

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107515

基于二维延时叠加的激光诱导声表面波成像研究*

李兵^{1,2}, 唐涛¹, 秦峰²

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710054;
2. 西安交通大学微纳制造与测试技术国际合作联合实验室 西安 710049)

摘要:激光诱导声表面波损伤成像是激光超声无损检测的难点之一,存在成像分辨率低、成像效果差、设备要求高等问题。针对这些问题,提出采用二维延时叠加成像算法提高成像质量。首先通过实验和仿真手段对激光超声扫描过程中产生的多种信号进行系统的分析,以此为基础改进激光诱导声表面波的成像算法。本文设置具有深度梯度的矩形裂纹缺陷和圆形缺陷,通过激光超声扫描平台对缺陷进行扫描检测并成像,图像清晰地反映了两种类型缺陷的形貌。成像结果表明二维延时叠加成像算法的分辨能力较能量法有显著的提高,半峰全宽不超过0.3 mm,对圆形缺陷半径与矩形裂纹长度的测量误差不超过0.4 mm,并且对缺陷深度也有一定的测量能力。

关键词:激光超声;声表面波;无损检测;延时叠加

中图分类号: TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Study on imaging of laser-induced surface acoustic wave based on 2D time-delay superimposition

Li Bing^{1,2}, Tang Tao¹, Qin Feng²

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China; 2. International Joint Laboratory for Micro/Nano Manufacturing and Measurement Technologies, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Damage imaging based on laser-induced surface acoustic wave is one of the difficult points of laser ultrasonic nondestructive testing. There exist the problems such as low imaging resolution, poor imaging effect and high equipment requirements. Aiming at these problems, propose that the 2D time-delay superposition imaging algorithm is adopted to improve the imaging quality. Firstly, through experiment and simulation, a variety of signals generated in the process of laser ultrasonic scanning are systematically analyzed. Based on this, the imaging algorithm of laser-induced surface acoustic wave is improved. In this paper, the rectangular crack defects and circular defects with depth gradient are set up. Then, the defects are scanned, detected and imaged with the laser ultrasonic scanning platform. In the images, the morphologies of the rectangular crack defects and circular defects are clearly reflected. The imaging results show that the resolution of the 2D time-delay superposition imaging algorithm is significantly improved compared with that of the energy method. The full width at half maximum is no more than 0.3 mm; and the measurement errors of the radius of the circular defects and the length of rectangular crack defects are no more than 0.4 mm. And the algorithm also has certain measurement ability for the defect depth.

Keywords: laser ultrasonic; surface acoustic wave; nondestructive testing; time-delay superimposition

0 引言

随着近年来科学技术的进步,工业现代化实现了飞速的发展,取得了卓越的成就。无损检测技术在其中起

着重要的作用。激光超声无损检测技术,是激光作为激发方式的超声检测。相较于传统的超声探测,非接触式的超声激发方式使激光超声具有许多优点:在热弹效应的范围内时检测过程完全无损;激光声源非常灵活,可根据材料的形状等参数调节激光的位置、距离、大小和形状

收稿日期:2021-02-22 Received Date: 2021-02-22

* 基金项目:国家科技重大专项(2017-VII-0008-0101)、国家自然科学基金项目(51875448)资助

等特征,可对表面形状复杂的对象进行检测;可远距离激发和接收,方便实现自动化检测。

White^[1]提出了热弹机制,建立了激光超声理论,利用一维热扩散理论建立了激光束与物体热耦合模型,解释了材料热弹形变到产生超声波的物理过程。在此之后激光超声在理论、实验、应用等方面不断发展,成为了一个极具吸引力的热点研究方向。激光超声已在厚度测量^[2],应力测量^[3],弹性常数测量^[4-5],缺陷检测^[6-8],晶粒尺寸表征^[9]等方面均有应用,在众多工业领域都有着广阔的前景。

Achenbach^[10]首次将激光光源沿着材料表面进行扫描并以此进行缺陷检测,这种扫描激光源法为无损检测带来了新的方向,使得激光超声成像成为了可能。曾伟^[11]研究了一种基于能量分析的激光超声波检测技术,对表面带有圆孔缺陷的铝样品和带有方形凹槽缺陷的不锈钢材料进行激光超声波检测,得到扫描区域内的能量分布图像。这种成像方法能直观、高效地检测出被检测材料表面的缺陷位置、形状、大小等信息,且结构简单,抗噪声能力强。Park 等^[12]结合二进制搜索和压缩感知的加速激光超声扫描技术从稀疏扫描点的信号重建损伤周围的波场图像,并极大地提高了检测效率。Gao 等^[13]提出了一种基于多频局部波数估计的激光超声导波检测方法,通过滑动波数窗口成像来计算缺陷的尺寸,位置和深度。骆英等^[14]将一维扫描阵列的信号进行频段滤波后将散射波通过频率波数域反演后与入射波相累加得到了较好的损伤成像结果。Levesque 等^[15]将激光超声与频域合成孔径技术结合在一起并进行了改进,得到了高信噪比的损伤成像结果。Selim 等^[16]使用切趾函数改善了合成孔径成像方法,提高了激光超声 3 d 成像的分辨率。

虽然目前针对激光超声扫描成像已进行了深入研究,但是成像分辨率大多依赖于较小步长的扫描机构来实现,使得对于缺陷的成像往往需要繁复的操作和昂贵的设备。而高分辨率的合成孔径方法^[15-16]大多使用横波与纵波用于材料的内部检测,但激光超声在无损条件下的检测大多是热弹效应激发出表面波实现的。本文利用激光扫描激发出表面波,再将信息通过二维延时叠加算法进行成像,能够实现对缺陷的损伤成像,并有效提高成像的分辨率,从而实现缺陷的定性定量定位表征,并降低了对扫描设备、检测设备的要求。

1 实验与仿真

1.1 一维扫描的实验与仿真

由于激光超声含有多种类型声波,所以首先进行一维扫描以判断成像所需波形类型。在远离缺陷的位置进行扫描可以减少反射波的影响,从而超声波与裂纹相互

作用后产生的波形以散射波为主。在路径通过缺陷的位置进行扫描可以直接探究超声波与裂纹的相互作用。声波的传播具有互易性,超声波从声源沿某一路径传播至接收点的过程可看作从接收点以相同的条件和相同的路径传回声源点。这一性质可以简化许多声波的传播情况。因此检测过程可看作探头激发表面波,由扫描点接收。安装表面波探头,使用位移台沿表面波探头检测的平行方向以激发激光进行扫描并记录下信号,如图 1 所示。

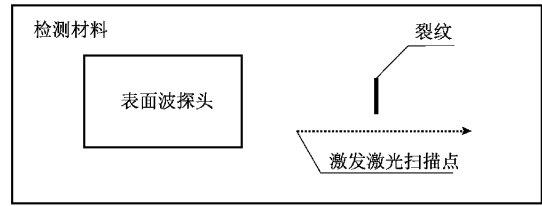


图 1 检测实验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of detection experiment

同时为了更好地研究这一过程,本文使用 kwave 工具箱对表面波的传播进行仿真。因为表面波探头具有方向性,只有平行于探头检测方向的超声波可被接收,整体可看作垂直于探头检测方向的线型超声波通过裂纹,其相互作用的声波由各扫描点接收。从而将多次由点声源激发的流程简化为一次由线声源激发的流程。因此两种情况的波场传播仿真如图 2 所示。

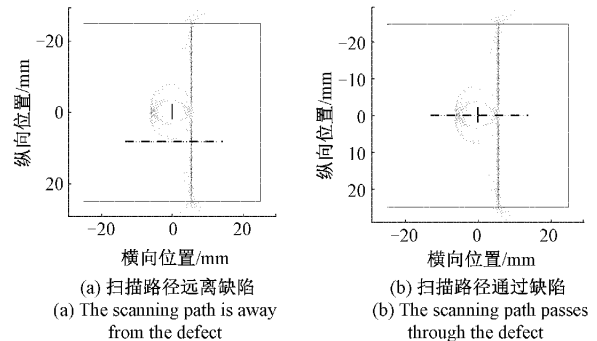


图 2 波场传播仿真

Fig. 2 Simulation of wave field propagation

以时间为 x 轴,扫描点位置为 y 轴,幅值为 z 轴绘制数据的 B 扫图像。图 3、4 为扫描路径远离缺陷的实验与仿真的 B 扫图像。除了入射波可以看到表面波在矩形凹槽 4 个边角处产生的 4 条极性各异的散射波。

图 5、6 为扫描路径通过缺陷的仿真与实验一维扫描的 B 扫图像。这种检测方式得到的幅值最大的是超声波与裂纹相互作用后产生的反射波或透射波,同时还有各种丰富的模式转换波形。

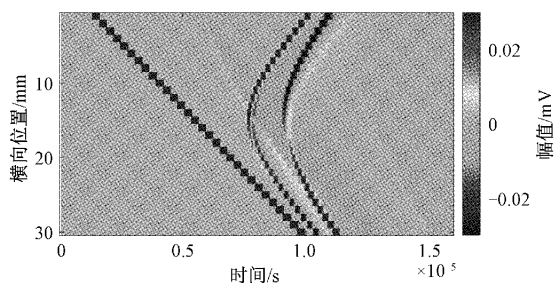


图3 扫描路径远离缺陷仿真的B扫图像

Fig. 3 The B-scan image in simulation when scanning path is away from defect

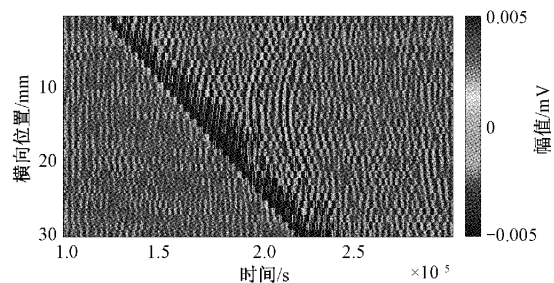


图4 扫描路径远离缺陷实验的B扫图像

Fig. 4 The B-scan image in experiment when scanning path is away from defect

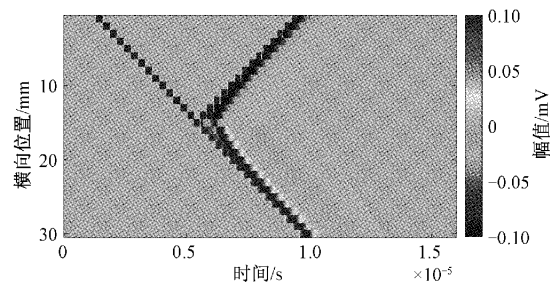


图5 扫描路径通过缺陷仿真的B扫图像

Fig. 5 The B-scan image in simulation when scanning path passes through the defect

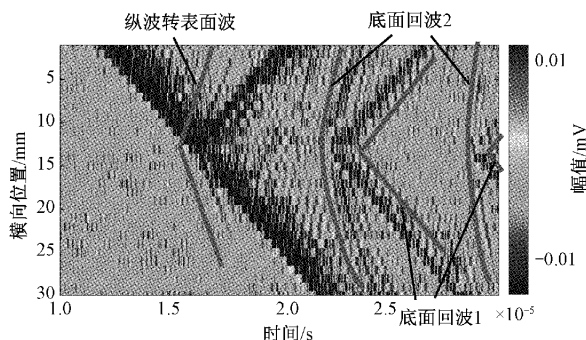


图6 扫描路径通过缺陷实验的B扫图像

Fig. 6 The B-scan image in experiment when scanning path passes through the defect

图5与6对比可以看到除了共有的直达波、反射波和透射波外还多了许多不同的波形。本文的仿真是在二维平面上进行的仿真,因此其为表面波与裂纹作用后发生模式转换的波形。其中包括纵波转表面波与两种不同类型的底面回波。以下为两种底面回波的解释。

图6中底面回波1为表面波与裂纹作用转换为横波(S),又在底面反射回缺陷处发生模式转换为表面波(SR)被表面波探头接收。图6中曲线部分的底面回波2为激光在材料上激发的横波由底面反射后在缺陷处发生模式转换变为表面波被探头接收的信号。其机理如图7所示。末端重复的底面回波1与底面回波2为二次底面回波。

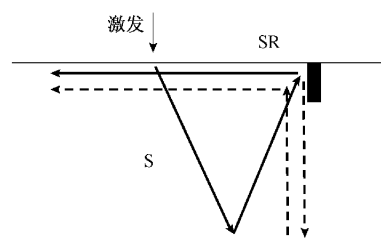


图7 激光激发横波转换为表面波的过程

Fig. 7 Laser-induced shear wave is converted to surface wave

1.2 二维扫描实验

激光超声声源灵活,易于实现多种扫描方式,二维扫描是最常用的一种。通过激光源的二维扫描,由互易性激光扫描源可看做密集布置的超声探头阵列,从而能够从材料表面获得丰富的波场信息。其由互易性可知的扫描过程如图8所示。

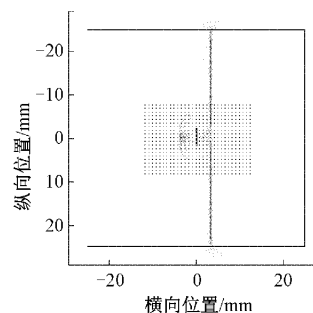


图8 二维扫描实验

Fig. 8 2D scanning experiment

铝材料在航空航天等行业有着广泛应用,且在激光超声的研究领域进行了广泛的实验,所以以纯铝材料为实验样品具有参考性且有较大的实验价值。铝板型号为1060纯铝,长度为200 mm,宽度为50 mm,厚度为

10 mm。在平板材料中设置了裂纹型缺陷和圆形缺陷。用标准槽代替裂纹型缺陷,裂纹型缺陷的宽度和长度分别为 0.5 mm 和 5 mm,缺陷的深度分别为 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 mm。圆形缺陷为标准圆形凹槽,圆形缺陷的直径为 5 mm,深度分别为 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 mm。图 9、10 所示为加工了其中 3 种深度缺陷的铝板。

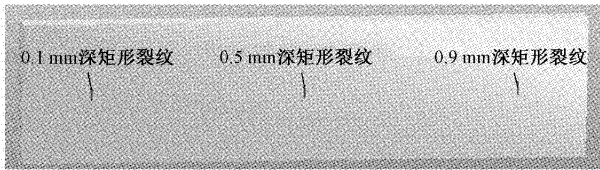


图 9 矩形裂纹缺陷铝板

Fig. 9 Aluminum plate with rectangular crack defect

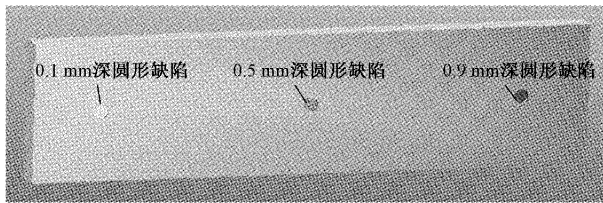


图 10 圆形缺陷铝板

Fig. 10 Aluminum plate with circular defect

激光器采用高功率脉冲激光器,波长 1 064 nm,脉宽 8 ns,激光单次脉冲能量在 20~150 mJ,可在铝板上激发出中心频率为 2.5 MHz 的超声波。围绕缺陷划出 19 mm×29 mm 的区域进行激光超声扫描实验,得到 600 个扫描点的数据。将扫描点数据由各点信号的幅值直接成像得到激光超声表面波在各时刻的声场图像,如图 11 所示。该时刻可以清晰看到直达波与缺陷作用的反射波,通过该图可以对缺陷位置形貌等进行初步定量表征。但从图中可看出成像效果较差,分辨率较低,且无法直接得到缺陷形貌与位置。针对此问题本文提出应用并改进延时叠加成像方法提高成像分辨率。

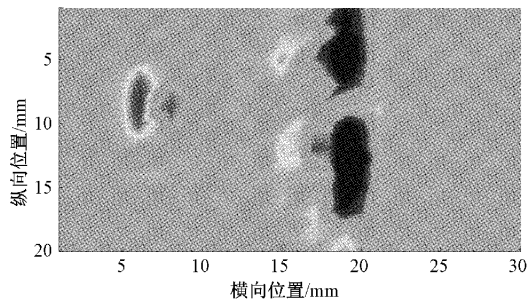


图 11 扫描数据图像

Fig. 11 Scanning data image

2 延时叠加算法

2.1 一维延时叠加法

扫描成像方法可分为使用特征量直接进行成像与利用时域波数域等信息进行反演的成像。直接成像可利用的特征量包括信号幅值、信号能量、频域特征、波数域特征等。一维扫描无法直接实现二维空间的成像,一般只能通过反演方法来得到二维图像。

延时叠加法是一种有效提升超声分辨率的损伤成像方法,通过调整接收到的信号的时延来实现聚焦。在 5 mm 长、0.5 mm 宽的矩形裂纹的 $y=20$ mm 处测量一组数据,使用延时叠加法得到如图 12 所示结果。可见在 (13,5)(13,10) 两个坐标附近有异常的波形,这就是根据散射波所聚焦的缺陷。入射波对图像有较大的干扰,造成了左下角条纹状的波纹,且越靠近检测位置幅度越大。此时需要滤去直达波成分。

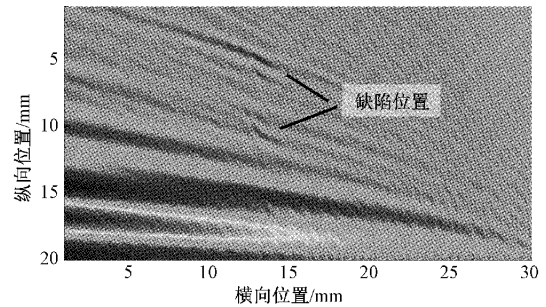


图 12 延时叠加结果

Fig. 12 Result of time-delay superimposition

图 13(a) 为一个扫描点对整幅图的作用,图 13(b) 为时域上加窗滤掉直达波之后扫描点对整幅图的作用,抛物线形状的空洞就是在时域上被滤掉的直达波成分。图 14 为滤掉直达波后的最终结果,信噪比得到了较大提升。其两个波形峰值分别在 (13.1, 5.4)、(13.2, 10.3)。从最终的成像效果上看,表面波的一维延时叠加法噪声较多。

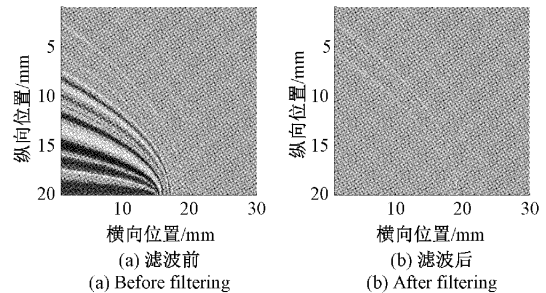


图 13 延时叠加中直达波的时域滤波

Fig. 13 Time-domain filtering of direct wave in time-delay superimposition

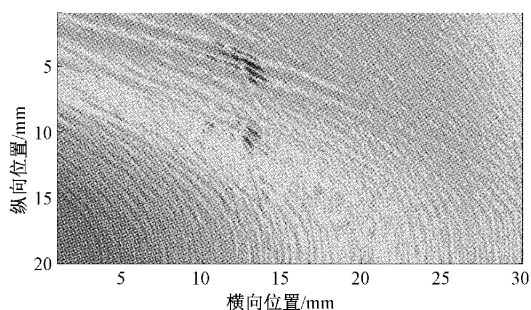


图 14 滤波后的成像结果

Fig. 14 Imaging result after filtering

图 15 为对直径 5 mm 的圆形缺陷的一维延时叠加法的成像图,图中并不能获得圆形缺陷的轮廓,波形叠加到了缺陷边缘的一个散射点,因此无法对圆形缺陷的特征进行进一步测算。

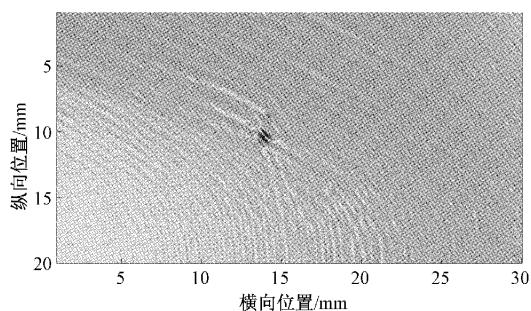


图 15 圆形缺陷的一维延时叠加成像结果

Fig. 15 1D time-delay superimposition imaging results of the circular defect

2.2 二维延时叠加法

激光超声扫描检测中,相较于一维扫描,二维扫描能够获得更多信息。但通常获得一幅成像图需要成千上万个点,这对扫描设备有较高的要求。延时叠加可以通过后处理来弥补扫描点少的问题。

图 16 所示为二维延时叠加法的基本原理。首先将检测区域划分网格得到所需的聚焦点。假设聚焦点存在微小缺陷,则直达波遇到缺陷后发生散射或反射被各个扫描点所接收。根据表面波到聚焦点再到各扫描点的声程得到扫描点的信号所需要的延迟的时间值,将所有延迟后的信号相加即得到了聚焦点的信号。当聚焦点附近有缺陷时,该点的幅值便被极大地累加起来,最终呈现出缺陷的形貌,同时可以通过缩小聚焦点间隔来增大分辨率。其数学表达式为:

$$u_{das}(t) = \sum_1^N u_n \left(t - \frac{l}{c_r} - r_n \right) \quad (1)$$

$$r_n = \left| \overrightarrow{u_{das} u_n} \right| \quad (2)$$

式中: u_{das} 表示聚焦点; u_n 表示扫描点; l 表示探头到聚焦点的距离; c_r 表示表面波速度; r_n 表示聚焦点到扫描点的距离。

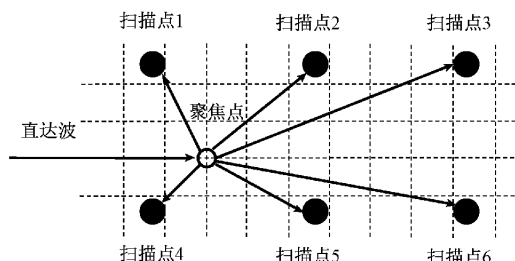


图 16 表面波的二维延时叠加的基本原理

Fig. 16 The basic principle of 2D time-delay superimposition for surface acoustic wave

使用二维延时叠加法对矩形裂纹曲线进行成像,其结果如图 17(a) 所示。其中入射波对图像的影响较大使得裂纹缺陷信息几乎被覆盖。在时域加窗降低入射波基础上,再设立一个规则来过滤入射波:当聚焦点位于扫描点左侧且 y 向距离少于一定值时舍去该扫描点。该规则可有效去除入射波但同时也会降低部分正向传播的波的作用。同时可以看到在缺陷的右侧 10 mm 左右的地方还有一个杂波。根据第 2 节中的分析,该波为底面回波,为降低该波的影响,再设立一个过滤规则:距离聚焦点一定半径以外的扫描点全部舍弃。由于该规则去除了离聚焦点过远的扫描点,所以它同时也能起到过滤其他杂波的作用。滤波后的成像结果如图 17(b) 所示,与滤波前的结果图 17(a) 相比可见该规则能有效去除缺陷左侧靠近激发位置的直达波所导致的伪影,并减弱由于底面回波导致的伪影。两条规则可表示为:

$$u_n = \begin{cases} 0, & x_{das} < x_n \cap |y_{das} - y_n| < y_M \\ u_n, & x_{das} \geq x_n \cup |y_{das} - y_n| > y_M \end{cases} \quad (3)$$

$$u_n = \begin{cases} 0, & r_n > r_M \\ u_n, & r_n \leq r_M \end{cases} \quad (4)$$

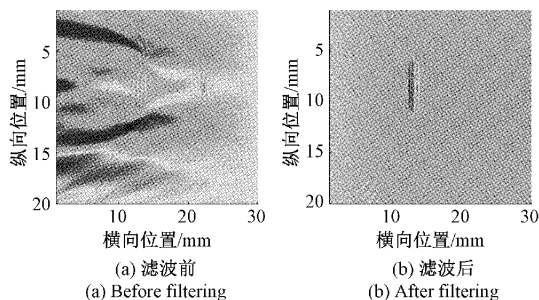


图 17 矩形裂纹缺陷在过滤杂波前后的二维延时叠加成像结果

Fig. 17 2D time-delay superimposition imaging results of the rectangular crack defect before and after filtering

3 成像结果与分析

3.1 圆形缺陷的成像结果与分析

以 0.1 mm 的聚焦点间隔使用二维延时叠加算法分别对深度为 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 mm 深的圆形缺陷进行扫描成像,将 600 个扫描点扩展为约 60 000 个数据点。图 18 为 0.1 mm 深圆形缺陷的二维延时叠加成像与能量法成像图。可以看出能量法无法对浅圆形缺陷进行识别,而二维延时叠加算法成像图虽然幅值较小,但能够准确直观地表征出圆形缺陷的形貌与位置。采用 -6 dB 的波束宽度,即半峰全宽 (full-width at half maximum, FWHM) 对成像质量进行量化评估。二维延时叠加成像的 FWHM 值小于 0.2 mm,而原始扫描步长为 1 mm,表明该方法能有效提高分辨率。

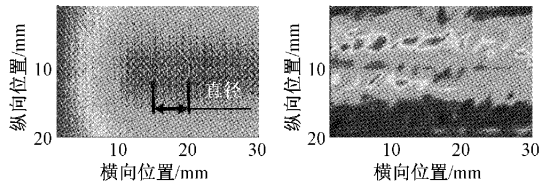


图 18 0.1 mm 圆形缺陷的两种方法的成像结果
Fig. 18 Imaging results of the 0.1 mm deep circular defect with two methods

图 19 为 4 种深度圆形缺陷的二维延时叠加成像结果。由图 18(a)与图 19(a)(b)可看出,0.1、0.3、0.5 mm 深的圆形缺陷的成像结果能清晰识别出右侧轮廓,而当缺陷深度超过大约表面波波长 1/2,即图 19(c)、(d),0.7、0.9 mm 深时,则难以识别出右侧轮廓,因此浅缺陷虽然难以识别,但能够提供更多探头对侧的信息。

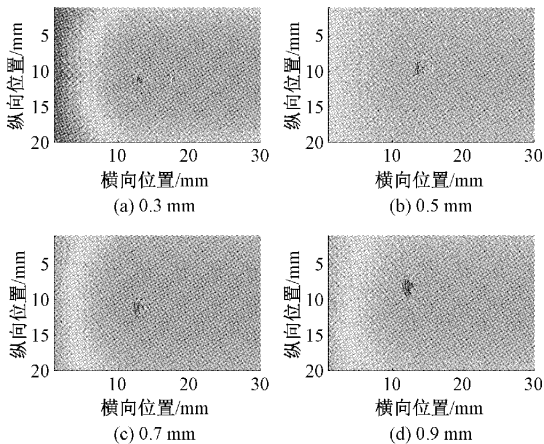


图 19 不同深度圆形缺陷的二维延时叠加成像结果
Fig. 19 2D time-delay superimposition imaging results of circular defects with different depths

图 20 为二维延时叠加成像结果中两侧信号幅值比与缺陷深度的关系曲线,可以看出深度越深,探头对侧与探头正侧的幅值比越小,因此能够以此定量表征缺陷深度,但缺陷深度在 0.5 mm 以上时该对应关系较弱,该特征的代表深度的范围应限于半个表面波波长以内。由 0.1、0.3、0.5 mm 的图像中测得圆形缺陷直径分别为 5、4.9、4.9 mm,由激光三坐标测量仪测得直径均为 5.1 mm,误差最大为 0.2 mm。

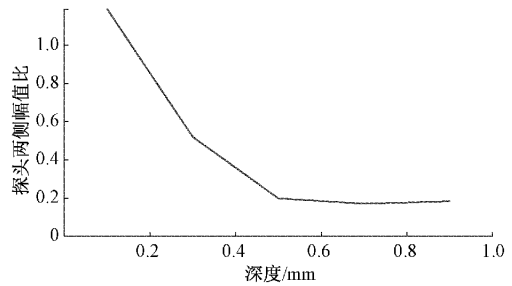


图 20 两侧信号幅值比与缺陷深度的关系
Fig. 20 Relationship between the amplitude ratio of the signals on two sides and defect depth

3.2 裂纹型缺陷的成像结果与分析

1) 直裂纹的成像结果与分析

图 21 为 0.1 mm 裂纹型缺陷的二维延时叠加成像与能量法成像图。能量法对 0.1 mm 裂纹的成像效果较差,而二维延时叠加法的成像效果较好。二维延时叠加成像的 FWHM 值小于 0.3 mm,能量法约 2 mm。

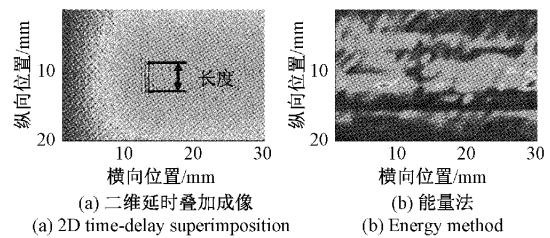


图 21 0.1 mm 裂纹缺陷的二维延时叠加成像与能量法成像结果

Fig. 21 2D time-delay superimposition imaging results of the 0.1 mm deep rectangular crack defect with two methods

图 22 为 0.3、0.5、0.7、0.9 mm 深裂纹缺陷的成像结果。由裂纹型缺陷的成像结果可以分析得出,对于裂纹,由于波长与扫描步长的限制,裂纹宽度与波长相近,两侧波形相重叠,无法识别对侧波形,矩形裂纹的右侧实际上很难判断,所以后续可以加装多个表面波探头同时测量,再通过拼接合成方法由多段轮廓信息得到全部轮廓。由图 21(a)与图 22 测得 5 种深度的矩形裂纹的长度分别

为4.6、4.8、5 mm、4.9、5.2 mm,激光三坐标测量仪测得长度均为5 mm,误差最大为0.4 mm。

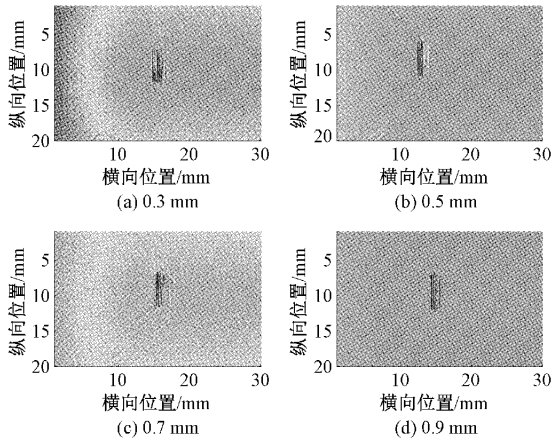


图 22 不同深度矩形裂纹缺陷的二维延时叠加成像结果
Fig. 22 2D time-delay superimposition imaging results of rectangular crack defects with different depths

2) 斜裂纹的成像结果与分析

图 23 为斜裂纹缺陷的扫描检测实验示意图。以能量法与二维延时叠加成像对实验数据进行成像。图 24 为两种方法的成像结果。其二维延时叠加成像的 FWHM 值小于 0.3 mm,能量法约 1.5 mm。由以上圆形、直裂纹与斜裂纹的成像结果对比可以看出,能量法与延迟叠加法均能得到缺陷的位置信息,但二维延时叠加法具有更好的分辨率与形貌表征能力。

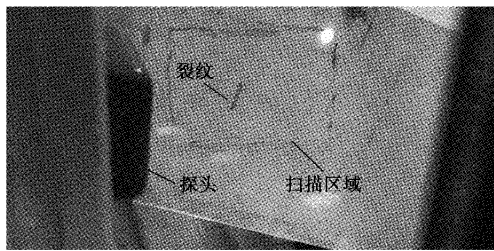


图 23 斜裂纹缺陷扫描实验
Fig. 23 Scanning experiment of the oblique crack

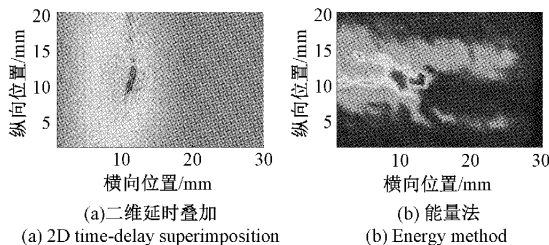


图 24 斜裂纹的损伤成像
Fig. 24 Damage imaging of the oblique crack

4 结 论

基于激光超声表面波,通过二维延时叠加算法对表面缺陷进行成像。通过该方法能够实现对缺陷的定位定性定量表征,并通过与能量法进行对比,结果表明该方法具有分辨率高,设备要求低等特点,且该方法适用于不同形状,不同方向缺陷。

1) 在激光超声表面波缺陷检测中采用二维延时叠加成像算法进行损伤成像,能够直观地给出缺陷的形貌特征与位置信息,并在较少扫描点的条件下有效提高分辨率,且半峰全宽不超过 0.3 mm,对圆形缺陷半径与矩形裂纹长度的测量误差不超过 0.4 mm。

2) 由于延时叠加效果受到缺陷深度的影响,即正对侧信号幅值比与缺陷深度密切相关。基于此便可实现缺陷的定量表征。研究发现在缺陷深度小于半个表面波波长时探头对侧与探头正侧信号的幅值比随缺陷深度的增加而减小,能够以此在较小范围内定量表征缺陷深度。

参考文献

[1] WHITE R M. Generation of elastic waves by transient surface heating[J]. Journal of Applied Physics, 1963, 34(12):3559-3567.

[2] 杨依光,赵锋,王飞,等. 管道壁厚及焊缝缺陷激光超声检测技术[J]. 油气储运,2015,34(7):751-754.
YANG Y G, ZHAO F, WANG F, et al. Laser ultrasonic detection technology of pipe wall thickness and weld defects [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(7):751-754.

[3] 潘永东,钱梦驩,徐卫疆,等. 激光超声检测铝合金材料的残余应力分布[J]. 声学学报,2004(3):254-257.
PAN Y D, QIAN M L, XU W J, et al. Residual stress profiling of an aluminum alloy by laser ultrasonics [J]. Acta Acustica, 2004(3):254-257.

[4] QIN F, LI B, CHEN L, et al. Laser-induced surface acoustic waves for measurement of elastic constants based on mode conversion [J]. Materials Chemistry and Physics, 2020,242:122523.

[5] 何存富,周辛庚,戴福隆. 一种非接触式测定材料弹性常数的新方法[J]. 力学学报,1997,29(6):720-725.
HE C F, ZHOU X G, DAI F L. A new non-contact method for measuring elastic constants of materials [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1997,29(6):720-725.

[6] 周正干,孙广开,李征,等. 复合材料层压板钻孔分层激光超声检测方法[J]. 机械工程学报,2013,49(22):29-33.
ZHOU ZH G, SUN G K, LI ZH, et al. Laser ultrasonic

- detection of drilling-induced delamination in composite laminates[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49 (22):29-33.
- [7] QIN F, LI B, CHEN L, et al. Quantitative characterization of laser ultrasonic based on energy loss and resonance phenomenon [J]. *Optik*, 2020, 223: 165380.
- [8] 尤博文,倪辰荫,沈中华. 光热调制裂纹闭合的激光超声实时监测[J]. *中国激光*, 2019, 46(2):148-158.
YOU B W, NI CH Y, SHEN ZH H. Laser ultrasonic real-time monitoring of photothermal modulation crack closure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46 (2): 148-158.
- [9] XUE R, WANG X, YANG Q, et al. Grain size characterization of aluminum based on ensemble empirical mode decomposition using a laser ultrasonic technique[J]. *Applied Acoustics*, 2019, 156:378-386.
- [10] ACHENBACH J D. Simplifications for the calculation of surface wave pulses generated by laser-irradiation[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2004, 116(3):1481.
- [11] 曾伟. 扫查式激光超声技术及其在表面缺陷检测中的应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2016.
ZENG W. Research on the scanning laser ultrasonic technology and application in the detection of surface defect[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [12] PARK B, SOHN H, LIU P. Accelerated noncontact laser ultrasonic scanning for damage detection using combined binary search and compressed sensing [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2017, 92(AUG.):315-333.
- [13] GAO T F, SUN H, HONG Y Q, et al. Hidden corrosion detection using laser ultrasonic guided waves with multi-frequency local wavenumber estimation[J]. *Ultrasonics*, 2020, 108:106182.
- [14] 骆英,陈力,徐晨光,等. 激光超声导波分段时域滤波及频率波数域逆时损伤成像[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(13):87-94.
- LUO Y, CHEN L, XU CH G, et al. Time-reversal damage imaging in f-k domain method based on laser ultrasonic guide wave time-domain filtering in multi-band[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(13):87-94.
- [15] LEVESQUE D, OCHIAI M, BLOUIN A, et al. Laser-ultrasonic inspection of surface-breaking tight cracks in metals using SAFT processing [C]. *Ultrasonics Symposium*, 2002,1: 753-756.
- [16] SELIM H, DELGADO-PRIETO M, TRULL J, et al. Defect reconstruction by non-destructive testing with laser induced ultrasonic detection [J]. *Ultrasonics*, 2020, 101:106000.

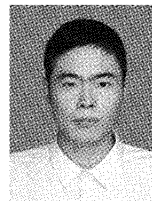
作者简介



李兵,分别在1988年、1991年和2004年于西安交通大学获得学士学位、硕士学位和博士学位,现为西安交通大学教授、博士生导师,主要研究方向为精密测试技术、无损检测、大尺寸复杂表面检测等。

E-mail: lb@xjtu.edu.cn

Li Bing received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Xi'an Jiaotong University in 1988, 1991 and 2004, respectively. Now, he is a professor and Ph. D. supervisor at Xi'an Jiaotong University. His main research interest includes precision test technology, nondestructive testing and large scale complex surface inspection.



唐涛(通信作者),2018年于重庆大学获得工学学士学位,现为西安交通大学硕士研究生,主要研究方向为激光超声无损检测技术。

E-mail: tangtao1996@stu.xjtu.edu.cn

Tang Tao (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Chongqing University in 2018. Now, he is an M. Sc. candidate at Xi'an Jiaotong University. His main research interest is laser ultrasonic nondestructive testing technology.