

前置反射器辐射温度计系统误差研究

张 平

(武汉冶金设备制造公司设计研究所)

摘要——本文对前置反射器辐射温度计的系统误差进行了研究, 推导出根据其测量值计算被测表面温度和发射率的公式, 从而提高了此类仪表的测量精度, 较好地解决了某些低发射率表面的温度和发射率测量问题。

一、引 言

如何消除被测表面发射率的影响是辐射测温研究中的一个重要课题。为了解决这个问题, 人们制做了各种温度计, 其中 Drury Land 制作的表面辐射温度计^[1]具有一定的代表性。其原理是: 将理想全反射器扣在被测表面(平面或凸面)上, 设被测表面温度为 T 、发射率为 ε , 则被测表面发出的一次辐射能为 $\varepsilon E_0(T)$, 经过与反射器无数次来回反射以后, 被测表面发出的有效辐射能为 $E_{e0} = E_0(T)$, 即为温度 T 时的黑体辐射。

如果在反辐器上开一个小孔, 小孔发出的辐射近似于温度 T 时的黑体辐射, 由接收元件转换成温度即可消除被测表面发射率的影响。如要测量被测表面的发射率, 可再用一个反射器为理想全吸收的同样温度计测量, 接收到的辐射能为^[1] $E_{ab} = \varepsilon E_0(T)$ 。两次测量结果之比即为被测表面发射率:

$$E_{ab}/E_{e0} = \varepsilon E_0(T)/E_0(T) = \varepsilon。$$

实际测量是在非理想条件下进行的, 只要两个反射器的反射率和吸收率足够高, 所测结果即可接近真值。

我们发现, 在实际测量中影响这种温度计准确性的因素是很多的, 有一些因素是不可忽略的。例如, 当被测表面发射率较低时, 这种温度计测得的温度和发射率值是很不可靠的。对低发射率(小于 0.5)的表面无法直接测量其温度和发射率。

二、几种引起误差的因素

1. 反射器固有辐射的影响

一个平面或凸面, 其表面积为 F_1 、温度为 T_1 , 被另一个面积为 F_2 、温度为 T_2 的物体所包围, 形成了一个封闭腔体。在稳定状态下, 被测表面的有效辐射为^[1]

本文 1985 年 11 月 3 日收到, 修改稿 1986 年 1 月 25 日收到。

$$Q_{12} = \frac{F_1 E_0(T_1) - \varphi_{21} F_2 E_0(T_2)}{\frac{1}{A_1} + \varphi_{21} \left(\frac{1}{A_2} - 1 \right)}, \quad (1)$$

式中 A_1 、 $E_0(T_1)$ 和 A_2 、 $E_0(T_2)$ 分别为表面 1 和表面 2 的吸收率和黑体辐射能； φ_{21} 为表面 2 对表面 1 的辐射角系数。对于半球型反射器， $F_1/F_2 = \frac{1}{2}$ 。根据有效发射率 ε_e 的定义，可求得

$$\varepsilon_e = \frac{\left(\frac{1}{A_2} - 1 \right) + 2}{\frac{2}{A_1} + \left(\frac{1}{A_2} - 1 \right)} + \frac{2 \left(\frac{1}{A_1} - 1 \right)}{\frac{2}{A_1} + \left(\frac{1}{A_2} - 1 \right)} \cdot \frac{E_0(T_2)}{E_0(T_1)} \quad (2)$$

或

$$\varepsilon_e = \frac{\frac{\rho_2}{1-\rho_2} + 2}{\frac{2}{\varepsilon_1} + \frac{\rho_2}{1-\rho_2}} + \frac{2 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right)}{\frac{2}{\varepsilon_1} + \frac{\rho_2}{1-\rho_2}} \cdot \frac{E_0(T_2)}{E_0(T_1)}, \quad (3)$$

式中 ε_1 为表面 1 的发射率（等于吸收率 A_1 ）， ρ_2 为表面 2 的反射率（等于 $1 - A_2$ ）。式(2)和式(3)是被围表面 1 的有效发射率的表达式。

2. 被测表面温升的影响

在测温时被测表面产生的温升现象对有效发射率会产生影响^[1]：

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varepsilon_{e, \Delta T} &= \frac{E_0(T + \Delta T) - E_0(T)}{E_0(T)}, \\ \Delta T &= \frac{\alpha \varepsilon \sigma_0 T^4}{\lambda} \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{(2n-1)^2} \cdot e^{-\frac{\lambda(2n-1)^2 \pi^2}{4c\gamma\alpha^2}} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(4)中 α 为平板样品导温系数（ $\alpha = \frac{\lambda}{c\gamma}$ ）； λ 为平板样品导热系数； c 为平板样品比热； γ 为

平板样品重量； ε 为平板样品表面发射率； σ_0 为斯忒潘-玻耳兹曼常数。

3. 开孔和测量缝隙的影响

不考虑反射器的固有辐射时，可以求出表面 2 对表面 1 的等效反射率

$$\rho_0 = \frac{\varphi_{21}\rho}{\varphi_{21}\rho + (1-\rho)}. \quad (5)$$

这样就很容易求出由开孔 F_3 发出的辐射能占被测表面有效辐射能的百分比为

$$\varphi_3 = \varphi_{13} + \rho_0 \cdot \varphi_{23}. \quad (6)$$

由测量间隙 F_4 发出的辐射能占被测表面有效辐射能的百分比为

$$\varphi_4 = \varphi_{14} + \rho_0 \cdot \varphi_{24}. \quad (7)$$

可以把这些损失量归结到反射器的反射率和吸收率中，并把它定义为反射器材料的有效反射率 ρ' 和有效吸收率 s' ，有：

$$\rho' = \rho(1-\varphi_3)(1-\varphi_4), \quad (8)$$

$$s' = 1 - (1-A_2)(1-\varphi_3)(1-\varphi_4). \quad (9)$$

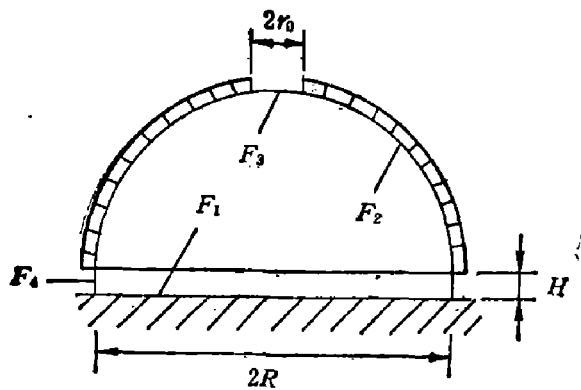


图 1 开孔和测量缝隙的影响

Fig. 1 Influence of the aperture (F_3) and the gap (F_4)

参见图 1, 半球反射器各辐射角系数为 $\omega_{21} = \frac{1}{2}$ 、 $\varphi_{13} = 0.7 \frac{r^2}{R^2}$ 、 $\varphi_{23} = 0.15 \frac{r^2}{R^2}$ 、 $\varphi_{14} = \frac{H(2R-H)}{2R^2}$ 、 $\varphi_{24} = \frac{H(2R-H)}{4R^2}$, 由此可得:

$$\rho' = \rho \left(1 - \frac{1.4 - 0.55\rho}{2 - \rho} \cdot \frac{r^2}{R^2} \right) \cdot \left[1 - \frac{4 - \rho}{2 - \rho} \cdot \frac{H(2R-H)}{4R^2} \right], \quad (10)$$

$$\varepsilon' = 1 - (1 - A_2) \left(1 - \frac{0.85 + 0.55A_2}{1 + A_2} \cdot \frac{r^2}{R^2} \right) \left[1 - \frac{3 + A_2}{1 + A_2} \cdot \frac{H(2R-H)}{4R^2} \right]. \quad (11)$$

4. 误差因素的综合考虑

综合考虑以上各种影响有效发射率的因素, 可得出被测表面有效发射率的表达式:

$$\varepsilon_e = \frac{1}{\frac{2}{\varepsilon_1} + \frac{\rho'}{1 - \rho'}} \left[\left(\frac{\rho'}{1 - \rho'} + 2 \cdot \frac{E_0(T_1 + \Delta T_1)}{E_0(T_1)} \right) + 2 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + 1 \right) \frac{E_0(T_2)}{E_0(T_1)} \right], \quad (12)$$

影响有效发射率的诸因素可通过上式综合分析。在实际测量计算中, 往往会忽略一些次要因素, 如反射器固有辐射的影响。当 $T_1 = 1000^\circ\text{C}$ 、 $T_2 = 100^\circ\text{C}$ 时, 其黑体辐射能之比为 $E_0(T_2)/E_0(T_1) = 7.4 \times 10^{-3}$, 这一影响是很小的。又如, 测量时在 4~5s 以内, 被测表面的温升一般只有几度, 其影响也是不大的, 而且, 当温度计与被测表面相对移动时, 这一影响就不存在了。式(12)可简化成:

$$\varepsilon_e = \frac{\frac{\rho'}{1 - \rho'} + 2}{\frac{2}{\varepsilon_1} + \left(\frac{\rho'}{1 - \rho'} \right)} \quad (13)$$

或

$$\varepsilon_e = \frac{\left(\frac{1}{\varepsilon'} - 1 \right) + 2}{\frac{2}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon'} - 1 \right)} \quad (14)$$

三、发射率和温度的计算

1. 计算发射率

用一个反射器镀金、发射率为 ρ_g 的辐射温度计和一个反射器涂黑、吸收率为 ε_b 的辐射温度计对同一表面往返移动接近或接触测量, 这时两个温度计测量表面的有效发射率分别为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{eg} &= \frac{\frac{\rho'}{1 - \rho'} + 2}{\frac{2}{\varepsilon} + \frac{\rho'}{1 - \rho'}} \\ \rho' &= \rho_g \left(1 - \frac{1.4 - 0.55\rho_g}{2 - \rho_g} \cdot \frac{r^2}{R^2} \right) \left[1 - \frac{4 - \rho_g}{2 - \rho_g} \cdot \frac{H(2R-H)}{4R^2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

和

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{eb} &= \frac{\left(\frac{1}{\varepsilon'} - 1 \right) + 2}{\frac{2}{\varepsilon} + \left(\frac{1}{\varepsilon'} - 1 \right)} \\ \varepsilon' &= 1 - (1 - \varepsilon_b) \left(1 - \frac{0.85 + 0.55\varepsilon_b}{1 + \varepsilon_b} \cdot \frac{r^2}{R^2} \right) \left[1 - \frac{3 + \varepsilon_b}{1 + \varepsilon_b} \cdot \frac{H(2R-H)}{4R^2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

输出的电压值分别为^[1]

$$V_g = \varepsilon_{gg} \cdot R_\lambda \cdot K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_\lambda \cdot W_0(\lambda, T) d\lambda, \quad (17)$$

$$V_b = \varepsilon_{bb} \cdot R_\lambda \cdot K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_\lambda \cdot W_0(\lambda, T) d\lambda. \quad (18)$$

式中 ε 为被测表面发射率, K 为测温仪结构常数, τ_λ 为透镜的透过率, R_λ 为温差电偶的响应率 (V/W), λ 为波长 (μm), $W_0(\lambda, T)$ 为黑体辐射功率 (其值可用普朗克或维恩公式代入)。只要用两只经过校正性能是相同的温度计, 并且在测量时保持对同一表面同样地移动, 则可令式(18)和式(17)之比为 G , 得到

$$G = \frac{V_b}{V_g} = \frac{\varepsilon_{bb}}{\varepsilon_{gg}}$$

或

$$G = \frac{\left(\frac{1}{\varepsilon'} - 1\right) + 2}{\frac{2}{\varepsilon} + \left(\frac{1}{\varepsilon'} - 1\right)} \div \frac{\frac{\rho'}{1-\rho'} + 2}{\frac{2}{\varepsilon} + \frac{\rho'}{1-\rho'}}, \quad (19)$$

由此可得

$$\varepsilon = 2 \frac{\left(\frac{\rho'}{1-\rho'} + 2\right) G - \left(\frac{1}{\varepsilon'} + 1\right)}{\frac{\rho'}{1-\rho'} \left(\frac{1}{\varepsilon'} + 1\right) - \left(\frac{1}{\varepsilon'} - 1\right) \left(\frac{\rho'}{1-\rho'} + 2\right) G}. \quad (20)$$

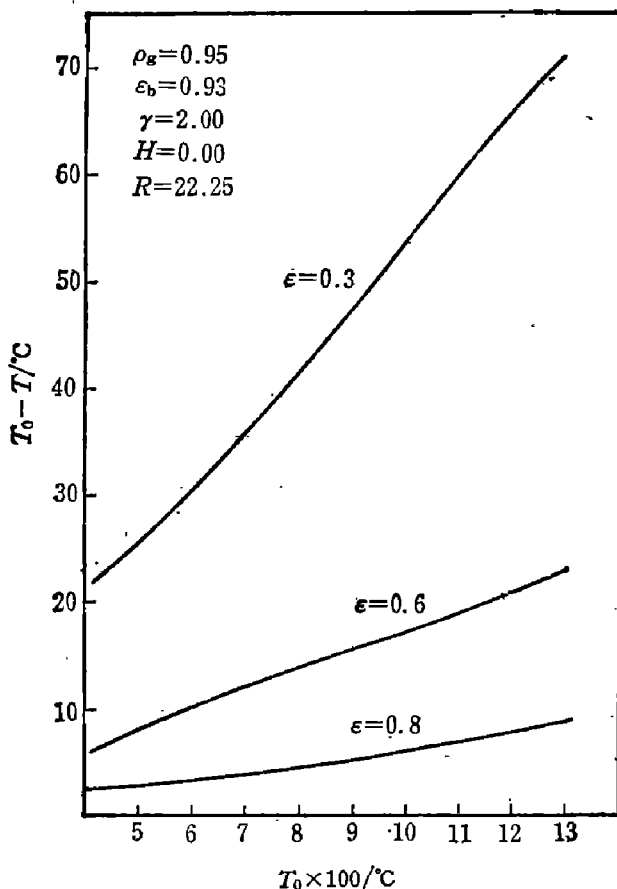


图2 直接测量误差和被测表面发射率的关系
Fig. 2 Relation of the directly measured error to the emissivity of the measured surface

式(20)表示: 由反射器涂黑和镀金两辐射温度计输出电压值之比 G 及其吸收率、反射率、半球半径、开孔半径和测量间隙可以算出被测表面的发射率。

2. 计算温度

在式(17)中, 令 $V_0(T) = R_\lambda \cdot K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_\lambda \cdot W_0(\lambda, T) d\lambda$ 是温度计测量温度为 T 的绝对黑体表面时所输出的电压值, 则有 $V_g = \varepsilon_{gg} \cdot V_0(T)$, 稍加变换即为

$$V_0(T) = V_g / \varepsilon_{gg} = V_g \cdot \frac{\frac{2}{\varepsilon} + \frac{\rho'}{1-\rho'}}{\frac{\rho'}{1-\rho'} + 2}. \quad (21)$$

式(21)就是用测量值计算被测表面真实温度的公式, 当然, 还需要经过简单的电势-温度换算, 这里^[1]

$V_0(T) = k(aT + bT^2 + cT^3 + dT^4)e^{-1/T}$, 式中 a, b, c, d, f, k 都是常数。

在实际测量中, 当被测表面发射率较大, 如大于 0.8 时, $\varepsilon_{gg} \approx 1$, 这时可认

为 $V_g \doteq V_0(T)$ 。这样引起的误差不是很大的(目前此类仪表大多是这样使用的),在精度要求不高时,此法是可取的,用此法获得的温度 T 的误差请参看图 2, 这里假设被测表面真实温度 T_0 近似为计算后的修正值(下文将证明这种假设的正确性)。显然,当 s 较小时,直接测温的误差是比较大的,因而必须用式(21)计算。

四、计算结果的检验与应用

我们通过实验检验前面提出的方法。先将一块发射率为 0.38、表面光洁均匀的铝板平放在恒温加热炉中加热并恒定到某一温度,此温度由安装在铝板上的 EU-2 型镍铬-镍硅标准温差电偶给出。再将两只反射器分别镀金和涂黑的辐射温度计扣在铝板上对同一表面进行移动接触测量,经过 4~5s 后,记下两个测温仪的输出值。改变炉温并使其恒定,重复以上测量,结果见表 1。

表 1 检验计算公式的实验结果

Table 1 The results of the experiment for testing the formulas

测 量 值				计 算 值			温差电偶示值
$\rho_g=0.985$		$\epsilon_b=0.9$		辐射能比	温度(°C)	发射率	温度(°C)
温度(°C)	电压(mV)	温度(°C)	电压(mV)				
169	0.61	110	0.268	0.442	176.2	0.393	176.5
261	1.637	177	0.669	0.409	271.5	0.357	270
340.7	3.24	246.3	1.424	0.44	352	0.39	350
397.7	4.93	290	2.144	0.435	411.2	0.386	411

测量条件: $R=22.25\text{mm}$ 、 $r_0=3\text{mm}$ 、 $H=0\text{mm}$ 、 $\epsilon=0.38$ 。

实验证明用式(20)和式(21)进行计算(修正)的结果接近真值。

2. 实验应用

我们到一些工厂进行了在线测量,表 2 为结果之一。

轧辊温度一般是难以测量的,主要是因为它既是高速旋转的,表面发射率又很低。使用

表 2 实际测量结果

Table 2 The results of the actual measurements

测 量 值				计 算 值			
$\rho_g=0.97$		$\epsilon_b=0.85$		辐射能比	温度(°C)	发射率	有效发射率
温度(°C)	电压(mV)	温度(°C)	电压(mV)				
965	12.739	930	11.027	0.866	968.1	0.844	0.937
1065	18.66	1035	16.72	0.896	1067.8	0.878	0.99
1168	26.6	1112	21.94	0.825	1173.5	0.801	0.983
1168	26.6	1118	22.498	0.846	1172.4	0.821	0.985

测量地点: 沈阳线材厂; 测试样品: 低碳钢(出炉); 测量条件: $R=22.25\text{mm}$ 、 $r=2\text{mm}$ 、 $H=0\text{mm}$ 。

一般辐射温度计测量误差很大,而本方法则可解决这个问题,测量结果见表3。

表3 轧辊的实际测量与计算结果

Table 3 The results of the actual measurement and calculation for running roll

测量值				计算值			
$\rho_g=0.97$		$\epsilon_b=0.85$		辐射能比	温度(°C)	发射率	有效发射率
温度(°C)	电压(mV)	温度(°C)	电压(mV)				
535	1.964	460	1.053	0.536	589.8	0.398	0.774

测量地点:鞍山薄板厂;测量样品:轧辊;测量条件: $B=22.25\text{ mm}$, $r=3\text{ mm}$, $H=0\text{ mm}$ 。

根据直接测量结果通过式(20)和式(21)计算被测表面的发射率和温度在实际使用时比较麻烦,为了计算简便,可在常用的范围内将测量得到的 G 、 ϵ 以及 ϵ_{gg} 的关系以表格的形式给出。如果需要连续测量,还可以附加运算电路直接给出修正结果。

五、反射器反射率间接测量法

对前置反射器辐射温度计测量精度影响最大的是金碗(镀金反射器)的反射率 ρ_g 和测量缝隙 H ,参看图3~6。测量缝隙在许多情况下是可以避免的。而金碗反射率则是一个必须认真考虑的重要因素。从图3可知,准确测定金碗反射率的大小对提高仪表的测量精度关系很大。可是目前测量高反射率表面的反射率是比较困难的。为此,本文提出一种金碗反射率的间接测量方法。

这种间接测量方法的主要设想是:对已知温度的表面进行测温,然后假设若干个金碗反射率,再利用测量值计算测量温度。与已知温度最接近的计算温度所用的金碗反射率也就是最接近真实值的反射率。欲求高精度测量,则可进行多组测量取其平均值。具体的测量方法与“计算结果的检验”一节中的方法相同,取得测量结果后进行整理,参看图4。

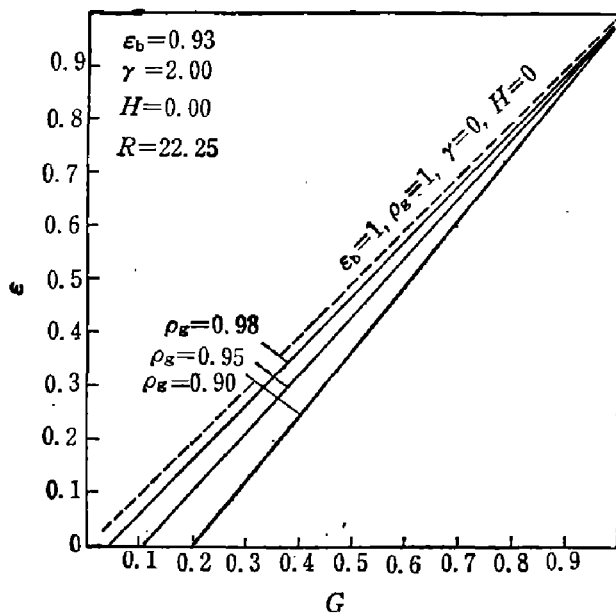


图3 G 、 ϵ 及 ρ_g 之间的关系

Fig. 3 Relation between G , ϵ and ρ_g

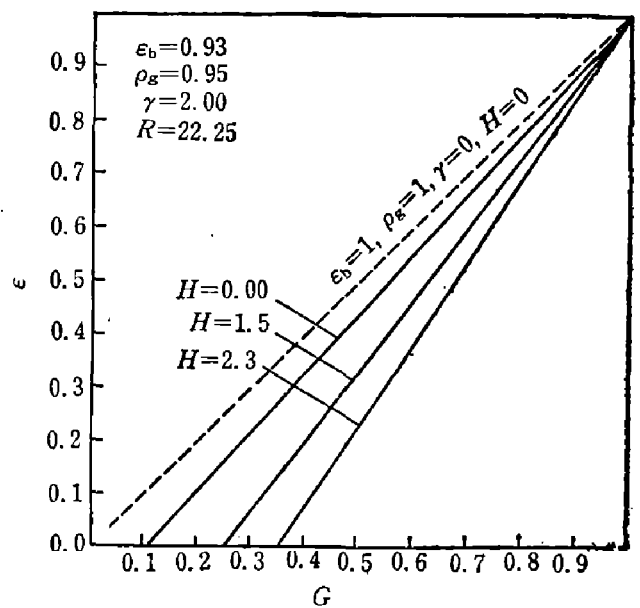


图4 G 、 ϵ 及 H 之间的关系

Fig. 4 Relation between G , ϵ and H

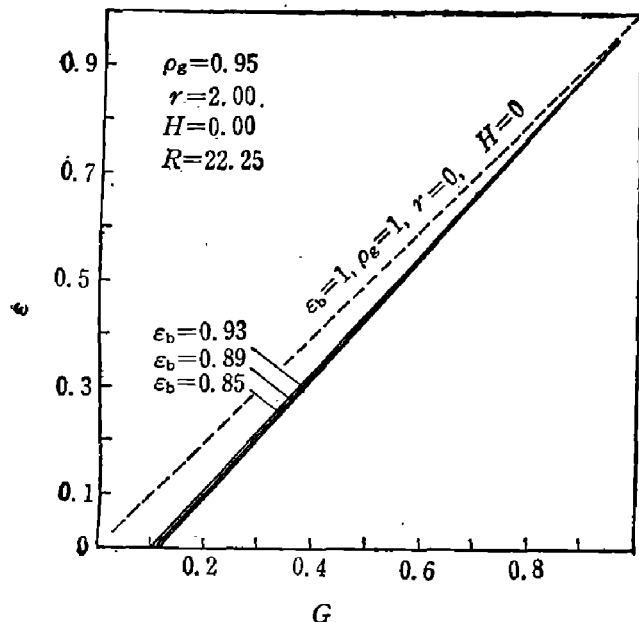


图5 G 、 ε 及 ε_b 之间的关系

Fig. 5 Relation between G , ε and ε_b

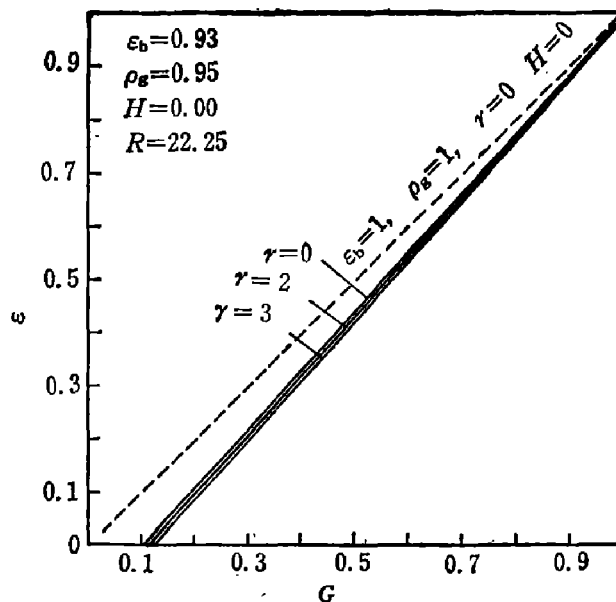


图6 G 、 ε 及 γ 之间的关系

Fig. 6 Relation between G , ε and γ

表4 反射器反射率(ρ_g)间接测量结果

Table 4 The results of the experiment of mediate measurement for reflectivity (ρ_g) of the reflector

测量值				假定值	按假定计算值	温差电偶示值
$\rho_g = ?$		$\varepsilon_b = 0.9$		ρ_g	温度(°C)	温度(°C)
温度(°C)	电压(mV)	温度(°C)	电压(mV)			
169	0.606	110	0.268	0.978	177.7	176.5
				0.98	177.2	
				*0.985	176.2	
				0.99	175	
261	1.637	177	0.669	0.978	274.3	270
				0.98	273.7	
				0.985	271.5	
				*0.99	269.9	
340.7	3.24	246.3	1.424	0.978	355	350
				0.98	353	
				0.985	352	
				*0.99	350	
397.7	4.93	290	2.144	0.978	414.5	411
				0.98	413.9	
				*0.985	411.7	
				0.99	408.9	

$$\rho_g = (0.985 + 0.99 + 0.99 + 0.985) \div 4 = 0.988$$

测量条件: $R=22.25\text{mm}$, $r=3\text{mm}$, $H=0\text{mm}$ 。

表4所示的方法,既测量了辐射计反射器的反射率,也是对辐射计的校正。因此,按此法测得的反射率的误差主要取决于温差电偶的测温误差及实验时的随机误差。在较好的实

验条件下,这种误差与仪器精度相比是很小的。

参 考 文 献

- [1] 高魁明等,东北化工学院学报,(1981), 327.
- [2] Drury M. D. et al., *JISI*, **169**(1951),245.
- [3] 井内彻,铁と钢,-651(1979), 97.

A STUDY OF THE SYSTEMATIC ERROR OF SURFACE PYROMETER

Zhang Ping

(Institute of Wuhan Metallurgical Equipment Manufacturing Corporation)

ABSTRACT

The systematic error of surface pyrometer is studied, and the formula used for calculating the temperature and the emissivity of the measured surface by measured values is put forward. The precision of the measurement is raised and the problem to measure the temperature of the surface and its low emissivity is solved.