

板中孔状缺陷的超声导波检测试验研究

刘增华, 赵继辰, 吴 斌, 何存富

(北京工业大学 机械工程及应用电子技术学院, 北京 100124)

摘 要: 为了实现对板类结构的主动健康监测, 采用附着在结构上的压电陶瓷晶片激励和接收导波模式, 选取合适模式用于板中缺陷的识别和评估. 理论分析结果表明, 在低频范围内, 相对于 A_0 模式, 以面内位移为主、频散小的 S_0 模式更适用于铝板的缺陷检测. 利用直径 11 mm、厚 0.4 mm 的压电陶瓷晶片在 1 mm 厚的铝板上激励和接收得到适合缺陷检测的频率 300 kHz 的 S_0 模式. 在此基础上, 在铝板中加工一孔状缺陷, 分析了 S_0 模式的缺陷检测能力, 并进一步研究了缺陷直径对接收到的导波信号幅度的影响. 实验结果表明, 利用一发一收法得到的 Lamb 波模式可以用于铝板中的缺陷检测, 并且缺陷回波的幅度可实现对缺陷大小的表征.

关键词: 超声导波; 频散; 模式

中图分类号: TB 132; TB 559

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2011)01-0027-06

飞机机翼、桥梁以及储罐等大型板件结构, 易受到化学腐蚀、应力作用、热疲劳及外部冲击等诸多因素的影响, 产生局部结构损伤, 从而影响结构的安全运行, 甚至使结构失效. Lamb 波作为板中的超声导波, 具有传播距离远、检测范围大的优点, 常用于板中的缺陷检测和结构状态评估^[1-6].

随着传感器材料的发展, 传感器的几何尺寸逐渐变小, 可以粘贴在被测结构表面或埋在内部, 用于结构健康状况的实时监测, 该方法即是嵌入式主动监测技术. 压电陶瓷晶片因体积小、质量轻、价格便宜, 便于大量分布于结构中, 能提高检测精度, 在板类结构健康监测方面得到了一定的应用^[7-12], 从而使常规超声导波无损检测方法逐渐过渡到嵌入式结构健康监测, 使结构的健康状况评估实时而有效.

在此, 利用压电陶瓷晶体在薄铝板中激励和接收超声导波 Lamb 波, 优化选取适合缺陷检测的 Lamb 波模式, 选取合适的模式用于板中孔状缺陷的检测, 并分析缺陷尺寸对检测信号的影响.

1 薄板中的超声导波

在薄板中传播的 Lamb 波为超声导波的类型之一. 由于受到板厚的影响, 超声波在板中传播时速度受频率的影响产生几何弥散, 即超声导波的相速度 (c_p) 随频率的不同而改变, 这种现象就是导波的频散现象^[13]. 导波的频散特性取决于加载条件和波导的形状. 在板中传播的超声导波 Lamb 波存在 2 种模式, 即对称模式 (S_0, S_1, \dots) 和反对称模式 (A_0, A_1, \dots).

经数值计算得到, 1 mm 厚的铝板中的 Lamb 波的相速度和群速度频散曲线如图 1 所示. 其中板的密度为 2700 kg/m^3 , 纵波波速为 6320 m/s , 横波波速为 3130 m/s . 图 2 给出了频率 300 kHz 的 Lamb 波包括 S_0 模式和 A_0 模式的位移分布.

从图 1 和 2 中可以看出:

- 1) 在任意频率下至少存在 2 个以上的导波模式, 并且随着频率增加模式数迅速增加, 这就是超声导波 Lamb 波的多模态现象, 多模态的存在使得导波检测更加复杂;
- 2) 当频率低于 A_1 模式的截止频率 1.565 MHz 时, 只出现 S_0 模式和 A_0 模式, 在低于该频率下激励

收稿日期: 2009-01-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975006, 10972014); 北京市自然科学基金资助项目(2072003); 北京市优秀人才培养资助项目(20081B0501500173); 北京市教委科技计划项目(KM201010005003); 北京市科技新星计划资助项目(2008A015).

作者简介: 刘增华(1973—), 男, 江西湖口人, 副教授.

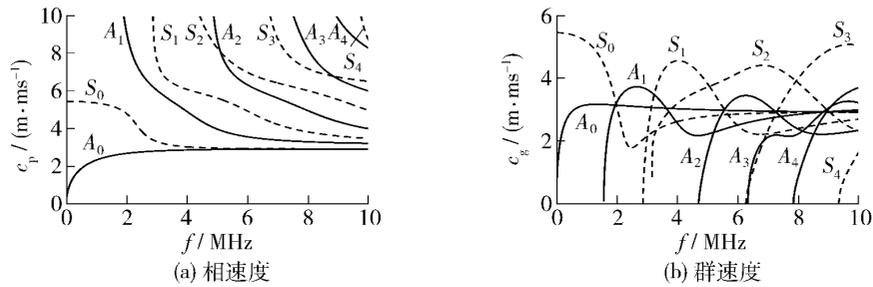


图1 在1 mm厚的铝板中Lamb波的频散曲线

Fig. 1 Dispersion curves for Lamb waves in a 1 mm thick aluminum plate

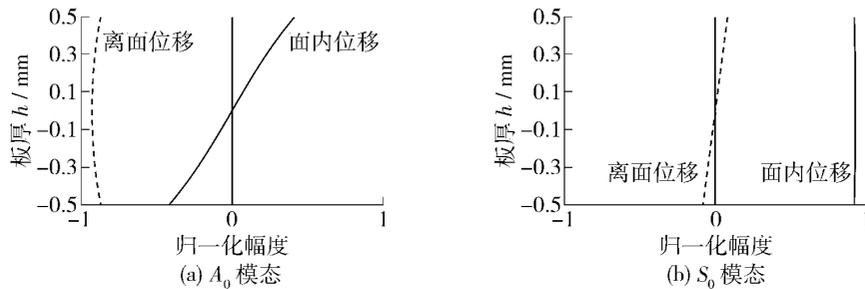


图2 频率300 kHz的Lamb波的位移分布

Fig. 2 Displacement distributions of Lamb wave modes at 300 kHz

Lamb波模态更易于控制,得到的检测信号中模态较少,波形更简单,更易处理和分析,便于对板中缺陷的识别和定位;

3) 在频带0~1.565 MHz, A_0 模态频散较大,并且传播时主要以离面位移为主,传播时能量易被周围介质所吸收,传播距离短,检测能力有限,而 S_0 模态频散较小,并且传播时主要以面内位移为主,能量主要在板内传播,传播距离远,可用于板中缺陷的长距离检测;

4) 对图1(b)的数据分析可以得到频率300 kHz的 S_0 模态和 A_0 模态导波的理论群速度(c_g)分别为5.42 m/ms和2.63 m/ms, S_0 模态的传播速度远大于 A_0 模态的传播速度。

通过以上分析可知,在低频段,相对于 A_0 模态, S_0 模态更适合于铝板的缺陷检测。

2 实验研究

实验中利用压电陶瓷晶片在一定频率范围内激励和接收超声导波,优化选取得到适合缺陷检测的Lamb波模态。然后利用选取的导波模态进行铝板的人工缺陷检测。和传统的超声波一样,当Lamb波遇到铝板中的缺陷或在缺陷附近传播时,其传播特性会发生变化。Lamb波对板中缺陷检测的关键是提取检测信号的特征信息,并对缺陷特征参数进行提取,最终实现对板中缺陷的检测。

2.1 实验装置

整套实验装置如图3所示,由内置数据采集卡的计算机、函数发生器HP33120A、功率放大器Ultra2020、数字示波器TDS3032B、压电陶瓷晶片以及铝板试样所组成。铝板厚1 mm,长1 000 mm,宽800 mm。实验采用的压电陶瓷晶片共有3片,分别作为激励器和接收器,用于在板中激励和接收Lamb波。压电陶瓷晶片材质为锆钛酸铅即PZT,直径11 mm,厚0.4 mm,分别布置在铝板的点(300, 200)、(400, 300)和(500, 200)3个位置,如图4所示。坐标系的原点位于板的左下角。压电陶瓷晶片采用502胶直接粘贴在铝板表面。

函数发生器产生的激励信号经功率放大器放大后激励其中1片压电陶瓷晶片,在铝板中激励产生

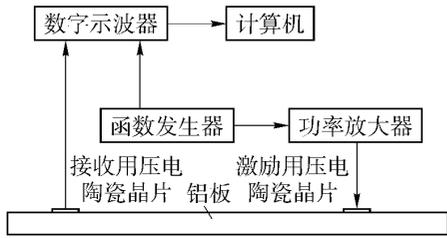


图 3 采用压电陶瓷晶片的实验装置

Fig. 3 Experimental setup with bonded piezoelectric ceramic wafers

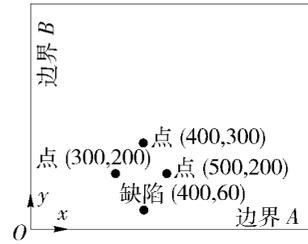


图 4 压电陶瓷晶片和缺陷在铝板中的位置分布

Fig. 4 The location of the piezoelectric wafers and the defect in the aluminum plate

Lamb 波, Lamb 波在板中传播一定距离后,被另一位置的压电陶瓷晶片所接收。接收到的导波信号显示在数字示波器上,同时通过示波器上的以太网接口将数据输入到计算机中,用于以后的信号分析和处理。

为使被激励信号在传播过程中频散的现象尽可能降低,激励能量集中于频带较窄的导波模式,以便于波形识别,以及板中缺陷的检测和定位,函数发生器产生的激励信号为经 Hanning 窗调制的 10 个震荡周期的正弦脉冲^[14],峰峰值为 100 mV。

2.2 在无缺陷铝板中的导波检测实验

采用图 3 所示的实验装置,首先在无缺陷铝板中进行激励和接收 Lamb 波的实验。经过比较优化,激励信号的中心频率选取为 300 kHz,得到的导波信号的波形更清晰,能量最大。在该频率下,位于点(300,200)的压电陶瓷晶片作为激励器,在铝板中激励超声导波,超声导波在铝板中以该压电陶瓷晶片为中心向四周柱状传播,位于点(400,300)的压电陶瓷晶片作为接收器得到的原始波形如图 5(a) 所示。从图中可以看出,信号中含有许多噪声,影响了对信号的分析。以 40 阶 Daubechies 小波为母小波的多层离散小波分解及单支重构的方法适合用于单音频导波信号的降噪处理^[15]。利用该小波降噪方法得到的波形如图 5(b) 所示。与图 5(a) 对比可以看出,噪声信号得到了明显消除,有效地提高了信噪比,信号变得清晰而便于识别。后文给出的所有接收波形信号均是采用相同的小波降噪方法处理后得到的波形图。

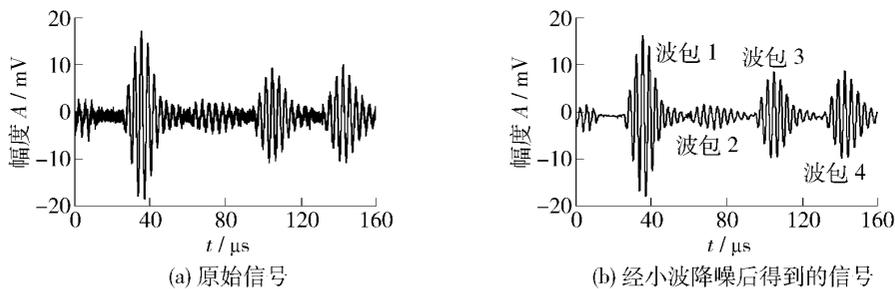


图 5 无缺陷铝板中接收的信号

Fig. 5 Received signal in the defect-free aluminum plate

从图 5(b) 所示的波形可以看出,当激励信号的中心频率为 300 kHz 时,在 0 ~ 160 μs 时间范围内,可以清楚地看出信号中含有 4 个波包。其中波包 1 到达的时间为 26.3 μs,传播的距离为 141.4 mm,由此可知该波包的群速度值为 141.4/26.3 = 5.38 m/ms,与 S₀ 模式导波的理论群速度 5.42 m/ms 非常接近,故可以确定该波包为 S₀ 模式导波。同理可以得出,波包 2 为沿着 2 点间直线传播得到的 A₀ 模式导波;波包 3 为经 A 边界反射接收得到的 S₀ 模式导波;波包 4 为经 B 边界反射接收得到的 S₀ 模式导波。同时从图 5(b) 中还可以看出,传播相同的距离后,波包 1 即 S₀ 模式的峰峰值为 33.4 mV,而波包 2 即 A₀ 模式的峰峰值为 4.9 mV, S₀ 模式的幅度是 A₀ 模式幅度的 6.8 倍,由此可以看出,当激励信号的中心频率为 300 kHz 时,压电陶瓷晶片在铝板中激励的主要是 S₀ 模式。

2.3 铝板中的缺陷检测实验

在铝板的点(400,60)位置加工一缺陷,缺陷类型为圆形通孔.取激励信号的中心频率同样为300 kHz,位于板的点(400,300)的压电陶瓷晶片作为激励器,点(500,200)的压电陶瓷晶片作为接收器,逐渐增大缺陷的直径,从5 mm到10 mm,间隔为1 mm,依次对该缺陷进行检测.

从图6所示的实验结果可以看出,当激励信号的中心频率为300 kHz时,在0~120 μs 时间范围内,可以清楚地看出信号中含有4个波包.经过统计分析,可以得到图6信号中主要波包的幅度与缺陷直径之间的关系曲线,如图7所示.

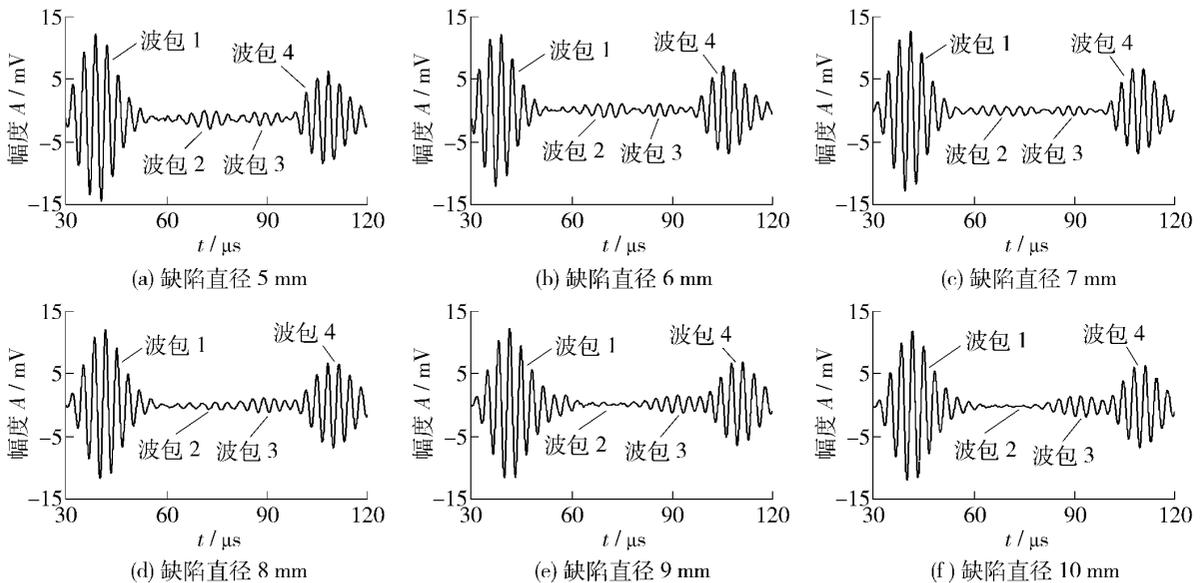


图6 铝板中不同缺陷大小时接收到的波形

Fig. 6 Received signals in the aluminum plate with different sizes of the defect

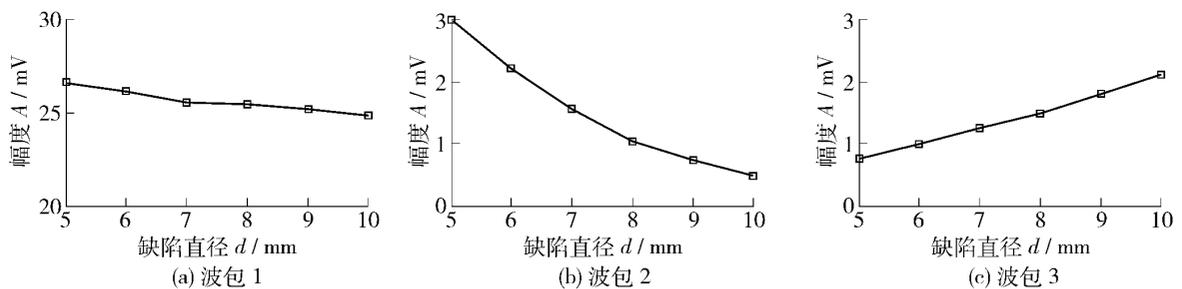


图7 接收信号的峰峰值与缺陷直径之间的变化关系曲线

Fig. 7 The relation curves between the amplitudes of received signals and the defect diameter

图6中的波包1和2为沿激励点和接收点之间的直线传播被接收压电陶瓷晶片所接收到的 S_0 模态和 A_0 模态,2个模态的峰峰值随着缺陷直径的增大而均呈不同程度的单调下降,如图7(a)和(b)所示.这说明缺陷在一定程度上影响直达传播的 S_0 模态和 A_0 模态的能量.由于缺陷的出现,板结构的刚度减少,Lamb波在结构中传播时的能量将会发生变化^[16].尽管缺陷并不位于这些模态的传播路线上,但缺陷的出现和尺寸的变化仍然会影响导波模态的传播.图6中的波包3为激励信号经缺陷处反射之后被接收压电陶瓷晶片所接收到的缺陷回波信号,经分析为 S_0 模态,其峰峰值随着缺陷尺寸的增大而逐渐增大,如图7(c)所示.这说明Lamb波的 S_0 模态对板中孔状缺陷比较敏感,通过对缺陷回波信号峰峰值的测量,可以估计出缺陷的尺寸.波包4为经边界A反射的 S_0 模态,由于其幅度除了与缺陷尺寸有关,还受边界的影响,影响因素较为复杂,因此,波包4的幅度与缺陷尺寸之间的关系在此不做统计分析.

3 结束语

利用附着在薄铝板中的压电陶瓷晶片实现了超声导波 Lamb 波的激励和接收,优化选取频率 300 kHz 的 S_0 模态用于结构的缺陷检测,并进一步分析得出孔状缺陷尺寸与接收到的导波信号幅值之间的关系曲线. 实验结果表明, S_0 模态适于检测薄板中的通孔类缺陷,并且随着缺陷直径的增大,接收到的直达传播的 S_0 模态和 A_0 模态信号的幅值随之减少,而与此同时,从缺陷处反射的 S_0 模态的幅值也随之增大. 实验结果验证了 Lamb 波检测薄板缺陷的可行性,同时也为进一步分析利用 Lamb 波对更为复杂的板中缺陷进行检测奠定一定基础.

参考文献:

- [1] ALLEYNE D N, CAWLEY P. The interaction of Lamb waves with defects [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1992, 39(3): 381-397.
- [2] SIMONETTI F. Lamb wave propagation in elastic plates coated with viscoelastic materials [J]. *Journal of Acoustical Society of America*, 2004, 115(5): 2041-2053.
- [3] YE Lu, LIN Ye, ZHONG Qing-su, et al. Quantitative assessment of through-thickness crack size based on Lamb wave scattering in aluminium plates [J]. *NDT&E International*, 2008, 41: 59-68.
- [4] CASTAINGS M, HOSTEN B. Lamb and SH waves generated and detected by air-coupled ultrasonic transducers in composite material plates [J]. *NDT&E International*, 2001, 34: 249-258.
- [5] 何存富, 怀保玲, 杜婷, 等. 基于兰姆波的大型罐体液位定点检测方法 [J]. *机械工程学报*, 2007, 43(6): 99-104.
HE Cun-fu, HUAI Bao-ling, DU Ting, et al. Method monitoring fixed liquid level of large tanks using Lamb waves [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(6): 99-104. (in Chinese)
- [6] 严刚, 周丽. 应用遗传算法和散射 Lamb 波的板结构损伤识别 [J]. *振动工程学报*, 2007, 20(3): 291-296.
YAN Gang, ZHOU Li. Damage identification for plate-like structure using genetic algorithms and scattered Lamb waves [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2007, 20(3): 291-296. (in Chinese)
- [7] 解维华, 汤珺, 张博明, 等. 基于 Lamb 的金属薄板损伤主动监测技术研究 [J]. *压电与声光*, 2008, 30(3): 349-352.
XIE Wei-hua, TANG Jun, ZHANG Bo-ming, et al. Technical research on active detection and monitoring of damage in metallic plate based on Lamb wave [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2008, 30(3): 349-352. (in Chinese)
- [8] 彭鹤, 袁慎芳. 主动 Lamb 波监测技术中的传感元件优化布置研究 [J]. *航空学报*, 2006, 27(5): 957-962, 777.
PENG Ge, YUAN Shen-fang. Optimization for collocation of sensors in active Lamb wave-based monitoring [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2006, 27(5): 957-962, 777. (in Chinese)
- [9] 张锋, 王乘. 压电晶体传感器激励模型及其在结构健康监测中的应用 [J]. *传感技术学报*, 2005, 18(2): 215-220.
ZHANG Feng, WANG Cheng. Piezoelectric wafer model and its application in structural health monitoring [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2005, 18(2): 215-220. (in Chinese)
- [10] XU Buli, GIURGIUTIU V. Single mode tuning effects on Lamb wave time reversal with piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2007, 26(2/3/4): 123-134.
- [11] GIURGIUTIU V, CUC A. Embedded non-destructive evaluation for structural health monitoring, damage detection, and failure prevention [J]. *Shock and Vibration Digest*, 2005, 37(2): 83-105.
- [12] HAY T R, ROYER R L, GAO Huidong, et al. A comparison of embedded sensor Lamb wave ultrasonic tomography approaches for material loss detection [J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, 16: 946-951.
- [13] ROSE J L. *Ultrasonic waves in solid media* [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1999.
- [14] 刘增华, 吴斌, 李隆涛, 等. 管道超声导波检测信号选取的实验研究 [J]. *北京工业大学学报*, 2006, 32(8): 699-703.
LIU Zeng-hua, WU Bin, LI Long-tao, et al. Experimental study on signal choice for ultrasonic guided wave inspection in pipes [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2006, 32(8): 699-703. (in Chinese)
- [15] 何存富, 刘溯, 刘增华, 等. 小波降噪在钢绞线缺陷检测中的应用研究 [J]. *机械工程学报*, 2008, 44(7): 118-122.
HE Cun-fu, LIU Su, LIU Zeng-hua, et al. Application of wavelet denoise in defect inspection of steel strands [J]. *Chinese*

Journal of Mechanical Engineering ,2008 ,44(7) : 118-122. (in Chinese)

[16] 周晚林,王鑫伟. Lamb 波理论及层合板冲击损伤的实验研究[J]. 实验力学,2004,19(2): 211-216.

ZHOU Wan-lin ,WANG Xin-wei. Lamb wave theory and experimental study on impact damage in laminated plate [J]. Journal of Experimental Mechanics ,2004 ,19(2) : 211-216. (in Chinese)

Experimental Research on Hole-like Defect Detection in Plate Based on Ultrasonic Guided Waves Technique

LIU Zeng-hua , ZHAO Ji-chen , WU Bin , HE Cun-fu
(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology ,
Beijing University of Technology , Beijing 100124 , China)

Abstract: To achieve active health monitoring of plate-like objects , piezoelectric ceramic wafers bonded in the structures are applied for excitation and reception of guided wave modes and proper modes are optimized for identification and evaluation of the defects. According to the theoretical prediction , compared with A_0 mode , S_0 mode in a low frequency range with dominant in-plane displacement and low dispersion is suitable for defect detection in the aluminum plate. The piezoelectric ceramic wafers 11 mm in diameter and 0.4 mm in thickness are used for excitation and reception of S_0 mode at 300 kHz , which is suitable for defect detection in aluminum plates with a thickness of 1 mm. Based on the experimental results , an artificial hole-like defect is machined in the plate for verifying the ability of defect detection using S_0 mode , and the effect of the defect diameter on the amplitudes of received guided wave signals is further analyzed. Experimental results show that Lamb wave modes can be applied for defect detection in the aluminum plate using the pitch-catch method and defect characterization can be achieved based on the amplitudes of the received echoes.

Key words: ultrasonic guided waves; dispersion; mode

(责任编辑 吕小红)