

材料法向光谱发射率测量方法研究

陈诗伟 章卫祖

(中国科学院上海技术物理研究所)

摘要——本文报道利用红外分光光度计和微机系统,采用二次测量技术,测量材料表面法向光谱发射率的基本原理和测试方法。推导出光谱发射率的计算公式,对引起测量误差的诸因素进行讨论,并实测了几种材料法向光谱发射率曲线。

一、引 言

材料发射率是热辐射特性的重要参数之一。测量材料发射率的方法按其不同的测试原理通常可分为:1. 量热法;2. 反射率法;3. 辐射能量法。量热法主要用于测量金属材料的全发射率。反射率法主要用于高反射率材料的低发射率测量。辐射能量法是目前国内外常用的发射率测量方法^[1~3],它既可测量非金属材料和部分金属材料的全发射率,也可测量光谱发射率。本文根据辐射能量法原理,采用双独立黑体炉,样品加热炉以及精密温度自动控制仪等组成测试系统,应用 P-E 983 型红外光栅分光光度计的双光束测试技术和微机系统,直接自动记录出材料表面法向光谱发射率随波长的变化曲线,既简化了操作规程,又提高了测量精度和可靠性。测试温度范围为 500~1000 K;可测波长范围为 2~55 μm 。

二、测 试 原 理

材料的光谱发射率根据定义可用公式表示为

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{W_{\lambda, T}}{W_{b, \lambda, T}}; \quad (1)$$

式中, $W_{\lambda, T}$ 表示某温度 T 时样品单色辐射通量密度; $W_{b, \lambda, T}$ 表示同一温度下黑体辐射源单色辐射通量密度,用普朗克公式表示为

$$W_{b, \lambda, T} d\lambda = \frac{n^2 c_1 \lambda^{-5} d\lambda}{e^{c_2/\lambda T} - 1}; \quad (2)$$

式中, n 为样品所处周围介质的折射率; λ 为波长; c_1 和 c_2 分别为第一和第二辐射常数。

设在某一温度下接收器所接收到的辐射强度为

$$S(\lambda, T) = R(\lambda) [\varepsilon(\lambda, T) W(\lambda, T) + B(\lambda) + \rho(\lambda) E(\lambda, T)] \omega A \tau_a \Delta \lambda; \quad (3)$$

式中, T 为绝对温度; $R(\lambda)$ 为仪器整个系统的响应函数; $\varepsilon(\lambda, T)$ 为材料的发射率; $W(\lambda, T)$ 为普朗克函数; $B(\lambda)$ 为背景及杂散辐射; $E(\lambda, T)$ 为被测样品周围的辐射能量; $\rho(\lambda)$ 为样品表面的反射率; ω 为测试立体角; A 为狭缝面积; τ_a 为大气透过率。

对于标准黑体源, $\varepsilon=1, \rho=0$; 所以, 测量标准黑体源所得到的辐射强度为

$$S_1(\lambda, T_1) = R(\lambda) [W(\lambda, T_1) + B(\lambda)] \omega A \tau_a \Delta \lambda; \quad (4)$$

$$S_3(\lambda, T_2) = R(\lambda) [W(\lambda, T_2) + B(\lambda)] \omega A \tau_a \Delta \lambda; \quad (5)$$

对于样品在两种不同温度下进行测量, 其辐射强度为

$$S_2(\lambda, T_1) = R(\lambda) [\varepsilon(\lambda, T_1) W(\lambda, T_1) + B(\lambda) + \rho(\lambda) E(\lambda, T_1)] \omega A \tau_a \Delta \lambda; \quad (6)$$

$$S_4(\lambda, T_2) = R(\lambda) [\varepsilon(\lambda, T_2) W(\lambda, T_2) + B(\lambda) + \rho(\lambda) E(\lambda, T_2)] \omega A \tau_a \Delta \lambda. \quad (7)$$

假设样品的发射率和反射率在整个测试波长范围内随温度的变化很小, 而且 $[W(\lambda, T_2) - W(\lambda, T_1)] \gg [E(\lambda, T_2) - E(\lambda, T_1)]$, 则上述式子可简化为

$$S_4 - S_2 = R(\lambda) \varepsilon(\lambda) [W(\lambda, T_2) - W(\lambda, T_1)] \omega A \tau_a \Delta \lambda; \quad (8)$$

$$S_3 - S_1 = R(\lambda) [W(\lambda, T_2) - W(\lambda, T_1)] \omega A \tau_a \Delta \lambda; \quad (9)$$

将方程式(8)除以(9)可得材料法向光谱发射率为

$$\begin{aligned} \varepsilon(\lambda, T) &= \frac{S_4 - S_2}{S_3 - S_1} \\ &= \frac{R(\lambda) \varepsilon(\lambda) [W(\lambda, T_2) - W(\lambda, T_1)] \omega A \tau_a \Delta \lambda}{R(\lambda) [W(\lambda, T_2) - W(\lambda, T_1)] \omega A \tau_a \Delta \lambda}. \end{aligned} \quad (10)$$

进行上述材料法向光谱发射率的测量, 既可用红外分光光度计手动操作, 也可使用微机通过 P-E 983 磁盘实现联机操作。同时能将测试结果进行数据处理, 消除大气中 H_2O 和 CO_2 等气体的影响, 提高测量结果的准确性。必要时还可把测试结果和曲线贮存于计算机磁盘中。

三、测量装置

本测量装置主要由 P-E 983 型红外分光光度计、3600 型数据站、G 660 型打印机、标准黑体炉和样品加热炉及精密自动控温系统等组成。其中, 光学系统原理如图 1 所示。

1. 标准黑体炉

标准黑体炉是整个测试系统的关键部件之一。为此, 我们专门设计并制作了体积小、结构简单、并能适用于分光计的黑体炉, 其结构如图 2 所示。

黑体腔选用不锈钢材料(1Cr18Ni9Ti), 圆形腔内径为 16 mm, 腔体长度为 50 mm, 辐射口为长方形(4×10 mm²), 为提高黑体空腔有效发射率, 空腔内壁经喷砂打毛, 再经高温氧化处理, 这样腔体本身材料的发射率 $\varepsilon_s > 0.86$ 。为减少空腔内的温差, 加热炉丝采用炉管两端密而中间疏的绕制方法。

黑体空腔有效发射率实测比较困难复杂, 通常都是经理论计算求得。对黑体空腔有效发射率的计算, 国内外采用的计算方法很多^[4,5,6], 我们根据 Bedford 精确求解迭代法, 按

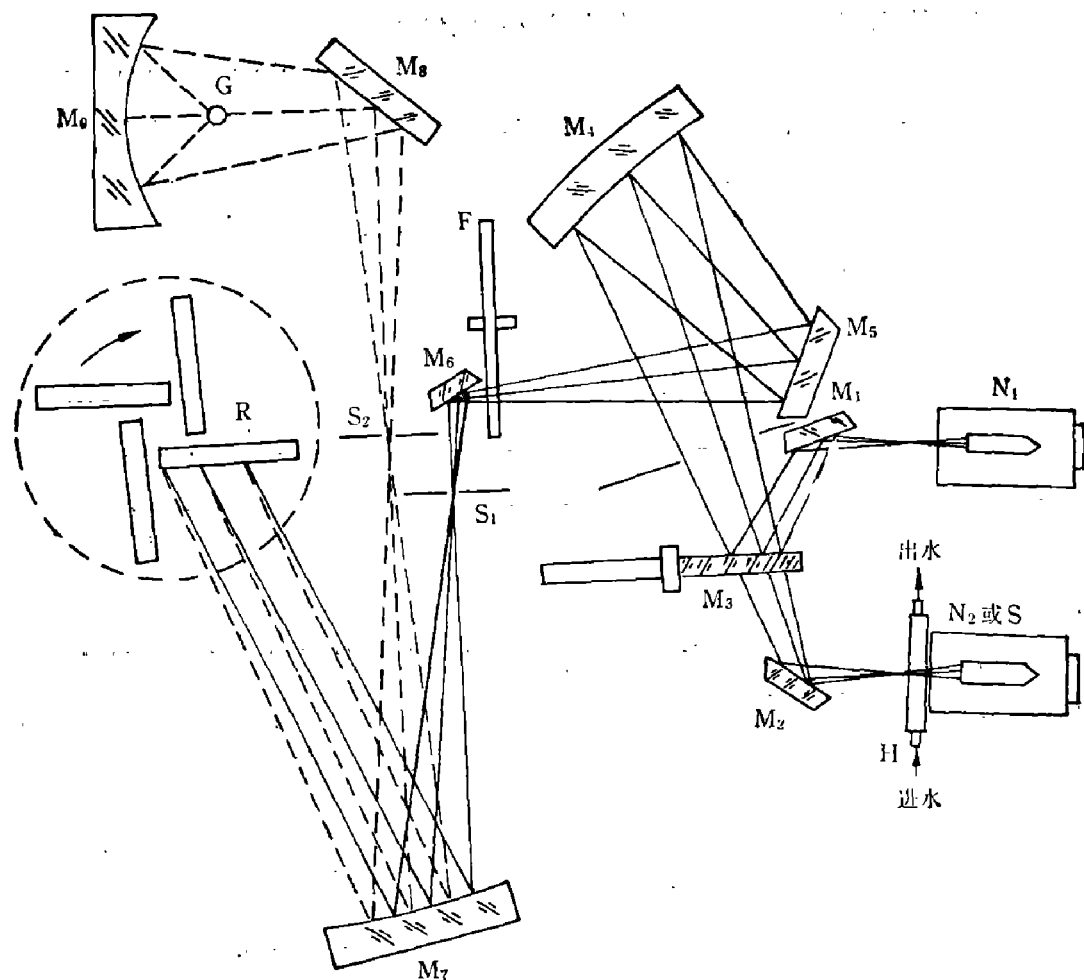


图1 光学系统

Fig. 1 The optical system.

N_1 —室温黑体; N_2 —标准黑体炉; S —样品加热炉; H —水冷却光栏; M_1 、 M_2 、 M_5 、 M_6 、 M_8 —平面反射镜; M_3 —斩光(调制)反射镜; M_4 —球面反射镜; M_7 —抛物面镜; M_9 —椭球面反射镜; S_1 — λ 射狭缝; S_2 —出射狭缝; F —光学滤光片组; R —光栅; G —真空温差电偶

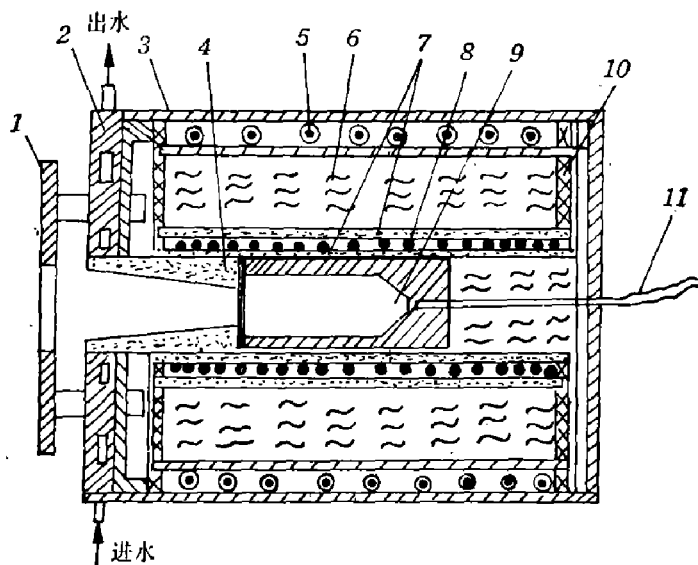


图2 标准黑体结构图

Fig. 2 The structure diagram of the standard blackbody.

1—插板; 2—水冷却光栏; 3—炉壳; 4—氧化镁材料; 5—水冷却套管; 6—保温层; 7—陶瓷管; 8—加热炉丝; 9—黑体空腔; 10—石棉板; 11—温差电偶。

实际腔形和尺寸算出黑体空腔有效发射率为 $\epsilon=0.996$ 。

温度控制系统用 DWT-702 型精密温度自动控制仪, 对黑体炉和样品加热炉进行自动控温, 控温精度为 $\pm 0.5\text{K}$, 黑体空腔恒温区经实际测量大于腔长的三分之二。实测数据见表 1; 表中 x 表示测温点位置; L 表示腔长。

表 1 黑体腔轴向温度分布

Table 1 The axial temperature profile of the black body cavity

X/L	腔底 → 腔口											
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
温度(°C)												
400	400	399.8	399.6	399.6	399.5	399.2	399.0	398.0	397.0	395.0	385.0	
600	600	599.8	599.6	599.4	599.2	599.0	598.4	598.0	596.7	594.2	584.5	

2. 样品加热炉

样品加热炉结构与黑体炉基本一样, 仅加热腔形状略有不同。样品直径 ϕ 为 19 mm; 厚度视不同材料而定; 一般对金属材料可薄些, 为 1~2 mm; 对非金属材料可厚些, 为 2~3 mm。样品表面温度可用标准温差电偶或测温仪测定。

四、样品测试与分析

我们实测了几种不同材料的光谱发射率曲线, 以便于分析对比。

1. 乳白石英玻璃材料

图 3 为乳白色石英玻璃反射率和发射率曲线图。由图可见, 石英玻璃的法向光谱发射率曲线在波数 1100 cm^{-1} ($9.09\ \mu\text{m}$) 和 480 cm^{-1} ($20.8\ \mu\text{m}$) 两处的发射率降低, 这是由于反射率增大所致。在 $4000\sim 2400\text{ cm}^{-1}$ 间发射率逐渐增大, 这恰好是石英玻璃透射性能逐渐下降所在处。

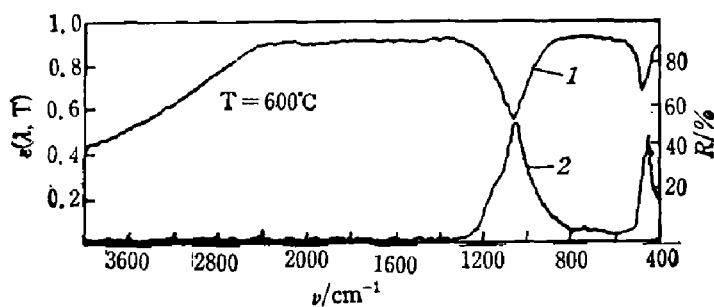


图 3 乳白石英玻璃的反射率与发射率曲线

Fig. 3 Curves of reflectivity and emittance for quartz

1—法向光谱发射率曲线; 2—室温时反射率曲线

2. 氧化铝和氮化硼材料

图 4 为氧化铝和氮化硼法向光谱发射率曲线图。图 4 提供了实测法向光谱发射率曲线与美国空军研究所 BLAN 等人的研究报告数据的比较; 由图可见, 除个别处数值不相符合外, 整个测试波段基本一致, 在 1500 cm^{-1} ($6.67\ \mu\text{m}$) 处数值相差较大, 这可能是 BLAN 等

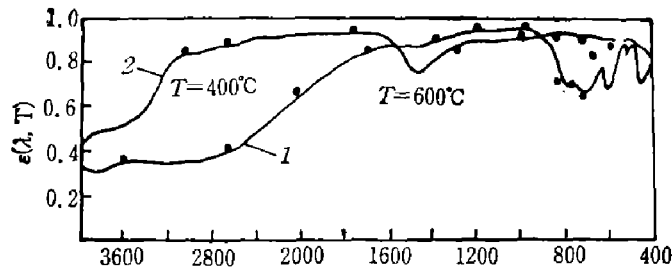


图4 氧化铝(纯度99%)和氮化硼法向光谱发射率曲线
Fig. 4 Normal spectral emittance of pure alumina(99%) and boron nitride.

●—美国空军研究所研究报告中的数据
1—氧化铝法向光谱发射率曲线 2—氮化硼法向光谱发射率曲线

人采用单光路测量,受大气中水蒸气强吸收影响所致。

五、误差分析

对于测量方法的误差分析如下:

1. 黑体空腔偏离理想绝对黑体引起的空腔有效发射率小于1的误差(δ_1)。

我们设计的锥形圆筒空腔,根据实际尺寸及温度分布,按 Bedford 方法精确计算黑体空腔有效发射率 $\epsilon = 0.996$ 。根据斯忒藩-玻尔兹曼公式可得 $\delta_1 = 0.004$ 。

2. 温度测量和控温引起的误差(δ_2)

- (1) 用二等标准铂铑-铂温差电偶测量温度,其传递极限误差为 $\pm 0.9^\circ\text{C}$;
- (2) 黑体空腔内壁与测温温差电偶所处位置存在的温差为 $\pm 0.25^\circ\text{C}$;
- (3) 样品表面与测温温差电偶之间存在的最大温差为 $\pm 1^\circ\text{C}$;
- (4) 黑体炉和样品炉两者的控温稳定度均为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$;
- (5) 样品表面温度的不均匀性存在的温差为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

由上述五项合成的温度误差均方根值为 $\pm 1.54^\circ\text{C}$ 。

由普朗克公式得

$$\frac{dW(\lambda, T)}{W(\lambda, T)} = \frac{e^{c_2/\lambda T}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \cdot \frac{C_2}{\lambda T} \cdot \frac{dT}{T}; \quad (11)$$

$$\text{令 } F(\lambda, T) = \frac{e^{c_2/\lambda T}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \cdot \frac{C_2}{\lambda T},$$

$$\text{当 } e^{c_2/\lambda T} \gg 1 \text{ 时, } F(\lambda, T) \approx \frac{C_2}{\lambda \cdot T},$$

若取波长为 $2 \mu\text{m}$, 测试温度为 $T = 673\text{K}$,

$$F(\lambda, T) = 10.67$$

$$\text{则 } \delta_2 = \frac{dW(\lambda, T)}{W(\lambda, T)} = F(\lambda, T) \frac{dT}{T} = \pm 0.025.$$

为验证上述误差分析,我们降低样品加热炉的温度,测量不锈钢材料经喷砂打毛高温氧化后法向光谱发射率,结果如图5所示。当样品温度为 770K (比黑体温度低 3K)时,在波长 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 处,光谱发射率变化最大为 ± 0.02 ,而长波方面变化不大,这与式(11)的结果相一致;波长越短,测量温度越低,误差就越大。

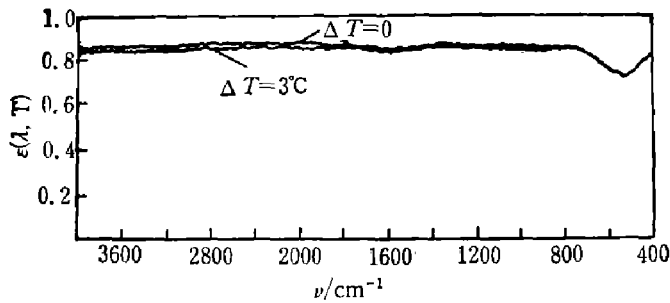


图5 样品炉与黑体炉不等温时 $\varepsilon_{\lambda, T}$ 曲线

Fig. 5 Normal spectral emittance of stainless steel when the temperature of the specimen is different from that of the blackbody.

3. 红外分光光度计本身的测量误差 (δ_3)

P-E 983 型红外分光光度计本身的测量误差为 $\delta_3 = \pm 0.1\%T$ 。

4. 其他测量误差 (δ_4)

进行二次测量时, 由于环境湿度有变化, 难以完全消除大气中 H_2O 和 CO_2 等气体的吸收, 但这种影响可通过微机数据处理或双光束系统消除。因此, 这一误差可忽略。

综合上述误差可得总的均方根误差为 ± 0.027 。

若对波长积分, 还可计算 500~1000 K 法向全发射率及辐射能谱分布曲线。

致谢——本工作得到徐世秋老师的指导, 王德华、王燕燕、曹卫军等同志在工作上给予帮助, 在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] 徐世秋等, 红外研究, **2**(1983), 4: 263~269.
- [2] 许勤堂等, 热工程物理学, **5**(1984), 1: 75~81.
- [3] Claek Howard E. & Mooredwightg, *Research N. B. S.*, **70 A**(1963), 393.
- [4] Heinisch R. P. & Schmidt R.N., *Appl.* **9** (1970), 1920.
- [5] Gouffea, *Rev. Optique*, **24** (1945), 1.
- [6] Bedford R. E., *J. Opt. Soc. Amer.*, **65** (1975), 565.

MEASURING METHOD FOR NORMAL SPECTRAL EMITTANCE OF MATERIALS

CHEN SHIWEI ZHANG WEIZU

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The experimental principle and the method to measure the normal spectral emittance of materials by infrared spectrophotometer and microcomputer system are presented. The calculative expression of normal spectral emittance is deduced. Some factors which cause the error are discussed. Normal spectral emittance curves of several materials are measured.