

金属小径管外壁裂纹的内检式 电磁超声导波检测

李孟奇, 李 勇, 苏冰洁, 刘天浩, 裴翠祥, 陈振茂

(西安交通大学 机械结构强度与振动国家重点实验室, 陕西省无损检测与结构完整性
评价工程技术研究中心, 西安 710049)

摘 要: 探究了基于内检式电磁超声导波检测的金属小径管外壁裂纹定量评估方法。基于三维有限元仿真, 在确定激励中心频率和激励波形的基础上, 对金属小径管的超声导波检测进行数值仿真, 通过改变裂纹缺陷的长度和径向深度, 分析并获取检测信号对外壁裂纹的响应特性及规律。同时, 搭建管件电磁超声导波检测试验平台, 获取管件不同尺寸缺陷的电磁超声导波检测响应信号。试验结果表明, 管件外壁裂纹深度越深, 检测信号中的缺陷回波面积越大, 内检式电磁超声导波可有效对金属小径管外壁裂纹进行定量检测。

关键词: 电磁超声导波检测; 金属小径管; 缺陷特征; 定量评估

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2022)10-0001-05

Evaluation of external cracks in small-diameter metallic tubes via bobbin-typed guided-wave electromagnetic acoustic transduction

LI Mengqi, LI Yong, SU Bingjie, LIU Tianhao, PEI Cuixiang, CHEN Zhenmao

(State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Shaanxi Engineering Research Centre of NDT
and Structural Integrity Evaluation, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The bobbin-typed guided-wave electromagnetic acoustic transduction (GW-EMAT) is intensively investigated for detection and assessment of external cracks in small-diameter metallic tubes (SMTs). Based on 3D finite element analysis, the central frequency and waveform of the GW-EMAT excitation are sought. Series of simulations regarding GW-EMAT inspection of SMT have been conducted. The characteristics and relation of the signal response to the external crack are obtained and analyzed by changing the circumferential length and radial depth of the crack. Meanwhile, a GW-EMAT testing system is built up. The experimental signals of cracks in different sizes are acquired and scrutinized. From the investigation results, it can be found that the area of the crack echo increases as the crack depth rises, indicating the feasibility of bobbin-typed GW-EMAT for detecting and evaluating the external cracks in SMTs.

Key words: guided-wave electromagnetic acoustic transduction; small-diameter metallic tube; defect characteristics; quantitative evaluation

收稿日期: 2022-03-01

基金项目: 国家磁约束核聚变能发展研究专项(2019YFE03130003); 国家自然科学基金项目(51777149, 11927801); 国家重点研发项目(2017YFF0209703)

作者简介: 李孟奇(1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电磁超声导波检测

通信作者: 李 勇(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为机械结构无损定量检测及完整性评估, yong.li@mail.xjtu.edu.cn

金属小径管广泛应用于能源装备领域, 在服役过程中容易因局部载荷过大出现疲劳损伤, 尤其是管件外壁裂纹可能导致管件断裂, 严重威胁结构整体安全。因此在装备服役阶段, 定期对金属小径管进行无损评价及维护具有非常重要的意义。对比各种传统无损检测方法, 超声导波沿传播路径衰减减小, 既可检测构件内部缺陷, 亦可检出内外表面缺陷。

因此对于金属管道结构来说, 超声导波技术是一种简洁、高效且易于操作的无损检测技术^[1-5], 是金属小径管损伤, 特别是外壁裂纹的有力定量检测方法之一。

超声导波模态转换、缺陷反射等方面的探究是超声导波检测的热门研究方向之一, 国内外学者基于不同模态超声导波进行了大量的研究。DEMMA 等^[6-7]通过分析有缺陷的管道中导波模态的传播特性, 发现纵向模态 $L(0, 2)$ 遇到管中的周向切槽时会发生模态转换现象。HAYASHI 等^[8]分析了模态反射强度系数与模态频率的关系。武静等^[9]针对管道缺陷的检测, 应用时间窗函数截取接收信号并计算其 Lyapunov 指数曲线, 根据曲线的突变识别缺陷的回波信号。王伟等^[10]通过有限元仿真的方式研究了 $T(0, 1)$ 扭转模态对管道纵向裂纹的检测及定位情况。然而, 国内外针对金属小径管中的外壁切槽、裂纹等典型局部缺陷结构参数对超声导波回波幅值量化影响的研究尚存不足。

鉴于此, 文章围绕金属小径管外壁裂纹的无损定量检测, 提出了一种内检式电磁超声导波检测换能器。通过建立有限元仿真模型开展系列仿真, 探究管件外壁裂纹参数与检测信号的映射关系; 同时, 搭建金属小径管内检式电磁超声导波检测试验平台, 探究管件外壁裂纹的电磁超声导波检测及量化评估手段, 验证所提内检式电磁超声导波检测换能器在金属小径管外壁裂纹定量检测中的有效性。

1 管件内检式电磁超声导波检测的有限元仿真分析

1.1 换能器构型及检测原理

内检式电磁超声导波换能器构型及检测原理如图 1 所示。换能器结构主要由两部分组成: ① 一对 N 极相对放置的永磁铁; ② 放置于永磁铁对轴向空气间隙中的由多个涡流线圈组成的薄壁线圈组 (相邻两个涡流线圈的间距为超声导波的半波长)。实施检测时, 电磁超声导波换能器同轴置入被检管道内部, 永磁铁对产生沿管道径向方向的静态偏置磁场, 同时通入高频交流电驱动的涡流线圈组在管件内感应出动态电磁场 (包括感应涡流和动态磁场)。在涡流与磁场 (包括静态偏置磁场和动态磁场) 的共同作用下, 在被测管道内感应涡流分布域中的质点将受到主方向为轴向的洛伦兹力, 在该洛伦兹力作用下, 被测管道质点产生轴向振动从而激发出纵向

模态 (L 模态) 的超声导波。导波在被检测管件内沿轴向传播, 当遇到诸如外壁裂纹形成的材料不连续时, 在界面处会发生反射, 当反射的超声导波再次传播回到换能器位置时, 振动的管件质点在永磁铁对产生的静态磁场作用下会激发出涡生涡流, 同时在薄壁线圈组两端产生感应电动势; 提取该电动势信号作为缺陷回波信号, 通过对其变化特性进行研究, 可实现管件外壁裂纹的检出, 完成管件的电磁超声导波定量检测^[11]。

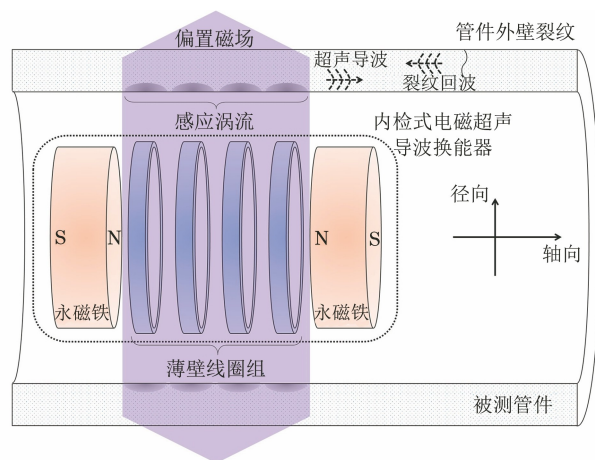


图 1 内检式电磁超声导波换能器构型及检测原理示意

1.2 三维有限元仿真模型的建立

为分析内检式电磁超声导波检测方法在金属小径管外壁裂纹定量检测中的可行性, 基于笔者所在课题组自主开发的超声导波检测有限元仿真源代码, 建立金属管件的内检式电磁超声导波检测有限元模型 (见图 2)。在该模型中, 管材料为 2205 不锈钢, 其管外径为 19 mm, 壁厚为 2 mm, 管长为 500 mm, 弹性模量为 190 GPa, 密度为 $7\ 980\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 泊松比为

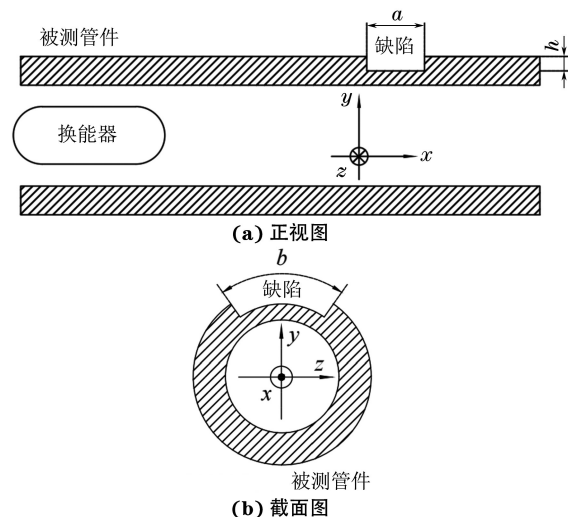


图 2 金属管件的有限元模型

0.27。在管件外壁设置裂纹,其位置和尺寸参数(包括轴向宽度 a 、周向长度 b 和径向深度 h)可变,用于分析计算不同位置、不同尺寸裂纹对检测信号的影响规律。综合考虑有限元计算速度和精度,采用四面体单元对管件进行网格划分,在裂纹缺陷区域进行网格加密,提高计算精度。

1.3 激励信号选择及加载方式

在进行管件内检式电磁超声导波检测之前,为抑制所激发的超声导波出现频散现象,应对激励信号中心频率和波形进行择优选取,将管件的几何和物理参数代入频散方程中,计算得到 2205 不锈钢中 L 模态导波的群速度和相速度频散曲线(见图 3)。

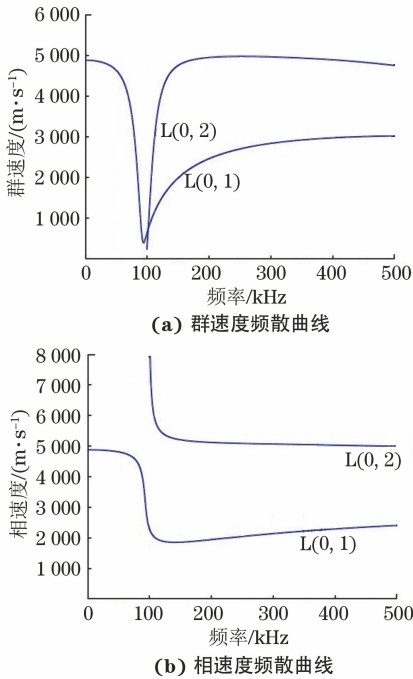


图 3 2205 不锈钢中 L 模态导波频散曲线

由图 3 可见, $L(0,2)$ 模态导波在低频区域的频散曲线较为平滑,频散现象轻微,最终选取导波激励信号中心频率为 250 kHz。由图 3 亦可知,250 kHz 对应的 $L(0,2)$ 导波模态的群速度为 $4\,971\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $L(0,1)$ 模态导波的群速度为 $2\,701\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。考虑到实际检测中单一模态信号无法激励形成,同时为使管道缺陷检测更精准,采用汉宁窗调制单频正弦信号作为窄带激励信号,其表达式为

$$F(t) = \frac{A}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi ft}{n}\right) \right] \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

式中: $F(t)$ 为激励信号函数; n 为脉宽中的正弦周期数; f 和 A 分别为激励信号的中心频率和最大幅值; t 为时间。

为了进一步保证比较集中的激励信号频率和

较窄的时域宽度,最终确定式(1)中的 n 为 5, f 为 250 kHz, A 为 1。在确定激励信号中心频率和波形后,考虑到感应涡流集中分布于管件内壁,与薄壁线圈组中的涡流线圈个数及位置对应,在被测管件内壁处选取一组环形激励面,将主方向为轴向且波形为式(1)所定义的瞬时力施加在激励面上,通过瞬态动力学仿真计算,获取信号拾取位置处(轴向位置为薄壁线圈组中心;径向位置为管件内壁)的质点纵向位移信号,因为该信号与薄壁线圈组输出的电动势信号正相关,所以在仿真中以质点纵向位移信号来表征检测信号,用于信号特性分析。

1.4 外壁裂纹的定位及分析

为了分析裂纹位置和缺陷回波出现时间的关联性,根据仿真得到的检测信号计算并绘制其单边包络线,选取包络线幅值的局部极大值点作为检测信号各回波的时间点,距左端面 200 mm 及 300 mm 处的外壁裂纹(深度为 0.5 mm、宽度为 2 mm、弧长为 $1/2$ 管件周长)的检测信号及其包络线如图 4 所示。

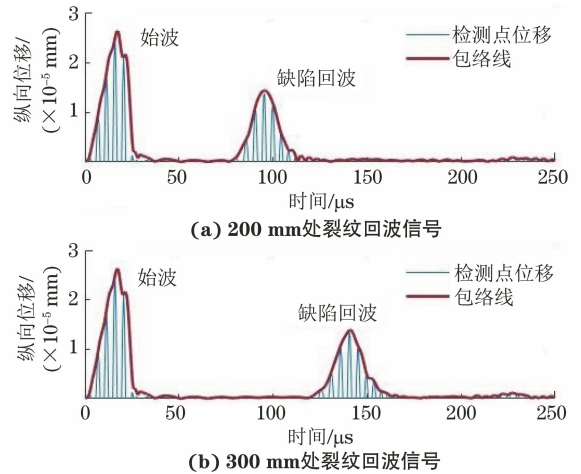


图 4 不同位置裂纹的检测信号及其包络线(仿真计算)

由图 4 可知,当裂纹轴向位置发生改变时,缺陷回波时间也随之发生变化,结合波速及始波与缺陷回波之间的时间差,即可预估裂纹的轴向位置。为了进一步探究裂纹位置判定的准确性,仿真中改变裂纹轴向位置,设定其位于距激励端面 200~400 mm 处,将计算得到的预估位置与实际位置相比较,绘制出的裂纹位置误差图如图 5 所示。进一步分析可知,缺陷回波峰值时间点与裂纹实际轴向位置紧密相关,相较于设定的裂纹位置,基于缺陷回波时间所计算得出的裂纹预估位置的相对误差小于 4.2%。由此可见,采用内检式电磁超声导波检测,结合缺陷回波峰值时间的判定,可实现对金属管件裂纹的轴向定位。

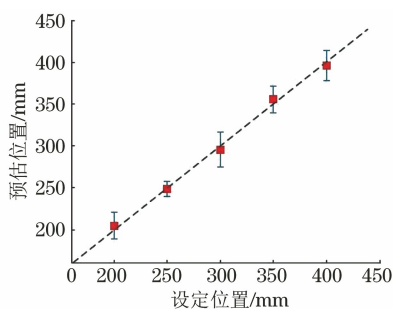


图5 外壁裂纹位置误差图(仿真计算)

1.5 外壁裂纹的定量分析

通过系列仿真,进一步探究所提内检式电磁超声导波换能器在外壁裂纹定量评估中的可行性。设定管道模型中的缺陷为局部外壁裂纹,其距导波激励中心 300 mm,裂纹宽为 2 mm,深度为 0.5 mm,当裂纹周向长度分别为 2/6 和 3/6 管道周长时,计算所得检测点处的质点位移信号及其包络线如图 6 所示。保持裂纹宽度和深度不变,建立不同裂纹周向弧长的仿真模型,仿真计算所得到的缺陷回波面积与缺陷周向弧长间的映射关系曲线如图 7 所示。

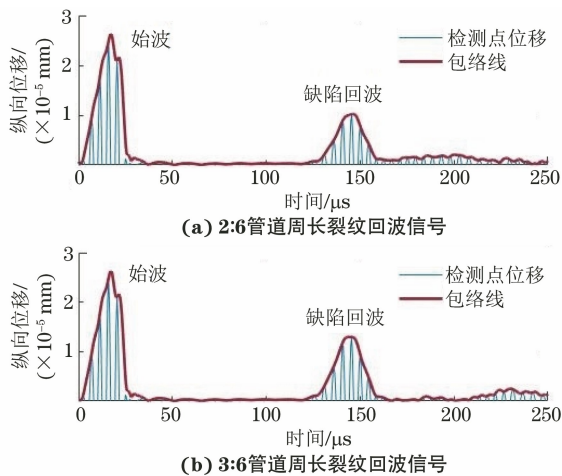


图6 不同裂纹周向弧长对应的质点位移信号及其包络线

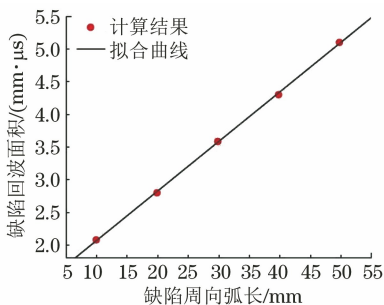


图7 缺陷回波面积与裂纹周向弧长的映射关系曲线(仿真计算)

为进一步分析裂纹深度对缺陷回波面积的影响规律,在所建立模型中设置宽为 2 mm、周向长度为 1/2 管件周长、深度分别为 0.25~0.75 mm 的外壁

裂纹。仿真计算得到的深度为 0.25,0.75 mm 裂纹的检测信号及其包络线如图 8 所示,缺陷回波面积与裂纹深度之间的关联曲线如图 9 所示。

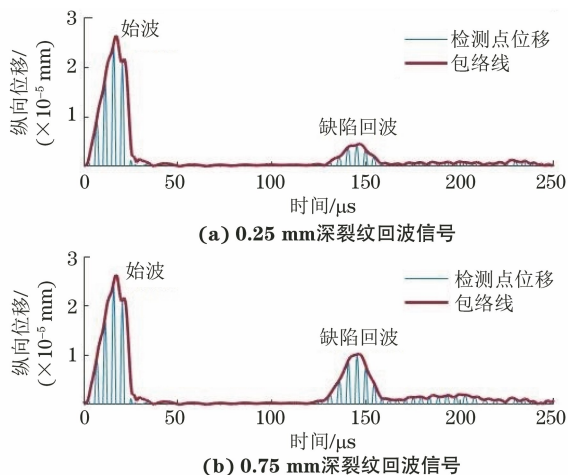


图8 不同裂纹深度对应的检测信号及其包络线(仿真计算)

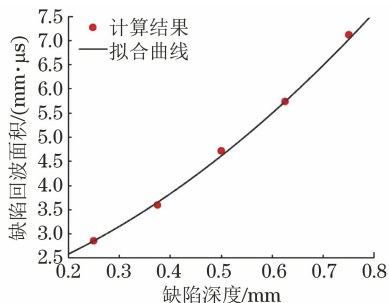


图9 缺陷回波面积与裂纹深度的关联曲线(仿真计算)

分析图 8,9 可知,随着裂纹周向长度和深度的增加,缺陷回波面积增大。其原因主要在于:裂纹周向长度和深度决定了裂纹面积,待测管件中裂纹面积的增大导致裂纹处形成的异质界面声阻抗增大,进而使反射的导波回波能量增强,表现为检测信号中缺陷回波面积的增大。上述分析亦表明,内检式电磁超声导波检测方法,结合缺陷回波面积的量化分析,可对金属管件裂纹面积实施定量评估。

2 检测试验

在开展仿真研究的同时,搭建了金属小径管电磁超声导波检测试验系统,其系统框图及实物如图 10,11 所示。该系统主要由计算机、电磁超声激励装置(RITEC RAM-5000 型)、阻抗匹配器(RITEC RT-50 型)、双工器(RITEC RDX-EM2 型)、超声导波换能器、带通滤波器(NF FV-628B 型)以及示波器(Tektronix DPO 4104 型)组成。

电磁超声导波换能器是检测系统的核心部件。试验所采用的内检式电磁超声导波换能器结构主要

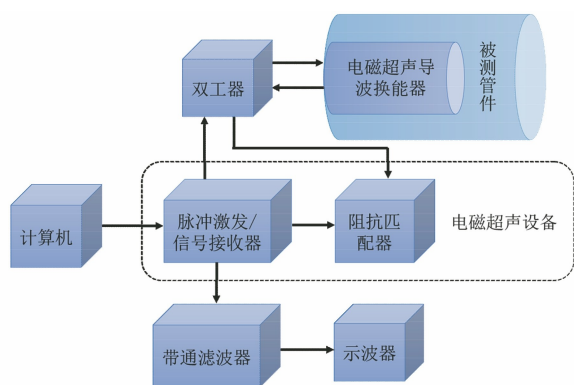


图 10 试验系统框图

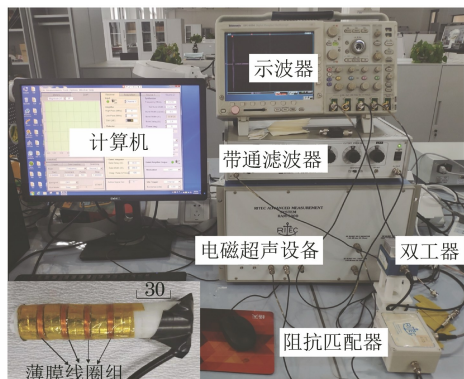


图 11 试验系统及换能器实物

包括永磁铁对、薄壁线圈组以及支撑骨架。试验所采用小径管内径为 14 mm, 壁厚为 2 mm, 长度为 0.5 m, 材料为 2205 不锈钢。预先在样件外壁加工了局部缺陷, 用于模拟外壁裂纹, 其位于距左端面 250 mm 处, 轴向宽度为 2 mm, 周向角度为 90°, 深度为 0.5 mm。试验时将制备的电磁超声导波换能器同轴放置于样件内, 其工作模式为“自激自检”, 在激发电磁超声导波的同时, 拾取薄壁线圈组两端的电动势作为管件导波检测信号。首先改变换能器与缺陷间的轴向位置, 观察并分析裂纹位置对检测信号的影响规律, 所获检测信号如图 12 所示。由图 12 可见, 缺陷回波与端面回波之间的时间间隔为 0.38 μs , 结合 1.3 节中已求的 $L(0, 2)$ 导波波速, 可预估裂纹位置, 预估位置与实际位置误差为 8.2%。且随换能器与缺陷间轴向位置的缩小, 检测信号中的缺陷回波信号峰值时间向始波靠近, 表明基于缺陷回波与始波间的时间差, 可对外壁裂纹进行的轴向定位, 验证了仿真结论的正确性。

裂纹定量分析的试验中, 保持缺陷的轴向位置、宽度和周向长度不变, 加工缺陷深度分别为 0.5 mm 和 1 mm。不同缺陷情况下的电磁超声导波检测信号如图 13 所示, 可见, 裂纹缺陷径向截面面积越大,

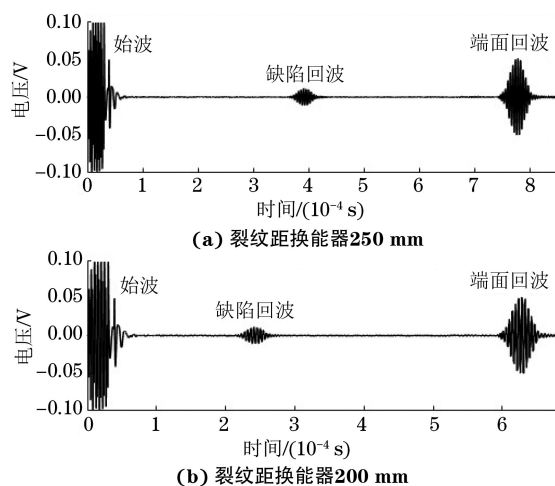


图 12 小径管不同位置缺陷的实际检测信号

缺陷回波面积增大, 与仿真研究所得结论一致, 反映了在实际检测中可根据缺陷回波面积对金属小径管外壁裂纹实施定量评估的可行性。

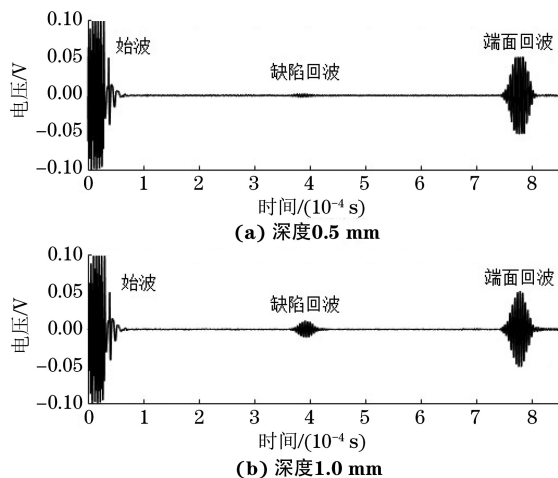


图 13 小径管不同深度缺陷的实际检测信号

3 结论

通过三维有限元仿真和试验, 对不锈钢小径管外壁裂纹的内检式电磁超声导波检测可行性进行了探究。在提出一种内检式电磁超声导波换能器构型的基础上, 首先建立了金属小径管外壁裂纹的内检式电磁超声导波检测三维有限元仿真模型, 通过仿真确定了检测信号中缺陷回波峰值时间和回波面积在裂纹定位和定量中的可行性。同时, 搭建了电磁超声导波检测试验系统, 开发了金属小径管内检式电磁超声导波换能器。通过试验获取了不同位置、尺寸的管件外壁裂纹电磁超声导波检测信号, 在验证仿真结论的同时, 进一步确定了内检式电磁超声导波检测技术在不锈钢小径管外壁裂纹定量检测中的可行性。

(下转第 51 页)

透、磁粉、相控阵超声等方法。其次由于内外表面检测灵敏度差异较小,故可在设备外表面进行扫查,来检测内表面母材裂纹缺陷。

3 结语

(1) 高频导波对于承压设备环境开裂所致的裂纹具有较高的检出率,内外表面检测灵敏度差异较小,可实现在线检测。

(2) 高频导波检测应用于母材裂纹检测时,具有检测效率高,一次性扫查面积大等优势,可对未拆除包覆层部分进行检测。

(3) 现场检测应结合高频导波粗扫和其余检测

方法复验的方法进行,防止缺陷的漏判与误判。

(4) 高频导波技术对于深度为 0.5~2 mm 的小尺寸裂纹,最大检测距离为 600 mm;对于深度为 3~5 mm 的大尺寸裂纹,最大检测距离为 1 000 mm。

参考文献:

- [1] 赵云飞. 超声导波在钢轨中衰减特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [2] 邢博. 基于超声导波的钢轨裂纹检测方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [3] 盛华吉. 钢轨轨底斜裂纹及焊缝的导波检测方法研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016.



(上接第 51 页)

参考文献:

- [1] 他得安,刘镇清,田光春. 超声导波在管材中的传播特性[J]. 声学技术,2001,20(3):131-134.
- [2] 许西宁. 基于超声导波的无缝线路钢轨应力在线监测技术应用基础研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
- [3] 许西宁,郭保青,余祖俊,等. 半解析有限元法求解钢轨中超声导波频散曲线[J]. 仪器仪表学报,2014,35(10):2392-2398.
- [4] 朱力强,许西宁,余祖俊,等. 基于超声导波的钢轨完整性检测方法研究[J]. 仪器仪表学报,2016,37(7):1603-1609.
- [5] BARTOLI I, MARZANI A, LANZA DI SCALEA F, et al. Modeling wave propagation in damped waveguides of arbitrary cross-section[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 295(3/4/5): 685-707.
- [6] DEMMA A, CAWLEY P, LOWE M. Scattering of the fundamental shear horizontal mode from steps and notches in plates [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2003, 113(4 Pt 1):

- 1880-1891.
- [7] DEMMA A, CAWLEY P, LOWE M, et al. The reflection of guided waves from notches in pipes: a guide for interpreting corrosion measurements [J]. NDT & E International, 2004, 37(3): 167-180.
- [8] HAYASHI T, KAWASHIMA K, SUN Z Q, et al. Guided wave propagation mechanics across a pipe elbow [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2005, 127(3): 322-327.
- [9] 武静,张伟伟,聂振华,等. 基于 Lyapunov 指数的管道超声导波小缺陷定位实验研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(1): 40-45, 53.
- [10] 王伟,游鹏辉,钟力强,等. 基于 T(0,1) 扭转波的管道纵向裂纹定位方法[J]. 中国测试, 2016, 42(6): 139-144.
- [11] LI Y, WANG Y, YAN B, et al. A hybrid model of capsule-typed electromagnetic acoustic transducers for inspection of tubular conductors [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2019, 59(4): 1459-1467.

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告