

文章编号: 1001-3806(2018)04-0487-07

激光激发横波作用垂直裂纹侧面后的模式转换

冯湾湾, 金磊, 赵金峰, 潘永东*

(同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092)

摘要: 为了研究激光激发横波与材料表面垂直裂纹侧面作用所发生模式转换现象, 采用有限元法模拟了激光水平激发、垂直侧面接收的声传播及模式转换, 并进行了相应的实验验证。分析激光激发超声波传播至垂直侧面时, 侧面接收点在不同深度接收位移信号的变化情况。结果表明, 当侧面接收点处于临界角对应深度以内时, 出现激光激发表面波在拐角次生源处产生的表面波信号; 而当侧面接收点处于临界角以外时, 在此信号之前出现了经由激光激发横波作用垂直裂纹侧面所产生的模式转换, 并形成新的表面波; 且对于固定的激发位置, 随着接收点位置下移, 两种信号之间的到达时差逐渐增大。该结果可促进激光超声对垂直裂纹的检测研究。

关键词: 激光技术; 横波模式转换; 有限元法; 表面波

中图分类号: TN249 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs. issn. 1001-3806. 2018. 04. 011

Mode conversion of laser-excited shear waves interaction with the side of vertical cracks

FENG Wanwan, JIN Lei, ZHAO Jinfeng, PAN Yongdong

(School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to study mode conversion of laser-excited shear waves interaction with the side of vertical cracks, the laser-generated ultrasound propagating along the horizontal surface and received on the vertical surface was simulated by means of finite element method. After experiments, the change of displacement signals received by side receiving point at different depths was analyzed when laser-excited ultrasonic was transmitted to the vertical side. The results show that, when the side receiving point is within the corresponding depth of the critical angle, the surface wave signal generated by laser-excited surface wave at the secondary source of the corner appears. When the side receiving point is outside the critical angle, there is a mode transformation generated by laser-induced shear wave acting on the side of the vertical crack, and a new surface wave is formed. Furthermore, when the excitation position is fixed, time difference of arrival between both signals increases gradually with the downward receiving position. The results can promote the detection of vertical cracks by laser ultrasound.

Key words: laser technique; mode conversion of shear waves; finite element method; surface wave

引言

激光超声由于其非接触、灵敏度高、宽频带、空间分辨率高等优点, 在材料的无损检测、在线监测等领域得到了越来越多的关注。激光辐照材料表面, 可以同时产生纵波、横波和表面波等多种模式的超声波, 其中表面波常被用来检测材料表面和近表面缺陷^[1-7]。传

基金项目: 中央高校基础研究能力提升计划资助项目(1330219171)

作者简介: 冯湾湾(1992-), 女, 硕士研究生, 现主要从事激光超声无损检测方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: ypan@tongji.edu.cn

收稿日期: 2017-10-16; 收到修改稿日期: 2017-12-12

统超声检测技术中, 体波(横波和纵波)常被用来检测材料内部缺陷^[8-10]。参考文献[8]中采用激光激发横波进行材料内部缺陷的检测, 主要利用激光激发横波的入射波和试样底边的反射波分别经过缺陷时对应的时间差, 进一步估算缺陷的位置, 故只能相对定性检测缺陷位置。

由于横波在固体材料中的传播速度接近于表面波, 且在材料边界处与表面波之间存在相关模式转换, 故经常被用来解释表面波与表面缺陷的作用机理^[11-14]。其中, COOPER等人在分析激光激发表面波与表面矩形缺陷作用的机理时^[13-14], 根据惠更斯原理将缺陷下奇异点作为次声源, 该源产生的横波以30°倾斜角斜入射至材料侧面, 并在侧面处转换为表面波。

但关于横波在界面处发生模式转换的详细机理,尤其是模式转换对应临界角的相关具体研究和应用,目前仍需进一步推进。

本文中首先采用有限元方法,建立了在空间2维半无限平面中,激光水平面激发、接收点垂直侧面接收的数值模型,主要研究激光激发横波在垂直裂纹侧面所可能发生的模式转换,尤其是横波发生模式转换时对应临界角与垂直侧面接收点的位置关系。随后又针对数值模拟的过程和结果,采用实验室自主研发激光超声场检测仪,进行了对应的激光超声实验。实验中采取激光水平面辐照、表面波压电探头侧面接收,主要研究了不同激发位置(水平面)、接收位置(垂直面)下,接收信号的变化规律。数值模拟和实验结果均表明,激光辐照材料表面可以有效产生横波,且横波由激发点发散传播至试样侧面。对于特定的固体材料,存在一定的临界角,当侧面接收点位于该临界角对应深度以内时,接收点接收到激光激发表面波在拐角处生成的表面波;但当侧面接收点位于该临界角以外时,接收点信号中增加了来自于横波模式转换而产生的新的表面波信号。根据模式转换信号“从无到有”这一规律,反向估算出固体材料的临界角,与理论计算结果接近,进一步验证了其模式转换机理。通过本文中的研究,进一步明确了横波在垂直裂纹侧面处发生模式转换的相关机理及其临界角的性质,这为激光超声检测垂直裂纹提供一种新途径。

1 临界角与模式转换现象的理论基础

根据超声波的传播机理^[15],当一束超声波以一定的倾斜角到达两种材料的界面时,超声波会像光波一样发生反射和折射,因此遵循反射定律和折射定律。如图1所示,假设介质1为固体材料,介质2为真空。由于超声波传播需要介质,因此当横波S由固体斜入射到达界面时,其在界面处只有反射而不会发生折射。对于同一种固体介质中,当入射横波到达界面发生反

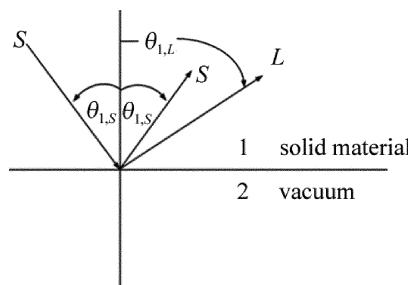


Fig. 1 Analysis of reflection characteristics of shear wave at oblique incidence to vacuum interface in solid materials

射产生横波和纵波L时,横波的入射角和反射角均为 $\theta_{1,S}$,而由于固体介质中的纵波波速较横波大,根据Snell定律可知,其反射角 $\theta_{1,L} > \theta_{1,S}$,其中下标1,S表示介质1中传播的横波S,下标1,L表示介质1中传播的纵波L。

此种情况下,设想横波的入射角 $\theta_{1,S}$ 不断增大,则纵波的反射角 $\theta_{1,L}$ 也随之不断增大。则入射横波必然存在某一临界角度 θ ,使纵波的反射角度 $\theta_{1,L} = 90^\circ$,并产生界面波。而由于介质2为真空,实际上该界面波即为表面波,参考文献中也提到了横波以一定的角度到达材料表面,并且模式转换为表面波^[11-12]。因此,可以根据该结论计算该临界角,具体为:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{v_{1,S}}{v_{1,L}}\right) \quad (1)$$

式中, $v_{1,S}$, $v_{1,L}$ 分别为介质1固体材料中传播的横波S和纵波L的波速。

2 有限元模型建立及结果分析

2.1 有限元模型的建立

采用ABAQUS软件建立有限元模型^[16-18]。假设在无限半空间内激光线源在y轴方向上均匀分布,并且激光线源趋于无限长。对于沿y方向均匀分布的激光线源,在光源长度范围内,样品承受的外力不随y轴变化,即沿y方向的应变和位移都是0,故可将该3维问题简化成2维平面应变问题来研究,建立如图2所示的有限元模型。垂直裂纹侧面为BE面,A是激光源位置,到BE面的距离为a,C是接收信号的位置,到水平面拐点B的距离为h。本文中通过分析不同深度h接收到的表面波信号的变化,分析横波与垂直裂纹侧面作用后发生模式转换形成表面波的机理。

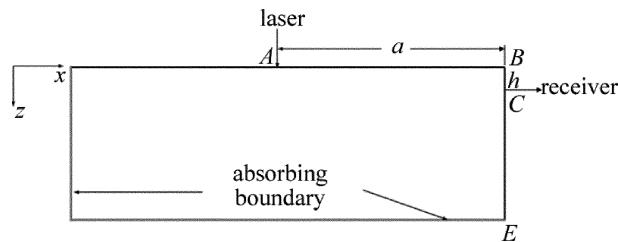


Fig. 2 Finite element model of waves generated on the horizontal surface and received on the vertical side

所建模型为各向同性均匀的铝块,材料的热物理参量见表1,计算过程中忽略温度变化对材料参量的影响。表2中 v_L , v_S , v_R 分别为纵波、横波及表面波在铝材料内的传播速率。模型的左侧和下侧均采用CINPE4平面无限单元消除来自边界的反射波干扰信

号,右侧为固体和真空的自然交界,所采用的脉冲激光上升时间为10ns,即激光激发产生的表面中心频率大

约为6.104MHz,计算出对应的中心波长约为500μm。激光源A至右侧水平距离设定为a=6mm。

Table 1 Material parameters of aluminum for finite element model

Young modulus/ GPa	Poisson's ratio	density/ (kg·m ⁻³)	specific heat capacity/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	thermal conductivity/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	thermal expansion coefficient/10 ⁻⁵ K	absorptivity
70	0.33	2700	900	160	2.3	0.05

Table 2 Velocity of waves in aluminum material

v_s /(km·s ⁻¹)	v_L /(km·s ⁻¹)	v_R /(km·s ⁻¹)
3.080	6.260	2.910

2.2 数值计算结果及分析

图3为数值模拟结果。图3a~图3d分别表示h为0μm~400μm,0μm~1200μm,400μm~4000μm,6000μm~6800μm的垂直位移波形图,图中P,R,S, R_R , R_S 分别表示掠面纵波、直达表面波、直达横波、拐点B相当于次生源生成的表面波、横波模式转换生成的表面波。

在图3a中,h增至400μm,信号接收位置小于表面波渗透深度,即一个波长约500μm,所以接收的能量主要以激光激发的直达表面波R为主,对应的表面波传播路径如图4a所示,且由直达表面波传播距离a与图3a到达接收点C时间计算的表面波波速约2884.477m/s,可知该部分能量主要来源于激光激发的表面波R,这也符合参考文献[17]中的结论,即激光在材料水平面激发的表面波在其穿透深度内可以不经垂直裂纹壁端奇异点B而直接传播至接收侧面点C。而激光激发横波由于波速与表面波波速相近,但信号强度相对表面波十分微弱,所以在图中表现不明显,图中首先出现的信号P表示掠面纵波。当h增至400μm时,直达的表面波能量有明显衰减,且波形出现一定的分离。

不断增大h,如图3b和图3c所示,发现原始的表面波信号充分分离成两部分。其中,波形图中第一信号(即前面的信号)的到达时间先保持不变后逐渐前移,当h>1600μm时,又呈现明显的非线性滞后。分析原因,当h<500μm时,第一信号的到达时间仍基本保持不变,即对应图3a中的信号R;但当h>500μm时,此时h大于表面波中心波长,激光激发的直达表面波信号变得十分微弱,激光激发的横波能量开始占主导作用,且由于铝材料中横波波速略大于表面波波速,第一信号的到达时间略微提前,对应横波的传播路径主要是由激发点斜入射直达接收点,传播路径如图4b所示,但当h>1600μm时,第一信号呈现明显的非线性滞后,这说明此时横波波速 v_s 的增长率已经不及

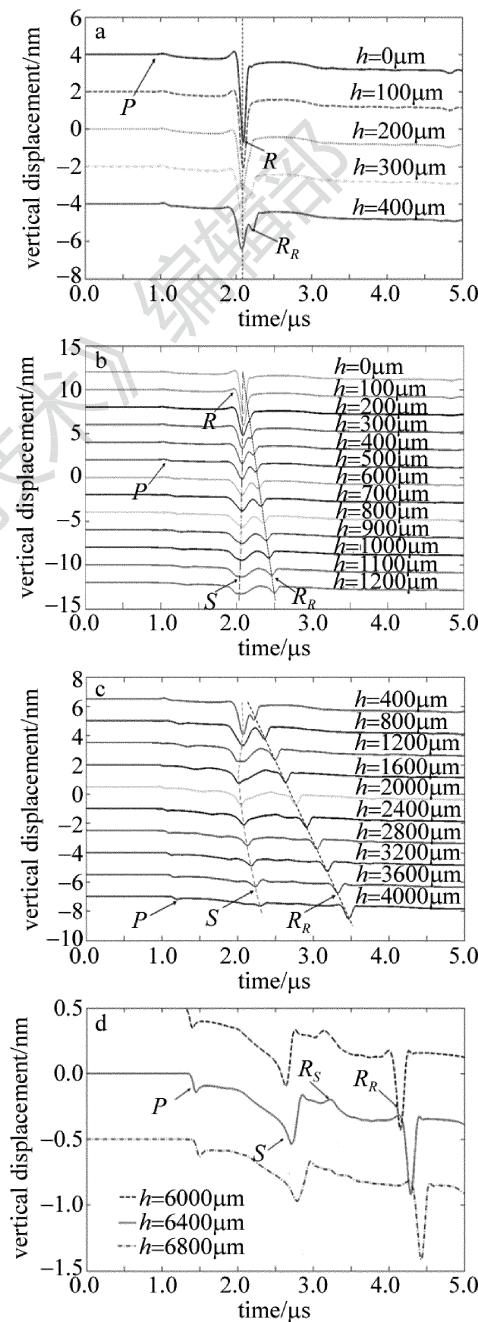


Fig. 3 Displacement signals at different receiving positions
a—from 0μm to 400μm b—from 0μm to 1200μm c—from 400μm to 4000μm d—from 6000μm to 6800μm

横波传播距离(即图4b中路径AC对应的距离)的增长率,传播时间随着传播距离AC的增大而增大。

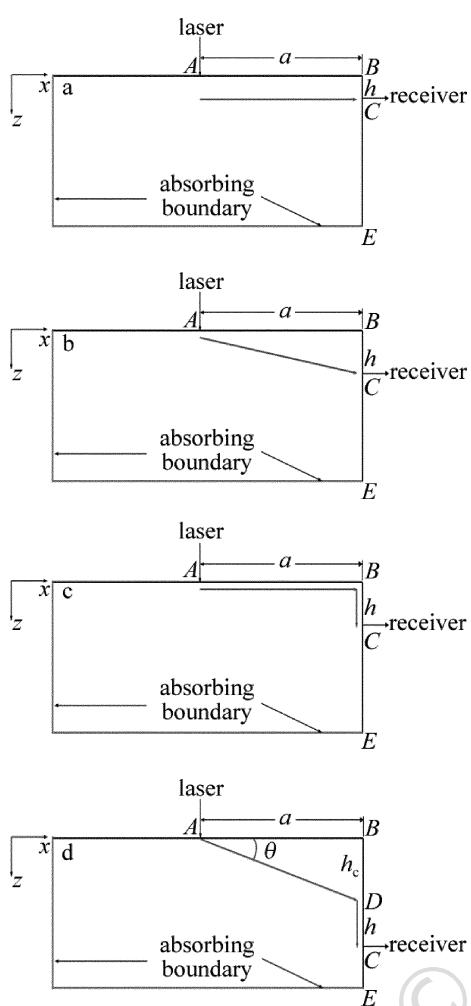


Fig. 4 Propagation routes of different displacement signals

a—the propagation route of laser-excited surface waves b—the propagation route of laser-excited shear waves c—the propagation route of surface waves generated by corner B d—the propagation route of surface waves generated by mode conversion

而关于波形图中分离出的第二信号,分析原因,当接收位置在表面波中心波长内,激光激发的表面波R直达接收点C,且其信号较强,而经奇异点B转化生成的表面波R_R相对较弱,表现不明显;当接收深度h逐渐变大,直达表面波R的能量逐渐衰减,经奇异点B转化生成的表面波R_R相对增强,表现为图3b中分离出的信号,且图中所示第二信号到达时间随h线性增加,具体的传播路径如图4c所示。以接收信号深度在2000μm为例,信号S的到达时间为2.047μs,对应图3b中传播路径的距离为6324.555μm,则计算出对应的波速为3089.670m/s,即对应横波波速;信号R_R的到达时间为2.774μs,对应图3c中传播路径的距离为8000μm,则计算出对应的波速为2883.922m/s,即对应表面波波速。

根据第1节中关于横波斜入射至界面处模式转换

理论的介绍,当信号接收深度足够大时,将出现由横波转换形成的表面波信号,即满足图1所示的转换规律,对应理论传播路径如图4d所示,其中θ为实现模式转换的最小角度(临界角),对应横波发生模式转换的位置距水平面的距离BD为h_c(即临界深度)。则当h<h_c时,横波不发生模式转换,信号接收位置C只能接收激光激发的直达表面波R和由B点作为次生源产生的表面波R_R;当h>h_c时,接收信号增加了经激光激发横波在BC面发生模式转换形成的模式转换表面波R_S。令临界角处横波模式转换的表面波信号(路径见图4d)到达时间为t₁,次生源生成的表面波信号(路径见图4c)到达时间为t₂,两个信号点到达时间差Δt₁₂及t₁,t₂的表达式如下:

$$t_1 = \frac{a}{v_s \cos \theta} + \frac{h - h_c}{v_R} \quad (2)$$

$$t_2 = \frac{a + h}{v_R} \quad (3)$$

$$h_c = \frac{a}{\tan \theta} \quad (4)$$

$$\Delta t_{12} = t_2 - t_1 = a \left(\frac{1 + \tan \theta}{v_R} - \frac{1}{v_s \cos \theta} \right) \quad (5)$$

根据表2中铝材料的速度参量值,并结合(1)式计算出,满足该模式转换的斜入射临界角约为30°,这也符合参考文献[13]和参考文献[14]中的结论。由(4)式计算,侧面能够接收到模式转换波的临界深度h_c≈3464μm。图3c中当h增至4000μm,此时接收深度已大于铝材料的临界深度3464μm,但并未发现新生成的表面波信号,分析原因可能是因为此时h比较接近临界深度,转换生成的表面波能量很小,不易直接看出。但当h分别增至6000μm,6400μm和6800μm时,如图3d所示,波形图中在S波与R_R波之间出现了一个新的信号,图中标记为R_S。以h=6000μm时接收到的信号为例,由(5)式计算出的理论时间差Δt₁₂=1.00μs,由图3d中模拟出的信号R_S的到达时间t₁≈3.140μs,信号R_R的到达时间t₂≈4.152μs,则两者时间差为1.01μs,与理论时间差十分接近,进一步证明该信号为横波模式转换生成的表面波信号。但图中该信号不太明显,可能是由于横波指向性,该方向上横波能量较弱,加之接收深度较大而能量衰减,故而转换生成的表面波能量也很弱。

3 横波模式转换机理的实验验证

3.1 实验器材的准备

实验试样为150mm×50mm×120mm的铝制试

样,如图5a所示,图中已经标注了激发面(x)和接收面(y)。由于探头接触面为矩形,其实际接收位置距离图5a中接收点即探头上边沿约为12.5mm,所以实际接收信号的位置为($y+12.5$)mm。按照表1中定义的铝材料理论波速参量值,计算出的理论临界角约为30°,由此计算出激发位置 x 在30mm,40mm,50mm,60mm时理论临界深度对应的 y 值,如表3所示。探头上边沿与垂直侧面标记的一系列水平刻度对齐,具体标记如图5a所示,即 y 从顶点0mm~55mm,每间隔5mm采集一次数据。实验信号采集过程如图5b所示,本实验中采用实验室自主研发的激光超声场检测仪LUFT-1301^[19]进行激光超声实验。选用2.5MHz表面波压电探头接收,由于该探头只能接收表面波信号而不能接收图4b中对应的横波直达信号,因此排除了其它信号的干扰。

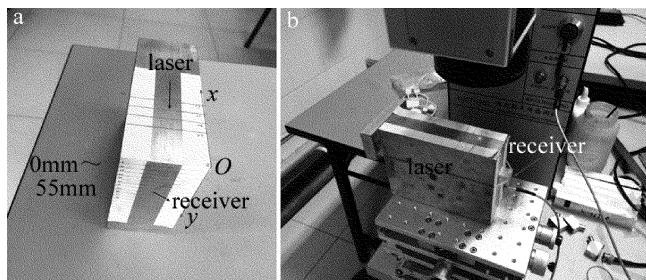


Fig. 5 Experimental diagram of surface waves converted by shear waves
a—text sample b—experimental arrangements

Table 3 Position of laser excitation and signal reception

laser excitation x/mm	critical angle $\theta/(\text{°})$	critical depth $x\tan\theta/\text{mm}$	probe position y/mm
30		17.3	4.8
40	30	23.1	10.6
50		28.9	16.4
60		34.6	22.1

3.2 激光超声实验的结果及分析

图6为实验信号采集结果。图6a、图6b、图6c和图6d分别表示激光源在距右边界30mm,40mm,50mm,60mm处激发、表面波压电探头在侧面(y 轴, $y=0\text{mm} \sim 55\text{mm}$)不同位置接收所得到的信号图。

结合前面的数值模拟结果可知,当激光辐照材料表面所产生的表面波沿 x 负方向传播时,表面波到达试样边界处(即图中坐标轴交界处)会重新产生表面波并沿 y 轴正方向传播至探头,因此理论上采集波形图中至少存在一个超声信号 R_R ,对应图4c中的传播路径。从图6a~图6d的波形图中,均发现存在符合这一特征的表面波信号,图中标记为 R_R 。

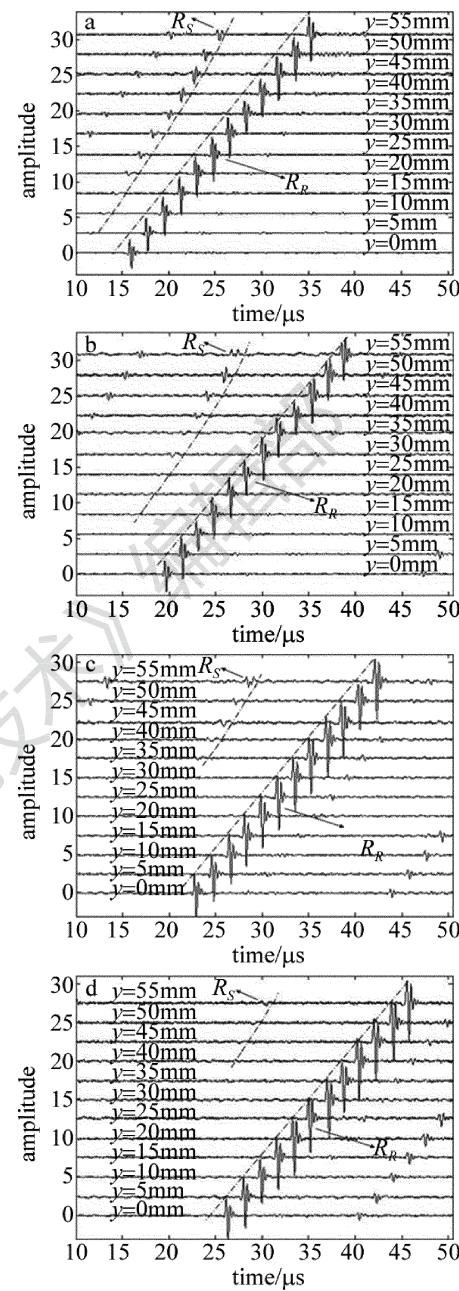


Fig. 6 Side reception of surface wave piezoelectric probe corresponding to laser-excited ultrasonic at different positions
a— $x=30\text{mm}$ b— $x=40\text{mm}$ c— $x=50\text{mm}$ d— $x=60\text{mm}$

前面已经论证,当表面波压电探头位于临界深度之外(即横波入射角大于临界角)时,探头可接收到由于横波在垂直裂纹侧面发生模式转换生成的新的表面波信号。结合表3中的计算结果,当激光源在 $x=30\text{mm}$ 处激发,并且侧面接收探头起始位置位于 $y=5\text{mm}$ 时,理论上应开始接收到横波转换的表面波。实验结果如图6a所示,存在符合条件的表面波信号,对应数值模拟信号 R_S ,并且进一步发现随着 y 的增大,信号 R_S 的幅值越来越大。这是由于激光源产生的横

波有效扫描区域是以类似“扇形”传播到右侧,如图7所示。当探头接收点大于临界深度时,只要横波入射角不小于临界角,在两种材料界面处就可以生成转换表面波,转换率主要取决于扇形扫描有效面积。该面积的大小由 $\Delta h = h - h_c$ 决定,即 h 刚达到临界深度 h_c 时,扇形扫描的有效面积较小,此时信号较弱;而继续增大 h ,扇形有效面积增大,可转换生成表面波信号的区域增大,接收信号强度增强,表现为图6a中的信号 R_s 幅值随 y 增大呈递增趋势。进一步分析,对于侧面C和E之间的任意一点D,其对应的斜入射角度记为 β ($\beta > \theta$),则易知横波沿路径ADE传播到达E点所需要的时间较ACE小,即表现为信号 R_s 提前出现。并且随着探头位置不断下移,可发生模式转换的横波信号区域越来越大,信号 R_s 的到达时间 t_1 越来越小,则 R_R 和 R_s 信号点之间的时间差逐渐增大,符合图6特征。此时运用(5)式计算两信号的时间差时, β 对应式中的 θ 。

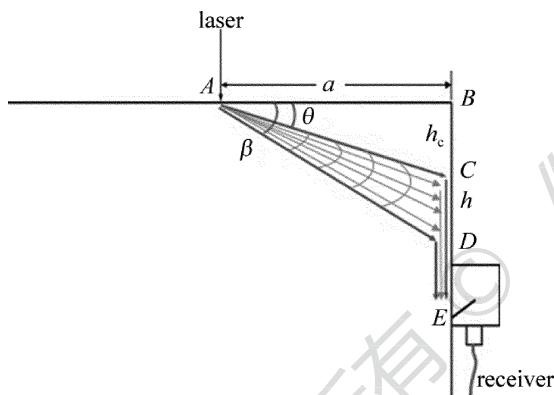


Fig. 7 Side reception of surface wave piezoelectric probe corresponding to laser-induced transverse wave at critical angle

同理当激光源在 x 为40mm,50mm,60mm处激发时,理论上探头应分别在 y 为15mm,20mm,25mm处可以接收到转换表面波,并随着 y 的增大信号强度增强,图中所示也基本都符合该规律。值得注意的是,图6c、图6d表明,当激光在 x 为50mm,60mm处激发时,分别在 y 为30mm,40mm处才出现转换表面波信号 R_s ,信号十分微弱,且探头接收位置 y 一定时,信号幅值相对 x 为30mm,40mm时更小。分析原因,当 x , y 逐渐增大时,临界深度和横波传播路径也随之增大,则到达探头的能量逐渐衰减,加之图6中信号的幅值被压缩,因此开始转换形成的表面波信号很微弱,在图中很难直观看出。但随着扇形扫过有效面积的增大,信号强度也随 y 的增大而增大,符合上文规律。同时,在图6a~图6d中,除了信号 R_s 与 R_R ,还出现了两个其

它的信号。在信号 R_R 后到达的信号是由于界面反射引起的,信号 R_s 前面出现的信号可能是激光激发掠射纵波转换的表面波,本文中不做详细研究。

3.3 材料临界角的估算

基于图6a至图6b的实验结果,利用(4)式,反向估算材料发生模式转换的临界角,计算结果如表4所示。由表4可知,总体上估算结果均接近理论值30°,进一步验证了前面的结论。而表中对于 x 为50mm和60mm时计算结果出现了一定的偏差,是因为此时能量衰减较快,临界深度的选取存在一定的误差;另外,本实验中采用的铝块所对应的实际的波速比 v_s/v_L 与理论值可能存在一定的偏差,进而造成实际的临界角与30°存在一定的差距。但实验结论与数值计算结果吻合较好,临界角和模式转换的机理均得到了很好的解释,该结论有助于更好地利用于超声检测领域。

Table 4 Experimental calculation of critical angle of aluminum materials

laser excitation x/mm	probe position for the first signal R_s y/mm	critical depth y/mm	critical angle $\theta/(\text{°})$
30	5	17.5	30.2
40	15	27.5	34.5
50	30	42.5	40.4
60	40	52.5	41.2

4 结论

首先建立了2维平面中激光辐照材料水平面、节点垂直侧面接收信号的数值模型,分析了激光源产生的超声波传播到达垂直裂纹侧面信号接收点的规律。结果表明,右侧接收点除了能够接收得到激光激发表面波直达信号及其在拐角次生源处重新生成的表面波信号,还能够接收横波直达信号以及经横波模式转换产生的表面波信号,并且该过程主要取决于接收点距离水平面的深度。随后基于数值计算模型和结论,进一步设计了激光水平面辐照、表面波压电探头侧面接收的激光超声实验进行对比验证。实验结果表明,存在一个临界角,当压电探头接收位置处于临界角对应深度以内时,压电探头能够接收到激光激发产生的表面波信号经拐角次生源新生成的表面波信号,并未接收到激光激发表面波直达信号,这是由于压电探头实际接收信号位置深度已经大于直达表面波传播深度;但当压电探头接收位置处于临界角对应深度以外时,接收信号中增加了一个信号,该信号主要源于激光激发横波斜入射至侧面时发生模式转换所产生的表面波,并且该信号由横波斜入射至侧面并发生模式转换

时对应的临界角所确定,主要取决于材料中横波和纵波的速度比。该实验结果与数值模拟结果吻合较好,说明了实验结论正确。并且,随着压电接收位置逐渐下移,模式转换表面波的信号强度不断增大,且转换信号与激光激发表面波信号之间的时间差逐渐增大,这与激光激发横波的“扇形”散射扫描的面积和角度有关。通过针对激光激发横波与材料表面垂直裂纹侧面相作用发生模式转换现象的机理研究,进一步明确了模式转换现象和临界角的性质。同时,由于实验采用常规且廉价的压电探头,使用方法简单可靠,本文中的研究为实际应用激光激发、压电接收检测垂直裂纹提供一定的理论基础。

参 考 文 献

- [1] GUAN J F, SHEN Zh H, XU B Q, *et al*. Spectral analysis of the scattering waveform of the laser-generated ultrasonic waves for detecting the crack in the material [J]. *Laser Technology*, 2005, 29 (3): 287-290 (in Chinese).
- [2] WANG W, ZHONG Zh, PAN Y D. 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).
- [3] JIAN X, DIXON S, GUO N, *et al*. Rayleigh wave interaction with surface-breaking cracks [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101 (6): 064906.
- [4] ZHOU Zh G, ZHANG K Sh, 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.
- [5] GUAN J F. Numerical study on signal enhancement of the Rayleigh wave in the near-field of surface defects [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2014, 49(6): 1212-1219.
- [6] ZENG W, WANG H T, TIAN G Y, *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): 134302 (in Chinese).
- [7] GUAN J F, SHEN Zh H, XU B Q, *et al*. Numerical simulation of laser ultrasonics for detecting subsurface lateral defects [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2005, 5629: 457-465.
- [8] LI Y L. Research on laser ultrasonic testing of internal defects in metal materials based on reflected shear wave [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014: 29-39 (in Chinese).
- [9] LI M. A study on ultrasonic inspection of tyres by transverse waves [J]. *Nondestructive Testing*, 2000, 22(4): 162-164 (in Chinese).
- [10] XU Ch G, LI H X, WANG J F, *et al*. Ultrasonic shear and longitudinal wave testing method of residual stress [J]. *Acta Acustica*, 2017, 42(2): 195-204 (in Chinese).
- [11] GUAN J F, SHEN Zh 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 (in Chinese).
- [12] JIAN X, DIXON S, GUO N, *et al*. Rayleigh wave interaction with surface-breaking cracks [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101 (6): 064907.
- [13] 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 & Frequency Control*, 1986, 33(5): 462-470.
- [14] COOPER J A, DEWHURST R J, PALMER S B, *et al*. Characterization of surface-breaking defects in metals with the use of laser-generated ultrasound [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1986, A320(1554): 319-328.
- [15] ROSE J L. Ultrasonic waves in solid media [M]. Beijing: Science Press, 2004: 36-40 (in Chinese).
- [16] ZHAN Y, XUE J Zh, LIU Ch Sh. Numerical simulation of laser ultrasonic elastic constant measurement based on Abaqus [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(5): 0508002 (in Chinese).
- [17] JIN L, WANG W, PAN Y D. 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).
- [18] WANG M Y, ZHOU Y J, GUO Ch. Numerical simulation of laser ultrasonic detection of surface micro-crack depth [J]. *Laser Technology*, 2017, 41(2): 178-181 (in Chinese).
- [19] LI X X, ZHAO J F, PAN Y D. On the measurement method of material constants based on laser ultrasonic field testing system [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2016, 31(3): 352-360 (in Chinese).