

铬镍合金钢水红外测温误差分析及补偿

李明* 徐俊凯 李明琨 孙夏天 王宁

青岛新力通工业有限责任公司, 中国·山东 青岛 266700

摘要: 为提高铬镍合金钢液连续测温稳定性, 采用 LAND SPOT+ 短波双色高温计对 25Cr-35Ni、35Cr-45Ni 共 50 组现场配对数据进行分析。剔除 1 组遮挡或脱靶异常记录后, 49 组数据拟合得 $T_{TC}=0.9157T_{IR}+141.87$, 留一法 MAE、RMSE 分别为 14.18、18.15 °C。依据误差温度趋势, 在 1500~1800 °C 每 50 °C 设置 +5、+3、0、-13、-27、-27、-27 °C 偏置, 并以有效帧门控和周期热电偶复核抑制异常。结果表明, 该方法可在裸露钢液窗口内实现稳定连续测温。

关键词: 铬镍合金钢水; 短波双色测温; LAND SPOT+; 分段偏置; 在线测温

Error Analysis and Compensation of Infrared Temperature Measurement for Cr-Ni Alloy Melts

Li Ming*, Xu Junkai, Li Mingkun, Sun Xiatian, Wang Ning

Qingdao Xinliting Industry Co., Ltd., China Shandong Qingdao 266700

Abstract: To improve continuous temperature measurement of Cr-Ni alloy melts, 50 field pairs from 25Cr-35Ni and 35Cr-45Ni heats were analyzed using a LAND SPOT+ short-wave two-colour pyrometer. After excluding one obstruction or target-loss record, 49 pairs yielded $T_{TC}=0.9157T_{IR}+141.87$, with leave-one-out MAE and RMSE of 14.18 and 18.15 °C. Offsets of +5, +3, 0, -13, -27, -27 and -27 °C were assigned at 50 °C intervals from 1500 to 1800 °C. Valid-frame gating and periodic thermocouple checks suppressed abnormal readings and provided stable output during exposed-melt windows.

Keywords: Cr-Ni alloy melt; Short-wave two-colour pyrometry; LAND SPOT+; Piecewise offset; Online temperature measurement

0 引言

热电偶只能反映插入时刻的局部温度, 且人员接近炉口、偶头消耗及测量间隔会造成数据空白。红外测温可远距离连续采样, 但易受渣层、烟尘、反射、液位和测点漂移影响^[1-3], 高铬合金表面发射率也随温度变化。为此, 本文结合有效帧判别、总体拟合和分温区偏置, 对铬镍合金钢液红外测温误差进行分析与补偿。

1 测温原理与系统安装

1.1 短波双色法原理及优势

LAND SPOT+ 采用约 1.0 μm 和 1.2 μm 短波通道采集辐射信号。带宽积分模型考虑通道增益、光谱响应、光路透过率和钢液发射率; 在窄带及维恩近似下可由灰度比反演温度。近灰体且两波段同比例衰减时, 绝对发射率和共同衰减可部分抵消^[2-3], 但不透明浮渣、发射率比变化及非一致烟尘衰减仍需现场标定和有效帧判别。

(1) 考虑光路透过率与通道光谱响应的带宽积分模型

$$G_i(T) = K_i \int_{\lambda_{i,a}}^{\lambda_{i,b}} s_i(\lambda) \tau(\lambda) \varepsilon(\lambda, T) \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/(\lambda T)) - 1]} d\lambda$$

(2) 窄带近似及维恩条件下的双色反演温度

$$T = \frac{c_2(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1 \lambda_2} \phi^{-1}$$

$$\phi = \ln \frac{G_1}{G_2} + \ln \frac{K_2 s_2(\lambda_2) \tau(\lambda_2)}{K_1 s_1(\lambda_1) \tau(\lambda_1)} + \ln \frac{\varepsilon(\lambda_2, T)}{\varepsilon(\lambda_1, T)} + 5 \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

(3) 灰体与共同衰减近似

$$\varepsilon(\lambda_1, T) \approx \varepsilon(\lambda_2, T), \quad \tau(\lambda_1) \approx \tau(\lambda_2) \Rightarrow T \approx \frac{c_2(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1 \lambda_2} \left[\ln \frac{G_1}{G_2} + \ln c_{12} + 5 \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right]^{-1}$$

式中, G_i 、 K_i 、 $s_i(\lambda)$ 、 $\tau(\lambda)$ 和 $\varepsilon(\lambda, T)$ 分别为通道灰度、增益、光谱响应、光路透过率和钢液光谱发射率, c_1 、 c_2 为辐射常数。当灰体或共同衰减条件不满足时, 需结合现场标定修正。

1.2 安装结构与半炉液位问题

高温计安装于炉口侧方刚性立柱, 以约 20° 斜视钢液。测温头配置冷却和镜头吹扫, 温度、双通道强度及设备状态送入 PLC, 如图 1 所示。半炉时视线可能转向炉壁或渣面, 调试中应记录满炉、半炉落点, 并按液位、工艺阶段和目标占比切换 ROI; 机械零位和镜头洁净度随班确认。

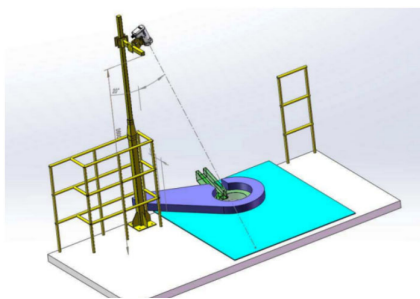


图1 固定式斜视安装总体布置

2 现场数据与误差拟合

2.1 数据构成与指标

试验采集 10 炉次 50 组同步配对值，每炉 5 组，两个牌号各 25 组；1500~1600、1600~1700、1700~1800 ℃ 区间样本数分别为 15、20、15。误差定义为 $e=T_{IR}-T_{TC}$ 。一组 1336/1611 ℃记录相差 -275 ℃，作为遮挡、脱靶或不同步故障样本保留，但不参与正常回归和交叉验证。

表1 50组现场数据的误差统计

数据范围	n	ME/℃	MAE/℃	RMSE/℃	± 15 ℃/%	± 20 ℃/%
全部现场数据	50	-9.32	21.32	43.26	58.00	74.00
正常样本	49	-3.90	16.14	19.13	59.18	75.51
正常样本留一拟合	49	-0.04	14.18	18.15	59.18	71.43

2.2 热电偶—高温计总体拟合

49 组正常配对数据的线性关系为：

$$T_{TC} = 0.9157 T_{IR} + 141.87$$

按炉次留一验证的 MAE 为 14.18 ℃、RMSE 为 18.15 ℃，原始 MAE 为 16.14 ℃。图 2 表明误差由低温端偏低逐步转为高温端偏高，因此采用分温区偏置而非单一常数修正。

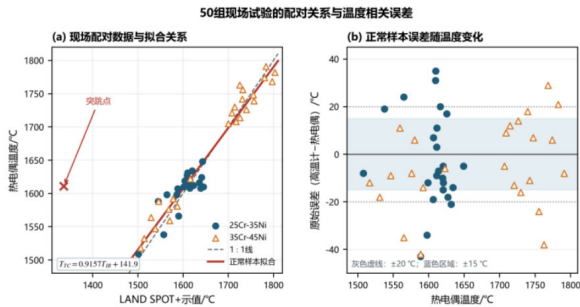


图2 现场配对拟合及原始误差随温度变化

2.3 一致性与分温区离散特征

Bland-Altman 分析^[4]显示，49 组正常样本平均偏差为 -3.90 ℃，95% 一致性界限为 -41.0~33.2 ℃。图 3 中误差中位数随温区由负转正，两个牌号分布重叠；现阶段按温度与信号质量修正比按牌号分别设定常数更稳妥。

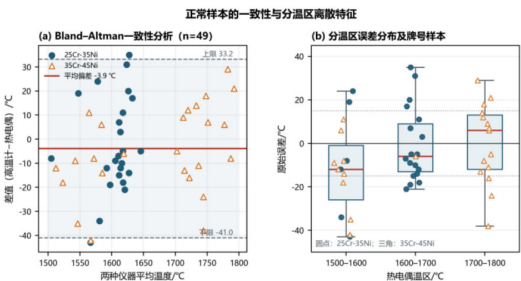


图3 正常样本Bland - Altman一致性 及分温区误差分布

3 现场误差机理及解决方案

误差来源可分为光路遮挡、落点偏移、界面发射率变化和热电偶不确定度^[1-3]。表 2 给出可观测信号及处理措施；数值补偿仅作用于有效钢液帧，视线落在渣面或炉壁时直接判无效。

表2 现场问题、影响机理及对应解决方案

问题类别	主要表现	判别依据	处理措施
落点异常	视线落到炉壁或渣面，示值突降	目标占比下降、中心移动或温度阶跃	刚性可调支架；保存满/半炉ROI；失靶报警
光路遮挡	强度下降、比值漂移或尖峰	双通道强度、比值离散度及连续帧数	除渣触发、镜头吹扫、阈值门控，仅输出稳定帧
界面状态变化	误差随温区转向，单点重复性下降	分温区中位数、ROI内温差及长期漂移	短波双色、50 ℃偏置节点、稳定ROI中位数
有效窗口短	裸露钢液仅持续数秒	有效帧持续时间	事件触发、高频采样，在1~3 s稳定窗锁定
基准与设备漂移	热电偶重复差异或镜头透过率下降	配对时差、重复测量、设备温度和信号基线	统一热电偶条件；周期复核；冷却、吹扫和清洁

4 每 50 ℃动态偏置与在线控制

4.1 偏置节点及插值方法

在线输出按 $T_{out}=T_{IR}+\Delta(T_{IR})$ 计算。偏置节点综合配对数据趋势、稳定窗口复核和控制实现确定；1500~1800 ℃每 50 ℃设一节点，节点间采用线性插值：

$$\Delta(T) = \Delta_k + \frac{(\Delta_{k+1} - \Delta_k)}{(T_{k+1} - T_k)}(T - T_k)$$

表3 初始动态偏置配置

高温计示值/℃	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800
偏置 Δ /℃	+5	+3	0	-13	-27	-27	-27

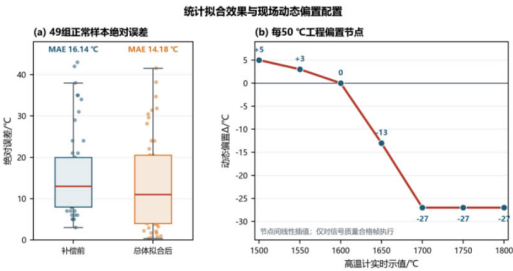


图4 总体拟合效果与每50 ℃动态偏置节点

偏置仅在双通道强度、比值稳定度、目标占比和连续有效帧数均合格时执行；遮挡或脱靶时保持最近有效值并输出质量标志。运行后按温度节点汇总同步热电偶差值的稳健中位数，以小权重更新节点，跟踪镜头污染和炉况变化。上述参数仅适用于当前设备、安装位置、牌号及操作条件。

5 结语

(1) 剔除 1 组遮挡或脱靶异常记录后，49 组正常数据拟合得 $T_{TC}=0.9157T_{IR}+141.87$ ，留一法 MAE 为 14.18 °C、RMSE 为 18.15 °C，给出了当前安装条件下的基线精度。

(2) 液位与落点偏移需通过机械调整和 ROI 切换处理，渣层与烟尘需通过有效帧门控处理；每 50 °C 偏置表仪作为初始工程参数，应在周期热电偶复核下滚动更新，长期验证后方可由逐炉测量过渡为周期校核。

参考文献：

[1] 潘冬，蒋朝辉，许川等. 高炉铁水温度检测方法的研究进展[J]. 仪器仪表学报，2023, 44(12): 280-296.

[2] 杨友良，刘爱旭，马翠红等. 基于红外 CCD 的钢水红外测温模型分析[J]. 激光技术，2018, 42(4): 562-566.

[3] MONIER R, THUMEREL F, CHAPUIS J, et al. Liquid metals surface temperature fields measurements with a two-colour pyrometer[J]. Measurement, 2017, 101: 72-80.

[4] BLAND J M, ALTMAN D G. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement[J]. The Lancet, 1986, 327(8476): 307-310.

作者简介：第一作者 /* 通讯作者：李明（1990-），男，本科，研究方向：自动化及数智化改造；E-mail: 1252505373@qq.com。