

热管型大面积低温黑体面辐射源

庞世杰

文耀普

(中国科学院上海技术物理研究所)

(航天部第 501 设计部)

摘要——本文报道了利用热管等温性原理研制成功的大面积黑体面辐射源,其工作范围为 $-50^{\circ}\text{C}\sim+50^{\circ}\text{C}$ 。它包含一个发黑的蜂窝腔体列阵,这个列阵产生一个高的比辐射率(大于 0.995)。实验结果表明,这个黑体面辐射源具有等温性能好、变温迅速、无噪声、无振动和无污染等优点。

一、引 言

为了解决航天遥感仪器从定性图象向目标定量信息过渡,航天遥感仪器必须在地面进行精确的辐射定标,为此,除了要有 $80\sim 100\text{K}$ 冷背景的真空容器外,还要有一个高比辐射率的标准黑体辐射源。我们采用面源定标法,所以就需要一个能充满遥感仪器孔径和视场的大面积黑体面辐射源。

热管作为蒸发和凝结的装置,不仅具有良好的等温性能,而且具有无振动、无噪声、不污染环境和工作可靠等优点,而蜂窝列阵可作成有效比辐射率较高的黑体面辐射源,为此,把两者结合起来,研制成热管型大面积低温黑体面辐射源。

二、结构设计

1. 热管结构设计

热管的基本结构见图 1,其外形如图 2 所示。为了使工作面与环境隔开,以限制来自于环境的辐射贡献,在黑体面源的四周应有遮护装置,为此,把热管设计成具有大工作面的圆筒状热管。圆筒壁就成为与工作面基本等温的理想遮护装置。

为了使蒸汽在上圆板内表面凝结后形成厚度均匀的液膜,在此面上敷设两层 250 目不锈钢网。在内外筒夹层的壁面上、支承环上也都敷设 250 目不锈钢网,形成凝结液体的回流通道。外圆筒的内表面上用两层 300 目不锈钢网覆盖,以使加热区网芯能被液体工质充满,工质被网芯的毛细作用提升的高度可用下式计算:

$$\Delta h = \frac{4H}{D} \cos \theta; \quad (1)$$

式中, D 为金属网的有效毛细孔径,这里取孔的边长; θ 为工质对不锈钢网的润湿角; H 为

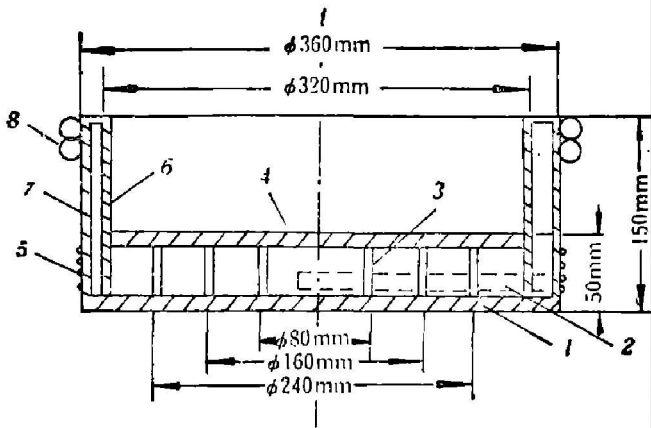


图 1 平面辐射源热管结构

Fig. 1 The configuration of the pipe for the area radiant source

- 1—圆环板；2—测温管；3—支承环；
4—工作平面圆板；5—电加热器；6—内圆筒；
7—外圆筒；8—调温管

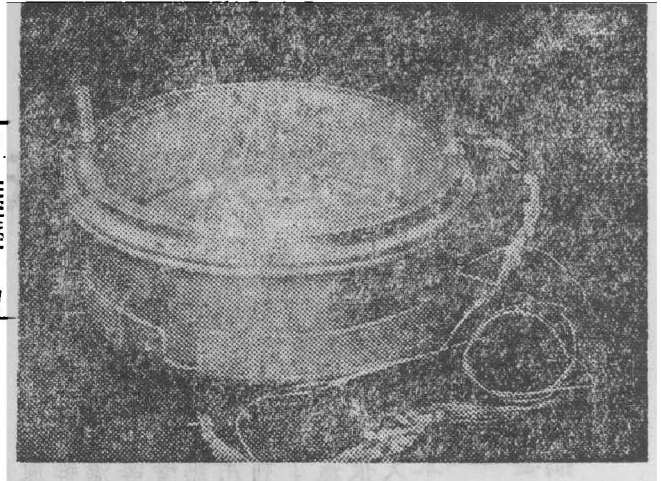


图 2 热管外形照片

Fig. 2 The photo of the heat pipe

工质的毛细提升高度系数, 它的值为

$$H = \frac{\sigma}{\rho_l g}; \quad (2)$$

式中, σ 为工质的表面张力; ρ_l 为液体的密度。

这里, 毛细提升高度取最大值的 1/3, 则

$$\Delta h = \frac{4H}{3D}; \quad (3)$$

对氨与 300 目不锈钢网组合, $D=0.05 \text{ mm}$; 在 50°C 时, $H=2.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, 计算得到 $\Delta h=66 \text{ mm}$, 即工作液体液面以上的加热区高度应小于 66 mm。

2. 工作平面热性能分析

蒸汽凝结释放出的热量通过液膜和上圆板传出, 假设液膜和金属网的组合厚度为 l_1 , 组合导热系数为 K_1 , 不锈钢壁的厚度为 l_2 , 导热系数为 K_2 , 则通过单位面积的热流 q 为

$$q = \frac{T_v - T_2}{l_1/K_1 + l_2/K_2}; \quad (4)$$

式(4)可改写成

$$T_v - T_2 = (l_1/K_1 + l_2/K_2)q; \quad (5)$$

式中, T_v 为蒸汽饱和温度; T_2 为上圆板外表面(工作平面)温度。

在工作平面与外部环境换热不变的条件下, 即 q 保持不变时, $T_v - T_2$ 值与 l_1 、 K_1 、 l_2 、 K_2 有关。由于上圆板各点的 l_1 、 K_1 相同, 各点的 T_v 相同, 所以, 要保持各点的 T_2 相同, 必须使 l_2 相同; 因此, 将网芯均匀贴紧上圆板内表面是重要的。

3. 蜂窝列阵

六角形、正方形和三角形小腔体均可看成一个小黑体腔, 由它们组成的列阵称之为蜂窝列阵, 并可以构成一个黑体辐射源。

根据 A. R. Karoli 等人的建议^[1], 空腔的高与宽度之比和它们的壁厚之间采取折衷办

法，以使空腔内的温度梯度达到最小。考虑导热和焊接问题，我们采用紫铜蜂窝，每一元窝的宽度为 3 mm，高度为 25 mm，壁厚为 0.05 mm，整个蜂窝表面积约 700 cm²。

蜂窝列阵钎焊在厚为 5 mm 的紫铜基板上，整个基板通过导热硅脂与热管工作面相接触，这样既保证良好的热接触，又拆卸方便。在基板背面有安装温差电偶的槽沟，所装电偶用来测量基板和蜂窝底温度。整个辐射源装置如图 3 所示。

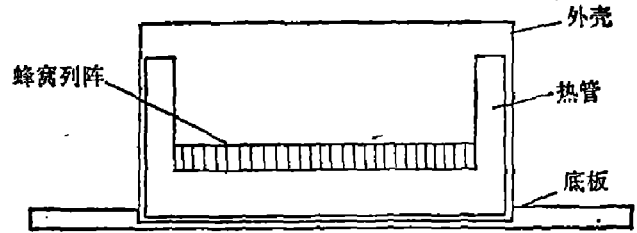


图 3 辐射源装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the radiant source

三、比辐射率估算

至今，多边形单元的有效比辐射率是用适当的正圆柱体作近似计算。由蜂窝列阵所组成的黑体面辐射源有效比辐射率是单元的有效比辐射率和连接边界比辐射率的近似平均值。蜂窝高 $H=25$ mm，边长 $L=3$ mm，壁厚 $K=0.05$ mm。黑体腔涂有 F_{26} 黑漆，其半球面向比辐射率 $E=0.88$ 。

采用 P. Campanaro 和 T. Ricolfi 方法^[2,3]，算出源有效法向比辐射率 $E_N=0.995$ 。根据文献[4]算出元窝腔底有效比辐射率 $E_0=0.998$ ，考虑蜂窝壁厚的影响，总的有效比辐射率大约为 0.995。

由于蜂窝黑体有效比辐射率只能作一般估算，不可靠因素较多，其有效比辐射率的准确值应与标准黑体比较确定，但目前尚不具备这一条件。

四、性能测试与结果

1. 热管组装前性能测试

(1) 大气条件下测试。在工作面上和圆筒壁上分别点焊 20 对和 10 对 $\phi 0.2$ 的铜-康铜温差电偶，它们的测温参考点均置于测温管内(见图 4)。

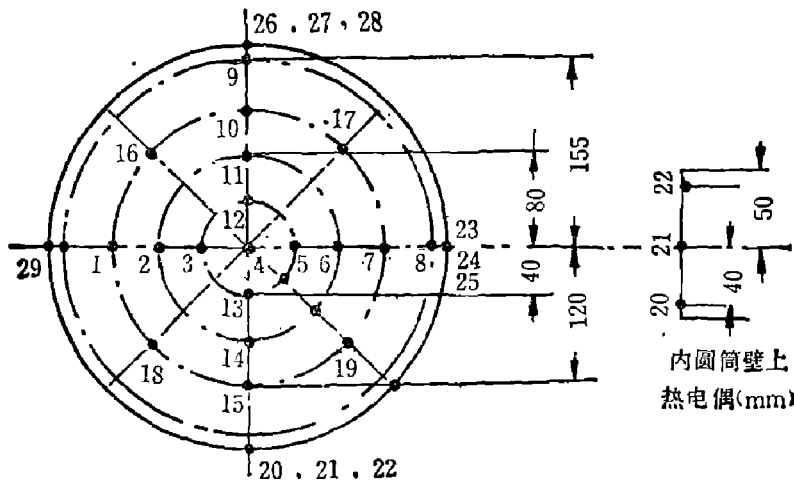


图 4 温差电偶分布示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the distribution of thermocouples

用 0~8# 温差电偶测量工作面上径向温度分布; 用温差电偶 1#、7#、10#、15~19#, 测量工作上的周向温度分布; 其余点为参考测点。

控温仪表用 DWT 控温仪, 测温仪表用 PZ-12 数字电压表, 其分辨率为 $0.1\mu\text{V}$ 。由于是大气下测试, 工作温度在 $0\sim 50^\circ\text{C}$ 之间, 所以仅能对 0°C 以上的温区测量, 每隔 10°C 为一个工况, 分 0、10、……50 六个工况测量, 其不均匀性之标准偏差 σ_{n-1} 分别为 0.01、0.008、0.009、0.019、0.030、0.050。

(2) 真空条件下测试。将热管放置在 Km-1A 超高真空容器内, 在侧边包扎着 20 层涤纶薄膜和尼龙绸, 在热管底部垫有有机玻璃板, 均作为隔热用。其温差电偶的分布如图 5 所示。

温差电偶的温差电势采用 PF15 多路数字电压表来测量, 其分辨率为 $1\mu\text{V}$, 测量后打印输出。热管升温采用直流加热, 降温采用调温管通液氮加速冷却, 用 DWT-702 精密温控仪进行温度控制。

在高真空常温背景和冷背景条件下, 分别作了热管工作面的均温性测试, 其 σ_{n-1} 相应为 $0.013\sim 0.09^\circ\text{C}$ 和 $0.10\sim 0.14^\circ\text{C}$ 。

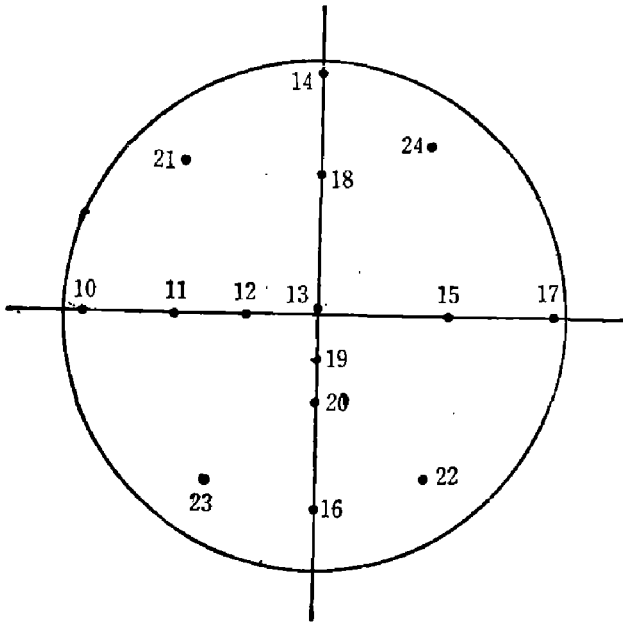


图 5 温差电偶分布示意图
Fig. 5 Schematic diagram of the distribution of thermocouples

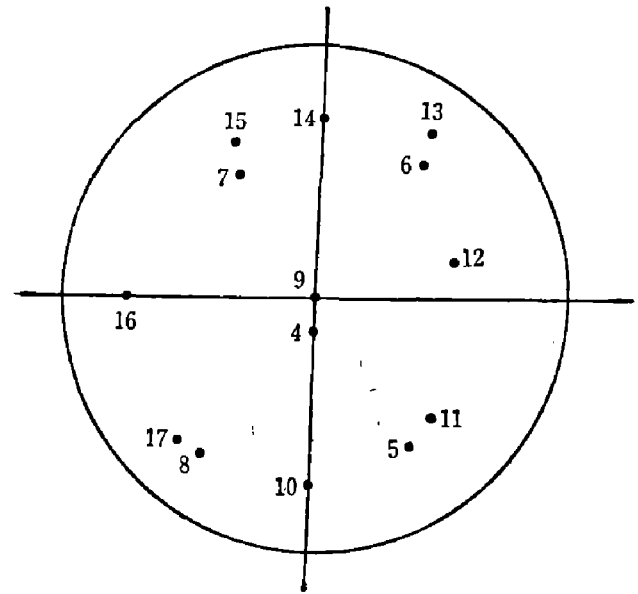


图 6 温差电偶分布示意图
Fig. 6 Schematic diagram of the distribution of thermocouples

2. 热管组装成黑体面源后性能测试

在蜂窝基板不同部位设置若干铜-康铜温差电偶, 用来测量绝对温度, 所使用的温差电偶均在 ZDW-100 型精密恒温槽内校定过, 电偶测温点的分布如图 6 所示。其中, 温差电偶 ($\phi 0.2$) 4~8# 为蜂窝基板底测温; 温差电偶 ($\phi 0.2$) 9~17# 为蜂窝底测温。

测试结果如下:

黑体面源工作温度范围可达 $-65^\circ\text{C}\sim +50^\circ\text{C}$; 温控稳定性可达 $0.05^\circ\text{C}/20\text{min}$ 。在大气条件下, 面源温度为 $35\sim 50^\circ\text{C}$ 时, 其 $\sigma_{n-1}=0.016\sim 0.037^\circ\text{C}$; 在高真空, 常温背景和冷背景条件下, 面源温度为 $-60\sim +50^\circ\text{C}$ 时, 其 σ_{n-1} 分别为 $0.012\sim 0.050^\circ\text{C}$ 和 $0.16\sim 0.20^\circ\text{C}$ 。 $\sigma_{n-1}-T$ 关系曲线见图 7。

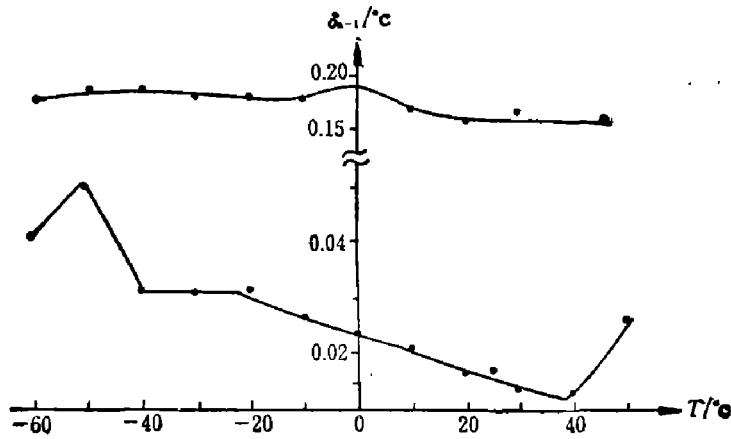


图7 $\delta_{n-1}-T$ 关系曲线
Fig. 7 The $\delta_{n-1}-T$ curve

五、温度测量的不确定度与分析

面源温度测量是采用上海计量局标定的铜-康铜温差电偶,其测温精度为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 。

1. 表面均温性不确定度分析

(1) 作为测量仪表的 PF15 数字电压表的最小步进值为 $1\mu\text{V}$ (相当于 0.025°C 温差),即由该项误差引入的不确定度 $\sigma_{\text{PF15}} = \pm 0.025^\circ\text{C}$ 。

(2) 温控稳定性为 $0.05^\circ\text{C}/20\text{min}$,但在测量表面温差所需的一分钟时间内只允许 PF15 有 $1\mu\text{V}$ 的跳动,即由温控精度引入的不确定度 $\sigma_{\text{温控}} = \pm 0.025^\circ\text{C}$ 。

(3) 所用之 $\phi 0.2$ 康铜丝皆用液氮局部致冷法选取,其不均匀性温差电势均小于 $\pm 3\mu\text{V}$ (相当于 $\pm 0.08^\circ\text{C}$),即 $\sigma_{\text{材料}} = \pm 0.08^\circ\text{C}$ 。

(4) 由性能测试数据可以看出,温差电偶焊接引入的不确定度不会超过 $\pm 0.05^\circ\text{C}$,文中取 $\sigma_{\text{焊}} = \pm 0.05^\circ\text{C}$ 。

根据上述分析,可以求出热管型面源均温性测定数据的总不确定度 $\bar{\sigma}_{\text{总}} = \pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

2. 黑体温度测量的不确定度分析

(1) 温差电偶定标误差 $\sigma_{\text{定}} = \pm 0.2^\circ\text{C}$;

(2) 源表面温度不均匀性 $\sigma_{n-1} = \pm 0.2^\circ\text{C}$;

(3) PF15 数字电压表测量误差 $\sigma_{\text{PF15}} = \pm 0.025^\circ\text{C}$;

(4) 测温参考点(冰点)引入误差 $\sigma_{\text{参}} = \pm 0.1^\circ\text{C}$;

(5) 温差电偶焊接引入误差 $\sigma_{\text{焊}} = \pm 0.05^\circ\text{C}$;

(6) 温差电偶接插件引入误差 $\sigma_{\text{接}} = \pm 0.1^\circ\text{C}$;

(7) 温差电偶材料不均匀性引入误差 $\sigma_{\text{材料}} = \pm 0.08^\circ\text{C}$;

总测温误差 $\sigma_{\text{总}} = \pm 0.33^\circ\text{C}$ 。

六、讨 论

1. 从实验数据可以看出,在真空冷背景条件下的 σ_{n-1} 大于真空常温背景条件下的 σ_{n-1} ,为此从视因子概念出发,曾计算了热沉(产生冷背景)对黑体辐射面不同部位的辐射差

别。计算结果表明,在辐射面温度为 $-50^{\circ}\text{C}\sim+50^{\circ}\text{C}$ 范围内,在黑体辐射面中心和边缘位置之间的温差仅为 $0.01\sim 0.03^{\circ}\text{C}$,由此可以认为,在真空冷背景条件下, $\sigma_{\text{e}-1}$ 较大,其原因并非是热沉的冷背景造成的,而是测温方法引进较大误差所致。

2. 在蜂窝壁安装了温差电偶,用来测量蜂窝壁之温度梯度,由于温差电偶丝线径较小 ($\phi 0.1$),极易断,在测试过程中,有些已损坏,所以测试结果是不完善的,估算蜂窝底与蜂窝顶最大温差约 3°C 、温差为 3°C 的不等温腔与等温控其法向比辐射率的变化是可以忽略的,故不再作不等温腔法向比辐射率的计算。

致谢——参加本工作的有王正官、高根林、傅克俭、潘介仪等同志;参加实验准备和部分实验工作的有姜惠新、秦根娣、郑秀兰和孙淑英同志;褚朝善和王迁两位师傅在金加工方面给予了大力帮助;本工作曾与匡定波先生和龚惠兴同志讨论过,得益匪浅。在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Karoli A. R. et al., *Appl. Opt.*, **6**(1967),7:1183~1187.
- [2] Campanaro P. and Ricolfi T., *J. opt. Soc. Amer.*, **57**(1967), 1:48~50.
- [3] *NASA-CR-156682*.
- [4] 张建镛, *红外物理与技术*, (1975), 5/6:45~53.

LOW TEMPERATURE LARGE AREA BLACKBODY RADIANT SOURCE WITH HEAT PIPE

PANG SHIJIE

(*Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica*)

WEN YAOPU

(*The Institute of Spacecraft System Engineering*)

ABSTRACT

A Large area and low temperature area-blackbody radiant source with an operating range of -50°C to $+50^{\circ}\text{C}$ is reported, developed by the isothermal theory of heat pipe, consisting of a blackened honeycomb cavity array which produces a high emissivity (>0.995). Experimental results show that this source has excellent temperature uniformity and rapid response to temperature changes, no noise, no vibration and no contamination.