

## 电磁超声换能器金属缺陷探测有限元仿真研究\*

钦峰 谢国利

(湖州市特种设备检测研究院 湖州 313000)

**摘要:** 分析了电磁超声换能器(electromagnetic acoustic transducer, EMAT)超声波发生、接受过程及导体缺陷检测的原理,然后基于电磁学理论和有限元技术,建立了一个可用于导体内部缺陷探测的二维 EMAT 有限元模型。通过细分单元网格技术和理论与仿真结果对照验证了模型的准确性。最后仿真结果表明:仿真模型可以检测出铝和钢铁两种材质板中不同位置的内部缺陷,且对铝材质内部的缺陷探测更加有效。

**关键词:** EMAT;横波;有限元;缺陷探测;仿真模型

**中图分类号:** TB55    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510. 1040

## FE simulation study on detecting steel defects using EMAT

Qin Feng Xie Guoli

(Huzhou Special Equipment Inspection Research Institute, Huzhou 313000, China)

**Abstract:** The processes of generation, reception of ultra acoustic wave of EMAT and principle of detecting defect in conductive material were presented in this paper. Then a FEA model of 2D EMAT was set up to detect the internal defects in conductive material based on the electromagnetics theory and finite element method. The accuracy of FEA model was verified by refining mesh elements and result comparison between theoretical calculation and simulation. In the last, simulation result comparisons indicate that the 2D EMAT model can be applied to detect internal defects in aluminum and steel plates, and compared to the steel plate, detecting effect for aluminum plates is more efficient.

**Keywords:** EMAT; transverse wave; finite element; defect detecting; simulation model

## 1 引言

无损检测(NDT)是一种最常见的且广泛用于材料缺陷检验的有效方法,能够为材料的生产、加工、检验等过程决策提供有用的测试信息。无损检测技术不需要破坏或改变测试对象,它即可节省测试加工成本,也可减少产品评估和故障诊断的时间。根据材料和缺陷的类型,多种类型的无损检测测试程序可满足任何类型的测试需求,当前主流的无损检测技术包括射线法、涡流探伤、磁粉探伤、目测法、超声波测试和电磁超声换能器(electromagnetic acoustic transducer, EMAT)<sup>[1]</sup>。超声波检测的缺点是需要一个耦合介质传输超声波进入材料,当材料表面由于生锈、材料高温或则位置的影响可能导致无法进入,且传递能量也会造成不小的损失。

为了研究 EMAT 检测过程的多物理场之间的耦合关系和分布规律,当前有限元及有限差分方法是用来评估 EMAT 和优化设计的最常见数值方法。国内外也有不少

研究成果报道了 EMAT 的数值仿真模型和技术进展。如任晓可等人<sup>[2]</sup>基于 ANSYS 仿真模型比较了缺陷对被测导体表面的磁流密度、磁感应强度和涡流等的影响;王淑娟<sup>[3]</sup>结合铝板测厚的 FEA 分析和正交试验设计方法确定了 EMAT 的设计准则,并依次对线圈和永磁体进行了优化设计;杨声践等人<sup>[4-5]</sup>利用 ANSYS 仿真确定了电磁超声横波在铝板中的传播形状与方向,之后研究了铝板传播中兰姆波模态的产生依据及与激励频率的关系,为电磁超声兰姆波检测仪器研制提供依据;刘素贞<sup>[6]</sup>仿真分析了 EMAT 换能过程中的电场、磁场、力场的分布规律,并通过电磁结构耦合建立了声场模型,获得了表面波在被测导体中的辐射声场分布和指向性规律;焦敬品等人<sup>[7]</sup>通过检测试验表明基于小波变换奇异点提取的电磁超声技术可以很好地实现薄液体厚度测量,解决了传统超声反射回波方法时间分辨率低,难以实现薄层厚度测量以及压电换能器测量结果受界面耦合性能影响问题;杜云朋等人<sup>[8]</sup>利用回波信号和噪声的小波变换模极大值在不同尺度上传播特性的差异,采

收稿日期:2015-11

\* 基金项目:湖州市科技计划项目(2014GY01)资助

用小波变换模极大值的去噪算法,对超声导波回波信号进行去噪处理。Kaltenbacher等人<sup>[9]</sup>基于有限元及有限差分方法来测试非铁磁材料,研究了薄板中超声导波的生成和接收过程;Mirkhani等人<sup>[10]</sup>基于实验和数值分析方法研究了EMAT发射器,并对EMAT传感装置作出了多目标优化设计;Thomas等人<sup>[11-13]</sup>系统研究了EMAT的电磁-机械耦合机制、超声横波传播的时域分析、非铁磁性材料的表面缺陷检测方法。本文建立准确的仿真模型探索EMAT检测试件内部缺陷的工作机理,通过质点位移幅值来检测铝和钢铁两种导电性材料中的表面缺陷,并比较检测效果。

## 2 电磁超声换能器工作原理

### 2.1 电磁超声波发射过程<sup>[4]</sup>

EMAT是一种电磁超声换能器,由永磁体或电磁铁、螺旋线圈和被测导电试件组成,内部结构如图1所示。磁铁产生静态磁场,磁场方向垂直向下,而螺旋线圈通以高压脉冲交流电激励形成交变电场,被测导体则是形成和传播超声波的载体。当螺旋线圈放置在磁铁下方,靠近被测导体表面,所需的超声波频率被外部交流电激发出来,从而在被测导体表面趋肤层感应出涡流,由于涡流是带电粒子流,所以涡流中的带电粒子在静态磁场作用下产生洛伦兹力,在电场的交变作用下,带电粒子所受的洛伦兹力方向不断发生改变,从而使得带电粒子在被测导体中发生高频横向振动,从而在被测导体表面形成一个波源,波源处粒子的振动不断向外传递,进而形成向外传播的超声横波。

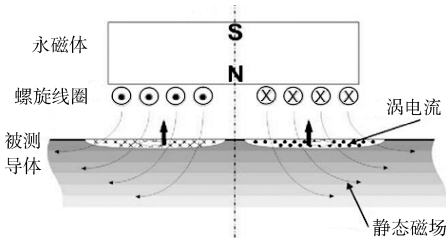


图1 EMAT结构示意图

图1详细描述了电磁超声波的发射过程,利用电磁学理论可以将这一过程用数学公式描述为:

$$B_{jc} = \nabla \times A \quad (1)$$

$$E_e = -\frac{\partial A}{\partial t} \quad (2)$$

$$J_e = \gamma E_e \quad (3)$$

$$F_l = J_e \times (B_{jc} + B_s) \quad (4)$$

式中: $B_{jc}$ 是激励电流在被测导体中产生磁场的磁感应强度; $\nabla$ 哈密顿算子; $A$ 是磁矢势; $E_e$ 是涡旋电场强度; $\gamma$ 被测导体电导率; $J_e$ 涡流密度; $B_s$ 是永久磁铁提供的磁场强度; $F_l$ 是洛伦兹力。式(4)表明洛伦兹力与线圈产生的涡流以及涡流区域的磁场强度成正比,增强涡流及其分布区

域内的磁场强度均可提高EMAT的换能效率。

### 2.2 电磁超声波接收过程

电磁超声波接收过程是其发射过程的逆过程。被测导体中涡流中的带电粒子受到洛伦兹力的作用发生位移,从而产生时变电流,其电流密度是:

$$J = \xi(v \times B) \quad (5)$$

式中: $\xi$ 是被测导体磁导率; $v$ 是被测导体中带电微粒的移动速度; $B$ 是永磁铁产生的磁感应强度。当该电流移动到接收螺旋线圈下方时,接受螺旋线圈内会感生出电流,从而使螺旋线圈中产生压降。

### 2.3 缺陷探测原理

电磁超声波发射过程中,螺旋线圈中通有高频交变电流,交变电流在空气中和铝板中产生与电磁超声波发射频率一致的交变磁场,并进而而在被测导体表面趋肤深度内感生出与螺旋线圈电流方向相反、频率相同的涡流。如果在空间内施加一个静磁场,交变的涡流会受到洛伦兹力作用,被测试件表面就会产生周期性的质点振动和弹性形变。这种振动能量以波的形式在试件内传播出去,这就完成了电磁超声波的发射过程。在电磁超声波接收过程中,电磁超声波遇到机械界面发生机械波的发射,发射回波行进到电磁超声换能器下方时,质点振动会切割静磁场,在试件内引发感应电动势和涡流,并导致换能器附件的磁场发生变化;接受线圈处于变化的磁场中时,会在螺旋线圈内感生出电压,通过检测该电压就可获得被测导体试件内部缺陷的回波信息<sup>[6]</sup>。

## 3 数值仿真

### 3.1 FEA模型和准确性验证

EMAT工作过程通常分为两个阶段:EMAT产生洛伦兹力的电场-磁场-力场的能量转换和洛伦兹力作用激发超声波的能量转换。本文研究的EMAT结构如图1所示,它有6个具有相同截面高度 $a$ 和宽度 $b$ 的矩形螺旋线圈, $d$ 是线圈间距, $h$ 是螺旋线圈和被测导体之间的提高距离。瞬态线圈激励电流 $i_k(t)$ 按如下形式给定:

$$i_k(t) = \begin{cases} (-1)^k I_0 [1 - \cos(\omega_0 t/n)] \cos(\omega_0 t) & , 0 \leq t \leq (2n\pi)/\omega_0 \\ 0 & , t \geq (2n\pi)/\omega_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $I_0$ 是电流振幅; $\omega_0 = 2\pi f_0$ 是角频率; $n$ 是脉冲循环数。参数值分别是 $f_0 = 500$  kHz, $n = 2$ , $I_0 = 100$  A, $B_s = 1.0$  T, $a = 0.1$  mm, $b = 0.5$  mm, $d = 0.5$  mm, $h = 1.0$  mm。整体网格划分采用二阶三角形单元,被测导体表面深度0.1mm周边区域内进行了网格细化,局部放大图如图2所示,同时时间步长、相对容限和绝对容限也调整到更精确计算的最适值。

为验证数值仿真方法准确性,首先通过减小三角形网

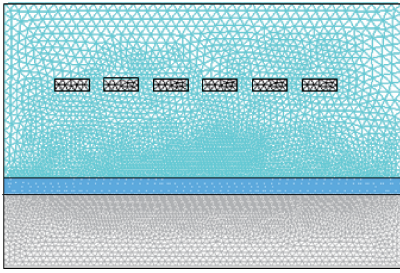


图 2 被测导体表面皮肤层的细化网格局部放大图

格单元尺寸确定位移的收敛性,它可以确保其它所有物理变量的收敛性。探测器放置在线圈下面的被测导体表面探测质点的机械位移,划分的二阶三角形单元总数从 1 110 个细化到 10 072 个,且时间步长  $\Delta t$  设为  $0.01 \mu\text{s}$ 。图 3 所示的质点机械位移结果表明单元数达到 3 000 个时,位移达到收敛。其次,数值方法的准确性还通过减少时间步的大小来测试验证。虽然当单元数量超过 3 000 个以上就足以获得准确的结果,但仍选用了含有 7 519 个网格的细化模型,探测器仍放置在同一个位置,因此综合考虑所有仿真模型的收敛性分析获得的结果,最终选用了含有 7 519 个网格,时间步长为  $0.01 \mu\text{s}$  的模型用于本次数值仿真分析研究。

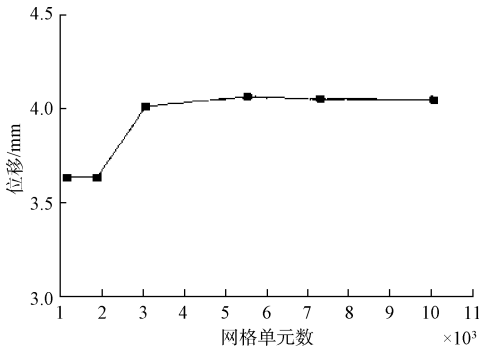


图 3 质点位移与网格单元数的关系

### 3.2 数据处理

探测器放置在第 4 个螺旋线圈下方,从 EMAT 结构的左边记录仿真过程中所有提取数据的时变量。考虑应用于螺旋线圈的外部源电流和被测导体材料中的静磁场,通过完全方程可求解计算出被测导体中的感应电流。图 4 所示的结果是在被测导体的皮肤表面深度为  $0.119 \text{ mm}$  处的感应电流变化曲线。在感应电流出现的同一位置通过探测器检测到洛伦兹力拥有相同的波形,这是一个预期的结果,同样验证了仿真模型的准确性,因为洛伦兹力取决于感应电流,如式(3)所示。

随后研究了随着提高距离  $h$  的改变,EMAT 的检测效能变化。研究发现洛伦兹力一个关于提高距离  $h$  的非线性函数。当提高距离是从  $1.0 \text{ mm}$  减少到  $0.1 \text{ mm}$  的过程中,材料表面层中洛伦兹力可提升至原来的 16 倍,这一结果与

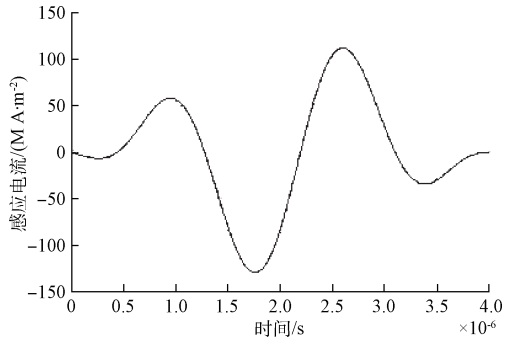


图 4 表面皮肤层的感应电流变化曲线

文献所描述的结果非常吻合。当提高距离  $h=1.0 \text{ mm}$  时,获得的洛伦兹力密度约为  $120 \text{ MN/m}^3$ ,而当  $h=0.1 \text{ mm}$  的洛伦兹力密度约为  $2 000 \text{ MN/m}^3$ 。如图 5 所示。

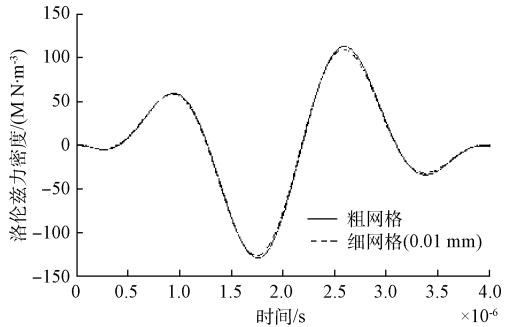


图 5 表面皮肤层的洛伦兹力密度变化曲线

### 3.3 仿真结果讨论

在收敛性和数据提取测试成功之后,在上述模型基础上建立了用于研究两种材料(铝和钢)的缺陷检测的仿真模型。其中,铝的材料属性如下:密度为  $2 700 \text{ kg/m}^3$ ,泊松比为  $0.33$ ,杨氏模量  $70 \text{ GPa}$  和电导率为  $37.7 \text{ MS/m}$ 。EMAT 换能器放置在距离被测导体表面  $0.1 \text{ mm}$  处。如图 6 所示的结果是含缺陷的铝测试样件中的应力分布。图 6(a)中的第一个实例显示了  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  的缺口被放置在换能器前面,在与被测导体的其它大部分相比,可以看出缺陷周围的应力相当高,这是因为电磁超声波传导过来接触到缺陷的四壁,被反射回来恰好产生了波形振动叠加,导致位移幅度增大,从而使得缺陷周围产生了更高的应力集中。图 6(b)~(d)显示了模型检测铝材质其它位置的缺陷仿真结果。

接下来是测试该仿真模型是否有能力检测钢铁材料中相同大小的缺陷。钢铁材料属性:钢密度  $7 850 \text{ kg/m}^3$ ,泊松比为  $0.33$ ,杨氏模量为  $200 \text{ GPa}$ ,电导率为  $4.0 \text{ MS/m}$ ,数值仿真模型的其他参数设置与铝质模型相同。四个仿真应力分布结果分别绘制在图 7(a)~(d)中,显然该模型也能够检测钢铁材料中的缺陷。图 7 所示的结果与图 6(a)的结果吻合得非常好,都是缺陷四壁反射机械波的情况。类

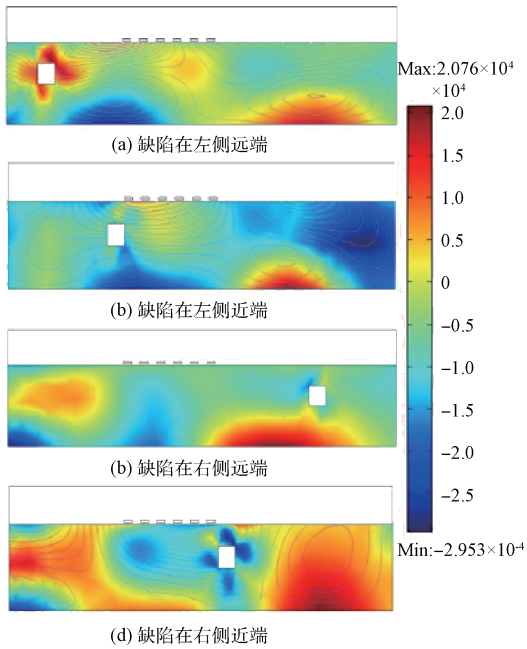


图 6 缺陷在铝板不同位置的仿真应力分布

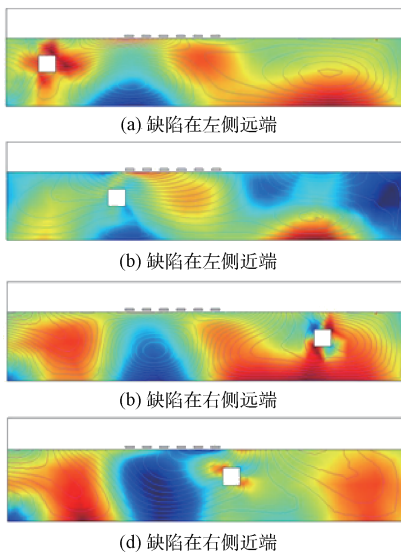


图 7 缺陷在钢板不同位置的仿真应力分布

似的应力仿真结果同样显于图 7(b)~(d), 最大应力区同样在被测导体材料中的缺陷周围。

### 3.4 EMAT 检测效率比较

上述仿真结果表明数值模型可以检测钢质和铝质板材中的缺陷之后, 接下来需要比较 EMAT 换能器探测板内的缺陷方法对于哪种材料更有效率。重新设计检测如下两个工况: 第一个是在缺陷设置在板的左侧, 如图 7(a)所示, 即距电磁超声发射器几 mm 处的左侧远端; 而第二个工况是将缺陷设置在电磁超声发射机的右侧远端如图 7(c)所示。这两种仿真工况下分析发射器和接收器周边的应力和位移

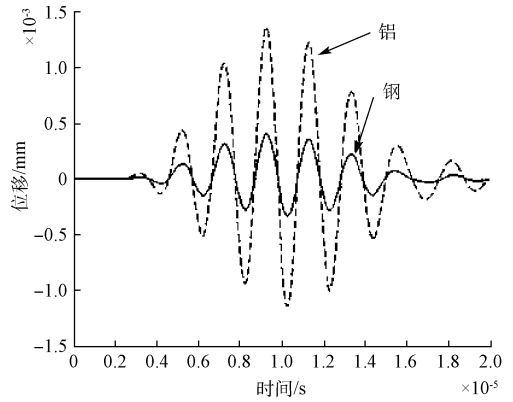


图 8 两种材质中发射器周边位移对比

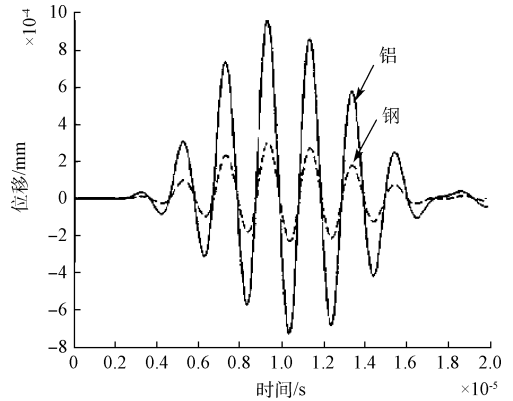


图 9 两种材质中接收器周边位移对比

分布, 并将位移结果绘于图 8 和 9 中。结果表明: 相对于钢材质板而言, 铝板缺陷检测过程中具有更高的位移值, 这是由于钢材料具有更低电导率和更高磁导率所致<sup>[14]</sup>, 这就证明了 EMAT 对铝板的缺陷检测比钢质板材更有效。

## 4 结 论

本文分析了电磁超声换能器的缺陷检测工作原理以及 EMAT 电磁和机械之间的耦合关系, 并建立了一个稳定可靠的有限元模型, 它可用于研究电磁超声换能器对导电材料的缺陷检测, 但计算量更大的三维仿真模型有待进一步深入研究。

EMAT 耦合的数值仿真模型成功检测了两种导电金属材料(钢和铝)的内部缺陷, 同时分析了缺陷在不同位置时对表面质点机械位移和被测导体内部应力分布的影响。仿真结果表明: 与钢材料相比, EMAT 换能器对铝材料的缺陷检测时的机械位移幅值更大, 效果更好。

## 参考文献

- [1] 敬人可, 李建增, 周海林. 超声无损检测技术的研究进展[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(7): 28-30.
- [2] 任晓可, 李健. 电磁超声无损检测的 ANSYS 仿真研究[J]. 电子测量技术, 2008, 31(7): 26-28.

- [3] 王淑娟, 康磊, 李智超, 等. 电磁超声换能器三维有限元分析及优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 123-128.
- [4] 杨理践, 臧慧, 高松巍. 电磁超声换能器在金属板厚检测中的优化[J]. 沈阳工业大学学报, 2013, 35(5): 535-540.
- [5] 杨理践, 邹金津, 邢燕好. 电磁超声兰姆波在铝板传播中的模态识别[J]. 仪器仪表学报, 2015, 35(4): 909-916.
- [6] 刘素贞, 张闯, 金亮, 等. 电磁超声换能器的三维有限元分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 7-12.
- [7] 焦敬品, 于兆卿, 刘文华. 基于小波变换的薄层厚度电磁超声测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(3): 588-595.
- [8] 杜云朋, 王建斌, 靳小强. 超声导波管道检测的小波模极大值去噪法[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(7): 683-687.
- [9] KALTENBACHER M, ETTINGER K, LERCH R, et al. Finite element analysis of coupled electromagnetic acoustic systems [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35(3): 1610-1613.
- [10] MIRKHANI R K, CHRIS C, MASTERSON C, et al. Optimal design of EMAT transmitters [J]. NDT&E International, 2004, 37(3): 181-193.
- [11] THOMAS S, OBAYYA S, TANJA R, et al. A coupled electromagnetic and mechanical analysis of electromagnetic acoustic transducers [J]. International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics, 2009, 10(2): 124-133.
- [12] THOMAS S, OBAYYA S, PINTO D, et al. Time domain analysis of ultrasonic wave propagation using an electromagnetic acoustic transducer [J]. Sensors & Transducers Journal, 2009, 108(9): 102-115.
- [13] THOMAS S, OBAYYA S, PINTO D, et al. Surface defect detection in non ferromagnetic material using an electromagnetic acoustic transducer [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2009, 12(12): 121-136.
- [14] RIBICHINI R., CEGLA F, NAGY P B, et al. Experimental and numerical evaluation of electromagnetic acoustic transducer performance on steel materials [J]. NDT&E International, 2012, 45(1): 32-38.

### 作者简介

钦峰(通讯作者), 在读研究生, 工程师, 主要研究方向为承压设备无损检测和数值仿真技术。

E-mail: generalqin@zju.edu.cn

谢国利, 大学本科, 高级工程师, 主要研究方向为承压设备新型检验检测技术。

E-mail: hztjxgl@163.com