

文章编号:1002-2082(2015)02-0272-05

# IRS400 型材料发射率测试装置的研制

王学新,岳文龙,杨鸿儒,谢 毅

(西安应用光学研究所 国防科技工业光学一级计量站,陕西 西安 710065)

**摘 要:**为了准确评估红外材料和涂层的隐身性能,研制了一套 IRS400 型材料发射率测试装置,主要用于温度范围(50~400)℃,光谱范围(3~5)μm 和(8~12)μm 的固体不透明材料和涂层定向发射率测量。给出 IRS400 型材料发射率测试装置的技术指标,阐述其工作原理,IRS400 的光学系统采用全反射式设计,探测器选用钽酸锂热释电探测器,采用“50℃~1 000℃黑体辐射源标准装置”对黑体发射率 $\epsilon_B(\lambda_1, \lambda_2)$ 进行标定。通过解决标定和环境温度补偿等关键技术,确保发射率测量不确定度小于 2%( $k=2$ )。

**关键词:**红外隐身;材料发射率;测试方法;测试装备

中图分类号:TN216

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201536.0203006

## Development of measurement equipment for IRS400 type material emissivity

Wang Xuexin, Yue Wenlong, Yang Hongru, Xie Yi

(Primary Optical Metrology Station of Science Technology and Industry for National Defense, Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to accurately evaluate the stealth performance of infrared materials and coating, the IRS400 type material emissivity measurement equipment was developed. It is mainly used in the temperature range of 50℃~400℃, spectrum range of 3 μm~5 μm and 8 μm~12 μm directional measurement for the emissivity of solid opaque material and coating sample. The importance of the material emissivity measurement for infrared stealth technology was introduced, the IRS400 type emissivity measurement equipment was described, including the technology performance and working principle. The IRS400 optic system adopted total reflection design, the detector selected the LiTaO<sub>3</sub> pyroelectric detector, and the 50℃~1 000℃ black body radiation source standard device was utilized to calibrate the black body emissivity  $\epsilon_B(\lambda_1, \lambda_2)$ . By solving the key technology of calibration and environmental temperature compensation, the emissivity measurement uncertainty can be ensured less than 2%.

**Key words:** infrared stealth; material emissivity; measurement method; test equipment

## 引言

材料发射率在军事上主要应用于红外隐身技术方面。隐身技术是军事目标的主动防护技术,包括雷达隐身和红外隐身。雷达隐身技术主要用于减少目标自身雷达波的反射信号,红外隐身是

降低自身的红外辐射信号,从而达到隐身的目的,红外隐射与探测能力有关,探测能力越强,隐身所需要的距离越长。目前,隐身应用最广泛的是飞机,美国的 F-22 和 F-35,俄罗斯的米格 1.14 都采用了隐身技术。

收稿日期:2014-09-19; 修回日期:2014-12-07

作者简介:王学新(1972—),男,陕西大荔人,博士,高级工程师,主要从事光学设计和光学计量方面的研究。

E-mail:wxw205.163.com

随着红外探测技术发展而发展起来的,具有高精度、高灵敏度的红外光电武器系统如红外制导引头、军用红外热像仪等,使得武器精确打击能力越来越强,为了降低被对方光电武器系统识别的概率,或先于发现对方,目前世界上许多国家都在研究红外隐身技术,采用各种方法和途径降低军事目标自身的红外辐射,降低被敌方红外光电武器系统识别的概率,提高生存能力。

降低自身的红外辐射是一种非常有效的红外隐身手段。物体的红外辐射主要由其材料表面的温度和发射率决定,材料发射率越小,其发射的红外辐射越弱,降低军事目标表面材料的发射率可有效地减小自身的红外辐射,从而达到军事目标的红外隐身。因此需要开展材料和涂层发射率测量和校准技术研究,从而评估其红外隐身性能。

国防科工局光学计量一级站成功地研制了 IRS400 型材料发射率测试装置,主要用于各种材料表面的法向发射率测试,可实现  $\pm 70^\circ$  范围内方向发射率测量,该测试装置测量温度范围为  $(50\sim 400)^\circ\text{C}$ ,光谱范围为  $(3\sim 5)\mu\text{m}$  和  $(8\sim 12)\mu\text{m}$ ,发射率测量范围为  $0.2\sim 0.99$ ,测量不确定度为  $2\%(k=2)$ 。

## 1 测试原理

任何物体或者材料的表面都具有发射辐射的能力,该辐射能力用发射率来表示。发射率定义为材料的辐射量与相同温度下的普朗克辐射体的相应辐射量之比,是体现物体红外辐射特性最重

要的技术指标。物体的发射率主要由其表面材料、涂层或漆层决定,材料发射率越高,向外发射的辐射就越强。

发射率分为定向发射率和半球发射率。定向发射率是某个小的立体角的发射率,半球发射率半球空间的发射率。使用目的不同,选择发射率评价的参数不同,在工业辐射加热方面,加热材料半球空间都产生热辐射,关心的参数为半球发射率,主要用于评估材料的加热效率;在红外隐身方面,光电武器系统主要用于远距离观察和打击,一般距离目标较远,目标相对于光学探测系统立体角较小,因而关心的是目标的定向发射率。

红外光电武器系统大都工作在  $(1\sim 3)\mu\text{m}$ 、 $(3\sim 5)\mu\text{m}$  和  $(8\sim 12)\mu\text{m}$  3 个波段,该波段大气对红辐射衰减较少,有利于对红外目标的探测,因而材料发射率测试仪器一般也主要针对这 3 个波段的发射率值进行测试和评估。材料发射率随自身温度的变化而有所变化,因而材料发射率的测试,是相对于某个温度而言。

IRS400 型材料发射率测试装置主要用于测量  $(3\sim 5)\mu\text{m}$  和  $(8\sim 12)\mu\text{m}$  波段下的法向发射率值,根据需要可增加滤光片,通过标定后可实现关心波段的发射率测试。其测试原理如图 1 所示。装置主要由被测样品 1、样品炉 2、黑体 3、直线导轨 4、热隔离光栏 5、滤光片转盘 6、准直物镜 7、会聚物镜 8、斩波器 9、热释电探测器 10 和计算机及软件处理系统等组成。

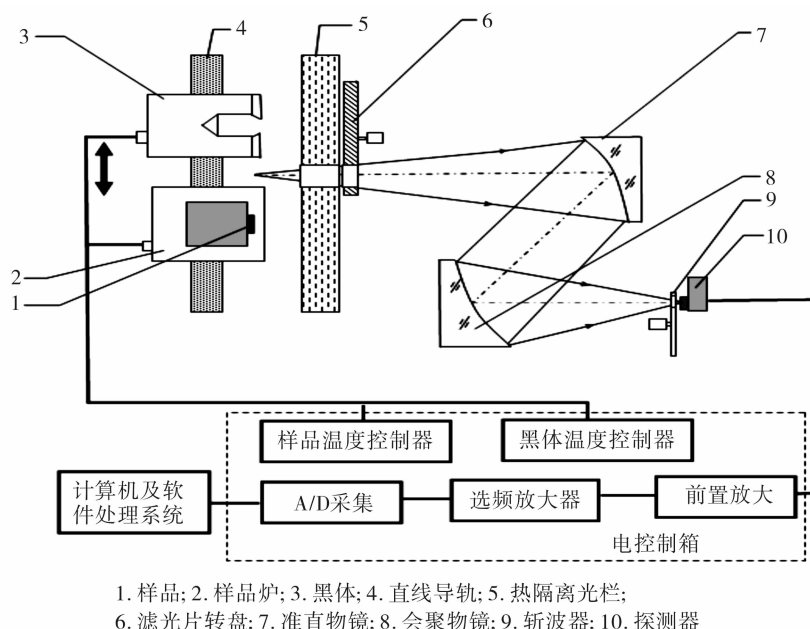


图 1 IRS400 型材料发射率测试装置原理图

Fig. 1 Schematic of IRS400 type material emissivity measurement device

测试时, 首先将被测样品放置于样品炉内, 通过参考黑体和样品炉温度控制器将参考黑体和装有被测样品的样品炉加热到同一温度  $T$ , 同一温度下由于发射率不同, 向外辐射的功率也不同, 通过直线导轨带动样品炉和参考黑体分别进入采集光路中, 滤光片转盘上安装有 2 个滤光片:  $(3 \sim 5) \mu\text{m}$  和  $(8 \sim 14) \mu\text{m}$  波段滤光片, 以及 4 个备用孔, 可根据需要安装关心的滤光片, 参考黑体和样品炉发出的辐射经过滤光片后被准直物镜和会聚物镜反射聚焦到探测器上, 探测器前面装有斩波器, 斩波器主要用于调制光信号, 消除外界杂散辐射的影响, 光信号到达探测器后进行光电转换, 将光信号转化为电信号, 电信号通过前放和选频放大电路后进入信号采集卡, 信号采集卡将模拟信号转化为数字信号后进入计算机及软件处理系统进行处理。

根据发射率的定义, 材料发射率是相同测试条件下, 某温度下辐射量与相同温度的参考黑体的相应辐射量的比值如下:

$$\epsilon_M(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda M}(T) d\lambda}{\epsilon_B(\lambda_1, \lambda_2) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda}(T) d\lambda} \quad (1)$$

式中:  $\epsilon_M(\lambda_1, \lambda_2)$  为被测材料在  $(\lambda_1 \sim \lambda_2)$  时发射率值;  $L_{\lambda M}(T)$  为被测材料在波长为  $\lambda$  时的辐射亮度;  $L_{\lambda}(T)$  为参考黑体在波长为  $\lambda$  时的辐射亮度;  $T$  为温度;  $\epsilon_B(\lambda_1, \lambda_2)$  为参考黑体在  $(\lambda_1 \sim \lambda_2)$  时的光谱发射率。

若被测材料和参考黑体的辐射采用相同的光学系统和探测系统接收, 光学系统的在  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  下的透过率为  $T(\lambda_1, \lambda_2)$ , 探测系统的光谱响应度为  $R(\lambda_1, \lambda_2)$ , 则探测系统对黑体和样品探测时, 探测器输出信号为

$$V_M(\lambda_1, \lambda_2) = T(\lambda_1, \lambda_2) \cdot R(\lambda_1, \lambda_2) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda M}(T) d\lambda \quad (2)$$

$$V_B(\lambda_1, \lambda_2) = T(\lambda_1, \lambda_2) \cdot R(\lambda_1, \lambda_2) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda B}(T) d\lambda \quad (3)$$

式中:  $V_B(\lambda_1, \lambda_2)$  为参考黑体辐射在探测器上产生的电压值;  $V_M(\lambda_1, \lambda_2)$  为材料辐射在探测器上产生的电压值。

将(2)式和(3)式代入(1)式得到材料的光谱发射率为

$$\epsilon_B(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{V_M(\lambda_1, \lambda_2)}{V_B(\lambda_1, \lambda_2)} \cdot \epsilon_B(\lambda_1, \lambda_2) \quad (4)$$

式中:  $V_B(\lambda_1, \lambda_2)$  和  $V_M(\lambda_1, \lambda_2)$  可以测试得到;  $\epsilon_B(\lambda_1, \lambda_2)$  通过定标可以得到。根据公式(1)可以计算得到被测材料的发射率  $\epsilon_M(\lambda_1, \lambda_2)$ 。

为了提高信噪比, IRS400 的光学系统采用全反射式设计, 准直物镜和会聚物镜为 2 个大离轴量的抛物面反射镜, 反射镜表面镀金, 保证系统较高的透过率。为了保证成像光斑符合探测要求, 这 2 个反射镜面形误差波峰-波谷值均小于 30 nm。

探测器既要满足波长测量范围, 也要有好的重复性和稳定性。探测器选用钽酸锂热释电探测器, 探测器从紫外到亚毫米波光谱响应几乎不变, 从而保证全红外波段测量。斩波器选用占空比为 1:1, 热释电探测器由于响应频率比较低, 所以斩波频率选为 10 Hz 左右。考虑到探测器的响应及前放、选频放大的稳定, 调制器的稳定性对探测信号的稳定非常重要, 因而选用比较好的调制器是相当重要的。A/D 采样转化时间为 200 ms 或小于 100 ms, 所以仪器需要采用外触发(边沿触发), 使采样点固定, 保证数据稳定可靠。

由于自然界各种物体随时随地都在向外发出红外辐射, 为了保证被测样品的数据准确, 不受外界红外杂波的干扰, 在系统中加入了冷屏蔽, 以保证测试系统的准确、稳定和可靠。

## 2 定标和温度补偿技术

国防科工局光学计量一级站作为国防重点实验室, 拥有国际先进水平的国防最高标准“50 °C ~ 1 000 °C 黑体辐射源标准装置”, 可用于参考黑体发射率  $\epsilon_B(\lambda_1, \lambda_2)$  的标定。

IRS400 型材料发射率测量装置溯源如图 2 所示。将被测材料的样品放入样品炉里加热到需要标定的温度, 通过“50 °C ~ 1 000 °C 黑体辐射源标准装置”可对被测样品的真实发射率值进行标定, “50 °C ~ 1 000 °C 黑体辐射源标准装置”可溯源到国际标准金属凝固点黑体, 从而实现材料发射率的溯源。

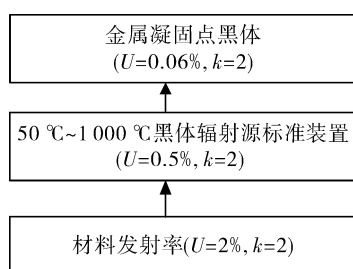


图2 IRS400 型材料发射率测量装置溯源图

Fig. 2 Traceability chart of IRS400 type material emissivity measuring device

环境温度补偿技术是保证被测材料发射率准确的一个非常关键的技术。探测器探测的是目标的温差信号,采用“50 °C~1 000 °C 黑体辐射源标准装置”标定的温度,当样品温度稳定时,随着季节的变化,环境温度会发生变化,样品随着环境的温差相应地会发生变化,由于材料发射率与温度有关,材料发射率随环境温度发生变化,造成材料发射率测量不准确,因而本装置采用了环境温度补偿技术,以温差为温度参数,从而保证了材料发射率测量的准确性。

IRS400 型材料发射率测试装置的测量不确定度主要包括以下分量:标定引入的测量不确定度  $u_1=0.5\%$ ;由于探测电路和探测器等不稳定性引入的测量不确定度,通过示波器测量电信号得到,测量不确定度为  $u_2=0.5\%$ ;由发射率测量重复性引入的测量不确定度为  $u_3=0.2\%$ 。这 3 个分量之间相互独立,且不相干,则合成测量不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.82\% \quad (5)$$

取  $k=2$ ,则相对扩展不确定度  $U$  为

$$U = k \cdot u_c = 1.64\% \quad (6)$$

因此,IRS400 型材料发射率测试装置测量不确定度小于  $2\%$  ( $k=2$ )。

### 3 测试软件

IRS400 型材料发射率测试装置软件采用 VB 语言编程,发射率测控软件界面如图 3 所示。软件能够实现数据存储、打印、重新显示等功能,可设置不同测试温度和测试波长,包括手动和自动测试 2 个功能,测试结果显示在醒目的位置。图 3 中下方数据框内显示黑漆和铝片的材料发射率测量结果。



图3 IRS400 型材料发射率测试装置测试界面

Fig. 3 Test interface of IRS400 type material emissivity measuring device

### 4 总结和展望

IRS400 型材料发射率测试装置通过采用锁相放大探测、环境温度补偿和溯源等技术,测量不确定度小于  $2\%$  ( $k=2$ ),能够对口径小于  $\Phi 20$  mm,厚度小于 10 mm 样品材料表面或者涂层的发射率进行测试,测量最高温度为 400 °C。

飞机发动机喷管的最高工作温度达到 1 200 °C 左右,西北工业大学等单位也针对飞机喷管研制了隐身涂层,因而需要对这些隐身涂层的发射率进行测试,以评估飞机发动机的红外隐身性能,但由于样品和样品炉之间需要通过热传递进行加热,热损耗较大,采用普通的方法将样品加热到高温比较困难。因此,为满足高温材料发射率测试的需求,需要采取有效的措施,提高样品的加热效率,提高温度测量范围,研制测量温度高于 1 200 °C 的材料发射率测量装置,以满足飞机红外隐身技术发展的需求。

#### 参考文献:

- [1] Wu Jianghui, Gao Jiaobo, Li Jiajun. Directional spectral emissivity measurement of solid materials and its error analysis[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(4): 597-601.  
吴江辉,高教波,李建军. 固体材料定向光谱发射率测量装置研究及误差分析[J]. 应用光学, 2010, 31(4): 597-601.
- [2] Dai Jingmin, Zhao Zhongyi, Li Ying. BRDF measurement of material surface at variable temperatures[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(3): 321-324  
戴景民,赵忠义,李颖. 可变温条件下材料表面的双向反射分布函数测量[J]. 应用光学, 2008, 29(3):

- 321-324.
- [3] Xu Rongguo, Wang Lei, Yin Wanhong et al. Measuring method of temperature coefficient of infrared optical material transmittance[J]. Journal of Applied Optics, 2013,34(6):1000-1004.  
许荣国,王雷,阴万宏,等. 红外光学材料透过率温度特性测量方法[J]. 应用光学, 2013, 34(6): 1000-1004.
- [4] Dai Jingmin, Wang Xinbei. Review of emissivity measurement and its applications[J]. Acta Metrologica-inica, 2007,28(3): 232-236.  
戴景民,王新北. 材料发射率测量技术及应用[J]. 计量学报,2007,28(3):232-236.
- [5] Dai J M, Liu X D, Sun X G. Equipment for the spectral characterization of high temperature particles [J]. International Journal of Thermophysics, 2005, 26(4):1207-1213.
- [6] Zhang Bufa, Redgrove J, Clark J. New apparatus for measurement of the spectral, angular and total emissivity of solids[J]. High Temperatures-high Pressures, 2004,35:289-302.
- [7] Editorial Committee of Measurement and Testing Technology Handbook. Measurement and testing technology handbook[M]. Beijing: China Metrology Press, 1995.  
《计量测试技术手册》编辑委员会, 计量测试技术手册(第10卷): 光学[M]. 北京: 中国计量出版社, 1995.
- [8] Zhang Bufa, Redgrove J, Clark J. A transient method for total emissivity determination[J]. International Journal of thermophysics, 2004,25:423-438.