

# 识别薄板中兰姆波和体波的阶梯板方法

李 阳<sup>1</sup>, 韩晓辉<sup>2</sup>, 周庆祥<sup>2</sup>, 李广凯<sup>2</sup>, 蔡桂喜<sup>1</sup>

(1. 中国科学院金属研究所, 辽宁沈阳 110016; 2. 中车青岛四方车辆股份公司, 山东青岛 266000)

**摘要:** 斜探头在某些频率下激励出的兰姆波, 其群速度与体波的传播速度相近, 所以通过判断传播速度不易区分出兰姆波和体波。通过数值模拟和实验, 分别研究了激励频率为 2 MHz 的纵波和  $S_0$  模态兰姆波在阶梯板上的反射特性, 发现: 在阶梯板上入射  $S_0$  模态兰姆波时, 有反射回波; 而入射纵波时, 无反射回波。基于这种反射特性的差别, 提出了一种利用阶梯板区别薄板中兰姆波和体波的方法, 该方法可用于确认探头的激励特性。

**关键词:** 兰姆波; 体波; 反射; 阶梯板; 有限元

中图分类号: B845.2 Q62

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2016)-05-0398-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2016.05.002

## A method of using step plates to distinguish Lamb waves from bulk waves in thin plates

LI Yang<sup>1</sup>, HAN Xiao-hui<sup>2</sup>, ZHOU Qing-xiang<sup>2</sup>, LI Guang-kai<sup>2</sup>, CAI Gui-xi<sup>1</sup>

(1. Non-Destructive Testing Group, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China;  
2. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266000, Shandong, China)

**Abstract:** Lamb wave in thin plate is generally excited by using an angle beam transducer. At some frequencies, the group velocity of Lamb wave excited by an angle beam transducer is nearly same as the velocity of bulk wave, so it is not easy to distinguish Lamb wave from bulk wave through the propagation velocity. This paper respectively researches the reflection characteristics of both the Lamb wave  $S_0$  mode and the longitudinal wave in step plates by finite element method (FEM) and experiments, when the incident frequency is 2 MHz. Moreover, it has been found that Lamb waves  $S_0$  mode are reflected from the step plates and that bulk waves are not. Based on this reflection characteristic, a method of using step plates to distinguish Lamb waves from bulk waves is presented.

**Key words:** Lamb wave; bulk wave; reflection; step plate; finite element method

## 0 引 言

板状结构在车辆、航空航天装置、船舱、化工储罐等结构中使用广泛。而这些关键设备随着服役时间的延长, 会出现一些腐蚀、裂纹等缺陷。为了能够安全运行这些大型设备, 需对其进行定期的无损检测<sup>[1-2]</sup>。

兰姆波检测作为一种快速的无损检测方法, 在薄板探伤中有很重要的地位。兰姆波相对于超声体波探伤主要有两点优势: 第一, 兰姆波在薄板中最远可以传播几十米的距离, 探头在一点激励下就可以检测一条线, 而超声体波的探伤范围只是探头下方局部区域, 所以兰姆波的检测效率高; 第二, 兰姆波在薄板的整个厚度方向上都存在振动, 所以兰

姆波能够检测整个壁厚中的缺陷<sup>[3]</sup>。随着兰姆波探伤的广泛应用, 许多国家已经将其写入了一系列的探伤标准中, 如美国宇航材料规范 AMS-2632 《0.5 英寸以下厚度薄板材料的超声检验》<sup>[4]</sup>、我国军用标准 GJB-3384-1998 《金属薄板兰姆波检验方法》<sup>[5]</sup> 以及我国冶金工业部提出的 GB/T 2108-80 《薄钢板兰姆波探伤方法》<sup>[6]</sup> 等。

兰姆波自身存在一些检测缺点, 如兰姆波在一定的频厚积下, 至少存在两个以上的模态。于是兰姆波与缺陷反射后, 发生模态转换导致反射回波复杂难辨。另外, 兰姆波存在一定程度的频散, 即随着传播距离的增加, 兰姆波的波包和能量发散, 导致传播距离减小。因此, 在薄板探伤中激励出的兰姆波应满足以下条件<sup>[3]</sup>: 第一, 激励出的兰姆波模态应该尽量少, 若多个模态存在, 兰姆波与缺陷反射后形成的多模态将使得信号不易解释; 第二, 兰姆波的频散应尽可能小, 这样可降低波包发散使传播距离更远且信号清晰易辨; 第三, 激励频率不能

收稿日期: 2015-12-06; 修回日期: 2016-03-07

作者简介: 李阳(1988-), 男, 河南焦作人, 博士研究生, 研究方向为超声导波。

通讯作者: 蔡桂喜, E-mail: guixicai@imr.ac.cn

过低，提高激励频率可提高缺陷的检测灵敏度。

在薄板中激励兰姆波的方法有很多种，其中最简单和常用的方式为斜探头激励。斜探头激励出的体波在板的上下边界来回反射并伴随着模态转换，传播一定距离后形成兰姆波。斜探头的入射角可通过 Snell 定律和频散曲线计算得到，但制成的斜探头并不一定都能在板中激励出相应的兰姆波，有时在板中传播的波可能是体波。由于体波不具备兰姆波在壁厚方向上完全检测的特点，因此会造成缺陷的漏检。现有标准中判断板中波的属性的方法通常为：测量波在薄板中的传播速度，并与频散曲线进行对比，以此判断波的属性。但是，当兰姆波的群速度和体波的传播速度相近时，就不易区别出兰姆波和体波，容易导致误判。所以，需要一种简单易行的方法来区分两者。

本文基于兰姆波在阶梯板上有反射而超声体波没有反射的差异，提出了一种利用阶梯板来区别薄板中兰姆波和体波的方法。以 2 mm 厚 304 不锈钢板中的  $S_0$  模态和超声纵波为例，通过有限元方法和实验分别研究了激励频率为 2 MHz 的  $S_0$  模态和体波在阶梯板上的反射特性。然后，利用阶梯板判断激励频率为 4 MHz、入射角为  $48^\circ$  的斜探头在 2 mm 厚的薄板中激励出波的属性。

### 1 频散曲线

频散曲线反映了不同模态的相速度(群速度)和激励频率的关系，其推导过程见 Viktorov 的专著<sup>[7]</sup>。由于频散方程是超越方程，因此只能通过数值方法进行求解，数值求解过程采用牛顿迭代法。计算得到的 2 mm 厚 304 不锈钢板中的频散曲线如图 1 所示。其中 304 不锈钢的材料参数如下：密度  $\rho=8000 \text{ kg/m}^3$ ，杨氏模量  $E=193 \text{ GPa}$ ，泊松比  $\nu=0.29$ 。

从图 1 中可以看出，当频厚积(频率和板厚的乘积)为  $4 \text{ MHz}\cdot\text{mm}$  时，存在对称模态  $S_0$ 、 $S_1$  和反对称模态  $A_0$ 、 $A_1$ ，其相速度和群速度的大小见表 1。

在有限元模型中激励出单一模态的兰姆波，需要得到兰姆波在壁厚方向上的位移分布。兰姆波的波结构显示了壁厚方向上每点的面内位移和离面位移，波结构的计算方法同样见 Viktorov 的专著<sup>[7]</sup>。在 2 mm 厚的 304 不锈钢板中，激励频率为 2 MHz 的  $S_0$  模态的波结构如图 2 所示。将加汉宁窗的 5 周正弦信号乘以离面位移，施加在有限元模型左端的所有节点上，以激励出单一  $S_0$  模态兰姆波<sup>[8]</sup>。

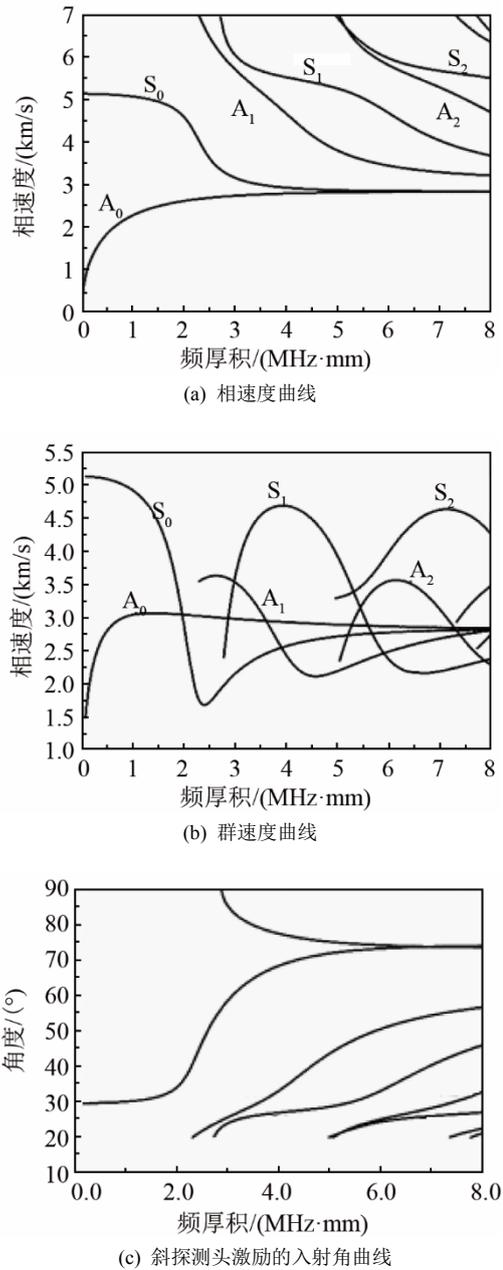


图 1 2 mm 厚的 304 不锈钢板中兰姆波的频散曲线  
Fig. 1 Dispersion curves of Lamb waves in the 304 stainless steel plate of 2 mm thickness

表 1 激励频率为 2 MHz 时，2 mm 厚 304 不锈钢板中，兰姆波模态的相速度和群速度

Table 1 Phase velocity and group velocity of Lamb wave modes in the 304 stainless steel plate of 2 mm thickness at the exciting frequency of 2 MHz

模态	$S_0$	$S_1$	$A_0$	$A_1$
相速度/(m/s)	2920	5522	2784	4666
群速度/(m/s)	2572	4686	2932	2431

实验中，通常采用斜探头来激励兰姆波<sup>[9]</sup>：探头的激励频率为 2 MHz；探头压电晶片尺寸为  $14 \text{ mm}\times 14 \text{ mm}$ ；探头的入射角  $\theta$  通过 Snell 定律计

算<sup>[10]</sup>，计算公式为：

$$\sin\theta/2730=1/c_p \tag{1}$$

式中，2730 m/s 为有机玻璃中的声速； $c_p$  为  $S_0$  模式的相速度 2920 m/s。于是，计算得到的探头入射角  $\theta$  为  $69^\circ$ 。

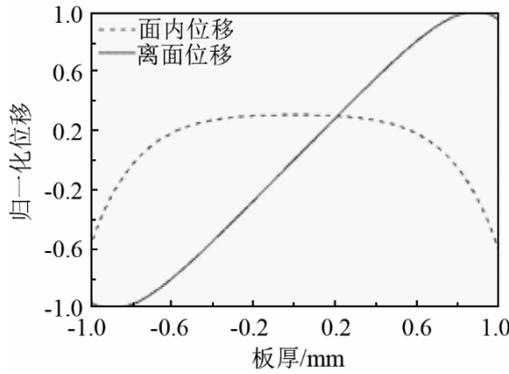


图2 激励频率为 2 MHz 时，2 mm 厚的 304 不锈钢板中  $S_0$  模式兰姆波的波结构  
 Fig.2 Wavestructures of Lamb wave mode  $S_0$  in the 304 stainless steel of 2 mm thickness at the exciting frequency of 2 MHz, where the solid line means off-plane displacements and the dash line means in-plane displacements

## 2 有限元模拟

### 2.1 有限元模型

模拟所用的有限元软件为 ANSYS。304 不锈钢中的纵波声速和横波声速<sup>[10]</sup>可以通过公式(2)得到。

$$c_l = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho} = 5632 \text{ m/s} \tag{2}$$

$$c_s = \sqrt{\mu / \rho} = 3058 \text{ m/s}$$

其中， $\lambda = \nu E / [(1 + \nu)(1 - 2\nu)]$  和  $\mu = E / 2(1 + \nu)$  都为拉梅系数， $E$  为杨氏模量， $\nu$  为泊松比。模拟所用的单元为二维线性 8 节点单元，单元尺寸为  $0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ ，且满足  $L_{\max} < \lambda_{\min} / 10$  的要求，其中  $L_{\max}$  为最大单元尺寸， $\lambda_{\min}$  为模型中的最小波长<sup>[11]</sup>。计算使用的时间步长为  $1.67 \times 10^{-8} \text{ s}$ ，且满足  $\Delta t < 0.7L / c_{\max}$  的要求，其中  $L$  为最小的单元尺寸， $c_{\max}$  为模型中的最快声速(通常为纵波声速)。假设模拟过程中无衰减，定义模型边界为自由边界。设定阶梯板的左侧厚 2 mm、长 100 mm，右侧厚 3 mm、长 100 mm，左右两侧同底，如图 3 所示。

### 2.2 有限元结果

将加载汉宁窗的中心频率为 2 MHz 的 5 周正弦信号乘以相同的面内位移，施加在阶梯板左端的所有节点上，以激励中心频率为 2 MHz 的纵波<sup>[12]</sup>。纵波在经过阶梯板的某时刻波形如图 4 所示。从图 4 中可知：纵波在经过阶梯处时，无反射回波，全部

透射。其中，信号 A 为透过阶梯板的纵波，信号 B 为板中激励出的兰姆波，由于兰姆波的传播速度比纵波速度慢，且在纵波后，在此不予考虑。

将加载汉宁窗的中心频率为 2 MHz 的 5 周正弦信号乘以  $S_0$  模式的离面位移，加载到阶梯板的左端以激励  $S_0$  模式。 $S_0$  模式在经过阶梯板的某时刻波形如图 5 所示。从图 5 中可知：兰姆波在阶梯处不仅有透射波 A，而且还存在反射波 B。

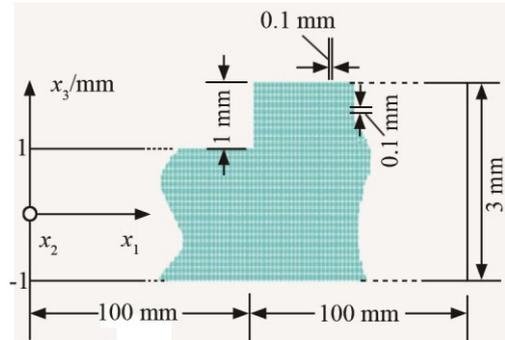


图3 阶梯板的有限元模型， $x_1$  代表面内方向， $x_3$  代表离面方向， $x_2$  与  $x_1$ 、 $x_3$  平面垂直。  
 Fig.3 Finite element model of a step plate, where  $x_1$  means in-plane direction,  $x_3$  means out-plane direction and  $x_2$  is perpendicular to the plane of  $x_1$  and  $x_3$ .

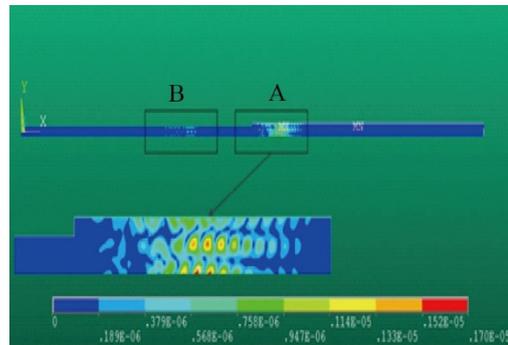


图4 纵波在阶梯板上传播的某时刻截图  
 Fig.4 Screenshot of longitudinal wave propagation in a step plate

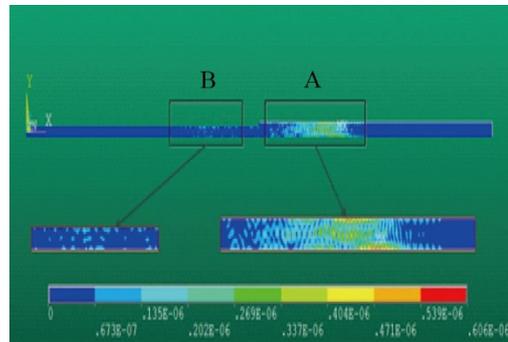


图5  $S_0$  模式兰姆波在阶梯板上传播的某时刻截图  
 Fig.5 Screenshot of Lamb wave mode  $S_0$  propagation in a step plate

通过以上有限元模拟结果可知：纵波在阶梯板上无反射回波，而兰姆波有反射回波，这种差别可

用图 6 进行表示。由于纵波在经过阶梯处时无反射面存在,所以纵波在阶梯板上无反射回波,如图 6(a)所示。而兰姆波在阶梯处,由于板厚变化会产生模态转变<sup>[13-14]</sup>,为了平衡阶梯面两侧的应力 and 位移而产生反射回波<sup>[15]</sup>,如图 6(b)所示。

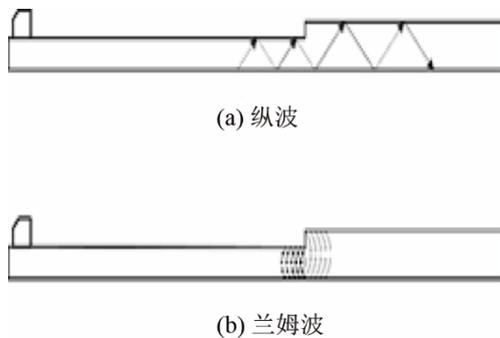


图 6 纵波和兰姆波在阶梯板上传播示意图  
Fig.6 Diagram of longitudinal wave and Lamb wave propagation in the step plate

### 3 实验

选择一块 3 mm 厚、100 mm 长、50 mm 宽的不锈钢板来制作阶梯板,要求板的长度和宽度足够,并且平整度较高。利用线切割设备,将板一端切薄至 65 mm 处且厚度为 2 mm,形成阶梯面。阶梯长度应足够,可使兰姆波在阶梯板处的反射回波与探头始波分离。使用 Olympus 的脉冲激励接收仪进行信号激励和接收,信号的显示和存储采用 Tektronix 数字示波器。将 2 MHz 的 K1 探头和入射角为 69° 的斜探头依次连接在脉冲激励接收仪上,进行信号激励和接收。两个探头在阶梯板上采集到的信号如图 7 所示。从图 7(a)中可以看出:在阶梯面上无反射波,只存在端头回波。由此可判断 K1 斜探头在 2 mm 厚的薄板上激励出的体波传播一段距离后未形成兰姆波。从图 7(b)中可看出:在阶梯板上不仅出现了端头回波,而且还存在阶梯面的反射回波。由此可判断入射角为 69° 的斜探头在 2 mm 厚的薄板上激励出的波传播一段距离后形成了 S<sub>0</sub> 模态兰姆波。

### 4 讨论

通过以上的有限元和实验结果知:用阶梯板能够很好地辨别出薄板中的体波和兰姆波。为了更好地说明该方法的可行性,我们在 2 mm 厚的 304 不锈钢板中激励 4 MHz 的 S<sub>1</sub> 模态兰姆波。从频散曲

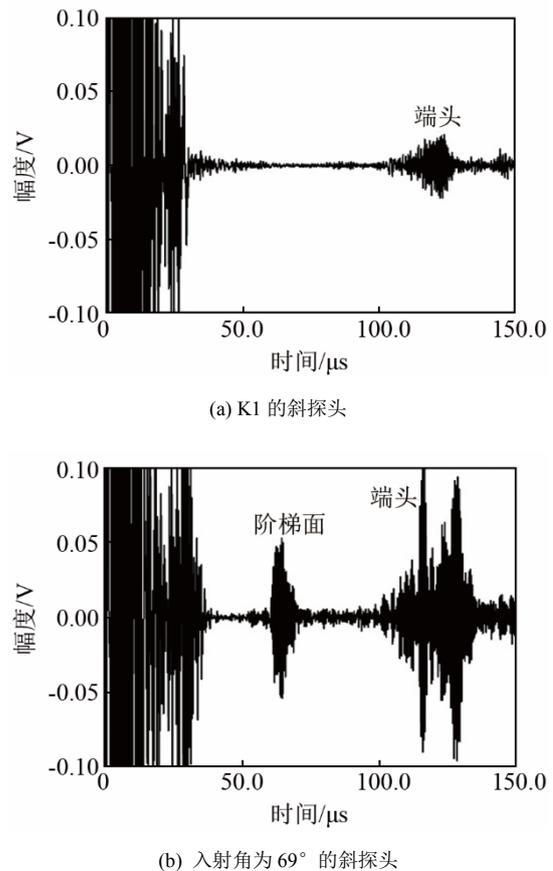


图 7 激励频率为 2MHz, (a) K1 的斜探头和 (b) 入射角为 69° 的斜探头分别在阶梯板上接收到的信号  
Fig.7 Receiving signals: (a), of the angle beam transducer with an incident angle 69° and (b), of the K1 angle beam transducer with arefracting angle 45° on the step plate at the exciting frequency of 2 MHz

线上知: S<sub>1</sub> 模态的相速度为 3676 m/s, 群速度为 2379 m/s。通过 Snell 定律求得斜探头的入射角为 48°。假设该 48° 的斜探头在 2 mm 厚的不锈钢板中激励出的波在传播一定距离后,不是兰姆波而是横波,那么根据 Snell 定理可求出横波的折射角为 56°。根据横波在板中传播的几何声路,求出横波在板中的传播速度为 2535 m/s。对比 S<sub>1</sub> 模态的群速度和横波的传播速度,发现两者相差不大。

将激励频率为 4 MHz 的 48° 斜探头连接在探伤仪上,将斜探头声束垂直于 2 mm 厚钢板的端头激励超声波,并接收端头的反射回波。当探头移动 47 mm 时,反射信号的峰值在探伤仪上变化两格,两格对应的时间间隔为 39 μs,则计算得到波的传播速度为 2410 m/s。由于计算得到的速度与 S<sub>1</sub> 模态的群速度相差不大,所以有可能将此波认定为 S<sub>1</sub> 模态兰姆波。但是,将探头放置在阶梯板上时,发现探头在阶梯处无反射回波,这说明板中的波不是兰姆波而是横波。

## 5 结 论

通过有限元模拟纵波和兰姆波在阶梯板上的反射特性知：兰姆波在阶梯板上有反射，而体波在阶梯板上无反射。通过实验验证了有限元模拟结果。在实际探伤中，可利用体波和兰姆波在阶梯板上的反射特性差别判断板中波的属性，从而避免将体波误判为兰姆波，造成缺陷的漏检。

### 参 考 文 献

- [1] 高广健, 邓明晰. 用于储罐底板缺陷检测的超声兰姆波模式研究[J]. 应用声学, 2012, 31(1): 42-48.  
GAO Guangjian, DENG Mingxi. Examination of ultrasonic Lamb waves for detection of flaws in the bottom plate of oil tank[J]. Applied Acoustics, 2012, 31(1): 42-48.
- [2] 何存富, 怀保玲, 杜婷, 等. 基于兰姆波的大型罐体液位定点检测方法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(6): 99-104.  
HE Cunfu, HUAI Baoling, DU Ting, et al. Method monitoring fixed liquid level of large tanks using lamb waves[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(6): 99-104.
- [3] Alleyne D N, Cawley P. Optimization of Lamb wave inspection techniques[J]. Ndt & E International, 1992, 25(1): 11-22.
- [4] 美国汽车工程师协会. SAE AMS 2632-1995 0.5 英寸以下厚度薄板材料的超声检验[S]. 俄亥俄州: 美国国家标准化组织, 1995.
- [5] 中国航空工业总公司. GJB-3384-1998 金属薄板兰姆波检验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [6] 中华人民共和国冶金工业部. GB/T 2108-80 薄钢板兰姆波探伤方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1981.
- [7] Viktorov I A. Rayleigh and Lamb Waves[M]. New York: Plenum Press, 1967.
- [8] Alleyne D, Cawley P. A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagation multimode signals[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1991, 89(3): 1159-1168.
- [9] Rokhlin S I, Mayhan R J, Adler L. On-line ultrasonic Lamb wave monitoring of spot welds[J]. Materials Evaluation, 1985, 43(7): 879-883.
- [10] Rose J L. Ultrasonic waves in solid media[M]. Cambridge: Cambridge University, 1999.
- [11] Alleyne D N, Cawley P. The interaction of lamb waves with defects[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 1992, 39(3): 381-397.
- [12] 刘长福, 牛晓光, 李中伟, 等. 基于 ANSYS 的超声纵\_横波传播仿真计算[J]. 无损检测, 2010, 30(6): 15-18.  
LIU Changfu, NIU Xiaoguang, LI Zhongwei, et al. Simulating calculation of propagations of ultrasonic longitudinal/transverse wave based on ANSYS[J]. Nondestructive Testing, 2010, 30(6): 15-18.
- [13] 景永刚, 张海燕, 刘镇清. 板材厚度变化对 Lamb 波透射系数的影响[J]. 声学技术, 2006, 25(1): 26-29.  
JING Yonggang, ZHANG Haiyan, LIU Zhenqing. Influence of plate thickness variation on transmission coefficients of Lamb mode[J]. Technical Acoustics, 2006, 25(1): 26-29.
- [14] 田光春, 刘镇清, 景永刚. 台阶型厚度变化板中导波的研究[J]. 无损检测, 2003, 25(7): 333-336.  
TIAN Guangchun, LIU Zhenqing, JING Yonggang. Study on guided waves in a step plate[J]. Nondestructive Testing, 2003, 25(7): 333-336.
- [15] 凤飞龙, 陈文生. 阶梯板兰姆波散射特征模式展开法研究[J]. 失效分析与预防, 2012, 7(1): 19-24.  
FENG Feilong, CHEN Wensheng. Scattering characteristics of Lamb wave of step plate[J]. Failure Analysis and Prevention, 2012, 7(1): 19-24.