

粒度对样品辐射特性影响的实验研究

刘 健

(青岛大学纺织服装学院物理教研室, 山东, 青岛, 266033)

张才根

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要 利用 IRE-1 型红外辐射测量仪对不同粒度砂纸样品进行了(法向)光谱比辐射率的测试; 测试波段为 $8\sim 14\mu\text{m}$; 测试温度分别为 40°C 、 50°C 和 70°C 。通过对测试结果的分析, 指出在粒度尺寸大于测试波长时, 随着颗粒尺寸的减小, 样品的光谱比辐射率将减小, 相应的 $8\sim 14\mu\text{m}$ 的平均比辐射率也有减小的趋势。

关键词 红外, 辐射, 温度, 比辐射率, 粒度。

引言

近年来, 随着军事和工业上对材料的需求以及测试手段的不断提高, 表面光学特性的研究已成为人们关注的热点。Maradudin A. A. 和 O'Donnell K. A.^[1~5] 等人对散射光的偏振特性及背散射现象与金属或电介质涂层表面粗糙度的关系进行了理论分析和实验研究, Roy S.^[6~8] 等人也就温度及粗糙度对表面反射特性的影响进行了深入探讨。

对于红外材料, 比辐射率是影响其辐射特性的一个非常重要的参量^[9~11], 尤其是三个大气窗口之一的 $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段^[10]。我们知道, 材料的比辐射率不但取决于材料的内在性质, 而且取决于其表观的物理状态, 如粗糙度、材料粒度、温度及衬底等。Nerry F.^[12] 曾报道了 SiC 的粒度对 $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段比辐射率的影响; 文献 [13] 指出蜂窝元面上的线宽度对蜂窝平面黑体源的平均比辐射率的提高是很关键的; 汤大新^[14] 报道了影响涂料红外辐射特性的因素。

本文对 $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段材料的粒度对光谱比辐射率的影响进行了研究。

1 测量原理

IRE-1 型红外辐射测量仪是中国科学院上海技术物理研究所研制的用来测量材料(样

品) 比辐射率的测量装置. 其样品温度控制精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$; 测量精度为 ± 0.01 (比辐射率单位); 在 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段配有带宽约 $1\ \mu\text{m}$ 、中心波长分别为 8.55 、 9.5 、 10.6 、 12.0 及 $13.5\ \mu\text{m}$ 的窄带滤光片. 它的测量原理如图 1 所示.

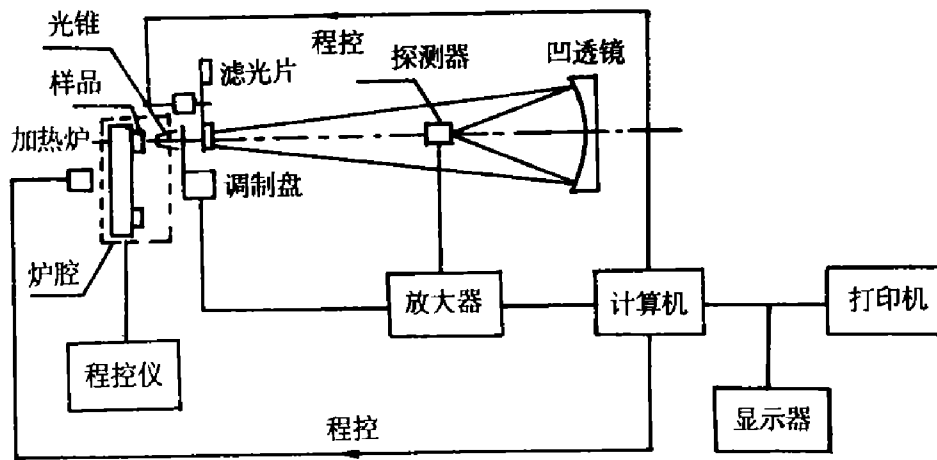


图 1 测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of measurement

IRE-1 型红外辐射测量仪采用与标准样品的辐射亮度比较的方法来得出待测样品 (法向) 的比辐射率. 来自标准样品或待测样品的辐射信号经光学斩波器调制, 再由椭球面同轴反射光学系统聚焦投射到热释电探测器上. 探测器把此交变信号转换成电信号, 经锁相放大后送入微机处理.

根据辐射理论, 探测器接收到来自样品的辐射功率为

$$P(\lambda, T) = K(\lambda, T)[\varepsilon(\lambda, T) \cdot L(\lambda, T) + \rho(\lambda, T) \cdot L(\lambda, T_0)], \quad (1)$$

式 (1) 中 $K(\lambda, T)$ 为与光学系统反射比、孔径角、探测器接收面积等因素有关的仪器常数; $\varepsilon(\lambda, T)$ 为样品的比辐射率; $\rho(\lambda, T)$ 为样品的反射率; $L(\lambda, T)$ 为与样品温度相同的黑体的辐射亮度; $L(\lambda, T_0)$ 为环境的有效辐射亮度. 根据普朗克定律, 有

$$L(\lambda, T) = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot [\exp(C_2/\lambda T) - 1]^{-1},$$

同理, 探测器接收到来自调制盘的辐射功率为:

$$P_1(\lambda, T) = K(\lambda, T)[\varepsilon_0(\lambda, T) \cdot L(\lambda, T_0) + \rho_0(\lambda, T) \cdot L(\lambda, T_0)], \quad (2)$$

假定调制盘的温度等于环境温度, 由式 (1) 和式 (2) 可得

$$\Delta P = K(\lambda, T) \cdot \varepsilon(\lambda, T)[L(\lambda, T) - L(\lambda, T_0)].$$

在一窄带滤光片的透射范围 $\lambda_1 - \lambda_2$ 内可以认为样品的发射率及仪器常数的变化较小, 因此有:

$$\Delta P_1 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Delta P \cdot d\lambda = K_1(T) \cdot \varepsilon_1(T) [M(T) - M(T_0)], \quad (3)$$

式 (3) 中 $M(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) \cdot d\lambda$; $\varepsilon_1(T)$ 是光谱在 $\lambda_1 - \lambda_2$ 范围内样品有效比辐射率. 放大器输出信号电压 V 与探测器接收到的辐射功率差 ΔP_1 成正比, 即

$$V = K \Delta P_1. \quad (4)$$

由式 (3) 和式 (4) 可得

$$\varepsilon_1(T) = \alpha \cdot V, \quad (5)$$

式 (5) 中 $\alpha = K^{-1} K_1(T) \cdot [M(T) - M(T_0)]$, 在窄带滤光片的透射范围内它为一仪器的常数.

同理, 对于标准样品, 有:

$$\varepsilon_b(T) = \alpha \cdot V_b, \quad (6)$$

式 (6) 中 $\varepsilon_b(T)$ 是标准样品 (法向) 的比辐射率; V_b 是标准样品进入光路后放大器的输出信号电压.

由式 (5) 和式 (6) 可得

$$\varepsilon_1(T) = (V/V_b) \cdot \varepsilon_b. \quad (7)$$

式 (7) 为 IRE-1 红外辐射测量仪的基本计算公式. 由式 (7) 可知, 只要知道标准样品的法向比辐射率值 ε_b , 并测得待测样品及标准样品进入光路时仪器的输出信号电压 V 和 V_b , 即可计算出待测样品的法向比辐射率.

2 实验结果

测试时, 标准样品为腔内壁涂 3M 黑漆的微型球形空腔 (带半开口圆柱), 取 $\varepsilon_b = 0.98$. 待测样品为不同粒度的棕钢玉砂纸 (Al_2O_3 94-95%; SiO_2 约 4%; 其它约 2%). 选出 7 种砂纸, 在 40°C , 50°C 和 70°C 的温度下, 分别测出对应于中心波长为 8.55、9.5、10.6、12.0 及 $13.5 \mu\text{m}$ 的窄带滤光片的光谱比辐射率 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 、 ε_4 和 ε_5 , 并由此算出 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段内的平均值 ε . 5 种样品在不同温度下的比辐射率测量值见表 1.

表 1 不同温度时比辐射率测试结果
Table 1 Emissivity measurement results at different temperatures

温度 (°C)	砂纸 标号 (#)	粒 度 号	磨料颗粒 尺寸平均 值 (μm)	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ
40	80	70	230	0.93	0.91	0.89	0.83	0.83	0.881
	120	80	190	0.92	0.91	0.89	0.83	0.84	0.881
	180	120	140	0.93	0.92	0.89	0.80	0.80	0.873
	300	180	80	0.92	0.90	0.88	0.80	0.80	0.865
	400	240	58	0.91	0.90	0.87	0.79	0.79	0.457
50	80	70	230	0.93	0.91	0.88	0.83	0.83	0.881
	120	80	190	0.92	0.91	0.89	0.84	0.84	0.884
	180	120	140	0.94	0.93	0.89	0.81	0.81	0.881
	300	180	80	0.92	0.91	0.88	0.80	0.81	0.870
	400	240	58	0.93	0.91	0.88	0.80	0.80	0.870
70	80	70	230	0.93	0.92	0.90	0.84	0.84	0.892
	120	80	190	0.93	0.92	0.90	0.85	0.86	0.896
	180	120	140	0.95	0.94	0.91	0.83	0.83	0.896
	300	180	80	0.93	0.92	0.89	0.81	0.82	0.881
	400	240	58	0.94	0.93	0.90	0.83	0.83	0.893

3 分析与讨论

从上面的实验结果可以看出:

(1) 对实验测试的任一砂纸样品, 在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 光谱区内, 其光谱比辐射率随波长的增大而减小, 最大变化 (差值) 约为 0.1.

(2) 样品表面微观结构对 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 光谱区内光谱比辐射率的影响明显, 随着砂纸粒度号的增大 (即磨料平均颗粒尺寸变小), 所测得的光谱比辐射率 (尤其是 ϵ_4 、 ϵ_5 和 ϵ) 均呈减小趋势 (见表 1).

(3) 测试样品的比辐射率随着样品温度的升高而增大, 而且平均颗粒尺寸小的样品的比辐射率增大的幅度大于平均颗粒尺寸大的样品. 在 70°C 时, 平均颗粒尺寸大小不同的样品, 在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 光谱区内平均比辐射率的差异变小, 即样品表面颗粒尺寸的影响不明显.

文献 [14] 中给出了硫酸铜材料的颗粒度对辐射特性的影响曲线, 其影响规律与本文相同.

实际上, 在样品表面颗粒尺寸大于测试波长时, 样品表面微观结果对红外辐射特性的影响主要是由于颗粒度不同的样品的总辐射表面积不同引起的. 颗粒度大的样品, 总辐射表面积大, 辐射能力强, 则比辐射率就大; 而颗粒度小的样品, 总辐射表面积小, 比辐射率也就小. 当样品温度升高后, 温度对辐射的影响增强, 颗粒尺寸的影响则减弱.

本文的工作对于实际应用具有一定的指导意义, 尤其是测试由颗粒构成的目标的物理

参量(如温度)时. 通常, 当所测的目标的有关参量需作比辐射率校正时, 大多是用实验室测得的数值, 由于实验室样品与实测目标的颗粒尺寸不同, 将对所测试参量(如温度)的精度产生影响. 如果参照本文结果, 根据实测目标的粒度, 对所用比辐射率值进行一定的修正, 将大大提高测量的准确性.

致谢 样品测试得到中国科学院上海技术物理研究所陈诗伟同志的大力帮助, 谨致谢意.

参考文献

- 1 Maradudin A A, Mendez E R. *Optics Letters*, 1992,17(24):1752~1754
- 2 Knotts M E, Michel T R, O'Donnell K A. *J. Opt. Soc. Am.*, 1992,9(10):1822~1831
- 3 O'Donnell K A, Knotts M E. *J. Opt. Soc. Am.*, 1991,8(7):1126~1131
- 4 Zu-Han Gu *et al.* *J. Opt. Soc. Am.*, 1993,10(8):1753~1764
- 5 Homes C C *et al.* *Appl. Opt.*, 1993,32(16):2976~2983
- 6 Roy S *et al.* *Appl. Opt.*, 1993,32(19):3550~3558
- 7 Bennett H E, Porteus J O. *J. Opt. Soc. Am.*, 1961,51(2):123~129
- 8 Stagg B J, Charalampopoulos T T. *Appl. Opt.*, 1991,30(28):4113~4118
- 9 Nicodemus F E. *Appl. Opt.*, 1965,4(7):767~773
- 10 Zhang Y W, Zhang C G, Klemas V. *Appl. Opt.*, 1986,25(20):3683~3689
- 11 Hanssen L M. *Opt. Eng.*, 1993,32(4):877~879
- 12 Nerry F *et al.* *Appl. Opt.*, 1988,27(4):758~765
- 13 张才根. *红外与毫米波学报*, 1991,10(5):385~388
- 14 汤大新. *红外研究*, 1985,4(4):323~328

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF GRIT SIZE ON THE RADIATIVE PROPERTIES OF SAMPLES

Liu Jian

(Qingdao University, Qingdao, Shandong 266033, China)

Zhang Caigen

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract By means of the IRE-1 IR radiometer, the spectral emissivities of abrasive paper with different grit sizes were measured in the 8 ~ 14 μm spectral band at temperatures of 40°C, 50°C, 70°C, respectively. It is indicated that the values of the emissivities go down with the decrease of the grit size when it is larger than the wave length.

Key words infrared, radiation, temperature, emissivity, grit size.