

双波段比色辐射温度计的波长选择

张友山

(武汉钢铁公司自动化部, 湖北, 武汉, 430083)

摘要: 通过对比色测温法灵敏度温区特性和波比数判据的分析, 讨论了比色波长的匹配原理, 试图解决选择比色波长的理论依据。

关键词: 比色波长, 灵敏度。

引言

比色测温法属于非发射率法测温, 对于近灰体而言它不受物体发射率的影响, 因此它有可能使温度由监测参量变成直接控制变量。然而比色测温法的理论与实验研究远远少于亮度测温 and 全辐射测温的研究^[1]。其原因在于比色波长的选择至今没有解决。1990年以来, 武汉钢铁公司自动化部红外技术应用室用红外双色测温仪在炼钢厂检测铸坯表面温度, 为比色测温法积累了一些经验, 本文就此讨论了比色波长的选择问题。

1. 比色灵敏度的温区特性

假设从黑体辐射中选出 λ_1 和 λ_2 两个波长, 当黑体温度为 T 时, 在 λ_1 和 λ_2 处的单辐射亮度 $L(\lambda_1, T)$ 和 $L(\lambda_2, T)$ 之比, 即比色测温法的分度值公式为

$$W = \frac{L(\lambda_1, T)}{L(\lambda_2, T)} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 \exp \frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right), \quad (1)$$

式(1)中 C_2 为第二辐射常数, $C_2 = 0.014388 \text{ m}\cdot\text{K}$ 。

式(1)表明: 当实际物体与黑体的单色辐射亮度之比 W 相等时, 比色测温的示值即为实际物体的颜色温度。

人们习惯于用相对灵敏度 $R = \frac{dW}{W} / \frac{dT}{T}$ 来比较比色测温法与其它红外测温法的特性^[2]。

$$R = \frac{dW}{dT} / \frac{W}{T} = \frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right). \quad (2)$$

本文所讨论的灵敏度是表征探测器响应率特性的比色灵敏度 $Q = \frac{dW}{dT}$. R 与 Q 的概念虽然很接近, 但其温度特性却全然不同. 根据定义, 对式 (1) 求导得

$$Q = -C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 \exp \frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) / T^2.$$

为了讨论方便, 取 $Q > 0$, 必须有 $\lambda_1 < \lambda_2$, 则 Q 的表达式为

$$Q = C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 / T^2 \exp \frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right); \quad (3)$$

式 (3) 中 $\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)$ 为比色波长, 式 (3) 中 Q 在 T 轴上呈极值分布. 求极值时先对式 (3) 求导:

设 $f(T) = C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) / T$, 则 $T = C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) / f(T)$, 将上式代入式 (3) 得:

$$Q = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 / C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) * \frac{f^2(T)}{\exp f(T)}$$

$$\frac{dQ}{df(T)} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 / C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) * \frac{2f(T) - f^2(T)}{\exp f(T)},$$

令 $\frac{dQ}{df(T)} = 0$; 即 $2f(T) - f^2(T) = 0$, 得 $f(T) = 0$, 即 $C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) / T_M = 2$, 则比色灵敏度的极值所对应的温度为

$$T_M = 0.5 C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right); \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (3), 得比色灵敏度的极值为

$$Q_{\max} = 4 \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 / e^2 C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right). \quad (5)$$

式 (4) 和式 (5) 表明: 当被测温度处在 T_M 附近时, 探测器的响应率才能维持在最佳工作状态, 即 T_M 落在测温量程较为中心的位置时, T_M 为测温量程的特征温度.

2 温区定义域

比色测温的温区就是指比色灵敏度具有可测的最低分辨率时所对应的温度区间.

设 $T_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为小于维恩位移定律确定的 $T_{02} = \frac{2898}{\lambda_2}$ K 黑体温度, 其普朗克分布曲线见图 1(a).

图 1(a) 中 $L(\lambda_1, T_i)$ 或 $L(\lambda_2, T_i)$ 与普朗克分布曲线相交于 A_i 或 B_i . 图 1(b) 为分布曲线的相似等效三角图, 从图 1(b) 可见:

$$\frac{L(\lambda_1, T_i)}{L(\lambda_2, T_i)} = \frac{B_i \lambda_1}{A_i \lambda_2};$$

因为 $\frac{B_0\lambda_1}{A_0\lambda_2} = \frac{B_1\lambda_1}{A_1\lambda_2} = \frac{B_2\lambda_1}{A_2\lambda_2} = \dots = \frac{B_i\lambda_1}{A_i\lambda_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ 为常数, 所以 $W_i = \frac{L(\lambda_1, T_i)}{L(\lambda_2, T_i)} \doteq \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ (约为常数), 表明比色灵敏度 Q 为零, 即被测温度 $T_i < T_{02} = \frac{2898}{\lambda_2}$ K 时, 比色灵敏度 Q 接近可测的最低分辨率.

当被测温度 T_j 高于维恩位移定律确定的 $T_{01} = \frac{2898}{\lambda_1}$ K 时, 普朗克定律趋向于高温的长波分布, 单色辐射亮度将服从瑞利-琼斯公式, 其分度比值 $W_j = \frac{2CKT_j\lambda_1^{-1}}{2CKT_j\lambda_2^{-1}} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$ 为常数, 比色灵敏度 Q 也将接近可测的最低分辨率.

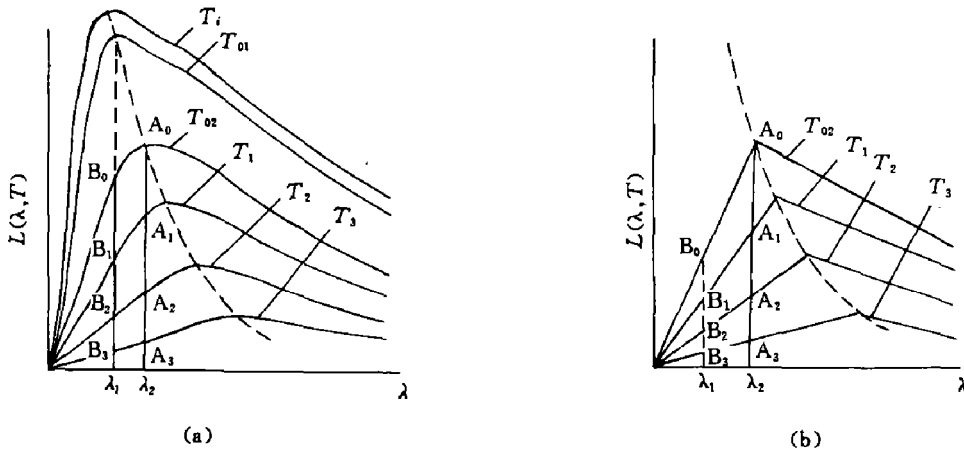


图 1 $T_i < T_{02}$ 的普朗克分布曲线. (a) 普朗克分布; (b) 等效三角图
Fig. 1 Planck's curves (a) and the equivalent triangles (b) for $T_i < T_{02}$

由此可见, 温区与比色波长 $\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)$ 有关, 它的定义域为 $\left[\frac{2898}{\lambda_1} \sim \frac{2898}{\lambda_2}\right]$.

3 比色波长的匹配

当比色灵敏度的最大值 Q_{max} 对应温度 T_M , 即式 (4) 中的 $T_M = 0.5 C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)$ K 落在温区定义域 $\left[\frac{2898}{\lambda_1} \sim \frac{2898}{\lambda_2}\right]$ K 之间时, $\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)$ 的选择就是匹配的.

我们以铸坯测温为例, 取铸坯结晶时表面温度为 900°C ($T = 1173$ K), 代入维恩位移定律得 $\lambda_m = 2.4 \mu\text{m}$, 为避免冷却水的水蒸汽吸收干扰, 取 $\lambda_2 = 2.2 \mu\text{m}$, 则所对应的 $T_{02} = 1360$ K ($t_{02} = 1043^\circ\text{C}$), t_{02} 与结晶时的表面温度是接近的. 以结晶器铸坯入口温度为上限温度, 取 $t_{01} = 1650^\circ\text{C}$ ($T_{01} = 1928$ K), 其对应的 $\lambda_1 = 1.5 \mu\text{m}$, 将 λ_1, λ_2 代入式 (4) 得 Q_{max} 所对应的温度为: $T_M = 1526$ K, $t_M = 1253^\circ\text{C}$, 因为 $1043^\circ\text{C} < t_M < 1650^\circ\text{C}$, 所以 T_M 落在温区定义域中, 因此比色波长 $\left(\frac{1}{1.5} - \frac{1}{2.2}\right)$ 的选择是匹配的.

比色测温法属于非辐射率测温, 在考虑比色波长匹配的同时, 还要考虑发射率的变色性. 对于冶金工艺过程, 其“温区”处在中、远红外波段, 如果根据经验公式 $\epsilon_\lambda = 0.365\sqrt{\rho/\lambda}$

计算^[1]. 则颜色温度与真实温度的差值小于 $\pm 1\%$, 可见比色波长的匹配性与发射率的变色性是基本兼容的.

4 匹配性的波比判据

在比色波长 $\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)$ 中, λ_2 与 λ_1 之比 $\xi = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$ 称为波比. 本文以 ξ 值作为比色波长的匹配性判据.

以 $T_M = \frac{2898}{\lambda_M} \text{K}$, $\xi = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$, $C_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{m}\cdot\text{K}$ 代入式 (4) 得

$$T_M = 0.5 C_2 \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} - \frac{\lambda_2}{\lambda_2} \right) \frac{1}{\lambda_2},$$

即 $\frac{2898}{\lambda_M} = 0.5 C_2 (\xi - 1) \frac{1}{\lambda_2} = 0.5 \times 1.4388 \times 10^{-2} (\xi - 1) \frac{1}{\lambda_2}$, 有:

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_M} = 2.5 (\xi - 1). \quad (6)$$

根据温区的定义, λ_M 的范围是 $[\lambda_1 \sim \lambda_2]$. 设 $\lambda_M = \lambda_1$, 则 $\frac{\lambda_2}{\lambda_M} = \xi$, 代入式 (6) 得 $\xi_1 = 1.66$. 又设 $\lambda_M = \lambda_2$, 则 $\frac{\lambda_2}{\lambda_M} = 1$, 代入式 (5) 得 $\xi_2 = 1.4$. ξ_1, ξ_2 分别为 $\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)$ 匹配时波比的上、下限. 即当波比 $\xi = (1.4 \sim 1.66)$ 时, $\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)$ 的选择是匹配的.

5 相对灵敏度的重新评价

式 (2) 表明比色测温的相对灵敏度 R 与比色波长成正比, 与被测温度成反比, 它的大小介于亮度测温与辐射测温之间^[2]. 本文认为: 比色波长因受匹配性约束, 其大小变化甚微, 故 $\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)$ 对 R 的影响很小. 当被测温度为 T_M 时, 其相对灵敏度为 $R_M = 2$, 由于被测温度受测温量程限制, 所以 R 的大小为中心值 $R_M = 2$.

因为辐射测温法的相对灵敏度 $R_{\text{辐}} = 4$. 亮度测温与比色测温相对灵敏度的比值 $\frac{R_{\text{亮}}}{R} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1}$, 可见比色测温的 R 是较低的, 它只相当于 $R_{\text{辐}}$ 或 $R_{\text{亮}}$ 的 $1/2$. 而 $R_{\text{辐}}$ 与 $R_{\text{亮}}$ 大小相当.

致谢: 本文是在红外技术应用室陈建华博士的帮助下完成的, 谨表谢意!

参考文献

- 1 崔志尚. 常用辐射测温仪器及其检定, 北京: 计量出版社, 1988, p.86
- 2 杨泽宽, 王魁汉. 热工测量技术, 沈阳: 东北工学院出版社. 1987, p.136

WAVELENGTH SELECTION FOR TWO-WAVEBAND COLOR PYROMETER

ZHANG YOUSHAN

*(Department of Automation, Wuhan Iron and Steel Corporation,
Wuhan, Hubei 430083, China)*

Abstract: Through analyses of the temperature characteristics of sensitivity and the wavelength ratio criterion in the colorimetric method, the matching principle of colorimetric wavelength is discussed, in an attempt to give the theoretical foundation of the colorimetric wavelength selection.

Key words: colorimetric wavelength, sensitivity.