

高温下表面波测量亚表面缺陷宽度的数值模拟

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: 为了实现激光超声技术对不同温度下亚表面缺陷宽度的定量检测, 本文采用了有限元法模拟了激光激发表面波与亚表面缺陷的作用, 并提出了一种利用表面波定量计算亚表面缺陷宽度的方法。首先在亚表面缺陷的一侧产生表面波, 然后在另一侧产生表面波, 最后分别在两侧检测到来自亚表面缺陷的入射和反射表面波。当亚表面缺陷处于一个表面波波长的作用范围内时, 基于入射和反射表面波的到达时间可实现计算亚表面缺陷宽度。数值结果与理论结果吻合良好, 为高温下采用激光超声技术定量计算亚表面缺陷宽度提供了一种十分有效的数值方法。

关键词: 激光超声; 高温; 有限元法; 亚表面缺陷; 表面波

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2019.04.003

Numerical simulation on width gauging of subsurface defects using surface waves at high temperature

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 the quantitative detection of subsurface defect width by laser ultrasound technology at different temperatures, the finite element method is employed to simulate the interaction of subsurface defect with laser-generated surface waves in the paper, and then a method to calculate the width of the subsurface defect using surface waves is presented. First, surface waves are first generated on one side of the subsurface defect and then on the other side. Finally, incident and reflected surface waves from subsurface defect are detected on both sides of the defect in the two detections, respectively. When the subsurface defect is within a wavelength range of the surface wave, the subsurface defect width can be calculated based on the arrival time of incident and reflected surface waves. The numerical results are in good agreement with the theoretical results, which provides a very effective numerical method for quantitatively calculating the subsurface defect width using laser ultrasound technology at high temperature.

Key words: laser ultrasonic; high temperature; finite element method; subsurface defects; surface waves

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51805279); 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, 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: 2018-09-03; **修订日期:** 2018-09-21

1 引言

在工业生产中,材料表面和近表面缺陷在循环载荷作用下很容易扩展,从而导致材料局部失效。因此,在高温下对生产过程中的工件表面或内部裂纹进行及时检测,以确保材料的性能和安全性有重要意义。传统的检测手段并不适用于高压、高温等恶劣环境中,而激光超声技术具有非接触、宽带、高时空分辨率等优点克服了这种局限性^[1],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、不易衰减及其自身的渗透特性^[5],已被广泛用于定位和表征一些金属材料中表面与亚表面缺陷的情况。

近年来,许多学者致力于研究表面波和表面缺陷与亚表面缺陷的作用,并取得了许多研究成果。Zhou 等^[6]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。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。王威^[8]等人发现时域信号中的散射回波特征点到达时间差与缺陷深度和宽度有线性关系,为估算缺陷尺寸提供了理论依据。金磊^[9]等人发现位移信号中的散射回波的特征点到达时间与缺陷的埋藏深度和纵向尺寸有关,实现了缺陷纵向尺寸的估算。曾伟^[10]等人发现振荡信号中心频率与近表面缺陷深度呈近似线性关系,这为近表面缺陷的定量检测提供了一种理论基础。目前许多工作主要是针对表面缺口深度的定量表征。对于缺口宽度的测量,Wang 等^[11]提出了一种利用激光激发表面波测量表面缺陷宽度的方法,然而并没有对亚表面缺陷宽度的测量展开研究。因此,本文在前人研究的基础上进一步对高温下亚表面缺陷宽度的定量计算进行了分析。

有限元方法不仅能够处理复杂结构中波传播的问题,也能考虑到材料参数随温度变化的实际情况。因此,本文采用了有限元法模拟了脉冲线源激光在铝板中激发表面波与亚表面缺陷的作用,然后研究了亚表面缺陷的埋藏深度 h_1 和缺陷前沿纵向尺寸 h_2 的变化对 RR 波到达时间的影响,最终基于入射和反射表面波的到达时间以实现在高温下定量计算亚表面缺陷宽度。

2 热弹性理论模型

2.1 有限元模型及理论基础

当脉冲激光照射金属铝板表面时,部分能量被吸收,产生一个瞬态温度场。温度分布的不均匀产生热膨胀,进而引起应力波的产生。有限元方法被用于计算脉冲线源的超声波的产生和传播,建立脉冲激光辐射铝板的模型如图 1 所示,在模型中探测点 B 距离激光源 A 和缺陷左边界 CD 的水平距离均为 3 mm。

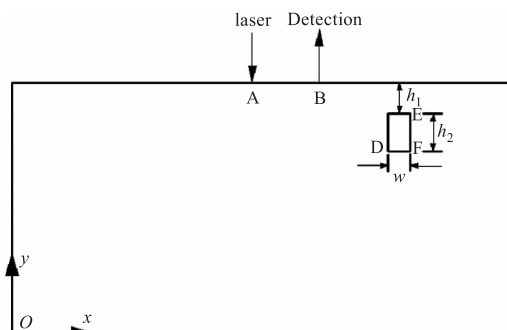


图 1 数值模型示意图

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]:

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

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

其中, $T(x, y, t)$ 表示瞬态温度分布; ρ 、 c_p 、 k 分别表示材料的密度、比热容、热传导系数; $U(x, y, t)$ 是瞬态位移场; 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, 激光辐照区边界条件描述为:

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

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

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

式中, $Q(x, t)$ 表示材料表面所吸收的总能量; $f(x)$ 、 $g(t)$ 分别为激光的空间、时间分布; 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。

另外,初始温度与位移场要满足初始条件:

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

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

2.2 激光与材料的参数

在有限元模型中铝板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,激光线源的半宽取 0.3 mm。为了更好地反映出激光辐射在上表面产生的温度梯度分布,本文采用变网格技术,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 ,中间的部分采用三角

形网格进行过渡。

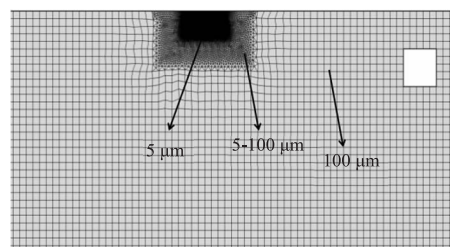


图2 网格划分的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of finite element mesh generation

常温下铝板的热物理参数与力学参数如表 1 所示。查阅相关资料可得到铝板的各个参数随温度的变化情况^[12-14]。

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 采用表面波对亚表面缺陷宽度定量计算的思路

本文首先研究亚表面缺陷与表面波的相互作用,缺陷纵向尺寸 h_2 和缺陷宽度 w 设置为 1 mm,埋藏缺陷深度 h_1 为 0.5 mm,探测点接收的位移信号如图 3 所示。

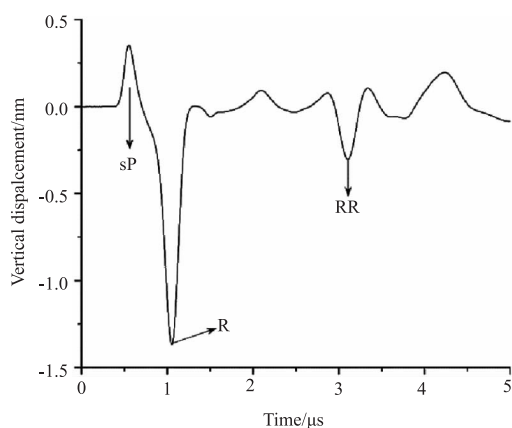


图3 声表面波与亚表面缺陷作用的位移信号

Fig. 3 Displacement signals of surface acoustic wave interaction with subsurface defect

图 4 为不同时刻的位移场。其中,图 4(a)为表面波与亚表面缺陷作用前形成的表面波(R)、横波(S)、头波(H)以及纵波(L),图 4(b)、4(c)为表面波与亚表面缺陷后形成的反射表面波(RR)、透射

表面波(TR)。由图 4(b)可知,当表面波到达缺陷前沿时,一部分低频成分的表面波将直接越过 D 点形成透射表面波(TR),另一部分表面波产生反射形成 RR 波,还有一部分表面波直接通过 C 点沿着缺陷上表面传播过去。表面波的传播速度为 2900 m/s,因此,RR 波的理论到达时间为 3.103 μs ,与探测点接收反射表面波的到达时间 3.105 μs 基本一致。

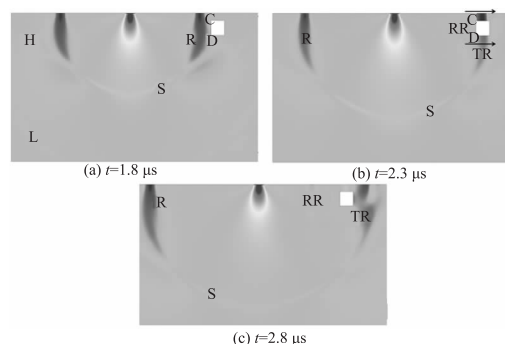


图4 表面波与亚表面缺陷作用的位移场

Fig. 4 Displacement fields of surface acoustic wave interaction with subsurface defect at time

因此,可基于入射表面波与反射表面波的到达时间来定量计算亚表面缺陷宽度,图 5 为表面波定量计算亚表面缺陷宽度的示意图,具体表现为首先在亚表面缺陷的左侧通过激光源 1 进行激发表面波,进一步通过探测点 1 接收到表面波 R_1 与反射表

面波 RR_1 的信号;然后在亚表面缺陷的右侧通过激光源 2 进行激发表面波,进一步通过探测点 2 接收到表面波 R_2 与反射表面波 RR_2 的信号。因此, L_1 、 L_2 可分别表示为:

$$L_1 = \frac{T_{RR1} - T_{R1}}{2} V_R \quad (8)$$

$$L_2 = \frac{T_{RR2} - T_{R2}}{2} V_R \quad (9)$$

其中, L_1 、 L_2 分别为探测点 1 到边界 CD 的水平距离和探测点 2 到边界 EF 的水平距离。 T_{R1} 和 T_{RR1} 分别为表面波 R_1 和反射表面波 RR_1 的到达时间, T_{R2} 和 T_{RR2} 分别为表面波 R_2 和反射表面波 RR_2 的到达时间, V_R 为表面波在铝板中的传播速度。

同时,探测点 1 到探测点 2 的距离 d 是已知的。因此,缺陷宽度 w 最终可以通过公式 (10) 计算得到。

$$w = d - L_1 - L_2 \quad (10)$$

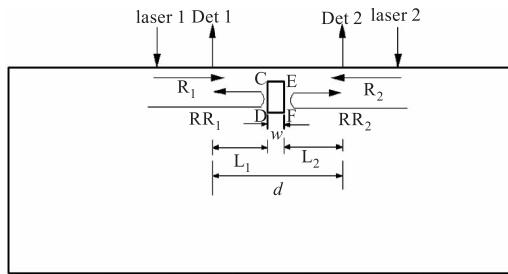


图5 亚表面缺陷宽度的计算方法

Fig. 5 Method for calculating subsurface defect width

考虑到本文是通过提取时域图中 R 波和 RR 波的到达时间来实现对亚表面缺陷宽度的定量计算。因此,我们需要分析埋藏深度 h_1 和缺陷前沿纵向尺寸 h_2 的变化对 RR 波到达时间的影响,以实现亚表面缺陷宽度的精准计算。

3.2 埋藏深度的变化对 RR 波到达时间的影响

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 K、500 K、700 K。激光源到探测点的距离为 3 mm,当亚表面无缺陷时,探测点接收的位移信号如图 6(a) 所示。由图 6(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下降。因此,得到不同温度下表面波声速才能准确检测亚表面缺陷宽度。通过计算得到温度分别为 500 K 和 700 K 时,对应的表面波速度分别为 2700 m/s、2480 m/s。对图 6(a) 中的时域波形进行 FFT 转

化,对应的频域波形如图 6(b) 所示。由图 6(b) 可知,当初始温度分别为 300 K、500 K、700 K 时,对应入射表面波中心频率分别为 2.997 MHz、2.798 MHz、2.598 MHz。因为温度的升高会导致表面波声速的下降,因此表面波的中心频率会向左偏移。并通过计算得到了中心表面波波长大约为 1000 μm ,为后文的讨论奠定基础。

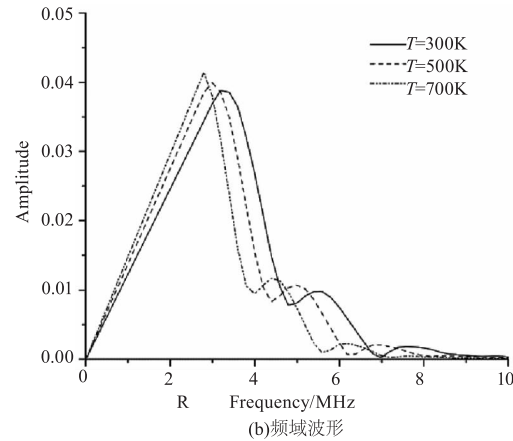
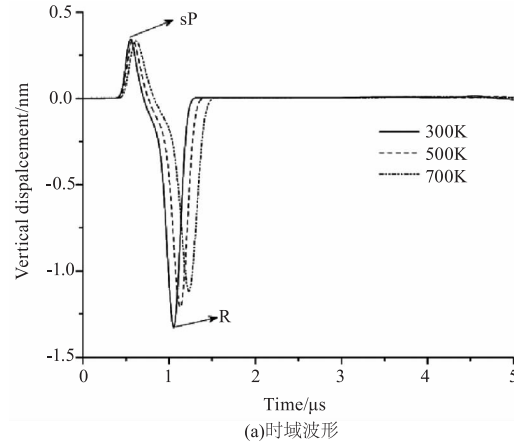


图6 激光激发表面波的时域和频域波形

Fig. 6 Time and frequency domain waveforms of the laser-generated surface acoustic waves

为了分析埋藏深度 h_1 对 RR 波到达时间的影响,设置缺陷纵向尺寸 h_2 和缺陷宽度 w 均为 1 mm, h_1 分别取 0.5 mm、0.75 mm 和 1 mm,探测点所接收的位移信号如图 7 所示。由图可知,埋藏深度 h_1 的增加会导致 RR 波的幅值逐渐减小。因为随着 h_1 的增加,更多的表面波能量会直接通过 C 点沿着缺陷上表面传播过去,导致反射率下降,从而探测点接收到的表面波能量逐渐减少,造成 RR 波的幅值降低。同时,当埋藏深度 h_1 为 1 mm 时,RR 波的到达时间略有滞后的趋势。

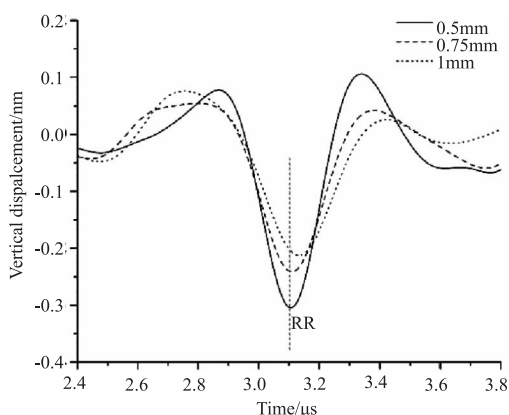


图7 不同埋藏深度下的位移信号

Fig. 7 Displacement signals at different burial depths

为了进一步分析 h_1 对 RR 波到达时间的影响, 取 h_1 从 0.25 mm 线性增加到 1.25 mm, 增量为 0.25 mm。RR 波到达时间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, 埋藏深度 h_1 对 RR 波的到达时间有一定的影响, 表现为埋藏深度 h_1 小于一个表面波波长时, RR 波的到达时间基本不变, 然而当埋藏深度 h_1 超过一个表面波波长后, RR 波的到达时间出现了一定的滞后。产生的原因可能是表面波的能量主要集中在一个波长范围内, 当埋藏深度 h_1 大于一个表面波波长, 导致绝大部分表面波能量会从缺陷上表面和材料表面之间直接传播过去, 只有小部分表面波能量会产生反射返回探测点, 其他超声波 (如横波、模式转换波) 的作用逐渐明显, 进而造成反射时间的滞后^[9]。因此, 可以考虑调整激光参数控制表面波的中心频率, 导致激光激发不同的表面波波长, 使亚表面波缺陷处于一个表面波作用的范围内, 以提高探测点接收到 RR 波到达时间的准确性。

表 2 不同 h_1 时 RR 波到达
时间的数值和理论结果

Tab. 2 Numerical and theoretical results of the
arrival time of RR wave at different h_1

Depth/mm	arrival time $T_{RR}/\mu s$	
	numerical result	theoretical result
0.25	3.105	3.103
0.50	3.105	3.103
0.75	3.110	3.103
1	3.130	3.103
1.25	3.170	3.103

3.3 亚表面缺陷前沿深度的变化对 RR 波到达时间的影响

为了便于研究缺陷前沿深度的变化对 RR 波到达时间的影响, 采用如图 8 所示的模型进行分析。在模型中埋藏深度 h_1 为 0.5 mm 不变, 并且将缺陷宽度 w 设置为无限大, 从而忽略缺陷宽度的影响。取缺陷前沿深度分别为 0.6 mm、0.8 mm、1 mm 以及无限大时, 探测点接收 RR 波的局部位移信号如图 9 所示。由图 9 可知, 当固定埋藏深度 h_1 时, RR 波的幅值随着缺陷前沿深度的增加而增大, 当 h_1 趋向于无限大时, RR 波的幅值达到了最大。因为随着缺陷前沿深度的增加, 反射率逐渐增加而透射率的较小造成了更多的表面波能量反射回探测点, 从而导致 RR 波幅值逐渐增大。并且 RR 波的到达时间无明显变化。

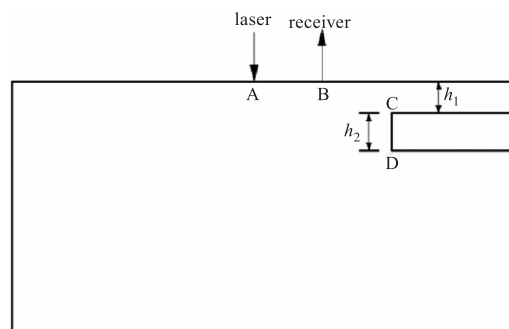


图8 亚表面缺陷前沿与表面波作用的模型

Fig. 8 Model of the interaction between the front edge of the subsurface
and the surface acoustic wave

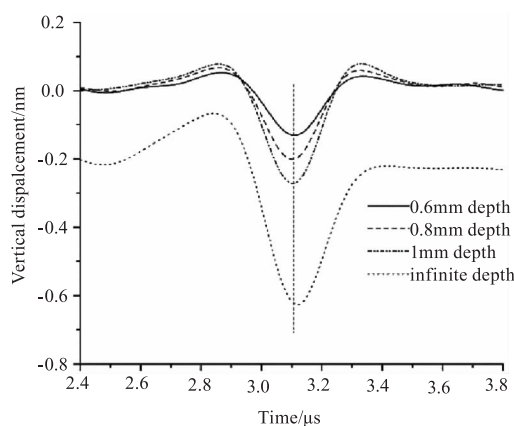


图9 不同缺陷前沿深度下的位移信号

Fig. 9 Displacement signals at different
the front edge of the defect depths

为了进一步验证缺陷前沿深度 h_2 对 RR 波到达时间的影响, 取 h_2 从 0.4 mm 线性增加到 1.4 mm, 增量为 0.2 mm。由表 3 可知, RR 波到达

时间的数值结果与理论结果基本吻合,说明了缺陷前沿深度的变化对 RR 波到达时间基本无影响。

表 3 不同 h_2 时 RR 波到达时间的数值和理论结果
Tab.3 Numerical and theoretical results
of the arrival time of RR wave at difficult h_2

Depth/mm	arrival time $T_{RR}/\mu s$	
	numerical result	theoretical result
0.4	3.110	3.103
0.6	3.110	3.103
0.8	3.115	3.103
1	3.110	3.103
1.2	3.110	3.103
1.4	3.115	3.103

3.4 亚表面缺陷宽度定量计算

基于上述分析可知,RR 波的到达时间仅取决于埋藏深度 h_1 ,与亚表面缺陷前沿深度的变化无关。因此,对于测量不同埋藏深度下的亚表面缺陷宽度,只需调整激光参数控制表面波的中心频率,使亚表面缺陷处于一个表面波波长的作用范围内即可。我们设置缺陷纵向尺寸 h_2 和埋藏缺陷深度 h_1 均为 0.5 mm,取缺陷宽度 w 从 0.5 mm 线性增加到 1 mm,增量为 0.1 mm。表 4 是根据公式(10)对亚表面缺陷宽度计算的数值结果。由表 4 可知,在不同温度下亚表面缺陷宽度的数值结果与理论结果基本吻合,验证了采用公式(10)定量计算亚表面缺陷宽度的可行性。

表 4 亚表面缺陷宽度的数值与理论结果的相对误差
Tab.4 Relative errors of the numerical and theoretical results of the subsurface defect width

width/mm	$T=300\text{ K}$		$T=500\text{ K}$		$T=700\text{ K}$	
	width'/mm	relative error/%	width'/mm	relative error/%	width'/mm	relative error/%
0.5	0.483	-3.40	0.478	-4.40	0.472	-5.60
0.6	0.598	-0.33	0.584	-2.67	0.584	-2.67
0.7	0.698	-0.29	0.692	-1.14	0.690	-1.43
0.8	0.805	0.63	0.798	-0.25	0.790	-1.25
0.9	0.912	1.33	0.905	0.56	0.897	-0.33
1	1.012	1.20	1.019	1.90	1.009	0.90

4 结 论

1)本文采用有限元法研究了在铝板中激光远程激发表面波与亚表面缺陷的作用过程,提出了一种定量检测亚表面缺陷宽度的方法,通过在缺陷的两侧进行激光激发表面波和接收到入射表面波与反射表面波,再根据 R 波与 RR 波到达时间即可计算亚表面缺陷宽度。

2)RR 波的到达时间仅取决于埋藏深度 h_1 ,与亚表面缺陷前沿深度 h_2 的变化无关。因此,对于计算不同埋藏深度下的缺陷宽度,只需调整激光参数控制表面波的中心频率,使亚表面缺陷处于一个表面波波长的作用范围内即可。最后,数值计算了不同温度下亚表面缺陷宽度,与理论结果吻合良好,验证了该方法计算亚表面缺陷宽度的可行性。同时该方法也为激光超声计算表面和亚表面 v 形槽,或者其他类型的缺陷宽度提供了一定的参考价值。

参考文献:

[1] ZENG Xianlin, XU Liangfa. Laser ultrasonic technique and its applications in non-destructive testing[J]. Laser & Infrared,2002,32(4):224-227. (in Chinese)
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] PEI Cuixiang, YI Dongci, LIU Wenwen, et al. Numerical simulation of laser ultrasonic nondestructive testing of internal defects in PBX[J]. Chinese Journal of Energetic Materials,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] SUN Kaihua, SHEN Zhonghua, LI Yuanlin, et al. Inspection of material internal defects using double shadow method based on laser ultrasonic reflected shear waves

- [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 243 – 251. (in Chinese)
- 孙凯华, 沈中华, 李远林, 等. 材料内部缺陷的激光超声反射横波双阴影检测方法[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 243 – 251.
- [4] GUO Haiyang, XU Zhixiang, LIU Zhiyi, et al. Laser ultrasonic test for defects of metal plate with coating[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(5): 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(5): 541 – 547.
- [5] ZHAO Yan, YAN Wei, SHEN Zhonghua, et al. Numerical simulation of elastic wave interaction with surface – breaking defects[J]. Laser Technology, 2010, 34(1): 91 – 94. (in Chinese)
- 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 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.
- [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] 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(2): 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(2): 157 – 165.
- [9] JIN Lei, WANG Wei, PAN Yongdong. Theoretical study of the interaction of laser excited surface acoustic waves with subsurface defects[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2017, 38(2): 170 – 179. (in Chinese)
- 金磊, 王威, 潘永东. 激光激发表面波与亚表面缺陷作用的理论研究[J]. 固体力学学报, 2017, 38(2): 170 – 179.
- [10] ZENG Wei, WANG Haitao, TIAN Guiyun, et al. Research on the oscillation effect of near-surface metal defect based on laser-generated acoustic surface wave[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(13): 200 – 205. (in Chinese)
- 曾伟, 王海涛, 田贵云, 胡国星, 汪文. 研究激光激发的声表面波与材料近表面缺陷的振荡效应[J]. 物理学报, 2015, 64(13): 200 – 205.
- [11] WANG Jijun, SHEN Zhonghua, NI Xiaowu, et al. Width gauging of surface slot using laser-generated Rayleigh waves[J]. Optics & Laser Technology, 2007, 92: 15 – 18.
- [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-network[J]. NDT and E International, 2018, 98: 208 – 214.
- [13] 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.
- [14] 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.