

## 双色热敏磷光涂层测温技术

王 晟, 胡志云, 邵 珺, 张振荣, 叶景峰, 李国华

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

**摘 要:** 空气动力表面温度和压力分布的精确测量对理解复杂流场内部机制和流体力学仿真模型的验证具有重要意义。热敏磷光表面测温技术作为一种非接触测量、可对试件全尺度测量、空间分辨率高等优点。开发了一种室温到 800 K 温度范围内的双色热敏磷光涂层材料。该发光材料受激辐射的发光光谱的两个发射峰光强在不同温度下呈现不同的衰减趋势, 根据这种规律发展了双色测温技术。建立了热敏涂料温度标定系统, 获得了双峰光强比与温度的变化曲线。采用双色法测温技术测量了旋转曲面物体表面的温度分布。结果表明, 双色热敏磷光涂层测温技术能够实现物体表面温度的定量测量, 对于测试技术的发展具有重要推动作用。

**关键词:** 发光光谱; 热敏磷光涂层; 测温; 双色法

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)05-1406-05

## Two-color thermally sensitive phosphor coatings for temperature measurement

Wang Sheng, Hu Zhiyun, Shao Jun, Zhang Zhenrong, Ye Jingfeng, Li Guohua

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** The accurate determination of spatially continuous temperature and pressure distribution on aerodynamic surfaces is critical for the understanding of complex flow mechanisms and for comparison with computational fluid dynamics predictions. Thermally sensitive phosphor coatings provide a way to obtain simple, inexpensive, full-field measurements of temperature with much higher spatial resolution. A new sort of two-color thermally sensitive phosphor coating was developed, which could be used to measure surface temperature between room temperature and 800 K. The various spectral regions in emission differ with temperature, which could be used to support the two-color temperature measurement method. The temperature calibration system was set up, and the intensity-ratio change curve as a function of temperature was obtained. The temperature distribution of curved surface was measured by two-color temperature measurement method. The results show that the two-color temperature measurement method has the ability of surface field temperature quantitative measurement.

**Key words:** emission spectrum; thermally sensitive phosphor coatings; temperature measurement; two-color method

收稿日期: 2013-09-15; 修订日期: 2013-10-25

基金项目: 国家重点实验室基金(SKL111108)

作者简介: 王晟(1977-), 工程师, 硕士, 主要从事燃烧诊断方面的研究工作。Email: pplunum1@163.com

## 0 引言

随着材料科学的迅速发展,出现了众多的特种功能涂料。功能涂料已经从传统的保护、装饰作用发展为具有阻尼减震、隐身、发光、耐高温、防火阻燃、防滑等特殊功能。其中,利用发光涂料的发光淬灭特性制成的温度敏感涂层,可以喷涂到模型表面,依靠分子发光淬灭原理来测量表面温度分布,这种新型的表面传感技术称为温度敏感涂层(TSP)<sup>[1]</sup>。这种技术作为一种非接触测量技术,具有使用简单、可重复使用、非接触测量、可对试件全尺度测量、空间分辨率高等优点。

在众多的发光涂层材料中,以稀土离子为发光体的磷光发光材料,由于其发光强度高、耐高温、良好的物理和化学稳定性,近年来受到了广泛的关注,在宇航领域也获得了重要的应用,这种技术又称为热敏磷光表面测温技术。该技术在光物理基础上与 TSP 方法有相似之处,不同的是,热敏磷光材料发光寿命更长、温度敏感范围更宽。

1953 年,Bradly 首次采用热敏磷光涂层测量表面温度<sup>[2]</sup>。Czys 和 Dixon 于 1969 年将之用于高速风洞测试<sup>[3]</sup>。1985 年,Noel 开始采用热敏磷光涂层测量涡轮发动机的表面温度<sup>[4]</sup>。20 世纪 90 年代后,热敏磷光表面测温技术在国外迅速发展。美国(NASA)<sup>[5-7]</sup>、瑞典(隆德大学燃烧物理中心)、英国(诺丁汉-特伦特大学)等都对这项技术进行了研究,并应用于风洞流场测试研究。热敏磷光表面测温技术作为 NASA-Langly 中心气动热设备的基本定量测试手段,为航天飞机、再入弹头、运载器等的研制做出了贡献。

热敏磷光表面测温技术在国内刚刚起步,中国航天空气动力技术研究院与中国科学院长春应用化学研究所合作,开发了单色磷光材料,采用参考光强法,测量了高超声速压缩拐角的热流分布。相关研究有,山东大学与英国布鲁内尔大学合作,将激光诱导磷光测温技术应用到发动机缸内气体的二维温度测量中<sup>[8]</sup>。西北核技术研究所从 1996 年开始激光燃烧诊断方面的工作,并建立了较为完备的激光燃烧诊断实验系统,经过 10 年的努力,已在稳态燃烧场、火炸药瞬态复杂燃烧场、航空发动机燃烧流场等方面

开展了 CARS、HTV、SVRS、TDLAS、PLIF、FRS 等实验技术研究,并实现了燃烧场温度、速度、组分浓度等参量的高时空分辨测量<sup>[9]</sup>。近年来,开始了热敏磷光涂层测温技术研究,成功开发了一种双色热敏磷光材料,其测温范围从室温到 800 K。

## 1 测温原理

发光材料在受到激励光照射时,根据能级跃迁的不同,可出现荧光或磷光两种发光现象,并且发光过程会因为氧化淬灭和热力淬灭效应而衰减,受氧化淬灭效应影响大的发光材料可用于压力测量,而受热力淬灭影响大的发光材料用于温度测量。使用时,将发光涂料喷涂或刷到试件表面,当溶剂挥发后,发光材料就嵌入到聚合物基体中。采用短波激光直接照射试件表面,辐射出长波光,如图 1 所示。辐射光的发光光强、发光光谱或发光寿命会随着温度发生变化。通过滤光片将激励光和辐射光分离,采用光电探测器记录这种变化,就能从中提取出温度信息。

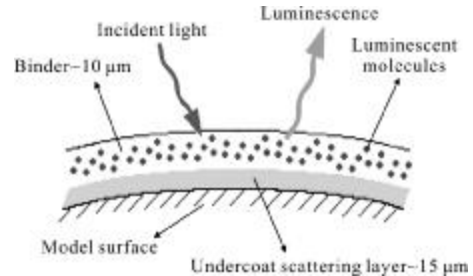


图 1 热敏磷光涂层结构示意图

Fig.1 Schematic of thermally sensitive phosphor coatings

如何从辐射光中提取温度信息,存在不同的测温方法。一种是根据热敏涂料在不同温度下发光强度的强弱来判断温度的高低。这种方法一般采用参考光强的方法测量物体表面温度,需要实验前获得已知温度时的涂层表面参考发光图像,然后再测量实验状态时的涂层表面发光图像,通过两幅图像光强比获得物体表面温度信息。但如果在这期间物体移动或变形时,就会引起测量图像与参考光强图像的对应位置出现偏差,从而导致最终结果出现误差。

近来发展的发光光谱法测温方法,可以克服这方面的缺点。发光光谱测温方法是利用某些热敏涂料发光光谱的多峰结构光强随温度变化出现不同变

化趋势而发展起来的一种测温方法。这种测温方法事先标定出热敏涂料发光光谱的两个发射峰发光强度比与温度的关系曲线，测量时分别记录两个发光峰所在波段的发光图像，如图 2 所示，通过比较这两个波段发光图像的光强比与标定曲线插值来获得物体表面温度，称为双色法测温。

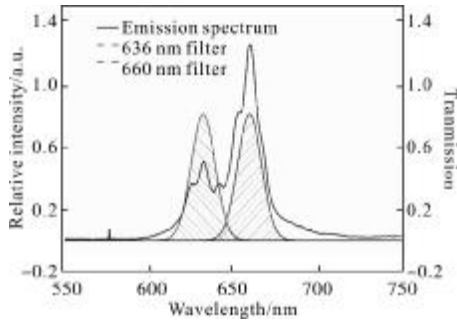


图 2 双色热敏涂料的发光光谱

Fig.2 Emission spectrum of a two-color thermally sensitive phosphor coating

### 2 双色热敏涂料的温度标定

热敏涂料温度标定系统如图 3 所示。采用 254 nm、365 nm 双波长紫外线灯作为激光源，maya2000 光

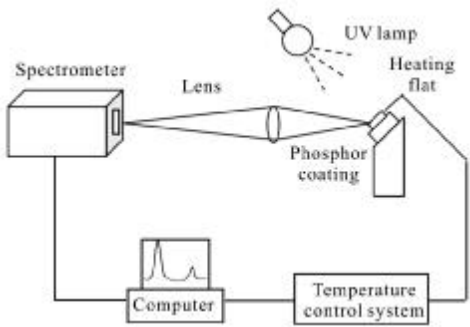


图 3 温度标定系统示意图

Fig.3 Schematic of temperature calibration system

纤光谱仪测量发光光谱，其光谱范围为 300~1100 nm。加热板可在常温到 1100 K 之间控制加热温度。实验时，254 nm 紫外激光照射到加热板上的热敏涂料，热敏涂料受到激发后辐射发光，采用透镜组接收辐射光，通过光纤传输进入光纤光谱仪，光谱曲线最后由计算机分析处理。实验采用的双色热敏磷光材料双峰发射光强比与温度的关系曲线如图 4 所示。从图中曲线可以看出，测温曲线近似双曲形式，常温到约 500 K 曲线下降较快，其光强比对温度更敏感，500 K 后，曲线下降较缓，温度敏感性稍差，到 800 K

左右，热敏涂料发光较弱，背景辐射干扰较大，已无法分辨磷光信号，因此该涂料的测温范围为常温到 800 K 左右，其测温精度取决于探测器的动态范围，理论上可到 0.001 K 以下。

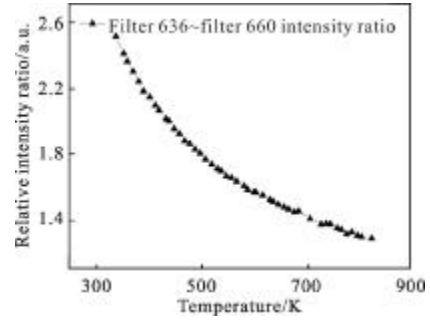


图 4 双峰强度比与温度关系曲线

Fig.4 Intensity-ratio change curve as a function of temperature

### 3 测温实验

发动机叶片表面温度的测量对于分析发动机性能具有重要意义，同时也是测量难点。采用热敏涂层可以解决这一难题，但采用单色热敏涂层时，旋转时叶片位置变化会导致测量发光图像与初始参考图像空间位置适配，给数据处理带来困难，增加了测量误差。而双色法测温由于同时记录两个发射峰的发光图像，对叶片的旋转位置不敏感，不存在这方面的问题。为了验证双色法测温的优势，设计了图 5 所示的旋转曲面物体测温实验光路。在台式电钻上固定一个螺旋桨形状物体，采用高压喷涂的方式在螺旋桨曲面上附着了双色热敏涂料。螺旋桨底部放置一个加热源，加热螺旋桨叶片表面。在紫外连续灯照射下，螺旋桨表面的涂层发光颜色会因为温度不同而存在差异。安装有立体镜头的 ICCD 相机用于接收视角稍有不同的两路发光图像，这两路光路通过中心波长不同的滤光片分别接

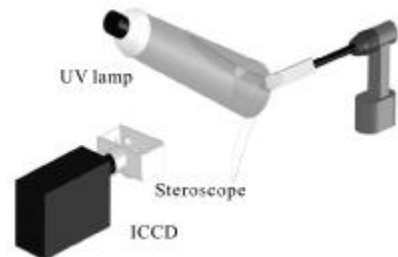


图 5 旋转曲面物体测温验证实验示意图

Fig.5 Schematic of the rotating object surface temperature measurement system

收两个发射峰的发光图像, 测量的典型瞬时发光图像如图 6 所示。图中色彩为伪彩色, 色彩的亮度代表发光强度的高低。

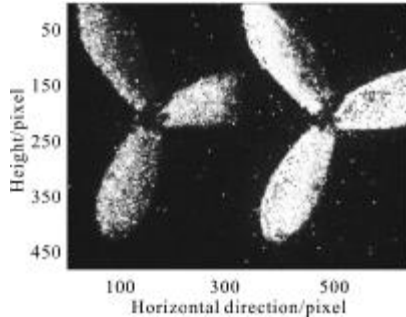


图 6 测量的典型瞬时图像

Fig.6 Typical luminescence image

选取图 7 所示的区域, 根据涂层表面标记点的坐标, 采用仿射变换对左右图像进行空间位置匹配,

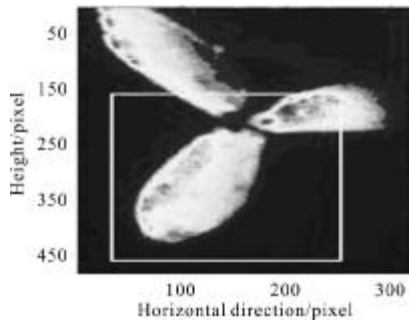


图 7 旋转测量图像温度处理区域

Fig.7 Processing region of luminescence image

并求得图像相应位置的光强比图像, 与图 4 所示曲线线性插值计算获得对应的温度分布, 结果如图 8 所示。从图上可以看出, 右上方螺旋桨叶片温度较高, 最下面叶片温度相对较低, 与实验加热右上方叶片的情况相符。

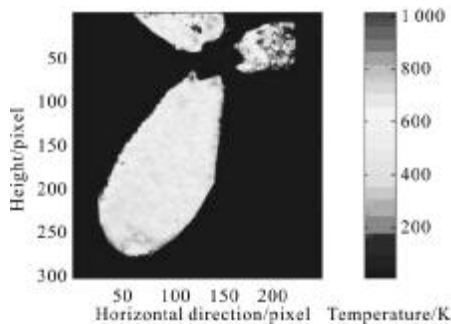


图 8 获得的典型温度计算结果

Fig.8 Typical temperature measurement result

## 4 结 论

开发了一种室温到 800 K 温度范围内的双色热敏磷光涂层材料。该热敏涂料在受到紫外光照射后, 辐射光中存在两个发射峰, 这两个发射峰的发光光强会随着温度变化呈现不同的衰减趋势。根据这种变化规律, 发展了双色测温技术。建立了测温标定系统, 并获得了双峰光强比与温度的变化曲线。采用双色法测温技术测量了旋转曲面物体表面的温度分布。结果表明, 双色热敏磷光涂层测温技术能够实现物体表面温度的定量测量, 对推动测试技术的发展具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] Campbell B T, Liu T, Sullivan J P. Temperature sensitive fluorescent paint systems [C]//18th AIAA Aerospace Ground Testing Conference. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA 94-2483, 1994.
- [2] Bradley L C. Temperature sensitive phosphor used to measure surface temperature in aerodynamics [J]. Rev Sci Instrum, 1953, 24(3): 219-220.
- [3] Czysz P, Dixon W P. Quantitative heat transfer measurement using thermographic phosphor[J]. Opt Eng, 1969, 7(3): 070377.
- [4] Noel B W, Borella H M. A proposed method for remote thermometry in turbine engines[C]//AIAA/SAE/ASME/ASCE 21st Joint Propulsion Conference. New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA: 85-1468, 1985.
- [5] Richard A T, Harris H H, Scott A B, et al. Hypersonic boundary layer transition for X-33 PHASE II vehicle[C]//36th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA 98-0867, 1998.
- [6] Horvath T J, Berry S A, Hollis B R, et al. X-33 experimental aero-heating at Mach 6 using phosphor thermography [C]//33rd Thermophysics conference. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA 99-3558, 1999.
- [7] Berry S A, Nowak R J, Horvath T J, et al. Boundary layer control for hypersonic airbreathing vehicles [C]//34th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA 2004-2246, 2004.

- [8] Bai Shuzhan, Hua Zhao, Li Guoxiang. Combustion temperature measurement in engine using laser -induced phosphorescence thermometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 617-621. (in Chinese)  
白书战, Hua Zhao, 李国祥. 基于激光诱导磷光测试技术的发动机缸内燃烧温度测试 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 617-621.
- [9] Liu Jingru, Hu Zhiyun, Zhang Zhenrong, et al. Laser spectroscopy applied to combustion diagnostics[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(2): 284-296. (in Chinese)  
刘晶儒, 胡志云, 张振荣, 等. 激光光谱技术在燃烧流场诊断中的应用[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(2): 284-296.