

基于激光辅助加热的激光超声投捕法识别微裂纹

李 加¹ 倪辰荫² 张宏超¹ 董利明¹ 沈中华¹

(¹ 南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094)
(² 南京航空航天大学理学院, 江苏 南京 210016)

摘要 工件几何形状不规则或材料性质非均匀时,易发生局部应力突变,导致工件产生裂纹。利用传统的超声检测技术(如超声投捕法)对这种早期裂纹进行检测时,由于裂纹尺寸很小以及工件表面其他的散射物(如表面突起、凹槽和腐蚀坑等)对声波的影响,从而难以有效分辨微裂纹。搭建了基于激光超声投捕法的表面缺陷光学检测系统,超声信号由激光线源激发,光偏转差分法探测。对比了传统投捕法、扫描激光源法与扫描加热源法对表面含有突起和微裂纹的样品进行扫描检测的结果。投捕法对信号信噪比要求较高、可靠性较差。扫描激光源法能检测两种缺陷但不能将微裂纹识别出来。扫描加热源法利用微裂纹受热膨胀易发生局部闭合的特性,可以将其与样品表面的突起加以区分。采用有限元方法,分析了裂纹尺寸变化对透射声表面波的影响。

关键词 测量;激光超声;投捕法;激光加热;微裂纹识别;声表面波

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0408008

Detection of Micro-Crack by Ultrasonic Approach of One-Sided Pitch-Catch Method Based on Laser Assisted Heating

Li Jia¹ Ni Chenyin² Zhang Hongchao¹ Dong Liming¹ Shen Zhonghua¹

(¹ School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)
(² School of Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract Due to the geometry irregularities of specimens and the inhomogeneous of materials, micro-crack is usually generated by abrupt change of local stress. Traditional detecting techniques using ultrasound, such as pitch-catch method, are difficult to distinguish the micro-crack effectively, because the size of the cracks are so small that they are often hidden from ultrasonic detection by a stronger scattering from the very same structural imperfection, such as surface protuberance, surface grooves, corrosion pits, etc. The laser ultrasonic detecting system is built to detect the surface irregularities based on one-sided pitch-catch method. The laser line source is used to excite ultrasound and the optical deflection beam method is used to detect ultrasound. The traditional pitch-catch method, scanning laser source method and the scanning heating laser source method are used to detect the surface irregularities of specimen which contains a surface protuberance and a surface breaking micro-crack. The pitch-catch method requires high signal to noise ratio of signals and the reliability is poor. The scanning laser source method can detect both one but can not distinguish the crack from them. Based on the characteristics that the micro-crack can get closed partially after illuminated by heating laser, the scanning heating laser method can recognize it efficiently. The finite element method (FEM) is used to calculate the transmitted surface acoustic waves (SAW) which are influenced by different sizes of surface breaking cracks.

Key words measurement; laser ultrasonic; pitch-catch method; laser heating; micro-crack detection; acoustic surface waves

OCIS codes 070.7345; 120.4290; 280.3375

收稿日期: 2012-11-28; 收到修改稿日期: 2013-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(61108013, 11274175)和中央高校基本科研业务费专项资金(NUST2012ZDJH007)资助课题。

作者简介: 李 加(1984—),男,博士研究生,主要从事激光超声检测技术方面的研究。E-mail: lijia_njust@hotmail.com

导师简介: 沈中华(1973—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事激光超声技术及应用,激光与材料相互作用及应用等方面的研究。E-mail: shenzh@mail.njust.edu.cn(通信联系人)

1 引言

工业设备、零件上的微裂纹在设备运行过程中不断生长,最终有可能导致其发生断裂,造成重大事故。因此,对于微裂纹的检测十分必要。声表面波由于对表面和亚表面缺陷的高度敏感性,非常适用于表面和亚表面缺陷的检测。近年来,激光超声技术因其宽频带、非接触和探测距离远等特点,成为无损检测领域的重要分支^[1~3]。超声投捕法是目前使用较多的传统超声检测方法之一^[4],该方法操作简单、检测效率高,但探测精度受信号噪声的影响很大。Kromine 等^[5]提出了扫描激光源方法,提高了对微裂纹的检测能力。实际检测中,工件表面的突起、凹槽、腐蚀坑和粗晶粒等散射物对表面波信号产生影响,增加了分辨微裂纹的难度。针对微裂纹的检测方法一直在发展之中,非线性技术成为提高分辨率的有效手段。Buck 等^[6]最早提出通过外部机械加载的方式对样品之间的非接触界面进行非线性调制,并通过监测二次谐波分量判断裂纹的存在。这种外部载荷通常是施加在整个样品上,很可能对结构的某一部分带来二次损伤。Yan 等^[7,8]提出利用激光辐照的热弹效应可以使裂纹发生局部闭合,提高了声表面波对裂纹的检测能力。通过激光辐照方式对样品的裂纹区域进行加热可以获得暂时的热应力,当加热源关闭后,裂纹区域温度下降,热应力消失,调制过程完全可逆,不会对样品的结构造成破坏。此外,激光加热可以实现非接触式的调制,不受样品大小、形状等的限制。Li 等^[9,10]采用 532 nm

连续激光作为加热激光源,与其提到的利用脉冲激光进行调制的方法相比,连续激光可以实现准静态的调制,并且可以从加热时间、加热能量上进行精确的监测和控制。

本文分别使用传统投捕法、扫描激光源法、扫描加热源法对样品表面缺陷进行检测。投捕法对信号信噪比以及反射回波幅值要求较高,不适合检测微裂纹。扫描激光源法对样品表面存在的突起和裂纹能够清晰地检出,但无法分辨两者。扫描加热源时,微裂纹受激光辐照发生受热膨胀,导致局部闭合,通过对激光加热时,透射声表面波信号强度变化的监测,能清晰地识别出微裂纹。通过对比,进一步验证了扫描加热源法识别样品表面微裂纹的能力,利用有限元方法分析了不同裂纹尺寸对声表面波透射率的影响,为扫描加热源方法的合理性提供了理论依据。

2 实验系统和方法

基于激光辅助加热的微裂纹识别系统如图 1 所示。波长为 1064 nm、脉宽为 1 ns、重复频率为 100 Hz 的 Nd:YAG 脉冲激光经柱面镜、三棱镜后在样品表面聚焦成激发线光源,长度约为 1.5 mm,宽度约为 300 μm 。激光能量密度控制在样品的损伤阈值以下,确保超声信号的热弹激发。波长为 808 nm、功率为 800 mW 的半导体激光器发出的激光经过芯径为 0.5 mm 的石英光纤辐照到样品表面形成加热点光源,光斑直径 $d = 500 \mu\text{m}$ 。由光电管接收激发光的散射光并触发数字示波器后,激光激发的超声波信

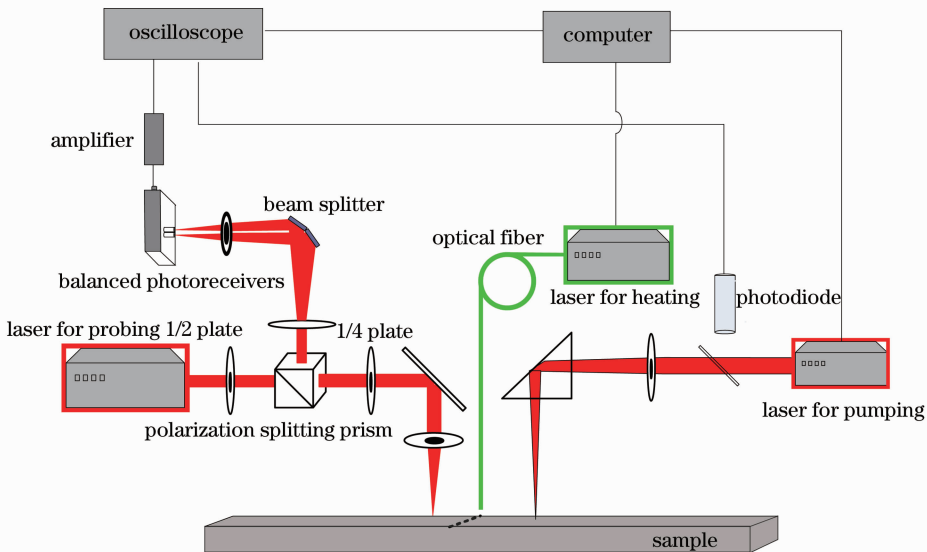


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

号由光偏转差分检测系统探测,并在数字示波器上输出信号,最后由计算机记录数据。

波长为 632.8 nm 的单模 He-Ne 激光器被用作光偏转检测方法的探测光源,激光输出功率为 17 mW。探测光经 1/2 波片调整偏振方向后入射到偏振分光棱镜,可以实现探测光能量的控制,透射光再经 1/4 波片后由全反镜偏折,最后垂直聚焦在样品表面形成直径为 400 μm 的探测点。经样品反射的光束由原光路返回至偏振分光棱镜,由于两次经过 1/4 波片,反射光与入射光的偏振方向呈 90° 夹角,经偏振分光棱镜反射后与入射光以 90° 夹角分离。反射光照射到由两块半圆反射镜以微小夹角组合成的分光镜中心,从而将反射光分成两束并各自聚焦到平衡接收器的两个光敏面上,平衡接收器为美国 New Focus 公司产品,型号为 1607-AC-FS。由平衡接收器得到的差分信号经前置放大器放大后由示波器显示并最终由计算机记录。该差分信号记录了探测点处的表面倾斜程度,即样品表面的声振动。该系统对传统的斜入射式光偏转差分检测系统进行了改进,使得探测光垂直入射到样品表面,并且经样品反射后沿原光路返回。与传统光偏转方法相比,垂直入射可以使探测点的光斑尺寸更小,能提高探测到的信号的频宽。另外,由于入射的探测光垂直入射到样品表面,当样品水平放置时,反射光线也会沿入射光的轨迹垂直返回,更换样品时,只需要调整样品水平即可。相比于传统的斜入射光偏转方法,垂直入射法的入射光和反射光由同一面反射镜进行 90° 偏折,部分光路重叠在一起,因此光路更加紧凑,有利于整个探测系统的移动和扫描。

实验样品为一块 50 mm \times 25 mm \times 3 mm 的黑色玻璃,通过热冲击方法加工出垂直于样品边缘的表面开口微裂纹 M,裂纹长度约为 10 mm,开口宽度为 300 μm 。再利用熔化的焊锡在样品表面加工出一条约 10 mm 长,350 μm 宽的细长型突起 N,裂纹和突起之间的距离约为 32 mm,如图 2 所示。该实验分三部分进行。首先是利用经典的投捕法(pitch-catch)检测裂纹。其次是扫描激光源法检测,探测点固定不变,激发线光源由点 A 至点 B 逐点扫描 60 步越过突起、裂纹区域,扫描步长为 100 μm 。最后利用扫描加热激光源法进行检测,激发线源和探测点源固定于样品两侧,调整加热激光源的起始位置,使扫描加热源法与扫描激光源法的扫描路径一致。加热源由点 A 至点 B 逐点扫描 60 步越过突起裂纹区域,扫描步长为 100 μm 。通过计算机可同时控制声表面波

信号的激发和采集及激光加热源的加热时间,实现整个扫描检测过程的自动化。

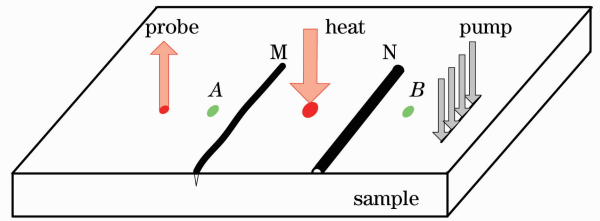


图 2 具备裂致和突起的实验样品示意图

Fig. 2 Schematic diagram of specimen with protuberance and crack

3 结果和讨论

3.1 投捕法

传统的投捕法是检测表面缺陷的有效手段,该方法利用探测激光激发出的声表面波传播至表面缺陷处并与其相互作用后幅值、频谱等的变化,从而对表面缺陷进行检测。如图 2 所示,当探测点固定,激发线源位于裂纹 M 和突起 N 之间时,由投捕法得到的超声波信号如图 3 所示,两幅图为激发线源位于不同位置时得到的信号。图 3(a)信噪比较高,可以清楚地分辨出透过裂纹 M 的掠面纵波模式转换成的瑞利(Rayleigh)波 tR-L,透射瑞利波 R,以及由突起 N 反射的瑞利波 rR。由于光学检测方法对环境振动十分敏感,当实验过程中有振动发生时,超声波信号信噪比明显下降,如图 3(b)所示,图 3(a)中能清晰分辨的 tR-L 波和 rR 波都淹没在噪声中。因此,利用投捕法检测裂纹时,需要超声波信号具备较高的信噪比,当信噪比下降时,无法得到可靠的检测结果。该方法对超声波反射波幅值也有一定的要求,当裂纹尺寸较小,引起的超声回波幅值相比入射

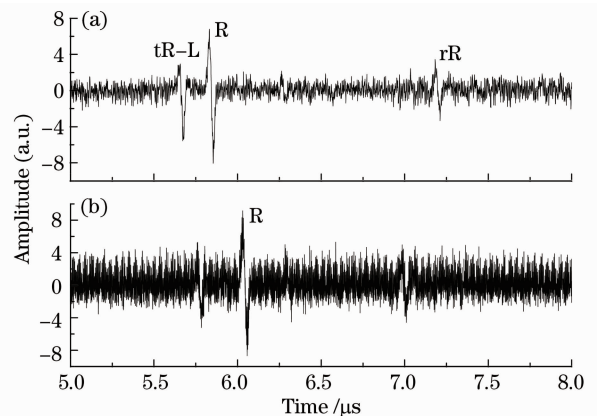


图 3 基于投捕法得到的超声波信号

Fig. 3 Signals detect by pitch-catch method

波小很多时,难以观测。因此投捕法对于微小裂纹的检测能力有限。

3.2 扫描激光源法

激发源沿样品表面扫描可分为三个区间,即探测点与裂纹 M 之间、裂纹 M 与突起 N 之间、越过突起 N,如图 4(a)~(c)所示。扫描得到的实验结果如图 4(d)所示。图中,直接到达的瑞利波标记为 R,由裂纹反射导致掠面纵波模式转化成的瑞利波标记为 rR1-L,由裂纹反射的瑞利波标记为 rR1,经过裂纹传播并且纵波发生模式转换形成的透射瑞利波标记为 tR1-L。表面波到达表面突起 N 后,再次被突起反射且透射部分发生模式转换,分别标记为 rR2 和 tR2-L。由于传播距离较远且经过裂纹,探测不到明显的由突起反射导致的掠面纵波的模式转换。对不同信号的确认是通过比较实验测得的到达时间和

理论值得到的。观察图中直达的和反射的瑞利波 R, rR1, rR2,三者速度一致。当激发源位于探测点与裂纹之间时,如图 4(a)所示, rR1 的到达时间 $t_{rR1} = (2s_1 + d_1)/c_R$, rR1-L 的到达时间 $t_{rR1-L} = s_1/c_L + (s_1 + d_1)/c_R$, 两者到达的时间差 $\Delta t_1 = t_{rR1} - t_{rR1-L} = s_1(1/c_R - 1/c_L)$ 。当激发源位置如图 4(b)所示时, $t_R = (s_2 + d_2)/c_R$, $t_{rR1-L} = s_2/c_L + d_2/c_R$, $\Delta t_2 = t_R - t_{rR1-L} = s_2(1/c_R - 1/c_L)$ 。当激发源位置如图 4(c)所示时, $t_R = (s_3 + d_3)/c_R$, $t_{rR2-L} = s_3/c_L + d_3/c_R$, $\Delta t_3 = t_R - t_{rR2-L} = s_3(1/c_R - 1/c_L)$ 。由以上的推导得到,纵波转换成的瑞利波 rR1-L, tR1-L, tR2-L, 三者相对于瑞利波到达时间差的斜率一致,为 $1/c_R - 1/c_L$ 。该结果与实验结果相吻合,表现为 rR1-L 与 tR1-L 对称, tR1-L 与 tR2-L 平行。

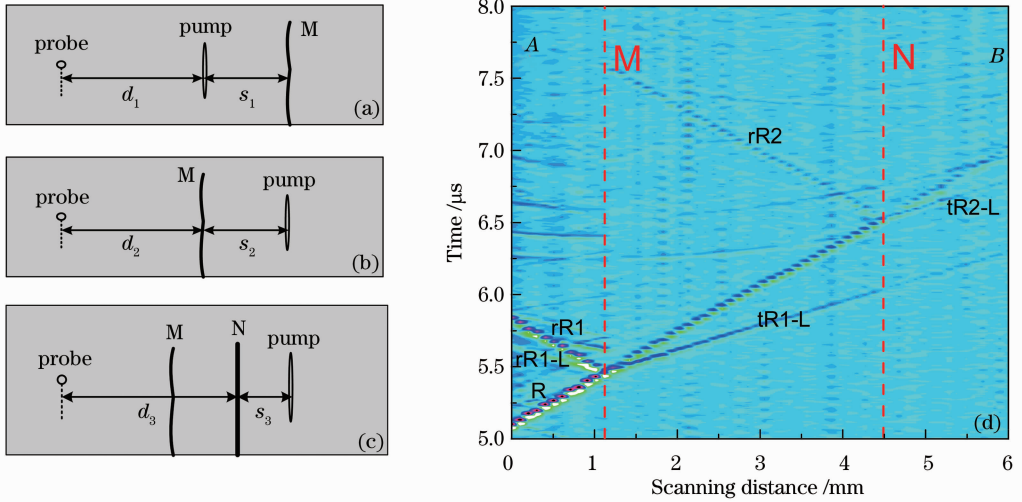


图 4 (a), (b), (c) 激发源不同位置示意图; (d) 扫描激光源法检测表面缺陷的实验结果图

Fig. 4 (a), (b), (c) Schematic diagrams of pump point with different locations; (d) scanning figure obtained by scanning laser source method

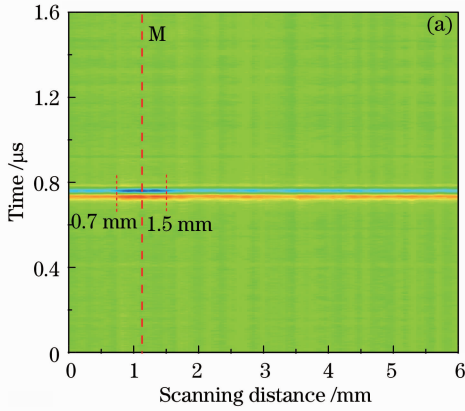
图 4(d)为扫描激光源得到的典型的实验结果。激发源在不断靠近表面缺陷直至掠过表面缺陷的过程中,在样品上固定的接收点处探测到的超声波位移信号在振幅和频率成分等方面都会发生显著的变化。该方法主要利用了表面缺陷的存在改变了激光在材料表面作为激发源产生的热弹性声源分布以及超声波的近场散射。激发源位于初始位置时,接收点能够探测到清晰的直达和反射瑞利波信号 R, rR1, 由于裂纹的存在,使得掠面纵波有一部分发生模式转换,形成瑞利波 rR1-L。当激发源扫描至 M 位置(1.1 mm)时, rR1 及 rR1-L 消失。随着扫描的继续,开始观察到透射的瑞利波信号 R 及透射的模式转换的瑞利波 tR1-L, 并且在信号的末端区域

发现另一反射回波信号 rR2。扫描结果清晰地显示出表面裂纹的位置。该裂纹能反射一部分瑞利波并且使一部分反射和透射的掠面纵波发生模式转换。当激发源扫描至突起 N(4.5 mm)时,反射回波 rR2 与直达的瑞利波会聚。激发源越过突起后,由于突起的存在,能观察到一部分透射的掠面纵波模式转换成瑞利波 tR2-L。通过扫描激光源的方法,可以有效地检测出样品表面裂纹和突起的准确位置,但是不能将微裂纹与表面突起分辨开来。

3.3 扫描加热源法

扫描加热激光源得到的加热信号一维扫描图如图 5(a)所示。激发点和接收点的位置固定不变,所以在超声波传播路径上没有条件发生变化时,接收

到的信号趋于稳定。观察图中的结果,在扫描至 0.7 mm 时,加热信号的幅值发生了明显的增大。在 1.1 mm 处,加热信号达到最大值。随后,加热信号



逐渐减小,扫描点越过 1.5 mm 以后,加热信号趋于稳定值。图 5(b) 给出的加热信号峰峰值曲线直观地表现了加热信号幅值的变化。

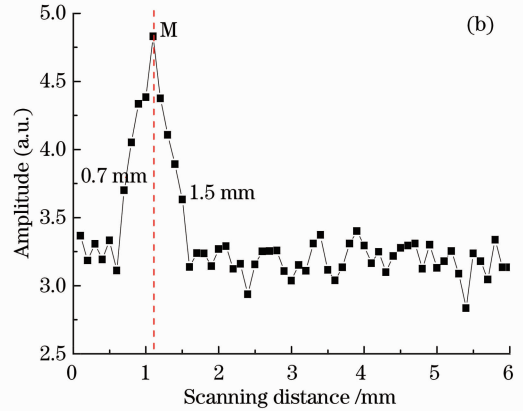


图 5 (a) 加热信号一维扫描图; (b) 加热信号峰峰值曲线

Fig. 5 (a) Heating signals scanning across the sample surface; (b) peak to peak value of heating signals

在之前的研究结果中,扫描加热源方法已被成功应用于检测微裂纹^[9]。由于微裂纹的裂纹壁距离较近,当裂纹区域受到激光辐照时,裂纹两壁由于受热膨胀,很容易发生局部闭合,这将对经裂纹传播的超声波信号产生明显的影响。而对于表面突起这一类表面缺陷而言,激光辐照并不会明显改变缺陷区域的形态,即加热表面突起区域对经其传播的超声波信号没有明显影响。在这里的扫描加热源实验中,激发点和接收点是固定的,当没有加热源存在时,接收点处可以探测到稳定的透射声表面波信号。如图 5 所示,当加热源扫描至 0.7 mm 之前时,透射表面波信号幅值稳定,该区域没有微裂纹存在。在加热源扫描至 0.7 mm 时,加热光斑接近裂纹的一侧,靠近加热光斑一侧的裂纹壁受热膨胀,相对于另一侧裂纹壁发生位移,导致裂纹区域发生局部闭合,透射声表面波信号呈现逐渐增大的趋势。当加热光斑扫描至 1.1 mm 时,光斑中心与裂纹中心重合,裂纹两壁受到的激光能量最多,闭合效应最显著,裂纹发生局部闭合的部分最多,使得透射声表面波的信号强度最大。当加热光斑中心离开裂纹中心后,裂纹局部闭合的部分逐渐减少,最终由于加热源离开裂纹区域,透射声表面波信号趋于扫描开始时的初始幅值。通过扫描加热源方法,可以判定,在扫描加热源位于 1.1 mm 处时,检测到样品表面存在微裂纹,由于该裂纹的存在,导致透射声表面波信号幅值发生变化。

利用扫描加热源法识别微裂纹,其理论基础为热弹条件下连续激光点源辐照样品裂纹区域引起的

温升和裂纹壁的相对位移。连续激光点源垂直辐照在样品表面裂纹区域时,在表层内被迅速吸收。根据能量守恒定律,当材料表层吸收激光能量后,表层材料的焓值增加,在宏观上表现为温度的升高及局部的体积膨胀,裂纹壁发生相对移动,从而使裂纹局部闭合。

加热源在扫描过程中,相对于裂纹的位置不同,导致裂纹发生闭合的程度不同,并最终影响透射的声表面波信号。因此研究不同尺寸的裂纹对声表面波传播的影响,对于验证扫描加热源检测微裂纹方法的合理性具有重要意义。有限元方法(FEM)是研究该影响的有效工具^[11,12]。模拟中以 SiO_2 为材料,V形槽开口宽度为 L ,深度为 h ,如图 6(c)所示。选取无裂纹情况(no crack)及 7 种不同裂纹尺寸($L \times h$,单位为 μm)进行计算,得到不同情况下得到的透射声表面波信号,如图 6(a)所示。图 6(b)所示的信号峰值变化曲线(从无裂纹到最大裂纹)直观地表明透射声表面波幅度随裂纹尺寸变化的关系。在样品表面没有裂纹时,透射声波幅度最大,当样品表面存在尺寸为 $100 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ 的 V 形缺口时,透射信号幅度下降到无裂纹时的一半,随着裂纹尺寸的进一步加大,透射声波信号的幅度呈现依次衰减的趋势,当 V 形槽尺寸增大到 $350 \mu\text{m} \times 1750 \mu\text{m}$ 时,透射声表面波幅度仅为无裂纹情况下的 1/8。以上计算结果表明,裂纹尺寸的大小对经其传播的声表面波信号影响明显,随着裂纹尺寸的加大,声表面波的透射率明显降低。该结果为扫描加热源法识别微裂纹提供了理论依据。

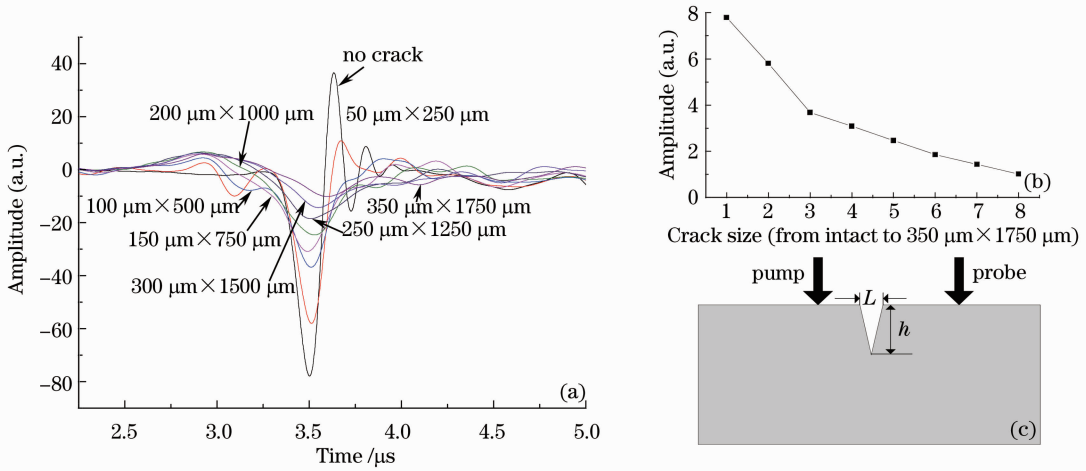


图 6 (a)不同裂纹尺寸下透射声表面波信号; (b)信号峰值变化曲线; (c)有限元模型示意图

Fig. 6 (a) Transmitted SAWs signals propagated through cracks with different sizes; (b) peak value of signals; (c) model used in FEM (illustration)

对比扫描激光源和扫描加热源的结果可以得出,通过这两种方法在 1.1 mm 处都能检测到表面裂纹,而扫描激光源法在 4.5 mm 处能检测出表面突起的存在。对于以微裂纹为检测对象的检测工作来说,检测到的突起类似于噪声,干扰了微裂纹的检测。在工业检测中,微裂纹作为断裂发生的起始阶段,是否能被及时检出十分重要。而突起作为一般性的瑕疵,对整个结构的影响并不大。因此需要准确检测出裂纹,排除类似于突起这种表面瑕疵的干扰。扫描加热源法利用微裂纹受热膨胀发生局部闭合的特性,可以有效地识别微裂纹。

4 结 论

传统的投捕法是检测表面裂纹的有效手段,但是该方法对于信号的信噪比以及反射信号的幅值都有较高的要求,在微裂纹检测中,能力有限。扫描激光源法不依赖于超声波反射波的幅值,且不受个别激发位置信号信噪比低的影响,是一种新型表面缺陷检测方法。在样品表面存在多种缺陷时,能够通过缺陷对超声波信号的透射、反射及模式转换等信息判定缺陷的位置。但通过该方法,不能将表面开口微裂纹从其他缺陷中识别出来。基于微裂纹易受热膨胀并发生局部闭合的特性,提出了扫描加热源方法,该方法对微裂纹的存在十分敏感。有限元计算得到的不同尺寸裂纹对透射声表面波透射率的影响,为该方法的提出提供了理论依据。通过实验对比,扫描加热源法可以将扫描激光源法不能分辨的微裂纹准确识别出来。该方法对于早期裂纹的检测具有十分重要的意义,在工业在线检测领域有广阔

的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Dong Liming, Ni Chenyin, Shen Zhonghua *et al.*. Determination of elastic constants of materials based on the velocity measurement of laser-generated multi-mode ultrasound [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0408004
董利明, 倪辰荫, 沈中华 等. 基于激光激发多模态超声波速测量的材料弹性常数测定[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0408004
- 2 Shen Zhonghua, Shi Yifei, Yan Gang *et al.*. Progresses in the applications of laser induced surface acoustic waves[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(z1): 239~244
沈中华, 石一飞, 严刚 等. 激光声表面波的若干应用研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(z1): 239~244
- 3 Qian Menglu. Progress in laser ultrasonics [J]. *Technical Acoustics*, 2002, **21**(1): 19~24
钱梦騷. 激光超声学的若干进展[J]. *声学技术*, 2002, **21**(1): 19~24
- 4 I. Y. Yang, K. H. Im, U. Heo *et al.*. Ultrasonic approach of Rayleigh pitch-catch contact ultrasound waves on CFEP Laminated composites [J]. *J. Mater. Sci. Technol.*, 2008, **24**(3): 407~409
- 5 A. K. Kromine, P. A. Fomitchov, S. Krishnaswamy *et al.*. Applications of scanning laser source technique for detection of surface-breaking defects[C]. *SPIE*, 2000, **4076**: 252~259
- 6 O. Buck, W. L. Morris, J. M. Richardson. Acoustic harmonic generation at unbonded interfaces and fatigue cracks[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **33**(5): 371~373
- 7 Z. Yan, P. B. Nagy. Thermo-optical modulation of ultrasonic surface waves for NDE [J]. *Ultrasonics*, 2002, **40** (1-8): 689~696
- 8 H. Xiao, P. B. Nagy. Enhanced ultrasonic detection of fatigue cracks by laser-induced crack closure[J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, **83**(12): 7453~7460
- 9 Jia Li, Liming Dong, Chenyin Ni *et al.*. Application of ultrasonic surface waves in the detection of microcracks using the scanning heating laser source technique [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2012, **10**(11): 111403
- 10 Dong Liming, Li Jia, Ni Chenyin *et al.*. Crack detection of engine blade based on laser-heating assisted surface acoustic waves generated by scanning laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011,

38(11): 1103001

董利明, 李 加, 倪辰荫等. 基于光热调制检测发动机叶片疲劳裂纹的激光声表面波方法[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1103001

- 11 Wang Xinggang, Zhou Ming, Di Jianke *et al.*. Numerical simulation and experiment of CO₂ laser cutting electronic strengthened glass[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(9): 091402

王星罡, 周 明, 狄建科等. CO₂激光切割电子强化玻璃过程的有限元模拟与实验[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(9): 091402

- 12 Li Juan, Sun Wenjun, Sun Jingnan *et al.*. Numerical analysis of CW laser damage in GaAs[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(5): 571~574

李 娟, 孙文军, 孙京南等. 连续激光辐照 GaAs 材料损伤的数值模拟计算[J]. 光子学报, 2012, 41(5): 571~574

栏目编辑: 何卓铭