

基于激光超声可视化的厚壁管内壁缺陷无损检测

詹超¹, 彭笑永², 李阳^{2*}

¹广东省特种设备检测研究院珠海检测院, 广东 珠海 519002;

²郑州大学机械工程学院, 河南 郑州 450001

摘要 采用一种斜入射纵波探头在管内壁上形成爬波, 以达到检测厚壁管内壁缺陷的目的。首先采用有限元方法模拟斜入射纵波在管内壁上形成爬波的过程; 然后使用激光超声可视化技术观察爬波在管内壁上的形成过程, 以验证有限元仿真的结果; 最后通过超声波探伤仪连接研制的爬波探头, 得到爬波在管内壁人工缺陷上的反射信号。实验结果表明, 超声纵波在管内壁上发生模态转换形成爬波, 而爬波能量和纵波的入射角有关; 探头和缺陷之间的距离影响着缺陷反射信号的幅值和出现时间; 纵波在管内壁上只是部分转换为爬波, 还存在其他模式的超声波。试制的爬波探头可有效地检测厚壁管的内壁缺陷, 为保障厚壁管的运行安全提供有效的无损检测方法。

关键词 传感器; 激光超声; 爬波; 厚壁管; 有限元模拟; 模态转换

中图分类号 TN247; TB551

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0628004

Nondestructive Testing Cracks on Inner Surface of Thick Pipes by Laser Ultrasonic Visualization

Zhan Chao¹, Peng Xiaoyong², Li Yang^{2*}

¹ Zhuhai Branch, Guangdong Institute of Special Equipment Inspection and Research, Zhuhai, Guangdong 519002, China;

² School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China

Abstract An oblique incident longitudinal wave probe is used to form creeping waves on the inner wall of the tube to achieve the purpose of detecting defects on the inner wall of the thick-walled tube. First, the finite element method is used to simulate the creeping wave formation process on the inner wall of the obliquely incident longitudinal wave. Then, the laser ultrasonic visualization technology is used to observe the creeping wave formation process on the inner wall to verify the results of the finite element simulation. Finally, the developed ultrasonic flaw detector is connected the creeping wave probe obtains the reflected signal of the creeping wave on the artificial defect on the inner wall. The experimental results show that the ultrasonic longitudinal wave undergoes modal conversion on the inner wall of the tube to form a creeping wave. The creeping wave energy is related to the incident angle of the longitudinal wave, The distance between the probe and the defect affects the amplitude and time of the defect reflection signal. Longitudinal waves are only partially converted into creeping waves on the inner wall and there are other modes of ultrasound. The trial-produced creeping wave probe can effectively detect the inner wall defects of thick-walled pipes and provide an effective non-destructive testing method to ensure the safe operation of thick-walled pipes.

Key words sensors; laser ultrasonic; creeping wave; thick pipes; finite element simulation; mode conversion

OCIS codes 280.3375; 000.2700; 110.7170

收稿日期: 2020-08-17; 修回日期: 2020-09-02; 录用日期: 2020-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(51705470)、河南省重点研发与推广专项(182102210009)、广东省特检院 2017 年度院级立项科技项目(2017CY07)、河南省教育厅-河南省高等学校重点科研项目(18A460032)、郑州大学青年骨干教师培养计划

*E-mail: yangli@zzu.edu.cn

1 引言

厚壁管常见于化工和能源管道,使用环境通常为高温、高压和高腐蚀条件。运行一段时间后,厚壁管的内壁上常出现裂纹、腐蚀坑和点蚀群等缺陷^[1]。如果在缺陷形成前期无法检测出来,一旦引发事故,则后果较为严重。为了能够及时且无损地检测出厚壁管内壁上的缺陷,通常采用超声和射线等手段对其进行无损检测^[2]。由于受到一些厚壁管的检测空间限制,其可接触的面积较小,部分管道无法进行全面的超声或射线探伤。基于厚壁管的检测现状,本文提出在厚壁管可接触的小面积外壁上使用斜入射纵波探头,从而在内壁上形成爬波,达到检测整个内壁缺陷的目的。

爬波是纵波或横波以第一临界角入射在第二介质中产生的一种非均匀波。使用直探头来激励出纵波,其在厚壁管的内表面发生模态转换而形成爬波。爬波类似瑞利波,其能量主要集中在表面以下一个波长深度层内,所以对工件表面的粗糙度不敏感。应崇福等^[3]采用了光弹法观察圆柱空腔上弹性波的爬波现象,当纵波垂直入射在固体内的圆柱形空腔时,在空腔界面上会形成沿空腔界面爬行的表面波,即爬波。王小民等^[4]通过理论分析和光弹实验研究了圆柱空腔上爬波的传播规律,通过斜入射脉冲回波实验装置建立了爬波反射回波的幅度与裂纹长度的关系。Hassan 等^[5]采用了数值方法绘制爬波在固-液空腔界面中的频散曲线,发现沿周向传播的爬波随着传播距离的增加,其向周围液体中散射体波,这会导致爬波能量泄漏,影响传播距离。Wu 等^[6]从理论计算的角度研究了圆柱体空腔上瑞利波的频散曲线,并通过激光超声实验验证了理论结果。蔡智超等^[7]采用了电磁超声的方法激励出超声体波,当体波遇到内部空洞时,超声体波会发生模态转换而形成纵爬波和横爬波。从已有的研究结果可以看到,当纵波或横波遇到圆柱空腔时,势必会发生模态转换而形成爬波。但上述研究多数是建立在光弹法的基础上,在透明介质中可以实现无法直接在真实的钢铁材料上观察超声波的传播过程,而激光超声可视化技术的优势在于可实现真实条件的声场重现。

爬波在传播过程中具有较为复杂的传播特性,主要有两个方面。一是爬波会不断地向周围传播其他模态的波,导致能量衰减较快;另一方面是由于爬波具有一定的频散特性,随着传播距离的增加,波包

能量逐渐发散^[4]。因此,上述复杂的因素会导致爬波在工程应用中受到限制,所以科研人员较少利用爬波来检测缺陷。由于无法接触到厚壁管的内壁,所以超声波的其他模态,诸如导波和表面波等都无法在其上进行激励和传播,但超声体波可以在管内壁上转换为爬波。因此,在此特定的情况下,研究爬波检测内壁缺陷的可行性。

为了利用爬波检测厚壁管上的内壁缺陷,本文首先采用有限元模拟的方法研究爬波在厚壁管内壁上的形成机理和传播特性;然后通过激光超声可视化技术研究爬波在厚壁管内壁上的传播过程;最后通过特制的探头在厚壁管外侧激励纵波,使纵波在内壁上形成爬波以检测预制的内壁人工缺陷。通过以上研究,以期形成厚壁管内壁缺陷的爬波无损检测方法。

2 有限元模拟

有限元模拟采用商业软件 ANSYS,将厚壁管作为研究对象。由于厚壁管的轴向长度可视为无限长,所以可使用二维平面模型代替三维模型以节省计算时间。简化后的有限元模型如图 1 所示。以厚壁管的中心为坐标原点,厚壁管的内径为 50 mm,外径为 108 mm,材质为 304 不锈钢。楔块采用有机玻璃块,楔块长度为 76 mm,厚度为 10 mm。纵波激励的位置距离楔块中心 12.5 mm 处,加载区域为 5 mm,采用加汉宁窗的 5 周期正弦位移信号,中心频率为 5 MHz。

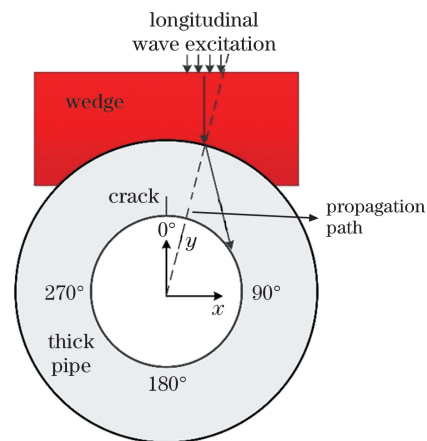


图 1 厚壁管内壁缺陷的有限元模型

Fig. 1 Finite element model of inner wall defect of thick pipe

有限元仿真模拟中,厚壁管和楔块的单元类型均选择 8 节点的二维线性单元,其中有机玻璃和 304 不锈钢的材料参数如表 1 所示。

表 1 有限元模拟的材料参数

Table 1 Material parameters of finite element simulation

Material	Elastic modulus(E) / GPa	Poisson ratio(ν)	Density(ρ) / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
Polymethyl methacrylate	2.33	0.37	1190
304 stainless steel	193.00	0.29	8000

根据表 1 的材料参数,可以分别计算纵波和横波在 304 不锈钢中的传播速度,表达式为

$$c_1 = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}, \quad (1)$$

$$c_s = \sqrt{\mu/\rho}, \quad (2)$$

式中: $\lambda = \nu E / [(1 + \nu)(1 - 2\nu)]$; $\mu = E / 2(1 + \nu)$ ^[8]。由(1)式和(2)式计算得到的纵波声速为 5632 m/s,横波声速为 3058 m/s。

模型的单元尺寸满足 $L < \lambda_{\min} / 10$, 其中 λ_{\min} 为模型中的最短传输波长, L 为最大单元尺寸^[8-9]。

L 值应小于 0.06 mm, 此时设定模型的单元尺寸为 0.06 mm \times 0.06 mm, 两个相邻节点的间距为 0.03 mm。定义模型边界条件为自由边界, 超声波在模型中传播无衰减。时间步长满足 $\Delta t < L_1 / c_1$, 其中 L_1 为最小单元尺寸, 即 0.06 mm, 那么 $\Delta t < 1.06 \times 10^{-8}$ s, 则选取的时间步长为 0.8×10^{-8} s。选取 4 张不同时刻的超声波传播图像, 如图 2 所示, 其中 MN 为位移的最小值, MX 为位移的最大值。

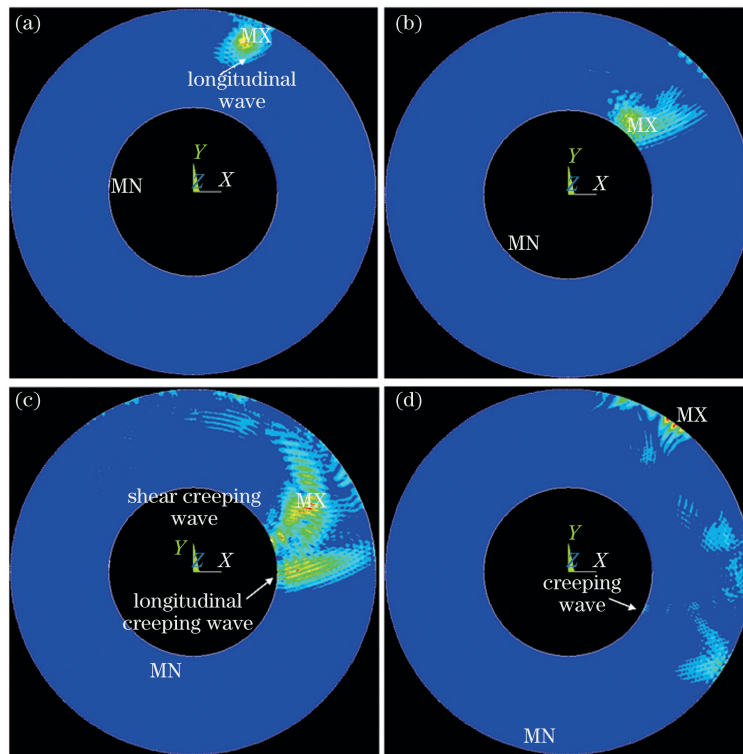


图 2 不同时刻的超声波传播图像。(a) 9×10^{-6} s; (b) 14×10^{-6} s; (c) 18×10^{-6} s; (d) 24×10^{-6} s

Fig. 2 Images of ultrasonic transmission at different moments. (a) 9×10^{-6} s; (b) 14×10^{-6} s; (c) 18×10^{-6} s; (d) 24×10^{-6} s

从图 2 可以看到,当超声纵波从楔块入射到厚壁管中时,超声波的声束方向发生偏转,而偏转角度可通过斯涅耳定律进行计算;当纵波声束遇到管内壁时,部分超声波的声束方向与管内壁内表面相切;随着传播时间的增加,纵波在内壁上发生模态转换形成纵爬波和横爬波等不同模态的超声波;爬波在沿着管内壁传播的同时向管内壁内散射其他模态的超声波,因此爬波的能量衰减较大。另外,从纵波发生模态转换形

成爬波的过程可以看到,纵波的部分能量转换为爬波的能量,而且有更多的纵波发生反射并在管壁上传播;爬波沿着管壁传播的过程中会不断地散射出其他模态的能量,造成能量不断衰减;管壁中的超声波模态复杂,势必造成超声波信号较为复杂。

通过有限元的模拟结果可知,超声纵波在管外壁上激励出来,经过一段传播距离后在管内壁上发生模态转换而形成超声爬波,超声爬波沿着管内壁

进行传播。基于此有限元模拟结果可知,超声爬波检测管内壁上的缺陷具有可能性。为了验证有限元模拟的结果,使用激光超声可视化技术来实现超声波在内壁上传播特性的观察。

3 实验与讨论

3.1 激光超声可视化

激光超声的检测系统如图 3 所示。Nd:YAG 激光器的波长为 1064 nm,单脉冲激光的能量最大可达到 2 mJ,时间宽度为 1.6 ns,脉冲激光的重复频率最高可达 2000 Hz,脉冲激光器发射的激光光斑直径小于 0.3 mm。由于单脉冲激光的能量小于 2 mJ,根据激光超声理论可知超声产生机制为热弹效应,其对工件表面不会造成损伤或产生较小损伤^[10-11]。使用压电探头接收超声信号,其通过模数转换器(A/D)转换后被数据采集卡(NI PXIe-5160,带宽为 1000 MHz,每 1 s 采集 2.5×10^9 个点采集并保存至个人计算机(PC)中。根据超声波传播过程的可逆性,可以观察到压电探头激励出的超声波在厚壁管上的传播过程^[12-13]。

由于实验中使用的楔块为透明材质,所以激光

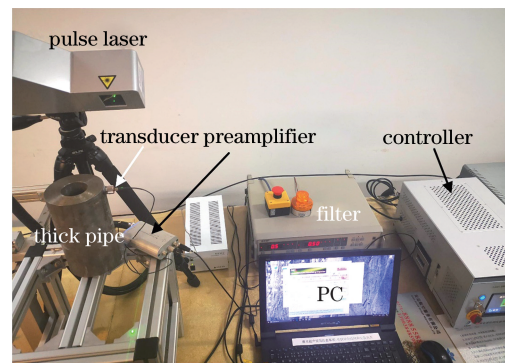


图 3 激光超声的检测装置

Fig. 3 Laser ultrasonic detection device

无法在楔块中激励出超声波,为此直接将探头贴附在厚壁管的外壁上,沿着外壁的法向入射超声纵波。通过激光超声可视化设备可以观察到超声波在厚壁管上的传播过程,选择 4 幅典型的超声波传播过程,如图 4 所示。

从图 4 可以看到,探头在管外壁上激励出能量较强的纵波,在纵波后形成能量较弱的横波,随着传播时间的增加,纵波遇到管内壁后发生反射;当部分纵波的入射方向与内壁相切时,纵波发生模态转换形成爬波,随着传播时间的进一步增加,爬波沿内壁

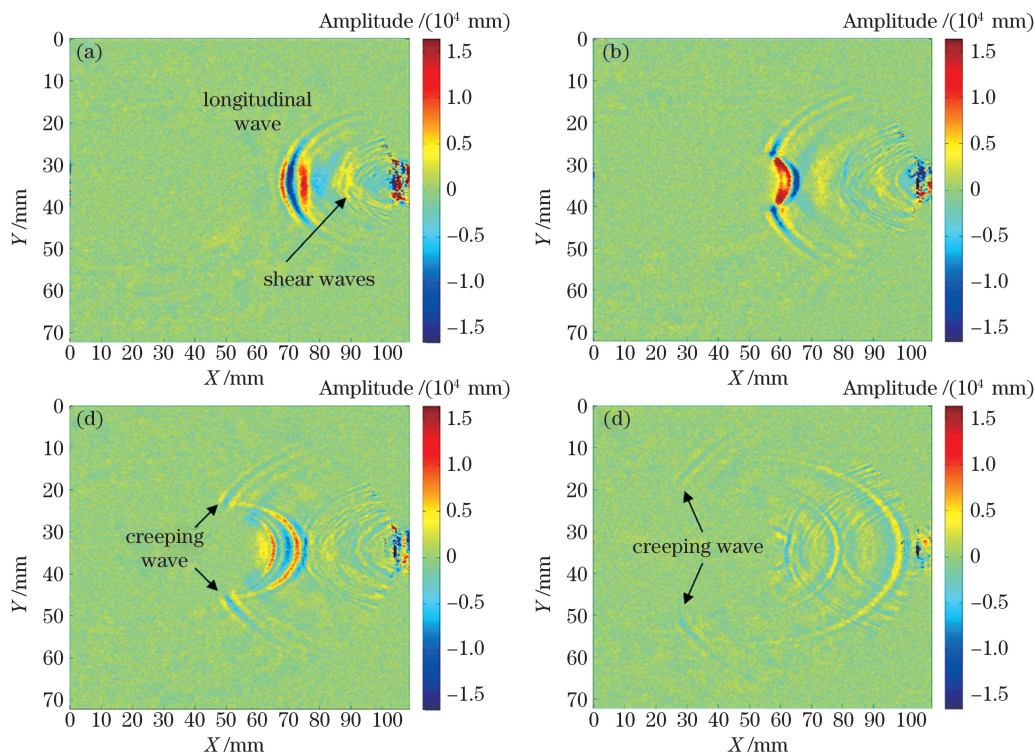


图 4 不同传播过程的声场分布情况。(a)压电探头在厚壁管上激励出超声纵波;(b)纵波遇到内壁发生反射;(c)纵波在内壁上发生模态转换形成爬波;(d)爬波沿内壁传播

Fig. 4 Distribution of sound field in different propagation process. (a) Piezoelectric probe excites ultrasonic longitudinal wave on thick-walled tube; (b) longitudinal wave is reflected when it encounters inner wall; (c) creeping wave is formed by mode conversion of longitudinal wave on internal wall; (d) creeping wave propagates along inner wall

继续传播,并且能量逐渐衰减,另外探头形成的横波也在内壁上发生反射。从整个超声波的传播过程可以看到,纵波在内壁上发生模态转换形成爬波,与之前的研究结果相同^[4];探头在激励出纵波的同时也激励出能量较弱的横波;超声波在内壁中的传播过程比较复杂,在管内壁上反射之后具有多模态的特性,导致接收到的超声信号也变得较为复杂;超声波的声场覆盖整个厚壁管,这对全壁上的缺陷检测有一定的优势。

激光超声可视化实验不仅可以直观地观察到超声纵波在内壁上发生模态转换形成爬波的过程,也验证了有限元模型的有效性,为爬波探头的试制提供实验基础。由有限元模拟和激光超声可视化结果可知,当超声纵波以合适的角度入射在管内壁上时,会发生模态转换形成超声爬波。基于以上结果,将试制超声爬波探头,用以检测管内壁上的人工缺陷。

3.2 爬波探头的检测

实验使用的钢管选用外径为 108 mm 和内径为 50 mm 的不锈钢管,使用线切割技术在管内壁上切出 1 mm 深的人工缺陷。为了使加工的楔块和钢

管紧密接触,使用黏接剂将中心频率为 5 MHz 的直探头粘在楔块上,直探头的人射角根据斯涅耳定律^[14]来选择合适的角度。将试制好的探头连接到超声波探伤仪上,爬波探头和检测装置如图 5 所示。超声波探伤仪的型号为 EUT-302,每 1 s 采集 4×10^8 个点,垂直线性误差不大于 3%,水平线性误差不大于 2%,测厚范围为 0.2~1000.0 mm(使用纵波测钢试样的厚度范围)。不同角度下的超声信号如图 6 所示,横轴表示检测长度,纵轴表示振幅。

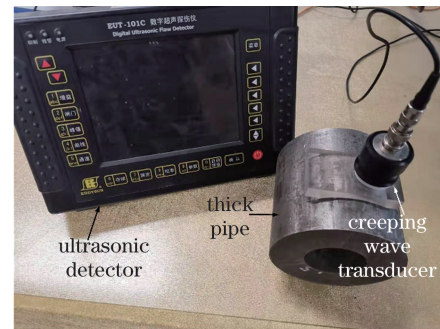


图 5 爬波探头的检测装置

Fig. 5 Detection device of creeping wave probe

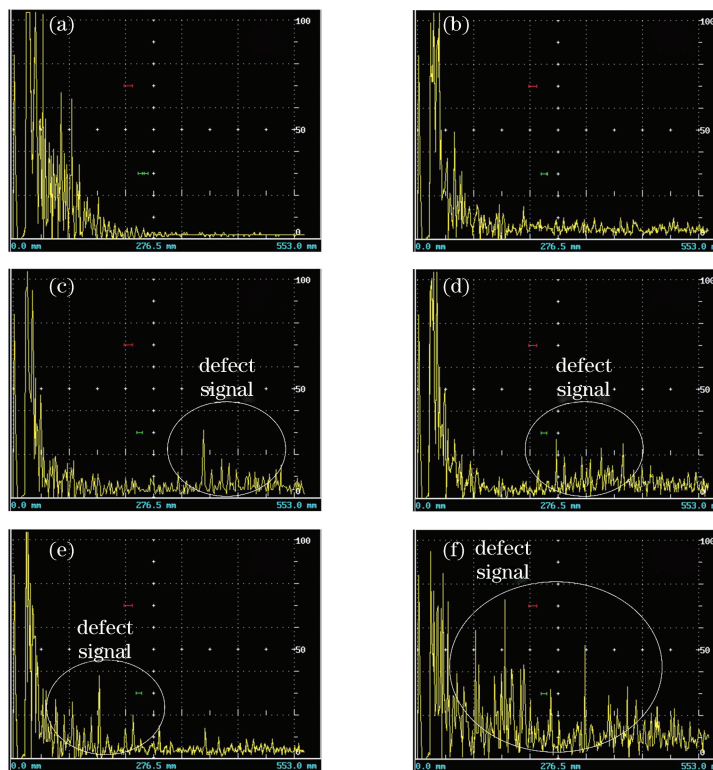


图 6 试制探头的检测信号。(a)探头空载;(b)探头贴附在无缺陷钢管上;(c)探头处于裂纹正上方;(d)探头和裂纹处于 90°的位置;(e)探头和裂纹处于 180°的位置;(f)探头和裂纹处于 270°的位置

Fig. 6 Detection signal of the trial-produced probe. (a) No load of probe; (b) probe is attached to non-defective steel tube; (c) probe is directly above crack; (d) probe and crack are at position of 90°; (e) probe and crack are at position of 180°; (f) probe and crack are at position of 270°

从图 6 可以看到,探头空载即为不接触钢管,检测信号有较大的楔内回波;当探头贴附在无缺陷的

钢管时,探头可以接收到少量的微弱信号,原因在于少量的超声波经过一周期后返回到探头内;当探头处于缺陷的正上方位置时,由于超声波的声束偏离缺陷,则超声波传播一周期后与缺陷相互作用,探头还是可以接收到缺陷信号,此时的缺陷信号较弱且出现的时间靠后;当探头与缺陷处于 90° 的位置时,探头可以接收到超声信号;与图 6(c) 相比,图 6(d) 的缺陷信号前移且信号能量变大,这是由于探头距离缺陷更近,反射回来的超声波能量更强;当探头与裂纹处于 180° 的位置时,缺陷信号出现的时间进一步前移,信号能量也更强;当探头与裂纹处于 270° 的位置时,缺陷信号能量进一步增大,与无缺陷的信号差异明显。

从上述实验结果可以看到,当厚壁管的内壁上出现裂纹缺陷时,试制的爬波探头能够有效地得到缺陷的反射波,而反射波出现的位置和能量大小与爬波探头的位置有关;与无缺陷反射波相比,缺陷反射波的波形较为复杂,无法阐明具体的超声波模态,但是并不影响缺陷的检测结果,该结果与有限元模拟和激光超声可视化结果相互印证。

4 结 论

采用有限元模拟、激光超声可视化技术和研制的爬波探头,研究爬波检测厚壁管内壁缺陷的可行性。实验研究结果表明,当超声纵波以一定的入射角度入射到厚壁管内壁时,其发生模态转换形成爬波;压电探头在厚壁管上可以形成纵波,也可以形成能量较弱的横波;爬波在沿着厚壁管内壁的传播过程中有较大的能量衰减,同时也向周围散射其他模态的超声波;压电探头在厚壁管中形成模态复杂的超声波信号,可以实现厚壁管的全覆盖,对厚壁管的整壁厚检测有较大的优势。

通过以上研究,提供一种厚壁管内壁缺陷的爬波检测方法,为厚壁管的整壁厚检测提供研究思路。

参 考 文 献

- [1] Simonetti F, Alqaradawi M Y. Guided ultrasonic wave tomography of a pipe bend exposed to environmental conditions: a long-term monitoring experiment[J]. *NDT & E International*, 2019, 105: 1-10.
- [2] Zhang J J, Qian X, Liu H Q, et al. A new method for testing cracks on the inner surface of thick pipes? Modified shear-wave corner-echo method [J]. *Nondestructive Testing Technologing*, 1994, 16(5): 121-124.
- 张家骏, 钱旭, 刘惠琴, 等. 超声波检验厚壁管内壁裂纹的新方法: 变型横波端角反射法[J]. *无损检测*, 1994, 16(5): 121-124.
- [3] Ying C F, Zhang S Y, Wang L S. Experimental research on photo-elastic of creeping waves on a cylindrical cavity [J]. *Science in China Series A*, 1981, 11(6): 681-686, 785-788.
- 应崇福, 张守玉, 王丽生. 固体中圆柱形空腔上爬波的光弹法实验研究[J]. *中国科学*, 1981, 11(6): 681-686, 785-788.
- [4] Wang X M, An Z W, Lian G X. Testing of cracks on a cylindrical cavity by creeping waves [J]. *Acta Acustica*, 2015, 40(2): 234-239.
- 王小民, 安志武, 廉国选. 圆柱空腔上裂纹的爬波检测方法[J]. *声学学报*, 2015, 40(2): 234-239.
- [5] Hassan W, Nagy P B. Circumferential creeping waves around a fluid-filled cylindrical cavity in an elastic medium [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1997, 101(5): 2496-2503.
- [6] Wu X M, Qian M L, Cantrell J H. Dispersive properties of cylindrical Rayleigh waves [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(19): 4053-4055.
- [7] Cai Z C, Zhang C. Research on internal hole-type defect detecting by electromagnetic ultrasonic bulk wave [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2017, 30(1): 64-70.
- 蔡智超, 张闯. 电磁超声体波方法对内部孔洞缺陷检测研究[J]. *传感技术学报*, 2017, 30(1): 64-70.
- [8] Li Y, Cai G, Zhang S. Changes of ultrasonic guided waves propagating through a bend [J]. *Materials Evaluation*, 2017, 75(9): 1142-1149.
- [9] Li Y, Cai G X, Dong R Q. The reflection and transmission of Lamb waves at overlap joints [J]. *Acta Acustica*, 2017, 42(4): 495-503.
- 李阳, 蔡桂喜, 董瑞琪. 兰姆波在搭接焊缝上的反射和透射[J]. *声学学报*, 2017, 42(4): 495-503.
- [10] Lu P X, Wang D, Li Y. Method of measuring the width of stiffeners by using laser ultrasonic C-scan [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(17): 171203.
- 路培鑫, 王栋, 李阳. 基于激光超声 C 扫描测量加强筋宽度的方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(17): 171203.
- [11] Zhan C, Peng X Y, Li Y. The visualization of creeping waves propagation on the inner surface of thick walled pipes based on laser ultrasonic [J]. *Nondestructive Testing Technologing*, 2019, 41(9): 53-55, 59.
- 詹超, 彭笑永, 李阳. 基于激光超声的厚壁管内壁爬波传播的可视化[J]. *无损检测*, 2019, 41(9): 53-

- 55, 59.
- [12] Li Y, Yang L J, Sun J J, et al. Surface cracks testing by laser-ultrasonic visualization inspection of Lamb waves[J]. *Technical Acoustics*, 2020, 39(2): 157-160.
李阳, 杨连杰, 孙俊杰, 等. 表面裂纹的激光超声可视化兰姆波检测研究[J]. *声学技术*, 2020, 39(2): 157-160.
- [13] Yang L J, Li Y, Sun J J, et al. Reflection and transmission of laser ultrasonic waves on surface defects[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 041203.
杨连杰, 李阳, 孙俊杰, 等. 激光超声表面波在表面缺陷上的反射与透射[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(4): 041203.
- [14] Rose J L. *Ultrasonic guided waves in solid media* [M]. New York: Cambridge University Press, 2014.