

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2519963

中间包内嵌分布式钢水连续测温系统的研发<sup>\*</sup>

刘博 石刚 赵伟 王玉 李永庆

(中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110169)

**摘要:**以中间包钢水非等温流动为研究背景,面向在生产条件下监测中间包钢水多点温度的实际需求,针对连铸车间现有测温系统无法散布且精准地监测到多点温度的问题,研发了中间包内嵌分布式钢水连续测温系统。首先创新性地提出了采用穿壁式黑体空腔的测量方式,对光电池产生的微弱信号进行低功耗采集和抗高温漏电干扰处理,通过热传导分析计算定制设计隔热箱来抵御永久层的热冲击,最终对系统的连续测温性能进行了对比测试。结果表明,感温探头黑体空腔结构能够灵敏感知温度变化,测温节点能够精确采集 pA 级电流信号,测温节点的静态功耗在 60  $\mu$ A 左右,隔热箱能够持续 12 h 保证内腔温度不高于 50 $^{\circ}$ C,通过与高温炉以及热偶测温系统数据对比分析可知,整体系统的连续测温性能是稳定准确的。综上所述,系统能够在生产条件下实现对中间包钢水多点温度的监测,为研究中间包钢水非等温流动提供了实际系统级支撑。

**关键词:**非等温流动;黑体空腔;弱信号采集;低功耗;隔热箱;高温漏电干扰

**中图分类号:** TN219 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4010

## Research and development of a distributed continuous temperature measurement system embedded in the tundish for molten steel

Liu Bo Shi Gang Zhao Wei Wang Yu Li Yongqing

(Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China)

**Abstract:** Based on the research on non-isothermal flow of molten steel in the tundish, and in response to the practical demand for monitoring multi-point temperature of molten steel in the tundish under production conditions, a distributed continuous temperature measurement system embedded in the tundish for molten steel was developed to address the problem that the existing temperature measurement system in the continuous casting workshop cannot accurately and dispersedly monitor multi-point temperature. Firstly, an innovative measurement method using a through-wall blackbody cavity was proposed. The weak signal generated by the photovoltaic cell is collected with low power consumption and resistant to high-temperature leakage interference. A customized insulation box is designed through thermal conduction analysis to resist the thermal shock of the permanent layer. Finally, a comparative test was conducted on the continuous temperature measurement performance of the system. The results indicate that the blackbody cavity structure of the temperature sensing probe can sensitively detect temperature changes and the temperature measurement node can accurately collect pA level current signals. The static power consumption of the temperature measurement node is around 60  $\mu$ A, and the thermal insulation box can last for 12 h to ensure that the internal temperature does not exceed 50 $^{\circ}$ C. By comparing and analyzing data with high-temperature furnaces and thermocouple temperature measurement systems, it can be concluded that the overall system's continuous temperature measurement performance is stable and accurate. In summary, the system can monitor the multi-point temperature of molten steel in the tundish, providing practical system level support for studying the non isothermal flow of molten steel in the tundish.

**Keywords:** non-isothermal flow; blackbody cavity; weak signal acquisition; low power consumption; thermal insulation box; high-temperature leakage interference

## 0 引言

中间包作为钢水凝固之前所经过的主要耐火材料容

器,对钢水洁净度有着重要的影响。在连铸生产过程中,由于熔炼炉出钢温度不同<sup>[1]</sup>,以及钢包和中间包的散热条件不同,势必会出现钢包与中间包的钢水温度有差别。钢水

收稿日期:2025-09-30

\* 基金项目:辽宁辽河实验室自主科研项目(LL24ZZ-05-01)资助

温度不同则密度不同,当钢包钢水注入中间包后,即使温差只有十几度,在中间包内部也会形成钢水的非等温流动,导致渣流现象的产生,干扰钢水夹杂物的上浮,从而影响铸坯质量<sup>[2-3]</sup>。

目前对于中间包钢水非等温流动的现有研究,在理论分析方面,如唐海燕等<sup>[4]</sup>通过建立电磁-热-流动耦合数学模型,研究了一种六流 H 型通道感应加热中间包内电磁力的作用特点、钢水的流动及传热规律;如董文利等<sup>[5]</sup>针对中间包通过对瞬态流场和温度场的数值分析,揭示了中间包内流场和温度场的传输规律。在建模仿真方面,如宋丽娜等<sup>[6]</sup>采用 CFD 数值模拟方法定性和定量分析了不同结构滞流抑制器、导流隔墙及其组合在非对称三流中间包内的应用效果;如邓伟等<sup>[7]</sup>对中间包冶金行为的热流体动力学数值进行模拟研究,揭示了原型中间包边流水口响应慢及各流一致性差的原因。在水模型试验方面,如王舒皓等<sup>[8]</sup>基于非等温水模拟试验,对中间包内的速度场、涡量场和 RTD 等表征参数进行了定量研究,探究非等温条件对中间包流场的影响;如王凯民等<sup>[9]</sup>通过墨汁示踪扩散对比试验探究了通道孔径、角度等对钢水流动的影响。尽管这些研究在一定程度上能够揭示中间包钢水非等温流动的特点和规律,但往往是基于理想化的假设,如钢水为不可压缩黏性流体、电磁导率为常数、忽略位移电流等,而在实际生产过程中,存在热浮力、渣层摩擦力、侧壁散热等多种复杂多变的不可控因素。因此对于中间包钢水非等温流动的研究需要一套能够在生产条件下监测中间包钢水多点温度的实际系统。

然而,目前应用于连铸车间的顶插式和穿壁式测温系统并不能满足监测中间包钢水多点温度的需要。顶插式测温系统<sup>[10-11]</sup>由于是从中间包顶部插入感温管至钢水中,因此很难精确深入到中间包内需要监测的特征点位置,并且多点监测需要在中间包上方配合多套顶插系统,影响中间包受钢操作。穿壁式测温系统<sup>[12]</sup>以贵金属铂铑制成的热电偶来进行温度监测,多点监测势必会大大增加连铸生产成本,并且采集节点以拖偶方式挂载在中间包周围<sup>[13]</sup>,采集节点的增多使得中间包周围遍布拖偶导线,势必会影响连铸生产过程的正常进行。

针对上述问题,本文以某钢铁公司连铸车间的中间包为参考,研发了中间包内嵌分布式钢水连续测温系统,并结合实际生产工艺需求,在感温结构、光路传输、弱信号采集、低功耗、热防护、抗干扰等方面进行了相关设计,为研究中间包钢水非等温流动提供了实际系统级支撑。

## 1 系统概述

本文研发了一种中间包内嵌分布式钢水连续测温系统,其研发方案的整体架构如图 1 所示。

从实际生产工艺需求的角度出发,系统研发方案首先需要确定感温的方式,分析连铸车间现有测温系统的优缺

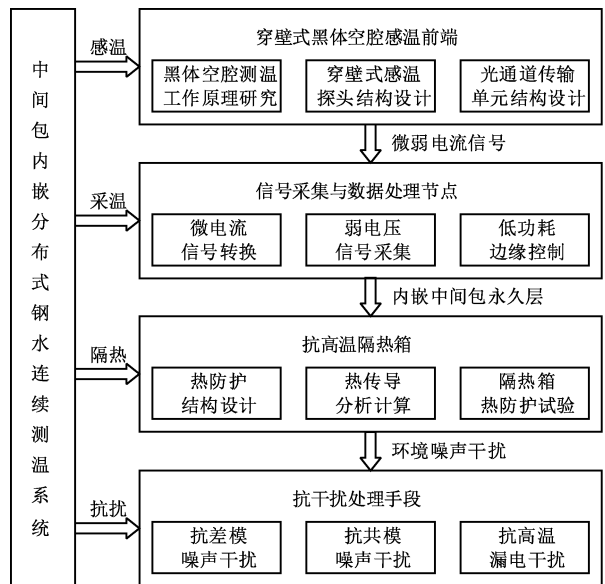


图 1 系统研发方案整体架构

Fig. 1 Overall architecture of system development plan

点,方案创新性地提出了采用穿壁式黑体空腔的感温方式,为避免漏钢风险,空腔内管的直径较细,导致光电池产生的电流信号十分微弱。因此针对这种特殊情况,采温节点包含微电流信号转换和弱电压信号采集等功能设计,考虑到中间包钢水温度监测是一个长时间连续的工艺过程,同时对节点进行了低功耗设计。由于节点需要内嵌在中间包永久层内,因此定制设计了抗高温隔热箱进行隔热防护。抗高温隔热箱虽然能够抵挡住中间包永久层的热冲击,但却屏蔽不了环境噪声对采集信号的干扰,因此系统增加了一些抗干扰处理手段,保证了对钢水温度测量的准确性和稳定性。

## 2 穿壁式黑体空腔感温前端

### 2.1 黑体空腔测温工作原理

任何物体都具有不断辐射、吸收、反射电磁波的性质,辐射出去的电磁波与物体本身的特性及其温度有关,因而被称之为热辐射。为了研究不依赖于物体本身特性的热辐射规律,物理学家定义了一种理想物体——黑体,它在任何条件下对任何波长的外来辐射完全吸收而无任何反射。理想黑体可以吸收所有照射到它表面的电磁辐射,并将这些辐射转化为热辐射,其光谱特征仅与该黑体的温度有关,与黑体的材质无关<sup>[14-16]</sup>。

从热力学理论出发,通过对实验数据的归纳总结,约瑟夫·斯特藩和路德维希·玻尔兹曼得出了斯特藩波尔兹曼定律,即一个黑体表面单位面积辐射出的总功率与黑体本身的热力学温度的四次方成正比<sup>[17]</sup>。这一定律是全辐射测温的基本原理,不仅对绝对黑体是正确的,而且对于任何实际物体来说也是成立的。从微观物理角度,普朗克提出能量量子假设并运用经典统计得出黑体辐射定律,即在任意温

度下,从一个黑体中发射出的电磁辐射的辐射率与频率彼此之间符合特定关系式。两个定律共同构建了热辐射理论体系,为后续辐射测温工程应用提供了坚实的理论支撑<sup>[18]</sup>。

## 2.2 穿壁式感温探头

由于需要监测中间包内多个特征点的钢水温度情况,因此感温探头采用预置方式从中间包的侧壁和底部深入钢水内部,及时、准确地反映钢水的实际温度及温度变化趋势。感温探头采用内外套管的形式构成,内管基于黑体空腔原理感知钢水温度,外管用于隔绝钢水对内管产生的冲刷、腐蚀等影响,如图 2 所示。

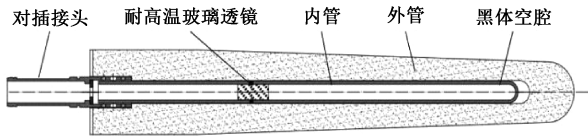


图 2 穿壁式感温探头结构

Fig. 2 Structure of through-wall temperature sensing probe

理想黑体在自然界并不存在,以氧化铝为主要成分的陶瓷材料本身不具有放射性元素,且氧化铝在高温烧结过程中已形成稳定的晶体结构,不会因外界环境变化(如辐射、温度波动等)而改变其放射性特性,因此感温探头选用辐射特性稳定的高纯度氧化铝刚玉管作为感温探头内管。将刚玉管制作成一端开口一端封闭、内径远小于管长的密闭空腔管,相当于带有小孔的密闭空腔,电磁波经过小孔射入空腔,要在腔壁上经过多次反射,在多次反射过程中,外面射来的电磁波几乎全部被腔壁吸收,最终不能从空腔射出,这种带小孔的空腔近似等同于黑体,因此感温探头可以用内管来模拟黑体的辐射特性,通过采集内管的辐射强度来推导出钢水温度。

以氧化铝和石墨为主要成分的铝碳质材料能耐受 1 600℃ 以上的极端高温环境且导热性能优异,其较低的热膨胀系数能有效减少热应力引起的裂纹风险,通过添加抗氧化剂形成的保护层可以显著提升抗熔渣侵蚀的能力,因此感温探头选用铝碳质材料制作感温探头外管。

由于感温探头从中间包的侧壁和底部深入钢水内部,为防止探头断裂产生漏钢风险,在保证能够有效感知钢水温度和耐受钢水冲刷的前提下,内外套管要尽可能细且紧密贴合。选用熔点可达 2 000℃ 以上的耐高温玻璃透镜,在高温环境下结构稳定;其透光范围为 150~5 000 nm,透过率通常可达 80%~90%。因此在内管的空腔内部固定一块耐高温玻璃透镜,可以在保证黑体空腔辐射强度的前提下,进一步抵御漏钢风险。

## 2.3 光通道传输单元

光通道传输单元与感温探头通过对插接头连接固定并保持光轴对齐,如图 3 所示,光通道传输单元的光路结构由物端光阑、滤波透镜、像端光阑、光纤和光电池组成。根据

感温探头内管直径尺寸调整物端光阑孔径大小,在抑制杂散光的同时使得透镜的视场角完全落在感温探头内管盲端半球面内,这样可以保证穿壁式感温探头插入钢水深浅不会造成测温误差。由于刚玉管在高温状态下主要辐射红外波段光,因此光通道传输单元选用红外带通滤波透镜将辐射光汇聚到一个焦点上。像端光阑位于焦点和像面之间,通过改变像端光阑孔径大小可以调整像面接收光通量的多少。由于光电池的工作上限温度为 100℃ 而包壁永久层的温度通常在 200℃~300℃,因此光通道传输单元使用耐高温光纤将像面接收的辐射光以较低的能量损失传输至光电池的感光面上<sup>[19-20]</sup>。光电池基于光电效应原理,当感光面上的硅基材料受到光子的照射后,会使硅中的电子跃迁到导带,形成自由电子和空穴对,这些自由电子和空穴在电场的作用下产生与辐射光能量成正比的光电流信号。

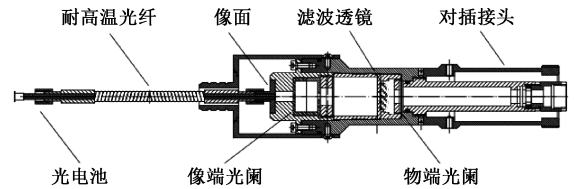


图 3 光通道传输单元光路结构

Fig. 3 Optical path structure of optical channel transmission unit

## 3 信号采集与数据处理节点

### 3.1 微电流信号转换

由于感温探头从中间包的侧壁和底部深入钢水内部,为防止探头断裂产生漏钢风险,内管的内径大约 10 mm 左右,因此黑体空腔产生的辐射光强度较低,再经过光纤传输过程中的衰减,最终光电池仅能产生 pA 级的微弱电流信号。

pA 级的微弱电流极易被环境中的电磁干扰、射频干扰以及热噪声等淹没,因此需要使用运算放大电路将其放大。常规的运算放大器的输入偏置电流可能直接导致 pA 级的输入误差,而且电路板的表面污染、绝缘不良或湿度过高可能会产生比被测电流更大的漏电流干扰。因此节点选用极低输入偏置电流且集成保护环缓冲器的 ADA4530-1 运算放大器来搭建微电流信号转换电路,如图 4 所示。

ADA4530-1 是一款 fA 级输入偏置电流的运算放大器,还具有低失调电压、低失调漂移、低电压噪声和电流噪声特性,适合要求极低误差的高阻抗电路应用。而高阻抗和低误差的应用会对电路板材料的绝缘电阻提出不切实际的高要求,有一种保护技术可将此类要求降低到合理水平。其原理是用一种驱动到相同电位的导体(保护环)包围高阻抗导体,如果高阻抗导体与保护环之间的绝缘电阻上没有电压,那么就不会有任何电流流经其中。芯片内部集成的保护环缓冲器连接至芯片外部管脚可供外围电路使用,如

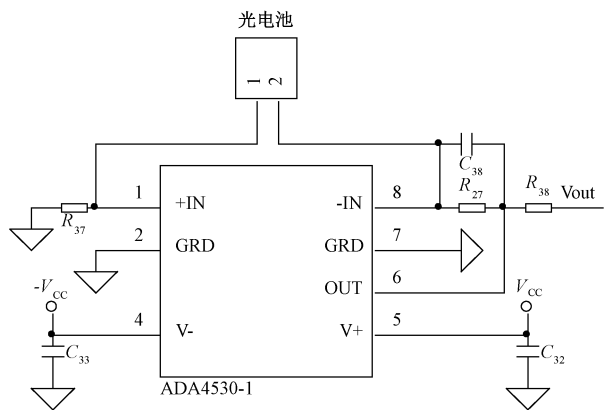


图 4 微电流信号转换电路原理图

Fig. 4 Schematic diagram of microcurrent signal conversion circuit

图 5 所示,通过板级布局布线可以使因绝缘电阻产生误差电流大大降低。保护环上的一圈过孔是补充防护结构,用于防护内层和保护环之间板材侧面的漏电路径。

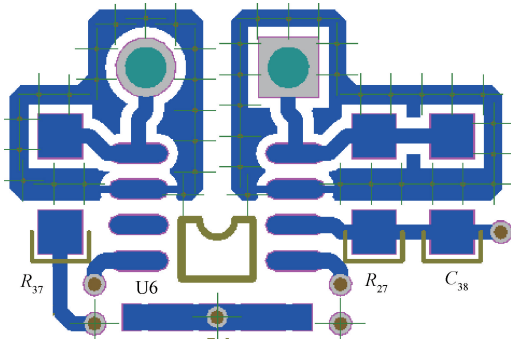


图 5 保护环包围高阻抗导体电路布局图

Fig. 5 Layout diagram of high impedance conductor circuit surrounded by protective ring

### 3.2 弱电压信号采集

光电池产生的 pA 级电流信号经过 GΩ 级反馈电阻可以转换成 mV 级的电压信号,虽然 mV 级电压信号照比 pA 级电流信号放大了多个数量级,但想要精确采集还是存在多方面的难度。首先是需要高分辨率的 ADC 芯片才能够在 V 级基准电压情况下满足 mV 级的精确采集需求;其次信号质量容易受到高频噪声干扰,需要通过滤波器进行抑制。因此节点选用 24 位分辨率的 ADS1220 模数转换器并结合外围滤波电路来搭建弱电压信号采集电路,如图 6 所示。

本电路采用差分输入的方式采集弱电压信号,具有较强的抗共模干扰能力。偏置电阻 R<sub>35</sub> 和 R<sub>36</sub> 用于将差分输入的共模电压设置在合适范围内,为避免偏置电流降低测量精度,偏置电阻的阻值都在 MΩ 级别。偏置电阻还起到检测差分输入电压发生开路情况的作用,如果差分输入的走线因故障开路,则偏置电阻分别将 ADS1220 的模拟输入 AIN<sub>0</sub> 和 AIN<sub>1</sub> 拉至 AVDD 和 AVSS,因此当 ADS1220 读取超出差分电压正常测量范围的满量程值时,证明差分

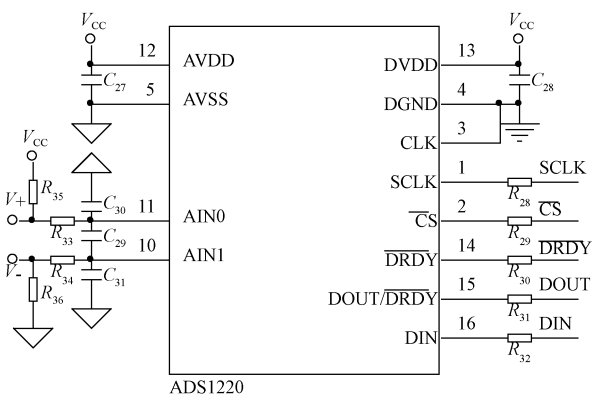


图 6 弱电压信号采集电路原理图

Fig. 6 Schematic diagram of weak voltage signal acquisition circuit

输入存在开路故障状态。

尽管 ADS1220 内部的数字滤波器会使噪声的高频分量产生衰减,本电路在差分输入处依然使用一阶无源 RC 滤波器进一步增强抗噪性能。由滤波电阻 R<sub>33</sub>、R<sub>34</sub> 和差模电容 C<sub>29</sub> 组成差模 RC 滤波器,同时添加两个共模滤波电容 C<sub>30</sub>、C<sub>31</sub>,使得在进入芯片模拟输入端之前高频噪声分量已经产生衰减。差模电容应至少比共模电容高出一个数量级,否则共模电容的不匹配可能会导致共模噪声转换为差模噪声。滤波电阻还起到限流的作用,当差分输入发生过压时,滤波电阻可以将流入芯片模拟输入端的电流量限制在安全水平。同时由于流经滤波电阻的输入电流会产生压降,为避免此压降增加测量误差,滤波电阻的阻值一般在 1 kΩ 以下。

### 3.3 低功耗边缘控制

由于系统需要同时监测中间包内多个特征点的钢水温度情况,每个特征点对应一套穿壁式黑体空腔感温前端和信号采集与数据处理节点,因此根据实际业务需求,整个系统可能会包含若干个甚至十几个节点,每个节点相当于一台边缘控制器。从不影响实际生产过程的角度出发,节点需要内置电池作为其供电来源,采集处理本特征点温度数据后,需要通过无线方式将数据上传至上级系统中。

由于磷酸铁锂电池热稳定性好、自放电率低,适合在钢厂等高温环境下的便携设备中使用,因此节点选其作为供电来源,与之匹配,需要节点具备电源管理和电量监测的功能。如图 7 所示,节点采用针对磷酸铁锂电池特有的充电算法对电池进行充电,免除了锂离子电池充电周期中常用的恒定电压模式控制,取而代之的是,将电池快速充电至过充电电压,然后使之衰减至一个较低的浮动充电电压门限,可提供高达 1 A 的充电电流,可显著地缩短充电时间。如图 8 所示,节点基于磷酸铁锂电池参数,采用阻抗追踪技术精准计算电池剩余容量。

由于系统需要连续监测中间包内钢水温度情况,而中间包一个浇次的时间在几个小时甚至十几小时以上,这种工艺过程就要求以电池作为供电来源的节点能够长时间连

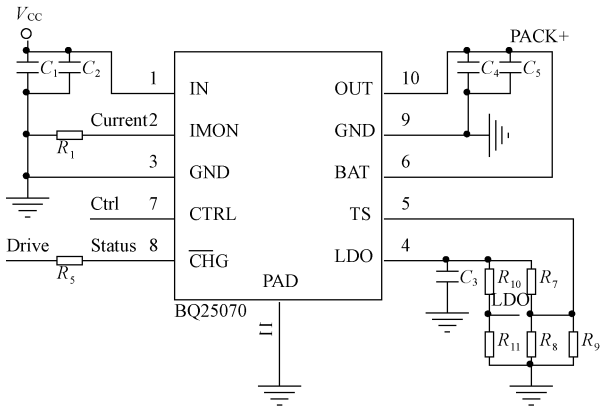


图 7 电源管理功能电路原理图

Fig. 7 Schematic diagram of power management function circuit

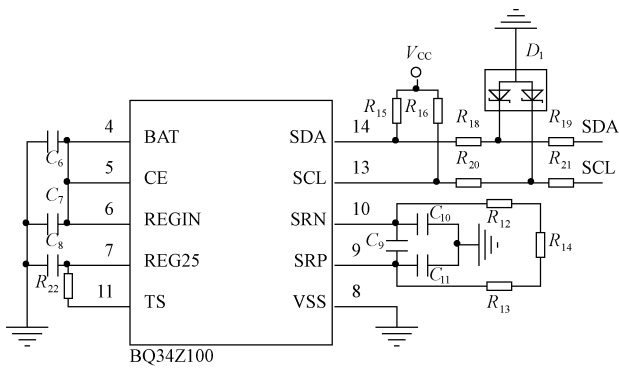


图 8 电量监测功能电路原理图

Fig. 8 Schematic diagram of power monitoring function circuit

续工作,因此节点基于嵌入式解决方案,在处理器架构、逻辑器件功耗以及软件优化处理等方面进行了低功耗设计。如图 9 所示,节点选用 SILICON LABS 的 EFM32 系列处理器,具有 EM0-EM4 共 5 种低功耗模式,在 EM2 的低功耗模式下,微处理器仍可实现 RTC 运行、LEUART、LETIMER 以及 LESENSE 的通信或控制功能,而功耗仅需 900 nA。而且它具有灵活的唤醒方式和自主工作的 PRS 系统,可以由外部 I/O、I2C 通信接口、LEUART 通信信号等方式唤醒。在嵌入式软件设计方面,节点应用微处理器的自身休眠机制和中断唤醒功能实现低功耗运行,除通过唤醒定时器进行周期性工作外,其余时段均处于深度休眠状态;另外在与无线通信模块交互过程中,基于 IO 引脚的中断唤醒功能实现休眠模式下的状态机切换,避免了微处理器等待过程中的无用电能消耗。经过测试,节点的静态功耗在 60  $\mu$ A 左右,3 000 mAh 电池满电状态下可供节点连续工作至少半年以上。

## 4 抗高温隔热箱

### 4.1 热防护结构设计

由于系统需要同时监测中间包内多个特征温度点,从不影响实际生产过程的角度出发,信号采集与数据处理节

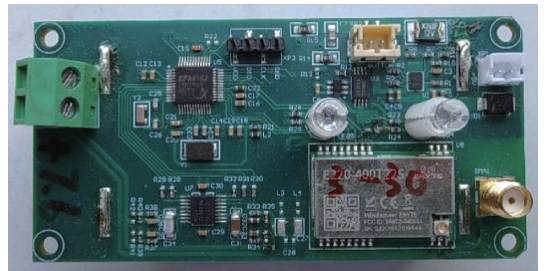


图 9 信号采集与数据处理节点实物图

Fig. 9 Physical diagram of signal acquisition and data processing node

点采用预置方式固定在中间包侧壁和底部的永久层内。由于包壁永久层的温度大概在 200 $^{\circ}$ C~300 $^{\circ}$ C,而节点芯片的工作温度上限为 85 $^{\circ}$ C,因此需要在节点外围设计热防护结构,至少保证在一个浇次周期内节点不会因为环境温度过高而无法工作。

本系统设计的抗高温隔热箱分为 3 层结构,如图 10 所示,外部为气凝胶隔热保温层,中间为石蜡相变吸热层,内部为存放节点的空腔。在 300 $^{\circ}$ C 以下范围内,气凝胶相比于其他隔热保温材料的导热系数更低,通常在 0.012~0.025 W/(m $\cdot$  $^{\circ}$ C),可以有效减缓来自包壁永久层的热量传入速度。由于一个浇次周期的时间较长,因此需要添加相变层来吸收传入的热量。石蜡的熔点温度范围通常在 40 $^{\circ}$ C~60 $^{\circ}$ C,溶解热相对较高,由固态变为液体时可吸收大量热量并保持本身温度近似不变,与节点芯片的工作温度范围十分吻合;石蜡的沸点温度范围通常在 300 $^{\circ}$ C~550 $^{\circ}$ C,包壁永久层温度不足以使石蜡汽化,不会造成大量气体的产生,相变容积比较稳定。另外,石蜡无过冷现象,在浇次间歇期温度低于凝固点后迅速变为固态,可循环使用,因此石蜡非常适合作为本系统抗高温隔热箱的相变材料。

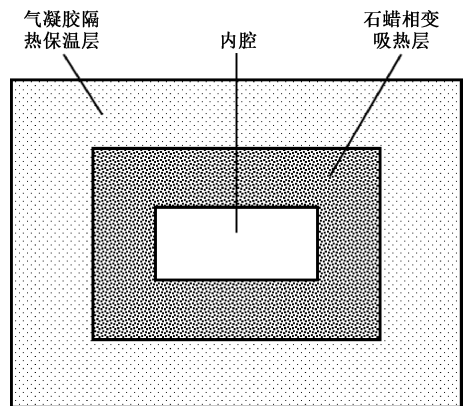


图 10 抗高温隔热箱结构

Fig. 10 Structure of high-temperature thermal insulation box

### 4.2 热传导分析计算

对于隔热箱传热问题的分析计算比较复杂,它涉及到多层隔热保温材料的导热、蓄热以及相变材料的相变潜热

等因素。由于抗高温隔热箱是立方体结构,可以认为在隔热箱各面上的传热条件近似相同,因此将隔热箱传热问题简化成一维传热问题来分析计算。

由于一个浇次周期的时间较长,中间包永久层的温度相对于时间变化十分缓慢,因此隔热箱的传热过程可以认为是一个稳态导热过程,因此气凝胶隔热保温层传递给石蜡相变层的热量可由式(1)表示,即:

$$Q = S(t_1 - t_2)\tau\lambda/d \quad (1)$$

式中:Q 为传递热量,单位为 J;S 为隔热保温层的外表面积,单位为 mm<sup>2</sup>;t<sub>1</sub> 为中间包永久层温度,单位为℃;t<sub>2</sub> 为石蜡的熔化温度,单位为℃;τ 为一个浇次周期,单位为 h;λ 为气凝胶的导热系数,单位为 W/(m·℃);d 为隔热保温层的厚度,单位为 mm。

石蜡相变层能够吸收的热量可由式(2)表示,即:

$$Q = m[A + c(t_1 - t_2)] \quad (2)$$

式中:Q 为吸收热量,单位为 J;m 为石蜡的质量,单位为 kg;A 为石蜡的溶解热,单位为 kJ/kg;c 为石蜡的比热容,单位为 kJ/(kg·℃);t<sub>1</sub> 为石蜡的熔化温度,单位为℃;t<sub>2</sub> 为浇次开始前的石蜡温度,单位为℃。

为保证节点能够安全稳定的工作,气凝胶隔热保温层传递给石蜡相变层的热量要少于石蜡相变层能够吸收的热量。根据节点尺寸,隔热箱内腔的尺寸为 95 mm×45 mm×25 mm,因此可以推算出隔热保温层和石蜡相变层的截面积为 4 275 mm<sup>2</sup>。根据实际情况,设定式(1)参数(中间包永久层温度 t<sub>1</sub> 为 300℃,石蜡的熔化温度 t<sub>2</sub> 为 50℃,平均一个浇次周期 τ 为 12 h,气凝胶的导热系数 λ 为 0.02 W/(m·℃),隔热保温层的厚度 d 为 30 mm),可以计算得出气凝胶隔热保温层传递给石蜡相变层的热量为 30.78 kJ。根据式(2)的参数(石蜡的密度为 0.9 g/cm<sup>3</sup>,石蜡的溶解热 A 为 249 kJ/kg,石蜡的比热容 c 为 3.2 kJ/(kg·℃),石蜡的熔化温度 t<sub>1</sub> 为 50℃,浇次开始前的石蜡温度 t<sub>2</sub> 为 25℃),可以计算得出石蜡相变层的厚度至少为 24.32 mm。由于中间包侧壁和底部的截面积相对于隔热箱要大很多,因此隔热箱的长度和宽度尺寸可以轻

松扩展,而隔热箱的厚度尺寸受到中间包永久层厚度的约束。由上述计算过程,可推算出隔热箱的厚度尺寸为 133.64 mm(内腔厚度+两层石蜡相变层厚度+两层隔热保温层厚度),而中间包永久层的厚度大概在 170 mm 左右,因此抗高温隔热箱从理论分析计算上符合实际需求。

### 4.3 隔热箱热防护试验

把抗高温隔热箱置于马弗炉中,将马弗炉从室温加热至 300℃。引入两支热电偶,一支测量马弗炉内温度变化情况,另一支测量隔热箱内腔的温度变化情况,所得结果如图 11 所示。从图 11 中可以看出,在 12 h 的时间范围内,马弗炉一直维持在 300℃左右,马弗炉内的热量不断从气凝胶隔热保温层递给石蜡相变层,随着温度逐步上升,石蜡相变层在不断地吸收热量,材质由硬变软、再由软变稠、最后完全熔化为液态,隔热箱内腔的温度也从 25℃缓慢上升至 50℃左右。从试验结果可以看出,抗高温隔热箱能够保障节点不会因为中间包永久层的热冲击而烧毁。

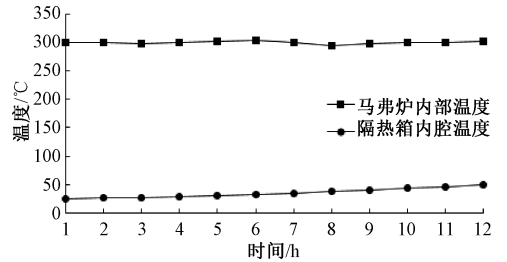


图 11 马弗炉及隔热箱内腔温度变化曲线

Fig. 11 Temperature variation curve of muffle furnace and thermal insulation box cavity

## 5 抗干扰手段与测温性能测试

### 5.1 抗高温漏电干扰

由于中间包的侧壁、底部以及感温前端内外套管的主要成分都是氧化铝材料,其绝缘性能随着温度的升高而逐渐下降,有些绝缘材料在高温时甚至会变成良导体,如表 1 所示,从而在穿壁式感温前端的输出信号上叠加了高温漏电干扰,严重影响后端的采集。

表 1 不同耐火材料的比电阻与温度的关系

Table 1 The relationship between specific resistance and temperature of different refractory materials

产品名称	主要成分	比电阻/(Ω·cm <sup>-3</sup> )				
		常温	1 000℃	1 200℃	1 400℃	1 500℃
氧化铝砖	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	133×10 <sup>6</sup>	17 200	6 100	2 200	1 100
耐火粘土砖	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiO <sub>2</sub>	137×10 <sup>6</sup>	10 800	4 160	1 420	890
氧化镁砖	MgO	137×10 <sup>6</sup>	708 000	193 000	22 400	2 500

通过示波器观测可以看到叠加在热电偶输出信号上的高温漏电干扰以频率为 50 Hz 呈现,并随着温度的不断升高,波形的振幅也随之增大,如图 12 所示,当振幅超过 3.3 V 时,波峰发生畸变,采集数据也开始出现跳动。

通过使用 Multisim 硬件仿真软件结合滤波频率分析,

增大差模滤波电容和共模滤波电容容值,降低滤波截止频率,可以将 50 Hz 高温漏电干扰振幅限制在 2 V 以内,在 1 600℃以下,采集电路均不受影响。

### 5.2 测温性能测试方案

为验证系统的连续测温性能,使用箱式高温炉模拟钢



图 12 高温漏电干扰实测图

Fig. 12 High temperature leakage interference measurement diagram

水温度,与设置炉温以及穿壁式热偶测温系统进行对比测试。如图 13 所示,箱式高温炉开两个测温孔,一个孔插入当前主流的穿壁式热偶感温探头,另一个孔插入本文研究的穿壁式光电感温探头,两者插入炉内的深度相同。不论是热偶感温探头产生的电压,还是光电感温探头产生的电流,在低温段均十分微弱,对比测得的温度数值无实际意义,并且从实际业务角度考虑,中间包受钢后的熔融钢水温度基本在 1 500℃左右,因此选择 1 200℃~1 600℃作为测试目标的温度范围,通过设置高温炉升温曲线,从多维度来验证本系统的测温性能。设置炉温每升高 100℃耗时 1 h,将本系统测得的温度数据与炉温数据进行比对,用于验证本系统测温的动态特性;设置炉温每升高至整百数温度时,保温 1 h,用于验证本系统测温的稳定性;整个目标温度范围内,将本系统与穿壁式热偶测温系统测得的数据进行比对,用于验证本系统测温的准确性。

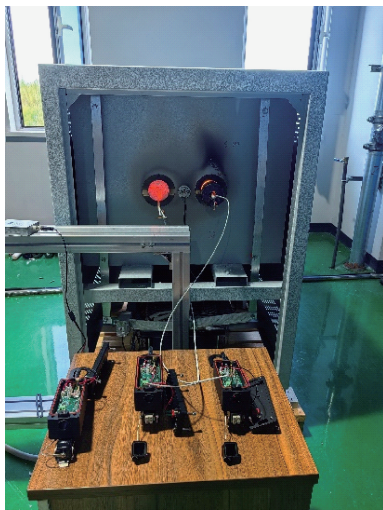


图 13 系统测温性能测试

Fig. 13 System temperature measurement performance test

### 5.3 测温性能数据分析

从温度动态特性方面来看,如图 14 所示,本系统在高温炉 1 200℃~1 300℃、1 300℃~1 400℃、1 400℃~1 500℃和 1 500℃~1 600℃各升温时段的测温数据上升趋势与炉温数据基本一致,由于感温探头是内外套管结构,高温炉内的热量传递至探头内部需要一定时间,因此温度曲线稍微有一些迟滞时间,属于正常现象,而且结合实际生产过程中,中间包内钢水温度是缓慢变化量,并不会像高温炉一样存在剧烈地温度变化,可以表明系统的温度动态特性符合实际应用的要求。

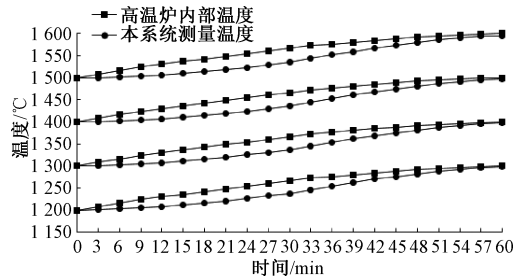


图 14 系统测温的动态特性曲线

Fig. 14 Dynamic characteristic curve of system temperature measurement

从稳定性方面来看,如图 15 所示,本系统在高温炉 1 200℃、1 300℃、1 400℃和 1 500℃各 1 h 的保温时段内分别测量了 21 组数据,每组数据的平均值和均方根值与炉温数据值的差均在 1℃以内,可以证明系统的连续测温数据是稳定可靠的。

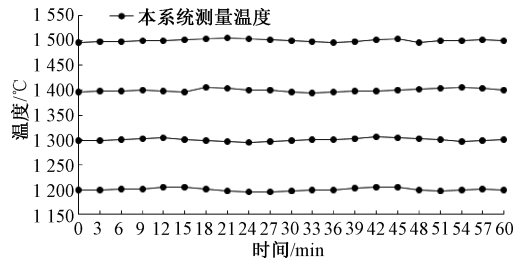


图 15 系统测温的稳定性曲线

Fig. 15 Stability curve of system temperature measurement

从准确性方面来看,如图 16 所示,本系统在 1 200℃~1 600℃目标温度范围内,将本系统测温数据与穿壁式热偶

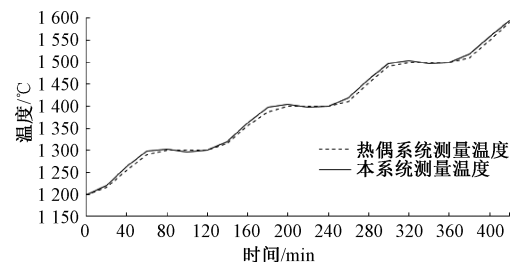


图 16 系统测温的准确性曲线

Fig. 16 Accuracy curve of system temperature measurement

测温系统测得的数据进行比对,温度差均在 3℃ 以内,可以说明系统对钢水温度的测量数据是准确的。

## 6 结 论

本研究研发了一种中间包内嵌分布式钢水连续测温系统,通过穿壁式黑体空腔探头能够灵敏感知钢水的温度变化,结合抗高温漏电干扰等处理手段,测温节点能够精确采集探头产生的 pA 级电流信号,计算得到准确的钢水温度数据。为适应内嵌分布式监测的使用场景,通过热传导分析计算定制设计的隔热箱能够保障测温节点不会因为中间包永久层的热冲击而烧毁,通过低功耗设计的测温节点静态功耗在 60  $\mu$ A 左右,3 000 mAh 电池满电状态下可供节点连续工作至少半年以上。最终在 1 200℃ ~ 1 600℃ 目标温度范围内,与设置炉温以及穿壁式热偶测温系统进行对比测试,测试结果可以表明系统的连续测温性能是稳定准确的,适用于在生产条件下的中间包钢水多点温度监测应用。

## 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.  
PAN D,JIANG ZH H,XU CH,et al. Research progress of measurement methods of molten iron temperature in blast furnace[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2023,44(12):280-296.
- [2] 李成江,张正伟.中间包钢水净化技术[J].河北冶金,2023(9):46-51.  
LI CH J,ZHANG ZH W. Tundish molten steel purification technology [J]. Hebei Metallurgy, 2023(9):46-51.
- [3] 住玉乾,张兴,张杰,等.中间包工作层对 430 不锈钢水洁净度的影响[J].甘肃冶金,2024,46(6):77-81.  
ZHU Y Q,ZHANG X,ZHANG J,et al. Effect of intermediate package working layer on cleanliness of molten steel of 430 stainless steel [J]. Gansu Metallurgy,2024,46(6):77-81.
- [4] 唐海燕,李小松,张硕,等.基于恒过热控制的感应加热中间包内钢水的流动与传热[J].金属学报,2020,56(12):1629-1642.  
TANG H Y,LI X S,ZHANG SH,et al. Fluid flow and heat transfer in a tundish with channel induction heating for sequence casting with a constant superheat control[J]. Acta Metallurgica Sinica,2020,56(12):1629-1642.
- [5] 董文利,李春艳,黎才庆,等.电磁感应加热对连铸大圆坯中间包内流场及温度场的影响[J].炼钢,2025,41(6):67-81,106.  
DONG W L,LI CH Y,LI C Q,et al. Effect of electromagnetic induction heating on flow field and temperature field in tundish of continuous casting round bloom[J]. Steelmaking,2025,41(6):67-81,106.
- [6] 宋丽娜,铁占鹏.非对称中间包常用控流装置冶金效果的数值模拟[J].钢铁研究学报,2023,35(6):692-703.  
SONG L N,TIE ZH P. Metallurgical effects of commonly used flow control devices in asymmetric tundish[J]. Journal of Iron and Steel Research,2023,35(6):692-703.
- [7] 邓伟,牛帅,杨恩蛟,等.特殊钢大方坯连铸中间包各流冶金效果一致性研究[J].钢铁研究学报,2021,33(11):1144-1153.  
DENG W,NIU SH,YANG EN J,et al. Study on an identical metallurgical effect for multi-strand tundish during special steel bloom casting[J]. Journal of Iron and Steel Research,2021,33(11):1144-1153.
- [8] 王舒皓,黄军,张瑞,等.通道式中间包非等温流场的数理模拟与优化[J].连铸,2022(1):14-24.  
WANG SH H,HUANG J,ZHANG R,et al. Mathematical and physical simulation and optimization of non-isothermal flow field in channel tundish [J]. Continuous Casting,2022(1):14-24.
- [9] 王凯民,唐海燕,肖红,等.六流双通道感应加热中间包钢水流动控制[J].中国冶金,2022,32(2):84-91.  
WANG K M,TANG H Y,XIAO H,et al. Control on flow of molten steel in a 6-strand tundish with dual channel induction heating[J]. China Metallurgy,2022,32(2):84-91.
- [10] 谢洪先.针对钢水浇注温度的塞棒式黑体空腔传感器建模与研制[D].沈阳:东北大学,2022:15-36.  
XIE Q X. Modeling and development on stopper blackbody cavity sensor for molten steel pouring temperature[D]. Shenyang: Northeastern University, 2022:15-36.
- [11] 郑建忠,刘用权,陈克武.黑体空腔式钢水连续测温系统的校验[J].中国仪器仪表,2025(3):32-36.  
ZHENG J ZH,LIU Y Q,CHEN K W. Verification of continuous temperature measurement system for black body cavity type molten steel[J]. China Instrumentation, 2025(3):32-36.
- [12] 唐英淇.中间包连续测温技术在连铸中的开发应用[J].冶金与材料,2024,44(10):127-129.  
TANG Y Q. Development and application of continuous temperature measurement technology for tundish in continuous casting [J]. Metallurgical and Materials,2024,44(10):127-129.
- [13] 王志超,张志杰,张秋宁.一种基于 FPGA 的瞬态温度采集系统设计[J].电子测量技术,2023,46(19):

- 49-55.
- WANG ZH CH, ZHANG ZH J, ZHANG Q N. Contact temperature measurement system based on FPGA[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(19):49-55.
- [14] 崔双龙,孙博君,孙晓刚. 黑体红外波段辐射亮度响应的通用公式[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(5): 1329-1333.
- CUI SH L, SUN B J, SUN X G. Universal formula of blackbody waveband radiation brightness response in the infrared temperature measurement technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(5): 1329-1333.
- [15] 高山,熊新梦,刘海龙. 基于红外辐射的发动机涡轮叶片温度测量方法综述[J]. 计测技术, 2024, 44(4): 1-28.
- GAO SH, XIONG X M, LIU H L. Overview of temperature measurement methods for engine turbine blades based on infrared radiation[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(4): 1-28.
- [16] 管今哥,卫娜瑛,郑永秋,等. 基于同步共轴结构的辐射层析测温仪设计[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(9): 239-247.
- GUAN J G, WEI N Y, ZHENG Y Q, et al. Design of radiation tomography thermometer based on synchronous coaxial structure[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(9): 239-247.
- [17] 曹则贤. 黑体辐射公式的多种推导及其在近代物理构建中的意义(D)[J]. 物理, 2021, 50(11): 761-766.
- CAO Z X. Derivations of black-body radiation formula and their implication to the formulation of modern physics(D)[J]. Physics, 2021, 50(11): 761-766.
- [18] 黄架栋. 统计力学视域下的量子理论发展——从玻尔兹曼到普朗克[J]. 物理通报, 2023(12): 154-158.
- HUANG J D. The development of quantum theory in the perspective of statistical mechanics——from Boltzmann to Planck[J]. Physics Bulletin, 2023(12): 154-158.
- [19] 周龙,宋树祥,杨军,等. 基于 VMD-SVD 的拉曼分布式光纤测温系统降噪方法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(12): 172-177.
- ZHOU L, SONG SH X, YANG J, et al. Noise reduction method of raman distributed optical fiber temperature measurement system based on VMD-SVD[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(12): 172-177.
- [20] 李昭旭,王宇,郭欣明,等. 基于 G-S 混合编码的分布式单模光纤测温方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(1): 244-252.
- LI ZH X, WANG Y, GUO X M, et al. Research on distributed single-mode fiber temperature measurement method based on G-S hybrid coding [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(1): 244-252.

## 作者简介

刘博, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为嵌入式技术、高温检测装置与系统等。

E-mail: liubo@sia. cn

石刚(通信作者), 博士, 研究员, 主要研究方向为嵌入式技术、工业物联网与智能控制系统等。

E-mail: sg0105@sia. cn