

# 电磁超声换能器设计性能评价\*

钦峰 谢国利 阮利程 施沈科 钱建新

(湖州市特种设备检测研究院 湖州 313000)

**摘要:** 阐述了电磁超声换能器(EMAT)超声波激发机理、极化过程超声波振幅解析解和换能效率数学表达式。建立了EMAT实物模型,对不同几何形状的励磁线圈、电磁感应强度和提离距离等影响因子设计了多组基于回波幅度对比试验。然后基于测试试验结果,分析了核心功能组件设计对EMAT测试性能的影响,并比较了不同材质的测试效率和EMAT适用范围。试验结果表明:功能组件组合和参数因子优化设计可有效改善EMAT测试性能,这为EMAT最优性能设计和工程测试解决方案提供基础技术参考。

**关键词:** EMAT; 声波振幅; 换能效率; 验证试验; 性能设计

**中图分类号:** TN712+.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1040

## Evaluation of performance designs on EMAT

Qin Feng Xie Guoli Ruan Licheng Shi Shenke Qian Jianxin

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

**Abstract:** It described the mechanism of ultrasonic wave excitation in EMAT (electromagnet acoustic transducer), mathematical expressions of oscillation amplitude solution of ultrasonic wave in polarisation process and transduction efficiency. EMAT physical prototypes were established and multiple comparative tests based on echo magnitude were designed to investigate influence factors including excitation coils with different geometry, electromagnetic induction intensity and lift-off distance. Then, based on the test results, the corresponding influences of core functional component design on EMAT test performance were analyzed, and the test efficiency and EMAT application range in different materials were compared. Test results show that the assembly of functional components and optimization of parameter factors can improve the test performance of EMAT, which provides the basic technical reference for EMAT optimal performance design and engineering test solution.

**Keywords:** EMAT; acoustic wave amplitude; transduction efficiency; verification test; performance design

## 0 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,能够为型材的生产、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,它既可节省测试加工成本,也可减少产品评估和故障诊断时间。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<sup>[1]</sup>。除了压电效应,光电效应<sup>[2]</sup>之外,电磁声学效应也可产生和接收超声波。虽然电磁超声效应产生的信号比压电效应产生的信号弱,但是它提供了诸多优点,因为该物理效应是通过电磁场来传播声波能量的,它避免了与测试工件表面的直接机械接触,在所需测试的工件表面发生声

能互换。与压电振荡器相比,超声换能器与工件直接相耦合的,工件表面属于超声换能器的一部分。因此,电磁超声测试方法不需要耦合介质,避免了许多不必要的麻烦。事实上,湿法耦合会给工程测试带来了多种扰动<sup>[2]</sup>。由于两个界面处反射波之间相互干扰,液体层的渗透性很大程度上取决于被测工件厚度,所以必需将液体层厚度降至最小并保持恒定。而当测试热工件时,温度越高,就越难找到合适的耦合剂。电磁超声换能器(EMAT)不包含机械振荡元件,就避免了机械组件自身振动频率干扰整体测试频响的现象发生。

为了探明EMAT多物理场之间的耦合关系、分布规律及工程应用,国内外有不少学者开展了EMAT的数值仿真、电磁超声检测应用和试验研究。如王淑娟等人<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

收稿日期:2017-02

\*基金项目:湖州市科技计划项目(2014GY01)、浙江省2017年度省级公益技术应用研究项目(2017C33236)资助

的设计准则;任晓可等人<sup>[4]</sup>基于 ANSYS 仿真分析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影响;刘素贞等人<sup>[5]</sup>仿真分析了 EMAT 换能过程中电场、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;杨理践等人<sup>[6]</sup>利用 ANSYS 仿真模型研究了铝板传播中兰姆波模式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支持;杨理践等人<sup>[7]</sup>基于 ANSYS 仿真分析了 EMAT 在铝板中的超声波传播机理,获得了铝板中单个质点的最大位移方向;焦敬品等人<sup>[8]</sup>通过电磁超声技术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;Thomas 等人<sup>[9-11]</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;王帅<sup>[12]</sup>等采用一种扁平铜线缠绕的换能器,并采用振荡电路激励信号,提高了激励线圈散热能力。本文通过设计和建立 EMAT 原型实验,分析 EMAT 检测过程中的工作机理及内在影响因子,探索通过内部组件组合和参数优化设计对 EMAT 换能效率和检测精度的影响。

### 1 电磁超声激励原理

超声波的电磁超声激励是基于两个物理机制:洛伦兹力和铁磁材料的磁致伸缩效应。此处涉及理论只采用洛伦兹力来描述声电磁转换现象,将一个通交变电流的螺旋线圈放置在靠近工件表面的地方,传输电磁超声信号,如图 1 所示。

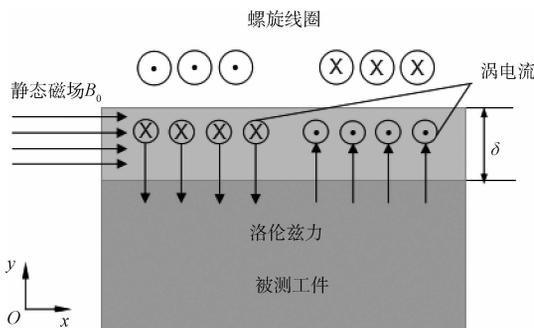


图 1 电磁超声产生机理

金属响应发生在典型的趋肤深度层,深度设为  $\delta$ ,同时引入趋肤层内涡电流  $J(z, t)$  和相关感生电场  $E(z, t)$ 。对上述过程施加一个静态磁场,就会打破原始平衡,从而对涡电流产生一个洛伦兹力,表达式如下:

$$F(z, t) = [J(z, t) \times B_0] / n_0 \quad (1)$$

式中: $z$  为坐标值,垂直纸面朝外, $t$  为瞬时时刻, $B_0$  为静磁场强度, $n_0$  为电荷密度。若  $B_0$  朝  $ox$  方向,洛伦兹力则是  $oy$  纵向的,电流电荷密度沿  $oz$  向变化。一个沿  $z$  向的内部电场  $E(z, t)$  必须存在且维持电荷中立,其离子来自一个振

幅为  $\xi_z$  的纵波震荡。而当  $B_0$  朝  $oz$  方向,涡电流  $J(z, t)$  朝  $oy$  方向,洛伦兹力则朝  $ox$  方向,如此洛伦兹力将沿  $ox$  产生剪切震荡,振幅为  $\xi_x$ 。对于上述两个极化过程,超声波控制方程为:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - s^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{|J \times B_0|}{\rho} \quad (2)$$

式中: $s$  为超声波传播速度, $\rho$  为金属密度。当  $\delta \ll \lambda$  和距离  $z \gg \delta$  时,可以获得超声波的振幅  $\xi$  解析解为:

$$|\xi| = \frac{BB_0}{\mu_0 \rho s \omega} \frac{1}{(1 + \beta^2)^{1/2}} \quad (3)$$

式中: $B$  为交变磁场磁感应强度, $\mu_0$  为被测工件相对磁导率, $\omega$  为超声波振动频率,趋肤深度参数  $\beta = q^2 \delta^2 / 2$ , $q$  是超声波数。

电磁超声换能器换能效率  $\eta$  是产生的声波功率  $P$  与进入工件表面的电磁功率  $Q$  之间的比值。它可表示为:

$$\eta = \frac{P}{Q} = \frac{2B_0^2}{\mu_0 (\rho s \omega \delta)} \quad (4)$$

对于铝材质中的纵波,当频率  $\omega$  为 10 MHz,且  $B_0 = 1$  T 时,可得  $\eta = 5.7 \times 10^{-5}$ 。在非铁磁性材料中,洛伦兹力是激发超声波的唯一来源,而对于铁磁性材料,磁致伸缩应力会产生额外的力,在所施加的磁场中,超声波不再是一个线性函数<sup>[6]</sup>。根据上述原则,一个 EMAT 需包括一种能产生静态偏置磁场的方法,即永磁体或电磁体,加上一组承载动态驱动电流的螺旋线圈。

### 2 EMAT 原型和实物

如图 2 所示,组件均设置在一个紧凑的金属圆柱形筒中,电磁铁安装在内部。电磁绝缘通过一根 BNC-Lemon 光纤电缆连接励磁线圈来完成。电磁铁是用一个树脂玻璃

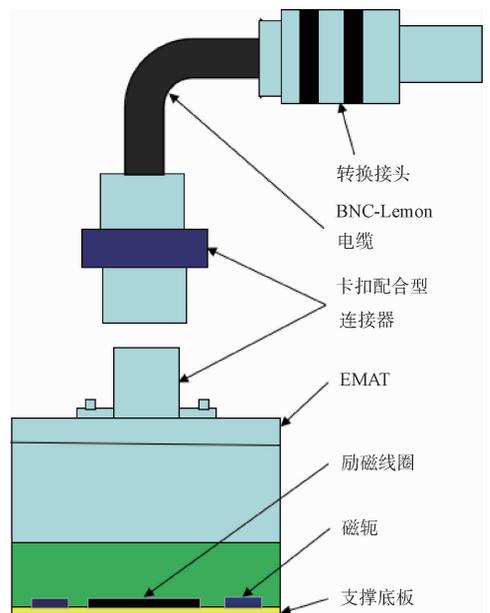


图 2 EMAT 原型示意图

制成固定底板托住,并在底板上固定磁轭和励磁线圈。激励和接收线圈在印刷电路板上制作,其中 U 型电磁铁用于纵波 EMAT,而 E 型则用于剪切波 EMAT。所有组件集成组装后的 EMAT 实物图如图 3 所示。



图 3 EMAT 实物图

### 3 影响因子试验研究

#### 3.1 励磁线圈几何形状

为了确定线圈几何对发射效率和检测灵敏度的影响,测试过程中设计了几套不同特征的平板线圈:单螺旋线圈,双螺旋线圈以及曲折线圈(蛇形线圈)。制作了两种平板螺旋线圈如图 4 所示,线圈刻制在相同的矩形平板,平板尺寸为 35 mm×14 mm,两者的圈数和匝间距离不同。由于板比较小,操作间距仅为 14 mm,最多获得 9 圈。小的匝间距离在超声波激发过程中起着重要的作用,实际上设计的静

态磁场与匝间距离对超声波激发过程同等重要,而且占据的区域更小。因此,这两个参数的影响:匝数和匝间距离,呈现出了矛盾的特性。图 5 展示了另一组线圈:曲折线圈,双螺旋和单螺旋,这些线圈被限制在 21 mm 间距内制作,而之前的则是 14 mm 间距内操作。表 1 给每一种线圈设计获得的最佳测试结果。分析表 1 可知传送和接受放大增益均最大的是曲折线圈,传送增益最小的是六匝单螺旋线圈,回波接受的拒收比率最低也是六匝单螺旋线圈为 35%,其余线圈对应的回波拒收比率均在 40%。

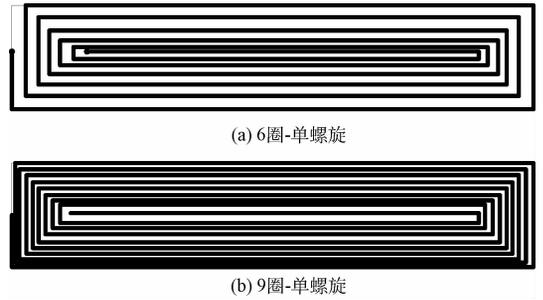


图 4 印刷电路板上螺旋线圈(宽度 14 mm)

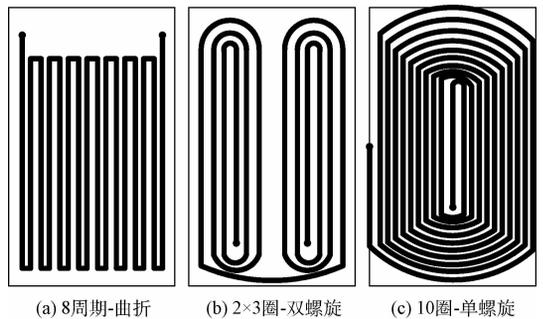


图 5 3 种螺旋线圈(宽度 21 mm)

表 1 线圈几何对回波高度影响

线圈类型		6 圈-单螺旋	9 圈-单螺旋	8 周期-曲折	2×3 圈-双螺旋	10 圈-单螺旋
增益/dB	传送	85.5	90	99	90	86
	接收	105	100	110	108	102
拒绝/%	传送	0	5	22	0	0
	接收	35	40	40	40	40
操作宽度/mm		14	14	21	21	21

#### 3.2 静态磁场感应

图 6 所示为铝材测试工况中,发射和接收回波振幅高度几乎与电磁铁电流成线性关系,但是纵波比剪切横波的斜率大,说明纵波测试回波信号比横波回波信号的更有利于区分。铜和不锈钢材质测试工况下也观察到同样的结果。但在铁磁钢测试工况中,实际上在低电流阶段,纵波的回波振幅迅速增加,在电流强度  $I=0.05\text{ A}$  左右接近饱

和,并随着电流的增加基本保持恒定,如图 7 所示。

#### 3.3 提高距离

在剪切和纵向回波幅度中分析提高距离(线圈-测试工件表面之间)的影响。对于上述两种极化情况,传输和接受回波振幅高度与提高距离成反比关系,同时获得了对应的指数趋势曲线,图 8 和 9 分别为铝材质和不锈钢材质的关系曲线,两者测定系数相同  $R^2=0.995$ 。

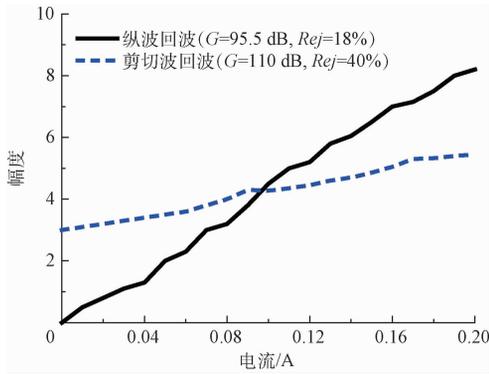


图6 铝中磁感应对回波高度影响

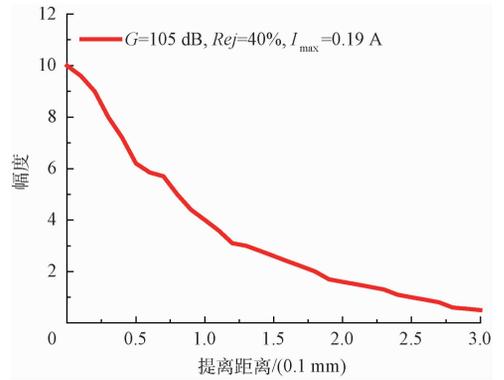


图9 不锈钢材质中提高距离对回波高度影响

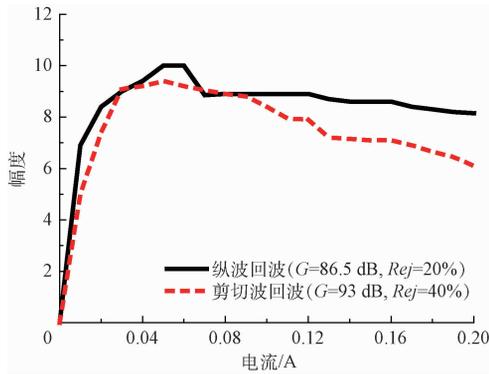


图7 铁磁钢中磁感应对回波高度影响

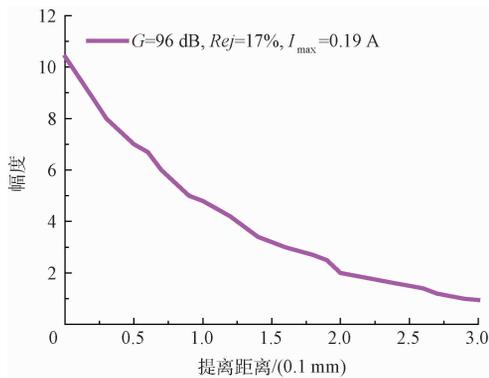


图8 铝材质中提高距离对回波高度影响

**表2 最佳诱导参数 (A)**

材料类型	模式	最佳诱导传送	接受
铁磁钢	纵向	0.05	0.06
	剪切	0.05	0.02
铝	纵向	0.21	0.21
	剪切	0.21	0.21
铜	纵向	0.21	0.21
	剪切	0.21	0.21
不锈钢	纵向	0.21	0.21
	剪切	0.21	0.21

增加电流是无效的,这是因为纵向模式和剪切模式下,响应都会在相对低的电流强度时达到饱和状态,而后随电流强度升高保持基本恒定。

#### 4.2 螺旋线圈设计

通过表1综合比较可知六匝单螺旋线圈在传输中得到了最好的结果,但这不仅仅是线圈形式一个因素导致的良好效率。事实上,线圈所放置的间隙宽度也是一个显著影响磁力线分布的参数。因为6匝线圈是印刷在14 mm宽度的间隙内,与此同时曲折线圈印刷在21 mm宽度的间隙内。磁场线的分散程度会随着线圈放置的间隙宽度增大而增加,从而稀释了电磁铁电流提供的静磁功率。

曲折线圈是适用于生成有角度的剪切波。值得注意的是这种线圈具有相控阵列的基本特征,其限制是相邻阵列元件的相位均是恒定的180°。表1显示了对于每一种线圈类别获得的最佳结果。从中可知超声单元的增益、拒绝和操作间隙宽度在铁磁钢工件中的100%动态响应。同时也观察到在传送情况下,所有记录中最低增益和最低拒绝率是由刻制在14 mm间隙内的6匝单螺旋线圈所得的。而对于接收情况,最有效率的则是9匝单螺旋线圈。

#### 4.3 材料属性和激发频率

由于无法对激励频率的参数影响进行实验研究。理论研究表明激励频率对产生信号的振动幅度有很大影响。表征激励频率相关的换能效率的曲线可回溯几种材料<sup>[13]</sup>。

### 4 优化分析

#### 4.1 静态磁场

通过相关试验和记录,表2是在不同材质工件测试分析中获得的最优交变电流诱导强度值。

图6,7中曲线表示磁感应引起的回波幅度演变。图6表明对于非铁磁性材料,EMAT换能效率与静态磁化强度成线性关系,采用纵波测试效果较好,同时表明必须提供强电流来使掺杂的电磁体达到最大强度。而图7分析可得,对于铁磁性材料尤其钢,转导效率并非线性关系,仅仅

材料的机械和电气相配特性为声速  $s$  和趋肤深度参数  $\beta$ 。因此,假设超声波传播介质的电学和机械性能是各向同性的,曲线簇给出它们产生的应力幅度与激励频率之间的关系。

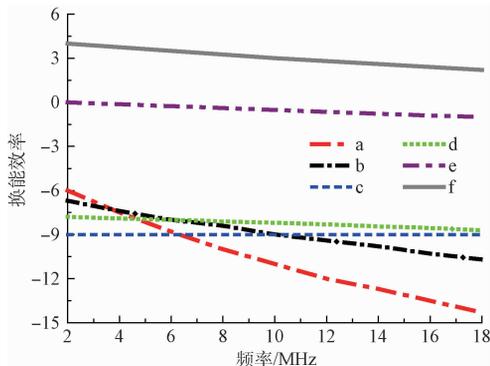


图 10 不同材质中剪切波电磁激发相对效率-频率关系

根据关系式(4),室温下在各种金属中,脉冲回波法产生的剪切波相对效率可看作是激励频率  $\omega$  的函数,如图 10 所示,此处假设  $B$  和  $B_0$  是常数,且金属中任何信号衰减均可忽略。在 2 MHz 时,铝材质的换能效率被用来作为 0 参考点, dB 正值表示较高的换能效率(Mg, 曲线 f), dB 负值表示较低的换能效率(曲线 a~d)。显然电磁超声换能器对于轻金属(如 Al, Mg)测量是最有效率的,而在小声速和非常大  $\beta$  值(Sn, 曲线 a)的金属工件测试时,其换能效率是强烈频率相关的(Sn, a)。用于磁导率  $\mu_0=100$  的碳钢换能效率计算(曲线 c),只是一个粗略估计,因为它忽略在激发过程中任何铁磁性相互干扰。

#### 4.4 波型

励磁线圈设计和电磁体配置决定了换能的模式。作为励磁电流脉冲的基座,螺旋线圈和磁铁可以有多种配置方式,从而产生各种波型,例如垂直于样品表面的纵波和受激剪切体波,倾斜剪切波和导向设计模式(包括难以激发的水平极化)。这些超声波通过在已知试样中测量传播速度来识别。纵波自然由螺旋线圈和平行布置的静磁场中激发产生。因此,在铁磁钢,不锈钢和铝中生成纵波,有记录的最大换能效率是铁磁工件,峰值对应的电磁体电流为 0.05 A。这是因为一旦工件材料处于饱和状态,磁致伸缩现象就会消失。在铝中,声波振幅和磁化之间有一个完美的线性关系。E 型圆柱形磁轭用于生成剪切横波。然而,平板螺旋与 U 型磁轭相结合也会产生剪切波和纵波。实验表明,只有 E 型磁轭产生纯剪切模式波,而 U 型磁轭产生的是准纵波。由双螺旋线圈(图 5(b))和曲折线圈与 U 型磁轭相结合,可产生表面波。实验过程包括在抛光表面上采用 EMAT 进行传送和采用常规传感器接收产生的表面波,该传感器具有角度机械可调,预先调整(在脉冲回波模式)至第二临界角。与之前获得的体波回波相比,

表面波回波一样重要。这个现象仅在铁磁钢中观察到,而在铝的相同实验中却没有。因此推可断产生的应力是来自磁致伸缩效应。当观察到瑞利波回波对静磁场的高灵敏度响应时,上述假设已被证实。

#### 4.5 相控阵 EMAT

超声相控阵通过对各阵元的有序激励可得到灵活的偏转及聚焦声束,联合线性扫查、扇形扫查、动态聚焦等独特的工作方式,使其比传统超声检测具有更快的检测速度与更高的灵敏度,是目前无损检测领域的研究热点之一<sup>[14]</sup>。曲折线圈换能器具有相控阵列的基本特性,该换能器限制相邻阵列元件的相位是恒定的  $180^\circ$ 。这个充分解释了它的有角度辐射特点。其远场的图示可以通过调整每个阵列元素的激发振幅权重来轻松产生更多的方向性。这提供了一种有效的手段用于控制所产生的超声波束的方向,极化和聚焦。这种控制方式一方面可以通过调整静态磁化和激发的相关配置来完成。另一方面,通过修改几何线圈的特性即曲折线圈的特定扩展期。最重要的是超声波方向取向和聚焦控制可以通过电子方式作用于线圈中的阵列元件相位和幅度来完成。为了获得这种控制,EMAT 的绕组必须分离成单个的、分开操作的环路在传输的过程中它们是顺序定时的,且接收电压是逐步延迟的,如图 11 所示。相控阵 EMAT 的辐射示意图可以通过调整空间配置(线性,圆形,…)两个相邻元件之间的距离,激发幅度和每个元件相位,所使用元件的最终自然特性和元件数来控制。

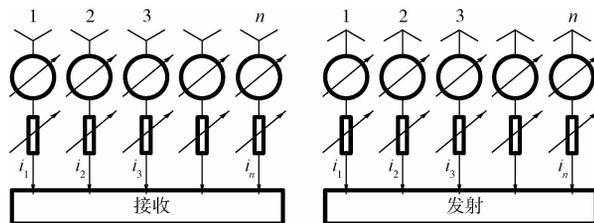


图 11 取向和聚焦控制线性相阵

## 5 结 论

本次研究展现了电磁声学测试方法的重要性,它在高温高压设备的无损检测和工程测试信号领域开拓了广阔的视野。通过设计并实现 EMATS 原型,并使它能产生和接收纵向,剪切和表面波,试验结果比较甄别了影响换能效率的参数因子。理论上参数因子优化可以增加 EMAT 的换能效率,同时避免无用的能量损失,尤其是电磁铁中的交变电流选择。

实验过程可知 EMAT 允许简单地控制超声波束的方向和极化,适当的权重调节可减少次要信号和精炼主要信号。消除 EMAT 双向辐射问题的一种解决方案是利用曲折线圈的相控阵特性,且电磁激励过程依靠电流激励电子

器件可以实现。

实验结果比较表明,功能组件和参数因子优化设计可有效改善 EMAT 测试性能,这为 EMAT 最优性能设计和工程测试解决方案提供基础技术参考,同时该测试手段对于精确测量如残余应力测量和快速自动化在线测试等方面也是非常有用的。

## 参考文献

- [1] 钦峰,谢国利. 电磁超声换能器金属缺陷探测有限元仿真研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(7): 39-43.
- [2] ZHANG W L, LIANG D C, TIAN Z, et al. Optical generation, detection and non-destructive testing applications of terahertz waves [J]. Instrumentation, 2016, 3(1): 1-20.
- [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] 任晓可, 李健. 电磁超声无损检测技术的 ANSYS 仿真研究[J]. 电子测量技术, 2008, 31(7): 26-34.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 杨理践, 李春华, 高文凭, 等. 铝板材电磁超声检测中波的产生与传播过程分析[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(6): 1218-1223.
- [8] 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.
- [9] THOMAS S, OBAYYA S S A, 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.
- [10] THOMAS S, OBAYYA S S A, 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.
- [11] THOMAS S, OBAYYA S S A, TANEJA R, et al. A coupled electromagnetic and mechanical analysis of electro-magnetic acoustic transducers [J]. International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics, 2009(10): 124-133.
- [12] 王帅, 陈鹏, 刘美全, 等. 电磁超声连续脉冲激发方式探讨[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(1): 14-16.
- [13] 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.
- [14] 靳世久, 杨晓霞, 陈世利, 等. 超声相控阵检测技术的发展及应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 24(9): 925-934.

## 作者简介

钦峰, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为承压设备无损检测和数值仿真技术。

E-mail: 302595135@qq.com