

高温测量技术(II)

赵 琪

(中国计量科学研究院)

三、间接测温法

1. 间接测温的特点和种类

前已叙述用热电偶和高温铂电阻温度计直接测温的方法。所谓间接测温法就是测温的敏感元件与被测对象不直接接触的方法。由于这一特点使该方法的应用价值愈来愈大,在某些情况下只能用非接触法,不能用直接法。辐射法,激光法,偏振法都属于非接触测温法。后面两种方法受到各种条件的限制,使用尚不普遍。辐射法测温有悠久的历史,种类繁多,量限宽,精度逐步提高。尤其近些年来,由于宇航和空间技术的进步,促进了其发展,使它不但在高温范围应用广泛,而且红外辐射高温计在中、低温范围也将得到广泛的应用。本文重点讨论辐射法测温,它分为下列几种:

(1) 亮度温度法: 光学高温计,光电高温计,红外高温计,光谱高温计都属于此类,所测温度为亮度温度 T_b (简称亮温)。

(2) 颜色温度法: 比色高温计(或称颜色高温计)属于此类,所测温度称为颜色温度(简称色温) T_c 。

(3) 全辐射温度法: 全辐射高温计属于此类,所测温度称为全辐射温度 T_r 。

(4) 光谱法: 主要用于 4000 K 以上的等离子体测温。采用等离子体的绝对或相对线光谱强度或连续光谱强度测量,所测的温度为真空温度 T 。该法所测温度较高,不属本文讨论的范围。

辐射法测温具有下列特点:

(1) 由于被测物体与测温元件不接触,所

以可用来测量高温,理论上非接触法测温是无上限的。但实际上亮温法,色温法或全辐射法测温上限常在 4000 K 左右,光谱法可测几万度到几十万度。

(2) 可进行动态快速测温。非接触测温中常采用光电元件作为接收器,其响应速度可达毫秒级或微秒级。在军事工业和国防科研中得到广泛应用。

(3) 可对物体温度场进行快速扫描,给出详细的热图象及其温度分布。

(4) 可测量热容量小的物体,如细丝,金属薄片。此时如采用直接法测温,会大大干扰被测对象原始热状态,引起温度畸变,其示值不能反应实际热状态。

(5) 可测量导热系数很小的物体表面温度,如玻璃表面,塑料表面。

(6) 可测量移动物体温度,如不停地移动的热钢锭。

(7) 可测量远距离物体温度,如几十米的高压线接头温度。

2. 亮度温度法

亮度法测温是辐射测温中最常见的,在科研和工业高温测试中广泛应用,使用温度范围一般为 800—4000°C。常用的有光学高温计,光电高温计,红外高温计等。窄带光谱光电高温计是目前非接触测温仪表中最准确的。在金凝固点温度(1064.43°C)其不确定度可达 $\pm 0.04^\circ\text{C}$,分辨力为 0.005°C ,2000°C 的不确定度为 $\pm 0.25^\circ\text{C}$ ^[5]比最好的精密光学高温计分辨力提高两个数量级,不确定度提高一个数量级。目前发达国家都采用该种仪器复现 1064.43°C 以上的国际实用温标。我国复现该段温标的国

家基准也采用这种仪器——基准光电高温比较仪。科研中精密测温常采用自动光电高温计，如美国 CITCC 公司生产的自动光电高温计具有较高的准确度，在 1064℃ 为 ± 0.7℃，2300℃ 为 ± 3.4℃。因此认为非接触法测温准确度不高是一种过时的看法。

亮温法的理论基础是黑体辐射理论。普朗克公式为

$$E_{\lambda,T} = C_1 \lambda^{-5} (e^{C_2/(\lambda T)} - 1)^{-1}, \quad (1)$$

其中 $E_{\lambda,T}$ 为黑体在波长 λ ，温度 T 时的光谱辐射亮度； C_1 为第一辐射常数； C_2 为第二辐射常数； λ 为辐射波长； T 为黑体的热力学温度(K)。由公式(1)可知黑体的光谱辐射亮度 $E_{\lambda,T}$ 是温度和波长的函数。在一定辐射波长下，物体的辐射亮度 $E_{\lambda,T}$ 与温度 T 相对应，因此可以用光谱辐射亮度来表示物体的温度。直接应用公式(1)测温，应满足两个条件，即物体为绝对黑体，辐射测量必须在单色波长下进行。实际上这两个条件常常得不到满足，为此引出亮度温度和有效波长的概念。

实际物体不是黑体，不能直接应用公式(1)。此时引入亮度温度的概念，使非黑体温度在一定条件下用黑体温度表示。亮温的定义是：物体在波长 λ 和温度 T 时所发射的光谱辐射亮度等于某黑体在同一波长下所发射的光谱辐射亮度，此时黑体的温度就称为该物体在该波长下的亮度温度 T_λ ，即

$$\begin{aligned} \varepsilon_\lambda \cdot C_1 \lambda^{-5} (e^{C_2/(\lambda T)} - 1)^{-1} \\ = C_1 \lambda^{-5} (e^{C_2/(\lambda T_\lambda)} - 1)^{-1}, \end{aligned} \quad (2)$$

ε_λ 为物体的光谱发射系数！

公式左侧为真实物体发射的光谱辐射亮度，右侧为黑体在同一波长下所发射的光谱辐射亮度，此时黑体的温度 T_λ 称为该物体的亮温。由于引入等式(2)，则非黑体测温中可应用黑体辐射理论及其公式。

同样，单一波长 λ 在实际上也是不存在的，谱线总有一定的宽度。等式(2)实际上是一积分等式：

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_\lambda \cdot E_{\lambda,T} \cdot \tau_\lambda \cdot S_\lambda d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda,T_\lambda} \cdot \tau_\lambda \cdot S_\lambda \cdot d\lambda,$$

物理

其中 τ_λ 为滤光片光谱透过率； S_λ 为接收器光谱响应。

此时需引入一特征波长来定义其亮度温度。这一特征波长就是有效波长。延伸温标及运算过程用平均有效波长，定义某温度点的亮温用极限有效波长。平均有效波长 λ_e 的表达式为

$$\lambda_e = \frac{C_2 \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)}{\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda,T} \cdot \tau_\lambda \cdot S_\lambda \cdot d\lambda}{\ln \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda,T_0} \cdot \tau_\lambda \cdot S_\lambda \cdot d\lambda}}},$$

T_0 为起始点温度， T 为延伸点温度。

极限有效波长是平均有效波长的极限情况，即 $T_0 \rightarrow T$ 的极限情况。极限有效波长 λ_T 的表达式为

$$\lambda_T = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda,T} \cdot \tau_\lambda \cdot S_\lambda \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{1}{\lambda} \cdot E_{\lambda,T} \cdot \tau_\lambda \cdot S_\lambda \cdot d\lambda}.$$

因此测量亮温的仪器，不讲有效波长，只讲亮温值是没有意义的，只有给出亮温值，并给出该温度点下的极限有效波长值，才是有意义的。此时，由亮温可以换算真温，并可以与其它测温值进行比较。

在分度高温计时，必须注明其有效波长。温标传递过程中，当标准仪器与被分度的仪器有效波长不一致时，应进行修正。

只有正确理解有效波长和亮温定义才能正确运用亮度高温计。按照正确方法分度的亮度高温计在被测对象为黑体时，所测温度为物体真实温度；被测对象为非黑体时，所测温度为亮度温度。根据物体的光谱发射系数可将亮温修正到真温，将公式(2)中的普朗克公式用维恩公式代入，并引入有效波长的概念，则

$$\begin{aligned} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_\lambda \cdot C_1 \lambda^{-5} e^{-C_2/(\lambda T)} \cdot \tau_\lambda \cdot S_\lambda \cdot d\lambda \\ = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C_1 \lambda^{-5} e^{-C_2/(\lambda T_\lambda)} \tau_\lambda \cdot S_\lambda d\lambda, \end{aligned}$$

$$\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_{\lambda} C_1 \lambda^{-5} e^{-C_2/(\lambda T)} \tau_{\lambda} S_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C_1 \lambda^{-5} e^{-C_2/(\lambda T_s)} \tau_{\lambda} S_{\lambda} d\lambda} = \frac{\epsilon_{\lambda_e} \cdot E_{\lambda_e \cdot T}}{E_{\lambda_e \cdot T_s}}$$

$$= \frac{\epsilon_{\lambda_e} \cdot e^{-C_2/(\lambda_e T)}}{e^{-C_2/(\lambda_e T_s)}} = 1,$$

简化整理,并取对数

$$\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda_e}{C_2} \ln \frac{1}{\epsilon_{\lambda_e}},$$

其中 T_s 为被测物体亮温 (K); T 为被测物体真温 (K); λ_e 为有效波长; ϵ_{λ_e} 为 λ_e 下的物体光谱发射率。

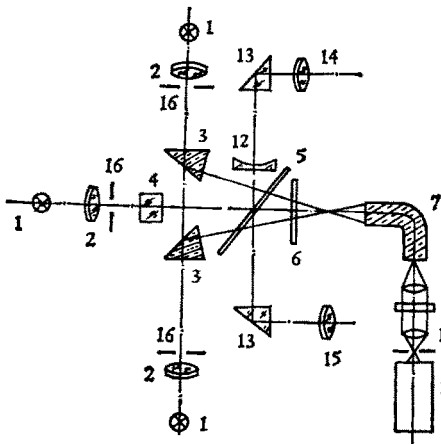


图4 光电高温比较仪光路简图

1. 光源; 2. 物镜; 3. 转向棱镜; 4. 补偿镜; 5. 45°分光镜; 6. 调制器; 7. 光导纤维; 8. 聚光镜; 9. 干涉滤光片; 10. 聚光镜; 11. 光电倍增管; 12. 带分划板场镜; 13. 转向棱镜; 14. 瞄准显微镜; 15. 监视显微镜; 16. 限制光阑

图4为计量院研制的光电亮温比较仪^[6],用来复现国际实用温标。仪器设有三光路,当延伸温标时,该仪器作为倍增器,三光路同时投入。用来精密测温或分度钨带灯时,只需两光路。其中一路以温度灯为参考光源,另一路为被测光源。

两光源经各自的物镜又成象在调制器6各自的狭缝上,入射光经调制器调制,光导纤维7混合后进入干涉滤光片9,使调光成为单色光,最后均匀地落在光电倍增管11的光阴极上。所得电信号经放大器放大,解调器解调,最后由指零仪指示。调制器两窗口相位差 π , 因此

当两光源亮度相等时,则光电倍增管的交流信号为零,此时指零仪指零;当交流信号不等于零时,应调正被测对象(或标准源)的温度,使指零仪指零。此时标准源的温度,即表示被测源的温度。显微镜14用来瞄准辐射源,显微镜15用来调正分划板与狭缝的光学共轭。

实际测量中由于两光路的光学透过率不等,引起系统误差。采用置换法消除此误差,即被测与标准源交替地放在同一光路上,另一光路单纯作为过渡光源。

比较仪的特点是高精度。可以消除各光学元件,过渡光源,接收器本身长期不稳定性影响,这些元件在测量的短期内保持稳定即可。复现温标的不确定度为:金点 $\pm 0.07^\circ\text{C}$, $200^\circ\text{C} \pm 1.2^\circ\text{C}$ 。但该仪器占用室内面积较大,只适用于计量研究及高精密科研测温。

云南仪表厂与中国计量科学研究院等单位联合研制的标准光电高温计更为方便,可满足一般计量和科研中的需要。该仪器(图5)采用内光源(高温计小灯),可以直接给出小灯电流值与温度的对应关系,其重复性在 1100°C 时为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$, 2000°C 时为 $\pm 1^\circ\text{C}$,比原一等光学高温计精度大大提高,消除了主观随意性。也可以将标准光电高温计当比较仪用,此时内参考源小灯只作为过渡光源,使用时应配备标准温度灯,这样可以消除小灯不稳定引起的误差,也可以消除其它光学元件长期不稳定性引起的误差。这样使用,虽然不太方便,但可进一步提高仪器精度。

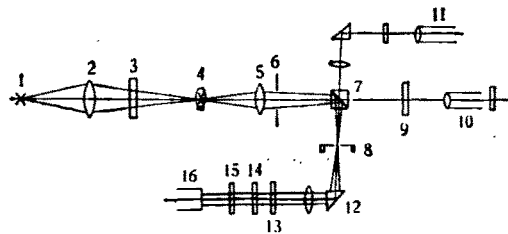


图5 标准光电高温计光路简图

1. 被测对象; 2. 物镜; 3. 减弱玻璃; 4. 小灯; 5. 透镜; 6. 光阑; 7. 析光棱镜; 8. 调制器; 9. 分划板; 10. 瞄准显微镜; 11. 调正显微镜; 12. 转向棱镜; 13. 快门; 14. 偏振片; 15. 干涉滤光片; 16. 光电倍增管

光学高温计是亮温法测温最古老、最普遍的方法。标准光学高温计(原一等光学高温计)是目前国内科研单位使用的最准确的仪器,它结构简单(如图6所示),使用方便。但以人眼睛作为接收器进行亮度匹配,其灵敏度受到眼睛的限制,最好的分辨率在1100℃时可达0.5℃。因此使用该种仪器时,亮度平衡中的主观性和分散性难以克服,精度不可能再提高。表2又给出我国标准光学高温计的不确定度^[7]。该仪器在今后若干年内将逐步被标准光电高温计代替。

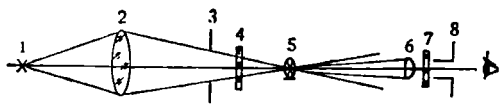


图6 标准光学高温计光路图

1. 被测光源; 2. 物镜; 3. 限制光阑; 4. 接收玻璃; 5. 高温计小灯; 6. 目镜; 7. 红色滤光片; 8. 出口光阑

表2 标准光学高温计的不确定度

温度(℃)	不确定度(℃)	温度(℃)	不确定度(℃)
800	±4.5	1400	±3.5
1100	±3.0	1700	±5.0
		2000	±6.5

红外高温计也是光电高温计的一种,只是接收器,干涉滤光片等光学元件适合于红外区,其有效波长在红外段,如上海自动化仪表三厂生产的光电高温计以硅光电池或硫化铅为接收元件,前者光谱范围为0.85—1.1 μm,后者为1.8—2.7 μm。不用光电倍增管,这样结构较为简单,现场使用方便。

目前国内工业上广泛使用的标准光学高温计和光电高温计精度都不高,后者一般为±1%。其原因很多,有的属于使用不当,有的属于分度检定不当。(1)使用中应经常保持物镜清洁,特别是在有烟雾的现场,应经常擦洗物镜,否则仪器透过率减低,引起示值降低。(2)光电高温计对于光源面积大小及杂散光的影响很灵敏,应予以注意。它可用适当办法消除或采用修正计算的方法。如光源面积较大,其杂散光引起

的附加误差使示值升高。(3)亮温是有效波长的函数,各种型号高温计的有效波长是否与传递温标的标准仪器的有效波长一致。该问题必须引起严重注意,否则必造成示值混乱。当高温计的有效波长未经精确测定时,此时应采用黑体分度。如已知仪器的有效波长,但与标准仪器的有效波长不同,此时应进行修正计算^[7]。

综上所述亮温法测温具有如下特点:

- (1) 所测温度为亮度温度,只有被测对象为黑体时,所测温度才是真温。
- (2) 亮温是波长的函数,只有给出有效波长其亮度温度才有确切的意义。
- (3) 用物体发射率可将亮温修正到真温。

3. 颜色温度法

用颜色温度法测出的温度称为颜色温度(简称色温)。色温的定义有三种:

- (1) 在某段光谱范围内,黑体与非黑体光谱能量分布相同,此时黑体的温度就称为该非黑体的色温。
- (2) 非黑体与黑体有着同样的颜色,则称黑体温度为非黑体的色温。
- (3) 黑体在波长 λ_1 和 λ_2 下的光谱辐射亮度比等于非黑体在两同样波长下的光谱辐射亮度比,此时黑体温度称为非黑体的色温。

(1),(2)定义的色温一般只用于可见光谱。(3)中定义的色温更为普遍。目前所用的比色高温计(或称双色高温计,比率高温计)都是以定义(3)为基础的。下面讨论的比色高温计的色温就是以定义(3)为依据的。根据定义(3)可知

$$E_{\lambda_1, T} / E_{\lambda_2, T} = E_{\lambda_1, T_c} / E_{\lambda_2, T_c}$$

其中公式右侧为黑体在 λ_1 和 λ_2 两波长下光谱辐射亮度比,左侧为非黑体在同样波长 λ_1 和 λ_2 下的光谱辐射亮度比。此时黑体的温度 T_c 称为非黑体的色温。用维恩公式后可写成

$$\frac{\varepsilon_{\lambda_1} \cdot C_1 \cdot \lambda_1^{-5} \cdot e^{-C_2/(\lambda_1 T)}}{\varepsilon_{\lambda_2} \cdot C_1 \cdot \lambda_2^{-5} \cdot e^{-C_2/(\lambda_2 T)}} = \frac{C_1 \cdot \lambda_1^{-5} \cdot e^{-C_2/(\lambda_1 T_c)}}{C_1 \lambda_2^{-5} e^{-C_2/(\lambda_2 T_c)}} \quad (3)$$

取对数,整理后

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} = \frac{\ln(\varepsilon_{\lambda_1}/\varepsilon_{\lambda_2})}{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}, \quad (4)$$

T 为物体真实温度(简称真温); $\varepsilon_{\lambda_1}, \varepsilon_{\lambda_2}$ 为物体在波长 λ_1 和 λ_2 下的光谱发射率, 公式(4)给出由色温修正到真温的公式。

此时应注意 λ_1 和 λ_2 是比色高温计的两个有效波长, 须由窄带滤光片决定。由公式(4)可以看出色温是可以大于真温的, 这是与亮温不同之处, 亮温只能小于真温。

设 $\lambda_2 > \lambda_1$ 。

第一种情况: $\ln \varepsilon_{\lambda_1}/\varepsilon_{\lambda_2} > 0, \varepsilon_{\lambda_1} > \varepsilon_{\lambda_2}$ 。由公式(4)可知, 此时 $\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} > 0$, 即 $T_c > T$, 也就是此时色温高于物体的真温。很多金属具有这种性质, 例如在可见光范围的钨。设 $\lambda_1 = 0.40 \mu\text{m}, \lambda_2 = 0.50 \mu\text{m}, \varepsilon_{\lambda_1} = 0.473, \varepsilon_{\lambda_2} = 0.457^{[8]}$ 。当 $T = 1400\text{K}$ 时, 由公式(4)计算得到色温 $T_c = 1409\text{K}$, 即 $T_c > T$ 。

第二种情况: $\ln \varepsilon_{\lambda_1}/\varepsilon_{\lambda_2} < 0, \varepsilon_{\lambda_1} < \varepsilon_{\lambda_2}$, $\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} < 0, \therefore T_c < T$, 非金属都属于这种情况。

第三种情况: $\ln \varepsilon_{\lambda_1}/\varepsilon_{\lambda_2} = 0$, 即 $\varepsilon_{\lambda_1} = \varepsilon_{\lambda_2}$ 。此种情况称该物体为灰体, 即物体的发射率不随波长变化。此时 $T_c = T$ 。即色温等于真温。

在讨论色温时常常引入颜色系数 ε_c 来说明非黑体的辐射特性, 并建立色温与亮温的定量关系。颜色系数 ε_c 由下式定义:

$$\varepsilon_c = E_{\lambda, T_1} / E_{\lambda, T_c}, \quad (5)$$

$$\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_1} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \varepsilon_c.$$

利用下述公式可计算出颜色系数 ε_c :

$$\begin{cases} \frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_{s_1}} = \frac{\lambda_1}{C_2} \ln \varepsilon_c, \\ \frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_{s_2}} = \frac{\lambda_2}{C_2} \ln \varepsilon_c. \end{cases}$$

联立二式后可以得到

$$\frac{1}{T_{s_1}} - \frac{1}{T_{s_2}} = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{C_2} \ln \varepsilon_c$$

测出钨带灯同一电流下的两个亮温 $T_{s_1},$

T_{s_2} , 已知 λ_1 和 λ_2 , 则可计算 ε_c , 钨带灯的 $\varepsilon_c \approx 0.38$ 。

国产 WDS 型光电比色高温计适于工业测温, 以两个硅光电池作为接收元件, 其中之一接收可见光谱, 另一路接收红外光谱。测温范围为 $800-1600^\circ\text{C}, 1200-2000^\circ\text{C}$, 测量精度为 $\pm 1\%$ 。比色高温计在工业上广泛应用, 其优点是:

(1) 色温比亮温更接近真温。例: 当真温 $T = 1400\text{K}$ 时, 色温 $T_c = 1409\text{K}$, 与真温相差 9K ; 亮温 $T_s = 1360\text{K} (\lambda = 0.40 \mu\text{m}, \varepsilon_\lambda = 0.473)$, 与真温相差 40K 。

(2) 工业测温中, 在测试通道中常常存在烟雾, 灰尘, 用亮温法测温时使示值严重歪曲。而根据颜色温度定义可知, 比色高温计对烟雾, 灰尘等并不敏感, 其影响大部分可消除。但应注意, 测量通道中的介质对比色高温计的一对有效波长 λ_1 和 λ_2 光的吸收不应有选择性, 否则会造成重大误差。

(3) 当物体为灰体时, 则色温 T_c 等于真温 T 。当物体接近灰体时, 色温 T_c 接近真温 T 。

比色高温计也常用在精密测试中。但就其精度来说往往不如单色光电高温计, 其原因有二: 色温温标来自亮温, 因此其不确定度必然较后者为大。公式(3)可写成

$$\frac{C_1 \lambda_1^{-5} e^{-C_2/(\lambda_1 T_{s_1})}}{C_1 \lambda_2^{-5} e^{-C_2/(\lambda_2 T_{s_2})}} = \frac{C_1 \lambda_1^{-5} e^{-C_2/(\lambda_1 T_c)}}{C_1 \lambda_2^{-5} e^{-C_2/(\lambda_2 T_c)}},$$

$$\frac{1}{T_c} = \frac{1/(\lambda_2 T_{s_2}) - 1/(\lambda_1 T_{s_1})}{1/\lambda_2 - 1/\lambda_1}.$$

常常将亮温 T_{s_1} 和 T_{s_2} 复现在钨带灯上, 然后根据上述公式计算 T_c , 可得到钨带灯电流值与色温 T_c 的一一对应关系。

色温 T_c 的误差首先来自于亮温 T_{s_1} 和 T_{s_2} :

$$\Delta T_c = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\Delta \lambda} \left(\frac{1}{\lambda_1} \frac{\Delta T_{s_1}}{T_{s_1}^2} + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\Delta T_{s_2}}{T_{s_2}^2} \right) T_c^2,$$

$$\begin{aligned} \therefore \Delta T_c &= \frac{\lambda_2}{\Delta \lambda} \left(\frac{T_c}{T_{s_1}} \right)^2 \Delta T_{s_1} \\ &+ \frac{\lambda_1}{\Delta \lambda} \left(\frac{T_c}{T_{s_2}} \right)^2 \Delta T_{s_2}. \end{aligned}$$

$$(\lambda/\Delta\lambda)(T_c/T_s) > 1, \therefore \Delta T_c > \Delta T_s.$$

目前使用的最精密的比色高温计仍是用黑体炉和标准光学高温计来分度。当然它的分度误差大于标准光学高温计的亮温误差。

另外若将色温修正到真温时，其修正误差比亮温的修正误差大，这些误差是由于发射率测量不准确引起的。真温与色温的关系式为

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} = \frac{\ln \varepsilon_1 / \varepsilon_2}{C_2(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)},$$

$$\Delta T/T^2 \approx \frac{2\lambda^2}{C_2 \Delta\lambda} \cdot \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}$$

$$= \frac{\lambda}{C_2} \left(\frac{2\lambda}{\Delta\lambda} \right) \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}.$$

亮温修正到真温时的误差为

$$\Delta T/T^2 = \frac{\lambda}{C_2} \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}.$$

由于 $2\lambda/\Delta\lambda > 1$,

$$\therefore \frac{\lambda}{C_2} \left(\frac{2\lambda}{\Delta\lambda} \right) \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} > \frac{\lambda}{C_2} \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon},$$

也就是色温的修正误差 ΔT 比亮温的修正误差 ΔT 大 $2\lambda/\Delta\lambda$ 倍。

综上所述，对于要求较高的精密测试，目前这种形式的比色高温计尚不适用。

不管是亮温法还是色温法，要想得到精确的表面真实温度值是很困难的。这是由于发射率的测量精度低，不同作者的实验结果偏离较大^[9,10]，最好的符合程度为 1—2%；而且使用状态与测量状态不同，这样使发射率的测量误差进一步扩大。文献[11]介绍了一种新型的比色高温计，它用激光吸收法精确地测定发射系数比 $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ ，从而得到表面真温值。该方法测温准确度大有提高，所测温度为真实温度。当 $\lambda_1 = 514.5\text{nm}$, $\lambda_2 = 1060\text{nm}$, $T = 1000\text{K}$ 时，测温的不确定度 $\Delta T \approx 0.3\text{K}$ 。该方法不足之处是需要精密的辐射计，带宽高温计和比色高温计。此方法适用于科研中精密测温 and 精密测定物体发射率。

4. 全辐射温度法

接收器响应不随辐射波长变化的高温计称为全辐射高温计。利用黑体温度与其发射的全

辐射能量的关系(斯蒂芬-波耳兹曼公式)来测温。

$$E = \sigma T^4.$$

实际物体常常是非黑体，因此测量时需引入“辐射温度” T_p 的概念。当黑体与非黑体在特定的光谱段辐射密度相等时，此时黑体的温度称为该非黑体的辐射温度 T_p 。辐射温度 T_p 与真实温度 T 的关系是

$$\varepsilon \sigma T^4 = \sigma T_p^4,$$

其中 $T = T_p \sqrt[4]{1/\varepsilon}$, ε ——全辐射发射系数。

ε 可在有关的资料中查到，然后由测定值 T_p 计算真温 T 。

辐射高温计由两部分组成：辐射镜头(或称辐射感温器)和测量仪表。辐射镜头包括辐射接收器，光学系统(成像系统和瞄准系统)，冷端补偿系统。标准辐射感温器接精密电位差计或数字电压表测试。图 7 为国产 PII 型辐射镜头的结构图。接收器为一涂有碳黑的金属片，它的温度由热电堆测量，热电堆由四对镍铬-考铜热偶串联而成。被测物的辐射经物镜会聚在热电堆的平面上。目镜是为瞄准用，高温瞄准

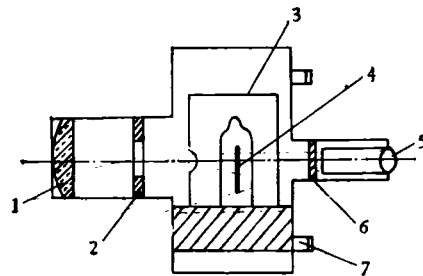


图 7 辐射感温器结构图

1. 物镜；2. 光阑；3. 铜壳；4. 热电堆；5. 目镜；6. 保护玻璃；7. 接线柱

时应加有颜色的玻璃保护眼睛。瞄准时使热物体的象完全覆盖热电堆，且对称于中心。温度范围为 900—1800℃，这种型号产品已不再生产，但国内仍有一些单位使用。图 8 为正确瞄准国产 PII 型及 WFT-202 型热电堆的图象。WFT-202 型接收器由八对镍铬-考铜热偶串联而成，双金属片作为冷端补偿器。温度范围有两种 400—2000℃ (石英透镜)，700—2000℃

(光学玻璃透镜)。应用全辐射温度计测温时应注意下列问题:

(1) 辐射高温计物镜与接收器距离固定,不可调节,测量时必须使被测物的象完全覆盖接收器面积,否则造成极大误差,所以应尽量在额定瞄准系数下使用。所谓瞄准系数即被测物体直径 D 与被测物和物镜距离 L 之比。系数 D/L 表示该种辐射高温计的结构特性。仪器说明书上一般给出额定瞄准系数(或名义观察指数)是为了确定 L 等于一米时的最小测定面积。若被测面积小于最小测定面积,则不能完全覆盖热电堆。若被测物面积较大时, L 在一米附近稍许变化,满足全覆盖的条件,此时示值在误差范围内变化。国产WFT型 $D/L = 1/20$,国产PTI型 $D/L = 1/16$ 。

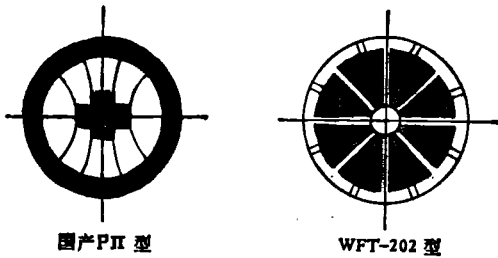


图8 热电堆正确瞄准图象

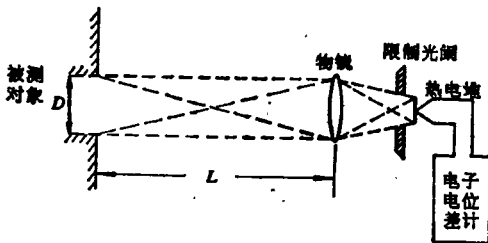


图9 瞄准系数示意图

(2) 全辐射高温计在全波段内响应。因此空气中的二氧化碳和水蒸汽对示值影响较大。

水蒸汽的几条吸收带(中心波长为 $1.3\mu\text{m}$, $1.85\mu\text{m}$, $2.7\mu\text{m}$, $3.2\mu\text{m}$)和二氧化碳的几条吸收带(中心波长 $2.7\mu\text{m}$, $4.3\mu\text{m}$ 等)对示值影响较大。因此测量时应避开烟雾和潮湿。

(3) 上述(2)已说明辐射高温计受环境影响较大,因此使用时距离 L 不可太长,否则过多的介质吸收使示值下降,应尽量按分度状态使用。

辐射高温计的分度采用两种方法:

(1) 要求精度较高的应采用黑体炉分度。以标准光学高温计为标准仪器测出炉温,逐点分度辐射高温计,得到温度毫伏对照表。

(2) 工业用辐射高温计可采用放映灯做为过渡光源进行分度。以同种类型的标准辐射高温计(由黑体炉分度)作为标准仪器分度工业辐射高温计,给出温度毫伏对照表或直接给出二次仪表的温度指示值。由于放映灯辐射面积不均匀,因此分度精度不高,只满足一般工业使用。

辐射高温计在工业上广泛应用,其特点是简单方便,价钱便宜,相对稳定,可以自动记录和显示,作为生产工艺中的温度指示器是很合适的。但由于受周围环境影响较大,其准确度常常不如光学高温计,光电高温计和比色高温计。

参 考 文 献

- [5] H. Kunz, Temperature measurement (1975), 224.
- [6] 赵琪等, 计量学报, 2-2 (1981), 81.
- [7] 国家计量总局, 标准光学高温计检定规程, 计量出版社, 1980.
- [8] A. H. Гордов, Основы пирометрии, (1964), 448.
- [9] De Vos, Physica, Deel XX, 10 (1954), 690.
- [10] R. D. Larrabee, Journal of the optical society of America, 49-6 (1959), 619.
- [11] H. Kunz, Temperature measurement (1975), 273.