

模拟裂纹闭合的激光超声实验研究

郑杰¹, 沈中华², 倪辰荫^{1*}

¹南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;

²南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094

摘要 基于激光激发/检测的非线性激光超声裂纹检测技术的核心在于,使用机械/激光辐照的方式在样品/裂纹上施加载荷,并使裂纹实现周期性开合。但真实裂纹的形貌复杂、裂纹壁粗糙等因素都会对结果产生影响。针对这一问题,用一黑玻璃平面与一平凸透镜的凸面模拟两裂纹壁,通过改变两者之间的距离模拟真实裂纹在载荷施加时的闭合过程。采用脉冲点激光源作为超声激发源,在黑玻璃中激发多模态的超声波,用激光测振仪探测超声,定量推进黑玻璃模拟裂纹的闭合过程,记录并研究不同推进距离下各模态信号峰峰值的变化。实验结果表明:在黑玻璃和平凸透镜完全不接触的状态下推动黑玻璃,随着黑玻璃推进距离的增大,黑玻璃与平凸透镜之间的挤压力度增大,直达纵波信号峰峰值和直达横波信号峰峰值呈现增大的趋势;在黑玻璃与平凸透镜挤压力度较小时,纵波转横波的模式转换信号峰峰值先增大后减小,而反射纵波信号峰峰值有减小的趋势。

关键词 测量; 激光超声; 裂纹闭合; 人工裂纹; 超声波

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1212003

Experimental Study on Simulated Crack Closure Using Laser Ultrasonic

Zheng Jie¹, Shen Zhonghua², Ni Chenyin^{1*}

¹School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

²School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract The core of the nonlinear laser ultrasonic crack detection technology based on laser excitation/detection lies in the fact that it makes the crack to be periodically opened and closed by using mechanical/laser irradiation to apply a load on the sample/crack. However, many factors such as the complex crack morphology and crack wall roughness affect the results. Aiming at this problem, a black glass plane and a convex surface of a plano-convex lens are used to simulate crack walls, by changing the relative position between the black glass and the lens to simulate the real crack closure process. The pulse point laser source is used as the ultrasonic excitation source to excite the ultrasonic wave on the black glass surface, the ultrasonic wave is detected by the laser vibrometer to quantitatively promote the closure process of the black glass simulated crack, and the peak-to-peak value of each modal signal under different push distances is recorded. The experimental results show that the black glass is pushed in a state where the black glass and the convex lens are not in contact at all. With the increase of the black glass push distance, the pressing force between the black glass and the plano-convex lens increases, and the peak-to-peak values of the direct longitudinal wave signal and transverse wave signal have a tendency to become larger. When the pressing force between the black glass and the plano-convex lens is small, the peak-to-peak value of the mode-transition signal of the longitudinal wave to the transverse wave first increases and then decreases, and the peak-to-peak value of the reflected longitudinal wave signal decreases.

Key words measurement; laser ultrasonic; crack closure; artificial crack; ultrasonic wave

OCIS codes 280.3375; 120.4290; 110.7170

1 引 言

随着当今时代工业水平的迅猛发展,人们对工

件能够长期在高温高压等恶劣环境下工作的要求越来越高。因为工件长期在恶劣环境下工作,所以工件本身极易产生缺陷。若工件产生了微小缺陷却未

收稿日期: 2019-07-09; 修回日期: 2019-07-25; 录用日期: 2019-08-08

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61405093)、国家自然科学基金(61975080)、江苏省自然科学基金青年科学基金(BK20140771)

* E-mail: chenyin.ni@njust.edu.cn

及时地加以检测修复,那么微小缺陷就会不断生长,最终致使工件断裂。因此,对工件进行无损检测^[1-3]是工业发展必不可少的技术之一。激光超声无损检测技术具有对检测对象无损伤、可远距离进行检测、检测方式灵活多样等优点,近年来在各个领域均得到了广泛研究^[4-8]。

最早的激光超声裂纹无损检测技术使用激光在裂纹远场(几个波长之外)激发出超声波,并利用超声波与裂纹作用产生的反射信号与透射信号来确定裂纹的位置、深度等信息^[9]。非线性激光超声方法对微小裂纹有更高的敏感性和出色的信噪比,近年来受到了广泛关注。非线性激光超声裂纹检测的思路来源于传统超声领域。Buck等^[10]于1978年提出可通过对样品外部施加机械载荷的方式实现调制裂纹的目的,通过监测二次谐波判断裂纹的存在,但这种方法的外部载荷通常是施加在整个样品上,因此可能会对样品造成二次损伤。针对这一问题,Xiao等^[11]将一束长脉冲近红外激光辐照在铝表面微裂纹上对其进行光热调制,以在样品表面产生瞬时的压缩热应力,通过换能器激发的声表面波来检测微裂纹的动态闭合,实验结果表明,该方法不会对样品造成伤害,同时也可有效地区分出裂纹与其他结构缺陷。2011年,Mezil等^[12]报道了一种用全光学方法对固体材料裂纹进行非线性声学检测的方法,通过吸收来自两个频率调制的一对激光束的辐射来引发声波并在裂纹处产生非线性混频现象,基于光干涉测量法和光偏转法进行检测。该研究得到了裂纹在完全张开、部分闭合、完全闭合时混频信号幅值随加热光功率的变化关系,发现在裂纹状态发生变化时引起的声学非线性现象要强于裂纹处于完全闭合或完全张开状态时所引起的声学非线性现象。2013年Ni等^[13]对激光加热致裂纹闭合过程及超声信号随加热光功率的变化关系进行了实验研究,结果表明,随着加热光功率增大,裂纹会经历完全张开、部分闭合、完全闭合三个状态,在这三个状态中,表面波幅值先不变后逐渐增大,模式转换信号先增大后减小,表面波和模式转换信号的到达时间会随着裂纹的闭合而逐渐提前。2017年吕锦超等^[14]采用激光超声方法观测黑玻璃上的真实裂纹在光热调制下的闭合和改变,结果表明,激光加热致使裂纹的第一次闭合过程中,裂纹壁上的凸起等微结构发生了不可逆的改变,这一不可逆改变会对激光激发的各模式超声信号峰峰值产生显著影响,经过多次加热后,裂纹壁微结构的变化会趋于稳定。

2019年尤博文等^[15]使用激光超声方法对裂纹在受不同功率加热光辐照和关闭加热光自然冷却后的透射超声信号进行了实时监测,结果表明,通过对透射超声信号峰峰值变化趋势的分析,可以得到裂纹在受热闭合和冷却张开时其凸起的细节变化过程,且这种变化与裂纹的初始形貌有关。

目前,已有大量文献报道了基于激光超声无损检测技术的微裂纹研究,但是真实裂纹形貌复杂、裂纹闭合不可精确控制,以及裂纹壁粗糙等因素都会对声波信号的幅值产生影响。针对这一问题,本文用一黑玻璃平面与一平凸透镜的凸面模拟裂纹两壁,通过推进黑玻璃改变两者的相对位置,以模拟真实裂纹闭合过程。使用激光超声方法,固定激发、探测激光,进而通过移动样品实现对黑玻璃与平凸透镜接触面的扫描,记录在不同推进距离下平凸透镜平面处探测到的各模式超声信号,得到各声波信号峰峰值随推进距离的变化关系,从而对样品接触面进行成像。结果表明:在改变推进距离模拟裂纹闭合的过程中,当黑玻璃与平凸透镜未接触时,未出现透射声波信号;当黑玻璃与平凸透镜微接触时,出现纵波、横波、反射纵波,以及纵波转横波的模式转换信号,此时横波峰峰值大于纵波峰峰值,反射纵波信号峰峰值会随着直达纵波峰峰值的增大而减小,纵波转横波的模式转换信号峰峰值先增大后减小;当黑玻璃与平凸透镜紧密接触时,横波峰峰值远小于纵波峰峰值,反射纵波信号峰峰值以及纵波转横波的模式转换信号峰峰值变化趋势趋于平缓。

2 实验装置与步骤

2.1 实验装置

采用如图1所示的实验装置。将一块厚度为3 mm的黑玻璃平面和一个中心厚度为5 mm的K9玻璃材质平凸透镜的凸面贴合在一起构成人工裂纹,其中,黑玻璃可沿Y方向移动以改变黑玻璃与平凸透镜的挤压力度,平凸透镜与黑玻璃可在X-Z平面内同时移动。激发光为波长为1064 nm的脉冲激光(镭宝SGR-40 Nd:YAG脉冲激光器),脉宽约为10 ns,重复频率为5 Hz。激发光经过一个透明玻璃片分出一小部分光,这部分光反射至触发电路用来触发示波器记录数据。激发激光的很大一部分光经过透镜辐照在样品黑玻璃表面(辐照在黑玻璃表面的激发光圆形光斑直径约为2 mm)。把激光测振仪(Polytec, OFV-505)作为检测装置,探测

光经过透镜再经过小孔辐照在样品凸透镜的平面, 聚焦后的检测激光光斑直径约为 $35\ \mu\text{m}$ 。因为样品由透镜和黑玻璃构成, 所以当检测光辐照在透镜平面上时, 会有三束反射光, 分别来自透镜平面、透镜凸面和黑玻璃表面。为了避免透镜凸面和黑玻璃表

面反射光对检测结果的影响, 实验中稍微倾斜黑玻璃, 使探测光辐照在平凸透镜中心偏左位置, 并使用小孔遮挡来自透镜凸面和黑玻璃表面反射的光(图1插图)。激光测振仪与示波器(RIGOL DS4024)相连接, 信号通过 USB 传输至计算机。

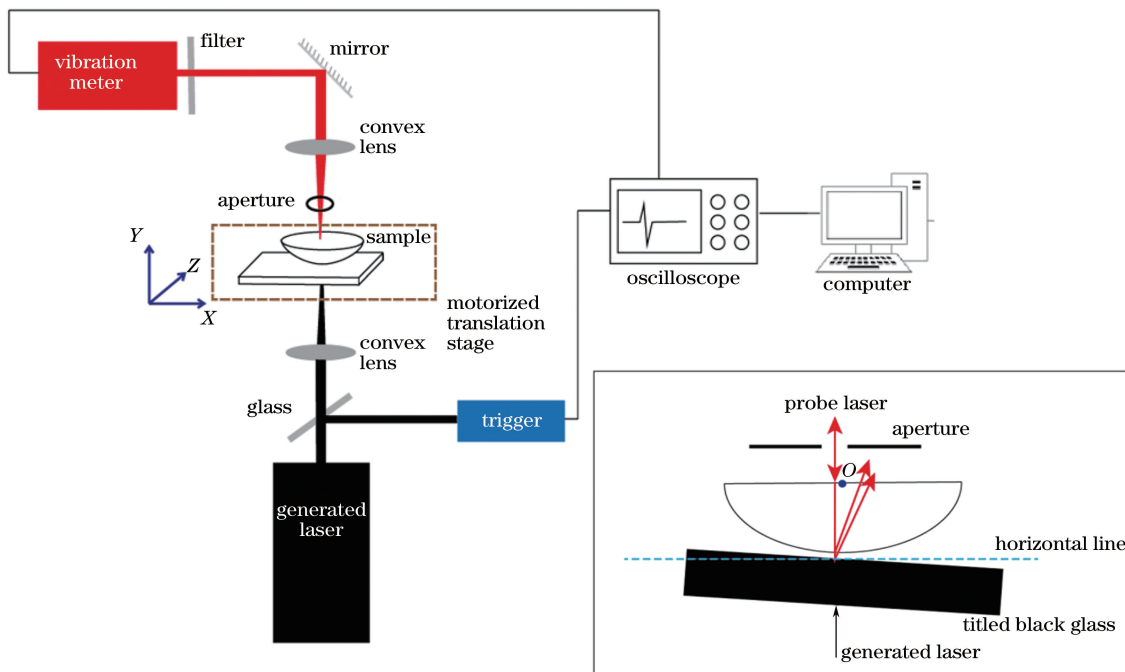


图1 实验装置示意图, 插图样品反射光示意图

Fig. 1 Diagram of experimental system. Illustration is diagram of reflected light from sample

2.2 实验方法

2.2.1 识别超声波模态

如图1插图所示, 当脉冲激光辐照在黑玻璃表面时, 黑玻璃中会激发出多种模态的超声波, 这些超声波穿过黑玻璃进入透镜后, 在透镜平面被测振仪探测。为了识别探测到的超声波信号, 首先需要知道各超声波在样品中的传播速度。

构成样品的平凸透镜材料是 K9 玻璃, K9 玻璃的泊松比 $\sigma=0.206$, 密度 $\rho=2.51 \times 10^3\ \text{kg/m}^3$, 杨氏模量 $E=82\ \text{GPa}^{[16]}$, 中心厚度为 $5\ \text{mm}$ 。已知剪切模量 $\mu = \frac{E}{2(1+\sigma)}$, $\lambda = \frac{E\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}^{[17]}$, 则该材料

中纵波波速 $V_L = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}} = 6047\ \text{m/s}$, 横波波速

$$V_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = 3679\ \text{m/s}.$$

构成样品的黑玻璃材料复杂, 因此采用时间飞行散射(TOFD)法获得各超声波信号在黑玻璃中的传播速度。首先在黑玻璃表面进行扫描, 激发光和探测光的位置如图2所示。探测光固定, 激发光以

$0.1\ \text{mm}$ 的步长按图2的黑色实心箭头所指方向移动, 共移动49步。因各模式超声信号速度不同, 扫描结果中各超声模式会形成不同斜率的直线, 其斜率表示该模式超声的波速, 扫描结果如图3所示。

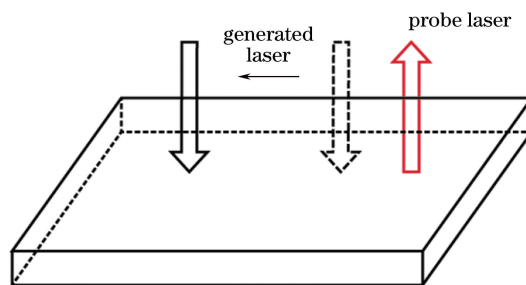


图2 TOFD法扫描路径示意图

Fig. 2 Diagram of scanning path by TOFD method

图3中横坐标为扫描距离, 纵坐标为时间, 红蓝色的直线为表面波信号R在不同接收距离下的到达时间, 绿色直线为纵波信号L在不同接收距离下的到达时间。分别计算两条直线的斜率, 可得到表面波在黑玻璃中的传播速度约为 $2900\ \text{m/s}$, 纵波在黑玻璃中的传播速度约为 $5200\ \text{m/s}$ 。因为黑玻璃的材质是普通玻璃, 将普通玻璃的泊松比 $\sigma=0.25$

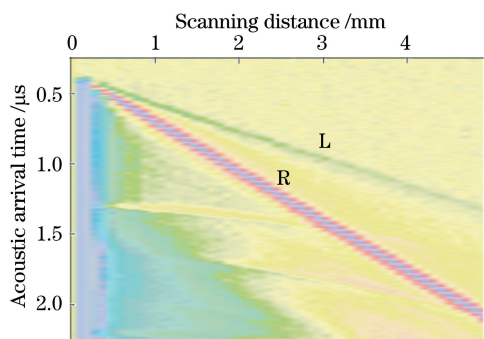


图 3 TOFD 法得到的超声信号 B 扫描图

Fig. 3 B-scan image of ultrasonic signal obtained by TOFD method

$$\text{代入横波与纵波的关系式} \left(\frac{V_T}{V_L}\right)^2 = \frac{1-2\sigma}{2 \times (1-\sigma)} \quad [18]$$

得到横波在黑玻璃中传播的速度约为 3002 m/s。

图 4 给出了对心激发、探测得到的时域波形图。在获得各模态超声波波速后,为了识别图 4 中的各声波模态,需要计算各声波模态信号到达平凸透镜平面的时间。表 1 给出了不同声波模态的到达时间,以及声波在样品中的传播路径,其中, S_g 表示黑玻璃的厚度, S_t 表示平凸透镜的中心厚度, V_{gl} 表示

纵波在黑玻璃中的传播速度, V_{tl} 表示纵波在平凸透镜中的传播速度, V_{gt} 表示横波在黑玻璃中的传播速度, V_{tt} 表示横波在平凸透镜中的传播速度。根据计算得到的声波模态的到达时间,将各声波模态在时域波形图中标注出来(图 4)。图 4 中, L 表示直达纵波信号, L-T 表示纵波转横波的模式转换信号, T 表示直达横波信号, rL 表示反射纵波信号。

时域图中各声波信号的模态均由理论计算时间

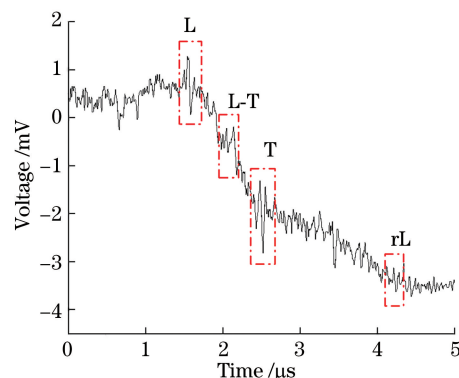


图 4 对心激发、探测得到的时域波形图

Fig. 4 Time domain waveform obtained by heterolateral excitation and detection

表 1 各模态声波信号的到达时间及其在样品中的传播路径

Table 1 Arrival time of each modal acoustic signal and propagation path in sample

Type of acoustic signal	Propagation path in sample	Signal arrival time
L		$T_L = \frac{S_g}{V_{gl}} + \frac{S_t}{V_{tl}} \approx 1.4 \mu\text{s}$
L-T		$T_{L-T} = \frac{S_g}{V_{gl}} + \frac{S_t}{V_{tt}} \approx 1.93 \mu\text{s}$
T		$T_T = \frac{S_g}{V_{gt}} + \frac{S_t}{V_{tt}} \approx 2.4 \mu\text{s}$
rL		$T_{rL} = 3 \times \left(\frac{S_g}{V_{gl}} + \frac{S_t}{V_{tl}}\right) \approx 4.2 \mu\text{s}$

与实际到达时间相吻合得到的,由于在 $3.4 \mu\text{s}$ 的实际到达时间处没有与之对应的理论时间,不能确定此处的声波模态,因此不对此进行数据分析。

2.2.2 模拟真实裂纹闭合监测

在确定超声信号模态后,对模拟裂纹闭合过程中各个模态的超声信号进行研究,具体实验步骤如下:

1) 确保探测激光光束在实验过程中一直聚焦在凸透镜平面上,并使用小孔遮挡来自透镜凸面和

黑玻璃表面的反射光,如图 1 插图所示。

2) 实现对样品接触面的一维行扫描。在黑玻璃与平凸透镜刚完全分开时向前推进黑玻璃 1 mm,确保黑玻璃与平凸透镜紧密贴合,如图 5 所示,图中 O 点为接触面中心, A 点为扫描起点, B 点为扫描终点。通过电控平移台将样品移至 A 点处,沿图中箭头方向以步长 $24 \mu\text{m}$ 进行扫描,扫描距离为 4.8 mm。

3) 对样品接触面的二维面扫描。如图 6 所示,

图中黄色圆形区域为接触面, O 为接触面中心点, A 为扫查起点, B 为扫查终点。从 A 点开始, 沿图中第一行箭头方向以步长 ΔZ 进行扫查, 扫查距离为 3 mm , 接着向下移动 ΔX , 对接触面第二行进行相同的扫查, 以此类推, 直至实现对 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 面积的扫查, 扫查点为 21×21 个。在黑玻璃与平凸透镜完全不接触的状态下扫查完一组后, 沿 Y 方向推进黑玻璃 ΔY , 再次进行第二组实验。

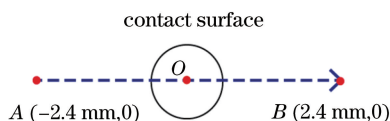


图 5 对接触面进行行扫查的路径示意图

Fig. 5 Diagram of line scanning path for contact surface

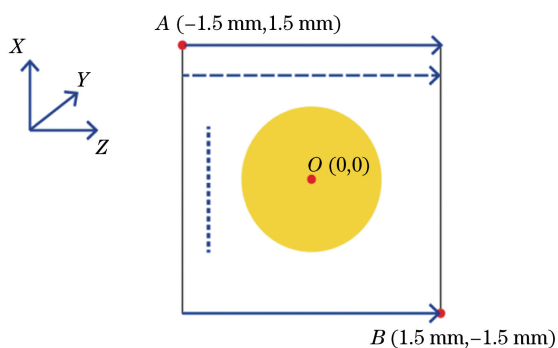


图 6 对接触面进行面扫描的路径示意图

Fig. 6 Diagram of surface scanning path for contact surface

3 实验结果

用图 1 所示的实验装置, 按 2.2.2 节所述的实验步骤进行模拟真实裂纹闭合实验, 对平凸透镜和黑玻璃的接触区域分别进行一维行扫查和二维面扫查, 实验结果如下。

3.1 对样品接触面进行一维行扫查的实验结果

如图 7 所示, 图中方形标志、圆形标志和三角形标志分别表示对应扫查点处的直达纵波峰峰值、直达横波峰峰值, 以及反射纵波峰峰值, 横轴表示与中心接触点的距离, 纵轴表示峰峰值大小。由图 7 可知, 当扫查点逐渐向接触中心靠近时, 直达纵波峰峰值、直达横波峰峰值逐渐增大, 而反射纵波峰峰值的变化趋势与直达纵波峰峰值变化趋势相反, 即当扫查点逐渐向接触中心靠近时, 反射纵波峰峰值逐渐减小。

3.2 对样品进行二维面扫查的实验结果

为了进一步分析接触面的接触情况, 按图 6 所示路径, 以步长 $\Delta X = 150\ \mu\text{m}$, $\Delta Z = 150\ \mu\text{m}$ 对接触面进行二维扫查。首先, 在黑玻璃和平凸透镜完全

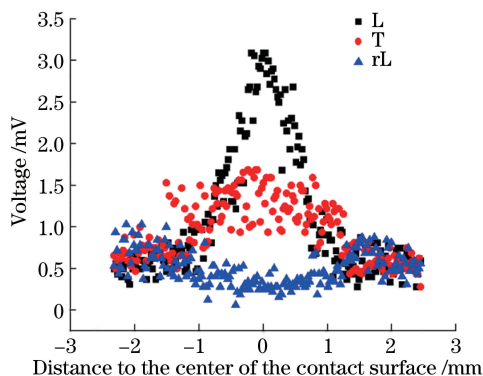


图 7 直达纵波、直达横波、反射纵波峰峰值随扫查位置的变化

Fig. 7 Peak-to-peak values of direct longitudinal wave, direct transverse wave, and reflected longitudinal wave obtained at different scanning positions

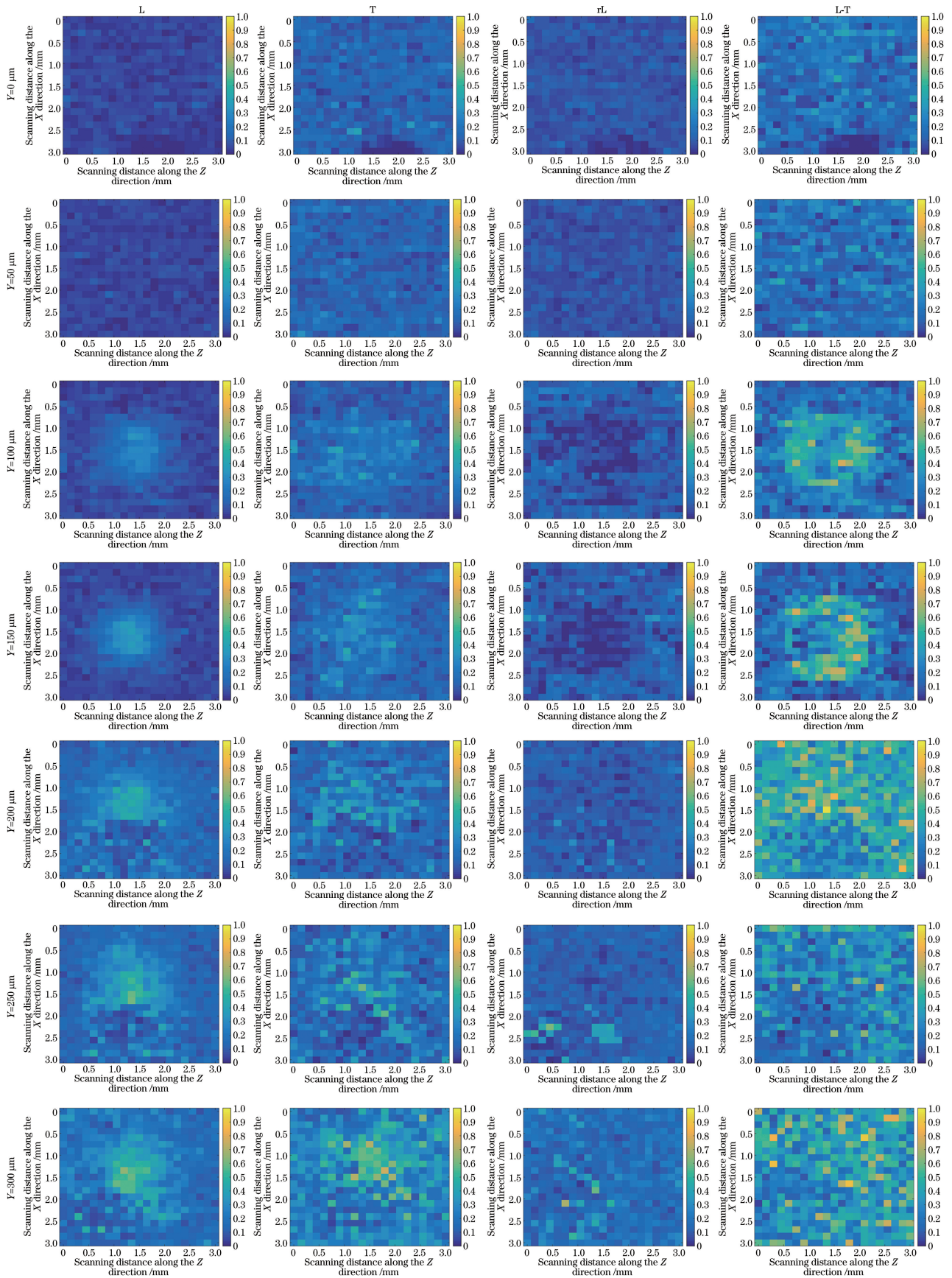
分开 ($Y = 0\ \mu\text{m}$) 时进行一次二维扫查, 扫查完一组后, 将黑玻璃向前推进 $\Delta Y = 50\ \mu\text{m}$, 进行第二次扫查, 如此共完成推进及扫查 11 次。将实验结果中的 L 信号、T 信号、rL 信号和 L-T 信号按照公式 $G^* = \frac{G - G_{\min}}{G_{\max} - G_{\min}}$ 进行归一化处理, 其中, G 代表 11 次实验结果中的每一个峰峰值, G_{\min} 代表实验中该信号的最小峰峰值, G_{\max} 代表实验中该信号的最大峰峰值。

图 8 给出了不同 Y 值对应的各模式信号峰值成像图, 其中第 1 列表示推进距离, 第 2~5 列分别代表 L 信号、T 信号、rL 信号和 L-T 信号。图 8 中, 每一幅图像的大小为 $21\ \text{pixel} \times 21\ \text{pixel}$, 横轴代表在 Z 方向的扫查距离, 纵轴代表在 X 方向的扫查距离, 每个像素的颜色代表直达纵波峰值大小, 当推进距离为 $0\ \mu\text{m}$ 和 $50\ \mu\text{m}$ 时, 分别是黑玻璃与平凸透镜没有接触和刚好接触时得到的实验结果。观察图 8 中 L 信号可以发现, 随着黑玻璃的推进, 黑玻璃与平凸透镜的接触面积在逐渐增大的同时, 直达纵波峰峰值也呈现增大趋势。

需要指出的是, 推进黑玻璃时, 随着挤压力度的增大, 安装黑玻璃和平凸透镜的装置会发生形变, 致使接触点位置发生细微变化, 测量到的这种偏移的平均值为 $300\ \mu\text{m}$, 但可以通过对数据的处理移动接触中心, 使接触中心处于扫查面积的中心位置, 如图 8 中第 2 列图所示。

实验中直达横波的 B 扫描结果如图 8 中第 3 列图所示。观察 T 信号发现, 随着黑玻璃的推进, 直达横波峰峰值增大, 但增大的幅值较 L 信号小。

对图 8 中第 2 列 (L 信号峰峰值) 和第 4 列 (rL



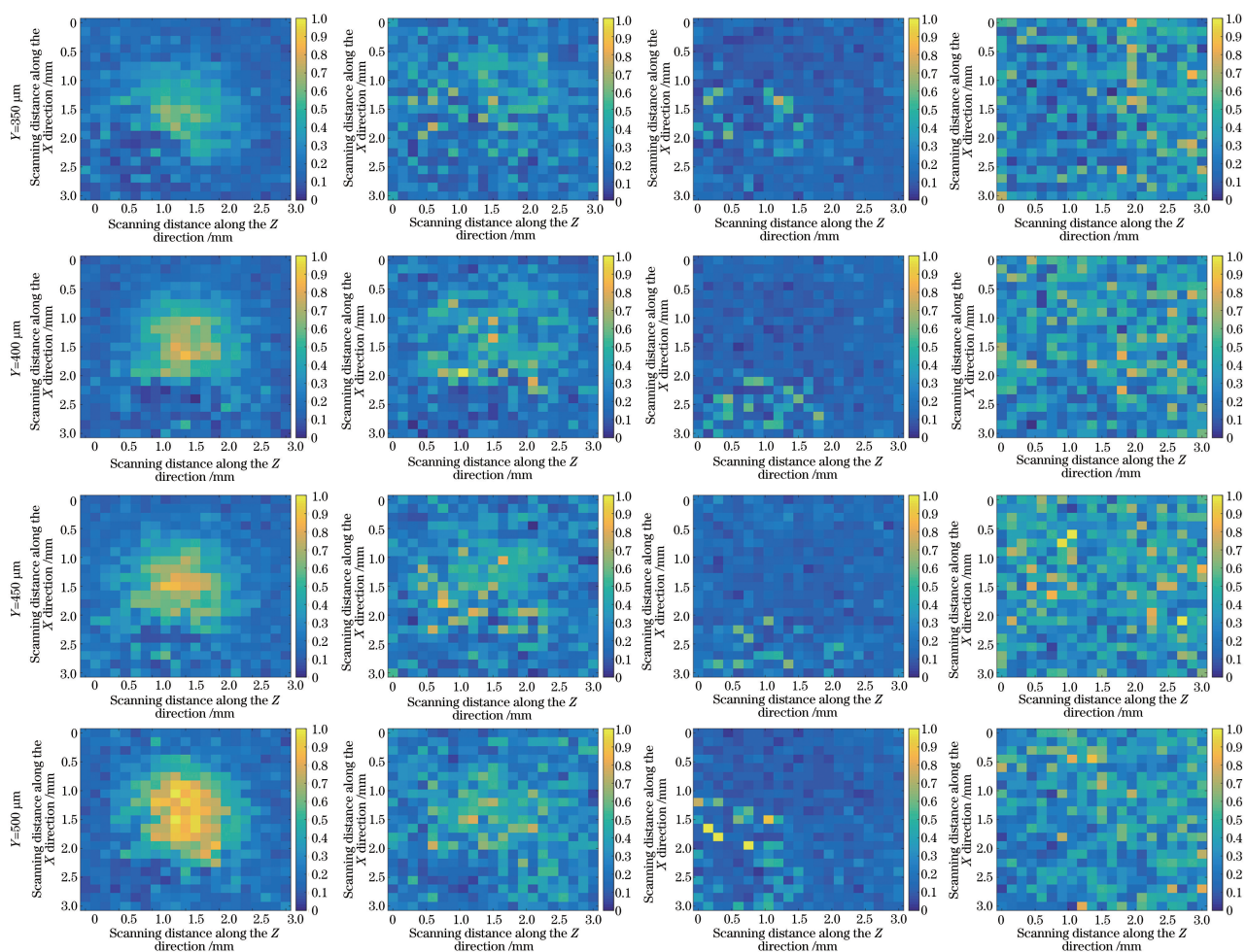


图 8 不同推进距离下各模态信号峰峰值

Fig. 8 Peak-to-peak value of each modal signal at different propulsion distances

信号峰峰值)图进行对比,在推进黑玻璃 $Y = 100 \mu\text{m}$ 和 $Y = 150 \mu\text{m}$ 时,反射纵波峰峰值随直达纵波峰峰值的增大而减小,当推进黑玻璃的距离大于 $150 \mu\text{m}$ 时,该现象消失。

对实验中纵波转横波的模式转换信号进行分析处理。由图 8 中第 5 列图可知,当黑玻璃被推进 $100 \mu\text{m}$ 和 $150 \mu\text{m}$ 时,纵波转横波的模式转换信号峰峰值呈先增大后减小的趋势。此外,当推进距离为 $100 \mu\text{m}$ 和 $150 \mu\text{m}$ 时还可以发现,在直达纵波峰峰值较小时,纵波转横波的模式转换信号峰峰值较大。当推进黑玻璃的距离大于 $150 \mu\text{m}$ 时,该现象消失。

4 分析与讨论

Ni 等^[13]将激发光与探测光分别放置于裂纹的同侧和异侧进行实验,利用激光加热致裂纹闭合,研究真实裂纹在闭合过程中各模态超声信号随加热光功率变化的动态关系,但真实裂纹形貌复杂,两壁粗

糙,在闭合过程中有很多不确定因素会对信号幅值产生影响。为此,采用一黑玻璃平面与一平凸透镜的凸面贴合来模拟裂纹壁的接触,并通过步进电机沿 Y 方向推进黑玻璃改变两者之间的相对位置来模拟真实裂纹的闭合过程。相较于之前的实验研究,该方法的优点包括:1)由于黑玻璃与平凸透镜接触面平滑,避免了真实裂纹两壁上微结构对实验结果的影响;2)与之前研究中采用的某一路径的激发探测实验方法相比,所使用的样品由黑玻璃和平凸透镜构成,由于构成样品的平凸透镜有一定的曲率半径,因此当平凸透镜与黑玻璃接触时,由接触中心沿平凸透镜半径方向的接触会逐渐变小,这一变化可模拟真实裂纹的不同接触状态。同时,由于对样本进行了二维扫查,因此可以得到更为全面的信息。

分别对样本接触面进行了行扫查和面扫查,从行扫查结果可知,扫查点越接近接触中心,则透射纵波信号(L)峰峰值越大,这说明黑玻璃与平凸透镜挤压得越紧密,则穿过接触点从激发点到达探测点

的纵波信号(L)越强。对于真实裂纹来说,两裂纹壁接触越紧密,可探测到的L信号越大,这与已有的对真实裂纹的报道相吻合^[12]。在扫查点逐渐接近接触中心时,透射横波信号(T)峰峰值呈现增大趋势,最大峰峰值(1.7 mV)与未接触时峰峰值(0.75 mV)的差值为0.95 mV,而透射纵波信号(L)最大峰峰值(3 mV)与未接触时的峰峰值(0.75 mV)的差值为2.25 mV,L信号峰峰值的差值约为T信号峰峰值差值的2.4倍,所以相较于透射纵波信号(L),透射横波信号(T)的变化趋势较为平缓。此外,从图7中还可以发现,横波信号变化的宽度大于纵波。以上关于横波和纵波在幅值和宽度范围方面的区别,主要是因为横波、纵波质点振动方向和声波传播方向不同。对于对心激发探测的方法来说,纵波、横波分别主要包含离面位移和面内位移。相比之下,离面位移对于裂纹壁之间的距离更加敏感,因此纵波在两裂纹壁处于不同接触状态时,其峰峰值变化较横波信号大,而面内位移对于已接触区域的大小较为敏感,因此横波信号较纵波可更好地体现出对已接触区域的检测。

观察 rL 信号,随着扫查点逐渐接近接触中心,L信号峰峰值与 rL 信号峰峰值的变化趋势相反。需要指出的是,反射纵波的传播路径有两种可能,如图9所示。如果反射纵波的传播途径如图9(b)所示,那么随着裂纹闭合越来越紧密,反射纵波信号峰峰值的变化趋势应该与直达纵波信号峰峰值一致,但实验结果显示,反射纵波信号峰峰值的变化趋势与直达纵波信号峰峰值相反,由此可排除第二种可能。用 E_{total} 表示激发光激发出的超声波总能量,用 E_T 表示声波传播至界面处透过的声波能量,用 E_R 表示声波传播至界面处反射的声波能量,用 E_{other} 来表示散射、被吸收的声波能量,则有 $E_{total} = E_T + E_R + E_{other}$,因为总能量是不变的,所以当 E_T 增大时, E_R 减小。当脉冲激光照射在黑玻璃表面激发出纵波时,在黑玻璃与平凸透镜接触面处,透射的纵波越多,反射回来的纵波就越少。此外,观察图7中三种模式的信号可知,在距离接触中心1 mm位置处三种模式的信号均被探测到,而若黑玻璃与平凸透镜之间存在缝隙(未接触),则无法探测到信号。由此可知,在距离接触中心1 mm位置处两者开始接触。

此外,从图8中可以看出,随着裂纹的闭合,接触区域内直达纵波信号峰峰值和直达横波信号峰峰值均呈现增大趋势,反射纵波信号峰峰值呈现减小

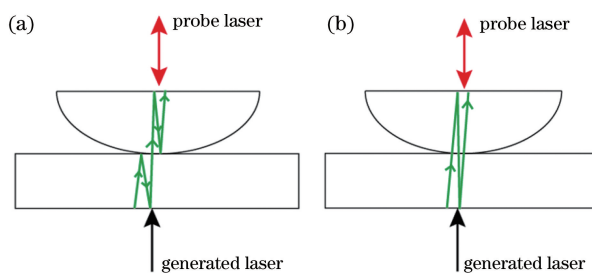


图9 反射纵波的传播途径。(a)在接触面反射后被探测;(b)在平凸透镜平面反射后被探测

Fig. 9 Propagation paths of reflected longitudinal wave.

(a) Detection after contact surface reflection;

(b) detection after plano-convex lens plane reflection

趋势,纵波转横波的模式转换信号峰峰值呈现先增大后减小的趋势。图8中L信号峰峰值结果显示,当黑玻璃推进距离 $100 \leq Y \leq 150 \mu\text{m}$ 时,裂纹两壁开始接触,接触面积随推进距离的增大而增加,且在接触中心区域L信号峰峰值大于四周。当黑玻璃的推进距离 $Y \geq 200 \mu\text{m}$ 时,裂纹壁间接触面积已经大于图8中所表示的面积。选取图8右上角1~3行19~21列的9个峰峰值并取平均,得到如图10所示的纵波信号峰峰值随Y方向推进距离变化的曲线。根据估算,在 $Y = 150 \mu\text{m}$ 的结果中,这9个点均未进入接触区域;而在 $Y = 200 \mu\text{m}$ 的结果中,这9个点已全部进入接触区域。这说明该数据选取方式是合理的。通过计算得到每一次实验测量数据的误差,并在图10中用误差棒的形式表示。因为右上角处的峰峰值可代表整个扫查面积的最外沿,因此可通过比较右上角9个峰峰值的平均值在不同推进距离下的幅值变化得到裂纹接触面积和扫查面积的关系。当 $Y < 200 \mu\text{m}$ 时,该点透射纵波峰峰

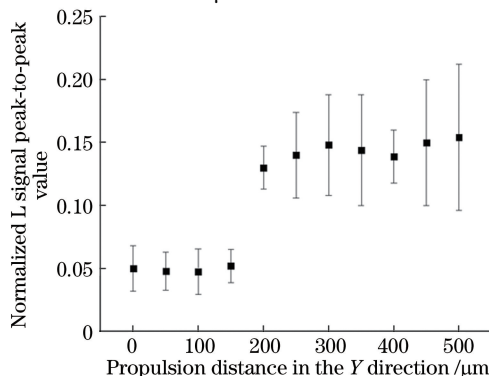


图10 图8中右上角9个纵波峰峰值的平均值随推进距离的变化

Fig. 10 Average value of peak-to-peak values of longitudinal waves of nine points varies with propulsion distance in upper right corner of Fig. 8

峰值 ≥ 0.12 。由此可以证明,当 $Y \geq 200 \mu\text{m}$ 时,裂纹的实际接触面积已超出了实验的扫查面积范围。

图8中第3列是对接触面进行面扫查得到的T信号峰峰值的实验结果,T信号呈现出的颜色对比度远没有L信号高,由于像素颜色表示的是峰值大小,这也再次说明由于横波振动方向与传播方向垂直,导致L信号峰峰值的变化强于T信号。图8中L信号与rL信号的对比实验结果,不仅再次验证了rL信号随着L信号逐渐增大而减小的结论,而且还可以看出,在挤压力度较小(推进距离 $Y = 100, 150 \mu\text{m}$)时,rL信号随L信号的增大而减小的现象较为明显,但当挤压力度较大(推进距离 $Y = 200 \mu\text{m}$)时,该现象消失。这主要是因为当推进距离 $Y < 200 \mu\text{m}$ 时,裂纹两壁间接触面积小于图8中所表示的 $3 \text{mm} \times 3 \text{mm}$ 区域,而当 $Y \geq 200 \mu\text{m}$ 时,裂纹壁间接触面积已经大于图8中所表示的面积,因此无法再看到该现象。由图8中L信号峰峰值与L-T信号峰峰值的对比结果可知,当裂纹壁的接触面积小于扫查面积(即 $Y = 100, 150 \mu\text{m}$)时,L信号的边缘区域处恰是L-T信号的最大幅值区域,而在L信号出现的区域内,L-T信号峰峰值随着L信号峰峰值的增大而减小。这一结果意味着,L-T信号比L信号对接触状态的变化更为敏感,即在真实裂纹中,当裂纹的状态发生变化时,纵波转横波的模式转换信号比直达纵波信号要更早地探知到裂纹状态的改变,这与已有的对真实裂纹的实验研究结果吻合。当推进黑玻璃 $Y = 200 \mu\text{m}$ 时,黑玻璃与平凸透镜的接触面边缘会继续挤压,从而使两者间的接触面积超过扫查面积,导致L-T信号峰峰值的包络超过扫查面积,从而无法继续观察到该现象。

5 总 结

利用一黑玻璃平面与一平凸透镜的凸面模拟裂纹壁,通过改变两者的相对位置来模拟真实裂纹的闭合过程,并采用激光超声方法研究模拟裂纹闭合过程中各模态信号峰峰值的变化。对接触面主要进行了两种扫查研究,即行扫查和面扫查。研究结果表明,利用所描述的方法可以实现对人工裂纹不同接触状态下的监测,并可观察到在不同接触状态下各模态信号峰峰值的变化趋势。这些现象与已有的对真实裂纹的研究相符合,是对已有研究的有力证明。此外,该研究为深入了解激光超声裂纹的检测方法提供了有用的信息,同时也提供了研究裂纹的新思路与方法。

参 考 文 献

- [1] Bates D, Smith G, Lu D, *et al.* Rapid thermal non-destructive testing of aircraft components [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2000, 31(3): 175-185.
- [2] Jhang K Y. Nonlinear ultrasonic techniques for nondestructive assessment of micro damage in material: a review [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2009, 10(1): 123-135.
- [3] Sun M J, Liu T, Cheng X Z, *et al.* Nondestructive detecting method for metal material defects based on multimodal signals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(16): 167802.
孙明健, 刘婷, 程星振, 等. 基于多模态信号的金属材料缺陷无损检测方法 [J]. *物理学报*, 2016, 65(16): 167802.
- [4] Wang H C, Fleming S, Lee Y C, *et al.* Laser ultrasonic surface wave dispersion technique for non-destructive evaluation of human dental enamel [J]. *Optics Express*, 2009, 17(18): 15592-15607.
- [5] Lomonosov A, Mayer A P, Hess P. 3. Laser-based surface acoustic waves in materials science [M] // Levy M, Bass H E, Stern R. *Experimental methods in the physical sciences. Modern acoustical techniques for the measurement of mechanical properties*. USA: Academic Press, 2001, 39: 65-134.
- [6] Lomonosov A M, Hess P. Nonlinear surface acoustic waves: realization of solitary pulses and fracture [J]. *Ultrasonics*, 2008, 48(6/7): 482-487.
- [7] An Y K, Song H, Sohn H. Wireless ultrasonic wavefield imaging via laser for hidden damage detection inside a steel box girder bridge [J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(9): 095019.
- [8] Yang C, Duan Z H, Ma H T, *et al.* Microwave nondestructive testing of metal pipe surface defects [J]. *Nondestructive Testing*, 2013, 35(3): 34-37, 44.
杨晨, 段滋华, 马海桃, 等. 金属管道表面缺陷微波无损检测 [J]. *无损检测*, 2013, 35(3): 34-37, 44.
- [9] Cooper J A, Dewhurst R J, Palmer S B. Characterization of surface-breaking defects in metals with the use of laser-generated ultrasound [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1986, 320(1554): 319-328.
- [10] Buck O, Morris W L, Richardson J M. Acoustic harmonic generation at unbonded interfaces and fatigue cracks [J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 33(5): 371-373.

- [11] Xiao H, Nagy P B. Enhanced ultrasonic detection of fatigue cracks by laser-induced crack closure [J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 83 (12): 7453-7460.
- [12] Mezil S, Chigarev N, Tournat V, *et al.* All-optical probing of the nonlinear acoustics of a crack [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(17): 3449-3451.
- [13] Ni C, Chigarev N, Tournat V, *et al.* Probing of laser-induced crack closure by pulsed laser-generated acoustic waves [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(1): 014906.
- [14] Lü J C, Shen Z H, Vitalyi G, *et al.* Laser ultrasonic probing of crack closure and modification caused by laser irradiation [J]. *Nondestructive Testing*, 2017, 39(6): 19-23, 78.
吕锦超, 沈中华, Vitalyi G, 等. 光致裂纹闭合及改变的激光超声监测 [J]. *无损检测*, 2017, 39(6): 19-23, 78.
- [15] You B W, Ni C Y, Shen Z H. Laser ultrasonic real-time monitoring of photothermal modulation crack closure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0204009.
尤博文, 倪辰荫, 沈中华. 光热调制裂纹闭合的激光超声实时监测 [J]. *中国激光*, 2019, 46 (2): 0204009.
- [16] Luo F, Du X W, Sun C W. Near-infrared laser beam diameter effect on damage threshold in K9 glass [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002, 22(1): 61-65.
罗福, 杜祥琬, 孙承纬. 光斑尺寸对 K9 玻璃近红外激光损伤阈值的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2002, 22 (1): 61-65.
- [17] Shen Z H, Yuan L, Zhang H C, *et al.* Laser ultrasound in solids [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2015: 11-15.
沈中华, 袁玲, 张宏超, 等. 固体中的激光超声 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015: 11-25.
- [18] Dong L M. Study on nondestructive evaluation of residual stress on welded metal by laser ultrasonic technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012: 55-59.
董利明. 金属焊接残余应力的激光超声无损检测研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012: 55-59.