

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412731

基于电磁超声换能器的 SH 型焊缝导波激励方法*

刘博涵^{1,4}, 陈宗泽¹, 于建新^{1,2}, 余旭东¹, 邓明晰³

(1. 北京航空航天大学宇航学院 北京 100191; 2. 中国航天科技集团运载火箭技术研究院 北京 100076;
3. 重庆大学航空航天学院 重庆 400044; 4. 北京航空航天大学沈元学院 北京 100191)

摘要:采用传统压电换能器在板类结构中激励 SH 型导波时常出现波束指向性不佳以及随同激励 Lamb 波侧向反射干扰, 影响缺陷检测定位的效率和精度。本文通过基于洛伦兹力的电磁超声换能器(EMAT)的设计与激励研究, 提出一种可在板类焊接接头特征结构中产生高指向性超声特征导波(FGW)的激励方法。研究采用周期性永磁体及回折线圈制备电磁超声换能器, 通过多物理场频域/时域有限元数值方法分析了板类水平剪切型导波的传播特性和远场波束指向性, 并加以实验验证。结果表明所提出的激励方法能够在 4 mm 板厚铝制搅拌摩擦焊缝中有效激发出中心频率为 440 kHz 的水平剪切(SH)型特征导波, 具有较高的导波模式纯度以及局域于焊缝传播的声能陷效应。相较于压电方式激励 SH 型焊缝导波, 有效抑制了侧向 Lamb 波的产生, 为焊缝特征导波的远距离传播及缺陷检测提供支撑。

关键词: SH 型导波; 电磁超声换能器; 洛伦兹力; 高指向性

中图分类号: TH878 TN912 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Investigation of exciting SH-type welded guided waves based on electromagnetic acoustic transducers

Liu Bohan^{1,4}, Chen Zongze¹, Yu Jianxin^{1,2}, Yu Xudong¹, Deng Mingxi³

(1. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076; 3. China College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 4. Shen Yuan Honors College, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: When exciting SH-type guided ultrasonic waves in plate-like structures, traditionally utilized piezoelectric transducers often exhibit relatively poor ultrasonic beam directivity, thereby affecting the efficiency and accuracy of defect detection and localization. To address this limitation, the present study proposes an excitation approach based on Lorentz force electromagnetic acoustic transducers (EMAT) for generating highly directive feature guided waves (FGW), which are firmly confined to the welded joints of the plate. The configuration of periodic permanent magnets and a repulsion coil is used for fabrication of the EMAT. The propagation and directivity characteristics of far-field ultrasonic beam of SH-type guided waves in flat aluminum plate are analyzed using multiphysics finite element (FE) simulations in both the frequency and time domains, and are validated experimentally. The results have manifested that the proposed excitation method effectively generates SH-type FGW centered at 440 kHz in 4-mm-thick aluminum friction stir welded joints, demonstrating high mode purity and the presence of energy trapping effect localized to the weld seam. Compared to piezoelectric excitation of SH-type weld guided waves, the proposed method effectively suppresses the generation of lateral Lamb waves, providing solid support for the EMAT aided capabilities of long-distance propagation and defect detection.

Keywords: SH-type guided waves; electromagnetic acoustic transducer; Lorentz force; high directivity

收稿日期: 2024-08-05 Received Date: 2024-08-05

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(12134002, 12374429, 12004026)、中国科协青年人才托举工程项目(2020QNRC002)、北航沈元学院卓越研究基金项目(230123205)资助

0 引言

基于超声导波的监/检测技术因其具备检测效率高、传播距离远、缺陷识别灵敏度高等特点,已应用于管道、板类等工程结构的无损检测与健康监测^[1-2]。其中,相较于 Lamb 波,水平剪切(shear horizontal, SH)型导波模式,因兼具可选择低频散“模式-频率”组合较多、对多方向/多类型缺陷识别灵敏、可表征粘接结构剪切模量等特点,更具应用优势^[3]。各类超声换能器是激励和接收超声导波信号的核心元件,主要包括压电超声换能器和电磁超声换能器(electromagnetic acoustic transducer, EMAT)两大类。传统的压电换能器须通过耦合剂或粘结剂与被测件连接以阻抗适配提高声能量传输效率,往往在激发 SH 型导波的同时激励出沿侧向传播的 Lamb 波,影响了待测方向范围内 SH 型导波传播的模式纯度,增加了对应的波传播及缺陷交互信号分析的复杂度^[3],进而较为明显地限制了其应用效果。而 EMAT 因其设计灵活度高、非接触、无需耦合剂等特性,已成为激励/接收 SH 型导波及相对高频瑞利波等特定模式的重要手段^[4-11]。对于铁磁性材料(如铁、镍等),使用 EMAT 激励 SH 型导波基于磁致伸缩效应^[12]。对于非铁磁性材料(如铝、铜等),EMAT 激励 SH 型导波则是通过施加电磁洛伦兹力实现,即采用周期性永磁体(periodic permanent magnet, PPM)提供恒定磁场,对围绕永磁体轴线缠绕的线圈通电,其会在待测件上表面产生感应涡流,感应涡流在恒定磁场作用下产生洛伦兹力,进而激发 SH 型导波^[13]。

激励 SH 型超声导波 EMAT 设计及应用的研究主要集中于永磁体布置方式、线圈样式优化等。有研究工作探讨通过优化 EMAT 布置形式,使之由多层多组周期性永磁体交替放置,简化为仅需两组水平充磁的永磁体形式即可实现 SH0 导波的有效激励^[14];亦有研究工作利用在特定工作点下的 PPM 型 EMAT 的应力边界条件和激励信号带宽特征,聚焦控制不同 SH 型模式生成,使 EMAT 在相对高频时仍然可以仅激励单一 SH0 模式,以有效减少其他导波模式的干扰^[15]。类似地,除在板类结构中可稳定激励/接收长距离传播的 SH 型导波外,EMAT 亦应用于激励圆管类结构中沿轴向稳定传输的 T 模式导波,如 T(0,1), T(0,2)等,以实现其中的裂纹缺陷检测和腐蚀情况判别^[16-17]。

此外,实际工程结构应用中存在大量异形结构,例如焊缝、弯角、加筋壁板等,而该类结构的共同点是截面形状非规则并沿着侧向延伸,且横截面中存在几何形状或材料属性不同于相邻区域的特征区,通常将含有特征区的异形结构称为异形特征结构。导波在异形特征结构中传播时,存在声能量稳定局域于特征区的“声能陷效

应”,而沿着侧向母体呈现消逝波(evanescent wave)特性。特征区对超声传播起到了约束和引导的作用,在此情形下异形特征结构可视为声波导,在其中特征区传播的超声导波被称为特征结构导波(feature guided wave, FGW)。近年来的研究表明,FGW 应用于三维异形特征结构的无损检测已呈现出独特的优势与潜力^[18-19]。本文发现并验证了焊缝、弯角、加筋壁板等特征结构中存在的系列 SH 型特征导波模式及其传播特性,并通过压电激励-激光/压电接收等形式的试验测试有效论证了稳定局域传播的 SH 型 FGW 可以对焊缝等特征区内的裂纹、孔洞、分层脱粘等缺陷进行长距离检测检测识别及精确定位^[20-21]。相较于由焊接板侧向激励板内导波并传播横穿焊缝以推断其结构完整性的检测方式^[22]更具评价效率。然而大量实验测试过程中发现,采用剪切式压电换能器在焊接接头端面/表面激励 SH 型焊缝特征导波将不可避免地在邻接母材板内激发出 S 或 A 模式导波,经板侧边界等反射后将回传经过沿纵向延伸的焊缝结构^[23],对 SH 型 FGW 的接收及其信号分析十分不利。

从换能器激励角度讲,声场指向性描述超声场定向发射与传播的能力,可视为激励声能量向单一方向集中辐射超声波束能量的性质^[24]。因此,本文探究借助 EMAT 激励方式自身的高指向性以强化 FGW 激励及其在特征结构中传输效率,并同时有效抑制声能量向邻接母材板内 Lamb 波模式的分配和激发,进而提高特征结构延伸方向的导波模式纯度。文献研究多探讨全向(omnidirectional)SH 模式导波的激励方法及其对缺陷反射信号的有效接收,而对 SH 模式传播声场指向性的相关讨论较少。本文以运载火箭箭体结构中广泛采用的搅拌摩擦焊^[25]连接结构为例,针对性地探讨通过 EMAT 设计与应用在其焊缝结构内激发高指向性、长距离传播的 SH 型焊缝特征导波的激励方法。

研究基于洛伦兹力原理的周期性永磁体及回折线圈 EMAT 设计、制备及激励应用,通过多物理场频域/时域有限元数值模拟方法分析板类焊缝中 SH 型导波的传播特性和远场波束指向性,通过实验测试验证了在 4 mm 板厚铝制搅拌摩擦焊焊缝内所激发的中心频率为 440 kHz 的 SH 型焊缝特征导波。并且,与压电换能器激励实验声场信号及指向角对比,论证了 EMAT 在焊缝结构中激励的 SH0 特征导波具有较高的模式纯度和较为良好的指向性。

1 换能器设计

1.1 设计原理

设计的 EMAT 由 PPM 和激励线圈构成,基于洛伦兹力原理,通过激励线圈在铝板焊缝区域内产生感应电流,

感应电流在周期性磁场作用下产生作用力,激励焊缝区域内的 SH0 特征导波,其原理图如图 1 所示。其中,试件件为非铁磁性材料铝板;PPM 使用多个磁铁交替堆叠两层以提高磁感应强度;激励线圈使用回折线圈构型,实现方式为 PCB 印刷。

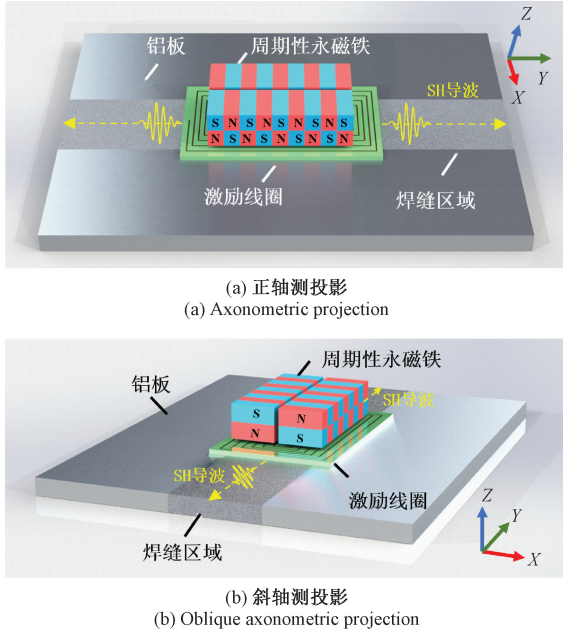


图 1 高指向性 SH0 特征导波 EMAT 设计原理
Fig. 1 Diagram of high-directivity EMAT for SH0 feature guided wave

按图 1 所示坐标系,铝板上表面为 XY 平面, Z 轴方向为垂直于铝板向上。当交变电流通过线圈时,线圈产生的感应电场会在铝板焊接区域的近表面产生同频率感应涡流 J_e 。此时,铝板中存在 PPM 产生的静磁场 B_s 和感应涡流 J_e 产生的感生磁场 B_d ,由于 $B_d \ll B_s$,所以可以在分析时忽略 B_d ,则铝板靠近表面的区域会受到主要沿着 X 轴方向的正负交替的洛伦兹力 F_L ,从而引起试件内部的质点发生振动,且其频率等于激励频率。通过合理设置磁铁间距,激励线圈形状,洛伦兹力 F_L 的大小、方向高度灵活可调,从而可经过合理设计在铝板的焊缝中产生沿着 Y 轴方向传播的 SH 型特征导波。

1.2 换能器工作点选择

为简化记号,令激励信号的频率为 f 、铝板的厚度 d ,磁铁间距为 D ,定义频厚积 f' 和距厚比 D' 两个特征量:

$$f' = f \times d \quad (1)$$

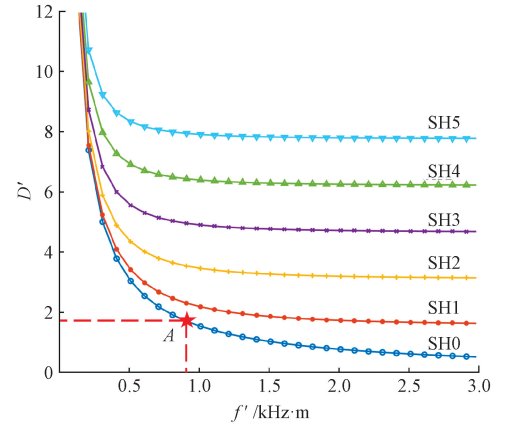
$$D' = D/d \quad (2)$$

在此基础上,通过 SH 型导波方程,可以得到 SH 型导波激励方程和相速度方程^[26]:

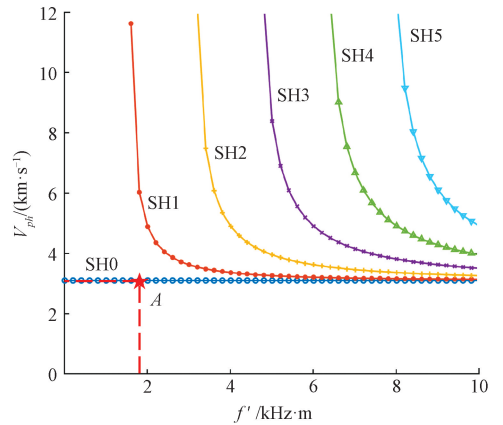
$$\frac{4f'^2}{c_s^2} - \frac{1}{D'^2} = n^2 \quad (3)$$

$$V_{ph} = 2f'D' = \frac{2f'c_s}{\sqrt{4f'^2 - n^2c_s^2}} \quad (4)$$

其中, V_{ph} 为 SH 型导波相速度; c_s 为铝板的横波波速,大小为 3 080.4 m/s; n 为 SH 型导波的阶数。基于式(3)、(4)可以绘制出如图 2 所示的频散曲线和工作点设计曲线。从频散曲线中看出,非频散的 SH0 模式导波的相速度和群速度不随频率的变化而变化,恒等于铝板中横波的波速。正因为如此,在铝板中激励 SH0 特征导波模式在 NDT 中具有优势。



(a) SH 型导波 $f'-D'$ 曲线
(a) Curves of $f'-D'$ for SH guided wave



(b) SH 型导波 $V_{ph}-D'$ 曲线
(b) Curves of $V_{ph}-D'$ for SH guided wave

图 2 SH 型导波频散曲线及工作点选取
Fig. 2 Dispersion curves of SH guided wave and the selection for operating point

为只激发出 SH0 模式特征导波,在选取设计参数时,激励信号的频率尽量小于 SH1 模式导波的截止频率,但综合考虑过低的频率会导致波长增大,会在一定程度上影响 EMAT 换能器大小和缺陷检测的工程要求。此处,作者选取的 EMAT 设计点为:频率 $f = 440$ kHz,波长 $\lambda = 7$ mm,相速度和群速度均为 3 080.4 m/s,已在图 1 和 2 中被标出。

2 EMAT 三维时频域仿真分析

2.1 时频域仿真设置

EMAT 的三维仿真模型使用 COMSOL Multiphysics 进行建模。在建立三维模型的过程中对回折线圈进行适当简化,仅保留位于 PPM 磁铁正下方的部分线圈,将其按照印刷电路板对应的位置设定为单层的二维几何直线,且按照实验设计对应的提离距离进行 Z 向位置设置,激励方式为在直线中的边电流激励。PPM 磁铁使用材料为 NdFeB,在激励区域内按两层交错周期性排列。对焊接区域的材料设置直接使用母材的材料属性,这主要是考虑到搅拌摩擦焊通过旋转摩擦加热与塑性变形原理实现,虽可能引起铝板中微观组织结构相变,但不会影响其杨氏模量、泊松比等力学性能变化^[20],而且由于 EMAT 激励的导波信号波长较大,该设置不影响仿真中产生 SH0 型特征导波模式。除 PPM 磁铁和铝板外,空间中剩余部分使用空气域进行填充。EMAT 仿真模型所使用的主要设计参数如表 1 所示。

表 1 EMAT 设计及试验件材料参数表		
Table 1 Design parameters of the EMAT and experimental materials		
组件	设计参数	值
磁铁	长度/mm	10
	宽度/mm	3.5
	高度/mm	4
	提离距离/mm	0.5
	剩余磁通密度/T	1.21
	电导率/($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	6.67×10^7
激励线圈	线圈匝数	7
	导线宽度/mil	25
	提离距离/mm	0.5
	导线间距/mil	25
	有效长度/mm	30
	峰峰电流/A	200
铝板试件	板厚/mm	4
	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 740
	杨氏模量/GPa	70
	泊松比	0.33
	电导率/($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	3.77×10^7

在仿真实施方面,该三维仿真模型使用固体力学场和磁场的多物理场耦合进行计算。在频域分析中,本文使用

稳态分析和频域扰动相结合的方式仿真计算:首先通过稳态分析获取空间中磁场分布的稳定状态,然后通过频域扰动计算中心频率在 440 kHz 的模态,进而进行可以获得 EMAT 的整体频域响应结果。在时域分析中,在保证波包大小适中、易于观察和分辨的前提下,激励电流选择 5 个周期,经过汉宁窗调制的 440 kHz 正弦电流信号。在边界条件方面,整个模型磁场域几何外轮廓的边界条件为磁绝缘边界条件,铝板四周的边界条件为低反射边界条件,上下表面为自由边界条件。其余几何区域的设置两模型保持一致。建模完成后的仿真模型如图 3 所示。

此外,为保证 SH0 特征导波仿真的准确性,对铝板区域的最大网格大小设定为 1.2 mm,空气域等区域最大网格大小适当放宽,设定为 8 mm;在时域求解器中,采用隐式求解方法,默认时间步进设定为 3×10^{-6} s。

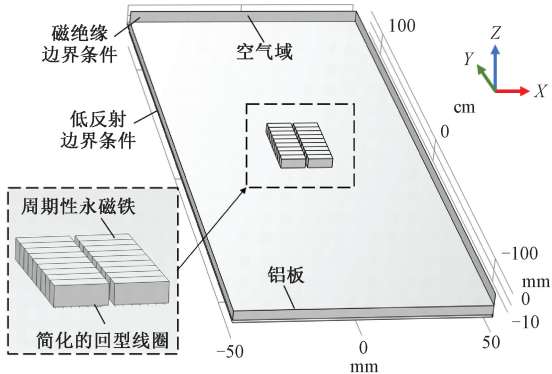


图 3 洛伦兹力耦合的 EMAT 仿真模型
Fig. 3 EMAT simulation model diagram based on Lorentz force coupling

2.2 仿真计算结果

通过频域仿真结果可绘制铝板的位移云图如图 4(a) 所示,图中粒子位移幅值已进行归一化处理。在 EMAT 中心沿 Y 方向 ± 30 mm 内为 EMAT 激励的近场区,超过该范围的区域为远场区。如果以能量下降 6 dB(位移幅值降低 50%)为声束边界进行判定,可以得到声场能量的 -6 dB 线如图中虚线所示,该线与 EMAT 中轴线夹角为 8.5° ,此角度即为 EMAT 的声场指向角。与现有文献对比可以看出,此 EMAT 构型可在铝板焊缝中激励出具有高指向性的 SH0 模式超声特征导波。

为进一步研究该 EMAT 是否激发出 S0 波等板内 Lamb 波信号,对铝板中轴线上点的位移进行提取,绘制沿不同方向的粒子位移图如图 4(b) 所示。由此可得,在铝板中轴线上的粒子位移 X 方向占据主导其余两个方向的粒子位移极小,符合 SH 型模式特征导波的粒子位移分布特征。且在远场区中可测得归一化粒子位移的峰峰值位置坐标间距为 7.15 mm,符合波长 7 mm 的 SH0 特征导波设计预期。

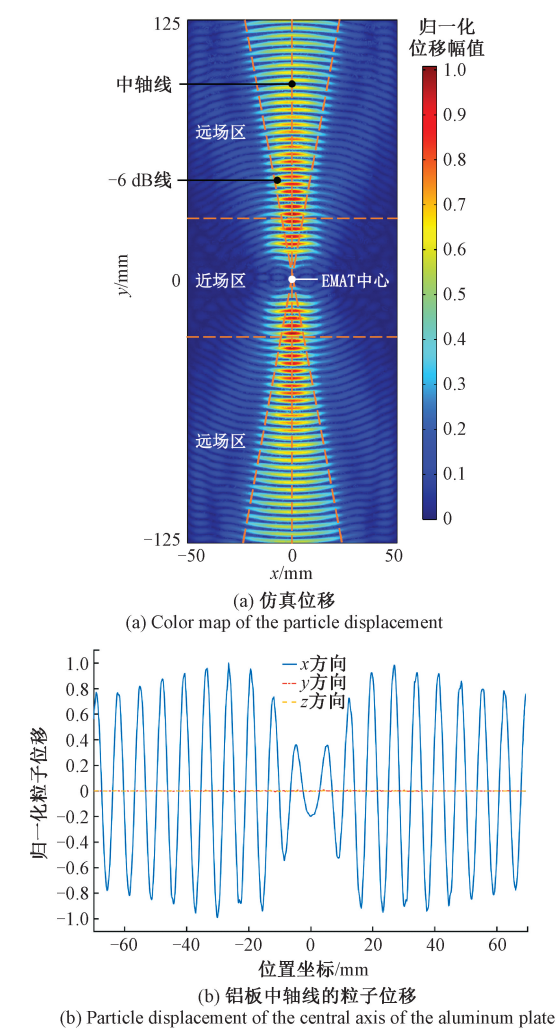


图 4 频域仿真中铝板粒子位移结果

Fig. 4 Displacement results of aluminum plate particles in frequency-domain simulation

在时域仿真中,提取了铝板中的归一化粒子位移在 10、12 和 14 μs 的位移云图如图 5(a) 所示。可从中明显观察到 SH0 特征导波模式的波传播特征。为进一步求得所激励导波的波速,在图 5(a)中标记了在 EMAT 中轴线上的 P_0 和 P_1 两点,它们距离 EMAT 中心点分别为 3 和 4 cm。提取 P_0 和 P_1 两点的 X 方向位移,其结果如图 5(b) 所示。由此可计算出激励的 SH0 特征导波模式的波包的群速度约为 3 150 m/s。

3 实验验证

3.1 实验设置

开展实验验证所设计 EMAT 在铝板搅拌摩擦焊缝中激励高指向性 SH0 特征导波的可行性,采用的实验装置有制备的 EMAT 换能器、通过搅拌摩擦技术焊接的铝

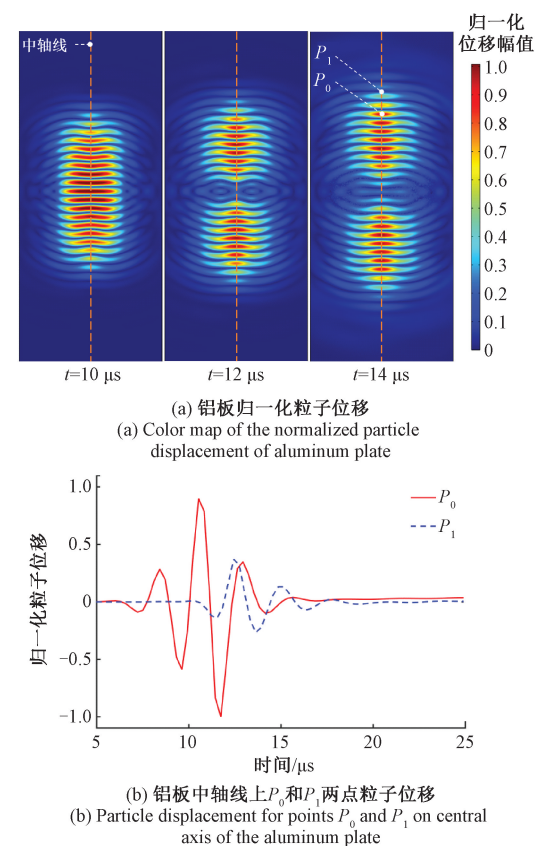
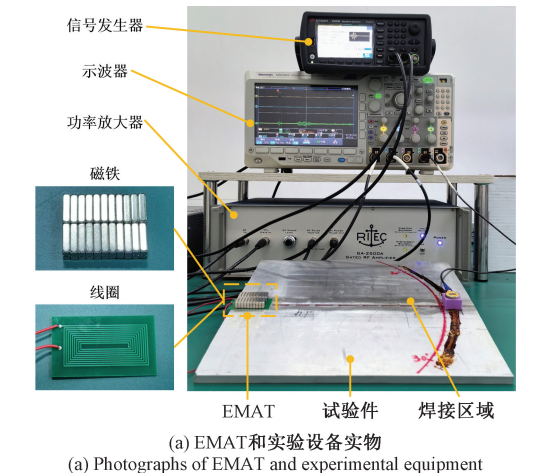


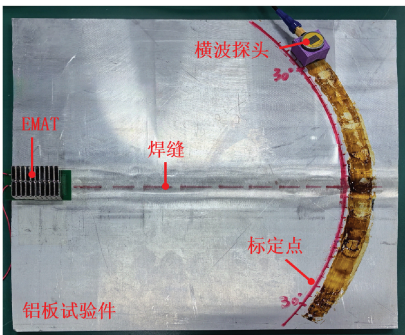
图 5 时域仿真模型中铝板粒子位移结果

Fig. 5 Displacement results of aluminum plate particles in time-domain simulation

板、信号发生器(Keysight Inc. , 型号:33500B)、功率放大器(RITEC Inc. , 型号: GA-2500)、剪切式压电换能器(Olympus Inc. , 型号: V154-RM)、示波器(Tektronix , 型号: MDO3024)。实验的实物图如图 6 所示。

PPM 磁铁阵列的组装方式采用两步组装相结合,以尽可能降低形位误差:首先,拼装 2×2 底面面阵磁铁;再将面阵磁铁在保证中心对齐的条件下平移对接组合成





(b) EMAT激励SH0特征导波指向角测量实验照片
(b) Experimental photo of EMAT excitation SH0 characteristic guided wave directional angle measurement

图 6 EMAT 激励 SH0 特征导波实验实物

Fig. 6 Photographs of EMAT for excitation of SH0 guided wave experiment

PPM 磁铁阵列。完成后测量其形面偏移,并使用重物压紧以减小过大的形面偏移量。

本文的实验方法为:信号发生器产生汉宁窗调制的正弦信号,其通过功率放大器放大产生的电流作为激励通过 EMAT 线圈,在铝板中激发高指向性 SH0 特征导波,SH0 特征导波沿着焊缝特征区域向前传播,并由位于焊缝另一侧的压电换能器接收。激励信号和接收信号全部通过示波器获取。本次实验的激励信号与仿真相同,为 5 周期汉宁窗调制的 440 kHz 正弦信号。该设置在方便工程实现的基础上,保证了较高的形位精度。

将通过实验验证所设计 EMAT 的参数合理性和激发高指向性 SH0 特征导波的能力,设计的测试位点如图 7 所示。其中,A、B 两点位于焊缝上,其距离 EMAT 中心距离分别为 86 和 186 mm,用于验证 SH0 特征导波激励的正确性。在测量 SH0 导波指向性方面,在距离 EMAT 中心 224 mm 的圆周上均布有 27 个测点,相邻的测点的圆

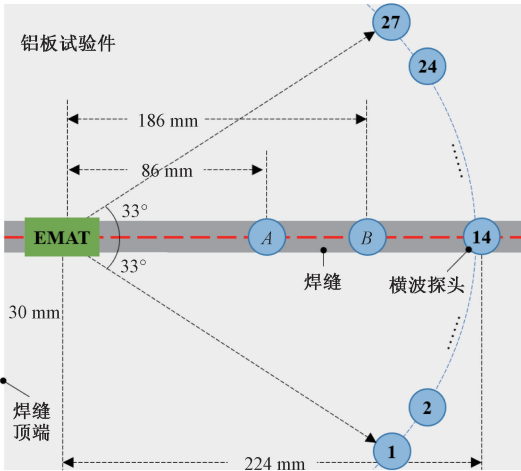


图 7 实验测试位置点

Fig. 7 Schematic diagram of experimental testing locations

周间距约为 1 cm,可测量沿 EMAT 中轴线呈对称分布的 66°圆周角范围内的铝板表面位移信号,测量的位移方向为沿圆周方向的切向位移。切向位移将通过剪切式压电换能器转换为电压信号,测试 EMAT 高指向性激励的性能。

3.2 实验结果

首先,以 A 点的激励信号和接收信号为例,验证所设计 EMAT 的参数合理性和导波激发的有效性。EMAT 激励电流信号和在 A 点处剪切式压电换能器接收到的电压信号如图 8 所示。考虑到铝板的长度有限,EMAT 在铝板焊缝的一端施加激励,则铝板的焊缝顶端会产生反射的 SH0 特征导波,也同时被剪切式压电换能器接收到。对于位置 A,SH0 特征导波被直接接收的理论传播距离为 86 mm,在焊缝顶端反射后接收的理论传播距离为 146 mm。在实验中,将接收到的信号经过 Hilbert 变换后,2 次对应的飞行时间(time of flight, TOF)分别为 34.4 和 53.9 μs ,对应的实测波速分别为 3 098.0 和 3 089.3 m/s,与理论误差仅为 0.6% 和 0.3%。同理,对于位置 B 测量的波速与理论误差仅为 0.6% 和 1.2%。以上结果从实验上证明了本文设计的基于 EMAT 的激励方法能够成功在焊缝中激发所设计的 SH0 特征导波。

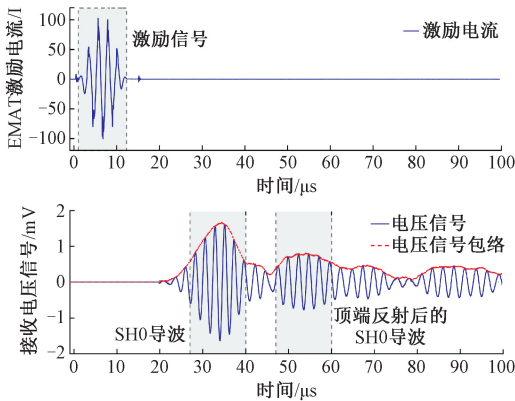


图 8 EMAT 激励电流和换能器接收电压信号

Fig. 8 Figures of the excitation current of EMAT and voltage signal received by the transducer

使用 3.1 节所述的 27 个测点的接收电压信号,选取第 10、12、14(对应 EMAT 中轴线)、16、18 位置,绘制换能器的电压信号,结果如图 9 所示。图 9 中阴影区域表示 SH0 导波模式波包初至时间的理论范围,从图中可以明显看出在中轴线上位置处有着较强的 SH0 特征导波信号,在其余位置处的导波信号迅速减小,没有多余的 Lamb 波侧向反射干扰信号,以上结果证明该 EMAT 激励 SH0 特征导波信号的纯度和指向性都较好。

此外,通过提取每一组接收信号对应傅里叶变换的频谱最大值,并进行归一化处理,以在频域上比较实验和

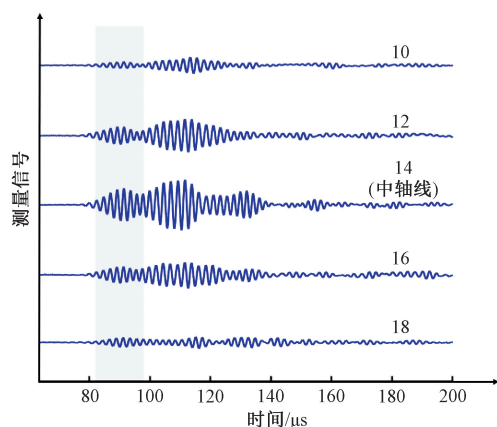


图 9 EMAT 声场指向性实验中不同位置接收电压信号对比

Fig. 9 Comparison diagram of voltage signals received at different positions in the sound field directionality experiment by EMAT

仿真结果如图 10 所示。图中实线为从有限元仿真中距离 EMAT 中心 50 mm 圆周提取的结果;圆点是实验数据;圆点之间连接的实线是实验数据通过 3 次样条插值的拟合曲线。从中可以看出,回折线圈 EMAT 的声场指向性实验结果与仿真结果比较接近,以能量下降 6 dB 为声束边界进行判定,实测声场指向角约为 6.5° 。总体与仿真计算相一致。在角度大于 20° 时,实验中的归一化幅值和仿真结果有偏差,主要原因有:在实验中,接收换能器角度放置不易控制,PPM 磁铁与激励回折线圈放置平行度存在误差;在仿真中,未充分考虑激励回折线圈外侧弯角部分电流产生的磁场对洛伦兹力的影响。

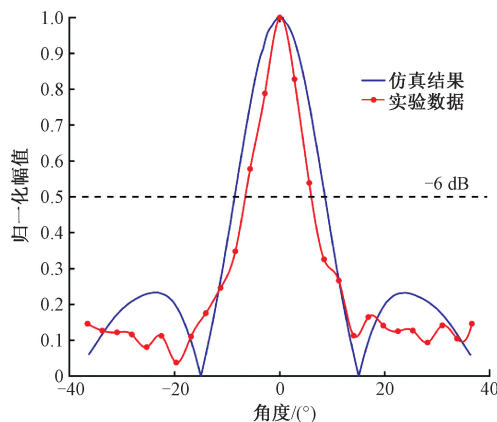


图 10 焊缝中声场指向性仿真和实验结果对比

Fig. 10 Comparison between simulation and experimental results of the directionality property of sound field

作为对照,使用常规的剪切式压电换能器配合横波耦合剂进行激励,使用另一个压电换能器进行接收,在同

样的位置进行测试,得到如图 11 所示的实验结果。在该实验中,压电换能器除 SH0 特征导波外产生大量的 Lamb 波,进而产生较多侧面反射信号,在很多位置区域,换能器接收到的侧面反射干扰信号强度甚至超过 SH0 特征导波。整个铝板中弥散的侧向反射信号极大地降低了信噪比,使得通过压电换能器几乎难以分辨出显著的 SH0 特征导波信号。与图 9 对比,使用本文设计的洛伦兹力耦合的回折线圈 EMAT,可以激励出纯度较高的在铝板焊缝中稳定传播的 SH0 特征导波,这对于后续基于长距离传播的 SH0 特征导波的焊缝检测有较大的工程意义。此外,若需检测焊缝的长度较长,可考虑使用增大电流,采用更多层磁铁堆叠或更换单位体积磁感应强度更大的磁铁等方式提高 SH 型焊缝导波的能量,具备较好的工程适应性。

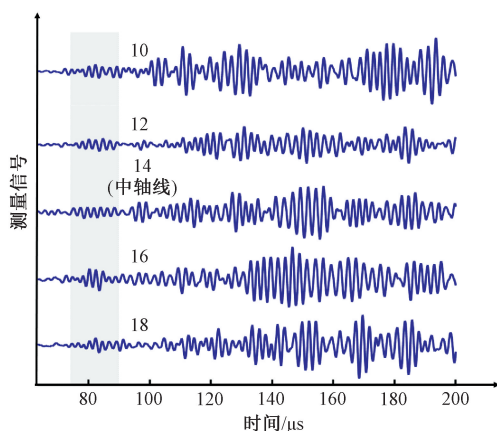


图 11 使用横波压电换能器激励的声场指向性实验中不同位置接收电压信号对比

Fig. 11 Comparison diagram of voltage signals received at different positions in the sound field directionality experiment by transverse transducer

4 结 论

通过基于洛伦兹力原理的电磁超声换能器 (EMAT) 激励方法研究,在有限元仿真和实验测试中有效激发了铝制板件搅拌摩擦焊缝内 SH 型特征结构导波,实现了声场指向角约 6.5° 的高指向性,具有较好的声能陷效应和声传输效率。通过与剪切压电激励方式对比,结果证明 EMAT 可有效抑制邻接板内 Lamb 波的随同激发及板件侧向反射波干扰,具有较好的模式纯度。基于本文提出的激励方法,依据目标导波模式波长和 PPM 周期性永磁体间距关系设置,可采用 EMAT 激励更高阶、非频散率段的 SH 型特征结构导波,为其应用于长距离焊缝的工业检测提供有力支撑。

参考文献

- [1] SU ZH Q, LIN Y. Identification of damage using Lamb waves: From fundamentals to applications[M]. Springer London, 2009.
- [2] OSTACHOWICZ W, SOMAN R, MALINOWSKI P. Optimization of sensor placement for structural health monitoring: A review[J]. Structural Health Monitoring, 2019, 18(3): 963-988.
- [3] THON A, BEANGER P. EMAT design for minimum remnant thickness gauging using high order shear horizontal modes[J]. Ultrasonics, 2019, 95: 70-78.
- [4] WILCOX P, LOWE M, CAWLEY P. Omnidirectional guided wave inspection of large metallic plate structures using an EMAT array[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, 52(4): 653-665.
- [5] LIU T H, PEI C X, CAI R, et al. A flexible and noncontact guided-wave transducer based on coils-only EMAT for pipe inspection[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 314: 112213.
- [6] XIE Y D, LI J Y, HUANG P, et al. A novel design of window function modulated meander-line-coils EMATs for unidirectional Rayleigh waves generation and sidelobes suppression[J]. NDT & E International, 2021, 123: 102501.
- [7] 孟凌霄, 石文泽, 卢超, 等. 基于编码压缩的纤维缠绕气瓶贴附式电磁超声检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(8): 82-99.
MENG L X, SHI W Z, LU CH, et al. Research on the attached electromagnetic acoustic detection method of fiber-wrapped gas cylinder based on coded compression[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(8): 82-99.
- [8] 杨理张, 张佳, 邢燕好, 等. 一种管道中 $T(0,1)$ 模态单向电磁超声换能器[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 98-106.
YANG L J, ZHANG J, XING Y H, et al. A unidirectional $T(0,1)$ mode electromagnetic acoustic transducer in pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2): 98-106.
- [9] 付悦, 王振, 罗嵘, 等. 基于点聚焦表面波 EMAT 的钢轨踏面检测实验研究[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(2): 84-89.
FU Y, WANG ZH, LUO R, et al. Research on rail tread detection based on point-focusing surface wave EMAT[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(2): 84-89.
- [10] 刘轩, 吕炎, 边策, 等. 管道电磁超声传感器阵列检测技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(11): 24-32.
- LIU X, LYU Y, BIAN C, et al. Electromagnetic acoustic transducer array of pipeline inspection technology[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(11): 24-32.
- [11] 杨斌, 易朋兴, 郝峥旭. 基于电磁超声的小样本铝板表面缺陷检测方法[J]. 电子测量技术, 2024, 47(3): 109-115.
- YANG B, YI P X, HAO ZH X. A small sample aluminum plate surface defect detection method based on electromagnetic ultrasound[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(3): 109-115.
- [12] 焦敬品, 刘文华, 张永强, 等. 基于磁致伸缩效应的 SH 波电磁超声换能器设计[C]. 中国电子学会, 中国振动工程学会. 2010 振动与噪声测试峰会论文集. 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 2010: 6.
- JIAO J P, LIU W H, ZHANG Y Q, et al. Electromagnetic acoustic transducer based on magnetostrictive effect for SH waves detection[C]. China Electronics Society, China Vibration Engineering Society Proceedings of the 2010 Vibration and Noise Testing. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, 2010: 6.
- [13] 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.
- [14] 崔雅鑫, 张应红, 胡芷逸, 等. 基于 SH_0 导波的电磁超声换能器设计与实验研究[J]. 压电与声光, 2021, 43(4): 443-448.
- CUI Y X, ZHANG Y H, HU ZH Y, et al. Design and experimental study of electromagnetic ultrasonic transducers based on SH_0 guided waves[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2021, 43(4): 443-448.
- [15] ZHAI G F, LI Y Q. Single SH guided wave mode generation method for PPM EMATs[J]. Chinese Physics B, 2020, 29(5): 054303.
- [16] BENEGAL R, KARIMI F, FILLETTER T, et al. Optimization of periodic permanent magnet configuration in Lorentz-force EMATs[J]. Research in Nondestructive Evaluation, 2018, 29(2): 95-108.
- [17] THON A, PAINCHAUD-APRIL G, LE DUFF A, et al. On the use of a linear array EMAT for remote thickness gauging using the reflected modes on a steel pipe[J]. NDT & E International, 2023, 139: 102917.
- [18] FAN ZH, LOWE M J S. Elastic waves guided by a welded joint in a plate[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2009, 465(2107): 2053-2068.

- [19] PETCHER P A, DIXON S. Weld defect detection using PPM EMAT generated shear horizontal ultrasound [J]. NDT & E International, 2015, 74: 58-65.
- [20] YU X D, ZUO P, XIAO J, et al. Detection of damage in welded joints using high order feature guided ultrasonic waves [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 126: 176-192.
- [21] YU X D, QIN R, DENG M X. New insights into topographically feature guided waves (FGW) propagation in non-uniform elastic waveguides [J]. Wave Motion, 2022, 109: 102866.
- [22] ZHANG J, HUNTER A, DRINKWATER B W, et al. Monte Carlo inversion of ultrasonic array data to map anisotropic weld properties [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2012, 59(11): 2487-2497.
- [23] WANG Y SH, GAO T, LIU D B, et al. Propagation characteristics of ultrasonic weld-guided waves in friction stir welding joint of same material [J]. Ultrasonics, 2020, 102: 106058.
- [24] 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.
LIU S ZH, ZHANG CH, JIN L, et al. 3D finite element analysis of electromagnetic ultrasonic transducers [J]. Journal of Electrical Engineering Technology, 2013, 28(8): 7-12.
- [25] 赵衍华, 李延民, 郝云飞, 等. 2219 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头组织与性能分析 [J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(6): 70-75.
ZHAO Y H, LI Y M, HAO Y F, et al. Microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welding of 2219 aluminium alloy [J]. Aerospace Materials Technology, 2012, 42(6): 70-75.
- [26] WANG SH J, MA Z J, LI Y Q, et al. 3-D simulation for the acoustic field directivity of SH-wave EMATs [C]. 2017 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT), 2017: 187-191.

作者简介



刘博涵, 2021 年于北京航空航天大学获得学士学位, 现为北京航空航天大学博士研究生, 主要研究方向为航天器智能结构、航天器结构健康监测。

E-mail: by2115123@buaa.edu.cn

Liu Bohan received his B. Sc. degree in 2021 from Beihang university. Now he is a doctoral student in Beihang university. His main research interests include microsatellite technology and spacecraft intelligent structures.



陈宗泽, 2023 年于北京航空航天大学获得学士学位, 现为北京航空航天大学硕士研究生, 主要研究方向为结构/机构动力学与控制。

E-mail: czz155067106@163.com

Chen Zongze received his B. Sc. degree in 2023 from Beihang university. Now he is a postgraduate in Beihang university. His main research interests include structure/mechanism dynamics and control.



于建新, 2004 年于北京航空航天大学获得学士学位, 2007 年于北京航空航天大学获得硕士学位, 现为北京宇航系统工程研究所研究员, 同时攻读北航博士学位, 主要研究方向为智慧火箭以及液体火箭动力系统。

E-mail: jason_0415@buaa.edu.cn

Yu Jianxin received his B. Sc. degree in 2004 from Beihang University and received his M. Sc. degree in 2007 from Beihang University. Now he is a research fellow in Beijing institute of aerospace systems engineering, simultaneously pursuing a doctoral degree from Beihang University. His main research interests include intelligent rocket and liquid rocket power system.



余旭东 (通信作者), 2013 年于南京航空航天大学获得学士学位, 2018 年于新加坡南洋理工大学获得博士学位, 现任北京航空航天大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为: 航天器健康监测、超声无损检测、智能材料与结构等。

E-mail: yxudong@buaa.edu.cn

Yu Xudong (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2013 from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, and received his Ph. D. degree in 2018 from Nanyang Technological University, Singapore. He is currently appointed with associate professor and doctoral supervisor in Beihang University (BUAA). His main research interests include health monitoring of spacecraft, ultrasonics-based nondestructive evaluation, and smart material and structures.



邓明晰, 1986 年于四川大学获得学士学位, 1989 年于南京大学获得硕士学位, 2002 年于同济大学获得博士学位, 现为重庆大学航空航天学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为超声和非线性超声。

E-mail: mx deng@cqu.edu.cn

Deng Mingxi received his B. Sc. degree in 1986 from Sichuan University, received his M. Sc. degree in 1989 from Nanjing university, received his Ph. D. degree in 2002 from Tongji university. Now he is a professor and Ph. D. supervisor in College of Aerospace Engineering, Chongqing University. His main research interests include linear and nonlinear ultrasound.