

文章编号: 1000-4750(2013)07-0255-07

窄板中超声导波传播特性试验研究

焦敬品¹, 钟 茜¹, 王炯耿², 罗宏建², 周重回², 何存富¹, 吴 斌¹

(1. 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124; 2. 浙江省电力试验研究院, 浙江, 杭州 310014)

摘 要: 针对工程中窄板结构安全评价问题, 该文对窄条板结构中超声导波传播特性进行了试验研究。首先, 对无限大板结构中不同模式超声导波的传播特性进行了理论分析。然后, 在不同宽度窄铝板上进行了不同模式超声导波对比试验研究。结果表明, 与兰姆波相比, 低阶水平剪切波(SH0波)受窄板宽度方向边界的影响小。当窄板宽度大于电磁声换能器宽度情况下, SH0波检测结果不受板宽度变化影响。在此基础上, 将SH0波应用于电力系统接地网扁钢检测。结果表明, SH0波在扁钢中传播能力强, 可用于现地埋扁钢无损检测。该文研究工作为工程窄板结构健康检测提供可行的技术方案。

关键词: 无损检测; 水平剪切波; 超声导波; 地线; 电磁超声换能器; 窄板

中图分类号: TU317.8 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.02.0076

ON PROPAGATION CHARACTERISTICS OF GUIDED WAVES IN NARROWBAND

JIAO Jing-pin¹, ZHONG Xi¹, WANG Jiong-geng², LUO Hong-jian², ZHOU Chong-hui², HE Cun-fu¹, WU Bin¹

(1. Institute of Mechanical Engineering and Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Power Test and Research Institute of Zhejiang Province, Hangzhou, Zhejiang 310014, China)

Abstract: For the safety evaluation of narrowband used in engineering structures, the propagation characteristics of guided waves in a narrowband are investigated experimentally. Firstly, the characteristics of guided waves propagated in an infinite plate is theoretical analyzed; then the contrastive experiments are conducted in narrowbands with different widths using different modes of guided waves. It is found that comparing to the lamb modes, shear horizontal waves (SH0) are almost not affected by the boundary of a narrowband, and the width variation of a narrowband has no influence on the waveforms of an SH0 mode when the width of a narrowband is bigger than the width of electromagnetic acoustic transducers. Finally, the SH0 mode guided wave is used to the non-destructive testing (NDT) of flat steel in a ground grid. It is showed that a SH0 mode can propagate a long distance in flat steel, and can be used for NDT of buried flat steel. The developed method provides feasible scheme for the health monitoring of narrowbands in engineering structures.

Key words: non-destructive testing; shear horizontal waves; guided waves; ground grid; electromagnetic acoustic transducer; narrowband

在组成工业构件的各基本结构中, 有一类特殊的板结构——窄板结构。其宽度方向尺寸远小于其

长度方向尺寸, 这类窄板在航空^[1]、船舶^[2]、电力输配送^[3]和机械制造^[4]等行业应用广泛。例如, 电

收稿日期: 2012-02-15; 修改日期: 2012-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(11272017, 51075012); 北京市自然科学基金项目(1122005); 质检公益性行业项目(201210080)

通讯作者: 焦敬品(1973—), 女, 河北晋州人, 教授, 博士, 从事超声无损检测新技术研究(E-mail: jiaojp@bjut.edu.cn).

作者简介: 钟 茜(1985—), 女, 江西人, 硕士生, 从事超声导波无损检测技术研究(E-mail: zhongxi@emails.bjut.edu.cn);

王炯耿(1973—), 男, 浙江诸暨人, 高工, 从事无损检测研究(E-mail: wjgxyz@126.com);

罗宏建(1978—), 男, 广西东兰人, 高工, 硕士, 材料加工工程专业, 从事无损检测研究(E-mail: lhjndt@qq.com);

周重回(1971—), 男, 浙江金华人, 高工, 学士, 金属材料专业, 从事无损检测研究(E-mail: zhouchonghui50@sina.com);

何存富(1958—), 男, 山西大同人, 教授, 博士, 从事超声无损检测新技术研究(E-mail: hecunfu@bjut.edu.cn);

吴 斌(1962—), 男, 山西大同人, 教授, 博士, 博导, 从事超声无损检测新技术研究(E-mail: wb@bjut.edu.cn).

力系统的接地网就是由窄板结构焊接而成。这些窄板一般厚度为 0.6cm~1cm, 宽度为 6cm~8cm, 长度为 600cm~800cm。由于窄板结构宽度方向尺寸特点, 使得利用超声导波技术对其进行无损检测, 与对常规板结构的无损检测有很大的不同。

目前, 国内外学者利用超声导波技术对板结构无损检测开展了大量卓有成效的理论和试验研究^[5-8], 但研究主要集中在板结构大范围缺陷检测, 鲜少考虑板边界对兰姆波检测的影响。例如, Su Zhongqing^[9]对复合材料板中兰姆波检测研究现状进行了综述。Rose^[10]利用超声导波技术对板结构中腐蚀缺陷进行了试验和边界元数值模拟研究。研究腐蚀减薄对超声导波的截止频率、群速度以及反射和透射信号幅度的影响, 提出了一种基于频率补偿的腐蚀深度检测方法。Cawley^[11]对板中椭圆缺陷处 SH0 波的反射特性进行了数值仿真和试验研究。研究表明, 由于椭圆缺陷两侧边界的作用, SH0 波在缺陷处的反射谱呈周期变化规律。

目前, 国内外学者对窄板结构中超声导波检测研究还很有限。例如, Bingham^[12]利用兰姆波技术对飞机中的铝制桁条结构(长 100cm、宽 5.8cm、厚 0.16cm)的腐蚀减薄进行了三维数值仿真和检测试验研究。通过对检测信号进行时频分析, 利用提取出的兰姆波的达到时间变化反映腐蚀造成的兰姆波传播路径变化。在国内, 利用超声导波技术对窄板进行无损检测的研究还鲜见报道。

针对以上情况, 本文在对无限大板结构中不同模式超声导波传播特性理论分析基础上, 对不同模式超声导波在不同宽度板结构中传播特性进行了对比试验, 在此基础上, 将低阶 SH0 波应用于地线窄板结构的无损检测。

1 板中超声导波传播特性理论分析

本节通过对无限大板结构中不同模式超声导波传播特性理论分析, 以期对不同模式超声导波在窄板结构中传播能力进行预测。

1.1 频散特性

图 1 给出 0.1cm 厚无限大铝板中超声导波传播的频散曲线。从图 1 可以看出, 在 0~2.5MHz 频率范围内, 存在三种模式超声导波, 即低阶对称兰姆波 S0 模式、低阶反对称兰姆波 A0 模式、A1 模式

以及低阶水平剪切波 SH0 模式。在该频率范围内, 水平剪切波速度不随频率改变而变化(恒为 3130m/s), 即不存在频散; 而三种低阶兰姆波模式均存在不同程度的频散。同时, SH0 遇到反射体或在界面处, 不会发生模式转换现象。SH0 波的非频散和在边界出无模式转换特征使得其检测信号易于分析识别。因此, 通过理论分析可以预见, 与兰姆波相比, SH0 波在窄条板结构中传播时, 其检测波形受边界影响较小。

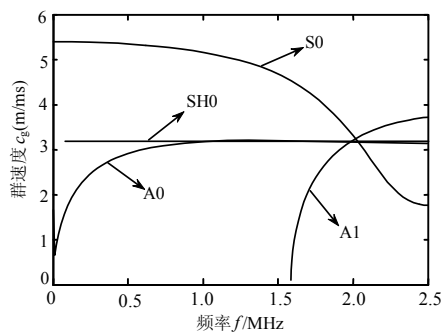
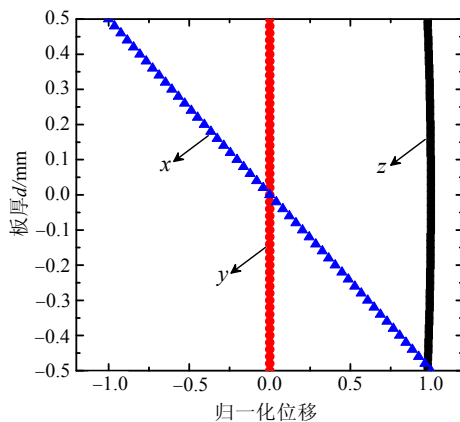


图 1 1mm 铝板频散曲线

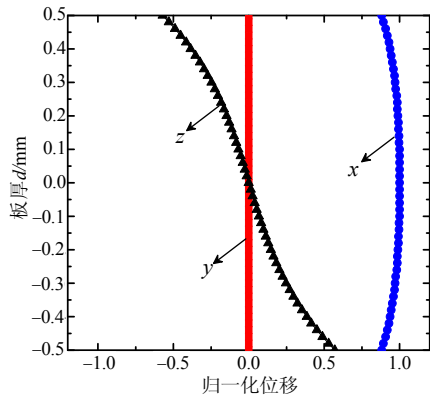
Fig.1 Disperse curves of 1mm aluminum plate

1.2 波结构

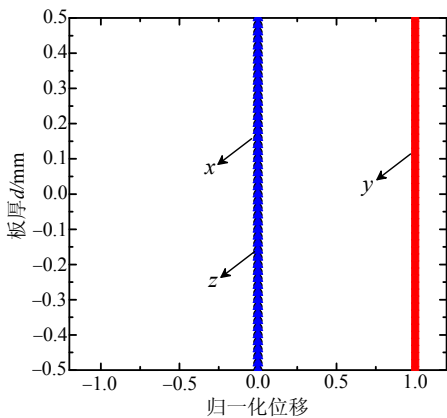
波结构为超声导波的场量(如位移、应力等)沿厚度方向的分布规律。超声导波的波结构决定了该模式导波传播能力、对缺陷的灵敏度以及对环境介质的敏感性。图 2 分别给出了 0.5MHz 处 S0 模式、0.9MHz 处 A0 模式和 0.31MHz 处 SH0 波的典型波结构。从图中可以看出, A0 和 S0 有两个非零的位移分量, 即垂直板厚度方向(x 方向)的离面位移和沿传播方向(z 方向)的面内位移, 且 A0 模式导波以离面位移为主, S0 模式导波以沿传播方向的面内位移为主。而 SH0 波仅有一个非零的位移分量, 即垂直于传播方向(y 方向)的面内位移, 离面位移和沿传播



(a) 0.5MHz 处 S0 模式



(b) 0.9MHz 处 A0 模态



(c) 0.31MHz 处 SH0 模态

注: x 为板厚度方向; y 为板面内切向; z 为板长度方向

图 2 1mm 厚铝板中超声导波的波结构

Fig.2 Wave structure of guided waves in 1mm plate

方向的面内位移分量均为零。由于 SH0 波的离面位移为零, 因此当板埋于土壤或粘性介质情况下, SH0 向板周围介质中能量泄漏较小, 能够在板中传播较长的距离。此外, SH0 波的面内位移沿板厚度均匀分布, 因此, 对于板厚度不同深度缺陷具有相同的灵敏度。

因此, 相对于低阶兰姆波, SH0 波的非频散、仅存在沿板厚均匀分布的板面内切向位移分量的特点, 更适合于板结构的无损检测。下面通过具体试验, 对这些模态导波在窄板结构中的传播能力进行对比分析。

2 窄板中导波传播特性试验研究

在实验室内, 分别利用 S0 模态兰姆波和 SH0 波对同一批不同宽度的铝板结构进行对比试验。该批铝板的厚度均为 0.1cm, 长度均为 240cm, 宽度 W 分别为 3cm、4cm、5cm、6cm、7cm、8cm、9cm、10cm 和 100cm。

2.1 兰姆波检测试验

2.1.1 兰姆波检测试验系统

兰姆波检测系统如图 3 所示, 主要由函数发生器、功率放大器、压电斜探头、示波器组成。其中压电斜探头的倾角为 45° , 中心频率为 1MHz。根据 Snell 定理, 利用倾角为 45° 的斜探头(探头宽度为 4cm), 在 0.46MHz 附近可以在 0.1cm 厚铝板中激励出 S0 模态兰姆波。激励信号采用汉宁窗调制的 10 个周期单音频信号, 信号中心频率为 0.46MHz, 峰-峰值为 300mV。试验采用一激一收模式。在两个探头间距 D 分别为 80cm、0.16cm、0.18cm、200cm 和 220cm 情况下, 进行不同宽度铝板中兰姆波检测试验。

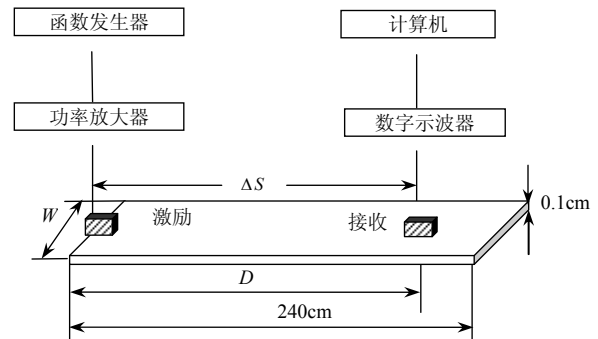


图 3 兰姆波检测试验装置图

Fig.3 Experimental system for Lamb waves

2.1.2 兰姆波检测试验结果

图 4 给出了当传感器间距为 2m 情况下, 不同宽度铝板的检测波形。从图中可以看出, 宽度为 3cm~10cm 窄铝板的检测波形复杂, 接收信号的主波包群位于 0.4ms 附近。该波包群中包含多个回波信号, 模态辨识分析困难。这是因为, 由于铝板宽度较窄, 兰姆波在窄板边界会产生反射和模态转换, 使得接收信号波形复杂。而当铝板宽度为 100cm 时, 检测信号中可以清晰地区分出若干回波信号。由第一个直达波的到达时间 0.39ms, 可以计算出该波包传播速度为 5120m/s, 与该频率下 S0 模态的理论群速度 5380m/s 吻合较好。

可以看出, S0 模态兰姆波在 100cm 宽铝板上传播能力较强, 可以接收到 2 次以上的端面回波, 而 S0 模态兰姆波在窄板结构中传播能力较差, 仅能接收到直达波, 且波形复杂, 难以辨识。因此, 以上检测试验结果说明, 铝板宽度对板中兰姆波传播有很大的影响。与相同条件下宽铝板相比, 窄铝板中兰姆波传播受板边界作用明显, 传播能

力较差。

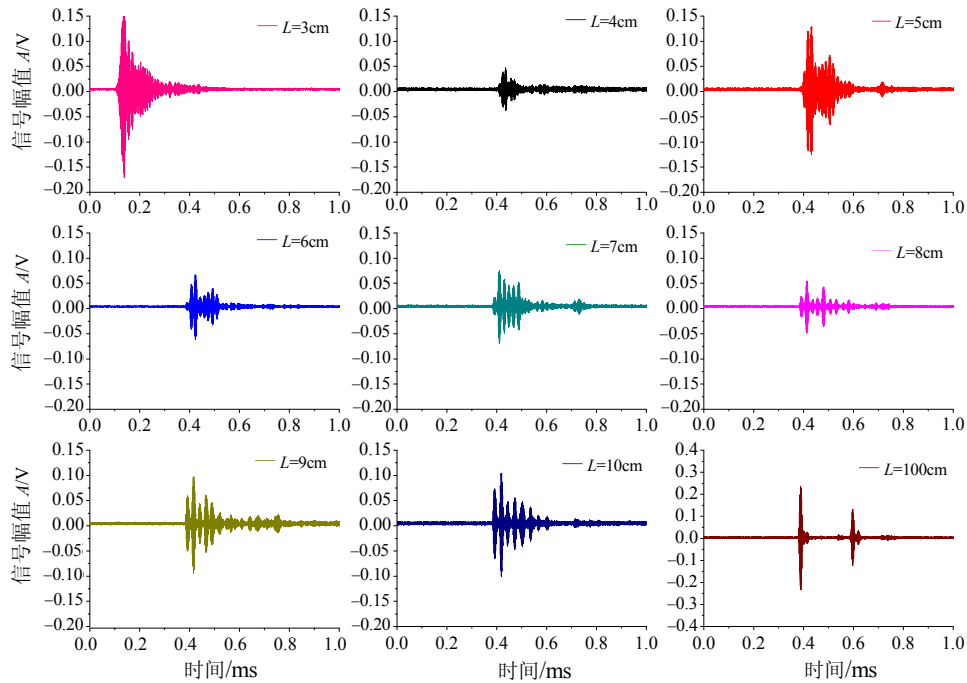


图 4 不同宽度铝板兰姆波检测波形

Fig.4 Waveforms of Lamb wave picked up from aluminum plates with different width

2.2 SH0 波检测试验

2.2.1 试验系统

图 5 为板结构 SH0 波电磁超声检测试验系统。主要包括高功率脉冲激励接收仪(RPR4000)、超声换能器、阻抗匹配器、示波器等。换能器采用中心频率为 300kHz 的 SH0 波电磁超声换能器，其宽度为 4cm。SH0 波检测试验中，高功率脉冲激励接收仪激励信号设定为中心频率 0.31MHz 的 5 个周期的方波信号。试验采用一激一收模式。与上述兰姆波检测试验相同，在两个换能器间距 D 分别为 80cm、160cm、180cm、200cm 和 220cm 情况下，进行不同宽度铝板中 SH0 波检测试验。

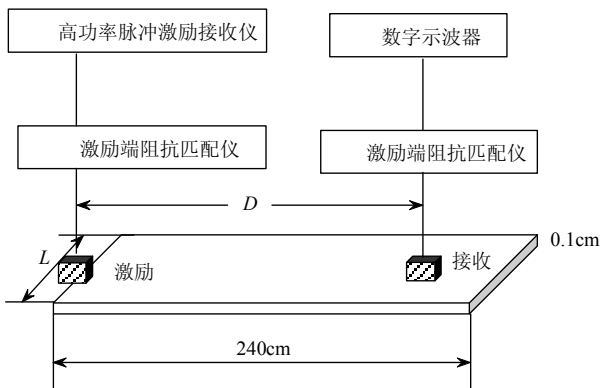


图 5 SH0 波检测试验系统

Fig.5 Experimental system for SH0 wave

2.2.2 SH0 波在窄板中传播能力研究

图 6 给出当传感器间距为 200cm 情况下，不同宽度铝板的典型检测波形。

从图 6 中可以看出，对于宽度大于电磁声换能器宽度的窄铝板，即宽度为 5cm、6cm、7cm、8cm、9cm、10cm 以及 100cm 铝板，其检测波形基本相同。可以清晰分辨出 6 个检测波包，依次为直达波、右端面第一次回波、左端面第一次回波、右端面第二次回波、左端面第二次回波以及右端面第三次回波。根据各波包传播时间以及相应的传播距离，计算出平均波速为 3080m/s，与 SH0 波的理论波速 3130m/s 相比，吻合较好。而对于宽度小于或等于电磁声换能器宽度的铝板，即宽度为 3cm 和 4cm 铝板，其检测波形中可分辨的波包数量相对较少，而且直达波和右端面回波附近出现干扰波包，使得回波幅度降低，信噪变差。

为进一步说明窄板宽度对 SH0 波检测的影响，在换能器间距为 80cm、160cm、180cm、200cm、220cm 的情况下，对不同宽度窄板进行多次重复检测试验，统计检测波形中直达波幅度、第一次端面回波幅度和第二次端面回波幅度随窄板宽度和换能器间距的变化规律，结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出，在板宽大于换能器宽度情况下(即大于

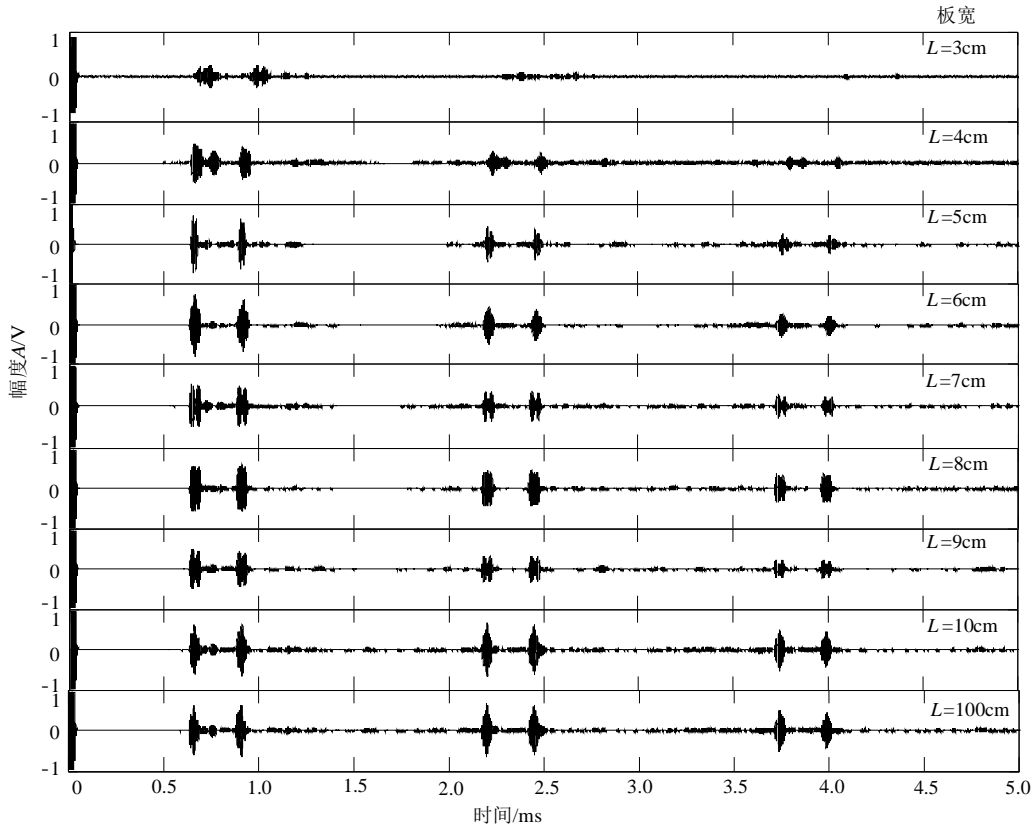


图6 不同宽度铝条中检测到 SH0 波的波形

Fig.6 Waveforms of SH0 wave picked up from aluminum plates with different width

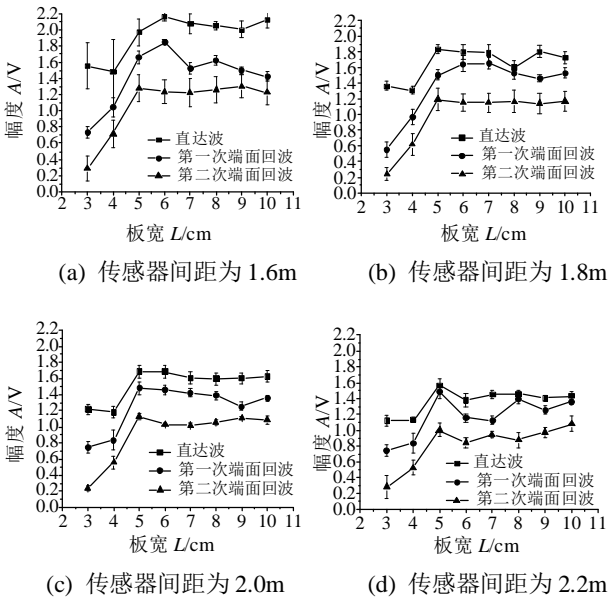


图7 不同换能器间距条件下, 波幅随板宽变化关系

Fig.7 Amplitudes of reflected echoes versus width of plates when the diatances of sensors are different

4cm 情况下), 不同换能器间距下, 接收信号中的直达波幅度、一次端面回波幅度及二次端面回波幅度受板宽度影响很小, 可以忽略不计。而当板宽小于

或等于换能器宽度情况下(3cm、4cm), 各次回波幅度均随板宽增大呈增加趋势。

因此, 当窄板宽度大于换能器宽度情况下, SH0 波受窄板边界影响小, 可以在窄板中传播较长的距离, 且板宽度变化对 SH0 检测波形基本没有影响。因此, SH0 波可以用于窄板结构的无损检测。

2.2.3 窄板中 SH0 波电磁换能器的指向性研究

在远场情况下, SH0 波电磁超声换能器的声场响应可表示为^[13]:

$$R(r_m, q_m, t) = A_0 \sqrt{\frac{2}{\pi k}} e^{-j\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right)} \sum_{m=0}^N (-1)^m \frac{L_m}{\sqrt{r_m}} \left[\frac{\sin\left(\frac{1}{2} k L_m \sin q_m\right)}{\frac{1}{2} k L_m \sin q_m} \right] e^{j k r_m} \quad (1)$$

其中: r_m 为检测点与换能器间的等效距离; q_m 为换能器中心连线与换能器中心线间的夹角; L_m 为换能器宽度; m 为换能器中包含的螺线圈的个数; k 为 SH 波的波数; A_0 为常数。图 8 给出距离为 30cm 条件下, 激励信号频率为 125kHz、250kHz、310kHz 和 500kHz 时, SH0 波换能器的指向性。可以看出,

随着激励频率的增加, SH0 波换能器指向性越好, 但旁瓣幅值相对变大。

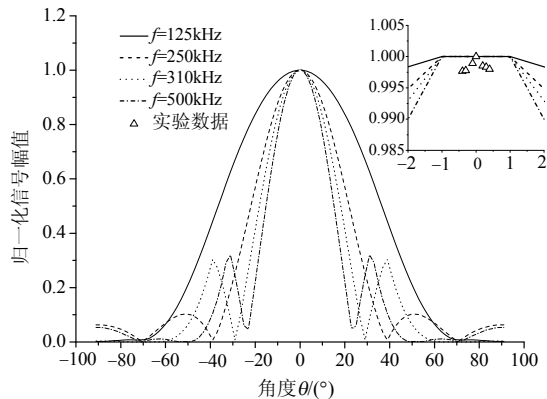


图 8 换能器接收信号幅值与偏移角度关系

Fig.8 Relationship between amplitude and offset angle of received signals

根据 SH0 波电磁声换能器的声指向性分析可知, 当激励换能器中心线与接收换能器中心线在同一直线时, 检测效果最佳。实际检测过程中, 很难保证激励换能器中心线与接收换能器中心线的完全对中。下面通过检测试验说明, 接收换能器中心线偏离激励换能器中心线的距离对 SH0 波检测结果的影响。以厚度为 0.1cm、长为 100cm、宽为 8cm 的铝板为例, 当两换能器间距保持为 30cm 情况下, 将激励换能器中心线与窄板中心线对齐, 在接收换能器中心线相对偏移距离 x 分别为 0.5cm、1cm、1.5cm 情况下, 进行 SH0 波检测试验。将不同偏移距离下检测波形中直达波幅度与零偏移下直达波幅度相比, 得到归一化的直达波幅值随偏移角度的关系, 结果如图 8 中局部图所示。可以看出, 在接收换能器偏移角度 情况下, 接收信号幅度衰减较小, 且与 SH0 波声场空间分布吻合较好。因此, 在正常操作情况下(偏移角度 $\theta \leq 1^\circ$), 可以忽略换能器对中对 SH0 波检测结果的影响。

3 SH0 波在接地网扁钢检测中应用

作为一种典型的窄板结构, 电力系统接地网是保证电力系统安全可靠运行的重要措施, 其可靠性直接关系到电力设备的安全运行。实际工程中, 接地网通常分两层, 埋于地下 80cm 或者 180cm。接地网主要由镀锌扁钢焊接成网状。图 9 给出检测试验中所选用扁钢的实物照片。下面通过接地网扁钢 SH0 波检测试验, 验证 SH0 波对于窄板结构无损检测的可行性。

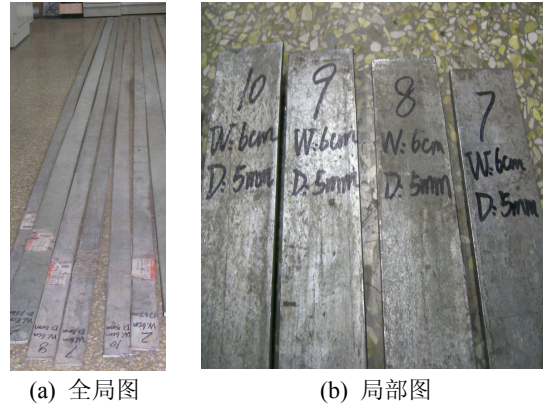


图 9 地线实物照片

Fig.9 Photos of ground grids

3.1 无缺陷底线 SH0 波检测试验

以长为 400cm、厚度为 0.58cm、宽度为 6cm 的扁钢为研究对象(试件 1), 利用图 7 所示 SH0 波检测试验系统进行扁钢检测试验研究。图 10 为典型检测波形。从图中可以清楚的分辨出 3 个波包。波包 1、波包 2、波包 3 依次为直达波、右端面回波和左端面回波。根据各检测回波到达时间(依次为 0.240ms、2.323ms 和 2.75ms)和传播距离, 计算出波包的传播速度为 3186m/s, 与 SH0 波的理论传播速度误差为 2.27%。

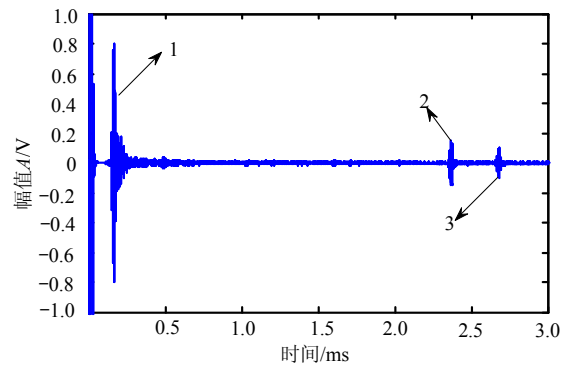


图 10 无缺陷扁钢地线 SH0 波检测典型波形

Fig.10 Typical waveform of SH0 waves detected from ground grids without defects

3.2 有缺陷扁钢 SH0 波检测试验

在无缺陷检测试验基础上, 在扁钢试件 1 上加工宽 1cm, 深 0.2cm 的槽状缺陷, 缺陷距扁钢端部 100cm, 进行 SH0 波缺陷检测试验。

保持激励接收换能器间距 75cm 不变, 在接收换能器分别位于缺陷同侧(即板上表面)以及异侧(即板下表面)情况下, 进行缺陷检测试验, 结果如图 11 所示。对比图 11(a)和图 11(b)可以发现, 接收换能器在板上表面的检测波形与换能器位于板下

表面的检测波形几乎完全相同,均包含 5 个检测波包,且各波包的到达时间和幅度几乎完全相同。根据图中各波包的传播时间(依次为 0.240ms、1.667ms、2.14ms、2.3ms、2.75ms)以及 SH0 波的传播速度,可以确定图中各波包依次为直达波、缺陷回波、缺陷反射波传至左端面的反射回波、缺陷透射波传至右端面的反射回波、缺陷透射波经右端面-左端面的反射回波。因此,换能器置于板上表面和下表面均可很好实现扁钢上表面缺陷检测,验证了 SH0 波对不同位置缺陷具有相同灵敏度的特性。

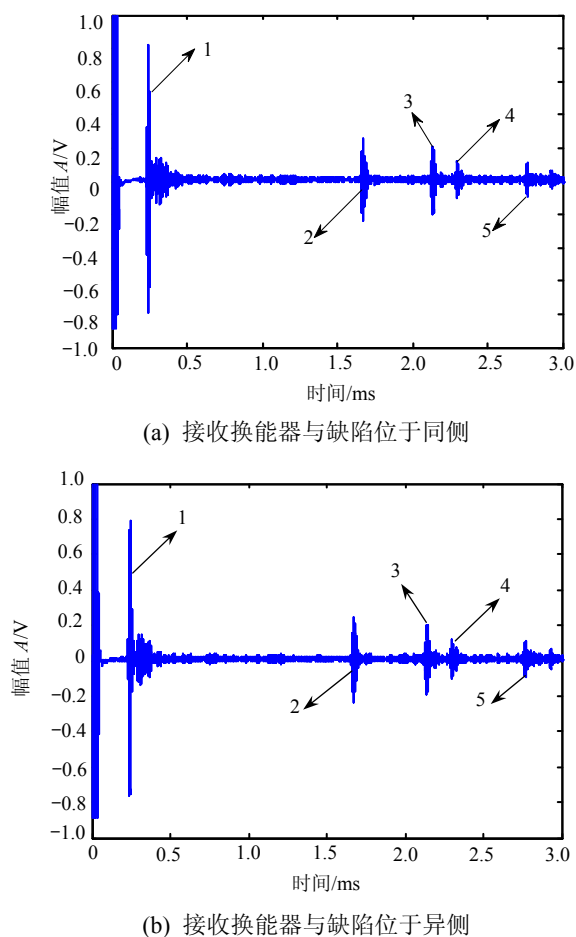


图 11 缺陷地线扁钢 SH0 波检测典型波形

Fig.11 Typical waveform of SH0 waves detected from ground grids with defects

3.3 地埋有缺陷扁钢的 SH0 波检测试验

为模拟接地网埋于地下的实际工况,在实验室进行地埋扁钢检测试验研究。扁钢长为 600cm、厚度为 0.5cm、宽度为 6cm(试件 2),在距其端部 100cm 处,加工宽度为 0.2cm、深为 0.1cm 的槽缺陷。扁钢埋土长度为 200cm,埋地深度为 6cm,传感器间距为 200cm。图 12 给出该试件在未埋地以及埋地深度为 6cm 情况下的检测波形。从图中可以看出,

埋地情况下,依然可以清楚地辨识出缺陷回波、右端面回波和左端面回波,但幅度与未埋地下回波幅度相比,则明显变小。

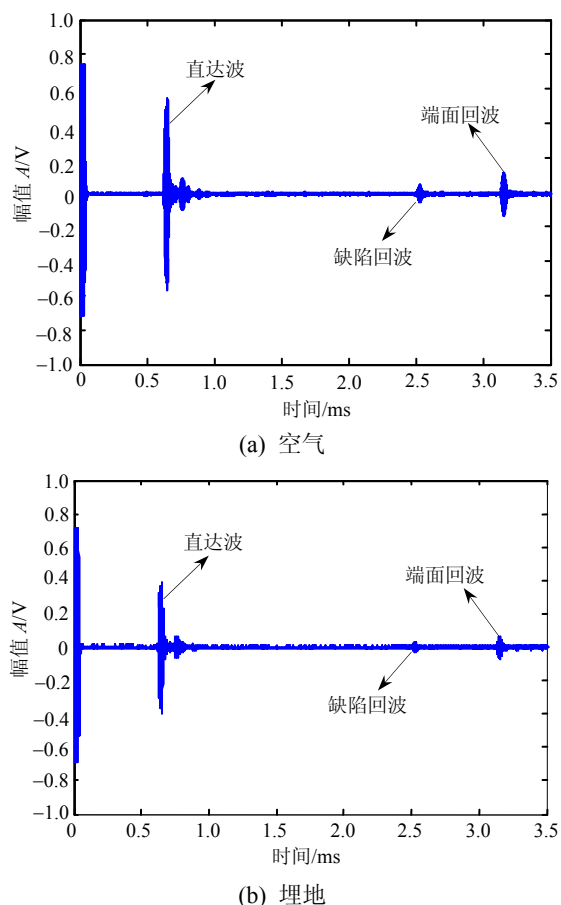


图 12 不同环境下地线检测波形

Fig.12 Waveforms detected from ground grids under different environments

4 结论

针对窄条板结构安全评价问题,本文对窄条板结构中不同模态超声导波传播特性进行了研究。在对无限大板结构中不同模态传播特性理论分析基础上,利用不同模态超声导波对不同宽度窄铝板进行了对比检测试验。结果表明,与低阶兰姆波相比,SH0 波在窄板中传播能力强,当窄板宽度大于换能器宽度时,检测波形基本不受窄板宽度变化的影响。在此基础上,将 SH0 波应用于电力系统接地网扁钢结构检测试验研究,结果表明,SH0 波在扁钢中传播能力强,可以实现地埋扁钢中缺陷检测。本文研究工作为工程窄板结构健康检测提供了可行技术方案。

(参考文献转第 275 页)

- [13] 杨学祥. 均布荷载下一端固定的文克尔地基梁的基底压力特性及其工程意义[J]. 工程力学, 2006, 23(11): 76—79.
Yang Xuexiang. The feature of foundation pressure on winkler foundation-beam with one fixed end and its application [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(11): 76—79. (in Chinese)
- [14] 刘金海, 冯涛, 万文. 煤矿离层注浆减沉效果评价的弹性薄板法[J]. 工程力学, 2009, 26(11): 252—256.
Liu Jinhai, Feng Tao, Wan Wen. Elastic-thin-plate bending method for evaluating reducing-subsidence effectiveness by injecting grout into separated strata in coal mine [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(11): 252—256. (in Chinese)
- [15] Arici Marcello, Granata Michele Fabio. Generalized curved beam on elastic foundation solved by transfer matrix method [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2011, 40(2): 279—295.
- [16] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 2002: 28—31.
Xu Zhilun. A concise course in elasticity [M]. 3rd ed. Beijing: Advanced Education Press, 2002: 28—31. (in Chinese)
- [17] Sneddon I N. 富利叶变换[M]. 何衍璇, 译. 北京: 科学出版社, 1985: 20—21.
Sneddon I N. Fourier transform [M]. Translated by He Yanxuan. Beijing: Science Press, 1985: 20—21. (in Chinese)
- [18] 图马, 沃尔什. 工程数学手册[M]. 欧阳芳瑞, 张玉平, 译. 北京: 科学出版社, 2002: 308.
Tuma J, Walsh Ronald A. Engineering mathematics handbook [M]. Translated by Ouyang Fangrui, Zhang Yuping. Beijing: Science Press, 2002: 308. (in Chinese)

(上接第 261 页)

参考文献:

- [1] 尚柏林, 宋笔锋, 杨建军. 飞机结构健康监测传感器新技术[J]. 无损检测, 2008, 30(5): 289—291.
Shang Bolin, Song Bifeng, Yang Jianjun. New sensor technologies in aircraft structural health monitoring [J]. Non-destructive Testing, 2008, 30(5): 289—291. (in Chinese)
- [2] 殷毅. 船舶无损检测开启新纪元[J]. 中国船检, 2010, 8(6): 46—48.
Yin Yi. Ship's NDT opens a new aera [J]. China Ship Survey, 2010, 8(6): 46—48. (in Chinese)
- [3] 许崇武, 胡学文. 接地网防蚀金属材料性能试验研究[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 77—79.
Xu Chongwu, Hu Xuwen. Investigation of anti-corrosive metallic material for earthing grid [J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 77—79. (in Chinese)
- [4] 高荣刚. 汽轮机叶片叶身的无损检测[J]. 新疆电力技术, 2009(1): 45—46.
Gao Ronggang. Non-destructive of blade of steam turbine [J]. Xinjiang Electric Power Technology, 2009(1): 45—46. (in Chinese)
- [5] Tuzzeo D, Scalea F L. Noncontact aircoupled guided wave ultrasonics for detection of thinning defects in aluminum plates [J]. Research in Nondestructive Evaluation, 2001, 13(2): 61—77.
- [6] Terrien N, Royer D, Lepoutre F, Deom A. Optimization of hidden corrosion detection in aircraft structures using Lamb waves: Numerical predictions and experimental results [C]// AIP Conference Proceedings, Portland, American Institute of Physics, 2007, 894(1): 1282—1289.
- [7] Hirotsugu Ogi, Masahiko Hirao, Toshihiro Ohtani. Line focusing electromagnetic acoustic transducers for the detection of slit defects [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1999, 46(2): 341—346.
- [8] Dutton B, Boonsang S, Dewhurst R J. Modelling of magnetic fields to enhance the performance of an in-plane EMAT for laser-generated ultrasound [J]. Ultrasonics, 2006, 44(1): 657—665.
- [9] Su Zhongqing, Ye Lin, Lu Ye. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 295(3/4/5): 753—780.
- [10] Zhu W, Rose J L, Barshinger J N. Ultrasonic guided wave NDT for hidden corrosion detection [J]. Research in Nondestructive Evaluation, 1998, 10(4): 205—225.
- [11] Alleyne D, Cawley P. The interaction of Lamb waves with defects [J]. IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1992, 39(3): 381—397.
- [12] Bingham J, Hinders M. Lamb wave characterization of corrosion-thinning in aircraft stringers: Experiment and three-dimensional simulation [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2009, 126(1): 103—113.
- [13] 焦敬品, 刘文华, 张永强, 何存富, 吴斌. 基于磁致伸缩效应的 SH 波电磁超声换能器设计[J]. 仪器仪表学报(增刊 II), 2010, 31(4): 284—289.
Jiao Jingpin, Liu Wenhua, Zhang Yongqiang, He Cunfu, Wu Bin. Electromagnetic acoustic transducer design based on magnetostrictive effect for SH waves detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument (Suppl II), 2010, 31(4): 284—289. (in Chinese)