

# 非铁磁性金属薄层涡流测厚法

李长青<sup>1)</sup>, Yaron Danon

(复合材料学院 航空航天与核工程 机械系)

**摘要:**采用涡流方法弥补超声法检测厚度 $<1$  mm的薄层非铁磁性金属的不足。推导了涡流线圈感抗简化公式,试验测量了厚度 $25\sim 250\ \mu\text{m}$ 的铝和 $25\sim 500\ \mu\text{m}$ 的不锈钢,得出了其厚度与幅值的关系曲线,理论计算与实验结果吻合较好。最后根据简化公式进行了理论仿真。研究表明,涡流方法适合测量导电率低的薄层金属厚度,选用合适的低频,增加铁心或考虑相位信息与脱离的关系后,该方法可有效监控非铁磁性金属薄层的厚度变化。

**关键词:**涡流检测;非铁磁性金属;厚度测量;仿真

中图分类号: TG115.28 文献标识码: A 文章编号: 1000-6656(2005)09-0-0

## Thickness Measurements for Non-magnetic Metals by Eddy Current Testing

LI Chang-qin, Yaron Danon

(Department of Mechanical, Aerospace and Nuclear Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy NY 12180, USA)

**Abstract:** A simplified formula of eddy current coil inductance was derived for the application of eddy current testing method to the thickness measurement of nonferrous metal sheets of less than 1mm in thickness which is not possible to be measured by the ultrasonic testing method. The proposed eddy current testing method was used in the testing of aluminium sheets with thickness from  $25\sim 250\ \mu\text{m}$  and stainless steel sheets with thickness from  $25\sim 500\ \mu\text{m}$ , and curves showing the relationship between thickness and amplitude were given. Results obtained by this method were found to be in good consistency to the theoretically calculated values. Theoretical simulation was carried out by the simplified formula proposed. It was concluded that the eddy current testing method is suitable to be used for the measurement of thickness of metal sheets with low conductivity, and is also feasible to be used effectively in the monitoring of variation of thickness of nonferrous metal sheets by choosing suitable frequency, using of iron core or considering the relationship of phase and lift-off distance.

**Keywords:** Eddy current testing; Non-magnetic metal; Thickness measurement; Simulation

涡流技术是一种成熟的镀层厚度测量技术,可以用来测量金属表面的非金属层(如表面漆)的厚度,也可以用来测量镀在铁磁性金属物质表面的非铁磁性金属镀层的厚度(例如镀在铁磁性不锈钢 SST4340 的表面上的钛)<sup>[1]</sup>。金属表面的非金属层厚度的测量应用的是涡流的提高效应;测量镀在铁磁性金属物质表面的非铁磁性金属镀层的厚度应用的是磁感应技术。对应这两种技术,市场上已经有很多的商用产品。但是对于测量单层金属厚度的仪器,现在成型的商用产品非常少。这是因为,对于一

般的金属和非金属,超声波法测量范围为 $1\sim 200$  mm,测量精度非常好,所以,超声波法在单边厚度测量上是一种广泛应用的技术。但是,这种方法也有其缺陷,① 超声波法通常是一种接触式的测量方法,测量过程中需要耦合剂。② 很难测量厚度 $<1$  mm的金属薄层。在此,笔者详细讨论了应用涡流法测量厚度 $<1$  mm的非铁磁性金属。选用的铝薄层的厚度为 $25\sim 250\ \mu\text{m}$ ,不锈钢 SST304 的厚度为 $25\sim 500\ \mu\text{m}$ ,并进行了理论仿真。

## 1 理论

金属薄层涡流测厚实验装置见图 1。对于非铁

收稿日期:2004-10-08

1) E-mail: cqlee2182@yahoo.com

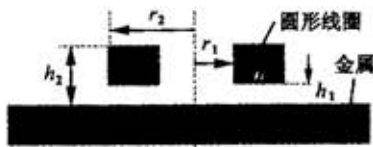


图1 金属薄板涡流测厚装置示意图

$r_1, r_2$ ——线圈内、外径  $n$ ——线圈的匝数  
 $h_1, h_2$ ——线圈的底部和顶部到金属薄板上的距离  
 $\sigma$ ——金属薄层的电导率  $d$ ——金属薄层的厚度

磁性金属,磁导率  $\mu = \mu_0$ ,应用文献[2]和[3]的理论,经过简化和推导,可得图1中的通电线圈的感抗  $Z$  为

$$Z = K j \omega \int_0^\infty \frac{I^2(\alpha, r_1, r_2)}{\alpha^5} \{2(h_2 - h_1) + \frac{1}{\alpha} [2e^{-\alpha(h_2-h_1)} - 2 + A(\alpha)\phi(\alpha)]\} d\alpha \quad (1)$$

式中  $K$ ——和线圈特性有关的参量

$$K = \frac{\pi \mu_0 n^2}{(h_2 - h_1)^2 (r_2 - r_1)^2}$$

$\mu_0$ ——真空的磁导率

$\omega$ ——角频率

$$\omega = 2\pi f$$

$f$ ——激励电流频率, Hz

$$I(\alpha, r_1, r_2) = \int_{r_1}^{r_2} x J_1(x) dx$$

$$A(\alpha) = (e^{-\alpha h_1} - e^{-\alpha h_2})^2$$

$\alpha$ ——解偏微方程时出现的分离常数

$$\phi(\alpha) = \frac{(\mu\alpha + \mu_0\alpha_p)(\mu\alpha - \mu_0\alpha_p)(e^{2\alpha d} - 1)}{(\mu\alpha + \mu_0\alpha_p)^2 \cdot e^{2\alpha d} - (\mu\alpha - \mu_0\alpha_p)^2}$$

$J_1(x)$ ——阶第一类 Bessel 函数

$$\alpha_p = \sqrt{\alpha^2 + j\omega\mu\sigma}$$

$\mu$ ——磁导率, H/m

$\sigma$ ——金属电导率, S

以上结果也可从麦克斯韦方程组直接推导得出。

## 2 实验装置

实验设计见文献[4],差分系统结构见图2。采

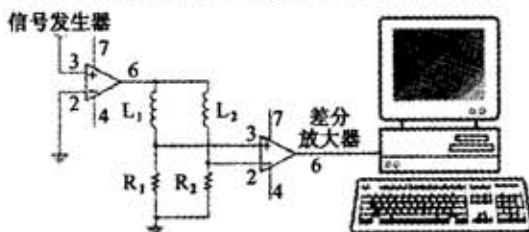


图2 差分系统示意图

用一个 Tabor-8024 信号发生器作为信号源,电阻  $R_1$  和  $R_2$  都是  $100\Omega$ ,根据实际情况用运放设计合适的差分放大器,其放大的信号被送到一个内置在 PC 机内的 14 位 A/D 卡(CompuScope 14100)上。

图2所示驱动器的内阻  $< 1\Omega$ ,用以驱动整个系统并用正弦信号来激励系统。

通常情况下,线圈探头的设计和选择对于系统十分重要,实验所用探头 A 和 B 的线圈是手工绕制的,两个探头的参数见表1。线圈 A 被放置在铝的薄层上;线圈 B 作为参考线圈被放置在空气中。

表1 线圈 A 和 B 的参数

探头	$n$ /匝	$r_1$ /mm	$r_2$ /mm	$(h_2-h_1)$ /mm	电阻 $R_c/\Omega$
A	280	2.75	5.75	2.02	10.02
B	282	2.75	5.72	2.03	10.17

## 3 实验结果

已知金属铝的电导率是  $37 \text{ MS/m}$ , 不锈钢 SST304 的电导率是  $1.45 \text{ MS/m}$ , 提高距离保持在  $0.5 \text{ mm}$ ,图3是 A/D 采集软件进行厚度测量的屏幕显示。

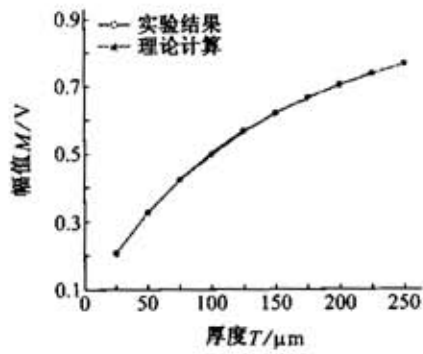


图3 A/D采集软件的测厚波形

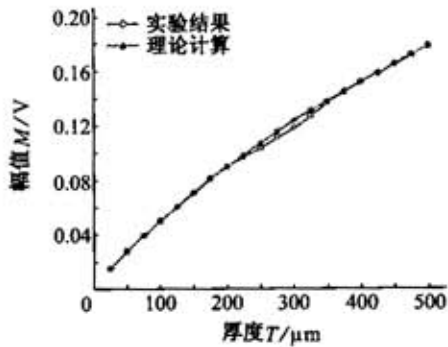
A/D 采集卡得到的数据经过分析处理后,得到的结果见图4。

图4a可见理论计算和实验结果很吻合。图4a中响应信号的幅值和铝层的厚度不呈线性关系,这可以用集肤效应来解释。更多的涡流集中在金属薄层的表面,所以表面部分对线圈的阻抗影响也最大;随着金属层厚度的增加,增加的部分中涡流的密度减小,对线圈的阻抗影响也随之减小,反映在测量结果上就是响应信号的幅值变化也较小。如果想解决这个问题,必须让涡流能穿透相对厚一些的金属层,由渗透深度  $\delta$  可知

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$



(a) 铝



(b) 不锈钢 SST304

图4 在 10 KHz 时实验和理论测厚值

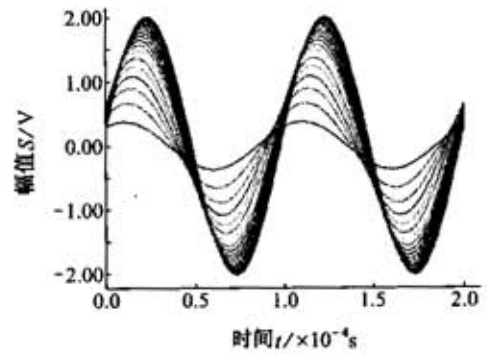
因此如果要增加涡流的穿透能力,必须使用更低的频率。

不锈钢 SST304 的测量结果和理论计算见图 4b,可见,理论计算和实验数据总体吻合很好,只是在 250~325  $\mu\text{m}$  段出现了测量误差,这是因为在 10 kHz 下,铝的集肤厚度是 800  $\mu\text{m}$ ,而 SST304 是 4 125  $\mu\text{m}$ ,铝的响应信号的幅度和测量的厚度是非线性关系,而 SST304 接近线性关系。

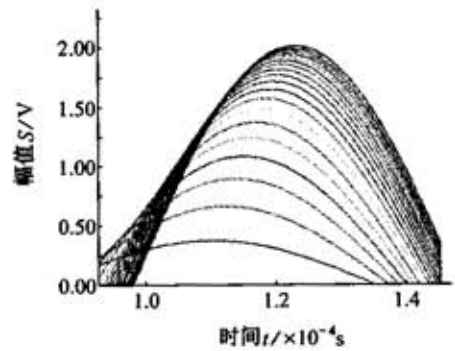
图 4 显示的定标曲线可以存储在计算机中,作为测量数据用来推算金属薄层的厚度。在有了很好的定标曲线后,待测金属的厚度就可以推导出来。

#### 4 理论仿真和讨论

既然理论计算和实验结果吻合很好,于是设计用理论计算仿真来预测一些实验室无法进行的实验(由于线圈探头的限制)。采用数学计算软件包 MATHCAD 进行理论仿真(式(1)为 MATHCAD 计算所得),MATHCAD 中的计算结果拷贝到画图软件 ORIGIN 中。该仿真使用了两个 100 $\Omega$  的电阻和较大的线圈,线圈内径  $r_1 = 4 \text{ mm}$ ,外径  $r_2 = 8 \text{ mm}$ , $h_1 = 0.5 \text{ mm}$ , $h_2 = 4.5 \text{ mm}$ , $n = 500$  匝,仿真结果如图 5。

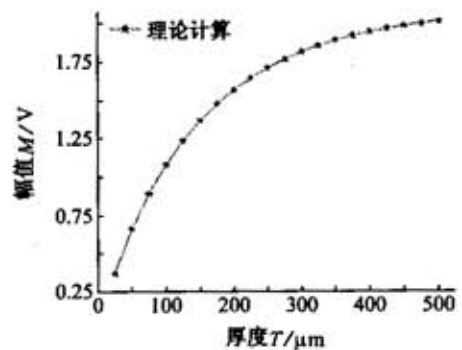


(a) 仿真实验

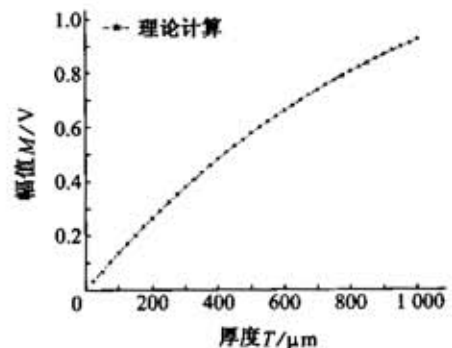


(b) 图 5a 的部分放大

图 5 25~500  $\mu\text{m}$  铝薄层的仿真实验



(a) 10 kHz 时



(b) 500 Hz 时

图 6 响应信号的幅值随铝薄层的厚度变化曲线

图 5a 不仅给出了响应信号的幅值变化,也得到

了信号的相位变化。从图 5b 的放大部分来看,其左下方显示的是 25, 50, 75, 100 和 125  $\mu\text{m}$  等厚度的测量,响应信号的幅值见图 6a。图 6a 可见,从 25~250  $\mu\text{m}$  间信号幅值变化较大,但随着厚度的增加,信号幅值变化越来越小,对此可以通过以下方法来解决。

(1) 采用更低的 500 Hz 频率,铝的集肤厚度增大到 3 660  $\mu\text{m}$ ,即可测量更深的厚度。

(2) 采用铁心线圈,增加磁场密度,即可以增加信噪比,测量厚的金属薄层。

(3) 分析相位信息,以得到高的灵敏度和分辨率,减少提高距离变化带来的影响。

需要注意的是,铝的导电率是 37 MS/m,比大部分其它金属(除银,铜和金等)要高很多,所以铝是一种较难测量的金属,说明涡流法更适合导电率低的金属。

为了说明降低频率的效果,采用 500 Hz 频率,  $r_1=6\text{ mm}$ ,  $r_2=12\text{ mm}$ ,  $h_1=0.5\text{ mm}$ ,  $h_2=6.5\text{ mm}$  和  $n=1\ 500$  匝进行仿真计算(图 6b),可见响应信号的幅度和测量厚度几乎呈线性关系。

## 5 结论

理论计算和实验结果证明,应用涡流法测量金属薄层的厚度是可行的,简化计算是合理和正确的。

该方法适合导电率低的金属,低频测量有很好的应用前景。在 25  $\mu\text{m}$  的量级上,涡流法有很高的灵敏度和分辨率,其最大测量厚度可达 1 000  $\mu\text{m}$ ,甚至 2 000  $\mu\text{m}$ ,可以弥补超声测厚在此段上的不足。

实验中假设被测金属表面是光滑的,测量厚度时,提高距离是固定的,而实际应用中,这些条件很难完全满足,难免带来误差,可分析相位信息来减少提高距离变化带来的影响。

虽然涡流法不能测量非金属厚度,也很难测量厚度  $>2\text{ mm}$  的金属板,但该方法对薄层金属的均匀性监测非常重要,当考虑单边测量时有很大优势。

## 参考文献:

- [1] 李喜孟. [J]. 无损检测, 2001, (5): 80-81.
- [2] Dodd CV, Weeds WE. Analytical solution to eddy-current probe-coil problems[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 1968, (5): 2829-2838.
- [3] 雷银照. 时谐电磁场解析方法[J]. , 2000, (9): 178-194.
- [4] Yaron Danon, Changqing Lee, Chris Mulligan, et al. Characterizing tantalum sputtered coating on steel by using eddy currents[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 2004, 40(4): 1826-1832.