

## 新型接触式钢水连续测温传感器设计与研制

张雷博<sup>1</sup>, 刘建华<sup>1</sup>, 王贵勇<sup>2</sup>, 沈学静<sup>2</sup>, 刘帅<sup>3</sup>, 杨利彬<sup>4</sup>, 胡砚斌<sup>4</sup>, 冯红亮<sup>1</sup>

(1 北京遥测技术研究所 北京 100076;

2 钢研纳克检测技术股份有限公司 北京 100094;

3 机械工业仪器仪表综合技术经济研究所 北京 100055;

4 钢铁研究总院 北京 100081)

**摘要:** 针对冶金领域钢水温度原位连续测量的需求, 本文提出一种新型接触式连续测温传感器结构方案。通过建立三维传热模型对其热响应特性进行了分析; 采用高压工艺和高温退火工艺实现了热电偶/陶瓷保护体一体化敏感组件制备, 并将其封入 MgO-C 材质的探枪式支撑结构内部制作成接触式连续测温传感器。在 LF 炉 (钢包精炼炉) 钢水环境下进行了连续测温试验, 结果表明: 在 1 600 °C~1 650 °C 高温钢水环境下, 该传感器有效连续测温时间超过 16 min。

**关键词:** 钢水连续测温传感器; 接触式; 钨铼热电偶; MgO-C 复合材料; 热响应特征

中图分类号: TP212.11

文献标志码: A

文章编号: 2095-1000(2025)03-0112-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20241217002

CSTR: 32406.14.ycyk.20241217002

引用格式: 张雷博, 刘建华, 王贵勇, 等. 新型接触式钢水连续测温传感器设计与研制[J]. 遥测遥控, 2025, 46(3): 112-118.

## Design and Development of a New Contact-Type Continuous Temperature Sensor for Molten Steel

ZHANG Leibo<sup>1</sup>, LIU Jianhua<sup>1</sup>, WANG Guiyong<sup>2</sup>, SHEN Xuejing<sup>2</sup>, LIU Shuai<sup>3</sup>, YANG Libin<sup>4</sup>, HU Yanbin<sup>4</sup>,  
FENG Hongliang<sup>1</sup>

(1. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China;

2. NCS Testing Technology Co., Ltd., Beijing 100094, China;

3. Instrumentation Technology and Economy Institute, Beijing 100055, China;

4. Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In response to the demand for in-situ continuous measurement of molten steel temperature in the field of metallurgy, a novel contact-type continuous temperature measurement sensor structure scheme is proposed. The thermal response characteristics are analyzed by establishing a three-dimensional heat transfer model. Then a high-pressure process and a high-temperature annealing process are used to realize the preparation of an integrated sensitive component of thermocouple/ceramic protection body, which is then encapsulated inside the lance-type support structure of MgO-C material for making a temperature measurement sensor; Continuous temperature measurement tests are carried out under the environment of molten steel of Ladle Furnace, and the results show that in the 1 600 °C~1 650 °C high temperature molten steel environment, the sensor can effectively measure temperature continuously for more than 16 minutes.

**Keywords:** Continuous temperature sensor for molten steel; Contact-Type; Tungsten-Rhenium thermocouple; MgO-C composite; Thermal response

**Citation:** ZHANG Leibo, LIU Jianhua, WANG Guiyong, et al. Design and Development of a New Contact-Type Continuous Temperature Sensor for Molten Steel[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2025, 46(3): 112-118.

### 0 引言

测温传感器是钢铁产线应用最多的传感器之

一。钢铁产线应用最多的测温方式为消耗型快偶单点测温, 该技术目前为钢水测温的标准技术, 其主要优点在于以较低的成本实现钢水温度的准

确测量。但该测温方法的缺点是只能实现某个时刻温度的间断测量，测量值分散性较大，而无法实现钢水温度的连续监测，这对于炼钢和连铸过程的工艺控制十分不利。

钢水温度的连续测量方法主要有两种。一种是基于黑体空腔的辐射式连续测温方法，其测温原理是将一根耐火材料管制作成黑体空腔并插入钢水，黑体空腔底端同钢水达到温度平衡，产生红外辐射信号，被红外探测器接收并反映温度信息。1994年，维苏威公司的Han KPark研制了基于 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ 的测温黑体空腔<sup>[1]</sup>，但该材料会引入较为严重的烟气干扰，从而影响测温精度。同时，黑体腔底部的发射率也在测温过程中存在不确定性，也会对测温精度产生影响。从2002年开始，国内东北大学谢植团队开展了基于黑体空腔的钢水连续测温技术研究<sup>[2]</sup>，其黑体腔包括双层结构，外层依然采用抗腐蚀抗震性能良好的 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ 耐火材料，内层采用高纯刚玉管，形成黑体空腔，实现钢水温度感知，并可用于屏蔽 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ 材料高温下产生的烟气，保证测温的准确性和可靠性。然而，该方法也比较严重地影响了响应速度。2007年，谢植团队对该传感系统的结构进行了改进<sup>[3]</sup>，研制了采用惰性气体吹扫消除烟气的黑体测温腔结构形式，该结构采用单层结构，直接采用 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ 形成黑体腔，采用开口的排烟管代替刚玉管，这种结构形式将测温响应时间缩短至5 min~6 min，同时降低了成本，但该方法并未从根本上解决传感器响应速度慢的问题，另外，惰性气体吹扫有可能会引起风冷等其他测量问题。2016年，谢植教

授团队以提升传感器响应时间为目标，对结构和材料进行改进<sup>[4]</sup>，提出一种 $\text{Mo-W-ZrO}_2$ 金属陶瓷制作成黑体测温腔材料，将低成本的 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ 材料作为支撑结构，并采用气体吹扫去除烟气干扰的测温系统结构形式，该结构显著提升了响应速度。

综合来看，黑体辐射腔式测温方法实现了钢水温度连续测量，但其主要问题是测温精度极度依赖发射率以及纯净的传输路径，实际传输路径中的烟尘环境、黑体腔非等温条件以及材料高温下发射率变化等因素均会对测量精度产生影响<sup>[5]</sup>。通过对测温枪内管吹惰性气体等方法虽然可以在一定程度上解决传输路径中的烟尘问题，但也会引入气体冷却效应等次生问题。此外，传感器快速响应问题并未在根本上得以解决。

钢水温度连续测量的另一个重要方法为带保护套管的热电偶测量方法。1991年，维苏威公司R.Michael Phillippi团队开发了热电偶加保护套管的钢水连续测温传感器，用于精炼钢水的温度测量<sup>[6]</sup>。采用含C耐火材料 $\text{MgO-C}$ 作为保护管，由于保护管为厚壁结构，该传感器同样存在响应速度慢的问题，难以满足精炼对测温响应速度的要求。目前，贺利氏电测骑士(日本)有限公司在热电偶接触式钢水连续测温方面处于领先地位，其研制的Cas Temp测温探头，将带保护管的热电偶穿过耐火材料从中间包外部安装，可在整个连铸过程提供精确实时的钢水温度测量数据。该传感器敏感元件为铂铑型热电偶，探头响应时间小于90s，使用寿命约25 h~50 h<sup>[7]</sup>，Cas Temp钢水温度连续测量系统如图1所示，目前Cas Temp连续测温系统已经在中间包钢水环境下得到应用。

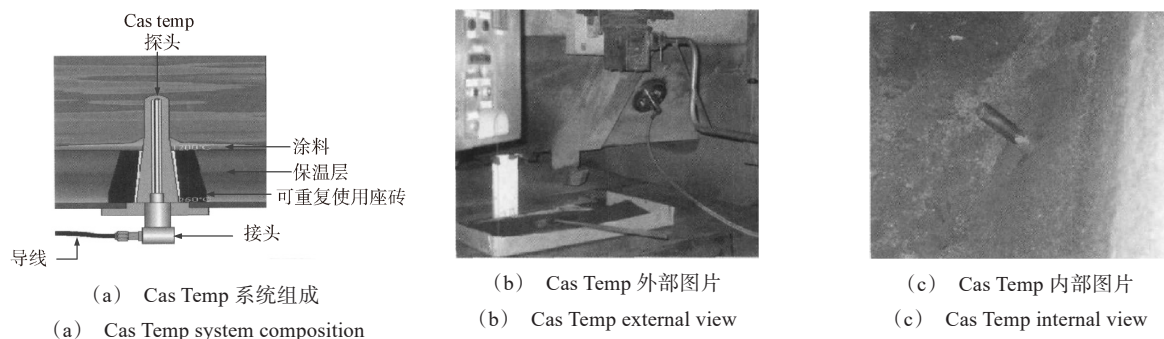


图1 贺利氏公司 Cas Temp 钢水温度连续测量系统

Fig. 1 Heraeus Cas Temp continuous molten steel temperature measurement system

目前来看, 热电偶加保护套管的接触式钢水测量主要针对中间包、结晶器钢水环境<sup>[8-11]</sup>。而对于钢包精炼炉(LF 炉)等环境, 由于其温度更高(通常在 1 650 °C 左右, 最高可超过 1 700 °C<sup>[12]</sup>), 且内部由于吹氩存在剧烈的钢水翻滚冲刷, 加上严苛的钢渣侵蚀, 对接触式传感器提出巨大的挑战。2021 年, 安徽大学高宗保团队设计研发了基于双光路近红外面阵 CCD 探测器的非接触式测温系统<sup>[13]</sup>, 实现了 LF 炉环境下的钢水温度连续测量。然而, 由于 LF 炉表面钢渣的存在, 不可避免地会对非接触式测温方法产生影响, 因此, 开展 LF 炉等环境下的接触式连续测温方法研究具有重要工程价值。针对这个问题, 本文提出一种新型的接触式钢水连续测温传感器方案, 通过高压压制的方式将热电偶敏感元件同陶瓷保护体制成一体化结构, 构成测温单元, 相比传统的保护套管的方式, 由于保护体为实心结构, 最大程度地提升了传感器/保护体的换热效率和力学强度, 并可耐受 LF 炉高温钢水环境下的大压强、强热震、强冲刷、钢渣腐蚀等恶劣条件。本文采用较为廉价的 MgO-C 耐火材料制成探枪式支撑结构, 将测温单元封装入支撑结构内部制成钢水连续测温传感器, 并在 LF 炉高温钢水环境下进行了试验测试, 结果表明, 该传感器对 LF 炉钢水环境具有比较好的适应性, 未来有望解决精炼炉环境下高温钢水连续快速准确测量的问题。

## 1 传感器整体方案设计

### 1.1 传感器结构方案

图 2 所示为新型钢水连续测温传感器结构方案图。该传感器主要包括钨铼热电偶、陶瓷保护体、耐高温填充物、探枪枪体、绝缘陶瓷管、热电偶接插件等部分。其中钨铼热电偶和陶瓷保护体采用高压压制工艺制备成一体化结构, 构成核心的测温敏感组件。将测温敏感组件穿过探枪枪体中间通孔, 并用耐高温填充物填充间隙。探枪可采用含 C 耐火材料, 如 MgO-C、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C 等。

在实际的高温钢水冶炼炉环境下使用时, 采用水冷式夹具工装夹持测温传感器探头。水冷工装结构中间留通孔, 将传感器尾端插入通孔, 并通过使用螺钉固定传感器与水冷探枪, 传感器接插件连接热电偶专用补偿导线, 将信号引出至室温区域进行信号采集。为保证测温效果, 传感器探头插入钢水深度应不小于 200 mm。传感器在 LF 炉应用场景下的插入方式如图 3 所示。

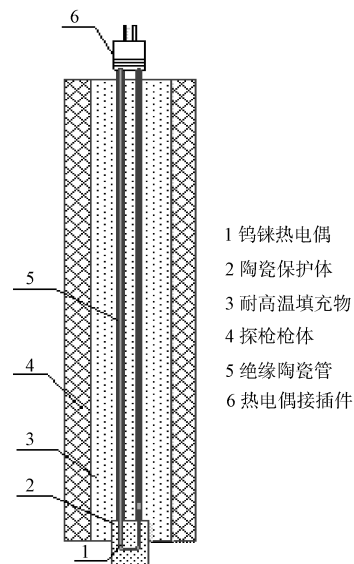


图 2 新型钢水连续测温传感器结构方案

Fig. 2 Structural configuration of novel continuous molten steel temperature sensor

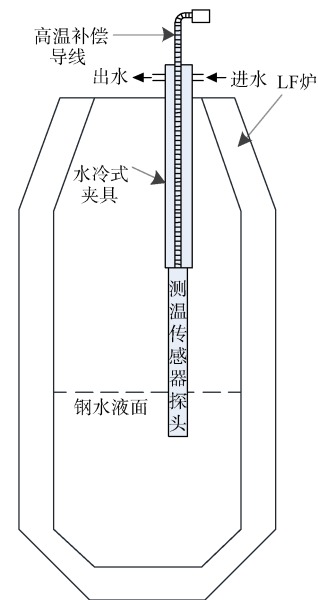


图 3 传感器在 LF 炉应用场景下的插入方式

Fig. 3 Sensor insertion methodology for LF applications

### 1.2 传感器热响应仿真

针对图 2 所示的传感器探头建立三维传热模型进行热响应仿真。图 4 所示为传感器探头三维图。探枪枪体采用耐火砖材料; 陶瓷保护体和耐高温填充物材料为氧化镁; 金属热电偶为钨铼 5-26, 为简化模型, 将其设定为钨。耐火砖、氧化镁和钨等材料的热物性参数见表 1。设定陶瓷保护体突出探枪顶面高度为 1 cm, 陶瓷保护体内部热电偶突出探

枪顶面长度为  $H$ ，分别设定为  $-5\text{ mm}$ 、 $0\text{ mm}$ 、 $5\text{ mm}$ 、 $8\text{ mm}$ ，并针对不同的  $h$  进行热响应仿真。

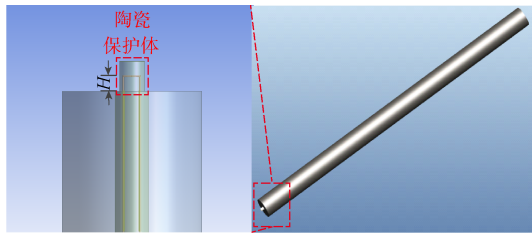


图4 传感器探头三维图

Fig. 4 Three-dimensional view of sensor probe

表1 模型所涉及材料的热物性参数<sup>[14, 15]</sup>

Table1 Thermophysical properties of materials used in the model

材料名称	导热系数 (W/m·K)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比热容 (J/kg·K)
陶瓷保护体、 耐高温填充物(氧化镁)	48.3	3 580	863
金属热电偶(钨)	168.2	19 260	133.98
探枪(耐火砖)	8.7	2 900	1 000

本次温度场分析为无内热源的三维非稳态传热，其控制方程可以写成：

$$\rho C_p \frac{\partial T_i}{\partial t} = k_i \nabla^2 T_i \quad (1)$$

式中， $T$ 为温度； $t$ 为时间； $\rho$ 为材料密度； $C_p$ 为定压热容； $k$ 为材料导热系数，下标  $i$  代表不同材料。

本次分析的初始条件为：

$$T|_{t=0} = \varphi(x, y, z) \quad (2)$$

设定传感器探枪在整个区域中的初始温度为  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ，即  $\varphi(x, y, z) = 20\text{ }^\circ\text{C}$ 。

本次热分析的边界条件有：

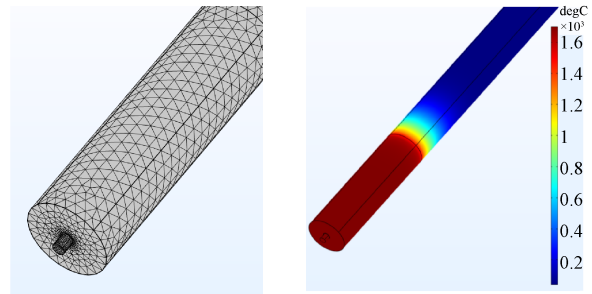
①探枪直接插入钢水的深度为  $200\text{ mm}$ ，探枪和钢水接触面设定为  $S_1$ ，满足第三类边界条件中的对流边界条件：

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_1} = h(T_{S_1} - T_{w1}) \quad (3)$$

式中， $T_{w1}$ 为传感器同钢水接触部分外壁温度； $T_{S_1}$ 为钢水温度， $h$ 为对流换热系数，此处取  $T_{S_1} = 1\text{ }700\text{ }^\circ\text{C}$ ， $h = 2\text{ }000\text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ <sup>[16]</sup>。

②为简化模型，对于钢水液面以上探枪暴露于空气的部分，仅考虑探枪和空气的对流传热，仍然采用第三类边界条件中的对流边界条件。将炉盖以下、钢液面以上部分空气温度设定为  $400\text{ }^\circ\text{C}$ ，对流换热系数设定为  $5.66\text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ <sup>[17]</sup>。

采用 COMSOL Multiphysics 软件进行仿真求解，图 5(a)所示为仿真网格划分情况，采用四面体网格，图 5(b)所示为热仿真结果云图。



(a) 网格划分 (b) 仿真云图  
(a) Mesh discretization (b) Simulation contour plot

图5 COMSOL Multiphysics 网格划分和仿真云图

Fig. 5 COMSOL Multiphysics mesh discretization and simulation contour plot

图 6 呈现了不同热电偶突出长度  $H$  条件下的传感器热响应仿真曲线。在此基础上，将时间常数  $\tau$  (传感器输出达到稳态值的 63.2% 所需的时间) 进行统计汇总，结果见表 2。

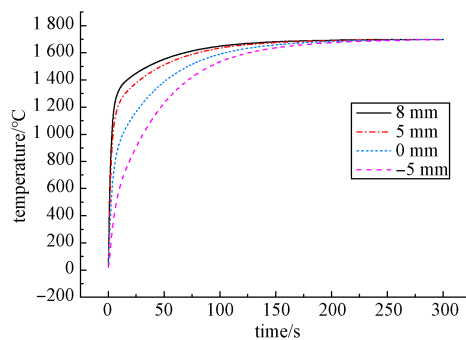


图6 热响应仿真结果

Fig. 6 Thermal response simulation results

表2 响应时间仿真统计表

Table 2 Response time simulation statistics

热电偶突出长度 $H(\text{mm})$	8	5	0	-5
时间常数 $\tau(\text{s})$	3.9	5.3	18.3	37.1

热响应仿真结果表明，热电偶敏感元件突出高度对传感器响应速度具有显著影响。因此可以根据实际测试需要选择不同的突出长度，以平衡响应速度和可靠性。经综合评估，推荐敏感元件突出长度约  $5\text{ mm}$ 。

### 2 传感器探头制备

图 7(a)所示为热电偶/陶瓷保护体一体化敏感元件结构示意图，采用高压工艺和高温退火工艺制备而成，图 7(b)所示为所制备的敏感元件实物。敏感元件制备完成后，采用激光焊接方式，将热电偶正负极引线延长至 1 m 左右。然后将热电偶正负极引

线插入 99 氧化铝陶瓷保护管中，构成测温敏感组件。

该测温敏感组件插入中间有通孔的 MgO-C 材质探枪式支撑结构中，并用氧化镁或高温水泥等耐高温材料填充间隙，敏感组件后端接入热电偶专用接插件将测温信号引出。图 7(c)所示为敏感元件封装后的图片，其中所采用探枪支撑结构直径为 60 mm，长度为 1 000 mm。

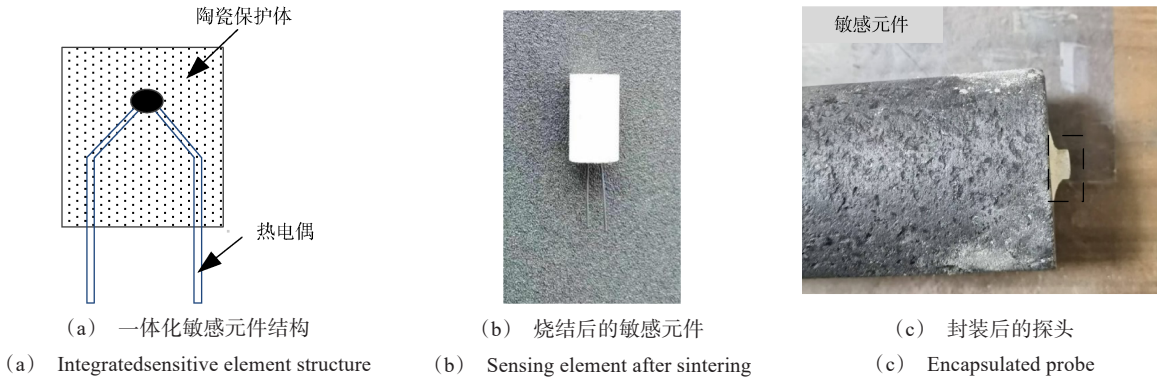


图 7 传感器敏感元件及探头

Fig. 7 Sensor sensing elements and probe

### 3 钢水环境测温试验

#### 3.1 小型高频熔炼炉熔融钢水试验

敏感组件制备完成后，首先在小型高频熔炼炉中进行熔融钢水环境下的测温验证试验。由于熔炼炉较小，封装后无法插入，因此直接将敏感元件插入熔炼炉中，实现钢水温度测量。试验过程如图 8(a)所示，试验后的敏感元件如图 8(b)所示。

为防止敏感元件及氧化铝保护管发生热震断裂，该试验首先在熔炼炉炉口预热 30 s 左右，然后将敏感元件缓慢插入钢液。该敏感元件共在小型熔炼炉中进行三次测试，图 9 所示为末次测试试验曲线，该次测试敏感元件工作时间约 15 min，最高测试温度为 1 610 °C。



图 8 小型钢水熔炼炉试验

Fig. 8 Small-scale molten steel furnace test

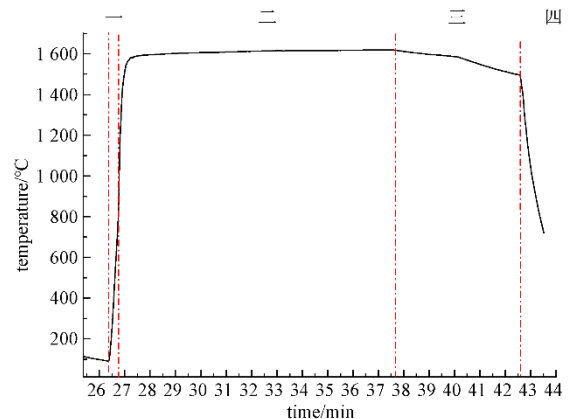


图 9 小型熔炼炉钢水试验测试曲线

Fig. 9 Temperature measurement curve in small-scale molten steel furnace

将本次钢水温度测试分成 4 个阶段，第一阶段是敏感元件从炉口位置预热并缓慢向下插入的过

程, 阶段二为插入钢水后的温度响应曲线, 可以看到阶段一和阶段二之间有个明显的拐点, 插入钢水后敏感元件温升速率明显加快。阶段二持续时间大约 11 min, 测温温度值约为 1 610 °C, 阶段三两次调低了熔炼炉功率, 钢水温度降低。阶段四将传感器从钢水中取出, 传感器测量温度值迅速降低。小型熔炼炉钢水试验测试曲线如图 9 所示。试验后的传感器敏感元件如图 8(b)所示, 可以看到有凝固后的钢液黏附在测温敏感元件上, 敏感元件形貌保持完好。

### 3.2 LF 炉高温钢水测温试验

如图 10 所示, 在马鞍山钢铁股份有限公司 LF 炉开展了传感器钢水环境综合试验验证。试验过程为: 为防止探枪枪体热震断裂, 首先在炉口附近位置进行 10 min 左右的烘烤, 随后采用图 3 所示的水冷机械装置带动测温探头缓慢下降并插入钢水, 直到探头插入钢液面以下 200 mm 左右。



图 10 LF 炉钢水环境现场测试

Fig. 10 Testing in LF molten steel environment

如图 11 所示, 本次钢水试验获取了完整的钢水温度变化曲线, 试验过程中采用传统单点测温热电偶进行温度测量, 并和连续测温传感器测量结果进行比对, 单点测温热电偶测量温度值为 1 642 °C, 而连续测温热电偶测量值为 1 638 °C, 两者测温结果相差约 4 °C。LF 炉单炉次测温窗口一般约 6 min~15 min, 之后需要停止连续测温试验。本次钢水试验持续时间约 16.5 min, 可以满足 LF 炉单炉次连续测温的需求。测量结束后, 连续测温探头通路和测温功能均正常。

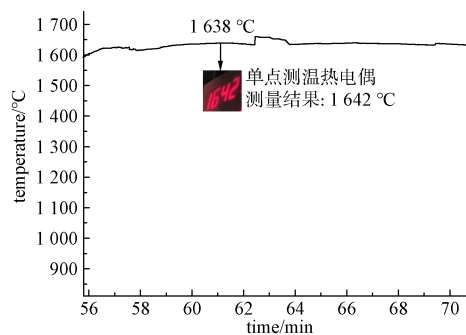


图 11 LF 炉钢水连续测温试验曲线

Fig. 11 Continuous temperature measurement curve of molten steel in LF

## 4 结束语

本文报道了一种新型接触式钢水连续测温传感器方案, 并对其热响应特性、制备工艺、钢水环境应用验证等进行了相关研究。该传感器可适应 LF 炉现场的复杂恶劣工况, 在 1 600 °C~1 650 °C 钢水温度范围内, 有效工作时间超过 16 min, 比传统单点测温热电偶测量结果低约 4 °C, 并有望实现多次测量。未来该传感器可以从以下几个方面继续开展工作:

- ①改进传感器探头结构, 比如将测温端改成锥形结构设计, 减小测温端的体积和热容, 进一步改善响应特性。
- ②通过大量的现场应用试验, 评估传感器寿命和长期使用的可靠性。
- ③结合传感器动态补偿算法<sup>[18-20]</sup>, 进一步缩短传感器响应时间。

## 参考文献

- [1] Vesuvius Crucible Company. Refractory sight tube for optical temperature measuring device: US5302027[P]. 1994-04-12.
- [2] 谢植, 陈儒军, 孟红记. 钢水温度连续测量方法和测温管: CN1333455[P]. 2002-01-30.
- [3] 次英, 谢植, 费文伯. 用于熔融金属温度连续测量的黑体空腔温度传感器: CN200953958[P]. 2007-09-26.
- [4] 张玖. 具有快速响应特性的新型黑体空腔钢水连续测温传感器研制[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.
- [5] 姚江林, 宫爱红, 刘帅, 等. 接触式高温钢水连续测温传感器研究现状[J]. 测控技术, 2024, 43(12): 1-12. YAO Jianglin, GONG Aihong, LIU Shuai, et al. Current research status of contact type high-temperature molten

- steel continuous temperature measurement sensors[J]. Measurement & Control Technology, 2024, 43(12): 1-12.
- [6] Vesuvius Crucible Company. Protective sheath for a continuous measurement thermocouple: US5069553A[P]. 1991-12-03.
- [7] 加藤木健. 在线连续测温提高连铸生产效率[C]//全国炼钢-连铸生产技术会议, 河北迁安, 2010: 499-505.
- [8] 宋振亚. 中间包钢水连续测温管的制作方法: CN109115353A[P]. 2019-01-01.
- [9] 宝山钢铁股份有限公司. 一种中间包钢液的连续测温装置: CN112059127A[P]. 2020-12-11.
- [10] 吴光杰, 王海宝. 中间包钢水温度连续测量技术研究[J]. 科技通报, 2005, 21(2): 233-241.  
WU Guangjie, WANG Haibao. Study on the technique for temperature measurement continuously of the liquid steel in tundish[J]. Bulletin of Science and Technology, 2005, 21(2): 233-241.
- [11] 陈艳波, 王建军, 周俐. 连铸结晶器钢水连续测温技术[J]. 安徽工业大学学报, 2007, 24(4): 357-365.  
CHEN Yanbo, WANG Jianjun, ZHOU Li. Technique for continuous temperature measurement of the liquid steel in mold[J]. Journal of Anhui University of Technology, 2007, 24(4): 357-365.
- [12] 杨西男. LF 炉钢水温度连续监测系统的研发[D]. 合肥: 安徽大学, 2018.
- [13] 高宗保, 吴海滨, 葛军成, 等. LF 炉钢水非接触测温系统及应用[J]. 大气与环境光学学报, 2021, 16(1): 74-80.  
GAO Zongbao, WU Haibin, GE Juncheng, et al. Non-contact temperature measurement system of molten steel in LF Furnace and its application[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2021, 16(1): 74-80.
- [14] 官文超. 连续测温传感器温度场数值模拟及分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [15] 马庆芳等编. 实用热物理性质手册[M]. 北京: 农业机械出版社, 1986.
- [16] 史新清. 黑体空腔连续测温传感器快速测量研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.
- [17] 赵树茂, 梅国晖, 张玖, 等. 复合结构钢水连续测温传感器有限元分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(7): 926-929.
- ZHAO Shumao, MEI Guohui, ZHANG Jiu, et al. Finite element analysis of composite structure continuous temperature-measuring sensor for liquid steel[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2012, 33(7): 926-929.
- [18] 韩太林, 张延雪, 王啸, 等. 改进型灰狼算法在热电偶动态补偿中的应用[J]. 控制与决策, 2021, 36(1): 61-67.  
HAN Tailin, ZHANG Yanxue, WANG Xiao, et al. Application of improved grey wolf algorithm in dynamic compensation of thermocouple[J]. Control and Decision, 2021, 36(1): 61-67.
- [19] 贺俊, 李新娥, 崔春生, 等. 基于改进天鹰优化算法的热电偶动态补偿方法[J]. 探测与控制学报, 2024, 46(3): 79-85.  
HE Jun, LI Xin'e, CUI Chunsheng, et al. Application of improved aquila optimizer in thermocouple dynamic compensation[J]. Journal of Detection & Control, 2024, 46(3): 79-85.
- [20] 王志超, 张志杰, 李岩峰, 等. 基于 HHO 算法的铠装热电偶动态补偿方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(2): 139-144.  
WANG Zhichao, ZHANG Zhijie, LI Yanfeng, et al. Research on the dynamic compensation method of armored thermocouple based on HHO algorithm[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(2): 139-144.
- [作者简介]
- 张雷博 1984 年生, 博士, 高级工程师。  
刘建华 1983 年生, 硕士, 研究员。  
王贵勇 1985 年生, 博士, 高级工程师。  
沈学静 1974 年生, 博士, 正高级工程师。  
刘 帅 1988 年生, 硕士, 高级工程师。  
杨利彬 1977 年生, 博士, 正高级工程师。  
胡砚斌 1975 年生, 博士, 正高级工程师。  
冯红亮 1976 年生, 硕士, 研究员。
- (本文编辑: 杨秀丽)