

基于能量密度法的超声导波层状管道 结构损伤检测

李 赢^{1,2,3}, 阎 石^{1,2}, 尉中华⁴

(1. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024; 2. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;
3. 沈阳大学建筑工程学院, 辽宁 沈阳 110044; 4. 沈阳军区空军勘察设计院, 辽宁 沈阳 110015)

摘 要 目的 根据超声导波在管道结构径向能量密度分布, 选择导波最佳模态和频率, 提出一种基于能量密度的超声导波层状管道结构损伤检测方法. 方法 根据能量密度表达式, 采用数值分析软件 Matlab 绘制频厚积-能量密度曲线, 并将能量密度曲线与频散曲线相对比, 验证其有效性. 结果 频厚积范围 $2\ 160 \sim 3\ 240\ \text{kHz} \cdot \text{mm}$, $L(0,6)$ 模态适合作为层状管道结构的损伤检测的超声导波, 其具有清晰的缺陷回波和边界反射回波, 而且能量密度曲线与频散曲线趋势一致. 结论 基于能量密度法能够实现不同目的超声导波层状管道结构损伤检测, 且效果良好.

关键词 层状管道结构; 能量密度曲线; 超声导波; 损伤检测; 频厚积

中图分类号 TU392.3; TP206⁺.1; O426.2

文献标志码 A

Damage Detection for Layered Pipeline Structures Using Ultrasonic Guided Waves Based on Energy Density

LI Ying^{1,2,3}, YAN Shi^{1,2}, WEI Zhonghua⁴

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, 116024; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University, Shenyang, China, 110044; 4. Shenyang Air Force Survey & Design Institute, Shenyang, China, 110015)

Abstract: The purpose of the paper is to analyze the energy density distribution of ultrasonic guided waves in different radial locations in the LPS. According to the purpose, the optimal mode and frequency of guided waves were selected, and a method based on the energy density was proposed for damage detections of LPSs using ultrasonic guided waves. Based on the energy density formula, the FTP energy density curves were drawn by using numerical analysis software Matlab,

收稿日期: 2018-11-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0705602); 辽宁省高等学校基本科研项目(重点)(LJZ2017002); 辽宁省教育厅科学研究项目(LJZ2016029); 辽宁省自然科学基金项目(20180550332); 辽宁省自然科学基金项目(20180550502); 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1802018)

作者简介: 李赢(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事结构健康监测与诊断等方面研究.

and the energy density curves were compared with the dispersion curve to verify their effectiveness. For the FTP range in $2\ 160 \sim 3\ 240\ \text{kHz} \cdot \text{mm}$, the $L(0,6)$ mode is suitable and suggested for damage detections of LPSs. The results show that the defect echo and boundary echo both are clear, and the energy density curves are consistent with the dispersion curves. Based on the proposed energy density method, the damage detection of LPSs using different ultrasonic guided waves can be realized.

Key words: layered pipeline structures (LPSs); energy density curves; ultrasonic guided wave; damage detection; frequency thickness product (FTP)

管道运输具有费用低、效率高、占地少和受气候变化影响小的优点,适用于天然气、石油和热网等各种液体和气体的运输,应用十分广泛。然而,长期使用的管道结构将不可避免地产生损伤导致泄漏,如果检测定位和维修不及时,将会造成重大的资源浪费甚至人身伤亡。因此,对管道结构进行损伤检测十分重要。

超声导波技术的关键是分析超声导波的传播性质,而不同模态和频率的超声导波在结构中传播的性质也不同。为了便于分析接收的缺陷回波和端部回波,选择最佳的导波模态和中心频率对于能否成功进行结构损伤检测具有重要的意义。

以往研究中,多采用解频散方程并绘制频散曲线的方法确定某一模态超声导波的非频散区间,超声导波在非频散区间具有传播速度稳定、模态转换效应较小等优点。1995年,M. J. S. Lowe等^[1-2]用传递矩阵法建立了Lamb波在多层平板中的频散方程,随后又推导出导波在层状圆柱体中的频散方程。J. G. Yu等^[3]开发了改进的勒让德正交多项式展开法,解决了不同材料的相邻两层边界处的应力不连续问题。北京工业大学何存富团队^[4]在管道时间反演聚焦检测方法与系统研制等方面取得了丰硕成果。南卡罗来纳大学Giurgiutiu研究团队^[5-7],利用主动式压电阵列,针对复合材料开展了超声导波结构健康监测等相关工作。同济大学研究组针对超声导波在管道和复合材料中的传播特性做了大量研究^[8]。阎石等^[9]使用有限元软件对超声导波在管道结构传播性质进行了精确模

拟,研究表明超声导波在管道的两端都具有端部反射回波,根据波速、传播距离和调整激励、接收信号位置能够将两侧端部回波分离,并进行了试验验证。

上述方法主要应用频散曲线对结构进行损伤检测,其局限性在于:频散曲线表示超声导波的传播性质,并没有区分超声导波在管道结构不同径向层结构的性质差别。尤其对层状管道结构进行损伤检测时,由于损伤的径向位置不同,对超声导波的敏感性也不同。例如,对于结构层(钢管)处于外层的双层钢塑复合管道结构与结构层处于内层的三层供暖管道结构,不同模态和频率的超声导波对钢管层的缺陷敏感不同。因此,需要在一定非频散区间确定超声导波模态和较为精确的频率范围,保证超声导波能够根据使用目的达到更加精确的使用效果,为工程检测服务。基于此,笔者针对超声导波在层状管道结构的径向能量分布密度进行试验,研究表明基于能量密度法能够实现不同目的超声导波层状管道结构损伤检测,且效果良好。

1 数值分析

在损伤检测中,选择最佳检测超声导波是非常重要的前期工作,直接决定能否进行有效检测。首先,通过分析频散曲线,以频散小且传播速度快为原则,选择具有一定频域的超声导波;由于层状管道结构在径向的材料性质和几何性质的复杂性,以能量密度为参数绘制径向能量密度曲线,确定待测层结构敏感性较高的超声导波频域范围,根据不

同的检测目的及要求,选择超声导波的激发频率和模态,以达到更加精确的检测效果。

1.1 根据频散曲线选择激励信号

研究对象选为广泛用于石油、天然气运输和供暖运输的三层层状管道结构,其材料和几何性质复杂且差异较大,管道参数见表1。频散曲线具有较多的L模态、F模态和T

模态,其中L模态振动形式比较简单,适合作为检测导波,L模态群速度频散曲线如图1所示^[10]。分析频散曲线,只有L(0,6)模态在65~85 kHz频域范围,能够同时满足在频域内频散较小且传播速度最快的需求,为了直观清晰地表述频散曲线的性质,笔者只绘制0~100 kHz频域内L模态超声导波。

表1 三层层状管道结构参数表

Table 1 Material and dimension parameters of three layers in pipeline structure							
结构层编号	结构层材料	内半径/mm	外半径/mm	结构层厚度/mm	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/Pa	泊松比
1	钢管(结构层)	34	38	4	7 850	2.10×10 ¹¹	0.32
2	聚氨酯硬质泡沫塑料(保温层)	38	68	30	80	7.80×10 ⁸	0.25
3	高密度聚乙烯(防腐层)	68	70	2	946	5.52×10 ⁸	0.40

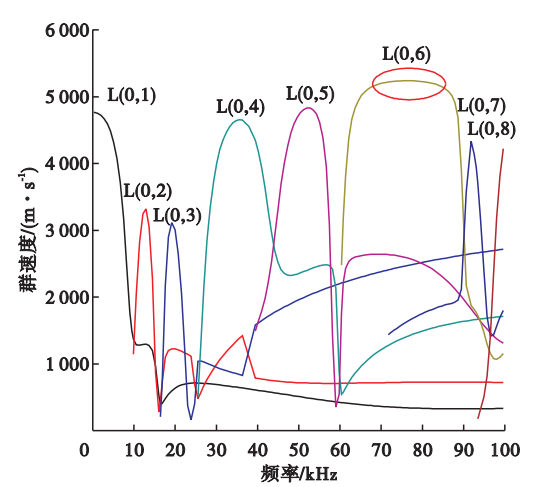


图1 三层层状管道结构的导波群速度频散曲线

Fig.1 Group velocity dispersion curves for a guided wave in a three-layer pipeline

三层层状管道结构的内层是结构层,中间层是保温层,最外层是防腐层。在工程应用中,结构层作为受力层,起到运输物体的关键作用,结构层是否完好直接关系整个结构能否正常使用。而保温层和防腐层则作为附加层存在,如果产生损伤,虽然降低了部分使用功效(保温和防腐),但是对于结构的整体运输没有实质影响。因此,对于三层管道结构进行损伤检测时,关键是检测结构层。

1.2 能量密度方程和曲线

根据频散曲线确定适合作为损伤检测的

超声导波模态和频域后,以能量密度为参数研究其径向对损伤的敏感性,当超声导波在结构某一位置能量密度较高时,说明在这个位置超声导波对于结构损伤的敏感性较高。

根据已有研究成果,能量密度 E 是动能密度 E_k 和应变能量密度 E_v 之和。 E_k 是材料密度与各速度平方的乘积,计算如式(1)所示。 E_v 是与应变分量和应力分量有关的参数,计算如式(2)所示。

$$E_k = \frac{1}{2} \rho \frac{\partial U}{\partial t} \cdot \frac{\partial U}{\partial t}.$$

(1)

式中: U 为包含 r 、 θ 和 z 三个方向的位移矢量; t 为时间。

$$E_v = \frac{1}{2} \left\{ \sigma_{rr} \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \sigma_{\theta\theta} \left(\frac{u_r}{r} \right) + \sigma_{zz} \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right\} + \frac{1}{4} \sigma_{rz} \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right).$$

(2)

式中: σ_{ij} 表示不同方向的应力分量。

$$\sigma_{\theta\theta} = \left(\frac{\lambda + 2\mu}{r} \right) u_r + \lambda \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right).$$

其中: $\lambda = \frac{E\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}$ 为Lame系数; μ

为泊松比。

能量密度计算见式(3)。

$$E = E_k + E_v.$$

(3)

1.3 根据能量密度曲线选择频厚积

在不同频厚积条件下,超声导波在层状

管道结构中传播时,由式(3)可以得到相应

的径向位置-能量密度分布曲线(见图 2).

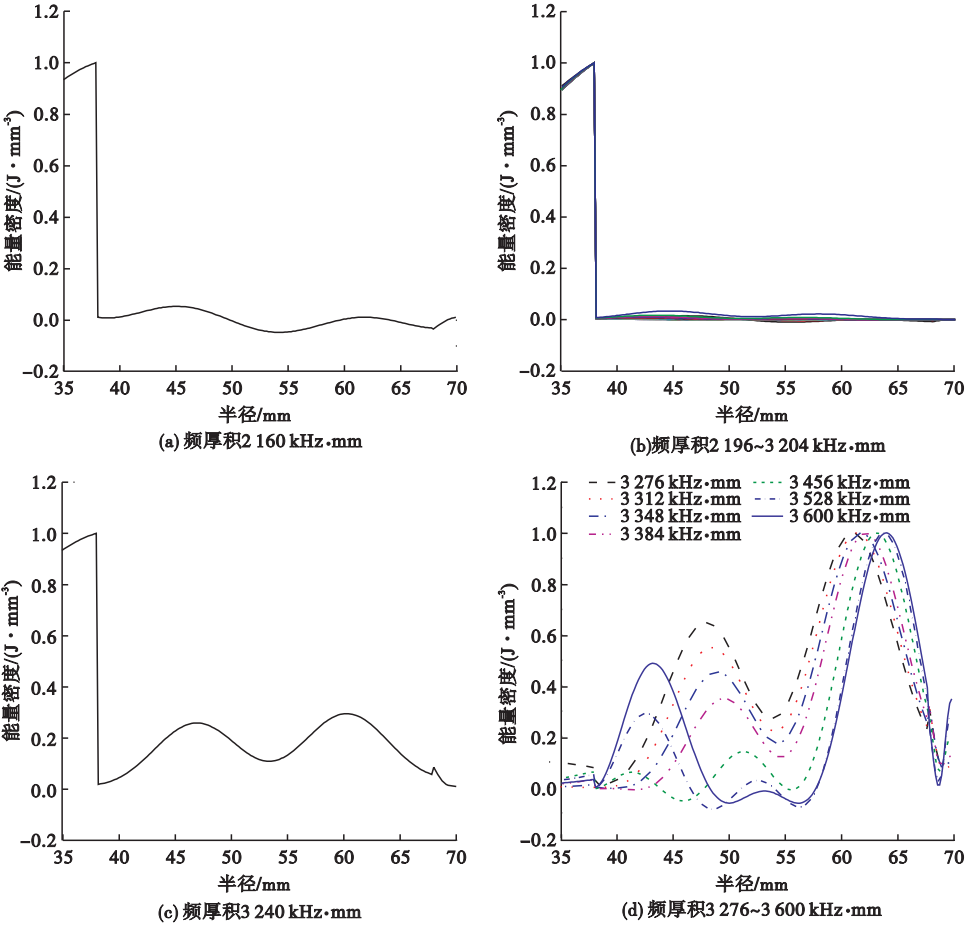


图 2 层状管道结构能量密度曲线

Fig. 2 The energy density curves of layered pipeline structure

从图 2(a)可以看出,当频厚积为 2 160 kHz·mm 时,超声导波在层状管道的结构层能量密度分布最大,且能量密度在结构层和保温层交界面有较大突变,在保温层能量密度明显降低,呈振幅较小的波浪形式,保温层和防腐层的能量密度较小,在交界面处无能量突变,分布均匀;从图 2(b)可以看出,当频厚积范围在 2 196 ~ 3 204 kHz·mm 时,能量密度同样集中在结构层,与图 2(a)相比,主要区别是保温层和防腐层的能量密度径向分布更加均匀,能量密度分布曲线的幅值变化较小;从图 2(c)可以看出,当频厚积继续增大至 3 240 kHz·mm 时,超声导波能量密度分布主要变化集中在保温层和防腐层,由之前分布曲线幅值变化较小转变为幅

值稍大(大于图 2(a))的波浪形式,而且在保温层和防腐层交界面处有微小的能量密度突变尖角;从图 2(d)可以看出,超声导波在层状管道结构的能量密度较图 2(a)、(b)、(c)有了非常明显的变化:在结构层的能量密度明显降低,而在保温层的能量密度增大,分布曲线呈振幅较高的波浪形,因此,结构层和保温层的能量密度突变明显减小,在防腐层的能量密度也有所增大,呈斜率较大的直线形状,保温层和防腐层交界面处能量密度突变增大。

在图 2(a)、(b)、(c)中,频厚积范围在 2 160 ~ 3 240 kHz·mm 时,超声导波的能量密度主要集中在结构层,进行损伤检测时,超声导波对位于结构层的损伤和端部回波较敏感,能够比较精确地检测损伤位置;在这个频

厚积范围,超声导波位于保温层和防腐层的能量密度较小,因此,对于损伤和端部回波的敏感性较小. 同理,图 2(d) 显示的 $3\,276 \sim 3\,600\text{ kHz}\cdot\text{mm}$ 频厚积范围,超声导波在结构层能量密度较小,因此对于结构层损伤和端部回波敏感性较小,虽然超声导波在保温层和防腐层的能量密度较大,但是在不同的径向位置分布并不均匀,因此,超声导波对于保温层和防腐层的损伤检测是否敏感还有待研究.

2 试验验证

2.1 试验装置

建立一个三层管道结构试验系统,对以上研究结果进行试验验证. 试验系统见图 3. 管道结构的材料性质和几何性质见表 1. 激励信号选取 5 峰波 HANNING 窗函数调制的单音频正弦叠加信号^[14-16]. 图 2 表明在频厚积在 $2\,160 \sim 3\,600\text{ kHz}\cdot\text{mm}$ 时,超声导波能量密度较为敏感,且根据表 1 可知管道结构的径向厚度为 36 mm,可以初步确定试验超声导波频域 $60 \sim 100\text{ kHz}$ 对于结构健康监测比较敏感. 而频散曲线(见图 1)的非频散范围是 $65 \sim 85\text{ kHz}$,综合能量密度方法和频散曲线方法,选择较大频率范围即 $60 \sim 100\text{ kHz}$. 试验中的频率以 5 kHz 为步长,从 60 kHz 增加到 100 kHz . 采用压电陶瓷片激励出 $L(0,6)$ 模态导波,压电作动器和接收器用耦合剂粘结在钢管的同一端部^[11-13],具体位置和信号传播方向如图 3 所示.

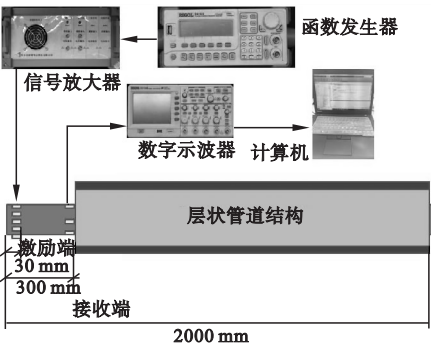


图 3 试验系统示意图

2.2 试验结果与分析

利用图 4 所示试验装置,采用 $L(0,6)$ 模态超声导波对 1 根 2 m 长层状管道结构进行试验.

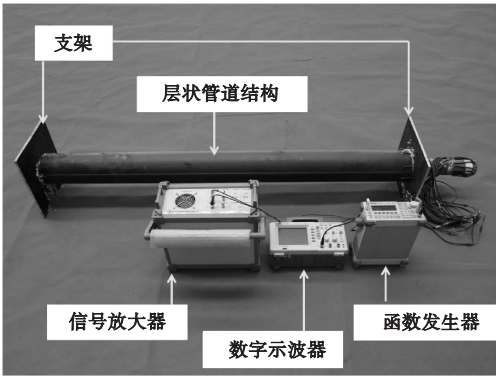


图 4 试验系统图

Fig. 4 The experimental system

图 5 为中心频率 70 kHz 时超声导波在管道结构中传播并经过反射一次,端部回波在接收位置获得的时域图和信号传播机理图形. 由图 5(a) 可知,超声导波在层状管道结构传播,端部反射回波明显. 但是在端部反射回波 0 和端部反射回波 1 之间,有两个连续的明显信号,经过超声导波的传播速度和这两个信号出现的时间判断,在管道结构 1 m 处存在一处损伤,超声导波传播机理见图 5(b). 在损伤反射回波和端部反射回波 1 之间还存在一个信号,这个信号是模态转换波. 同理,以 5 kHz 为步长,相应测得 $60 \sim 100\text{ kHz}$ 的回波信号,根据端部反射回波信号位置计算各信号的实际传播速度以及实际速度与理论速度的相对误差,结果见表 2.

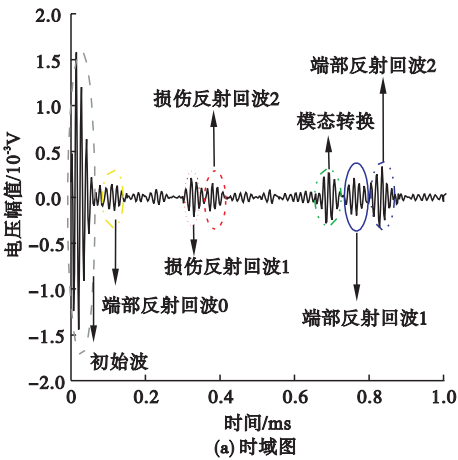


Fig. 3 The schematic of experimental system

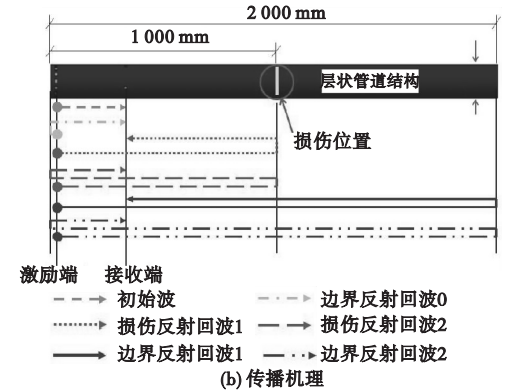


图5 接收信号和传播机理

Fig. 5 Received signal and propagation mechanism

表2 导波传播速度试验值与理论值比较

Table 2 Comparison of guided wave propagation velocities between experimental and theoretical values

激发频率/kHz	试验速度/(m·s ⁻¹)	理论速度/(m·s ⁻¹)	相对误差/%
60	2 571	2 478	3.75
65	5 063	5 021	0.84
70	5 164	5 208	0.84
75	5 117	5 238	0.78
80	5 131	5 225	1.80
85	5 017	5 116	1.90
90	2 010	2 170	7.37
95	1 176	1 296	9.26
100	1 038	1 157	10.29

注:相对误差 = $\frac{| \text{试验速度} - \text{理论速度} |}{\text{理论速度}}$

励频率在 65 ~ 85 kHz 内,速度误差相对较小;在这个范围以外,误差较大,而且与这个频率范围相差越大,计算速度与理论速度的误差越大。在图 1(a)中,L(0,6) 模式 65 ~ 85 kHz 时域频散较小,导波传播速度较稳定,表 2 分析结论与图 1 频散曲线结论相符,证明以能量密度为参数选择激励超声导波对层状管道结构损伤检测的可行性。验证超声导波的传播速度以后,由于层状管道结构径向几何性质复杂,且不同层结构的材料性质差异较大,当管道结构的使用目的不同时,对不同层结构的损伤检测敏感性也不同。当对不同功能层进行检测时,为了确定对不同层结构检测时超声导波敏感性与频厚积的关系,需要进行能量密度的相关试验验证研究。

试验中压电元件耦合在结构层表面,所以

接收到的信号为超声导波在管道结构传播以后在结构层接收到的信号部分。从图 2 可以看出,在保温层和防腐层传播的超声导波能量密度分布不均匀,因此对于保温层和防腐层超声导波的能量密度分布暂不做研究。笔者采用数值分析方法绘制了结构层的频厚积-能量密度曲线(见图 6)。在 60 ~ 100 kHz 频域,以 5 kHz 为步长分别绘制试验时程曲线。提取曲线数据作为结构层的数据分析试验能量密度值,如图 6 左侧纵坐标所示。能量密度计算方法见式(4),表示该时程曲线的能量密度值,获得不同激发频率试验能量密度值见图 6 实心正方形所示^[17]。

$$E_i = \sum_{t=0}^t (x_i(t))^2.$$

(4)

式中: t 表示时程曲线的横坐标值; $x_i(t)$ 表示接收信号在 t 时刻的幅值。

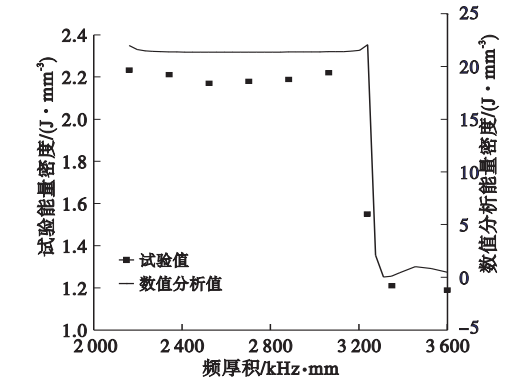


图6 能量密度对比图

Fig. 6 Comparison of energy density

由图 6 可知,由于能量损失等因素导致理论值和试验值的数量级不同,但是二者的能量密度趋势完全相同。说明层状管道结构的几何性质和材料性质复杂,要求检测导波对其结构层的敏感性较高,而采用飞行时间法无法达到这一目的时,采用能量密度为参量作为衡量超声导波在管道结构不同径向位置的敏感性是可行的,也可以为选择最佳模式和频率提供参考依据。

3 结 论

(1) 超声导波在层状管道结构不同层结

构的能量密度分布差别较大,对于笔者研究的层状管道结构,频厚积在 $2\ 160 \sim 3\ 240\ \text{kHz} \cdot \text{mm}$ 时,超声导波在管道结构的能量密度主要分布在结构层,而频厚积在 $3\ 276 \sim 3\ 600\ \text{kHz} \cdot \text{mm}$ 时,能量密度主要分布在保温层,因此可以选择 $2\ 160 \sim 3\ 240\ \text{kHz} \cdot \text{mm}$ 频厚积范围作为对管道结构损伤检测的激励超声导波。

(2) 采用超声导波对层状管道结构进行损伤检测时,分析单一频散曲线来选择超声导波的模态和最佳频率范围具有一定的局限性。以管道结构的使用要求为基础,同时结合径向能量密度曲线能够更加准确的分析,有益于试验结果更加精准。

(3) 超声导波在管道结构径向位置能量密度大,损伤检测的敏感性就大。使用 $L(0,6)$ 模态、频厚积 $2\ 160 \sim 3\ 600\ \text{kHz} \cdot \text{mm}$ 对管道结构进行试验研究,试验结果与数值分析结果吻合,表明该方法可行。

参考文献

- [1] LOWE M J S. Matrix techniques for modeling ultrasonic waves in multilayered-media [J]. IEEE UFFC, 1995, 42(4): 525–542.
- [2] LOWE M J S, ALLEYNE D N, CAWLEY P. Defect detection in pipes using guided waves [J]. Ultrasonics, 1998, 36(1): 147–154.
- [3] YU J G, LEFEBVRE J E, ELMAIMOUNI L. Guided waves in multilayered plates: An improved orthogonal polynomial approach [J]. Acta mechanica solida sinica, 2014, 27(5): 542–550.
- [4] 何存富, 周进节, 吴斌, 等. 管道导波时反聚焦检测系统的设计与实现 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(2): 342–348.
(HE Chunfu, ZHOU Jinjie, WU Bin. Design and implementation of time reversal focusing inspection system for guided wave in pipeline [J]. Chinese journal of scientific instrument, 2012, 33(2): 342–348.)
- [5] GIURGIUTIU V. Tuned Lamb wave excitation and detection with piezoelectric water active sensors for structural health monitoring [J]. Journal of intelligent material systems and structures, 2005, 16(4): 291–305.
- [6] YU L, BOTTAI-SANTION G, GIURGIUTIU V. Shear lag solution for tuning ultrasonic piezoelectric wafer active sensors with applications to Lamb wave array imaging [J]. International journal of engineering science, 2010, 48(10): 848–861.
- [7] KAMAL A M, LIN B, GIURGIUTIU V. Exact analytical of power and energy for multimode lamb waves excited by piezoelectric wafer active sensors [J]. Journal of intelligent material systems and structures, 2014, 25(4): 452–471.
- [8] WANG S, LI Z, LI P, et al. Numerical and experimental evaluation of the receiving performance of meander-line coil EMATs [J]. Non-destructive testing & evaluation, 2014, 29(4): 269–282.
- [9] YAN S, LI Y, ZHANG S, SONG G B, et al. Pipeline damage detection using piezoceramic transducers: numerical analyses with experimental validation [J]. Sensors, 2018, 18, 2106.
- [10] 阎石, 程杨, 王伟, 等. 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): 32–39.
(YAN Shi, CHENG Yang, WANG Wei, et al. Plotting and experimental validating of guided wave dispersion curves for layered pipe structures [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32(1): 32–39.)
- [11] 李赢, 阎石, 刘尚波. 基于超声导波埋地层状管道结构健康监测 [J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(5): 98–103.
(LI Ying, YAN Shi, LIU Shangbo. Structural health monitoring of ultrasonic guided waves in underground layered pipeline [J]. Journal of civil engineering and management, 2018, 35(5): 98–103.)
- [12] 王秋婧. 压电陶瓷驱动器力学模型理论与试验研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011.
(WANG Qiujing. Theoretical and experimental research on mechanical model of piezoelectric ceramic actuators [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2011.)
- [13] 梁丽聘. 压电陶瓷传感器力学模型理论与试验研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011.
(LIANG Liping. Theoretical and experimental research on mechanical model of piezoelectric ceramics sensors [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2011.)
- [14] 阎石, 何彬彬, 赵乃志. 管结构导波频散曲线绘制与试验验证 [J]. 工程力学, 2012, 29(2): 159–163.
(YAN Shi, HE Binbin, ZHAO Naizhi. Experimental validation and plotting guided wave dispersion curve of pipe structure [J]. Engineering mechanics, 2012, 29(2): 159–163.)
- [15] 赵乃志. 利用压电超声导波时间反转法的管道裂纹健康监测研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
(ZHAO Naizhi. Research on pipeline structural crack monitoring by using PZT based ultrasonic guided waves time reversal method [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.)
- [16] YAN S, ZHAO P T, DAI Y, et al. Reinforcement and concrete interface corrosion damage detection using piezoelectric ceramics [C]. Proceedings of the Twenty-seventh International Ocean and Polar Engineering Conference, San Francisco: [s. n.], 2017.
- [17] YAN S, MA H Y, LI P, et al. Development and application of a structural health monitoring system based on wireless smart aggregates [J]. Sensors, 2017, 17: 1641.
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)