

DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2412812

基于双磁场的管道非体积损伤检测研究*

刘斌, 罗宁, 武梓涵, 何璐瑶, 杨理践

(沈阳工业大学信息科学与工程学院 沈阳 110870)

摘要:管道应力集中区的应力量化对管道寿命评估及安全预防具有重要作用。弱磁检测技术是一种有效的应力集中检测方法,但是管道的硬点也会产生类似的缺陷信号对应力量化分析产生干扰。本文建立了管道非体积损伤的磁信号检测解析模型,分析了硬点及应力对管材磁特性参数的影响,对硬点及应力集中区在不同励磁强度下的信号特征进行了研究,提出利用强弱励磁的双磁场应力检测方法用以排除硬点对应力弱磁信号的干扰,对理论研究进行了试验验证。研究表明:弱励磁下,磁化强度随应力及硬度增大而减弱。磁化强度的衰减梯度随应力增大而增大,随硬度增大而减小;强磁激励下,磁化强度随硬度增大呈近线性减小趋势且不受应力变化影响。引入信号特征磁敏系数表征不同励磁强度下非体积缺陷的检测能力,10 kA/m 励磁下,随着应力增大,磁信号的切向磁敏系数从 1.54 增强到 25.87,随着硬度的增大,磁信号的切向磁敏系数从 7.46 增强到 33.87,应力及硬点均有较好的识别能力;30 kA/m 励磁下,随着应力增大,磁信号的切向磁敏系数从 0.07 增强到 0.54,随着硬度的增大,磁信号的切向磁敏系数从 0.49 增大到 4,硬点仍有较好的识别能力,应力识别能力低,因此利用强弱磁双场检测方法可以排除硬点对应力检测的干扰。

关键词: 硬点;应力;双场检测;力磁关系

中图分类号: TH878

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 460.40

Research on non-volume damage of pipeline based on dual magnetic field detection

Liu Bin, Luo Ning, Wu Zihan, He Luyao, Yang Lijian

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

Abstract: The stress quantification in the stress concentration area of pipeline plays an important role in pipeline life evaluation and safety prevention. Weak magnetic detection technology is an effective stress concentration detection method. However, the presence of hard spots on the pipeline can generate similar signals to those of defects, interfering with stress quantification. This paper establishes an analytical model for the magnetic signal detection of non-volumetric damage in pipelines, analyzing the effects of hard spots and stress on the magnetic properties of the pipe material. The signal characteristics of hard point and stress concentration area are studied under different excitation intensities, and the dual magnetic field stress detection method using strong and weak excitation is proposed to eliminate the interference of hard point on stress weak magnetic signal. Experimental verification of the theoretical research was conducted. The results show that under weak excitation, the magnetization intensity decreases with the increase of stress and hardness. The attenuation gradient of magnetization increases with the increase of stress and decreases with the increase of hardness. Under strong magnetic excitation, the magnetization decreases linearly with the increase of hardness and is not affected by the change of stress. The signal characteristic magnetic sensitivity coefficient is introduced to characterize the detection ability of non-volume defects under different excitation intensities. Under 10 kA/m excitation, the tangential magnetic sensitivity coefficient of magnetic signal increases from 1.54 to 25.87 with the increase of stress, and from 7.46 to 33.87 with the increase of hardness. Both stress and hard points have good recognition ability. Under a 30 kA/m excitation, the tangential magnetic sensitivity coefficient of the magnetic signal increases from 0.07 to 0.54 as stress increases and from 0.49 to 4 as hardness increases, with hard spots being well identified but low stress identification capability. Therefore, the use of strong and weak

收稿日期: 2024-05-08 Received Date: 2024-05-08

* 基金项目: 国家自然科学基金(61871450)、辽宁省兴辽英才计划青年拔尖人才(XLYC2007062)项目资助

magnetic two-field detection method can eliminate the interference of hard point on stress detection.

Keywords: hard spot; stress; dual magnetic field detection; magnetomechanical relationship

0 引言

管道是石油和天然气运输的主要手段,保障管道的安全运行具有重要的经济和社会意义^[1-3]。漏磁管道内检测技术是国内外最为成熟有效的管道在线检测方法,通过漏磁信号的识别对管道上的体积损失进行检测与尺寸量化分析,从而制定相应的维修方案^[4-5]。但是漏磁检测方式只能检测出已经形成的体积缺陷^[6-9],从体积损失到管道失效所需要的时间可能会低于定期检测的时间间隔,无法满足对管道安全预防的要求^[10-12]。随着人们对管道安全事故的分析及研究发现,管道的应力集中往往是管道失效的前置因素,应力腐蚀也是导致管道失效的主要原因,应力检测需求随之而来^[13-16]。除应力外,由管道材质变硬导致的韧性降低也是一种管道的安全隐患^[17-18],因此在国际的管道检测标准及国标检测文件中都提到了管壁局部超过一定硬度的管道硬点也是一种管道缺陷。有效的识别这些没有造成管道体积损失的缺陷对管道安全预防具有重要意义。

近年来,随着检测技术的发展,单纯的漏磁检测技术进行体积损伤检测已经无法满足管道安全人员的要求。为了能够预防管道失效的发生,弱磁检测技术逐渐被应用,用于检测管道上的应力集中区或硬度异常区域^[19-22]。通过检测机理的研究发现硬度变化及应力变化均能够影响弱励磁下的铁磁体磁特性,如果能够区分管道磁信号异常区域是单纯的应力变化还是单纯的管壁硬度变化对提高管道维护效率具有重要作用。本文采用了双励磁场的管道内检测技术对应力集中区及硬点的磁信号特征进行了分析,建立了硬点及应力集中区的磁场检测解析模型,研究了硬度变化及应力变化对磁信号的影响,分析了不同强度励磁场下的磁信号区别,为应力检测中的硬点区分提供了理论基础。

1 非体积缺陷磁信号检测模型

假设管道内壁存在一处非体积缺陷,该缺陷可以为超出管道壁均匀分布应力大小的应力集中区域,也可以为受力均匀或无应力的一处硬点。为方便计算,将该缺陷近似视为规则的立方体,立方体的长和宽,分别对应管壁轴向方向及周向方向的缺陷尺寸,立方体的高度为缺陷深度。当检测器从缺陷上方沿轴向经过对管壁进行检测,外磁场 H 沿轴向方向对管壁进行磁化。当磁通流经非体积缺陷区域时,由于管材磁性改变,磁通量发生变化,缺陷上方磁场发生改变,可以利用磁荷模型对磁场强

度进行解析计算。

磁荷模型是假定缺陷沿轴向的两个端面上存在均匀分布的等效磁荷,在理想条件下,这些磁荷在检测位置的磁场强度矢量和的大小即等效视为该点的磁场强度。磁荷模型如式(1)所示^[23]:

$$dH_0 = \frac{\rho dS}{4\pi\mu_0 |r|^3} \mathbf{r} \quad (1)$$

其中, H_0 为单个磁荷在检测点位置的磁场强度; ρ 为缺陷端面的等效磁荷密度; dS 为磁荷的面积微元; $\mathbf{r}$ 为磁荷表面到检测位置的方向向量; r 为检测器到磁荷表面的距离; μ_0 为真空磁导率。

对缺陷端面所有磁荷微元进行积分计算可以得到检测点位置的切向及法向磁信号,如式(2)、(3)所示:

$$H_x = \frac{\rho}{4\pi\mu_0} \int_{-D_z/2}^{D_z/2} \int_{D_y} \times \frac{x + D_x/2}{[(x + D_x/2)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{x - D_x/2}{[(x - D_x/2)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{\frac{3}{2}}} dy_0 dz_0 \quad (2)$$

$$H_y = \frac{\rho}{4\pi\mu_0} \int_{-D_z/2}^{D_z/2} \int_{D_y} \times \frac{y - y_0}{[(x + D_x/2)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{y - y_0}{[(x - D_x/2)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{\frac{3}{2}}} dy_0 dz_0 \quad (3)$$

式中: D_z 为缺陷的宽度, D_x 为缺陷的长度, D_y 为缺陷深度,检测器位置为 (x, y, z) 。已知缺陷尺寸时,利用等效磁荷密度可以计算磁场强度。根据磁荷密度的定义,非体积缺陷处的等效磁荷密度如式(4)所示^[24]:

$$\rho = \mu_0(M_1 - M_2) \quad (4)$$

式中: M_1 为正常管壁处的磁化强度, M_2 为非体积缺陷处的材料磁化强度。铁磁体材料在不同外磁场激励下的磁化强度可以由 J-A 模型进行计算。本文采用修正过的改进 J-A 模型进行计算^[25-27],磁化强度与外磁场关系如式(5)所示:

$$\frac{dM}{dH} = \frac{\mu_0(M_{an} - M)}{k\delta} \frac{c}{1-c} \frac{dM_{an}}{dH} + \frac{\mu_0}{k\delta} (M_{an} - M) \left\{ \alpha + \frac{3\sigma}{\mu_0} [(r_{1(0)} + r'_{1(0)}\sigma) + 6(r_{2(0)} + r'_{2(0)}\sigma)M^2] \right\} \frac{c}{1-c} \quad (5)$$

式中: M 为材料的磁化强度,单位 A/m ; H 为外磁场强度,单位 A/m ; μ_0 为真空磁导率; δ 为方向系数,励磁时为 1,退磁时为-1; c 为不可逆系数; α 为磁畴耦合系数; $r_{1(0)}$, $r'_{1(0)}$, $r_{2(0)}$, $r'_{2(0)}$ 均为材料相关系数; σ 为材料应力,单位 Pa ; k 为钉扎系数; M_{an} 为无磁滞磁化强度,单位 A/m ,可以表示为^[28-30]:

$$M_{an} = M_s \left[\coth \left(\frac{H_e}{a} - \frac{a}{H_e} \right) \right] \tag{6}$$

式中: M_s 为材料的饱和磁化强度,单位 A/m ; a 为磁化曲线形状系数; H_e 为材料受到外磁场和应力共同作用下的等效磁场强度,单位 A/m ,可以表示为^[31-32]:

$$H_e = H + \alpha M_{an} + \frac{3\sigma}{\mu_0} [(r_{1(0)} + r'_{1(0)} \sigma) M + 6(r_{2(0)} + r'_{2(0)} \sigma) M^3] \tag{7}$$

式中第 3 项为应力的等效磁场。

上述公式中:钉扎系数 k 表达式为^[33-34]:

$$k = \left(G_1 + \frac{G_2}{d} \right) \rho_0^{1/2} k_0 - \frac{3}{2} \eta \lambda \sigma \tag{8}$$

磁化曲线形状系数 a 的表达式为:

$$a = \left(G_3 + \frac{G_4}{d} \right) \rho_0^{1/2} a_0 \tag{9}$$

磁畴耦合系数 α 的表达式为:

$$\alpha = \alpha_0 + \frac{21}{4} \frac{E_s}{\mu_0} \left\{ \lambda \exp \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^2 \right] / M_s \right\}^2 \tag{10}$$

式中: ρ_0 为位错密度; $-3\eta\lambda\sigma$ 表示应力对钉扎系数的改变量, η 为拟合常数, λ 为无应力下材料饱和磁滞伸缩应变, σ 为应力,无应力作用时,该项为零; k_0 为初始钉扎系数; a_0 为初始形状系数; G_1, G_2, G_3, G_4 为拟合常数,一般取 $G_1 = G_3, G_2 = G_4$; d 为材料晶粒尺寸; α_0 为初始畴壁耦合系数; E_s 为弹性模量; σ_0 为初始应力常数。

通过上述公式,根据管材非体积损失缺陷的实际状态带入相应的参数可以计算管材的磁化曲线。结合外部激励磁场强度可以计算管材缺陷处及无损区域的磁化强度,根据式(4)可以求得缺陷端面处的磁荷密度,利用磁荷模型可以正向解析计算磁信号特征。

2 不同非体积缺陷对磁信号的影响

2.1 应力集中区磁信号特征分析

根据式(8)~(10)中钉扎系数、磁化曲线形状系数及磁畴耦合系数的定义公式,考虑应力对参数的影响,假定管材处于弹性形变状态下,此时,式(8)、(9)中 $(G_3 + G_4/d)\rho_0^{1/2}$ 和 $(G_1 + G_2/d)\rho_0^{1/2}$ 取 1, $k_0 = 4.522 \times 10^{-3} A/m$, $a_0 = 1\,000$, $\eta = 1.5 \times 10^{-7}$, $\lambda = 3.85 \times 10^{-6}$, σ 为即时应力强度。式(10)中参数取值为 $\alpha_0 = 1.44 \times 10^{-3}$, $E_s = 2.07 \times 10^5 MPa$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} NA^{-2}$, $\lambda = 3.85 \times 10^{-6}$, $\sigma_0 = 100 MPa$, $M_s = 1.58 \times 10^6 A/m$ 。

带入不同强度应力值,计算不同应力下管材磁化曲线如图 1 所示。

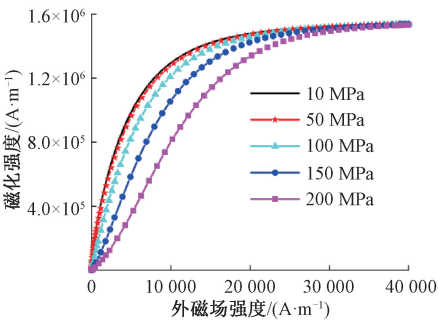


图 1 不同应力磁化曲线

Fig. 1 Different stress-dependent magnetization curves

如图所示,当管材所受应力从 10 MPa 逐渐增大到 200 MPa,在同等强度外磁场激励下,材料的磁化强度呈减弱趋势。励磁强度在 0~10 kA/m 时,随应力增大,磁化强度的减小幅度逐渐增大;励磁强度在 10~40 kA/m 时,随应力增大,磁化强度的减小幅度逐渐减弱直到趋于一致。说明在弱磁激励下,应力变化可以被识别,在漏磁检测时,应力变化难以识别。

分别提取管材在 10、20、30 kA/m 励磁强度下的磁化强度如表 1 所示。

表 1 不同励磁强度下不同应力钢材的磁化强度

Table 1 Magnetization strength of different stressed steel under different excitation strengths (A·m⁻¹)

	10 MPa	50 MPa	100 MPa	150 MPa	200 MPa
10 kA/m	1 322 441. 807	1 292 439. 651	1 254 109. 078	1 118 533. 303	818 359. 912 6
20 kA/m	1 484 407. 01	1 475 333. 228	1 466 808. 715	1 438 168. 615	1 341 959. 03
30 kA/m	1 526 373. 607	1 522 509. 094	1 520 188. 347	1 513 522. 535	1 494 699. 172

假设管壁上存在一处长 10 mm,宽 10 mm,深 5 mm 的应力集中区,正常管壁处的钢材应力为 10 MPa,应力集中区处的应力从 50 MPa 逐渐增大至 200 MPa。在不

同外磁场激励下,根据磁荷密度公式可以求得应力集中区端部截面的磁荷密度如表 2 所示。

根据磁荷模型对 10 kA/m 励磁环境下不同应力的

表 2 不同励磁强度下不同应力集中区端面磁荷密度

	excitation intensity				(T)
	50 MPa	100 MPa	150 MPa	200 MPa	
10 kA/m	0.037 682 708	0.085 825 908	0.256 109 081	0.633 126 859	
20 kA/m	0.011 396 67	0.022 103 459	0.058 075 424	0.178 914 663	
30 kA/m	0.004 853 828	0.007 768 687	0.016 140 946	0.039 783 090	

应力集中区信号进行解析计算如图 2 所示。

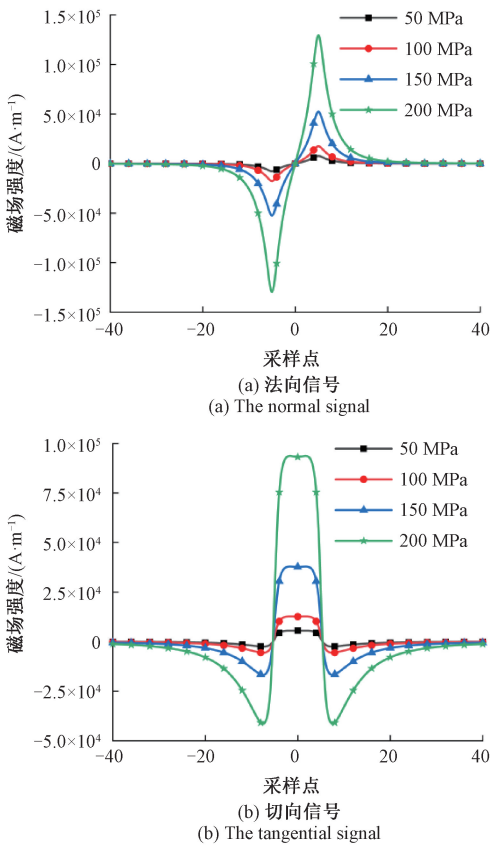


图 2 10 kA/m 励磁不同应力磁信号

Fig. 2 Different stress magnetic signal at 10 kA/m excitation field

由图可知,在 10 kA/m 的弱磁激励下,应力集中区的切向信号峰值与法向信号峰峰值随应力强度的增大而增大,信号特征的增大趋势呈非线性变化,信号特征相对于 10 kA/m 的外磁场可以被识别。同理可以计算 20 kA/m 及 30 kA/m 励磁条件下不同应力集中区的磁信号特征如图 3、4 所示。

由图可知,在 20 kA/m 及 30 kA/m 的励磁激励下,应力集中区的切向信号特征及变化趋势与 10 kA/m 励磁时一致。但是,随着励磁强度的增加,同等应力强度的应力集中区信号切向峰值及法向信号的峰峰值呈减小趋势,应

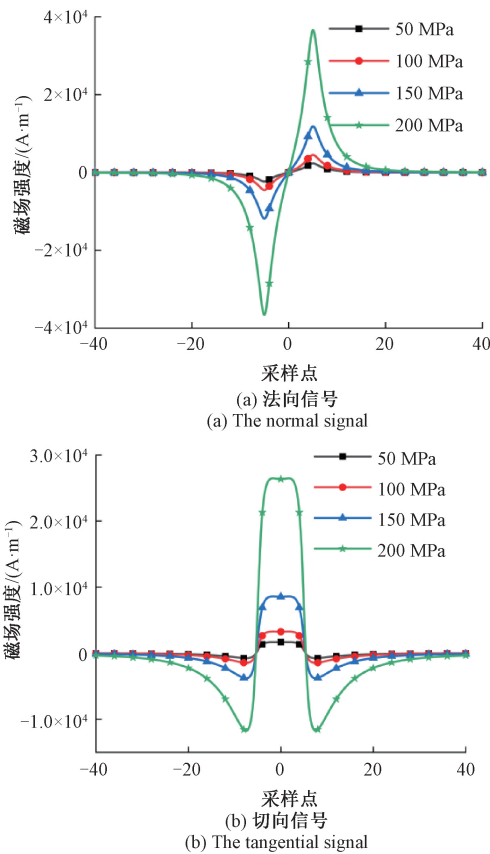
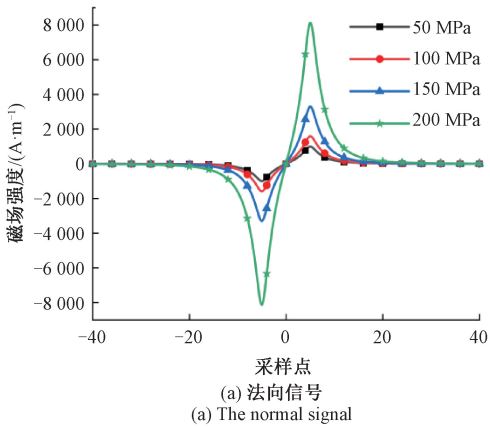


图 3 20 kA/m 励磁不同应力磁信号

Fig. 3 Different stress magnetic signal at 20 kA/m excitation field



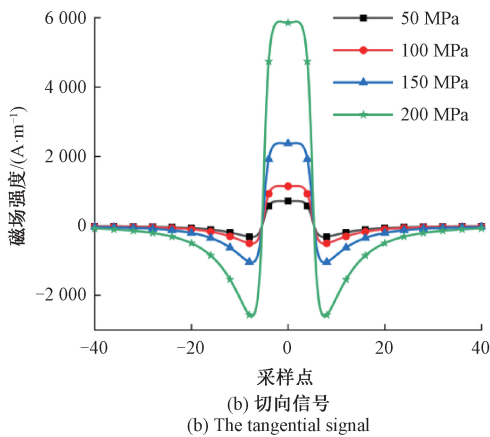


图4 30 kA/m 励磁不同应力磁信号

Fig. 4 Different stress magnetic signal at 30 kA/m excitation field

力强度越大,信号特征减弱趋势越明显。原因在于随着励磁强度的增大,非应力集中区域与应力集中区的磁化强度差值逐渐减小,端部的磁荷密度逐渐减小。提取不同励磁强度下的不同应力信号特征值进行分析如图5所示。

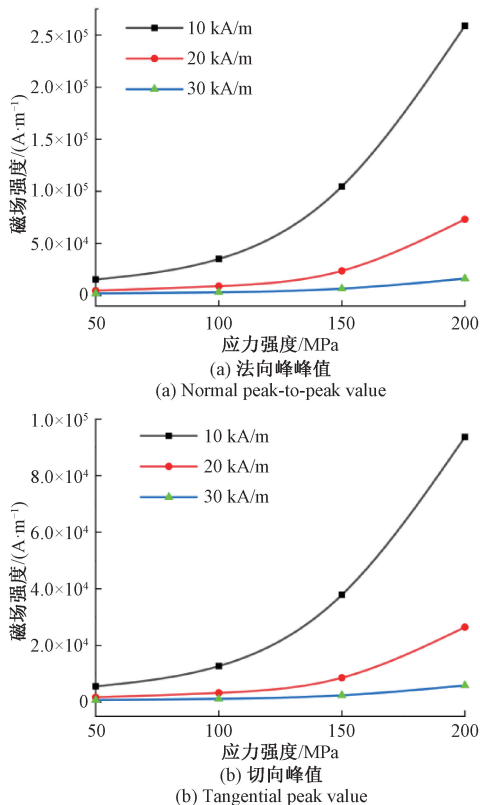


图5 不同应力信号特征值变化图

Fig. 5 Change plot of the eigenvalues of different stress signals

由图可知,随着励磁强度的增大,信号特征值呈减弱趋势。随着励磁强度的增大,信号特征值随应力变化的

斜率逐渐减小,说明应力识别能力逐渐减弱。在30 kA/m 励磁情况下,曲线趋近平行,说明强磁状态下,应力强度的信号特征难以区分,无法被识别。但是在低磁化情况下,应力的变化斜率随应力的增大逐渐增大,应力强度更容易被识别。

2.2 硬点对磁信号影响分析

硬点处的硬度值高于管道其余位置,硬度的提高意味着塑性变形抗力的增加。在管材的塑性变形过程中,塑性变形抗力增加体现在流变应力的增加,流变应力 τ 是位错密度平方根的函数^[35]:

$$\tau = \tau_0 + \beta G b \sqrt{\rho_0} \quad (11)$$

式中: τ_0 为无加工硬化时所需的切应力; β 为与材料有关的常数; G 为剪切模量; b 为位错的柏格斯矢量; ρ_0 为位错密度。由公式可知,流变应力的增加意味着材料位错密度增大,即当管材硬度增大时,该处的管材位错密度增加。由公式(8)、(9)可知,位错会以钉扎的形式阻碍管材磁畴壁运动,影响管材的钉扎系数与形状系数。

经过退火处理的钢材,其位错密度 ρ_0 一般在 $10^{12} \sim 10^{13}/\text{cm}^2$,取不同位错密度计算不同硬度下的磁化曲线。当材料处于无应力状态时,式(8)、(10)中第2项为0,式(8)~(10)中参数取值为: $G_1 = G_3 = 0.81 \times 10^{-6} \text{ m}$, $G_2 = G_4 = 3.8 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, $d = 1.25 \times 10^{-3} \text{ m}$, $k_0 = 4.522 \times 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$, $a_0 = 1000$, $\alpha_0 = 1.44 \times 10^{-3}$ 。将钉扎系数、磁化曲线形状系数及磁畴耦合系数带入式(5)中,式中参数取值为: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$, $M_s = 1.58 \times 10^6 \text{ Am}^{-1}$, $c = 0.25$, $\gamma_{1(0)} = 7 \times 10^{-18} \text{ A}^{-2} \text{ m}^2$, $\gamma'_{1(0)} = -1 \times 10^{-25} \text{ A}^{-2} \text{ m}^2 \text{ Pa}^{-1}$, $\gamma_{2(0)} = -3.3 \times 10^{-30} \text{ A}^{-4} \text{ m}^4$, $\gamma'_{2(0)} = 2.1 \times 10^{-38} \text{ A}^{-4} \text{ m}^4 \text{ Pa}^{-1}$ 。分别带入不同位错密度得到钢材的磁化曲线如图6所示。

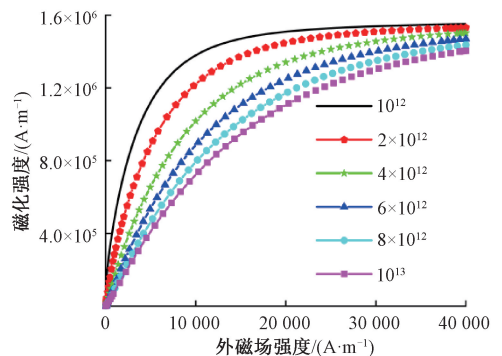


图6 不同硬度磁化强度曲线

Fig. 6 Magnetization curves for different hardness levels

如图6所示,当钢材的位错密度从 $10^{12}/\text{cm}^2$ 逐渐提高到 $10^{13}/\text{cm}^2$,意味着钢材的硬度逐渐加大,此时同等外磁场激励情况下,钢材磁化强度呈减弱趋势。在低励磁强度下,磁化强度减弱幅度较大,高励磁强度下,磁化强度减弱幅度较小。分别提取钢材在10 kA/m、20 kA/m、

30 kA/m 励磁强度下的磁化强度如表 3 所示。

假设管壁上存在一处长 10 mm,宽 10 mm,深 5 mm 的硬点,正常管壁处的钢材位错密度为 $10^{12}/\text{cm}^2$,硬点处的位错密度随着硬度的增大逐渐增大至 $10^{13}/\text{cm}^2$ 。在不同外磁场激励下,根据磁荷密度公式可以求得硬点端面截面的磁荷密度如表 4 所示。

表 3 不同励磁强度下各位错密度钢材的磁化强度

Table 3 Magnetization of staggered steel at different excitation strengths (A·m⁻¹)

	10 ¹² /cm ²	2×10 ¹² /cm ²	4×10 ¹² /cm ²	6×10 ¹² /cm ²	8×10 ¹² /cm ²	10 ¹³ /cm ²
10 kA/m	1 399 024.964	1 253 685.519	1 017 347.399	900 815.241 6	803 737.194 4	739 039.279 1
20 kA/m	1 512 998.822	1 456 068.495	1 340 576.71	1 254 175.862	1 176 056.387	1 114 454.156
30 kA/m	1 540 579.901	1 512 040.954	1 456 005.181	1 403 602.99	1 351 886.073	1 306 591.456

表 4 不同励磁强度下不同硬点端面磁荷密度

Table 4 Magnetic charge density of different hard points under different excitation strength (T)

	2×10 ¹² /cm ²	4×10 ¹² /cm ²	6×10 ¹² /cm ²	8×10 ¹² /cm ²	10 ¹³ /cm ²
10 kA/m	0.182 546 343	0.479 387 022	0.625 751 411	0.747 681 439	0.828 942 02
20 kA/m	0.071 504 491	0.216 562 173	0.325 081 638	0.423 199 698	0.500 572 1
30 kA/m	0.035 844 917	0.106 225 848	0.172 043	0.236 999 448	0.293 889 487

根据磁荷模型对 10 kA/m 励磁环境下不同硬度的硬点信号进行解析计算如图 7 所示。

由图可知,在 10 kA/m 的弱磁激励下,硬点试样的切向信号峰值与法向信号峰值随硬度的增大而增大,信号特征的增大趋势呈非线性变化,信号特征相对于 10 kA/m 的外磁场可以被识别。同理可以计算 20 kA/m 及 30 kA/m 励磁条件下不同硬点的磁信号特征如图 8、9 所示。

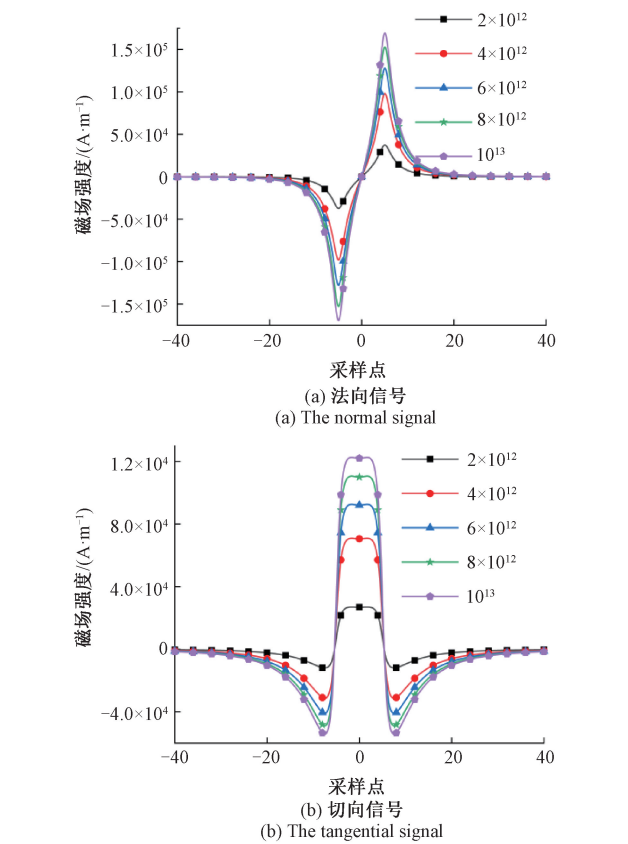


图 7 10 kA/m 励磁不同硬度硬点磁信号

Fig. 7 Different hardness magnetic signal at 10 kA/m excitation field

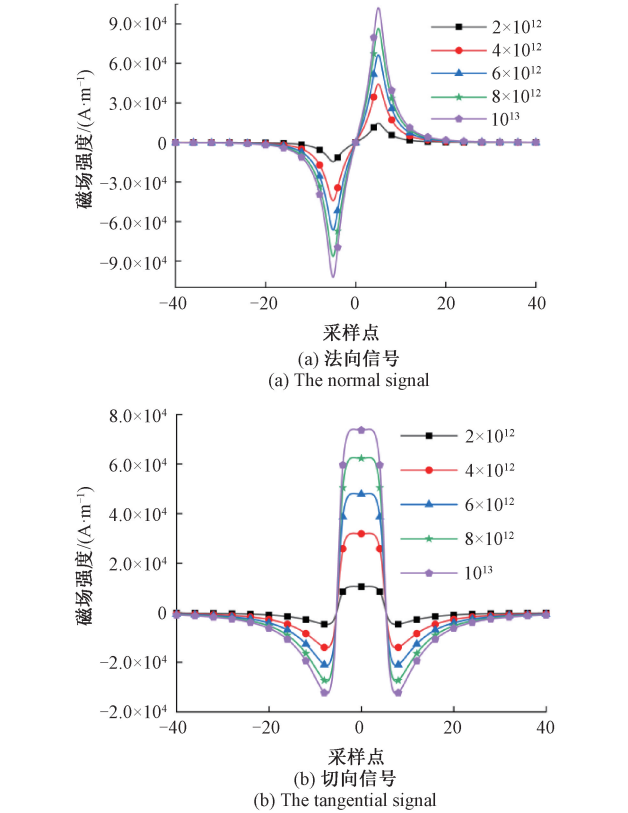


图 8 20 kA/m 励磁不同硬度硬点磁信号

Fig. 8 Different hardness magnetic signal at 20 kA/m excitation field

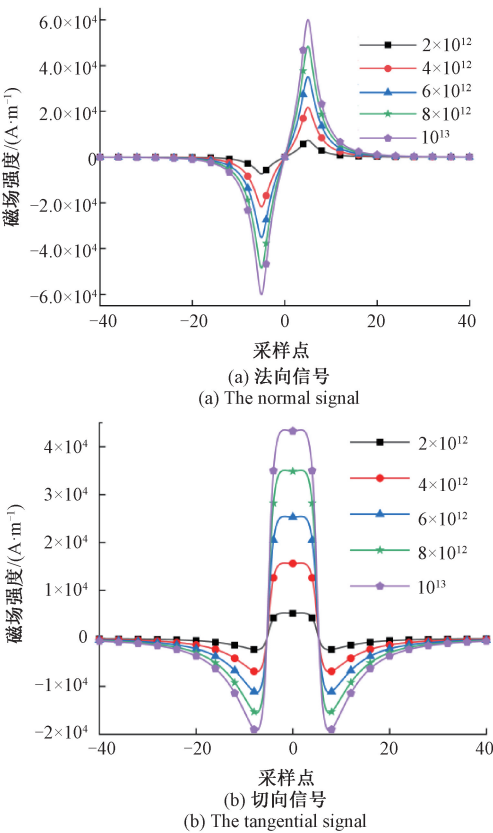


图 9 30 kA/m 励磁不同硬度硬点磁信号

Fig. 9 Different hardness magnetic signal at 30 kA/m excitation field

由图可知,在 20 和 30 kA/m 的励磁激励下,硬点试样的切向信号特征及变化趋势与 10 kA/m 励磁时一致。但是,随着励磁强度的增加,同等硬度的硬点信号切向峰值及法向信号的峰峰值呈减小趋势。其原因在于随着励磁强度的增大,非硬点区域与硬点区域的磁化强度差值逐渐减小,硬点端部的磁荷密度呈减弱趋势。提取不同励磁强度下的不同硬度信号特征值进行分析如图 10 所示。

由图可知,随着励磁强度的增大,信号特征值呈减弱趋势。随着励磁强度的增大,信号特征值随硬度变化的斜率逐渐减小,在 30 kA/m 励磁情况下,仍有较大斜率,说明强磁状态下,硬点仍可识别,但是在低磁化情况下,

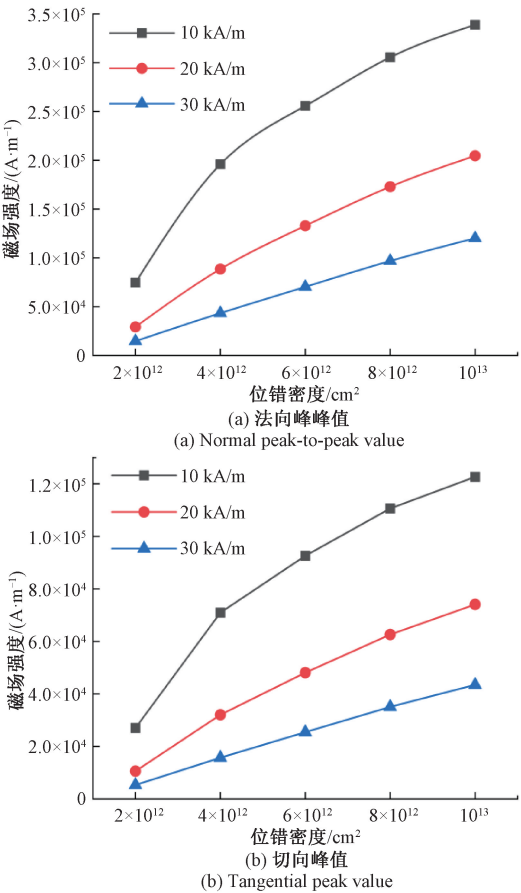


图 10 不同硬度信号特征值变化图

Fig. 10 Change plot of the eigenvalues of different hardness signals

硬度的变化区分度高,更易识别。在 10 kA/m 励磁时,信号特征变化呈非线性,随着管材硬度的增大,信号特征变化梯度逐渐减小。随着励磁强度增大,信号特征变化梯度逐渐趋于线性,且励磁强度越高,信号变化梯度越小。

为了对比分析硬度及应力变化对强弱磁信号的影响,引入磁敏系数 θ , 其大小为信号特征值与外激励磁场的比值,其中法向磁敏系数为法向信号的峰峰值与外激励磁场的比值,切向磁敏系数为切向信号的幅值与外激励磁场的比值。不同励磁强度下,硬点检测的法向磁敏系数如表 5 所示。

表 5 不同励磁强度下不同硬点法向信号磁敏系数 θ

Table 5 The magnetic sensitivity coefficient of normal signals under different excitation intensity

	$2 \times 10^{12} / \text{cm}^2$	$4 \times 10^{12} / \text{cm}^2$	$6 \times 10^{12} / \text{cm}^2$	$8 \times 10^{12} / \text{cm}^2$	$10^{13} / \text{cm}^2$
10 kA/m	7.460 76	19.592 8	25.574 8	30.558 1	33.879 3
20 kA/m	1.461 215	4.425 505	6.643 15	8.648 2	10.229 3
30 kA/m	0.488 333 333	1.447 166 667	2.343 83	3.228 763 333	4.003 8

在 10 kA/m 励磁下,随着硬度的增大,磁敏系数从 7.46 逐渐增大至 33.88。在 20 kA/m 励磁下,随着硬度的增大,磁敏系数从 1.46 逐渐增大至 10.23。在

30 kA/m 励磁下,随着硬度的增大,磁敏系数从 0.49 逐渐增大至 4。硬点检测的切向磁敏系数如表 6 所示。

表 6 不同励磁强度下不同硬点切向信号磁敏系数 θ

Table 6 The magnetic sensitivity coefficient of tangential signals under different excitation intensity

	$2\times10^{12}/\text{cm}^2$	$4\times10^{12}/\text{cm}^2$	$6\times10^{12}/\text{cm}^2$	$8\times10^{12}/\text{cm}^2$	$10^{13}/\text{cm}^2$
10 kA/m	2.701 139	7.093 491	9.259 245	11.063 44	12.265 86
20 kA/m	0.529 026	1.602 235 5	2.405 117	3.131 043 5	3.703 483
30 kA/m	0.176 799 1	0.523 941 333	0.848 573 667	1.168 960 333	1.449 561

在 10 kA/m 励磁下,随着硬度的增大,磁敏系数从 2.7 逐渐增大至 12.27。在 20 kA/m 励磁下,随着硬度的增大,磁敏系数从 0.53 逐渐增大至 3.7。在 30 kA/m 励磁下,随着硬度的增大,磁敏系数从 0.18 逐渐增大至 1.45。应力检测的法向磁敏系数如表 7 所示。

表 7 不同励磁强度下不同应力集中区法向信号磁敏系数 θ

Table 7 The magnetic sensitivity coefficient of normal signals under different excitation intensity

	50 MPa	100 MPa	150 MPa	200 MPa
10 kA/m	1.540 11	3.507 75	10.467 3	25.876 2
20 kA/m	0.232 894	0.451 69	1.186 785	3.656 165
30 kA/m	0.066 126	0.105 836 667	0.219 896 333	0.541 986 667

在 10 kA/m 励磁下,随着应力的增大,磁敏系数从 1.54 逐渐增大至 25.88。在 20 kA/m 励磁下,随着应力的增大,磁敏系数从 0.23 逐渐增大至 3.66。在 30 kA/m 励磁下,随着应力的增大,磁敏系数从 0.07 逐渐增大至 0.54。应力检测的切向磁敏系数如表 8 所示。

表 8 不同励磁强度下不同应力集中区切向信号磁敏系数 θ

Table 8 The magnetic sensitivity coefficient of tangential signals under different excitation intensity

	50 MPa	100 MPa	150 MPa	200 MPa
10 kA/m	0.557 591 1	1.269 966	3.789 647	9.368 38
20 kA/m	0.084 318 3	0.163 532 45	0.429 671 1	1.323 700 5
30 kA/m	0.023 940 7	0.038 317 767	0.079 612 533	0.196 223 5

对比表中数据可以得出结论。相同励磁强度下,相同硬度的法向信号磁敏系数高于切向信号,因此判读法向信号可以更容易识别出硬点信号特征。相同励磁强度下,随着硬度的增大,磁敏系数呈增大趋势;相同硬度的材料,随着励磁强度的增大,磁敏系数减弱,30 kA/m 励磁强度的磁敏系数低于 10 kA/m 励磁强度时 1 个数量级;在相同励磁条件下,应力的磁敏系数要低于硬点的磁

敏系数;相同励磁强度下,相同应力强度的法向信号磁敏系数高于切向信号,同理在识别应力时可以从法向信号特征入手;对比硬点在 30 kA/m 时的磁敏系数与应力在 10 kA/m 时的磁敏系数可以看出,硬点信号在强磁状态下仍能有较高的识别能力,但应力在强磁状态下识别能力极低。因此在判断一处非体积缺陷的管壁时,可以通过强弱磁检测方法判读该处缺陷是硬点还是应力集中,若强磁激励和弱磁激励下该处管壁均有缺陷信号特征则可以判断为管壁硬点,若强磁激励下无明显缺陷特征,弱磁激励下有缺陷信号特征,则该处管壁为应力集中区域。

3 实验及结果分析

3.1 硬点对强弱磁信号影响试验

为了验证硬点与应力集中在不同强度励磁下的信号差异,本文设计了钢条的拖拉及拉伸试验。

试验试件如图 11 所示。

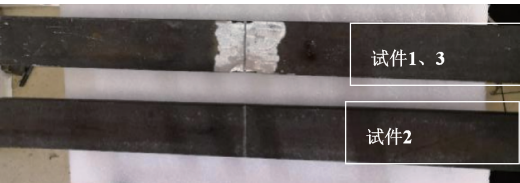


图 11 试件图

Fig. 11 Test specimen figure

试件 1 进行了硬度加工,预制了一处无缺陷的硬点区域,改变了钢材硬度并进行了一次无裂纹下的拖拉试验,试验后在试件 1 的硬点区域制作了裂纹作为试件 3 进行相同的拖拉试验。试件 2 为无硬度处理的钢材在相同位置制作同样尺寸的裂纹。对试件 1、2、3 进行拖拉试验,对试件 2 进行拉伸试验。试件尺寸为:长 600 mm,宽 60 mm,厚 15 mm,裂纹尺寸为宽 2 mm、深 2 mm。拖拉试验装置如图 12 所示。

由图所示,通过桥式电路及变压器将 220 V 交流电转换为直流电对线圈进行励磁,通过改变电流大小控制



图 12 拖拉试验装置图
Fig. 12 Drag test device

励磁强度,经过测试,当施加 2.5、5、7.5 A 强度的电流时,线圈内部中心处的磁场强度分别为 10、20、30 kA/m,试件在 30 kA/m 时趋于磁饱和状态。检测探头置于线圈中心位于检测路径正上方,检测数据实时传输至上位机进行记录并显示。试件置于滑轨上从右向左经过励磁线圈记录磁信号。

对比不同励磁强度下的 3 种试件的磁信号特征分析硬点在强弱磁场下的表征。在 10 kA/m 的弱磁激励下,3 种试件的磁信号如图 13 所示。

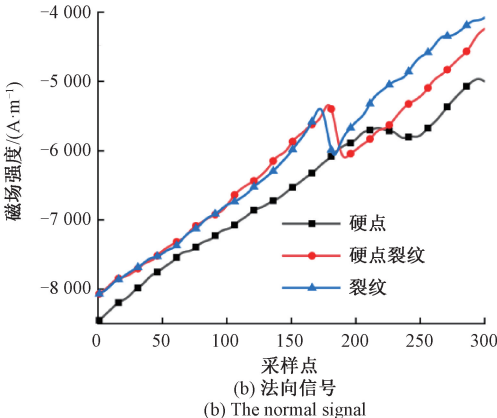
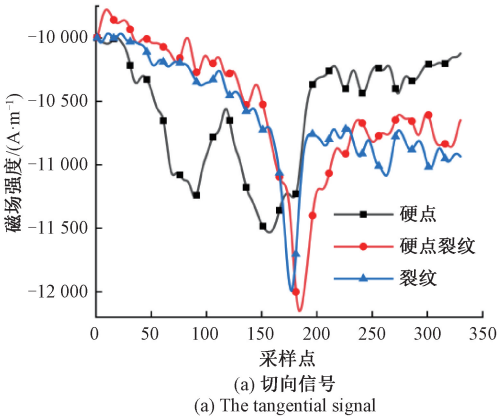


图 13 10 kA/m 外磁场下的信号特征图
Fig. 13 Signal features under 10 kA/m external magnetic field

为 1 250 A/m(基值为-10 000 A/m,极值为-11 500 A/m),含裂纹的两种试样信号幅值同样为 1 250 A/m(基值为-10 750 A/m,极值为-12 000 A/m),说明硬点的信号在弱磁条件下可以被识别。由于硬点处的管材硬度分布不均匀,硬点信号峰宽大于裂纹信号的峰宽,硬点上的裂纹的信号峰宽大于单纯的裂纹信号。

在 20 kA/m 的弱磁激励下,3 种试件的磁信号如图 14 所示。

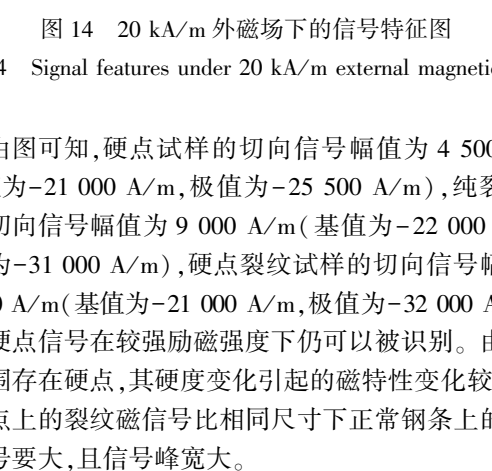
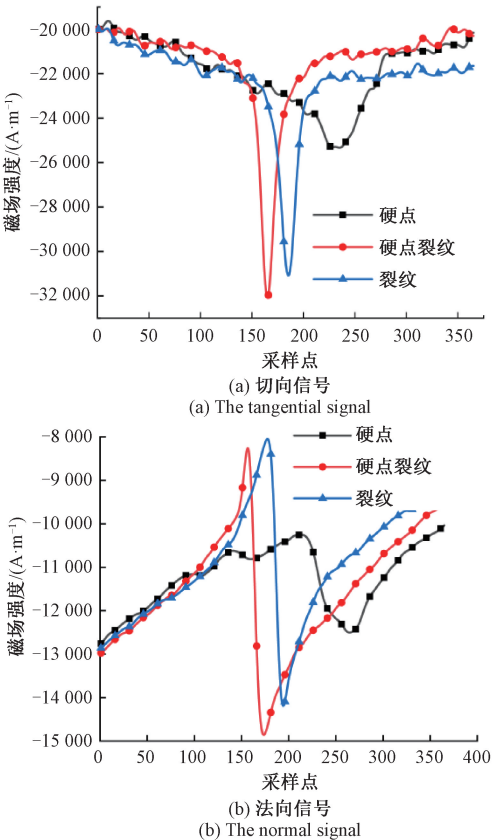


图 14 20 kA/m 外磁场下的信号特征图
Fig. 14 Signal features under 20 kA/m external magnetic field

由图可知,硬点试样的切向信号幅值为 4 500 A/m(基值为-21 000 A/m,极值为-25 500 A/m),纯裂纹试样的切向信号幅值为 9 000 A/m(基值为-22 000 A/m,极值为-31 000 A/m),硬点裂纹试样的切向信号幅值为 11 000 A/m(基值为-21 000 A/m,极值为-32 000 A/m),说明硬点信号在较强励磁强度下仍可以被识别。由于裂纹周围存在硬点,其硬度变化引起的磁特性变化较大,会使硬点上的裂纹磁信号比相同尺寸下正常钢条上的裂纹磁信号要大,且信号峰宽大。

在 30 kA/m 的弱磁激励下,3 种试件的磁信号如图 15 所示。

由图可知,硬点试样的切向信号幅值为 7 500 A/m(基值为-30 000 A/m,极值为-37 500 A/m),纯裂纹试

由图可知,在弱磁激励下,硬点试样的切向信号幅值

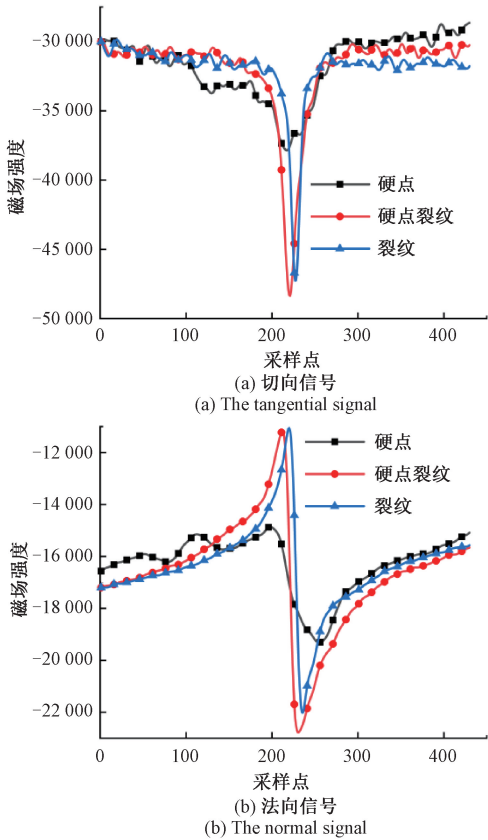


图 15 30kA/m 外磁场下的信号特征图

Fig. 15 Signal features under 30 kA/m external magnetic field
样的切向信号幅值为 17 000 A/m(基值为-30 000 A/m,极值为-47 000 A/m),硬点裂纹试样的切向信号幅值为 18 000 A/m(基值为-30 000 A/m,极值为-48 000 A/m),说明硬点信号在漏磁激励下仍可以被识别。

3.2 应力集中的强弱磁信号特征试验

进行裂纹受应力集中试验需对钢条进行拉伸,如图 16 所示,对试件 2 施加不同强度的拉应力可以在裂纹



图 16 拉伸试验装置图
Fig. 16 Stretching test device

处产生应力集中效应,采用拖拉试验相同的励磁设备对试件进行励磁,检测磁信号。

如图 16 所示,试件进行夹持施加拉力,利用液压杆上下移动励磁线圈对应力集中区域进行扫描检测,探头固定在线圈中心处。分别对线圈通 2.5、5、7.5 A 强度的电流,线圈内部中心处的磁场强度分别为 10、20、30 kA/m。对试件施加 80 kN 的拉应力,经仿真模拟,在裂纹处能产生 160 MPa 左右的应力集中。检测试件在无应力作用下和存在应力集中时的强弱磁信号特征。

在 10 kA/m 的弱磁激励下,不同拉伸强度的磁信号如图 17 所示。

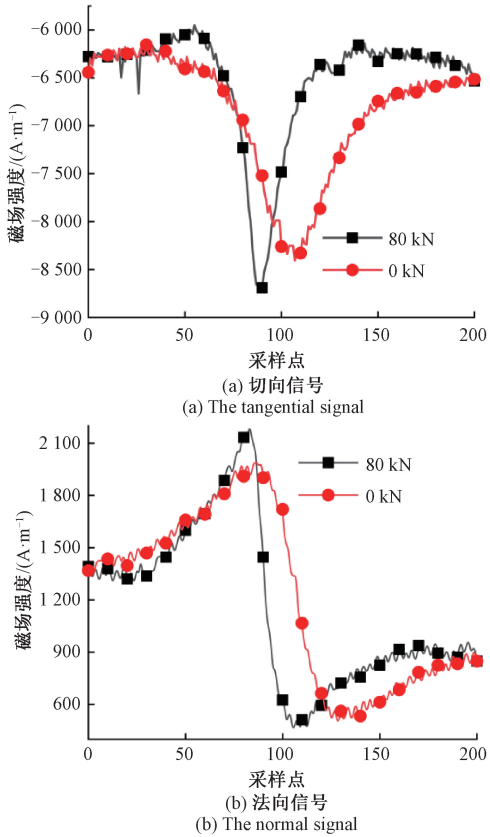


图 17 10 kA/m 外磁场下的信号特征图

Fig. 17 Signal features under 10 kA/m external magnetic field

由图 17 可知,无应力时试样的切向信号幅值为 2 000 A/m(基值为-6 300 A/m,极值为-8 300 A/m),80 kN 时的切向信号幅值为 2 500 A/m(基值为-6 300 A/m,极值为-8 800 A/m),说明应力导致裂纹处的磁信号增大,应力信号在弱磁激励下能够被识别,应力影响的磁信号变化幅度占外磁场强度的 5%。80 kN 时的法向信号峰峰值大于无应力状态。

在 20 kA/m 的弱磁激励下,不同拉伸强度的磁信号如图 18 所示。

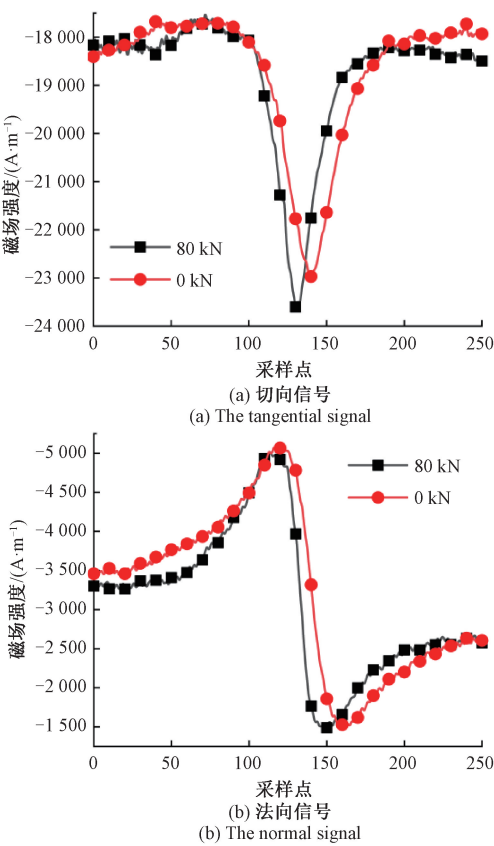


图 18 20kA/m 外磁场下的信号特征图

Fig. 18 Signal features under 20 kA/m external magnetic field

由图 18 可知,无应力时试样的切向信号幅值为 4 600 A/m(基值为-18 000 A/m,极值为-22 600 A/m),80 kN 时切向信号幅值为 5 000 A/m(基值为-18 500 A/m,极值为-23 500 A/m),说明应力导致裂纹处的磁信号增大,应力信号在较强磁场激励下有一定的区分度,应力影响的磁信号变化幅度占外磁场强度的 2%,说明应力信号的识别能力下降。80 kN 时的法向信号峰峰值与无应力状态基本相同。

在 30 kA/m 的弱磁激励下,不同拉伸强度的磁信号如图 19 所示。

由图 19 可知,无应力时试样的切向信号幅值为 6 500 A/m(基值为-39 000 A/m,极值为-45 500 A/m),80 kN 时切向信号幅值为 6 500 A/m(基值为-39 000 A/m,极值为-45 500 A/m),说明强磁状态下,应力对磁信号无明显变化,应力信号难以识别。80 kN 时的法向信号峰峰值与无应力状态基本相同。

上述两组实验验证了理论计算时的结论,利用强弱磁双场检测可以进行硬点及应力集中区的检测。在弱磁激励条件下,硬点及应力集中区均可以被识别,且信号识别能力强。在强磁激励条件下,硬点信号仍能够被识别,信号强度减弱,但是应力集中区信号难以识别。因此,在

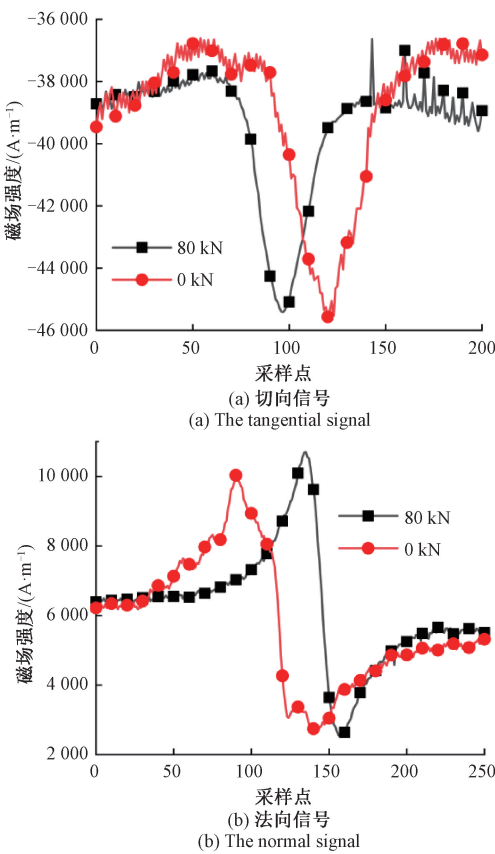


图 19 30 kA/m 外磁场下的信号特征图

Fig. 19 Signal features under 30 kA/m external magnetic field

管道无体积损伤时,可以通过双场检测的方法区分管壁处的缺陷是硬点还是应力集中区,从而给管道维护工作提供依据。

3.3 管道非体积缺陷的强弱磁信号特征试验

设计了管道的拖拉试验对管壁上的非体积缺陷在强磁激励与弱磁激励下的信号特征进行验证。如图 20 所示,采用直径 273 mm 的管道进行拖拉试验,在管道预制硬点缺陷及应力集中区,应力集中区由液压泵撑起木梁

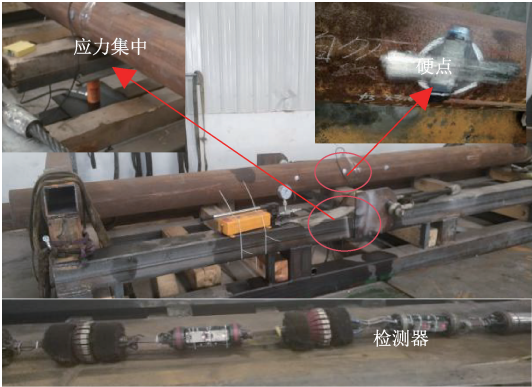


图 20 管道拖拉试验图

Fig. 20 Plumbing drag test

对管壁施加压力产生。利用图中所示的双磁场内检测器对管道进行内检测拖拉试验。

硬点拖拉试验结果如图 21 所示,硬点信号在强磁及弱磁状态下均能够检测。且通过定位缺陷的信号可知,在弱磁激励下,缺陷信号信号特征小于强磁激励下的信号特征。

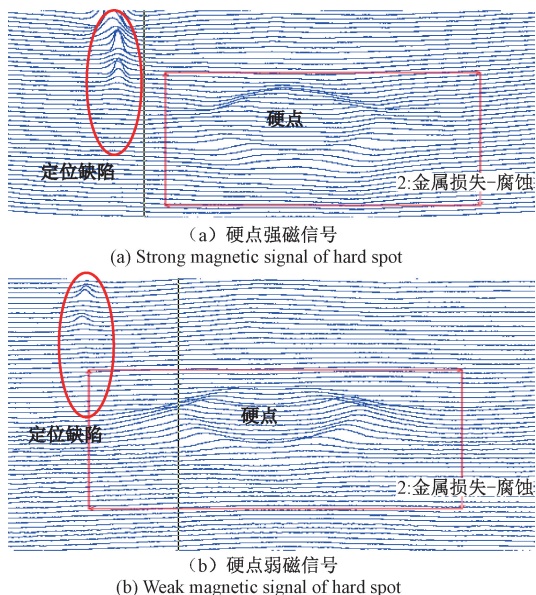


图 21 硬点信号双场检测图

Fig. 21 Dual-field detection signals of the hard-spot

应力集中区拖拉试验结果如图 22 所示,强磁状态下应力集中区信号强度小于弱磁激励下的应力集中区信号。说明强磁状态下的应力检测能力弱。强磁信号中局部信号偏大可能是木梁对管壁施加应力时管壁形变引起的检测误差。

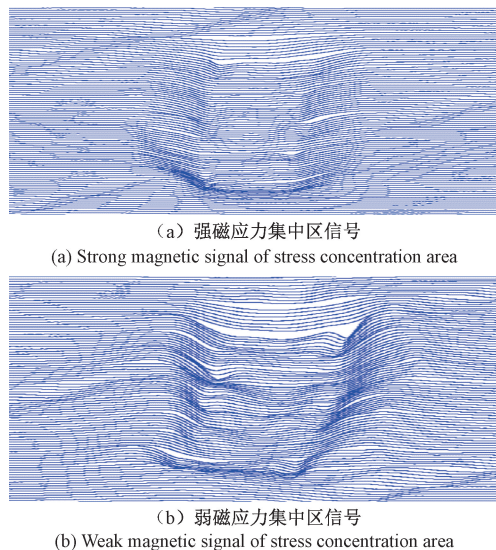


图 22 应力集中区信号双场检测图

Fig. 22 Dual-field detection signals of the stress concentration area

通过管道拖拉试验再次验证了双场应力内检测方法对区分硬点及应力集中的重要作用。且通过该试验证明了双场管道内检测方法在工程应用中的可行性。

4 结 论

传统的漏磁检测仅可以检测管道的体积损伤缺陷,为了预防管道的失效,非体积损伤的检测为管道维护提供重要帮助。在非体积损伤检测中,弱磁检测方法被用于应力集中区的检测,但是硬点对应力的量化分析具有干扰影响,区分管道硬点及应力集中区具有重要意义。本文利用 J-A 理论中的力磁关系对管道硬点及应力对管材磁特性参数的影响进行了研究,通过分析硬点及应力对 J-A 模型中参数的影响分析了磁信号特征的变化。通过利用双磁场的检测方式对硬点及应力异常的检测磁信号进行对比分析,提出了一种区分管道硬点及应力集中区的方法,进行了试验验证。主要结论如下:

1) 在 J-A 模型中,钉扎系数、磁化曲线形状系数、磁畴耦合系数均会对磁化曲线产生影响。管材的硬度变化改变了材料的位错密度,从而影响了钉扎系数与磁化曲线形状系数,对磁畴耦合系数不会产生影响;管材在弹性阶段受到应力时会改变钉扎系数与磁畴耦合系数,对磁化曲线形状系数不会产生影响。

2) 当管材所受应力逐渐增大时,在同等强度外磁场激励下,材料的磁化强度呈减弱趋势,励磁强度在 0~10 kA/m 时,磁化强度随应力增大,减小幅度逐渐增大;励磁强度在 10~30 kA/m 时,磁化强度随应力增大,减小幅度逐渐减弱直到趋于一致。当钢材的硬度逐渐加大时,在同等外磁场激励情况下,钢材磁化强度呈减弱趋势,在弱励磁强度下,减弱幅度较大,在强励磁强度下,减弱幅度较小。因此,由理论分析可知,硬点在强磁及弱磁状态下均会对管材磁化强度产生影响,但是应力在强磁状态下对磁化强度影响极小。

3) 10 kA/m 励磁下,随着应力从 50 MPa 增大到 200 MPa,法向信号的磁敏系数从 1.54 增强到 25.87,切向信号的磁敏系数从 0.56 到 9.37。随着硬度的增大,法向信号的磁敏系数从 7.46 增强到 33.87,切向信号的磁敏系数从 2.7 增强到 12.27,说明硬点及应力在弱磁条件下均有较好的识别能力;30 kA/m 励磁下,随着应力从 50 MPa 增大到 200 MPa,法向信号的磁敏系数从 0.07 增强到 0.54,切向信号的磁敏系数从 0.02 到 0.19。随着硬度的增大,法向信号的磁敏系数从 0.48 增强到 4,切向信号的磁敏系数从 0.18 增强到 1.45,说明在强磁状态下,硬点信号仍能够识别,应力识别能力低。在管道无体积损伤时,可以通过双场检测的方法排除硬点对应力检测的干扰。

参考文献

- [1] 李秋扬, 赵明华, 张斌, 等. 2020 年全球油气管道建设现状及发展趋势[J]. 油气储运, 2021, 40(12): 1330-1337, 1348.
- LI Q Y, ZHAO M H, ZHANG B, et al. Current construction status and development trend of global oil and gas pipelines in 2020[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(12): 1330-1337, 1348.
- [2] 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 H, 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.
- [3] 李睿. 油气管道内检测技术与数据分析方法发展现状及展望[J]. 油气储运, 2024, 43(3): 241-256.
- LI R. Current progress and prospects of in-line inspection techniques and data analysis methods for oil and gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(3): 241-256.
- [4] 杨理践, 耿浩, 高松巍. 长输油气管道漏磁内检测技术[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1736-1746.
- YANG L J, GENG H, GAO S W. Magnetic flux leakage internal detection technology of the long distance oil pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1736-1746.
- [5] 刘桐, 刘斌, 冯刚, 等. 载荷作用下管道漏磁内检测信号量化研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 262-273.
- LIU T, LIU B, FENG G, et al. Quantization of pipeline magnetic flux leakage detection signal under load[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1): 262-273.
- [6] 卢森骧, 神祥凯, 张俊楠, 等. 基于三轴融合的漏磁内检测数据缺陷反演方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12): 245-253.
- LU S X, SHEN X K, ZHANG J N, et al. Research on defect inversion method of magnetic flux leakage internal inspection data based on triaxial fusion[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12): 245-253.
- [7] 杨理践, 赵东升, 耿浩, 等. 漏磁信号增强算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 176-186.
- YANG L J, ZHAO D S H, GENG H, et al. Research on magnetic flux leakage signal enhancement algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 176-186.
- [8] 耿浩, 夏浩, 王国庆. 高速漏磁检测过程中管道内外壁缺陷定位方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4): 70-78.
- GENG H, XIA H, WANG G Q. Study on the defect location method of inner and outer wall of pipeline during high-speed magnetic flux leakage testing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4): 70-78.
- [9] 郑福印, 杨理践, 白石, 等. 基于电磁技术的油气管道应力检测方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2022(1): 87-92.
- ZHENG F Y, YANG L J, BAI S H, et al. Research on stress detection method of oil and gas pipeline based on electromagnetic technology[J]. Instrument Technique and Sensor, 2022(1): 87-92.
- [10] 田野. 基于管道应变的应力弱磁检测模型[J]. 油气储运, 2024, 43(1): 67-74.
- TIAN Y. Study on weak magnetic detection model based on strain of pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(1): 67-74.
- [11] 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. Pipeline stress detection method based on dual field stress magnetic coupling[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(5): 542-549.
- [12] 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 Instrument, 2022, 36(12): 106-116.
- [13] 杨理践, 郑福印, 高松巍, 等. 基于力磁耦合型的管道电磁应力检测解析模型研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 41(8): 249-258.
- YANG L J, ZHENG F Y, GAO S W, et al. An analytical model of electromagnetic stress detection for pipeline based on magneto-mechanical coupling model[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,

- 2021, 41(8): 249-258.
- [14] LIU B, FENG G, HE L Y, et al. Quantitative study of MMM signal features for internal weld crack detection in long-distance oil and gas pipelines [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 6008013.
- [15] 刘琳琳, 杨理践, 高松巍, 等. 基于有限元法的磁层析成像管道应力集中区磁场检测研究[J]. 仪表技术与传感器, 2023(2): 93-98, 126.
- LIU L L, YANG L J, GAO S W, et al. Magnetic field detection research of stress concentration zone of pipes by using magnetic tomography based on finite element method [J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(2): 93-98, 126.
- [16] 张贺, 刘斌, 冯刚, 等. 铁磁材料应力损伤处弱磁信号的量化研究[J]. 仪表技术与传感器, 2022(4): 112-118.
- ZHANG H, LIU B, FENG G, et al. Quantitative study of weak magnetic signal at stress damage of ferromagnetic materials [J]. Instrument Technique and Sensor, 2022(4): 112-118.
- [17] 范德良, 王志武, 句光宇. P91 钢管道异常低硬度部位的组织和性能[J]. 金属热处理, 2020, 45(3): 1-6.
- FAN D L, WANG ZH W, JU G Y. Microstructure and properties of P91 steel pipeline in abnormal low hardness parts[J]. Metal Heat Treatment, 2020, 45(3): 1-6.
- [18] LIU B, ZHENG S M, HE L Y, et al. Study on internal detection in oil-gas pipelines based on complex stress magneto-mechanical modeling[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 69(7): 5027-5036.
- [19] 刘斌, 何璐瑶, 王缔, 等. 基于 FLAPW 算法屈服极限磁记忆信号特征的研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2): 141-148.
- LIU B, HE L Y, WANG D, et al. Study on characteristics of magnetic memory signal of yield limit based on FLAPW algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2): 141-148.
- [20] LIU B, MA Z Y, LIU Z, et al. Research on internal detection technology for axial crack of long-distance oil and gas pipeline based on micromagnetic method [J]. Structural Health Monitoring, 2020, 19(4): 1123-1136.
- [21] 时朋朋, 郝帅. 磁记忆检测的力磁耦合型磁偶极子理论及解析解[J]. 物理学报, 2021, 70(3): 105-114.
- SHI P P, HAO SH. Analytical solution of magneto-mechanical magnetic dipole model for metal magnetic memory method[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(3): 105-114.
- [22] WANG Z D, YAO K, DENG B, et al. Quantitative study of metal magnetic memory signal versus local stress concentration[J]. Ndt & E International, 2010, 43(6): 513-518.
- [23] 廉正, 刘斌, 刘桐, 等. 基于双磁场管道复合型缺陷应力信号提取方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(3): 107-118.
- LIAN ZH, LIU B, LIU T, et al. Research on the stress signal extraction method of pipeline composite defect based on dual magnetic field [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(3): 107-118.
- [24] LIU B, LUO N, FENG G. Quantitative study on mfl signal of pipeline composite defect based on improved magnetic charge model [J]. Sensors, 2021, 21(10): 3412.
- [25] 罗旭, 朱海燕, 丁雅萍. 基于力磁耦合效应的铁磁材料修正磁化模型[J]. 物理学报, 2019, 68(18): 295-306.
- LUO X, ZHU H Y, DING Y P. A modified magnetization model of ferromagnetic materials based on the effect of force-magnetic coupling [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(18): 295-306.
- [26] 赵志刚, 马习纹, 姬俊安. 基于 AFSA 与 PSO 混合算法的 J-A 动态磁滞模型参数辨识及验证[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1): 26-34.
- ZHAO ZH G, MA X W, JI J A. Parameter identification and verification of J-A dynamic hysteresis model based on hybrid algorithms of AFSA and PSO [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(1): 26-34.
- [27] 张召泉, 时朋朋, 苟晓凡. 铁磁板磁巴克豪森应力检测的解析模型[J]. 物理学报, 2022, 71(9): 308-316.
- ZHANG ZH Q, SHI P P, GOU X F. Analytical model of magnetic Barkhausen stress test of ferromagnetic plates [J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(9): 308-316.
- [28] JILES D C. Theory of the magnetomechanical effect [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1995, 28(8):

1537-1546.

- [29] JILES D. Introduction to magnetism and magnetic materials[M]. CRC press, 2015.
- [30] JILES D C, LI L. A new approach to modeling the magnetomechanical effect [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 95(11): 7058-7060.
- [31] 赵志刚, 马习纹, 姬俊安. 基于 AFSA 与 PSO 混合算法的 J-A 动态磁滞模型参数辨识及验证[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1): 26-34.
- ZHAO ZH G, MA X W, JI J A. Parameter identification and verification of J-A dynamic hysteresis model based on hybrid algorithms of AFSA and PSO[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(1):26-34.
- [32] SHI P P, JIN K, ZHENG X J. A magnetomechanical model for the magnetic memory method[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 124/125: 229-241.
- [33] 刘清友, 罗旭, 朱海燕, 等. 基于 Jiles-Atherton 理论的铁磁材料塑性变形磁化模型修正[J]. 物理学报, 2017, 66(10): 297-306.
- LIU Q Y, LUO X, ZHU H Y, et al. Correction of the magnetization model for plastic deformation of ferromagnetic materials based on Jiles-Atherton theory [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(10):297-306.
- [34] LI J W, XU M Q, LENG J CH, et al. Modeling plastic deformation effect on magnetization in ferromagnetic materials [J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(6): 063909.
- [35] MOLOTSKII M, FLEUROV V. Spin effects in plasticity[J]. Physical Review Letters, 1997, 78(14): 2779-2782.

作者简介



刘斌, 分别于 2004 年、2007 年、2013 年于沈阳工业大学获得学士、硕士、博士学位, 现为沈阳工业大学信息科学与工程学院院长、“翔源学者”特聘教授、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。

E-mail: 13998284051@163.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. He is currently the Dean of School of Information Science and Engineering at Shenyang University of Technology. He is the “Xiangyuan Scholar” distinguished professor and a Ph.D. advisor at Shenyang University of Technology. His research interests include stress internal detection technology of long-distance oil and gas pipeline and related theories.



罗宁(通信作者), 2013 于哈尔滨工业大学获得学士学位, 2020 年于沈阳工业大学获得硕士学位, 现为沈阳工业大学博士研究生, 主要研究方向为长输油气管道应力内检测技术、无损检测技术及相关理论。

E-mail: ilccmm@163.com

Luo Ning (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2013, and received his M. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2020. He is currently a Ph. D. candidate at Shenyang University of Technology. His main research interests include internal stress testing technology, nondestructive testing technology and related theories for long oil and gas pipelines.