

文章编号: 1000-7032(2025)11-2180-12

基于磷光强度比的高温表面温度测量技术

叶诚可¹, 蔡 静^{2*}, 占春连¹, 温 悦²

(1. 中国计量大学 光学与电子信息学院, 浙江 杭州 310018;

2. 北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 为了提高磷光强度比法测温技术在二维表面温度测量中的测温上限和测量精度, 采用高温固相法和化学粘合法制备了温度灵敏度更高的 Dy³⁺掺杂 YAG/YAP 磷光涂层, 基于磷光特征峰的强度比对温度敏感的原理建立了磷光强度比-温度标定曲线, 并在此基础上搭建了针对高温环境中表面温度分布的磷光测温系统。最终开展了与红外辐射热像仪的对比测温实验, 实验结果表明, 该系统在 650~1 300 K 范围内具有良好的二维温度分布测量性能, 最大测温误差为 1.24%, 系统不确定度为 1.60 K, 在超声速风洞、航空发动机热端部件等高温目标表面测温中体现出巨大的应用潜力。

关键词: 磷光强度比; 温敏磷光涂层; 非接触测温; 表面温度分布

中图分类号: TB942; O551.2

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250134

CSTR: 32170.14.CJL.20250134

High Temperature Surface Temperature Measurement Based on Phosphorescent Intensity Ratio

YE Chengke¹, CAI Jing^{2*}, ZHAN Chunlian¹, WEN Yue²

(1. School of Optics and Electronic Science and Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Changcheng Institute of Metrology and Measurement, Beijing 100095, China)

* Corresponding Author, E-mail: caijing@cimm.com.cn

Abstract: To enhance the upper temperature measurement limit and accuracy of phosphor thermometry for two-dimensional surface temperature measurement, this study employed high-temperature solid-state reaction and chemical bonding methods to fabricate Dy³⁺-doped YAG/YAP phosphor coatings with higher temperature sensitivity. Based on the principle that the intensity ratio of characteristic phosphor emission peaks is temperature-sensitive, phosphor intensity ratio *versus* temperature calibration curves were established. Building upon this, a phosphor thermometry system was developed for mapping surface temperature distributions in high-temperature environments. Comparative temperature measurement experiments were conducted with an infrared thermographic camera. The results demonstrate that this system exhibits excellent performance for 2D temperature distribution measurement within the range of 650–1 300 K, with a maximum measurement error of 1.24% and a system uncertainty of 1.60 K. It shows considerable application potential for surface temperature measurement of high-temperature targets such as in supersonic wind tunnels and hot-end components of aero-engines.

Key words: phosphorescent intensity ratio; temperature sensitive phosphorescent coating; non-contact thermometry; surface temperature distribution

收稿日期: 2025-04-30; 修订日期: 2025-05-13

基金项目: 计量与校准技术实验室基金(JLKG2023001B006)

Supported by the Science and Technology on Metrology and Calibration Laboratory(JLKG2023001B006)

1 引 言

在航空发动机、超声速风洞等高温、高压、高振动的复杂严苛的测温环境中,传统的测温技术如热电偶、辐射测温等并不能精确、安全地完成测温任务。热电偶作为一种接触式测温手段,线路排布受到测温场景的限制较大,并不适合在机械结构复杂的环境中安装测量;辐射测温则受环境温度和辐射的影响大,对发射率未知目标的测量准确度较低。而磷光测温是一种利用温敏磷光材料在不同温度下受激发光特性的变化,建立温度与磷光特性的映射关系来推断温度的测温方法^[1]。作为一种非接触的主动式测温技术,磷光测温具有高精度、高测温上限、不受发射率影响的优点^[2]。

20 世纪 80 年代,国外学者开始研究温敏磷光材料的合成,通过在 Y_2O_3 、 Y_2O_2S 、 La_2O_2S 、 $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG)等金属氧化物中掺杂 Dy、Eu、Tb、Sm 等稀土元素,使稀土离子成为发光中心,从而使材料具有磷光特性,而磷光光谱中的部分波段对温度敏感的性质为磷光材料在测温方面的应用提供了可能性^[3-8]。近年来,国内也开展了相关的技术研究,以北京航空航天大学、上海交通大学、中国科学院等单位为代表,进行了磷光测温技术的原理探究、系统搭建、实验验证等工作^[9-11]。随着磷光测温理论的发展,磷光测温技术逐渐被尝试投入航空发动机热端部件、燃烧室、超声速风洞、热障涂层等各种测温场景中进行测试^[12-15]。磷光测温方法主要分为磷光寿命法和磷光强度比法,分别通过观察磷光衰减寿命、磷光特征峰光强比值的温敏性质进行温度测量。在高温表面温度测量的实际应用中,磷光寿命法相比于磷光强度比法具有更高的精度和上限。但因其需要记录完整的磷光衰减过程,所以对脉冲激发和采集的同步性提出了较高的要求,特别在对高速旋转目标的温度测量时,动态目标、激发脉冲、信号采集三者同步使得寿命法的测量系统变得更复杂^[16-18]。相比之下,磷光强度比法在测量方法上显得更为简单,理论上只需在磷光激发过程中采集一次双特征波长的信号即可获得温度信息^[19]。因此,在高速瞬态的温度测量时,研究者们通常采用信息采集更便捷的磷光强度比法对温度场的变化进行记录。

掺 Dy^{3+} 的 $Y_3Al_5O_{12}$ 磷光材料(YAG:Dy)作为

一种拥有多个短波温敏特征峰的磷光材料,具有接近 2 000 K 的理论测温上限,同时适用于磷光强度比法和磷光寿命法两种测温方法。对于 YAG:Dy 材料而言,在 1 200 K 以上寿命法表现出更高的测量精度,而在室温到 1 200 K 的范围内两种方法的精度相差不大,但强度比法在测量方法上相对简单^[20]。自 1989 年 Goss 将 YAG:Dy 用于温度传感以来,研究者们开始了对该材料在强度比法测温方向的研究^[21]。早期的研究大多在实验室中进行,Feist 等用 CCD 记录了 YAG:Dy 在 900~1 500 K 范围内强度比值的变化,但 5% 的测温误差并不足以将该方法应用于实际的测温场景^[22]。21 世纪以后,研究者们开始结合涂层粘合技术,将 YAG:Dy 以温敏涂层的形式在实际测温场景进行二维测温实验,如 Konits 的超音速燃烧室表面测温、Seyfried 的发动机排气口测温、Bai 的内燃机内壁测温、Han 的风洞内目标表面热流测量等应用场景皆采用了磷光强度比法测温^[6,14,23-24]。然而,上述场景温度区间大多在 500~1 100 K 范围内,且在温度上限附近仍存在 5% 左右的测温误差;同时,受制于激发光源或涂层可靠性的影响,该测温方法在大面积温度分布测量上的效果并不理想^[25]。近几年来,研究者们针对强度比法的材料和算法方面进行了深入研究。在材料方面,Hertle 等对比研究了 Tm、Tb、Dy 等不同稀土元素掺杂 YAG 的温敏性能,同时也研究了 Dy 离子掺杂 YAG、YAP 等不同宿主时的温敏性能,证明了 YAG:Dy 优秀的测温能力,并提出了多种元素共掺杂提高测温上限的思路^[26-27]。Chepyga 和 Liang 分别合成了 YAG/YAP:Dy 材料,前者发现该混合物比 YAG:Dy 的发光效率更高,后者则利用强度比法在 373~1 573 K 测温区间内获得了最小 ± 2 K 的测温误差,但仅限于单点测温^[28-29]。在算法方面,Quan 提出了高温下磷光强度比测温的工作波长和带宽选择方法,并通过 YAG:Dy 进行了验证,大幅缩小系统误差至 0.36%,但基于全光谱波长选择的算法并不适用于相机的二维温度分布测量^[30]。而 Zhang 等同样合成了 YAG:Dy,在常温至 1 273 K 的温度区间进行了磷光强度比法的二维温度分布测量,但未能明确测温系统的误差,与其他测温方法相比依旧存在差距^[31]。

总体来看,目前利用磷光强度比测温法在单点温度测量上具有较高的精度,而在扩展到二维

表面温度分布测量时并不能保持单点测温的精度和测温上限。针对这一问题,本课题组在北京长城计量测试技术研究所制备了 Dy^{3+} 掺杂的 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}/\text{YAlO}_3$ 温敏磷光涂层,搭建了基于强度比的二维高温表面温度分布测量系统,选用双指数函数模型进行了温度的标定实验。与以往的研究相比,该系统的磷光材料在特征峰能量更强,随温度变化幅度更大,保证了良好的温度灵敏度;同时,更强的磷光信号使采集系统可以选取更窄的特征波段和更短的积分时间,使测温系统拥有瞬态测温的潜力;而拟合效果更好的双指数模型则可以保证测温的精确度。最终,本系统与红外辐射热像仪进行了二维测温对比实验,获得了良好的测试结果。

2 磷光强度比测温原理

磷光强度比测温法是在某一温度时刻对磷光光谱的两个或多个发射峰波长的光强值进行比率计算,通过温度与光强比的单一映射关系推断温度的方法^[21]。如图 1 所示,当使用连续的激发光 λ_0 照射磷光材料时,磷光材料中处于基态 E_0 的电子不断被激发到更高的能级,在历经振动弛豫后到达不同的激发能级 E_1 、 E_2 ,在返回基态时通过辐射跃迁发出 λ_1 、 λ_2 波段的磷光。

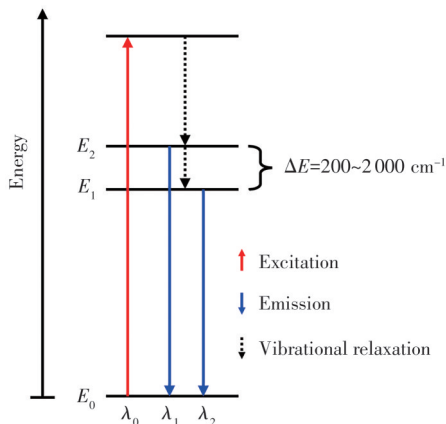


图 1 磷光强度比法能级示意图

Fig.1 Schematic diagram of the energy levels of the phosphorescence intensity ratio method

此时,激发能级的发射光强 S_j 可表示为:

$$S_j = IC_j T_e \tau_j N_j \frac{hc}{\lambda_j} \exp\left(-\frac{E_j}{kT}\right), \quad (1)$$

其中 I 为激发光强, C_j 为探测器对磷光的探测效率, T_e 为探测器的曝光时间, τ_j 为滤光片透射率, N_j 为激发能级的电子数密度, h 为普朗克常数, c 为

光速, λ_j 为发射波长, E_j 为激发态的能量, k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度。

当温度变化时,发生辐射跃迁的概率随之变化,导致磷光材料不同波段的发光光强也发生变化。但此时的光强信号也受其他与温度无关变量的影响,并非是对温度的单值映射。所以用于磷光强度比法测温的磷光材料需要有多波段的磷光发射峰,通过对不同波段的发射光强进行比值计算消除其他变量对测温带来的影响:

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

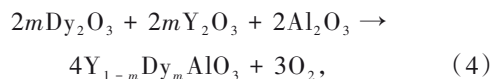
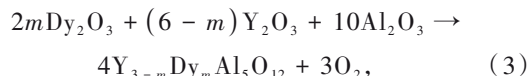
其中 R 是测量的比率, ΔE 是两个能级之间的差值, ζ 是通过标定得到的常数。一般来说,能级差 ΔE 在 $200 \sim 2\,000 \text{ cm}^{-1}$ 内,小于 200 cm^{-1} 的能级差不易分离不同能级的发射峰;而大于 $2\,000 \text{ cm}^{-1}$ 的能级差则会发生低温解耦现象,在低温时高能级的电子布居数极少,从而使强度比失去温敏特性^[32]。

通过标定磷光强度比与温度之间存在单值映射的关系,在温度已知的情况下记录磷光强度比,可以得到温度-磷光强度比的函数关系模型,最终可以通过反推该标定模型实现由磷光强度比测算目标温度。

3 磷光测温系统构成

3.1 温敏磷光涂层

本文使用的磷光材料为 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}/\text{YAlO}_3:\text{Dy}^{3+}$ (掺杂稀土离子 Dy 浓度为 2% (摩尔分数)), 简称 YAG/YAP:Dy, 采用高温固相法合成, 其中材料合成部分工作与中北大学合作完成^[22]。根据化学反应式 (3)、(4) 对原料 Y_2O_3 ($\geq 99.999\%$, Alfa Aesar)、 Al_2O_3 ($\geq 99.99\%$, Alfa Aesar)、 Dy_2O_3 ($\geq 99.9\%$, Reacton) 进行配比, 加入质量分数 10% 的助熔剂 LiF ($\geq 99.99\%$, Alfa Aesar) 进行研磨。其中反应式 (3) 描述的是主反应过程, 反应式 (4) 描述的是合成过程中存在的附加反应:



将研磨后的混合物置入坩埚, 在 $1\,700 \text{ K}$ 的空气中高温烧制 7 h 。最后, 将冷却后的混合物研磨成粉末便可得到磷光材料 YAG/YAP:Dy³⁺。

本文使用 X 射线衍射仪 (Bruker D8 Advance)

测量了磷光材料的晶体成分和结构, XRD 测试结果如图 2 所示。样品中 YAG 和 YAP 的占比分别为 89.5% 和 10.5%, 两者皆呈现正交晶体结构。其中, YAG 属于 $Ia-3d$ 空间群, Dy^{3+} 离子主要通过替换 Y^{3+} 离子进入十二面体位点, 与 8 个 O^{2-} 离子配位; YAP 属于 $Pnma$ 空间群, Dy^{3+} 和被取代的 Y^{3+} 由 9 个 O^{2-} 离子包围, 由立方钙钛矿空间群相变演化而来。

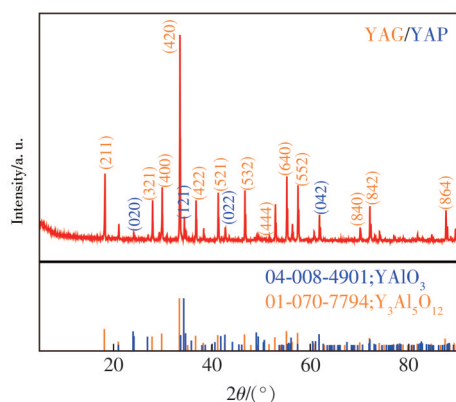


图 2 YAG/YAP:Dy 的 XRD 图

Fig.2 XRD diagram of YAG/YAP:Dy

在室温环境下, 本文使用 355 nm 波长的激光器 (EPL-355) 对磷光材料的光致发光光谱进行了测量。通过光谱仪 (Maya2000Pro) 记录了 400~600 nm 范围内的磷光发射光谱, 测试光谱如图 3 所示。磷光发射光谱中存在两个明显的主发射峰, 分别位于蓝色光谱区 (480~500 nm) 和黄色光谱区 (570~600 nm)。根据 Deike 能级图, Dy^{3+} 离子的部分能级分布如图 4 所示, 497 nm 的发射峰对应 $^4F_{9/2}$ 能级到 $^6H_{15/2}$ 能级的辐射跃迁, 584 nm 的发射峰对应 $^4F_{9/2}$ 能级到 $^6H_{13/2}$ 能级的辐射跃迁。在低温下, 由于 $^4I_{15/2}$ 能级到 $^4F_{9/2}$ 能级的非辐射跃迁占比较大, 导致 457 nm 处的发光强度较弱; 而随

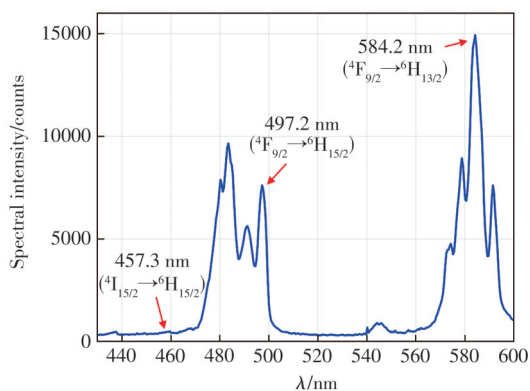


图 3 YAG/YAP:Dy 激发光谱

Fig.3 YAG/YAP:Dy excitation spectrum

着温度升高, $^4F_{9/2}$ 能级的电子通过热激发到达 $^4I_{15/2}$ 能级, 两个能级的电子满足玻尔兹曼分布, 457 nm 处的发光增强。此时, 457 nm 和 497 nm 两处发光强度的比值变化可以直观反映温度的变化, 这正是 YAG/YAP:Dy $^{3+}$ 磷光强度比用于测量温度的原理。

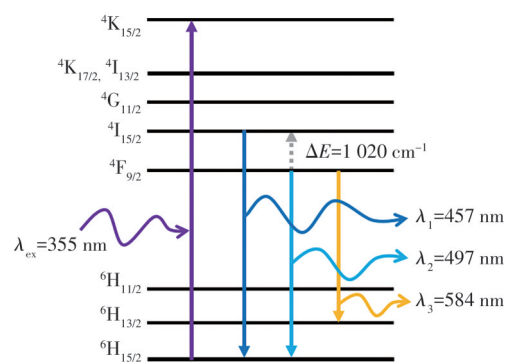


图 4 Dy^{3+} 离子部分能级分布图

Fig.4 Partial energy level distribution of Dy^{3+} ions

在磷光材料粉末得到验证后, 本文采用化学粘合法制备了磷光涂层, 将 YAG/YAP:Dy 磷光材料粉末与 HPC 水基粘合剂 (ZYP coatings) 以 1:4 的比例混合, 经混匀仪混匀后, 用空气喷枪将混合液均匀喷涂至待测样品表面。将样品在空气中静置干燥 4 h, 再于 420 K 烘箱中高温固化 4 h, 由此可得单次喷涂的薄涂层。经过测试, 以该方法制备的温敏磷光涂层在室温至 1 300 K 的温度范围内未出现开裂、脱落现象。若需要增强磷光信号, 可以重复喷涂干燥固化流程, 经 2~4 次的循环, 可以得到厚度为 300~500 μm 的温敏磷光涂层, 粘合牢固性和温度灵敏度较好, 达到后续实验要求。图 5 为后续实验使用的磷光涂层样品 (测试样品表面的刮擦痕迹由于加热炉固定部件夹持力度过大导致, 并不影响实验)。

不同温度下, 我们对磷光涂层的光谱变化情况进行了记录, 图 6 为不同温度下的磷光激发

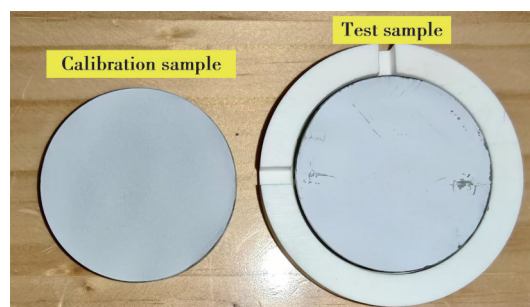


图 5 涂覆有磷光涂层的样品

Fig.5 Samples coated with phosphorescent coating

光谱。其中, 497 nm 波峰的激发光强会随温度的升高而单调递减; 而当温度升高时, 在 457 nm 波长附近会出现一个与温度变化正相关的发射峰。由此可见, 磷光涂层拥有与 YAG/YAP: Dy 磷光材料相同的温敏特性, 选取 457 nm 和 497 nm 作为特征峰进行比值计算, 即可得到磷光强度比 R , 用于温度表征。而粘合剂的引入对 YAG/YAP: Dy 的激发光谱性质并无影响。

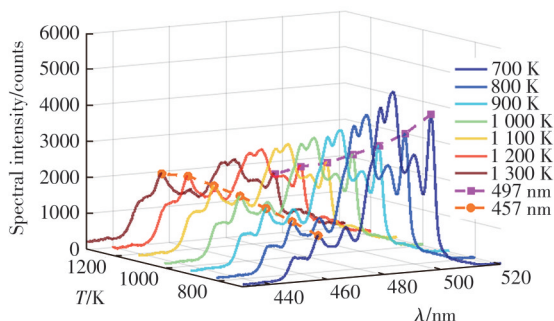


图 6 不同温度下的磷光光谱

Fig.6 Phosphorescence spectra at different temperatures

3.2 磷光测温系统

本文针对高温目标的表面温度测量搭建了基于磷光强度比的测温系统, 系统构成如图 7 所示。待测样品是半径为 45 mm、厚度为 5 mm 的合金钢圆

片, 提前涂覆磷光涂层后夹持于高温加热炉中。在加热炉的正面搭设荧光激发与收集光路。磷光激发装置由多个中心波长 368.74 nm、半带宽 13 nm 的紫外 LED 灯珠组成, 功率约为 10 W, 经汇聚准直后均匀照射在磷光涂层表面, 置于 LED 前的 400 nm 低通滤光片用于滤除 LED 在 400~500 nm 间的杂散光。磷光收集光路由滤光片组与 CMOS 相机(大恒图像 MER2-041-528U3)组成, 受激激发的磷光经过滤光片组进入镜头, 通过滤光轮切换中心波长 460 nm (± 5 nm) 和 500 nm (± 5 nm) 窄带滤光片, 在 CMOS 中获得当前温度下两个特征波段的磷光图像, 最终搭建完成的测温系统实物如图 8 所示。

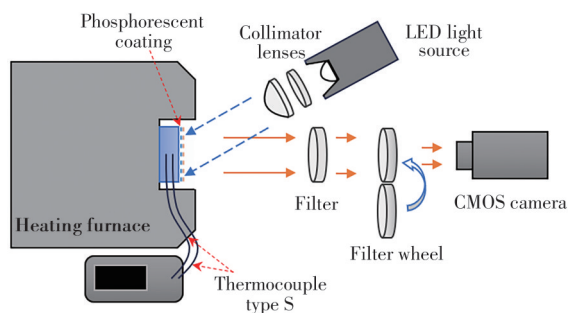


图 7 磷光测温系统示意图

Fig.7 Schematic diagram of the phosphor thermometry system

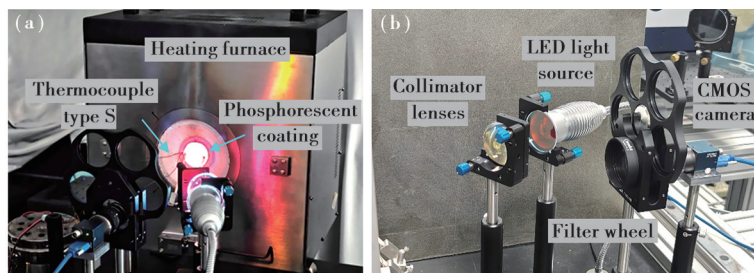


图 8 (a)~(b)不同角度拍摄的磷光测温系统

Fig.8 (a)~(b)Phosphorescence thermometry system taken from different angles

4 磷光测温实验

4.1 相机非均匀性校准

在进行测温实验之前, 需要对 CMOS 相机的传感器像元和光学系统的非均匀性进行校准^[33]。本文采用两点校正, 校准每个像元的响应曲线, 使其在灰度变化范围内线性化, 消除固定模式噪声。通过测量两个不同的已知光照条件(R_1 、 R_2)下的响应情况(I_1 、 I_2), 建立方程组, 求解每个像元的增益 G 和偏置 O :

$$\begin{cases} I_1 = G \cdot R_1 + O \\ I_2 = G \cdot R_2 + O \end{cases} \quad (5)$$

利用标定所得的增益 G 和偏置 O , 对原始图像 I_{raw}

中的每个像素点进行两点校正, 最终可以得到均匀的图像 I :

$$I = G \cdot I_{\text{raw}} + O, \quad (6)$$

通过对 CMOS 相机进行两点校正, 可以补偿传感器像素点本身和光学系统引入的非均匀性, 提高成像的质量和准确性。

4.2 标准表面温度计算方法

因实验采用的高温加热炉为接触式加热, 样品本身存在一定的厚度, 受热底面和磷光涂层表面的真实温度存在差异。为消除 S 型热电偶与磷光涂层表面由于样品热导率导致的温度误差, 更好地进行温度校准, 课题组在样品侧面设计了两

个深度与样品半径相同的内插孔,用于插入热电偶,如图9所示。

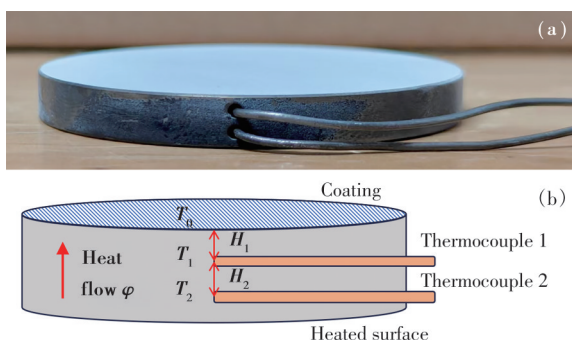


图9 (a)待测样品照片;(b)一维导热结构示意图

Fig.9 (a) Photograph of the sample to be tested. (b) Schematic of the one-dimensional thermal conductivity structure

在加热过程中,样品轴向可近似为一维导热结构,通过测量不同厚度处的温度,建立一维导热模型,进而计算磷光涂层表面真实温度。导热公式如下:

$$\lambda = \frac{\varphi H_1}{A(T_1 - T_0)} = \frac{\varphi H_2}{A(T_2 - T_1)}, \quad (7)$$

λ 表示样品导热系数, φ 表示样品内部热流量, A 表示横截面面积, H_1 、 H_2 分别为涂层表面到热电偶的间距及双热电偶的间距(在本实验系统中为定值), T_0 、 T_1 、 T_2 分别为涂层表面温度、双热电偶位置温度。将公式(7)进一步约简计算,可得磷光涂层的表面真实温度:

$$T_0 = \left(1 + \frac{H_1}{H_2}\right) T_1 - \frac{H_1}{H_2} T_2, \quad (8)$$

本实验系统使用的S型热电偶经过计量机构校准,在使用时进行了温度误差修正,标准不确定度 $u(T)$ 为 0.55 K。对于公式(8),通过应用不确定度传播公式即可推导本实验中样品表面真温测量的不确定度,推导过程如下:

$$u(T_0)^2 = \left(\frac{\partial T_0}{\partial T_1}\right)^2 u(T_1)^2 + \left(\frac{\partial T_0}{\partial T_2}\right)^2 u(T_2)^2, \quad (9)$$

$$u(T_0) = \sqrt{\left(1 + \frac{H_1}{H_2}\right)^2 u(T_1)^2 + \left(-\frac{H_1}{H_2}\right)^2 u(T_2)^2}, \quad (10)$$

最终代入 H_1 、 H_2 计算可得本实验中样品表面真温测量的不确定度 $u(T_0)$ 为 1.23 K。

4.3 温度-磷光强度比曲线标定

本文选取 YAG/YAP:Dy 磷光光谱中 457 nm 和 497 nm 的峰值光强比进行温度标定。具体实验流程为:在 480~1 300 K 范围内,高温加热炉每

升温大约 50 K,进行 10 次为一轮的循环采样,控制光源的开关,切换滤光轮中 460 nm 和 500 nm 的窄带滤光片,用 CMOS 记录两个特征峰未激发的背景图像和激发后的磷光图像,并同时记录双热电偶的测温示数。

在完成每个温度点的拍摄后,通过上位机对磷光图像中的像素信息进行比率计算处理:

$$R = \frac{I_{457}}{I_{497}} = \frac{\int_0^t I_{460}(t)dt - \int_0^t B_{460}(t)dt}{\int_0^t I_{500}(t)dt - \int_0^t B_{500}(t)dt}, \quad (11)$$

其中 R 是特征峰磷光图像的灰度比值矩阵, I_{457} 和 I_{497} 为对应特征峰的磷光信号灰度矩阵, I_{460} 和 I_{500} 为磷光激发后 CMOS 透过 460 nm 和 500 nm 滤光片拍摄的灰度图像, B_{460} 和 B_{500} 为无光环境下 CMOS 透过 460 nm 和 500 nm 滤光片拍摄的背景图像, t 为 CMOS 的曝光时间。在标定实验中,在磷光激发前和激发后各拍摄一组背景图像,对两次拍摄的灰度值取平均得到最终的背景图像 B 。在 CMOS 曝光时间的选择上,课题组在 50~450 μ s 的曝光时间范围内进行了对比测试。测试发现,低温时长曝光拍摄的信噪比较好,高温时由于热辐射能量向短波移动,导致背景信号大幅增强,较长的曝光时间会导致相机灰度饱和。最终,基于高信噪比、避免信号饱和、相机成像清晰的原则,选择 350 μ s 为最佳曝光时间进行后续实验。

在标定过程中,取样品中心像素为 30×30 的小正方形区域作为标定区域,将该区域的双波段灰度比值进行平均处理,由此得到单次采集的磷光强度比值。用于标定的磷光强度比值由当前温度点的全部 10 次采集的强度比取均值得到。用于标定的温度则是由公式(8)计算得到的表面真温。

将公式(2)两侧取对数,可得:

$$\ln R = \ln \zeta - \frac{\Delta E}{k} T^{-1}, \quad (12)$$

在公式(12)中代入标定数据即可拟合得到温度与磷光强度比的关系函数,函数图像如图 10 所示。此时可将公式(12)看作线性函数,斜率为 -1 468,由此可推断该材料的能级差 ΔE 为 1 020 cm^{-1} 。

然而,该线性模型虽然可以在理论上验证该测温系统的测温原理,但在表示磷光强度比 R 与温度 T 的关系时不够直观。在参考了前人关于强度比拟合函数研究并尝试了众多的拟合模型后,本文最终采用了拟合效果最佳的双指数函数模型

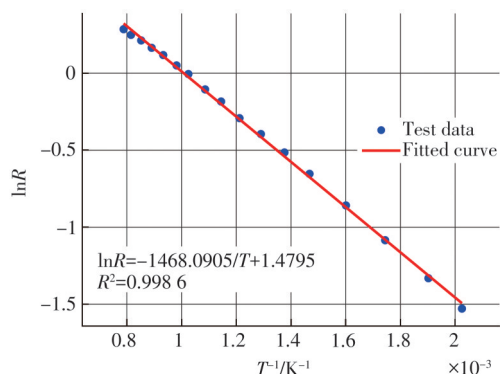


图 10 温度与磷光强度比的关系函数

Fig.10 The relationship function between temperature and phosphorescence intensity ratio

对标定实验数据进行了非线性最小二乘法拟合^[29,31]:

$$T = A_1 \exp(R/B_1) + A_2 \exp(R/B_2) + C, \quad (13)$$

其中 T 为目标表面真温, R 为当前温度的磷光强度比值, A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 、 C 为拟合参数。拟合结果如下:

$$T = 1.06 \exp(R/0.26) - 2167.10 \exp(-R/3.20) + 2517.44, \quad (14)$$

该函数模型的拟合优度 R^2 为 0.9998, 多拟合参数对环境杂散光等外在影响因素有更好的包容性, 与公式(12)理论线性模型的拟合优度相比, 表现出更好的拟合效果。图 11 为磷光强度比-温度标定曲线, 图中标定曲线的误差区间由每个温度点全部采样数据推断温度的标准差所得。其中, 误差区间在 493.84 K 时取到最小值 0.048 K (0.010%), 在 1227.00 K 时取到最大值 1.057 K (0.086%)。图 11 中存在 1100 K 以上的误差显著

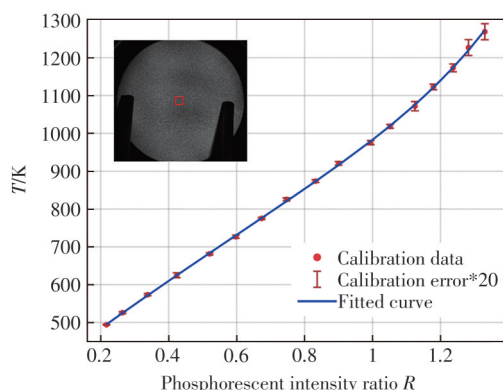


图 11 磷光强度比-温度标定曲线(小图内红框为 30×30 像素标定区域)

Fig.11 Phosphorescence intensity ratio-temperature calibration curve (the red box in the small figure is the calibration area of 30×30 pixels)

增大的现象, 该现象可归因于黑体辐射的维恩位移定律: 随着温度升高, 热辐射向短波方向移动, 1200 K 左右时, 在 450~500 nm 波长区间存在较强的热辐射能量, 导致背景噪声波动随之变大, 信噪比降低, 磷光信号的采集误差明显增大, 以至于推断温度的误差相应变大。特别说明的是, 图中的误差区间为真实值的 20 倍放大处理, 方便观察变化特征。

将多次测温结果的最大标准差考虑进入系统不确定度, 得到磷光强度比测温的不确定度为 1.06 K。考虑样品表面真温测量的不确定度, 可以合成得到测温系统的总不确定度:

$$u(T) = \sqrt{u(T_0)^2 + u(T_{PIR})^2}, \quad (15)$$

其中, $u(T_0)$ 为样品表面真温测量的不确定度, $u(T_{PIR})$ 为磷光强度比测温的不确定度, 计算可得本文磷光测温系统的总不确定度 $u(T)$ 为 1.60 K。

4.4 磷光测温系统的温度灵敏度

根据标定实验所得的温度和磷光强度比的关系, 可以推算 YAG/YAP:Dy 磷光涂层的温度灵敏度^[34]。公式推导如下:

$$S_a = \left| \frac{dR}{dT} \right| = R \cdot \frac{\Delta E}{kT^2}, \quad (16)$$

$$S_r = \left| \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \right| = \frac{\Delta E}{kT^2}, \quad (17)$$

其中 S_a 为绝对灵敏度, 代表温度变化 1 K 时磷光强度比值的变化量; S_r 为相对灵敏度, 代表温度变化 1 K 时测温系统中 R 的相对变化百分比。图 12 为温度灵敏度随温度变化曲线, 绝对灵敏度最大值为 $1.52 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, 在 734.3 K 处取得; 相对灵敏度则随着温度的升高逐渐降低。与前人的研究相比, 本文 YAG/YAP:Dy 磷光涂层的

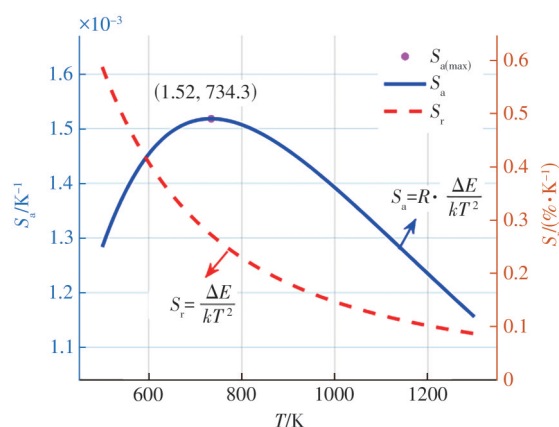


图 12 磷光涂层的温度灵敏度

Fig.12 Temperature sensitivity of phosphorescent coatings

457 nm 发射峰光强变化更大,所以计算所得磷光强度比的比值变化更大(0.21~1.35),温度灵敏度更高,约为参考文献[28-29]中同类材料的 1.5 倍以上。

4.5 磷光测温与红外辐射测温对比实验

在对磷光涂层的强度比-温度曲线进行标定后,课题组开展了磷光测温系统与红外辐射热像仪的表面温度测量对比实验。在 650~1 300 K 范围内,采用磷光测温系统和红外热像仪对目标样品的表面温度分布情况进行测量。具体测量过程为:每隔约 100 K 取一个温度点,等待加热炉温度稳定后,分别对双热电偶、磷光测温系统、红外

辐射热像仪进行信号采集工作。首先读取一次双热电偶的示数,然后立即同时开启磷光测温系统的 CMOS 相机和热像仪进行拍摄,CMOS 相机以 350 μs 的曝光时间对双波长信号各拍摄 10 帧,取 10 次的平均值计算强度比推导温度;热像仪则开启自动曝光功能拍摄 10 帧辐射温度图像,同样取平均值;再采集完成后再次读取双热电偶的示数,最终的参考温度为前后两次双热电偶推导表面真温的平均值,以此减少加热炉控温不稳定性带来的影响。图 13 为实验过程中拍摄的磷光灰度图、磷光示温图、红外热像图、待测样品实拍图。

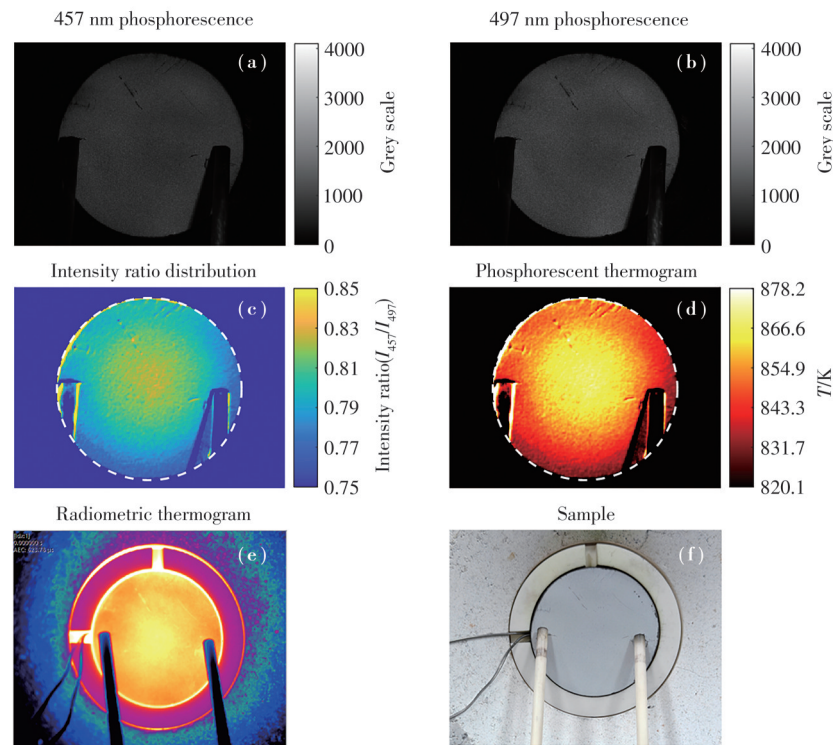


图 13 (a)~(b)特征峰波长的磷光灰度图像;(c)磷光强度比分布图;(d)磷光强度比示温图;(e)辐射热像图;(f)磷光涂层样品

Fig.13 (a)~(b)Phosphorescent grey scale image of characteristic peak wavelengths. (c)Phosphorescent intensity ratio distribution. (d)Phosphorescent intensity ratio temperature indication. (e)Radiothermogram. (f)Phosphorescent coated sample

首先,我们将双热电偶测温 and 磷光测温两种方法在样品圆心处的测温结果进行对比,测温数据如表 1 所示。双热电偶测温数据由公式(8)推断,作为圆心位置处的参考表面真实温度。

表 1 列举了磷光测温在 650~1 300 K 温度范围内 7 个不同测试温度点的测量结果。观察磷光测温误差的变化趋势,可以得出两点结论:(1)当温度到达 1 100 K 以上,磷光测温的误差随着温度升高明显增大。由于黑体辐射的维恩位移定律,当

表 1 磷光测温与双热电偶对比实验数据

Tab. 1 Experimental data of phosphorescent thermometry and thermocouples thermometry

测试温度点	双热电偶/K	磷光测温		
		温度/K	测温偏差/K	引用误差/%
1	684.88	686.82	1.94	+0.15
2	777.39	773.80	-3.59	-0.28
3	873.59	870.45	-3.14	-0.25
4	972.12	964.7	-7.41	-0.58
5	1 075.71	1 072.08	-3.63	-0.29
6	1 169.38	1 158.82	-10.56	-0.83
7	1 272.27	1 256.47	-15.8	-1.24

温度升至 1 100 K 左右时, 500 nm 处的背景热辐射能量较强, 与 497 nm 的发射峰发光重叠较多, 信噪比不佳; 同时, 由于加热炉在高温处控温的不稳定性, 导致背景扣除时引入的误差增大。而温度继续上升, 457 nm 发射峰处相继受到热辐射能量影响, 则会进一步扩大误差。(2) 磷光测温大部分的测量结果相较于参考温度偏低。磷光测温系统的激发 LED 光源功率较大, 即使在光源前放置滤光片, 依然存在小部分 400~500 nm 波段的干扰光被 CMOS 接收, 所以实际得到的磷光强度比为 $(I_{457} + I_{LED}) / (I_{497} + I_{LED})$ 。理论

上磷光涂层的 I_{457}/I_{497} 比值在相同温度下不发生变化, 而测试实验时激发出的磷光绝对光强大于标定实验时的磷光绝对光强, I_{LED} 的引入导致测试样品的实际比值偏小, 最终测得的温度偏低。

其次, 我们对磷光测温 and 辐射测温两种方法得到的温度分布示意图进行了比对分析。在红外辐射测温时, 我们使用参考表面真温对红外热像仪进行了发射率校准, 保证圆心处温度与参考温度一致, 由此确保整个测温区域温度分布的准确性。以温度测试点 5 为例, 图 14(a)、(b) 分别为磷

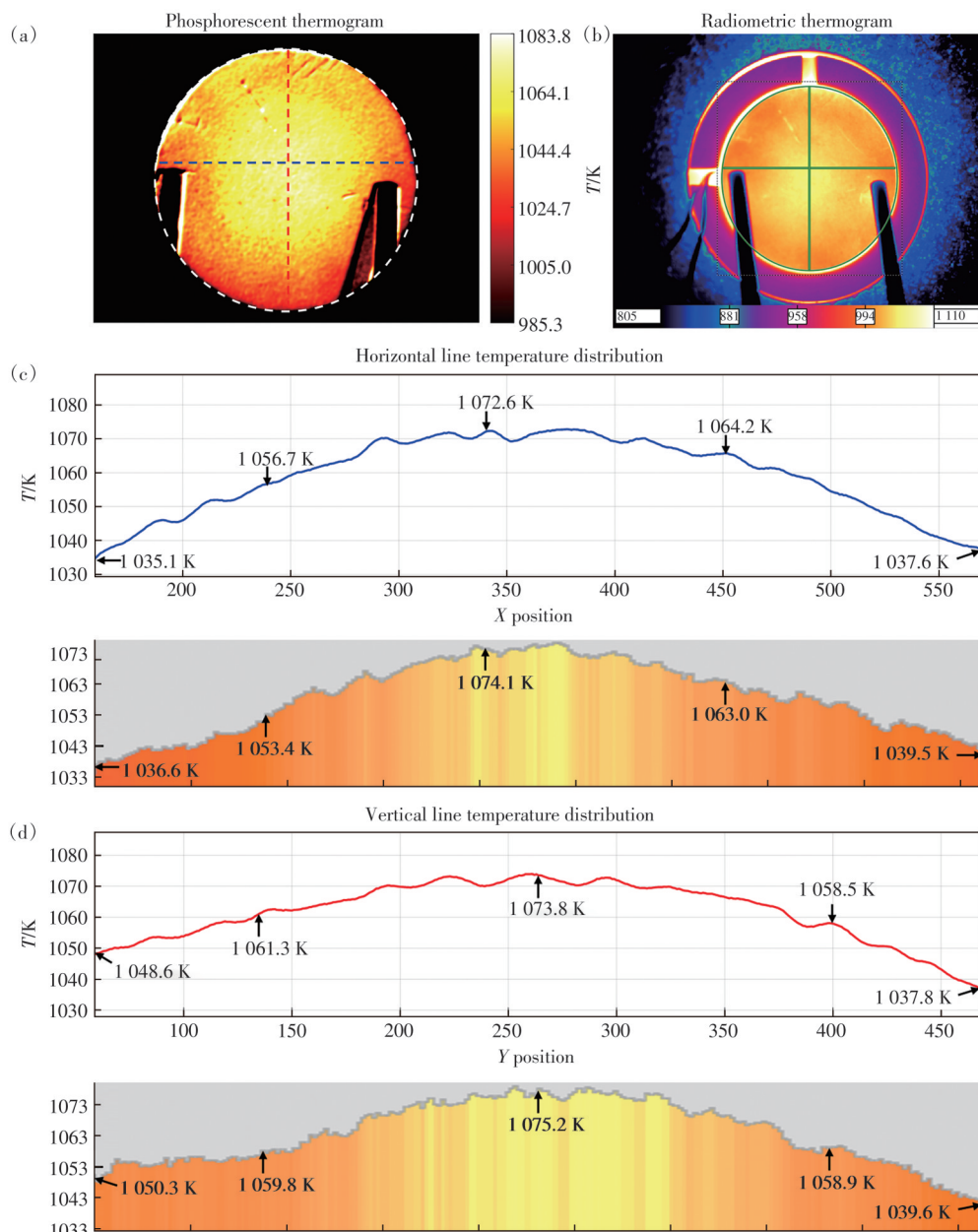


图 14 (a)~(b) 磷光测温 and 辐射测温的温度分布示意图; (c)~(d) 两种测温方法在参考线上的温度分布

Fig. 14 (a)~(b) Schematic temperature distributions for phosphorescence and radiation thermometry. (c)~(d) Temperature distribution of the two thermometry methods on the reference line

光测温 and 辐射测温得到的温度分布示意图, 圆形待测样品在两张热像图中均呈现出从圆心到边缘温度逐渐降低的温度分布。为了更加直观地体现温度分布, 我们在两种示温图的相同位置画了横纵两条参考线段, 图 14(c)、(d) 为两种测温方法在参考线位置处的温度分布。观察图 14(c)、(d) 可知, 两种测温方法的温度分布大体一致, 皆呈现出中间高、两边低的分布情况, 磷光测温经过滤波处理显得更为平滑, 辐射测温则为无预处理的原始数据。其中, 水平参考线上磷光测温的最大温差约为 37 K, 辐射测温的最大温差约为 39 K, 两侧温度分布较为对称; 竖直参考线上磷光测温的最大温差约为 36 K, 辐射测温的最大温差约为 36 K, 其中可明显观察到上侧边缘相较于其他边缘位置温度更高, 大约有 10 K 的温度差, 符合自然对流效应中热流向上运动导致样品上侧温度相对更高的实际情况。在两条参考线上任取 10 个坐标点的温度值进行比较, 其中最大温度偏差约为 3.4 K (0.27%)。从总体来看, 两种测温方法得到的温度分布高度一致, 由此验证了本文磷光强度比测温系统良好的高温表面温度分布测量性能。

然而, 仔细观察可以发现, 图 14(a) 温度渐变较不顺滑, 渐变区域存在一些明暗不一的“斑点”。该现象出现的主要原因是磷光涂层喷涂过程中液滴大小的不均匀性导致单位像素的磷光能量存在一定的偏差, 而多次喷涂的制备流程进一步扩大了该偏差。后续可以通过优化喷涂工艺的均匀性或用中值滤波等图像处理方法对该问题进行改进。

5 结 论

本文开展了基于磷光强度比的高温表面温度测量技术研究, 制备了磷光温敏涂层, 搭建了磷光强度比测温系统, 并进行了表面温度的标定和测量实验, 得到结论如下: (1) YAG/YAP: Dy 磷光涂层在 480 K~1 300 K 内具有良好的光学温度传感特性, 磷光发射峰温度灵敏度高, 且涂层粘合牢固性好; (2) 该磷光测温系统在 650~1 300 K 温度范围内的测温精度高, 最大引用误差为 1.24%, 系统不确定度为 1.60 K。与红外辐射热像仪的测温结果对比, 得到了高度相似表面温度分布热像图, 证明该系统具有良好的表面温度分布测量性能。

经过实验和误差分析, 课题组也发现了该系统的不足之处。在 1 300 K 以上的测试环境中受背景热辐射影响较大, 信噪比不佳; 表面温度分辨率一定程度上受磷光涂层均匀性影响。后续课题组将尝试通过增强磷光材料激发效率、改进喷涂工艺等手段提高信噪比和单位能量的均匀性; 并考虑通过改用分幅相机或双相机分光采集的思路优化磷光收集光路, 使测温系统向动态、瞬态测量的方向发展。综上所述, 基于磷光强度比的高温表面测温度测量技术具有可非接触测温、不受发射率影响、测温精度高等优点, 未来在航空发动机热端部件、超声速风洞等恶劣高温环境中具有巨大的应用潜力。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250134>

参 考 文 献:

- [1] SHANG Y, YANG H J, FENG Y, *et al.* Research progress of smart thermal barrier coatings based on phosphorescence temperature measurement technology [J]. *Acta Aeronaut. Astronaut. Sinica*, 2024, 45(12): 26-42.
- [2] 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.
- [3] BRÜBACH J, DREIZLER A, JANICKA J. Gas compositional and pressure effects on thermographic phosphor thermometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2007, 18(3): 764-770.
- [4] FEIST J P, HEYES A L. The characterization of $Y_2O_3:Sm$ powder as a thermographic phosphor for high temperature applications [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2000, 11(7): 942-947.
- [5] HUSBERG T, GJIRJA S, DENBRATT I, *et al.* Piston temperature measurement by use of thermographic phosphors and thermocouples in a heavy-duty diesel engine run under partly premixed conditions [J]. *Am. J. Psychiatry*, 2005, 171(1): 118-119.

- [6] SEYFRIED H, SARNER G, OMRANE A, *et al.* Optical diagnostics for characterization of a full-size fighter-jet afterburner [C]. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air, Reno*, 2005: 813-819.
- [7] ALLISON S W, GILLIES G T. Remote thermometry with thermographic phosphors: instrumentation and applications [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1997, 68(7): 2615-2650.
- [8] OMRANE A, JUHLIN G, OSSLER F, *et al.* Temperature measurements of single droplets by use of laser-induced phosphorescence [J]. *Appl. Opt.*, 2004, 43(17): 3523-3529.
- [9] 刘剑宇, 全永凯, 徐国强, 等. 航空发动机热端部件磷光测温技术研究进展 [J]. *航空动力学报*, 2023, 38(12): 2861-2871.
LIU J Y, QUAN Y K, XU G Q, *et al.* Research progress on phosphor thermometry technology for aero-engine hot section component [J]. *J. Aerosp. Power*, 2023, 38(12): 2861-2871. (in Chinese)
- [10] CAI T, KIM D, KIM M, *et al.* Two-dimensional thermographic phosphor thermometry in a cryogenic environment [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2017, 28(1): 015201.
- [11] 毕志献, 韩曙光, 伍超华, 等. 磷光热图测热技术研究 [J]. *实验流体力学*, 2013, 27(3): 87-92.
BI Z X, HAN S G, WU C H, *et al.* Phosphor thermography study in gun tunnel [J]. *J. Exp. Fluid Mech.*, 2013, 27(3): 87-92. (in Chinese)
- [12] 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]. *Meas. Sci. Technol.*, 2020, 31(4): 044003.
- [13] ELDRIDGE J I, ALLISON S W, JENKINS T P, *et al.* Surface temperature measurements from a stator vane doublet in a turbine afterburner flame using a YAG:Tm thermographic phosphor [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2016, 27(12): 125205.
- [14] 韩曙光, 贾广森, 文帅, 等. 磷光热图技术在常规高超声速风洞热环境实验中的应用 [J]. *气体物理*, 2017, 2(4): 56-63.
HAN S G, JIA G S, WEN S, *et al.* Heat Transfer measurement using a quantitative phosphor thermography system in blowdown hypersonic facility [J]. *Phys. Gases*, 2017, 2(4): 56-63. (in Chinese)
- [15] PENG D, YANG L X, CAI T, *et al.* Phosphor-doped thermal barrier coatings deposited by air plasma spray for in-depth temperature sensing [J]. *Sensors*, 2016, 16(10): 1490.
- [16] PENG D, LIU Y Z, ZHAO X F, *et al.* Comparison of lifetime-based methods for 2D phosphor thermometry in high-temperature environment [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2016, 27(9): 095201.
- [17] CAI T, PENG D, LIU Y Z, *et al.* A novel lifetime-based phosphor thermography using three-gate scheme and a low frame-rate camera [J]. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2017, 80: 53-60.
- [18] SUTTON G, GREENEN A, ROEBUCK B, *et al.* Imaging phosphor thermometry from $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ using the time-domain intensity ratio technique [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2019, 30(4): 044002.
- [19] FUHRMANN N, BRÜBACH J, DREIZLER A. Phosphor thermometry: a comparison of the luminescence lifetime and the intensity ratio approach [J]. *Proc. Combust. Inst.*, 2013, 34(2): 3611-3618.
- [20] ALLISON S W, BESHEARS D L, CATES M R, *et al.* Luminescence of YAG:Dy and YAG:Dy,Er crystals to $1\text{ }700\text{ }^{\circ}\text{C}$ [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2020, 31(4): 044001.
- [21] GOSS L P, SMITH A A, POST M E. Surface thermometry by laser-induced fluorescence [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1989, 60(12): 3702-3706.
- [22] FEIST J P, HEYES A L, CHOY K L, *et al.* Phosphor thermometry for high temperature gas turbine applications [C]. *Proceedings of the 18th International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities. Record, Toulouse*, 1999: 6/1-6/7.
- [23] KONTIS K. Surface heat transfer measurements inside a supersonic combustor by laser-induced fluorescence [J]. *J. Thermophys Heat Transfer*, 2003, 17(3): 320-325.
- [24] 白书战, 赵华, 李国祥. 激光诱导磷光测温技术在缸内温度测量中的应用 [J]. *燃烧科学与技术*, 2010, 16(6): 515-518.
BAI S Z, ZHAO H, LI G X. Two-dimensional gas-phase temperature measurements in engine using laser-induced phosphorescence thermometry [J]. *J. Combust. Sci. Technol.*, 2010, 16(6): 515-518. (in Chinese)
- [25] FLORES-BRITO W, MAHAFFEY J, VACKEL A, *et al.* Aerosol deposition of dysprosium-doped yttrium-aluminum-garnet for phosphor thermography applications [C]. *Proceedings of AIAA Scitech 2019 Forum, San Diego*, 2019: 2102.

- [26] HERTLE E, CHEPYGA L, BATENTSCHUK M, *et al.* Influence of codoping on the luminescence properties of YAG:Dy for high temperature phosphor thermometry [J]. *J. Lumin.*, 2017, 182: 200-207.
- [27] HERTLE E, CHEPYGA L, BATENTSCHUK M, *et al.* Temperature-dependent luminescence characteristics of Dy³⁺ doped in various crystalline hosts [J]. *J. Lumin.*, 2018, 204: 64-74.
- [28] CHEPYGA L M, OSVET A, BRABEC C J, *et al.* High-temperature thermographic phosphor mixture YAP/YAG:Dy³⁺ and its photoluminescence properties [J]. *J. Lumin.*, 2017, 188: 582-588.
- [29] LIANG Y S, LIU L, ZHAO L, *et al.* Temperature sensing technique across a wide range using phosphorescence intensity ratio of Dy³⁺-doped YAG/YAP [J]. *J. Lumin.*, 2024, 266: 120309.
- [30] QUAN Y K, YIN Q Y, CHENG Z, *et al.* Optimization method of working wavelengths and bandwidths for high precision phosphor thermometry at high temperature [J]. *Int. J. Therm. Sci.*, 2025, 210: 109649.
- [31] 张粟, 庞然, 姜丽宏, 等. 基于稀土 Dy 离子荧光强度比的温度测试技术 [J]. *实验流体力学*, 2023, 37(2): 115-124.
ZHANG S, PANG R, JIANG L H, *et al.* A temperature measurement technique based on fluorescence intensity ratio of rare earth Dy ion [J]. *J. Exp. Fluid Mech.*, 2023, 37(2): 115-124. (in Chinese)
- [32] WANG C L, JIN Y H, ZHANG R T, *et al.* A review and outlook of ratiometric optical thermometer based on thermally coupled levels and non-thermally coupled levels [J]. *J. Alloys Compd.*, 2022, 894: 162494.
- [33] CHENG W L, LIU Y Z, PENG D. Parametric study of intensity-ratio-based phosphor thermometry using Mg₄GeO₆:Mn⁴⁺ for instantaneous temperature measurement [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2024, 35(1): 015204.
- [34] CAO J K, CHEN W P, XU D K, *et al.* Wide-range thermometry based on green up-conversion of Yb³⁺/Er³⁺ co-doped KLu₂F₇ transparent bulk oxyfluoride glass ceramics [J]. *J. Lumin.*, 2018, 194: 219-224.



叶诚可(2000-),男,浙江宁波人,硕士研究生,2023年于中国计量大学获得学士学位,主要从事磷光温度测量相关的研究。

E-mail: 3346359881@qq.com



蔡静(1976-),女,河北石家庄人,博士,研究员,2005年于中国科学院电工研究所获得博士学位,主要从事热学计量与测试的研究。

E-mail: caijing@cimm.com.cn