

模型燃烧室壁面与火焰温度光学测量方法研究

孙彬¹, 韩啸^{2,3}, 蔡伟伟¹, 张弛^{2,3}

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 北京航空航天大学航空发动机研究院, 北京 100191;
3. 北京航空航天大学航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘要: 为研究燃气轮机燃烧室壁面温度与火焰燃烧的关系, 实验研究了模型燃烧室壁面温度发生改变前后火焰的燃烧特性。采用磷光测温技术对壁面温度进行测量, 利用辐射层析技术结合双色测温法对火焰的三维结构及温度场进行了重建。实验时壁面温度在 200 °C 附近, 火焰的温度范围是 1 500 ~ 2 000 K。实验结果表明: 当气流冲击壁面时, 壁面温度发生局部变化, 导致火焰与壁面的换热条件改变, 会直接影响火焰结构及温度分布, 火焰会趋向于壁面温度降低的部分发展。

关键词: 磷光测温; 燃烧诊断; 层析成像; 非接触测量

中图分类号: V231.2 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.01.012

[引用本文格式] 孙彬, 韩啸, 蔡伟伟, 等. 模型燃烧室壁面与火焰温度光学测量方法研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(1): 89-95. SUN Bin, HAN Xiao, CAI Wei-wei, et al. Research on optical measurement method for temperatures of wall and flame in model combustor[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(1): 89-95.

Research on Optical Measurement Method for Temperatures of Wall and Flame in Model Combustor

SUN Bin¹, HAN Xiao^{2,3}, CAI Wei-wei¹, ZHANG Chi^{2,3}

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200240;
2. Research Institute of Aero-engine, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, China, Post Code: 100191;
3. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-engine Aero-thermodynamics,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, China, Post Code: 100191)

Abstract: In order to investigate the relationship of combustor wall temperature and flame combustion of gas turbine, the combustion characteristics of the flame before and after the wall temperature of model combustor changes was studied experimentally. Wall temperature was measured by phosphorescence thermometry technology, and the three-dimensional structure and temperature field of flame were reconstructed by radiation tomography technology combined with two-color thermometry. The wall temperature was around 200 °C in the experiment, and the temperature range of the flame was 1 500 K to 2 000 K. The research results show that when the air flow impinges on the wall, the wall temperature changes locally, leading to the change of heat transfer conditions between the flame and the wall surface, which will directly affect the flame structure and temperature distribution, and the flame tends to develop in the section where the wall temperature decreases.

Key words: phosphorescent temperature measurement, combustion diagnosis, tomography, non-contact measurement

引 言

航空发动机运行过程中,燃烧室壁面温度对发动机的工作效率和稳定性有重要影响,运行时不仅壁面温度分布不均会影响燃烧效率,各部件的热胀量不同也会引发振动等不良工况。因此,壁面温度及其散热条件对燃烧的影响是研发人员非常感兴趣的问题^[1~4]。燃气发动机内部运行环境非常复杂,具有高温、高压、强振动的特点,如热电偶^[5]这样的传统的测温方法,由于其接触式测量的特点以及需要布线,不适合复杂环境的测量。红外热像技术^[6]虽然具有非接触的特点,但对目标表面的灰体发射系数有精确要求,而发射系数会受到波长、测量角度、表面性质等参数的影响,对于结构复杂的部件或者有环境光干扰的测量环境,此种方法有一定的局限性。

磷光热成像测温技术(Thermographic Phosphor, TP),简称磷光测温,通常是指利用掺杂过渡元素离子的陶瓷材料进行温度测量。由于磷光的发光特性与其所处的温度环境息息相关,因此可以用于对温度进行非接触式测量,且表现出了非常优异的性能^[7~12]。根据响应信号的不同,磷光热成像测温技术也有多种方法,目前应用最为广泛的是寿命衰减法^[13]和强度比法^[14]。其中,寿命衰减法利用磷光发射强度衰减曲线随温度变化的特性实现测温的目的,具有更高的精度。

早期的磷光测温多使用光电倍增管(Photo Multiplier Tube, PMT)来探测磷光信号,但是光电倍增管只能获得零维的测量信号,需要采用多点扫描测量的方式来获得温度分布信息^[15],空间分辨率不高。近年来,随着高速相机技术的发展和进步,研究者逐渐开始大规模采用高速相机来获取温度分布信息^[16],且测量精度也在不断提高。磷光测温技术结合激光多普勒测速^[17]和粒子图像测速(Particle Image Velocity, PIV)^[18]等先进测量技术,可以实现气液两相流动中温度和速度的同步测量。

本研究对磷光材料的光学性质进行了分析,并将磷光热成像测温技术应用到模型燃烧室的壁面温度二维测量。同时,使用三维层析成像技术对火焰

结构进行了重建和分析。在对壁面进行气流冲击的条件下,模拟壁面换热条件改变时的燃烧室环境,测量了壁面二维温度的变化,并使用双色测温技术对内部火焰等温面进行了重建,分析了其变化趋势。

1 实验原理

1.1 磷光热成像测温

不同的磷光材料在不同测温范围内的效果也有所不同^[19~23],实验中采用的磷光材料为 $\text{Mg}_2\text{F}_2\text{GeO}_4:\text{Mn}$,简称 MFG。这种材料测温范围广,覆盖了从室温到 1 000 K 的测温范围;灵敏度高,衰减时间随温度变化非常显著,这对测温精度的提高非常重要;发光强度高,因为掺杂 Mn 元素,发射率较高,对激光反应敏感,激发的信号信噪比高^[24]。

在磷光材料受到激光的激发后,磷光的发射强度为:

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

式中: I_0 —被激发后磷光的最大光强度,cd; t —时间,s; τ —衰减常数,s; e —自然常数。

衰减常数表示磷光强度下降至初始强度的 $1/e$ 大小所需的时间。当磷光材料所处环境的温度发生变化时,其发光强度的衰减规律也将发生变化,一般来说,温度越高,发光强度衰减得越快,即 τ 越小。一般在实验进行前,先通过热电偶对衰减时间常数和温度的关系进行标定,获得衰减时间常数的变化曲线。测量时,通过拍摄不同时间点的磷光发光图像,获得其强度的衰减曲线,进而计算衰减时间常数。将每一像素点的衰减时间常数与标定曲线对比,即可反推出该点的温度。

1.2 基于辐射层析成像和双色法的火焰测温

层析成像技术的物理背景和数学原理在文献[25~26]中已经有详细的介绍,主要是通过对光场的有限数目的投影进行反卷积以得到其三维的分布。具体来说,将光场离散成一个个发光的体素,计算每个体素的点扩散函数(Point Spread Function, PSF),进而得到投影与光场的关系。利用点扩散函数,离散的体素和投影之间的关系可以表示为:

$$P_{s,t} = \sum_{i=1}^I f_i \cdot w_i(s,t) \quad (2)$$

式中: i —体素编号; I —体素总数; $P_{s,t}$ —第 t 个投影中第 s 个像素的信号强度,cd; f_i —第 i 个体素的火焰辐射强度,cd; $w_i(s,t)$ —第 i 个体素到 $P_{s,t}$ 像素点的点扩散函数的值。

使用发展较为成熟的代数重建算法 (Algebraic Reconstruction Technique, ART) 对火焰的三维结构进行重建,这种算法在燃烧诊断领域的应用非常广泛。代数重建算法的迭代过程为:

$$\vec{f}^{h+1} = \vec{f}^h + \alpha \cdot \vec{w}_{s,t} \cdot \frac{P_{s,t} - \vec{w}_{s,t} \cdot \vec{f}^h}{\vec{w}_{s,t} \cdot \vec{w}_{s,t}} \quad (3)$$

式中: h —迭代的次数; $\vec{w}_{s,t}$ —权重矩阵; α —收敛系数。

双色测温法是通过对不同谱段的火焰发光进行采集,结合对黑体辐射源标定的结果,获得火焰温度的方法。在利用层析成像获得了不同谱段火焰光场的基础上,可得火焰的温度公式^[27]:

$$T = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_R} - \frac{1}{\lambda_G} \right)}{\ln \frac{I(\lambda_G, T)}{I(\lambda_R, T)} + \ln(S_\lambda) + \ln \left(\frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_G} \right) + \ln \left(\frac{\lambda_G}{\lambda_R} \right)^5} \quad (4)$$

式中: T —火焰的温度, K; C_2 —第二普朗克常数; $I(\lambda_G, T)$ —G 波长下重建得到的灰阶强度, cd; $I(\lambda_R, T)$ —R 波长下重建得到的灰阶强度, cd; S_{λ_R} —成像系统在 λ_R 处的光谱敏感度; S_{λ_G} —成像系统在 λ_G 处的光谱敏感度。测量系统在不同波长下的光谱敏感系数,可以通过对黑体辐射源的标定来获得。

2 实验设置

2.1 模型燃烧室

图 1 为模型燃烧室的实物图,底部为独立分层旋流燃烧器,包括内旋流器和外旋流器,流量为 1 L/min 的燃料 CH_4 通入内旋流器,流量为 50 L/min 的空气通入外旋流器,燃烧当量比为 0.19。在燃烧器的凹槽内插入上端开口的石英管,该石英管高度为 300 mm,内径为 51 mm,外径为 55 mm。在石英管的一侧预先喷涂了黑色的纳米陶瓷耐高温涂料,该涂料可以避免火焰在石英管内壁形成反光,同时还可以防止磷光透过石英管干扰火焰的成像,这些

干扰可能影响火焰的重建。

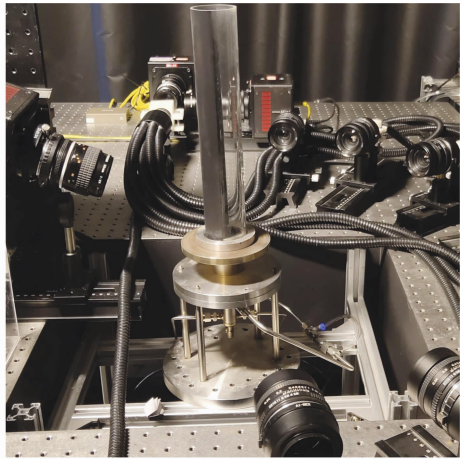


图 1 模型燃烧室实物图

Fig. 1 Physical drawing of model combustor

2.2 磷光光谱测量

使用 Q-switched Nd:YAG 脉冲激光器 (Quantel, Qsmart-Twins 850) 对磷光材料进行激发,激光器的重复频率为 10 Hz,波长为 266 nm,能量为 90 mJ。使用光谱仪 (HR4000) 对激发光的光谱进行了测量,测量结果如图 2 所示。光谱在 650 nm 附近出现了明显的波峰,因此可以用中心波长为 650 nm,半高峰宽 25 nm 的带通滤光片来过滤该波峰处的其他杂光。

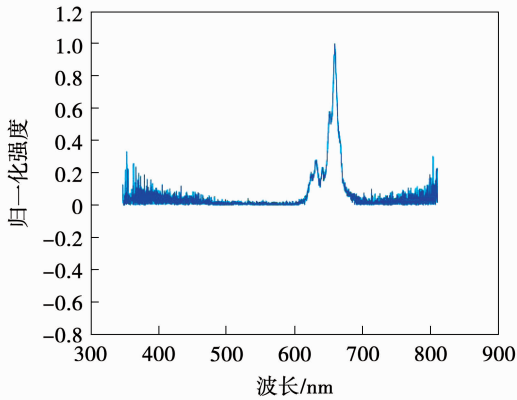


图 2 MFG:Mn 材料的发射光谱

Fig. 2 Emission spectrum of MFG:Mn material

2.3 磷光衰减时间的标定

标定的过程在一台背面嵌有 K 型热电偶的加热台上进行,将加热台的温度在 150 ~ 450 °C 范围内

逐渐升高。等待温度达到稳定,同时保持周围环境无气流等干扰因素。激发光的信号由 CMOS 高速相机 (Photron FASTCAM Mini AX100) 进行收集,信号发生器 (DG645) 发出同步信号控制激光脉冲和相机快门。相机光圈为 f 2.8,曝光时间 1/4 000 s,焦距为 55 mm,逐次调整激光脉冲与相机快门之间的延迟时间,对每个延迟时间下的发光强度进行 20 次重复拍摄,就可以得到磷光强度的完整衰减曲线。

对各个温度下的磷光信号强度分别进行平均和归一化,并根据式 (1) 对磷光的衰减常数 τ 进行计算。对衰减时间常数与温度的关系进行多项式拟合,得到如图 3 所示的曲线。

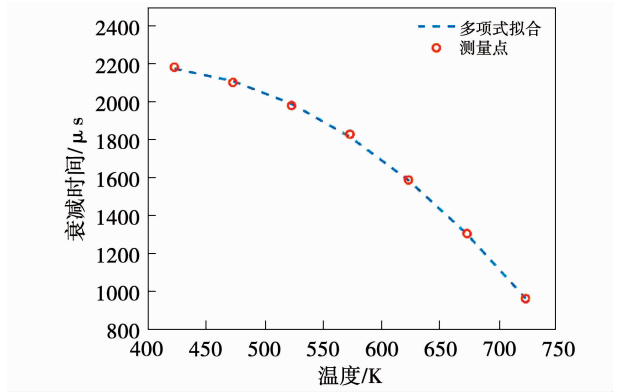


图 3 MFG 衰减时间随温度的变化曲线

Fig.3 Variation curves of MFG attenuation time with temperature

2.4 火焰温度场测温

如图 4 所示,由信号发生器对相机 1 的快门和激光器脉冲进行控制,实现对壁面的温度测量。相机 1 的快门速度为 1/3 000 s,焦距为 55 mm,光圈为 f 2.8。在另一侧 180°的范围内均匀布置了 6 枚定焦镜头,用于采集火焰的发光信号,镜头焦距为 50 mm,光圈为 f 2.8。每一枚镜头的信号会经由 5.2 mm×5.2 mm,分辨率 355×420 的光纤束传导汇总至分光镜,相机 2 和相机 3 前分别安装了中心波长为 425 nm 和 715 nm 的带通滤波片,用于采集不同波长的火焰信号。

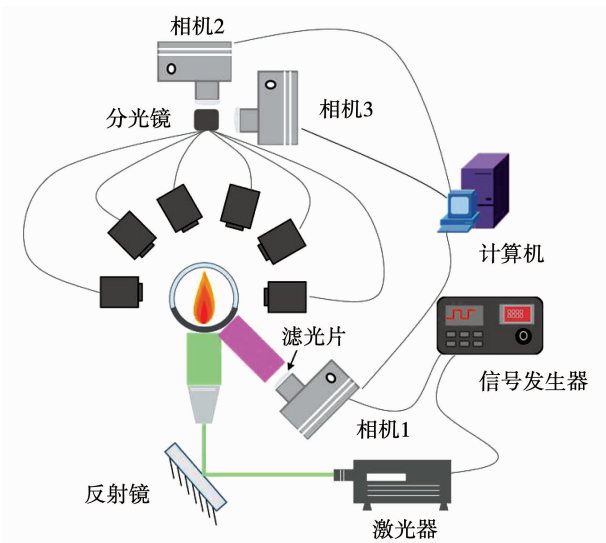


图 4 壁面温度和火焰温度分布测量装置

Fig.4 Wall temperature and flame temperature distribution measuring devices

3 结果与分析

使用标定获得的数据对平板表面的温度进行了测量,并将测量结果与热电偶进行对比,温度的测量误差为 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图 5 显示了模型燃烧室外表面距离燃烧室出口 4.5 cm 高度处 1.78 cm² 面积内的平均温度从点火开始至温度稳定阶段的变化曲线,其测量间隔为 0.1 s,在 10 s 内对模型燃烧室表面温度进行了连续测量。可以看到自点火开始,壁面温度在 2~10 s 内迅速从室温 25 $^{\circ}\text{C}$ 升高至 200 $^{\circ}\text{C}$,升温速率达到了 21 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$,并且在此后趋于稳定。这说明 10 s 后石英管壁面与火焰的换热已经达到动态平衡,火焰的燃烧处于稳定状态。

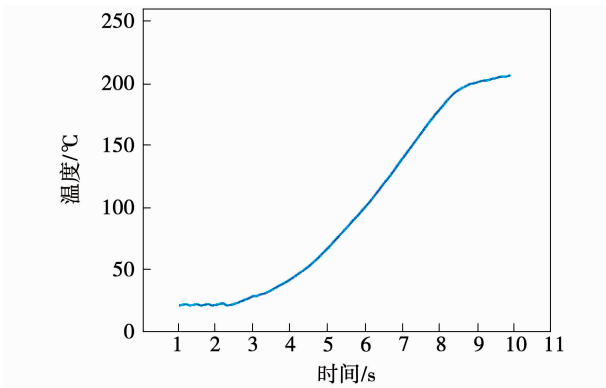


图 5 点火后温度随时间的变化曲线

Fig.5 Variation curve of temperature with time after ignition

图 6(a) 为模型燃烧室外表面的二维温度分布。可以看到,在测量区域内温度近似为均匀分布,约为 204 ℃。

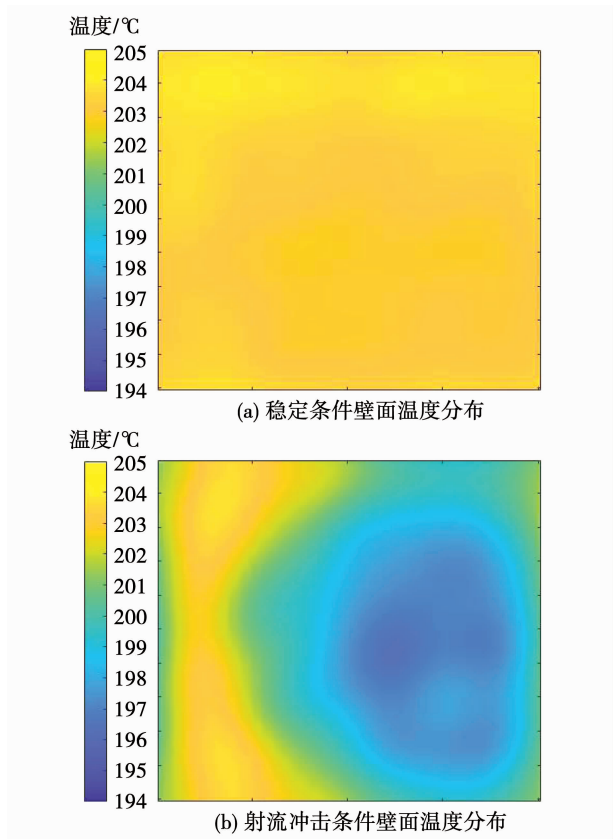


图 6 壁面温度分布图

Fig. 6 Wall temperature distribution diagram

为了探究火焰三维结构与壁面温度之间的关系,在火焰达到稳定之后,使用压力为 172 kPa 的气泵持续对外壁喷射气流。等待壁面温度重新达到稳定工况后,对壁面以及火焰的温度再次进行测量。图 6(b) 为气流冲击模型燃烧室外表面的工况下的表面温度的变化。可以看到,在气流冲击壁面的情况下,以气流冲击点为中心,出现了局部低温区域,比稳定工况下的壁面温度下降了 8 ~ 10 ℃。

图 7(a) 为没有气流冷却和有气流冷却时测得的火焰三维温度分布,内外的两层分别代表 1 500 K 和 2 000 K 的等温面。 X 、 Y 、 Z 坐标轴对应空间中的前后、左右和上下 3 个方向。火焰的最高温度在 2 000 K 左右,远高于壁面温度,这是由于燃烧室内的空气吸收了大部分热量。火焰整体呈锥形,只有火焰的根部与壁面接触紧密。因此,壁面对火焰的

影响也主要发生在根部位置。

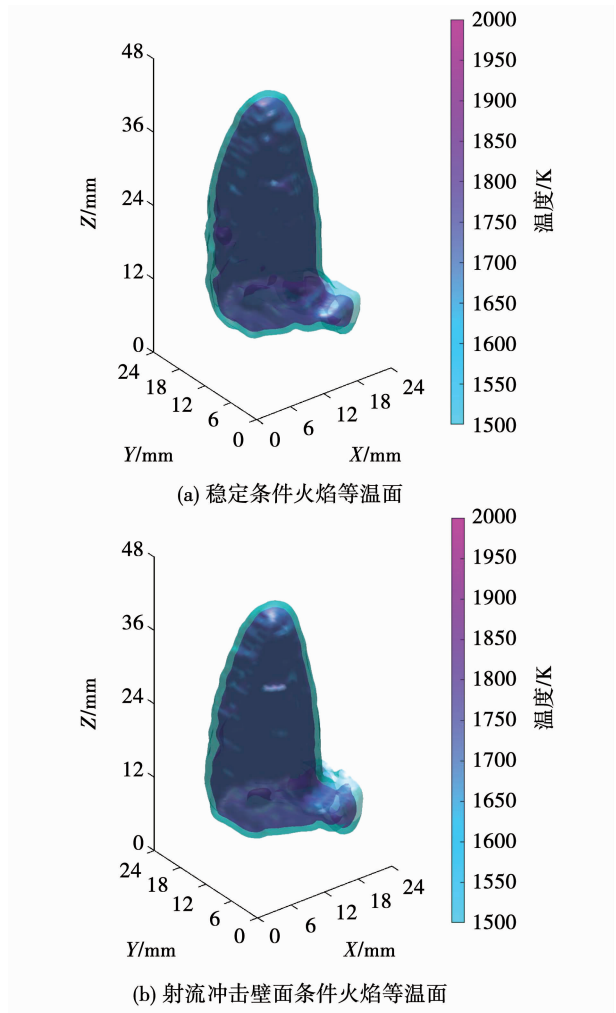


图 7 火焰等温面示意图

Fig. 7 Schematic diagram of flame isothermal surface

火焰的右下角出现了不同程度的不对称凸起,这是由于石英管外壁喷涂了涂料,导致该处区域的热阻与其他地方不同,改变了局部边界条件。由图 7(b) 可知,相比于稳定燃烧的工况,气流冷却条件下火焰右下角凸起更加明显,而火焰的其他部分没有出现明显的变化。这是因为气流冲击带走了部分壁面热量,从而降低了壁面温度,进一步增大了局部边界条件之间的差异,改变了火焰与壁面的换热。火焰更加向该区域倾斜,使得火焰变得更加不对称。

图 8 通过对火焰进行动力学模态分解,选取了能量最高的 6 组模态进行分析,图 8(a)、(c) 是模态能量的分布,图 8(b)、(d) 是每个模态对应的增长率。其中圆点的大小代表能量的大小,频率正数代

表增长的趋势,负数代表减弱的趋势,0 代表稳定。对比气流冲击壁面前后的模态可以看出,壁面温度改变后,火焰的震荡频率增大,火焰模态的能量减小,这说明气流对壁面的冷却使得火焰燃烧变得更加不稳定。

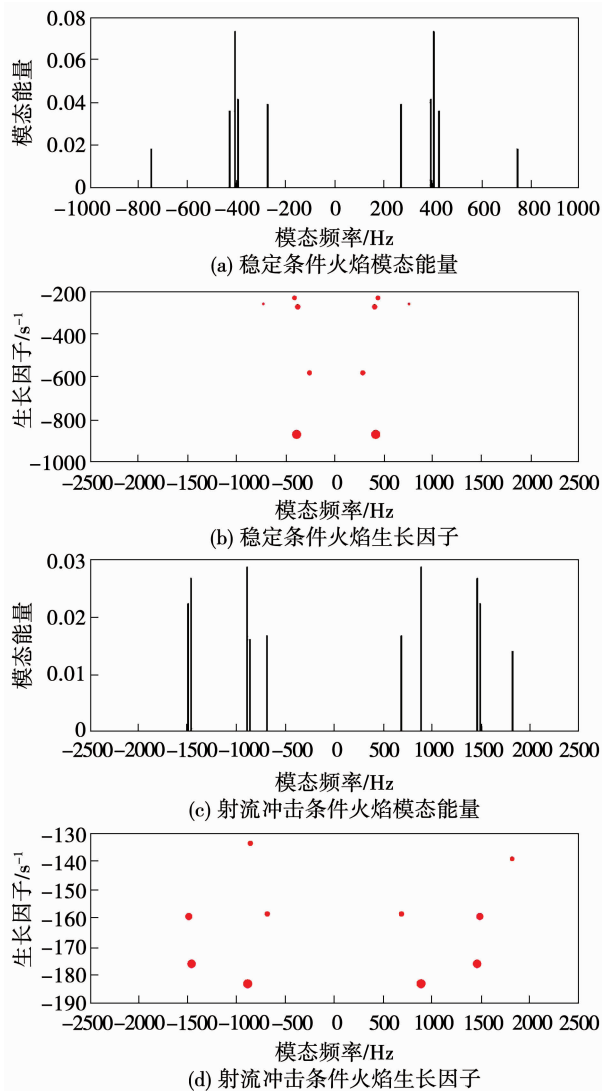


图 8 火焰动力学模态分解结果

Fig. 8 Dynamics mode decomposition results of the flame

4 结 论

为了探究燃烧过程中燃烧室壁面温度与火焰的关系,将磷光测温技术与层析成像双色测温技术相结合,对模型燃烧室外表面点火后的温度变化及受到气流冲击时的温度变化进行了测量,同时,对模型燃烧室内火焰的温度分布进行了重建。实验结果

显示:

(1) 磷光测温技术可以很好地对燃烧室壁面温度进行非接触测量,具有良好的时间和空间分辨率,旋流火焰在燃烧参数稳定的条件下,火焰根部与燃烧室壁面换热充分,壁面温度分布均匀。

(2) 在燃烧室壁面受到气流冲击时,壁面与火焰的换热条件发生改变,会对火焰温度分布的结构产生显著影响,即使是小范围内的温度变化,火焰的结构也会随之发生变化,使燃烧变得不稳定。

参考文献:

- [1] AHMED U, CHAKRABORTY N, KLEIN M. Scalar gradient and strain rate statistics in oblique premixed flame - wall interaction within turbulent channel flows[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2021, 106(2): 701 - 732.
- [2] SANTOS MD, DIAS S, GONSALVES A P, et al. Thermoelectric power generation from biogas + H₂ flames: influence of flame-wall interaction[J]. Experimental Thermal and Fluid Science (EXP THERM FLUID SCI), 2021, 126: 110350.
- [3] ARNDT C, NAU P, MEIER W. Characterization of wall temperature distributions in a gas turbine model combustor measured by 2D phosphor thermometry[C]//Proceedings of the Combustion Institute, 2021: 1867 - 1875.
- [4] 周 娜,熊元建,戴 斌,等. 固壁温度对换热系数计算影响的分析研究[J]. 东方汽轮机, 2018, (2): 23 - 28.
ZHOU Na, XIONG Yuan-jian, DAI Bin, et al. Effect of solid wall temperature on calculation of heat transfer coefficient[J]. Dangfang Turbine, 2018, (2): 23 - 28.
- [5] 陈 浩,邓忠华,余红梅. 热电偶测温系统原理及应用[J]. 制造业自动化, 2004, 26(9): 68 - 71.
CHEN Hao, DENG Zhong-hua, YU Hong-mei. Principle and application of thermocouple temperature measurement system[J]. Manufacturing Automation, 2004, 26(9): 68 - 71.
- [6] 孙晓刚,李云红. 红外热像仪测温技术发展综述[J]. 激光与红外, 2008, 38(2): 101 - 104.
SUN Xiao-gang, LI Yun-hong. Review of the development of temperature measurement technology with infrared thermal imager[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(2): 101 - 104.
- [7] KOPF A, BADRI M, KOHLER E, et al. Survivability of the thermographic phosphors YAG:Pr and SMP:Sn in a premixed flame[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(7): 074001.
- [8] ESPOSITO A, HEAPS E, SUTTON G, et al. Phosphor thermometry

- for nuclear decommissioning and waste storage[J]. Nuclear Engineering and Design, 2021, 375(4):111091.
- [9] BRÜBACH J, PFLITSCH C, DREIZLER A, et al. On surface temperature measurements with thermographic phosphors: a review [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2013, 39(1): 37–60.
- [10] CAI T, KIM D, KIM M, et al. Two-dimensional thermographic phosphor thermometry in a cryogenic environment[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 28(1):015201.
- [11] KIM D, KIM M, KIM K C. Effect of frost on phosphorescence for thermographic phosphor thermometry[J]. Measurement Science & Technology, 2017, 28(12):125202.
- [12] KEMPEMA N J, LONG M B. Boundary condition thermometry using a thermographic-phosphor-coated thin filament[J]. Applied Optics, 2016, 55(17):4691–4698.
- [13] ZHANG Z Z, ZHANG F, LI G Q, et al. Red-emitting phosphor series; $\text{Ca}_9\text{Y}(\text{PO}_4)_7(1-x)(\text{VO}_4)_7x;\text{Eu}_3+(x=0-1)$ with improved luminescence thermal stability by anionic polyhedron substitution [J]. Journal of Materials Science, 2019, 30(9): 8838–8846.
- [14] ISHIWADA N, TSUCHIYA K, YOKOMORI T. Applicability of Dy-doped yttrium aluminum garnet (YAG:Dy) in phosphor thermometry at different oxygen concentrations[J]. Journal of Luminescence, 2019, 208(10):1016.
- [15] GUIBERTI T F, DUROX D, SCOURLAIRE P, et al. Impact of heat loss and hydrogen enrichment on the shape of confined swirling flames[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(2):1385–1392.
- [16] TAO C, MK A, BH A, et al. Phosphor thermometry at the surface of single reacting large-diameter spherical coke particles to characterise combustion for packed bed furnaces[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(3):4225–4232.
- [17] OJO A O, FOND B, ABRAM C, et al. Thermographic laser Doppler velocimetry using the phase-shifted luminescence of BAM:Eu²⁺ + phosphor particles for thermometry [J]. Opt Express, 2017, 25(10):11833–11843.
- [18] ABRAM C, FOND B, BEYRAU F. High-precision flow temperature imaging using ZnO thermographic phosphor tracer particles [J]. Opt Express, 2015, 23(15):19453–19468.
- [19] LI C L, FAN X L, JIANG P, et al. Delamination-indicating of atmosphere-plasma-sprayed thermal barrier coating system using Eu³⁺ + luminescence mapping [J]. Materials Letters, 2018, 222:41–44.
- [20] ALLISON S W, GILLIES G T. Remote thermometry with thermographic phosphors: Instrumentation and applications[J]. Review of Scientific Instruments, 1997, 68(7):2615–2650.
- [21] KWONG W Y, STEINBERG A, CHIN Y H. Effect of B³⁺ + N³⁺ – on YAG:Dy thermographic phosphor luminescence [J]. Opt Lett, 2014, 39(21):6166–6169.
- [22] HERTLE E, CHEPYGA L, BATENTSCHUK M, et al. Influence of codoping on the luminescence properties of YAG:Dy for high temperature phosphor thermometry[J]. Journal of Luminescence, 2017, 182:200–207.
- [23] BRÜBACH J, ZETTERBERG J, OMRANE A, et al. Determination of surface normal temperature gradients using thermographic phosphors and filtered Rayleigh scattering [J]. Applied Physics B, 2006, 84(3):537.
- [24] BRUBACH J, FEIST J P, DREIZLER A. Characterization of manganese-activated magnesium fluorogermanate with regards to thermographic phosphor thermometry [J]. Measurement Science and Technology, 2008, 19(2):025602.
- [25] FLOYD J, GEIPEL P, KEMPF A M. Computed tomography of chemiluminescence (CTC): instantaneous 3D measurements and phantom studies of a turbulent opposed jet flame[J]. Combustion and Flame, 2011, 158(2):376–391.
- [26] YU T, LIU H, CAI W. On the quantification of spatial resolution for three-dimensional computed tomography of chemiluminescence: erratum[J]. Optics Express, 2018, 25(20):24093–24108.
- [27] HOSSAIN M M, LU G, SUN D, et al. Three-dimensional reconstruction of flame temperature and emissivity distribution using optical tomographic and two-colour pyrometric techniques [J]. Measurement Science & Technology, 2012, 24(7):55–55.

(姜雪梅 编辑)