

层状管道结构损伤识别的数值模拟和试验验证

李 赢^{1,2,3}, 阎 石^{1,2}, 杨青潮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. 山东交通职业学院公路与建筑系, 山东 潍坊 261206)

摘 要 目的 根据超声导波在无损和损伤层状管道结构传播特性和损伤指数, 建立一种层状管道结构损伤识别算法, 并提出损伤指数与破坏等级的关系, 实现层状管道结构损伤识别. 方法 利用有限元方法建立不同损伤程度层状管道结构模型, 分析超声导波传播特性差异, 计算损伤指数, 并进行试验验证. 结果 根据结构损伤指数与损伤程度的关系, 将层状管道结构分为 5 个破坏等级, 明确提出结构从完好到破坏的程度, 当损伤指数大于 0.3 时, 建议更换层状管道结构. 结论 结构的损伤指数与损伤程度密切相关, 所提出的损伤识别算法是有效的, 所建议更换层状管道结构的损伤指数范围具有可行性, 有利于工程应用.

关键词 层状管道结构; 超声导波; 有限元模型; 损伤识别算法; 试验验证

中图分类号 TU392.3; TP206⁺.1; O426.2

文献标志码 A

Numerical Analyses with Experimental Validation for Damage Identification of Layered Pipeline Structures

LI Ying^{1,2,3}, YAN Shi^{1,2}, YANG Qingchao⁴

(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. School of Highway and Architecture, Shandong Transport Vocational College, Weifang, China, 261206)

Abstract: The purpose of the paper is to achieve damage identification, establish a damage identification algorithm (DIA) of layered pipeline structures (LPSs) and the relationship between damage indexes and damage levels according to propagation characteristics and damage indexes of ultrasonic guided waves (UGWs) in the health and damaged LPSs. The finite element models for the LPS with different damage levels were established. Meanwhile, different characteristics of UGWs propagation were analyzed. Damage indexes of different damage levels were calculated and ex-

收稿日期: 2019-03-12

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); 辽宁省自然科学基金项目(20180550332, 20180550502); 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1802018); 辽宁省自然科学基金指导计划项目(2019-ZD-0552); 潍坊市科技发展计划资助项目(2019GX089); 山东交通职业学院青年骨干教师国内访问学者资助项目

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.

perimentally validated. According to the relationship between structural damage indexes and damage levels, five damage levels of LPSs were classified from the healthy state to the failure. It was also suggested that the LPS should be replaced when the damage index was greater than 0.3. The damage indexes closely related to the damage level, the proposed DIA is efficient, and the suggested damage index scope for replacing LPS is feasible for engineering application.

Key words: layered pipeline structures (LPSs); ultrasonic guided waves (UGWs); finite element method (FEM); damage identification algorithm (DIA); experimental verification.

目前,管道结构的有限元模拟多数集中在单层管道结构,对于层状管道结构尤其是具有损伤的层状管道结构有限元分析少见报道。而实际工程中,层状管道结构广泛应用于供热、供水和石油运输等各个领域,由于外包层存在使层状管道结构的损伤识别和监测有一定难度,因此,利用超声导波对层状管道结构进行损伤识别和结构健康监测具有更加实际和重要的意义。

在层状管道结构和结构健康监测中,导波传播机理复杂性、多模态特性和频散特性导致的回波信号识别难的问题,可以采用传感信号能量分析的方法加以解决。W. T. Thomson^[1]和 N. A. Haskell^[2]采用矩阵方法求解多层结构的频散曲线。M. J. S. Lowe^[3-4]用传递矩阵法建立了 Lamb 波在多层平板的频散方程,随后又推导出导波在层状圆柱体的频散方程。W. Rose 等^[5]对不同模态的超声导波在外敷防腐层双层管道结构中传播的能量衰减规律进行了分析研究,结果表明,超声导波在双层介质中具有更明显的能量衰减。S. I. Rokhlin^[6]以折射波能量为研究对象,分析了具有纤维的多层介质中纤维铺向和超声导波的入射角度变化对研究目标的影响,研究结果表明,随着导波入射角度的增加,折射波能量迅速减小。S. Y. Kim 等^[7]研究了土层覆盖深度对超声导波在介质中传播时衰减系数的影响,结果表明,土层覆盖深度增加,则衰减系数增大。杨理践等^[8]从能量

密度的角度对防腐层缺陷进行检测,结果表明,以能量作为特征参数提供一种管道结构防腐层剥离等缺陷检测的理论方法。

以上研究对象由单层结构到复杂的层状结构,结论清晰,不足之处在于研究对象都是试验室结构,而非实际工程应用结构,因此,结论的应用性受到限制。笔者的研究对象是实际工程应用结构,采用有限元分析方法,建立不同损伤程度的层状管道结构,对比分析不同损伤程度与损伤指数的关系,提出损伤指数与破坏等级关系,建立损伤识别算法。然后建立层状管道结构损伤识别试验系统,达到试验研究与有限元分析互相验证的目的。

1 理论基础

1.1 飞行时间损伤定位法

对于损伤定位问题,假设在接收位置接收到第一个损伤反射回波的时间为 t_1 ,入射波的时间为 t_0 ,那么入射波与缺陷回波的时间差为 $\Delta t = t_1 - t_0$,根据脉冲回波原理及飞行时间法(Time of flight, TOF),可以计算出损伤距接收信号位置的距离为

$$c_g \cdot \frac{\Delta t}{2} = x. \quad (1)$$

式中: c_g 为超声导波在管道结构传播群速度,一般情况下,结合指定频率和模态下导波群速度频散曲线确定该群速度; Δt 为脉冲导波缺陷回波时间差; x 为缺陷在管道结构中的位置到检测端的距离。由此可见,导波群速度 c_g 和回波时间差 Δt 评估值的准确与否将

决定损伤定位的精度.

1.2 基于传感信号能量的损伤识别法

关于损伤程度识别问题,可以结合导波能量法进行分析.一般情况下,损伤程度越严重,损伤回波信号携带的能量越大^[9]. 假设传感器接收到的传感信号为 $x_i(t)$,则传感信号的能量值 E_i 为时域内离散信号幅值的平方和:

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

管道结构超声导波损伤程度识别技术,管道结构的“健康状态”是基础模型,“损伤状态”是对比模型. 通常情况下,将传感信号能量值选为损伤变量,通过损伤变量构建损伤指标. 根据有限元模拟结果,推断损伤管道结构传感信号能量值降低,降低程度很可能与损伤程度有关^[10]. 为了评估管道结构损伤程度,通常将损伤传感信号能量值与相应的健康信号能量值进行对比,定义损伤指标为

$$H_i = \frac{E_n}{E_0} . \tag{3}$$

式中: E_0 为健康状态传感信号的能量,是基准值; E_n 为损伤状态传感信号的能量,是对比值; H_i 表示 t 时刻管道结构的相对健康程度;显然 $0 \leq H_i \leq 1$,当 $H_i = 1$ 时,管道结构是无损的,当 $H_i = 0$ 时,管道结构完全失效. 根据 H_i 定义表示管道结构损伤程度的量,即结构损伤指数 D_i :

$$D_i = 1 - H_i = 1 - \frac{\sum_{t=0}^{\infty} (x_n(t))^2}{\sum_{t=0}^{\infty} (x_0(t))^2} . \tag{4}$$

表 1 管道各结构层参数

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	轴向长度/ mm	结构层 厚度/mm	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ Pa	泊松比
1	钢管(结构层)	34	2 000	4	7 850	2.1×10^{11}	0.32
2	聚氨酯硬质泡沫塑料(保温层)	38	1 680	30	80	7.8×10^8	0.25
3	高密度聚乙烯(防腐层)	68	1 680	2	946	5.52×10^8	0.40

损伤指数的物理意义表明,损伤程度识别需要一个健康管道结构作为基础,通过将损伤信号能量值与健康原型信号能量值的比对,表征损伤的程度,即健康状态下,损伤指标 $D = 0$;在损伤状态下 $0 < D < 1$ 时,可以根据损伤指标 D 的大小,将 $[0,1]$ 详细划分成不同的等级,以区分不同的损伤程度,详细的损伤指标与损伤程度之间的对应关系将是本研究的一项重点内容.

这种方法有效避免了损伤位置不同时,评价指标产生变化,不能定量检测的缺点. 而是将损伤程度作为唯一变量,与损伤位置无关,即在管道结构轴向长度范围,当产生一定程度的损伤时,无关损伤位置,对整个结构产生的不利影响是相同的.

2 数值分析

2.1 无损层状管道结构有限元模型

建立压电元件(PZT 片)模型,长宽高为 $12 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,极化方向为厚度方向.

层状管道结构几何参数和材料参数见表 1 所示. 根据层状管道结构频散曲线(见图 1), $L(0,6)$ 模态 $65 \sim 85 \text{ kHz}$ 属于非频散区间,因此,选择 $L(0,6)$ 模态,中心频率为 70 kHz 为激励导波. 施加荷载为经 Hanning 窗函数调制的 5 周期单音频正弦叠加信号,激励信号的幅值为 10 V . 有限元结构模型见图 2,划分情况见表 2.

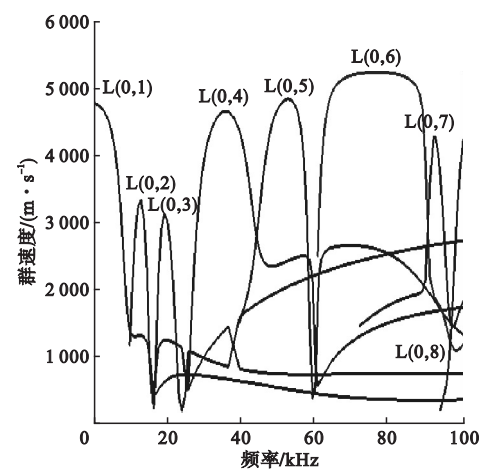


图1 层状管道结构群速度频散曲线

Fig.1 Group velocity dispersion curves of layered pipe structure

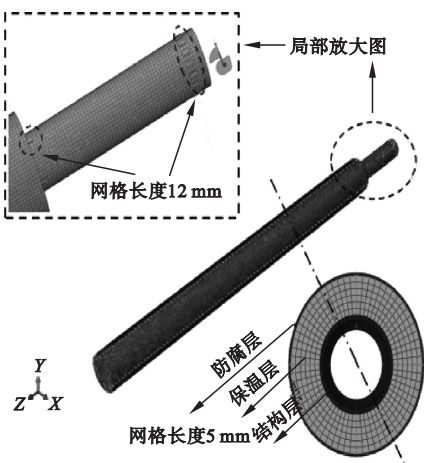


图2 激发和接收位置

Fig.2 Positions of excitation and reception

表2 层状结构有限元结构网格划分情况

Table 2 Meshing of finite element model for the layered structure

结构名称	网格划分技术	单元类型	网格长度/mm	单元数量
压电元件	结构(structured)	C3D8E	12	20
结构层	结构(structured)	C3D20R	5	19 200
保温层	结构(structured)	C3D20R	5	130 560
防腐层	结构(structured)	C3D20R	5	29 920

在传感器位置获得接收信号(见图3)。

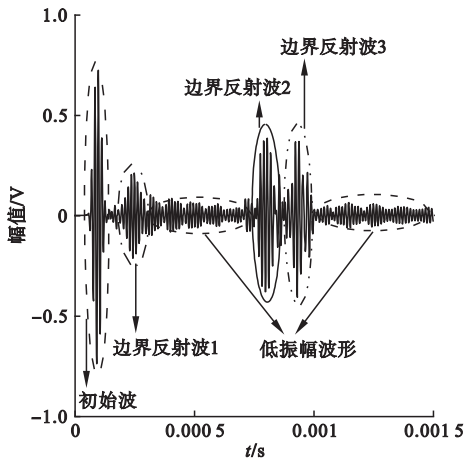


图3 无损层状管道结构有限元信号

Fig.3 FEM waveform of health layered pipe structure

由图3可以清晰地看到边界反射波,并伴有部分低振幅波形.由初始波和边界反射波1、边界反射波2和边界反射波3的位置读取导波接收时间,层状管道结构轴向长度

为2 000 mm,结合超声导波传播距离计算超声导波的速度为5 025 m/s,对比图1层状管道结构频散曲线L(0,6)模态的速度是5 208 m/s可知,在图3中的超声导波是L(0,6)模态中心频率为70 kHz的导波.

2.2 不同程度层状管道结构损伤模型

在层状管道结构中,结构层(钢管层)是十分重要的,而外包层(保温层和防腐层)则作为附加作用(保温和防腐)存在,因此,笔者研究的损伤直接作用在结构层.建立非贯穿损伤的层状管道结构的有限元模型,采用周向损伤类型来模拟裂纹的形式.损伤的几何性质:轴向位置Z=1 m,宽2 mm,深度3 mm,周向损伤对应的角度分别为45°、90°、180°、270°和360°.与无损层状管道结构相同,施加电势荷载,中心频率为70 kHz、幅值10 V、L(0,6)模态超声导波.由于篇幅有限,所有损伤剖面图和网格图不能全部列出,特

选取 90°周向损伤的剖面图(见图 4).

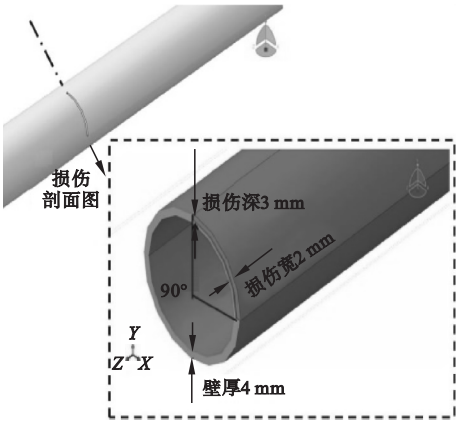


图 4 90°周向损伤层状管道结构模型

Fig. 4 90° circumference damage model of layered pipeline structure

在传感器位置获得接收信号(见图 5).

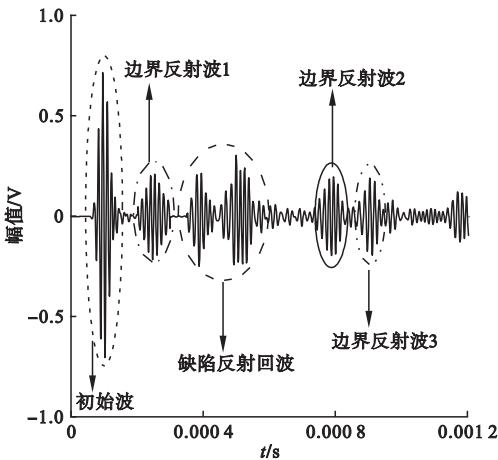


图 5 周向损伤 90°层状管道结构有限元信号

Fig. 5 FEM waveform of 90° circumference damage in layered pipe structure

由图 5 可见清晰边界反射波和缺陷反射

波, $t=0.33\text{ ms}$ 位置处,出现了两个信号(缺陷反射回波),其幅值低于边界反射回波的幅值,根据信号出现的时间($t=0.33\text{ ms}$)和 $L(0,6)$ 模态 70 kHz 的理论速度 $5\,208\text{ m/s}$ 判断,损伤反射回波的计算传播距离是 1.72 m ,与损伤位置($Z=1\,000\text{ mm}$)理论传播距离 1.66 m 的误差为 2.38% . 因此,判定这两个信号是损伤反射回波. 其他边界反射波判断方法与无损层状管道结构相同.

2.3 层状管道结构损伤识别算法

2.3.1 损伤指标与损伤程度的对应关系

根据前述基本理论可知,结构损伤指数 D_i 与管道结构损伤前后接收信号的能量比有关,而管道结构损伤前后的能量值与损伤的截面面积有关,损伤的截面面积是损伤深度和周向长度的乘积. 在此提出非贯穿结构损伤程度用面积比来表示,即周向损伤的径向截面面积与层状管道结构径向截面面积之比. 为了分析损伤指标和损伤程度之间的关系,建立损伤识别算法,根据 45° 、 90° 、 180° 、 270° 和 360° 周向损伤有限元分析结果和式 (2),分别计算不同损伤程度传感信号的能量值. 根据式 (3)、式 (4) 和无损层状管道传感信号能量值计算损伤指数 D_i ,结果见表 3. 其中,损伤程度表示径向截面损伤面积与无损面积的比值,在层状管道结构中,径向截面的无损面积是结构层和外包层面积之和,但是由于结构层是起到运输作用的主要结构,笔者研究的非贯穿损伤全部存在于结

表 3 不同损伤程度与损伤指数关系表

Table 3 Relation between different damage degree and damage index

周向角度/(°)	损伤面积 S/m^2	无损面积 S_0/m^2	损伤程度 $(S/S_0)/\%$	损伤指数 D_i
45	8.6×10^{-6}	0.000 9	9.6	0.11
90	17.19×10^{-5}	0.000 9	19.1	0.20
180	34.38×10^{-5}	0.000 9	38.2	0.38
270	51.57×10^{-5}	0.000 9	57.3	0.61
360	68.76×10^{-5}	0.000 9	76.4	0.87

构层,因此为了便于比较,将不同损伤程度所对应的无损径向面积基础值选择为结构层径向截面面积,即当结构层损伤面积为0时,损伤程度为0;当结构层全部损伤时,损伤程度为1(100%)。绘制损伤程度-损伤指数关系曲线(见图6),并拟合损伤程度-损伤指数关系曲线,函数表达式如下:

$$y=0.011\,2\,x-0.019.$$

(5)

式中: x 表示结构层损伤程度,是自变量, $x\in[0,100]$; y 表示损伤指数,是因变量, $y\in[0,1]$. 当 $x=0$ 时, $y\approx0$,表示结构完好,当 $x=100$ 时, $y\approx1$,表示结构完全失效. 拟合公式的含义基本满足损伤程度与损伤指数的关系.

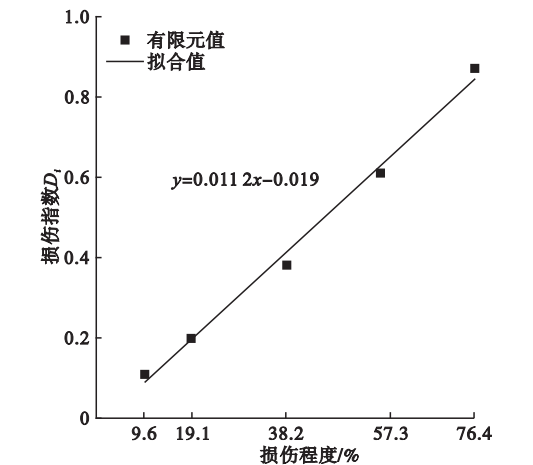


图6 损伤程度与损伤指数关系

Fig. 6 Relation between damage level and damage index

2.3.2 损伤指标的评估范围界定

建立损伤程度和损伤指数的量化关系后,最终目标是界定损伤指标的评估范围,即建立损伤指数和破坏等级的对应关系,对于确定是否需要更换管道结构具有借鉴意义. 关于结构的损伤指标范围,J. R. Young^[11]提出了水泥混凝土的破坏等级与损伤指数的关系,V. V. Bertero^[12]提出了钢筋混凝土框架柱的破坏等级与损伤指数的关系. 笔者在前述研究的基础上并结合团队的成果^[13-15],提出层状管道结构非贯穿损伤破坏等级与损伤指数的关系,结果见表4.

表4 层状管道结构破坏等级与损伤指数关系

Table 4 Relation between damage degree and damage index

损伤指数	破坏等级
$D_i < 0.1$	完好,无明显损伤
$0.1 \leq D_i < 0.2$	轻微损伤,不影响使用
$0.2 \leq D_i < 0.3$	中等损伤,为了避免损失可以考虑更换管道结构
$0.3 \leq D_i < 0.4$	严重破坏,必须更换管道结构
$D_i \geq 0.4$	严重破坏,无法使用

3 试验验证

3.1 无损层状管道结构

建立一个层状管道结构压电超声导波损伤识别试验系统^[16],其中,被测层状管道结构的几何和材料参数与有限元分析相同(见表1),试验装置见图7. 与有限元模型相同,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,16片PZT作动器中心对称耦合在结构层端部 $Z=20$ mm位置,4片PZT传感器布置在结构层端部 $Z=320$ mm位置,选择中心频率为70 kHz并经Hanning窗函数调制的5周期单音频正弦叠加信号作为激励信号,并根据PZT列阵的布设方式,可产生 $L(0,6)$ 模态的超声导波,激励幅值为10 V. 获得接收信号见图8,并计算其损伤指数与层状管道结构有限元分析结果作为对比.

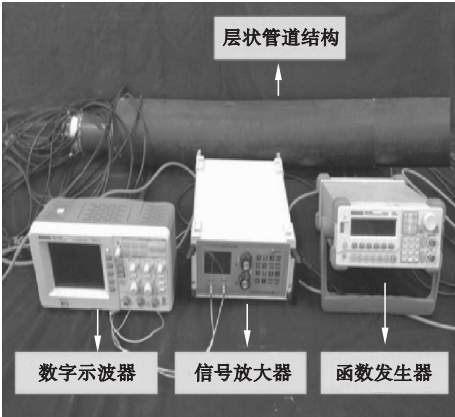


图7 试验系统装置

Fig. 7 The setup of experimental system

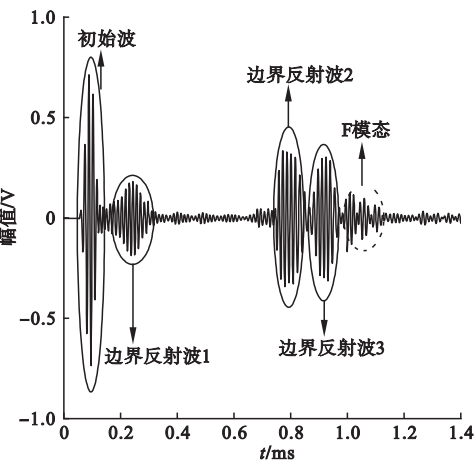
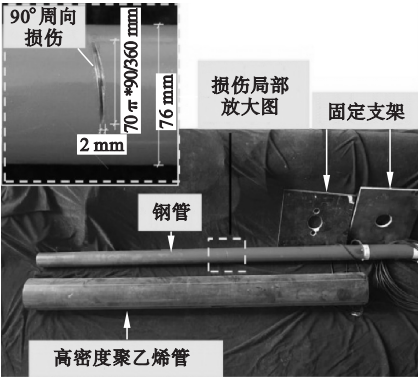
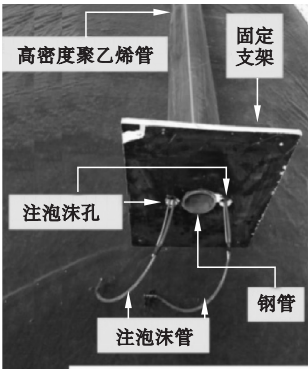


图8 无损层状管道结构试验信号

Fig. 8 Experimental waveform of health layered pipe structure



(a) 未组装前管道结构图



(b) 灌注泡沫前层状管道结构侧面图

图9 试验对象制作过程

Fig. 9 The manufacturing process of experimental object

损伤层状管道结构试验装置与无损层状管道结构相同。在结构层布置作动器和传感器阵列,形式和激励信号均与无损管道结构的相同。获得传感信号见图10,可见损伤反射回波和边界反射波。根据图10计算结构损伤指数 D_i 与有限元模拟结果进行对比。

3.3 试验结果与有限元模拟对比

根据无损层状管道结构和90°周向损伤层状管道结构传感接收信号分别计算损伤系数,并与有限元模拟图形对比,结果见图11。

在试验中,通过计算接收传感信号的能量值获得无损层状管道结构的损伤指数值在拟合直线延长线与 x 轴相交的位置(圆点),说明当损伤程度为零时(周向损伤角度0),

3.2 损伤层状管道结构

试验用损伤层状管道结构是在实验室内人工制作完成的。试验对象制作流程如图9所示。首先,采用具有周向损伤的钢管作为结构层,钢管性质见表1,损伤位置 $Z=1\text{ m}$,宽2 mm、深度3 mm,见图9(a);在钢管外部固定高密度聚乙烯外套管制作试验对象,高密度聚乙烯管长1.68 m,内半径是68 mm,壁厚2 mm;然后,在高密度聚乙烯外套管与钢管之间注入聚氨酯硬质泡沫,见图9(b);最后,聚氨酯硬质泡沫硬化后完成具有损伤的层状管道结构的制作。

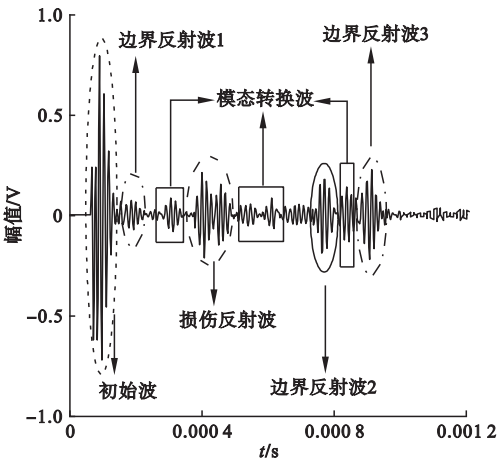


图10 90°损伤层状管道结构试验信号

Fig. 10 Experimental waveform of 90° circumference damage in layered pipe structure

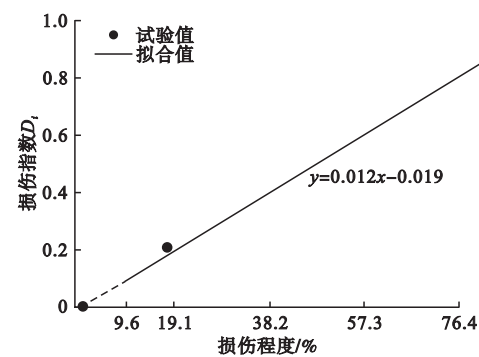


图 11 损伤指数有限值和试验值对比

Fig. 11 The comparison of damage index between finite element model and experimental values

损伤指数 $D_i = 0.018$, 与损伤识别算法理论值 -0.019 的误差是 5.3% ; 当损伤程度为 19.1% 时 (周向损伤角度 90°), 损伤指数 $D_i = 0.22$, 与损伤识别算法理论值 0.21 的误差是 4.8% ; 通过以上两组数据可知, 损伤指数试验值与有限元模拟值误差在合理范围, 有限元模型有效且可靠。

4 结 论

- (1) 根据脉冲回波法和飞行时间法分析接收信号, 其中的损伤反射波和端部反射波能够较准确地判断损伤位置。
- (2) 层状管道结构非贯穿损伤程度越大, 损伤指数也随之增大, 损伤程度和损伤指数拟合为线性关系。
- (3) 提出层状管道结构更换建议值为 $D_i = 0.3 \sim 0.4$ 。
- (4) 试验值与有限元模拟值基本相符, 因此在有限元模拟中提出的损伤识别算法和损伤指数与破坏等级之间的关系均合理, 能够为指导工程应用服务。

参考文献

[1] THOMSON W T. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium[J]. Journal of applied physics, 1950, 21(2) : 89 – 93.

[2] HASKELL N A. The dispersion multilayered media[J]. Bulletin society of America, 1953, 43(1) : 17 – 34.

[3] LOWE M J S. Matrix techniques for modeling ultrasonic waves in multilayered-media [J]. IEEE UFFC, 1995, 42(4) : 525 – 542.

[4] LOWE M J S, ALLEYNE D N, CAWLEY P. Defect detection in pipes using guided waves [J]. Ultrasonics, 1998, 36(1) : 147 – 154.

[5] LUO W, ROSE J L. Phased array focusing with guided waves in a viscoelastic coated hollow cylinder [J]. Journal of the acoustical society of America, 2007, 121(4) : 1945 – 1955.

[6] 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.

[7] KWUN H, KIM S Y, CHOI M S, et al. Torsional guided-wave attenuation in coal-tar-enamel-coted buried piping [J]. NDT & E international, 2004, 37(8) : 663 – 665.

[8] 杨理践, 吕瑞宏, 刘斌, 等. 电磁超声兰姆波模态能量密度分布特征研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11) : 2602 – 2610.

(YANG Lijian, Lü Ruihong, LIU Bin, et al. Research on the distribution of energy density of modal identification of electromagnetic ultrasonic lamb wave propagation [J]. Chinese journal of scientific instrument, 2015, 36(11) : 2602 – 2610.)

[9] JAYANT S, CHOPRA I. Fundamental understanding of piezoelectric strain sensors [J]. Journal of intelligent material systems and structures, 2000, 11 : 246 – 257.

[10] TANIMOLA F, HILL D. Distributed fibre optic sensors for pipeline protection [J]. Journal of natural gas science and engineering, 2009, 1 : 134 – 143.

[11] YOUNG J R, ALFRADO H, ANG S. Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings [J]. Journal of structural engineering, ASCE, 1985, 111(4) : 740 – 756.

[12] BERTERO V V. State-of-the-art report on design criteria [C]. In 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco: CD-ROM, 1996.

[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, 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.)

[15] 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.)

[16] 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.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)