

# 带涂层金属板件缺陷的激光超声检测研究

郭海洋<sup>1</sup>, 徐志祥<sup>1</sup>, 刘志毅<sup>2</sup>, 张祥春<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 中国航空综合技术研究所, 北京 100028)

**摘要:**针对带涂层金属板件的缺陷检测存在分辨率低, 形状、尺寸难确定等问题, 基于热弹激励原理、依托两套不同的检测系统对带涂层金属板件的缺陷进行检测, 展开对激光超声检测技术的方法研究。首先通过实验验证这项技术的可行性和有效性、检验涂层对缺陷检验有无影响, 其次利用实验产生的数据以及图像分析了涂层影响下缺陷波形并对缺陷波进行理论分析, 然后对波形参数进行了实时计算最终得到了 50  $\mu\text{m}$  涂层影响下缺陷的形状和尺寸特征。研究表明: 激光超声检测技术可以实现对带涂层机械板件缺陷的定性定量检测, 可应用于工程领域的实时在线检测, 并具有良好的发展前景。

**关键词:**涂层; 金属板件; 激光超声; 缺陷检测

**中图分类号:** TG115. 28      **文献标识码:** A      **DOI:** 10. 3969/j. issn. 1001-5078. 2017. 05. 004

## Laser ultrasonic test for defects of metal plate with coating

GUO Hai-yang<sup>1</sup>, XU Zhi-xiang<sup>1</sup>, LIU Zhi-yi<sup>2</sup>, ZHANG Xiang-chun<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Dalian University of technology, Dalian 116024, China;

2. Institute of Aeronautical Technology of China, Beijing 100028, China)

**Abstract:** Based on thermal elastic excitation principle, two different sets of detecting systems are used to detect defects of metal plate with coating, and laser ultrasonic test methods are studied. Firstly, the feasibility and validity of this technology are verified by the experiments, and the influence of the coating on defects is discussed. Secondly, the defect waves under the effect of the coating are theoretically analyzed through experimental data, and then the parameters of defect waves are calculated in real time, and the shape and dimension parameters of the defects are obtained under the effect of the 50  $\mu\text{m}$  coating. The results show that laser ultrasonic test technology can qualitatively and quantitatively detect the defects of coated metal plate. Thus the technology can also be applied to on-site measurement in the engineering field, and has good development prospects.

**Key words:** coating; metal plates; laser ultrasonic; defect detection

### 1 引言

激光超声应用技术源于 20 世纪 60 年代到 80 年代, 广泛地应用于物理、化学、微电子学、表面科学、材料科学、环境科学以及生物医学等诸多领域。学者们对激光与物质相互作用产生超声机理进行探索并开展这方面的机理和实验研究, 使此技术在无

损检测领域得到广泛的应用<sup>[1]</sup>并愈加成熟。激光激发的超声波具有好瞬态、宽频带、多模态等特点赋予了它精度高、测量范围广、灵敏度高、可以无接触测量, 不使用耦合剂等优点。机械板件的疲劳破坏通常是由交变载荷引起, 因表面覆盖涂层而难以察觉。应用传统检测技术(如磁粉检测)对金属板件

**基金项目:**大连理工大学中央高校基本科研业务费专项项目(No. DUT15ZD110)资助。

**作者简介:**郭海洋(1989-), 男, 硕士, 研究方向为无损检测技术。E-mail: yangkuoyabian@163.com

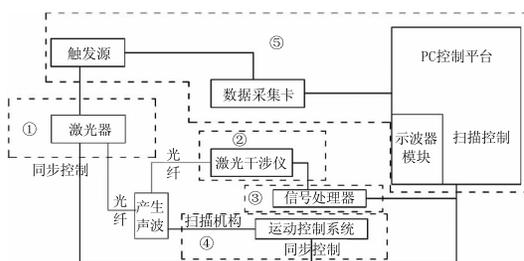
**收稿日期:**2016-08-22; **修订日期:**2016-11-04

缺陷进行检测首先要对涂层进行处理,但是这个过程中耗时长、工序繁琐致使其检测效率低。考虑到激光超声技术的上述优点,因此展开以此技术为基础对带涂层金属板件的缺陷检测的实验研究。激光激发超声的机制按激光入射能量大小可以分为两类:热弹激励和烧蚀激励。烧蚀往往能量过高而导致涂层的破坏,若采用烧蚀激励就失去了无损探伤的意义,因此本实验研究的机理采用热弹激励。

本文首先介绍了激光超声检测系统原理及其组成(激光器的原理,激光干涉仪接收系统,信号处理系统,精密控制系统等),然后重点研究了涂层在应用此系统过程中对机械板件缺陷的影响,以及是否能达到对缺陷定性定量目的,着重进行了相关理论分析和实时计算。

## 2 激光超声技术实验系统的建立

激光超声检测系统主要由激光器系统、信号接收系统、信号处理系统、精密电控装置等组成,具体系统<sup>[2]</sup>如图 1 所示。在激光激励试件表面的过程中,样件产生热应力从而激发出超声波,超声波在样件内部传播引起一定程度的振动引起对表面检测光束的调制,系统通过检测光电信号得出缺陷信息,检测系统实验装置图如图 1 所示,检测激光为 Nd:YAG 激光器,波长为 1064 nm,脉冲激光束经过衰减片后通过 PBS(极性分光器)一束作为参考信号,一束作为检测信号,在两束信号之间为了防止激光的反射干扰以及反射光束对激光器造成损伤常放置一个法拉第隔离器在两束激光信号之间,参考信号与被缺陷超声波调制过的检测信号光束发生干涉现象,通过检测系统对干涉的信号放大滤波等处理过程实现对缺陷信号的提取。



①激光器模块 ②信号接收模块 ③信号处理系统模块  
④扫描系统模块 ⑤软件处理模块

图 1 激光超声系统图

Fig. 1 Laser ultrasound system diagram

在检测的过程中因为检测的目的性不同,使用的调制方法也不同。比如检测表面缺陷的长度使用表面波来探测比较合适,如检测缺陷的深度或薄

膜<sup>[2]</sup>的厚度使用  $\lambda$  波相对比较合适,为得到较理想的波的形式,在光学平台上调出合适的细线光束和激光斑点,线性光束的能量聚集性较小、强度较弱,能量主要集中于表层,线型光束的作用面积大则容易形成表面波。调制出激光斑状较小但是能量较大则易于形成纵横波,通过  $0.2 \mu\text{m}$  级的精度精密平移电控装置实现激光束与样件的相对运动,上述都保证了系统的正常检测缺陷的需要,由此建立起激光超声检测系统。激光超声系统实物图如图 2 所示。



①零差干涉仪 ②激光器 ③手动控制器 ④导光镜 ⑤位置移动装置  
⑥耦合光纤光学头 ⑦工件 ⑧操作系统

图 2 激光超声检测系统实物图

Fig. 2 Real products diagram of laser ultrasound detecting system

## 3 带涂层的机械板件缺陷检测的实验研究

涂层是一种经济、方便和性能优异减缓微动损伤的表面工程<sup>[3]</sup>技术材料。常见的涂层材料粘结  $\text{MoS}_2$  固体润滑层、超音速火焰喷  $\text{WC} - 17\text{Co}$ 、 $\text{WC} - 27\text{CrNi}$  涂层和激光淬火层和成分为丙烯酸树脂油漆层。当覆盖下的机械板件受到振动,或者受到交变应力的作用会造成金属疲劳形成裂纹破损。

激光超声技术利用激光激发和接收超声波来检测材料和板件中的缺陷,该技术是解决在带涂层机械板件内部检测含有复杂形式的缺陷问题的有效途径。激光可以在不垂直结构表面的条件下,远距离激发脉冲激光在材料中激发超声波,基于零差干涉原理进行超声信号的检测,并且有很高的时间和空间分辨力,也可以使用超声传感器配合耦合剂接收超声波信号完成涂层下的缺陷检测。

通过软件或控制面板控制激光能量值释放得到一定波长,重复频率,脉宽的激光束,由于光束的成分为中红外光和近红外光,因此需要加一个导光束使光束可见,照射在工作部件上,特定材料的热弹效应激发产生多模态的超声波场,通过信号处理模块的信号放大以及信号滤波,再通过信号检测系统检测出缺陷信号波,并把它转化成电信号,A/D 转换

系统最后通过软件处理模块(如图1⑤所示)对信号的处理,得到二维或三维图像形成对数据的具体分析<sup>[4-5]</sup>得到动态图像达到对缺陷的诊断,最终实现对缺陷的定性定量的检测。

#### 4 实验研究及分析

此次实验研究主要使用两个系统(LUVI系统以及 Bossa Nova Technologies 系统),激光超声检测技术的系统原理具体如上文所述,在下面实验中主要针对在带涂层的机械部件的缺陷检测过程中出现的现象进行研究。

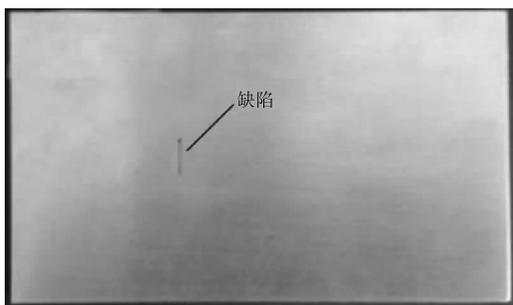
由于轴类零件的空间机构较为复杂,形成的波场<sup>[6-7]</sup>较为混乱,因此选择45#钢板和铝板,作为基础研究的样件并在板上加工出矩形槽状裂纹,其尺寸各有不同。本文选择45#钢板和铝板作为样件并在板上加工出矩形槽状裂纹,其尺寸各有不同。具体如表1所示。

表1 工件参数  
Tab.1 Workpiece parameters

材料	有无裂纹	裂纹尺寸 (长×宽×深)/mm	工件尺寸 (长×宽×高)/mm
涂层45#钢	有	10×0.6×1	200×120×6
45#钢	有	10×0.6×1	200×120×6
铝板	有	10×1×1	120×80×6
铝板	无	0×0×0	120×80×6

有无缺陷条件下(如图3所示)的对照实验是基于激光的各项参数,激发位置,接收位置等都相同时做的对比,均是以带涂层的铝板为实验对象,此实验依托于LUVI激光超声可视化检测仪来分析激光超声波缺陷检测实验结果如图4所示。

由图3(a)位置可以看出有缺陷工件(图4下图)中与无缺陷(图4上图)的工件中产生的超声波有明显的不同,38 μs处有明显的信号波动。此实验说明激光超声检测技术检测带涂层板件缺陷具有有效性和高效性。



(a)含缺陷 (120×80×6) mm



(b)无缺陷 (120×80×6) mm

图3 金属样件图

Fig.3 Metal sample diagram

下面依托于 Bossa Nova Technologies 激光超声检测仪对有无涂层情况下(如图5所示)相同位置处的缺陷进行检测:涂层主要成分为丙烯酸树脂,厚度为50 μm,其结果如图6所示。

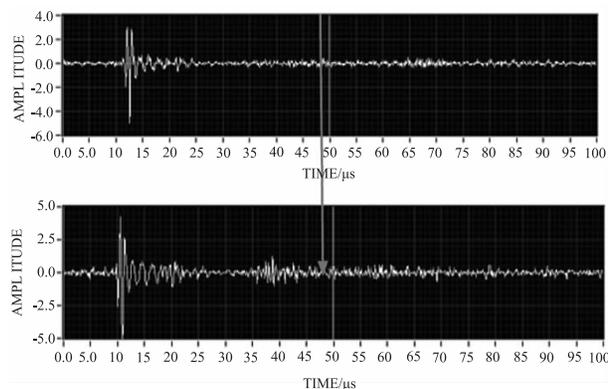
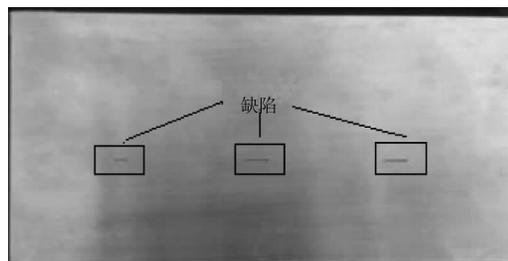


图4 缺陷对比图

Fig.4 Defects comparison diagram



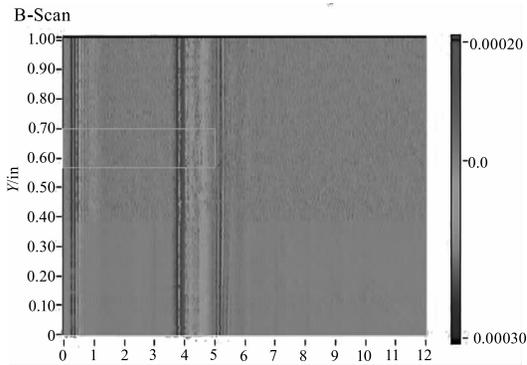
(a)有涂层样件 (200×120×6) mm



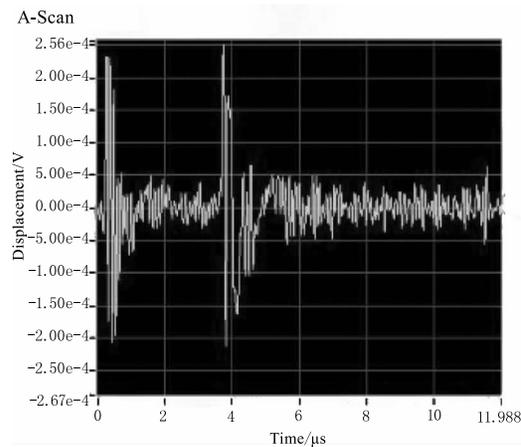
(b)无涂层样件 (200×120×6) mm

图5 样件图

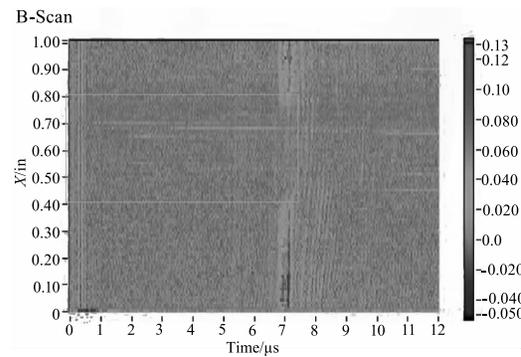
Fig.5 Sample diagram



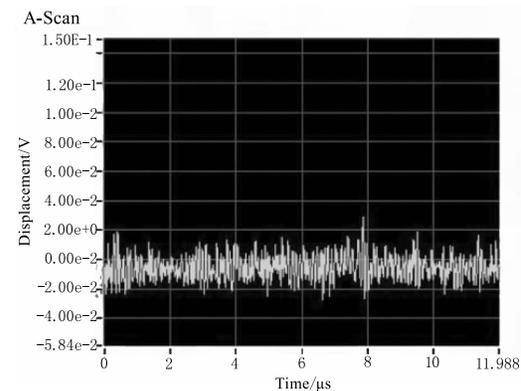
(a) 宽度方向B扫图



(b) 宽度方向A扫图



(c) 长度方向B扫图



(d) 长度方向A扫图

图 6 带涂层样件缺陷检测图

Fig. 6 Defects detection of sample with coating diagram

除了激励波, A 扫图显示为多模态的波形, B 扫图显示缺陷的形状; 深度和宽度这两个尺寸主要由超声波的纵波, 横波这两种波的波速 (Time of Flight 原理) 计算出, 长度的尺寸主要根据表面波、纵波波速 (Time of Flight 原理) 计算出, 缺陷出现的时间可从图 6(b), (d) (带涂层工件) 中读出。在 45# 钢内纵波 ( $V_p = 5850 \text{ m/s}$ ) 横波 ( $V_s = 3240 \text{ m/s}$ ) 表面波 ( $V_R = 2890 \text{ m/s}$ ), 由此计算出 (图 6(a) 以及图 6(c) 为英制尺寸换算为公制) 宽度为 3.05 mm, 长度为 10.160 mm, 深度尺寸的确定需要建立相应的模型进行计算, 由于板厚已经确定, 在工件内波反射次数不确定, 时间确定的情况下需要根据纵波与表面波的波速以及板厚确定缺陷的位置。深度的确定具体模式分为下列两种, 如图 7 所示。

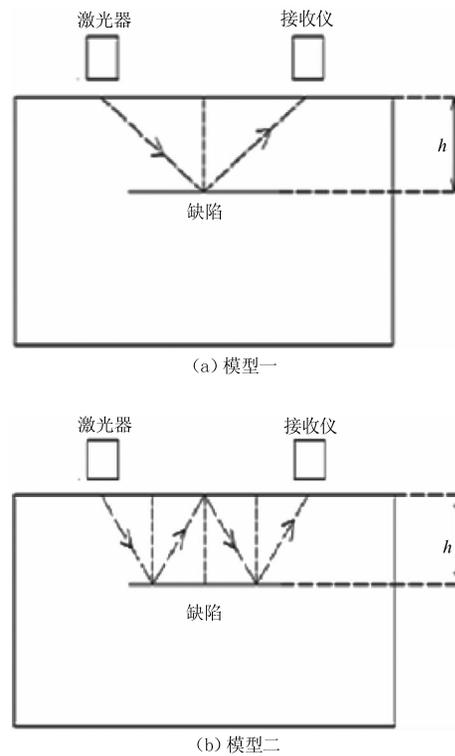


图 7 检测示意图

Fig. 7 Detecting sketch diagram

图 7(a) 图设纵波的传播的入射与反射波路径长分别为  $S_1$  和  $S_2$ ;  $a$  为激光器与接收仪之间的直线距离; 图 7(b) 图四个入射反射路径由左至右分别为  $S_3, S_4, S_5, S_6$ , 缺陷的实际高度为板厚  $w$  (6 mm) 减去  $h$  :

$$S_1 + S_2 = V_p \cdot t \quad (\text{其中 } t \text{ 已知}) \quad (1)$$

$$S_1 = S_2 \quad (2)$$

$$h = \sqrt{S_1^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2} \quad (3)$$

$$a = V_R \cdot t \tag{4}$$

同理:

$$S_3 + S_4 + S_5 + S_6 = V_p \cdot t \tag{5}$$

$$S_3 = S_4 = S_5 = S_6 \tag{6}$$

$$a = V_R \cdot t \tag{7}$$

$$h = \sqrt{S_3^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2} \tag{8}$$

$$H = 6 - h \tag{9}$$

已知45#钢内纵波波速  $V_p = 5850$  m/s, 表面波波速  $V_R = 2890$  m/s, 时间(由图6(b),(d)可得)为

3.5  $\mu$ s:

由式(3)、(9)计算得:

$$H = -2.901 \text{ mm}$$

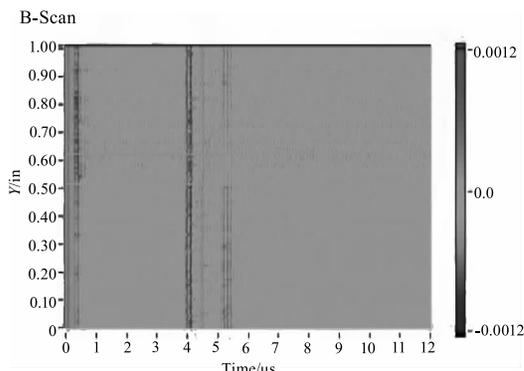
已知45#钢内纵波波速  $V_p = 5850$  m/s, 表面波波速  $V_R = 2890$  m/s, 时间(由图8(b),(d)可得)为

3.5  $\mu$ s:

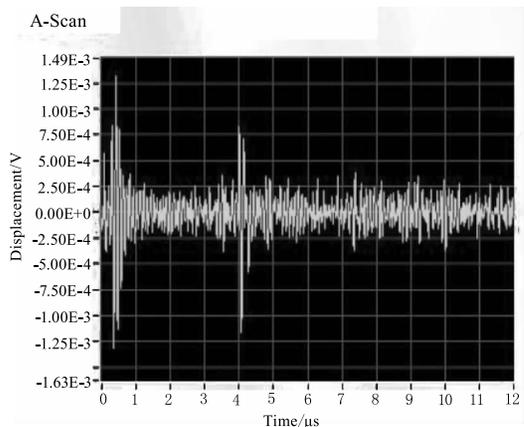
由式(8)、(9)得:

$$H = 1.548 \text{ mm}$$

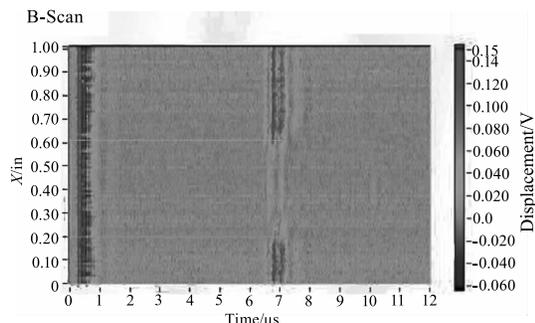
由费马原理以及计算结果可得图7(a)的模式不符合要求, 在200 mm  $\times$  120 mm  $\times$  6 mm的带涂层工件中超声波最少经过两次反射, 由此最短路径图7(b)图的模式求解出厚度为1.548 mm。



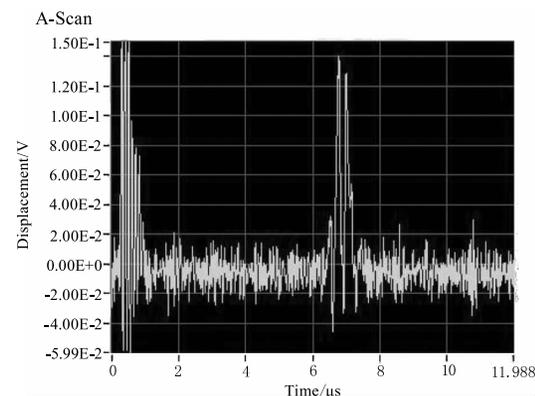
(a) 宽度方向B扫图



(b) 宽度方向A扫图



(c) 长度方向B扫图



(d) 长度方向A扫图

图8 不带涂层缺陷检测图

Fig.8 Defects detecting of sample without coating diagram

最终可以得出带涂层缺陷的尺寸长度为10.160 mm, 宽度方向3.048 mm, 深度方向为1.548 mm。

由Time of Flight原理可得:图8(无涂层工件)(a),(b)(英制单位换算后)的宽度2.794 mm,(c)(d)图可得(英制公制单位换算后)长度为10.160 mm;

已知45#钢内纵波波速  $V_p = 5850$  m/s, 表面波波速  $V_R = 2890$  m/s, 时间(由图8(b),(d)可得)为3.5  $\mu$ s:

深度方向的尺寸由公式(8)、(9)得:

$$H = 1.548 \text{ mm}$$

由此图6(d)与图8(d)可以看出涂层对缺陷检测的影响。激光产生的能量主要集中于表面, 涂层吸收了不少能量致使A扫图中波信号的振幅下降, 同时波形较无涂层工件有较大的不同, 表面波的波速也与基底和涂层的性质有较大的关系。从测量长度方向的波形图可以看出表面波的波速有较明显变化, 且带涂层板件的信号变化比较明显, 由于树脂以及酯类涂层的存在导致对热量的吸收比较好使热量的传导速度较快从而使表面波

速度较无涂层快。

图 9 为根据对金属板件缺陷数据仿真出的三维图像,颜色的不同表明信号振幅的强弱红色表示位移比较大蓝色表示位移比较小,从三维图中也可以得出缺陷的大致位置和大小。

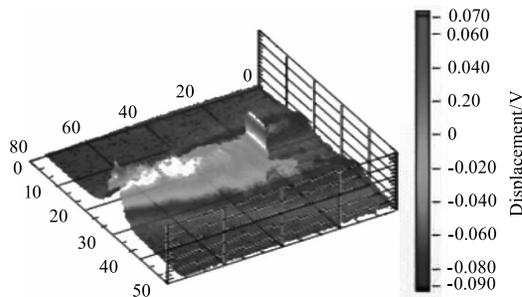


图 9 三维缺陷标示图

Fig. 9 3D defects marked diagram

涂层与基底材料的性质共同决定超声波的色散<sup>[8]</sup>特征,频率以不同的相速度传播,其传播速度与涂层的参数和入射光束参数(频率,波长等)<sup>[9-12]</sup>有关。对带涂层工件缺陷信号的分析:从图 6 和图 8 中的 A 扫图可以看到首先到来的是掠面纵波,这是涂层纵波和基底纵波共同作用的结果,同时涂层的存在限制了表面波的传播速度,其中低频成分<sup>[9]</sup>速度传播较快,出现了相比于无涂层工件的明显的色散情况。部分原因是有机涂层的纵波速度(1180 m/s 左右)较慢出现了明显的缺陷信号的不连续;并且在带涂层的缺陷信号检测过程中出现了一系列的振荡波形,这些振荡波形是由于涂层和基底之间的多次反射形成的;同样可以看出由于涂层吸收能量大导致热量的传导速度较快,表面波速度较无涂层快,但是降低了表面波的振幅。

## 5 结 语

带涂层金属板件缺陷尺寸为 10 mm × 0.6 mm × 1 mm,检测出来尺寸为 10.16 mm × 3.048 mm × 1.548 mm 的缺陷,可以得出缺陷的形状为槽形,由表面波 Time of Flight 原理计算出长度方向尺寸与实际尺寸相差不大,在对宽度方向进行检测时,由于宽度方向的缺陷尺寸和激发的波长相近,波发生了一定程度的衍射导致检测出的尺寸较大,在深度方向尺寸的形成尺寸差距是误差叠加的结果。由图 6 以及图 8 还可以看出涂层可以影响

超声波的色散程度,以及表面波波速的快慢。通过检测带缺陷与不带缺陷板件说明此检测方法具有可行性与高效性,通过对带涂层与不带涂层的板件缺陷检测对比,可以实现对带涂层缺陷形状和尺寸的定性和定量检测;同时在带涂层与不带涂层在缺陷信号的检测过程中也发现了涂层的存在确实带来干扰。鉴于上述所述,激光超声技术可以应用于高铁、航空、汽车等工程领域的实时在线检测并具有良好的发展前景。

## 参考文献:

- [1] CHIMENTI D. Guided waves in plates and their use in materials characterization [J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1997; 50 - 247.
- [2] HESS P. Laser diagnostics of mechanical and elastic properties of silicon and carbon films [J]. *Applied Surface Science* 1996, 106(1): 429 - 437.
- [3] ZHU Manhao, LUO Weili, ZHOU Zhongrong. Research status of surface engineering technology on fretting damage [J]. *Mechanical engineering materials*, 2003, 27(4): 13 - 29. (in Chinese)  
朱曼昊, 罗唯力, 周仲荣. 表面工程技术抗微动损伤的研究现状 [J]. *机械工程材料*, 2003, 27(4): 13 - 29.
- [4] LI Ziquan, ZHANG Xiaorong, ZHANG Shuyi, et al. Determination of the elastic constants of metal-matrix composites by a laser ultrasound technique [J]. *Composites science and technology*, 2001, 61(10): 1457 - 1463. (in Chinese)  
李子权, 张晓荣, 张叔毅, 等. 通过激光超声技术确定金属基复合材料的弹性常量 [J]. *复合材料科学与技术* 2001, 61(10): 1457 - 1463.
- [5] Jcostley JR R D, Berthelot Y H. Dispersion curve analysis of laser-generated Lamb waves [J]. *Ultrasonic*, 1994, 32(4): 249 - 253.
- [6] FU Xing, LIU Yunqiang, HU Xiaodong, et al. Micro laser Doppler technique for dynamic measurement of MEMS [J]. *Optoelectronics · Laser* 2004, 15(11): 1357 - 1360. (in Chinese)  
傅星, 刘昉强, 胡晓东, 等. 适用于 MEMS 动态测量的显微激光多普勒技术 [J]. *光电子 · 激光*, 2004, 15(11): 1357 - 1360.
- [7] XU Linyan, LI Dachao, LIU Ruipeng, et al. Measurement

- of residual stress of nano beam by using micro laser Doppler [J]. *Optoelectronics · Laser*, 2009, 20 (8): 1045 - 1048. (in Chinese)
- 徐临燕, 栗大超, 刘瑞鹏, 等. 利用显微激光多普勒测量纳米梁的残余应力[J]. *光电子·激光*, 2009, 20 (8): 1045 - 1048.
- [8] W Arnold, B Betz, B Hoffmann. Efficient generation of surface acoustic waves by thermo elasticity [J]. *Applied Physics Letters*, 1985, 47(7): 672 - 674.
- [9] XU Boqiang, NI Xiaowu, Shen Zhonghua, et al. Finite element numerical simulation of ultrasonic guided wave in laser induced plate material [J]. *Chinese Laser*, 2004, 31 (5): 621 - 625. (in Chinese)
- 许伯强, 倪晓武, 沈中华, 等. 激光激发板状材料中超声导波的有限元数值模拟[J]. *中国激光*, 2004, 31 (5): 672 - 674.
- [10] Xi'an laser ultrasonic visualization detection technology to fill the gaps in the domestic [J]. *Silicon Valley*, 2012: 23 - 24. (in Chinese)
- 西安激光超声波可视化检测技术填补国内空白[J]. *硅谷*, 2012: 23 - 24.
- [11] ZHOU Zhengang, SUN Guangkai, MA Baoquan, et al. Application of new technology in ultrasonic nondestructive testing of advanced composite materials [J]. *Technology Review* 2014, 32(9): 15 - 20. (in Chinese)
- 周正干, 孙广开, 马保全, 等. 先进复合材料超声无损检测新技术的应用[J]. *科技导报*, 2014, 32 (9): 15 - 20.
- [12] Dubois M, Drake Jr T E. Evolution of industrial laser-ultrasonic systems for the inspection of composites [J]. *Non-destructive Testing and Evaluation*, 2011, 26(3/4): 213 - 228.