

高温固体表面温度场激光诱导磷光测试技术研究

黄 宇¹, 刘丝雨¹, 赵婷杰², 王晓琪¹, 翁武斌¹, 何 勇¹, 王智化^{1*}

(1. 浙江大学 能源高效清洁利用全国重点实验室, 杭州 310027;

2. 中国航发贵阳发动机设计研究所, 贵阳 550081)

摘 要: 针对航空发动机热端部件等高温固体表面温度场非接触在线监测需求, 建立了基于磷光强度比值法的固体表面温度场激光诱导磷光非接触测试系统。采用溶胶-凝胶法制备了温敏磷光物质 $Y_3Al_5O_{12}:Dy$ 并验证了其磷光特征光谱的温敏特性。探究了紫外脉冲激光能量与增强型电荷耦合器件相机探测延时对所采集的磷光信号强度的影响规律。在此基础上设计并标定了 400~1 700 °C 温度范围内的激光诱导磷光非接触测温系统, 在 1 500 °C 以下时其测温误差低于 3%。将该测温系统应用于受火焰冲刷高温固体表面温度场测量, 结果表明, 所测温度与壁面热电偶测量温度误差较小, 验证了将激光诱导磷光测温技术应用于航空发动机热端部件表面温度场宽温域、快响应、高精度测量的可行性。

关键词: 热端部件; 非接触测温; 磷光测温; 火焰冲刷; 磷光光谱; 温敏特性; 航空发动机

中图分类号: V232.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2620(2026)02-0009-10

DOI: 10.3724/j.GTER.20250085

Laser-induced phosphorescence testing technique for high temperature solid surface temperature field

HUANG Yu¹, LIU Siyu¹, ZHAO Tingjie², WANG Xiaoqi¹,
WENG Wubin¹, HE Yong¹, WANG Zhihua^{1*}

(1. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. AECC Guiyang Engine Design and Research Institute, Guiyang 550081, China)

Abstract: A laser induced phosphorescence non-contact test system based on the phosphorescence intensity ratio method was established for the non-contact online temperature field monitoring of high temperature solid surface such as hot end parts of aero-engine. The temperature-sensitive phosphor $Y_3Al_5O_{12}:Dy$ was prepared by sol-gel method, and the temperature sensitive characteristics of its phosphorescence spectrum were verified. The effect of ultraviolet pulse laser energy and intensified charge-coupled device camera detection delay on the captured phosphorescence signal intensity was investigated. On this basis, a laser induced phosphorescence non-contact temperature measurement system was designed and calibrated in the range of 400~1 700 °C, achieving a measurement error of less than 3% below 1 500 °C. The temperature measurement system was applied to the surface temperature field measurement of a high temperature solid wall subject to flame washout. The results show that the measured temperature is in good agreement with the temperature measured by the embedded thermocouple, which verifies the feasibility of applying the

收稿日期: 2025-05-06

基金项目: 中国航发集团产学研合作项目(HFZL2022CXY023)

作者简介: 黄 宇(1998-), 男, 江苏泰州人, 博士研究生, 主要从事高温固体表面温度场光学测试技术研究。

通信作者: 王智化, 教授, 博士, 研究方向为激光燃烧诊断。E-mail: wangzh@zju.edu.cn

引用格式: 黄 宇, 刘丝雨, 赵婷杰, 等. 高温固体表面温度场激光诱导磷光测试技术研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2026, 39(2): 9-18. HUANG Yu, LIU Siyu, ZHAO Tingjie, et al. Laser-induced phosphorescence testing technique for high temperature solid surface temperature field[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2026, 39(2): 9-18.

laser induced phosphorescence technology to the surface temperature field measurement of hot end parts of the aero-engine with a wide temperature range, fast response and high precision.

Key words: hot section component; non-contact thermometry; phosphor thermometry; flame washout; phosphorescence spectrum; temperature sensitive characteristics; aero-engine

0 引言

现代飞机对航空发动机的性能要求不断提高,推动航空发动机设计向高温升、高推重比方向快速发展^[1]。航空发动机温升的提高使得参与燃烧的空气量逐渐增加,而用于冷却的空气量进一步减少,同时压气机出口温度提高、冷却品质下降以及涡轮叶片、燃烧室壁面等热端部件热强度增大,均为热端部件的有效冷却带来了巨大挑战。目前,对于航空发动机热端部件缺乏精确的在线表面温度场测试技术和方法,极大地限制了航空发动机内部燃烧性能评估、冷却流场组织、危险部位识别、工作寿命预测的理论和技術发展。因此,针对航空发动机热端部件开发表面温度场的高精度在线测量技术和方法,对发展新型高参数航空发动机具有重要的理论和现实意义。

固体表面温度测量方法可分为接触式测温法和非接触式测温法。传统的高温测量以接触式测温法为主,常用测温元件包括热电偶、热电阻等。接触式测温法必须与待测目标接触才能进行测量,因此会破坏目标的热平衡状态,改变其温度场,造成测温误差;同时,其布置过程复杂且仅支持点测量,无法实现对目标表面温度场的实时精确测量。而非接触式测温法无需接触目标物体,不会对目标温度场产生干扰,且响应速度快,适用于高温复杂环境下的物体表面温度场测量。

目前,固体表面的非接触式测温法主要包括比色测温法、红外热像仪测温法、示温漆法等^[2-6]。其中,比色测温法等辐射测温技术虽然理论上可获得物体表面温度场,但由于其基于普朗克辐射定律,而物体表面的发射率会随波长、物质种类、表面温度和表面状况等多种因素变化,通常难以被精确确定,加之周围高温环境辐射的影响难以消除,应用此类方法得到的反演温度往往误差较大,难以实现复杂环境下的高精度测温。示温漆法基于示温涂料在温度升高过程中因发生物理或化学反应所产生的颜色变化,来测量目标表面温度分布。但是,由于上述反应往往为不可逆过程,该方法无法对目标温度场进行

实时监测,仅能反映目标所经历的最高温度,且温度分辨率与精度较低;此外,示温漆无法重复使用,每次测温均需要拆卸部件重新喷涂示温漆与判读温度,测温过程较为繁琐。

近年来,随着激光技术的快速发展,基于激光光谱的温度场非接触在线测量技术为航空发动机热端部件表面温度场测量提供了新的方法。激光诱导磷光(Laser-induced phosphorescence, LIP)测温技术利用特定磷光物质对温度敏感的特点来测量固体表面温度。LIP测温技术采用激光主动照明,磷光材料物性已知,特征发射波长及强度与环境辐射无关,因此可不考虑目标物体发射率开展温度测量,且不受周边环境干扰,具有系统响应快、灵敏度高、测温范围宽、可实时反映目标温度场变化过程、重复利用性好等优点,是一种理想的固体表面温度场测试方法。

国内外学者围绕利用LIP测温技术测量航空发动机固体表面温度场开展了大量研究。美国洛斯·阿拉莫斯国家实验室率先提出将LIP测温技术应用于航空发动机温度测量的理念^[7],并首次验证了利用磷光寿命法测量运行中的航空发动机定子叶片单点温度的可行性,测温上限达700℃,且结果与热电偶测温数据吻合^[8]。美国麦卓激光公司联合NASA格林研究中心^[9]采用磷光强度比值法测量了航空发动机运行期间涡轮叶片的表面温度,结果显示温度测量值与发动机制造商估计温度值仅相差约25℃。瑞典隆德大学ALDÉN院士团队^[10-11]分别采用磷光强度比值法与磷光寿命法,测量了沃尔沃RM12航空发动机快速启动和熄火过程中加力燃烧室尾喷管内壁面的温度变化,测温范围涵盖室温至1200℃,表明LIP测温技术在高温恶劣工况下具备瞬态温度测量能力。德国宇航中心^[12-15]试验研究了LIP测温技术在燃气轮机旋流模型燃烧器表面及燃烧室壁面温度测量中的应用,评估了多种磷光物质的温敏性与可靠性,验证了LIP测温技术应用于燃气轮机燃烧器瞬态温度测量的可行性,并综合分析了火焰形态、火焰温度、内部流场等因素对燃烧室壁面温度分布的影响。德国达姆施塔特工业大学^[16]

与法国国家科学研究中心^[17-19]均采用LIP测温技术测量了燃气轮机模型燃烧器内气膜冷却壁面表面温度场,以探究火焰与气膜冷却壁面间的相互作用。我国上海交通大学孙彬等^[20]将LIP测温技术与层析成像双色测温技术相结合,测量了燃气轮机模型燃烧室外表面在点火后及受到气流冲刷时的温度变化,同时重建了模型燃烧室内火焰的温度分布,以探究燃烧过程中模型燃烧室壁面温度与火焰间的作用关系。综上所述,目前国外学者已将LIP测温技术应用于航空发动机相关领域,并开展了大量研究;而国内对于LIP测温技术的研究起步较晚,针对与真实航空发动机工作状态更为相近的火焰冲刷高温目标表面温度场的LIP测试研究尤为缺乏。

本文针对航空发动机热端部件表面温度场测量需求,发展了基于LIP的宽温域、快响应、高精度固体表面温度场非接触测试技术,主要开展了温敏磷光物质开发、磷光光谱温敏特性验证、400~1 700 °C范围内LIP测温系统的设计与标定、火焰冲刷高温静态固体表面温度场LIP测试等相关研究,可为我国开发工作状态下的航空发动机热端部件表面温度场高温、高精度测量技术提供理论和技术支撑。

1 激光诱导磷光测温原理

LIP测温是一种基于磷光发光过程中热淬灭效应的光学温度测量方法^[21]。磷光物质的电子受激光激发后,会从基态跃迁至单线激发态。其中,少部分电子会进一步通过系间窜越,转换为三线激发态,并最终辐射跃迁或非辐射跃迁的形式,由三线激发态返回基态。其中,辐射跃迁过程中所释放的光子称为磷光,而非辐射跃迁主要表现为热淬灭,且无磷光产生。此外,自三线激发态返回基态为自旋禁阻跃迁,需通过系间窜越完成,且该过程中存在电子自旋多重态的改变,进行较为缓慢。因此,相较于荧光,磷光通常拥有更长的发光寿命($>10^{-8}$ s)。随着温度上升,电子通过非辐射跃迁返回基态的概率增加,导致通过辐射跃迁所释放的光子数量降低,从而使磷光信号强度降低,且衰减速度增加,磷光寿命缩短。磷光寿命法通过标定磷光衰减寿命与温度的对应关系,实现温度测量。另外,对于具有多个激发态能级的磷光物质,其不同能级的热淬灭效应有所不同。因此,可选取两个温敏特性差异较大甚至相反的磷光特征发射峰,对其在不同温度下的信号强度

比值进行标定,从而实现目标温度测量,即磷光强度比值法。

磷光涂层经紫外激光照射后,其某一能级 j 的电子跃迁产生的磷光信号强度 S_j 可表示为

$$S_j = C_j T_c \tau_j I \exp\left(-\frac{hcE_j}{kT}\right) \quad (1)$$

式中: C_j 为信号采集装置对磷光信号的探测效率; T_c 为采集装置的曝光时间; τ_j 为光学滤光片的透光效率; I 为紫外激光的脉冲能量; h 为普朗克常数; c 为光速; k 为波尔兹曼常数; E_j 为发射能级的能量; T 为磷光涂层温度。

测量两个不同能级跃迁产生的磷光信号强度,并计算其比值,可以消除紫外激光脉冲能量的波动及其他因素所引起的测量误差

$$R = \frac{S_j}{S_{j+1}} = \zeta \exp\left(-\frac{hc\Delta E}{kT}\right) \quad (2)$$

式中: R 为所测量的不同能级跃迁产生的磷光信号强度比值; ΔE 为两个发射能级之间的能隙; ζ 为试验所确定的常数。

利用式(2)对测温标定系统获得的同一温度下不同特征波长的磷光信号强度进行比值计算,并将结果与磷光涂层温度进行拟合,得到磷光强度比值-温度标定曲线,从而测量目标表面温度场。

2 试验装置与系统

2.1 温敏磷光物质及涂层制备

磷光物质通常被分为有机物和无机物两类,LIP测温技术采用的磷光物质通常为无机物。这些无机材料包含无机基质和掺杂于其中的活性物质(激活剂),磷光物质的选择主要取决于测温范围与磷光信号探测波长。目前已知的测量温度最高的磷光物质为镱掺杂钇铝石榴石($Y_3Al_5O_{12}:Dy$, YAG:Dy)晶体。其基质为钇铝石榴石(YAG)晶体,活性物质为 Dy^{3+} ,可以实现常温到1 700 °C范围内的温度测量,是最常见的用于高温测量的磷光物质之一。YAG是一种人造晶体,其Y元素以 Y^{3+} 的形式存在。由于大多数的稀土离子半径与 Y^{3+} 半径接近,可以用稀土离子取代其中部分 Y^{3+} ,从而获得不同稀土离子掺杂浓度的YAG晶体。

采用溶胶-凝胶法制备 Dy^{3+} 掺杂浓度为1%(摩

尔分数)的YAG:Dy晶体。具体制备过程如下:

(1) 按配比称量 Y_2O_3 和 Dy_2O_3 并加入烧杯,随后向烧杯中加入适量硝酸,恒温水浴加热搅拌至完全溶解并形成透明溶液后,提高加热温度以挥发过量的硝酸,再加入适量去离子水,形成 $Y(NO_3)_3$ 和 $Dy(NO_3)_3$ 的混合溶液。

(2) 称取适量柠檬酸作为金属螯合剂,加入适量去离子水并搅拌形成柠檬酸溶液,将柠檬酸溶液缓缓滴入步骤(1)所制备的混合溶液中并充分搅拌,形成溶液A。

(3) 按配比称量 $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ 溶解于去离子水中,加入适量聚乙二醇作为分散剂,充分搅拌后形成溶液B。

(4) 将溶液A与溶液B转移至同一烧杯,充分搅拌直至混合均匀,形成透明溶液。

(5) 将透明溶液以80℃恒温水浴加热并持续搅拌,直至变为亮黄色稠状透明溶胶,随后将其转移至120℃鼓风干燥箱中干燥15 h,得到黄色干凝胶。

(6) 将黄色干凝胶研磨后放入900℃的高温马弗炉中煅烧12 h,获得如图1所示的白色磷光物质YAG:Dy。

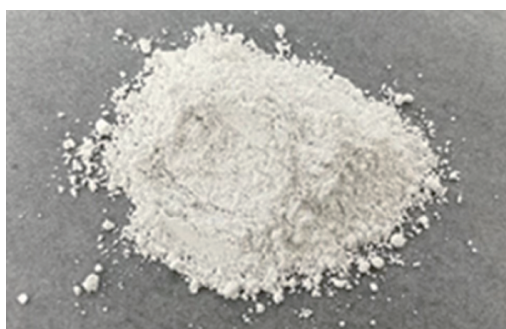


图1 制备的YAG:Dy磷光物质
Fig.1 YAG:Dy phosphor prepared

为制备厚度适宜且均匀的耐高温磷光涂层,将YAG:Dy与耐高温黏结剂(HPC,ZYP Coatings)按适当比例(每0.2 g磷光物质混合1 mL黏结剂)混合,借助由高压气泵驱动的喷笔均匀喷涂至待测物体表面,先后在350℃和1 000℃的马弗炉中高温加热1 h。磷光涂层中存在温度梯度易导致测量温度值与目标表面实际温度存在偏差。研究^[22-23]表明,当磷光涂层厚度小于20 μm时,该误差可忽略。通过涂层测厚仪测量所制备的磷光涂层厚度,并将其控制在约15 μm。

2.2 磷光光谱温敏特性测量

为验证所制备磷光物质YAG:Dy的温敏特性,搭建磷光发射光谱测试系统(图2),分析其在不同温度下受355 nm激光激发的磷光发射光谱。系统主要由Nd:YAG紫外纳秒脉冲激光器(PRO-250-10Hz, Spectra Physics)、激光光路、高温电炉、光谱仪(Acton SP2300, Princeton Instruments)组成。Nd:YAG激光器产生波长为355 nm的脉冲激光,通过凹面扩束镜照射至涂有磷光物质YAG:Dy的陶瓷板上,从而诱导磷光信号产生。所产生的磷光信号由直径50 mm、焦距200 mm的球面凸透镜收集,并通过狭缝导入光谱仪进行磷光光谱信号采集。将表面均匀喷涂YAG:Dy的陶瓷板置于高温电炉内,通过调节高温电炉内的温度,获得不同温度下400~600 nm内YAG:Dy的磷光发射光谱。

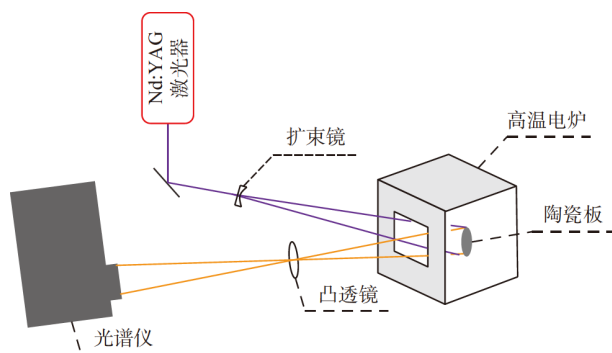


图2 磷光发射光谱测试系统示意图
Fig.2 Schematic diagram of the phosphor emission spectroscopy test system

2.3 磷光强度比值-温度标准曲线标定系统

基于磷光强度比值法的LIP测温标定系统主要由Nd:YAG紫外纳秒脉冲激光器(PRO-250-10Hz, Spectra Physics)、激光光路、高温电炉、增强型电荷耦合器件(ICCD)相机(PI-MAX3, Princeton Instruments)和立体镜(1108531, Lavision)等部件组成,如图3所示。Nd:YAG激光器产生355 nm的脉冲激光,通过凹面扩束镜照射至高温电炉内喷涂有磷光物质YAG:Dy的陶瓷板上。加装立体镜头的ICCD相机放置于高温电炉光学窗口正前方。立体镜的左、右镜头分别装有中心波长为457.9 nm(FL457.9-10, Thorlabs)和490.0 nm(FB490-10, Thorlabs)的带通滤光片。高温电炉内的温度可在室温至1 700℃范围内自行调节。

2.4 火焰冲刷固体壁面表面温度场LIP测量系统

待完成磷光强度比值-温度标准曲线标定后,利用LIP测温技术测量火焰冲刷固体壁面表面温度场,以验证利用该技术测量航空发动机热端部件表面温度场的可行性。为保证上述标定数据的可靠性,以及减小光学元器件位置移动造成的测量误差,火焰冲刷固体壁面表面温度场LIP测量系统中光学元器件布置与上述磷光测温标定系统类似。高温电炉及其中的陶瓷板被更换为受火焰冲刷陶瓷板,模拟航空发动机内部受高温烟气冲刷的热端部件。火焰冲刷固体壁面表面温度场LIP测量系统主要包括燃烧系统、激光系统和数据采集系统,如图4所示。

燃烧系统主要包括热流量炉平面火焰燃烧器、表面喷涂YAG:Dy磷光涂层的陶瓷板。其中,热流量炉具体结构见文献[24-26],其出口处可形成一个直径为3 cm,温度为1 600 ℃左右的平面火焰(图5)。陶瓷板尺寸为3 cm×4 cm,表面均匀喷涂YAG:Dy磷

光涂层,背面距右侧1 cm位置处以1 cm为间隔埋有B型热电偶,如图6所示。图中红色圆点为背面热电偶测点所在位置。通过夹具夹持陶瓷板,将其固定于平面火焰燃烧器左上方2 cm处,陶瓷板右边缘与火焰中心重合。

激光系统包括Nd:YAG紫外纳秒脉冲激光器(PRO-250-10Hz, Spectra Physics)、355 nm激光反射镜、凹面扩束镜等设备。Nd:YAG激光器产生波长为355 nm的紫外脉冲激光,通过激光反射镜改变激光路径,并由凹面扩束镜扩束,投射至陶瓷板表面形成圆形光斑,从而激发诱导磷光信号产生。

数据采集系统包括ICCD相机(PI-MAX3, Princeton Instruments)、立体镜(1108531, Lavision)、数字延时脉冲发生器(DG535, Stanford Research Systems)和计算机。试验时通过数字延时脉冲发生器统一控制Nd:YAG激光器与ICCD相机时序,确保准确采用标定时的探测延时来采集磷光信号与背景辐射信号。

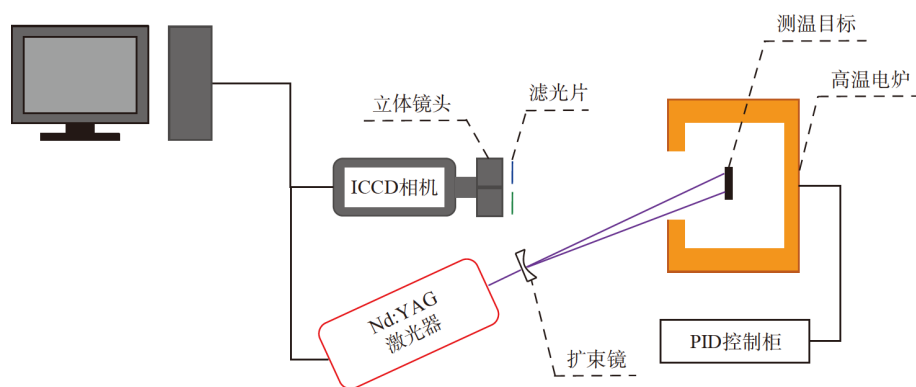


图3 LIP测温标定系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of LIP temperature measurement calibration system

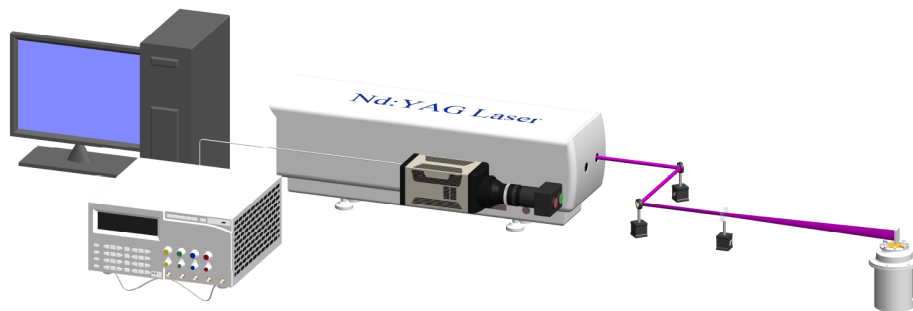


图4 火焰冲刷固体壁面表面温度场LIP测量系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of LIP testing system for surface temperature field measurement of a high temperature solid wall subject to flame washout

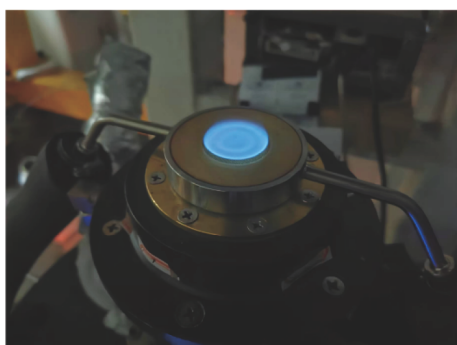


图5 热流量炉平面一维火焰

Fig.5 Heat flux burner plane one-dimensional flame

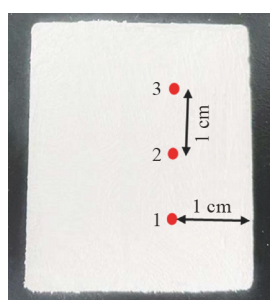


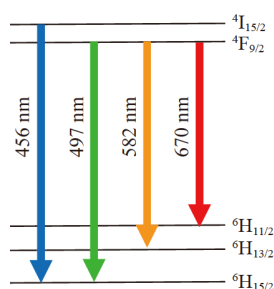
图6 喷涂YAG:Dy的耐高温陶瓷板

Fig.6 A high temperature resistant ceramic plate sprayed with YAG:Dy

3 结果与讨论

3.1 磷光光谱特性

常温下使用355 nm激光照射磷光物质YAG:Dy,照射区域会表现为白光,发射光谱呈现3个发射峰带:波长位于470~500 nm区间的绿光发射峰,570~590 nm区间的黄光发射峰,以及600~685 nm区间的红光发射峰。这些发射峰均属于 Dy^{3+} 的4f能级特征峰,其对应的跃迁如图7所示。随着环境温度的增加,部分处于 $^4F_{9/2}$ 能级的电子由于热力作用跃迁

图7 Dy^{3+} 的简化能级图Fig.7 Simplified energy level diagram for Dy^{3+}

到 $^4I_{15/2}$ 能级,并在向基态跃迁的过程中发出中心波长为456 nm的蓝光。温度越高,发生 $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 跃迁的粒子数越多,中心波长456 nm处的发光强度越大。使用YAG:Dy基于磷光强度比值法开展LIP测温的原理为,中心波长456 nm处的特征峰峰值随温度增加而增加,而中心波长497 nm处的特征峰峰值基本不随温度变化。

制备的YAG:Dy在不同温度下的400~600 nm区间的磷光发射光谱如图8所示。可以看出,当温度从常温增加到1 000 $^{\circ}C$,456 nm处(G-Level)的光谱特征峰强度不断增加,且对温度变化极为敏感,而497 nm处(F-Level)的光谱特征峰强度保持不变。该结果初步验证了所制备的YAG:Dy特征发射光谱的温度敏感特性,可将其应用于较宽范围内的温度测量。

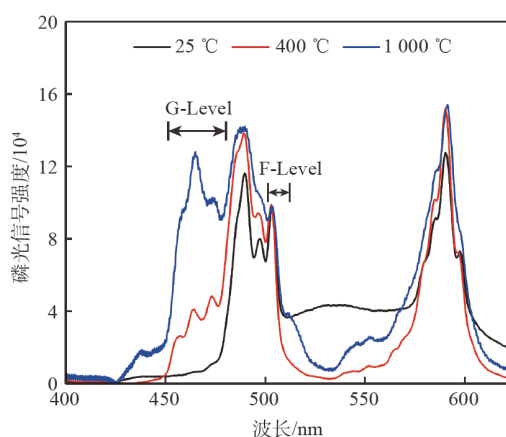


图8 制备的YAG:Dy在不同温度下经355 nm激光激发的磷光光谱

Fig.8 Phosphorescence spectra of prepared YAG:Dy excited by 355 nm laser at different temperatures

3.2 磷光强度比值-温度标准曲线

3.2.1 激光能量对磷光信号强度的影响

在进行磷光强度比值-温度标准曲线标定过程中,首先研究了激光能量对磷光信号强度的影响。通过调节355 nm激光的能量强度,获得了YAG:Dy在497 nm处的特征峰强度随激光能量(单脉冲,下同)变化(8~60 mJ)的关系,如图9所示。可以看出,当激光能量在8~21 mJ范围内变化时,497 nm处的特征峰强度随激光能量线性变化。随着激光能量的进一步提高,受激发的特征峰信号强度趋于饱和。当激光能量大于38 mJ时,受激发的特征峰信号强度

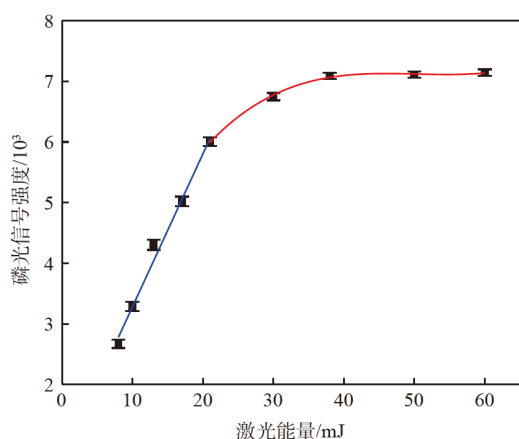


图9 常温下YAG:Dy在497 nm处特征峰的
磷光信号强度随激光能量的变化

Fig.9 The characteristic peak signal intensity of YAG:Dy at 497 nm varies with laser energy at room temperature

基本不再变化。为尽可能获得较强的磷光信号,同时避免激光能量饱和造成的边际效应,在温度标定过程中采用16 mJ的激光能量。

3.2.2 相机探测延时对磷光信号强度的影响

为探究相机探测延时对磷光信号强度的影响,通过调节相机与激光器之间的延迟时间,分别获得相机采集到的456 nm和497 nm特征峰处信号总强度与干扰信号的关系,从而获得最佳相机探测延迟,如图10所示。由于磷光发生过程涉及电子的系间窜越,相较于激光散射光和荧光,其响应更为缓慢,且寿命更长。适当延长相机的延迟时间,可以显著避免非弹性散射和杂质荧光的干扰,从而增加测试系

统的信噪比。可以看出,当相机探测延时为160 ns时,相机拍摄到的总信号强度依然较强,而散射信号强度几乎为0,即此时拍摄到的信号大多来自YAG:Dy的磷光。因此,选择160 ns为最佳相机探测延时。

3.2.3 磷光强度比值-温度标准曲线的标定

在获得最佳激光能量和相机探测延时后,标定400~1 700 °C范围内磷光强度比值随温度变化的曲线,如图11所示。在整个标定过程中,相机门宽为100 ns。可以看到,在整个标定范围内(400~1 700 °C),磷光强度比值随温度升高而单调递增,表明以YAG:Dy为磷光物质,利用基于比值法的LIP测温技术可以实现高温固体表面温度测量。此外,由于辐射信号强度随温度升高而逐渐增加,系统信噪比降低,测量不确定性随之增加。为验证LIP测温技术的精度,通过调节高温电炉温度,根据ICCD相机在不同特征波长下所采集信号的强度,计算不同温度下的磷光强度比值,并根据标定曲线(图11)获得温度信息,将LIP测温技术测量得到的温度与热电偶测量得到的炉内实际温度进行对比,如图12所示。可以看出,在温度小于1 500 °C时,LIP测量温度和炉内实际温度具有良好的一致性。特别是当温度小于1 200 °C时,测温误差远低于1%。随着温度进一步升高,测温误差略微增大。当温度升至1 500 °C时,测温误差低于3%;当温度升至1 700 °C时,测温误差在5%左右。这是由于随着温度升高,497 nm处的热辐射信号强度逐渐增加,而磷光信号强度由于受到热淬灭的影响逐渐降低。当温度大于1 600 °C时,较

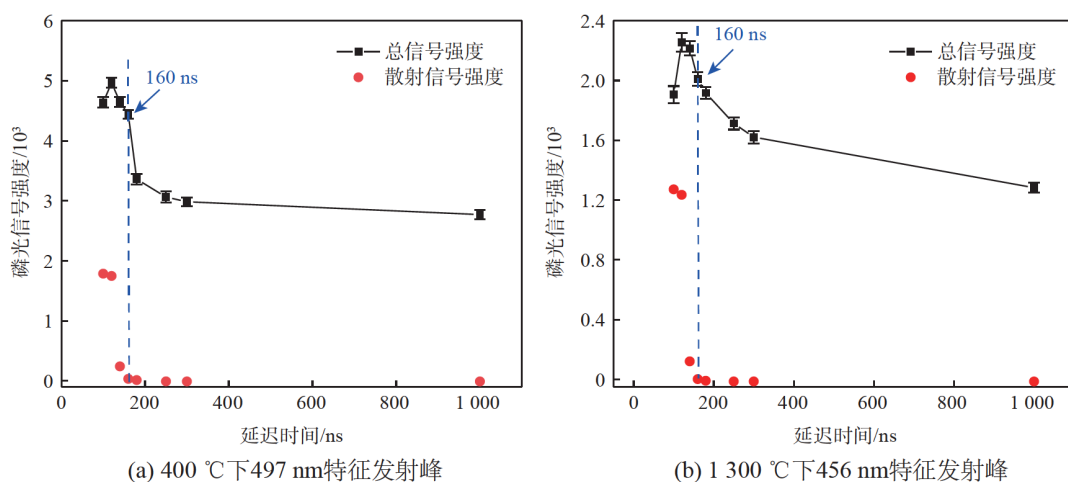


图10 ICCD相机探测延时对磷光信号强度的影响

Fig.10 The effect of ICCD camera detection delay on phosphor signal intensity

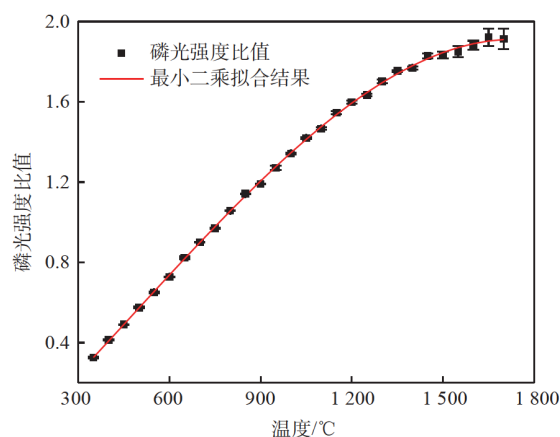


图11 不同温度下YAG:Dy在456 nm和497 nm处发射峰的磷光强度比值

Fig.11 Intensity ratio of YAG:Dy emission peaks at 456 and 497 nm under different temperatures

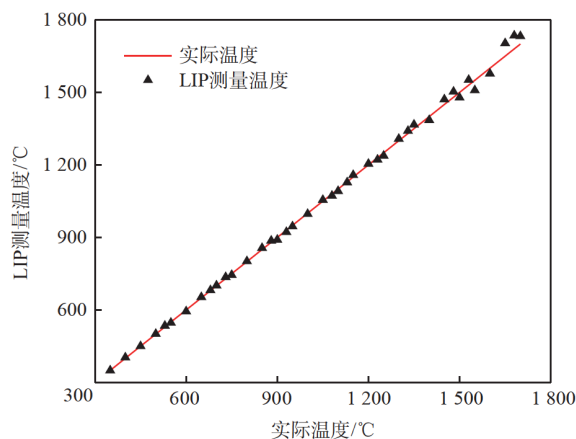


图12 LIP法测量温度与炉内实际温度对比

Fig.12 Comparison between the temperature obtained by the LIP method and the actual temperature in the heat flux burner

强的热辐射信号造成系统信噪比降低,波动增加,从而导致系统测量误差增加。

3.3 火焰冲刷高温壁面温度场测量结果

基于LIP测温技术所获得的火焰冲刷陶瓷板表面二维温度场如图13所示,测试过程中所有参数设定均与标定过程保持一致。可以看出,在垂直方向上,陶瓷板靠近燃烧器出口处的温度最高,而随着高度增加,温度逐渐降低;在径向上,陶瓷板温度随着径向距离的增加而降低,当径向距离大于1.5 cm时,由于烟气温度急剧下降,陶瓷板温度迅速下降。将LIP测量温度与相应位置热电偶测量温度进行比较,如表1所示。可以看出,LIP测量温度与热电偶测量温度基本一致,表明使用LIP测温技术进行航空发动

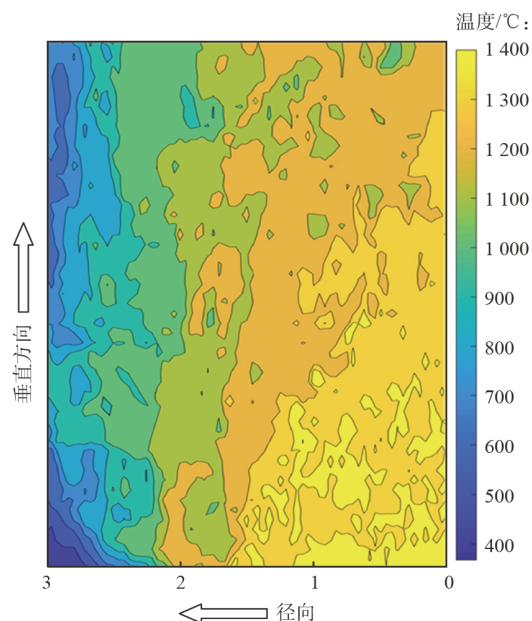


图13 受火焰冲刷陶瓷板表面的二维温度场

Fig.13 Two-dimensional temperature field on the surface of a ceramic plate subject to flame washout

表1 LIP与热电偶所测温度

Table 1 Temperature measured by LIP and thermocouple

热电偶编号	热电偶温度/°C	LIP测试温度/°C	相对偏差/%
1	1 402.60	1 418.30	1.1
2	1 293.40	1 310.28	1.3
3	1 208.70	1 219.23	0.9

机热端部件表面温度场高精度测量具备可行性。

4 结论

针对航空发动机热端部件表面温度场非接触在线监测需求,重点研究了基于LIP测温原理的宽温域、快响应、高精度的固体表面温度场非接触测试技术。主要结论如下:

(1) 采用溶胶-凝胶法制备的温敏磷光物质YAG:Dy,其由355 nm紫外脉冲激光所激发的特征磷光光谱在400~1 700 °C温度范围内具备良好的温敏特性。

(2) 针对所搭建的LIP测温系统,试验研究了紫外激光能量与ICCD相机探测延时所采集的磷光信号强度的影响规律,并确定其最佳激光能量为16 mJ,相机探测延为160 ns。采用该参数成功进行了400~1 700 °C温度范围内的LIP测温系统标定:当温度小于1 200 °C时,其测温误差远低于1%;当温度

升至1 500 °C时,测温误差低于3%;当温度升至1 700 °C时,测温误差在5%左右。

(3) 利用LIP测温系统测量的受火焰冲刷高温固体壁面表面温度与热电偶测量温度基本一致,验证了将LIP测温技术用于航空发动机高温热端部件表面温度场高精度测量的可行性。

参考文献:

- [1] 姚艳玲,代 军,黄春峰. 现代航空发动机温度测试技术发展综述[J]. 航空制造技术,2015,(12):103-107.
YAO Yanling,DAI Jun,HUANG Chunfeng. Development for temperature measurement technology in modern aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2015,(12):103-107. (in Chinese)
- [2] 熊 兵,侯敏杰,陈洪敏,等. 辐射测温技术在涡轮叶片温度场中的应用[J]. 燃气涡轮试验与研究,2008,21(3):50-54.
XIONG Bing,HOU Minjie,CHEN Hongmin,et al. Application of infrared thermometer in turbine blade temperature field[J]. Gas Turbine Experiment and Research,2008,21(3):50-54. (in Chinese)
- [3] TIAN Jibin,FU Tairan,XU Qiaoqi,et al. Effective spectral emissivity of gas turbine blades for optical pyrometry[J]. Journal of Heat Transfer,2017,139(7): 072701.
- [4] GAO Shan,ZHANG Xianqi,CHEN Liwei,et al. Review: radiation temperature measurement methods for engine turbine blades and environment influence[J]. Infrared Physics & Technology,2022,123:104204.
- [5] JI Jie,YAN Bing,SUN Chang,et al. A new positioning method of multichannel pyrometer in aeroengine[J]. IEEE Sensors Journal,2023,23(23):29749-29760.
- [6] 吴明佳,李梦茜,王波涛,等. 涡轮叶片辐射测温中反射辐射误差校正方法综述(特邀)[J]. 光电技术应用,2024,39(1):22-26.
WU Mingjia,LI Mengxi,WANG Botao,et al. Methods for correction reflection radiation errors in radiation temperature measurement of turbine blades (invited)[J]. Electro-Optic Technology Application,2024,39(1): 22-26. (in Chinese)
- [7] NOEL B W,BORELLA H M,FRANKS L A,et al. Proposed laser-induced fluorescence method for remote thermometry in turbine engines[J]. Journal of Propulsion and Power,1986,2(6):565-568.
- [8] NOEL B W,BORELLA H M,LEWIS W,et al. Evaluating thermographic phosphors in an operating turbine engine[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,1991,113(2):242-245.
- [9] JENKINS T P,HESS C F,ALLISON S W,et al. Measurements of turbine blade temperature in an operating aero engine using thermographic phosphors [J]. Measurement Science and Technology,2020,31(4):044003.
- [10] SEYFRIED H,SÄRNER G,OMRANE A,et al. Optical diagnostics for characterization of a full-size fighter-jet afterburner[R]. ASME GT2005-69058,2005.
- [11] SEYFRIED H,RICHTER M,ALDÉN M,et al. Laser-induced phosphorescence for surface thermometry in the afterburner of an aircraft engine[J]. AIAA Journal,2007,45(12):2966-2971.
- [12] NAU P,YIN Zhiyao,GEIGLE K P,et al. Wall temperature measurements at elevated pressures and high temperatures in sooting flames in a gas turbine model combustor[J]. Applied Physics B,2017,123(12):279.
- [13] YIN Zhiyao,NAU P,MEIER W. Responses of combustor surface temperature to flame shape transitions in a turbulent bi-stable swirl flame[J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2017,82:50-57.
- [14] NAU P,YIN Zhiyao,LAMMEL O,et al. Wall temperature measurements in gas turbine combustors with thermographic phosphors[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2019,141(4):041021.
- [15] ARNDT C M,NAU P,MEIER W. Characterization of wall temperature distributions in a gas turbine model combustor measured by 2D phosphor thermometry[J]. Proceedings of the Combustion Institute,2021,38(1): 1867-1875.
- [16] GREIFENSTEIN M,HERMANN J,BOEHM B,et al. Flame-cooling air interaction in an effusion-cooled model gas turbine combustor at elevated pressure[J]. Experiments in Fluids,2019,60(1):10.
- [17] PETIT S,BLAISE A,GODARD G,et al. Experimental study of the interaction between a turbulent flame and a cooling air film[C]//Proceedings of the 20th International Symposium on the Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics,2022.
- [18] BLAISE A,PETIT S,GRISCH F,et al. Effect of the blowing ratio on the interaction between a flame and an air-cooled combustor wall[R]. ASME GT2023-102672,2023.
- [19] PETIT S,QUEVREUX B,MORIN R,et al. Experimental investigation of flame-film cooling interactions with an academic test rig and optical laser diagnostics [J]. Journal of Turbomachinery,2023,145(4):041007.
- [20] 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 Weiwei, 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. (in Chinese)
- [21] KHALID A H, KONTIS K. Thermographic phosphors for high temperature measurements: principles, current state of the art and recent applications[J]. *Sensors*, 2008, 8(9):5673–5744.
- [22] KNAPPE C, ALGOTSSON M, ANDERSSON P, et al. Thickness dependent variations in surface phosphor thermometry during transient combustion in an HCCI engine[J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(8): 1466–1475.
- [23] PILGRIM C C, FEIST J P, HEYES A L. On the effect of temperature gradients and coating translucence on the accuracy of phosphor thermometry[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(10):105201.
- [24] WANG Zhihua, YANG Linbin, LI Bo, et al. Investigation of combustion enhancement by ozone additive in CH₄/air flames using direct laminar burning velocity measurements and kinetic simulations[J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(1):120–129.
- [25] WANG Zhihua, WENG Wubin, HE Yong, et al. Effect of H₂/CO ratio and N₂/CO₂ dilution rate on laminar burning velocity of syngas investigated by direct measurement and simulation[J]. *Fuel*, 2015, 141: 285–292.
- [26] HAN Xinlu, WANG Zhihua, COSTA M, et al. Experimental and kinetic modeling study of laminar burning velocities of NH₃/air, NH₃/H₂/air, NH₃/CO/air and NH₃/CH₄/air premixed flames[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 206:214–226.