

管道弯头缺陷检测外置式远场涡流探头设计*

徐志远^{1,2}, 林章鹏^{1,2}, 袁湘民³, 林 稳³

(1. 湘潭大学 复杂轨迹加工工艺及装备教育部工程研究中心 湘潭 411105;
2. 湘潭大学机械工程学院 湘潭 411105; 3. 湖南省特种设备检验检测研究院岳阳分院 岳阳 414000)

摘 要:远场涡流技术在金属管道的无损检测中应用广泛,但通常需要设备停机以便将探头放入管内。为满足压力管道在役检测的需求,针对其易腐蚀的弯头部位,设计了一种在管外放置的远场涡流探头。首先,应用有限元软件对探头的结构及其激发磁场的效果进行了仿真设计;而后建立了弯头缺陷远场涡流检测仿真模型,分析了内、外壁缺陷深度与检测信号特征量的定量关系;最后搭建试验平台进行了预制缺陷检测试验。结果表明:探头电压信号的相位随缺陷深度的增加而近似线性减小,可用于缺陷深度的定量;内壁缺陷信号的相位减小得更快,利用相位特征量可对仅有外壁或内壁缺陷时的缺陷深度进行定量,而不能对两种缺陷都存在的情况进行定量。

关键词:远场涡流;探头设计;管道弯头;有限元仿真

中图分类号: TG115.28 TH87 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

External remote field eddy current probe for defect detection at pipe elbows

Xu Zhiyuan^{1,2}, Lin Zhangpeng^{1,2}, Yuan Xiangmin³, Lin Wen³

(1. Engineering Research Center for Complex Path Processing Technology and Equipment, Ministry of Education, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China; 2. School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China; 3. Hunan Special Equipment Inspection & Testing Research Institute, Yueyang Branch, Yueyang 414000, China)

Abstract: The remote field eddy current (RFEC) technique is widely applied for nondestructive testing of metallic pipes, but it always requires shutting down equipment to place the probe inside the pipe. In order to meet the demands of in-service inspection for pressure piping whose elbow regions are prone to corrosion, a novel RFEC probe placed outside the elbow is designed in this paper. Firstly, the probe structure and the pattern of its exciting field are simulated and designed by using finite element software. Then, the simulation model of RFEC testing for elbow defect detection is established, and the quantitative relationship of the inner diameter (ID) and outer diameter (OD) defect depth to the signal characteristics is analyzed. Finally, a test platform is set up and the detecting prefabricated defect experiments are conducted. The results show that: i) the probe signal phase decreases almost linearly with the increase of ID or OD defect depth, which can be used to quantify defect depth; ii) the phase of ID defect signal decreases more rapidly, and therefore, the defect depth can be quantified in the presence of only one type (ID or OD) defect by using the phase feature, but cannot be quantified when both two types of defect exist simultaneously.

Keywords: remote field eddy current; probe design; pipe elbow; finite element simulation

1 引言

自1951年被发明以来,远场涡流技术在金属管道的无损检测中备受人们的重视。该技术以低频电磁场两次

穿透管壁的远场涡流效应为基础,通过检测磁场的相位和幅值变化间接获取管壁的缺陷信息^[1-9]。与传统电涡流技术相比,远场涡流技术的独特优势在于能以相同的灵敏度检测内外壁缺陷,且对探头的提离不敏感^[3,4]。

常规的远场涡流检测探头为内通过式,由一个沿管

道轴线放置的激励线圈和一个位于远场区的同轴接收线圈或沿周向分布的接收线圈阵列组成。由于远场区始点一般位于距激励线圈 2~3 倍管内径处,因而探头尺寸较长;同时,在远场区,激励线圈产生的磁场已经两次穿透管壁,在接收线圈内感应的信号十分微弱,通常为微伏级。为改善远场涡流探头的性能,国内外学者进行了广泛的研究,主要方法有^[5-7]:在激励线圈和接收线圈之间增设屏蔽盘、采用辅助激励线圈和设置导磁磁路。通过采用这些方法,接收信号的幅值可增强至毫伏级,远场区始点到激励线圈的距离可缩短至约 1 倍管内径。此外,为通过工业管线中大量存在的限制性管段如弯头、封头、阀门等,研究者们提出了柔性探头和可折叠探头^[8-9]。

但是,这种常规探头在实际应用时往往需要设备停机,以便将探头放入管内。而对于石化、电力等领域的压力管道,为保证其长周期连续运行,有必要从管外进行在役检测。压力管道的弯头改变管内介质的传输方向,是整体管道中的薄弱环节,其外侧容易发生腐蚀失效^[10]。目前,对管道弯头的在役检测方法主要有射线检测、超声相控阵检测和超声导波检测等,但由于分别存在射线源保护、必须使用耦合剂和导波模式转换的不足^[11-12],在检测的效率、经济性或结果解释等方面难以满足大范围的现场应用要求。

内通过式远场涡流探头检测直管段的缺陷相对容易,但是,在弯头部位,由于内腔为轴向弯曲的圆柱孔,探头通过时会发生摇晃和激励线圈与接收线圈轴向不对中等现象,所引起的噪声严重干扰甚至淹没缺陷信号^[13]。弯头表面虽然沿轴向弯曲,但周向形状与直管表面相似,若将探头沿周向放置,则可能解决弯头检测中出现的问题。同时,考虑到在役检测的需求,应从管外进行检测。为此,本文设计了一种在管外放置的远场涡流检测探头。该探头采用沿管道周向布置的结构,激发的磁场能量可在管壁周向形成二次穿透,实现远场涡流效应。仿真分析和试验结果表明,探头电压信号的相位与内、外管壁缺陷的深度成不同的线性关系,可用于内壁或外壁缺陷深度的定量,但由于其随内、外壁缺陷深度变化的快慢不一样,不能对内、外壁缺陷都存在时的缺陷深度进行定量。

2 外置式远场涡流探头设计

常规内通过式探头激励产生的在管内传播的磁场(称为直接磁场)由于受到管壁中感应涡流的阻碍作用而快速衰减,穿透管壁在管外传播的磁场(称为间接磁场)衰减较慢,使得在远场区间接磁场强于直接磁场,因此,间接磁场会再次穿透管壁向管内传播,形成二次穿透现象。当将探头置于管道外部时,激励线圈产生的磁场仍可分为两个部分:一部分在管道外部沿着弯曲的管壁

传播,为直接磁场;另一部分穿透管壁在管道内部传播,为间接磁场。但是,直接磁场不再受到管壁的屏蔽作用,因此,能否使间接磁场二次穿透管壁成为外置式探头设计的关键。

为定性分析激励磁场与管壁的交互作用,进而为探头设计提供指导,在 Comsol 软件中建立激励线圈置于管道外的有限元模型。严格地讲,按这种方式配置的线圈和管道应建立三维模型,但考虑到建模目的为定性分析二次穿透现象有无发生,选择管道横截面进行二维有限元建模以简化计算。

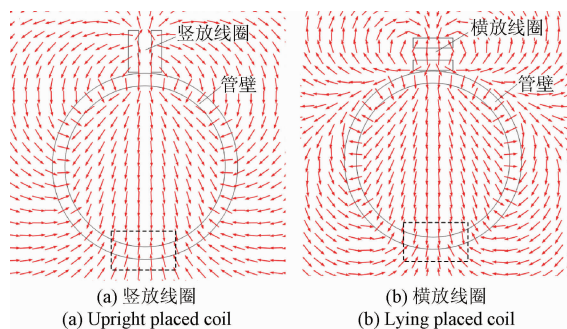


图 1 激励线圈竖放和横放的坡印廷矢量分布

Fig. 1 Poynting vector distribution for upright and lying coil

图 1 所示为分别采用激励线圈竖放和横放时坡印廷矢量的分布情况,坡印廷矢量的方向描述了电磁场传播过程中能量流动的方向。在图 1 中,间接磁场能量从线圈底下一次穿过管壁后在管内流动,直接磁场能量在管外沿外壁流动;由于直接能量大于间接能量,部分管壁处直接能量穿透管壁向管内流动,而间接能量始终未能二次穿透管壁。另外,从图 1 中虚线框内底部管壁的坡印廷分布情况可以看出,激励线圈横放时,间接能量与直接能量在接近管外壁的地方相遇,而激励线圈竖放时,间接能量没有进入管壁。在涡流检测中,矩形线圈通常为横放,因此,选择矩形线圈为所设计探头的激励线圈。

为实现间接磁场能量的二次穿透,借鉴 Sun Y. S. 等人^[14]提出的平板远场涡流探头的结构,用高磁导率的 U 型屏蔽罩将激励线圈包围起来,以抑制管外的直接磁场能量。图 2 所示为用带屏蔽罩矩形线圈激励时的坡印廷矢量分布和以均匀密度显示的磁力线分布。从坡印廷分布可看出,管内的间接磁场能量已穿透管壁,穿透范围几乎覆盖整个圆周,其中,在底部区域能量流垂直于管壁穿透。从磁力线分布看,从底部管壁泄漏出去磁场较多,如图 2 中虚线框所示。因此,为接收到更多的间接磁场,宜将探头接收线圈置于底部管壁。

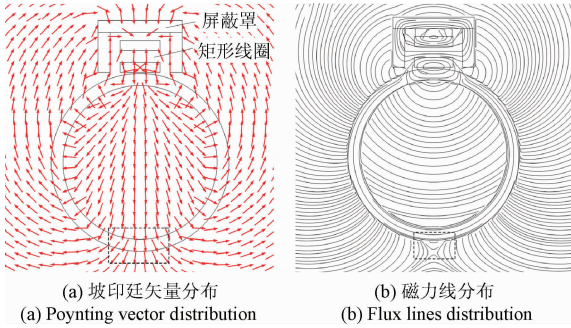


图2 带屏蔽罩矩形线圈激励效果

Fig. 2 Excitation results of shielded rectangular coil

为进一步增强二次穿透管壁的间接磁场,同时缩短接收线圈到激励线圈的距离以减小探头尺寸,在周向布置两个参数相同的激励单元。图3所示为周向120°布置两个激励单元时的坡印廷矢量分布和以均匀密度显示的磁力线分布。从图3中可以看出,两个激励单元将管壁分为周向两段圆弧,在每段圆弧中点处,能量流垂直穿透管壁,磁力线泄漏到管外。为使探头更紧凑,选择将接收线圈放在短圆弧段。不过,在仿真模型中,并未建立接收线圈,这是由于线圈感应电压 U 与磁通密度 B 的关系为:

$$U = -NS \frac{dB}{dt} = -NSj\omega B \quad (1)$$

从而有:

$$\angle U = \angle B = \arctan\left(\frac{\text{Im}(B)}{\text{Re}(B)}\right) \quad (2)$$

式中: N 为线圈匝数, S 为感应面积, j 为虚数单位, ω 为角频率, $\angle U$ 和 $\angle B$ 分别表示感应电压和磁通密度的相位角, $\text{Im}(B)$ 和 $\text{Re}(B)$ 分别为磁通密度虚部和实部。因此,读取接收线圈处的磁通密度,即可对线圈电压信号的相位和幅值进行等价描述^[15]。

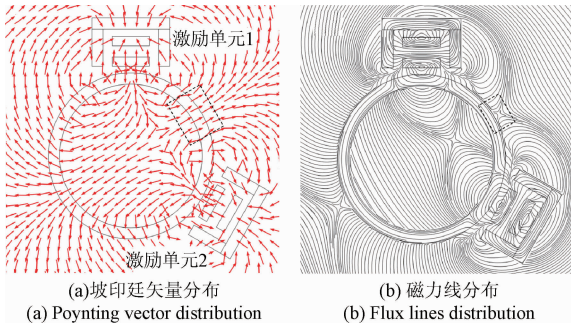


图3 周向120°布置两个激励单元的效果

Fig. 3 Results of two exciter units placed 120 degrees apart

图4所示为两激励单元夹角从90°每隔30°递增至180°时,在管外壁上方0.5 mm处读取的磁通密度幅值和相位随着到激励单元1弧长距离变化的曲线。由图4可以看到,由于探头结构的对称性,所有幅值曲线和相位曲线都是对称的;在激励单元邻近处,相位曲线出现翻转,表明实现了远场涡流效应。同时可见,随着夹角的增大,磁通密度幅值减小;而相位曲线平缓段(对应远场区)的长度在夹角增至120°以后不再增加,甚至略有减小。因此,选择120°作为两个激励单元的夹角,此时,远场区覆盖管壁的周向范围大,磁场也较强。

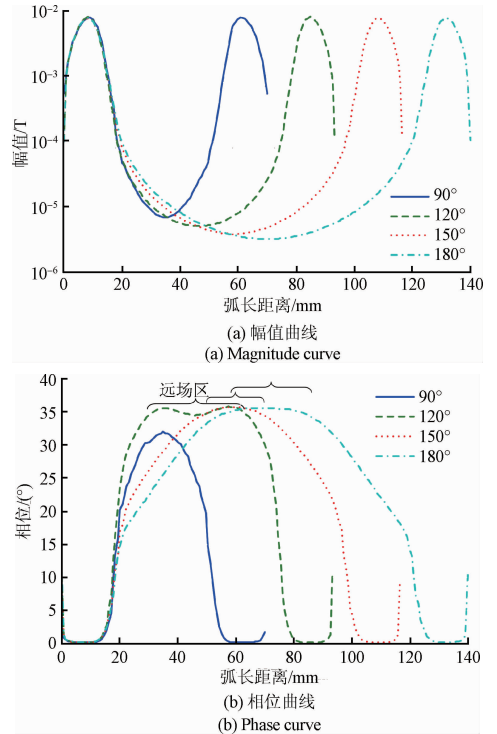


图4 激励单元夹角对幅值和相位曲线的影响

Fig. 4 Influences of exciter angle on amplitude and phase curves

3 弯头缺陷检测仿真

利用所设计的外置式远场涡流探头,建立如图5所示的弯头缺陷检测有限元模型。在图5中,为显示内部的探头和弯头,隐去了模型周围的空气域。

被测弯头材料为Q235钢,其几何尺寸及材料属性参数如表1所示。在弯头中部的外壁(或内壁)设置一个矩形轴向槽,长12 mm×宽4 mm,深度设置为变量,分别为弯头壁厚的20%、40%、60%和80%。探头由两个激励单元构成,每个单元由矩形线圈和U型屏蔽罩组成,它们的物理参数如表2所示。探头到管外壁的距离(提离距离)为1 mm。

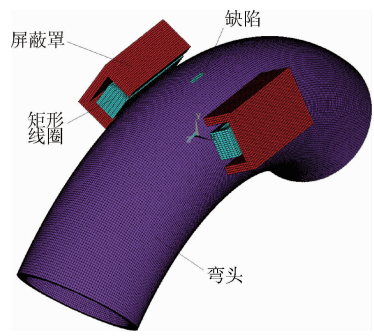


图 5 弯头缺陷检测有限元模型

Fig.5 Finite element model for elbow defect detection

表 1 弯头参数
Table 1 Elbow parameters

外径/ mm	壁厚/ mm	弯曲角度/ (°)	弯曲半径/ mm	电导率/ (S·m ⁻¹)	相对 磁导率
89	6	90	178	5×10 ⁶	329.5

表 2 探头参数
Table 2 Probe parameters

	长度/ mm	宽度/ mm	高度/ mm	厚度/ mm	电导率/ (S·m ⁻¹)	相对 磁导率
矩形线圈	70	20	16	5	5.8×10 ⁷	1
屏蔽罩	70	42	26	6	10	4 000

给两个线圈加载频率为 5 Hz、初始相角为 0°、密度为 5×10^6 A/m² 的正弦电流,并在空气域最外层施加磁力线平行边界条件,基于棱边单元法进行谐波磁场分析。

采取固定激励单元位置,逐步移动接收线圈的方法,分别对弯头中部不同深度的外壁缺陷和内壁缺陷远场涡流检测进行分析,仿真计算结果如图 6 所示。可见,无论外缺陷还是内缺陷,当缺陷深度变化时,检测信号的幅值和相位均会发生变化。随着缺陷深度的增加,信号幅值增大,而相位减小。这是因为缺陷越深,该处剩余的管壁厚度越小,磁场穿透管壁所损失的能量越少,相位滞后越小。

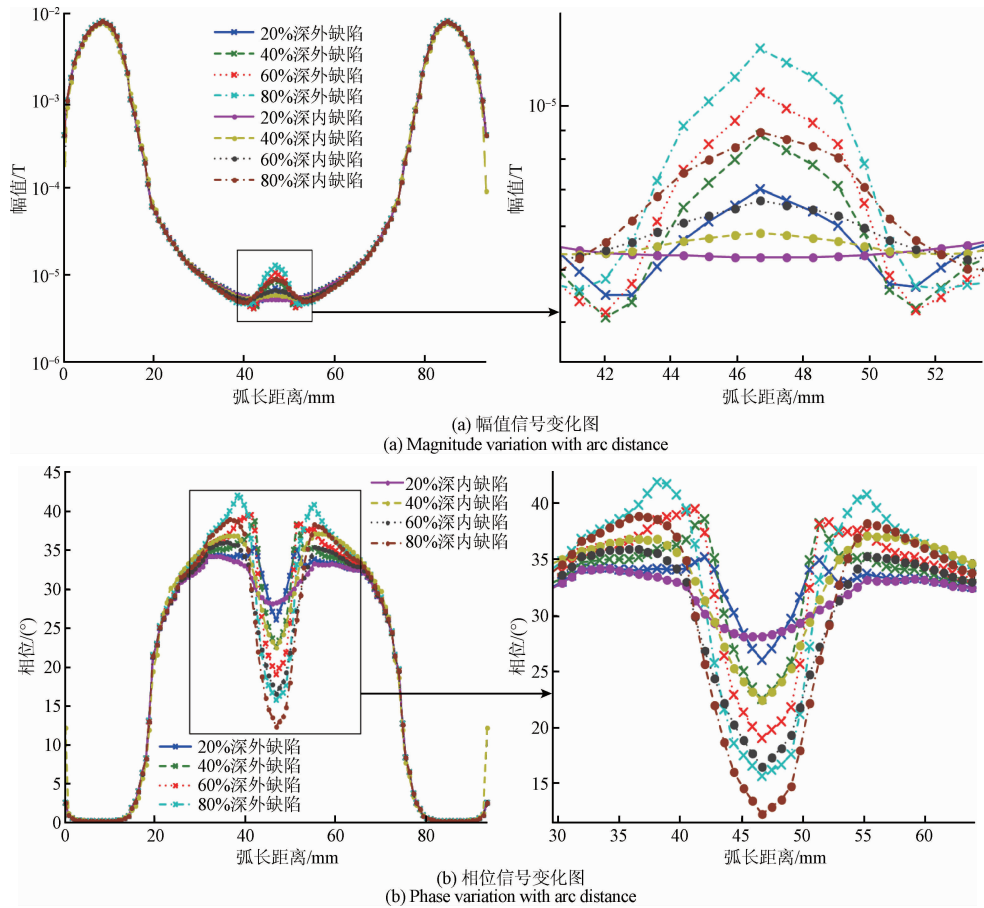


图 6 检测信号与内外缺陷深度的关系

Fig.6 Relations of detection signals with the ID and OD defect depth

为进一步明确信号特征量与缺陷深度及位置的量化关系,提取接收线圈位于缺陷正上方时的信号幅值和相

位,按缺陷深度由小到大的顺序,结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出,外缺陷信号的幅值和相位与缺陷深度之

间都近似为线性关系;内缺陷信号的相位与缺陷深度也近似为线性关系,但幅值与缺陷深度呈明显的非线性关系;外缺陷信号的相位关于缺陷深度的直线斜率比内缺陷信号相位关于缺陷深度的直线斜率要小,其原因可能为探头屏蔽罩对直接磁场的抑制作用有限,仍有微弱的直接磁场与外壁缺陷交互作用,导致间接磁场与外壁缺陷的交互作用相对减弱。

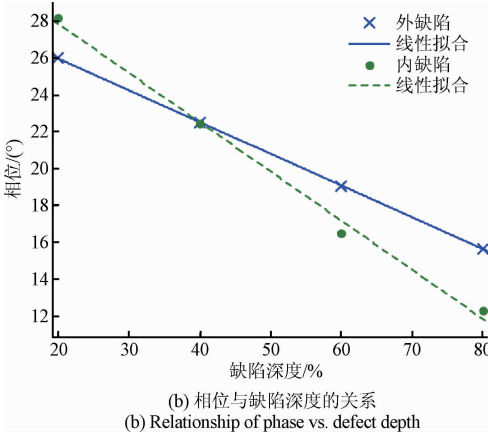
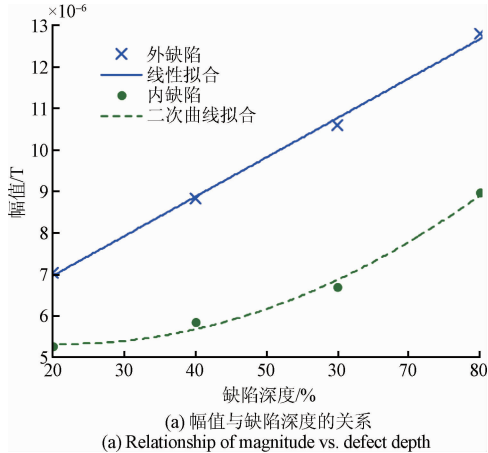


图7 仿真信号特征量与缺陷深度的关系
Fig.7 Relationship of simulation signal features and defect depth

因此,当管壁仅有外缺陷或内缺陷时,以相位为特征量即可对缺陷深度进行定量,但是,当管壁同时存在内、外缺陷时,由于检测灵敏度的不同,仅利用相位难以对缺陷深度进行准确的定量。

4 检测试验

试验平台主要由信号发生器、功率放大器、远场涡流探头、前置放大板、数据采集模块和被测弯头试件6个部分组成。信号发生器(ATF20B)产生正弦电压信号,经过功率放大器(BLZ Tech. PA100)后输入激励线圈完成激

励电流的加载;接收线圈感应的电压信号经前置放大板(新超仁达 P-710B)滤波放大后,输入到数据采集模块(NI PXIe-4497、PXIe-8840、PXIe-1082)进行数据采集,并利用LabVIEW软件进行虚拟锁相放大,实现接收信号幅值和相位的提取。

探头激励单元的参数与仿真模型的参数相同,接收线圈外径15 mm,内径3 mm,高度1 mm,匝数2 200。被测弯头是通过往直管中注沙后热弯加工而成,加工后壁厚实测为5.2 mm,其余参数与仿真模型一致。一个弯头外表面加工有4个直径为7.2 mm,深度分别为1 mm、2 mm、3 mm和4 mm的盲孔;另一个弯头用线切割加工的方法沿轴线分成拱背和拱腹两半,在拱背内壁加工有4个直径为5 mm,深度分别为1 mm、2 mm、3 mm和4 mm的盲孔,试验中用扎带将拱背和拱腹沿切口绑在一起,以使弯头结构完整。整个试验平台和试件如图8所示。



(a) 试验平台实物
(a) Photograph of experiment set-up

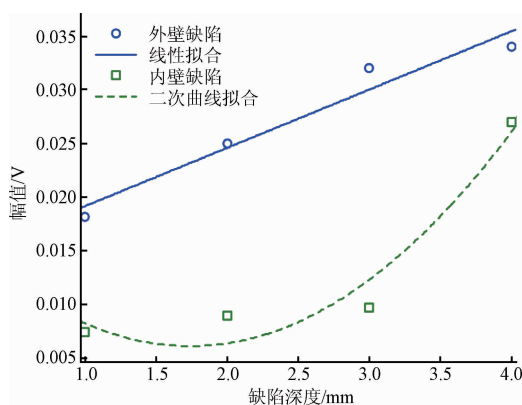


(b) 被测试件
(b) Test specimen

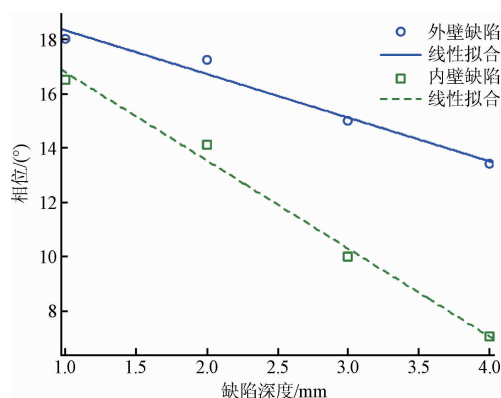
图8 试验平台和试件
Fig.8 Experiment set-up and specimen

使用探头分别在每一缺陷所对应的拱背外表面进行检测,探头设计提离高度为1 mm,利用虚拟锁相放大器获得接收线圈电压信号的幅值和相位,结果如图9所示。从图9(b)可见试验信号的相位变化规律与图7(b)基本一致,从而验证了仿真模型的正确性,证明了所设计探头的有效性和实用性。而图9(a)中试验信号幅值的变化与仿真结果相比存在较大的差异,造成这一差异的主要

原因可能为仿真模型中缺陷位置始终位于弯头中央,而试验试件的缺陷位于弯头不同部位,一方面探头在移动过程中难以保证相同的提离,另一方面不同曲面所带来的附加提离不一样,而提离的变化主要影响信号的幅值^[16]。



(a) 幅值与缺陷深度的关系
(a) Relationship of magnitude vs. defect depth



(b) 相位与缺陷深度的关系
(b) Relationship of phase vs. defect depth

图9 试验信号特征量与缺陷深度的关系

Fig.9 Relationship of test signal features and defect depth

5 结 论

针对管道弯头部位的特殊结构,本文设计了一种在管外放置的远场涡流检测探头。该探头采用沿管道周向布置的结构,激发的磁场能量可在管壁周向形成二次穿透,实现远场涡流效应。研究表明利用探头电压信号的相位变化特征,可实现对弯头内壁或外壁缺陷深度的定量,但由于探头对内、外壁缺陷检测灵敏度不同,尚不能对内、外壁缺陷都存在时的缺陷深度进行定量。另外,虽然文中的仿真和试验都针对管道弯头,但根据探头的结构特点可知该探头也适用于直管段。

所提出的外置式探头与常规内通过式探头相比,检测原理一致,都以两次穿透管壁的电磁场传播为基础。

在结构上,前者置于管外,激励线圈和接收线圈沿周向分布,激励线圈必须加屏蔽罩,探头结构紧凑;而后者在管内沿轴向一前一后放置,可不设屏蔽装置,探头尺寸较长。在检测结果解释上,两者都以信号相位与缺陷深度的线性关系作为缺陷定量依据,但前者对内、外壁缺陷的检测灵敏度不同,而后者对内、外壁缺陷具有相同的灵敏度。在适用性上,前者可在役检测,后者通常需要设备停机,且在弯头处检测信号易受干扰。因此,研究结果可为压力管道在役检测提供可借鉴的新思路和方法。进一步的研究工作将在优化试验系统软硬件的前提下,对检测信号进行时域波形分析,探索内、外壁缺陷都存在时的分类和定量方法。

参考文献

- [1] SCHMIDT T R. The remote field eddy current inspection technique[J]. Materials Evaluation, 1984, 42(2): 225-230.
- [2] ATHERTON D L. Remote field eddy current inspection[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(6): 4142-4147.
- [3] 罗清旺, 师奕兵, 王志刚, 等. 一种基于远场涡流的管道大面积缺陷定位检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(12): 2790-2797.
LUO Q W, SHI Y B, WANG ZH G, et al. Location and inspection method for large area pipe defect based on RFEC testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(12): 2790-2797.
- [4] 张芸, 张伟, 师奕兵, 等. 基于远场涡流的管道局部缺陷定量评估方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(3): 623-631.
ZHANG Y, ZHANG W, SHI Y B, et al. Research on local defects quantification of pipes based on RFEC testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(3): 623-631.
- [5] ATHERTON D L, CZURA W, SCHMIDT T R. Finite-element calculations for shields in remote-field eddy current tools[J]. Materials Evaluation, 1989, 47(9): 1084-1088.
- [6] SUN Y S, QU M X, SI J T, et al. Improvement in remote field eddy current probe structure[J]. Materials Evaluation, 1992, 50(5): 600-604.
- [7] XU X, LUO F. Optimal sensor design and digital signal processing techniques for remote field eddy current testing[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2006, 48(7): 421-425.
- [8] SADEK H M. NDE technologies for the examination of heat exchangers and boiler tubes-principles, advantages and limitations[J]. Insight-Non-Destructive Testing and

- Condition Monitoring, 2006, 48(3): 181-183.
- [9] TEITSMA A, TAKACH S, MAUPIN J, et al. Small diameter remote field eddy current inspection for unpiggable pipelines [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2005, 127(3): 269-273.
- [10] 杨理践, 王健, 高松巍. 管道腐蚀超声波在线检测技术[J]. 中国测试, 2014, 40(1): 88-92.
YANG L J, WANG J, GAO S W. On-line ultrasonic detecting technology for pipe-line corrosion [J]. China Measurement & Test, 2014, 40(1): 88-92.
- [11] JAYASINGHE V. Application of flexible PAUT Probes for small diameter flow assisted corrosion elbow inspection[C]. ASNT Annual Conference, 2015: 82-86.
- [12] DEMMA A, CAWLEY P, LOWE M J S. Mode conversion of longitudinal and torsional guided modes due to pipe bends [C]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2001, 557(1): 172-179.
- [13] THIRUNAVUKKARASU S, RAO B P C, JAYAKUMAR T, et al. Techniques for processing remote field eddy current signals from bend regions of steam generator tubes of prototype fast breeder reactor [J]. Annals of Nuclear Energy, 2011, 38(4): 817-824.
- [14] SUN Y S, UDPA S, LORD W, et al. Inspection of metallic plates using a novel remote field eddy current NDT probe [C]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Newyork: Springer, 1996: 1137-1144.
- [15] 周海婷, 厚康, 潘红良, 等. 基于有限元仿真电涡流传感器的结构优化 [J]. 电子测量技术, 2016, 39(7): 15-19.
ZHOU H T, HOU K, PAN H L, et al. Structure optimization of eddy current sensor based on the finite element simulation [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(7): 15-19.
- [16] 赵友全, 刘潇, 陈玉榜, 等. 微型涡流电导率测量传感器的优化设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4): 598-603.
ZHAO Y Q, LIU X, CHEN Y B, et al. Optimizing design for miniature eddy current conductivity measurement sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(4): 598-603.

作者简介



徐志远(通讯作者), 分别在2007年和2012年于华中科技大学获得学士学位和博士学位, 现为湘潭大学机械工程学院副教授, 主要研究方向为电磁无损检测、工程测试与信号处理等。

E-mail: xuzhiyuan@xtu.edu.cn

Xu Zhiyuan (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees from Huazhong University of Science and Technology (HUST) in 2007 and 2012, respectively. Now he is an associate professor in School of Mechanical Engineering, Xiangtan University. His main research interests include electromagnetic nondestructive testing, engineering test and signal processing.



林章鹏, 2014年于湘潭大学获得学士学位, 现为湘潭大学硕士研究生, 主要研究方向为远场涡流无损检测技术。

E-mail: 18711349090@163.com

Lin Zhangpeng received his B. Sc. degree in 2014 from Xiangtan University. Now he is a master candidate in Xiangtan University. His main research interest is remote field eddy current nondestructive testing.