

电磁涡流内检测系统在双金属复合管中应用研究

成海军,夏明坤,吴 骏,王 超,游 斌,朱 林,谢裕喜

四川德源管道科技股份有限公司

摘要:文中分析了电磁涡流检测原理,并在理论上开展了有限元仿真试验,建立了管道涡流内检测系统。文中通过电磁涡流检测系统在人工预制内壁缺陷的双金属复合管道上进行 4 次牵拉试验,研究涡流检测技术在双金属复合管道内检测的适用性。试验结果表明:基于电磁涡流检测原理的管道内检测系统,能准确识别管道的特征,在缺陷的识别上,具备较高的识别概率 (POI),缺陷时钟方向高度一致,在缺陷的量化上存在一定偏差。

关键词:涡流检测;双金属复合管;有限元仿真;牵拉试验

中图分类号:TP23

Research on Application of Electromagnetic Eddy Current Internal Inspection System in Bimetallic Composite Pipes

CHENG Haijun, XIA Mingkun, WU Jun, WANG Chao, YOU Bin, ZHU Lin, XIE Yuxi

Sichuan Deyuan Pipeline Technology Co., Ltd.

Abstract: The principle of electromagnetic eddy current inspection was analyzed in this paper, and on this theoretical basis, finite element simulation tests were carried out, and a pipeline eddy current internal inspection system was established. In the text, four pull tests were conducted on the bimetallic composite pipe with artificially prefabricated inner wall defects through the electromagnetic eddy current inspection system. The applicability of eddy current testing technology in the internal inspection of bimetallic composite pipes was studied. The test results show that the pipe internal inspection system based on the electromagnetic eddy current principle can not only accurately identify the characteristics of the pipeline, but also has a high recognition probability (POI) in defect identification. The defect clock direction is highly consistent. In terms of defect quantification, there is a certain deviation.

Keywords: eddy current inspection; bimetallic composite pipes; finite element simulation; drawing test

0 引言

管道内壁会由于运输物质的特殊性产生不同程度的腐蚀缺陷,这些缺陷会对管道性能产生影响。为了尽可能阻止内部腐蚀,目前已经大量应用双金属复合管,在管道内部增加耐蚀性合金材料内衬,尽管如此,衬管的耐蚀合金也会出现腐蚀失效问题,例如机械型复合管较为常见的失效包括焊接失效和衬层塌陷失效^[1]。聂海亮等^[2]总结了目前双金属复合管的制造工艺,统计了常见的失效形式并且给出了可能导致管道失效的原因,为管道失效分析及检测提供了可行性依据^[2]。

目前,双金属复合管的检测已存在一定的成功应用案例。宋晓俊等^[3]研究了复合管道磁应力检测,在缺陷处会有应力集中,自然磁场在管道应力集中处会发生畸变,利用畸变的磁场来进行缺陷判定,已经在现场取得了一定成果;刘琰等^[4]应用漏磁检测技术检测双金属复合管,可识别法兰、环焊缝等管道特征,检出刺漏、内衬塌陷及位于碳钢管道上的人工缺陷,但无法检测出位于不锈钢内衬上的人工缺陷;孙虎等^[5]提出了一种基于电压型脉冲激励的铁磁性套管涡流检测方法,在充分考虑脉冲激励的上升和下降时间基础上,给出了铁磁性套管

脉冲涡流检测的解析解;张超等^[6]针对不锈钢-碳钢双层套管内、外管腐蚀缺陷,利用脉冲涡流近-远场进行检测,实验验证了不锈钢-碳钢双层套管外壁减薄损伤识别及量化评估方法的有效性;Fu等^[7]研究了脉冲涡流检测套管,实验表明可以检测出大面积管壁减薄及套管长裂纹。

1 电磁涡流检测原理

电磁涡流检测原理如图1所示,当在一个线圈中通以交变电流,在其附近会产生交变磁场,该磁场会随着线圈中交变电流的大小及频率改变而发生改变,称为初级磁场。当线圈靠近导电材料时,根据楞次定律,会在材料中感生出抵抗磁场发生变化的涡流,涡流与线圈中电流方向相反,涡流产生与初级磁场相反的磁场,称为次级磁场。涡流受导电材料的物理属性影响,主要是电导率及磁导率,当材料出现缺陷时会扰动涡流而影响次级磁场,进而影响接收线圈的电流及电压,通过监测接收线圈的电流与电压变化能检测到缺陷。

2 电磁涡流检测仿真试验

为验证电磁涡流检测的实用性,设计仿真试

验,针对涡流检测对导电材质均能有效进行检测,发现材质的非连续性变化等缺陷的特性。基于该检测原理,应用 Comsol Multiphysics 仿真软件,以有限元法为基础,通过求解偏微分方程或偏微分方程组来实现真实物理现象的仿真,采用网格划分的形式,将 CAD 模型分割为许多很小的单元,在每个单元上求解方程组,网格划分越细,单元越小,求解的结果越接近真实解。涡流检测探头采用平面矩形线圈,缺陷仿真在非铁磁性导电试件上进行。试件材料相对磁导率、相对介电常数均为1,电导率为 $1.37 \times 10^6 \text{ S/m}$,试件表面有一个长宽高为 $10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的表面开口缺陷,探头提高高度为 3 mm 。仿真过程采用探头从试件左侧划过缺陷,仿真试验环境图如图2所示,激励与接收线圈采用单匝模拟,激励为 1 A 电流,频率为 1 MHz 。仿真试验显示,在涡流探头划过缺陷时,接收线圈能够接收到显著的电压信号变化,接收线圈输出电压仿真结果如图3所示。

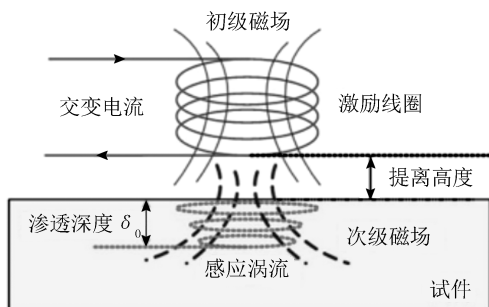


图1 电磁涡流检测原理图

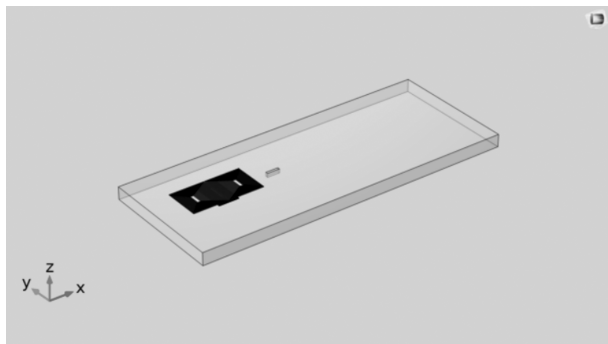


图2 仿真试验环境图

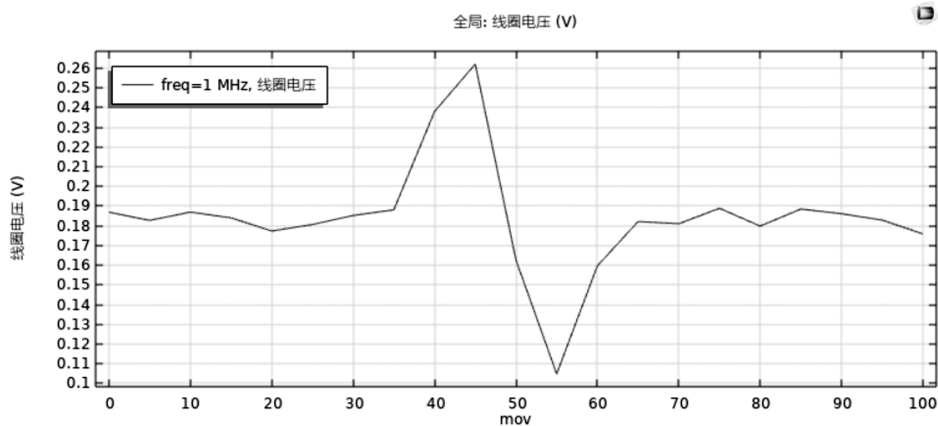


图3 接收线圈输出电压仿真结果

3 电磁涡流内检测系统建立

在电磁涡流仿真试验的基础上,建立电磁涡流内检测系统,系统由皮碗、涡流探头、电子硬件、里程轮、电池组成。其中皮碗主要用于整个系统的支撑,必要时可提供密封的动力来源;涡流探头为整个系统的检测单元,负责收集检测本体的数据信号;电子硬件是系统的主要功能单元,负责处理探头传输的数据信息,并进行转换;里程轮主要记录运行过程中的里程信息;电池为整个系统提供电源支持,主要为电磁涡流内检测系统提供直流电源,通过逆变转换为涡流探头提供必要的激发交流信号源。电磁涡流内检测试验系统结构简图如图4所示。

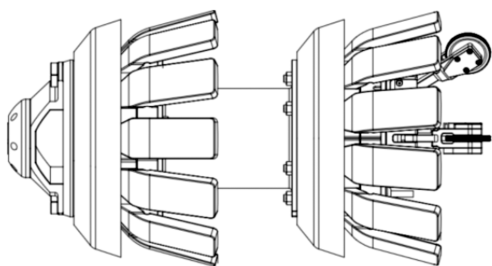


图4 电磁涡流内检测系统结构简图

4 电磁涡流内检测系统在双金属管道的牵拉试验

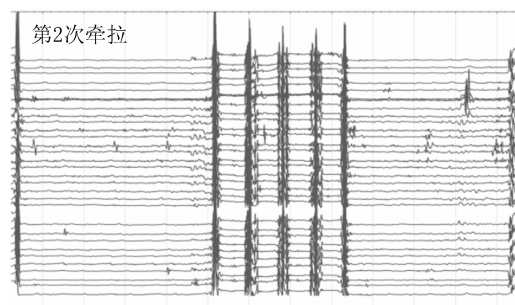
牵拉试验管道为双金属复合管道,管道规格DN300×(6+3)mm,即管道外层为6 mm碳钢管,内衬3 mm的316L不锈钢管,双金属管道长度4 m,双金属两端分别用法兰连接3 m碳钢管作为发射台和接收台,双金属复合管道内部预先设置标准缺陷。通过卷扬机匀速拖拉置于双金属管道内的电磁涡流内检测试验系统进行试验,电磁涡流内检测试验系统在运行过程中识别双金属复合管道内部缺陷及特征,并通过里程轮记录特征或缺陷的里程数据,牵拉试验环境如图5所示。

现场共进行4次牵拉,均获取了完整检测数据,牵拉结果显示,4次检测的大小缺陷信号,均清晰可见,且一一对应,具备较高的识别概率(POI),且双金属复合管道特征也完整识别,图6(a)、图6(b)分别展示了双金属复合管第2次、第4次牵拉信号,图7展示了双金属管段缺陷信号图。

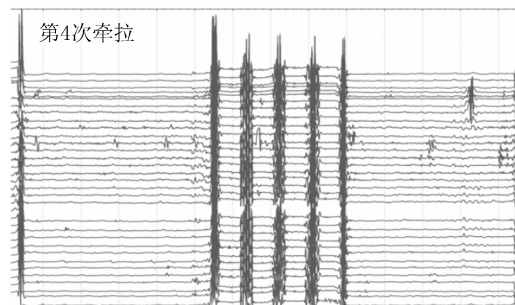
对比内检测与预制缺陷的尺寸数据,缺陷数据对比结果如表1所示(展示较为严重的3个缺陷数



图5 牵拉试验环境图



(a) 第2次牵拉信号



(b) 第4次牵拉信号

图6 双金属复合管牵拉信号图

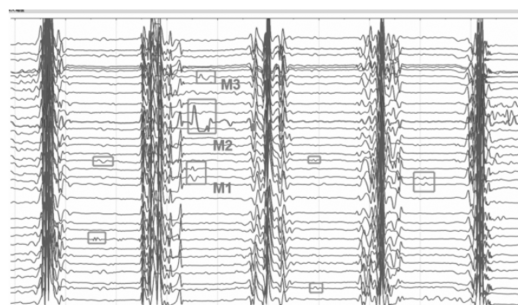


图7 双金属管段缺陷信号图

据,图7中的M1、M2、M3)。结果显示检测数据与实测数据长度、宽度存在一定偏差,最大可达

6 mm,但周向角度偏差较小,量化尺寸精度需进一步提高。

表 1 缺陷数据对比表

缺陷 编号	数据来源	长度/mm	宽度/mm	周向角度 /(°)
M1	内检测	35.0	36.0	112
	实测	40.0	30.0	120
M2	内检测	23.4	15.0	192
	实测	20.0	10.0	200
M3	内检测	35.0	15.0	290
	实测	40.0	13.0	300

5 结论

综上所述,基于涡流内检测原理的管道内检测系统,可有效用于双金属复合管内衬管道的检测,并且通过实地的牵拉试验,发现基于涡流原理的管道内检测系统,不仅能准确识别管道的特征,且在缺陷的识别上,具备较高的识别概率(POI),且缺陷时钟方向高度一致,在缺陷的量化上存在一定偏差,在后期的量化模型上可进行优化迭代。在未来的双金属复合管道的检测中,涡流检测技术可检出内衬管道的缺陷状况,保障管道运行安全。

参考文献

[1] 闫可安,许天旱,韩礼红,等. 双金属复合管的研究现状与发展趋势[J]. 化工技术与开发,2020,49(10): 45-50.

[2] 聂海亮,马卫锋,赵新伟,等. 双金属复合管在油气管道的应用现状及分析[J]. 金属热处理,2019,44(增刊1):515-518.

[3] 宋晓俊,刘汉广,周继兵,等. 磁应力检测技术在双金属复合管检测上的实践[J]. 无损探伤,2021,45(2): 42-45.

[4] 刘琰,聂向晖,周春,等. 双金属复合管漏磁内检测试验研究[J]. 石油管材与仪器,2020,6(3):30-33.

[5] 孙虎,师奕兵,张伟,等. 铁磁性套管脉冲涡流检测的时域解析解[J]. 仪器仪表学报,2020,41(6): 179-186.

[6] 张超,李勇,闫贝,等. 金属套管腐蚀缺陷的脉冲涡流近-远场复合检测[J]. 无损检测,2019,41(10):37-43.

[7] FU Y, YU R, PENG X, et al. Investigation of casing inspection through tubing with pulsed eddy current[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2012, 27(4): 353-374.

作者简介:成海军(1991—),工程师,从事油气管道中心线测绘、管道检测及完整性研究相关工作。
E-mail:chj111666333@163.com

(上接第 31 页)

[12] 商玉梅,陈健飞,江文军,等. 基于模态理论降低声发射源定位误差的方法[J]. 无损检测,2018,40(2):20-23.

[13] FARRUKH H, KAMIL A M B, NORASHIKIN Y, et al. State-of-the-art review on the acoustic emission source localization techniques[J]. IEEE Access, 2021, 9: 101246-101266.

[14] 尹志彪,曹育军,邹健,等. 城镇燃气埋地钢质管道防腐蚀现状[J]. 腐蚀与防护,2024,45(10):97-103.

[15] CHEN W P, SHEN Y Q. Frequency characteristic analysis of acoustic emission signals of pipeline leakage[J]. Water,2022,14(24):3992.

[16] 陈桂凤,刘晓晴,张鑫远,等. 基于导波理论的管道缺陷检测的数值模拟研究[J]. 四川建材,2022,48(2):74-75.

[17] JIAO J P, ZHANG J W, REN Y B, et al. Sparse representation of acoustic emission signals and its application in pipeline leak location[J]. Measurement,2023, 216:112899.

[18] 李俊,张家瑞,范斌斌,等. 埋地天然气管道泄漏振动信号传播特性研究[J]. 石油机械,2024,52(1): 138-144.

[19] 张丽珍,王文奥. 天然气管道阀门微小泄漏声发射检测及缺陷识别方法[J]. 油气储运,2024,43(6): 656-664.

作者简介:申伟(1981—),高级工程师,研究方向为流程工业承压设备系统无损检测与完整性管理技术研究。E-mail:122309677@qq.com

通信作者:王志成(1981—),硕士生导师,正高级工程师,研究方向为承压设备安全可靠性和石化装置风险评估。E-mail:wangzc@cczu.edu.cn