

薄膜辐射热探测器

中国科学院力学研究所 竺乃宜 李红德 邹惠良 崔季平 李连祥
天津大学无线电系 高俊杰 张瑞智 董向红 张敏 黄文国

薄膜辐射热探测器是一种结构简单,灵敏度高,响应快速的辐射热测量元件,特别适用于短时间超声速设备中的辐射测量,也可以在辐射能的标定中使用.这种探测器是在通常薄膜电阻温度计^[1-3]的表面上覆盖一层碳黑类物质,以增加它的吸收率和扩大吸收谱的宽度,且减少吸收率随波长的变化.

过去国外制作薄膜辐射热探测器时往往是将特制的液态金属悬浮物刷在玻璃或陶瓷基片上^[4],或者是将事先制好的碳薄膜覆盖在已溅射了白金膜的玻璃基片上^[5].这样得到的探测器,表面均匀性较差,而且频响宽度一般只能到达波长为 1μ 以下.我们改进了制作工艺,在玻璃基片上先溅射一层白金薄膜,然后用真空蒸发方法将碳直接蒸发在白金膜的表面上.这样得到的碳膜均匀性较好,碳膜与白金膜之间粘合得也较好,且频响范围可以扩大到 2μ 以下的波长范围,超过了国外同类探测器(图3).

1. 结构和工作原理

薄膜辐射热探测器的结构见图1.玻璃基片的尺寸为 $\phi 20\text{mm} \times 5\text{mm}$,白金膜的厚度一般为几百个 \AA ,碳膜的厚度一般为 $1000-4000\text{\AA}$.由于碳膜足够薄,所以外界高温气体传给碳膜的辐射热流 $\dot{q}_{r,t}$ 绝大部分都将通过碳膜传给白金膜^[5].同样,由于白金膜也足够薄,所以白金膜的温度也就代表了玻璃基片的表面温度^[3].若通过银浆引线给白金膜加上一个恒定的小电流,当外界有一个定常的辐射热流 $\dot{q}_{r,t}$ 输入时,膜的温度和电阻将随时间而增加,相应地膜上的电压降也将增加.按照半无限平板传热理论,探测器表面温度随时间的变化为^[6,7]

$$T(t) - T(0) = \dot{q}_{r,t} \cdot 2\sqrt{t/\pi(\kappa\rho c)_{\text{玻璃}}} \quad (1)$$

探测器上有恒定电流 I 通过时

$$T(t) - T(0) = \Delta V/I \cdot R_f \cdot \alpha \quad (2)$$

薄膜探测器给出的电压信号与热流的关系为(习惯称为温度曲线)

$$\dot{q}_{r,t} = \frac{\sqrt{\pi(\kappa\rho c)_{\text{玻璃}}}}{2I \cdot R_f \cdot \alpha} \cdot \frac{\Delta V'(t)}{\sqrt{t}} \quad (3)$$

我们实验中采用的电路由图2给出,因此式(3)将变成

$$\dot{q}_{r,t} = \frac{(R_0 + R_f)^2}{R_0 \cdot R_f \cdot E_0} \cdot \frac{\sqrt{\pi(\kappa\rho c)_{\text{玻璃}}}}{2\alpha} \cdot \frac{\Delta V'(t)}{\sqrt{t}} \quad (4)$$

2. 制作工艺

首先将 κ 玻璃基片在高真空镀膜机中溅射上一层白金膜,白金靶与玻璃基片距离约为 2.5cm ,罩内真空度为 10^{-2}mmHg ,直流轰击电压为 $1.2-1.5\text{kV}$,轰击电流为 $15-20\text{mA}$,

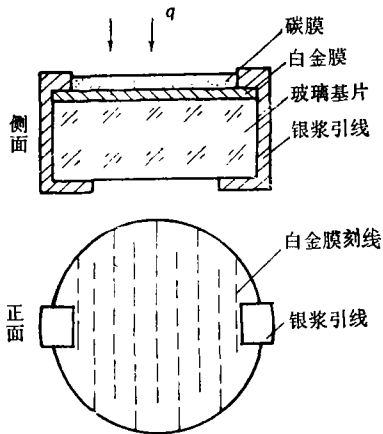


图 1 薄膜辐射热探测器结构示意图

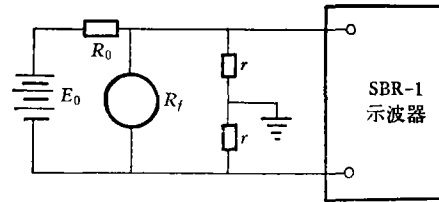


图 2 测量温度曲线的线路

溅射时间为 13 分钟左右。为了增大白金膜的电阻值以提高探测器的灵敏度,用刀片将白金膜刻划成一些彼此连续的长条形状,这时白金膜总电阻约为 200—300 Ω 。将玻璃基片的两侧刷上两条银浆引线。然后将探测器放入高温炉内,加温到 610—630 $^{\circ}\text{C}$,恒温 2 小时,再令其自然冷却。老化以后电阻值降为 60—100 Ω 。采用真空蒸发镀膜技术将探测器的白金膜上再蒸发上一层碳膜,一般同时使用两对碳电极效果较好。真空度要求在 $5 \times 10^{-5} \text{mmHg}$ 以上,电流为 150A 左右,蒸发时间约在 2 秒钟左右。最后再将探测器通上几十 mA 的电流,约十几分钟,进行电老化,用以增加探测器的稳定性。

3. 标定

单层白金膜,虽然透射率一般小于 2%,但是反射率却高达 40—60%,且随波长变化太大。单层碳膜的反射率虽只有 10—20%,但同时其透射率也将达到 10—20%。现在我们使用的一层白金膜加一层碳膜的探测器则克服上述二者的缺点。图 3 给出了我们实验中使用最多的 II 型探测器的总反射率、总透射率及总吸收率随波长的变化,可以看出,波长从 0.2 μ 直到 2.2 μ 范围内,探测器的总吸收率都在 $0.85 \pm 10\%$ 的范围内。在实际应用中我们近似选取探测器的总吸收率为 0.85。我们在 24.4—79.0 $^{\circ}\text{C}$ 的范围内测定了探测器白金膜电阻值的变化,从而得出其电阻温度系数 $\alpha = (R_{T_2} - R_{T_1}) / R_{T_1} (T_2 - T_1)$ 。我们实验中使用得最多的两个 II 型探测器的 α 值均为 $3.06 \times 10^{-3} / \text{度}$ 。用 6J 型干涉显微镜对各种型号探测器碳膜的标准样品测量了其厚度,II 型碳膜厚度小于 1400 \AA 。我们还使用 JSM-U3 扫描电子显微镜观察了碳膜标准样品的表面形貌,放大倍数从 60 倍一直变到 30000 倍。观察结果只在样品的边缘部分看到少数直径为 1 μ 量级的小黑点,可能是属于气泡或针孔。绝大部分表面都很平滑、致密,说明碳膜的均匀性是良好的。

4. 实验方法和装置

在本实验室内径为 800mm 的激波管中,同时安置八个半径 $r_1 = 29\text{mm}$ 的元柱形平头模型。模型头部正中间装有 5mm 厚的石英玻璃窗,窗口半径 $r_2 = 8\text{mm}$ 和 10mm 两种。探测器表面至窗口外表面距离一般为 6 至 8mm 左右。探测器表面的有效使用半径为 8mm 和 9.5mm 两种。

假设激波管中②区气流在有效实验时间内是均匀的,模型头部弓激波与模型窗口之间的高温气体向正前方的辐射能透过窗口被探测器表面接收,表面白金膜上产生的电压信号在 SBR-1 示波器上显示出来。通过公式(4)就可以计算出探测器表面所接收到的辐

射热流率 $\dot{q}_{r,i}$.

在我们目前的实验状态下,模型头部的高温气体是属于光学薄的.且假设弓激波层中各处的温度和密度是常数,那么根据几何配置,就可以给出在驻点情况下,高温气体的总辐射强度 E 与探测器表面接收到的辐射热流率 $\dot{q}_{r,i}$ 之间的关系式

$$\dot{q}_{r,i} = F_{\text{视}} \cdot T_{\text{壁}} \cdot a_f \cdot \delta \cdot F_{\text{几}} \cdot \frac{E}{2} \quad (5)$$

$$F_{\text{几}} = \frac{1}{2\pi \cdot s_1} \iint_{r_1} ds_1 \cdot \iint_{r_2} \frac{\cos \beta}{r^2} ds_2 \quad (6)$$

在本工作中选取 $F_{\text{视}} = 1$, $T_{\text{壁}} = 0.9$, $a_f = 0.85$, $\delta/r_3 = 0.55$ 左右,主要使用的两个 II 型探测器的几何因子分别为 $F_{\text{几}} = 0.38$ (1 号)和 0.24 (6 号)

同时,我们也在反射激波的情况下测量了③区的辐射传热.即在模型头部加一个直

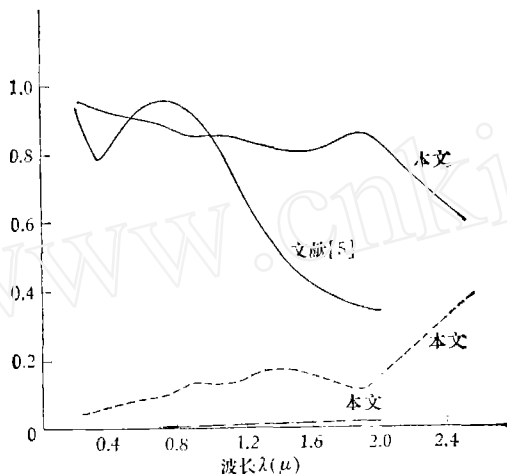


图 3 II 型薄膜辐射热探测器的光学性质
 — 吸收率
 - - - 反射率(MPS-5000 分光光度计)
 - · - 透射率(Beckman 分光光度计)

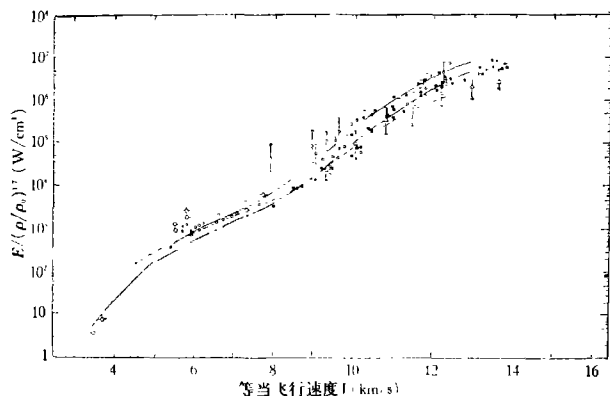


图 4 高温空气平衡辐射能的实验和理论比较
 实验 ○文献[8] ●文献[9] +文献[10] △文献[11] □本文
 理论 —文献[12] - - -文献[13] —·—文献[14]

径为 9.2cm, 深度为 8cm 的反射筒。如果近似地认为⑤区厚度的增长速度是均匀的, 且⑤区处的温度、密度是常数, 那么由于窗口处及探测器表面所接收到的热流率都与⑤区厚度成正比, 因此也就与时间成正比:

$$\dot{q}_{r,i}(t) = A \cdot t \quad (7)$$

根据积分方程可以得到, 探测器表面产生的电压信号为

$$\Delta V(t) = B \cdot t^{3/2} \quad (8)$$

对于恒定电压 E_0 的情况下, 式(4)变成

$$\dot{q}_{r,i}(t) = \frac{3\pi(R_0 + R_f)^2}{4R_0 \cdot R_f \cdot E_0} \cdot \frac{\sqrt{\pi(\kappa\rho c)_{玻璃}}}{2\alpha} \cdot \frac{\Delta V(t)}{\sqrt{t}} \quad (9)$$

这时相应地式(5)变成

$$\dot{q}_{r,i}(t) = F_{\text{窗}} \cdot T_{\text{窗}} \cdot a_f \cdot \delta(t) F_{\text{L}} \cdot \frac{E}{2} \quad (10)$$

其中 $\dot{q}_{r,i}(t)$ 为 t 时刻的热流率; $\delta(t)$ 为 t 时刻⑤区的厚度; 其他各系数仍与式(5)中一样。

5. 实验结果

我们在 $p_1 = 10, 1, 10^{-1}$ mmHg 三种状态下, 在驻点和⑤区分别测到了辐射热流率。测量点的散布一般在 $\pm 20\%$ 以内。

图 4 将我们的实验结果与国外已有的实验及理论计算结果进行了比较。我们的结果与别人结果平均值之间的偏差一般在百分之几十以内, 这与现有其他各作者之间的偏差是同等量级的。不同状态之间的变化趋势也是一致的。说明这些数据可以供工程上使用。

从初步的实验结果看来, 我们的探测器的牢固程度、灵敏度、响应时间都已基本符合要求, 多次实验的重复性和稳定性也是较好的。当然在工艺上还比较粗糙, 标定工作也还不完善。实验误差主要来源于状态的不重复性和激波速度测量的不准确。其他如标定、气流不均匀及杂质等方面也都会带来误差。今后还有待改进。

感谢单泽珍同志在溅射白金膜过程中给我们的大力帮助。

参 考 文 献

- [1] W., Klaus, *The Review of Scientific Instruments*, 44, 1(1973), 23.
- [2] Rose, P. H. and Stark, W. L., *J. Aero. Sci.*, 25, 2(1958), 86.
- [3] Videl, R. J., A. R. S., TP-327 (1956).
- [4] Nerem, R. M., AD-432473 (1964).
- [5] Hoshizaki, H., AD-424935 (1963).
- [6] Videl, R. J., Cornell Aeronautical Laboratory, Rep. AD-917-A-1 (1956).
- [7] Carslow, H. S., *Conduction of Heat in Solids* (1959).
- [8] Page, W. A., IAS, Paper 63—41 (1963).
- [9] Nerem, R. M., AD-601371 (1964).
- [10] Gruszczynski, J. S., *AIAA Paper 66-103* (1966).
- [11] Golobic, R. A., *AIAA J.*, 6, 9(1968), 1741.
- [12] Kivel, B., AVCO. RR., 21(1957).
- [13] Breene, R. G; Nardone, M. C., GE R62 SDS2 (1962); GE R63 SD3 (1963).
- [14] Meyerott, R. E., LMSD. 288052 (1959); *Geophysical Research, Paper 58, GRD-TN-60-277* (1960).