

基于 Hilbert 变换的激光超声波成像技术 在缺陷检测中的应用

曾 伟¹ 王海涛¹ 田贵云^{1,2} 方 凌¹ 汪 文¹

(¹南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 210016

²纽卡斯尔大学电气与电子工程学院, 纽卡斯尔 NE1 7RU 英国)

摘要 介绍了一种基于 Hilbert 变换的激光超声波传播图像方法, 通过采用脉冲激光器在被测材料表面产生超声波信号, 对接收的超声波信号进行 Hilbert 变换, 并详细分析了超声波信号在被检测材料表面传播的时域波形图, 最后利用超声波成像技术将超声波信号在被测材料的传播过程进行图像显示。实验结果表明: 采取 Hilbert 对超声波信号进行变换的方法不仅能有效地提取超声波信号在缺陷处传播的信息, 还能从超声波传播的图像中直观、高效地检测出表面缺陷的形状、大小及分布情况。因此, 提出的 Hilbert 变换的激光超声波成像技术为工业中缺陷的定量检测提供了方法。

关键词 激光技术; Hilbert 变换; 激光超声波; 脉冲激光器; 表面缺陷; 定量检测

中图分类号 TN249; TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0508004

Application Laser Ultrasound Imaging Technology for Detecting Defect Based on Hilbert Transform

Zeng Wei¹ Wang Haitao¹ Tian Guiyun^{1,2} Fang Lin¹ Wang Wen¹

¹College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

²School of Electrical and Electronic Engineering, Newcastle University, Newcastle NE1 7RU, UK

Abstract This paper describes a method of laser ultrasonic propagation imaging based on Hilbert transform. The ultrasonic signals are excited by pulsed laser on the measured material surface. Then ultrasonic signal is transformed by Hilbert transform. and time-domain waveforms of analyzed measured ultrasonic signal propagation. Finally, ultrasonic signal propagation in the material is displayed by ultrasound imaging technology. The experimental results show that taking the ultrasonic signal Hilbert transform method can not only effectively extract the ultrasonic signal propagation at the defect, but also the shape, size and distribution of surface defects can be intuitive, efficiently detected by ultrasonic propagation imaging. Hence, the Hilbert-transform ultrasonic propagation imaging technology provides a method for quantitative detection of defects in manufacturing.

Key words laser technique; Hilbert transform; laser ultrasonic; pulsed laser; surface-breaking defects; quantitative detection

OCIS codes 140.3538; 140.3540; 140.3460

1 引 言

激光超声技术^[1-5]作为一种非接触、远距离的新兴检测技术, 主要将激光技术与超声技术有机结合, 不仅具有传统意义的超声波技术的特点, 而且还

具有如下特点: 可实现非接触激发超声波信号; 能同时在被测材料激发出纵波、横波及表面波; 易聚焦、可自由选取点、线、环的激光声源; 具有极高的时空分辨率; 可实现大面积、快速扫描及超声波成像等。

收稿日期: 2013-10-15; **收到修改稿日期**: 2013-12-13

基金项目: 国家科技部国际合作项目(2011DER71080)、欧盟 FP7 项目(FP7-PEOPLE-2010-IRSES 269202)

作者简介: 曾 伟(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事激光超声波检测技术方面的研究。E-mail: 270401671@qq.com

导师简介: 田贵云(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事传感器技术、电磁与电磁超声无损检测与评估、数字信号处理等方面的研究。E-mail: tian280@hotmail.com

激光超声技术的研究始于 1962 年,White 等^[6]提出采用激光技术在固体材料激发超声信号的方法以来,激光超声技术就成为各国学者研究的重点。目前,在许多工业技术领域都应用了激光超声技术,其主要包括以下几个方面:利用激光超声技术对材料内部缺陷的无损检测应用;材料特性如厚度、密度、应力分布、疲劳损伤等测量;激光超声波快速扫描及成像;生物组织光声成像等。

激光超声波成像技术,作为现代工业无损检测技术向着信息化高速发展的标志,已经成为国内外学者研究的热点。Takatsubo^[7]提出一种激光超声波可视化方法,根据超声波传播的可逆性原理(当激光超声波接收端与激光激发点位置固定时,交换超声波接收端与激光激发点位置,所接收到的超声波信号不变),采取该理论还原出超声波在被测材料中的传播图像,实现对被测材料的缺陷检测。Kromine 等^[8-10]采取激光扫描技术对表面缺陷进行检测,提出采取超声波信号的幅值及频率变化分析缺陷。为了从原始超声波信号中提取有关缺陷位置、大小等信息,提出了一系列的分离缺陷回波的方法如小波滤波法、傅里叶滤波法^[11]、阈值法^[12]及邻近平均值法等。Cianga 等^[13]提出采取超声波传播图像的方法自动检测管道缺陷,该方法能有效地检测出管道缺陷。因此,超声波传播图像方法^[14-17]能广泛应用于各种无损评估和结构健康监测等方面。

针对以上分离缺陷回波的问题,本文提出一种 Hilbert 变换的方法,对接收到的超声波信号进行 Hilbert 分析,得到超声波信号时域包络线,该方法能有效对缺陷产生的回波信号进行提取,比较采取 Hilbert 变换后的超声波传播图像和常规的超声波传播图像,结果表明采用 Hilbert 变换后的超声波传播成像方法可以对缺陷进行定量检测。

2 激光超声波检测系统

如图 1 所示,激光超声传播检测系统主要包括脉冲激光器、控制器、扫描动镜、超声波传感器、放大器及 A/D 采集卡等部分构成。

实验过程中,选取被测材料为铝材料,其表面有一直径为 2 mm,深为 1 mm 的圆孔,选取波长为 1064 nm 的 Nd:YAG 脉冲激光器作为超声波信号的激发端,其接收端选取一个斜角为 90°的超声波传感器,其中心频率为 2 MHz,如图 2 所示。

将 Nd:YAG 脉冲激光器产生的激光束入射扫描动镜系统,其主要作用在于改变激光束辐照被测

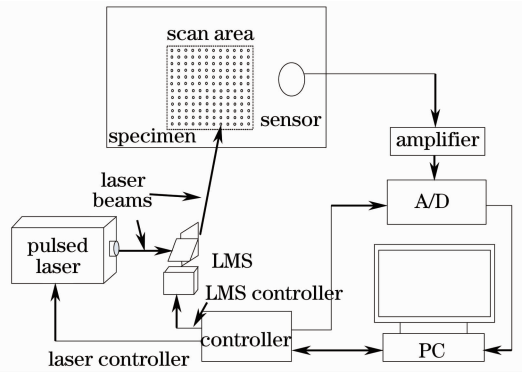


图 1 激光超声波检测系统

Fig. 1 Laser ultrasonic inspection system



图 2 超声波传感器

Fig. 2 Ultrasonic transducer

材料的位置。其中,激光器的重复频率为 0~20 Hz 可选,激光束光斑直径小于 1 mm,激光单脉冲能量输出 5 mJ,激光功率密度约为 2.5 MW/cm²,该激光器的功率密度对被测材料表层无任何损伤,其超声波信号主要在热弹机制下产生。

3 实验方法

图 3 为激光器扫描被测材料示意图,其中,超声波传感器在距离 Y 坐标轴 10 mm 的位置接收超声波信号,圆孔缺陷在扫描区域中心,X 轴的扫描区域为 0~100,Y 轴的扫描区域为 0~50,其中,每个扫描点的间距为 0.2 mm,X 轴的扫描区域为 20 mm,Y 轴的扫描区域为 10 mm,总的扫描点为 5151 个,超声波传感器接收到 5151 个波形信号。

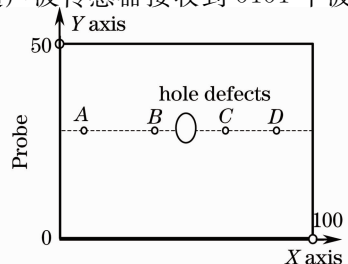


图 3 激光器扫描示意图

Fig. 3 Schematic diagram of laser scanning

实验过程中,选取高速 A/D 采集卡对超声信号进行实时采集。采样频率为 25 MHz,采样点为 500,每个超声波信号的总采样时间为 20 μs ,并对采集的超声波信号进行 1~3 M 带通滤波,以减少实验过程中随机噪声信号产生的干扰。

4 Hilbert 变换

Hilbert 变换主要揭示了响应信号经傅里叶变换后的时域与频域之间的互换关系^[18],该变换不受傅里叶分析的局限,响应信号经 Hilbert 变换后,能反映出响应信号的时频图、幅值谱及时频谱,具有良好的局部适应性。原始信号先由 Hilbert 变换得到伴随虚部信号,然后根据原始信号和伴随虚部信号,获得原始信号对应的解析信号,从而得到原始信号的上、下包络线。

利用 Hilbert 变换得到超声波信号在被测材料的时域信号包络线。对于任意连续超声波信号 $V(t)$,可得到它的 Hilbert 变换 $U(t)$ 为

$$U(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{V(\tau)}{t - \tau} d\tau, \quad (1)$$

其反变换为

$$V(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{U(\tau)}{\tau - t} d\tau. \quad (2)$$

$V(t)$ 与 $U(t)$ 形成复数共轭对,其解析信号为

$$A(t) = V(t) + jU(t) = R(t)\exp[j\theta(t)], \quad (3)$$

式中 $R(t)$ 为 $V(t)$ 的外包络线, $\theta(t)$ 为瞬时相位,

$$R(t) = [V^2(t) + U^2(t)]^{1/2}, \quad (4)$$

$$\theta(t) = \arctan \frac{U(t)}{V(t)}. \quad (5)$$

5 实验结果与讨论

图 4 为激光束在被测材料不同位置所得到的超声波信号时域波形图,从图中可以看出,当激光在 A 点激发时,可以看到接收到的超声波信号,而圆孔缺陷产生的回波信号较小,这是由于激发点离缺陷较远,得到的缺陷回波信号较小。随着激发点距离缺陷位置的减少,在 B 点激发所接收到的超声波信号产生突增,这是由于激光束激发的超声波信号与缺陷产生的回波相互叠加。从能量的角度讲,激光束在被测材料表面照射,由于受到缺陷作用,大部分能量向缺陷一侧传播,只有较少能量能透过缺陷向另一侧传播。当激光束在 C、D 点激发时,超声波到达时间长于 A、B 激发产生的超声波,其信号幅值较小,这是由于受到缺陷的影响,绕过缺陷传播到接收端的信号较少。

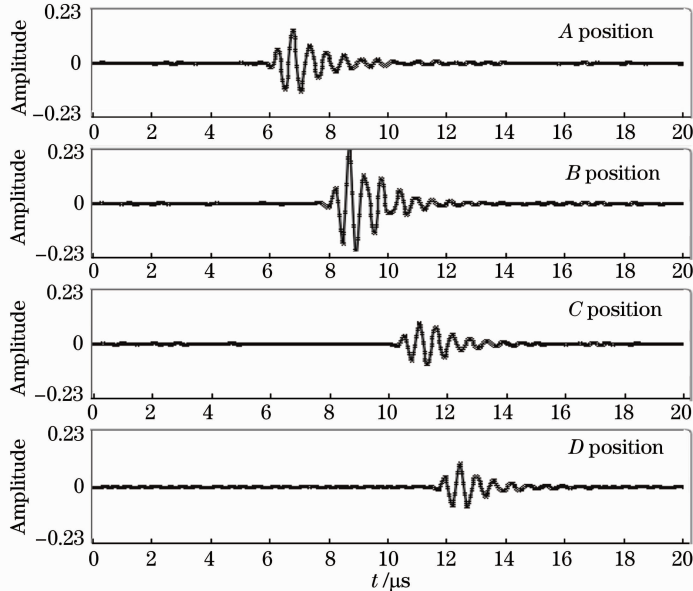


图 4 超声波信号时域图

Fig. 4 Time-domain analysis of ultrasonic

图 5 为激光束在 A、B、C、D 四点激发的超声波信号经 Hilbert 变换得到的包络信号时域波形图。选取超声波幅值大于 0 的信号包络线进行分析。图

6 到图 10 为经 Hilbert 变换后,超声波信号在扫描区域传播的振动图像。

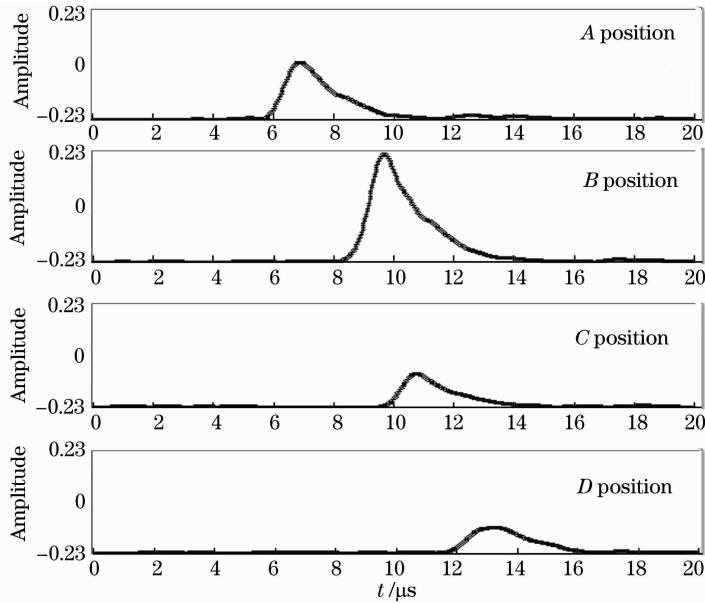


图 5 希尔伯特变换后超声波信号

Fig. 5 Ultrasonic signal after Hilbert transformation

图 6 为当 $Y=2\text{ mm}$ 时,不同时刻超声波沿着 X 轴正方向传播的振动图像,从图中可以看出,从 $t=8.4\ \mu\text{s}$ 到 $t=12\ \mu\text{s}$,超声波从 $X=0\text{ mm}$ 传播到 $X=20\text{ mm}$,超声波信号的最大幅值保持在 0.08 V 左右,而且超声波信号变化稳定,其超声波信号在 $Y=2\text{ mm}$ 上传播过程受圆孔缺陷的影响较小。

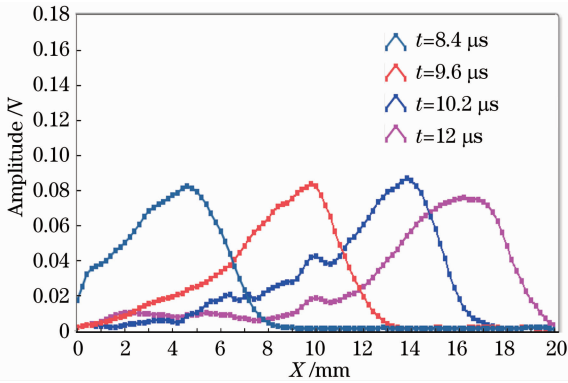


图 6 超声波传播图像($Y=2\text{ mm}$)

Fig. 6 Ultrasonic transmission images ($Y=2\text{ mm}$)

图 7 为当 $Y=4\text{ mm}$ 时,不同时刻超声波沿着 X 轴正方向传播的振动图像,从图中可以看出,当 $t=9.6\ \mu\text{s}$ 时,超声波在缺陷位置处产生突增,最大幅值达 0.16 V 。随着传播时间的增加,其幅值逐渐下降,而且传播到 X 轴正方向的最大振幅值小于 0.08 V ,这是由于在 $Y=4\text{ mm}$ 位置处,超声波传播过程中受到圆孔缺陷边缘位置的作用,超声波在缺陷边缘处出现突增,能够传播过缺陷处的超声波信号减小。

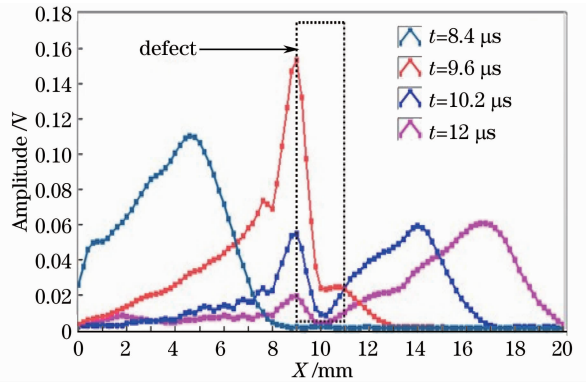


图 7 超声波传播图像($Y=4\text{ mm}$)

Fig. 7 Ultrasonic transmission images ($Y=4\text{ mm}$)

图 8 为当 $Y=5\text{ mm}$ 时,不同时刻超声波沿着 X 轴正方向传播的振动图像,从图中可以看出,当 $t=8.4\ \mu\text{s}$ 时,超声波传播过程很稳定,但是当 $t=9.6\ \mu\text{s}$ 时,在缺陷附近,信号最大幅值达 0.17 V ,其

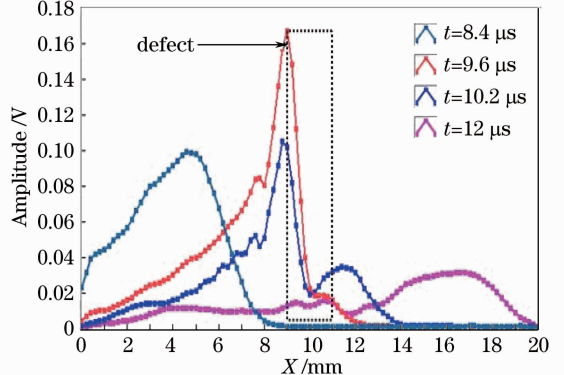


图 8 超声波传播图像($Y=5\text{ mm}$)

Fig. 8 Ultrasonic transmission images ($Y=5\text{ mm}$)

信号幅值产生突增现象,这是由于信号在传播过程中,受到圆孔缺陷的阻碍作用,大部分的超声波以回波信号进行传播。随着传播时间的增加,能够传播过缺陷位置的超声波信号最大幅值低于 0.04 V。

图 9 为当 $Y=6\text{ mm}$ 时,不同时刻超声波沿着 X 轴正方向传播的振动图像,从图中可以看出,当 $t=9.6\ \mu\text{s}$ 时,超声波信号在缺陷附近取得最大值。而当 $Y=6\text{ mm}$ 时,其位置位于圆孔缺陷的一侧,信号变化与当 $Y=5\text{ mm}$ 分析一致,这是由于实验过程中扫描区域的对称性导致,因此,传播过程会出现这样的情况。

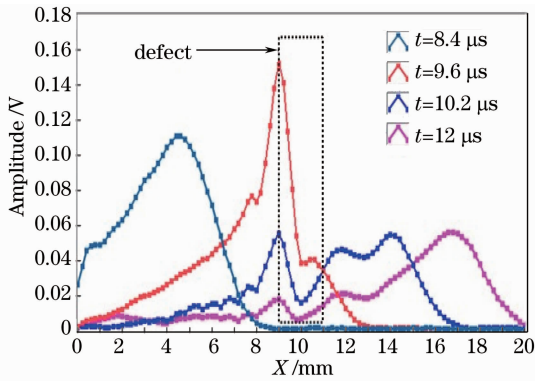


图 9 超声波传播图像($Y=6\text{ mm}$)

Fig. 9 Ultrasonic transmission images ($Y=6\text{ mm}$)

图 10 为当 $t=9.6\ \mu\text{s}$,不同 Y 值所对应的超声

波沿着 X 轴正方向传播的振动图像,从图中可以看出,随着 Y 值的增加,在缺陷附近的超声波信号逐渐下降。这是由于超声波信号在传播过程中,随着距离缺陷位置的减小,缺陷回波信号逐渐增大。

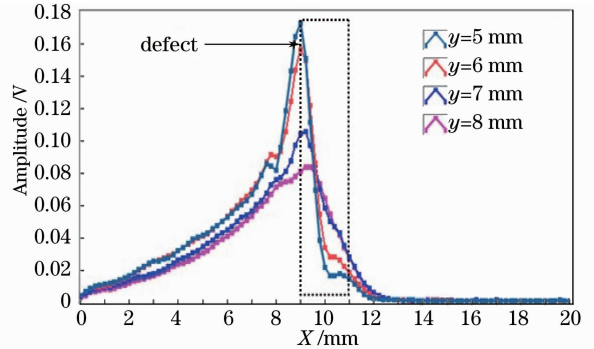


图 10 超声波传播图像($t=9.6\ \mu\text{s}$)

Fig. 10 Ultrasonic transmission images ($t=9.6\ \mu\text{s}$)

图 11 为不同时刻超声波在被测材料表面传播的过程图像,从图中可以看出,当 $t=9.6\ \mu\text{s}$ 时,超声波信号在被测材料表面传播平稳,此时超声波刚好抵达缺陷位置。当 $t=10\ \mu\text{s}$ 时,由于传播过程中受到缺陷的作用,在缺陷附近出现了回波信号,与超声波传播方向相反。当 $t=10.6\ \mu\text{s}$ 及 $11.2\ \mu\text{s}$ 时,可以清楚看到缺陷回波信号,从超声波传播图像可以确定缺陷的位置,但是缺陷的大小,形状无法从超声波传播图像中进行判断。

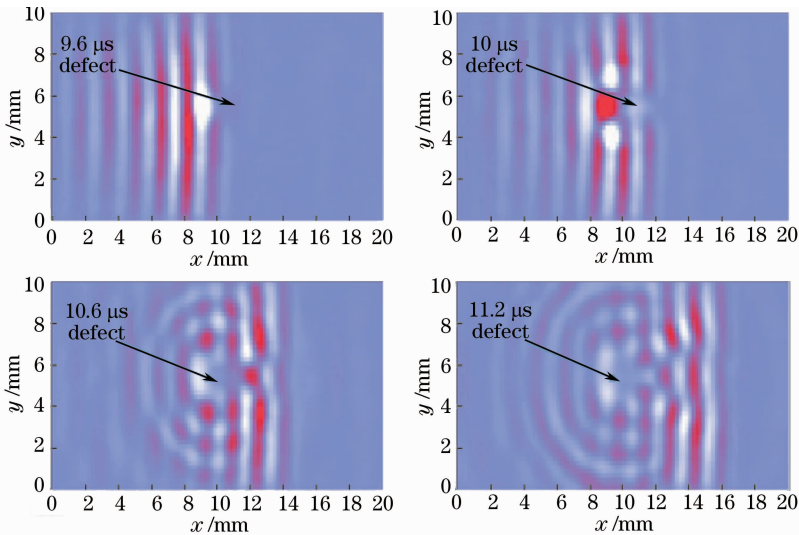


图 11 不同时刻超声波传播图像

Fig. 11 Ultrasonic wave propagation images at different propagation time

图 12 为超声波信号经 Hilbert 变换后,不同时刻在被测材料表面的传播图像。从图中可以看出,当 $t=9.6\ \mu\text{s}$ 时,超声波在被测材料表面传播平稳,此时超声波刚好抵达缺陷处。当 $t=10\ \mu\text{s}$ 时,超声波开始绕着圆孔缺陷进行传播,其大小与实际圆孔

缺陷大小相一致。当 $t=10.6\ \mu\text{s}$ 时刻,超声波传播到圆孔缺陷另一侧,从图中可以看出,一个直径约为 2 mm 的圆孔缺陷在超声波传播过程中出现,随着传播时间的增加,超声波信号全部通过缺陷,缺陷将超声波信号分为三部分,其传播轨迹与图 11 中的传

播轨迹相一致。因此,采用这种 Hilbert 变换,可以有效地从超声波传播过程中,对缺陷进行定量检测,

而且能直观地从传播图像中检测出缺陷的形状,大小等信息。

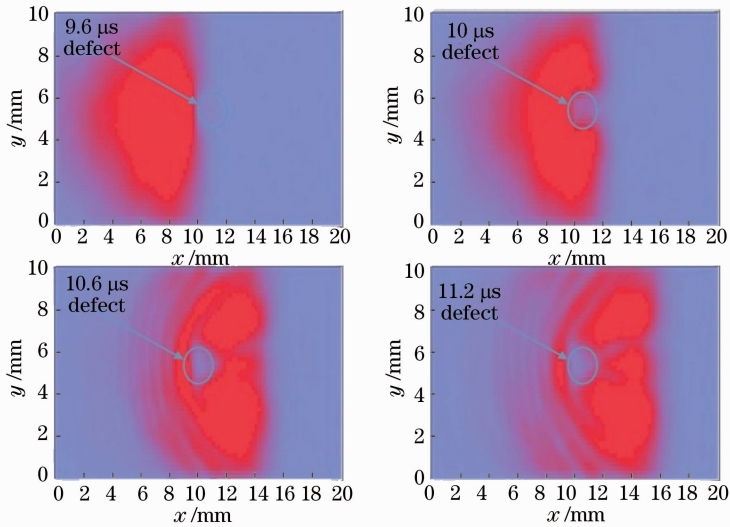


图 12 不同时刻超声波传播图像(希尔伯特变换后)

Fig. 12 Ultrasonic wave propagation images at different propagation time (after Hilbert transformation)

6 结 论

采取 Hilbert 方法对超声波信号进行变换,并详细分析了超声波信号在被测材料表面传播的振动图像,分析了超声波信号在传播过程中遇到缺陷或无缺陷的信号变化情况:当传播过程中无缺陷时,超声波信号平稳的向前传播,但是遇到缺陷时,超声波沿着缺陷边缘进行传播,在缺陷边界处会产生回波信号。

采取 Hilbert 方法对超声波信号进行变换,比较了采取 Hilbert 变换后的超声波传播图像和常规的超声波传播图像。采取 Hilbert 变换后的超声波传播图像可以直观、高效地检测缺陷的形状、大小及分布情况,而且采取 Hilbert 变换的方法不需要参考信号,就可以从被检测材料中提取缺陷信息。

参 考 文 献

- 1 Shi Yifei, Shen Zhonghua, Ni Xiaowu, *et al.*. Welding stress measurement using laser-generated Rayleigh waves in aluminum alloys[J]. Chinese J lasers, 2008, 35(10): 1627-1631.
石一飞, 沈中华, 倪晓武, 等. 激光激发瑞利波测量铝合金焊接残余应力[J]. 中国激光, 2008, 35(10): 1627-1631.
- 2 Yuan Lin, Ren Xudong, Yan Gang, *et al.*. Experimental study of laser-generated surface acoustic waves in laser shock hardening metals[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(1): 120-124.
袁玲, 任旭东, 严刚, 等. 激光冲击硬化层中激光声表面波实验研究[J]. 中国激光, 2008, 35(1): 120-124.
- 3 Yang Lifeng, Wang Yafei. Application of laser in the ultrasonic detection technique[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(2): 29-32.
杨立峰, 王亚非. 激光在超声检测技术中的应用[J]. 激光与光

- 电子学进展, 2006, 43(2): 29-32.
- 4 Xu Baiqiang, Yang Xiaoping, Xu Guidong, *et al.*. Theoretical model of single-scattered laser-induced ultrasound in weak-scattering materials [J]. Chinese J lasers, 2012, 39 (3): 0303003.
许伯强, 杨小平, 徐桂东, 等. 弱散材料中激光超声单散射理论模型[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0303003.
- 5 Li Jia, Ni Chenyin, Zhang Hongchao, *et al.*. Detection of microcrack by ultrasonic approach of one-sided pitch-pitch method based on laser assisted heating[J]. Chinese J lasers, 2013, 40 (4): 0408008.
李加, 倪辰荫, 张宏超, 等. 基于激光辅助加热的激光超声投捕法识别微裂纹[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0408008.
- 6 R M White. Elastic wave generation by electron bombardment of electron magnetic wave absorption[J]. Appl Physics, 1963, 34 (7): 2123-2124.
- 7 S Yashiro, J Takatsubo, H Miyauchi, *et al.*. A novel technique for visualizing ultrasonic waves in general solid media by pulsed laser scan[J]. NDT&E International, 2008, 41(2): 137-144.
- 8 A Kromine, P Fomitchov, S Krishnaswamy, *et al.*. Laser ultrasonic detection of surface breaking discontinuities: scanning laser source technique[J]. Materials Evaluation, 2000, 58(2): 173-177.
- 9 Y Sohn, S Krishnaswamy. Interaction of a scanning laser-generated ultrasonic source with a surface-breaking flaw[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2004, 115(1): 172-181.
- 10 Takahiro Hayashi, Morimasa Murase, Tsunaji Kitayama. Frequency dependence of images in scanning laser source technique for a plate[J]. Ultrasonics, 2012, 52(5): 636-642.
- 11 Matz V, Smid R, Starman S, *et al.*. Signal-to-noise ratio enhancement based on wavelet filtering in ultrasonic testing[J]. Ultrasonics, 2009, 49(8): 752-759.
- 12 Li L Q, Cheng W, Tsukada K, *et al.*. A novel denoising approach based on multiresolution thresholding and its NDT application[C]. AIP Conference Proceedings, 2004, 23: 636-642.
- 13 Lee J-R, Jeong H, Chia C C, *et al.*. Application of ultrasonic

- wave propagation imaging method to automatic damage visualization of nuclear power plant pipeline [J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240(10): 3513—3520.
- 14 Lee J-R, J Takatsubo, Toyama N. Disbond monitoring at wing stringer tip based on built-in ultrasonic transducers and a pulsed laser[J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(4): 1025—1035.
- 15 J Takatsubo, Wang Bo, Tsuda H, *et al.*. Generation laser scanning method for the visualization of ultrasounds propagating on a 3-D object with an arbitrary shape[J]. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 2007, 1(12): 1405—1411.
- 16 W J Staszewski, B C Lee, R Traynor. Fatigue crack detection in metallic structures with Lamb waves and 3D laser vibrometry[J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18(3): 727—739.
- 17 T E Michaels, J E Michaels. Application of acoustic wavefield imaging to non-contact ultrasonic inspection of bonded components[J]. Quantitative Nondestructive Evaluation, 2006, 820: 1484—1491.
- 18 N E Huang, Shen Zheng, S R Long, *et al.*. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proc R Soc Lond, 1998, 454(1971): 903—995.

栏目编辑:宋梅梅