



引用格式:孔令天,李兵,张云飞,等. 超声界面波在充液双金属复合管道中的传播特性分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(9): 3475-3480.
Kong Lingtian, Li Bing, Zhang Yunfei, et al. Analysis of ultrasonic interface wave propagation characteristics in liquid filled bimetal composite pipe[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(9): 3475-3480.

物理学

超声界面波在充液双金属复合管道中的传播特性分析

孔令天, 李兵*, 张云飞, 李明航, 王家琪

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

摘要 随着管道运输行业的发展,复合管道越来越多地应用于机械、能源、化工等领域。利用超声界面波对复合管道的界面位置进行损伤探测成为机械装备超声无损检测研究的新方向。以充液金属复合管道为研究对象,采用多物理场有限元分析软件建立了充液复合管道的有限元模型,利用电信号激励超声界面波,分析了超声界面波在管道中的传播特性,并分析了不同液体对超声界面波的影响。结果表明:与空的复合管道相比,超声界面波在充液复合管道中的传播特性差别明显。在充液双金属复合管道中,超声界面波一部分来自初始激励,另一部分来自液体中激励的超声导波;随着传播的进行,初始激励的超声界面波迁移至固液界面处,形成固-液界面波,并逐渐泄漏至液体中;液体中的超声导波每经过一次管道壁面反射,在固液界面处形成一股新的固-液界面波,从而形成等间隔传播的固-液界面波群组。液体密度影响界面波的能量分布:液体密度越大,界面波能量越分散;液体的纵波波速影响固-液界面波的形成速度:纵波波速越快,固-液界面波形成越快。研究工作和分析结果可为管道损伤检测提供理论依据。

关键词 超声界面波;充液复合管道;传播特性;有限元分析

中图分类号 O426.2; 文献标志码 A

Analysis of Ultrasonic Interface Wave Propagation Characteristics in Liquid Filled Bimetal Composite Pipe

KONG Ling-tian, LI Bing*, ZHANG Yun-fei, LI Ming-hang, WANG Jia-qi

(State Key Lab for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

[Abstract] With the development of pipeline transportation industry, composite pipeline is widely used in machinery, energy, chemical and other fields. It is a new research direction of ultrasonic nondestructive testing of mechanical equipment to detect the damage of composite pipeline by ultrasonic interface wave. Therefore, the liquid filled metal composite pipeline was taken as the research object. The finite element model of the liquid filled composite pipeline was established by the multi physical field finite element analysis software, the ultrasonic interface wave was excited by the electrical signal, the propagation characteristics of the ultrasonic interface wave in the pipeline were analyzed, and the influence of different liquids on the ultrasonic interface wave was identified. The following results are got from the research. In the liquid filled bimetal composite pipeline, the ultrasonic interface wave is partly from the initial excitation, and partly from the ultrasonic guided wave excited in the liquid. With the propagation, the initially excited ultrasonic interface wave moves to the solid-liquid interface, forming the solid-liquid interface wave, and gradually leaks into the liquid. The ultrasonic guided wave in the liquid passes through the wall reflection of the pipeline every time, a new solid-liquid interface wave is then formed at the solid-liquid interface, thus forming a group of solid-liquid interface waves with equal interval propagation. The density of liquid influences the energy distribution of interface wave with a law. The higher the density of liquid, the more dispersed the energy of interface wave. Moreover, the velocity of longitudinal wave of liquid affects the forming speed of solid-liquid interface wave. The faster the velocity of longitudinal wave, the faster the formation of solid-liquid interface wave. The research and analysis results can provide theoretical basis for pipeline damage detection.

[Keywords] ultrasonic interface wave; liquid filled composite pipe; propagation characteristics; finite element analysis

复合管道由两种或两种以上材料复合而成,利用各层材料的特性抵抗运输介质的腐蚀和外界环

收稿日期:2020-06-07; 修订日期:2020-10-24

基金项目:国家自然科学基金(51875438)

第一作者:孔令天(1995—),男,汉族,硕士研究生。研究方向:机械设备动态监测。E-mail:475082400@qq.com。

*通信作者:李兵(1976—),男,汉族,博士,教授。研究方向:机械动态设计与故障诊断。E-mail:bli@xjtu.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

境的侵蚀,大大提高了管道的使用寿命和环境适应性。金属复合管道利用耐蚀金属衬里进行管材的防腐改性,借助基管力学性能保证强度,极大降低了管道腐蚀泄露的概率、起到较好的防腐作用,是解决管线腐蚀问题的一种相对安全和经济的办法^[1]。

目前,复合管道的检测常常采用超声导波的方法。超声导波法是根据超声导波在波导结构中能量衰减小、传播距离远的特点,用于管道系统的大规模无损检测。在管道的一端激励某种模态的超声导波,在管道合适位置接收超声导波的回波信号,通过分析回波信号,判断管道内部的状况^[2]。与传统检测技术相比,超声导波法检测具有检测方便、检测速度快、检测距离长、检测范围广等优点^[3]。

超声界面波是沿介质界面传播的一种超声导波,可以对介质的界面位置进行检测。根据相邻介质的不同,超声界面波可以划分为 Stoneley 波^[4]、Scholte 波^[5]、Rayleigh 波^[6]。Stoneley 波是沿两半无限大固体介质界面传播的界面波,最先被 Stoneley 发现,又称固-固界面波;Scholte 波是沿固体和液体界面传播的界面波,又称固-液界面波;Rayleigh 波称为表面波,是沿固体和气体界面传播的界面波,又称固-气界面波^[7]。相比于单层管道,不同材料层的相邻界面是复合管道特有的几何位置。利用超声界面波沿介质界面传播的特点,可以对金属复合管道的界面进行检测。

在超声导波领域,学者们已经开展了大量工作。刘增华等^[8]理论分析和实验研究了在充非黏性液体管道中超声导波的传播特性;刘胜兴等^[9]研究了在无限液体介质管道中超声导波的传播特性;蒋睿等^[10]研究了孔隙介质包裹的充液管道中纵向导波的传播特性,并分析了孔隙介质参数对频散曲线的影响;赵乃志等^[11]理论研究了超声导波在充液埋地管道结构中的传播特性;齐向上^[12]对充黏性液体的单层管道进行了损伤检测的实验研究;宋振华等^[13]研究了基于小波分析的超声导波法充液管道的损伤检测,并对导波的频散现象进行了理论和数值分析。然而,针对超声界面波在充液金属复合管道中的传播问题尚鲜有报道。在油气输送领域,石油管道在工况下内部充满液体。故研究超声界面波在充液金属复合管道中的传播特性、实现对充液管道界面位置的检测,对节约工况管道的检测时间、提高检测效率、增加经济效益具有重要意义。

随着数值分析软件的进步,科研人员越来越多地采用有限元仿真分析软件研究各类振动和声学

问题。谢大帅等^[14]利用 ANSYS 软件研究了气液两相流海洋立管的流固耦合振动,并将单、双向流固耦合进行了对比分析;曾昭阳等^[15]利用 ANSYS 软件研究了基于多层圆柱壳体结构的潜艇减振降噪问题,并定量分析了影响减振效果的因素;McCarthy 等^[16]利用 ABAQUS 软件分析了固-气界面波的传播情况;董福祥等^[17]采用 COMSOL 软件对多孔材料夹层板的隔声性能进行了仿真分析,并研究了影响隔声性能的因素。有限元仿真分析软件的应用,为模拟并分析各种工程问题的的工作过程和作用机理提供了便利。

基于此,采用电信号激励超声界面波的有限元分析方法,重点研究超声界面波在充液双金属复合管道中的传播问题。仿真分析超声界面波在充液双金属复合管中的传播特性,与超声界面波在空的双金属复合管道中的传播特性进出对比,分析不同液体对超声界面波传播的影响,以期复合管道损伤检测提供理论参考。

1 充液双金属复合管道的有限元建模

在充液双金属复合管道这种波导结构中,利用压电材料激励超声界面波,沿着管道轴向方向传播,该过程涉及电、力、声等多个物理场。基于此,采用 COMSOL 软件进行多物理场耦合的仿真分析。COMSOL 是一款采用有限元方法求解多物理场耦合问题的大型仿真软件,它将每一种物理场表达成一个偏微分方程,对多个物理场耦合的偏微分方程组进行离散、通过差值的方法求得方程组的结果,从而解决多个物理场耦合的问题。

双金属复合管道具有轴对称结构,采用二维轴对称空间建立充液双金属复合管道的几何模型,分别建立液体、钢管、钛管以及激励探头的几何模型。其中液体材料选择水作为具体仿真对象;探头几何模型建立在裸露钢管的外表面,由压电材料和丙烯酸塑料两种材料组成,给压电材料施加汉宁窗调制的激励电压信号,利用逆压电效应激励超声界面波。有限元模型,如图 1 所示。

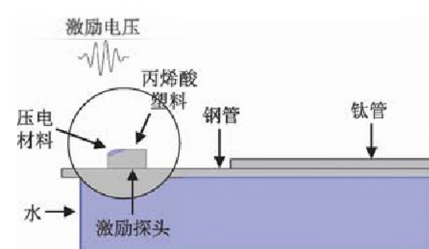


图 1 仿真模型

Fig. 1 Simulation model

1.1 材料参数

根据超声导波有限元仿真的需要,设置充液双金属管道中各种材料参数,如表 1 所示。

表 1 材料属性
Table 1 Material properties

| 材料 | 密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 弹性模量/ GPa | 泊松比 | 纵波波速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) |
|-------|--|--------------|------|---|
| 钢 | 7 850 | 190 | 0.3 | 5 708 |
| 钛 | 4 510 | 111 | 0.32 | 5 935 |
| 丙烯酸塑料 | 1 190 | 3.2 | 0.35 | 2 813 |
| 压电材料 | 7 500 | — | — | — |
| 水 | 1 000 | — | — | 1 500 |

1.2 仿真参数

1.2.1 激励信号

采用频率为 1MHz 经过汉宁窗调制的五周期正弦电压信号,激励信号时域波形如图 2 所示。

1.2.2 边界条件设置

固体边界采用低反射边界条件,消除杂波的干扰;液体边界采用阻抗边界条件,超声导波部分能

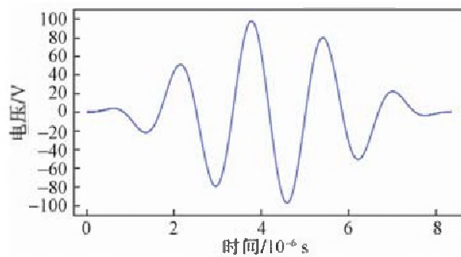


图 2 激励信号

Fig. 2 Excitation signal

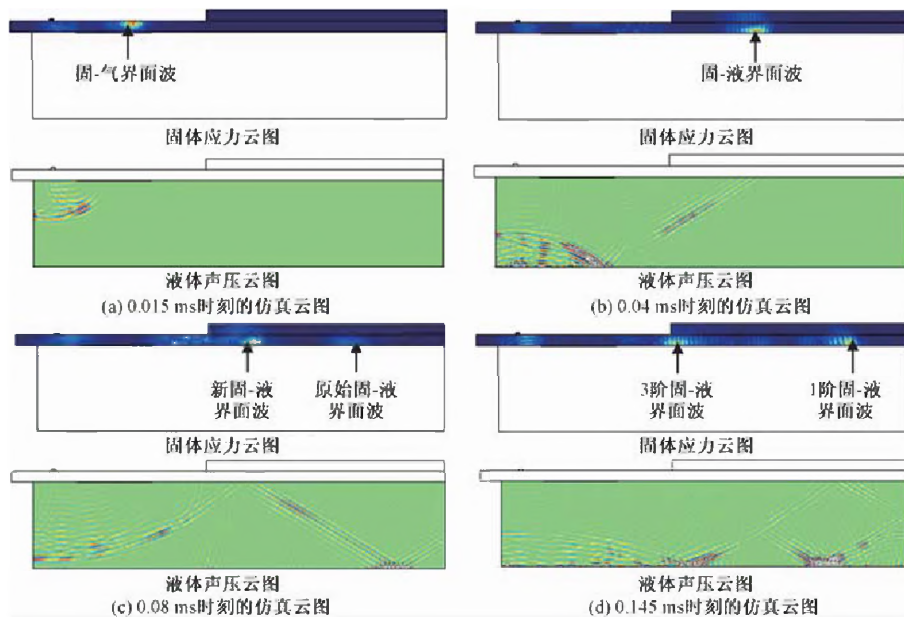


图 3 典型时刻的仿真云图

Fig. 3 Simulation cloud chart of typical time

量被吸收,部分能量被反射。

1.2.3 有限元网格划分

采用四边形网格划分几何,提高有限元分析的精度;采用独立网格划分技术,针对不同几何,根据相应几何所赋予的材料特性来确定有限元网格的大小,网格尺寸为对应材料纵波波长的 1/6,从而在保证计算精度的同时,提高计算效率。

1.2.4 多物理场选择和耦合

选择静电场、固体力学场、压力声学场,耦合压电效应和声-结构边界,实现电-力-声的多物理场耦合。

2 仿真结果与分析

2.1 超声界面波的传播特性分析

超声界面波在充液金属复合管道中的传播云图,如图 3 所示。

在导波激励的起始阶段,一股导波能量沿钢管外表面传播,形成固-气界面波;另一股能量射入液体中,形成液体中的超声导波并向管壁对面扩散传播。如图 3(a)所示。

固-气界面波在传播过程中,能量逐渐向固液界面处迁移、形成固-液界面波并向前传播。同时,液体中的超声导波在管道壁面形成反射波。如图 3(b)所示。

随着传播的进行,原始的固-液界面波能量大幅泄露到水中。此时,主要是液体中的超声导波在传播。超声导波经过管道壁面反射,形成一股沿着水-钢界面传播的新固-液界面波。如图 3(c)所示。

液体中的超声导波每经过一次壁面反射,就会形成一股新的固-液界面波,从而形成间隔传播的固-液界面波群组,如图3(d)所示。对上壁面而言,依次形成1阶、3阶、5阶、7阶固-液界面波(阶数代表超声导波在管道上下壁面的总反射次数)

在充液的金属复合管道中,超声界面波产生和传播均受到液体的影响。一方面,主要的固-液界面波产生于液体中超声导波的反射;另一方面,初始激励的超声界面波能量在传播过程中逐渐泄露进入液体中。

2.2 超声界面波的时域信号

在靠近钢钛复合界面的钢管外表面设置超声界面波的信号接收点,采集超声界面波的时域信号,如图4所示。

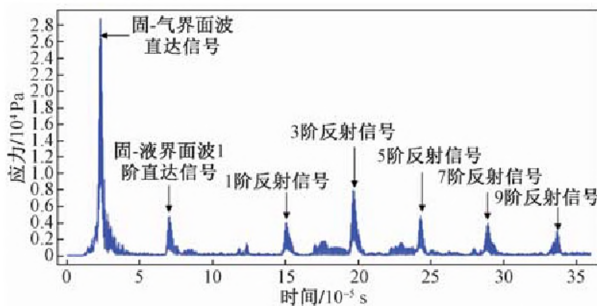


图4 充水管道中界面波的时域信号

Fig. 4 Time domain signal of interface wave in water filled pipeline

该时域图中共有7个波包信号,经过分析发现:第一个波包是固-气界面波直达信号;后面6个波包全部为由液体中的超声导波反射形成的固-液界面波信号,依次为1阶固-液界面波直达信号、1阶固-液界面波反射信号、3阶固-液界面波反射信号、5阶固-液界面波反射信号、7阶固-液界面波反射信号、9阶固-液界面波反射信号。界面波的反射信号以均匀时间间隔分布,也从侧面印证这些界面波源自于液体中超声导波在管道壁面的反射。

在充液管道中,超声界面波能量主要分布于固-液界面处,主要沿着固-液界面传播,最终以固-液界面波的形式存在。

2.3 仿真对比

在充液复合管道有限元仿真的基础上,对超声界面波在空复合管道中传播特性进行有限元仿真,与超声界面波在充液管道中的传播特性进行对比。

(1) 超声界面波在空的复合管道中的传播云图,如图5所示。在激励的起始阶段,超声界面波沿着钢管的外表面传播、形成固-气界面波,界面波的能量也集中于钢的外表面,如图5(a)所示;到达分界面时,超声界面波的小部分能量反射回去、形成

沿着钢管外表面传播的反射界面波,大部分能量射入钢钛复合管道内部,形成固-固界面波、沿着钢-钛界面传播,如图5(b)、图5(c)所示。

超声界面波在没有液体的金属复合管道中,没有发生能量的大规模泄露,能量保持在初始的界面位置,以初始的传播路径向前传播,并且在分界面处发生模态转换。

(2) 在相同的位置采集空管道中超声界面波的时域信号,如图6所示。



图5 空管道的仿真云图

Fig. 5 Simulation cloud chart of empty pipeline

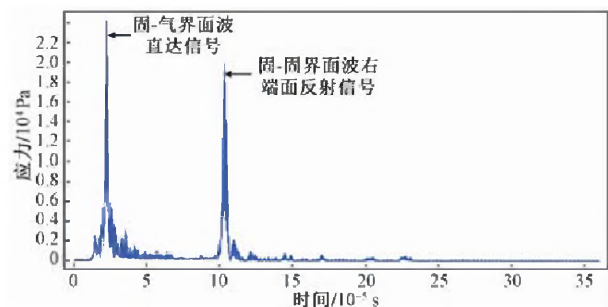


图6 超声界面波在空管道中的时域信号

Fig. 6 Time domain signal of ultrasonic interface wave in empty pipeline

该时域图中共有两个波包信号,根据超声导波的飞行时间法,计算各波包的传播距离,可以确定第一个为固-气界面波直达信号,第二个为固-固界面波经过右端面反射回来的回波信号。即在空管道状态下,超声界面波能量集中于界面位置、沿着界面位置传播,在单层管道处以固-气界面波的形式传播,在管道复合处(具体为钢钛复合界面)主要以固-固界面波的形式传播。

超声界面波在空管道和充液管道中有不同的传播特性。相比于在空管道中的传播情况,超声界面波在管道充液状态下的传播特性发生了变化:超声界面波在充液复合管道中有独特的传播特性。

2.4 液体类型对超声界面波的影响

在研究超声界面波在充液管道中传播特性的基础上,进一步探究液体类型对超声界面波传播的

影响。选取汽油、甘油两种液体进行有限元仿真分析,与水的仿真结果进行对比。汽油、甘油和水这三种液体的材料参数如表2所示。

采集充甘油管道和充汽油管道中的超声界面波信号,得到汽油、甘油的仿真结果如图7(a)、图7(b)所示。

表2 液体材料参数

Table 2 Liquid material parameters

| 液体类型 | 纵波波速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) | 密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) |
|------|---|--|
| 汽油 | 1 250 | 700 |
| 甘油 | 1 900 | 1 300 |
| 水 | 1 500 | 1 000 |

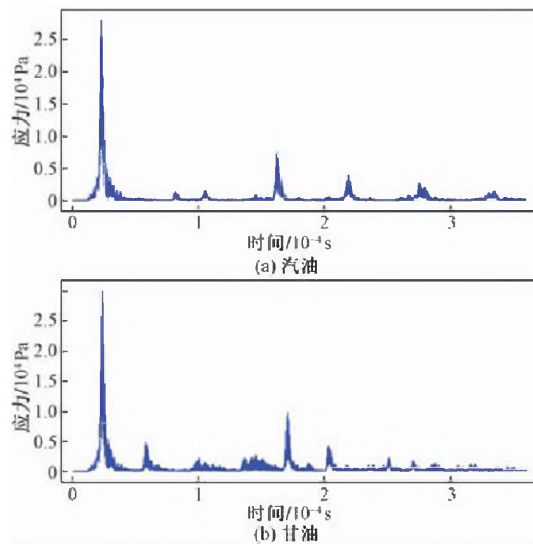


图7 汽油和甘油的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of gasoline and glycerinum

更换双金属复合管道中的液体,超声界面波的时域信号中仍然存在等间隔排布的波包。与界面波在充水复合管道中的情况相比,界面波在充汽油复合管道中的能量相对集中,波包的间隔增大;界面波在充甘油复合管道中的能量相对分散、波包幅值总体上是减小的,同时波包的间隔缩小。

超声界面波在充汽油和充甘油复合管道中保持原来的传播规律,印证了界面波在充液双金属复合管道中传播特性的普适性。液体密度影响界面波的能量分布:液体密度越大,界面波能量越分散;液体的纵波波速影响波包的形成速度:波速越快,形成速度越快。

3 结论

通过有限元仿真,研究了超声界面波在充液双金属复合管道中的传播特性;分析了液体类型对界面波的影响,得出如下结论。

(1) 超声界面波在充液双金属复合管道中的能量主要分为:①一股能量产生于原始的激励、集中在复合管道的固-气界面处,且随着传播的进行,能量向管道内部和液体中泄漏;②另一股能量产生于液体中超声导波的反射,集中在管道的固液界面处传播。

(2) 超声界面波在充液双金属复合管道中传播过程分为三个阶段:①在激励的起始阶段,一股能量形成沿管道表面传播的固-气界面波,另一股能量射入液体中,形成液体中的超声导波;②在传播的中间阶段,固-气界面波能量泄漏到管道内部,并在固液界面处形成固-液界面波,进而泄漏到液体中;③在传播的最后阶段,液体中的超声导波在壁面间来回反射并向前传播,每经过一次壁面反射,就在固液界面处形成一股新的固-液界面波,从而形成等间隔分布的固-液界面波群组,并向前传播。超声界面波最终主要以固-液界面波的形式存在。

(3) 液体类型对超声界面波有一定影响。液体密度影响界面波的能量分布:液体的密度越大,界面波的能量越分散;液体纵波波速影响固-液界面波的形成速度:纵波波速越快,固-液界面波的形成速度越快。

参 考 文 献

- [1] 李发根, 杨家茂, 冯 泉, 等. 在役双金属复合管道失效机制及控制措施分析[J]. 焊管, 2019, 42(9): 64-68.
Li Fagen, Yang Jiamao, Feng Quan, et al. Analysis of failure mechanism and control measures of bimetal composite pipeline in service [J]. Welded Pipe, 2019, 42(9): 64-68.
- [2] 吕文超. 基于超声导波的管道缺陷检测的研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
Lü Wenchao. Research on pipeline defect detection based on ultrasonic guided wave [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014.
- [3] 温宇立, 武 静, 林 荣, 等. 基于相轨迹的多裂纹管道超声导波检测研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(23): 114-122.
Wen Yuli, Wu Jing, Lin Rong, et al. Study on ultrasonic guided wave detection of multi crack pipeline based on phase trajectory [J]. Vibration and Shock, 2017, 36(23): 114-122.
- [4] Stoneley R. Elastic waves at the surface of separation of two solids [J/OL]. (2007-01-01) [2020-06-07]. <https://doi.org/10.1190/1.9781560801931.ch3o>.
- [5] Scholte J G. The range of existence of rayleigh and stoneley waves [J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1947, 5(5): 120-126.
- [6] Mandi A, Kundu S, Pati P, et al. An analytical study on the Rayleigh wave generation in a stratified structure[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2020, 41(7): 1039-1054.
- [7] Fei T, Li B, Zhou W M. Ultrasonic interface wave for interlaminar crack detection in steel-titanium composite pipe [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2019, 141(4): 041401.

- [8] 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 analysis and experimental study on propagation characteristics of longitudinal ultrasonic guided waves in water filled pipes[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(3): 171-178.
- [9] 刘胜兴, 汤立国, 许肖梅. 无限液体介质内管道轴对称纵向导波激发与传播特性研究[J]. 声学学报(中文版), 2009, 34(4): 334-341.
Liu Shengxing, Tang Ligu, Xu Xiaomei. Excitation and propagation characteristics of axisymmetric longitudinal guided waves in infinite liquid medium[J]. Acta Acoustica (Chinese Version), 2009, 34(4): 334-341.
- [10] 蒋 睿, 韩庆邦, 许洲琛, 等. 孔隙介质包裹的充液管道结构中导波传播特性[J]. 声学学报, 2019, 44(3): 376-384.
Jiang Jian, Han Qingbang, Xu Zhouchen, et al. Propagation characteristics of guided waves in liquid-filled pipes wrapped in porous media[J]. Acta Acoustica, 2019, 44(3): 376-384.
- [11] 赵乃志, 陈桂凤. 超声导波在充液埋地管道结构传播特性的理论研究与试验验证[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(5): 812-818.
Zhao Naizhi, Chen Guifeng. Theoretical research and experimental verification of the propagation characteristics of ultrasonic guided waves in liquid-filled buried pipeline structures[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science Edition), 2017, 33(5): 812-818.
- [12] 齐向上. 基于超声导波技术的充液管道损伤检测实验研究[D]. 广州: 暨南大学, 2012.
Qi Xiangshang. Experimental research on liquid-filled pipeline damage detection based on ultrasonic guided wave technology[D]. Guangzhou: Jinan University, 2012.
- [13] 宋振华, 王志华, 马宏伟. 基于小波分析的超声导波管道裂纹检测方法研究[J]. 固体力学学报, 2009, 30(4): 368-375.
Song Zhenhua, Wang Zhihua, Ma Hongwei. Research on ultrasonic guided wave pipeline crack detection method based on wavelet analysis[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2009, 30(4): 368-375.
- [14] 谢大帅, 韩翔宇, 李道喜, 等. 基于 ANSYS 的气液两相流海洋立管流固耦合振动分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(19): 7677-7682.
Xie Dashuai, Han Xiangyu, Li Daoxi, et al. Fluid-solid coupling vibration analysis of gas-liquid two-phase flow marine vertical riser based on ANSYS[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(19): 7677-7682.
- [15] 曾昭阳, 范红伟, 焦映厚, 等. 基于三明治夹层约束阻尼结构的潜艇降噪[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(22): 8975-8982.
Zeng Zhaoyang, Fan Hongwei, Jiao Yinghou, et al. Submarine noise reduction based on the thick sandwich type thick shell with restrained damping layer[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(22): 8975-8982.
- [16] McCarthy R F, Georgiou G A. Application of ABAQUS/Explicit to ultrasonic surface wave propagation problems[J]. Insight Non Destructive Testing & Condition Monitoring, 2000, 42(11): 725-729.
- [17] 董福祥, 李丽君, 张宪旭, 等. 对多孔材料夹层板的隔声性能进行试验及仿真分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(12): 4660-4664.
Dong Fuxiang, Li Lijun, Zhang Xianxu, et al. Simulation analysis and test on the sound insulation performance of the sandwich panel of porous material[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(12): 4660-4664.