

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107423

聚氨酯夹芯板发泡缺陷电磁超声导波快速检测*

屠泽熹^{1,2}, 涂 君^{1,2}, 袁 宁³, 张 旭^{1,2}, 宋小春^{1,2}(1. 湖北工业大学机械工程学院 武汉 430068; 2. 现代制造质量工程湖北省重点实验室 武汉 430068;
3. 中车长江集团科技开发分公司工艺研究所 武汉 430212)

摘 要: 聚氨酯夹芯板在生产中因发泡不均容易在聚氨酯泡沫层形成空洞型缺陷, 直接影响其保温效果, 为此提出了一种从金属板外侧实施的电磁超声 SH 导波检测的快速检测方法。通过理论分析、解析推导、仿真计算和试验验证, 建立了聚氨酯夹芯板中的 SH 导波透反射比系数与激励参数之间的关系, 结果表明, 当磁铁间距为 4.5 mm 时, 控制 SH₀ 导波入射角度为 75°, 能够得到最佳的检测效果。同时也进一步验证了 SH₀ 导波接收信号幅值与缺陷面积、缺陷深度均基本上呈线性关系。在此基础上, 提出了一种可应用于实际检测的缺陷当量大小评价方法。通过评价公式进行修正, 可消除因收、发探头之间距离变化引起的缺陷信号评价波动问题, 这对于后期实现缺陷定位具有较好的指导作用。

关键词: 电磁超声; SH 导波; 聚氨酯夹芯板; 透反射系数

中图分类号: TH165+.4 TB553 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4020

Rapid detection of foaming defects of polyurethane sandwich insulation board using electromagnetic ultrasonic guided waves

Tu Zexi^{1,2}, Tu Jun^{1,2}, Yuan Ning³, Zhang Xu^{1,2}, Song Xiaochun^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. Hubei Province Key Laboratory of Modern Manufacture Quality Engineering, Wuhan 430068, China;

3. Technology Research Institute, CRRC Changjiang Group Science and Technology Development Branch, Wuhan 430212, China)

Abstract: In the production of polyurethane sandwich insulation board, void defects are easy to form in the polyurethane foam layer due to uneven foaming, and it directly affects the heat conservation effect. For this reason, a rapid detection method implementing electromagnetic ultrasonic SH guided wave inspection from the outside of the metal board is proposed. Through theoretical analysis, analytical derivation, simulation calculation and experiment verification, the relationship between the transmission reflection coefficient ratio of the SH guided wave in polyurethane sandwich insulation board and the excitation parameters is established. It is found that when the magnet spacing is 4.5 mm and the incident angle of the SH₀ guided wave is about 75°, the best detection effect can be achieved. Furtherly, it is verified that the amplitude of the received signal of the SH₀ guided wave has linear relationship with both the defect area and defect depth basically. On this basis, a defect equivalent size evaluation method that could be applied in actual inspection is proposed. With the evaluation formula, the problem of defect signal evaluation fluctuation caused by the change of the distance between the receiving and transmitting probes can be eliminated, which has a good instruction for the later realization of defect location.

Keywords: electromagnetic ultrasound; SH guided wave; polyurethane sandwich insulation board; transmission reflection coefficient ratio

收稿日期: 2021-01-22 Received Date: 2021-01-22

* 基金项目: 国家自然科学基金(51707058, 51807052)、湖北省自然科学基金(2019CFA021)项目资助

0 引 言

聚氨酯夹芯板通常由金属板、聚氨酯泡沫板和粘接层组成。其中,聚氨酯泡沫板是由有机异氰酸酯、多元醇化合物和部分助剂使用手工法或机械法发泡制作而成,发泡过程分为 3 个阶段:熔体中起泡形核、泡核膨胀变大、泡体固化定型。在聚氨酯泡沫板发泡成型的过程中,若泡体合并、塌陷或聚氨酯内部气体未充分地排放进入树脂熔体内,则会产生体积大且形状不规则的气孔缺陷。由于发泡混合原料在流动时阻力很大,其中在近表层的气孔孔被拉伸导致变形破裂,累积成近表层大的气孔缺陷影响使用效果。现有的检测方法中,对于粘接结构的缺陷检测有很多种方法,且每一种方法所侧重的方面都不尽相同。最常用的敲击回声法是击打粘接层外层金属板,通过回声判断内部是否有气孔缺陷情况,此方法误差较大且对工人经验要求较高。曾学峰等^[1]先后利用了空气耦合超声兰姆波技术对多层蜂窝夹芯结构的脱粘进行了检测,能够对空气脱粘的缺陷进行定量与定位成像检测,但受检测的方向限制导致检测效率较低。温银堂等^[2]利用计算机断层扫描(computer tomography, CT)对新型复合材料界面的粘接缺陷进行检测,准确的分割量化粘接层结构并应用 CT 成像技术进行表征,但设备昂贵、复杂且操作不便,也不满足工业化的要求。红外热成像法检测缺陷有高时效性、非接触等特点,通过工件表面温度判别缺陷,但该方法受到环境温度影响过大不适用于复杂工况的检测。电磁超声具有无需耦合剂、传播距离远、设备成本低、可灵活产生不同波型等特点。其中, Lamb 波受到复杂边界条件限制容易发生频散和模式转换^[3],垂直剪切波(shear vertical wave, SV 波)适合于检测 2~3 倍以上波长厚度的对象,而水平剪切波(shear horizontal wave, SH 波)衰减小、效率高、模式稳定,当板厚与波长接近或者小于波长时有明显的检测优势。SH 导波具有较多模式,其中 SH_0 模式无频散且速度恒定,通过激励出模式单一的 SH_0 导波可以对表层板以下的缺陷进行大面积快速探测。

Castangs 等^[4]利用仿真模拟与实际试验相结合的方法,发现了在铝/环氧树脂/铝三层粘接结构中, SH_0 波的传播对于在不同剪切模量下其粘接层的粘接性能变化十分敏感。Predoi 等^[5]结合 SH 波峰值与粘结构厚度之间的变化,评估了两者的变化关系。Crom 等^[6]通过建立非铁磁性材料与复合板的粘接结构数学建模,分析了复合板的杨氏模量、拉梅系数和厚度等参数与相速度的影响关系。Yew 等^[7]的研究表明在使用 SH 波进行脱粘检测时,粘接结构的整体厚度和机械性能参数决定着 SH 波的二阶模式的截止频率。综上可见,SH 波对于板状粘

接层缺陷的无损检测有着重要的研究意义,少许国内外学者利用 SH 导波对板状粘接结构进行检测并取得了一定的进展。然而,大多数研究工作是利用多模式的频散效应进行检测,且检测的缺陷都比较大,占到总检测面积的 25% 以上。此外,本文要研究的聚氨酯夹芯板检测对象是一种多层结构,缺陷主要出现在粘接层以下部位,SH 导波对于其中较小尺寸缺陷的长距离检测能力不足,直接影响到接收信号灵敏度,所以 SH 导波探头的激励参数尤为重要。本文提出一种透反射比系数的计算方法,并建立其与激励参数之间的关系。另外,目前采用的基于能量衰减的 SH 导波检测方法难以实现对缺陷进行定位,因此本文研究一种与检测距离解耦的缺陷幅值修正公式,这对于后期实现缺陷定位具有较好的指导作用。

1 聚氨酯夹芯板 SH 导波检测原理

SH 导波沿平行于偏振方向的表面反射时,声波单一且杂波较少,对负载也不敏感,可以得到比较纯净的反馈信号^[8-9]。为了在聚氨酯夹芯铝板中激励 SH 导波,可采用一组周期排列放置的薄片钕铁硼永磁铁与一个平面跑道线圈组成的周期性永磁体电磁超声换能器(periodic permanent magnet electromagnetic acoustic transducer, PPM EMAT),如图 1 所示。其中,通以交变电流的线圈会在铝板上表面感应出涡流;而磁铁磁化极性方向垂直于平面线圈,且相邻两个磁铁的极性相反,并在铝板中提供一个方向交替变化的静态磁场。涡流与静态磁场相互作用产生沿 $\pm Z$ 方向周期变化的洛伦兹力,从而在上层铝板内产生沿 $\pm Y$ 方向传播的 SH 导波^[10]。

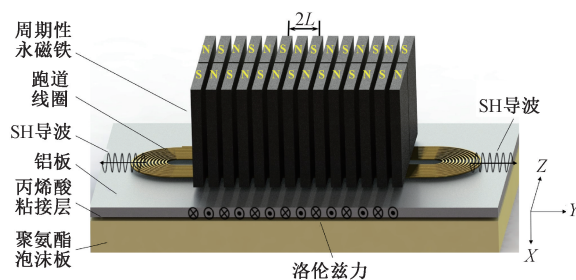


图 1 PPM EMAT 洛伦兹力激励斜入射 SH 波工作原理

Fig. 1 PPM EMAT lorentz force excitation oblique incident SH wave working principle

当改变电磁超声探头线圈中的激励频率和相邻磁铁间距时,所产生的极性相同超声波相互干涉,从而可以控制 SH 导波以一定角度 θ 斜入射并向铝板内渗透,具体表示为^[11]:

$$\sin \theta = \frac{c_s}{2Lf} \quad (1)$$

图 2 是 SH 导波在聚氨酯夹芯板中的传播示意图。夹芯板是由铝板、丙烯酸粘接剂和聚氨酯泡沫板 3 种介质材料组成,SH 导波从上层铝板内斜入射时,遇到丙烯酸粘接剂和聚氨酯泡沫板分界面时,均会发生反射和透射现象。首先,PPM EMAT 激励出的 SH_{i1} 导波以入射角 θ 在铝板内传播,遇到第 1 层界面时,形成 SH_{r1} 反射波和 SH_{t2} 透射波。以入射角 α 继续向下传播的 SH_{t2} 透射波遇到第 2 层界面时,进一步形成 SH_{r2} 反射波和 SH_{t3} 透射波。由于泡沫板衰减较大,以入射角 β 向下传播的 SH_{t3} 透射波会逐渐衰减直至消失。一旦泡沫板中出现气孔缺陷时,由于巨大的声阻抗差,则 SH_{t3} 透射波能量减小,而 SH_{r2} 反射波能量增强,从而在远端设置电磁超声接收探头,其接收到的信号幅值相对于无缺陷时会随之增大。因此,如果能够有效地控制 PPM EMAT 激励出的导波在聚氨酯泡沫板中产生更大的透射能量,则更有利于发现其中的气泡缺陷。

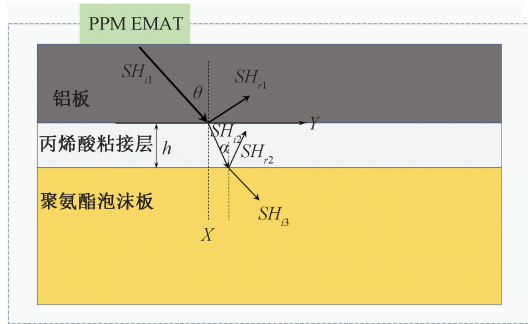


图 2 聚氨酯夹芯板中 SH 导波传播示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SH guided wave propagation in polyurethane sandwich insulation board

忽略 SH 导波在传播时的非线性效应与能量衰减,对传播中的位移变化情况进行分析。由于平面 SH 导波属于平面外的运动,且只在 z 方向上的位移不为 0,容易得到位移形态的波动方程为^[12-13]:

$$\frac{\partial^2 l_z}{\partial t^2} = c_s^2 \nabla^2 l_z \quad (2)$$

其中, l_z 是 SH 导波在铝板 z 方向上的位移分量。假设 SH 导波在夹芯板 3 种不同介质中的 z 方向位移表达式为:

$$l_{sj} = p_j(x) e^{i(k_j y - \omega t)}, \quad j = 1, 2, 3 \quad (3)$$

其中, $p_j(x)$ 为 3 层介质中的主要物理场位移,其会随不同介质的横波速度 C_{sj} 改变而改变,而指数项代表的沿 y 方向传播位移不是主要的。 k_j 为不同介质中的波数,可以表示为:

$$k_j = \frac{2\pi f}{C_{sj}} \quad (4)$$

将式(3)代入式(2)中可以得到:

$$p_j''(x) + k^2 E_j^2 p_j(x) = 0 \quad (5)$$

其中,

$$E_j = \sqrt{\frac{c^2}{C_{sj}^2} - 1} \quad (6)$$

其中, $c = \omega/k$, 是 SH 导波在各个介质中的相速度,根据波在均质弹性体中传播特性规律和 Snell 定律可以得到 SH 导波在 3 层介质复合板中的位移通解为:

$$u_{sj} = (A_j + B_j) e^{ik(y + E_j x - ct)} \quad (7)$$

其中,系数 A、B 分别表示每一层反射层中透射波与反射波的幅值,且已假设第 3 层介质中无反射,即 $B_3 = 0$ 。

介质中的剪切应力可以表示为:

$$\tau_{xj} = \mu_j \frac{\partial u_{sj}}{\partial x} \quad (8)$$

其中, μ_j 为不同介质的剪切模量。由于在夹芯板各层接触界面处的剪切应力是相等的,联立式(7)~(8)进行运算,最终得到 SH 导波在 3 层夹芯板中透射与反射系数之比的表达式为:

$$\Gamma = \frac{\left| \frac{SH_{t3}}{SH_{i1}} \right|}{\left| \frac{SH_{r1}}{SH_{i1}} \right|} = \frac{\left| \frac{A_3}{B_1} \right|}{\frac{4a_5}{\sqrt{(a_1 a_2)^2 + (a_3 a_4)^2 + 2a_1 a_2 a_3 a_4 \cos M}}} \quad (9)$$

其中,

$$a_1 a_2 = \frac{\cos \theta \left(\mu_2 \sqrt{\frac{C_1^2}{C_2^2} - \sin^2 \theta} + \mu_3 \sqrt{\frac{C_1^2}{C_3^2} - \sin^2 \theta} \right)}{\mu_1} - \frac{\mu_2^2 \left(\frac{C_1^2}{C_2^2} - \sin^2 \theta \right) - \mu_3^2 \left(\frac{C_1^2}{C_3^2} - \sin^2 \theta \right)}{\mu_1^2}$$

$$a_3 a_4 = \frac{\cos \theta \left(\mu_2 \sqrt{\frac{C_1^2}{C_2^2} - \sin^2 \theta} - \mu_3 \sqrt{\frac{C_1^2}{C_3^2} - \sin^2 \theta} \right)}{\mu_1} + \frac{\mu_2^2 \left(\frac{C_1^2}{C_2^2} - \sin^2 \theta \right) - \mu_3^2 \left(\frac{C_1^2}{C_3^2} - \sin^2 \theta \right)}{\mu_1^2}$$

$$a_5 = \frac{\mu_2}{\mu_1} \cos \theta \sqrt{\frac{C_1^2}{C_2^2} - \sin^2 \theta} \quad (10)$$

$$M = \frac{2kh \sqrt{\frac{C_1^2}{C_2^2} - \sin^2 \theta}}{\sin \theta} \quad (11)$$

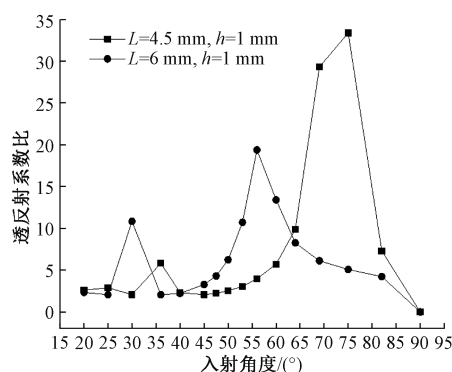
联合上述公式在 MATHCAD15 中进行计算,考虑到尽可能大的频率范围以及实验室现有条件,选择了厚度

分别为 6 mm 和 4.5 mm 两种厚度的磁铁,粘结层厚度为 1 mm。同时结合 SH_0 模态导波和各层材料的相关参数如表 1 所示,可以计算出 SH_0 导波在聚氨酯夹芯板传播过程中透反射比与入射角度的关系曲线如图 3 所示。

表 1 聚氨酯夹芯板的机械参数

Table 1 Mechanical parameters of polyurethane sandwich insulation board

材料	杨氏模量/GPa	泊松比	声速/($m \cdot s^{-1}$)
铝板	69.0	0.33	3 100
聚氨酯泡沫板	0.4	0.47	950
丙烯酸粘接剂	2.4	0.35	1 380

图 3 SH_0 导波在聚氨酯夹芯板传播过程中透反射系数比与入射角的函数图Fig. 3 The function diagram of transmission reflection coefficient ratio vs. incident angle during the propagation process of the SH_0 guided wave in the polyurethane sandwich insulation board

显然,对于磁铁厚度为 4.5 mm 的情况,存在两个透反射比峰值点,分别出现在 35° 和 75°,可以认为此时能量更多渗透到聚氨酯层中,有利于缺陷的检出。相对而言,角度越小,其频率越大,则导波在夹芯板长距离传播过程中的衰减也会增大,从而降低了检测灵敏度,因此选择 75° 作为入射角比较合适。同理,对于磁铁厚度为 6 mm 的情况,也存在同样的现象。通过计算还发现,不同的粘接层厚度、磁铁间距、材料属性均会对 SH 导波的透反射比产生不同的影响。因此在实际应用中,可以利用上述推导公式计算出最佳的 SH_0 模态导波激励参数。

2 仿真试验

由于 SH 导波激励电磁超声探头是由方向交替变化的磁铁组和跑道型线圈组成,为了较真实地模拟这种物理模型,在 COMSOL 仿真软件中采用如图 4 所示的三维有限元模型。聚氨酯夹芯板由 3 层材料组成,分别是铝、

丙烯酸和聚氨酯,材料属性与表 1 相同,长度和宽度一致,均为 155 mm 和 30 mm,厚度分别为 3、1 和 10 mm。在模型右侧设有一个贯穿粘接层与泡沫板的方槽缺陷,采用空气域代替原有材料,其大小为 20 mm×20 mm×5 mm。由于实际探头是由两排磁铁组成,为了减少仿真的计算量,在三维模型中仅添加了单排磁铁组,共有 10 个磁铁组成,每个磁铁大小为 15 mm×8 mm×4.5 mm,总长度为 45 mm,所有磁铁磁化极性均沿高度方向,相邻磁铁的磁化方向相反;线圈采用多根导线代替,共 5 根,长度为 48 mm,相邻导线中心距 1 mm。导线和磁铁组分别距离铝板表面 0.2 mm 和 0.5 mm,所有导线内均沿铝板长度方向通以相同的余弦函数加汉宁窗激励电流信号,电流大小为 10 A,汉宁窗函数长度为 5,激励频率作为可调变量,电流波形如图 5 所示。为了简化接收换能过程,分别设置探头线圈最右侧处和距铝板边缘 5 mm 处的铝板表面中心点为接收点 1 和接收点 2,在模型中直接提取该点的内位移动大小,并将其视为 SH 导波传播到该处的接收信号幅值。其中,接收点 1 处的幅值可近似为 SH 导波探头的初始激励能量。

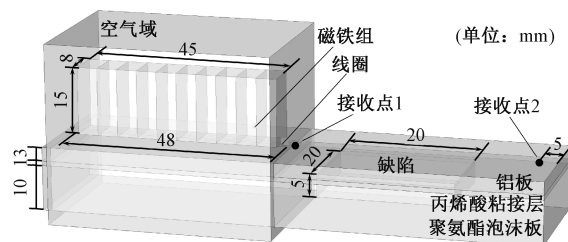
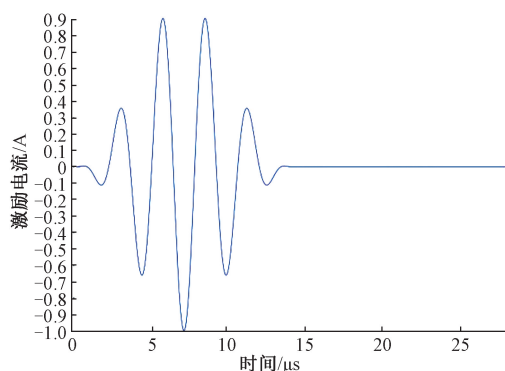
图 4 含缺陷的聚氨酯夹芯板检测仿真模型($d=4.5$ mm)Fig. 4 Detection simulation model of polyurethane sandwich insulation board with defect ($d=4.5$ mm)

图 5 导线内加载的激励电流信号波形

Fig. 5 Excitation current signal waveform loaded in the wires

磁铁组周围设置一个空气域,3 层夹芯板四周均设为低反射边界,以减少 SH 导波边界反射对接收信号的影响。本模型中永磁体与空气域采用常规网格划分,聚

氨酯夹芯板的网格划分按照最大网格单元大小与波长的关系进行划分,网格大小为波长的 $1/5 \sim 1/10^{[14]}$ 。并设定瞬态求解的时间步长 $\Delta t = 0.14 \mu\text{s}$,求解总时长 $84 \mu\text{s}$ 。

2.1 传播过程的仿真试验

为了清晰地观察上述建立的物理模型在聚氨酯夹心板中激励 SH 导波以及传播的过程,此次仿真选取了激励频率为 398 kHz ,从而所激励的 SH 导波斜入射角度为 60° ,计算结果如图 6 所示。

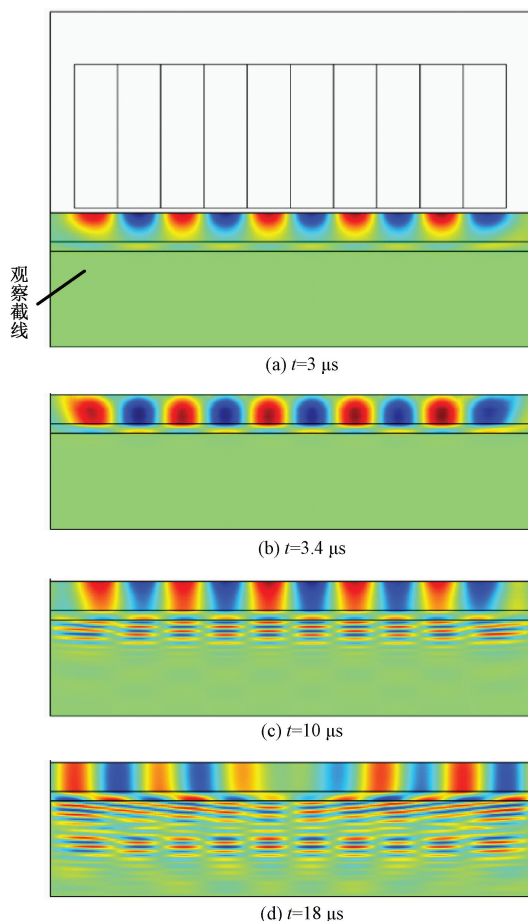


图 6 以声压值呈现的不同时刻的导波激励与传播过程

Fig. 6 Guided wave excitation and propagation process at different moments when the sound pressure value presents

选取了几个不同时刻的声压分布图,仅在图 6(a)中可以看到探头模型,其余图中进行了裁剪。可以看出,PPM EMAT 首先在铝板中产生了方向交替变换的声压,随后开始向粘接层内渗透,再接着向聚氨酯层渗透,在 $10 \mu\text{s}$ 时刻已进入聚氨酯层 $1/3$ 深度。当铝板内的电磁超声换能过程全部完成后,SH 导波开始在铝板内向两侧传播,此时导波由于波源产生声波的相互干涉而产生以所控制的激励频率发生斜入射。在 $18 \mu\text{s}$ 时可以明显看出粘接层与聚氨酯层内的导波方向均发生了明显的偏转,折射角度约为 60° 。为了进一步验证在聚氨酯层内所

产生的导波为 SH 波,如图 6(a)所示在聚氨酯板上表面以下 3 mm 处设置一条二维截线进行观察,提取该截线上 $18 \mu\text{s}$ 时刻的 3 个方向的位移分布,结果如图 7 所示。可以看出介质内以沿 $\pm Z$ 方向的振动为主,验证了所激励的导波在聚氨酯夹芯板中的主要成分为 SH 波。

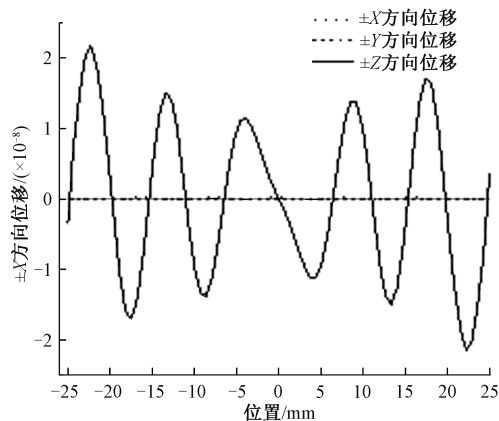


图 7 提取聚氨酯板表面以下 3 mm 截线上的 3 个方向位移分布

Fig. 7 The displacement distribution in three directions extracted at the cross-section line 3 mm below the surface of the polyurethane board

2.2 透射比率仿真

为了去掉传播过程中的衰减的影响,在模型中将聚氨酯板材料改为空气,则夹芯板变为铝-丙烯酸双层板。图 8 是以磁铁间距 4.5 mm ,激励频率 344 kHz ,入射角度 90° 为例做的一组仿真试验结果。在接收点 1 处,由于距离较短,双层板和三层板中的接收信号受透射衰减影响较小;而在接收点 2 处的接收信号幅值均小于接收点 1 处的,并且 3 层板中的接收点 2 信号幅值明显小于两层板中的接收点 2 信号幅值。这说明当 SH_0 导波在双层板中传播时,仅存在传播衰减。而在 3 层板中传播时,一部分能量会向聚氨酯板中渗透,同时在铝板中传播时还会存在一定的衰减。这一点也在其他入射角度的仿真试验中得到证实,并且随着 SH_0 导波入射角度的改变,能量渗透导致的衰减程度也随之改变。

因此,将三层板与双层板的接收信号幅值进行差值,可以得到 SH_0 导波向聚氨酯板中透射部分的能量。从而透射比率可以利用如下公式进行计算:

$$T = \frac{(A_{tri0} - A_{tri1}) - (A_{dou0} - A_{dou1})}{A_{tri0}} \quad (12)$$

其中, A_{tri0} 和 A_{tri1} 分别是三层板模型中接收点 1 和接收点 2 处的信号幅值; A_{dou0} 和 A_{dou1} 分别是双层板模型中接收点 1 和接收点 2 处的信号幅值。

为了研究磁铁间距对检测透射比率的影响,将上述模型中的磁铁厚度改为 6 mm ,数量减少为 8 个,其余参

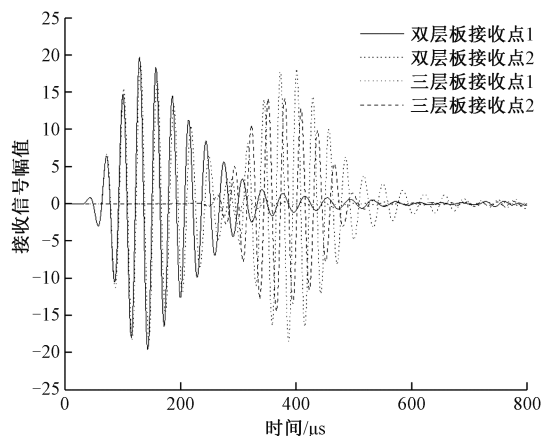


图 8 磁铁间距 4.5 mm, 激励频率 344 kHz, 入射角度 90° 时双层板与三层板仿真接收信号幅值

Fig. 8 The simulation received signal amplitudes of the double-layer board and three-layer board when the magnet spacing is 4.5 mm, the excitation frequency is 344 kHz and the incident angle is 90°

数均保持不变。利用式(12), 对磁铁间距为 4.5 和 6 mm 的两种情况进行仿真试验, 改变激励频率以获得不同的入射角度, 得到仿真计算的结果如表 2 所示。

表 2 不同入射角度下 SH_0 波的能量透射比率与缺陷幅值比

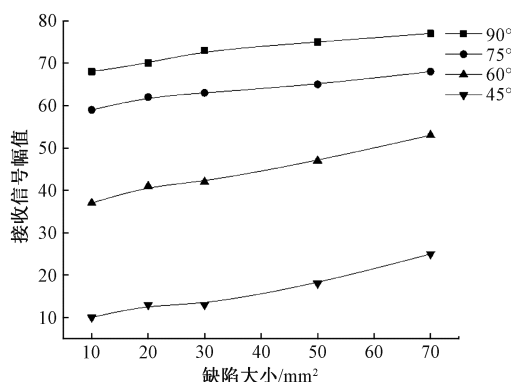
Table 2 SH_0 wave energy transmission ratio and defect amplitude ratio at different incident angles

磁铁间距 /mm	激励频率 /kHz	入射角度 /(°)	透射比率 T
4.5	487	45.0	$(21-15) \div 48 \times 100\% = 12.5$
4.5	398	60.0	$(60-20) \div 262 \times 100\% = 15.3$
4.5	357	75.0	$(86-25) \div 355 \times 100\% = 17.2$
4.5	344	90.0	$(89-29) \div 376 \times 100\% = 15.9$
6	337	50.0	$(48-23) \div 110 \times 100\% = 22.7$
6	311	56.5	$(61-26) \div 137 \times 100\% = 25.5$
6	267	75.0	$(104-66) \div 204 \times 100\% = 18.6$
6	258	90.0	$(110-79) \div 208 \times 100\% = 14.9$

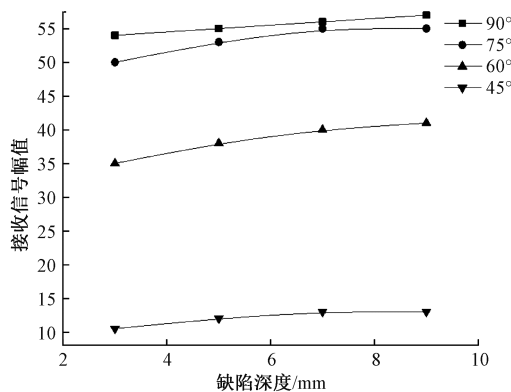
结果显示当磁铁间距为 4.5 mm 时, 控制 SH_0 导波入射角度为 75°, 可以得到最大的透射比率。也即是说, 入射角的改变影响了导波信号在传播过程中能量透射进入聚氨酯层的比例, 而导波在通过缺陷时能量会发生反射, 因此高透射比率的信号在通过缺陷时的能量变化更加灵敏。同理, 对于磁铁间距为 6 mm 的情况, 最佳入射角度为 56.5°。

2.3 不同大小缺陷的仿真试验

进一步研究缺陷大小对 SH_0 导波接收幅值信号的影响。根据前述的检测原理可知, 影响 SH_0 导波接收幅值的因素主要是缺陷面积和深度。首先考虑缺陷面积变化的情况, 缺陷宽度和深度保持不变, 而缺陷的长度按照 10 mm 的步进从 10~70 mm 变化, 缺陷近端一侧边缘与磁铁组中心之间的距离始终为 20 mm。然后考虑缺陷深度变化的情况, 缺陷面积为 20 mm×20 mm, 而缺陷的深度按照 2 mm 的步进从 3~9 mm 变化。磁铁间距选择 4.5 mm, 对 4 种不同入射角度分别进行仿真试验。信号接收点仍然选取距铝板最远端边缘 5 mm 的表面, 仿真试验结果如图 9 所示。



(a) 不同缺陷长度下的接收信号幅值
(a) The received signal amplitudes under different defect lengths



(b) 不同缺陷深度下的接收信号幅值
(b) Thereceived signal amplitudes under different defect depths

图 9 仿真计算不同大小缺陷的接收信号幅值
Fig. 9 Simulation calculated received signal amplitudes for the defects with different sizes

结果显示随着缺陷面积的增大, 接收信号幅值基本上呈线性增加, 与理论分析结论一致。同样, 缺陷深度增大也会导致接收信号幅值增加。不过缺陷深度的改变对接收信号幅值影响较小, 并且达到一定深度后变化不再明显, 这是由于缺陷深度一旦超出了 SH_0 导波的波长, 则在聚氨酯板中更深位置不再有导波存在, 从而更深位置没有向下渗透的能量^[15]。



3 试验验证

为了验证所述方法的有效性,搭建了如图 10 所示的试验台。其中,待测夹芯板与仿真一致,为 3 层结构,从上至下分别为 3 mm 厚的铝板、1 mm 厚的丙烯酸 3 M 胶带和 20 mm 厚的聚氨酯发泡泡沫板。在聚氨酯泡沫板和胶带居中同一位置横向制作了 5 个方形盲孔,编号为 1#~5#,边长分别为 70、50、30、20 mm 和 10 mm,再将铝板压在上面并均匀施力使三者粘接牢固;SH 导波探头激励和接收线圈相同,均使用柔性印制跑道线圈,线圈总长 150 mm,宽 40 mm,其中线宽 0.7 mm、相邻线间隔 0.3 mm、匝数 13 匝;磁铁为稀土钕铁硼材质、牌号为 N35、厚度为 3 mm,相邻磁铁之间均采用 1.5 mm 厚的塑料薄片隔开,以保证所有磁铁中心间距均为 4.5 mm,磁铁组合总长 61 mm,总宽 50 mm;激励探头和接收探头分别接入 RPR4000 脉冲发生器的发射和接收通道,工作模式为一发一收方式,输出信号在 DPO3012 示波器上观察。

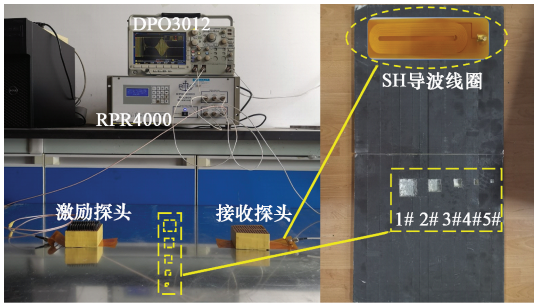


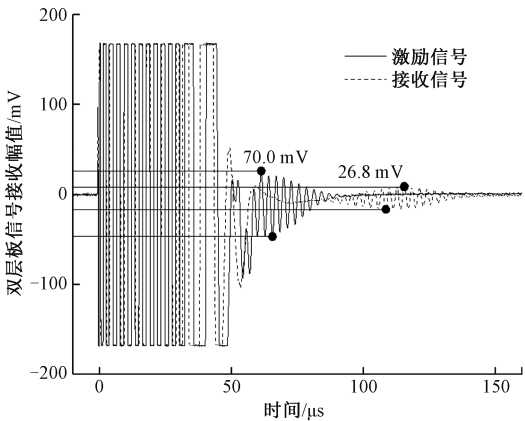
图 10 聚氨酯夹芯板泡沫层缺陷检测试验平台

Fig. 10 Test platform for the defect detection of the foam layer of polyurethane sandwich insulation board

3.1 最佳入射角验证试验

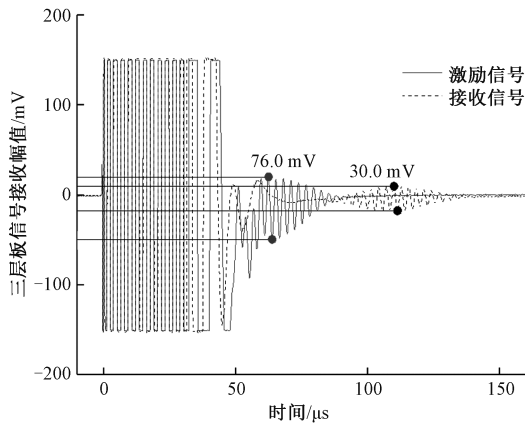
为确保检测结果不受探头与缺陷相对尺寸的影响,选择尺寸比探头略大的 2#缺陷进行最佳入射角检测试验。由于磁铁间距固定不变,因此通过改变激励频率的方式来调整 SH_0 导波初始入射角度。为了采集激励点的信号幅值,将接收探头靠近激励探头放置,用接收信号近似等效为激励信号;随后将激励探头与接收探头分别置于 2#缺陷的两侧,并且到缺陷的距离均为 10 cm,从而采集到 SH_0 导波经过缺陷后的接收信号。试验分别在铝-粘接层双层板和铝-粘接层-聚氨酯板 3 层板中完成,激励频率为 357 kHz,此时的初始入射角为 75° 。采集到的激励信号和接收信号如图 11 所示。

表 3 是在不同激励频率下对 2#缺陷开展试验,将采集数据代入式(12)计算得到的 SH_0 导波能量透射比率。显然,在初始入射角度为 75° 时,能够得到最佳的检测效果,与仿真结果基本吻合。在某些角度的透射比率变化



(a) 铝-粘接层双层板中的 2#缺陷检测试验采集信号

(a) The acquired signal of 2# defect detection test in the aluminum-adhesive layer double-layer board



(b) 铝-粘接层-聚氨酯板三层板中的 2#缺陷检测试验采集信号

(b) The acquired signal of 2# defect detection test in the aluminum-adhesive layer-polyurethane three-layer board

图 11 不同粘接层板中的 2#缺陷检测试验采集信号

Fig. 11 The acquired signals of 2# defect detection test in different adhesive layer boards

趋势出现波动,可能的原因是:1) 粘接层受到外部应力的长时间挤压,其厚度的改变同时导致剪切模量发生了变化,影响了透射比率。2) 仿真数据来自于接收有限元网格单元点的值,而实验数据是接收探头与被检测件接触面积的幅值平均值,且接收探头具有一定的面积,导致实验值与理论值存在一定的误差,但总体趋势是一致的,表明透射比计算及有限元仿真结果基本准确。

表 3 不同初始入射角度下的 SH_0 波能量透射比率

Table 3 Energy transmission ratios of SH_0 wave at different initial incident angles

磁铁间距 /mm	激励频率 /kHz	入射角度 /(°)	透射比率 T
4.5	398	60	$(12.4-11.8) \div 20.8 \times 100\% = 2.9$
4.5	357	75	$(46.0-43.2) \div 76 \times 100\% = 3.7$
4.5	344	90	$(47.8-46.2) \div 83 \times 100\% = 2.0$



3.2 不同大小缺陷检测试验

为了测试本方法对不同大小的聚氨酯板内部缺陷的检测灵敏度,分别对 1#~5#缺陷进行了试验。所有试验中,初始入射角始终保持为 75° 。继续将激励探头与接收探头分别置于每个缺陷的两侧,并且到缺陷的起始距离均为 10 cm,记录下接收探头的信号幅值。试验结果如图 12 所示,可以看出随着缺陷面积的增大,接收信号幅值也在呈线性不断增加。

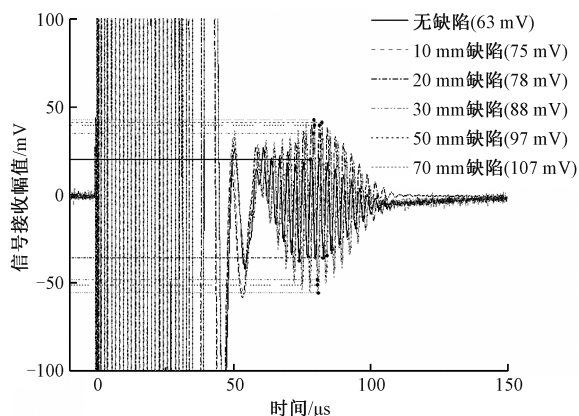


图 12 20 cm 探头间距下不同大小缺陷的检测信号接收幅值

Fig. 12 The detection signal received amplitudes for different size defects under 20 cm probe spacing

接着以 5 cm 的步长逐步加大两探头之间的距离,同样记录下接收信号幅值。试验结果如图 13 所示,显然不同的检测距离下表现出同样的规律。不过随着两探头的距离变化,接收信号幅值也会改变,这与 SH_0 导波在夹芯板中的传播衰减有较大关系。

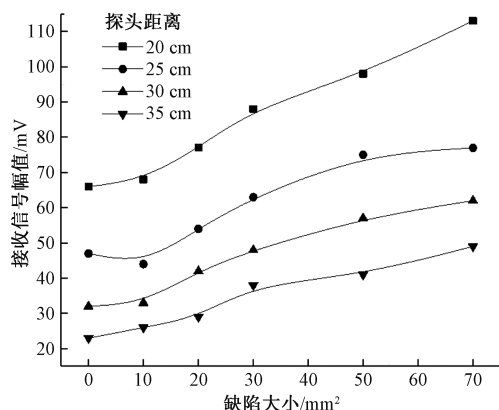


图 13 不同探头间距下缺陷大小对检测信号的影响曲线

Fig. 13 The influence curve of defect size on detection signal under different probe spacing

3.3 距离-幅值修正试验

由于本方法是基于缺陷对 SH_0 导波能量的衰减进行检测,当激励探头与接收探头之间的距离发生改变时,势必会影响对缺陷当量大小的评价。考虑到聚氨酯发泡层内缺陷面积对能力衰减的影响相对于导波传播路径所占面积的衰减影响较小,因此有必要对检测幅值进行面积的加权。通过如下修正后,可得到与检测距离解耦的缺陷检测评价值为:

$$E = A_{def}/A_{com} \times \sqrt{\frac{S_{def}}{S_{max}}} \quad (13)$$

其中, A_{def} 和 A_{com} 分别为有缺陷和无缺陷时的接收信号幅值; S_{max} 为导波传播路径所占面积(选取激励与接收两探头之间的面积); S_{def} 为缺陷面积。

为了验证上述修正公式的有效性,以 3#缺陷为对象进行了试验。仍然将激励探头与接收探头分别置于 3#缺陷的两侧,并且到缺陷的起始距离均为 10 cm,随后以 5 cm 的步长逐步加大两探头之间的距离。所有试验中,初始入射角仍然保持为 75° 。试验结果如表 4 所示,采用式(13)计算得到不同探头间距下的缺陷检测评价值均约等于 0.5,这验证了本修正方法是有效的^[16]。

表 4 不同探头间距下的 3#缺陷检测评价值

Table 4 The detection evaluation value of 3# defect under different probe spacing

探头间距 /cm	A_{def} /mv	A_{com} /mv	S_{max} /cm ²	S_{def} /cm ²	E
20	88	66	3×20	3×3	0.51
25	63	47	3×25	3×3	0.46
30	48	32	3×30	3×3	0.47
35	38	23	3×35	3×3	0.48

采用同样的方法对 1#~5#缺陷开展试验,计算结果如图 14 所示。结果表明在不同检测距离下,所有缺陷检

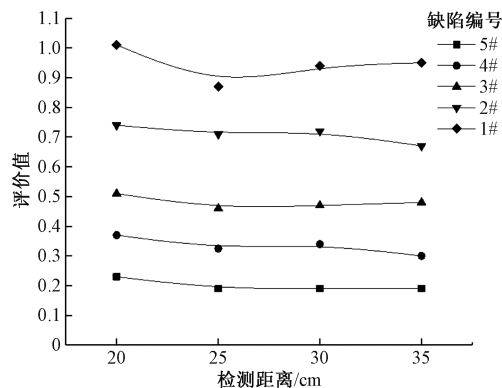


图 14 1#~5#缺陷的检测评价曲线

Fig. 14 The detection evaluation value curves of defect 1#~5#



测评价价值基本相同。另外,在保证两探头间距不变的情况下,改变激励探头到缺陷的距离,试验结果保持不变。因此,通过上述修正公式,可以消除距离对检测结果的影响。在实际检测中,可以先制作标准样板缺陷,试验得到不同大小缺陷的当量评价价值;然后对真实缺陷检测时,便可以利用式(13)换算出缺陷的当量大小值。

4 结 论

本文使用 SH_0 波对聚氨酯夹芯板的发泡缺陷进行检测,对聚氨酯夹芯板透反射系数与 SH_0 波入射角度的关系进行了理论推导,结合洛伦兹力 SH 波的斜入射工作原理,确定了不同磁铁间距下最佳的入射角度。基于 COMSOL 有限元法建立了 SH_0 波在聚氨酯夹芯板中传播的有限元模型,对不同的 SH_0 波入射角度产生信号质点振动强度进行了仿真研究并通过实验进行验证。结果表明聚氨酯夹芯板的材料、剪切模量和粘接层厚度均影响透射与反射系数曲线,当系数比最大时 SH_0 波能量最多的渗透进入聚氨酯板层,在遇到缺陷时,接收信号幅值变化最大。

除此以外探究了不同缺陷尺寸、缺陷深度对信号的影响。当缺陷尺寸面积持续增大, SH_0 波的能量渗透衰减减小,接收点的信号幅值变大。而当缺陷面积不变,缺陷深度增大时,超过一定深度后信号的幅值增加不明显,同时采用的基于能量衰减的 SH 导波检测方法研究与检测距离解耦的缺陷幅值修正公式,为后期实现缺陷定位提供了一定的指导。通过仿真与实际试验可知,本文所提出的电磁超声 SH_0 波检测方法可用于多层复合材料的内部缺陷检测。

参考文献

- [1] 曾雪峰,常俊杰,万陶磊,等. 基于空气耦合超声兰姆波技术的固体火箭发动机脱粘检测研究[J]. 固体火箭技术,2020,43(4):524-531.
ZENG X F, CHANG J J, WAN T L, et al. Research on debonding detection of solid rocket motors based on air-coupled ultrasonic Lamb wave technology[J]. Solid Rocket Technology, 2020, 43(4): 524-531.
- [2] 温银堂,张松,张玉燕,等. 新型复合材料界面粘接缺陷的 CT 检测及表征[J]. 中国测试,2020,46(1): 12-17.
WEN Y T, ZHANG S, ZHANG Y Y, et al. CT detection and characterization of bonding defects at the interface of new composite materials[J]. China Test, 2020, 46(1): 12-17.
- [3] WANG Z, HUANG S, WANG S, et al. Multifrequency identification and exploitation in Lamb wave inspection[J]. IEEE Access, 2019, 7: 150435-150443.
- [4] CASTAINGS M. SH ultrasonic guided waves for the evaluation of interfacial adhesion[J]. Ultrasonics, 2014, 54(7): 1760-1775.
- [5] PREDOI M V, KETTANI M E C, LEDUE D, et al. Use of shear horizontal waves to distinguish adhesive thickness variation from reduction in bonding strength[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2015, 138(2): 1206-1213.
- [6] CROM B L, CASTAINGS M. Shear horizontal guided wave modes to infer the shear stiffness of adhesive bond layers[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2010, 127(4): 2220-2230.
- [7] YEW C H, WENG X W. Using ultrasonic SH waves to estimate the quality of adhesive bonds in plate structures[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1985, 77(5): 1813-1823.
- [8] SUN H Y, HUANG S L, WANG Q, et al. Improvement of unidirectional focusing periodic permanent magnet shear-horizontal wave electromagnetic acoustic transducer by oblique bias magnetic field[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 290: 36-47.
- [9] 杨理践,吕瑞宏,高松巍,等. 基于 SH 导波的防腐层能量密度检测机理研究[J]. 仪器仪表学报,2016, 37(5):1101-1109.
YANG L J, LYU R H, GAO S W, et al. Research on the detection mechanism of energy density of anticorrosion coating based on SH guided wave[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(5): 1101-1109.
- [10] 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 C F, ZHENG M F, LYU Y, et al. Development, applications and challenges in ultrasonic guided waves testing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1713-1735.
- [11] 赵亮,张金,董子华,等. 斜入射 SH 波厚壁管道内壁裂纹检测方法[J]. 应用声学, 2020, 39(5): 747-752.
ZHAO L, ZHANG J, DONG Z H, et al. The detection method of cracks on the inner wall of thick wall pipes with inclined beams of SH waves[J]. Journal of Applied Acoustics, 2020, 39(5): 747-752.
- [12] 徐红玉,陈殿云,王钦亭. 层合介质中平面 SH 波的传播[J]. 焦作工学院学报(自然科学版),2003, 22(4): 320-323.
XU H Y, CHEN D Y, WANG Q T. Propagation of plan SH wave in laminated medium[J]. Journal of Jiaozuo



- Institute of Technology (Natural Science), 2003, 22(4): 320-323.
- [13] 丁俊才,吴斌,何存富. SH_0 导波在粘接结构中传播时的相位变化[J]. 力学学报,2017,49(1):202-211.
DING J C, WU B, HE C F. Phase change of SH_0 guided waves when propagating in a bonded structure[J]. Acta Mechanica Sinica, 2017, 49(1): 202-211.
- [14] 朱力强,许西宁,余祖俊,等. 基于超声导波的钢轨完整性检测方法研究[J]. 仪器仪表学报,2016,37(7): 1603-1609.
ZHU L Q, XU X N, YU Z J, et al. Research on rail integrity detection method based on ultrasonic guided waves[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7): 1603-1609.
- [15] KHALILI P, CEGLA F. Excitation of single-mode shear-horizontal guided waves and evaluation of their sensitivity to very shallow crack-like defects[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2020, 10:1-11.
- [16] 常俊杰,万陶磊,钟海鹰. 短空间二维傅里叶变换对铝板的损伤定量研究[J]. 电子测量与仪器学报,2020, 34(6):102-108.
CHANG J J, WAN T L, ZHONG H Y. Quantitative study on the damage of short space two-dimensional Fourier transform to aluminum plate [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(6): 102-108.

作者简介



屠泽熹,2018年于西安理工大学获得学士学位,现为湖北工业大学硕士研究生,主要研究方向为超声无损检测新技术及应用。
E-mail:609072516@qq.com

Tu Zexi received his B. Sc. degree in 2018

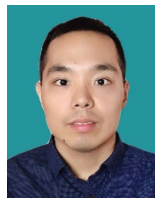
from Xi'an University of Technology. Now, he is studying for a master degree in Hubei University of Technology. His main research interest is new technology and application of ultrasonic nondestructive testing.



涂君(通信作者),分别在2006年,2009年和2014年于华中科技大学获得学士,硕士和博士学位,现为湖北工业大学副教授,主要研究方向为超声无损检测新技术及应用。

E-mail:juntu@hbut.edu.cn

Tu Jun (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Huazhong University of Science and Technology in 2006, 2009 and 2014, respectively. Now, he is an associate professor in Hubei University of Technology. His main research interest is new technology and application of ultrasonic nondestructive testing.



袁宁,2009年于湖北工业大学获得学士学位,2012年于湖北工业大学获得硕士学位,现为中国中车长江集团科技发展分公司技术研究院主管工艺师,工程师,主要研究方向为铁道车辆、冷链运输装备制造工艺技术。

E-mail: yuanning5201314@126.com

Yuan Ning received bachelor degree in 2009 and master degree in 2012 both from Hubei University of Technology. He is the chief technologist and engineer of the Technology Research Institute of CRRC Changjiang Group Science and Technology Development Branch. The main research direction is the manufacturing process technology of railway vehicles and cold chain transportation equipment.