

金属内部裂纹的超声衰减特性与近表面缺陷识别

肖会芳¹⁾✉, 徐金梧¹⁾, 何飞¹⁾, 黎敏²⁾

1) 北京科技大学国家板带生产先进装备工程技术研究中心, 北京 100083 2) 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083

✉ 通信作者, E-mail: huifangxiao@ustb.edu.cn

摘要 建立了包含裂纹缺陷的二维金属板模型. 采用有限元方法, 对具有不同深度裂纹的材料内部超声波场进行计算, 获得了不同裂纹深度金属材料上表面的回波信号, 分析了裂纹深度对超声波传播特性的影响规律. 进一步分离提取不同阶次底面回波的频谱特征, 获得了由裂纹缺陷引起的超声衰减系数随频率的变化关系. 最后提出了通过底面回波频谱图辨识近表面裂纹缺陷的方法.

关键词 近表面; 裂纹; 无损检测; 超声; 衰减; 辨识

分类号 TG 115.28⁺5

Ultrasonic attenuation characteristics of metal materials with cracks and identification of subsurface flaws

XIAO Hui-fang¹⁾✉, XU Jin-wu¹⁾, HE Fei¹⁾, LI Min²⁾

1) National Engineering Research Center of Flat Rolling Equipment, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉ Corresponding author, E-mail: huifangxiao@ustb.edu.cn

ABSTRACT A two-dimensional isotropic plate model with an embedded horizontal crack was established. Finite element analysis with absorbing boundary condition was employed to simulate the experimental pulse-echo mode to obtain ultrasonic data. The effect of crack depth on the wave propagation was studied and the spectra of different backwall echoes were further extracted. A relationship was determined between ultrasonic attenuation due to the crack and frequency. Finally, a method was proposed for identifying subsurface cracks based on the spectra of backwall echoes.

KEY WORDS subsurface; cracks; non-destructive testing; ultrasonic; attenuation; identification

超声无损检测技术 (ultrasonic non-destructive testing, UNDT) 是一种利用超声波在材料中的传播特性来判断被测材料的缺陷和异常的无损检测方法^[1-3]. 其中, 超声脉冲回波检测法 (pulse-echo mode) 以测量精度高、检测速度快而广泛应用于金属材料内部裂纹缺陷无损检测.

然而, 对金属内部的近表面裂纹缺陷, 由于裂纹回波信号会淹没在表面回波信号中而无法辨识缺陷, 导致存在检测盲区, 成为超声回波检测法最主要的缺点和难点之一^[4-5]. 如何实现从回波信号中辨

识近表面裂纹缺陷, 对超声无损检测带钢缺陷具有重要的理论和实际意义.

本文通过建立包含裂纹缺陷的二维金属板模型, 采用有限元数值仿真的方法对具有不同深度裂纹的材料内部超声波场进行计算, 获得了不同裂纹深度金属上表面的回波信号, 研究了裂纹深度对超声波传播特性的影响规律, 并进一步分离提取底面回波的频域特征, 获得了由裂纹缺陷引起的超声衰减系数随频率的变化关系, 提出了通过底面回波频谱图辨识近表面裂纹缺陷的方法, 为检测近表面裂

收稿日期: 2013-06-26

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAF04B02); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51304019)

DOI: 10.13374/j.issn1001-053x.2014.06.019; http://journals.ustb.edu.cn

纹缺陷提供指导.

1 二维金属板模型

1.1 模型描述

研究材料内部裂纹缺陷对超声波传播及衰减特性影响规律的模型示意图,如图 1 所示. 二维矩形金属板的宽为 B , 厚度为 H . 宽度为 l , 高度为 d 的矩形裂纹位于金属板的半宽位置, 且裂纹方向平行于金属板表面, 因而裂纹在金属板内部的位置仅由其深度 h 决定. 沿宽度方向等幅分布的法向激励载荷作用在金属板的上表面, 引起表面的振动并向金属板内部传播, 产生平行于 y 方向的纵波 L 和平行于 x 方向的横波 S , 并与金属板的上、下表面以及裂纹相互作用. 由于横波 S 几乎不与裂纹相互作用, 因此主要表现为纵波 L 与裂纹的相互作用, 纵波在裂纹表面反射的同时, 在裂纹尖端发生散射, 并产生波型转换为横波^[6-7].

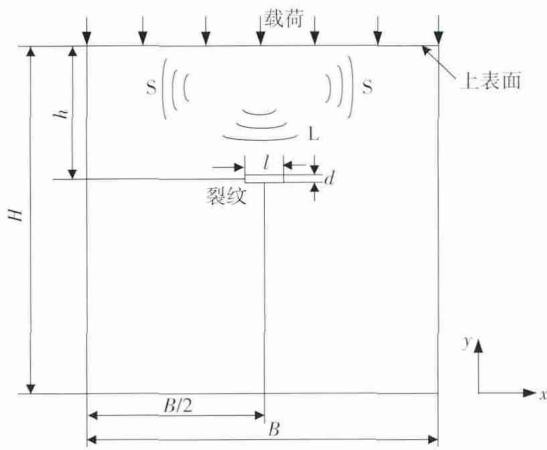


图 1 具有内部裂纹缺陷的二维金属板模型示意图

Fig. 1 Sketch diagram of a two-dimensional isotropic panel with an embedded crack

通过检测上表面的回波信号, 采用同端激励、同端接收的方式, 模拟实际超声检测中的脉冲回波法. 当内部存在裂纹时, 超声波在到达底面之前, 先与裂

纹表面相互作用并发生反射, 反射回波被检测探头接收. 由于裂纹回波的传播距离小于底面回波, 因此其到达接收探头的时间较早. 假设从激发到接收裂纹回波信号的时间间隔为 t_c , 纵波波速为 C_p , 当时间 t_c 大于始波或底面回波的时间宽度 t_b 时, 裂纹的深度位置可估算为 $h = C_p t_c / 2$. 通过裂纹回波可以提取裂纹的深度信息, 如图 2 (a) 所示.

但是, 当裂纹位于近表面位置, 使得从激发到接收裂纹回波信号的时间 t_c 小于始波的时间宽度 t_b (如图 2 (b) 所示), 或缺陷回波宽度 t_c 小于底面回波的时间宽度 t_d (如图 2 (c) 所示), 则裂纹回波信号淹没在始波或底面回波信号中, 从而无法直接从回波信号中辨识缺陷的存在, 即存在缺陷检测的盲区.

同时, 裂纹会引起超声波的散射和衰减, 对底面回波也会产生影响, 因而底面回波也包含了丰富的裂纹特征信息. 文献 [6] 研究了裂纹宽度对反射回波的影响. 结果表明: 当裂纹宽度较小时 ($l < 3\lambda$, λ 为纵波波长), 反射系数 (定义为反射波幅值与入射波幅值的比值) 随着裂纹宽度递增; 当裂纹宽度较大时 ($l > 3\lambda$), 反射系数随着裂纹宽度递减. 本文保持裂纹尺寸不变, 通过建立不同裂纹深度 h 的金属板模型, 采用有限元方法, 获得不同裂纹深度的反射回波曲线.

1.2 有限元计算模型

采用商用有限元软件 ABAQUS 求解超声波在板内的传播. 钢板的尺寸为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$, 对应的材料参数为弹性模量 $E = 200\text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.28$, 密度 $\rho = 7850\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. 根据 Christoffel 方程^[8], 金属板内超声波的波速分别为纵波 $C_p = 5707\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 横波 $C_s = 3155\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 为了模拟超声换能器声场, 在金属板上表面施加法向的瞬时压力载荷 $P(t)$. 激励信号 $P(t)$ 为 Hanning 窗调制, 中心频率为 $f_c = 10\text{ MHz}$, 时间长度为 $\Delta t = 200\text{ ns}$ 的单周期正弦脉冲, 其时域波形和频谱图如图 3 所示. 中心频率为 10 MHz 的探头

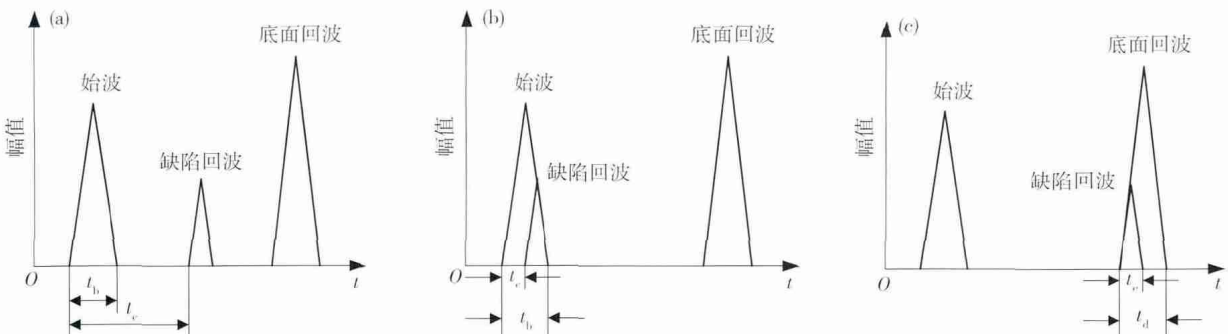


图 2 裂纹回波时间 t_c 与表面回波的时间宽度 t_b 之间的关系. (a) $t_c > t_b$; (b) $t_c < t_b$, 裂纹近上表面; (c) $t_c < t_b$, 裂纹近下表面

Fig. 2 Relationship between time t_c and t_b : (a) $t_c > t_b$; (b) $t_c < t_b$, the crack is close to the frontwall; (c) $t_c < t_b$, the crack is close to the backwall

是中厚板缺陷检测使用最为广泛的探头之一^[4 9].

对中心频率为 10 MHz 的激励载荷,纵波的波长为 $\lambda = 0.57 \text{ mm}$. 采用四节点 CPS4R 单元离散,为了精确模拟超声波的传播,网格尺寸的大小选为 $\lambda / 60$,即每个纵波波长内有 60 个单元. 时间步长为 0.1 ns,以保证在单个时间步内,即使波速最大的纵波的传播距离也小于一个网格尺寸. 由于有限元模

型的宽度远小于实际带钢宽度,为了消除计算模型宽度尺寸有限而引入的边界反射效应对波场的影响,在金属板的左右边界采用了吸收边界^[10-11]. 求解脉冲激励载荷下的波场,提取金属板上表面所有节点在 y 方向的位移,并对所有节点位移求平均值. 这与实际超声测量中换能器作用面积上所接收到的回波声压能量相对应.

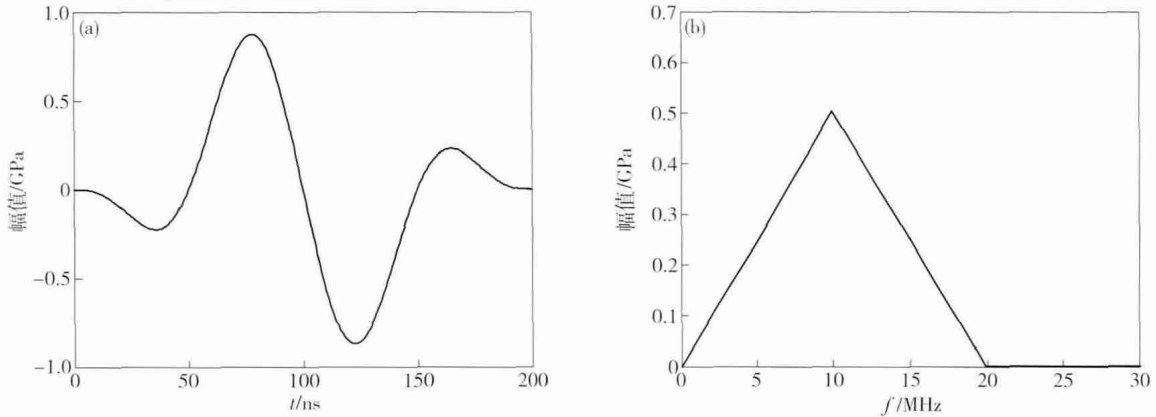


图 3 瞬时激励载荷曲线. (a) 时域; (b) 频域

Fig. 3 Transient excitation load in time (a) and frequency (b) domains

1.3 有限元计算方法有效性验证

采用有限元方法模拟无缺陷金属板上表面反射回波,并与实验测量结果进行对比以检验本文采用有限元方法模拟金属内超声波传播的有效性. 金属板上表面所有节点 y 方向位移的平均值,如图 4 所示. 图 4 显示,第 1 次底面回波到达上表面的时间 $t = 1.80 \mu\text{s}$,相邻两次底面回波之间的时间间隔也为 $t = 1.80 \mu\text{s}$,与理论计算值 $t = 1.75 \mu\text{s}$ 基本一致. 由于有限元计算采用显示中心差分算法,在数值计算过程中存在舍入误差和截断误差,从而引起计算中的数值噪声^[12].

为了验证有限元计算结果的准确性,采用 IOS AIR-1550 TWM 激光超声检测设备测量了无缺陷钢板的超声波信号. 激光发生器的波长为 532 nm,发射的激光垂直作用在被测钢板表面,产生的超声信号被带宽为 125 MHz 的激光超声接收仪接收. 测量钢板为矩形断面,厚度 $H = 5 \text{ mm}$,宽度 $B = 20 \text{ mm}$. 采样点数为 500,采样率为 $0.02 \mu\text{s}$,信号总长度为 $10 \mu\text{s}$. 测量获得的 $1 \sim 8 \mu\text{s}$ 时间内钢板上表面的 y 方向位移响应,如图 4 所示. 仿真结果和实验结果各底面回波到达时间基本完全一致,验证了本文有限元方法的准确性. 但是,由于仿真计算忽略了实际材料内部晶界多重背散射引起的衰减,因此仿真计算结果的回波幅值衰减要小于实测结果. 同时,实验测试的噪声和测试样品的有限宽度也是引

起实验测试结果和仿真结果差异的原因.

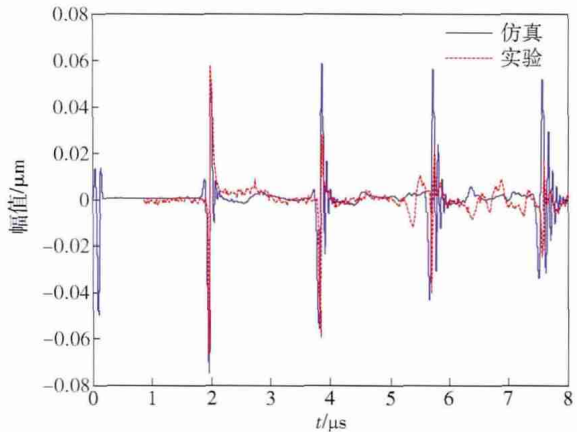


图 4 厚度为 5 mm 无缺陷金属板 y 方向波形的仿真结果和实测结果对比

Fig. 4 Comparison of the numerical and experimental reflected y -displacement in a defect-free plate with the thickness of 5 mm

2 计算结果与分析

2.1 内部无裂纹

对图 4 所示的无裂纹金属板上表面仿真曲线的四次底面回波进行快速傅里叶变换后的频域曲线如图 5 所示. 图 5 显示,对入射中心频率为 10 MHz 的载荷,随着超声波在金属板内传播,底面回波的频率范围扩大,不同底面回波的频率范围均在 $0 \sim 20 \text{ MHz}$. 图 5 同时显示,随着回波次数的增加,不同频

率成分的幅值均有所减小,即存在衰减. 由于金属板为各向同性且无缺陷,该衰减主要由于几何扩散引起^[13].

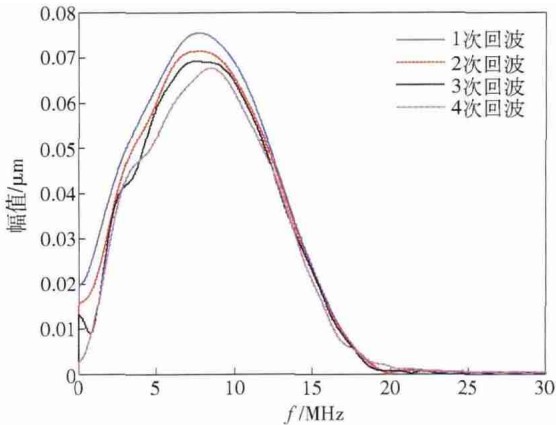


图 5 内部无裂纹金属板的不同阶次底面回波的频谱图

Fig.5 Spectra of different backwall echoes for the defect-free plate

超声波在金属板内传播的衰减特性随频率的变化关系,可以采用下式所示的衰减系数描述^[14]:

$$\alpha = -\frac{1}{2H} \ln \left| \frac{F_{n+1}(\omega)}{F_n(\omega)} \right|. \quad (1)$$

式中: α 为衰减系数,定义为单位距离上振幅比值的自然对数, $\text{Np} \cdot \text{cm}^{-1}$; H 为金属板厚; $F_{n+1}(\omega)$ 和 $F_n(\omega)$ 分别为相邻的底面回波在频域内的幅值, $n = 1, 2, 3$. 对四次底面回波,可以计算获得三组衰减系数,对三组衰减系数进行平均处理获得的平均衰减系数随频率的变化关系曲线,如图 6 所示. 图 6 显示,由几何扩散引起的衰减系数较小,最大值仅为 $0.075 \text{ Np} \cdot \text{cm}^{-1}$,对应的频率为 $f = 18.6 \text{ MHz}$. 同时可以看到,扩散衰减系数随频率的增大逐渐增加. 在计算由裂纹引起的衰减时,需要将由几何扩散引起的衰减量从计算获得的总衰减量中减除.

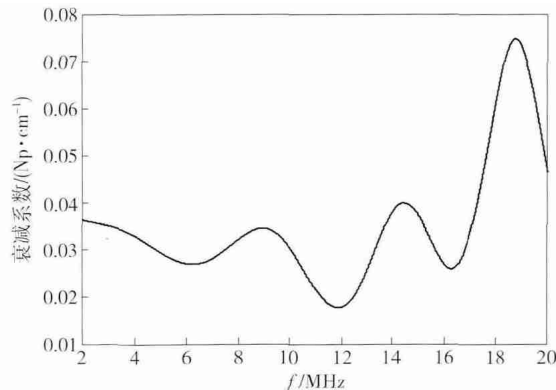


图 6 内部无裂纹金属板的衰减系数随频率的变化关系曲线

Fig.6 Plot of attenuation coefficient vs. frequency for the defect-free plate

2.2 内部有裂纹

为了获得裂纹深度对超声波的反射、散射以及衰减的影响规律,通过建立不同裂纹深度 h 的有限元仿真模型,计算获得反射回波信号,并提取其衰减系数随频率的变化关系. 其中,裂纹的尺寸为 $l = 0.5 \text{ mm}$, $d = 0.1 \text{ mm}$.

2.2.1 时域波形

裂纹深度 $h = 0.25, 1, 2, 4.75 \text{ mm}$ 时,金属板上表面接收的反射回波的时域波形,如图 7 所示. 图 7(b) 和 (c) 显示,对缺陷深度 $h = 1 \text{ mm}$ 和 $h = 2 \text{ mm}$,在始波 F_{echo} 和第 1 次底面回波 ($1^{\text{st}} B_{\text{echo}}$) 之间,以及相邻的底面回波 $1^{\text{st}} B_{\text{echo}}$ 、 $2^{\text{nd}} B_{\text{echo}}$ 、 $3^{\text{rd}} B_{\text{echo}}$ 和 $4^{\text{th}} B_{\text{echo}}$ 之间,可以观察到明显的多次缺陷回波信号 $1^{\text{st}} C_{\text{echo}}$ 、 $2^{\text{nd}} C_{\text{echo}}$ 、 $3^{\text{rd}} C_{\text{echo}}$ 和 $4^{\text{th}} C_{\text{echo}}$. 对低阶底面回波,回波信号更为集中且幅值较大. 随着回波次数增加,底面回波信号的幅值逐渐减小而时间跨度逐渐增大,即第 4 次底面回波时间跨度 T_4 最大,第 1 次底面回波时间跨度 T_1 最小,表明经过多次反射后,超声波发生了衰减和散射.

多次裂纹回波信号具有与底面回波信号类似的特征,即较早的裂纹回波信号 ($1^{\text{st}} C_{\text{echo}}$) 更为集中,随着回波次数增加 ($2^{\text{nd}} C_{\text{echo}}$ 、 $3^{\text{rd}} C_{\text{echo}}$ 和 $4^{\text{th}} C_{\text{echo}}$),可以观察到明显的衰减和散射. 图 7(b) 和 (c) 同时显示,随着裂纹深度 h 增加,入射波传播到裂纹表面的时间增加,相邻底面回波之间的缺陷回波次数减少.

然而,对裂纹深度 $h = 0.25 \text{ mm}$,裂纹缺陷非常靠近上表面,始波和缺陷回波之间的时间间隔小于始波的时间宽度,缺陷回波与始波发生混叠,导致无法识别裂纹回波,如图 7(a) 所示. 对裂纹深度 $h = 4.75 \text{ mm}$,裂纹缺陷非常靠近底面,由于底面回波和缺陷回波之间的时间间隔小于底面回波的时间宽度,缺陷回波与底面回波发生混叠,如图 7(d) 所示. 对采用同端激励、同端接收的脉冲回波法,这些靠近检测物体表面的区域为检测盲区.

2.2.2 波场分布

当裂纹深度为 $h = 1 \text{ mm}$ 时,不同时刻 $t = 0.30, 0.45, 1.15, 2.00 \mu\text{s}$ 材料内部的波场分布,如图 8 所示. 从图 8 可以清楚地观察波在传播过程中,在裂纹表面的反射、散射和波型转换特征. 图 8(a) 显示,产生的纵波沿着厚度方向传播,向底面传播的波和从裂纹表面反射的波在 $t = 0.30 \mu\text{s}$ 相遇. 当波到达裂纹表面后,以裂纹的尖端和表面作为新的波源,产生不同的散射波,如图 8(b) 所示. 一部分透射波 W_p 继续向底面传播,而另一部分反射波 W_r ,则向材料上表面传播,在上表面和裂纹表面之间发生多

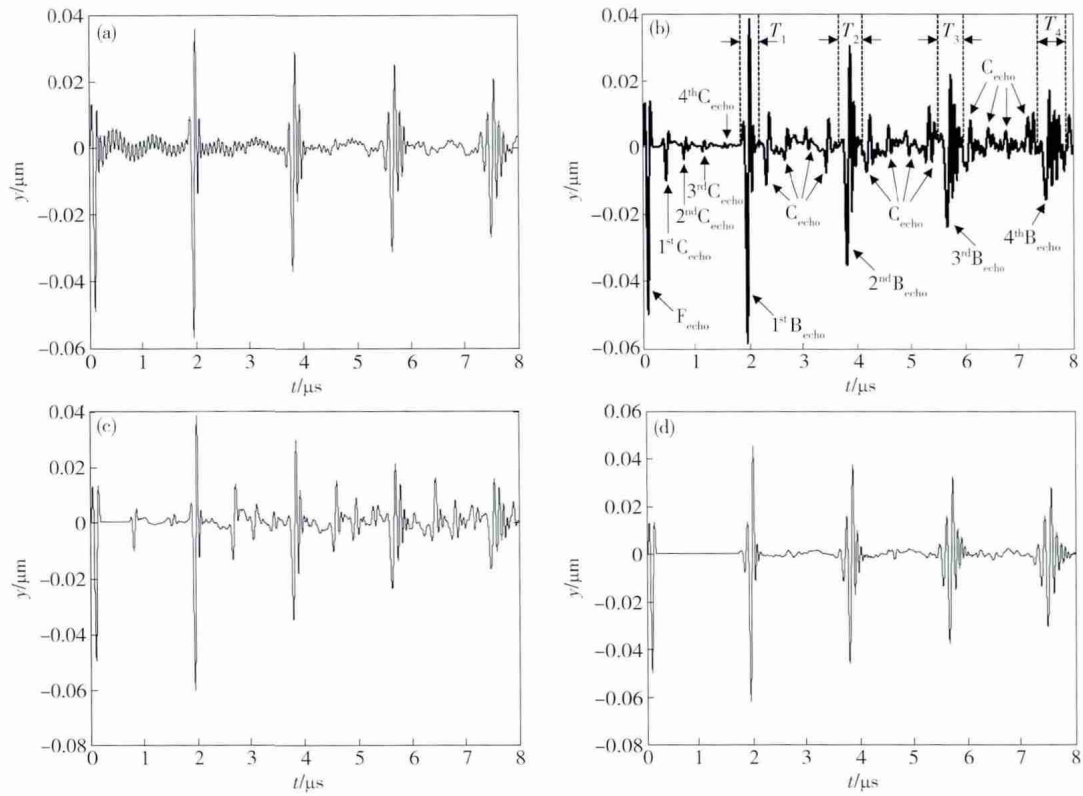


图7 不同裂纹深度时金属板上表面接收的反射回波波形. (a) $h=0.25$ mm; (b) $h=1$ mm; (c) $h=2$ mm; (d) $h=4.75$ mm

Fig.7 Reflected y -displacement for four different crack depths; (a) $h=0.25$ mm; (b) $h=1$ mm; (c) $h=2$ mm; (d) $h=4.75$ mm

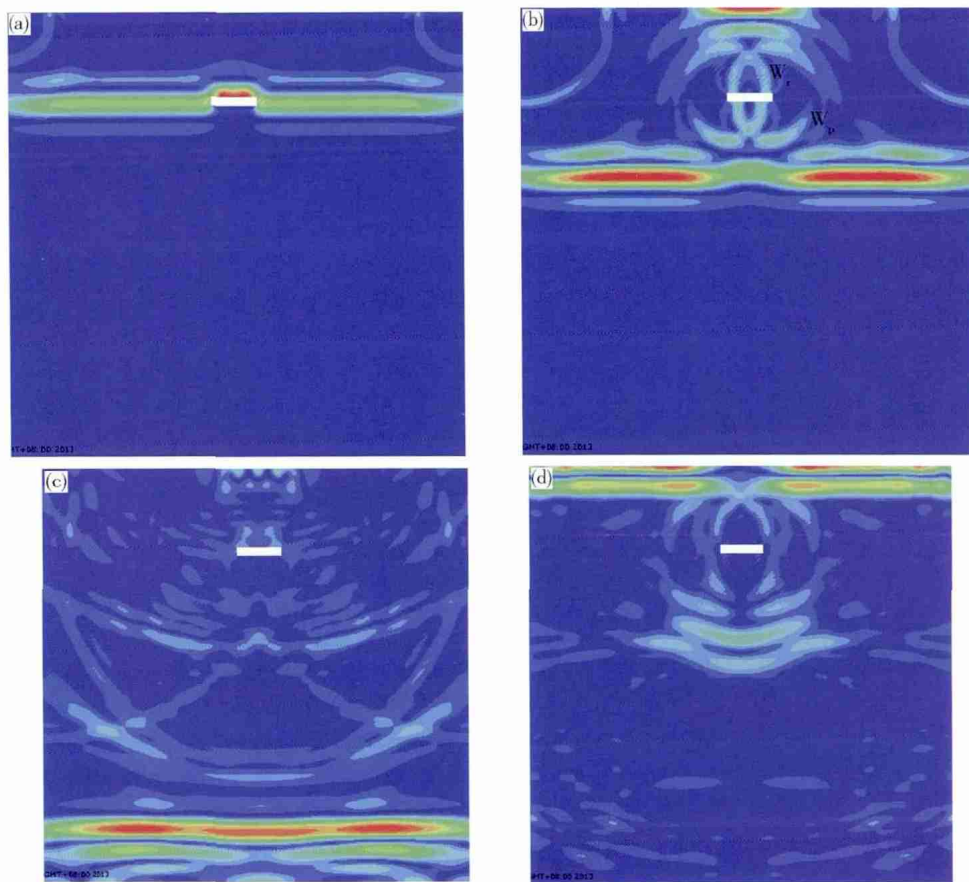


图8 裂纹深度为 $h=1$ mm 时不同时刻的波场图. (a) $t=0.30$ μ s; (b) $t=0.45$ μ s; (c) $t=1.15$ μ s; (d) $t=2.00$ μ s

Fig.8 Propagation of ultrasonic waves for the crack depth of 1 mm at different time steps; (a) $t=0.30$ μ s; (b) $t=0.45$ μ s; (c) $t=1.15$ μ s; (d) $t=2.00$ μ s

次反射,被探头接收,如图 7(b) 所示的多次裂纹回波信号. 图 8(d) 显示,第 1 次底面回波在 $t = 2.00 \mu\text{s}$ 到达上表面. 之后,底面回波从上表面反射,并以第 2 次入射波再次进入材料内部,继续向底面传播. 由于第 2 次入射波、第 1 次传播波的波场和裂纹散射波的相互作用,波场更为复杂.

2.2.3 衰减系数

对图 7 所示的不同裂纹深度金属板上表面接收的反射回波中的四次底面回波进行快速傅里叶变换后的频域曲线,如图 9 所示. 与无裂纹类似,由于超声波的传播,底面回波的频率成分增加. 不同底面回波的频率范围均在 $0 \sim 20 \text{ MHz}$. 同时,由于存在内部裂纹,随着回波次数的增加,不同频率成分超声波的

幅值均减小,且衰减量远大于图 5 所示的几何散射衰减量.

图 9(a) 和(d) 显示,由于裂纹回波完全淹没在始波或底面回波中,高次回波的衰减量较小,尤其是在中心频率附近. 同时,裂纹对回波信号的调制作用较弱,回波信号的频谱图与无缺陷回波信号相似(图 5),不同之处在于中心频率附近的带宽变窄. 与图 9(a) 和(d) 所对应的裂纹回波完全淹没在始波或底面回波中的情况相比,图 9(b) 和(c) 显示,由于裂纹回波与表面回波分离,缺陷引起的波场与底面回波发生混叠,对底面回波信号产生明显的调制作用,高次回波的频率衰减现象严重,且衰减频率发生在低频部分.

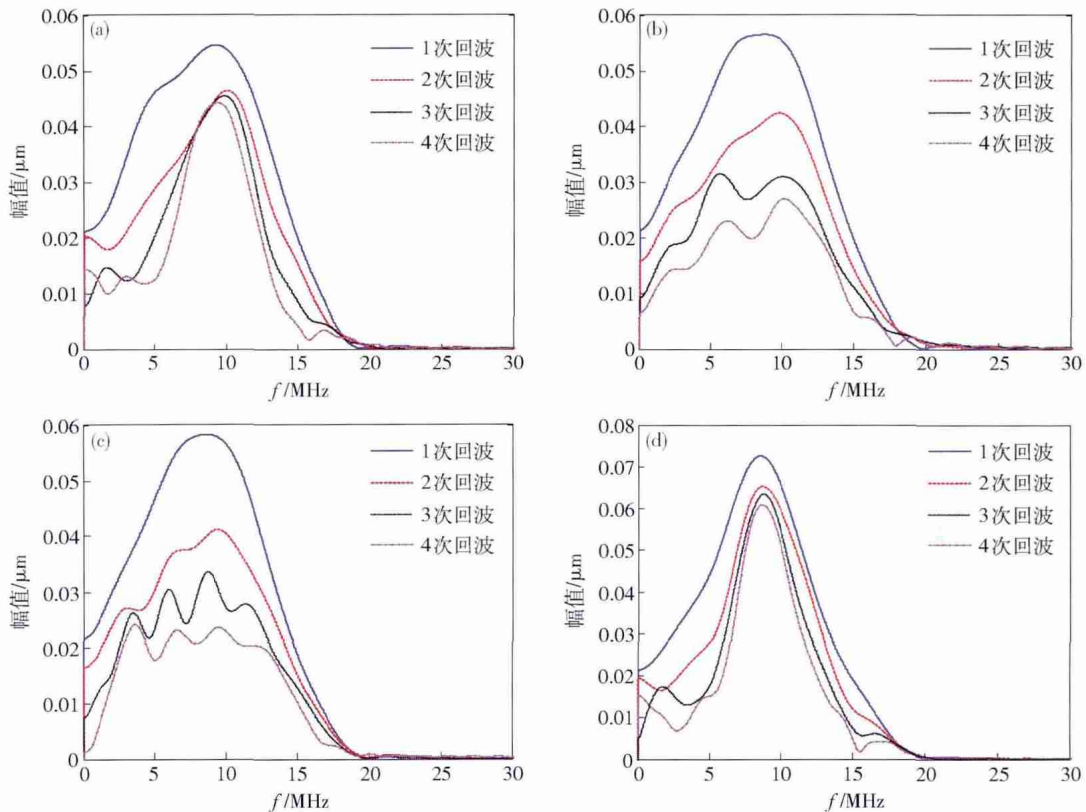


图 9 不同裂纹深度时底面回波的频谱图. (a) $h = 0.25 \text{ mm}$; (b) $h = 1 \text{ mm}$; (c) $h = 2 \text{ mm}$; (d) $h = 4.75 \text{ mm}$

Fig. 9 Spectra of the four backwall echoes for different crack depths: (a) $h = 0.25 \text{ mm}$; (b) $h = 1 \text{ mm}$; (c) $h = 2 \text{ mm}$; (d) $h = 4.75 \text{ mm}$

图 9(a) 和(d) 所示的频域特征可用于辨识材料内部是否存在近表面缺陷: 首先,通过脉冲回波法测试无缺陷样品的表面回波信号,并通过快速傅里叶变换获得其底面回波的频谱曲线,作为参考曲线(如图 5); 对被检测样品,同样获得其底面回波的频谱曲线,与参考曲线进行对比. 若其中心频率附近的带宽变窄,则其近表面可能存在缺陷.

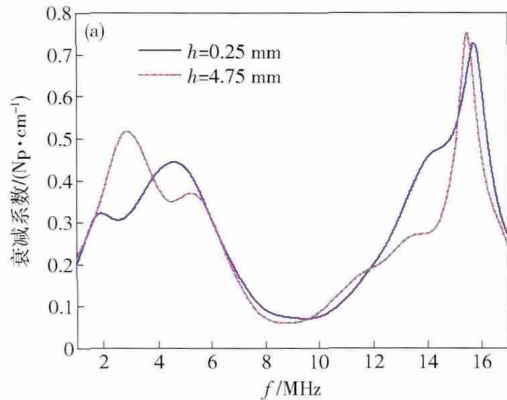
采用式(1) 计算不同裂纹深度时的衰减系数,并将几何扩散引起的衰减量从计算获得的总衰减量中减除,获得不同裂纹深度的衰减系数随频率的变

化关系曲线,如图 10 所示. 其中,图 10(a) 的裂纹深度为 $h = 0.25 \text{ mm}$ 和 $h = 4.75 \text{ mm}$,对应于裂纹回波淹没在表面回波中; 图 10(b) 的裂纹深度为 $h = 1 \text{ mm}$ 和 $h = 2 \text{ mm}$,对应于裂纹回波与表面回波分离. 图 10 显示,由裂纹缺陷导致的衰减量远大于由几何扩散引起的衰减量(如图 6 所示),但在整个频域范围内,其高频衰减量的相对幅值却小于几何扩散.

图 10(a) 显示,当裂纹回波淹没在表面回波中时,对不同的裂纹深度,衰减系数随频率的变化关系

基本完全一致: 最小衰减系数发生在中心频率附近, 对应于最小衰减量; 随着频率成分偏离中心频率, 衰减量增大, 最大衰减量发生在高频处, 对应的频率约为 $f = 16$ MHz.

图 10 (b) 显示, 当裂纹回波与表面回波分离时,



由于裂纹回波信号对底面回波信号的频谱调制作用较严重, 衰减系数随频率的变化关系曲线存在多个峰值与谷值, 最大的衰减系数仍出现在高频处, 对不同的裂纹深度 $h = 1$ mm 和 $h = 2$ mm, 最大衰减量对应的频率约为 $f = 15$ MHz 和 $f = 16.5$ MHz.

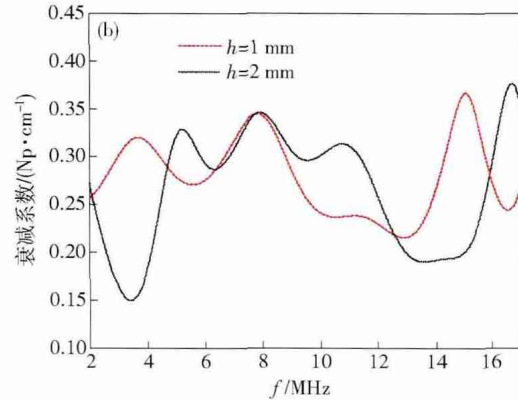


图 10 不同裂纹深度时衰减系数随频率的变化关系曲线

Fig. 10 Plots of attenuation coefficient vs. frequency for different crack depths

3 结论

(1) 不同深度裂纹对底面回波信号的调制作用不同, 随着深度增大, 调制作用增强, 但是近表面裂纹对底面回波信号的调制作用较弱.

(2) 对近表面缺陷, 与无缺陷回波信号相比, 其底面回波信号的频谱图中心频率附近的带宽变窄. 该频域特征可用于辨识材料内部是否存在近表面缺陷.

(3) 对近表面缺陷, 最小衰减量发生在中心频率附近, 随着频率成分偏离中心频率, 衰减量增大, 最大衰减量发生在高频处.

(4) 当裂纹回波与表面回波分离时, 衰减系数随频率的变化关系曲线存在多个峰值与谷值, 最大的衰减系数仍出现在高频处.

参 考 文 献

[1] Achenbach J D. Quantitative nondestructive evaluation. *Int J Solids Struct*, 2000, 37: 13

[2] Wagle S, Kato H. Ultrasonic wave intensity reflected from fretting fatigue cracks at bolt joints of aluminum alloy plates. *NDT & E Int*, 2009, 42: 690

[3] Wang X G, Chang J J, Shan Y C, et al. Testing of characteristic of rubber thin layer by ultrasonic echo signal. *Chin J Mech Eng*, 2008, 44(10): 114
(王兴国, 常俊杰, 单英春, 等. 超声回波信号检测橡胶薄层的特性. *机械工程学报*, 2008, 44(10): 114)

[4] Takada H, Tomura Y, Aratani M, et al. On-line detection system

for internal flaws in as-hot-rolled steel strip using ultrasonic probe array. *Mater Trans*, 2011, 52: 531

[5] Chi D Z, Gang T, Yao Y X, et al. Mode for near surface defect detection based on ultrasonic TOFD. *Trans China Weld Inst*, 2011, 32(2): 25
(迟大钊, 刚铁, 姚英学, 等. 一种基于超声 TOFD 法的近表面缺陷检测模式. *焊接学报*, 2011, 32(2): 25)

[6] Rajagopal P, Lowe M J S. Scattering of the fundamental shear horizontal guided wave by a part-thickness crack in an isotropic plate. *J Acoust Soc Am*, 2008, 124(5): 2895

[7] Tsaur D H. Exact scattering and diffraction of antiplane shear waves by a vertical edge crack. *Geophys J Int*, 2010, 181: 1655

[8] Kline R A. *Nondestructive Characterization of Composite Media*. New York: Technomic Publishing Company, 1992

[9] Yeh H Y, Cheng J H. NDE of metal damage: ultrasonics with a damage mechanics model. *Int J Solids Struct*, 2003, 40: 7285

[10] Dattal D, Kishoret N N. Features of ultrasonic wave propagation to identify defects in composite materials modelled by finite element method. *NDT & E Int*, 1996, 29: 213

[11] Wang X D, Huang G L. Identification of embedded cracks using back-propagating elastic waves. *Inverse Probl*, 2004, 20: 1393

[12] Ghoshal G, Turner J A. Numerical model of longitudinal wave scattering in polycrystals. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 2009, 56(7): 1419

[13] Liu D L, Turner J A. Ultrasonic backscatter in two-phase media and its dependency on the correlation function. *Proc Meet Acoust*, 2012: 045004

[14] Islam M N, Arai Y. Ultrasonic back reflection evaluation of crack growth from PSBs in low-cycle fatigue of stainless steel under constant load amplitude. *Mater Sci Eng A*, 2009, 520: 49