

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413569

# 纵向 $L(0,2)$ 模态超声导波在弯管中的传播特性

王晓娟, 马旭泽, 赵 锴, 郑 毅, 高鹤明

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院 西安 710048)

**摘 要:**弯管是管道工业中常见的管道形式,弯头部分是整个弯管的薄弱环节,由于弯曲应力及传输物质的冲刷很容易产生各种缺陷。超声导波可有效检测管道等结构中的缺陷,很多研究已验证并推进超声导波技术在直管检测中的应用。超声导波通过弯管弯头时会产生复杂的变化,进而影响管道导波的缺陷检测性能。针对此问题,采用有限元法通过全波场仿真数据量化研究了纵向  $L(0,2)$  模态超声导波在弯管的弯头区域及弯头后直管区域的传播特性,从能量变化、波场分布及与缺陷相互作用几个方面分析讨论了弯头结构对导波传播的影响,以及弯管不同位置缺陷的导波检测问题,并通过实验进行了验证。研究结果表明弯管中的弯头结构会使超声导波能量产生较大衰减,导波波场在轴向和周向上的分布产生变化,在弯头弯曲点前后的区域呈现不同的能量聚焦及扩散特征。超声导波在弯管弯头中的传播特性与波达轴向位置、弯头弯曲半径和激励频率有密切关系。进入弯头后直管段区域的导波引入非对称模态,呈现出更多的复杂性。此项研究有助于建立对弯管超声导波传播特性的深入了解,为进一步利用超声导波实现弯管缺陷的全面检测提供理论基础。

**关键词:** 超声导波; 弯管; 传播特性

**中图分类号:** TH70 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.99

## Propagation characteristics of longitudinal $L(0,2)$ mode guided waves in bend pipeline

Wang Xiaojuan, Ma Xuze, Zhao Kai, Zheng Yi, Gao Heming

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The bend pipeline is a common form of piping in the pipeline industry, and the elbow section is the weakest part of the entire bend. Due to bending stress and material erosion, various defects can easily occur. Ultrasonic guided waves can effectively detect defects in pipeline structures, and numerous studies have validated and advanced the application of this technology in straight pipe inspections. When ultrasonic-guided waves pass through the elbow of a bend, they undergo complex changes, which can affect the defect detection performance of the guided waves in the pipeline. To address this issue, the finite element method is used to quantitatively study the propagation characteristics of the longitudinal  $L(0,2)$  mode-guided waves in the elbow region and the straight pipe section after the elbow through full-wavefield simulation data. The study analyzes and discusses the influence of the elbow structure on the guided wave propagation, wavefield distribution, and interaction with defects, as well as the detection of defects at different positions in the bend. The findings are evaluated through experiments. The results show that the elbow structure in a bend causes significant attenuation of ultrasonic-guided wave energy, and the distribution of the guided wave field changes in both the axial and circumferential directions, showing different energy focusing and diffusion characteristics before and after the bending point of the elbow. The propagation characteristics of ultrasonic-guided waves in the elbow of a bend are closely related to the axial position of wave arrival, the bending radius of the elbow, and the excitation frequency. The guided waves after the elbow introduce asymmetric modes, presenting additional complexities. This research contributes to a deep understanding of the propagation characteristics of ultrasonic-guided waves in bends and provides a theoretical foundation for further utilizing ultrasonic-guided waves to achieve comprehensive defect detection in bends.

**Keywords:** ultrasonic guided waves; bend pipeline; wave propagation characteristics

## 0 引言

弯管在化工、天然气和石油等工业领域应用广泛,弯管的弯头部分作为改变传输路径的部件,易受内部运输材料的冲击进而形成缺陷,导致管壁变薄。此外,弯管由于加工工艺等原因会在弯头区域引入弯曲应力,在服役过程中相比于直管更易产生缺陷<sup>[1-2]</sup>,因此对弯管的检测尤为必要和重要。超声导波技术可实现对结构的大范围快速扫查,近年来受到广泛关注,被大量运用于板、杆、管等结构检测<sup>[3-5]</sup>。目前针对管道的超声导波研究主要集中于直管,弯管超声导波相关理论尚不完备<sup>[6]</sup>,其应用也存在一定困难。

制造弯管过程中,弯头区域各部位受到不同应力作用,管壁会因拉伸或压缩产生不同的厚度变化。超声导波在弯管中的传播具有非连续特征,因此弯管中的超声导波相比直管中的超声导波更为复杂,使用超声导波检测弯管各区域缺陷可能会发生漏检情况。Rasgado-Moreno等<sup>[7]</sup>设计了简化声学正演模型用于研究弯管中的导波传播,并利用此模型分析了缺陷的散射波场。Demma等<sup>[8]</sup>通过有限元模拟结合实验研究了超声导波在弯管中的频散曲线,讨论了弯管参数对频散的影响。周邵萍等<sup>[9]</sup>、陈灵等<sup>[10]</sup>和王畅等<sup>[11]</sup>分别研究了激励频率、弯曲半径和弯曲角度等因素对导波透射系数和模态转换的影响。并得出相似的结论。伍文君等<sup>[12]</sup>研究了低频L(0,1)模态导波在管道弯头传播时的模态转换现象,韩佳琪等<sup>[13-14]</sup>进一步研究了L(0,1)模态导波检测管道弯头缺陷的问题。李阳等<sup>[15-16]</sup>研究了T(0,1)模态在弯管中的传播,Long等<sup>[17-18]</sup>基于缺陷回波特性分别研究了T(0,1)模态导波检测位于弯管弯头区域不同位置、不同严重性缺陷的问题。这些工作主要从频散曲线、模态转换和结构参数影响等方面建立了弯管导波的研究基础。

本研究采用有限元法获得全波场数据,进一步系统地研究了纵向L(0,2)模态超声导波在弯管中的传播特性,重点考虑弯头区域及弯头后直管区域。从能量变化、波场分布及与缺陷相互作用几个方面量化分析讨论了弯头结构对超声导波传播的影响。这些工作有助于建立对超声导波在弯管或类似复杂结构中传播特性的深入了解,为在实际工程中应用并推广管道导波技术提供理论支持。

## 1 弯管的有限元基本模型

采用ANSYS有限元软件对弯管导波进行建模仿真,讨论的实例中所用弯管几何参数和材料参数如表1所示。

表1 管道模型几何参数及材料特性

Table 1 Pipe model geometry and material properties

壁厚/mm	外半径/mm	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/GPa	泊松比
4	17	7 850	200	0.3

弯管模型包括3部分:前直管段、弯头部分和后直管段,其中前直管段长度为5 m,后直管段长度为2 m,内外半径分别为13和17 mm。弯头折弯度数为 $90^\circ$ ,弯曲系数为4,则弯头弯曲半径 $R$ 为 $2\times 17\times 4 = 136$  mm。导波激励设置在距前直管段端面3 m处。

此研究所用弯管基本模型及各部分相对位置关系如图1所示。根据文献<sup>[19]</sup>的建模流程和建模参数,此研究建立的弯管仿真模型如图2所示。

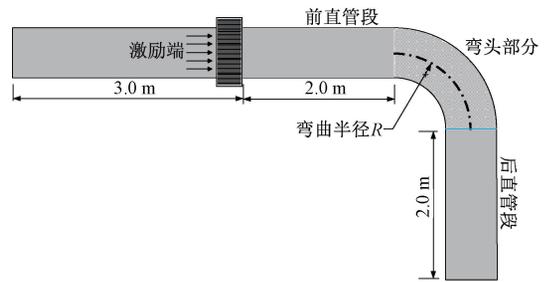


图1 弯管参数说明

Fig. 1 Description of bend pipe parameters

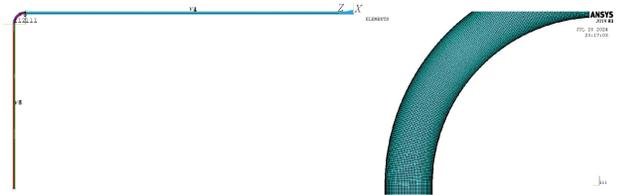


图2 弯管的仿真模型

Fig. 2 Simulation model of bend pipe

整个弯管在周向方向上均匀划分96个网格单元,直管段轴向和径向网格单元长度、以及弯头部分轴向方向上网格单元划分长度均设置为1 mm,以保证导波经过模型弯头区域的过程具有足够的计算精度。直管段的频散曲线如图3所示,选取中心频率150 kHz、五周期的toneburst信号为激励,在直管段激励位置周向方向每个网格节点加载轴向激励信号以产生纵向L(0,2)模态超声导波<sup>[20]</sup>。

在直管段及弯头区域均设置了多个观测点,具体为: $90^\circ$ 弯头部分从弯头起始位置(轴向角度 $0^\circ$ )到弯头结束位置(轴向角度 $90^\circ$ ),每隔 $10^\circ$ 设置96个周向观测点,即共10组接收信号;弯头后直管部分每隔0.1 m设置96个周向观测点,即后直管段部分共设置20组观测点

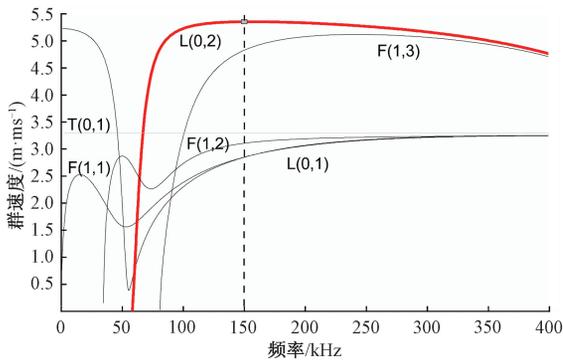


图3 直管段频散曲线

Fig. 3 Dispersion curves of straight pipe section

用来接收传播的导波信号。模型计算完成后导出全波场数据以实现对接管导波传播特性的量化描述。

## 2 超声导波在弯管中的传播

如前所述,超声导波在弯头部分的传播特性非常复杂。其结构复杂性主要体现在波沿周向各位置,如弯头外拱、旁侧和内拱的行程差异,以及波在弯头区域内传播过程中传播方向的变化。为表征弯头部分相关的结构参数,引入变量 $\alpha$ 和 $\beta$ , $\alpha$ 表示沿周向方向的角度, $\beta$ 表示沿轴向方向的角度。如图4所示,其中 $R$ 为弯头的弯曲半径, $r$ 为弯管的外半径。则 $\alpha$ 取值范围为 $0\sim 90^\circ$ , $\beta$ 取值范围为 $0\sim 360^\circ$ 。 $\alpha=0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 和 $270^\circ$ 分别对应弯头旁侧、外拱、旁侧和内拱位置; $\beta=0^\circ$ 、 $90^\circ$ 分别对应弯头部分起始和终止位置。

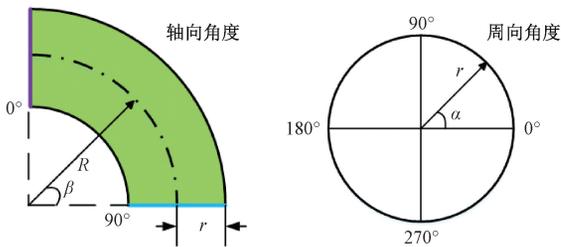


图4 90°弯头轴向角度及周向角度示意图

Fig. 4 Axial and circumferential angles of 90° elbow

对建立的弯管模型进行导波传播的仿真计算,并将所得结果映射到管道沿周向展开的二维平面得到超声导波在弯管中的位移场云图。为了更加直观地观察超声导波在弯头区域传播过程中位移场能量分布的动态变化情况,给出超声导波在410、440、460和480  $\mu\text{s}$  4个时刻的位移场云图,分别对应超声导波传播进入弯头区域,到达弯头中部附近以及离开弯头的时刻,如图5所示。

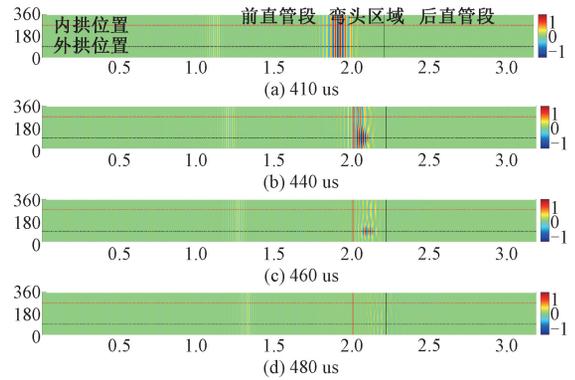


图5 超声导波在弯头区域的位移场云图

Fig. 5 Displacement field cloud of the guided wave within the elbow region

图5中直管段及弯头部分的位移场数据均沿水平方向显示,以便于图像的绘制。竖直方向上两条实线之间的区域即对应弯头部分,水平方向上贯穿整个管道的两条直线分别对应弯头内拱位置和外拱位置。图像水平方向提供了相对管道长度的导波传播轴向距离信息,竖直方向则表征理论上沿周向展开的管道周向角度范围( $0\sim 360^\circ$ )。如图5所示,410  $\mu\text{s}$ 时刻云图显示轴对称 $L(0,2)$ 模态被激励, $L(0,2)$ 模态已传播至弯头附近,此时导波周向波场分布均匀; $L(0,2)$ 模态导波进入弯头区域后波场能量出现聚焦趋势,较多的导波能量向弯头的外拱位置传播,如图5中440  $\mu\text{s}$ 时刻云图所示,这也是很多类似研究工作所总结的现象;460  $\mu\text{s}$ 时刻云图是 $L(0,2)$ 模态导波传播至弯头区域中部附近的波场表示,此时导波波场能量出现明显的聚焦分布特征,更多的能量集中在弯头外拱位置,较少能量分布于弯头内拱位置,而在这两个位置之间的区域(弯头旁侧附近)导波波场能量覆盖得非常少;当 $L(0,2)$ 模态导波经过弯头的弯曲点并向弯头后部传播时,如480  $\mu\text{s}$ 时刻云图所示,导波波场能量分布再次发生变化,其逐渐向旁侧扩散,能量也出现明显的衰减。

为了进一步对 $L(0,2)$ 模态超声导波在弯头传播过程中不同区域的波场能量变化进行量化表征,计算弯头不同轴向角度位置对应弯头周向上的 $L(0,2)$ 模态导波能量分布。所得结果如图6示例,其中包括弯头轴向角度 $\beta=0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 和 $90^\circ$ 这4个位置,分别对应进入弯头、弯头前半部分、弯头后半部分及离开弯头区域。

从图6(a)~(d)中可以看到,随着弯头轴向角度 $\beta$ 的增大,即随着 $L(0,2)$ 模态超声导波在弯头区域的传播,初始沿周向均匀分布的导波能量逐渐出现非均匀特性。在弯头内传播时,导波能量主要集中在弯头外拱附近;导波传播至弯管弯头尾端时,导波能量开始向弯头外

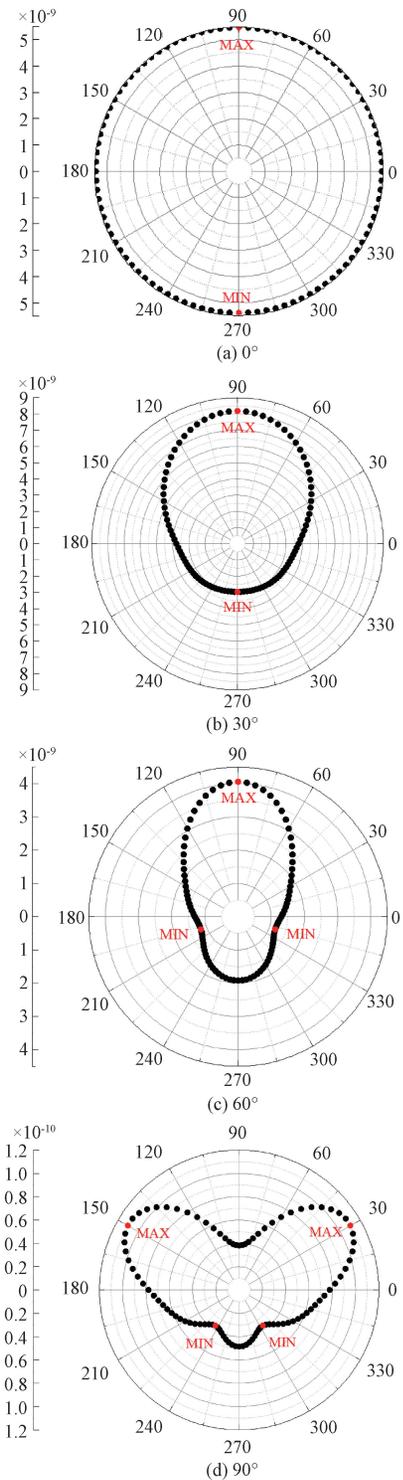


图 6 L(0,2) 模态导波在弯头不同轴向位置周向能量分布  
Fig. 6 Circumferential energy distribution of L(0,2) mode guided wave at different axial positions of the elbow

拱两侧扩散,并改变分布特征。L(0,2) 模态导波在弯头前半部分传播时,弯头内拱处的导波能量最小;随着 L(0,2) 模态导波继续在弯头后半部分传播过程中,导波

能量的最小值出现在弯头旁侧或旁侧附近,即周向角度  $\alpha = 0^\circ$  或  $180^\circ$  位置附近,如图 6(c) 所示。

管中导波能量极值可以进一步反映波场的分布及变化情况。弯头区域轴向上 L(0,2) 模态导波变化趋势如图 7 所示,其纵坐标为以弯头始端模态导波能量极值为参考值进行归一处理的数值。导波进入弯头后,由于波的连续性以及波场能量在特定区域的聚集,随着轴向角度  $\beta$  的增大,导波波场能量的极大值呈增长趋势。直到接近弯头弯曲点时,导波反射加强,波场能量最大值开始减小。进入弯头后半部分后,传播引起的能量衰减占主导,导波波场能量的最大值呈减小趋势,波场能量的最小值在整个弯头区域则持续衰减。

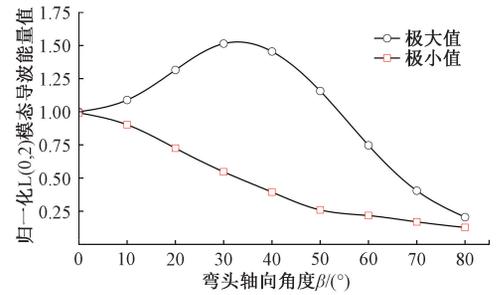
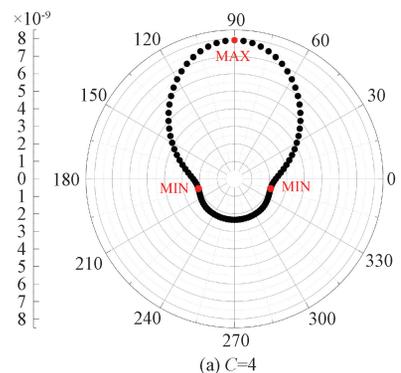


图 7 弯头区域导波周向能量极值曲线  
Fig. 7 Plots of wave energy extreme at the circumference of elbow

为了分析弯管弯曲半径对弯头处导波能量分布的影响,选取弯管内外径相同,弯曲系数  $C$  分别为 4、8、15 和 30 的弯管进行研究。以弯头轴向  $40^\circ$  位置处 ( $\beta = 40^\circ$ ) 的波场为例,导波能量在不同弯曲半径的弯头内沿周向分布情况如图 8(a) ~ (d) 所示。随着弯曲半径的增大,周向方向上导波能量逐渐呈均匀分布,即逐渐接近在直管内的分布特征。弯头截面上波场能量最大值 (MAX) 均集中在弯头外拱附近;波场能量最小值 (MIN) 出现在弯头旁侧和内拱之间的区域,弯曲半径越大,波场能量最小值的位置越靠近弯头内拱。



(a) C=4

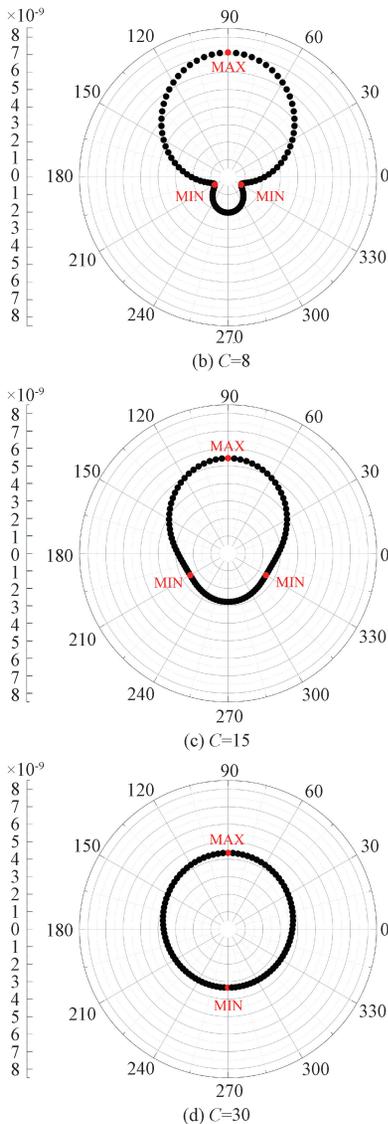


图8 不同弯曲半径弯头轴向 $40^\circ$ 位置导波能量周向分布  
Fig. 8 Circumferential energy distribution of guided waves at  $40^\circ$  axial position of the elbow with different bending radii

为了进一步研究导波能量分布与激励频率的关系,选取不同中心频率(85~175 kHz)的 toneburst 信号激励  $L(0,2)$  模态。仍以弯头轴向 $40^\circ$ 位置处的波场为例,不同激励频率的导波能量沿弯头周向分布情况如图9所示。

随着激励频率的增大,波场能量呈单调衰减;不同激励频率导波在此轴向位置的波场能量沿周向的极大值均位于外拱( $\alpha = 90^\circ$ 位置),而波场能量的极小值则分布在不同周向位置,详见图10。图10中可知,随着激励频率的增大,波场能量极小值从弯头外拱位置逐渐过渡到弯头旁侧,弯头其他轴向位置的波场分布也有类似的变化规律。结合前面的结论可以说明,导波

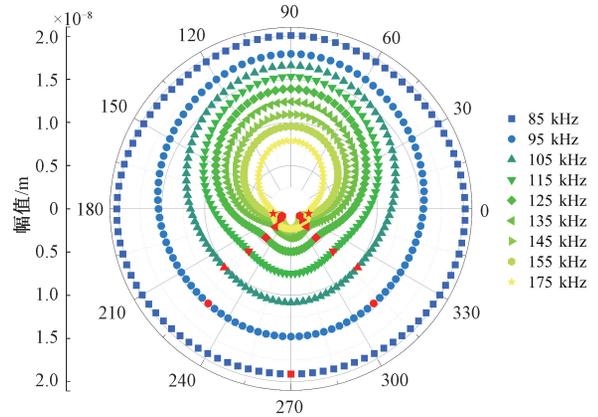


图9 不同激励频率下导波能量周向分布( $\beta = 40^\circ$ )  
Fig. 9 Circumferential distribution of guided wave energy under different frequency excitation( $\beta = 40^\circ$ )

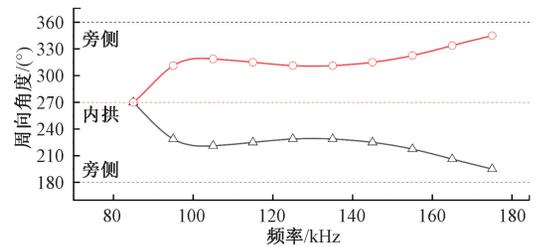


图10 不同激励频率下导波能量极小值周向分布( $\beta = 40^\circ$ )

Fig. 10 Circumferential distribution of energy minima of guided wave under different frequency excitations ( $\beta = 40^\circ$ )

在弯头区域传播过程中,波场能量分布特征和对应弯头轴向位置及激励频率有密切关系。波场能量的极大值主要聚焦于弯头外拱,而波场能量的极小值则出现在弯头内拱或旁侧附近。随着导波在弯头轴向传播角度的增大或激励频率的增加,导波能量最小值逐渐从内拱处转变为旁侧附近。

通过弯头区域后,超声导波能量产生较大衰减且波场能量分布发生变化,波形也更为复杂。超声导波在弯头后直管段传播过程中的位移场能量分布如图11所示,图11(a)~(d)分别是超声导波在480、490、500和510  $\mu\text{s}$  4个时刻的位移场云图。从图中可以看到,离开弯头后  $L(0,2)$  模态导波波场能量主要集中于弯管外拱轴线两侧,随着导波在后直管中的传播,导波能量的聚焦区在弯管外拱轴线两侧和弯管内拱轴线两侧这两者之间转换。

利用在后直管段设置的多个观测点采集的波场数据绘制了  $L(0,2)$  模态导波在弯管不同轴线方向上( $0^\circ$ 和 $180^\circ$ 轴线,对应弯管旁侧; $90^\circ$ 轴线,对应弯管外拱; $270^\circ$ 轴线,对应弯管内拱)导波能量的变化,如图12所示。

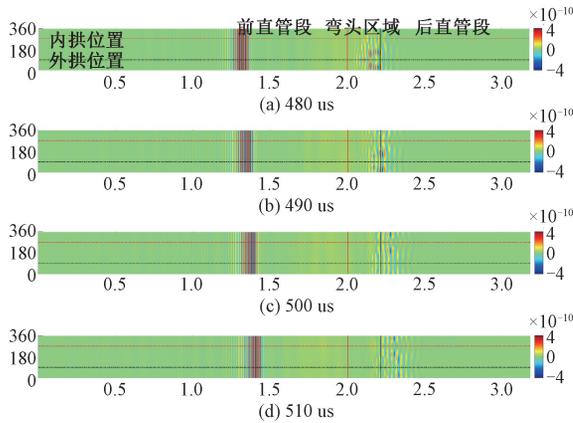


图 11 超声导波后直管段区域的位移场云图

Fig. 11 Displacement field cloud of the guided wave within the back straight pipe section

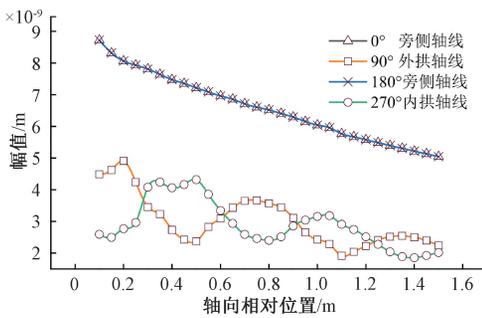


图 12 后直管段导波传播能量轨迹

Fig. 12 Plots of wave energy when propagating in back straight pipe section

由图 12 可知,随着轴向距离的增大,由于超声导波本身的传播特性,各轴线方向上的导波能量均呈现衰减。0°和 180°旁侧轴线几何对称,故这两个位置轴线方向上导波能量完全相同,均持续单调减小。而外拱轴线和内拱轴线方向上导波能量相比其他区域导波能量更小,且随着轴向距离的增大,呈现振荡衰减。两者能量变化曲线振荡周期相同,仅起始点能量不同:外拱轴线导波能量大而内拱轴线能量小。

### 3 L(0,2) 模态导波与弯管缺陷的相互作用

在上文研究结果基础上,为了进一步验证弯头对管道超声导波检测缺陷能力的影响,在已建弯管模型基础上引入缺陷,通过不同缺陷的导波回波分析讨论超声导波的传播及与弯管不同位置缺陷的相互作用。观测点设置在激励端附近,将 96 个观测点采集得到的 96 路信号进行叠加作为缺陷回波信号进行分析。

### 3.1 弯管弯头缺陷的导波检测

由第 2 节可知,L(0,2) 模态超声导波在弯头区域传播时,导波能量在特定轴线方向上聚焦,周向上呈现变化的能量分布。由于弯管弯头结构本身的几何对称特点,导波能量分布也具有对称性。故在弯管弯头中部,即轴向角度  $\beta = 45^\circ$  的位置处分别引入 3 个缺陷,位于 ①弯头内拱(周向角  $\alpha = 270^\circ$ )、②弯头旁侧(周向角  $\alpha = 180^\circ$ )和 ③弯头外拱(周向角  $\alpha = 90^\circ$ ),如图 13 所示。3 个缺陷几何尺寸完全相同,轴向位置也相同,仅周向位置不同。缺陷尺寸参数具体为:轴向长度  $2^\circ$ ,周向宽度  $60^\circ$ ,径向深度 2 mm。外拱缺陷、旁侧缺陷和内拱缺陷的仿真模型见图 14。

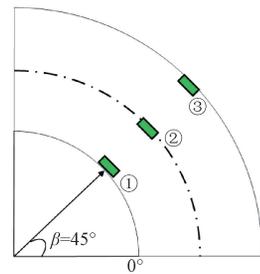


图 13 弯管弯头区域缺陷位置示意图

Fig. 13 Diagram of the location of defects in pipe elbow

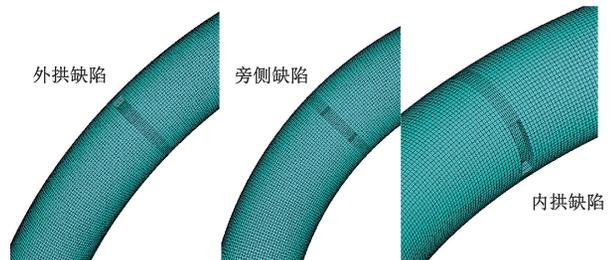
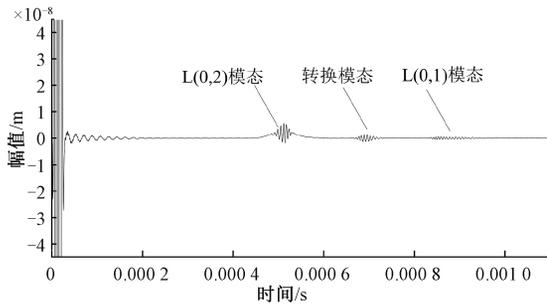


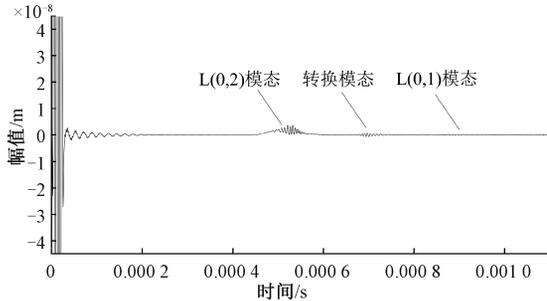
图 14 弯管弯头区域缺陷模型

Fig. 14 Models of the defects in pipe elbow

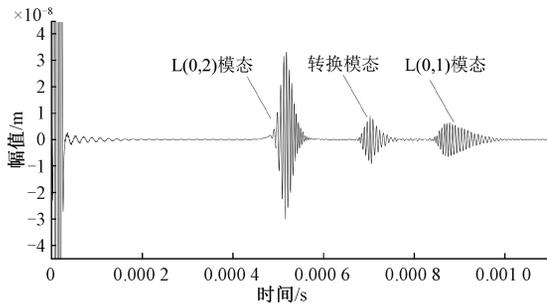
图 15(a)~(c) 分别给出了上述 3 个缺陷的回波信号。从图中可以看到,和直管缺陷回波类似,纵向模态激励得到的弯头缺陷回波也包括 3 个波包成分:L(0,2) 模态回波、转换模态回波和 L(0,1) 模态回波<sup>[20]</sup>,其中 L(0,2) 模态为主模态。可明显地看到,由于弯头和缺陷均引起结构特性的不连续,故 L(0,2) 模态回波包含了缺陷反射和弯头反射两部分。以无缺陷的弯头回波为基准,利用基线减法提取出缺陷回波部分以便进行更准确的理论分析。无缺陷的弯头回波如图 15(d) 所示,可见导波在弯头处产生的反射能量很小。进行基线处理后所得缺陷回波进行比较,如图 16 所示。



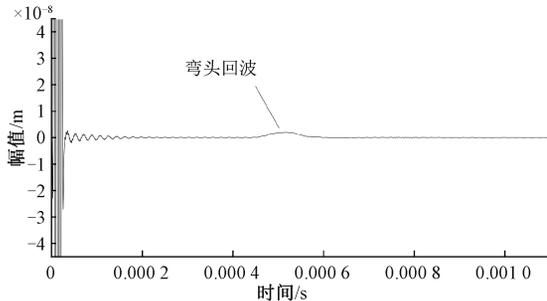
(a) 内拱缺陷回波信号  
Reflection signal from the bend with defect in elbow extrados



(b) 旁侧缺陷回波信号  
Reflection signal from the bend with defect in elbow side



(c) 外拱缺陷回波信号  
Reflection signal from the bend with defect in elbow intrados



(d) 无缺陷回波信号  
Reflection signal from the bend without defects

图 15 弯管缺陷回波时域波形

Fig. 15 Reflection waveforms of the defects in bend pipe

由图 16 可知,大小相同但位于弯头不同位置的缺陷与 L(0,2) 模式超声导波相互作用所得缺陷回波有明显差异。外拱缺陷 L(0,2) 模式回波信号幅值最强,旁侧及内拱缺陷的 L(0,2) 模式回波信号幅值相对很弱。旁侧缺陷回波的频散更为严重,模式转换对回波信号的影响也更明显。计算回波中 L(0,2) 模式在不同缺陷情况下

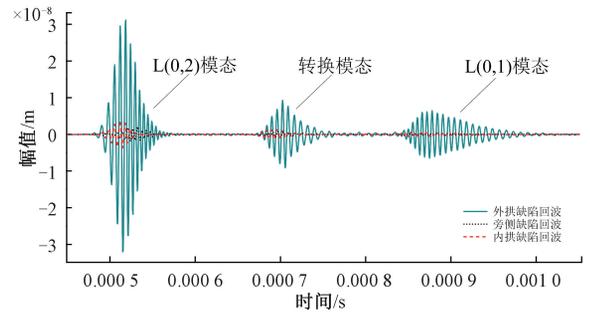


图 16 不同位置缺陷回波信号比较

Fig. 16 Comparison of reflections from the defects at different locations

的反射系数并进行归一化处理,结果如图 17 所示。图 17 中 3 种情况反射系数相差较大,外拱缺陷反射系数是旁侧缺陷反射系数的 16 倍,旁侧缺陷反射系数与内拱缺陷反射系数接近。说明超声导波检测弯管弯头缺陷的能力与缺陷位置有密切关系,缺陷位于弯头外拱时缺陷检测灵敏度最高,而当缺陷位于弯头内拱或旁侧时则会出现缺陷难以检出或漏检的情况。

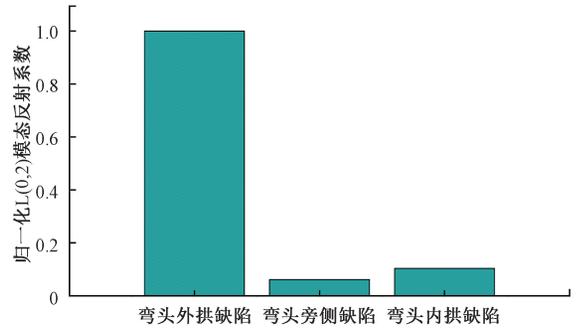


图 17 不同位置缺陷反射系数比较

Fig. 17 Comparison of reflection coefficient of defects at different locations

### 3.2 弯头后直管段缺陷的导波检测

超声导波在弯头后直管段传播时,导波能量在周向及轴向均呈现变化的能量分布规律,故与缺陷的相互作用也相对更为复杂。为了研究后直管段缺陷的导波检测问题,在后直管段的不同位置分别引入缺陷,分析讨论各缺陷的回波特性。如图 18 所示,缺陷分别设置在外拱轴线(90°)、旁侧轴线(180°)及内拱轴线(270°)方向上间隔 0.1 m 的位置,简称其为外拱缺陷、旁侧缺陷和内拱缺陷。共 30 组缺陷模型,缺陷几何参数完全相同,通过仿真计算采集得到 30 组缺陷回波。

相对于后直管段始端轴向位置为 0.1、0.5、0.8 m 的外拱缺陷产生的回波信号如图 19 所示。大小相同但位置不同的外拱缺陷回波能量呈周期性变化:0.5 m 处缺

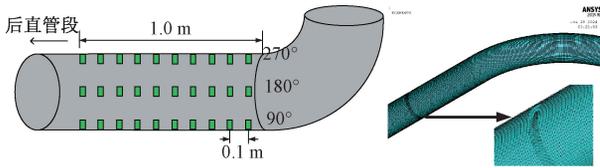


图 18 弯管后直管段缺陷示意图

Fig. 18 Diagram of defects in the back straight pipe after the bend

陷回波相比 0.1 m 处缺陷回波能量减小,而 0.8 m 处缺陷回波能量增大,但相比 0.1 m 处则能量减小,说明导波在此传播路径上整体呈衰减趋势。

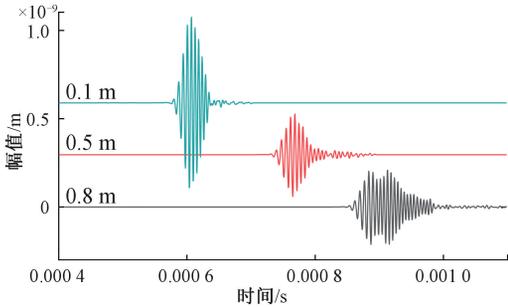


图 19 不同轴向位置外拱缺陷的反射回波

Fig. 19 Reflections of extrados defect at different axial positions

图 20 为相同轴向位置处的内拱缺陷产生的 L(0,2) 模态回波,也呈现类似的周期性变化规律,但 0.1 m 处内拱缺陷的回波能量更小。此外,随着传播距离的增大,由于频散及模态转换现象,两组信号的 L(0,2) 模态波包在时域上出现明显扩展。在某些位置,例如 0.8 m 的外拱处及 0.5 m 的内拱处,L(0,2) 模态导波与缺陷相互作用产生的模态转换更为强烈。

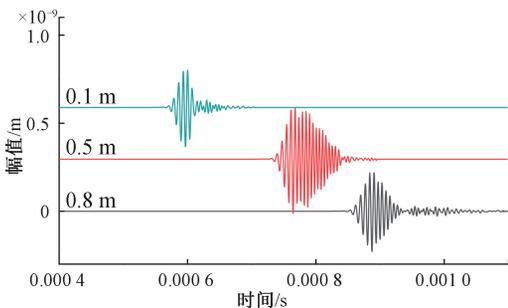


图 20 不同轴向位置内拱缺陷的反射回波

Fig. 20 Reflections of intrados defect at different axial positions

图 21 为 180° 旁侧缺陷在不同轴向位置处产生的 L(0,2) 模态回波,不同于内拱缺陷和外拱缺陷回波能量的振荡,旁侧缺陷回波能量保持单调衰减的趋势,这说明后直管区域内旁侧位置的缺陷与导波相互作用所形成的回波主要受传播距离及模态频散的影响。

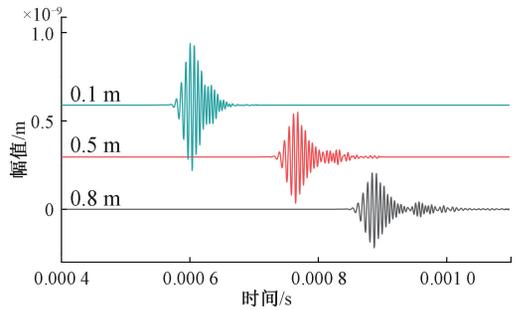


图 21 不同轴向位置弯管旁侧缺陷的反射回波

Fig. 21 Reflections of side defect at different axial positions

以上现象说明,弯头后直管段缺陷回波时域特征具有一定规律,其能量和缺陷轴向位置及周向位置有密切关系。但由于缺陷回波涉及导波在弯头部分的前向传播和后向散射信息,故回波信号更为复杂,特别是位于内外拱轴线上及其附近的缺陷。图 22 中计算了多个内外拱缺陷的反射系数以表征缺陷检测的灵敏度,归一处理后进行比较。结果也进一步反映了影响弯管内缺陷的导波检测影响因素较多,这会对缺陷的量化检测及识别带来很多困难。

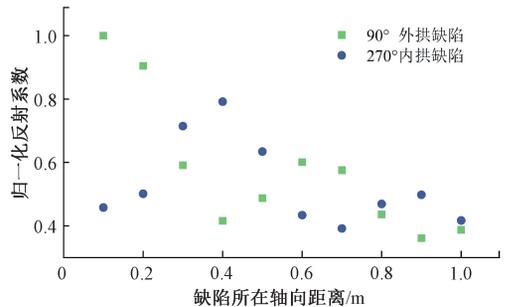


图 22 后直管段内外拱缺陷检测灵敏度比较

Fig. 22 Comparison of detection sensitivity for the intrados and extrados defects at different positions in the back straight pipe section

## 4 实验验证

为了验证数值仿真研究所得结果,在实际弯管上进行了实验。弯头部分是整个弯管的薄弱环节,且正是由于弯头结构的特殊性造成了弯管内超声导波的复杂性,故实验内容重点考虑对弯头区域内缺陷的检测,验证 L(0,2) 模态超声导波在弯管弯头区域的波场分布和能量聚焦特性。

### 4.1 实验系统及弯管样本

实验在实际弯管上开展,弯管的各项参数与上文弯管仿真模型的参数基本一致,包括几何参数和材料特性

等。实验研究了缺陷位于弯管弯头区域不同周向位置的3种情况,缺陷设置在弯头轴向角度45°,周向分别位于内拱、旁侧和外拱轴线的位置。3种情况中缺陷均为轴向长约2 mm,周向长约35 mm。深度方向上递进加工,得到2、2.5、3和3.5 mm等多种深度情况。

本研究实验所用装置如图23所示,实验装置由任意波形发生器、功率放大器、转换开关、前置放大器和数据采集及显示装置组成。90°弯管的前后直管段长度均为1.1 m,16个纵向伸缩压电片沿周向均匀布置在管道一端以激励L(0,2)模态超声导波,激励信号为中心频率150 kHz的五周期toneburst信号,采用自发自收方式接收缺陷回波。

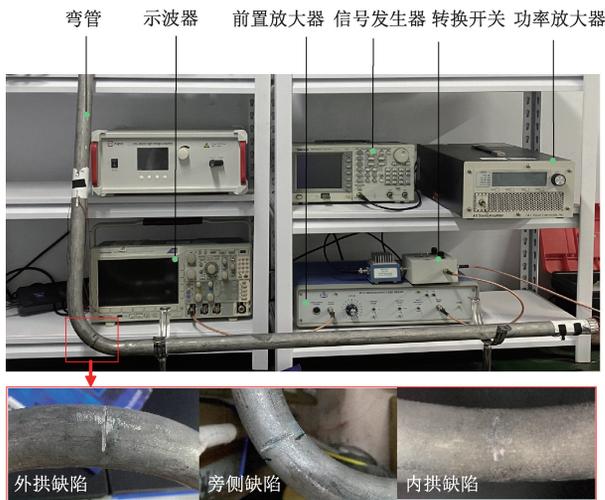


图23 超声导波弯管检测实验装置

Fig. 23 Experiment system for bend inspection based on guided waves

#### 4.2 实验结果及分析

纵向模态超声导波与弯头缺陷相互作用产生的典型缺陷回波如图24所示,缺陷为位于弯头中部外拱位置的穿透型裂纹。和仿真结果一致,实际缺陷回波由L(0,2)

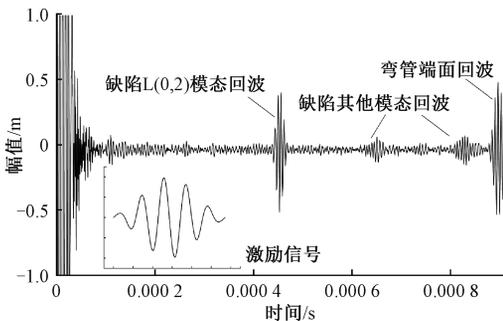


图24 激励信号及弯管缺陷典型回波信号

Fig. 24 Typical reflection signal of the defect in bend pipe and excitation

模态回波及其他转换模态组成。超声导波在弯头本身产生的回波能量很小,且在反向传播过程中存在衰减,故实验中很难直接观察到。

实验重点研究比较了弯头外拱缺陷、旁侧缺陷和内拱缺陷的回波信号。图25给出了当缺陷径向深度从2 mm线性递增到3.5 mm(间隔0.5 mm)时,3种缺陷各自产生的L(0,2)模态回波部分。

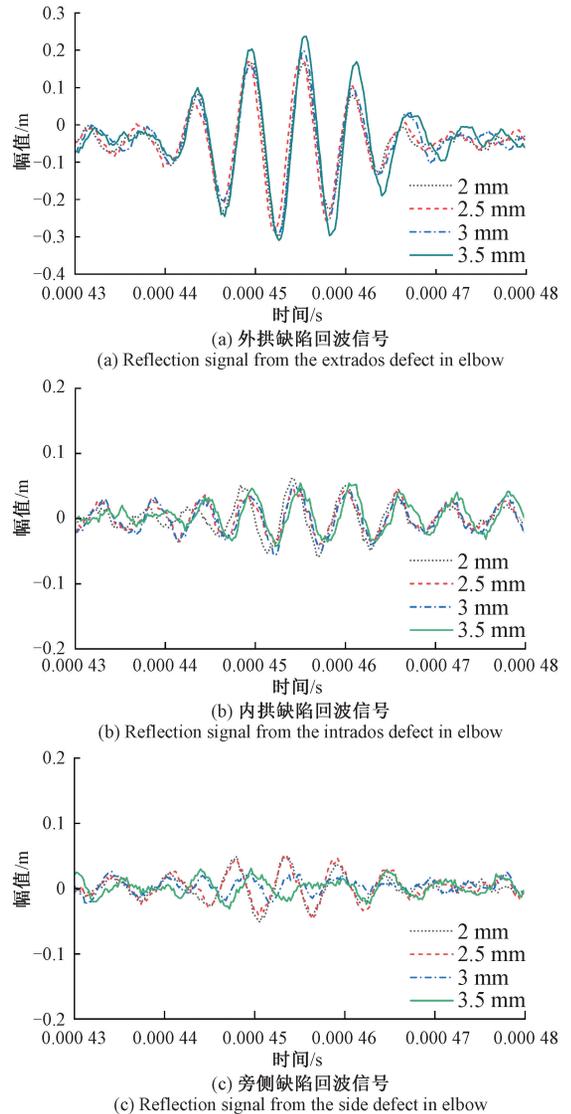


图25 不同位置弯头缺陷回波比较

Fig. 25 Comparison of echoes from the defects at different elbow locations

从图25(a)可以看到,弯头外拱缺陷回波幅值较大,随着缺陷径向深度的增加,外拱缺陷回波幅值呈现单调增的趋势。图25(b)和(c)中内拱缺陷回波和旁侧缺陷回波的幅值均远远小于外拱缺陷回波幅值,这说明相同大小的缺陷位于弯管弯头不同周向位置时会

产生不同大小的回波信号。各缺陷在不同径向深度情况下的L(0,2)模态回波能量的量化比较如图26所示。

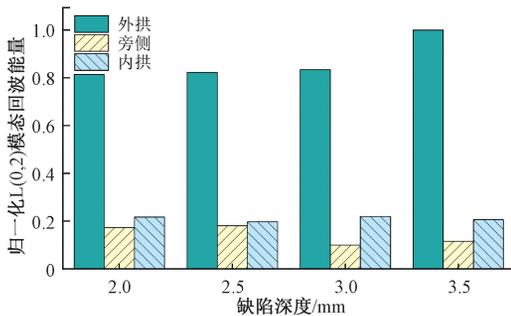


图26 弯头不同位置缺陷回波能量比较

Fig. 26 Comparison of echo energy of the defects at different elbow locations

当缺陷径向深度变化时,外拱缺陷回波、旁侧缺陷回波和内拱缺陷回波能量呈现出不同的变化趋势。实验中缺陷加工精度难以控制,实际缺陷与仿真缺陷存在差异、弯管样本与模型存在不同、传感器耦合一致性及外部噪声干扰等因素均会对采集的回波数据造成影响。特别是对本身能量小,容易受噪声干扰的旁侧缺陷回波和内拱缺陷回波影响更大。但仍可观察到,缺陷在不同的径向深度情况下,3种缺陷回波的相互大小关系始终保持不变:外拱缺陷回波能量强,旁侧和内拱缺陷回波能量弱。进一步验证了超声导波在弯管内传播时,波场能量更多地聚焦于外拱方向,而旁侧及外拱方向上波场能量分布很少。波场能量在弯管弯头区域分布的变化对缺陷的定位识别及量化也带来了更多困难,因为回波特性和不仅取决于缺陷大小及类型,也和其周向位置及轴向位置有密切关系。

## 5 结 论

本研究探究了L(0,2)模态超声导波在弯管中的传播特性,重点分析了超声导波在弯管的弯头区域及弯头后直管区域的变化,利用全波场量化数据从能量变化、波场分布及与缺陷相互作用几个方面完整地分析了弯头结构对导波传播的影响,以及弯管不同位置缺陷的导波检测问题,得到的结论为:

1) 弯管中的弯头结构不仅会使超声导波能量产生较大衰减,而且会使导波波场在轴向和周向上的分布产生变化,导波在弯头弯曲点前后的区域呈现不同的能量聚焦及扩散特征。

2) 导波进入弯头后导波能量向外拱方向上聚集,在通过弯头弯曲点后导波能量逐渐向弯头旁侧扩散。导波在弯头区域传播过程中周向上的能量极小值一般出现在弯头内拱或旁侧,与导波激励频率、当前轴向位置和弯头弯曲半径有密切关系。

3) 导波进入弯头后的直管段区域后,由于沿周向导波能量不对称,引入非对称模态,主要的导波能量在弯头旁侧轴线附近(内外拱轴线之间)传播,而内外拱轴线方向上导波能量很小且呈衰减振荡。

4) 弯管结构的复杂性使得弯管缺陷的检测及评估,特别是位于弯头及弯头后直管段的缺陷,相比直管缺陷问题更为困难。超声导波在不同管段的不同位置具有不同缺陷检测灵敏度,可考虑聚焦扫描技术实现弯管结构的完整检测。

此研究工作有助于建立对弯管内超声导波传播特性的全面了解、优化弯管缺陷检测方案,为进一步利用超声导波实现复杂结构中缺陷的可靠检测及评估提供理论基础。

## 参考文献

- [1] 王亮添,胡文钰,黄国斌,等. 残余应力存在时Cl<sup>-</sup>对304不锈钢管道点蚀行为的影响[J]. 西安交通大学学报,2022,56(11):104-114.  
WANG L T, HU W Y, HUANG G B, et al. Effect of Cl<sup>-</sup> on the pitting behaviour of 304 stainless steel pipelines in the presence of residual stress [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022,56(11):104-114.
- [2] 李彬,何贝,李瑞光,等. 基于TRESCA强度理论的弯管应力分析及变壁厚模型建立[J]. 应用力学学报,2021,38(6):2411-2418.  
LI B, HE B, LI R G, et al. Stress analysis and variable wall thickness modelling of bent pipe based on Tresca strength theory [J]. Journal of Applied Mechanics, 2021,38(6):2411-2418.
- [3] 张梁,张艳花,杨录. 基于超声导波技术的柱面接触研究[J]. 电子测量技术,2020,43(12):46-50.  
ZHANG L, ZHANG Y H, YANG L. Research on contact stress iron-chromium alloy based on ultrasonic guided wave technology [J]. Electronic Measurement Technology, 2020,43(12):46-50.
- [4] 周琛,何建,胡暮平,等. 基于L(0,2)超声导波的管段结构损伤定位研究[J]. 仪器仪表学报,2020,41(12):181-191.

- ZHOU CH, HE J, HU M P, et al. A study on structural damage localisation in pipe segments based on  $L(0,2)$  ultrasonic guided waves[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020,41(12):181-191.
- [ 5 ] 龙盛蓉,邓文武,陈炫宇,等. 基于频率-波数的频域合成孔径导波成像研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10):230-238.
- LONG SH R, DENG W W, CHEN X Y, et al. Frequency-domain synthetic aperture guided wave imaging based on frequency wave number[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021,42(10):230-238.
- [ 6 ] WU W J, ZHU L X, WANG Y M. Study on mode repulsion of ultrasonic-guided waves in pipe bends[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2020, 142(3): 031402.
- [ 7 ] RASGADO-MORENO C O, RIST M, LAND R, et al. Acoustic forward model for guided wave propagation and scattering in a pipe bend[J]. Sensors, 2022, 22(2): 486.
- [ 8 ] DEMMA A, CAWLEY P, LOWE M, et al. The effect of bends on the propagation of guided waves in pipes[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2005, 127(3): 328-335.
- [ 9 ] 周邵萍,张蒲根,吕文超,等. 基于导波的弯管裂纹缺陷的检测[J]. 机械工程学报,2015,51(6):58-65.
- ZHOU SH P, ZHANG P G, LYU W CH, et al. Detection of crack defects in bent pipes based on guided wave [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(6): 58-65.
- [10] 陈灵,徐建成,吴键,等. 超声导波在缺陷弯管上的数值模拟研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(6): 64-67.
- CHEN L, XU J CH, WU J, et al. Numerical simulation study of ultrasonic guided waves on defective bends[J]. Mechanical Manufacturing and Automation, 2021, 50(6):64-67.
- [11] 王畅,王兆坤,刘俊焱,等. 弯管缺陷尺寸与位置对超声波传播特性影响[J]. 应用声学,2023,42(4): 710-721.
- WANG CH, WANG ZH K, LIU J Y, et al. Influence of defect size and location on ultrasonic propagation characteristics of bent pipes [J]. Applied Acoustics, 2023, 42(4):710-721.
- [12] 伍文君,王悦民,陈乐,等. 管道弯头对低频纵向导波传播特性影响分析[J]. 声学学报,2017,42(1): 95-102.
- WU W J, WANG Y M, CHENG L, et al. Analysis of the effect of pipe elbow on the propagation characteristics of low-frequency longitudinal guided waves[J]. Journal of Acoustics, 2017,42(1):95-102.
- [13] 韩佳琪,刘尧,杨宁祥,等. 弯折小径管中槽型缺陷的  $L(0,1)$  模态导波检测[J]. 无损检测,2021,43(7): 35-40.
- HAN J Q, LIU Y, YANG N X, et al.  $L(0,1)$  modal guided wave detection of groove defects in bent small diameter pipes [J]. Nondestructive Testing, 2021, 43(7):35-40.
- [14] 朱龙翔,张海兵,王悦民,等. 基于  $L(0,1)$  模态导波的管道弯头中缺陷检测研究[J]. 海军工程大学学报,2022,34(2):62-68.
- ZHU L X, ZHANG H B, WANG Y M, et al. Research on defect detection in pipe elbow based on  $L(0,1)$  modal guided wave [J]. Journal of Naval Engineering University, 2022,34(2):62-68.
- [15] 李阳,邹云,张双楠,等.  $T(0,1)$  模态导波在弯管上传播的仿真与实验[J]. 声学技术,2017,36(5):442-449.
- LI Y, ZOU Y, ZHANG SH N, et al. Simulation and experiment of  $T(0,1)$  mode guided wave propagation on a bent tube [J]. Acoustic Technology, 2017, 36(5): 442-449.
- [16] 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.
- GU T, XI G F, HU D, et al. Detection test of torsion mode ultrasonic guided wave in a bent pipe [J]. Nondestructive Testing, 2019,41(12):17-20,29.
- [17] LONG SH R, DENG W W, HUANG Y Y, et al. The mode transformation of a  $T(0,1)$  guided wave in an elbow pipe and its influence on defect location[J]. AIP Advances, 2020, 10(11):1-7.
- [18] CHEN SH L, YANG N X, LIU Y, et al. Monitoring the cumulative process of corrosion defects at the elbow of a

welded pipe using magnetostrictive-based torsional guided waves[J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2021, 5:1630-1643.

- [19] 王晓娟,杨帆,王错,等. 面向超声导波检测的管道腐蚀建模及仿真实现[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(5):71-80.

WANG X J, YANG F, WANG C, et al. Pipeline corrosion modeling and simulation for guided-waves-based inspection[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(5):71-80.

- [20] 王晓娟,赵锴,郑毅. 管道纵向超声导波的对称模态转换特性分析[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(9):151-160.

WANG X J, ZHAO K, ZHENG Y. Characterisation of symmetric mode conversion of longitudinal ultrasonic guided waves in pipelines [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(9):151-160.

## 作者简介



王晓娟(通信作者),2011年于香港城市大学获得博士学位,现为西安理工大学讲师,主要研究方向为结构无损检测等。

E-mail:xjwang@xaut.edu.cn

**Wang Xiaojuan** (Corresponding author)

received her Ph.D. degree from City University of Hong Kong in 2011. She is currently a lecturer at Xi'an University of Technology. Her main research interests include NDT, etc.



马旭泽,2020年于湖南工业大学获得学士学位,现为西安理工大学机仪学院硕士研究生,主要研究方向为超声无损检测。

E-mail:841125353@qq.com

**Ma Xuze** received his B.Sc. degree from Hunan University of Technology in 2020. He is currently a master student in the School of Mechanical and Precision Instrument Engineering at Xi'an University of Technology. His main research interests include NDT, etc.