

基于声表面波的 V 型裂纹快速检测数值研究

宋大成, 张兴媛*, 陈超

上海工程技术大学航空运输学院, 上海 201620

摘要 为了实现对金属表面 V 型裂纹深度的快速检测, 本文研究了声表面波与一定深度范围内的 V 型裂纹的作用过程, 采用有限元方法模拟了热弹机制下, 线性脉冲激光光源激发的声表面波信号在金属材料中的传输过程, 以及声表面波与 V 型裂纹的相互作用。研究表明, 不同深度的 V 型裂纹和声表面波有不同的相互作用。通过分析不同深度裂纹与声表面波的作用机制, 将裂纹深度信息划分为三个范围区间, 并推算出了相应的裂纹深度的计算方法。本文根据作用过程的不同, 提出了一种对金属表面 V 型裂纹深度进行快速判断和检测的方法。该方法通过检测声表面波反射回波信号 RR 和转换横波信号 RS 峰值的大小, 可对 V 型裂纹的深度范围进行快速判断, 然后检测出其深度信息。该方法可以快速定位裂纹深度区间, 提高了金属表面 V 型裂纹深度信息的检测效率。模拟结果表明, 裂纹深度计算值和实际值之间的误差均不超过 5%, 该方法可以实现对金属表面 V 型裂纹的高效检测。

关键词 激光光学; 激光超声; 有限元; 表面波; 快速检测; 裂纹缺陷

中图分类号 O426

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0514004

Numerical Study on Rapid Detection of V-Shaped Cracks Based on Surface Acoustic Wave

Song Dacheng, Zhang Xingyuan*, Chen Chao

School of Air Transport, Shanghai University of Engineering and Technology, Shanghai 201620, China

Abstract This study seeks to achieve rapid detection of the V-shaped crack depth on metal surfaces. To this end, this study investigates the action process of the V-shaped crack and the surface acoustic wave within a certain range and adopts the finite element method to simulate the transmission process of the surface acoustic wave signal excited by the linear pulse laser source in metal materials under the thermoelastic mechanism and the interaction process of surface acoustic wave and V-shaped crack. The study shows that V-shaped cracks of different depths and surface acoustic waves have different interaction processes. By analyzing the mechanism of different depth cracks and surface acoustic wave, the crack depth information is divided to three range intervals, and the calculation method of corresponding crack depth is estimated. In accordance with different action processes, this study proposes a rapid judgment and detection method for the V-shaped crack depth on metal surfaces. By detecting the surface acoustic wave reflected echo signal RR and the converted shear wave signal RS peak size, the depth range of the V-shaped crack can be quickly judged, and then its depth information is detected. This method enables rapid location of the crack depth interval and improvement of the detection efficiency of V-shaped crack depth information on metal surfaces. The simulation shows that the error of the crack depth between the calculated value and actual one does not exceed 5%, and that this method can achieve efficient detection of metal surface V-shaped cracks.

Key words laser optics; laser ultrasound; finite element; surface wave; rapid detection; crack defect

OCIS codes 280.3375; 140.3325

收稿日期: 2020-07-01; 修回日期: 2020-07-26; 录用日期: 2020-08-06

基金项目: 国家自然科学基金(51465047)

*E-mail: zhyy_yuan@163.com

1 引言

金属零件在服役过程中会受到高温、高压、高负荷、腐蚀、辐射等恶劣环境的影响,导致其表面易产生裂纹缺陷。如果不能及时有效地识别这些裂纹缺陷并采取必要的措施,缺陷就会进一步发展,最终导致零件失效,因此需要及时检测裂纹并对其定量评价。在金属零件裂纹的无损检测过程中,除了准确判断裂纹有无外,检测人员更希望知道裂纹的位置、形状、尺寸等参数信息。

激光超声技术^[1-2]具有非接触、灵敏度高、宽频带等优点,该技术经过近几十年的发展,已成为金属零件中裂纹缺陷检测的主要手段。近年来,很多学者通过仿真和实验研究了材料表面的裂纹缺陷:关建飞等^[3-5]采用有限元模拟软件证明了超声反射回波和超声透射表面波信号与缺陷深度之间的线性关系;孙宏祥等^[6]根据表面波信号的传播路径和渡越时间,采用有限元仿真技术检测了材料表面凹痕的深度;张进朋等^[7]利用缺陷对激光超声的衍射作用实现了内部缺陷的定位及定量检测;杨连杰等^[8]采用激光超声可视化技术研究了脉冲激光激发的表面波在不同深度缺陷上的反射和透射;尤博文等^[9]基于激光超声方法在加热和冷却条件下实现了对裂纹的实时监测;张政等^[10]采用有限元方法模拟了热弹机制下声表面波在圆弧处的反射及透射;隋皓等^[11]通过有限元模拟和实验研究了点源、线源激光激发的超声波对钢轨表面缺陷检测的影响;Dutton等^[12]在材料表面引入V型斜裂纹,验证了裂纹的角度及深度与表面波反射系数、透射系数之间的关系。以上研究均是针对一定深度范围的裂纹进行研究,但在实际生产过程中,不同深度范围的裂纹缺陷的检测方式不同,鉴于此,本文提出一种快速检测金属中V型裂纹深度范围的方法。

本文针对于金属材料中的V型裂纹,采用有限元仿真的方法模拟了热弹机制下激光辐照在金属材料表面,在V型裂纹处发生反射、透射和衍射的过程。本文首先确定V型裂纹的开口宽度,模拟小深度下V型裂纹与声表面波的作用过程,研究声表面波与小深度裂纹的作用过程;之后逐渐增大裂纹深度,研究不同深度下声表面波与V型裂纹的作用过程,并对该作用过程进行总结分析;最后采用仿真模拟计算出三种不同特质V型裂纹深度的界限和检测方法,并对仿真结果进行了验证。

2 激光超声的有限元理论

激光在金属表面激发超声场的工作机制较为复杂,根据激光功率密度强度和材料特性,激光激发超声波主要有两种机制:热弹机制和热弹机制。为了满足对金属零件进行无损检测的要求,本文采用激光热弹机制进行仿真。在热弹机制下,激光源的功率密度较小,能量会被材料表面吸收转化成热能,热能逐渐积累产生温度梯度场,进而使材料发生膨胀并产生各种内部应力,最后形成超声波。在这个过程中,主要存在温度场和超声场的耦合作用,故本文采用有限元方法进行研究,以便于求解。对于各向同性材料,热弹机制下的Navier-Stokes方程^[13]为

$$(\lambda + \mu)\nabla(\nabla \cdot \mathbf{U}) + \mu(\nabla^2 \mathbf{U}) = \beta \nabla T + \rho \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial t^2}, \quad (1)$$

式中: μ 和 λ 为Lamé常数; \mathbf{U} 为材料内部不同时刻的位移向量; $\beta = (3\lambda + 2\mu)\alpha$,其中 α 代表线性膨胀系数, β 代表热弹耦合系数; ρ 为材料密度; t 为时间; ΔT 为不同时刻的温度差。激光辐射过程中存在温度场和超声场的耦合,控制方程为

$$k\nabla^2 T = \rho c_v \dot{T} + T_0 \beta \nabla \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial T} - Q, \quad (2)$$

式中: k 为热传导系数; Q 为单位体积的金属材料在单位时间内吸收的热量; T 为热力学温度; c_v 为材料的比热容。金属材料是典型的各向同性材料,考虑到结构的对称性,可利用轴对称模型分析脉冲激光在金属铝中激发超声的过程。激光源的能量呈高斯分布^[14-15],其在时间和空间上的分布为

$$Q = W_0 A(T) f(x) g(t), \quad (3)$$

其中,

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{2}{a_0} \exp\left[-\frac{2(x-x_0)^2}{a_0^2}\right], \quad (4)$$

$$g(t) = \frac{8t^3}{t_0^4} \exp\left(-\frac{2t^2}{t_0^2}\right) \quad (5)$$

式中: W_0 为单位长度脉冲激光的输出功率; $A(T)$ 为材料表面对激光能量的吸收率; a_0 代表高斯型激光线源宽度的一半; t_0 为激光脉冲的上升时间; x_0 为激光线源中心的横坐标。

3 有限元模型的建立

在仿真过程中,取激光脉冲上升时间为10 ns,光斑半径为300 μm ,单脉冲能量为10 mJ,激光输出

功率为 3 MW/cm^2 , 初始温度设定为 293.15 K , 且不考虑材料表面对激光的反射, 认为激光能量全部被材料吸收, 即 $A(T) = 1$ 。

当激光脉冲上升时间为 10 ns 时, 对其进行快速傅里叶变换, 得到如图 1 所示的结果。可见, 超声声场表面波的中心频率约为 6.71 MHz , 经计算可知其对应的表面波的中心波长约为 $430 \mu\text{m}$ 。为了保证能量在各网格之间传递的精确性和连续性, 同时考虑到计算量的大小, 本文设置网格单元尺寸为 $50 \mu\text{m}$, 时间步长为 2 ns 。

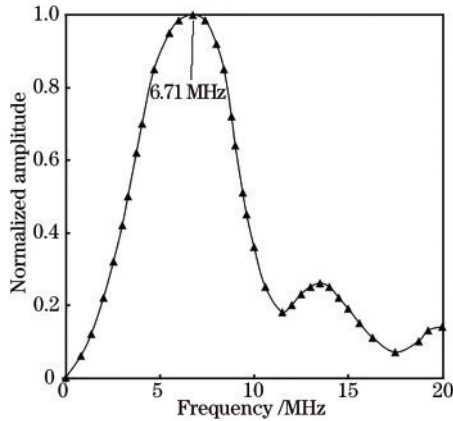


图 1 上升时间为 10 ns 时入射表面波的频谱

Fig. 1 Spectrum of incident surface waves at a rise time of 10 ns

脉冲激光束光源在无限空间中分布均匀且材料各向同性, 故在 y 轴方向上的材料应变和位移均为 0。鉴于此, 本文将三维瞬态弹性问题转换为二维平面应变问题进行研究^[16], 建立如图 2 所示的有限元模型。为了减小或者消除边界的反射影响, 将左右边界设置为低反射边界, 将下边界设置为固定约束边界。裂纹的开口宽度为 $20 \mu\text{m}$, 深度 H 存在变化, A 点为裂纹的左端点, B 点为裂纹底部的中心点, C 点为裂纹的右端点, 裂纹中心左侧 7 mm 处为激光激发位置, 左侧 3 mm 处为 reL 接收点, 右侧 6 mm 处为 reR 接收点。

本文建模选取的材料为金属铝, 其各项力学参

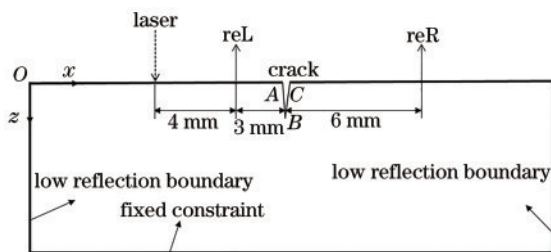


图 2 激光激发与接收的有限元模型

Fig. 2 Finite element model of laser excitation and reception

数和声波在其中传播的速度 (v_s 、 v_L 、 v_R 分别为横波速度、纵波速度和声表面波速度) 如表 1 所示。在求解过程中设定周围环境温度不变, 并忽略环境温度的影响。

表 1 有限元模型中铝的各项力学参数以及声波在铝内部的传输速度

Table 1 Various mechanical parameters of aluminum and internal acoustic wave transmission speed in the finite element model

Material parameter	Value
Poisson's ratio	0.33
Young's modulus/GPa	70
Density / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2700
Thermal conductivity / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	160
Thermal expansion coefficient / (10^{-5}K)	2.3
Absorption rate	0.05
Specific heat capacity / ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	900
$v_s / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	3.08
$v_L / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	6.26
$v_R / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	2.91

4 仿真结果分析

4.1 微小深度裂纹缺陷

图 3(a) 为开口裂纹深度 H 为 $0 \mu\text{m}$ 、 $200 \mu\text{m}$ 和 $400 \mu\text{m}$ 时接收点 reL 处的垂直位移波形图, 图 3(b) 为图 3(a) 的局部放大图, 图 3(c) 为接收点 reR 处的垂直位移波形图, 图中的 L 、 S 、 R 、 RR 、 TR 分别表示直达纵波、直达横波、直达表面波、奇异点 A 反射的表面回波和透射表面波。

图 3(a) 为超声信号的全波形图。从图中可以发现: 当材料表面没有裂纹时, 即裂纹深度 H 为 $0 \mu\text{m}$ 时, 出现了直达纵波 L 、直达横波 S 和直达表面波 R , 之后接收点信号幅值趋于平稳, 未出现表面回波信号; 当裂纹深度 H 增大至 $200 \mu\text{m}$ 和 $400 \mu\text{m}$ 时, 信号曲线在 $3 \mu\text{s}$ 处出现了表面波的反射回波信号。这说明当有裂纹存在时, 超声信号位移图会出现表面波的反射回波, 所以反射回波信号可以作为实验中检测裂纹是否存在的重要依据。

图 3(b) 截取了左接收点 $3 \sim 4 \mu\text{s}$ 的信号位移波形, 可以发现, 反射回波信号的峰值随着裂纹深度的增大而逐渐增大, 这说明裂纹的深度和表面回波信号 RR 的峰值存在一定关系。

图 3(c) 为右接收点 reR 处的超声信号位移图, 此时的信号为透射表面波 TR 。没有裂纹时, TR 的峰值与直达表面波 R 的峰值近乎相等, 这说明在信

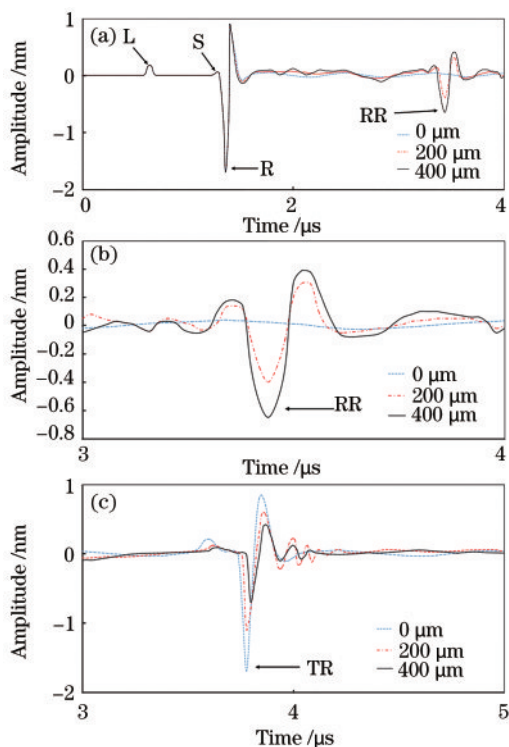


图 3 裂纹深度为 $0\ \mu\text{m}$ 、 $200\ \mu\text{m}$ 和 $400\ \mu\text{m}$ 时的位移波形图。
(a)(b)左接收点处的位移波形图及其放大图;(c)右接收点处的位移波形图

Fig. 3 Displacement waveform diagrams when crack depth is $0\ \mu\text{m}$, $200\ \mu\text{m}$, and $400\ \mu\text{m}$. (a) (b) Displacement waveform diagrams of left receiving point; (c) displacement waveform diagram of right receiving point

号传输过程中能量发生了衰减;当裂纹深度为 $200\ \mu\text{m}$ 和 $400\ \mu\text{m}$ 时,TR 的峰值随着裂纹深度的增大而逐渐减小,且峰值的大小与直达波属于同一级别。从图 3(c)中还可以看出,右端接收点信号位移图中的信号类型较多,并且峰值的大小与直达波属于同一级别,这是下文区分小深度和大深度裂纹的关键。

为了继续研究裂纹深度与 RR 信号峰值的关系,将裂纹深度 H 从 $0\ \mu\text{m}$ 增加至 $500\ \mu\text{m}$,然后提取 RR 信号中的峰值,并将其绘制成如图 4 所示的趋势图。从图中可以看出:当裂纹深度为 $0\sim 300\ \mu\text{m}$ 时,反射回波的峰值增加得较为迅速;当裂纹深度为 $300\sim 430\ \mu\text{m}$ 时,反射回波峰值增大的趋势减缓;当裂纹深度大于 $430\ \mu\text{m}$ 后,反射回波的峰值几乎不再变化。这一变化趋势的原因是表面波的能量主要集中在金属材料表面以下、表面波一个波长的深度范围内(即 $430\ \mu\text{m}$ 左右),并且越靠近表面能量越密集;当裂纹深度小于一个表面波波长时,反射回波

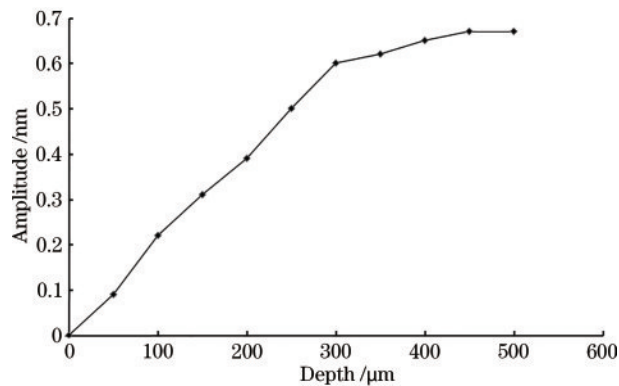


图 4 不同裂纹深度下 RR 信号峰值的变化趋势图

Fig. 4 Trend graph of RR signal peaks at different crack depths

的能量主要为表面波的反射能量;随着裂纹深度增大,表面波的能量被逐渐阻挡,发生反射的能量越来越多,故反射回波的峰值随裂纹深度的增大而增大,并且增长速度先大后小;当裂纹深度超过表面波一个波长量级时,表面波的大部分能量被反射,回波峰值达到最大;随着裂纹深度继续增大,裂纹深度的增大量仅会对反射能量产生微小作用,此时回波幅值近乎不变。这一现象表明,通过回波峰值的大小可以判断深度在 $430\ \mu\text{m}$ 以下的小深度裂纹缺陷。

4.2 中深度裂纹缺陷

继续增大开口裂纹的深度,当裂纹深度 H 为 $500\ \mu\text{m}$ 时,接收点 reL 处的信号如图 5 所示。从图中可以清楚地发现,在增大裂纹深度 H 后出现了新的回波信号 RS,RS 出现在 RR 之后,通过到达时间可计算得到 RR 和 RS 的传播速度分别为 $2905\ \text{m/s}$ 和 $3003\ \text{m/s}$,都与表面波的传播速度相近,说明 RS 波是表面波的衍生波。

为了进一步研究 RS 的出现机制,设置裂纹深度分别为 $1000\ \mu\text{m}$ 、 $2000\ \mu\text{m}$ 、 $3000\ \mu\text{m}$ 、 $4000\ \mu\text{m}$ 和

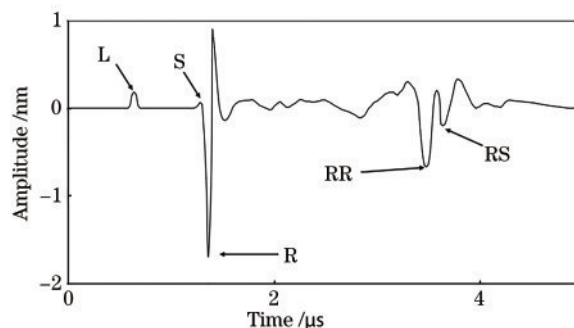


图 5 裂纹深度为 $500\ \mu\text{m}$ 时左接收点处的位移波形图

Fig. 5 Displacement waveform diagram of left receiving point when the crack depth is $500\ \mu\text{m}$

5000 μm , 截取反射回波 RR 和 RS 出现的时间段 (如图 6 所示) 进行研究。

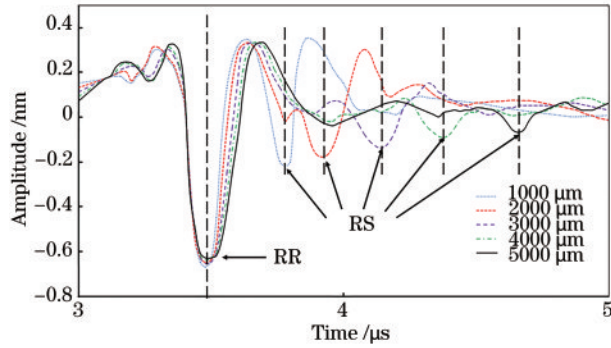


图 6 裂纹深度为 1000~5000 μm 时左接收点的位移波形图
Fig. 6 Displacement waveform diagram of left receiving point when the crack depth is 1000-5000 μm

由图 6 可以看出, 改变裂纹深度 H 后, 反射回波信号 RR 在峰值大小和到达时间上都几乎没有发生改变。这验证了 RR 信号为直达表面波 R 遇到奇异点 A 时的反射信号不受裂纹深度的影响, 并且在裂纹深度超过表面波波波长后, 其反射能量几乎不变。从图 6 中可以看出, RS 信号的传播速度与表面波的传播速度相当, 在改变裂纹深度 H 后 RS 信号的到达时间线性推迟, 并且峰值会随着深度的增加而变小。这说明 RS 信号的到达时间与裂纹深度呈一定的线性关系, 即证明了 RS 信号为直达表面波在 B 点的转换波。当表面波到达 A 点后, 一部分能量反射回去, 形成 RR 波, 另一部分能量随着裂纹边 AB 向下传播, 并在裂纹底部 B 点处发生转换, 形成 RS 波向上传输, 被接收点接收。

为研究 RS 波的实质, 定义 Δt 为裂纹深度每增加 1000 μm 时 RS 波的到达时间差, 提取 RS 信号的到达时间, 则 Δt 分别为 0.15 μs 、0.21 μs 、0.25 μs 、0.27 μs , 定义 ΔS 为每增加 1000 μm 深度时 RS 波的行程差, 则 ΔS 分别为 443 μm 、637 μm 、757 μm 、831 μm , 对应的 RS 信号的速率分别为 2953.3 m/s、3033.3 m/s、3028 m/s、3077.8 m/s, 与铝材料中横波的传输速度几乎相同。由此说明, 沿着裂纹边 AB 传播的部分能量在裂纹尖端 B 处发生了模式转换, 形成了新的横波信号, 该信号继续向材料内部传播。

基于上述分析可以得出声表面波信号与开口型裂纹的作用机理, 如图 7 所示。激光束在材料表面激发出声表面波, 表面波沿材料表面传输, 通过接收点 reL 后继续传输到达裂纹左端点 A, 其中一

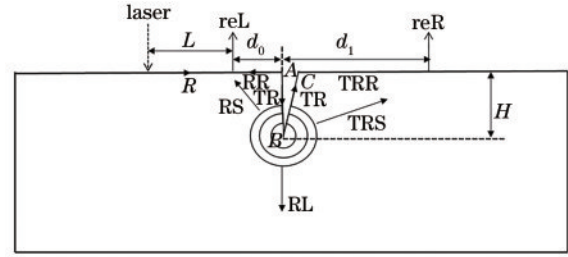


图 7 声表面波与中深度裂纹的作用机理
Fig. 7 Mechanism of surface acoustic wave and medium-depth crack

部分能量在 A 点发生反射, 形成反射表面波 RR, RR 在材料表面传输到达接收点 reL; 其他能量则继续沿裂纹边 AB 形成透射波 TR 向下传输, 传输至裂纹尖端 B 点时大部分能量发生模式转换, 形成转换纵波、横波等体波继续在材料内部传输; 转换横波的一部分向材料左部传输到达表面接收点形成 RS, 另一部分向材料右部传输越过裂纹形成 TRS; 转换纵波大部分向下传输形成 RL, 到达 B 点的少量能量沿裂纹 BC 边向上传输, 经过奇异点 C, 到达表面后转换成透射表面波 TRR。

根据超声波与裂纹的作用机理, 可以通过 RR 和 RS 的到达时间计算裂纹的位置及深度信息。根据 RR 的传输路径可得

$$t_{RR} = \frac{L + 2d_0}{v_R}, \quad (6)$$

式中: t_{RR} 为 RR 的到达时间。根据 RS 的传输路径及转换情况可得

$$t_{RS} = \frac{L + d_0 + H}{v_R} + \frac{S}{v_S}, \quad (7)$$

其中,

$$S = \sqrt{d_0^2 + H^2}, \quad (8)$$

式中: t_{RS} 为 RS 的到达时间; S 为 RS 的渡越路程。根据 (6) 式可得到左接收点 reL 与开口裂纹的距离 d_0 , 其表达式为

$$d_0 = \frac{t_{RR} v_R - L}{2}. \quad (9)$$

将 (8) 式和 (9) 式代入 (7) 式可得到裂纹深度 H 。当裂纹深度为 1 mm、2 mm、3 mm、4 mm 和 5 mm 时, t_{RR} 为 3.47 μs , t_{RS} 分别为 3.78 μs 、3.92 μs 、4.13 μs 、4.37 μs 、4.64 μs , 将 t_{RR} 代入 (9) 式可得 d_0 为 3.05 mm, 将 t_{RS} 分别代入 (7) 式, 可得出裂纹深度 H 分别为 0.98 mm、1.96 mm、2.94 mm、3.91 mm 和 4.89 mm, 与模型参数误差均不超过 5%。

4.3 大深度裂纹缺陷

增大裂纹深度 H 至 $6000\ \mu\text{m}$, 接收点 reL 处的信号图如图 8 所示。可见, 在奇异点 B 处转换的 RS 波的峰值较小, 几乎无法在信号图中分辨出。这是因为裂纹深度较大时, 能量衰减严重, 故转换成的 RS 波能量也较弱, 无法用 RS 检测裂纹信息。文献 [17] 认为, 当接收深度足够大且入射激光与裂纹尖端呈 θ 角度时, 入射处激发的横波信号会直接在裂纹尖端发生衍射, 转换成横波和纵波在材料内部传输。其中 θ 满足 $\theta = \arcsin\left(\frac{V_{L,S}}{V_{L,L}}\right)$, $V_{L,S}$ 和 $V_{L,L}$ 分别为介质 1 中横波和纵波的传输速度。此结论也可由惠更斯原理 [18-19] 进行验证。超声信号传输至裂纹尖端时, 裂纹尖端处的各点均可以看成是发射子波的波源, 可形成纵波和横波等体波向平板内部传播, 其后任意时刻的子波的包络就是该时刻新的波阵面。

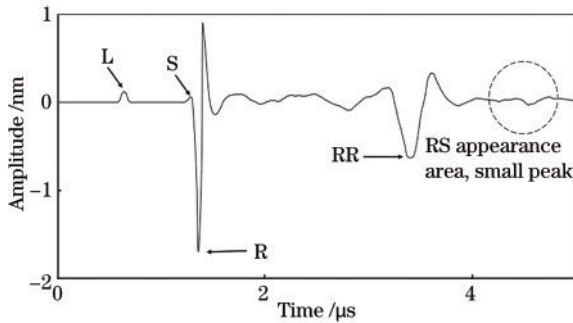


图 8 裂纹深度为 $6000\ \mu\text{m}$ 时左接收点的位移波形图
Fig. 8 Displacement waveform diagram of left receiving point when the crack depth is $6000\ \mu\text{m}$

超声信号与大深度裂纹的作用机理如图 9 所示。激光在材料表面激发表面波、横波和纵波, 表面波能量的占比最大, 其次为横波。由于裂纹深度过大, 表面波能量几乎全部经过裂纹表面反射回去, 横波能量则通过材料内部传输至裂纹尖端。横波在传输过程中具有指向性, 因此其在 $\pm 35^\circ$ 方向的

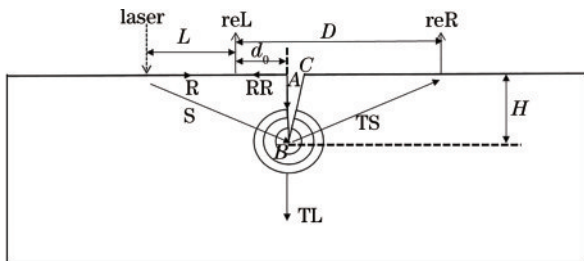


图 9 声表面波与大深度裂纹的作用机理
Fig. 9 Mechanism of surface acoustic wave and deep crack

能量最大。横波到达裂纹尖端后发生衍射, 在裂纹尖端形成新的超声波源, 激发衍射横波和纵波; 衍射横波在材料内部继续传输, 到达表面接收点后发生模式转换形成衍射横波 TS, 而纵波则向下传输形成衍射纵波 TL。

通过分析声表面波与裂纹作用机理可知左端信号成分比较复杂, 且衍射信号的能量相比直达表面波和反射表面波较小, 此时在 reR 接收点处接收超声信号。设置裂纹深度 H 分别为 $6000\ \mu\text{m}$ 和 $7000\ \mu\text{m}$, 信号图如图 10 所示。

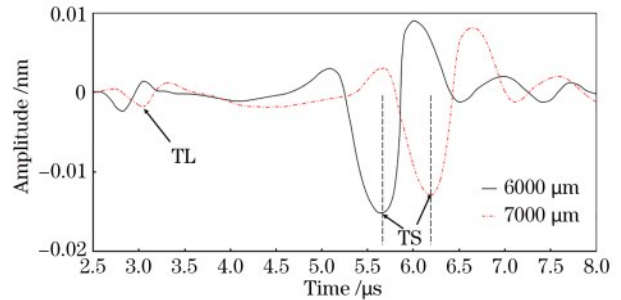


图 10 裂纹深度为 $6000\ \mu\text{m}$ 和 $7000\ \mu\text{m}$ 时右接收点的位移波形图
Fig. 10 Displacement waveform diagram of right receiving point when the crack depth is $6000\ \mu\text{m}$ and $7000\ \mu\text{m}$

图 10 中最大的峰值信号为 TS。在大深度裂纹情况下, TS 的渡越路程 S 分别为 $17.71\ \text{mm}$ 和 $19.12\ \text{mm}$, TS 到达时间分别为 $5.83\ \mu\text{s}$ 和 $6.29\ \mu\text{s}$, 从而求得 TS 的传输速度分别为 $3037.7\ \text{m/s}$ 和 $3039.7\ \text{m/s}$ 。这与横波的传输速度几乎一致, 证明了 TS 为超声横波信号的衍射波。

设置左右接收点的距离为 D , 左接收点到裂纹的距离为 $d_0 = \frac{t_{RR}v_R - L}{2}$, 则裂纹到右接收点的距离为 $D - d_0$ 。由大深度裂纹与超声信号的作用机理可得信号 TS 的到达时间为

$$t_{TS} = \frac{\sqrt{(L + d_0)^2 + H^2} + \sqrt{(D - d_0)^2 + H^2}}{v_s} \quad (10)$$

根据接收点 reR 信号图提取 TS 信号的到达时间, 将该时间代入 (10) 式即可求得裂纹深度。另设置裂纹深度分别为 $6200\ \mu\text{m}$ 、 $6700\ \mu\text{m}$ 、 $7200\ \mu\text{m}$ 和 $7600\ \mu\text{m}$, 用于验证 (10) 式。左右接收点距离 D 为 $9\ \text{mm}$, 信号 TS 的到达时间 t_{TS} 分别为 $5.87\ \mu\text{s}$ 、 $6.11\ \mu\text{s}$ 、 $6.27\ \mu\text{s}$ 和 $6.55\ \mu\text{s}$, 将其代入 (10) 式可得裂纹深度分别为 $6272\ \mu\text{m}$ 、 $6294\ \mu\text{m}$ 、 $7134\ \mu\text{m}$ 和 $7705\ \mu\text{m}$, 这

与模型参数(真实值)的误差均不超过 5%。

根据不同深度裂纹与超声波的作用机理,本文将金属中 V 型裂纹深度大致分为三个范围:1)0~500 μm ,此深度范围的裂纹为小深度裂纹,此时的裂纹深度与表面波反射信号 RR 的峰值呈线性关系;2)500~6000 μm ,此时由于裂纹左侧出现两个奇异点,上奇异点反射波为表面反射波 RR,该区间内不同深度裂纹的 RR 波峰值大小和到达时间几乎不变,下奇异点处发生模式转换出现转换横波 RS,其峰值大小和到达时间携带有裂纹的深度信息;3)6000 μm 以上,激光激发的超声信号在裂纹尖端发生衍射,可通过衍射横波 TS 渡越时间求出裂纹的深度信息。

基于以上分析,本文针对不同深度范围的 V 型裂纹,提出了一种可快速判断裂纹深度范围,然后根据不同范围求解裂纹深度的方法。首先,根据表面波反射回波信号是否出现转换横波 RS,判断裂纹深度是否超过表面波波长:若出现转换横波信号 RS,则裂纹属于中深度裂纹,然后对其深度进行检测;若未出现 RS,则通过右端接收点的透射信号进行判断。透射峰值远小于表面波峰值且信号类型较为单一的属于大深度裂纹,峰值大小和表面波峰值相差不大且类型较为复杂的属于小深度裂纹。

为检测该方法的正确性,本文进行了实验

证。设置有限元模型的裂纹深度分别为 830 μm 、140 μm 、650 μm 、2700 μm 、230 μm 、3440 μm 、450 μm 、5100 μm 、350 μm 、1500 μm 、7200 μm 、6500 μm 、4600 μm 和 770 μm ,然后进行仿真实验,得出每个裂纹深度下的声表面波信号位移图。首先,根据所提检测方法检测不同深度裂纹的超声信号位移图是否出现转换横波信号 RS,其中深度为 830 μm 、650 μm 、2700 μm 、3440 μm 、5100 μm 、1500 μm 、4600 μm 和 770 μm 的裂纹出现了转换横波信号 RS,将其列为中深度裂纹;然后根据裂纹的超声信号位移图提取 RR 和 RS 的到达时间,将到达时间代入(7)式和(9)式便可得出中深度裂纹的深度信息。对于其他深度的裂纹,根据其透射信号的峰值大小和类型是否单一进行判断,将深度为 140 μm 、230 μm 、450 μm 和 350 μm 的裂纹划分为小深度裂纹,根据反射回波信号 RR 的峰值大小进行裂纹深度信息的检测;将深度为 6500 μm 和 7200 μm 的裂纹划分为大深度裂纹,根据接收点 reR 的透射信号位移图提取 TS 到达时间,将到达时间代入(10)式便可得出大深度裂纹的深度信息。该方法可对不同深度的裂纹进行快速定位,然后根据不同的作用过程对裂纹深度进行计算,计算结果如图 11 所示。由图 11 可知,计算深度与仿真模型中设置的裂纹深度(真实值)之间的误差均不超过 5%。

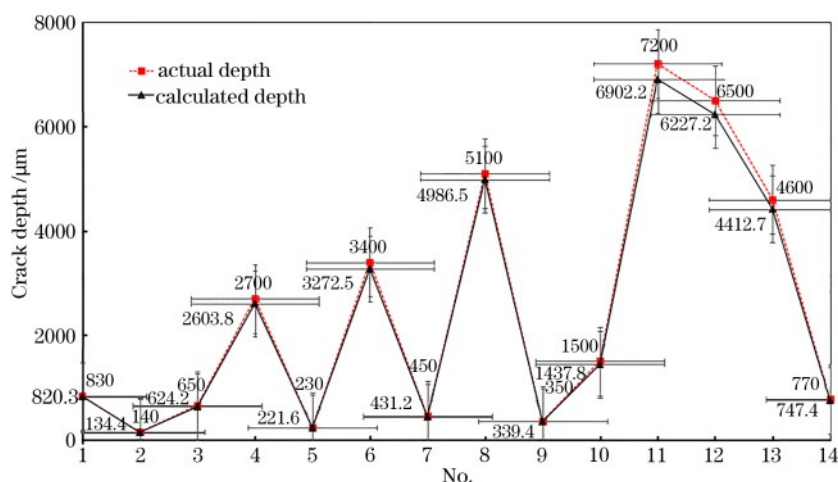


图 11 实际裂纹深度和计算深度的对比

Fig. 11 Comparison of actual and calculated crack depths

5 结 论

本文基于有限元分析的方法,模拟了中心波长为 430 μm 的声表面波与金属材料表面 V 型缺陷的相互作用过程;然后通过改变材料表面 V 型裂纹的

深度,得到了不同深度的裂纹缺陷与表面波作用的信号时域波形图,并分析了其中的直达纵波、横波、表面波、反射表面波、转换横波和衍射横波等。

仿真结果表明:1)当裂纹深度在声表面波的一个波长范围内时,反射表面波 RR 的峰值随裂纹深

度的增加而增加,二者具有线性关系。2)当裂纹深度超过 500 μm 时,反射表面波 RR 之后出现了新的回波信号 RS;分析裂纹深度在 500~5000 μm 的超声信号图发现,反射表面波 RR 为表面波到达奇异点 A 点处的反射波,而转换横波 RS 为表面波沿着裂纹边 AB 向下传输至 B 点后发生模式转换形成的,其波速的大小为横波波速,携带有裂纹的深度信息。根据这一点可分析得出裂纹深度为 500~5000 μm 时声表面波与 V 型裂纹的作用机理,根据作用机理和几何关系可得出中深度裂纹的深度计算公式,计算值与模型参数(真实值)之间的误差均不超过 5%。3)当裂纹深度为 6000 μm 左右时,RS 消失,此时直达横波与裂纹尖端发生了衍射现象,符合惠更斯原理;当采用右端接收时,发现裂纹右侧存在衍射横波,根据峰值的大小和渡越时间可得出其波速为横波波速,由此分析可得出大深度裂纹与超声的作用机理。根据作用机理得出裂纹深度的计算公式,将计算值与真实值进行比较,误差均不超过 5%。

根据不同深度裂纹与声表面波的作用过程,本文提出了一种对裂纹深度进行快速判断的方法,然后根据不同深度裂纹与表面波的作用原理对裂纹进行深度检测,提高了 V 型裂纹的检测效率和准确性。

参 考 文 献

[1] Ma B Q, Zhou Z G. Progress and development trends of composite structure evaluation using noncontact nondestructive testing techniques in aviation and aerospace industries [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(7): 1787-1803.
马保全,周正干. 航空航天复合材料结构非接触无损检测技术的进展及发展趋势[J]. *航空学报*, 2014, 35(7): 1787-1803.

[2] Zhou Z G, Sun G K, Ma B Q, et al. Application of new developed techniques for ultrasonic nondestructive testing for advanced composite materials [J]. *Science & Technology Review*, 2014, 32(9): 15-20.
周正干,孙广开,马保全,等. 先进复合材料超声无损检测新技术的应用[J]. *科技导报*, 2014, 32(9): 15-20.

[3] Guan J F, Shen Z H, Ni X W, et al. Numerical analysis of the surface notch inspection by laser generated Rayleigh waves on aluminum plate [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2006, 20(5): 390-396.
关建飞,沈中华,倪晓武,等. 激光声表面波检测铝

板表面凹痕的数值研究[J]. *测试技术学报*, 2006, 20(5): 390-396.

- [4] Guan J F, Shen Z H, Ni X W, et al. Numerical study on depth evaluation of micro-surface crack by laser generated ultrasonic waves [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2010, 24(1): 15-21.
关建飞,沈中华,倪晓武,等. 激光超声探测铝板表面微缺陷深度的数值研究[J]. *测试技术学报*, 2010, 24(1): 15-21.
- [5] Guan J F, Shen Z H, Xu B Q, et al. Numerical simulation of scattering of Rayleigh wave by a surface-breaking crack [J]. *Applied Acoustics*, 2006, 25(3): 138-144.
关建飞,沈中华,许伯强,等. 表面垂直裂痕诱发瑞利波散射的数值分析[J]. *应用声学*, 2006, 25(3): 138-144.
- [6] Sun H X, Xu B Q, Zhang S Y. Study on depth detection of surface notches using time-of-flight method with surface acoustic waves in viscoelastic media [J]. *Acta Acustica*, 2011, 36(2): 139-144.
孙宏祥,许伯强,张淑仪. 声表面波渡越时间法检测黏弹性介质表面凹痕深度的研究[J]. *声学学报*, 2011, 36(2): 139-144.
- [7] Zhang J P, Qin X P, Yuan J X, et al. Defect location and size detection based on laser ultrasonic diffraction bulk wave [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1214002.
张进朋,秦训鹏,袁久鑫,等. 基于激光超声衍射体波的缺陷定位定量检测[J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1214002.
- [8] Yang L J, Li Y, Sun J J, et al. Reflection and transmission of laser ultrasonic waves on surface defects [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 041203.
杨连杰,李阳,孙俊杰,等. 激光超声表面波在表面缺陷上的反射与透射[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(4): 041203.
- [9] You B W, Ni C Y, Shen Z H. Laser ultrasonic real-time monitoring of photothermal modulation crack closure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0204009.
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): 0204009.
- [10] Zhang Z, Zhao J F, Pan Y D. Numerical study on reflection and transmission of surface acoustic waves at circular arc [J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2019, 38(5): 815-823.

- 张政, 赵金峰, 潘永东. 声表面波在圆弧处反射及透射的数值研究[J]. 应用声学, 2019, 38(5): 815-823.
- [11] Sui H, Gao X R, Luo L, et al. Finite element simulation and experiment on interaction of surface waves excited by laser point or line source with rail defects[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(8): 081201.
- 隋皓, 高晓蓉, 罗林, 等. 激光点源与线源激发表面波与钢轨缺陷作用的有限元仿真和实验[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(8): 081201.
- [12] Dutton B, Clough A R, Rosli M H, et al. Non-contact ultrasonic detection of angled surface defects [J]. NDT & E International, 2011, 44(4): 353-360.
- [13] Achenbach J D. Laser excitation of surface wave motion[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2003, 51(11/12): 1885-1902.
- [14] Xu B Q, Shen Z H, Ni X W, et al. Time-frequency analysis of laser-generated ultrasonic wave in coating-substrate systems [J]. Laser Technology, 2004, 28(6): 609-612.
- 许伯强, 沈中华, 倪晓武, 等. 涂层-基底系统激光激发表面波的时间-频率分析[J]. 激光技术, 2004, 28(6): 609-612.
- [15] Luo Y K. Study on finite element analysis and signal testing methods of laser-generated ultrasonic[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- 罗玉昆. 激光超声有限元分析与信号检测方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- [16] Ye Z M. A new finite element formulation for planar elastic deformation[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1997, 40(14): 2579-2591.
- [17] Feng W W, Jin L, Zhao J F, et al. Mode conversion of laser-excited shear waves interaction with the side of vertical cracks [J]. Laser Technology, 2018, 42(4): 487-493.
- 冯湾湾, 金磊, 赵金峰, 等. 激光激发横波作用垂直裂纹侧面后的模式转换[J]. 激光技术, 2018, 42(4): 487-493.
- [18] NDT Branch of Chinese Mechanical Engineering Society. Ultrasonic testing[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2000: 16-18.
- 中国机械工程学会无损检测分会. 超声波检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 16-18.
- [19] Cooper J A, Crosbie R A, Dewhurst R J, et al. Surface acoustic wave interactions with cracks and slots: a noncontacting study using lasers[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1986, 33(5): 462-470.