DOI: 10.3901/JME.2019.10.027

基于水平剪切波声弹特性的矩形管轴向应力 检测方法 with 试验研究*

吴英思¹ 刘飞¹ 吴斌² 何存富² 杜文亮¹

(1. 内蒙古农业大学机电工程学院 呼和浩特 010018;

2. 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 北京 100124)

摘要: 矩形管作为一种非典型波导结构, 导波在其中的传播特性较为复杂, 不便于利用其特有的模态进行检测。为实现矩形管结构应力的在役检测, 基于特征频率法计算了水平剪切波 SH_0 模态的声弹特性, 搭建了矩形管轴向应力评估检测系统。针对试验加载条件, 利用有限元法分析受轴向拉伸矩形管的应力分布情况, 以合理布置 SH_0 模态 EMAT 传感器, 并对矩形管在承受不同拉应力条件下的声弹常数进行了试验研究。试验结果表明: 矩形管中 SH_0 模态的试验声弹常数与理论计算结果的比值为 0.592 6, 其声弹效应受材料织构效应影响较弱, 通过应力评估误差结果可发现, SH_0 模态在低应力区域误差较大, 当应力低于 100 MPa 时, 应力偏差普遍在 20 MPa 以上; 而在高应力区域偏差可稳定在 10 MPa 左右, 结果表明基于 SH_0 模态声弹效应可以预估矩形管结构应力是否超载。

关键词: 水平剪切波; 声弹性; 应力检测; 矩形管; 特征频率法

中图分类号: TG156

Horizontal Shear Wave Acoustoelasticity Based Axial Stress Testing of Rectangular Tube and Experimental Research

WU Yingsi¹ LIU Fei¹ WU Bin² HE Cunfu² DU Wenliang¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018;

2. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology,
Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract: Rectangular tube as an atypical waveguide structure, the propagation characteristics of the guided wave in it are more complex, and it is not easy to use its specific mode for detection. In order to realize the in-service detection of the rectangular tube structure stress, the acoustoelastic properties of the SH_0 modal of the horizontal shear wave are calculated based on the characteristic frequency method. The numerical simulation is used to verify acoustoelastic constant and experimental feasibility. According to the experimental loading conditions, the stress distribution of axially drawn rectangular tube is analyzed by using finite element method to reasonably arrange the SH_0 mode EMAT sensor. The experiment on the acoustoelastic constant of rectangular tube subjected to different tensile stress is carried out on a self-made tensile platform. The experimental results show that the ratio of the test acoustoelastic constant to the theoretical calculation result for SH_0 mode in rectangular tube is 0.592 6, and it is weakly affected by the texture effect of material. According to the results of the stress evaluation error, it is found that the SH_0 mode error is larger in the low stress region. When the stress is lower than 100 MPa, stress deviation is generally above 20 MPa, whereas the deviation in the high-stress region can be stabilized at about 10 MPa. The results show that whether the stress of rectangular tube structure is overloaded can be estimated based on the SH_0 mode acoustoelastic effect.

Key words: SH wave; acoustoelasticity; stress measurement; steel rectangular tubing; eigenfrequency method

0 前言

矩形管作为一种典型的波导结构, 被广泛应用

于制作机械零件和工程结构, 以及输送流体的管道等。在其服役期内要受环境等多种突发因素的作用和影响, 不可避免地会产生一些损伤, 从而威胁整个结构的正常使用和安全, 故对矩形管结构进行在役无损检测, 检测其工作状态应力水平与微损缺陷就显得尤为重要。

* 国家自然科学基金资助项目(11662013)。20180529 收到初稿, 20181210 收到修改稿

矩形管可看作是由板条搭接而成的波导结构, 导波在其中的波动特性受边界影响较大。由于导波的多模态及频散特性, 矩形管中的导波模态及 Lamb 波等用于矩形管健康状况检测时, 存在模态混杂明显, 很难分离及识别模态的问题。众所周知 SH_0 模态受板宽边界影响较弱, 无频散特性, 单模态激励较为容易, 且可以分离材料织构对波速的影响等优点, 故选取 SH_0 模态是比较适合检测板条类结构的。

SH 模态导波在无损检测中已被广泛应用, 其不仅用于测试结构存在的微缺陷, 在其他领域均有所应用。如 PREDOI 等^[1]研究了三层板状结构中黏结层厚度变化对 SH 波传播特性的影响, 证实高阶 SH 模态可以用于检测黏结强度。MOUNSIF 等^[2]基于半解析有限元法研究了铝-环氧树脂-铝三层结构中界面粗糙度对 SH 波传播特性的影响, 发现存在声子模并通过试验得到了验证。RYMANTAS 等^[3]基于半解析有限元法计算了矩形截面波导结构中水平剪切波的传播特性, 发现传播的模态数量依赖于宽厚比, 且 SH_0 模态受板宽影响产生一系列传播特性各异 SH 子波。

此外也有部分学者在考虑结构受初始应力状态下 SH 波的传播特性。KAYESTHA 等^[4]研究了有限振幅水平剪切波在预应力半空间层状结构中的传播特性, 发现传播速度随预应力和传播角的改变而变化。ABD-ALLA 等^[5-6]分别理论研究了 SH 波在压电与压磁层状结构中初始应力对波速的影响, 发现了应力对波速的影响趋势。上述学者主要是从理论上分析了预应力对 SH 波传播特性的影响, 采用的是 neo-Hookean 材料, 关于声弹方面的理论并无涉及, 且没有进行相关的试验验证。应用 SH_0 模态的声弹特性进行应力检测可追溯到 20 世纪 80 年代, 如 KING 等^[7]针对体波声弹效应与材料织构效应混杂的问题, 发展了水平剪切波的声弹性理论, 有效地分离了材料织构效应对波速的影响, 并采用 EMAT 传感器对铝板试样的未知残余应力进行了试验验证。MURATA 等^[8]基于 SH 波的声弹特性试验测试了角钢的残余应力, 利用自行研发的 T 型 SH 波专用传感器消除了耦合剂对测试精度的影响, 且可保证测试的波速误差不高于 0.1 m/s。MURAYAMA^[9]针对压电式传感器接触式测量的不足, 基于 SH_0 波和 Lamb 波的声弹效应, 使用 EMAT 传感器对 0.25 mm 厚的试件进行了应力测量, 结果表明 SH_0 波较 Lamb 波更适合应力测量, 且可保证测量精度在 10 MPa 内。

国内学者关于水平剪切波声弹效应的研究工作还鲜见报道, 但在水平剪切波的无损检测应用及在

板条结构中的传播特性已开展了较多的研究, 典型工作如吴斌等^[10]基于水平剪切波的检测方法, 对锅炉水垢的试样进行试验研究, 该方法可有效实现板表面附着物的厚度检测。丁俊才等^[11]理论研究了 SH_0 导波在理想连接界面的三层板状黏接结构中传播时的相位变化情况, 发现相位差的变化主要依赖于入射角度、频率等参数。魏唯一等^[12]理论研究了 SH 波在具有初应力周期压电-压磁层状结构中的传播特性, 数值结果表明初应力大于临界值时, 其对禁带效应及频散关系影响显著。MA 等^[13]研制了适用于窄板无损检测的水平剪切波电磁声传感器, 对并窄板结构中超声导波的传播特性进行了系统的研究。朱新杰等^[14]针对 SH 波直线合成孔径阵列, 运用波幅接收矩阵和渡越时间接收矩阵对接收孔径进行讨论, 通过成像试验验证了理论分析的合理性。

本文在前人的研究基础上, 以矩形管为检测对象, 通过理论数值计算与试验研究 SH_0 模态的声弹效应, 旨在为工程结构超声导波应力检测的试验研究与工程应用提供理论支持。同时, 由于 SH 波的频散特性与杆中扭转模态的是相同的, 分析 SH 波的声弹性也可作为扭转模态声弹效应提供参考。故该研究工作具有非常重要的现实意义。

1 水平剪切波声弹系数计算方法

1.1 声弹性理论

关于体波、表面波与 Lamb 波等的声弹理论已被国内外众多学者进行了详细的讨论^[15-16]。本文的 SH 波声弹理论主要借鉴 GANDHI 等^[17-18]的理论, 分析声弹效应时考虑材料为 Murnaghan 超弹性体, 具有各向异性。对于在各向异性介质中传播的体波, 其波动方程可以表达为

$$\frac{\partial}{\partial a_\beta} \left(\Gamma_{\alpha\beta\gamma\delta} \frac{\partial u_\gamma}{\partial a_\delta} \right) = \rho^0 \frac{\partial^2 u_\alpha}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中 ρ^0 ——无初始应力的密度;

$\Gamma_{\alpha\beta\gamma\delta}$ ——等效弹性常数四阶张量;

a_β , a_δ ——位置方向分量, $\beta, \delta = 1, 2, 3$;

u_γ , u_α ——位移分量, $\gamma, \alpha = 1, 2, 3$;

t ——时间。

SH 波在板类结构中传播的几何模型如图 1 所示。其中 h 是板厚, 波沿 x_1 方向传播, x_2 方向是偏振方向。

考虑到矩形管结构受力状况多是沿轴向或长度方向的单轴应力, 假设板结构沿 x_1 方向预变形是均匀的且是连续的。对于 SH 波在此类板状结构中传

播时, 式(1)中四阶张量 $\Gamma_{\alpha\beta\gamma\delta}$ 可表示为

$$\Gamma_{\alpha\beta\gamma\delta} = C_{ijkl} + C_{jlmn} e_{mn}^i \delta_{ik} + C_{ijml} e_{km}^i + C_{mjkl} e_{im}^i + C_{ijklmn} e_{mn}^i \quad (2)$$

式中 C_{ijkl} ——二阶弹性常数张量;

C_{ijklmn} ——三阶弹性常数张量;

e_{mn}^i ——应变张量;

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

式(1)中位移形式可由式(3)表示

$$u_j = U_j \exp(i(kx_1 - \omega t)) \quad (3)$$

式中, k 为 SH 波传播方向的波数; ω 为圆频率; U_j 为单元节点的位移矢量。

图 1 SH 波的传播示意图

式(2)中的六阶张量 C_{ijklmn} 可以由 Murnaghan 超弹常数 l 、 m 、 n 表示为

$$C_{ijklmn} = 2 \left(l - m + \frac{n}{2} \right) \delta_{ij} \delta_{kl} \delta_{mn} + 2 \left(m - \frac{n}{2} \right) \times \left(\delta_{ij} I_{klmn} + \delta_{kl} I_{mnij} + \delta_{mn} I_{ijkl} \right) + \frac{n}{2} \left(\delta_{ik} I_{jlmn} + \delta_{il} I_{jkmn} + \delta_{jk} I_{ilmn} + \delta_{jl} I_{ikmn} \right) \quad (4)$$

式中, $I_{ijkl} = \frac{(\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk})}{2}$ 。

采用有限元特征频率法计算 SH 波的声弹系数可将式(4)利用有限元法建立单元体应变位移关系矩阵和弹性矩阵, 具体计算方法参见文献[19]。

1.2 特征频率法声弹计算模型及结果

水平剪切波求解模型长度 L 选取 300 mm, 宽度 b 选取矩形管宽面与窄面的平均值 60 mm, 模型边界设置如图 2 所示, 设置预定位移 $U_x=0.3$ mm 以实现预应力的加载, 网格单元采用 0.15 mm 边长的四边形单元。计算所用材料如表 1 所示。

图 2 SH 波频散计算模型与边界条件设置

表 1 碳素结构钢材料参数

参数	值
拉梅常数/ GPa	λ 115
	μ 76.9
三阶弹性常数/ GPa	l -300
	m -620
	n -720
密度/(kg/m ³)	ρ 7 850

选择计算的最大频率为 1 MHz, 可知 SH 波在该频率以下存在的主要模态有 SH_0 , SH_1 , SH_2 和 SH_3 , 但由于 SH_3 模态在该频段内频散较大, 因而只求解 SH_0 , SH_1 和 SH_2 这三种模态在 0 MPa 和 200 MPa 两种拉应力状态下的频散特性, 图 3 为计算得到的群速度频散曲线。为便于分析激励频率对声弹敏感性的影响, 利用速度变化率反应的声弹常数与频率之间的关系来确定较优的激励频率。图 4 为计算得到的群速度声弹性常数频散曲线。

图 3 不同应力水平 SH 波群速度频散曲线

图 4 SH 波声弹性常数频散曲线

从图 4 声弹常数频散曲线可发现, 水平剪切波各模态具有相同的声弹性效应, 与模态类型无关。在 SH_1 与 SH_2 模态截止频率处, 声弹性效应波动较为明显, 原因是在该频段内, 频散较大, 使用有限元法计算得到的相速度与群速度误差较大引起的。水平剪切波的群速度声弹常数为 -0.0054 GPa^{-1} , 该量值与 A_0 模态在较低频散段的量值相接近, 且

该值也接近于横波的声弹常数。由于板中 A_0 模态和 SH_0 波本身即是横波的一种特殊形式, 故在某种情况下水平剪切波也可参照横波的声弹常数进行应力检测。

2 试验方法及结果分析

2.1 试验测试系统

水平剪切波声弹测量系统如图 5 所示。该系统主要包括计算机、函数发生器、RPR-4000 高能脉冲发射器、示波器、 SH_0 波 EMAT 传感器、拉伸装置与矩形管试件等。试验时选取与理论计算材料参数最为接近的 Q235 碳素钢, 以评估不同激励频率的声弹敏感性, 矩形管试件尺寸为 $80\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 1\text{ 000 mm}$, 壁厚为 3.5 mm 。

图 5 试验装置测试系统

2.2 传感器的布置

矩形管在拉伸时需要使用矩形管夹头夹持管的端面。由于该夹头是通过螺栓连接的方式与矩形管相连, 故在螺孔周围会存在一定的应力集中, 因而在布置传感器时应考虑如何避免应力集中区域, 使测试结果更为准确。对所有螺孔受力端面施加一定的拉力, 使矩形管承受 200 MPa 的静力, 通过有限元静力学分析矩形管在此拉伸作用下的应力分布情况, 以指导试验时传感器的合理布置。有限元分析时矩形管材料参数与理论计算和试验时的 Q235 钢材料参数完全一致, 计算结果如图 6 所示。

图 6 结果表明, 矩形管在轴向拉伸作用下, 在管夹头及螺孔周围存在较大的应力集中。为消除应力集中对检测结果的影响, 选择矩形管各个面内的应力分布较为均匀的图示虚线方框区域布置传感器, 此范围内测量的应力值作为矩形管轴向受力的平均水平。为使接收到的时延信号不受端面回波等

的影响, 选择布置传感器的布置距离为 780 mm , 试验时传感器的布置如图 7 所示。

图 6 矩形管轴向拉伸应力分布云图

窄面布置

宽面布置

图 7 传感器布置图

2.3 检测方法

选择 310 kHz 的 EMAT 传感器以激励 SH_0 模态导波, 采用 10 个周期经汉宁窗调制的正弦信号作为激励信号。为使采样信号具有足够的精度, 选择采样率 2.5 G , 平均数 256 次。由于接收的直达波具有较高的信噪比, 且不受回波相位变化的影响, 波形包络受端面回波等杂波的影响较小, 故较为适用于时延计算。

为使计算得到的结果具有足够的精度, 需要准确评估由应力引起的时延值^[20]。相关研究表明, 采用互相关函数法时延值误差最小^[21]。互相关系数函数计算如式(5)所示。为了预防信号自身幅值对互相关函数值计算的影响, 将互相关函数作归一化处理, 并引入量纲一函数 $\rho_{xy}(\tau)$, 对其进行离散化处理, 得到离散后的互相关系数函数如式(6)所示。通过计算式(6)的最大值, 即可得到原始信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 之间的时间延迟。

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^{n=N-1} [x(t)y(t)] \quad (5)$$

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{1}{\sqrt{\left[n \sum_{t=1}^{t=n} x^2(t) - \sum_{t=1}^{t=n} x(t)^2 \right]}} \cdot \frac{n \sum_{t=1}^{t=n} x(t)y(t) - \left(\sum_{t=1}^{t=n} x(t) \right) \left(\sum_{t=1}^{t=n} y(t) \right)}{\sqrt{\left[n \sum_{t=1}^{t=n} y^2(t) - \sum_{t=1}^{t=n} y(t)^2 \right]}} \quad (6)$$

2.4 试验结果及分析

试验时,矩形管拉力从0加载到8 t后再卸载到0 t,每加载或卸载0.4 t采集一次数据,对应最大载荷为126.3 MPa (55% UTS)。以无加载力时获取到的信号作为初始信号,其他采集点的时延信号分别与初始信号进行互相关运算,图8为互相关计算得到的窄面与宽面对应力点的时延结果。

图8 SH₀模态声弹时延结果

从图8时延结果不难发现,SH₀模态相比纵向模态,总的时延结果趋势分散性较大。卸载具有较高的线性度,而加载的线性度稍差一些。产生该现象的原因主要是由于加载时管夹头与矩形管试件存在一定的间隙,试件初始受力并不均匀;而在卸载时由于拉力的充分作用,应力相对较为均匀。从结果可知,加卸载宽窄面各自的线性拟合斜率都具有较好的一致性,表明时延结果的准确较高,可用其计算矩形管内SH₀模态的声弹常数。根据上述得到

的结果,以拟合斜率的均值计算声弹常数。

试验计算得到的声弹常数约为 -0.0032 GPa^{-1} ,试验声弹常数与理论声弹常数的比值为0.5926,该比值与纵向L(0,1)模态二者比值0.6125较为接近^[19]。作者通过理论计算导波各个模态在不同频率点的声弹常数与试验声弹常数对比,发现理论计算结果与试验结果的比值均在0.6附近,表明可以通过该比值修正理论声弹常数指导工程实测以评估应力的大小。此外,SH₀模态声弹效应相较纵向模态受材料织构效应影响较弱,主要是由于SH₀模态传播的偏振方向与应力方向是垂直的,而纵向模态应力方向与偏振方向是一致的;在拉伸时材料内部的晶格点阵间距变化主要是沿应力方向,故造成纵向模态受材料织构效应较为明显,而SH₀模态受影响较小。

采用试验计算得到的声弹常数评估每个应力测试点的误差,结果如图9所示。从图9的应力评估误差结果可发现,SH₀模态在低应力区域误差仍较大,这与纵向模态的现象是一致的。在应力低于100 MPa区域,应力偏差普遍在20 MPa以上,个别应力点的偏差甚至达到40 MPa,与应力实际值接近。而在高应力区域偏差大多在10 MPa左右,故SH₀模态较为适合检测应力是否超载。

图9 不同应力声弹评估误差

3 结论

提出一种基于水平剪切波声弹特性检测矩形管轴向应力的方法,采用有限元特征频率法计算得到了水平剪切波的声弹系数。为验证该方法的可行性,搭建了矩形管轴向应力评估检测系统,从试验角度分析水平剪切波声弹技术应力检测的可行性。通过试验研究矩形管中水平剪切波的声弹特性,结合理论数值计算得到的结果,得到如下结论。

(1) 水平剪切波各个模态的声弹性效应是相同的, 与模态类型无关, 其相速度声弹常数与群速度声弹常数的量值均完全一致, 该值接近于横波的声弹常数。

(2) SH_0 模态的试验声弹常数与理论计算结果的比值为 0.592 6, 可以通过该比值修正理论声弹常数指导实测以评估应力的大小。

(3) SH_0 模态在低应力区域误差较大, 在高应力区域误差较小, 表明 SH_0 模态较为适合检测应力是否超载, 而不适合检测结构预应力是否缺失。

综上所述, 基于水平剪切波声弹特性可有效用于板条类结构应力检测评估领域。但鉴于板条的宽度对水平剪切波的传播特性有一定的影响, 准确评估应力需要考虑结构宽度。

参 考 文 献

- [1] PREDOI M V, MOUNSIF E C E K, LEDUC D, et al. Use of shear horizontal waves to distinguish adhesive thickness variation from reduction in bonding strength[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2015, 138(2): 1206-1213.
- [2] MOUNSIF E C E K, LEDUC D, POTEI C, et al. Effects of the interface roughness in metal-adhesive-metal structure on the propagation of shear horizontal waves[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 141(6): 4591-4599.
- [3] RYMANTAS K, EGIDIJUS Ž, LIUDAS M, et al. Propagation of ultrasonic shear horizontal waves in rectangular waveguides[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2016, 16(8): 1-18.
- [4] KAYESTHA P, FERREIRA E R, WIJEYEWICKREMA A C. Finite-amplitude shear horizontal waves propagating in a pre-stressed layer between two half-spaces[J]. International Journal of Solids and Structures, 2013, 50(22-23): 3586-3596.
- [5] ABD-ALLA A E N N, OTHMAN M, HASBULLAH N, et al. Shear horizontal waves in composite materials: Behavior under rotation and initial stress[J]. Mathematics and Mechanics of Solids, 2018, 23(2): 42-53.
- [6] ZHAO X, QIAN ZH, ZHANG S, et al. Effect of initial stress on propagation behaviors of shear horizontal waves in piezoelectric/piezomagnetic layered cylinders[J]. Ultrasonics, 2015, 63(2015): 47-53.
- [7] KING R B, FORTUNKO C M. Determination of in plane residual stress states in plates using horizontally polarized shear waves [J]. Journal of Applied Physics, 1983, 54 (6): 3027-3035.
- [8] MURATA Y, HASHIMOTO Y, IKESHITA M, et al. Application of an acoustoelastic stress measurement system using grazing sh-wave to angle steel construction[J]. Journal of JSEM, 2012, 12(Suppl.): 188-193.
- [9] MURAYAMA R. Non-Contact Stress Measurement during tensile testing using an Emat for SH_0 -plate wave and lamb wave [J]. Journal of Sensor Technology, 2011, 1 (3): 65-70.
- [10] 吴斌, 李杨, 郑阳, 等. 水平剪切波在板表面附着物厚度检测中的应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(18): 78-84.
WU Bin, LI Yang, ZHENG Yang, et al. Thickness measurement of surface attachment on plate with SH wave [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(18): 78-84.
- [11] 丁俊才, 吴斌, 何存富. SH_0 导波在粘接结构中传播时的相位变化[J]. 力学学报, 2017, 49(1): 202-211.
DING Juncai, WU Bin, HE Cunfu. The phase shift of SH_0 guided wave propagating in bonding structure[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 49(1): 202-211.
- [12] 魏唯一, 刘金喜, 方岱宁. 初应力对周期压电-压磁层状结构中 SH 波传播特性的影响[J]. 工程力学, 2010, 27(11): 184-190.
WEI Weiyi, LIU Jinxi, FANG Daining. Effect of initial stress on the propagation characteristics of SH-waves in periodic piezoelectric-piezomagnetic layered structures. Engineering Mechanics, 2010, 27(11): 184-190.
- [13] MA Qingzeng, JIAO Jingpin, HU Ping, et al. Excitation and detection of shear horizontal waves with electromagnetic acoustic transducers for nondestructive testing of plates[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(02): 428-436.
- [14] 朱新杰, 邓明晰, 都东, 等. 接收孔径对超声导波合成孔径阵列成像检测的影响分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(12): 133-140.
ZHU Xinjie, DENG mingxi, DU Dong, et al. Influence of receiving aperture on imaging and testing of synthetic aperture array for ultrasonic guided waves[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(12): 133-140.
- [15] ABBASI Z, OZEVIN D. Acoustoelastic coefficients in thick steel plates under normal and shear stresses[J]. Experimental Mechanics, 2016, 56 (9) : 1-17.
- [16] 陈天瑞, 项延训, 陈虎, 等. 基于相位-频率测量的材料残余应力超声表征方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(22): 9-14.
CHEN Tianrui, XIANG Yanxun, CHEN Hu, et al. Ultrasonic characterization of residual stress in materials based on phase-frequency relationship [J]. Journal of

- Mechanical Engineering, 2016, 52(22): 9-14.
- [17] GANDHI N, MICHAELS J E, Lee S J. Acoustoelastic Lamb wave propagation in biaxially stressed plates[J]. Journal of the acoustical society of America, 2012, 132(3): 1284-1293.
- [18] PEI N, BOND L J. Higher order acoustoelastic Lamb wave propagation in stressed plates[J]. Journal of the acoustical society of America, 2016, 140(5): 3834-3843.
- [19] 刘飞, 吴斌, 何存富, 等. 杆中导波声弹敏感模态与激励频率的确定方法[J]. 振动与冲击, 2015, 34(1): 24-28/43.
- LIU Fei, WU Bin, HE Cunfu, et al. Determination of surveying mode and excitation frequency for waveguard structure stress measurement by use of acoustoelastic effect of guided waves in bar[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(1): 24-28/43.
- [20] JANUSZ KWAŚNIEWKI, IRENEUSZ DOMINIKN, KRZYSZTOF LALIK, et al. Influence of acoustoelastic coefficient on wave time of flight in stress measurement in piezoelectric self-excited system[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 78: 143-155.
- [21] 刘彬, 董世运, 徐滨士, 等. 互相关函数步长影响超声波评价涂层应力的实验研究[J]. 材料工程, 2011(4): 54-57.
- LIU Bin, DONG Shiyun, XU Binshi, et al. Study on influence of calculating length on evaluation result of stress by surface acoustic wave for coating[J]. Journal of Materials Engineering, 2011(4): 54-57.
-
- 作者简介:** 吴英思, 女, 1982 年出生, 博士研究生。主要研究方向为农业装备性能检测技术。
E-mail: wys@emails.imau.edu.cn
- 刘飞, 男, 1984 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为农业装备性能检测技术、高寒干旱地区农业装备工程与技术。
E-mail: afei2208@imau.edu.cn
- 杜文亮(通信作者), 男, 1958 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为高寒干旱地区农业装备工程与技术。
E-mail: duwl5711@imau.edu.cn