

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210977

# 时间反转 $SH_0$ 波跨焊缝检裂纹缺陷研究\*

岳雯颖<sup>1</sup> 周进节<sup>1</sup> 郑阳<sup>2</sup> 张吉堂<sup>1</sup>

(1. 中北大学机械工程学院 太原 030051; 2. 中国特种设备检测研究院 北京 100029)

**摘要:** 针对水平剪切导波跨越焊缝检测裂纹缺陷信号弱的难题,提出了一种基于SH导波模式的时间反转检测方法。本文选择低频的 $SH_0$ 导波模式,建立了3 mm板上跨越焊缝检测缺陷的三维等效模型,并对时间反转检测进行了数值模拟以及实验验证。首先,从模拟角度验证了时间反转可以提高检测焊缝后缺陷的灵敏度。随后,设计和搭建PPM EMAT产生 $SH_0$ 模式波进行常规和时反检测实验。实验验证了时间反转检测的有效性。实验和仿真结果均表明,时间反转法对常规检测中较低的缺陷回波信号有较强的聚焦效果。该方法能够将铝板中的常规信号幅值最大增至3.22倍,可有效检测1 mm的纵向裂纹缺陷。本文为跨焊缝导波检测缺陷提供了新的思路。

**关键词:** SH导波;时间反转法;跨焊缝;缺陷检测

**中图分类号:** TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## The detection of crack defects by $SH_0$ guided wave across weld using time reversal method

Yue Wenyi<sup>1</sup> Zhou Jinjie<sup>1</sup> Zheng Yang<sup>2</sup> Zhang Jitang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China)

**Abstract:** To solve the problem of weak signal of shear horizontal guided wave detection across weld, a time reversal detection method based on SH guided wave mode is proposed in this paper. The low frequency  $SH_0$  guided wave mode is selected for this detection. A 3D equivalent model for the defect detection of cross weld on a 3 mm thick plate was established, and the time reversal detection was simulated numerically and demonstrated by experiment. Firstly, it is verified that time reversal can improve the sensitivity of post-weld defect detection from the perspective of simulation. Then, the PPM EMAT system was designed and built to generate  $SH_0$  mode wave for conventional and time-reversal detection experiments. Experiments verify the validity of a time reversal detection method. Experimental and simulation results show that the time reversal method has a strong focusing effect on the low defect echo signal in conventional detection. This method can increase the conventional signal amplitude to 3.22 times, and can be used to detect 1 mm longitudinal crack defects effectively. This paper provides a new idea for conducting wave detection of defects across welding seams.

**Keywords:** SH guided wave; time reversal method; the detection of crack defects; a cross weld

## 0 引言

石油、天然气、化工原料等储运的大型储罐设备中存在大量的金属板类结构。随着服役时间的增加,金属板在内、外壁腐蚀的双重作用易于产生裂纹,引发危险。因此,设备在使用过程中必须定期对其进行检测,确保设备的安全运行。

但许多情况下,缺陷存在的环境往往复杂,通常不利于

检测。例如缺陷周围存在的焊缝会降低缺陷的检测灵敏度<sup>[1]</sup>。水平剪切(shear horizontal, SH)导波凭借质点振动平行于试件表面的特点,使得焊缝对声传播的影响很小。如,洪红等人在10 mm厚钢板上激励SH导波对焊缝中直径3 mm的纵向通孔进行实验。实验结果能够观察到缺陷回波,但定位存在10%的误差<sup>[2]</sup>。刘素贞等人利用COMSOL建立了钢板裂纹缺陷模型,验证了跨焊缝检测缺陷的可行性<sup>[3]</sup>。Zhang等根据近场动力学建立了焊缝中的

收稿日期:2022-08-06

\* 基金项目:国家自然科学基金(62071433)项目资助

SH 波色散方程。实验验证了该方法可以提高导波检测精度的有效性,并根据研究结果探究了钢板上 SH 波通过焊缝时的传播原理,发现焊缝残余高度超过宽度的 5% 时更有利于焊缝的检测<sup>[4-5]</sup>。但由于激励频率低,导波跨越焊缝后,得到缺陷处的声波能量小。因此,在跨越焊缝检测缺陷的实验中,只对 3 mm 以上缺陷的检测效果明显。

针对这一问题,近年来越来越多的学者开始采用时间反转法进行解决。如王建斌等<sup>[6]</sup>构建了一种时反超声导波检测系统,能够更加有效的提高小缺陷反射回波信号幅值。Park 等<sup>[7]</sup>将时间反转技术应用在复合材料板,证明了时间反转技术的增强效果。同时在铝板上用 A0 模态检测缺陷,进一步对时间反转波速、振幅色散的现象进行了解释<sup>[8]</sup>。Lyu 等<sup>[9]</sup>通过激励  $L(0, 2)$  模态对管中的缺陷进行检测。发现时间反转法可将反射系数提高 1.5 倍,证明了时反检测的可靠性。Zhang 等<sup>[10]</sup>采用  $L(0, 2)$  和  $L(0, 3)$  两种模态分别对深度 1 mm 和 3 mm 的缺陷进行时反检测。结果证明时反法能够检测到 1 mm 的裂纹缺陷。赵乃志等<sup>[11]</sup>从理论上建立了试验系统。验证了时间反转法在板中传播可以取得比较理想的效果。为了解决选择合适窗宽进行时间反转检测时无法预判缺陷位置的难题,周进节等提出分段时间反转法。将全段时反分隔成不同区间时反,确保得到较高信噪比的情况下降低检测的成本<sup>[12]</sup>。顾建祖等人提出了时反局部损伤量化方法,运用 f-k 时反成像法定量评估了半径 5 mm 通孔缺陷的大小<sup>[13]</sup>。上述研究表明当缺陷很小、检测环境差时,将导波时间反转技术应用于缺陷检测,可以提高回波幅值,增强检测效果,识别出常规导波无法识别的缺陷。但是目前焊缝后 3 mm 以下缺陷检测信号弱的问题依然少有研究。

本文主要利用 COMSOL 有限元分析软件,建立了时间反转增强电磁超声 SH<sub>0</sub> 导波跨越焊缝后检测裂纹的等效模型。在 3 mm 厚的对接焊缝铝板中利用 SH 导波对 3 mm~1 mm 纵向裂纹进行常规、时反检测实验。通过分析常规、时反检测的仿真和实验结果,来验证时反方法增强 SH 波跨越焊缝检测裂纹缺陷的能力。为超声检测对焊缝后缺陷的精准识别提供了新的方法。

## 1 基础理论

### 1.1 EMAT 换能机理

本文采用的电磁超声 SH 导波传感器由周期性永磁体(periodic permanent magnet, PPM),和跑道形线圈组成。周期性永磁体电磁超声传感器(periodic permanent magnet electromagnetic acoustic transducer, PPM EMAT)的具体换能过程基于洛伦兹力。如图 1 所示,周期性永磁体产生垂直方向  $z$  的静态磁场,其中相邻永磁体的磁场沿上下两个方向相互交替。跑道形线圈的电流  $i$  沿  $x$  方向平行于板的表面,当线圈中产生的激励信号,则会产生动态磁场,并在下方试件表面的集肤深度内感生出相同频率的涡流。静

态磁场、动态磁场与涡流相互作用,会引起  $y$  向的洛伦兹力,从而试件内部质点产生振动,进而激发出沿  $x$  轴方向传播的 SH 导波。

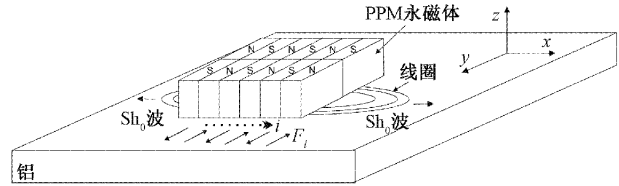


图 1 PPM EMAT 换能原理

### 1.2 SH 导波质点运动方程

被测试件为 3 mm 薄板,水平剪切波在板上下表面反射形成稳定向前传播的波包,即 SH 导波。假设板的表面积无限大,材料为各向同性的情况下,根据 Navier 理论及 Helmholtz 定理<sup>[3]</sup>可得到 SH 导波的位移场为:

$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} = \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} \quad (1)$$

假设  $u_y$  可以用式(2)表示,其中的指数项表示 SH 导波沿着  $x$  轴方向传播:

$$u_y = f(z)e^{i(kx - \omega t)} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),得到其通解为:

$$u_2 = [A \sin(qz) + B \cos(qz)]e^{i(kx - \omega t)} \quad (3)$$

式中:  $q^2 = \frac{\omega^2}{c_s^2} - k^2$ ,  $k$  为波数,  $\omega$  为角频率,  $k = \omega/c_p = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为波长,  $c_p$  为相速度。式(3)中包含余弦项和正弦项两部分,分别对应 SH 导波对称模态位移、反对称模态位移,如下:

$$u_y^S = B \cos(qz)e^{i(kx - \omega t)} \quad (4)$$

$$u_y^A = A \sin(qz)e^{i(kx - \omega t)} \quad (5)$$

SH 导波在板材中传播时,板的上下表面为自由表面,即边界条件是应力为 0。通过边界条件可以得到 SH 导波频散方程:

$$qh = \frac{n\pi}{2} \quad (6)$$

式中:  $n$  为偶数时为对称模态,  $n$  为奇数时为反对称模态。通过  $q$ 、 $k$ 、 $\omega$ 、 $C_s$  的定义,式(6)可以写成:

$$\frac{\omega^2}{c_s^2} - \frac{\omega^2}{c_p^2} = \left(\frac{n\pi}{2h}\right)^2 \quad (7)$$

进一步求解得到 SH 导波模态的质点运动方程为:

$$u_y^S = B \cos(n\pi z/d) \cos(kx - \omega t) \quad (8)$$

$$u_y^A = A \sin(n\pi z/d) \cos(kx - \omega t) \quad (9)$$

式中:  $A$ 、 $B$  均是非零常数。当  $n=0$  时, SH<sub>0</sub> 模态的质点位移为一个常数。可以看出, SH<sub>0</sub> 模态在整个板厚方向上振动一致,波结构简单,在传播过程中模态较纯净,不会发生频散和模态转换。因此,在薄板跨越焊缝缺陷中,只有少部分能量反射和衰减,大部分可以通过并抵达缺陷位置。

### 1.3 时间反转检测方法

时间反转方法是常规检测信号中缺陷回波作时间反

转处理,然后作为时反激励信号来进行时反检测。这样能够将导波信号聚焦于缺陷处,增强缺陷回波能量,检测过程如图 2 所示。其具体过程为:激励端在激励信号的作用下发射超声导波,由接收端接收信号,接收到的信号即为常规检测信号。随后,对得到的信号进行分段时间反转。接收端与激励端互换,将时反信号作为激励信号,重新发射信号。此时,激励端做为接收端检测缺陷反射回波,接收到的即是时反检测信号。这种方法使接收信号中原来先接收到的波包后到,而后接收到的波包先到,实现了在缺陷处的聚焦。

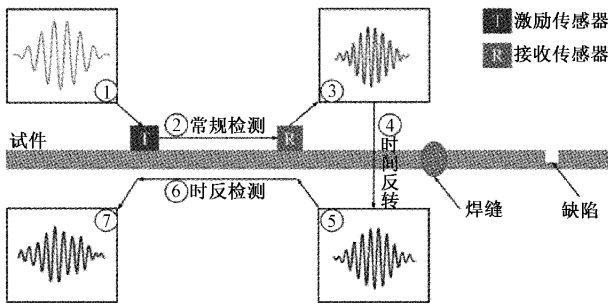


图 2 时反检测原理图

将中心频率为  $\omega$  的信号  $V_A(\omega)$  输入激励传感器 A,得到激励传感器 A 处的时域响应信号为:

$$V_A(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} V_A(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (10)$$

设  $H(d, \omega)$  为激励传感器 A 到接收传感器 B 的传递函数。当信号传递到接收传感器时,得到 B 处波的能量为:

$$E_B = H(d, \omega) V_A(\omega) \quad (11)$$

其中,  $d$  为传感器 A 和 B 之间的距离,  $H(d, \omega)$  为导波在传感器 A 和 B 之间的传递函数。  $H(d, \omega)$  可以被表示为:

$$H(d, \omega) = \beta A(d, \omega) e^{ik(\omega)d} \quad (12)$$

式中:  $\beta$  为缺陷回波系数,且  $\beta > 1$ 。  $A(d, \omega)$  为导波模式的振幅函数,  $k(\omega)$  为导波模式的波数,  $e^{-ik(\omega)d}$  为导波模式相位延迟因子。激励信号  $V_A(\omega)$  存在一定频率带宽,由于频散曲线上每一个频率分量都产生相位差,导致响应信号  $V_B(\omega)$  发生频散。接收传感器 B 处的时域响应信号为:

$$V_B(t) = H(d, \omega) V_A(\omega) \quad (13)$$

对传感器 B 接收到的信号进行时间反转,并将时反响应信号重新施加于传感器 B。按照声波传播互易原理,传感器 A、B 结构、位置保持不变,且两者之间具有相同的频率响应传递函数。则接收传感器 A 接收的响应信号为:

$$V_B^r(\omega) = H(d, \omega) V_B^*(\omega) = H(d, \omega) V_A^*(\omega) H^*(d, \omega) = \beta^2 A^2(d, \omega) V_A^*(\omega) \quad (14)$$

从式(14)中能够看出,传感器 A 接收的响应信号不包含任何相位延迟因子,即时反聚焦过程可以抑制导波频散。同时式(14)中包含缺陷回波信号  $\beta^2$ ,因此时反信号的能量在缺陷处得到聚焦。

## 2 有限元数值模拟

### 2.1 模型搭建

使用 COMSOL 有限元 AC/DC 模块建立 3 mm 厚对接焊缝板上跨越焊缝检测缺陷的三维时域仿真模型。选用 SH<sub>0</sub> 导波检测缺陷,运用有限元仿真的方式验证时间反转法对常规检测中较小的缺陷回波信号有较强的聚焦效果。

由于三维模型计算量较大,将电磁和固体力学模块耦合计算无法实现。为了简化仿真方便计算,仿真模型分为电磁激励和超声传播两部分实现。为验证数值仿真方法准确性,网格划分保证小于波长的 6 倍以下,确保其它所有物理变量的收敛性<sup>[14]</sup>。如图 3 所示为电磁激励模块 SH 导波 PPM EMAT。周期性永磁体由 6 对极性相反的永磁体排列而成,材料为钕铁硼,几何尺寸(长×宽×高)为 10 mm×3 mm×10 mm。跑道形线圈内径、外径分别为 2 mm 和 17 mm。线圈线间距为 0.3 mm,线圈匝数为 30 匝。如图 4 所示为超声传播模块,以两块铝板及对接焊缝组成。其中铝板尺寸分别为 250 mm×50 mm×3 mm 和 130 mm×50 mm×3 mm,焊缝尺寸为 3 mm×50 mm×3 mm。裂纹设在焊缝后 100 mm 处板的中间位置。按裂纹长度 3 mm、2.5 mm、2 mm、1.5 mm、1 mm,将模拟分为 5 组进行。铝板边缘设置为低反射边界,吸收边界回波,防止对裂纹检测的干扰。

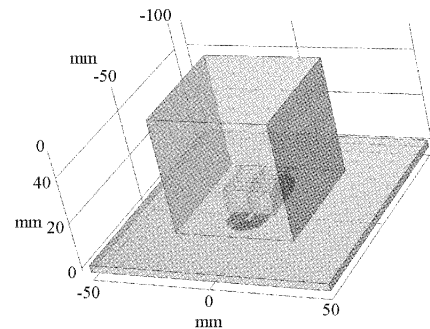


图 3 电磁激励模块

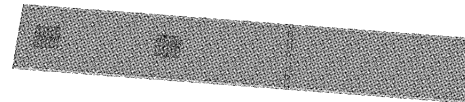


图 4 超声传播模块

### 2.2 等效模型设计

激励模块由电磁和固体力学模块共同耦合计算,超声传播模块仅固体力学模块,施加等效受力诱导表面切变形。诱导面切变形对 SH 波的激发具有一定物理等效性<sup>[15]</sup>。为得到纯净的 SH<sub>0</sub> 模式导波,对于 3 mm 厚铝板,本文选取 500 kHz 的汉宁窗调制的 5 周期正弦波。参数设置如表 1 中所示,缺陷为不同长度纵向通透裂纹。值得注意的是,理想的焊缝是几乎没有回波的。但为了和实际结合,这里将焊缝材料的密度和杨氏模量适量地增大,目的是模拟实验

中焊缝中有不可控缺陷的影响。

表 1 仿真材料参数列表

材料参数		数值
铝板	密度	2 700(kg/m <sup>3</sup> )
	杨氏模量	90×10 <sup>9</sup> Pa
	泊松比	0.28
	电导率	3.774×10 <sup>7</sup> (S/m)
PPM	剩磁	1.4 T/个
	矫顽力	880(kA/m)
	密度	3 300(kg/m <sup>3</sup> )
焊缝(铝)	杨氏模量	100×10 <sup>9</sup> Pa
	泊松比	0.33
	频率	5×10 <sup>5</sup> Hz
线圈激励	周期数	5
	幅值	10 A

如图 5 所示为检测原理图,虚线区域为模拟区域。裂纹检测仿真模拟实验具体检测步骤如下:

1)常规检测:在激励模块中输入 5 周期汉宁窗调制的正弦波信号,计算试件近表面内所受洛伦兹力。将此力等效输入到超声传播模块,计算接收处的位移,从而得到裂纹的常规检测信号。

2)时反检测:步骤 1)常规检测超声传播模块的激励传感器位置作为时反检测的接收传感器,接收传感器作为激励传感器。划分出时反截取区域,将此区域在时间上进行反转。然后,将该信号按激励信号比例放大后,通过电磁激励模块计算等效力。从而等效输入到传播模块,在原先激励处接收位移信号,从而得到裂纹的时反检测信号。

3)其它裂纹检测:按照步骤 1)和 2)的方式分别改变裂纹尺寸以及接收传感器的位置。分别进行常规和时反检测,得到其余裂纹的检测信号。

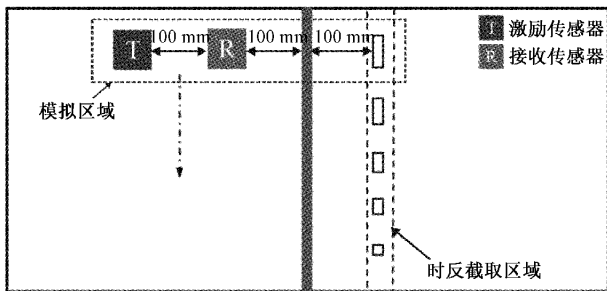


图 5 时反检测原理图

2.3 模拟结果分析

基于以上参数和步骤设计,利用 COMSOL 计算得到一下仿真结果。

1)磁通密度分布:

如图 6 所示为 PPM EMAT 的静态磁通密度分布情况。箭头方向表示静磁场分布,磁铁交替放置,相邻磁铁在

试样表面产生垂直相反的磁场。图 7 所示为 4.7 μs 近表面传导电流的分布情况。涡流场与线圈电场相反,且分布在近表面线圈下方。

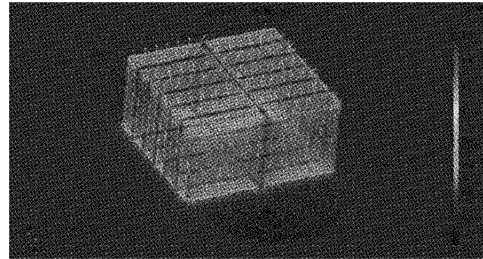


图 6 静态磁通密度

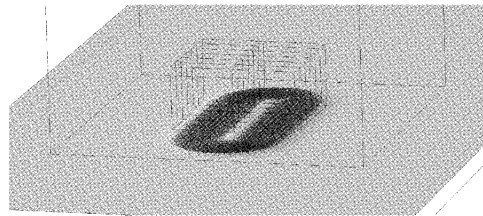


图 7 近表面涡流分布

2)洛伦兹力计算及等效:

一般洛伦兹力方程可写为  $F_l = \rho(E + v \times B)$ ; 其中  $\rho$  为单位体积电荷密度,后 3 项分别为电场,电荷速度,电磁感应强度。

然而在 EMAT 中,洛伦兹力由被测试块中产生的涡流引起,故仅由第 2 项计算得到。传导电流密度  $J_c = \rho v$ , 即洛伦兹力计算公式为:

$$F_l = J_c \times B$$

图 8 所示为 4.7 μs 时刻电磁模块计算的试块近表面应力分布。其中阴影区域为应力分布,应力大小对应颜色深浅,最大值约为  $8.41 \times 10^4$  (N/m<sup>2</sup>)。箭头表示洛伦兹力受力方向及分布的情况。由图 8 可以看出,水平相邻磁铁对应面积下的受力相反,垂直相邻磁铁对应面积下的受力相同,从而产生水平剪切波。这与 SH 波结构理论一致。从表面应力分布情况可以看出,水平相邻磁铁处的应力值最大,这是由于此处洛伦兹力方向发生改变导致。垂直相邻磁铁处应力最小,由于此处为跑道线圈的中心区域,无激励电流通过。图 9 所示为超声传播模块等效后同时刻试块近表面的应力分布和洛伦兹力指向图。此等效方式是将电磁模块的磁通值和不同时刻的近表面涡流分布情况导入超声传播模块,近似地给定一个沿 y 轴方向的体载荷分布。由此可将 PPM EMAT 三维模型简化,对于其时域声场的分析具有极大优势。

3)超声波传播

通过超声传播模块,计算得到板上产生的 SH<sub>0</sub> 模态波。如图 10 所示,截取铝板的 xy 平面,提取中心线上的质点位移。上下两幅位移云图分别表现了在常规检测中

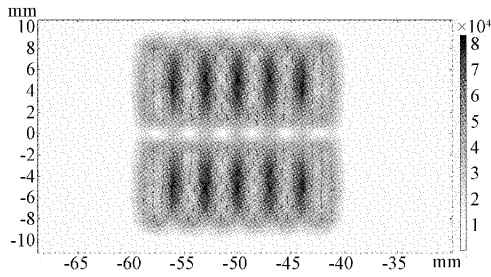


图8 电磁模块4.7 μs试块近表面受力分布

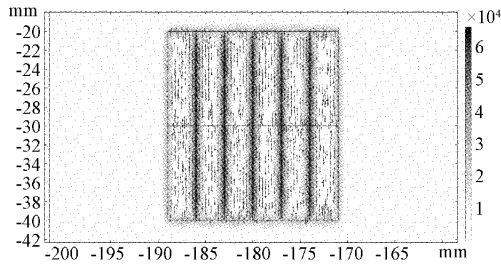


图9 4.7 μs等效洛伦兹力及近表面受力分布

SH<sub>0</sub> 波的产生和传播过程。从图10中可以看出,SH<sub>0</sub> 模态导波双向传播,且在声轴线上的能量是最强的。声束呈弧形分布,由于该板设计较窄且四边均设置低反射边界,故抵达左边和两侧的波将会被吸收而不会发生反射干扰模拟实验进行。

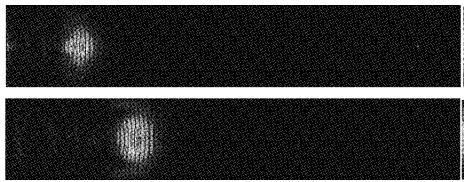


图10 SH<sub>0</sub> 波传播位移云图

4) 缺陷检测以及时反效果分析:

本文选用SH<sub>0</sub> 模态波通过焊缝检测后面的微小缺陷。由于焊缝不是绝对完美的,因此也会有部分波反射回来,但大部分能量通过焊缝继续传播。如图11所示为1 mm缺陷处的回波,可以看到通过缺陷的能量很大,回波非常微弱。

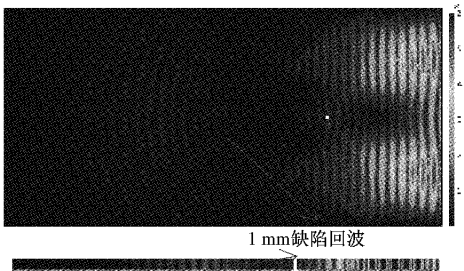


图11 1 mm缺陷处回波位移云图

对铝板中的裂纹缺陷进行常规和时反检测模拟,得到1~3 mm裂纹的常规检测信号以及时反检测信号数据。

对所得数据归一化处理,如图12所示。分析可知,裂纹的常规和时反检测信号中包含直达波、焊缝回波、裂纹回波。为研究时间反转方法增强SH导波跨越焊缝检测裂纹缺陷的能力,图中将裂纹回波等比例放大。展现了常规和时反检测的裂纹回波的对比。可以明显看出直达波和裂纹回波的时反检测回波幅值均大于常规检测。

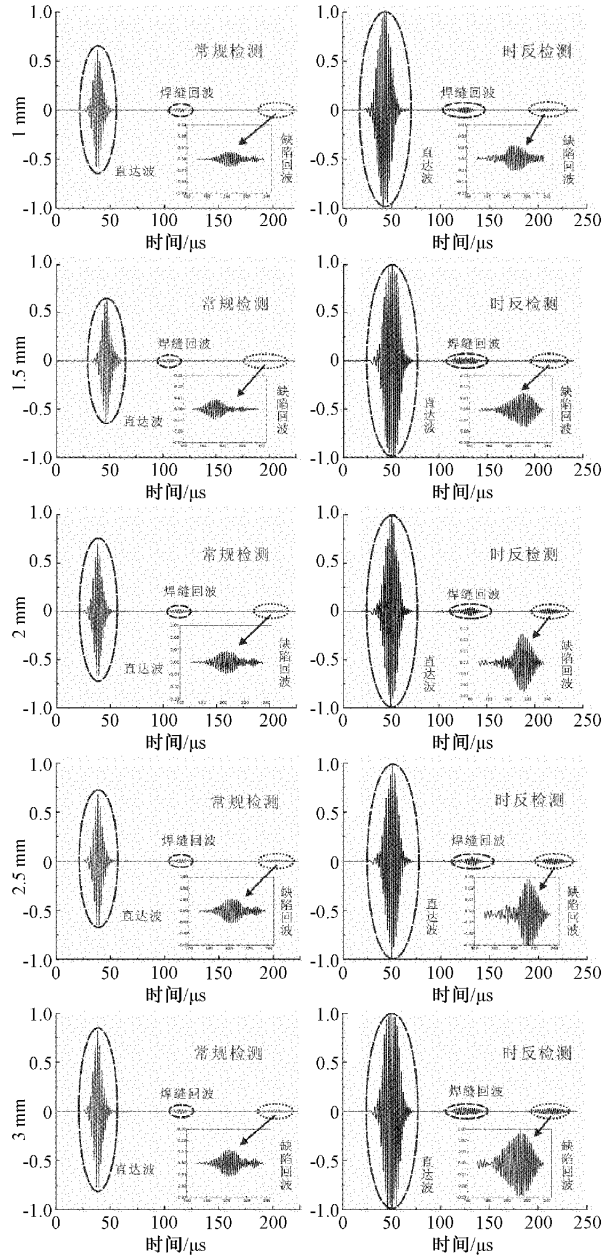


图12 仿真模拟缺陷的常规-时反对比图

图12由上至下分别为1 mm、1.5 mm、2 mm、2.5 mm、3 mm缺陷检测信号。由图12可看出:常规和时反检测的缺陷回波结果均随着纵向缺陷增大而增强。但常规检测的缺陷信号幅值非常小,容易被噪声淹没。与常规检测相比,采用时反检测手段裂纹回波幅值至少增强了1~2倍。这

说明时间反转方法对于薄板上跨越焊缝检测缺陷有很好的增强效果。

### 3 实验验证

#### 3.1 实验系统搭建

跨焊缝检测微小缺陷的可行性在使用仿真手段得到验证后,按照仿真步骤设计实验进行验证,图 13 为常规和时反检测实验系统示意图,主要包括激励和接收两部分。实验与仿真的检测流程基本对应,激励传感器和接收传感器相同,均为 PPM EMAT。被检试件由两块 3 mm 厚铝板(表面尺寸为 500 mm×500 mm)对接焊接而成。选择板长较大从而消除边界影响。纵向裂纹距离焊缝水平间距为 100 mm。每个纵向裂纹的宽度和深度均相同,其尺寸为(宽度×深度):1 mm×3 mm。裂纹长度按 1~5 序号依次为:3 mm、2.5 mm、2 mm、1.5 mm、1 mm。

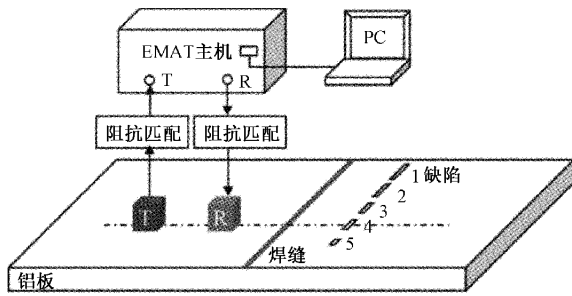


图 13 实验检测系统示意图

按图 5 原理图进行实验,常规检测和时反检测时激励传感器、接收传感器、裂纹中心位于一条直线上,且垂直于焊缝布置。

#### 3.2 结 果

铝板中的裂纹缺陷进行常规和时反检测实验,对实验所得数据归一化处理,如图 14 所示。实验与模拟结果均显示,使用时间反转检测法对跨越焊缝的缺陷回波有很好的增强效果。1~3 mm 裂纹常规检测信号幅值较小,1.5 mm、1 mm 裂纹的反射回波信号幅值几乎淹没于背景噪声之中难以区分。经过时反检测,可以有有效的增强裂纹回波,尤其是 1.5 mm、1 mm 的裂纹回波。

分别提取时反和常规检测信号中的裂纹回波幅值,将两者的幅值比绘制于图 15 的(a)和(b),其中,圆点折线表示 1~3 mm 裂纹对应常规检测幅值,三角点折线表示时反检测幅值,方块点折线表示时反幅值/常规检测的比值。研究时反检测对裂纹回波信号幅值的增强效果。随着裂纹尺寸减小,常规检测信号幅值逐渐减小。并且,常规检测的每个裂纹回波信号幅值都较小。经过时反检测后,裂纹回波信号均得到了明显增强。且随着裂纹尺寸的增大,两种检测方法的裂纹回波幅值总体呈现上升趋势。时反检测相比常规检测,不同裂纹尺寸的回波幅值均得到增强。且随着裂纹尺寸的减小,裂纹回波幅值增强的倍数呈现上升趋势。

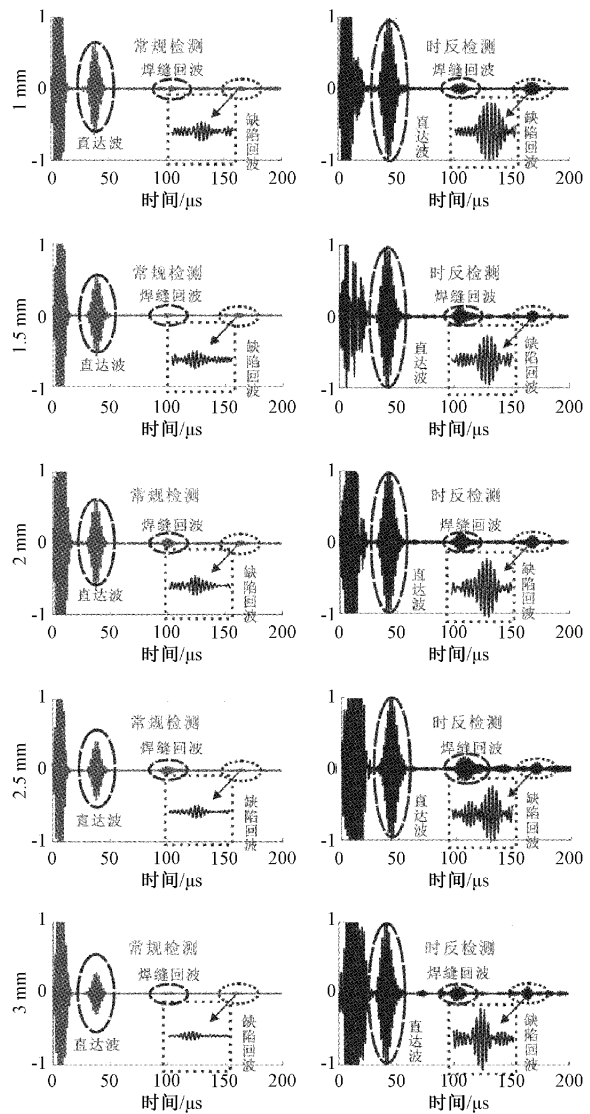


图 14 实验检测缺陷的常规-时反对比图

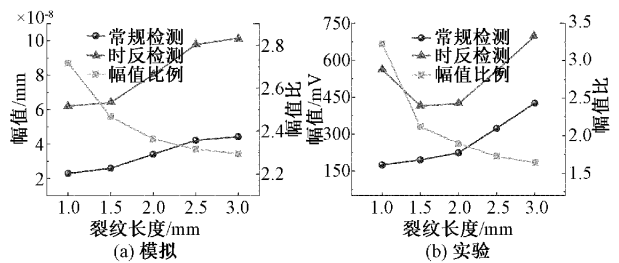


图 15 铝时反检测/常规检测增强效果

模拟和实验结果趋势基本接近,但实验所得裂纹回波幅值比比模拟结果比值大。模拟和实验结果显示,在 1 mm 裂纹处的回波幅值分别达到 2.72 和 3.22 倍的增强效果。随着纵向裂纹尺寸的减小,裂纹回波增强效果增大。实验和仿真结果表明在铝板中 SH 导波时反检测微小裂纹,检测信号幅值增强倍数更大,聚焦效果更好。

## 4 结 论

本文建立 SH 导波检测仿真和实验检测系统,对 1~3 mm 长度裂纹的对接焊缝铝板进行常规、时反检测。在金属板中跨越焊缝进行常规检测时,SH 导波可以检测大于 2 mm 的纵向裂纹。当长度减小到 1.5 mm 或 1 mm 时,裂纹的回波信号幅值非常小,很难从噪声中区分缺陷位置。采用时反检测法后,可以明显检测到 1.5 和 1 mm 裂纹缺陷的回波信号。仿真和实验结果显示,1 mm 裂纹的回波幅值分别增强了 2.72 和 3.22 倍。表明时反检测法使 SH 导波跨越焊缝后的检测精度有了明显提升。同时,时反检测的直达波、裂纹回波信号幅值相较于常规检测均得到一定程度增强。且检测的裂纹尺寸越小,时间反转后得到的幅值增强倍数越大。验证了时间反转法在 SH 导波跨焊缝检测时的有效性。

### 参考文献

- [1] FAN Z, LOWE M J S. Interaction of weld-guided waves with defects[J]. *NDT&E International*, 2012, 47:124-133.
- [2] 洪红,许楨英,刘欢,等. SH 波在中厚板对接焊缝中的传播特性[J]. *应用声学*, 2017, 36(6):540-547.
- [3] 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, DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.02.008.
- [4] ZHANG X Z, XU Z Y. Dispersion of an SH-guided wave in weld seam based on peridynamics theory[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020: 1-9, DOI:10.1155/2020/4802930.
- [5] ZHANG X L, XU Z Y. Formation mechanism of SH guided wave in weld seam[J]. *Results in Physics*, 2020, 16(C): 102840-102840.
- [6] 王建斌,杜云朋,张轩硕. 基于改进时间反转法的超声导波检测系统构建[J]. *中国测试*, 2014, 40(2): 130-134.
- [7] PARK H W, SOHN H, LAW K H, et al. Time reversal active sensing for health monitoring of a composite plate[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 302(1):50-66.
- [8] PARK H W, KIM S B, SOHN H. Understanding a time reversal process in Lamb wave propagation[J]. *Wave Motion*, 2009, 46(7):451-467.
- [9] LYU W C, ZHOU S P. Research on the nondestructive detection of ultrasonic guided wave based on the time reversal method[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 2453(330-330):996-1002.
- [10] ZHANG Y Y, LI D S, ZHOU Z, et al. Time reversal method for guided waves with multimode and multipath on corrosion defect detection in wire[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(4), DOI:10.3390/app7040424.
- [11] 赵乃志,陈桂凤. 基于超声导波时间反转理论的板结构健康监测[J]. *仪器仪表与分析监测*, 2016(1):24-27.
- [12] 周进节,郑阳,杨齐,等. 管道超声导波分段时间反转检测方法研究[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(12): 78-86.
- [13] 顾建祖,毕秀祥. 基于导波相控阵全域波束形成及局部时反的损伤定位和量化研究[J]. *中国测试*, 2019, 45(6):6-12.
- [14] 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.
- [15] MIAO H C, LI F X. Shear horizontal wave transducers for structural health monitoring and nondestructive testing: A review [J]. *Ultrasonics*, 2021, 114(prepublish): 106355-106355.

### 作者简介

周进节,博士,副教授,主要研究方向为超声检测方法、传感器与检测仪器、声场可视化技术等。

E-mail:zhoujinjiechina@126.com

岳雯滢,硕士,主要研究方向为电磁超声导波检测。

E-mail:1140445329@qq.com