

不锈钢管道均匀电磁场内检测探头设计和试验研究

李伟¹, 赵建明¹, 葛玖浩², 袁新安¹, 刘健¹, 殷晓康¹, 陈国明¹

(1. 中国石油大学(华东)海洋油气装备与安全技术研究中心, 山东青岛 266580;

2. 南京航空航天大学高速载运设施的无损检测监控技术工信部重点实验室, 江苏南京 210016)

摘要:针对传统的均匀电磁场检测探头不适用于管道内检测的不足,设计一种赫姆霍兹线圈式不锈钢管道内检测探头并搭建试验系统。通过有限元软件 COMSOL 建立轴向裂纹的不锈钢管道均匀电磁场内检测有限元模型,探究不锈钢管道内电磁场的分布和变化规律,提取特征信号 B_z 和 B_r ,分析裂纹的长度和深度对特征信号的影响。根据仿真结果和管道内检测的特点,设计赫姆霍兹线圈式管道内检测探头,搭建不锈钢管道内检测试验系统,并进行试验测试。结果表明:管道内表面的裂纹会引起均匀电磁场的扰动;特征信号 B_z 的畸变量包含裂纹的深度信息, B_r 的波峰波谷间距包含裂纹的长度信息;检测系统可以实现不锈钢管道内表面轴向裂纹的全周向扫查。

关键词:不锈钢管道内检测;均匀电磁场;赫姆霍兹线圈;轴向裂纹

中图分类号:TE 973 **文献标志码:**A

引用格式:李伟,赵建明,葛玖浩,等. 不锈钢管道均匀电磁场内检测探头设计和试验研究 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(6):123-129.

LI Wei, ZHAO Jianming, GE Jiuhao, et al. Design and experimental analysis of uniform electromagnetic probe for inner inspection of stainless steel pipe[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(6): 123-129.

Design and experimental analysis of uniform electromagnetic probe for inner inspection of stainless steel pipe

LI Wei¹, ZHAO Jianming¹, GE Jiuhao², YUAN Xin'an¹, LIU Jian¹, YIN Xiaokang¹, CHEN Guoming¹

(1. Center for Offshore Equipment and Safety Technology in China University of Petroleum (East China),
Qingdao 266580, China;

2. Nondestructive Detection and Monitoring Technology for High Speed Transportation Facilities Key Laboratory
of Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautic and Astronautic,
Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the deficiencies of traditional uniform electromagnetic detection probes which are not suitable for the stainless pipe inner detection, a Helmholtz coil-type inner detection probe for stainless steel pipes and its experimental system are proposed and built. Through the finite element software COMSOL, the finite element model of the uniform electromagnetic field in the axial crack on the stainless steel pipe inner detection was established. The distribution and variation law of the electromagnetic field in the pipe were explored, the characteristic signals B_z and B_r were selected, and the influence of the length and depth of the crack on the characteristic signal was analyzed. Based on the simulation results and the characteristics of the inner detection in the pipe, the Helmholtz coil-type pipe detection probe was designed, and then a stainless steel pipe inner detection experimental system was built and tested. The results show that the crack on the inner surface of the pipeline

收稿日期:2019-02-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0804503);国家自然科学基金项目(51574276);山东省重点研发计划项目(2018GHY115026);
博士后创新人才支持计划项目(BX20190386);中国石油大学(华东)研究生创新工程项目(YCX2019063)

作者简介:李伟(1980-),男,教授,博士,研究方向为海洋油气设备安全检测技术。E-mail:liwei@upc.edu.cn。

通信作者:赵建明(1994-),男,博士研究生,研究方向为电磁无损检测、油气管道安全检测。E-mail: jianmingzhao123@163.com。

will cause the disturbance of the uniform electromagnetic field. The characteristic signal B_z contains the depth information of the distorted crack, and the peak-to-valley spacing of B_r contains the information of the crack length. Finally, the detection system can realize the full circumferential scan of the axial crack on the inner surface of the stainless steel pipe.

Keywords: inner inspection of stainless steel pipe; uniform electromagnetic field; Helmholtz coil; axial crack

在石油石化中,不锈钢管道广泛应用于管道输送系统,但由于管道中的腐蚀介质和交替的冷却和加热环境,在管道的内壁很容易产生疲劳裂纹^[1-3]。通常疲劳裂纹在纵向上聚集和生长^[4],最终导致管道的泄露和失效,所以需要定期对管道进行检测。目前,常规的检测技术主要包括磁粉、渗透、超声、漏磁和涡流等检测技术^[5]。磁粉和渗透检测技术是目前最可靠的无损检测技术,但磁粉和渗透检测需要和被测材料直接接触,对表面要求比较高,并且只能实现裂纹的检出,不能对裂纹量化,对管道内检测难以实现^[6];超声检测技术需要在检测工具和被测管道之间添加耦合剂^[7],如果没有彻底清洁,很难在管道的内壁涂抹耦合剂;漏磁检测技术只能检测铁磁性材料^[8];涡流检测检测技术容易受提高和抖动的影响。均匀场扰动无损检测方法,比如交流电磁场检测技术、交流电位降检测技术和周向电流场检测,对检测和评估导电材料具有良好的前景^[9-11]。目前针对均匀电磁场检测探头形式开展了一系列研究,李伟^[12]建立U型探头仿真模型并搭建了试验系统;袁新安等^[13]使用双U型探头对任意走向的裂纹进行检测;葛玖浩等^[14-15]使用外穿式探头实现了管道外壁裂纹的检测。然而U型探头不适用于管道曲面检测,外穿式探头由于集肤效应的存在,很难实现管道内壁的检测,为了实现对管道内壁的检测,还需要内检测探头,但目前对于均匀电磁场管道内检测探头的研究还处于空白。笔者提出一种赫姆霍兹线圈式不锈钢管道内检测探头并搭建试验系统。通过有限元软件COMSOL建立不锈钢管道内检测仿真模型,分析不锈钢管道内电磁场的分布和变化规律,提取特征信号,分析裂纹的尺寸对特征信号的影响,设计不锈钢管道内检测探头,搭建管道内检测试验系统,对管道内壁裂纹进行检测。

1 有限元仿真

均匀电磁场管道内检测探头采用赫姆霍兹线圈结构。赫姆霍兹线圈是一对平行共轴的不同载流线圈,当对线圈通以相同方向的电流,且两个线圈间距等于线圈半径时,线圈的总磁场在轴的中心附近,会呈均匀分布的状态^[15]。

1.1 管道内电场分布规律

根据赫姆霍兹线圈结构,利用有限元软件COMSOL,建立的管道内检测仿真模型如图1所示,其中管道的材料为不锈钢,相对磁导率为1,导电率为 $3.7 \times 10^7 \text{ S/m}$,赫姆霍兹线圈采用直径为0.8 mm的漆包线,匝数为200,激励信号采用电流为0.5 A,频率为2000 Hz的正弦交流信号。具体的模型尺寸参数如表1所示。

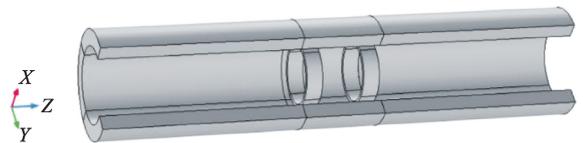


图1 仿真模型

Fig.1 Simulation model

表1 模型尺寸参数

Table 1 Sizes of model

组成	外径/mm	内径/mm	长度/mm
管道	65	45	200
激励线圈	40	36	10
空气	130		300

提取管道内表面电流密度如图2所示。由图2可知,感应电流的最大值在激励线圈附近,而在两个线圈中间位置会感应出均匀的电场,符合均匀电磁场检测要求。

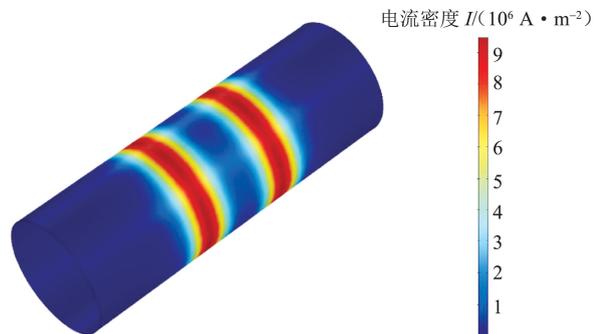


图2 表面电流密度

Fig.2 Surface current density

1.2 裂纹扰动规律

为了探究裂纹的扰动机制,仿真管道内表面存在裂纹时铝合金管道内电磁场的分布规律。设置管道内壁轴向裂纹的长度为20 mm,宽度为1 mm,深度为5 mm。

提取管道内壁轴向裂纹附近的电流密度如图 3 所示。由图 3 可知,均匀的电流场经过裂纹时,表面的电流会从裂纹的尖端绕过(图 3(a)),内部的电流会从裂纹的上方绕过(图 3(b)),符合均匀电磁场检测的原理。

采用参数化扫描方式模拟真实的探头检测,线圈的原点从 Z 坐标的 -60 mm 扫描到 60 mm,步长

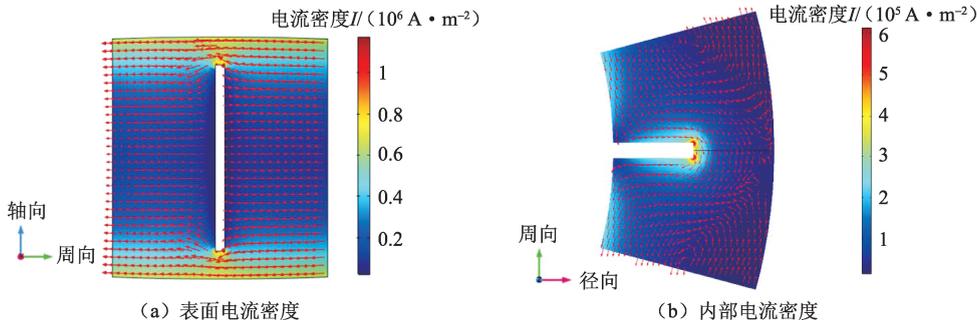


图 3 电流密度

Fig.3 Current density

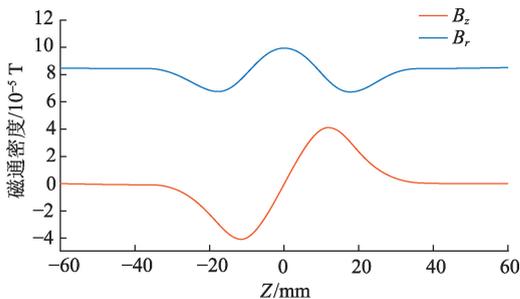
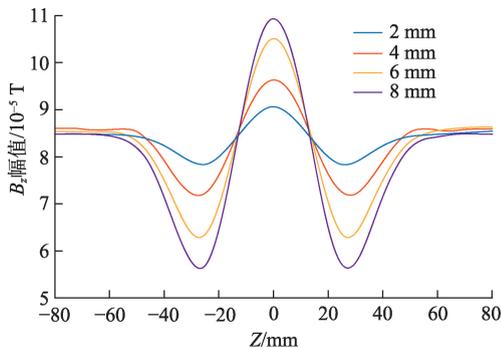


图 4 轴向裂纹上方轴向磁场信号 B_z 和径向磁场信号 B_r

Fig.4 Axial direction signal B_z and radial direction signal B_r above crack

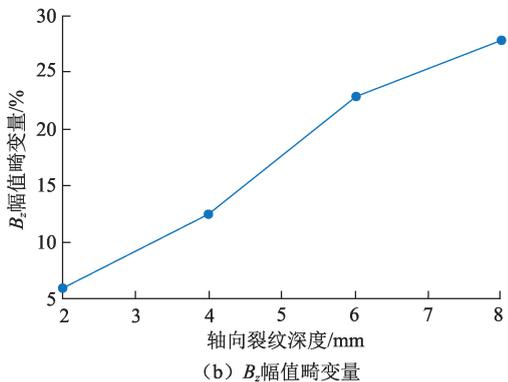


(a) B_z 信号

1.3 裂纹尺寸对特征信号影响

为探究提取的特征信号与裂纹尺寸关系,分别对不同深度和不同长度的裂纹进行有限元仿真分析。首先保持裂纹的长度(30 mm)、宽度(0.8 mm)不变,对不同深度的裂纹进行仿真分析,提取裂纹上方 7 mm 提离处的轴向磁场信号 B_z ,仿真的结果如图 5(a)所示。可以看出,相比较传统的均匀电磁场检测技术,裂纹越深,特征信号波谷越深不同,所提出的内穿式赫姆霍兹线圈所感应的电流从裂纹的上方绕过,特征信号 B_z 波峰的高度随着裂纹深度增加而增加。因此定义 $\Delta B_z/B_{z_0}$ 为裂纹引起轴向磁场信号 B_z 的畸变量,其中 B_{z_0} 为 B_z 的背景值, ΔB_z 为 B_z 波峰的最大值与背景值 B_{z_0} 的差值,得到的裂纹深度和 B_z 畸变量的关系见图 5(b)。可以看出,在裂纹深度一定范围内, B_z 磁场的畸变量和深度保持比较好的线性关系,说明 B_z 特征信号包含裂纹的深度信息。

为 1 mm,考虑探头结构和传感器的尺寸,提取裂纹正上方提离为 7 mm 处的轴向磁场信号 B_z 和径向磁场信号 B_r ,见图 4。从图 4 中可以看出,无裂纹时 B_z 信号为固定的值, B_r 信号为 0;当经过缺陷时, B_z 信号出现两个较小的波谷和一个较大的波峰, B_r 信号出现波峰波谷。因此把轴向磁场信号 B_z 和径向磁场信号 B_r 作为裂纹检测的特征信号。



(b) B_z 幅值畸变量

图 5 裂纹深度和 B_z 关系

Fig.5 Relationship between B_z and crack depth

保持裂纹的深度(4 mm)、宽度(0.8 mm)不变,对不同长度的裂纹进行仿真分析,提取裂纹上方 7 mm 提离处的径向磁场信号 B_r ,仿真结果如图 6 所示。在裂纹长度较小时,裂纹长度对 B_r 信号的波峰波谷间距和幅值均会产生影响,裂纹越长,波峰波谷间距和畸变幅值越大;当裂纹较长时,裂纹长度几乎

不对畸变的幅值产生影响,而波峰波谷的间距会随着裂纹长度的增加而增加,所以特征信号 B_z 包含裂纹的长度信息。

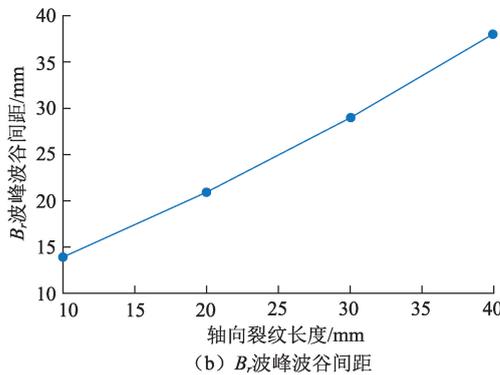
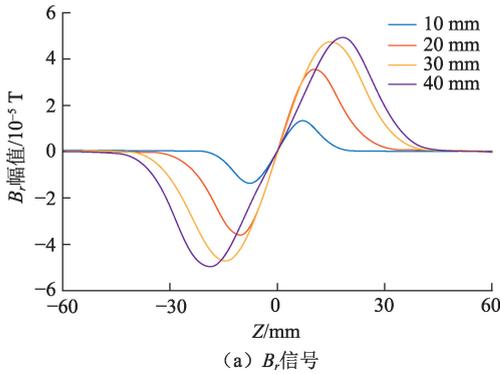


图6 裂纹长度和 B_z 关系

Fig. 6 Relationship between B_z and crack length

2 检测探头设计和试验分析

2.1 检测探头设计

检测探头结构如图7所示,主要包括激励线圈、非磁性骨架、线缆保护装置、连接装置和检测传感器。用直径0.8 mm的漆包线在非磁性骨架的两侧各缠绕200匝组成赫姆霍兹激励线圈,用于产生激励的磁场;线缆保护装置用来通过和保护激励线圈和检测传感器的输入和输出;连接装置与管道内的驱动装置连接在一起,可以完成管道的自动扫查。

在激励线圈中间位置的周向均布10个检测传感器,可以一次性实现管道内壁裂纹的全面检测。所安装的电路板如图8所示。选择的传感器为体积小、线性范围大、灵敏度高的TMR传感器,传感器安装在电路板中央靠近边缘的地方,检测轴向特征信号 B_z 的TMR在电路板的A面,如图8(a)所示;检测径向特性信号 B_r 的TMR在电路板的B面,如图8(b)所示。电路板上安装用于放大信号的AD620,对 B_z 和 B_r 信号各放大100倍,借助共地电容,达到滤波、降噪和抗干扰的能力^[16-17]。

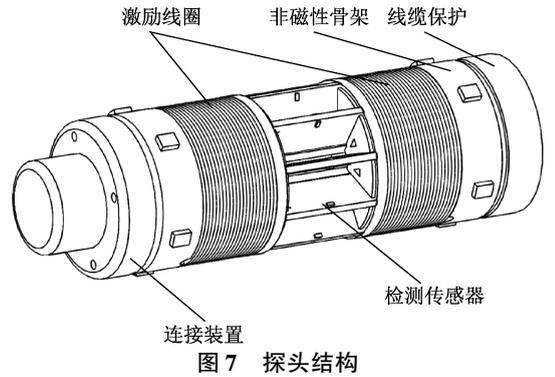
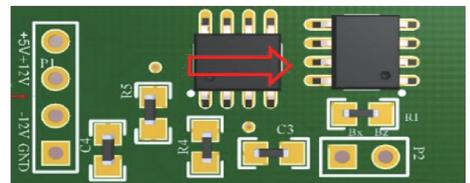
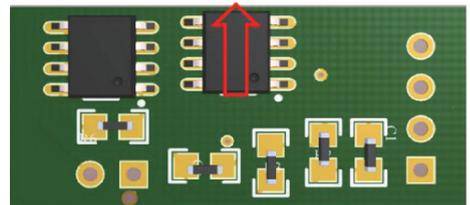


图7 探头结构

Fig. 7 Structure of testing probe



(a) 检测电路板A面



(b) 检测电路板B面

图8 传感器电路板

Fig. 8 TMR PCB

2.2 检测系统

整个检测系统如图9、10所示,包括台架、待测管道、检测探头、硬件集成机箱、PC机。硬件集成机箱中的信号发生器产生2000 Hz的正弦交流信号,经过功率放大器,加载在检测探头的激励线圈上,激励线圈在管道内感应出均匀的电场和磁场,台架驱动检测探头在管道中以10 mm/s的速度匀速运行。当管道中存在缺陷时,会引起管道内电场和磁场的畸变,检测探头中间位置的周向均布10个检测传感器拾取磁场信号,通过硬件集成机箱中的采集卡采集到PC机中,PC机上基于MATLAB和LABVIEW共同开发的软件识别程序对信号进行处理,最终识别出缺陷。



图9 试验测试系统

Fig. 9 Test system

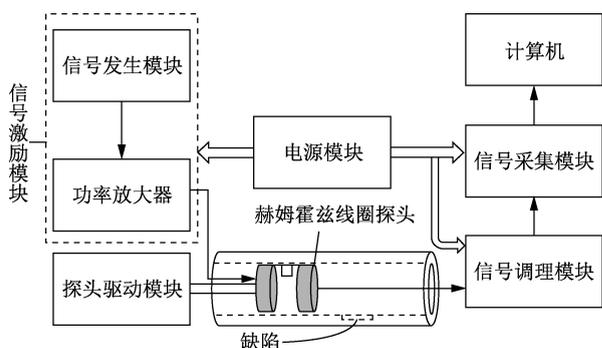


图 10 试验测试系统

Fig. 10 Experiment system structure

2.3 检测结果

对管道内壁不同深度、相同长度的裂纹进行检测,管道尺寸如图 11 所示。得到减去背景场以后的

B_z 和 B_r 信号如图 12 所示。由图 12 可知,当存在裂纹时,特征信号 B_r 会出现波峰,特征信号 B_z 会出现波峰和波谷。对于相同长度、不同深度的裂纹,裂纹越深, B_z 信号的畸变量越大。观察每一路特征信号,3 号传感器的畸变量最大,可以初步判定缺陷存在于 3 号传感器附近。提取 3 号传感器的 B_z 信号,得到仿真和试验的 B_z 信号畸变量和裂纹深度的关系如图 13 所示。由图 13 可知,裂纹深度和 B_z 信号的畸变量具有良好的线性关系,和仿真结果一致,仿真结果相对于试验结果的最大相对误差为 9.83%。对裂纹的深度和 B_z 信号的畸变量进行线性拟合,得到裂纹深度测量结果如表 2 所示。由表 2 可知,深度测量最大误差为 3.83%,具有较高的裂纹深度测量精度。

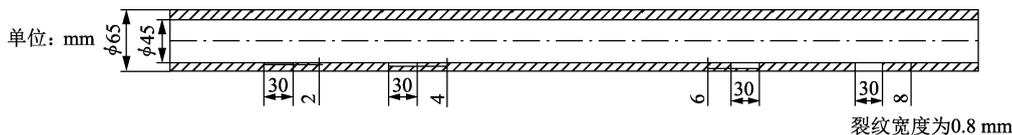
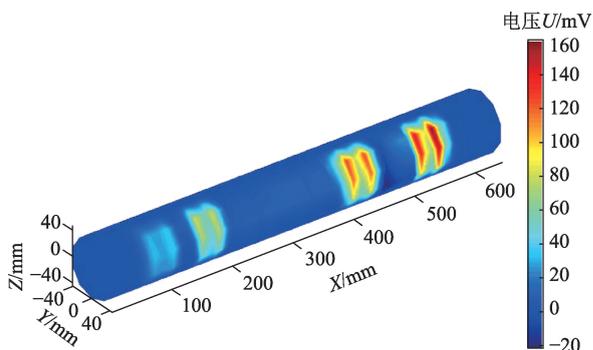
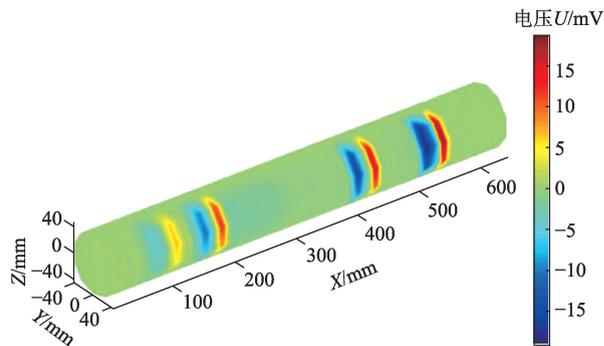


图 11 不同深度裂纹管道

Fig. 11 Pipes with different depth cracks



(a) B_z 信号



(b) B_r 信号

图 12 不同深度裂纹检测结果

Fig. 12 Crack detection results at different depths

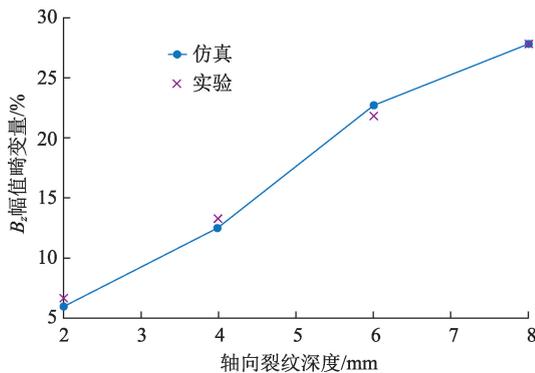


图 13 不同深度裂纹 B_z 畸变量

Fig. 13 B_z amplitude distortion of cracks with different depths

表 2 裂纹深度测量结果

Table 2 Results of crack depth measurement

真实深度/mm	测量深度/mm	误差/%
2	2.02	1.00
4	3.87	3.25
6	6.23	3.83
8	7.87	1.63

对于管道内壁不同长度、相同深度的裂纹进行检测,管道的尺寸如图 14 所示。得到 B_z 和 B_r 信号如图 15 所示,对于不同长度、相同深度的裂纹,裂纹越长, B_r 信号的波峰波谷间距越大。观察每一路信号,3 号传感器的畸变量最大,可以初步断定,裂纹

存在于3号传感器附近。提取3号传感器的 B_z 信号,得到仿真和试验的 B_z 信号的波峰波谷间距和裂纹长度的关系如图16所示。由图16可知,裂纹长度和 B_z 信号波峰波谷的间距具有良好的线性关系,和仿真结果一致,仿真结果相对于试验结果的最大

相对误差为12.0%。对裂纹的长度和 B_z 信号波峰波谷的间距进行线性拟合,得到裂纹长度测量结果如表3所示。由表3可知,长度测量最大误差为8.70%,具有较高的裂纹长度测量精度。

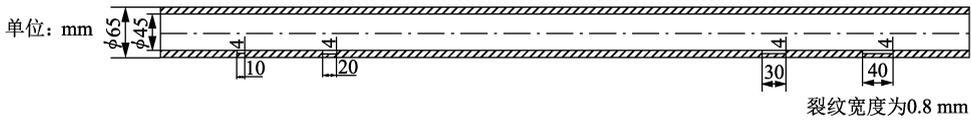


图14 不同长度裂纹管道

Fig. 14 Pipes of different length cracks

表3 裂纹长度测量

Table 3 Crack length measurement

真实长度/mm	测量长度/mm	误差/%
10	10.87	8.70
20	18.93	4.65
30	29.70	1.00
40	40.46	1.15

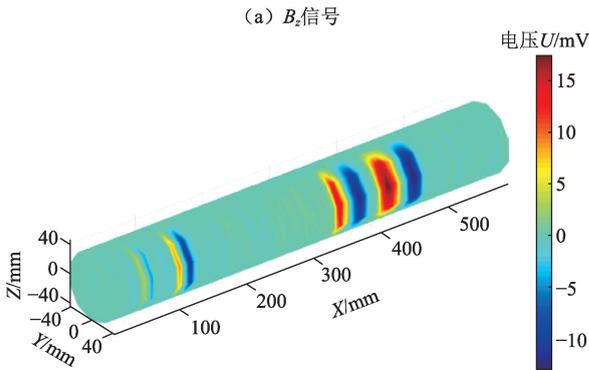
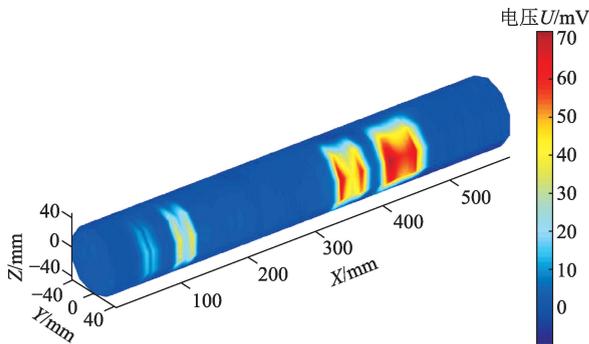


图15 不同长度裂纹检测结果

Fig. 15 Crack detection results at different lengths

3 结论

(1)赫姆霍兹线圈式不锈钢管道内检测探头可实现不锈钢管道中轴向裂纹的全周向检测;当存在裂纹时轴向磁场信号 B_z 出现波峰,径向磁场信号 B_r 出现波峰和波谷。

(2) B_z 信号的畸变量包含裂纹的深度信息, B_r 信号的波峰波谷间距包含裂纹的长度信息。裂纹长度较小时,裂纹的长度对 B_r 信号的幅值和波峰波谷均会产生影响;裂纹长度较大时,裂纹长度对 B_r 信号的幅值影响减小,主要影响 B_r 信号波峰波谷的间距。

参考文献:

[1] ZARRINZADEH H, KABIR M Z, DEYLAMI A. Experimental and numerical fatigue crack growth of an aluminium pipe repaired by composite patch [J]. Engineering Structures, 2017, 133: 24-32.

[2] TAHERISHARGH M, VESENJAK M, BELOVA I V, et al. In situ manufacturing and mechanical properties of syntactic foam filled tubes [J]. Materials & Design, 2016, 99: 356-368.

[3] MALEKAN M, BARROS F B, SHEIBANI E. Thermo-mechanical analysis of a cylindrical tube under internal shock loading using numerical solution [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2016, 38(8): 2635-2649.

[4] MALEKAN M, CIMINI JR C A. Finite element analysis of a repaired thin-walled aluminum tube containing a lon-

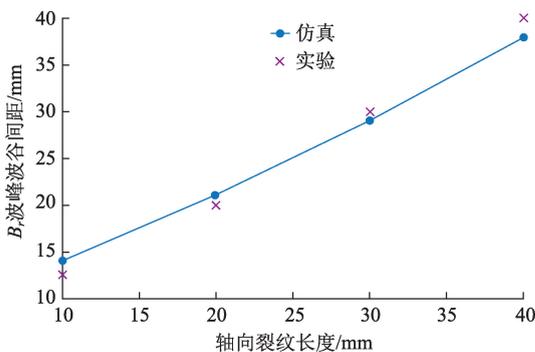


图16 不同长度裂纹 B_z 波峰波谷间距

Fig. 16 B_z peak-to-valley spacing of cracks of different lengths

- gitudinal crack with composite patches under internal dynamic loading [J]. *Composite Structures*, 2018, 184: 980-1004.
- [5] CHENG Y F. Stress corrosion cracking of piperines[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013:224-227.
- [6] 陈长龙. 无损检测技术在压力管道的应用[J]. *化工设计通讯*, 2018, 44(7): 80-81.
CHEN Changlong. Application of nondestructive testing technology in pressure pipeline[J]. *Technology and Equipment*, 2018, 44(7): 80-81.
- [7] 文毅, 冯强, 李燕. 超声检测在管道焊缝腐蚀中的应用[J]. *无损检测*, 2014, 36(2): 50-52.
WEN Yi, FENG Qiang, LI Yan. The application of ultrasonic testing in pipeline welds corrosion[J]. *Nondestructive Testing*, 2014, 36(2): 50-52.
- [8] 杨理践, 耿浩, 高松巍. 基于多级磁化的高速漏磁检测技术研究[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(6): 148-156.
YANG Lijian, GENG Hao, GAO Songwei. Study on high-speed magnetic flux leakage testing technology based on multistage magnetization[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(6): 148-156.
- [9] 胡祥超, 罗飞路, 何赟泽, 等. 脉冲交变磁场检测技术缺陷识别与定量评估[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(4): 17-22.
HU Xiangchao, LUO Feilu, HE Yunze, et al. Pulsed alternating current field measurement technique for defect identification and quantification [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(4): 17-22.
- [10] LEWIS A M, MICHAEL D H, LUGG M C, et al. Thin-skin electromagnetic fields around surface-breaking cracks in metals[J]. *Journal of Applied Physics*, 1988, 64(8): 3777-3784.
- [11] MUNOZ J M C, MARQUEZ F P G, PAPAELIAS M. Railroad inspection based on ACFM employing a non-uniform B-spline approach[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 40(2): 605-617.
- [12] 李伟. 基于交流电磁场的缺陷智能可视化检测技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2007.
LI Wei. Research on ACFM based defect intelligent recognition and visualization technique[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2007.
- [13] LI W, YUAN X A, CHEN G M, et al. High sensitivity rotating alternating current field measurement for arbitrary-angle underwater cracks [J]. *NDT & E International*, 2016, 79(2): 123-131.
- [14] LI W, GE J, WU Y, et al. An electromagnetic Helmholtz-coil probe for arbitrary orientation crack detection on the surface of pipeline[J]. *Materials Transactions*, 2017, 58(4): 641-645.
- [15] GE J, LI W, CHEN G M, et al. Multiple type defect detection in pipe by Helmholtz electromagnetic array probe[J]. *NDT & E International*, 2017, 91: 97-107.
- [16] 李伟, 袁新安, 陈国明, 等. 基于 ACFM 的隔水管表面裂纹链式阵列检测探头设计与试验研究[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(8): 8-15.
LI Wei, YUAN Xin'an, CHEN Guoming, et al. Research on the detection of surface cracks on drilling riser using the chain alternating current field measurement probe array [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(8): 8-15.
- [17] 高扬华, 张光新, 黄平捷, 等. 基于 GMR 传感器的电涡流检测系统关键技术研究[J]. *传感器与微系统*, 2009, 28(11): 31-33.
GAO Yanghua, ZHANG Guangxin, HUANG Pingjie, et al. Research on key technology of eddy current testing system based on GMR transducer [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2009, 28(11): 31-33.

(编辑 沈玉英)