

C/C 复合材料光谱发射率测量研究

张友华 陈连忠 刘德英 欧东斌 陈海群

(中国航天空气动力技术研究院,北京 100074)

文 摘 使用石英灯辐射加热器对 C/C 复合材料进行加热试验,分别用 NiCr - NiSi 热电偶及红外测温仪测量材料的背面温度,通过加热过程中的背面温度曲线,得到了材料的 $\varepsilon_\lambda - T$ 图。结果表明:在 1 123 ~ 1 273 K 情况下, $\varepsilon_\lambda (\lambda = 1.6 \mu\text{m})$ 在 0.93 ~ 0.87,随温度升高,C/C 复合材料的光谱发射率 ε_λ 呈下降趋势。

关键词 C/C 复合材料,温度测量,光谱发射率测量

Spectral Emittance Measurement of C/C Composite

Zhang Youhua Chen Lianzhong Liu Deying Ou Dongbin Chen Haiqun

(China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074)

Abstract This paper introduces spectral emittance of C/C composite. The quartz lamps radiant heater was used to heat C/C model. The NiCr - NiSi thermocouples and infrared thermometer were used to measure temperature on the back surface of C/C. The figure of $\varepsilon_\lambda - T$ was attained by the temperature curve. The results show that for the 1 123 to 1 273 K range, the $\varepsilon_\lambda (\lambda = 1.6 \mu\text{m})$ is 0.93 to 0.87 and the spectral emittance ε_λ decreases when the temperature increases.

Key words C/C Composite, Temperature measurement, Spectral emittance measurement

1 引言

C/C 复合材料作为烧蚀耐热材料,其烧蚀机理主要由两部分组成:化学烧蚀和机械剥蚀,热化学烧蚀仅与材料的组元有关,而机械剥蚀则与材料工艺和材料表面的烧蚀形貌有关,文献[1]介绍了 C/C 复合材料烧蚀形貌测量结果并对其烧蚀机理进行了阐述,此外,国内外对 C/C 复合材料的烧蚀性能^[2~7]及热物性能^[8~11]进行了大量的研究工作。

随着 C/C 复合材料在航天运载器大面积防热层重复使用上的需求,对材料光谱发射率的测量越发受到重视,美国对航天飞机轨道运载器的增强 C/C 复合材料进行过深入的研究^[12~13],而我国的研究却相对较少。本文使用了石英灯辐射加热器作为热源,以热电偶直接测温 and 红外测温仪的间接测温结果为基础,得到了 C/C 复合材料在 1 123 ~ 1 273 K 情况下的光谱发射率并进行了误差分析。

2 试验设备及模型

试验设备为石英灯辐射加热器,主要包括电源系统、石英灯管、水冷反射板、模型安装窗口等部件;试验模型为 C/C 复合材料,尺寸为 100 mm × 100 mm ×

4 mm,试验过程中模型安装在模型安装窗口内,模型前表面受到石英灯辐射加热,背面布置有一对 NiCr - NiSi 热电偶,测量加热过程中的温度数据;此外,试验使用了 MA2SC 型红外测温仪测量模型背面对应热电偶测量区域温度。MA2SC 型红外测温仪为单色红外测温仪,量程为 350 ~ 2 000 °C,系统精度 ± 0.3%,光学分辨率 ≥ 300:1,响应光谱 1.6 μm。

3 结果及分析

对 C/C 复合材料进行了测温试验,红外测温仪垂直于 C/C 复合材料,试验以轨道形式运行,总试验时间 500 s,在 350 s 以前为低状态,350 s 以后为高状态,两状态下 C/C 复合材料背面的平衡温度在 1 123 ~ 1 273 K,温度测量结果见图 1。

本文研究所得试验结果为石英灯辐射加热情况下 C/C 复合材料背面温度的热电偶直接测量值和红外测温仪的间接测量值,而红外测温仪测温时需要预设 C/C 复合材料的光谱发射率,预设光谱发射率偏差引起的温度测量偏差满足以下关系式^[14]:

$$\Delta T = \frac{\lambda}{c_2} \cdot \frac{\Delta \varepsilon_{\lambda_0}}{\varepsilon_{\lambda_0}} \cdot T_0^2 \quad (1)$$

收稿日期:2008 - 09 - 20

作者简介:张友华,1974 年出生,硕士,主要从事航天飞行器气动热研究。

$$\Delta T = T - T_0 \quad (2)$$

$$\Delta \varepsilon_{\lambda_0} = \varepsilon_{\lambda_0} - \varepsilon_{\lambda} \quad (3)$$

式中, ΔT 为 C/C 复合材料背面温度真实值和红外测温仪测量值的偏差, λ 为红外测温仪的工作波长(1.6 μm), T 为 C/C 复合材料背面温度真实值, T_0 为红外测温仪测量值, c_2 为第二辐射常数, $\Delta \varepsilon_{\lambda_0}$ 为 C/C 复合材料光谱发射率与预设光谱发射率的偏差, ε_{λ_0} 为红外测温仪预设的光谱发射率, ε_{λ} 为 C/C 复合材料的光谱发射率。

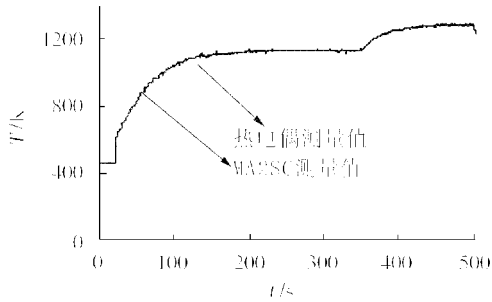


图1 C/C 复合材料背面温度测量结果

Fig. 1 Temperature on back surface of C/C composite

以热电偶直接测量值作为 C/C 复合材料背面温度的真实值 T , 通过(1) ~ (3)可以得到 C/C 复合材料的光谱发射率 ε_{λ} 随温度 T 的变化关系:

$$\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda_0} - \varepsilon_{\lambda_0} \cdot \frac{c_2(T - T_0)}{\lambda T_0^2} \quad (4)$$

将试验结果整理后得到 $\varepsilon_{\lambda} - T$ 图见图 2。

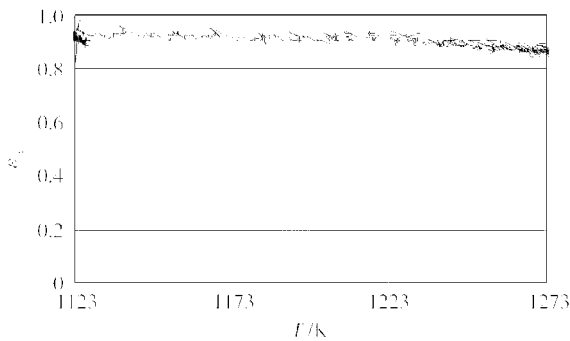


图2 C/C 复合材料材料的 $\varepsilon_{\lambda} - T$ 图

Fig. 2 $\varepsilon_{\lambda} - T$ of C/C composite

由图 2 可以看出: 在 1 123 ~ 1 273 K 情况下, ε_{λ} 为 0.93 ~ 0.87, 随着温度 T 升高, C/C 复合材料的光谱发射率 ε_{λ} 呈下降趋势。

4 误差分析

C/C 复合材料的光谱发射率 ε_{λ} 测量过程中误差主要由 T_0 和 T 产生, 其中, T_0 由 MA2SC 型红外测温仪测量, 在 350 ~ 2 000 °C 的测量精度为 $\pm 0.3\%$, T 由

直径为 $\Phi 0.3 \text{ mm}$ 的 NiCr - NiSi 热电偶测量, 在 400 ~ 1 100 °C 的测量精度为 $\pm 0.4\%$, 对式(4)引入误差分析:

$$\delta \varepsilon_{\lambda} = \frac{\partial \varepsilon_{\lambda}}{\partial T} \cdot \delta T + \frac{\partial \varepsilon_{\lambda}}{\partial T_0} \cdot \delta T_0 \quad (5)$$

式中, $\delta \varepsilon_{\lambda}$ 为 ε_{λ} 的绝对误差, δT 和 δT_0 分别为 T 和 T_0 的绝对误差, 进一步推导后得:

$$\delta \varepsilon_{\lambda} = -\frac{\varepsilon_{\lambda_0} c_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T_0^2} \cdot \delta T - \frac{2T}{T_0^3} \cdot \delta T_0 + \frac{1}{T_0^2} \cdot \delta T_0 \right) \quad (6)$$

代入 ε_{λ} 并化简后得相对误差关系式:

$$\sigma_{\varepsilon_{\lambda}} = \frac{\delta \varepsilon_{\lambda}}{\varepsilon_{\lambda}} = \frac{\frac{1}{T_0} \cdot \frac{\delta T}{T} - 2 \frac{1}{T_0} \cdot \frac{\delta T_0}{T_0} + \frac{1}{T} \cdot \frac{\delta T_0}{T_0}}{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} - \frac{\lambda T_0}{c_2 T}} \quad (7)$$

式中, $\sigma_{\varepsilon_{\lambda}}$ 为 ε_{λ} 的相对误差。

由式(7)可以作出 $\sigma_{\varepsilon_{\lambda}} - T$ 关系曲线见图 3。从图 3 可以看出, 在 1 123 ~ 1 273 K 情况下, C/C 复合材料的 $\sigma_{\varepsilon_{\lambda}}$ 在 $\pm 0.8\%$ 以内, 随着温度 T 升高, $\sigma_{\varepsilon_{\lambda}}$ 呈下降趋势。

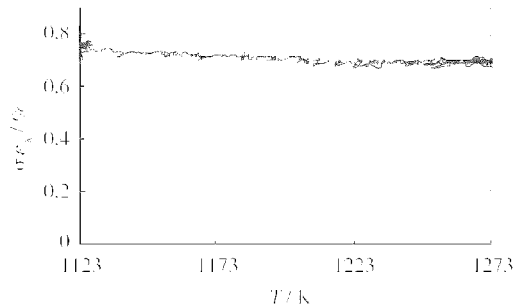


图3 C/C 复合材料的 $\sigma_{\varepsilon_{\lambda}} - T$ 图

Fig. 3 $\sigma_{\varepsilon_{\lambda}} - T$ of C/C composite

5 结论

对 C/C 复合材料进行了石英灯辐射加热, 以热电偶直接测温 and 红外测温仪间接测温结果为依据, 得到了 C/C 复合材料在 1 123 ~ 1 273 K 情况下的光谱发射率并进行了误差分析, 研究表明: 在 1 123 ~ 1 273 K 情况下, C/C 复合材料的 ε_{λ} 为 0.93 ~ 0.87, $\sigma_{\varepsilon_{\lambda}}$ 在 $\pm 0.8\%$ 以内, 随温度升高, C/C 复合材料的光谱发射率及相对误差呈下降趋势。

参考文献

- 俞继军, 马志强, 姜贵庆等. C/C 复合材料烧蚀形貌测量及烧蚀机理分析. 宇航材料工艺, 2003; 33(1): 36 ~ 39
- Dicristina V. Hyperthermal ablation performance of carbon-carbon composites. AIAA71 - 416

(下转第 96 页)