

预混火焰诱导里克管热声振荡实验

罗列朝, 李 挺, 邓江革, 赵润洲, 王晋魁

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为了探究热声振荡现象中各物理量的变化规律, 采用单端可调谐激光吸收光谱技术对火焰的温度进行了测量, 测量频率为 5 kHz, 揭示了热声振荡中温度的变化规律。在里克管中, 温度以大约 230 Hz 的频率规律性变化, 变化频率与里克管的本征频率接近。里克管出口处的静压监测表明静压与温度在同一频率变化。此外, 采用高速相机对火焰化学自发光进行了测量, 火焰化学发光强度及发光面积在静压的影响下, 也在周期性波动。温度、静压、化学发光强度三者波动频率保持一致。

关 键 词: 激光吸收光谱; 热声振荡; 温度测量; 熵波; 化学发光强度

中图分类号: V219; TK311

文献标志码: A

Experiment of thermoacoustic oscillation phenomenon in Rijke tube induced by premixed flame

LUO Liezhao, LI Ting, DENG Jiangge, ZHAO Runzhou, WANG Jinkui

(School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to investigate the properties of various physical parameters in the thermoacoustic oscillation in the Rijke Tube, the flame temperature was measured by single-end tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS), at the TDLAS measurement frequency of 5 kHz, which effectively revealed the properties of temperature in thermoacoustic oscillation. Result showed that, the temperature varied regularly at approximate 230 Hz, which coincided with the eigen frequency of the Rijke tube. The static pressure at the exit of the Rijke tube fluctuated at the same frequency. Besides, the flame chemiluminescence intensity was captured by the high-speed camera. The result showed that the flame chemiluminescence intensity area also fluctuated periodically due to the variation of static pressure. The frequencies of temperature, static pressure and chemiluminescence intensity were consistent with each other.

Keywords: laser absorption spectrum; thermoacoustic oscillation; temperature measurement; entropy wave; chemiluminescence intensity

航空发动机经过百余年的发展, 发动机的性能不断提高。为了满足新一代飞行器的需求, 人们在不断提高其推力、涡轮前温度和总的增压比等性能参数的同时, 也对其提出了低排放、低噪声等方面要求。为了满足低排放要求, 发动机燃

烧室可以采取贫油预混燃烧的方式工作。但是贫油预混燃烧又极易导致燃烧室中出现热声振荡现象。该现象的大致形成过程如下: 在燃烧室的非定常燃烧过程中, 非定常的热释放率会产生压力波, 也就是直接燃烧噪声。同时燃烧和流动之间

收稿日期: 2022-04-29

基金项目: 航空发动机气动热力国家级重点实验室基金

作者简介: 罗列朝(1994—), 男, 博士生, 主要从事激光燃烧诊断方面的研究。

通信作者: 李挺(1981—), 男, 副教授、博士生导师, 博士, 主要从事发动机燃烧先进诊断技术等方面的研究。E-mail: li1329@buaa.edu.cn

引用格式: 罗列朝, 李挺, 邓江革, 等. 预混火焰诱导里克管热声振荡实验[J]. 航空动力学报, 2022, 37(11): 2553-2559. LUO Liezhao, LI Ting, DENG Jiangge, et al. Experiment of thermoacoustic oscillation phenomenon in Rijke tube induced by premixed flame[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(11): 2553-2559.

的非定常热交换会导致区域温度变化,即熵波或“热斑”,最后可能形成熵噪声^[1]。在非加速的均匀流动中,熵波和声波之间是互不干扰的^[2]。此时熵波并不会产生噪声,但是当流体通过叶片或喷管等装置被加速时,熵波和声波会相互干扰^[3-6],从而形成熵噪声,也就是间接燃烧噪声。部分噪声会向上游传播,进而有可能加剧热释放率的非定常性,导致燃烧不稳定性现象的出现^[7-8]。该现象会严重影响发动机的性能,甚至会毁坏发动机结构,造成飞机失事事故。

为了研究热声振荡现象,不少学者发展了理论模型来描述熵波的产生^[1,9-11]。这些模型都是在假定均匀流场和热源视为一维的情况下提出的,而对于实际的湍流流动,流场很复杂,两者差异较大。熵波本质上是温度波动^[12],可以通过测量流场温度来实验探究熵波特性。早期人们主要利用热电偶实现温度测量^[13-15],但是热电偶的测量频率较低(<100 Hz),主要用于一些简单的流场研究。近年来随着测量技术的发展,人们开尝试利用声学^[16]、光学^[17-18]等手段来测量热声振荡中温度的变化,极大地提高了测量频率和拓宽了被研究流场范围,更好地揭示了真实流场中热声振荡现象的温度变化规律。

吸收光谱测温技术具有高分辨率、高准确率以及快速响应等优点,此外它不会对原有流场造成干扰,属于非接触式测温手段,所以被广泛地应用于各种领域^[19-21]。也有学者利用该技术研究热声振荡中温度变化^[18,22],但是他们的光路都是传统意义上的“发射-接收”双端布置,在光学通路有限的情况下可能很难应用。

本文利用 6+1 光纤,将发射端和接收端布置于一侧,实现单端吸收光谱对预混火焰的热声振荡现象温度变化的快速测量,测量频率达到 5 kHz。同时利用高速相机对火焰化学发光强度进行了测量,展示了火焰形态在热声振荡中的变化情况。对热声振荡现象中温度、化学发光强度、静压的频率进行了分析。

1 理论背景

1.1 熵波

热声振荡现象是由于热源的不稳定热释放与声场之间的相互耦合形成的。在里克管中加入适当的热源,并放置于合适的位置,就能形成一个简单的热声振荡发生装置。熵波作为热声振荡现象中一个非常重要的物理参数,目前有很多文章

都对熵波现象进行了详细的研究^[1,10-11,23]。由于其与温度紧密相关,故需要做一个简单的回顾。对于一个小的流动扰动,流体参数可以写成平均项 $(\bar{\cdot})$ 与扰动项 $(\cdot)'$ 之和^[12]。根据熵(s)的定义,熵波可以写为 $s' = c_v p' / \bar{p} - c_p \rho' / \bar{\rho}$,结合理想气体方程,可以得到

$$\frac{s'}{c_p} = \frac{T'}{T} - \left(\frac{\gamma-1}{\gamma} \right) \frac{p'}{\bar{p}} \quad (1)$$

式中 p 为静压, ρ 为密度, c_p 和 c_v 分别为比定压热容和比定容热容, γ 为比热比, T 为温度。

在燃烧流动中,温度的相对变化远大于静压的相对变化^[12],因此 $s' \approx c_p T' / \bar{T}$ 。熵波与温度变化线性相关,即可通过测量流场温度的变化来研究熵波的特性。

1.2 吸收光谱

吸收光谱测量技术是建立在 Beer-Lambert 定律的基础上。如图 1 所示,当一束波数为 ν ,光强为 $I_{0,\nu}$ 的单频光束通过长度为 L 的均匀待测气体,透射光强 I_ν 与入射光强 $I_{0,\nu}$ 满足如下 Beer-Lambert 关系式:

$$I_\nu = I_{0,\nu} e^{(-k_\nu L)} \quad (2)$$

式中 k_ν 为波数 ν (单位: cm^{-1})下的吸收系数, L 为吸收长度(单位: cm),定义 $A = k_\nu L$ 为吸收面积。

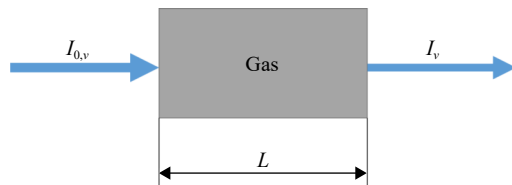


图 1 吸收光谱测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of absorption spectroscopy

式(2)中有两个假设:首先吸收介质为均匀介质,沿光程的气流参数相同;其次是入射光为单一波数 ν 。 k_ν 可以写成

$$k_\nu = p_{\text{total}} x S(T) \phi(\nu) \quad (3)$$

式中 p_{total} 为总压, x 为被测物质的摩尔分数, $\phi(\nu)$ (单位: cm)是线型函数,满足归一化条件,即 $\int \phi(\nu) d\nu \equiv 1$ 。在大多数应用中,线型函数 $\phi(\nu)$ 可以用 Voigt 函数准确描述。 $S(T)$ (依行业惯例,单位为 $\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$, $1 \text{ atm} = 101.325 \text{ kPa}$)是线型强度,与温度有关。

当使用两个不同吸收峰对同一气体进行测量时,可以分别得到各自的吸收面积 A_1 和 A_2 ,两者的比值仅与温度有关,从而得到被测气体温度。

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{\int_0^L \int_{-\infty}^{+\infty} k_{v,1} dv dl}{\int_0^L \int_{-\infty}^{+\infty} k_{v,2} dv dl} = \frac{\int_0^L \int_{-\infty}^{+\infty} p_{\text{total}} x S_1(T) \phi_{v,1}(v) dv dl}{\int_0^L \int_{-\infty}^{+\infty} p_{\text{total}} x S_2(T) \phi_{v,2}(v) dv dl} = \frac{S_1(T)}{S_2(T)} = f(T) \quad (4)$$

2 实验装置

里克管作为一种简单的实验装置,被广泛地应用于热声振荡的相关研究中^[24-25]。虽然它的构造与实际的发动机差别较大,但是在揭露热声振荡物理性质方面起着重要作用,这些性质可以进一步推广到发动机的设计与生产中,避免热声振荡现象的出现。本文主要对长度为 750 mm,内径为 55 mm 的里克管中的预混火焰热声振荡的火焰形态、温度及静压开展了实验研究。实验装置示意图见图 2。

吸收光谱测温装置由以下部分构成:两只分布式反馈激光器(NEL),中心波长分别为 1 343 nm 和 1 391 nm,固定在各自的激光座上,分别由激光控制器(Arroyo 6305)通过调节温度和电流控制激光器的输出波长和强度。函数发生器(RIGOL 4102)输出 5 kHz 的锯齿波对激光控制器的电流进行控制,从而达到测量频率为 5 kHz 的目的。

两束激光利用时分复用的方法^[26]经过 2 合 1 光纤耦合器,并进入定制的“6+1”光纤中。定制光纤呈“Y”型,一端由一根直径为 9 μm 的单模光纤和包裹在同一包层中的 6 根直径为 105 μm 的多模光纤组成,另外一端为 6 根多模光纤包裹单模光纤组成,如图 3 所示。激光通过单模光纤入射,并经准直镜穿过里克管内的被测区域(图 2 中里克管中的红色部分代表激光路径),即本生灯火焰正上方,距离本生灯喷嘴出口高度为 30 mm。再由平面镜反射经过准直镜耦合进多模光纤。携带流场信息的激光经准直镜准直入射到光电探测器上,并由采集卡(NI 9223,采集速率为 1 MSa/s)采集数据。

火焰形态通过高速相机 SA-Z 2100K 进行观测,考虑到本实验中里克管的本征频率为 230 Hz 左右,故拍摄速率设定为 3 000 帧/s。里克管出口处的静压变化由麦克风采集监测。

燃烧装置为本生灯,本生灯的出口管径为 10 mm,燃料为丁烷气体,体积流量为 300 mL/min,在底部与空气充分混合,实验过程中保持燃气体积流量不变。对于预混火焰,如果当量比保持恒定,不易产生热声振荡现象^[11,18]。可以在本生灯喷管出口处固定一个自制的金属网,极大地加剧了整个流场的非定常性,使得该燃烧场更容易发生热声振荡现象。本生灯的喷嘴距离里克管一端管口距离为 185 mm,使得产生的热源所在位置对应于

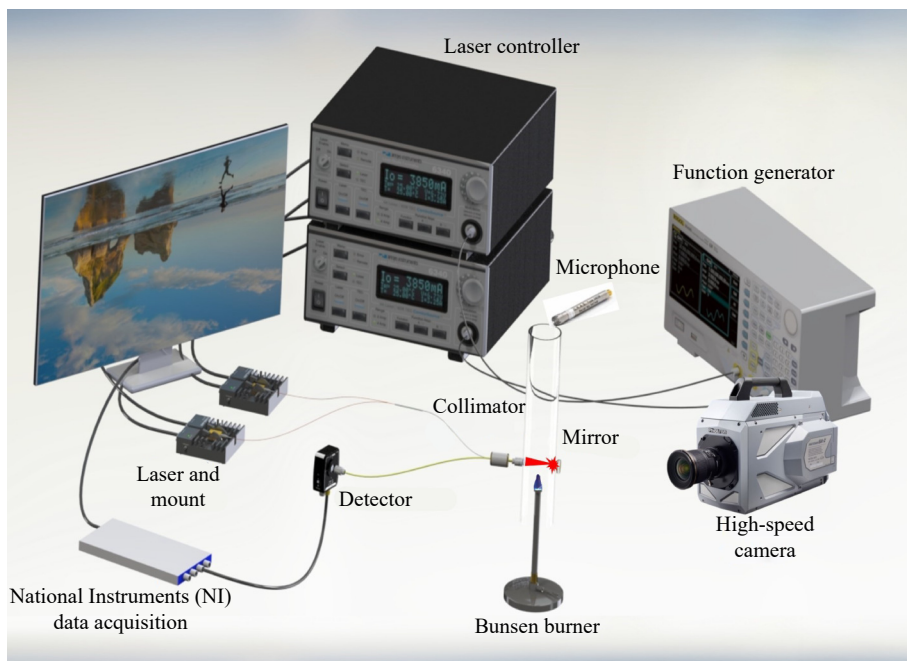


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Scheme of experimental setup

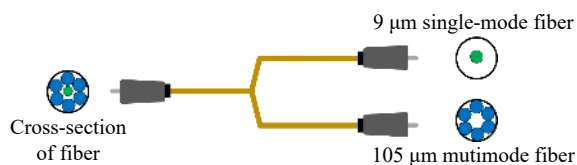


图3 Y型光纤示意图

Fig. 3 Schematic of Y-shape fiber

1/4管长,从而更容易使里克管中出现热声振荡现象。

3 结果与讨论

3.1 温度

激光通过火焰上方区域,携带着燃烧场温度等信息的典型吸收光谱特性如图4所示。图中红色圆点代表实测的光谱吸收率强度,蓝色实线是对实测数据的Voigt拟合, ν_0 表示吸收中心的波数。图4(a)是吸收中心在 7185.59 cm^{-1} 的 H_2O 分子吸收谱线,图4(b)为吸收中心在 7444.36 cm^{-1} 的 H_2O 分子吸收谱线。由于 7444.36 cm^{-1} 的附近还有两个较小的吸收峰,采取多峰Voigt拟合的方法

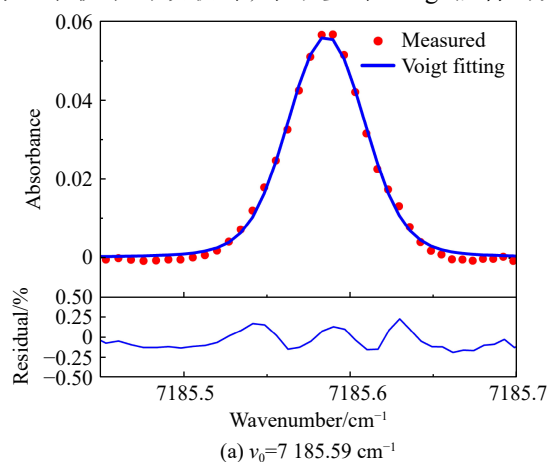
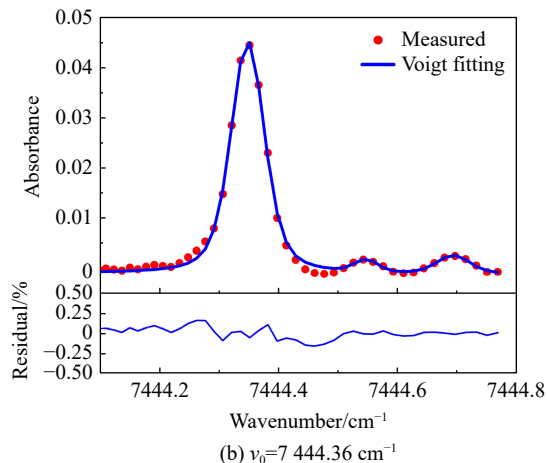
(a) $\nu_0=7185.59\text{ cm}^{-1}$ (b) $\nu_0=7444.36\text{ cm}^{-1}$

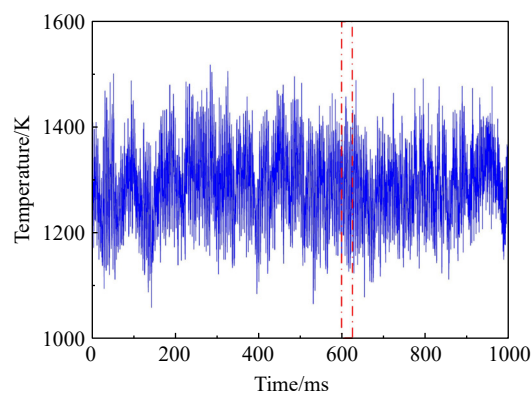
图4 吸收光谱图

Fig. 4 Absorbance spectrum

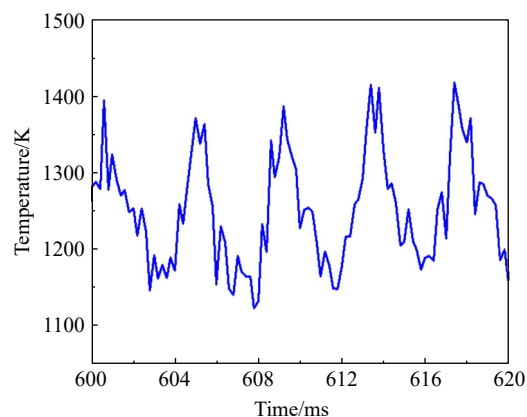
式消除其对主吸收峰的影响。从图中可以看出,Voigt拟合与实测的光谱吸收率之间的残差都在0.25%以内,拟合效果很好。

从吸收光谱图中,可以分别得到 H_2O 分子两条吸收谱线的吸收面积 A_1 和 A_2 。根据1.2节介绍的方法,从光谱吸收率中得到火焰上方1 s内的温度变化,如图5(a)所示。从图中可以看出,火焰温度在 $1100\sim 1500\text{ K}$ 之间变化。图5(b)是图5(a)中红色虚线方框的放大视图,可以看出温度呈线“正弦式”周期变化,周期性的温度波动是熵波最重要的性质之一。在整个热声振荡期间,温度保持着这种规律性变化。通过短时傅里叶变换分析其频率成分,可以清楚地看见,在整个时间段火焰温度变化的频率都在 230 Hz 附近,与里克管的1阶本征频率接近。此外,除了 230 Hz 的基频,2阶频率也被较好地保留。图5(c)为火焰频率分布。

由于热声振荡中声波与热的相互耦合而导致的温度周期性地变化,不断快速变换的温度会对里克管壁面产生不同强度的热应力,不过由于本实验中的热声振荡强度并不大(可通过下文的里克管出口处的静压变化看出),引起的温度波动幅值较小,所以热应力的强度较小,不会对壁面



(a) 测量周期内火焰温度变化



(b) 图(a)红色方框中火焰温度变化放大图

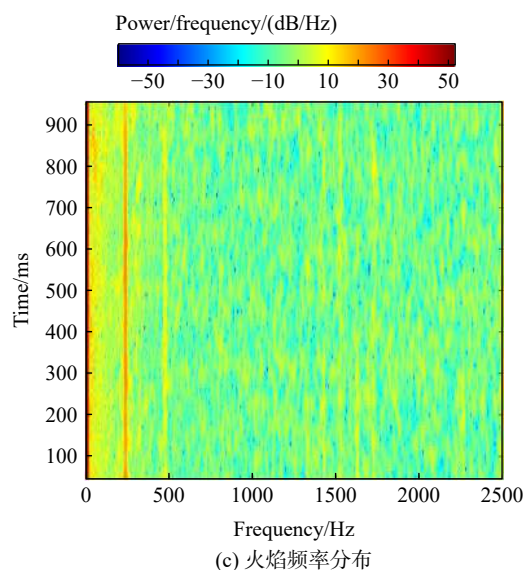


图 5 火焰温度幅值变化及频率分布

Fig. 5 Temperature variation of flame and its frequency distribution

产生实质性损害。而在实际的发动机工作中, 热声振荡中的高频温度变化会对发动机壁面产生不可忽略的热应力, 甚至会造成发动机的毁坏。

3.2 火焰形态及静压

热声振荡中静压的变化会导致火焰形态周期性变化, 利用高速相机观察火焰的化学发光强度变化。不同时刻的火焰化学发光强度如图 6 所示 (AU 为 absorbance unit, 吸光度单位)。虽然整体上火焰呈轴对称分布, 但是火焰的大小及不同位置的发光强度有明显变化, 尤其是喷嘴出口处的火焰发光强度变化最为明显。在时间 $t=0$ ms 时, 火焰发光强度最大, 随即发光强度开始逐渐减弱, 在 $t=2.31$ ms 附近火焰发光强度达到最低。随后火焰发光强度又开始逐渐增强, 在 $t=4.29$ ms 附近再次达到最强, 形成一个完整周期。

本文定义一定发光强度的面积变化来表征火焰的不同形态, 通过采用合适的阈值, 对原始图像的二值化处理, 可以得到火焰中发光强度的面积变化, 以此来表征火焰形态变化。值得注意的是, 阈值的选取只会影响火焰发光强度面积的绝对值, 并不会影响发光强度面积的变化频率。在 0.1 s 内的火焰发光强度面积占同一尺寸图片面

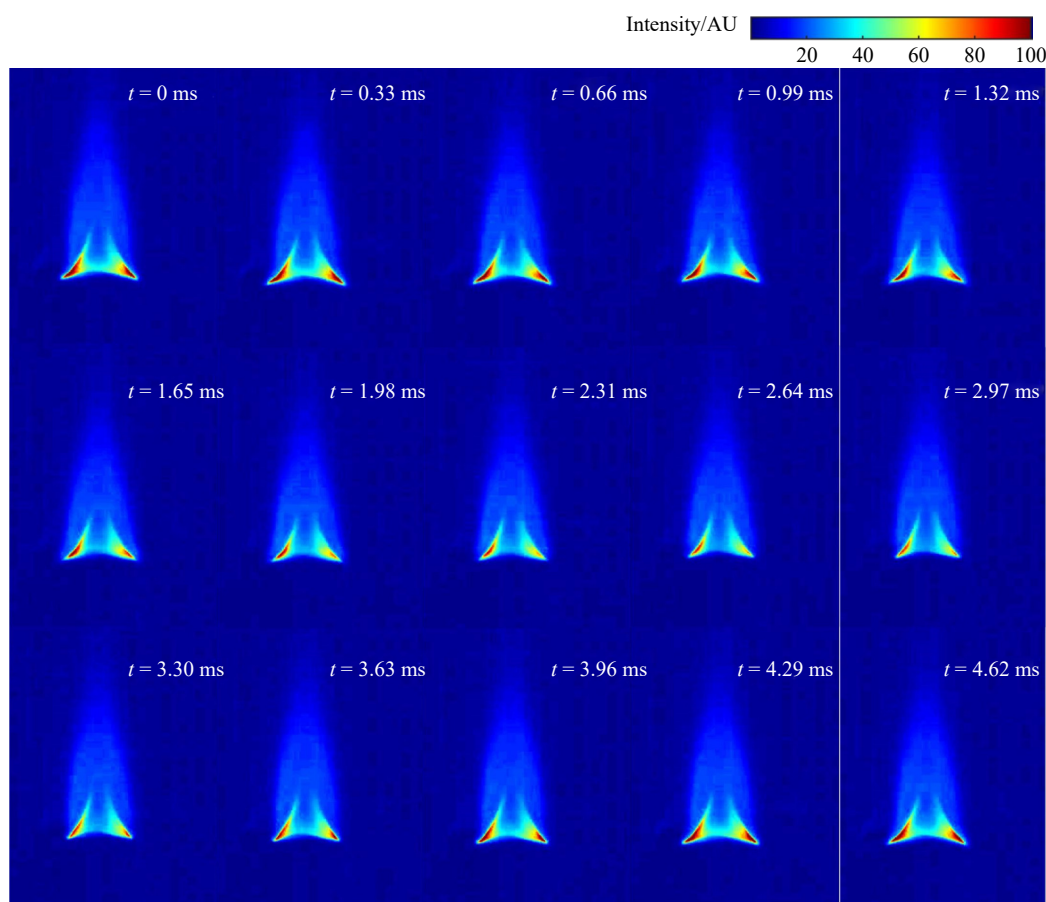


图 6 不同时刻的火焰化学发光强度

Fig. 6 Measurements of flame chemiluminescence intensity at different times

积的大小如图7(a)所示,可以明显看出火焰发光强度面积在规律性地变化,最大面积占到2.48%,最小面积为1.82%。对发光强度面积进行傅里叶变换,如图7(b)所示,图中 Δp 为静压的波动。可以发现其具备230 Hz的基频,与热声振荡引起的温度变化基频相近。此外,2倍频及3倍频的信息也被完好地保留。这表明火焰形态也会受到热声振荡的影响,从而展现相同频率的振荡变化,有可能是由于静压变化导致的。

里克管出口处的静压随时间的变化如图7(c)所示,静压的波动幅度在20 Pa左右。图7(d)是静压的频谱图,其基频与火焰发光强度的基频保持一致,2倍频及3倍频的信息也清晰可见。

火焰形态及静压变化的周期性相较于火焰温

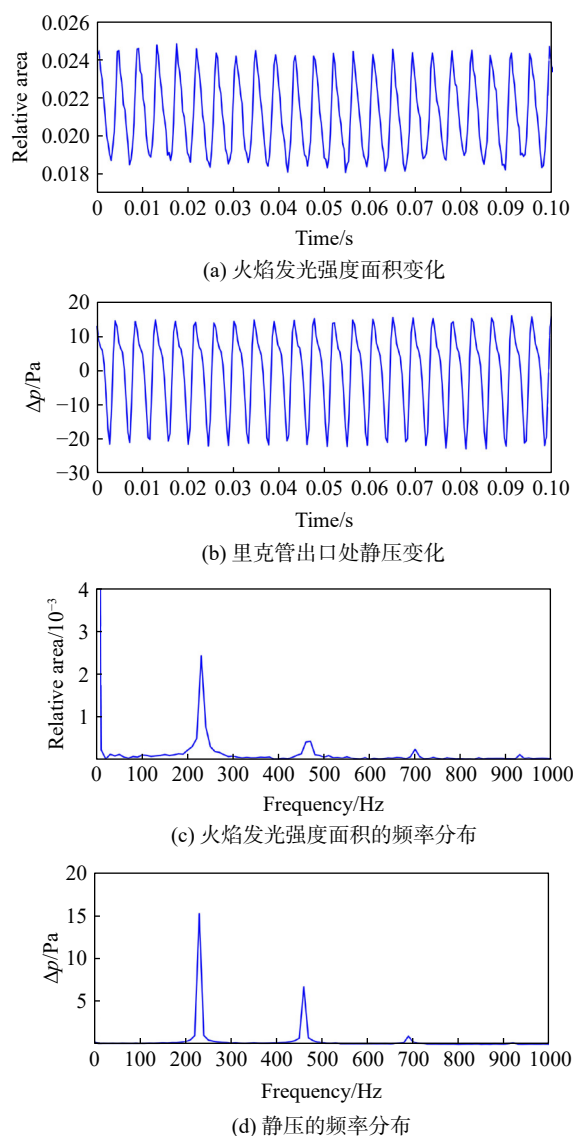


图7 火焰发光强度面积和里克管出口处的静压

Fig. 7 Flame radiation intensity area and fluctuations of static pressure at exit of Rijke tube

度的周期性更强一些,主要是因为高温气体不断与里克管中冷空气部分及管壁进行换热,使得局部气体温度受到了更多的扰动。即便如此,三者的基频均保持一致。

4 结 论

本文对里克管内的热声振荡现象进行了实验研究,利用激光吸收光谱测温技术实现了对气体温度的高速测量,测量频率达到5 kHz,有效地揭示了热声振荡中温度的变化特性。温度在一定范围内有规律地波动,频率在230 Hz附近,接近里克管的本征频率。同时,高速相机对热声振荡中火焰化学发光强度测量表明:在热声振荡中,火焰形态可能受静压的影响而与其保持相同频率振荡,两者频率均为230 Hz。静压、火焰形态、温度三者的基频都保持一致。但是由于温度受到更多扰动,导致其还有其他一些频率成分。此外,单端吸收光谱装置的成功应用,也说明了该装置的测量可行性,有望解决部分装置由于光学窗口有限而无法进行光学测量的问题。

热声振荡及燃烧噪声在先进燃气轮机和航空发动机的设计和应用中是不可忽略的问题,本文采用的测量技术在热声振荡的基础研究和工业应用方面都有相当不错的前景。

参考文献:

- [1] DOWLING A P. The calculation of thermoacoustic oscillations[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1995, 180(4): 557-581.
- [2] CHU B T, LESLIE S G K. Non-linear interactions in a viscous heat-conducting compressible gas[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1958, 3(5): 494-514.
- [3] MARBLE F E, CANDEL S M. Acoustic disturbance from gas non-uniformities convected through a nozzle[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1977, 55(2): 225-243.
- [4] STOW S R, DOWLING A P, HYNES T P. Reflection of circumferential modes in a choked nozzle[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2007, 467: 215-239.
- [5] DURAN I, MOREAU S. Solution of the quasi-one-dimensional linearized Euler equations using flow invariants and the Magnus expansion[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2013, 723: 190-231.
- [6] DURAN I, MORGANS A S. On the reflection and transmission of circumferential waves through nozzles[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2015, 773: 137-153.
- [7] POLIFKE W, PASCHEREIT C O, PASCHEREIT K. Constructive and destructive interference of acoustic and entropy waves in a premixed combustor with a choked exit[J]. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 2001, 6(3): 135-146.
- [8] DOWLING A P, STOW S R. Acoustic analysis of gas-turbine combustors[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2005, 19(5): 751-758.
- [9] NADER K, MICHAEL J B, WILLIAM H M. Acoustic and disturbance energy analysis of a flow with heat communication[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 225(3): 557-581.

- nal of Fluid Mechanics, 2008, 596: 67-89.
- [10] BAUERHEIM M, NICOUD F, POINSOT T. Theoretical analysis of the mass balance equation through a flame at zero and non-zero Mach numbers[J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(1): 60-67.
- [11] LIN S C, BOMBERG S, POLIFKE W. Propagation and generation of acoustic and entropy waves across a moving flame front[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 166: 170-180.
- [12] MORGANS A S, DURAN I. Entropy noise: a review of theory, progress and challenges[J]. *International Journal of Spray and Combustion Dynamics*, 2016, 8(4): 285-298.
- [13] KELLER J J, EGLI W, HELLAT J. Thermally induced low-frequency oscillations[J]. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 1985, 36(2): 250-274.
- [14] ECKSTEIN J, FREITAG E, HIRSCH C, et al. Experimental study on the role of entropy waves in low-frequency oscillations for a diffusion burner[R]. Vienna, Austria: ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2004.
- [15] BAKE F, RICHTER C, MÜHLBAUER B, et al. The entropy wave generator (EWG): a reference case on entropy noise[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 326(3/4/5): 574-598.
- [16] WASSMER D, SCHUERMANS B, PASCHEREIT C O, et al. An acoustic time-of-flight approach for unsteady temperature measurements: characterization of entropy waves in a model gas turbine combustor[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2016, 139(4): 041501.1-041501.8.
- [17] HENDRICKS A G, VANDSBURGER U, SAUNDERS W R, et al. The use of tunable diode laser absorption spectroscopy for the measurement of flame dynamics[J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17: 139-144.
- [18] WANG Guoqing, LIU Xunchen, WANG Sirui, et al. Experimental investigation of entropy waves generated from acoustically excited premixed swirling flame[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 204: 85-102.
- [19] WEBBER M E, BAER D S, HANSON R K. Ammonia monitoring near 1.5 m with diode-laser absorption sensors[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(12): 2031-42.
- [20] GOLDENSTEIN C S, SPEARRIN R M, JEFFRIES J B, et al. Infrared laser-absorption sensing for combustion gases[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2017, 60: 132-176.
- [21] REUTER S, SOUSA J S, STANCU G D, et al. Review on VUV to MIR absorption spectroscopy of atmospheric pressure plasma jets[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2015, 24(5): 054001.1-054001.41.
- [22] BAYU D, SERGEY A S, AUDREY BLONDÉ, et al. Entropy waves measurement of a technically premixed turbulent swirled flame by tunable diode laser absorption spectroscopy[R]. San Diego, US: 2022 Science and Technology Forum and Exposition, 2022.
- [23] GOH C S, MORGANS A S. The influence of entropy waves on the thermoacoustic stability of a model combustor[J]. *Combustion Science and Technology*, 2013, 185(1/2/3): 249-268.
- [24] ZHANG Mingxuan, LI Ting, CHENG Wenwang, et al. Active control of thermoacoustic instability using microsecond plasma discharge[J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 127(3): 033301.1-033301.9.
- [25] PUEJDL K, HURÁK Z, ZEMÁNEK J. Rijke organ: modeling and control of array of Rijke tubes[J]. *International Federation of Automatic Control: PapersOnLine*, 2020, 53(2): 8866-8871.
- [26] LIU Peijin, HUANG Bin, YANG Bin, et al. TDLAS for measurement of temperature in combustion environment[R]. Xi'an: International Symposium on Laser Interaction with Matter, 2013.

(编辑: 秦理曼)