

铝板表面缺陷的激光超声可视化检测

罗朝莉,朱冰,徐志伟,王波

(西安石油大学 电子工程学院, 西安 710065)

摘要: 激光超声可视化检测技术是一种新型检测技术,与传统检测方法相比,该技术具有检测速度快、检测距离远、无检测盲区等优点。研究了一种基于超声信号峰峰值三维最大振幅及三维波场重建的检测算法,搭建了基于脉冲激光激励、压电探头接收超声信号的激光超声可视化检测系统,并对铝板表面裂纹缺陷进行检测。试验结果表明,激光超声可视化检测技术可快速检出铝板表面的裂纹缺陷,并且能够三维地显示表面裂纹的位置及大小信息,能够实时显示出三维超声波场的传播及反射情况。

关键词: 激光超声; 可视化检测; 金属板材; 表面缺陷

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2023)10-0009-05

Laser ultrasonic visualizing inspection of surface defect in aluminum plate

LUO Zhaoli, ZHU Bing, XU Zhiwei, WANG Bo

(School of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: Laser ultrasonic visualizing is a new type of inspection technology. Compared with traditional detection a method, this technology has the advantages of rapid detection, long-distance, and no detection blind areas. A detection technology based on three-dimensional maximum amplitude and three-dimensional wave field reconstruction detection algorithm for ultrasonic signal peak-to-peak values was studied. A laser ultrasonic visualization detection system with pulse laser excitation and piezoelectric probe receiving ultrasonic signals was established to detect surface crack defects in aluminum plates. The results showed that the laser ultrasonic visualization detection technology can quickly detect cracks defects on the surface of aluminum plates, and can display the position and size information of surface cracks in 3D, as well as real-time display of the propagation and reflection of 3D ultrasonic field.

Key words: laser ultrasonic; visualizing inspection; metal sheet; surface defect

金属表面缺陷的无损检测方法主要有超声检测、磁粉检测及渗透检测等^[1]。这些方法检测时需要接触被测体表面或进行特殊检测工序,且对表面微小缺陷分辨率较低,检测效率不高,在特殊环境下已无法满足检测需求。随着技术的发展与无损检测要求的不断提高,迫切需要研究发展非接触式检测技术。

激光超声检测可实现非接触、远距离、高时空分辨率检测,是近年来国内外相关表面缺陷检测研究

的热点,并取得了一定进展^[2-8]。为满足快速、高时空分辨率的检测需求,TAKATSUBO 等^[9]提出一种基于超声传播的可逆性原理和可视化图像处理技术,用脉冲激光扫描产生超声信号,通过对接收到的信号进行处理实现超声波三维波场传播过程可视化,进而对被测体内部损伤情况进行评价。

与传统的超声检测技术相比,激光超声可视化检测技术具有非接触扫描,检测过程无需使用耦合剂;无检测盲区,频带较宽,分辨率高;可实现远距离操作,用于高温及腐蚀性强等恶劣条件下的检测;适用于复杂形状、大面积板材的检测;快速扫描、可重复性高;能将超声波在被测物体中的传播过程可视化;可实时显示检测结果,缺陷精确定位等优点。

收稿日期: 2023-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(1927801)

作者简介: 罗朝莉(1988—),女,硕士研究生,主要研究方向为激光超声及冷阴极 X 射线检测技术

通信作者: 罗朝莉,714116474@qq.com

目前关于表面缺陷激光超声检测的研究主要集中于理论分析、模型仿真、一维和二维信号处理等方面,对三维信号重构研究较少^[10-16]。文章采用高坪等^[17-18]开发的一种激光超声可视化检测系统,利用脉冲激光器产生超声信号,压电探头接收超声信号;采用脉冲激光逐点扫描检测范围内的采样点并得到单点超声时域波形,再提取峰峰值以重构扫描区域内的二维超声波场图像及三维超声波场图像,由此快速识别表面裂纹缺陷的位置和大小,对接收到的信号按时间-强度方向重新排列以实时观察超声波场时空变化。结果表明,激光超声可视化检测技术可快速检出铝板表面的裂纹缺陷,并且能够三维显示表面裂纹的位置及大小信息。

1 激光超声激发机理

激光超声产生机理主要有热弹效应和烧蚀效应。热弹效应是指当入射激光的功率密度较低时,激光照射在物体表面,激光能量激发电子迁移引起晶格振动使得物体表面温度上升且瞬间热膨胀,从而产生超声波,热弹效应原理如图 1 所示,热弹效应所产生的超声波对物体表面无损伤,可产生多种波形,应用最广。当入射激光的功率较高时,物体表面局部熔化、汽化,材料表面有小部分物质喷发出来,产生垂直于表面的反作用力,此时仍产生超声波,但主要是烧蚀效应产生的超声波,烧蚀效应原理如图 2 所示,烧蚀效应会对表面产生一定的微损伤,但可获得更高强度的超声信号。文中介绍的激光超声主要是基于热弹效应产生。



图 1 热弹效应原理示意

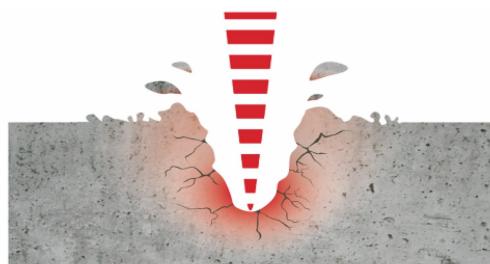


图 2 烧蚀效应原理示意

2 激光超声可视化检测系统

激光超声可视化检测基本原理如图 3 所示,检测系统由脉冲激光发射扫描单元、数据采集单元和系统控制单元、信号接收单元等组成。检测仪器主要包括脉冲激光器、电动小镜、数据采集卡、滤波器、放大器及数据处理器等部件。脉冲激光扫描顺序如图 4 所示,激光扫描点从左下角位置①出发自下向上以设定扫描点数逐点扫描至位置②,然后移至第二列最后一点位置③,再自下向上逐点扫描,如此反复扫描直至完成设定范围内最后一扫描点;图中 N_x 为 x 轴激光扫描点数; N_y 为 y 轴激光扫描点数; (l_x, l_y) 为扫描点坐标。

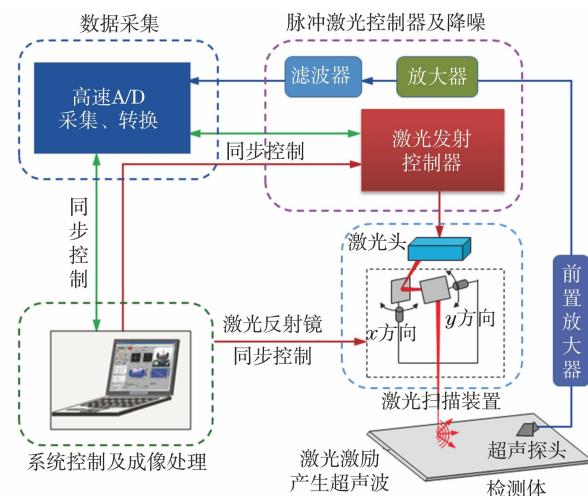


图 3 激光超声可视化检测基本原理

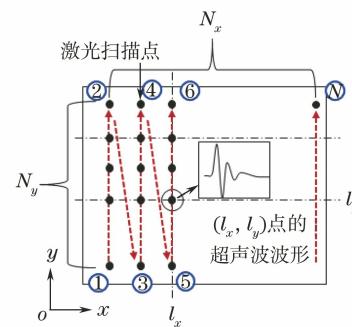


图 4 脉冲激光扫描顺序

采用波长为 1 064 nm 的空冷调 Q 固态二极管泵浦脉冲激光器,通过激光腔内锁模、激光器阵的定时激发、电光调 Q 技术,利用光纤相阵法控制产生脉宽为 7 ns 的激光束。激光能量为 2 mJ,光斑直径不大于 1 mm。同步控制激光反射镜使其按上述设定顺序从上到下、从左至右偏转 $\pm 25^\circ$ 进行扫描。脉冲激光照射在被测体表面,试件表面会吸收光能、瞬间热膨胀产生微小变形。压电传感器在铝板表面接

收超声信号,信号经滤波、降噪及放大后通过高速A/D(模/数)采集卡转换存入计算机。检测结束后所记录超声波信号被重新整合处理后以最大振幅图像、时域图像、频域图像及三维波场传播图像等形式显示。从上述图像中可实时观察到物体构造及其物理性能的变化对超声信号的影响,也可动态地显示超声波在物体中的实际传播过程,从而直观地检测出物体内部的损伤。

3 试验及结果分析

3.1 试验设置

检测样件结构如图5所示,在规格为300 mm×100 mm×3 mm(长×宽×厚)的铝板表面制作一个尺寸(长×宽)为8 mm×0.2 mm(C1)的人工裂缝。用上述激光超声波可视化系统对该铝板进行检测,检测现场如图6所示。

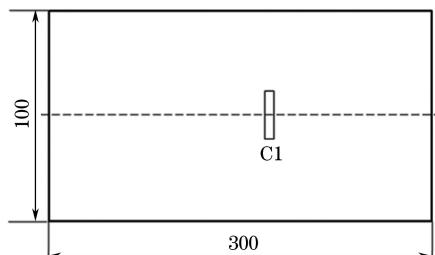


图5 检测样件结构示意

设定可视化检测范围为58 mm×58 mm(长×宽),超声探头频率为2 MHz,扫描间隔 $dx = dy =$

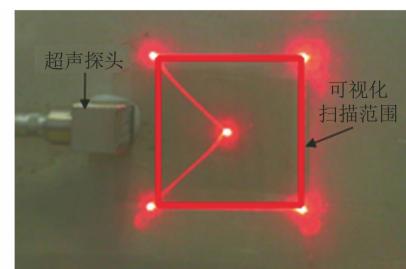
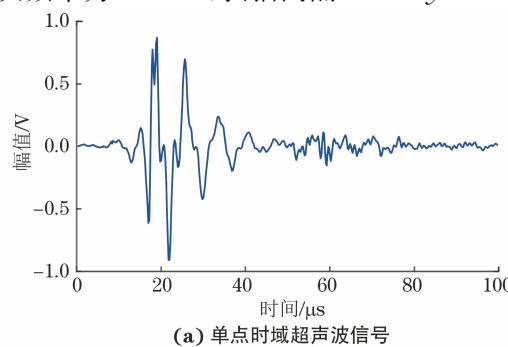


图6 激光超声检测现场

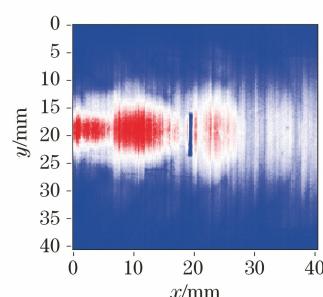
0.198 mm,扫描间隔设定在超声波波长的1/2以下,可视化范围内激光扫描总点数N为41 820。脉冲激光能量设置为60%(0.75 mJ),以确保铝板样件表面不被烧蚀。A/D采样频率为20 MHz,波形采样点数为500,故每个波形采样时间为25 μ s。信号波形峰-峰电压值为10 V,扫描频率为1 000 Hz,检测时间为42 s。按上述检测条件及扫描模式进行检测,采集数据且同时自动存于计算机中。通过系统解析软件将检测结果以最大振幅图像、超声波动态传播图像显示。

3.2 检测结果及分析

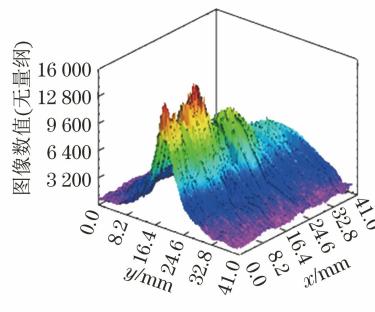
为了检测表面裂纹缺陷,使用激光束扫描目标区域,通过压电传感器接收超声信号,同时监测表面裂纹缺陷引起的平面内入射超声反射或传输振幅变化情况。激光产生的超声波包含了很大一部分表面波信号,激光束与表面异常的相互作用可通过超声信号振幅增加和超声频率的变化来表示,激光超声时域及空域信号如图7所示。传感器接收到的单点



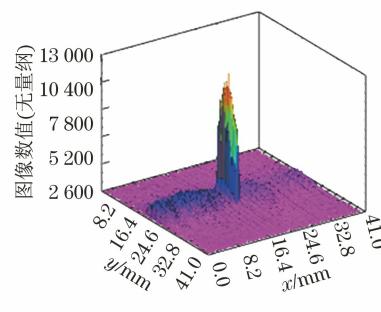
(a) 单点时域超声波信号



(b) 最大振幅图像



(c) 三维最大振幅图像



(d) 相邻点差分后最大三维振幅图像

图7 激光超声时域及空域信号

超声响应信号如图 7(a)所示,对采集到的响应信号的每个点取最大值得出图 7(b)所示的最大振幅图像,然后将响应信号放置在三维数据中与目标区域对应的位置。利用颜色表示信号在某个位置处能量的大小,红色区域表示超声信号幅值较大,能量较强;蓝色区域代表超声信号幅值较小,能量较弱。图 7 以超声信号遇到缺陷时相互作用产生的能量强弱变化来表示被测体内部的损伤情况。从图 7 中可以看到尺寸为 $8 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ 的裂缝缺陷处能量幅值较高,缺陷周围及其他位置能量幅值较低,缺陷边缘有明显的衍射和反射现象。图 7(c)为目标区域内三维数据重构的最大振幅图像, x, y 分别表示目标区域范围, z 为扫描点最大振幅,可以清楚显示出激光束撞击裂纹附近产生的超声信号振幅变化轨迹。7(d)为通过信号差分处理后重构的三维最大振幅图像,清楚显示了缺陷的位置及大小。

将检测区域内采集到的每个激励点的超声信号数据整合成空间时域的三维超声波场数据,三维声场传播图像如图 8 所示。超声波场中任意时刻的截

面图用强度表示,不同时刻以同一方式排列组合实时成像,沿时间轴截取相应时域数据截面图即可得到超声随时间变化的三维动态传播图,该原始动态传播图像包含超声前进波和反射波。

图 8(a)中 $t = 3.5 \mu\text{s}$ 时最先出现的波为传播速度较快的纵波波包,经过 $3 \mu\text{s}$ 后纵波强度降低、表面波随即出现且强度及宽度较大,如图 8(b)所示。由图 8(c)可见 $t = 10.5 \mu\text{s}$ 三维超声波场遇到缺陷后前进波场及部分缺陷波场相互叠加,因此强度大幅增加。如图 8(d)所示, $t = 11.5 \mu\text{s}$ 时缺陷处波场强度急剧降低且波包较多,可以看出超声波场遇到缺陷后发生了模态转换,但主要传播包络仍以表面波包为主。图 8(e)显示了 $t = 15 \mu\text{s}$ 时,前进波遇到边界发生反射产生边界反射回波,前进波场强度降低的情况。在此时刻产生与前进波场方向相反的反射波波场,反射波场返回到物体表面作为缺陷反射回波被观察到,图 8(e)红色箭头所指位置即为缺陷回波。由图 8(f)可见 $t = 19 \mu\text{s}$ 时边界反射回波减弱,前进波场强度增加但传播较为散乱。

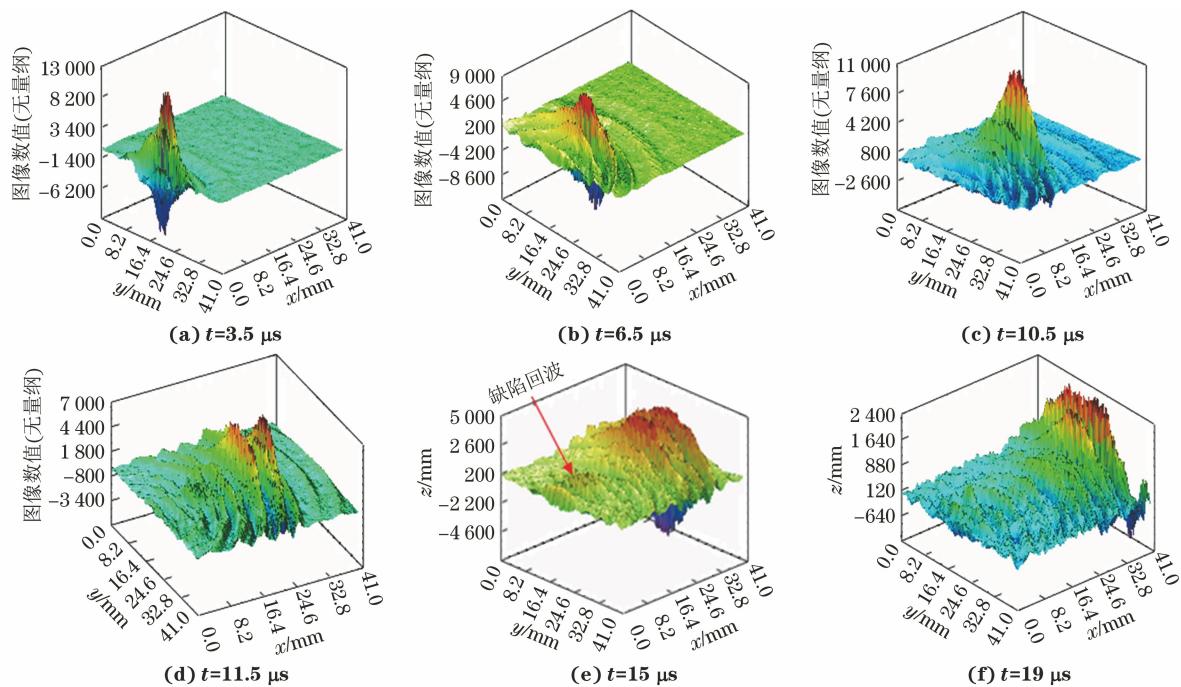


图 8 三维声场传播图像

反射波场与前进波场传播方向相反且幅值较小,在很多情况下易被前进波场或噪声覆盖,难以从波场中提取有效损伤信息。为了提高检测灵敏度及信噪比,在检测时可对同一点多次扫描并进行信号平均。亦可在检测完成后利用频率滤波法、相邻点同步差分法等可视化图像处理方法将反射波从超声

波场中分离出来,消除有干扰的前进波场而突显出缺陷回波,使缺陷更易于识别,提高可视化检测的准确性。

4 结论

介绍了一种基于脉冲激光发射信号、压电传感

器接收信号的激光超声可视化检测系统,该系统以各扫描点最大振幅重构三维最大振幅图以及动态三维超声波场图像,来实现缺陷检测。对铝板中裂纹进行可视化检测并对缺陷信号进行表征和识别,证明了该检测技术的有效性。所提出的激光超声可视化检测扫描系统和三维成像方法具有以下优点。

(1) 采用脉冲激光发射、压电传感器接收信号,通过激光反射镜控制激光束快速扫描检测物体表面设定范围能够实现高时空分辨率检测,可对铝板表面长度为8 mm的缺陷进行检测并精确成像。

(2) 对缺陷进行二维最大振幅成像和三维超声最大振幅成像,能够清晰观测到缺陷对于超声波场的反射及衍射情况,易于分辨判别铝板表面缺陷位置及大小。

(3) 根据时间轴截取相应时域数据截面图得到的三维动态声场传播图像,能够实时观测到三维超声传播中的前进波场、反射波场及缺陷回波。

参考文献:

- [1] LU G, LI Y, WANG T, et al. A multi-delay-and-sum imaging algorithm for damage detection using piezoceramic transducers[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2017, 28 (9) :1150-1159.
- [2] DOMAR4KAS V, KHURI-YAKUB B T, KINO G S. Length and depth resonances of surface cracks and their use for crack size estimation [J]. Applied Physics Letters, 1978, 33(7):557-559.
- [3] LEE J R, JANG J K, KONG C W. Fully noncontact wave propagation imaging in an immersed metallic plate with a crack[J]. Shock and Vibration, 2014 (2):1-8.
- [4] 倪辰荫. 扫描激光源法激发声表面波用于金属表面裂纹检测的研究[D]. 南京:南京理工大学,2010.
- [5] 毛毛. 基于激光超声技术的3D打印材料表面缺陷检测研究[J]. 激光杂志,2022,43(12):31-35.
- [6] 房海基,叶国良,吕波,等. 不锈钢增材制造件表面缺陷激光超声检测[J]. 机械制造文摘(焊接分册),2022,297(01):36-41.
- [7] 邓进,姜文鑫,李海洋,等. 表面裂纹深度检测的非接触光声检测技术研究[J]. 激光与红外,2021,51(11):1403-1409.
- [8] 弓鹏飞,张彦杰,王法雨,等. 棒材表面缺陷的激光超声无损检测方法研究[J]. 激光杂志,2022,43(9):44-49.
- [9] TAKATSUBO J, WWANG B, HIROSHI T, et al. Generation laser scanning method for the visualization of ultrasound propagating on a 3-D object with an arbitrary shape[J]. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 2007 , 1(2):1405-1411.
- [10] HIRAO M, FUKUOKA H, MIURA Y. Scattering of Rayleigh surface waves by edge cracks: Numerical simulation and experiment,[J]. Acoust. , 1982, 72 (2): 602.
- [11] LIU S W, DATTA S K. Scattering of ultrasonic wave by cracks in a plate[J]. Appl. Mech. , 1993, 60(2): 352.
- [12] WU T T, GONG J H. Application of transient elastic waves to the nondestructive evaluation of plate structure with cavity or inclusion[J]. Acoust. Soc. Am, 1993, 94(3): 1453.
- [13] DATTA D, KISHORE N N. Features of ultrasonic wave propagation to identify defects in composite materials modelled by finite element method[J]. NDT & E International, 1996, 29(4): 213.
- [14] CHO Y, ROSE J L. An elastodynamic hybrid boundary element study for elastic guided wave interactions with a surface breaking defect[J]. Sol. Struc. , 2000, 37(30): 4103.
- [15] MORI A, SUZUKI K. High-repetition-frequency short pulses in a VHF discharge-excited slab-type carbon dioxide laser using an ultrasonic vibrator[J] . Elect. Eng. Jpn. , 2004, 146(3): 1.
- [16] HASSAN W, VERONESI W. Finite element analysis of Rayleigh wave interaction with finite-size, surface-breaking cracks[J] . Ultrasonics, 2003, 41 (1): 41.
- [17] YASHIRO S, TAKATSUBO J, TOYAMA N. An NDT technique for composite structures using visualized Lamb-wave propagation[J] . Composites. Sci. Technol. , 2007, 67(15):3202.
- [18] SRIDHAR K. Theory and applications of laser ultrasonic techniques[J] . Ultrasonic Non-destructive evaluation, 2003, 11:435-494.