

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104286

基于弱交流磁化的钢材应力检测方法研究*

周明¹ 黄新敬² 陈乾² 燕玉田² 李健² 张宇²

(1. 国家管网集团东部原油储运有限公司 徐州 221008; 2. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072)

摘要:定期对工业领域中的铁磁性构件进行应力检测可确保工业设备安全工作。提出了一种弱交流磁化条件下的基于磁弹效应的钢材应力检测方法。首先通过有限元仿真研究了弱交流磁化条件下的钢板力磁关系,并优化了测点位置。其次针对不同热磁处理钢板开展了弱交流磁化条件下的钢板应力磁测实验。结果表明,钢板表面法向弱交流感应磁场在不同频率下均具有良好的应力敏感特性;弹性应力变化范围为0~167 MPa时,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;消磁和热处理可以有效改善相同尺寸钢板的力磁关系的一致性;弱交流磁化条件下的应力磁测方案具有非接触、良好的一致性和抗背景磁场干扰等优势。

关键词:磁弹效应;弱交流磁化;钢板;应力

中图分类号: TP27; TH86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

Research on steel stress measurement based on weak AC magnetization

Zhou Ming¹ Huang Xinjing² Chen Qian² Yan Yutian² Li Jian² Zhang Yu²

(1. National Pipeline Network Group Eastern Crude Oil Storage and Transportation Co., Ltd., Xuzhou 221008, China;

2. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Regular stress detection for the ferromagnetic components in the industrial field can ensure the safety of industrial equipment. This paper proposes a method of steel stress measurement based on magneto-elastic effects under weak alternating current (AC) induction magnetic field. Firstly, the magnetic-stress relationship of steel plates under weak AC magnetization condition is studied through finite element simulations and the position of the measuring point is optimized. Then the stress measurement experiment for different thermomagnetic treated steel plates is carried out under weak AC magnetization condition. Results demonstrate that the normal weak AC induction magnetic field near the steel plate surface under different frequencies has noticeable stress-sensitive characteristics, when the elastic stress varies from 0 MPa to 167 MPa, the normal weak AC magnetic field amplitude on the surface of the steel plate has an approximately linear monotonic relationship with the stress, demagnetization and heat treatment can effectively improve the consistency of the stress-magnetic relationship of the same size steel plate, the weak AC magnetization condition has non-contact, good repeatability and ability of stress measurement to resist background magnetic interference.

Keywords: magneto-elastic effects; weak AC magnetization; steel plate; stress

0 引言

铁磁性材料作为桥梁、轨道、压力容器、管道等构件的原材料,在工业领域中应用广泛。铁磁性材料的应力-应变状态是衡量构件安全性的重要指标,因此需要对其

进行定期检测,确保工业设备安全工作^[1-2]。

目前常用的无损应力检测方法主要包括电阻应变片法^[3-4]、光纤光栅法^[5-6]、超声波法^[7-9]、射线衍射法^[10-12]和磁弹效应法^[13-15]等。其中,电阻应变片法和光纤光栅法精度较高,但需要清理容器表面的覆层,对粘贴质量有严格的要求,且光纤光栅法需要光源和解调器,成本高。超

声波法通过测量材料内部的声传播时间来测量应力,但是布局复杂、需要耦合剂。射线衍射法通过测量材料内部晶体间距来实现应力的检测,但是需要射线衍射仪,成本较高。

磁弹效应法主要通过检测铁磁性材料附近的磁场变化实现应力检测,其检测原理是基于铁磁性材料的磁弹效应,即铁磁性材料的磁畴会跟随其受到的应力而产生变化,表现为材料磁化、磁导率、附近磁场的改变以及磁各向异性。利用磁弹效应检测应力的方法主要包括如下 3 种。

1) 磁记忆法,即通过检测试件受力区域的切向磁记忆信号分量来实现应力测量。Leng 等^[16]研究了低碳钢的金属磁记忆信号在不同应力范围内的变化特征,结果表明磁记忆信号对塑性形变的灵敏度很高且其对形变的检测效果很好。王庆国等^[17]从能量平衡角度出发,从宏观和微观对应力作用下分析铁磁体磁记忆信号特征,建立应力与材料磁化率及原子磁矩之间的关系模型;通过含裂纹管道磁记忆检测,验证应力损伤磁记忆检测理论分析的正确性及工程应用的有效性。磁记忆法可用于检测应力集中区,由于易受背景磁场干扰,尚不能准确表征钢材应力。

2) 磁巴克豪森检测法,即通过检测受力试件的磁巴克豪森信号幅值来实现应力测量。祁欣等^[18]研究了磁巴克豪森信号的频谱与应力之间的关系,分析和探讨了时域和频域内的磁巴克豪森信号变化规律。吴杰课题组^[19]将接收线圈和磁化器通过弹性元件相连接,采用 BP 神经网络消除了传感器脱离对应力检测结果的影响,构建了一套磁巴克豪森应力检测设备。磁巴克豪森法适用于对构件局部的动态应力检测,而不适用于一些准静态、移动式应力测量场合。

3) 磁各向异性检测法,即利用磁各向异性传感器检测试件表面磁信号来实现准接触式应力测量。张富臣等^[20]搭建了磁各向异性检测实验平台,分析和讨论了磁各向异性参数和应力之间的定量关系。李立新等^[21]研制了 3 种不同结构类型的检测探头,利用这 3 种探头对不同应力、不同激励频率条件下的钢件进行了检测,应力检测效果均比较好。

基于磁弹效应的应力检测方法设备小巧简易,且检测时无需在材料表面涂覆胶水、耦合剂等,适用于铁磁性材料应力状态的接触或非接触式定期检测与评估。但是上述研究没有考虑钢材残余应力及剩余磁化对应力磁测灵敏度的影响和消除方法。

本文基于磁弹效应提出了一种弱交流磁化条件下铁磁性材料应力非接触检测方法。首先通过理论分析和有限元仿真建立弱磁化钢板模型,分析弱磁化条件下铁磁性材料的力磁关系,并选取最佳测点位置。其次,针对不

同热处理和退磁条件、不同激励频率,开展弱交流磁化条件下钢板拉伸和磁测实验,深入研究钢板的力磁特性,并对该应力检测方法的灵敏度、一致性以及抗干扰能力进行验证。

1 测量原理及测点选取

由 J-A 模型^[22]可知,给一待测材料施加恒定的外部磁场 H ,同时施加应力 σ ,则外部磁场 H 与应力 σ 综合作用所产生的磁场可以等效为一个有效磁场 H_e :

$$H_e = H + \alpha M + \frac{3\sigma}{\mu_0} [(\gamma_1(0) + \gamma_1'(0)\sigma)M + 2(\gamma_2(0) + \gamma_2'(0)\sigma)M^2] \quad (1)$$

式中:为 $\gamma_i'(0)$ 为 $\sigma=0$ MPa 时 γ_i 的导数,其中 M 为磁化强度, α 为耦合系数。将外加磁场 H 和应力 σ 作用下的无滞后磁化等效为磁场 H_e 和 0 应力的作用效果,即:

$$M_{an}(H, \sigma) = M_{an}(H_e, 0) \quad (2)$$

磁场强度 M ,可逆磁化强度 M_{rev} ,不可逆磁化强度, M_{irr} 非滞后磁化强度 M_{an} 存在如下关系:

$$\begin{cases} M_{rev} = c(M_{an} - M_{irr}) \\ M = (M_{rev} + M_{irr}) \end{cases} \quad (3)$$

联立式(1)~(3)可得:

$$\frac{dM}{d\sigma} = \frac{\sigma}{E\xi}(M_{an} - M) + c \frac{dM_{an}}{d\sigma} \quad (4)$$

根据 Craik 和 Wood 的实验检测结果,选取下述参数赋值:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^7 \text{ N/A}^2,$$

$$a = 1000 \text{ A/m},$$

$$M_s = 1.71 \times \frac{10^6 \text{ A}}{m},$$

$$c = 0.1,$$

$$\xi = 609 \text{ Pa},$$

$$E = 200 \text{ GPa},$$

$$\gamma_1 = -1 \times 10^{-26} \text{ A}^{-2} \text{ Nm},$$

$$\gamma_2' = -5 \times 10^{-39} \text{ A}^{-2} \text{ Nm},$$

$$\gamma_1 = 2 \times 10^{-18} \text{ A}^{-2} \text{ m}^2,$$

$$\gamma_2 = 2 \times 10^{-30} \text{ A}^{-2} \text{ m}^2.$$

相对磁导率定义为:

$$\mu_r = \frac{M}{H} + 1 \quad (5)$$

由此可绘制出外部磁场 H 分别 1、25 和 50 A/m 时 μ_r 和 σ 之间的关系曲线,如图 1 所示。当拉应力为 0~121 MPa 时,磁导率与拉伸应力之间呈线性关系;当拉应力和压应力过大时,会出现磁导率随应力增加而下降的情况。不同外部磁场强度作用下,磁导率随着一定应力

的增量基本相近。应力作用时磁导率改变,进而引起外部磁感应强度的变化,因此可以通过测量受力钢板附近的磁感应强度来检测钢板内部的应力。

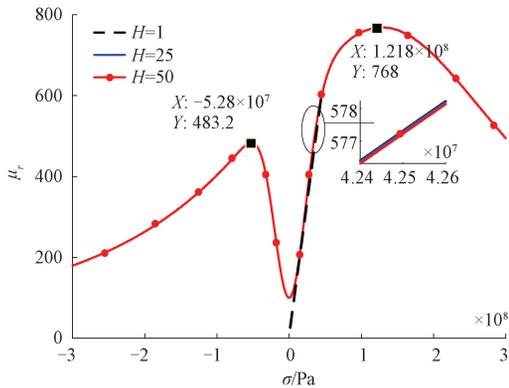


图 1 不同 H 下 μ_r 随 σ 的变化曲线

Fig. 1 μ_r vs σ curves under different H

利用 COMSOL 有限元仿真软件对弱交流磁化条件下铁磁性材料的力磁关系进行分析,仿真模型如图 2 所示。钢板厚度为 3 mm,激励线圈下表面距离钢板上表面 45 mm,线圈线径为 0.5 mm,匝数为 1 800 匝,弱交流激励信号幅值为 1 V_{pp},频率为 500 Hz。对钢板和线圈覆盖空气域,空气域的相对磁导率设置为 1,待测钢板试件的相对磁导率设为变量 μ_r 。图中点 1~6 为测点,其中点 1~3 位于线圈正下方,点 4~6 位于线圈侧方。

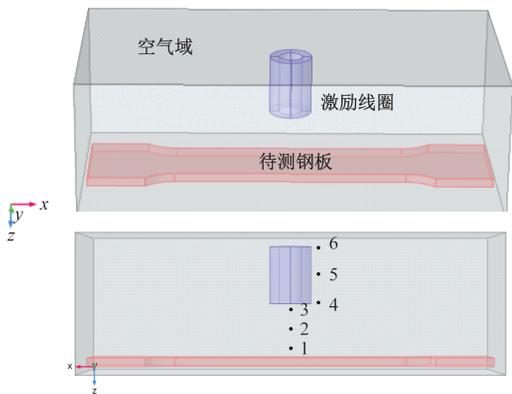


图 2 仿真模型

Fig. 2 Simulation model

由磁弹效应可知,铁磁性材料的应力发生改变时,其内部的磁导率会随应力呈现特殊的变化规律,因此仿真时将钢板的相对磁导率 μ_r 从 50 扫描至 500 模拟钢板被拉伸的过程,获得 6 个测点处的法向交流感应磁场幅值 B_z 随磁导率 μ_r 变化的数据,如图 3 所示。

由图 3 可知,测点 1~6 的磁通密度与钢板相对磁导率之间均存在单调的变化关系,对于测点 1~3, B_z 与 μ_r ,

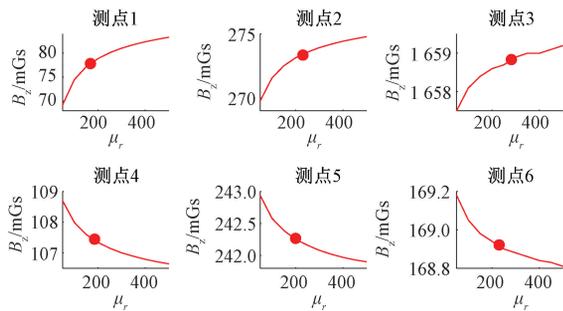


图 3 不同测点处 B_z 随 μ_r 的变化曲线

Fig. 3 B_z vs μ_r curves at different measuring points

呈正相关,对于测点 4~6, B_z 与 μ_r 呈负相关。测点 1 距离线圈最远,距离钢板最近,因此与其他测点相比,此处 B_z 最小,但此处 B_z 随 μ_r 的变化灵敏度最大。因此,为了更好地研究钢板的力磁敏感特性,后期开展实验时将磁传感器放置在测点 1 的位置进行磁信号检测。

2 弱磁化条件下的钢板应力磁测实验

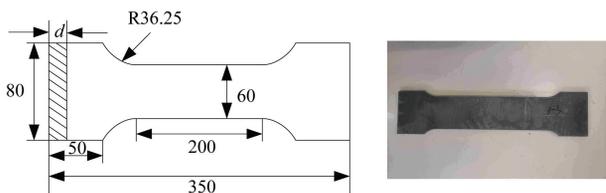
为了研究弱交流磁化条件下钢板的力磁特性,开展了钢板拉伸磁测实验。利用载有交流信号的线圈磁化受力钢板,将磁传感器放置在弱交流磁化区域,同步采集钢板表面法向感应磁场随钢板应力的变化数据。实验所用应力加载装置为 MTS 公司的电子静态万能材料试验机,其主要技术指标如表 1 所示。实验所用钢板尺寸图和实物照片如图 4 所示,钢板厚度为 9 mm,材质为 Q235 钢,屈服强度为 235 MPa。激励线圈选用线径为 0.5 mm 的漆包线,匝数 $N=1\ 800$,交流激励信号幅值为 1 V_{pp}。选用的磁阻传感器灵敏度为 16 mV/Gs,具有高灵敏度、低功耗等优点。供电芯片选用输出电压为 5 V 的基准电压芯片,其误差为 ± 6 mV。由于实验是在弱交流磁化条件下开展的,因此磁传感器直接输出的信号较小,需要用仪表放大器对输出信号进行放大,放大倍数为 100 倍。磁信号通过信号采集卡传输至上位机。实验所用传感器电路如图 5 所示。

表 1 万能材料试验机性能

Table 1 Universal material testing machine performance

技术参数	
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

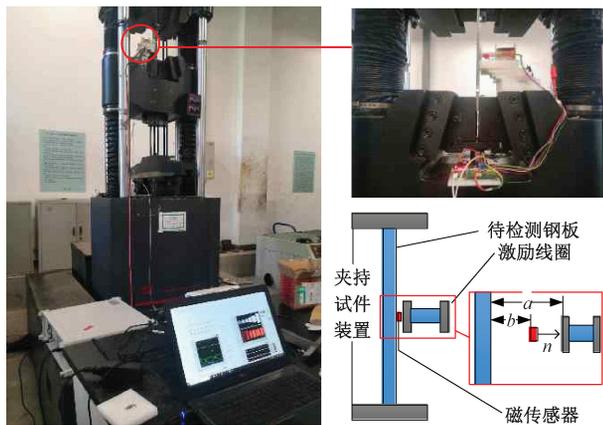
钢板应力磁测实验装置如图 6(a) 所示。实验时,将激励线圈和磁阻传感器固定在钢板中部,线圈底部距离钢板表面的激励提高值 $a=45$ mm,磁阻传感器距离钢板



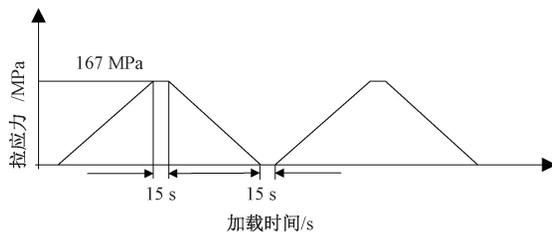
(a) 试件尺寸
(a) Specimen size
(b) 试件实物
(b) Specimen

图 4 拉伸试件示意图

Fig. 4 Schematic diagrams of tensile specimen



(a) 实验装置图
(a) Experimental setup



(b) 应力加载曲线
(b) Stress loading curve

图 6 实验方案

Fig. 6 Experimental schemes

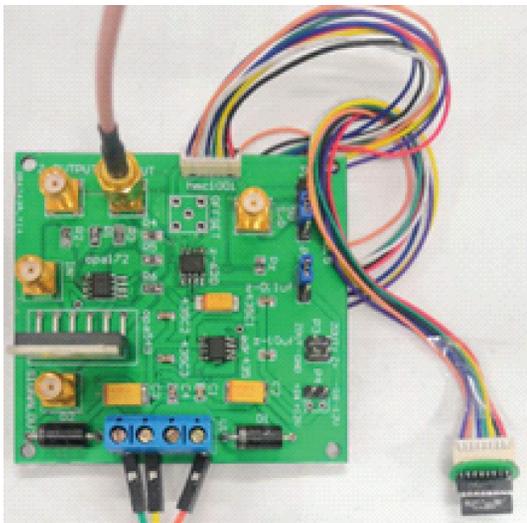


图 5 交流磁化电流产生电路和感应磁场测量电路

Fig. 5 AC magnetizing current generating circuit and induced magnetic field measuring circuit

表面的接收提高值 $b = 3 \text{ mm}$, 敏感轴 n 沿钢板表面法向方向。将该钢板两端夹持在万能试验机上对其进行应力加载, 应力加载过程如图 6(b) 所示。机器的拉伸速度为 1 kN/s , 拉应力从 0 MPa 线性加载至 167 MPa , 保持 15 s 后线性卸载至 0 MPa , 在 0 MPa 处保持 15 s , 将这一“加载-保持-卸载-保持”的过程称为一个“加载周期”, 对每块试件重复 2 个加载周期。试件被拉伸时, 同步启动信号激励和磁信号采集, 并将采集到的钢板表面法向磁信号传输至上位机, 完成数据的显示和保存。

实验步骤如下。

1) 对未消磁、未热处理; 消磁、未热处理和消磁、热处理这 3 种状态钢板分别开展上述拉伸磁测实验, 研究不同热磁处理钢板的力磁关系。

2) 对不同频率的激励信号作用下的钢板开展上述拉伸磁测实验, 激励信号频率 $f = 80 \sim 2000 \text{ Hz}$, 研究不同激励频率作用下的钢板力磁关系, 图 7 所示为不同频率激励信号和相应接收信号的原始数据。

3) 对相同尺寸、相同热磁处理条件的钢板开展上述拉伸磁测实验, 研究相同尺寸和热磁处理钢板力磁关系

的一致性。

4) 对同一块钢板开展无干扰和有干扰条件下的拉伸磁测实验, 研究实验系统抵抗背景磁场干扰的能力。

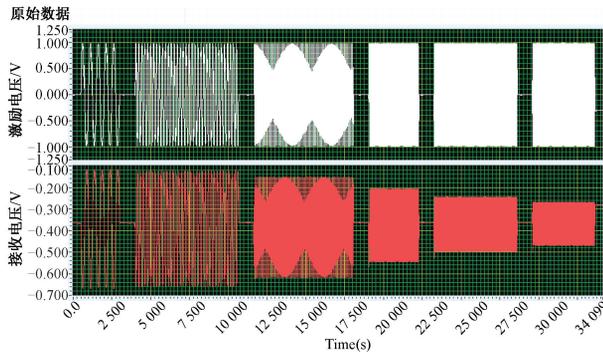


图 7 激励信号(上)和接收信号(下)原始数据

Fig. 7 Excitation signal (top) and raw received signal (bottom)

3 结果与讨论

3.1 灵敏度

3 种热磁处理钢板的应力磁测实验结果如图 8~10 所示。图 8~10 为不同激励频率 f 作用下的钢板表面磁信号和钢板应力同步变化曲线, 横轴为拉应力加载时间, 蓝色曲线为两个加载周期内采集到的钢板表面法向交流

感应磁场幅值 B_z , 红色曲线为两个加载周期内钢板拉应力的变化。其中拉应力加载两个周期, 磁信号也随之产生两个周期变化。

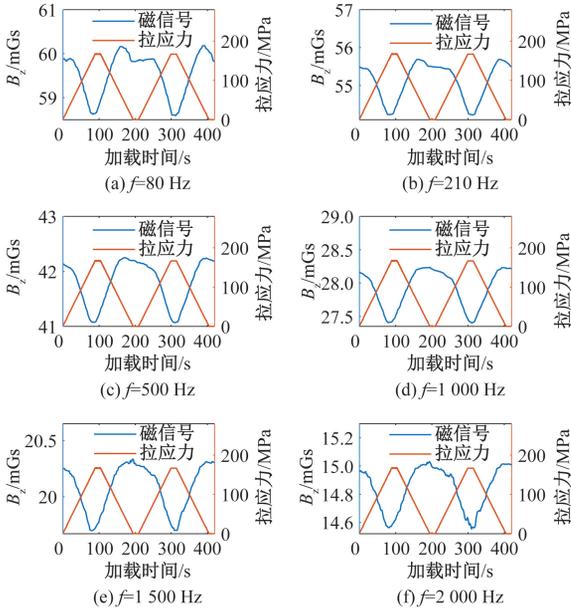


图 8 未消磁、未热处理钢板 B_z 随 σ 的变化曲线

Fig. 8 B_z vs σ curves of steel plates without demagnetization and heat treatment

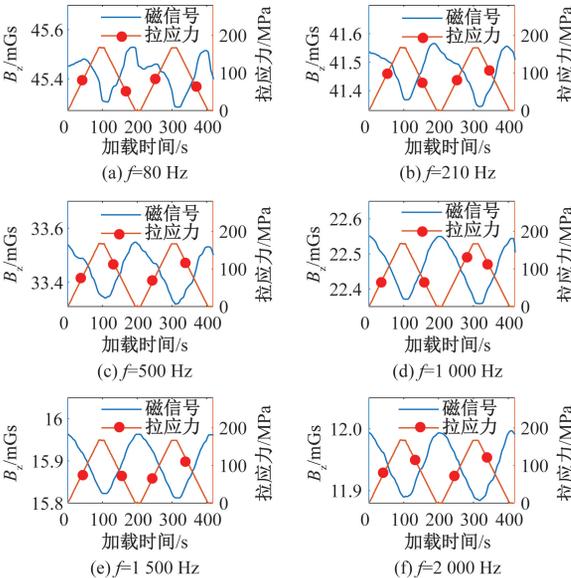


图 9 消磁、未热处理钢板 B_z 随 σ 的变化曲线

Fig. 9 B_z vs σ curves of steel plates with demagnetization but without heat treatment

由图 8~10 可知, 对于 3 种热磁处理钢板, 在单个加载周期内, 每个激励频率 f 作用下的钢板表面法向交流感应磁场幅值 B_z 与钢板应力 σ 之间均存在线性单调的关系, σ 越大, B_z 越小, 这与 J-A 理论模型以及仿真结果

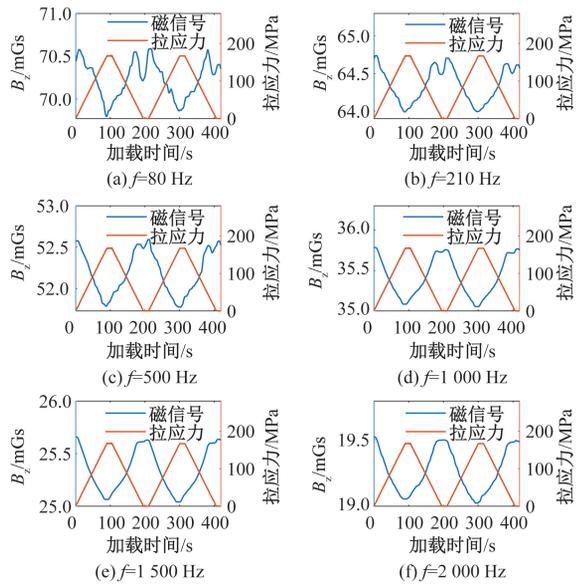


图 10 消磁、热处理钢板 B_z 随 σ 的变化曲线

Fig. 10 B_z vs σ curves of steel plates with demagnetization and heat treatment

一致。同一激励频率作用下, 每块钢板相邻加载周期之间的力磁特性一致。将钢板表面法向弱交流感应磁场幅值 B_z 对应力 σ 的灵敏度 S 定义为 σ 从 0 MPa 线性增加至 167 MPa 时 B_z 的变化量, 将初始幅值 B_{z0} 定义为钢板应力为 0 MPa 时钢板表面法向感应磁场幅值。对 3 种热磁处理钢板在不同激励频率 f 作用下的 S 和 B_{z0} 作进一步统计汇总, 如表 2 和 3 所示。

表 2 三种热磁处理钢板灵敏度汇总

Table 2 Summary of the sensitivity of three types of thermomagnetic treated steel plates (mGs)

热磁处理条件	未消磁、未热处理	消磁、未热处理	消磁、热处理
80 Hz	1.23	0.19	0.77
210 Hz	1.22	0.17	0.67
500 Hz	1.14	0.21	0.76
1 000 Hz	0.81	0.18	0.66
1 500 Hz	0.58	0.15	0.55
2 000 Hz	0.43	0.11	0.46

表 3 三种热磁处理钢板初始幅值汇总

Table 3 Summary of initial amplitudes of three types of thermomagnetic treated steel plates (mGs)

热磁处理条件	未消磁、未热处理	消磁、未热处理	消磁、热处理
80 Hz	59.87	45.47	70.50
210 Hz	55.45	41.54	64.73
500 Hz	42.21	33.55	52.58
1 000 Hz	28.22	22.55	35.78
1 500 Hz	20.28	15.97	25.66
2 000 Hz	15.00	12.00	19.52

由表 2、3 可知,对于每种热磁处理条件下的钢板,激励频率越高,钢板的 B_{z0} 越小。作用在其上的激励频率 $f=80\sim 500\text{ Hz}$ 时,灵敏度 S 较高,最大灵敏度 S_{Max} 为 1.23 mGs ;当激励频率 $f>1\ 000\text{ Hz}$ 时,灵敏度 S 会随着激励频率的增加而显著下降,这与趋肤效应有关。消磁会削弱钢板表面法向弱交流感应磁场对应力的灵敏度。

3.2 一致性

为了避免实验的偶然性,对上述 3 种热磁处理的尺寸完全相同的 1 号和 2 号钢板分别开展两个加载周期的拉伸磁测实验,验证相同尺寸钢板的力磁关系的一致性,实验结果如图 11~13 所示。图 11 拉应力共加载两个周期,磁信号也随之产生两个周期的变化。

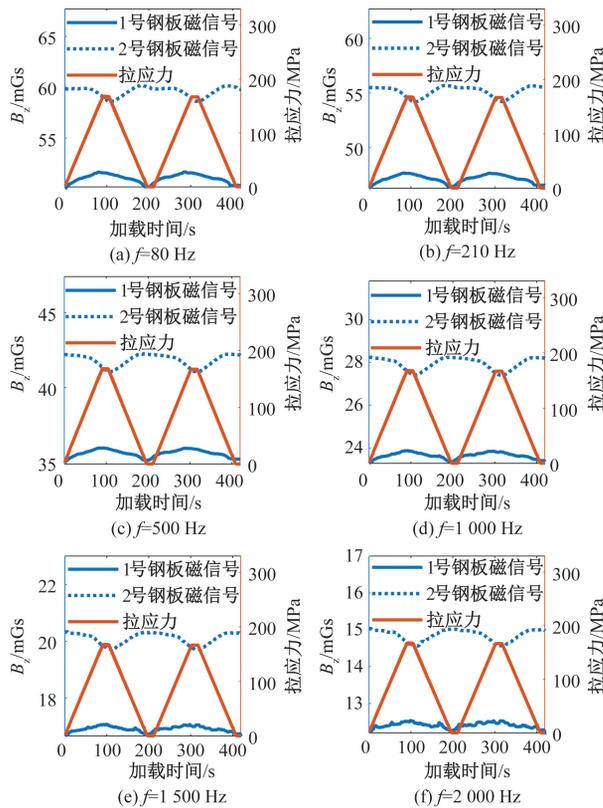


图 11 未消磁、未热处理钢板 B_z 随 σ 的变化曲线

Fig. 11 B_z vs σ curves of steel plates without demagnetization and heat treatment

由图 11 可知,钢板未消磁时,1 号和 2 号钢板在同一应力下所测得的磁场幅值 B_z 之间的差异较大,最大可达 10 mGs ,这可能与不同钢板的表面剩磁差异、残余应力差异等因素有关;由图 12 可知,消磁后的相同尺寸钢板的力磁特性趋于一致,同一应力下其 B_z 之间的最大差异减小至 0.5 mGs ;由图 13 可知,消磁、热处理后的相同尺寸钢板的力磁特性一致性最好,同一应力下其 B_z 之间的差异几乎为 0 mGs 。由此可知,消磁和热处理均可以有效

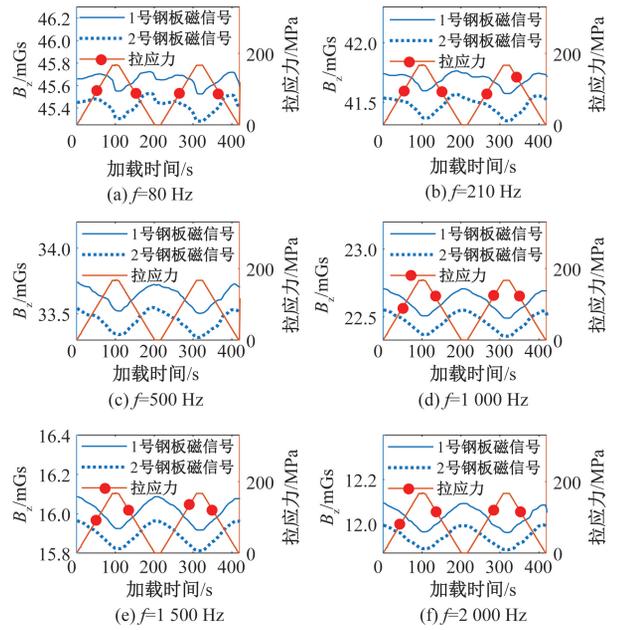


图 12 消磁、未热处理钢板 B_z 随 σ 的变化曲线

Fig. 12 B_z vs σ curves of steel plates with demagnetization but without heat treatment

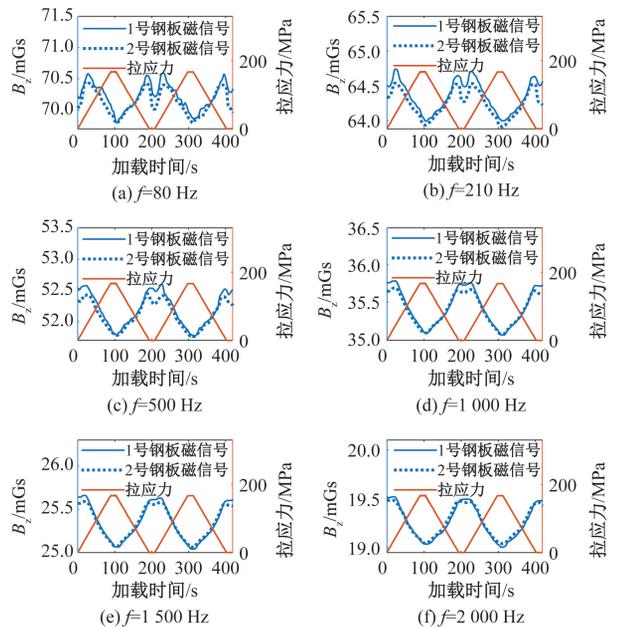


图 13 消磁、热处理钢板 B_z 随 σ 的变化曲线

Fig. 13 B_z vs σ curves of steel plates with demagnetization and heat treatment

改善相同尺寸钢板的力磁关系一致性,其中热处理的效果最为显著,可以有效消除钢板的初始残余应力,确保相同尺寸钢板力磁特性的一致性。

3.3 抗干扰能力

为了研究弱交流磁化条件下磁测应力方案的抗干扰能力,选取经过热处理的钢板开展抗干扰能力实验。对钢板进行 3 个周期的拉伸加载;第 1 个加载周期内,无背景磁场干扰;第 2 个加载周期内,用铁块靠近试件,改变背景磁场;第 3 个加载周期内,将铁块拿走,恢复试件周围的背景磁场。在每个加载周期内,同步采集钢板表面磁信号,实验示意图如图 14 所示。

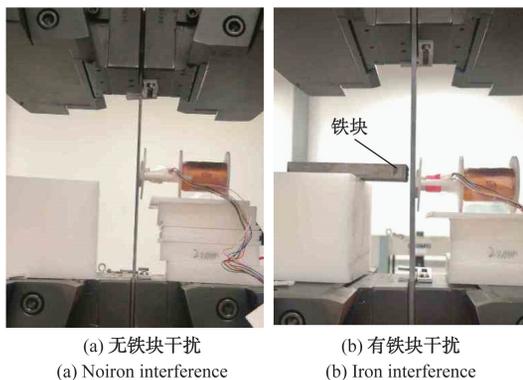


图 14 抗干扰能力测试实验

Fig. 14 Anti-interference ability tests

分别整理采集到的磁场信号的直流分量和交流分量,直流分量结果如图 15 所示,交流分量结果如图 16 所示。由图 15 可知,施加铁块干扰之后,钢板表面接收信号的直流分量均会产生 ± 6 mGs 以内的偏移,且拿走铁块后,直流分量无法恢复到受干扰之前的状态。

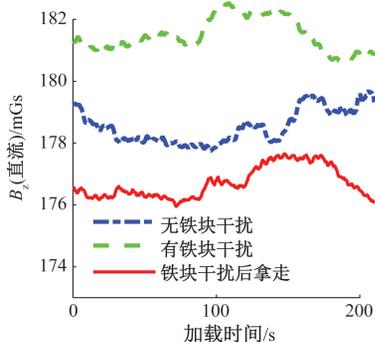


图 15 钢板附近直流磁场分量变化曲线

Fig. 15 Variation curves of DC magnetic field components near steel plate

图 16(a) ~ (f) 分别表示不同频率激励信号作用下钢板表面法向弱交流感应磁场幅值随应力的同步变化曲线。由图 16 可知,铁块受到干扰前后的交流磁信号随应力的变化曲线之间的偏差很小,为 $0.1 \sim 0.5$ mGs,即有无铁块干扰对弱交流感应磁场幅值基本无影响。因此,与直流磁化条件下进行应力磁测相比,弱交流磁化条件下

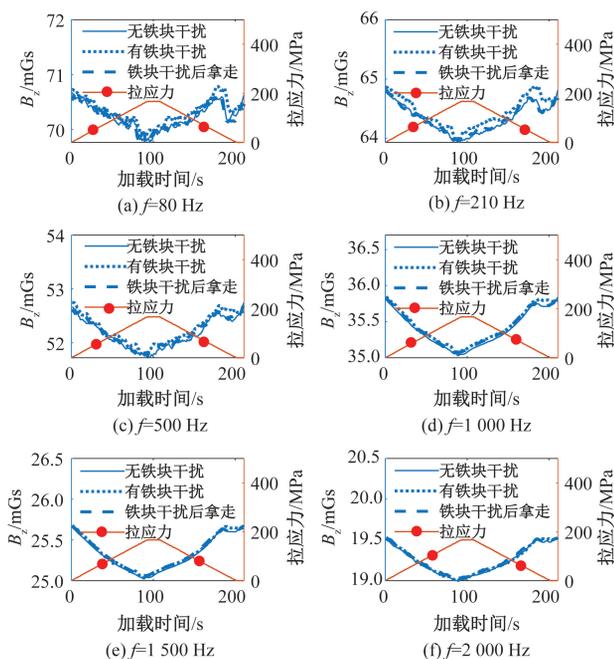


图 16 钢板附近交流磁场分量变化曲线

Fig. 16 Variation curves of AC magnetic field components near steel plate

的应力磁测方案具有能够抵抗背景磁场干扰的优良特性。

3.4 讨论

上述拉伸加载试验是针对不同热磁处理条件、不同厚度、不同激励条件的钢板开展的,目的是分析灵敏度、一致性和抗干扰能力。现有磁测试验都是对一块钢板做各种测试,没有通过不同对比测试去主动发现不同钢板的差异性,在实际检测场合,比如管道,不同部位的交流磁化响应很可能不相同,会影响检测结论。发现不同钢板的磁响应差异后,本文还通过消磁和热处理来减小这种差异,或者分析对差异有什么影响,别的文献并没有做过不同热磁处理条件的力磁关系测试。其他文献没有测试过直流磁化干扰的影响,而本文不但发现了确实存在这种不可忽视的直流干扰,还提出了通过主动弱交流磁化消除了该直流干扰。此外,探头可以封装在一个非金属外壳内,外壳始终和被测试件的表面贴合,当试件变形时,探头的提高值并未发生改变。因此,试件变形不会影响力磁测量结果。

4 结论

本文研究了弱交流磁化条件下基于磁弹效应的铁磁性材料应力检测方法。首先通过理论分析和有限元仿真研究了弱磁化条件下钢板的力磁关系,优化了传感器位

置。其次针对不同热磁处理条件、不同激励条件的钢板开展了钢板拉伸加载实验。结果表明:对于不同热磁处理条件下的钢板,当其所受拉应力为 0~167 MPa 范围内时,钢板表面法向交流感应磁场幅值 B_z 与应力 σ 之间具有近似线性单调的关系;消磁和较高的激励频率 ($f > 1\ 000$ Hz) 均会导致钢板的力磁灵敏度显著降低。最后验证了钢板力磁关系的重复性和实验系统的抗干扰能力,实验结果表明,消磁和热处理可以有效改善相同尺寸钢板的力磁关系的一致性,且该弱交流磁化测应力方案具备良好的抗背景磁场干扰的能力。

参考文献

- [1] 张富臣,李红梅,景宗福,等. 铁磁钢材应力致磁各向异性定量检测特性研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2019,47(5):22-26.
ZHANG F CH, LI H M, JING Z F, et al. Quantitative detection characteristic of stress-induced magnetic anisotropy for ferromagnetic steel [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47 (5) : 22-26.
- [2] WEI Y Y, CHEN D X, ZHOU W H, et al. Design of weak magnetic signal detection system for residual stress detection [C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 632 (4) : 042064.
- [3] 李艳凤. 钢结构材料应力磁电效应实验研究[D]. 沈阳东北大学,2006.
LI Y F. Research on the stress-magneto-electric effects for steel structure material [D]. Shenyang: Northeastern University, 2006.
- [4] 李盼菲. 电阻应变测量中提高精度的方法研究[J]. 计量与测试技术,2019,46(12):62-64.
LI P F. Research on method of improving accuracy in resistance strain measurement technique [J]. Metrology & Testing Technique, 2019, 46 (12) : 62-64.
- [5] 冷建成,苗秀杰,周国强,等. 基于光纤光栅的管道应力监测系统[J]. 化工自动化及仪表,2012,39(11):1504-1506.
LENG J CH, MIAO X J, ZHOU G Q, et al. Pipeline stress monitoring system based on fiber Bragg grating sensors [J]. Control And Instruments in Chemical Industry, 2012, 39 (11) : 1504-1506.
- [6] 淦邦. 某原油管道沿线滑坡区安全监测与预警的应用研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2020.
GAN B. Study on the application of safety monitoring and early warning in the landslide area along the crude oil pipeline [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [7] 林睿,许小蓓. 超声波法金属应力检测技术的研究[J]. 无损探伤,2018,42(4):38-39.
LIN R, XU X B. Research on ultrasonic method of metal stress detection technology [J]. NDT, 2018, 42 (4) : 38-39.
- [8] 曹海龙,王军强,牛关梅,等. 超声波残余应力测试技术在工程实际中的应用[J]. 热加工工艺,2020,49(16):24-27.
CAO H L, WANG J Q, NIU G M, et al. Application of ultrasonic residual stress measurement technology in engineering practice [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (16) : 24-27.
- [9] 李晨,楼瑞祥,王志刚,等. 残余应力测试方法的研究进展[J]. 材料导报,2014,28(S2):153-158.
LI CH, LOU R X, WANG ZH G, et al. Research progress of measuring residual stresses techniques [J]. Material Guide, 2014, 28 (S2) : 153-158.
- [10] 张定铨,何家文. 材料中残余应力的 X 射线衍射分析和作用[M]. 西安:西安交通大学出版社,1999.
ZHANG D Q, HE J W. Residual Stress Analysis by X-ray Diffraction and Its Functions [M]. Xi ' an: Xi ' an Jiaotong University Press, 1999.
- [11] ZHU Y, ZHOU L, YING X Y, et al. Molecular dynamics simulation for single crystal aluminum nano-indentation effect by indenter radius [J]. Applied Mechanics and Materials, 2008, 10 (12) : 401-405.
- [12] 李德刚,梁迎春,白清顺,等. 单晶硅(111)晶面纳米压痕过程分子动力学仿真及实验(英文)[J]. 纳米技术与精密工程,2008(4):242-248.
LI D G, LIANG Y CH, BAI Q SH, et al. Molecular dynamics simulation and experiments of nano-indentation of single crystal silicon (111) plane [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2008 (4) : 242-248.
- [13] ZENG Z M, ZHAO C W, HUANG X J, et al. Non-invasive pressure measurement based on magneto-mechanical effects [J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29 (9) : 095106-8.
- [14] 曾杰伟,苏兰海,徐立坪,等. 逆磁致伸缩效应钢板内应力检测技术研究[J]. 机械工程学报,2014,50(8):17-22.
ZENG J W, SU L H, XU L P, et al. Research on the stress measurement of steel plate based on inverse magnetostrictive effect [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50 (8) : 17-22.
- [15] 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.

- [16] LENG J C, XING H Y, ZHOU G Q, et al. Dipole modelling of metal magnetic memory for V-notched plates[J]. *Insight*, 2013, 55(9): 498-503.
- [17] 王庆国, 杨理践, 刘斌. 基于磁记忆的油气管道应力损伤检测方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(2): 13-20.
- WANG G Q, YANG L J, LIU B. Study on the testing method of oil-gas pipeline stress damage based on magnetic emory [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(2): 13-20.
- [18] 祁欣, 陈娟, 刘殿魁. 局部磁化法对焊接结构件残余应力的磁弹噪讯测试[J]. *焊接学报*, 2000(3): 1-5.
- QI X, CHEN J, LIU D K. Magneto-elastic noise test of residual stress of welded structural parts by local magnetization method [J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2000(3): 1-5.
- [19] 吴杰. 巴克豪森应力检测的提高消除及软硬件实现研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- WU J. Realization of system of barkhausen stress testing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [20] SABLİK M J, JILES D C. Coupled magnetoelastic theory of magnetic and magnetostrictive hysteresis [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1993, 29(4): 2113-2123.
- [21] ATHERTON D L, RAO T S, SCHOBACHLER M. Magnetization changes induced by stress under constant applied field in 2% Mn pipeline steel [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1988, 24(3): 2029-2032.
- [22] 郭贻诚. 铁磁学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2014: 1-45.
- GUO Y CH. *Ferromagnetism* [M]. Beijing: Peking University Press, 2014: 1-45.

作者简介



周明, 分别在 1992 年、2007 年、2015 年于中国石油大学(华东)、中国石油大学(北京)、天津大学获得工学学士、工程硕士和工学博士学位, 现为国家石油天然气管网集团东部原油储运有限公司仪表技术专家、高级工程师, 研究方向为输油管道检测仪表和自动控制、管道运行安全监测和故障诊断、管道模拟仿真与运行优化。

E-mail: zmxhy1997@126.com

Zhou Ming received her B. Sc., M. Sc., and Ph. D. degrees from China University of Petroleum (East China), China University of Petroleum (Beijing), and Tianjin University in 1992, 2007, and 2015, respectively. Now she is an instrument expert in automation and a senior engineer at National Pipeline Network Group Eastern Crude Oil Storage and Transportation Co., Ltd. Her main research interests include detection instrument and automation of oil pipelines, security monitoring and fault diagnosis of pipeline operation, pipeline simulation and operation optimization.



黄新敬(通信作者), 分别在 2010 年和 2016 年于天津大学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、硕士生导师, 研究方向为管道缺陷检测、管道安全预警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. Now he is an associate professor and M.Sc. supervisor at the School of Precision Instruments and Opto-electronic Engineering, Tianjin University. His main research interests include pipeline defect detection, pipeline safety warning and new type pipeline detector.