

引文格式: 杨丽霞, 付雅婷, 赵晓峰, 等. 热障涂层在线/离线磷光温度测量技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(3): 71-81.
 YANG Lixia, FU Yating, ZHAO Xiaofeng, et al. Research progress of on-line/off-line phosphor thermometry technology for thermal barrier coatings[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(3): 71-81.

热障涂层在线/离线磷光温度测量技术研究进展*

杨丽霞¹, 付雅婷¹, 赵晓峰², 陈照峰¹, 彭迪², 牟仁德³, 刘德林³

(1. 南京航空航天大学, 南京 210016;

2. 上海交通大学, 上海 200240;

3. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

[摘要] 精确测量涡轮叶片表面热障涂层温度对航空发动机和地面燃气轮机设计和研制具有极其重要的意义。近年来, 基于热像磷光材料磷光特性的热障传感涂层在线测温技术与热历史磷光涂层离线测温技术得到了迅猛发展。前者通过在线测量高温下磷光信号来获取实时温度信息, 后者通过离线测量经高温服役后的磷光材料不可逆磷光信号变化来获取服役温度信息。这两项技术都适用于高温、高腐蚀环境下热障涂层非干涉、非接触式和高精度温度测量, 具有广阔的应用前景。从热障涂层在线/离线测温原理与方法、磷光材料与制备及应用3个方面详细介绍了热障涂层在线/离线测温技术的研究现状与技术特点, 并对这两种技术的发展进行了展望。

关键词: 热障涂层(TBCs); 在线/离线温度测量; 磷光; 稀土离子; 热障传感涂层; 热历史传感器

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2022.03.071



杨丽霞

讲师, 博士, 研究方向为热障涂层在线/离线温度测量与高温氧浓度/压力敏感磷光涂层。

热障涂层(Thermal barrier coatings, TBCs)通常是指由隔热陶瓷涂层、热生长氧化层和抗氧化金属黏结层组成的涂层系统^[1], 它是高性能航空发动机和工业燃气轮机涡轮叶片的高温隔热防护关键材料, 能大幅提升涡轮叶片的服役温度和使用寿命。热障涂层的表面/界面温度是影响热障涂层寿命的关键因素, 热障涂层的失效机理如陶瓷层烧结、黏结层氧化、高温熔盐腐蚀等都与温度密切相关, 温度的提高极大加速了热障涂层失效过程, 严重威胁航空发动机与燃气轮机的安全稳定运行。服役环境下热障涂层的真实隔热效果是涡轮叶片设计的重要依据, 决定了叶片高温合金耐高温能力。然而常用的高温热导率测量方法激光闪射法往往获得的是热障涂层本征热导率, 忽略了红外辐射对热导率的影响, 无法反

映工作环境下真实隔热效果。因此, 针对航空发动机与燃气轮机内部高温、高腐蚀、复杂气氛、振动等苛刻环境, 精确测量热障涂层温度对研究涂层失效机理、监测涂层健康状态、预测涂层寿命、评估涂层高温真实隔热效果、设计新型热障涂层以及优化冷却系统至关重要, 是发展未来高性能航空发动机和燃气轮机的关键。

在现有的测温技术中, 埋入式热电偶测量温度精准, 但仅可测量预安装点温度、无法测量旋转涡轮叶片运转环境下的温度^[2]。红外测温技术对温度敏感、可快速响应, 但易受环境燃气辐射干扰导致精度下降。基于颜色温度特性的示温漆可用于复杂形状表面且测温范围广, 但温度测量精度低, 只能获得大致温度范围。传统测温方式的不足导致获得服役条件下热障涂层真实温度异常困难,

*基金项目: 国家自然科学基金(51905268); 江苏省“双创博士”人才项目(1006-KFR20034)。

热障涂层的真实隔热效果长期存在争议。自 20 世纪 80 年代以来,一种利用热像磷光材料(Thermographic phosphor, TP)的光学非接触式测温技术为航空发动机和燃气轮机温度测量提供了解决途径^[3-5]。热像磷光涂层一般是由作为磷光中心的稀土离子/过渡金属掺杂陶瓷基体组成,通过将热像磷光材料涂覆于测量表面,以激光或紫外灯激发涂层发出强度或寿命与温度成正比的磷光,通过磷光强度比或寿命变化获得表面温度信息。当热像磷光技术应用于热障涂层温度测量时,为避免在热障涂层中引入新的陶瓷层而影响涂层寿命,Choy 等^[6]在 1998 年首次提出了热障传感涂层(Thermal barrier sensor coatings, sensor TBCs),即采用磷光离子局部改性热障涂层成分,使其既可以作为热像磷光测温层,又可以作为热障涂层,从而实现热障涂层温度的在线测量。英国南方热科学研究所^[7]、帝国理工学院^[8]、克兰菲尔德大学^[9]、美国哈弗大学^[10]、NASA^[11-13]、国家橡树岭实验室^[14]、加利福尼亚大学^[15]、国内上海交通大学^[16]和南京航空航天大学^[17]等多家研究机构对此开展了研究。与传统测温技术相比,热障传感涂层测温技术具有精度高、非接触、响应快、能应用于旋转部件、应用范围广等优势,尤其适用于航空发动机与燃气轮机高温、高腐蚀环境。目前,这项技术已经成功应用于涡轮叶片和燃烧室的温度在线测量。2007 年,Feist 等^[18]针对发动机内部结构复杂、在线测温技术无法实现部分受限区域内温度测量的局限性,首次提出了热历史传感器(Thermal history sensor, THS),利用无定形态或低价态的热像磷光材料在高温下发生的不可逆晶体结构/价态等变化与磷光特性之间关系,用于实现热障涂层温度的离线测量。英国南方热科学研究所^[19]、英国传感涂层系统公司^[20]、

帝国理工学院^[21]、法国克莱门特阿德研究所^[22]等多家研究机构也对此开展了相关探索。热历史磷光测温技术具有操作简单、成本低等特点,可应对复杂表面的温度场离线测量。本研究将系统介绍热障传感涂层在线测温技术与热历史磷光涂层离线测温技术的测量原理与测量方法、材料与制备、实际应用与未来趋势。

1 磷光温度测量原理与方法

1.1 基于热障传感涂层的在线测温原理

图 1 为含磷光层的热障涂层系统示意图。热障传感涂层一般是由镧系稀土离子(如 Eu^{3+} 、 Dy^{3+} 和 Er^{3+} 等)掺杂热障涂层陶瓷层(如 YSZ、 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 和 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 等)组成^[9,15]。在紫外/可见光源激发下,磷光层产生特征与温度相关的磷光信号,如磷光光谱、强度与寿命,通过测量磷光信号获得磷光层所在位置的温度信息。这项技术使得热障涂层陶瓷层表面、内部和陶瓷基/黏结层界面的温度测量成为可能,且不影响热障涂层寿命。根据用于温度测量的磷光特征不同,热障传感涂层在线测温技术可以分为磷光强度比法和磷光寿命法。

1.1.1 磷光强度比法

磷光强度比法是基于稀土离子磷光强度与温度的相关性,利用两个

磷光峰的强度比值来获得温度信息的方法。在连续光源的激发下,稀土离子基态电子从基态跃迁到激发态,当达到平衡状态时,激发态能级的电子数量是固定不变的,可通过玻尔兹曼定律表示^[3],

$$n_{\text{excited}} = n_{\text{ground}} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \quad (1)$$

式中, n_{excited} 和 n_{ground} 表示激发态和基态的电子数量; ΔE 为基态与激发态能级差; k 为玻尔兹曼常数; T 为温度。根据磷光强度与电子数量成正比,可得到磷光强度与温度的关系,即

$$I_{\text{excited}} = I_{\text{ground}} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \quad (2)$$

式中, I_{excited} 和 I_{ground} 表示激发态和基态的磷光强度。据此,通过测量两个磷光峰的强度比变化就可获得温度信息。

1.1.2 磷光寿命法

磷光寿命法的测温原理是基于光致发光过程中的热猝灭效应(Thermal quenching, TQ)。在脉冲光源激发下,稀土离子中的电子从基态跃迁到激发态;当激励停止时,激发态电子将会自发回到基态,在这个过程中,激发态电子通过辐射跃迁(发射光子,即产生磷光)或者非辐射跃迁(发射声子,即散热)回到基态,如图 2(a)中简化的磷光离子能级示意图所示。由于辐射跃迁和非

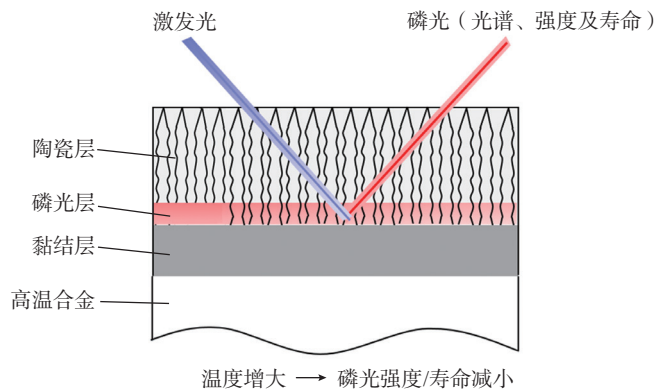


图1 含磷光层的热障涂层系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of sensor TBCs with phosphorescence coating

辐射跃迁同时存在并相互竞争,在激发停止后磷光强度随时间的增加而降低,显示出图 2 (b) 所示的磷光衰减曲线。通过磷光衰减曲线即可得到磷光寿命^[23],

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (3)$$

式中, I_0 为在时间 $t = 0$ 时的初始荧光强度, τ 为磷光寿命。

磷光寿命的倒数为辐射跃迁速率 W_r 与非辐射跃迁速率 W_{nr} 之和,

$$1/\tau = W_r + W_{nr} \quad (4)$$

式中, 辐射跃迁速率与温度无关, 可认为是一个常数。而非辐射跃迁速率与温度高度相关, 当非辐射跃迁受

多声子弛豫 (MPR) 过程控制时, 非辐射跃迁速率可以表示为^[23]

$$1/W_{nr}(T) = \tau^0 \left[1 + \left(\exp \frac{h\omega}{2\pi kT} - 1 \right)^{-1} \right]^{-2\pi\Delta E / h\omega} \quad (5)$$

式中, τ^0 为在 0K 温度下的非辐射跃迁寿命; h 为常数; ω 为角频率; ΔE 为能极差。对于某些磷光离子 (如 Eu^{3+}), 非辐射跃迁常常被认为受电荷迁移带跃迁 (CTS) 控制, 此时非辐射跃迁速率可表示为^[23]

$$1/W_{nr}(T) = [cT^{*1/2} \exp(-E_a/kT^*)]^{-1} \quad (6)$$

$$T^* = (hv/2k) \text{chth}(hv/2kT) \quad (7)$$

式中, E_a 为激活能; V 为频率; 根据式 (5) 和 (7) 可得, 随着温度增加, 非辐射跃迁速率增加, 磷光寿命减少。典型的磷光寿命-温度曲线如图 2 (c) 所示, 当温度大于热猝灭温度时, 磷光寿命受非辐射跃迁控制, 随着温度的升高, 磷光寿命在指数坐标下近线性减小。据此通过测量磷光寿命, 即可获得温度信息。

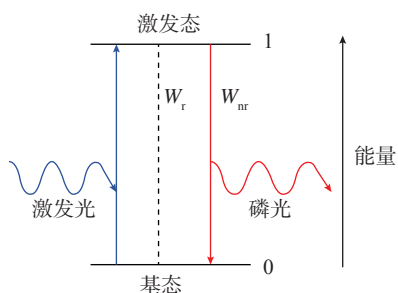
1.1.3 磷光在线测温技术测量系统

利用磷光在线测温技术进行热障涂层温度测量时需在航空发动机与燃气轮机中搭载磷光测量系统。典型的磷光测量系统主要由激发光源、磷光信号接收器和加热装置构成。

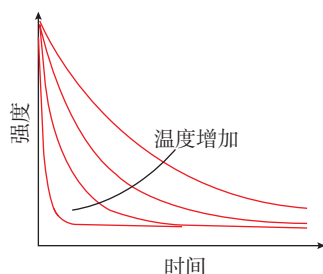
磷光信号接收装置包括光谱仪、光电倍增管、CCD 相机和 CMOS 相机。其中光电倍增管主要用来测量单点磷光寿命, CCD 相机和 CMOS 相机常用来测量磷光强度与寿命面分布。图 3 为本研究搭建的采用光电倍增管作为磷光信号接收器的磷光测量系统示意图。

基于磷光强度比的在线测温技术通常选用两个独立的磷光信号接收器 (CCD 或 CMOS 相机), 测量两个不同波段范围的磷光强度, 利用磷光强度比实现温度分布的测量。与直接测量磷光强度相比, 强度比法是自参照的相对测量, 消除了如激发光强度、信号检测位置、涂层表面粗糙度以及周围环境影响导致的误差来源。基于磷光寿命的在线测温技术通常选用单个光电倍增管进行磷光寿命的测量, 如图 3 所示, 但这种方法往往只能测量单点温度。相较而言, 尽管磷光寿命法具有更高的温度测量精度, 但磷光强度比法通过使用高速相机成像轻松获得二维温度分布, 使其更具有吸引力。

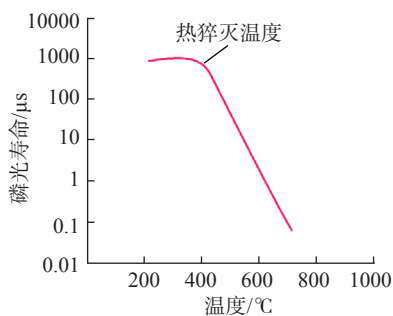
近年来, 随着成像技术的发展, 双帧寿命法^[24]等测量方法出现使得



(a) 简化的两个能级系统示意图



(b) 磷光衰减曲线



(c) 磷光寿命-温度曲线

图2 基于磷光寿命法的在线测温原理示意图
Fig.2 Schematic diagram of on-line temperature measurement principle based on phosphorescence lifetime

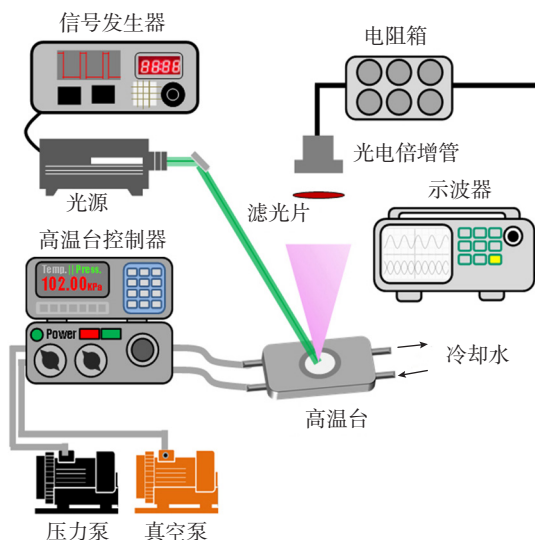


图3 典型的磷光在线测量系统示意图

Fig.3 Typical experimental set up used to on-line measure phosphorescence signal

利用 CCD 或 CMOS 相机实现基于磷光寿命的二维温度分布测量成为可能。

1.2 基于热历史磷光涂层的离线测温原理

在一些无法进行在线测温的区域,一种新型离线测温技术即热历史磷光涂层成为理想的替代方案^[18,25]。热历史磷光材料通常为无定形态或非稳价态的热像磷光材料,它的离线测温原理是基于热历史磷光材料在高温和氧化环境下发生的不可逆变化,如无定形转变为晶体或二价掺杂离子氧化为三价,这些不可逆变化将永久改变磷光特性。只需将热历史磷光粉末与黏结剂混合涂覆于热障涂层或其他热端部件表面,在高温环境下,磷光特性随温度发生变化,冷却后也不会发生复原。待发动机冷却后,在室温下通过测量磷光特性获得温度大小和分布。图4为基于热历史磷光涂层的离线测温原理示意图。热历史磷光涂层与示温漆的测温原理非常相似,不同的是示温漆是通过判读热暴露后颜色变化获得温度信息,一般依赖专业技术人员进行颜色判读,温度测量精度低;而热历史磷光涂层可以定量测量磷光强度比或磷光寿命,温度数据是连续的,因此具有更高的温度测量精度、效率和可重复性。此外,热历史磷光测量技术还具有操作简单、区域测量、温度测量范围广等特点,能够实现大面积、连续温度场测试,获得高分辨率的表面温度分布情况。目前,这项技术测量温度达到 900℃,温度误差小于 ±5℃,空间分辨率小于 3mm^[26]。

热历史磷光测温技术是待被测对象冷却至室温并拆卸后进行磷光信号测量,商用的磷光性能测试设备就能满足测量需求。热历史磷光测温技术也可分为磷光强度比法和磷光寿命法。磷光强度比法具有检测方便、温度敏感性高等特点,但存在易受试验条件和样品表面杂质影响

的缺陷;而寿命法具有较高的测量精度,但存在对磷光信号质量要求高、温度敏感性较低等缺陷。两种方法的详细对比可参见 Amiel 等^[22]的相关研究。

1.3 测温技术的比较

表1是热障传感涂层在线测温技术和热历史磷光涂层离线测温技术的对比。可以看出,两种方法都适用于发动机内部高温、高腐蚀恶劣环境下涡轮叶片表面热障涂层的温度点/温度分布的高精度、非接触测量。但两者也存在各自的优劣势。表2比较了热电偶、红外技术、示温漆等传统测温技术与热障传感磷光涂层、热历史磷光涂层新型测温技术的优

缺点。与传统测温技术相比,基于磷光特性的热障涂层在线/离线测温技术用于航空发动机与燃气轮机内部温度测量具有显著优势,逐渐成为国内外研究的热点。

2 热障传感涂层与制备技术

常用热障涂层陶瓷层成分包括^[27]:氧化钇稳定氧化锆(YSZ)、稀土锆酸盐 Ln₂Zr₂O₇(如 La₂Zr₂O₇、Gd₂Zr₂O₇等)、钇铝石榴石 Y₃Al₅O₁₅(YAG)等。其中 YSZ 是热障涂层陶瓷层首选材料,得到了最为广泛的应用。热障涂层是应用于高温合金叶片的热防护涂层,而环境障涂层(EBCs)是应用于未来航空发动

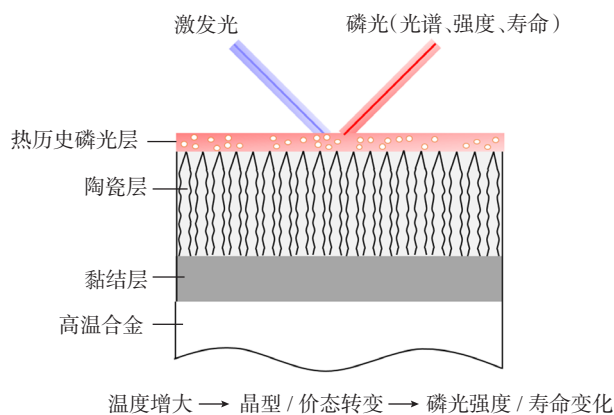


图4 热历史磷光涂层系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of thermal history sensor coatings

表1 热障传感涂层在线测温技术和热历史磷光涂层离线测温技术的对比

Table 1 Comparison of temperature measurement techniques using sensor TBCs and thermal history sensor

对比项目	热障传感涂层在线测温技术	热历史磷光涂层离线测温技术
优势	可应用于高温、高腐蚀恶劣环境下温度测量;非接触式、实时、在线、快响应、高精度测量;可重复测量;可实现热障涂层表面、内部及界面的温度测量,且不影响涂层寿命;适合点、面测量	可应用于高温、高腐蚀恶劣环境下温度测量;非接触式、非干涉、离线、高精度测量;无须测量引线,操作简单,成本低;温度测量上限高,测温范围广;特别适宜在旋转部件和复杂结构件的表面温度或温度场测量,且可大面积测量
劣势	需要光学接入发动机,实际应用存在挑战;热猝灭效应使高温磷光强度显著减弱,来自于样品表面和高温气流的背景热辐射显著增强,高温下磷光性能测量难度增大,测量误差增大;检测设备要求高、成本高	无法监测温度变化;每次测温需要拆卸叶片后才能进行喷涂涂层和温度测量,因此只适宜进行发动机测试时使用;一般仅能一次性使用,不能连续重复利用;一般用于表面温度测量

表2 涡轮叶片热障涂层测温技术比较

Table 2 Comparison of temperature measurement techniques for thermal barrier coatings on turbine blades

测温技术	信号连接方式	测量精度	重复性与稳定性	实时测量的能力和信号响应能力	涡轮叶片安装难易度/有无损	定点测量的难度	传感器阵列的形成
红外技术	非接触式	差	连续稳定	快	容易/无损	大	—
示温漆	非接触式	一般	一次性	最高温度	容易/有损	小	容易
测温晶体技术	非接触式	一般	一次性	最高温度	一般/有损	小	不容易
热电阻温度计	有线测量	精确	好	一般	难/有损	大	困难
热电偶温度计	有线测量	精确	好	一般	难/有损	大	困难
薄膜热电阻传感器	有线测量	精确	好	一般	不易/有损	小	容易
薄膜热电偶传感器	有线测量	精确	好	一般	不易/有损	小	容易
SAW 传感器	无线遥感	精确	好	一般	不易/有损	小	容易
磷光在线测温技术	非接触式	精确	好	超快	容易/无损	无	面测量
热历史磷光离线测温技术	非接触式	精确	好	无法实时测量	容易/无损	无	面测量

机中 SiC_f/SiC 陶瓷基复合材料涡轮叶片表面的热防护涂层。常见的环境障涂层有硅酸盐 (Y_2SiO_5) 和钽锆铝硅酸盐 (BSAS)。与热障传感涂层相似,通过稀土离子局部改性环境障涂层也可实现温度测量,因此,以 Y_2SiO_5 和 BSAS 为基体的热像磷光材料也引起许多研究者的关注。稀土离子是决定热像磷光材料磷光测温性能的关键,几种常用稀土离子包括 Eu^{3+} 、 Dy^{3+} 、 Er^{3+} 和 Sm^{3+} 等。

表3总结了常见的热障/环境障传感涂层用磷光材料及其特征。除了 Dy^{3+} 和 Sm^{3+} 可用强度比法外,大部分热障传感材料采用寿命法进行温度测量。在镧系稀土离子中, Eu^{3+} 被认为是最佳的掺杂离子^[42]。到目前为止,YSZ:RE的磷光测温性能研究已经趋于成熟,测量极限普遍在800~1300℃之间。然而新一代高推重比航空发动机的涡轮进口温度已达到1500℃,YSZ:RE难以满足需求。YSZ:RE具有非常优异的光学特性和磷光测温性能(高猝灭温度、强的高温磷光强度),使其在超高温测量领域具有非常大的潜力。如表3所示,YAG:Dy的最高可测温度达到1700℃,该温度测量上限能基本满足未来航空发动机涡轮叶片的

测温需求。

热障涂层常见的制备技术包括电子束物理气相沉积(EB-PVD)和等离子喷涂(APS)^[43]。EB-PVD技术主要用于航空发动机涡轮叶片,而APS主要用于燃气轮机涡轮叶片或燃烧室。前者制备的陶瓷层为柱状结构,具有较高的光透射率,有利于内部磷光信号测量;后者制备的陶瓷层为层状结构,具有较低的光透射率,不利于内部磷光信号测量。因此,EB-PVD技术最早同时也是最常被用于制备热障传感涂层^[9,15,44-45]。2001年,Feist等^[45]制备了以YSZ:Eu为热障传感涂层的EB-PVD TBCs,最高可测温度达800℃。随后,Steenbakker等^[9]研究了以 Dy^{3+} 、 Eu^{3+} 或 Gd^{3+} 分别掺杂YSZ为热障传感涂层的EB-PVD TBCs磷光测温性能。尽管APS陶瓷层具有较高光散射系数,但由于YSZ陶瓷层具有半透明性质,2005年Chen等^[46]成功观察到在0.5mm厚YSZ首层内部YSZ:Dy热障传感涂层的磷光信号。本研究采用APS技术制备了以YSZ:Eu为热障传感涂层的TBCs(图5),实现了280μm厚陶瓷首层内部磷光涂层在室温~900℃磷光信号测量^[16]。热障

传感涂层除了用于温度在线测量,也可用于热障涂层的失效监测研究^[11-12,44]。美国NASA格伦研究中心分别采用EB-PVD技术和APS技术制备的以YSZ:Er、Yb磷光层为底层的热障涂层用以监测陶瓷首层的失效过程^[44]。

3 热历史磷光材料与制备技术

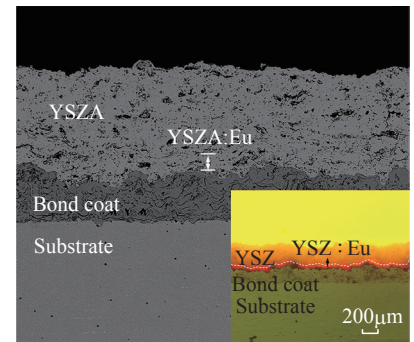
根据导致热像磷光材料在高温下发生不可逆变化过程不同,常见热历史磷光涂层可分为无定形热历史磷光材料和非稳价态热历史磷光材料两类,表4为文献报道的热历史磷光材料及其测温范围。热历史磷光涂层发展历史较短,最早是在2001年提出^[18]。早期的热历史磷光材料为无定形热历史磷光材料,如无定形YSZ:Er、无定形 Y_2SiO_5 :Tb等,一般采用溶胶-凝胶法制备。克莱门特阿德研究所研究团队^[22,47]采用溶胶-凝胶法分别制备了非晶态的YSZ:Er和完全结晶的YSZ:Eu,其中YSZ:Eu³⁺参比磷光材料,采用磷光寿命法实现了900~1100℃的温度测量,温度分辨率为2~5℃;并采用强度比法实现了900~1200℃的温度测量,温度分辨率

表3 常见热障/环境障传感涂层用热像磷光材料及其特征

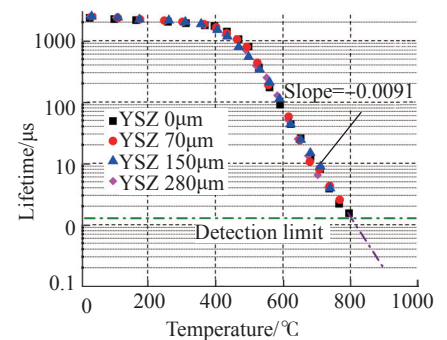
Table 3 Survey of thermographic phosphors employed for sensor TBCs/EBCs and their characteristics

热像磷光材料	特征
YSZ 基	YSZ:Eu ^[22, 28-30] 寿命法 测温范围: 400~1150℃ 测温精度: 0.5℃
	YSZ:Dy ^[31-33] 强度比法/寿命法 强度比法测温范围: 300~1200℃ 寿命法测温范围: 400~1100℃ 测温精度: 5℃
	YSZ:Er ^[10, 34] 寿命法 测温范围: 20~1200℃ 相对灵敏度: 20~800℃范围内为6.5%/°; 800~1100℃范围内为1.84%/°
	YSZ:Sm ^[34] 强度比法/寿命法 测温范围: 300~1100℃
	YSZ:Gd ^[9, 35] 寿命法 测温范围: 25~250℃
YAG 基	YAG:Dy ^[9-10, 36] 强度比法/寿命法 测温范围: 300~1700℃ 测温精度: 0.5℃
	YAG:Tb ^[9-10] 寿命法 测温范围: 550~1100℃ 测温精度: 5%
	YAG:Tm ^[36-38] 寿命法 测温范围: 100~1500℃ 测温精度: 5℃
	YAG:Sm ^[39] 强度比法 测温范围: 30~90℃ 相对灵敏度: 0.5%/°
	YAP/YAG:Dy ^[40] 强度比法 测温范围: 20~1020℃ 相对灵敏度: 0.25%/°
YAG:Eu ^[36-37] 寿命法 测温范围: 700~1200℃	
Ln ₂ Zr ₂ O ₇ 基	(Sm _{0.99} ,Eu _{0.01})Zr ₂ O ₇ ^[15] 寿命法 测温范围: 400~1000℃
	(Gd,Eu) ₂ Zr ₂ O ₇ ^[15] 寿命法 测温范围: 450~1200℃
	Eu ₂ Zr ₂ O ₇ ^[15] 寿命法 测温范围: 600~1200℃
Y ₂ SiO ₃ 基	Y ₂ SiO ₃ :Dy ^[35,41] 强度比法/寿命法 强度比法测温范围: 25~1400℃ 寿命法测温范围: 700~1200℃ 相对灵敏度: 0.89%/°
	Y ₂ SiO ₃ :Dy,Er ^[35] 强度比法 测温范围: 25~900℃ 相对灵敏度: 0.89%/°
	Y ₂ SiO ₃ :Eu ^[36] 寿命法 测温范围: 600~1200℃
	Y ₂ SiO ₃ :Ce ^[36] 寿命法 测温范围: 380~700℃
BSAS 基	BSAS:Eu ^[10] 寿命法 测温范围: 500~1000℃
	BSAS:Dy ^[10] 寿命法 测温范围: 1000~1400℃
	BSAS:Tb ^[10] 寿命法 测温范围: 500~1400℃
Y ₂ O ₃ 基	Y ₂ O ₃ :Eu ^[36] 寿命法 测温范围: 500~1200℃

为 1.5~4.8℃。目前,无定形热历史磷光材料基本可实现 300~1200℃的测温范围,但也存在一些缺陷如无法商业购买,且只能一次性使用。针对存在的缺陷, Rabhiou^[52]、Yáñez-González^[53-54]、González^[55] 等在 2013 年提出了非稳价态热历史磷光材料,如 BaMgAl₁₀O₁₇:Eu²⁺(BAM:Eu²⁺)和 SrAl₄O₂₅:Eu²⁺(SAE:Eu²⁺)等。非稳价态磷光材料是成熟的商业产品,且在使用后可通过还原处理进行重复利用,通过一次制备实现温度的反复测量。目前,该种磷光材料的测量温度已经达到 1300℃。本研究近期研究了非晶态 CeO₂:Eu 在不同温度煅烧后的磷光寿命如图 6 所示,可以看出,在 700~1300℃温度范围内,磷光寿命与温度呈现非常好的近线性关系,可作为热历史磷光材料实现服役温度高精度离线测量。



(a) 采用 APS 技术制备的含 YSZ:Eu 磷光层的热障涂层显微照片



(b) 磷光寿命-温度曲线

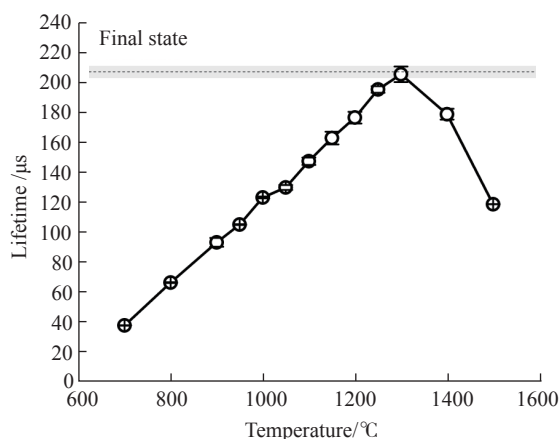
图5 APS YSZ:Eu磷光层的热障涂层显微照片与磷光寿命-温度曲线

Fig.5 Microstructures of APS TBCs with YSZ:Eu sensor coating and its phosphorescence lifetime-temperature curve

表4 常见热历史磷光材料

Table 4 Survey of thermal history sensor materials

热历史磷光材料	测温范围 /℃
YSZ:Er ³⁺ /YSZ:Eu ³⁺ [22,47]	900~1200
Y ₂ O ₃ :Eu ³⁺ , Tb ³⁺ [48]	700~1000
YAG:Ln [20]	400~900
YAG:Eu ³⁺ [21]	300~900
YAG:Dy ³⁺ [21]	300~900
YSZ/YAG:Dy [19]	800~900
Y ₂ SiO ₅ :Tb [19,25,49~50]	600~1000
GdAlO ₃ :Er ³⁺ , Yb ³⁺ [51]	1000~1300
BaMgAl ₁₀ O ₁₇ :Eu ²⁺ [52~55]	700~1300
BaMgAl ₁₀ O ₁₇ :Eu ²⁺ , Mn ²⁺ [52]	1000~1300
SrAl ₁₄ O ₂₅ :Eu ²⁺ /β[52]	600~1300
Zn ₃ (PO ₄) ₂ :Mn ²⁺ [56]	600~1000

图6 非晶态CeO₂:Eu磷光寿命-热处理温度曲线Fig.6 Phosphorescence lifetime-temperature curve of amorphous CeO₂:Eu

热历史磷光涂层一般采用两种方法制备:(1)将磷光粉末与高温黏结剂均匀混合,以涂料形式应用于表面温度测量^[19-20,22,26,48-49,54,57]; (2) APS技术^[19-21,57]。第1种方法较为常见。Feist等^[20]将无定形Eu基热历史磷光涂料与水基碱金属硅酸盐黏合剂混合后涂覆于基体表面,实现10~800℃温度测量,温度测量误差<0.3%;同时采用APS技术在钛瓦上制备了YAG:Ln涂层,实现了400~900℃温度测量,且温度误差通常<5℃,在450~900℃的温度范围内甚至<0.05℃^[50]。丝网印刷法是

制备热历史磷光涂层的新型方法,Yáñez-González等^[54]采用这种方法在Inconel 625高温合金基体表面制备了BAM:Eu²⁺热历史磷光涂层。

4 磷光温度测量在发动机中的应用

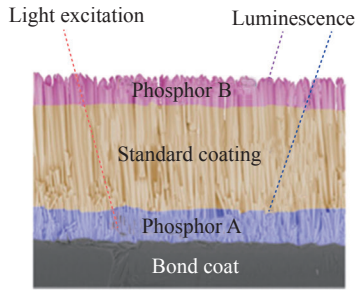
4.1 热障传感涂层在线温度测量

目前,热障传感涂层材料研究已经趋于成熟,但在实际航空发动机和燃气轮机中应用研究仍非常有限。英国帝国理工学院与南方热科学研究所^[8,58-59]、美国NASA Glenn研究中心^[11-13,60-64]是最早开

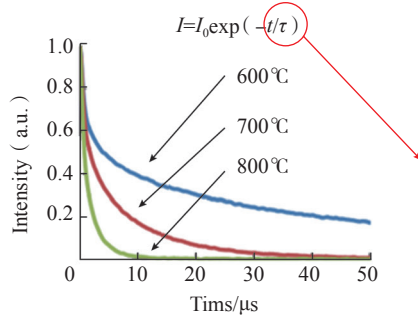
展应用研究的机构。2013年,南方热科学研究所开发了发动机温度在线监测系统^[58-59],随后与英国克兰菲尔德大学合作将热障传感涂层用于Rolls-Royce喷射发动机和英国Didcot发电机的燃气轮机上。同年,美国NASA Glenn研究中心的Eldridge等^[11]将YSZ:Eu应用于Honeywell TECH7000演示发动机HPT定子表面热障涂层中,测量温度高达1300℃。此外,他们将热障传感涂层应用于带气膜冷却的热障涂层温度测量^[61,63]和热障涂层的失效测试^[44,65]。目前,南方热科学研究所和NASA都已经初步实现了发动机实际工况下涡轮叶片表面热障涂层的温度测量^[5]。如图7所示,本研究近期采用EB-PVD技术制备了表层为Y₂O₃:Eu磷光层、界面处为YSZ:Dy磷光层、中间为YSZ陶瓷层的Sensor TBCs系统,采用磷光测量系统与磷光寿命-温度曲线,测试了样品在燃气冲击、热梯度环境下的表面与界面温度值,获得了EB-PVD YSZ陶瓷涂层的真实隔热效果为1.31μm/℃,此外,还测试了涡轮叶片表面瞬时温度分布。

4.2 热历史磷光涂层离线温度测量

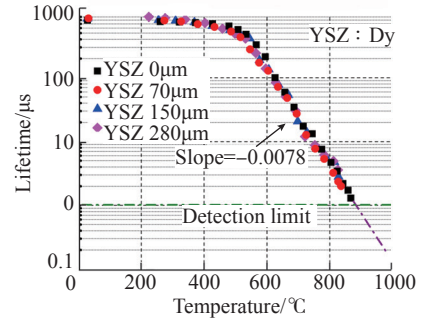
热历史磷光涂层研究起步较晚,理论体系尚未完善,目前仍然处于实验室研发阶段,仅英国传感涂层系统与帝国理工学院联合在航空发动机^[20,57]和燃气轮机燃烧室^[19,26,49]上开展了初步应用研究。如2014年,帝国理工学院、传感涂层系统和克兰菲尔德大学研究团队^[57]联合在Rolls-Royce Viper发动机的涡轮叶片上采用APS技术制备了热历史磷光涂层,并利用该涂层测试了在实际工况下的温度。同年,英国传感涂层系统公司^[20]将热历史磷光涂层应用于Rolls-Royce喷气发动机的燃烧室温度测量。2017年,他们与曼柴油与透平公司、德国航空航天中心合作将热历史磷光涂层在工业燃



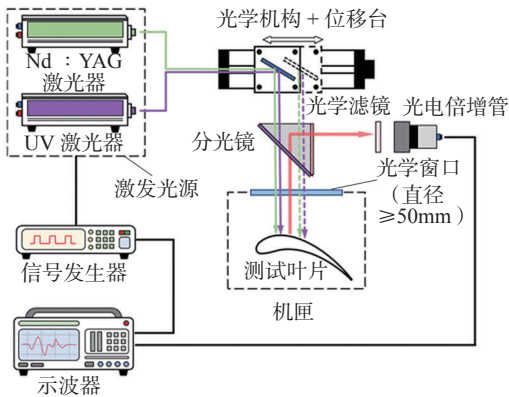
(a) 双磷光层 EB-PVD sensor TBCs 系统示意图



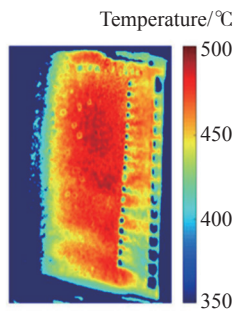
(b) 磷光衰减曲线



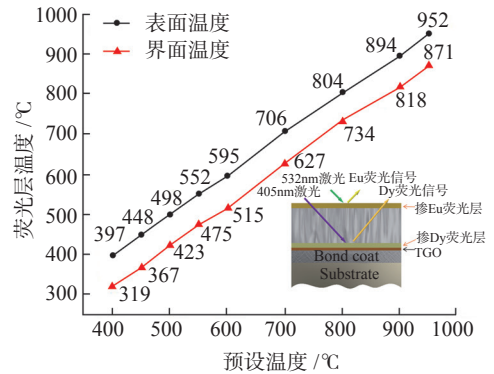
(c) 磷光寿命-温度关系



(d) 叶片磷光温度测量系统



(e) 叶片表面瞬时温度分布



(f) EB-PVD YSZ 涂层隔热效果

图7 EB-PVD热障涂层隔热效果与叶片表面瞬时温度分布的测量

Fig.7 Temperature measurements of thermal insulation effect of EB-PVD TBCs and instantaneous temperature distribution on surface of turbine blade

气轮机燃烧室上完成了测量技术验证^[26]。结果发现热历史磷光涂层表现出比传统测温技术更好的耐久性,可获得更加精细的局部温度变化和全场温度变化。尽管热历史磷光涂层在真实发动机条件下的测试数量非常有限,但依旧表现出了巨大的应用潜力。

5 结论

基于热障传感涂层的热障涂层在线测温技术与基于热历史磷光涂层的热障涂层离线测温技术具有各自的特点与不足,如在线温度测量技术可以实现在线、实时温度测量,可以监测温度变化,但需要光学接入,而热历史磷光涂层无须测量引线,操作简单,成本低,可大面积测量,但经常无法重复使用。与传统测温技术相比,两种测温技术具有明显优势,然

而目前两种技术发展尚不成熟,要使其成功应用于航空发动机与燃气轮机中,仍存在许多有待解决的问题。

(1) 对于热障传感涂层在线测温技术,需开发高温下仍具有较强磷光强度、较长磷光寿命且高温稳定的热像磷光材料,如通过敏化提高发光效率等,以提高测量温度;改进测量方法与测量系统,以提高磷光信号收集效率,如通过时间相关单光子技术等;研发易实现光学接入的磷光测量系统,以克服现阶段实际应用中面临的接入困难的挑战,并降低成本;研究磷光材料对周围气相成分与压力的敏感性,为保证可靠的测温,必须选择只对温度敏感的磷光材料。

(2) 对于热历史磷光涂层离线测温技术,需开发能够在应用环境下(如发动机中)重复利用且不影响热

障涂层寿命的新型热历史磷光材料,以实现温度变化的监测和在实际航空发动机与燃气轮机中的应用;研究热处理时间与升温速率等参数对测温精度的影响,建立能准确描述热处理参数与磷光信号关系模型,从而提高测量重复性与精度;目前研究的热历史磷光涂层最高可测温度为1300°C,需进一步探索提升测量温度范围方法,开发新型热历史磷光离线测温原理与方法。

参考文献

- [1] 刘纯波, 林锋, 蒋显亮. 热障涂层的研究现状与发展趋势[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(1): 1-13.
LIU Chunbo, LIN Feng, JIANG Xianliang. Current state and future development of thermal barrier coating[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(1): 1-13.
- [2] KONTIS K. A review of some

current research on pressure sensitive paint and thermographic phosphor techniques[J]. The Aeronautical Journal, 2007, 111(1122): 495–508.

[3] KHALID A H, KONTIS K. Thermographic phosphors for high temperature measurements: Principles, current state of the art and recent applications[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2008, 8(9): 5673–5744.

[4] 王志平, 许婧, 刘延宽. 热障涂层荧光测温法的现状与发展研究[J]. 热加工工艺, 2021(50): 6–13.

WANG Zhiping, XU Jing, LIU Yankuan. Research on current status and development of fluorescence thermometry for thermal barrier coatings[J]. Hot Working Technology, 2021(50): 6–13.

[5] 蔡涛, 赵晓峰, 刘应征, 等. 基于磷光光学特性的高温热力参数非接触测量技术研究[J]. 中国材料进展, 2019(39): 728–738.

CAI Tao, ZHAO Xiaofeng, LIU Yingzheng, et al. Study of phosphorescence-based non-contact measurement technology for thermomechanical parameters in high temperature environment[J]. Materials China, 2019(39): 728–738.

[6] CHOY K L, HEYES A L, FEIST J P. Thermal barrier coating with thermoluminescent indicator material embedded therein: US8173266[P]. 2012–05–08.

[7] SKINNER S J, FEIST J P, BROOKS I J E, et al. YAG: YSZ composites as potential thermographic phosphors for high temperature sensor applications[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2009, 136(1): 52–59.

[8] FEIST J P, HEYES A L. Photo-stimulated phosphorescence for thermal condition monitoring and nondestructive evaluation in thermal barrier coatings[J]. Heat Transfer Engineering, 2009, 30(13): 1087–1095.

[9] STEENBAKKER R. Phosphor thermometry in an EB-PVD TBC[D]. Cranfield: University of Cranfield, 2008.

[10] CHAMBERS M D, CLARKE D R. Doped oxides for high-temperature luminescence and lifetime thermometry[J]. Annual Review of Materials Research, 2009, 39(1): 325–359.

[11] ELDRIDGE J I. Luminescence-based diagnostics of thermal barrier coating health and

performance[C]// 37th International Conference on Advanced Ceramics & Composites. Daytona Beach, 2013.

[12] ELDRIDGE J I. Optical diagnostics for high-temperature thermal barrier coatings[R]. San Francisco: NASA Glenn Research Center, 2009.

[13] GENTLEMAN M M, ELDRIDGE J I, ZHU D M, et al. Non-contact sensing of TBC/BC interface temperature in a thermal gradient[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(7): 3937–3941.

[14] ELDRIDGE J I, BENCIC T J, ALLISON S W, et al. Depth-penetrating temperature measurements of thermal barrier coatings incorporating thermographic phosphors[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2004, 13(1): 44–50.

[15] GENTLEMAN M M. High temperature sensing of thermal barrier materials by luminescence[D]. Santa Barbara: University of California, 2006.

[16] YANG L X, PENG D, ZHAO C S, et al. Evaluation of the in-depth temperature sensing performance of Eu- and Dy-doped YSZ in air plasma sprayed thermal barrier coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 316: 210–218.

[17] YANG L X, ZHONG B F, KOU Z D, et al. Concentration effect on oxygen quenching behavior of $\text{Eu}_x\text{Y}_{0.08-x}\text{Zr}_{0.92}\text{O}_{1.96}$ and $\text{Dy}_x\text{Y}_{0.08-x}\text{Zr}_{0.92}\text{O}_{1.96}$ phosphors[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2022, 105(1): 428–440.

[18] FEIST J P, NICHOLLS J R, HEYES A L. Determining thermal history of components: US8746969[P]. 2014–06–10.

[19] HEYES A L, RABHIOU A, FEIST J P, et al. Thermal history sensing with thermographic phosphors[J]. Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry, Volume 8: Proceedings of the 9th International Temperature Symposium, 2013 (1552): 891–896.

[20] FEIST J P, KARMAKAR BISWAS S, PILGRIM C C, et al. Off-line temperature profiling utilizing phosphorescent thermal history paints and coatings[J]. Journal of Turbomachinery, 2015, 137(10): 4030259.

[21] PILGRIM C C, HEYES A L, FEIST J P. Thermal history sensors for non-

destructive temperature measurements in harsh environments[C]//The 9th International Temperature Symposium. Los Angeles, 2014.

[22] AMIEL S, COPIN E, SENTENAC T, et al. On the thermal sensitivity and resolution of a YSZ: Er^{3+} /YSZ fluorescent thermal history sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 272: 42–52.

[23] SHEN Y, CLARKE D R. Effects of reducing atmosphere on the luminescence of Eu^{3+} -doped yttria-stabilized zirconia sensor layers in thermal barrier coatings[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2009, 92(1): 125–129.

[24] PENG D, LIU Y Z. A grid-pattern PSP/TSP system for simultaneous pressure and temperature measurements[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 222: 141–150.

[25] RABHIOU A, FEIST J, KEMPF A, et al. Concept for a phosphorescent thermal history sensor[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air. Glasgow, 2010.

[26] KREWINKEL R, FÄRBER J, ORTH U, et al. Validation of surface temperature measurements on a combustor liner under full-load conditions using a novel thermal history paint[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2017, 139(4): 4034724.

[27] CAO X Q, VASSEN R, STOEVER D. Ceramic materials for thermal barrier coatings[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2004, 24(1): 1–10.

[28] FEIST J P, HEYES A L. Europium-doped yttria-stabilized zirconia for high-temperature phosphor thermometry[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2000, 214(1): 7–12.

[29] CHOY K L, MEI J, FEIST J P, et al. Microstructure and thermoluminescent properties of ESAVD produced Eu doped Y_2O_3 - ZrO_2 coatings[J]. Surface Engineering, 2000 (16): 469–472.

[30] GENTLEMAN M M, CLARKE D R. Luminescence sensing of temperature in pyrochlore zirconate materials for thermal barrier coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 200(5–6): 1264–1269.

- [31] FEIST J P, HEYES A L, NICHOLLS J R. Phosphor thermometry in an electron beam physical vapour deposition produced thermal barrier coating doped with dysprosium[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2001, 215(6): 333–341.
- [32] ABOU NADA F, LANTZ A, LARFELDT J, et al. Remote temperature sensing on and beneath atmospheric plasma sprayed thermal barrier coatings using thermographic phosphors[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 302: 359–367.
- [33] HEYES A L, SEEFELDT S, FEIST J P. Two-colour phosphor thermometry for surface temperature measurement[J]. Optics & Laser Technology, 2006, 38(4–6): 257–265.
- [34] SHEN Y, CHAMBERS M D, CLARKE D R. Effects of dopants and excitation wavelength on the temperature sensing of Ln^{3+} -doped 7YSZ[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 203(5–7): 456–460.
- [35] 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.
- [36] HERTLE E, CHEPYGA L, BATENTSCHUK M, et al. Temperature-dependent luminescence characteristics of Dy^{3+} doped in various crystalline hosts[J]. Journal of Luminescence, 2018, 204: 64–74.
- [37] FEIST J P, NICHOLLS J R, FRASER M J, et al. Luminescent material compositions and structures incorporating the same: US9045830[P]. 2015–06–02.
- [38] 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]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(12): 125205.
- [39] ZHU K S, ZHOU H L, QIU J R, et al. Optical temperature sensing characteristics of Sm^{3+} doped YAG single crystal fiber based on luminescence emission[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 890: 161844.
- [40] CHEPYGA L M, OSVET A, BRABEC C J, et al. High-temperature thermographic phosphor mixture YAP/YAG: Dy^{3+} and its photoluminescence properties[J]. Journal of Luminescence, 2017, 188: 582–588.
- [41] CHEPYGA L M, HERTLE E, ALI A, et al. Synthesis and photoluminescent properties of the Dy^{3+} doped YSO as a high-temperature thermographic phosphor[J]. Journal of Luminescence, 2018, 197: 23–30.
- [42] CLARKE D R. Embedded optical sensors for thermal barrier coatings[R]: California: The Regents of the University of California, 2006.
- [43] 牟仁德, 何利民, 陆峰, 等. 热障涂层制备技术研究进展[J]. 机械工程材料, 2007, 31(5): 1–4.
- MU Rende, HE Limin, LU Feng, et al. Development in research on TBC deposition technologies[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2007, 31(5): 1–4.
- [44] ELDRIDGE J I, WOLFE D E. Monitoring thermal barrier coating delamination progression by upconversion luminescence imaging[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 378: 124923.
- [45] FEIST J P, HEYES A L. Europium-doped yttria-stabilized zirconia for high-temperature phosphor thermometry[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2000, 214(1): 7–12.
- [46] CHEN X, MUTASIM Z, PRICE J, et al. Industrial sensor TBCs: Studies on temperature detection and durability[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2005, 2(5): 414–421.
- [47] COPIN E B, MASSOL X, AMIEL S, et al. Novel erbia-yttria co-doped zirconia fluorescent thermal history sensor[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(1): 015001.
- [48] STENDERS D, ATAKAN B, KARADAGLI I, et al. Sol-gel deposited thermographic phosphors as possible thermal history coatings[C]//IET & ISA 60th International Instrumentation Symposium 2014. London: Institution of Engineering and Technology, 2014.
- [49] HEYES A L, RABHIOU A, FEIST J P, et al. Phosphor based temperature indicating paints[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition. Copenhagen, 2013.
- [50] RABHIOU A, FEIST J, KEMPF A, et al. Phosphorescent thermal history sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 169(1): 18–26.
- [51] DENG T L, YAN S R, HU J G. Effect of calcination temperature on up-conversion photoluminescence of the GdAlO_3 : Er^{3+} , Yb^{3+} Phosphor[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2014, 4(3): 48–53.
- [52] RABHIOU A, KEMPF A, HEYES A. Oxidation of divalent rare earth phosphors for thermal history sensing[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2013, 177: 124–130.
- [53] YÁÑEZ-GONZÁLEZ Á, RUIZ-TREJO E, VAN WACHEM B, et al. A detailed characterization of $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}$: Eu phosphor as a thermal history sensor for harsh environments[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 234: 339–345.
- [54] YÁÑEZ-GONZÁLEZ Á, RUIZ-TREJO E, VAN WACHEM B, et al. Development of an optical thermal history coating sensor based on the oxidation of a divalent rare earth ion phosphor[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(11): 115103.
- [55] GONZÁLEZ Á Y, SKINNER S, BEYRAU F, et al. Reusable thermal history sensing via oxidation of a divalent rare earth ion-based phosphor synthesized by the sol-gel process[J]. Heat Transfer Engineering, 2015, 36(14–15): 1275–1281.
- [56] SALEK G, DEMOURGUES A, JUBERA V, et al. Mn^{2+} doped $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ phosphors: Irreversible thermochromic materials useful as thermal sensors[J]. Optical Materials, 2015, 47: 323–327.
- [57] PILGRIM C, FEIST J, BISWAS S, et al. Temperature memory coatings for short and long term applications in gas turbines[C]//The Future of Gas Turbine Technology 7th International Gas Turbine Conference. Brussels Belgium, 2014.
- [58] SOLLAZZO P Y, FEIST J P, BERTHIER S, et al. Application of a production line phosphorescence sensor coating system on a jet engine for surface temperature detection[C]//

The 9th International Temperature Symposium. Los Angeles, 2013.

[59] FEIST J P, SOLLAZZO P Y, BERTHIER S, et al. Application of an industrial sensor coating system on a Rolls-Royce jet engine for temperature detection[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2013, 135(1): 4007370.

[60] 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.

[61] ELDRIDGE J I, SHYAM V,

WROBLEWSKI A C, et al. Temperature mapping of air film-cooled thermal barrier coated surfaces using Cr-doped GdAlO₃ phosphor thermography[R]. San Francisco: NASA Glenn Research Center, 2016.

[62] ELDRIDGE J I, JENKINS T P, ALLISON S W, et al. Real-time thermographic-phosphor-based temperature measurements of thermal barrier coating surfaces subjected to a high-velocity combustor burner environment[R]. San Francisco: NASA Glenn Research Center, 2011.

[63] ELDRIDGE J I, WROBLEWSKI A C, ZHU D, et al. Temperature mapping above and below air film-cooled thermal barrier

coatings using phosphor thermometry[C]. *Thermal Barrier Coatings V*. Irsee, 2018.

[64] ELDRIDGE J I. Temperature mapping of air film-cooled thermal barrier coated surfaces using phosphor thermometry[R]. San Francisco: NASA Glenn Research Center, 2016.

[65] ELDRIDGE J I, SINGH J, WOLFE D E. Erosion-indicating thermal barrier coatings using luminescent sublayers[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2006, 89(10): 3252-3254.

通讯作者：赵晓峰，教授，博士，研究方向为航空发动机与燃气轮机热障涂层。

Research Progress of On-Line/Off-Line Phosphor Thermometry Technology for Thermal Barrier Coatings

YANG Lixia¹, FU Yating¹, ZHAO Xiaofeng², CHEN Zhaofeng¹, PENG Di², MU Rende³, LIU Delin³

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China ;

3. AECC Beijing Institute of Aeronautic Material, Beijing 100095, China)

[ABSTRACT] Accurate temperature monitoring in thermal barrier coatings on turbine blades is of paramount importance for the design and development of aero-engines and gas turbines. Recently, a new on-line temperature measurement technology using thermal barrier sensor coatings and a new off-line temperature measurement technology using thermal history sensor coatings based on temperature-dependent phosphorescence properties of thermographic phosphors are both developed rapidly. The former obtains the real-time temperature by on-line measuring the phosphorescent signal, and the later obtains the exposure temperature by off-line measuring the irreversible changes in the phosphorescence properties after operation. Both of these technologies are suitable for non-interference, non-contact, high-precision temperature measurement of thermal barrier coatings under high temperature and high corrosion environments, and have broad application prospects. According to the introduction of the principles and methods of on-line/off-line temperature measurement in thermal barrier coatings, thermal barrier sensor and thermal history sensor materials and preparation, their applications in aero-engines and gas turbines, the research status and technical characteristics of on-line/off-line temperature measurement technology of thermal barrier coatings are described in detail. Finally, the development of the two technologies is also prospected.

Keywords: Thermal barrier coatings (TBCs); On-line/off-line temperature measurement; Phosphorescence; Rare earth ions; Thermal barrier sensor coatings; Thermal history sensor (THS)

(责编 古豪)