

# 外磁场下三轴弱磁应力检测信号定量化分析

张 贺,刘 斌,武梓涵,张保平,廉 政  
(沈阳工业大学 信息科学与工程学院,沈阳 110870)

**摘 要:**从微观角度量化分析了外磁场作用对铁磁性材料磁力学特性的影响因素,计算了不同方向及强度的外磁场下,铁磁性材料三轴弱磁信号的检测特性,并进行了系统的试验研究。试验结果表明:磁畴自发磁化强度矢量趋于应力方向重新排列产生弱磁信号;弱磁信号在轴向具有峰值,径向具有峰-峰值,且过零点,周向呈不规则波动;随外磁场强度的增强,弱磁信号增大,但增大幅度逐渐减小,外磁场对弱磁信号的影响趋于饱和;外界磁场对其垂直方向的弱磁信号影响程度微弱。

**关键词:**弱磁;铁磁;磁畴;有限元  
**中图分类号:** TG115.28      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6656(2022)05-0064-07

## Quantitative analysis on triaxial weak magnetic stress detection signal under external magnetic field

ZHANG He, LIU Bin, WU Zihan, ZHANG Baoping, LIAN Zheng

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

**Abstract:** This paper quantitatively analyzes the influence factors of the magnetic properties of the ferromagnetic material under the external magnetic field from a microscopic point of view, and calculates the three-axis weakening of the ferromagnetic material under the external magnetic field of different directions and strengths. The detection characteristics of the magnetic signal are studied and the system experiments are carried out. The research results show that: the spontaneous magnetization vector of the magnetic domain tends to rearrange in the direction of the stress to produce a weak magnetic signal; the weak magnetic signal has a peak in the axial direction and a peak-to-peak value in the radial direction, and at the zero crossing point, it fluctuates irregularly in the circumferential direction. The intensity of the magnetic field increases and the weak magnetic signal also increases, but the magnitude of the increment gradually decreases, and the influence of the external magnetic field on the weak magnetic signal tends to be saturated; the external magnetic field has a weak influence on the weak magnetic signal in the vertical direction.

**Key words:** weak magnetic; ferromagnetic; magnetic domain; finite element

铁磁性金属构件在外部载荷的长时间作用下会产生应力集中区,导致机械强度大幅度下降,进而造成突发性失效<sup>[1-2]</sup>。传统的无损检测技术无法检测出尚未形成体积缺陷的疲劳损伤,难以对大型金属构件的安全性和使用寿命做出正确的评估<sup>[3-5]</sup>。弱磁应力检测的原理是铁磁性材料在地磁场环境下,应力集中区会产生可被检测的弱磁信号,可基于此弱磁信号的

磁力学特性进行应力损伤的量化评估<sup>[6-8]</sup>。弱磁应力检测技术具有支持非接触性在线检测,检测之前无需对材料进行预处理,检测之后对材料性能无影响等优点<sup>[9-11]</sup>,被广泛运用于工业生产中。然而弱磁信号很微弱,容易受到外界磁场影响<sup>[12-16]</sup>。

文章从铁磁材料微观角度,研究了损伤应力下磁畴自发磁化的强度矢量分布规律,描述了外磁场对微观磁力学特性的影响特性。利用有限元法计算了铁磁材料三轴弱磁应力检测信号特性,分析不同强度和方向外磁场下,三轴弱磁应力检测信号的变化规律。其结果为弱磁应力检测结果的有效性和科学性提供了理论依据。

收稿日期:2021-12-15  
作者简介:张 贺(1983—),男,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  
通信作者:张 贺,634366317@qq.com

1 外磁场下铁磁材料微观磁特性的计算

1.1 外磁场下的磁畴移壁

当外磁场强度较弱时,磁畴移壁是铁磁材料微观磁特性变化的主要因素<sup>[17]</sup>。在磁畴移壁过程中,某些矢量接近于外磁场方向的磁畴长大,而另一些矢量不同于外磁场方向的磁畴缩小<sup>[18-19]</sup>。磁畴移壁导致铁磁晶体的总自由能不断发生变化,这些变化主要来自畴壁内应力能的变化以及内部散磁场能的变化等,此时,畴壁的平衡位置决定于各部分自由能的总和达到极小值的条件<sup>[20]</sup>。

当未加外磁场时,畴壁的平衡位置在总自由能  $F$  极小值处,当加上外磁场(磁场强度为  $\mathbf{H}$ )时,靠近外磁场的磁畴长大而远离外磁场的磁畴缩小,进而导致畴壁发生移动。设畴壁移位为  $dx$ ,此时外磁场所做的功等于自由能  $F$  的增加量,即

$$\mathbf{H}\mathbf{I}_s dx = \frac{\partial F}{\partial x} dx \tag{1}$$

式中: $\mathbf{I}_s$  为磁畴磁化强度。

式(1)即为外磁场下的磁畴移位方程,可知,磁场  $\mathbf{H}$  把畴壁推进单位距离  $dx$  时,对畴壁移动每单位面积所作的功为  $2\mathbf{H}\mathbf{I}_s$ ,即磁场的作用相当于畴壁对右方有一个静压强  $2\mathbf{H}\mathbf{I}_s$ 。

1.2 外磁场磁畴矢量转动

当外磁场强度较强时,磁畴矢量转动是铁磁材料微观磁特性变化主要因素。此时,铁磁材料的磁畴矢量会在外磁场的作用下,趋于外磁场方向排列,进而使铁磁材料产生磁信号。设磁化强度为  $\mathbf{I}_s$  的磁畴在方向为  $\theta$  的外磁场作用下,转动角度为  $\phi$ 。此时,磁晶各向异性能  $F_K$  与外磁场能  $F_H$  的关系可表示为

$$\frac{\partial}{\partial \phi}(F_K + F_H) = \frac{1}{2}K_1 \cdot \sin(4\phi) - \mathbf{H}\mathbf{I}_s \cdot \sin(\theta - \phi) = 0 \tag{2}$$

式中: $K_1$  为磁晶各向异性参数。

在外磁场平衡条件的下,可进一步计算出铁磁材料的磁化强度  $\mathbf{I}_H$  与磁畴方向角度的对应关系,即

$$\delta \mathbf{I}_H = \frac{I_s^2}{2K_1} \sin \theta \sin(\theta - \phi) \delta \mathbf{H} \approx \frac{I_s^2}{2K_1} \sin^2 \theta \delta \mathbf{H} \tag{3}$$

式(3)即为外磁场下磁畴矢量转动的方程。由式(3)可以看出,外磁场对磁畴矢量的影响主要由外磁场强度与外磁场方向共同决定。

2 外磁场下铁磁材料微观磁力学特性的计算

铁磁材料内部各元磁矩(电子自旋)间的相互作用构成了晶体自由能中与磁化有关的部分。此时,铁磁体中单位体积的总自由能  $F$  可表示为

$$F = F_{ex} + F_K + F_\sigma + F_H \tag{4}$$

式中: $F_{ex}$  为电子自旋间的交换作用能; $F_\sigma$  为应力能。

在非自发磁化时可将电子自旋间的交换作用能变化忽略不计,且当外应力很强,而磁晶各向异性参数很小时,磁晶各向异性几乎全部由应力贡献,此时,铁磁体中单位体积的总自由能变化为

$$\delta F = \delta F_\sigma + \delta F_H \tag{5}$$

外磁场对铁磁材料磁信号的影响主要由畴壁移位、磁畴矢量变化、正自旋磁矩等 3 部分组成。此时,外磁场对铁磁材料磁信号的影响可用公式表示为

$$\delta F_H = -\mathbf{H} \cdot$$

$$\sum_i (\mathbf{I}_s \cos \theta_i \delta V_i - \mathbf{I}_s V_i \sin \theta_i \delta \theta_i + V_i \cos \theta_i \delta \mathbf{I}_s) \tag{6}$$

式中: $\theta_i$  为磁畴  $i$  的磁化矢量与任意特定方向的角度; $V_i$  为磁畴  $i$  的体积;累加式中第一项为磁畴壁移位对总磁化的贡献;第二项为磁畴矢量变化对总磁化的贡献;第三项为正自旋磁矩对总磁化的贡献。

由于正自旋磁矩只有在很强的磁场作用下才对总磁化有贡献,所以可以忽略不计,又由于在变化的初始阶段,磁畴矢量变化对总磁化的贡献远远小于磁畴壁移位对总磁化的贡献,所以式(6)可简化为

$$\delta F_H = -\mathbf{H} \cdot \sum_i \mathbf{I}_s \cos \theta \delta V_i \tag{7}$$

由式(7)可知,对于垂直磁化方向的磁畴,外界磁场对其磁化的贡献为零,又由于当外界磁场在其垂直方向上时,叠加磁场为零,所以外界磁场对其垂直方向弱磁信号的影响较小,即该方向上的弱磁信号强度完全由应力决定,即

$$\delta F = \delta F_\sigma \tag{8}$$

$F_\sigma$  的应力能可表示为

$$F_\sigma = -\frac{3}{2}\lambda_{100}\sigma(\alpha_1^2\gamma_1^2 + \alpha_2^2\gamma_2^2 + \alpha_3^2\gamma_3^2) - 3\lambda_{111}\sigma(\alpha_1\alpha_2\gamma_1\gamma_2 + \alpha_2\alpha_3\gamma_2\gamma_3 + \alpha_1\alpha_3\gamma_1\gamma_3) \tag{9}$$

式中: $\lambda_{100}, \lambda_{111}$  分别为 $\langle 100 \rangle$ 晶向和 $\langle 111 \rangle$ 晶向上的磁致伸缩系数; $\sigma$  为应力值; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  表示应力方向; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  为应力方向与所对应的晶轴间的夹角。

由于铁磁性材料为磁致伸缩各向同性的立方晶系,所以有  $\lambda_{100} = \lambda_{111} = \lambda_s, \lambda_s$  为饱和磁滞伸缩系数。

此时,式(9)可简化为

$$F_{\sigma} = -\frac{3}{2}\lambda_s\sigma\cos^2\varphi \tag{10}$$

式中: $\varphi$  为应力  $\sigma$  方向与自发磁化矢量间的夹角,所以有  $\cos^2\varphi = \alpha_1\gamma_1 + \alpha_2\gamma_2 + \alpha_3\gamma_3$ 。

由式(10)可知,当铁磁体受到外应力作用时,应力能  $F_{\sigma}$  发生改变,进而导致系统能量增加。为维持系统能最小原则,铁磁体只有改变  $\varphi$  值,即使磁畴自发磁化矢量转动,才能使铁磁体产生磁性。对于铁磁性材料( $\lambda_s > 0$ ),当受到的应力为拉应力时,拉应力使磁畴自发磁化方向趋于应力  $\sigma$  的方向,因为当  $\varphi$  为  $0^\circ$  或  $180^\circ$  时,系统能量最小。

### 3 不同外界磁场下三轴弱磁应力检测信号仿真计算

#### 3.1 模型建立

为了进一步研究外磁场对弱磁信号的影响特性,利用有限元方法对不同方向及强度外磁场下的三轴弱磁信号特性进行了仿真计算。建立的钢板及应力集中区模型如图 1 所示。钢板尺寸为  $200\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),材料为 X80 钢材,弹性模量为  $2 \times 10^6\text{ N/m}^2$ ,泊松比(PRXY 主泊松比)为 0.3,磁导率为  $280\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ 。钢板中部设置应力集中区,应力集中区尺寸为  $5\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),应力集中程度为  $350\text{ MPa}$ 。以应力集中区为原点建立三轴直角坐标系,映射钢板的轴向( $x$  轴)、周向( $y$  轴)和径向( $z$  轴)的三维空间。

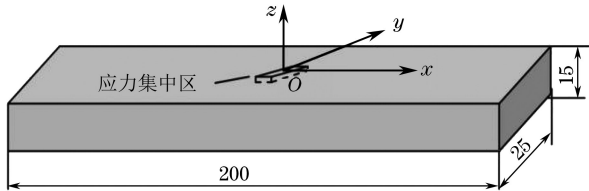


图 1 钢板及应力集中区模型

为了在钢板外部叠加不同强度及方向的外界磁场,在钢板外建立空气场,空气场尺寸为  $500\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),磁导率设为  $1\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ 。当钢板被外磁场磁化时,其磁场分布如图 2 所示。

由图 2 可知,外磁场磁化后的钢板其两端和应力集中区处磁场分布较强,且应力集中区处的磁场向外泄漏形成散射磁场。

#### 3.2 仿真结果分析

##### 3.2.1 轴向励磁计算

将外磁场施加于平行  $yOz$  的两个空气场侧面,

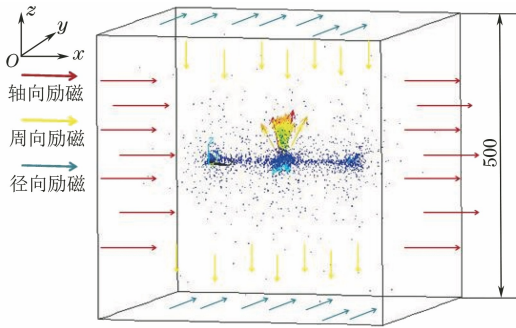


图 2 外磁场磁化下钢板的磁场分布

进而得到钢板的轴向励磁磁场。分别设置外磁场强度为  $50$ (地磁场),  $60, 70, 80\text{ }\mu\text{T}$ 。以应力集中区中心为原点,沿  $x$  轴的正负半轴分别取  $+50\text{ mm}$  和  $-50\text{ mm}$  作为检测器扫描范围,设置提离值为  $2\text{ mm}$ ,计算三轴弱磁信号强度,得到弱磁信号的三轴轴向励磁特性曲线(见图 3)。

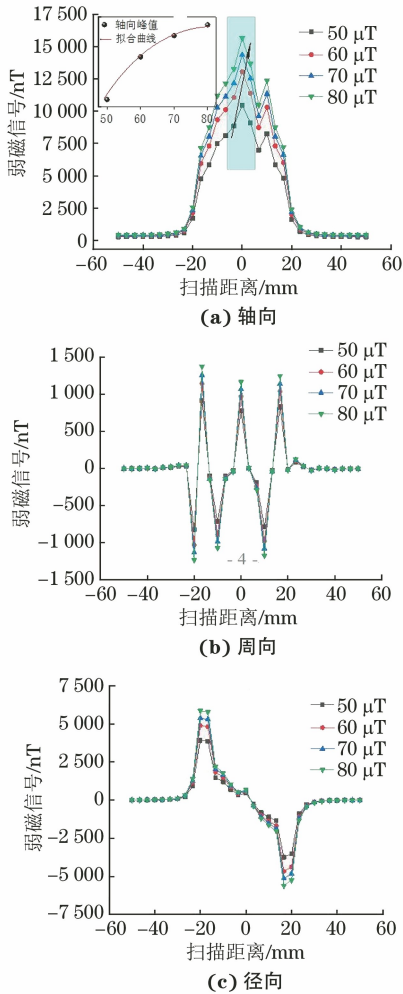


图 3 钢板三轴轴向励磁特性曲线

由图 3 可知,由于钢板应力集中区的磁畴自发磁化强度矢量趋于轴向重新排列,进而产生弱磁信号,该弱磁信号在轴向具有峰值;径向具有峰-峰值

且过零点;周向呈不规则分布,且信号值较弱,对应力损伤检测结果影响不大;轴向峰值和径向零点位于应力集中区的中心位置;随轴向励磁强度增大,弱磁信号轴向峰值增大,增大幅度逐渐减小,表明外磁场对弱磁信号的影响趋于饱和;弱磁信号的周向和径向信号不随轴向励磁强度的加强发生波动。

3.2.2 周向励磁计算

将外磁场约束施加于平行于  $xOz$  的两个空气场侧面,进而得到钢板的周向励磁磁场。分别设置磁场强度为 50,60,70,80  $\mu\text{T}$ 。以裂纹区中心为原点,沿  $x$  轴的正负半轴分别取 +50 mm 和 -50 mm 作为检测器的扫描范围,设置提离值为 2 mm,计算三轴弱磁信号强度,得到弱磁信号的三轴周向励磁特性曲线(见图 4)。

由图 4 可知,随周向励磁强度增大,弱磁信号周向波动的基值增大,增大幅度逐渐减小;弱磁信号的轴向和径向信号不随周向励磁强度的加强发生波动,信号强度较弱。

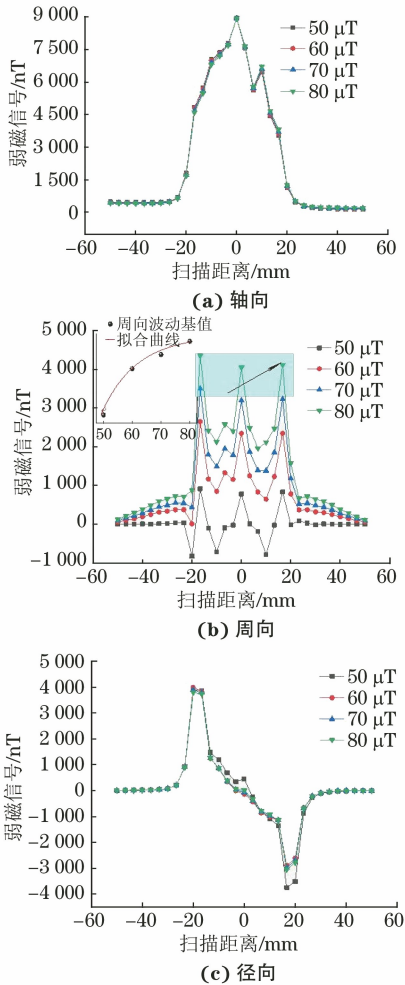


图 4 钢板三轴周向励磁特性曲线

3.2.3 径向励磁计算

将磁场施加于平行于  $xOy$  两个空气场侧面,进而得到钢板的径向励磁磁场。分别设置磁场强度为 50,60,70,80  $\mu\text{T}$ 。以裂纹区中心为原点,沿  $x$  轴正负半轴分别取 +50 mm 和 -50 mm 作为检测器的扫描范围,设置提离值为 2 mm,计算三轴弱磁信号强度,得到弱磁信号三轴径向励磁特性曲线(见图 5)。

由图 5 可知,随径向励磁强度增大,弱磁信号径向峰-峰值增大,增大幅度逐渐减小,外磁场对弱磁信号的影响趋于饱和。综合轴向与周向励磁特性分析可知,这一特性不随励磁方向发生改变。弱磁信号的周向和径向信号不随轴向励磁强度的加强发生波动。综合轴向与径向励磁特性可知,外磁场对其垂直方向的弱磁信号影响较小,这与外磁场下弱磁信号磁力学特性的计算结果有很好的 consistency。

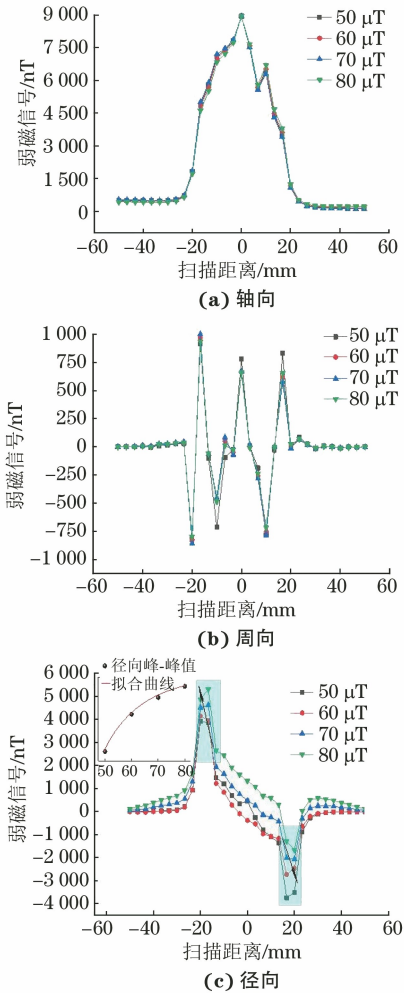


图 5 钢板三轴径向励磁特性曲线

4 弱磁应力检测试验

为了验证理论计算的正确性进行了钢条拉伸试



验,并在拉伸钢条外叠加不同方向和强度的外界磁场,进行不同外磁场下弱磁应力检测特性的验证。

4.1 试件及试验方法

试件为 X80 型管道钢的截取钢条,尺寸为 450 mm×50 mm×18.6 mm(见图 6)。在试件中部制作一处裂纹,在外部载荷作用下,裂纹处会产生严重的应力集中,进而产生弱磁信号。

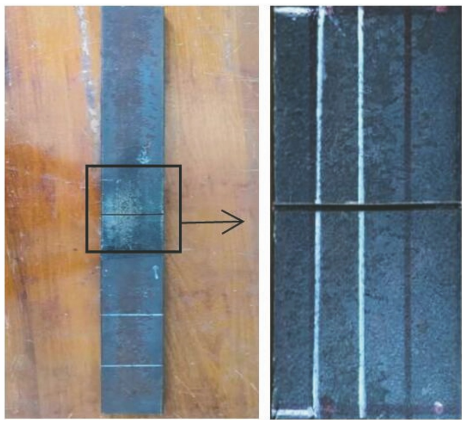


图 6 试件及裂纹局部放大图

试验设备外观如图 7 所示。利用拉力机将试件沿长度方向进行轴向拉伸,拉力从 0 kN 增加至 90 kN。利用永磁铁分别对钢条进行轴向和径向励磁,外磁场的变化范围为 0~60 μT(间隔为 20 μT)。在试件上贴上金属应变片进行应力采集,将三轴弱磁探头固定在试件裂纹上部,采集试件裂纹处的三轴弱磁信号。



图 7 试验设备外观

4.2 励磁特征分析

4.2.1 轴向励磁特性分析

利用轴向励磁下采集的三轴弱磁信号和对应的应力值,绘制得到轴向励磁弱磁信号特性曲线(见图 8)。

由图 8 可见,在轴向拉伸应力作用下,磁畴自发

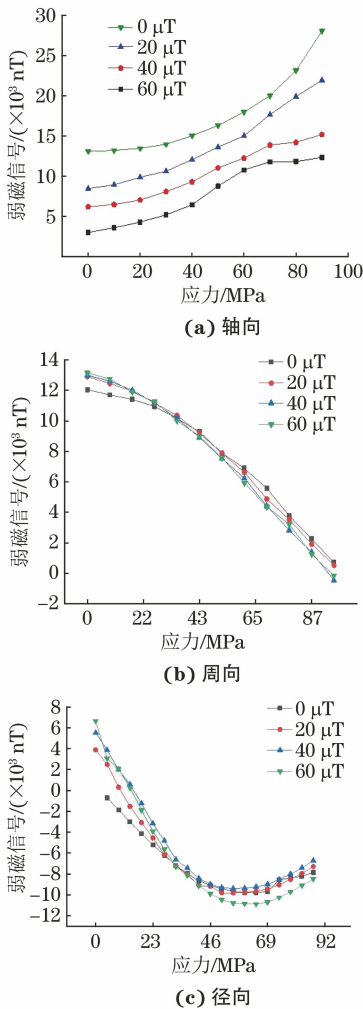


图 8 试件的轴向励磁特性曲线

磁化强度矢量趋于拉伸方向(轴向)重新排列,进而导致轴向弱磁信号线性增大,而周向与径向弱磁信号减小,且趋近于零。这与外磁场下弱磁信号磁力学特性的计算结果吻合。随轴向励磁场增强,轴向弱磁信号增大,而周向、径向弱磁信号不发生波动,这说明轴向励磁场对其垂直方向弱磁信号的影响较小。

4.2.2 径向励磁特性分析

利用径向励磁下采集的三轴弱磁信号和对应的拉力值,绘制得到径向励磁弱磁信号特性曲线(见图 9)。

由图 9 可知,在径向励磁场的作用下,径向弱磁信号增加,而轴向、周向弱磁信号不发生波动,这说明径向励磁场同样对其垂直方向弱磁信号的影响较小。

4.2.3 励磁强度特性分析

分别提取拉力为 70 MPa 下,轴向励磁时的轴向弱磁信号和径向励磁时的径向弱磁信号,绘制弱磁信号磁化特性曲线(见图 10)。

由图 10 可知,随励磁强度的增加,弱磁信号

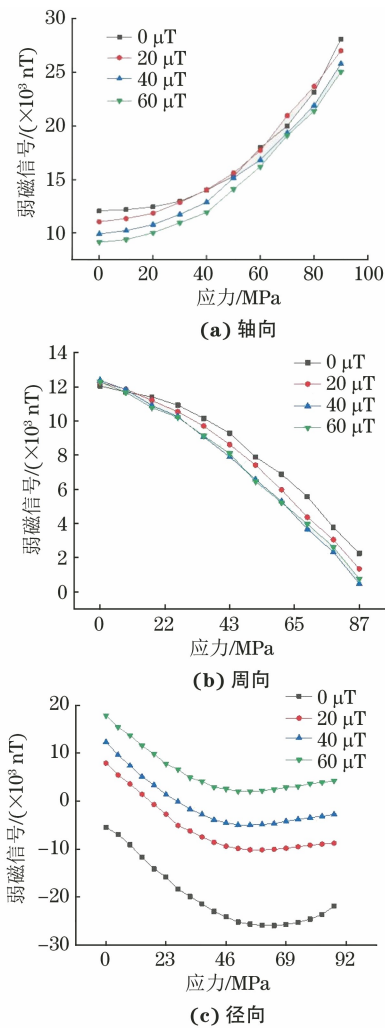


图 9 试件的径向励磁特性曲线

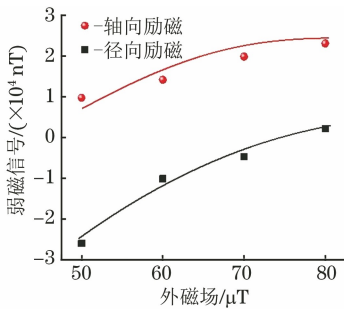


图 10 70 MPa 下试件的弱磁信号磁化特性曲线

强度增加,但增加幅度逐渐减小,外磁场对弱磁信号的磁化趋于饱和,这与仿真计算结果有很好的—致性。

5 结语

(1) 损伤应力下,铁磁材料磁畴自发磁化强度矢量趋于应力方向重新排列,进而产生弱磁信号。弱磁信号在轴向具有峰值;径向具有峰-峰值,且过零点;周向呈不规则波动,且信号强度较小。弱磁信号轴向

峰值和径向峰-峰值位于应力集中区中心位置。

(2) 外磁场的强度和方向都会对微观磁畴产生影响。随外磁场强度增大,弱磁信号增大,但增大幅度逐渐减小,外磁场对弱磁信号的影响趋于饱和。这一特性不随外磁场的励磁方向发生变化。

(3) 外磁场对其垂直方向的磁畴总磁化贡献为零,且当外界磁场垂直于弱磁信号时,其叠加磁场也为零,导致外界磁场对其垂直方向的弱磁信号影响较小,即该方向上的弱磁信号完全由应力决定。

参考文献:

[1] GORKUNOV E S. Different remanence states and their resistance to external effects. Discussing the “method of magnetic memory”[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2014, 50(11): 617-633.

[2] HUANG H H, QIAN Z C, YANG C, et al. Magnetic memory signals of ferromagnetic weldment induced by dynamic bending load[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2017, 32(2): 166-184.

[3] 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: 15-20.

[4] LI G R, WANG H M, LI P S, et al. Mechanism of dislocation kinetics under magnetoplastic effect [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(14): 148102.

[5] 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.

[6] LIU B, FU Y, XU B. Study on metal magnetic memory testing mechanism [J]. Research in Nondestructive Evaluation, 2015, 26(1): 1-12.

[7] BINNS C, BAKER S H, LOUCH S, et al. Building high-performance magnetic materials out of gas-phase nanoclusters[J]. Applied Surface Science, 2004, 226(1/2/3): 249-260.

[8] SUKHORUKOV V. Magnetic flux leakage testing strong or weak magnetization [J]. Materials Evaluation, 2013, 71(5): 26-31.

[9] LIU X B, ALTOUNIAN Z, RYAN D H. Magnetocrystalline anisotropy in Gd (Co, Fe)<sub>12</sub> B<sub>6</sub>: a first-principles study [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 688: 118-122.

[10] CLARK A E, RESTORFF J B, WUN-FOGLE M, et al. Magnetostrictive properties of body-centered cubic Fe-Ga and Fe-Ga-Al alloys[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(5): 3238-3240.

[11] ONO F, YAMADA O. Temperature dependence of the uniaxial magneto-crystalline anisotropy energy of co[J]. Journal of the Physical Society of Japan, 1979, 46(2):462-467.

[12] JU J, XUE F, LI H. Microstructure and magnetic property variation with addition of rare earth element Dy in co-Ni-Al ferromagnetic shape memory alloy [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2015, 22(9):858-863.

[13] ZHANG H W, JIANG X, HE J C. Modeling of orientation and alignment of primary Al<sub>3</sub>Ni crystal in Al-Ni alloy by imposing a high magnetic field[J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2012, 19(S2):1095-1098.

[14] WANG D S, WU R Q, FREEMAN A J. Magnetocrystalline anisotropy of interfaces: first-principles theory for Co-Cu interface and interpretation by an effective ligand interaction model [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1994, 129(2/3):237-258.

[15] WANG X D, WANG D S, WU R Q, et al. Validity of the force theorem for magnetocrystalline anisotropy [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1996, 159(3):337-341.

[16] KIM Y K, LEE J H, WU J H, et al. Iron-gold barcode nanowire and manufacturing method thereof: US9175412[P]. 2015-11-03.

[17] MCCOLLOUGH J P, GANNON J L, BAKER D N, et al. A statistical comparison of commonly used external magnetic field models[J]. Space Weather, 2008, 6(10):S10001.

[18] HAYAT T, MUHAMMAD T, SHEHZAD S A, et al. Impact of magnetic field in three-dimensional flow of an Oldroyd-B nanofluid[J]. Journal of Molecular Liquids, 2015, 212:272-282.

[19] RYU J, CHOE S B, LEE H W. Magnetic domain-wall motion in a nanowire: Depinning and creep [J]. Physical Review B, 2011, 84(7):075469.

[20] MAZIEWSKI A, ZABLOTSKII V, KISIELEWSKI M. Analysis of magnetic domain sizes in ultrathin ferromagnetic films[J]. Physica Status Solidi (a), 2002, 189(3):1001-1005.



(上接第 63 页)

检测定位的准确性和适用性。

(2) 开罐检查发现,罐底板缺陷主要来自于建设期的金属损失和点蚀,罐底板的腐蚀缺陷多位于中幅板,腐蚀分布具有随机性。

(3) 已发现的 8 个缺陷深度都较浅,最大深度不超过底板设计壁厚的 18.75%,在标准许可的 40%深度范围内,该成品油储罐底板安全状态较好。

参考文献:

[1] 汪金龙. 成品油储罐内的腐蚀及防腐分析[J]. 全面腐蚀控制, 2019, 33(4):91-92, 101.

[2] PETRYNA D Y, HOHOL' V M, PETRYNA Y D, et al. Corrosion and corrosion-mechanical fracture of the steel of crude-oil tanks[J]. Materials Science, 2016, 51(5):666-672.

[3] 何利民,高祁. 油气储运工程施工[M]. 北京:石油工业出版社, 2007.

[4] 蒋林林,李玲杰,苏碧煌,等. 声发射技术在储罐底板腐蚀检测中的应用[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(2):56-59, 77.

[5] 谢小娟,杨宁祥. 储罐超声导波检测技术研究进展[J]. 西部特种设备, 2020, 3(1):31-36.

[6] 韩文礼,蒋林林,刘苒,等. 在役原油储罐的在线检测技术应用现状[J]. 石油工程建设, 2019, 45(4):1-4.

[7] 刘永恒. 大型原油储罐罐底板腐蚀声发射在线检测系统研究与应用[D]. 舟山:浙江海洋大学, 2018.

[8] 张彤翼,张延兵,孙志涛. 基于在线安全评价的 10<sup>5</sup> m<sup>3</sup> 原油储罐延期检修技术探讨[J]. 无损检测, 2021, 43(2):21-25, 32.

[9] 徐中原,王维,王玉林,等. 大型原油储罐的在线全面检测技术应用[J]. 无损检测, 2019, 41(2):52-55.

[10] 苟东晓,苏宪章,艾川,等. 储罐底板检测方法的组合应用[J]. 无损检测, 2019, 41(5):47-53.

[11] 胡振龙,肖尧钱,胡笠. 声发射检测在常压储罐基于风险的检验中的应用[J]. 无损检测, 2020, 42(10):10-13, 17.