

材料内部缺陷的激光超声反射横波双阴影检测方法

孙凯华¹, 沈中华², 李远林², 李建文¹, 王增勇¹, 孙朝明¹

¹中国工程物理研究院机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621999;

²南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094

摘要 为了实现材料内部微小缺陷的非接触无损检测, 解决激光超声检测内部缺陷时衍射回波信号弱、透射体波检测无法获得缺陷深度信息等问题, 提出了一种激光超声反射横波双阴影检测方法。该方法结合超声透射法和反射法的优点, 依据缺陷对反射横波的两次衰减作用, 利用时间飞行法对样品进行扫描检测, 通过波形互相关算法计算波形时延, 精确测量了激光激发点与探测点距离和横波双阴影间距, 结合样品厚度实现了对直径为 0.8 mm 内部缺陷的检出和深度定位。与 X 射线数字射线照相、传统超声换能器检测的结果进行对比后可知, 激光超声方法能够实现材料内部微小缺陷的非接触无损检测和精确定位。

关键词 测量; 激光超声; 无损检测; 双阴影法; 反射横波; 内部缺陷

中图分类号 TN247; O426

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0710001

Inspection of Material Internal Defects Using Double Shadow Method Based on Laser Ultrasonic Reflected Shear Waves

Sun Kaihua¹, Shen Zhonghua², Li Yuanlin², Li Jianwen¹, Wang Zengyong¹, Sun Chaoming¹

¹*Institute of Mechanical Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang, Sichuan 621999, China;*

²*School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China*

Abstract Because the amplitude of diffraction waves from the internal defects is weak and the depth information of the defects cannot be obtained by transmission bulk waves, it is still difficult to inspect the small internal defects of material by using laser ultrasonics (LU) in nondestructive conditions. In order to achieve remote nondestructive testing of internal tiny defects, we propose a double shadow method based on the LU reflected shear waves. By combining the advantages of the ultrasonic transmission method and the reflection echo-wave method, this method utilized the time of flight method to inspect the internal defects based on the twice attenuation effect of the defects on the reflected shear waves. The cross-correlation algorithm is used to calculate the time delay of the surface acoustic wave and the reflected shear wave, respectively. On basis of the accurate measurement of the distance between the pump and probe lasers, the distance between the two shadow positions and the thickness of the sample, the internal defect of 0.8 mm diameter is successfully detected by the double shadow method, and the depth position of the defect is measured. By comparing with the result of X-ray digital radiography imaging and the detection of conventional ultrasound transducers, the experimental results demonstrate that the LU method has the ability to inspect the internal tiny defects and locate the position of the defects accurately under nondestructive conditions.

Key words measurement; laser ultrasonics; nondestructive testing; double shadow method; reflected shear waves; internal defects

OCIS codes 280.3375; 120.4290; 110.5125; 110.7170

收稿日期: 2017-12-26; 收到修改稿日期: 2018-02-06

基金项目: 中国工程物理研究院发展基金(2015B0203028)

作者简介: 孙凯华(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事激光超声检测、射线检测等技术方面的研究。

E-mail: sundoom@126.com

导师简介: 沈中华(1973—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光超声技术及应用、激光与材料相互作用及应用等方面的研究。E-mail: shenzh@njust.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

由于加工或处理不当,材料中常常会产生内部缺陷,当对材料长期施加载荷时,其内部的体积型缺陷会在外力作用下发展成为裂纹并扩展,最终导致材料结构断裂失效,这会给工程质量安全等带来巨大危害。因此,对材料内部缺陷进行无损检测至关重要。材料内部缺陷的无损检测方法主要有射线检测、超声检测、涡流检测等。其中,超声检测法具有无辐射危害、穿透厚度大、无材料种类限制、成本低等优点,被广泛应用于航空航天、机械制造等工业领域。然而,传统的超声检测方法是利用耦合剂利用压电换能器产生超声波对材料进行接触式检测的,不适合用于高温、高压、高辐射等恶劣的环境下。加之探头的结构尺寸受限,难以对复杂结构实现快速的扫查检测。

激光超声^[1-5](LU)作为一种新型的超声无损检测技术,继承了传统超声检测的优势,可以同时实现超声波的非接触激发与检测。利用脉冲激光辐照材料表面可以同时激发出多种模式的超声波,如超声表面波、超声体波(纵波和横波)等,可用于不同位置和不同类型的缺陷检测。目前,基于LU的缺陷无损检测研究主要集中在利用声表面波进行表面缺陷检测方面^[6-10],对于薄板中的内部缺陷,多采用导波检测方法^[11-12],而在大厚度材料中通常采用反射体波法^[13-15]或透射体波法^[16-18]进行检测。Levesque等^[13-14]利用LU反射纵波法结合合成孔径聚焦技术,在熔蚀机制下实现了对焊接、增材制造等结构内部缺陷的准确检测。Tanaka等^[16]在熔蚀机制下利用激光激发纵波,采用透射法对0.1 mm的通孔缺陷进行了检测,并分析了检测信号与缺陷尺寸的关系。相比于热弹机制,上述研究中采用熔蚀机制提高了纵波的激发效率,并将其传播方向由斜入射改变为垂直入射,更有利于缺陷的扫描检测,但是由于激光能量过大,损伤了材料,这种情况下已经不是严格意义上的无损检测。Pei等^[15]利用激光在热弹机制下激发出横波,通过检测横波与内部缺陷相互作用后产生的衍射信号实现通孔缺陷的测定,但由于衍射信号较弱,直径在1 mm以下缺陷的检测信号信噪比较差。在本课题组的早期工作^[18]中,通过在样品表面覆盖透明薄膜层实现了表面约束条件下对超声纵波的激发,实现了0.5 mm内部气孔缺陷的高精度无损检测。该方法虽然显著提高了纵波在热弹模式下的激发效率,并使其传播方向垂直于入射表面,更有利于对心透射检测,但由于约束机制需对

材料表面进行前处理,并且利用对心透射波检测方法难以实现对缺陷的深度定位,因此该方法有待进一步完善。上述研究工作表明,在热弹模式下实现对内部缺陷的无损检测和深度定位还存在一定困难。

为了克服LU在内部缺陷无损检测中存在的衍射信号弱、透射波难以定位缺陷深度等问题,本文结合体波反射法和衰减透射法的优点,提出了一种反射横波双阴影检测方法。该方法基于内部缺陷对底面反射横波的衰减原理,通过固定激发源与探测源的相对位置,精密移动样品实现时间飞行(TOF)法扫描检测;在扫描过程中,反射横波会被内部缺陷衰减两次,通过准确测定两次衰减信号的位置间距、激发探测位置间距和样品厚度实现内部缺陷的无损检测和深度定位。

2 双阴影检测方法的理论分析

2.1 反射体波双阴影检测法

为了改善缺陷衍射回波信号弱、透射体波检测法无法获得缺陷深度信息等问题,结合体波衰减透射法和反射法的优点,提出了一种基于反射体波的双阴影检测方法^[19],其检测过程示意图如图1所示,其中 Φ 为缺陷的直径。

所提方法拟采用激光热弹机制下无损激发、并经底面反射的体波作为检测波形,调节激发激光与探测激光的距离 W ,使探测得到的反射体波具有较高的幅值和信噪比,然后固定 W 不变,通过精密移动样品实现反射体波的扫描检测。在激光扫描的起始位置 a 处,内部缺陷不在反射体波的传播路径上,设此时的横坐标为 x_0 ;精密移动样品至 b 位置时,激发激光接近内部缺陷,此时内部缺陷第一次对底面反射体波产生衰减,声波幅值从 A_0 衰减到 A_1 ,此时的坐标为 x_1 ;激光继续向内部缺陷方向扫描,移动至 c 位置时,内部缺陷不再遮挡体波,信号幅值恢复正常大小;当扫描至 d 位置时,声波幅值又出现下降,缺陷对体波形成第二次衰减,此时坐标为 x_3 。由此可知,在反射体波扫描经过内部缺陷的过程中,缺陷会在 b 、 d 两个位置处对反射体波产生两次衰减作用,而探测到的反射体波的幅值会在这两个位置(对应坐标 x_1 和 x_3)处出现减小,即出现图1中波形幅值曲线所示的双阴影现象。因此,将该方法称为反射体波双阴影检测法。

通过测量两个阴影位置的间距 ϵ ,并依据激发探测距离 W 和材料厚度 H ,就可以利用(1)式计算得到内部缺陷的深度位置 h 和横向位置 x_d :

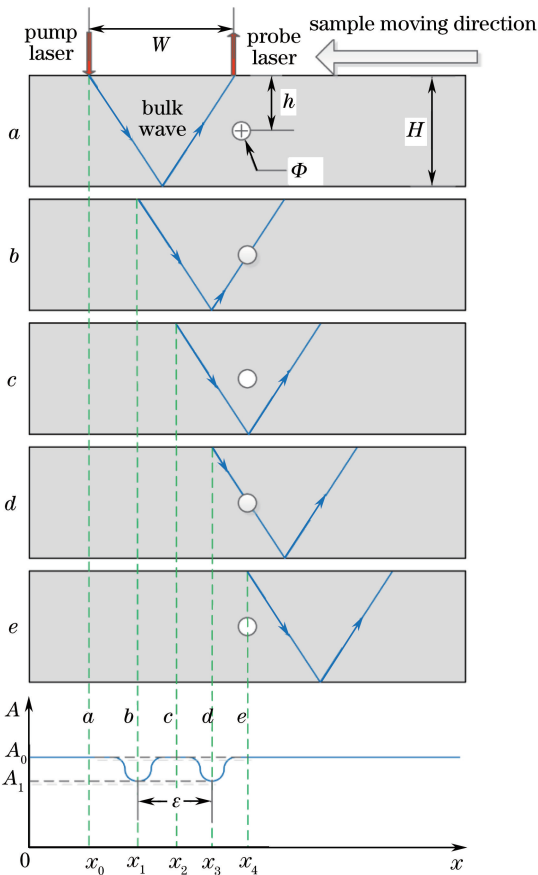


图 1 利用反射体波双阴影法在不同位置 (a, b, c, d, e) 处的缺陷检测示意图

Fig. 1 Schematic of defect detection of double shadow method with reflected bulk waves at different positions (a, b, c, d, e)

$$\begin{cases} h = (W - \epsilon)H/W \\ x_d = x_1 + (W + \epsilon)/2 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: x_1 为首次出现阴影时激发源的横坐标。该方法实现内部缺陷检测和定位的关键在于 ϵ 、 W 和 H 这 3 个距离的准确测量, 这就需要检测波形具有高信噪比和时域可辨识度(无干扰波形)。然而, 激光激发的体波具有两种模式, 经底面发射后还会发生模式转换, 并且各种模式的波形幅值会随激发探测距离的变化而变化。由此可知, 利用所提方法准确检测内部缺陷的前提是选取具有高幅值和信噪比的超声波模式, 并且波形在时域上无干扰, 区分辨识度高; 另外, 还需要选取合适的激发探测距离, 以保证所选波形具有较高的幅值。因此, 首先需要对 LU 体波经底面反射后的传播路径、模式转换以及随激发探测距离的幅度变化等传播特性进行理论分析。

2.2 LU 体波的传播特性及模式选取分析

激光辐照材料表面能够激发出多种类型的超声

波, 主要有沿材料表面传播的声表面波 R 和掠面纵波 L_s 、向材料内部传播的横波 S 和纵波 L 等, 如图 2(a) 所示。随着 W 的变化, 横波 S 和纵波 L 的幅度、传播路径和角度也会随之改变, 这两种波在传播到样品底面时均会发生反射和模式转换, 横波 S (或纵波 L) 的能量在经过底面反射后主要分成两部分: 反射横波 2S (或反射纵波 2L) 和横波转纵波 SL (或纵波转横波 LS)。利用 Comsol Multiphysics 软件对激光激发超声体波的传播声场以及模式转换进行有限元仿真^[20], 结果如图 2(b) 所示。

超声波经界面作用后产生的反射波和模式转换波都遵循声波的 Snell 定理, 即:

$$(\sin \theta_{in})/c_{in} = (\sin \theta_{out})/c_{out}, \quad (2)$$

式中: θ_{in} 和 θ_{out} 分别为入射角和出射角; c_{in} 和 c_{out} 分别为入射波波速和出射波波速。如图 2(a) 所示, 改变激发点与探测点的距离 W , 依据各模式超声波的波速可以计算得到各模式声波到达激光探测点的时间 t , R、 L_s 、2S、2L 的到达时间可分别表示为

$$\begin{cases} t_R = W/c_R \\ t_{L_s} = W/c_{L_s} \\ t_{2L} = W/\{c_L/\sin[\arctan(W/H/2)]\} \\ t_{2S} = W/\{c_S/\sin[\arctan(W/H/2)]\} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: c_R 、 c_{L_s} 、 c_L 、 c_S 分别为声表面波、掠面纵波、纵波和横波的声速。对于模式转换波 LS 和 SL, 两者的路径虽然不同, 但是传播距离和到达时间相同。设 W_L 和 W_S 分别为 LS (或 SL) 传播路径中纵波和横波成分的传播距离在底面的投影, θ_L 和 θ_S 分别为纵波和横波的传播方向与垂直方向的夹角, 则其与 W 、 H 的关系为

$$\begin{cases} W = W_L + W_S \\ H = W_L/\tan \theta_L = W_S/\tan \theta_S \end{cases}, \quad (4)$$

联立(2)式和(4)式, 可以计算得到两种模式转换波的到达时间 $t_{SL/LS}$ 为

$$t_{SL/LS} = W_L/[(\sin \theta_L)/c_L] + W_S/[(\sin \theta_S)/c_S]. \quad (5)$$

设平板样品的材料为铝, $H = 10$ mm, 铝中各模式声波的速度如表 1 所示。设 W 为变量, 变化范围为 0~30 mm, 依据(3)式和(5)式可以计算得到各模式波形的到达时间随 W 的变化关系, 如图 3(a) 所示。依据铝材料中的材料参数和声速, 利用 Comsol Multiphysics 有限元软件仿真计算得到各模式超声波随激发探测距离变化的波形, 绘制得到波形 B 扫描图, 如图 3(b) 所示。对比理论计算和模拟结果可知, 两者具有高度一致性, 随着 W 的变化, 各模式声波交杂在一起。

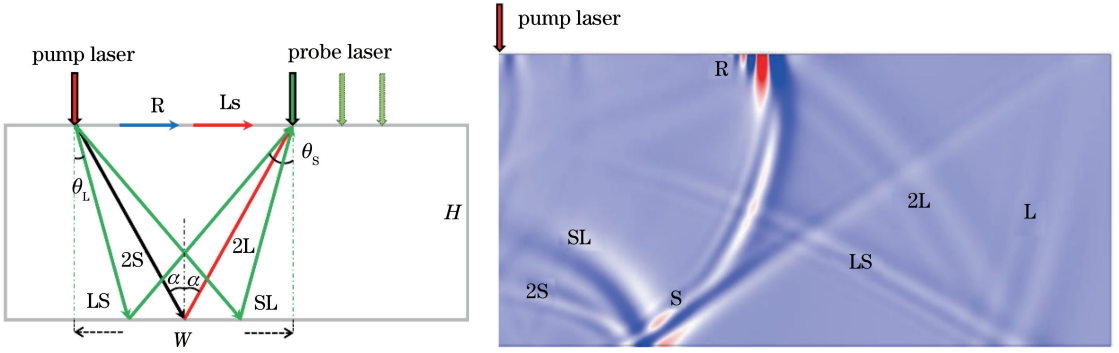


图 2 (a) LU 体波的传播路径和模式转换示意图;(b)仿真声场图

Fig. 2 (a) Schematic of the propagation path and mode-translation of LU bulk waves; (b) simulated diagram of ultrasonic field

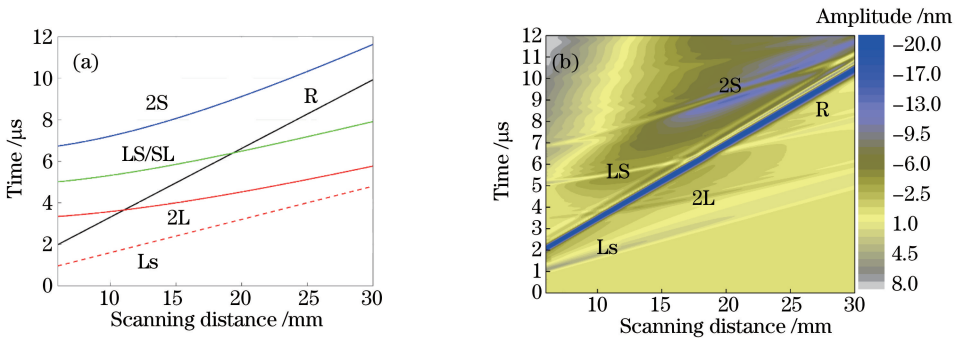


图 3 10 mm 厚铝板中各模式超声波到达时间随 W 变化的(a)理论计算结果和(b)有限元仿真结果

Fig. 3 Relationships between the arrival time and W of multi-modes ultrasonic waves in 30 mm thick aluminum plate obtained by (a) theoretical calculation and (b) finite element simulation

表 1 铝材料中超声波的波速

Table 1 Velocity of ultrasonic waves in aluminum

| Wave mode | Rayleigh wave | Longitudinal wave | Shear wave |
|-----------------------------------|---------------|-------------------|------------|
| Velocity / (m · s ⁻¹) | 3020 | 6250 | 3100 |

利用底面反射波对内部缺陷进行检测时,首先,所选波形要能够在时间上与其他模式的波形分开;其次,要选择信噪比较高、较稳定的波形。依据理论、仿真与实验结果,对比各种模式的底面反射波(2L、LS/SL、2S)可知:反射横波 2S 的振幅最大,信噪比最高;2L 和 LS/SL 的幅值较小,信噪比较差;反射横波 2S 可以很明显地与其他模式声波(主要与声表面波 R)在时间上分离开。因此,利用底面反射横波 2S 对内部缺陷进行双阴影检测是理想的选择。

采用有限元方法对 LU 波在材料内部的传播过程进行数值模拟,如图 4 所示,图 4(a)为无缺陷时的传播声场,图 4(b)为含 0.8 mm 直径孔形缺陷时的传播声场。由图 4(b)可知,横波与缺陷作用后不仅幅值会衰减,相应的传播时间也会被延迟,这主要是因为横波会沿内部缺陷边缘绕行传播,

同时产生衍射波。综合上述理论分析和模拟结果可知,底面反射横波 2S 与缺陷作用后的反射横波的幅值衰减和到达时间延迟可以用于内部缺陷的检测和定位,反射横波双阴影检测法在理论上是可行有效的,为该方法应用于实验检测提供了可靠的理论基础。

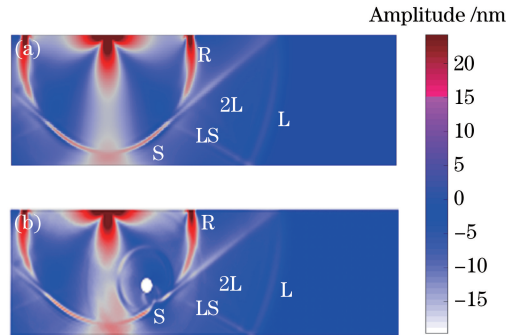


图 4 LU 在铝板中的超声场仿真结果。

(a)无缺陷;(b)含 0.8 mm 直径缺陷

Fig. 4 Ultrasonic field simulation results of LU in aluminum plate. (a) Without defect; (b) containing defect with diameter of 0.8 mm

3 实验方法与结果分析

3.1 实验装置与样品

利用反射横波双阴影法检测内部缺陷的实验装置如图 5(a)所示。该检测系统由 Nd:YAG 激光器激发出波长为 532 nm、脉宽为 7 ns、重复频率为 10 Hz、单脉冲能量为 5 mJ 的脉冲激光,中途分别经过分光片、全反镜和柱面凸透镜后聚焦为长 6 mm、宽 0.2 mm 的线形光斑辐照在铝合金样品表面。利用激光功率仪对激光功率进行测定,该脉冲激光辐照在样品表面处的峰值功率密度为 24.4 MW/cm²,远小于铝合金材料的激光损伤阈值,因此在此功率密度下的激光不会对材料造成损伤,为无损检测。全反镜和聚焦透镜被固定在精密电动平移台上,可实现激光光源的扫描移动,样品被固定在另一个精密移动平台上,可在横向

(x 方向)移动以实现扫描检测。利用激光测振仪对超声信号进行非接触探测,探测激光采用波长为 632.8 nm 的连续激光,与激发激光位于样品同一侧,两者之间的距离为 W 。激发激光器发出的触发信号以及测振仪的探测信号均被传输到示波器上进行波形显示,检测信号被平均 32 次后进行记录,以此来提高超声信号的信噪比。

被检样品为铝合金材料,用游标卡尺测得样品的平均厚度 $\bar{H} = 9.62$ mm,长、宽分别为 80 mm 和 60 mm,在样品中心区域垂直于厚度方向上钻有深 15 mm、直径 $\Phi = 0.80$ mm 的人工盲孔缺陷,孔中心距样品上表面的距离 $h = 3.98$ mm。

样品的 X 射线数字射线照相成像 (DR) 检测图如图 5(b)所示,但是由于射线成像原理,该方法仅能得到缺陷的透视图,无法得到缺陷的深度信息。

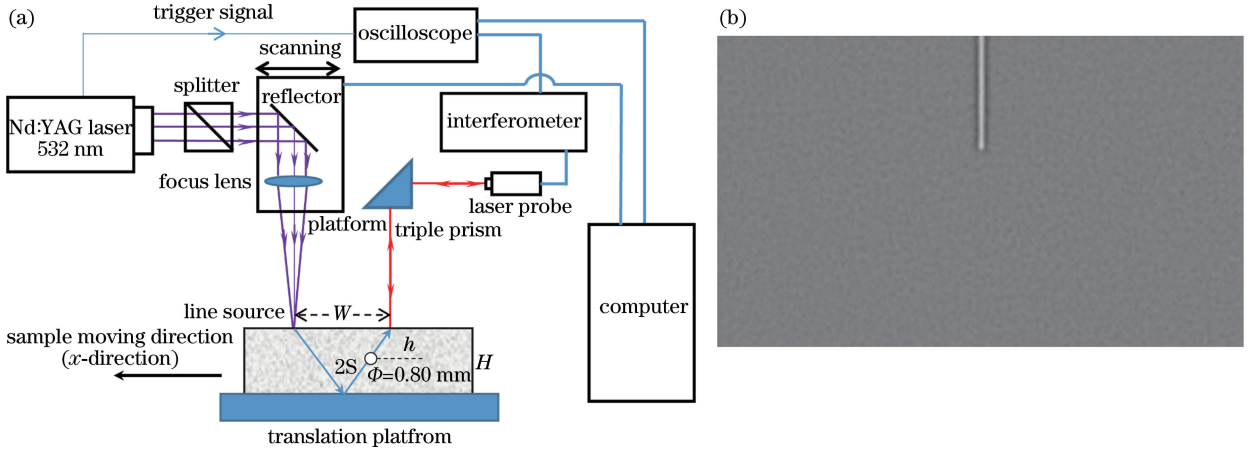


图 5 (a) LU 检测内部缺陷实验装置图;(b)样品的 X 射线 DR 成像图

Fig. 5 (a) Experimental setup schematic for inspection of internal defects by LU;

(b) X-ray DR image of the sample

3.2 反射横波双阴影检测实验与结果分析

利用反射横波双阴影法对内部缺陷进行检测和定位,具体实验步骤如下所示:1)采用扫描激光光源 (SLLS)法确定激发探测距离 W 的合适范围,并采用互相关算法计算超声表面波的声速;2)固定激发光与探测光相对距离 W 不变,精密移动样品获得超声波在样品中的 B 扫描图,再依据声表面波的波速与平均到达时间准确测定激发探测距离 W ;3)采用互相关算法计算反射横波在每个扫描位置处的时延,根据时延最大时的位置间距确定准确的双阴影间距 ϵ ;4)根据(1)式计算得到内部缺陷距上表面的深度 h_{d1} ,重复步骤 2)、3),将样品翻转,对样品底面进行扫描检测,测定内部缺陷距底面的深度 h_{d2} 。

合适的激发探测距离 W 能够保证反射横波具有较大的幅值和信噪比,并且能够在时域上减小与

其他模式波形的叠加干扰。利用图 5(a)所示实验装置,采用 SLLS 方法在无缺陷区域对超声波进行激发和检测。该方法通过固定探测光位置不变,利用步进电机控制激光光源进行精密移动,移动步长为 0.20 mm,记录每个位置处的超声信号,得到超声波的 B 扫描图,如图 6 所示。对比图 3 与图 6 可知,实验结果中各种模式的声波均能够被检测到,并且其到达时间与理论及数值仿真结果高度一致。同时,图 6 中声表面波 R 的信号幅度最强,其次是反射横波 2S,其在 13~22 mm 区间的幅值较大,在 18 mm 附近处的幅值存在极大值,并且此时波形 2S 与其他模式的声波不叠加,具有较高的信噪比和识别度,这一实验结果与图 3(b)所示的仿真结果也具有较好的一致性,实验结果与理论、仿真结果的高度一致性充分说明了反射横波检测理论的正确性与检

测实验的可行性。设初始扫描位置 $x_0 = 10$ mm, 则在 10 mm 和 18 mm 处检测得到的声波波形如图 7 所示, 可知代表 18 mm 位置的红色曲线中的 2S 波形幅值明显高于 10 mm 处的波形幅值。因此, 在利用反射横波阴影法进行检测时, 合适的激发检测距离 W 为 17~19 mm。

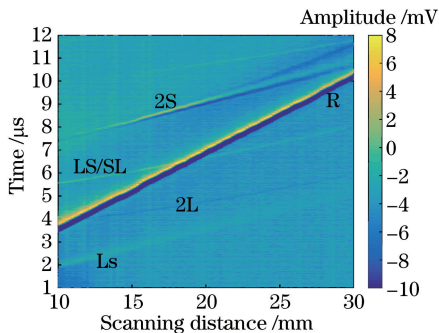


图 6 LU 扫描线源法得到的超声波 B 扫描图
Fig. 6 B-scanning figure obtained by LU scanning laser line source method

由(1)式可知, 缺陷位置的定位精度取决于 W 、 H 以及 ϵ 的测量精度, 对于 W , 量尺的测量误差较大, 故而拟依据 c_R 以及 t_R 来精确测定 W 。

首先, 采用波相关算法来精确测量声表面波的速度。设在两个不同位置处探测得到的包含声表面波波包的信号为 $r(t)$ 和 $s(t)$, 对其进行互相关归一化运算, 得到其相关系数为

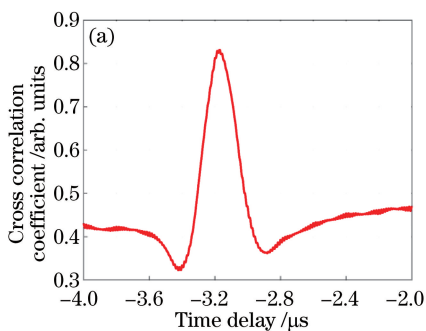


图 8 (a) 不同激发位置条件下探测得到的两超声波的互相关系数; (b) 声表面波波速计算关系图
Fig. 8 (a) Cross correlation coefficient curve of two ultrasonic signals obtained at different excitation positions; (b) fitting curve for calculating the wave velocity of surface acoustic wave

然后, 将激发探测距离 W 调节至 18 mm 左右, 固定激发激光与探测激光对样品上表面进行辐照, 移动样品进行 TOF 法扫描检测, 每步移动 0.10 mm, 对信号进行滤波降噪后得到声波信号的 B 扫描图, 如图 9(a) 所示, 测得声表面波 R 的平均到达时间 $t_R = 6.22 \mu s$, 则 $W = 18.68$ mm。在扫描距离 x 为 1, 16 mm 位置处探测得到的超声波波形如图 9(b) 所示, 在 16 mm 位置处由于孔缺陷对横

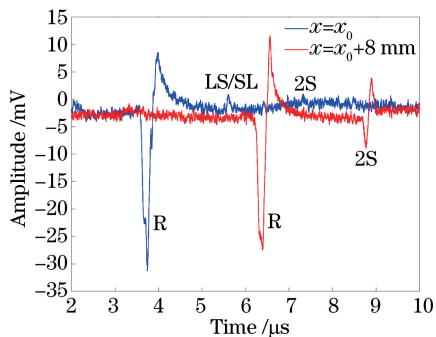
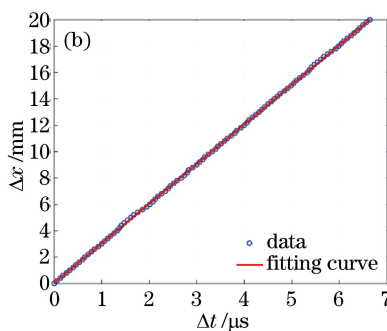


图 7 不同位置处探测得到的超声波时域波形
Fig. 7 Time domain waveforms of ultrasonic signals detected at different positions

$$B(\tau) = \left[\int s(t-\tau)r(\tau)dt \right] / \sqrt{\int s(t)^2 \int r(\tau)^2 dt}, \quad (6)$$

式中: τ 为两信号间的时间延迟。当相关系数 $B(\tau)$ 达到最大时, 说明两个信号最相关, 此时 τ 的取值即为两信号的时差。对图 7 中的两信号进行归一化互相关计算可得到其相关系数, 如图 8(a) 所示, 此时可通过最大相关系数对应的时延来确定两信号的时差。将图 6 中利用 SLLS 方法测量得到的等间隔超声信号逐一进行互相关计算可以精确得到相对应的时间差, 通过线性拟合可以得到间隔距离 Δx 与时差 Δt 的关系图[图 8(b)], 该直线的斜率即为 c_R , 测得 $c_R = 3006.50$ m/s。



波的衰减作用, 反射横波 2S 在阴影位置会发生明显的时延和降幅现象, 当时间延迟达到最大时, 表明横波在缺陷中心位置处发生了绕射, 可依此对缺陷进行定位。维持 W 不变, 采用同样的方法在样品反面进行 TOF 法扫描检测, 得到其超声 B 扫描图。

对于在样品正、反面检测得到的超声信号, 只取 2S 到达的时间区域 7.5~10.0 μs , 探测得到在样品正、反面上具有双阴影的反射横波 B 扫描图, 分别

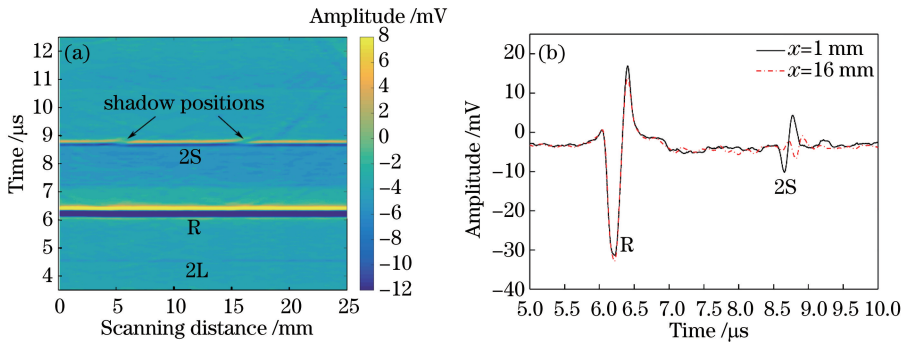


图 9 (a) TOF 方法探测得到的超声波 B 扫描图; (b) 缺陷位置和无缺陷位置的波形图

Fig. 9 (a) B-scanning figure of ultrasonic signals by TOF method; (b) waveforms obtained at positions with or without defect

如图 10(a)、(b)所示。将 1 mm 处的 2S 波形作为参考,分别对图 10(a)、(b)中每个扫描位置上的 2S 波进行互相关运算,记录得到归一化相关系数最大时的波形时延值,对离散的时延数据点进行双峰高斯拟合,得到如图 11(a)、(b)所示反射横波时延随扫描位置的变化关系曲线。图中的时延值会随扫描过程中材料的表面粗糙度、2S 的信噪比等因素的影响出现小范围的波动,经拟合后不会对检测结果造

成影响。在扫描过程中,反射横波越靠近孔缺陷,时延值越大,当反射横波的波前位于缺陷的中心位置时时延达到极值,依据反射横波 2S 两个时延极值出现的位置可以准确测得样品正、反面的双阴影间距,经过多次测量求平均得到正、反面检测的双阴影间距分别为 $\epsilon_1 = 10.90 \text{ mm}$ 、 $\epsilon_2 = 7.90 \text{ mm}$,同时测得样品正、反面首次出现阴影时激发激光的位置分别为 $x_{11} = 4.50 \text{ mm}$ 、 $x_{21} = 6.50 \text{ mm}$ 。

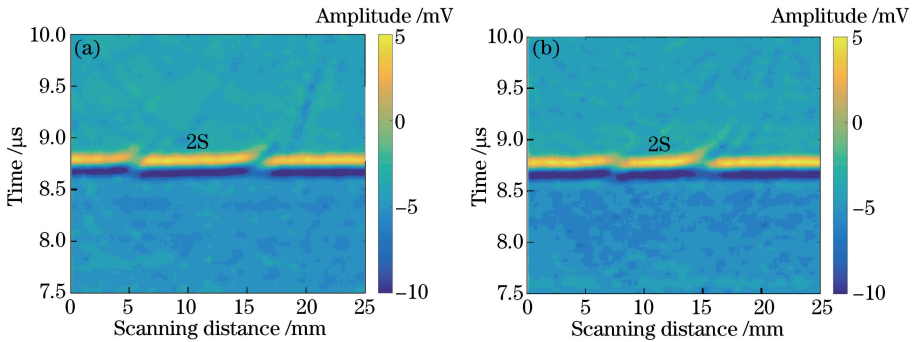


图 10 双阴影法在(a)样品正面和(b)反面检测得到的 B 扫描图

Fig. 10 B-scanning figures detected at (a) the front-surface and (b) the bottom-surface of sample by double shadow method

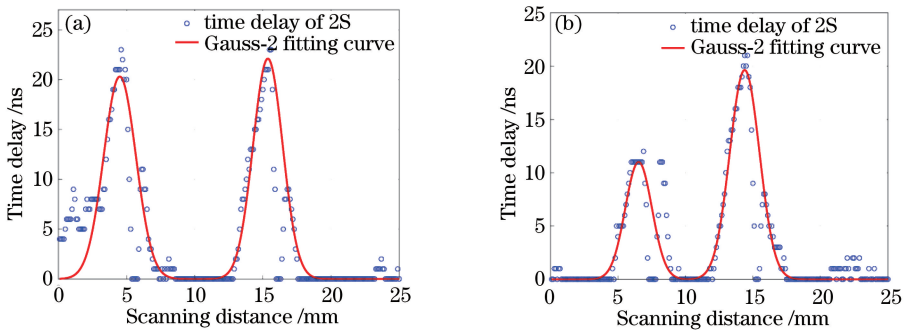


图 11 (a)样品正面和(b)反面检测得到的双阴影时延图

Fig. 11 Time delay curves detected at (a) the front-surface and (b) the bottom-surface of sample by double shadow method

设激光源扫描的起始位置为 0 mm,依据(1)式以及上文测得的 W 、 H 、 ϵ_1 和 ϵ_2 ,从样品正、反面检测得到的缺陷深度和横向位置分别为 $h_{d1} = 4.01$ mm和 $x_{d1} = x_{11} + (W + \epsilon_1)/2 = 19.30$ mm、 $h_{d2} = 5.57$ mm 和 $x_{d2} = x_{21} + (W + \epsilon_2)/2 = 19.78$ mm。其中,从样品正、反面检测缺陷深度的测量相对误差分别为 $\delta_1 = 0.75\%$ 、 $\delta_2 = 1.29\%$ 。该结果表明,采用反射横波双阴影法能够有效检出直径为 0.8 mm 的内部盲孔缺陷,并且在深度和横向位置上能够准确定位。

作为对比验证,分别采用 X 射线 DR 成像法和传统纵波换能器方法对含 0.8 mm 横孔缺陷的样品进行了检测,检测结果分别如图 5(b)和图 12 所示。由图可知,X 射线 DR 成像法可以清晰地检测得到 0.8 mm 直径盲孔的二维图像,但是较难获得缺陷的深度位置信息;利用传统的 10 MHz 纵波探头对样品进行检测,波形信噪比较高,可以清晰地分辨得到缺陷的反射回波,依据反射回波的到达时间可以定位缺陷深度。但是深度定位的准确性取决于缺陷横向中心位置定位的精确程度,并且该方法需要将耦合剂涂覆在材料或探头表面,接触式的检测方式不利于提高扫查效率,并且仅分析 A 扫描波形对于缺陷的分布检测不够直观有效。上述对比结果表明,LU 作为一种新型超声检测方法,具有非接触式、可快速扫查、直观成像、高精度检测等优点,在未来工业无损检测领域具有较广阔的应用前景。

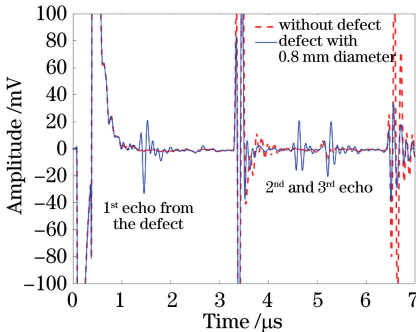


图 12 10 MHz 纵波换能器对 0.8 mm 直径缺陷的检测结果
Fig. 12 Detection result of defect with 0.8 mm diameter using 10 MHz longitudinal wave transducer

4 结 论

基于内部缺陷对反射横波的两次衰减原理,提出了 LU 反射横波双阴影检测方法。首先,在理论上分析了多种模式声波的传播路径、模式转换及到达时间,结合有限元仿真验证了反射横波双阴影检

测理论的正确性与可行性;然后,建立内部缺陷的 LU 检测系统,利用 SLLS 技术在样品无缺陷区域进行扫描检测,确定激发探测距离的合适范围,并结合互相关算法测得声表面波的准确波速;最后,固定激发光与探测光,分别在样品正、反面进行了 TOF 法扫描检测,得到含有 2S 波形双阴影的 B 扫描图,通过准确测定激发探测距离、双阴影间距和样品厚度实现了 0.8 mm 直径内部缺陷的无损检测和准确定位。检测结果表明,利用反射横波双阴影法能够实现材料内部微小缺陷的无损检测和精确定位,该方法克服了 LU 在内部缺陷无损检测上的衍射信号弱、透射信号难以定位深度等问题;该方法具有非接触式激发探测的特点,在工业无损检测方面具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Scruby C B. Some applications of laser ultrasound [J]. Ultrasonics, 1989, 27(4): 195-209.
- [2] Yuan Y Q. Modern ultrasound theory and application [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1996: 320-400.
袁易全. 近代超声原理与应用[M]. 南京: 南京大学出版社, 1996: 320-400.
- [3] Shen Z H, Yuan L, Zhang H C, et al. Laser ultrasound in solids [M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2015: 102-144.
沈中华, 袁玲, 张宏超, 等. 固体中的激光超声[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015: 102-144.
- [4] Zhu Q, Qiu J H, Zhang C, et al. Application of laser ultrasonic detection method for double-layer laminated material [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53: 031402.
朱倩, 裘进浩, 张超, 等. 双层层压材料中激光超声检测方法的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53: 031402.
- [5] He N, Luo X H, Zhao Z H, et al. Nondestructive testing method based on fiber coupling and coherent detection [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0812006.
何宁, 骆湘红, 赵中华, 等. 基于光纤耦合与相干探测的无损检测方法[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0812006.
- [6] Li J, Ni C Y, Zhang H C, et al. Detection of microcrack by ultrasonic approach of one-sided pitch-catch method based on laser assisted heating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(4): 0408008.
李加, 倪辰荫, 张宏超, 等. 基于激光辅助加热的激光超声投捕法识别微裂纹[J]. 中国激光, 2013, 40

- (4): 0408008.
- [7] Kromine A K, Fomitchov P A, Krishnaswamy S, *et al.* Laser ultrasonic detection of surface breaking discontinuities: scanning laser source technique[J]. *Materials Evaluation*, 2000, 58(2): 173-177.
- [8] Dutton B, Clough A R, Rosli M H, *et al.* Non-contact ultrasonic detection of angled surface defects[J]. *NDE & E International*, 2011, 44: 353-360.
- [9] Lomonosov A M, Grigoriev P V, Hess P. Sizing of partially closed surface-breaking microcracks with broadband Rayleigh waves[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(8): 084906.
- [10] Ni C Y, Dong L M, Shen Z H, *et al.* The experimental study of fatigue crack detection using scanning laser point source technique[J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43(8): 1391-1397.
- [11] Takahiro H, Morimasa M, Tsunaji K. Frequency dependence of images in scanning laser source technique for a plate[J]. *Ultrasonics*, 2012, 52(5): 636-642.
- [12] Clough A R, Edwards R S. Characterisation of hidden defects using the near-field ultrasonic enhancement of Lamb waves[J]. *Ultrasonics*, 2015, 59: 64-71.
- [13] Blouin A, Levesque D, Neron C, *et al.* Improved resolution and signal-to-noise ratio in laser-ultrasonics by SAFT processing[J]. *Optics Express*, 1998, 2(13): 531-539.
- [14] Levesque D, Blouin A, Néron C, *et al.* Performance of laser-ultrasonic F-SAFT imaging[J]. *Ultrasonics*, 2002, 40(10): 1057-1063.
- [15] Pei C X, Fukuchi T, Zhu H T, *et al.* A study of internal defect testing with the laser-EMAT ultrasonic method [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2012, 59(12): 2702-2708.
- [16] Tanaka T, Izawa Y. Nondestructive detection of small internal defects in carbon steel by laser ultrasonics[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2001, 40(3A): 1477-1481.
- [17] Quinteroa R, Simonettia F, Howardb P, *et al.* Noncontact laser ultrasonic inspection of Ceramic Matrix Composites (CMCs) [J]. *NDT & E International*, 2017, 88: 8-16.
- [18] Sun K H, Shen Z H, Shi Y F, *et al.* Nondestructive detection of small blowholes in aluminium alloy by using laser ultrasonics technique [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2015, 36(5/6): 1181-1188.
- [19] Shen Z H, Sun K H, Ni C Y, *et al.* All-optical laser ultrasonic testing method for internal defects of materials: CN103808802A[P]. 2014-02-06.
沈中华, 孙凯华, 倪辰荫, 等. 一种材料内部缺陷的全光学激光超声测定方法: CN103808802A [P]. 2014-02-26.
- [20] Xu B Q, Ni X W, Shen Z H, *et al.* Numerical simulation of laser-generated ultrasonic by finite element method in the plate material [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(5): 621-625.
许伯强, 倪晓武, 沈中华, 等. 激光激发板状材料中超声导波的有限元数值模拟 [J]. *中国激光*, 2004, 31(5): 621-625.