DOI: 10.3901/JME.2014.08.010

基于半解析有限元法的多层管超声导波数值模拟与试验研究*

张小伟¹ 唐志峰² 吕福在¹ 王亚东¹ 柳伟续²

(1. 浙江大学现代制造工程研究所 杭州 310027;

2. 浙江大学数字技术与仪器研究所 杭州 310027)

摘要: 超声导波检测技术因其检测距离远、检测效率高,在工业管道的无损检测和健康监测中显示出良好的应用前景,但是目前对于广泛应用于工业领域的多层管的导波检测研究仍较少。应用半解析有限元法(Semi-analytical finite element method, SAFE),基于虚功原理构建超声导波在多层管中传播的控制方程,求解导波在多层管中传播的特性,导出多层管中导波的频散特性,包括相速度、能量速度、衰减、波结构等,为导波检测多层管时选择模式 and 频率提供理论依据。讨论多层管中黏弹性介质引入的阻尼对导波传播的影响,求解多层管中的导波衰减频散曲线,用于指导多层管检测,并通过数值仿真以及利用 MSGW 磁致伸缩导波检测仪检测单层钢管和衬塑钢管试验验证部分理论结果。

关键词: 超声导波; 多层管; 半解析有限元法; 频散特性; 黏弹性

中图分类号: TB559; O347

Numerical Simulation and Experimental Investigation on Ultrasonic Guided Waves in Multilayered Pipes Based on SAFE

ZHANG Xiaowei¹ TANG Zhifeng² LÜ Fuzai¹ WANG Yadong¹ LIU Weixu²

(1. Institute of Modern Manufacture Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027;

2. Institute of Advanced Digital Technologies and Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: Ultrasonic guided waves detecting technology has shown a good prospect in non-destructive testing and health monitoring of industrial pipelines, thanks to its advantages such as long detection range and high detection efficiency, but very few researches have been conducted on guided waves inspection of multilayered pipes, which is widely used in industrial circle. The semi-analytical finite element method is used to formulate the governing equation for guided waves propagating in multilayered pipes on the basis of the virtual work principle, dispersive characteristics including phase velocity, energy velocity, attenuation and wave structures are extracted by solving governing equation, which provide the basis for selecting mode and frequency during application. The effect of viscoelastic material on guided waves propagating in multilayered pipes is taken into consideration, and the dispersive solutions for multilayered pipes are obtained in terms of attenuation curves, which can be used to supervise the inspection of multilayered pipes, furthermore, the theoretical result is partly verified by numerical simulation as well as detecting single-layered pipe and lining plastic pipe by using MSGW guided waves detecting instrument.

Key words: guided waves; multilayered pipes; semi-analytical finite element method(SAFE); dispersive characteristics; viscoelasticity

0 前言

超声导波无损检测技术由于其单点激励、检测距离远、100%横截面检测等优点,在石油、化工、

电力等工业领域的管道无损检测和健康监测中显示出良好的应用前景。工业领域使用的管道多采用多层管,即在管道内外壁涂覆黏弹性介质以防止管道受到潮湿空气、土壤的腐蚀以及其他外界损伤等。然而,目前超声导波的研究多数集中于单层管,应用范围受到限制,因此,研究导波传播理论,求解导波在多层管中传播的特性,并以此指导多层管的检测是非常必要的。

* 国家自然科学基金(61271084, 51275454)、浙江省重大科技计划(2012C01015-2)和浙江大学青年教师交叉研究种子基金(2011022)资助项目。20130418 收到初稿,20131015 收到修改稿

国内外许多学者对导波传播理论进行了深入的研究。DENOS^[1]推导出导波在无限长管道中传播的完整解析解，为导波技术应用于管道检测奠定了理论基础；LOWE^[2]使用矩阵法求解超声导波的频散特性，推动了长距离导波检测技术的应用；刘增华等^[3-4]也使用解析方法分析了包覆层管道中轴对称模态导波的传播特性，并设计试验验证了衰减频散曲线。但是，解析法(矩阵法)在求解包覆层管中导波特性时存在耗时、漏根和稳定性差等问题，且无法应用于任意截面波导，在实际应用中受到了限制。

近年来，半解析有限元法(Semi-analytical finite element method, SAFE)由于其高效、精确、稳定、可用于任意截面波导等优点，得到了越来越多的关注。TAKAHIRO 等^[5]以杆和钢轨为例，应用 SAFE 求解任意截面波导的频散曲线；BARTOLI 等^[6]则主要以板为例，应用 SAFE 对具有黏弹性包覆层的波导中导波的传播进行了建模；ALESSANDRO 等^[7-8]应用 SAFE 求解了管道中导波的特性并计算出波导受到轴对称激励后的时域响应。但是，现有的二维 SAFE 求解方案，多难以识别导波模态，难以准确分析各模态导波的波结构和应力分布，难以分析高阶弯曲模态的特性，且计算效率较低，对设计和检测工作的指导仍属有限。

本文拟在已有研究工作的基础上，利用管道的轴对称性，将多层管横截面简化为一维有限单元划分，使用一维半解析有限元法(1D-SAFE)求解衬塑钢管中超声导波的频散特性，包括相速度、能量速度(群速度)、衰减、波结构等，识别多模态，数值仿真导波在管道中的传播，同时设计扭转模态导波检测单层钢管和衬塑钢管对比试验，并对试验结果和理论分析进行比较和分析。

1 半解析有限元法

SAFE 的基本假设^[11]是波导沿导波传播方向的尺寸显著大于其他方向的尺寸，如图 1 所示多层管模型，当一束应力波垂直入射到波导横截面时，可认为导波沿波导以时空谐波函数 $\exp(i(kz - \omega t))$ (k 表示波数)传播，即可用精确的解析表达式 $\exp(i(kz - \omega t))$ 表示轴向 z 的运动(应力波传播)，因此只需要对波导横截面进行有限元划分，与单纯的有限元法将波导进行三维有限元划分相比，大大提高了计算效率。对于管道而言，如果将截面二维有限元划分，圆周方向的单元数限制了可计算的弯曲模态的阶次，且计算量仍相对较大。本文利用管道的轴对称性，用

精确的解析函数 $\exp(in\theta)$ (n 表示周向阶次)表示圆周方向的运动，只在径向 r 方向一维有限元划分，既提高了精确度和计算效率，也突破了计算高阶弯曲模态的限制。

图 1 多层管模型

1.1 控制方程

根据虚功原理，自由边界管道波动控制方程的弱形式^[10]为

$$\int_V \delta \mathbf{u}^T \cdot \rho \ddot{\mathbf{u}} dV + \int_V \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \cdot \boldsymbol{\sigma} dV = 0 \quad (1)$$

式中， ρ 为密度； $\mathbf{u}$ 为位移； $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为应变； $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力，分别可表示为

$$\mathbf{u}(r, \theta, z, t) = (u_r \ u_\theta \ u_z)^T \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}(r, \theta, z, t) = (\varepsilon_r \ \varepsilon_\theta \ \varepsilon_z \ \gamma_{\theta z} \ \gamma_{rz} \ \gamma_{r\theta})^T \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\sigma}(r, \theta, z, t) = (\sigma_r \ \sigma_\theta \ \sigma_z \ \tau_{\theta z} \ \tau_{rz} \ \tau_{r\theta})^T \quad (4)$$

根据弹性力学，应力-应变关系表示为

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (5)$$

式中， $\mathbf{C}$ 为材料刚度矩阵。

应变-位移关系表示为

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\partial u_r}{\partial r} \\ \varepsilon_\theta &= \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial u_z}{\partial z} \\ \gamma_{\theta z} &= \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \\ \gamma_{rz} &= \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \\ \gamma_{r\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

根据有限元法基本理论，在管道的径向 r 进行一维有限元划分，即沿管道的厚度方向划分杆单元，单元每个节点拥有 3 自由度，此时管道任意一点的位移 $\mathbf{u}(r, \theta, z, t)$ 可表示为

$$\mathbf{u}(r, \theta, z, t) = \mathbf{N}(r) \mathbf{U}^j \exp(i(kz + n\theta - \omega t)) \quad (7)$$

式中， $\mathbf{U}^j$ 为单元 j 的节点位移矢量， $\mathbf{N}(r)$ 为形函数。

对于一阶杆单元而言, $\mathbf{U}^j$ 则是一个 6×1 的列矢量, $\mathbf{N}(r)$ 是一个 3×6 的矩阵。

将式(7)代入式(6), 应变矢量表示为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = (\mathbf{B}_1 + i n \mathbf{B}_2 + i k \mathbf{B}_3) \mathbf{U}^j \exp(i(kz + n\theta - \omega t)) \quad (8)$$

式中, $\mathbf{B}_1$ 、 $\mathbf{B}_2$ 、 $\mathbf{B}_3$ 均为 6×6 的带参数矩阵。将应力矢量式(5)、位移矢量式(7)、应变矢量式(8)代入控制方程式(1)并简化, 可得到单元 j 的波动控制方程

$$(\mathbf{K}_1^j + i n \mathbf{K}_2^j + i k \mathbf{K}_3^j + n^2 \mathbf{K}_4^j + n k \mathbf{K}_5^j + k^2 \mathbf{K}_6^j - \omega^2 \mathbf{M}^j) \mathbf{U}^j = 0 \quad (9)$$

$$\begin{cases} \mathbf{K}_1^j = \int \mathbf{B}_1^T \mathbf{C} \mathbf{B}_1 r dr & \mathbf{K}_2^j = \int (\mathbf{B}_1^T \mathbf{C} \mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_2^T \mathbf{C} \mathbf{B}_1) r dr \\ \mathbf{K}_3^j = \int (\mathbf{B}_1^T \mathbf{C} \mathbf{B}_3 - \mathbf{B}_3^T \mathbf{C} \mathbf{B}_1) r dr & \mathbf{K}_4^j = \int \mathbf{B}_2^T \mathbf{C} \mathbf{B}_2 r dr \\ \mathbf{K}_5^j = \int (\mathbf{B}_2^T \mathbf{C} \mathbf{B}_3 + \mathbf{B}_3^T \mathbf{C} \mathbf{B}_2) r dr & \mathbf{K}_6^j = \int \mathbf{B}_3^T \mathbf{C} \mathbf{B}_3 r dr \\ \mathbf{M}^j = \int \mathbf{N}^T \rho \mathbf{N} r dr \end{cases} \quad (10)$$

组装 r 方向所有单元的控制方程, 得到整个管道模型的控制方程

$$(\mathbf{K}_1 + i n \mathbf{K}_2 + i k \mathbf{K}_3 + n^2 \mathbf{K}_4 + n k \mathbf{K}_5 + k^2 \mathbf{K}_6 - \omega^2 \mathbf{M}) \mathbf{U} = 0 \quad (11)$$

式中, 刚度矩阵 $\mathbf{K}_1$ 、 $\mathbf{K}_2$ 、 $\mathbf{K}_3$ 、 $\mathbf{K}_4$ 、 $\mathbf{K}_5$ 、 $\mathbf{K}_6$ 和质量矩阵 $\mathbf{M}$ 均为 $N \times N$ 的矩阵, N 表示所有节点的自由度, 即节点数的 3 倍。对于无阻尼管道, 波数 k 为实数, 可直接求解式(11)特征值问题, 得到导波在管道中传播的频散特性。

对于有阻尼管道, 波数 k 为复数, 且虚部具有实际物理意义, 因此将式(11)重建构建为

$$(\mathbf{A} - k \mathbf{B}) \mathbf{Q} = 0 \quad (12)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & \mathbf{K}_K \\ \mathbf{K}_K & i k \mathbf{K}_3 + n k \mathbf{K}_5 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \mathbf{K}_K & 0 \\ 0 & -\mathbf{K}_6 \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \mathbf{U} \\ k \mathbf{U} \end{pmatrix} \quad (15)$$

式中, $\mathbf{K}_K = \mathbf{K}_1 + i n \mathbf{K}_2 + n^2 \mathbf{K}_4 - \omega^2 \mathbf{M}$ 。

式(12)给出了导波在管道中传播的控制方程, $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 为 $2N \times 2N$ 的矩阵。确定周向阶次 n 并给定角频率 ω , 可通过求解特征值问题得到导波 m 模态 ($m = 1, 2, \dots, 2N$) 的波数(特征值)和波结构(特征矢量), 进而可以求解相速度、群速度、波结构、衰减等特性。其中, 所得 $2N$ 个模态包括沿 $+z$ 和 $-z$ 方向传播的各 N 个模态。

1.2 黏弹性层的处理

管道包覆层或者内衬层黏弹性介质引入阻尼, 造成弹性波传播时迅速衰减。本文使用迟滞模型描

述黏弹性层材料的特性^[6,8,15], 与 Kelvin-Voigt 模型不同, 由迟滞模型得到的材料刚度矩阵不是频率 f 的函数, 这将大大降低计算成本。根据迟滞模型, 黏弹性材料的 Lamé 常数表示为

$$\hat{\mu} = \rho c_T^2 \left(1 + i \frac{\kappa_T}{2\pi} \right)^{-2} \quad (16)$$

$$\hat{\lambda} = \rho \left[c_L^2 \left(1 + i \frac{\kappa_L}{2\pi} \right)^{-2} - 2c_T^2 \left(1 + i \frac{\kappa_T}{2\pi} \right)^{-2} \right] \quad (17)$$

式中, c_T 、 c_L 表示横波速度和纵波速度, κ_T 、 κ_L 表示横波衰减和纵波衰减。

应用 SAFE 求解多层管道频散问题时, 将黏弹性层与弹性层分别处理, 然后组装到整体刚度矩阵中即可。

1.3 导波频散特性

导波的相速度和衰减可直接获得

$$c_p^m = \omega / k_{Re}^m \quad (18)$$

$$a_u^m = k_{Im}^m \quad (19)$$

对于无阻尼波导, 群速度 $c_g^m = \partial \omega / \partial k_{Re}^m$ 也可直接获得^[8]

$$c_g^m = \frac{(\mathbf{U}_L^m)^T (n \mathbf{K}_2 + i \mathbf{K}_3 + 2k_{Re}^m \mathbf{K}_6) \mathbf{U}_R^m}{2\omega (\mathbf{U}_L^m)^T \mathbf{M} \mathbf{U}_R^m} \quad (20)$$

对于有阻尼波导, 群速度不能准确描述导波能量的传播速度, 需要计算波包的能量速度^[8,13]

$$v_e^m = \frac{\mathbf{P}}{E} = \frac{\frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} (\mathbf{P}^m \cdot \mathbf{z}) d\Omega}{\frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} (\mathbf{S}^m + \mathbf{K}^m) d\Omega} \quad (21)$$

式中, $\mathbf{P}$ 为玻印亭矢量, E 为总能量, Ω 为波导横截面, $\mathbf{P}^m$ 为能流密度矢量, $\mathbf{S}^m$ 为应变能流密度, $\mathbf{K}^m$ 为动能流密度。

1.4 导波传播数值模拟

应用 SAFE 模拟管道中导波的传播^[8-9], 计算管道 $z=z_S$ 处受到激励后, 位置 $z=z_R$ 处的时域响应。基本步骤为利用傅里叶变换及其逆变换先计算频域响应然后计算时域响应。

对 $z=z_S$ 处的激励载荷 $F=F_0 \delta(z-z_S)$ 实行傅里叶变换

$$\tilde{F} = \int_{-\infty}^{+\infty} F_0 \delta(z-z_S) \exp(-ik^m z) dz = F_0 \exp(-ik^m z_S) \quad (22)$$

根据简正模态展开理论, 首先得到频率-波数域内的响应, 然后实行傅里叶逆变换得到频域响应

$$\tilde{U}(z_R) = -i \sum_{m=1}^{M_R} \frac{k^m}{D_m} \left\{ (\mathbf{U}_L^m)^T \tilde{F} \mathbf{U}_R^m \exp[ik^m (z_R - z_S)] \right\} \quad (23)$$

$$D_m = Q_L^m B Q_R^m \quad (24)$$

对式(23)实行傅里叶逆变换得到距离激励源

$d=z_R-z_S$ 的时域响应

$$U(z_R, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{U}(z_R) \exp(i\omega t) d\omega \quad (25)$$

通过式(25)可对导波在管道中的传播进行数值仿真。

2 应用

管道中的导波包括扭转模式 $T(0, m)$ 、纵向模式 $L(0, m)$ 和弯曲模式 $F(n, m)$ 三种^[12], 扭转模式 T 和纵向模式 L 是轴对称模式, 弯曲模式 F 是非轴对称模式, 其中扭转模式只有周向 θ 位移, 纵向模式有径向 r 和轴向 z 位移, 弯曲模式则有径向 r 、周向 θ 和轴向 z 位移。

衬塑钢管继承了钢管和塑料管各自的优点, 广泛应用于各类建筑的冷热水给水系统。本文选用 DN50 衬塑钢管作为研究对象, 通过数值模拟和试验的方法研究超声导波在多层管中的传播特性。

2.1 衬塑钢管导波求解

所选衬塑钢管以无缝钢管为基管, 内附 PE 塑料, 外壁镀锌(镀层很薄, 本文不予考虑), 样管的实测外径为 59.8 mm, 钢层厚度为 2.3 mm, 内衬层平均厚度为 2.2 mm。选用衬塑钢管材质的主要参数如表 1 所示, 其中钢的材料参数源自文献[3], PE 的材料参数源自手册 DISPERSE 的用户手册。

表 1 衬塑钢管材质主要参数

材料	密度/ (kg/m ³)	横波 速度/ (m/s)	纵波 速度/ (m/s)	横波 衰减/ (Np/λ)	纵波 衰减/ (Np/λ)
钢	7 932	3 260	5 960	—	—
PE	950	950	2 300	0.15	0.03

频散曲线用于指导导波检测时模式和频率的选择, 其求解具有重要意义。在 Matlab 平台下编写程序实现 SAFE, 求解样管的频散特性, 得到频散曲线(轴对称模式)如图 2(相速度)、3(能量速度)所示, 图 2、3 中空曲线表示与样管具有相同几何尺寸的单层钢管的频散曲线。

图 2 单层钢管与衬塑钢管相速度曲线

图 3 单层钢管与衬塑钢管能量速度曲线

观察图 2、3 不难发现, 黏弹性内衬层对管中导波的模式产生了显著影响: 在曲线所示频带内, 衬塑钢管中导波的模式更多, 频散情况更为复杂。具体可得如下结论。

(1) 在频带 0~300 kHz, 单层钢管只存在 $T(0,1)$ 、 $L(0,1)$ 和 $L(0,2)$ 三种轴对称模式导波, 衬塑钢管中则在单层钢管的基础上多出 $T(0,2)$ 、 $L(0,3)$ 和 $L(0,4)$ 三种轴对称模式。这说明管道结构越复杂, 导波模式越多。PE 内衬层使管道中导波模式情况更为复杂, 这必将加大衬塑管道检测的复杂性: 激励模式更难控制, 检测信号的信噪比下降等。

(2) 在频带 0~300 kHz 内, 衬塑钢管中 $T(0,1)$ 、 $L(0,1)$ 和 $L(0,2)$ 的频散情况比单层钢管中更复杂。在频带 0~100 kHz 内, 两种管道中的纵向模式 $L(0,2)$ 频散曲线大致相同, 在频带 100~300 kHz 内则差异显著。单层钢管中, $L(0,2)$ 模式在该频带内频散曲线近似为一条平行于横轴的直线, 频散现象微弱, 衬塑钢管中 $L(0,2)$ 模式则发生剧烈的频散现象。对于常用于管道检测的扭转模式 $T(0,1)$, 其在单层钢管中一般不发生频散, 即相速度曲线和群速度曲线均为平行于横轴的直线, 这也正是 $T(0,1)$ 模式能够得到广泛应用的最大优势之一, 但是根据图 2、3, 内衬层的引入改变了 $T(0,1)$ 模式的频散状况, 衬塑钢管中的 $T(0,1)$ 模式在 90 kHz 后发生了显著的频散现象。这为衬塑钢管的检测带来困难: 可选择的检测频率范围更窄, 检测信号信噪比下降等。

使用 SAFE 求解衬塑钢管的衰减曲线如图 4 所示, 衰减曲线表征各个模式导波在波导中传播单位距离的衰减随频率变化的情况, 即导波衰减对频率的依赖关系。由衰减曲线可知, 各模式随频率变化的衰减情况不尽相同: $T(0,1)$ 和 $L(0,2)$ 模式在频带 0~120 kHz 内随频率增大而衰减加剧, 120 kHz 之后保持较高衰减并呈上升趋势(本文由于纵坐标范围限制未予完整显示); $L(0,1)$ 模式导波的衰减在 0~200 kHz 内随频率增大而增大, 在 200~220 kHz 内

随频率增大而减小,之后又呈增大趋势; $L(0,3)$ 模态衰减则在曲线所示频带内随频率增大经历了减小-增大-减小的过程。管道包覆层或内衬层引入衰减,减弱导波传播能力,降低导波检测管道缺陷的效率。

图4 衬塑钢管中轴对称模式的衰减曲线

图5为样管中45 kHz和100 kHz的 $T(0,1)$ 和 $L(0,2)$ 模态的波结构(位移分布)。管道中导波的波结构,表示为导波各方向的位移幅度沿壁厚的分布情况,它表征特定模态导波在波导横截面的能量分布。根据图5可知,45 kHz时, $T(0,1)$ 的周向位移 θ 和 $L(0,2)$ 的纵向位移 z 在内衬层内均未发生显著变化,对应衰减曲线中较小的衰减;100 kHz时, $T(0,1)$ 的周向位移 θ 和 $L(0,2)$ 的纵向位移 z 在内衬层内急剧增大,此时,导波能量主要集中在黏弹性内衬层中,导致衰减也较大;其他模态均情况类似。

图5 衬塑钢管中典型模式的波结构

通过导波传播数值仿真观察导波衰减情况。根据衰减频散曲线,64 kHz时, $T(0,1)$ 模态导波的衰减为 0.1435 Np/m (1.2473 dB/m),因此64 kHz的 $T(0,1)$ 模态导波在样管中传播的理论衰减函数应为 $y=A_0\exp(-0.1435(z_R-z_S))(A_0\text{为初始幅度})$ 。基于SAFE

数值仿真 $T(0,1)$ 模态导波在衬塑钢管中的传播,激励信号采用10周期汉宁窗调制的正弦信号,中心频率为64 kHz,分别计算 $T(0,1)$ 传播1 m、2 m、3 m、4 m、5 m后的信号,仿真信号如图6所示。显然,仿真信号与理论预测的结果吻合良好。

图6 64 kHz的 $T(0,1)$ 在样管中传播的仿真信号

2.2 研究

如图7所示,使用由杭州浙大精益机电技术工程有限公司开发的MSGW磁致伸缩超声导波检测仪对单层钢管和衬塑钢管进行端面检测对比试验。试验管道长均为6 m,分别在5.5 m处安装磁致伸缩导波传感器,采用脉冲回波的方式检测端面信号。由于MSGW磁致伸缩超声导波检测仪采用饱和截断的方式采集检测信号,试验通过调节偏置磁场大小保证回波信号不达到饱和。分别在单层钢管和衬塑钢管中激励32 kHz、45 kHz、64 kHz的 $T(0,1)$ 模态导波,试验信号图如图8~10所示,图8a、9a、10a为单层钢管检测信号图,图8b、9b、10b为衬塑钢管检测信号图。

图7 钢管导波检测试验图

图8 32 kHz $T(0,1)$ 模态导波检测信号图

图 9 45 kHz T(0,1)模态导波检测信号图

图 10 64 kHz T(0,1)模态导波检测信号图

利用 MSGW 的方向控制功能,使导波单向传播,图 8~10 中的两个波包均为端面信号,其中第一个波包为 T(0,1)模态导波在远端端面反射的信号,第二个波包为首次端面信号继续传播到近端端面反射的信号。使用远端端面首次回波信号,计算 T(0,1)模态导波在衬塑钢管中传播的衰减,计算方法为

$$\delta = -\frac{20}{D} \lg \frac{A_L}{A_S} \quad (26)$$

式中, D 为导波传播的距离, A_L 为衬塑钢管检测信号幅值, A_S 为单层钢管检测信号幅值。

衬塑钢管中 T(0,1)模态导波衰减计算结果如表 2 所示。对比衬塑钢管中 T(0,1)模态导波衰减的试验结果与理论预测值,如图 11 所示,有限个衰减试验值与理论值吻合良好,最大相对误差不超过 10%,验证了 SAFE 求解衬塑钢管衰减曲线的正确性。误差主要来源于样管材质参数未经实测,查表所得参数与实际值有较大出入。衰减曲线可用于指导衬塑钢管导波检测,具有重要的实用价值。

表 2 衬塑钢管中 T(0,1)模态导波衰减试验结果

频率/kHz	32	45	64
衰减/(dB/m)	0.168 7	0.371 9	1.132 6

图 11 T(0,1)模态导波衰减曲线

3 结论

(1) 文章应用半解析有限元法建立管道中导波的数学模型,求解导波频散特性,讨论黏弹性内衬层(或包覆层)对管道中导波频散特性的影响。

(2) 求解衬塑钢管中导波的衰减曲线,从波结构的角度分析各模态导波的衰减,基于 SAFE 数值仿真衬塑钢管中扭转模态导波的传播,理论验证衰减曲线。

(3) 通过单层钢管、衬塑钢管导波检测试验,获取衬塑钢管中不同频率扭转模态导波的衰减实测值,试验验证衰减曲线。

(4) 本文采用一维半解析有限元法,在方法上克服了解析法存在的问题,具有较高的计算效率和精度,该方法可求解任意多层管($n \geq 2$)导波问题,对多层管导波检测具有理论指导意义。

参 考 文 献

- [1] DENOS C G. Three dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. I. Analytical foundation[J]. Journal of the Acoustic Society of America, 1959, 31(5): 568-573.
- [2] LOWE M J S. Matrix techniques for modeling ultrasonic waves in multilayered media[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1995, 42(4): 525-542.
- [3] 刘增华, 何存富, 吴斌, 等. 带粘弹性包覆层管道中的纵向模态[J]. 机械工程学报, 2007, 43(4): 187-192.
LIU Zenghua, HE Cunfu, WU Bin, et al. Longitude modes in pipes with viscoelastic coatings[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(4): 187-192.
- [4] 刘增华, 吴斌, 何存富, 等. 超声导波扭转模态在粘弹性包覆层管道中传播特性研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(3): 291-299.
LIU Zenghua, WU Bin, HE Cunfu, et al. Torsional mode of ultrasonic guided wave propagation characteristics in pipes with viscoelastic coatings[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2005, 13(3): 291-299.
- [5] TAKAHIRO H, SONG W J, ROSE J L. Guided wave dispersion curves for a bar with an arbitrary cross-section, a rod and rail example[J]. Ultrasonics, 2003, 41: 175-183.
- [6] BARTOLI I, MARZANI A, FRANCESCO L D S, et al. Modeling wave propagation in damped waveguides of arbitrary cross-section[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 295: 685-707.

- [7] ALESSANDRO M, ERASMO V, BARTOLI I, et al. A semi-analytical finite element formulation for modeling stress wave propagation in axisymmetric damped waveguides[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 318: 488-505.
- [8] ALESSANDRO M. Time-transient response for ultrasonic guided waves propagating in damped cylinders[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2008, 45: 6347-6368.
- [9] ALESSANDRO M, BARTOLI I. High frequency waves propagating in octagonal bars: A low cost computation algorithm[J]. *Algorithms*, 2009, 2: 227-246.
- [10] MU Jing, ROSE J L. Guided wave propagation and mode differentiation in hollow cylinders with viscoelastic coatings[J]. *Journal of Acoustical Society of America*, 2008, 124(2): 866-874.
- [11] LEE C M. Guided elastic waves in structures with an arbitrary cross-section[D]. State College: The Pennsylvania State University, 2006.
- [12] ROSE J L. *Ultrasonic waves in solid media*[M]. Cincinnati: Cambridge University Press, 1999.
- [13] BERNARD A, LOWE M J S. Guided waves energy velocity in absorbing and non-absorbing plates[J]. *Journal of Acoustical Society of America*, 2000, 110(1): 186-196.
- [14] 刘增华, 何存富, 杨士明, 等. 充水管道中纵向超声导波传播特性的理论分析与试验研究[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(3): 171-178.
LIU Zenghua, HE Cunfu, YANG Shiming, et al. Theoretical and experimental studies of longitudinal ultrasonic guided wave propagation characteristics in water-filled pipes[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(3): 171-178.
- [15] LAKES R S. Review article: Viscoelastic measurement techniques[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(4): 797-810.

作者简介: 张小伟, 男, 1988 年出生。主要研究方向为磁致伸缩超声导波无损检测技术。

E-mail: veryzxw@gmail.com

唐志峰(通信作者), 男, 1977 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向智能检测与控制, 机电一体化。

E-mail: tangzhifeng@zju.edu.cn