

重大工程装备

球墨铸铁管道磁记忆应力检测的数值模拟及验证研究

范翔峰^{1,2}, 杨理践¹

(1.沈阳工业大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110870; 2.中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 目的 针对当前磁记忆应力检测方法研究较少的问题, 建立适用于球墨铸铁管道的磁记忆应力检测方法, 并进行合理验证。方法 采用解析计算和有限元仿真模拟2种方法, 建立球墨铸铁管道磁记忆应力检测模型, 研究应力值和传感器提离值对球墨铸铁管道磁记忆信号的影响, 并通过搭建球墨铸铁管道磁记忆应力检测实验平台进行模型验证。结果 轴向峰值和径向零点位置不随应力变化发生偏移, 信号强度随应力值增加呈线性变化。球墨铸铁管道磁记忆信号随着提离值的增加呈指数衰减, 在2.5~4 mm内, 提离值的衰减近似呈线性, 信号波动较小, 适用于信号采集。结论 2种方法的结果较为吻合, 球墨铸铁管道磁记忆应力检测实验平台的结果与数学仿真计算具有很好的一致性, 这些模拟和实验结果均验证了基于解析计算和有限元建立的2种磁记忆应力检测模型的数值合理性。

关键词: 球墨铸铁; 管道; 应力检测; 磁记忆; 数值研究; 有限元模拟; 磁信号

中图分类号: TG141

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)08-0163-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.08.019

Numerical Simulation and Verification of Magnetic Memory Stress Detection in Ductile Iron Pipeline

FAN Xiangfeng^{1,2}, YANG Lijian¹

(1. School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. China Institute of Atomic Energy (CIAE), Beijing 102413, China)

ABSTRACT: Aiming at the lack of study on magnetic memory stress testing method, the work aims to develop a new method for ductile iron pipelines and verify its reasonableness. Based on analytical calculations and finite element simulation, a magnetic memory stress testing model for ductile iron pipelines was developed. The influence of stress values and sensor lift-off on the magnetic memory signal of the ductile iron pipelines was studied, and the model was verified by constructing an experimental platform for magnetic memory stress testing of ductile iron pipelines. The results indicated that the axial peak and the radial zero-point positions did not shift with stress change, while the signal strength varied linearly with the increase of stress. The magnetic memory signal of the ductile iron pipelines exponentially decayed with the increase in lift-off. Within the range of 2.5 to 4 mm, the decay was approximately linear with minimal signal fluctuation, which was suitable for signal acquisition. The results from both methods are in good agreement. The outcomes from the magnetic memory stress testing experimental platform

收稿日期: 2024-02-18; 修订日期: 2024-03-18

Received: 2024-02-18; Revised: 2024-03-18

引文格式: 范翔峰, 杨理践. 球墨铸铁管道磁记忆应力检测的数值模拟及验证研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(8): 163-171.

FAN Xiangfeng, YANG Lijian. Numerical Simulation and Verification of Magnetic Memory Stress Detection in Ductile Iron Pipeline[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(8): 163-171.

align well with the mathematical simulation calculations, validating the numerical rationality of the two magnetic memory stress testing models established based on analytical calculations and finite element simulation.

KEY WORDS: ductile iron; pipeline; stress detection; magnetic memory; numerical research; finite element simulation; magnetic signal

球墨铸铁是一种高强度铸铁材料,通过球化和孕育处理将铸铁中的石墨变成球状,进而有效提高铸铁的力学性能,特别是塑性和韧性,得到比碳钢还高的强度。由于良好的综合性能和成形性,球墨铸铁在航空航天、核电、油气运输等重要工业领域和市政用水管道中得到广泛应用,如污水管、废水管和自来水管等。然而,在长时间的服役过程中,球墨铸铁除了受到服役介质的作用以外,还可能承受流体摩擦应力、局部结构应力、热应力和材料内应力等多种力学环境累积作用,且在管道不同部位(如弯头、三通处)的应力累积效应均不同。由于材料自身特性、环境和应力的耦合作用,球墨铸铁管道的抗疲劳强度、抗应力腐蚀开裂、抗脆断能力及高温蠕变开裂能力可能会显著下降,从而导致材料性能的变化。这无疑将严重威胁管道的正常使用和安全性,因此对管道服役阶段应力集中程度的评估已经成为管道安全评估的主要方向^[1]。

在众多管道检测技术当中,超声、涡流、射线等方法在管道、桥梁、轨道、锅炉等铁磁性金属结构的事事故预防和缺陷监测等方面发挥了重要作用^[2-6],但都存在不同程度的局限性。例如,超声检测法可以对不透明的材料内部结构精准成像,适用于金属、非金属、复合材料等,但其在空气中会消耗散射,需要借助耦合剂来完成。射线检测法能够穿透较薄的物体,形成直观俯视透视图,且成像快,可以在工件内部进行无损检测成像,但其受制于材料本身密度和内部影像相互重叠的影响,成像质量低,检测成本高。涡流检测法无需接触检测材料,对金属工件表面检测时反应快,灵敏度高,环境要求低,但被检材料必须导电,仅适合金属表面缺陷检测,分析判断专业性高,检测成本相对高。磁记忆检测法是利用材料的应力集中区具有的天然磁力学关系来评估其应力状态的一种技术,与其他磁性检测技术相比,该方法不仅可以确定应力集中的部位,对铁磁性材料应力集中区域进行早期预判和评估,而且还不需要昂贵的磁化设备,无需表面处理,具有检测速度快、设备轻便等优点^[7]。该技术的提出和应用引起了广泛关注与讨论,并取得了快速的发展^[8-10]。

磁记忆检测技术实质上涉及力、磁场以及材料微观结构之间的相互影响。Jiles等^[11-13]在磁机械效应、磁滞特性、磁化特性以及铁磁材料的磁性无损检测等方面进行了大量的研究工作,通过对铁磁性构件的磁机械效应的研究,探讨了铁磁性材料所受应力与磁化

强度之间的关系,为定量计算磁记忆信号提供了基础依据。基于材料畴壁理论、“有效场理论”和“理想回滞线”,J-A 量化模型得以提出。该理论模型经过多位研究学者的验证,并不断完善。针对 J-A 模型的不足, Schneider 等^[14-15]提出了协同各向异性理论,而 Smith 等^[16]在此基础上建立了均匀能力模型。与此同时,研究者们将模拟计算引入磁记忆技术的研究中。姚凯等^[17]利用 ANSYS 有限元软件,针对缺陷处应力集中宽度、埋深位置以及传感器提离值等不同影响因素,分析了它们对漏磁信号变化特征的影响。Dubov 等^[18-19]将磁记忆检测技术与传统的巴克豪森噪声法、拉力测量法、硬度测量法和试验设计法进行了对比,并通过奥氏体磁信号检测结果的分析,论证了其可行性。国内在磁记忆检测的发展和机理研究始于 21 世纪初。南昌航空大学任吉林教授领导的团队^[20-21]研究了磁记忆检测中的现象,并深入探讨了磁记忆信号与应力之间的耦合机理。黄松龄等^[22]基于金属磁记忆法,分析了焊缝附近残余应力分布和试件表面磁感应强度垂直分量的关系。总体而言,磁记忆检测技术从提出到现今已经得到了较好的发展,目前已经对与其有关的定量计算、模型构建进行了验证分析,发现其与传统的方法相比,具有响应快、检测环境要求低等优点。然而,目前该方法还主要应用于低合金钢管道,如 X70、X80 等^[23-26],对于球墨铸铁这类含有大量石墨、珠光体等微观结构,且广泛应用于航空航天、核电、油气运输等重要工业领域和市政领域的管道,相关研究仍较少。

由此可知,将磁记忆检测法应用于球墨铸铁管道应力检测方面是一项创新性的举措,验证其在相关方面的适用性,并建立合适的模型具有挑战性,将会进一步完善磁记忆检测技术在管道应力损伤精准评估的应用。因此,本文针对球墨铸铁管道磁记忆应力检测信号,采用了解析计算和有限仿真元计算 2 种方法,建立了球墨铸铁管道磁记忆应力检测模型,研究了应力值和传感器提离值对球墨铸铁管磁记忆信号的影响,为进一步量化应用该技术提供了理论依据。

1 计算方法与模型

1.1 特性解析计算

基于 J-A 磁滞模型理论,当应力作用于材料时,其实际磁化强度 M 可以表示为:

$$M=M_{\text{rev}}+M_{\text{irr}} \quad (1)$$

式中: M_{rev} 表示由磁壁弯曲造成的可逆磁化强度; M_{irr} 则由钉扎点引起的不可逆磁化强度组成。通过对畴壁运动机理进行研究, 推导出不可逆

微分磁化强度和可逆微分磁化强度 2 个微分方程, 并采用适当的无磁滞磁化函数求解此微分方程组, 得到式 (2):

$$\frac{dM}{d\sigma} = \frac{\frac{\sigma}{\varepsilon^2}(M_{an} - M) + cM_s \left[\operatorname{csch}^2\left(\frac{H_e}{a}\right) - \frac{a}{H_e^2} \right] \left\{ \frac{3}{\mu_0} [(\gamma_1 + \gamma_1'\sigma)M + 2(\gamma_1 + \gamma_2'\sigma)M^3] \right\}}{1 - cM_s \left[\operatorname{csch}^2\left(\frac{H_e}{a}\right) - \frac{a}{H_e^2} \right] \left[\frac{3\sigma}{\mu_0} (\gamma_1 + 6\gamma_2 M^2) + \alpha \right]} \quad (2)$$

中: σ 为应力值; ε 为应变值; M_{an} 为非磁滞磁化强度; c 为可逆磁化系数; M_s 为饱和磁化强度; H_e 为等效磁场; a 为分子场参数; α 为磁化耦合系数; μ_0 为真空磁导率; γ_1 、 γ_2 、 γ_1' 、 γ_2' 分别表示应力方向。

在 MATLAB 软件下求解, 得到球墨铸铁管在拉应力与压应力下的磁力学曲线, 如图 1 所示。可以看出, 随着拉应力和压应力的增加, 球墨铸铁管的磁性得到增强, 球墨铸铁管道磁力学曲线存在维拉反转点。当应力解除时, 材料的磁性并不会回到初始位置, 这意味着产生残余磁场。

利用磁荷模型建立了空间磁场, 并将球墨铸铁磁力学计算引入该空间磁场, 从而建立了球墨铸铁管道磁记忆应力检测的数学模型。在模型中设定球墨铸铁管表面存在一个应力损伤区 (如图 2 所示), 该应力损伤区的尺寸为 $D_x \times D_y \times D_z$ 。将应力损伤区中由于应力集中引起的局部磁场变化用端面上均匀分布的磁荷等效。在这个模型中, 以应力损伤区中心为原点, 建立一个三维直角坐标系。在端面上, 设磁荷面微元为 $dy_m dz_m$ 。因此, 在坐标系中任意取一点 $P(x, y, z)$, 磁荷面微元在该点产生的磁场强度为:

$$dH = \frac{\rho r_0 dy_m dz_m}{2\pi\mu_0 |r_0|^3} \quad (3)$$

$$\begin{cases} H_x = \frac{MD_z}{4\pi\sqrt{D_x^2/4 + D_z^2}} \int_{-D_y}^{D_y} \int_{-D_z}^{D_z} \frac{x + D_x}{\left[(x + D_x)^2 + (y - y_m)^2 + (z - z_m)^2 \right]^{3/2}} - \frac{x - D_x}{\left[(x - D_x)^2 + (y - y_m)^2 + (z - z_m)^2 \right]^{3/2}} dy_m dz_m \\ H_z = \frac{MD_z}{4\pi\sqrt{D_x^2/4 + D_z^2}} \int_{-D_y}^{D_y} \int_{-D_z}^{D_z} \frac{z - z_m}{\left[(x + D_x)^2 + (y - y_m)^2 + (z - z_m)^2 \right]^{3/2}} - \frac{z - z_m}{\left[(x - D_x)^2 + (y - y_m)^2 + (z - z_m)^2 \right]^{3/2}} dy_m dz_m \end{cases} \quad (5)$$

式中: H_x 为切向磁记忆信号强度; H_z 为法向磁记忆信号强度。

1.2 有限元仿真计算

利用有限元仿真方式对球墨铸铁管道磁记忆应力检测特性进行多种工程仿真计算时, 需要进一步建立球墨铸铁管道材料磁导率与应力以及磁特性的对应关系。在材料系统的能量下, 磁化强度 M 与材料磁导率 μ_r 可以进一步表示为:

$$M = (\mu_r - 1)H \quad (6)$$

式中: H 为磁记忆信号强度。将式 (6) 代入式 (2) 得:

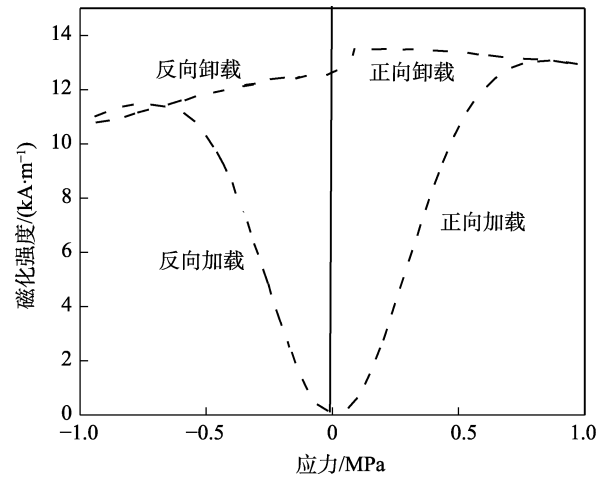


图 1 球墨铸铁管磁力学曲线
Fig.1 Magnetomechanics curve of ductile iron pipeline

式中: r_0 为面微元到点距离; ρ 为磁荷密度, 可用式 (4) 表示。

$$\rho = \mu_0 M \frac{D_z}{\sqrt{D_x^2/4 + D_z^2}} \quad (4)$$

对式 (3) 进行积分, 并代入式 (4), 得到缺陷在点 P 处产生的散射磁场强度为:

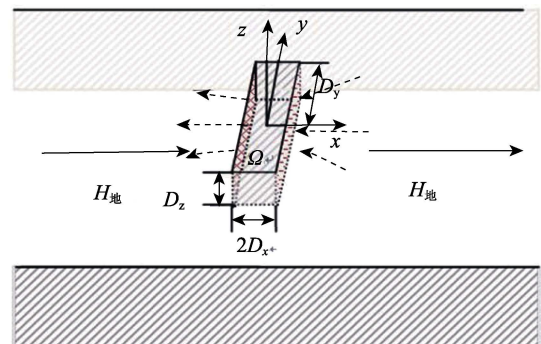


图 2 球墨铸铁管应力损伤区数学模型计算
Fig.2 Calculation of mathematical model of stress damage zone of ductile iron pipeline

$$\frac{d\mu_r}{d\sigma} = \frac{\frac{\sigma}{E\xi} [M_{an} - (\mu_r - 1) \cdot H] + cM_s \left[\operatorname{csch}^2 \left(\frac{H_e}{a} \right) - \frac{a}{H_e^2} \right] \cdot \left\{ \frac{3}{\mu_0} [(\gamma_1 + \gamma'_1 \sigma)(\mu_r - 1) \cdot H + 2(\gamma_1 + \gamma'_2 \sigma)(\mu_r - 1)^3 \cdot H^3] \right\}}{\left\{ 1 + cM_s \left[\operatorname{csch}^2 \left(\frac{H_e}{a} \right) - \frac{a}{H_e^2} \right] \cdot \left[\frac{3\sigma}{\mu_0} (\gamma_1 + 6\gamma_2 (\mu_r - 1)^2 \cdot H^2) + \alpha \right] \right\}} H \quad (7)$$

因此，基于 J-A 磁滞模型的磁力学计算与磁荷模型的磁空间分布相结合，可以建立球墨铸铁管道磁记忆信号数学模型，使得能够从解析的角度对球墨铸铁管道磁记忆检测特性进行量化计算。利用有限元仿真方法，可以对球墨铸铁管道的工程检测特性进行仿真计算与深入分析。

2 实验验证

为了研究和验证磁记忆信号对球墨铸铁管的应力检测特性，本文基于球墨铸铁管磁记忆应力检测的数学模型与仿真模型的计算，建立了球墨铸铁管磁记忆应力检测实验平台，并进行了相应的实验，实验装置及设备如图 3 所示。利用液压式万能拉力机 (WAW-2000) 等外力加载设备对球墨铸铁试件进行了加载，其中加载速率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，加载模式为单向拉伸应力。同时，利用俄罗斯动力诊断公司的 TSC-2M-8 金属磁记忆检测设备，采集了试件表面的磁记忆信号，并对相关数据进行了计算与分析。

3 计算结果与讨论

3.1 基于特性解析计算应力和提离值对磁记忆信号的影响

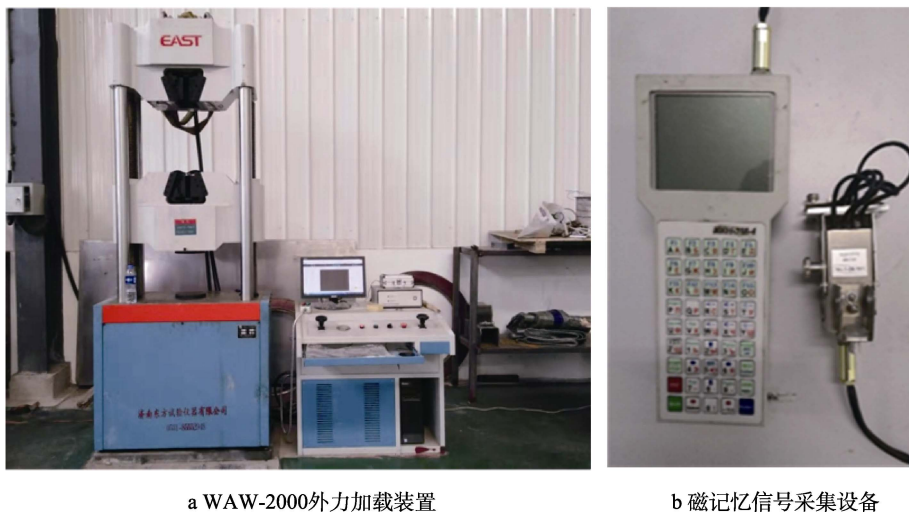
利用式 (2)，设置应力集中程度变化范围为 10~60 MPa (间隔 10 MPa)，以应力损伤区为零点。沿 x 轴正负半轴分别取 +80 mm 和 -80 mm 作为扫描路

径，设置提离值为 3mm。利用式 (5) 得到了不同应力下球墨铸铁管道磁记忆信号的解析计算图，如图 4 所示。由图 4 可知，球墨铸铁管道磁记忆信号在切向分量上具有波峰，在法向分量上具有峰峰，且过零点。切向峰值和法向峰峰值位于应力损伤的中心位置，轴向的峰值与径向的零点位置不随应力变化而发生偏移，而是随应力值的增加呈线性增加。

利用公式 (2)，设置应力集中程度为 60 MPa，以应力损伤区为零点，沿 x 轴正负半轴分别取 +80 mm 和 -80 mm 作为扫描路径，提离值范围为 1~6 mm。利用式 (5) 计算得到了不同提离值下球墨铸铁管道磁记忆信号的解析计算结果，如图 5 所示。从图 5 中可以观察到，球墨铸铁管道磁记忆信号在轴向上的峰值与径向上的零点位置不随提离值变化而发生偏移。随提离值的增加，信号逐渐衰减。通过提取磁记忆信号的切向峰值和法向峰谷值，得到了球墨铸铁磁记忆信号传递特性图，如图 6 所示。图 6 表明，球墨铸铁管道磁记忆信号随着提离值的增加呈指数衰减，当提离值在 2.5~4 mm 时，提离值的衰减拟合曲线近似呈线性，而且信号波动较小，适合进行信号采集。

3.2 基于有限元仿真计算应力和提离值对磁记忆信号的影响

如图 7 所示，建立一块长方形球墨铸铁管截取材料，其尺寸为 200 mm×25 mm×15 mm。材料的磁导率为 280 N/m。在材料中部设置应力损伤区，使用式 (7) 设定应力值。在材料的外部引入磁导率为 1 的



a WAW-2000外力加载装置

b 磁记忆信号采集设备

图 3 实验装置及设备

Fig.3 Experimental device and equipment: a) WAW-2000 external force loading device; b) magnetic memory signal acquisition device

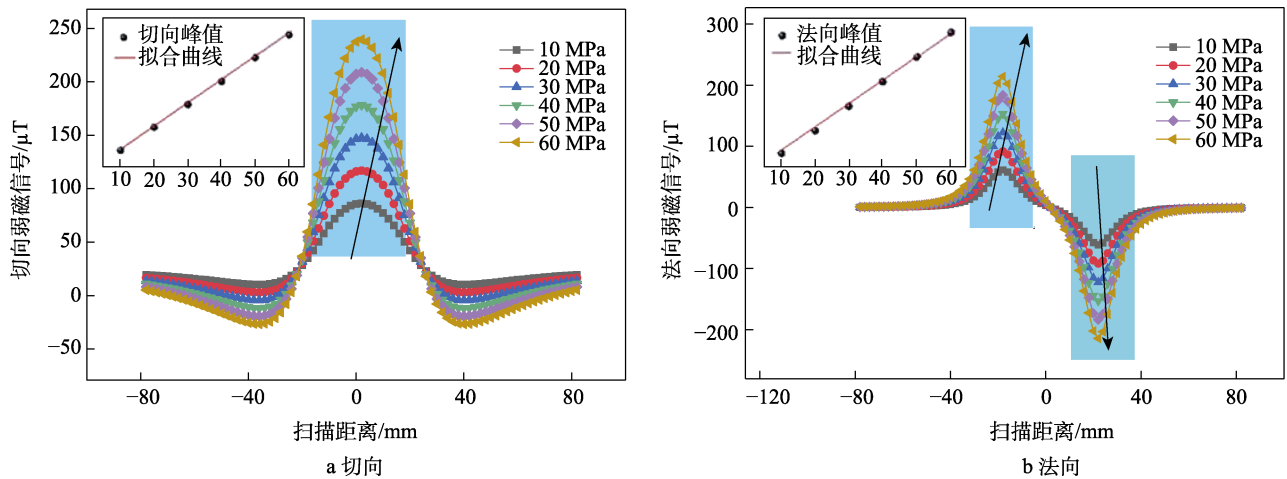


图 4 不同应力下球墨铸铁管道磁记忆信号解析

Fig.4 Analytical diagram of magnetic memory signal of ductile iron pipeline under different stresses: a) tangential direction; b) normal direction

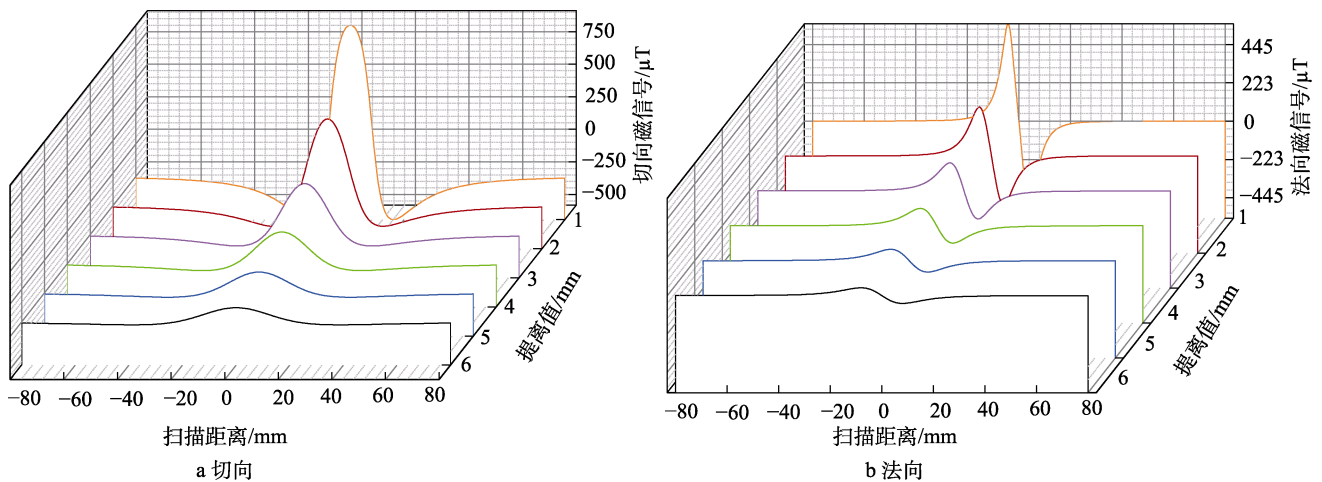


图 5 不同剥离值下球墨铸铁管道磁记忆信号解析

Fig.5 Analytical diagram of magnetic memory signal of ductile iron pipeline under different removal values: a) tangential direction; b) normal direction

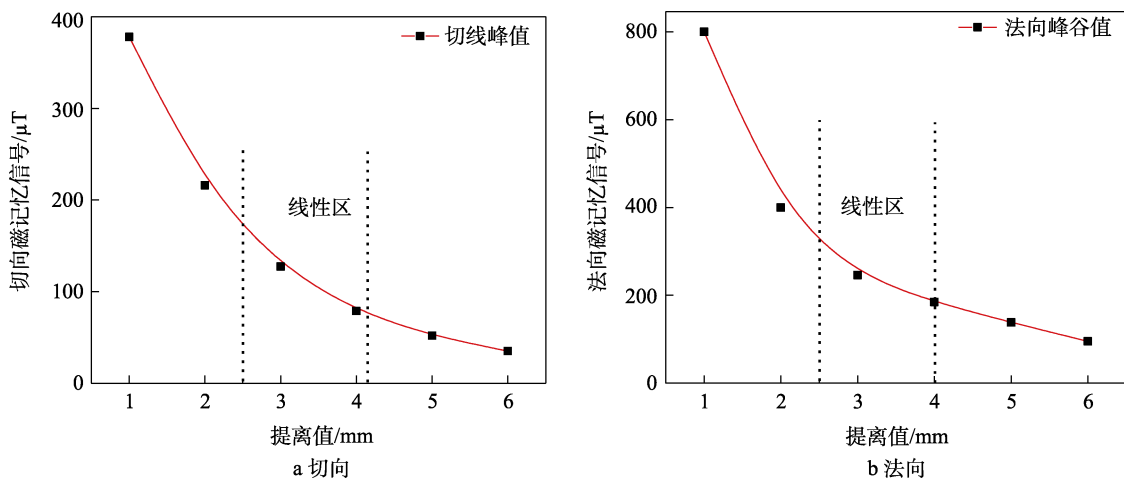
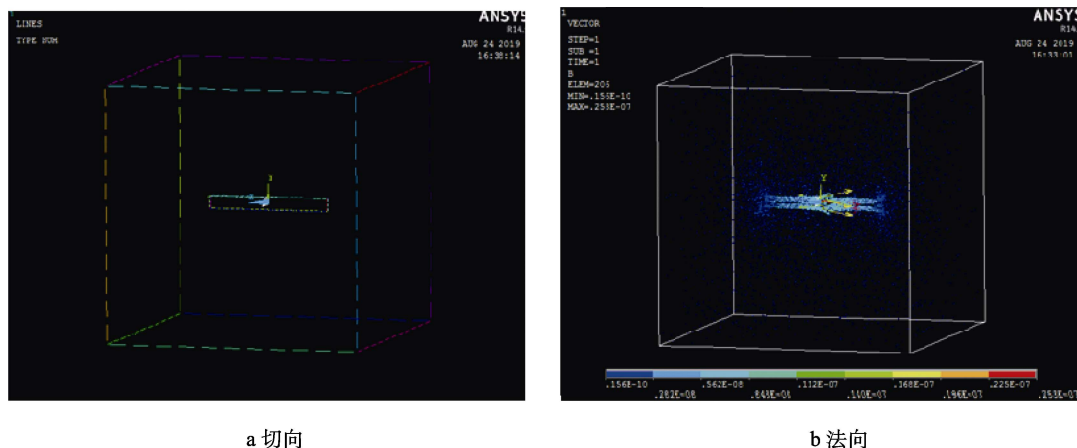


图 6 球墨铸铁管道磁记忆信号传递特性

Fig.6 Magnetic memory signal transmission characteristics of ductile iron pipeline: a) tangential direction; b) normal direction



a 切向

b 法向

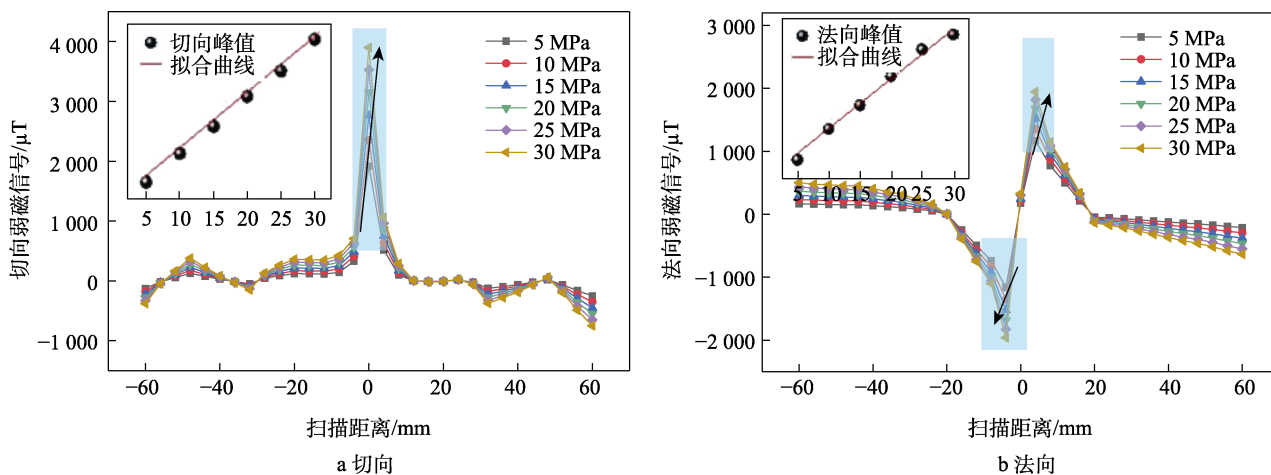
图7 不同应力下磁记忆信号

Fig.7 Magnetic memory signal under different stresses: a) tangential direction; b) normal direction

空气场。以应力损伤区为原点，建立一个三轴直角坐标系，并计算检测信号的强度。

以式(7)设置应力损伤区的应力变化范围为5~30 MPa，以5 MPa为间隔，外磁场设置为50 μT(地磁场)，沿x轴的正负半轴分别取+60 mm和-60 mm作为检测器的扫描路径，同时设置提离值为3 mm。通过计算磁记忆信号强度，得到了不同应力下球墨铸铁磁记忆信号的仿真计算结果，如图8所示。从图8中可以观察到，球墨铸铁管截取材料磁记忆信号在切向存在峰值，法向存在峰峰值，且过零点。切向峰值和法向峰峰值位于应力损伤的中心位置，且随应力值的增加而增加。以式(7)设置应力损伤区应力为

30 MPa，外磁场设为50 μT(地磁场)，沿x轴的正负半轴分别取+80 mm和-80 mm作为检测器的扫描路径，同时设置提离值的变化范围为1~6 mm。通过计算磁记忆信号强度，得到了不同提离值下球墨铸铁磁记忆信号的仿真计算结果，如图9所示。在仿真计算中，球墨铸铁管道磁记忆信号在轴向上的峰值与径向上的零点位置不随提离值的改变而发生变化。通过提取磁记忆信号的切向峰值和法向峰峰值，得到球墨铸铁磁记忆信号传递特性图，如图10所示。图10表明，球墨铸铁管道磁记忆信号随着提离值的增加呈指数衰减，当提离值在2.5~4 mm时，磁记忆信号出现线性区。



a 切向

b 法向

图8 不同应力下球墨铸铁磁记忆信号仿真计算

Fig.8 Simulation calculation of magnetic memory signal of ductile iron pipeline under different stresses: a) tangential direction; b) normal direction

3.3 球墨铸铁管道磁记忆应力检测实验验证

利用采集磁记忆信号与对应力制作球墨铸铁管道的磁记忆应力检测信号特征图，如图11a所示。同时提取切向与法向峰峰值，绘制球墨铸铁管道的磁记忆应力检测信号磁力学曲线图，如图11b所示。从图

11a可以看出，球墨铸铁管道的磁记忆应力检测信号在切向上存在峰值，在法向上存在峰峰值，且过零点。切向峰值和法向峰峰值位于扫描距离的76~89 mm，即位于应力损伤的中心位置。由图11b可见，随着应力的增加，磁记忆信号的切向峰值和法向峰峰值也增大。这些结果表明，球墨铸铁管道磁记忆应力检测实

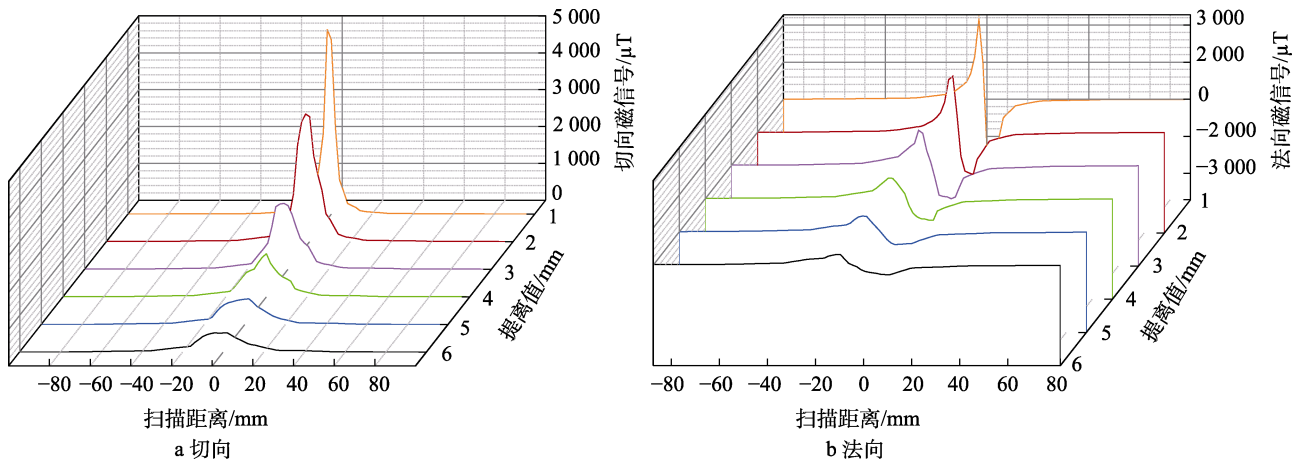


图 9 不同提离值下球墨铸铁磁记忆信号仿真计算

Fig.9 Simulation calculation of magnetic memory signal of ductile iron pipeline under different removal values: a) tangential direction; b) normal direction

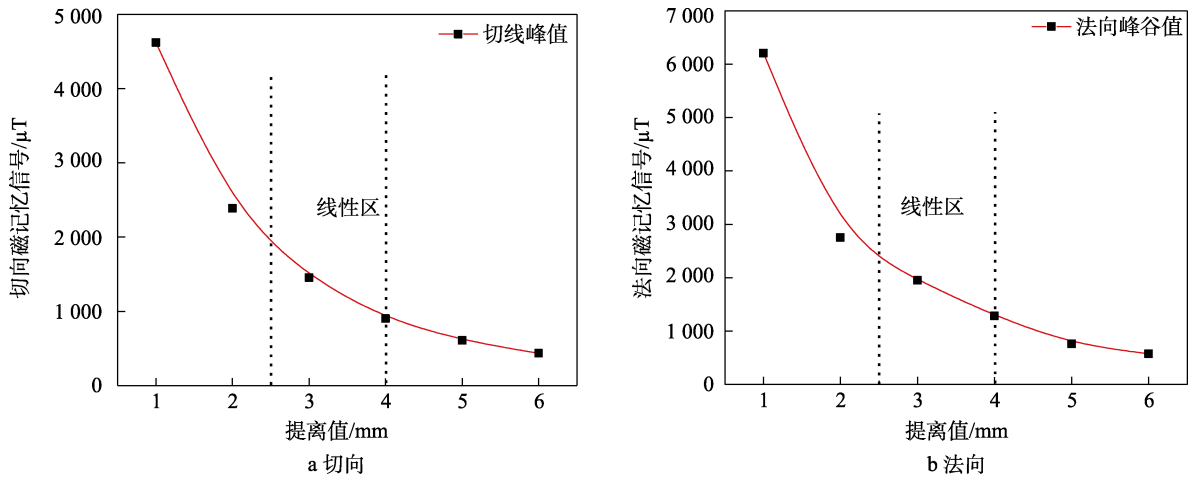


图 10 球墨铸铁管磁记忆信号传递特性

Fig.10 Magnetic memory signal transmission characteristics of ductile iron pipeline: a) tangential direction; b) normal direction

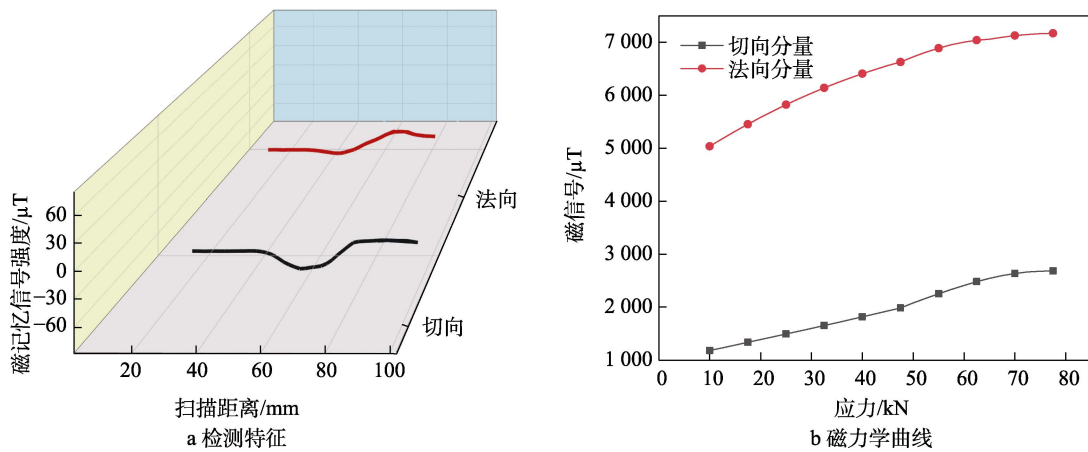


图 11 球墨铸铁管实验特性

Fig.11 Experimental characteristics of ductile iron pipeline: a) detection characteristics; b) magnetic curve

验平台的实验结果与数学模型和仿真计算具有很好的一致性。

4 结论

本文通过利用特性解析计算方法和有限元方法,建立了2种不同的球墨铸铁磁记忆应力检测模型,通过数值模拟计算了应力值和提离值对球墨铸铁磁记忆信号的影响,并通过分析切向和法向的磁记忆信号特征变化验证了这些模型。结合球墨铸铁管道磁记忆应力检测实验平台的实验,得出以下结论:

1) 基于特性解析计算和有限元仿真计算建立的球墨铸铁磁记忆应力检测模型,均能够有效反映磁记忆技术的特征,而且两者的模拟计算结果较为吻合。

2) 轴向峰值和径向零点位置在应力变化时不发生偏移,信号强度随应力值增加呈线性变化。球墨铸铁管道磁记忆信号随提离值的增加呈指数衰减,在2.5~4 mm内,提离值的衰减近似呈线性,信号波动较小。

3) 数值模拟计算和实际应力检测实验结果相印证,即球墨铸铁管道在法向和切向上的磁记忆信号强度变化趋势是相似的,验证了基于解析计算和有限元建立的2种磁记忆应力检测模型的数值合理性。

参考文献:

- [1] 李健, 陈世利, 黄新敬, 等. 长输油气管道泄漏监测与准实时检测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1747-1760.
LI J, CHEN S L, HUANG X J, et al. Review of Leakage Monitoring and Quasi Real-Time Detection Technologies for Long Gas & Oil Pipelines[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1747-1760.
- [2] 侯静, 梁清文, 张宇, 等. 陵水气田输气管道阴极保护效果数值仿真研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(10): 50-56.
HOU J, LIANG Q W, ZHANG Y, et al. Simulation Study on Influencing Factors of Sacrificial Anode Cathodic Protection Effect of Oil Pipeline of Lingshui Platform[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(10): 50-56.
- [3] 李叶斌, 姚国斌, 郭志宏, 等. 基于光纤振动传感的长输管道清管器跟踪定位方法[J]. 化工自动化及仪表, 2021, 48(5): 430-435.
LI Y B, YAO G B, GUO Z H, et al. Tracking and Positioning Method for Long Distance Pipeline Pig Based on Optical Fiber Vibration Sensor[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2021, 48(5): 430-435.
- [4] LANGMAN R. Measurement of the Mechanical Stress in Mild Steel by Means of Rotation of Magnetic Field Strength[J]. NDT International, 1981, 14(5): 255-262.
- [5] 孟祥岩, 李磊, 李祥琦, 等. 管道交流干扰腐蚀风险识别方法研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(3): 132-140.
MENG X Y, LI L, LI X Q, et al. Identification Method of AC Interference Corrosion Risk of Pipeline[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(3): 132-140.
- [6] 朱丹, 曾效舒. 铸铁件超声波检测方法的应用和发展[J]. 现代铸铁, 2009, 29(5): 76-79.
ZHU D, ZENG X S. Application of Ultrasonic Test to Iron Castings and Its Development[J]. Modern Cast Iron, 2009, 29(5): 76-79.
- [7] DOUBOV A. Screening of Weld Quality Using the Magnetic Metal Memory Effect[J]. Welding in the World, 1998, 41(3): 196-199.
- [8] DOUBOV A. Diagnostics of Metal Items and Equipment by Means of Metal Magnetic Memory[C]// NDT'99 and UK Corrosion'99 Conference. Poole: [s. n.], 1999.
- [9] MAKAR J M, TANNER B K. The Effect of Stresses Approaching and Exceeding the Yield Point on the Magnetic Properties of High Strength Pearlitic Steels[J]. NDT & E International, 1998, 31(2): 117-127.
- [10] NOTOJI A, HAYAKAWA M, SAITO A. Strain-Magnetization Properties and Domain Structure Change of Silicon Steel Sheets Due to Plastic Stress[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(5): 3074-3077.
- [11] JILES D C, ATHERTON D L. Theory of the Magnetisation Process in Ferromagnets and Its Application to the Magnetomechanical Effect[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1984, 17(6): 1265-1281.
- [12] JILES D C, ATHERTON D L. Theory of Ferromagnetic Hysteresis[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1986, 61(1/2): 48-60.
- [13] JILES D C. Theory of the Magnetomechanical Effect[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 1995, 28(8): 1537-1546.
- [14] SCHNEIDER C S. Anisotropic Cooperative Theory of Coaxial Ferromagnetoelasticity[J]. Physica B: Condensed Matter, 2004, 343(1/2/3/4): 65-74.
- [15] SCHNEIDER C S. Effect of Stress on the Shape of Ferromagnetic Hysteresis Loops[J]. 2005, 97(10): 10E503.
- [16] SMITH R C, DAPINO M J, BRAUN T R, et al. A Homogenized Energy Framework for Ferromagnetic Hysteresis[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(7): 1747-1769.
- [17] 姚凯, 王正道, 邓博, 等. 金属磁记忆技术的数值研究[J]. 工程力学, 2011, 28(9): 218-222.
YAO K, WANG Z D, DENG B, et al. Numerical Study on Metal Magnetic Memory Technique[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(9): 218-222.
- [18] DUBOV A A. Estimating the Service Life of Thermal Power Equipment in Accordance with the New National Standard[J]. Thermal Engineering, 2011, 58(11): 957-961.
- [19] DUBOV A A. Development of a Metal Magnetic Memory Method[J]. Chemical and Petroleum Engineering, 2012, 47(11): 837-839.
- [20] 任吉林, 王东升, 宋凯. 典型铁磁构件磁记忆效应的试

- 验研究[J]. 无损检测, 2005, 27(8): 409-411.
- REN J L, WANG D S, SONG K. Experimental Study on the Magnetic Memory Effect of Typical Ferromagnetic Items[J]. Nondestructive Testing Technology, 2005, 27(8): 409-411.
- [21] 任吉林, 陈曦, 宋凯. 金属构件磁记忆效应影响因素研究[J]. 无损检测, 2006, 28(6): 292-295.
- REN J L, CHEN X, SONG K. Study on the Influencing Factors of Metal Magnetic Memory Effect of Metallic Structures[J]. Nondestructive Testing, 2006, 28(6): 292-295.
- [22] 黄松岭, 李路明, 施克仁, 等. 地磁场激励下残余应力分布的磁检测方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(11): 1426-1428.
- HUANG S L, LI L M, SHI K R, et al. Magnetic Testing Method of Residual Stress Distribution by Geomagnetic Excitation[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2002, 42(11): 1426-1428.
- [23] HUANG S L, LI L M, SHI K R, et al. Magnetic Field Properties Caused by Stress Concentration[J]. Journal of Central South University of Technology, 2004, 11(1): 23-26.
- [24] LI Y F, ZENG X G, WEI L M, et al. Characterizations of Damage-Induced Magnetization for X80 Pipeline Steel by Metal Magnetic Memory Testing[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2017, 54(1): 23-35.
- [25] 田野, 罗宁. 强弱磁场下管道应力内检测方法[J]. 油气储运, 2023, 42(5): 542-549.
- TIAN Y, LUO N. Internal Detection of Pipeline Stress under Strong and Weak Magnetic Field[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(5): 542-549.
- [26] 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 Pipeline Stress Measurement System Based on Alternating Current Field[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(10): 1149-1157.