

引用格式: CHAI Huaqi, CHEN Youxing, WANG Zhaoba, et al. Research on Directivity of Laser Ultrasonic Sound Field Based on Transmission Method[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(1):0114003

柴华淇,陈友兴,王召巴,等.基于透射法的激光超声声场指向性研究[J].光子学报,2023,52(1):0114003

# 基于透射法的激光超声声场指向性研究

柴华淇,陈友兴,王召巴,郭星,王鉴,赵霞

(中北大学 信息与通信工程学院,太原 030051)

**摘要:**在忽略尺寸激光激励下的超声回波路径分析的基础上,通过设置不同直径的光源对不同厚度的 1060 铝合金平板进行激励,并在对侧接收信号,获取各次回波达到时间和幅值,用于分析不同尺寸光源激励下的激光超声各次回波传播路径及声场指向性规律。结果显示,在波形混叠处,纵波被淹没在横波内,到达时间难以提取,而横波的到达时间会向前移,偏离理论到达时间,若忽略波形混叠的影响,给出的各次回波到达时间扩展公式的理论值与实验值之间的最大误差不超过  $0.1 \mu\text{s}$ ;通过分析幅值分布情况可以看出,直径  $\leq 0.1 \text{ mm}$  的激励源可以产生指向性较好的横波声场,而增大激励源直径,纵波声场指向性变好,横波幅值逐渐向法线方向移动,但当直径增加到一定程度,两者声场都会受到热弹效应的影响而向两边扩散。研究结果表明,在实际应用中可针对不同的检测需求选择合适的光源直径。

**关键词:**激光超声;传播路径;指向性;透射法;光源直径;1060 铝合金平板

中图分类号:TN249

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235201.0114003

## 0 引言

作为一种非接触式超声无损检测方法,激光超声可以灵活适应各种条件、型面、材料的检测,可在高温、高压等恶劣环境中对待测物体进行检测<sup>[1]</sup>,被广泛应用于缺陷检测、材料状态监测等领域<sup>[2-6]</sup>。此外,激光超声还具有多模、宽频<sup>[7-8]</sup>、较高的时间分辨率等特点,是一种极具发展潜力的无损检测技术。

激光超声分别使用脉冲激光器和连续激光器来激励和接收超声信号,两个激光器可以放置在样品同侧进行接收,也可放置在对侧进行对心或斜向接收,在对侧接收的情况下,需要考虑激励点与接收点之间的水平相对位置,即激光超声路径传播与声场分布情况<sup>[9]</sup>。1981年,HUTCHINS D A 等为了研究激光辐照金属表面所产生的超声分布情况,将激励光源视为理想点源,给出了热弹和烧蚀两种机制下的远场波场指向性方程,确定了两种不同机制下的激光超声声场模式<sup>[10]</sup>。近年来,很多学者研究了不同空间分布情况下的激励光源在激光超声检测中的应用,如马健等分析了倾斜入射的激光超声声场分布情况<sup>[11]</sup>;周航等利用有限元方法对环形光源激发超声进行了数值模拟,研究了环形光源中轴线上的叠加横波随激光各参量的变化规律,并将该方法应用于材料内部缺陷检测<sup>[12]</sup>;YI D C 等为了提高激光超声对金属内部裂纹的检测,提出使用弧线聚焦激光源产生聚焦角束体波,并利用干涉仪对弧线激光源产生的剪切波分布及焦域进行评估<sup>[13]</sup>;YAO D 等提出了一种基于双光束干涉产生激光超声的激光阵列线源的新型光学排布方式,通过改变两束干涉光的交会角,简化了激光阵列光源周期的调整,实验表明激光阵列声源产生声表面波的强度高于相同入射能量的激光点源所产生的声表面波的强度<sup>[14]</sup>;隋皓等对比了点光源和线光源激发的超声波信号及声场,对不规则钢轨的表面缺陷进行了仿真与实验检测,研究发现线光源所激发的超声信号有更大的幅值与更好的指向性<sup>[15]</sup>;SCHMIEDER F 等为了解决常用高斯光束会导致强度迅速下降的发散声场问题,利用微

**基金项目:**山西省自然科学基金(Nos. 20210302124189,20210302124202),山西省省筹资金资助回国留学人员科研项目(No. 2022-145),山西省研究生教育创新项目(No. 2021Y610)

**第一作者:**柴华淇,445170842@qq.com

**通讯作者:**陈友兴,chenyouxing@nuc.edu.cn

**收稿日期:**2022-07-11;**录用日期:**2022-09-09

<http://www.photon.ac.cn>

机电系统(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)空间光调制器通过全息投影产生任意分布的光源激励产生超声,在样品内的检测深度可达7.4 mm<sup>[16]</sup>。目前学者的研究主要考虑理想点源或线下光源空间分布对激光超声幅值或声场分布的影响,而在实际测量过程中光源尺寸也是很重要的影响因素之一。

本文针对上述问题,以不同厚度1060铝合金平板为对象,开展不同尺寸光源下激光超声传播路径和声场指向性的研究,得出基于光源直径的回波到达时间修正公式以及声场指向性规律,完善光源空间分布对激光超声信号模式与声场分布影响的研究。

## 1 实验方案

图1为使用完全非接触方法进行激光超声检测的实验方案。使用波长为1064 nm的Nd:YAG脉冲激光器产生脉冲激光,脉冲重复频率设置为10 Hz,采样频率为100 MHz。实验中可通过聚焦透镜改变激励激光光斑大小,为了调整脉冲激光光源直径大小,将黑色相纸固定在待测试件受辐照的一面,控制脉冲激光器发出一个脉冲的激光作用于相纸,通过测量烧蚀光斑大小来确定激励光源的直径大小。选择焦距为 $f=300$  mm的凸透镜,依次改变透镜与激光器之间的距离,获得直径为1 mm、2 mm、……、6 mm的激励光源。调整单脉冲能量以使辐照在试件表面的激光能量密度保持在 $1.9 \times 10^6$  W/cm<sup>2</sup>,在该能量密度下可以保证激发机制为烧蚀。

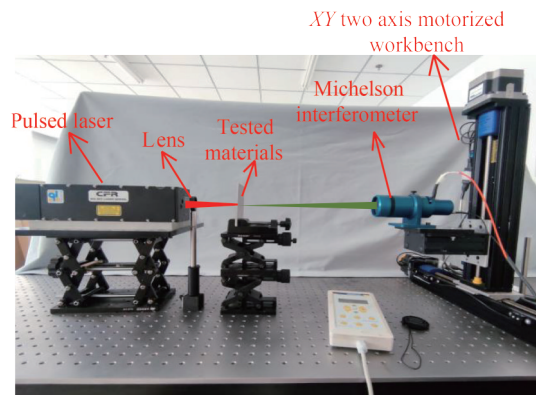


图1 实验装置

Fig.1 Experimental apparatus

在烧蚀机制中,高密度激光功率在试件表面激发等离子体生成的反作用力会诱发产生在材料内部传播的宽带超声波,通过波长为532 nm的连续激光器QUARTET在试件背面进行接收。共使用三块厚度不同的1060铝合金板,尺寸分别为200 mm×200 mm×5 mm、200 mm×200 mm×10 mm、200 mm×200 mm×15 mm,调节QUARTET激光器光纤头与试件之间的距离和方向,使得接收效率最大。为了获得完整的激光超声声场信息,采用图1所示透射法对激光超声信号进行采集,将QUARTET激光器光纤头固定在XY两轴机动工作台上,控制探测激光束的移动扫描,经多次实验后确定扫描范围为 $[-15$  mm, 15 mm],扫描步进为0.3 mm。将探测激光器连接到NI采集卡,所采集的数据传输到计算机进行进一步处理,对于每一个接收点,计算机记录一个A扫数据集。此外,为了方便描述,将数据信息用 $(h, a, d_i)$ 的形式进行标识, $h$ 表示试件厚度, $a$ 表示光源直径, $d_i$ 表示接收点与激励点对心位置之间的水平距离, $i$ 表示回波次数。例如(10, 1, 5)表示被检试件厚度为10 mm,使用直径为1 mm的光源对试件进行激励,接收激光器在距离对心位置5 mm处接收信号。

## 2 激光超声传播路径分析

只有当缺陷处于声场内部时才能很好地被检测到,故研究激光超声在被检试件内的传播路径具有重要意义。图2(a)为部分激光超声的A扫信号,结合反射定律分析线扫描中各个A扫信号中的横波、纵波到达时间,可以得到激光超声在试件中传播的一般情况。如图2(b)所示,点 $G$ 为脉冲激光激励位置,点 $O$ 为激励点的对心位置,固定点 $G$ ,假设在接收点 $D$ 可以同时接收到透射纵波和横波,则激光辐照试件表面产生的一次纵波 $L_1$ 和一次横波 $S_1$ 、以及在界面发生多次反射的二次纵波 $L_2$ (二次横波 $S_2$ )、三次纵波 $L_3$ (三次横波 $S_3$ )等的传播路径分别如图2(b)中的红、蓝、黄色虚线所示。

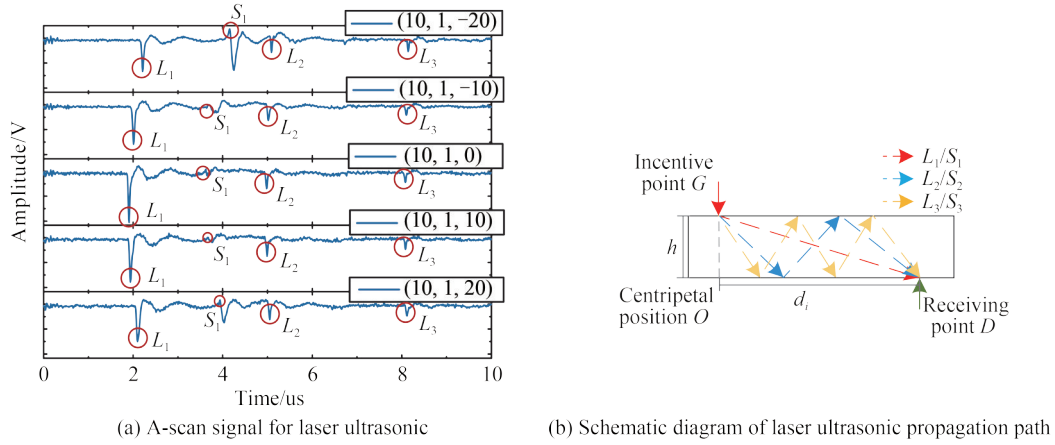


图2 激光超声传播路径  
Fig.2 Laser ultrasonic propagation path

此时,根据图2可以推导出忽略光源直径影响时的各次回波到达时间公式为

$$t = \frac{\sqrt{[(2i-1)h]^2 + d_i^2}}{v} \quad (1)$$

式中,  $v$  表示超声在试件中的传播速度。

但考察实际的实验情况,发现各回波到达时间与辐照光源大小之间有一定的关系。图3展示了厚度为10 mm、激励光源直径分别为1 mm和6 mm时的B扫图,纵波在B扫图中呈现深蓝色,横波在B扫图中呈现亮黄色。从图3(a)中可以看出,随着检测点  $D$  与辐照光源对心位置  $O$  之间的距离  $d$  增加,其对应的激光各次回波到达时间也向后延迟,特别是一次纵波和一次横波,可以明显地看出其达到时间为一个圆弧形。对比图3(b)和图(a),可以看出图3(b)中一次纵波和一次横波在  $[-3 \text{ mm}, 3 \text{ mm}]$  左右的区间范围到达时间几乎一致,分别为  $1.74 \mu\text{s}$ 、 $3.44 \mu\text{s}$ ,超过此区间范围,到达时间随检测距离  $d_i$  的增加而逐渐向后延迟。

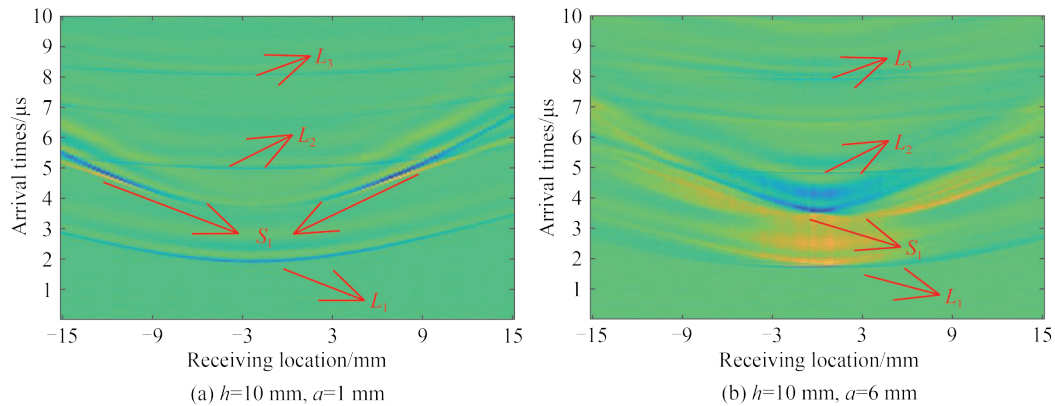


图3 不同直径光源的B扫图  
Fig.3 B-scan of light sources with different diameters

由此可以推断,在光源辐照范围内,各次回波到达时间一致,而在辐照范围外,到达时间与检测距离之间的关系仍可用式(1)表示。增加光源直径参量后,经校正后的式(1)可表示为

$$t = \begin{cases} \frac{\sqrt{[(2i-1)h]^2 + d_i^2}}{v} & |d_i| > a/2 \\ \frac{h}{v} & |d_i| < a/2 \end{cases} \quad (2)$$

为了验证此关系,使用第1节所设置的六种不同直径光源对厚度为10 mm的铝合金板进行超声激励。从实验数据中获取各次回波到达时间,并根据式(2)画出各次回波到达时间随光源直径变化的曲线,将两者进行对比,如图4所示。其中,虚线为实验值,实线为理论值,两者重合度较高。

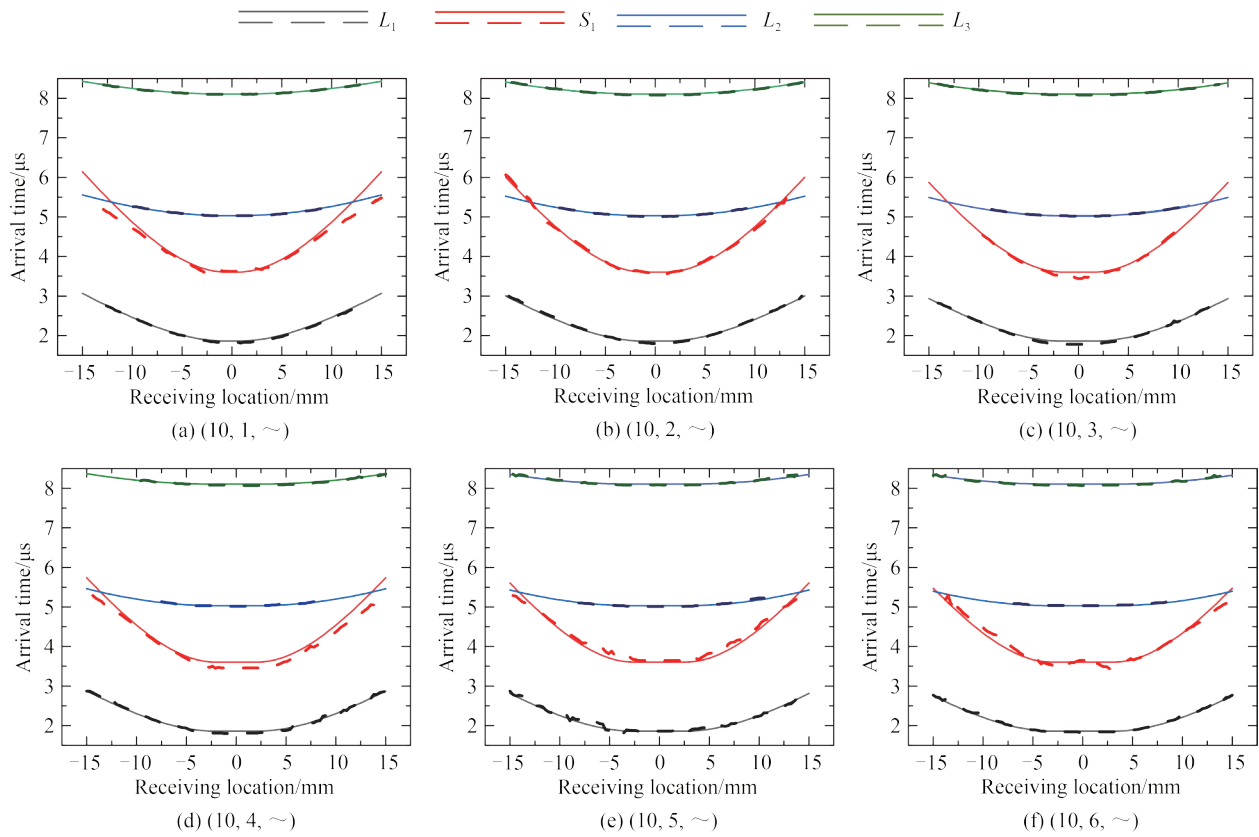


图4 各次回波理论与实验到达时间对比

Fig.4 Comparison of theoretical and experimental arrival time of each echo

对理论与实验到达时间作差得到检测误差,统计其最大误差,记录在表1中。从表中数据可以看出,一次横波到达时间的误差整体较大,比较并观察图4,可以发现横波在 $-10\text{ mm} < d_i < 10\text{ mm}$ 的检测范围内与理论值重合较好,而当 $d_i < -10\text{ mm}$ 或 $d_i > 10\text{ mm}$ 时,越往两边,到达时间与理论值偏差越大。初步推断,这是由于横波与二次纵波混叠导致的。为了验证此推论,对比厚度为10 mm、15 mm铝合金板的B扫成像图,如图5所示,发现两种板厚下的二次纵波与横波到达时间相交位置,横波到达时间均前移,偏离了理论到达时间。若忽略横波与二次纵波混叠部分,其余到达时间的最大误差不超过 $0.1\text{ }\mu\text{s}$ ,由此可以验证式(2)中激光超声各次回波到达时间与光源直径的关系。

表1 理论与实验各次回波到达时间平均误差

Table 1 Average error of arrival time of each echo in theory and experiment

	Echo				
	Primary longitudinal wave	Primary shear wave	Secondary longitudinal wave	Cubic longitudinal wave	
Light source diameter	1 mm	0.003 8	0.661 3	0.013 8	0.004 5
	2 mm	0.052 7	0.086 2	0.019 2	0.017 6
	3 mm	0.057 3	0.046 1	0.030 2	0.006 9
	4 mm	0.071 3	0.447 0	0.049 1	0.019 4
	5 mm	0.098 4	0.198 8	0.055 4	0.043 8
	6 mm	0.091 5	0.309 5	0.043 8	0.060 0

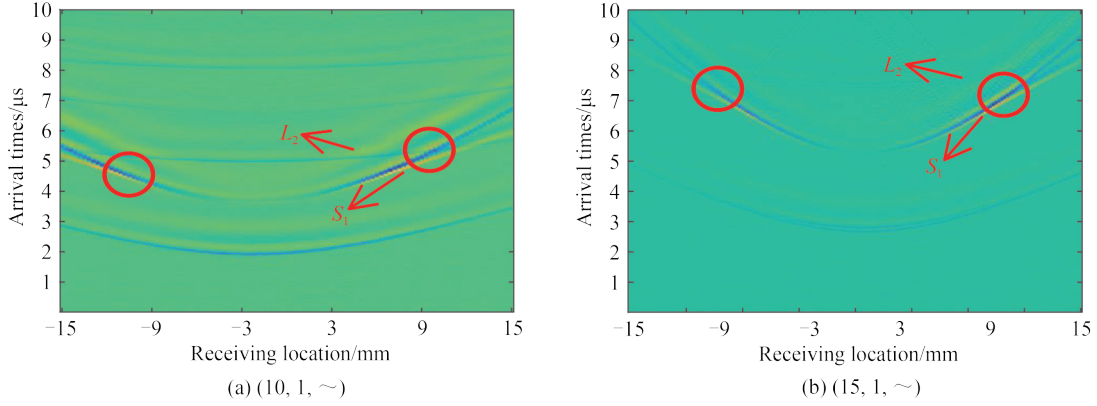


图5 不同厚度铝合金板的B扫图  
Fig.5 B-scan of aluminum alloy plates with different thickness

### 3 透射声场分布

#### 3.1 声场理论模型分析

目前理论研究多将激励源视为一个理想点源,理想点源的激励相当于出现三对相等且正交的力,称为力偶极子<sup>[17]</sup>,文献[10,17]给出了理想点源激励下热弹和烧蚀机制下纵波和横波的指向性方程,即

$$\begin{cases} U_{TL}(\theta) \propto \frac{2k^2 \cos \theta (k^2 - 2 \sin^2 \theta)^{1/2}}{(k^2 - 2 \sin^2 \theta)^2 + 4 \sin^2 \theta (1 - \sin^2 \theta)^{1/2} (k^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}} \\ U_{TS}(\theta) \propto \frac{\sin 2\theta (1 - k^2 \sin^2 \theta)^{1/2}}{(k(1 - 2 \sin^2 \theta))^2 + 4 \sin^2 \theta (1 - \sin^2 \theta)^{1/2} (1 - k^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} U_{AL}(\theta) \propto \frac{2k^2 \cos \theta (k^2 - 2 \sin^2 \theta)^{1/2}}{(k^2 - 2 \sin^2 \theta)^2 + 4 \sin^2 \theta (1 - \sin^2 \theta)^{1/2} (k^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}} \\ U_{AS}(\theta) \propto \frac{\sin 2\theta (1 - k^2 \sin^2 \theta)^{1/2}}{(k(1 - 2 \sin^2 \theta))^2 + 4 \sin^2 \theta (1 - \sin^2 \theta)^{1/2} (1 - k^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} \end{cases} \quad (4)$$

式中,下标中T、A分别表示热弹机制和烧蚀机制,L、S分别表示纵波和横波; $k$ 表示在样品中传播的纵波与横波波速之比; $U$ 随远场角度的变化而变化。根据式(3)、(4)可以得到激光超声的指向性图,如图6所示。

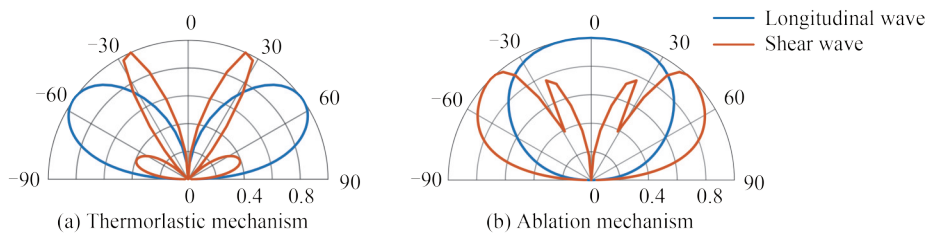


图6 激光超声方向性对比  
Fig.6 Comparison of laser ultrasonic directivity

图7分别给出了(10,1,0)、(10,1,12)、(10,6,0)、(10,6,9)四个A扫信号。首先对比图7(a)和(b),发现对心位置(即图(a))处的纵波非常清晰,而横波几乎淹没在噪声中,随着检测点 $D$ 远离对心位置,纵波幅值降低,横波幅值大幅度增加;接着观察图7(c)和(d),发现6 mm光源激励下仍然有清晰的纵波,但横波幅值比光源直径为1 mm时更大,检测点远离对心位置,纵波幅值减小,而横波幅值略有增加。为了揭示激光超声声场分布随光源直径变化的规律,使用激光超声检测系统对三种厚度的铝合金平板进行线扫描,提取各A扫信号中一次纵波和一次横波的幅值,将检测激光移动的位置信息转换为角度信息,在极坐标中绘制幅值关于扫描角度的曲线,便可得到纵波、横波声场指向性图。

理论上,考虑激励源的尺寸相当于添加了一个垂直于表面的额外不平衡力,使得垂直于表面的力偶极子大于其他两个偶极子,因此需要在指向性方程中添加<sup>[17]</sup>

$$r(\theta) = \frac{J_1(\pi f a \sin \theta / v)}{\pi f a \sin \theta / v} \quad (5)$$

式中,  $J_1$  是第一类贝塞尔函数,  $f$  是超声波频率。将式(3)、(4)与式(5)相乘, 即可得到与光源直径有关的指向性方程为

$$u_r(\theta) = U(\theta)r(\theta) \quad (6)$$

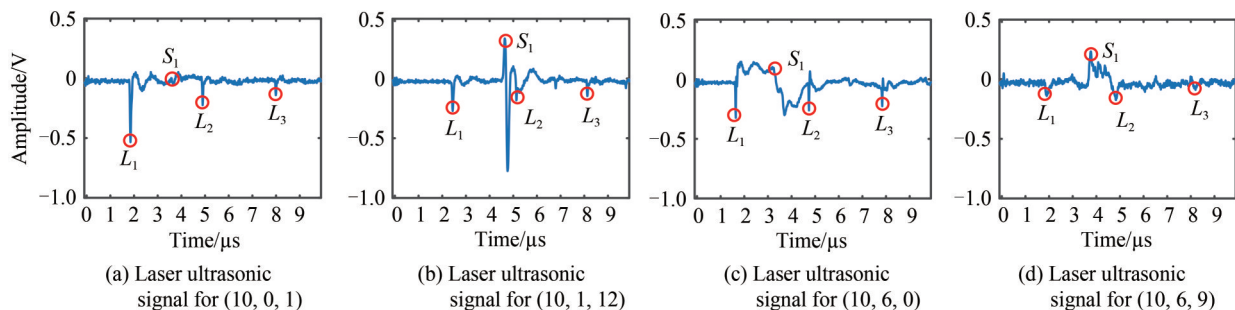


图7 典型激光超声 A 扫信号  
Fig.7 Typical laser ultrasonic A-scan signal

根据式(3)、(4)和(6)可分别绘制出与光源直径有关的纵波、横波指向性曲线, 如图8所示。可以看出, 烧蚀纵波的声束宽度随光源直径的增加而逐渐减小; 对于横波而言, 若考虑光源尺寸的影响, 则声场开始由  $\pm 45^\circ$  方向逐渐向法线方向集中。

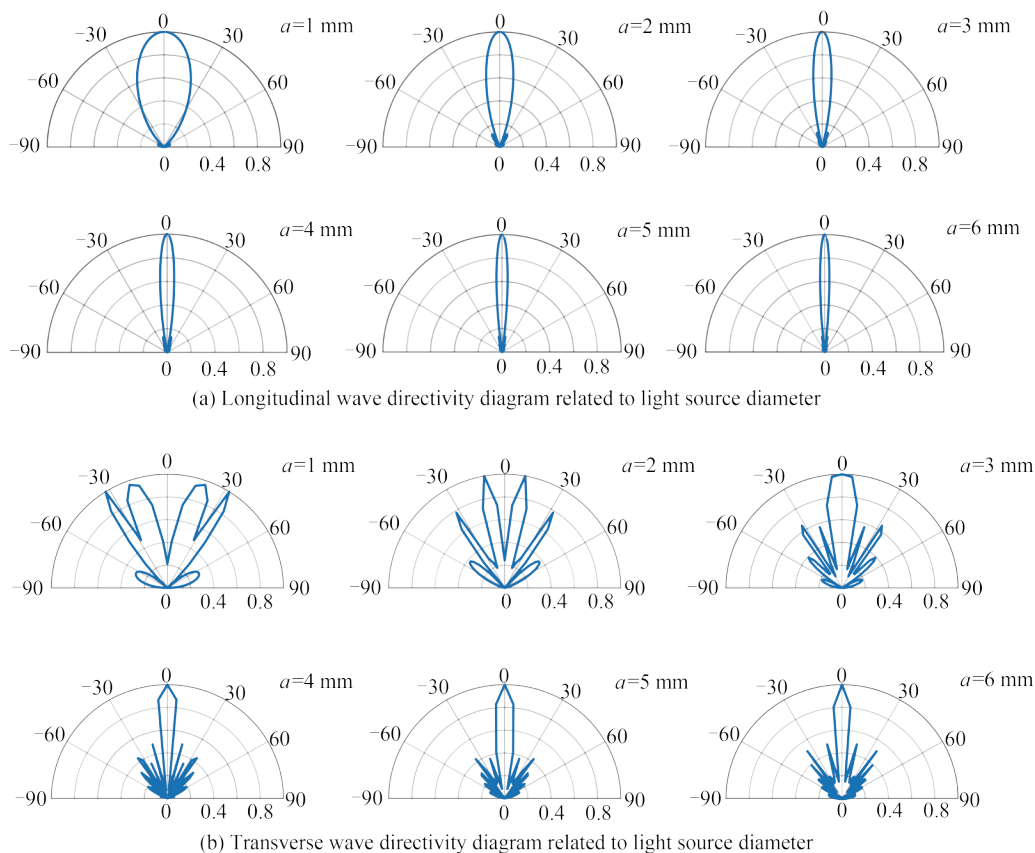


图8 与光源直径相关的声场指向性图  
Fig.8 Directivity diagram of sound field related to light source diameter

### 3.2 纵波声场指向性分析

为了验证关于光源直径与声场波束宽度关系的正确性, 使用不同直径光源对三种厚度金属板进行激励, 并提取一次纵波和横波的幅值, 绘制成极坐标。

图9展示了10 mm铝合金板中的激光超声一次纵波指向性图。图9(a)中,当光源直径 $a=1$  mm时,纵波声场分布在 $\pm 45^\circ$ 之间,且几乎在所有方向上都有相当大的振幅;随着光源直径增大,即从1 mm增加到4 mm,纵波声场变窄,能量主要集中在 $\pm 20^\circ$ 之间,与式(5)、(6)结果相一致;随后继续增大光源直径,纵波声场却又继续增加,这是因为本实验虽然以烧蚀机制为主,但由于激光器发出的激光呈现高斯分布,中心能量大而边缘能量小,增大光源直径后,边缘能量小的地方会受到热弹机制的影响,热弹机制所产生的纵波对结果产生影响,在 $30^\circ\sim 60^\circ$ 附近出现了小侧叶,影响纵波波束宽度。

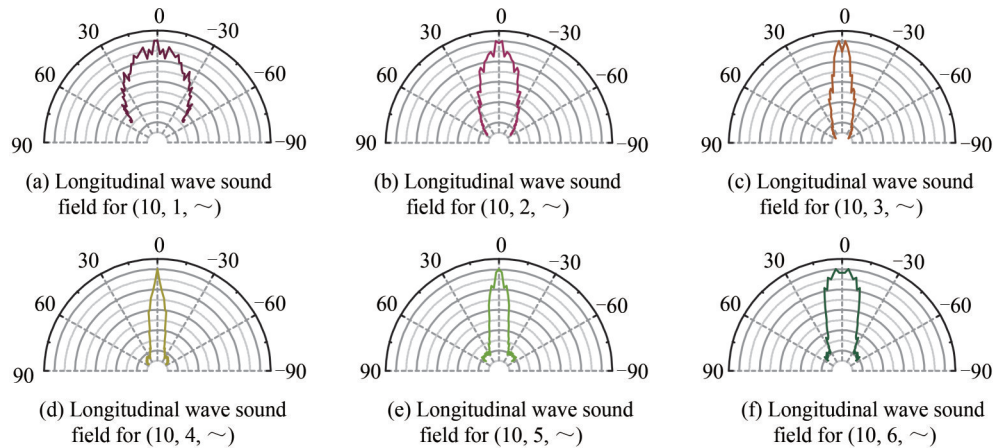


图9 10 mm 铝合金板的纵波声场分布

Fig.9 Longitudinal wave field distribution of 10 mm aluminum alloy plate

此外,为了定量研究声场与光源直径之间的关系,使用3 dB波束宽度对纵波声场进行描述。3 dB波束宽度原本是雷达中用来衡量天线方向图胖瘦的指标,定义为主瓣功率下降到1/2处的两个方向的夹角,也可以用来评价超声声场宽度<sup>[18]</sup>。计算得到厚度为5 mm、10 mm、15 mm在各直径光源激励下的纵波波束宽度,记录于表2,并将表2中的数据绘制成曲线,如图10所示。从图中可以看出,不同厚度铝合金板的纵波声场

表2 一次纵波波束宽度

Table 2 Beam width of primary longitudinal wave

		Thickness of metal aluminum plate		
		5 mm	10 mm	15 mm
Light source diameter	1 mm	103	85	67
	2 mm	57	46	16
	3 mm	46	27	10
	4 mm	40	17	9
	5 mm	51	20	14
	6 mm	51	35	25

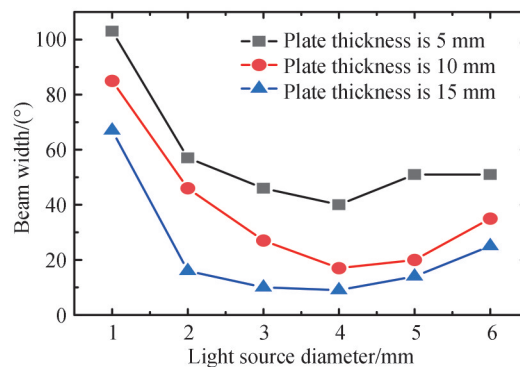


图10 不同厚度铝合金板的纵波声束宽度

Fig.10 Longitudinal wave beam width of aluminum alloy plates with different thickness

都呈现出先减小后增大的趋势,与图7所得的结论一致。此外,可以发现当光源直径 $a=1\text{ mm}$ 时,波束宽度最大,继续增大光源,波束宽度缓慢上升,与受热弹机制影响的分析相吻合。

### 3.3 横波声场指向性分析

图11为5 mm铝合金板中的激光超声一次横波指向性图,同样,使用3 dB波束宽度对横波声场分布进行评估,记录于表3,将表3结果绘制成曲线,如图12所示。观察声场分布与光源直径之间的关系,当板厚 $h=5\text{ mm}$ 、光源直径 $a=1\text{ mm}$ 时,由于光源直径小,可以将其看成是理想点源,横波幅值主要分布 $-25^\circ\sim-60^\circ$ 和 $-25^\circ\sim-60^\circ$ 范围内,此时在 $\pm 45^\circ$ 位置处横波指向性最好,与式(4)的理论相吻合;随着光源直径的增加,破坏了理想点源三个相等正交力偶极子的分布平衡,横波能量开始向法线方向移动,在 $a=2\text{ mm}$ 时,有一部分能量离开 $\pm 45^\circ$ 方向而向法线方向扩散,使得波束变窄,如图11(b)和图12黑色曲线所示,而在 $a=3\text{ mm}$ 时已经出现了 $0^\circ$ 横波,如图11(c)所示,且 $\pm 45^\circ$ 处的横波幅值变小、波束变窄;继续增大光源直径, $0^\circ$ 横波波束变窄;当光源直径到达5 mm时,横波能量又开始向两边移动,这是由于光源能量分布不均匀而受到热弹效应的影响。此外,实验发现,不同厚度的试件出现 $0^\circ$ 横波所需要的光源直径不同,如图11(g)、(h),板厚为10 mm、15 mm的 $0^\circ$ 横波在分别在 $a=5\text{ mm}$ 、 $6\text{ mm}$ 时出现。

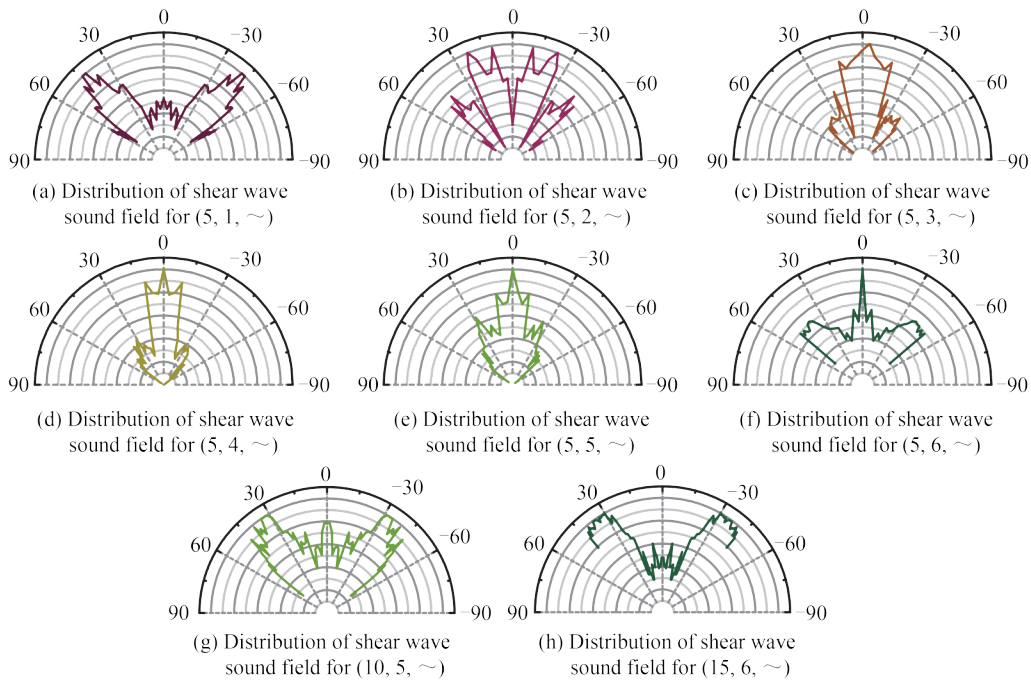


图11 铝合金板的横波声场分布

Fig.11 Transverse wave sound field distribution of aluminum alloy plate

表3 一次横波波束宽度

Table 3 Beam width of primary transverse wave

		Thickness of metal aluminum plate		
		5 mm	10 mm	15 mm
Light source diameter	1 mm	38	10.5	9
	2 mm	15.5	59.2	29.3
	3 mm	32.7	67.4	28
	4 mm	33.7	68	23
	5 mm	43.1	42	23.7
	6 mm	44	41.4	24.7



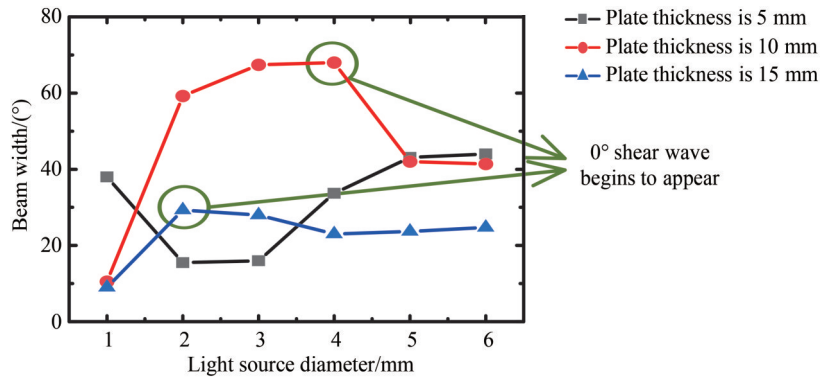


图 12 不同厚度铝合金板的横波声场宽度

Fig.12 Transverse wave beam width of aluminum alloy plates with different thickness

## 4 结论

本文研究了不同条件下的激光超声声场分布情况。一方面,在现有理论上对激光超声各次回波到达时间与激励光源直径之间的关系表达式进行了校正,通过激光超声检测装置采集不同直径光源激励下的激光超声信号,提取各次回波到达时间,排除波形混叠的影响,将实验值与理论值对比,发现最大误差不超过  $0.1 \mu\text{s}$ 。这对于材料内部缺陷的检测是很有意义的,若内部缺陷与大直径的激励源处于同一轴线,则通过回波到达时间可以很容易获取到内部缺陷的尺寸与深度信息。另一方面,分析了一次纵波和一次横波的指向性,指向性图表明,直径  $\leq 1 \text{ mm}$  的激励源可以产生指向性较好的横波声场,而增大激励源直径,纵波声场指向性变好,但当直径增加到一定程度,两者声场都会受到热弹效应的影响而向两边扩散。

本研究可以为激光超声检测技术在缺陷检测、声场选择与重建方面提供理论和技术参考。在研究中发现还有很多影响声场重建的问题需要解决,如激励光源与被检材料表面的夹角、被检材料的厚度、材料平整度以及表面约束层等,将是后期研究的内容。

### 参考文献

- [1] YUAN Jiuxin, QIN Xunpeng. Research progress of laser ultrasonic nondestructive testing technology [J]. Surface Engineering & Remanufacturing, 2019, 19(1): 30-34+42.  
袁久鑫,秦训鹏.激光超声无损检测技术研究进展[J].表面工程与再制造,2019,19(1):30-34+42.
- [2] MENG W R, ZHOU Z G. Non-contact detection of debonding defects in a steel-lead adhesive structure using laser ultrasonic technology[J]. Lasers in Engineering, 2018,41(4-6):373-392.
- [3] ZHANG Y, WANG X, YANG Q, et al. Research on epoxy resin curing monitoring using laser ultrasonic [J]. Measurement, 2020,158: 1-10.
- [4] CHEN Y N, LV J C, ZHANG Y Y, et al. Laser ultrasonic monitoring of reversible/irreversible modification of a real crack under photothermal loading[J]. Structural Health Monitoring, 2020,20(1): 173-187.
- [5] LI M M, ALEXEY M L, SHEN Z H, et al. Monitoring of thermal aging of aluminum alloy via nonlinear propagation of acoustic pulses generated and detected by lasers[J]. Applied Sciences, 2019,9(6): 1191.
- [6] SUBHRA M, ABGIJIT M, NITHIN V G, et al. Corrosion monitoring in steel bars using Laser ultrasonic guided waves and advanced signal processing[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021,149: 1-19.
- [7] LI F Z, LUO Y. Total focusing method damage imaging in frequency domain using laser-ultrasonic lamb wave based on time-domain filtering in multi-band[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2021,34(3): 404-424.
- [8] ZHONG Hua, SUN Kaihua, SUN Ming, et al. Simulation analysis of multi-mode synthetic aperture focusing technique based on laser ultrasound[J]. Journal of Applied Acoustics, 2021,41(4): 535-547.  
钟华,孙凯华,孙铭,等.激光超声的多模式合成孔径聚焦成像仿真分析[J].应用声学,2021,41(4): 535-547.
- [9] SAKAMOTO J M S, TITTMANN B R, BABA A, et al. Directivity measurements in aluminum using a laser ultrasonics system[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2011,278(1): 1-4.
- [10] HUTCHINS D A, DEWHURST R J, PALMER S B. Directivity patterns of laser-generated ultrasound in aluminum[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1981,70(5): 233-240.
- [11] MA Jian, ZHAO Yang, ZHANG Zhenzhen, et al. A scoustic field directivity of longitudinal wave generated by oblique laser based on combustion wave[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016,28(2):25-29.  
马健,赵扬,张振振,等.斜入射激光支持燃烧波时纵波声场的指向性[J].强激光与粒子束,2016,28(2):25-29.

- [12] ZHOU Hang, ZHANG Bin, FENG Qibo, et al. Numerical study on defect detection by ring light source generated ultrasonic[J]. Laser Technology, 2021,45(2):168-173.  
周航,张斌,冯其波,等.环形光源激发超声进行缺陷检测的数值研究[J].激光技术,2021,45(2):168-173.
- [13] YI D C, PEI C X, LIU T H, et al. Inspection of cracks with focused angle beam laser ultrasonic wave[J]. Applied Acoustics,2019,145:1-6.
- [14] YAO D, QIANG H F, WANG D, et al. Laser array line source with adjustable period used for LGUS chemical corrosion detection[J]. Journal of Saudi Chemical Society,2022,26(4): 1-5.
- [15] SUI Hao, GAO Xiaorong, LUO Lin, et al. Finite element simulation and experiment on interaction of surface wave excited by laser point or line source with rail defects[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019,56(8):158-166.  
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):158-166.
- [16] SCHMIEDER F, BUTTNER L, CZARSKA J. Adaptive laser-induced ultrasound generation using a micro-mirror array spatial light modulator[J]. Optics Express,2016,24(20): 22536-22543.
- [17] DRAIN L E. Laser ultrasonics techniques and applications[M].CRC Press, 2019:237-272.
- [18] NIU Miao, WU Delin, YAO Lei, et al. Study on calibration of directivity of ultrasonic stress transducer[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2022, 44(3):422-425.  
牛淼,吴德林,姚磊,等.超声应力换能器指向性校准方法研究[J].压电与声光,2022,44(3):422-425.

## Research on Directivity of Laser Ultrasonic Sound Field Based on Transmission Method

CHAI Huaqi, CHEN Youxing, WANG Zhaoba, GUO Xing, WANG Jian, ZHAO Xia  
(Faculty of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Laser ultrasonic nondestructive testing technology has become a research hotspot due to its advantages of non-contact, wide frequency, and multi-mode. However, it is also because of its wide-band and multi-mode characteristics that the technology is difficult to identify and extract characteristic signals and determine the receiving position in practical applications. Especially when it comes to the test piece with a complex shape, the generated ultrasonic wave is reflected in the test piece for many times, which increases the difficulty of testing and seriously affects the practical application of this technology. In addition, in order to facilitate the research, the excitation light source is often regarded as an ideal point source, however, the size of the light source is one of the important factors in the actual measurement process. On the basis of previous studies, 1060 aluminum alloy plates with three thicknesses of 5 mm, 10 mm, and 15 mm are taken as the research objects in this paper, and the light source diameters of 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm and 6 mm are respectively set to excite the aluminum alloy plates. The Michelson interferometer scans the back of the plates to receive signals. Firstly, the arrival time and amplitude of each echo are obtained from the experimental A-scan data. By analyzing the arrival time of each echo, the echo propagation path under the excitation of light sources with different diameters is derived, and the relationship between the arrival time of each echo of laser ultrasound and the diameter of the excitation light source is given. The directivity formula of ideal point source given by HUTCHINS D A et al. is analyzed, and on this basis, the directivity diagram of laser ultrasonic sound field in polar coordinate system is drawn by using the amplitude of primary longitudinal wave and primary transverse wave excited by light sources with different diameters, from which the law of the directivity of sound field changing with the diameter of the excitation light source is analyzed. The results show that as the detection laser moves away from the center, the amplitude of the longitudinal wave gradually decreases, and then it is submerged in the transverse wave. The arrival time of the longitudinal wave is difficult to extract, and the arrival time of the transverse wave will move forward, deviating from the theoretical arrival time. However, if the influence of waveform aliasing is ignored, the maximum error between the experimental value and the theoretical value of each echo arrival time spread formula given in this paper is not more than 0.1  $\mu\text{s}$ . In addition, by analyzing the amplitude distribution of the primary longitudinal wave and the primary shear wave, it can be seen that an excitation source with a diameter of  $a \leq 1$  mm can generate a shear wave sound

field with good directivity near  $\pm 45^\circ$ , and the longitudinal wave has a considerable amplitude in almost all directions. With the increase of the diameter of the excitation light source, the sound beam of the longitudinal wave sound field becomes narrower and the directivity becomes better, while the shear wave energy gradually moves to the normal direction away from  $\pm 45^\circ$ . However, when the diameter increases to a certain extent, the acoustic fields of both will be affected by the thermoelastic effect. In the longitudinal wave directivity diagram, there are obvious small side lobes around  $\pm 30^\circ \sim \pm 60^\circ$ , and the energy of the shear wave concentrated in the normal direction will diffuse to both sides. The research results of this paper show that the diameter of the excitation light source is a non negligible factor for the study of the distribution of laser ultrasonic sound field. In practical application, the appropriate diameter of the light source should be selected according to different detection needs.

**Key words:** Laser ultrasound; Propagation path; Directivity; Transmission method; Light source diameter; 1060 Aluminum alloy plate

**OCIS Codes:** 140.3460; 040.1880; 140.3540; 140.5560