

表面裂纹的激光超声可视化兰姆波检测研究

李 阳^{1,2}, 杨连杰¹, 孙俊杰^{1,2}, 路培鑫¹, 邹 云^{1,2}

(1. 郑州大学机械与动力工程学院, 河南郑州 450001; 2. 抗疲劳制造技术河南省工程实验室, 河南郑州 450001)

摘要: 兰姆波在板材的缺陷检测中具有重要的地位, 但兰姆波在裂纹检测过程的可视化实验研究较少。通过激光超声可视化技术, 观察了激光激励出的宽频兰姆波在 0.4 mm 深、0.2 mm 宽的裂纹上的反射和透射现象; 并利用带通滤波技术, 研究了不同中心频率的兰姆波在裂纹上的散射特性。结果发现: 兰姆波在裂纹上发生了模态转换现象, 出现了传播速度较快的兰姆波模态; 并随着兰姆波频率的增加, 反射兰姆波的能量增强。该研究为板中裂纹的兰姆波检测提供了实验参考。

关键词: 检测; 激光超声; 可视化; 兰姆波; 散射

中图分类号: TB551

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2020)-02-0157-04

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.02.006

Surface cracks testing by laser-ultrasonic visualization inspection of Lamb waves

LI Yang^{1,2}, YANG Lianjie¹, SUN Junjie^{1,2}, LU Peixin¹, ZOU Yun^{1,2}

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China;

2. Henan Province Engineering Laboratory for Anti-Fatigue Manufacturing Technology, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract: Lamb wave plays a significant role in plate defect testing, but the visualized research on Lamb wave scattering at cracks is still not enough. In this paper, the laser-ultrasonic visualization inspection method is used to inspect the reflection and transmission of the laser excited broadband Lamb wave at a crack of 0.4 mm deep and 0.2 mm wide. In addition, the scattering characteristics of Lamb wave with different center frequencies at cracks are studied by band-pass filtering technique. It is found that the mode transformation of Lamb wave occurs at cracks and a mode with faster velocity is found. As the frequency increases, the reflected Lamb wave is getting more energy. This research offers an experimental reference for the crack detection of Lamb wave.

Key words: testing; laser ultrasonic; visualization; Lamb waves; scattering

0 引 言

兰姆波是导波的一种形式, 在工程应用上也称之为板波, 因其有传播距离远, 可检测整个壁厚上缺陷的优点, 所以应用较为广泛^[1-3]。兰姆波在板中缺陷检测方面已有诸多研究, 如: Alleyne 等^[4]通过模拟和实验研究了兰姆波与裂纹的散射作用, 发现: 兰姆波在裂纹上的反射率和透射率与兰姆波的波长和裂纹深度的比值有关。但上述的结论是基于传统的压电探头得到的结果, 存在一定的测量误差, 另外, 上述结果未能直观地显示兰姆波在裂纹上的散射现象。Benmeddour 等^[5-6]通过模拟和实验, 研究了兰姆波在板上对称和非对称几何体上的散

射特性, 发现 A0 模态的兰姆波在非对称几何体上发生模态转换形成了 S0 模态, 同样 S0 模态在非对称几何体上也形成 A0 模态。但 Benmeddour 的实验和有限元结果未能直观地给出兰姆波的模态转换现象。吴斌等^[7]通过数值仿真研究了兰姆波在搭接板上的传播规律, 发现: 搭接长度对 S0 和 A0 模态的反射率和透射率有周期性的影响, 但未能通过实验反映出兰姆波在搭接板上的传播特性。Kazys 等^[8]通过仿真和实验研究了兰姆波在 T 型接头中缺陷上的散射现象, 由于该实验通过水浸聚焦探头完成, 其分辨率和超声波频率受到一定的限制。

激光超声技术的应用使得超声波传播过程的可视化成为了现实, 如 Yashiro 等^[9]利用激光超声实现了超声波传播的可视化, 并对不同的缺陷进行了检测研究。Urabe 等^[10]采用脉冲激光激励出周向导波, 利用空气耦合探头接收, 使得铝管上的缺陷检测实现了可视化。朱红玲等^[11]利用罚函数图像处理方法, 改善了激光超声可视化的图像质量, 为缺陷的图像识别提供了数据处理手段。李巧霞等^[12]利用

收稿日期: 2018-11-02; 修回日期: 2018-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(51705470)、河南省重点研发与推广专项(18A460032)、河南省高等学校重点科研项目(18A460032)

作者简介: 李阳(1988-), 男, 河南焦作人, 博士, 副教授, 研究方向为激光超声、超声导波、材料无损评价。

通讯作者: 李阳, E-mail: yangli@zzu.edu.cn

激光超声实现了表面缺陷深度的 B 扫描检测, 研究了表面波在缺陷处的反射和透射波的特性, 为研究表面波在缺陷处的散射奠定了基础。

由于激光超声在板中激励出的兰姆波具有宽频带、多模态的特性, 所以现阶段很少有兰姆波在裂纹上散射特性方面的报导。本文利用激光超声可视化技术, 研究兰姆波在裂纹上的散射特性, 并观察到兰姆波在裂纹上的模态转化现象, 为兰姆波在裂纹上散射的可视化研究奠定了一定的实验基础。

1 试样及实验装置

本文所用的试样为 6061 铝合金板, 试样规格为 100 mm×100 mm×2 mm, 在试样长度为 40 mm 处, 利用线切割预制深为 0.4 mm、宽为 0.2 mm 的裂纹。

激光超声设备采用西安金波检测设备公司研制的 LUVI-LL2 系统, 如图 1 所示, 其中, 脉冲激光器的最大脉冲能量为 2 mJ, 脉冲时间宽度为 2 ns。通过控制电动小镜的偏转, 进行脉冲激光的扫查。激光干涉仪接收超声波信号的离面位移, 干涉仪的接收带宽为 0.5~24 MHz。

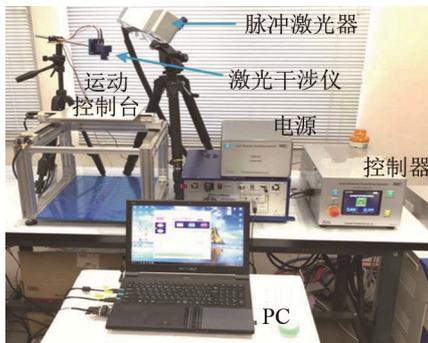


图 1 实验装置
Fig.1 Experimental equipment

扫查区域覆盖预制的人工裂纹和接收激光点, 其检测过程如图 2 所示。扫查区域为 40 mm×40 mm, 扫查间隔为 0.18 mm。激光超声检测设备通过激励和接收超声波信号, 根据声波可逆的原理, 实现超声波点源激励并传播的动态图像。

2 结果及讨论

通过激光超声设备的扫查, 可得到兰姆波在板中随时间传播的动态图像, 这里选取第 8.8 μs 时刻的图像, 如图 3 所示。

从图 3 中可以看出, 激光激励出的兰姆波花纹分布情况无规律, 说明兰姆波存在多种模态(如果是

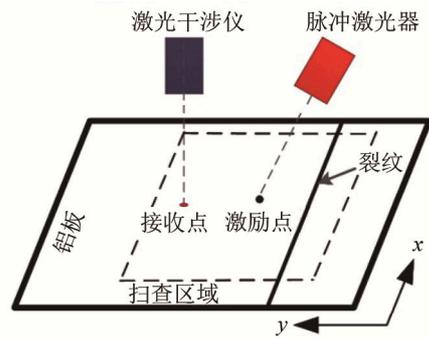


图 2 检测过程示意图
Fig.2 Schematic diagram of testing process

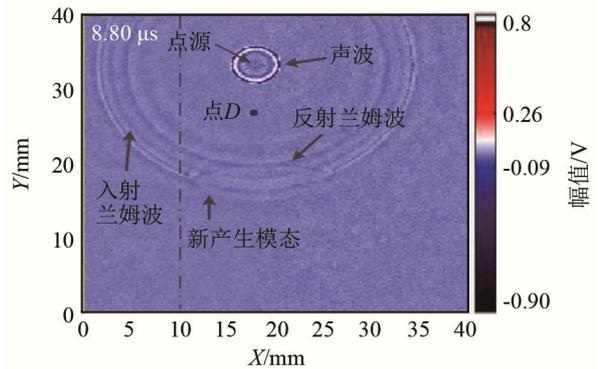


图 3 第 8.8 μs 时刻兰姆波在板中随时间传播的图像
Fig.3 Image of Lamb wave propagating in plate at the time of 8.8 μs

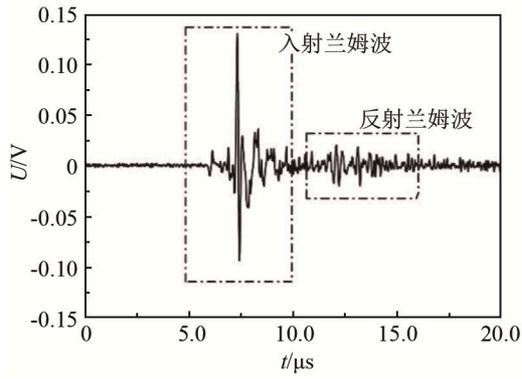
单一模态, 兰姆波将会呈现有规律间隔的花纹)。这个现象也直观地说明了激光超声的多模态特点; 而且, 兰姆波在裂纹处发生了反射和透射现象, 同时出现了模态转换现象, 产生了较原模态传播速度快的新模态(新模态的传播速度快, 所以新模态的波前在原波形前方)。由于激光激励过程中在空气中会产生能量较强的声波信号, 直接被激光干涉仪接收到, 该声波信号会影响兰姆波信号的信噪比。

在图 3 上选取位于声源和裂纹之间的一点 D, 取其 A 扫数据, 并做傅里叶变换, 结果如图 4 所示。

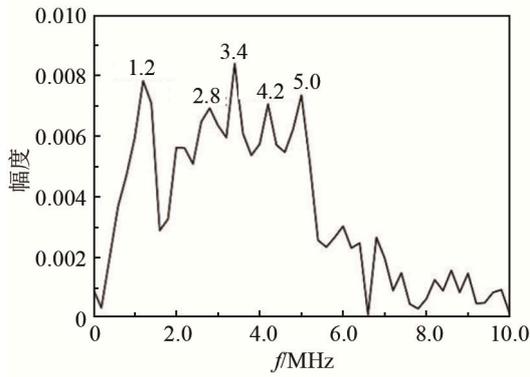
从图 4(a)中可以看出: 激励出的兰姆波(入射波)存在传播速度不同的多个模态, 并随着传播距离的增加, 波包逐渐地分离开来。将 D 点入射波的 A 扫数据进行傅里叶变换, 得到兰姆波的频谱图, 如图 4(b)所示, 可以发现: 激励出的兰姆波能量主要集中在 1~6 MHz 之间, 并且在 1.2、2.8、3.4、4.2 和 5.0 MHz 处的能量较大, 说明上述 5 个频率分量的兰姆波能量较强。

为了更清楚地看出兰姆波在裂纹上的散射特性, 在 X=10 mm 处(图 3 中的虚线)取 Y 方向上的 B 扫描图像, 结果如图 5(a)所示。

将带通滤波的通带设置为 2 MHz, 中心频率分别为能量幅值较高的频率(1.2、2.8、3.4、4.2 和 5.0 MHz), 带通滤波后的结果如图 5(b)~5(f)所示。

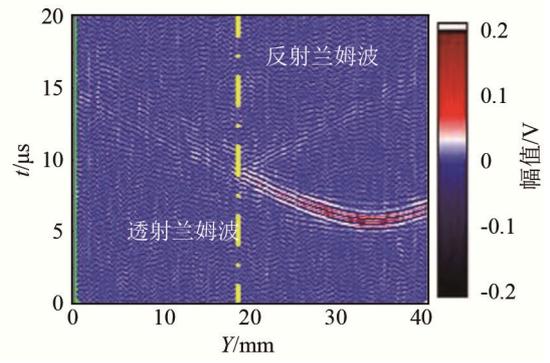


(a) A 扫图像

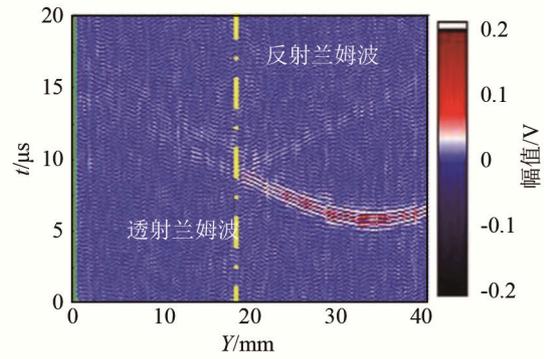


(b) 入射波的频谱

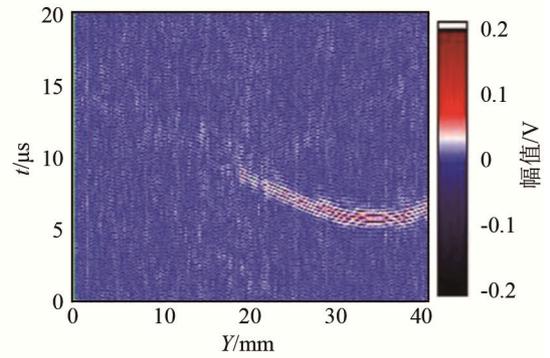
图 4 点 *D* 处的 A 扫图像和入射波的频谱图
Fig.4 The A-scan image at point *D* and the spectrogram of the incident waves



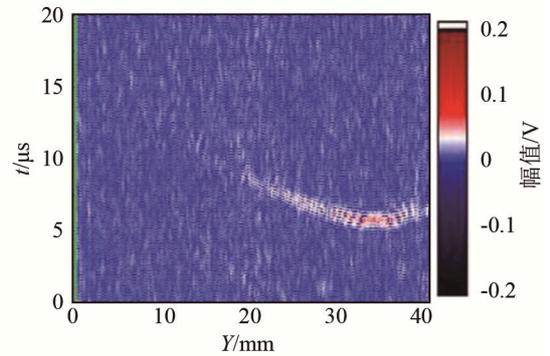
(c) 中心频率 2.8 MHz



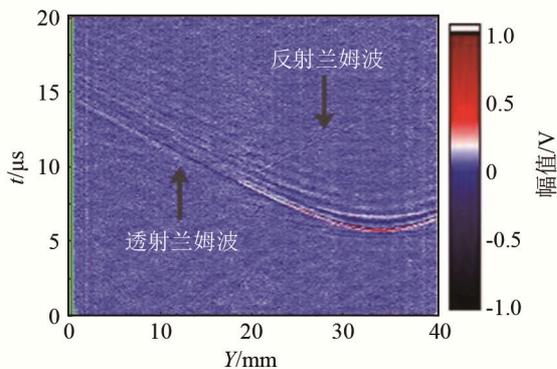
(d) 中心频率 3.4 MHz



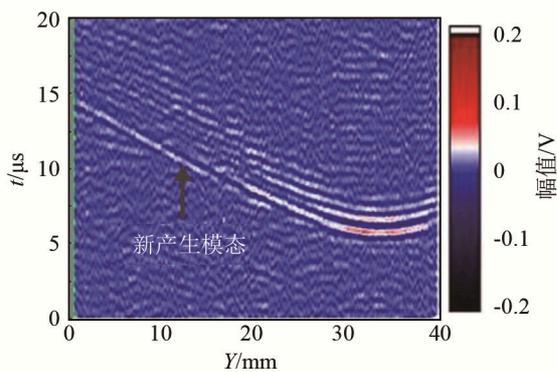
(e) 中心频率 4.2 MHz



(f) 中心频率 5.0 MHz



(a) *Y* 方向的 B 扫图像



(b) 中心频率 1.2 MHz

图 5 在 *X*=10 mm 处, (a) *Y* 方向上的 B 扫描图像, 经带通滤波处理后中心频率分别为(b)1.2 MHz, (c) 2.8 MHz, (d) 3.4 MHz, (e) 4.2 MHz, (f) 5.0 MHz 的图像

Fig.5 The B-scan image in the *Y* direction at the *X*=10 mm (a), and the images after bandpass filtering of the centre frequencies (b) 1.2 MHz, (c) 2.8 MHz, (d) 3.4 MHz, (e) 4.2 MHz and (f) 5.0 MHz respectively

从图 5(a)中可知:点源激励出的兰姆波在 $X=10\text{ mm}$ 处的 Y 方向上接收到的波前呈双曲线函数分布,并在 $Y=18\text{ mm}$ 处的预制人工裂纹(0.4 mm 深、 0.2 mm 宽的裂纹)上发生反射和透射,由于反射波能量相对于入射波较小,反射波清晰度较低;另外,兰姆波经过裂纹后,波包明显变宽,这一方面是由于随着传播距离的增加,频散效应加大,另一方面是由于裂纹处的模态转换形成了新的兰姆波模态。为了更清晰地看出兰姆波在裂纹上的散射特性,对原始信号进行带通滤波,以观察不同频率时的兰姆波特性。

从图 5(b)中可知:当中心频率为 1.2 MHz 时,兰姆波的能量较弱,信噪比较低;由于激励频率低,兰姆波的波长较大;透射兰姆波清晰可见并存在模态转换现象,而反射兰姆波几乎不存在。从图 5(c)、5(d)中可知:当中心频率升高为 2.8 、 3.4 MHz 时,兰姆波的能量明显增强;同时反射兰姆波清晰可见,这是由于随着兰姆波频率的增高,其波长相应地减小,相对于裂纹的尺寸有小的波长裂纹比,故出现反射兰姆波,和已有的数值模拟结果相符^[2]。这一现象也从实验上反映了选择适当的、较高的兰姆波频率,可以增强其裂纹检测能力。另外,反射波和透射波以裂纹呈对称分布。从图 5(e)、5(f)中可知:当中心频率分别升高为 4.2 MHz 和 5.0 MHz 时,兰姆波的能量较弱,信噪比较低,反射和透射波模糊不清。

3 结 论

通过激光超声可视化技术研究了兰姆波在裂纹上的反射和透射特性,可得到如下结论:(1)激光超声可视化技术可动态显示兰姆波在裂纹上的检测过程,裂纹上的反射波和透射波关于裂纹呈对称分布;(2)兰姆波在裂纹上反射和透射过程中,存在模态转换现象,多模态的存在造成兰姆波的波包变宽;(3)随着激励频率的增加,兰姆波在裂纹上的反射能量增强。

参 考 文 献

[1] 李阳,蔡桂喜,董瑞琪.兰姆波在搭接焊缝上的反射和透射[J].声

学学报,2017,42(4):495-503.

- LI Yang, CAI Guixi, DONG Ruiqi. The reflection and transmission of Lamb waves at overlap joints[J]. Acta Acustica, 2017, 42(4): 495-503.
- [2] 李阳,韩晓辉,周庆祥,等.识别薄板中兰姆波和体波的阶梯板方法[J].声学技术,2016,35(5):398-402.
- LI Yang, HAN Xiaohui, ZHOU Qingxiang, et al. A method of using step plates to distinguish Lamb waves from bulk waves in thin plates[J]. Technical Acoustics, 2016, 35(5): 398-402.
- [3] 张海燕,李加林,徐梦云.多缺陷兰姆波拓扑成像[J].声学技术,2019,38(5):520-525.
- ZHANG Haiyan, LI Jialin, XU Mengyun. Multi-defect Lamb wave topological imaging[J]. Technical Acoustics, 2019, 38(5): 520-525.
- [4] ALLEYNE D N, CAWLEY P. The interaction of Lamb waves with defects[J]. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control, 1992, 39(3): 381-397.
- [5] BENMEDDOUR F, GRONDEL S, ASSAAD J, et al. Study of the fundamental Lamb modes interaction with asymmetrical discontinuities[J]. Ndt & E International, 2008, 41(5): 330-340.
- [6] BENMEDDOUR F, GRONDEL S, ASSAAD J, et al. Study of the fundamental Lamb modes interaction with symmetrical notches[J]. Ndt & E International, 2008, 41(1): 1-9.
- [7] 吴斌,周伟,何存富.兰姆波在搭接板中传播规律的数值仿真研究[J].压力容器,2011,28(6):24-30.
- WU Bin, ZHOU Wei, HE Cunfu. Experimental and numerical study of the Lamb waves propagation in overlapping plates[J]. Pressure Vessel Technology, 2011, 28(6): 24-30.
- [8] 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: E1127-E1130.
- [9] YASHIRO S, TAKATSUBO J, MIYAUCHI H, et al. A novel technique for visualizing ultrasonic waves in general solid media by pulsed laser scan[J]. NDT & E International, 2008, 41(2): 137-144.
- [10] URABE K, TAKATSUBO J, TOYAMA N, et al. Flaw inspection of aluminum pipes by non-contact visualization of circumferential guided waves using laser ultrasound generation and an air-coupled sensor[C]//3rd International Symposium on Laser Ultrasonics and Advanced Sensing, 2014: 012009.
- [11] 朱红玲,刘畅,张博,等.激光超声可视化图像处理研究[J].中国激光,2018,45(1):1-8.
- ZHU Honglin, LIU Chang, ZHANG Bo, et al. Research on Laser Ultrasonic Visual Image Processing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 1-8.
- [12] 李巧霞,李海洋,王召巴,等.针对金属表面缺陷深度的激光超声检测研究[J].测试技术学报,2018,32(1):81-85.
- LI Qiaoxia, LI Haiyang, WANG Zhaoba, et al. Study on laser ultrasonic technology for depth detection of metal surface defects[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2018, 32(1): 81-85.