

Lamb 波在薄铝板无损评价中的模态识别与应用

侯云霞, 陈 军, 林 莉

(大连理工大学 无损检测研究所, 大连 116024)

摘 要:在厚度为 0.7 mm 的铝板上制作直径为 $\phi 0.6 \sim 1.8$ mm 的通孔, 以模拟薄铝板中的孔洞类缺陷。利用 Matlab 软件绘制了 Lamb 波的频散曲线和质点位移-幅度曲线。根据频散曲线和质点位移-幅度曲线, 选择 S0 模态的 Lamb 波。试验结果表明, S0 模态 Lamb 波的信号峰值与缺陷大小具有良好的对应关系。

关键词:Lamb 波检测; 模态; 频散曲线; 质点位移-幅度曲线

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2009)07-0517-03

Mode Identification and Application for Nondestructive Evaluation of Thin Aluminum Sheet by Lamb Waves

HOU Yun-Xia, CHEN Jun, LIN Li

(Nondestructive Testing & Evaluation Laboratory, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The holes with different diameters were made in thin aluminum sheet with thickness of 0.7 mm to simulate the hole-class defects. Frequency dispersion curves and particle displacement curves were drawn by software Matlab. Based on frequency dispersion curves and particle displacement curves, S0 mode wave was selected out. Experimental results showed that good corresponding relationship between amplitude of S0 mode wave and size of the given defect existed.

Keywords: Lamb wave; Mode; Frequency dispersion curves; Particle displacement-amplitude curves

Lamb 波由于衰减小, 可长距离传播, 非常适合大面积板材结构的无损检测。但是, 由于 Lamb 波的多模式和频散特性引起的在激励、传播、接收以及信号处理方面的复杂性, 大大限制了它在工程实际中的应用^[1], 所以选择合适模态的 Lamb 波对于板状材料的检测非常重要。

铝的多种优良性能使其有着极为广泛的用途。铝及其合金广泛应用于航空、航天、汽车和船舶等制造工业。铝板的快速大面积检测成为一个突出问题。国内外已经有很多人在钢板上进行了 Lamb 波与缺陷的研究^[2-5], 但是 Lamb 波与薄铝板上缺陷相互作用的研究还较少。笔者根据频散曲线和波结

构曲线, 选择合适模态的 Lamb 波, 通过频谱分析方法, 对 Lamb 波进行模态识别, 并利用该模态的 Lamb 波对薄铝板的人工缺陷进行检测和评价。

1 Lamb 波的频散曲线

描述 Lamb 波波动特性的方程是 Rayleigh-Lamb 方程^[6], 其数学表达式如下:

对称模式:

$$4pq \tan \frac{\pi f d}{c_p} q + (p^2 - 1)^2 \tan \frac{\pi f d}{c_p} p = 0 \quad (1)$$

反对称模式:

$$(p^2 - 1)^2 \tan \frac{\pi f d}{c_p} q + 4pq \tan \frac{\pi f d}{c_p} p = 0 \quad (2)$$

式中 $p = \sqrt{\left(\frac{c_p}{c_T}\right)^2 - 1}$;

$$q = \sqrt{\left(\frac{c_p}{c_L}\right)^2 - 1};$$

收稿日期: 2008-12-26

作者简介: 侯云霞(1982-), 女, 硕士研究生, 研究方向为材料的无损检测与评价。

- c_p ——Lamb 波的相速度;
 c_T ——横波波速;
 c_L ——纵波波速;
 f ——Lamb 波频率;
 d ——板厚。

取铝板 $c_L = 6\,500\text{ m/s}$, $c_T = 2\,992\text{ m/s}$ 。利用 Matlab 软件编程对 Rayleigh-Lamb 方程进行数值求解。通过搜索法计算,分别得到 Lamb 波在铝板中的相速度曲线(图 1)和群速度频散曲线(图 2)。

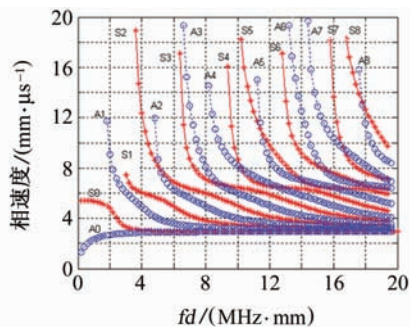


图 1 铝板相速度频散曲线

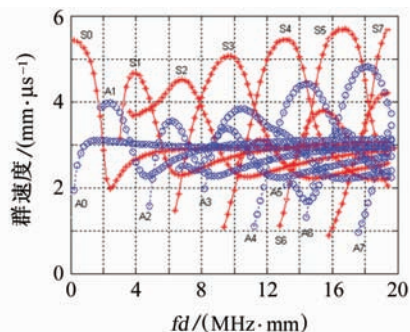


图 2 铝板群速度频散曲线

通过图 1 和 2 所示的相速度和群速度频散曲线可以进行频率的选择。从图 1 中可以看出,当频厚积 $> 3\text{ MHz} \cdot \text{mm}$ 时,模态数至少达到 4 个,大大增加了信号分析处理的难度。试验采用的板厚为 0.7 mm ,所以选择频率为 3.5 MHz ,即选择频厚积为 $2.45\text{ MHz} \cdot \text{mm}$,此时只能激励出 A_0 , S_0 和 A_1 模态,减少了频散引起的分析难度。但是在试验中发现, A_0 模态因其相速度低,在低频厚积条件下难以用有机玻璃材料斜楔激励。

2 Lamb 波的质点位移-幅度曲线

Lamb 波的质点位移-幅度曲线反映了 Lamb 波能量在板中的变化分布情况,是模态选择的主要依据之一。分别以 U, V 表示质点振动的面内位移振幅和离面位移振幅,质点到波导轴的垂直距离为 x ,则对

称型与反对称型 Lamb 波的 U, V 表达式分别为^[7]:

对称型 Lamb 波:

$$U = \frac{(k_z^2 - s^2) \sin(0.5sd)}{2q_1 \sin(0.5q_1 d)} \cdot \cos(q_1 x) B + s \cdot \cos(sx) B \quad (3)$$

$$V = \frac{(k_z^2 - s^2) \sin(0.5sd)}{2k_z \sin(0.5q_1 d)} \cdot \sin(q_1 x) B + k_z \sin(sx) B \quad (4)$$

反对称型 Lamb 波:

$$U = \frac{(k_z^2 - s^2) \cos(0.5sd)}{2q_1 \cos(0.5q_1 d)} \cdot \sin(q_1 x) D - s \cdot \sin(sx) D \quad (5)$$

$$V = \frac{(k_z^2 - s^2) \cos(0.5sd)}{2k_z \cos(0.5q_1 d)} \cdot \cos(q_1 x) D + k_z \cos(sx) D \quad (6)$$

式中 $k_z = \frac{2\pi f}{c_p}$; $s = k_z \left[\left(\frac{c_p}{c_L} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}}$; $q_1 = k_z \left[\left(\frac{c_p}{c_T} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}}$ 。

计算得到 Lamb 波几个模态在频厚积为 $1.75\text{ MHz} \cdot \text{mm}$ 时的质点位移-幅度曲线见图 3。

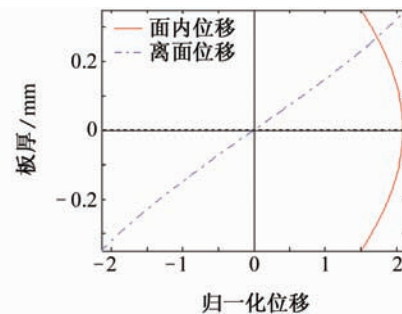
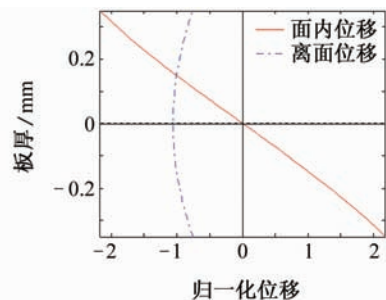
(a) S_0 模态(b) A_1 模态

图 3 Lamb 波模态质点位移-幅度曲线

Lamb 波在板内位移分量较大,能量比较集中时,适合进行缺陷检测。图 3 中纵坐标 0 代表板的中间位置, S_0 模态的面内位移幅度在板上比 A_1 模态分布集中,且 S_0 模态在板上下表面有很强的离面位移,便于接收 Lamb 波,因此 S_0 模态是适合于缺陷检测的模式。已知 Snell 定律为:

$$\theta = \sin^{-1} \frac{c_L}{c_p} \quad (7)$$

由式(7)可计算得到 Lamb 波模态入射角曲线(图 4)。由图可知,激励 S0 模态 Lamb 波的入射角为 55°。但是由于超声波在不同材料中具有不同的工作频率,而且不同模态的工作频率也会有差异,所以实际入射角可能会有所差异。

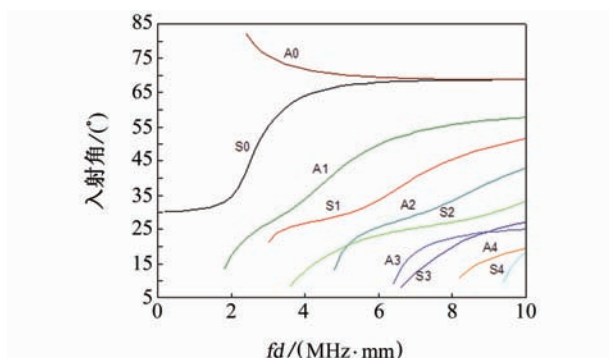


图 4 Lamb 波入射角曲线

3 试验步骤及结果分析

3.1 试验装置

利用 RDM-1600B 钻机在 500 mm×200 mm×0.7 mm 铝板的中心线上分别钻直径为 0.6, 1.0, 1.2, 1.6, 1.8 mm 的通孔。采用 12 位 A/D 50 MHz 采样的超声检测系统作为超声发射/接收设备,用中

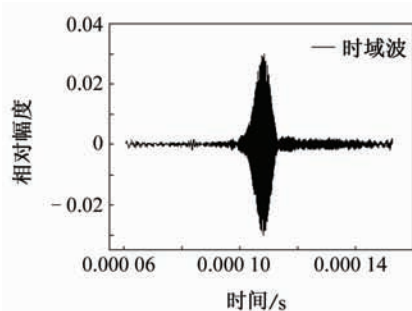


图 5 单发单收法 52°入射时得到的波形

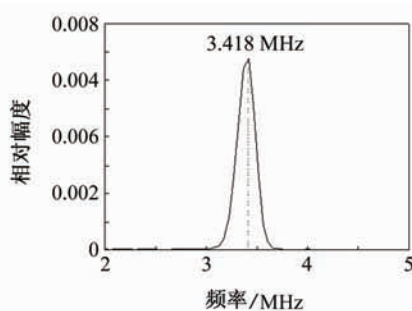


图 6 单发单收法 52°入射时 Lamb 波的频谱

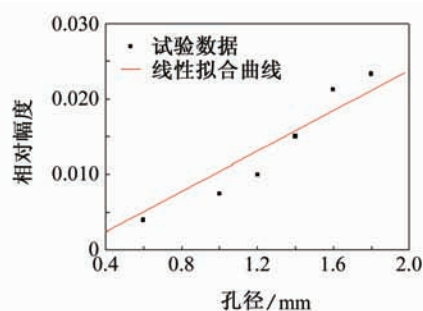


图 7 孔径与通孔反射波的幅值关系

参考文献:

- [1] 刘镇清. 无损检测中的超声兰姆波[J]. 无损检测, 1999, 21(9): 410—423.
- [2] 徐可北. 金属薄板兰姆波检验技术[J]. 无损检测, 1999, 21(10): 461—465.
- [3] 刘增华, 何存富, 吴斌, 等. 利用 Lamb 波对板状结构中隐蔽腐蚀缺陷的检测[J]. 实验力学, 2005, 20(3): 166—170.

心频率为 3.5 MHz 的可变角探头在铝板上激励 Lamb 波。

3.2 试验结果及分析

入射角为 52°时激励出的 Lamb 波如图 5 所示。对图 5 得到的波形进行 FFT 频谱分析可知,模态的中心频率为 3.418 MHz(图 6)。根据式(7)反推得到图 5 中模态相速度为 3 564 m/s。通过与图 1 中的相速度频散曲线比较可知,图 5 中激励的模态为 S0。

由图 6 可知, S0 模态在铝板中的工作频率为 3.418 MHz,此时由图 4 可知,校正后的 S0 模态的入射角应为 51.5°,与试验入射角 52°非常吻合。

图 7 是铝板中不同孔径反射波幅值的变化情况。观察发现,随着孔径增加,通孔反射波幅值整体呈现出线性增加趋势。对数据点进行线性回归分析,得到线性回归系数 $R^2 = 0.9537$ 。利用该线性回归结果,可根据检测信号得到的幅值反过来推断缺陷孔径的大小,在实际工程中对于缺陷尺寸定量有很好的应用价值。

4 结论

虽然 Lamb 波的频散及多模态特点限制了其在检测中的应用,但依据频散曲线和质点位移-幅度曲线,可以选择合适模态的 Lamb 波对板材进行大面积快速检测,缺陷大小与其反射波幅值之间具有较好的对应关系。

- [4] 郑祥明, 杨齐, 郝国法, 等. 金属薄板中缝类缺陷的 Lamb 波检测[J]. 无损检测, 2007, 29(21): 630—633.
- [5] Kazys R, Mazeika L, Barauskas R, et al. 3D Analysis of interaction of Lamb waves with defects in loaded steel plates[J]. Ultrasonics, 2006, 44: 1127—1130.
- [6] Filipczynski L, Pawlowski Z, Wehr J. Ultrasonic Methods of Testing Materials[M]. London: Butterworths, 1966.
- [7] 徐可北. 兰姆波单模探伤可行性研究[J]. 无损检测, 1997, 19(8): 222—225.