

# The Analysis and Verification of the Acoustic Emission Lamb Wave Mode in the Thin Plate

Baochun Xu, Jingqiu Wu, Qihua Chen, Xin Liu

Industrial Center, Nanjing Institute of Technology, Nanjing Jiangsu  
Email: baochun\_xu@njit.edu.cn

Received: May 26<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jun. 5<sup>th</sup>, 2019; published: Jun. 12<sup>nd</sup>, 2019

---

## Abstract

In this paper, the characteristics of acoustic emission wave velocity excited in different directions of force on thin plate are analyzed, and the relationship between the low-order modes of Lamb wave in plate and them is explained. In order to verify this relationship, aluminum plate and epoxy glass fiberplate are taken as experimental objects, and the vertical and parallel forces are simulated by using the lead breaking on surface and end of the plate. The acoustic emission analysis results are consistent with the theoretical analysis. The experimental results are consistent with the conclusions from the theoretical analysis in the text. The results show that the relationship between the low-order modes of Lamb wave and the acoustic emission waveforms excited by forces in different directions can be used for the structural health monitoring of plate.

## Keywords

Acoustic Emission, Lamb Wave, Structural Health Monitoring

---

# 薄板声发射信号Lamb波模式的分析与验证

胥保春, 吴京秋, 程啟华, 刘 欣

南京工程学院工业中心, 江苏 南京  
Email: baochun\_xu@njit.edu.cn

收稿日期: 2019年5月26日; 录用日期: 2019年6月5日; 发布日期: 2019年6月12日

---

## 摘 要

文章分析了薄板不同受力方向激发的声发射波速特点, 接着说明了板内Lamb波低阶模式与之对应的关系。为了验证这种关系, 以铝板与环氧玻璃纤维板为实验对象, 利用板面断铅与断面断铅模拟垂直与平

行方向的力产生声发射, 实验结果与文中理论分析相符。实验表明文中分析的Lamb波低阶模态与不同方向力激发的声发射波形之间的关系, 可以用于板结构健康监测。

## 关键词

声发射, Lamb波, 结构健康监测

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 背景介绍

材料局部能量快速释放产生的瞬态弹性波, 一般称为声发射。声发射在结构健康监测领域用途广泛, 如在桥结构[1]、板结构[2]、材料韧性[3]、岩石破坏[4]等监测中有不俗的表现。这是由于声发射来自于结构自身活动, 反映状态, 而且对构件的几何形状不敏感。

声发射传播离不开介质, 传播过程中携带了声源、路径中的结构物理信息。研究者利用信号处理技术, 通过分析声发射信号可以监测结构的特性。文献[5] [6]中的研究内容, 利用建立的模型, 计算冲击产生的板结构中传播的声发射传感信号参数, 根据参数诊断复合材料板结构的损伤情况, 文献[7] [8]研究了, 板结构中声波传感信号的频谱变化, 实现板结构损伤判断与冲击位置的定位。国内南京航空航天大学袁慎芳教授领导的科研小组也对复合材料板结构冲击损伤监测做了大量的研究工作[9] [10] [11]。这些文献的研究表明冲击声发射是板结构健康监测的一个重要研究对象, 因此对板结构受冲击产生的声发射信号特征研究非常有必要。

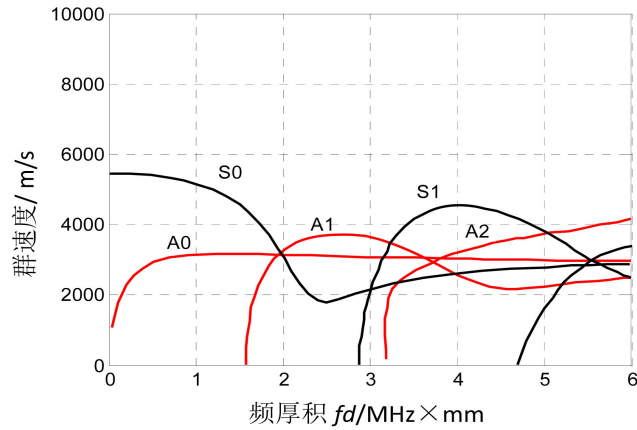
声发射属于应力波。一般应力波在一定厚度的固体中波速恒定, 与频率无关。但是在板结构中, 应力波的波速与频率相关, 也就是色散现象, 此时的应力波也被称为 Lamb 波, 存在对称型(S 型)和非对称型(A 型)。板结构中的声发射波形复杂, 如果用 Lamb 波理论解释, 可以更清晰的分析声发射波形携带的信息。针对声发射信号波形与结构关系的研究有助于其在结构健康领域的应用。文章首先从板结构力与声发射信号波形的关系入手, 理论分析了不同力的方向特点, 接着利用力模拟作用, 验证了理论分析结论。

## 2. 薄板中声发射 Lamb 波模式讨论

声发射是结构内部能量瞬间释放产生的弹性波, 这个过程是人为无法控制的, 接收到的波形相对于主动监测的波形复杂得多。Groman [12]提出了板波声发射称为模态声发射), 可以用 Lamb 波理论解释板结构中声发射, 就可以将声发射波形与 Lamb 波模态联系起来解读声发射中的信息, 声发射信号分析就变得简单起来。该理论实际就是利用 Lamb 波理论研究板中声发射波的特点。

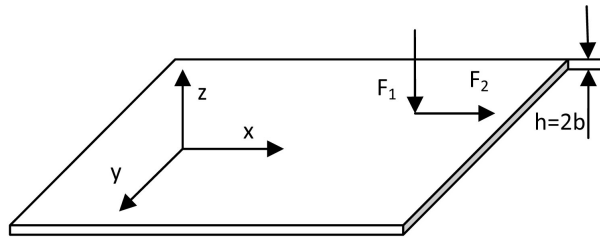
工程中大量使用板状结构, 如飞机机翼、平尾、压力容器壳体等, 它们的共同特征就是厚度方向尺寸远小于其他二个方向的长度, 在这种类型板中形成的应力波主要是 Lamb 波。由文献[13] [14]可知, 由于波速与频厚积之间存在一定的关系, 板中的 Lamb 波存在多模式与频散现象。但是在其理论研究中存在一个模式截止现象, 就是在一定厚度的板中, 当频率小于截止频率时, 板中只能存在零阶的 Lamb 波。如图 1 所示, 铝板中频率与板厚乘积小于  $1 \text{ MHz} \times \text{mm}$  时, 板中只存在零阶 Lamb 波。因此对于薄板中的声发射波形可进一步简化。

在工程上就声发射检测而言, 绝大多数主要频率段大概在几百千赫兹, 实验中使用的是 2 mm 厚的



**Figure 1.** Lamb wave theory group velocity dispersion curve of aluminium plate  
**图 1.** 铝板 Lamb 波理论群速度频散曲线

板结构, 其频厚积在  $1 \text{ MHz} \times \text{mm}$  左右, 甚至更小。因此薄板中的声发射起主导作用的应该是最低阶模式的 Lamb 波。在这样的条件下薄板中声发射产生的 Lamb 波模式问题就简化了。外界对板的冲击力可简化为垂直于板面的力( $F_1$ )与平行于板面的力( $F_2$ ), 如图 2 所示, 设板厚  $h = 2b$ 。这里首先分析垂直于板面力  $F_1$  在板内激发的声发射波速。



**Figure 2.** The direction of force acting on the plate surface  
**图 2.** 板面作用力示意图

板的平衡方程可化简为:

$$D\Delta^2\zeta - P = 0 \quad (1)$$

其中  $D = Eh^3/12(1-\sigma^2)$ , 为板的抗弯强度;  $P$  为垂直于板面的力  $F_1$ ;  $\zeta$  为力作用下的板面位移;  $E$  为杨氏模量;  $\sigma$  为泊松比。如果  $P$  的表达式写成加速度与单位面积的质量  $\rho h$  相乘, 及

$$P = -\rho h \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} \quad (2)$$

将公式(2)带入公式(1)可得:

$$\rho h \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \frac{Eh^3}{12(1-\sigma^2)} \Delta^2 \zeta = 0 \quad (3)$$

设  $\zeta = \zeta_0 \exp[j(kx - \omega t)]$ ,  $\zeta_0$  为常数,  $k$  为波长。对于一维问题  $\Delta = d^2/dx^2$ , 由(3)式可得:

$$\rho(-\omega^2) + Ak^4 = 0 \quad (4)$$

其中  $A = D/h$ ,  $\omega$  为角频率, 代入可得:

$$\omega^2 = h^2 Ek^4 / 12\rho(1-\sigma^2) \quad (5)$$

则弯曲波的波速  $c_g$  表示为:

$$c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \sqrt{kh^2 E / 3\rho(1-\sigma^2)} = \left[ 4E / 3\rho(1-\sigma^2) \right]^{1/4} \sqrt{\omega h} \quad (6)$$

现在分析力  $F_2$  平行于板面时声发射的波速, 这时波的方向分为波传播方向与质点位移一致都在  $x$  方向, 及质点位移(在  $y$  方向)与传播方向垂直( $x$  方向)。二种波的运动方程分别为:

$$\frac{\rho}{E} \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{1}{1-\sigma^2} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{1}{2(1+\sigma)} \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{1}{2(1-\sigma)} \frac{\partial^2 u_y}{\partial y \partial x} \quad (7)$$

$$\frac{\rho}{E} \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{1}{1-\sigma^2} \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{1}{2(1+\sigma)} \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{1}{2(1-\sigma)} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial y} \quad (8)$$

如果不考虑他们之间的耦合, 则有:

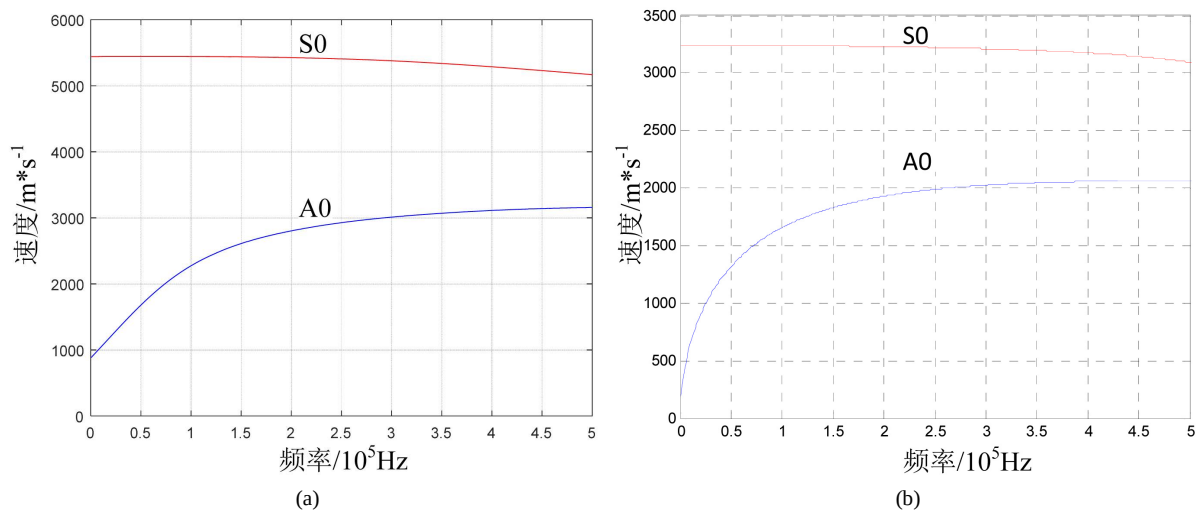
$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho(1-\sigma^2)} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{E}{2\rho(1+\sigma)} \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} \quad (10)$$

可得沿  $x$  方向传播的扩展波速度为:

$$c_{ext} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)}} \quad (11)$$

另外还有一种沿着  $y$  方向传播的横波, 在薄板中可以忽略, 文中只讨论沿  $x$  方向传播的扩展波。由公式 (6)、(11) 可以判断出在低频厚积下  $S_0$  无频散现象, 而  $A_0$  存在频散现象。图 3 为 2 mm 厚的铝板与环氧玻璃纤维板的理论曲线, 其符合公式(6)、(11)的描述。由上面的推导可知, 当力与板面垂直时, 板中应当主要产生的是  $A_0$  模式 Lamb 波; 力与板面平行, 将主要获得  $S_0$  模式 Lamb 波。

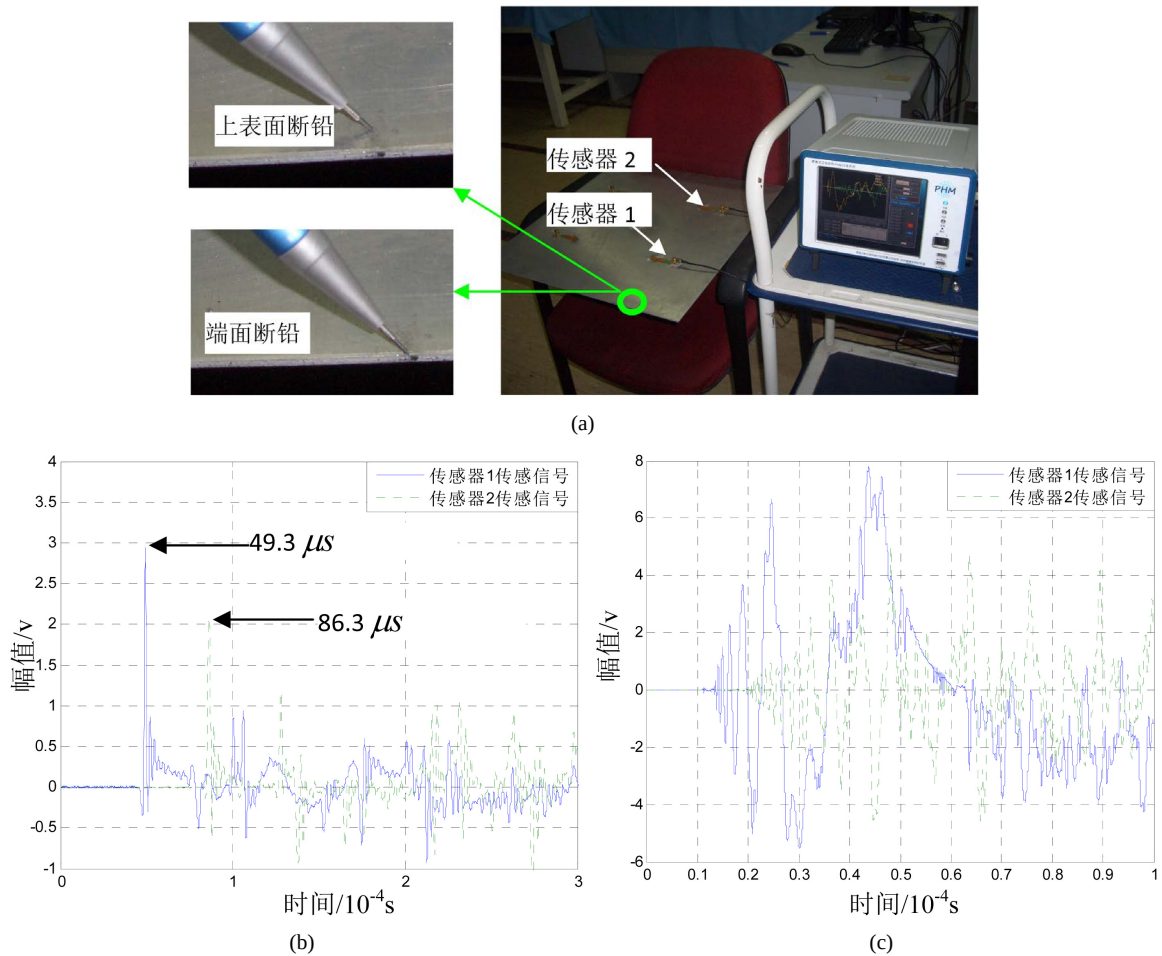


**Figure 3.** The velocity of Lamb wave in  $S_0$  mode and  $A_0$  mode under low frequency thick product, (a) Zero-order mode velocity of Lamb wave in aluminium plate at frequencies less than 500 KHz; (b) Zero-order mode velocity of Lamb wave in epoxy glass fiberplate at frequencies less than 500 KHz

**图 3.** Lamb 波在低频厚积下  $S_0$  与  $A_0$  的速度说明图, (a) 铝板在 500 KHz 前零阶 Lamb 波; (b) 环氧玻璃纤维板在 500 KHz 前零阶 Lamb 波

### 3. 薄板中声发射 Lamb 波模式实验验证

这里利用断铅试验, 验证以上的结论, 测试对象同样为厚度 2 mm 的型号 1070 铝板与 3240 环氧复合材料板, 长宽都为 1 m。传感器为陶瓷压电片(PZT), 直径为 8 mm, 厚度为 0.5 mm。数据采集装置是由南京航空航天大学, 机械结构力学及控制国家重点实验室结构健康监测与预测小组开发的便携式压电结构 PHM 扫查系统。与板垂直的激励力源是在板平面上的断铅; 与板面平行的激励力源, 是在板端面断铅。其中铝板二个传感器相距约 200.0 mm, 试验装置如图 4(a)所示, 测得的 Lamb 波如图 4(b)、图 4(c)所示; 环氧玻璃纤维板三个传感器之间相距约 47.0 mm, 试验装置如图 5(a)所示, 测得的板中 Lamb 波如图 5(b)、图 5(c)所示。断铅方式参见图 4(a), 铅芯直径为 0.25 mm。



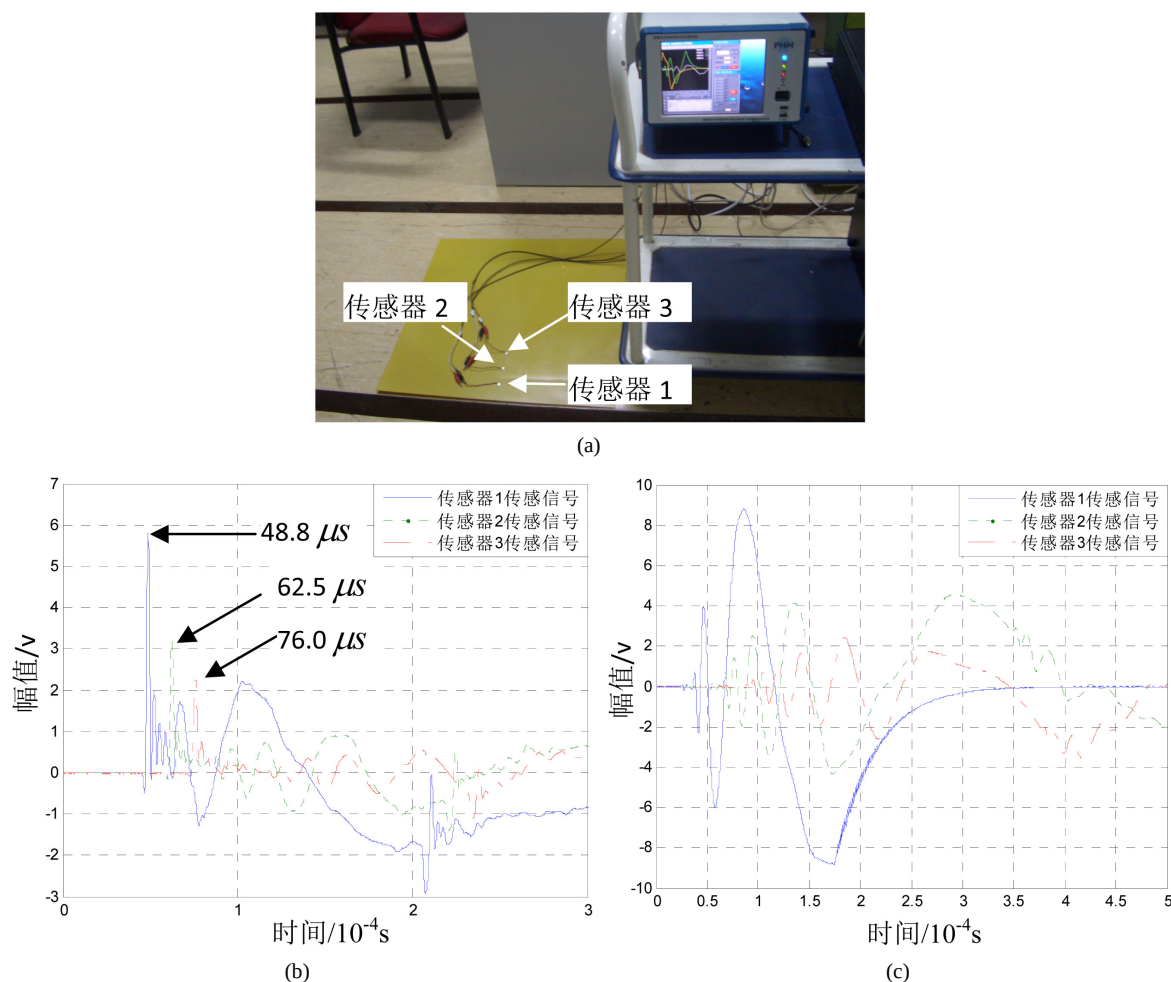
**Figure 4.** The Lamb wave propagating in aluminum plate and its lead breaking test device, (a) An experimental device for the lead breaking on the surface and the end of the aluminium plate; (b) Lamb wave induced by lead breakage at the end of aluminium plate; (c) Lamb waves induced by lead breakage on the surface of aluminium plate

**图 4.** 铝板断铅试验装置图与测得的 Lamb 波图, (a) 铝板上表面断铅与端面断铅实验装置; (b) 铝板端面断铅产生的 Lamb 波; (c) 铝板上表面断铅产生的 Lamb 波

由图 4(b)、图 5(b)可以看到明显的冲击波形, 显然是宽频信号, 经过一段距离的传播后其波形始终保持冲击波形, 表明其传播速度与频率几乎无关, 另外可以计算得到铝板对应的波速约为 5405 m/s, 400 K~200 K 频段; 环氧玻璃纤维板对应的波速约为 3455 m/s, 频率能量主要集中在 150 K~350 K 频段。结合图 3, 可以判断图 4(b)、图 5(b) Lamb 波模式主要是 S<sub>0</sub>。实验板上表面的断铅, 但图 4(c)、图 5(c)波形



上明显可以看出高频速度比低频信号先到达, 而且随着传播距离增加波形展开得更长, 这些特征表明波的速度与频率有关。截取铝板传感器 1 前 1500 个数据点, 频率主要是 170 K~80 K 范围; 截取环氧玻璃纤维板传感器 1 前 500 个点的数据分析, 能量主要集中在频率 150 K~60 KHz 范围, 都属于低频厚积, 小于截止频厚积, 符合 A0 模态特征。



**Figure 5.** The Lamb wave propagating in epoxy glass fiberplate and its lead breaking test device, (a) An experimental device for the lead breaking on the surface and the end of the epoxy glass fiberplate; (b) Lamb wave induced by lead breakage at the end of epoxy glass fiberplate; (c) Lamb waves induced by lead breakage on the surface of epoxy glass fiberplate

**图 5.** 环氧玻璃纤维板断铅实验装置图与板中传播的 Lamb 波图, (a) 环氧玻璃纤维板上表面与断面断铅实验装置图; (b) 环氧玻璃纤维板端面断铅产生的 Lamb 波; (c) 环氧玻璃纤维板上表面断铅产生的 Lamb 波

从实验结果看垂直上表面作用力主要产生 A0 模态的 Lamb 波; 板内平行于板面的作用力主要产生的是 S0 模态的 Lamb 波, 波的频率成分主要集中在 500 KHz 以下。这符合本节关于薄板中 Lamb 波模态理论分析。不过需要注意的是, 文中是以断铅模拟板结构受到的力冲击, 实际冲击中不一般不可能只存在一个方向的作用力, 而是在板面的垂直方向和水平方向都存在不为零的分力, 传感信号中 A0、S0 模态会共存。由于 S0 速度远大于 A0, 在时间上 S0 波形始终在 A0 波形的前面。

#### 4. 结论

文章研究了板结构被冲击后, 激发的声发射 Lamb 波模态特征。以上研究表明复合材料损伤, 如基

体开裂、纤维断裂等,会产生平行于板面的力作用,激发出 S0 模态 Lamb 波。如果无损伤产生,声发射信号不存在 S0 模态 Lamb 波。因此,利用声发射监测技术及合适的信号处理技术,声发射信号中是否有 S0 模态 Lamb 波,可以用来作为外部冲击是否产生损伤的判断依据。这将作为下一步继续跟进研究的内容。

## 项目基金

江苏省高校自然科学研究面上项目(15KJB460011)资助,南京工程学院校级科研项目基金(ZKJ201310, SYKJ201603, CKJB201808)资助课题

## 参考文献

- [1] 李冬生, 欧进萍. 声发射技术在拱桥吊杆损伤监测中的应用[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2007, 23(1): 6-10.
- [2] 朱永凯, 潘仁前, 陈盛票, 等. 基于声发射传感器阵列的风机叶片结构健康监测方法[J]. 无损检测, 2010, 32(10): 753-756.
- [3] 朱波, 王成国. 声发射特性与材料断裂韧性相关性研究[J]. 物理学报, 2003, 52(8): 1960-1963.
- [4] 朱振飞, 陈国庆, 肖宏跃, 等. 基于声发射多参量分析的岩桥裂纹扩展研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018(4), 909-918. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1397.O3.20171219.2316.006.html>
- [5] Nardi, D., Lampani, L., Pasquali, M., et al. (2016) Detection of Low Velocity impact-Induced Delaminations in Composite Laminates Using Auto-Regressive Models. *Composite Structures*, **151**, 108-113. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.005>
- [6] Pérez, M., Gil, L. and Oller, S. (2014) Impact Damage Identification in Composite Laminates Using Vibration Testing. *Composite Structures*, **108**, 267-276. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.09.025>
- [7] Aymerich, F. and Staszewski, W.J. (2010) Impact Damage Detection in Composite Laminates Using Nonlinear Acoustics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **41**, 1084-1092. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.09.004>
- [8] Takeda, S., Aoki, Y., Ishikawa, T., et al. (2007) Structural Health Monitoring of Composite Wing Structure during Durability Test. *Composite Structures*, **79**, 134-138. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.11.057>
- [9] Yuan, S.F., Liu, P.P. and Qiu, L. (2012) A miniaturized Composite Impact Monitor and Its Evaluation Research. *Sensors and Actuators A: Physical*, **184**, 182-192. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.07.011>
- [10] Liang, D., Yuan, S.F. and Liu, M.L. (2013) Distributed Coordination Algorithm for Impact Location of Preciseness and Real-Time on Composite Structures. *Measurement*, **46**, 527-536. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.08.011>
- [11] Qiu, L., Liu, B., Yuan, S.F., et al. (2016) Impact Imaging of Aircraft Composite Structure Based on a Model-Independent Spatial-Wavenumber Filterd. *Ultrasonics*, **64**, 10-24. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.07.006>
- [12] Gorman, M.R. (1991) Plate Wave Acoustic Emission. *JASA*, **90**, 358-364. <https://doi.org/10.1121/1.401258>
- [13] 郑祥明, 赵玉珍, 史耀武. 兰姆波频散曲线的计算[J]. 无损检测, 2003, 25(3): 66-68.
- [14] 耿荣生, 沈功田, 刘时风. 模态声发射基本理论[J]. 无损检测, 2002, 24(7): 302-306.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2328-0530, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ojav@hanspub.org](mailto:ojav@hanspub.org)