

引用格式: 袁阿琳, 赖迎庆, 石剑, 等. 铝薄板裂纹电磁超声导波 B 扫描检测实验研究[J]. 声学技术, 2022, 41(2): 211-219. [YUAN Alin, LAI Yingqing, SHI Jian, et al. Experimental research on B-scan detection of electromagnetic ultrasonic guided wave for aluminium sheet cracks[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(2): 211-219.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.02.010

铝薄板裂纹电磁超声导波 B 扫描检测实验研究

袁阿琳¹, 赖迎庆¹, 石剑¹, 段检发¹, 卢超², 石文泽²

(1. 中国航发南方工业有限公司, 湖南株洲 412000; 2. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 江西南昌 330063)

摘要: 采用 Disperse 软件, 计算了 3 mm 厚度铝合金薄板的水平剪切(Shear horizontal, SH)导波频散曲线, 设计制作了中心频率为 0.22 MHz 的 SH 导波电磁超声换能器(Electromagnetic acoustic transducer, EMAT), 对铝薄板试样中直裂纹进行了 B 扫成像检测实验分析, 采用同步挤压小波变换(Synchrosqueezed wavelet transform, SWT)对来自铝薄板试样中直裂纹 SH 导波信号进行了去噪处理。实验结果表明, SWT 可以去除原始导波信号中的噪声, 并实现导波模式分离, 有助于改善 B 扫图像的质量。所设计的 SH 导波 EMAT 能够有效地检出 3 mm 厚铝薄板试样中 10 mm 长、1 mm 宽、2 mm 深的人工直裂纹。

关键词: 铝板; SH 导波; 电磁超声换能器 (EMAT); 同步挤压小波变换; B 扫描

中图分类号: TH878 TB552

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2022)-02-0211-09

Experimental research on B-scan detection of electromagnetic ultrasonic guided wave for aluminium sheet cracks

YUAN Alin¹, LAI Yingqing¹, SHI Jian¹, DUAN Jianfa¹, LU Chao², SHI Wenzhe²

(1. AECC South Industry Co., Ltd. Zhuzhou 412000, Hunan, China;

2. Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China)

Abstract: In this paper, the Disperse software is used to calculate the dispersion curves of shear-horizontal (SH) guided wave in a 3 mm thick aluminium sheet, an electromagnetic acoustic transducer (EMAT) with a center frequency of 0.22 MHz is developed to generate SH guided wave, and the experimental research on B-scan imaging detection of the straight cracks in the aluminium sheet is carried out. The synchrosqueezed wavelet transform (SWT) is used to de-noise the SH guided wave signal from the straight cracks. Experimental results show that SWT can remove the noise in the original guided wave signal, realize the guided wave mode separation and improve the quality of the B-scan image. The designed SH guided wave EMAT can effectively detect the artificial direct crack of 10 mm long, 1 mm wide and 2 mm deep in the 3 mm thick aluminum sheet specimens.

Key words: aluminium sheet; SH guided wave; electromagnetic acoustic transducer (EMAT); synchrosqueezed wavelet transform; B-scan

0 引言

铝板已被广泛用于航空航天领域^[1], 为降低耗油量, 大型飞机 C919 机身的主要材料为航空铝合金薄板, 占了总重量的 70%^[2]。铝板在制造过程中容易产生夹杂、裂纹等缺陷, 如果未能及时检出这些缺陷, 其制件在装机后, 在高强度的服役过程中易造成重大事故^[3]。现有的板材检测技术主要有射线检测^[4], 渗透检测^[5], 涡流检测^[6], 磁粉检测^[6]和超声检测^[7]。超声检测由于灵敏度高、穿透力强、

对缺陷形貌评价准确等优点, 被广泛用于板材缺陷检测^[7]。齐子诚等^[8]开展了钢板超声检测工艺研究, 并对钢板内部不同深度缺陷进行超声检测实验研究, 研究结果表明超声波能有效检测钢板内部深度范围为 20~100 mm、内 $\phi 5$ mm 平底孔当量的缺陷。对于大型金属薄板构件, 使用传统超声纵波探头逐点检测效率低, 迫切需要新的检测方法。超声导波具有传播距离远, 检测范围广等优点, 被广泛用于板状构件检测^[9]。周正干等^[10]研究过铝薄板兰姆波线扫描检测方法, 相比线扫描检测, 导波成像检测不仅可以提高检测效率, 还可以进行检出缺陷定位。卢超等^[11]采用迭代重建技术重建铝板中腐蚀缺陷图像。刘增华等^[12]运用双压电片激励单一模式兰姆波, 结合椭圆成像算法与数据融合方法对有机玻璃薄板进行缺陷成像检测。然而, 传统的压电式超

收稿日期: 2020-12-01; 修回日期: 2021-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(12064001)资助项目。

作者简介: 袁阿琳(1981—), 女, 陕西乾县人, 本科, 研究方向为超声检测。

通信作者: 卢超, E-mail: luochaoniat@163.com

声导波对被检件表面光洁度要求高,回波信号幅值和扫查速度受耦合效果影响较大,不利于薄板构件的快速检测。因此,迫切需要一种非接触式的超声导波检测方法用于实现铝薄板的快速在线高效检测。

目前,超声导波的非接触激励和接收方式有脉冲激光式、空耦式、电磁式等^[9],但空耦超声设备和激光超声设备成本高、技术复杂、信噪比较低。电磁超声换能器(Electromagnetic acoustic transducer, EMAT)因不需要耦合剂、较粗糙表面也可直接探伤,具有非接触、容易激发各种超声波模式等优点^[13]而得到广泛应用。Liu 等^[14-15]提出了一种新型的定向磁集中器型 EMAT,在铝薄板中激励 S0 模式的兰姆波进行缺陷检测。LIU 等^[16-17]设计了一种全向型 EMAT,用于在铝薄板中激励和接收 A0 和 S0 模式的兰姆波。将线圈或者永磁体以一定的排布方式组成 EMAT 阵列,可显著改善成像质量,凸显裂纹的位置信息^[18]。焦敬品等^[19]对兰姆波 EMAT 阵列进行了优化设计,通过对导波检测信号的等相位叠加处理,实现了等厚薄铝板的全周向成像检测。兰姆波和表面波在铝薄板中传播时,铝薄板表面质点作椭圆运动,由于大型薄板构件在生产过程中,薄板表面存在附着物,这会导致兰姆波和表面波快速衰减。水平剪切(Shear horizontal, SH)导波只有面内位移,不受表面附着物的影响,适合对薄板构件进行快速检测。Seung 等^[20]发展了一种新的 EMAT,用于在薄铝板中产生全向 SH 导波。刘素贞等^[21]分析了 SH 导波在钢板中的传播特性。刘增华等^[22]提出了一种的双线圈全向剪切水平波磁致伸缩贴片换能器激励 SH 导波,实现了复合板损伤成像。

由于导波存在频散现象,导波检测信号伴随着多模式特征,同时 EMAT 提离距离的变化和环境噪声会使得信号信噪比较差,这些导致缺陷回波无法识别,需要对检测回波信号进行有效的后处理。超声导波信号具有非平稳随机信号特征,传统傅里叶变换无法获取导波信号在某个特定时间区域的频谱特性,时频分析可以同时时间和频率方向表征导波信号强度,适合对导波信号进行分析、处理^[23]。Daubechies 等^[24]提出了一种新的时频分析工具,称为同步挤压小波变换(Synchrosqueezed Wavelet Transform, SWT)。SWT 是小波分析和重新分配技术的结合^[25],具有高时频分辨率和可逆的特点,对高斯白噪声干扰具有较好的鲁棒性^[26]。与 S 变换、连续小波变换和经验模式分解等时频分析方法相比,SWT 可以较好地改善频率混叠现象,信号提取效果优于其他时频分析方法^[26-27]。由于导波的频散特性,导波信号会出现多个模式混叠,导致无法有

效识别缺陷回波。Liu 等^[28]使用 SWT 对兰姆波信号进行模式识别和重构,实现了单一兰姆波模式的自动提取。在现场检测过程中,EMAT 提离及检测环境带来的噪声干扰,会使得信号的信噪比较差。胡松涛等^[29]采用 SWT 去除表面波信号中的强噪声,实现了提高条件下钢轨踏面裂纹的快速成像检测。由于将电磁超声导波应用于铝薄板的快速在线检测存在超声回波信噪比差、导波模式多导致分辨率差等问题,因此将高时频分辨率和可逆特点的 SWT 应用于导波检测信号处理具有一定的研究价值。

本文采用 Disperse 软件计算了 3 mm 厚铝合金薄板的 SH 导波频散曲线,并据此设计制作了 SH 导波 EMAT;利用 Matlab 软件进行信号重构,验证了 SWT 在信号去噪和高低阶导波信号分离中的应用效果;最后开展了铝薄板试样裂纹电磁超声检测实验,以验证 SWT 在 SH 导波 A 扫信号和 B 扫检测中降噪和导波模式分离的实际应用效果。

1 检测方法

1.1 周期性永磁体阵列 EMAT 换能机理

周期性永磁体阵列 EMAT (Periodic-Permanent-Magnet Electromagnetic Acoustic Transducer, PPM EMAT)具有一系列周期性交替的磁极,对于应用于铝薄板检测的 PPM EMAT,洛伦兹力是产生 SH 导波的主要机制^[30],其换能机理如图 1 所示。跑道线圈沿永磁体的周期性方向延伸,在铝合金薄板表面产生电涡流。电涡流在周期性偏置磁场的的作用下,产生平行于铝薄板表面并垂直于导线方向的洛伦兹力,SH 导波的原理如图 2 所示。洛伦兹力在铝薄板中激发 SH 导波,SH 导波波长为两倍的永磁体宽度,洛伦兹力 F_1 为^[31]

$$F_1 = J_e \times B \quad (1)$$

其中: J_e 为涡流密度; B 为静态偏置磁感应强度。

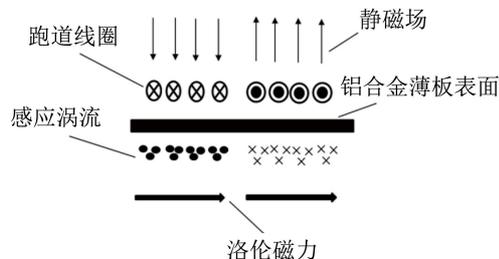


图 1 洛伦兹力换能机理

Fig.1 Conversion mechanism of Lorentz force

1.2 PPM EMAT 设计参数

铝薄板的材料型号为 7050,在其中传播横波的声速为 $3\ 080\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,纵波的声速为 $6\ 300\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,其

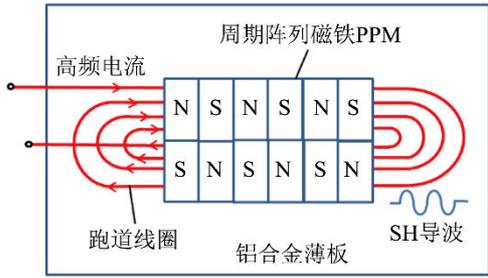
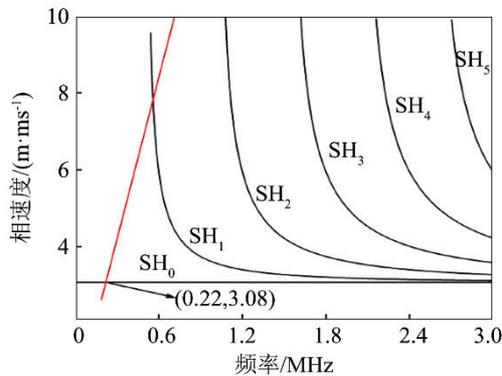
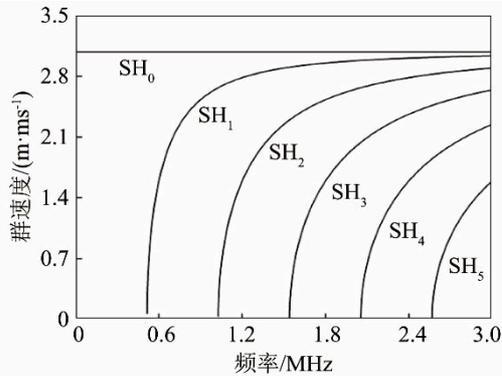


图 2 电磁超声换能器的 SH 导波激发原理
Fig.2 Principle of SH guided wave excitation by EMAT

密度为 $2\ 800\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。通过 Disperse 软件，绘制了 3 mm 厚的铝薄板的频散曲线，结果如图 3 所示。PPM EMAT 的激励频率越低，SH 导波的波长越大，超声回波的分辨率也随之降低。综合考虑 PPM EMAT 的激励频率和超声回波的分辨率，采用永磁体宽度为 7 mm 的 PPM EMAT 激励 SH_0 模态导波，对铝薄板进行检测。在相速度频散曲线中，绘制红色实线，根据 $C_{\text{ph}} = \lambda f = 2df$ ，红色实线的斜率即为 SH 导波波长。斜率为 14 的红色实线与 SH_0 的交点为激励 EMAT 的工作点，即得到 PPM EMAT 的激励频率为 0.22 MHz，如图 3(a)所示。由图 3(b)可知，当激励频率为 0.22 MHz 时， SH_0 导波的群速度为 $3\ 080\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。



(a) 相速度频散曲线



(b) 群速度频散曲线

图 3 铝薄板 SH 导波频散曲线

Fig.3 Dispersion curves of SH guided waves in aluminium sheet

1.3 SWT 信号重构方法

时变信号 $f(t)$ 的小波系数 $W_f(a, b)$ 为^[32]

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2)$$

式中： a 为尺度因子； b 为平移因子； Ψ 为母小波函数；“*”为共轭。

通过对小波系数求偏导数可估计瞬时频率^[32]：

$$\omega_f(a, b) = \begin{cases} \frac{-j\partial_b W_f(a, b)}{W_f(a, b)}, & W_f(a, b) \neq 0 \\ \infty, & W_f(a, b) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

能量由时间-尺度平面 (b, a) 转换到时间-频率平面 $[b, \omega_f(a, b)]$ ，并重新排列，使能量得到聚焦。在 a, b, ω 均离散的情况下， $a_i - a_{i-1} = \Delta a_i$ 。通过挤压任一中心频率 ω_i 附近区间 $[\omega_i - \frac{1}{2}\Delta\omega, \omega_i + \frac{1}{2}\Delta\omega]$ 的值，获得同步挤压变换量值 $T_f(\omega_i, b)$ ^[32]，即：

$$T_f(\omega_i, b) = \sum_{a_i: |\omega_f(a, b) - \omega_i| \leq \frac{\Delta\omega}{2}} W_f(a, b) a_i^{-\frac{3}{2}} \Delta a_i \quad (4)$$

SWT 反变换为^[32]

$$h(t) = 2\text{Re} \left[C_\psi^{-1} \sum_i T_f(\omega_i, b) (\Delta\omega) \right] \quad (5)$$

式中， $C_\psi^{-1} = \int_0^{+\infty} \varphi^*(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{\varepsilon}$ ， $\varphi^*(\varepsilon)$ 为母小波函数的共轭傅里叶变换， Re 为取实部， a_i 为离散的尺度， i 为尺度个数。

1.4 基于 SWT 的 SH 导波模态分离仿真

由图 3(a)可知，当激励频率很高时，会在铝薄板中同时激励出高低阶 SH 导波，导致回波信号波包混乱，无法有效识别裂纹回波。使用商业有限元软件构建含有 0.22 和 0.4 MHz 频率成分的导波信号来模拟高低模态导波同时存在的情况，构建的导波信号如图 4 所示。对构建的导波信号进行 SWT 处理，得到的时频图如图 5 所示。从图 5 中可以看出，高阶导波信号和低阶导波信号在频率方向产生分

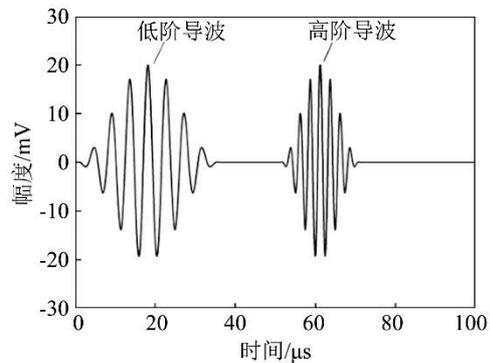


图 4 有限元软件模拟的导波信号
Fig.4 SH guided wave signals simulated by the finite element software

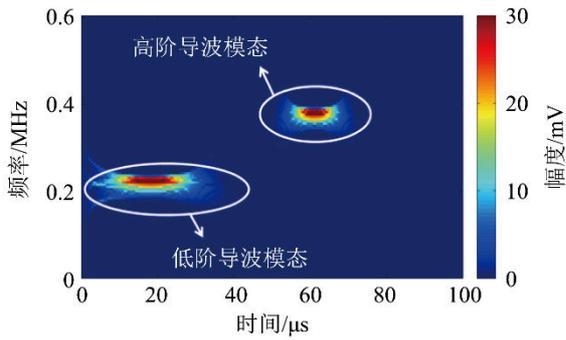
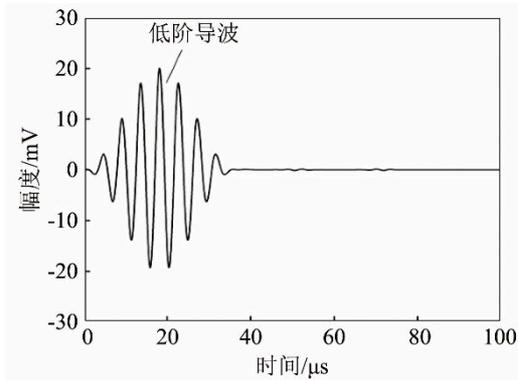
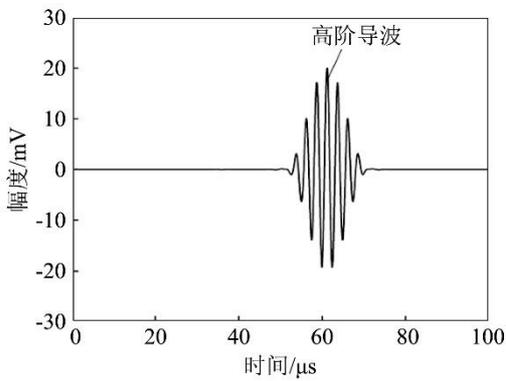


图 5 导波信号的时频图

Fig.5 Time-frequency diagram of guided wave signal



(a) 低阶导波信号



(b) 高阶导波信号

图 6 高阶导波信号与低阶导波信号分离

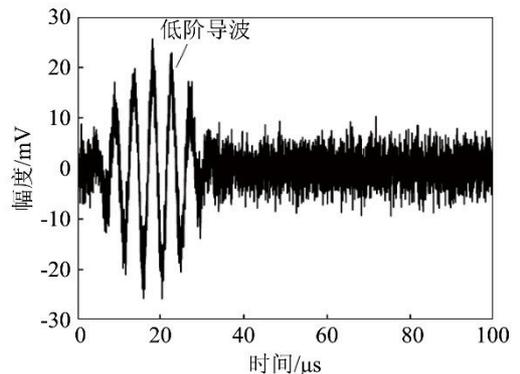
Fig.6 Separation of high-order and low-order guided wave signals

离。对时频图进行切片分析，提取高阶与低阶导波信号在频率方向的同步挤压变换值 $T_f(\omega, b)$ ，并采用式(5)重建高阶与低阶导波信号，重建信号如图 6 所示。从图 6 中可以看出，高阶导波信号与低阶导波信号完全分离，说明 SWT 可以有效地分离导波模式。

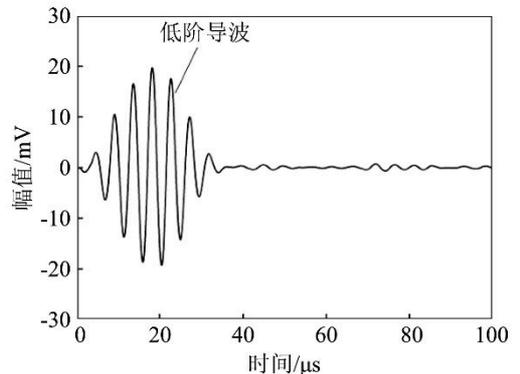
1.5 基于 SWT 的 SH 导波信号消噪仿真

电磁超声导波信号容易受到周围环境的电磁干扰，信噪比(Signal to noise ratio, SNR)较差。使用商业有限元软件，在低阶导波信号中加入信噪比为 10 dB 的高斯白噪声，如图 7(a)所示。从图 7(a)中可

以看出，导波信号的信噪比较差，但仍然可以分辨出低阶导波信号。对含噪声的导波信号进行 SWT 处理，提取低阶导波信号在频率方向的同步挤压变换值 $T_f(\omega, b)$ ，并采用式(5)重构低阶导波信号，重构信号如图 7(b)所示。从图 7(b)中可以看出，噪声被有效去除，低阶导波信号的信噪比显著提高。得到导波信号的时频图如图 8(b)所示。从图 8 中可以看出，导波信号与噪声在频率方向分离，噪声在高频范围聚集分布。



(a) 含 10 dB 噪声的导波信号



(b) SWT 处理后的导波信号

图 7 SWT 处理前后信噪比为 10 dB 的导波信号对比

Fig.7 Comparison of guided wave signals with a SNR of 10 dB before and after SWT processing

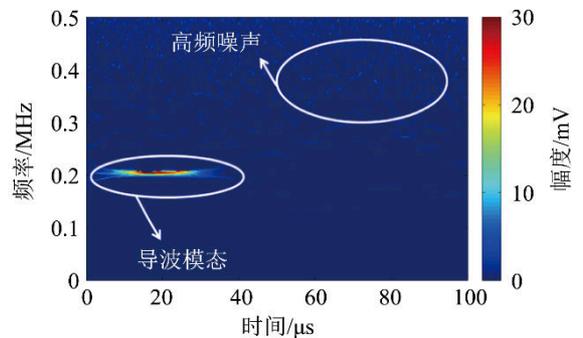


图 8 含噪声导波信号的时频图

Fig.8 Time-frequency spectrum of the guided wave signal with noise

在低阶导波信号中加入信噪比为 20 dB 的高斯白噪声，波形如图 9(a)所示。从图 9(a)中可以看出，

导波信号被噪声淹没，无法识别低阶导波信号。对含噪声的导波信号进行 SWT 处理，提取低阶导波信号在频率方向的同步挤压变换值 $T_f(\omega, b)$ ，并采用式(5)重建低阶导波信号，重建信号波形如图 9(b)所示。从图 9(b)中可以看出，强噪声被有效去除，导波信号的信噪比得到了显著提高。

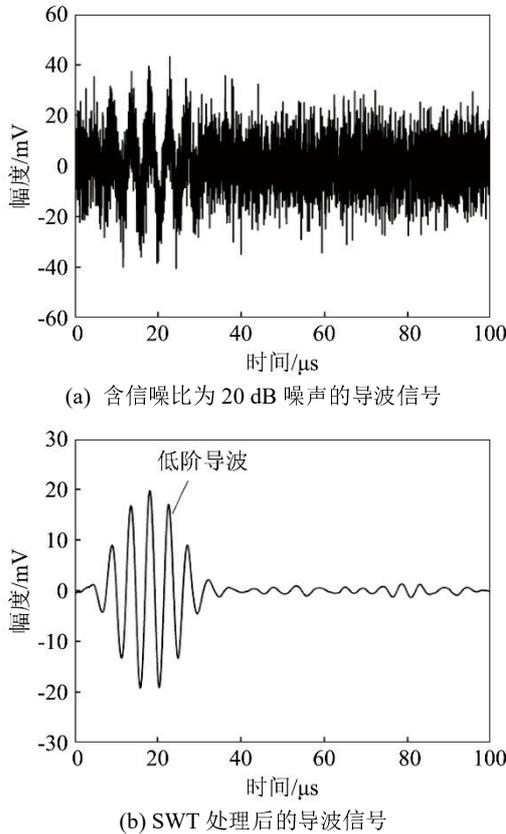


图 9 SWT 处理前后信噪比为 20 dB 的导波信号对比
Fig.9 Comparison of guided wave signals with a SNR of 20 dB before and after SWT processing

2 实验系统和试样

铝薄板裂纹电磁超声 SH 导波检测实验系统如图 10 所示。由信号发生器(Agilent 33220A)产生的激励脉冲信号经过功率放大器(RITEC GA-2500A)放大后，再通过阻抗匹配网络，使激励信号从功率放大器传输到激励 EMAT 的能量最大化。在洛伦兹力的作用下，铝薄板中激励出 SH 导波，接收 EMAT 接收到 SH 导波信号后，通过阻抗匹配网络使信号幅值最大化，再经过前置放大器(OLYMPUS 5072PR)放大。放大的信号由数据采集卡(ART Technology NET8544)完成模数转换，然后将其传输到计算机以进行信号分析和处理。

铝薄板裂纹电磁超声 SH 导波检测的布设图如图 11 所示，人工直裂纹的长度为 10 mm，宽度为 1 mm，垂直深度为 2 mm。激励 EMAT 与接收 EMAT

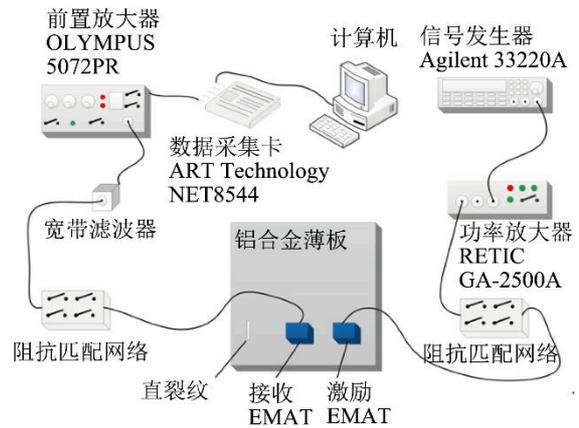


图 10 实验系统框图
Fig.10 Block diagram of experimental system

布置在缺陷的同一侧，铝薄板左端面距直裂纹 200 mm，直裂纹到接收 EMAT 的距离为 300 mm，激励 EMAT 与接收 EMAT 间距为 200 mm，激励 EMAT 距铝薄板右端面 200 mm。激励与接收 EMAT 采用匝数为 50 的跑道线圈，线圈间距为 0.35 mm，跑道线圈的长、宽分别为 40 和 80 mm，单根线圈的外径为 0.35 mm。激励与接收 EMAT 均使用 8 对永磁体，单个永磁体的长、宽、高分别为 20、7、5 mm。激励与接收 EMAT 沿平行于裂纹的方向进行检测，激励 EMAT 的激励频率为 0.22 MHz。每隔 3 mm 采集一组 A 扫回波数据，采样频率为 40 MHz，同步平均次数为 64，共采集 61 组数据。

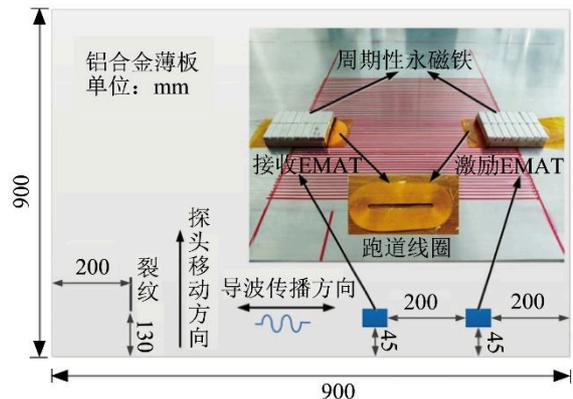


图 11 薄板直裂纹 SH 导波检测的布设图
Fig.11 Layout of SH guided wave detection of straight cracks in sheets

3 检测结果与分析

3.1 铝薄板试样中直裂纹电磁超声 B 扫成像检测

当激励与接收 EMAT 提高距离为 0.1 mm 时，采集的 A 扫回波信号如图 12 所示，从图 12 中可以明显看到直达波、裂纹回波和两个端面回波，直达波幅值为 1 995 mV，裂纹回波幅值为 149 mV。采

用电磁超声 SH 导波可实现 900 mm 长度范围内裂纹的快速检测, 相比于传统的超声纵波逐点检测, 极大地提高了检测效率。图 13 为薄板直裂纹对应的基于幅值的 B 扫描图像。从图 13 中可以直观地得到裂纹的位置信息, 实现了 900 mm×180 mm 范围内的成像检测, 相比于逐个分析 SH 导波信号, B 扫描检测的效率更高。由于 SH 导波在铝薄板中传播的过程中, 铝合金薄板是全截面振动, 当激励与接收 EMAT 正对直裂纹时, 裂纹回波幅值最大。由图 13 还可知, 当激励与接收 EMAT 移动 75 mm 时, 激励 EMAT、接收 EMAT 和直裂纹的正中心在同一条直线上。

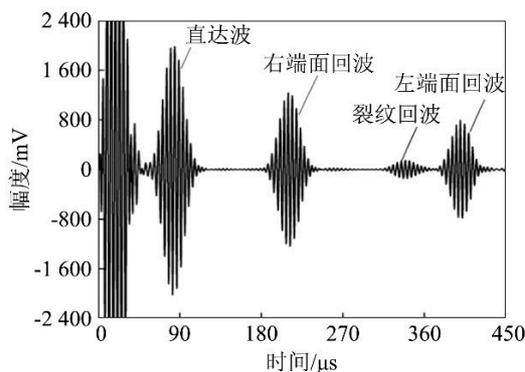


图 12 EMAT 提高 0.1 mm 和激励频率为 0.22 MHz 时铝薄板中的 SH 导波信号
Fig.12 SH guided wave signal in aluminium sheet when EMAT lifts by 0.1 mm and its excitation frequency is 0.22 MHz

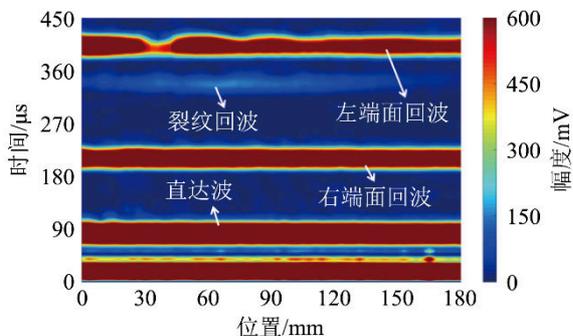


图 13 EMAT 提高 0.1 mm 时 SH 导波信号对铝薄板 B 扫描检测结果
Fig.13 B-scan detection result of the SH guided wave signal for aluminium sheet when EMAT lifts by 0.1 mm

3.2 铝薄板试样中直裂纹大提高 B 扫描检测

由于铝薄板在生产过程中, 薄板表面会有表面附着物, 因此, 有必要增加激励与接收 EMAT 的提离距离。当激励与接收 EMAT 提离距离为 2 mm, 激励 EMAT 的激励频率为 0.22 MHz、同步平均次数为 64 时, 采集到的 SH 导波信号如图 14 所示。从图 12 和图 14 中可以看出, 随着激励与接收 EMAT 提离距离的增加, 直达波的幅度由 1 995 mV 下降到 131 mV, 回波信号幅度急剧下降, 但仍可

以清楚地分辨出裂纹回波。激励与接收 EMAT 提离距离为 2 mm 时, 得到的 B 扫描图如图 15 所示, 从图 15 中可以看出, 虽然 SH 导波信号幅度急剧下降, 但 B 扫描图仍能清楚地显示裂纹回波的位置信息。

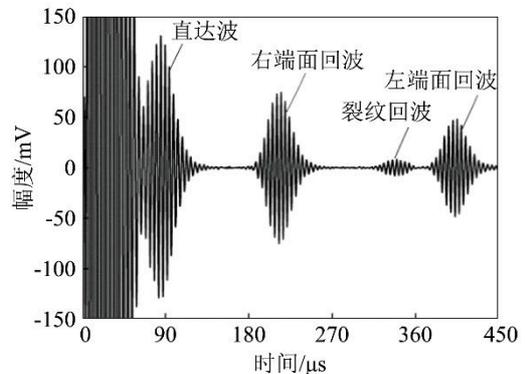


图 14 EMAT 提高 2 mm 和激励频率为 0.22 MHz 时铝薄板中的 SH 导波信号(64 组数据平均)
Fig.14 SH guided wave signal in aluminium sheet when EMAT lifts by 2 mm and its excitation frequency is 0.22 MHz (average of 64 data sets)

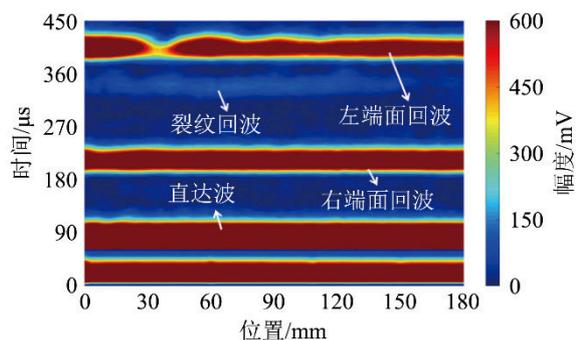


图 15 EMAT 提高 2 mm 时 SH 导波信号对铝薄板 B 扫描检测结果(64 组数据平均)
Fig.15 B-scan detection result of SH guided wave signal for aluminium sheet when EMAT lifts by 2 mm (average of 64 data sets)

3.3 SWT 在大提高快速成像检测中的应用

当激励与接收 EMAT 提离距离为 2 mm、激励 EMAT 的激励频率为 0.22 MHz、同步平均次数为 64, B 扫描图质量很好, 但 64 次同步平均需要时间较长, 不利于铝薄板的快速检测。为实现铝薄板的快速 B 扫描检测, 只采集一次, 使用 SWT 对原始信号进行消噪处理。单次采集得到的 SH 导波信号, 如图 16 所示。从图 16 中可以看出, 单次采集使得 SH 导波信号出现大量随机噪声, 裂纹回波被噪声淹没, 无法辨别裂纹回波。采用 SWT 对单次采集信号进行处理, 得到的时频图如图 17 所示。从图 17 中可知, SH₀ 导波信号主频成分为 0.22 MHz, 通过式(4)将时频谱值向中心位置挤压后, SH₀ 导波信号与噪声在频率方向分离, 时频曲线更加精细。

提取 SH_0 导波信号在频率方向的同步挤压变换值 $T_f(\omega, b)$ ，并采用式(5)重建 A 扫信号，结果如图 18 所示，由图可见重建信号清楚地显示了裂纹回波。当激励信号的脉冲重复频率为 20 Hz 时，64 次同步平均采集超声回波信号所需时间为 3.2 s，单次采集并使用 SWT 处理所需时间为 0.05 s。SWT 可以显著提高检测效率，实现铝薄板伤损的快速检测。

当激励与接收 EMAT 提高距离为 2 mm 时，采用无同步平均单次采集，进行 B 扫描，共采集 61 组数据，结果如图 19 所示。从图 19 中可以看出，

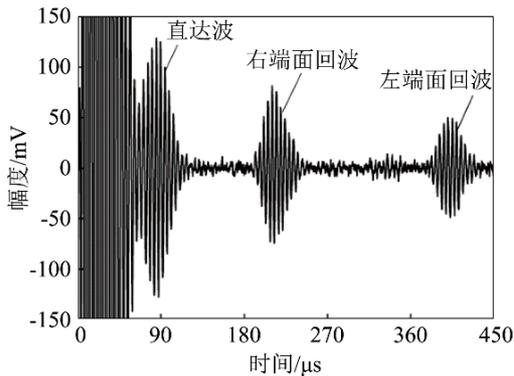


图 16 EMAT 提高 2 mm 和激励频率为 0.22 MHz 时单次采集的铝薄板中 SH 导波信号

Fig.16 The single collected SH guided wave signal in aluminium sheet when EMAT lifts by 2 mm and its excitation frequency is 0.22 MHz

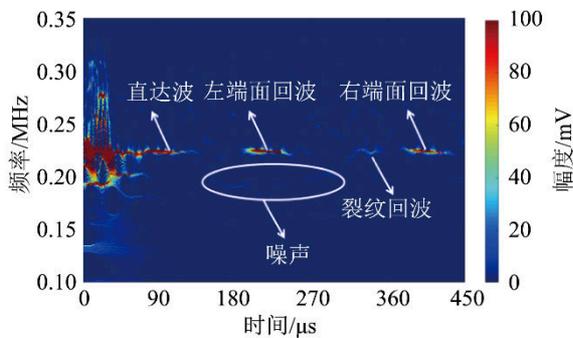


图 17 相应的单次采集的 SH 导波信号的 SWT 时频图

Fig.17 SWT time-frequency spectrum of the corresponding single collected SH guided wave signal

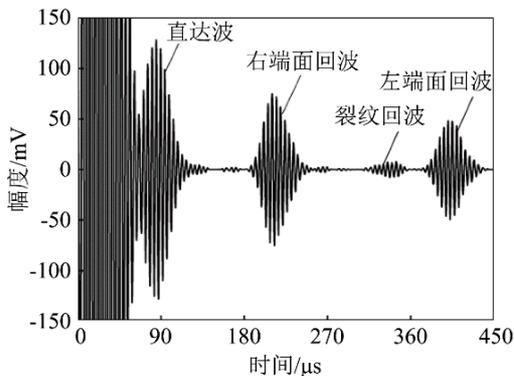


图 18 SWT 重建的 SH 导波信号

Fig.18 The SH guided wave signal after SWT processing

B 扫描图像背景噪声太大，无法准确获取裂纹的位置信息。经过 SWT 处理并重建的图像如图 20 所示。从图 20 中可以看出，噪声被有效去除，清晰地显示了人工裂纹在铝合金薄板的位置信息，实现了 900 mm×180 mm 范围内的快速成像检测。

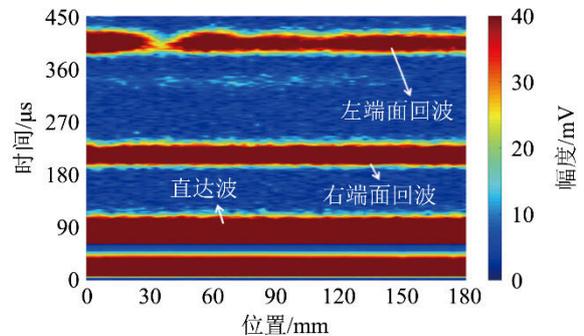


图 19 EMAT 提高 2 mm 单次采集的 SH 导波信号对铝薄板 B 扫描检测结果

Fig.19 B-scan detection result of the single collected SH guided wave signal for aluminium sheet when EMAT lifts by 2 mm

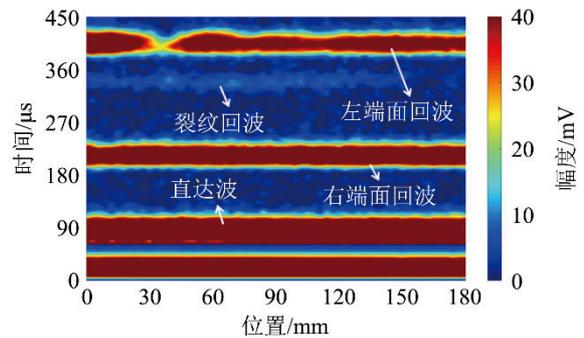


图 20 SWT 处理后对应的 B 扫描检测结果

Fig.20 The corresponding B-scan detection result after SWT processing

3.4 SWT 在模态分离中的应用

在实际现场检测中，为获得更好的波包分辨率，需要提高激励 EMAT 的激励频率。当激励与接收 EMAT 提高距离为 0.1 mm，激励 EMAT 的激励频率为 0.55 MHz、同步平均次数为 64 时，得到的 SH 导波信号如图 21 所示。从图 21 中可以看出，SH 导波信号中波包发生了混叠，无法辨别裂纹回波。采用 SWT 对 SH 导波信号进行处理，得到的时频图如图 22 所示。从图 22 可知，低阶 SH 导波和高阶 SH 导波模态在频率方向分离。

提取 SH 低阶与高阶 SH 导波信号在频率方向的同步挤压变换值 $T_f(\omega, b)$ ，并采用式(5)重建 SH 导波信号，重建信号如图 23 所示。从图 23 中可知，低阶和高阶 SH 导波信号分离有效，图 23(a)中清楚地显示了裂纹回波。图 21 中裂纹回波波包的时间长度为 65 μs，图 23(a)中裂纹回波波包的时间长度为 50 μs。因此，高频激励可以显著提高波包分辨率

率, SWT 可有效分离高阶与低阶 SH 导波。

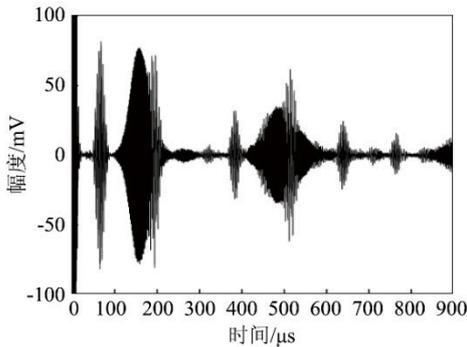


图 21 EMAT 提高距离为 0.1 mm 和激励频率为 0.55 MHz 时铝薄板中的多模态 SH 导波信号

Fig.21 Multi-modal SH guided wave signal in aluminium sheet when EMAT lifts by 0.1 mm and its excitation frequency is 0.55 MHz

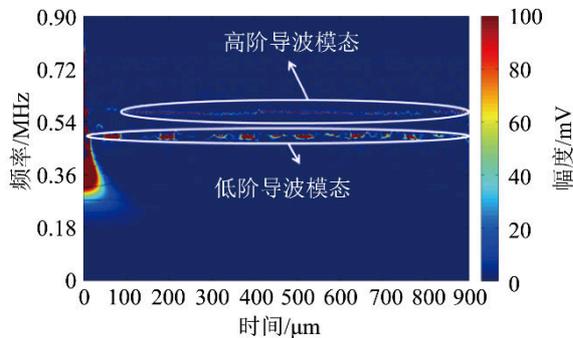
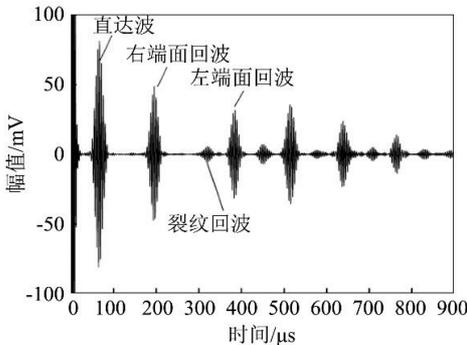
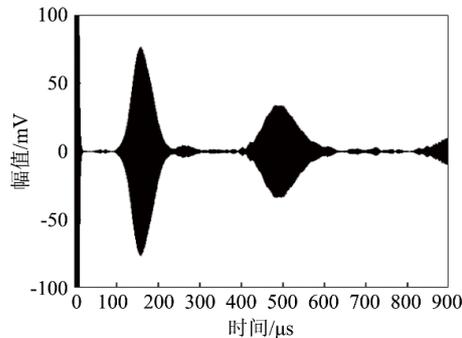


图 22 相应的多模态 SH 导波信号的 SWT 时频图

Fig.22 SWT time-frequency spectrum of the corresponding multi-modal SH guided wave signal



(a) 铝薄板电磁超声检测的低阶 SH 导波信号



(b) 铝薄板电磁超声检测的高阶 SH 导波信号

图 23 SWT 处理后铝薄板中分离的高阶与低阶导波信号
Fig.23 High-order and low-order guided wave signals in aluminium sheet separated by SWT processing

4 结 论

通过以上分析, 得到结论如下:

(1) SH₀ 导波能够有效地检出 3 mm 铝薄板试样中 10 mm 长、1 mm 宽、2 mm 深的人工直裂纹, 利用 B 扫描可以获取裂纹的位置信息。

(2) 激励与接收 EMAT 提高会对 SH 导波信号幅度有较大影响, 裂纹 SH 导波幅度随着提高距离增大而急剧下降。当激励与接收 EMAT 提高距离为 2 mm, 同步平均次数为 64 时, 利用 B 扫描仍然可以获得试样中直裂纹的位置信息。

(3) 当激励与接收 EMAT 提高距离为 2 mm、单次采集时, 来自裂纹的 SH 导波信号被噪声淹没, 无法有效识别出裂纹 SH 导波信号, 此时单次采集信号形成的 B 扫描图背景噪声很大, 无法获取裂纹位置信息。对单次采集信号进行 SWT 处理并重建 A 扫信号后, 重建信号可清楚显示裂纹回波, 此时 B 扫描图可清晰地显示了试样中直裂纹的位置信息。

(4) 当激励 EMAT 采用较高的激励频率时, 接收信号中会同时存在低阶与高阶 SH 导波信号, 无法辨别来自试样中直裂纹的 SH 导波信号。利用 SWT 可有效分离低阶与高阶 SH 导波信号, 进而可以识别来自试样中直裂纹的 SH 导波信号。

参 考 文 献

[1] 王芳文, 陈宜亨. 航空铝合金薄板在疲劳载荷下孔洞聚合的试验研究和一个新发现[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(1): 125-128.
WANG Fangwen, CHEN Yiheng. A new find in experimental research on coalescence between two holes in aluminum alloy strip under cyclic tensile loading[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(1): 125-128.

[2] 王祝堂. 铝材在国产大飞机上的应用[J]. 轻合金加工技术, 2016, 44(11): 1-8.
WANG Zhutang. Application of aluminum materials on domestic large aircrafts[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2016, 44(11): 1-8.

[3] 宋千光, 赵彬, 耿小亮, 等. 温度和应力比对航空铝合金疲劳裂纹扩展规律的影响及其机理[J]. 材料科学与工程学报, 2015, 33(2): 157-162, 177.
SONG Qianguang, ZHAO Bin, GENG Xiaoliang, et al. Effect of stress ratio and temperature on the fatigue crack growth behaviour of aerometal and study of the mechanism[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2015, 33(2): 157-162, 177.

[4] 杨民, 路宏年, 张亚崇. 一种新的板状构件无损检测方法[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(3): 245-248.
YANG Min, LU Hongnian, ZHANG Yachong. New laminography method for the non-destructive testing of shell-like or plate-like objects[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(3): 245-248.

[5] 沈功田, 张万岭. 特种设备无损检测技术综述[J]. 无损检测, 2006, 28(1): 34-39.
SHEN Gongtian, ZHANG Wanling. Survey of nondestructive

- testing techniques for special equipment[J]. *Nondestructive Testing Technology*, 2006, **28**(1): 34-39.
- [6] 李瑶, 王快社, 刘长瑞. 金属板材表面缺陷检测发展现状[J]. *材料导报*, 2011, **25**(S2): 238-241.
- LI Yao, WANG Kuaishe, LIU Changrui. Development status of surface defects inspection for metal plants[J]. *Materials Review*, 2011, **25**(S2): 238-241.
- [7] 孟翔震, 李再伟, 朱文发, 等. 基于空耦超声 Lamb 波的金属板状结构内部缺陷检测方法[J]. *应用声学*, 2020, **39**(2): 316-324.
- MENG Xiangzhen, LI Zaiwei, ZHU Wenfa, et al. Detection of internal defect in metal plate structures using air-coupled ultrasonic Lamb waves[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2020, **39**(2): 316-324.
- [8] 齐子诚, 郑子军, 唐盛明, 等. 滚动式钢板超声检测设备研制[J]. *兵器材料科学与工程*, 2016, **39**(2): 76-80.
- QI Zicheng, ZHENG Zijun, TANG Shengming, et al. Development of ultrasonic testing equipment with rolling structure for steel plate detection[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2016, **39**(2): 76-80.
- [9] 何存富, 郑明方, 吕炎, 等. 超声导波检测技术的发展、应用与挑战[J]. *仪器仪表学报*, 2016, **37**(8): 1713-1735.
- HE Cunfu, ZHENG Mingfang, LV Yan, et al. Development, applications and challenges in ultrasonic guided waves testing technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, **37**(8): 1713-1735.
- [10] 周正干, 冯占英, 高翌飞, 等. 超声导波在大型薄铝板缺陷检测中的应用[J]. *航空学报*, 2008, **29**(4): 1044-1048.
- ZHOU Zhenggan, FENG Zhanying, GAO Yifei, et al. Application of ultrasonic guided waves to defect inspection of large thin aluminum plate[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, **29**(4): 1044-1048.
- [11] 魏运飞, 卢超. 薄板腐蚀缺陷兰姆波成像检测的有限元模拟[J]. *测试技术学报*, 2010, **24**(3): 259-264.
- WEI Yunfei, LU Chao. Finite element modeling of corrosion image detection using lamb wave in thin plate[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2010, **24**(3): 259-264.
- [12] 刘增华, 徐营赞, 何存富, 等. 板状结构中基于 Lamb 波单模态的缺陷成像试验研究[J]. *工程力学*, 2014, **31**(4): 232-238.
- LIU Zenghua, XU Yingzan, HE Cunfu, et al. Experimental study on defect imaging based on single lamb wave mode in plate-like structures[J]. *Engineering Mechanics*, 2014, **31**(4): 232-238.
- [13] 刘素贞, 李礼, 蔡智超, 等. 非线性电磁超声对铝合金拉伸变形评价研究[J]. *声学学报*, 2017, **42**(1): 60-66.
- LIU Suzhen, LI Li, CAI Zhichao, et al. Evaluation of the tensile deformation of aluminum alloy using EMAT for nonlinear ultrasonic detection[J]. *Acta Acustica*, 2017, **42**(1): 60-66.
- [14] LIU Z H, DENG L M, ZHANG Y C, et al. Development of a mode-tuning magnetic-concentrator-type electromagnetic acoustic transducer[J]. *Ultrasonics*, 2020, **103**: 106094.
- [15] LIU Z H, LI A L, ZHANG Y C, et al. Development of a directional magnetic-concentrator-type electromagnetic acoustic transducer for ultrasonic guided wave inspection[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, **303**: 111859.
- [16] LIU Z H, HU Y N, XIE M W, et al. Development of omnidirectional A0 mode EMAT employing a concentric permanent magnet pairs with opposite polarity for plate inspection[J]. *NDT & E International*, 2018, **94**: 13-21.
- [17] LIU Z H, DENG L M, ZHANG Y C, et al. Development of an omni-directional magnetic-concentrator-type electromagnetic acoustic transducer[J]. *NDT & E International*, 2020, **109**: 102193.
- [18] 刘增华, 谢穆文, 钟翔文, 等. 超声导波电磁声换能器的研究进展[J]. *北京工业大学学报*, 2017, **43**(2): 192-202.
- LIU Zenghua, XIE Muwen, ZHONG Xuwen, et al. Research progress of electromagnetic acoustic transducers for ultrasonic guided waves inspection[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2017, **43**(2): 192-202.
- [19] 焦敬品, 杨敬, 何存富, 等. 基于虚拟聚焦的板结构兰姆波换能器阵列检测方法研究[J]. *机械工程学报*, 2011, **47**(8): 12-20.
- JIAO Jingpin, YANG Jing, HE Cunfu, et al. Virtual focusing based lamb wave transducer array method for plate structure inspection[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, **47**(8): 12-20.
- [20] SEUNG H M, PARK C I, KIM Y Y. An omnidirectional shear-horizontal guided wave EMAT for a metallic plate[J]. *Ultrasonics*, 2016, **69**: 58-66.
- [21] 刘素贞, 刘亚洲, 张闯, 等. SH 导波在钢板缺陷检测中的传播特性[J]. *声学技术*, 2017, **36**(2): 140-146.
- LIU Suzhen, LIU Yazhou, ZHANG Chuang, et al. Propagation characteristics of SH guided wave in steel plate defect detection[J]. *Technical Acoustics*, 2017, **36**(2): 140-146.
- [22] LIU Z H, ZHONG X W, XIE M W, et al. Damage imaging in composite plate by using double-turn coil omnidirectional shear-horizontal wave magnetostrictive patch transducer array[J]. *Advanced Composite Materials*, 2017, **26**(sup1): 67-78.
- [23] 孙雅欣, 吴斌, 何存富, 等. 时频分析在杆中导波传播特性研究中的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2006, **27**(S2): 1316-1317, 1325.
- SUN Yaxin, WU Bin, HE Cunfu, et al. Application of time-frequency analysis in propagation characteristic of guided waves in rod[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, **27**(S2): 1316-1317, 1325.
- [24] DAUBECHIES I, LU J F, WU H T. Synchrosqueezed wavelet transforms: an empirical mode decomposition-like tool[J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2011, **30**(2): 243-261.
- [25] CLAUSEL M, OBERLIN T, PERRIER V. The monogenic synchrosqueezed wavelet transform: a tool for the decomposition/demodulation of AM-FM images[J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2015, **39**(3): 450-486.
- [26] 汪祥莉, 王斌, 王文波, 等. 混沌干扰中基于同步挤压小波变换的谐波信号提取方法[J]. *物理学报*, 2015, **64**(10): 15-24.
- WANG Xiangli, WANG Bin, WANG Wenbo, et al. Harmonic signal extraction from chaotic interference based on synchrosqueezed wavelet transform[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(10): 15-24.
- [27] 刘晗, 张建中, 黄忠来. 应用同步挤压小波变换去除面波[J]. *石油地球物理勘探*, 2016, **51**(1): 71-79, 19.
- LIU Han, ZHANG Jianzhong, HUANG Zhonglai. Surface wave removal with synchrosqueezing wavelet transform[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2016, **51**(1): 71-79, 19.
- [28] LIU Z L, XU K L, LI D, et al. Automatic mode extraction of ultrasonic guided waves using synchrosqueezed wavelet transform[J]. *Ultrasonics*, 2019, **99**: 105948.
- [29] 胡松涛, 石文泽, 卢超, 等. 钢轨踏面裂纹电磁超声表面波同步挤压小波快速成像检测研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, **41**(1): 35-46.
- HU Songtao, SHI Wenzhe, LU Chao, et al. Research on rapid imaging detection of electromagnetic ultrasonic surface wave synchrosqueezed wavelet for rail tread cracks[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, **41**(1): 35-46.
- [30] LIU Z H, ZHANG Y C, LI A L, et al. Development of a shear horizontal wave electromagnetic acoustic transducer with periodic grating coil[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2019, **60**(4): 545-563.
- [31] 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 Feiran, SUN Zhenguo, ZHANG Wenzeng, et al. Review of modeling method and optimum design of EMAT transmitters based on Lorentz principle[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, **52**(6): 12-21.
- [32] 刘景良, 任伟新, 黄文金, 等. 基于同步挤压小波变换的时变结构损伤识别方法研究[J]. *振动与冲击*, 2017, **36**(21): 8-15, 33.
- LIU Jingliang, REN Weixin, HUANG Wenjin, et al. Damage detection for time-varying structures based on the synchrosqueezing wavelet transform[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, **36**(21): 8-15, 33.