

# 采用 Lamb 波理论的超大型航空 铝板的损伤检测

赵乃志<sup>1,2</sup>, 陈桂凤<sup>2</sup>

(1. 江南大学环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122;

2. 扬州工业职业技术学院建筑工程学院, 江苏 扬州 225127)

**摘要** 目的 针对飞机机翼的铝板在正常使用条件下经常出现的切割和冲击两种微损伤类型进行损伤检测. 利用超声导波传播过程中衰减减小, 传播距离远的特点, 从而解决传统检测方法的逐点扫描的缺点. 方法 采用 PZT 压电陶瓷作为检测的 Lamb 波信号的激发和接收传感器, 通过 Hilbert 变换计算监测信号的幅值变化, 从而确定信号能量的分布规律, 进而研究铝板的损伤程度. 结果 切割损伤产生新的边界会产生新的反射波, 信号分析过程中可以根据波的传播速度确定损伤的位置, 同时根据信号幅值和能量变化确定损伤的程度. 结论 冲击损伤可以从回波的 Hilbert 变换能量变化中检测到, 但是信号的解析和确定损伤位置变得复杂得多. 该方法可以有效地对超大型铝板进行无损检测.

**关键词** 航空铝板; Lamb 波; PZT; Hilbert 变换; 损伤识别

中图分类号 TG115.28; TM282

文献标志码 A

## Detection of Damage at the Aircraft Wing Slat by Using Lamb Wave Method

ZHAO Naizhi<sup>1,2</sup>, CHEN Guifeng<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi, China, 214122; 2. School of Civil Engineering, Yangzhou Polytechnic Institute, Yangzhou, China, 225127)

**Abstract:** The purpose of this paper is to detect the damages of the two types of micro-damages in the aluminum plate of an aircraft wing. By using ultrasonic guided waves, the attenuation is small and the propagation distance is long, thus solving the problems of the disadvantage of point scanning by traditional methods. PZT piezoelectric ceramics were used as excitation and receiving sensors for detecting Lamb wave signals. Hilbert transform was used to calculate the amplitude changes of the monitoring signals, and the distribution of signal energy was determined to study the damage degree of aluminum plates. The results show that the new boundary generated by the cut-

收稿日期: 2017-04-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308357); 江苏省高校自然科学基金项目(16KJB560024); 江苏高校‘青蓝工程’资助项目; 江苏省第五期“333 高层次人才培养工程”资助项目

作者简介: 赵乃志(1973—), 男, 副教授, 博士, 主要从事智能材料与结构健康监测方面研究.

ting damage will generate new reflection wave. During the signal analysis process, the position of the damage can be determined according to the propagation speed of the wave, and the degree of damage can be determined according to the signal amplitude and energy change. The conclusion is that the impact damage can be detected from the Hilbert transform energy change of the echo, but the signal analysis and the determination of the damage location become more complicated. This method can effectively perform non-destructive testing of ultra-large aluminum plates.

**Key words:** aircraft wing slat; Lamb wave; PZT; Hilbert transform; damage identification

结构健康监测 (SHM) 技术是用于评估结构完整性,发现安全隐患,进而评价结构的健康状态,目前常用的方法有涡流探头、超声波、磁粉测试、X 射线、热成像和目视检查等几种<sup>[1-3]</sup>. 这些方法都只能对结构进行逐点的扫描,检测速度比较慢. 超声导波沿传播过程中衰减很小,可以传播很远的距离,从而克服了逐点扫描的缺点,进而实现长距离、大范围的监测<sup>[4-6]</sup>.

1880 年法国物理学家 P. 居里和 J. 居里兄弟发现把重物放在石英晶体上,晶体某些表面会产生电荷,电荷量与压力成比例,这一现象被称为压电效应. 随即,居里兄弟又发现了逆压电效应,即在外电场作用下压电体会产生形变. 研究者们通过压电效应产生的导波在结构中传播的变化来对结构进行健康监测<sup>[7]</sup>. 以压电材料制成的 PZT 传感器是 SHM 中使用最多的传感器,通过施加很小的电压便可以在便宜的压电材料产生 Lamb 波. Lamb 在波薄板结构中传播能量衰减很少,因此可以对薄板结构的疲劳裂纹、分层裂纹和腐蚀破坏进行健康监测<sup>[8-11]</sup>.

笔者采用 Lamb 波主动检测技术对飞机机翼板条的超大型铝板结构切割和冲击破坏产生的损伤进行检测,利用 Hilbert 变换来分析回波信号的能量或幅值变化,研究面波的

传播规律并画出波的包络图,进而对航空铝板的损伤进行健康监测. 研究结果表明, Lamb 波方法不仅可用于飞机机身的铝板损伤检测,也可以用在其他大尺寸的铝板部件,甚至是复合材料构件. 该方法填补了目前超声波无损检测领域中超大型铝板检测的空白.

1 理论背景

1.1 Lamb 波

当弹性作用力施加到自由边界的薄板表面上便产生了弹性波. 弹性波在板的两个上下自由边界上均会发生反射,叠加后就形成了 Lamb 波<sup>[12]</sup>,或者叫导波(见图 1). 霍勒斯·兰姆于 1917 年提出 Lamb 理论,但是真正在工程上得到应用却是很多年以后. Lamb 波在整个薄板体内作椭圆运动传播,由于薄板结构平面所限而形成的纵波与横波组合的 Lamb 波有对称的 S 模态 (S0, S1, S2, ...) 和反对称 A 模态 (A0, A1, A2, ...) 两种模态(见图 2),对称模态(S 波,扩展波)Lamb 波的特点是沿薄板中心质点作纵向振动,上下表面质点作椭圆运动,振动相位相反并对称于中心. 非对称型(A 型,弯曲波)Lamb 波特点是薄板中心质点作横向振动,上下表面质点作椭圆运动、相位相同,不对称. 如果波长和板厚是已知的话便可以计算出波的传播速度<sup>[13-15]</sup>.

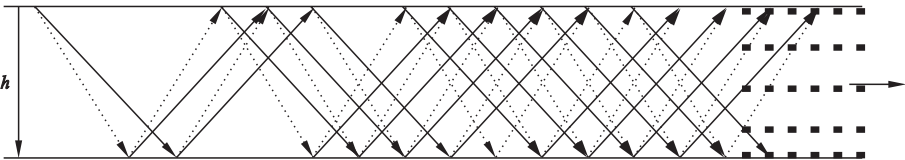


图 1 板中导波传播示意图

Fig. 1 The schematic in guided wave propagation

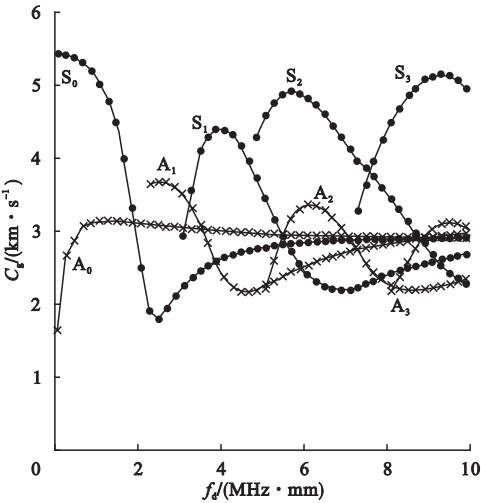


图2 Lamb波在航空铝板中的群速度曲线(AI 2024)

Fig.2 Group velocity curve of Lamb waves in an aluminum plate (AI 2024)

1.2 解析信号和 Hilbert 变换

Hilbert 变换是运用 Hilbert 线性算子把接收到的信号转换成一种解析信号<sup>[16]</sup>. 信号经 Hilbert 变换后,在频域各频率分量的幅度保持不变,用 Hilbert 变换描述幅度调制或相位调制的包络、瞬时频率和瞬时相位会使分析简便,解析信号 $x_a(t)$ 是真实信号 $x(t)$ 通

过式(1)的 Hilbert 变换得到<sup>[17-18]</sup>:

$$x_a(t) = x(t) + iH\{x(t)\}. \tag{1}$$

式中: $H\{x(t)\}$ 是 Hilbert 算子.  
解析信号也可以写成下面极坐标的形式:

$$x_a(t) = re^{-i\theta}. \tag{2}$$

式中: $i$ 和 $\theta$ 分别是半径和分析信号的相位角; $r$ 是解析信号的包络最大幅值.

Hilbert 算子的定义式为

$$H\{x(t)\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} dt. \tag{3}$$

公式也可以在卷积理论来定义:

$$H\{x(t)\} = x(t) \times \frac{1}{\pi t}. \tag{4}$$

2 试验装置

波音 737 飞机机翼由两种不同类型的铝板(AI 2024 和 AI 7075)制成,通过铆钉连接在一起. AI 2024 板为 1 mm 厚并且用复合蜂窝芯支撑, AI 7075 板为 2.5 mm 厚.

本项研究是模拟飞机机翼受到冲击破坏产生切割和变形两种损伤并进行检测. 试验设置如图 3 所示.

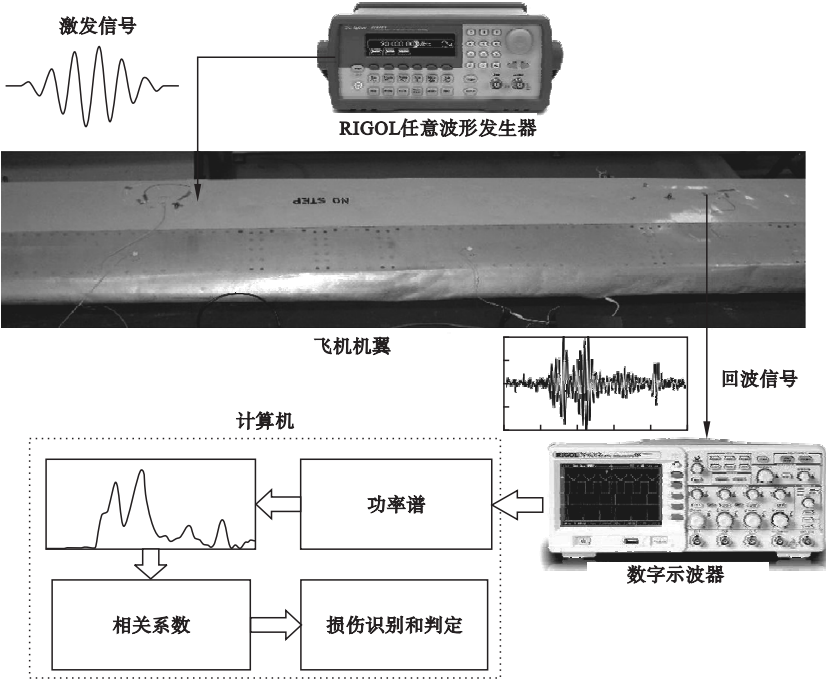


图3 试验装置

Fig.3 Experimental setup

任意波型发生器 (AWG) (Agilent 33220A)用于产生经过汉宁窗调制 5 个循环周期的 Lamb 波. 激发信号的中心频率分别为 7 kHz、40 kHz 和 230 kHz,用于激发出不同模态的 Lamb 波,激发和接收传感器均为粘结在铝板表面的 PZT 传感器. Lamb 波沿着铝板表面传播被其他的 PZT 接受传感器接收,通过使用数字示波器 (Rigol 1104B)将 PZT 传感器接收到的信号输出并且数字化移到计算机中. 信号的 Hilbert 变换和分析通过使用 MATLAB 程序来实现. 根据图 2 的群速度曲线,激发频率确定以后根据群速度可确定出 A0 和 S0 模态 Lamb 波.

3 试验过程及结果分析

3.1 Al 2024 铝板的截面切割损伤识别

Al 2024 铝板的截面厚度为 1 mm,并用蜂窝复合结构支撑. 如图 4、图 5、图 6 所示,在铝板上人工制作三个不同长度的切口以模拟深而严重的微裂缝,其中字母 P 表示 PZT 传感器. 首先形成 18 mm 长的切口,具有 5 mm 宽度. 随后,切口的长度增加到 55 mm 和 88 mm. 4 个 PZT 传感器粘贴到 Al 2024 截面的表面. Lamb 波由 P1 激发,激发频率为 7 kHz,波沿铝板传播由其他 PZT 传感器监测接收回波信号. 根据铝板的频散曲线可以得出,当激发频率为 7 kHz 时会激发出 A0 模式的 Lamb 波. 其他相关的试验参数见表 1.

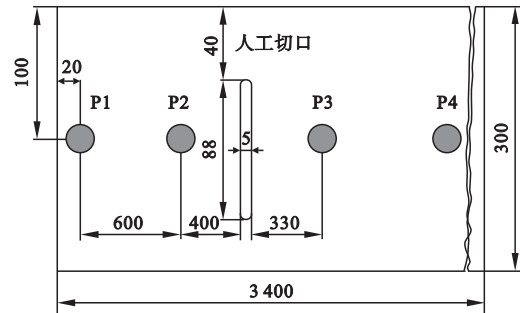


图 4 切口损伤试验布置示意图

Fig. 4 Schematic plan for cut damages

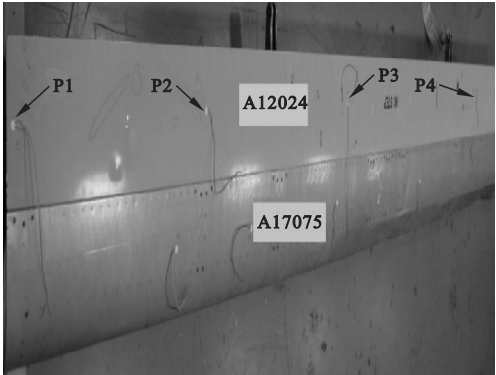


图 5 两种不同的铝板制成的飞机机翼

Fig. 5 A slat which was made of two different aluminum alloys



图 6 切口长度 55 mm

Fig. 6 Cut with 55 mm length

表 1 Al 2024 铝板试验参数

| Table 1 Al 2024 aluminum test parameters mm |      |      |
|---|------|------|
| 试验编号  | 裂缝长度 | 裂缝宽度 |
| 1   | —    | —    |
| 2   | 18   | 5    |
| 3   | 55   | 5    |
| 4   | 88   | 5    |

如图 7 所示,P1 传感器激发出 Lamb 波,理论上经过一定时间延迟会被 P2 传感器接收到,并继续朝向切口和 P3 传感器传播然后被接收到. 传播过程中如果 Lamb 波遇到任何边界条件就会产生反射. 由于切割损伤产生了新的明确边界,传感器能收到明确的反射信号. 实际测试中对信号的分析也证明这一点.

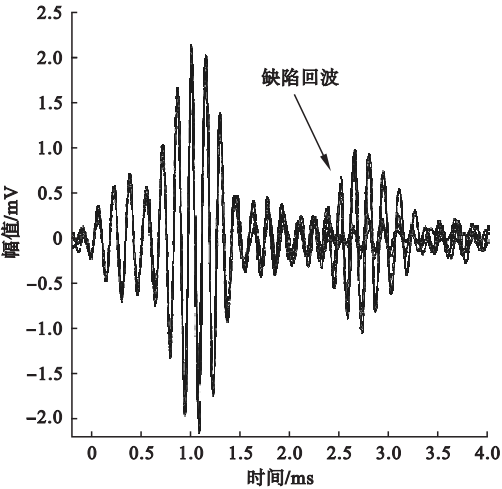


图7 P2接收到的P1激发A0模式信号的回波信号  
Fig. 7 The signals received from the P2 when the P1 was excited at the A0 mode

为了更好地分析信号,对 P2、P3 传感器接收到的信号进行 Hilbert 变换,结果如图 8、图 9 所示. 根据图 7 第一组波的到达时间来计算 Lamb 波的群速度. 波从 P1 传感器传播到达 P2 传感器被接收到耗时 1.07 ms,P1 和 P2 传感器之间的距离为 60 cm. 计算 Lamb 波的速度为 561 m / s. 切口的位置是通过波在 1.07 ~ 2.71 ms 能够到达和返回的距离来计算确定的. 损伤位置经过计算确定为距 P2 传感器 40.12 cm,计算值与实际值 40 cm 距离基本一致.

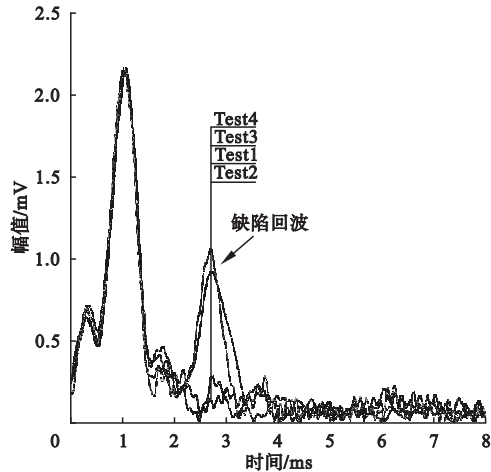


图8 P3信号的Hilbert变换能量(A0模式)  
Fig. 8 The Hilbert energy of the signals received from P3(A0 mode)

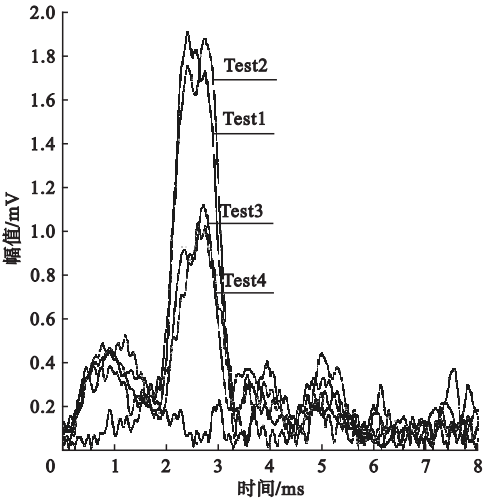


图9 P2信号的Hilbert变换能量(A0模式)  
Fig. 9 The Hilbert energy of the signals received from P2(A0 mode)

切口损伤尺寸与回波信号能量衰减关系如图 10 所示. 从图 10 可以看出,P2 传感器接收到的信号当没有切口或者切口非常小(小于18 mm)时,单波峰在 8 ms 内达到 P2,当损伤切口长度达到 55 mm 时,出现第二波峰被 P2 传感器接收到,当损伤切口达到 88 mm 时,第二波峰的幅值比切口为 55 mm 接收到的信号幅值明显增加. P3 信号的变化幅值和 P2 的明显不同,首次到达的信号幅值随着切割长度的增加而减小. 无切口时和切口的长度为 18 mm 第一到达波的振幅具有

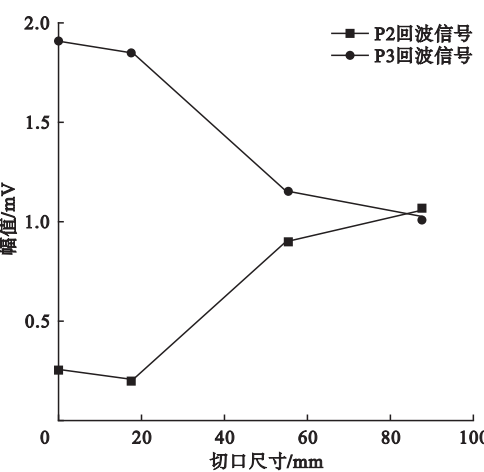


图10 切口损伤尺寸与回波信号能量衰减关系图  
Fig. 10 The correlation between the Hilbert energy and the cuts size



最大值,当切口长度达到 55 mm 时,它们的 Hilbert 能量幅值显著降低,当切口的长度为 88 mm 时幅值最小. 可以解释为由于切口的存在,一部分波的能量被反射回去导致 P3 传感器接收到的波的能量随着切口尺寸的增大而减少.

3.2 Al 7075 铝板冲击损伤识别

Al 7075 铝板的截面厚度为 1 mm,传感器布置如图 11、图 12 所示,铝板上人工制作不同面积冲击损伤见图 13,其他试验参数见表 2. 对 Al 7075 截面进行检测时,根据图 2 Lamb 频散分布曲线,确定 A0 和 S0 模态激发频率分别为 40 kHz 和 230 kHz,在两个频率处波速几乎没有衰减. 在 P5 传感器激发 40 kHz 五峰波信号,损伤区域两侧 P7、P8 传感器接收回波信号并用于分析研究铝板损伤情况.

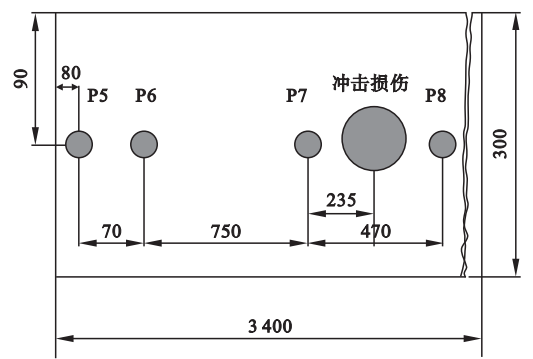


图 11 冲击损伤试验布置示意图

Fig. 11 Schematic plan for impact damages

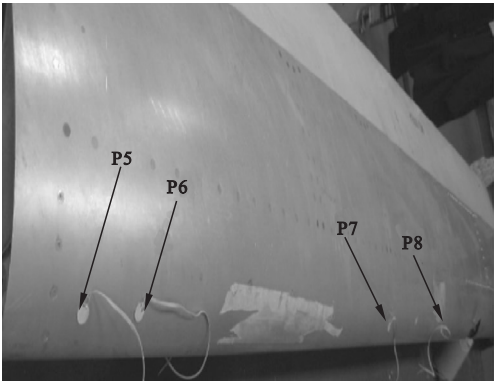


图 12 飞机机翼

Fig. 12 The slat (P letters shows PZTs.)

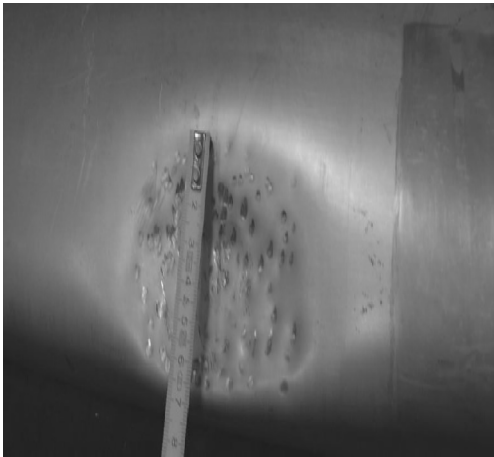


图 13 冲击损伤尺寸

Fig. 13 Close up view of the damage

表 2 Al 7075 铝板试验参数

Table 2 Al 7075 aluminum test parameters

| 试验编号 | 面积/mm <sup>2</sup> | 深度/mm | 激发频率/kHz |
|------|--------------------|-------|----------|
| 5    | —                  | —     | 40       |
| 6    | 40                 | 1     | 40       |
| 7    | 60                 | 1     | 40       |
| 8    | 70                 | 1     | 40       |
| 9    | —                  | —     | 230      |
| 10   | 40                 | 1     | 230      |
| 11   | 60                 | 1     | 230      |
| 12   | 70                 | 1     | 230      |

3.2.1 P7 传感器接收的 A0 模态信号分析

P7 号传感器接收到的信号如图 14 所示. 对 P7 接收到的回波信号在  $1.58 \sim 1.68 \times 10^{-3}$  s 时间段做 Hilbert 变换. 为了研究信号的衰减,图 15 给出了 0.5 ~ 2.5 ms 时间段信号的 Hilbert 变换能量衰减情况. 根据第一波峰最先到达的时间可以计算出 Lamb 波的群速度为 1 065 m/s. 由于波总是以最小的衰减移动,所以它们到达边界以后产生反射在接收信号中会产生附加的波峰. Hilbert 变换的特征幅值在冲击损伤后显著变化,然而回波信号并没有出现由冲击损坏区域产生的新的峰值.

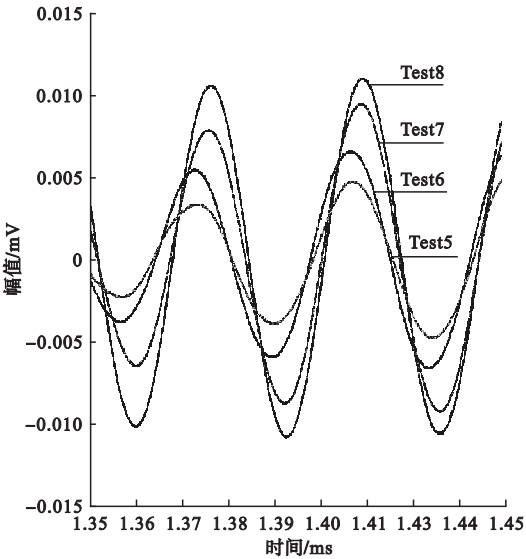


图 14 P7 接收到的 P5 激发 A0 模态信号的回波信号

Fig. 14 The signals received from the P7 when the P5 was excited at the A0 mode

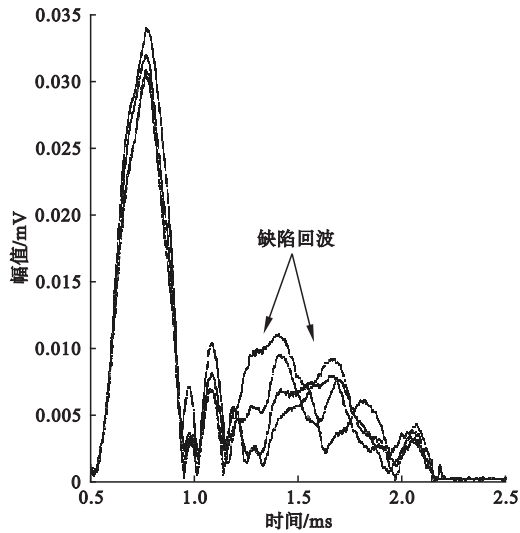


图 15 P7 信号的 Hilbert 变换能量(A0 模态)

Fig. 15 The Hilbert energy of the signals received from P7( A0 mode)

这些结果表明,冲击损伤使表面变形,但没有产生之前切割情况下看到的明显边界条件而产生新的回波峰值.图 16 为时域信号的幅度和冲击损伤尺寸之间的关系,可以研究信号的衰减和损伤尺寸之间到相关性.从图中可以看出,信号能量的衰减随着冲击损伤尺寸的增加而减小.

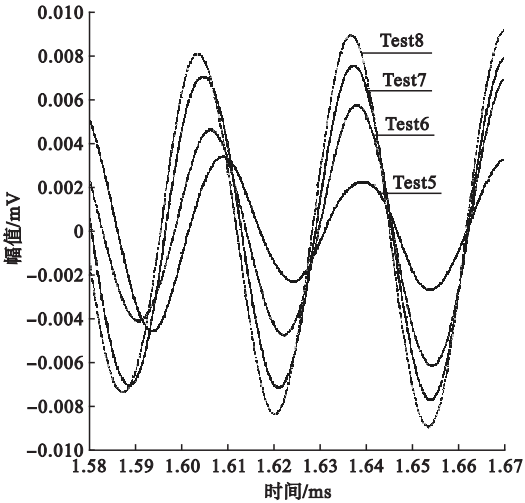


图 16 衰减与冲击损伤尺寸关系(P5 激发 P7 接收)

Fig. 16 The correlation between the Hilbert energy and the cuts size. (the signals received from the P7 when the P3 was excited )

3.2.2 P7、P8 传感器接收的 S0 模态信号分析

为了进一步验证 A0 模态检测出的结果,笔者还进行了 S0 模态的试验.图 17、18 分别为 P7 传感器接收到的由 P5 传感器发出的 S0 模态信号和 Hilbert 变换的能量幅值变化关系.0.17 ms 延迟时间后第一波峰到达,计算群速度为 5 124 m/s.第一个波峰之后的多个波峰是波在边界的反射并且沿着表面以很小的衰减传播形成的,冲击损伤产生后没有产生明确的新的波峰.

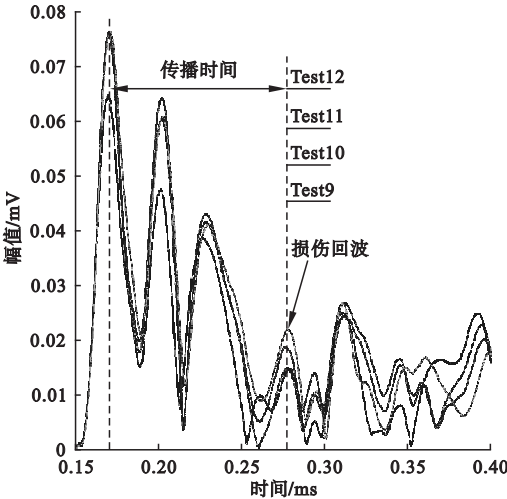


图 17 P7 信号的 Hilbert 变换能量(S0 模态)

Fig. 17 The Hilbert energy of the signals received from P7( S0 mode)

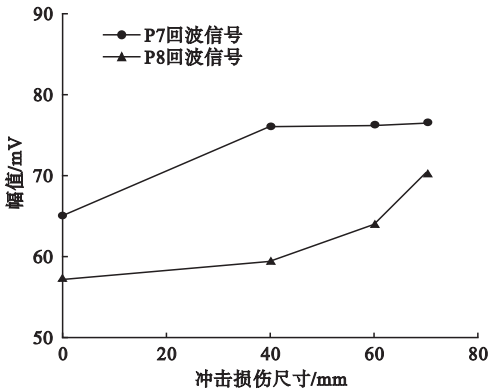


图 18 冲击损伤尺寸与回波信号能量衰减关系

Fig. 18 The correlation between the attenuation and the impact damage size

图 18 中的第四波峰的幅值随着损伤面积的增加而增大,表明损伤对波的峰值产生了明显影响. P7 接收到的信号能量由于没经

过冲击损伤,主波峰能量幅值变化很少, P8 接收到的信号能量在冲击损伤尺寸较小的时候幅值缓慢增加(40 mm 以下),然后主波峰能量幅值随着冲击损伤尺寸增加而增加.

根据 A0 和 S0 模态的研究结果可以得出,冲击损伤不会产生切口损伤那样明显的边界条件,但是可以在损伤部位传递一定的 A0、S0 模态导波. 所以对冲击损伤可以根据能量变化来确定损伤的程度,但是要准确定位还需要进一步的研究.

4 频散曲线和 Lamb 波传播速度

表 3 是根据试验测到 Lamb 波传播速度和理论计算的传播速度. 从表中可以看出,二者数值符合得很好.

表 3 根据试验数据和离散曲线估计 Lamb 波速度

Table 3 The Lamb wave speeds estimated from experimental data and dispersion curves

| 编号 | 型号    | 厚度/mm | 模态 | 频率/kHz | 理论波速/(m·s <sup>-1</sup> ) | 实际波速/(m·s <sup>-1</sup> ) |
|----|-------|-------|----|--------|---------------------------|---------------------------|
| 1  | 2 024 | 1     | A0 | 7      | 500                       | 561                       |
| 2  | 2 024 | 1     | A0 | 7      | 500                       | 582                       |
| 3  | 7 075 | 2.5   | A0 | 40     | 1 600                     | 1 603                     |
| 4  | 7 075 | 2.5   | S0 | 230    | 5 300                     | 5 124                     |
| 5  | 7 075 | 2.5   | S0 | 230    | 5 300                     | 5 160                     |

5 结 论

(1)有蜂窝状复合材料芯支撑 Al 2024 号铝板,随着激发频率的增加波的能量衰减也随之增加. 当使用较低的激发频率作为激发频率时或者铝板部分有支撑时,PZT 传感器的设置距离应该减小.

(2)在不同尺寸的航空铝板产生切割和冲击损伤两种类型的损伤. 切割创建新的边界, Lamb 波在新边界产生反射. 可以从反射波的到达时间以计算损伤的位置. 能量的损失随着切割的长度而增加.

(3)Lamb 波经过冲击损坏区域之后没有产生明显的波峰,只有能量衰减损失. 可以从 Hilbert 变换能量特性的变化来检测冲击损伤程度,但是不能估计损伤位置. 切割损伤

很容易地被检测出,并且可以高精度估计它们的位置.

参考文献

[ 1 ] KORLA S, LEON R A, TANSEL I N, et al. Design and testing of an efficient and compact piezoelectric energy harvester [ J ]. Microelectronics journal, 2011, 42 ( 2 ) : 265 - 270.

[ 2 ] 李豪,李锐华,胡波,等. 基于导波的大电机定子绝缘损伤定位仿真研究 [ J ]. 系统仿真学报, 2015, 27 ( 11 ) : 2816 - 2821.

( LI Hao, LI Ruihua, HU Bo, et al. Simulation study on damage localization of large generator stator insulation based on guided waves [ J ]. Journal of system simulation, 2015, 27 ( 11 ) : 2816 - 2821. )

[ 3 ] PADMAKMUAR P, ROSE J L. Ultrasonic guided wave inspection of a titanium repair patch bonded to an aluminum aircraft skin [ J ]. International journal of adhesion and adhe-



- sives, 2010, 30(7): 566 – 573.
- [4] 潘群, 王强. 主动 Lamb 波结构损伤监测中的非线性信号提取[J]. 压电与声光, 2014, 36(35): 814 – 816.  
(PAN Qun, WANG Qiang. Nonlinear signal extraction process for active Lamb wave based structural damage monitoring[J]. Piezoelectrics & acoustooptics, 2014, 36(35): 814 – 816.)
- [5] ROBIN E J, FRANCESCO S, MICHAEL J S L, et al. The effect of bends on the long – range microwave inspection of thermally insulated pipelines for the detection of water[J]. Journal of nondestructive evaluation, 2011, 31(2): 117 – 127.
- [6] PETER C, DAVID A. The use of Lamb waves for the long range inspection of large structures[J]. Ultrasonics, 2016, 34(2/5): 287 – 290.
- [7] HINDERS M K, MILLER C A. Intelligent feature selection techniques for pattern classification of lamb wave signals[J]. AIP conference proceedings, 2014, 1581(1): 294 – 301.
- [8] 和儒辉, 王开圣, 赵志敏, 等. 基于时频分析技术的激光超声 Lamb 波模式识别[J]. 理化检验, 2012, 48(3): 151 – 155.  
(HE Ruhui, WANG Kaisheng, ZHAO Zhimin, et al. Pattern recognition of laser-generated Lamb wave based on time-frequency analysis[J]. PTCA, 2012, 48(3): 151 – 155)
- [9] 王强, 孙丽华. 非线性 Lamb 波结构早期损伤监测研究[J]. 压电与声光, 2016, 38(1): 170 – 173.  
(WANG Qiang, SUN Lihua. Early structural damage detection based on nonlinear Lamb wave[J]. Piezoelectrics & acoustooptics, 2016, 38(1): 170 – 173.)
- [10] 阎石, 张海凤, 蒙彦宇. Lamb 波频散曲线的数值计算及试验验证[J]. 华中科技大学学报, 2010, 27(1): 1 – 4.  
(YAN Shi, ZHANG Haifeng, MENG Yanyu. Numerical calculation and experimental validation for Lamb wave dispersion curves[J]. Journal of huazhong university of science and technology, 2010, 27(1): 1 – 4.)
- [11] 齐霁. 基于 PZT 超声导波的多裂纹管道损伤识别研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2014.  
(QI Ji. Research on multiple crack pipeline structural monitoring by using PZT-based ultrasonic guided waves[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2014.)
- [12] 阎石, 程杨, 王伟. 层状管道结构频散曲线绘制及试验验证[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(1): 45 – 50.  
(YAN Shi, CHENG Yang, WANG Wei. Plotting and experimental validating of guided wave dispersion curves for layered pipe structures[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2016, 32(1): 45 – 50.)
- [13] 李光海, 焦阳, 孙广开, 等. 钢管中 L(0,2) 与 T(0,1) 模态导波数值模拟与特性分析[C/CD]//压力管道技术研究进展精选集, 2010.  
(LI Guanghai, JIAO Yang, SUN Guangkai, et al. L(0,2) and T(0,1) guided wave simulation and characterization in steel pipe[C/CD]//Pressure Piping Technology Research Anthology, 2010.)
- [14] ROSE J L. 固体中的超声波[M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
(ROSE J L. Ultrasonic waves in solid media[M]. Beijing: Science Press, 2004.)
- [15] 邓菲, 吴斌, 何存富. 基于时间反转的管道导波缺陷参数辨识方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(8): 18 – 24.  
(DENG Fei, WU Bin, HE Cunfu. Guided wave defect identification method based on time reversal[J]. Journal of mechanical engineering, 2010, 46(8): 18 – 24.)
- [16] LIEW J Y R. Survivability of steel frame structures subject to blast and fire[J]. Journal of constructional steel research, 2008, 64(7/8): 854 – 866.
- [17] 王悦民, 沈立华, 申传俊, 等. 管道导波无损检测频率选择与管材特性关系[D]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 243 – 248.  
(WANG Yuemin, SHEN Lihua, SHEN Chuanjun, et al. Relationship between frequency selection and pipe characteristics for guided waves[J]. Journal of mechanical engineering, 2009, 45(8): 243 – 248.)
- [18] ROSE J L. Guided wave nuances for ultrasonic nondestructive evaluation[J]. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control, 2000, 47(3): 575 – 583.