

# 检测熔池背面温度的电涡流传感器设计

廖平<sup>1</sup>, 杨文杰<sup>1</sup>, 李富金<sup>2</sup>

(1. 佳木斯大学, 黑龙江 佳木斯 154007; 2. 合江林业管理局, 黑龙江 佳木斯 154002)

**摘要:** 从电涡流传感器的测量原理出发, 研究了电涡流传感器检测熔池温度的基本原理。经过分析发现, 在焊接状态下, 熔池温度与传感器输出电压信号具有单值对应性。对传感器的电参数和结构参数进行了理论计算, 设计了带有冷却系统的电涡流传感器, 解决了传感器受热辐射影响的问题。采用步进式脉冲 TIG 焊焊接低碳钢时, 该传感器能够准确检测到熔池背面温度变化的电压信号, 为焊缝熔透控制提供了一种新的研究方法。该传感器的优点是采用非接触测量, 不受热辐射、弧光的干扰, 抗干扰性强, 结构简单, 成本低。

**关键词:** 电涡流传感器; 熔池背面温度; 检测

中图分类号: TG442 文献标识码: A 文章编号: 0253—360X(2002)04—57—04



廖平

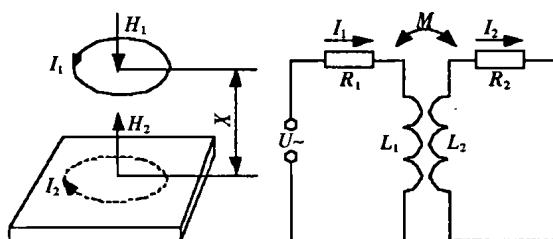
## 0 序言

在焊缝熔透控制的研究领域, 人们用检测熔池温度场来控制熔透的方法研究的比较多, 如红外检测法、CCD 摄像法等, 但是这些方法存在着传感器受弧光和热辐射干扰严重的问题, 影响检测信号准确地反映熔池的尺寸, 而且配套设备复杂, 成本很高。电涡流传感器利用电涡流效应可以把工件温度的变化转换成电量来测量, 它具有测量线性范围大, 结构简单, 抗干扰能力强的优点, 作者提出了利用电涡流传感器检测焊缝背面熔池温度的新方法。

## 1 电涡流传感器的测温原理

### 1.1 电涡流传感器的基本工作原理

电涡流传感器基本工作原理如图 1<sup>[1]</sup> 所示。



(a) Principle of electric eddy (b) Equivalent circuit

图 1 电涡流传感器工作原理图

Fig. 1 Principle diagram of electric eddy sensor

在图 1a 中, 把一个金属线圈置于金属导体附近, 线圈通过高频电流  $I_1$  激励时, 便产生一个高频交变磁场  $H_1$ , 它在导体表面产生了与此外加磁场相交链的电涡流  $I_2$ , 同时  $I_2$  产生一个交变磁场  $H_2$  阻碍外加磁场的变化。从能量角度来看, 在被测导体内存在着涡流的损耗和磁损耗, 从而使产生磁场的线圈阻抗发生变化, 引起线圈输出信号的变化, 把引起线圈阻抗变化的量转换成电量。

电涡流传感器可以简化为一同向连结的空心变压器, 其等效电路图如图 1b 所示, 图中左边回路是传感器线圈, 右边回路为被测导体中电涡流的等效电路。可以列出方程式

$$\begin{aligned} R_1 I_1 + j\omega L_1 I_1 - j\omega M I_2 &= U, \\ R_2 I_2 + j\omega L_2 I_2 - j\omega M I_1 &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $R_1$ 、 $L_1$  分别为线圈的电阻和电感;  $R_2$ 、 $L_2$  分别为金属导体中涡流的等效电阻和电感;  $U$  为线圈的激励电压;  $M$  为线圈与金属导体间的互感。

对方程组求解, 可得出被测金属引入时传感器的等效阻抗为

$$Z = \left\{ R_1 + R_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \right\} + j\omega \left\{ L_1 - L_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \right\}. \quad (2)$$

由上式可知被测参数  $R_2$ 、 $L_2$  的变化, 能引起线圈阻抗  $Z$  的变化。这样金属导体的电阻率  $\rho$ 、磁导率  $\mu$ 、线圈与金属导体的距离  $X$ 、线圈激励电流的角频率  $\omega$  等参数, 都将通过涡流效应和磁效应与线圈阻抗发生联系, 用函数形式可表示为

$$Z = f(\rho, \mu, \omega, X) .$$

如果将式中的三个参数保持为常量, 那么线圈阻抗就成为某一个参数的单值函数。

## 1.2 电涡流传感器的测温原理

使用电涡流传感器测量温度, 是利用导体的电阻率随温度而变化的性质。当  $\mu, \omega, X$  一定时,  $Z$  就成为  $\rho$  的单值函数。但是与阻抗  $Z$  有关的四个参数中  $\rho$  和  $\mu$  均为温度的函数, 所以要考虑这两个参数随温度变化时对阻抗  $Z$  的影响。

### 1.2.1 温度对材料电阻率的影响

导体的电阻率与温度的关系是比较复杂的, 许多金属材料物理特性的数据在高温下, 特别是接近金属熔化状态时还是空白, 但是金属及其合金的电阻率随温度而变化, 温度越高, 其电阻率越大, 金属在熔化为液态时, 其电阻率是固态时的 2 倍左右。在金属的德拜温度与其熔点间的温度范围内, 电阻率与温度呈正比关系<sup>[2]</sup>, 其关系式可以表示为

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha t), \quad (3)$$

式中:  $\rho_t$  为温度  $t$  时的电阻率;  $\rho_0$  为温度 0 °C 时的电阻率;  $\alpha$  为电阻温度系数。

文中研究低碳钢的导电性是在焊接高温下进行的, 而铁的德拜温度仅为 470 K, 所以低碳钢的电阻率按正比于温度的线性变化规律, 应用式(3)即可。

### 1.2.2 温度对材料磁导率的影响

电涡流传感器的线圈阻抗与金属材料的磁导率  $\mu$  有关, 当材料的温度发生变化时,  $\mu$  值也发生变化, 即  $\mu$  为温度的函数。在温度超过金属的居里点后, 其磁导率降为零<sup>[3]</sup>。而电涡流传感器所检测范围内的低碳钢温度高于其居里点(铁的居里点为 770 °C), 所以在焊接过程中材料的磁导率与温度无关, 即  $\mu$  对线圈阻抗不会有影响。从能量损耗角度来看, 在高频时电涡流损耗值远大于磁损耗值, 由于电涡流传感器的交变电流频率很高(1 MHz 左右), 只需考虑电涡流损耗即可。

从以上分析可知, 在焊接高温下, 电涡流传感器线圈的阻抗与低碳钢的磁导率无关, 当  $X, \omega$  一定时, 阻抗  $Z$  只与材料的温度有关系, 当温度变化时, 通过测量电路把  $Z$  变换为相应的电压信号, 达到温度转换成电量的目的。这样就为检测材料表面温度提供了可靠的理论依据。

由于磁性材料的温度系数比非磁性材料的大, 从而决定了磁性材料的电阻率要比非磁性材料的电阻率变化大, 因此用电涡流传感器测温主要适合于测量铁磁性材料的温度。

## 2 电涡流传感器参数的选择

### 2.1 电涡流传感器线圈结构参数的确定

电涡流传感器一般为扁平线圈, 其结构示意图如图 2 所示。在距线圈轴向某处的磁感应强度与线圈的尺寸参数( $r_1, r_2, b$ )有关系, 线圈外径在轴向磁场的分布范围, 对磁感应强度变化梯度的影响较大, 而对  $r_1, b$  的影响较小。线圈外径越大, 线性范围将越大, 但灵敏度要降低。线性范围约是线圈外径的  $1/3 \sim 1/5$ 。线圈内径和厚度的变化只在靠近线圈处对灵敏度稍有影响<sup>[4]</sup>。

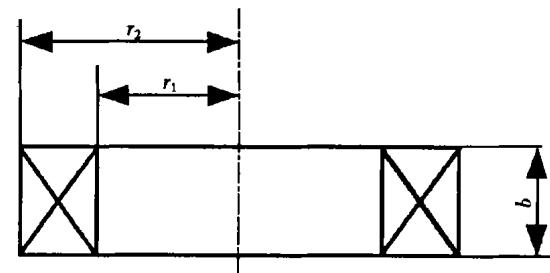


图 2 电涡流传感器线圈结构示意图

Fig. 2 Scheme of coil construction of electric eddy sensor

$r_1$ —inner radius of coil;  $r_2$ —outer radius of coil;

$b$ —thickness of coil

由于使用电涡流传感器检测温度时距工件有一定距离(约 4 mm), 所以线圈内径和厚度对线性范围基本上没有影响。传感器的线性范围应在 6 mm 左右比较合适, 根据传感器线性范围与线圈外径的关系, 线圈外径应为 18 mm 才能满足线性范围的要求, 线圈内径取 8 mm。

### 2.2 电涡流传感器电参数的确定

电涡流传感器是由电感线圈与测量电路组成的, 根据电涡流传感器的使用要求, 选用线性范围大, 灵敏度较好, 稳定性好的恒定频率调幅式电涡流传感器, 该电路的特点是把与传感器线圈相等效的电感  $L$  和一个固定电容  $C$  相并联, 组成并联谐振电路, 由频率稳定的石英振荡器提供高频激励信号。在没有金属导体的情况下使电路的  $LC$  谐振回路的谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} . \quad (4)$$

等于振荡器的振荡频率, 这时  $LC$  回路呈现阻抗最大, 输出电压的幅值最大。当有金属导体靠近线圈时, 线圈的等效电感发生变化, 谐振回路的谐振频率和等效阻抗发生变化, 使谐振回路失谐,  $LC$  回路阻抗的降低导致输出电压幅值下降<sup>[5]</sup>。

#### 2.2.1 传感器线圈电感 $L$ 的确定

由已知条件石英振荡器的振荡频率  $f = 1 \text{ MHz}$ , 谐振电容  $C = 22.4 \text{ pF}$ , 把参数代入式(4)得

$$L = 1.18 \text{ mH}.$$

### 2.2.2 线圈匝数 $N$ 的确定

线圈采用直径为  $\phi 0.5 \text{ mm}$  的高强度漆包线绕制, 由矩形截面的扁平圆线圈电感计算公式

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} N^2 d\varphi, \quad (5)$$

式中:  $N$  为电感线圈匝数;  $d$  为线圈平均直径;  $\varphi$  为磁通量, 由文献[6]中的图表查得 ( $\varphi = 8.8$ )。将参数带入式(5)求出  $N = 57$ 。由线圈匝数确定线圈的轴向厚度  $b = 3 \text{ mm}$ 。

## 3 电涡流传感器的结构设计

传感器是在高温下检测工件表面的电阻率变化, 焊接时的工件表面温度高, 热辐射强, 很容易将线圈的绝缘漆烧坏。另外, 温度变化时, 会使线圈的电阻发生变化, 从而引起线圈阻抗的变化, 导致输出电压随温度变化而发生漂移。只有保持线圈阻抗的稳定性, 使之不受温度变化的影响, 才能保证测量的准确性和稳定性。因此传感器必须有冷却措施, 防止高温、热辐射对线圈电阻的影响。

### 3.1 传感器的结构设计

根据传感器的结构参数、电参数和冷却要求, 设计了有冷却系统的电涡流传感器, 其结构如图3所示。

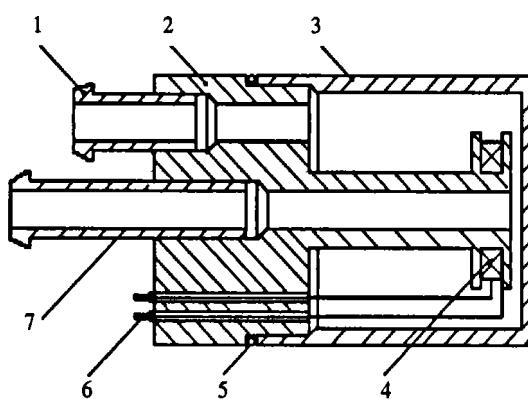


图3 电涡流传感器结构图

Fig. 3 Construction map of electric eddy sensor

1—Outlet of liquid; 2—Hermetic cover; 3—Crust; 4—Coil;  
5—Hermetic loop; 6—Conjunctional post; 7—Inlet of liquid

线圈框架和壳体选用损耗小, 介电性能好, 膨胀系数小的材料, 以提高灵敏度, 减小误差。传感器组装完后测量其电感值为  $1.16 \text{ mH}$ , 与理论计算值基本吻合。

### 3.2 冷却液的选择

传感器的线圈完全浸在冷却液中, 冷却介质的电性能对传感器的输出有很大影响。用水作冷却液时, 传感器输出电压的下降幅度为 87% 左右, 主要原因是线圈产生的磁场在水中产生很大的涡流损耗, 导致传感器检测的灵敏度很低。因此必须选用绝缘性能良好的介质作冷却液, 试验证明, 采用变压器油作冷却液时, 其产生的涡流损耗极小, 对传感器输出电压基本上没有影响。

## 4 试验与分析

在传感器装配完后进行了标定, 传感器输出电压与工件之间的距离具有良好的线性度, 线性范围在  $0 \sim 7 \text{ mm}$  之间; 传感器的输出电压和温度之间的关系如图4所示。

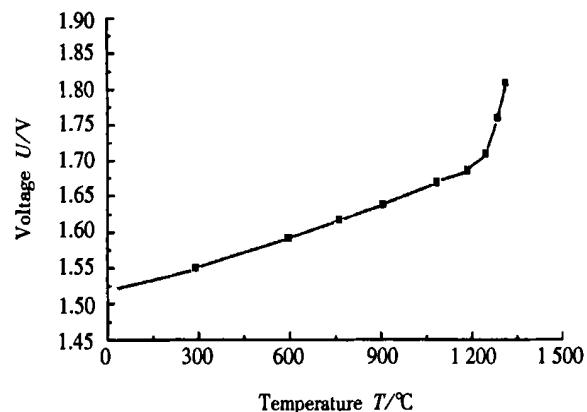


图4 电涡流传感器输出电压与温度的关系

Fig. 4 Relationship between output voltage of electric eddy sensor and temperature

从测得的参数和焊缝背面的熔透情况可以看出, 在焊缝背面熔化前传感器的输出电压与温度基本上呈线性变化的, 从焊缝背面出现熔化开始输出电压迅速上升, 这与传感器的检测位置和金属的电阻率有关。传感器以焊枪的钨极为参考点, 位于焊缝背面的熔池前部并使电涡流环经过熔池, 其检测的是一个圆环内金属的电阻率变化, 即反映的是一个平均温度, 由熔池温度场分布的特点, 圆环内的电阻可以看作是阻值不同的电阻串联成的若干个圆环的电阻组成, 当焊缝背面熔化时, 电涡流要经过一个较大的电阻, 产生很大的涡流损耗, 在输出电压上则反映为电压的迅速上升。

采用步进式脉冲 TIG 焊, 对  $2 \text{ mm}$  厚低碳钢板进行了平板焊接试验, 脉冲电流  $I_m = 80 \text{ A}$ , 基值电流  $I_j = 8 \text{ A}$ , 步距为  $2.9 \text{ mm}$ 。用传感器检测钢板背面的

熔池温度, 图 5 为采用计算机控制时, 传感器检测到的随熔池温度变化的电压信号。为直观反映熔池温度上升与电压信号上升一致(实际上熔池温度上升时, 输出电压信号下降), 在检测电路中设置了比较电压, 并对检测信号进行差动放大处理。曲线上升时为  $I_m=80\text{ A}$  的固定焊接过程, 熔池的温度逐渐上升; 曲线下降时为一个步距行走过程, 仅有  $I_j=8\text{ A}$  的维弧电流, 熔池的温度逐渐下降。

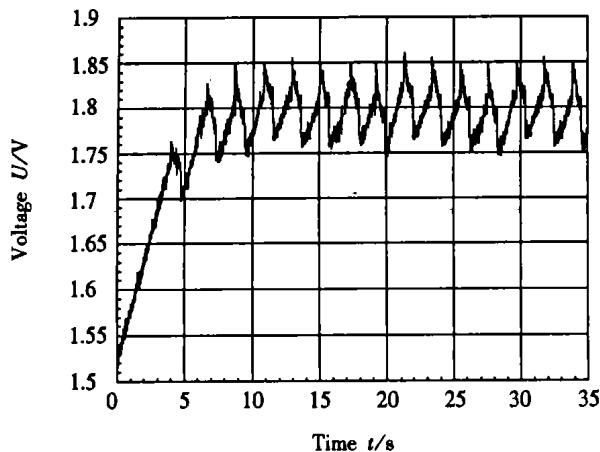


图 5 电涡流传感器的采样波形

Fig 5 Sampling waveform of electric eddy sensor

从采样波形可以看出, 第一个焊点反映的熔透时的电压信号与传感器的标定情况相吻合。在后面的各个焊点中, 由于工件的热输入量逐渐增加, 传感器检测到的平均温度也在增加, 焊点熔透时电压的突变起始值相应地增加了, 当工件达到热稳态后, 反映焊点完全熔透的电压信号趋于稳定, 此时相对应的平均温度约为  $1345^{\circ}\text{C}$  左右。

## 5 结 论

(1) 电涡流传感器能够检测到熔池及其周围的温度变化, 且输出信号稳定、可靠、反应灵敏, 加入冷却系统后, 传感器可以防止高温、热辐射对电感线圈电阻的影响, 使传感器具有很强的抗干扰能力。

(2) 利用电涡流传感器检测背面熔池的表面温度, 以及金属由固态变为液态时电阻率变化很大的特点, 在焊缝背面完全熔透时, 可以检测到突变的电压信号, 从而获得了一个有效的焊缝熔透信息, 可以用来控制焊缝的熔透。

## 参考文献:

- [1] 严钟豪, 谭祖根. 非电量电测技术[ M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [2] 徐祖耀. 金属材料热力学[ M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [3] 宋学孟. 金属物理性能分析[ M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [4] 谭祖根, 陈守川. 电涡流传感器的基本原理分析与参数选择[ J]. 仪器仪表学报, 1980, 1(1): 113~122.
- [5] 汪乐宇. 电涡流传感器的最优化设计法[ J]. 仪器仪表学报, 1983, 4(2): 147~152.
- [6] 卡兰塔罗夫 II JI, 采伊特林 JI A. 电感计算手册[ M]. 陈汤铭译. 北京: 机械工业出版社, 1992.

**作者简介:** 廖平, 男, 1965年1月出生, 工学硕士, 副教授。主要从事焊接设备及弧焊质量控制方面的研究, 发表论文 10 余篇。

**Email:** wuxd@public.hljmppt.net.cn