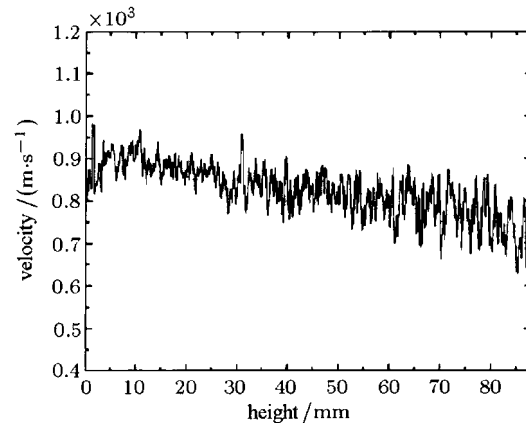


图 7 光路 1 和光路 2 测得的燃烧室出口气流速度分布

Fig.7 Velocity distribution along vertical location at the combustor exit (beam1 and beam2 results)

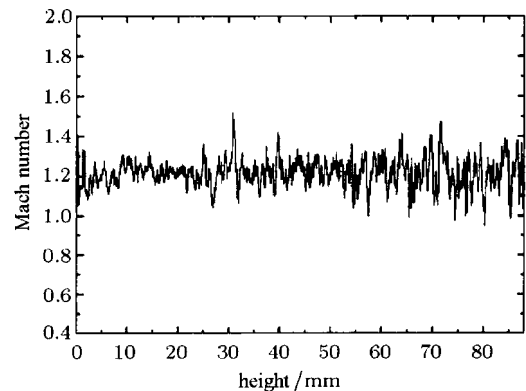


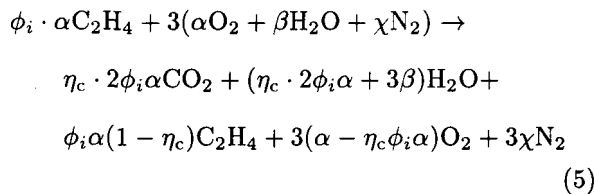
图 8 燃烧室出口马赫数分布

Fig.8 Mach number distribution along vertical location at the combustor exit

3.2 燃烧效率计算

参考文献 [9], 根据 TDLAS 测量结果, 有两种计算燃烧效率的方法, 一种是结合水蒸气分压与壁面静压测量结果, 根据燃烧消耗的燃料和总燃料的比值计算燃烧效率; 另一种是按照气流静温和速度分布, 按照热量进行计算, 即化学反应的实际生成热与完全反应的生成热比为燃烧效率. 本文根据第一种方法计算燃烧效率: 即在来流气体参数和当量比已知的条件下, 气体中水蒸气的摩尔浓度的增加量, 直接反映了燃料 (C₂H₄) 的消耗量 (燃烧效率). 在本文的燃烧效率计算中, 进入燃烧室的气体参数使用的是加热器的设计参数, 它已通过 TDLAS 测量证实 [10].

由截面气流速度 (图 7) 和马赫数分布图 (图 8) 可知, 测量范围内不存在较强压缩波, 因此可以认为壁面静压测量值为整个截面的气流静压 (9.7 × 10⁴ Pa). 水蒸气分压分布见图 6(b). 根据乙烯燃烧的简化化学反应方程式:



其中, ϕ_i 为乙烯当量比, α, β, χ 分别为进入燃烧室的气流中氧气、水蒸气和氮气的摩尔含量, η_c 为燃烧效率.

根据燃烧消耗的燃料和总燃料的比值计算燃烧效率

$$\frac{1}{\dot{m}} \int_0^H \rho V L \frac{P_{H_2O}}{P} dy = \frac{2\eta_c \phi_i \alpha + 3\beta}{\phi_i \alpha + 3(\alpha + \beta + \chi)} \quad (6)$$

其中, \dot{m} 为摩尔流量, ρ 为燃烧后气体的摩尔密度, V 为气流速度, L 为模型宽度, P_{H_2O} 为水蒸气分压, P 为壁面静压, H 为测量截面的高度.

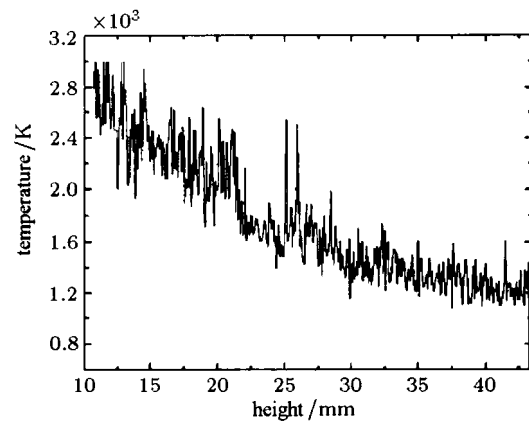
在实际计算中, 做流量平均假设, 则 $\dot{m} = \rho V L \cdot H$. 于是由壁面静压数据 $P = 9.7 \times 10^4$ Pa, 该工况当量比 $\phi_i = 0.4$ 以及加热器出口气体参数信息 α, β, χ , 可以得到平均燃烧效率 $\eta_c = 0.89$.

3.3 燃烧室内气流参数

光路 3 和光路 4 用于测量燃烧室内的气流参数分布. 图 9 为光路 3 测得的燃烧室内凹腔后部某截面的气体静温和水蒸气分压分布. 由于窗口和光路设计的限制, 光路 3 只能扫描距离上壁面 11~43.5 mm 的截面范围 (零位置为未安装凹腔时的上壁面位置).

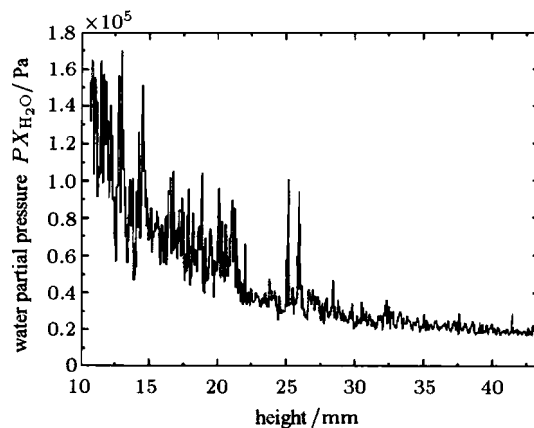
图 10 为光路 4 测得的气流静温随着高度的变化, 其测量范围是距离上壁面 -2.5 ~ 43.5 mm 范围 (负数代表凹腔内部), 并未测量到下壁面附近, 及凹腔更深的范围.

由图 9 可见, 在距离上壁面 22 mm 以外的区域内, 静温和水蒸气分压下降迅速, 说明剧烈燃烧集中于距离上壁面 22 mm 以内的区域内, 这个范围外只存在少量燃烧, 并且在 40 mm 以外的区域无燃烧发生. 因此 22 mm 应是该截面对应的凹腔剪切层的外边缘, 且越向凹腔靠近, 温度和水蒸气分压越大, 说明剪切层的核心区域在 10 mm 以内. 该工况下, 燃烧室内的水蒸气浓度极值约为 30%. 而图 9(b) 中, 在高度 10 mm 附近, 水蒸气分压约 1.5×10^5 Pa, 因此



(a) 静温分布

(a) Static temperature distribution



(b) 水蒸气分压分布

(b) Water vapor partial pressure distribution

图 9 光路 3 测得的燃烧室内气流参数分布

Fig.9 Distribution along vertical location in the combustor (beam3 results)

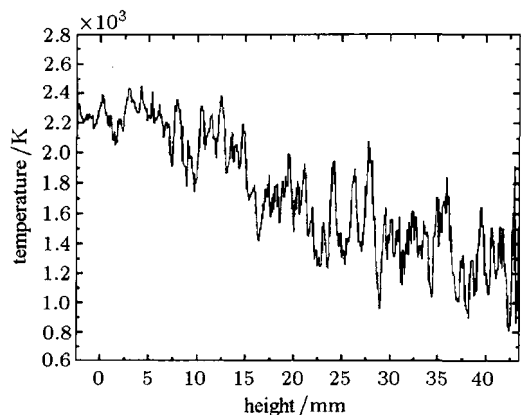


图 10 光路 4 测得的燃烧室内气流静温分布

Fig.10 Temperature distribution along vertical location in the combustor (beam4 results)

当地气流静压应大于 4.5×10^5 Pa, 它大于上壁面静压测量平均值 (约 3.3×10^5 Pa). 因此说明燃烧室内截面方向有较明显的静压梯度, 燃烧区边缘可能存在较强压缩波. 相信该压力梯度是燃烧不稳定性的原因之一.

光路 4 可以测量到深入凹腔 2.5 mm 的范围, 由图 10 可见, 温度在 $-2.5 \sim 10$ mm 范围近似不变, 说明剪切层和凹腔内温度相当, 该处气流速度很低, 静温略小于燃烧后气流总温. 对比图 9(a) 和图 10, 可见两者在 $27 \sim 43.5$ mm 范围内, 气流静温相近, 这是由于该范围内几乎没有燃烧产生. 而靠近上壁面时, 光路 3 测温明显高于光路 4, 这是由于光路 4 存在与气流流向存在 30° 夹角, 且与光路 3 相比, 在流向上前倾了近 40 mm, 因此光路 4 测得的平均气流静温包含了凹腔前部的气流参数信息, 因此其测量值偏低, 这从侧面也反映出在凹腔附近, 流向上温度梯度明显, 燃烧呈逐步发展态势.

对比两光路的测量结果还可发现, 光路 4 的温度结果脉动剧烈程度明显大于光路 3, 这是由两个原因造成的: 第一, 流向燃烧脉动强烈, 光路 4 的前倾平均温度测量, 更易感知燃烧脉动; 第二, 光路 4 受气流折射率梯度影响较大, 光线偏折明显, 大大增加了测量的不确定性. 另外, 虽然光路 3 和光路 4 的组合理论上可以得到凹腔附近的气流速度随高度的变化, 但是由于该工况下, 燃烧室内气流速度很低, 且光路 4 信噪比很低, 因此本文无法给出燃烧室内的速度分布定量结果. 这部分工作还需在优化光路布置的基础上, 进一步实验研究.

4 结 论

本文利用 TDLAS 技术, 组建了一套双波长、4 光路、位移扫描式吸收测量系统. 在 4 kHz 的测量频率下, 定量测量了燃烧室出口气流的多参数截面分布 (静温、水蒸气浓度和流向速度). 由气流静温和速度获得燃烧室出口马赫数分布, 并由水蒸气浓度分布和壁面静压数据计算了燃烧室的燃烧效率, 分析了燃烧室燃烧的主要发生范围和特征.

试验还同时测量了燃烧室中凹腔后部某截面的气流静温和水蒸气分压分布, 并利用该数据分析分析了凹腔附近剪切层的燃烧范围、气流静压等特征. 为理解和判读凹腔附近流场特征提供了较精细的数据.

TDLAS 是沿光程的积分测量, 因此只适用于准二维燃烧室的诊断. 下一步工作需要设法提高沿光程空间分辨能力, 另一方面通过流向更多截面气流参数的同时诊断, 可为整个燃烧室的燃烧结构和释热分布提供判据.

参 考 文 献

- 1 Reed RA, Slack MW. Infrared measurements of a scramjet exhasut. NASA Contractor Report, 3242, 1980
- 2 潘余, 王振国, 刘卫东. 超燃冲压发动机燃烧效率测量方法简介. 实验流体力学, 2007, 21(2): 68-73 (Pan Yu, Wang Zhenguo, Liu Weidong. Introduction of scramjet combustion efficiencies measurement methods. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2007, 21(2): 68-73(in Chinese))
- 3 Allen MG. Diode laser absorption sensors for gas-dynamic and combustion flows. *Meas Sci Technol*, 1998, 9: 545-562
- 4 Griffiths AD, Houwing AFP. Diode laser absorption spectroscopy of water vapour in a scramjet combustor. *Applied Optics*, 2005, 44: 6653-6659
- 5 Liu X, Jeffries JB, Hanson RK, et al. Development of a tunable diode laser sensor for measurements of gas turbine exhaust temperature. *Appl Phys B*, 2006, 82: 469-478
- 6 Rieker GB, Jeffries JB, Hanson RK, et al. Diode laser-based detection of combustor instabilities with application to a scramjet engine. In: *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32: 831-838
- 7 Chadwick DL, Jackson KR, Williams S, et al. Shock train structure resolved with absorption spectroscopy Part 1: system design and validation. *AIAA Journal*, 2009, 47(10): 2368-2378
- 8 Gruber M, Carter C, Ryan M. Laser-based measurements of OH, temperature and water vapor concentration in a Hydrocarbon-fueled scramjet. AIAA 2008-5070
- 9 李飞, 余西龙, 顾洪斌等. 利用吸收光谱方法诊断超燃直联台燃烧效率. CSTAM 2009-0035. 见: 第二届高超声速科技学术会议文集, 黄山, 2009 (Li Fei, Yu Xilong, Gu Hongbin, et al.

Measurement of combustion efficiency in a direct-connected scramjet test facility based on near-infrared absorption. In: Pro. of the 2nd Hypersonic Sci-tech Meeting. Huangshan, 2009 (in Chinese)

10 李飞. 近红外吸收光谱诊断技术在超燃研究中的应用. [博士

论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2009. 1-141 (Li Fei. Application of near-infrared absorption technology on supersonic combustion. [PhD Thesis]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009. 1-141(in Chinese))

(责任编辑: 刘 丽)

MEASUREMENT OF FLOW PARAMETERS IN A SCRAMJET COMBUSTOR BASED ON NEAR-INFRARED ABSORPTION¹⁾

Li Fei Yu Xilong²⁾ Gu Hongbin Li Zhi Chen Lihong Chang Xinyu

(State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China)

Abstract A multi-channel tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) system was constructed to measure flow parameters in a direct-connected scramjet test facility fueled with ethylene. Two fibers coupled distributed feedback (DFB) lasers with narrow line width were used to probe two H₂O absorption features by using direct absorption time-division-multiplexing (TDM) strategy at a 4 kHz scan rate. Flow parameters were measured, which included the distribution of temperature, water vapor concentration and velocity at the exit cross section of the combustor, the distribution of temperature and water vapor concentration in the cross section near the cavity. Combustion efficiency was obtained by using the water vapor partial pressure distribution and the wall static pressure. Mach number distribution was deduced from the temperature and velocity parameters distributions at the exit cross section of the combustor, and the distributions of temperature and water vapor concentration in the cross section near the cavity were used to analyze combustion characteristics in the combustor.

Key words tunable diode laser absorption spectroscopy, temperature distribution, velocity distribution, supersonic combustion, combustion efficiency

Received 5 November 2010, revised 27 June 2011.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (90816015, 11002148).

2) E-mail: xlyu@imech.ac.cn