

光热调制裂纹闭合可逆/不可逆变化的激光超声监测

张月影¹, 倪辰荫^{1*}, 沈中华²

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 非线性激光超声裂纹检测技术的核心是使用机械/光热加载的方式在裂纹上施加载荷,使裂纹实现周期性开合。针对关于这一裂纹闭合机理研究较少的问题,在加热激光辐照区域内,使用时域激光超声方法对真实微裂纹的闭合响应及裂纹闭合引起的裂纹局部塑性/弹性微观变化进行研究。通过分析各模态超声波在裂纹不同闭合状态下的峰峰值、到达时间变化,可以获得裂纹闭合的相关信息。结果表明,信号峰峰值和到达时间的变化过程与裂纹闭合出现的早晚有关,裂纹闭合出现早晚的顺序与裂纹宽度对应。

关键词 测量; 激光超声; 无损检测; 光热调制; 声表面波

中图分类号 TG115.28

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1204006

Laser Ultrasonic Monitoring of Reversible/Irreversible Changes in Photo-Thermal Modulation Crack Closure

Zhang Yueying¹, Ni Chenyin^{1*}, Shen Zhonghua²

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

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

Abstract The core of nonlinear laser ultrasonic crack detection technology involves the use of a mechanical/photo-thermal loading method to induce loading on cracks, thereby enabling periodic opening and closing of these cracks. The crack closure mechanism has rarely been investigated. To address this issue, in the heated laser irradiation area, the time domain laser ultrasonic method is used to study the closing response of real micro-cracks. The local plastic/elastic microscopic changes induced by the crack closure are also investigated. Analysis of the changes in the peak-peak value and arrival time of each ultrasonic mode in different crack closing states yield pertinent information about the crack closure process. The results reveal that the change process of the signal peak-peak value and arrival time is related to the time of crack closure, and the sequence of crack closure corresponds to the crack width.

Key words measurement; laser ultrasonic; non-destructive detection; photo-thermal modulation; surface acoustic wave

OCIS codes 120.4290; 280.3375; 110.7170

1 引 言

随着工业水平的不断提高,高负载的生产环境对材料质量的要求越来越高。然而,材料长期在这种生产环境下工作可能会产生各种缺陷。为了保证材料在生产过程中的安全性,人们需要对材料进行无损检测。相比于其他传统的检测技术,激光超声

检测技术因具有可远程激发/探测、激发/探测方式灵活、无需耦合剂等优点,成为了目前无损检测领域中的研究热点之一,在实验研究^[1-2]和数值模拟^[2-3]等方面都已经取得了一定的成果。

裂纹检测是无损检测的一个重要方面,激光超声裂纹检测技术是裂纹检测方向的新兴研究热点之一^[4]。线性激光超声裂纹检测方法通过探测超声波

收稿日期: 2020-05-19; 修回日期: 2020-07-03; 录用日期: 2020-07-28

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

*E-mail: chenying@njjust.edu.cn

与裂纹作用产生的反射和散射信号来确定裂纹的存在,然而若裂纹的开口宽度进一步减小,表面波将直接穿过裂纹而不发生反射与散射,则其无法对这类微裂纹进行有效的检测。非线性激光超声裂纹检测方法利用裂纹闭合状态的变化及由此引起的各种非线性声学现象对开口宽度很小的真实微裂纹进行检测,相比于传统的线性激光超声检测方法,其突出的优点是可以大幅度地改善和提高对真实微裂纹的检测灵敏度。

Buck 等^[5]于 1978 年提出,在样品外部施加机械载荷可以实现调制裂纹的目的,可以通过二次谐波来监测裂纹的存在。1998 年,Xiao 等^[6]将脉冲激光辐照在样品表面上,样品表面上产生了暂时的压缩热应力,通过换能器激发的表面波可以检测到热应力引起的微裂纹的动态闭合,这证明了该方法能够有效地区分疲劳裂纹与其他结构缺陷。2011 年,Mezil 等^[7]报道了通过非线性混频激光法使用全光学方法研究固体裂纹的非线性声学效应的实验。在该实验中,样品受到两种不同频率的调制激光束的辐射,通过探测混频声波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。实验结果表明,裂纹状态发生变化时的声非线性系数要大于裂纹处于完全闭合或完全分开状态时的声非线性系数。2013 年,Ni 等^[8]利用激光激发超声,对激光加热引起的裂纹闭合过程中的各超声信号随加热光功率的变化关系进行研究。研究表明,随着加热光功率逐渐增大,透射表面波幅值先增大后不变,模式转换波先增大后减小。同时,通过实验发现,超声信号的到达时间会随裂纹的闭合而逐渐提前。

已有大量文献报道了关于非线性激光超声裂纹检测技术的研究,但这些研究仅限于裂纹闭合过程中加热区域内单个位置处的超声信号的变化,而关于裂纹闭合过程中加热区域内多个位置处的超声信号的变化及在此过程中裂纹形貌结构可能发生的变化等细节尚未研究^[9-10]。针对这一问题,本文利用激光激发和探测的声波对激光加热引起的裂纹闭合的非线性响应进行研究,探究不同加热区域内裂纹形貌结构的弹性/塑性微观变化。在样品裂纹的三个区域(裂纹起始处、裂纹中部、裂纹尖端)上使用具有不同功率的加热光源对裂纹进行加热,同时移动扫描激发源和探测源,得到了不同加热功率下裂纹处于加热状态时透射表面波和模式转换波峰峰值的扫查结果;此外,还得到了三个区域处光热循环

中裂纹处于加热状态时透射表面波信号到达时间的扫查结果,对三个区域处裂纹不可逆闭合过程中裂纹形貌结构变化及透射表面波的传播路径进行了研究。

2 实验装置及步骤

2.1 实验装置

实验所用的激光超声探测装置如图 1 所示。激发光(激发激光器型号为 DSS 1064-450)为输出波长为 1064 nm 的脉冲激光,重复频率为 80 Hz,脉宽为 1.5 ns,最大单脉冲能量为 650 μJ 。激发光经一个窄带反射镜(能反射波长为 1000~1100 nm 的激光,透射其他波长的激光)后聚焦于样品表面,光斑直径 $d_G \approx 50 \mu\text{m}$ 。加热光(加热激光器型号为 MGL-N-532A)为输出波长为 532 nm 的连续激光,最大功率为 5 W,经 $\lambda/2$ 波片和偏振分光棱镜,被凸透镜聚焦于样品表面的裂纹上,光斑直径 $d_H \approx 100 \mu\text{m}$ 。 $\lambda/2$ 波片被安装在旋转电动平移台上,可通过电脑控制 $\lambda/2$ 波片转动来调节加热光功率。探测光(探测激光器型号为 LuxXplus 638-100)为输出波长为 638 nm 的连续激光,平均输出功率为 100 mW,光斑直径 $d_D \approx 30 \mu\text{m}$ 。探测装置为差分偏转装置,探测光由具有微小夹角的两个半圆形反射镜分成两束,聚焦后由平衡接收器(型号为 New Focus 1607)的两个输入口接收。探测到的信号接入示波器(型号为 DS2302A)并通过通用串行总线(USB)传输至电脑。样品为黑玻璃,尺寸为 10 cm \times 5 cm \times 3 mm(长 \times 宽 \times 高),其上有一道使用热冲击方法获得的裂纹(裂纹贯穿样品上下表面,平均开口宽度为百纳米量级^[10]),裂纹生长方向与样品宽度方向基本一致,总长约 21 mm。样品被固定在两个平移台上,使其可以在竖直方向和左右方向平移。实验中加热光经过的反射镜和透镜均固定在样品放置的电动平移台上,移动电动平移台可使加热光斑与裂纹的相对位置保持不变,实现仅激发光和探测光在移动样品表面的扫查。

2.2 实验步骤

首先采用如图 1 所示的实验装置,关闭加热光,使用时间飞行散射(TOFD)法在样品表面扫查,以分辨各超声信号模式^[9]。图 2 为在裂纹三个区域处激发点和探测点位于裂纹异侧时的时域波形,各超声信号模式已在图中标出,“tL”、“tL-R”、“tR”信号分别代表透射纵波、由表面波模式转换并透射的纵波、透射表面波。图 3 为激发点和探测点位于裂纹

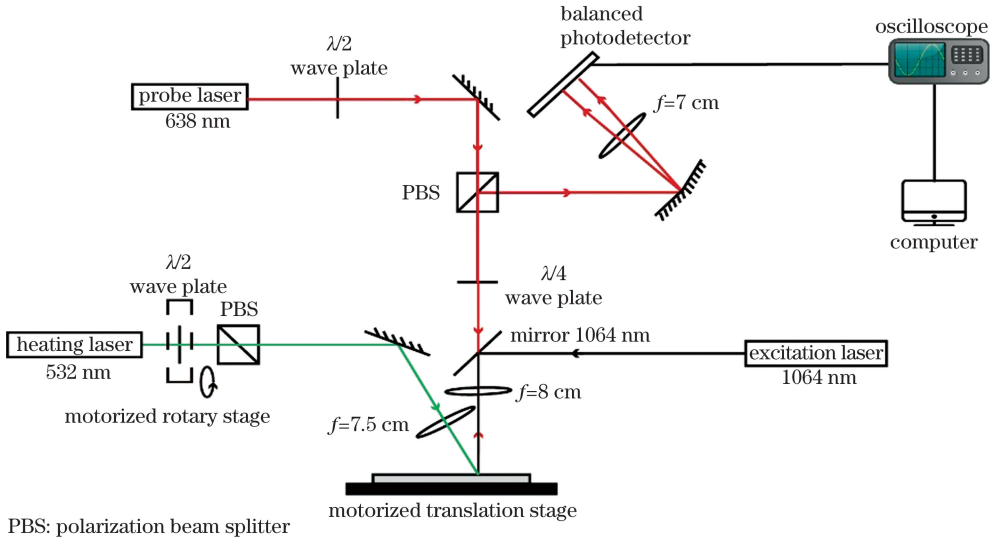


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

异侧时, 声波在表面裂纹处的透射示意图。“tL”为透射纵波, 即从激发点出发经裂纹透射传播到探测点的纵波, 纵波的部分能量沿裂纹壁传播到裂纹尖端, 并且在裂纹尖端处发生透射, 之后沿裂纹壁传播到探测点。“tL-R”为由表面波模式转换并透射的纵波, 即从激发点出发的表面波在裂纹处发生模式转换并透射传播到探测点的纵波,

表面波的部分能量沿裂纹壁传播到裂纹尖端, 并且在裂纹尖端处发生模式转换并透射, 之后沿裂纹壁传播到探测点。“tR”为透射表面波, 即从激发点出发经裂纹透射传播到探测点的表面波, 表面波的部分能量沿裂纹壁传播到裂纹尖端, 并且在裂纹尖端处发生透射, 之后沿裂纹壁传播到探测点。

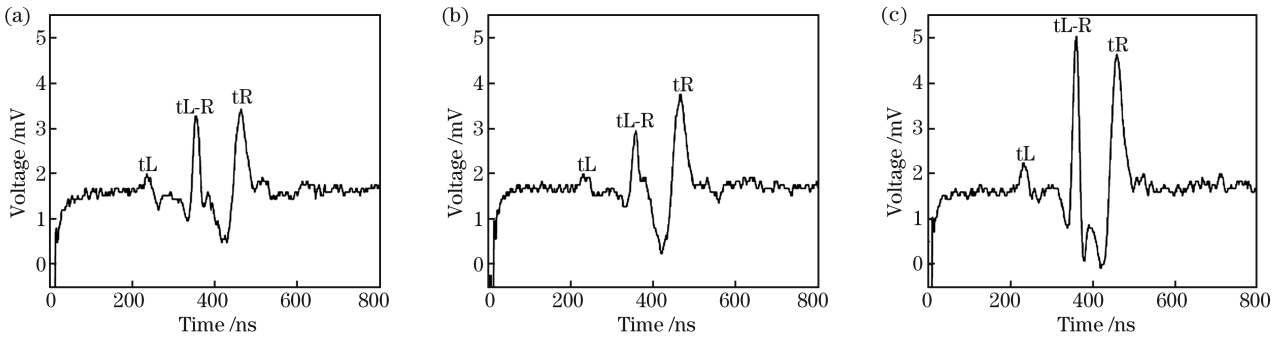


图 2 在裂纹三个区域处基于 TOFD 法得到的时域波形。(a) 裂纹起始处; (b) 裂纹中部; (c) 裂纹尖端

Fig. 2 Time domain waveforms based on TOFD method in three areas of crack. (a) Start of crack; (b) middle of crack; (c) tip of crack

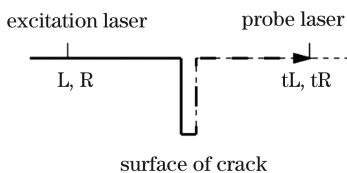


图 3 声波在表面裂纹处的透射示意图

Fig. 3 Schematic of sound wave transmission at surface of crack

后, 研究光致裂纹闭合过程中裂纹的变化。开启加热光, 将加热光固定于裂纹之上, 激发光源和探测光源按如图 4 所示的箭头方向沿着裂纹生长方向扫描, 扫描步长为 $30 \mu\text{m}$, 扫描范围为 $0 \sim 300 \mu\text{m}$ 。扫描过程中, 激发源与探测源始终在一条竖直直线上, 该直线与裂纹在样品表面上的走向垂直。在图 4 中, 激发光用位于于裂纹上方的圆点表示, 探测光用位于于裂纹下方的圆点表示, 加热光用位于于裂纹处的圆点表示。具体实验步骤如下。

在使用 TOFD 法分辨出实验所需的超声模式

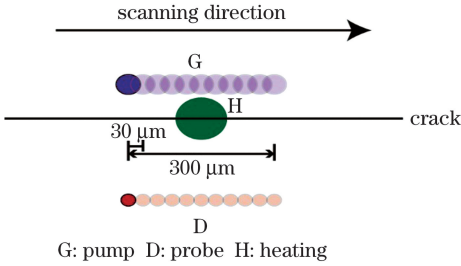


图 4 激发-探测源扫描路径示意图

Fig. 4 Schematic of excitation-detection source scanning path

1)首先在裂纹区域 1(离裂起始点 $h \approx 4 \text{ mm}$ 处),将激发光、探测光及加热光照射在样品上并调节三者至同一直线,该直线与裂纹在样品表面的走向垂直,使加热光落在裂纹正上方(此时加热光功率不超过 10 mW)。随后沿着裂纹生长方向移动加热光,使得加热光光斑离开激发-探测源构成的直线,但此时加热光仍然落在裂纹正上方,移动距离大约 $150 \mu\text{m}$ 。

2)遮挡加热光,激发源和探测源在样品表面共同移动实现扫描,如图 4 所示,检测无加热光时的透射超声信号时域波形并记录数据。

3)开启加热光,在每个加热光功率下,首先等待 20 s 使裂纹在加热光辐照下达到热平衡状态;随后,将激发源和探测源从起始位置按步骤 2)完成一次扫描,记录一组数据后返回至起始位置;然后遮挡加热光使裂纹冷却,等待 20 s 使裂纹到达热平衡状态后再以相同方式采用激发源和探测源扫描,记录一组数据。

4)以上加热光功率从 0 mW 增加至 300 mW 时的所有扫描步骤构成一个光热循环,完成后等待 5 min ,重复相同的步骤,总共进行 3 次光热循环。每个光热循环包括对裂纹进行周期性地加热然后冷却的 31 个子循环。

5)如图 5 所示,在裂纹的区域 2 和 3 处(离裂起始点 $h \approx 12 \text{ mm}$, $h \approx 20 \text{ mm}$ 处),重复步骤 1)~4)。

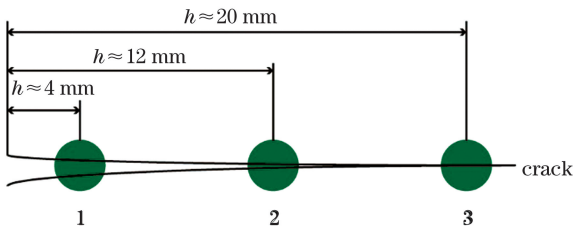


图 5 裂纹加热区域位置示意图

Fig. 5 Schematic of location of crack heating area

实验选择 300 mW 作为最大加热光功率和 20 s 作为加热时间的原因是,之前的实验研究中在类似的样品上 300 mW 的加热光功率足以完全闭合裂纹^[8],且 20 s 足以让裂纹状态达到稳定^[11]。

3 实验结果与分析

3.1 扫描区域内信号峰峰值的扫描结果

图 6、7 分别为在三个区域处,三次光热循环中裂纹处于加热状态时透射表面波 $tR(\text{heat})$ 和模式转换波 $tL-R(\text{heat})$ 峰峰值的扫描结果图。

图 6、7 中,横坐标为激发-探测源的扫描步数,纵坐标为加热光功率,单位为 mW 。每幅图由 11×31 个像素组成,像素颜色代表所探测信号的峰峰值,单位为 mV 。

3.1.1 第 1 次光热循环

1)随着加热光功率的增大, $tR(\text{heat})$ 峰峰值整体呈增大趋势(由暗变亮),而 $tL-R(\text{heat})$ 峰峰值整体呈减小趋势(由亮变暗)。

2)当加热光功率增大至约 80 mW 后,随着加热光功率增大,区域 3 处的 $tR(\text{heat})$ 峰峰值基本不变,如图 6(a)第 3 幅图所示,其余区域处的峰峰值增大,如图 6(a)第 1、2 幅图所示。当加热光功率增大至约 150 mW 之后,随着加热光功率增大,区域 2、3 处的 $tR(\text{heat})$ 峰峰值基本不变,如图 6(a)第 2、3 幅图所示,区域 1 处的峰峰值增大,如图 6(a)第 1 幅图所示。当加热光功率增大至约 200 mW 之后,随着加热光功率增大,所有区域处的 $tR(\text{heat})$ 峰峰值基本不变且黑色区域逐渐消失,如图 6(a)所示;区域 2、3 处的 $tL-R(\text{heat})$ 峰峰值基本不变,如图 7(a)第 2、3 幅图所示,区域 1 处的峰峰值减小,如图 7(a)第 1 幅图所示。当加热光功率为 300 mW 时,区域 1、2 处的 $tL-R(\text{heat})$ 峰峰值不为 0,如图 7(a)第 1、2 幅图所示。

3.1.2 第 2 次光热循环

1)随着加热光功率的增大, $tR(\text{heat})$ 峰峰值整体呈增大趋势, $tL-R(\text{heat})$ 峰峰值整体呈先增大后减小的趋势。

2)当加热光功率增大至约 50 mW 之后,随着加热光功率增大,区域 3 处的 $tR(\text{heat})$ 峰峰值基本不变且黑色区域逐渐消失,如图 6(b)第 3 幅图所示。当加热光功率增大至约 100 mW 之后,随着加热光功率增大,区域 2、3 处的 $tR(\text{heat})$ 峰峰值基本不变且黑色区域逐渐消失,如图 6(b)第 2、3 幅图所示。当加热光功率继续增大至约 150 mW 之后,随着加

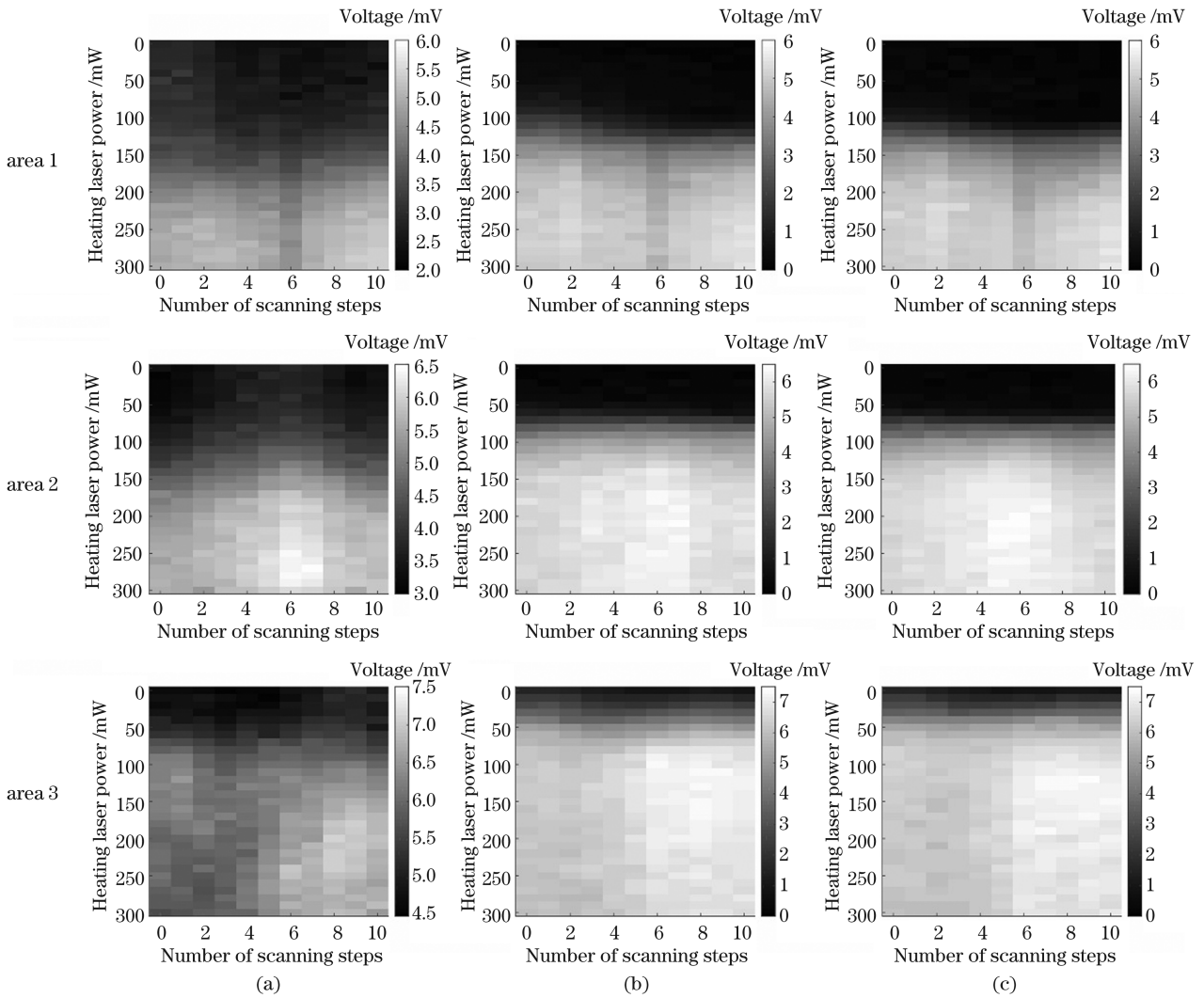


图 6 三次光热循环中裂纹处于加热状态时 $tR(\text{heat})$ 峰峰值的扫查结果。(a)第 1 次光热循环;(b)第 2 次光热循环;(c)第 3 次光热循环

Fig. 6 Scanning results of $tR(\text{heat})$ peak-peak value when cracks are heated in three photo-thermal cycles. (a) 1st photo-thermal cycle; (b) 2nd photo-thermal cycle; (c) 3rd photo-thermal cycle

热光功率增大,所有区域处的 $tR(\text{heat})$ 峰峰值基本不变且黑色区域逐渐消失,如图 6(b)所示。

3.1.3 第 3 次光热循环

从图 6、7 可以看出,第三次光热循环中信号峰峰值的扫查结果与第二次光热循环相似。

3.2 扫描区域内信号到达时间的扫查结果

对第 1 次光热循环中扫描区域内透射表面波 $tR(\text{heat})$ 信号的到达时间进行分析。由于模式转换波 $tL-R(\text{heat})$ 信号在裂纹闭合时信噪比较低,在此不进行分析。图 8 为在三个区域处,第 1 次光热循环中裂纹处于加热状态时 $tR(\text{heat})$ 信号到达时间的扫查结果。

图 8 中,每幅图由 11×31 个像素组成,像素颜色代表信号到达时间。从图 8 可以看出,随着

加热光功率的增大, $tR(\text{heat})$ 信号到达时间整体呈提前趋势(由亮变暗)。当加热光功率为 0 mW 时,在区域 1 处,裂纹扫描区域的左侧(扫描步数为 0~4 时)声波到达时间早于右侧(扫描步数为 5~10 时),如图 8(a)所示,其余区域处,左侧声波到达时间晚于右侧,如图 8(b)、(c)所示;在区域 1 处,当加热光功率约 150 mW 时,信号到达时间几乎相同,在区域 2 处,当加热光功率约 100 mW 时,信号到达时间几乎相同,在区域 3 处,当加热光功率约 50 mW 时,信号到达时间几乎相同;当加热光功率约 80 mW 时,扫描区域的右侧信号到达时间到达最小值;当加热光功率继续增大至约 200 mW 后,右侧信号到达时间开始整体呈延后趋势。

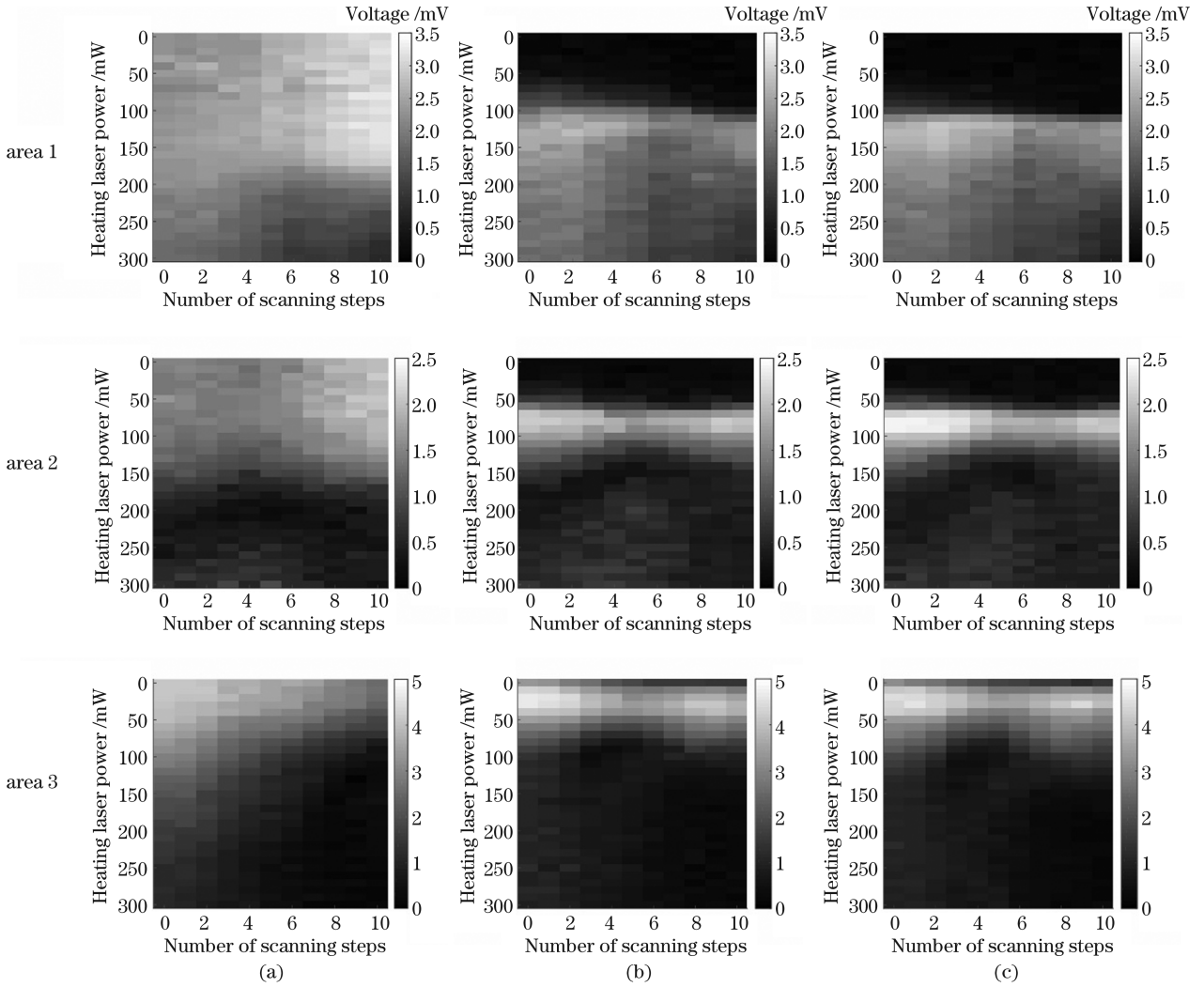


图 7 三次光热循环中裂纹处于加热状态时 tL-R(heat)峰峰值的扫描结果。(a)第 1 次光热循环;(b)第 2 次光热循环;(c)第 3 次光热循环

Fig. 7 Scanning results of tL-R(heat) peak-peak value when cracks are heated in three photo-thermal cycles. (a) 1st photo-thermal cycle; (b) 2nd photo-thermal cycle; (c) 3rd photo-thermal cycle

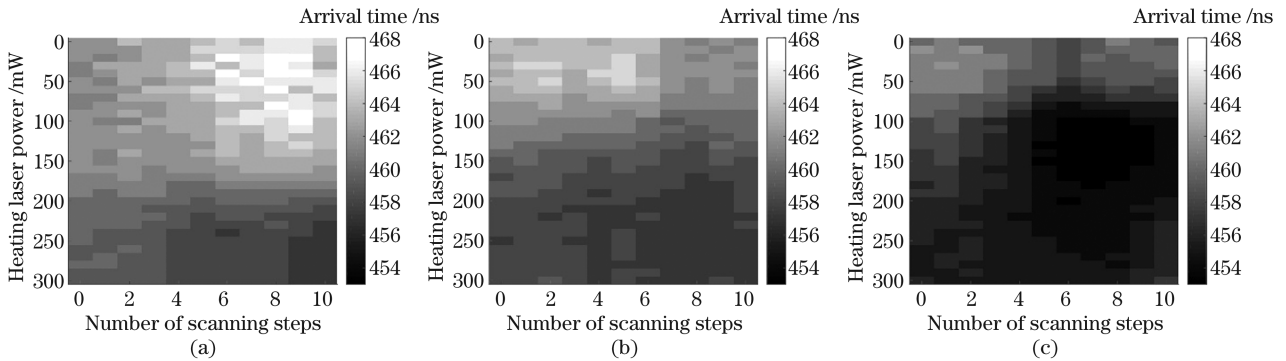


图 8 第一次光热循环中裂纹处于加热状态时 tR(heat)信号到达时间的扫描结果。(a)区域 1;(b)区域 2;(c)区域 3

Fig. 8 Scanning results of arrival time of tR(heat) signal when crack are heated in first photo-thermal cycle. (a) Area 1; (b) area 2; (c) area 3

3.3 分析与讨论

已有研究表明,使用连续激光辐照的方式可以使裂纹闭合,且裂纹闭合过程中透射、反射超声信号

幅值会增加加热光功率的变化而发生不同的变化^[9]。此外,裂纹壁上分布有很多微观凸起,在裂纹闭合时,这些凸起会因裂纹壁的挤压而首先接触^[8-9,11]。

随着裂纹的闭合,裂纹壁的接触进一步增多,且已接触的凸起会被裂纹壁挤压而破坏^[9,11]。当裂纹完全闭合再张开后,由于裂纹壁上微观凸起的破坏,裂纹不能回到第一次闭合前的状态。这一裂纹的不可逆改变可通过透射声波的幅值变化体现^[9]。在这些已有结果的基础上,对扫描区域内裂纹闭合过程中裂纹形貌结构变化和透射表面波的传播路径进行分析。

图 9、10 为在三个区域处,三次光热循环中裂纹处于加热状态时 $tR(\text{heat})$ 、 $tL-R(\text{heat})$ 峰峰值的平均值曲线。图 11 为在三个区域处,第 1 次光热循环中裂纹处于加热状态时 $tR(\text{heat})$ 信号达到时间的平均值曲线。

首先,图 6 中 $tR(\text{heat})$ 峰峰值扫描图总体颜色从黑变白,图 7 中 $tL-R(\text{heat})$ 白色信号、图 8 中信号达到时间扫描图总体从白变黑出现得越早,代表裂纹闭合得越早。在第 1 次光热循环中,图 9 中 $tR(\text{heat})$ 峰峰值的平均值和图 11 中 $tR(\text{heat})$ 信号达到时间的平均值到达基本不变的状态出现得越早,代表裂纹闭合得越早。在第 2 次光热循环中,图 9 中 $tR(\text{heat})$ 峰峰值的平均值到达基本不变的状态和图 10 中 $tL-R(\text{heat})$ 峰峰值的平均值到达最大值的状态出现得越早,代表裂纹闭合得越早。结合三个位置的结果可以看出,区域 3 处最早出现裂纹闭

合,其次是区域 2,最后是区域 1,这正与裂纹宽度对应。由于区域 1 更靠近样品边缘,裂纹宽度最大,而区域 3 更靠近裂纹尖端,因此宽度最小。

其次,在本次实验结果中,第 1 次光热循环所得结果与后两次光热循环结果的不同、后两次光热循环结果的相似,与已有报道一致^[9]。

在三个区域处,第 1 次和第 2 次光热循环结果的对比,表明了从不可逆子循环[图 6(a)和图 7(a)]到可逆子循环[图 6(b)和图 7(b)]的转变,这些现象直接说明在第 1 次光热循环使裂纹闭合的过程中,裂纹两壁的部分凸起可能发生了断裂等不可逆的塑性变化。同样地,第 2 次和第 3 次光热循环结果的对比,表明了从第 2 次光热循环开始,子循环大部分是可逆的,即裂纹的变化是弹性的。这些现象直接说明在第 2 次和第 3 次光热循环使裂纹闭合的过程中光致热弹性过程是可逆的。从图 9、10 三次光热循环结果的对比也可以得出以上结论。

从图 6、7、9、10 可以看出,在所有区域内,与第 1 次光热循环相比,第 2 次循环中信号峰峰值总体变化更快,这也与第 1 次光热循环中裂纹两壁之间部分凸起发生的断裂等不可逆塑性变化有关。裂纹在一次闭合后,裂纹壁上可供声波传播的凸起变少并变短,因此裂纹在完全张开-凸起接触(部分接触)-完全闭合的过程中,部分接触状态变短。

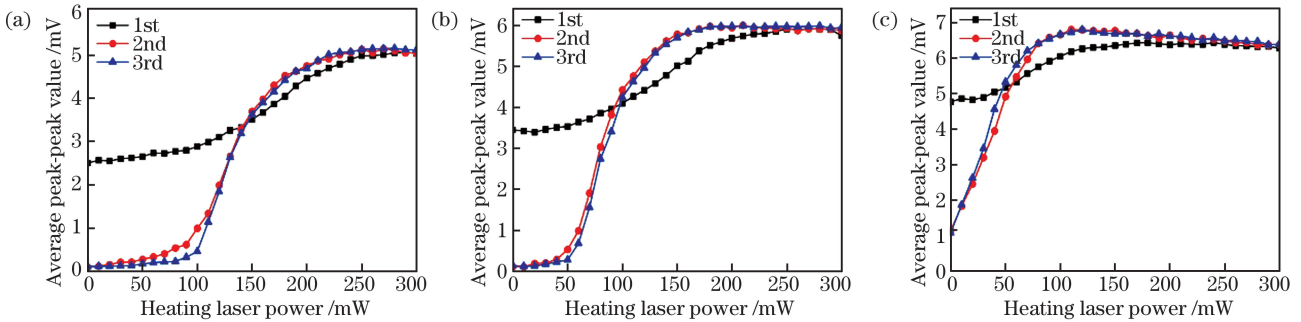


图 9 裂纹处于加热状态时 $tR(\text{heat})$ 峰峰值的平均值曲线。(a)区域 1;(b)区域 2;(c)区域 3

Fig. 9 Curves of average peak-peak value of $tR(\text{heat})$ when cracks are heated. (a) Area 1; (b) area 2; (c) area 3

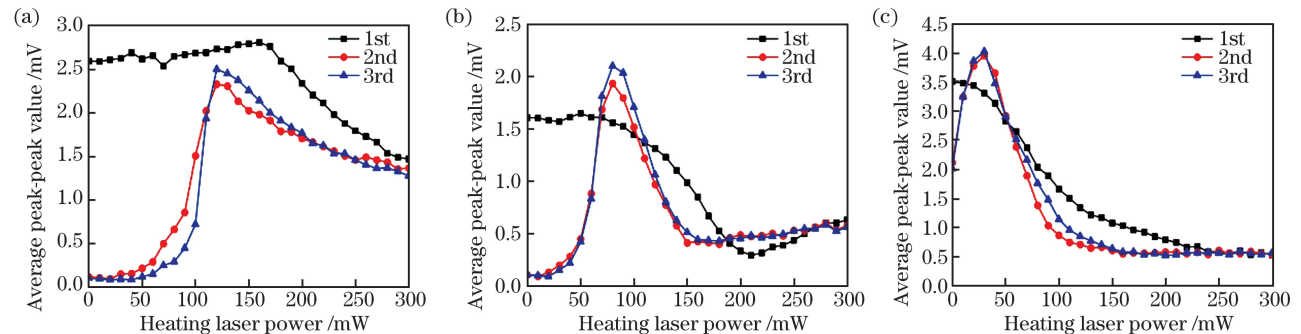


图 10 裂纹处于加热状态时 $tL-R(\text{heat})$ 峰峰值的平均值曲线。(a)区域 1;(b)区域 2;(c)区域 3

Fig. 10 Curves of average peak-peak value of $tL-R(\text{heat})$ when cracks are heated. (a) Area 1; (b) area 2; (c) area 3

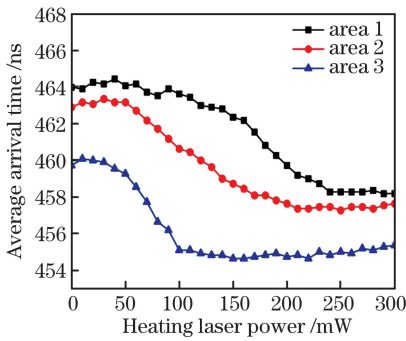


图 11 第 1 次光热循环中裂纹处于加热状态时 tR(heat) 信号达到时间的平均值曲线

Fig. 11 Curve of average arrival time of tR(heat) when cracks are heated in first photo-thermal cycle

此外,从三个区域的扫描实验结果中可以提取出更多裂纹闭合的信息。图 12 为在三个区域处,第 1 次光热循环中裂纹加热前表面波传播路径示意图。当加热光功率为 0 mW 时,三个扫描区域内 tR(heat)和 tL-R(heat)峰峰值均大于 0 mV,说明即使在没有加热光的情况下,裂纹两壁之间仍存在接触且裂纹没有达到完全闭合状态。在区域 1 处,裂纹扫描区域的左侧声波到达时间早于右侧,表明起始状态下裂纹壁上的接触点在左侧,当激发-探测源连线位于左侧时,声波从激发点传播至探测点的路径更短,因此传播耗时更少,如图 12(a)所示。其余区域处,左侧声波到达时间晚于右侧,表明起始状态下

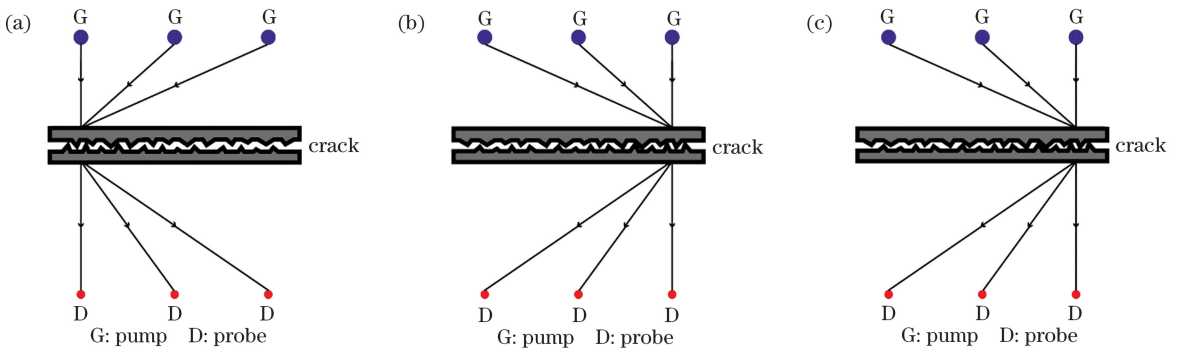


图 12 第 1 次光热循环中裂纹加热前表面波传播路径示意图。(a)区域 1;(b)区域 2;(c)区域 3

Fig. 12 Schematic of surface wave propagation path before crack heating in the first photo-thermal cycle. (a) Area 1; (b) area 2; (c) area 3

4 结 论

采用光热调制辅助的激光超声方法对黑玻璃样品表面的裂纹进行检测。利用所提方法,通过分析各模式超声波在裂纹不同闭合状态下的峰峰值、到达时间变化,可以获得裂纹闭合的相关信息。信号峰峰值和到达时间的变化过程与裂纹闭合出现的早

晚有关。裂纹闭合出现早晚的顺序与裂纹宽度对应,越靠近样品边缘,裂纹宽度越大,闭合出现越晚,越靠近裂纹尖端,裂纹宽度越小,闭合出现越早。

从图 8 看出,在所有区域内,当加热光功率达到某一功率时,信号到达时间几乎相同,表明在这一加热光功率下扫描区域内裂纹闭合状态相似,声波可以在整个辐照区域内沿激发-探测源直线传播。接着,从图 6 看出,当加热光功率继续增大之后,tR(heat)峰峰值扫描图中黑色区域逐渐消失,说明裂纹两壁之间的接触点开始大量增加,声波透射进一步增大。值得注意的是,在区域 3 处,当加热光功率约 80 mW 时,扫描区域的右侧信号到达时间到达最小值,表明在这一加热光功率下扫描区域右侧裂纹达到完全闭合状态。此时相比于左侧,右侧裂纹壁上有更靠近激发-探测源连线的接触点。当加热光功率增大至约 200 mW 之后,右侧信号到达时间有延后的迹象,这一延迟随加热光功率的增大而增大,这主要是由加热光功率增大使材料内表面波的传播速度变慢引起的。

最后,当加热光功率为 300 mW 时,在区域 1、2 处,tL-R(heat)峰峰值不为 0,且裂纹左侧信号到达时间晚于右侧,这表明在 300 mW 这一加热光功率下裂纹仍然没有达到完全闭合状态,且两扫描区域内裂纹的主要接触点均位于扫描区域右侧。这一现象说明裂纹在光热加载下的闭合并不是均匀的,而与裂纹局部的形貌紧密相关,这与已有报道中对裂纹闭合的观测结果一致^[9-10]。

晚有关。裂纹闭合出现早晚的顺序与裂纹宽度对应,越靠近样品边缘,裂纹宽度越大,闭合出现越晚,越靠近裂纹尖端,裂纹宽度越小,闭合出现越早。与第 1 次光热循环相比,第 2 次循环中峰峰值总体变化更快,这与第 1 次光热循环中裂纹两壁之间部分凸起发生的断裂等不可逆塑性变化有关。信号到达时间可能出现延后的迹象,这一延迟随加热光功率

的增大而增加,这主要是由加热光功率增大使材料内表面波的传播速度变慢引起的。

参 考 文 献

- [1] Zheng J, Shen Z H, Ni C Y. Experimental study on simulated crack closure using laser ultrasonic [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1212003.
郑杰, 沈中华, 倪辰荫. 模拟裂纹闭合的激光超声实验研究 [J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1212003.
- [2] Xu W, Shen Z H, Ni C Y, et al. Influence of temperature on zero-group-velocity Lamb waves of thin plate [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1202005.
许薇, 沈中华, 倪辰荫, 等. 温度对薄板中零群速度 Lamb 波的影响 [J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1202005.
- [3] Li J Y, Shen Z H, Ni X W, et al. Laser-ultrasonic non-destructive detection based on synthetic aperture focusing technique [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 0904003.
李俊燕, 沈中华, 倪晓武, 等. 基于合成孔径聚焦技术的激光超声无损检测方法研究 [J]. *中国激光*, 2018, 45(9): 0904003.
- [4] Shen Z H, Yuan L, Zhang H C. *Laser ultrasound in solids*[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2015.
沈中华, 袁玲, 张宏超. *固体中的激光超声*[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Lü J C, Shen Z H, Gusev V, 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, Gusev V, 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.
- [10] Ni C Y, Lü 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.
- [11] 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.