

加热炉内钢坯温度在线红外 测试新技术

赵裕铃 李鸿德 王素兰 罗有霖 张兴中

(中国科学院力学研究所)

(济南钢铁厂)

在概述国内外轧钢加热炉内钢坯辐射测温原理基础上,重点研究了炉内钢坯温度在线红外测温新技术新方法。

该项技术是从炉内辐射测温光程空间干扰场性质和钢坯表面特性研究出发,在系统分析测温数模和辐射传输方程基础上,提出用光谱滤波技术,自相关测量方法,实时判断处理了非稳态随机跳变干扰,应用现场绝对定标数据,在线扣除各温程段等效背景干扰,由所测等效辐射中分离出“钢坯表面温度”辐射信息。

我们研制的测温系统运行稳定,维修方便,在1200 °C左右测温相对误差 $\frac{\Delta T}{T} \leq 1 \sim 1.5\%$,并实现了开环温度控制。

A NEW INFRARED TECHNOLOGY FOR ON-LINE MEASURING SLAB TEMPERATURE IN REHEATING FURNACE

Zhao Yuqian Li Hongde Wang Sulan

(Institute of Mechanics, Academia SINICA)

Luo Youfu Zhang Xingzhong

(Jinan Iron & Steel Plant)

Based on the summarized principles of radiation temperature measurement for slabs in reheating furnace, research on a new on-line infrared technique for temperature measurement in reheating furnace was carried out.

The technique proceeded from nature of the space interference field and characteristics of slab surface in reheating furnace. On the basis of systematic analysis of mathematic model and equation of radiant transfer, a real time diagnosis and treatment method has been worked out, in which the spectral filter and auto-correlation measurement are used of non-stationary random fluctuation interference.

Therefore, the radiant information of surface temperature might be obtained through measured equivalent radiation after deducting various background interferences from absolute calibration data.

The operation of developed system is stable and easy to maintain. The relative error $\frac{\Delta T}{T} \leq 1 \sim 1.5\%$ of measurement near 1200°C. The open loop control of temperature has been realized.

1. 引言

实时测量和控制轧钢加热炉内钢温，可防止钢的过热、过烧和欠热、欠烧及氧化脱碳，从而保证钢的加热质量，减少烧损和节约燃油。

辐射法在线测量炉内钢坯表面温度的难点在于，炉内视场光程空间为一复杂干扰空间；燃油加热为一多相燃烧反应，高温燃气流场、炉体内衬和钢表面构成一封闭的多维变量相关空间，干扰变量是时间和位置的分布函数，并具有随机分布性质。这些都直接影响测量钢表面的温度辐射信息；同时探测系统还要经受高温、烟气和灰尘等现场恶劣条件下长期连续运行。因此，用辐射法在线测量炉内钢坯温度，一直是国内外科学和工业中温度测控领域待深入研究的技术难题之一。

80年代前后，美国匹兹堡、琼斯—劳林钢铁公司 John E. Roney 系统地研究了双计补偿法^[1, 2]；英国兰德红外仪器公司 G. Raymond Peacock 在贝斯莱赫姆钢铁公司应用双计相关补偿法^[3~6]；和日本的萨米托莫金属工业有限公司塔穆拉的可伸缩冷却视管遮挡环境干扰的辐射测温法等^[7]都存在明显待探讨的问题，特别是结合国内加热炉现场实际，很难具体推广应用。作者在系统分析国内外有关专业文献基础上^[8]，通过理论分析和炉前实验研究，提出一种炉内钢坯红外测温在线测试新技术，研制了新的测试系统，并首次成功地应用于山东济南钢铁厂。

2. 在线红外测试新技术

按照 Planck 公式，黑体在波长 λ 的亮度 $B_{b\lambda}$ 只与绝对温度有关，故测出亮度就可间接求出温度 T_M ^[9]：

$$T_M = \frac{C_2}{\lambda \ln \left(\frac{C_1}{\lambda^5 B_{b\lambda}} + 1 \right)} \quad (1)$$

式中， C_1 和 C_2 分别为第一和第二辐射

常数。

而加热炉内钢坯的辐射测温如图 1 所示。

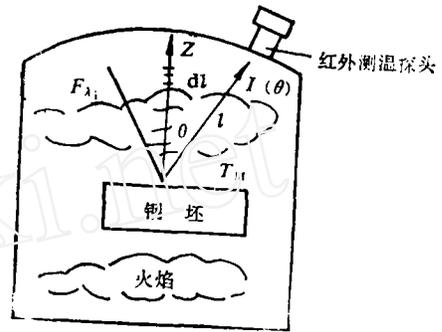


图 1 炉内高温流场辐射干扰空间

实测条件是：①被测钢坯表面不是黑体；②红外辐射高温计测温所经炉内视场光程空间，具有介质辐射、散射、吸收及炉衬反射等构成互为相关的干扰空间。因此，应用辐射传输方程，可求得红外辐射高温计对钢坯表面积 dS 上的辐射亮度 $B_{\Delta\lambda}(T_M)$ 为：

$$B_{\Delta\lambda}(T_M) = A_0 \cos\theta \cdot \varepsilon_{\lambda M}^{-1} \left\{ \tau_{\lambda(\lambda, l)}^{-1}(\theta) \cdot \tau_{\lambda l}^{-1}(\theta) \left[I_{\Delta\lambda}(\theta) - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{l_1}^{l_2} B_{F\lambda} \cdot (T_{F\lambda}(z)) \cdot \frac{\partial \tau_{\lambda}(z, \theta)}{\partial z} dz d\lambda \right] - (1 - \varepsilon_{\lambda M}) \sum_{i=1}^n \phi_{w_i-M} \cdot \left[\varepsilon_{w_i} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{w_i}(\lambda, T_{w_i}) d\lambda + (1 - \varepsilon_{\lambda w_i}) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda M} B_{\lambda}(T_M) d\lambda \right] \right\} \quad (2)$$

式中， $I_{\Delta\lambda}(\theta)$ 为红外辐射高温计沿 l 方向接收的辐射强度；

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{l_1}^{l_2} B_{F\lambda}(T_{F\lambda}(z)) \frac{\partial \tau_{\lambda}(z, \theta)}{\partial z} dz d\lambda$$

为测距空间炉内介质辐射，是介质分层高度及位置的分布函数，包括微粒碳的连续辐射和随机干扰辐射；

$$(1 - \epsilon_{\lambda M}) \sum_{i=1}^n \phi_{wi-M} \left[\epsilon_{\lambda wi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{wi} \cdot (\lambda, T_{wi}) d\lambda + (1 - \epsilon_{\lambda wi}) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_{\lambda M} B_{\lambda}(T_M) d\lambda \right]$$

是炉衬辐射和钢坯辐射经炉衬反射之和，通过dS的反射辐射；

其中， $B_{F\lambda}$ 为火焰介质在波长 λ 处的等效辐射亮度； $B_{wi}(\lambda, T_{wi})$ 为炉衬元辐射亮度； $\epsilon_{\lambda M}$ 为钢坯表面黑度系数； $\epsilon_{\lambda wi}$ 为炉衬元黑度系数； ϕ_{wi-M} 为炉衬对钢坯dS表面的角度系数； $A_0 = DdS/\pi l^2$ 为红外辐射高温计仪器常数； D 为光测系统通光口径的有效面积；

$$\tau_{\lambda}(l, l_1)(\theta) = \exp\left\{-\int_{l_1}^{l_2} \rho_x(l) k_x^*(l) \cdot dl\right\}$$

为测温光程空间介质的透过率； k_x 和 ρ 分别为吸收介质的吸收系数和密度； $\rho_x(l)$ 为炉内视场光程 l 方向上的总密度； k_x^* 为体积吸收系数； $\tau_{\lambda}(\theta) = \exp(-r(\lambda))$ 为炉内空间介质的散射透射比； $r(\lambda)$ 为散射系数。

炉内介质散射主要是无选择性散射和少量米氏散射。由于实际标定和通过计算机对 $\epsilon_{\lambda wi}$ 的定期适时修正，及钢坯的 $\epsilon_{\lambda M}$ 在加热中趋于一常数，因此应用(1)、(2)式可求解出炉内钢坯表面温度。

测试系统如图2所示。

绝对定标选择在炉内稳定加热条件下进行，是用自行研制的标枪，分度误差为0.2%的铂铑₃₀-铂铑₆热偶高温计，与红外辐射高温计在时间上严格同步条件下取值，按两计的计算程序计算出各温程段等效背景反射辐射的归化改正系数 k_{ij} ：

$$k_{ij} = V_{TC-slab} / V_{slab} \quad (3)$$

式中， V_{slab} 为红外辐射高温计实测信号

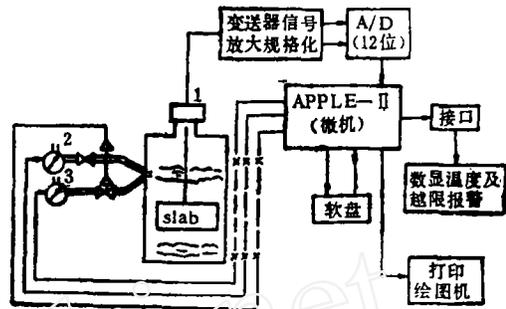


图2 新辐射测温法开环控制原理框图

1—红外高温计；2—燃油源；3—空气源

值； $V_{TC-slab}$ 为标定热电偶实测温度归化到红外高温计的相应信号值；注脚 i 表示不同钢种， j 表示不同温度。

若红外辐射高温计现场安置条件和被测表面状态与实验室标定条件存在差别，以及氧化铁皮存在温度降 ΔT_M 时，还需对(3)式进行修正。

在线测试新技术的主要特点是：

1) 采用了光谱滤波技术。选取了炉内介质透射窗口 $\lambda_{0.9 \pm \Delta \lambda}$ 窄带接收，滤掉介质中分子谱（包括CO、CO₂、N₂O、C_mH_n分子谱）的干扰，同时又限制了碳微粒连续谱及反射辐射的干扰量。

2) 应用了自相关测量方法。根据 $T_{M_1}(t)$ 和 $T_{M_2}(t + \Delta t)$ 两相邻时刻钢表面温度升降的自相关性，应用微机的硬软件功能，实时判断，由于燃烧条件的突变及碳粒子分布密度的变化（如 $C_m H_n \rightarrow mC + \frac{n}{2}$

H₂）形成的瞬间闪烁，进行适时处理随机干扰，这是一种有偏估算方法，但可使测量值控制在测温允许限度内。

3) 根据现场炉前标定数据，实时校正稳态辐射等效背景的干扰。

4) 通过理论研究和实验分析，建立和完善了炉内钢坯红外测温数模，实现了非接触法单计直接测温的新技术。

经上述处理后的实测数据结果，仍存在

表 1

炉体条件	已运行两年的老炉体 (A2, A3)			新炉体结构, 运行一个月后情况(A3F)			
钢 温, °C	1146.9	1182.0	1230.1	1040.1	1121.0	1167.2	1231.6
$V_{TC-slab}, mV$	1.526	1.570	2.285	0.485	0.977	1.395	2.307
V_{slab}, mV	1.95	1.965	2.628	0.664	1.298	1.795	2.933
k_{ij}	0.783	0.799	0.869	0.73	0.752	0.777	0.786

某些偶然因素的影响:

1) 钢坯排料及推钢过程中几何因子的变化。

2) 对同一规格钢种, 在不同温度炉气条件下, 钢表面发射率的变化; 钢的内部缺陷在加热过程中呈现的变形所引起的表面状态和形状的变化。

3) 加热边界条件的随机变化及温场不均匀性等。为寻求最佳在线状态温度的测量和控制, 对实测归化改正后的数据还须进行回归分析计算和适时修正。

3. 标定结果及分析讨论

现场绝对标定是应用微机的两路存储记忆功能, 使标枪热偶热接点直接接触到钢坯表面, 当达到热平衡瞬间的读数 V_{TC} 与红外辐射高温计在该瞬间的读数 V_{slab} 相对应, 两计读数在时间上寻求严格同步, 其数据结果如表 1 及图 3 所示。

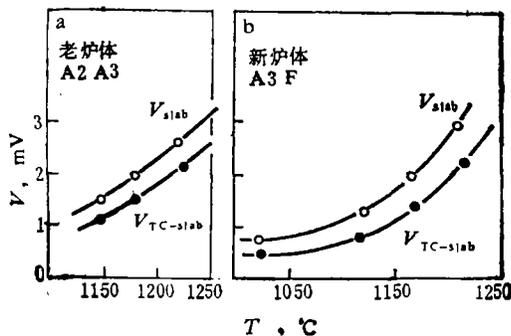


图 3 等效背景归化改正曲线

通过对上述标定数据的分析和现场观测, 可给出该项新技术的应用条件及求解钢坯表面温度的规律性关系是:

1) 经光谱滤波和自相关处理后的实测数据, 具有各温程下的稳态历经性质, 炉体结构的改变, 其稳态历经性质不变。

2) 各温程等效背景归化的引入, 在适当选取分段数的情况下, 测温相对误差可控制在允许限度内。

3) 现场观测表明, 当炉内钢坯处于非正常强化加热, 氧化铁皮处于溶化或出现破裂时, 数据结果将会出现明显下降; 而当高温介质中的微粒碳呈现随机闪烁强辐射时, 数据结果将会出现明显增大。上述两种情况分别出现时, 可通过自相关测量法使异常信号处理到设定值。实验证明, 在正常燃油加热条件下, 本文提出的在线红外测试新技术, 原理正确, 方法可行。

4. 结论

4.1 实验研究发现, 燃油加热炉内钢坯辐射测温, 可通过选择炉内介质透射窗口; 当炉内去掉随机干扰后, 余下的等效背景干扰具有各历经稳态性质。

4.2 三段式加热炉加热段的钢表面所形成的氧化铁皮的黑度系数趋于一常数。

4.3 实验证明, 钢坯温度1200 °C左右, 该法测温相对误差 $\frac{\Delta T}{T} \leq 1 \sim 1.5 \%$ 。

4.4 测试系统运行稳定, 维修方便, 并实现了开环温度控制。该项技术已对提高产品质量、减少烧损率、节约燃油和实现低温轧制等都具有明显的经济效益。从加热炉控制角度分析, 实时检测炉内钢温, 对简化钢坯加热温升控制模型^[10]、实现闭环自适应

控制提供了关键性技术基础。

参加该项工作的还有陈德清、方悦周等同志，以及中国科技咨询中心新技术专家组的杨树智、朱问毅、黎红、徐玉山、王之耀

等同志，在研制过程中曾得到中科院力学研究所吴承康先生的指导，在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Roney, J. E. *Iron and steel Engineer*, June 1982.
- [2] Roney, J. E. *Temperature Its measurement and control in science and Industry*, 1982, №5.
- [3] Peacock, G.R., *Iron and steel Engineer*, 1984, №11.
- [4] Beyon, T. G. R. and Ridley, I., *High Temperature Technology*, 1984, №2.
- [5] Peacock, G. R., *Iron and steel Engineer*, May 1982.
- [6] Rudzki *et al.*, United States patent 4,432637, 1984.
- [7] Tamura, Y. and Tatsuwaki, M., *Temperature its measurement and Control in science and Industry*, 1982, №5.
- [8] 赵裕铃等, 钢铁, 21 (1986), №9.
- [9] 曾庆存, 大气红外遥测原理, 科学出版社, 1974.
- [10] 陈南岳, 冶金自动化, 1985, №3.

(上接第86页)

冶金工业用高效耐火材料的论文约占 40 %。主要反映了优质新产品的工艺、特征、性能和使用的近期成果。如高炉和铝电解槽用的氮化硅或赛伦(Sialon)结合的碳化硅制品; 热风炉用的低蠕变高铝制品, 复吹氧气转炉用的镁碳和镁白云石碳制品; 二次精炼炉用的全合成镁铬制品, 连续铸锭用的铝碳和铝锆碳滑板和水口, 以及用于钢包、中间包和其他用途的低水泥、超低水泥和无水泥浇注料。

水泥窑和玻璃窑用的耐火材料的论文约占 20 %, 包括直接结合镁铬砖, 高纯镁铝尖晶石砖, 含锆致密白云石砖, 熔铸锆刚玉砖, 含锆高铝砖以

及不定形和轻质材料。

有关工艺装备的几篇文章引起了较大兴趣, 如高效率的高压力压砖机和 2500 °C 的高温竖窑等。有关断裂力学、高温机械行为、侵蚀机理和动力学, 烧结特征, 无损检测方法和标准化的论文反映了近期国内外在基础研究方面的新进展, 具有理论价值和实际意义。

会议开得比较活跃。中外专家聚集一堂, 增进了相互了解, 加强了联系, 有利于促进今后的技术合作和贸易往来。

(本刊讯)