

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311358

基于主动磁化的钢板应力测量性能提升方法研究*

刘珊^{1,2}, 陈乾¹, 马金玉¹, 曾周末¹, 黄新敬¹

(1. 天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室 天津 300072; 2. 北华航天工业学院机电工程学院 廊坊 065000)

摘要:提出一种提高基于磁弹效应的钢板应力测量灵敏度和一致性的方法。从力磁耦合理论模型出发,分析强磁化和弱交流磁化对力磁耦合所起的作用;强磁化能通过降低初始磁导率和统一力磁耦合参数,提高应力测量的灵敏度及一致性;弱交流磁化提供小幅振荡磁场,能有效消除干扰磁场影响。开展了基于磁弹法的钢板应力测量有限元仿真研究,表明当初始相对磁导率较低时,应力作用下的钢板法向磁感应强度变化率较大,即应力测量灵敏度较高。开展了不同强磁化条件下不同厚度钢板的拉伸试验,测量其法向磁感应强度变化。实验结果表明:与未磁化相比,强磁化后钢板应力测量灵敏度有数十倍提升,一致性有数倍至百倍提高。其中,3 mm厚度钢板采用单磁铁移动磁化方式的应力测量灵敏度和一致性参数提高至1.665 mGs/MPa和2%;5 mm厚度钢板采用双磁移动磁化方式的应力测量灵敏度提高至1.41 mGs/MPa,采用单磁铁移动磁化方式的一致性参数提高至0.2%;7 mm厚度钢板采用双磁铁移动磁化方式的应力测量灵敏度和一致性参数提高至1.2 mGs/MPa和1.8%。

关键词:强磁化;弱交流磁化;应力测量;磁场;磁弹效应

中图分类号: TH73 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4010

Research on improving the performance of steel plate stress measurement based on active magnetization

Liu Shan^{1,2}, Chen Qian¹, Ma Jinyu¹, Zeng Zhoumo¹, Huang Xinjing¹

(1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. School of Mechanical and Electrical Engineering, North China Institute of Aerospace Technology, Langfang 065000, China)

Abstract: Proposes a method to improve the sensitivity and consistency of stress measurement for steel plates based on magnetoelastic effects. From the framework of the theoretical model of magnetoelastic, it analyzes the roles of strong magnetization and weak AC magnetization; Strong magnetization can improve the sensitivity and consistency of stress measurement by reducing the initial magnetic permeability and unifying the parameters of the magnetoelastic model. Weak AC magnetization provides a minor oscillating magnetic field, which can effectively eliminate the influence of interfering magnetic fields. A finite element simulation study on stress measurement of steel plates based on the magnetoelastic method is conducted, and the results demonstrate that when the initial relative permeability is low, the change rate of normal magnetic induction intensity of the steel plate under stress is relatively high, which indicates a high sensitivity of stress measurement. Tensile experiments are conducted on steel plates with different thicknesses under different strong magnetization conditions to measure the changes in normal magnetic induction intensity. The experimental results show that compared with unmagnetized case, the sensitivity of stress magnetic measurement has been improved by strong magnetization by tens of times, and the consistency has been improved by several to hundreds of times. The stress measurement sensitivity and consistency parameter of 3mm thick steel plates using single magnet moving magnetization method have been improved to 1.665 mGs/MPa and 2%. The sensitivity of 5 mm thick steel plates using dual magnets moving magnetization method has been enhanced to 1.41 mGs/MPa, and the consistency parameter of 5 mm thick steel plates using single magnetic moving magnetization method has been increased to 0.2%. The sensitivity and consistency parameter of 7 mm thick steel plates using dual magnets moving magnetization method have been improved to 1.2 mG/s/MPa and 1.8%.

Keywords: strong magnetization; weak AC magnetization; stress measurement; magnetic field; magnetoelastic effect

收稿日期: 2023-04-26 Received Date: 2023-04-26

* 基金项目: 国家自然科学基金(62073233)、天津市自然科学基金(21JCQNJC00690)、河北省教育厅高等学校科学研究项目(QN2020179, ZC2021004)资助

0 引言

铁磁材料广泛应用于管道、桥梁、压力容器、轨道交通等领域,应力-应变状态是评估铁磁构件安全性的重要指标^[1-2]。因此,定期对铁磁构件的应力状态进行检测,是保障其安全运行的重要手段。

Jiles 等^[3-4]建立的 J-A 理论模型,在力磁建模领域应用广泛。文献[5]在经典 JA 模型的基础上,结合铁磁材料热力学理论和有效磁场理论,进一步完善铁磁材料磁机械耦合模型,新模型可以更准确地预测在外加应力和磁场作用下的磁化、磁导率和磁滞伸缩的非线性变化。文献[6]基于磁畴理论和趋近定律,提出各向异性非线性磁力学本构关系,与经典模型相比,可以预测不同方向的加载应力和环境磁场共同作用下的应力-磁化曲线。文献[7]针对工程应用中的二维薄板结构,建立铁磁材料的二维非线性力磁耦合模型,将力磁模型和磁荷理论结合,为二维试件建立磁正演模型。文献[8]从微观和宏观两方面分析了磁化状态对力磁耦合关系的影响,发现外加应力使初始磁化状态逐渐靠近无滞后磁化状态。文献[9]基于磁机械效应和磁塑性模型,分别讨论了弹性和塑性变形阶段外加载荷对表面磁场的影响。

在实验方面,文献[9]测试了应力不同作用阶段的试件表面磁场的变化规律:在弹性变形阶段,应力对磁特性的影响符合有效场变化规律;然而,在塑性变形状态下,磁化率表现为初始阶段急剧变化,之后缓慢变化的规律。文献[9]也指出,为量化表面磁场和不同的应力水平,还有很多基础实验工作要做。文献[10]对应力集中测量的敏感性进行了研究,测试了多种试件包括 L80 合金钢、20 种其他结构钢试样和 4140-L80 钢制管道,在地磁场背景下,应力引起的磁异常法向和切向信号,发现应力历史会影响磁信号,且磁信号非常微小,不能实现对应力集中区的可靠检测。对实验研究总结发现,利用力磁耦合模型能有效预测外加应力下的磁化规律,定性描述表面磁感应强度变化规律,但也存在诸多问题仍需进一步研究。比如由于历史效应不同,如制造、加工过程所受温度、应力等作用,使试件常具有不同的初始磁化状态,不能获得一致得初始幅值,导致难以量化表面磁场与应力之间的关系^[9-10];力磁检测信号灵敏度低,未达到现场应用的要求^[10-11]。决定力磁检测有效性和准确性的关键因素为力磁信号灵敏度以及初始信号的一致程度。

因此,在增强力磁信号灵敏度及初始信号一致性方面,文献[12]从理论上计算了同时施加激励磁场和应力与分别单独施加应力和激励磁场的表面磁场强度差值,得出该差值随拉应力的增大而增大,并开展了实验验证,

说明外加激励磁场对力磁耦合作用起到一定的强化作用。文献[13]通过外加激励磁场,形成稳定的磁通环,克服金属磁记忆检测中试样初始磁化状态随机多变的问题。测试结果在 0~180 MPa 范围内,法向分量梯度值随拉应力表现良好的线性关系。文献[14]提出一种利用弱交流磁化的力磁检测方法,通过大量实验发现,钢板表面法向弱交流感应磁场幅值与应力之间具有近似线性单调的关系,弱交流磁化条件下的应力测量方案具有良好的一致性和抗背景干扰等优势。以上研究表明通过一定方式改变试件的磁化状态,能够有效提升力磁检测性能。然而,现有研究仍缺乏对磁化方法和效果的全面深入探究,尚未形成能够同时提高力磁信号灵敏度和一致性的磁化方法。

本文提出利用强磁化提高弱交流磁化的钢板应力测量灵敏度和一致性。结合 JA 力磁耦合模型,分析强磁化对相对磁导率与耦合模型参数的影响,从而提出强磁化能够提高力磁耦合的灵敏度与一致性;弱交流磁化作用能有效消除干扰磁场影响,利用有限元仿真建立不同初始相对磁导率条件下,弱交流磁化作用的法向磁感应强度与应力变化的关系。设计两组不同方式强磁化方案和未磁化方案,分别开展了弱交流激励条件下的不同厚度钢板拉伸试验,测得其法向磁感应强度变化,计算应力测量的灵敏度与一致性参数。对比分析不同强磁化方案对应力测量信号的灵敏度与一致性的提升情况。

1 理论分析

1.1 力-磁耦合模型

根据 Jiles 等^[15-16]有效场理论,应力对铁磁材料磁化的影响可用一个等效磁场 H_e 表示。在外部磁场 H 作用的条件下,系统沿着可逆的非滞后磁化曲线的能量为:

$$A = \frac{1}{2} \alpha \mu_0 M^2 + \mu_0 H M + \frac{2}{3} \sigma \lambda - T S \quad (1)$$

式中: M 表示磁化强度, σ 表示应力, μ_0 是真空磁导率, α 为磁畴耦合系数, $\frac{1}{2} \alpha \mu_0 M^2$ 为自耦合能, T 为温度, S 为熵, λ 为材料的磁致伸缩系数, A 为沿着可逆的非滞后磁化曲线的系统能量。

由于有效场引起磁化强度的改变,所以可将系统能量 A 对 M 微分得到有效场 H_e 如下:

$$H_e = \frac{1}{\mu_0} \frac{dA}{dM} = H + \alpha M + \frac{3}{2} \frac{\sigma}{\mu_0} \frac{d\lambda}{dM} \quad (2)$$

式中:磁致伸缩系数 λ , 取决于铁磁性材料的磁畴结构。由应力作用导致磁致伸缩系数改变表示为^[17]:

$$\lambda = (\gamma_1 + \gamma_1' \sigma)^2 + (\gamma_2 + \gamma_2' \sigma) M^4 \quad (3)$$

式中: $\gamma_1 = 7 \times 10^{-18} \text{ A}^{-2} \text{ m}^2$, $\gamma_1' = -1 \times 10^{-25} \text{ A}^{-2} \text{ m}^2 \text{ Pa}^{-1}$,

$\gamma_2 = -3.3 \times 10^{-30} \text{ A}^{-4} \text{ m}^4, \gamma'_2 = -2.1 \times 10^{-38} \text{ A}^{-4} \text{ m}^4 \text{ Pa}^{-1}$, 均为是磁致伸缩参数^[17], 将式(3)带入式(2)得:

$$H_e = H + \alpha M + \frac{3\sigma}{\mu_0} [(\gamma_1 + \gamma'_1 \sigma) M + (\gamma_2 + \gamma'_2 \sigma) M^3] \quad (4)$$

应力导致的铁磁体磁化效应相当于等效磁场 H_σ 对铁磁体的磁化。于是在应力作用下铁磁体的非滞后磁化强度 M_{an} 由 Langevin 方程给出:

$$M_{an}(H, \sigma) = M_s \left[\coth \left(\frac{H + H_\sigma + \alpha M}{a} - \frac{a}{H + H_\sigma + \alpha M} \right) \right] \quad (5)$$

其中, $a = \frac{k_B T}{\mu_0 M}$ 为材料规划常数, k_B 是玻尔兹曼常数, M_s 为饱和磁化强度。

磁化强度 M 、无滞后磁化 M_{an} 及不可逆磁化 M_{irr} 之间存在以下关系^[18]:

$$M = c(M_{an} - M_{irr}) + M_{irr} \quad (6)$$

$$dM_{irr} = \frac{\sigma}{\xi E} (M_{an} - M_{irr}) d\sigma \quad (7)$$

其中, $E = 200 \text{ GPa}$, 为铁磁性材料杨氏模量, $\xi = 24.5 \text{ kPa}$, 为铁磁性材料能量相关系数, $c = 0.1$, 为初始磁化率与初始无滞后磁化率的比值。

则由以上公式可以推导出 J-A 力磁耦合模型的表达式为:

$$\frac{dM}{d\sigma} = \frac{\sigma}{\xi E} (M_{an} - M) + c \frac{dM_{an}}{d\sigma} \quad (8)$$

相对磁导率定义为:

$$\mu_r = \frac{M}{H} + 1 \quad (9)$$

由此, 可绘制外加载荷对材料相对磁导率的影响变化规律。

由图 1 所示, $\sigma = 0 \text{ MPa}$ 时为初始状态, 当 $\sigma > 0$ 时, 即应力为拉应力, $\sigma < 120 \text{ MPa}$ 时相对磁导率随 σ 增加而增加, 但增加速率在 $\sigma = 60 \text{ MPa}$ 左右开始减小, 而当 $\sigma > 120 \text{ MPa}$ 时相对磁导率随 σ 增加而变小。当 $\sigma < 0$ 时, 即应力为压应力, 当 $\sigma < 50 \text{ MPa}$ 时相对磁导率随 σ 增大而增大, 当 $\sigma > 50 \text{ MPa}$ 时相对磁导率随 σ 增大而减小。综上对比拉压应力的作用过程, 可以发现, 拉应力使相对磁导率变化更加明显; 在拉应力的作用过程中, 区域 1 为相对磁导率与应力呈正比。

1.2 初始磁导率对力磁检测灵敏度的影响

由力磁模型公式(式(8))可知, 磁化强度的计算是由初始磁化与应力变化的迭代计算得到, 因此, 初始磁导率 μ_{r0} 的选取也会影响力磁耦合关系, 设 $H = 40 \text{ A/m}$, $a = 1000, \alpha = 0.0002, c = 0.1$, 初始磁导率 μ_{r0} 分别为 20, 200, 400, 得到对应应力磁曲线如图 2 所示。

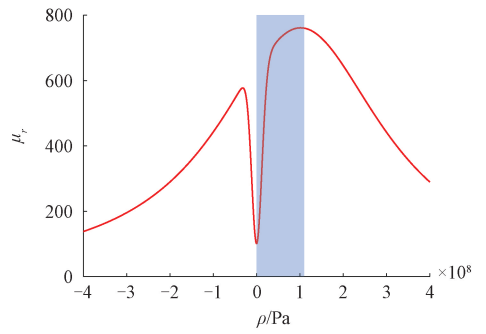


图 1 相对磁导率随应力变化曲线
Fig. 1 Curve of $\mu_r - \sigma$

如图 2 所示, 不论 μ_{r0} 是大还是小, $\sigma - \mu_r$ 曲线形状相同, 变化规律基本一致。在区域 1 内, 初始磁导率 μ_{r0} 越小, 力磁曲线的增长速率越快, 应力 - 相对磁导率灵敏度越大。反之, 初始磁导率 μ_{r0} 越大, 力磁曲线的增长速率越慢, 应力 - 相对磁导率灵敏度越小。

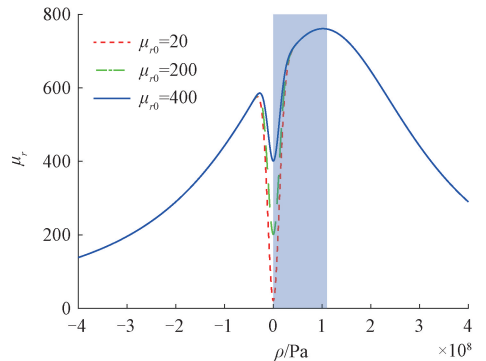


图 2 不同 μ_{r0} 条件下, μ_r 与 σ 关系

Fig. 2 In conditions of different μ_{r0} , the relationship between μ_r and σ

1.3 强磁化作用分析

由铁磁材料磁导率变化曲线如图 3 所示, 在外加磁场作用下, 相对磁导率 μ_r 会随之变化。当外加磁场为低磁场时, 相对磁导率 μ_r 迅速增加; 当外加磁场为高磁场时, 相对磁导率 μ_r 减小; 当外加磁场为饱和磁场时, 相对磁导率 μ_r 逐渐趋于稳定值。由此可推断, 给试件加强磁化时, 即外磁场位于强磁场甚至饱和磁场时, 试件相对磁导率大幅下降。

对于力磁耦合模型参数, 材料规划常数 $a = k_B T / \mu_0 M$, 磁化强度 M 的大小影响 a 的大小。磁畴耦合系数 α 表示材料各个磁矩与磁化强度 M 的耦合强度, 磁矩与 M 的耦合方向, 影响 α 值大小。所以磁化强度影响力磁耦合参数 α 。强磁化作用下会使力磁耦合参数趋于一致。由此可知, 可以通过外加强磁场

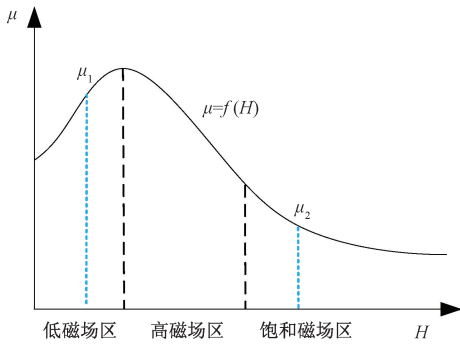


图3 铁磁材料磁导率变化曲线

Fig. 3 Permeability curve of ferromagnetic materials

的方式对试件进行磁化,降低初始相对磁导率,提高应力-相对磁导率灵敏度;使力磁耦合参数趋于一致,提高初始幅值一致性。

1.4 弱交流磁化应力测量仿真分析

在强磁化作用后,外加强交流线圈磁化作用,则其相对磁导率围绕工作点小幅度变化。相对磁导率变化量为增量磁导率 $\Delta\mu$,增量磁导率 $\Delta\mu$ 远小于工作点相对磁导率。在实际测量环境中,存在电磁、其他磁源等干扰,而施加的弱交流磁化提供的小幅振荡磁场能有效消除外界磁干扰^[14]。下面通过有限元仿真测试不同初始相对磁导率,弱交流磁化作用下法向磁感应强度与作用力变化的关系。

利用COMSOL建立仿真模型,如图4所示,钢板厚度为5 mm,激励线圈下表面距离钢板上表面30 mm,线圈线径0.5 mm,匝数设置为180匝,激励频率为1 kHz,在试件两端施加拉伸作用力F,变化过程为从0增加到 7×10^7 N,测点位置如图4所示。设置钢板的初始相对磁导率值分别为 $\mu_{r0} = 20, 80, 200$,得到不同初始相对磁导率条件下测点在应力作用过程中的磁感应强度变化情况。

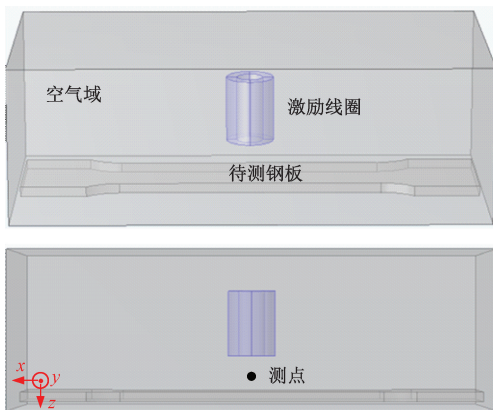
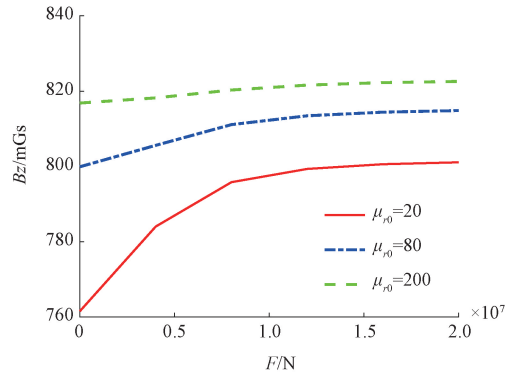


图4 仿真模型

Fig. 4 Simulation model

仿真结果如图5所示,随作用应力增大,法向磁感应强度逐渐增大,之后趋于一个稳定值。当初始相对磁导率较小时,法向磁感应强度变化率较高,说明能够取得较高的应力测量灵敏度;当初始相对磁导率较大时,法向磁感应强度变化率较低,说明应力测量灵敏度越低。

图5 B_z 随 F 变化曲线Fig. 5 Curve of $B_z \sim F$

2 实验设计

2.1 磁化方案设计

由上一节可知,通过强磁化可提高力磁检测灵敏度及一致性。设计两种强磁化方案,开展弱交流磁化条件下的钢板拉伸实验。如图6所示,图6(a)为单磁铁-移动磁化,图6(b)为双磁铁-移动磁化。两种移动磁化方案将单、双磁化装置在钢板上方从左往右平移至终点,磁化完成之后,在测量点进行应力测量量实验。图6(c)为移动磁化实验装置实物图。设计电动推杆连接铝板以固定钢板,电动推杆推动磁铁,实现磁铁与钢板的相对运动。装置结构包括铝板、电机、电动推杆。

2.2 不同磁化条件下的应力测量实验

实验所用应力加载装置为MTS公司的E64.106型号电子静态万能材料试验机,其主要技术指标如表1所示。

表1 E64.106 电子静态万能材料试验机性能
Table 1 Parameters of E64.106 electronic static universal material testing machine

技术参数	数值
额定负荷/kN	1 000
作动器行程/mm	250
最大拉伸空间/mm	720
最大压缩空间/mm	790

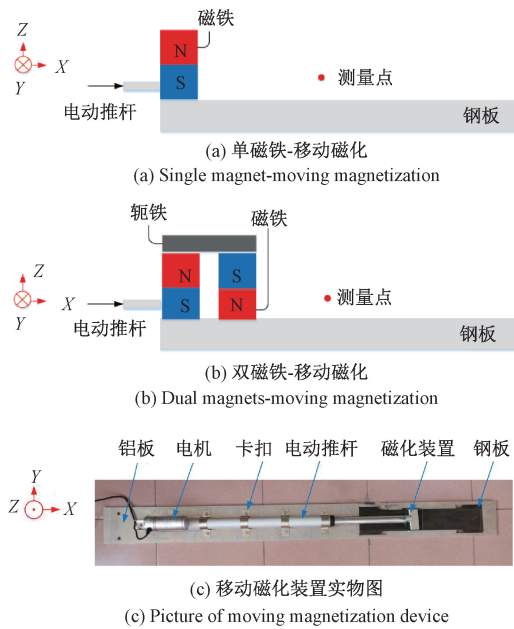


图 6 磁化方案

Fig. 6 Magnetization scheme

被测钢板试件如图 7 所示,图 7(a)为钢板试件尺寸图,图 7(b)为钢板试件实物图。钢板材质为 Q235 钢,屈服强度为 235 MPa,厚度包括 3、5 与 7 mm,每种磁化方式每种厚度钢板各用 2 块,钢板命名方式如 3 mm-1, 3 mm-2,分别表示 3 mm 厚度钢板的 1 号试件和 2 号试件; 5 mm-1, 5 mm-2,分别表示 5 mm 厚度钢板的 1 号试件和 2 号试件。

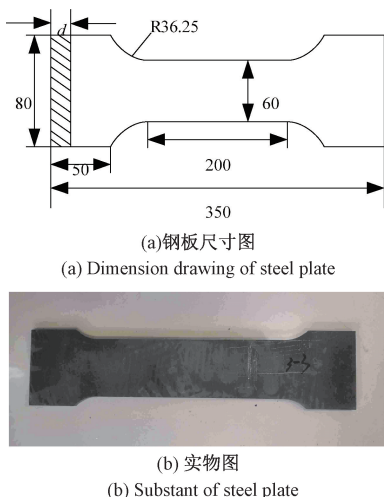
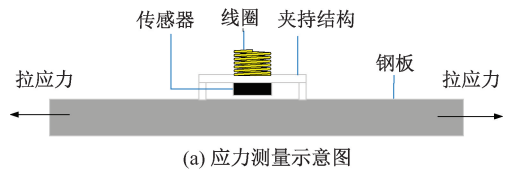


图 7 钢板试件图

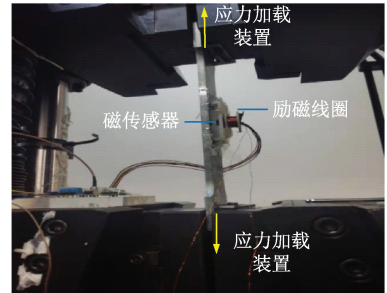
Fig. 7 Figure of steel plate specimen

实验装置如图 8 所示。为提高钢板表面附近磁场测量抗干扰能力,采用交流磁化,激励线圈选用线径为 0.5 mm 的漆包线,匝数 $N = 180$ 。磁探头选用磁阻传感

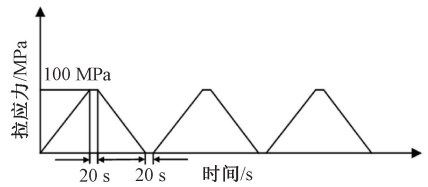


(a) 应力测量示意图

(a) Schematic of stress measurement system



(b) 实验现场图
(b) Photo of testing site



(c) 应力加载曲线
(c) Curve of stress loading

图 8 实验装置

Fig. 8 Experimental apparatus

器,灵敏度为 16 mV/Gs,后接差分放大电路。信号采集装置为 16 位,最大采样率 200 k。将激励线圈和磁阻探头固定在钢板中央,磁阻探头距离钢板表面的接收提高值设为 4 mm,磁阻探头敏感轴沿钢板法向方向,将钢板两端夹持在液压机上。当试件被拉伸时,同步启动信号激励与磁信号采集,激励频率分别为 200 Hz、500 Hz、1 kHz、2 kHz、3 kHz,并将各测点法向磁信号传输至上位机,完成数据的显示和保存。

实验过程:首先,未加载应力情况下,采集磁阻传感器输出信号;然后进行应力加载,机器的拉伸速度为 1 kN/s,拉应力从 0 MPa 线性加载至 100 MPa,保持 20 s 后线性卸载至 0 MPa,在 0 MPa 处保持 20 s,将“加载-保持-卸载-保持”过程称为一个加载周期,对钢板试件重复 3 个周期,在此过程中连续采集磁阻传感器的输出信号。

3 结果分析与讨论

3.1 实验结果

实验结果如图 9~11 所示,分别为不磁化处理、单磁铁-移动磁化、双磁铁-移动磁化条件下,测得钢板拉伸应

力测量结果。图9~11中,(a)~(f)分别代表不同厚度钢板力磁关系曲线,横轴为与拉应力 σ 相关的采样点,纵轴为每个采样点处采集到的钢板表面法向磁感应强度幅值 B_z ,以图9(a)为例具体说明单个加载周期内拉压力 σ 随采样点的变化规律:采样点在0~33范围内时, σ 从0 MPa线性增加至100 MPa;采样点在33~50范围内时, σ 保持100 MPa不变;采样点在50~83范围内时, σ 从100 MPa线性减小至0 MPa;采样点在83~100范围内时, σ 保持0 MPa不变,拉应力一共加载3个周期,磁信号随之产生3个周期的变化。

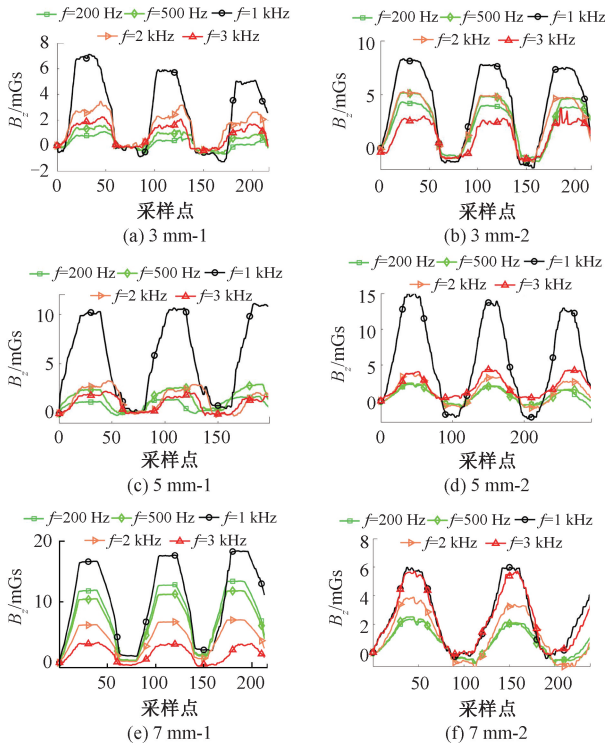


图9 不同厚度钢板 B_z 随 σ 的变化曲线-不磁化
Fig. 9 Steel plate with different thickness, curve of B_z with σ —unmagnetization

由图11可知:1)无论被测钢板有没有被磁化处理,在单个加载周期内,不同激励频率作用下的钢板法向感应磁场幅值 B_z 与钢板应力 σ 均存在线性单调的关系,且 σ 越大, B_z 越大;2)在同一激励频率作用下,每块钢板相邻加载周期的力磁特性基本一致;对于相同厚度的钢板,当激励频率在200 Hz~1 kHz时,法向磁感应强度幅值 B_z 变化量较大,当激励频率大于1 kHz时,法向磁感应强度幅值 B_z 变化量下降;3)对于同一厚度不同钢板,在相同频率激励下,由拉应力加载所引起的 B_z 变化是相近的。

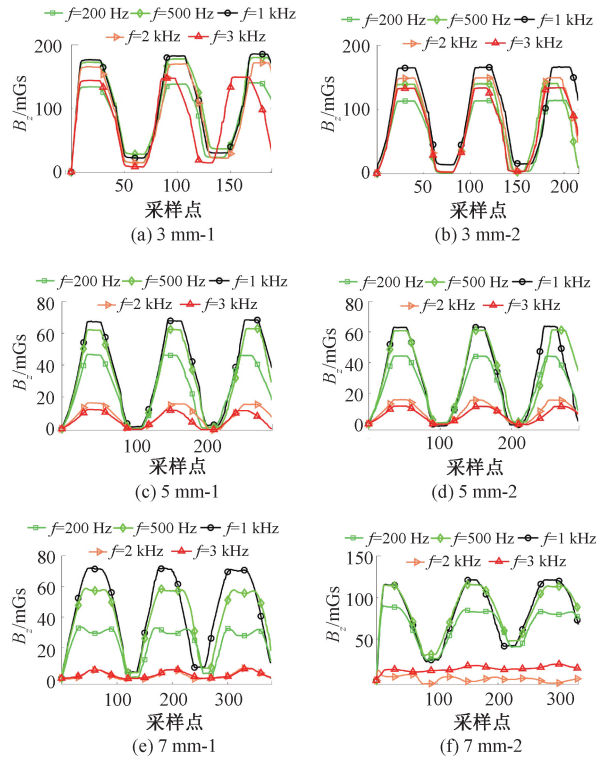


图10 不同厚度钢板 B_z 随 σ 的变化曲线-单磁铁-移动磁化
Fig. 10 Steel plate with different thickness, curve of B_z with σ —Single magnet-moving magnetization

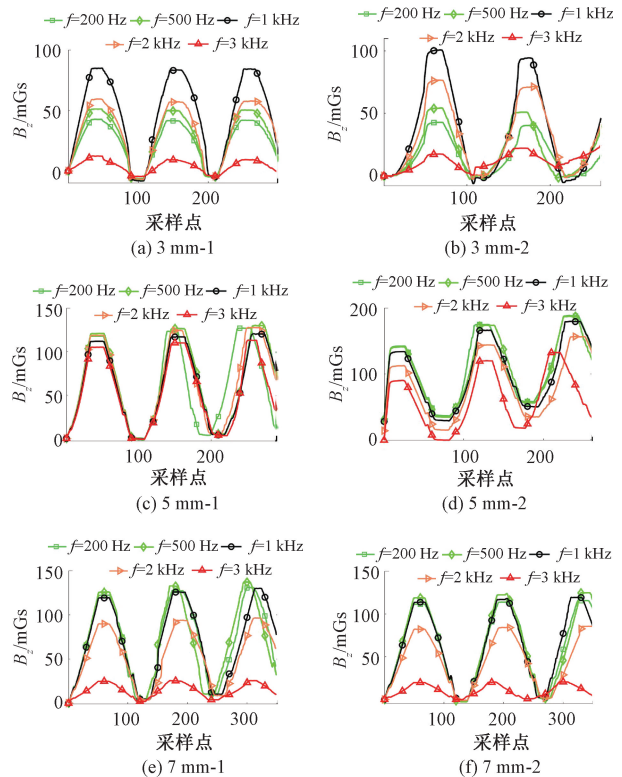


图11 不同厚度钢板 B_z 随 σ 的变化曲线-双磁铁-移动磁化
Fig. 11 Steel plate with different thickness, curve of B_z with σ —Dual magnet-moving magnetization

3.2 灵敏度参数 S 分析

对 3 种不同厚度钢板分别作不磁化、单磁铁-移动磁化、双磁铁-移动磁化,在交流磁化条件下进行磁感应强度测量。取应力从 0 MPa 增加至 100 MPa,所对应磁感应强度幅值 $B_{\sigma 0}$ 及 B_{σ} ,利用公式:

$$S = \frac{\Delta B}{\Delta \sigma} = \frac{B_{\sigma} - B_{\sigma 0}}{\sigma - \sigma_0} \quad (10)$$

计算得到不同磁化方式下不同厚度钢板的力磁灵敏度 S 如图 12 所示。

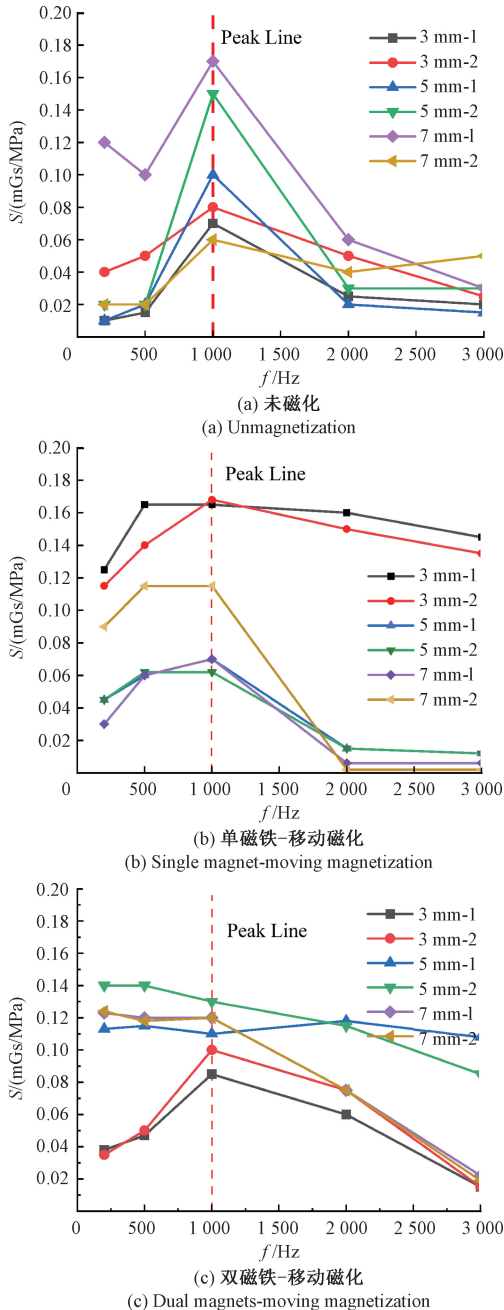


图 12 力磁灵敏度 S
Fig. 12 Sensitivity S

对比 3 种磁化方式对应结果可以发现,励磁频率 f 对力磁灵敏度与一致性的影响规律:当 f 从 200 Hz 增加至 1 kHz 时,力磁灵敏度在增加,当 f 从 1 kHz 增加至 3 kHz 时,力磁灵敏度在减小;当 $f=1$ kHz 时,力磁灵敏度 S 取得最大值。分别计算不同厚度钢板在不同磁化方式下的力磁灵敏度 S 的平均值 S_{AVG} ,结果如表 2 所示。

表 2 3 mm 厚度钢板平均力磁灵敏度 S_{AVG}
Table 2 Average sensitivity of 3 mm thick steel plate S_{AVG}

S_{AVG}	200 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	3 kHz
未磁化 (mGs/MPa)	0.025 0	0.032 5	0.075 0	0.037 5	0.022 5
单磁铁-移动 磁化(mGs/MPa)	1.200	1.525	1.665	1.550	1.400
双磁铁-移动 磁化(mGs/MPa)	0.365	0.485	0.925	0.675	0.150

由表 2 可知,励磁频率 $f=1$ kHz 条件下,对于 3 mm 厚度钢板,未磁化处理平均力磁灵敏度为 0.075 mGs/MPa;单磁铁-移动磁化平均力磁灵敏度为 1.665 mGs/MPa;双磁铁-移动磁化平均力磁灵敏度为 0.925 mGs/MPa。对比 3 组数据可知,对于 3 mm 钢板,单磁铁-移动磁化处理和双磁铁-移动磁化处理的平均力磁灵敏度很高,且是未磁化处理的 22 倍和 12 倍。

由表 3 可知,励磁频率 $f=1$ kHz 条件下,对于 5 mm 厚度钢板,未磁化处理平均力磁灵敏度为 0.125 mGs/MPa;单磁铁-移动磁化平均力磁灵敏度为 0.66 mGs/MPa;双磁铁-移动磁化平均力磁灵敏度为 1.41 mGs/MPa。对比 3 组数据可知,对于 5 mm 厚度钢板,单磁铁-移动磁化处理和双磁铁-移动磁化处理的平均力磁灵敏度很高,且是未磁化处理的 5 倍和 11 倍。

表 3 5 mm 厚度钢板平均力磁灵敏度 S_{AVG}
Table 3 Average sensitivity of 5 mm thick steel plate S_{AVG}

S_{AVG}	200 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	3 kHz
未磁化 (mGs/MPa)	0.015 0	0.020 0	0.125 0	0.025 0	0.022 5
单磁铁-移动 磁化(mGs/MPa)	0.450	0.610	0.660	0.150	0.120
双磁铁-移动 磁化(mGs/MPa)	1.265	1.275	1.410	1.165	0.965

由表 4 可知,励磁频率 $f=1$ kHz 条件下,对于 7 mm 厚度钢板,未磁化处理平均力磁灵敏度为 0.115 mGs/MPa;单磁铁-移动磁化平均力磁灵敏度为 0.925 mGs/MPa;双磁铁-

移动磁化平均力磁灵敏度为 1.2 mGs/MPa。对比三组数据可知,对于 7 mm 厚度钢板,单磁铁-移动磁化处理和双磁铁-移动磁化处理的平均力磁灵敏度很高,且是未磁化处理的 8 倍和 11 倍。

表 4 7 mm 厚度钢板平均力磁灵敏度 S_{AVG}

Table 4 Average sensitivity of 7 mm thick steel plate S_{AVG}

S_{AVG}	200 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	3 kHz
未磁化 (mGs/MPa)	0.070	0.060	0.115	0.050	0.040
单磁铁-移动 磁化(mGs/MPa)	0.600	0.875	0.925	0.040	0.040
双磁铁-移动 磁化(mGs/MPa)	1.235	1.190	1.200	0.750	0.205

综合以上分析可知,对于 3 mm 厚度钢板,单磁铁-移动磁化 S_{AVG} 最高;对于 5 mm 和 7 mm 厚度钢板,双磁铁-移动磁化的 S_{AVG} 最高;单、双磁铁-移动磁化所得最高平均力磁灵敏度是未磁化钢板的几倍至几十倍。不论钢板厚度是多少,未磁化力磁灵敏度最弱,强磁化之后的力磁灵敏度大幅升高。测试表明,强磁化使试件相对磁导率大幅下降,力磁检测灵敏度大幅提高,与理论推断一致。

3.3 初始幅值 B_{z_0} 一致性分析

强磁化一方面改变试件初始磁化的强度幅值,另一方面,改变初始磁化的均匀一致性。为评定初始磁化一致性,统计对比拉应力为 0 MPa 时不同厚度钢板不同磁化方式下的钢板表面法向感应磁场幅值为初始幅值 B_{z_0} ,结果如图 13 所示。

如图 13 所示,分析对比激励频率变化对不同磁化方式钢板初始幅值的影响,可以发现,随激励频率变化,未磁化初始幅值极值相差较大,单磁铁-移动磁化和双磁铁-移动磁化初始幅值极值相差较小。说明单、双磁铁-移动磁化方式下的初始幅值对励磁频率变化不敏感,相对更稳定。分析不同厚度钢板初始幅值的数据特征,初始幅值的离散程度用相对极差表示,相对极差=极差/平均值。结果列在了表 5~7。

由表 5~7 可知,当励磁频率 $f=1$ kHz 时,对于 3 mm 钢板,初始幅值相对极差最小为 2%,对应的磁化方式为单磁铁-移动磁化。对于 5 mm 钢板,初始幅值相对极差最小为 0.2%,对应的磁化方式为单磁铁-移动磁化。对于 7 mm 钢板,初始幅值相对极差最小为 1.8%,对应的磁化方式为双磁铁-移动磁化。3 种厚度钢板在未磁化方式的初始幅值相对极差,3 mm 厚度为 16.8%,5 mm 厚度为 22%,7 mm 厚度为 44.6%。通过对比最优磁化方式与

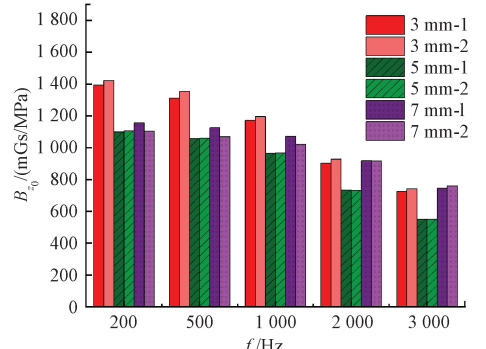
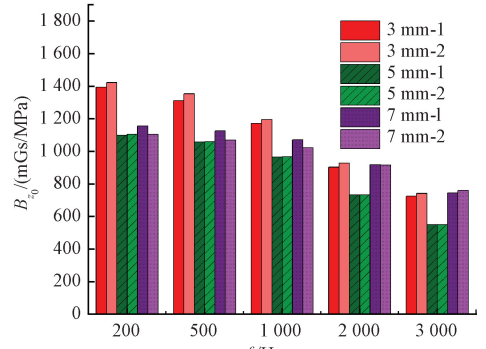
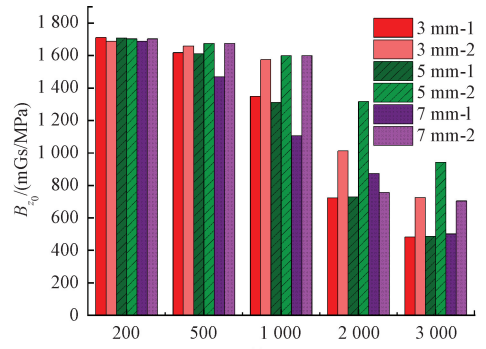


图 13 初始幅值 B_{z_0} /mGs

Fig. 13 Initial amplitude of B_{z_0} /mGs

表 5 3 mm 钢板初始幅值相对极差

Table 5 Relative limit difference of initial amplitude of 3 mm steel plate

RSD	200 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	3 kHz
未磁化/%	1.4	2.4	16.8	39.9	50.6
单磁铁-移动磁化/%	2.0	3.2	2.0	2.8	2.3
双磁铁-移动磁化/%	2.0	2.7	6.0	5.9	3.3

表 6 5 mm 钢板初始幅值相对极差

Table 6 Relative limit difference of initial amplitude of 5 mm steel plate

RSD	200 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	3 kHz
未磁化/%	0.3	4.0	22.0	80.7	94.0
单磁铁-移动磁化/%	0.5	0.2	0.2	0.1	0.0
双磁铁-移动磁化/%	4.9	1.4	8.0	11.1	12.5

表 7 7 mm 钢板初始幅值相对极差

Table 7 Relative limit difference of initial amplitude of 7 mm steel plate

RSD	200 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	3 kHz
未磁化/%	2.1	14.0	44.6	15.5	40.5
单磁铁-移动磁化/%	4.6	5.2	4.9	0.2	2.0
双磁铁-移动磁化/%	1.6	0.19	1.8	2.0	1.1

未磁化可知,初始幅值相对极差有数倍至百倍降低,一致性获得了很大提高。

4 结 论

本文提出了一种基于磁弹效应的钢板应力测量性能提升方法。该方法对钢板施加移动强磁化,之后在弱交流磁化作用下对钢板施加拉伸应力,测量钢板表面的磁感应强度变化以及初始磁感应强度。实验结果表明,该方法的应力测量灵敏度及初始磁感应强度一致性有明显增强。

从理论角度,结合力磁耦合模型与磁化曲线关系,分析证明:强磁化通过降低初始相对磁导率和统一力磁耦合参数,来提高力磁检测灵敏度及一致性;弱交流磁化通过提供小幅度振荡磁场,来有效消除外界磁干扰。

建立有限元仿真模型,测试初始相对磁导率不同时,钢板在拉应力作用下的法向磁感应强度变化;结果表明:初始相对磁导率越小,法向磁感应强度关于相对磁导率的变化率越大,能够取得较高的应力测量灵敏度。

设计了未磁化、单磁铁磁化、双磁铁磁化 3 组磁化方案,分别开展弱交流磁化下的钢板拉伸试验,测得不同厚度钢板在应力加载过程中的法向磁感应强度变化;结果表明:强磁化与未磁化组对比,应力测量灵敏度有数十倍提升,一致性有数倍至百倍提高。

本方法能有效提高基于磁弹效应的钢板应力测量的灵敏度及一致性。但是,当被测部件体积较大时,存在强

磁化装置不便操作以及磁化效率低的问题,为提高此方法的现场适用性,未来需要在强磁化方法上进一步研究,开发一种易操作、适用于多种结构的便携式磁化装置。

参考文献

- [1] YANG X H, JIA ZH B, CHEN L, et al. A numerical simulation method of residual magnetic field signals for evaluating deformation-induced stress concentration in ferromagnetic materials [J]. *Insight Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2023, 65(3):146-152.
- [2] ZENG J M, ZHAO C W, HUANG X J, et al. Non-invasive pressure measurement based on magneto-mechanical effects [J]. *Measurement Science & Technology*, 2018, 29(9):095106-8.
- [3] JILES D C, ATHERTON D L. Theory of the magnetisation process in ferromagnets and its application to the magneto-mechanical effect [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1984, 17(6):1265-1281.
- [4] JILES D C. Theory of the magneto-mechanical effect [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 1999, 32(15):1945-1945.
- [5] KIM S, KIM K, KANG C, et al. A nonlinear magneto-mechanical coupling model for magnetization and magnetostriction of ferromagnetic materials [J]. *AIP Advances*, 2020, 10(8):085304-1-16.
- [6] ZHANG P, SHI P, JIN K, et al. An anisotropic magneto-mechanical model of ferromagnetic materials for the magnetic memory testing method [J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 125(23):233901.
- [7] 罗旭,王丽红,吕良,等. 基于面磁荷密度的金属磁记忆检测正演模型[J]. *物理学报*, 2022, 71(15):103-119.
- [8] LUO X, WANG L F, LYU L, et al. A forward model for metal magnetic memory detection based on surface magnetic charge density [J]. *Journal of Physics*, 2022, 71(15):103-119.
- [9] 段振霞,任尚坤,赵珍燕,等. 磁化状态对力磁耦合关系的影响分析[J]. *中国机械工程*, 2017, 28(9):1029-1034.
- [10] DUAN ZH X, REN SH K, ZHAO ZH Y, et al. Analysis of the influence of magnetization state on the force magnetic coupling relationship [J]. *China Mechanical Engineering*, 2017, 28(9):1029-1034.
- [11] LI J W, XIAO L Y, HAN X M. Influence of applied load in ferromagnetic material on magneto-mechanical phenomena [J]. *Insight*, 2016, 56(6):308-312.
- [12] LI Z, DIXON S, CAWLEY P, et al. Experimental studies of the magneto-mechanical memory (MMM) technique using permanently installed magnetic sensor arrays [J]. *Ndt & E International*, 2017, 92136-148.
- [13] LI H, ZHAO C, ZHANG F, et al. An experimental study

- of relationship between stress and excitation magnetic field [J] . IEEE Transactions on Instrumentation Measurement. 2023,72:6000609.
- [12] 刘志峰,费志洋,黄海鸿,等. 激励磁场对力磁耦合作用的强化机制研究[J]. 中国机械工程,2018,29(9): 1108-1126.
LIU ZH F, FEI ZH Y, HUANG H H, et al. Study on the strengthening mechanism of excitation magnetic field for force magnetic coupling cooperation [J] . China Mechanical Engineering, 2018,29 (9) : 1108-1126.
- [13] ZENG S, LI H, ZHAO C. Influence of tensile stress on magnetic flux leakage signal of ferromagnetic steel after overcoming initial magnetization disturbance[J]. NDT & E International: Independent Nondestructive Testing and Evaluation,2023,133:102758.
- [14] 周明,黄新敬,陈乾,等. 基于弱交流磁化的钢材应力检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(11): 23-31.
ZHOU M, HUANG X J, CHEN Q, et al. Research on steel stress detection method based on weak AC magnetization [J] . Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021,35 (11) : 23-31.
- [15] JILES D C , LI L. A new approach to modeling the magnetomechanical effect [J] . Journal of Applied Physics, 2004, 95(11) : 7058-7060.
- [16] JILES D C, KIARIE W. An integrated model of magnetic hysteresis, the magnetomechanical effect, and the barkhausen effect[J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers,IEEE, 2021,57(2):800211-1-11.
- [17] ZHANG Y, XUE Y, HUANG X, et al. Characterizations of magnetic field distributions inside buckling pipelines[J]. Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2018, 33(12):1475-1482.

- [18] HUANG X J, YAN Y T, FENG H, et al. Nondestructive pressure measurement of pressurized vessels via local magnetization and magnetic sensing [J] . Measurement, 2020, 163: 107993.

作者简介



刘珊,2010年和2013年分别于长春理工大学获得学士学位和硕士学位,现为天津大学精密仪器与光电子工程学院博士研究生,主要研究方向为结构健康检测技术、管道安全磁检测。

E-mail:lshan1006@tju.edu.cn

Liu Shan received her B. Sc. degree and M. Sc. degrees in 2010 and 2013 from Changchun University of science and technology. She is currently a Ph. D student in the School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering at Tianjin University. Her research interests include structural health inspection technology and magnetic detection of pipeline safety.



黄新敬(通信作者),2010年和2016年于天津大学分别获得学士学位和博士学位,现为天津大学精密仪器与光电子工程学院副教授、博士生导师,主要研究方向为结构健康检测技术及仪器、声磁智能感知、管道缺陷检测和新型管道内检测器。

E-mail:huangxinjing@tju.edu.cn

Huang Xinjing (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Tianjin University in 2010 and 2016, respectively. He is currently an associate professor and a doctoral advisor in the School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering at Tianjin University. His main research interests include structural health inspection and monitoring technology and instrument, acoustic and magnetic intelligent sensing, pipeline defect detection, and new type pipeline detector.