

超声导波在损伤层状管道结构的传播性质研究

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 建立损伤层状管道结构模型, 研究压电超声导波在管道结构的传播性质. 方法 层状管道结构有限元模型能够克服外包层阻碍导致的压电元件只能设置在管道结构两端的问题, 在结构的任意位置和任意节点都能提取传感信号进行分析和研究. 以波形图和信号传播速度、端部反射率和能量衰减系数为研究参数, 从三个方面分析超声导波在层状管道结构的传播性质及损伤程度对传感信号的影响. 结果 建立以管道结构轴向长度为自变量、分别以端部反射率和能量衰减系数为因变量的拟合公式并绘制拟合曲线, 自变量与因变量均呈线性关系. 结论 损伤程度越严重、提取传感信号位置距离激励位移越远, 波形图混叠越严重, 端部反射率越小、能量衰减越严重.

关键词 有限元模拟; 超声导波; 层状管道结构; 损伤程度; 传播性质

中图分类号 TU392.3; TP206⁺.1; O426.2

文献标志码 A

Behaviors Analysis on UGWs Propagation in Layered Pipeline Structures with Damages

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 was to analyze the behaviors of Ultrasonic Guided Waves (UGWs) propagation in the layered pipeline structures (LPSs) with damage using ABAQUS to establish the finite element models (FEMs). The problem that the structural layer is wrapped by the outer layers in order to the piezoelectric elements are had to tie on the ends of the LPSs is solved by FEMs. In addition, everywhere the LPSs can be extracted from signals to analyze the behaviors, especially on the structural layer in FEMs. The paper discusses the propagation behaviors of UGSs in the LPSs with damage in three aspects: waveforms and signal propagation

收稿日期: 2020-02-28

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, 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方面研究.

velocities, reflection ratio of the end and energy attenuation coefficient. Subsequently, fitting formulas of reflection ratio and energy attenuation coefficient according to the argument of axial length were established respectively to illustrate the shapes of propagation behaviors on various extent damages. Thus, the more serious the damage degree is, meanwhile the distance between the position of the extracted from signal and the excitation displacement is greater, the more serious the waveform aliasing is, the smaller the reflection ratio is, and the more serious the energy attenuation is.

Key words: FEM analysis; ultrasonic guided waves; layered pipeline structures; damage degree; propagation behaviors

层状管道结构广泛应用于市政供水、供热管网工程和物资(石油、天然气)运输系统.在实际工程中,最内层作为层状管道结构的工作层和受力层,是损伤识别和结构健康监测的重点对象,因而检测部件直接与最内层耦合才能达到最好的检测效果.而受到外包层限制,只能在管道结构的两个端部附近剥离外包层,然后将检测部件与最内层相耦合.而管道的轴向工作长度非常长,在结构中传播的超声导波由于频散和能量衰减等原因,导致较长管道结构的超声导波传播性质研究受到影响,也降低了损伤识别效果.因此,需要建立含有损伤的层状管道结构有限元模型,克服外包层的影响,充分发挥有限元模型能够在任意位置和节点提取传感信号的优势,研究超声导波的传播性质,为损伤识别和结构健康监测服务.

有限单元法是求解复杂数学问题的有效数值方法.利用有限元分析软件 ABAQUS 模拟超声导波在损伤层状管道结构的传播性质,对损伤识别具有重要意义. D. N. Cawley^[1]和 M. J. S. Lowe^[2-4]等通过有限元方法分析待测结构的不同损伤状态对 Lamb 波的传播影响,根据研究结果设计了求解板及管道波导的频散方程以及绘制频散曲线的软件 Disperse. J. L. Rose^[5]将有限元法和边界元法相结合,充分发挥导波研究优势. Zhao X 等^[6]在波的散射理论研究领域,研究确定了波导中二维状态缺陷损伤的大小.超声导波特性和功能的理论研究目前已较为成

熟^[7-11],但实际工程应用,尤其是损伤层状管道结构的传播特性还亟需深入研究.基于此,笔者对超声导波在单层管道结构、双层管道结构传播理论和传播性质进行研究,绘制相应结构的频散曲线,并分析传播机理,分别建立了有限元模型和试验系统,研究表明理论分析、有限元模型和试验结果一致.

1 试 验

1.1 试验方法及装置

试验中层状管道结构由3种工况组成,分别是无损层状管道结构、45°和90°损伤层状管道结构.由于非贯穿损伤具有较强的预见性和避免损失的经济性,因此笔者以非贯穿损伤作为研究对象.内部结构层(钢管)作为运输物质的唯一载体,而且为整个管道结构提供强度和刚度的结构,因此非贯穿损伤作用在钢管结构.

层状管道结构由轴心向外分别为结构层、保温层和防腐层,由内向外的内半径分别为34 mm、38 mm、68 mm和70 mm,即结构层、外包层(保温)和外包层(防腐)的厚度分别为4 mm、30 mm和2 mm,长度分别为2 m、1.68 m和1.68 m,密度分别为 $7\,850\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $80\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $946\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,泊松比分别为0.32、0.25和0.4.周向损伤位置在结构层轴向长度 $Z=1\text{ m}$ 位置,损伤宽2 mm,深3 mm.两个外包覆层结构完好,无损伤.

建立层状管道结构损伤识别系统^[12-14],

试验装置和超声导波传播机理如图1所示.

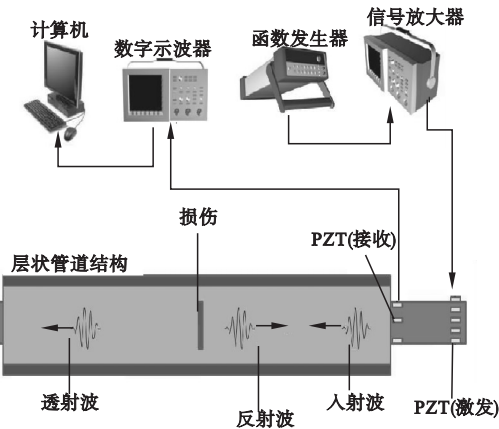


图1 试验系统装置

Fig. 1 The setup of experimental system

1.2 试验参数分析

(1) 传感信号

压电元件激励位置产生压电超声导波,在管道结构径向全壁厚范围沿着中心轴向方向传播,并在端部反射后被传感器接收,过程如图1所示.因此,传感信号携带了管道结构所有信息,对其进行分析和研究意义重大.

(2) 端部反射率

端部反射尤其是损伤反射,使超声导波发生能量损耗,直观体现是超声导波幅值降低.端部反射率的含义为超声导波在结构传播经过若干次端部反射和损伤反射后,幅值所降低的比率,一般以端部反射波与初始波幅值的比值表示.本研究压电元件作动器和传感器在管道结构同端布置,根据超声导波的传播机理,第一个端部反射波表示超声导波在管道结构首次往返传播的过程,该传感信号包含管道结构全长度、全壁厚范围的信息,即损伤位置、程度等.不仅如此,由于未经过多次端部反射和损伤反射,信号的模态转换和能量衰减较小.因此定义端部反射率的计算公式为

$$R_A = \frac{A_n}{A_0} \tag{1}$$

式中: A_n 为第一次端部反射波的最大幅值, A_0 为初始超声导波的幅值.

(3) 能量衰减分析

端部反射率的主要作用是超声导波经过管道结构端部反射和损伤反射后,量化能量降低的比率,该方法适用于波形较单一,在分析的时域没有过多的反射波,且相邻的不同波包之间界限清晰、基本没有混叠的理想状态.层状管道结构由于多个层结构甚至多个损伤导致传感器信号可能存在模态转换和波形混叠等现象.为了克服以上困难,笔者采用能量衰减系数分析方法:由于超声导波在单层管道结构传播的波形图形式简洁且易于分析,因此将层状管道结构看作在单层管道结构外层包裹了外包层,首先将单层管道结构超声导波传播的能量分布作为基准值,将增加外包层后超声导波传播的能量分部作为对比值,并进行相应的对数运算,分析增加外包层前后超声导波能量分布的变化程度.

根据文献[15],能量衰减系数定义公式为

$$E_{att} = 20\log_{10} \left(\frac{E_0}{E_n} \right) \tag{2}$$

根据已知研究成果^[16],将连续的传感信号离散为有限个数值,将能量量化表达为时域范围内离散变量对应的幅值平方之和,即

$$E = \sum_{t=0}^{\infty} (x(t))^2$$

在能量衰减系数公式中, E_0 和 E_n 增加外包层前后管道结构相同位置的 能量值^[9], 计算式分别为 $E = \sum_{t=0}^{\infty} (x_0(t))^2$ 、 $E_n = \sum_{t=0}^{\infty} (x_n(t))^2$. 式(2)表明,能量衰减系数越大,超声导波在传播过程的能量衰减越严重,即与激励导波的幅值相比,传感信号的幅值降低越严重.

2 有限元模型

2.1 压电元件和无损层状管道结构模型

建立3个工况的层状管道结构有限元模型,分别为无损层状管道结构、45°和90°损伤层状管道结构有限元模型.

压电元件模型包括压电驱动器模型和压

电传感器模型. 首先,分别建立压电驱动器和传感器模型,再建立无损层状管道结构有限元模型. 随后将压电驱动器和传感器分别与无损层状管道结构绑定,用于激励压电超声导波和接收传感信号. 压电超声导波在无损层状管道结构的传播性质是损伤层状管道结构传播性质的研究基础,也是参照对比数据.

2.2 不同损伤程度的层状管道结构模型

结构层的周向损伤是层状管道结构常见的损伤形式,在工程中以周向裂缝的形式存在. 以圆心角对应的结构层周向损伤表征工程中管道结构的周向裂缝,本研究中损伤分别是45°和90°周向损伤. 损伤参数:轴向位置 $Z = 1\text{ m}$, 圆心角分别为45°和90°,宽2 mm,深3 mm. 其中45°周向损伤剖面见图2.

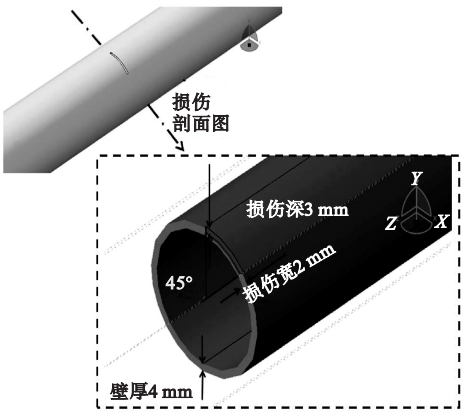


图2 45°周向损伤剖面图

Fig. 2 45° circumferential crack model

根据研究成果^[17-18],选择频散弱的超声导波作为激励导波进行损伤检测,在荷载模块中施加电势荷载:单音频正弦叠加信号,中心频率为70 kHz、幅值10 V的 $L(0,6)$ 模态超声导波.

3 有限元与试验验证对比

针对相同损伤程度的层状管道结构,将有限元分析的传感信号与试验传感信号进行对比分析,以验证有限元模型的准确性. 由于篇幅限制,笔者仅列出90°周向损伤的对比

波形图(见图3). 从图中可以观察到清晰的端部反射波(包括端部反射波1、端部反射波2和端部反射波3,以下简称为波1、波2和波3)和损伤反射波,波包在时域出现的时间基本一致,误差较小. 分析原因可能由于试验的损伤位置误差或压电元件作动器、传感器人工耦合于管道结构并非严格中心对称导致的误差. 两种传感信号另一明显区别:试验信号在 $t = 1.2\text{ ms}$ 附近出现清晰的模态转换波,而有限元信号在该时间附近并未出现明显的模态转换波,说明有限元模拟中心对称布置的压电元件作动器能够有效地抑制其他模态导波,产生较单一的 $L(0,6)$ 模态导波. 因此试验中产生误差的原因较多,且难以避免,产生的模态转换波的可能性较大.

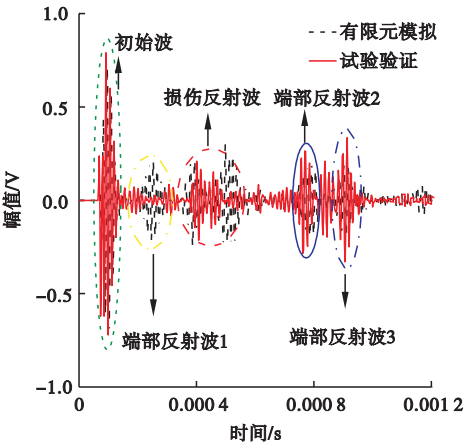


图3 90°损伤结构有限元与试验信号对比图

Fig. 3 Comparison of 90° damage signal between FEA and experiment

根据以上分析,有限元分析与试验信号的波形图符合程度高,说明有限元模型准确合理,可以采用该模型进行更加细致的分析.

4 有限元模型结果分析

经验证有限元模型准确后,从波形图和信号传播速度、端部反射率和能量衰减三个角度对不同损伤程度的层状管道结构超声导波的传播性质进行分析. 以有限元模拟结果

间接表示试验结果,克服了在试验过程中由于外包层阻碍、压电传感器只能布置在结构层首尾端部的缺点,进而分析压电超声导波在不同损伤程度层状管道结构的传播性质.

4.1 传感信号的对比分析

4.1.1 无损和损伤结构对比分析

将无损、45°损伤层状管道结构相同传感器位置提取的信号进行对比,分析两种结构的超声导波传播性质差异,波形图如图4(a)所示.可以看出,较无损结构,45°损伤结构的传感信号在 $t = 0.33\text{ ms}$ 位置具有两个损伤反射波,且损伤反射波的幅值明显小于初始波.针对两种结构传感信号的波包相似部分进行分析:初始波和波1的脉宽和幅值相差不大,在图中基本能够完全重合.但波2及波3的差别较明显,主要体现在脉宽和

幅值两个方面.从脉宽角度分析,波2和波3在无损信号中表现为脉宽较窄且边界清晰、无混叠;与之相比,在45°周向损伤信号中表现为脉宽较宽,导致两个波包的部分低幅值信号发生混叠,信号分析难度增大;从幅值的角度分析,波2和波3在无损结构信号的幅值较高,而损伤信号的幅值明显降低.以上关于无损和损伤结构的传感信号定性分析说明:超声导波在结构传播时,在损伤位置由于模态转换等原因消耗了部分能量,直接导致其在随后传播过程幅值降低且脉宽增加,信号方向性减弱.同时,将无损结构与45°周向损伤结构信号的频域图进行对比分析,见图4(b).从图中可以看出,损伤结构信号的主瓣宽度明显增大,且幅值较低,旁瓣宽度也有所增加,也说明损伤导致超声导波的能量降低.

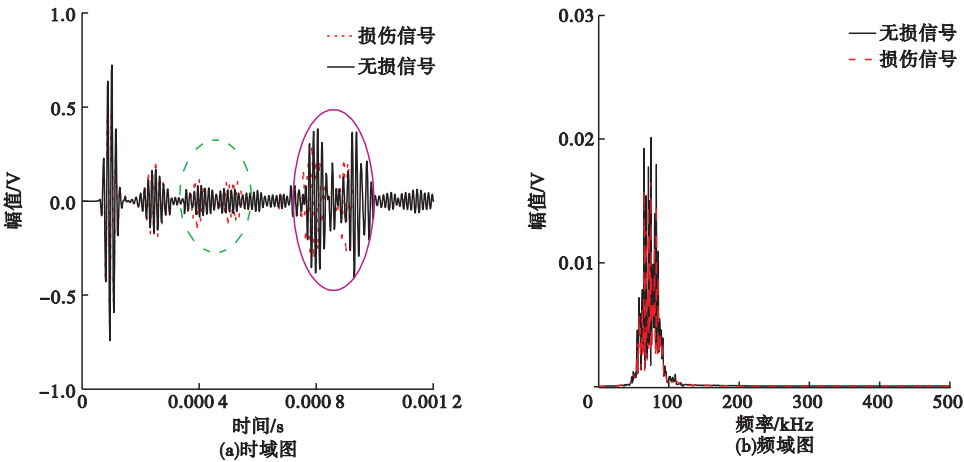


图4 无损和45°损伤结构的信号对比图

Fig. 4 Comparison between 45°damage signal and healthy signal

4.1.2 不同程度损伤结构对比分析

管道结构的损伤程度不尽相同,为了区别不同程度周向损伤对于超声导波传播性质的影响,将45°周向损伤的传感信号与90°周向损伤的传感信号进行对比分析(见图5).根据损伤反射波的传播距离和时间计算其传播速度,结果见表1.可以看出,90°损伤的计算速度明显小于45°损伤的计算速度.此外,以幅值为参数分析两种损伤程度主要的差

别:损伤程度增大,时域内传感信号损伤反射波幅值增大,导致随后出现的端部反射波(波2和波3)的幅值减小.以上的速度变化和幅值差异均说明损伤程度增大,使得损伤反射波幅值增大更容易辨别.与此同时,更严重的损伤消耗了更多能量,直接导致超声导波在传播后期能量衰减加剧,直接体现在传感信号损伤反射波之后时域的端部反射波幅值降低.

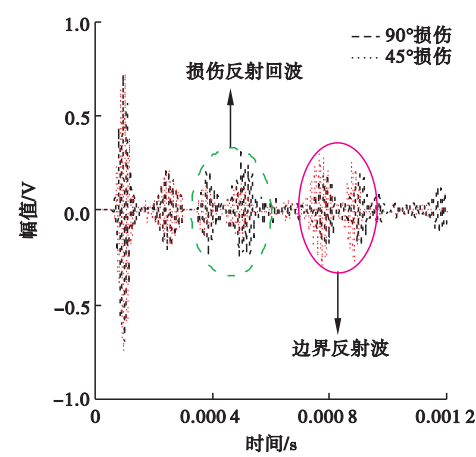


图5 损伤信号对比图

Fig. 5 Comparison of damage signal

表1 不同损伤程度下损伤反射波速度对比

Table 1 Comparison of damage reflection signals in different damage levels

| 结构类型 | 传播时间/ 10^{-3} s | 传播距离/m | 速度计算值/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | 速度理论值/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | 速度误差/% |
|-------|-------------------|--------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------|
| 45°损伤 | 0.329 | 1.66 | 5 035 | 5 208 | -3.32 |
| 90°损伤 | 0.317 | 1.66 | 4 930 | 5 208 | -5.34 |

构传播距离越长,端部反射率越小,且相同损伤程度端部反射率减小的速率比较均匀. 对比不同损伤程度结构的传感信号的端部反射率发现,90°损伤的端部反射率明显小于45°损伤,说明当损伤程度增加时,损伤反射波的幅值明显增大,但是随后时域的端部反射波的幅值明显减小. 这一结论与图5中波形相符.

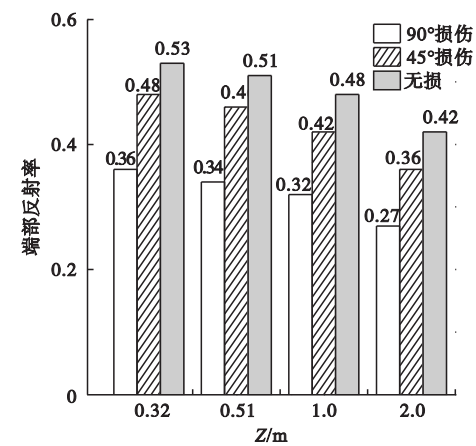


图6 不同损伤程度端部反射率对比图

Fig. 6 Reflection ratio of the end with the extent of damages

4.2 端部反射率分析

以上通过分析波形图实现了对于超声导波传播的定性分析,表现为损伤结构的超声导波波形变化明显,即幅值降低、脉宽增加. 为了更加精确地分析结构损伤前后及损伤程度对于超声导波的影响,需进行定量分析,采用端部反射率作为分析参数,计算见式(1). 根据计算结果,绘制以轴向位置为自变量、端部反射率为因变量的损伤、无损层状管道结构对比图(见图6). 从图中可以看出,对于有限元模拟信号,损伤结构信号的端部反射率明显小于无损管道结构,随着提取信号位置与作动器位置的距离增大,即超声导波在结

根据不同结构的端部反射率分别进行曲线拟合,获得拟合式(3):

$$y = ax + b.$$
 (3)

式中:无损结构、45°损伤结构和90°损伤结构系数a、b取值见表2.

表2 端部反射率拟合公式系数值

Table 2 Coefficient value of fitting formula for end reflectance

| 结构形式 | a | b |
|---------|-------|------|
| 无损结构 | -0.06 | 0.05 |
| 45°损伤结构 | -0.07 | 0.50 |
| 90°损伤结构 | -0.05 | 0.37 |

不同损伤程度端部反射率拟合曲线如图7所示. 分析图7可知,在管道结构轴向长度范围,端部反射率拟合图形呈线性规律,其中斜率相差较小且均为负值,截距差距较大,表现为损伤程度增大则截距减小,因此三种结构的拟合线基本平行,主要区别体现在纵向坐标轴的截距不同.

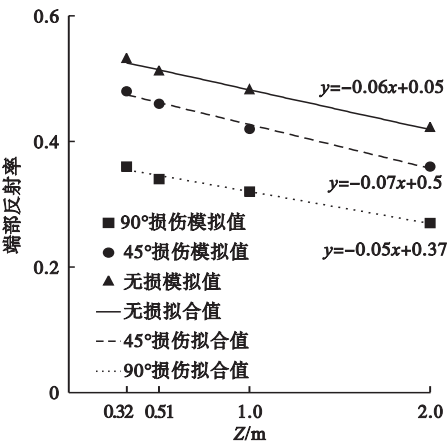


图7 不同损伤程度端部反射率拟合图

Fig. 7 Fitting figure of reflection ratio of the end with the extent of damages.

4.3 能量衰减分析

由图4(a)可知,结构层的损伤导致了端部反射波和损伤反射波的脉宽增加,产生了波形混叠. 为了避免不同反射波之间难以区分,采用能量分析方法定量分析传感信号,能量衰减系数计算见式(2). 通过计算,将无损与损伤管道结构传感信号的能量衰减系数进行对比,结果如图8所示.

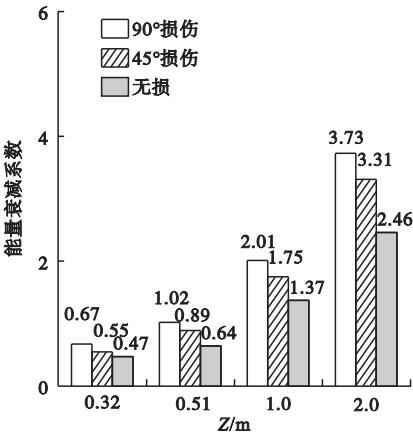


图8 不同损伤程度能量衰减系数对比图

Fig. 8 Comparison of energy attenuation coefficient with the extent of damages

超声导波分别在损伤管道结构 and 无损管道结构传播,在相同的时域范围内,损伤管道结构传感信号的能量衰减系数明显增大,表示损伤导致的能量衰减更加严重. 当损伤程

度增大,即损伤对应的圆心角由45°增大至90°时,能量衰减也更加严重. 而且,超声导波在管道结构传播的距离增大即轴向位置变大,45°圆心角周向损伤的能量衰减系数从0.55增大至3.31,表示当损伤程度不变时,随着传感器和作动器的距离越来越远,能量衰减越来越严重. 结合图5分析原因,损伤程度增大,则损伤反射波幅值增大,但更严重的损伤使得信号的能量衰减加剧,导致在损伤以后的信号端部反射波的幅值明显降低,使得整个时域内信号总能量减小.

根据不同结构的能量衰减系数进行拟合,分别得到3种结构的能量衰减系数拟合式(见式(4))和拟合图形(见图9).

y = cx + d. (4)

式中:无损结构、45°损伤结构和90°损伤结构系数c、d取值见表3.

表3 能量衰减拟合公式系数值

| 结构形式 | c | d |
|---------|------|------|
| 无损结构 | 1.2 | 0.09 |
| 45°损伤结构 | 1.63 | 0.06 |
| 90°损伤结构 | 1.82 | 0.12 |

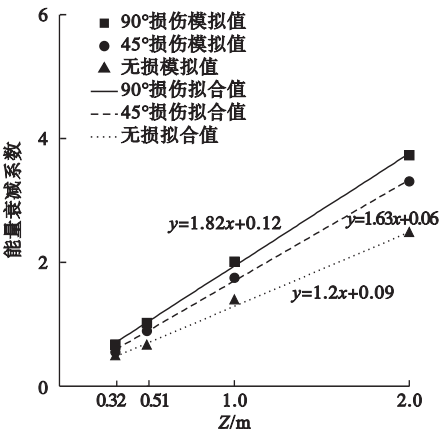


图9 损伤前后能量衰减系数拟合图

Fig. 9 Fitting figure of energy attenuation coefficient before and after damage

在管道结构轴向长度范围,能量衰减系数的拟合图形呈线性规律. 其中,无损和45°

损伤结构的斜率差异较小,90°损伤的斜率最大且与上述两种结构差异明显。

5 结 论

(1)有限元波形图和试验波形图的基本趋势一致,说明有限元仿真分析比较真实地模拟了试验情况。

(2)根据端部反射率拟合公式,可以计算相应程度损伤结构在任意轴向位置的端部反射率。计算后获得的端部反射率小,说明传感信号的方向性减弱,不利于结构损伤识别。

(3)根据能量衰减系数拟合公式,可以计算对应损伤程度结构的任意轴向位置的能量衰减系数,损伤程度越大,能量衰减越严重,越不利于管道结构的损伤识别。

参考文献

- [1] ALLEYNE D N, CAWLEY P. The interaction of Lamb wave with defects [J]. IEEE transaction on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control, 1992, 39(3): 381–397.
- [2] LOWE M J S, ALLEYNE D N, CAWLEY P. The mode conversion of a guided wave by a part-circumferential notch in a pipe [J]. Journal of applied mechanics, 1998, 65(3): 649–656.
- [3] LOWE M J S, ALLEYNE D N, CAWLEY P. Mode conversion of guided waves by defects in pipes [J]. Review of progress in quantitative nondestructive evaluation, 1997, 16(5): 1261–1268.
- [4] WILEOX P, LOWE M J S, CAWLEY P. The effect of dispersion on long-range inspection using ultrasonic guided waves [J]. NDT & E international, 2001, 34(1): 1–9.
- [5] ROSE J L, ZHANG W, CHO Y. Boundary element modeling for guided wave reflection and transmission factor analyses in defect classification [C]. IEEE Ultrasonics Symposium, New York: IEEE, 1998.
- [6] ZHAO X, ROSE J L. Boundary element modeling for defect characterization potential in a wave guide [J]. International journal of solids and structures, 2003, 40: 2645–2658.
- [7] YAN S, FU J Z, SUN W, et al. PZT based detection of compactness of concrete in concrete filled steel tube using time reversal method [J]. Mathematical problems in engineering, 2014, 9(9): 682.
- [8] YAN S, WU J X, SUN W, et al. Development and application of structural health monitoring system based on piezoelectric sensors [J]. International journal of distributed sensor networks, 2013, 27(9): 27.
- [9] YAN S, LI Y, ZHANG S, SONG G B. Pipeline damage detection using piezoceramic transducers: numerical analyses with experimental validation [J]. Sensors, 2018, 18(7): 2106.
- [10] YAN S, LI Y, YUAN X Z. Propagation energy distribution of PZT-based ultrasonic guided waves in laminated pipeline [C]. Proceedings of the twenty-fourth (2014) international ocean and polar, Busan: [s. n.], 2014.
- [11] 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(7): 1641.
- [12] WILCOX P D, LOWE M J S, CAWLEY P. Mode and transducer selection for long range Lamb wave inspection [J]. Journal of intelligent material systems and structures, 2001, 12(8): 553–565.
- [13] 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.)
- [14] 李赢, 阎石, 杨青潮. 层状管道结构损伤识别的数值模拟和试验验证 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2019, 35(6): 996–1003. (LI Ying, YAN Shi, YANG Qingchao. Numerical analyses with experimental validation for damage identification of layered pipeline structures [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(6): 996–1003.)
- [15] SONG F, HUANG G L, HUDSON K. Guided wave propagation in honeycomb sandwich structures using a piezoelectric actuator/sensor system [J]. Smart materials and structures, 2009, 18(12): 5007.
- [16] YAN Shi, SUN Wei, SONG Gangbing, et al. Health monitoring of reinforced concrete shear walls using smart aggregates [J]. Smart materials and structures, 2009, 18(4): 1–6.
- [17] 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.)
- [18] 李赢, 阎石, 尉中华. 基于能量密度法的超声导波层状管道结构损伤检测 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2019, 35(3): 506–511. (LI Ying, YAN Shi, WEI Zhonghua. Damage detection for layered pipeline structures using ultrasonic guided waves based on energy density [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(3): 506–511.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)