

# 超声导波在缺陷弯管上的数值模拟研究

陈灵,徐建成,吴键,王鑫,奚润开

(南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094)

**摘要:**采用数值模拟的方法对弯管结构进行了分析。通过对4种不同弯曲半径弯管的特性进行分析,最终选定70 kHz作为导波的激励频率;通过对不同周期信号在弯管中的特征进行分析,选定激励信号的周期为5。通过对不同弯曲角度弯管进行分析, $L(0, 2)$ 模态导波经过弯管时会发生模态转换,转换为 $F(1, 2)$ 模态;在弯管内侧与外侧进行检测发现存在显著区别,弯头内侧会发生信号衰弱,较小的损伤不易检测,外侧会发生能量聚集,损伤特征更加明显;透射系数受弯曲角度影响较大,在 $90^\circ$ 时透射系数较小,能量损失严重。

**关键词:**超声导波;数值模拟;弯管缺陷;模态转换

**中图分类号:**TP206+.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)06-0064-04

## Numerical Simulation of Ultrasonic Conductive Waves on Defective Elbows

CHEN Ling, XU Jiancheng, WU Jian, WANG Xin, XI Runkai

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The elbow structure is analyzed by numerical simulation. With the analysis on the characteristics of four different bending radius elbows, 70 kHz is finally chosen as the excitation frequency of guide wave. Through the analysis of the characteristics of different periodic signals in the elbow, the period of the excitation signal is determined to be 5. By analyzing the elbows at different bending angles, the  $L(0, 2)$  modal guide wave will be converted to  $F(1, 2)$  mode when passing through the elbow. The detection conducted inside and outside of the elbow exhibits significant difference, in which signal weakness occurs inside the elbow with smaller damage uneasy to be detected, while energy accumulation occurs on the outside with more obvious damage characteristics. Much affected by bending angle, transmission coefficient is small at an angle of 90 degrees with big energy waste.

**Keywords:** ultrasonic conduction; numerical simulation; elbow defects; modal conversion

## 0 引言

近年来,随着工程结构越来越复杂,出现了各类型的管结构,它们拥有各自独特的弯曲角度以及弯曲半径以适应实际工程的需要。管结构类型主要有输油输气管道、海底运输管道、工业管道等。我国的大工程项目大多在环境相对恶劣环境下,由于弯管结构长期服役在此环境下,会出现各种问题,常见的比如疲劳损伤、氧化以及裂纹等,这些损伤会带来严重的安全隐患。2013年11月22日凌晨3时青岛输油管道破裂事件引起了人们对工程结构损伤安全的广泛关注,事故导致62人死亡、136人受伤,直接损失接近7.5亿元;2020年3月23日中石油长庆油田发生管线爆裂事故,造成2死4伤。类似的安全事故还有很多,不提前对缺陷进行监测,一旦发生事故,这种后果是无法承受的。因此,必须提前预警,对工程结构的健康进行实时监测,提前预测危险的发生,减少工程事故的发生<sup>[1-2]</sup>。

学者GAZIS D C推导出了管道内超声导波传播的波动方程,这为后期对于管道的研究奠定了基础<sup>[3]</sup>。国内学者何存富等对弯管结构的结构损伤进行了检测,并通过

有限元仿真方式对导波的传播进行了研究<sup>[4]</sup>。邓进等对超声导波在弯管的传播进行了仿真与实验研究<sup>[5]</sup>。马君鹏等对不同深度缺陷的螺栓通过超声导波技术进行了检测<sup>[6]</sup>。邓文等对弯管结构进行了研究,分析了弯曲角度对弯管的影响<sup>[7]</sup>。袁慎芳教授<sup>[8]</sup>及其团队对各种常用结构的无损检测进行研究,并在无线传感网络与结构健康监测相结合方面取得了很多重大突破。上海交通大学李富才教授及其团队对复杂工程结构的健康监测进行相应研究,并使用有限元法和谱元法等数值方法进行了研究<sup>[9]</sup>。

对弯管<sup>[10]</sup>进行研究有其必要性,弯管相较于直管而言在弯曲处更容易存在安全隐患,通过超声导波对损伤进行安全监测也能避免传统检测方式的缺陷,利用有限元法能够很好地对管道中导波的传播进行模拟并对管道中的损伤进行有效的识别<sup>[11]</sup>。

## 1 管道超声导波检测基本理论

对超声导波传播特性研究<sup>[12]</sup>,一般用坐标以及特征尺寸进行表示,其中 $a$ 、 $b$ 分别表示所测管道的内、外半径, $h$ 表示管道厚度, $r$ 为径向坐标, $\theta$ 为周向坐标, $z$ 为纵向坐标。如果在 $r=a$ 与 $r=b$ 处,会出现 $\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_z = 0$ ,

对应圆柱的坐标系柱面坐标系如图 1 所示<sup>[13]</sup>。

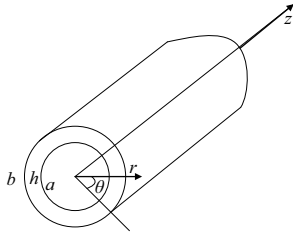


图 1 管结构柱面坐标系

在柱面坐标系下其位移表达式如式(1)所示。

$$\begin{aligned} u_r &= U_r(r) \cos(n\theta) \cos(\omega t + kz) \\ u_\theta &= U_\theta(r) \cos(n\theta) \cos(\omega t + kz) \\ u_z &= U_z(r) \cos(n\theta) \cos(\omega t + kz) \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $u_r$ 、 $u_\theta$ 、 $u_z$  分别代表径向位移、周向位移、轴向位移; $U_r(r)$ 、 $U_\theta(r)$ 、 $U_z(r)$  分别代表径向、周向、轴向的位移幅度; $n$  代表导波周向方向的阶数。

根据 Helmholtz 定律,位移  $U$  可以转化为标量对应势函数  $\phi$  与矢量等容势函数  $\mathbf{H}$ ,分解过程如下:

$$U = \nabla \phi + \nabla \times \mathbf{H} \quad (2)$$

$$\nabla \mathbf{H} = 0 \quad (3)$$

可以通过对式(4)频散方程的求解来对位移场进行求解。

$$D = [c_{ij}]_{6 \times 6} = 0 \quad (4)$$

其中  $c_{ij}$  与对应管结构的基本尺寸、材料特性相关。当周向阶数  $n$  为 0 时,导波模态轴向对称。

## 2 激励信号选择与模型建立

### 2.1 有限元模型建立

弯管特性因弯曲半径以及弯曲角度的不同会有所不同。本节先以典型的  $90^\circ$  弯管进行有限元建模,模型如图 2 所示。其主要参数为两直管长 1 000 mm、弯曲半径 100 mm、外半径 70 mm、壁厚 4 mm、弹性模量 206 GPa、泊松比 0.305、密度  $7\,980 \text{ kg/m}^3$ 。

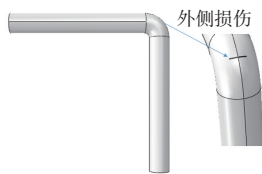


图 2 典型弯管模型

模型的激励通过选择一端施加周向集中力进行实现,用于模拟  $L(0,2)$  模态对结构的激励。信号的接收设置了 4 个接收点,分别在距离激励 100 mm 管道的内外侧以及过弯头 100 mm 的内外侧,用于后续对导波信号的接收。激励信号采取的是用汉宁窗调制的正弦波信号,其公式如式(5)所示。激励信号如图 3 所示。

$$x(t) = 0.5 \times \left[ 1 - \cos\left(\frac{2\pi ft}{n}\right) \right] \times \sin(2\pi ft) \quad (5)$$

在对弯管结构进行建模时,由于弯管的尺寸相对较

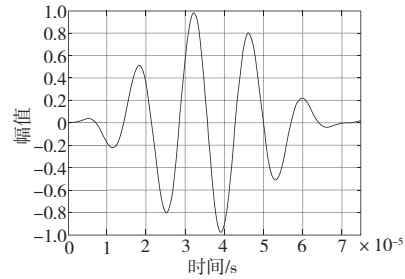


图 3 激励信号

大,如果网格划分得十分密集,会大大加大计算时间;网格划分较大,会影响导波传播特性的模拟。一般要求每个波长最小需要划分为 7 个节点,如式(6)所示。时间步长也有一定限制,一般要求最快波速在两个单元节点的传播时间应大于时间步长。

$$\lambda_{\min} = \frac{c_{\min}}{f_{\max}} \geq 7\Delta x \quad (6)$$

其中: $\lambda_{\min}$  代表最短波长; $f_{\max}$  代表最大频率; $c_{\min}$  代表最小单元; $\Delta x$  代表单一节点。

### 2.2 激励频率选择

对弯管频率的选择主要通过不同弯曲半径的弯管来进行研究,弯曲角度选择  $90^\circ$  这种最常见的弯管。弯头半径选取 4 种不同的弯头,设  $F = 50 \text{ mm}$ ,弯头半径分别选取  $2F$ 、 $3F$ 、 $4F$ 、 $5F$ 。不同弯曲角度弯管云图如图 4 所示。

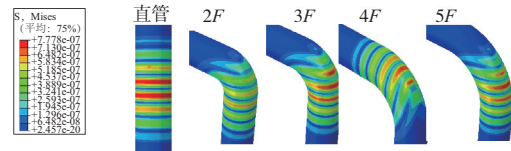


图 4 不同弯管角度弯管云图

如图 4 所示,在弯曲角度改变时,弯管的云图有着相对明显的区别。总体而言,在弯头这边能量主要集中在中心线处;直管相较于弯管而言,节点位移无明显区别,能量相较平均。

如图 5 所示,在频率  $> 30 \text{ kHz}$  之后导波趋于稳定。一般弯管结构与直管结构类似,可取  $30 \text{ kHz} \sim 200 \text{ kHz}$ ,在这个频率范围之内,导波频散较小。为了保证结果的准确性以及减少计算时间,选取的激励频率范围在  $30 \text{ kHz} \sim 150 \text{ kHz}$ ,频率间隔为  $20 \text{ kHz}$ 。计算不同频率下导波的透射系数,结果如图 6 所示。

透射系数代表经过弯管后导波信号幅值与入射信号幅值的比值。由图 6 可以看到各弯曲半径之下,透射系数都有超过系数 1 的情况,说明经过弯管之后,导波信号的幅值还超过了激励信号的幅值。主要原因是导波信号经过弯头部分之后出现了能量聚集,导致导波幅值增大。对于每个具体的管道模型而言,当弯曲半径为  $2F$  时,中心频率在  $50 \text{ kHz} \sim 70 \text{ kHz}$  时透射系数会出现最大值,整体而言透射系数出现先增加后减小的趋势。对于弯曲半径为  $3F$  与  $4F$ ,整体呈现先增加后减小再增加的趋势,在  $50 \text{ kHz} \sim 70 \text{ kHz}$  透射系数更高,其他频率相较而言有所下

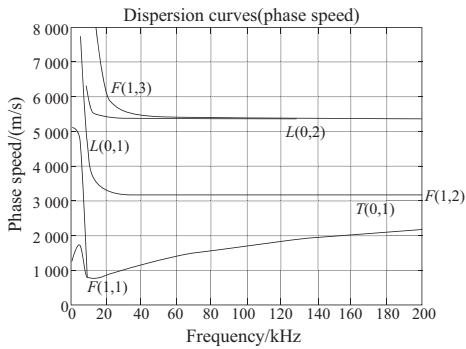


图5 管结构频散曲线

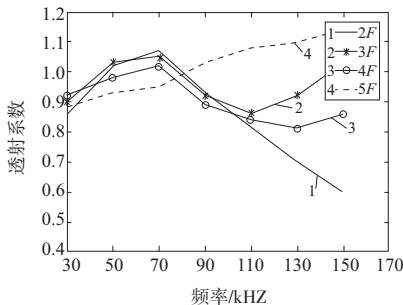
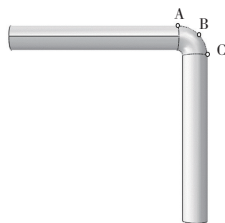


图6 不同频率下透射系数

降。对于弯曲半径为  $5F$  情况下,透射系数整体呈现上升趋势,后逐渐趋于平稳。综上分析,选择  $70\text{ kHz}$  作为  $L(0,2)$  模式的激励频率。

### 2.3 激励周期选择

模型参数如 2.1 节所示,分别在弯头开始、弯头中点、弯头结束选择 3 个接收点 A、B、C。结构如图 7 所示,幅值与周期关系如图 8 所示。



A—弯头开始;B—弯头中点;C—弯头结束。

图7 弯头接收示意图

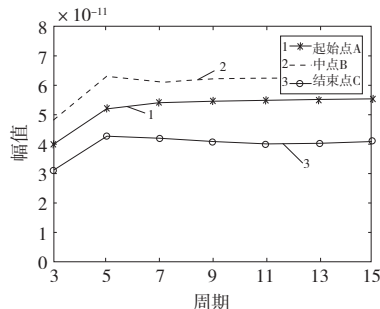


图8 激励周期与幅值

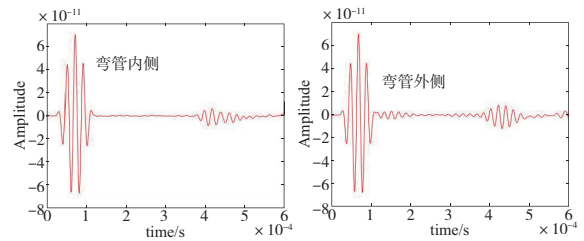
从图 8 中可以看出,在 3~5 周期范围内,幅值有明显的增长。在中点 B 处,7 周期取得最大幅值,但在开始 A 与结束 C 处 5 周期幅值较大。随着周期的增长,幅值提升相对较小,有时甚至出现幅值下降的情况。为了保证结果准确性,最终选择 5 周期作为激励的周期。

## 3 不同弯曲角度弯管数值模拟

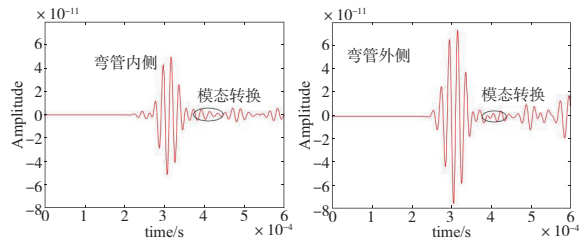
一般市面上比较常见的弯管为  $90^\circ$  弯管,但其他弯曲角度弯管也有一定市场空间。

### 3.1 模态转换

超声导波在经过弯管时会发生模态转换现象,产生新的模态导波,在过弯头  $100\text{ mm}$  的弯管内外侧设置接收点,接收点的时域图如图 9 所示。可以明显地看到弯管内侧与弯管外侧都出现了明显的模态转换现象,在原有信号基础上多了一段凸起部分。另外在弯管外侧信号幅值明显高于内侧,在外侧出现了能量聚集,内侧发生了能量衰减现象。



(a) 弯管前



(b) 弯管后

图9 弯管前后时域信号对比图

在弯头结束与结束后  $100\text{ mm}$  外侧分别设置接收点,其时域图以及包络图如图 10 所示。

图 10(a) 中存在两个波包,达到时间分别是  $279.9\ \mu\text{s}$  与  $344.1\ \mu\text{s}$ ,在图 10(b) 中,两个波包的时间分别是  $299.1\ \mu\text{s}$  与  $377.0\ \mu\text{s}$ 。通过作差计算可知第一个波包时间相差  $19.2\ \mu\text{s}$ ,第二个波包时间相差  $32.9\ \mu\text{s}$ ,两个接收点的距离为  $100\text{ mm}$ 。计算的波包 1 与波包 2 速度分别为  $5\ 208.3\text{ m/s}$  和  $3\ 039.5\text{ m/s}$ ,查询图 5 频散曲线知两波包速度分别为  $5\ 324\text{ m/s}$  与  $3\ 022.6\text{ m/s}$ ,对应的误差率为  $2.22\%$  与  $0.56\%$ ,误差在工程的允许范围内。所以这两个波包分别对应  $L(0,2)$  模态以及  $F(1,2)$  模态。此时  $L(0,2)$  模态经过  $90^\circ$  弯头后转换成一部分  $F(1,2)$  模态。

### 3.2 透射系数

$L(0,2)$  模态导波经过弯头会发生模态转换,经过不同弯曲角度的弯头会发生不同的透射系数。入射信号接

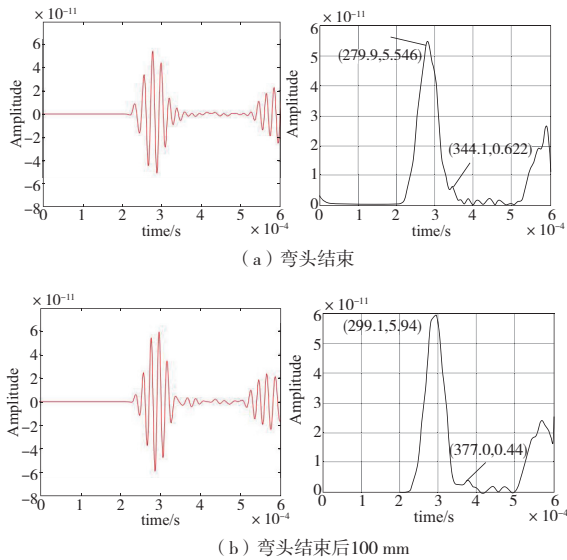


图 10 弯头后两接收点时域图与包络图

收点距离激励端 100 mm, 弯头信号接收点距弯头结束 100 mm。不同弯曲角度弯头对应透射系数关系如图 11 所示。

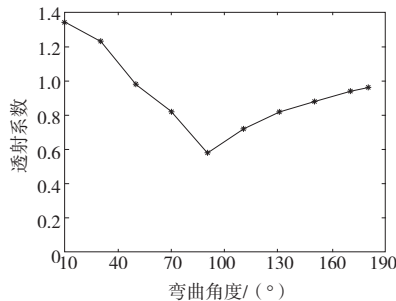


图 11 弯曲角度与透射系数关系

从图 11 可以看出,在弯曲角度较小时,透射系数较高,主要是因为弯曲角度较小,在弯管外侧更容易发生能量聚集现象,导致透射系数较大。伴随着弯曲角度的增大,透射系数会随之减小,弯曲角度为  $90^\circ$  时达到最小,只有 0.58 的透射率,在  $90^\circ \sim 180^\circ$  范围内,伴随着弯曲角度的增大,透射系数逐渐增大,并无限接近于 1。当弯曲角度为  $180^\circ$  时,弯管变成了直管,导波传播过程中会存在能量消耗,所以透射系数未到达 1。

## 4 结语

1)通过对不同弯曲半径管道的透射系数进行分析,

选择了 70 kHz 频率作为激励频率,此时具有更好的透射系数,有利于损伤检测。合适的激励频率还会因为弯曲半径改变而有一定改变。

2)  $L(0,2)$  模态经过弯头后会发生模态转换,会转换为  $F(1,2)$  模态。

3)  $L(0,2)$  模态在经过弯管外侧时,会发生能量聚集;经过弯管内侧时,会发生能量衰减。外侧缺陷易于检测,内侧缺陷若较小会发生漏检。

4) 弯管的透射系数受到弯头弯曲角度的影响,弯曲角度为  $90^\circ$  时透射系数最小,能量损失超过 40%。在弯曲角度为  $0^\circ \sim 90^\circ$  时,透射系数随着弯曲角度的增大而减小,  $90^\circ \sim 180^\circ$  时,透射系数随着弯曲角度的增大而增大。

### 参考文献:

- [1] 袁慎芳. 结构健康监测[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
- [2] LOVEDAY P W. Guided wave inspection and monitoring of railway track[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2012, 31(4):303-309.
- [3] GAZIS D C. Three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. I. analytical foundation[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1959, 31(5): 568-573.
- [4] 何存富,孙雅欣,刘增华,等. 弯管缺陷超声导波检测的有限元分析[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(4):289-294.
- [5] 邓进. 超声导波检测压力弯管的仿真与试验[J]. 化工装备技术, 2020, 41(2): 56-59.
- [6] 马君鹏,王永强,岳贤强,等. 输电铁塔地脚螺栓腐蚀超声导波检测技术研究[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(5): 196-199.
- [7] 邓文. 超声导波在弯曲圆杆中的传播特性及裂纹检测应用[D].南昌:南昌航空大学,2015.
- [8] 袁慎芳,凌必赞,任元强,等. 一种面向航空结构的具有穿透能力的无线节点[J]. 振动·测试与诊断, 2016, 36(4): 624-629, 805.
- [9] 孙学伟,李富才,苗晓婷,等. 厚梁结构中的超声导波传播与损伤识别[J]. 机械工程学报, 2012, 48(14): 1-10.
- [10] 谷涛,席光峰,胡栋,等. 扭转模态超声导波在弯管中的检测试验[J]. 无损检测, 2019, 41(12): 17-20, 29.
- [11] 栗霞飞,刘飞,赵满全,等. 基于超声导波检测管道缺陷的数值模拟[J]. 声学技术, 2019, 38(2): 164-169.
- [12] 郭鹏,田振华,李鸿源,等. 板中 Lamb 波与管中纵向模态的传播特性的对比分析[J]. 无损检测, 2017, 39(4): 42-48.
- [13] 肖君桢. 基于超声导波的机械结构健康监测机理研究[D]. 西安:长安大学,2015.

收稿日期:2020-12-03