

超声导波在层状管道结构传播性质的有限元模拟及验证

李 赢^{1,2}, 阎 石³

(1. 沈阳大学建筑工程学院, 辽宁 沈阳 110044; 2. 沈阳大学辽宁省环境岩土工程重点实验室, 辽宁 沈阳 110044; 3. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 使用有限元分析软件 ABAQUS 建立层状管道结构模型, 克服试验中不能在任意位置设置传感器的弊端, 不破坏外包层的前提下实现对结构层的损伤识别和健康监测. 方法 利用有限元模型能对管道结构任意位置和任意节点的信号进行提取和分析的优势, 分析压电超声导波的轴向传播机理. 然后制定同等条件的试验室模型, 建立试验系统, 验证有限元分析的准确性. 随后采用试验方法定量分析外包层对结构层的影响. 结果 试验结果与有限元模型的端部反射波波波形图相符合, 在非频散区间, 试验信号和有限元模拟信号的群速度误差较小. 结论 有限元模型能够准确地模拟压电超声导波在层状管道结构的传播性质, 量化外包层影响后, 为后续损伤识别研究奠定了基础.

关键词 有限元模拟; 层状管道结构; 压电超声导波; 传播性质; 试验验证

中图分类号 TU392.3; TP206⁺.1; O426.2

文献标志码 A

FEM Analysis and Verification of UGWs Propagation Properties in LPSs

LI Ying^{1,2}, YAN Shi³

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University, Shenyang, China, 110044; 2. The Key Laboratory of Geoenviromental Engineering, Shenyang University, Shenyang, China, 110044; 3. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The purpose of the paper is to achieve damage detection and structural health monitoring (SHM) for structural layer without any damage of outer layer in the layered pipeline structure according to the finite element models (FEMs) using ABAQUS were established, meanwhile the problem that the sensors cannot be tied anywhere on the LPSs were solved. The radial propagation mechanisms of ultrasonic guided waves (UGWs) in the LPSs were researched in the advantage that

收稿日期: 2020-02-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0705602); 辽宁省自然科学基金项目(2020-BS-262, 20180550332, 2019-ZD-0552); 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1802018)

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

the signal can be analyzed and extracted from anywhere in the FEM. Subsequently, the SHM system of experimental model with the equally conditioned FEM was established, and then to be proved the validity. Then, the influence of outer layer on structural layer was analyzed quantitatively by experiment. The reflected waveform in the experiment was agreed with the FEM's, and the relative error of group velocity experimental value was little compared with the FEM data in the non-dispersion. Thus, the FEM can accurately simulate the propagation properties of UGWs in the LPSs, which will benefit damage detection of LPSs in the future research.

Key words: FEM analysis; layered pipeline structure; PZT-based ultrasonic guided waves; propagation behavior; experimental verification

管道结构在物资运输过程中发挥着重要的作用. 根据结构形式分类, 管道结构分为单层管道结构和多层管道结构, 其中多层管道结构用途广泛, 一般由结构层(受力层, 一般是钢骨架)和外包层(一层或以上, 实现保温或防腐作用)组成, 其中结构层是受力层, 是运输介质的主要载体, 在管道结构服役过程中, 结构层由于内外环境的长期影响, 易产生不同类型的损伤. 而由于外包层的阻隔, 不能在结构层任意位置设置检测装置, 导致对结构层的健康监测受到直接影响. 因此, 对层状管道结构尤其是外包层无破坏情况下结构层的损伤识别技术的研究具有重要的现实意义.

F. Moser 等^[1-2]应用有限元软件 ANSYS 和 ABAQUS 模拟了导波在薄圆环结构和黏合复合层板结构的传播, 并结合二维傅里叶变换法和实验进行验证, 确定了导波的传播性质. 阎石^[3]使用有限元方法对于单层管道结构超声导波的传播性质和损伤识别进行了研究, 随后采用试验方法验证了有限元分析中的周向和轴向损伤定位结果^[4]. ZHENG Mingfang^[5]等以空心圆柱体导波的传播理论为基础, 利用 ABAQUS 软件模拟了三维空心圆柱体结构中纵向模态和扭转模拟的导波传播, 并且得出 $L(0,1)$ 模态的导波比 $L(0,2)$ 模态的导波更适合检测管道中的小缺陷.

国内外关于超声导波在层状结构传播性质的研究成果虽然比较丰富^[6-8], 但主要存在两方面问题: 首先激励的压电超声导波是由于压电元件的压电效应产生的, 而在有限

元模拟中, 压电效应被单一的轴向位移代替, 二者区别在于 L 模态压电超声导波的振动方向以轴向为主, 尚具有少量径向振动, 对结构施加轴向位移也是模拟了轴向振动但却忽略了径向振动. 这种方法应用到单层管道结构损伤识别时, 也能得到较理想的分析结果, 但应用到层状管道结构, 由于其几何和结构性质复杂, 采用单一轴向位移的替代方法已经不能满足损伤检测的需求. 其次在有限元分析中为了节约计算成本, 多数将单层管道结构赋予一定厚度的“壳”单元, 而非“实体”单元, 但层状管道结构的厚度是单层管道结构近 10 倍, 应赋予模型“实体”单元才能达到更好的模拟分析效果. 综合以上问题, 笔者在有限元分析中建立压电元件实体模型, 实现了直接模拟压电元件的压电效应, 更加准确和清晰地模拟了超声导波的传播特性. 在此研究成果的基础上, 利用有限元模型的独特优势, 量化分析外包层对结构层的影响, 研究成果对于采取一定措施避免检测导波的能量泄漏, 从而间接提高结构健康监测的准确度具有积极作用.

1 压电元件有限元模型

压电元件模型的长度、宽度、厚度分别为 12 mm、6 mm、1 mm, 压电模型如图 1 所示. 在特征模块中定义 PZT 元件的材料参数和压电特征^[9]. 随后定义极化方向, 由于压电元件各向异性, 将厚度方向(d_{33})定义为极化方向^[10](见图 1).

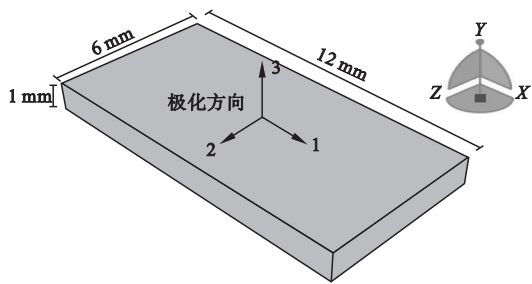


图 1 压电单元模型

Fig. 1 Piezoelectric element model

2 层状管道结构有限元模型

2.1 几何性质和材料性质

分别建立结构层、保温层和防腐层管道结构模型,设置其几何参数和材料参数(见表 1)。

表 1 管道各层参数表

Table 1 Parameters of three layers in pipeline structure

材料	内径/ mm	层厚/ mm	长度/ m	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比
结构层	68	4	2	7850	0.32
保温层	76	30	1.68	80	0.25
防腐层	136	2	1.68	946	0.4

2.2 部件集合和定义分析步

将三个物理层和压电单元部件集合(见图 2)。弯曲模态导波在轴向、周向和径向都有位移分量,传播形式比较复杂,为了接收到形式单一的传感信号,便于与激发导波对比,选择 L 模态导波作为激励信号^[11]。激励器的数量要大于管道结构中能出现导波的最高模数,以达到产生轴对称模态同时抑制弯曲模态导波的作用。在管道结构端部中心对称布置了 16 个 PZT 元件^[12-13],组成一个激励器阵列,位置在距离管道结构端部 20 mm 的位置。4 个中心对称的 PZT 元件组成一个接收器阵列,布置在与激励器距离 300 mm 的位置,实现了初始波和端部反射波信号分离,便于观察波形时间并结合传播距离计算导波的传播速度^[9](见图 2、图 3)。

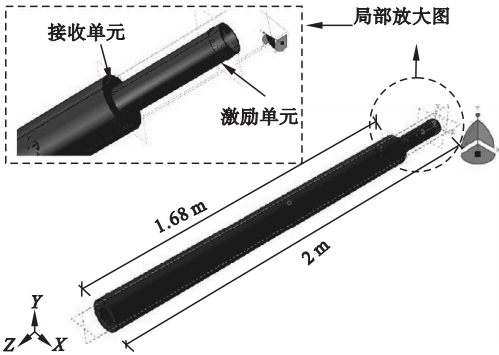


图 2 部件集合

Fig. 2 Assembly

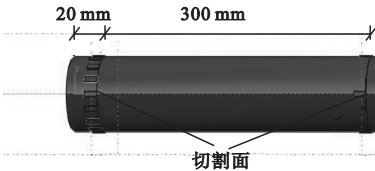


图 3 激发和接收信号位置

Fig. 3 Positions of excitation and reception

在分析步模块,选择动态隐式分析方法。在计算过程中,时间步长的大小直接影响着计算效率和计算精度:如果时间步长较小且网格划分精细,则计算精度高,但也增大了计算量,降低了计算效率。为了兼顾计算效率和计算精度,笔者根据 Newmark 时间增量方案:最大时间步长应小于最高频率波形对应周期的二十分之一^[9],即

$$\Delta t < \frac{1}{20f_{\max}}.$$

(1)

式中: Δt 表示时间步长; f_{\max} 表示导波的最高频率。

根据三层管道结构的群速度频散曲线,激励频率选取 70 kHz,将其代入式(1)可得时间步长 Δt 的最大值为 0.7 μs 。但实际值应小于 0.7 μs ,为了使计算结果更加准确,并结合时间取整,最后确定实际时间增量步长为 0.5 μs 。随后设置输出的场变量为电势和平动位移。

2.3 相互作用

有限元模型的相互作用包括两部分:压电元件与管道结构的作用、三层管道结构不同物理层之间的相互作用。首先将压电元件

(包括作动器和传感器)与结构层以绑定的关系进行耦合,其关键步骤是相互接触的两个表面的主、从表面的设定.在作动器与结构层的绑定关系中,选取与结构层接触的压电元件的内表面为主表面,结构层外表面为从表面;在传感器与结构层的绑定关系中,主、从表面的设定与前述方式相反,即选取结构层外表面为主表面,压电元件的内表面为从表面.根据以上设定可以发现,结构层外表面既是主表面,也是从表面,为了避免近距离范围内(300 mm)结构层外表面被定义不同的关系而导致有限元计算不收敛,将结构层进行切割,切割面及其位置见图 3,实现了分割两个绑定范围的目的.同理,三个物理层之间的主从表面设定方法为结构层内表面为主表面,保温层内表面为从表面;保温层外表面为主表面,防腐层内表面为从表面.

2.4 施加荷载

在荷载模块,对压电元件施加电势边界条件模拟正负压电效应,实现激励和接收压电信号.主要步骤包括:设置电势方向、选择激励导波的中心频率和周期数.

(1) 设置电势方向及电势面

激励压电元件和接收压电元件的电势方向需要分别设定.对于激励压电元件,高电势面垂直于压电单元极化方向,且在极化方向的箭尾位置,另一个与之平行的面即为低电势面,在极化方向的箭头位置,也是零势能面.接收压电元件只需在导波传播的前进方向设置零势面即可.

(2) 选择导波中心频率和周期数

激励信号为经 Hanning 窗函数调制的 5 周期单音频正弦叠加信号,该信号主瓣幅值高,频谱能量集中,旁瓣幅值低且能量迅速衰减,因此识别结构损伤敏感度高.根据三层管道结构频散曲线,L(0,6)模态在 60~90 kHz 频域内传播速度最快且非频散,因此选择激励信号为 L(0,6)模态、中心频率为 70 kHz,幅值为 10 V.

2.5 网格划分

由于层状管道结构厚度达到 36 mm,为了提高网格的质量,达到提高有限元计算精度的目的,分别为压电元件、结构层、保温层和防腐层四个部件划分网格.同时为了避免划分网格过程中产生小尖角,应改变管道的拓扑结构,将其切割成 Z 轴对称的四个部分,径向切割面 XOZ、YOZ 和切割后的结构层见图 4.

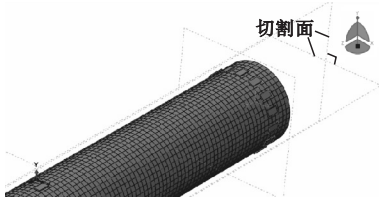


图 4 轴向切割面位置

Fig. 4 Axial partition planes

与分析步长的大小影响计算效率和计算精度类似,网格的大小也直接影响计算精度和计算效率.一般来讲,网格长度小即网格数量较多时,计算精度会有所提高,但同时也降低了计算效率.相反,网格长度增加即网格数量减小时,可以显著提高计算效率,但计算精度也受到影响.所以应在保证计算效率的前提下提高计算精度,网格长度需小于最小波长的二十分之一^[9],即

$$l_m < \frac{\lambda_{\min}}{20} \tag{2}$$

式中: l_m 表示网格长度; λ_{\min} 表示激励导波的最小波长.

压电元件与管道结构层的接触类型为绑定,且激励器的接触面为主面,结构层的接触面为从面,为了保证激励器激发超声导波效果,主面网格长度应大于从面网格长度.同时结合式(2),压电元件网格长度设置为 12 mm,管道结构的三个物理层的网格长度分别设置,均为 5 mm.压电元件和各层管道结构的单元类型分别为 C3D8E 和 C3D20R,压电元件、结构层、保温层和防腐层的单元数量分别为 20、19 200、130 560 和 29 920.

2.6 结果分析

超声导波在管道结构的传播机理是分析的重点,其分析对象是端部反射波.层状管道结构压电信号分析结果见图5.根据图可知,超声导波在管道结构的两端均存在端部反射波.如果端部反射波传播距离过短,则不能包含结构的全长度范围信号;如果端部反射波传播距离过长,则在传播过程中的能量衰减和模态转换严重,影响了信号分析的准确度和精度.综合以上分析,选择超声导波从激励位置起在轴向长度往返一个周期后接收的端部反射波,即图5(a)中“端部反射波2”作为研究对象,根据其传播距离和接收时间计算其传播速度.

首先分析接收信号的中心频率,见图5(b).传感信号的主瓣频率集中在70 kHz附近,且幅值较高,其周围具有少量旁瓣频率,但幅值较低.频谱图的包络图呈顶角较小的三角形,且振幅较高,说明信号的能量较集中,衰减较小.以上说明接收信号的主要成分是70 kHz,兼具少量的模态转换.

随后分析超声导波的传播机理,与试验结果进行验证.可以看出,作动器在结构端部激励产生超声导波,形成初始波,传感器先后接收到直接传播的初始波和近端的端部反射波1.随后超声导波继续传播,在不同的层界面发生折射和反射现象,存在径向能量泄露,因此传播性质更为复杂,又经过一次端部反射后在传感器位置先后接收到端部反射波2和端部反射波3,其幅值明显降低,传播机理见图5(c).

最后根据端部反射波2出现的时间和传播距离计算导波传播速度,与理论速度进行对比,验证导波的模态.其中,端部反射波2的时间从图5(a)读取,从图5(c)读取其传播距离,则信号传播速度的计算值为5 148 m/s.根据现有研究,L(0,6)模态超声导波在层状管道结构传播的理论的速度为5 208 m/s^[14],速度计算值与理论值误差较

小.由此证明了激发和接收的超声导波是L(0,6)模态,中心频率是70kHz,有限元模型真实可靠,能够较好的表现超声导波在结构中的传播性质.

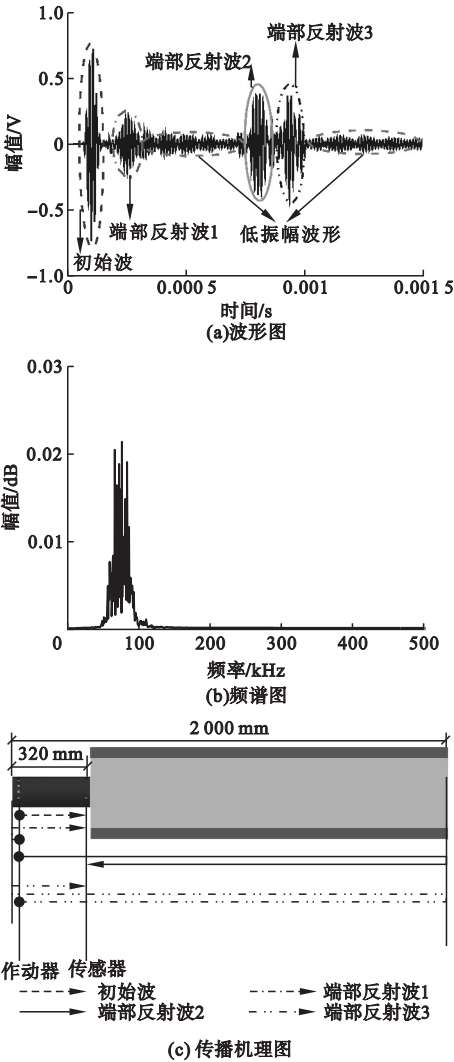


图5 层状管道结构压电信号结果分析

Fig.5 Data processing for sensing signals in a layered pipe structure

3 试验验证

3.1 建立试验系统

为了验证有限元模型的准确性,建立基于压电超声导波的层状管道结构试验系统^[3,14-15].其中被测层状管道结构的几何和材料参数与有限元模型相同,试验装置见图6.作动器和传感器均采用12 mm×6 mm×

1 mm伸缩型 PZT-4 压电陶瓷元件,1 组作动器和 1 组传感器分别中心对称耦合在管道结构端部 $Z=20\text{ mm}$ 和 $Z=320\text{ mm}$ 位置,作用分别是激励导波和接收信号,根据试验数据分析速度等参数作为验证数据,与前述有限元分析结果进行对比. 由于作动器和传感器均耦合在结构层外表面,而结构层被外包层包裹. 为了保留外包层的功能,只能在端部有限范围将外包层剥离,将作动器和传感器布设在端部结构层外表面. 激励信号的选择与有限元模拟相同: $L(0,6)$ 模态、中心频率为 70 kHz 的 5 周期单音频正弦叠加信号,激励幅值为 10 V .



图 6 试验系统装置

Fig. 6 The setup of experimental system

3.2 结果分析

为了验证前述层状管道结构有限元模拟的正确性,将激励信号频率 70 kHz 传感器接收信号的试验波形图和有限元模拟波形图进行对比,结果见图 7.

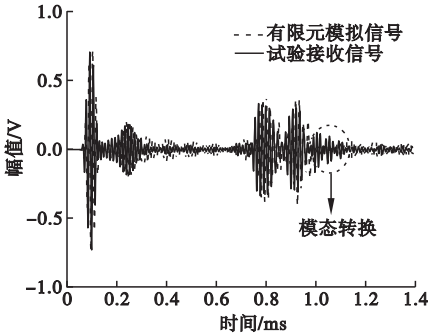


图 7 试验和有限元模拟波形图对比

Fig. 7 Comparison of wave forms between experiment and FEM

3.2.1 传播机理验证

观察端部反射波出现的时间,有限元模拟与试验的时间基本相同. 观察波形图的幅值,有限元模拟的波形图的幅值比试验的幅值稍有增大,但是增大的程度较小,即二者的相对误差较小. 但是在试验波形图中的 $1.0\sim 1.2\text{ ms}$ 时域内可见清晰的模态转换信号(见图 7),根据层状管道结构群速度频散曲线 L 模态、 T 模态和 F 模态的速度特性可以判断^[15],这三个波形都是 F 模态,传播机理见图 8 的端部反射波 3 及模态转换波. 如果忽略超声导波在端部反射时可能产生的模态转换现象,分析这三个模态转换信号出现的原因:管道端部耦合的 16 个作动器的目的是,作动器个数大于出现的导波的最高模数,实现抑制 F 模态导波的目的;而所有作动器手动布置,可能位置稍有误差,并非精确的中心对称,因此产生的目标导波并非纯粹的 $L(0,6)$ 模态,尚有部分未能完全抑制的 F 模态导波.

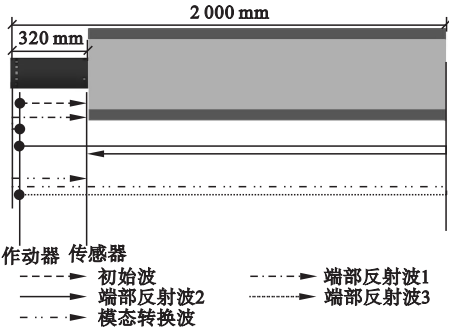


图 8 试验过程导波传播机理

Fig. 8 Propagation mechanism of UGSs in experiment

3.2.2 群速度的验证

根据 $L(0,6)$ 模态群速度频散曲线的特点^[10],非频散区域为 $60\sim 90\text{ kHz}$,在试验中,以 5 kHz 为步长,分别以 65 kHz 、 70 kHz 、 75 kHz 、 80 kHz 和 85 kHz 为激励的中心频率,在传感器位置提取其反射波信号,滤波后计算其端部反射波的速度,即为试验速度,并与频散曲线的理论速度进行对比,结果见表 2.

表2 有限元模拟和试验群速度值对比

Table 2 Comparison of group velocity value between experiment and FEM

激励频率/kHz	群速度模拟值/(m·s ⁻¹)	群速度试验值/(m·s ⁻¹)	相对误差/%
65	5 021	4 782	-4.8
70	5 208	5 148	-1.2
75	5 238	5 166	-2.3
80	5 225	5 097	-2.5
85	5 116	4 908	-4.1

注:相对误差 = $\frac{\text{试验值} - \text{模拟值}}{\text{模拟值}} \times 100\%$.

4 外包层对结构层影响的定量分析试验

根据以上有限元模拟和验证试验结果:在激励频率范围内,群速度模拟值和试验值基本一致,证明了应用 ABAQUS 有限元软件建立模型的可靠性和准确性. 笔者研究的层状管道结构,结构层提供了强度、刚度及实现了运输作用,而外包层(保温层和防腐层)是提供附加作用,在结构健康监测中,外包层不可避免的会对检测结果产生一定的影响. 因此将这种影响程度进行量化,有利于采取相应措施减小影响,提高结构健康监测的准确程度.

量化分析方法采用对比层状管道结构和单层管道结构传感信号的端部反射率^[16-20],具有直观且计算简便的特点,端部反射率见式(3). 方法是完成层状管道结构的试验验证后,拆除外包层,形成单层管道结构,即为对比分析构件,而且单层管道结构与层状管道结构的结构层的各项性质完全相同.

$$R_A = \frac{A_n}{A_0}.$$

(3)

式中:定义 A_n 为第一次端部反射回波的最大幅值; A_0 为初始超声导波的幅值,初始波和第一次端部反射回波位置参见图 5(a).

层状管道结构的两个不同轴向位置的端

部反射率以及拆除外包层后,与之轴向位置相同的单层管道结构的端部反射率的对比图见图 9. 分析可知,在 $Z = 0.32\text{ m}$ 位置,层状管道结构的端部反射率比单层管道结构的下降了 41%;在 $Z = 2.0\text{ m}$ 位置,端部反射率下降了 50%,即距离激发位置越远,端部反射率下降越严重.

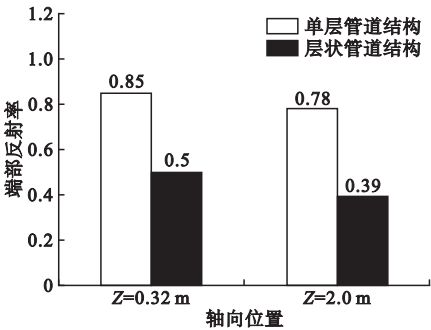


图9 端部反射率试验值对比

Fig. 9 Comparison of experimental reflection index

研究中,同时采用了有限元分析方法对图 9 的试验方法进行了模拟,其结果与试验结果基本一致,误差在合理范围.

5 结 论

(1)层状管道结构有限元模型,有限元模拟波形图和试验波形图的基本趋势(时域位置和幅值趋势)相同、中心频率相同、群速度基本相同,说明有限元模型比较真实地反映了超声导波在结构的传播性质.

(2)外包层对层状管道结构的超声导波传播速度有一定影响,尤其在损伤识别和结构健康监测中必须要考虑.

(3)层状管道结构的端部反射率试验值均小于单层管道的值,两个接收信号位置(轴向位置)端部反射率的平均值降低了 45%. 分析原因:导波在传播过程中,外包层为径向能量泄漏提供了一个通道,导致导波轴向传播能量降低,方向性减弱. 因此在层状管道结构健康监测中,选择能量泄漏小的检测导波,能够直接增加超声导波传播的距离,间接增加监测准确程度.

参考文献

- [1] MOSER F, JACOBS L J, QU J. Modeling elastic wave propagation in wave guides with the finite element method [J]. NDT & E international, 1999, 32(4): 225 - 234.
- [2] SEIFRIED R, JACOBS L J, QU J. Propagation of guided waves in adhesive bonded components [J]. NDT & E international, 2002, 35(5): 317 - 328.
- [3] 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.)
- [4] 赵乃志. 利用压电超声导波时间反转法的管道结构裂纹监测研究 [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.)
- [5] ZHENG Mingfang, LU Chao, CHEN Guozhu, et al. Modeling three-dimensional ultrasonic guided wave propagation and scattering in circular cylindrical structures using finite element approach [C]//International conference on physics science and technology, Amsterdam: Elsevier, 2011.
- [6] HASKELL N A. The dispersion multilayered media [J]. Bulletin society of America, 1953, 43(1): 17 - 34.
- [7] ROKHLIN S I, WANG L. Ultrasonic waves in layered anisotropic media: characterization of multidirectional composites [J]. International journal of solids & structures, 2002, 39(21): 5529 - 5545.
- [8] KWUN H, KIM S Y, CHOI M S, et al. Torsional guided-wave attenuation in coal-tar-enamel-coated buried piping [J]. NDT & E international, 2004, 37(8): 663 - 665.
- [9] YAN Shi, LI Ying, ZHANG Shuai, et al. Pipeline damage detection using piezoceramic transducers: numerical analyses with experimental validation [J]. Sensors, 2018, 18(7): 30 - 34.
- [10] 张帅. 基于时间反演的管道结构损伤定位与成像研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2017.
(ZHANG Shuai. The research of pipeline structures damage localization and imaging based on time reversal [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2017.)
- [11] 齐霁. 基于 PZT 超声导波的多裂纹管道损伤识别研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2014.
(QI Ji. Research on multiple crack pipeline structural monitoring by using PZT-based ultrasonic guided waves [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2014.)
- [12] 焦敬品, 何存富, 吴斌. 管道超声导波检测技术研究进展 [J]. 实验力学, 2012, 17(1): 1 - 9.
(JIAO Jingpin, HE Cunfu, WU Bin. Research progress of ultrasonic guided wave testing technology for pipeline [J]. Journal of experimental mechanics, 2012, 17(1): 1 - 9.)
- [13] YAN Shi, MA Haoyan, LI Ping, et al. Development and application of a structural health monitoring system based on wireless smart aggregates [J]. Sensors, 2017, 17, 1641.
- [14] 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.)
- [15] YAN Shi, ZHAO Putian, DAI Yong, et al. Reinforcement and concrete interface corrosion damage detection using piezoelectric ceramics [C]//Proceedings of the twenty-seventh international ocean and polar engineering conference, Berlin: Springer, 2017.
- [16] 孙丽, 孙茜茜, 任亮, 等. 应用光纤布喇格光栅传感器监测地下管道腐蚀的新方法研究 [J]. 光子学报, 2012, 41(1): 6 - 10.
(SUN Li, SUN Qianqian, REN Liang, et al. A new method for underground pipeline corrosion monitoring applied FBG [J]. Acta photonica sinica, 2012, 41(1): 6 - 10.)
- [17] SUN Li, LI Chuang, LI Jun, et al. Strain transfer analysis of a clamped fiber bragg grating sensor [J]. Applied sciences, 2017, 7(2): 14 - 19.
- [18] LI C, SUN L, XU Z, et al. Experimental Investigation and error analysis of high precision FBG displacement sensor for structural health monitoring [J]. International journal of structural stability and dynamics, DOI: 10.1142/S0219455420400118.
- [19] 孙丽, 苏中新, 张春巍, 等. 基于楔形腔结构的光纤光栅位移传感器 [J]. 光电子·激光, 2017, 28(6): 573 - 578.
(SUN Li, SU Zhongxin, ZHANG Chunwei, et al. A fiber bragg grating displacement sensor based on wedge cavity structure [J]. Journal of optoelectronics laser, 2017, 28(6): 573 - 578.)
- [20] ZHANG C W, WANG H. Swing vibration control of suspended structures using the active rotary inertia driver system: theoretical modeling and experimental verification [J]. Structural control and health monitoring, 2020, 27(6): 25 - 43.
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)