

# 基于激光超声临界频率的表面缺陷检测与评价

李海洋<sup>1</sup>, 李巧霞<sup>1</sup>, 王召巴<sup>1</sup>, 潘强华<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;

<sup>2</sup>中国特种设备检测研究院, 北京 100029

**摘要** 激光超声能够激发宽频带的表面波, 可实现金属材料表面微缺陷的定位分析与深度检测。根据表面波在缺陷处的透射/反射阈值现象, 提出了测量表面缺陷深度的临界频率法; 基于光弹激发原理搭建了激光超声检测平台, 得到了铝合金样品的 B 扫成像, 实现了表面缺陷的定位; 结合小波变换分析了表面缺陷的透射与反射波形能量分布, 测得透射/反射阈值  $\theta_0 = 1/4$ , 进而采用临界频率法实现了表面微缺陷的深度估计。此外, 还分析了激发点与探测点距离、待测样品材料对透射/反射阈值的影响。结果表明, 基于激光超声临界频率法可以实现表面微缺陷的定位及深度检测, 且透射/反射阈值大小与表面波传播距离、待测样品材质无关。

**关键词** 测量; 激光超声; 表面缺陷; 小波变换; 临界频率

中图分类号 TN249; O426.9

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0712003

## Detection and Evaluation of Surface Defects Based on Critical Frequency Method by Laser Ultrasonic

Li Haiyang<sup>1</sup>, Li Qiaoxia<sup>1</sup>, Wang Zhaoba<sup>1</sup>, Pan Qianghua<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Information and Communication Engineering, North University of China,

Taiyuan, Shanxi 030051, China;

<sup>2</sup>China Special Equipment and Research Institute, Beijing 100029, China

**Abstract** Laser ultrasonic can realize the localization and depth detection of microdefects on the metal surface owing to broadband surface waves. In this paper, a critical frequency method for measuring the depth of a microdefect is proposed according to the transmission/reflection threshold phenomenon. Based on the principle of photoelastic excitation, a laser ultrasonic testing platform is built and B-scanning images of aluminum alloy samples and the localization of microdefects are obtained by using the platform. Spectral energy distribution of the transmission and reflection waves of a microdefect is analyzed by combining the wavelet transform, and the threshold value  $\theta_0$  is measured as  $1/4$  when the transmission/reflection threshold phenomenon occurs. At last, the depth estimation of a microdefect is realized by the critical frequency method. In addition, the influences of sample material and the distance between the excitation points and the detection points are also analyzed. Experimental results show that the critical frequency method based on the laser ultrasonic can realize the depth detection of microdefects on the metal surface, and the transmission/reflection threshold value is independent of the propagation distance and the sample material.

**Key words** measurement; laser ultrasonic; surface defect; wavelet transform; critical frequency

**OCIS codes** 120.4290; 110.7170; 240.6490

## 1 引 言

随着工业技术的进步和高新材料的涌现, 航天、航空、船舶等重要行业中对关键零部件缺陷进行定

量无损评价的需求不断增长。表面缺陷是威胁工业和生活生产安全的元凶之一, 对它的检测和分析一直以来都是十分重要的课题。超声无损检测技术一般采用表面波在介质表面传播过程中与缺陷作用发

收稿日期: 2017-12-05; 收到修改稿日期: 2018-03-01

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11604304)、山西省高等学校科技创新项目、山西省自然科学基金(201701D221127)

作者简介: 李海洋(1987—), 女, 博士, 讲师, 主要从事激光超声检测方面的研究。E-mail: climb021@163.com

生反射、散射等现象来实现对样品表面缺陷的分析和定位,但传统超声检测方法依赖于超声波换能器技术的发展,这使得表面缺陷的定量分析和深度检测受到了严重限制。

激光超声具有波形丰富、频带宽及非接触检测等优点,在缺陷检测<sup>[1-5]</sup>、厚度检测<sup>[6-8]</sup>、残余应力<sup>[9-10]</sup>和弹性参数检测<sup>[11-13]</sup>等方面取得了大量研究成果。石一飞<sup>[14]</sup>探讨了扫描激光源法检测板状和柱状金属材料表面微小缺陷的机理以及激光声表面波传播特性,分析了缺陷对温度场和声场的影响,讨论了不同缺陷深度下超声场分布的变化。张建炎<sup>[15]</sup>研究了高温条件下激光超声表面波传播速度的降低和幅值的减小,分析了不同深度的缺陷对声表面波传播的影响。激光超声技术虽然在表面缺陷评价方面已取得了大量成果,但在实验检测方面仍存在研究空间。

本文根据激光超声表面在缺陷处的透射/反射阈值现象,提出了临界频率测量表面缺陷深度的检测方法;搭建了激光超声实验平台,实现了铝合金材料样品的表面波激发与接收,完成了样品表面 B 扫检测,实现了铝合金样品表面缺陷的定位;采用小波变换得到了缺陷处反射和透射声波信号的频谱能量分布,计算出了透射/反射现象的阈值,采用临界频率法实现了样品表面缺陷的深度检测。这一研究成果为激光超声用于样品表面微缺陷的定位分析和深度检测提供了实验经验和检测依据。

## 2 基本原理

### 2.1 表面波在表面缺陷处的散射效应

表面波在传播过程中与缺陷相互作用后会发生反射、透射和散射现象。假设样品表面有一个深度为  $h$  的表面缺陷,设激光超声激励表面声波为  $u_i$ ,表面波在样品表面传播中与表面缺陷相互作用,导致一部分声波  $u_r$  遇到缺陷表面发生反射,一部分声波  $u_t$  沿着缺陷表面绕到缺陷另一侧,同时还有一部分声波发生散射现象,如图 1 所示。

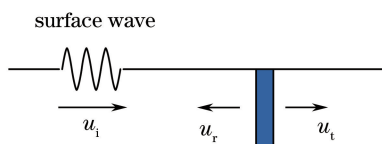


图 1 表面波与缺陷之间的散射效应

Fig. 1 Scattering effect between surface wave and defect

由文献<sup>[16]</sup>可知,在声波垂直入射的情况下,表面缺陷可以看作是一个起能量吸收作用的共振器,

并且吸收能力与入射声波的波长有关。假设有一个无限长的表面缺陷,入射声波能量为  $u_i$ ,缺陷处的反射声波能量  $u_r$  和透射声波能量  $u_t$  与入射声波的波长有关,且满足

$$\begin{cases} u_r < u_i, \theta \leq \theta_0 \\ u_r > u_i, \theta \geq \theta_0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\theta$  为入射至缺陷处声波波长  $\lambda$  与缺陷深度  $h$  的比值,即  $\theta = \lambda/h$ ;  $\theta_0$  为一个常数。

由(1)式可知:若声波波长  $\lambda$  与缺陷深度  $h$  的比值  $\theta$  大于  $\theta_0$ ,则反射声波能量大于透射声波能量;若声波波长  $\lambda$  与缺陷深度  $h$  的比值  $\theta$  小于  $\theta_0$ ,则反射声波能量小于透射声波能量,这种现象称为透射/反射阈值现象,而发生阈值现象对应的波长称为临界波长,该波长对应的频率为临界频率。对于固定尺寸的表面缺陷,临界频率是一个确定值。所以测量表面缺陷深度的问题就转化为对临界频率的求解。激光超声激励表面波具有宽频带的特点,可观测到透射/反射阈值现象,从而实现表面缺陷的深度测量。因此,通过分析表面波在缺陷处的反射声波信号和透射声波信号的能量分布,采用透射/反射阈值现象的临界频率检测法能够实现对缺陷深度的测量。

### 2.2 光弹效应

按照入射激光功率密度和固体表面条件的不同,激光激励超声原理一般可以分为热弹激发原理和烧蚀激发原理。若入射激光的功率密度小于  $10^7 \text{ W/cm}^2$ ,表层局部升温且没有导致样品表面发生任何相变,弹性应力是体积膨胀引起的,则称为热弹激发原理;若入射激光的功率密度大于  $10^7 \text{ W/cm}^2$ ,表层局部温度升高到材料的熔点,导致材料熔化、汽化,甚至形成等离子体被喷射出来,造成烧蚀现象,则称为烧蚀激发。一次激发会对表面造成深度约为  $0.3 \mu\text{m}$  的损伤。

基于热弹原理激发声波,激发过程不会对样品产生损伤,是真正意义上的无损。本研究采用热弹原理激发声波。在各向同性的介质中,热弹耦合方程为

$$\begin{aligned} & \mu \nabla^2 \mathbf{U}(x, y, z, t) + (\lambda' + \mu) \times \\ & \nabla[\nabla \cdot \mathbf{U}(x, y, z, t)] = \\ & \rho \frac{\partial^2 \mathbf{U}(x, y, z, t)}{\partial t^2} + \beta \nabla T(x, y, z, t), \quad (2) \end{aligned}$$

式中: $\rho$  为材料密度; $\mathbf{U}(x, y, z, t)$  为  $t$  时刻的瞬态位移向量; $\lambda'$  与  $\mu$  为拉梅常数; $\beta$  为热弹耦合系数; $\beta \nabla T(x, y, z, t)$  为基于热梯度形成的瞬态体力源; $\nabla T(x, y, z, t)$  为激光照射样品表面产生的温度变化。

由(2)式可知,激光照射表面会导致局部温度瞬时升高,导致样品表面和内部发生热膨胀现象,进而产生表面波、横波和纵波,在样品表面和内部传播。激光致声的基本原理是光能、热能与声能的转换。本研究采用激光超声产生表面波对待测样品表面缺陷进行检测与评价。

### 3 实验研究

#### 3.1 实验平台

激光超声检测平台采用 CFR200 激光发生器作为激光激发部分,采用基于迈克耳逊干涉原理的 QUARTET-500 mV 激光超声接收仪作为接收部分。激发部分发射的激光经聚焦距离为 200 mm 的柱面透镜在样品表面形成线源激发表面声波,并由激光干涉部分接收回波信号。该激光超声检测平台配有自动扫查架,可以完成对检测样品的 A 扫声信号接收和 B 扫成像。扫查架的行程为 250 mm × 250 mm,扫查分辨率为 6 μm。通过 LU Scan 软件设置步进为 0.05 mm,扫查距离为 15 mm 的水平方向的扫查。初始扫查时,接收点与缺陷距离 7 mm。实验框图如图 2 所示,实验平台如图 3 所示。

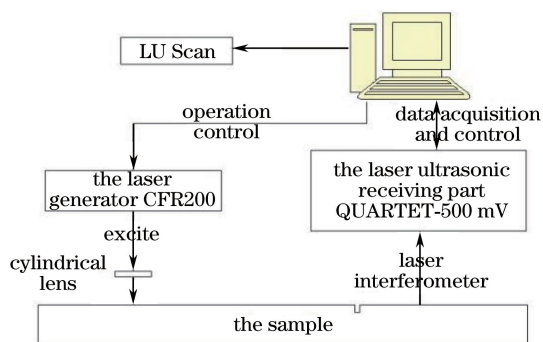


图 2 实验框图

Fig. 2 Experimental diagram

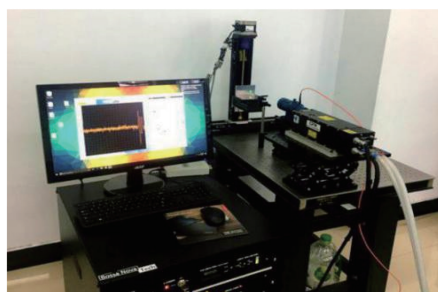


图 3 激光超声检测平台

Fig. 3 Laser ultrasonic platform

#### 3.2 实验样品

待测样品为铝合金样品,表面具有不同深度的缺陷,缺陷形状为矩形槽。为了降低样品表面粗糙

度对表面波传播的影响,对样品进行抛光处理。待测样品外观及其尺寸分别如图 4 和图 5 所示,相应样品中缺陷的深度  $T$  如表 1 所示。

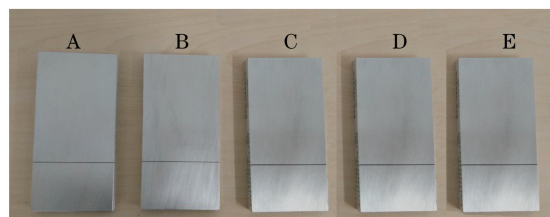


图 4 实验样品

Fig. 4 Experimental samples

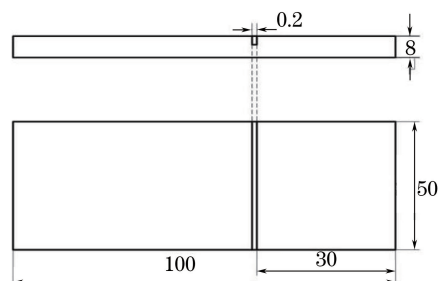


图 5 样品尺寸

Fig. 5 Sample size

表 1 缺陷的深度

Table 1 Defect depth

Sample	Defect depth /mm
A	0.40
B	0.30
C	0.20
D	0.10
E	0.08

### 4 结果分析

#### 4.1 直达波频谱

采用上述实验平台完成样品的表面缺陷检测。图 6 为接收到的表面直达波的频谱图。

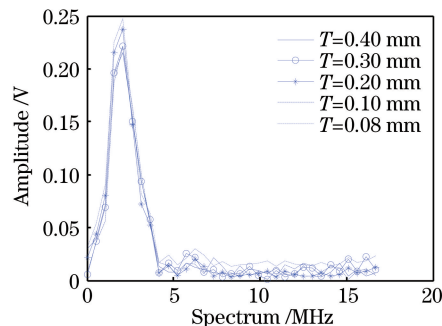


图 6 直达波频谱图

Fig. 6 Direct wave spectrum diagram

从图6可以看出,样品A、B、C、D和E的直达波频谱几乎完全相同,且频谱范围为0~4 MHz,中心频率为2 MHz。在传统的超声检测技术中,通常采用耦合剂与样品接触,检测结果易受到耦合情况的影响。激光超声通过激光激励和接收样品的表面声波,完全

不接触样品即可实现声波检测,不受检测环境的影响,激励声波频带一致且具有频带宽的优点。

#### 4.2 表面缺陷的定位

基于激光超声检测平台得到了样品A、B、C、D、E表面缺陷的B扫图像,如图7所示。

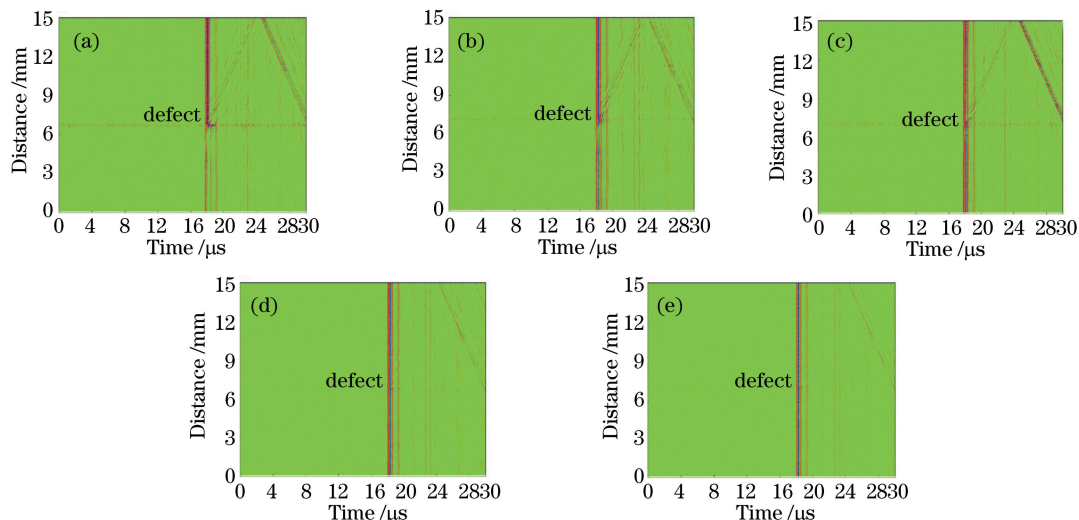


图7 表面缺陷的B扫图像。(a)缺陷深度为0.40 mm;(b)缺陷深度为0.30 mm;  
(c)缺陷深度为0.20 mm;(d)缺陷深度为0.10 mm;(e)缺陷深度为0.08 mm

Fig. 7 B-scanning images of surface defect. (a) Defect depth of 0.40 mm; (b) defect depth of 0.30 mm;  
(c) defect depth of 0.20 mm; (d) defect depth of 0.10 mm; (e) defect depth of 0.08 mm

从图7中读取样品表面缺陷的位置,其与实际位置之间的误差如表2所示。实际样品的表面缺陷位置为与扫描初始点的距离为7 mm。

表2 实际测量缺陷的位置及误差

Table 2 Measured location and error of defects

Sample	Defect location /mm	Error /%
A	6.7	4.2
B	6.9	1.4
C	6.9	1.4
D	7.1	1.4
E	7.1	1.4

从图7和表2可以看出,基于本研究搭建的激光超声检测平台可以完成样品表面的B扫成像,并可以直接读取表面缺陷的实际位置,实现了表面缺陷的定位。由图7可以得出,缺陷深度越小,B扫成像图中越难分辨缺陷的位置,这说明单从时域分析声波透射信号与反射信号不足以辨别缺陷的特征。

#### 4.3 表面缺陷反射波和透射波频谱分析

小波分析可以实现信号频率的细节分析。本研究对表面缺陷深度分别为0.40,0.30,0.20,0.10,0.08 mm样块的缺陷反射声表面波和透射声表面波进行阈值为db10的小波变换,对信号进行6层分解,得到每一层的高低频信号,对每一层信号进行频

谱变换,得到不同频段的频率幅值变换曲线;然后再根据帕塞瓦尔定理得到不同频段信号随频率变化的频谱能量曲线图。

待测样品的表面缺陷深度较浅,预测透射/反射阈值现象应发生在信号的高频段处。采用小波法分析信号在不同高频段的频谱能量,得到如图8所示的曲线。图8中的S表示原始信号频谱能量, $d_1$ 为第一层信号频谱能量,频率范围为8.34~16.67 MHz; $d_2$ 为第二层信号频谱能量,频率范围为4.17~8.34 MHz; $d_3$ 为第三层信号频谱能量,频率范围为2.08~4.17 MHz; $d_4$ 为第四层信号频谱能量,频率范围为1.04~2.08 MHz; $d_5$ 为第五层信号频谱能量,频率范围为0.52~1.04 MHz; $d_6$ 为第六层信号频谱能量,频率范围为0.26~0.52 MHz。

在图8(a)中,对于原始信号频谱能量以及第四、第五、第六层信号频谱能量,透射信号能量大于反射信号能量;第三层信号的频谱发生变化,反射信号能量大于透射信号能量,可以看到此时发生了透射/反射信号阈值现象,利用第三层信号频率能量分布可估算出临界频率为1.82 MHz;同理可求得图8(b)中透射/反射信号阈值现象发生在第二层信号处,临界频率为2.60 MHz;图8(c)中透射/

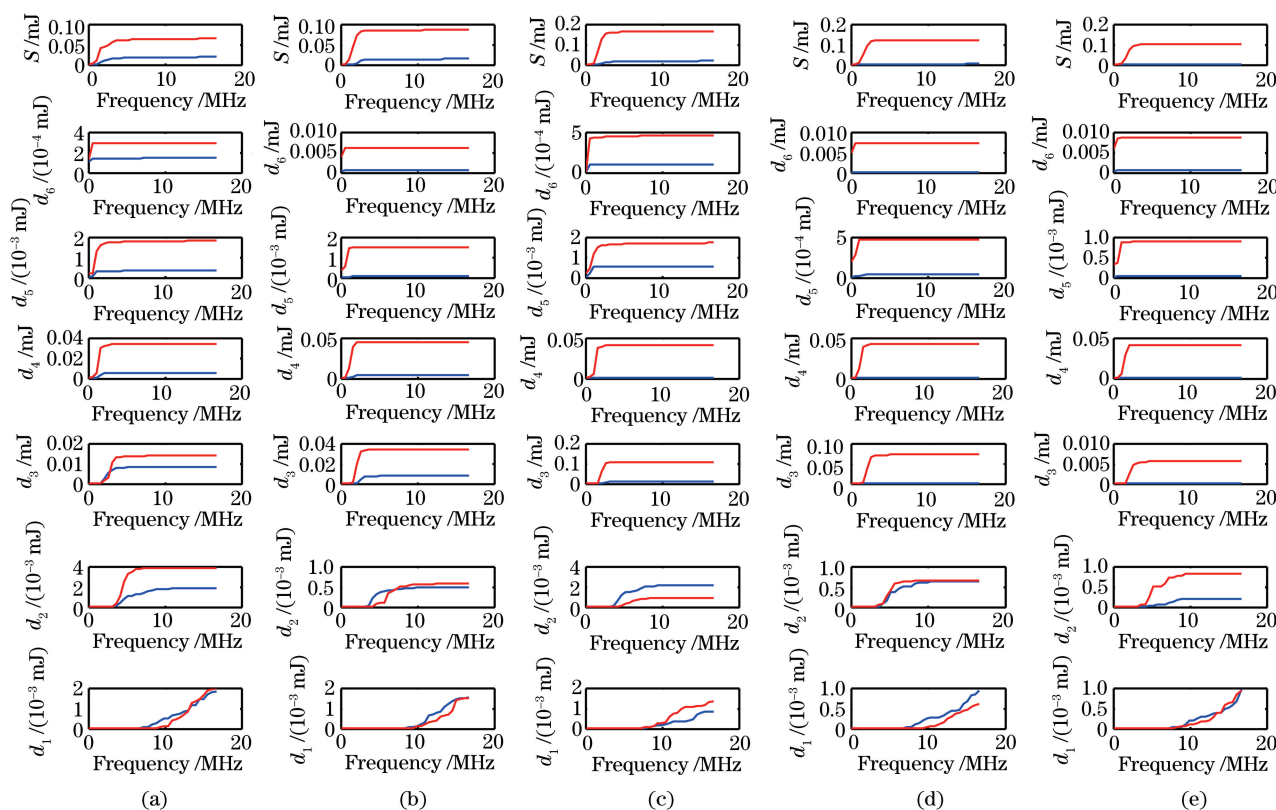


图 8 反射/透射信号频谱能量图。(a)缺陷深度为 0.40 mm;(b)缺陷深度为 0.30 mm;(c)缺陷深度为 0.20 mm;(d)缺陷深度为 0.10 mm;(e)缺陷深度为 0.08 mm(红色实线为透射声表面波曲线,蓝色实线为缺陷反射声表面波曲线)

Fig. 8 Frequency spectrum energy diagrams of reflection/transmission signals. (a) Defect depth of 0.40 mm; (b) defect depth of 0.30 mm; (c) defect depth of 0.20 mm; (d) defect depth of 0.10 mm; (e) defect depth of 0.08 mm (red solid lines and blue solid lines represent curves of transmission surface wave and defect reflection surface wave, respectively)

反射信号阈值现象发生在第二层信号处,临界频率为 3.39 MHz;图 8(d)中透射/反射信号阈值现象发生在第一层信号处,临界频率为 7.60 MHz;图 8(e)中透射/反射信号阈值现象发生在第一层信号处,临界频率为 9.50 MHz。根据公式  $c = \lambda f$  ( $c$  为声速; $f$  为声波频率)可计算临界频率对应的临界波长,缺陷深度与临界波长间的关系如图 9 所示。

由图 9 可知,表面缺陷深度与临界波长近似呈线性关系,且直线斜率为 4。由此可以判断,表面波与样品表面缺陷相互作用时会发生透射/反射阈值现象,阈值大小为  $1/4$ ,即  $\lambda/h = 1/4$ 。根据这一关系可以得到表面缺陷深度和误差,结果如表 3 所示。由表 3 可知,采用激光超声临界频率法可以实现缺陷深度的检测。表面波在表面缺陷处发生透射/反射阈值现象,经测量,阈值大小为  $\theta_0 = 1/4$ 。文献 [16]中提出,在声波垂直入射表面缺陷的情况下,当缺陷深度  $h$  与入射声波波长  $\lambda$  满足  $h = (2n + 1)\lambda/4$  时,反射声信号出现极大值现象,即声波与表面缺陷

相互作用会呈现与入射声波波长相关的透射与反射现象。若  $n=0$ ,根据该式得到的缺陷深度与波长的关系为  $h = \lambda/4$ ,与本研究测得的透射/反射现象阈值为  $1/4$  相吻合。

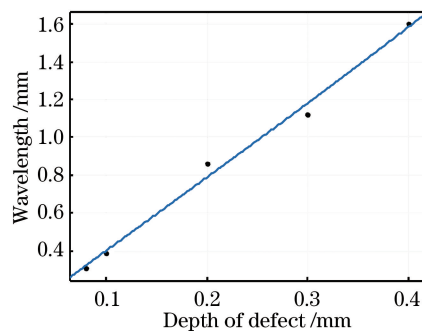


图 9 表面缺陷深度与对应波长关系图  
Fig. 9 Relationship between surface defect depth and corresponding wavelength

由以上分析可知,激光超声表面波遇到缺陷时会发生透射/反射阈值现象,对采集的透射与反射信号进行小波分解和频谱能量分析,可计算出发生透射/

表 3 测得的缺陷深度及误差  
Table 3 Measured defect depth and error

Sample defect depth /mm	Frequency /MHz	Wavelength /mm	Measured defect depth /mm	Error /%
0.40	1.82	1.602	0.401	0.25
0.30	2.60	1.122	0.281	6.33
0.20	3.39	0.860	0.215	7.50
0.10	7.60	0.384	0.096	4.00
0.08	9.50	0.307	0.077	3.75

反射阈值现象的阈值大小为 1/4,进而采用临界频率法可实现表面缺陷深度的检测,测量误差为 7.50%。

4.4 探测点与接收点间距离对检测结果的影响

声波在传播过程中,衰减系数与频率的平方成正比,也就是高频率声波衰减快,低频率声波衰减慢。本实验使用表面波作为检测波形,声波能量集中在样品表面,可实现样品表面性能的远距离检测。在 3.1 节中,探测点与接收点间的距离为 15 mm,样品长度为 100 mm,探测点与接收点之间的距离较短,对缺陷处发生透射/反射阈值现象的阈值影响不明显。为此,本研究针对缺陷深度为 0.40 mm 的样品,设置激光激发点和探测点间的距离分别为 5, 10, 15, 20, 25 mm,并分别进行扫查步长为 0.05 mm、扫查距离为 30 mm 的扫描,采集到的 B

扫图像如图 10 所示。对采集到的缺陷反射表面波及透射表面波进行小波变换,并求解其能量随频谱的变化曲线,得到如图 11 所示的曲线。

由于频率大的信号易发生反射,频率小的信号易发生透射,声波在 d4、d5、d6 层的频率段都是透射信号大于缺陷反射表面波,如图 11 所示;从 d3 层开始出现缺陷反射表面波信号大于透射表面波信号的情况。也就是说,声波在 d<sub>3</sub> 信号中发生了透射/反射信号阈值现象,通过 d<sub>3</sub> 信号频率能量分布可以得到缺陷反射表面波信号与透射表面波信号发生透射/反射信号阈值现象的临界频率,据此可以得到临界波长;根据声波临界波长及参数 1/4 的关系可求得缺陷深度,并可得到关于缺陷深度的误差,结果如表 4 所示。

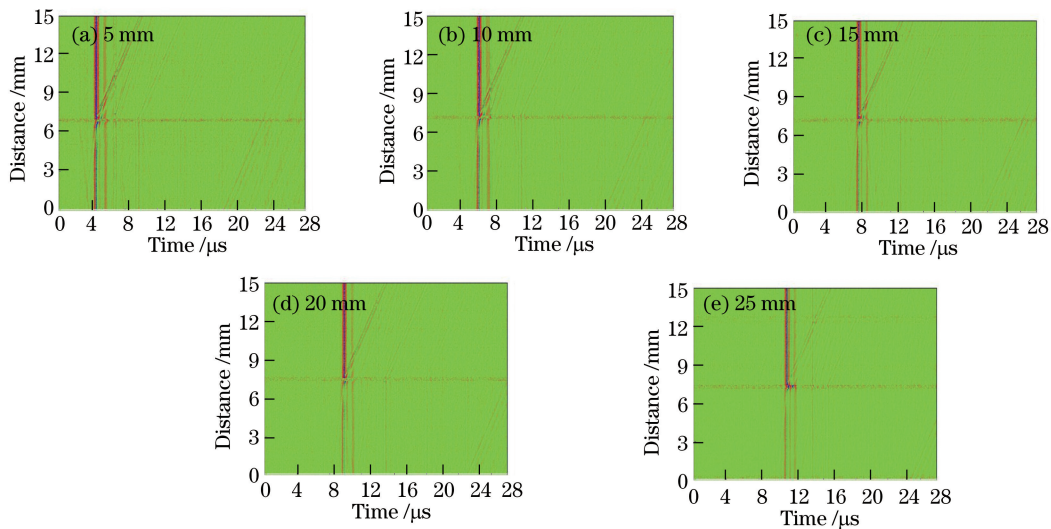


图 10 激发点和探测点距离不同时的 B 扫图像

Fig. 10 B-scanning images at different distances between excitation point and detection point

表 4 激发点与探测点距离不同时测得的缺陷深度及误差

Table 4 Measured defect depth and error at different distances between excitation point and detection point

Distance /mm	Frequency /MHz	Wavelength /mm	Measured defect depth /mm	Error /%
5	1.96	1.488	0.372	7.00
10	1.87	1.559	0.390	2.50
15	1.71	1.705	0.426	6.50
20	1.85	1.576	0.394	1.50
25	1.79	1.629	0.407	1.75

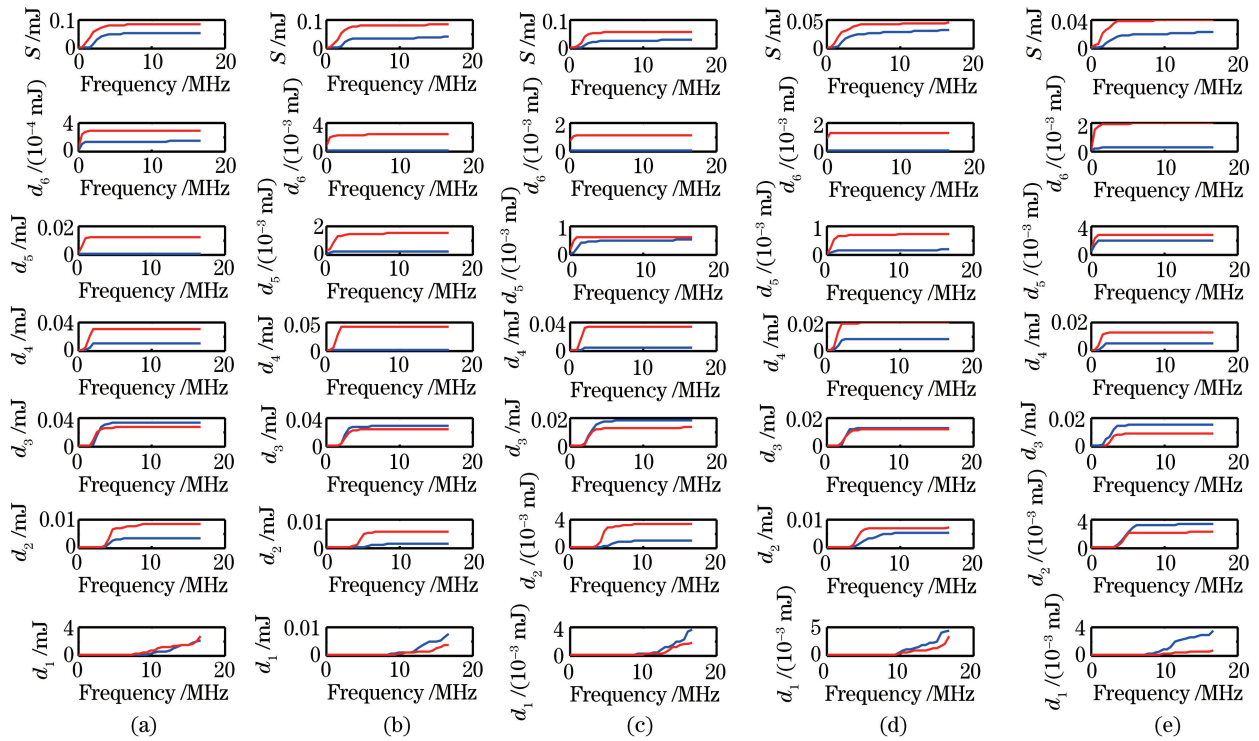


图 11 激光激发点与探测点间距离不同时的反射/透射信号频谱能量图。(a)距离为 5 mm;(b)距离为 10 mm;(c)距离为 15 mm;(d)距离为 20 mm;(e)距离为 25 mm(红色实线为透射声表面波曲线,蓝色实线为缺陷反射声表面波曲线)

Fig. 11 Frequency spectrum energy diagrams of reflection/transmission signal when distance between excitation point and detection point is different. (a) Distance of 5 mm; (b) distance of 10 mm; (c) distance of 15 mm; (d) distance of 20 mm; (e) distance is of 25 mm (the red solid lines and blue solid lines represent curves of transmission surface wave and defect reflection surface wave, respectively)

由表 4 可知,在本实验条件下,发生透射/反射信号阈值现象时,临界频率对应波长与表面缺陷深度的比值为 1/4,激光激发点与探测点之间距离的变化对缺陷深度及误差的影响不明显。

#### 4.5 不同材质对检测结果的影响

针对表面缺陷深度为 0.40 mm 的铝样品和钢样品进行激光超声检测,如图 12 所示,并对缺陷反射表面波和透射表面波信号进行小波变换,对

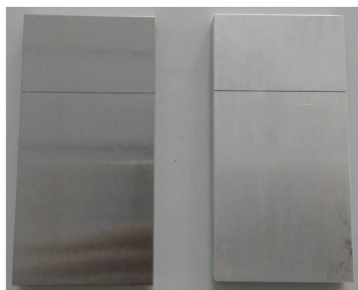


图 12 不同材质的样品。(a)钢;(b)铝  
Fig. 12 Samples with different materials.  
(a) Steel sample; (b) aluminum sample

每一层信号求其能量随频率的变化曲线,如图 13 所示。

依据图 13 得出的 2 种材质样品发生透射/反射信号阈值现象时的临界频率、临界波长、缺陷深度估算及误差如表 5 所示。

由表 5 可知,根据铝合金样品和钢材样品测量得到的相同深度表面缺陷处发生透射/反射阈值现象的阈值参数均为 1/4。

以上表明,激光超声表面波在表面缺陷处会发生透射/反射阈值现象,经测量阈值大小为 1/4,也就是发生透射/反射信号阈值现象时临界频率对应波长与表面缺陷深度的比值为 1/4。在本实验条件下,激光激发点与探测点的距离对表面缺陷发生阈值现象的临界频率影响不明显,且该阈值大小与待测样品的材质无关。

## 5 结 论

激光超声激发表面波具有频带宽的特点,可实现样品表面微缺陷的定位检测和深度估计。分析了

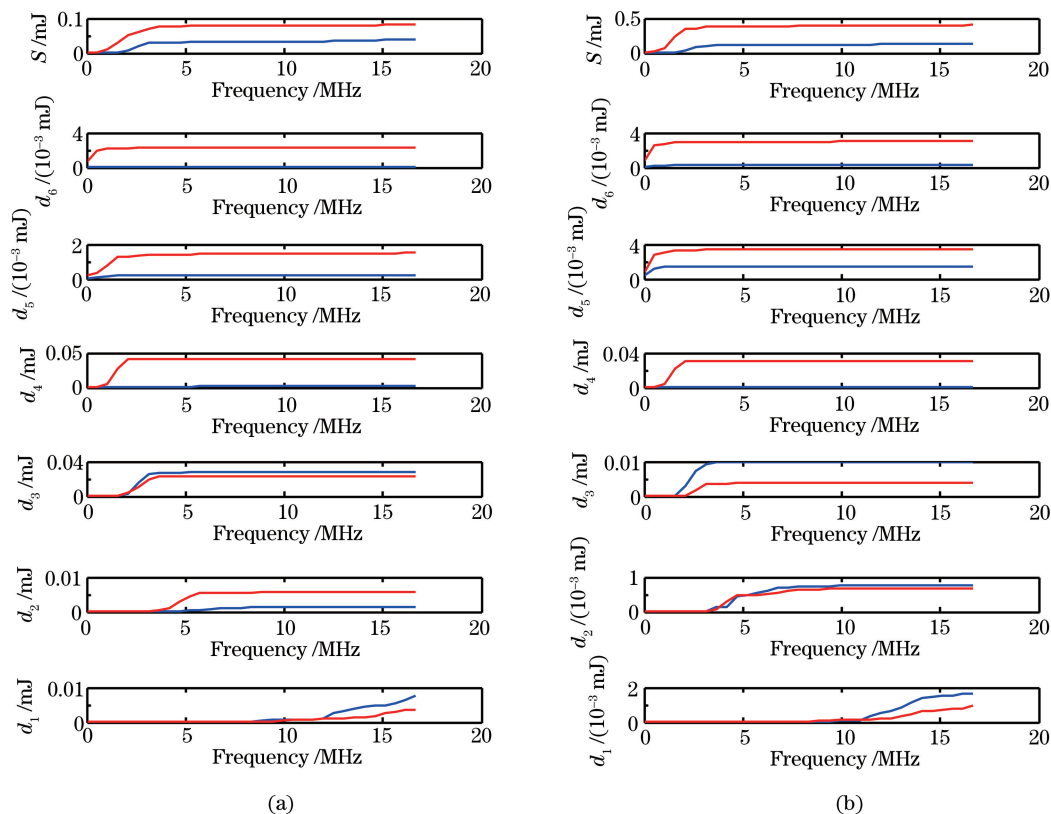


图 13 不同材质样品的反射/透射信号频谱能量图。(a)铝样品；  
(b)钢样品(红色实线为透射声表面波曲线,蓝色实线为缺陷反射声表面波曲线)

Fig. 13 Frequency spectrum energy diagrams of reflection/transmission signals of samples with different materials.

(a) Aluminum; (b) steel (the red solid lines and blue solid lines represent curves of transmission surface wave and defect reflection surface wave, respectively)

表 5 不同材质样品的缺陷深度及误差

Table 5 Defect depth and error of samples with different materials

Material	Sample defect depth /mm	Frequency /MHz	Wavelength /mm	Measured defect depth /mm	Error /%
Aluminum	0.40	1.87	1.559	0.390	2.50
Steel	0.40	1.85	1.514	0.379	5.25

激光超声表面波在表面缺陷处的透射/反射现象,提出了临界频率法检测表面缺陷深度的方法;基于光弹激发原理,搭建了激光超声检测平台,完成了铝合金样品表面缺陷深度的检测与评价。实验结果表明,激光超声表面波在表面缺陷处会发生透射/反射阈值现象,经测量阈值大小为 1/4,采用临界频率法可实现表面微缺陷深度的精确测量。此外,本研究还对激光激发点与接收点间距离、待测样品材质对阈值大小的影响进行了分析,结果发现阈值大小与表面波传播距离、待测样品材质无关。

参 考 文 献

[1] Qian M L. Laser ultrasonic technique and its applications[J]. Shanghai Measurement and Testing,

2003, 30(1): 4-7.

钱梦騄. 激光超声检测技术及其应用[J]. 上海计量测试, 2003, 30(1): 4-7.

[2] Zhang Y Z. Study of detecting the metal surface defects based on laser ultrasound technology [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.

张颖志. 基于激光超声技术的金属表面缺陷检测研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.

[3] Li Y L. Study of the laser ultrasonic shear wave in the metal material internal defect detection [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.

李远林. 基于反射横波的金属材料内部缺陷激光超声检测研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.

[4] Zheng D G, Chen H B, Wang J F, et al. Analysis of typical defects signal in Al alloy under FSW based on



- laser ultrasonic detection [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(7): 35-38.
- 郑德根, 陈华斌, 王继锋, 等. 基于激光超声的铝合金搅拌摩擦焊典型缺陷检测及分析[J]. 焊接学报, 2015, 36(7): 35-38.
- [5] Soltani P, Akbareian N. Finite element simulation of laser generated ultrasound waves in aluminum plates [J]. Latin American Journal of Solids & Structures, 2014, 11(10): 1761-1776.
- [6] Hu D H. Study of test on thickness of material based on laser ultrasonic [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- 胡东辉. 基于激光超声的材料厚度检测方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [7] Zhu Q, Qiu J H, Zhang C, *et al.* Application of laser ultrasonic detection method for double-layer laminated material [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2016, 53(3): 031402.
- 朱倩, 裘进浩, 张超, 等. 双层层压材料中激光超声检测方法的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 031402.
- [8] Luo K Y, Chen Q, Lü C, *et al.* Thickness analysis of two-sided simultaneous laser shock processing on AM50 Mg alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(1): 0103003.
- 罗开玉, 陈起, 吕刺, 等. 双面激光同时冲击 AM50 镁合金板料的厚度分析[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0103003.
- [9] Dong L M. Study on nondestructive evaluation of residual stress on welded metal by laser ultrasonic technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- 董利明. 金属焊接残余应力的激光超声无损检测研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [10] Duquennoy M, Ouafrouh M, Qian M L, *et al.* Ultrasonic characterization of residual stresses in steel rods using a laser line source and piezoelectric transducers [J]. Nondestructive Testing and Evaluation International, 2001, 34(5): 355-362.
- [11] Zhan Y, Xue J C, Liu C S. Numerical simulation of laser ultrasonic elastic constant measurement based on Abaqus [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(5): 0508002.
- 战宇, 薛俊川, 刘常升. 激光超声测量弹性常数的 Abaqus 数值模拟 [J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0508002.
- [12] He N, Luo X H, Zhao Z H, *et al.* Nondestructive testing method based on fiber coupling and coherent detection [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0812006.
- 何宁, 骆湘红, 赵中华, 等. 基于光纤耦合与相干探测的无损检测方法 [J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0812006.
- [13] Pietroni P, Paone N, Lebeau M, *et al.* Development of non-destructive Young's modulus measurement techniques in non-oriented CeF<sub>3</sub> crystals [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2005, 537(1/2): 203-206.
- [14] Shi Y F. Study on nondestructive evaluation of surface defect and residual stress on metal by laser ultrasonic technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- 石一飞. 金属材料表面缺陷及残余应力的激光超声无损检测研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [15] Zhang J Y. Non-contact surface defect detection technology of laser ultrasonic on hot metal [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- 张建炎. 激光超声非接触检测高温金属表面缺陷研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [16] Domarkas V, Khuri-Yakub P T, Kino G S. Length and depth resonances of surface cracks and their use for crack size estimation [J]. Applied Physics Letters, 1978, 33(7): 557-559.