

基于磁记忆的油气管道应力损伤检测方法研究*

王国庆^{1,2}, 杨理践², 刘斌²

(1. 辽宁石油化工大学机械工程学院 抚顺 113001; 2. 沈阳工业大学信息科学与工程学院 沈阳 110870)

摘要:应力集中是油气管道损坏的关键因素,对管道安全构成重大威胁。对其进行有效检测,既可发现由应力集中引起的机械损伤亦可实现对管道早期损伤的预判。磁记忆检测技术作为一种应力检测方法得到了业界认可。从能量平衡角度出发,分别从宏观和微观的角度对应力作用下的铁磁体磁记忆信号特征进行分析,建立应力与材料磁化率及原子磁矩之间的理论关系模型。采用基于第一性原理的 CASTEP 软件对铁碳金属体系的磁记忆力磁耦合过程进行仿真。结果表明,铁磁体在外力作用下,体系能量将重新平衡并达到稳定状态,电子能带及态密度分布特征发生改变,导致材料磁性下降,原子磁矩及材料磁化率随应力增大呈线性减小的变化趋势。通过对含裂纹管道的磁记忆检测,验证了应力损伤磁记忆检测方法的理论分析正确性及工程应用有效性。

关键词:磁记忆;应力损伤;油气管道;原子磁矩

中图分类号: TH701 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 430.25

Study on the testing method of oil-gas pipeline stress damage based on magnetic memory

Wang Guoqing^{1,2}, Yang Lijian², Liu Bin²

(1. School of Mechanical Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China;

2. School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Stress concentration is the key factor that induces the damage of oil-gas pipeline. It is a serious threat to the safe of pipeline. Effective test can both find the mechanical damage induced by stress concentration and achieve pre-judgment of early damage of pipeline. Magnetic memory technology has been widely recognized by the customers as a method of stress testing. In this paper, magnetic memory signal character of ferromagnetic material in different stress application is analyzed in the macroscopic and microcosmic range from the point of energy balance. The theory relation model between stress and susceptibility or atomic magnetic moment is build. Force magnetic coupling process of magnetic memory in Fe-C metal system is simulated by CASTEP software, which is based on first principle. The results show that ferromagnetic system energy balances and achieves to stable state when the stress is applied. It also weakens the material magnetism and changes the distribution character of electron band structure and density of state. Atomic magnetic moment and susceptibility decrease linearly along with the increase of stress. Finally, magnetic memory testing experiments on pipeline contained crack demonstrate the correctness of theory analysis and effectiveness of engineering application.

Keywords: magnetic memory; stress damage; oil-gas pipeline; atomic magnetic moment

1 引言

油气管道作为国家能源重要的运输方式,具有高效、低耗等优势,成为国民经济和社会发展不可缺少的“生命

线”。我国现有在役石油天然气管道十几万公里,遍布全国 20 多个省市和渤海、黄海、南海等广大海域,并且每年还在新建大批油气管线,形成国民经济的血脉。由于管道具有高能高压、易燃易爆、有毒有害、连续作业、链长面广、环境复杂等特点,决定了其安全管理的重要性^[1]。很

多新建管道由于建设速度快,新材料、新工艺、新技术的研究与推广应用尚不完全配套,工程建设质量控制不够规范,直接影响了管道本体质量,可能直接导致在投产前强度试压中或刚投产运行不久就发生破坏^[2]。另外还有一大部分管线已运行多年,如东部管网服役运行已30多年,其他在用管道中有约60%服役时间超过20年。据统计,我国约有40%左右的管网建于20世纪60~70年代,当时设计标准较低,管道本身缺陷较多,加之投入不足、老化严重,同时由于服役过程中环境、应力等各因素的综合作用,使得这批管道进入事故高发期^[3]。

石油天然气输送管道所使用的铁磁性金属材料(如碳钢、合金钢)具有良好的强度、硬度、塑性和韧性,其发生损坏的主要根源是应力集中引起的各种微观及宏观机械损伤,如管体局部塑性变形、疲劳裂纹等^[4]。因而对应力损伤的检测既可实现对形成危害的检测亦可对管道可能发生破坏的危险区进行预判,这对降低事故的发生、保障管道安全运行具有重要意义。

传统的超声、射线、漏磁等无损检测技术只能检测到已形成缺陷,而无法实现对导致缺陷形成的关键因素-应力集中的检测,因而也就无法对危害形成的早期阶段进行预判^[5]。磁记忆检测技术是在地磁环境下,铁磁材料局部应力集中区出现表面磁场畸变,从而产生表面自有磁场信号的变化^[6]。源于地磁场强度本身较微弱,该信号强度相比于强磁场来说非常微弱。通过检测材料表面的磁记忆信号可实现对应力集中程度及应力损伤的在线检测^[7-8]。但目前针对磁记忆信号形成的机理及特征尚无统一的定论,还不能明确在各种条件下的检测信号特征^[9-13]。同时由于微弱的磁记忆信号亦受影响,对实验研究方法的有效性具有较高要求,很多实验方法具有一定局限性,不能有效说明磁记忆现象真实情况^[14-17],从而导致该方法在一些工程应用中的有效性受到质疑。本文从铁磁体能量平衡出发,从宏观和微观两个角度对应力作用下铁磁体表面磁记忆信号的存在状态及特征进行理论分析。通过基于第一性原理的CASTEP软件对磁记忆力磁耦合的过程进行模拟仿真,分析应力作用对铁磁体能量状态、电子能带和态密度分布及原子磁矩的影响,得到应力与磁记忆信号间的定量变化关系。通过在实际管道上对裂纹应力集中区的检测,验证了磁记忆效应的理论分析及油气管道应力损伤磁记忆检测工程应用的有效性。

2 应力损伤磁记忆检测模型

铁磁材料的基本特点是磁畴结构,磁畴是其一切磁特性的基础^[18]。磁畴的本质是物质原子磁矩在一微小区域内的有序排列,而它的形成及存在状态则是各种能

量共同作用的结果。各种能量须遵循的热力学准则是:在平衡条件下,磁畴的实际存在状态,必定是总自由能取最小值的状态^[19]。铁磁体的应力损伤受应力及地磁场的共同作用,因而其磁信号的产生是一个力磁耦合的过程。

当磁畴受外磁场 H 作用时将发生磁畴转动,设磁畴的易磁化方向同所加磁场方向之间的夹角为 θ_0 。磁矩原在易磁化方向上,铁磁体外磁场能 E_H 为:

$$E_H = -\mu_0 M_s H \cos\theta_0 \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率, M_s 为饱和磁化强度, H 为外磁场强度。

而受外场的作用将转动一个小角度 θ ,此时铁磁体的外磁场能 E_H' 为:

$$E_H' = -\mu_0 M_s H \cos(\theta_0 - \theta) \quad (2)$$

外磁场能 E_H' 比磁矩在易磁化方向时的数值 E_H 要小。 θ 越大,外磁能越小,如果没有其他阻碍,磁矩会继续转动,直到 $\theta = \theta_0$ 为止。但当铁磁体中同时存在应力 σ 时,将产生应力能 E_σ ,可用下式表示:

$$E_\sigma = \frac{3}{2} \lambda_s \sigma \sin^2\theta \quad (3)$$

式中: λ_s 为磁致伸缩系数。

应力能的存在会产生应力各向异性,如同磁各向异性一样,对磁矩转动起到阻碍作用。此时对材料磁化的影响需考虑应力能。这样单位体积中的总自由能是应力能 E_σ 与外磁场能 E_H' 之和,即:

$$E = E_\sigma + E_H' = \frac{3}{2} \lambda_s \sigma \sin^2\theta - \mu_0 M_s \cdot H \cos(\theta_0 - \theta) \quad (4)$$

对式(4)求极小,可得到 θ 与外场 H 的关系为:

$$\frac{dE}{d\theta} = 3\lambda_s \sigma \sin\theta \cos\theta - \mu_0 M_s H \sin(\theta_0 - \theta) = 0 \quad (5)$$

在弱磁场下,磁矩转动的角度 θ 很小,所以式(5)中 $\sin\theta = \theta$, $\cos\theta \approx 1$, $\sin(\theta_0 - \theta) \approx \sin\theta_0$,于是式(5)可简化为:

$$\theta = \frac{\mu_0 M_s H}{3\lambda_s \sigma} \sin\theta_0 \quad (6)$$

另外,在磁场方向的磁化强度可表示为:

$$M = M_s \cos(\theta_0 - \theta) \quad (7)$$

由式(6)和(7)可计算材料起始磁化率 χ 为:

$$\chi = \left(\frac{dM}{dH} \right)_{H \rightarrow 0} = M_s \sin(\theta_0 - \theta) \frac{d\theta}{dH} \approx M_s \sin\theta_0 \frac{d\theta}{dH} = \frac{\mu_0 M_s^2}{3\lambda_s \sigma} \sin^2\theta_0 \quad (8)$$

式(8)为具有相同方向、均匀的应力区域的起始磁化率。实际铁磁材料为多晶体,在不同晶粒中应力方向有所不同, θ_0 有各种数值,因而需求出 χ 对方向的平均值。认为各磁畴中应力方向是均匀分布的,将式(8)对

θ_0 求平均,得到多晶体磁化率公式为:

$$\chi_{(多晶)} = \bar{\chi} = \frac{\mu_0 M_s^2}{3\lambda_s \sigma} \cdot \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin^2 \theta_0 \sin \theta_0 d\theta_0 d\varphi = \frac{\mu_0 M_s^2}{3\lambda_s \sigma} \cdot \frac{2}{3} = \frac{2\mu_0 M_s^2}{9\lambda_s \sigma} \quad (9)$$

材料的磁化率表征了铁磁材料的磁化特征。由式(9)可知应力改变了铁磁体的磁性和磁化状态,使磁体在局部形成多畴,产生新的各向异性,使局部磁化强度的特征发生改变。由铁磁体在外磁场 H 作用下的磁化强度 M 与磁化率关系可得:

$$M = \chi H = \frac{2\mu_0 M_s^2 H}{9\lambda_s \sigma} \quad (10)$$

由式(10)可知,在应力集中区,由于应力的显著增大,将导致局部磁化强度明显减小,表现出磁场畸变特征,即在局部应力集中区出现表面磁场信号幅值突然变化的特征。

根据量子力学理论,物质的磁性来源于原子,原子的磁性来源于原子磁矩,而原子磁矩取决于电子轨道磁矩及自旋磁矩,本质上决定于电子所处的能量状态及自旋分布特征。外力作用将引起铁磁体微观结构变化,从而影响轨道电子能量状态及自旋分布状态,进而引起原子磁矩的改变^[20]。根据 Stoner 判据,固体总磁矩 P_m 为所有原子磁矩之和。

$$P_m = \sum \mu_j \quad (11)$$

而固体磁化强度 M 与原子磁矩的关系可表示为:

$$M = \frac{P_m}{V} \quad (12)$$

式中: V 为固体体积。由式(10)~(12),可建立应力与原子磁矩之间的数学关系模型为:

$$\sum \mu_j = \frac{2\mu_0 M_s^2 HV}{9\lambda_s \sigma} \quad (13)$$

式(13)表明了应力与其作用区域内总原子磁矩间的线性变化关系。在应力作用区域,原子磁矩随应力的增加而减小,材料的微观磁特性发生改变,宏观表现为材料表面磁化强度分布特征的改变,形成金属的磁记忆效应。

3 磁记忆效应仿真计算

在对应力作用下铁磁材料表面磁记忆信号特征的理论分析基础上,采用第一性原理方法对力磁耦合过程中的磁记忆效应进行仿真计算。利用材料研究软件 Material-Studio 中基于第一性原理的 CASTEP 模块,建立具有体心立方晶格结构的 α -Fe 超原胞力磁耦合计算模型^[21]。基态晶格常数设定为 2.8664 \AA ,并在 a, b, c 3 个晶向上各扩展 3 个单位,构成 $3 \times 3 \times 3$ 超原胞。实际管

道钢材中都含有碳元素,因而在模型中加入 C 原子掺杂,并以置换的形式存在于模型的原胞结构中,构成铁碳合金体系,晶体模型如图 1 所示。

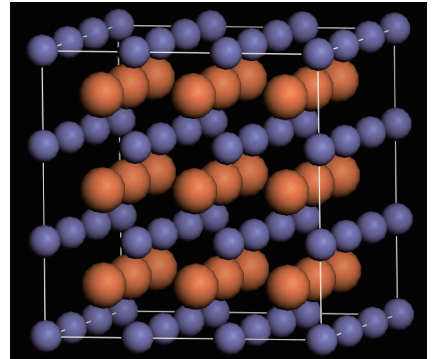


图 1 计算模型

Fig. 1 The calculation model

计算中,考虑铁磁体力磁耦合过程的磁记忆效应与电子自旋运动状态相关,加入电子自旋极化。设定布里渊区 K 点抽样为 $11 \times 11 \times 11$,计算截止能量 330 eV 。采用广义梯度近似(general gradient approximation, GGA)函数对力磁耦合的计算过程做近似处理。GGA 函数综合考虑了外力作用对体系电子密度及其梯度分布的影响,可实现磁记忆力磁耦合过程的准确计算^[22]。

3.1 体系能量

对所建立的力磁耦合模型 X, Y, Z 3 个方向同时施加拉应力,模拟管道内部压力状态。计算得到各外力下体系能量的变化过程,如图 2 所示。

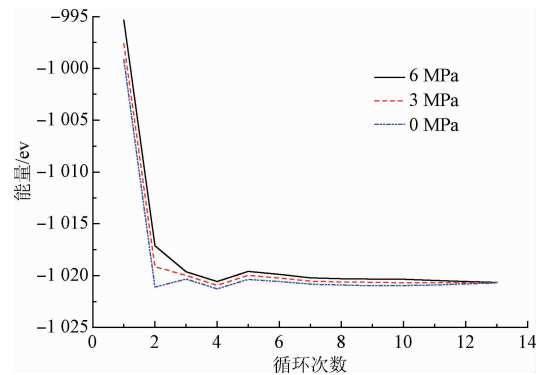


图 2 体系能量

Fig. 2 System energy

外力作用将导致体系能量增加,使体系处于不稳定状态,计算过程通过多次循环以达到稳定的能量平衡点,由图 1 计算结果可见,体系能量在初期经几次波动后,最终通过循环均达到极小,即达到能量平衡的稳定状态,表明力磁耦合模型的计算过程收敛,实现了体系基态性质的准确计算。

3.2 电子能带结构及态密度分布

材料的磁性在微观上体现在原子磁矩上,而原子磁矩决定于电子的自旋运动及分布状态。铁磁晶体在外力作用下,晶体结构将发生改变,进而影响原子核外轨道电子的自旋运动状态及分布特征,导致与之有关材料磁特性的改变。这可以通过体系的电子能带及态密度分布特征的计算反映出来。各种外力下体系电子能带结构如图3所示。

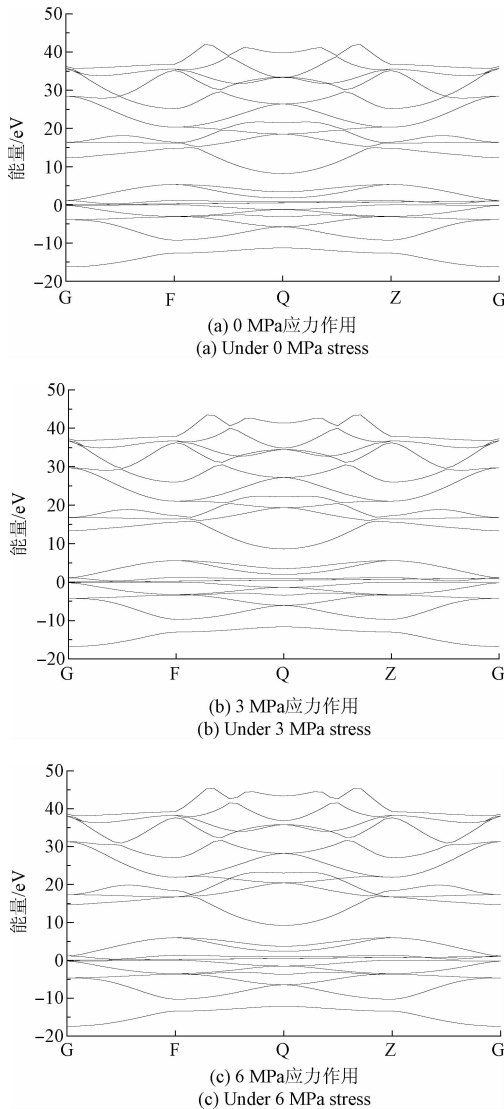


图3 电子能带结构
Fig. 3 Electron band structure

由图3可见,在0、3、6 MPa 3种应力状态下,在铁磁体系的布里渊区内,费米能级(能量为零)附近的能带分布均存在交叠状态,轨道定域电子和巡游电子能带占据费米能级附近,能带弯曲且与费米能级相交,无禁带区域,表明在几种应力下铁碳合金体系均具有铁磁特性。从能带结构及分布看,外力作用未改变能带的

形状,即体系的铁磁性特征未改变。但外力改变了能带的分布,随着外力增加,费米能级两侧能带向远离费米能级方向移动,说明费米能级附近电子能量逐渐降低,这将影响到体系的基态磁性,导致铁磁体磁性的改变。

体系电子能带分布的变化与自旋电子的运动及分布直接相关,根本上决定于自旋向上运动和自旋向下运动两类电子分布态密度之差,即电子总的态密度分布。而铁磁体系的磁性来源于轨道电子的自旋运动,因而通过对体系电子态密度分布的计算可进一步分析铁磁体的磁性变化特征。不同应力状态下,体系电子总态密度分布计算结果如图4所示。

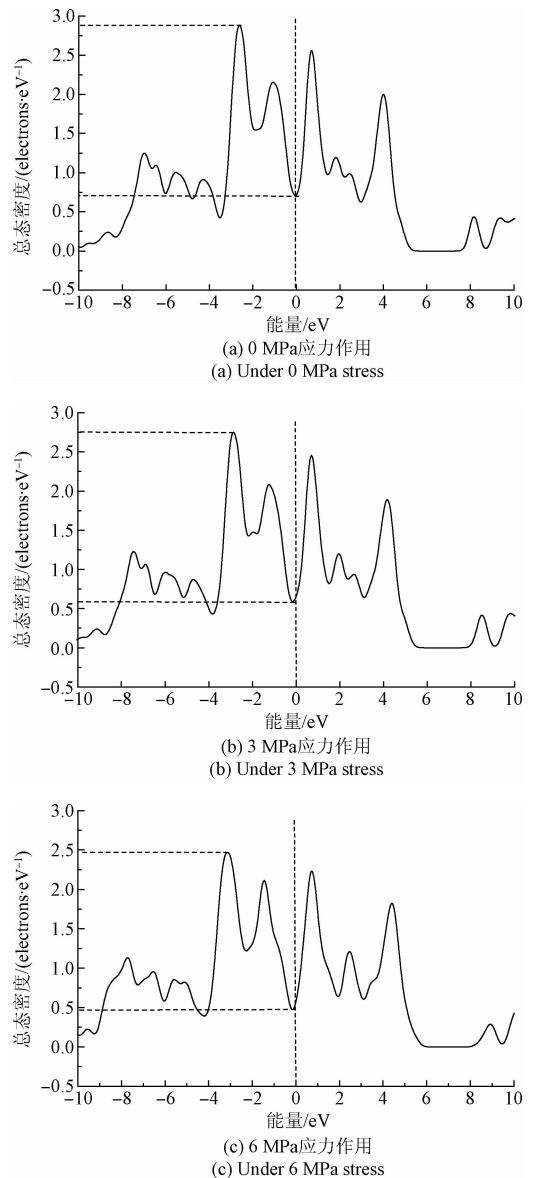


图4 电子态密度分布
Fig. 4 Electron density of states

由图4可见,随着外力的增加,在费米能级附近,自旋电子态密度分布曲线的波峰波谷值均明显降低,表明了自旋电子在费米能级附近的分布数量逐渐减少,自旋向上与自旋向下运动电子的态密度之差逐渐减小。自旋电子态密度分布直接影响到体系的磁性,从而可知随着外力的增加,体系的磁性逐渐减弱。

3.3 原子磁矩的计算

通过铁磁金属体系能带结构及电子分布态密度的计算,定性的得到了铁磁体在外力作用下体系磁特性的变化特征。而为了对铁磁材料力磁耦合过程的磁信号特征进行定量分析,计算了外力下铁磁材料的原子磁矩,结果如图5所示。

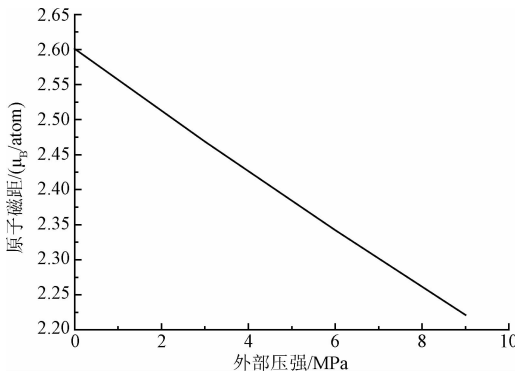


图5 原子磁矩与压强的关系

Fig. 5 The relationship between atomic magnetic moment and stress

由图5可见,铁磁体在外力作用下,原子磁矩逐渐减小,外力与原子磁矩之间呈线性变化关系。而原子磁矩决定材料的磁化强度,因而外力作用将导致材料在应力作用区内磁化强度的减弱,表现出磁记忆效应的特征,与理论分析结果一致。

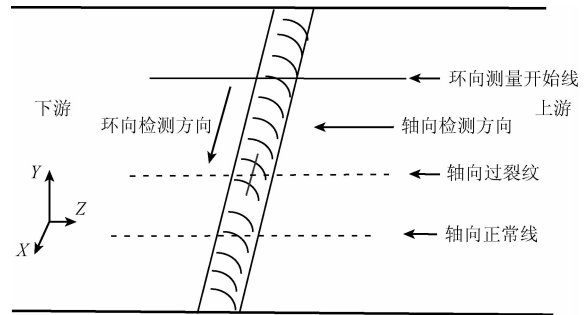
4 应力损伤磁记忆检测工程实验

4.1 实验

以含裂纹的天然气管道螺旋焊缝为研究背景,开展应力损伤磁记忆检测有效性的工程实验研究。管道材质为X80,外径1 219 mm,壁厚18 mm。裂纹存在于焊缝内表面,经超声波及TOFD(超声衍射时差法)由外壁检测裂纹埋深为11 mm。磁记忆信号检测在外壁进行,因而排除了裂纹开口对磁记忆信号测量的影响,同时实验在实际管线上进行,排除了有限尺寸试件实验中磁信号检测的端部效应。

针对实验管道的焊缝裂纹区,分别进行沿螺旋焊缝和沿轴向过焊缝两个方向上的检测。检测区域为焊缝区。实验在管道现场进行在线检测,压力通过管内气体

的排放进行控制。分别采集在不同管道内压下,管道表面的磁记忆信号。实验管道及检测方式如图6所示。



(a) 检测方式
(a) The schematic diagram of testing

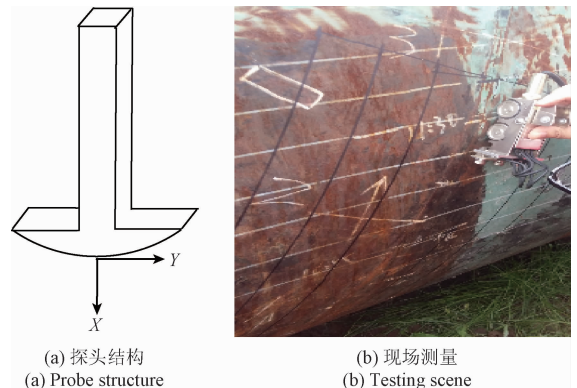


(b) 实验管道现场
(b) The photograph in the scene

图6 实验管道

Fig. 6 Experiment pipeline

磁记忆信号采集仪器采用俄罗斯TSC-2M型弱磁检测仪。检测磁场范围为 $\pm 2\ 000\ \text{A/m}$,误差小于5%。扫描装置为一可移动小车,安装4组探头,每组探头垂直放置,分别采集X向(法向)和Y向(切向)磁场。4组探头覆盖了整个焊缝区(检测宽度约30 mm),通过小车移动对检测面进行扫查,检测并记录里程及磁记忆信号检测数据。探头结构及现场测量示意图如图7所示。



(a) 探头结构
(a) Probe structure

(b) 现场测量
(b) Testing scene

图7 检测装置

Fig. 7 Testing device

4.2 结果及分析

在实验管道上分别标定沿焊缝及沿轴向测量的起始线,如图6(a)所示。从起始线开始,在0、3和6 MPa 3个压力下,分别检测沿焊缝和沿轴向两个检测区的磁记忆信号。比较X向和Y向的磁记忆信号检测结果可知,两向的磁记忆信号具有一致的特征,但X向信号特征更加明显,因而这里只对X向的磁记忆信号特征进行分析。

1) 沿焊缝方向检测

沿焊缝方向的X向磁记忆信号检测结果如图8所示。

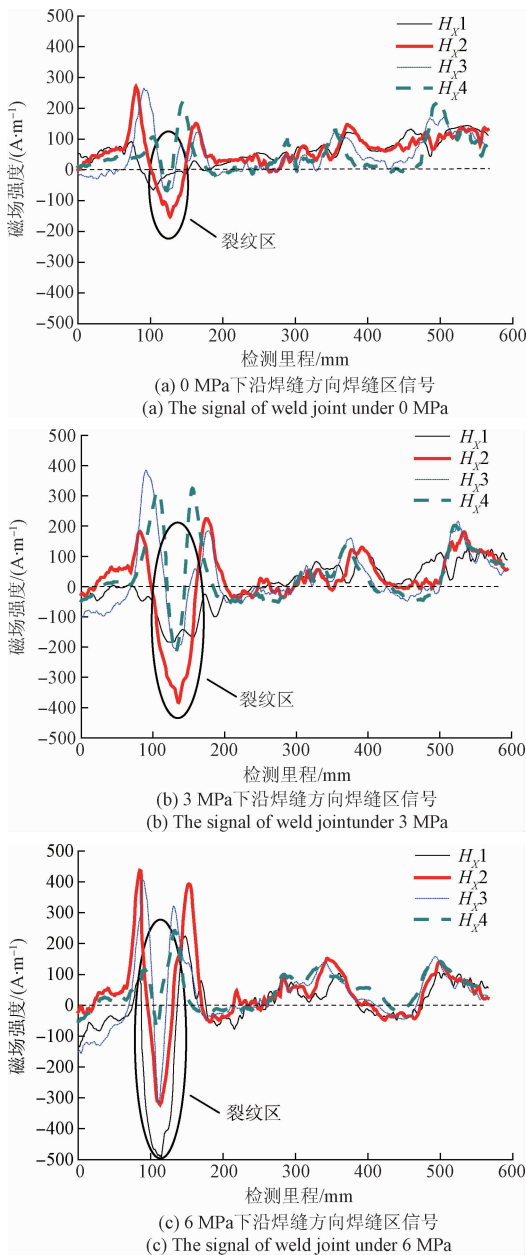


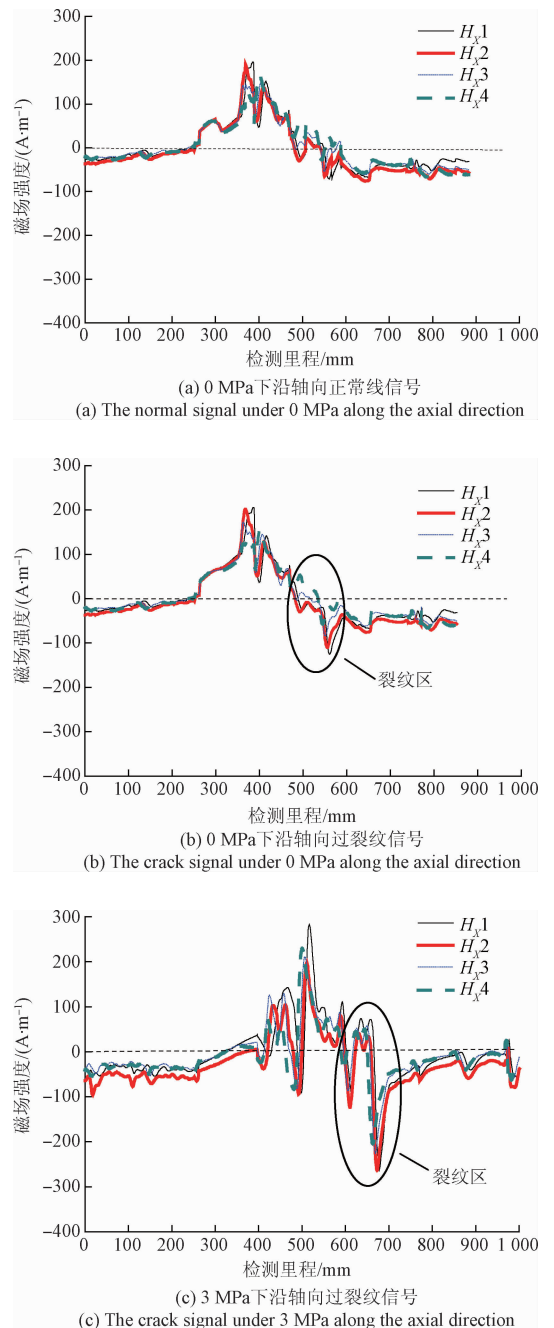
图8 不同压力下沿焊缝方向焊缝区信号

Fig. 8 The signal of weld joint under different stress along the direction of weld joint

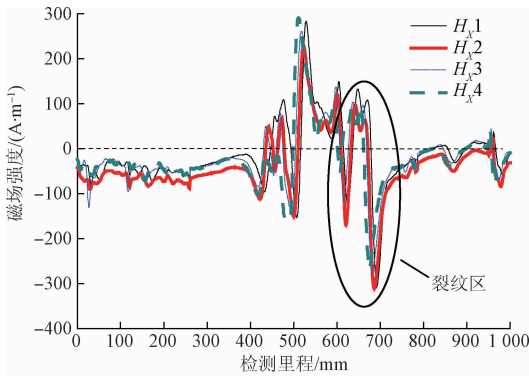
由图8检测结果可见,3种压力下,焊缝区磁记忆信号均存在一系列波动,这是由焊缝区组织的不均匀性引起,但其波动幅值不大。在不同压力下,焊缝裂纹区将产生强烈的应力集中,对应磁场强度均出现了急剧下降,导致峰谷信号的明显降低,从检测信号可明显看出裂纹区。并且压力越大,曲线峰谷值下降越多。4个探头的信号特征具有一致性。检测结果表明,应力损伤具有磁记忆效应特征。

2) 沿轴向检测

不同压力下,沿管道轴向过正常区和过裂纹区的X向磁记忆信号检测结果如图9所示。



(c) The crack signal under 3 MPa along the axial direction



(d) 6 MPa下沿轴向过裂纹信号
 (d) The crack signal under 6 MPa along the axial direction

图9 不同压力下沿轴向检测信号

Fig. 9 The testing signal under different stress along the axial direction

在轴向检测状态下,由图9(a)、(b)检测结果可见,在无应力时,焊缝区也出现了由焊缝组织不均匀引起的磁场信号较小的起伏振荡变化。裂纹区因存在一定的应力集中,信号极小值比正常区小,表现出了磁记忆效应,从磁场峰谷值的特征可判断出裂纹的存在。由图9(c)、(d)可见,在应力的作用下,由组织不均匀引起的磁场振荡变化特征依然存在,但应力集中引起了磁场极小值的明显减小。并且随着压力的增大,磁场峰谷下移,极小值逐渐降低,形成明显的磁记忆信号特征。检测结果表征了应力对管道表面磁记忆信号的影响特征,同时也体现了应力损伤的磁记忆效应。

5 结 论

应力作用下,铁磁体内部产生的应力能导致体系能量发生变化。通过磁场能的降低抵消应力能的增加使铁磁体内部能量平衡并达到稳定的极小值状态是应力损伤磁记忆效应产生的根本原因。应力作用的宏观表现为材料磁化率的下降,微观表现为原子磁矩的减小。应力作用与材料磁化率和原子磁矩间存在线性关系。

材料磁性与铁磁晶体内部结构及电子运动及分布状态有关。应力作用引起铁磁体电子能带结构及态密度分布特征发生变化,进而导致材料磁性减弱,定量表现为原子磁矩随应力的增大而减小。

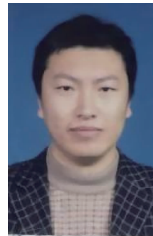
对管道螺旋焊缝存在的裂纹区,在不同的应力和检测方式下,均检测到明显的磁记忆信号特征,且随着应力的增加,磁记忆信号极小值逐渐减小。表征了磁记忆信号与应力的对应规律,验证了理论分析的正确性及管道应力损伤磁记忆检测的有效性。

参考文献

- [1] 黄小美,李百战,彭世尼,等.燃气管道失效概率评估方法研究[J].石油学报,2010,31(4):664-667.
HUANG X M, LI B ZH, PENG SH N, et al. Assessment methods of failure probability on gas pipelines[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 664-667.
- [2] 杨锋平,罗金恒,赵新伟,等.输气管道高强度试压方法及其在X80管道上的实践[J].石油学报,2013,34(6):1206-1211.
YANG F P, LUO J H, ZHAO X W, et al. A new method for high-strength pressure testing in gas pipelines and its application to the X80 gas pipeline in china[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1206-1211.
- [3] 罗更生,周煜.含裂纹油气管道可靠性评定方法及敏感性分析[J].石油学报,2011,32(6):1083-1087.
LUO G SH, ZHOU Y. A reliability assessment method of crack-containing oil-gas pipelines and its sensitivity analysis[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6): 1083-1087.
- [4] 杨理践,王国庆,高松巍,等.基于OPWP算法力磁耦合磁记忆信号特征研究[J].仪器仪表学报,2016,37(7):1588-1595.
YANG L J, WANG G Q, GAO S W, et al. The study on force magnetic coupling signal character of magnetic memory based on OPWP algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7): 1588-1595.
- [5] 杨理践,邹金津,邢燕好.电磁超声兰姆波在铝板传播中的模式识别[J].仪器仪表学报,2014,35(4):909-916.
YANG L J, ZOU J J, XING Y H. Modal identification of electromagnetic ultrasonic Lamb wave propagation in aluminum plate[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(4): 909-916.
- [6] JUN J, LEE J. Non-destructive evaluation of cracks in a paramagnetic specimen with low conductivity by penetration of magnetic fluid[J]. NDT&E International, 2009, 42(3):297-303.
- [7] DUBOV A, DUBOV A, KOLOKOLNIKOV S. Application of the metal magnetic memory method for detection of defects at the initial stage of their development for prevention of failures of power engineering welded steel structures and steam turbine parts[J]. Weld World, 2014, 58(2):225-236.
- [8] DUBOV A, KOLOKOLNIKOV S. The metal magnetic memory method application for online monitoring of damage development in steel pipes and welded joints specimens[J]. Weld World, 2013, 57(1):123-136.
- [9] KOLOKOLNIKOV S M, DUBOV A A, MARCHENKOV A Y. Determination of mechanical properties of metal of welded joints by strength parameters in the stress

- concentration zones detected by the metal magnetic memory method [J]. *Weld World*, 2014, 58(5): 699-706.
- [10] 杨理践, 刘斌, 高松巍, 等. 基于密度泛函理论的磁记忆信号产生机理研究[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(4): 809-816.
YANG L J, LIU B, GAO S W, et al. Theoretical studies of metal magnetic memory technique on magnetic flux leakage signals based on Density Functional Theory [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(4): 809-816.
- [11] 刘斌, 付英, 于慧, 等. 基于GGA算法磁记忆检测模型的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(10): 2200-2207.
LIU B, FU Y, YU H, et al. Study on magnetic memory testing model based on GGA algorithm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(10): 2200-2207.
- [12] YANG L J, LIU B, CHEN L J, et al. The quantitative interpretation by measurement using the magnetic memory method (MMM)-based on density functional theory [J]. *NDT&E International*, 2013, 55(3): 15-20.
- [13] 黄海鸿, 姚结艳, 刘儒军, 等. 基于金属磁记忆技术的车桥桥壳损伤检测[J]. *电子测量与仪器学报*, 2014, 28(7): 770-776.
HUANG H H, YAO J Y, LIU R J, et al. Damage detection of axle housing based on metal magnetic testing technology [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2014, 28(7): 770-776.
- [14] 唐继红, 潘强华, 任吉林. 静载拉伸下磁记忆信号变化特征分析[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(2): 336-341.
TANG J H, PAN Q H, REN J L. Characteristic analysis of magnetic memory signals of 20 # steel under static loading tensile [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(2): 336-341.
- [15] YAO K, WANG Z D, DENG B, et al. Experimental research on metal magnetic memory method [J]. *Experimental mechanics*, 2012, 52(3): 305-314.
- [16] 任吉林, 孙金立, 周培, 等. 磁记忆二维检测的研究与工程应用[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(22): 8-15.
REN J L, SUN J L, ZHOU P, et al. Engineering application prospect and research on magnetic memory in two-dimensional testing [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(22): 8-15.
- [17] LIU B, SUN W R, LIN Y. The study of electromagnetic stress testing method on oil-gas pipelines based on WT [J]. *Geomaterials*, 2014, 4(2): 55-63.
- [18] 李龙军, 王晓锋, 杨宾峰, 等. 基于力磁耦合的金属磁记忆检测机理与仿真[J]. *空军工程大学学报: 自然科学版*, 2012, 13(3): 85-90.
LI L J, WANG X F, YANG B F, et al. The basic theory and simulation research on metal magnetic memory based on stress-magnetization [J]. *Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition*, 2012, 13(3): 85-90.
- [19] 郭国明, 丁红胜, 谭恒, 等. 铁磁性材料的力磁效应机理探讨与实验研究[J]. *测试技术学报*, 2012, 26(5): 369-376.
GUO G M, DING H SH, TAN H, et al. Research on mechanism and experiment about stress-magnetism effect for ferromagnetic materials [J]. *Journal of test and measurement technology*, 2012, 26(5): 369-376.
- [20] 杨理践, 刘斌, 高松巍, 等. 金属磁记忆效应的第一性原理计算与实验研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(8): 086201-086207.
YANG L J, LIU B, GAO S W, et al. First-principles calculation and experimental study of metal magnetic memory effects [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(8): 086201-086207.
- [21] 高潭华, 卢道明, 吴顺情, 等. Fe原子薄片的磁性: 第一性原理计算[J]. *物理学报*, 2011, 60(4): 663-668.
GAO T H, LU D M, WU SH Q, et al. First-principles calculations of magnetism of Fe atomic sheet [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(4): 663-668.
- [22] KAKEHASHI Y, PATOARY M A R. First-principles dynamical coherent-potential approximation approach to the ferromagnetism of Fe, Co, and Ni [J]. *Journal of the Physical Society of Japan*, 2011, 11(3): 1683-1694.

作者简介



王国庆(通讯作者), 2009年于辽宁石油化学大学获得硕士学位, 现为辽宁石油化学大学讲师, 主要研究方向为应力检测技术及相关理论、无损检测技术等。

E-mail: wangguoqing100110@163.com

Wang Guoqing (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Liaoning Shihua University in 2009. Now he is a lecturer in Liaoning Shihua University. His main research interests cover stress detection technology and related theory, nondestructive testing technology.



杨理践, 1984年于哈尔滨工业大学获硕士学位, 现为沈阳工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为长输油气管道内检测技术及相关理论、无损检测技术等。

E-mail: yanglijian888@163.com.

Yang Lijian received his M. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 1984. Now, he is a professor and a doctoral supervisor in Shenyang University of Technology. His main research interests cover in-detection technology of long distance oil and gas pipeline and related theory, nondestructive testing technology.