

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2018.02.003

# 前置反射器比色高温计的研究

车勋建, 谢植

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 研究了一种改进的比色高温计测量表面温度, 测量范围为 600 ~ 1 200 ℃. 将半球型镀金反射器置于比色高温计上, 利用多次反射效应, 可缩小两个接收波长的有效发射率之间的差异, 从而减小比色高温计误差. 研究了反射器对焦情况下的辐射特性, 推导出有效发射率的表达式. 为避免反射器对被测面温度场的破坏, 设计了一套快速测量装置, 每次测量需时 0.7 s. 为验证其准确性, 制作了平片热电偶, 直接测量平片热电偶的表面温度. 结果显示, 与平片热电偶相比, 测量误差小于 1.1 ℃.

**关 键 词:** 反射器; 比色高温计; 表面温度; 温度测量; 发射率

**中图分类号:** TP 212.11      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2018)02-0162-04

## Development of a Two-Color Pyrometer with a Reflector Placed Ahead

CHE Xun-jian, XIE Zhi

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: CHE Xun-jian, E-mail: 67139712@qq.com)

**Abstract:** An improved two-color pyrometer for measuring surface temperature ranging from 600 ℃ to 1 200 ℃ is developed. A gold-plated semispherical reflector is placed ahead of a two-color pyrometer. When the reflector is positioned facing the measured target, the received radiance energies are increased, and the disparity between the effective emissivities of the two received wavelengths is decreased. As a result, the measurement error of the two-color pyrometer is reduced, compared with the one without a reflector. The expression of effective emissivity for the focused reflector is deduced. A fast measurement apparatus is developed, which spends 0.7 s on one time of measurement, in order to prevent temperature disturbance. A plain-type thermocouple is made, and the proposed pyrometer measures the surface temperature of the thermocouple for validation. The measurement error is within 1.1 ℃.

**Key words:** reflector; two-color pyrometer; surface temperature; temperature measurement; emissivity

表面温度的准确测量受发射率无法确定的影响, 一直是计量测试领域没有解决的难题. 广泛使用的各种光学高温计均是在实验室标准计量器具——黑体辐射源(发射率 $\approx 1$ )条件下标定的. 实际测量时获得的只是亮度温度(表观温度、颜色温度), 并不是物体的真实温度; 只有知道物体的另一参数——发射率, 才可求得物体的真实温度. 实际物体的发射率是不确定的, 与物体的组分、表面状态、测量波长和温度有关, 因此如何消除发射率的影响是长期困扰红外辐射温度测量技术的问题. 近几十年, 一系列解决发射率影响的方法和仪表被提出: 比色法(two-color)<sup>[1]</sup>, 多波长法(MRT)<sup>[2]</sup>, 间接测量法(pyroreflectometer)<sup>[3]</sup>和前置反射器法(Land SP)<sup>[4-5]</sup>等. 其中, 比色法相比于其他方法结构简单, 价格低廉, 工业应用最广泛. 比色法原理是根据两个给定波长 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 的辐射功率之比确定物体的温度. 如果选定的两个波长下光谱发射率相等, 即 $\lambda_1 = \lambda_2$ , 就可得到

收稿日期: 2016-10-31  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61273178).  
作者简介: 车勋建(1985-), 男, 吉林省吉林市人, 东北大学博士研究生; 谢植(1957-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师.

与发射率无关的真实温度,然而只有理想灰体才满足这种条件.实践证明,在诸多场合中由于发射率不确定导致的比色测量误差比单色辐射测温仪更大.

本文提出一种改进的比色高温计:利用前置反射器,缩小了两个接收波长下的有效发射率的差异,从而减小了比色测温误差.推导了反射镜对焦情况下的有效发射率表达式.为验证其准确性,制作了平片热电偶并直接测量其表面温度,有效避免了传统验证方法中测量面与热电偶的温度差异.

## 1 光学高温计基础

对于单色高温计,其亮度温度 (spectral radiance temperature)  $T_s$  (K),真实温度  $T_0$  (K) 和光谱发射率  $\varepsilon(\lambda)$  的关系式表述为<sup>[3]</sup>

$$\frac{1}{T_s} = \frac{1}{T_0} - \frac{\lambda}{c_2} \ln \varepsilon(\lambda). \quad (1)$$

式中:  $c_2 = 1.438 \times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{K}$  为普朗克第二辐射常数;  $\lambda$  为接收波长 (或有效接收波长), m. 从式(1)可以看出,除非  $\varepsilon(\lambda) = 1$  (黑体),亮度温度  $T_s$  永远小于真实温度  $T_0$ . 所以对于单色高温计,只有准确地确定被测表面发射率,才能获得真实温度. 而实际表面发射率小于 1 且难以确定. 针对发射率问题,比色高温计应用最广泛,其理论表达式为<sup>[1]</sup>

$$\frac{1}{T_r} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{c_2(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)} \ln \frac{\varepsilon(\lambda_1)}{\varepsilon(\lambda_2)}. \quad (2)$$

式中  $T_r$  (K) 为比色温度. 从式(2)可以看出,比色法不需要发射率的确切值,当  $\varepsilon(\lambda_1) = \varepsilon(\lambda_2)$  时 (灰体),有  $T_r = T_0$ ,从而消除发射率影响. 然而,灰体只是理想体,实际上并不存在,两个发射率之间很小的差异,就能造成很大误差. 比如,假设  $\varepsilon(\lambda_1) = 0.7$ ,被测真实温度  $T_0 = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ,发射率间的差异  $d\varepsilon = \varepsilon(\lambda_2) - \varepsilon(\lambda_1) = 0.05$ ,测量误差达到  $T_r - T_0 = -15.3 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\lambda_1 = 0.96 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $\lambda_2 = 1.46 \text{ } \mu\text{m}$ ).

## 2 前置反射器比色高温计

### 2.1 测量原理

前置反射器高温计最初来源于 Land 表面温度计 (Land SP)<sup>[4]</sup>,将半球反射镜正对着高温表面,利用多次反射效应增大有效发射率,减小单色高温计的测量误差. 本文基于该思想,提出一种改

进的比色高温计. 图 1 是测量原理图,在比色高温计前端置有内表面镀金的半球型反射镜,内部开有通孔作为探测孔,以接收辐射能量. 与无反射镜相比,前置反射器的高温计可接收更多的能量:除了被测面的固有辐射,还包括来自被测面与反射镜之间的反射辐射. 所以,两个接收波长的有效发射率  $\varepsilon_a(\lambda_1)$  和  $\varepsilon_a(\lambda_2)$  增加,其发射率之间差异减小,从而比色测温误差也相应减小.

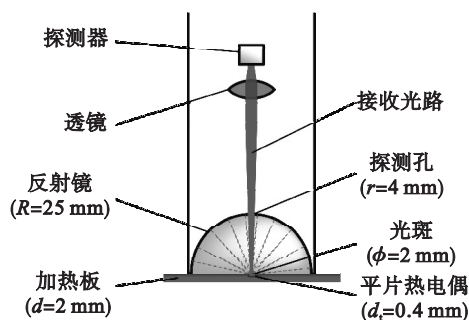


图 1 测量原理图

Fig. 1 Measurement principle

接收装置采用宽波段双色探测器 (Hamamatsu 公司生产,型号 K3413-09). 该探测器包含两个光电二极管 Si 和 InGaAs PIN,两者叠交在一起,可沿同一光轴接收两个不同波段. Si 对红外光透过性,辐射光可穿过 Si 被 InGaAs PIN 接收. 两个接收波段分别为  $0.3 \sim 1.1 \text{ } \mu\text{m}$  (Si) 和  $0.9 \sim 1.8 \text{ } \mu\text{m}$  (InGaAs PIN),有效波长分别为  $0.96 \text{ } \mu\text{m}$  (Si) 和  $1.46 \text{ } \mu\text{m}$  (InGaAs PIN). 该探测器内部置有热电冷却片,可使探测器保持恒温,从而实现较低的系统误差和高信噪比.

### 2.2 半球反射器的辐射特性计算

除了半球型反射镜,还有楔形、双曲面型、抛物面型、圆柱型等反射镜<sup>[6]</sup>. 相比于其他形状,半球型反射镜 (见图 2) 的特点为:在测量时,保证半球反射器的几何球心正好落在被测面上,称之为对焦反射镜. 当反射镜已对焦时,焦点向半球空间发出的辐射能量仅有三种去处:①被反射镜反射回焦点处;②被反射镜吸收;③从探测孔或底面间隙逸出. 假设被测面为平面,被测面任意非焦点处的任意方向的辐射能量均不可能被反射回焦点处. 所以,得到对焦反射镜的重要性质:其焦点是孤立的辐射点,不与非焦点进行热交换. 下面推导对焦反射镜焦点处的有效发射率表达式.

设焦点为朗伯体 (半球光谱发射率等于定向光谱发射率),面积为单位 1. 焦点第一次向半球空间发出的固有辐射能量为  $\varepsilon \pi I_b$ ,  $\varepsilon$  为焦点处半球光谱发射率 (为书写简便  $\lambda$  标记省略,下同).  $I_b$

为黑体定向光谱辐射强度. 其中,探测器接收的固有辐射能量为  $L_0 = \varepsilon \pi I_b \Omega / \pi$ , ( $\Omega$  为探测器的接收立体角),经球镜全部反射回焦点处的能量为  $\varepsilon \pi I_b \rho \psi$  ( $\rho$  为反射镜的光谱反射率,  $\psi$  为未从探测孔和底面间隙逸出的辐射能量占总辐射能量的比值). 根据基尔霍夫定律,被焦点处吸收的能量为  $\varepsilon \pi I_b \rho \psi \varepsilon$ ,在焦点处反射的能量为  $\varepsilon \pi I_b \rho \psi \times (1 - \varepsilon)$ ,发射角服从朗伯分布. 探测器接收的第一次由焦点处反射的能量为  $L_1 = \varepsilon \pi I_b \rho \psi (1 - \varepsilon) \times \eta \Omega / \pi$  ( $\eta$  为焦点处的漫射系数,  $\eta = 1$  代表完全漫反射,  $\eta = 0$  代表完全镜反射,镜反射成分的辐射能量不会被探测器接收). 反射过程继续下去,依此类推,探测器接收的第  $i$  次由焦点处反射的能量为  $L_i = \varepsilon \pi I_b [\rho \psi (1 - \varepsilon)]^{i-1} \eta \Omega / \pi, i = 1, 2, \dots$ , 则焦点处有效发射率为

$$\varepsilon_a = \frac{\sum_{i=0}^{\infty} L_i}{\Omega I_b} = \frac{\varepsilon - \varepsilon \rho (1 - \varepsilon) \psi (1 - \eta)}{1 - \rho (1 - \varepsilon) \psi} \quad (3)$$

下面推导几何因子  $\psi$ . 未从探测孔和底面间隙逸出的辐射能量占总辐射能量的比值为

$$\psi = \frac{1}{\pi I_b} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{\theta_1}^{\theta_2} I_b \sin\theta \cos\theta d\theta = \frac{1}{2} (\cos 2\theta_1 - \cos 2\theta_2) \quad (4)$$

式中:  $\varphi$  为经度角;  $\theta$  为纬度角,其位置如图 2 所示. 设探测孔半径  $r$  和底面间隙尺寸  $h$  相比于反射镜半径  $R$  很小,有  $\cos 2\theta_1 > 0, \cos 2\theta_2 < 0$ . 又因为  $\sin\theta_1 = r/R, \cos\theta_2 = h/R$ , 根据三角关系,有  $\cos 2\theta_1 = 1 - 2\sin^2\theta_1 = 1 - 2r^2/R^2, \cos 2\theta_2 = 1 - 2\cos^2\theta_2 = -1 + 2r^2/R^2$ . 代入式(4),得

$$\psi = 1 - \frac{h^2}{R^2} - \frac{r^2}{R^2} \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)得

$$\varepsilon_a = \frac{\varepsilon - \varepsilon \rho (1 - \varepsilon) (1 - \frac{h^2}{R^2} - \frac{r^2}{R^2}) (1 - \eta)}{1 - \rho (1 - \varepsilon) (1 - \frac{h^2}{R^2} - \frac{r^2}{R^2})} \quad (6)$$

由上式可以看出,当焦点处为漫反射,即  $\eta = 1$  时,其表达式与 Drury 公式<sup>[4]</sup> 相同. 所以 Drury 公式实际上是半球反射镜对焦,且其焦点处为漫发射和漫反射情况下的表达式. 可以看出,  $\varepsilon_a$  随着  $\eta$  的减小而减小;极端情况,当  $\eta = 0$  时(焦点处为完全镜反射),  $\varepsilon_a = \varepsilon$ ,即反射镜作用完全失效. 换句话说,反射镜能增大有效发射率得益于被测面的漫反射性质.

在光学设计上,保证光斑位置正好位于焦点处,且光斑半径 (1 mm) 远小于反射器半径

(25 mm). 对焦反射镜设计带来的优点是,由于焦点与非焦点没有热交换,测量点为焦点处温度,不受被测面非等温性(或发射率的分布)的影响. 极端情况下,如果被测面只有光斑大小,若将反射镜对焦,亦可测量.

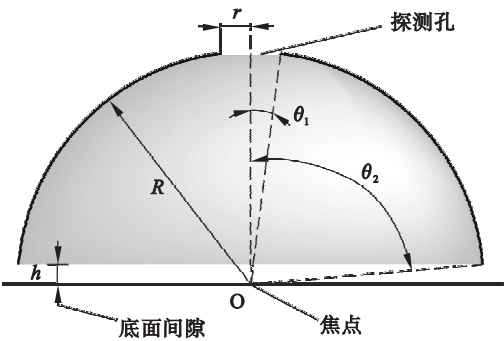


图 2 对焦球镜示意图

Fig. 2 Schematic of focused hemispherical reflector

前置反射器将减小比色高温计的测量误差. 下面举例分析. 设前置反射器参数  $h = 1 \text{ mm}$ ,  $\rho(\lambda_1) = \rho(\lambda_2) = 0.9, \eta = 1$ ; 被测表面真实温度  $t_0 = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ , 发射率  $\varepsilon(\lambda_1) = 0.7$ , 发射率间差异  $d\varepsilon = \varepsilon(\lambda_2) - \varepsilon(\lambda_1) = 0.05$ . 应用前置发射器后,有效发射率分别为  $\varepsilon_a(\lambda_1) = 0.9499$  和  $\varepsilon_a(\lambda_2) = 0.9606$ ,其差异  $d\varepsilon$  从 0.05 缩小到 0.01. 与不使用前置反射器相比,根据式(2)可得出,比色测温误差从  $-15.2 \text{ }^\circ\text{C}$  缩小到  $-2.5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

2.3 测量装置设计

为验证测量准确性,制作了平片热电偶. 制作方法:采用盐水焊接法焊接 K 和 B 型热电偶,在焊接瞬间用镊子或钳子挤压焊点,使之成为平片状. 平片热电偶厚度约 0.5 mm,直径大于 3 mm,在黑体炉内由 B 型二等铂铑热电偶标定后,再用耐高温胶(翌坤 yk-8907,  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 贴在加热面上,如图 3 所示. 测量时,使反射镜直接对焦于平片热电偶上,从而直接测量热电偶温度,避免了由测量中间介质温度带来的温度差异.

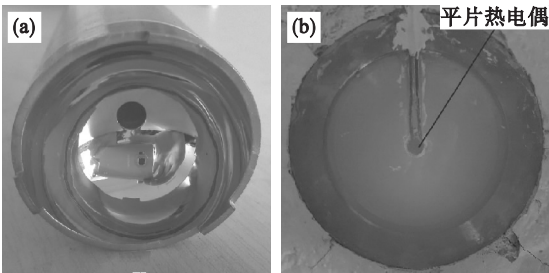


图 3 前置反射器和加热面

Fig. 3 Photos of the reflector and the heated surface  
(a)—前置反射器; (b)—加热面.

前置反射器高温计存在一个缺陷,即破坏被测面温度的分布<sup>[5,7]</sup>.当反射器突然靠近高温被测物时,被测表面的边界条件会发生突变.高魁明等<sup>[5]</sup>给出了表面温升公式,其破坏作用是显著的:如表面温度为 600 ℃ 的不锈钢暴露在室温中(全波长半球发射率为 0.8),将前置反射器突然置于其表面上,其表面边界条件从自由辐射突变到近乎绝热(表面辐射能量被返回),表面温度在 1 s 时就达到了 2.2 ℃,2 s 时达到 3.1 ℃.所以前置反射器不能长时间监测同一被测物.为减小对表面温度的破坏,设计了标准化快速测量方法.如图 4 所示,设计直线导轨实现高温计的垂直运动,采用步进电机(Panasonic Motor,型号 MSMD082G1V)驱动,其垂直分辨率可达 0.012 5 mm,满足了球镜对焦的精度要求.基座采用回转支撑,可实现高温计的水平移动,在非测量时段,将高温计水平从加热炉上表面移开,以避免高温计被高温烤坏.测量时,将高温计水平移至加热面的正上方 400 mm,再垂直下落至反射镜对焦处,采集信号后测量结束,测量时间仅需 0.7 s,表面温升可控在 0.5 ℃ 以内.测量结束,将高温计提升.

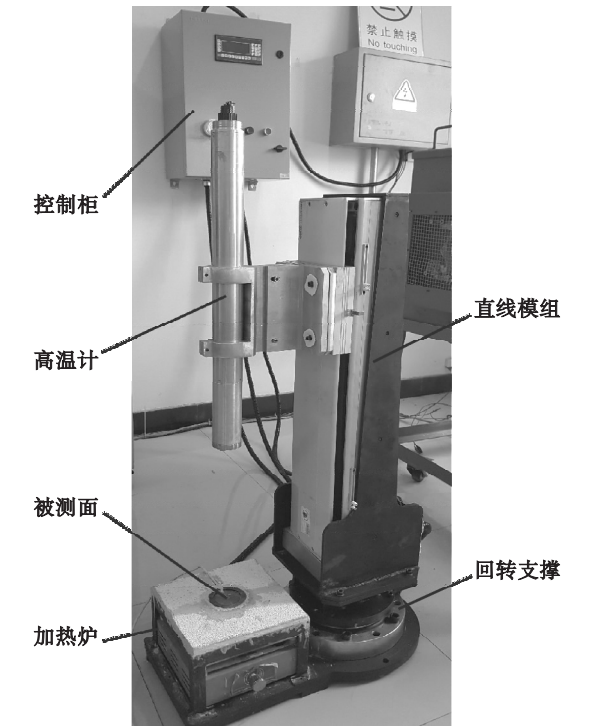


图 4 表面温度的快速测量装置

Fig. 4 Apparatus for fast measurement of surface temperature

2.4 准确性验证实验

使用 K 型和 B 型平片热电偶各 2 个,待炉温

稳定后分别测量热电偶表面温度,并将测量结果与热电偶输出结果相比较,见表 1.其中亮温误差为前置反射器单色高温计的误差,结果显示,与前置反射器单色高温计相比,前置反射器比色高温计的误差更小,最大误差可控制在 1.1 ℃ 以内.

表 1 准确性实验结果					
Table 1	Results of accuracy validation experiment				℃
平片热电偶	K 型 (No. 1)	K 型 (No. 2)	B 型 (No. 1)	B 型 (No. 2)	
测量温度	747.1	747.0	736.5	727.6	
亮温误差 $\lambda_1$	-1.2	-3.0	-2.8	-6.1	
亮温误差 $\lambda_2$	-1.6	-4.8	-4.7	-9.8	
比色误差	-0.5	0.5	0.9	1.1	

3 结 论

1) 将反射器置于比色高温计前段,可将两波长有效发射率差异缩小,明显减小比色测温误差.

2) 前置反射器比色高温计具有如下优点:快速测量、无背景辐射、结构简单和高信噪比.

参考文献:

[1] Raj V, Prabhu S. Measurement of surface temperature and emissivity of different materials by two-color pyrometry[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(12):124903.

[2] Wen C. Investigation of steel emissivity behaviors: examination of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(9/10):2035–2043.

[3] Hernandez D. A concept to determine the true temperature of opaque materials using a tricolor pyroreflectometer [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(2):024904.

[4] Drury M D, Perry K P, Land T. Pyrometers for surface temperature measurement [J]. *Journal of Iron and Steel Institute*, 1951, 169:245–250.

[5] 高魁明,刘怀良,陈万庆.前置反射器辐射温度计的研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 1984, 5(3):40–47. (Gao Kui-ming, Liu Huai-liang, Chen Wan-qing. Study on the radiation pyrometer preceded with a reflector[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 1984, 5(3):40–47.)

[6] Krapez J C, Belanger C, Cielo P. A double-wedge reflector for emissivity enhanced pyrometry [J]. *Measurement Science & Technology*, 1990, 1(1):857–864.

[7] Ciauriz C, Hernandez D, Olalde G, et al. Thermoregulated fiber-optic probe validation for temperature determination in spite of radiation disturbances [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1992, 63(7):3623–3628.