

基于磁各向异性的交流电磁场应力检测技术研究^{*}陈子婧^{1,2} 李 睿¹ 朱明达² 富 宽¹ 杨光勇¹

(1. 国家管网科学技术研究总院 天津 300450; 2. 中国石油大学(北京)人工智能学院 北京 102249)

摘 要: 交流电磁场应力检测技术能够实现管道应力集中区域的快速筛查,但目前的交流电磁场应力检测技术局限于单轴应力的测量,无法适应管道复杂应力状态的识别。本研究结合磁各向异性应力检测技术,建立管道平面应力理论及有限元仿真模型,设计双线圈组正交应力检测结构,通过仿真验证,轴向应力作用下的同向磁通密度变化幅度达正交方向的 2.61 倍。通过万能拉伸机加载试验验证,在 200 MPa 的拉伸范围内,传感器输出电压与应力梯度及应力方向的夹角之间呈现 $\Delta U = K \cdot (\boldsymbol{\varepsilon}_l - \boldsymbol{\varepsilon}_h) \cos 2\theta$ 的数量关系。结论证实该方法突破了传统 ACSM 技术的单轴检测局限,实现了双轴应力解耦与主应力方向判断,为管道应力状态检测提供了新手段。

关键词: 应力;磁各向异性;ACSM;无损检测

中图分类号: TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Research on AC electromagnetic field stress detection technology
based on magnetic anisotropyChen Zijing^{1,2} Li Rui¹ Zhu Mingda² Fu Kuan¹ Yang Guangyong¹

(1. PipeChina Institute of Science and Technology, Tianjin 300450, China;

2. College of Artificial Intelligence, China University of Petroleum, Beijing, Beijing 102249, China)

Abstract: AC electromagnetic field stress detection technology can achieve rapid screening of stress concentration areas in pipelines, but current AC electromagnetic field stress detection technology is limited to uniaxial stress measurement and cannot adapt to the identification of complex stress states in pipelines. This study integrates magneto-anisotropic stress detection technology to establish a theoretical pipeline plane stress model and a finite element simulation model. It designs an orthogonal stress detection structure with dual coil sets. Simulation results verify that under axial stress, the variation amplitude of the longitudinal magnetic flux density reaches 2.61 times that of the transverse direction. Verified through universal testing machine loading tests, within the tensile range of 200 MPa, the sensor's output voltage exhibits a quantitative relationship with the angle between the stress gradient and stress direction, expressed as $\Delta U = K \cdot (\boldsymbol{\varepsilon}_l - \boldsymbol{\varepsilon}_h) \cos 2\theta$. The conclusion confirms that this method breaks through the uniaxial detection limitation of traditional ACSM technology, achieves biaxial stress decoupling and principal stress direction determination, providing a new means for pipeline stress state detection.

Keywords: stress; magnetic anisotropy; ACSM; NDT

0 引 言

在长期服役过程中,管道因为材料老化、地质活动、输送介质腐蚀、第三方破坏等多种因素的影响,会产生应力集中^[1]。应力集中会导致微小缺陷加速扩张,进一步导致重大安全事故的发生^[2]。目前常见的管道应力检测技术有 X 射线、超声、磁记忆和交变电磁场应力检测等^[3]。交变电磁场应力检测技术^[4]是近些年快速发展的一种无损检测技

术,通过逆磁致伸缩效应实现对单一方向应力大小的快速筛查。宋凯等^[5]对交变电磁场应力检测原理进行了研究,分析了 Q235 钢在不同应力下检测信号的变化规律。段金尧等^[6]利用交流电磁场应力检测技术(alternating current stress measurement, ACSM)技术设计了一种管道轴向应力内检测系统并进行了现场牵拉试验,实现了对管道轴向应力集中区的检出。Cornu 等^[7-8]设计了一种平面交变电磁场应力检测传感器,但未给出应力方向的判断方法。

磁各向异性应力检测是利用应力作用下铁磁材料的磁学特性在不同方向上表现出的差异现象,实现对管道的应力大小与方向的评估^[9]。目前常见的磁各向异性探头都采用四足、八足磁芯等设计。杨理践等^[10]设计了双U型磁芯垂直交叉磁各向异性应力检测探头,根据最大剪应力理论判断管壁是否发生屈服失效。李立新等^[11]基于磁各向异性方法的检测原理,研制了三足、四足和六足这3种不同结构类型的锰锌铁氧体检测探头,但均采用立体式磁极磁芯探头结构,能耗大且易受磁芯材料结构不对称的影响。辛伟等^[12]推导了九极磁传感器磁测残余应力理论模型,并制作九极应力磁传感器,构建应力磁测试验平台,对残余应力磁测理论模型的准确性进行了验证。

Liu等^[13]设计了一种基于涡流、交变电磁场、巴克豪森噪声和增量磁导率信号的混合磁传感结构并对硅钢样品进行了应力检测试验,但新的传感器结构为适应其他检测方法的需要牺牲了ACSM信号的灵敏度与可重复性。

本研究将交变电磁场应力检测技术和磁各向异性应力检测技术进行融合,推导应力致磁各向异性情况下管道磁导率的分布情况,设计出了一种基于正交交变电磁场的管道应力检测方法,进行了检测电压信号与应力、力磁场夹角的量化。通过COMSOL Multiphysics建立交流电磁场-应力耦合有限元模型开发相应的传感器结构,依靠开发的磁各向异性的交变电磁场应力检测系统进行试验验证。试验结果表明磁各向异性交变电磁场应力检测技术能够同时解决ACSM技术难以实现应力方向的检出和磁各向异性应力检测技术机械结构复杂、几何形状适配性差等问题。

1 原 理

1.1 ACSM 检测原理

ACSM又称交流电磁场应力检测技术,其理论依据主要为电磁感应原理及逆磁致伸缩效应^[14]。如图1所示,通交变电流的激励线圈靠近导体时,交变电流在周围的空间中产生交变磁场,铁磁性材料表面便会产生对应的感应涡流^[15-16]。不存在应力集中时,材料的磁导率不变,因此激励线圈在材料表面产生分布均匀的涡流场;当存在应力集中时,由于逆磁致伸缩效应导致铁磁性材料的磁导率发生改变,导致材料表面感生涡流场及材料附近磁场改变,此时用检测线圈拾取工件附近磁场信号便可对应应力大小及应力集中区的尺寸进行检测^[17]。

1.2 应力致磁各向异性

应力对铁磁材料微磁性能的影响与外界磁场对磁畴壁的作用类似,通过改变材料内部磁畴结构来实现,即磁致伸缩现象^[18]。当铁磁性材料内无应力时,磁畴遵循能量最小原则随机排列,对外不显示磁性^[19],如图2(a)所示。当材料内存在单轴拉应力时,磁化方向趋向于拉应力方向,如图2(b)所示,拉应力方向的磁导率增加,磁化强度增加;而与拉应力垂直方向的磁导率减小,磁化强度减小。当对材

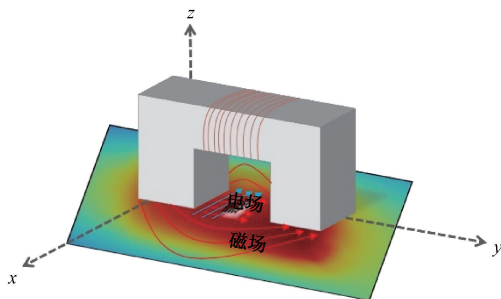


图1 ACSM原理

Fig. 1 Schematic of ACSM

料内存在单轴压应力时,各方向磁导率的变化与拉应力时相反,如图2(c)所示。应力的存在导致铁磁材料在各个方向上的磁学特性发生改变,具体可表现为各方向的磁导率不同,即受应力方向和垂直受应力方向呈现磁各向异性差异。

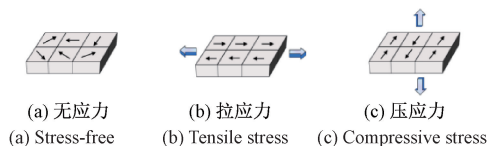


图2 应力对磁畴的影响

Fig. 2 The influence of stress on magnetic domains

管道的实际应力状态为轴向、环向和径向三向应力综合的复杂应力,但是由于在管道内压和外界土壤压力的共同作用下,管道的径向应力远远小于管道的轴向应力和环向应力,因此可将管道的应力状态近似为二维平面应力状态^[20]。

根据能量守恒原理,管道某一方向的磁场能等于磁晶各向异性能和应力能之和,即:

$$F_H = F_\sigma + F_{K_0} \quad (1)$$

其中, F_H 为磁场能, F_σ 为总应力能, F_{K_0} 为等效为各向同性材料的同向能。

在平面应力状态下,管道轴向应力、环向应力和外界磁场的关系如图3所示,其中 σ_l 为轴向应力, σ_h 为环向应力, H 为外界磁场,外界磁场或磁化强度与管道轴向应力之间的夹角记为 θ ,则外界磁场与管道环向应力之间的夹角为 $(\frac{\pi}{2} - \theta)$ 。

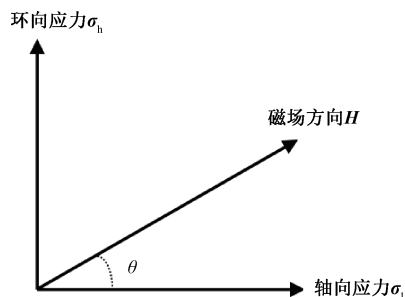


图3 管道应力与外界磁场关系^[21]

Fig. 3 Relationship between pipeline stress and external magnetic field^[21]

管道在磁场方向产生的应力能可表示为轴向应力与环向应力在 θ 处共同产生的应力能之和,即:

$$F_{\sigma} = F_{\sigma_1}(\theta) + F_{\sigma_h}\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = -\frac{3}{2}\lambda_s\sigma_1\cos^2\theta - \frac{3}{2}\lambda_s\sigma_h\sin^2\theta \quad (2)$$

其中, $F_{\sigma_1}(\theta)$ 为在磁场方向的管道轴向应力能, $F_{\sigma_h}\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)$ 为在磁场方向的管道环向应力能, λ_s 为饱和磁致伸缩系数。

由于磁矩会自发转向与外磁场平行的方向以降低能量,此时的磁场能为:

$$F_H = -\mu_0 \mathbf{H} \mathbf{M} \quad (3)$$

其中, μ_0 为真空磁导率, $\mathbf{M}$ 为磁化强度。联立以上各式,可以得到铁磁性材料在同时存在外磁场和应力场时的能量平衡方程,即:

$$\mu_0 \mathbf{H} \mathbf{M} = \frac{3}{2}\lambda_s\sigma_1\cos^2\theta + \frac{3}{2}\lambda_s\sigma_h\sin^2\theta - F_{K_0} \quad (4)$$

代入 $\mathbf{M} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{H}$, 其中 $\mathbf{B}$ 为磁感应强度^[22], 可得磁导率 $\mu(\theta)$ 与轴向应力 σ_1 、环向应力 σ_h 之间的函数表达式,如式(5)所示。

$$\mu(\theta) = \mu_0(1 - \chi_0) + \frac{3}{2H^2}\lambda_s\sigma_1\cos^2\theta + \frac{3}{2H^2}\lambda_s\sigma_h\sin^2\theta \quad (5)$$

其中, $\mu_0(1 - \chi_0)$ 为无应力时材料的各向同性磁导率,与角度 θ 无关; $\mu(\theta)$ 为考虑应力致磁各向异性时的磁导率,由此可知管道的磁响应能力与管道轴向应力、环向应力及与检测磁场方向夹角三者有关。代入 $\theta_1 = \theta, \theta_h = \frac{\pi}{2} - \theta$ 可得:

$$\mu(\theta_1) - \mu(\theta_h) = \frac{3}{2H^2}\lambda_s(\sigma_1 - \sigma_h)\cos 2\theta \quad (6)$$

当外界磁场与轴向应力一致时,磁场方向与轴向应力方向之间的夹角为 0° , 即 $\theta = 0$, 磁导率与轴向应力与环向应力之间的关系可简化为:

$$\mu(\theta_1) - \mu(\theta_h) = \frac{3}{2H^2}\lambda_s(\sigma_1 - \sigma_h) \quad (7)$$

式(6)和(7)描述了管道在不同磁场角度下磁导率与轴向应力与环向应力之差的关系,应力差 $\sigma_1 - \sigma_h$ 代表正交应力梯度,诱导铁磁性材料产生磁各向异性,同时,材料更倾向于沿高应力方向磁化; $\cos 2\theta$ 说明当应力存在时,管道磁导率变化具有对力磁角度的周期性。

2 传感器设计及有限元仿真

2.1 传感器结构设计

1) 探头结构

正交交变电磁场应力检测探头由两组线圈单元及导磁

磁芯构成,每个线圈单元包含一个激励线圈和一个接收线圈,如图 4 所示。线圈采用线径 0.15 mm 的漆包铜线绕制,匝数均为 200 匝。两组线圈单元正交放置,激励线圈缠绕方向一致,并串联连接通以相同的激励信号;两组检测线圈串联反接取差分信号。信号线采用 RVPP 屏蔽线,由外壳尾部集中引出。传感器外壳使用 peek 材料制成,具有耐高温、质量轻、强度大等特性,外壳底部嵌入氧化锆陶瓷片,进一步提升传感器外壳的耐磨性能,正交交变电磁场应力检测传感器内部结构如图 5(a)所示,实物外壳如图 5(b)所示。

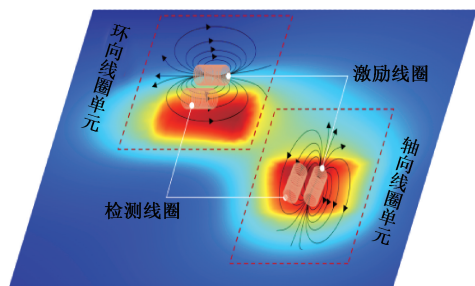
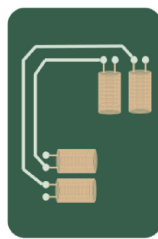


图 4 线圈组示意

Fig. 4 Schematic of the coil group



(a) 传感器内部结构
(a) Internal structure of the sensor



(b) 传感器外壳实物
(b) Physical drawing of the sensor housing

图 5 传感器实物

Fig. 5 Physical picture of the sensor

当铁磁材料没有应力作用时,材料呈现磁各向同性,两组线圈处于同一磁位点上,检测线圈输出感应差分信号为 0;当铁磁性材料内部存在应力作用时,由于应力致磁各向异性,两组线圈方向的磁导率产生变化,导致两检测线圈中的阻抗不同,在检测线圈中产生感应电压。

2) 探头等效磁路结构

建立传感器的磁路模型对于理解传感器工作原理、进行误差分析和校正以及优化设计、提高性能都具有重要作用。根据基尔霍夫磁路定理及欧姆磁路定理,建立磁各向异性正交 ACSM 探头的磁路模型。轴向线圈组和环向线圈组两路信号彼此相互独立,仅由于摆放方向的不同,各自产生方向与线圈方向一致的平行磁场。因此,可建立单路线圈组等效磁路模型,得到单组检测线圈电压与该方向管道应力的机理模型,再对两路检测线圈信号进行差分处理得到正交 ACSM 探头的输出与应力的关系。

单一线圈组的等效磁路结构如图 6 所示。

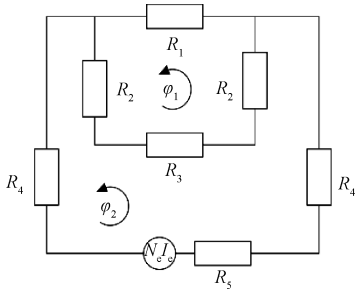


图 6 单一线圈组的等效磁路结构

Fig. 6 The equivalent magnetic circuit structure of a single coil group

其中, R_1 是管道应力区域磁阻, R_2 为检测线圈与管道间空气磁阻, R_3 为检测线圈磁芯磁阻, R_4 为激发线圈与管道间空气磁阻, R_5 为激发线圈磁芯磁阻, N_e 为激发线圈匝数, I_e 为激发电流。

依据磁路基尔霍夫定律和欧姆定律,列写磁路网孔方程得联立方程组,如式(8)所示。

$$\begin{cases} \varphi_1(R_1 + 2R_2 + R_3) = \varphi_2(2R_2 + R_3) \\ \varphi_2(2R_4 + R_5 + R_3 + 2R_2) - \varphi_1(2R_2 + R_3) = N_e I_e \end{cases} \quad (8)$$

其中, φ_1 为网孔 1 内磁通, φ_2 为网孔 2 内磁通。

由于激励线圈与检测线圈形状一致且位置具有对称性,因此磁路等效长度与等效面积可视为相同。当激励线圈与检测线圈磁路长度相等时,有 $R_2 = R_4 = R_1$; 当激励线圈与检测线圈横截面积相等时,有 $R_3 = R_5 = R_a$ 。此时,通过感应线圈的磁通为 $\Delta\varphi$, 有:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (9)$$

联立上述方程组与上式,可得:

$$\Delta\varphi = \frac{-R_1 N_e I_e}{2Q(R_1 + Q)} \quad (10)$$

其中, $Q = 2R_1 + R_a$ 。

根据法拉第电磁感应定律,线圈的感应电动势 U 与磁通量变化率 $\Delta\varphi$ 的关系为:

$$U = -N_d \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{R_1 N_d N_e I_e}{2Q(R_1 + Q) \Delta t} = \frac{R_1 N_d N_e I_e f}{2Q(R_1 + Q)} \quad (11)$$

其中, f 为激励频率, N_d 为检测线圈匝数。

根据磁阻的计算公式 $R_1 = \frac{l}{\mu A}$, 其中 l 为磁力线通过路径的有效长度, μ 为磁导率, A 为磁路横截面积,得到感应电动势 U 的表达式:

$$U = \frac{R_1 N_d N_e I_e f}{2Q(R_1 + Q)} \quad (12)$$

由于 $Q \gg R_1$, 因此可将 U 简化为:

$$U = \frac{R_1 N_d N_e I_e f}{2Q(R_1 + Q)} \approx \frac{R_1 N_d N_e I_e f}{2Q^2} = \frac{l N_d N_e I_e f}{2\mu A Q^2} \quad (13)$$

绘制磁导率-线圈电压的关系如图 7 所示。应力导致

钢板磁导率的变化范围很小,一般均在几到几十磁导率之间,因此可以将检测线圈电压与磁导率近似为线性关系,即 $U \approx K\mu$, 其中 K 为比例系数。

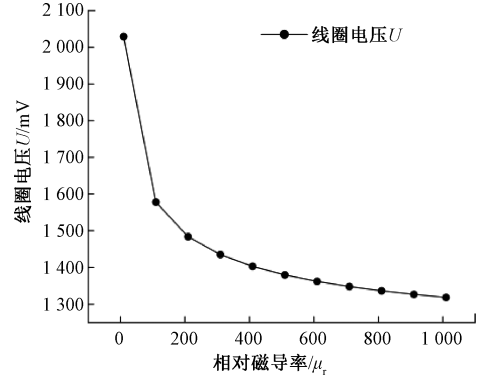


图 7 磁导率-电压关系

Fig. 7 The relationship between magnetic permeability and voltage

对于磁各向异性正交 ACSM 传感器的轴向和环向的检测线圈而言,两者差分电压将与磁导率的倒数之差存在正相关关系,即:

$$\Delta U \approx K[\mu(\theta_1) - \mu(\theta_h)] = K^*(\epsilon_1 - \epsilon_h) \cos 2\theta \quad (14)$$

其中, K^* 为感应电压与应力的比例系数。

2.2 有限元仿真

依托 COMSOL Multiphysics 建立三维管道交流电磁场-应力检测模型,利用维拉里效应将固体力学场与电磁场进行耦合,仿真 X52 材质平板在静载拉伸情况下基于磁各向异性的交变电磁场应力检测探头的检测能力,固体力学模块用于求解管道在不同拉力载荷下各部分产生的应力及应变,电磁场模块用于求解在交流激励下管道表面的涡流及磁场变化。仿真模型包括轴向激励线圈与检测线圈、环向激励线圈与检测线圈、磁芯、管道和空气域及无限元域,仿真模型和参数如图 8 和表 1、2 所示。

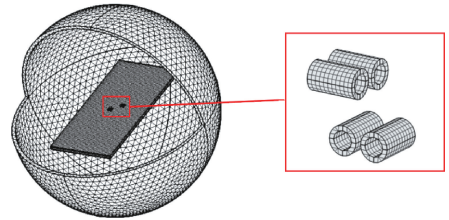


图 8 仿真模型示意

Fig. 8 Schematic of the simulation model

表 1 仿真模型尺寸

Table 1 Simulation model dimensions		mm
模型名称	参数	
平板	长 400, 宽 200, 高 10	
激励线圈	外径 8, 内径 6, 长 10	
检测线圈	外径 8, 内径 6, 长 10	
空气域	半径 300	
磁芯	直径 6, 长 10	

表 2 材料特性参数

Table 2 Material characteristic parameters

材料	电导率/($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	相对介电常数	相对磁导率
X52 钢	4×10^6	1	—
铜	5.998×10^7	1	1
软铁	0	1	10×10^6
空气	0	1	1

1)轴向拉伸应力仿真结果

平板拉伸试验可以评估材料在单轴拉伸载荷下的力学行为,对于验证传感器原理、评估传感器性能指标

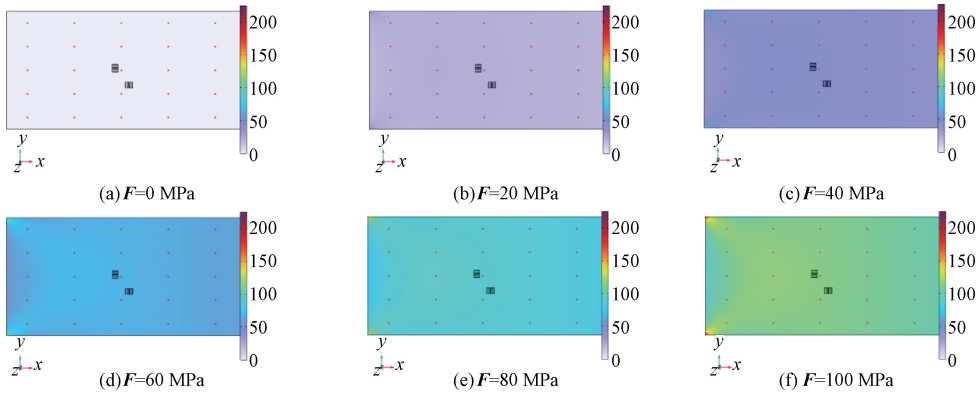


图 9 试件轴向拉伸应力云图

Fig. 9 Cloud of axial tensile stress of the specimen

在固定约束端,应力首先呈现快速减小趋势且随着拉力载荷的增大这种现象更加明显。同时由于固定端限制平板的变形,在靠近固定端的位置应力分布并不均匀,符合圣维南原理的基本规律,表明端部约束条件对平板整体力学行为产生了显著的边界效应。

在达到平板应力值极小点后,继续远离左侧固定端,平板应力值呈现非线性增长趋势,待达到峰值后逐步回落至平稳,趋近于设定的拉力载荷。

将传感器置于应力平稳区域,利于寻找线圈电压与应力关系。导出平板试样应力应变曲线(图 10),曲线斜率保持一定,表明整个拉伸过程试样均处于弹性阶段。

2)电磁仿真检测结果分析

对于磁各向异性正交 ACSM 传感器而言,磁场强度分布和电流激励特性是影响传感器性能的核心物理量。在正交激励线圈的激励下,试样表面形成交叉磁场和电场,磁感应强度(图 11)及电流强度(图 12)在两检测线圈附近产生最大值。在两检测线圈处存在平行磁场与电场且彼此干扰较少,独立电磁场便于实现不同方向应力的测量。

由图 13 可知,分别提取拉伸载荷变化时的轴向检测线圈(图 13(a))和环向检测线圈(图 13(b))处的磁通密度模的变化,结果表明磁通密度与施加的载荷存在较好的线性关系:轴向检测线圈处磁通密度随设定的轴向应力载荷增大而增大,环向检测线圈处磁通密度随载荷增大而减

具有重要意义。本研究通过有限元仿真和实际试验验证磁各向异性 ACSM 传感器的机理模型,通过对比实验数据和仿真结果,评估磁各向异性 ACSM 传感器的可行性。

利用有限元仿真软件的压磁模块,建立了平板试件的力磁耦合模型;平板试件左端面设置完全固定约束,模拟管道实际情况中的刚性连接;在试件右端面设置沿 x 轴负方向的拉力载荷控制边界条件,拉力载荷 F 从 0 MPa 起始,以 10 MPa 为增量步长逐步增至 100 MPa,共计 10 个载荷子步;选取拉力载荷为 0、20、40、60、80、100 MPa 时的 Von Mises 应力云图绘制,如图 9 所示。

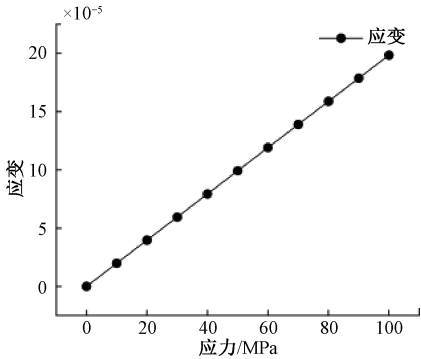


图 10 试件应力-应变曲线

Fig. 10 Stress-strain curve of the specimen

小,且同施加拉力载荷方向一致的轴向方向的磁通密度模变化范围明显更大,为环向的 261%。

3 试验研究

3.1 试验系统搭建

磁各异性 ACSM 传感器测量系统如图 14 所示,主要包括交流信号发生器、功率放大器、应力测量探头、信号调理电路、示波器、采集存储电路及上位机,信号调理电路包含前馈放大电路、锁相放大电路和低通滤波电路。

应力检测系统通过信号发生器提供两路频率为 5 kHz 的正弦交流信号,分别作为激励信号和参考信号,激励信

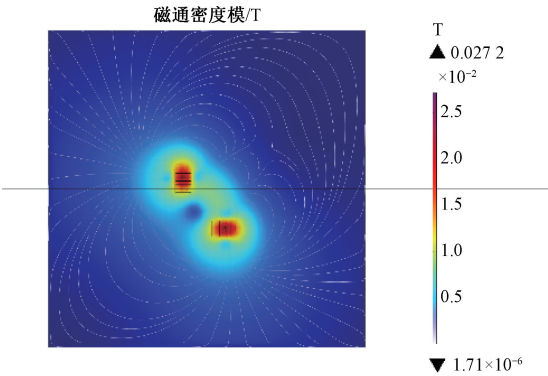


图 11 钢板表面磁场分布

Fig. 11 Magnetic field distribution on the surface of steel plates

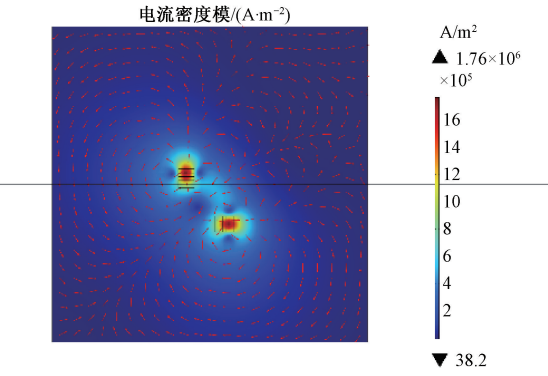
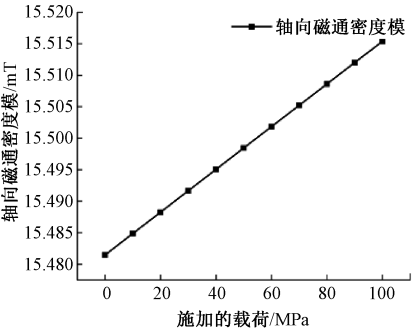


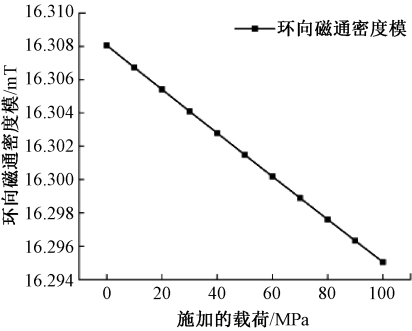
图 12 钢板表面涡流分布

Fig. 12 Eddy current distribution on the surface of the steel plate



(a) 轴向应力检测单元磁通密度

(a) Magnetic flux density of axial stress detection unit



(b) 环向应力检测单元磁通密度

(b) Magnetic flux density of circumferential stress detection unit

图 13 应力-磁通关系曲线

Fig. 13 Stress-flux relationship curve

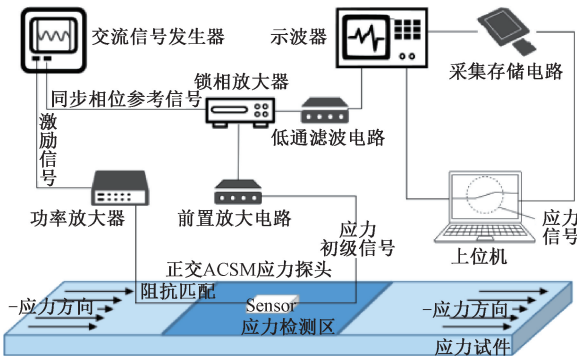


图 14 磁各异性 ACSM 传感器测量系统

Fig. 14 Block of the magnetic anisotropy ACSM sensor measurement system

号经功率放大模块 OPA541 后输入正交 ACSM 探头中驱动激励线圈;由应力加载工装对试件施加轴向拉力,检测线圈拾取试件应力信号,输入信号调理电路中,信号调理电路包括锁相放大器 AD630 和低通滤波电路;为提高应力信号的信噪比,采用低噪声运算放大器 AD620 对检测线圈拾取的初级应力信号进行放大;信号经调理电路处理后输入示波器或上位机显示。

3.2 试验过程

为了模拟工件受到的不同应力状态,通过万能拉伸机对样品施加轴向拉力。试件夹持在夹持装置上,被测试样由 X52 管线钢按照 GB/T 228.1-2021 制作,其结构尺寸如图 15 所示,性能参数如表 3 所示。

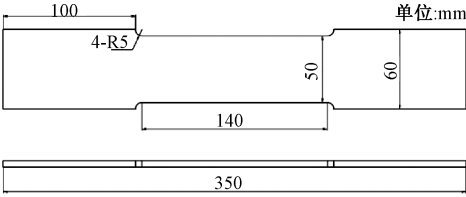


图 15 试样尺寸

Fig. 15 Sample size

表 3 X52 试样力学特性参数

Table 3 Mechanical characteristic parameters of sample X52

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
435	495	44

拉伸钢板通过液压装置装夹于拉伸机上,探头通过强力胶固定于钢板中央,钢板正反两侧均设置传感器作为参照组,如图 16 所示。具体试验步骤为:夹持试件后将传感器固定在试样表面,传感器轴向方向与拉伸机轴向拉力方向一致,标记传感器摆放角度为 0°;利用拉伸机沿试件长度方向施加拉伸载荷;拉伸载荷范围为 0~50 kN,步长为 10 kN,到达每一步长处停顿稳定,记录传感器、拉伸机示数;改变传感器摆放角度,如图 17 所示,重复上述试验步骤。



图 16 传感器试验

Fig. 16 Sensor test

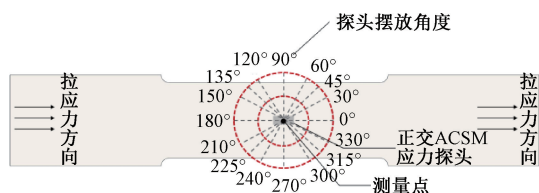


图 17 探头放置方式示意

Fig. 17 Schematic of the probe placement method

3.3 结果分析

选取每个传感器被导磁胶固定于试件上且无拉伸载荷时的传感器电压数值作为传感器基值 U_0 ，将各拉伸状态下传感器的电压示数 U_i 减去基值 U_0 作为应力的电压表征量，即 $\Delta U = U_i - U_0$ 。将 ΔU 作为纵坐标，试件应力大小作为横坐标绘制应力载荷-电压曲线。

在探头摆放位置为 0° 时，应力载荷-电压关系曲线如图 18 所示。在试块的弹性阶段，随应力载荷的增加，传感器输出电压值呈增加趋势，且线性度较好，试件左右两侧对照组数据趋势一致，有效表明磁各向异性正交 ACSM 传感器在单向应力状态下能够有效表征应力大小。

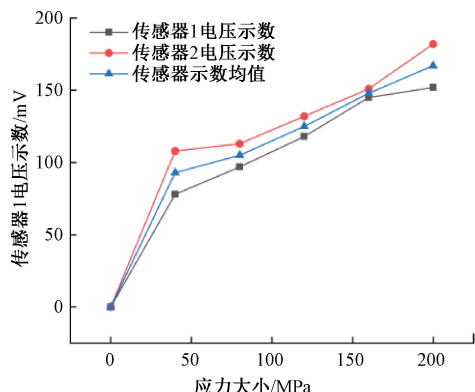


图 18 传感器示数与轴向应力关系

Fig. 18 The relationship between sensor readings and axial stress

更换探头与轴向应力方向为 30° 、 45° 、 60° 、 90° 、 120° 、 135° 、 150° 、 180° 、 210° 、 225° 、 240° 、 270° 、 300° 、 315° 、 330° 、 360° 重复试验，得到不同力磁角度下的传感器电压-应力载荷的关系曲线，如图 19 所示。结果显示，在 $0^\circ \sim 45^\circ$ ，传感器电压信号随角度的增大而减小；在 $45^\circ \sim 90^\circ$ ，传感器电压信号随角度的增大而反向增大；在 90° 时达到反向最大值；在 $90^\circ \sim 135^\circ$ ，传感器电压信号随角度的增大反向减小直至最小；在 $135^\circ \sim 180^\circ$ ，电压信号随角度的增大而增大；在 180° 时，传感器示数与 0° 时接近；角度在进入 $210^\circ \sim 360^\circ$ 后，传感器示数与从 $30^\circ \sim 180^\circ$ 时的变化规律相同。试验结果有效说明了磁各向异性正交 ACSM 传感器除可表征应力大小外，还可以与空间角度解耦，测量管道主应力方向，传感器示数与力磁夹角之间存在 $\Delta U = K^* (\epsilon_1 - \epsilon_h) \cos 2\theta$ 的关系。

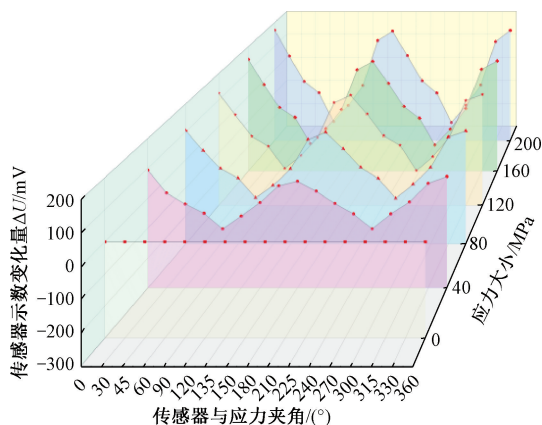


图 19 传感器示数与角度关系

Fig. 19 The relationship between the sensor reading and the angle

4 结 论

本研究通过建立管道应力-磁导率耦合模型，表征了管道磁导率磁各向异性与双轴应力的数值关系：磁导率差值 $\mu(\theta_1) - \mu(\theta_h)$ 同正交应力差值 $\epsilon_1 - \epsilon_h$ 之间存在线性相关关系； $\mu(\theta_1) - \mu(\theta_h)$ 同力磁夹角存在 $\cos 2\theta$ 的余弦相关关系。通过 COMSOL 多物理场仿真验证，轴向应力作用下的同向磁通密度变化幅度达正交方向的 2.61 倍，轴向检测线圈处磁场变化量显著高于环向检测线圈，与前述理论模型预测的磁各向异性特征高度吻合。研制的磁各向异性正交 ACSM 传感器通过正交线圈布局实现双轴应力解耦，实现管道平面应力大小及方向的测量，突破了传统 ACSM 技术仅能检测单轴应力的局限，为管道应力状态检测提供了一种全新的技术手段。

本研究从原理和试验上证明了磁各向异性交变电磁场应力检测技术的可行性，后续将进一步开展管道牵拉试验及现场应用验证传感器的实际效果。

参考文献

- [1] 李睿,陈健,王长友,等.管材力学性能与应力应变内检测技术及应用[J].油气储运,2023,42(4):407-413.
LI R, CHEN J, WANG CH Y, et al. In-line inspection technology of mechanical properties and stress-strain of pipe materials and its application[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(4): 407-413.
- [2] 马朝阳,梁煌朗,谢志栋,等.压力容器焊接区几何角度对相控阵检测的影响[J].电子测量技术,2025,48(16):78-87.
MA ZH Y, LIANG H L, XIE ZH D, et al. The influence of geometric angles in the welding area of pressure vessels on phased array detection [J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(16): 78-87.
- [3] 黄新敬,陈乾,马金玉,等.基于磁弹效应的悬跨管道应力检测方法研究[J].电子测量与仪器学报,2022,36(12):106-116.
HUANG X J, CHEN Q, MA J Y, et al. Research on spanning pipeline stress measurement based on magnetoelastic effect[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(12): 106-116.
- [4] 宋凯,侯凯,王婵,等.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.
SONG K, HOU K, WANG CH, et al. Ferromagnetic components stress characterization based on ACSM[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(10): 16-22.
- [5] 宋凯,潘继岗,王婵,等.基于ACSM法铁磁构件应力测量及影响因素研究[J].仪表技术与传感器,2016(8):87-91.
SONG K, PAN J G, WANG CH, et al. Stress measurement for ferromagnetic components based on ACSM and its influence factor analysis[J]. Instrument Technique and Sensor, 2016(8): 87-91.
- [6] 段金尧,钟婷,赵一桦,等.交流电磁场应力测量法在管道应力内检测中的应用[J].压力容器,2024,41(5):1-11.
DUAN J Y, ZHONG T, ZHAO Y H, et al. Application of AC electromagnetic field stress measurement method in the stress detection of pipelines [J]. Pressure Vessel Technology, 2024, 41(5): 1-11.
- [7] CORNU S, KARÉ R, SWEEDY A, et al. New approaches in utilizing eddy current testing to address pipeline inline inspection requirement[C]. International Pipeline Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2023.
- [8] CORNU S, KARÉ R, VOS W. New approaches in utilizing eddy current testing to address pipeline geohazards[C]. ASME India Oil and Gas Pipeline Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2023.
- [9] 邱忠超,张瑞蕾,李立新,等.一种检测铁磁材料应力的磁各向异性方法[J].仪表技术与传感器,2020(4):94-97.
QIU ZH CH, ZHANG R L, LI L X, et al. A magnetic anisotropy magnetic anisotropy method for detecting stress of ferromagnetic materials [J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(4): 94-97.
- [10] 杨理践,吕志鹏,高松巍,等.基于磁各向异性的管壁应力集中区域检测方法[J].沈阳工业大学学报,2024,46(1):97-102.
YANG L J, LYU ZH P, GAO S W, et al. Detection method based on magnetic anisotropy for stress concentration area of pipe wall [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2024, 46(1): 97-102.
- [11] 李立新,邱忠超,高强,等.基于磁各向异性方法的铁磁材料应力检测研究[J].仪表技术与传感器,2019(9):118-121.
LI L X, QIU ZH CH, GAO Q, et al. Research on stress detection of ferromagnetic materials based on magnetic anisotropy method[J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(9): 118-121.
- [12] 辛伟,梁琳,丁克勤,等.基于磁各向异性的铁磁构件残余应力磁测理论与方法研究[J].仪器仪表学报,2020,41(11):137-146.
XIN W, LIANG L, DING K Q, et al. Study on the magnetic measurement theory and method of residual stress for ferromagnetic components based on magnetic anisotropy [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11): 137-146.
- [13] LIU Y, LIU Q H, GAO R B, et al. Stress measurement of ferromagnetic materials using hybrid magnetic sensing[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-13.
- [14] 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 G F, LI X Y, TANG X, et al. Design and experimental research of a pipeline stress measurement system based on alternating current field[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(10): 1149-1157.
- [15] 王克宇.基于ACSM的管道应力检测系统开发及测

试[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2021.

WANG K Y. Pipeline stress testing system based on ACSM development and testing[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2021.

[16] 孙宏达. 基于 ACSM 法的石油管道应力测量系统设计与试验研究[D]. 南昌:南昌航空大学,2021.

SUN H D. Oil pipeline stress measurement based on the ACSM method, system design and experimental research[D]. Nanchang: Nanchang Aviation University, 2021.

[17] LIU SH C, LI R, PANG T. Dynamic detection method of axial stress in orthogonal alternating magnetic field of pipeline steel[J]. Measurement, 2025,253: 117690.

[18] LE SOUDEER J, HUBERT O. Magnetoelastic behavior of DP steel in biaxial mechanical loading condition-equivalent stress for magnetostriction[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2025, 628: 173058.

[19] DING L, LI H M, ZHAO CH T. Modelling and validating of constitutive relationship between uniaxial stress and AC electromagnetic field[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2024, 599: 172111.

[20] 吕志鹏. 基于磁各向异性技术的管道应力检测方法研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2020.

LYU ZH P. Pipeline stress testing based on the technology of magnetic anisotropy method research[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2020.

[21] JIA X X, CHEN J ZH, HE R Y, et al. A novel stress concentration inspection method for marine oil and gas pipeline based on UNSM [J]. Ocean Engineering, 2024, 300: 117497.

[22] MIAO X Y, SUN X L, ZHAO H. Quantitative stress evaluation of hydrogen transmission pipeline based on incremental magnetic-stress coupling model [J]. Energy, 2025,330: 136979.

作者简介

陈子婧,硕士研究生,主要研究方向为管道内检测技术、传感器研制等。

E-mail:2023216011@student.cup.edu.cn

李睿(通信作者),博士研究生,高级工程师,主要研究方向为管道完整性评价及管道检测技术等。

E-mail:kjlirui@petrochina.com.cn

朱明达,博士研究生,副教授,主要研究方向为传感技术及仪器研发等。

E-mail:zhumingda@cup.edu.cn

富宽,博士,高级工程师,主要研究方向为管道完整性评价及检测技术研发等。

杨光勇,硕士,助理工程师,主要研究方向为管道完整性评价等。