

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312147

水载压力对管道超声导波信号的影响研究*

胡晓谟¹, 林霆威¹, 张维煊¹, 魏子麒², 王奕首¹

(1. 厦门大学航空航天学院 厦门 361005; 2. 中国科学院自动化研究所 北京 110007)

摘要:为了研究水载压力对管道超声导波信号的影响,利用半解析有限元的方法分析了管道导波的频散曲线和波结构,选择 $L(0,2)$ 模式导波用于实验验证。设计了一个可承受30 MPa压力的防水卡箍,对管道上的压电传感器进行封装。将安装了防水耐压卡箍的管道放入压力舱中进行打压循环测试,压力在0~30 MPa之间变化。打压过程中采集无损伤及5%损伤的管道超声导波信号,分析水载压力对导波信号的影响。实验结果表明,该防水卡箍具有良好的防水和耐压性能,水载压力对 $L(0,2)$ 模式导波信号幅值没有显著影响。

关键词: 管道; 超声导波; 水载压力; 半解析有限元

中图分类号: TB559 TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

A study of the effect of waterborne pressure on ultrasonic guided wave signals in pipelines

Hu Xiaodie¹, Lin Tingwei¹, Zhang Weixuan¹, Wei Ziqi², Wang Yishou¹

(1. Xiamen University, School of Aeronautics and Astronautics, Xiamen 361005, China;

2. Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 110007, China)

Abstract: In order to study the effect of water-loaded pressure on the ultrasonic guided wave signals, the dispersion curve and wave structure of guided wave in the pipe are analyzed by using the semi-analytical finite element (SAFE) method. The $L(0,2)$ mode guided wave is selected in the detection experiment. A waterproof clamp that can withstand a pressure of 30 MPa is designed to encapsulate the piezoelectric transducer on the pipe. The encapsulated pipe is placed into a pressure chamber for the pressure cycle test, where the pressure varies between 0 MPa and 30 MPa. The guided wave signals of the healthy pipe and the damaged pipe with 5% area loss are collected during the pressure cycle experiments in order to analyze the effect of the water-loaded pressure on the guided wave signals. The experimental results show that the waterproof clamp has good waterproof and pressure-resistant properties, and at the same time, the water-loaded pressure does not have a significant effect on the amplitude of the $L(0,2)$ modal waveguide signal.

Keywords: pipe; ultrasonic guided wave; water load pressure; semi-analytical finite element

0 引言

近些年来,全球油气行业发展迅猛,管道运输是比较可靠的油气运输方式。由于海洋环境对管道的影响,导致管道中产生缺陷,利用结构健康监测(structural health monitoring, SHM)技术对管道状态进行实时或周期性实时监测,是确保海底管道服役安全的重要手段。基于脉

冲-回波模式的管道超声导波健康检测/监测是最常用的技术,在管道一处布置换能器即可实现数十米范围内管道的全局检测,可检测管道中的腐蚀、裂纹、结垢等,效率高,成本低^[1-3]。但海洋中的管道检测与陆地上有所不同,洋流、水压等环境因素会对管道检测产生一定的影响。因此,需要研发针对海洋管道的缺陷检测设备,并且对海洋管道进行检测时需要考虑水载环境对检测结果的影响。

针对以上问题,一些国内外学者进行了相应的研究。针对水载对超声导波信号的影响,许多学者建立了物理模型进行理论分析,闫孝姮等^[4]构建了流-固-声多物理场耦合模型,分析了充水管道中不同频率纵向模式导波的声压分布和波结构,从而选择最佳激励频率。宋振华等^[5]通过数值模拟建立了充液管道流-固耦合模型,发现充液管道 $L(0,2)$ 模式导波幅值和群速度与空管中相比有所衰减。Yan 等^[6]基于声固耦合理论,分析了双层充液管道的相速度-厚度积,并分析了角频率与波数-厚度积之间的关系,为超声导波检测提供了理论依据。刘增华等^[7]进行了纵向模式导波在水载和非水载钢管中传播的实验研究,结果表明,在充水钢管中存在着模式分离和群速度降低等传播特征。刘丁楠等^[8]通过实验发现充液管道中超声导波的能量会向内部液体介质泄漏的现象,并提出基于 $L(0,2)$ 模式的概率成像法对充水管道中的损伤进行定位。Aristegui 等^[9]学者研究了管道内外不同流体介质对导波传播的影响,对比了包括管内外均为空气、管外空气管内充液、管外液体管内充气、管内外均为水、管外为水管内为蓖麻油等5种类型下的管道频散曲线和衰减曲线,发现高频 α 模式导波在高频时在管壁上主要为弯曲运动,并且在水中的径向位移和轴向位移随着距管内壁的距离呈指数衰减。Vogelaar 等^[10]利用扭转模式导波进行实验,发现相对于管内外同介质,管内外不同介质(无论是空气与水,还是水与空气)下导波传播的衰减要高一倍。

针对水流速度对超声导波传播特性的影响,刘增华等^[11]采用数值仿真手段分析了纵向模式导波在载流管道中的传播特性,发现载流管道内频率为 305 kHz 的 $L(0,5)$ 模式的群速度与液体流速呈近似线性变化。Ju 等^[12]发现水流会造成超声导波信号幅值变化和时移,并提出一种时间和频率滤波方法进行补偿。Qu 等^[13]通过建立导波在含流动水管道中传播的有限元仿真模型,得到了声压沿管道轴向的分布,并且在水流的影响下,除垢效果随管长而减弱。

关于水载压力对超声导波信号的影响,这方面的研究比较少,尤其是针对深海环境下耐高压超声导波传播特性试验研究。Dubuc 等^[14]设计了一种测量不同压力下薄壁充水钢管内螺旋波能量速度变化的实验装置,用声弹性泄漏兰姆波描述压力引起的螺旋波的能量速度变化,与实验结果相符合。因此,本文主要在这方面开展研究。

本文结合深海采矿混输立管超声导波检测需求,研究 3000 米水深环境下管道超声导波传播特性,管道水载环境为管内外均为水。首先利用半解析有限元方法(semi-analytical finite-element, SAFE)分析了实验管道的频散曲线和波结构,为检测模式和激励频率选择提供依

据;然后,设计了一种防水卡箍,对压电传感器进行封装;最后进行打压实验,在压力测试实验中,分别针对有损管道和无损管道进行打压,通过设置不同的打压次数进行试验,分析了回波信号幅值与压力的关系。

1 管道频散曲线和波结构

半解析有限元方法(SAFE)被广泛用于求解任意截面波导中的波传播特性,SAFE 方法采用有限元网格来离散化波导截面,而假设波在传播方向上以简谐波的形式运动^[15]。与有限元法相比,SAFE 的主要优点是只需要对垂直于波传播方向的截面进行有限元网格划分,把波三维传播问题简化为一维或二维问题,计算简单和效率高。

如图1所示为管道的三维模型,假设波为简谐波,沿着 OX_3 轴传播。波导中的位移矢量可以表示为:

$$u_i(x_1, x_2, x_3, t) = U_i(x_1, x_2) e^{I(kx_3 - \omega t)} I = \sqrt{-1} \quad (1)$$

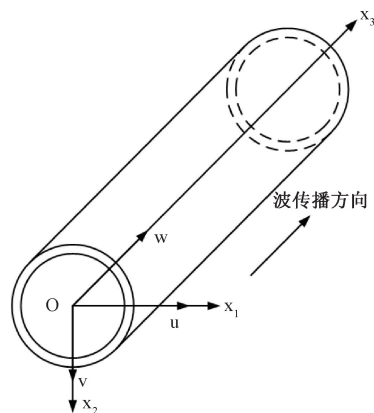


图1 三维管道模型

Fig. 1 Three-dimensional piping model

其中 k 为波数, $\omega = 2\pi f$ 为角频率, f 为频率, t 为时间变量,下标 $i = 1, 2, 3$ 。对于一般的各向异性材料,动态平衡方程可以写成如下表达式 $r = 1, 2, 3$ 以及 $p, q = 1, 2$ 的总和^[16]:

$$C_{sprq} \frac{\partial^2 U_r}{\partial x_p \partial x_q} + I(C_{s3rp} + C_{spr3}) \frac{\partial(kU_r)}{\partial x_p} - kC_{s3r3}(kU_r) + \rho\omega^2 \partial_{sr} U_r \quad (2)$$

系数 C_{sprq} 是刚度模量,对于弹性或粘弹性材料,分别取实数或复数。解方程(2)的过程是选择一定范围角频率 ω 的值,求波数 k 的特征值,在一定频率范围内,通过 k 的特征值得求对应频率的群速度以及相速度,从而可以得到所需频率范围的频散曲线。

每个频率的相速度可以用下式求出:

$$C_{ph} = \frac{\omega}{k} \quad (3)$$

群速度可以用下式求出：

$$C_g = \frac{\Delta \omega}{\Delta k}$$

(4)

Bocchini^[17]利用半解析有限元公式计算波的传播特性,管道参数的设置如表 1 所示。如图 2 所示为利用以上参数计算得到的 200 kHz 以内的管道纵向和扭转模态导波的频散曲线,相速度频散曲线如图 2(a)所示,群速度频散曲线如图 2(b)所示。通过频散曲线可以看出,在 200 kHz 以下,管道中的纵向模态仅包含 L(0,1)和 L(0,2)两个模态。对于纵向模态,随着频率的上升,管道中导波模态也逐渐增多。这种现象表征于时域信号上即呈现出多个模态的回波信号混叠,这对分析管道回波信号是十分不利的。同时,在 50 kHz 以后,L(0,2)模态的相速度和群速度基本不变,表现出非频散,故在实验过程中应选择合适频率的激励信号,从而防止高阶模态导波以及频散现象的出现。对于水载管道而言,频散曲线中多出了 α 模态,水可以吸收导波的能量,故不同的模态都存在不同程度的衰减,以及传播过程中频散程度的增加,这种衰减是导波传播过程中能量由管道泄漏至水中引起的。而 T(0,1)模态在整个频率段都是非频散的。由于液体不能承载剪应力,T(0,1)模态的导波能量不会泄漏到水中,也不会发生频散现象。

表 1 管道材料参数设置

Table 1 Pipe material parameter settings

参数	值
材料	304 不锈钢
密度/(kg/m ³)	7930
弹性模量/Gpa	194.02
外径/mm	48
内径/mm	41
长度/mm	500

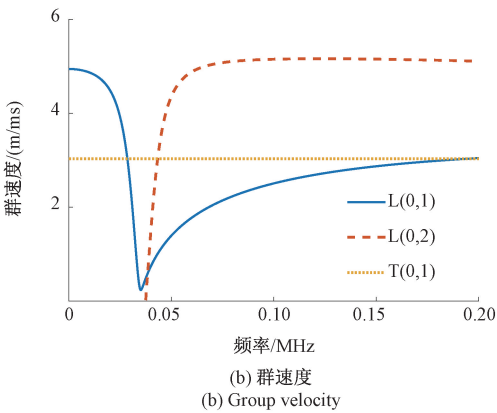
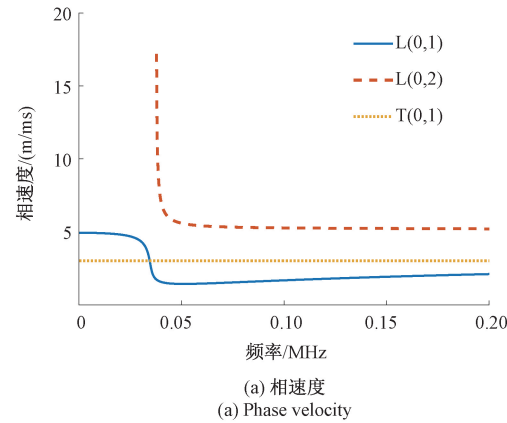


图 2 管道典型模态的频散曲线

Fig. 2 Dispersion curves for typical modes of the pipe

如图 3 所示为利用 SAFE 方法求得的本次实验管道中典型模态导波在 190 kHz 的波结构,即位移或应力沿管道壁厚的分布图。L(0,2)模态沿壁厚的位移分布如图 3(a)所示,T(0,1)模态沿壁厚的位移分布如图 3(b)所示。从图中可以看出,L(0,2)模态仅存在径向位移和轴向位移,而 T(0,1)模态仅存在周向位移。其中 L(0,2)模态的轴向位移较大而径向位移很小,且轴向位移在管壁厚度方向上分布较为均匀,T(0,1)模态的周向位移在管壁外侧较大,而在管壁内侧较小。

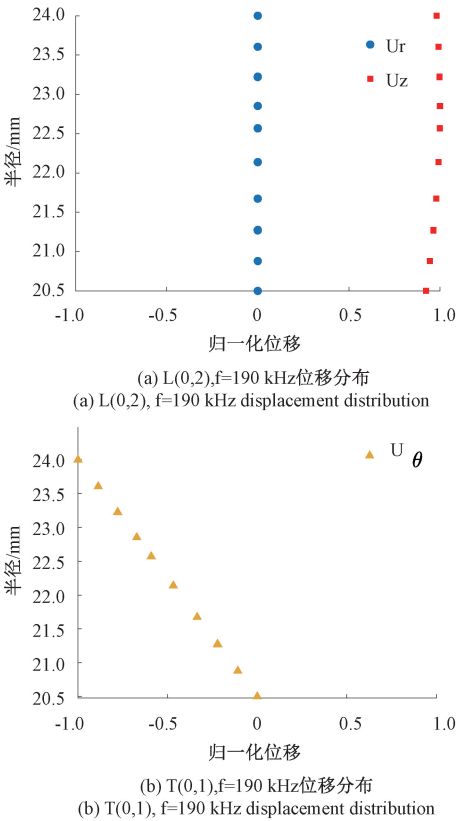


图 3 管道典型模态的波结构图

Fig. 3 Wave structure diagram for typical modes of the pipe

对频散特性和波结构进行分析可选取合适检测模态检测管道中的缺陷^[18]。根据超声导波的检测原理,质点的轴向位移对于周向分布的缺陷敏感度较强,比较适合缺陷检测。因此 $L(0,2)$ 模态更适合用于管道周向裂纹损伤检测。尽管对于水载管道而言, $T(0,1)$ 模态的能量不会泄漏到水中,而 $L(0,2)$ 模态的能量会泄漏到水中,能量的泄漏会导致导波信号的衰减,但考虑到本文所设置缺陷的类型以及激励不同模态导波的压电晶片加工和封装的难易程度,本文选择 $L(0,2)$ 模态作为导波的激励模态,激励频率范围可以选择在 50~200 kHz 之间。

2 水载管道传感器网络设计与封装

水载压力不但会作用于管道上,还会作用于粘贴在管道周向方向的压电传感器。因此,本文设计了可实现防水和耐压性能的传感器网络。主要包括压电智能层、防水卡箍、环氧树脂密封胶等。

本文采用压电传感器激励和接收超声导波,选用长度伸缩型 PZT-5A 压电陶瓷,利用聚酰亚胺作为柔性基体,在其表面蚀刻金属铜箔电路,并利用焊锡将压电晶片焊接于薄膜表面,形成压电智能层。最后,通过对压电智能层设计柔性电路以抑制水载环境中的噪声信号。同时,通过在管道圆周等间距布置压电传感器以抑制或消除弯曲模态,从而激励出 $L(0,2)$ 模态的导波。然而,仅靠聚酰亚胺薄膜是无法承受过高压强,也无法实现防水功能,针对该情况,设计了一款防水卡箍用于保护压电智能层并实现防水耐压封装。

针对适应 3 000 m 水深应用场景,按照 30 MPa 压强进行防水卡箍的强度和稳定性设计与校核。防水卡箍结构采取 U 型设计,如图 4(a) 所示,卡箍中心区域为凹槽,凹槽深度大于压电智能层厚度,以防止卡箍破坏压电传感器,剩余空间用密封胶填充密封。由于防水卡箍上下两部分与管道是采取过盈配合,需要施加一定预紧力,确保卡箍能够固定在管道上,因此防水卡箍直接作用在管道上区域要承受一定应变,该预紧力所产生的应变对压电换能器和耦合剂没有影响。本文设计的防水卡箍与一般的防水卡箍相比,具有如下优点:(1) 本文设计的防水卡箍不仅能防水,同时能耐高低温(-40~120℃);(2) 安装和防水密封简单。传感器网络封装过程如下:首先将压电智能层粘贴在管道上,然后再安装防水卡箍,卡箍与管道配合处采用过盈配合锁紧,并在接合面均采用橡胶垫片、垫圈进行密封处理,最后通过预留的注胶口灌注环氧密封胶进行进一步防水封装。采用的密封胶是 Hasuncast 142SW 环氧树脂,它由 A、B 两组分组成,依靠其自身缩合反应常温固化,基本不受外界气温影响。如图 4(b) 所示是传感器封装于打压测试管道的实物图,防

水卡箍的顶部安装有防水接插件,可以连接内部电路与外部线缆。

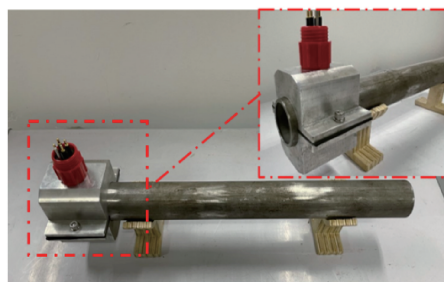
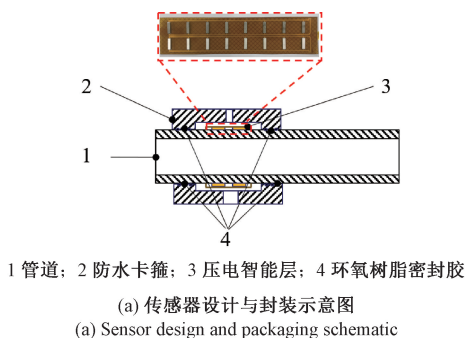


图4 传感器网络封装示意图与实物图

Fig. 4 Schematic and physical diagram of sensor network package

3 水载管道的压力测试实验方案

3.1 压力测试实验装置

实验装置简图如图 5 所示,实验装置包括打压泵、压力泵增压控制台、封装后的管道、超声导波激励与数据采集设备以及超声导波诊断软件系统。压力舱作为管道的容器,提供压力测试的环境,将封装后的管道放入压力舱中,并通过耐压接插件引至信号采集设备。数据激励与采集设备是大连君晟生产的超声导波损伤诊断平台系统 V1.0。最后通过超声导波诊断软件系统实现信号的采集与显示。



图5 压力测试实验装置

Fig. 5 Experimental setup for pressure testing

3.2 管道损伤设置

管道损伤设置如图 6 所示,试验所采用的管道模型长 500 mm,外径 48 mm,壁厚 3.5 mm,管道材质为 304 不锈钢,在压力测试实验中需要设置管道的损伤形式,采用横截面积损失来定义管道损伤大小,本文采用在管道上距离管道端面 150 mm 处切割形成一个大小为 5% 的损伤,该损伤大小为管道截面缺失的部分占整个管道截面的百分比。

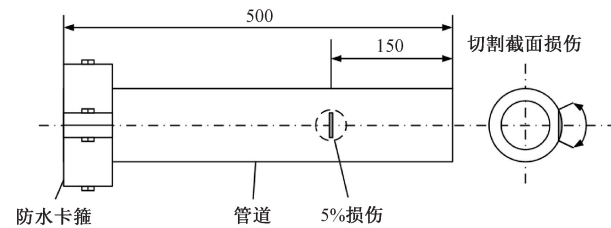


图 6 损伤设置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of injury setup

4 实验结果与分析

4.1 压力对无损管道回波信号的影响

针对无损管道,选取端面回波信号幅值进行分析。对于初期打压试验,随着管道所承受的压力逐渐增大,端面回波信号的幅值逐渐减小。而在同一压力下,随着试验逐步进行,被环氧树脂胶密封的传感器逐渐“适应”水压,所以端面回波信号幅值随着试验次数增加呈现一个先减小再增大的趋势。

如图 7 所示是无损伤管道的水下回波信号,激励频率为 190 kHz,可清晰地看到多个端面回波信号。对无损状态下采集的回波进行波速计算,以验证所激励的导波模式为 $L(0,2)$ 模式。一次端面回波峰值对应的时间为 208.71 μs ,初始激励脉冲波包峰值对应的时间为 8.29 μs ,两者差值为 200.42 μs ,波程为 1 m,计算得到的波速为 4 989.5 m/s,对应频率下理论 $L(0,2)$ 模式波速

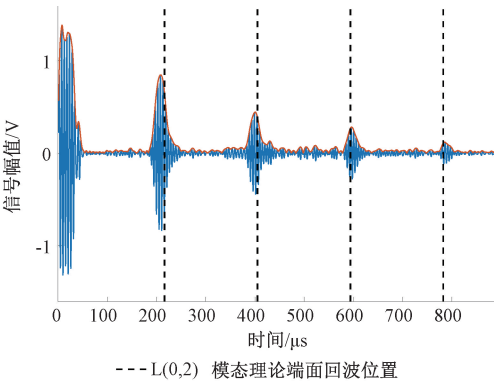


图 7 无损管道的水下回波信号

Fig. 7 Underwater echo signals from non-destructive pipeline

为 5 102.1 m/s,相对误差为 2.2%,在可接受的范围内,表明回波为 $L(0,2)$ 模式的回波。

第一次打压实验的结果如图 8 所示。在 0~5 MPa 时,使用较小的采集步长,每隔 1 MPa 采集一次信号,在 5~35 MPa 时,使用较大的采集步长,每隔 5 MPa 采集一次信号。在 0~5 MPa 时信号存在不稳定的波动,其原因主要是加压的过程点动,导致传感器受压不均匀,所以出现了信号幅值的波动。在第一次打压中,从整体而言端面回波幅值随压力的增加而降低。然后对实验数据进行拟合,以观察端面信号幅值随水压的变化规律。由于第一个点是管道未入水前所测,与加压过程关系不大,故拟合过程将其剔除,剔除后拟合函数为 $y = -0.006\ 904x + 0.595\ 6$ 。用和方差 (SSE) 与确定系数 (R-square) 综合评价拟合效果。和方差计算的是拟合数据和原始数据对应点的误差的平方和,和方差 SSE 越接近于 0,说明数据模型和拟合效果越好,数据预测也更加准确。确定系数越接近于 1,拟合效果越好。如图 9 所示为第一次压力测试数据的拟合曲线,其中,和方差仅有 0.002 49,确定系数为 0.974 8,这表明,该拟合函数拟合效果较好。同时,该曲线不能表示拟合曲线 0 以前的部分,因为这部分没有参考数据。从拟合曲线来看,端面回波信号的幅值与水压大致为线性负相关的关系。

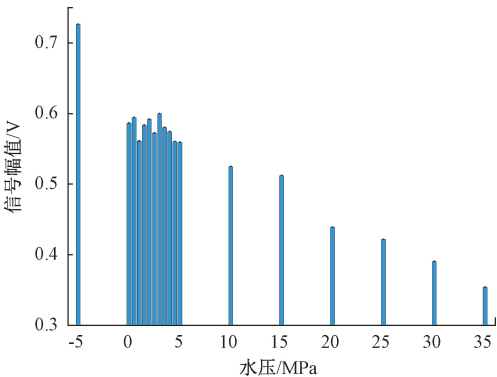


图 8 第一次打压端面回波信号

Fig. 8 First pressurized end face echo signal

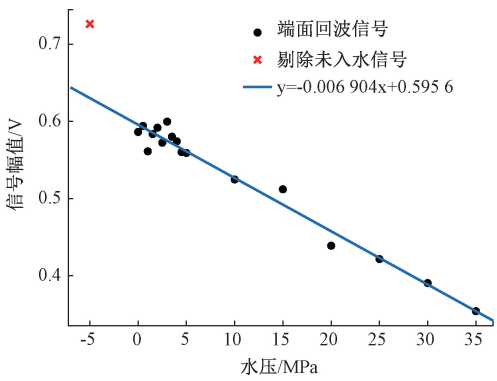


图 9 第一次打压端面回波信号拟合曲线

Fig. 9 Fitting curve of first pressurized end face echo signal

第二次打压实验结果如图 10 所示,在 0~30 MPa 每间隔 5 MPa 采样一次,整体信号还是趋向线性下降的过程,0~5 MPa 的过程还是处于不稳定的状态,基本上可以确定在水压不高的工况下,水压对信号并无太大的影响。拟合曲线结果如图 11 所示,拟合函数为 $y = -0.002\ 941x + 0.422\ 2$,和方差 $SSE = 0.000\ 519\ 1$,确定系数 $R\text{-square} = 0.921$,和方差接近于 0,同时确定系数接近于 1,可见,用该函数拟合的效果较好。从拟合曲线可以看出,随着压力的进一步增加,信号随压力呈现线性变化,拟合曲线相关性也较高。

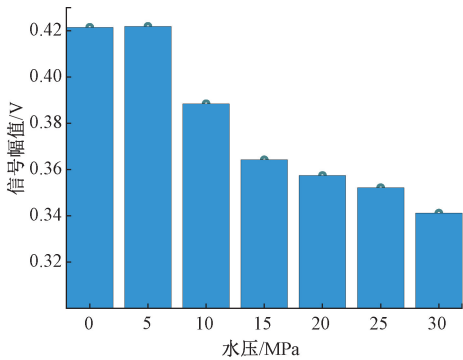


图 10 第二次打压端面回波信号

Fig. 10 Second pressurized end face echo signal

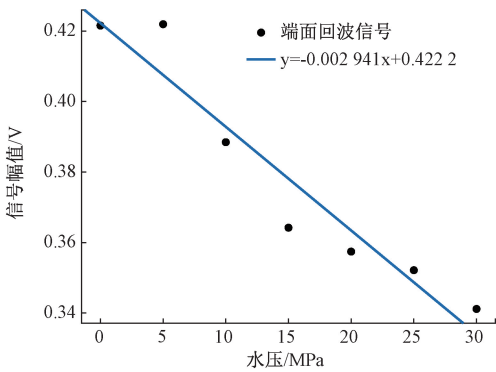


图 11 第二次打压端面回波信号拟合曲线

Fig. 11 Fitted curve of the second pressurized end face echo signal

如图 12 所示为第 1~10 次压力测试实验 0 MPa 与 30 MPa 两个压强下的端面回波信号幅值,主要目的是为了研究在多次循环打压之后传感器的耐压性能。从图中可以看出,第一次打压后信号的幅值是最大的,第 2~4 次打压中,信号的幅值存在波动,而从第四次打压开始,信号的幅值逐渐上升,直到第十次打压结束,信号的幅值与第一次打压后的幅值非常接近。对比打压过程中 0 与 30 MPa 回波信号的幅值的变化,不难发现,在同一次打压试验中,0 MPa 信号的幅值明显高于 30 MPa,随着打压

次数增加,二者的差值在逐渐缩小,这表明,压力大小对导波信号的影响逐渐减小。在十次打压过程中虽有泄压过程,但并没有取出传感器及管道。由于封装传感器所采用的胶层具有弹性,在第四次打压过后,防水胶层呈现一个类似塑性变形的状态,胶层被“压实”,传感器会逐渐“适应”水压,回波信号的幅值也逐渐上升,逐渐接近第一次打压的情况。

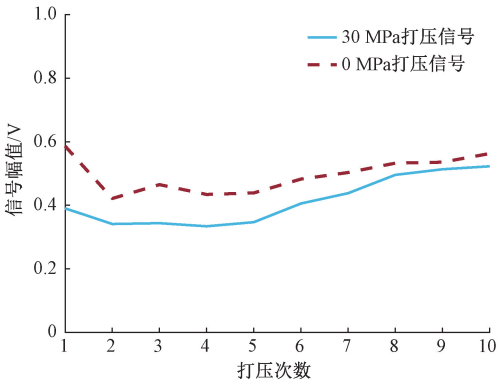


图 12 0 MPa 与 30 MPa 工况不同打压次数信号幅值变化

Fig. 12 Signal amplitude change of different pressurization times for 0 MPa and 30 MPa conditions

前十次实验均表明,压力在一定程度上会导致回波信号幅值的减小,表现为同一打压次数下,0 信号的幅值明显高于 30 MPa 信号的幅值。这主要是由于卡箍内用于密封传感器的密封胶层具有弹性,在第四次打压过后,防水胶层呈现一个类似塑性变形的状态,胶层被“压实”,传感器会逐渐“适应”水压,回波信号的幅值也逐渐上升。第十次打压后,0 和 30 MPa 信号的幅值非常接近,传感器基本上适应了高压环境。

4.2 压力对损伤管道回波信号的影响

经过前 10 次打压后,传感器基本上适应了水压,然后取出管道,设置 5% 损伤,对损伤管道进行加减压的循环打压实验。即先从 0 MPa 升压,直到 30 MPa,保压 5 分钟,然后从 30 MPa 开始减压,直到 0 MPa。如图 13 所示为加减压循环过程中,损伤回波和端面回波幅值的变化。从图中可以看出,在升压过程中,端面和损伤回波信号的幅值存在不稳定的波动,这种波动十分不规律,但总体上呈下降的趋势,升压过程中端面回波 0 与 30 MPa 差值仅有 0.042 5 V,下降了 7%,而出舱刻制损伤前的 10 次打压后端面回波下降的幅值在 40% 左右,相比之下基本可以判断随着压力的变化导波信号逐渐趋于稳定,这说明压力对端面回波信号的影响不大。在减压过程中,信号幅值整体上呈现出增加的趋势,在 0 MPa 时,升压过程的幅值与减压过程的幅值相同,这表明压力没有对传感器及管道造成损伤。比较损伤回波升压过程与减压过程的幅值变化,可以发现,两条曲线的相似度很高,

损伤回波的幅值在加减压前后相差不大,说明水压对损伤回波的影响较小。

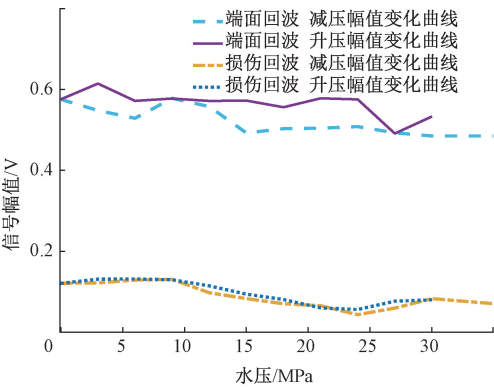


图 13 加减压过程中信号幅值的变化

Fig. 13 Changes in signal amplitude during pressurization and depressurization

5 结 论

本文利用半解析有限元方法分析了实验管道的频散曲线以及波结构,选择了合适的检测模态和频率;然后设计了一种防水卡箍来包覆压电智能层,实现对压电智能层的防水耐压封装;最后对管内外均含有水的管道进行打压实验,分别采集无损伤管道和有损伤的管道回波进行分析,可以得出如下结论:

(1)所设计的防水卡箍能够对压电传感器实现防水耐压封装,整个打压过程中,传感器防水性较好且没有因为压力而遭到破坏。

(2)水载压力对 L(0,2) 模态超声导波信号幅值没有显著影响,经过前 10 次打压,传感器基本上适应了高压环境,损伤管道的端面回波和损伤回波幅值在加减压前后变化不大。

参考文献

[1] 马书义, 武湛君, 刘科海, 等. 空心圆管中导波频散特性与检测频率选择[J]. 机械工程学报, 2014, 50(20): 8-17.
MA SH Y, WU ZH J, LIU K H, et al. Guided wave dispersion characteristics and detection frequency selection in hollow circular tubes [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(20): 8-17.

[2] 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. Structural damage localization of pipe segments based on L(0,2) ultrasonic guided wave [J]. Journal of Instrumentation, 2020,

41(12): 181-191.

[3] 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. Modeling and simulation implementation of pipeline corrosion for ultrasonic guided wave detection [J]. Journal of Instrumentation, 2023, 44(5): 71-80.

[4] 闫孝姮, 光思辰, 胡宇, 等. 换流阀冷却系统均压电极结垢超声导波检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 251-263.
YAN X H, GUANG S CH, HU Y, et al. Ultrasonic guided wave detection of fouling on homogeneous electrode of converter valve cooling system[J]. Journal of Instrumentation, 2021, 42(10): 251-263.

[5] 宋振华, 王志华, 黄世清, 等. 基于纵向超声导波信号特性的管道损伤检测研究[J]. 机械强度, 2011, 33(1): 55-61.
SONG ZH H, WANG ZH H, HUANG SH Q, et al. Research on pipeline damage detection based on longitudinal ultrasonic guided wave signal characteristics[J]. Mechanical Strength, 2011, 33(1): 55-61.

[6] YAN J, LI J, ZOU L, et al. Acoustic characteristics analysis of double-layer liquid-filled pipes based on acoustic– solid coupling theory [J]. Applied Sciences, 2023, 13(19): 11017.

[7] 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, (3): 171-178.
LIU Z H, HE C F, YANG SH M, et al. Theoretical analysis and experimental study on propagation characteristics of longitudinal ultrasonic guided waves in water-filled pipes [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, (3): 171-178.

[8] 刘丁楠, 李富才, 苏文胜. 充液管道超声导波传播特性及损伤定位的研究[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(4): 135-141.
LIU D N, LI F C, SU W SH. Study on propagation characteristics of ultrasonic guided wave and damage localization in liquid-filled pipelines [J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(4): 135-141.

[9] ARISTEGUI C, LOWE M J S, CAWLEY P. Guided waves in fluid-filled pipes surrounded by different fluids[J]. Ultrasonics, 2001, 39(5): 367-375.

[10] VOGELAAR B, GOLOMBOK M. Simplified ultrasonic damage detection in fluid-filled pipes [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2017, 36(4).

[11] 刘增华, 宋振华, 张易农, 等. 管道液体流速对超声

导波纵向模态传播的影响分析[J]. 实验力学, 2018, 33(1): 1-7.

LIU Z H, SONG ZH H, ZHANG Y N, et al. Analysis of the effect of pipeline liquid flow velocity on longitudinal mode propagation of ultrasonic guided waves [J]. Experimental Mechanics, 2018, 33(1): 1-7.

[12] JU T, FINDIKOGLU A T. Ultrasonic testing of mechanical changes in a water-filled pipe with multi-mode and broadband signals and two-level compensation[J]. Sensors, 2022, 22(22): 8647.

[13] QU Z, JIN S, WU L, et al. Influence of water flow velocity on fouling removal for pipeline based on eco-friendly ultrasonic guided wave technology[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 240: 118173.

[14] DUBUC B, EBRAHIMKHANLOU A, SALAMONE S. Effect of pressurization on helical guided wave energy velocity in fluid-filled pipes[J]. Ultrasonics, 2017, 75: 145-154.

[15] ZUO P, FAN Z. SAFE-PML approach for modal study of waveguides with arbitrary cross sections immersed in inviscid fluid[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 406: 181-196.

[16] CASTAINGS M, LOWE M. Finite element model for waves guided along solid systems of arbitrary section coupled to infinite solid media[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 123(2): 696-708.

[17] BOCCHINI P, MARZANI A, VIOLA E. Graphical user interface for guided acoustic waves [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2011, 25(3): 202-210.

[18] 吴斌, 刘增华, 王秀彦, 等. 利用纵向导波检测充水管道周向缺陷的实验研究[J]. 中国机械工程, 2005, (22): 2038-2043.

WU B, LIU Z H, WANG X Y, et al. Experimental study on the detection of circumferential defects in water-filled pipes using longitudinal guided waves [J]. China Mechanical Engineering, 2005, (22): 2038-2043.

作者简介



胡晓谍, 2022 年于武汉科技大学获得学士学位, 现为厦门大学硕士, 主要研究方向为结构健康监测。

E-mail: 35120221151648@stu.xmu.edu.cn

Hu Xiaodie received her B. Sc. degree from Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, China, in 2022, and is now an M. Sc. degree holder at Xiamen University, Xiamen, China, with a major research interest in structural health monitoring.



魏子麒, 2009 年于中国人民大学获得学士学位, 2012 年于北京大学获得硕士学位, 2018 年于阿尔伯塔大学获得博士学位, 现为中国科学院自动化研究所副研究员, 主要研究方向为数据挖掘、图像处理及强化学习。

E-mail: ziqi.wei@ia.ac.cn

Wei Ziqi received his B. Sc. degree in 2009 from Renmin university of China, received his M. Sc. degree in 2012 from Peking University, received his Ph. D. degree in 2018 from University of Alberta, now he is an associate research fellow at Institute of Automation, CAS. His main research interests include data mining, image processing and reinforcement learning.



王奕首(通信作者), 2002 年于大连理工大学获得学士学位, 2009 年于大连理工大学获得博士学位, 现为厦门大学航空航天学院教授, 主要研究方向为结构健康监测, 无损检测, 发动机健康管理。

E-mail: wangys@xmu.edu.cn

Wang Yishou (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2002 from Dalian University of Technology, received his Ph. D. degree in 2009 from Dalian University of Technology, now he is professor in Xiamen University. His main research interests include structural health monitoring, nondestructive detection and aero-engine health management.