

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905606

基于 EMAT 的三维声场断层扫描测量方法研究*

郑阳¹, 李铮^{1,2}, 李超月^{1,2}, 张宗健¹, 周进节²

(1. 中国特种设备检测研究院 北京 1000291; 2. 中北大学机械工程学院 太原 030051)

摘要:不同电磁超声换能器(EMAT)的辐射声场分布特性不同,为了保证检测的有效性,需要对其声场分布进行准确测量。为测量固体金属材料中超声横波辐射声场的分布,采用针式 EMAT 作为测量超声横波声场的换能器,研究了基于断层扫描方式测量并重构三维辐射声场的方法。进一步建立了三维声场断层扫描测量实验系统,分析了测量系统的误差,并提出测量数据的补偿方法。实验测量了环形线圈 EMAT 在激励频率 3.5 MHz 时的辐射声场分布,获得其在铝和 20#钢中的三维辐射声场,并分析得到其近场距离约为 8 mm。结果表明该方法可有效地呈现超声横波在固体金属材料内部不同深度截面的声场分布,并对其处理可以获得待测 EMAT 在固体中的三维辐射声场分布。

关键词:电磁超声;声场测量;三维声场;断层扫描;无损检测

中图分类号: TB551 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Measurement of three-dimensional sound field with the layered scanning method based on EMAT

Zheng Yang¹, Li Zheng^{1,2}, Li Chaoyue^{1,2}, Zhang Zongjian¹, Zhou Jinjie²

(1. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China;

2. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Acoustic field distribution characteristics of electromagnetic acoustic transducers (EMAT) are different. To ensure the effectiveness of detection, it is necessary to accurately measure the acoustic field distribution. For measuring the distribution of ultrasonic shear wave radiation sound field in solid metal materials, the pin-type EMAT is used as a transducer. The method of measuring and reconstructing three-dimensional radiation sound field based on tomography is studied. In further, a three-dimensional sound field tomography measurement experiment system is established. The errors of the measurement system are analyzed, and a compensation method is proposed. During implementing experiments, the radiation sound field distribution of the toroidal coil EMAT at the excitation frequency of 3.5 MHz is measured. Its three-dimensional radiation sound field in aluminum and low carbon steel is obtained, and its near field distance is approximately 8 mm. Experimental results show that this method can effectively provide the sound field distribution of ultrasonic shear waves at different depth sections in solid metal materials. By superimposing them, the three-dimensional radiation distribution of EMAT in the solid can be achieved.

Keywords: electromagnetic acoustic transducers; acoustic field measurement; 3D acoustic field; layered scanning; non-destructive testing

0 引言

电磁超声换能器(electromagnetic acoustic transducer, EMAT)由于无需耦合剂、对待检试样的表面精度要求不

高、并且能在高温下长期监测,逐渐受到了越来越多的关注与重视^[1-2]。且电磁超声换能器的种类多种多样,有聚焦式、直入式和斜入式等。不同线圈结构与永磁体的组合可以激发出 SH 导波、Lamb 波和体波等^[3-4],可以应用于绝大多数的场合,如超声波及超声导波测厚和探

收稿日期:2019-09-11 Received Date:2019-09-11

* 基金项目:国家重点研发计划(2016YFF0203003)、国家自然科学基金(51605494)、质检总局科技计划(2017QK185)项目资助

伤^[5-7]。电磁超声检测系统由仪器与换能器组成,而换能器的特性往往决定检测的精度和稳定性。不同换能器由于线圈及永磁体的结构不同,其激励的超声波声场也大相径庭,若能够预先了解换能器的声场分布特性,对于现场应用可以起到事半功倍的效果。然而,EMAT 主要用于工业中金属材料检测,所以如何测量其在固体材料中的三维声场分布是一个需要解决的问题。

电磁超声换能器辐射声场的研究在相关报道中见到,如数值与仿真计算已有大量研究。Kawashima^[8]以螺旋形线圈为例,在非铁磁性材料上,通过计算由于超声振动而产生的洛伦兹力进而计算了辐射声场,得到了 EMAT 深度方向上的辐射声场。Dhayalan 等^[9]同样以螺旋形线圈为例,通过建立二维有限元模型,忽略动磁场的影响,计算了涡流密度与静磁场耦合产生的洛伦兹力。并利用弹动力学方程计算了该组合下由 EMAT 激励产生的超声波。Zhai 等^[10]在其基础上考虑了动磁场的影响,并建立了不同磁场下产生洛伦兹力的方程,并在铝块一侧建立水箱采用水听器接收声场的方式对螺旋形线圈 EMAT 辐射声场进行了测量,表明与计算结果符合性较好。

基于环形线圈的 EMAT 也有大量研究。Wu 等^[11]和陈秋颖等^[12]等通过建立环形线圈声场测量系统,将环形线圈 EMAT 作为激励传感器,用压电传感器作为接收器,以非铁磁性材料 Al 为例,设计了一个半弧形试块,厚度为 80 mm,并按照角度进行移动,接收不同角度的接收信号,从而得到环形线圈的横波声场指向图并与计算的解析解进行对比。目前的研究中,电磁超声辐射声场测量的实验中主要采用在方形或弧形试块上进行辐射声场的指向性扫描^[10-14],得到的为某截面上沿一条线的声场分布,无法测量到辐射声场在任意厚度下的具体形状,无法了解换能器在固体材料中不同截面的声场分布特性及形状。

此外对超声换能器辐射声场测量的方法主要有水听器法^[15]和光弹法^[16-17]。水听器法是将压电换能器置于水中,使用水听器作为接收换能器对辐射声场进行测量,其优点是可以获得三维声场分布,但由于水中只能传播纵波,对横波测量具有局限性。Mirkhani 等^[18]提出通过契块转换波的模式,采用铝棱镜将 EMAT 激发产生的横波转化为纵波,这样避免了横波不能再水中传播的缺点,之后采用水听器可以对其声场进行测量。然而该方法虽然可以测得声场,但是测量的并不是固体材料中的辐射声场,而是水中的声场,此方法的误差较大。光弹法是利用置于偏振光场中的模型在施加应力、应变时会在模型上看到干涉条纹图,来对换能器的辐射声场进行测量。其优点是可以获得截面视角下的声场动态传播图,但此图中的像素点相当于是某一线上声场效应的叠加,从而

失去了三维中的一个维度的声场信息。

现有的文献中并没有一种能很好地实现固体金属中超声横波换能器三维辐射声场测量的方法。本文基于文献[19]的研究成果,提出采用一种针式 EMAT 换能器断层扫描测量方式对 EMAT 横波换能器辐射声场进行测量的方法。相比于上述方法,本文方法可以直接测量横波换能器在固体介质中的辐射声场,得到声场在某一厚度上的二维平面分布及在空间的三维分布。

本文首先研究了 EMAT 超声波的激励原理与断层扫描声场测量原理,然后组建了对 EMAT 辐射声场扫描测量的实验系统,并分析了针式接收 EMAT 的磁场位于不同位置与在不同厚度铝块时对激励信号的影响和待测换能器对针式 EMAT 的影响,通过实验测量了不同厚度试块上激励换能器和针式 EMAT 的补偿曲线。利用断层 C 扫描的方法测量了横波换能器在不同厚度试件上的接收信号,对接收信号进行补偿之后,绘制了环形线圈 EMAT 在不同厚度上辐射声场的分布图,随后,分析了辐射声场的声束宽度随厚度的变化规律。

1 固体中三维声场断层扫描测量方法

1.1 声场断层扫描测量原理

在工业应用中,横波换能器在检测时是在试件内部激励并产生超声波,其三维声场也是在试件内传播,无法直接对固体材料中的三维声场进行测量。基于计算机断层扫描成像思想提出的固体中三维声场断层扫描测量方法,是采用透射接收方式,利用横波 EMAT 接收被测超声换能器在不同厚度试件上形成的超声振动场进行 C 扫描,得到不同深度上辐射声场的二维断层扫描图,再通过各断层扫描的声场进行堆叠,形成三维声场测量图。

基于断层扫描方法测量超声换能器辐射声场原理如图 1 所示,由函数发生器输出激励信号,经功率放大器放大和阻抗匹配网络输入被测 EMAT,被测 EMAT 与被检试件作用实现电声转换,在试件中耦合产生超声波,试件为一系列不同厚度的金属体,位于试件另一面的接收 EMAT 将超声波振动进行声电转换,电信号通过阻抗匹配网输入信号放大器进行放大,并被信号采集器记录。

断层扫描测量具体步骤如下:

- 1) 换能器对中。将激励与接收换能器的中心对正,并将中心点设为扫描区域零点,作为位置基准参考点被扫描试块置于激励换能器上方。
- 2) 确定扫描区域。以扫描区域原点为中心点,在扫描测量最厚的试块上,分别沿 X 轴、Y 轴进行 B 扫描,通过 B 扫描确定试件上表面 X、Y 轴扫描区域范围。
- 3) 断层 C 扫描。设定接收 EMAT 在 X、Y 轴位移步距,即将扫描区域沿 X、Y 轴划分成网格。针式 EMAT 按

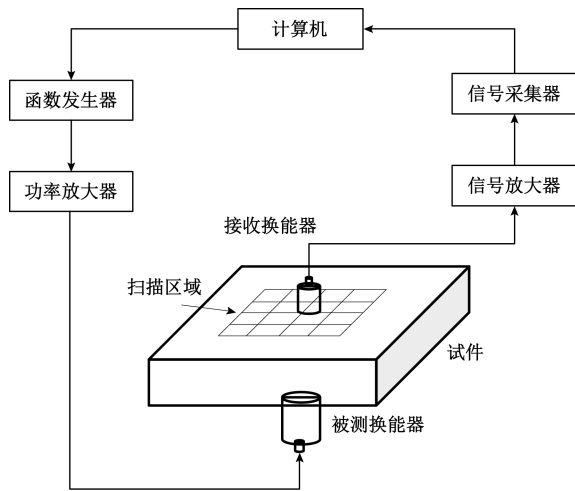


图 1 三维辐射声场断层扫描测量原理

Fig.1 3D sound field measurement with the layered scanning method base on EMAT

照“弓”字形扫描路径对每一点的超声信号进行接收。为了防止后壁回波对信号的干扰,分析提取直达波的峰值表示一点的声压大小。

4) 幅值补偿。测量 EMAT 在非铁磁性材料中的辐射声场时,由于磁感线将会直接穿过待测材料,造成上下换能器的磁场相互叠加耦合,从而造成测量的信号有些许误差,需要考虑接收 EMAT 位于不同位置及不同厚度的待测试件上时,二者的相互影响,并基于这种影响关系建立补偿系数,对 EMAT 接收信号进行补偿。

5) 三维声场绘制。将不同厚度的辐射声场进行叠加,即可绘制出被测 EMAT 在厚度方向上三维辐射声场的分布。若断层数较少时,采用三维插值算法,拟合中间层的声场。

基于针式 EMAT 断层扫描测量固体中超声横波换能器辐射声场的方法是一种定量测量方法。测量中声场的接收器为横波针式 EMAT,由电磁超声的原理可知,直接测量量是 EMAT 线圈感生的电信号,间接测量量是材料表面传感器接收区内表面剪切振动位移的积分。针式 EMAT 线圈感生的电信号与材料表面横波的剪切振动位移成正比。此种测量方式类比于采用水听器在水中测量超声纵波换能器辐射声场时,水听器表面水的压缩波振动模式对其作用,由压电效应产生出电信号,被采集记录,此电信号正比于测量处的声压。这两种方式都是定量测量声场的方式,只不过测量的是转换后的电信号,而不是直接测量的声场中质点的振动。

测量中采用针式 EMAT 作为声场的接收器,因此该方法适用于导电和导磁材料,如钢、铜、铝等金属材料,不适用于既不导电也不导磁的材料,如木材、石材、混凝土等。测量中,要充分考虑被测换能器与针式接收 EMAT

是否会相互产生影响,如果被测换能器是电磁超声换能器在非铁磁性导电材料中的声场,此时被测电磁超声换能器中的磁铁和接收用针式 EMAT 中的磁铁将会透过被测材料相互作用,增强激励换能效率和接收换能效率,从而导致较大的测量误差,此种情况下需要进行测量信号的补偿。其他情况下,如被测换能器为压电超声横波换能器,测量的是铁磁性材料中的三维辐射声场,被测换能器与针式接收 EMAT 不会相互产生影响,则不需要进行测量信号补偿。

1.2 针式接收 EMAT

由于电磁超声换能器激发效率较低,通常激发换能器的线圈多为多层、多匝的线圈,这样可以提高换能效率,提高接收信号的信噪比。但电磁超声换能器接收效率较高,即便使用面积较小的线圈,同样可以接收到信噪比良好的回波信号。为此设计了针式 EMAT,通过减小线圈面积来减小接收 EMAT 的接收区域,同样提高了测量时的准确度。如图 2 所示为针式 EMAT 线圈及换能器,采用漆包线密集绕制成直径 10 mm 的螺旋形线圈。在线圈上方放置直径 23 mm 的柱形磁铁作为偏置磁场,形成针式横波接收换能器,接收到来自环形线圈 EMAT 的激励信号,提高辐射声场扫描的分辨率与精确度。值得注意的是,此时由于接收面积减小,为了获得良好的检测信号,在换能器与信号放大器间加入良好的阻抗匹配网络,以获得高信噪比的信号。



(a) 针式 EMAT 线圈
(a) Pin-type EMAT and coil

(b) 针式 EMAT
(b) Pin-type EMAT

图 2 针式接收 EMAT 线圈及换能器

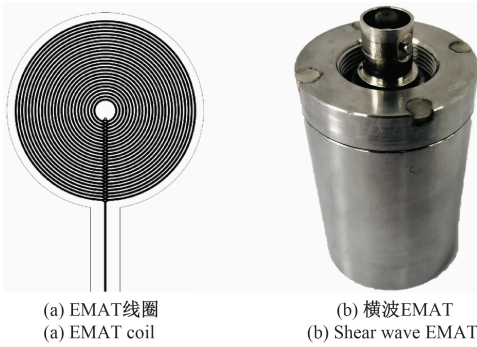
Fig.2 Pin-type receiving EMAT and coil

2 实验研究

2.1 EMAT 三维辐射声场测量系统

实验中以测量一横波直入射环形线圈 EMAT 在铝材中的三维辐射声场为例。被测换能器线圈及实物如图 3 所示。环形线圈外径 20 mm,内径 2.25 mm,绕线 25 匝,双层 PCB 印刷线圈。其工作主频为 3.9 MHz,产生直入射横波,一般用于电磁超声测厚及直入射探伤。

根据 1.2 节所述测量原理,建立 EMAT 三维辐射声场的断层扫描测量的实验系统,如图 4 所示。该系统分



(a) EMAT线圈
(a) EMAT coil
(b) 横波EMAT
(b) Shear wave EMAT

图3 待测横波直入射环形线圈 EMAT

Fig.3 Shear wave direct incident planner coil EMAT to be tested

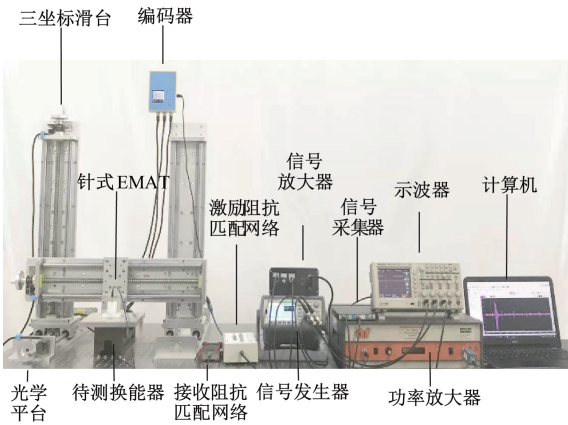


图4 实验系统实物

Fig.4 Real experimental system

为两部分:1)为待测 EMAT 激励系统与针式 EMAT 信号接收系统。2) 扫查装置。激励系统由信号发生器 (Agilent, 33522B)、功率放大器 (amplifier research, Model 75A250 A)、阻抗匹配网络、环形线圈 EMAT 组成;接收系统由针式 EMAT、阻抗匹配网络、信号放大器(自制 90 dB 固定增益微弱信号放大器)、信号采集器 (Handscope, HS3) 和计算机组成。此外,采用示波器 (Agilent, DSOX4 034 A) 用来观察信号发生器产生的激励波形和经功率放大器放大后的波形。

为了保证测量的准确性,扫查装置必须保证精度。三坐标机械台保证针式 EMAT 可以在 X 、 Y 、 Z 三轴水平运动,最大行程为 500 mm,各轴移动定位精度为 0.01 mm,重复定位精度为 0.01 mm。扫查中,三坐标水平滑台各轴接有编码器及读数装置,如图 4 实验系统中三坐标装置上部带黑色显示屏的蓝色盒子,编码器的位置精度为 0.001 mm,用于控制扫查中的步进。三坐标机械水平滑台固定在光学水平台上,增加了机械运动系统的抗干扰能力。

断层扫描用试块为厚度 4、6、8、10、20、30、40 mm 的铝块,表面尺寸为 200 mm×200 mm。

激励信号由信号发生器产生,如图 5 所示,为 3 周期汉宁窗调制正弦波,激励频率为 3.5 MHz,通过功率放大器放大后经阻抗匹配网络输入待测 EMAT,在不同厚度的铝块中产生超声波。针式接收 EMAT 接收透射的超声波信号,经阻抗匹配网络输入接收信号放大器,并被采集器记录。作为典型接收信号,图 6 所示为 10 mm 厚铝块扫描时中心处接收到的原始信号,信号经过 256 次平均采样消除随机噪声。以接收透射信号的峰峰值作为反应声场辐值的特性参数。

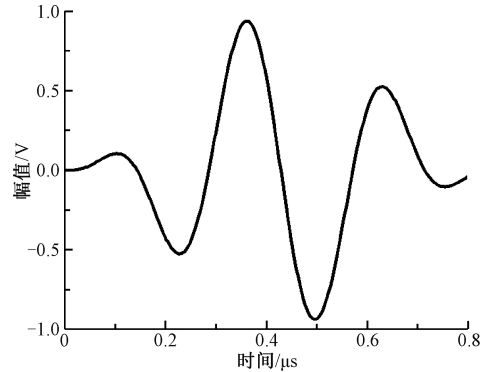


图5 初始激励信号

Fig.5 Initial excitation signal

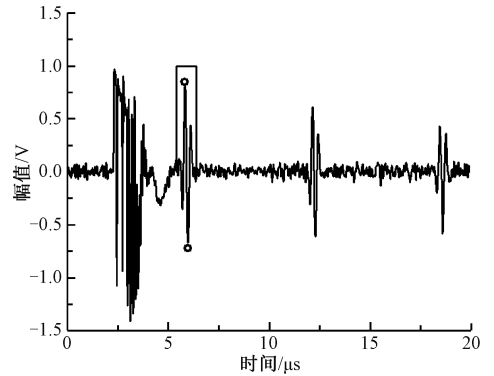


图6 10 mm 厚铝块扫描中心原始信号

Fig.6 Original signal of a 10 mm thick aluminum block scanning center

2.2 声场断层扫描测量设置

针式接收 EMAT 固定于三坐标机械水平滑台的 Z 轴上,待测 EMAT 固定于光学水平台上,调整机械滑台 X 、 Y 、 Z 轴将针式 EMAT 与待测 EMAT 中心正对,此中心正对点即为扫描区域的零点。分别记录下 X 、 Y 轴的位置,每次扫描完一个平面时,都将 X 、 Y 轴归零。按 1.2 节所述,在对进行辐射声场的扫描测量前,需要确定扫描的范围,因激励线圈为环形线圈,辐射声场具有轴对称性,所以只需

要在 40 mm 厚铝块上表面的以扫描区域零点为中心,沿 X 轴方向进行 B 扫描,步距为 1 mm,分析接收 EMAT 得到的原始数据,得到辐射声场在中心线上的分布,以透射信号小于噪声处为测量的边界,确定铝块上表面以零点为正中心的 27 mm×27 mm 方形扫面区域为。将针式接收 EMAT 位移到扫描区域网格中左上第一格作为起始点,采用“弓”字形路径进行扫描,在 X、Y 轴步距均为 1 mm,对扫描区域网格内每一格的信号进行测量,得到了扫描区域内的信号分布。对不同厚度的铝块进行上述 C 扫描完成声场的断层扫描测量。

2.3 针式接收 EMAT 性能测试

为了保证针式接收 EMAT 能够有效、稳定、可靠地接收到被测 EMAT 的辐射声场信号,需要考虑两个条件:1) 针式接收 EMAT 的工作频带需与被测 EMAT 工作频带有重叠;2) 由针式 EMAT 组成的接收系统测量信号的一致性和稳定性要好,即重复测量误差要小。

首先测试针式接收 EMAT 与被测 EMAT 的频带覆盖性。在厚度为 10 mm 的铝试块,两个换能器均采用自激自收形式激发与接收超声波,以试块底面脉冲回波峰值作为换能器幅频特性曲线中的幅值。激励信号在 2~5.5 MHz 间进行扫频测试,得到如图 7 所示的频率特性曲线。由图 7 可知被测环形线圈的中心频率为 3.9 MHz, -3 dB 带宽为 2.9~5.2 MHz,针式接收 EMAT 的中心频率为 4.2 MHz, -3 dB 带宽为 3.1~5.4 MHz。两者的频带有较大的覆盖,因此针式接收 EMAT 可以有效地接收到环形线圈 EMAT 所激励的超声波频率。

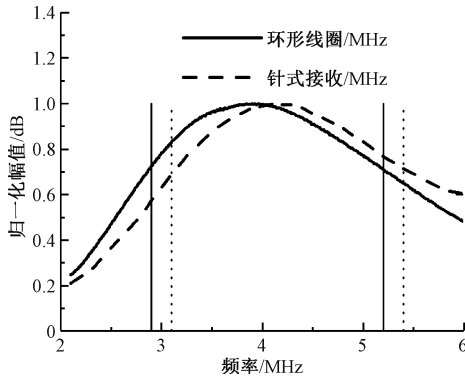


图 7 针式 EMAT 与被测 EMAT 的频率特性曲线

Fig.7 Frequency response curve of pin EMAT and tested EMAT

测试由针式 EMAT 组成的接收系统的相对测量误差。考虑近场和远场两层的测量误差,在厚度为 4 mm 和 40 mm 的铝试块上,采用 2.1 节中设置的激励信号,针式 EMAT 位于辐射声场中心和最边缘区域分别进行 20 次信号检测,每次检测信号都平均 256 次。如图 8 所示,虚线为上、下误差线,4 个点代表在两种极限厚度上的测量值,分别考虑了边缘与中心的相对误差,对数据点分析

发现 4 mm 厚和 40 mm 厚铝块中心的相对误差分别为 1.16% 和 5.86%。而边缘误差分别为 3.99% 和 7.87%。通过分析发现随厚度增加,相对误差越大,随着偏离中心点,靠近边缘的误差越大。整体而言针式 EMAT 组成的接收系统测量信号的一致性和稳定性良好。

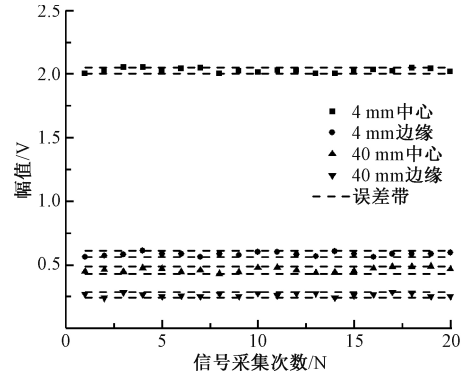


图 8 重复测量误差曲线

Fig.8 Error plot of repeated measurement

2.4 激励接收 EMAT 磁场相互影响及补偿

EMAT 中的永磁铁会提供一个静态偏置磁场,用于在 EMAT 换能器激励过程中产生洛伦兹力,在接收过程中实现由质点振动产生电磁场,是 EMAT 换能过程的关键,偏置磁场的大小和分布会对 EMAT 换能过程产生影响,即磁场大小的变化会对激励的辐射声场强度分布及接收 EMAT 接收信号的效率产生影响。

由于本文将非铁磁性材料铝作为介质,其相对磁导率为 1,与空气接近,所以当采用透射式实验时,激励与接收换能器的磁场会穿过材料并最终叠加,对二者的换能过程造成影响,最终造成测量误差。图 9 所示为在 10 mm 厚度的铝块中心,针式 EMAT 接收的直达波信号。如图 9 所示,当针式 EMAT 在待测换能器正上方时,明显的发现由于两个永磁铁的叠加,造成穿过铝块的磁通量密度增大,直接造成在这一点上的峰峰值变大,不可忽视磁通量密度变化对检测信号的影响。

在扫描测量过程中,由于两个永磁铁的相对位置变化,使得在测量中的各点,叠加磁场不同。正如图 9 所述,由于磁通密度的增强,最终导致洛伦兹力的增大,结果就是造成测量误差。因此必须考虑针式 EMAT 和待测换能器由于相对位置变化对换能效率的影响。简而言之,在测量非铁磁性材料中的声场分布时,因待测 EMAT 与接收 EMAT 相互间的磁场耦合造成的测量误差是与位置相关的。

考虑用针式 EMAT 位于不同位置时对环形线圈 EMAT 激励信号的影响,绘制出不同位置的影响曲线,作为对接收信号的补偿曲线。操作过程如下,采用 B 扫描方式,将针式接收 EMAT 以扫描区域零点为中心,沿 X 轴

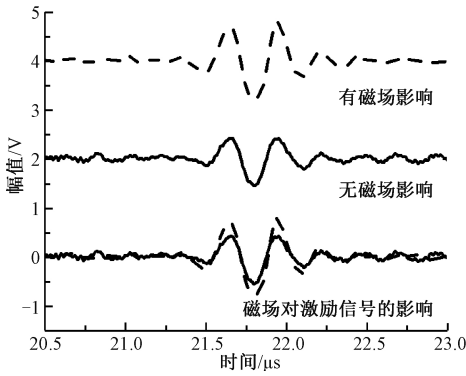


图9 磁场对激励信号的影响

Fig.9 Influence of the magnetic field on the excitation signal

方向位移,步进为1 mm,分别采集接收 EMAT 位于不同位置时环形线圈 EMAT 自激自收信号,与没有针式接收 EMAT 磁场影响时环形线圈 EMAT 自激自收信号。用接收 EMAT 磁场位于不同位置时的回波幅值 y_i 除以无磁场时的回波幅值 A_i , 得到接收 EMAT 磁场不同位置时,对激励信号的影响系数,将不同位置的影响系数通过多项式拟合得到补偿曲线,为了减小补偿曲线的误差,所有的试验数据都是采用3次测量数据的平均值。针式 EMAT 位于不同位置时环形线圈 EMAT 对其接收信号影响同上述方法补偿。

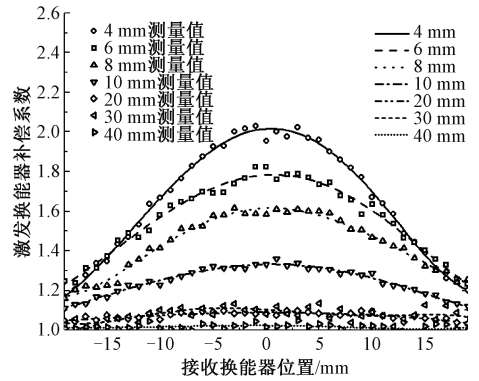
有磁场影响下针式 EMAT 位于不同位置时的回波幅值用 y_j 表示,无磁场时的回波幅值用 A_j 表示。如图 10(a) 所示为不同厚度试块下激发换能器补偿曲线,图 10(b) 所示为不同厚度试块下接收换能器补偿曲线。不同位置下针式接收 EMAT 接收到的信号回波幅值为 Y_i , 补偿修正后的回波幅值为 A_0 , 表示如下:

$$A_0 = Y_i \frac{y_i}{A_i} \frac{y_j}{A_j} \quad (1)$$

图 10 所示为在不同厚度度铝板上激发换能器和接收换能器的补偿系数。图 10 中各数据点为实际在不同位置测量的数据值,再根据式(1)计算得到的真实值,可以更加直观看到其变化规律。发现无论激发 EMAT 还是接收 EMAT 在中心位置的补偿系数最大,这是由于两个永磁体直接叠加的结果,随着接收 EMAT 位置的移动,补偿系数逐渐变小,且随着试件厚度的增加,中心点的补偿系数也逐渐降低,在 30 和 40 mm 时,接近一条直线,表明在此厚度下两个磁铁的影响较小。

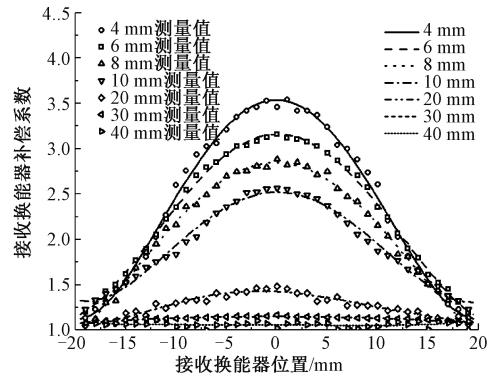
2.5 断层扫描成像的数据处理

由于针式 EMAT 接收的信号为扫描区域内各点的振动信号,经仪器 A/D 转换为电信号,通过提取各点的电信号即可表示该扫描区域的声场的分布图。本文以直达波信号的峰峰值作为特征量,用来表示一点的声压,提取直达波是为了防止超声波在试件内多次反射引入误差。



(a) 激发换能器补偿曲线

(a) Compensation curve of excitation transducer



(b) 接收换能器补偿曲线

(b) Compensation curve of receiving transducer

图 10 接收信号补偿曲线

Fig.10 Compensation curve of receive signal

信号处理的方法是设定一个高度和宽度适中的门控框,如图 6 所示,门控框之外的信号被忽视,意味着门控框越窄,提取的峰峰值越准确。峰峰值为直达波信号正负半轴的最大最小值,通过对减即可得到该点的峰峰值,代表这一点的声压。

扫描区域内每一格到扫描区域中心点的距离用勾股定理计算得到,将位置信息带入补偿曲线中,得到扫描区域网格内每一格的补偿系数。通过式(1)即得到补偿修正后的回波幅值。通过将补偿后的数据放入以扫描区域和扫描步进划分的网格,即可得到不同深度截面下,环形线圈换能器在固体金属材料中的辐射声场。

3 结果与讨论

3.1 三维声场的断层扫描图

按 2.5 节所述,分别对 4、6、8、10、20、30、40 mm 厚的铝块进行实验,按照 1.1 节中所提方法确定扫描区域,由于 B 扫发现在 28 mm 处,基本接收不到直达波信号,所以扫描范围为 27 mm×27 mm,按照 1 mm 步进行扫描。所接收的原始信号通过上文求取的补偿系数

补偿,绘制出不同深度截面的二维辐射声场分布如 图 11 所示。

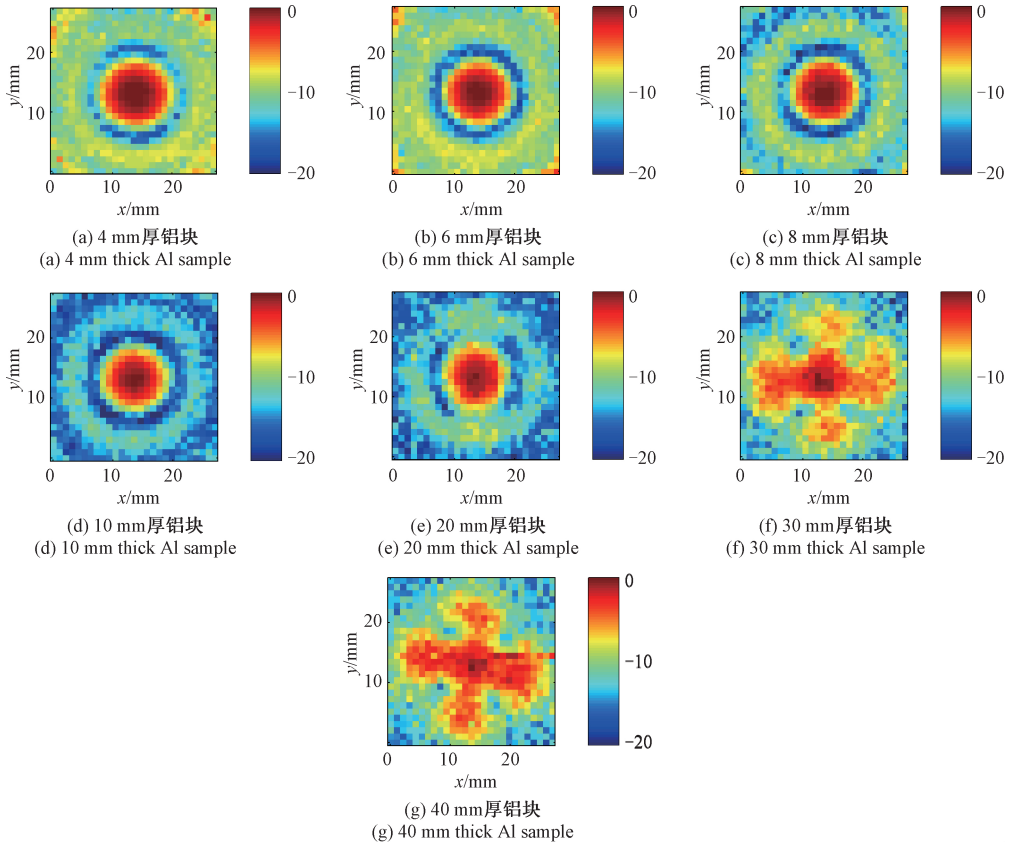


图 11 不同厚度下被测环形线圈 EMAT 声场分布

Fig.11 Sound field distribution of tested planner coil EMAT at different thicknesses

从图 11 中可以看出,环形线圈在金属固体材料中的辐射声场主要由主瓣与旁瓣构成,主瓣能量更高,而旁瓣能量较低,并且以一定间隔在主瓣周围环绕。在不同厚度截面下的声场都近似为轴对称分布,在 20 mm 以下,声场为圆形,而在 30 和 40 mm 声场形状发生较大变化,辐射声场的能量向外扩散,造成声场外型的变化,由之前的规则圆形变为四叶草形,这可能是由于声场扩散的指向性不同,造成声束扩散不均匀,导致声场发生较大的变形。

同时,随着厚度的变化,声场宽度也发生变化,在 4 和 6 mm 的铝板上,旁瓣的宽度相对较宽,与周围声场声压大小相近,较为混乱,而 8 mm 铝板上可以清晰观察到旁瓣宽度缩小,能够明显观察到旁瓣的宽度。随着厚度增加,旁瓣宽度逐渐加大,但能量在大幅减小。

以上分析发现环形线圈在厚度为 4、6、8、10、20 mm 厚度的铝块中,主声束能量相对集中,随着厚度增加,声场形状基本保持为规则的圆形,唯一变化的是声场宽度,主要表现为旁瓣的变化,旁瓣会随传播距离的增大而逐渐消失,而主声束中心能量会随这传播距离的增加而向周围扩散,变得越来越小。

为了更直观看到环形线圈 EMAT 在非铁磁性材料内部的三维辐射声场,对图 11 中不同深度截面的二维声场叠加,并归一化处理,得到的三维辐射声场如图 12 所示。从叠加后的三维辐射声场分布图可以看出,该待测换能器在铝块中的辐射声场,声压随传播距离增加而减小,在 30 mm 后声场声束外型发生巨大变化,由集中向外部扩散。

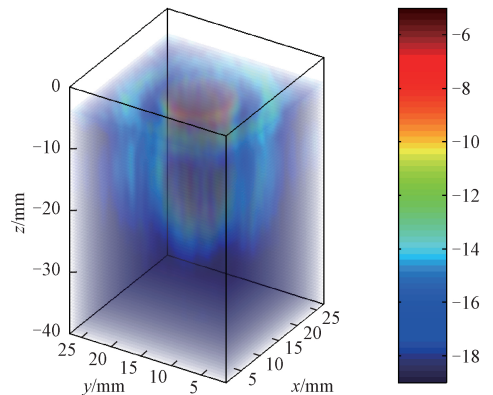


图 12 辐射声场的三维分布

Fig.12 Three-dimensional map of the radiated sound field

由于电磁超声换能器适用于铁磁性和非铁磁性材料,为了验证该方法的可靠性,故对铁磁性材料 20#钢采用相同的测试方法测试该换能器在铁磁性材料内部的辐射声场。而铁磁性材料的相对磁导率较高,激励与接收换能器

内部磁铁产生的静磁场不会因为穿过材料而产生磁场叠加,进而造成换能效率的变化。为此,当被测介质材料为铁磁性材料时,不需要进行幅值补偿。如图 13 所示为在不同厚度下,该被测换能器在 20#钢内部的辐射声场。

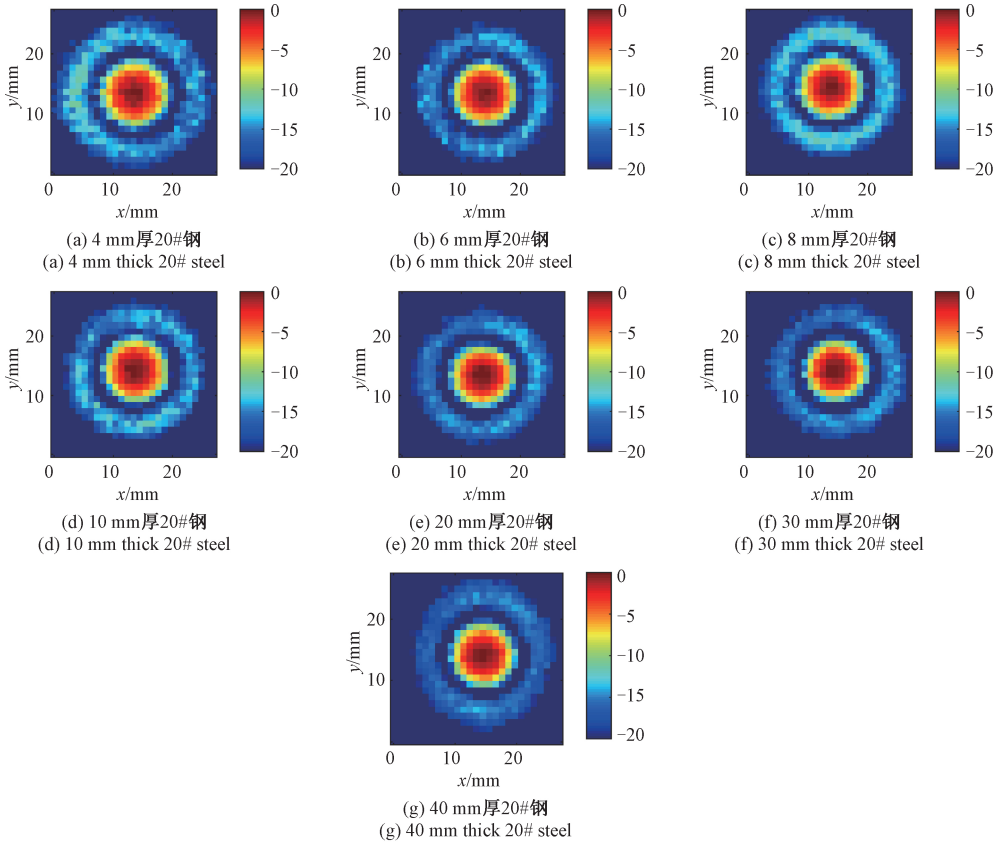


图 13 不同厚度 20#钢下被测环形线圈 EMAT 声场分布

Fig.13 Sound field distribution of 20# steel planner coil EMAT at different thicknesses

如图 13 所示,该换能器在铁磁性材料中的辐射声场与非铁磁性材料相似,都由主瓣与旁瓣构成,且随着厚度的增加,铁磁性材料中的辐射声场并无较大的外形变化,仅在 40 mm 处旁瓣有沿 Y 轴扩散的趋势。而不同厚度下主声束的能量集中,但会随厚度增大,中心能量降低。在 4 mm 时,旁瓣相对较宽,能量较大;而 6 mm 时,旁瓣能量有所减弱,声场宽度减小;8 mm 处,旁瓣能量较为均匀,之后其旁瓣能量则会随厚度增大而减弱,这与非铁磁性材料相同。对 20#钢在不同厚度下的声场采用相同方法叠加得到的三维声场分布如图 14 所示。

3.2 辐射声场声束变化

由于发现声束宽度在固体金属材料中变化很大,所以对声束宽度着重分析。从图 11 和 13 可以看出,环形线圈的声场为轴对称分布,所以本文以声束中心沿 X 或 Y 轴任意一轴取中心声压衰减 -6 dB 后的直径范围作为声场宽度。由于在中心区域声压最大, -6 dB 为中心声

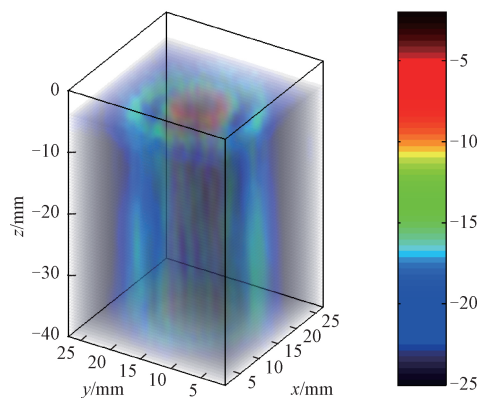


图 14 20#钢辐射声场的三维分布

Fig.14 20# steel three-dimensional map of the radiated sound field

压幅值的一半,对每个厚度下的声压范围提取绘制了声束宽度随传播距离的变化图,如图 15 所示。

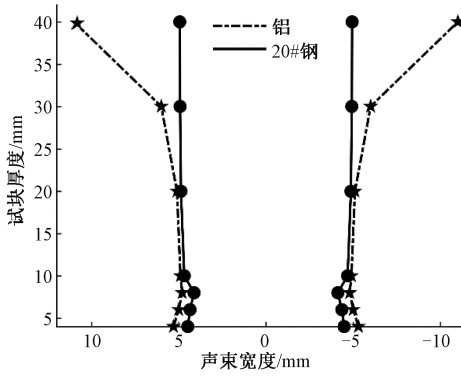


图 15 辐射声场声束宽度

Fig.15 Radiated sound field beam width

通过图 15 可以发现,环形线圈的声束在铁磁性和非铁磁性材料中都表现为轴对称,在 8 mm 范围内,声束宽度逐渐减小,8 mm 时最小,8 mm 之后声束宽度逐渐增大。铁磁性材料中声束宽度在 10~40 mm 基本变化不大,而非铁磁性材料中,声束从 10~20 mm,声束宽度缓慢增大,在 30 mm 后,声束宽度大幅增大,由于所测换能器的激励频率为 3.5 MHz,表明环形线圈在 3.5 MHz 的激励频率下其近场长度为 8 mm 左右,而之后为其远场区域。

4 结 论

本文提出了断层扫描方式对横波 EMAT 在固体中三维辐射声场分布进行测量的方法。研制了用于声场扫描测量的针式 EMAT,建立测量的实验系统,对某环形线圈横波直入射 EMAT 所激励的辐射声场进行了验证性测量。主要结论如下:

1) 断层扫描实验系统中的接收系统是测量的关键部分。采用针式 EMAT 换能器接收声场振动,针式 EMAT 需具有较小的面积,以提高扫描声场的分辨率,同时其频带需与被测换能器有较大的重合性,以保证其主频在被测换能器的工作频带内。此外,接收系统需具有良好的稳定性和一致性,本文接收系统分别在最薄的 4 mm 与最厚的 40 mm 试块中辐射声场的中心与最边缘进行测试,相对误差最小为 1.16%、最大为 7.87%。

2) 采用针式 EMAT 对 EMAT 进行三维声场测量时,如果测量的是非铁磁性材料中的辐射声场,则测量系统中针式 EMAT 的磁铁和被测 EMAT 的磁铁产生相互的作用力,从而同时影响针式 EMAT 和被测 EMAT 的换能效率,从而导致声场测量的误差。此时,应分别测量激励补偿曲线和接收补偿曲线,并对扫描测量信号进行补偿,才能得到准确的声场分布特征。

3) 分别对不同厚度的试块上的辐射声场进行扫描,

得到辐射声场在不同厚度下的辐射声场的二维分布图,经插值叠加后可绘制出三维辐射声场的分布图。

4) 测量了常见环形线圈 EMAT 在 3.5 MHz 的辐射声场,得到了其近场距离约为 8 mm,在 8 mm 以后为辐射声场的远场区域。在近场区域中辐射声场声束宽度先由大减小,在远场区域的开始位置减到最小,在远场区域中声束随传播距离逐渐扩大。

参考文献

- [1] 孙斐然,孙振国,张文增,等. 基于洛伦兹力机制的电磁超声发射换能器的建模与优化[J]. 机械工程学报, 2016,52(6):12-21.
SUN F R, SUN ZH G, ZHANG W Z, et al. Modeling and optimization of electromagnetic ultrasonic emission transducer based on lorentz force mechanism [J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2016,52(6):12-21.
- [2] OGI H. Field dependence of coupling efficiency between electromagnetic field and ultrasonic bulk waves [J]. Journal of Applied Physics, 1998, 82(8):3940-3949.
- [3] 徐文峰,赵建平. 电磁超声横波检测钢板减薄缺陷的有限元分析[J]. 压力容器, 2016, 33(5):62-68.
XU W F, ZHAO J P. Finite element analysis of electromagnetic ultrasonic shear wave detection of steel plate thinning defects [J]. Pressure Vessel, 2016, 33(5):62-68.
- [4] MA Q Z, JIAO J P, HU P, et al. Excitation and detection of shear horizontal waves with electromagnetic acoustic transducers for nondestructive testing of plates [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(2):428-436.
- [5] DIXON S, EDWARDS C, PALMER S B. High accuracy non-contact ultrasonic thickness gauging of aluminium sheet using electromagnetic acoustic transducers [J]. Ultrasonics, 2001, 39(6):445-453.
- [6] ISLA J, CEGLA F. Optimization of the bias magnetic field of shear wave EMATs [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2016, 63(8):1148-1160.
- [7] LEE J H, KIM D H. Integrity evaluation of pipe welding zones using wavelet transforms and specific sensitivities based on SH-EMAT pulse-echo method [J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2014, 15(10):2051-2057.
- [8] KAWASHIMA K. Theory and numerical calculation of the acoustic field produced in metal by an electromagnetic ultrasonic transducer [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1976, 60(5):1089-1099.

- [9] DHAYALAN R, KUMAR A, RAO B, et al. A hybrid finite element model for spiral coil electromagnetic acoustic transducer (EMAT)[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics*, 2014, 46(3): 491-500.
- [10] ZHAI G, WANG K, WANG Y, et al. Modeling of Lorentz forces and radiated wave fields for bulk wave electromagnetic acoustic transducers [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(5):054901.
- [11] WU D, LI M X, WANG X M. Shear wave field radiated by an electromagnetic acoustic transducer [J]. *Chinese Physics Letters*, 2006, 23(12):3294-3296.
- [12] 陈秋颖, 王小民, 李明轩, 等. 电磁声换能器的辐射声场研究[J]. *声学学报(中文版)*, 2009, 34(4): 318-32.
- CHEN Q Y, WANG X M, LI M X, et al. Study on radiation acoustic field of electromagnetic acoustic transducer[J]. *Acta acoustica (Chinese Version)*, 2009, 34(4):318-32.
- [13] SHI W, WU Y, GONG H, et al. Enhancement of lift-off performance and conversion efficiency using a copper backplate for a spiral coil EMAT [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics*, 2016(2):1-14.
- [14] SHI W, WU Y, GONG H, et al. Optimal design of spiral coil electromagnetic acoustic transducers considering lift-off sensitivity operating on non-ferromagnetic media[J]. *Nondestructive Testing & Evaluation*, 2018, 33(1): 1-19.
- [15] 柳增运. 基于水听器超声声场特性参数测量研究[D]. 北京:北京化工大学, 2011.
- LIU Z Y. Measurement of ultrasonic field characteristics based on hydrophone [D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2011.
- [16] JU Y, XIE H, ZHAO X, et al. Visualization method for stress-field evolution during rapid crack propagation using 3D printing and photoelastic testing techniques[J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1):43-53.
- [17] HU Z T, AN Z W, LIAN, et al. Propagation properties of backward Lamb Waves in plate investigated by

dynamic photoelastic technique [J]. *Chinese Physics Letters*, 2017, 34(11):49-51.

- [18] MIRKHANI K, CHAGGARES C, MASTERSON C, et al. Optimal design of EMAT transmitters[J]. *NDT & E International*, 2004, 37(3):181-193.
- [19] 李超月. 基于断层扫描的 EMAT 辐射声场测定及特性研究[D]. 太原:中北大学, 2019.
- LI CH Y. Measurement and characteristics of EMAT radiation sound field based on tomography[D]. Taiyuan: North University of China, 2019.

作者简介



郑阳(通信作者), 2007 年于北京航空航天大学机械工程及自动化专业获得学士学位, 2012 年于北京工业大学机械工程专业获得博士学位。现于中国特种设备检测研究院, 国家质量监督检验检疫总局无损检测与评价重点实验室担任研究员, 从事无损检测与评价技术相关的方法研究、检测装备开发及标准研制。

E-mail: zhengyangchina@126.com

Zheng Yang (Corresponding author) received his B. Sc. degree in mechanical engineering and automation from Beihang University in 2007, and Ph. D. degree in mechanical engineering from Beijing University of Technology in 2012. Now, he currently works as a research fellow at China Special Equipment Inspection and Research Institute. His research interests include non-destructive testing and evaluation techniques, instruments development and standards development.



李铮, 2017 年于中北大学信息商务学院机械设计制造及其自动化专业获得学士学位, 现为中北大学和中国特种设备检测研究院联合培养硕士。主要研究方向为电磁超声技术。

E-mail: 827039624@qq.com

Li Zheng received his B. Sc. degree in mechanical design, manufacturing and automation from the College of Information and Business, North University of China in 2017. Now, he is a joint master of North University of China and China Special Equipment Inspection and Research Institute. The main research field is electromagnetic acoustic transducer.