

非全视场条件下目标红外发射率的测试和计算

张彤,代晓东,陈春生,陈亮,代梦艳,刘海锋,任丽娜

(国民核生化灾害防护国家重点实验室,北京 102205)

摘要:非全视场条件下测试物体辐射特性时,背景干扰是影响其准确性的最关键因素。根据普朗克辐射定律,通过方法研究和公式推导消除背景干扰,建立了非全视场条件下目标辐射特性的测试和计算方法。在此基础上,采用SR-5000N光谱辐射计,在全视场和非全视场两种模式下开展铝板和碳纳米管(MWCNTs)复合涂层的红外光谱发射率测试实验,进一步验证该测试计算方法的有效性。结果表明,在非全视场条件下,尤其在测定高发射率目标时,该方法得到的样品红外发射率与全视场条件下的测试结果数据较为一致,可基本反映样品的真实光谱特性,有效解决了视场大小对目标辐射特性测试的局限,拓展其应用领域。

关键词:光谱辐射; 发射率; 非全视场; 测试; 计算

中图分类号:O432 **文献标志码:**A **文章编号:**1007-2276(2015)01-0001-05

Measurement and calculation of infrared emissivity of target with non-full field of view

Zhang Tong, Dai Xiaodong, Chen Chunsheng, Chen Liang, Dai Mengyan, Liu Haifeng, Ren Lina

(State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian, Beijing 102205, China)

Abstract: Background disturbance is the main factor affecting the testing results of infrared radiation characteristics with non-full field of view (FOV). In this paper, according to Planck's radiation law, the methods of measuring and calculating radiation characteristics of targets with non-full FOV were established with formula derivation and disturbance offset. On this basis, the infrared emissivities of aluminum plate and carbon nanotubes(MWCNTs) composite coatings were tested comparatively by using a SR-5000N spectroradiometer with both full FOV and non-full FOV. The results show that with non-full FOV, the infrared emissivities obtained by this method are in accord with the results measured with full FOV and can reflect the true spectral characteristics of the samples. This progress can effectively solve the FOV limitations to the radiation characteristics test of the target and greatly expand its application field.

Key words: spectral radiation; emissivity; non-full field of view; measurement; calculation

收稿日期:2014-05-11; 修订日期:2014-06-12

基金项目:国家自然科学基金(51103176, 41205097)

作者简介:张彤(1981-),男,助理研究员,博士,主要从事特种功能材料和光谱分析方面的研究工作。Email:tong_zhang@126.com

0 引言

近年来,随着高光谱技术的发展,光电探测武器可以选择几十、几百甚至几千个谱段进行光谱成像,具有超强的光谱分辨能力和目标识别能力^[1-3]。因此,对目标和背景在更精细波段的光谱辐射特性和发射率进行研究,对于提高军事目标的伪装隐身能力和抗干扰能力具有十分重要的意义。

目前,国内外对材料红外发射率的研究多采用红外发射率测量仪直接测试宽波段范围内(如 8~12 μm)的平均发射率^[4-5],该方法在操作和计算上简单易行;而为了进一步提高光谱分辨精度,科研人员通过测试材料的漫反射率来计算光谱发射率^[6],或采用精密的光谱辐射仪器直接测试计算发射率^[7],使光谱分辨能力获得大幅提高。不过,这些测试方法均建立在目标填充视场基础上,当目标尺寸较小或距离探测位置较远,即目标无法填充视场时,背景干扰会大大降低目标发射率的测试准确性。

文中针对上述问题,采用 SR-5000N 红外光谱辐射计,对目标表面红外辐射光谱和红外发射率测试方法进行了研究。通过测试和计算不同样品温度、不同复杂背景下红外光谱辐射计的电压响应,消除背景的光谱辐射影响,建立了非全视场条件下样品红外辐射光谱的测试和计算方法,并采用不同基材实验测试对该方法进行了验证。

1 实验和计算方法

1.1 基材制备

文中采用低发射率的铝板和高原子率的多壁碳纳米管(MWCNTs)涂层两种材料作为基材,用于发射率测试和验证。其中,铝板采用 1060 型纯铝板,尺寸 80 mm×80 mm×1 mm;MWCNTs 涂层采用碳纳米管(CNT102,德科岛金公司)与双组分聚氨酯(N100,德国拜耳公司)复合,经 50 $^{\circ}\text{C}$ 下超声分散 40 min,干燥 7 天后制备而成,碳纳米管含量为 4%,涂层厚度为 300 μm 。

1.2 实验仪器

采用 SR-5000N 红外光谱辐射计(以色列 CI 公司)进行光谱测试,其中,探测器类型为 InSb 和 MCT 探测器,测量模式为光谱测量,视场类型为窄视场,

视场大小 2~7 mrad,光谱范围 1.4~13 μm ,光谱分辨率 0.8%波长,斩波频率 1800 Hz,采样频率为 2 帧/s,测试距离 3 m。

采用 SR 200 黑体(以色列 CI 公司)进行标定和测试,口径 22.2 mm,发射率 0.99±0.01,温度读出分辨率 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。采用自设计加热控温装置,测温精度 0.1 $^{\circ}\text{C}$,控温精度 1 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.3 测试与计算

1.3.1 黑体标定

架设并调试 SR-5000N 红外光谱辐射计、数据采集和处理系统,并在指定的位置架设黑体,使黑体辐射面积小于视场面积,设定黑体温度,如图 1 所示。则红外辐射光谱仪在各谱段接收的红外辐射为黑体和视场内周围环境的辐射之和。

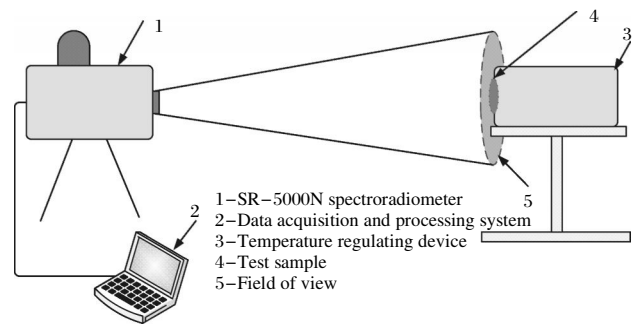


图 1 非全视场条件下目标红外辐射光谱测试示意图

Fig.1 Schematic diagram of infrared radiation spectrum test with non-full field of view

分别调节黑体温度为 T_{b1} 和 T_{b2} ,采用红外光谱辐射计测试,记录光谱仪的电压响应分别为 I_{b1} 和 I_{b2} 。则红外光谱辐射计接收的电压响应与接收到的红外辐射的响应函数关系如下:

$$I_{b1} = R(\lambda) [M_b(\lambda, T_{b1}) \cdot A_b + M_k(\lambda, T_0) \cdot A_0] \cdot \Omega \quad (1)$$

$$I_{b2} = R(\lambda) [M_b(\lambda, T_{b2}) \cdot A_b + M_k(\lambda, T_0) \cdot A_0] \cdot \Omega \quad (2)$$

式中: I_{b1} 和 I_{b2} 分别为 T_{b1} 和 T_{b2} 两种温度条件下黑体校准时的电压响应; $R(\lambda)$ 为响应函数; λ 为波长; T_0 为环境温度; $M_b(\lambda, T)$ 为黑体的光谱辐射出射度; $M_k(\lambda, T_0)$ 为环境辐射出射度; A_b 为黑体辐射面积; A_0 为环境辐射面积; Ω 为辐射立体角;根据普朗克辐射定律,黑体的光谱辐射出射度可由下式进行计算:

$$M_b(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_b T}} - 1} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (3)$$

式中: c 为光速, m/s; c_1 为第一辐射常数; c_2 为第二辐

射常数; K_B 为玻耳兹曼常数, J/K。

$$c_1=2\pi hc^2=(3.741\ 5+0.000\ 3)\times 10^8\ \text{W}\cdot\mu\text{m}^4/\text{m}^2$$

$$c_2=hc/K_B=(1.438\ 79+0.000\ 19)\times 10^4\ \mu\text{m}^4\cdot\text{K}$$

1.3.2 样品测试

在与黑体完全相同的位置, 架设目标样品系统, 并采用腔式加热控温装置, 控制样品的表面温度分别为 T_1 和 T_2 。则对于非全视场的样品/背景体系, 其电压响应为样品和视场内周围环境的响应之和。设样品的红外发射率为 $\rho(\lambda)$, 则样品的光谱辐射出射度为:

$$M_s(\lambda, T)=\rho(\lambda)M_b(\lambda, T) \quad (4)$$

记录光谱仪的电压响应分别为 I_1 和 I_2 , 则:

$$I_1=R(\lambda)[\rho(\lambda)M_b(\lambda, T_1)\cdot A_s+M_k(\lambda, T_0)\cdot A_0']\cdot\Omega \quad (5)$$

$$I_2=R(\lambda)[\rho(\lambda)M_b(\lambda, T_2)\cdot A_s+M_k(\lambda, T_0)\cdot A_0']\cdot\Omega \quad (6)$$

式中: I_1 和 I_2 分别为 T_1 和 T_2 温度条件下样品测试的电压响应 (样品和周围环境响应之和); A_s 为样品的辐射面积; A_0' 为环境辐射面积。

1.3.3 红外发射率计算

由公式(1)、(2)、(5)和(6)计算得样品的红外发射率:

$$\rho(\lambda)=\frac{I_2-I_1}{I_{b2}-I_{b1}}\cdot\frac{[M_b(\lambda, T_{b2})-M_b(\lambda, T_{b1})]}{[M_b(\lambda, T_2)-M_b(\lambda, T_1)]}\cdot\frac{A_b}{A_s} \quad (7)$$

2 结果与讨论

2.1 黑体校准

设置标准黑体温度为 $250\text{ }^\circ\text{C}$, 在响应模式下进行响应校准。然后在光谱测试模式下, 测试黑体在 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 下的光谱辐射特性, 如图 2 所示。其中, 每个温度下光谱数据取 5 组数据, 以实线表示, 校准后普朗克曲线以虚线表示。

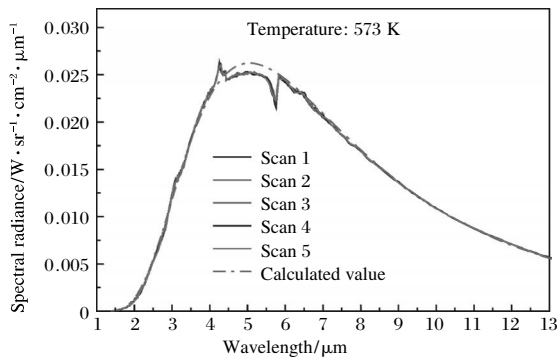


图 2 黑体校准曲线 ($300\text{ }^\circ\text{C}$)

Fig.2 Calibration curve of black body at $300\text{ }^\circ\text{C}$

图中曲线在 $3\ \mu\text{m}$ 、 $5.8\ \mu\text{m}$ 等处的干扰峰为大气

中各组分吸收和仪器滤波片误差所致, $4.4\ \mu\text{m}$ 处为二氧化碳不对称伸缩震动导致的瞬间偶极矩变化所致。可以看出, 五条实线基本重合, 即黑体光谱辐射亮度保持很好的稳定性, 辐射亮度曲线(实线)与校准普朗克曲线(虚线)拟合程度较高, 表明黑体校准精确, 满足要求。

2.2 全视场辐射特性

在全视场条件下, 控制样品表面温度为 $230\text{ }^\circ\text{C}$, 分别测试铝板和 MWCNTs 涂层的电压响应, 计算辐射亮度, 并根据黑体的光谱辐射亮度进行校准计算得到发射率曲线, 见图 3。

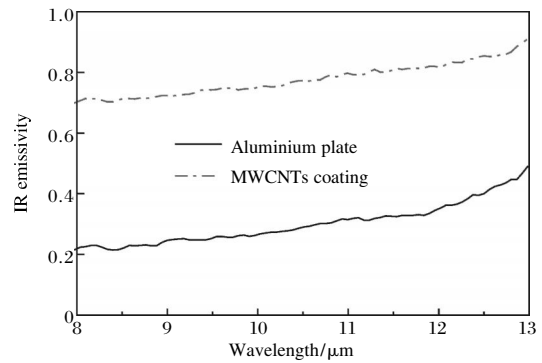


图 3 铝板和 MWCNTs 复合涂层的光谱发射率曲线 ($8\sim 13\ \mu\text{m}$, $230\text{ }^\circ\text{C}$)

Fig.3 Spectral emissivity of aluminium plate and MWCNTs coatings ($8\sim 13\ \mu\text{m}$, $230\text{ }^\circ\text{C}$)

可以看出, 在 $8\sim 13\ \mu\text{m}$ 波段, 两种基材的发射率曲线较为稳定。其中, 铝板发射率范围在 $0.2\sim 0.4$, 是一种典型的低发射率材料; 而 MWCNTs 复合涂层的发射率为 $0.7\sim 0.9$, 与相关研究基本一致^[8-9], 表明具有较好的红外吸收性能, 是一种高发射率材料。

2.3 非全视场辐射特性

在实际应用过程中, 受物体尺寸和测试距离限制, 不可避免会出现目标不能填充视场的情况。因此, 文中在较为精确稳定的 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段, 对非全视场条件下物体红外辐射特性进行研究, 以检验该方法的准确性。

图 4 描述了不同的视场类型示意图。当采用实线视场时, 黑体充满仪器整个视场, 为全视场测量; 当采用虚线视场时, 视场内除黑体外还存在周围背景的干扰, 为非全视场测量, 此时得到的光谱为目标和背景光谱之和, 并不能反应目标的真实光谱特性, 必须通过不同温度条件下的响应电压进行计算。



图 4 不同视场类型示意图

Fig.4 Schematic diagram of different field of view

控制黑体温度分别为 200 °C 和 400 °C, 测试非全视场条件下黑体的响应电压, 结果如图 5 所示。

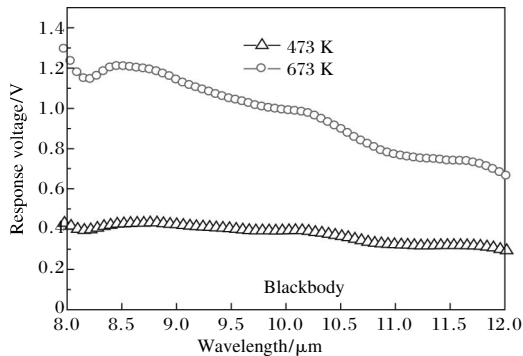


图 5 非全视场黑体的响应电压

Fig.5 Response voltage of blackbody with non-full field of view

控制铝板和 MWCNTs 复合涂层表面温度分别为 210 °C 和 230 °C, 测试非全视场条件下样品的响应电压, 结果见图 6。可以看出, MWCNTs 涂层在不同温度下的响应电压变化表现出很好的一致性, 而铝板的响应电压变化则不够稳定, 这是由于铝板发射率较低, 在相同温度下的辐射光谱更易被周围背景影响所致。按照公式(7), 对图 5 和图 6 中的响应电压进行计算, 即可得非全视场条件下样品的红外光谱发射率。

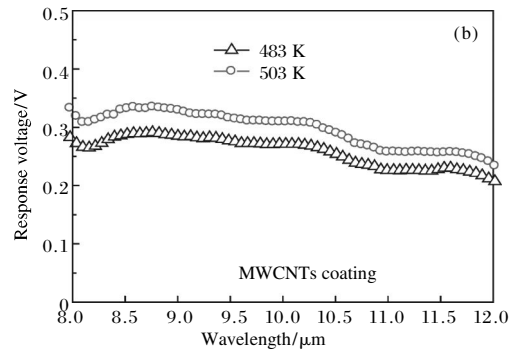
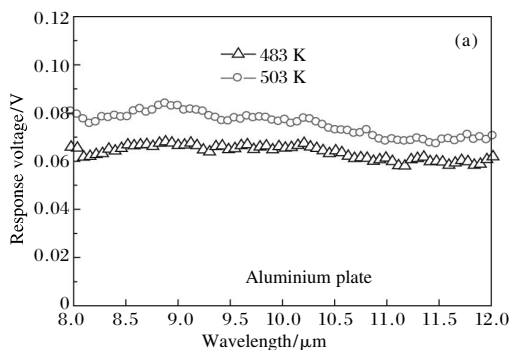


图 6 非全视场条件下铝板和 MWCNTs 涂层的响应电压(8~12 μm)

Fig.6 Response voltage of aluminium plate and MWCNTs coating with non-full field of view(8~12 μm)

图 7 为各样品在全视场和非全视场条件下计算的光谱发射率曲线。可以发现, 非全视场条件下的计算发射率曲线在数值和变化趋势上与全视场值表现一致, 但在稳定性方面有所差异。对比两种样品, 铝板在 8~12 μm 整个波段平均发射率为 0.264, 与真实值 0.305 的相对误差为 13.4%, 在 11 μm 处具有最大相对误差 42%; 而 MWCNTs 涂层在 8~12 μm 整个波段平均发射率为 0.782, 与真实值 0.779 的相对误差为 0.39%, 在 11.5 μm 处具有最大相对误差 12.8%。

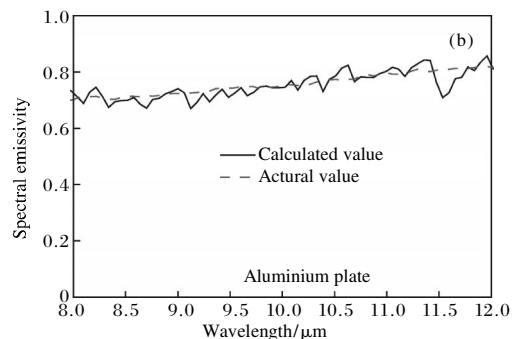
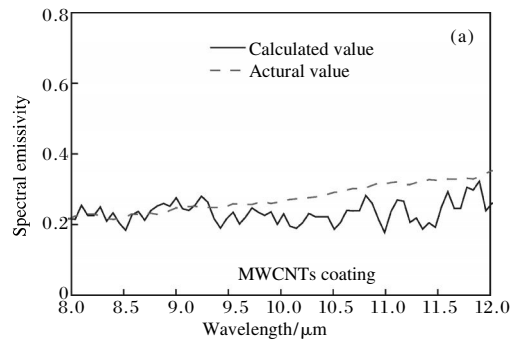


图 7 非全视场条件下铝板和 MWCNTs 涂层光谱发射率的实际值与计算值(8~12 μm)

Fig.7 Actual value and calculated value of spectral emissivities of aluminium plate and MWCNTs coating with non-full field of view(8~12 μm)

该实验结果表明,对于高发射率样品,非全视场条件下的测试和计算方法体现出较高的准确性,可基本反映样品的真实光谱发射率;而对于低发射率样品,由于辐射能量小,更易受周围背景的干扰,误差较大。非全视场红外光谱测试结果误差的原因体现于多个方面,包括测试仪器误差、加热控温误差、操作误差和背景干扰等。

3 结 论

文中采用 SR-5000N 光谱辐射计,对目标红外光谱特性的测试方法进行了研究,建立了非全视场下的光谱测试和计算方法,并通过铝板和 MWCNTs 涂层两种基材进行验证,结论如下:

(1) 全视场条件下,经黑体标定校准,可测得样品在 1.4~13 μm 的光谱辐射亮度和光谱发射率,其中 8~12 μm 光谱处能量集中,受大气影响较小,测得光谱可靠稳定。

(2) 非全视场条件下,测定高发射率目标(如 MWCNTs 涂层)时,由文中所述方法得到的样品红外发射率与全视场条件下的测试结果数据较为一致,基本反映了样品的真实光谱特性,可有效解决视场大小对目标辐射特性测试的局限。

(3) 非全视场条件下,测定低发射率目标(如铝板)时,由于辐射能量较低和仪器误差,计算结果与全视场条件下结果有一定偏离,需对标定、控温等方法 and 参数作进一步改进。

参考文献:

- [1] Yan Wenjun, Wang Tongzhao. Research on testing method for camouflage of ground target in high spectral imaging[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Magazine*, 2007, 24(1): 4-6. (in Chinese)
颜文俊,王同招. 高光谱遥感影像地面伪装目标检测方法的研究[J]. 机电工程, 2007, 24(1): 4-6.
- [2] Liu Danfeng, Wang Liguang. Color display of hyperspectral data in three levels[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2527-2533. (in Chinese)
刘丹凤,王立国. 高光谱数据三级彩色显示方法 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2527-2533.
- [3] Yuan Liyin, Lin Ying, He Zhiping, et al. Design and realization of an long-wave infrared hyperspectral imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 181-185. (in Chinese)
袁立银,林颖,何志平,等. 长波红外高光谱成像系统的设计与实现[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 181-185.
- [4] Yu Dabin, Tang Kun, Zou Jiwei, et al. Effect of infrared emissivity of coatings on the camouflage effectiveness of targets[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 194-197. (in Chinese)
余大斌,唐坤,邹继伟,等. 红外迷彩伪装涂料发射率对目标伪装效率的影响 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 194-197.
- [5] Xing Honglong, Ma Yan, He Liang, et al. Low infrared emissivity fabric coating with P (IP-co-AN) adhesive at spectral range of 8-14 μm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2349-2353. (in Chinese)
邢宏龙,马妍,何亮,等. 聚异戊二烯/丙烯腈基织物涂层在 8-14 μm 波段的红外低发射率 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2349-2353.
- [6] Wu Xiaowei, Feng Yujie, Wei Han, et al. Preparation of IR and microwave absorbing barium ferrite material by electroless Ni-P Plating[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2009, 24(1): 97-102. (in Chinese)
武晓威,冯玉杰,韦韩,等. Ni-P 化学镀制备钡铁氧体基红外-微波一体化隐身材料[J]. 无机材料学报, 2009, 24(1): 97-102.
- [7] Huang Zhibin, Zhou Wancheng, Tang Xiufeng, et al. Study on infrared emissivity characteristic of Ni/Au/Pt multilayer films by magnetic sputtering [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, 40(3): 534-537. (in Chinese)
黄智斌,周万城,唐秀凤,等. 磁控溅射 Ni/Au/Pt 多层膜红外发射率特征研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(3): 534-537.
- [8] Wang Zhifeng, Shi Xiumei, Yu Zongbao, et al. Study on infrared emittance of carbon nanotube coating [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2009, 32(1): 21-23. (in Chinese)
王志锋,史秀梅,余宗宝,等. 碳纳米管涂层红外发射率的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2009, 32(1): 21-23.
- [9] Sun Xiaogang, Zeng Xiaoshu, Cheng Guoan. Characteristics and applications of Carbon nanotubes [J]. *China Powder Science and Technology*, 2001, 7(6): 29-33. (in Chinese)
孙晓刚,曾效舒,程国安. 碳纳米管的特性及应用[J]. 中国粉体技术, 2001, 7(6): 29-33.