

# 基于合成孔径聚焦技术的激光超声无损检测方法研究

李俊燕<sup>1\*\*</sup>, 沈中华<sup>1</sup>, 倪晓武<sup>1</sup>, 袁玲<sup>1</sup>, 倪辰荫<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094;

<sup>2</sup>南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

**摘要** 针对厚钢板内部缺陷的检测问题,利用合成孔径聚焦技术(SAFT)实现了厚钢板样品内部缺陷的定位及成像。移动脉冲激光光源在样品内激发超声纵波,利用激光测振仪在固定点探测得到超声时域 B 扫描信号,从时域信号中提取缺陷反射的纵波回波,对样品内部缺陷进行成像。使用有限元方法对该成像过程进行数值模拟,并通过实验对其进行验证,所获得的实验结果与数值计算结果一致。采用这一缺陷成像方法可在缺陷回波信噪比较低的情况下实现缺陷检测,并且过程简便,在激光超声检测领域具有应用价值。

**关键词** 测量; 激光超声; 合成孔径聚焦技术; 无损检测; 超声成像

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0904003

## Laser-Ultrasonic Non-Destructive Detection Based on Synthetic Aperture Focusing Technique

Li Junyan<sup>1\*\*</sup>, Shen Zhonghua<sup>1</sup>, Ni Xiaowu<sup>1</sup>, Yuan Ling<sup>1</sup>, Ni Chenyin<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Science, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

<sup>2</sup>School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

**Abstract** To deal with the detection of the internal defect in the thick steel plate, we adopt the synthetic aperture focusing technique (SAFT) to locate and image the internal defect of the thick steel plate. The moving pulse laser line source is used to generate the longitudinal ultrasonic waves in the steel sample. The laser vibrometer is applied to obtain the time-domain ultrasound B-scan signals at the fixed point. The longitudinal echo-waves reflected by the defect are extracted from the time-domain signal. And the imaging of the internal defect of the sample is realized. This imaging process is simulated numerically by the finite element method (FEM) and verified in the experiment. The experimental results coincide well with the numerical calculation results. The proposed defect imaging method can realize the defect detection under the circumstance where the defect echo-waves have a low signal-to-noise ratio (SNR). The process of this method is simple and convenient, and the method has practical value in the laser-ultrasonic detection field.

**Key words** measurement; laser ultrasonic; synthetic aperture focusing technique; non-destructive detection; ultrasonic imaging

**OCIS codes** 120.4290; 280.3375; 110.7170

## 1 引 言

超声检测是一种常规的无损检测方式,它通过分析材料的声学特性和内部结构对超声信号传播产生的影响来实现对材料内外部缺陷的检测<sup>[1]</sup>。与传

统的接触式压电换能器(PZT)相比,激光超声技术具有非接触、宽频带、多模态激发以及激发和检测激光光源便于移动等特点,适合用于对复杂构件和大型构件的检测,并可应用在高温、高压及辐射等恶劣环境下<sup>[2-3]</sup>。在一般情况下,激光超声技术利用短脉冲

收稿日期: 2018-03-15; 修回日期: 2018-04-28; 录用日期: 2018-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(61627802)、国家自然科学基金青年基金(61405093)、江苏省自然科学基金青年基金(BK20140771)

\* E-mail: chenyin.ni@njust.edu.cn(通信作者); \*\* E-mail: lijunyannust@163.com

激光在材料内部激发超声,通过接触式(压电换能器)或非接触式方法(如电磁声换能器、光学检测方法)测量超声波引起的表面位移<sup>[4]</sup>、表面梯度<sup>[5]</sup>、表面速度<sup>[6]</sup>的变化来实现超声波的检测。通过进一步分析超声波的速度、振幅、频率等特性,可以实现对材料声学特性和内部结构的判断<sup>[7]</sup>。当利用超声对材料内部缺陷进行检测时,超声波束的宽度会影响检测的横向分辨率,波束宽度由超声换能器的半功率波束角决定。对于一个孔径为  $D$ 、工作波长为  $\lambda$  的换能器来说,其半功率波束角与波长  $\lambda$  成正比,与孔径  $D$  成反比,因此采用大孔径换能器能够减小超声波的半功率波束角,从而提高检测横向分辨率,但应用于形状复杂的待测件时,换能器的孔径不能太大,这就限制了检测横向分辨率的提高。

合成孔径聚焦技术(SAFT)是传统声学领域中提高检测分辨率的途径之一,其基本原理是将一系列单个小孔径传感器结合起来代替一个大孔径传感器,以达到提高检测横向分辨率的目的。这项技术最早应用在雷达领域,后来 Flaherty<sup>[8]</sup> 与 Burckhardt 等<sup>[9]</sup> 将这项技术拓展到超声检测领域。自 1976 年起,密歇根大学的研究人员<sup>[10-11]</sup> 利用基于超声换能器的脉冲回波法对 SAFT 成像进行了研究,他们指出,由缺陷引起的回波传播时间与换能器位置间的关系可以用双曲线函数来描述<sup>[10]</sup>。Berkhout 等<sup>[12]</sup> 提出了三种常用于合成孔径聚焦超声检测(SAFT-UT)的数据采集方式:平面波法、零偏移法、全数据集合法。

此后有诸多研究人员致力于对以上三种检测方式进行改进:Karaman 等<sup>[13]</sup> 将单个换能器替换换能器阵列,利用全数据集合法实现了对小型结构的 SAFT 成像;Spies 等<sup>[14]</sup> 基于 SAFT 技术提高了对强衰减材料缺陷的检测能力;Boehm 等<sup>[15]</sup> 展开了利用 SAFT 检测裂纹形状的相关研究,通过收集大量由裂纹反射的信号提高了信噪比;Lorraine 等<sup>[16]</sup> 首次将 SAFT 与激光超声相结合,采用类似于零偏移法的技术同时移动激发光源和检测光源,使二者重合于材料表面上的同一点,实现了对材料内部及表面缺陷的成像,但此法在探测超声信号时会不可避免地受到激发光入射到样品表面所引起的热膨胀的影响,为数据处理带来一定困难。此外,常规的激光超声检测方法,如迈克耳孙干涉或光偏转法,通常要求样品表面能够较好地反射激光,而实际上,工业中的待检材料常常很难满足这一条件。针对这些问题,本文提出了一种将激发光源与检测光源分离的

SAFT 成像方法。不同于上述介绍的三种方法,所提方法可有效地避免热膨胀的影响,不需要对时域波形进行特殊的滤波处理,只需要对时域信号进行简单的时延累加,便可实现样品内部缺陷的检测;同时,由于检测源固定,只需要在样品表面找到(或制造出)反光较好的点,即可实现超声的非接触式探测。本文建立了利用超声 B 扫描图像的 SAFT 算法数学模型,分别从数值计算和实验上实现了样品内部缺陷位置的 SAFT 成像。

## 2 基本原理

传统的 SAFT 利用超声换能器在样品表面的多个位置激发超声波并接收回波来实现对材料内部各点的重建<sup>[17]</sup>。本研究利用扫描激光源法,使用聚焦成线源的脉冲激光在样品表面扫描并激发超声,同时利用激光测振仪在固定点对超声波进行探测,其 SAFT 成像原理图如图 1 所示。其中: $z$  为缺陷的深度; $M_i (i=1, 2, 3, \dots, N)$  为激发光的位置; $d_0$  和  $d_i$  分别为检测光和激发光与缺陷之间的距离; $x_e$  和  $x_d$  分别为初始激发点和固定检测点与缺陷之间的横向距离; $x_i$  为各激发点与初始激发点之间的距离。用  $v$  表示材料中纵波的波速,对材料内部的点  $C$  进行重建的表达式为  $\sum(C) = \sum_{M_i \in \text{mesh}} S\left(M_i, t = \frac{d_0 + d_i}{v}\right)$ 。当图中的  $C$  点为缺陷时,探测光在  $t = \frac{d_0 + d_i}{v}$  时刻探测到的信号  $S(M_i, t)$  将出现一个由缺陷引起的反射波峰;若  $C$  点完好(不是缺陷),则  $S(M_i, t)$  中不会出现反射波。将各  $S(M_i, t) (i=1, 2, 3, \dots, N)$  累加起来,即可实现材料内部各点的重建。若  $C$  点为缺陷,由于(2)式对其反射回波的叠加,使得重建图形中  $C$  点所在位置的值增强,可通过对信号的累加实现  $\sqrt{N}$  倍的信噪比提升。

被样品内部任意一点  $C$  反射的声波的传播距离  $D$  可表示为  $D = d_i + d_0$ , 其中,  $d_i = \sqrt{z^2 + (x_e - x_i)^2}$ ,  $d_0 = \sqrt{z^2 + x_d^2}$ , 因此  $D = \sqrt{z^2 + (x_e - x_i)^2} + \sqrt{z^2 + x_d^2}$ 。若以  $n (n=0, 1, 2, \dots, N-1)$  表示激发点扫描过的步数,  $\Delta d$  表示每一步之间的间隔,则  $x_i = n\Delta d$ , 故而可以得到  $D = \sqrt{z^2 + (x_e - n\Delta d)^2} + \sqrt{z^2 + x_d^2}$ , 将该公式两边平方,可以得到:  $D^2 = n^2\Delta d^2 + 2z^2 + x_e^2 + x_d^2 - 2n x_e \Delta d + 2\sqrt{z^2 + (x_e - \Delta d)^2} \sqrt{z^2 + x_d^2}$ , 从这一公

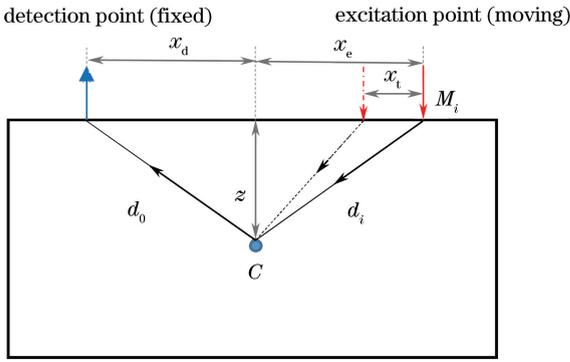


图 1 激发与检测分离的 SAFT 原理图  
Fig. 1 SAFT schematic of separated excitation and detection

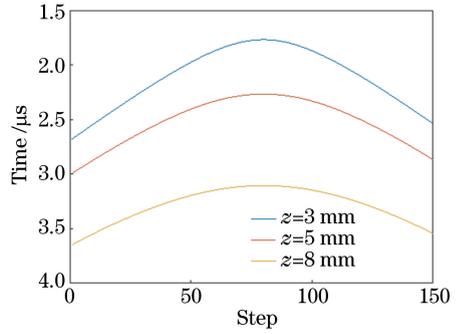


图 2 样品内不同深度处各点的反射声波到达时间与扫描步数的关系

Fig. 2 Relationship between arrival time of reflected sound waves and scan steps at different depths

式可以看出,  $D$  是关于  $n$  的双曲线型函数。又因为  $t = D/v_L$  ( $v_L$  为纵波波速), 所以, 当激发光在样品表面扫描时, 被缺陷反射的体纵波将在横轴为扫描步数  $n$  ( $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ )、纵轴为时间  $t$  的 B 扫图上呈现为双曲线的一支。图 2 绘制了样品表面下不同深度处几个点的反射声波的到达时间与扫描步数的关系曲线。若将不同曲线上的诸个值相加, 所得的结果便可以反映  $C$  点的性质, 这里称其为  $C$  的像。

当图 2 的这种关系反映在 B 扫图上时, 若  $C$  点完好, 则不存在反射声波, 即这一点对应的曲线在 B 扫图上不可见; 若  $C$  点为缺陷, 则声波会被  $C$  反射, 在时域波形的相应时间上将出现一个峰值, 其传播时间随扫描步数的变化趋势将在 B 扫图上呈现为双曲线型。当  $C$  点为缺陷时, 将样品内部各个点在 B 扫图上对应的曲线上的值相加后得到各个点的像, 则只有  $C$  点的像有一个明显的增强, 其余各完好点不存在明显变化, 这样就达到了对缺陷进行高对比度成像的目的。

### 3 数值计算研究

#### 3.1 有限元计算模型

为验证所提 SAFT 成像方法的可行性, 首先应用 COMSOL Multiphysic<sup>®</sup> 软件对上述方法进行数值计算。在计算过程中, 用热源代替激光源, 利用固体传热和固体力学两个模块的耦合模拟激发光入射在样品表面后引起局部热膨胀并在样品中激发超声波, 以及超声波在样品中的传播过程。相关模型的建立原理可参考文献[18]。本研究数值计算使用的模型如图 3 所示, 其中,  $z$  表示缺陷位于模型表面下的深度,  $x_{e0}$  和  $x_{de}$  分别为检测光初始位置和激发光

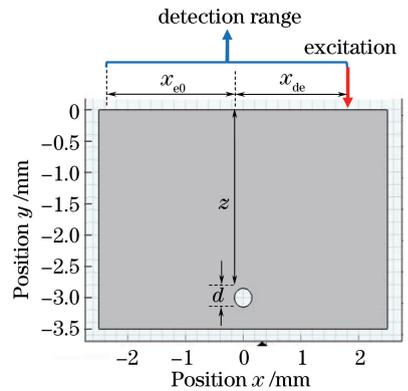


图 3 数值计算所用样品的结构示意图

Fig. 3 Schematic of sample structure used in numerical calculation

与缺陷之间的横向距离,  $d$  为孔状缺陷的直径。

数值计算所用样品材料为钢, 表 1 列出了其属性。为节约计算机内存, 提高计算速度, 对数值计算过程进行了以下优化:

1) 将模型的大小设置为  $5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ , 其中, 将左、右、下界面做低反射界面处理, 因此可将整个模型视作一半无限大空间。

2) 将上文所述的“移动式激发、固定点探测”的方法改为“固定点激发, 多点探测”。由于声波的传播路径可逆, 因此这两种方式在一定程度上是等效的, 不同之处在于, 由于激光激发超声的方向角分布使得“移动式激发、固定点探测”的方法比“固定点激发, 多点探测”方法获得的反射纵波信号幅值更高<sup>[3]</sup>。

参照图 3, 在样品表面下  $z = 3 \text{ mm}$  处设置一个圆形孔洞缺陷, 缺陷的直径  $d = 0.3 \text{ mm}$ 。激发光在  $x_{de} = 2 \text{ mm}$  处(由于数值计算为固定点激发, 多点探测, 此处激发点与检测点位置的表示符号应互换)垂直入射在样品表面, 探测范围自  $x_{e0} = -2.2 \text{ mm}$

开始到  $x_{eN} = 2 \text{ mm}$  结束,步长为  $0.05 \text{ mm}$ 。激发光的相关参数如表 2 所示。

表 1 钢样品的材料属性

Table 1 Material properties of steel sample

Parameter	Value
Density / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$7.85 \times 10^3$
Young's modulus / MPa	$2.0 \times 10^5$
Poisson's ratio	0.33
Thermal expansion coefficient / $\text{K}^{-1}$	$1.23 \times 10^{-5}$
Lamé instant $\lambda$ / ( $\text{N} \cdot \text{m}^2$ )	$1.5 \times 10^{11}$
Lamé instant $\mu$ / ( $\text{N} \cdot \text{m}^2$ )	$7.5 \times 10^{10}$

表 2 激发光的参数

Table 2 Parameters of excitation light

Parameter	Value
Energy / mJ	25
Duration / ns	7
Spot radius / $\mu\text{m}$	50
Energy density / ( $\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	$4.55 \times 10^4$

### 3.2 有限元计算结果

图 4(a)为对图 3 所示含缺陷模型进行数值计算后得到的 B 扫图像,横轴数值与图 3 中所标注的样品横向尺寸一致;图 4(b)为在无缺陷模型基础上得到的结果。图中的 L 表示直达掠面纵波,R 表示直达表面波,r1-R 表示由右侧边界反射的表面波,r2-R 为由左侧边界反射的表面波。仅从所得的两幅 B 扫图上进行比较,差异并不十分明显,故将两

幅图像的幅值相减。由于在两次数值计算过程中,除了是否包含缺陷以外,其余参数完全相同,在所得结果中,信号的最大值也是相同的,所以可以认为相减之前已作归一化处理。在图 5 中可以明显地观察到  $A_1$ 、 $B_1$  两条曲线,其中: $A_1$  信号是由激发点激发,被缺陷反射后直接到达探测点的体纵波[如图 6(a)所示]; $B_1$  信号则是由激发点激发的横波信号经缺陷反射,模式转换为纵波后到达探测点的信号[如图 6(b)所示]。曲线  $A_1$  的形成符合由缺陷引起的回波传播时间与换能器位置间的双曲线函数关系,而  $B_1$  信号对结果的影响不大。虽然从图 5 中曲线的出现便可判断样品内部存在缺陷,但无法精确获知其位置。为了进一步定位缺陷,需要对此结果进行 SAFT 重建。图 7 是针对图 5 利用固定检测点、移动激发点的 SAFT 重建方法成像后得到的结果,其中:红色区域代表缺陷所在位置,位于  $-3 \text{ mm}$  深度处,横向尺寸位于  $(-0.15 \text{ mm}, 0.15 \text{ mm})$  区间内。由于数值计算时采用的是二维模型,只能获得缺陷的横向尺寸以及上边缘的位置,所以成像的形状为一直线,与图 3 所示模型中缺陷的深度和横向尺寸相符合。图 8 是在  $d=0.5 \text{ mm}$  和  $d=0.8 \text{ mm}$  情况下所得的 SAFT 成像结果,由于缺陷尺寸增加,其几何形状对结果的影响增大,所以在成像结果图上呈现为一个倾斜的条状区域,其位置及横向尺寸与模型吻合得较好。

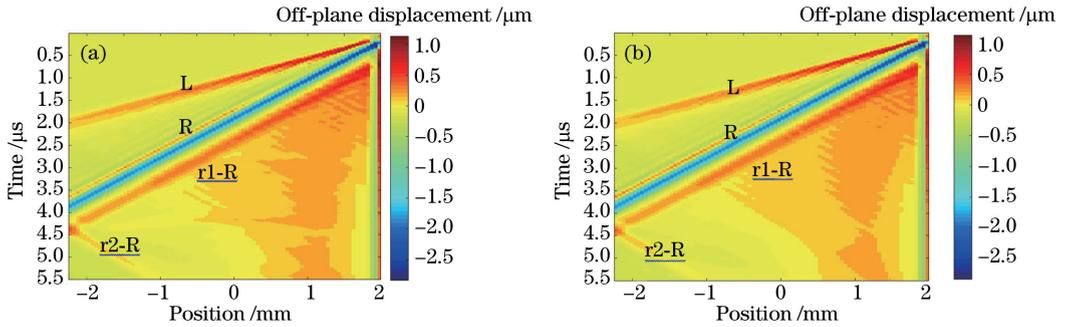


图 4 有无缺陷模型的数值模拟 B 扫图。(a)有缺陷;(b)无缺陷

Fig. 4 Numerical simulation B-scan images for models (a) with and (b) without defect

## 4 实验研究

### 4.1 实验装置及参数

对数值模拟得到的结果通过相应的实验进行验证,实验装置如图 1 所示。实验所用样品为一尺寸为  $11.2 \text{ mm} \times 4.7 \text{ mm} \times 1.9 \text{ mm}$  的钢板,在  $z = 3 \text{ mm}$  的位置处加工出一个直径  $d = 2 \text{ mm}$  的圆形孔洞缺陷。将一束脉冲激光(波长  $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ,脉宽  $\tau = 7 \text{ ns}$ ,重复频率  $f = 10 \text{ Hz}$ )聚焦为宽度约

$0.2 \text{ mm}$  的线光源,并将其作为激发光源。为提高信噪比,将其能量控制在使钢样品表面发生微弱熔蚀的范围内。将激发线光源从距缺陷中心  $8 \text{ mm}$  位置开始(图 1 中  $x_e = 8 \text{ mm}$ ),向靠近缺陷的方向进行扫查,步长为  $0.1 \text{ mm}$ ,直至与固定的检测光源(图 1 中  $x_d = -7 \text{ mm}$ )重合,共计 150 步。用于检测超声波的装置为激光测振仪(控制器型号为 Polytec OFV-5000,光学头型号 Polytec OFV-505,波长  $\lambda \approx 633 \text{ nm}$ ),检测带宽为  $0 \sim 20 \text{ MHz}$ 。激光测振仪与

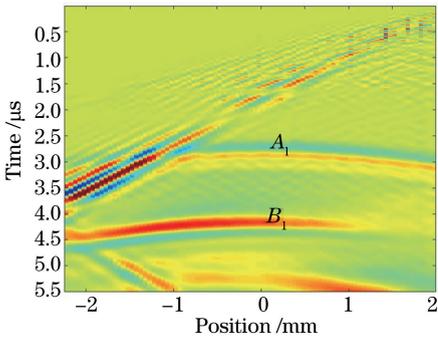


图 5 有无缺陷情况下所得 B 扫结果的差

Fig. 5 Difference between the B-scan image in the defective cases and the B-scan image in the perfect cases

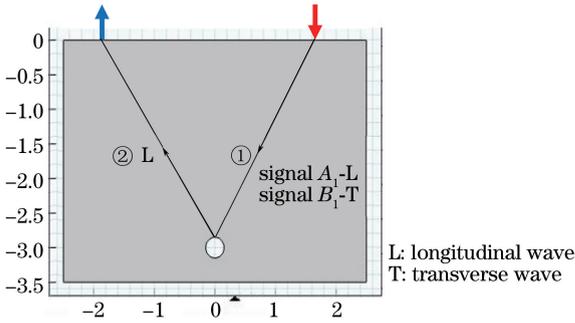


图 6 图 5 中  $A_1$ 、 $B_1$  信号的传播路径

Fig. 6 Propagation path of the signals  $A_1$  and  $B_1$  in Fig. 5

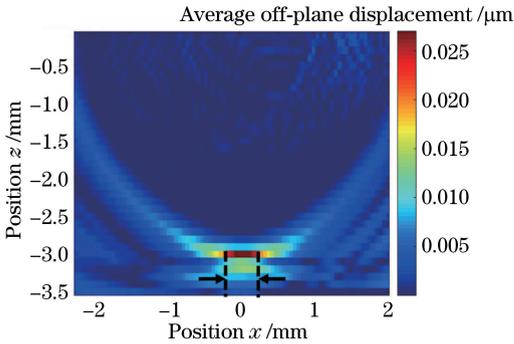


图 7 对图 5 的 SAFT 成像结果

Fig. 7 SAFT image of Fig. 5

示波器相连接,示波器采样间隔为 5 ns。将所得结果进行 32 次平均处理后记录下来。将示波器通过 USB 电缆线连接至计算机,利用 MATLAB 程序将实验数据输出至文件。

#### 4.2 实验结果

图 9 为移动激光源扫描激发所获得的 B 扫图像,其数值为激光测振仪测量超声离面位移的输出电压。图中的  $A_2$  表示被缺陷反射一次的体纵波,  $B_2$  表示被缺陷反射两次的体纵波。通过对图中掠面纵波进行线性拟合,可以得到钢样品的纵波声速  $v_1$  约为 5679.8 m/s。

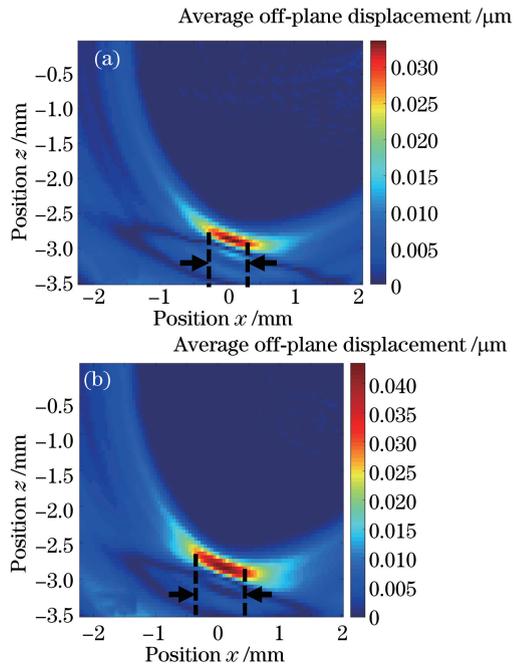


图 8 不同尺寸缺陷的 SAFT 成像结果。

(a)  $d=0.5$  mm; (b)  $d=0.8$  mm

Fig. 8 SAFT image results of defects with different sizes.

(a)  $d=0.5$  mm; (b)  $d=0.8$  mm

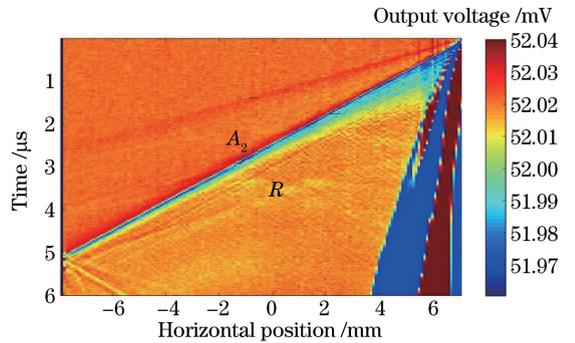


图 9 扫描激光源的实验 B 扫图

Fig. 9 Experimental B-scan image with scanning laser source

在图 9 中能够观察到  $A_2$  和  $B_2$  两条曲线,但信号并不明显。 $A_2$  与  $B_2$  信号的成因与图 5 中  $A_1$  与  $B_1$  信号的成因相同,且此处 SAFT 成像关注的也是被缺陷反射一次后到达接收点的信号,也就是图 9 中的  $A_2$  曲线,所以这一点对接下来的 SAFT 重建影响不大。

图 10 为当激光光扫描至第 60 步(即图 9 所示 B 扫图中水平位置为 -2 mm 处)时的时域波形。图中用圆圈标出了直达掠面纵波 L 和直达表面波 R。根据声波传播  $D$  的公式以及拟合所得的纵波波速可以计算得到扫描步数  $n=60$  时,被缺陷反射的纵波应在  $t=2.2 \mu\text{s}$  这一时刻到达检测点。图中方

框标出了理论上缺陷散射信号出现处的大致范围,但由于该反射信号比较微弱,再加上噪声的干扰,无法从时域波形上明显地观察到,这一点也说明了后续进行 SAFT 重建的必要性。由于直达表面波信号过强,会对 SAFT 重建结果造成很大影响,因此只截取表面波到达时间范围之外的时域信号进行 SAFT 重建。

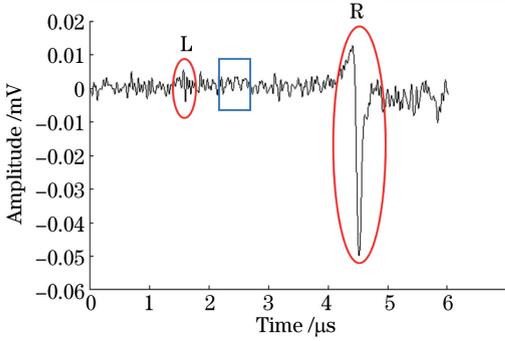


图 10 激发光扫查至第 60 步时获得的时域波形图  
Fig. 10 Time-domain waveform obtained when excitation light is scanned to the 60th step

重建后的结果如图 11 所示。不同区域颜色的深浅是由于在成像时直达表面波信号过强,对 SAFT 重建结果造成很大影响,因此只截取表面波到达时间范围之外的前半部分时域信号进行 SAFT 重建。由于表面波在 B 扫图上呈现为一条倾斜的直线,所以在不同位置处用来参与重建的数据量不同,从而在图 10 的结果中造成了一种区域上颜色的渐变分布,也就是靠近检测点的位置,其对应双曲线上的有效数据点较多,能够获得较大的幅值;而远离检测点的位置,其对应双曲线上的有效数据点较少,相应的幅值也较低。为使缺陷区域更加清晰,对所得结果进行指数变换,以达到增强对比度的目的。对比图 11 和图 12 可以看到,二者之间的显著差异在于是否含有图 11 所示的深色线状区域,且这一区域的位置及尺寸与样品中缺陷的情况相符,由此可以确定图 11 中所标区域即为检测到的缺陷区域。

### 4.3 对实验结果的讨论

由于在实验中使用聚焦成线状的激光源在样品表面进行一维扫查,只能获取缺陷的横向尺寸和深度,无法获知其深度方向的尺寸,因此所得 SAFT 成像结果中显示的缺陷为一线状区域。图 11 中缺陷区域横向位置位于  $x = 0.1 \text{ mm}$  处,缺陷尺寸为  $2.2 \text{ mm}$ ,与真实模型之间的偏差为  $10\%$ ,缺陷深度在表面以下  $5.8 \sim 7 \text{ mm}$  处,与实际情况的偏差在  $20\%$  左右。实验所得的成像结果与实际模型有一些

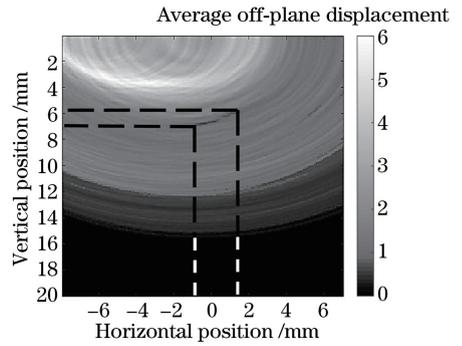


图 11 图 9 的 SAFT 成像结果  
Fig. 11 SAFT image of Fig.9

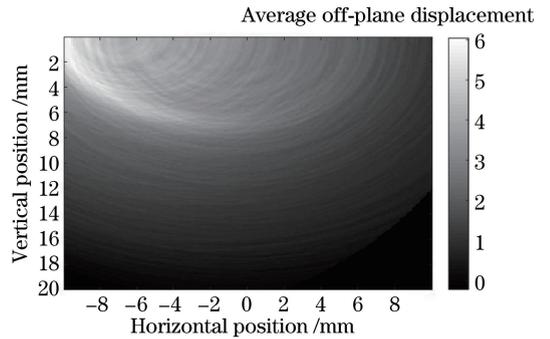


图 12 无缺陷区域的 SAFT 成像结果  
Fig. 12 SAFT image of the perfect area

偏差,这种偏差主要来自于以下两个方面:1)进行实验之前,由人工完成对样品侧面孔状缺陷的加工,所测量的深度值为侧面圆孔的位置,不排除孔状缺陷在材料体内发生倾斜而使其所处深度发生变化;2)对纵波波速测量的偏差也会影响成像后缺陷的位置。由于钢材料中的高频超声波衰减较快,用来测定声速的声波频率较低,从而影响了声速的测量精度。若测量声速比实际值大,成像结果中的缺陷将向远离样品表面的位置移动;若测量声速比实际值小,成像结果中的缺陷将向靠近样品表面的位置移动。

## 5 结 论

无论是传统的基于接触式超声换能器的 SAFT,还是文献中使用激光超声方法的 SAFT,在实际操作中,都是采用激发点与检测点重合的方式。为了实现在表面粗糙材料上的非接触式检测,并消除热膨胀对信号处理带来的不便,使用移动的脉冲激光光源在样品内激发超声纵波,用激光测振仪在固定点探测,从钢样品中得到时域 B 扫信号。利用 SAFT 实现了对厚钢板样品内部缺陷的定位及成像,分别利用数值模拟和实验对其进行验证,实验结果与数值计算结果一致。这一成像方法实现了对

表面粗糙样品的非接触式缺陷检测,且过程简便。实验结果表明,所提出的将激发源与检测源分离的SAFT时域方法是可行的,这为激光超声缺陷检测及SAFT成像提供了新思路。

## 参 考 文 献

- [1] Trtnik G, Gams M. Recent advances of ultrasonic testing of cement based materials at early ages[J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(1): 66-75.
- [2] An Y K, Park B, Sohn H. Complete noncontact laser ultrasonic imaging for automated crack visualization in a plate [J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(2): 025022.
- [3] Shen Z H, Yuan L, Zhang H C, *et al.*, *Laser ultrasound in solids*[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2015: 9-10.  
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: 9-10.
- [4] Watanabe Y, Fujisawa S, Yonezu A, *et al.* Quantitative evaluation of adhesion quality of surface coating by using pulse laser-induced ultrasonic waves [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2016, 286: 231-238.
- [5] Yuan L, Shen Z H, Ni X W, *et al.* Numerical simulation of laser-generated ultrasonic waves in steel with gradient changes of near-surface elastic property [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(12): 7058-7063.  
袁玲, 沈中华, 倪晓武, 等. 激光在近表面弹性性质梯度变化的材料中激发超声波的数值分析[J]. *物理学报*, 2007, 56(12): 7058-7063.
- [6] Yin A M, Wang X C, Glorieux C, *et al.* Texture in steel plates revealed by laser ultrasonic surface acoustic waves velocity dispersion analysis [J]. *Ultrasonics*, 2017, 78: 30-39.
- [7] Ni X W, Chen X, Xu B Q, *et al.* Study of laser-generated transient Lamb wave by experiment and numerical simulation [J]. *Journal of Nanjing University of Science & Technology (Natural Science)*, 2003, 27(5): 588-594.  
倪晓武, 陈笑, 许伯强, 等. 激光激发瞬态 Lamb 波 的实验检测与数值模拟[J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2003, 27(5): 588-594.
- [8] Flaherty J J, Erikson K R, Van Lund M. Synthetic aperture ultrasonic imaging systems: U.S. Patent 3, 548,642[P]. 1970-12-22.
- [9] Burckhardt C E, Grandchamp P A, Hoffmann H. An experimental 2 MHz synthetic aperture sonar system intended for medical use[J]. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 1974, 21(1): 1-6.
- [10] Vandenbroek C, Elzinga M B, Frederick J R, *et al.* Synthetic aperture ultrasonic imaging in metals[C]// *Proceedings of the First International Symposium on Ultrasonic Materials Characterization*. 1980: 249-256.
- [11] Padungsriborworn W, Furukawa A, Hirose S. Applicability of effective region technique in ultrasonic imaging by aws-saft[J]. *Journal of JSCE*, 2015, 3(1): 268-281.
- [12] Berkhout A J, Ridder J, vd Wal L F. Acoustic imaging by wave field extrapolation part I: theoretical considerations [M] // *Acoustical Imaging*. Boston: Springer, 1982: 513-540.
- [13] Karaman M, Li P C, O' Donnell M. Synthetic aperture imaging for small scale systems[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1995, 42(3): 429-442.
- [14] Spies M, Rieder H. Synthetic aperture focusing of ultrasonic inspection data to enhance the probability of detection of defects in strongly attenuating materials[J]. *NDT & E International*, 2010, 43(5): 425-431.
- [15] Boehm R, Brackrock D, Kitze J, *et al.* Advanced crack shape analysis using SAFT [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2010, 1211(1): 814-821.
- [16] Lorraine P W, Hewes R A, Staver P R. Method and system for laser ultrasonic imaging of an object: US5801312[P]. 1998-09-01.
- [17] Guan X F, He J J, Rasselkorde E M. A time-domain synthetic aperture ultrasound imaging method for material flaw quantification with validations on small-scale artificial and natural flaws [J]. *Ultrasonics*, 2015, 56: 487-496.
- [18] Ni C, Dong L, Shen Z, *et al.* Numerical simulation study of defect detections by using laser array generated giant acoustic waves [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2014, 36(5/6): 1236-1243.