

# 胶接板中兰姆波的传播模式分析与检测信号处理

夏美玲, 卢超, 车飞

(南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063)

**摘要:** 对兰姆波在铝胶接头中的传播模式进行了有限元模拟, 用二维傅里叶变化的方法识别兰姆波模式, 将模拟结果与理论结果进行了对比, 通过试验验证有限元模拟的准确性。研究证实, 兰姆波在胶接板中的传播有多模式、频散特性, 二维傅里叶能有效识别兰姆波模式, 有限元模拟结果与理论及试验结果吻合较好。

**关键词:** 兰姆波; 有限元; 二维傅里叶变换

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2010)08-0564-03

## Analysis of Lamb Wave Propagation Modes in Adhesive Plates and Signal Processing

XIA Mei-Ling, LU Chao, CHE Fei

(Key Lab of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** A finite element method was used to investigate the lamb wave propagation in aluminum adhesive joints. Using 2D-FFT to recognize the modes, the simulation results were compared with the theoretical results. The experiment results showed that the simulation was accurate and effective. It was approved that the lamb wave propagation is multi-mode and dispersion. The method of 2D-FFT can effectively identify the Lamb wave modes, the test results agree well with the results of the finite element analysis.

**Keywords:** Lamb; Finite element; Two-dimension Fourier transform

胶接结构最突出的特点是轻质高强, 比强度超过任何金属, 此外还有阻裂、吸波、减震和隔音等特殊作用, 目前已广泛用于航空航天工业。胶接技术的广泛应用使胶接质量及可靠性问题日益突出, 对无损检测的技术要求也越来越迫切。所以, 胶接接头的无损检测研究意义重大。

### 1 铝胶接板中的兰姆波理论频散曲线

兰姆波是一种频散波, 根据声波质点振动位移形态的特点分为对称模式和反对称模式。在厚度为  $b$  的无限大固体自由平板中, 兰姆波频散方程为:

$$\text{对称模式} \quad \frac{\tan k_{0s} b}{\tan k_{0L} b} = - \frac{4k_0^2 k_{0L} k_{0s}}{(k_0^2 - k_{0s}^2)^2}$$

$$\text{反对称模式} \quad \frac{\tan k_{0s} b}{\tan k_{0L} b} = - \frac{(k_0^2 - k_{0s}^2)^2}{4k_0^2 k_{0L} k_{0s}}$$

式中  $k_{0L}^2 = (\frac{\omega}{c_L})^2 - k_0^2$ ,  $k_{0s}^2 = (\frac{\omega}{c_s})^2 - k_0^2$ ,  $k_0$  为沿板水平方向的波数,  $b$  为 1/2 板厚,  $\omega$  为角频率,  $\omega = 2\pi f$ ,  $c_L$  为纵波速度(常数),  $c_s$  为横波速度(常数),  $c_P$  为相速度。式(1)表达了兰姆波的相速度  $c_P$  与频率-板厚乘积(即频厚积)  $fd$  间的关系。用 Matlab 求解得出兰姆波相速度曲线(图1); 兰姆波在传播时存

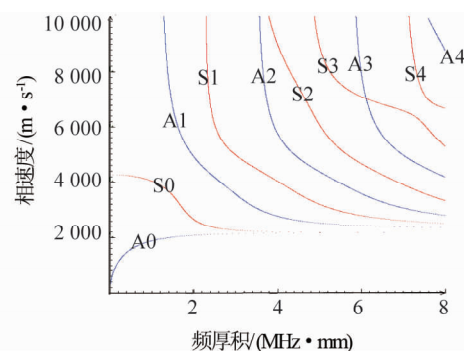


图1 兰姆波在铝板中的相速度曲线

**作者简介:** 夏美玲(1985—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为超声无损检测。

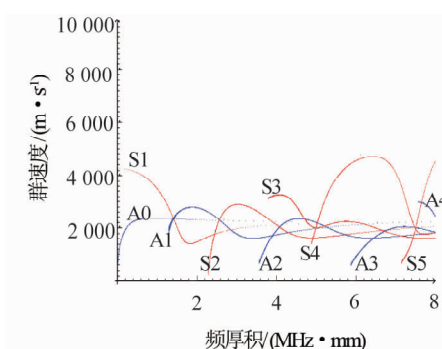


图2 兰姆波在铝板中的群速度曲线

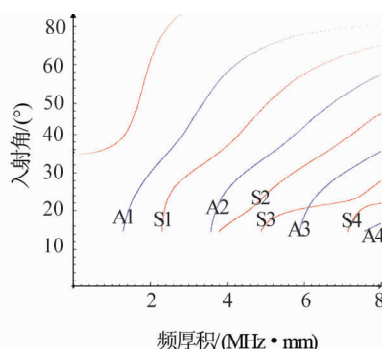


图3 兰姆波在铝板中的激励角曲线

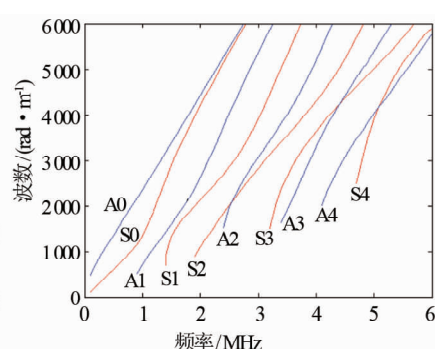


图4 兰姆波在铝板中的频率-波数曲线

在频散现象,根据群速度与相速度的关系可以得到群速度曲线(图2)。

根据相速度与激励角的关系,同样用 Matlab 编程得到激发角-频厚积曲线(图3),利用关系式  $k = \omega/c_p$ ,由相速度-频率曲线也可以计算出频率-波数曲线(图4)。

由以上理论,2 mm 厚铝板的理论兰姆波模式见表1。

表1 2 mm 厚铝板的理论兰姆波模式

激发频率/MHz		理论激发模式					
0.5	A0	S0	—	—	—	—	—
1.0	A0	S0	A1	—	—	—	—
2.5	A0	S0	A1	S1	A2	S2	—

## 2 有限元建模

### 2.1 材料参数

金属铝板厚 2 mm,长 102 mm,宽 40 mm,搭接区长 15 mm,胶层厚 0.2 mm。其他参数见表2。

表2 材料参数

材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量 E/MPa	泊松比 $\gamma$
2A12 铝	2 700	70 300	0.32
环氧树脂胶	3 000	1 500	0.30

### 2.2 激励信号

依照声-超声激发方式,垂直施加瞬时压力,模拟入射纵波,输入载荷值采用通过高斯函数调制的正弦信号。接头两端加入吸声材料,以减少兰姆波的反射。信号函数为:

$$f(t) = \begin{cases} e^{-\frac{(t-\frac{\tau}{2})^2}{\tau^2}} \cdot \sin(2\pi ft) & 0 < t \leq \tau \\ 0 & t > \tau \end{cases}$$

式中  $\tau$  为信号的脉冲时间,脉冲周期取决于所施加信号的频率大小。

在板右侧每隔 1 mm 设定一参考点,连续取 32 个,提取 32 组节点数据,输入 Matlab 进行检测信号的处理。施加信号位置如图5。

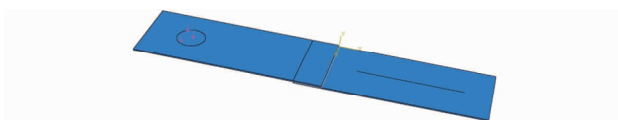


图5 施加激励信号

### 2.3 网格划分

如图6,采用八节点六面体单元,铝板层网格尺寸为 3 mm(长)×1 mm(宽)×0.25 mm(高);胶层部分网格尺寸 0.5 mm(长)×1 mm(宽)×0.25 mm(高),接头部分细化网格 0.5 mm×1 mm×0.05 mm。

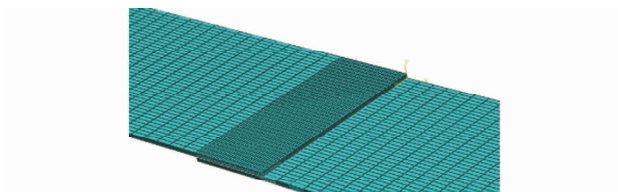


图6 网格划分

### 2.4 信号处理

分别使用 0.5, 1.0 和 2.5 MHz 三种频率激发胶接板中传播的兰姆波。采用二维傅里叶变换法(2D-FFT)进行兰姆波模式识别。通过将接收到的幅度-时间记录变换到各离散频率点的幅度-波数记录,得到三种频率下频率-波数频散曲线图,从而可分解出各兰姆波模式并测出它们的幅值。由图7得到模拟产生的兰姆波模式见表3。

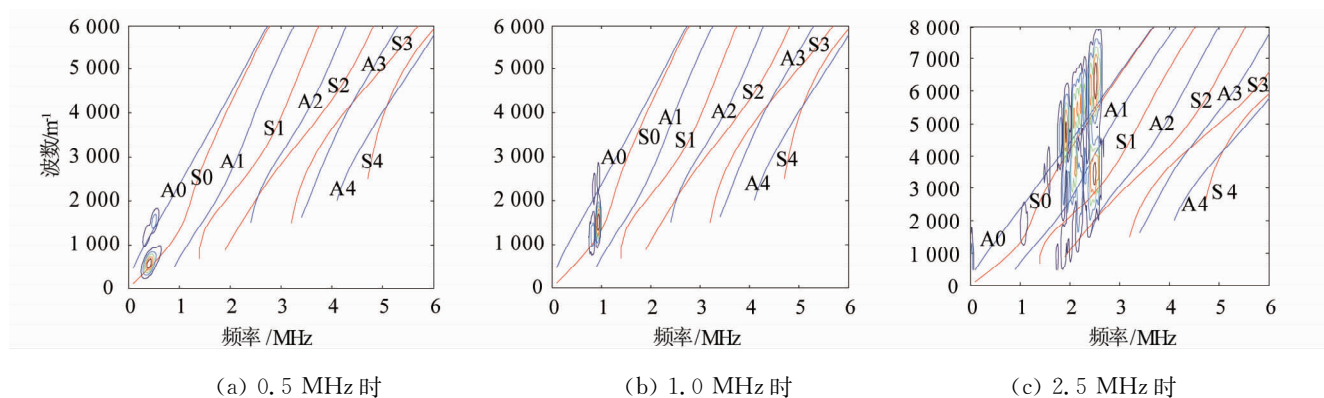


图7 不同频率时的频率-波数图

表3 模拟产生的兰姆波模式

激发频率/MHz	模拟激发模式
0.5	A0, S0
1.0	A0, S0, 少量 A1
2.5	主要: A1 S1 少量: A0 S0 极少量: A2 S2

### 3 试验步骤及数据处理

#### 3.1 试验布置

试验采用 CTS-22 型模拟超声探伤仪作为超声发射接收器,所接收 Lamb 波经 40MHz 高速数据采集后传入计算机中。研究中使用 Matlab 软件编制操作平台。探头用 2.5 MHz,固定接收探头,在发射和接收探头上加压块,消除耦合带来的影响,从接收探头处开始空间采样,以步距 1 mm 向前移动,每移动一次采样一次,一共采集 32 组数据并存储。

#### 3.2 试验数据处理

将所接收 d0~d31 位置的 32 组数据构成  $u(x, t)$ ,作二维傅里叶变换,得到  $H(k, f)$  的等高线和三维幅值图见图 8。

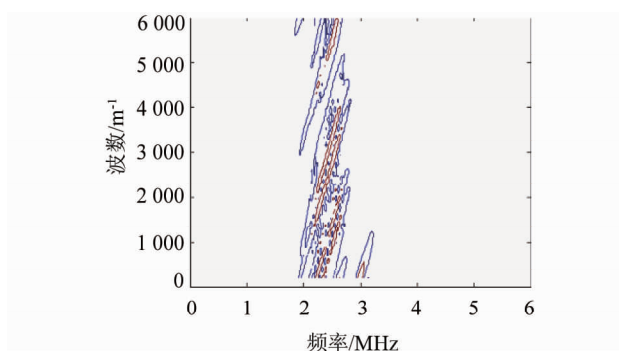
由试验所得激发频率为 2.5 MHz 时,兰姆波模式为 A1, S1, A0 和 S0。

### 4 分析与结论

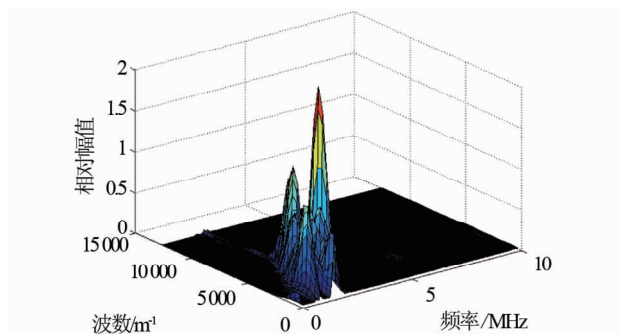
以上结果均是应用二维傅里叶变化的方法识别兰姆波的,试验验证了其模式识别的可行性。

(1) 低频激发时,兰姆波模式相对单一,主要是 A0 和 S0 模式。

(2) 2.5 MHz 时,模拟结果与试验结果对比,说明兰姆波传播经过胶接区域,会发生模式转化。



(a) 频率-波数等高线图



(b) 频率-波数三维幅值图

图8 试验结果

(3) 低频激发兰姆波,模拟结果与理论及试验结果吻合较好。

(4) 验证了采用有限元分析方法模拟胶接接头中兰姆波传播模式的可行性。但由于兰姆波的多模式-频散特性,模拟的准确性有待提高。

#### 参考文献:

- [1] 张海燕,他得安,刘镇清.层状各向异性复合板中的兰姆波[M].北京:科学出版社,2008:126—136.
- [2] 郑祥明,赵玉珍,史耀武.Lamb 波频散曲线的计算[J].NDT 无损检测,2003(2):242—246.

(下转第 600 页)

## 2.2 以 60 kg/m 钢轨踏面人工表面开口斜裂纹试验验证

对钢轨踏面人工模拟表面开口斜裂纹进行超声表面波频谱法检测,而此处是模拟实际钢轨裂纹沿轨头斜向下切的,是一种立体裂纹。选取长度分别为 5, 6, 7 mm 的裂纹,利用频谱法进行检测,结果如表 4 所示。

表 4 钢轨踏面人工斜裂纹频谱法检测结果

裂纹长度/mm	仪器增益/dB	截止频率/MHz
5	55.6	0.423
6	55.6	0.425
7	55.6	0.396

可以看出,裂纹扩展长度和截止频率对应的关系并不是十分明显,原因是此处裂纹是一个面状裂纹,表面波在裂纹面上传播过程中,散射过程并不是有限元模拟中二维平面上所呈现的散射特性,因而导致结果的偏差。但是综合考虑透射波的幅度和截止频率的大小,基本上可以得到截止频率与裂纹长度的关系。如何实现不规则面状裂纹的准确定量,还有待于进一步的研究。

## 3 结论

采用有限元模拟表面波在钢轨踏面裂纹的传播及波型转换,使用频谱分析对不同深度的裂纹进行模拟检测,通过人工试块和在钢轨踏面加工人工裂纹进行试验验证,得出以下结论:

(1) 使用有限元模拟表面波在钢轨踏面斜裂纹上的散射及波型转换是可行的,能够为使用低频表

面波检测钢轨踏面裂纹提供坚实的理论依据。

(2) 通过模拟,对钢轨踏面斜裂纹的检测,激发频率至关重要。要选取适当的频率,兼顾检测灵敏度和检测深度的需要。在厚度一定时,频率过低,表面波模式比较单一,但埋深很浅的裂纹出现漏检;频率过高,模式选择复杂,埋深深深的裂纹很难检测到。

(3) 通过模拟和试验验证,钢轨踏面开口裂纹对表面波的传播具有低通效应,即裂纹的深度与表面波的高频截止频率成反比。

(4) 通过模拟,表面波在传播过程中,沿裂纹包罗传播的表面波含有裂纹的深度信息,这些信息,是进行钢轨踏面开口斜裂纹深度反演的重要依据。

## 参考文献:

- [1] 邹定强,邢丽贤,高春平,等. 广深准高速铁路 PD3 钢轨轨头踏面剥离裂纹和核伤断裂原因的检验分析[J]. 无损检测,2003,32(1):12—16.
- [2] Suh Dong-Man. Ultrasonic image reconstruction using mode converted rayleigh wave[J]. IEEE Ultrasonics symposium,1998:869—872.
- [3] Chao L U, Ping M E N, Lianxiu L I. An experimental study of EMAT ultrasonic surface waves modes in rail-head[J]. 2009 Xi'an, China (ISEM'2009).
- [4] 王敬时,徐晓东. 利用激光超声技术研究表面微裂纹缺陷材料的低通滤波效应[J]. 物理学报,2008,57(12):7765—7768.
- [5] 李卓球,雷婧. 板结构中裂纹的超声波数值模拟[J]. 武汉理工大学学报,2006,28(10):53—54.
- [6] 刘晶波,谷音. 一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元[J]. 岩土工程学报,2006,28(9):1070—1075.

(上接第 566 页)

- [3] 艾春安,李剑. Lamb 波频率方程的数值解法[J]. NDT 无损检测,2005(5):294—296.
- [4] 张海燕,吕东辉,刘镇清. 二维傅里叶变换在 Lamb 波模式识别研究中的应用[J]. 振动、测试与诊断,2004,24(1):23—26.
- [5] Moler Cleve B. MATLAB 数值计算[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [6] Peng H K, Meng G, Li F C. Modeling of wave propagation in plate structures using three-dimensional spec-

- tral element method for damage detection[J]. Journal of Sound and Vibration,2009,320(4/5):942—954.
- [7] Staszewski W J. Silence of the lamb-wave[G]. Aerospace Testing International,2009:76—77.
- [8] Hou Z L, Assouar B A. Modeling of Lamb wave propagation in plate with two-dimensional phononic crystal layer coated on uniform substrate using plane-wave-expansion method[J]. Physics Letters A,2008(1):2091—2097.

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告