

环形厚度线性变化薄板中Lamb波传播轨迹研究

贾 静^{1,2}, 侯倩伟²

¹常州工学院, 电气信息工程学院, 江苏 常州

²河海大学, 物联网工程学院, 江苏 常州

Email: jiasujing2@126.com

收稿日期: 2020年11月3日; 录用日期: 2020年11月18日; 发布日期: 2020年11月25日

摘 要

本文利用激光激发Lamb波, 对环形厚度线性变化薄板中Lamb波传播轨迹进行了研究。基于在金属材料中激发超声的热弹机制, 分别建立激光线源和点源在环形厚度线性变化薄板中激发Lamb波的三维有限元模型。激光线源激发Lamb波进入环形厚度线性变化区域, 向着厚度减小的方向传播, 并在底部边界聚集, 与声波波振面传播方向相交的底部边界传播的声波, 能量最强, 其他部分相对较弱。激光点源激发Lamb波沿半径方向传播进入环形厚度线性变化区域, 声波能量持续在底边边界聚集, 振幅逐渐增强, 且以相同振幅、频率沿圆的两个方向传播。

关键词

线性变化, 振幅, 聚焦, 兰姆波

The Propagation Trajectory of Lamb Waves on Thin Plates with Circular Thickness of Linear Variation

Jing Jia^{1,2}, Qianwei Hou²

¹School of Electrical Information Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou Jiangsu

²College of Internet of Things Engineering, Hohai University, Changzhou Jiangsu

Email: jiasujing2@126.com

Received: Nov. 3rd, 2020; accepted: Nov. 18th, 2020; published: Nov. 25th, 2020

Abstract

In this paper, the propagation trajectory of Lamb waves on thin plates with circular thickness of

linear variation is studied by using laser ultrasonic technology. Based on the thermoelastic mechanism, three-dimensional finite element model of Lamb wave excited by laser line source and laser point source is established, respectively. The Lamb wave excited by laser line source propagates into the area of thickness variation, and focuses at the bottom boundary. The sound wave propagates along the bottom boundary; part is strong, while the other parts are relatively weak. The Lamb wave generated by laser point source propagates along the radius into area of thickness variation. The acoustic accumulates continuously at the bottom boundary and the amplitude increases gradually. Moreover, the Lamb wave propagates along two opposite directions of the circle with the same amplitude and frequency. The results of this paper can be used to detect and evaluate thin plates with circular thickness of linear variation.

Keywords

Linear Variation, Amplitude, Focus, Lamb Wave

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

Lamb 波是由 H. Lamb 求解波动方程式时, 采用自由边界条件得到的一种特殊的波, 主要存在于声波波长和板厚具有数量级相同的板中。与横波、纵波相比, 其能量集中、衰减小, 可以非接触式激发, 在薄板材料的无损检测中具有广泛的运用[1]。由于激光超声的非接触激发和检测, 同时激发出多种形式的超声波, 可以对薄板进行快速的全方位扫描, 对形状复杂、小尺寸的物体进行检测的优点, 其广泛用于材料结构和质量的无损检测。

利用脉冲激光光源在含有人工腐蚀缺陷的航空铝材中激发 Lamb 波, 采用外差 Mach-Zehnder 干涉仪对超声波引起的离面位移进行探测, 并对所得信号进行时频分析, 通过比较 S_1 模态色散曲线在截止频率附近的变化来判断样品背面腐蚀的存在, 实现对早期腐蚀缺陷的检测[2]。针对当前空耦 Lamb 波缺陷检测的不足, 建立了 Lamb 波在三维复合板传播的模型, 搭建了空耦 Lamb 波实验扫描方案, 根据概率损伤算法得到了扫描区域内的缺陷图像, 有效识别出多种复合板缺陷的尺寸, 形状和损伤程度[3]。利用激光在周期结构板中激发 Lamb 波, 从理论和实验两个方面研究了板的结构参数对激光 Lamb 波带隙的影响[4]。在真空条件下, 在薄板横截面的厚度与距边界的距离之间满足幂律分布时, 厚度逐渐变为 0 的薄板中弯曲波将被局限在边界附近, 不发生反射, 即“零反射效应”。Krylov 分别对一维声黑洞结构和二维声黑洞结构中弯曲波的传播进行了研究[5]。在厚度线性变化薄板中, 利用时延激光散斑干涉装置对 A_0 模态的传播特性和传播路径进行了研究[6]。从几何声学理论出发, 提出一种能有效地提高吸声材料的吸收能力二维声黑洞结构。该结构能将入射到边界的声束以螺旋线的轨迹引进中央填有吸声材料的腔体中, 在噪声控制, 声吸收和声隐身等领域具有潜在的应用价值[7]。通过控制薄板结构的厚度变化规律, 利用声学黑洞将波动能量聚集在特定的位置, 实现了波的传播与操控[8]。基于欧拉-伯努利梁理论建立了声黑洞梁和挡板碰撞振动的模型, 研究表明引入接触非线性后, 振动能量可以从声黑洞性能的低频段传递到效果显著的高频区域, 其能量衰减速度显著加快, 整体减振性能得到了有效的提高[9]。

本文对环形厚度线性变化薄板上 Lamb 波的传播轨迹进行了研究。基于热弹机制, 建立激光在环形厚度线性变化薄板激发 Lamb 波的三维有限元模型, 分别研究了激光光源和激光点源作用产生的 Lamb

波进入环形厚度线性变化区域后传播轨迹变化, 底部中心边界处声波的转换, 传播和能量聚集特性。本论文研究成果可用于环形厚度线性变化薄板结构的检测与评估。

2. 理论模型

基于热弹性理论, 建立如图 1(a)所示三维模型, 激光光源作用于模型的薄板区域激发 Lamb 波。建立轴对称型薄板和上下表面半径分别为 R_1 和 R_0 的锥形圆台, 薄板和锥形圆台做差集到环形厚度线性变化的薄板结构。锥形圆台厚度变化为: $h(r) = a(r - R_0)$, 其中, r 为锥形圆台任一位置半径, $R_0 \leq r \leq R_1$ 。Lamb 波的传播应该满足几何声学近似条件, 即厚度变化相对平缓, 因此, a 取值应尽量小, 本文取 $a = 0.125$ 。上下表面半径分别为 $R_1 = 5 \text{ mm}$, $R_0 = 1 \text{ mm}$ 。

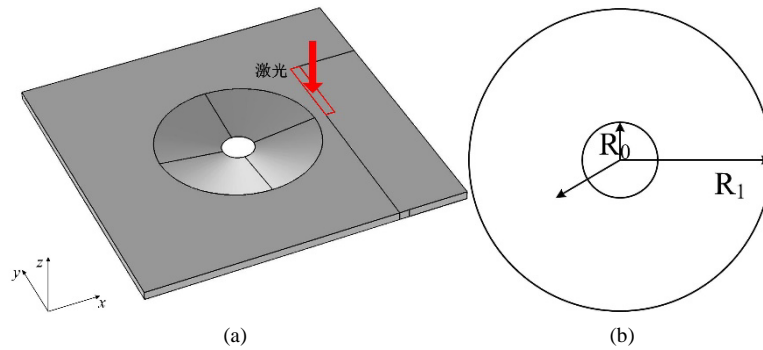


Figure 1. Schematic diagram of laser irradiation on annular thin plate with linear changes (a), Cone radius $R_1 = 5 \text{ mm}$, $R_0 = 1 \text{ mm}$ (b)

图 1. 环形厚度线性变化薄板结构示意图(a), 锥形圆台半径 $R_1 = 5 \text{ mm}$ 和 $R_0 = 1 \text{ mm}$ (b)

脉冲激光垂直辐照到薄板表面后, 表层迅速吸收能量, 并引起表层温度的升高及局部的体积膨胀, 从而产生瞬态位移场[10]。Lamb 波主要存在于厚度与激励声波波长具有相同数量级的薄板结构中, 能量局域在板结构的上、下两个自由界面内。根据板中质点位移起震的方向将 Lamb 波分为对称模态与反对称模态, 其传播方向如图 2 所示。

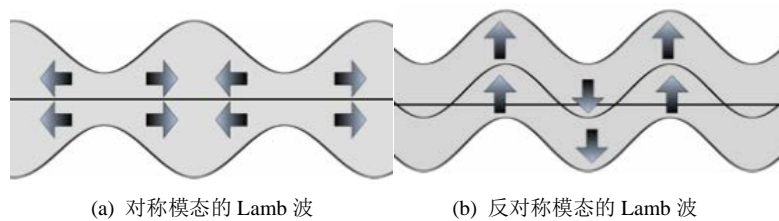


Figure 2. Schematic diagram of symmetry and antisymmetry Lamb wave mode

图 2. 对称与反对称模态的 Lamb 波示意图

激光作为热通量作用于薄板部分, 非激光辐照区域按绝热条件处理。假设薄板表面存在一个随时间变化的外部热源, 激光辐照区的边界条件满足

$$-k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial n} = I_0 A(T) f(x) g(t), \quad (1)$$

$$\text{或} -k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial n} = I_0 A(T) f(x, y) g(t), \quad (2)$$

其中, $A(T)$ 是材料表面的吸收率, I_0 是脉冲激光的峰值功率密度, $g(t)$ 为时间分布函数, $f(x)$ 和 $f(x,y)$ 分别为激光线源和点源的空间分布函数, 表达式为

$$g(t) = \frac{8t^3}{t_0^4} \exp\left(\frac{-2t^2}{t_0^2}\right), \tag{3}$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{2}{R_G} \exp\left(\frac{-2(x-x_0)^2}{R_G^2}\right), \tag{4}$$

$$f(x,y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{2}{R_G} \exp\left(\frac{-2(x-x_0)^2}{R_G^2} - \frac{-2(y-y_0)^2}{R_G^2}\right), \tag{5}$$

式中, R_G 为线源半宽或点源半径, x_0 定义了线光源位置, (x_0, y_0) 为点源加载中心位置, t_0 为激光一个脉冲的宽度。为了避免边界反射对声波传播特性的影响, 对模型的四个侧面设置低反射边界条件, 其余为自由边界。模型初始温度为室温, 初始的位移为零。

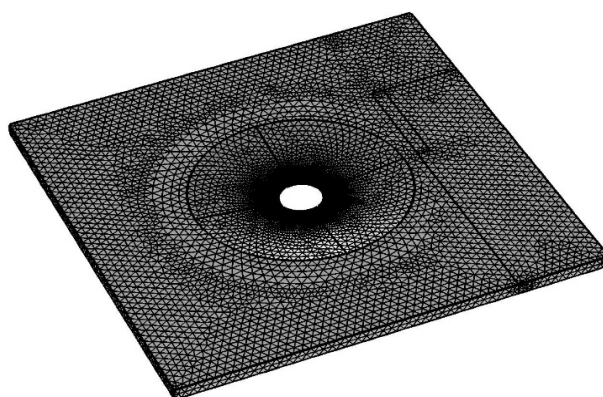


Figure 3. The meshing of thin plates with circular thickness of linear variation

图 3. 环形厚度均匀变化平板结构网格划分

为了满足超声波传播精度的要求, 对于空间分布为高斯型的脉冲激光, 网格单元的最大尺寸选择 $120 \mu\text{m}$, 激光辐照区和环形厚度变化区域网格划分更密, 最小为 $5 \mu\text{m}$, 如图 3 所示。时间步长的选择可以决定计算结果中结构响应中最高频率和解的精确度, 在此时间步长取值为 $4\text{e-}9 \text{ s}$, 总计算时间 t 取值为 $5 \mu\text{s}$ 。忽略材料参数对温度的依赖性, 常温下使用的铝板材料的参数如表 1 所示。

Table 1. Parameters of aluminum

表 1. 铝板材料的参数

吸收率	常压热容 C_p (J/(kg·K))	导热系数 κ (W/(m·K))	热膨胀系数 α (K ⁻¹)	泊松比 ν	杨氏模量 E (GPa)	密度 ρ (kg/m ³)	拉曼常数	
							λ (N/m ²)	μ (N/m ²)
0.052	900	238	$2.3\text{e-}5$	0.33	70	2700	$5.1\text{e}10$	$2.6 \text{e}10$

根据几何声学近似理论, 当满足一定条件时, 声波沿某一固定轨道传播[5]。此处所说条件即为声波进入轨道时相速度方向与轨道半径的夹角为 90° , 且角速度与固定轨道的角速度匹配, 即满足

$$\left. \frac{\partial V_p(r)}{\partial r} \right|_{r_0} = \frac{V_p(r_0)}{\partial r_0}, \tag{6}$$

其中, V_p 为 Lamb 波的相速度, 将角速度 $\Omega = V_p/r$ 代入式(6)中

$$\left. \frac{\partial \Omega(r)}{\partial r} \right|_{r_0} = 0, \tag{7}$$

当声波的速度满足公式(6)或(7)时, 声波将被限制在固定轨道 $r = r_0$ 中, 一直沿着轨道传播。

3. 仿真结果与讨论

3.1. 激光线源激发 Lamb 波传播轨迹研究

首先, 根据上文所述理论, 建立激光线源作用于环形厚度均匀变化平板结构的模型。激光线源沿 z 轴负方向垂直作用在薄板区域, 确保 Lamb 波在薄板中的激发与传播。激光线源中心位于 $x_0 = 6 \text{ mm}$, y 方向 $0 \sim 5 \text{ mm}$ 区域(线源长度约为 5 mm), 线源半宽为 $R_G = 0.15 \text{ mm}$, 激光脉冲的上升时间是 $t_0 = 10 \text{ ns}$, 激光脉冲中心辐射能量 I_0 为 $1 \times 10^{11} \text{ W/m}^2$, 模型尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 。图 4 为不同时刻的 Lamb 波传播的位移场示意图。

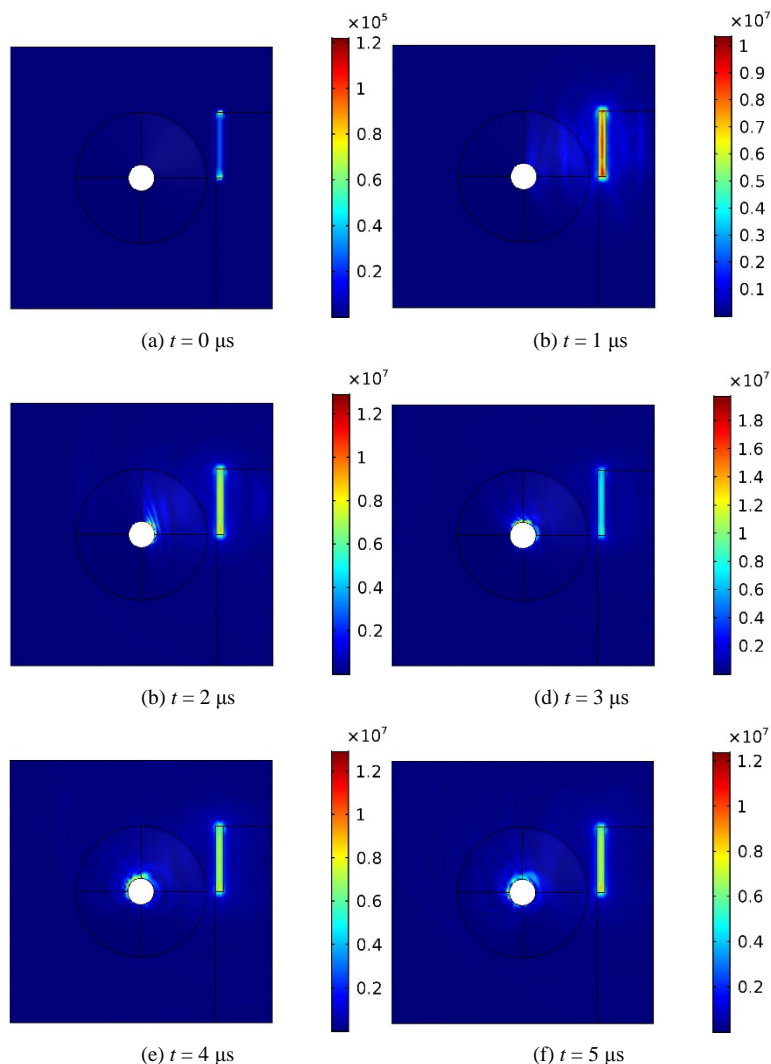


Figure 4. The displacement field of Lamb wave at $t = 0 \mu\text{s}, 1 \mu\text{s}, 2 \mu\text{s}, 3 \mu\text{s}, 4 \mu\text{s}, 5 \mu\text{s}$
图 4. 不同时刻($t = 0 \mu\text{s}, 1 \mu\text{s}, 2 \mu\text{s}, 3 \mu\text{s}, 4 \mu\text{s}, 5 \mu\text{s}$), Lamb 波传播的位移场示意图

图 4(a)和图 4(b)发现激光线源激发的 Lamb 波波振面平行于线源, 沿垂直于线源方向向外传播, 传播方向并未在环形变化区域的半径方向。声波传播进入到环形厚度变化区域, 原本沿 x 轴负方向传播的 Lamb 波发生了偏折, 声波开始向着厚度减小的方向传播, 如图 4(c)所示。由于激光线源长度与厚度变化区域上表面半径相同, 因此声波最终完全进入厚度变化区域传播, 图 4(d)所示。随着传播时间变长, 观察图(e)和图(f)的底部边界处可以发现边界处图像相比其他部分要明亮许多, 也就意味着在围绕着底部边界的一个环形区域处位移较大。在声波的传播过程中, 部分声波沿着固定轨道 r_0 传播, 对于 $r < r_0$ 的区域中的声波在向底部边界传播的过程中, 在边界处转化为沿着圆形楔形边界传播的边界局域波, 即为楔波; 而对于 $r > r_0$ 的区域中的声波, 以旋转发散的辐射形式远离厚度线性变化的区域, 向外界传播。

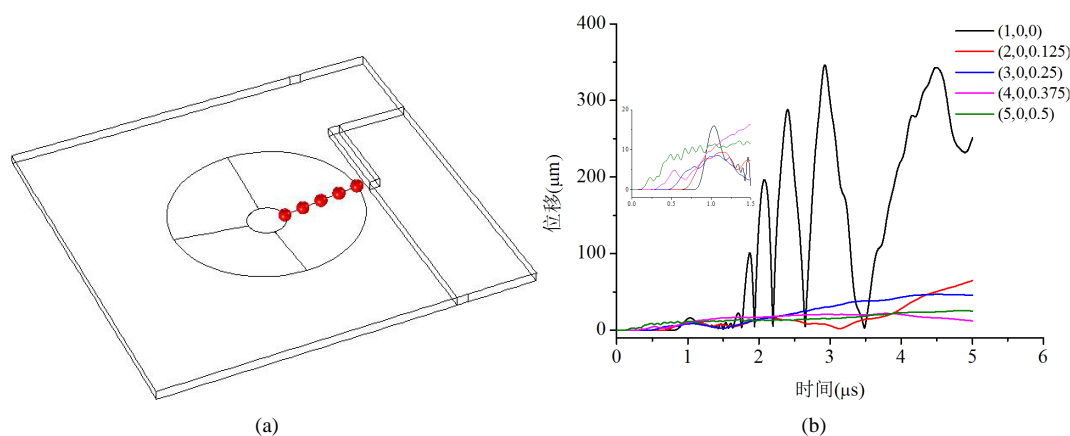


Figure 5. Diagram of three-dimensional point (a) and displacement curve (b)

图 5. 三维截点示意图(a)和时间位移曲线(b)

为了进一步分析 Lamb 波在薄板区域的传播特性, 我们取如图 5(a)所示 5 个三维截点, 坐标分别为(1, 0, 0)、(2, 0, 0.125)、(3, 0, 0.25)、(4, 0, 0.375)、(5, 0, 0.5), 分别绘制每个截点的位移时间曲线, 如图 5(b)所示。在图 5(b)中, 将时间 $0 \mu\text{s} \sim 1.5 \mu\text{s}$ 曲线放大发现, 随着截点远离激光线源, 声波起震时间越晚, 黑色曲线表示半径 $R_0 = 1 \text{ mm}$ 的底部边界点, 绿色线表示半径 $R_1 = 5 \text{ mm}$ 上表面交点。 z 轴坐标表示了薄板的厚度变化。随着厚度逐渐变小, 声波的振幅逐渐增大, 且在厚度为 0 的边界区域声波振幅显著增大。上述结果表明声波能量向厚度较小的位置聚焦。

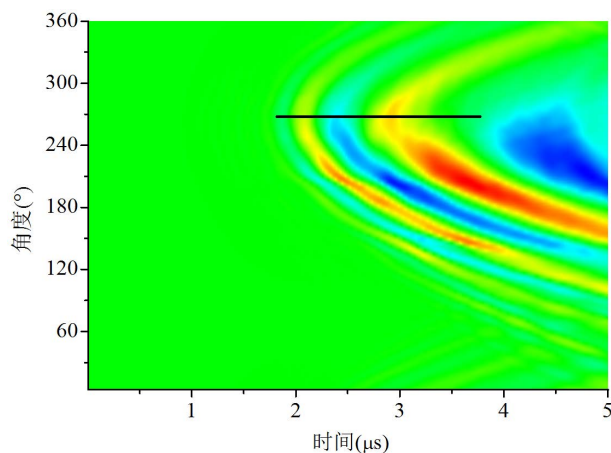


Figure 6. The B-scan of the displacement excited by line source on $R_0 = 1 \text{ mm}$

图 6. 线源激发声波在半径 $R_0 = 1 \text{ mm}$ 底部边界的时间位移 B-scan 图

在半径 $R_0 = 1 \text{ mm}$ 的底部, 以 $(0, -1, 0)$ 点位置为起点, 按照 3° 等分, 逆时针等间隔采样 120 个点, 绘制的时间位移图如图 6 所示。其中, 横坐标表示时间, 纵坐标表示角度, 图中的红蓝表示位移的大小。从图上可以看出, 大约 $t = 2 \mu\text{s}$ 时, 在 270° ($x = 1 \text{ mm}, y = 0 \text{ mm}$) 位置, 如图中黑色直线标识, Lamb 波传播到底部边界。由于激光加载区域与厚度均匀变化区域 $90^\circ \sim 270^\circ$ 平行, 因此沿其底部中心传播的声波能量最强, 其他部分相对较弱。

3.2. 激光线源激发 Lamb 波传播轨迹研究

激光点源沿 z 轴负方向垂直作用在薄板区域, 中心位置为 $(6 \text{ mm}, 2.5 \text{ mm})$, 恰好位于激光线源的正中心位置, 点源半径 $R_G = 0.15 \text{ mm}$, 其他参数与激光线源相同。

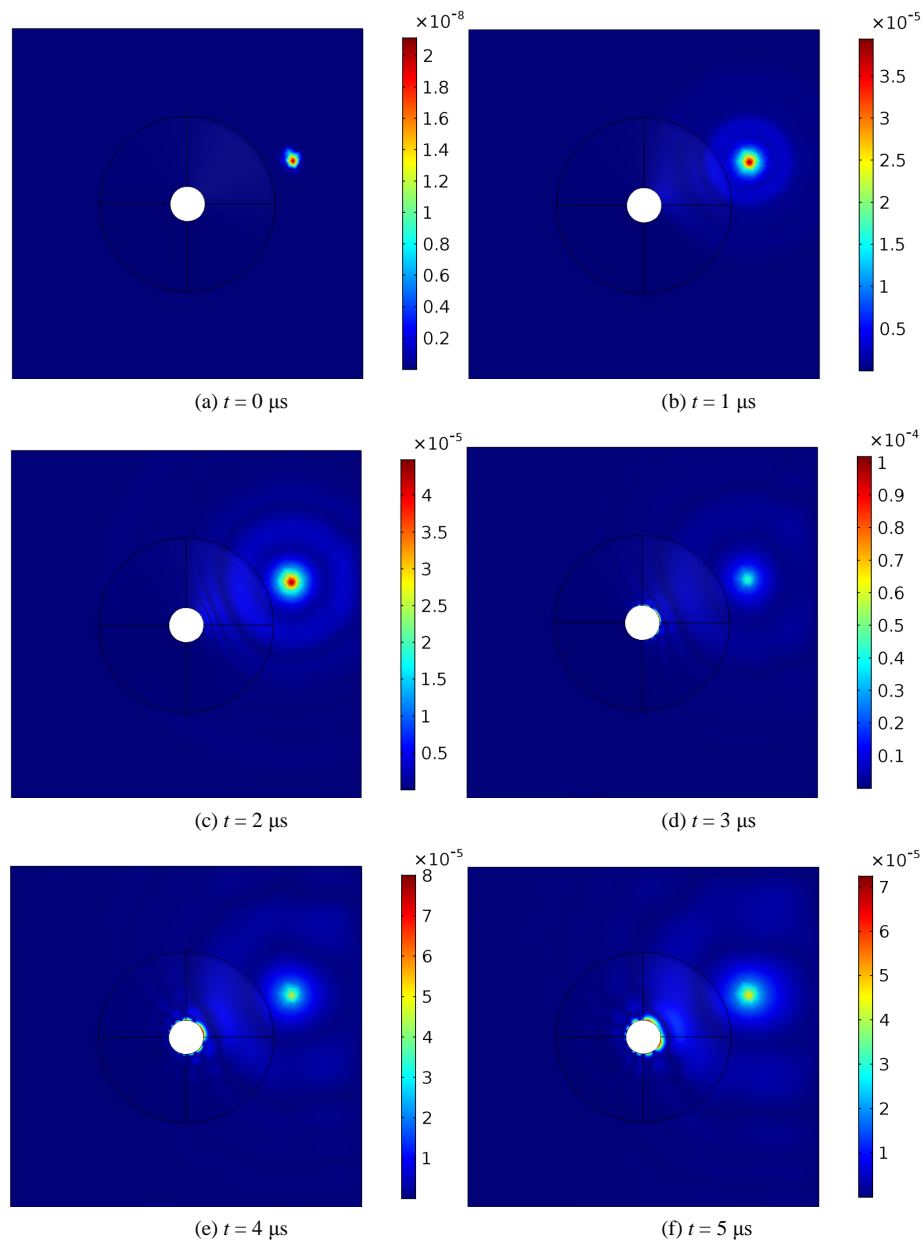


Figure 7. The displacement field of Lamb wave at $t = 0 \mu\text{s}, 1 \mu\text{s}, 2 \mu\text{s}, 3 \mu\text{s}, 4 \mu\text{s}, 5 \mu\text{s}$
图 7. 不同时刻($t = 0 \mu\text{s}, 1 \mu\text{s}, 2 \mu\text{s}, 3 \mu\text{s}, 4 \mu\text{s}, 5 \mu\text{s}$)时, 点源激发 Lamb 波传播的位移场示意图

图 7(a)和图 7(b)发现激光点源激发的 Lamb 波以圆形波振面向外传播, 声波波振面半径 $R_1 = 5 \text{ mm}$ 上表面处相切, 沿半径方向传播进入环形厚度变化区域。图 7(c)和图 7(d)中, 随着厚度逐渐减小, 进入环形厚度变化区域的声波发生频散, 其能量向底部边界汇聚。随着时间的延长, 底部边界的其他位置也出现了很大的位移振动。由于到达底部的声波被局限在底部边界附件, 不反射, 因此声波在边界处转化为沿着环形楔传播的楔波, 具有能量集中、频散、低相速度等特点。

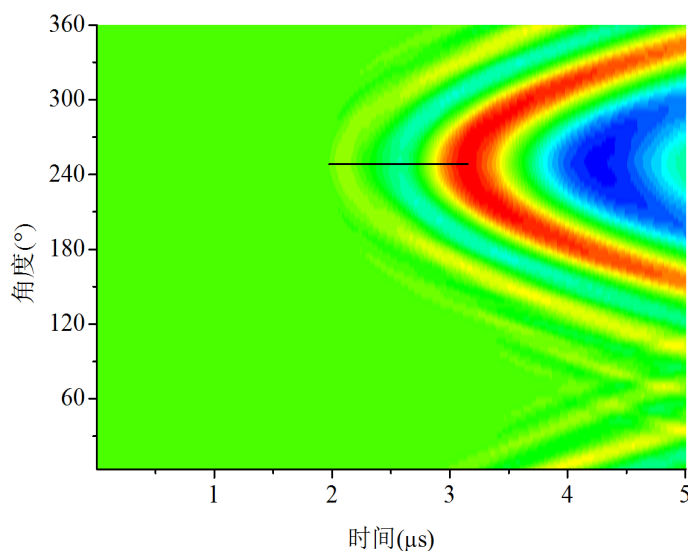


Figure 8. The B-scan of the displacement excited by point source on $R_0 = 1 \text{ mm}$
图 8. 点源激发声波在半径 $R_0 = 1 \text{ mm}$ 底部边界的时间位移 B-scan 图

在半径 $R_0 = 1 \text{ mm}$ 的锥形圆台底部, 以 $(0, -1, 0)$ 点位置为起点, 按照 3° 等分, 逆时针等间隔采样 120 个点, 绘制的时间位移图如图 8 所示。从图上可以看出, 大约 $t = 2 \mu\text{s}$ 时, 在大约 250° ($x = 1 \text{ mm}$, $y = 0.5 \text{ mm}$) 位置, 如图中黑色直线标识, Lamb 波传播到底部中心边缘。由于点源向外扩散传播, 声波振幅逐渐变小, 因此最先到达底部的声波振幅较小, 与线源激发结果不同。随着声波逐渐传播进入环形厚度变化区域, 声波能量持续在边界聚集, 振幅逐渐增强。由于声波波振面与半径 $R = 5 \text{ mm}$ 圆相切, 因此传播到底部边界的波振面以传播半径方向为轴对称分布, 边界处转化的楔波同时沿圆的正反两个方向传播, 其振幅、频率等参数完全相同。

4. 总结

本文对环形厚度线性变化薄板上 Lamb 波的传播特性及轨迹进行了研究。首先, 基于在金属激发超声的热弹机制, 分别建立激光线源和点源在环形厚度线性变化薄板的激发 Lamb 波的三维有限元模型。激光线源激发的 Lamb 波波振面平行于线源, 沿垂直于线源方向向外传播。声波传播进入到环形厚度变化区域, 原本沿 x 轴负方向传播的 Lamb 波发生了偏折, 声波开始向着厚度减小的方向传播, 并在底部边界聚集, 转化为沿着圆形楔形边界传播的楔波。激光点源激发的 Lamb 波沿半径方向传播进入环形厚度线性变化区域, 声波发生频散, 声波能量持续在底边边界聚集, 振幅逐渐增强, 且以相同振幅、频率沿圆的两个方向传播。本论文研究成果可用于环形厚度线性变化薄板结构的检测与评估。

基金项目

国家自然科学基金项目“基于激光超声的楔体缺陷检测与评估方法研究”(11704096)。

参考文献

- [1] Rose, J.L., 何存富, 吴斌, 王秀彦. 固体中的超声波[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] Silva, M., Gouyon, R. and Lepoutre, F. (2003) Hidden Corrosion Detection in Aircraft Aluminum Structures Using Laser Ultrasonics and Wavelet Transform Signal Analysis. *Ultrasonics*, **41**, 301-305. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(02\)00455-9](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(02)00455-9)
- [3] 张慧, 刘玉振, 于露, 曾周末. 复合板缺陷的空耦 Lamb 波扫描仿真与成像研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1): 150-157.
- [4] 丁红星, 沈中华, 李加, 祝雪丰, 倪晓武. 复合兰姆波声子晶体中超宽部分禁带[J]. 物理学报, 2012(19): 394-401.
- [5] Krylov, V. and Tilman, F. (2004) Acoustic “Black Holes” for Flexural Waves as Effective Vibration Dampers. *Journal of Sound and Vibration*, **274**, 605-619. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.05.010>
- [6] Yan, S.L., Lomonosov, A.M., Han, B., Zhang, H.C., Shen, Z.H. and Ni, X.W. (2015) Investigation of Wedge Waves Using Digital Shearing Speckle Interferometry. *International Journal of Thermophysics*, **36**, 1074-1080. <https://doi.org/10.1007/s10765-014-1737-7>
- [7] 李睿奇, 祝雪丰, 梁彬, 李勇, 程建春. 声黑洞结构[C]//中国声学学会. 中国声学学会第九届青年学术会议论文集. 2011: 55-56.
- [8] 季宏丽, 黄薇, 裘进浩, 成利. 声学黑洞结构应用中的力学问题[J]. 力学进展, 2017, 47(1):337-388.
- [9] 李海勤, 孔宪仁, 刘源. 接触非线性对声黑洞梁减振效果的影响[J]. 力学学报, 2019, 51(4): 1189-1201.
- [10] Jia, J., Shen, Z., Han, Q. and Jing, X.P. (2017) Design of Wedge Structure with Non-Dispersive Wedge Wave Propagation. *Applied Optics*, **56**, 8564. <https://doi.org/10.1364/AO.56.008564>