

# 铝硅合金变质效果涡流检测时传感器的阻抗分离研究

曾 辉<sup>1</sup>, 王小增<sup>1</sup>, 吴江萍<sup>2</sup>

(1. 广东嘉应学院 电子信息工程系, 梅州 514015; 2. 广东嘉应学院 电教中心, 梅州 514015)

**摘 要:**根据活塞合金 ZL108 的变质质量与材料电导率呈单调函数关系的规律, 利用电涡流原理检测 ZL108 的变质质量。研究应用移相、混频和滤波技术将电涡流传感器阻抗中的电阻分量和电感分量分离出来。设计的测量电路使传感器信号一方面与电源信号混频, 另一方面与移相  $\pi/2$  的电源信号混频, 并从前者获得电涡流传感器阻抗中的电阻分量, 从后者中获得电感分量。最终确定根据电涡流传感器电阻的改变获得 ZL108 合金的变质信息, 消除了电感分量的影响, 提高了测量的准确性。

**关键词:** 涡流检测; 传感器; 变质质量; 阻抗分量分离

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2008)02-0097-03

## Research of Impedance Separation of the Probe of Eddy Current Testing for the Metamorphic Quality of Alloy ZL108

ZENG Hui<sup>1</sup>, WANG Xiao-Zeng<sup>1</sup>, WU Jiang-Ping<sup>2</sup>

(1. Department of Electronics and Information Engineering, Guangdong Jiaying College, Meizhou 514015, China;

2. Audio-Visual Education Center, Guangdong Jiaying College, Meizhou 514015, China)

**Abstract:** According to the monotone function relations laws between the metamorphic quality of piston alloy ZL108 and the material conductivity, eddy current testing was used to test the metamorphic quality. The research was proceeded by applying phase shifters, mixing, filtering technology to separate the resistance and inductance component from the signal tested by eddy current testing sensor. The circuit was designed to mix the sensor signal to power signal, so as to separate the impedance component; and also mix the sensor signal to  $\pi/2$  phase shifter signal, so as to separate inductance component. Finally it was determined to use the resistance component to get the metamorphic quality information, thus eliminating the impact of inductance components and improved the measuring accuracy.

**Keywords:** Eddy current testing; Sensor; Metamorphic quality; Impedance component separation

涡流方法可检测铝硅合金变质质量<sup>[1]</sup>。该方法基于铝硅合金的变质质量与材料电导率呈单调函数关系<sup>[2]</sup>, 利用涡流传感器的信号变化来反映铝硅合金的变质质量<sup>[3]</sup>。信号中包含线圈电阻分量和电感分量。若两个分量都存在正增量, 则输出的信号误差小; 若两个分量一正一负, 则存在向量相减的问题。因此电阻和电感值直接影响检测结果的准确性。

### 1 电涡流传感器参数

设传感器的等效阻抗为  $Z$ , 可得<sup>[4]</sup>:

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

$$(R_1 + \Delta R) + j\omega(L_1 + \Delta L) = R_{eq} + j\omega L_{eq} \quad (1)$$

式中  $R_1, L_1$ ——传感器线圈的交流电阻和电感;

$R_2, L_2$ ——试样等效电阻和电感;

$M$ ——线圈与试样之间的互感;

$\omega$ ——线圈激励电流角频率;

$R_{eq}$ ——线圈受电涡流影响后的等效电阻;

收稿日期: 2007-03-15

作者简介: 曾 辉(1956—), 男, 教授, 硕士, 研究方向为材料性能无损检测。

$L_{eq}$ ——线圈受电涡流影响后的等效电感。

由式(1)可知,受电涡流影响后,传感器线圈的电阻增大,电感减小。当  $R_{eq}$  在增大时,  $L_{eq}$  在减小,但是其向量和有可能并未改变,这必将影响测量的准确性。因此有必要对受电涡流影响后的传感器线圈的电阻和电感分别作详细计算<sup>[5]</sup>。

### 1.1 传感器线圈的交流电阻 $R_1$

$$R_1 = 1 + \frac{X^4}{3} \quad (2)$$

$$X = \frac{d}{4b} \quad b = 5000(\rho/\mu f)^{1/2}$$

式中  $b$ ——涡流穿透深度;

$d$ ——线圈线径;

$\rho$ ——试样密度;

$\mu$ ——试样磁导率;

$f$ ——电源频率。

### 1.2 试样等效电阻 $R_2$ <sup>[6]</sup>

$$R_2 = \frac{2\pi}{\sigma b \ln \frac{r_2^2}{r_1^2}} \quad (3)$$

式中  $\sigma$ ——试样电导率;

$r_2$ ——涡流环外径;

$r_2 = 1.38 \times$  线圈外径;

$r_1$ ——涡流环内径;

$r_1 = 0.88 \times$  线圈外径;

### 1.3 传感器线圈的电感 $L_1$ <sup>[6]</sup>

$$L_1 = \frac{W^2 D_3}{0.0369 + \frac{0.14b}{D_3} + \frac{0.124B}{D_3}} \times 10^{-9} \text{ (H)} \quad (4)$$

式中  $W$ ——线圈匝数;

$D_3$ ——涡流环平均直径;

$D_3 = 2 \times 1.13 \times$  线圈外径;

$B$ ——涡流径向宽度;

$B = 0.5 \times$  线圈外径。

### 1.4 试样等效电感 $L_2$

$L_2$  的计算与  $L_1$  相同,视  $W=1$ 。

### 1.5 互感 $M$

$$M = \frac{W}{6[\sum M_i - 2M_9]} \quad i = 1 \sim 8 \quad (5)$$

式中  $M_i = \mu(L_1 L_2)^{1/2}[(\frac{2}{K} - K)K - (\frac{2}{K})E]$ ;

$$K = \int_0^{3.14/2} (1 - k^2 \sin^2 \alpha)^{-1/2} d\alpha;$$

$$k^2 = \frac{4L_1 L_2}{(L_1 + L_2)^2 + d^2};$$

$$E = \int_0^{3.14/2} (1 - k^2 \sin^2 \alpha)^{1/2} d\alpha。$$

试验中参数  $d = 0.21 \text{ mm}$ ,  $f = 400 \text{ Hz}$ ,  $\mu = 1$ ,  $W = 1000$ , 线圈外径  $25 \text{ mm}$ , 变质前后试样电阻率分别为  $0.059 \times 10^{-4}$  和  $0.045 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 。代入式(2)~(5)求解,结果见表1。

表1 各参数值对照表

| 电阻率<br>/ $\Omega \cdot \text{cm}$ | $R_1$<br>/ $\Omega$ | $R_2$ /<br>$\times 10^{-3} \Omega$ | $L_1$ /<br>$\times 10^{-3} \text{ H}$ | $L_2$ /<br>$\times 10^{-8} \text{ H}$ | $M$ /<br>$\times 10^{-5} \text{ H}$ |
|-----------------------------------|---------------------|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 0.059                             | 76                  | 1.36                               | 1.88                                  | 2.24                                  | 1.96                                |
| 0.045                             | 76                  | 1.19                               | 1.88                                  | 2.65                                  | 1.96                                |

从式(1)可见,  $R_2$  和  $\omega L_2$  都有相同的因子  $\omega^2 M^2 / [R_2^2 + (\omega L_2)^2]$ , 所以变化后的  $R_2$  和  $\omega L_2$  的数值比较具有十分重要的意义。

从表1数据可知,  $R_2 = 1.19 \times 10^{-3} \Omega$  时,  $L_2 = 2.65 \times 10^{-8} \text{ H}$ 。当电阻率从  $0.045$  变为  $0.059$  时,  $R_2 = 1.36 \times 10^{-3} \Omega$ ,  $L_2 = 2.24 \times 10^{-8} \text{ H}$ ,  $\Delta R_2 = 0.17 \times 10^{-3} \Omega$ ;  $\Delta L_2 = -0.41 \times 10^{-8} \text{ H}$ 。若希望以测量试样的电阻变化为主,则  $\Delta L_2$  的反向变化必须减小到可以忽略的程度,应有  $\omega \Delta L_2 / \Delta R_2 = K$ ,  $K$  值视检测的准确性要求而定。由研究数据可得  $K = 0.06$ , 其含义是当  $\Delta R_2$  对信号作水平正增量时,  $\omega \Delta L_2$  对信号产生相当于  $6\%(\Delta R_2)$  垂直负增量。传感器输出的参数以电阻的改变为主时,检测频率越低,负增量越小。

## 2 传感器阻抗的电阻和电感分量分离

由以上分析得出,传感器检测时,以测电阻量变化为目的的传感器输出信号,电感量的改变是对检测准确性的干扰,将干扰减轻的方法是降低检测频率;反之,以测电感量变化为目的的传感器输出信号,电阻量的改变是对检测准确性的干扰,将干扰减轻的方法是提高检测频率。因此在以下两种状态下,传感器的应用受到限制:其一是有的材料要求采用较高的频率测电阻的变化;另一种是要求采用较低的频率测电感的变化。设计一种新型电路将传感器的电阻和电感分量进行分离,就可以完全避免这种矛盾状况。

### 2.1 阻抗分离电路

应用移相、混频和滤波技术的阻抗分离电路见图1,传感器的阻抗  $Z_x = R_x + jX_x$ 。图1运放中的跟随器、鉴相器1和2均由乘法器和滤波器组成。计算可得传感器的输出电压向量  $U_1$  为:

$$U_1 = \frac{(R_x + jX_x)U_s}{R_b + R_x + jX_x}$$

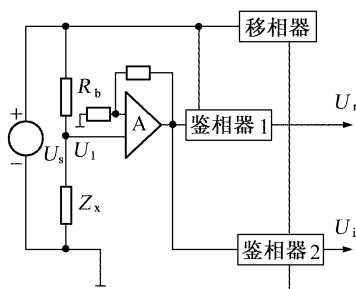


图1 阻抗分离电路原理图

设  $R_b \geq 10|R_x + jX_x|$ , 可得:

$$U_1 = \frac{R_x}{R_b} U_s + j \frac{X_x}{R_b} U_s = U_{1r} + U_{1i}$$

式中  $U_{1r}$  和  $U_{1i}$  分别为  $U_1$  的实部和虚部。

设  $u_s$  是交流电源电压瞬时值,  $u_s = U_s \cos \omega t$ , 则:

$$u_{1r} = U_{1r} \cos \omega t$$

$$u_{1i} = U_{1i} \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

$$u_1 = u_{1r} + u_{1i} = U_{1r} \cos \omega t + U_{1i} \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

将电源电压  $u_s$  和传感器输出  $u_1$  两信号送鉴相器 1, 低通滤波器滤掉  $2\omega$  高频信号, 仅输出直流值  $u_r = (1/2)K_r U_{1r} U_s$ , 所以鉴相器 1 的输出信号为  $u_r$ , 可得:

$$u_r \propto U_{1r} \propto \frac{R_x}{R_b} U_s \propto R_x$$

将电源电压  $u_s$  移相  $\pi/2$ , 和传感器输出信号  $u_1$  一起送鉴相器 2, 低通滤波器滤掉  $2\omega$  高频信号, 仅输出直流值  $u_i = (1/2)k_i U_{1i} U_s$ , 所以鉴相器 2 的输出信号为  $u_i$ , 可得:

$$u_i \propto U_{1i} \propto \frac{X_x}{R_b} U_s \propto X_x$$

当需要测量传感器电阻的变化时, 后续电路接鉴相器 1 的输出信号, 该信号中无电感分量; 当需要测量传感器电感的变化时, 后续电路接鉴相器 2 的输出信号, 该信号中无电阻分量。

## 2.2 阻抗分离电路的计算

将表 1 所列各值代入式(1), 测量频率为 715 Hz 时, 计算得到电阻率为  $0.059 \Omega \cdot \text{cm}$  时, 可得:

$$R_{eq} = (R_1 + \Delta R) = 76 + 5.675$$

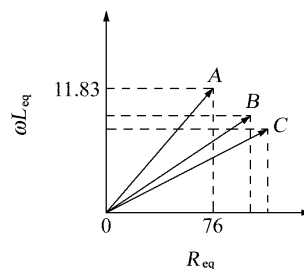
$$\omega L_{eq} = \omega(L_1 + \Delta L) = 16.913 - 0.421$$

电阻率为  $0.045 \Omega \cdot \text{cm}$  时, 可得:

$$R_{eq} = (R_1 + \Delta R) = 76 + 6.493$$

$$\omega L_{eq} = \omega(L_1 + \Delta L) = 16.913 - 0.651$$

传感器阻抗  $R_{eq}$  和  $\omega L_{eq}$  示意图见图 2。



$$OA = 76 + j11.83$$

$$OB = (76 + 5.675) + j(16.913 - 0.421)$$

$$OC = (76 + 6.493) + j(16.913 - 0.651)$$

图2 传感器阻抗  $R_{eq}$  和  $\omega L_{eq}$  向量示意图

取向量模计算,  $|OC| - |OB| = 0.738$ , 而两向量各自在横轴上的投影之差为 0.808, 以  $\Delta R$  作为测量判据可以增加信号值 10%。从传感器阻抗  $R_{eq}$  和  $\omega L_{eq}$  向量图中, C 点沿纵轴下降的幅度大于沿横轴增加的幅度, 导致  $|OC| - |OB|$  的值趋于零, 使取向量的模时检测分辨能力变差。因此取  $R_{eq}$  的值作为检测判据较之更准确。

## 3 结论

(1) 电涡流传感器在检测产品时, 线圈电阻增大, 线圈感抗减小, 使传感器的输出信号被削弱, 影响检测的准确性。

(2) 应用移相、混频和滤波技术可将涡流传感器阻抗中的电阻分量和电感分量分离出来, 最终根据电涡流传感器电阻的改变得到所需信息, 消除了电感分量的干扰。

## 参考文献:

- [1] 曾 辉. 涡流法判断铝硅合金活塞变质效果的方法[J]. 内燃机工程, 2000, 21(3): 50-53.
- [2] Mulazmoglu M H, Gruzleski J E. Electrical conductivity in aluminum possible alternative to thermal analysis[J]. Modern Casting, 1990, (1): 29-31.
- [3] Oswalt K J, Misra M S. Dendrite arm spacing(DAS): a nondestructive test to evaluate tensile preproperties of premium quality aluminum alloy (Al-Si-Mg) casting[J]. AFS Transaction, 1990, 88: 845-862.
- [4] 郁有文, 常 健. 传感器原理及工程应用[M]. 西安: 电子科技大学出版社, 2000: 60-61.
- [5] 谭祖根. 电涡流检测技术[M]. 北京: 原子能出版社, 1986: 49-60.
- [6] 曾 辉. 电涡流检测活塞铸件变质效果的方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2001: 12-13.