

磁记忆信号定量分析的电子交换模型及性能*

刘斌¹, 何璐瑶¹, 饶心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. 中石油西气东输甘陕管理处 乌鲁木齐 830000)

摘要:磁记忆法可以有效地判断铁磁性金属构件的应力损伤区域。但是,磁记忆自发漏磁信号形成机理和影响因素复杂,不同应力集中程度的磁记忆信号特征很难得到量化分析,严重影响了该项技术的实际应用。根据电子自旋理论,建立了s-d轨道电子交换模型,计算了晶体屈服前后电子自旋态密度、原子磁矩、晶格尺寸的变化规律,进而定量分析磁记忆信号与应力集中程度的对应关系。研究表明,磁记忆信号与应力成一一对应的线性变化关系。晶体在屈服前,磁记忆效应主要由d轨道电子自旋作用决定,磁记忆信号与应力的对应关系具有很好的可重复性;晶体发生屈服后,电子自旋交换作用增强,d轨道电子自旋作用减弱,s轨道电子自旋作用增强,磁记忆信号变化幅度减小,磁记忆效应整体减弱。

关键词: 电子; 应力损伤; 磁记忆; 屈服; 轨道

中图分类号: TH878^{+.3} **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 430.25

Electronic exchange model and performance of quantitative analysis of the magnetic memory signals

Liu Bin¹, He Luyao¹, Rao Xin², Yang Lijian¹

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

2. The Gansu and Shannxi Section of West-east Gas Transmission Pipeline Company, Urumqi 830000, China)

Abstract: The magnetic memory method can effectively determine the stress damage areas of the ferromagnetic metal components. However, the formation mechanism and complicated influenced factors of the spontaneous magnetic flux leakage signal make it hard to quantitatively analyze the magnetic memory signals under different stress concentration, and limit the practical applications. According to electron spin, the electronic exchange model of the s-d orbit is established, the changing rules of the electronic spin of density, the atomic magnetic moment and the crystal lattice size nearby the field of the crystal are calculated. Furthermore, the relationship between the magnetic memory signals and the degree of stress concentration is quantitatively analyzed. Results show that the magnetic memory signal varies linearly with the stress. Before the yielding stress appearing, the magnetic memory effect is determined by the electronic spin interactions of the d orbit, and the repeatability of the relationship between the magnetic memory signals and the stress is good. After the yielding stress appearing, the electronic spin interactions enhance, the electronic spin interactions of the d orbit weaken, the electronic action of the s orbit enhances, the amplitude of variation of the magnetic memory signal decreases, and the whole magnetic memory effect weakens.

Keywords: electron; stress damage; magnetic memory; yield; orbit

0 引言

应力是铁磁性金属构件发生破损前的重要参数,经常导致突发性事故的发生。金属磁记忆检测技术作为一

种新兴的无损检测技术,对应力集中区和尚未形成宏观体积缺陷的延时裂纹具有很好的敏感性,并且由于该项技术操作简单、检测速度快、不需要对被测构件表面进行处理、支持非接触在线测量等优点,受到了国内外学者的广泛关注^[1-2]。

目前,磁记忆法虽然在管道、化工、铁路、压力容器等诸多领域得到了较为成功的应用,但是由于磁记忆信号产生机理尚无定论^[3,4],不同应力集中程度下的磁记忆信号特征难以区分,所以无法通过磁记忆信号对构件的使用寿命、危险程度给出准确的评价,从而严重的制约了该项技术的发展^[5-7]。

本文根据电子自旋理论,利用固体能带结构和电子分布函数建立了 s-d 轨道电子交换磁力学模型,计算了晶体屈服前后电子自旋态密度、原子磁矩、晶格尺寸的变化规律,进而定量分析磁记忆信号在晶体屈服前后的变化特征,为磁记忆检测技术的定量化检测、评估提供了科学依据。

1 磁记忆效应的固体能带模型

根据固体能带理论^[8],铁磁性金属材料的磁性主要来源于电子自旋运动。由电子自旋运动形成的原子磁矩具有自发的磁化强度。晶体中单个原子内部的自发磁化强度会在晶体局部建立起内磁场,所以晶格体系中内磁场的有效磁感应强度 B_{eff} 可以表示为:

$$B_{\text{eff}} = B_m + \lambda M \quad (1)$$

式中: B_m 为晶体本征磁感应强度, λM 为内磁场强度, λ 为常数。

按照外斯的顺磁理论^[9],晶体磁化强度可以表示为:

$$M = Ng\mu_B JB_J(y) \quad (2)$$

式中: N 表示晶体中的原子数, μ_B 表示原子磁矩, T 表示温度, J 是未充满壳层中全电子的角动量总和, g 为常数,由原子的自旋角动量和轨道角动量决定, $B_J(y)$ 为布里渊函数。

假设布里渊区在 $[-J, +J]$ 范围内,则有:

$$B_J(y) = \frac{2J+1}{2J} \coth\left[\left(1 + \frac{1}{2J}\right)y\right] - \frac{1}{2J} \coth \frac{y}{2J} \quad (3)$$

$$y = \frac{g\mu_B JB_0}{k_B T} \quad (4)$$

式中: B_0 为磁场在真空中的磁感应强度, k_B 为玻尔兹曼常数。

在没有外力场作用时,本征磁感应强度为 0,铁磁体的自发磁化强度就是其内场作用下的磁化强度,即:

$$M(0) = Ng\mu_B JB_J(y) \quad (5)$$

此时,布里渊区函数变量为:

$$y = g\mu_B J \frac{M(0)}{k_B T} \quad (6)$$

由式(6)可知,当不存在外力场作用时,铁磁体的自发磁化强度 $M(0)$ 主要由温度决定,电子自旋运动和轨道运动不再受其他因素影响。

在有外力场作用时,本征磁感应强度不为 0,铁磁体的自发磁化强度为:

$$M(B_{\text{eff}}) = Ng\mu_B JB_J(y) = Ng\mu_B JB_J\left[\frac{g\mu_B J(B_m + \lambda M)}{k_B T}\right] \quad (7)$$

在常温环境下,令^[10]:

$$\frac{g\mu_B J(B_m + \lambda M)}{k_B T} \ll 1 \quad (8)$$

此时,布里渊区函数变量为:

$$y = \frac{g\mu_B(J+1)}{k_B T} \left(\frac{\mu_0 M}{\chi} + \lambda M\right) \quad (9)$$

式中: χ 为电子自旋波函数。

由式(9)可知,当存在外力场作用时,铁磁体的自发磁化强度对电子自旋运动产生重要影响,即内磁场对不同轨道电子的自旋运动的影响将导致原子磁矩的变化。根据 Stoner 判据^[11],外力场作用下,体系的磁感应强度为:

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0\left(H + \frac{d \sum_i \mu_{Bi}}{dV}\right) \quad (10)$$

式中: H 表示外加磁场强度。

由式(7)~(10)可知,在外界磁场不变的情况下,只有准确计算出不同轨道电子自旋运动之间的相互影响,才能定量计算出晶体在外力场作用下磁感应强度与原子磁矩的对应关系,即定量分析磁记忆信号的变化关系。

2 磁力学关系计算

在多电子体系中,可以通过电子运动的波函数来求解不同轨道电子之间的交换关联能^[12-13],进而定量分析磁力学关系。

2.1 经典算法

根据内场理论^[14],系统的哈密顿量可以表示为:

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}_{12} \quad (11)$$

式中: \hat{H}_0 为两个孤立原子 a 和 b 的哈密顿量, \hat{H}_{12} 为电子之间和原子核之间的库伦能量以及电子与原子核的相互作用能量。

$$\hat{H}_0 = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla_1^2 - \frac{e^2}{r_{1a}} - \frac{\hbar^2}{2m} \nabla_2^2 - \frac{e^2}{r_{2b}} \quad (12)$$

$$\hat{H}_{12} = \frac{e^2}{r_{12}} + \frac{e^2}{r_{ab}} - \frac{e^2}{r_{2a}} - \frac{e^2}{r_{1b}} \quad (13)$$

假设原子磁矩主要来源于 d 轨道电子自旋^[15], s、p、f 轨道电子自旋运动对原子磁矩贡献可以忽略。则系统的波函数 Ψ 是轨道波函数 $\mu(r_1, r_2)$ 和自旋波函数 $\chi(1, 2)$ 的乘积。设 $\psi_a(i)$ 表示电子 i 属于原子核 a 的原子基态波函数; $\psi_b(i)$ 表示电子属于原子核 b 的原子基态波函数, α 代表电子自旋朝上的状态 \uparrow ; β 为电子自旋朝下的状态 \downarrow , 则:

$$\mu(r_1, r_2) = C[\psi_a(1)\psi_b(2) - \psi_a(2)\psi_b(1)] \quad (14)$$

$$\chi(1,2) = \begin{cases} \alpha(1)\alpha(2) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}[\alpha(1)\beta(2) - \beta(1)\alpha(2)] \\ \beta(1)\beta(2) \end{cases} \quad (15)$$

由式(11)~(15)可以求得系统的能量:

$$E_A = \langle \Psi | \hat{H} | \Psi \rangle = \langle \mu_A | \hat{H} | \mu_A \rangle = 2\varepsilon_H + \frac{K-A}{1+\Delta^2} \quad (16)$$

式中: ε_H 是原子的基态能量, Δ 是交叠积分, A 有关电荷之间的交换关联能量。

$$\Delta = \int \psi_a^*(1)\psi_b(1)d\tau_1 \quad (17)$$

$$K = \int \psi_a^*(1)\psi_b^*(2)\hat{H}_{12}\psi_\alpha(1)\psi_b(2)d\tau_1d\tau_2 \quad (18)$$

$$A = \int \psi_a^*(1)\psi_b^*(2)\hat{H}_{12}\psi_\alpha(2)\psi_b(1)d\tau_1d\tau_2 \quad (19)$$

因为只有 d 轨道电子对原子磁矩有贡献,所以交叠积分 $\Delta \ll 1$, 由电子 1 和 2 在 ψ_α 和 ψ_b 两个波函数之间交换位置引起的系统能量 E_A 可简化为:

$$E_A = 2\varepsilon_H + K - A \quad (20)$$

通过求解式(20)可以确定电子之间的交换关联能,进而定量研究系统的磁力学关系。但是,在经典算法中,假设只有 d 轨道电子对磁力学关系有贡献,忽略其他轨道电子自旋的影响,计算结果误差较大。

2.2 改进算法

根据 Vonsovski S. V. 理论^[16], 原子 d 轨道电子之间直接交换作用形成的内场使 s 轨道电子的自旋发生极化。因此,在外力场作用下,内场作用发生变化, s 轨道电子的自旋也会相应发生变化,此时 s 轨道电子对原子磁矩的影响不可以忽略。

假设 s_d 、 s_c 为 d 电子和传导电子的自旋角动量,每个原子内部依赖自旋取向的能量可以表示为:

$$E_A = \frac{1}{2}\alpha_d s_d^2 - K_{dc} s_d s_0 + \frac{1}{2}\gamma_0 s_c^2 \quad (21)$$

式中:右边第 1 项为 d-d 电子的交换能,第 2 项为 s-d 电子的交换能,第 3 项为 4s 电子极化而增加的动能和关联能, α_d 、 K_{dc} 、 γ_0 是有关的系数。

系统处于稳定状态时,则有:

$$\frac{dE_A}{ds_c} = 0 \quad (22)$$

$$s_c = \frac{K_{dc} s_d}{\gamma_c} \quad (23)$$

由式(21)~(23)可以求得,外力场作用下,晶体内的最低能量:

$$E_{Amin} = \frac{1}{2} \left(\alpha_d - \frac{K_{dc}^2}{\gamma_c} \right) s_d^2 \quad (24)$$

根据密度泛函理论^[17], 在外场作用下,晶格体系中

的单电子近似 Schrodinger 方程可以表示为:

$$\left[\frac{p^2}{2m} + V(r) \right] \psi = E \psi \quad (25)$$

$$p = g \sqrt{J(J+1)} \quad (26)$$

式中: p 是有效玻尔磁子数, m 是电子质量, E 是系统能量函数, $V(r)$ 为外力场作用势能。

将式(24)代入式(21)中,可以求出系统波函数,进而可以求解系统的原子磁矩来分析磁记忆信号的定量变化关系。

3 仿真计算及结果分析

以实际工程应用中的 X80 钢为研究对象,本文利用 CASTEP 晶体库,建立了 s-d 电子交换磁力学模型,模型中主要成分为 Fe, 掺杂 C、Si、Mn、Ni、Mo 等元素来调节材料的机械性能。模型采用立方晶系,其平衡态的晶格常数为 2.8664 \AA ^[18-19], 不同轨道电子之间的交换关联能采用广义梯度近似 (generalized gradient approximation, GGA) 函数处理^[20]。

3.1 经典模型电子自旋计算

为了研究磁记忆信号经典模型^[21] 在不同应力集中程度下的变化规律,对经典模型施加流水静压力,分别在低压 0~500 MPa 和高压 100~350 GPa 对模型施加作用力。电子自旋态密度计算分布如图 1、2 所示。

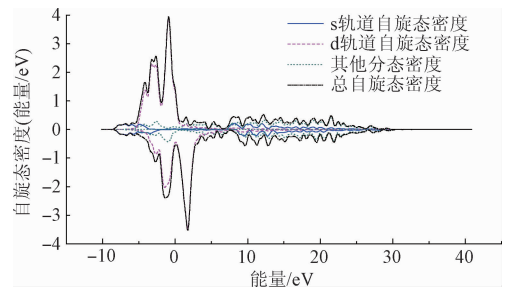


图 1 经典模型低压电子自旋态密度分布

Fig. 1 The spin density distribution in low pressure with classical model

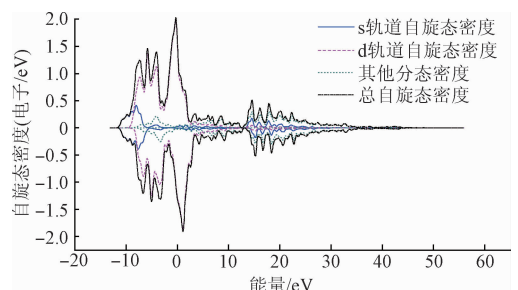


图 2 经典模型高压电子自旋态密度分布

Fig. 2 The spin density distribution in high pressure with classical model

图 1 和 2 反应了经典模型分别在低压和高压外场压力作用下,系统整体电子态密度以及分态密度的分布情况。从图 1 和 2 中可以看出,系统在低压和高压状态下,d 轨道电子对磁力学关系贡献最大,但是经典模型只考虑 d 轨道电子对磁力学关系的贡献,忽略其他轨道电子自旋的影响,计算结果误差较大。

3.2 s-d 电子交换模型优化

立方晶系磁力学模型属于多元化模型,在外力作用下,电子之间交换作用增强,计算系统总能量、晶格常数、电子态密度、原子磁矩等参数时,电子波函数波动较大,为保证计算精度和节省计算资源,必须对模型在不同外力场作用下进行优化,如图 3 所示。

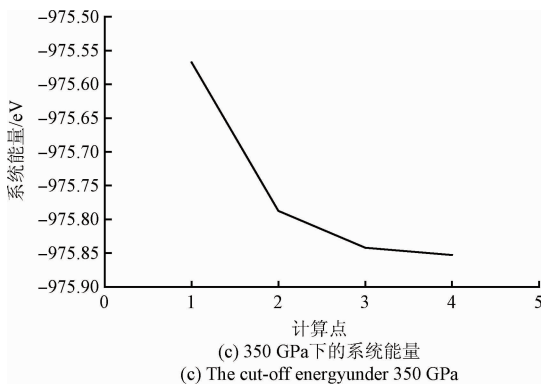
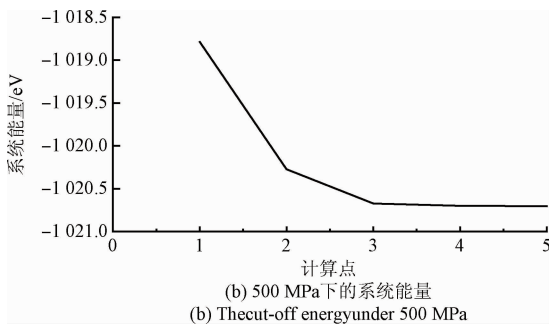
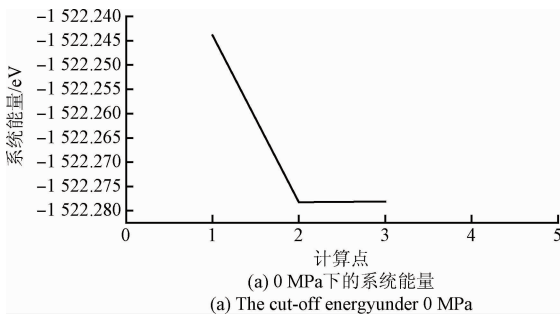


图 3 模型优化

Fig. 3 Model optimization

图 3 反映了模型在不同应力集中程度下能量计算情况。可以看出,模型在平衡态、低压(500 MPa)和高压(350 GPa)状态下,系统的能量都是收敛的,说明本文建

立的磁力学模型是正确的^[22];并且,系统在第 3 个计算点以后,能量趋于最小、稳定,说明平面波截止能取 300 eV 为最优^[23]。

3.3 s-d 电子交换模型电子自旋计算

为了研究磁记忆信号在不同应力集中程度下的变化规律,对模型施加流水静压力,分别在低压 0 ~ 500 MPa 和高压 100 ~ 350 GPa 对模型施加作用力,即研究晶体在屈服前后的磁力学特性^[24]。电子自旋态密度计算分布如图 4、5 所示。

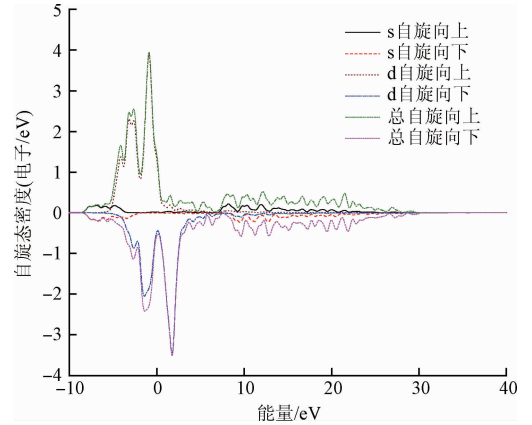


图 4 s-d 电子交换模型低压电子自旋态密度分布
Fig. 4 The spin density distribution in low pressure with s-d electronic exchange modified model

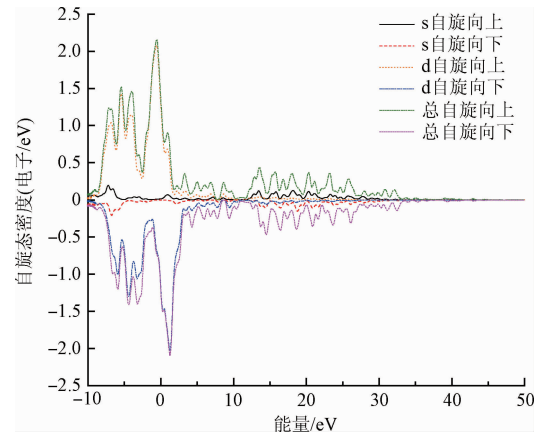


图 5 s-d 电子交换模型高压电子自旋态密度分布
Fig. 5 The spin density distribution in high pressure with s-d electronic exchange modified model

图 4 和 5 反应了模型分别在低压和高压外场压力作用下,系统整体态密度、d 轨道电子态密度和 s 轨道电子态密度的分布情况。从图 4 中可以看出,系统在低压状态下,态密度分布曲线呈现很好的不对称性,说明铁磁晶体具有很好的磁性^[25];图 5 中态密度分布趋于对称,说明系统在高压状态下,磁性能整体减弱。

比较图4和5,无论系统在低压状态还是在高压状态下,d轨道电子对系统磁性贡献最大。但是随着外加作用的增大,s轨道电子与d轨道电子之间的交互作用增强,s轨道电子对系统磁性的贡献也将发生变化,如表1所示。

表1 不同压力下s、d轨道电子对原子磁矩贡献

Table 1 The contribution to the atomic moments from the s and d orbits electrons under different pressure

低压/Mpa	d-电子 贡献/%	s-电子 贡献/%	高压/GPa	d-电子 贡献/%	s-电子 贡献/%
0	93.24	6.76	0	93.24	6.76
100	93.23	6.77	100	92.51	7.49
200	93.24	6.76	200	91.76	8.24
300	93.23	6.77	250	89.31	9.69
400	93.23	6.77	300	89.28	9.72
500	93.21	6.79	350	89.21	9.79

从表1中可以看出,在低压环境下,外力场作用未达到晶体屈服强度,d轨道电子与s轨道电子对原子磁矩的贡献比率不变,说明不同轨道电子之间几乎不发生交换作用,因此可以判断铁磁构件在弹性范围内使用,磁力学关系具有很好的重复性;在高压环境下,外力场作用已经达到晶体的屈服强度^[26],d轨道电子与s轨道电子对原子磁矩的贡献发生明显变化,随着压力的增加,s-电子的贡献增大、d-电子的贡献减小,说明轨道电子之间发生了不可逆的能量交换,磁力学关系发生不可逆的变化。

3.4 s-d 电子交换模型原子磁矩计算

在外力作用下,电子自旋运动的变化决定了原子磁矩的变化,压力与原子磁矩的对应关系如表2所示。

表2 不同压力下体系的原子磁矩

Table 2 The systematic atomic moments under different pressure

低压/Mpa	原子磁矩 μ_B	高压/Gpa	原子磁矩 μ_B
0	2.193 79	0	2.193 79
100	2.193 145	100	1.756 99
200	2.192 42	200	0.000 489
300	2.190 49	250	0.000 380
400	2.190 35	300	0.000 241
500	2.189 295	350	0.000 193

由表2可以看出,原子磁矩随着外力场的增加发生明显变化。无论在低压还是高压状态,原子磁矩与力近似成线性关系变化,如图6和7所示。在高压环境下,即外力场作用达到晶体的屈服强度以后,原子磁矩变化幅度减小,

当压力增加到200 GPa时,系统的原子磁矩趋于稳定值,这是因为外力场达到一定程度时,系统磁性趋于独立原子的磁性,系统磁力学关系减弱,磁记忆信号趋于稳定值。

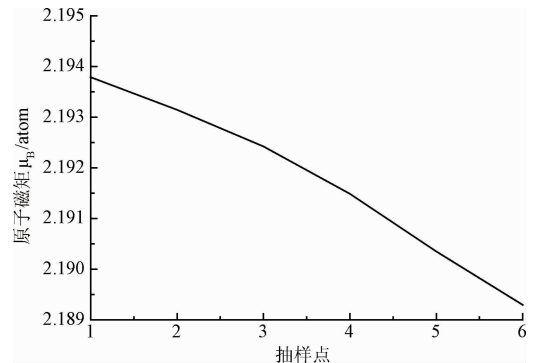


图6 s-d 电子交换模型低压环境下原子磁矩变化曲线
Fig. 6 The atomic magnetic moment distribution in low pressure with s-d electronic exchange modified model

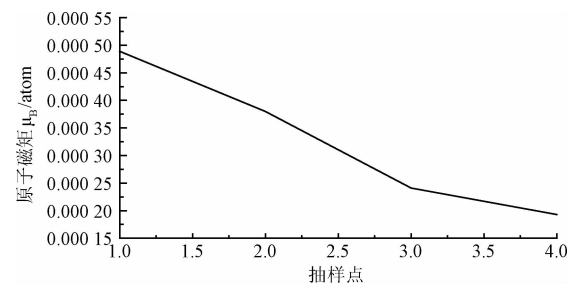


图7 s-d 电子交换模型高压环境下原子磁矩变化曲线
Fig. 7 The atomic magnetic moment distribution in high pressure with s-d electronic exchange modified model

4 实验结果分析

4.1 材料及方法

为了验证铁磁性金属构件在屈服前后的磁记忆信号变化规律,本文利用双开肩铣床,调用O1418程序,制作拉伸试件如图8所示。试件为X80型钢,尺寸公差 38 ± 0.5 mm,形状公差0.2 mm,厚度为18.4 mm。

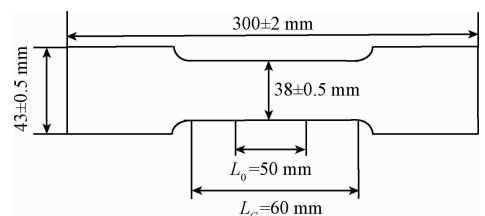


图8 拉伸试件

Fig. 8 The tensile specimen

实验采用SMT4106型拉力机对试件进行拉伸,拉伸系统量程100 t,对试件的应力应变进行实时监测。

4.2 应力-应变结果分析

实验使用两根完全相同的试件进行拉伸,试件①先进行屈服拉伸,然后泄压,再进行弹性拉伸,泄压再进行拉伸,应力应变曲线如图 9 所示。

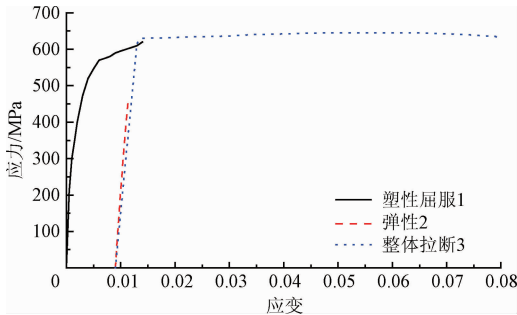


图 9 试件①的应力-应变曲线

Fig. 9 The stress-strain curve of specimen ①

由图 9 可以看出,第 1 次拉伸至屈服过程中,应力应变曲线在 578 MPa 时出现拐点,说明此时试件出现屈服;第 2 次拉伸和第 3 次拉伸过程,试件在弹性范围内应力-应变曲线重合。

试件②反复进行 3 次屈服拉伸,即每次拉伸施加拉力都超过 578 MPa,由图 10 可以看出,第 1 次拉伸应力应变曲线出现拐点,说明试件屈服;试件每进行一次屈服拉伸,变量就改变一些。

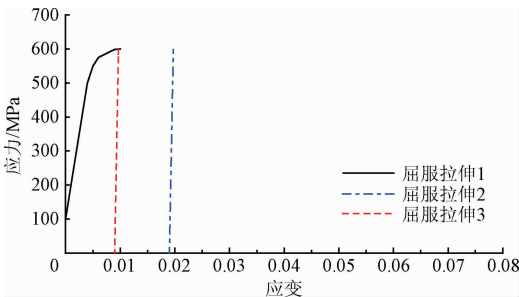


图 10 试件②的应力-应变曲线

Fig. 10 The stress-strain curve of specimen ②

4.3 磁记忆检测结果分析

试件在拉伸过程中,通过高精度磁通门传感器来监测磁记忆信号的变化情况,系统采样频率 1.5 kHz,磁场检测精度为 1 nT。在试件①反复拉伸过程中,试件表面磁记忆信号变化曲线如图 11 所示。由图 11 可见,磁记忆信号与应力集中成线性变化关系,并且磁记忆信号曲线在弹性范围内是基本重合的,说明试件在弹性范围内使用,磁记忆信号特征不变,具有很好的重复性;当试件发生屈服后,磁记忆信号曲线发生变化,初值改变,记录了试件曾经发生屈服后的变化。

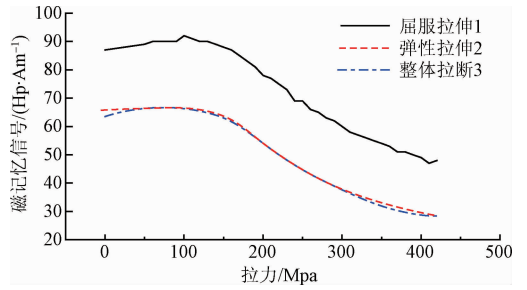


图 11 试件①磁记忆信号分布

Fig. 11 The magnetic memory signal distribution of Specimen ①

试件②在反复拉伸过程中,磁记忆信号曲线如图 12 所示,在屈服变形区域,磁记忆信号曲线相互平行但是不重合,每一次塑性变形的磁记忆信号曲线变化幅度减小,说明材料经历一次屈服,构件的磁记忆效应的磁力学灵敏度下降。

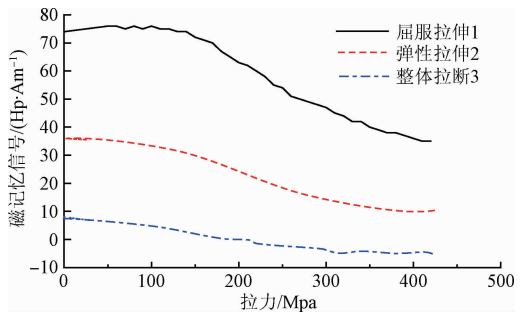


图 12 试件②磁记忆信号分布

Fig. 12 The magnetic memory signal distribution of Specimen ②

5 结 论

铁磁晶体的磁性来主要来源于电子自旋,d 轨道电子对系统磁性做主要贡献,系统原子磁矩与外力作用成线性变化关系。在弹性范围内,d 轨道电子和 s 轨道电子几乎不发生能量交换;在屈服变形后,d 轨道电子和 s 轨道电子发生不可逆的能量交换,d 轨道电子对系统磁性贡献减弱,s 轨道电子对系统磁性贡献增强,系统磁性特性减弱。磁记忆信号与应力集中成一一对应的线性变化关系。金属铁磁性构件在弹性范围内使用时,磁记忆信号具有很好的重复性;在发生屈服变形后,磁记忆信号初始值发生明显变化,并且磁记忆信号趋于稳定值。

参考文献

[1] 钱正春, 黄海鸿, 姜石林, 等. 铁磁性材料拉/压疲劳磁记忆信号研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(4): 506-517.

- QIAN ZH CH, HUANG H H, JIANG SH L, et al. Research on magnetic memory signal of ferromagnetic material under tensile and compressive fatigue loading [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(4):506-517.
- [2] 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 memory testing technology[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2014, 28(7):770-776.
- [3] GORKUNOV E S. Different remanence states and their resistance to external effects. Discussing the so-called magnetic memory method [J]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, 50(11):617-633.
- [4] 于敏, 缙瑞宾, 张春雨, 等. 基于金属磁记忆的局部屈服诊断新方法研究[J]. *热加工工艺*, 2014, 43(14):87-89.
- YU M, GOU R B, ZHANG CH Y, et al. Research on new test method for local yield based on metal magnetic memory[J]. *Hot Working Technology*, 2014, 43(14):87-89.
- [5] DAVYDOV V V, VELICHKO E N, DUDKIN V I, et al. A nutation nuclear-magnetic teslameter for measuring weak magnetic fields [J]. *Measurement Techniques*, 2014, 57(6):684-689.
- [6] 杨理践, 郭天昊, 高松巍, 等. 油气管道特殊部件的漏磁检测信号特征分析[J]. *沈阳工业大学学报*, 2017, 39(1):43-47.
- YANG L J, GUO T H, GAO S W, et al. Feature analysis on magnetic flux leakage detection signal for special parts of oil and gas pipeline [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2017, 39(1):43-47.
- [7] 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]. *Welding in the World*, 2014, 58(5):699-706.
- [8] SUKHORUKOV V. Magnetic flux leakage testing strong or weak magnetization [J]. *Materials Evaluation*, 2013, 71(5):26-31.
- [9] MATSUMOTO N, SHIMOSAKA T. Validation of a quantitative analytical method based on the effective magnetic moment and the Curie-Weiss law [J]. *Accreditation and Quality Assurance*, 2015, 20(2):115-124.
- [10] WAL A. Band structure, Brillouin zone, and condensation of states for an itinerant electron in a magnetic quantum dot [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2013, 410(2):222-226.
- [11] LIU B, HE L Y, ZHANG H, et al. The axial crack testing model for long distance oil-gas pipeline based on magnetic flux leakage internal inspection method [J]. *Measurement*, 2017, 103(6):275-282.
- [12] 刘斌, 曹阳, 王缔, 等. 基于 LMTO 算法磁记忆屈服信号的量化分析[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(6):1412-1420.
- LIU B, CAO Y, WANG D, et al. Quantitative analysis of the magnetic memory yielding signal characteristics based on the LMTO algorithm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(6):1412-1420.
- [13] ZUNIGA-GUTIERREZ B, KÖSTER A M. Analytical GGA exchange-correlation kernel calculation in auxiliary density functional theory [J]. *Molecular Physics*, 2015, 114(7-8):1026-1035.
- [14] LI X M, DING H S, BAI S W. Research on the stress-magnetism effect of ferromagnetic materials based on three-dimensional magnetic flux leakage testing [J]. *NDT&E International*, 2014, 62(2):50-54.
- [15] YAMAGUCHI Y, KATADA Y, ITOU T, et al. Experimental investigation of magnetic arc blow in plasma arc cutting [J]. *Welding in the World*. 2015, 59(1):45-51.
- [16] SASABE S. Zitterbewegung of the dirac electron from the point of view of Huang's expectation value [J]. *Electrical Engineering in Japan*, 2015, 132(1):1-6.
- [17] AFSHAR M, DOOSTI H. Magnetic properties of cobalt single layer added on graphene: A density functional theory study [J]. *Modern Physics Letters B*, 2015, 29(2):1450262.
- [18] CORNELISSEN L J, LIU J, DUINE R A, et al. Long distance transport of magnon spin information in a magnetic insulator at room temperature [J]. *Nature Physics*, 2015, 11(2):146-150.
- [19] CAZZOLA E, INNOCENTI M E, MARKIDIS S, et al. On the electron dynamics during island coalescence in asymmetric magnetic reconnection [J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22(9):3715-3719.
- [20] ALI S, KHAN W, MURTAZA G, et al. First principles study of magnetic and electronic properties of A₂BB'O₆ (A = Ba, Sr) (BB' = FeRe, MnMo, and MnRe) double perovskites [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, 441(11):113-123.

- [21] 刘斌, 曹阳, 王国庆. 基于 LAPW 算法磁记忆信号相变特性的研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1825-1832.
LIU B, CAO Y, WANG G Q. Study on characteristics of magnetic memory signal of phase transition point based on the LAPW algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1825-1832.
- [22] LIU B, HE L Y, ZHANG H, et al. Study on characteristics of magnetic memory testing signal on the stress concentration field[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2017, 11(1): 2-8.
- [23] 杨旭宏, 郭奇, 郭丽杰, 等. 磁记忆技术在焊缝残余应力检测中的试验研究[J]. 燕山大学学报, 2016, 40(3): 246-251.
YANG X H, GUO Q, GUO L J, et al. Experimental research on metal magnetic memory technology in detection of residual stress in welding seam[J]. Journal of Yanshan University, 2016, 40(3): 246-251.
- [24] ANDERSEN J O, NAYLOR W R, TRANBERG A. Inverse magnetic catalysis and regularization in the quark-meson model[J]. Journal of High Energy Physics, 2015, 2015(2): 1-14.
- [25] 刘斌, 何璐瑶, 霍晓莉, 等. 基于 Kp 微扰算法的磁场中 MMM 信号特征的研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(1): 151-158.
LIU B, HE L Y, HUO X L, et al. study on the MMM signal characteristics in magnetic field based on kp perturbation algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1): 151-158.

- [26] ALBAAJI A J, CASTLE E G, REECE M J, et al. Enhancement in the elongation, yield strength and magnetic properties of intermetallic FeCo alloy using spark plasma sintering[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52(22): 13284-13295.

作者简介



刘斌, 分别在 2004 年、2007 年和 2013 年于沈阳工业大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为沈阳工业大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为油气长输管道应力内检测技术及相关理论、无损检测技术。
E-mail: syuotwenwu@sina.com

Liu Bin received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Shenyang University of Technology in 2004, 2007 and 2013, respectively. Now he is an associate professor in Shenyang University of Technology. His main research interests include in-detection technology of long distance oil and gas pipeline and related theory, nondestructive testing technology.



何璐瑶(通讯作者), 2015 年于沈阳工业大学获得学士学位, 现为沈阳工业大学博士研究生, 主要研究方向为应力检测技术、无损检测技术及相关理论。
E-mail: 550501733@qq.com

He Luyao (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2015. Now she is a Ph. D. candidate in Shenyang University of Technology. Her research interests include stress detection technology, nondestructive testing technology and related theories.