

文章编号:1001-5078(2007)02-0158-04

## 消杂光反射涂料远红外波段反射率测试及误差分析

陈前荣<sup>1</sup>, 杨本永<sup>2</sup>, 王国玉<sup>1</sup>, 陈永光<sup>1</sup>, 张黎明<sup>2</sup>, 冯亮<sup>1</sup>, 吴军辉<sup>1</sup>, 李华<sup>1</sup>

(1. 63880 部队, 河南省洛阳市 061 信箱, 河南 洛阳 471003; 2. 中科院安徽光机所遥感研究室, 安徽 合肥 230031)

**摘要:**以空旷天空为冷背景, 以在远红外波段高吸收率低反射率的常温面源黑体和低吸收率高反射率的漫反射镀金参考板作参考, 采用夹逼的办法, 测得消杂光反射涂料在远红外波段的发射率, 从而间接测得消杂光反射涂料在远红外波段的反射率。通过进一步的公式推导与误差分析, 说明该夹逼测试方法在测试高吸收率的消杂光反射涂料时, 应该特别强调常温面源黑体发射率的定标精度, 并在测试时保持常温面源黑体、漫反射镀金参考板、被测试品三者的温度一致。

**关键词:**消光系数; 消光涂料; 远红外; 反射率; 测试

**中图分类号:**TN219 **文献标识码:**A

## The Measurement of the Extinction Dope's Reflectivity in Far IR and the Error Analysis

CHEN Qian-rong<sup>1</sup>, YANG Ben-yong<sup>2</sup>, WANG Guo-yu<sup>1</sup>, CHEN Yong-guang<sup>1</sup>,  
ZHANG Li-ming<sup>2</sup>, FENG Liang<sup>1</sup>, WU Jun-hui<sup>1</sup>, LI Hua<sup>1</sup>

(1. PLA. 63880, Luoyang 471003, China; 2. Remote sensing Lab of AIOFM, CAS, Hefei 230031, China)

**Abstract:** The reflectivity of the extinction dope in far IR is surveyed indirectly by measuring its emissivity. The emissivity is sandwiched and approached by using a panel blackbody in normal temperature with strong absorption & low reflectivity and a diffuse reflection gold-filled panel with weak absorption & high reflectivity in far IR waveband as references. The error analysis shows that two factors should be emphasized in order to minish the measurement errors. One is to scale the panel blackbody's emissivity with high precision. The other is to try our best to keep the panel blackbody, the gold-filled panel and the extinction dope sample in the same temperature during the measurement.

**Key words:** extinction coefficient; extinction dope; far IR; reflectivity; measure

### 1 引言

在使用高能激光等强光源的室内实验中, 泄漏出实验平台的强光, 经过试验大厅墙面或倒顶等的反射, 可能会给人员或设备带来损害。为了提高安全系数, 比较高档的实验室, 其内墙面和倒顶等, 一般要采用消杂光反射涂料进行处理。消杂光反射涂料最重要的一个指标是从可见到远红外光波段都具有很高的吸收率, 亦即很低的反射率。消杂光反射涂料从可见到中红外波段反射率的测试, 可以采用反射率直接测量法, 以国家计量传递标准为基准, 利用 UV-3410 紫外分光光度计等设备, 通过积分球

双光路进行比对测量, 直接得到涂层半球反射率。而对于远红外波段反射率的测试, 则要复杂得多。由维恩位移定律可以估算, 常温黑体对应的峰值辐射波长恰好在远红外波段, 常温背景的辐射会给远红外波段反射率的测试带来很大麻烦。人工低温背景一般只有在大型的远红外测试系统中才有, 设备十分昂贵, 国内极少。我们对消杂光反射涂料进行

**作者简介:** 陈前荣(1972-), 男, 光学工程专业博士, 现为 63880 部队博士后工作站博士后, 副研究员, 目前从事光电对抗试验与仿真技术研究, 发表科技论文十余篇, 其中 5 篇被 Ei 收录。E-mail: chen\_qianrong@126.com.cn

**收稿日期:** 2006-06-20

的远红外波段反射率测试,以空旷天空为冷背景,以在远红外波段高吸收率低反射率的常温面源黑体和低吸收率高反射率的漫反射镀金参考板作参考,采用夹逼的办法,测得消杂光反射涂料在远红外波段的发射率 $\varepsilon^{[1-8]}$ ,从而间接得到反射率 $\rho$ 。文中介绍了测试方法、测试结果,进行了误差分析<sup>[9]</sup>,并指出测试时应该注意的事项。

## 2 测试方法

光谱吸收系数等于光谱辐射系数,对于不透明物体,反射率 $\rho(\lambda)$ 与发射率 $\varepsilon(\lambda)$ 的关系为:

$$\rho(\lambda) = 1 - \varepsilon(\lambda) \quad (1)$$

通过测量发射率,可以间接测得反射率。

对消杂光反射涂料发射率的测试,以 BRUKER 公司 OPAG22 型 FTIR 光谱仪作为主要测量工具进行辐射量测量,并以变温黑体(美国 OMEGA BB701 定标黑体)对 FTIR 光谱仪进行实时定标。测试时以空旷天空为冷背景,利用常温黑体辐射源(上海福源 HFY-300A 面源黑体)、漫反射镀金参考板作参考,利用天地背景温差法对涂层红外发射率进行野外测量,然后根据 $\rho = 1 - \varepsilon$ 计算得到材料的反射率。为了减少周边背景的红外辐射干扰,测试在楼顶进行,测试时利用红外测温仪进行监测,保证常温面源黑体、漫反射镀金参考板温度和被测样品的温度 $T_s$ 相等,都与室外温度一致,楼顶空气温湿度用台湾 CENTER314 温湿度计进行监控<sup>[10]</sup>。图 1 是白天拍摄的测试现场,实际测试时尽量选在晴朗无云的夜晚进行。

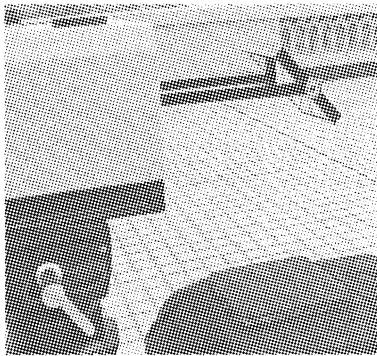


图 1 测试现场

Fig. 1 measuring scene

首先对 FTIR 光谱仪进行定标。变温定标黑体置于图 1 的样品位置处,使变温定标黑体辐射面充满光谱仪的视场,改变定标黑体的温度 $T_i$ ,FTIR 光谱仪相应地输出不同的电压测量值 $V_i$ ,则:

$$V_i(\lambda) = A(\lambda)L(\lambda, T_i) + [A(\lambda)L(\lambda, T_{\text{FTIR}}) + P] \quad (2)$$

其中, $[A(\lambda)L(\lambda, T_{\text{FTIR}}) + P]$ 表征了 FTIR 光谱仪自身背景辐射 $L(\lambda, T_{\text{FTIR}})$ 及电压偏置 $P$ 等的影响,认为 $[A(\lambda)L(\lambda, T_{\text{FTIR}}) + P]$ 在测试过程中保持不变, $L(\lambda, T_i)$ 是定标黑体的辐射亮度, $A(\lambda)$ 是 FTIR 光谱仪响应系数。通过定标,可以确定 $A(\lambda)$ 和 $[A(\lambda)L(\lambda, T_{\text{FTIR}}) + P]$ ,从而确定测量电压值与辐射亮度值的一一对应关系,即将测量电压值转化成辐射亮度值。故下面的讨论中,只提及辐射亮度值 $L$ 。

当表面喷涂有消杂光反射涂料的待测样品、常温面源黑体和漫反射镀金参考板三者的温度都一致时(都等于楼顶环境温度,记为 $T_s$ ),依次放在测试台中,利用 FTIR 光谱仪测试各自对应的辐射亮度 $L_s(\lambda)$ , $L_b(\lambda)$ , $L_g(\lambda)$ ,则有:

$$L_s(\lambda) = L_{\text{BL}}(\lambda, T_s) \times \varepsilon_s(\lambda) + L_{\text{inv}}(\lambda, T_{\text{space}}) \times (1 - \varepsilon_s(\lambda)) \quad (3)$$

$$L_b(\lambda) = L_{\text{BL}}(\lambda, T_s) \times \varepsilon_b(\lambda) + L_{\text{inv}}(\lambda, T_{\text{space}}) \times (1 - \varepsilon_b(\lambda)) \quad (4)$$

$$L_g(\lambda) = L_{\text{BL}}(\lambda, T_s) \times \varepsilon_g(\lambda) + L_{\text{inv}}(\lambda, T_{\text{space}}) \times (1 - \varepsilon_g(\lambda)) \quad (5)$$

其中, $L_s(\lambda)$ 是待测样品对应的测量辐射亮度; $L_g(\lambda)$ 是漫反射镀金参考板对应的测量辐射亮度; $L_b(\lambda)$ 是面源黑体对应的测量辐射亮度; $\varepsilon_s(\lambda)$ 是待测样品对应的有效发射率; $\varepsilon_b(\lambda)$ 是面源黑体对应的有效发射率, $\varepsilon_b(\lambda) = 0.95$ ; $\varepsilon_g(\lambda)$ 是漫反射镀金参考板对应的有效发射率, $\varepsilon_g(\lambda) = 0.1$ ; $L_{\text{BL}}(\lambda, T_s)$ 是理论黑体辐射亮度; $L_{\text{inv}}(\lambda, T_{\text{space}})$ 是空旷天空背景辐射亮度。一般高空大气温度 $T_{\text{space}}$ 非常低, $T_{\text{space}}$ 比 $T_s$ 要小得多,且天空背景的发射率也小于 1,所以 $L_{\text{inv}}(\lambda, T_{\text{space}})$ 比 $L_{\text{BL}}(\lambda, T_s)$ 小许多。

将常温面源黑体、漫反射镀金参考板的辐射亮度测量值 $L_b(\lambda)$ , $L_g(\lambda)$ 和发射率标称值 $\varepsilon_b$ , $\varepsilon_g$ 代入式(4)、(5),即可求出 $L_{\text{BL}}(\lambda, T_s)$ , $L_{\text{inv}}(\lambda, T_{\text{space}})$ ,再利用式(3),即可求得:

$$\varepsilon_s(\lambda) = \frac{L_s(\lambda) - L_{\text{inv}}(\lambda, T_{\text{space}})}{L_{\text{BL}}(\lambda, T_s) - L_{\text{inv}}(\lambda, T_{\text{space}})} \quad (6)$$

最后利用式(1),即可求得待测样品的反射率 $\rho(\lambda)$ 。

## 3 测试结果

将消杂光反射涂料分别喷涂在水泥板、金属板上,得到水泥基底涂层样件、金属基底涂层样件。利用上述方法,依次测得水泥基底涂层样件、金属基底涂层样件、软基黑体的发射率曲线,如图 2、3、4 所示。 $\text{CO}_2$ 激光器在军事领域应用广泛,消杂光反射涂料在其对应的 $10.6\mu\text{m}$ 波段的反射率是我们比较关心的,表 1 给出了不同时间测试的发射率值。

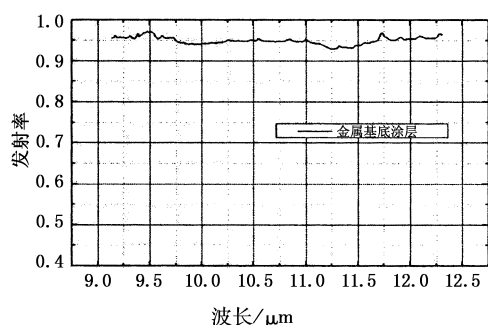


图2 金属基底涂层发射率曲线

Fig.2 the emissivity curve of the dope on metal

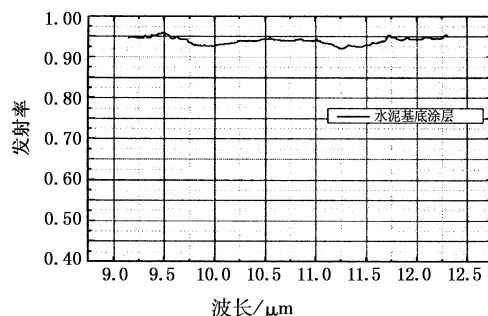


图3 水泥基底涂层发射率曲线

Fig.3 the emissivity curve of the dope on concrete

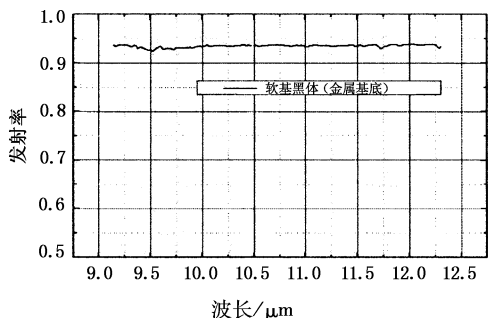


图4 软基黑体发射率曲线

Fig.4 the emissivity curve of the dope on black fabric

表1 10.6μm波段发射率

(晴天 下午:23.3~24.4℃;晚上:19.3~20.2℃)

Tab.1 the emissivity on 10.6μm(sunshine,

afternoon:23.3~24.4℃;night:19.3~20.2℃)

| 样品编号  | 样品名称       | 下午1<br>测值/% | 晚上1<br>测值/% | 晚上2<br>测值/% | 晚上3<br>测值/% | 均值<br>/% | 标准偏<br>差/% |
|-------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|------------|
| TL008 | 水泥基<br>底涂层 | 93.3        | 95.4        | 93.4        | 94.3        | 94.1     | 1.2        |
| TL009 | 金属基<br>底涂层 | 93.5        | 94.6        | 94.8        | 96.0        | 94.7     | 1.1        |
| PAN01 | 软基黑体       | 92.2        | 94.3        | 93.6        | 94.3        | 93.6     | 1.0        |

#### 4 误差分析

为了便于分析,作进一步的公式推导。

由式(3)、(4)、(5)有:

$$\varepsilon_s(\lambda) = \frac{L_s(\lambda) - L_g(\lambda)}{L_b(\lambda) - L_g(\lambda)} \varepsilon_b(\lambda) + \frac{L_b(\lambda) - L_s(\lambda)}{L_b(\lambda) - L_g(\lambda)} \varepsilon_g(\lambda) \quad (7)$$

微分,可得:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_s(\lambda) &= \frac{L_s(\lambda) - L_g(\lambda)}{L_b(\lambda) - L_g(\lambda)} d\varepsilon_b(\lambda) + \frac{L_b(\lambda) - L_s(\lambda)}{L_b(\lambda) - L_g(\lambda)} d\varepsilon_g(\lambda) - \\ &\quad \frac{(\varepsilon_b(\lambda) - \varepsilon_g(\lambda))(L_s(\lambda) - L_g(\lambda))}{(L_b(\lambda) - L_g(\lambda))^2} dL_b(\lambda) - \\ &\quad \frac{(\varepsilon_b(\lambda) - \varepsilon_g(\lambda))(L_b(\lambda) - L_s(\lambda))}{(L_b(\lambda) - L_g(\lambda))^2} dL_g(\lambda) + \\ &\quad \frac{\varepsilon_b(\lambda) - \varepsilon_g(\lambda)}{L_b(\lambda) - L_g(\lambda)} dL_s(\lambda) \\ &\equiv A + B + C + D + E \end{aligned} \quad (8)$$

显然,天地温差越大,则  $L_b(\lambda) - L_g(\lambda)$  越大,越有利于减小发射率的测量误差  $d\varepsilon_s(\lambda)$ 。

待测的消杂光反射涂料发射率  $\varepsilon_s(\lambda)$  大于 0.9,因此  $L_s(\lambda)$  比  $L_b(\lambda)$  不会小多少,而  $L_g(\lambda)$  则会比  $L_s(\lambda)$ ,  $L_b(\lambda)$  小许多。图5给出了实际测量的黑体、金板、样件对应的辐射亮度响应电压对比曲线,参考式(2)、(7)、(8),可以看出,在 8~13μm 范围内,  $\frac{L_s(\lambda) - L_g(\lambda)}{L_b(\lambda) - L_g(\lambda)}$  接近于 1,而  $\frac{L_b(\lambda) - L_s(\lambda)}{L_b(\lambda) - L_g(\lambda)}$  远小于 1,即  $A \gg B$ ,因此,若不考虑其他几项测量误差,则常温面源黑体发射率  $\varepsilon_b(\lambda)$  的定标误差几乎直接传递给待测样件发射率  $\varepsilon_s(\lambda)$  测量值,而镀金漫反射参考板发射率  $\varepsilon_g(\lambda)$  的定标误差对待测样件发射率  $\varepsilon_s(\lambda)$  测量值的影响可以忽略不计,即:  $A \approx d\varepsilon_b(\lambda)$ ,  $B \approx 0$ 。

设 OPAG22 型 FTIR 光谱仪对辐射亮度的相对测量误差为  $\sigma$ ,参考图5进行估算,有:

$$\begin{aligned} C &= - \frac{(\varepsilon_b(\lambda) - \varepsilon_g(\lambda))(L_s(\lambda) - L_g(\lambda))}{(L_b(\lambda) - L_g(\lambda))^2} dL_b(\lambda) \\ &\approx - \frac{0.95 - 0.1}{(L_b(\lambda) - L_g(\lambda))} \sigma L_b(\lambda) \approx -1.7\sigma \end{aligned} \quad (9)$$

$$D = - \frac{(\varepsilon_b(\lambda) - \varepsilon_g(\lambda))(L_b(\lambda) - L_s(\lambda))}{(L_b(\lambda) - L_g(\lambda))^2} dL_g(\lambda) \approx 0 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} E &= \frac{\varepsilon_b(\lambda) - \varepsilon_g(\lambda)}{L_b(\lambda) - L_g(\lambda)} dL_s(\lambda) \\ &\approx \frac{(0.95 - 0.1)}{(L_b(\lambda) - L_g(\lambda))} \sigma L_s(\lambda) \approx -1.7\sigma \end{aligned} \quad (11)$$

记常温面源黑体发射率  $\varepsilon_b(\lambda)$  的定标误差  $\delta$ ,则消杂光反射涂料发射率  $\varepsilon_s(\lambda)$  的测量误差为:

$$|d\varepsilon_s(\lambda)| \approx \sqrt{\delta^2 + (1.7\sigma)^2 + (1.7\sigma)^2}$$

$$=\sqrt{\delta^2 + 5.78\sigma^2} \quad (12)$$

对于黑体,其光谱辐射亮度  $L_{\text{eB}}(\lambda, T)$  为<sup>[11-13]</sup>:

$$L_{\text{eB}}(\lambda, T) = \frac{2c^2 h}{\lambda^5} \left[ \exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (13)$$

故光谱辐射亮度随温度变化的相对值为:

$$\frac{dL_{\text{eB}}(\lambda, T)}{L_{\text{eB}}(\lambda, T)} = \frac{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right)}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1} \cdot \frac{hc}{k_B} \cdot \frac{dT}{\lambda T^2} \approx \frac{c_2 dT}{\lambda T^2} \quad (14)$$

这里,  $c_2 = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。参考表 1 中晚上测量数据,  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ , 平均温度  $T = 292.9 \text{K}$ ,  $dT = \pm 0.45 \text{K}$ , 考虑到 OPAG22 型 FTIR 光谱仪的噪声等效温差为  $0.08^\circ\text{C}$ , 实际计算中取  $|dT| = 0.53 \text{K}$ , 代入式 (14), 有:

$$\sigma = \frac{dL_{\text{eB}}(\lambda, T)}{L_{\text{eB}}(\lambda, T)} \approx 0.0084 \quad (15)$$

面源黑体发射率定标误差为  $\delta = 0.012$ , 一起代入式 (12), 算出消杂光反射涂料发射率  $\varepsilon_s(\lambda)$  的测试误差为:

$$|d\varepsilon_s(\lambda)| \approx 0.023 \quad (16)$$

考虑消杂光反射涂料发射率的实际测量要求, 这个测量误差是可以接受的。

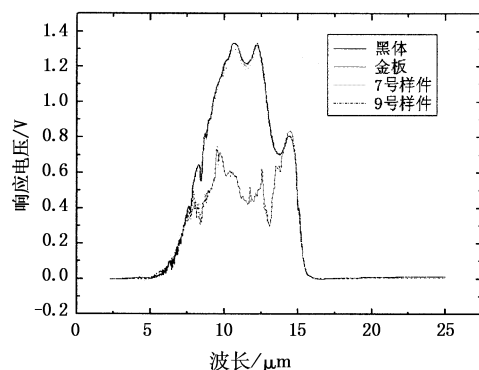


图5 黑体、金板、样件对应的辐射亮度响应电压对比曲线

Fig.5 the contrast curves of the voltage responding on radiant

luminance of the black, the gold panel, and the samples to be measured

## 5 结论

利用天地温差法测量消杂光反射涂料样件的发射率,以 FTIR 光谱仪作为主要测量工具,以常温面源黑体和镀金漫反射参考板作参考,以空旷天空为冷背景,利用夹逼的方法,完成发射率的测量。总的测量误差约为 0.023,满足测量精度要求。测量时,应该特别强调常温面源黑体发射率的定标精度,并在测试时保持常温面源黑体、漫反射镀金参考板、被测试品三者的温度一致,尽量减少温度波动带来的

误差。

## 参考文献:

- [1] J W. Salisbury, M D' Aria D. Emissivity of terrestrial materials in the 3 - 5  $\mu\text{m}$  atmospheric window [J]. Remote Sensing Environ, 1994 (47): 345 - 361.
- [2] John W Salisbury, Dana M D' Aria. Emissivity of terrestrial materials in the 8 - 14  $\mu\text{m}$  atmospheric window [J]. Remote Sens. Environ, 1992, 42: 83 - 106.
- [3] WANG Wenge. The research on the measurement of IR spectrum emissivity [J]. Journal of astronautic metrology and measurement, 2002, 22 (2): 36 - 39. (in Chinese).
- [4] XU Nanrong. the measurement and the evaluation of the radiation emissivity [J]. Infrared and laser technology, 1992, 4: 30 - 36 (in Chinese).
- [5] LU Xuerong. The research on the measurement of the emission spectral by using Fourier spectrometer [C]//The conference on technologies and application of the Fourier transform IR spectrometry ( II ). Beijing: The ocean publishing house, 1993 (in Chinese).
- [6] James M Palmer. Calibration of satellite sensors in the thermal infrared [C]//Infrared Technology XVIII, Proceedings of SPIE, 1992, 1762: 108 - 117.
- [7] Anne B Kahle, Ronald E Alley. Separation of temperature and emittance in remotely sensed radiance measurements [J]. Remote Sens. Environ. , 1992, 42: 107 - 111.
- [8] Eliel Villa-Aleman, Robert J Kurzeja, Malcolm M Pendergast. Assessment of Ivanpah Playa as a site for thermal vicarious calibration for the MTI satellite [A]. Proc. SPIE, 2003, 5093: 331 - 342.
- [9] Abraham Kribus, Irna Vishnevetsky, Eyal Rotenberg, et al. Systematic errors in the measurement of emissivity caused by directional effects [J]. Applied Optics, 2003, 42 (10): 1839 - 1846.
- [10] CUI Zhishang. The scale and measurement of the temperature [M]. Beijing: China scale publishing house, 1998 (in Chinese).
- [11] SHEN Xuanguo, ZHAN Tieqiang. Photoelectricity [M]. Beijing: Weapon Industry publishing house, 1994 (in Chinese).
- [12] CHEN Heng. Infrared physics [M]. Beijing: National defense industry publishing house, 1985 (in Chinese).
- [13] WU Jinguang. The neoteric technologies and applications on Fourier transform IR spectrometry (previous volum) [M]. Beijing: Scientific and Technoical Documents publishing house, 1994 (in Chinese).