

铝板中Lamb波检测的实验研究

陈 军^{1†} 李志浩¹ 林 莉¹ 侯云霞² 马清杰³

(1 大连理工大学材料科学与工程学院 大连 116024)

(2 沈阳沈鼓克莱德联合泵业有限公司 沈阳 110869)

(3 赤峰市天华机械有限责任公司 赤峰 024076)

摘要 Lamb波在传播过程中具有频散及多模态特性, 若相关参数选择不当, 会导致在实际应用中信号相互叠加而无法识别。本文基于Lamb波的频散曲线是其频散方程实数解分布的特点, 采用二分法绘制了铝板中Lamb波的频散曲线、波结构曲线和入射角曲线。根据曲线选择S0模态的Lamb波对1mm厚铝板中不同类型的缺陷进行检测。实验结果表明, S0模态的Lamb波对裂纹型缺陷和贯穿型缺陷十分敏感, 但对于裂纹型缺陷, 其幅值变化并不与缺陷大小成线性关系, 并且S0模态Lamb波的声场指向性十分集中, 在偏离声束轴线时无法检测到缺陷。

关键词 Lamb波, 频散, 波结构, 模态

Experiment investigations of Lamb waves in an aluminum plate

CHEN Jun¹ LI Zhihao¹ LIN Li¹ HOU Yunxia² MA Qingjie³

(1 School of materials Science and Engineering, Dalian 116024)

(2 Shenyang Shenggu Clyde Union Pumps Company Limited, Shenyang 110869)

(3 Chifeng Sky Machinery Company Limited, Chifeng 024076)

Abstract Lamb waves have dispersive and multi-modal characteristics during its propagation. In actual applications, the multi-modal signals overlap and the useful modes can not be identified if relevant parameters are not properly selected. The dispersion, wave structure and incident angle curves of Lamb waves in an aluminum plate are drawn with dichotomy based on the characteristics that the Lamb wave dispersion curve is the distribution of real solutions of a Lamb wave dispersion equation. S0 mode Lamb wave is selected to detect the flaws with different types in 1mm thick aluminum plate based on the dispersion curve. The results show that S0 mode Lamb wave is very sensitive to cracks and through defects; however, the amplitude of S0 mode don't change linearly with the defect size. Meanwhile, the sound field directivity of S0 mode Lamb wave is very concentrated, and the defects deviated from the beam axis can not be detected.

Key words Lamb wave, Dispersion, Wave structure, Mode

2010-10-26 收稿; 2011-01-31 定稿

作者简介: 陈军 (1965-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 副教授, 研究方向: 材料无损评价。

李志浩 (1986-), 男, 硕士研究生。

林莉 (1970-), 女, 教授, 博士生导师。

侯云霞 (1982-), 女, 高级工程师。

马清杰 (1967-), 男, 高级工程师。

†通讯作者: 陈军, E-mail: chenjun@dlut.edu.cn

1 引言

Lamb波是一种在厚度和激励声波波长为相同数量级的声波导中由纵波和横波叠加而成的特殊形式的应力波,包括对称和反对称两种模式,它在不同厚度及不同激发频率下会产生不同的传播模式。相对于传统的超声波检测技术,Lamb波具有传播距离远、检测速度快的特点,因此,在管道及板材的无损检测中具有良好的应用前景,这使得对Lamb波的理论 and 实验研究成为热点^[1,2]。但在实际检测过程中,兰姆波的激励、传播、反射及能流分布又极具特殊性和复杂性,因此Lamb波探伤中模式的选择是一个非常关键的问题,应选择能量高、波形好、不易发生模式转换、能量分布状况好的模式。但是,目前对Lamb波在实际应用中仍存在许多不一致的观点和未解决的问题。本文从Lamb波频散曲线和波结构曲线的绘制出发,研究了Lamb波与铝板中不同类型缺陷相互作用的特点。

2 Lamb波频散曲线及入射角曲线的绘制

频散是Lamb波的主要特性之一。频散是Lamb的相速度(群速度)随波频率的不同而改变的现象,频散特性是Lamb波应用于材料无损检测的主要依据。Lamb波的频散方程反映了Lamb波的频散特性,在自由边界的条件下,Lamb波的频散方程为^[3]:

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:

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

式中: $p = \sqrt{(\frac{C_p}{C_s})^2 - 1}$, $q = \sqrt{(\frac{C_p}{C_l})^2 - 1}$, C_p —相速度, C_s —横波速度, C_l —纵波速度, f —频率, d —板厚。

上述两个方程是超越方程,它决定了Lamb波是多模式和频散的,而且不同模式有不同的非线性关系,导致了相速度值并非常数而是随频率变化。由于频散方程是连续函数,符号的变化必然伴随着函数值通过零点,所以,当函数值在区间上变号时,在此区间就存在一个根,即可用二分法在变号区间内迭代求根^[4],完成频散方程的求解。

频散曲线实际上是频散方程实数解的分布图,通过上述步骤求出Lamb波频散方程的实数解后,借助计算机相关软件即可完成相速度频散曲线的绘制。

$$\text{Lamb波的群速度 } C_g = C_p^2 \left[C_p - (fd) \frac{dC_p}{d(fd)} \right]^{-1},$$

据此可绘制群速度频散曲线。

实验测得铝板中 $C_l = 6500 \text{ m/s}$, $C_s = 2992 \text{ m/s}$, 其频散曲线如图1和图2所示。

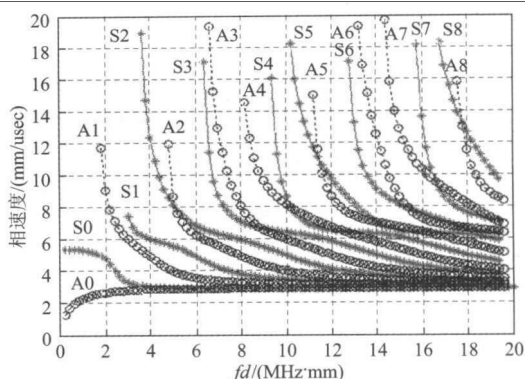


图1 无约束铝板的相速度频散曲线

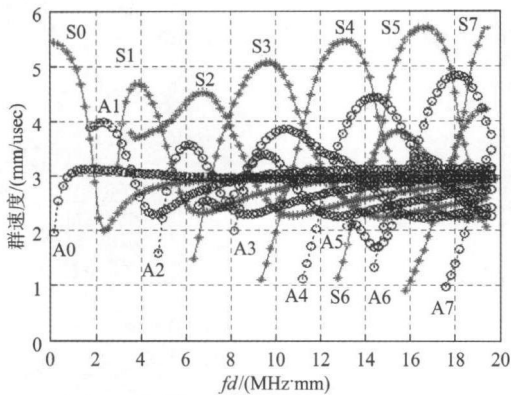


图2 无约束铝板的群速度频散曲线

由Snell定律: $\theta = \sin^{-1}(C_w/C_p)$ 可绘制铝板中Lamb波的入射角曲线, 如图3所示。式中: θ —入射角, C_w —斜楔材料的纵波声速, C_p —相速度。

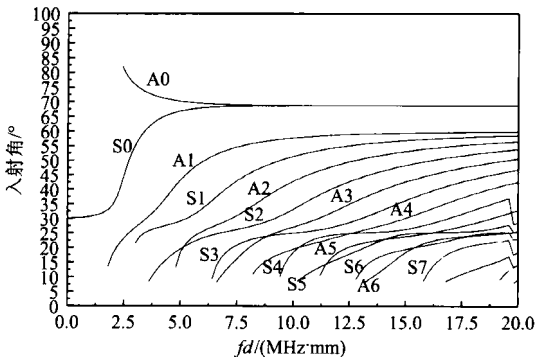


图3 铝板中Lamb波的入射角曲线

3 Lamb波波结构曲线的绘制

波结构指的是位移和应力等物理量沿板厚方向的分布, Lamb波的波结构曲线反映了不同模式的Lamb波其振动和能量在板中的分布情况, 是模式选择的主要依据之一^[5], 本文只考虑lamb波的位移波结构。利用波结构的特点可以增强波穿透被检对象的能力, 例如可避免在有水载或包层情况下的能量泄漏。在板厚度方向的某些点, 通过控制面内位移或离面位移的大小, 可以提高对某些缺

陷检测的灵敏度^[6]。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 , 板厚为 d , 则对称模式与反对称模式Lamb波 U 、 V 的表达式分别为:

对称模式:

$$U = \frac{(k^2 - s^2) \sin(0.5sd)}{2q \sin(0.5qd)} \cos(qx)B + s \cos(sx)B, \quad (3)$$

$$V = \frac{(k^2 - s^2) \sin(0.5sd)}{2k \sin(0.5qd)} \cos(qx)B + k \cos(sx)B. \quad (4)$$

反对称模式:

$$U = \frac{(k^2 - s^2) \cos(0.5sd)}{2q \cos(0.5qd)} \sin(qx)D - s \sin(sx)D, \quad (5)$$

$$V = \frac{(k^2 - s^2) \cos(0.5sd)}{2k \cos(0.5qd)} \cos(qx)D + k \cos(sx)D. \quad (6)$$

$$\text{式中: } k = \frac{2\pi f}{C_p}, \quad s = k \left[\left(\frac{C_p}{C_l} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}},$$

$$q = k \left[\left(\frac{C_p}{C_s} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad C_p \text{—Lamb波相速度, } C_l \text{—纵波速度, } C_s \text{—横波速度, } f \text{—频率。}$$

可见, Lamb波的面内位移和离面位移不仅与质点的位置 x 有关, 而且还是激励频率、板厚、相速度、横波速度及纵波速度的函数。

从图1和图2中可以看出, 当频厚积超过3 MHz·mm时模式数将至少达到4个, 这将大大增加信号分析处理的难度。频厚积在3 MHz·mm之前仅有 A_0 模式、 S_0 模式和 A_1 模式的Lamb波, 但是在实验中发现, A_0 模式因其相速度低, 在低的频厚积条件下难以激发, 因此, 本研究只绘制了 S_0 模式和 A_1 模式的Lamb波在频厚积2.5 MHz·mm时的波结构曲线, 分别如图4和图5所示。

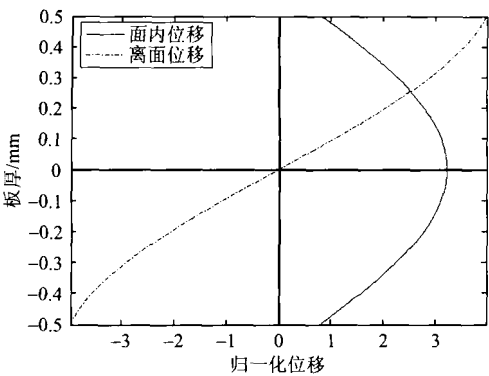


图4 S_0 模态 Lamb 波波结构曲线($fd=2.5\text{ MHz}\cdot\text{mm}$)

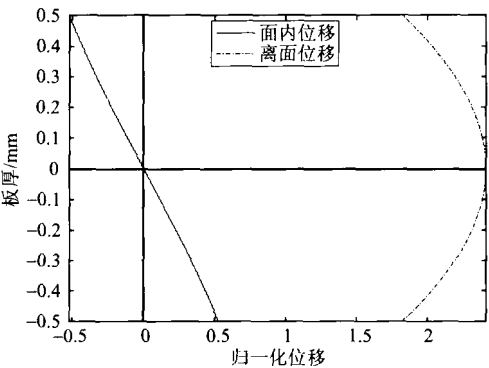


图5 A_1 模态 Lamb 波波结构曲线($fd=2.5\text{ MHz}\cdot\text{mm}$)

在利用波结构曲线进行模态选择时,应综合考虑检测工况和波结构曲线中面内位移振幅 U 和离面位移振幅 V 的分布特点。当面内位移在板内分量较大,能量比较集中时,适合检测板内与中性面垂直的缺陷;当离面位移在板内分量较大,能量比较集中时,适合检测与中性面平行的缺陷。但是当离面位移在板的上、下表面分量较大时,容易造成水载或包层结构中 Lamb 波的泄露^[7]。

图4中纵坐标0代表板的中性面位置, S_0 模态 Lamb 波的面内位移幅度分布基本均匀,适合检测与中性面垂直的缺陷,离面位移主要分布在板的上下表面,有利于 Lamb 波的接收,因此在频厚积为 $2.5\text{ MHz}\cdot\text{mm}$ 时 S_0 模态较适于缺陷检测。而图5中 A_1 模态的面内位移分量的能量较小,不适合缺陷检测。

4 实验过程与结果

在1 mm厚的铝板上,距板端50 mm处加工一系列不同孔径的通孔,直径为0.6 mm~1.8 mm。在1 mm厚的铝板上,距板端7 mm处加工一系列不同长度的半贯穿和贯穿型裂纹,长度为5.0 mm~17 mm。

依据 Lamb 波的频散曲线和波结构曲线,选择标称频率为2.5 MHz的可变角探头激发 S_0 模态的 Lamb 波,采用单发单收方式对上述缺陷进行检测。由图3可以看出,选择入射角为 47° 时可在1 mm厚的铝板中激发出 S_0 模态的 Lamb 波,实际入射角为 47.5° 。

图6为不同孔径缺陷反射波幅值的变化情况,可以看出,随孔径增加,反射波幅值也增加,其线性回归系数为 $R^2=0.9537$,表明孔径大小与反射波幅值具有良好的线性关系。

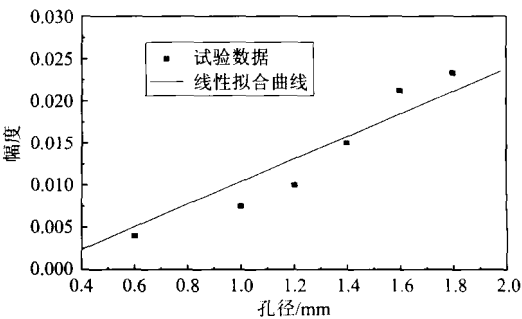


图6 孔径尺寸与反射波幅值的关系

图7为无缺陷的板端反射波与1 mm通孔的缺陷反射波的幅度谱,可以看出,缺陷波的幅值明显降低,下降幅度达32.4%,但中心频率变化不大,仅为0.7%,这说明在对通孔类缺陷检测过程中没有发生频散。

图8所示为检测5 mm贯穿型裂纹缺陷的时域波形,由图可以看出, S_0 模态 Lamb 波对于穿透裂纹非常敏感,板端边反射波幅度明显降低,缺陷波明显。

图9所示为检测5 mm半贯穿型裂纹缺陷

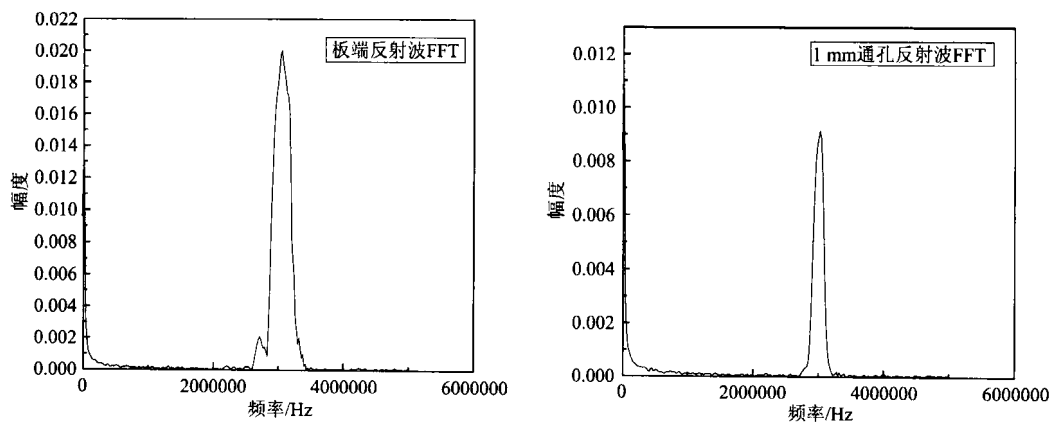
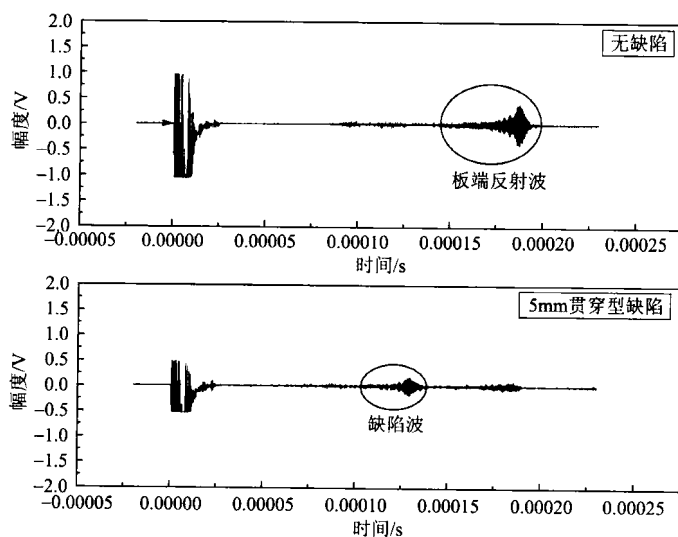
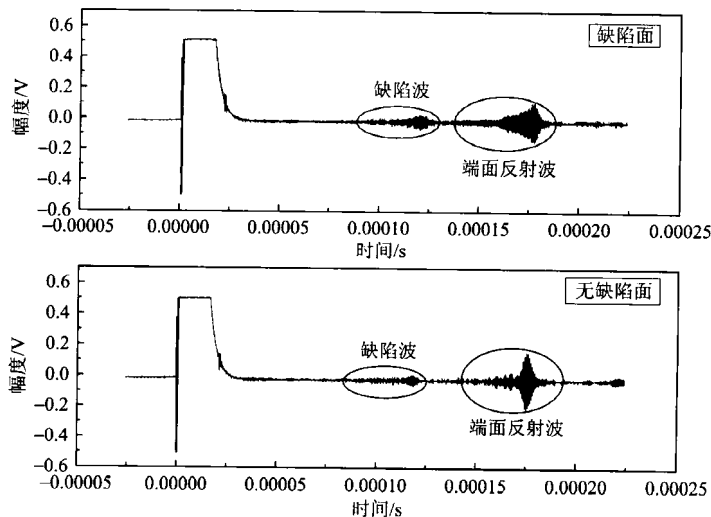


图7 板端反射波与通孔反射波的FFT

图8 S_0 模态的Lamb波与5 mm贯穿型缺陷作用的时域波形图9 S_0 模态的Lamb波与5 mm半贯穿型缺陷作用的时域波形

的时域波形, 由图可以看出, 在缺陷面, 可以很明显地分辨缺陷波, 而在无缺陷面, 虽然也可以分辨缺陷波, 但波幅度下降较多, 在实际检测过程中容易漏检。

值得注意的是, 裂纹型缺陷波的幅值变化并不是随裂纹长度的增加而呈线性增加, 如图10所示。产生这个现象的原因可能是

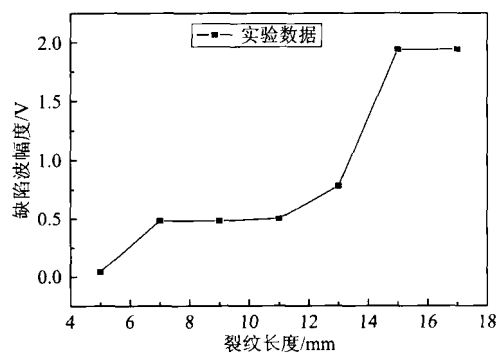


图10 S_0 模态时缺陷波幅值与裂纹长度的关系曲线

Lamb波与裂纹相互作用, 部分散射波沿裂纹表面传播, 另有一部分裂纹表面波和裂纹尖端作用产生衍射, 削弱了探头接收到的Lamb波, 这与Ye Lu等人^[8]的研究结果一致。

实验中测定了通孔缺陷偏离声束轴线时其反射波幅度变化情况, 图11所示为直径1 mm的通孔偏离声束轴线时反射波的变化情况。从图中可以看出, 通孔在声束轴线上时, 反射波幅值最大, 通孔偏离声束轴线5 mm时, 仍可见明显的通孔反射波, 但幅值下降约40%, 而板端反射波明显增大。通孔偏离声束轴线10 mm时, 已找不到通孔反射波。对于直径1.6 mm的通孔, 偏离声束轴线13 mm时即无法检测到缺陷反射波, 这说明Lamb波的声场很集中, 在偏离声束轴线很小的范围内, 声压即下降为零。

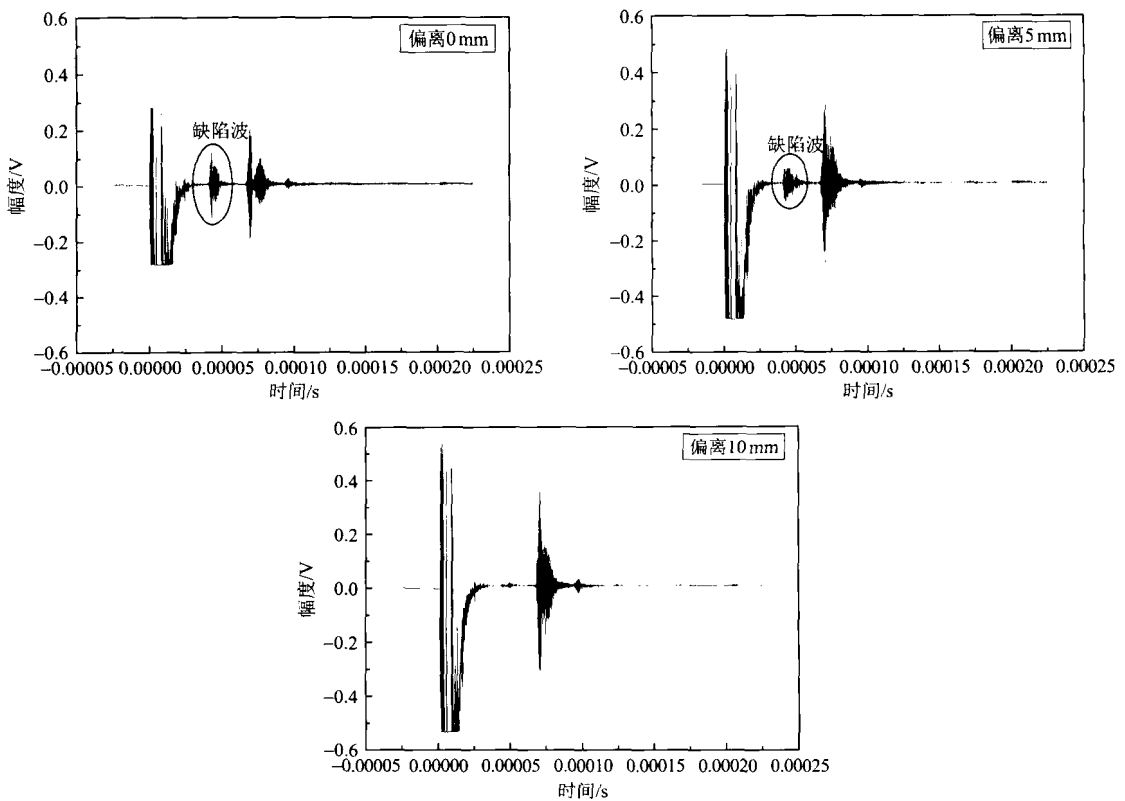


图11 1 mm通孔偏离声束轴线时反射波幅值变化

参 考 文 献

5 结 论

基于Lamb波的频散曲线是其频散方程实数解分布的特点,从实际应用的角度出发,用简化的方法绘制了铝板的Lamb波频散曲线和波结构曲线。根据绘制的频散曲线和波结构曲线,可根据实际检测工况选取合适模式的Lamb波,本文选取 S_0 模式的Lamb波对1 mm厚铝板的人工裂纹型缺陷进行了检测。实验结果表明, S_0 模式的Lamb波对通孔型缺陷和贯穿型裂纹缺陷十分敏感。通孔型缺陷反射波幅值与孔径大小具有良好的线性关系,但裂纹型缺陷的反射波幅值并不随裂纹长度的增加呈线性增加。对于半贯穿型裂纹缺陷也可从无缺陷面进行检测,但缺陷波的幅值下降较多,在实际应用过程中容易漏检。Lamb波的声场较为集中,对于通孔型缺陷,偏离声束轴线一定距离时即无法检测。

- [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] DIAMANTI K, SOUTIS C, HODGKINSON J M. Lamb waves for the non-destructive inspection of monolithic and sandwich composite beams[J]. Composites, part A. 2005, 36: 189-195.
- [3] J. L. Rose著, 何存富, 吴斌, 王秀彦, 译. 固体中的超声波[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 89-91.
- [4] 曹正敏, 林莉, 李喜孟. 兰姆波频散曲线的绘制与试验验证[J]. 理化检验(物理分册). 2008, 44(9): 193-199.
- [5] J. L. Rose. Dispersion curves in guided wave testing[J]. Materials Evaluation. 2003, 61(1): 20-22.
- [6] 史亦韦. 超声检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 111-116.
- [7] TOYAMA N, Takatsubo J. Lamb wave method for quick inspection of impact-induced delamination in composite laminates[J]. Composites Science and Technology. 2004, 64: 1293-1300.
- [8] LU Y, YE L, SU Z Q, et al. Quantitative assessment of through-thickness crack size based on lamb wave scattering in aluminum plates[J]. NDT & E Int. 2008, 41(1): 59-68.