超声导波用于液层负载板损伤检测的数值模拟

陈维业[1,2]，吴先梅[1,2]，刘 松[1,2]，陈家熠[1,2]
(1. 中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室，北京 100190；2. 中国科学院大学，北京 100049)

摘要：液层负载薄板结构的损伤检测是结构无损检测和健康监测中的一个重要问题。为寻求合适的液层负载薄板结构损伤检测信号及分析损伤缺陷对检测信号的响应，求解了双侧液层负载薄板的频散方程，计算得到 4 mm 双侧水域负载铝板的频散曲线，并利用有限元模拟方法研究了缺陷位置、角度及大小对铝板中检测信号的影响。研究结果表明：中心频率小于 100 kHz 的 S0 模式漏 Lamb 波衰减因子趋近于 0，适合长距离损伤检测。此外，当缺陷的存在造成板结构的不对称性时，声信号在缺陷处发生明显的模式转换，且转换出的 A0 模式信号的透射系数随缺陷位置到板厚中心距离的增加而减小，随缺陷与铝板中间面的角度和缺陷长度的增加先增大后减小，并随缺陷宽度的增加而增大。

关键词：超声导波；频散曲线；液层负载薄板；损伤检测；有限元模拟
中图分类号：O426 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2020)-01-0049-06
DOI 编码：10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.01.009

Numerical simulation of ultrasonic guided waves for damage detection of liquid layer loaded plate

CHEN Weiye[1,2], WU Xianmei[1,2], LIU Song[1,2], CHEN Jiayi[1,2]
(1. *State Key Laboratory on Acoustics*, *Institute of Acoustics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190, *China*)

Abstract: The damage detection of liquid layer loaded thin-plate structure is a key issue in structural nondestructive testing and health monitoring. In order to find a suitable damage detection signal of liquid layer loaded thin-plate structure and analyze the response of the damage defect to the detection signal, this paper solves the dispersion equation and calculates the dispersion curves of the 4 mm aluminum plate loaded by double sided semi-infinite water layers. Additionally, the effects of the position, angle and size of the defect on the acoustic detection signal in aluminum plate are investigated by using finite element simulation methods. The results show that the attenuation coefficient of the S0 mode leaky Lamb wave at the central frequency less than 100 kHz is close to zero, which is suitable for long-distance damage detection. When the presence of defects causes the asymmetry of the plate structure, the acoustic signal will have a significant mode transition at the defect. And, as the distance from the defect location to the center of the plate increases, the transmission coefficient of the converted A0 mode signal decreases, with the increase of the defect length and the angle between defect and medium layer, the transmission coefficient of the A0 mode signal increases first and then decreases; and with the increase of the defect width, the transmission coefficient of the A0 mode signal increases.

Key words: ultrasonic guided wave; dispersion curve; liquid layer loaded thin plate; damage detection; Finite element simulation

0 引 言

伴随着海洋资源的不断开发利用及海洋战略的需求，液层负载薄板结构越来越多地应用到海洋钻井平台、大直径管道及舰艇等海工装备[1-2]。但受外界环境和自身结构等因素影响，结构表面和内部难免会产生腐蚀、裂纹等损伤缺陷，缺陷的累积会严重影响其安全性，因此这些装备的损伤检测和健康监测也成为了一个关键问题。

超声导波具有在介质中传播距离长、可实现高效在线监测等优势，在板结构的损伤检测方面得到了广泛的关注[3]。马伟伟[4]采用分段计算的方法来分析 Lamb 波在缺陷板中的传播，并通过理论和数值模拟研究单层板中裂纹深度与损伤指数的关系。张超[5]对不同类型分层板的激发特性等进行了系统的分析，为分层板结构的损伤检测提供依据。而 Lamb 波在传播过程中会发生频散，影响损伤的定位和成像，利用时间反转方法能够补偿 Lamb 波的频散[6-7]。

收稿日期：2018-09-28；**修回日期**：2018-11-10
基金项目：国家自然科学基金(11674351)资助项目
作者简介：陈维业(1993－)，男，河北沧州人，硕士研究生，研究方向为超声传播与成像。
通讯作者：吴先梅，E-mail: wuxm@mail.ioa.ac.cn

何存富等[8]采用多通道时间反转方法对板中 Lamb 波进行聚焦，实现板内缺陷的准确定位并提高小缺陷识别分辨能力。但应用超声导波对含损伤液层负载薄板结构的研究相对较少。因此，本文通过计算 4 mm 厚双侧水域负载铝板的频散曲线来选择合适的激励频率和激励方式。同时利用有限元模拟研究了所选激励条件下双侧液体负载铝板中不同位置、角度及大小的缺陷对检测信号的影响。

1 双侧液体负载薄板中的漏 Lamb 波

1.1 模型的建立

针对于单层板中的声传播特性及损伤检测，国内外学者已开展了广泛的研究，本文所建立的是如图 1 所示的双侧液体负载薄板模型，图中 x 方向为声传播方向，z 方向为板厚方向，中间固体板的厚度为 $2h$，两侧为半无限大液体。

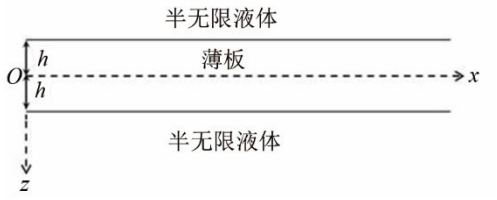


图 1 双面液体负载薄板几何示意图

Fig.1 Geometry model of double-sided liquid layer loaded thin-plate

1.2 特征方程的求解

Lamb 波是在自由板中产生的平面应变波，在板的上、下表面应力为零，随着波的入射角和频率的改变，在每一个点上都产生不同的模态结构[9]。而对处于一定振动模式的液体负载板，板中的声能量会向液体中辐射，从而形成漏 Lamb 波。当板的两侧负载为半无限大理想液体时，薄板中类 Lamb 波对称模式(S 模式)的频散方程为[10]

$$(\xi^2+s^2)^2\coth(2hq)-4\xi^2qs\coth(2hs)=\mathrm{i}(\rho_\mathrm{L}/\rho_\mathrm{S})k_\mathrm{T}^4q/(k_\mathrm{L}^2-\xi^2)^{1/2} \tag{1}$$

反对称模式(A 模式)的频散方程为[10]

$$(\xi^2+s^2)^2\tanh(2hq)-4\xi^2qs\tanh(2hs)=\mathrm{i}(\rho_\mathrm{L}/\rho_\mathrm{S})k_\mathrm{T}^4q/(k_\mathrm{L}^2-\xi^2)^{1/2} \tag{2}$$

其中：

$$s^2=\xi^2-k_\mathrm{T}^2 \tag{3}$$

$$q^2=\xi^2-k_\mathrm{L}^2 \tag{4}$$

$$k_\mathrm{T}=\frac{2\pi f}{C_\mathrm{T}} \tag{5}$$

$$k_\mathrm{L}=\frac{2\pi f}{C_\mathrm{L}} \tag{6}$$

$$\xi=k+\mathrm{i}\gamma \tag{7}$$

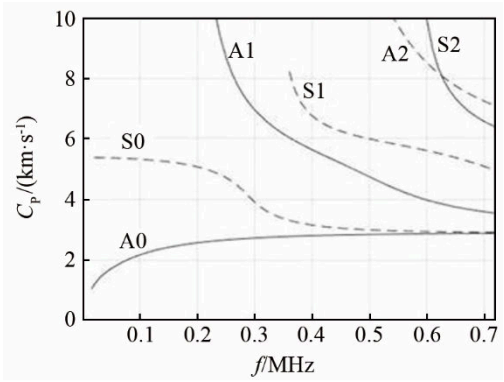
式中：C_L 为固体材料中纵波速度；C_T 为固体材料中横波速度；ρ_L 为液体的密度；ρ_S 为薄板的密度；f 为激励频率；k 为实波数；γ 为虚波数，即衰减因子。

铝板及水的相关参数如表 1 所示。将参数代入

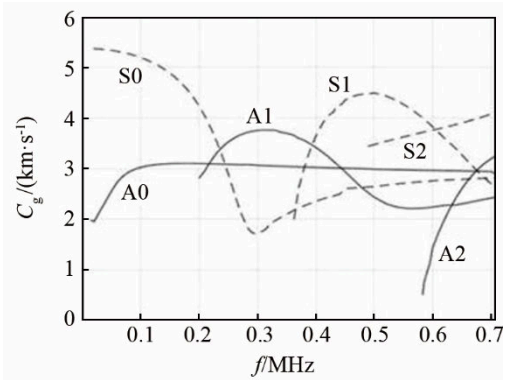
表 1 双面液体负载板模型参数[5,11]

Table 1 Model parameters of double-sided liquid layer loaded thin-plate [5,11]

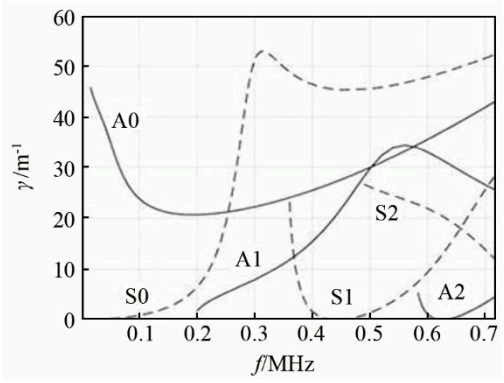
介质	纵波速度 C_L/(m·s^{-1})	横波速度 C_T/(m·s^{-1})	厚度 $2h$/m	密度 ρ/(kg·m^{-3})
铝板	6 300	3 080	0.004	2 700
水	1 494	-	-	998



(a) 相速度曲线



(b) 群速度曲线



(c) 衰减曲线

图 2 4 mm 双侧液体负载铝板频散曲线

Fig.2 Dispersion curves of double-sided liquid layer loaded 4 mm aluminum plate

式(1)、(2)可以计算得到如图 2(a)～2(c)所示的 4 mm 双侧半无限大水域负载铝板的相速度曲线，群速度曲线和衰减曲线。

1.3　激励频率与激励方式的选取

在液层负载条件下，激励频率的选择主要考虑两个方面，即声波的频散小和衰减小。群速度的变化率小对应声波的频散小，衰减因子的值小对应声波的衰减小。由图 2(b)、图 2(c)可见，激励频率为 100 kHz 以内的 S0 模式能够很好地满足上述两个方面的要求，本文选用的激励频率为 80 kHz。在激励频率为 80 kHz 时，为获得单一的 S0 模式，本文选用双面法向激励的方式。

2　双侧液体负载损伤薄板的数值模拟

2.1　有限元模型的建立

应用有限元软件对含缺陷的双侧水域负载铝板进行模拟，其模型坐标如图 3 所示。坐标原点 O 位于铝板左端面和板厚方向中间面的交点，铝板的长度为 2 000 mm，厚度为 4 mm，水域的高度为 200 mm，设置铝板及水域的吸收边界条件来模拟无限大铝板和半无限大水域。缺陷的长度为 l，宽度为 w，其左端面的横坐标为 1 000 mm。缺陷高度方向中心到薄板中间面的距离为 d，定义为缺陷位置深度。激励源位于铝板的上下表面来实现双侧法向激励，为获取足够能量的信号，线源长度取 10 mm，其中心点横坐标为 405 mm。有限元模拟时采用 5 个周期的汉宁(Hanning)窗调制的正弦波作为激励信号，信号的中心频率 f=80 kHz，其时域波形如图 4 所示。另外 A、B、C、D 四点位于铝板的上表面，其 x 方向坐标分别为 600、700、1 300 和 1 400 mm，用来接收信号。

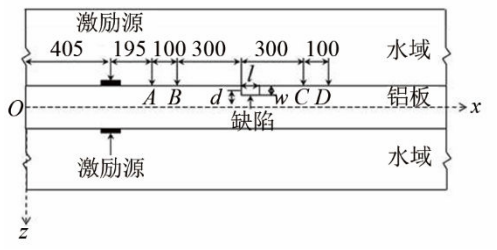


图 3　含缺陷双侧水域负载铝板模型 1 的坐标图

Fig.3　Coordinate chart of Model 1 of the water loaded aluminum plate with defects

2.2　模拟结果分析

2.2.1　缺陷位置深度对接收信号的影响

通过分析缺陷的反射信号和透射信号可以获得损伤缺陷的相关信息，其中无缺陷双侧水域负载铝板 x 方向坐标为 600 mm、1300 mm 即位置 A、位置 C 处的法向振动位移波形如图 5 所示。

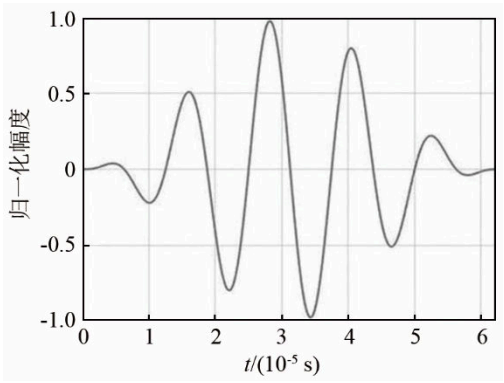
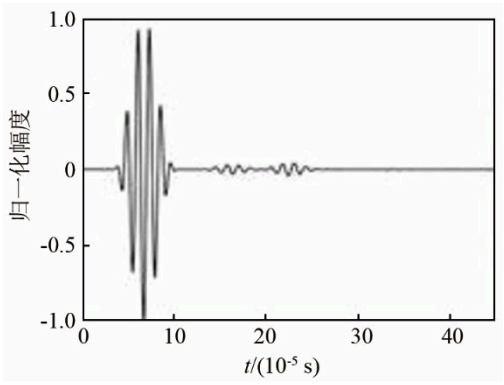


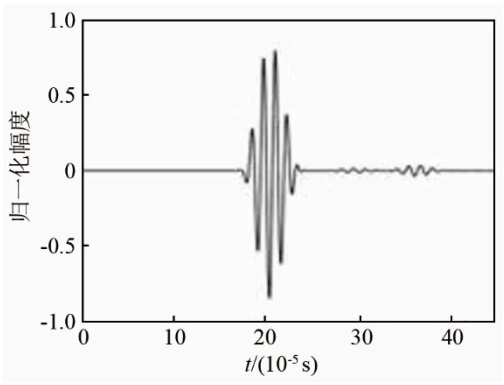
图 4　激励源信号时域图

Fig.4　Time domain diagram of excitation source signal

图 6 所示为存在内部缺陷或表面缺陷的双侧水域负载铝板在位置 A、位置 C 处的法向振动位移波形，缺陷的长度 l、宽度 w 分别保持 5 mm 和 1 mm，缺陷位置深度 d 分别为 0 和 1.5 mm，分别对应缺陷中间面与铝板中间面重合、缺陷位于铝板表面。对比图 5(a)和图 6(a)可见，图 6(a)中幅值较小的脉冲 1



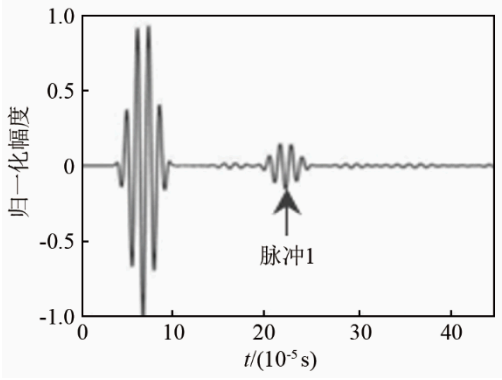
(a) x=600 mm



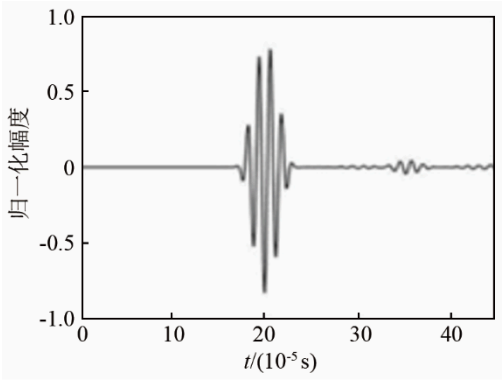
(b) x=1 300 mm

图5　无缺陷双侧水域负载铝板位置A、C处法向振动位移波形图

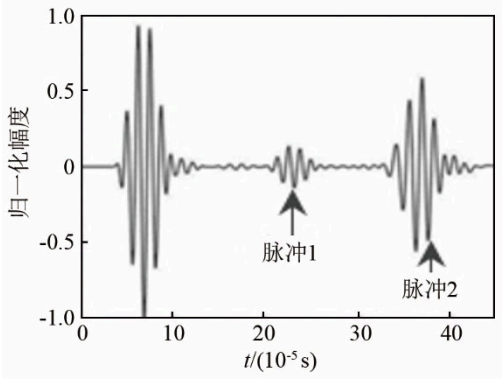
Fig.5　Normal vibration displacement waveforms at the positions A and C of the water loaded non-defective aluminum plate



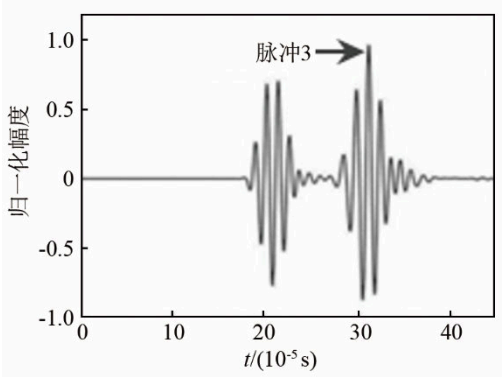
(a) x=600 mm, d=0



(b) x=1 300 mm, d=0



(c) x=600 mm, d=1.5 mm

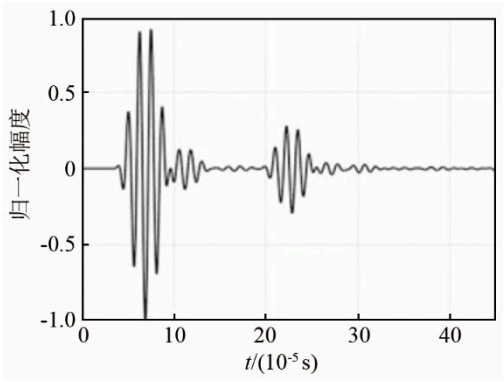


(d) x=1 300 mm, d=1.5 mm

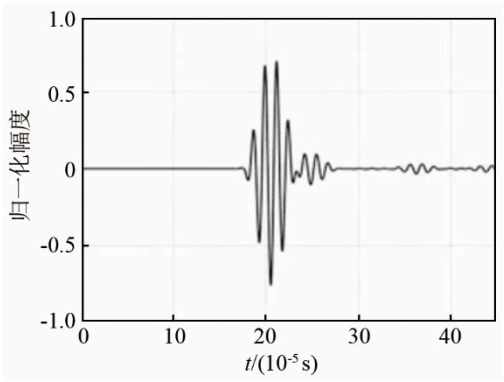
图 6 含 l=5 mm，w=1 mm 缺陷时，位置 A、位置 C 法向处的振动位移波形图

Fig.6 Normal vibration displacement waveforms at the positions A and C of the water loaded aluminum plate with the internal and surface defects of l = 5 mm and w = 1 mm

为缺陷反射回波，通过获取位置 B 的信号，计算当脉冲 1 传播距离为 0.1 m 时，传播时间为 1.87×10^{-5} s，则其相速度为 5 348 m·s^{-1}，与图 2(a)对比，可知其模式为 S0 模式。对比图 6(a)、6(c)，可以发现当缺陷位于铝板表面时，出现了一个新的声脉冲，即图 6(c)中的脉冲 2，此声脉冲到达时间明显晚于脉冲 1。对比图 6(b)、6(d)，图 6(d)中同样出现了新脉冲，即脉冲 3。通过获取位置 B 和位置 D 的接收信号来计算脉冲 2 和脉冲 3 的相速度，可得脉冲 2 和脉冲 3 为 A0 模式信号。可见当缺陷位于铝板表面时发生了明显的模式转换，并且 A0 模式信号的幅值大于 S0 模式信号的幅值。为探究发生模式转换的影响因素，在铝板的上下表面设置 l=5 mm，w=1 mm 的对称缺陷进行数值模拟，位置 A 和位置 C 处所接收的信号如图 7 所示。对比图 7(a)、图 6(c)或图 7(b)、图 6(d)可见，当缺陷关于板厚方向对称时，未观察到明显的模式转换现象。因此可以判定，当缺陷的存在造成结构的不对称性时会使得 S0 模式的信号转换出明显的 A0 模式信号。这是因为对称模式 S0 不能单独满足不对称边界条件，从而使得部分能量转换生成反对称模式 A0。



(a) x=600 mm, d=1.5 mm



(b) x=1 300 mm, d=1.5 mm

图 7 含 l=5 mm，w=1 mm 对称缺陷时，位置 A、位置 C 法向振动位移波形图

Fig.7 Normal vibration displacement waveforms at the positions A and C of the water loaded aluminum plate with the defects of l = 5 mm and w = 1 mm symmetrically on the upper and lower surfaces

通过分析数值模拟结果发现，随缺陷位置深度变化，S0 模式信号幅值变化不明显，A0 模式信号幅值变化较为明显。因此，本文分析 A0 模式的透射系数与缺陷位置深度的关系，其中透射系数指 A0 模式透射信号与激励源处信号能量的比。以信号包络的平方对时间的积分来描述信号的能量：

$$E=\int_{t_1}^{t_2}|x(t)|^2\mathrm{d}t \tag{8}$$

缺陷长度 l 为 5 mm、宽度 w 为 1 mm 时，单层铝板和水域负载铝板在位置 C 处透射系数随缺陷位置深度的变化如图 8 所示。由图 8 可见，随着缺陷位置深度的减小，即 d 值的增大，A0 模式信号的透射系数单调递增。

为研究缺陷方向对接收信号的影响，双侧水域负载损伤铝板模型坐标图如图 9 所示。缺陷与铝板中间面的夹角为 α，缺陷的最左端与铝板左端的距离为 1 000 mm。缺陷的长度 l 为 5 mm，宽度 w 为 1 mm，其对称中心位于铝板的中间面。A、B、C、D 点的位置及线源的位置、长度，激励方式、激励信号等设置与图 3 相同。

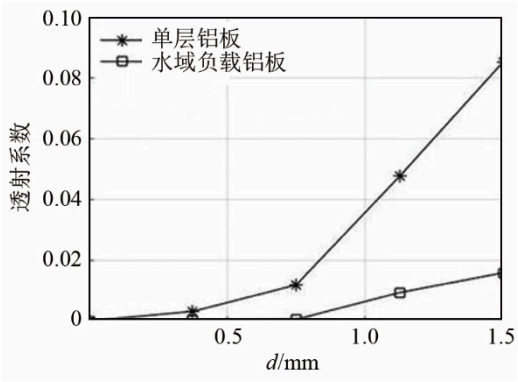


图 8　A0 模式透射系数与缺陷位置深度的关系

Fig.8　Relationship between the transmission coefficient of A0 mode and the depth of defect position

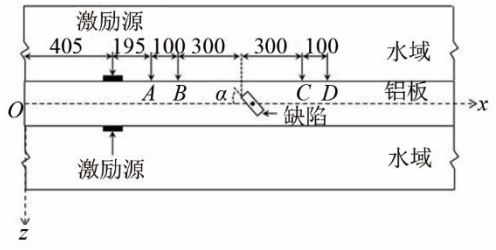


图 9　含缺陷双侧水域负载铝板模型 2 的坐标图

Fig.9　Coordinate chart of Model 2 of the water loaded aluminum plate with defects

2.2.2　缺陷方向对接收信号的影响

图 10 为 4 mm 厚双侧水域负载铝板及单层铝板在位置 C 处 A0 模式透射系数与缺陷角度关系图。由图 10 可见，随着缺陷角度 α 由 0°增加到 35°，透射系数先增大后减小，液层负载铝板的转折点发生在 25°左右，单层铝板的转折点发生在 30°左右。

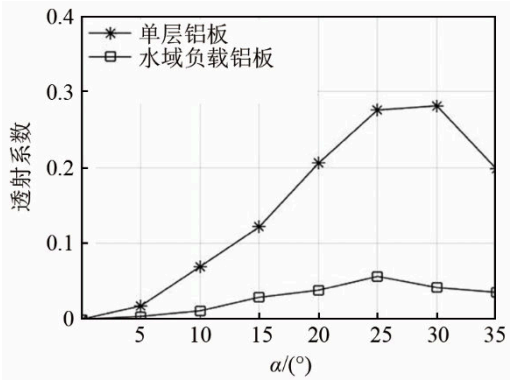


图 10　A0 模式透射系数与缺陷角度的关系

Fig.10　Relationship between transmission coefficient of A0 mode and defect angle

2.2.3　缺陷大小对接收信号的影响

图 11 所示是缺陷位置深度 d 为 0.75 mm 和 1.5 mm，即缺陷分别位于铝板的内部和表面，缺陷宽度 w 保持 1 mm，角度 α 保持为 0°的条件下，位置 C 处的 A0 模式透射系数随缺陷长度的变化曲线图。

由图 11 可见，在计算范围内，随缺陷长度的增加，A0 模式信号的透射系数均呈先增大后减小又增大的趋势，这是因为缺陷的存在使板的厚度发生两次变化，引起 S0 模式信号发生两次模式转换而生成两个 A0 模式信号，两个 A0 模式信号叠加成一个波包。随着缺陷长度的改变，生成的两个 A0 模式信号相位差发生改变，即叠加状态发生改变，从而引起计算范围内透射系数随缺陷长度的增加呈先增大后减小又增大的变化趋势。

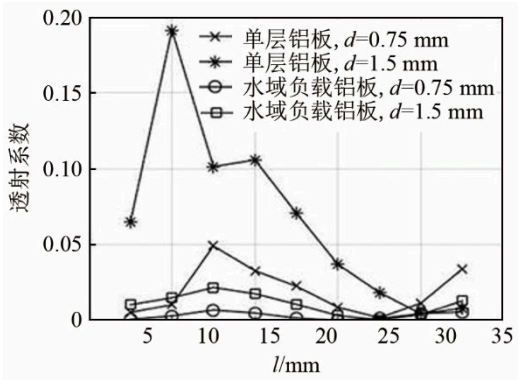


图 11　A0 模式透射系数与缺陷长度的关系

Fig.11　Relationship between transmission coefficient of A0 mode and defect length

另外，本文计算了缺陷位于表面时缺陷宽度 w 与 A0 模式透射信号的关系，来模拟实际工况下腐蚀深度对检测信号的影响。保持缺陷长度 l 为 5 mm，缺陷角度 α 为 0°，位置 C 处 A0 模式透射系

数与缺陷宽度 w 的关系如图 12 所示。由图 12 可见，随着缺陷宽度由 0.5 mm 增加到 2.5 mm，A0 模式透射系数逐渐增大，这是因为缺陷宽度的增大造成了铝板不对称程度的增大，增强了模式转换效应。

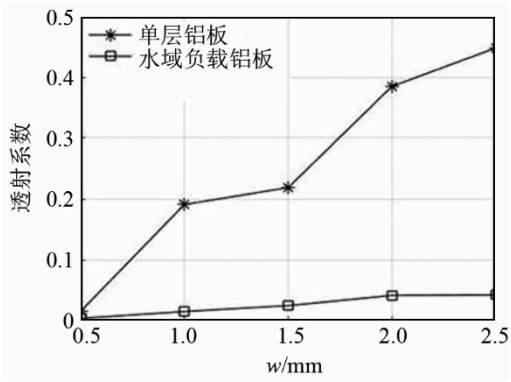


图 12 A0 模式透射系数与缺陷宽度的关系

Fig.12 Relationship between transmission coefficient of A0 mode and defect width

由于边界条件的改变及声波衰减的影响，以上三种情况下水域负载铝板的透射系数均小于单层铝板的透射系数。另外本文通过数值模拟定性分析了缺陷位置、角度及大小对检测信号的影响，定量分析及实验条件下三种情况对检测信号的影响还有待进一步的研究。

3 结束语

本文通过求解双侧液层负载薄板的频散方程，计算得到 4 mm 双侧水域负载铝板的频散曲线。利用有限元模拟对含不同位置、角度及大小缺陷的双侧水域负载铝板进行了仿真计算，并定性分析了缺陷位置、角度及大小对板内声信号的影响。研究结果表明：对于 4 mm 厚双侧水域负载铝板，中心频率为 100 kHz 以内的 S0 模式漏 Lamb 波衰减因子趋近于零，适合长距离损伤检测。另外，以频率为 80 kHz 的 S0 模式漏 Lamb 波作为检测信号时，当缺陷的存在造成板结构的不对称性时，波形在缺陷处会发生明显的模式转换，并且 S0 模式转换出的 A0 模式信号的透射系数能够较好地反映缺陷位置、角度及大小的变化。A0 模式的透射系数随缺陷位置到板厚中心距离的增加而增大，随缺陷角度的增加先增大后减小，随缺陷长度的增加呈先增大后减小又增大的变化趋势，并随缺陷宽度的增大而增大。本文的研究结果能够为液层负载板结构的损伤检测和健康监测提供依据。

参 考 文 献

[1] 张曙光, 邵建华. 无损检测技术在海洋工程中的应用[J]. 无损检测, 2014, **36**(5): 69-72.
ZHANG Shuguang, SHAO Jianhua. Application of NDT technique in marine engineering[J]. Nondestructive Testing, 2014 **36**(5): 69-72.

[2] 魏勤, 骆英. 液层负载作用下薄板中腐蚀的 Lamb 波检测[J]. 振动、测试与诊断, 2013, **33**(s1): 41-44.
WEI Qin, LUO Ying. Corrosion detection of Lamb waves in plate bordered with liquid layers[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, **33**(s1): 41-44.

[3] 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 Cunfu, ZHENG Mingfang, LYU Yan, et al. Development, application and challenges in ultrasonic guided waves testing technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, **37**(8): 1713-1735.

[4] 马伟伟. 基于时间反转的超声兰姆波检测方法研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
MA Weiwei. Research on ultrasonic Lamb wave detection method based on time reversal[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2017.

[5] 张超. 分层固体板中导波的传播及成像方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
ZHANG Chao. Research on propagation properties of guided waves and ultrasonic imaging in layered palte[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.

[6] PODDAR B, BIJUDAS C R, MITRA M, et al. Damage detection in a woven-fabric composite laminate using time-reversed Lamb wave[J]. Structural Health Monitorin-G-Sage-, 2012, **11**(5): 602-612.

[7] GAO X, LI J, SHI F F, et al. Acoustic field analysis of detection and location of targets in layered media by time reversal-reverse time migration mixed method[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2017, **36**(4): 385-400.

[8] 何存富, 周文桢, 刘增华, 等. 基于多通道时间反转 Lamb 波的铝板小缺陷检测[J]. 实验力学, 2015, **30**(6): 683-689.
HE Cunfu, ZHOU Wenzhen, LIU Zenghua, et al. Small-sized defect detection in aluminum plate based on time reversal Lamb waves[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, **30**(6): 683-689.

[9] 马琦, 胡文祥. 液浸层状介质泄漏模式频散特性的分 析求解方法[C]//2013 中国西部声学学术交流会, 2013: 513-516

[10] WU J R, ZHU Z M. The propagation of Lamb waves in a plate bordered with layers of a liquid[J]. J. Acoust. So. Am., 1992, **91**(2): 861-867.

[11] 姜学平. 液体中声场的 Schlieren 成像及可视化[D]. 上海: 同济大学, 2012.
JIANG Xueping. Schlieren imaging and visualization of acoustic fields in liquid[D]. Shanghai: Tongji University, 2012.