

[环保·安全]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.02.015

基于磁致伸缩超声导波 B 扫成像技术的大直径管道腐蚀检测

姚文胜^{1,2}, 王锋淮^{1,2}, 叶宇峰^{1,2}, 谢浩平^{1,2}, 杨敬鹏¹

(1. 浙江省特种设备科学研究院, 浙江 杭州 310020;
2. 浙江省特种设备安全检测技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310020)

摘要:针对传统超声导波检测技术仅能以 A 扫信号对管道缺陷进行轴向定位的局限性,笔者开展导波 B 扫成像技术的研究及应用。为满足大管径管道腐蚀缺陷的多维精确定位需求,通过研究导波局部加载及周向扫查技术,实现了轴向和周向缺陷的二维定位。通过实验室样管测试,验证了 $T(0,1)$ 模式局部加载导波扫查技术在管道盲孔缺陷和横槽缺陷检测方面的适用性,且最高灵敏度低于 2% 截面损失面积。现场应用结果表明导波 B 扫成像检测可满足大管径管道腐蚀缺陷检测的需求。

关键词:管道腐蚀检测;磁致伸缩;超声导波;B 扫成像

中图分类号: TG115.28; TH878 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2023)02-0099-06

Application of Large Diameter Pipeline Corrosion Detection Based on Magnetostrictive Ultrasonic Guided Wave B-Scan Imaging Technology

YAO Wensheng^{1,2}, WANG Fenghuai^{1,2}, YE Yufeng^{1,2}, XIE Haoping^{1,2}, YANG Jingpeng¹

(1. Zhejiang Academy of Special Equipment Science, Hangzhou 310020, China;

2. Key Laboratory of Safety Testing Technology for Special Equipment in Zhejiang Province, Hangzhou 310020, China)

Abstract: In view of the limitation that the traditional ultrasonic guided wave detection technology can only use A-scan signal to locate the pipeline defects axially, the research and application of guided wave B-scan imaging technology were carried out. In order to meet the needs of multi-dimensional accurate location of corrosion defects in large-diameter pipes, the guided wave local loading and circumferential scanning technology were studied to realize two-dimensional location of defects in axial and circumferential directions. The applicability of guided wave scanning technology with $T(0,1)$ mode local loading in the detection of pipe blind hole defects and transverse groove defects was verified through the test of sample pipes in the laboratory. The maximum sensitivity was less than 2% of the cross-sectional loss area. The field application results show that the guided wave B-scan imaging detection can meet the needs of large-diameter pipeline corrosion defect detection.

Keywords: pipeline corrosion detection; magnetostriction; ultrasonic guided wave; B-scan imaging

压力管道作为化工等企业重要的流体运输工具,其内部介质各异,工况参数非常复杂;尤其是运输易燃易爆、高度危害流体介质的管道,若是腐蚀泄漏将会造成巨大的危害。我国每年因管道内外腐蚀缺陷造成的

直接经济损失就达数十亿美元,因此必须进行严格监管及检验^[1-3]。目前,对于压力管道定期检验中常用的无损检测方法有磁粉、渗透、超声和射线等,这些技术因其逐点式抽查检测存在漏检风险^[4]。超声导波检

收稿日期:2022-08-29;修回日期:2022-11-30

基金项目:国家市场监督管理总局科技计划项目(2020MK046)。

第一作者简介:姚文胜(1996),男,浙江衢州人,硕士,工程师,主要研究方向为承压设备无损检测技术。E-mail: ywsq@163.com

测技术日趋成熟,具备长距离、全截面检测的优点,可减少检验工作量并增加检验范围,适合与传统检测手段优势互补。

目前广泛普及的轴对称模态超声导波检测技术已实现商用,一般基于 $T(0,1)$ 和 $L(0,2)$ 展开^[5]。类似技术具备良好的频散特性和可激励性,但同时具有一定的局限性,特别是在大直径管道检测中只能确定轴向位置而难以较快定位缺陷的周向分布点位;与此同时,以截面损失面积作为固定灵敏度衡量标准时,传统导波检测技术随着管道管径变大,灵敏度不断下降,甚至管道出现穿孔缺陷时依然不会产生有效的缺陷指示回波。

针对以上 2 点不足之处,笔者提出磁致伸缩导波 B 扫管道周向扫查技术并开展工程应用,实现大直径管道缺陷二维精确定位。根据周向扫查技术展开试验研究,并在此基础上推广到实际工程应用场景,在大管径管道腐蚀检测中验证导波 B 扫成像所独有的技术优势。

1 超声导波 B 扫成像技术原理

超声导波 B 扫成像检测技术运用导波局部加载模型实现周向信号采集,并通过合成孔径聚焦算法优化 B 扫描图像分辨率,以此实现导波 B 扫成像的工程化应用。该系统由上位机、导波检测仪和扫查器构成,如图 1 所示。

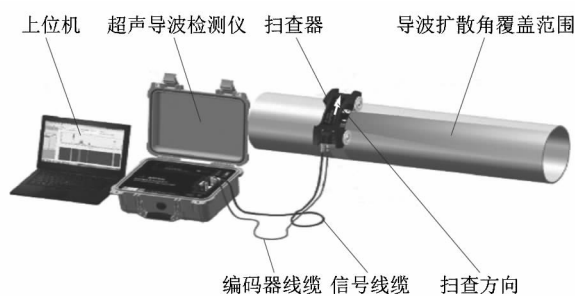


图 1 导波 B 扫检测系统各部分组成

Figure 1 Components of guided wave B-scan detection system

上位机运行软件并与导波检测仪通信,扫查器与导波检测仪线缆连接,编码器采集旋转圈数回传软件后计算获取管道圆周角度信息,扫查器内置的换能器由软件端控制激励信号并执行手动圆周扫查。图中导波扩散角覆盖范围表示换能器激发磁致伸缩导波信号

后在中距离(约 15 m)检测中具备缺陷预期检测灵敏度的区域。

1.1 导波局部加载模型

基于局部加载模型的周向扫查技术受相控阵圆周阵列探头的启发,将周向布置的磁致伸缩带材作为一个阵列并以固定圆周角划分,将每一细分单元模拟为单个探头。通过激励局部细分单元产生多模态导波信号并在反射后自接收,以此类推遍历 360° 圆周后,根据上位机记录的所有反射回波信号整合成沿周向展开的 B 扫成像图谱。图谱不但具有轴向位置信息还显示了周向角度信息^[6]。如图 2 所示的示意图中,在管道上分布的缺陷 1 和缺陷 2 在展开图中可以清晰反映其所在位置的角度和距离,即缺陷 1 坐标是(1 500, 320),缺陷 2 坐标是(2 000, 40);特别是在大直径管道中可以快速判断缺陷位置而避免繁复的无损检测方法复验工作。

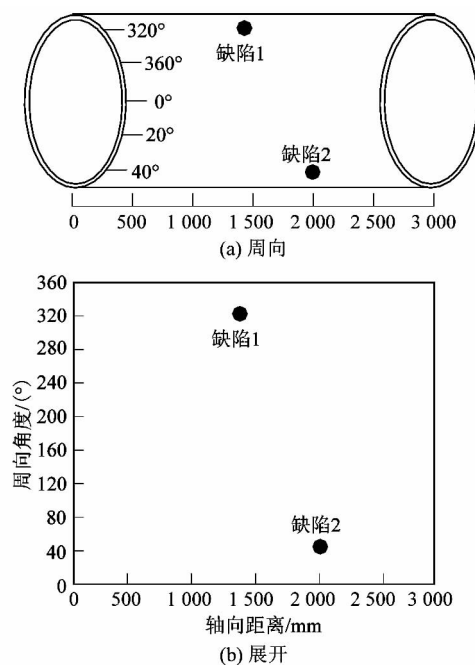


图 2 管道周向和展开示意图

Figure 2 Schematic diagram of pipeline circumference and expansion

管道在圆周局部位置接受换能器激励信号载荷后引发受迫振动,以此产生瞬态扰动可由简正模态展开法来描述,如图 3 所示^[7]。假设载荷区域轴向宽度为 $2l$,周向角度设为 2α ,那么基于简正模态展开可得到

周向和轴向的模式因子,该因子将受轴向宽度和周向角度影响而反映激励导波模式的不同^[8]。

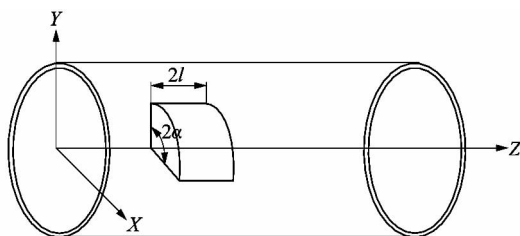


图3 局部加载的管道模型

Figure 3 Locally loaded pipe model

通过研究表明^[9]:导波模式的阶数受局部载荷的不同而产生变化,当载荷圆周角较小时,导波高阶非轴对称模式幅值较大;当载荷圆周角较大时,导波非轴对称模式逐渐消失,在极端情况下全圆周轴对称载荷情形下只激励产生0阶轴对称模式导波^[10]。因此,采用圆周角较小的情况来实现非轴对称模式导波的应用,尽管此时导波非轴对称模式成分各异且频散效应增强,但具备有效的圆周扫查条件,限制条件为中距离(约15 m)扫查;较远距离的扫查容易产生周向分辨率降低的问题。在大直径管道检测中,导波扩散性变小,周向分辨率由此提高,一定程度上减弱了周向分辨率下降的问题。

1.2 B扫成像合成孔径聚焦算法

合成孔径聚焦技术(synthetic aperture focusing technology, SAFT)是采用小孔径换能器和较低工作频率而获得高空间分辨率的一种信号处理技术;相应的成像算法可分为时域算法和频域算法^[11]。本研究中利用该技术提升以导波回波幅值绘制的RGB颜色导波B扫图谱的清晰度。

如图4所示,该图为合成孔径聚焦原理示意图。假设磁致伸缩导波换能器在X-Y平面内,激发出的导波沿Z方向传播,当遇到缺陷时导波信号被反射沿Z

轴负方向传播,在不同位置的接收器获取信号延迟具有差异。而在本研究中,每个接收器被替换为持续步进扫查的唯一导波激励换能器,尽管受导波扩散角的影响使边缘位置信号很弱,但所有接收的信号同样具有类似的延迟性质。合成孔径聚焦要求换能器向正方向移动距离L,且L等于缺陷距初始零点的距离,此时换能器接收到的信号具有最大分辨率,该过程可以通过二维傅里叶变换及其传递矩阵实现。

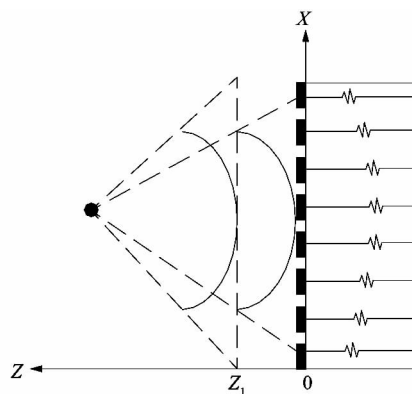


图4 合成孔径聚焦原理图

Figure 4 Schematic diagram of synthetic aperture focusing technique

2 超声导波周向B扫成像技术试验

为验证本导波B扫成像检测系统在不同管径和不同缺陷类型上的适用性,开展实验室样管研究。通过设立不同种类的缺陷(槽缺陷和通孔缺陷)以及同种缺陷不同圆周角度分布的通孔缺陷,研究导波B扫系统对多种缺陷的检测和定位能力。为衡量检测精确度,制定了仪器关键技术参数指标,如表1所示。表中检测盲区表示当换能器中心频率为64 kHz时,以磁致伸缩带材为初始点正向175 mm内无法识别任何缺陷;中心频率为128 kHz时,因频率提升,正向85 mm内无法识别任何缺陷。

表1 导波B扫成像检测系统技术指标

Table 1 Technical specifications of guided wave B-scan imaging detection system

操作原理	激励模式	中心频率/kHz	脉冲重复频率/Hz	适配管道直径/mm	检测长度/m
磁致伸缩	$T(n,1) (n=0,1,2,3,4,5\cdots)$	60~200	1~20	≥ 100	15
可靠检测精度 (横截面损失)/%	检测盲区	周向定位精度 (管径 ≥ 100)/mm	导波方向	接口	成像方式
3	64 kHz时,175 mm内; 128 kHz时,85 mm内	100	双向/单向可控	RJ-45 (TCP/IP)	B-Scan

如图 5 所示,本试验在外径 219 mm,壁厚 3.76 mm 的钢管上模拟了 2 种缺陷。磁致伸缩带材布置在样管靠近端面的一侧,本位置记为轴向初始零点;槽缺陷位于带材布置初始点距离 940 mm,圆周位置为水平方向顺时针 65°(逆时针 295°)处;2 个通孔缺陷距离零点 1 360 mm,直径为 5.5 mm,圆周位置分别为顺时针 225°(逆时针 135°)和 267°(逆时针 93°)附近,通孔缺陷的截面损失率为 0.8%。槽缺陷宽度 2 mm,深度为 3 mm,截面损失率低于 0.5%,具体情况如图 6 所示。

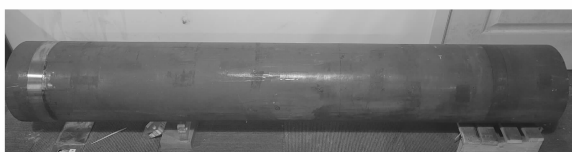


图 5 被测碳钢样管

Figure 5 Carbon steel sample pipe to be tested

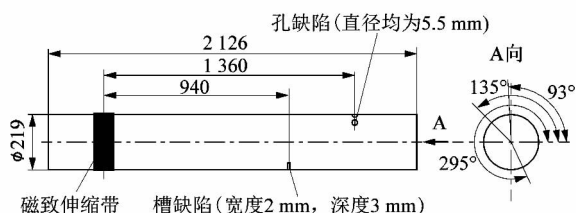


图 6 被测样管人工缺陷分布位置

Figure 6 Distribution position of artificial defects of tested sample tube

表 2 导波 B 扫系统试验参数设置

Table 2 Test parameter setting of guided wave B-scan system

扫查模式	扫查方式	步进角度/(°)	采样间隔/ms	功率占用率/%	增益/dB
逐点	角度	20	100	100	50
周期数	波速/(m·s ⁻¹)	平均次数	方向	正向距离/m	负向距离/m
4	3 250	4	双向	3	3

表 2 为本次试验仪器设置的参数,其中步进角度为 20°,故在扫查结束后将产生 18 个 A 扫描信号。导波因其沿管道表面传播的特性受管道防腐层影响,防腐层的存在会使高频导波衰减过大,但本试验碳钢管

并未留有防腐漆,故采用中心频率较高的 128 kHz 导波进行试验。

经过检测扫查后,通过合成孔径聚焦算法对图像进行处理,所得到的 B 扫图谱如图 7 所示。在图 7 的 B 扫图谱中标出了位于 1 360 mm 处的 2 个圆孔缺陷,图中颜色最浅的第 1 处缺陷顺时针周向角度约为 265°,第 2 处颜色较深处为 210°附近,角度误差率约为 1% 和 6%;而槽缺陷位于 950 mm 附近,顺时针圆周角度为约为 58°,角度误差率为 10%。以上误差在可接受范围内,基本与实际情况相符。

基于试验结果分析,槽和孔缺陷截面损失率低于 1% 均成功被系统捕捉,证明系统检测灵敏度高于工程应用的预期灵敏度 3%,能达到较好的识别效果。通孔缺陷在图谱中展示较为明显,而槽缺陷颜色较为暗淡,这与槽缺陷更低的截面损失率有关。从图 7 可知,其他时刻的 B 扫颜色带始终贯穿在 360°内,分别为导波始波、管道端面回波以及 2 处管道支架回波,其中 128 kHz 的始波宽度约占 40 mm,低于检测盲区参数设置的 85 mm;从 2 处通孔缺陷相距 42°换算二者的圆周弧长距离约为 80 mm,圆周定位精度小于 10 cm,本仪器各项指标均达到预期效果。

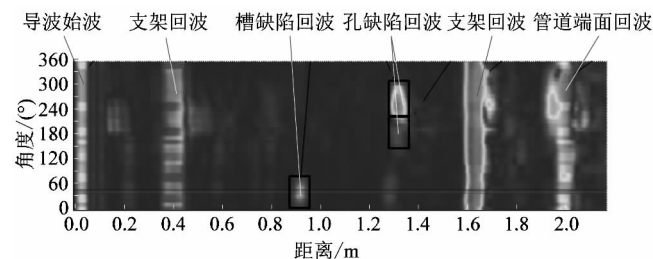


图 7 样管 B 扫图谱

Figure 7 B-scan atlas of sample tube

3 超声导波 B 扫成像技术工程应用

在前述章节对超声导波 B 扫仪器进行了试验测试,发现仪器满足预期指标且具备良好的使用性能。为进一步推动超声导波 B 扫检测技术的工程应用并完善 B 扫检测系统的性能,选取部分企业开展实地检测工作,对基于磁致伸缩的超声导波 B 扫成像检测系统进行可靠性和适用性评价,验证本研究成果在工程应用方面是否具备优势。

大口径螺旋焊管广泛应用于我国西气东输工程

中,其工作环境较为极端,服役时间长,因此可能存在腐蚀损伤。笔者在某管道基地开始实地检测,选取某螺旋焊管,其直径为 720 mm,壁厚为 12 mm,外表有环氧粉末涂层。选择管道某一端面作为起始点,布置磁致伸缩带材并整圈粘贴耦合,连接上位机及检测仪,设置检测参数后使用 B 扫成像扫查器进行 360° 圆周扫查。具体管道及仪器布置如图 8 和图 9 所示。



图 8 磁致伸缩带材布置及上位机连接
Figure 8 Magnetostriptive strip arrangement and upper computer connection



图 9 超声导波扫查器检测现场
Figure 9 Inspection site of ultrasonic guided wave scanner

由于导波 B 局部加载扫特性,采用螺旋式的局部激励方式可获得较高的信噪比,信号可解读性较高,检测覆盖距离较远,在 11 m 范围内均有较好的信噪比,覆盖共计 5 个焊缝。

经过多次检测选取较好的信号图谱,结果如图 10 所示。从 B 扫图上可以看到分布均匀的螺旋焊缝,每个颜色条带之间间隔距离约为 1.9 m。经过与管道对比,与实际焊缝位置偏离不到 20 mm,说明本仪器具备

高精度检测螺旋焊缝的能力,若此管道相邻焊缝之间存在缺陷,不同的焊缝图谱之间会出现颜色区域,且管道直径越大,其检测灵敏度越高。

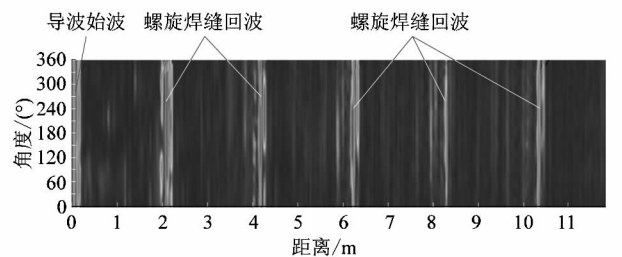


图 10 螺旋焊管超声导波 B 扫检测信号
Figure 10 Ultrasonic guided wave B-scan detection signal of spiral welded pipe

石化炼化工艺管道一般布置在沿海区域,处于露天服役,而且内部输送介质复杂,经过一定时间的运行后,易出现锈蚀、腐蚀减薄及裂纹等缺陷,其中腐蚀和裂纹最为普遍。课题组对某石化企业运送富胺液的管道(输送介质导致该管道具有胺腐蚀倾向)开展导波 B 扫检测,管道直径为 219 mm,壁厚 8 mm,管道现场如图 11 所示。



图 11 石化企业检测管道
Figure 11 Inspection pipeline of petrochemical enterprises

经过企业自身持续监测认为该段存在腐蚀减薄的可能性,故对直管段进行导波 B 扫检测。在多次检测后选取较优检测信号及图谱,如图 12 所示。从检测结果判断,该管道确实存在腐蚀减薄导致截面积损失的情况,且位置较多并存在聚集现象。在图中选取较为明显的 2 处缺陷,坐标分别为(2.0,120)和(4.6,53),这 2 处颜色与周围具有较强区分度,侧面说明截面损失率较大,可能存在超标缺陷。

经过现场测厚仪复验,第 1 处管道壁厚为 6.7 mm 左右,第 2 处为 6.3 mm 左右,减薄率分别为 16.25%

和 21.25% ;依照相关工业管道定检规程应当对该管道进行强度校核并长期监测使用。

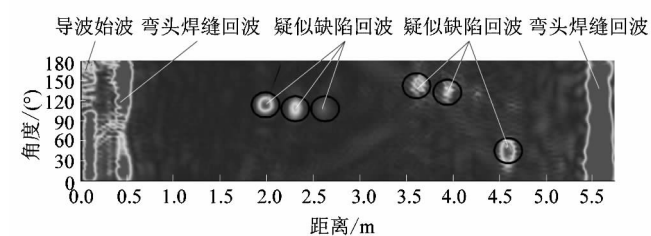


图 12 胺液输送管道缺陷图谱

Figure 12 Defect map of amine liquid transmission pipeline

4 结论

因传统单一 $T(0,1)$ 模态超声导波检测中难以对其实现精准二维定位,基于大直径压力管道腐蚀缺陷检测的特点,笔者提出超声导波 B 扫成像检测技术。研究了基于局部加载的导波多模态传播模型,为提升 B 扫图像的分辨率引入合成孔径聚焦算法。最后通过试验及现场工程应用验证了磁致伸缩超声导波 B 扫成像技术的可行性,并确定了周向定位精度及检测灵敏度。综上可以得出以下结论:

1) 根据局部加载超声导波 B 扫检测模型分析,该周向扫查技术适用于大管径管道检测,且管径越大其灵敏度越高;

2) 经试验验证,基于磁致伸缩超声导波 B 扫成像技术应用于大直径管道腐蚀减薄检测时其灵敏度最高可达截面损失率 1% ,周向定位精度可低于 10 cm ;

3) 经过现场工程检测应用,超声导波 B 扫检测技

术能判断管道相应特征(如焊缝、支架),具体表现为圆周角度的全覆盖颜色条纹带,且可识别螺旋焊缝及管道内腐蚀缺陷,具备进一步推广使用的价值;

4) 超声导波 B 扫检测技术因其导波自身扩散角的限制无法探测长距离管道,同时导波管道三通部位检测效果欠佳,未来研究方向应该着眼于长距离直线扫查技术的研究以及特殊管件的导波检测。

参考文献:

- [1] 刘艳双. 大庆油田在役埋地压力管道腐蚀现状评价[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2017, 34(5): 13-15.
- [2] 黄涛, 王琪, 郝宇飞, 等. 压力管道腐蚀损伤评价[J]. 中国特种设备安全, 2012, 28(3): 58-59.
- [3] 华创. 含腐蚀缺陷压力管道剩余强度研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2017: 47-48.
- [4] 张盼, 付明东, 李晓旭, 等. 压力管道无损检测技术及应用[J]. 管道技术与设备, 2020(2): 29-33.
- [5] 唐志峰, 吕福在. 超声导波管道无损检测技术及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2019: 21.
- [6] 陈会明, 唐志峰, 吕福在, 等. 基于磁致伸缩超声导波的管道周向扫查技术[J]. 无损检测, 2018, 40(12): 53.
- [7] 张小伟. 基于非轴对称超声导波的管道无损检测理论与实践研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 19.
- [8] 许波, 张子健, 柴军辉, 等. 超声导波 B 扫成像技术在压力管道腐蚀检测中的应用[J]. 化工机械, 2022, 49(1): 156.
- [9] 曹俊平, 胡文堂, 刘浩军, 等. 基于超声导波合成聚焦的波纹管缺陷检测研究[J]. 结构工程师, 2019, 35(1): 28.
- [10] 马书义, 武湛君, 刘科海, 等. 管道变形损伤超声导波检测试验研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(14): 1-8.
- [11] 冒秋琴, 陈尧, 石文泽, 等. 频域相位相干合成孔径聚焦超声成像研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 135.