

引文: 齐光峰, 李西彦, 唐鑫, 等. 管道应力交流电磁场检测系统设计与试验[J]. 油气储运, 2023, 42(10): 1149-1157.

QI Guangfeng, LI Xiyan, TANG Xin, et al. Design and experimental research of pipeline stress measurement system based on alternating current field[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(10): 1149-1157.

管道应力交流电磁场检测系统设计与试验

齐光峰¹ 李西彦¹ 唐鑫² 袁新安² 韩庆¹ 王安泉¹ 李伟² 王克宇²

1. 中国石化胜利油田分公司; 2. 中国石油大学(华东)机电工程学院

摘要: 铁磁性管道易在服役过程中产生应力畸变现象, 导致疲劳损伤、裂纹等破坏性缺陷, 引发重大安全事故, 因此对铁磁性管道的应力畸变现象进行检测尤为重要。基于交流电磁场检测技术, 通过有限元软件 COMSOL 建立管道应力检测的仿真模型, 选取表征应力大小的特征信号, 探究应力检测探头的最优激励方式, 分析管道受不同大小和方向的应力时的信号变化规律。依据仿真结果与管道应力分布的特点, 设计开发一套集便携式机箱-检测探头为一体的管道交流电磁场应力检测系统, 对 45# 钢拉伸试件和 X70 钢管道在 0~105 MPa 的应力范围内进行试验测试。仿真和试验结果表明: 管道的应力畸变会引起电磁场的扰动, 所选取的特征信号可反映应力畸变大小; 探头最佳激励方向为与应力垂直方向; 设计的便携式管道交流电磁场应力检测系统可检测出管道的应力畸变区域。研究成果可为铁磁性管道的应力畸变现象的快速检测提供参考。(图 13, 表 1, 参 24)

关键词: 油气管道; 交流电磁场; 仿真; 应力检测系统; 应力检测

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2023)10-1149-09

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.10.008

Design and experimental research of pipeline stress measurement system based on alternating current field

QI Guangfeng¹, LI Xiyan¹, TANG Xin², YUAN Xin'an², HAN Qing¹, WANG Anquan¹, LI Wei², WANG Keyu²

1. Sinopec Shengli Oilfield Co. Ltd.; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Petroleum (East China)

Abstract: Ferromagnetic pipelines are prone to stress distortion during service, which will likely cause destructive defects, such as fatigue damage and cracks, and even major safety accidents in severe cases. This makes it particularly important to measure the stress distortion of ferromagnetic pipelines. Herein, a simulation model of pipeline stress measurement was established by the finite element software COMSOL based on the alternating current field stress measurement (ACSM) technology. Then, the characteristic signals were selected to represent the stress, which allowed us to explore the influence of probe excitation direction on stress measurement, find the optimal excitation mode, and analyze the signal variation law of the pipeline subjected to stress in different magnitudes and directions. Based on the simulation results and the characteristics of pipeline stress distribution, a set of ACSM based pipeline stress measurement system integrating the portable case and probe was designed and developed to test the tensile specimen of 45# steel and X70 steel pipeline within 0~105 MPa. The simulation and test results demonstrate that the selected characteristic signal could reflect the stress distortion because the stress distortion of pipeline causes the disturbance in electromagnetic field. The optimal excitation direction of the probe is perpendicular to the stress, and the designed portable ACSM based pipeline stress measurement system has been verified to be capable of detecting the stress distortion area of the pipeline. The research results are expected to provide references for the rapid measurement of stress distortion in ferromagnetic pipelines.

(13 Figures, 1 Table, 24 References)

Key words: oil and gas pipelines, alternating current field, simulation, stress measurement system, stress measurement

在石油石化领域中, 铁磁性管道被广泛应用于石油、天然气等重要能源资源的运输。铁磁性材料的管

道具有较好的机械性能, 但在使用过程中容易受到各种外界环境、复杂交变载荷、内外压力等因素的影响,

产生应力畸变。应力畸变是管道位移、早期缺陷的反应,会对铁磁性管道的使用性能、使用寿命等造成较大的影响,导致管道产生裂纹、断裂等失效现象,因此对管道应力畸变进行检测具有十分重要的意义^[1-4]。

近年来,国内外大量学者在应力无损检测方面进行了研究,目前常用的应力无损检测技术主要包括电阻应变片法、超声波法、X 射线衍射法及磁测应力法等。李玉坤等^[5]梳理了超声中的临界折射纵波 (Longitudinal Critically Reflected Wave, LCR) 在 X80 钢弹塑性变形过程中的响应规律,给出了超声 LCR 波传播时间与应力/应变的定量关系,并利用研制的管道应力超声测量装置实现气变形管道工作状态应力的测量。但超声测量方法对管道表面质量要求较高,且需要耦合剂,对微弱应力测量不敏感,测量精确度不高^[6]。刘彦坤等^[7]基于电磁超声及瑞利波平面应力测量技术,设计了三发三收式电磁超声换能器对平板材料应力进行测量,在远离焊缝处得到的结果与盲孔法具有较好的一致性,但在焊缝处两者的偏差较大,测量不准确。电磁超声法虽无需耦合剂,但换能器仍对提离敏感,且能量衰减严重,输出信号弱,需要大功率信号发生装置才能工作^[8]。Preuss 等^[9]采用高能量的 X 射线同步衍射技术,研究了 IMI550 线性摩擦焊的残余应力分布规律,主要包括试样在原始焊接状态和 3 种不同的焊后热处理条件下的残余应力状态。Brewer 等^[10]采用 X 射线与中子衍射技术对 ODS 钢搅拌摩擦焊的焊缝进行残余应力测试,采用 X 射线测定表层不超过 60 μm 深度的应力,中子测量内部厘米级深度的应力,所测焊缝区域表层与内部应力基本一致。X 射线法的应用局限在于:检测精度受 X 射线的波长、工件表面处理情况、晶粒精细程度等诸多因素影响;对于 X 射线应力检测仪而言,其设备使用较为复杂;X 射线本身对人体健康有一定影响^[11]。

交流电磁场应力检测 (Alternating Current Stress Measurement, ACSM) 技术是一种电磁应力检测技术,其由交流电磁场检测 (Alternating Current Field Measurement, ACFM) 技术发展而来^[12],具有无需耦合剂、非接触式测量、操作简单、灵敏度高的优点^[13-17],非常符合实际管道应力检测的需求。国外学者对该方法的研究较早,Chen 等^[18]利用 ACSM 系统开展了低碳钢的四点弯曲及单向拉伸试验,研究其弹性范围内不同载荷下的信号响应,试验结果表明无论是弯曲还

是拉伸模式,其检测信号与载荷之间均具有良好的线性关系。Han 等^[19]提出了一种新型 ACSM 探头,通过在探头中增加另一个激励场使其形成正交磁场,并给出了在该模型下残余应力的计算方法。Dover 等^[20]等通过研究外加磁场与应力夹角的关系,发现探头敏感度与外加磁场、应力夹角存在关系,为了解决应力方向改变时单探头检测灵敏度下降的问题,提出了一种正交探头,可以提供正交方向的激励磁场,提高了探头对不同方向应力的检测能力。中国相关研究起步较晚,宋凯等^[21]利用研制的 ACSM 系统开展了铁磁性构件应力检测试验研究,提出了一种快速判断主应力方向的 ACSM 法应力评价方法。但目前国内外对于便携式 ACSM 设备的研究较少,而高集成度的便携式 ACSM 系统在管道上拥有广阔的应用前景。

基于 ACFM 技术,针对铁磁性管道应力检测的需求,通过建立管道 ACSM 仿真模型进行仿真分析,设计便携式机箱和检测探头,开发一套完整的便携式管道 ACSM 系统,并进行铁磁性管道应力检测试验验证。

1 ACSM 原理及仿真分析

1.1 ACSM 原理与仿真模型

1.1.1 ACSM 原理

铁磁性材料被磁化后会发生微小形变的现象为磁致伸缩效应。反之,铁磁性材料受到外力影响后其尺寸会发生微小改变,其磁化强度也随之发生变化的现象即为材料的逆磁致伸缩效应。当有应力畸变产生时,铁磁性材料内部的磁畴分布会发生变化,导致待测试件的磁导率特性发生变化,进而导致待测试件表面的感应磁场发生变化,通过测量待测试件表面的感应磁场的信息可以间接得到应力的变化信息^[22]。

根据电磁感应原理,通有交变信号的激励线圈会在其周围空间中产生交变磁场,而当激励线圈靠近铁磁性材料的待测试件时,线圈周围空间中的交变磁场会在没有应力作用的待测工件上感应出均匀的交变电流场^[23]。当工件受到应力作用时,工件内部微观组织发生变化,此区域的磁导率、电导率等参数发生改变,进而对工件表面感应电流分布产生影响,导致电磁场扰动,在应力集中区感应磁场产生变化,通过测量与激励磁场同方向感应磁场的磁信号即可实现应力测量(图 1)。

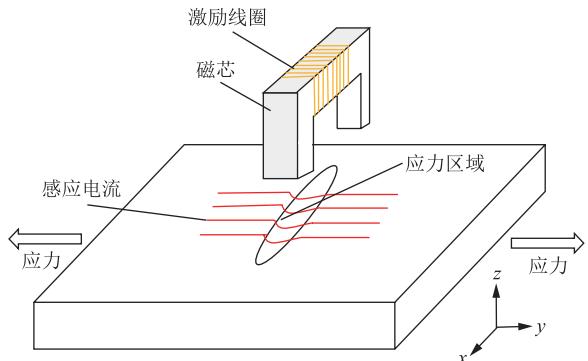


图 1 ACSM 原理示意图
Fig. 1 Schematic diagram of ACSM principle

ACSM 探头中的磁传感器可以将磁信号的变化转变成电压信号的变化,从而被检测机箱采集,进行进一步的信号处理分析。

1.1.2 仿真模型

利用有限元仿真软件 COMSOL 建立管道 ACSM 非磁饱和状态下的力磁耦合仿真模型(图 2,简称管道 ACSM 仿真模型),仿真模型包括局部管道、检测探头、空气区域等。以工业场景中常见的 X70 管线钢材管道为对象建立模型,管道直径为 273 mm,轴线方向为 x 轴方向、切向为 y 轴方向、法向为 z 轴方向。由于管道为对称分布,为了减少单元计算量,建立 1/2 管道模型。根据管道的实际情况,设定材料参数(表 1)。

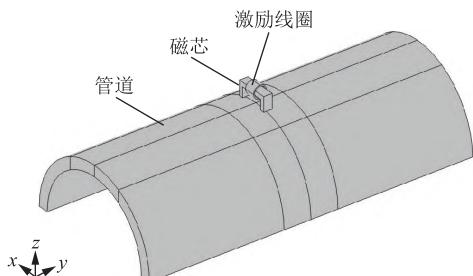


图 2 管道 ACSM 仿真模型图
Fig. 2 Pipeline ACSM simulation model

表 1 仿真模型对应管道材料属性表
Table 1 Mapping relation between simulation model and pipeline material

| 模型组成部分 | 材料名称 | 相对磁导率 | 电导率/ $(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$ | 相对介电常数 |
|--------|-------|-----------------|---------------------------------------|--------|
| 管道 | X70 钢 | $f(\sigma)$ | 4.032×10^6 | 1 |
| 激励线圈 | 铜 | 1 | 5.900×10^7 | 1 |
| 磁芯 | 软铁 | 1×10^7 | 0 | 1 |
| 空气层 | 空气 | 1 | 0 | 1 |

注: σ 为管道所受应力, MPa; f 为管道的相对磁导率, 其为 σ 的函数。

1.2 仿真分析

1.2.1 特征信号的选取

为更好地表征应力信息,依 ACFM 惯例,需选取

x 轴与 z 轴某一个方向磁通密度信号作为应力特征信号。对线圈施加幅值为 10 V、频率为 500 Hz 的正弦交流信号,管道一侧端面施加固定约束,另一侧施加轴向拉伸应力,提取磁芯正下方且位于管壁上方 2 mm 位置处的磁通密度数据。

分别提取管道沿外加磁场方向磁通密度 B_x 和水平面法向磁通密度 B_z 随拉伸应力的变化趋势(图 3)。可以发现 B_x 曲线的量级明显高于 B_z 曲线,随拉伸应力增大, B_x 幅值呈现近似线性增大趋势,且其线性度良好,可有效表征应力大小,因此选择 B_x 作为表征应力大小的特征信号。

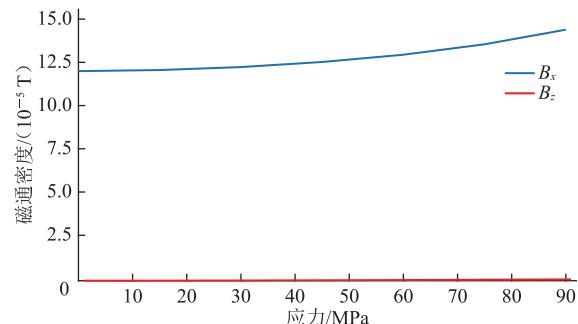


图 3 基于管道 ACSM 仿真模型的管道 x 轴与 z 轴磁通密度变化曲线

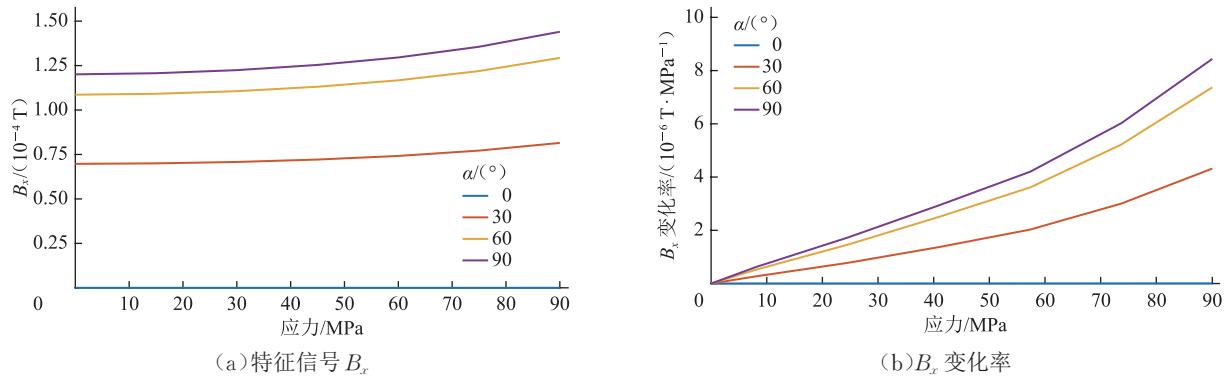
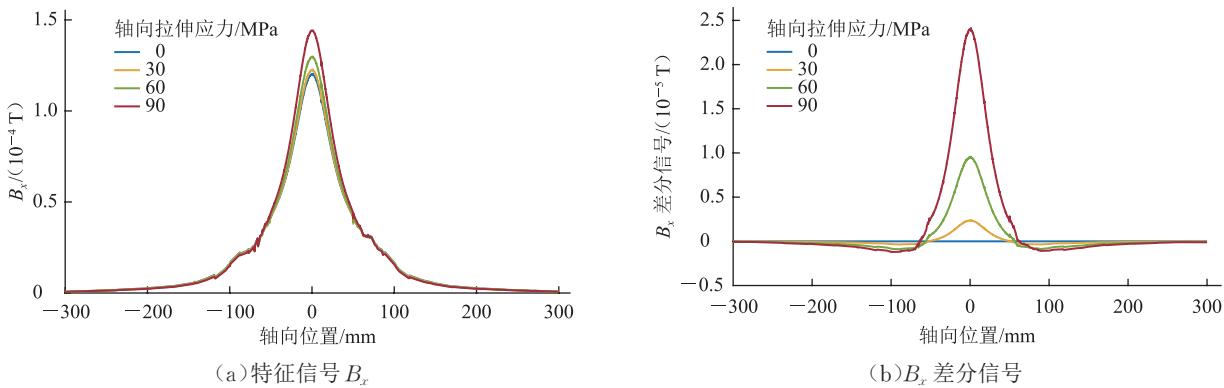
Fig. 3 Variation curves of magnetic flux density along pipeline x -axis and z -axis based on pipeline ACSM simulation model

1.2.2 外加激励方向的选取

外加磁场方向为磁芯两腿连线方向,通过改变外加磁场方向与应力方向的夹角 α ,可施加不同方向的外加磁场。外加磁场影响感应磁场的产生,并进一步影响检测效果。研究特征信号随 α 的变化情况,以找出最佳磁芯放置角度(图 4)。令 α 分别为 0°、30°、60°、90°,施力方式同 1.2.1 节所述,提取磁芯正下方、管壁上方 2 mm 位置点的 B_x 信号。随着轴向应力的增加, $\alpha=0^\circ$ 时的 B_x 几乎不随应力增大而变化,即当激励磁场方向与应力方向平行时, B_x 对应力响应不敏感。当 $\alpha=30^\circ$ 、 $\alpha=60^\circ$ 、 $\alpha=90^\circ$ 时, B_x 随应力增大而增大,且 B_x 的初始值也随应力增大而增大。用图 4a 中曲线斜率表示 B_x 变化率, α 增大 B_x 变化率也增大,当外加磁场与应力垂直时,变化率最高(图 4b)。因此,外加激励方向与应力方向垂直为最佳检测方式。

1.2.3 轴向拉伸应力分析

为了对管道的轴向拉伸载荷进行仿真分析,分别施加轴向拉伸应力为 0 MPa、30 MPa、60 MPa、90 MPa,提取沿 x 轴方向管道上方 2 mm 的 B_x 数据,研究管道磁特征信号变化规律(图 5)。对比不同拉伸

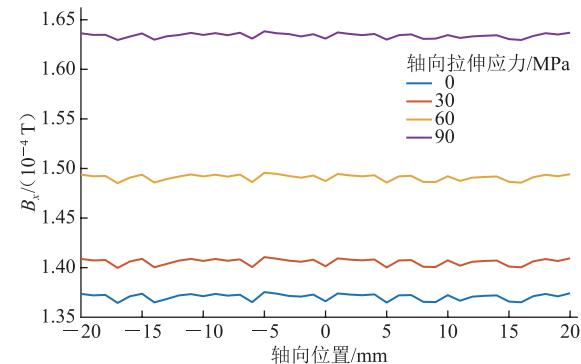
图4 管道 ACSM 仿真模型在不同夹角 α 下特征信号 B_x 及其变化率随应力的变化曲线Fig. 4 Variation curves of characteristic signal B_x and its change rate with stress at different angles in pipeline ACSM simulation model图5 管道 ACSM 仿真模型在不同轴向拉伸应力下特征信号 B_x 及其差分信号沿轴向变化曲线Fig. 5 Variation curves of characteristic signal B_x and its differential signal along the axial direction under different axial tensile stresses in pipeline ACSM simulation model

载荷下沿轴向 B_x 信号(图 5a)可见,在距离磁芯 50 mm 以内位置(磁芯正下方为轴向位置 0 点),激励信号较强, B_x 信号有较好的分层,且拉伸应力越大 B_x 信号越大。由于外加应力为 0 时, B_x 存在信号基值,为减去信号基值的影响,更直观地显示应力对信号的影响,用施加应力时的信号减去应力为 0 时的基值信号,得到施加不同拉伸应力时的 B_x 差分信号(图 5b)。仿真结果表明差分信号可以较好地表征拉伸应力大小,在磁芯有效范围内,随着施加拉伸应力值的增大, B_x 差分信号幅值明显增大。

为了检验动态测试的效果,选取管道轴向坐标 $-20\sim20$ mm 区域进行步进式参数化扫描,设置步长为 1 mm,得到 B_x 信号动态扫描结果(图 6)。可见此段区域在同一外加拉伸应力下沿轴向应力响应呈现均匀状态, B_x 沿轴向基本不变,随着外加拉伸应力的增大, B_x 逐渐增大,表明特征信号 B_x 与拉伸应力有极好的相关性。

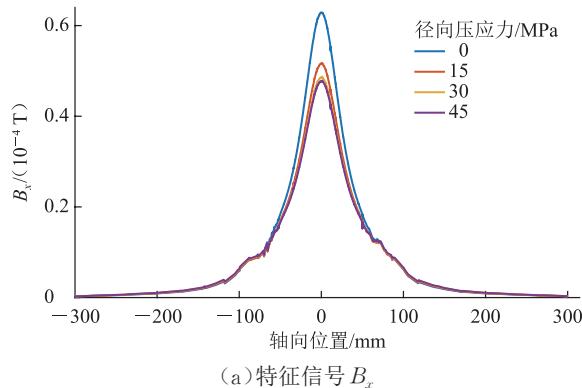
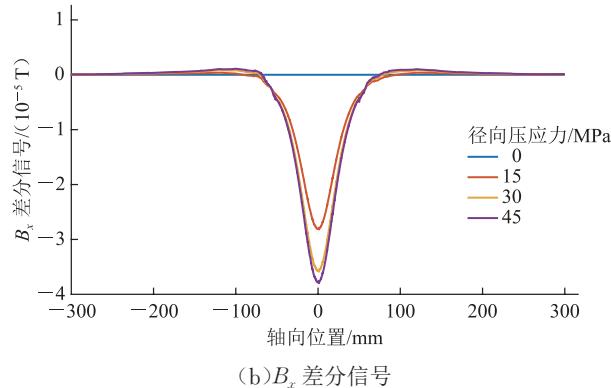
1.2.4 径向压应力分析

在管道两端面施加固定约束,在管道轴向中点位置 $50\text{ mm}\times50\text{ mm}$ 区域分别施加 0 MPa、15 MPa、

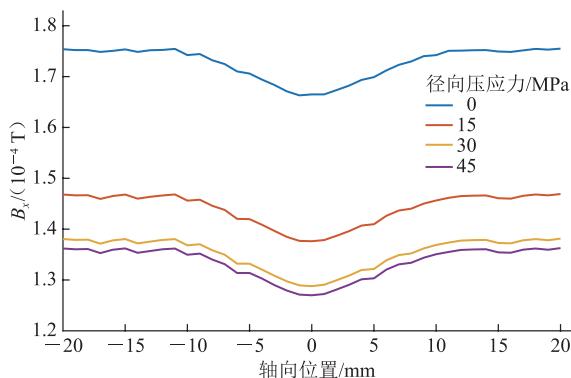
图6 管道 ACSM 仿真模型不同轴向拉伸应力下特征信号 B_x 轴向扫描曲线Fig. 6 Axial scanning curves of characteristic signal B_x under different axial tensile stresses in pipeline ACSM simulation model

30 MPa、45 MPa 径向压应力,进行管道的径向载荷仿真分析(图 7)。提取不同压应力下沿 x 轴方向管道上方 2 mm 的 B_x 数据,得到特征信号 B_x 沿轴向变化结果(图 7a),可见,在压应力一定时, B_x 幅值在轴向位置 0 点达到最大,施加的径向压应力越大, B_x 幅值越小。求取施加不同径向压应力时的差分信号值(图 7b),可见,差分后的信号为负值,压应力越大, B_x 差分信号幅值越小,符合既定规律。

求取管道受径向载荷时特征信号 B_x 动态扫描结

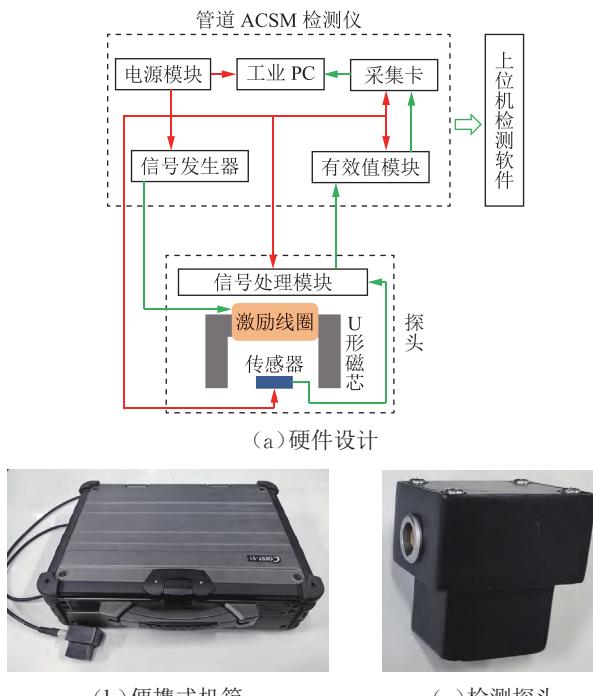
(a) 特征信号 B_x (b) B_x 差分信号图 7 管道 ACSM 仿真模型在不同径向压应力下特征信号 B_x 及其差分信号沿轴向变化曲线Fig. 7 Variation curves of characteristic signal B_x and its differential signal along the axial direction under different radial compressive stresses in pipeline ACSM simulation model

果(图 8),扫描范围依旧是轴向坐标-20~20 mm 的位置,设置步长为 1 mm。可见,外加径向压应力越大, B_x 信号幅值越小,在一定外载荷下,越靠近坐标 0 点处应力响应越大。表明特征信号 B_x 与径向压应力有极好的相关性。

图 8 管道 ACSM 仿真模型在不同径向压应力下特征信号 B_x 轴向扫描曲线Fig. 8 Axial scanning curves of characteristic signal B_x under different radial compressive stresses in pipeline ACSM simulation model

2 便携式管道 ACSM 系统设计

新设计的便携式管道 ACSM 系统主要由检测探头、检测仪器及上位机组成(图 9, 橙色线条表示电源线连接关系, 绿色线条表示信号发生流程连接关系)。检测探头与检测仪器采用雷莫线缆连接, 检测仪器与上位机采用一体化设计。检测探头主要由 U 形磁芯、激励线圈、隧道磁阻(Tunneling Magneto Resistance, TMR)磁场传感器及信号处理模块组成。检测仪器包括信号采集卡、处理器、硬盘、电源模块、信号发生模块, 其中电源模块包括锂电池、电源转换模块及电源稳压模块。

图 9 便携式管道 ACSM 系统硬件设计与实物图
Fig. 9 Hardware design and real object of portable pipeline ACSM system

管道 ACSM 检测仪的系统采用锂电池供电, 通过电源转换及稳压模块将锂电池输出电压转换为稳定的 +12 V 与 +5 V 输出; 激励模块采用直接数字合成技术设计了一款数字信号发生器, 可输出频率为 0~8 MHz、输出电压幅值最高为峰峰值为 5 V 的正弦激励信号; 设计的有效值电路对探头部分采集到的信号进行均方根处理, 减少有效值转换时间, 提升程序的运行速度; 信号经过有效值电路处理后, 再经数据采集卡传输至上位机进一步处理。

检测探头的作用是在试件表面激发均匀的电流场以及检测畸变的磁场信号。激励线圈采用 500 匝 0.15 mm 的铜线均匀缠绕在 U 形锰锌铁氧体磁芯上;

检测传感器为 TMR 磁场传感器, 具有功耗低、线性范围大、灵敏度高及尺寸小等特点^[24], 安装在 U 形磁芯底部中心; 探头内部的信号处理模块对检测到的微弱磁场信号进行放大和滤波处理, 采用 AD620 作为 TMR 传感器输出信号的放大器, 电路中的 RC(电阻-电容)低通滤波器用于滤除高频噪声信号, 最终输出处理后的磁场信号。

3 应力检测试验

在对便携式管道 ACSM 系统进行实物测试的过程中, 由于检测探头中的磁传感器将磁信号的变化转变成电压信号的变化传至便携式机箱的管道 ACSM 检测仪, 因此以下的信号处理分析将用电压特征信号 U_x 表征磁通密度特征信号 B_x 。

3.1 钢板轴向拉伸应力测试

通过拉力机进行管道 ACSM 系统拉伸试验验证, 拉伸所用的试件材料为 45# 钢, 厚度为 4 mm。将 45# 钢板固定在拉伸试验机上, 检测探头固定于试件中心位置, 在弹性范围内拉伸, 激励磁场方向与拉伸方向垂直。

首先对试件进行预加载试验, 验证系统可行性。以 0.1 kN/s 的速度加载拉伸应力, 每增加 1 kN 后, 拉力机停顿一段时间, 直至加载到 12 kN, 记录每次停顿时检测的磁通密度特征信号 B_x 对应的电压特征信号 U_x 信号值和磁通密度 B_z 信号对应的 U_z 信号值, 得到二者随拉伸应力的变化曲线(图 10)。可见, U_x 信号幅值随拉伸应力变化曲线的线性度较好, 拉伸应力每增加 1 kN, 信号幅值增加约 10 mV; 对于 U_z 信号, 拉伸应力每增加 1 kN, 其幅值变化约 5 mV, 且较不稳定, 因此 U_x 更适于作为应力检测的特征信号。更换试件, 以 0.1 kN/s 的速度加载拉伸应力, 每增加 2 kN 后, 拉力机停顿一段时间, 直至加载到 8 kN, 卸载, 记录试件中心测量点的特征信号 U_x 值, 得到其幅值变化曲线(图 11)。在 0~7 000 左右的采样点数内, 拉力机未进行加载, U_x 存在一定基值, 当拉力机进行第一次加载, U_x 首次发生畸变, 幅值增加约 20 mV, 与仿真实验结论相符。之后每次加载, 特征信号 U_x 都发生畸变, 每次畸变幅值增加约 20 mV, 拉伸应力保持不变时, 信号较为平稳。在多次加载、保持后, 信号呈现阶梯状变化趋势, 并在卸载后的零应力状态下恢复原位。说明试件的拉伸变形在弹性形变范围内, 系统能够对应力变

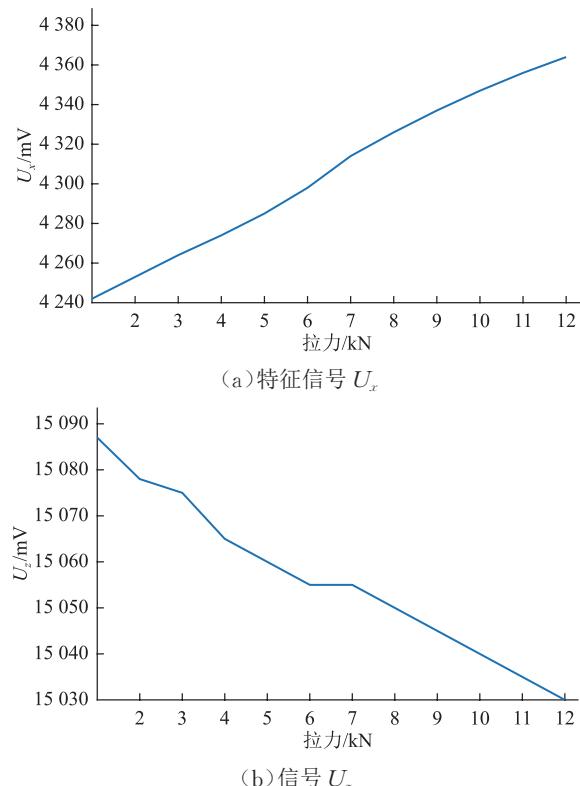


图 10 管道 ACSM 系统特征信号 U_x 与信号 U_z 随拉伸应力变化曲线

Fig. 10 Variation curves of characteristic signals U_x and signal U_z with tensile stress of pipeline ACSM system

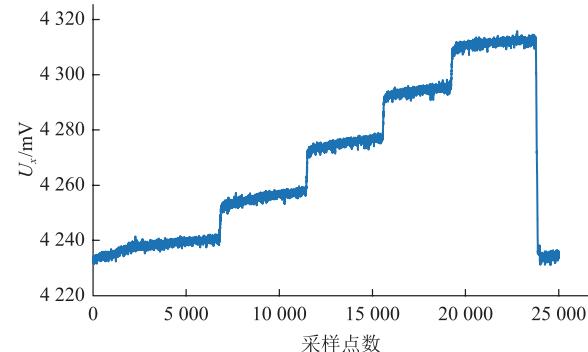


图 11 管道 ACSM 系统钢板拉伸测试特征信号 U_x 随采样点数变化曲线

Fig. 11 Variation curves of characteristic signal U_x with sampling points in steel plate tensile test with pipeline ACSM system

化做出响应, 并在应力卸载的状况下可以恢复到原位。

实际拉伸测试结果表明, 仿真实验所选取的特征信号的正确性, 且管道 ACSM 系统可有效用于钢板受拉伸应力变化时的检测。

3.2 大口径管道径向压应力测试

应用管道 ACSM 系统, 对大口径管道进行径向加载测试, 试验管道内直径 2 m、壁厚 0.02 m、高 0.45 m, 材料为 X70 钢, 实验过程在管道外壁通过液压装置施加集中压应力, 并粘贴应变片获取应力值。

3.2.1 静态单点加载

对大口径管道施加0~105 MPa的集中压应力,进行静态单点加载测试。具体操作:固定好探头并将探头转至正对施力点位置,施加压应力后保持一段时间,逐步增大压应力,直至压应力达到最大值105 MPa,记录特征信号 U_x 值,得到 U_x 随采样点数及压应力的变化曲线(图12)。每次 U_x 幅值的明显下降,都对应一次加载,当压应力保持不变时,信号较为平稳,在多次增加压应力、保持后,特征信号 U_x 呈现阶梯状变化趋势(图12a)。待信号平稳后,记录保持时 U_x 信号值,分析 U_x 随压应力变化趋势(图12b)可见,随着压应力的增加, U_x 呈近似线性下降趋势,信号下降与施加应力的方向有关,试验施加的是压应力,管道内壁受压状态,信号幅值呈下降趋势,与1.2.4节仿真分析结果吻合。压应力从0 MPa增至105 MPa,特征信号 U_x 幅值从4 060 mV降至3 830 mV,由此可见,管道ACSM系统对单一点处应力变化有明显反应,可进一步依据 U_x 幅值大小进行应力的定量评估。

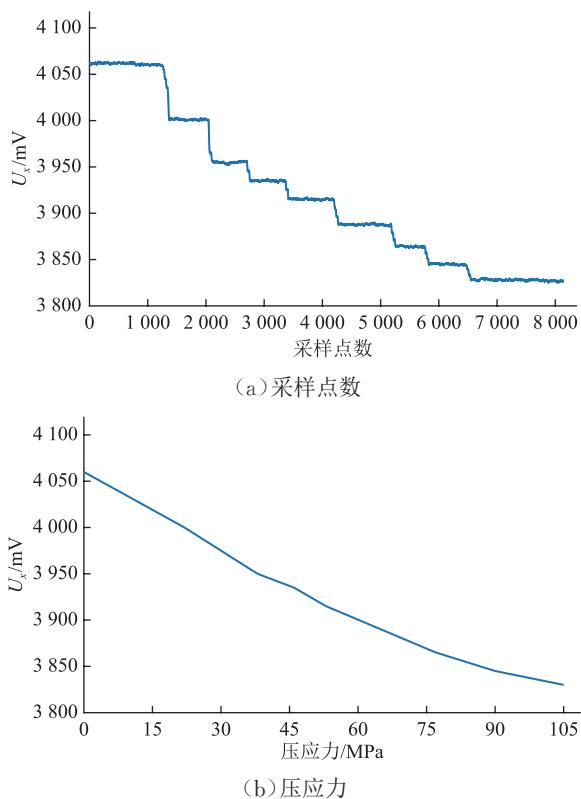


图12 管道ACSM系统大口径管道受压测试特征信号 U_x 随采样点数及压应力变化曲线

Fig. 12 Variation curves of characteristic signal U_x with sampling points and compressive stress in large-diameter pipeline stress test with pipeline ACSM system

3.2.2 多点动态扫查

从大口径管道压应力施加处向两侧每隔50 mm

取一个点,两侧各取10个点,共21个点,进行动态扫查测试。在位置坐标0处施加24 MPa的压应力,通过人工推动探头依次经过21个测量点,再改变压应力大小分别为54 MPa、96 MPa,提取 U_x 值,得到不同压应力下动态扫查 U_x 信号值(图13)。可见,不同压应力下,信号呈现出相似的变化趋势,且都在压应力施加点(位置坐标0)处信号出现畸变,呈现先峰值、后谷值的形式,且随着压应力值增加,峰谷差增加。因此,特征信号 U_x 特征变化可有效表征管道中存在径向应力畸变,设计的检测系统能实现应力畸变的检出。

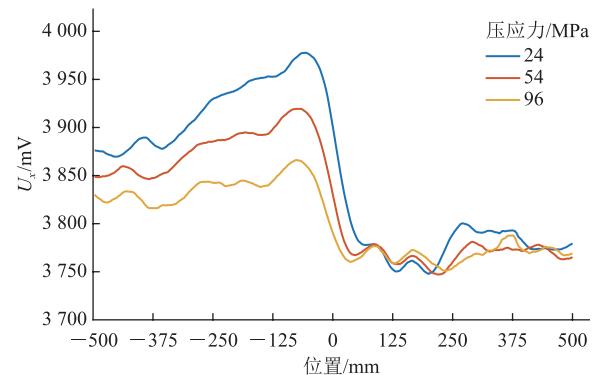


图13 管道ACSM系统大口径管道动态扫查测试在不同压应力下特征信号 U_x 随点位变化曲线

Fig. 13 Variation curves of characteristic signal U_x with point positions under different compressive stresses in large-diameter pipeline dynamic scanning test with pipeline ACSM system

4 结论

基于铁磁性油气运输管道应力畸变检测需求,引入ACFM技术,通过仿真对管道应力畸变进行分析,设计了管道ACSM系统,并开展了应力检测试验,主要结论如下:

(1)ACSM技术可以实现管道应力畸变的检测,沿外加磁场方向磁通密度 B_x 对应力响应最灵敏,且线性度较好,适合作为管道ACSM的特征信号。

(2)磁芯两腿之间的连线为外加磁场方向,当外加磁场方向与应力方向垂直时,特征信号 B_x 对应力响应最敏感,因此外加激励方向与应力方向垂直为最佳检测方式。

(3)设计开发了一套集便携式机箱-检测探头为一体的便携式管道ACSM系统,进行拉力机拉伸试验、环形大口径管道静态下应力加载单点测试以及多点动态扫查测试。检测结果与仿真结果一致,进一步表明,所选择的磁特征信号符合实际工况,设计

的管道 ACSM 系统可有效实现管道轴向和径向应力检测。

(4) 管道 ACSM 系统适用于铁磁性管道应力检测,但尚未开展具体工程管道对象的应力检测与评估,因此这将作为下一步的工作内容进行现场试验研究。

参考文献:

- [1] 赵瑞华,李玉坤,林浩然,邵军,白桦,管志伟. 不同应力状态下大口径管道超声波传输规律[J]. 油气储运,2018,37(6):651-657. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2018.06.009.
ZHAO R H, LI Y K, LIN H R, TAI J, BAI H, GUAN Z W. Propagation laws of ultrasonic wave in large diameter pipelines under different stress states[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(6): 651-657.
- [2] 路浩,朱政,邢立伟. 高钢级管道残余应力超声波法检测及小孔法验证[J]. 油气储运,2021,40(5):533-538. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.05.008.
LU H, ZHU Z, XING L W. Residual stress measurement of high-grade steel pipeline via ultrasonic method and verification by small hole method[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(5): 533-538.
- [3] 陈金忠,马义来,靳阳. 基于巴克豪森效应的管道应力内检测辅助装置[J]. 油气储运,2020,39(10):1192-1196. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.10.016.
CHEN J Z, MA Y L, JIN Y. An auxiliary device for internal pipeline stress detection based on Barkhausen effect[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(10): 1192-1196.
- [4] 伍奕,荣军. 管道弱磁应力内检测装置的设计与应用[J]. 油气储运,2015,34(7):727-731,736. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2015.07.010.
WU Y, RONG J. Design and application of weak magnetic stress inline inspection device for pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(7): 727-731, 736.
- [5] 李玉坤,李玉星,张玉,刘鹏,于文广. 大口径高压力复杂地形管道变形应力检测方法[J]. 油气储运,2020,39(3):262-267,276. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.03.002.
LI Y K, LI Y X, ZHANG Y, LIU P, YU W G. Method for detection of deformation stress of large-diameter and highpressure pipeline under complex terrain[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(3): 262-267, 276.
- [6] DING X, WU X J, WANG Y G. Bolt axial stress measurement based on a mode-converted ultrasound method using an electromagnetic acoustic transducer[J]. Ultrasonics, 2014, 54(3): 914-920. DOI: 10.1016/j.ultras.2013.11.003.
- [7] 刘彦坤,刘海波,李亚鹏,刘天然,王永青. 基于电磁超声瑞利波的平面应力测量方法[J]. 无损检测,2020,42(9):33-38. DOI: 10.11973/wsjc202009008.
LIU Y K, LIU H B, LI Y P, LIU T R, WANG Y Q. Plane stress measurement based on the electromagnetic ultrasonic Rayleigh wave[J]. Nondestructive Testing, 2020, 42(9): 33-38.
- [8] 康磊. 用于铝板检测的电磁超声导波换能器优化设计技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
KANG L. Research on optimal design technique of guided wave emitters for aluminum plate inspection[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [9] PREUSS M, DA FONSECA J Q, STEUWER A, WANG L, WITHERS P J, BRAY S. Residual stresses in linear friction welded IMI550[J]. Journal of Neutron Research, 2004, 12(1/2/3): 165-173. DOI: 10.1080/10238160410001734630.
- [10] BREWER L N, BENNETT M S, BAKER B W, PAYZANT E A, SOCHALSKI-KOLBUS L M. Characterization of residual stress as a function of friction stir welding parameters in oxide dispersion strengthened (ODS) steel MA956[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 647: 313-321. DOI: 10.1016/j.msea.2015.09.020.
- [11] 王维斌,雷铮强,杨辉. 长输管道数字射线 DR 检测技术应用与展望[J]. 油气储运,2020,39(12):1337-1343. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.12.003.
WANG W B, LEI Z Q, YANG H. Application and prospect of digital radiographic detection technology in long-distance pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(12): 1337-1343.
- [12] LOW C K, WONG B S. Defect evaluation using the alternating current field measurement technique[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2004, 46(10): 598-605. DOI: 10.1784/insi.46.10.598.45209.
- [13] YUAN X A, LI W, CHEN G M, YIN X K, YANG W C, GE J H. Two-step interpolation algorithm for measurement of longitudinal cracks on pipe strings using circumferential current field testing system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(2): 394-402. DOI: 10.1109/TII.2017.2728804.

- [14] ZHAO J M, LI W, ZHAO J C, YUAN X A, ZHU Y K, WANG Z X. A novel ACFM probe with flexible sensor array for pipe cracks inspection[J]. IEEE Access, 2020, 8: 26904-26910. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2971177.
- [15] 李伟,袁新安,陈国明,葛玖浩,姜永胜,贾廷亮.基于外穿式交流电磁场检测的钻杆轴向裂纹在役检测技术研究[J].机械工程学报,2015,51(12):8-15. DOI: 10.3901/JME.2015.12.008.
- LI W, YUAN X A, CHEN G M, GE J H, JIANG Y S, JIA T L. Research on in-service detection for axial cracks on drill pipe using the feed-through alternating current field measurement[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(12): 8-15.
- [16] YUAN X A, LI W, YIN X K, CHEN G M, ZHAO J M, JIANG W Y, et al. Identification of tiny surface cracks in a rugged weld by signal gradient algorithm using the ACFM technique[J]. Sensors, 2020, 20(2): 380-393. DOI: 10.3390/s20020380.
- [17] YUAN X A, LI W, CHEN G M, YIN X K, JIANG W Y, ZHAO J M, et al. Inspection of both inner and outer cracks in aluminum tubes using double frequency circumferential current field testing method[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 127: 16-34. DOI: 10.1016/j.ymssp.2019.02.054.
- [18] CHEN K, BRENNAN F P. A theoretical and experimental study of alternating current stress measurement under different loading modes[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1998, 33(4): 291-303. DOI: 10.1243/0309324981513002.
- [19] HAN S, BRENNAN F P, DOVER W D. Development of the alternating current stress measurement model for magnetostriction behaviour of mild steel under orthogonal magnetic fields for stress measurement[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2002, 37(1): 21-31. DOI: 10.1243/0309324021514808.
- [20] DOVER W D, KARE R F, BRENNAN F P. Stressprobe-a new non-contacting stress measurement technique[J]. Strain, 2005, 41(4): 185-192. DOI: 10.1111/j.1475-1305.2005.00229.x.
- [21] 宋凯,侯凯,王婵,徐聪,王振.基于ACSM法的铁磁构件应力表征[J].机械工程学报,2018,54(10):16-22. DOI: 10.3901/JME.2018.10.016.
- SONG K, HOU K, WANG C, XU C, WANG Z. Ferromagnetic components stress characterization based on ACSM[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(10): 16-22.
- [22] 高松巍,黄绍博,杨理践.钢板应力集中区域的磁检测[J].无损检测,2013,35(2):38-41.
- GAO S W, HUANG S B, YANG L J. Magnetic detection of steel stress concentration region[J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(2): 38-41.
- [23] 杨洋.基于磁测量的应力检测技术研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2011.
- YANG Y. Research on stress detection technology based on magnetic measurement[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2011.
- [24] 吴衍运,李伟,葛玖浩,袁新安.基于ACFM技术的阵列TMR探头及裂纹检测系统开发[J].无损检测,2016,38(10):29-33. DOI: 10.11973/wsjc201610008.
- WU Y Y, LI W, GE J H, YUAN X A. Development of TMR sensors array and crack detection system based on ACFM technology[J]. Nondestructive Testing, 2016, 38(10): 29-33.

(收稿日期:2021-11-09; 修回日期:2023-06-05; 编辑:刘博)

基金项目: 山东省自然科学基金项目“海洋油气装备裂纹交流电磁场成像监测与智能识别方法研究”,ZR201911040388。

作者简介: 齐光峰,男,1979年生,高级工程师,2018年毕业于中国石油大学(华东)电子与通信工程专业,现主要从事油气地面工程专业方向的研究工作。地址:山东省东营市西二路480号,257000。电话:18654637676。Email: Qiguangfeng.slyt@sinopec.com

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

