

DOI:10.16136/j.joel.2022.04.0542

横观各向同性复合材料激光超声检测的数值模拟

郭珊珊, 陈友兴, 吴其洲*, 赵霞, 连亚容

(中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 为了分析横观各向同性复合材料的内部材料属性, 结合激光超声理论, 使用仿真软件 Comsol Multiphysics 建立了复合材料在激光热弹下激发出超声波的等效模型, 通过设置完美匹配层、低反射边界等方法消除了边界回波。采用有限元法模拟了横观各向同性材料中激发超声波的物理过程, 对缺陷回波信号进行了时域分析。结果表明: 平板厚度的增加会使超声波逐渐转变为高阶模态, 且随着平板厚度的增加, 模态的截止频率会逐渐降低, 同时在横观各向同性复合材料中传播的超声波将逐渐失去 Lamb 波的特征, 转而表现出表面波特征, 将 Lamb 波向表面波转化激发出 Rayleigh 波。本次模拟为进一步研究复杂介质中超声波的产生和缺陷定位奠定了基础。

关键词: 激光超声检测; 横观各向同性材料; 缺陷检测; 数值模拟

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)04-0443-06

Numerical simulation of laser ultrasonic testing transversely isotropic composites

GUO Shanshan, CHEN Youxing, WU Qizhou*, ZHAO Xia, LIAN Yarong

(School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China)

Abstract: In order to analyze the internal material properties of the isotropic composite material, combined with the theory of laser ultrasound, the simulation software Comsol Multiphysics is used to establish an equivalent model of the transversely isotropic materials excited by the laser thermoelastic ultrasonic wave, by setting a perfect matching layer, low reflection boundary, etc. The method eliminates the boundary echo. The finite element method is used to simulate the physical process of ultrasonic excitation in transversely isotropic materials, and the time-domain analysis of the defect echo signal was carried out. The results show that the increase in the thickness of the plate will gradually transform the ultrasonic wave into a higher-order mode, and as the thickness of the plate increases, the cut-off frequency of the mode will gradually decrease, and the ultrasonic wave propagating in the isotropic composite material will gradually lose the Lamb wave. In turn, it shows the characteristics of surface waves, transforming Lamb waves into surface waves and excites Rayleigh waves. This simulation lays a foundation for further research on the generation of ultrasonic waves and defect location in complex media.

Key words: laser ultrasonic testing; transversely isotropic material; defect detection; numerical simulation

1 引 言

因为纤维复合材料具有质量轻、比强度高、比模量大等特点, 进而在航空航天领域应用颇为广泛, 但由于纤维复合材料在使用过程中经常会出

现分层、脱粘、夹杂等缺陷, 严重影响构件的工作安全, 因此及时的对其进行高可靠性和高质量的检测是很有必要的^[1]。

目前激光超声技术具有非接触和灵敏度高等优点, 已逐步成为复合材料结构无损检测的主要

* E-mail: wu_qz@nuc.edu.cn

收稿日期: 2021-08-02 修订日期: 2021-09-10

基金项目: 山西省研究生创新项目(2020BY097)和中北大学研究生科技立项项目(20201730)资助项目

技术手段^[2,3],研究复合材料中激光激发超声波的传播特性,一方面可以有效的推进激光超声检测技术在工业层面上的应用,另一方面也可以很好的对复合材料的内部特性进行分析研究。目前在激光超声的理论研究中有很多方法,包括双积分变换法^[4]、有限元法^[5]等多种解析法和数值算法。其中,有限元法能够分析各向异性材料结构中波的传播问题,精确地得到全场数值解,进而应用广泛。有很多学者都对复合材料进行了研究,孙宏祥等^[6,7]分别针对复合材料的粘弹性对超声波的频散及衰减特性做了研究。倪晓武等^[8]采用优化的有限元模型研究了复合材料中反射与透射瑞利波和缺陷深度的关系。目前复合材料中激光激发超声波的传播机理较为复杂,对其进行有效的性能评估和无损检测具有十分重要的意义。

本文在前人的基础上进行研究,针对横观各向同性复合材料,建立了在激光热弹下激发出超声波的数值模型,通过求解得出了超声波的传播规律和复合材料内部缺陷回波的传播情况,为后续对复杂介质的研究奠定了基础。

2 激光超声的激发原理

脉冲激光照射在工作表面时,在激光辐照区域形成瞬态温度梯度场,控制方程表示为^[9]:

$$K \nabla^2 T(x, y, t) = \rho \dot{T}(x, y, t) + T_0 \beta \nabla \cdot \dot{U}(x, y, t), \quad (1)$$

式中, K 是热传导系数, $T(x, y, t)$ 是内部 t 时刻的温度分布, T_0 、 ρ 、 κ 和 β 分别是检测的环境温度、检测介质密度、比热容和热膨胀系数。

激光源采用服从高斯分布的线源激光,材料上表面激光辐照区域满足的边界条件为^[10]:

$$-k_y \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \Big|_{y=h} = I_0 A(t) f(x) g(t), \quad (2)$$

式中, k_y 表示 y 方向的热扩散系数, h 为样品厚度, I_0 为入射脉冲激光的峰值功率密度。

假设激光能量被工件完全吸收,则 $A(t) = 1$, $f(x)$ 是脉冲激光的空间分布, $g(t)$ 是脉冲激光的时间分布,且表达式为:

$$f(x) = \exp(-x^2/R_0^2), \quad (3)$$

$$g(t) = (t/t_0) \cdot \exp(-t/t_0), \quad (4)$$

式中, R_0 为激光光斑半径, x 为测量点距离光斑中心的位置, t_0 为脉冲激光上升时间。

激光辐照固体平板模型如图 1 所示,在均匀的固体平板中,设沿 x 、 y 、 z 方向的位移量分别为 u_x 、 u_y 及 u_z 。

对于横观各向同性的固体平板,可将 3 维波动方程简化为 2 维形式,设脉冲线源激光沿 z 轴辐照平

板的表面,为了便于研究,分析时假设脉冲激光线源沿着图 1 中的 z 轴方向照射到固体平板的表面,则此时激光在 z 轴方向的位移量为零,激光激发出的超声波沿着固体平板的 xoy 平面进行传播,超声波沿平面传播情况如图 2 所示。

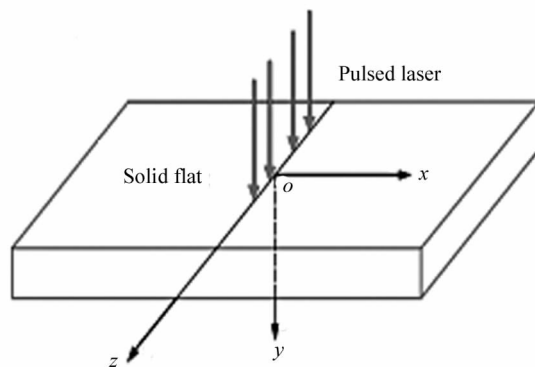


图 1 激光辐照固体平板

Fig. 1 Laser-irradiated solid flat plates

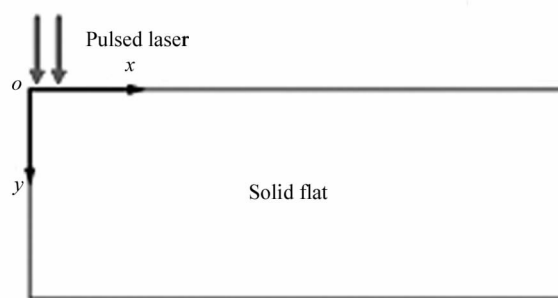


图 2 超声波沿平面传播情况

Fig. 2 Ultrasonic propagation along the plane

在横观各向同性固体平板中,平面 xoy 为各向同性面。时域中 2 维动力学波动方程表示为^[11]:

$$C_{11} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + C_{12} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + C_{66} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right) = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (5)$$

$$C_{22} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + C_{12} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + C_{66} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \quad (6)$$

式中, C_{ij} 表示材料的弹性劲度参数。

2 维波动方程有限元表达式为^[12]:

$$e_a \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - \nabla \cdot (C \nabla U) = 0, \quad (7)$$

式中, U 表示位移变量矩阵 $U = [u_x, u_y, u_z]^T$, ∇ 表示向量微分算符,系数 C 为 4×4 矩阵,表示为: $C =$

$$\begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 & C_{12} \\ 0 & C_{66} & C_{66} & 0 \\ 0 & C_{66} & C_{66} & 0 \\ C_{12} & 0 & 0 & C_{22} \end{bmatrix}, e_a \text{ 为 } 2 \times 2 \text{ 矩阵,表示为: } e_a =$$

$$= \begin{bmatrix} \rho & 0 \\ 0 & \rho \end{bmatrix}.$$

3 有限元激光超声传播模拟

本实验中设定的模型长度为 30 mm, 宽度为 20 mm, 激光源为脉冲激光等效力源, 激光源的中心位置是 x_0 , 材料为碳纤维/环氧树脂, 主要的材料参数如表 1 所示。图 3 为时域中激光激发超声波建立的二维数值模型图。

表 1 碳纤维/环氧树脂的材料参数 (GPa)
Tab. 1 Material parameters for the carbon fiber/epoxy resin (GPa)

$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	C_{11}	C_{12}	C_{22}	C_{66}
1.82	12	6	140	3.3

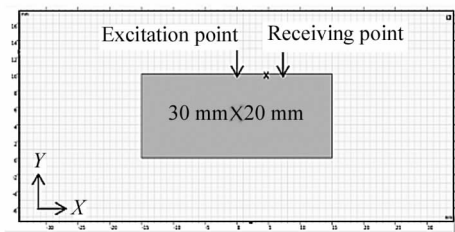


图 3 建立的 2 维模型
Fig. 3 The two-dimensional mode

为了使超声波的能量能够有效在 2 个连续节点间进行传递, 有限元模型的网格大小 L_e 与时间步长 Δt 可根据下列经验公式进行选择^[13]:

$$L_e = \frac{1}{10} \frac{c}{f_{\max}}, \quad (8)$$

$$\Delta t \leq \frac{L_e}{c \sqrt{3}}, \quad (9)$$

式中, c 为声表面波波速, $f_{\max}$ 为声表面波最高频率。

$f_{\max}$ 表示为^[14]:

$$f_{\max} = \frac{2 \sqrt{2c}}{\pi R_0}. \quad (10)$$

在对模型进行热分析过程中, 设定材料的初始温度为 293.15 K, 模型的边界条件按绝热处理。网格大小、时间步长分别选取 50 μm 和 10 ns。

4 数值模拟结果分析

4.1 激光超声的物理场分析

激光超声的激发过程主要体现在温度场的变化和位移场的传递。为了观察激光辐照附近区域温度的变化情况, 沿 x 轴距离激光辐照中心不同横向节

点绘制温度变化曲线, 可以更直观地观察到温度的变化。温度变化图如图 4 所示。

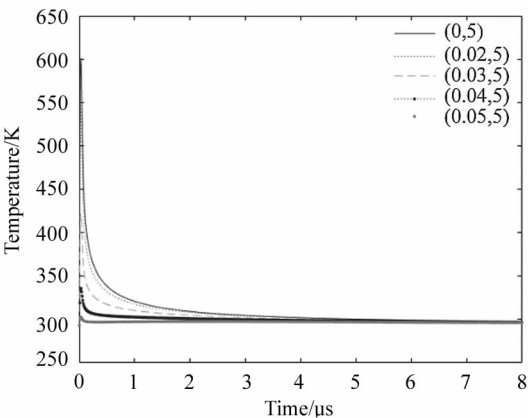


图 4 温度变化图

Fig. 4 Temperature variation diagram

由图 4 可以发现瞬态温度场集中于一个极其小的区域, 热传导促使热能传递到其它局部, 在瞬态温升处由复合材料表面的热膨胀产生瞬态应力场。

基于热膨胀原理, 膨胀周围结构间相互约束从而激发出瞬态热应力, 随即产生应力场。图 5 所示为 9.88 μs 时刻的应力场。

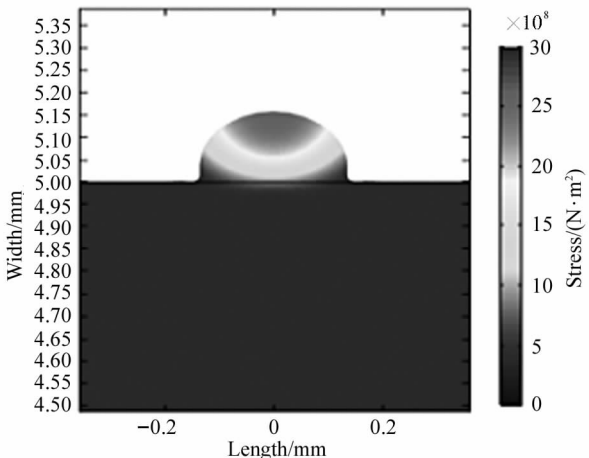


图 5 9.88 μs 时刻的应力场

Fig. 5 Stress field at 9.88 μs time

脉冲激光在复合材料表面产生的热应力是超声波的激发力源, 其产生的热应力将以瞬态脉冲的形式在复合材料中向内部传播^[15]。图 6 所示为

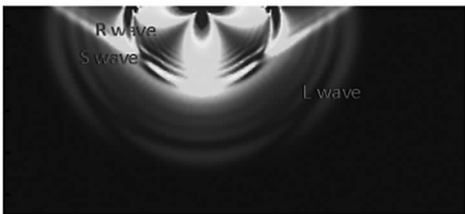


图 6 1.38 μs 时刻的超声云图

Fig. 6 Ultrasonic cloud map at 1.38 μs

1. $38\ \mu\text{s}$ 时刻的超声云图。

4.2 内部缺陷回波信号分析

基于有限元法研究不同缺陷位置的回波信号,通过分析特征回波信号到达的时间点以及幅值变化,研究缺陷的存在对特征回波信号产生的影响。

为了研究内部缺陷对特征回波的影响,模型大小保持不变,设置长为 $2\ \text{mm}$,宽为 $0.5\ \text{mm}$ 的内部裂纹缺陷,位于距离上表面 $1\ \text{mm}$ 位置处,内部矩形缺陷仿真模型如图 7 所示。

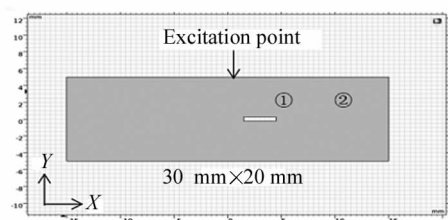


图 7 内部矩形缺陷仿真模型

Fig. 7 The Simulation model of Internal rectangular defect simulation model

以脉冲激光入射点为原点,接收点为距离入射中心 $7\ \text{mm}$ 处,分别改变缺陷位置至图 7 中标注处,无缺陷、缺陷位置①和缺陷位置②等计算结果如图 8、9 和 10 所示。

从图 8、图 9 和图 10 中可以分析出缺陷位置对始波(纵波、横波以及表面波)没有影响。当超声波传播至缺陷表面时,会阻碍波形的传播路线,使传播途径变短,底面反射回波到达时间会提前为 $2.28\ \mu\text{s}$ 。当保持目标检测点位置不变时,底面反射回波的信号到达时间与缺陷位置距入射激光点间的距离成正比,距离越远,时间越长,但其对底面反射回波信号的幅值影响较少。在实际的检测应用过程中,可以利用这个特点来粗略的判断缺陷的在检测构件中的位置。

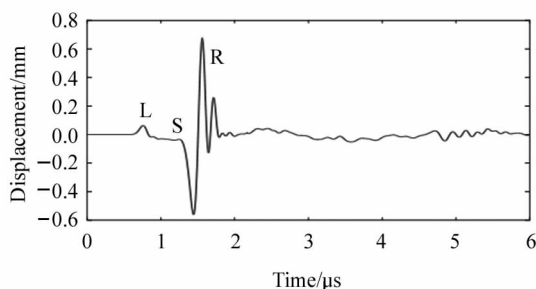


图 8 无缺陷

Fig. 8 The echo signal without defect

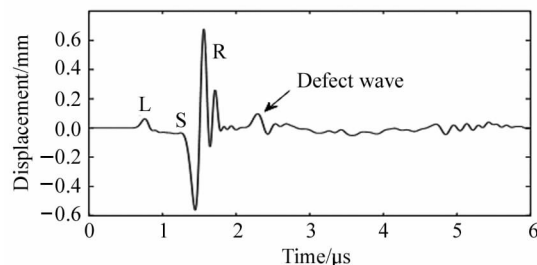


图 9 缺陷位置①位于(5,2)

Fig. 9 The echo signal in defect ① located at (5,2)

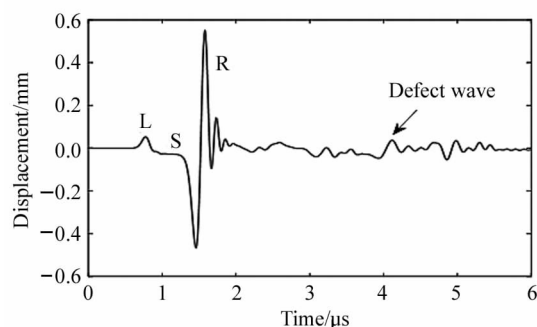


图 10 缺陷位置②位于(10,2)

Fig. 10 The echo signal in defect ② located at (10,2)

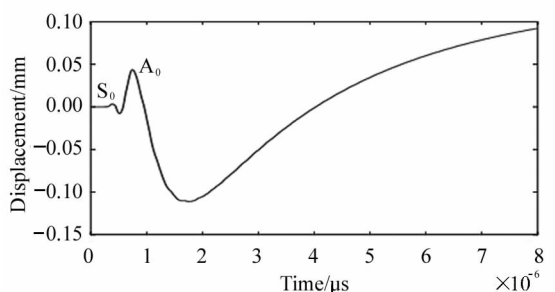
4.3 工件厚度对回波信号的影响

为了研究在不同工件厚度中激发出的超声波的传播规律,分别设置被测工件的厚度为 $0.2\ \text{mm}$ 和 $1\ \text{mm}$ 和 $20\ \text{mm}$,分析特征回波信号到达的时间点以及幅值变化。改变工件厚度,观察材料上表面距离激光辐照中心点处不同节点处的垂直方向位移变化。浏览资料可知 Lamb 波是由多种模态组成的,其内部的多种模态会根据不同的截止频率而表现出不同的运动速度,从而进行传播,且随着接收点和激光激发源之间距离的改变,Lamb 波也会进行相应的分解等变化。另外检测工件的厚度也会对 Lamb 波的传播产生影响,随着平板厚度的增加,Lamb 波不同模态的截止频率会逐渐降低,同时在各向同性复合材料中传播的超声波将逐渐失去 Lamb 波的特征,转而表现出表面波特征,将 Lamb 波向表面波转化激发出 Rayleigh 波不同工件厚度得到的回波信号结果分别如图 11、图 12 与图 13 所示。

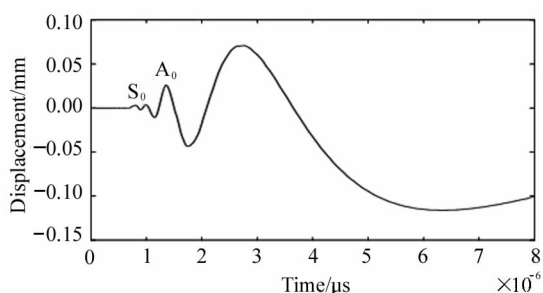
对图 11 进行分析可知,当工件厚度为 $0.2\ \text{mm}$ 时,瞬态 Lamb 波由对称模 S_0 模和反对称模 A_0 模组成。对称模 S_0 模先到达观察点,随后是反对称模 A_0 模。

图 12 是当工件厚度增加到 $1\ \text{mm}$ 时的回波信号。位移波形分别由掠面纵波(sP)、表面横波(sS)和具有双极波形的 Rayleigh 波(R)组成。R 的速度

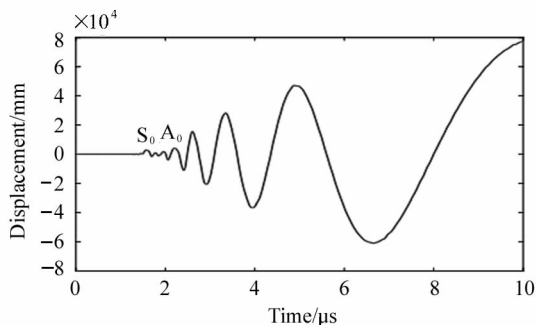
和 sS 接近,比 sP 要小得多。



(a) 1.5 mm from the irradiation point



(b) 4 mm from the irradiation point

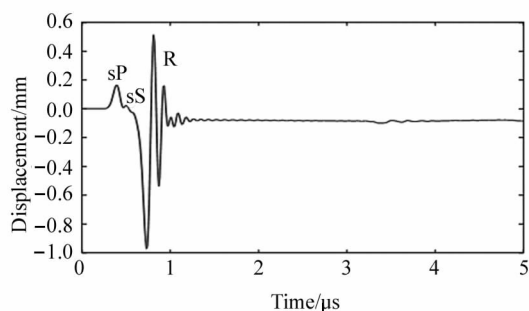


(c) 8 mm from the irradiation point

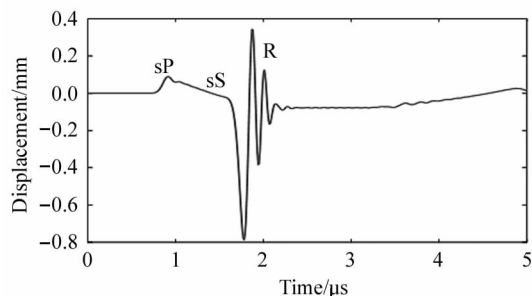
图 11 工件厚度为 0.2 mm 的回波信号

Fig. 11 Return signal with the thickness of 0.2 mm

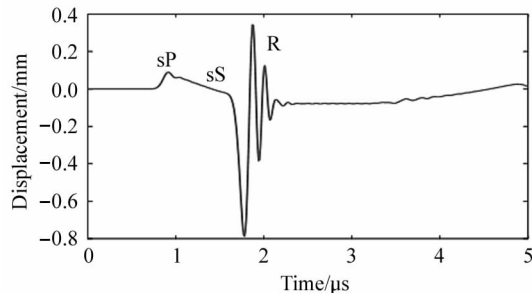
图 13 显示工件厚度为 20 mm 时的回波信号,接收距离分别为 5 mm 与 8 mm。此时,激光依次激发产生纵波 L,横波 S 及瑞利波 R。其中瑞利波的振幅最大,可以得出此时的垂直位移能量主要集中在瑞利波。



(a) 2 mm from the irradiation point



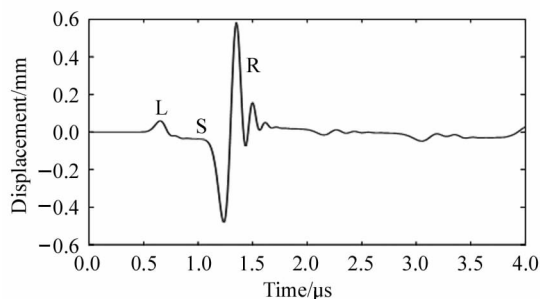
(b) 6 mm from the irradiation point



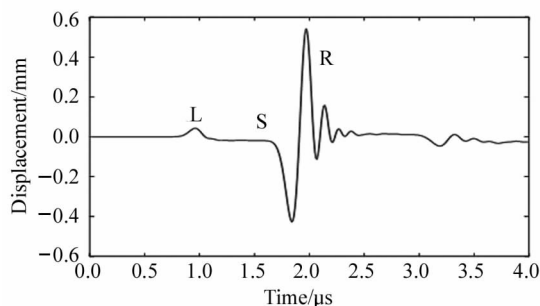
(c) 10 mm from the irradiation point

图 12 工件厚度为 1 mm 的回波信号

Fig. 12 Return signal with the thickness of 1 mm



(a) 5 mm from the irradiation point



(b) 8 mm from the irradiation point

图 13 工件厚度为 20 mm 的回波信号

Fig. 13 Return signal with the thickness of 20 mm

5 结 论

本文利用激光超声检测中的有限元法对横观各向同性材料中脉冲激光激发产生超声波的传播过程进行了模拟。得出结论:检测工件平板厚度的增加会使超声波逐渐转变为高阶模态,且随着平板厚度的增加,模态的截止频率会逐渐降低,同时在横向各

向同性复合材料中传播的超声波将逐渐失去 Lamb 波的特征,转而表现出表面波特征,将 Lamb 波向表面波转化激发出 Rayleigh 波。内部缺陷的存在会阻碍波形的传播,反射回波到达时间会提前,其结果为进一步研究复杂介质中超声波的产生和缺陷定位奠定了基础。

参考文献:

- [1] ZHANG J H. Application of Advanced Composites in Aircraft Structure[J]. Chemical Industry Design Communications, 2019, 45(9): 44-45.
张君红. 先进复合材料在飞机结构中的应用[J]. 化工设计通讯, 2019, 45(9): 44-45.
- [2] ZHU J F, GUO W J, LIU J B, et al. Application of wavelet transform in ultrasonic detection of multilayer composites[J]. Sichuan Military Engineering Daily, 2014, (7): 67-70.
朱建峰, 郭伟剑, 刘俊邦, 等. 小波变换在多层复合材料的超声波检测中的应用[J]. 四川兵工学报, 2014, (7): 67-70.
- [3] HU J P, GAO L M, YANG H M. Application of laser ultrasound technology in nondestructive detection of aviation composites[J]. Aviation manufacturing technology, 2018, 61(19): 50-57.
胡建萍, 高丽敏, 杨海敏. 激光超声技术在航空复合材料无损检测中的应用[J]. 航空制造技术, 2018, 61(19): 50-57.
- [4] MCDONALD F A. On the precursor in laser-generated ultrasonic waveforms in metals[J]. Applied Physics Letters, 1990, 56(3): 230-232.
- [5] XU B Q, SHEN Z, NI X, et al. Numerical simulation of laser-generated ultrasound by the finite element method[J]. Journal of Applied Physics, 2004, 95(4): 2116-2122.
- [6] SUN H X, XU B Q. Numerical analysis of the finite element time and frequency domain of laser excitation of Lamb waves[J]. China Laser, 2010, 37(2): 537-542.
孙宏祥, 许伯强. 激光激发 Lamb 波的有限元时域和频域数值分析[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 537-542.
- [7] GUAN Y J, SUN H X, YUAN S Q, et al. Propagation properties of laser-excited Rayleigh-like waves in viscoelastic adhesive coating-substrate structures[J]. The Journal of Acoustics, 2016, 41(5): 575-584.
管义钧, 孙宏祥, 袁寿其等. 粘弹性胶粘涂层-基底结构中激光激发类瑞利波的传播特性[J]. 声学学报, 2016, 41(5): 575-584.
- [8] SHI Y F, SHEN Z H, NI X W, et al. Finite element modeling of acoustic field induced by laser line source near surface defect[J]. Optics Express, 2007, 15(9): 5512-5520.
- [9] SHENG J Y. The acoustic surface wave is used for finite element simulation technology for surface processing damage detection[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
盛金月. 声表面波用于表面加工损伤检测有限元仿真技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [10] CAO D D. Finite element simulation of laser ultrasonic conduction by thermal elastic excitation[D]. Nanjing: Nanjing University of Aerospace Science and Astronautics, 2010.
曹豆豆. 激光热弹激发超声导波的有限元模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [11] SUN H X. Laser ultrasound finite element simulation of transverse isotropic composites[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009.
孙宏祥. 横观各向同性复合材料的激光超声有限元模拟[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
- [12] SUN H X, XU B Q, XU C G, et al. Finite element numerical simulation of laser ultrasound spectroscopy in transverse isotropic materials[J]. Photonics Journal, 2009, 38(5): 1041-1046.
孙宏祥, 许伯强, 徐晨光等. 横观各向同性材料中激光超声谱有限元数值模拟[J]. 光子学报, 2009, 38(5): 1041-1046.
- [13] SCHUBERT F, KOEHLER B, PEIFFER A. Time domain modeling of axisymmetric wave propagation in isotropic elastic media with CEFIT-cylindrical elastodynamic finite integration technique[J]. Journal of Computational Acoustics, 2001, 9(3): 1127-1136.
- [14] YOUNGHOON S, SRIDHAR K. Mass spring lattice modeling of the scanning laser source technique[J]. Ultrasonics, 2002, 39(8): 543-551.
- [15] YAN Y X, CHEN Y X, JIA P F, et al. Numerical simulation of laser excitation ultrasound in plate materials[J]. Applied Laser, 2020, 40(1): 169-175.
闫怡旭, 陈友兴, 贾鹏飞, 等. 板状材料中激光激发超声波的数值模拟[J]. 应用激光, 2020, 40(1): 169-175.

作者简介:

吴其洲 (1978—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 多年来主要从事超声检测、在线实时监测技术、阵列信号处理与重建。