

·封面文章·

光热调制裂纹闭合的激光超声实时监测

尤博文¹, 倪辰荫^{2*}, 沈中华¹

¹南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094;

²南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要 基于激光超声方法,对裂纹在加热光辐照及自然冷却条件下的透射超声信号进行了实时监测。在不同功率加热光辐照下,得到了裂纹壁上的突起在裂纹受加热光辐照闭合时的三种典型的变化过程,对所产生的三种典型的变化过程的成因进行了分析与讨论。研究表明,裂纹在加热光辐照及自然冷却条件下的变化均与裂纹在未加热时的初始形貌特征有关。

关键词 测量; 激光超声; 无损检测; 声表面波; 峰峰值

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0204009

Laser Ultrasonic Real-Time Monitoring of Photothermal Modulation Crack Closure

You Bowen¹, Ni Chenyin^{2*}, Shen Zhonghua¹

¹School of Science, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

²School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract Based on the laser ultrasonic method, the transmitted ultrasonic signals are monitored in real-time when the crack is irradiated with a heating laser and naturally cooled. Under the irradiation of different power heating laser, three typical processes of the crack wall asperities are obtained when the crack is closed by the irradiation of heating laser, and the causes of these different processes are analyzed and discussed. The results show that the change of crack under heating laser irradiation and natural cooling condition is related to the initial morphology characteristics of the crack when it is not heated.

Key words measurement; laser induced ultrasonic; nondestructive testing; surface acoustic wave; peak-to-peak value

OCIS codes 120.4290; 280.3375; 110.7170

1 引 言

裂纹是固体材料的一种常见缺陷,裂纹的出现和扩展会对材料的使用寿命和机械性能产生严重的影响,并最终导致工件的断裂,造成巨大损失。因此,对于材料可能存在的裂纹进行无损检测显得尤为重要^[1-3]。激光超声检测技术因具有非接触、空间分辨率高和探测距离远等优点^[4-5],近年来被广泛应用于制造业^[6-7]、建筑^[8]、航空航天^[9]及其他工业领域^[10]。最早的激光超声无损检测技术主要是利用

激光在裂纹远场激发超声,通过探测超声波与裂纹作用产生的反射和透射信号来确定裂纹的存在。Cooper 等^[11]通过监测由裂纹反射和经裂纹透射的超声信号实现了对铝表面人工裂纹的检测。但位置未知的微小裂纹易受到声波波长的限制,只有很少一部分超声信号会被反射,因此这类检测方法的检测效果会大幅降低。针对这一问题,美国西北大学的 Achenbach 教授带领的研究小组^[12]提出了一种采用扫描激光源技术检测裂纹的新方法,这种检测方法可以大大提高微小缺陷的检测能力,且具有较

收稿日期: 2018-07-30; 修回日期: 2018-09-25; 录用日期: 2018-11-20

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(30916014112-001)

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

高的信噪比。Arias 等^[13]采用线源激发光从裂纹一端扫描至另一端,研究发现当激发光由裂纹远场区扫至近场并最终扫过裂纹区域时,瑞利波幅值变化明显,通过观测瑞利波幅值在该区域内的急剧变化,即可判断裂纹的存在。然而,若裂纹的开口宽度进一步减小,瑞利波将直接穿过裂纹而不发生反射与散射,扫描激光源等传统的线性激光超声检测方法无法对这类微裂纹进行有效的检测。非线性激光超声检测方法是通过观测由裂纹闭合引起的参数调制、声弹效应及调制转移等非线性声学现象,来实现对材料中缺陷的检测^[14-16]。相比于传统的线性激光超声检测方法,非线性激光超声检测方法有着更高的检测灵敏度,可用来检测开口更小的裂纹^[17]。Rajakarunanayak 等^[18]最早提出利用非线性超声成像的方法对裂纹和缺陷进行检测。Yan 等^[19]提出利用光热调制疲劳裂纹的检测方法,即将一束调制激光辐照于裂纹上,使裂纹产生局部的闭合,通过观测超声信号与裂纹相互作用产生的非线性现象实现对裂纹的检测。实验结果表明,利用此方法可以使检测灵敏度至少提高一个数量级。近年来,研究人员利用全光学方法在频域内观测到了裂纹闭合时产生的非线性现象^[20-23]。Gusev 等^[24]将两束波长相同的调制频率分别为 16.6 kHz 的高频激发光和 5 Hz 的低频加热光聚焦于样品上,使两光斑重合,从样品一端扫描至另一端,实验结果表明,当光源扫描至裂纹区域时,高频的线性信号强度的变化幅度小于等于 5 dB,而混频的非线性信号强度的变化幅度大于 30 dB,这说明由裂纹闭合引起的非线性效应远大于材料自身引起的非线性效应,因此由裂纹闭合引起的非线性效应可以作为检测材料裂纹的有效方法,且非线性混频的激光超声方法的检测分辨率远高于传统激光超声方法的。为了详细研究非线性激光超声混频技术中加热光对裂纹的载荷加载作用,Ni 等^[25]将一束加热光加载于裂纹上,利用全光学方法研究了反射和透射超声信号的峰峰值随不同加热光功率的变化情况。研究表明,随着裂纹上加热光功率的增大,裂纹会有逐渐闭合的趋势,并且当加热光达到一定功率时,裂纹会完全闭合。研究还指出,相比于表面波信号,模式转换信号对裂纹状态的改变有着更高的敏感性。

目前,对光热调制辅助检测裂纹的研究大多是针对裂纹在受加热光辐照状态稳定后的静态,而对裂纹在加热时的动态闭合过程的研究较少。为了研究裂纹在受光热调制时其形貌结构的实时变化过

程,本文使用差分光偏转法,对裂纹在光热载荷加载时和撤去光热载荷加载,即冷却后的透射声表面波信号以及声表面波在裂纹处发生模式转换并透射的纵波信号进行实时监测,并在同一裂纹的不同位置及不同样品的多道裂纹上进行多次重复实验,通过对实验得到的透射超声信号峰峰值的变化趋势进行分析,总结了裂纹壁上突起在裂纹受加热光辐照闭合时的三种典型的变化过程。进一步从裂纹在未受加热光辐照时的初始形貌特征的角度对产生这三类变化过程的原因进行分析与讨论。

2 实验系统与方法

2.1 实验装置

基于差分光偏转法检测超声信号的实验系统如图 1 所示。激发光(激发激光器:CryLaS DSS 1064-450,CryLaS 公司,德国)为输出波长为 1064 nm 的脉冲激光,最大单脉冲能量为 650 μJ ,重复频率为 200 Hz,脉宽为 1.5 ns,经过一个半波片和偏振分光棱镜(PBS),聚焦在样品表面,光斑直径约为 210 μm 。加热光为加热激光器(MGL-N-532A,长春新产业光电技术有限公司,中国)输出的波长为 532 nm 的连续激光,最大功率为 5 W,经过一个半波片和偏振分光棱镜聚焦于样品表面,光斑直径约为 100 μm 。此半波片连接一个步进电机(SC101,北京北光世纪仪器有限公司,中国),通过转动半波片来控制加热光强度。探测光为探测激光器(LuxXplus[®] 638-100,Omicron Laserage 公司,德国)输出的波长为 638 nm 的连续激光,先经过一个半波片和偏振分光棱镜,再经过一个四分之一波片,最后被透镜聚焦于样品表面,光斑直径约为 100 μm 。系统采用差分式光偏转法探测^[26-27],由两个带有微小夹角的反射镜将探测光分成两束,聚焦后由平衡接收器(NEW FOCUS 1607,NEW FOCUS 公司,美国)接收。若样品表面受到声扰动,且入射到表面的探测光斑比要检测的最短声波波长大得多时,传播到探测区的声扰动会使探测区表面倾斜,使得从样品反射的探测光方向发生偏转,从而导致平衡接收器接收到的两束探测光的光通量发生变化。平衡接收器将两束探测光光通量的差值信号转化为超声信号,并将信号接入示波器(RIGOL DS4024,RIGOL 公司,中国苏州)读取数据。利用差分光偏转法检测超声信号,一方面可使有用的信号加倍,另一方面也使得光电传感器对模间拍频或激光电源波动等带来的探测光的波动不敏感。实验中使用了一个带有转动装置的窄

带反射镜(反射波长为 1000~1100 nm 的激光,透射其他波长的激光),用于将激发光反射至样品表面(和探测光共聚焦于样品表面),通过转动反射镜可改变样品上激发光和探测光间的距离。样品采用的

是厚度为 2.56 mm 的黑玻璃,采用热冲击方法在黑玻璃上获得裂纹(裂纹贯穿样品上下表面,平均开口宽度为百纳米量级)。样品被固定在平移台上,可以控制样品上下左右移动。

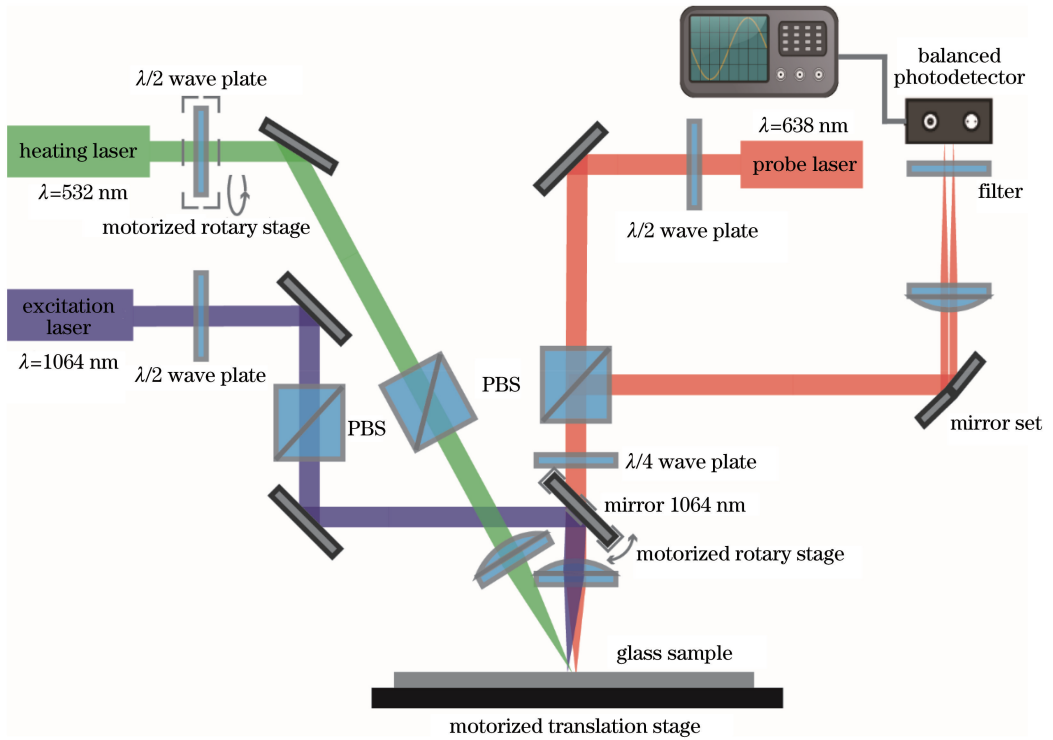


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of experimental system

2.2 实验方法

2.2.1 时间飞行散射法(TOFD)识别超声波模态

脉冲激光会同时在样品中激发出多模态的超声信号,因此需先对探测到的各模态超声信号进行辨别。首先使用 TOFD 对样品表面进行扫查。激发光、探测光及裂纹的位置如图 2 所示,激发光与探测光在一条水平直线上,激发光用深蓝色圆点表示,探测光用红色圆点表示。激发光以每步 16.67 μm 的

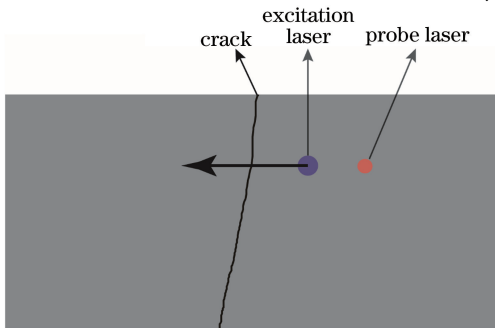


图 2 激发光、探测光及裂纹在样品表面的位置示意图

Fig. 2 Schematic of position of excitation laser, probe laser and crack on surface of sample

步长按图中箭头指示方向由裂纹右端扫描至裂纹左端,扫描步数为 49 步。各超声信号由于速度不同,会在扫描结果上形成斜率不同的直线,通过对这些直线的相对位置及斜率进行分析,即可得到各超声信号所对应的模态。

使用 TOFD 得到的 b 扫图(b 扫描即激发点或探头移动方向与超声声束传播方向平行的扫描方法)如图 3 所示。图 3 中横坐标为扫描步数,纵坐标

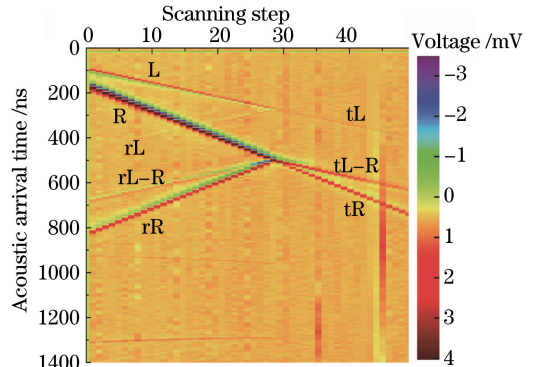


图 3 基于 TOFD 得到的超声信号的 b 扫图

Fig. 3 b-scan image of ultrasonic signal based on TOFD

为超声信号到达时间,右侧色条刻度代表光电探测器接收到的电压信号幅值,单位为 mV。

各超声信号所对应的模态已在图 3 中标出,其中 L 和 rL 分别为由激发点直接传播到探测点的直达纵波和由激发点传播至裂纹并被裂纹反射到达探测点的反射纵波;R 和 rR 分别为由激发点直接传播至探测点的直达瑞利波和由激发点传播至

裂纹并被裂纹反射到达探测点的反射瑞利波;tL 和 tR 分别为由激发点传播至裂纹并经裂纹透射到达探测点的透射纵波和透射瑞利波;rL-R 和 tL-R 分别为瑞利波在裂纹处发生模式转换并被裂纹反射和经裂纹透射到达探测点的纵波。图 4 所示为激发光和探测光在裂纹同侧和异侧的时域信号。

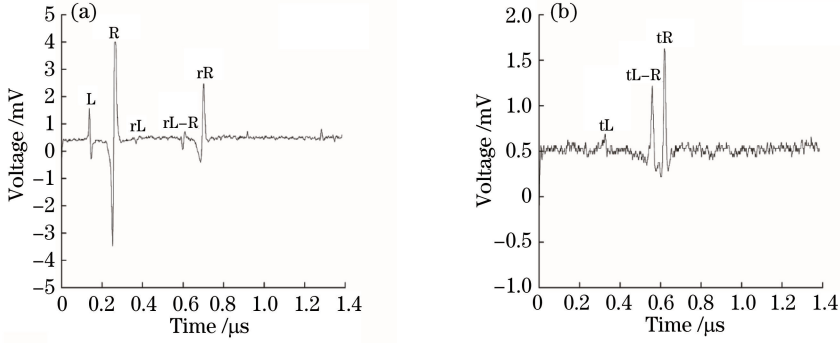


图 4 基于 TOFD 得到的时域波形。(a) 激发光扫描至第 9 步;(b) 激发光扫描至第 40 步
Fig. 4 Time domain waveforms obtained by TOFD. (a) Excitation laser scanning to step 9;
(b) excitation laser scanning to step 40

从上文的扫描结果可以看出,相比于反射时的超声信号,透射的超声信号模态更加简单,更利于分析,因此将在透射情况下对裂纹在加热和冷却时其行为的变化进行实时监测。

2.2.2 光热调制裂纹闭合实时监测的实验步骤

在确定各超声信号所对应的模态后,开始进行裂纹加热及冷却时透射超声信号的实时监测。此时,激发光、探测光、加热光及裂纹在样品表面的相对位置如图 5 所示。图中激发光、加热光和探测光在一条水平直线上,加热光用绿色圆点表示。

实验通过在裂纹受加热光辐照及撤去加热光自然冷却时快速多次读取数据,实现对 tR 信号及 tL-R 信号的实时监测。实验中每一轮记录数据(即开启激发光)的持续时间为 50 s,如图 6 中黄色区域所示。在 50 s 时间里共记录 500 次透射超声信号,每

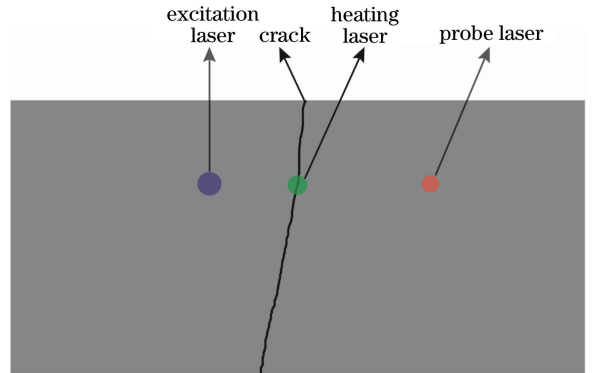


图 5 实时监测时激发光、加热光、探测光及裂纹在样品表面的位置示意图
Fig. 5 Schematic of position of excitation laser, heating laser, probe laser and crack on surface of sample during real-time monitoring

次记录超声信号的时间为 0.1 s。50 s 后,激发光关

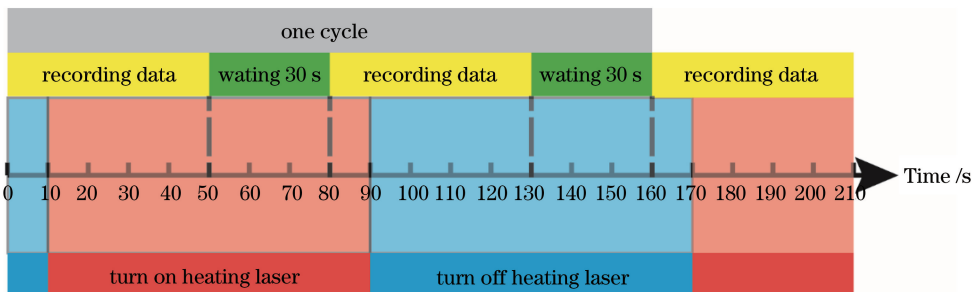
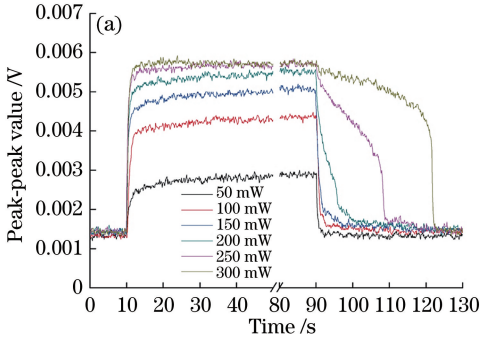


图 6 实验过程示意图
Fig. 6 Schematic of experimental process

闭,等待 30 s,如图 6 中绿色区域所示。实验记录了加热光功率分别为 50,100,150,200,250,300 mW 时透射超声信号的实时变化情况。实验过程可用图 6 的时间轴表示。

具体实验步骤如下:

- 1) 关闭加热光,打开激发光,开始记录透射超声信号,如图 6 中 0~10 s 的蓝色区域所示;
- 2) 在记录超声信号的第 10 s,开启加热光,如图 6 中第一个红色区域所示,在第 50 s,第一轮数据记录完成,如图 6 中 0~50 s 的黄色区域所示,之后关闭激发光,等待 30 s,如图 6 中 50~80 s 的绿色区域所示;
- 3) 在第 80 s,再次打开激发光,开始记录透射超声信号,在记录数据的第 10 s(即时间轴的第 90 s),关闭加热光,至时间轴的第 130 s,第二轮透射超声信号记录完成,关闭激发光,等待 30 s;



- 4) 以上三步作为一个循环(如图 6 中灰色区域所示),之后将加热光功率分别调至 100,150,200,250,300 mW,并重复以上三步;
- 5) 选取不同的裂纹及裂纹的不同位置重复以上实验过程。

3 实验结果与分析

在同一裂纹的不同位置及不同样品的多道裂纹处重复了多次实验,将可重复的典型实验结果归纳成三类。

3.1 第一类实验结果

第一类实验结果的透射超声信号的峰峰值在关闭加热光后,在所有加热光功率下,都可以在下一个加热周期开始前完全恢复到开启加热光之前的状态。实验结果如图 7 所示。

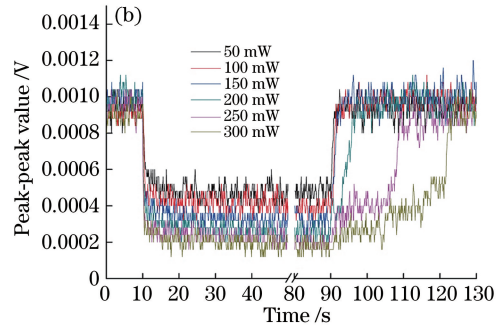


图 7 第一类实验结果。(a) 裂纹在不同功率加热及自然冷却时 tR 信号的实时监测结果;
(b) 裂纹在不同功率加热及自然冷却时 tL-R 信号的实时监测结果

Fig. 7 First type of experimental results. (a) Real-time monitoring results of tR signals for cracks under different power heating and natural cooling conditions; (b) real-time monitoring results of tL-R signals for cracks under different power heating and natural cooling conditions

由图 7(a)和 7(b)可知,裂纹受加热光辐照时,tR 信号的峰峰值会增大,tL-R 信号的峰峰值会减小,如图 7(a)和 7(b)的 10~20 s 区域不同加热光功率下所得信号幅值所示,tR 信号与 tL-R 信号的峰峰值的变化趋势相反,是因为随着辐照在裂纹上的加热光功率的增大,裂纹的闭合程度也会逐渐增大。裂纹的闭合过程会呈现出三种状态。对应这三种状态,声表面波信号变化趋势如下。

- 1) 裂纹两壁完全分开的状态。此时由于裂纹两壁没有接触,几乎不会有声表面波信号透过裂纹,tR 信号为 0;
- 2) 由于裂纹两壁是粗糙的,随着裂纹闭合程度的增大,裂纹两壁有些地方会接触,有些地方会分开。在裂纹部分闭合时,tR 信号开始出现,而 rR 信号幅值开始减小;
- 3) 裂纹两壁完全闭合。此时声表面波信号全

部透射,tR 信号达到最大,rR 信号减小为 0。

对于模式转换信号来说,当裂纹壁完全分开或裂纹壁完全闭合时,其幅值均应为 0;而当裂纹壁部分闭合时,其幅值不为 0。由此可知,随着裂纹壁由完全张开到部分闭合再到完全闭合,模式转换信号应经历由小变大再变小的变化趋势。由图 7(a)和 7(b)可知,在开启加热光之前,tR 信号与 tL-R 信号均不为 0,说明在裂纹未受加热光辐照时,裂纹两壁已有部分突起先接触,当表面波信号传播至此接触的突起时,此接触点相当于一个新的声源,会有一部分表面波信号转换成纵波信号并由裂纹反射和经裂纹透射。随着加热光功率的增大,裂纹两壁的闭合程度加深,声表面波信号会更易透过裂纹,因此 tR 信号会增大。而裂纹的闭合会使得已经接触的突起点的周围区域也开始接触,这会抑制声表面波信号发生模式转换,因此 tL-R 信号会减小。所以,当开

启加热光时, tR 信号与 tL-R 信号的变化趋势会相反。相应地, 在关闭加热光时, 裂纹会逐渐恢复至未加热时的状态, tR 信号与 tL-R 信号的变化趋势仍会相反。从图 7(a) 和图 7(b) 中还可以看出, 随着加热光功率的增大, tR 信号的峰峰值及 tL-R 信号的峰峰值在开启和关闭加热光时[图 7(a) 和 7(b) 中第 10 s 及第 90 s] 的变化幅度也会越来越大, 在之前的研究中也曾观察到过这种现象^[28]。由于当裂纹闭合时, 声表面波信号会更易经裂纹透射, 因此 tR 信号的峰峰值在裂纹受到加热时增大的幅度反映了裂纹在受加热光辐照时其闭合的程度, 而 tL-R 信号峰峰值则对裂纹形貌特征, 如裂纹壁上突起分布情况的变化, 更加敏感。上文描述的现象说明裂纹受加

热光辐照时会闭合, 并且随着辐照在裂纹表面的加热光功率的增大, 裂纹闭合的程度也会越来越明显。同时, 随着加热功率的增大, 在关闭加热光后, tR 信号的峰峰值与 tL-R 信号的峰峰值恢复到原来状态的时间会逐渐增加, 如图 7(a) 和 7(b) 的 90~125 s 区域所示, 但都可以在下一个加热周期开始前完全恢复到未加热时的状态, 这表示出现此类实验结果的裂纹的形貌特征并没有被辐照在其表面的加热光破坏。

3.2 第二类实验结果

第二类实验结果的透射超声信号的峰峰值在关闭加热光后, 只有在较低功率下, 才能在下一个加热周期开始前完全恢复到未加热时的状态。实验结果如图 8 所示。

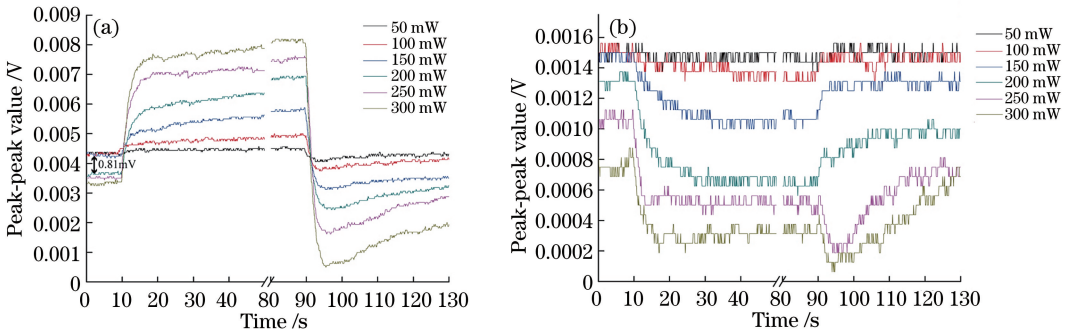


图 8 第二类实验结果。(a) 裂纹在不同功率加热及自然冷却时 tR 信号的实时监测结果;
(b) 裂纹在不同功率加热及自然冷却时 tL-R 信号的实时监测结果

Fig. 8 Second type of experimental results. (a) Real-time monitoring results of tR signals for cracks under different power heating and natural cooling conditions; (b) real-time monitoring results of tL-R signals for cracks under different power heating and natural cooling conditions

由图 8 可知, 与第一类实验结果相同的是, 开启加热光时[图 8(a) 中第 10 s], tR 信号的峰峰值会增大, 关闭加热光时(图 8(a) 中第 90 s), tR 信号的峰峰值会减小, 并且随着加热光功率的增大, tR 信号在开启和关闭加热光时的变化幅度也会越来越大, 关于此现象的原因已在第一类实验结果的分析中给出。而与第一类实验结果不同的是, 只有当辐照在裂纹上的加热光功率为 50 mW 和 100 mW 时, 透射超声信号的峰峰值在关闭加热光后可以在下一个加热周期开始前完全恢复到未加热时的状态。图 8(a) 中的 0 s 到 10 s 的时间段里, 所有功率下的 tR 信号均已达到稳定, 在 150 mW 功率下的声表面波信号的峰峰值在关闭加热光信号达到稳定时比加热前下降了约 0.81 mV。tR 信号峰峰值的大小反映了裂纹的闭合程度, 若裂纹的闭合程度减弱, 则 tR 信号会更难从裂纹一端透射到另一端, 使得 tR 信号的峰峰值减小。因此, 上述现象说明裂纹在 150 mW 功率加热的过程中已经受到了一定程度的破坏, 导致裂

纹的闭合程度在冷却后稳定时减弱, 使得 tR 信号的峰峰值减小。由图 8(b) 可知, 150 mW 功率加热及冷却下的 tL-R 信号峰峰值的变化趋势也与 50 mW 及 100 mW 时的明显不同: 在 50 mW 及 100 mW 的功率下, tL-R 信号的峰峰值基本没有因辐照在裂纹表面的加热光的开启和关闭而发生改变; 而当加热光功率增大到 150 mW 时, tL-R 信号的峰峰值会在开启加热光后逐渐减小, 并在关闭加热光后缓慢恢复。此外, 在冷却后稳定时, tL-R 信号的峰峰值也比加热前有所下降。tL-R 信号对裂纹的形貌特征更加敏感, 因此上述现象也说明裂纹在 150 mW 功率加热时其形貌特征的变化情况也与 50 mW 及 100 mW 功率下的有所不同。当功率增大到 200, 250, 300 mW 时, 从图 8(a) 中可以看到, tR 信号的峰峰值在冷却后稳定时比开启加热光前会有所减小, 说明裂纹在更高的功率下仍会进一步被破坏。从图 8(b) 中可以看到, 在 250 mW 功率加热再冷却后的 tL-R 信号峰峰值的变化趋势与

200 mW 时的也有较明显的区别,这说明裂纹在 250 mW 功率加热光辐照下,其形貌特征发生了进一步的改变。值得注意的是,在关闭加热光开始冷却后的第 5 s, tR 信号的峰峰值会减小到低于之前未加热时的状态,然后缓慢上升,向未加热时的状态恢复。

3.3 第三类实验结果

第三类实验结果的透射超声信号的峰峰值在关闭加热光后,也只有在较低功率下,能够在下一个加热周期开始前完全恢复到未加热时的状态,但 tR 信号的变化曲线存在突变现象。实验结果如图 9 所示。

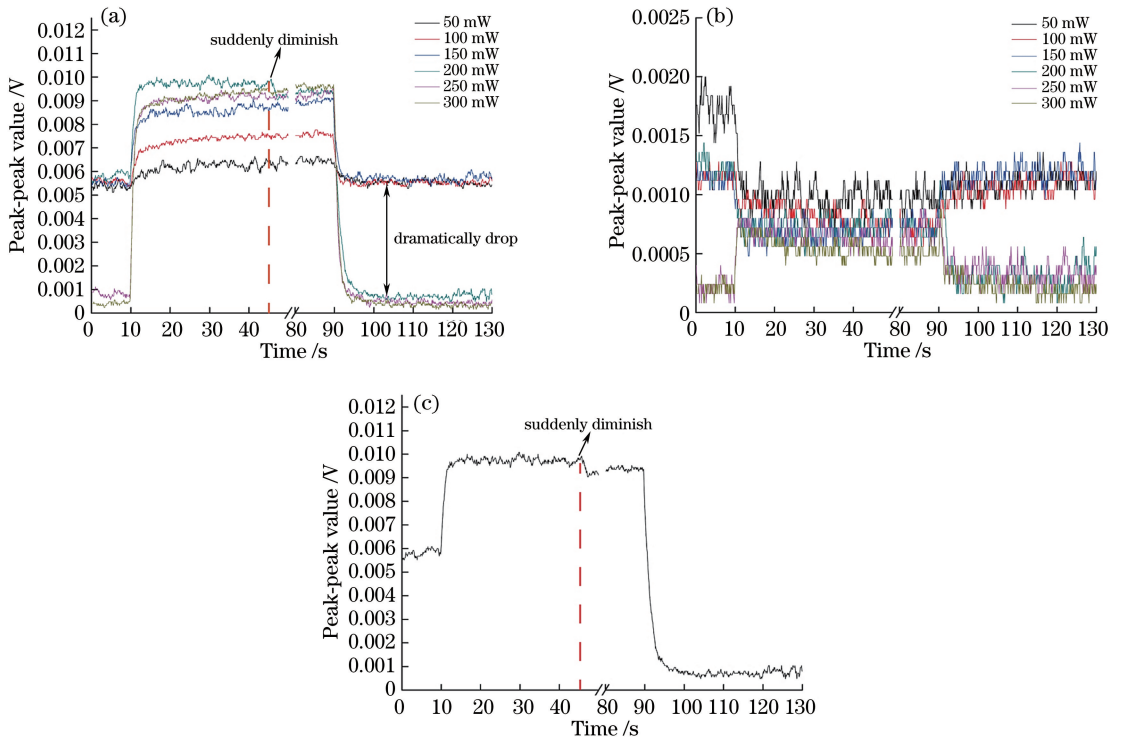


图 9 第三类实验结果。(a)裂纹在不同功率加热及自然冷却时 tR 信号的实时监测结果;(b)裂纹在不同功率加热及自然冷却时 tL-R 信号的实时监测结果;(c)裂纹在 200 mW 功率加热及自然冷却时 tR 信号的实时监测结果

Fig. 9 Third type of experimental results. (a) Real-time monitoring results of tR signals for cracks under different power heating and natural cooling conditions; (b) real-time monitoring results of tL-R signals for cracks under different power heating and natural cooling conditions; (c) real-time monitoring results of tR signals for cracks under 200 mW power heating and natural cooling conditions

由图 9 可知,与上文提到的两类实验结果相同的是,开启加热光时, tR 信号的峰峰值会增大,关闭加热光时, tR 信号的峰峰值会减小。而与上文提到的两类实验结果不同的是,当加热光功率增大到 200 mW 时, tR 信号的峰峰值在大约 45 s 时突然减小。图 9(c)单独列出了裂纹在 200 mW 加热及自然冷却时 tR 信号峰峰值随时间变化的曲线。由图 9(c)可知, tR 信号的峰峰值在 45 s 处突然减小并稳定。在此突变现象发生后, tR 信号以及 tL-R 信号的峰峰值的曲线均发生了明显变化, tR 信号在冷却后稳定时的峰峰值相较于突变现象发生前的冷却后稳定时的信号峰峰值有明显的下降,如图 9(a)中双箭头所示,而 tL-R 信号的峰峰值则呈现出与突变前相反的变化趋势。注意到在突变现象发生前,开启

加热光后, tL-R 信号的峰峰值呈减小趋势,如图 9 (b)中 50~200 mW 功率下的 10~20 s 区域所示,而突变现象发生后, tL-R 信号的峰峰值则呈增大趋势,如图 9(b)中 250 mW 和 300 mW 功率下的 10~20 s 区域所示。根据之前的研究^[29],若裂纹开口较大,即裂纹两壁离得较远,随着辐照在裂纹上的加热光功率的增大, tL-R 信号的峰峰值会呈现出先增大后减小的趋势,这是因为当加热光功率逐渐增大时,裂纹逐渐闭合,裂纹两壁的突起会先接触,这些接触的突起会使声表面波信号发生模式转换,转换为纵波信号并经裂纹透射,从而使 tL-R 信号的峰峰值增大,而随着加热光功率继续增大,裂纹闭合程度加深,这些突起的边缘也会逐渐接触,突起边缘的接触会抑制声表面波信号发生模式转换,导致 tL-R 信号

的峰峰值减小。由此可以看出,在突变现象发生前,裂纹闭合得更紧密,而突变现象发生后,裂纹的闭合程度大幅减弱,这说明此突变现象是由裂纹两壁的突起在加热时发生断裂引起的,突起发生断裂使得裂纹的开口增大,导致 tR 信号及 tL-R 信号的峰峰值出现上述的变化趋势。相较于第二类实验结果的裂纹随着加热光功率的增大而被逐步破坏,第三类实验结果的裂纹的形貌特征则是在功率为 200 mW

的加热光辐照下被突然破坏。

4 讨 论

已有研究对与本研究中类似的裂纹进行了原子力显微镜 (AFM) 扫描观测^[28], 结果如图 10 所示。文献[28]在与本研究相同的材料上使用相同的方法获得了多道裂纹, 这些裂纹在形貌特征及裂纹开口宽度上有较高的可重复性。

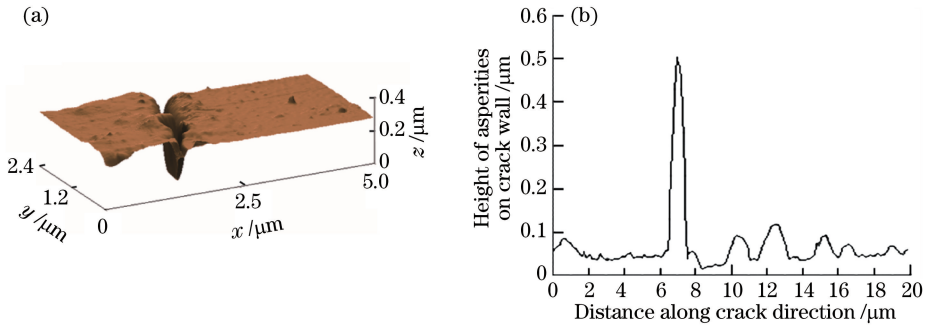


图 10 离裂起始点 1.5 mm 处的裂纹的三维 AFM 扫描结果(a)和裂纹壁上的突起高度沿裂纹方向的变化(b)
Fig. 10 Three-dimensional AFM image of crack at 1.5 mm from starting point of crack (a) and variation of asperity height on crack wall along crack direction (b)

由图 10(a)可知,裂纹左壁存在一个较大的突起,当辐照在此处的加热光功率足够大时,裂纹的闭合必然会使该突起发生断裂,从而造成裂纹形貌特征的突变。由图 10(b)可知,在裂纹壁较大的突起周围,还存在一些较小的突起,这些不规则的突起会使裂纹的形貌特征在受热闭合的过程中发生不同的改变。

基于实验结果,结合图 10 裂纹的 AFM 观测结果,可将实验所观察到的透射超声信号的三种不同的变化趋势归纳为裂纹壁上突起在裂纹受加热光辐照时的三种变化过程:

1) 裂纹壁上的突起没有因裂纹受加热光辐照而被破坏;

2) 裂纹壁上的突起会随着辐照在裂纹表面的加热光功率的增大而被逐渐破坏;

3) 裂纹壁上的突起会在辐照在裂纹表面的加热光增大到一定功率时被突然破坏。

以下将从裂纹在未加热时的初始形貌特征的角度对产生这三种不同变化过程的原因进行讨论。

对于第一类实验结果,因为裂纹在加热冷却后,透射超声信号可以在下一个加热周期开始前完全恢复到未加热时的状态,说明裂纹在受加热光辐照时,其形貌特征没有因受热闭合而被破坏,如图 11 所示。图中绿色区域为加热光辐照的区域,黑色的向内与向外的箭头分别表示裂纹的闭合与张开。

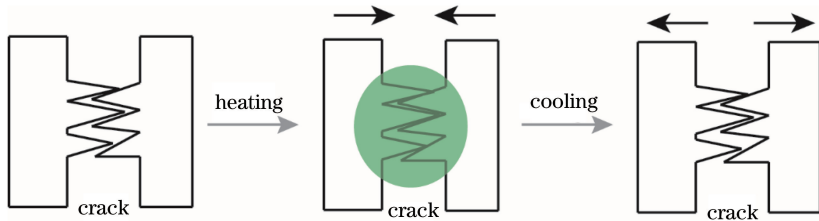


图 11 第一类实验结果所对应的裂纹形貌特征

Fig. 11 Crack morphology characteristics corresponding to first type of experimental results

由图 11 可知,当裂纹受加热光辐照时,虽然裂纹两壁会闭合,但裂纹两壁的突起不会因为裂纹的闭合而被破坏,因此关闭加热光后,裂纹可以在下一个加热周期开始前完全恢复到未加热时的状态。

对于第二类实验结果,由图 8 可知, tR 信号的峰峰值在关闭加热光后没有直接恢复到未加热时的状态,而是先减小到低于未加热时的状态,再缓慢增大,逐渐向未加热时的状态恢复。说明此类裂纹受

到加热光辐照时,裂纹的闭合会使两壁的突起受到一定程度的破坏,使得裂纹在关闭加热光后短时间内的闭合程度弱于开启加热光前的状态,但由于加热光辐

照此类裂纹时,裂纹闭合对裂纹壁上突起破坏程度较弱,裂纹壁上的突起在关闭加热光后仍有恢复到未加热时状态的趋势,具体示意图如图 12 所示。

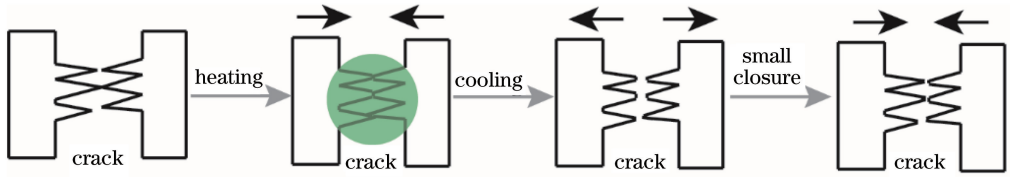


图 12 第二类实验结果所对应的裂纹形貌特征

Fig. 12 Crack morphology characteristics corresponding second type of experimental results

由图 12 可知,加热光辐照在裂纹表面使裂纹闭合时,不会对裂纹的形貌特征造成很严重的破坏,因此在撤去加热光后,裂纹有恢复到未加热状态时的趋势,同时由于裂纹壁不存在高于其他位置很多的突起,裂纹在受热闭合的过程中也不会由于突起的突然断裂造成裂纹形貌特征的突然改变,即裂纹在受加热光辐照时的变化过程是一个被缓慢破坏的过程。实际上,在关闭加热光后,裂纹会同时出现两种变化过程:一是辐照在裂纹上的加热光被撤去,导致裂纹两壁分开;二是由于裂纹的形貌特征没有被严重破坏,裂纹两壁的突起在玻璃弹性限度内会有恢复到未加热时状态的趋势(即闭合的趋势)。第一种

变化过程相比第二种变化过程持续时间要短,但变化更为剧烈,因此在关闭加热光后,裂纹两壁会先分开,再小幅闭合,使得 tR 信号的峰峰值在关闭加热光后先减小到低于未加热时状态,再缓慢向未加热时的状态恢复。

对于第三类实验结果,从上文对于此类结果的讨论中可知,当加热光功率增大到一定程度时,透射超声信号的曲线会出现突变,当此突变现象发生后,裂纹的闭合程度会大幅减弱且不可恢复。根据以上的讨论,可以推测出此类实验结果可能对应的裂纹形貌特征如图 13 所示(为了便于说明,这里假设裂纹壁的其中一边是水平的)。

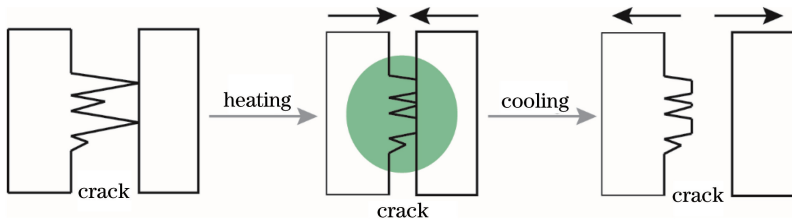


图 13 第三类实验结果所对应的裂纹形貌特征

Fig. 13 Crack morphology characteristics corresponding to third type of experimental results

由图 13 可知,此类裂纹存在的较高突起先与另一端的裂纹壁接触,当辐照在裂纹表面的加热光功率较小时,不足以对此突起造成破坏,而当加热光功率增大到某个值时,这些较高的突起会发生断裂,使裂纹的闭合程度大幅减弱,且裂纹的这种变化不可恢复。

始形貌特征及在加热和自然冷却时其形貌特征的变化过程进行了分析与讨论。结果表明,利用本研究所提方法,可以实现对裂纹在受不同加热光功率加热及关闭加热光自然冷却时的透射超声信号变化过程的实时监测,并观察到在准静态实验中观察不到的现象,这些现象反映了裂纹在受加热光辐照闭合及自然冷却分开时其形貌特征的细节变化过程。本研究可为深入了解非线性激光超声裂纹检测方法提供有用的信息,还可为系统解释裂纹在施加载荷时的行为和变化等提供新的思路。

5 结 论

利用差分的光偏转检测装置对裂纹在受不同加热光功率加热及自然冷却后透射超声信号的变化情况进行了实时监测,并在不同的裂纹及裂纹的不同位置进行了多次重复实验,根据实验得到的透射超声信号的变化趋势,将实验结果分为三类,并对每一类实验结果所对应的裂纹在未受加热光辐照时的初

参 考 文 献

[1] 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.
- [2] Bian X Y, Fan J Z, Ma Z L, *et al.* Influence of particulate inhomogeneous distribution on performance of particulate-reinforced aluminum matrix composites [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2010, 34(3): 357-362.
- 边心宇, 樊建中, 马自力, 等. 颗粒分布不均匀型缺陷对颗粒增强铝基复合材料性能的影响 [J]. *稀有金属*, 2010, 34(3): 357-362.
- [3] Wu X Y, Yu Y J, Lü L J. Review on non-destructive detection of inner defects of object [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(4): 040002.
- 伍小燕, 于瀛洁, 吕丽军. 物体内部缺陷无损检测技术综述 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(4): 040002.
- [4] Sun K H, Shen Z H, Li Y L, *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): 0710001.
- 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): 0710001.
- [5] Li H Y, Li Q X, Wang Z B, *et al.* Detection and evaluation of surface defects based on critical frequency method by laser ultrasonic [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0712003.
- 李海洋, 李巧霞, 王召巴, 等. 基于激光超声临界频率的表面缺陷检测与评价 [J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0712003.
- [6] Lévesque D, Dubourg L, Blouin A. Laser ultrasonics for defect detection and residual stress measurement of friction stir welds [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2011, 26(3/4): 319-333.
- [7] Everton S K, Hirsch M, Stravroulakis P, *et al.* Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing [J]. *Materials & Design*, 2016, 95: 431-445.
- [8] 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.
- [9] Park B, An Y K, Sohn H. Visualization of hidden delamination and debonding in composites through noncontact laser ultrasonic scanning [J]. *Composites Science and Technology*, 2014, 100: 10-18.
- [10] Campagne B, Levesque D, Blouin A, *et al.* Laser-ultrasonic inspection of steel slabs using SAFT processing [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2002, 615(1): 340-347.
- [11] 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 [and discussion] [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1986, 320(1554): 319-328.
- [12] Arias I, Achenbach J D. A theoretical model for the ultrasonic detection of surface-breaking cracks with the scanning laser source technique [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2003, 657(22): 281-288.
- [13] Arias I, Achenbach J D. Detection of surface-breaking cracks by laser-based ultrasonics [J]. *Proceedings of the Asian Pacific Conference on Fracture and Strength and International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics*, 2001, 1.01.203: 1-10.
- [14] Solodov I. Resonant acoustic nonlinearity of defects for highly-efficient nonlinear NDE [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2014, 33(2): 252-262.
- [15] Pfleiderer K, Aufrecht J, Solodov I, *et al.* Multi-frequency ultrasonic NDE for early defect recognition and imaging [C]. *IEEE Ultrasonics Symposium*, 2004: 693-696.
- [16] Solodov I, Döring D. New opportunities for NDT using non-linear interaction of elastic waves with defects [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011(3): 169-182.
- [17] Zaitsev V, Gusev V, Castagnede B. Luxemburg-gorky effect retooled for elastic waves: a mechanism and experimental evidence [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(10): 105502.
- [18] Rajakarunanayake Y N, Wickramasinghe H K. Nonlinear photothermal imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 1986, 48(3): 218-220.
- [19] Yan Z Y, Nagy P B. Thermo-optical modulation of ultrasonic surface waves for NDE [J]. *Ultrasonics*, 2002, 40: 689-696.
- [20] Mezil S, Chigarev N, Tournat V, *et al.* All-optical probing of the nonlinear acoustics of a crack [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(17): 3449-51.
- [21] Mezil S. Nonlinear optoacoustics method for crack detection and characterization [D]. *Le Mans : Université du Maine*, 2012: 1-9.
- [22] Mezil S, Chigarev N, Tournat V, *et al.* Two dimensional nonlinear frequency-mixing photoacoustic imaging of a crack and observation of crack phantoms [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(17): 174901.
- [23] Mezil S, Chigarev N, Tournat V, *et al.* Evaluation

- of crack parameters by a nonlinear frequency-mixing laser ultrasonics method[J]. *Ultrasonics*, 2016, 69: 225-235.
- [24] Gusev V, Chigarev N. Nonlinear frequency-mixing photoacoustic imaging of a crack: theory[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(12): 124905.
- [25] Ni C Y, Chigarev N, Tournat V, *et al.* Probing of laser-induced crack modulation by laser-monitored surface waves and surface skimming bulk waves[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, 131(3): EL250-EL255.
- [26] Adler R, Korpel A, Desmares P. An instrument for making surface waves visible[J]. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 1968, 15(3): 157-160.
- [27] Li J, Zhang H C, Ni C Y, *et al.* Analysis of laser generated ultrasonic wave frequency characteristics induced by a partially closed surface-breaking crack [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(18): 4179-4185.
- [28] 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.
- [29] Lü J C. Laser ultrasonic monitoring of laser-induced microcrack closure[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2017: 28-33.
吕锦超. 光致微裂纹闭合的激光超声监测研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017: 28-33.