

Design of Experimental Equipment for Slag Crystallization Based on Hot Wire Method^{*}

SHI Tao^{*}, LIU Fang, REN Hongge

(College of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei 063000, China)

Abstract: In some experimental equipments adopted to research the characteristics of slag crystallization, the traditional equipments are especially expensive, while a number of the existing equipments have the problems of poor controlling temperature, slow heating and cooling speed, as well as the leading and lagging temperature control system. In this paper, the experimental equipment based on the hot wire method is designed. The thermocouple of the equipment is not only used as a heating element, but also as a temperature measuring element. This system is set to 5 ms as a working cycle, of which 4 ms is the heating cycle and 1 ms is the temperature measurement cycle. This system is switched to different working states by the conversion circuit designed. The thermoelectric potential signal generated by the thermocouple is first input into the main control circuit through the signal amplification circuit and the AD acquisition circuit, and then the linear interpolation calculation is used by the main control circuit to convert it into the actual temperature. The PID adjustment method in the system is used to correct the deviation between the set temperature and the actual temperature. It can be seen from the experimental results that the error of the equipment at constant temperature can be controlled within 3 °C, the accuracy of temperature measurement can be controlled within 6 °C, and the whole performance of this experimental equipment is good.

Key words: slag; thermocouple; hot wire method; conversion circuit; PID adjustment

EEACC: 7210; 8540

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2021.01.042

基于热丝法的保护渣析晶实验设备的设计^{*}

史涛^{*}, 刘方, 任红格

(华北理工大学电气工程学院, 河北唐山 063000)

摘要: 在一些用来研究保护渣析晶特性的实验设备中, 传统的设备价格特别昂贵, 而现有的一些设备控温效果差、升温 and 降温速度慢以及温度控制系统存在超前和滞后的问题。本文设计了一种基于热丝法的改进实验设备, 该设备将热电偶既作为加热元件, 又作为测温元件。系统以 5 ms 为一个工作周期, 其中 4 ms 为加热周期, 1 ms 为测温周期, 利用本文设计的转换电路可以将系统切换成不同的工作状态。热电偶产生的热电势信号通过信号放大电路和 AD 采集电路, 最后输入到主控电路中, 主控电路再利用线性插值计算将其转换成实际温度。系统采用 PID 调节方式来修正设定温度与实际温度之间的偏差。从实验结果可以看出, 该设备恒温时的误差可以控制在 3 °C 之内, 温度测量的精度在 6 °C 之内, 整体表现良好。

关键词: 保护渣; 热电偶; 热丝法; 转换电路; PID 调节

中图分类号: TP212.9; TF19

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2021)01-0218-07

连铸保护渣是添加在钢液表面帮助正常浇铸的粉料, 其主要作用有防止钢液二次氧化、绝热保温、吸收非金属夹杂物、改善结晶器传热以及润滑铸坯的作用, 保护渣的选择对实际生产的顺利进行、铸坯表面质量以及皮下质量将产生巨大的影响, 其在连

铸过程中的作用是至关重要的。连铸保护渣的融化温度和融化速度必须可控, 熔渣层的厚度、渣膜的形成与融化温度和速度息息相关。

保护渣的融化速度太慢或者融化温度过高, 会减小熔渣层的厚度, 这样就难以形成均匀的渣膜, 从

项目来源: 河北省自然科学基金项目(F2018209289)

收稿日期: 2020-06-18 修改日期: 2020-08-06

而导致了保护渣对铸坯的传热不良情况。如果融化速度太快或者融化温度太低,就会出现熔渣层厚度变大,粉渣层及烧结层厚度减小,影响了保护渣的绝热保温性能,造成钢液容易被氧化,出现铸坯表面产生横向裂纹等缺陷^[1]。

保护渣的析晶过程研究是至关重要的。传统的方法如显微镜半球法,骤冷淬火法等^[2],这些方法所用的实验设备成本都是十分高的。而目前现有的一些设备存在控温效果差、升温和降温速度慢以及温度控制系统存在超前和滞后的问题。本文采用的基于热丝法的自研改进设备拥有廉价、体积小、操作简单、升温和降温速度快、恒温误差小、实时性强等

优点。目前已有的一些设备更是存在温度控制不精确,设定温度达不到,电路设计复杂,实验过程耗费时间等各种问题。本设备针对以上问题做出了大量的改进,设计的电路解决了以上的问题。本设备最大的优势在于可以观测不同速率下保护渣融化和结晶的全部过程,并且实验室做出了大量的实验,设备稳定性高,整体性能表现优秀。

1 系统的结构

该系统由热电偶、热电偶信号采集和加热转化电路、信号放大电路、AD采集电路、底层控制电路、显微镜和摄像机等组成。系统总结构如图1所示。

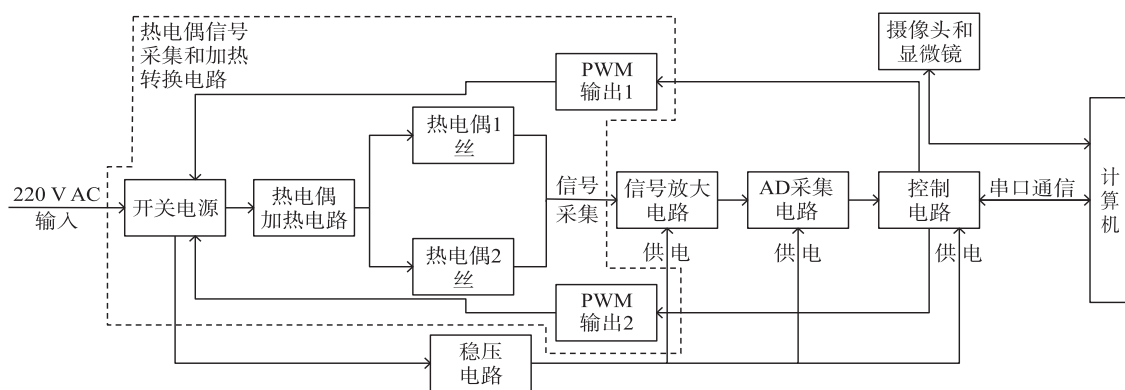


图1 系统结构总图

整个系统外接一根220 V AC的电源线到开关电源上,然后开关电源输出的电压经过稳压电路,将转换后的电压分别给仪表放大器的正电源供电、放大器的负电源供电以及主控芯片和串口的供电。此结构中有一个热电偶信号采集和加热转换电路,通过此转换电路可以使热电偶既是加热元件又是测量元件^[4]。系统以5 ms为1个工作周期,其中4 ms为热电偶加热周期,1 ms为热电偶信号采集周期,通过图1的控制电路输出PWM信号来切换转换电路。当转换电路为加热电路时,此时把热电偶当作加热元件,MOS管处于导通状态,热电偶的负极相当于与电源负极连接在一起,热电偶的正极与电源的正极连接在一起。当转换电路为信号采集电路时,系统采集此刻热电偶的热电势信号,然后通过信号放大电路和AD采集电路,最后将热电势信号输入到控制电路中,由主控芯片的ADC将热电势信号转换成数字信号以用来处理。主控芯片通过相应的算法处理,将热电势信号转换成实际的温度值,再计算出实际温度值与设定的温度值的偏差,通过PID调节的方式,最后输出PWM信号^[5],以控制热电偶的加热。整个系统的实际工作环境示意图如图2所示,可以看到该系统工作所需的环境极为简便,成本较低。

计算机使用自主研发的上位机软件,该软件使用VB语言编程,上位机界面如图3所示。

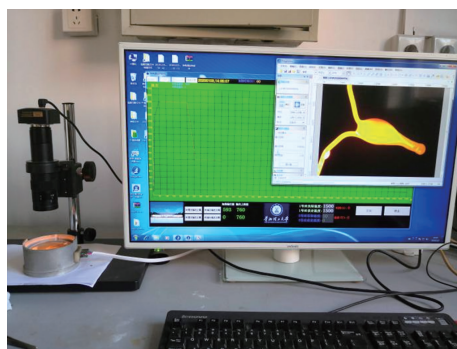


图2 系统工作示意图

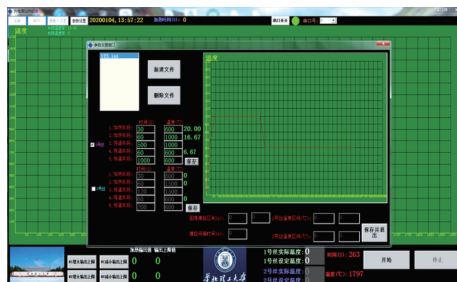


图3 系统上位机软件

在该软件上面可以看到热电偶加热时间、加热速度、加热温度、设定温度和加热曲线等^[6],还可以

设置热电偶设定温度、升温和降温速率以及恒温的时间。在上位机设置好参数之后,参数以串口通信的方式传递到下位机,即可开始进行实验。

2 系统的硬件电路设计

2.1 热电偶的转换电路设计

系统通过热电偶信号采集和加热转换电路,来使得让热电偶既可以当测量元件又可以当作加热元件。该电路由三个电阻、一个 MOS 管、一个三极管、热电偶、一个输出 +5 V、40 A 的开关电源、主控芯片的一路 PWM 输出以及稳压电路输出的 +3.3 V 和 +12 V 所构成,热电偶转换电路示意如图 4 所示。

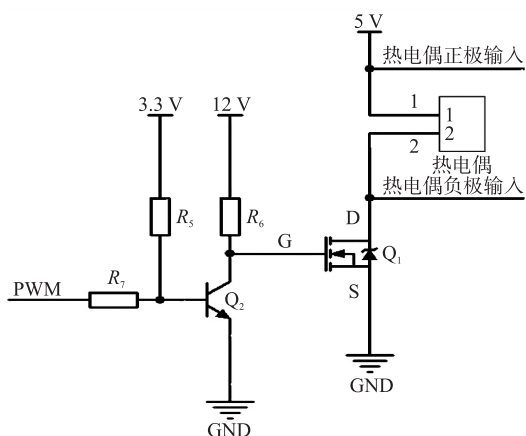


图 4 热电偶转换电路示意图

此电路中 R_7 为基极电阻, R_5 为上拉电阻, R_6 为集电极分压电阻。当主控芯片输入 PWM 控制信号为低电平时,此时三极管 Q_2 的基极是 0 V,三极管处于截止状态, Q_2 的集电极是 12 V, MOS 管 Q_1 的 G 端也是 12 V, MOS 管导通,热电偶的正极为 +5 V,负极相当于与 GND 短接在一起,是 0 V,此时电路属于热电偶加热阶段。热电偶加热的等效示意如图 5 所示。

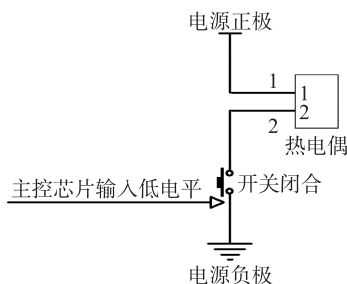


图 5 热电偶加热等效示意图

当热电偶处于信号采集状态时,此时主控芯片输入高电平,三极管 Q_2 的基极产生电流,从而 Q_2 处于导通状态,由于电阻 R_6 的分压作用下,此时相当于 Q_2 的集电极与 GND 端短接在一起, Q_2 的集电极电压^[7]为 0 V。此时 MOS 管 Q_1 的 G 端也是 0 V,

MOS 管处于截止状态,热电偶的正负极都产生 +5 V 的共模电压,此时电路属于热电偶信号采集阶段。热电偶信号采集等效示意如图 6 所示。

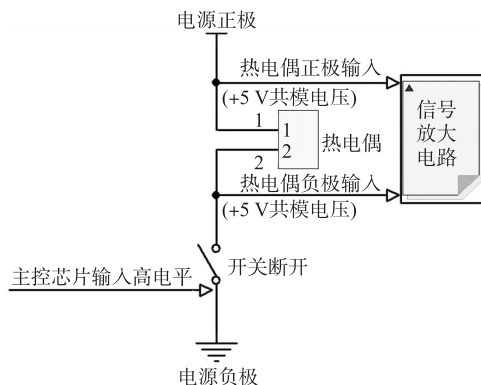


图 6 热电偶信号采集阶段等效示意图

2.2 热电偶的信号放大电路设计

信号放大电路的信号放大器采用的是 ADI 公司的 AD8221 仪表放大器芯片,此芯片价格低廉,性能优秀,低失调电压、低增益漂移、高增益精度以及高共模抑制比。此放大器仅通过一个外部电阻即可设置增益,增益范围为 1 至 1 000,其增益与电阻直接的公式如图 7 所示,其中 G 为增益, R_G 为增益电阻。

$$R_G = \frac{49.4k\Omega}{G-1}$$

图 7 AD8221 的增益公式

当热电偶转换电路为信号采集电路时,此时热电偶的正负极都有一个 +5 V 的共模电压,满足了放大器对输入偏置电压的设置。在此信号放大电路中,采用了差分放大电路,其有很好的电气对称性,对共模信号和噪声有很强的抑制作用,信号放大器所放大的信号为输入端正极的电压减去负极的电压^[8]。信号放大电路的示意图如图 8 所示。

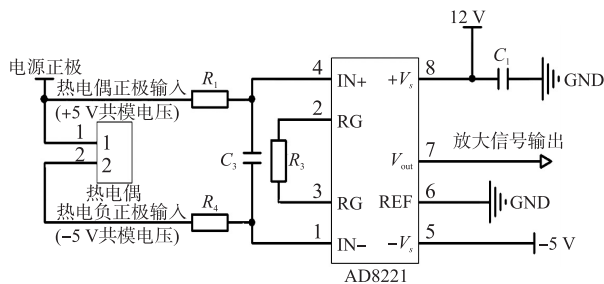


图 8 信号放大电路示意图

R_1 和 R_4 为输入限流电阻,防止输入电流过大,从而损坏仪表放大器芯片。 R_1 、 R_4 和 C_3 组成了 RC 低通滤波电路,可以有效地滤除高频噪声。 R_3 为增益电阻,电容 C_1 的作用是为了去除电源的高频噪声,

使得放大器正极电压更加稳定^[9]。基准电压引脚 REF 直接接到 GND, 放大后的信号最终从 7 脚输出。

2.3 AD 采集电路设计

经过放大后的热电势信号经过 ADC 采集电路最终由主控芯片自带的 ADC 采集得到, AD 采集电路示意图如图 9 所示。

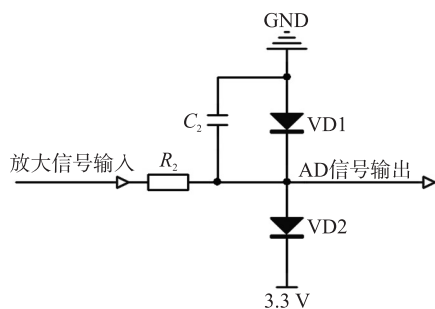


图 9 AD 采集电路示意图

AD 采集电路中, 电阻 R_2 有三个作用, 一是当作限流电阻, 防止输出电流过大烧坏主控芯片; 二是

与二极管 VD1 和 VD2 组成钳位电路, 防止放大器的输出电压过大而超过 ADC 采集电压的上限, 从而损坏主控芯片; 三是与电容 C_2 组成 RC 低通滤波电路, 滤除高频干扰, 使得 AD 输出电压更加的稳定^[10]。当热电偶转换电路属于加热电路时, 信号放大器的正极输入为 +5 V, 负极输入为 0 V, 这时候的差分输入电压不是热电偶的热电势信号, 属于异常信号, AD 采集电路的放大信号输入大于 5 V, 此时 VD1 截止, VD2 导通, 经过 R_2 电阻的分压, 以及利用二极管 VD2 的特性, 将最终的 AD 输出电压钳制在 3.5 V 左右。当放大电路的差分输入电压为负电压时, 若经过放大后的输出电压小于 -0.2 V, 则 VD1 导通, VD2 截止, 经过 R_2 电阻的分压后, 将最终的 AD 输出电压钳制在 -0.2 V 左右。通过此电路, 可以使得 AD 输出电压钳制在 -0.2 V 至 3.5 V 之间, 有效避免了输出电压过高或过低而损坏主控芯片^[11]。整个硬件电路设计总图如图 10 所示。

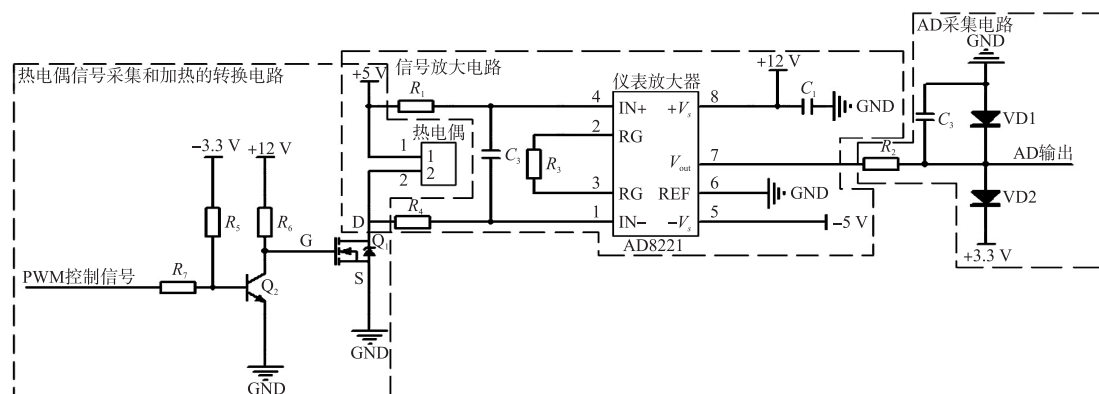


图 10 硬件电路设计总图

3 系统的软件设计

本文实验用的是 B 型热电偶, B 型热电偶最高短期工作温度可达 1 800 °C, 这就意味着有 1 800 个热电动势与其相对应, 如果要温度与电动势一一对应, 势必在算法编程上面增加很大的工作量, 同时热电偶的温度与热电势之间的关系是非线性的, 并且温度与热电势之间的关系是采用分度表体现的, 它无法准确地用数学式来表达, 也很难拟合出一个很好的函数表达式^[12]。为了解决这个问题, 同时保证结果的准确性, 本文采用了线性插值的方法, 其在 200 °C 以上输出精度达到了正负 1 度。我们将热电偶温度与热电势的离散点图绘制出来, 并且将离散点连接起来, 假设其是图 11 中 $\varphi(x)$ 的函数关系, 其中横坐标是温度, 纵坐标是热电动势。

我们定义 $x_0 \leq t_1 \leq t_2 \leq t_3 \leq \dots \leq t_n \leq x_1$, 其中 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ 称为插值节点, $n \leq 1\,800$ 。且已知道

$\varphi(t_1), \varphi(t_2), \varphi(t_3), \dots, \varphi(t_n)$ 的值, 这样我们就可以近似地把一条曲线看成 $n+1$ 条直线段了^[13]。把任意两相邻的点连接起来, 得到一条直线方程 $f(t)$, 如图 12 所示, $f(t)$ 可以近似地代替原函数 $\varphi(x)$ 。

我们已经知道了坐标 $A(t_0, f(t_0))$ 和坐标 $C(t_1, f(t_1))$, 假设 $B(t, f(t))$ 是经过直线上的一点, 而两点式的直线方程如下:

$$\frac{f(t)-f(t_0)}{f(t_1)-f(t_0)} = \frac{t-t_0}{t_1-t_0} \quad (1)$$

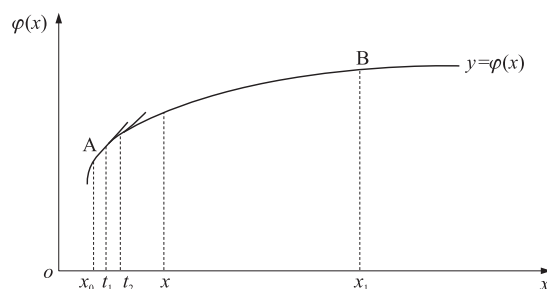


图 11 温度与热电势的函数关系

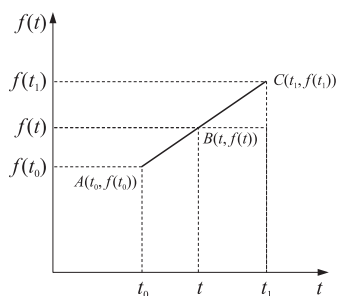


图 12 相邻两点之间的直线方程

上式经过变换之后可得:

$$f(t) = f(t_0) + \frac{f(t_1) - f(t_0)}{t_1 - t_0} (t - t_0) \quad (2)$$

通过线性插值法我们可以得到位于区间 $[t_{i-1}, t_i]$ 之间任意一点 t 的函数值 $f(t)$, 其公式如下:

$$f(t) = f(t_{i-1}) + \frac{f(t_i) - f(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}} (t - t_{i-1}) \quad (3)$$

对于数值表形式的线性插值法, 其公式为

$$T_{\text{emp}} = T(i-1) + \frac{T(i) - T(i-1)}{V(i) - V(i-1)} [V_{\text{Hot}} - V(i-1)] \quad (4)$$

式中: T_{emp} 为实际从热电势转换得到的温度值, $T(i)$ 是热电偶温度的数组集, $V(i)$ 是热电偶热电势的数组集, V_{Hot} 是实际采集到的热电势信号^[14]。

在实际编程中, 计算程序框图如图 13 所示。

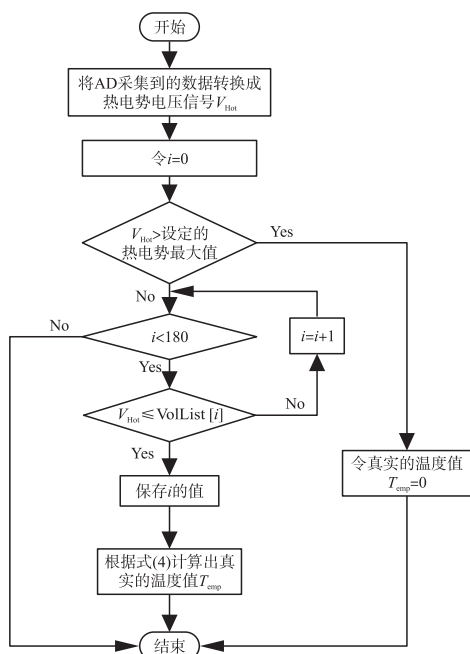


图 13 热电偶-温度转换计算框图

4 实验结果与分析

为了验证设备的有效性, 本文选取型号为 SIN-703 的手持式信号发生器当做信号源来验证测量温度的准确性, 以及进行真实实验对设备升温 and 降温

的功能性进行验证。

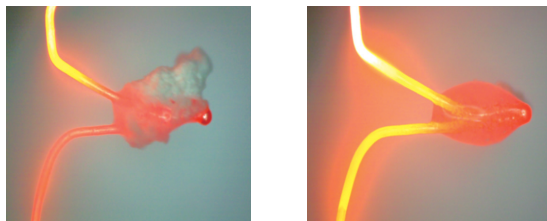


图 14 氯化钙融化图

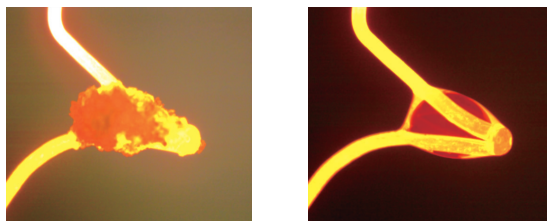


图 15 硫酸钾融化图

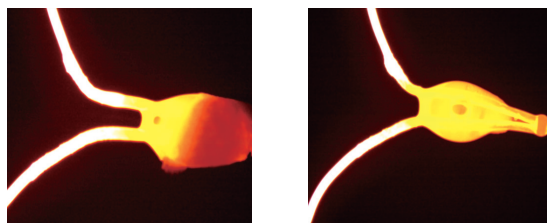


图 16 氟化钙融化图

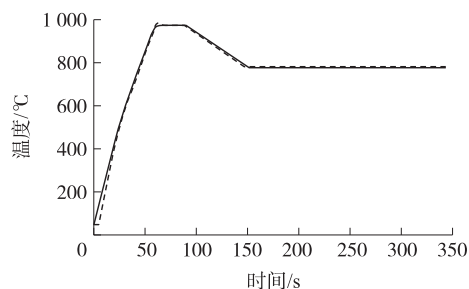


图 17 氯化钙升降温曲线图

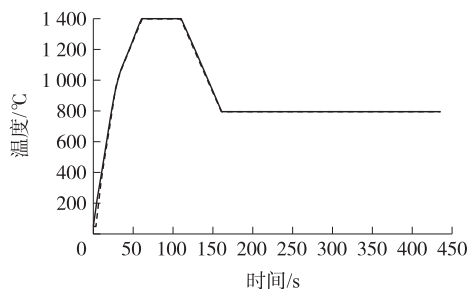


图 18 硫酸钾升降温曲线图

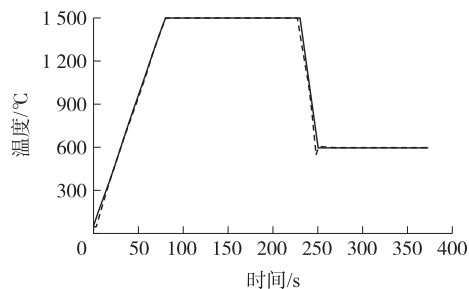


图 19 氟化钙升降温曲线图

表 1 实验测定结果

样品名称	第一次实验融点温度值/℃	第二次实验融点温度值/℃	第三次实验融点温度值/℃	升温速率/(℃/s)	降温速率/(℃/s)	平均熔点温度/℃	标准熔点温度/℃
氯化钙	775	780	773	14	3	776	782
	786	788	785	20	15	786	
	778	789	787	30	45	785	
氯化钾	1 065	1 062	1 064	14	3	1 064	1 067
	1 070	1 075	1 072	20	15	1 072	
	1 076	1 073	1 075	30	45	1 075	
氟化钙	1 418	1 415	1 420	14	3	1 418	1 423
	1 416	1 428	1 419	20	15	1 421	
	1 428	1 426	1 425	30	45	1 426	

为了验证温度测量的准确性,我们首先使用了信号发生器进行检验,在该设备上选择 B 型热电偶信号,然后输出不同的“温度值”即可以输出对应的热电势信号。我们从信号发生器上 200 ℃ 开始每隔 20 ℃ 输出一个热电势信号,直到 1 540 ℃ 为止,一共输出 68 个不同温度值对应的热电势信号。然后该信号经过图 13 的计算流程后,会将其转换成实际的温度值,我们记录最终转换的温度输出值,然后与相应的输入温度值做比较,计算温度的误差。热电偶各温度测量误差如图 20 所示,从中我们可以看到温度测量的最大误差在 8 ℃ 之内,大多数的温度测量误差在 6 ℃ 之内。

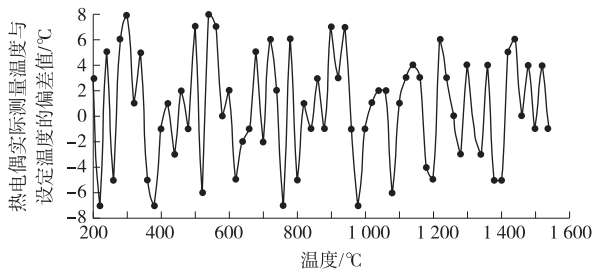


图 20 热电偶温度测量误差图

接下来我们进行真实的实验来验证,分别以不同的升温 and 降温速率对每类样品进行 3 次实验,图 14~图 16 展示的是三种样品在实验中的融化状态。实验所测得的数据如表 1 所示,从表中我们可以看到样品的平均熔点温度与标准熔点温度误差在 10 ℃ 之内。图 17~图 19 中,虚线是样品的实际温度,实线是样品的设定温度,在对样品进行实验的时候,样品的实际温度与设定温度之间几乎不存在超前与滞后的情况,各种速率下的样品升温 and 降温皆满足实验的要求。

5 结论

本文针对传统研究保护渣析晶过程的设备的价格昂贵和现有一些设备温度控制效果差的不足,提出

了一种利用热丝法设计的廉价高效的改良设备。该设备利用三极管和 MOS 管以及电阻设计了转换电路,因为转换周期很短的原因,可以看作热电偶信号采集和加热的工作是在同步进行。为了保证温度测量的准确性以及控温效果的稳定性,在硬件电路上加入了滤波,在算法上采用了软件滤波,最后通过信号发生器以及真实的实验验证了该设备的有效性。

参考文献:

[1] 陈永艳,李晓阳,徐金岩,等. 低碳钢板坯连铸结晶器用无氟保护渣的研制与应用[J]. 宽厚板,2019,25(05):26-29.

[2] 杨达朋. 稀土钢连铸保护渣的成分设计与性能研究[D]. 沈阳:东北大学,2015.

[3] 赵冬梅. 数字图像处理系统下位机设计[D]. 大连:大连海事大学,2012.

[4] 姜绍君. 热电偶测温电路的设计与仿真[J]. 电子测试,2019(15):36-37,73.

[5] 杨伟浩. 基于 PID 算法温度控制系统设计[J]. 数字技术与应用,2019,37(5):16-17.

[6] 孙晓丹. 余热锅炉控制系统上位机设计[D]. 合肥:合肥工业大学,2016.

[7] 方斌,张立,刘菊青. 基于单片机的恒温电锅炉控制系统[J]. 科技信息,2013(25):119-120.

[8] Bhopendra Singh, Abdhesh Kumar Singh, Raj Senani. A New Universal Biquad Filter Using Differential Difference Amplifiers Andits Practical Realization[J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2013, 75(2):293-297.

[9] 殷璐. 一种基于 ADS 的噪声优化的低噪声放大器设计[J]. 电子设计工程,2018,6(19):118-122.

[10] Dendouga A, Hafiane M L, Bouguechal N, et al. Analog Design-for-Testability Technique for First-Order Sigma Delta ADC[J]. Measurement, 2013, 46(9):3342-3346.

[11] He Tang. The Systematic Design for High Speed Interpolated/Averaging ADC[C]//2016 13th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT) Proceedings. IEEE Beijing Section(跨国电气电子工程师学会北京分会), 2016:1454-1457.

[12] 徐含青. 利用 EXCEL 对标准铂铑 30-铂铑 6 热电偶在高温段进行任意温度点的分度计算[J]. 计量与测试技术, 2013, 40

(9):36-37.

- [13] Emin Kahya. A New Unidimensional Search Method for Optimization: Linear Interpolation Method [J]. Applied Mathematics and Computation, 2005, 171(2): 912-925.



史 涛(1980—),男,汉族,河北定兴人,华北理工大学电气工程学院,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为类脑智能机器人、机器人视觉、生物启发的智能计算;



刘 方(1994—),男,汉族,安徽阜阳人,华北理工大学电气工程学院,在读硕士研究生,研究方向为机器人视觉,嵌入式系统。

- [14] Kalyan Shankar Bhattacharjee, Hemant Kumar Singh, Tapabrata Ray. An Approach to Generate Comprehensive Piecewise Linear Interpolation of Pareto Outcomes to Aid Decision Making [J]. Journal of Global Optimization, 2017, 68(1): 71-93.



任红格(1979—),女,汉族,河北正定人,华北理工大学电气工程学院,博士,副教授,硕士生导师。研究方向为认知发育机器人、生物启发的智能计算、自主学习理论与方法;