

DOI: 10.11973/wsje201608006

# 曲折线圈折线角度对 EMAT 换能效率的影响

杨理践, 宋靖宇, 高松巍, 刘 斌

(沈阳工业大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110870)

**摘 要:** 针对曲折线圈型电磁超声换能器的换能效率, 分析了不同折线角度曲折线圈对 EMAT(电磁超声换能器)换能效率的影响。根据声束指向原理, 通过改变载流导线的角度, 设计了  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  曲折线圈激励产生电磁超声导波, 并采用收发分离式换能器结构在钢板上进行检测试验。结果表明, 曲折线圈载流导线角度为  $0^\circ$  时, EMAT 激发的声波能量集中, 方向性好, 回波信号幅值强, 为钢板的长距离检测提供了可能; 曲折线圈载流导线角度增加为  $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  时, EMAT 激发的声波信号纯净, 简化了模态分析, 对工程中钢板检测的信号简化处理具有重要意义。

**关键词:** 电磁超声换能器; 曲折线圈; 钢板; 换能效率; 折线角度

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2016)08-0026-04

## Effect of Different Line Angle of Meander Coil on EMAT Energy Transfer Efficiency

YANG Li-Jian, SONG Jing-Yu, GAO Song-Wei, LIU Bin

(School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** By studying the energy transfer efficiency of the meander coil electromagnetic ultrasonic transducer, the impact of meander coils with different line angles on the energy transfer efficiency of the EMAT was analyzed. According to the principle of acoustic beam pointing in the direction and by changing the angle of the current-carrying conductor, 0 degrees, 30 degrees, 60 degrees, and 90 degrees meander coils were designed for the excitation of ultrasonic guided wave, and the transceiver separation transducer structure on the steel plate was adopted for experimental research. The results have shown that when the current-carrying conductor angle of the meander coil is 0 degree, the excitation acoustic energy of EMAT is focused, owing high directivity and strong echo signal amplitude, which provides the possibility for the long distance detection in the steel plate; when the current-carrying conductor angle of meander coil increased to 30 degrees, 60 degrees and 90 degrees, the EMAT inspires pure acoustic signal of being easy to identify and simplify the modal analysis, which has great significance for the signal processing in steel plate detection of the engineering.

**Key words:** Electromagnetic ultrasonic transducer; Meander coil; Steel plate; Energy transfer efficiency; Line angle

换能器中不同种类的线圈能够产生不同种类的波形及换能效率, 适用于不同的被检对象, 电磁超声换能器(EMAT)在检测时无需耦合剂、检测范围广, 还能够高温、高速等恶劣环境下进行在线检测, 在

板材、管道等检测领域中应用普遍。

康磊等<sup>[1]</sup>通过仿真分析分别从 EMAT 磁铁尺寸和线圈中导线的分布方式两个角度对电磁超声表面波换能器进行优化, 信号幅度提高了 39%。PETCHER P A 等<sup>[2]</sup>运用数值模拟的方法设计了轻便易弯曲的 EMAT 线圈, 能够在 10 mm 内变化的提高距离下对钢轨进行检测, 有效提高了缺陷检测信噪比。黄凤英等<sup>[3]</sup>研究了探头提高距离、激励信号电流幅值、激励频率等参数对 EMAT 换能效率的影响, 为换能器的优化设计提供了理论依据。

收稿日期: 2016-01-29

基金项目: 科技部国家重大仪表专项资助项目(2012YQ090175); 国家 863 计划资助项目(2012AA040104); 国家自然科学基金资助项目(61571308)

作者简介: 杨理践(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事管道检测及无损检测技术等方面的研究。

通信作者: 高松巍, E-mail: gaosongwei888@163.com。

笔者采用收发分离式电磁超声换能器结构对钢板进行检测试验,分析不同折线角度曲折线圈型 EMAT 产生的超声回波信号,为 EMAT 的优化设计及其板材检测提供试验依据。

## 1 EMAT 基本理论及方程

根据电磁超声理论可知,电磁超声波的产生涉及电磁场、力场、超声波场三场耦合的结果。电磁场、力场、超声波场共同构成了 EMAT 完整的作用原理,引起电磁超声波的产生。

### 1.1 EMAT 理论方程

EMAT 换能系统中的电磁超声波场是由机械力学场、电磁波场、和超声波场共同构成的,由麦克斯韦方程可计算导出电磁超声波电场和磁场系统转换的基本理论<sup>[5]</sup>,根据法拉第电磁感应定律,麦克斯韦方程组及边界条件用如下方程描述:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

式中:  $\vec{E}$  为电场强度;  $\vec{B}$  为磁感应强度。

各向同性弹性体中声波的运动方程为:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = f_{\text{total}} + \mu \nabla^2 u + (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot u) - \gamma \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

$$f_{\text{total}} = f_M + f_{MS} + f_L \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为介质的体密度;  $u$  为带电粒子的位移向量;  $r$  为介质的阻尼系数;  $f_{\text{total}}$  为质点的总受力;  $\lambda$ 、 $\mu$  为被测材料的弹性常数;  $f_L$  为洛伦兹力;  $f_{MS}$  为磁致伸缩力;  $f_M$  为磁化力。

这三种力的表达式分别为:

$$f_L = \mathbf{J}_e \times B_0 = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} \times B_0 \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{J}_e$  为密度向量;  $B_0$  为静态偏置磁场。

$$f_{MS} = -\nabla(e^T \mathbf{H}) \quad (5)$$

式中:  $e^T$  为磁致伸缩系数,由试验得其具体值;  $\mathbf{H}$  为动态磁场强度向量。

$$f_M = (\mathbf{M}_0 \cdot \nabla) \mathbf{B} \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{M}_0$  为磁化强度向量;  $\mathbf{B}$  为变化的磁通密度向量。

周期性的高频脉冲激励 EMAT 线圈,在被测材料表面感应出的涡流会在静磁场中产生高频振动,引起应力波的传播。其中,静磁场减弱时,磁化力常忽略不计,铁磁性材料中磁致伸缩力占主导作用;静磁场逐渐增强时,铁磁性材料被磁化饱和,洛

伦兹力是超声应力波产生的主要原因。

### 1.2 EMAT 换能机理

EMAT 的换能机理包括洛伦兹力机理、磁化力机理、磁致伸缩力机理<sup>[6]</sup>。在铁磁性材料中,EMAT 的换能机理是由磁致伸缩机理以及洛伦兹力机理构成的,且一般磁致伸缩机理占主要作用。由于磁化力的作用非常微弱,通常忽略磁化力对超声波产生的影响。

#### 1.2.1 洛伦兹力机理

根据法拉第电磁感应定律可知,EMAT 中线圈的高频交变电流会在钢板趋肤层产生感应涡流,感应涡流可以看成是无数带电粒子的集合,带电粒子在磁场中受力产生高频振动引起超声波的传播。洛伦兹力效应激发电磁超声波的原理示意如图 1 所示。

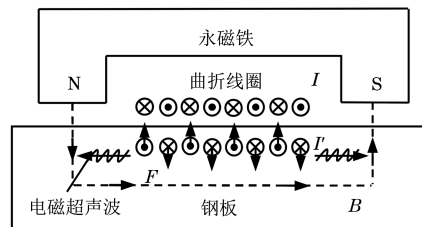


图 1 洛伦兹力效应激励超声波原理示意

由图 1 可见,交变的洛伦兹力引起趋肤层带电粒子受力振动,带动周围粒子一起以机械波的形式传播。

#### 1.2.2 磁致伸缩机理

通以高频交变电流的 EMAT 线圈,会在钢板趋肤层中产生周期性交变电磁场,而具有磁致伸缩效应的钢板在交变电磁场的作用下会产生周期性的压缩或拉伸变化,这种周期性的变化引起质点的高频振动,从而形成电磁超声波<sup>[7]</sup>。磁致伸缩效应激励超声波原理示意如图 2 所示。

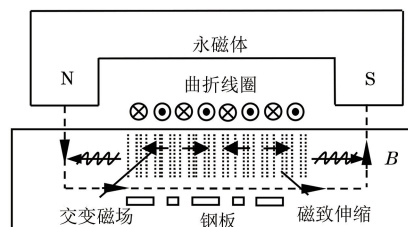


图 2 磁致伸缩效应激励超声波原理示意

由图 2 可见,在钢板中激励电磁超声导波时,根据法拉第电磁感应定律,具有磁致伸缩效应的钢板在交变电磁场的作用下产生周期性的伸缩或拉伸变化而引起材料的体积变化,周期性的体积变化引起

质点的高频振动, 振动以机械波的形式传播出去, 形成电磁超声波。

## 2 不同折线角度的曲折线圈

EMAT 包括永磁铁、载流线圈部分, 其中线圈的类型和磁场的分布可直接影响换能效率。在折线角度为  $0^\circ$  的直线型曲折线圈的基础上, 增加折线角度, 设计不同折线角度的曲折线圈型 EMAT。

为使激发的超声波能量集中, 根据声束聚焦指向性原理, 同心圆指向同一个圆心, 将圆心视为声束聚焦的焦点, 截取同心圆的一段圆弧作为具有一定折线角度的曲折线圈, 折线角度以焦点引出的两条法线之间的夹角定义。同心圆曲折线圈设计原理示意, 如图 3 所示。

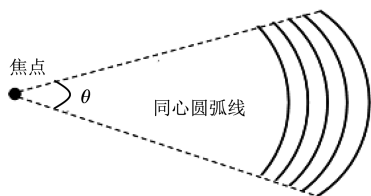


图 3 同心圆曲折线圈设计原理示意

基于同心圆弧线圆心交于一点的原理, 设计具有不同折线角度的曲折线圈, 分别取同心圆弧线夹角为整数倍角度  $30^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $90^\circ$ , 以折线为  $0^\circ$  的曲折线圈为参考, 保持线圈匝数一致, 有效宽度一致。

在曲折型线圈的设计过程中, 一般超声波的波长与线圈结构满足以下匹配条件:

$$d = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f} \quad (7)$$

式中:  $d$  为线圈间距;  $\lambda$  为超声波在介质中传播的波长;  $c$  为超声导波传播速度;  $f$  为激励频率。

在设计曲折线圈时, 保证激发、接收线圈的间距相同, 且满足式(7)时, 可实现激发和接收超声波的最优转换效率, 同时减弱了其他模式的超声波信号。试验中超声波波长  $\lambda$  为 6 mm, 因此能够使换能效率达到最优的线圈间距为 3 mm。

采用 PROTEL 软件绘制线圈 PCB 版图, 制成硬 PCB 板。

不同折线角度曲折线圈的周期均为 12, 线宽 1.5 mm, 线间距为 3 mm, 有效长度为 45 mm。

试验中采用钕铁硼永磁体提供水平偏置磁场, 钕铁硼永磁体尺寸(长×宽×厚)为 50 mm×50 mm×30 mm, 静态磁场强度 1.2 T, 用于提供方向平行于钢板的偏置磁场。

## 3 试验与结果分析

### 3.1 检测系统

曲折线圈 EMAT 试验检测系统由高频脉冲发生器 RAM-5000-SNAP、前置放大电路、滤波电路、阻抗匹配电路、换能器、示波器以及钢板组成。试验检测系统框图如图 4 所示。

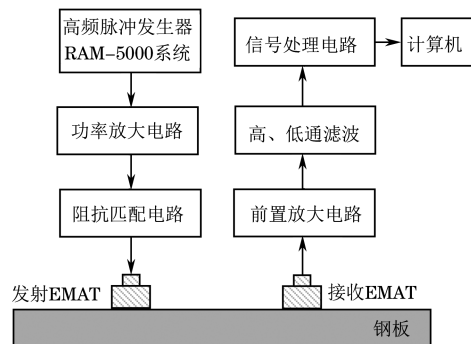


图 4 曲折线圈 EMAT 试验检测系统框图

如图 4 所示, 通有高频电流的曲折线圈在偏置静磁场的作用下, 会在钢板趋肤层产生交变的涡流场; 在静磁场与交变磁场的共同作用下, 钢板趋肤层带电粒子形成的涡流受到应力作用产生振动; 该振动以超声波的形式传播出去, 声波被接收线圈接收, 产生微伏级电压, 通过后续电路放大显示。

采用收发分离式曲折线圈 EMAT 结构激发与接收超声波。发射线圈采用不同折线角度的曲折线圈, 接收线圈采用折线角度为  $0^\circ$ 、匝数为 4 匝的曲折线圈, 线圈周期为 12, 间距为 3 mm, 线宽为 1.5 mm, 有效长度为 45 mm。钢板几何尺寸(长×宽×厚)为 1 500 mm×1 000 mm×6 mm。发射线圈、接收线圈与钢板的提离距离均为 0.3 mm。发射 EMAT 与接收 EMAT 在钢板中的位置分布见图 5。发射 EMAT 和接收 EMAT 呈线性置于钢板上方, 间距为 98 cm。



图 5 曲折线圈 EMAT 的位置分布示意

### 3.2 试验结果

根据线圈结构满足的匹配条件式(7), 通过上位机软件调节, 确定换能器的换能效率最优时线圈的激励频率为 470 kHz。折线角度为  $0^\circ$  时的曲折线圈型 EMAT 的试验结果如图 6 所示。

直达波为由发射 EMAT 直接传播至接收 EMAT 的超声波, 回波信号幅值较强, 能量集中。

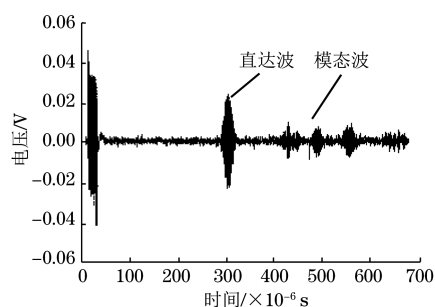


图6 0°曲折线圈 EMAT 试验波形

模态波为接收 EMAT 接收到的折射或反射回波的叠加,是钢板上下界面反射回波信号在介质中多次耦合叠加形成的结果,会导致回波信号难以识别,给后期回波信号的处理和分析带来困难。

保持各参数不变,改变发射线圈类型,不同折线角度曲折线圈 EMAT 的试验结果如图 7 所示。由

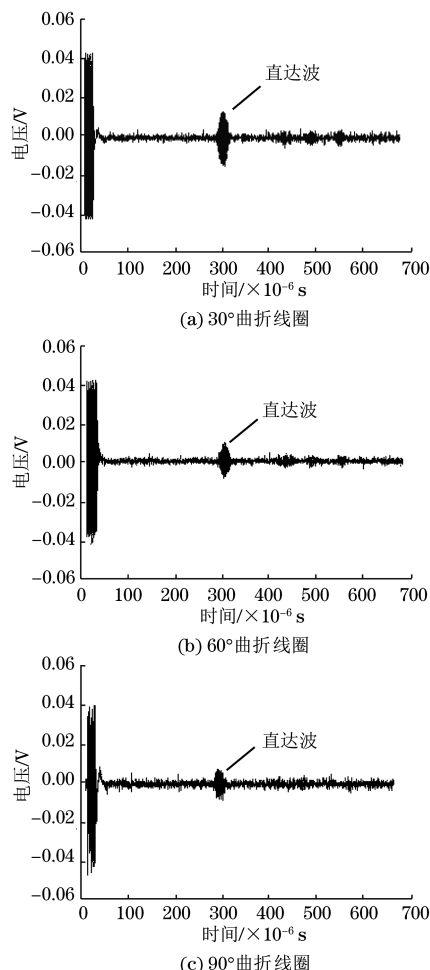


图7 不同角度曲折线圈 EMAT 试验波形

图 7 可见:曲折线圈折线角度分别为 30°、60°、90°时,直达波信号相比 0°曲折线圈发射 EMAT 的回波信号略有减小,但模态减少,信号纯净,方便信号的后期处理。

由图 6,7 可知:当发射 EMAT 与接收 EMAT 相对位置不变且参数匹配的情况下,保持线圈激励频率为最优频率 470 kHz,0°曲折线圈 EMAT 的回波信号幅值最大,指向性高,能量集中;随着折线角度增加,回波信号纯净而便于识别,简化了模态分析问题,为工程中钢板缺陷检测的信号简化处理问题提供了依据。

#### 4 结论

(1) 与折线角度为 30°、60°、90°的曲折线圈相比,0°曲折线圈(直线型曲折线圈)EMAT 激发的声波能量集中,方向性好,回波信号幅值强,为钢板的长距离检测提供了可能。

(2) 折线角度为 30°、60°、90°的曲折线圈 EMAT 激发的声波信号纯净,无模态回波,简化了模态分析,对工程中钢板检测的信号简化处理具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 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,2014,35(4):910-916.
- [2] PETCHER P A, DIXON S. A new electromagnetic acoustic transducer (EMAT) design for operation on rail[J]. NDT and E International, 2014, 65: 1-7.
- [3] 黄凤英,高东海.电磁超声电声转换效率的影响因素分析[J].机械工程学报,2011,47(10):1-4.
- [4] 周海强,杨占锋.静态偏置磁场对铁磁材料电磁超声换能器信噪比的影响[J].无损检测,2014,36(10):25-28.
- [5] 丁秀莉,武新军,郭锴.电磁超声传感器工作原理与结构[J].无损检测,2015,37(1):96-100.
- [6] 康磊,金昱,潘峰,等.曲折线圈型电磁超声表面波换能器的优化设计[J].仪表技术与传感器,2015(6):1-7.
- [7] 康磊,张晓辉,张雨平,等.电磁超声兰姆波换能器多目标优化设计[J].声学技术,2012,31(5):535-538.

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告