

激光激发表面波测量表面缺陷深度的数值研究

陶程^{1,2}, 殷安民^{1,2}, 王煜帆^{1,2}, 应志奇¹, 束学道^{1,2}

(1. 宁波大学机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;

2. 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要:为了研究声表面波与表面缺陷的作用机理,实现激光超声技术对表面微缺陷定量检测,本文采用有限元法首先分别研究了声表面波与缺陷前沿、缺陷后沿的作用,然后讨论了缺陷宽度的存在对缺陷前沿与声表面波作用的影响,最后通过分析矩形缺陷与声表面波的作用,给出了能定量表征表面缺陷的特征量。研究表明:RS波(特征点Q)后的振荡信号(特征点W、E)来源于透射表面波在缺陷后沿所产生的振荡。特征点Q的到达时间随表面缺陷深度或宽度增大都呈现微小的线性增长;特征点W、E的到达时间差随表面缺陷深度的增大呈线性增长,与缺陷宽度的变化无关。最后,根据特征点的到达时间实现了缺陷深度的定量计算。研究结果为表面缺陷的定量检测提供了理论依据。

关键词:激光超声;有限元法;表面缺陷;声表面波

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.01.007

Numerical study of depth gauging of surface defects using laser-generated surface acoustic waves

TAO Cheng^{1,2}, YIN An-min^{1,2}, WANG Yu-fan^{1,2}, YING Zhi-qi¹, SHU Xue-dao^{1,2}

(1. Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Part Rolling Key Laboratory of Zhejiang Province, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to realize quantitative detection of the surface-breaking defects by laser ultrasonic technology, the mechanism of the surface acoustic wave and the surface-breaking defects are studied. In this paper, the finite element method is used to study the interaction between the front and rear edge of the surface defects and surface acoustic wave, respectively. Then the influence of the existence of defect width on the front of the defect and the surface acoustic wave is discussed. Finally, the characteristic quantity (oscillation signal) which can quantitatively characterize the surface defect is given by analyzing the rectangular defect interaction with surface acoustic wave. The simulation results show that the oscillation signals (feature points W and E) after RS wave (feature point Q) originate from the oscillations of the transmitted Rayleigh wave at the rear edge of the defect. The arrival time of feature point Q showed a trend of slight increase linearly with the increase of defect depth or width; the arrival time difference of feature points W and E increase linearly with the increase of defect depth, which is independent of the defect width. The depth of the surface defect is quantitatively calculated according to the arrival time of the feature points. The research results will provide a theoretical basis for detecting surface defects.

Key words: laser ultrasonic; finite element method; surface defect; surface acoustic wave (SAW)

基金项目:浙江省自然科学基金项目(No. Q17E050012);宁波市自然科学基金项目(No. 2016A610057)资助。

作者简介:陶程(1995-),男,硕士研究生,主要从事激光超声无损检测技术的研究。E-mail:962287836@qq.com

通讯作者:殷安民(1984-),男,博士,讲师,主要从事激光超声无损检测技术,金属材料组织性能方面的研究。E-mail:yinanmin@nbu.edu.cn

收稿日期:2018-07-26

1 引言

铝板带作为国民经济发展的重要基础材料,市场需求强劲。随着技术发展和市场需求的变化,厂商对铝板带产品的性价比及产品的质量要求却愈来愈高^[1],需要满足在高速生产中对产品进行实时监控、在线缺陷分析,以确保表面的质量要求。激光超声技术具有非接触、宽带、高时空分辨率等优点,在无损检测领域越来越得到广泛的应用^[2-4]。其中激光激发表面波具有无色散、不易衰减的特点,尤其适用于表面缺陷的检测。

近年来,许多学者致力于研究激光激发表面波检测表面裂纹的特征,对于表面矩形缺陷的定量计算在国内外已进行了相关研究工作,并取得了一定的成果。Zhou 等^[5]通过分析了表面波与表面裂纹相互作用的时域与频域特性,得到表面波的反射系数与透射系数随缺陷深度的变化情况。Wang 等^[6]提出了一种利用激光产生表面波定量计算出表面缺陷宽度的方法。Guo 等^[7]探讨了表面波的中心频率与最大振幅随缺陷深度变化的关系。Guan^[8]采用激光近场激发表面波发现反射表面波后所出现的振荡信号的时间间隔仅依赖于缺陷深度,与缺陷宽度的变化无关。王威^[9]、刘辉^[10]和王余敬^[11]等人从数值和实验的角度,分析激光远程激发表面波从时域或频域信号中提取特征量来实现定量表征缺陷深度。上述的研究主要是通过提取出随缺陷深度或宽度变化呈线性关系的特征量来实现对缺陷尺寸的定量表征,而对于具体计算表面缺陷尺寸的公式相对较少。

考虑到有限元法能够灵活地处理复杂的几何结构,能够很好地捕捉到散射表面波的特征,因此,本文采用了有限元法对铝板进行激光远场激发表面波,分析了缺陷宽度的存在对 RS 波到达时间的影响,然后研究缺陷后沿与表面波的作用,解释了位移信号中所产生振荡信号的来源,最后根据矩形缺陷与表面波的作用的位移波形图,从中提取出能定量表征缺陷尺寸的特征点,以实现缺陷深度的定量计算。

2 热弹性理论模型

2.1 有限元模型及理论基础

当激光脉冲辐照金属铝板时,三维空间的弹性问

题借助于物理模型及载荷强度在 z 方向上的均匀分布,可通过平面应变理论将模型简化为二维平面 $x-y$ 问题进行处理,即求解二维热—结构耦合的平面应变的问题。激光激发表面波的数值模型如图 1 所示。

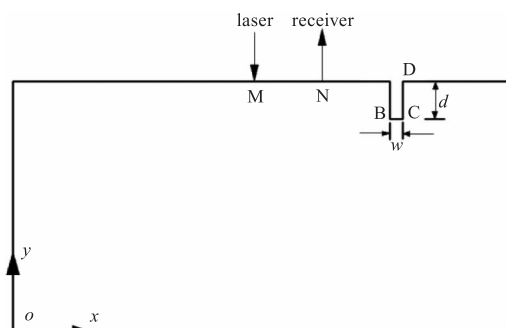


图1 数值模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the numerical model

在均匀各向同性的线弹性材料中,热—结构耦合场的控制方程为^[12]:

$$k \nabla^2 T(x, y, t) = \rho c_v \dot{T}(x, y, t) - Q(x, t) \quad (1)$$

$$\mu \nabla^2 U(x, y, t) + (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot U(x, y, t)) = \rho \ddot{U}(x, y, t) + \beta \nabla T(x, y, t) \quad (2)$$

其中, $T(x, y, t)$ 表示瞬态温度分布; ρ 、 c_v 、 k 、 T_0 分别表示材料的密度、比热容、热传导系数以及环境温度; $U(x, y, t)$ 是不同时刻位移场; λ 和 μ 表示材料的拉梅(Lamè)常数; $\beta = (3\lambda + 2\mu)\alpha_T$, α_T 是材料的热膨胀系数。

激光脉冲的输入能量作用在 $x-y$ 平面的上边界沿,激光辐射区域的热流边界条件可被表示为:

$$Q(x, t) = A(T)f(x - x_0)g(t)E_0 \quad (3)$$

式中 $f(x)$ 、 $g(t)$ 分别为激光的空间、时间分布,可以表示为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{2}{R_c} \exp\left(-\frac{2x^2}{R_c^2}\right) \quad (4)$$

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

式(3)、(4)、(5)中, $Q(x, t)$ 表示材料表面所吸收的总能量; E_0 表示激光光源单位长度的能量; $A(T)$ 表示材料表面的吸收率; x_0 表示激光光源中心的位置; R_c 表示激光光源半宽; t_0 表示激光脉冲上升时间。

上表面和矩形缺陷内部的边界不施加任何约束,满足自由边界条件。考虑到主要分析表面波与

缺陷的作用,为了简化模型尺寸,减小计算量,消除声波到达边界产生反射会对信号产生影响,模型中两侧边与下表面采用了低反射边界条件。

另外,初始温度与位移场要满足初始条件:

$$T(x, y, 0) = 300 \text{ K} \quad (6)$$

$$U(x, y, t) = \frac{\partial U(x, y, t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0 \quad (7)$$

表 1 计算中所需要铝的参数

Tab. 1 The required parameters of aluminum used in the calculation

Absorptivity	Density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Specific heat/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Thermal conductive coefficient/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Young modulus/ GPa	Poisson ratio	Thermal expansion coefficient/ ($10^{-5} \cdot \text{K}^{-1}$)
0.052	2700	900	238	70	0.34	2.3

3 计算结果与分析

3.1 声表面波与不同类型缺陷的作用

在图 1 中探测点 N 距离激光源 M 为 3 mm,当表面无缺陷时,激光激发表面波的位移信号如图 2(a)所示。

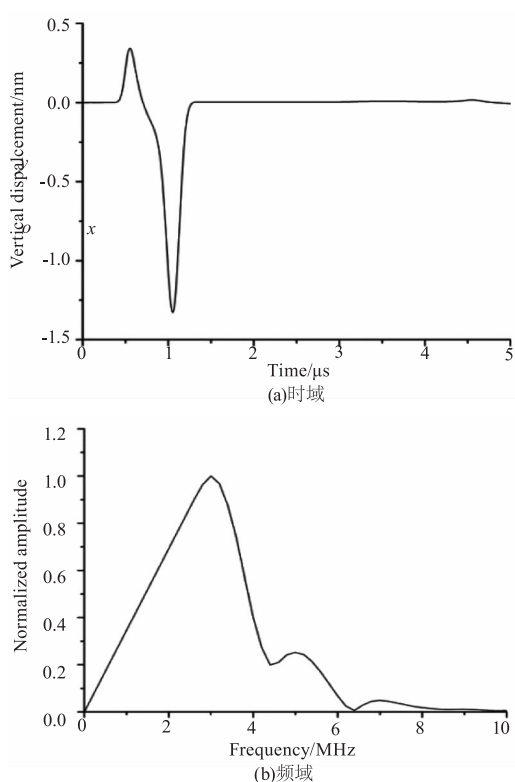


图 2 激光激发表面波的时域和频域波形

Fig. 2 Time and frequency domain waveforms of the laser-generated surface acoustic waves

对图 2(a)中的时域波形进行 FFT 转化,激光激发表面波的频域波形如图 2(b)所示。由图 2(b)可

2.2 激光与材料的参数

整个有限元模型的长和宽分别设置为 20 mm、10 mm,脉冲上升时间为 10 ns,激光的能量为 1 mJ,激光的线源的半宽取 0.3 mm。在激光辐射的近场区域网格大小为 5 μm ,远离激光激发范围的网格大小为 100 μm ,中间部分采用三角形网格进行过渡。计算中不考虑温度对材料的影响,铝的热物理参数与力学参数如表 1 所示。

知对应入射表面波中心频率分别为 3.195 MHz,计算可得对应的中心表面波波长大约为 1000 μm ,为后文讨论奠定基础。

为了讨论表面波与不同类型缺陷的作用,首先本文引入了表面波与沿缺陷前沿切割后的模型(模型 1)作为参照,如图 3(a)所示,然后比较声表面波与四种不同类型缺陷的作用,如图 3(b)~(e)所示。其中,图 3(b)为声表面波与缺陷前沿的作用模型(模型 2);图 3(c)为声表面波与缺陷后沿的作用模型(模型 3);图 3(d)为缺陷宽度存在时声表面波与缺陷前沿的作用模型(模型 4);图 3(e)为声表面波与表面缺口的作用模型(模型 5)。各个模型的探测点 N 距离激光源 M 均为 3 mm,其余的参数将在相应的小节中分别给出。最后对声表面波与这些缺陷的作用做了定性分析与定量计算,阐明了声表面波与表面微缺陷的作用机制。

3.1.1 声表面波与沿缺陷前沿切割后的作用

为了不考虑声表面波与缺陷的作用,模型 1 通过对图 1 的有限元模型沿边界 AB 进行剪切。此模型中,探测点 N 到缺陷边界 AB 的距离为 3 mm。探测点 N 接收的位移信号如图 4 所示,从图 4 中可以清楚的分辨出 4 种不同的位移信号成分,其中 rP、PR、RP 和 RR 分别表示反射的掠面纵波、掠面纵波模态转换形成的声表面波、声表面波模态转换形成的纵波以及反射表面波。当纵波或表面波到达 A 点时,A 点相当于一个次声源,此时会发生模态转换而形成纵波与表面波并返回探测点 N。

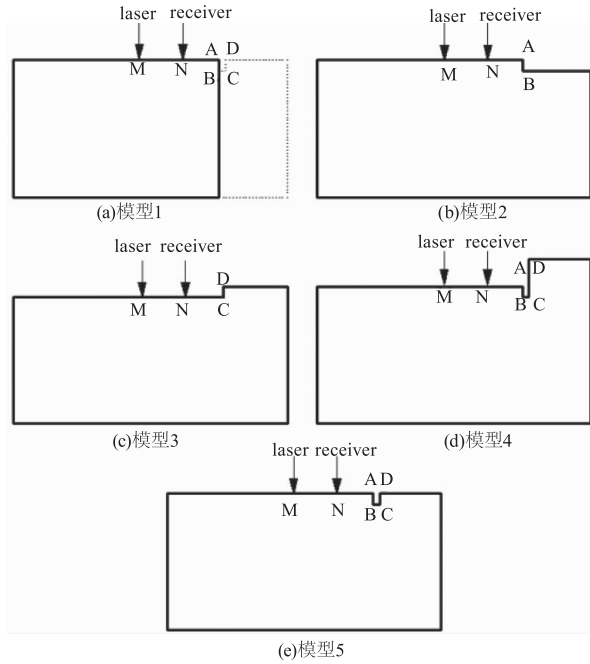


图3 激光激发表面波与表面缺陷作用的示意图
Fig. 3 Schematic diagram of laser-generated surface acoustic waves interaction with surface defects

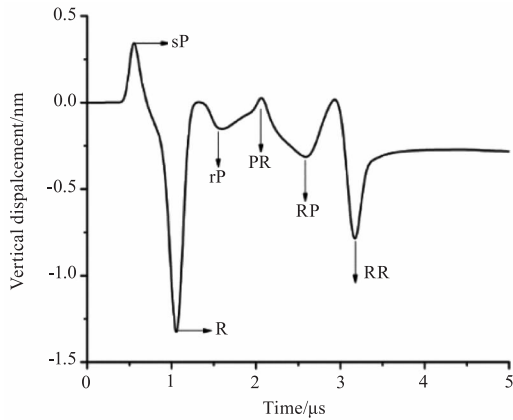


图4 沿缺陷前沿切割后的位移信号
Fig. 4 Displacement signals along the front edge of the defect after cutting

3.1.2 声表面波与缺陷前沿的作用

模型2 通过将缺陷宽度设置为无限大,从而忽略缺陷宽度的影响。此模型中,探测点N到边界AB的距离为3 mm,缺陷前沿深度为0.5 mm。模型2与模型1的位移信号对比结果如图5所示,可以看出rP、PR、RP、RR波的到达时间基本不变,模型2中的RP、RR波幅值有所降低。因为缺陷前沿的存在导致了部分低频成分的表面波在到达A点后会产透射,从而导致在A点模态转换后形成的RP、RR波幅值降低。

除此之外,在模型2的位移信号中出现了RS波,为了进一步说明RS波的产生过程,本文给出

了在不同时刻下缺陷前沿与声表面波作用的位移场,如图6所示。由图6可知,当入射表面波达到边界AB后,一部分表面波产生反射形成RR波。另一部分表面波将沿着AB方向传播,到达B点时绝大部分表面波会在B点发生模态转换,然后在上表面形成RS波,还有小部分表面波绕过B点沿着BZ方向继续传播。

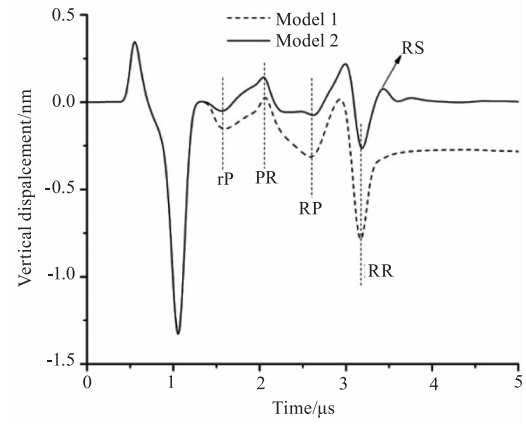


图5 缺陷前沿与声表面波作用的时域信号

Fig. 5 Time-domain signal of the front edge of the defect interaction with surface acoustic wave

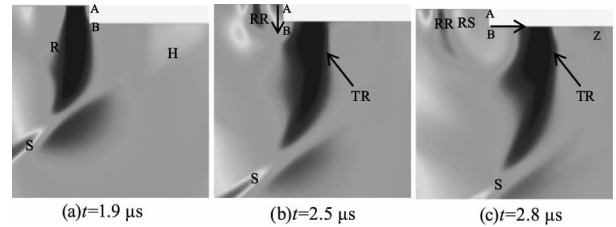


图6 缺陷前沿与声表面波作用在的位移场

Fig. 6 Displacement fields of the front edge of the defect interaction with surface acoustic wave

基于上述模拟结果并结合 Cooper 等人^[13]给出的实验结果,RS波产生过程如图7所示,入射表面波沿着MA方向传播到达边界AB,然后沿着AB方向传播到达缺陷底部,在缺陷底部发生模态转换形成了剪切波,其中部分剪切波以一定的角度 θ ($\theta \approx 30^\circ$)传播到上表面,在上表面又发生模态转换形成表面波,最后表面波沿着表面传播返回探测点。因此,RS波的到达时间可以表示为:

$$T_{RS} = \frac{(l_{MA} + d)}{V_R} + \frac{d}{V_S \cos \theta} + \frac{l_{NA} - d \tan \theta}{V_R} \quad (8)$$

将 $\theta \approx 30^\circ$ 代入公式(8)中进一步简化为:

$$T_{RS} = \frac{l_{MA} + l_{NA} + \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{3}\right)d}{V_R} + \frac{2\sqrt{3}d}{3V_S} \quad (9)$$

其中, l_{MA} 、 l_{NA} 分别为激光源与探测点到端点 A 的距离; θ 为剪切波入射到上表面与缺陷底端形成的夹角; V_R 、 V_S 分别为表面波、横波在铝中传播的速度; d 表示缺陷深度。

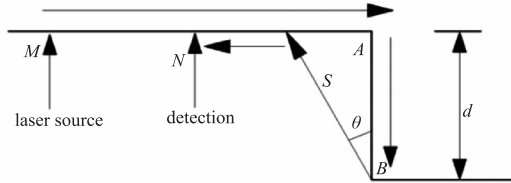


图 7 在模型 2 中 RS 波的产生机制

Fig. 7 Mechanism of the generation of RS wave in model 2

3.1.3 声表面波与缺陷后沿的作用

此模型中, 探测点 N 到边界 CD 的距离为 3.3 mm, 缺陷后沿深度为 0.5 mm, 探测点接收的位移信号如图 8 所示。缺陷后沿与表面波作用在不同时刻下的位移场如图 9 所示, 其中, S 表示横波, H 表示头波, R 为表面波, P、K 和 L 分别对应于图 8 中位移信号 P、K 和 L。由图 9(b) 可知, 入射表面波传播到达 G 点后会产生散射导致小部分表面波返回到探测点, 对应于图 8 中的 P 点信号, 大部分表面波沿着 CD 方向到达 D 点, D 点相当于一个次声源会形成纵波与表面波。考虑到纵波的影响远小于表面波而图 8 中 K 点对应的位移幅值较大, 因此特征点 K 的传播路径首先是入射表面波沿 MC 方向传播, 在到达 C 点后会沿着路径 CD-DC 进行传播, 最后会在 C 点形成两部分表面波, 如图 9(c) 所示, 分别对应于图 8 中的点 K 和 L。其中一部分绕过 C 点并返回探测点, 而另一部分在到达 C 点后会边界 CD 形成振荡, 另外由图 9(d) 可知, 产生的振荡信号 L 会绕过 C 点被探测点接收。

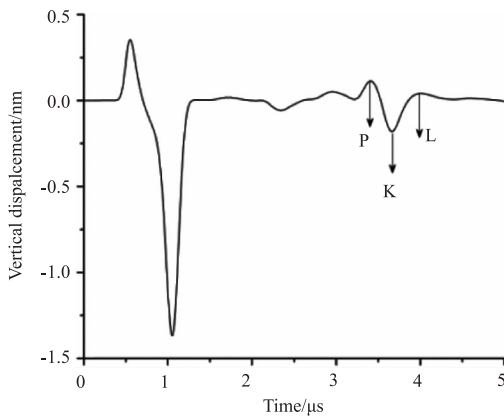


图 8 声表面波与缺陷后沿作用的位移信号

Fig. 8 Displacement signals of surface acoustic wave interaction with the rear edge of the defect

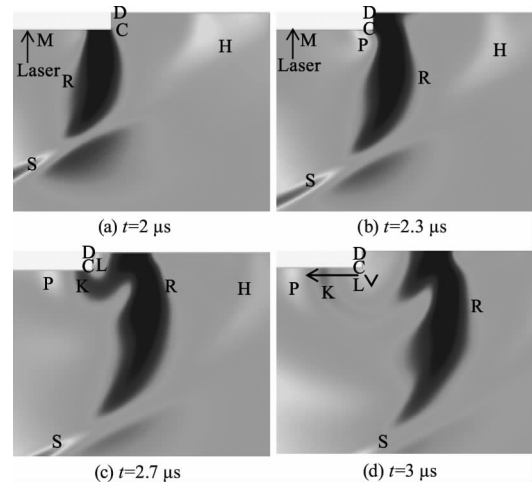


图 9 缺陷后沿与声表面波作用的位移场

Fig. 9 Displacement fields of the front edge of the crack interaction with surface acoustic wave

特征点 K 的传播的路径如图 10 所示, 特征点 K、L 到达时间可分别表示为:

$$T_K = \frac{(l_{MC} + l_{NC} + 2d)}{V_R} \quad (10)$$

$$T_L = T_K + \frac{2d}{V_R} \quad (11)$$

其中, l_{MC} 、 l_{NC} 分别表示激光源和探测点到边界 CD 的距离。

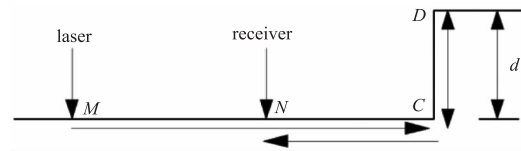


图 10 特征点 K 的传播示意图

Fig. 10 Schematic of the propagation of feature point K

为了验证特征点 K 和 L 的传播路径的正确性, 取缺陷后沿深度从 0.4 mm 线性增加到 0.7 mm, 增量为 0.1 mm, 利用公式 (10)、(11) 计算了在不同缺陷后沿深度下特征点 K 和 L 的到达的理论时间, 与模拟结果的对比情况如表 2 所示。由表 2 可知, 特征点 K 和 L 到达时间的数值结果与理论结果基本吻合, 验证了图 10 中的特征点 K 传播路径的正确性, 也说明了特征点 L 的到达时间仅依赖于缺陷后沿深度。

3.1.4 缺陷宽度的存在对声表面波与缺陷前沿作用的影响

模型 4 在声表面波与缺陷前沿的作用基础上, 讨论了缺陷宽度的存在对于表面波传播的影响, 重点分析了缺陷宽度的存在对 RS 波到达时间的影响, 通过将缺陷后沿深度设置为无限高, 从而忽

略缺陷后沿的影响。在模型中,探测点 N 到边界 EF 的距离为 3 mm,缺陷前沿深度为 0.5 mm,宽度为 0.3 mm。模型 4 与模型 2 的位移信号对比结果如图 11 所示,由图可以看出,缺陷宽度的存在导致 RS 波的到达时间产生微小的滞后且幅值大幅度增加。

表 2 特征点 K 和 L 到达时间的数值和理论结果

Tab. 2 The numerical and theoretical results of the arrival time of the feature points K and L

Depth/mm	Arrival time $T_K/\mu s$		Arrival time $T_L/\mu s$	
	Numerical result	Theoretical result	Numerical result	Theoretical result
0.4	3.605	3.586	3.880	3.862
0.5	3.665	3.655	4.005	4.000
0.6	3.725	3.724	4.135	4.138
0.7	3.785	3.793	4.265	4.276

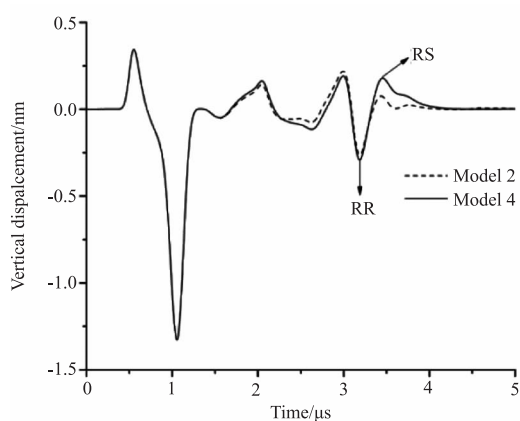


图 11 模型 4 与模型 2 的位移信号对比结果

Fig. 11 Comparison of displacement signals between model 4 and model 2

结合图 9(b)可知,入射表面波低频的部分到达 B 点会形成透射表面波直达 C 点,然后产生表面波返回 B 点,并与沿 AB 方向传播到达 B 点的表面波发生叠加导致模态转换形成的剪切波能量增加,最后导致 RS 波的幅值增大。

为了深入分析缺陷宽度的变化对 RS 波到达时间的影响,保持缺陷深度 0.5 mm 不变,取缺陷宽度从 0.1 mm 线性增加到 1 mm,增量为 0.3 mm,RS 波的变化情况如图 12 所示。当缺陷宽度在 0.1 ~ 0.4 mm 变化时,RS 波的到达时间产生了滞后;当缺陷宽度在 0.7 mm 时,RS 波的到达时间产生了分离,形成了特征点 X 和 Y;缺陷宽度在 0.7 ~ 1 mm 变化时,特征点 X 到达时间保持不变,特征点 Y 到

达时间发生延迟。因为缺陷宽度的存在导致在 F 点处的表面波模态转换形成的剪切波能量来源于两部分,其中一部分来自于入射表面波在到达 A 点后沿着 AB 方向的传播;另一部分来自于透射表面波在 C 点时产生的散射。

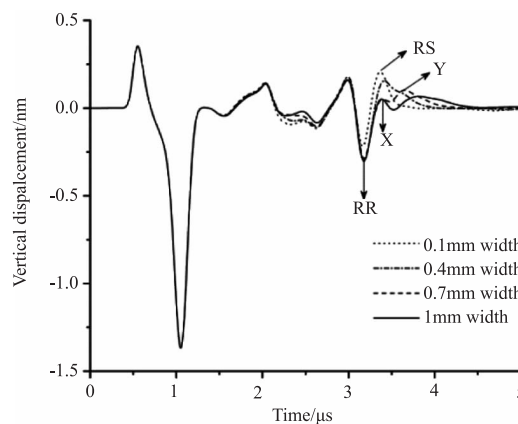


图 12 在模型 4 中不同缺陷宽度下的位移信号

Fig. 12 Displacement signals at different defect widths in model 4

进一步得到 RS 波的传播机制如图 13 所示,入射表面波分别沿路径①和②传播到达 B 点。当 RS 波的到达时间未发生分离时,沿路径①和②传播的表面波在 B 点发生叠加导致 RS 波的到达时间发生微小变化且幅值明显增大。随着缺陷宽度的增加,沿路径①和②传播到 B 点的表面波逐渐产生了分离,从而形成了 X、Y 两个波峰。

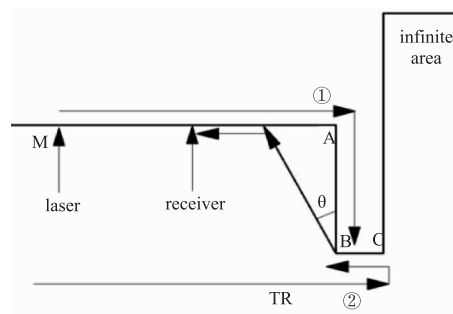


图 13 模型 4 中 RS 波的产生机制

Fig. 13 Mechanism of the generation of RS wave in model 4

3.1.5 声表面波与表面缺口的作用

此模型中,探测点 N 到边界 AB 的距离为 3 mm,缺陷深度、宽度分别为 0.5 mm、0.3 mm。模型 5 与模型 4 的位移信号对比结果如图 14 所示。其中,特征点 Q 表示 RS 波,模型 5 中 RS 波的到达机制与模型 4 保持一致,且在模型 5 中 RS 波后出现了振荡信号,对应于图 14 中特征点 W 和 E,说明了振荡信号来源于缺陷后沿。

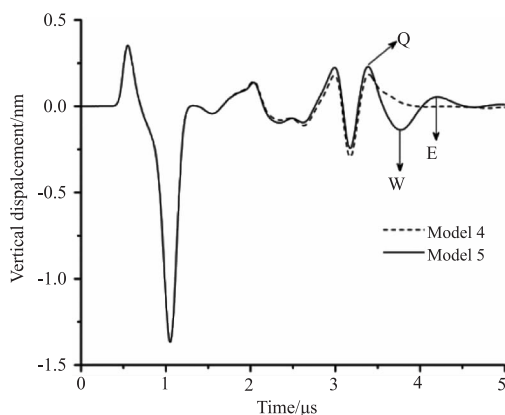


图 14 声表面波与表面缺口作用的位移信号

Fig. 14 Displacement signals of surface acoustic wave interaction with surface notch

结合图 9(a) ~ (c) 可知, 振荡信号产生的机制如图 15 所示, 当入射表面波达到边界 AB 后, 一部分表面波产生反射形成 RR 波, 另一部入射表面波低频的部分到达 B 点会形成透射表面波沿着 BC 方向直达 C 点, 然后在边界 CD 形成振荡, 最后返回探测点, 即振荡信号 (特征点 W、E) 来源于透射表面波在缺陷后沿所产生的振荡。定义 T_Q 为 RS 波的到达时间, δT_{WE} 为特征点 W、E 的到达时间差。

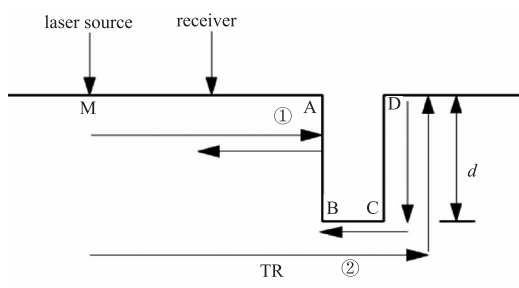


图 15 表面波与缺陷相互作用过程的示意图

Fig. 15 Schematic diagram of interaction processes between surface acoustic wave and surface defect

3.2 缺陷深度和宽度的变化对位移信号的影响

当缺陷宽度为 0.2 mm 且保持不变, 分别取缺陷深度为 0.4 mm、0.5 mm 和 0.6 mm, 图 16 表示缺陷深度的变化对位移信号的影响。探测点接收到的掠面纵波 (sP) 与声表面波 (R) 对应的位移信号完全吻合, 在 R 波与 RR 波之间的位移信号存在显著的差异。因为随着缺陷深度的增加, 更多低频成分的超声波无法从缺陷底端透射过去, 从而超声波在 B 点通过模式转换返回到探测点的能量增大。

为了进一步分析缺陷深度对 T_Q 和 δT_{WE} 的影响, 取缺陷深度从 0.4 mm 均匀增加到 0.65 mm, 增量为 0.05 mm, 图 17 为缺陷深度的变化对 T_Q 和 δT_{WE} 的影响, 表现为 T_Q 和 δT_{WE} 随着缺陷深度的增加呈近似

线性增长的关系。

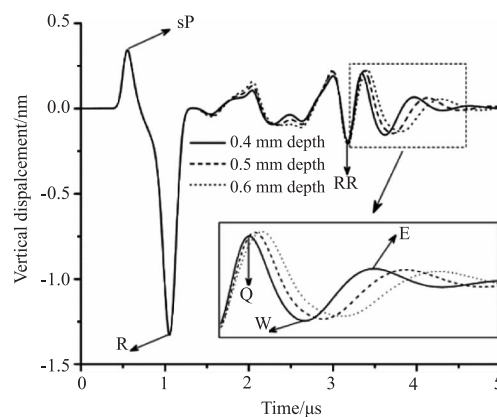
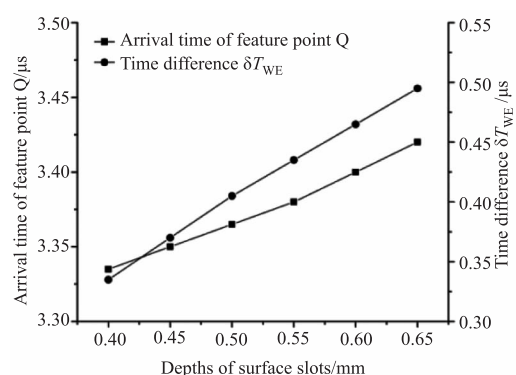


图 16 缺陷深度对位移信号的影响

Fig. 16 The displacement signals at different depths of the defect

图 17 T_Q 和 δT_{WE} 随缺陷深度的变化情况Fig. 17 T_Q and δT_{WE} with the change of the defect depth

当缺陷深度为 0.5 mm 且保持不变, 分别取缺陷宽度为 0.15 mm、0.2 mm 和 0.25 mm, 图 18 表示缺陷宽度变化对位移信号的影响。由图 18 可看出在 R 波与 RR 波之间的位移信号基本不变, 说明了缺陷宽度的变化对于表面波的传播并无阻隔作用。

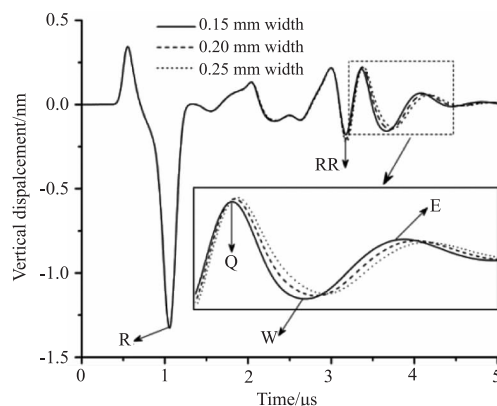


图 18 不同缺陷宽度的位移波形图

Fig. 18 The displacement signals at different widths of the defect

为了进一步讨论缺陷宽度变化对 T_Q 和 δT_{WE} 的影响, 宽度从 0.1 mm 线性变化为 0.35 mm, 增量步

长为 0.05 mm。图 19 表示缺陷宽度的变化对 T_Q 和 δT_{WE} 的影响,表现为 T_Q 随着缺陷宽度的增加呈近似线性增长的关系,而 δT_{WE} 随着缺陷宽度的增加基本保持不变,说明时间差 δT_{WE} 的变化仅依赖于缺陷深度,与缺陷宽度的变化无关。

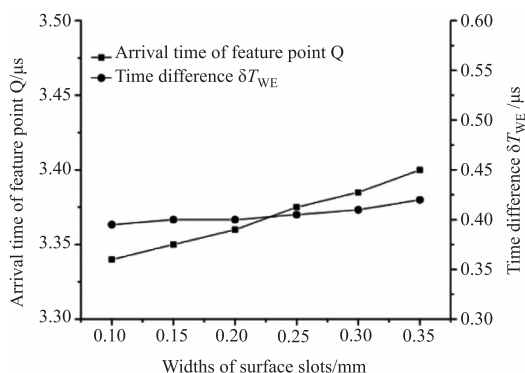


图 19 T_Q 和 δT_{WE} 随缺陷宽度的变化情况

Fig. 19 T_Q and δT_{WE} with the change of the defect width

3.3 缺陷深度与宽度的计算

基于上述分析并结合公式 (11), 特征点 W、E 的到达时间差与缺陷深度之间的关系可以表示为

$$d = \delta T_{WE} \frac{V_R}{2} \quad (12)$$

同时,当 RS 波的到达时间未发生分离时,可根据特征点 Q 的到达时间来估算缺陷深度。

$$d = \left(T_Q - \frac{l_{MA} + l_{NA}}{V_R} \right) \sqrt{\frac{3 - \sqrt{3}}{3V_R} + \frac{2\sqrt{3}}{3V_S}} \quad (13)$$

表 3 是根据公式 (12)、(13) 分别对缺陷深度进行计算的结果。由表 3 可知,采用 T_Q 计算缺陷深度时,当 $2w = d = 0.4$ mm 时,计算的误差最大,且相对误差随着缺陷深度的增加呈现先减小后增加的趋势。可能是当 T_Q 未发生分离时,在 0.4 ~ 0.5 mm 范围内,随着缺陷深度的逐渐增加, T_Q 的变化量是很小的,从而导致采用 T_Q 计算缺陷深度的相对误差逐渐降低。在 0.5 ~ 0.6 mm 范围内,随着缺陷深度的逐渐增加,数值计算的缺陷深度 d 小于理论结果,从而造成了相对误差逐渐增加。当缺陷深度小于表面波中心波长一半时,在 0.4 ~ 0.5 mm 范围内采用 δT_{WE} 定量计算缺陷深度的误差较大;当缺陷深度逐渐接近一个表面波中心波长时,相对误差逐渐减小。产生的原因可能缺陷后沿 C、D 点的距离较近,从而导致信号会出现耦合,存在其他模式超声波的干扰。随着缺陷深度的逐渐增加,各模态转化形成的超声波逐渐产生

了分离,误差逐渐减小。验证了采用 T_Q 和 δT_{WE} 定量计算缺陷深度的可行性。

表 3 T_Q 和 δT_{WE} 的数值与理论结果的对比

Tab. 3 The numerical and theoretical results of arrival time T_Q and time difference δT_{WE}

Depth' /mm	T_Q		δT_{WE}	
	Depth' /mm	relative error /%	Depth' /mm	relative error /%
0.4	0.4468	11.709	0.4858	21.428
0.45	0.4758	5.730	0.5365	19.222
0.5	0.5047	0.946	0.5873	17.450
0.55	0.5337	2.968	0.6308	14.681
0.6	0.5723	4.616	0.6743	12.375
0.65	0.6109	6.015	0.7178	10.431

4 结论

本文采用有限元法研究了在铝板中激光近场激发表面波与表面缺陷的作用过程,得到了矩形缺陷各部分的存在对声表面波传播的影响。其中,缺陷前沿的存在会产生 RS 波;缺陷宽度的存在对 RS 波的影响主要表现为幅值增大,且随着缺陷宽度增加,RS 波的到达时间会产生延迟,最后发生分离;缺陷后沿的存在会产生振荡信号(特征点 W、E),来源于透射表面波在缺陷后沿所产生的振荡。

通过得到特征点 Q(RS 波)的到达时间与特征点 W、E 的到达时间差(振荡信号)与缺陷深度之间的关系式,发现 T_Q 和 δT_{WE} 随缺陷深度增大都呈现近似线性增长的趋势; T_Q 随缺陷宽度的增加呈线性增长的趋势, δT_{WE} 与缺陷宽度的变化无关。最后在此基础上,通过 T_Q 和 δT_{WE} 计算得到了不同缺陷深度的数值计算结果,并与理论结果进行了比较,验证了公式的可行性。因此,可通过 T_Q 和 δT_{WE} 来实现对表面缺陷深度的定量计算。

参考文献:

- [1] LI Bingfeng. Application of surface inspection system in aluminum strip production line [J]. Nonferrous Metals Processing, 2015, 44(06): 29-31. (in Chinese)
李冰峰. 表面质量检测系统在铝板带生产线上应用 [J]. 有色金属加工, 2015, 44(06): 29-31.
- [2] PEI Cuixiang, YI Dongci, LIU Wenwen. Numerical simulation of laser ultrasonic nondestructive testing of internal defects in PBX [J]. Chinese Journal of Energetic Materi-

- als, 2017, 25(10): 822–828. (in Chinese)
- 裴翠祥, 弋东驰, 刘文文, 等. PBX 内部缺陷激光超声无损检测数值模拟[J]. 含能材料, 2017, 25(10): 822–828.
- [3] RUAN Xueqian, LIN Xin, HUANG Chunping, et al. Ultrasonic nondestructive testing of hole type defects in laser solid forming TC4 alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12): 72–79. (in Chinese)
- 阮雪茜, 林鑫, 黄春平, 等. TC4 合金激光立体成形孔洞类缺陷的超声检测[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 72–79.
- [4] GUO Haiyang, XU Zhixiang, LIU Zhiyi, et al. Laser ultrasonic test for defects of metal plate with coating[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(05): 541–547. (in Chinese)
- 郭海洋, 徐志祥, 刘志毅, 等. 带涂层金属板件缺陷的激光超声检测研究[J]. 激光与红外, 2017, 47(05): 541–547.
- [5] ZHOU Zhengang, ZHANG Kuanshuang, ZHOU Jianghua. Application of laser ultrasonic technique for non-contact detection of structural surface-breaking cracks[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 73: 173–178.
- [6] WANG Chuanyong, SUN Anyu, XUE Maosheng, et al. Width gauging of surface slot using laser-generated Rayleigh waves[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 92: 15–18.
- [7] GUO Hualing, ZHENG Bin, LIU Hui. Numerical simulation and experimental research on interaction of micro-defects and laser ultrasonic signal[J]. Optics and Laser Technology, 2017, 96: 58–64.
- [8] GUAN Jianfei. Numerical study on depth gauging of surface breaking defects using laser-generated surface acoustic waves[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2011, 50(3): 032703.
- [9] WANG Wei, ZHONG Zheng, PAN Yongdong. Scattered echo of surface defect in the far field of Rayleigh wave generated by laser[J]. Laser Technology, 2015, 39(02): 157–165. (in Chinese)
- 王威, 仲政, 潘永东. 激光远场激发表面波在开口缺陷处的散射回波[J]. 激光技术, 2015, 39(02): 157–165.
- [10] LIU Hui, ZHENG Bin, WANG Zhaoba, et al. Time dependence of laser-induced Rayleigh wave for detecting surface defect depth[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(06): 669–673. (in Chinese)
- 刘辉, 郑宾, 王召巴, 等. 激光瑞利波的时间依赖性探测表面缺陷深度[J]. 激光与红外, 2017, 47(06): 669–673.
- [11] WANG Yujing, WU Yaojin, LIU Hui, et al. An experimental study on depth evaluation of micro-surface crack by laser generated acoustic surface waves[J]. Journal of Applied Acoustics, 2016, 35(01): 36–41. (in Chinese)
- 王余敬, 吴耀金, 刘辉, 等. 声表面波检测铝板表面微缺陷深度实验研究[J]. 应用声学, 2016, 35(01): 36–41.
- [12] LI Kesi, MA Zhiyuan, FU Pan, et al. Quantitative evaluation of surface crack depth with a scanning laser source based on particle swarm optimization-neural network[J]. NDT & E International, 2018, 98: 208–214.
- [13] Cooper Jeremy A, Crosbie Ross A, Dewhurst Richard J, et al. Surface acoustic wave interactions with cracks and slots; a noncontacting study using lasers[J]. IEEE Trans. UFFC, 1986, UFFC-33: 462–470.