

# 复合材料超声导波吸收边界参数研究

夏小松, 郑艳萍\*, 熊勇坚, 张青松

(郑州大学机械工程学院, 郑州 450001)

**摘要:** 在超声无损检测研究中,对 Lamb 波的传播过程进行有限元仿真有助于认识其传播特性,提高测试精度。因复合材料结构尺寸限制和各向异性等特点,仿真过程中边界反射波的出现会掩盖损伤波形,影响测试结果。为抑制反射波,吸收边界的设置就显得尤为重要。通过对吸收边界参数研究发现:设置瑞雷阻尼递增的多层阻尼吸收层可以有效减少边界反射波,其中吸收边界长度对吸收效果影响最大。为了有效吸收反射波,吸收边界长度应大于波长的 2 倍。

**关键词:** 超声检测; 复合材料; 瑞雷阻尼; 吸收边界

**中图分类号:** TB332      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-0999(2019)06-0058-06

超声检测具有设备简单、检测方便、传播衰减小等优点,而其中的超声导波检测技术更因其传播距离远、传播速度快、可携带损伤信息等特点而被广泛应用于板类、复合材料类和管道类结构的无损检测中<sup>[1-3]</sup>。有限元仿真在超声导波传播特性的研究中极为常见,但由于超声导波遇到边界会产生大量反射波,对检测结果产生干扰。因此,如何减少仿真过程中产生的边界反射波尤为重要。现在,抑制反射波的方法一般有两种:一种是尽量增大仿真模型尺寸,使监测点不受反射波干扰,但这样会增加计算时间;另一种是采用吸收边界,在有限的几何模型上吸收边界反射波。

吸收边界反射波的方法主要有无限元法<sup>[4]</sup>、非反射吸收边界法<sup>[5]</sup>和边界吸收层法<sup>[6]</sup>。无限元法是指在仿真时改变最外侧网格单元类型和单元节点顺序,从而达到网格无限延伸的效果。常用的无限单元网格类型主要有二维的 CINPS4 和三维的 CIN3D8。非反射吸收边界是在边界处施加一种特殊的无反射边界条件,但其对弹性动力学问题效果较差。吸收层法是指在有限的模型外添加若干层具有吸收作用的材料层,从而达到吸收边界反射波的效果。该方法包括最佳匹配层法(PML)和阻尼递增法(ALID)。最佳匹配层法是指在模型外添加一层吸收材料单元,通过求解计算使 PML 吸收层的声阻抗与模型声阻抗达到最佳匹配。Hastings 等优化了材料特性与匹配连续层的声波阻抗,从而使得相邻匹配层之间不会发生反射<sup>[7,8]</sup>。但这需要在频域中进行大量计算,目前只有少数有限元仿真软件(如 COMSOL)支持。阻尼递增法<sup>[9,10]</sup>是通过在模型外添加由瑞雷阻

尼逐层递增的材料构成的吸收层,使边界反射波在吸收层被逐渐吸收。宋成杰等<sup>[11]</sup>研究了 Ansys 中 Combin14 单元的吸收效果,表明吸收层法可以通过大部分市场上的有限元仿真软件实现。目前,此方法多应用于各向同性材料,对于各向异性材料的研究很少,本文将其应用于各向异性的复合材料,研究吸收层边界参数对吸收效果的影响。

## 1 超声 Lamb 波频散特性

超声 Lamb 波是一种固体中传播的板波,是由在板中传播的横波、纵波相互耦合而产生的一种导波。根据板内质点振动位移的相位关系,Lamb 波的模式被分为对称模式和反对称模式。板内质点振动位移如图 1 所示。

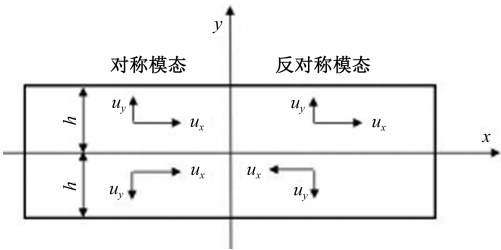


图 1 Lamb 波质点振动位移图

Fig. 1 Lamb wave point vibration displacement diagram

对应的振动位移方程如下:

对称模式:

$$u_1 = ikA_2 \cos(px_3) + qB_1 \cos(qx_3) \tag{1}$$

$$u_3 = -pA_2 \sin(px_3) - ikB_1 \sin(qx_3) \tag{2}$$

反对称模式:

$$u_1 = ikA_1 \cos(px_3) - qB_2 \cos(qx_3) \tag{3}$$

收稿日期: 2018-09-30

作者简介: 夏小松 (1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为复合材料结构健康检测。

通讯作者: 郑艳萍 (1975-), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为复合材料结构强度及损伤检测, ypzhang@126.com。

$$u_3 = pA_1 \sin(px_3) - ikB_2 \sin(qx_3)$$

(4)

式中: $p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2$ ;  $q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2$ ;  $u_1$  为面内位移;  $u_3$  为离面位移;  $x_3$  为与板面垂直方向;  $k$  为波数;  $\omega$  为角速度;  $c_L$  为纵波波速;  $c_T$  为横波波速;  $A$  和  $B$  值为常数。

进一步求解 Lamb 波频散方程。

对称模态:

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{-4k^2pq}{(q^2 - k^2)^2}$$

(5)

反对称模态:

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2pq}$$

(6)

式中: $p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2$ ;  $q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2$ ;  $\omega$  为角频率;  $c_p$  为相速度;  $k$  为波数;  $c_L$  为纵波速度;  $c_T$  为横波速度。

通过对频散方程求解,可以得到对称模态和反对称模态的无穷多个解,由此可以看出随着频率的增加,Lamb 波的传播呈现多模态性,即 Lamb 波的频散特性。对 3.5 mm 复合材料层合板 0°方向频散方程进行求解,得到其相应的频散曲线见图 2。

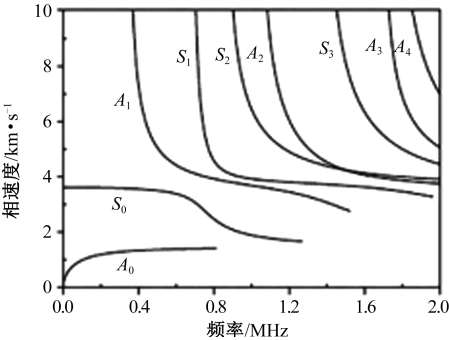


图2 厚度 3.5 mm 铺层顺序为[45°/0°/-45°/90°]<sub>3s</sub>的复合材料板 0°方向上的相速度频散曲线

Fig.2 Phase velocity dispersion curves in the 0 degree direction of composite plates with a thickness of 3.5 mm and a sequence of [45°/0°/-45°/90°]<sub>3s</sub>

2 仿真研究

2.1 模型建立

三维模型尺寸为 500 mm×500 mm×3.5 mm,铺层顺序为[45/0/-45/90]<sub>3s</sub>,共 24 层,复合材料层合板材料属性如表 1 所示。三维模型虽然与实际实验相同,但模型较大,计算时间长,对计算机硬件配置要求高。文献[12]表明二维有限元模型不仅计算效率高,而且结果与实际吻合,因此本文使用 ABAQUS 软件进行二维模型建模,模型最外层设置吸收层。为了减少信号激励时的复杂性,选取经汉宁窗调制的频率为 200 kHz 的五周期窄带正弦波,如图 3 所示。

在三维模型中一般通过在模型表面粘贴压电传感器,并在压电传感器接收信号。Nieuwenhuis 等<sup>[13]</sup>提出在仿真中采用在压电片边缘施加集中力的方法来达到实际的激励效果,本文采用两对剪切力来模拟信号的激励。通常有单面激励和双面激励两种,文献[14]表明可以通过在板的上下表面相同位置施加相同的集中力产生单一的对称模态波或者反对称模态波。本次仿真通过在板的上下表面相同位置施加相同方向的剪切力激发单一的 S<sub>0</sub> 模态波。在非吸收边界区域,距离激励点 100 mm 开始每隔 10 mm 设置一个监测点,吸收边界区域每隔 2 mm 设置一个监测点,二维模型如图 4 所示。

表1 T300/1034-C 复合材料单层板材料属性参数

Table 1 T300/1034-C composite single-layer board material property parameters

材料参数	数 值	材料参数	数 值	材料参数	数 值
$G_{xy}/\text{GPa}$	146.9	$G_{xy}/\text{GPa}$	6.185	$\mu_{12}$	0.30
$E_{xz}/\text{GPa}$	11.38	$G_{xz}/\text{GPa}$	6.185	$\mu_{13}$	0.30
$E_{yz}/\text{GPa}$	12.38	$G_{yz}/\text{GPa}$	5.780	$\mu_{23}$	0.42

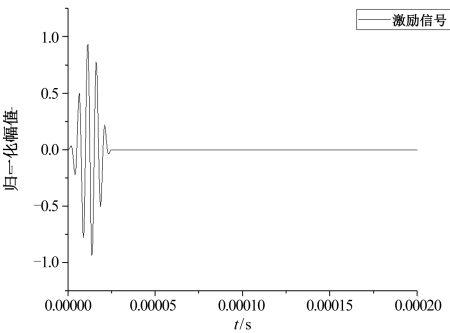


图3 中心频率为 200 kHz 经过汉宁窗调制的五周期正弦信号

Fig.3 Five-cycle sinusoidal signal modulated by Hanning window with a center frequency of 200 kHz

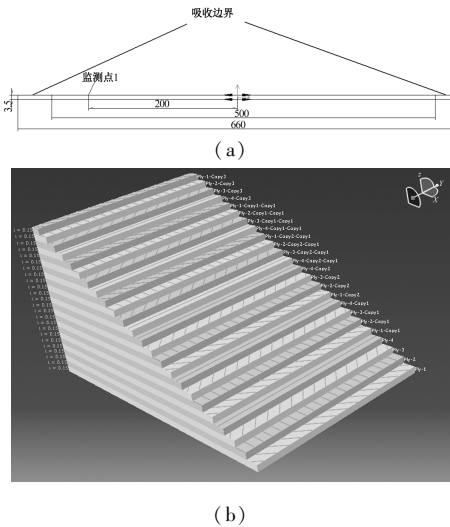


图4 (a)二维有限元模型及激励(b)铺层信息

Fig.4 (a) Two-dimensional finite element model and excitation (b) layout information

2.2 吸收边界的添加

吸收边界主要是在原模型外添加若干层阻尼递增的材料,每层材料的声阻抗变化很小,可以有效吸收边界反射波。本文在模型外添加若干层瑞雷阻尼递增的材料建立吸收边界,其中吸收边界层材料属性与原检测区域保持一致,在其基础上加入阻尼项。其瑞雷阻尼  $C=\alpha[M]+\beta[K]$ ,Prabhu Rajagopal 等在文献[15]中提到,在时域上计算时,与  $\beta$  值相比, $\alpha$  值的变化所引起的时间增量步变化更加稳定。因此在计算时应尽量避免使用  $\beta$  值进行计算,此次阻尼计算采用  $C=\alpha[M]$ , $\alpha$  值由最小到最大变化,满足式(7):

$$\alpha=\alpha_{\max}\left(\frac{l}{L}\right)^n\tag{7}$$

其中: $l$  为每层吸收边界长度; $L$  为吸收边界总长度; $\alpha_{\max}$  为阻尼系数最大值; $n$  为幂指数。从式(7)中可以看到,瑞雷阻尼系数  $\alpha$  与  $l$ 、 $L$ 、 $\alpha_{\max}$ 、 $n$  都有关。 $l$  的取值一般与网格大小有关,理想结果为一个网格长度,但若其取值过小会增大建模工作量,若过大则起不到吸收边界反射波的效果,这里取  $l$  为 2 mm。

2.3 研究方案

下面将分别研究  $L$ 、 $\alpha_{\max}$  和  $n$  对吸收效果的影响。

(1) $L$  取值对吸收效果的影响

对于  $\alpha_{\max}$  取值并没有实际计算方法,根据经验和文献中数据,将仿真研究中  $\alpha_{\max}$  取为  $2.1\times10^6$  (约  $10f$ ), $n=3$ 。文献[10]提及吸收边界长度应为  $0.5\lambda\sim2.5\lambda$ 。因此设置  $L$  的长度分别为  $0.5\lambda$ 、 $1\lambda$ 、 $1.5\lambda$ 、 $2\lambda$ ,研究吸收边界长度对复合材料吸收层吸收效果的影响。对(1)结果进行分析,找出最佳的吸收边界长度作为(2)和(3)研究参数的设置标准。

(2) $\alpha_{\max}$  取值对吸收效果的影响

取  $n=3$ ,分别设置  $\alpha_{\max}$  为  $0.5f$ 、 $5f$ 、 $7.5f$ 、 $10f$ 、 $12.5f$  和  $15f$ ,研究阻尼最大值  $\alpha_{\max}$  对复合材料吸收层吸收效果的影响。对(2)结果进行分析,找出最佳的阻尼最大值作为(3)参数研究的设置标准。

(3) $n$  取值对吸收效果的影响

将  $n$  分别取值为 3 和 2,研究幂指数变化对复合材料吸收层吸收效果的影响。

3 仿真结果分析

本小节将讨论不同参数对复合材料吸收层吸收效果的影响。取距离激励点 200 mm 处的 A 点作为基准点,如图 4 所示。此点波包无叠加,便于后续信

号的对比分析。

3.1 吸收边界长度对吸收效果的影响

图 5 所示为距离激励点 200 mm 处接收到的信号对比图,可以看到未添加吸收边界时,边界反射波经过多次叠加后波形十分复杂。添加吸收边界后,边界反射波被大大吸收。图 6 展示了距离信号激励点不同距离接收到的直达波位移动幅值变化,100 mm~250 mm 为未设置吸收边界的区域,250 mm~330 mm 为设置吸收边界的区域。可以看到未设置吸收边界的区域由于长距离传播衰减作用,接收信号幅值小幅度减小;吸收边界区域信号的幅值显著减小。以未设置吸收边界情况下点 A 接收信号对不同吸收长度吸收边界下接收到的信号幅值归一化处理,对比不同吸收边界长度下信号幅值的变化情况,其结果如图 7 所示。由图 7 可知,吸收边界长度为  $0.5\lambda$  (长度为 20 mm,10 层),反射波衰减了  $\frac{1}{5}$ 。随着  $L$  的增大,反射波幅值大幅度衰减,当吸收边界长度为  $2\lambda$  (长度为 80 mm,40 层)时,反射波幅值只有原反射波的  $\frac{1}{100}$ ,达到了吸收边界反射波的作用。

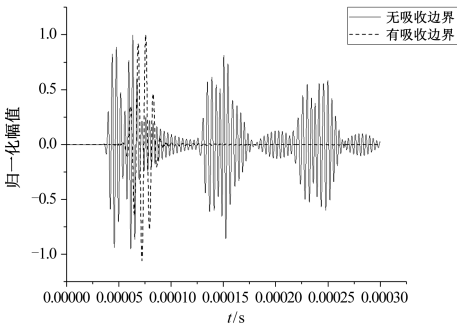


图 5 A 点有无吸收边界接收信号对比  
Fig. 5 Comparison of the absorption signal at the A point with or without the absorption boundary

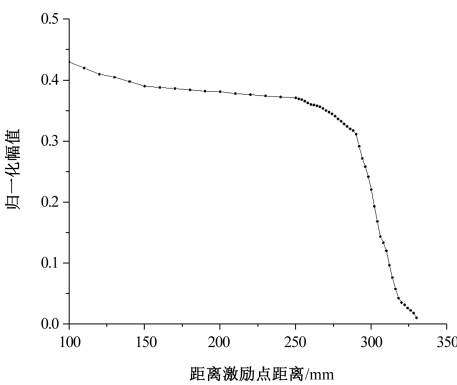


图 6 距离激励点不同距离直达波幅值对比图  
Fig. 6 Comparison of direct amplitudes from different distances from the excitation point

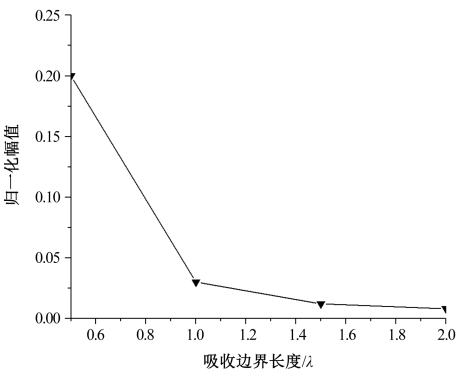


图7 不同吸收边界长度A点接收信号  
Fig. 7 Receive signal at point A of different absorption boundary length

3.2 阻尼系数最大值对吸收效果的影响

为了进一步分析阻尼系数最大值 $\alpha_{\max}$ 对复合材料吸收层吸收效果的影响,取A点为观测点,将其接收的反射波幅值与未添加吸收边界时接收到的反射波幅值作归一化处理。分别将 $\alpha_{\max}$ 值取为 $0.5f$ 、 $5f$ 、 $7.5f$ 、 $10f$ 、 $12.5f$ 和 $15f$ ,其结果如图8所示。

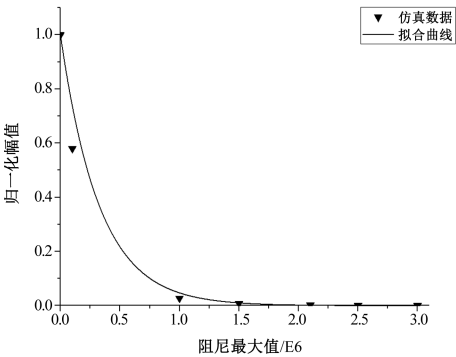


图8 不同阻尼最大值时接收到回波幅值对比  
Fig. 8 Comparison of received echo amplitudes at different damping maxima

由图8可知:当 $\alpha_{\max}$ 为 $10^5(0.5f)$ 时,回波信号幅值为未设置吸收边界反射波幅值的0.6,无法起到完全吸收边界反射波的作用;当 $\alpha_{\max}$ 增大到 $10^6(5f)$ 时,反射波幅值已大大衰减。随着 $\alpha_{\max}$ 的增大,回波幅值继续减小,整体曲线成指数形式快速衰减。当 $\alpha_{\max}$ 达 $2.1 \times 10^6$ 时,可以认为回波已经被完全吸收。

3.3 幂指数对吸收效果的影响

由经验可知, $n$ 一般取值为2或3,图9为不同吸收层阻尼值在 $n$ 取值为2和3时的对比图。以未设置吸收边界时A点接收到的回波信号为基准,对设置吸收边界的A点接收到的回波信号幅值作归一化处理,其结果如图10所示。图10表明: $\alpha_{\max}$ 较小( $1.5 \times 10^6$ )时,回波信号有较大差异;随着 $\alpha_{\max}$ 取值的增大,两者差异减小,幅值趋于一致。综合前面小

节关于 $\alpha_{\max}$ 取值应大于 $10f$ ,可以认为 $n$ 取值为2或者3对于吸收效果影响很小。

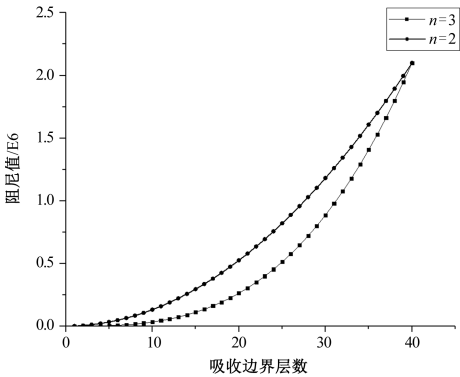


图9 每层吸收边界阻尼取值变化  
Fig. 9 Change in damping value of each layer of absorption boundary

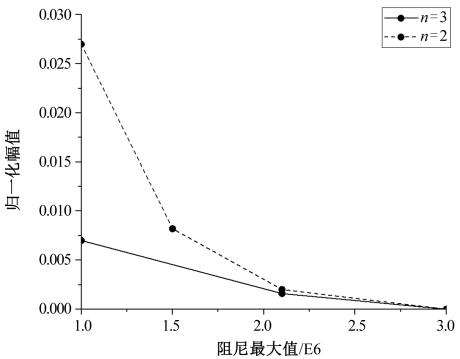


图10 阻尼最大值不同时n取值回波信号  
Fig. 10 n value echo signals when the damping maximum is different

综上所述可知: $L$ 、 $\alpha_{\max}$ 、 $n$ 均对吸收效果有影响,其中:①吸收边界长度 $L$ 取值对吸收效果有较大影响,其长度大于 $2\lambda$ 时才能对反射回波起到吸收作用,且其长度越长,吸收效果越明显,但是增大 $L$ 的长度会增加建模工作量且吸收边界长度增加到一定长度后吸收效果趋于一致,故对 $L$ 的取值应综合考虑;② $\alpha_{\max}$ 需要大于 $5f(10^6)$ 才能发挥吸收作用,但当 $\alpha_{\max}$ 超过 $12.5f(2.5 \times 10^6)$ 时,其值再增大对吸收效果已不明显;③阻尼计算公式采用平方或立方形式对吸收效果影响不大。

4 复合材料吸收边界在复合材料损伤检测中的应用

利用上文的研究在模型外边缘加入吸收边界并在模型上设置缺陷,模拟复合材料层合板损伤,将仿真计算得到的损伤位置与实际位置进行对比,验证吸收边界在损伤检测中的作用。



4.1 单损伤位置检测

复合材料层合板二维模型尺寸为 500 mm×3.5 mm,铺层角度为 $[45/0/-45/90]_{3s}$ ,共 24 层。以板中心为信号激励点,在距离激励点 50 mm、100 mm、150 mm 处设置尺寸为 0.25 mm×2 mm 的缺陷,在压电片 midpoint 处接收损伤反射信号,其二维模型如图 11 所示。

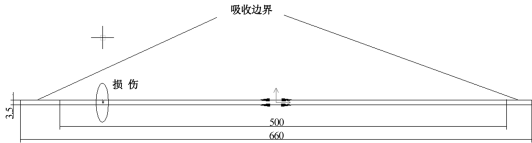


图 11 损伤检测二维模型

Fig. 11 Two-dimensional model of damage detection

损伤设置在 200 mm 处时接收到的信号如图 12 所示,未设置吸收边界时边界反射波和损伤反射波相互叠加而无法分辨。设置了吸收边界后波形较为单一,缺陷处反射波由于设置的阻尼层作用呈现典型的阻尼衰减现象。由于 Lamb 波经过损伤后反射波波速将会发生变化,以反射波最大波峰处计算缺陷反射波波速为 3.33 km/s。

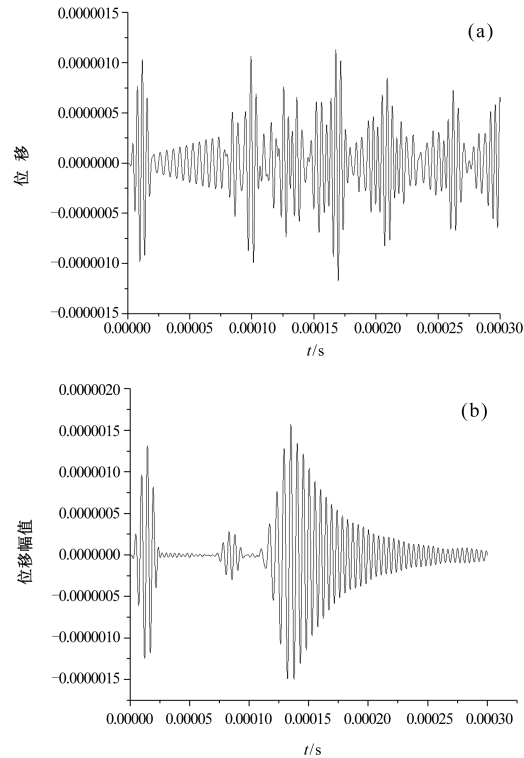


图 12 损伤在 200 mm 处接收信号

(a) 无吸收边界 (b) 有吸收边界

Fig. 12 Damage received at 200 mm (a) no absorption boundary (b) displacement-time map after establishing absorption boundary damage point

以同样的方法分别在距离激励点 50 mm、100 mm 和 150 mm 处设置损伤,由上文的速度值计算得到的损伤位置 and 实际位置对比如表 2 所示。

表 2 仿真损伤位置与实际损伤位置对比

Table 2 Comparison of simulated damage location and actual damage location

	计算位置/mm	实际位置/mm	误差/%
损伤 1	48.1	50	3.8
损伤 2	104.6	100	4.6
损伤 3	152.4	150	1.6

由表 2 可知,不同仿真计算损伤位置与实际损伤位置误差在 5% 以内,可以证明吸收边界在损伤位置的确定中是有作用的。进一步地,当损伤位置距离信号接收点小于 50 mm 时,直达波和损伤反射波叠加在一起已不能区分损伤位置,故损伤位置与激励点位置距离应当大于 50 mm。

4.2 多损伤检测

分别在距离激励点 70 mm 左右两边各设置一个尺寸为 0.25 mm×2 mm 的损伤,其在压电片中心接收到的信号如图 13 所示。图 13 所示波形成分复杂,除了能准确分辨出直达波以外,其他都不能识别。这是因为 Lamb 传播到损伤处损伤就会变成新的波源,激发出新的波形。两处损伤波源形成的波形相互叠加,故波形复杂无法分辨。这说明对于多缺陷形成的损伤,复合材料吸收边界无法进行损伤定位检测。

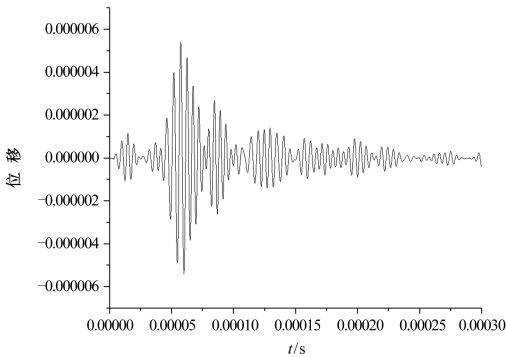


图 13 双缺陷接收波形图

Fig. 13 Double defect receiving waveform

5 结 论

在 Lamb 波损伤检测仿真过程中,因复合材料结构尺寸限制及其本身各向异性等特点,边界会出现反射波,该波会掩盖损伤信号波形,影响到测试结果。本文为抑制反射波对吸收层法开展了研究,结论如下:

(1)复合材料吸收边界是在原复合材料层合板外添加若干层瑞雷阻尼递增的材料,反射波经过每层吸收后逐渐较小,达到吸收边界反射波的效果;

(2)吸收边界长度、阻尼最大值对吸收边界吸收效果有重要影响。要达到吸收边界反射波的效果,吸收边界长度应大于波长的2倍,阻尼最大值取值一般应大于 $10f$ ( $f$ 为中心激励频率);幂指数 $n$ 一般取为2或者3,其对吸收效果影响较小;

(3)复合材料阻尼递增吸收层法可以由一般有限元软件实现,用于复合材料单缺陷损伤检测时损伤误差在5%以内,可以认为其可以在损伤检测中发挥作用。但是对于多缺陷形成的损伤,此方法无法实现损伤定位。

### 参考文献

- [1] 罗斯 J L. 固体中的超声波[M]. 何存富, 吴斌, 王秀彦, 译. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] 何存富, 郑明方. 超声导波检测技术的发展、应用与挑战[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1713-1735.
- [3] Memmolo V, Pasquin N, Ricci F. Experimental characterization of a damage detection and localization system for composite structures[J]. Measurement, 2018, 129: 381-388.
- [4] Xiao S, Yue Z Q, Xiao H T. Boundary element analysis of elastic fields in non-horizontally layered halfspace whose horizontal boundary subject to tractions[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2018, 95: 105-123.
- [5] Shen Y F, Giurgiutiu V. Effective non reflective boundary for Lamb waves: Theory, finite element implementation, and applications[J]. Wave Motion, 2015, 58: 22-41.
- [6] Pettit J R, Walker A, Cawley P, et al. A stiffness reduction method for efficient absorption of waves at boundaries for use in commercial Finite Element codes[J]. Ultrasonics, 2014, 54(7): 1868-1879.
- [7] Hastings F D, Schneider J B, Broschat S L. Application of the perfectly matched layer (PML) absorbing boundary condition to elastic wave propagation[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1996, 100(100): 3061-3069.
- [8] Skelton E A, Adams S D M, Craster R V. Guided elastic waves and perfectly matched layers[J]. Wave Motion, 2007, 44(7-8): 573-592.
- [9] Liu G R, Quek Jerry S S. A non-reflecting boundary for analyzing wave propagation using the finite element method[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2003, 39: 403-417.
- [10] Rajagopal P, et al. On the use of absorbing layers to simulate the propagation of elastic waves in unbounded isotropic media using commercially available Finite Element packages[J]. NDT & E International, 2012, 51: 30-40.
- [11] 宋成杰, 郑艳萍, 纪志星, 等. 吸波边界对 Lamb 波在复合材料中传播的影响研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(8): 10-14.
- [12] 袁媛. 超声 Lamb 波有限元模拟及其在损伤检测中的应用[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2012.
- [13] Nieuwenhuis J H, Neumann J J, Greve D W, et al. Generation and detection of guided waves using PZT wafer transducers[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, 52(11): 2103-2111.
- [14] 蔡建, 袁慎芳, 张道越, 等. Lamb 波双面激励方法及其在近邻损伤监测中的应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(1): 62-67.
- [15] Rajagopal P, Drozd M. On the use of absorbing layers to simulate the propagation of elastic waves in unbounded isotropic media using commercially available finite element packages[J]. NDT & E International, 2012, 59: 30-40.

## STUDY ON ABSORBING BOUNDARY PARAMETERS OF COMPOSITE FOR ULTRASONIC GUIDED WAVE

XIA Xiao-song, ZHENG Yan-ping\*, XIONG Yong-jian, ZHANG Qing-song

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In the ultrasonic nondestructive testing research, the finite element simulation of the lamb wave propagation process is helpful to understand its propagation characteristics and improve the test accuracy. Due to the structural size limitation and anisotropy of the composite material, the appearance of the boundary reflection wave in the simulation process will cover the damage waveform, and the test result is to suppress the reflected wave. The setting of the absorption boundary is particularly important. In order to effectively absorb the boundary reflection, a multi-layered Rayleigh damped incremental absorption layer is added at the model boundary. By changing the parameters such as absorption length and damping maximum, it is found that the multi-layer damping absorption layer with increasing Rayleigh damping can effectively reduce the boundary reflection wave, and the absorption boundary length has the greatest influence on the absorption effect. In order to effectively absorb the reflected wave, the absorption boundary length should be larger than the wavelength of 2 times.

**Key words:** ultrasonic testing; composite; rayleigh damping; absorbing boundary