

低发射率材料红外法向发射率谱 测量方法的研究

陈诗伟 苏锦文 张祖恭

(中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家实验室, 上海, 200083)

摘要: 采用热管技术研制了材料发射率谱的专用测量附件; 利用双温测量技术, 在 P-E983 型红外分光光度计及 3600 型数据站上进行了较低温度下低发射率材料红外法向发射率谱测量方法的研究. 实测了几种材料的发射率谱; 讨论了影响测量误差的诸因素.

关键词: 红外辐射, 发射率, 热管.

引言

目前国内的材料发射率及测量设备及测量方法大都适合于中高温范围 (500~1000 K), 对于 500 K 以下, 特别是低发射率材料的测量, 未见报道. 我们研制了体积小、结构简单, 适合于 P-E983 型红外分光光度计配套使用的扁柱形热管炉, 使热管炉内的黑体空腔与多块被测样品均处于热管等温面, 从而减小了黑体腔与样品表面间温差. 用材料发射率谱专用测量附件, 应用双温测量技术, 实现了在 P-E983 型红外分光光度计及 3600 型数据站上进行多块样品 (每次七块) 的同时测试, 并直接自动记录出材料法向发射率谱随波长变化的曲线. 本测量系统可测试温度范围为 100~200℃, 波长范围为 5~50 μm.

1 光学系统

在 P-E983 型红外分光光度计上把标准黑体炉和热管炉分别置于红外分光光度计参考光路和测试光路中, 替代红外分光计的红外光源, 测量光学系统的原理图如图 1 所示.

2 热管炉

2.1 热管炉结构

热管炉是本测量系统的关键部件之一, 其结构如图 2 所示.

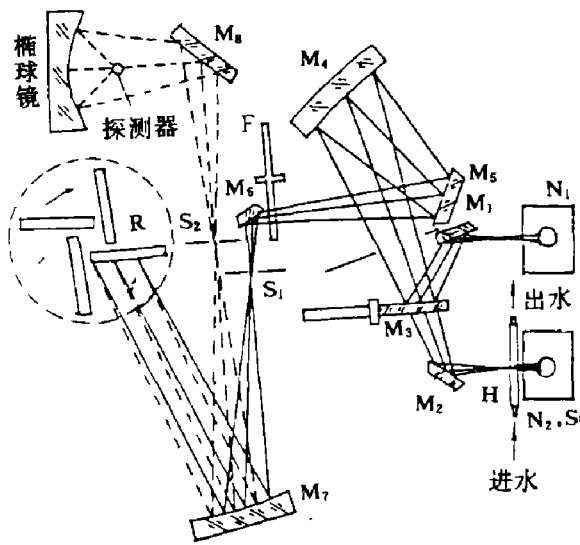


图1 光学系统

N_1, N_2, S 黑体炉和样品炉; $M_1 \sim M_8$ 反射镜
Fig.1 The optical system

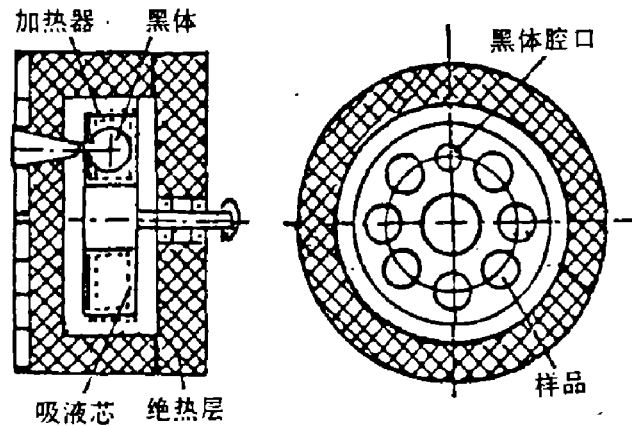


图2 热管炉的结构

Fig.2 Structure of the heat-pipe type heater

2.2 热管炉温度分布的测试

采用辐射能量比较法, 要求黑体空腔与被测样品表面同温, 或温差要小, 为此, 我们采用恒温性好的热管技术, 并配上 ZWK 智能化温度控制器, 其控温精度为 $\pm 0.1 \text{ K}$, 温度稳定性 $< \pm 0.2^\circ\text{C/h}$.

用铜-康铜差分温差电偶配以分辨率为 $1 \mu\text{V}$ 的数字电压表, 测量了黑体空腔底及热管等温面上各被测样品表面的温差和热管炉温度的稳定性. 测量结果见表 1~3.

表 1 样品表面温度测量结果

Table 1 Measured results of the surface temperature for various samples

黑体腔底温度 ($^\circ\text{C}$)	样品 1 ($^\circ\text{C}$)	样品 2 ($^\circ\text{C}$)	样品 3 ($^\circ\text{C}$)	样品表面最大温差 ($^\circ\text{C}$)
50	0.14	-0.12	-0.09	0.05
100	-0.68	-0.57	-0.55	0.13
150	-0.99	-0.89	-0.83	0.16

表 2 热管面温度均匀性测量结果

Table 2 Measured results of the surface temperature uniformity of the heat-pipe

炉温 ($^\circ\text{C}$)	黑体腔底 ($^\circ\text{C}$)	样品 1 ($^\circ\text{C}$)	样品 2 ($^\circ\text{C}$)	样品 3 ($^\circ\text{C}$)	热管面最大温差 ($^\circ\text{C}$)
150	150	149.889	149.867	149.889	0.025

表 3 热管炉温度稳定性测量结果

Table 3 Measured results of the temperature stability

时间 (min)	0	15	30	45	60
温度 ($^\circ\text{C}$)	150	149.84	149.84	149.86	149.90
温度稳定性 ($^\circ\text{C/h}$)	< 0.2				

2.3 黑体空腔有效发射率的计算

黑体腔的材料选用不锈钢(1Cr18Ni9Ti), 腔形为球园柱腔, 球腔内径 $\Phi = 20$ mm, 园柱腔内径 $\Phi = 13$ mm, 空腔开口口径 $\Phi = 8$ mm, 高度为2 mm, 为提高空腔的有效发射率, 对腔内壁进行喷砂打毛和高温氧化处理.

黑体空腔有效发射率的实测比较困难, 通常都是通过理论计算求得, 现国内外采用的计算方法很多^[4,5,6], 对本文所讨论的球形腔, 采用 Gouffe'A^[6]公式较为合适.

微型球腔的有效发射率 ϵ_b 按 Gouffe'A 公式为

$$\epsilon_b = \epsilon / [\epsilon(1 - s / S + s / S)], \tag{11}$$

式(11)中, ϵ 为腔壁材料的发射率, s 为开口面积, S 为腔壁(包括开口)的总面积. 计算结果如表4所示.

表4 微型球腔有效发射率计算值

Table 4 Calculated value of the effective emissivity of spherical small cavity

ϵ	0.94	0.93	0.90	0.80	0.70
ϵ_b	0.998	0.997	0.996	0.990	0.984

3 测量装置性能测试

3.1 分辨率

以聚苯乙烯为标准样品, 测量其透射率光谱, 实测结果表明, 仪器的分辨率较高, 在 $3200 \sim 2800 \text{ cm}^{-1}$ 之间仍能分辨出7个峰.

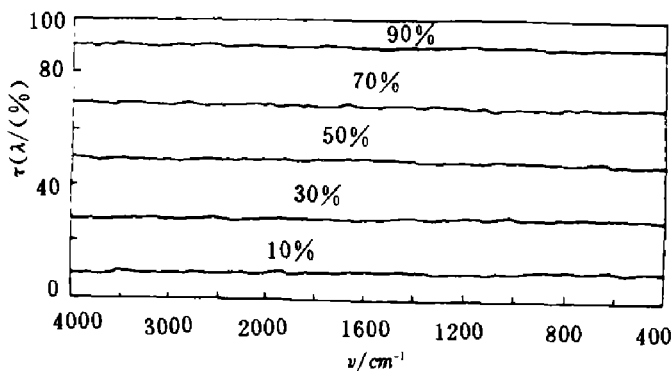


图3 仪器的线性实测曲线

Fig.3 Measured instrumental linearity

3.2 仪器线性

将自制的透过率校正盘安装在测试光路中, 使用 400 Hz 以上的调制频率, 用透过率 $\tau = 10\%$, 30% , 50% , 70% , 90% 的校正盘分别进行测量, 实测得到不同透过率的光谱曲线如图3所示, 由图3可见, 仪器的线性在 $\pm 1\%$ 之内.

3.3 重复性

选用 3M 黑漆(进口), TuH 和 TuL 涂料, Cu 黄铜基片(未处理), 镀铝镜面

等不同样品, 分别进行多次测试, 上述几种不同样品的表面法向光谱发射率实测曲线如图4和图5所示. 由图5可见, 本测量装置的重复性优于 $\pm 1\%$.

4 误差分析

4.1 黑体空腔偏离理想绝对黑体所产生的误差(δ_1)

若取空腔材料发射率 $\epsilon = 0.70$, 用 Gouffe'A 公式计算, 可得黑体空腔有效发射率 $\epsilon_b = 0.984$, 由此所引起的误差为 $\delta_1 = 0.016$.

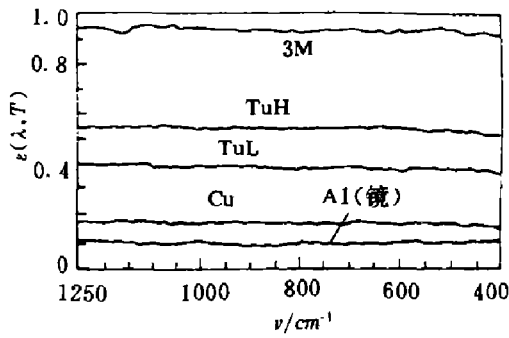


图 4 不同样品的光谱发射率曲线
Fig. 4 Normal spectral emissivity of several materials

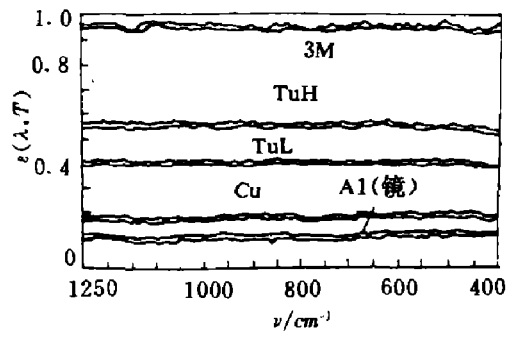


图 5 重复测试不同材料的光谱发射率曲线
Fig. 5 Repeated measurements of normal spectral emissivity of several materials

4.2 测温 and 控温引起的误差(δ₂)

- (1) 用二等标准的铜-康铜温差电偶测温, 其温度传递极限误差为 ±0.05℃;
- (2) 球腔底与热管面上各被测样品表面最大温差实测结果为 ±0.05℃;
- (3) 样品表面温度的不均匀性温差为 ±0.02℃;

上述三项温差合成得到的温度误差均方根值 (dT) 为 ±0.07℃.

由普朗克公式可得

$$\frac{dW_b(\lambda, T)}{W_b(\lambda, T)} = \frac{e^{C_2/\lambda T}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \cdot \frac{C_2}{\lambda T} \cdot \frac{dT}{T}; \tag{12}$$

令 $F(\lambda, T) = \frac{e^{C_2/\lambda T}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \cdot \frac{C_2}{\lambda T}$, 当 $e^{C_2/\lambda T} \gg 1$ 时, $F(\lambda, T) \approx C_2/\lambda T$. 若取波长为 8

μm, 测试温度为 323 °K, $F(\lambda, T) = 5.57$, 则 $\delta_2 = \frac{dW_b(\lambda, T)}{W_b(\lambda, T)} = F(\lambda, T) \frac{dT}{T} = \pm 0.001$.

4.3 红外分光光度计本身测量误差(δ₃)

δ₃ = ±0.01%τ (出厂指标), τ 为样品透过率, 若取 τ 的最大值 τ = 100%, 则 δ₃ = ±0.01.

4.4 样品周围物体热辐射及样品表面反射周围物体辐射所引起的误差(δ₄)

热管炉辐射口装有镀金光锥, 以减少被测样品之外的辐射能的影响. 测量时应尽量使光锥靠近样品表面, 测试结果表明, 样品辐射面与镀金光锥口的距离每增加 1 mm, 引入 ε_{λ, T} 测量值的增大约为 0.01~0.02.

综合上述误差分析, 可测得法向光谱发射率总的不确定度如表 5 所示.

表 5 被测材料发射率谱总的不确定度
Table 5 Total uncertainty of the measured spectral emissivity

测试温度 (°C)	材料发射率 ε(λ, T)	总不确定度 Δε(λ, T)	测试温度 (°C)	材料发射率 ε(λ, T)	总不确定度 Δε(λ, T)
150	>0.4	0.03	100	>0.4	0.04
	0.4~0.2	0.04		0.4~0.2	0.05

参考文献

- 1 徐世秋 et al. 红外研究, 1983, 4: 263~269
- 2 陈诗伟 et al. 红外研究, 1987, 6: 431~436
- 3 许勤堂 et al. 工程热物理学, 1984, 1: 75~81
- 4 Clack Howard E, Moordwightg. *Research N. B. S.*, 1963, A70: 393
- 5 Heinisch R P, Schmidt R N. *Appl. Opt.*, 1970, 9: 1920
- 6 Gouffe'A. *Rev. Opt: Que*, 1945, 24: 1

STUDY OF THE METHOD FOR MEASURING NORMAL SPECTRAL EMISSIVITY FOR MATERIALS WITH LOW EMISSIVITY

Chen Shiwei, Su Jinwen, Zhang Zugong

(National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The design of a special accessory for measuring emissivities of materials by means of the heat pipe heater technique is reported. The measuring system consists of a P-E983 IR spectrophotometer, a model 3600 data station and a heat pipe heater. The measuring technique for low emissivities of materials is studied by means of a double temperature-measuring technique. The normal spectral emissivity curves of some materials are measured and the factors which will determine the measuring errors are discussed.

Key words: infrared radiation, emissivity, heat pipe.