

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306698

铝板表面裂纹的激光超声检测与信号处理研究*

罗朝莉¹ 朱冰¹ 王波¹ 徐志伟¹ 刘小军²

(1. 西安石油大学电子工程学院 西安 710065; 2. 西安金波检测仪器有限责任公司 西安 710075)

摘要:为实现铝板表面裂纹缺陷检测,基于 COMSOL 建立铝板表面裂纹缺陷模型,分析了激光超声与缺陷的相互作用。针对激光超声在材料内部传播反射信号弱、信噪比较差的问题,提出了信号多次平均结合相邻三点信号差分处理方法。利用激光超声可视化检测系统对 5 mm 厚铝板表面 3 个裂缝进行检测,采用信号多次平均提高信噪比并增强最大振幅图中的损伤回波;提取目标区域内各扫描点信号峰峰值重构三维最大振幅图,通过相邻三点信号差分处理方法对水平、垂直方向上的超声信号进行处理,提供了更好的缺陷可见性。结果表明,表面波(R)与深度 1 mm 以内的表面缺陷存在明显的相互作用;激光超声可视化检测技术可快速检出铝板表面的裂纹且能够三维显示位置及大小,采用的多次平均及相邻三点信号差分处理方法能准确表征 0.5 mm 以上的缺陷,这将在工业无损检测及评估中有极其广泛的应用价值。

关键词:激光超声;可视化检测;表面裂纹;非接触

中图分类号: TN274; TH744 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.3538

Research on laser ultrasonic testing and signal processing of surface cracks in aluminum plate

Luo Zhaoli¹ Zhu Bing¹ Wang Bo¹ Xu Zhiwei¹ Liu Xiaojun²

(1. School of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;
2. Xi'an Jinbo Testing Instruments Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: To achieve the detection of surface crack defects on aluminum plates, a surface crack defect model is established based on COMSOL and the interaction between laser ultrasound and defects is analyzed. To deal with the problem of weak reflection signals and poor signal-to-noise ratio in the propagation of laser ultrasound inside materials, a signal multiple averaging combined with adjacent three-point difference processing method. Three cracks on the surface of 5 mm thick aluminum plate were detected using a laser ultrasonic visualization inspection system. Using multiple signals averaging can increase the signal to noise ratio (SNR) and enhance the damage echo in the maximum amplitude map. Extracting the peak and peak values of the signals at each scanning point in the target area reconstructs the three-dimensional maximum amplitude map. The ultrasonic signals in the horizontal and vertical directions are processed using an adjacent three-point difference processing method, providing better defect visibility. The results show that there is a significant interaction between surface waves (R) and surface defects within a depth of 1 mm. The laser ultrasonic visualization inspection technology can quickly detect cracks and defects on the surface of aluminum plates, and can display the position and size of surface cracks in three dimensions. The multiple averaging and adjacent three-point difference processing method used can accurately characterize defects above 0.5 mm, which will have extremely broad application value in industrial non-destructive testing and evaluation.

Keywords: laser ultrasonic; visualization inspection; surface crack; non-contact

0 引言

工程结构经常受到疲劳应力、循环载荷、环境因素和老化的影响,导致结构表面微观层面产生裂纹。裂缝降低了材料局部刚度从而导致结构中的组织不连续,早期检测可以有效防止损坏和失效的可能。超声波检测 (ultrasonic testing, UT) 是工业中材料鉴定和缺陷检测的无损检测方法之一。常规超声检测包括使用接触式的脉冲回波或透射法,各种锆钛酸铅^[14]、光纤传感器^[5] 等已成功集成并用于裂纹的损伤检测。然而,这些方法在敏感结构件上不实用且难以在复杂结构或高温下使用,对大面积检测非常耗时^[6]。采用电磁超声换能器^[7] (electromagnetic acoustic transducer, EMAT)、空气耦合换能器^[8-9] 能够实现非接触超声检测,但接收效率都较低且转换效率随样品距离增大而减小^[10]。相对而言,激光激励超声、激光干涉仪接收的全光学检测系统可以在较远距离上实现高分辨率、大面积的检测,是解决以上问题的理想方案,因此成为近年来国内外表面缺陷检测研究的热点^[11-16]。

Liu 等^[17] 利用基于多普勒效应的扫描激光干涉仪接收铝板上的非线性超声信号,检测长度为 10 mm 的裂纹。Yi 等^[18] 采用带宽为 200 MHz 的双波混合激光干涉仪来测量表面位移,提出一种弧线聚焦激光源在热弹性状态下产生聚焦体波并对铝试件上的人工裂纹进行测量。文献[19-22] 开发了激光扫描模式并在试件表面获得一组直线相控阵激光源并产生具有一定角度的聚焦体波,这种技术需要一组阵列激光源或光纤相控阵使得其相对复杂且成本较高。Sampath 等^[23] 搭建了具有线源模式的脉冲激光器产生两个不同频率窄带兰姆波,基于线阵列激发的非线性兰姆波混合技术用于板状结构中的微裂纹检测,这种系统搭建时内部多组偏光镜角度及准直聚焦距离不易控制。Michaels 等^[24] 基于激光超声成像时获得了丰富的超声场数据,清楚显示超声动态传播的细节并通过频率-波数域滤波分离出残余信号,得出导波中不同模式下样件近表面损伤的轮廓信息。LEE 等^[25] 提出基于相邻两点的波的激光超声异常波传播成像 (anomalous wave propagation imaging, AWPI) 结合可变时间窗振幅映射 (variable time window amplitude mapping, VTWAM) 方法,抑制入射波、放大损伤处异常回波增强了损伤处的可视化和尺寸,最终得出缺陷轮廓及位置。文献[26-32] 对于激光超声信号采用改进的双向相邻波减法 (dual-directional adjacent wave subtraction, DAWS) 对损伤处双向异常波进行成像,提高了表面裂纹及动态传播方向的可见度。He 等^[27] 针对厚波导中的亚毫米缺陷采用熵偏振双边滤波和最小方差波束进行激光超声成像,并进行

试验验证。Hong 等^[28] 提出一种基于学习抽样压缩感知 (blind compressive sensing, BCS) 和相邻区域面积差 (adjacent area difference coefficient, AADC) 交替进行的检测方法,实现损伤成像并确定的损伤阈值。这些信号处理方法有各自特点及实用性,但均未进行缺陷精确三维成像或信号处理后仍存在较多的噪声。

文献[29-32] 开发了一种激光超声可视化检测系统,该系统主要由脉冲激光器和多通道随机正交激光干涉仪组合而成,实现样件目标区域内非接触式快速扫描。本文利用该系统采集超声信号,通过多次信号平均和相邻点信号差分处理后,由二维超声波场图像和三维最大振幅图像能够快速识别表面裂纹缺陷的位置和大小。

文章内容如下:首先,基于理论模型和有限元仿真介绍激光超声用于表面裂纹检测的物理机制,模拟热弹机制下脉冲激光激发超声的传播过程;其次,介绍激光超声损伤成像及相邻三点信号处理方法;然后,详细分析激光超声系统及实验结果;最后,总结激光超声系统和信号处理方法的优点并指出需要进一步研究的问题。

1 理论模型

1.1 激光产生超声波理论

脉冲激光与固体相互作用激发超声波的机制分为热弹机制和烧蚀机制。当材料吸收能低于损伤阈值 (热弹性状态) 时,材料表面局部膨胀形成内应力和应变并以弹性波的形式传播。在这种情况下,激光不会对材料造成损伤。当材料吸收能高于材料损伤阈值 (烧蚀状态) 时,材料表面被熔化甚至被激光气化和电离^[33]。在这种情况下,材料内部会有温度梯度还有内部应力。固体内部的激光诱导超声波是一个多物理耦合过程,它可以用有限元法进行分析。在热弹性状态下,激光产生的超声波模型可以用热传导方程和热弹性方程来描述^[34],其表达式分别为:

$$\rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_v \mathbf{u}_1 \nabla T = k \nabla^2 T + Q \quad (1)$$

$$(\lambda + 2\mu) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}_1) - \mu \nabla \times \nabla \times \mathbf{u}_1 - \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}_1}{\partial t^2} = \alpha (3\lambda + 2\mu) \nabla T \quad (2)$$

其中, T 为金属的温升, K 为导热系数, ρ 为材料密度, C_v 为恒体积比热, Q 为激光照射产生的热源的功率密度, α 为线性热膨胀系数, λ 和 μ 为 Lamé 常数, $\mathbf{u}_1$ 为热弹性效应引起的位移分量。热源 Q 用二维柱坐标 $Q(r, z, t)$ 表示为:

$$Q(r, z, t) = Q_0 (1 - R_c) f(r) g(t) \quad (3)$$

其中, Q_0 为入射激光总功率密度, $f(r)$ 为激光照射的径向分布, t 为脉冲激光器的时间分布, R_c 为光反射系

数, ν 为吸收系数。 $f(r)$ 、 $g(t)$ 和 A_e 如式(4)~(6)表示:

$$f(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right)$$

(4)

$$g(t) = \frac{t}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

(5)

$$A_e = \sqrt{\pi \sigma \mu_r \mu_0 \nu}$$

(6)

式中: r_0 为激光光斑半径, τ 为激光脉冲上升时间, σ 为电导率, μ_r 为相对电导率, μ_0 为自由空间的电导率, ν 为辐射频率。

1.2 缺陷模拟结果

有限元方法在复杂几何模型方面有较高的灵活性和获得全场数值解的能力。采用 COMSOL 软件进行有限元建模与分析,可以得到热弹状态下的激光超声波瞬态速度分布图。有限元仿真中设置铝板截面尺寸为 30 mm×10 mm,激光脉冲的功率密度和光斑半径分别为 2.28 W/m², 0.2 mm。仿真过程中采用自由三角形网格, $\Delta t = 7 \text{ ns}$, $L = 10^{-4} \text{ mm}$ 。建模中材料力学性能参数如表 1 所示。

表 1 材料力学参数

Table 1 Mechanical parameters of materials

材料	Al
热传导系数/(W·m ⁻¹ ·k ⁻¹)	209
密度/(g·cm ⁻³)	2.71
泊松比	0.33
热膨胀系数(10 ⁻⁶)	23.6
杨氏模量/GPa	71.7

为保证数值解的准确性,计算过程应仔细选择网格大小和时间步长。建议的时间步长和网格尺寸可以表

示为:

$$\Delta t = \frac{1}{20f_{\max}}$$

(7)

$$L = \frac{\lambda_{\min}}{10}$$

(8)

其中, Δt 为时间步长, $f_{\max}$ 是声波的最高频率, L 为元素长度, $\lambda_{\min}$ 是声波的最小波长。

激光作用在铝板表面时,激发超声波在不同时刻的声场分布如图 1(a)、(b)所示。 $t = 1 \text{ }\mu\text{s}$ 时刻可以看出主要包括纵波(L)、横波(S)和表面波(R)。不同颜色代表质点的振动速度不同,纵波速度最快最先到达缺陷处,其次是横波,最后是表面波。表面波(R)能量较强振幅最大,在表面及近表面传播且在深度上振动幅度降低。图 1(c)所示, $t = 3 \text{ }\mu\text{s}$ 时纵波(L)传播到裂纹时与缺陷相互作用发生反射和模式转换,纵波(L)波转换为反射纵波(LL)。由于表面裂纹较浅,模式转换后的 LS 波及横波(S)发生的转换模式并不明显。图 1(d)所示, $t = 4.6 \text{ }\mu\text{s}$ 表面波(R)沿着铝板表面传播,纵波(L)和横波(S)传到底面后转化为底面反射纵波和底面反射横波,2La 是底面反射纵波,LSa 是底面反射横波(纵波模式转换为横波);2Lb 是底面反射纵波(横波模式转换为纵波),LSb 是底面反射横波。图 1(e)中 $t = 5.3 \text{ }\mu\text{s}$ 表面波(R)当遇到裂缝尖端拐角处时一部分散射并转换为纵波(RL)和横波(RS),RS 波的振幅明显强于 RL 波。因此,R 波和 RS 波在检测信号中很容易被识别出来。试验发现表面波中含有大量表面缺陷相关信息可以作为检测表面缺陷的有效数据,有利于准确有效地提取缺陷特征信号。

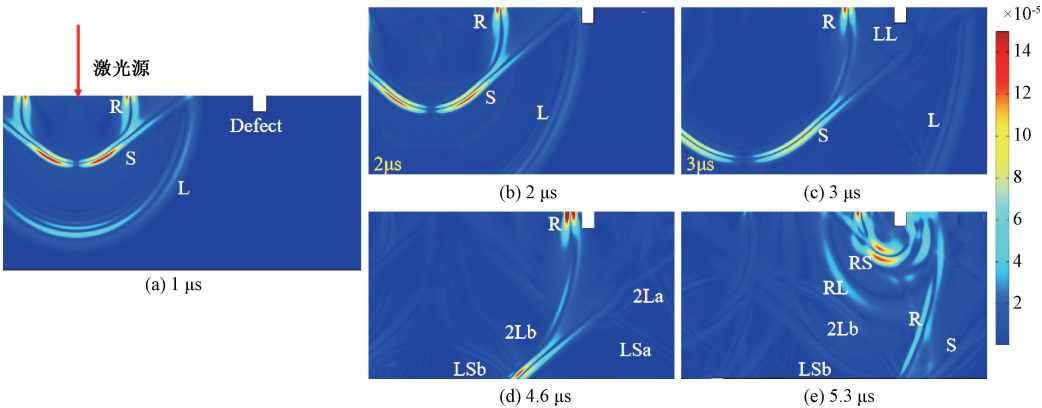


图 1 铝板中的激光超声速度分布图

Fig. 1 Laser ultrasonic velocity distribution in aluminum plate

2 激光超声损伤成像及信号处理方法

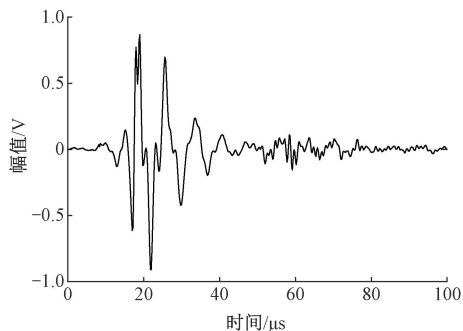
2.1 表面裂纹损伤成像

本次研究表面裂纹检测采用的技术涉及激光超声产

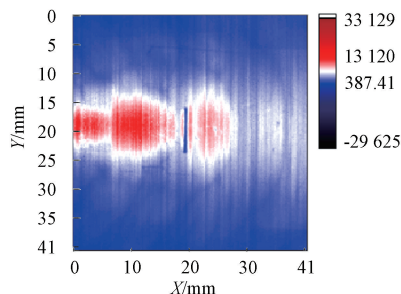
生、超声波和表面裂纹的相互作用。入射的超声波因样件中存在不连续和裂缝等缺陷而散射,散射场携带着关于裂纹损伤异常部位的变化信息。以往的激光超声可视化检测采用超声波传播成像方法,以超声波传播动态图像的形式得出检测结果^[35]。动态图像可显示出超声波场的传播过程,其中波峰和波谷反应检测样件中产生的

实际超声波场及反射波场变化,但这对缺陷的定位及定量帮助并不大。文章中使用激光束扫描目标区域、通过激光干涉仪接收超声信号同时监测由表面裂纹缺陷的存在引起的入射超声波反射或传输振幅变化。激光产生的超声波包含了很大一部分表面波信号,这与激光超声仿真结果一致。

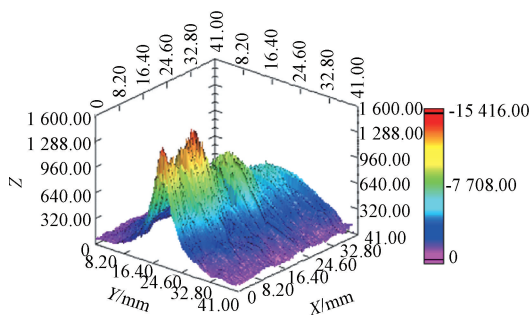
脉冲激光激励的同时采集信号,超声与表面裂纹的相互作用及接收到的单点超声响应信号如图 2(a)所示,采集到目标区域内的响应信号每个点取最大值得出图 2



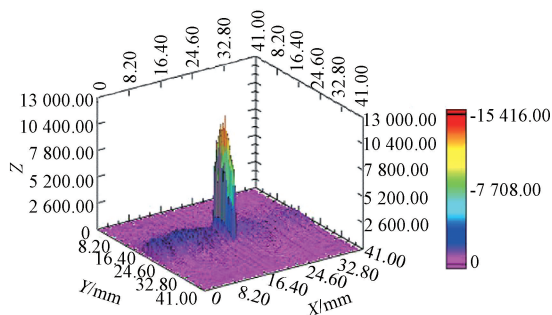
(a) 单点时域超声波信号
(a) Single point time-domain ultrasonic signal



(b) 最大振幅图像
(b) Maximum amplitude image



(c) 三维最大振幅图
(c) 3D maximum amplitude image



(d) 差分后三维最大振幅图
(d) 3D maximum amplitude map after difference

图 2 激光超声检测相关图像

Fig. 2 Laser ultrasonic testing related images

2.2 相邻三点信号差分处理方法

激光扫描点靠近结构异常时,扫描点与相邻点超声信号的相互作用由于异常而改变。图 3 所示,目标检测区域为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 、扫描间隔 0.2 mm 、 x 、 y 方向上扫描点均为 200,激光激励的同时采集超声信号,其中 x 和 y 表示激励点的坐标。A、B 表示损伤及无损伤位置,分别在 A、B 点附近取得相邻点信号。图 4(a) 显示在损伤处 X 方向上 A 点附近 3 个激励点 (50、100)、(51、100) 和 (52、100) 获得的信号,图 4(b) 显示损伤处 Y 轴方向上 (52、101)、(52、102) 和 (52、103) 获得的相邻三点信号。由图 4(a)、(b) 可以看出在损伤处, X 方向上在缺陷上的信号仍具有很强的相似性,但 Y 轴方向相邻三点信号存在差异。图 4(c) 显示了在无损伤处 X 方向上 3 个激励

(b) 所示的最大振幅图,响应信号放置在三维数据中与目标区域对应的位置,区域内三维数据重构成空域的三维最大振幅图像如图 2(c) 所示。2(d) 给出了通过相邻三点信号差分处理后重构的三维最大振幅图像。根据激光束撞击裂纹附近产生的超声信号振幅变化区分表面异常并实现细小裂纹的检测,结合最大振幅图及三维缺陷显示信号从而提高了裂纹检测可靠性,这在后面的实验结果中验证了这一点。

点 (100、103)、(101、103) 和 (102、103) 获得的信号,图 4(d) 显示在无损伤处 Y 方向上 3 个激励点 (100、100)、(100、101) 和 (100、102) 上获得的信号,这些相邻的信号仍然有很强的相似性。无损伤处 X 方向或 Y 方向相邻 3 个扫描点信号波形都表现出很强的相似性。

传统的相邻波减法在选择相邻两个信号时没有考虑裂纹的方向性,无法突显与激光扫描方向平行的裂纹。而改进的相邻波减法在处理相邻点信号之后并未突显出缺陷回波信号。由于扫描时包含设置区域全场的信号,对所有扫描区域内的单信号同时处理无先后顺序,裂纹方向与扫描方向不影响波形处理结果。因此,本文提出了相邻三点信号差分处理方法。激励点采样的信号 $u(x, y, t)$, 相邻 3 个信号 $u(x - \Delta x, y, t)$, $u(x, y, t)$ 和

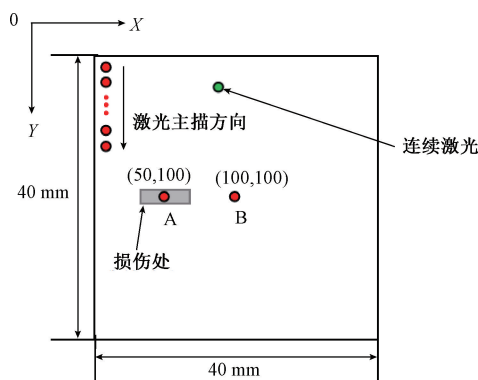


图 3 铝板中连续激光及损伤位置

Fig. 3 Continuous laser and damage location in aluminum plate

$u(x + \Delta x, y, t)$ 相互关系和信号处理结果表示为:

$$R(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u(x - \Delta x, y, t - \tau) \cdot u(x, y, \tau) \cdot u(x + \Delta x, y, t + \tau) d\tau \quad (9)$$

$$\Delta u(x, y, t) = u(x, y, t) - \frac{1}{2}u(x - \Delta x, y, t - \Delta t) - \frac{1}{2}u(x + \Delta x, y, t + \Delta t) \quad (10)$$

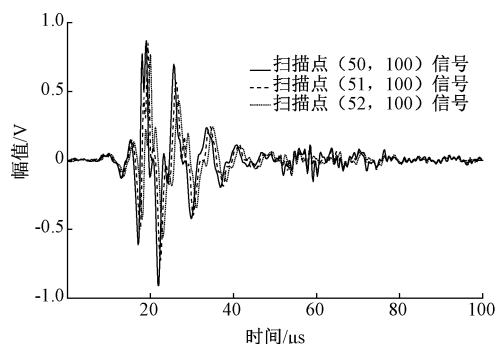
由式(9)可以得出 $R(t)$ 取得最大值时, $u(x, y, t)$, $u(x - \Delta x, y, t)$ 和 $u(x + \Delta x, y, t)$ 时间匹配得最好。其中 x, y 为激光扫描点的坐标, Δt 为信号的相对时移, t 为波形传播时间。

如图 5 相邻三点信号差分处理方法如下:首先,选择相邻 3 点 i^{n-1} 、 i^n 、 i^{n+1} 超声信号波形。其次,以第 2 个信号为基准信号移动第 1、3 个信号使它们的始波波峰信号同步。由相邻点、激励源和损伤之间的相对位置可知,波场中的入射波和损伤处发出的波都会先到达先激励的点,始波波峰信号同步后相对的时间错位将被消除。其中,匹配时间根据扫描采集的间隔、横波波速、纵波波速或表面波波速来确定,即 $\Delta t = \Delta x/V$ 。然后,将 i^{n-1} 、 i^{n+1} 信号强度减小 1/2 并反相,再与 i^n 信号相叠加处理后即可消除共同的入射波和反射波成分,残留波由缺陷散射造成。由于激光作用于金属表面所产生的纵波比横波弱得多,检测过程中最先出现的前进波包是速度较快的纵波,而激光超声中表面波检测缺陷占主导,因此,可利用该方法消除纵波干扰。

3 实验及结果

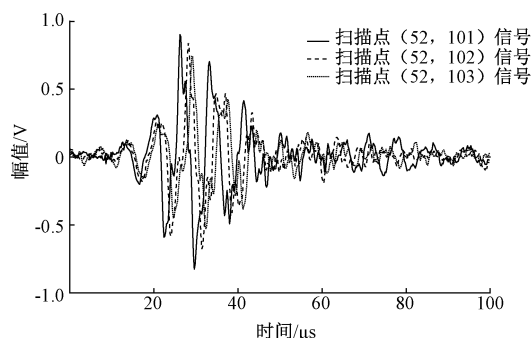
3.1 激光超声可视化系统

激光超声可视化检测基本原理如图 6 所示。系统由脉冲激光发射扫描单元、激光超声接收单元和系统控制单元组成,主要包括脉冲激光器、电动小镜、激光超声接



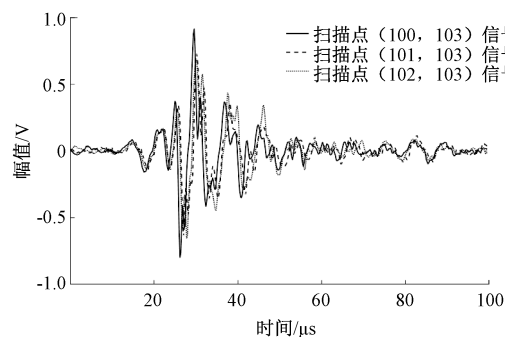
(a) 有缺陷水平方向相邻点信号

(a) Defective horizontal adjacent point signals



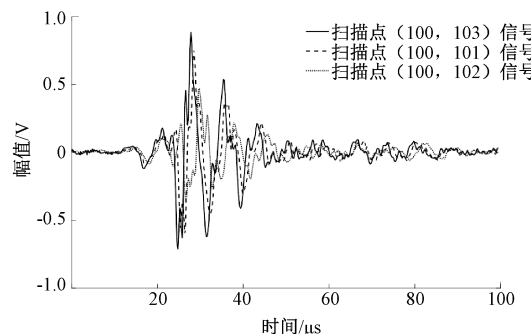
(b) 有缺陷垂直方向相邻点信号

(b) Defective vertical adjacent point signals



(c) 无缺陷水平方向相邻点信号

(c) Flawless horizontal adjacent point signals



(d) 无缺陷垂直方向相邻点信号

(d) Flawless vertical adjacent point signals

图 4 相邻三点信号显示

Fig. 4 Adjacent three-point signals display

收器、数据采集卡、滤波器、放大器及数据处理器等部件。脉冲激光器用波长为 1 064 nm 的空冷调 Q 固态二

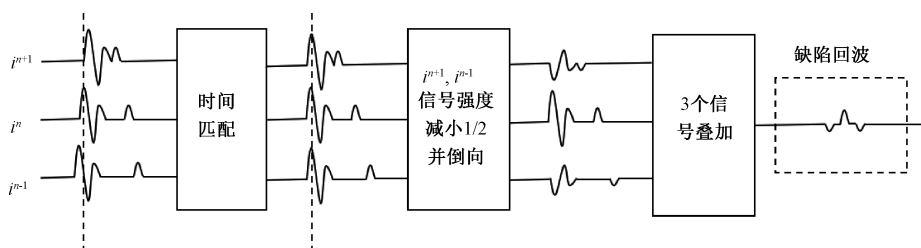


图 5 相邻三点信号波形处理过程

Fig. 5 Waveform processing process of adjacent three point signals

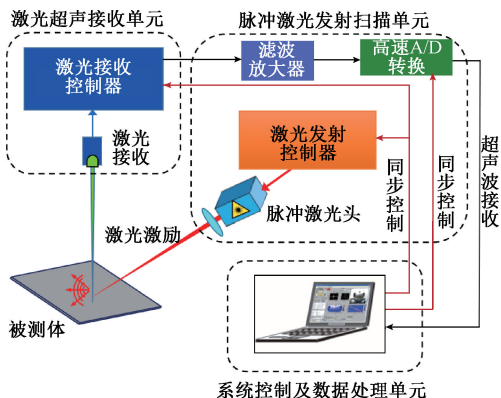


图 6 激光超声可视化检测原理

Fig. 6 Schematic diagram of laser ultrasonic visualization

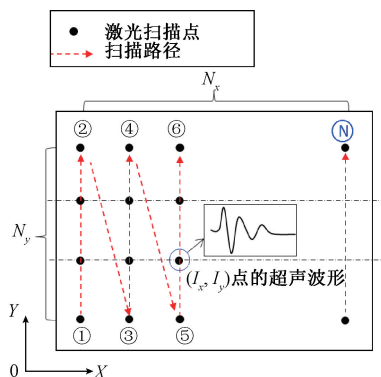


图 7 脉冲激光扫描顺序

Fig. 7 Pulse laser scanning sequence

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,光纤相阵法控制产生脉宽 7 ns 的激光束。激光能量为最大 0.8 mJ,光斑直径 ≤ 1 mm。采用基于零差干涉技术的多通道随机正交干涉仪接收超声波信号,连续激光波长 532 nm,激光功率最大 1 500 mW,频带响应 2~100 MHz。采用如图 7 所示是脉冲激光扫描顺序, N_x 、 N_y 分别表示 X、Y 轴激光扫描点数,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 2 列最后一点位置③,再自下向上逐点扫描。脉冲激光扫描时,对超声信号同步滤波、降噪及放大后通过高速 A/D 采集卡转换存入计算机,所记录的超声波信号被重新整合处理后以最大振幅图、时域图像及 B-scope 图像等形式显示。

图 8 给出了一种多通道随机正交激光干涉仪内部光路示意图,其中单个探测器被阵列探测器所取代与并行信号处理相结合,测量光与参考光之间不需要稳定或特定的相位关系,根据散斑随机分布即可提取超声波信号,非常适合与多模光纤集成用于超声信号的拾取。激光干涉仪频率为 100 MHz,在焦距为 350 mm 处聚焦成一个点照射在样品表面,由此提供了距离样品表面的最高有效性。系统中扫描激光束 $\pm 45^\circ$ 的入射角和发射距离几乎不影响可视化结果,而激光干涉仪接收信号感度性能受

到接收光束入射角、干涉仪距离样品表面的距离等因素的影响,敏感的激光干涉仪作为接收器需固定在最佳位置。研究中还通过激光干涉仪本身的阻抗匹配设计以优化、补偿超声信号的信噪比。

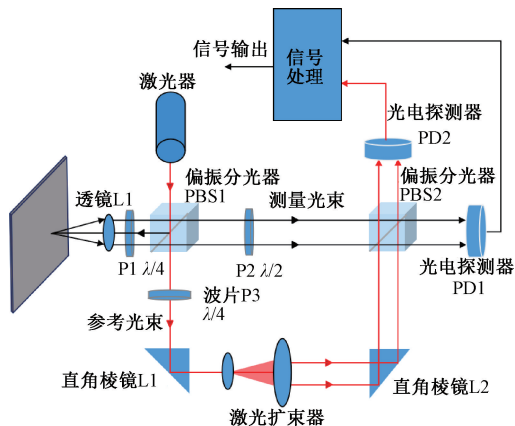


图 8 激光干涉仪光路示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the optical path of the laser interferometer

3.2 实验设置

如图 9 所示在 200 mm×150 mm×5 mm 铝板表面制作 3 个表面裂纹缺陷(简称为 C1、C2、C3),长度分别为 0.5、1、2 mm,深度均为 1 mm。

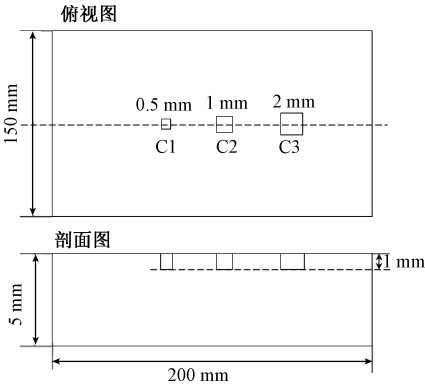
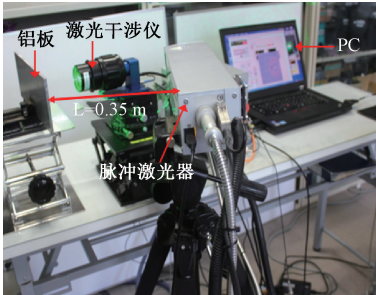


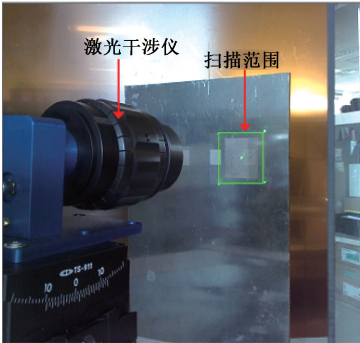
图 9 铝板示意图

Fig. 9 Schematic diagram of aluminum plate

实验装置如图 10(a)、(b) 所示,使用激光束扫描目标区域、QUARTET 激光干涉仪在固定点检测超声信号,将其与损伤可视化算法结合起来以实现激光超声成像的最高效率。激光干涉仪聚焦在样品上的一个接收点。目标区域位于接收点处 58 mm×58 mm 的范围。激光激励条件和连续激光器参数如表 2、3 所示。光斑照射在上述设定的扫描区域附近,使接收激光束与被测体表面接近垂直且避免与激光激励点重合。此外,增加 50 Ω 阻抗或外接 BNC 低通滤波器来降低激光器系统噪声影响。



(a) 实验设置
(a) Experimental setup



(b) 激光干涉仪设置
(b) Laser interferometer setup

图 10 全光学激光超声系统实验

Fig. 10 Experimental of fully optical laser ultrasonic system

表 2 激光激励参数

Table 2 Parameters of laser excitation	
参数	设定值
脉冲激光能量/mJ	0.8
AD 采样频率/MHz	60
采样点	1 200
重复频率/kHz	2
扫描区域/mm	58×58
扫描间隔/mm	0.15
扫描总点数	40 401
激光至检测体距离/m	0.35
检测时间/s	20

表 3 连续激光器参数设置

Table 3 Parameter settings for continuous laser	
参 数	设定值
激光波长/nm	532
连续能量/W	1.5
光斑直径/μm	150
聚焦距离/mm	350
表面位移灵敏度/(nm(Hz) ^{1/2})	2×10 ⁻⁶

脉冲激光启用扫描模式时,较高的重复频率使得在铝板表面产生的超声信号未完全衰减会产生新超声信号,这会导致以噪声形式存在超声波混叠信号。在某些情况下混叠信号可以包括整个信号,而这些信号的存在往往产生复杂和不可预测的模式,对材料的无损评价带来一定的干扰。因此对具有表面裂纹的铝板试样进行了实验研究以确定激光超声系统的最大允许重复频率。通过多次的检测试验,选择优化确定最佳重复频率为 2 000 Hz。激光干涉仪接收点设定于脉冲激光照射目标区域左侧 10 mm,采用信号平均方法对扫描点分别 5 次、10 次平均扫描以提高信噪比,无平均、5 次、10 次平均时检测时间分别为 20、101、202 s。

3.3 实验结果

通过简单的超声波信号采集试验优化激光束聚焦距离,固定连续激光干涉仪接收点位于扫描范围左侧 10 mm,同样条件下激光束对表面微裂纹相互作用时进行无平均、平均 5 次、平均 10 次实验研究得出如图 11 所示的归一化超声信号,对目标检测区域进行多次平均检测确定全光学激光超声检测系统对表面裂纹检测是否足够灵敏。11(a)~(c)分别为无平均、5 次信号平均、10 次信号平均消除随机噪声得出的超声波形图。图 11(a)可以看出目标区域内表面缺陷 C1、C2 对应的回波信号 F1、F2,而且在回波信号 F1 出现之前还有较强的噪声信号,这对于缺陷分析及识别有较大的干扰。图 11(b)是平均 5 次后的信号,超声信号幅值明显提高并且能得出 3 个缺陷回波信号 F1、F2、F3 的位置,但仍有较多微小残余杂

波信号。图 11(c)是平均 10 次后的信号,可以看到信噪比有极大的改善,3 个缺陷对应的回波信号很清楚。

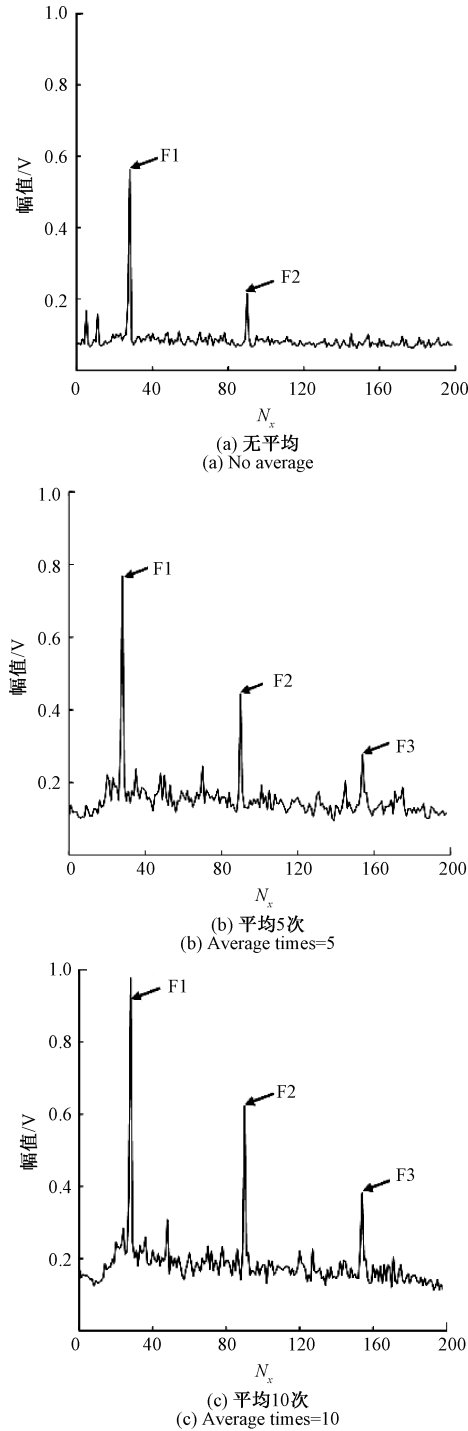


图 11 表面裂纹处反射信号

Fig. 11 Reflected signals at surface cracks

利用信号平均得到的缺陷最大振幅图成像和和相邻三点信号差分处理方法得到的最大振幅图进行比较。图 12 给出二维超声场图像,以颜色表示信号在某位置能量幅值大小,颜色较深区域表示超声信号幅值较大能量

较强,颜色较浅区域表示信号幅值较小能量弱。超声信号遇到缺陷时相互作用产生的能量强弱变化表示被测体内部的损伤情况。检测过程中对超声信号进行 5 次、10 次平均,随着平均次数的增加超声波场分布情况及缺陷边缘衍射现象更加明显,由图上可以准确判别出缺陷的位置和形状。采用相邻三点信号差分处理后的二维超声波场图像如图 13 所示,可以准确得出表面缺陷的大小及位置。因此,检测平均次数越多二维超声波场图像显示的缺陷越明显。

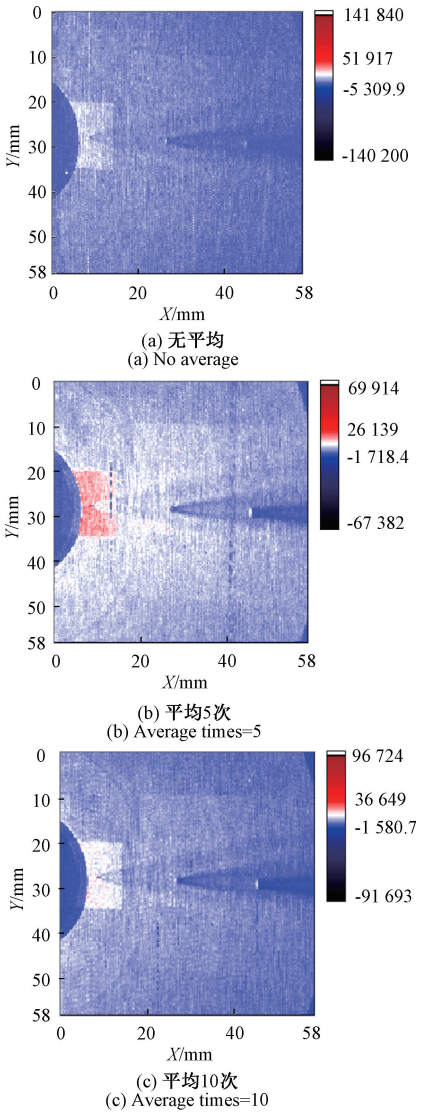


图 12 二维超声场图像

Fig. 12 2D Ultrasonic field image

在相同的激光照射条件下捕获不同采集点样品表面的原始超声信号排列在三维域中。其中 x 轴依次表示 x 方向采集点, y 轴表示 y 轴方向采集点, z 轴表示各信号幅值。图 14 给出了具有代表性的三维超声波场重构图像,14(a)~(c)显示了在相同激光照射条件下采用无平

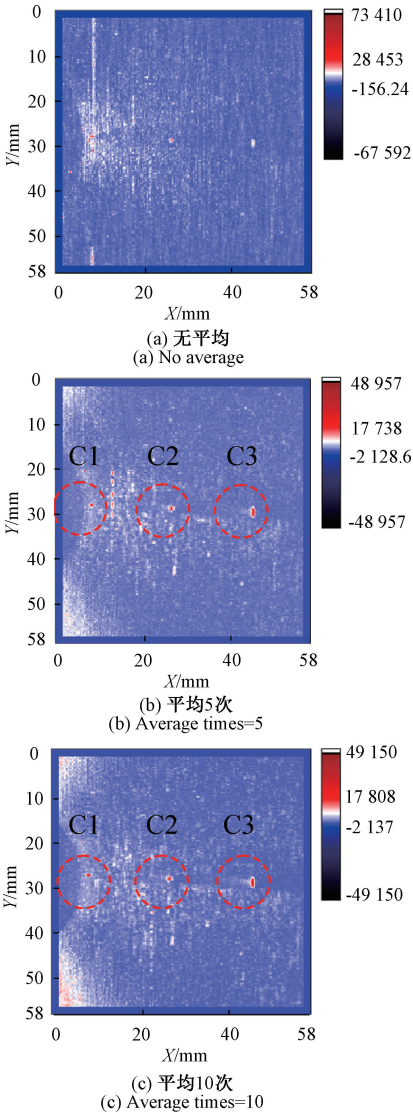


图 13 相邻 3 点信号差分后图像

Fig. 13 Image after difference of adjacent three point signals

均、平均 5 次、平均 10 次后获得的缺陷三维振幅图像。由图像可以得出信号无平均时杂波较多,难以分辨出缺陷信号;采用 5 次平均、10 次平均时杂波信号减弱、缺陷信号突出,可得出缺陷位置及缺陷大小。这表明采用超声信号平均有利于缺陷特征信号的识别但程度有限。

图 15 给出了相邻三点信号差分处理方法对缺陷空间信号显示结果的处理得到结果。由图可以得出相邻 3 点信号差分算法对缺陷空间显示图像进行水平和垂直处理抑制掉大多数与损伤无关的入射纵波、横波和表面波突出缺陷反射波,提供了更好的缺陷可见性。其中平均 5 次时残余波有一定减少但仍存在部分杂波,平均 10 次时在水平和垂直方向上的杂波明显减少,以较高对比度可视化了铝板表面人工裂纹。由 15(c)可以看出 C1 缺陷离声源较近缺陷回波较强,但是裂缝 3 缺陷的宽度较

大于裂缝 1、2。

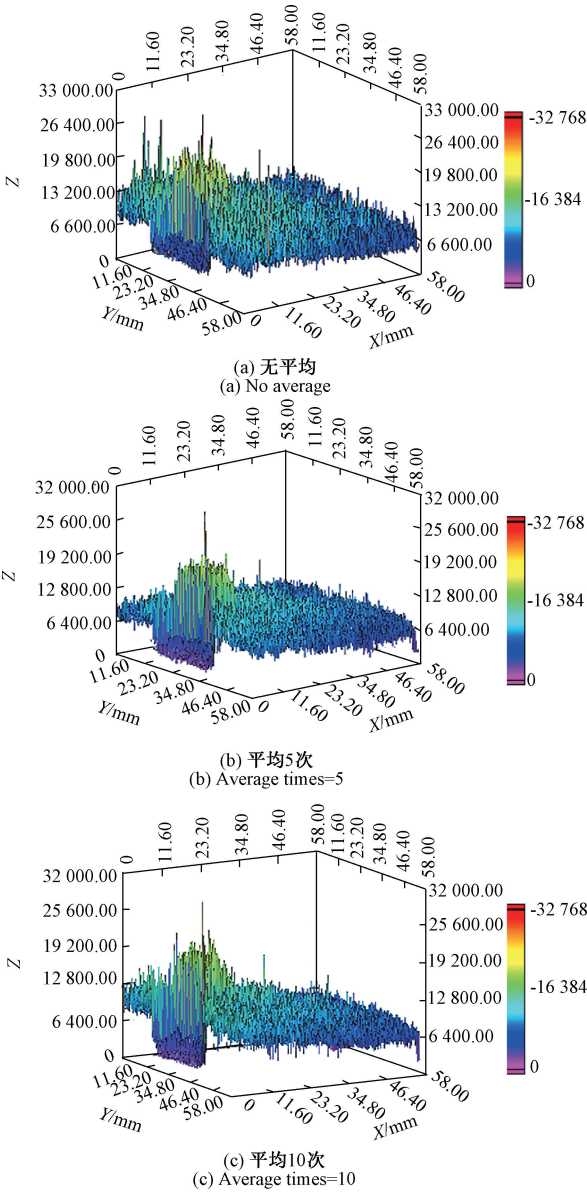


图 14 缺陷空间信号显示

Fig. 14 Defect space signal display

实验表明,多次平均和相邻三点信号差分处理信号方法都能够抑制低频或高频分量的范围信号。平均信号方法在保持在 0.5~2 MHz 范围内的关键信号分量方面优于其他的,但如果没有相邻三点信号差分过程,仅通过多次平均波束处理依然存在较多杂波不能对缺陷进行可视化成像。因此,信号平均结合相邻三点信号差分处理波束具有最好的成像性能及较高的灵敏度。

4 结 论

介绍了一种基于多通道正激光干涉仪接收信号的

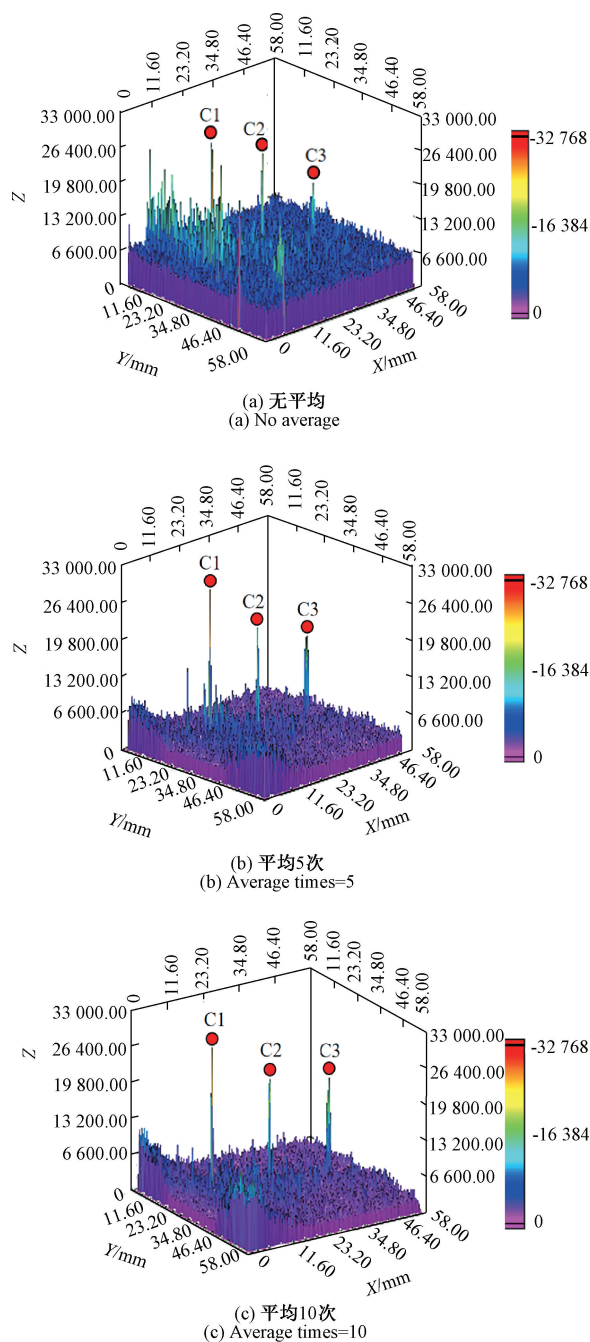


图15 相邻三点差分后缺陷空间信号显示

Fig. 15 Defect space signal display after three adjacent points difference

激光超声检测系统和一种相邻三点信号差分处理方法。该系统利用表面波(R)能够实现铝板表面缺陷检测,这与仿真建立的铝板表面裂纹模型中声波与缺陷的相互作用一致。采用脉冲激光发射、电动小镜控制激光束快速扫描,高频多通道随机正交干涉仪接收信号可实现完全非接触式、高时-空间分辨率检测,也可对高温、高压复杂环境下的表面微小缺陷检测。为有效抑制噪声提高信噪

比并增强损伤回波采用多次信号平均,之后提取扫描区域内扫描点信号峰峰值重构三维最大振幅图,通过相邻三点信号差分处理方法抑制掉大多数无关的反射信号进而对表面0.5、1、2 mm的缺陷进行准确成像。实验证明该方法明显改善了二维和三维超声波场缺陷反射波场的成像效果,更易于分辨铝板表面缺陷位置及大小。

由于激光激发的超声波中包含纵波、横波及表面波等各种类型的波,被检测物体的材料和表面状态等不尽相同,超声波在物体中的传播变得非常复杂,使得检测结果中信号处理、图像解析及缺陷定量存在一定难度。文章中采用的信号处理方法目前适用于金属板材表面、近表面微小缺陷及碳纤维复合材料内部分层缺陷的二维及三维超声波场信号成像。对于曲面结构和复合材料的不同类型缺陷检测并实现精确成像及缺陷分类识别将作进一步研究。

参考文献

- [1] MAKI C T, MICHAELS J E, WENG Y, et al. Angle-beam shear wave scattering from buried crack-like defects in bonded specimens [C]. 43RD Annual review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Volume 36. 43rd Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2016.
- [2] 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 and Structures, 2016, 28(9): 1150-1159.
- [3] CIANG C C, LEE J R, SHIN H J. Hot target inspection using a welded fiber acoustic wave piezoelectric sensor and a laser-ultrasonic mirror scanner [J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20:127003.
- [4] LEE J R, JEONG H, CIANG C C, et al. Application of ultrasonic wave propagation imaging method to automatic damage visualization of nuclear power plant pipeline [J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240:3513-3520.
- [5] LA CAVERA III S, PÉREZ-COTA F, SMITH R J, et al. Phonon imaging in 3D with a fibre probe [J]. Light: Science & Applications, 2021, 10(1): 91.
- [6] BERNSTEIN J R, SPICER J B. Hybrid laser/broadband EMAT ultrasonic system for characterizing cracks in metals [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2002, 111(4):1685-1691.
- [7] DIXON S, BURROWS S E, DUTTON B, et al. Detection of cracks in metal sheets using pulsed laser generated ultrasound and EMAT detection [J]. Ultrasonics, 2011, 51(1):7-16.
- [8] KEE S H, ZHU J. Effects of sensor locations on air-

- coupled surface wave transmission measurements across a surface-breaking crack [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2011, 58(2):427-436.
- [9] BALLAD E M, VEZIROV S Y, PFLEIDERER K, et al. Nonlinear modulation technique for NDE with air-coupled ultrasound [J]. *Ultrasonics*, 2004, 42 (1-9): 1031-1036.
- [10] HUTCHINS D A, WRIGHT W M D, HAYWARD G, et al. Air-coupled piezoelectric detection of laser-generated ultrasound [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1994, 41(6): 796-805.
- [11] DOMARKAS 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.
- [12] 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, 2014.
- [13] 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.
- NI CH Y. The non-destructive evaluation of surface breaking crack by using surface acoustic waves generated by the scanning laser source technique [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010.
- [14] 唐又红,左欧阳,武美萍. 激光超声裂纹深度定量检测研究[J]. *应用激光*, 2020, 40(6):1144-1152.
- TANG Y H, ZUO OU Y, WU M P. Research on laser ultrasonic crack depth quantitative detection [J]. *Applied Laser*, 2020, 40(6): 1144-1152.
- [15] 李海洋,李巧霞,王召巴,等. 基于激光超声临界频率的表面缺陷检测与评价[J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 134-142.
- LI H Y, LI Q X, WANG ZH B, et al. Detection and evaluation of surface defects based on critical frequency method by laser ultrasonic [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 134-142.
- [16] 张晓彤,潘强华,邓进,等. 基于激光超声绕射波能量的微裂纹角度检测[J]. *应用激光*, 2022, 42(6): 69-78.
- ZHANG X T, PAN Q H, DENG J, et al. Detection of microcrack angle based on laser ultrasonic diffraction wave energy[J]. *Applied Laser*, 2022, 42(6): 69-78.
- [17] LIU P, SOHN H. Numerical simulation of damage detection using laser-generated ultrasound [J]. *Ultrasonics*, 2016, 69: 248-258.
- [18] YI D, PEI C X, LIU T, et al. Inspection of cracks with focused angle beam laser ultrasonic wave [J]. *Applied Acoustics*, 2019, 145:1-6.
- [19] NOROY M H, ROYER D, FINK M. The laser-generated ultrasonic phased array: Analysis and experiments[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1993, 94(4): 1934-1943.
- [20] PEI C X, DEMACHI K, FUKUCHI T. Cracks measurement using fiber-phased array laser ultrasound generation [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(16):163101-163101-7.
- [21] BRUINSMA A J A, VOGEL J A. Ultrasonic noncontact inspection system with optical fiber methods [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(22):4690-4695.
- [22] MURRAY T W, DEATON J B, WAGNER J W. Experimental evaluation of enhanced generation of ultrasonic waves using an array of laser sources [J]. *Ultrasonics*, 1996, 34(1):69-77.
- [23] SAMPATH S, SOHN H. Non-contact microcrack detection via nonlinear Lamb wave mixing and laser line arrays[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 237: 107769.
- [24] MICHAELS T E, MICHAELS J E, RUZZENE M. Frequency-wavenumber domain analysis of guided wavefields [J]. *Ultrasonics*, 2011, DOI: 10.1016/j.ultras.2010.11.011.
- [25] LEE J R, CHIA C C, PARK C Y, et al. Laser ultrasonic anomalous wave propagation imaging method with adjacent wave subtraction: Algorithm[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(5): 1507-1515.
- [26] CHOI Y S, JEONG H, LEE J R. Laser ultrasonic system for surface crack visualization in dissimilar welds of control rod drive mechanism assembly of nuclear power plant [J]. *Shock Ang Vibration*, 2014.
- [27] HE Y, WANG K, XU L, et al. Laser ultrasonic imaging of submillimeter defect in a thick waveguide using entropy-polarized bilateral filtering and minimum variance beamforming [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 186: 109863.
- [28] HONG X, HUANG L, LIU F Y, et al. Laser ultrasonic scanning for detection of damage in copper pipelines using blind compressive sensing and the adjacent area difference coefficient [J]. *Measurement Science and Technology*, 2022, 33(6): 065202.
- [29] 高坪純治,宮内秀和,矢代茂樹,等. レーザー利用の超音波伝搬映像化技術[J]. *可視化情報*, 2006, 10: 29-34.
- TAKATSUBO J, HIDEKAZUM, SHIGEKIY. Laser used in ultrasonic transmission imaging technology[J]. *Journal of*

- the Visualization Society of Japan, 2006, 10:29-34.
- [30] TAKATSUBO J, WANG B, TSUDA H, et al. Generation laser scanning method for the visualization of ultrasounds propagating on a 3-D object with an arbitrary shape [J]. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 2007, 1(12): 1405-1411.
- [31] YASHIRO S, TAKATSUBO J, TOYAMA N. An NDT technique for composite structures using visualized Lamb-wave propagation [J]. Composites Science & Technology, 2007, 67(15-16): 3202-3208.
- [32] YU F, SAITO O, OKABE Y. An ultrasonic visualization system using a fiber-optic Bragg grating sensor and its application to damage detection at a temperature of 1000°C [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021; 147:107140.
- [33] ZENG Y, WANG X, QIN X, et al. Laser ultrasonic inspection of a wire + arc additive manufactured (WAAM) sample with artificial defects [J]. Ultrasonics, 2021, 110(8):106273.
- [34] ZHANG K S, LI S C, ZHOU Z G. Detection of disbonds in multi-layer bonded structures using the laser ultrasonic pulse-echo mode [J]. Ultrasonics, 2018; S0041624X1730971X.
- [35] LEE J R, JEONG H, CIANG C C, et al. Application of ultrasonic wave propagation imaging method to automatic damage visualization of nuclear power plant pipeline[J].

Nuclear Engineering & Design, 2010, 240 (10): 3513-3520.

作者简介



罗朝莉, 2017 年于北京交通大学获得学士学位, 西安石油大学研究生, 主要研究方向为激光超声与冷阴极 X 射线检测技术。
E-mail: 714116474@qq.com

Luo Zhaoli received her B. Sc. degree from Beijing Jiaotong University in 2017. Now she is a M. Sc. candidate in Xi'an Shiyou University. Her main research interests include laser ultrasound and cold cathode X-ray technology.



朱冰 (通信作者), 2000 年于西安石油大学获得学士学位, 2006 年于西北工业大学获得硕士学位, 2012 年于西北工业大学获得博士学位, 现为西安石油大学副教授, 主要研究方向为无损检测、数字图像处理。

E-mail: Bzhu@xsyu.edu.cn

Zhu Bing (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xi'an ShiYou University in 2000, M. Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 2006, and Ph. D. degree from Northwestern Polytechnical University in 2012, respectively. Now he is an associate professor in Xi'an Shiyou University. His main research interests include non-destructive testing and digital image processing.