

双重柱形腔低温面源黑体 有效比辐射率的计算

龚惠兴 冯旗

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

通过理论推导, 得到了双重柱形黑体腔在等温与非等温状态下法向有效比辐射率的计算方法, 对用于<风云一号>气象卫星红外定标的双重柱形腔高精度低温面源黑体进行了计算, 并就黑体腔的非等温性对有效比辐射率的影响给出了定量的计算结果.

关键词: 黑体辐射, 有效比辐射率.

1 引言

腔形黑体作为一种绝对黑体的模拟源已广泛地用于各种形式的辐射探测器及辐射测量仪器的响应率标定. 为了能在较小的腔长口径比的条件下获得高有效比辐射率, 减小腔体温度的非均匀性, 面源黑体采用了双重柱形腔结构. 低温黑体 (180~330K) 与常温目标的辐射强度接近, 为了降低红外波段的背景亮度, 面源黑体必须能在深冷背景的真空环境中工作. 尽管使用了等温热管及腔壁对腔底的温度跟踪等技术措施, 但严格地说整个黑体腔还是个非等温体. 本文通过理论推导, 得出了黑体腔在等温与非等温状态下法向有效比辐射的计算方法. 从<风云一号>气象卫星红外通道获得的红外定标结果表明, 该计算模式和方法是可行的.

2 等温状态下有效比辐射率的计算

图1是双重柱形腔面源黑体的示意图, 其外形为正八棱柱形, 其底部与侧壁被蜂窝腔群覆盖.

计算黑体的有效比辐射率时应得到其下限值 E_{\min} , 因黑体实际的有效比辐射率 E 满足 $E_{\min} \leq E < 1$, 以使用 E_{\min} 对黑体的辐射作可信的计算.

在计算黑体腔法向有效比辐射率之前应先计算构成黑体腔内壁的蜂窝腔的有效比辐射率. 为了得到可信的结果, 用外接圆柱腔的有效比辐射率作为同高度的六棱柱形蜂窝腔的下限近似.

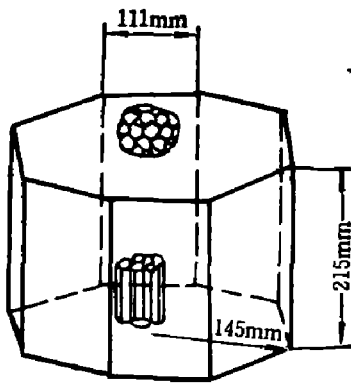


图1 双重柱形腔示意图

Fig. 1 Configuration of double cavities blackbody

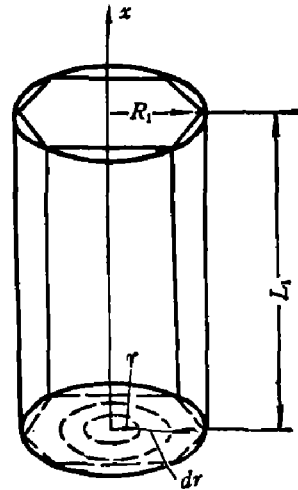


图2 蜂窝元腔及其外接圆柱腔示意图

Fig. 2 Schematic diagram of honeycomb element and its circumscribed cylinder

2.1 蜂窝元腔体有效比辐射率的计算

图2所示蜂窝元外接圆柱腔腔底单位面元的出射功率由腔底面元的自身辐射功率、腔壁辐射经腔底面元反射的一次反射功率、腔底辐射经腔壁反射再经腔底面元反射的二次反射功率、腔壁辐射经腔壁反射再经腔底面元反射的二次反射功率……等项辐射迭加而成。

腔壁单位面元的出射功率则由腔壁面元的自身辐射功率、腔壁辐射经腔壁面元反射的一次反射功率、腔底辐射经腔壁面元反射的一次反射功率、腔底辐射经腔壁反射再经腔壁面元反射的二次反射功率、腔壁辐射经腔壁反射再经腔壁面元反射的二次反射功率……等项辐射迭加而成。忽略二次以上的反射功率,蜂窝腔腔底有效比辐射率沿径向的分布为

$$E_B(r) = \varepsilon_N + \varepsilon_H \rho_H \int_0^{L_1} F_{\alpha,r} \cdot 2\pi R_1 dx + \varepsilon_H \rho_H^2 \int_0^{L_1} F_{B,\alpha} \cdot F_{\alpha,r} \cdot 2\pi R_1 dx + \varepsilon_H \rho_H^2 \int_0^{L_1} F_{\alpha,r} \cdot 2\pi R_1 dx \int_0^{L_1} F_{\gamma,\alpha} \cdot 2\pi R_1 dy; \quad (1)$$

蜂窝腔沿侧壁方向有效比辐射率的分布为

$$E_w(x_0) = \varepsilon_H + \varepsilon_H \rho_H \cdot F_{B,\alpha_0} + \varepsilon_H \rho_H \int_0^{L_1} F_{\alpha,\alpha_0} \cdot 2\pi R_1 dx + \varepsilon_H \rho_H^2 \int_0^{L_1} F_{B,\alpha} \cdot F_{\alpha,\alpha_0} \cdot 2\pi R_1 dx + \varepsilon_H \rho_H^2 \int_0^{L_1} F_{\alpha,\alpha_0} \cdot 2\pi R_1 dx \int_0^{L_1} F_{\gamma,\alpha} \cdot 2\pi R_1 dy; \quad (2)$$

式(1), (2)中 L_1, R_1 分别为蜂窝腔外接圆柱腔的高度和半径; r 为蜂窝腔腔底某处距中心的径向距离; x_0 为腔壁某处距腔底的垂直距离; $\varepsilon_N, \varepsilon_H$ 分别为材料的法向、全向发射率; $\rho_N = 1 - \varepsilon_N, \rho_H = 1 - \varepsilon_H$.

$$\begin{cases} F_{B,\alpha} = \frac{x}{2\pi R_1} \left[\frac{2R_1^2 + x^2}{\sqrt{(2R_1^2 + x^2)^2 - 4R_1^4}} - 1 \right], \\ F_{\alpha,r} = \frac{R_1}{\pi} \frac{x(x^2 + R_1^2 + r^2)}{[(x^2 + R_1^2 + r^2)^2 - 4R_1^2 r^2]^{3/2}}, \\ F_{\alpha,\gamma} = \frac{1}{4\pi R_1^2} \left\{ 1 - |x - \gamma| \frac{(x - \gamma)^2 + 6R_1^2}{[(x - \gamma)^2 + 4R_1^2]^{3/2}} \right\}, \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中 $F_{B,a}$ 腔底圆盘至距腔底高度为 x 处腔壁单位面积的视因子; $F_{a,r}$ 为距腔底高度为 x 处腔壁环状面元 $2\pi R_1 dx$ 的单位面积至腔底距中心径向距离为 r 处单位面积的视因子; $F_{a,y}$ 为距腔底高度为 x 处腔壁环状面元 $2\pi R_1 dx$ 的单位面积至距腔底高度为 y 处腔壁单位面积的视因子. 蜂窝腔腔底平均有效比辐射率 E_B 为*

$$E_B = \frac{1}{\pi R_1^2} \int_0^{R_1} E_B(r) 2\pi r dr. \quad (4)$$

2.2 面源黑体法向有效比辐射率的计算

我们对面源黑体采用双重柱形腔结构, 黑体腔高度 $L=215$ mm; 外接圆柱腔半径 $R=145$ mm; 腔底蜂窝元腔高度 $L_B=25$ mm; 其外接圆柱腔半径 $R_B=3$ mm; 腔壁蜂窝元腔高度 $L_w=12$ mm; 其外接圆柱腔半径 $R_w=5$ mm; 蜂窝壁厚 $t=0.1$ mm. 蜂窝用铜箔表面滚胶粘合拉伸而成. 蜂窝元六个壁面中有二个壁面是双重厚度的(见图3). 当蜂窝群个数趋向无穷多时, 平均每个蜂窝元腔占有4个面. 设每个面的截面积为 A_w , 蜂窝元开口面积为 A_c , 蜂窝边长为 d , 则

$$\begin{cases} A_c = \frac{3\sqrt{3}}{2} \left(d - \frac{2t}{\sqrt{3}} \right)^2, \\ A_w = t \left(d - \frac{t}{\sqrt{3}} \right). \end{cases} \quad (5)$$

蜂窝侧壁在蜂窝面阵中占的面积比 η 为

$$\eta = \frac{4A_w}{A_c + 4A_w}; \quad (6)$$

当 $d=3$, $t=0.1$ 时, $\eta=5.2\%$. 构成面源黑体腔底的蜂窝面阵的法向有效比辐射率 E_{BBN} 为

$$E_{BBN} = E_{BB}(1 - \eta_B) + \varepsilon_N \cdot \eta_B; \quad (7)$$

式(7)中 E_{BB} 为黑体腔底蜂窝元腔底的有效比辐射率; ε_N 为蜂窝口材料的法向比辐射率, η_B 为黑体腔底蜂窝侧壁在蜂窝面阵中占的面积比. 面源黑体腔底蜂窝面阵的最小有效比辐射率(主要与蜂窝口处腔壁的有效比辐射率 $E_{BW}(L_B)$ 有关)为

$$E_{BBM} = E_{BW}(L_B) \cdot (1 - \eta_B) + \varepsilon_H \eta_B; \quad (8)$$

式(8)中 ε_H 为蜂窝口材料的全向比辐射率. 同理, 可以得到面源黑体侧壁蜂窝面阵的法向有效比辐射率 E_{WN} 和最小有效比辐射率 E_{WM} 为

$$E_{WN} = E_{WB}(1 - \eta_w) + \varepsilon_H \eta_w; \quad (9)$$

$$E_{WM} = E_{WW}(L_w)(1 - \eta_w) + \varepsilon_H \eta_w; \quad (10)$$

式(9)、(10)中 η_w 为构成黑体腔侧壁的蜂窝腔侧壁在蜂窝面阵中占的面积比.

面源黑体法向有效比辐射率分布为

* 式(3)、(4)中 R_1 为蜂窝腔外接圆柱腔的半径, 在计算黑体腔底和侧壁时, R_1 分别用 R_B 和 R_w 代入, 式(1)、(2)中 L_1 , R_1 分别用 L_B , R_B 和 L_w , R_w 代入.

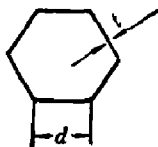
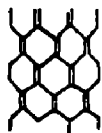


图3 蜂窝截面图

Fig. 3 Cross-section of a honeycomb

$$\begin{aligned}
 E_{BN}(\tau) = & E_{BBN} + E_{WM}(1 - E_{BBN}) \int_0^L F_{e,r} \cdot 2\pi R dx \\
 & + E_{BBM}(1 - E_{WN})(1 - E_{BBN}) \int_0^L F_{B,e} \cdot F_{e,r} \cdot 2\pi R dx \\
 & + E_{WM}(1 - E_{WN})(1 - E_{BBN}) \int_0^L F_{e,r} 2\pi R dx \int_0^L F_{y,e} \cdot 2\pi R dy; \quad (11)
 \end{aligned}$$

式(11)中蜂窝面阵的有效比辐射率和反射率取最小值,且用面源黑体腔(正八棱柱形)的外接圆柱腔对黑体腔的有效比辐射率作保守计算,其面源黑体法向有效比辐射率为

$$E_{BN} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R E_{BN}(\tau) 2\pi r dr \quad (12)$$

3 非等温状态下有效比辐射率的计算

由于蜂窝开口处与外界有辐射交换,所以严格地说黑体是个非等温体。设因温度分布引起的相对辐射强度变化 $\left(\frac{\Delta W_\lambda(x)}{W_\lambda}\right)$ 沿蜂窝壁呈线性分布,则因温度分布引起的蜂窝腔底有效比辐射率的变化为

$$\Delta E_B(\tau) = \varepsilon_H \rho_H \int_0^{L_B} \frac{x}{L_B} \frac{\Delta W_\lambda(L_B)}{W_\lambda} \cdot F_{e,r} 2\pi R_B dx; \quad (13)$$

式(13)中 $W_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_0} - 1}$; $\Delta W_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \left(\frac{1}{e^{c_2/\lambda T_{L_B}} - 1} - \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_0} - 1} \right)$; T_0 为腔底基板温度; T_{L_B} 为蜂窝开口处温度。因温度分布引起的蜂窝腔侧壁 x_0 处有效比辐射率的变化为

$$\Delta E_W(x_0) = \varepsilon_H \frac{\Delta W_\lambda(x_0)}{W_\lambda} + \varepsilon_H \rho_H \int_0^{L_B} \frac{\Delta W_\lambda(x)}{W_\lambda} F_{e,e_0} \cdot 2\pi R_B dx; \quad (14)$$

黑体腔底蜂窝面阵的有效比辐射率为

$$E_{BBNT} = E_{BBN} + \Delta E_B(1 - \eta_B) + \varepsilon_H \frac{\Delta W_\lambda(L_B)}{W_\lambda} \eta_B; \quad (15)$$

其中 $\Delta E_B = \frac{1}{\pi R_B^2} \int_0^{R_B} \Delta E_B(\tau) 2\pi r dr$.

黑体腔底蜂窝面阵的最小有效比辐射率为

$$E_{BBMT} = E_{BBM} + \Delta E_W(L_B)(1 - \eta_B) + \varepsilon_H \frac{\Delta W_\lambda(L_B)}{W_\lambda} \eta_B. \quad (16)$$

考虑到面源黑体腔的侧壁与腔底有一温差 ΔT ,由此引起的黑体法向有效比辐射率的变化为

$$\Delta E_{BNT}(\tau) = E_{WM}(1 - E_{BBNT}) \int_0^L \frac{\Delta W_\lambda}{W_\lambda} \cdot F_{e,r} 2\pi R dx; \quad (17)$$

式中 $\Delta W_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \left(\frac{1}{e^{c_2/\lambda(T_0 + \Delta T)} - 1} - \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_0} - 1} \right)$.

非等温状态下面源黑体法向有效比辐射率分布为

$$E_{BNT}(\tau) = E_{BNT}^*(\tau) + \Delta E_{BNT}(\tau); \quad (18)$$

式(18)中 $E_{BNT}^*(\tau)$ 为将 E_{BBNT} , E_{BBMT} 代替式(11)中的 E_{BBN} 和 E_{BBM} 得到的有效比辐射率。

非等温时面源黑体法向有效比辐射率为

$$E_{BNT} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R E_{BNT}(r) \cdot 2\pi r dr. \quad (19)$$

4 计算结果

等温状态下有效比辐射率的计算结果见表1.

表1 等温状态下有效比辐射率计算值

Table 1 The calculated results of effective emissivity at isothermal state

ϵ_N	ϵ_H	E_{BB}	E_{WB}	E_{BBN}	E_{BBW}	E_{WN}	E_{WM}	E_{BN}
0.9500	0.9120	0.9971	0.9911	0.9947	0.9344	0.9898	0.9348	0.9983

表1中 E_{BB} 为面源黑体腔底蜂窝元腔底有效比辐射率; E_{WB} 为面源黑体腔侧壁蜂窝元腔底有效比辐射率. 由表1可以看到, 由于蜂窝侧壁的影响, 整个蜂窝面阵的法向有效比辐射率比单个蜂窝腔的有效比辐射率小; 但面源黑体的法向有效比辐射率比单个蜂窝腔的有效比辐射率大. 黑体腔法向有效比辐射率的分布 $E_{BN}(r)$ 及其平均值 E_{BN} 见图4.

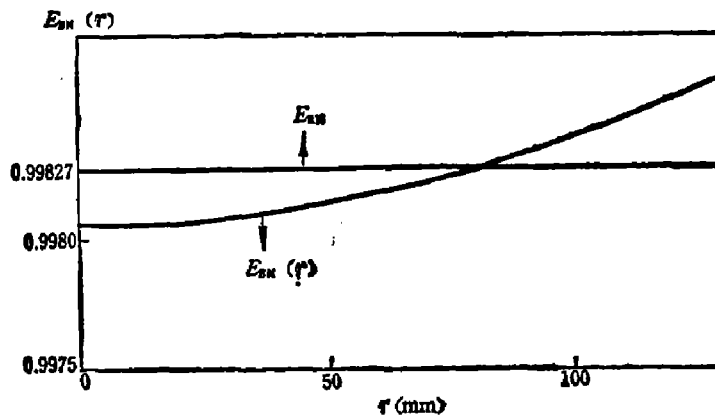


图4 法向有效比辐射率 $E_{BN}(r)$ 的分布及其平均值 E_{BN}

Fig. 4 Distribution of normal effective emissivity $E_{BN}(r)$ and its average value E_{BN}

非等温状态下有效比辐射率的计算结果见表2和表3.

表2 非等温状态下蜂窝腔及蜂窝面阵有效比辐射率的计算

Table 2 The calculated results of effective emissivity at unisothermic state

$\Delta T_1(K)$	$T_0(K)$	E_{BT}	E_{BBNT}	ΔE_{BBNT}
-0.5	220	0.9971	0.9940	-0.0007
	260	0.9971	0.9942	-0.0005
	300	0.9971	0.9943	-0.0004
-1	220	0.9970	0.9933	-0.0014
	260	0.9971	0.9937	-0.0010
	300	0.9971	0.9940	-0.0007
-1.5	220	0.9969	0.9926	-0.0021
	260	0.9970	0.9932	-0.0015
	300	0.9971	0.9936	-0.0011

表3 非等温状态下黑体有效比辐射率计算值

Table 3 The calculated results of effective emissivity of blackbody at isothermic state

$\Delta T_1(K)$	$\Delta T(K)$	$T_0(K)$	E_{BNT}	ΔE_{BNT}
-0.5	-0.5	220	0.9980	-0.0003
		260	0.9981	-0.0002
		300	0.9981	-0.0002
-0.5	-1	200	0.9979	-0.0004
		260	0.9980	-0.0003
		300	0.9981	-0.0002
-0.5	-2	220	0.9978	-0.0005
		260	0.9980	-0.0003
		300	0.9980	-0.0003

表2中 T_0 为黑体腔底基板温度； ΔT_1 为黑体腔底蜂窝开口处与基板温度 T_0 之差； E_{BT} 为黑体腔底蜂窝腔有效比辐射率； E_{BBNT} 为黑体腔底蜂窝面阵法向有效比辐射率； ΔE_{BBNT} 为非等温与等温时腔底蜂窝面阵法向有效比辐射率之差。表3中 ΔT 为黑体腔壁与腔底基板温度 T_0 之差； E_{BNT} 为非等温状态下黑体腔法向有效比辐射率； ΔE_{BNT} 为非等温与等温时法向有效比辐射率之差。

面源黑体的法向有效比辐射率随腔底基板温度 T_0 的变化见图5。

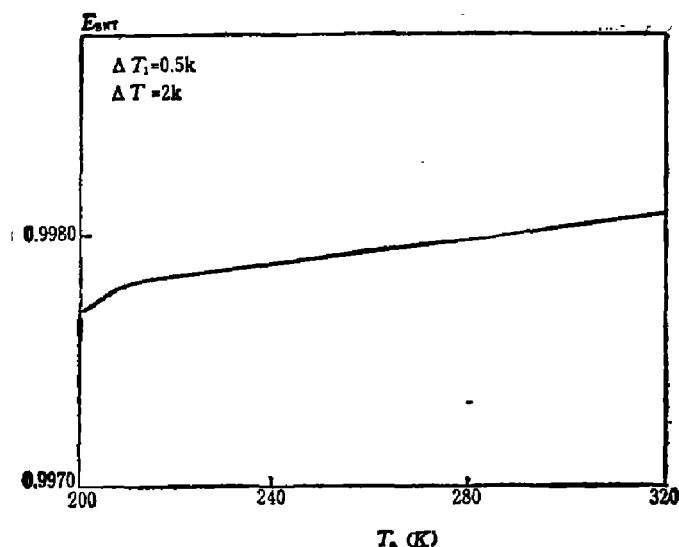


图5 法向有效比辐射率与腔底基板温度的关系

Fig. 5 Relationship of normal effective emissivity with the temperature of base plate

5 结 论

(1) 采用双重柱形腔结构,提高了黑体腔内壁的有效比辐射率,使该黑体在高度半径比为1.48时达到了0.9983的法向有效比辐射率。该黑体与理想黑体比辐射率之差仅为 1.7×10^{-8} 。

(2) 由于提高了黑体腔内壁的比辐射率, 使得黑体对蜂窝腔侧壁与底部及黑体腔壁与腔底温度的一致性要求显著降低. 当黑体温度为 270K, 蜂窝开口处与底部温差为 0.5K 时, 只带来 0.005K 的黑体附加温差. 黑体腔腔壁与腔底温差为 0.5K 时, 只带来 0.001K 的黑体附加温差.

参 考 文 献

- 1 *Advanced Very High Resolution Radiometer Final Engineering Report NASA-CR-160059*
- 2 张建镛, 红外物理与技术, 1975; (5~6): 45~53

CALCULATION OF EFFECTIVE EMISSIVITY OF DOUBLE CAVITIES BLACKBODY

GONG HUIXING, FENG QI

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

The calculation method of normal effective emissivity of double cavities blackbody at isothermic and unisothermic states is obtained by means of theoretical derivation. The effective emissivity of "Double Cavities High Precision Extended Source Blackbody" used in the infrared radiation calibration of the FY-1 Meteorological Satellite is calculated. The effect of temperature difference on the effective emissivity at unisothermic state is given quantitatively.

Key words: Blackbody radiation, effective emissivity.