

· 热工与热能 ·

加热炉内钢的温度测量

赵裕钐 李红德 高灵智

(中国科学院力学研究所)

TEMPERATURE MEASUREMENT FOR THE STEEL IN REHEATING FURNACE

Zhao Yuqian Li Hongde Gao Lingzhi
(Institute of Mechanics, Academia SINICA)

1. 引言

适时准确地测出加热炉加热段钢的加热温度,控制加热温度和加热时间,对防止钢的过热,过烧和氧化脱碳是国内钢铁部门老企业技术改造挖潜节能的重要技术措施之一。目前国内广泛使用的炉温检测控制方法,多是在炉顶内壁安置热偶测量炉气综合温度,再折合到钢的表面温度,精度约5%,结合经验可控制其相应烧损率为2~4%。显然,这种方法很不适应加热炉快速加热技术的发展和应^[1]。

我们采用的“双计补偿法”直接测量炉内钢的表面温度,是近几年国外较为成功的方法之一。

笔者参考有关国外文献^[2~4],在国内首次引用该法,并研制了双计测温系统,成功的用于炉内钢的温度测定。实验标定结果和国外八十年代初期报道的实验结果进行了比较,测温相对误差≤1~2%。

2. 测温原理和方法

在加热炉内测量钢锭辐射的特点是:除钢锭自身温度辐射外,还有较强的加热源背景干扰量,经钢锭表面反射混入测量光路中,钢锭表面的总有效辐射功率可写成,

$$W_{\text{eff}} A_a = \varepsilon_\lambda W_0(\lambda, T_s) A_a + (1 - \varepsilon_\lambda) \sum_{k=1}^n W(\lambda, T_k)_{\text{eff}} A_k F_{k-a} \quad (1)$$

式中 $\varepsilon_\lambda W_0(\lambda, T_s)$ ——钢锭温度 T_s 时的辐射功率;

$W(\lambda, T_k)$ ——加热源背景温度 T_k 时的辐射功率;

ε_λ ——钢锭在波长 λ 的发射率;

A_a ——高温计对钢锭表面的取光面积;

A_k ——温度是 T_k 的背景辐射源等效面积;

F_{k-a} ——辐射加热源和钢锭之间的角度系数,

$$F_{k-a} = \frac{1}{\pi A_a} \left[\sum_{i=1}^n \int_{\lambda_a} \int_{A_i} \frac{\cos \beta_{1i} \cos \beta_{2i}}{r_j^2} dA_a dA_i \right]$$

其中, r_i 是辐射源和钢锭之间连线的等效距离; β_{1i} 为 r_i 与钢锭表面垂线之间的夹角; β_{2i} 为 r_i 与辐射源等效表面垂线之间的夹角。

为扣除钢锭表面的反射辐射,采用了“双计补偿法”测温原理,如图1所示。这种方法是:

用测量高温计测出钢锭表面有效辐射,

用参考高温计测出混入测量光路的多次反射辐射；通过测量钢锭附近可忽略自身温度发射影响的冷靶，测出多次反射辐射。

测量高温计测出的钢锭表面温度讯号 =

$$W_{eff} = \frac{\epsilon_\lambda \cdot W_0(\lambda, T_S)}{\epsilon_p} + \frac{(1 - \epsilon_\lambda) \left[\epsilon_w \sum_{k=1}^n W(\lambda, T_w) + \epsilon_F \sum_{k=1}^n W(\lambda, T_F) \right]}{\epsilon_p}$$

$$\frac{(1 - \epsilon_r) \left[\epsilon_w \sum_{k=1}^n W(\lambda, T_w) + \epsilon_F \sum_{k=1}^n W(\lambda, T_F) \right]}{\epsilon_R} \quad (2)$$

式中 $\epsilon_w \cdot W(\lambda, T_w)$ ——内炉衬温度为 T_w 时的辐射功率；

$\epsilon_F \cdot W(\lambda, T_F)$ ——火焰温度为 T_F 时的辐射功率；

$(1 - \epsilon_\lambda)$ ——钢锭表面（在 1200 °C 时）的反射率；

$(1 - \epsilon_r)$ ——水冷靶面（在 500 °C 时）的反射率；

ϵ_p ——测量高温计发射率改正值安置数；

ϵ_R ——参考高温计发射率改正值安置数。

若满足双计补偿条件，应使（2）式第二、三项之和为零，则有

$$\epsilon_R = \epsilon_p \frac{1 - \epsilon_r}{1 - \epsilon_\lambda} \quad (3)$$

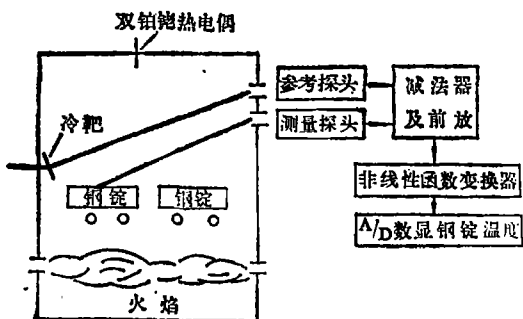


图 1 双计补偿法测量钢锭表面温度原理框图

（测量高温计有效讯号）—（总归化系数）×（参考高温计的反射辐射的讯号）。当双计系统归化到同一探测工况条件下，其原物理模型见文献〔2〕，经修正为，

上式为双计补偿法测温基本关系式，其中偏离理想多次漫反射补偿条件及各相对改正值的误差，均在绝对标定中修正。

3. 仪器设备的特点

双计测温系统的现场安装，如图 2 所示。

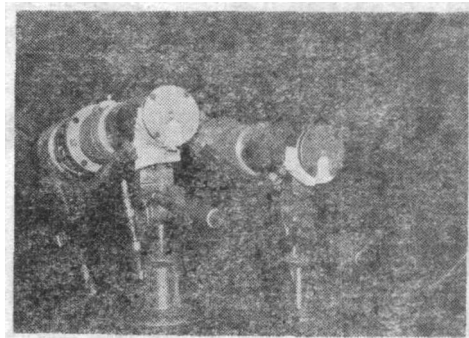


图 2 双计测温系统

为使测温仪表在高温烟气污尘环境下正常运行，对高温测量探头采取了冷却和气浴净化等技术措施，如图 3 所示。

参考靶是用软化水冷却，通过调节水的流量，使靶面温度控制在 500 °C 以上。

双高温计经改进后，在检测 900~1400 °C 时达到稳定工作，相对误差 ≤ 1 %。定标是在黑体炉上进行，而系统测试精度的绝对定标是用自行研制的绝对标定标枪，定标等级为 I 级，允许误差为 0.02 % 的铂铑₃₀-铂铑₆高温热电偶。

实验证明，在 1100~1300 °C 测温范围，非线性校正的数显仪表，温度显示误差 ≤

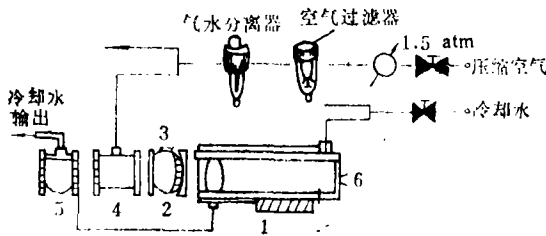


图 3 高温测量探头的冷却和气浴净化装置

1—WFH—60型红外辐射高温计；2—保护玻璃；3—擦拭窗口；4—气浴净化器；5—水冷管头；6—电讯号输出

1%，分辨率为±1℃。

系统设备条件和国外同类工作相比，特点是结合了现场具体条件和现时可行性，作了简化和改进。

4. 实验标定数据的分析讨论

测量标定钢的表面温度，是选在冷滑推钢式加热炉的加热段^[5]，如图4所示。

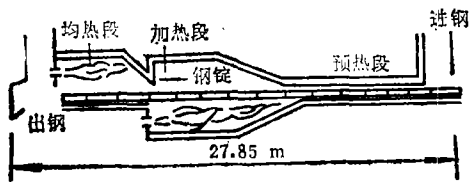


图 4 冷滑推钢式加热炉示意图

由于快速重油燃烧加热的应用，对流换热比重相对于辐射换热的加大，和温度场的不均匀性，使钢在加热段的加热是一种不稳定态传导传热。因此，用标枪直接标定钢的表面温度，应和双计补偿法测温在时间上严格同步。

根据补偿法测温特点，两高温计的测量条件须归化到同一工况条件。因此，须对几何因子（包括两计立体角相对改正系数和方向角相对改正系数）、不同钢种在不同温度下表面发射率、参考靶面反射系数、和两计探测灵敏度相对改正系数等进行修正^[6]。

综合上述修正因子，给出归化相对改正值 $K=1.07$ ，此时，双计系统测量讯号波形，如图5所示。

由于各相对改正值的偏差，双计系统测温值偏离理想补偿测温值。因此，还要进行绝对标定修正（见表1）。

分析表1标定数据结果，可得出双计系统测温误差的产生和分布的基本规律：

1) 不同钢种或同一种钢，在同一温度或不同温度下，表面状态对发射率的影响，特定炉气火焰和排料推钢中几何因子变化的影响，存在明显的不稳定性；

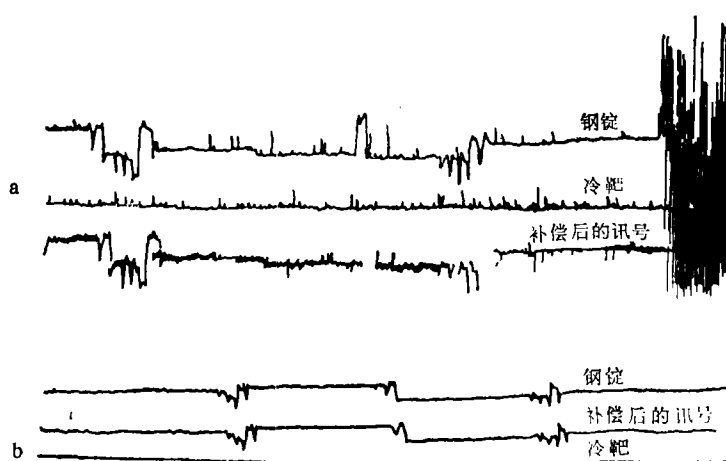


图 5 双计系统测量讯号波形

a—燃烧启动时和不稳定加热时的讯号波形；b—燃烧稳定后的波形

表 1

绝对标定结果

| 钢 种 | 不锈钢 | 15Cr | 15Cr | 15Cr | 15Cr | 15Cr | CrMnAT |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 标枪测温, ℃ | 1189.9 | 1238.2 | 1260.2 | 1259.7 | 1259.0 | 1256.0 | 1248.7 |
| 双计测温, ℃ | 1221.0 | 1281.0 | 1300.0 | 1325.0 | 1325.0 | 1326.0 | 1291.0 |
| $K_2 =$ 双计/标枪 | 1.036 | 1.035 | 1.032 | 1.052 | 1.052 | 1.056 | 1.034 |
| 按 K_2 改正后的相对误差, % | 1.5 | 0.78 | 1.1 | 0.87 | 0.87 | 1.2 | 0.89 |

2) 双计测温值均大于标枪的直接标定值, 存在系统误差, 这主要是由于参考冷靶表面发射率取值偏低产生的;

3) 由于几何因子和钢表面发射率的随机因素的影响, 存在随机误差, 其中主要是发射率相对误差的影响, 如

$$\Delta T_s = -\frac{\lambda_e T_s^2}{C_2} \cdot \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \quad (4)$$

当 $\Delta \epsilon / \epsilon$ 存在0.1~0.2变化时, 在 $C_2 = 1.4388 \text{ cm} \cdot \text{k}$; λ_e 为 $1 \mu\text{m}$; $T_s = 1100^\circ\text{C} \sim 1250^\circ\text{C}$ 时, 测温相对误差限定在1~2%以内;

4) 对标定改正数据按统计平均取值($K_2 = 1.041$)修正后, 可使双计系统在1100~1300℃温度范围内, 实测标定测量相对误差限定在 $\Delta T / T \approx 0.78 \sim 1.5\%$ 。

国外八十年代初期应用双计补偿法测温, 发表的理论精度 $< 1\%$, 而实测精度也是 $< 1 \sim 2\%$, 这主要是和炉内温度场稳定性、燃

烧条件、加热钢表面特性和测试补偿条件等有关[2]。

5. 结论

采用双计补偿法测量钢锭表面温度, 是国内首次应用成功。总结本研制工作, 主要有以下几点:

5.1 在J.E.Roney测温原理基础上, 从理论上进一步完善了补偿法测温数理模型。

5.2 研制出具有自己特点的标枪和绝对标定方法。

5.3 解决了技术难点, 使光学测试系统在高温烟气环境下可正常运行。

5.4 改进了国产仪表, 稳定了精度, 简化了辅助部件设计, 降低了研制成本。

本项工作在吴承康先生指导下进行, 参加这项工作的还有王孝林, 何蔚琅, 洪传玉, 王素兰, 刘玉珍和首钢特钢厂的蔡庄等同志。另外, 清华大学自动化系魏平田同志曾提出过有益的建议, 在此表示谢意。

参 考 文 献

- [1] Dixon, J., Temperature Measurement Control, 1978, July.
- [2] Roney, J.E., "Temperature" Its Measurement and Control in Science and Industry, 1982, 485~489.
- [3] Roney, J.E., U.S. Patent, №4144, 758, 1978.
- [4] Roney, J. E., Iron and Steel Engineer, 1982 June, 35~38.
- [5] Peacock, G. Raymond, Iron and Steel Engineer, 1982 May, 30~38.