

# 不同温度下表面微缺陷的声表面波定量分析

陶程<sup>1,2\*\*</sup>, 殷安民<sup>1,2\*</sup>, 应志奇<sup>1</sup>, 王煜帆<sup>1,2</sup>, 束学道<sup>1,2</sup>, 彭文飞<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>宁波大学机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;

<sup>2</sup>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** 采用有限元法研究了激光激发的声表面波与表面微缺陷的作用机理,在位移信号中选取能定量表征缺陷深度的特征量(振荡信号),分析了缺陷深度和宽度对振荡信号的影响。根据表面波与缺陷后沿作用的位移场,解释了振荡信号的来源。数值结果表明,振荡信号(特征点 A、B)来源于透射表面波在缺陷后沿所产生的振荡,同一温度下特征点 A、B 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。根据特征点 A、B 的到达时间差与缺陷深度之间的关系,结合表面波声速与温度之间的关系,实现了不同温度下缺陷深度的定量计算。

**关键词** 激光技术; 温度; 有限元法; 表面微缺陷; 声表面波

中图分类号 TN249 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.121409

## Quantitative Analysis of Surface-Breaking Defects by Surface Acoustic Waves Under Different Temperatures

Tao Cheng<sup>1,2\*\*</sup>, Yin Anmin<sup>1,2\*</sup>, Ying Zhiqi<sup>1</sup>, Wang Yufan<sup>1,2</sup>, Shu Xuedao<sup>1,2</sup>, Peng Wenfei<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Roll Forming Technology of Zhejiang Province, Ningbo, Zhejiang 315211, China

**Abstract** The mechanism of the laser-induced surface acoustic wave interacting with surface-breaking defects is studied by using the finite element method. The characteristic quantity (oscillation signal) quantifying defect depth is selected from the displacement signals and the influences of the defect depth and the width on the oscillation signals are further analyzed. The source of oscillation signals is clarified according to the displacement field occurred in the interaction between the surface acoustic wave and the rear edge of defects. The numerical results show that the oscillation signal with feature points of A and B originates from the oscillation induced at the rear edge of defects by the transmitted surface wave. At the same temperature, the arrival time difference between feature points A and B increases linearly with the defect depth, but is independent of the defect width. According to the relationship between the arrival time difference and the defect depth, the quantitative calculation of defect depths at different temperatures is realized by combining the relationship between the surface wave speed and the temperature.

**Key words** laser technique; temperature; finite element method; surface-breaking defect; surface acoustic wave

**OCIS codes** 140.3460; 240.6690; 120.4290; 000.4430

## 1 引言

在工业生产过程中,在高温下对工件表面或内部裂纹进行及时检测对确保其安全性与性能具有重要的意义。传统的检测手段并不适用于高压、高温等恶劣环境,而激光超声技术具有非接触、宽带、高时空分辨率等优点,能避免这种局限性<sup>[1]</sup>,在无损伤检测领域得到了越来越广泛的应用<sup>[2-4]</sup>。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<sup>[5]</sup>。因此,可利用激光激发表面波对工业生产中处于高温环境下的工件表面进行实时监控和在线缺陷分析,以保证表面质量。

国内外研究人员针对表面缺陷深度的定量计算进行了相关的研究。Zhou 等<sup>[6]</sup>通过分析表面波与表面裂纹相互作用的时域与频域特性,得到了表面波的反射系数与透射系数随缺陷深度的变化情况。

收稿日期: 2018-05-08; 修回日期: 2018-06-08; 录用日期: 2018-07-18

基金项目: 浙江省自然科学基金(Q17E050012)、宁波市自然科学基金(2016A610057)

\* E-mail: yinanmin@nbu.edu.cn; \*\* E-mail: 962287836@qq.com

Guo 等<sup>[7]</sup>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。王明宇等<sup>[8-9]</sup>从数值和实验的角度分析了激光远场激发表面波与表面缺陷的作用,通过提取时域或频域信号中的特征量,实现了缺陷深度的定量表征。扫描激光源(SLS)技术<sup>[10-11]</sup>提供了更高的灵敏度与信噪比,通过移动激光源的位置来实现表面微缺陷的检测。表面微缺陷的存在会使位移信号发生显著变化,从而大大提高对表面裂纹的检测灵敏度。Guan 等<sup>[12]</sup>采用 SLS 技术解释了反射表面波后出现振荡信号的时间间隔仅依赖于缺陷深度而与缺陷宽度无关这一现象,但未给出具体的关系式。上述研究主要是通过提取随缺陷深度或宽度呈线性变化关系的特征量,实现对常温下表面缺陷的定量表征,但针对在高温环境下的缺陷深度的定量分析相对较少。

有限元方法不仅能很好地捕捉散射表面波的特征,处理较复杂的结构中波的传播问题,也能考虑到材料参数随温度变化的实际情况。为了在高温下通过激光激发表面波定量分析表面缺陷深度,本文采用有限元法对铝板进行了激光近场激发的表面波,重点分析了表面波与缺陷前沿和后沿的作用过程,解释了位移信号中振荡信号的来源,实现了不同温度下表面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,根据物理模型及载荷强度在  $z$  方向上的均匀分布,三维空间的弹性问题可通过平面应变理论简化为二维平面  $x$ - $y$  问题,即求解二维热-结构耦合的平面应变的问题。数值模型的示意图如图 1 所示,探测点到缺陷左边界距离保持不变,  $L$  为激光源到探测点的距离,  $d$  和  $w$  分别为表面缺陷的深度和宽度,  $Oxy$  为坐标系。

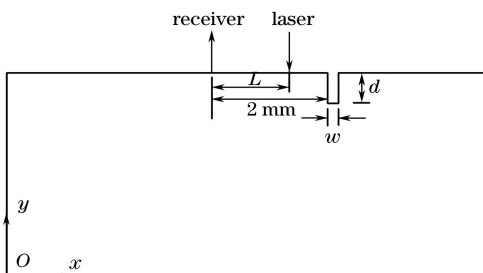


图 1 数值模型示意图

Fig. 1 Schematic of 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<sup>[13]</sup>为

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

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

式中  $T(x, y, t)$  为瞬态温度分布,单位为 K;  $t$  为时间;  $\rho$ 、 $c_v$ 、 $k$  分别为材料的密度、比热容、热传导系数;  $U(x, y, t)$  为不同时刻的位移场;  $\lambda$  和  $\mu$  为材料的拉梅(Lamé)常数;参数  $\beta = (3\lambda + 2\mu)\alpha_T$ ,其中  $\alpha_T$  为材料的热膨胀系数。

在热分析中,模型上表面的激光辐射区域的热流边界条件<sup>[12]</sup>为

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

式中  $Q(x, t)$  为材料表面所吸收的总能量;  $A(T)$  为材料表面对激光的吸收率;  $E_0$  为激光光源单位长度的能量;  $x_0$  为激光光源中心的位置;  $f(x)$ 、 $g(t)$  分别为激光的空间、时间分布,其表达式分别为

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

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

式中  $R_G$  为激光光源的半高全宽;  $t_0$  为激光脉冲的上升时间。

上表面缺陷内部的边界不施加任何约束,满足自由边界条件:

$$\mathbf{n} \cdot [\boldsymbol{\sigma} - (3\lambda + 2\mu)\alpha_T T(x, y, t)\mathbf{I}] = 0, \quad (6)$$

式中  $\mathbf{n}$  为垂直表面的单位向量;  $\mathbf{I}$  为单位张量;  $\boldsymbol{\sigma}$  为应力张量。

初始温度与位移场要满足初始条件:

$$T(x, y, 0) = 300 \text{ K}, \quad (7)$$

$$U(x, y, t) = \frac{\partial U(x, y, t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0. \quad (8)$$

### 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 10 mm 和 5 mm,脉冲上升时间为 10 ns,激光能量为 0.3 mJ,激光光源的半高全宽取 0.1 mm。为了更好地反映出激光激发所产生的温度梯度分布,采用变网格技术,网格划分的示意图如图 2 所示,在激光辐射的近场区域

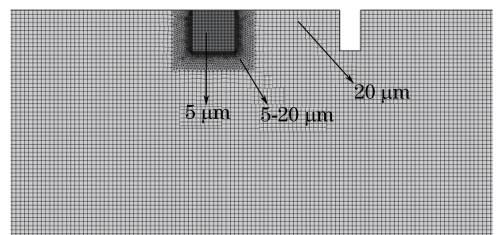


图 2 网格划分示意图

Fig. 2 Schematic of mesh generation

网格大小为  $5\ \mu\text{m}$ , 远离激光激发范围的网格大小为  $20\ \mu\text{m}$ , 中间部分利用三角形网格进行过渡。

为研究不同温度下表面波与表面缺陷的作用,

需要知道材料各个参数随温度的变化关系。铝的热物理参数与力学参数随温度的变化关系<sup>[14-16]</sup>见表 1。

表 1 用于计算的铝的热物理与力学参数

Table 1 Thermophysical and mechanical parameters of aluminum used for calculation

Parameter	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 / ( $10^{-5}\cdot\text{K}^{-1}$ )
Expression	$0.052+3\times 10^{-5}(T-300)$	$249.5-0.08T$	$780.3+0.48T$	$2769-0.22T$	$85-0.05T$	$0.34+10^{-4}\times(T-300)$	$17.7+0.018T$

### 3 计算结果与分析

#### 3.1 不同位置激光激发表面波的位移信号

模拟了 SLS 法检测表面缺陷的整个过程, 如图 3 所示, 表面缺陷深度与宽度分别设置为  $200\ \mu\text{m}$  和  $100\ \mu\text{m}$ , 探测点距离缺陷左边界为  $2\ \text{mm}$ , 模型上表面点  $a, b, c, d, e$  分别表示激光源辐射中心, 它们到探测点的距离分别为  $1, 1.2, 1.4, 1.7, 2.4\ \text{mm}$ 。

当激光源分别作用在上表面  $a, b, c, d, e$  五个不同的位置时, 探测点接收到的位移信号如图 4(a)~(e) 所示。其中, sP 表示掠面纵波, R 表示入射表面波, PR 表示掠面纵波模式转换形成的声表面波, RR 表示反射表面波以及在 RR 波后出现的振荡信号。由图 4(b)~(d) 可知, 当激光源不断靠近缺陷左边界时, PR 波的幅值逐渐增大且 R 波、PR 波和 RR 波之间的到达时间间隔逐渐减小, 最后会形成双极性的表面波 (bR) 位移信号。

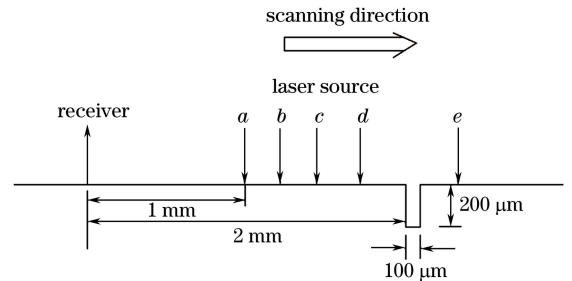


图 3 SLS 法检测表面缺陷的示意图

Fig. 3 Schematic of surface defect detection by SLS

当激光源扫到缺陷的另一侧时, 探测点接收到的位移信号如图 4(e) 所示。当入射表面波到达缺陷左边界时, 部分低频成分的表面波会直接越过缺陷底端被探测点接收, 对应于 TR 波。因此, TR 波的位移信号幅值明显小于入射表面波的幅值, 这种显著的位移信号变化可用于探测表面微缺陷的存在。同时由图 4(a)~(d) 可知, 在 RR 波后出现的振荡

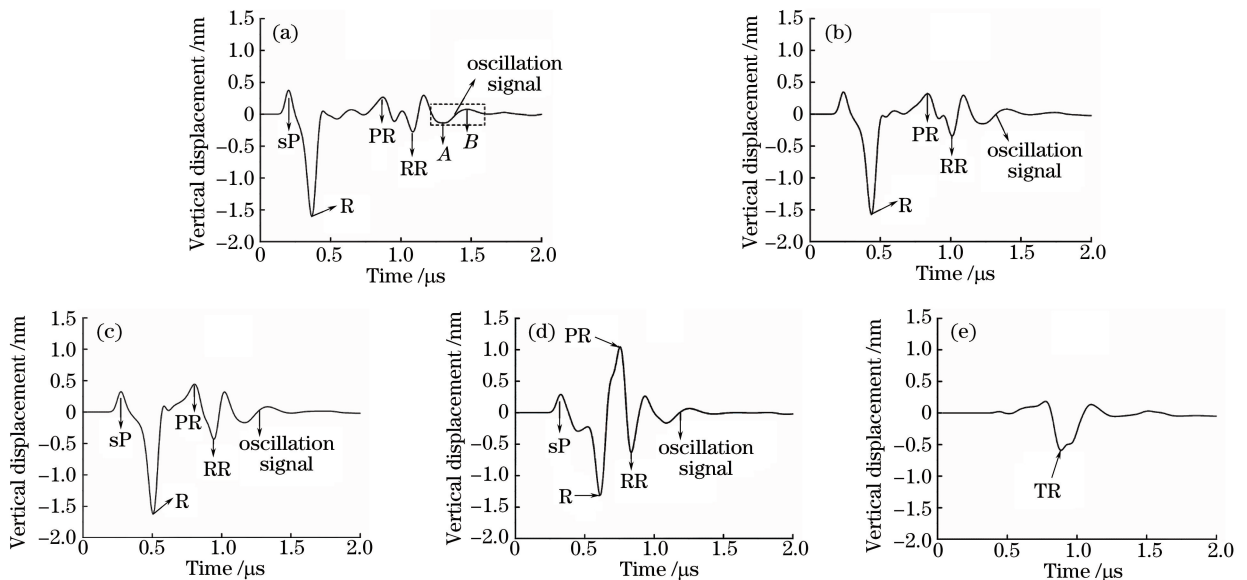


图 4 激光源辐射在上表面距离探测点不同位置的位移信号。(a)  $1\ \text{mm}$ ; (b)  $1.2\ \text{mm}$ ; (c)  $1.4\ \text{mm}$ ; (d)  $1.7\ \text{mm}$ ; (e)  $2.4\ \text{mm}$

Fig. 4 Displacement signals at upper surface by laser source irradiation for different distances from detection point.

(a)  $1\ \text{mm}$ ; (b)  $1.2\ \text{mm}$ ; (c)  $1.4\ \text{mm}$ ; (d)  $1.7\ \text{mm}$ ; (e)  $2.4\ \text{mm}$

信号随着激光源的移动并无明显变化。为了便于对振荡信号进行分析,在图 4(a)所示的位移信号中选取了特征点 A、B 的到达时间差  $\delta t_{AB}$  作为分析振荡信号的指标。

### 3.2 在不同温度下缺陷深度与宽度对振荡信号的影响

选取了图 3 中的  $d$  点作为激光源,为了分析温度对表面波传播的影响,初始温度分别设置为 300, 500, 700 K, 激光源到探测点的距离为 1.7 mm。当表面无缺陷时,不同温度下激光激发表面波的位移信号如图 5(a)所示。由图 5(a)可知,随着温度的升高,声表面波的幅值出现了明显的衰减趋势,且声速随温度的升高明显减小。探测点距离缺陷左边界为 2 mm 不变,当表面缺陷的深度与宽度分别为 0.2 mm

和 0.1 mm 时,探测点接收的位移信号如图 5(b)所示。可以看出,温度的升高导致特征点 A、B 的到达时间出现了明显的滞后,而传播速度的变化会使缺陷检测过程中缺陷位置的分析产生误差。因此,通过获得表面波声速随温度的变化关系可以提高对表面缺陷的检测精度。通过计算得到了当温度分别为 500 K 和 700 K 时,表面波的速度分别为 2685 m/s 和 2470 m/s。对图 5(a)中不同温度下的时域波形进行快速傅里叶变换(FFT),得到激光激发表面波的频域波形,如图 6 所示。可以看出,初始温度分别 300, 500, 700 K 时,对应入射表面波的中心频率分别为 5.988, 5.489, 4.990 MHz。这是因为温度的上升导致表面波声速减小,表面波的中心频率向左偏移。计算可得不同温度下中心表面波的波长约为 500  $\mu\text{m}$ 。

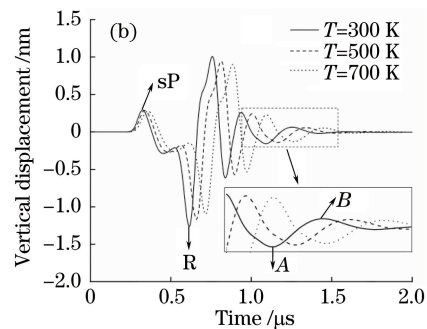
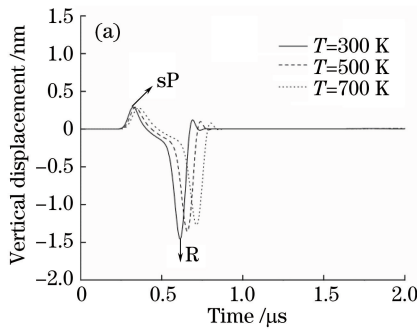


图 5 不同温度下激光激发表面波的位移信号。(a)无缺陷;(b)有缺陷

Fig. 5 Displacement signals of laser-induced surface acoustic waves under different temperatures.

(a) No defects; (b) with defects

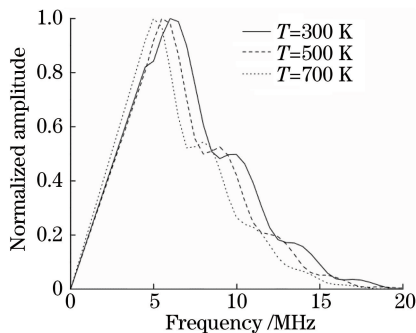


图 6 不同温度下激光激发表面波的频域波形图

Fig. 6 Waveforms in frequency domain of laser-induced surface acoustic waves under different temperatures

为了分析缺陷深度的变化对振荡信号的影响,保持缺陷宽度为 0.1 mm 不变,缺陷深度分别取 0.1, 0.15, 0.2 mm, 初始温度为 300 K, 探测点接收的位移信号如图 7 所示。可以看出,随着缺陷深度的增大,时间差  $\delta t_{AB}$  存在明显的差异,表面波双极性的特征更加明显,峰-峰值逐渐增大。这是因为随着缺陷深度的增大,更多低频成分的表面波无法从缺陷

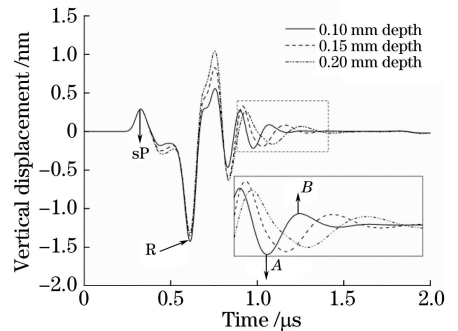
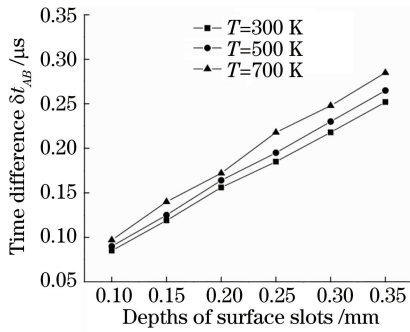


图 7 不同缺陷深度的位移波形图

底端透射过去,更多表面波能量被反射。

为了进一步分析高温下缺陷深度对时间差  $\delta t_{AB}$  的影响,分别取初始温度为 300, 500, 700 K, 缺陷深度从 0.1 mm 均匀增大到 0.35 mm, 增量为 0.05 mm, 得到高温下缺陷深度的变化对时间差  $\delta t_{AB}$  的影响,如图 8 所示。可以看出,在同一温度下,时间差  $\delta t_{AB}$  随着缺陷深度的增大呈近似线性增长,且随着温度的升高,时间差  $\delta t_{AB}$  逐渐增大。

图 8 不同温度下时间差  $\delta t_{AB}$  随缺陷深度的变化Fig. 8 Time difference  $\delta t_{AB}$  versus defect depth under different temperatures

为了分析缺陷宽度的变化对振荡信号的影响,设置缺陷深度为 0.2 mm,初始温度为 300 K,缺陷宽度分别取 0.1, 0.15, 0.2 mm,探测点接收的位移信号如图 9 所示。可以看出,时间差  $\delta t_{AB}$  随着缺陷宽度的增大无明显变化,并且双极性表面波的幅值随着缺陷宽度的增大基本不变,说明缺陷宽度的变化对表面波的传播并无阻隔作用。

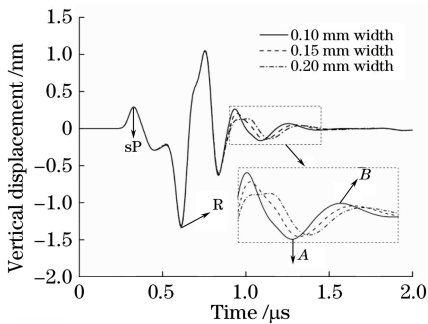


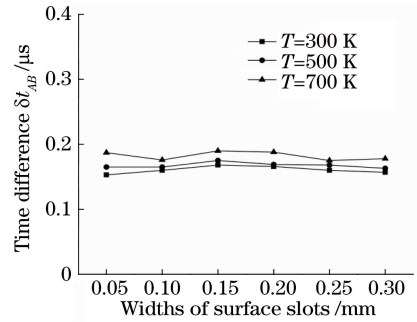
图 9 不同缺陷宽度的位移波形图

Fig. 9 Displacement waveforms at different defect widths

为了进一步分析高温下缺陷宽度对时间差  $\delta t_{AB}$  的影响,取初始温度为 300, 500, 700 K,缺陷宽度从 0.05 mm 增大到 0.3 mm,步长为 0.05 mm,得到在高温下缺陷宽度的变化对时间差  $\delta t_{AB}$  的影响如图 10 所示。可以看出,在同一温度下,时间差  $\delta t_{AB}$  随着缺陷宽度的增大基本保持不变,说明时间差  $\delta t_{AB}$  的变化仅依赖于缺陷深度,与缺陷宽度的变化无关。而随着温度的升高,时间差  $\delta t_{AB}$  逐渐增大。因此,通过在振荡信号中提取特征点到达的时间差,可实现对高温下缺陷深度的定量计算。

### 3.3 振荡信号的产生来源

为了更好地揭示出振荡信号的形成机制,建立了表面波与缺陷前沿的作用模型,通过将缺陷宽度设置为无限大,忽略缺陷宽度的影响,如图 11 所示,选取了点  $a$  作为激光源  $M$ ,探测点  $N$  距离缺陷前

图 10 不同温度下时间差  $\delta t_{AB}$  随缺陷宽度的变化情况Fig. 10 Time difference  $\delta t_{AB}$  versus defect width under different temperatures

沿 2 mm 不变。不同时刻下缺陷前沿与声表面波作用的位移场如图 12 所示。图 12(a) 所示为表面波与缺陷前沿作用前形成的表面波(R)、横波(S)、头波(H),图 12(b)~(c)为表面波与缺陷前沿作用后形成的 RR、透射表面波(TR)以及模态转换在上表面形成的 RS 波。表面波与缺陷前沿作用后的传播规律如图 13 所示。当入射表面波到达边界  $EF$  后,一部分低频成分的表面波直接越过缺陷底端  $F$  点形成 TR;另一部分表面波产生反射形成 RR 波;还有一部分表面波将沿着  $EF$  方向传播,到达  $F$  点时绝大部分表面波会在  $F$  点发生模态转换,在上表面形成 RS 波;还有小部分表面波将绕过  $F$  点沿着  $FC$  方向继续传播。

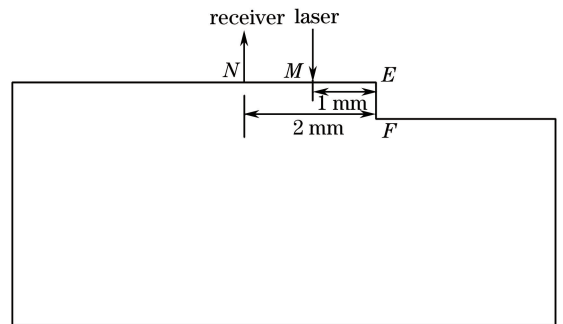


图 11 声表面波与缺陷前沿相互作用的有限元模型

Fig. 11 Finite element model of interaction between surface acoustic wave and front edge of defects

图 14 所示为探测点接收的位移信号与图 4(a) 所示位移信号的对比结果。可以看出,缺陷后沿的存在会导致 RS 波后出现明显的振荡信号,说明 RS 波后的振荡信号来源于缺陷后沿。

为了进一步解释缺陷后沿产生振荡信号的来源,建立了表面波与缺陷后沿的作用模型,如图 15 所示。在此模型中,探测点  $N$  与激光源  $M$  距边界  $GZ$  的距离分别为 2 mm 和 1.1 mm,缺陷后沿深度为 0.2 mm,探测点接收的位移信号如图 16 所示。

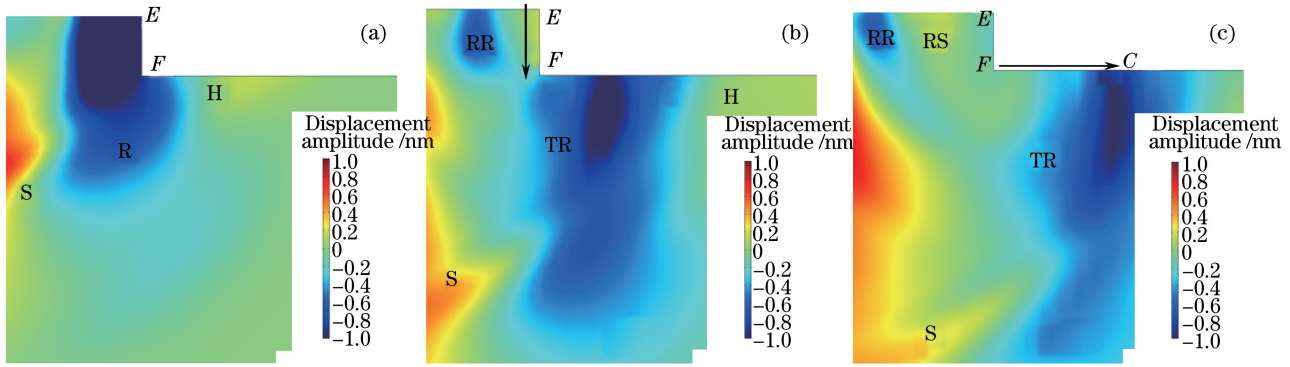


图 12 缺陷前沿与声表面波作用的位移场。(a)  $t=0.3 \mu\text{s}$ ; (b)  $t=0.5 \mu\text{s}$ ; (c)  $t=0.6 \mu\text{s}$   
 Fig. 12 Displacement fields of front edge of defects interacting with surface acoustic wave.  
 (a)  $t=0.3 \mu\text{s}$ ; (b)  $t=0.5 \mu\text{s}$ ; (c)  $t=0.6 \mu\text{s}$

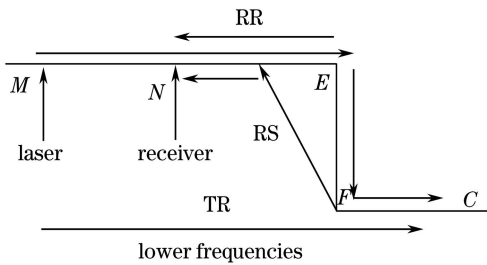


图 13 表面波与缺陷前沿作用产生的传播路径

Fig. 13 Propagation path produced by front edge of defects interacting with surface acoustic wave

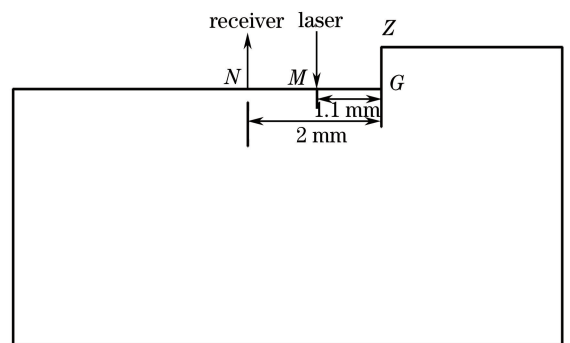


图 15 声表面波与缺陷后沿相互作用的有限元模型

Fig. 15 Finite element model of interaction between surface acoustic wave and rear edge of defects

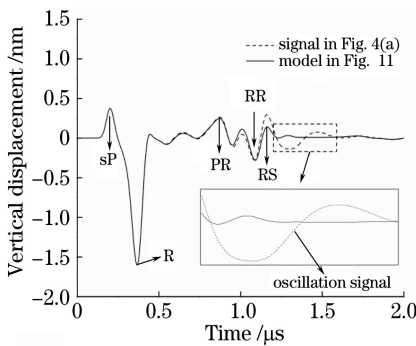


图 14 缺陷前沿与声表面波作用的时域信号

Fig. 14 Signal in time domain of front edge of defects interacting with surface acoustic wave

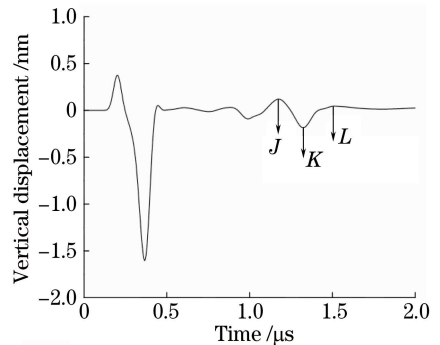


图 16 声表面波与缺陷后沿作用的位移信号

Fig. 16 Displacement signal of surface acoustic wave interacting with rear edge of defects

图 17 所示为缺陷后沿与表面波相互作用在不同时刻的位移场,其中  $J$ 、 $K$  和  $L$  分别对应于图 16 中的位移信号  $J$ 、 $K$  和  $L$ 。由图 17(b)可知,入射表面波传播到达  $G$  点后会产生散射,小部分表面波返回到探测点,对应于图 16 中的  $J$  点信号;大部分表面波沿着  $GZ$  方向到达  $Z$  点, $Z$  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的影响,且在图 16 中  $K$  点对应的位移幅值较大,因此特征点  $K$  的传播路径首先沿  $MG$  方向,

在到达  $G$  点后沿着路径  $GZ-ZG$  进行传播,最后在  $G$  点形成两部分表面波。其中一部分波绕过  $G$  点并返回探测点,而另一部分波在到达  $G$  点会在边界  $GZ$  形成振荡,如图 17(c)所示,这两部分表面波所表示的信号分别对应于图 16 中的点  $K$  和  $L$ 。另外由图 17(d)可知,产生的振荡信号  $L$  会绕过  $G$  点被探测点接收。

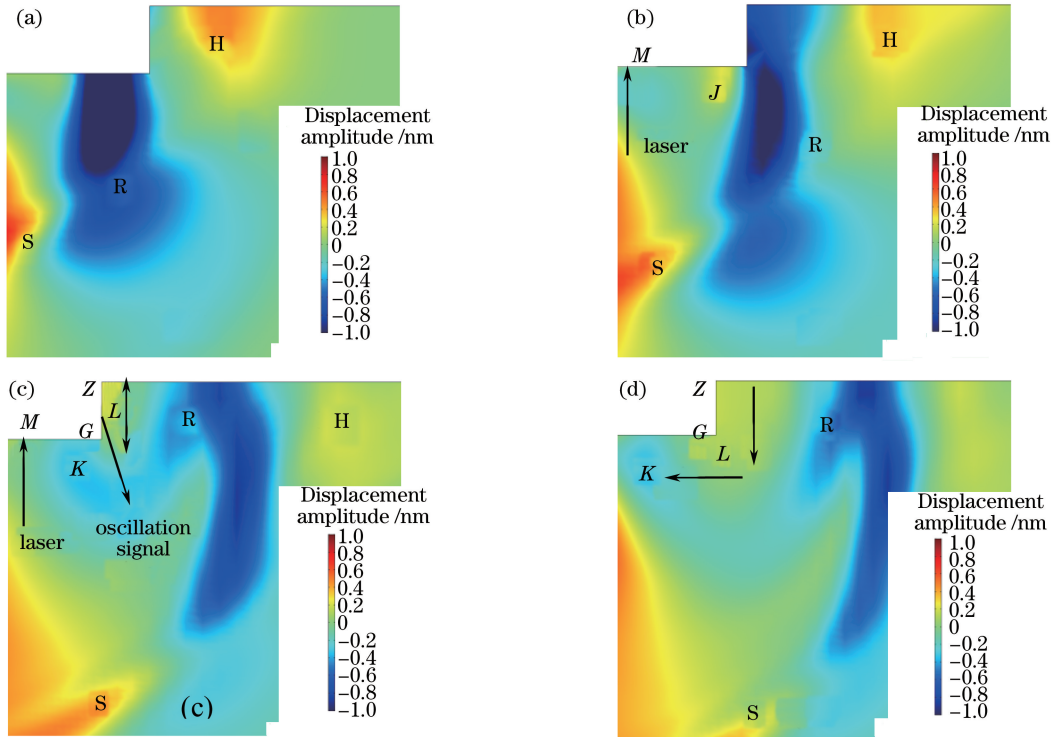


图 17 缺陷后沿与声表面波作用的位移场。(a)  $t = 0.3 \mu\text{s}$ ; (b)  $t = 0.4 \mu\text{s}$ ; (c)  $t = 0.6 \mu\text{s}$ ; (d)  $t = 0.7 \mu\text{s}$

Fig. 17 Displacement fields of rear edge of defects interacting with surface acoustic wave.

(a)  $t = 0.3 \mu\text{s}$ ; (b)  $t = 0.4 \mu\text{s}$ ; (c)  $t = 0.6 \mu\text{s}$ ; (d)  $t = 0.7 \mu\text{s}$

特征点  $K$  的传播的路径如图 18 所示,因此,特征点  $K$ 、 $L$  的到达时间分别为

$$t_K = \frac{l_{MG} + l_{NE} + 2d}{V_R}, \quad (9)$$

$$t_L = t_K + \frac{2d}{V_R}, \quad (10)$$

式中  $l_{MG}$ 、 $l_{NE}$  分别为激光源和探测点到缺陷后沿边界  $GZ$  的距离;  $V_R$  为表面波在铝板中的传播速度。

为了进一步验证特征点  $K$  和  $L$  传播路径的正确性,取缺陷后沿深度从 0.15 mm 线性增大到 0.3 mm,增量为 0.05 mm。当初始温度为 300 K 时,表面波在铝板中的传播速度为 2900 m/s,利用

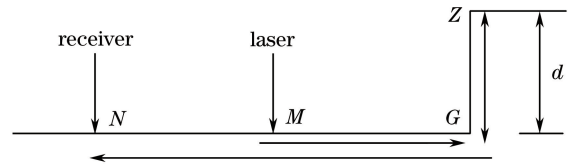


图 18 特征点  $K$  的传播示意图

Fig. 18 Schematic of propagation of feature point  $K$

(9)、(10)式计算了不同缺陷后沿深度下特征点  $K$  和  $L$  的理论到达时间,与有限元模型得到的模拟结果的对比情况见表 2。可以看出,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 18 中特征点  $K$  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。

表 2 特征点  $K$  和  $L$  到达时间的数值和理论结果

Table 2 Numerical and theoretical results of arrival time of feature points  $K$  and  $L$

Depth /mm	$t_K / \mu\text{s}$		$t_L / \mu\text{s}$	
	Numerical result	Theoretical result	Numerical result	Theoretical result
0.15	1.225	1.207	1.321	1.310
0.20	1.255	1.241	1.392	1.379
0.25	1.286	1.276	1.455	1.448
0.30	1.312	1.310	1.521	1.517

### 3.4 不同温度下缺陷深度的计算

基于上述分析可知,振荡信号产生的机制如图

19 所示,当入射表面波到达边界  $EF$  后,一部分表面波产生反射形成  $RR$ ,另一部表面波的低频部分

会形成 TR 越过  $F$  点,并沿着  $FG$  方向直达  $G$  点,在边界  $GZ$  形成振荡,最后返回探测点,即振荡信号(特征点  $A$ 、 $B$ )来源于 TR 在缺陷后沿所产生的振荡。

因此,结合(10)式,特征点  $A$ 、 $B$  的到达时间差与缺陷深度之间的关系可表示为

$$d = \delta t_{AB} \frac{V_R}{2}. \quad (11)$$

将图 8 中数值计算得到的不同温度下的时间差代入(11)式中可以得到对应缺陷深度的数值计算结果。在 300~700 K 下不同缺陷深度的数值结果  $D'$  与相对误差见表 3。可以看出,在同一温度下,当缺陷深度小于表面波中心波长的一半时,在 0.1~0.2 mm 范围内误差较大;当缺陷深度接近一个表面波的中心波长时,在 0.25~0.35 mm 范围内的数值计算结果相对准确。这可能是由于缺陷后沿  $G$ 、 $Z$  点之间的距离近会导致信号出现耦合,存在其他模

表 3 缺陷深度的数值结果与理论结果的相对误差

Table 3 Relative errors between numerical and theoretical results of defect depth

Depth / mm	$T=300$ K		$T=500$ K		$T=700$ K	
	$D'$ /mm	Relative error /%	$D'$ /mm	Relative error /%	$D'$ /mm	Relative error /%
0.10	0.1232	23.20	0.1208	20.80	0.1200	20.00
0.15	0.1755	16.97	0.1678	11.87	0.1732	15.47
0.20	0.2248	12.38	0.2201	10.09	0.2127	6.35
0.25	0.2668	6.72	0.2618	4.72	0.2572	2.88
0.30	0.3112	3.73	0.3088	2.93	0.3069	2.30
0.35	0.3654	2.71	0.3558	1.66	0.3529	0.83

## 4 结 论

采用有限元法研究了铝板中激光近场激发表面波与表面缺陷的作用过程,当激光源逐渐靠近缺陷时,可以很好地捕捉激光表面声波的瞬态位移信号,其位移信号由单极性信号向双极性信号过渡;当激光源越过缺陷时,TR 波的位移信号幅值明显小于之前的表面波信号。双极性表面波信号的显著增强有利于检测表面缺陷,同时在双极性表面波信号后伴随着明显的振荡信号。

在同一温度下,特征点到达时间差随表面缺陷深度的增大呈线性增长的趋势,与缺陷宽度的变化无关。随着温度的升高,时间差逐渐增大。通过分析表面波与缺陷后沿的作用,发现振荡信号来源于 TR 在缺陷后沿产生的振荡,得到了时间差与缺陷深度间的关系式。进一步得到了不同温度下缺陷深度的结果,并与理论结果进行了比较,验证了关系式的正确性。根据表面波声速与温度之间的关系并结

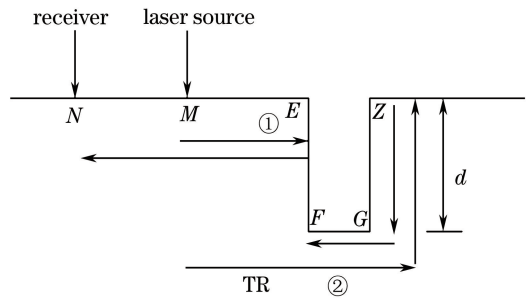


图 19 表面波与缺陷相互作用过程的示意图

Fig. 19 Schematic of interaction process between surface acoustic wave and surface defects

合特征点到达时间差与缺陷深度的关系式,可实现对高温下缺陷深度的定量计算。

## 参 考 文 献

- [1] Zeng X L, Xu L F. Laser ultrasonic technique and its applications in non-destructive testing [J]. Laser & Infrared, 2002, 32(4): 224-227.  
曾宪林, 徐良法. 激光超声技术及其在无损检测中的应用 [J]. 激光与红外, 2002, 32(4): 224-227.
- [2] 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(3): 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(3): 031402.
- [3] Ruan X Q, Lin X, Huang C P, et al. Ultrasonic nondestructive testing of hole type defects in laser solid forming TC4 alloy [J]. Chinese Journal of



- Lasers, 2015, 42(12): 1203001.
- 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): 1203001.
- [4] 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.
- [5] Zhao Y, Yan W, Shen Z H, *et al.* Numerical simulation of elastic acoustic wave interaction with surface-breaking defects[J]. Laser Technology, 2010, 34(1): 91-94.
- 赵艳, 严伟, 沈中华, 等. 弹性声波与表面缺陷相互作用的数值模拟[J]. 激光技术, 2010, 34(1): 91-94.
- [6] Zhou Z G, Zhang K S, Zhou J H, *et al.* Application of laser ultrasonic technique for non-contact detection of structural surface-breaking cracks[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 73: 173-178.
- [7] Guo H L, Zheng B, Liu H. Numerical simulation and experimental research on interaction of micro-defects and laser ultrasonic signal[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 96: 58-64.
- [8] Wang M Y, Zhou Y J, Guo C. Numerical simulation of laser ultrasonic detection of surface micro-crack depth[J]. Laser Technology, 2017, 41(2): 178-181.
- 王明宇, 周跃进, 郭冲. 激光超声检测表面裂纹深度的数值模拟[J]. 激光技术, 2017, 41(2): 178-181.
- [9] Liu H, Zheng B, Wang Z B, *et al.* Numerical simulation of laser ultrasonic transmitted wave: applied to detect surface defects depth[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2017, 38(2): 119-123, 139.
- 刘辉, 郑宾, 王召巴, 等. 激光超声透射波表征表面缺陷深度的仿真研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2017, 38(2): 119-123, 139.
- [10] Sohn Y, Krishnaswamy S. Interaction of a scanning laser-generated ultrasonic line source with a surface-breaking flaw[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2004, 115(1): 172-181.
- [11] Arias I, Achenbach J D. A model for the ultrasonic detection of surface-breaking cracks by the scanning laser source technique[J]. Wave Motion, 2004, 39(1): 61-75.
- [12] Guan J F. 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.
- [13] Li K, Ma Z Y, Fu P, *et al.* Quantitative evaluation of surface crack depth with a scanning laser source based on particle swarm optimization-neural network [J]. NDT and E International, 2018, 98: 208-214.
- [14] Shen Z H, Xu B Q, Ni X W, *et al.* Numerical simulation of pulsed laser induced ultrasound in monolayer and double layer materials [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(10): 1275-1280.
- 沈中华, 许伯强, 倪晓武, 等. 单层和双层材料中的脉冲激光超声数值模拟[J]. 中国激光, 2004, 31(10): 1275-1280.
- [15] Paul M, Haberer B, Arnold W. Materials characterization at high temperatures using laser ultrasound[J]. Materials Science and Engineering: A, 1993, 168(1): 87-92.
- [16] Touloukian Y S, Kirky R K, Taylor R E. Thermophysical properties of matter, thermal expansion: Metallic elements and alloys [M]. New York: Plenum Press, 1975.