

管道 $T(0,1)$ 模态导波检测数值模拟研究

董为荣, 帅 健, 许 葵

(中国石油大学(北京) 机电工程学院, 北京 102249)

摘 要: 简述了管道导波检测理论基础。运用有限元分析方法, 对目前现场检测中应用的 $T(0,1)$ 模态导波在管中传播过程进行数值模拟研究。在模型的特定部位删除或添加部分单元来模拟缺陷和焊缝, 对管子的一端切向瞬时位移载荷模拟 $T(0,1)$ 模态入射波, 计算管道的瞬时动力学响应, 对回波信号作频谱分析。计算结果表明, 缺陷位置可以根据缺陷处回波信号到达时间和波速确定。给出了缺陷回波反射系数与缺陷横截面积各影响因素之间的关系曲线, 可近似地判定缺陷的几何尺寸, 并通过回波初始相位来识别缺陷。

关键词: 管道检测; 超声导波; 模态; 数值模拟; 反射系数

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2008)03-0149-04

Numerical Simulation Study of Detection in Pipes Using $T(0,1)$ Mode Ultrasonic Guided Waves

DONG Wei-Rong, SHUAI Jian, XU Kui

(Faculty of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The basic theory of the ultrasonic guided wave detection technique was reviewed. Using the finite element method, numerical simulation studies were performed about the $T(0,1)$ modules applied in the current detection in field. In finite element models, the defect and welding were simulated by getting rid of or add some cells at specific position, and the $T(0,1)$ modules wave-input was simulated with tangent transient displacement applied at one end of pipe. The results showed that the corrosion defect was located by the time of the echo wave and the wave velocity. At the same time, the relationship between reflection coefficient and the geometrical dimension of defection was made. The flaw and the welded joint can be distinguished by the echo initialphase.

Keywords: Pipeline detection; Ultrasonic guided waves; Module; Numerical simulation; Reflection coefficient

长距离埋地管道是目前石油和天然气的主要运输工具。由于埋地管道运行的复杂环境, 各种因素造成的管道外部腐蚀直接影响管道使用安全。为了解管道腐蚀情况, 采取针对性的措施, 延长管道服役时间, 需要有快速、便捷的管道腐蚀检测技术。

导波检测时在管道的一端激励超声导波, 由于超声导波沿传播路径衰减较小, 可以沿管道传播多达几十米远的距离。在激励处, 探头所接收到的回波信号包含了管道的整体性的信息, 即一次可以检测几十米长的管道。此外, 利用导波检测管道无须剥离防腐层, 具有经济、快速的优点。

导波传播理论的研究已从板中导波到管中导波传播。目前国内外学者比较关注的是利用纵波和扭转波检测管道缺陷, 英国帝国理工大学^[1-3]开发了基于纵振波和扭转波的检测技术。其认为 $L(0,2)$ 模态导波频率在 70 kHz 处频散现象小且群速度最大, $T(0,1)$ 模态导波在 20 kHz 处群速度最大, 不易受其它模态信号干扰, 故分别选取 70 和 20 kHz 为上述两种模态导波激励信号的中心频率。相比于纵振波, 扭转波在输液管道中应用更广泛, 目前导波检测现场应用 $T(0,1)$ 模态居多。

为了研究管道导波检测中的缺陷识别方法, 对 $T(0,1)$ 模态导波在含腐蚀缺陷管道中的传播过程进行了数值模拟研究。

收稿日期: 2007-02-20

作者简介: 董为荣(1981—), 男, 硕士研究生, 从事油气生产安全及无损检测研究。

1 检测的理论基础

1.1 缺陷轴向定位

根据文献[4],管道中的导波波速只与材料的性能有关,其横波波速为:

$$C_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (1)$$

式中 C_T 为 T(0,1)模态导波在管中的传播速度, E 为材料弹性模量, ρ 为材料密度, ν 为泊松比。

传感器在管子试样的一端收发导波,设接收到的缺陷回波与发射波的时间间隔为 T ,缺陷离管端距离为 x ,则有:

$$2x = C \cdot T \quad (2)$$

由此,经过多次测量,可用作导波波速拟合,比较拟合出的波速是否与理论波速吻合。

1.2 回波信号反射

对于管中超声波的反射和入射问题,可以类比为根端点为自由端和固定端的振动弦线^[5]。联系管道检测的实际情况,缺陷部分可类比成固定端,焊缝部分类比成部分自由端。因此,缺陷与焊缝处的回波相位相反,焊缝处的回波与初始激励信号相位相同。下文数值模拟亦得出同样结论。

当导波经过缺陷处时,因抵抗变形必将产生回波信号,垂直入射时的反射系数 R 为:

$$R = \frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2} \quad (3)$$

式中 W 为材料的声阻抗,对于圆管中的超声波反射,令 $1 - A_q/A_g = \alpha$ (A_q 和 A_g 分别为缺陷和管体的截面积, α 为缺陷横截面积占管道横截面积比),则反射系数 R 为:

$$R = \frac{A_g - A_q}{A_g + A_q} = \frac{\alpha}{2 - \alpha} \quad (4)$$

式(4)适用于 T(0,1)模态导波的垂直入射情况。

2 数值模拟研究

2.1 网格划分及模型建立

选用有限元软件 ANSYS 中的瞬态动力学分析。研究对象为长 2.6 m,直径 76 mm(3 in),壁厚 5.5 mm 的管子。其 $E=200$ GPa, $\nu=0.32$, $\rho=7850$ kg/m³。管体采用实体模型,单元类型为 Solid45,划分为四方体网格。在管一端施加瞬时位移载荷,另一端固定约束,则可模拟出导波在管中的传播过程。

管道腐蚀缺陷多发生于管外壁,且由于模拟超

声波只需考虑管的整体性,无需细化缺陷形状表征,因此在距管端一定距离处删除部分外层单元以模拟不同形状的腐蚀缺陷;当删除一个单元时模拟点腐蚀;删除环向数个单元时模拟环状的腐蚀缺陷,同样,删除轴向数个单元可以模拟轴向腐蚀缺陷。与此对应,焊缝表征为在管外壁添加一些单元(图 1)。

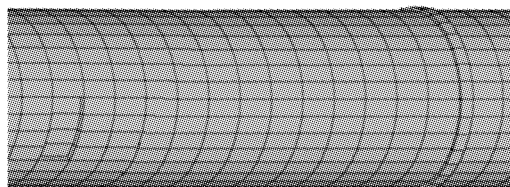


图 1 缺陷、焊缝数值模拟模型示意图

为忽略材料本身的阻尼效应而引起的导波传播频散现象,模拟过程中,选用瞬态分析中的完全法,阻尼系数为 0。此外,由文献[6]中频散曲线图得知, T(0,1)在 20 kHz 时基本不因管的几何因素而发生频散,因此式(4)在文中是有效的。

T(0,1)模态导波是沿管切向振动轴向传播的,因此在模拟时,需将载荷加载到管的切线方向。为了实现此目的,在 ANSYS 中采用柱坐标,在 θ 方向加载位移载荷。加载过程中,须注意选用的信号为位移,在柱坐标下位移要转换成角度,最后处理数据时再由角度转换成位移。选用中心频率 20 kHz,5 周期的激励信号(图 2)。

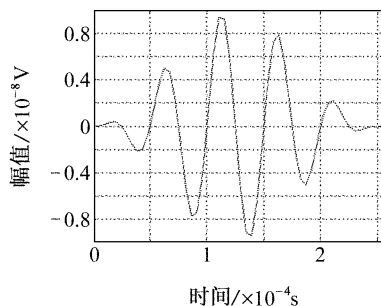


图 2 Hanning 窗调制的 5 周期音频信号

为较好地拟合,轴向单元划分需遵循一定的原则:由于激励信号为一组中心频率为 f_c 的窄带音频叠加信号,其主频波长 $\lambda = C/f_c$ (C 为波速),最大单元长度 $L_{\max} = \lambda/8$ 。此外,为添加载荷,需确定信号步长 $\Delta t = k \cdot L_m / C$ (L_m 为最终确定的单元长, k 为系数,此处 $k=0.8$)。

2.2 模拟效果验证

取 $Z=1.2$ m,初次波和末端回波到达时间分别为 3.8×10^{-4} s 和 12.9×10^{-4} s,拟合的波速为 3 077 m/s。

由式(1)得理论横波速度 $C_T = 3\ 105.3\text{ m/s}$, 拟合较好。对缺陷轴向定位, 缺陷回波到达时间为 $6.384 \times 10^{-4}\text{ s}$, 得出缺陷位置为信号激励端 1.182 m 处, 实际为 1.18 m , 模拟结果比较精确。

至此, 研究导波检测管道外腐蚀缺陷技术的关键在于研究反射系数对缺陷横截面积、管子横截面积及各影响因素的综合灵敏度问题。

2.3 单一缺陷模拟

为研究缺陷/横截面比的大小对导波缺陷处反射率的影响, 设计了一系列不同比率下的反射率测量试验。为兼顾缺陷环向比例及深度比例的影响, 设计试验分成环向和深度两大类进行。最后, 综合考虑不同缺陷/截面比与回波反射率的关系。

对单节点位移时程数据作简单叠加处理。图3为 0.4 m 处, 处理后的 T(0,1)模态导波时域图。由于数据读取点与信号激励端的距离较小, 故图中缺陷回波后有扭转波经管的近端面反射的二次回波。

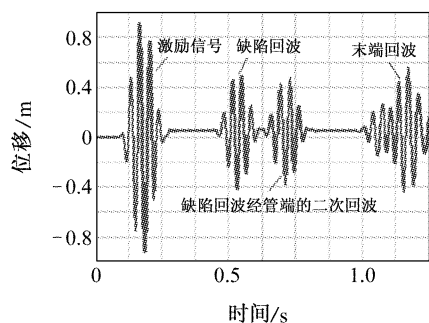


图3 数据处理后的 T(0,1)模态位移时域曲线

由式(4)及以上模拟算例所得的反射率曲线见图4。图中理论值略小于计算数值, 但整体走向一致。这是因为超声检测与材料特性有关。在管道的频厚积 $< 0.8\text{ MHz} \cdot \text{mm}$ 时, 超声波反射率围绕某一固定值浮动而不随频厚积变化^[7]。这说明在此管道工况下, 20 kHz 并非最合适 T(0,1)模态导波检测。因此, 最好的导波检测技术是在某一频率段的

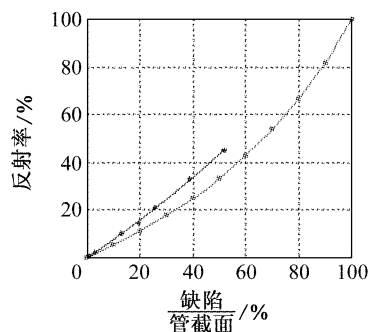


图4 反射系数—缺陷横截面积百分比曲线

全频率扫描支持下进行的。

2.4 带环焊缝管导波检测模拟

在实际管道检测中, 要求能够较好地区分环焊缝与缺陷。文献[8,9]对对接焊缝的形态尺寸做了相关研究, 且 API 5L 标准规定了管壁厚时, 内外余高不得超出 3.2 mm 。根据其对接焊缝尺寸的经验计算方法, 对于直径 76 mm , 壁厚 5.5 mm 管, 拟采用两条焊缝, 其中焊缝1宽 7.5 mm , 外余高 1.5 mm , 内余高 0.5 mm ; 焊缝2宽 7.5 mm , 外余高 3.2 mm , 内余高 3.2 mm 。

采用 2.3 节方法作 T(0,1)模态导波数值模拟, 得出焊缝的回波时域图并与缺陷的回波时域图比较(图5)。图5从时域图波形可以看出带余高焊缝回波相位与初始信号相位相同, 缺陷回波的相位与初始信号相差 180° , 即将焊缝回波信号时域图翻转后, 将与缺陷回波波形相似, 符合理论分析。由此可以在导波检测回波信号中识别出缺陷与焊缝。

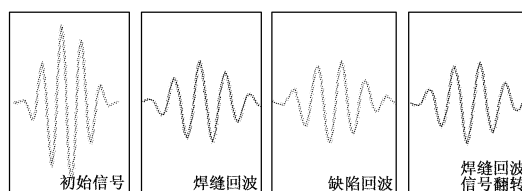


图5 带余高焊缝及缺陷回波比较

英国超声导波公司通过对符合 API(美国石油学会)标准标定的带余高焊缝进行大量实验, 测得基于时域振幅峰值的焊缝反射率为 25% 左右。针对焊缝2, 基于时域振幅峰值的焊缝反射率为 22% 。考虑到 GUL 公司的结论是在大量实验统计数据基础上得出, 且由文献[7]中超声波反射率与频厚积关系, 说明内外余高均为 3.2 mm 时, 数值模拟得出的焊缝处回波反射率基本符合实际情况。针对焊缝1, 其焊缝处回波反射率为 9.5% 。

为考虑更复杂的情况, 在 76 mm 管子上设计单一缺陷和焊缝加缺陷两种模型。单一缺陷深 50% 壁厚, 环向4个单元, 共32个单元, 轴向长 0.02 m ; 复合缺陷的焊缝外余高 1.5 mm 、内余高 0.5 mm 。

管上只有缺陷时, 缺陷时域幅值为 $5 \times 10^{-6}\text{ m}$, 有焊缝时缺陷时域幅值为 $4.5 \times 10^{-6}\text{ m}$ 。验证了阻尼为零的情况下, 反射系数不随轴向位置变化的结论。此时焊缝反射系数为 10% , 与 9.5% 有些误差。

单一缺陷与单一焊缝的算例可以应用到多缺陷多焊缝检测。在无衰减情况下, 波的能量逐级降低。

3 导波检测信号处理技术

单独的时域分析、频域分析和时频分析等并不完全适合导波检测信号的处理。目前常用时域分析来观察回波信号的初始相位,以判定该信号是来自缺陷还是焊缝。由于导波检测信号为与时间有关的非平稳信号,故频域分析并不能得到各个波包的频谱信息;而时频分析能够很好地解决此类问题。图6为针对上述焊缝-缺陷算例的短时傅里叶分析图(STFT)。

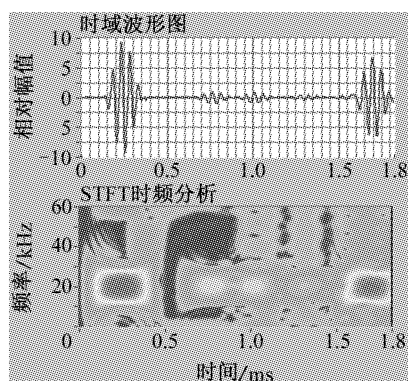


图6 导波检测信号 STFT 变换的时频图

目前导波检测反射率是基于时域波形中的振幅,而振幅并不能反映信号的能量信息,同时也不够准确。用时频分析方法,就可以得到基于频谱的反射系数。

4 结论

通过以上对 $T(0,1)$ 模态导波管中传播过程的数值模拟研究,得出如下结论:

(1) 现场检测中缺陷的轴向定位可由缺陷回波到达的时间和波速来确定;数值模拟检测效果由波速校验来标定。

(2) 由缺陷回波反射系数与缺陷横截面积的关系,可以近似地判定缺陷的几何尺寸。

(3) 焊缝回波信号的初始相位与激励信号初始相位相同,与缺陷回波信号初始相位相反,由此可以区分回波信号来自缺陷还是焊缝。焊缝的回波反射率与焊缝的余高尺寸有关。

(4) 对导波检测信号的处理比较受关注的主要是其回波信号的初始相位与回波能量;回波反射率

可以粗略地由时域振幅或者基于能量的频谱幅值来标定。

参考文献:

- [1] Wilcox P, Lowe M J S, Cawley P. Long range Lamb wave inspection: the effect of dispersion and modal selectivity[C]. Review of Progress in Quantitative NDE. New York: Plenum Press, 1999: 151—158.
- [2] Pavlakovic B, Lowe M J S, Alleyne D N, et al. Disperse: a general purpose program for creating dispersion curves[C]. Review of Progress in Quantitative NDE. New York: Plenum Press, 1997: 185—192.
- [3] Bay H, Shah A, Popplewell N, et al. Scattering of guided waves by circumferential cracks in steel pipes [C]. Review of progress in Quantitative NDE. New York: Plenum Press, 2001: 188—194.
- [4] Joseph L Rose. 固体中的超声波[M]. 何存富, 译. 北京: 科学出版社, 2004.
- [5] A P 弗伦奇, 著. 振动与波[M]. 徐绪笃, 译. 北京: 教育出版社, 1981.
- [6] 吴长太, 王丹龙, 李化强. 焊缝尺寸计算公式的研究及应用[J]. 煤矿机械, 2002(9): 42—43.
- [7] 李为卫, 刘亚旭. 存在错边时焊缝余高的测量[J]. 焊接, 2001, (9): 19—21.
- [8] 他得安, 刘镇清, 贺鹏飞. 管材超声检测中导波模式及频厚积的选择[J]. 同济大学学报, 2004, 32(5): 696.
- [9] Lowe M, Alleyne N, Cawley P. Defect detection in pipes using guided waves[J]. Ultrasonics, 1998, (36): 147—154.
- [10] 程载斌, 王志华, 张立军, 等. 管道超声纵向导波裂纹检测数值模拟[J]. 应用力学学报, 2004, 21(4): 76.
- [11] Lowe M, Alleyne 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: 649—656.
- [12] Alleyne N D, Lowe M, Cawley P. The reflection of guided waves from Circumferential notches in Pipe [J]. Journal of Applied Mechanics, 1998, 65(9): 635—641.
- [13] 董绍华, 费凡, 魏振红, 等. 超声导波技术及应用[C]. 中国国际油气管道(完整性)技术会议论文集. 廊坊: 2005: 410—419.
- [14] 翁永基, 董旭, 俞彦英. 导波超声技术检测带套管管道的腐蚀[J]. 管道技术与设备, 2004, (6): 36—38.

欢迎网上投稿

欢迎订阅

欢迎刊登广告