



# 外加磁场对 Q235 钢力磁效应影响试验研究

樊清泉, 任尚坤, 任仙芝, 许洋, 段振霞

(南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 江西 南昌 330063)

**摘要:** 为研究外加磁场对铁磁材料力磁效应的影响, 制作通不同大小直流电的螺旋管作为外加磁场, 对带有圆孔缺陷的 Q235 钢试件进行干扰的静载拉伸试验。结果表明: 在地磁场环境中, 经去应力退火的试件在没有施加载荷时, 初始磁感应强度值趋近于 0, 磁记忆信号曲线近似水平直线; 在施加载荷时, 法向磁信号和切向磁信号曲线均发生波动, 产生非线性变化; 在一定外加磁场范围内, 在外加磁场方向和地磁场方向存在差异时, 外加磁场与磁记忆信号具有不同的相关性, 同向外加磁场越大时, 应力集中区磁记忆信号愈加明显; 外加磁场的大小不改变其法向和切向磁记忆信号曲线变化规律, 但影响其磁感应强度  $B$  值和斜率  $K$  值的大小, 并且在弹性阶段和塑性阶段法向和切向磁记忆信号的影响也存在差异性。

**关键词:** 金属磁记忆; 外加磁场; 静载拉伸; 力磁效应

**中图分类号:** TG115.28

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-5124(2019)06-0046-08

## Experimental study on the influence of external magnetic field on magneto-mechanical effect for Q235 steel

FAN Qingquan, REN Shangkun, REN Xianzhi, XU Yang, DUAN Zhenxia

(Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** In order to study the effect of external magnetic field on the magneto-mechanical effect of ferromagnetic materials, the spiral tube with different sizes of direct current is used to apply the magnetic field for the test, which is the static tensile test of the Q235 steel specimen with circle hole defect. The result shows that in the geomagnetic environment, the initial magnetic induction value of specimens by stress relief annealing is similar to 0 without the external stress, and the magnetic memory signal curve approximate a horizontal line. Both the normal magnetic signal curve and the tangential magnetic signal curve produce fluctuation and nonlinear under the stress; within a certain external magnetic field. The different directions between the external magnetic field and the geomagnetic field makes the external magnetic field have different correlation with the magnetic memory signal, the larger the external magnetic field, the more obvious the magnetic memory signal in the area of stress concentration; the size of the external magnetic field don't change the variation low of the magnetic memory signal curve, but affect the size of the magnetic induction  $B$  and the slope  $K$ , and have different effects on the magnetic memory signals in the elastic stage and plastic stage.

收稿日期: 2018-07-20; 收到修改稿日期: 2018-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(51261023)

作者简介: 樊清泉(1991-), 男, 河南平顶山市人, 硕士研究生, 专业方向为金属磁记忆的研究。

**Keywords:** metal magnetic memory; external magnetic field; static tension; magneto-mechanical effect

## 0 引言

金属磁记忆检测技术作为无损检测方面的新型检测技术<sup>[1]</sup>, 相比于传统漏磁检测主要运用在压力容器、铁路轨道、飞机起落架等化工和交通方面<sup>[2-7]</sup>, 金属磁记忆检测技术目前能广泛应用于对铁磁性材料进行快速、早期的检测, 具有其他检测所不具有的优势<sup>[8-10]</sup>。该项技术由俄罗斯科学家 DUBOV 教授<sup>[11]</sup>于 1994 年首次提出这个概念, 其原理实质上是磁弹性和磁机械效应共同作用的结果<sup>[12]</sup>, 磁记忆检测技术就是利用了铁磁构件在地磁场环境中, 受到工作载荷的作用, 残余磁性发生改变和重新分布, 并在应力消失后得到了保留, 从而能成为铁磁构件无损评价的早期诊断方法。目前多以研究应力和磁信号之间的对应关系<sup>[13-15]</sup>, 通过磁信号的变化来对试件早期损伤进行预判, 但是相比其他传统无损检测技术需要外加激励磁场<sup>[16]</sup>, 金属磁记忆是不需要外加激励磁场的, 因此外磁场强度对磁记忆信号的影响至关重要<sup>[17]</sup>, 在不同的环境磁场中测得的磁信号具有显著差异<sup>[18-19]</sup>。以上多数只是单一的改变外部磁场环境, 对其法向磁记忆信号变化规律进行分析, 对其微观作用机制, 以及切向磁记忆信号变化规律却很少提及。

为充分了解外加磁场对铁磁材料力磁效应变化规律的影响, 本文将采用静载拉伸试验, 结合理论知识, 对法向和切向磁场信号曲线变化规律及力磁效应的微观机制进行分析, 并且结合数学理论分析, 充分验证应力与磁记忆信号之间的相关性, 分析对比弹性阶段和塑性阶段外加磁场对力磁效应的影响, 为通过运用磁记忆检测技术更好地进行早期诊断提供依据。

## 1 试验方案

### 1.1 实验设备

本文采用直流稳压电源进行单路输出, 外加磁场设备采用自制螺线管, 直径 50 mm, 漆包线直径 0.67 mm, 螺线管长 180 mm, 有效长度范围 40~160 mm, 漆包线匝数 400 匝, 共两层。磁记忆信号采集将采用由美国 Lake Shore 公司设计生产的 421 Gaussmeter 弱磁场测量仪, 测量范围为 10~30 T; 测量误差为  $\pm 0.2\%$ 。

### 1.2 试验方法

本实验材料选用 Q235 碳素钢, 为确保试验结果的可靠性, 对每种试块均预备加工试块 2 块进行试验, 总计预备 12 块圆孔缺陷试件, 编号 1~12。实验前, 对试件进行去应力退火试验, 消除试件的内应力, 然后用砂纸对试件表面进行打磨处理。试件尺寸如图 1 所示, 试件厚度为 3 mm。

实验前对编号为 12 的试件利用 INSTRON (8801) 电液伺服疲劳试验机进行静载拉伸试验, 测量其屈服强度 287 MPa。数据采集时为减小地磁场的影响, 试件东西方向放置, 分别在距离圆孔中心 2 mm 和 6 mm 处设立路径 1 和路径 2, 路径采集个数均为 15 个点, 从左到右依次记为采样点 1, 2, 3, ..., 14, 15, 每两个点间隔 8 mm, 其中第 8 个点位于路径中心处。将试件放在拉伸机上的螺线管内, 并依次通上 -30 mA、0 mA (地磁场环境)、60 mA、150 mA 和 300 mA 直流电产生外加磁场 -80 A/m、地磁场、160 A/m、400 A/m 和 800 A/m, 正、负分别表示磁场方向向下和向上。试验时将试件施加到固定载荷取下, 进行离线测量, 拉伸速率为 1 mm/min, 重复操作, 直到试件断裂, 并对断裂后试件进行再

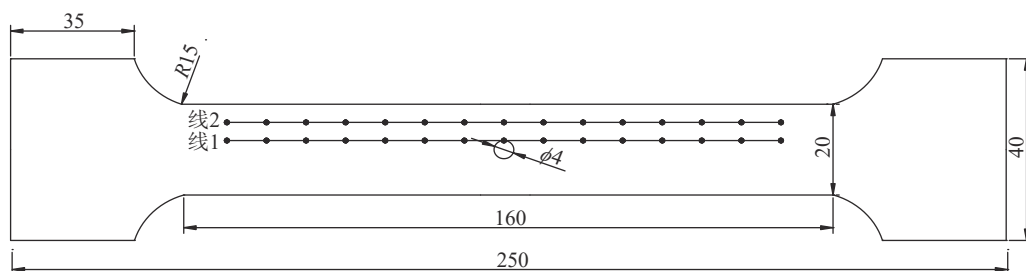


图 1 试件尺寸图 (单位: mm)

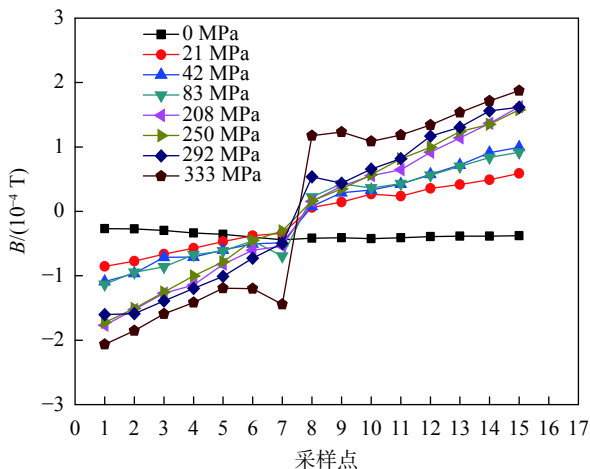
次测量。

## 2 实验结果及分析

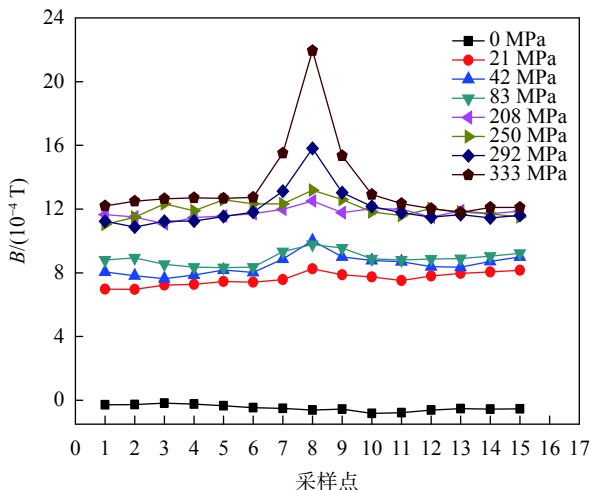
### 2.1 地磁场环境下的力磁效应分析

对试件 1 在地磁场下进行拉伸试验, 测量采样点的数据进行绘图分析, 图 2(a)、图 2(b) 分别为地磁场下测得的法向磁记忆信号和切向磁记忆信号强度曲线。

如图 2(a) 所示, 当拉应力  $\sigma$  为 0 时, 法向磁记忆信号基本保持在水平线上, 维持在  $B = 0 \text{ T}$  附近。随着拉应力  $\sigma$  的增加, 法向磁记忆信号曲线在采样点 1~5 和 11~15 区域呈斜直线, 采样点 6~10 区域呈 S 形, 呈逆时针方向转动, 且  $\Delta B = B_8 - B_7$  总体呈现增加趋势, 圆孔附近斜率  $K = \Delta B$  随之不断增加。如图 2(b) 所示, 在无应力时, 切向磁记忆信号趋向于一条直线, 维持在  $B = 0 \text{ T}$  附近。当应力  $\sigma$  逐渐增加时, 切向磁记忆信号曲线在采样点 1~5 和



(a) 法向磁感应强度



(b) 切向磁感应强度

图 2 地磁场环境下磁感应强度曲线分布

11~15 区域呈水平直线, 采样点 6~10 区域切向磁记忆信号曲线出现峰值, 呈三角形, 随着应力的增加, 以采样点 6~10 的采集数值构成的三角形面积随之增大。

弹性阶段, 法向和切向磁记忆信号变化曲线非线性都不是很明显, S 形和三角形变化不大; 塑性阶段, 在应力的作用下影响较大, 非线性较为明显, S 形和三角形变化较大。

分析其出现弹性和塑性阶段曲线分布差异的原因, 可能与材料初期的退火处理及后期应力磁化有关。铁磁材料经热处理可基本消除材料残余应力, 此时材料内的磁畴组织大体呈现出无序排布的状态, 各磁畴的磁矩相互抵消, 整个物体总磁矩为零即基本不呈现磁性, 表现为无应力时磁感应强度  $B \approx 0 \text{ T}$ 。弹性变形阶段, 在施加拉应力后, 材料内的磁畴组织由无序排布的状态向有序状态分布, 磁畴组织的转动使内部磁畴取向趋向一致, 显示一定的磁性, 虽然将试件卸载后, 应力恢复, 但是磁畴组织的转动所产生的磁性还是被部分保留下来, 表现为使其材料表面的磁场发生了改变<sup>[20]</sup>, 测得的磁感应强度数值曲线上移, 数值变大, 沿检测方向呈现为非线性变化; 在塑性变形阶段, 材料进行加载并卸载, 加载时的应力或者卸载后的残余应力导致材料发生应力磁化。根据 Ludwik 定理<sup>[21]</sup> 的定义, 在塑性阶段施加拉应力后:

$$\sigma_F = \sigma_f - \sigma_y = G \varepsilon_p^n \quad (1)$$

式中:  $G$ 、 $n$ ——常数, 与材料性质和形状有关;

$\varepsilon_p$ ——塑性形变量, %;

$\sigma_f$ ——加载应力, MPa;

$\sigma_y$ ——材料屈服应力, MPa;

$\sigma_F$ ——应变硬化应力, MPa。

塑性变形使材料内位错密度增大, 导致材料钉扎点增多。晶格滑移形变, 进一步影响和改变了材料内磁畴的形状和尺寸大小, 导致其微观磁畴结构发生可逆和不可逆运动, 从而影响磁记忆信号。

### 2.2 外加磁场环境下的力磁效应分析

取其余试件编号为 3、5、7、9 依次置于通有直流电的螺线管内, 进行静载拉伸, 测得磁感应强度曲线分布如图 3~图 6 所示。

如图 3(a)、图 4(a)、图 5(a)、图 6(a) 所示, 从  $-80 \text{ A/m}$  到  $800 \text{ A/m}$  在施加应力前, 法向磁记忆信

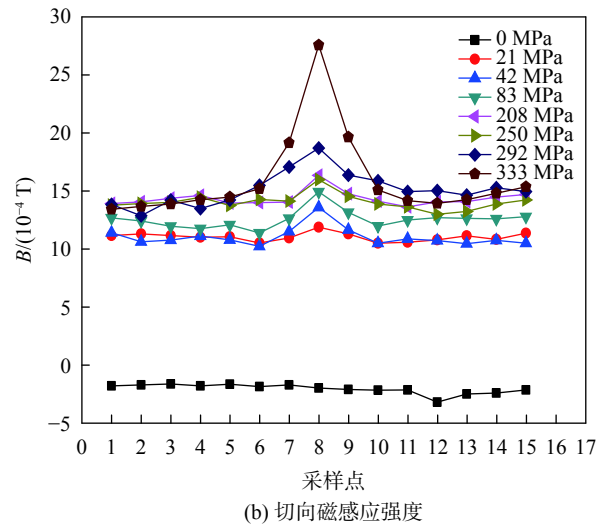
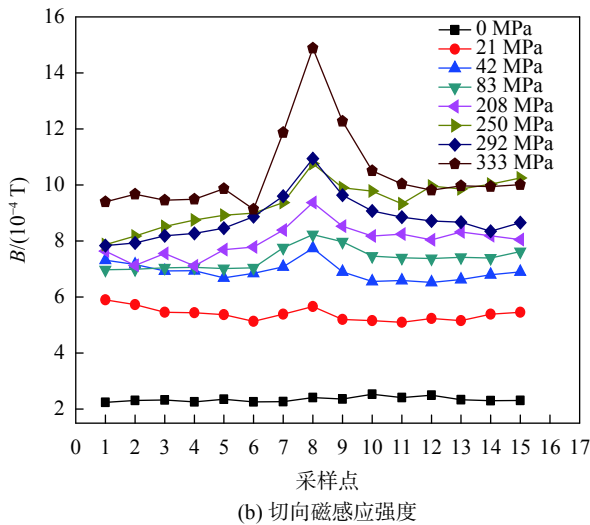
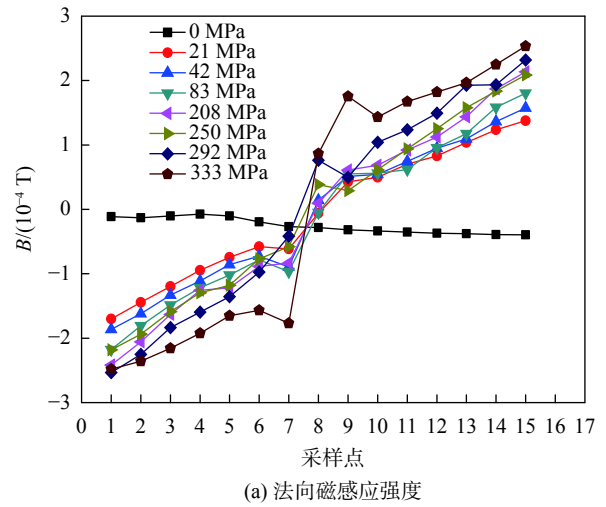
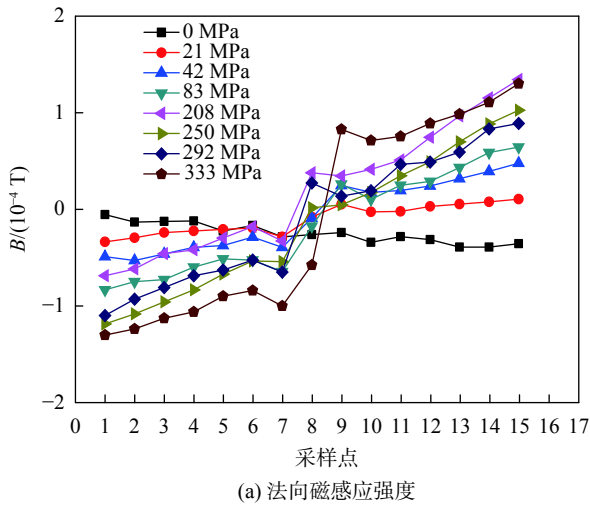


图 3 外磁场强度为-80 A/m 时的磁感应强度曲线

图 4 外磁场强度为 160 A/m 时的磁感应强度曲线

号分布曲线均呈现一条水平直线, 无明显非线性变化。随着应力载荷的增加, 法向磁记忆信号逆时针方向转动。弹性阶段,  $\Delta B$  变化幅度较小, 即法向磁记忆曲线的非线性特征变化不大; 在塑性阶段,  $\Delta B$  变化幅度较大, 即磁记忆曲线的非线性特征变化明显, 呈现跳跃式变化; 在采样点 7 和 8 之间的位置, 均出现  $B = 0 \text{ T}$  即过零点现象。由图 3(b)、图 4(b)、图 5(b)、图 6(b) 所示, 在 -80 A/m 到 800 A/m 在施加应力前, 切向磁记忆信号分布曲线呈现一条水平直线, 弹性阶段随着应力的增加, 测得磁感应强度  $B$  相较无应力时均增加, 在中间应力集中部分出现较小的非线性变化, 即出现方向朝上的峰值, 且峰值大小随应力增加而逐渐增大。塑性阶段, 随着应力增大, 峰值区域的三角形面积变大。

### 2.3 断裂时磁场强度变化分析

从图 7(a) 可以看出, 在试件断裂后, 法向磁记

忆信号均发生偏转, 呈现倒 S 形。在外加磁场不断增大的前提下, 磁感应强度值最高点和最低点的  $|B|$  增大。图 7(b) 显示试件断裂后, 切向磁感应强度出现的三角形方向发生转变, 且随着外加磁场强度的增加, 倒三角形面积越大。将在同向和反向磁场测的法向和切向磁记忆信号分析可知, 在外加磁场为 -80 A/m 时, 磁感应强度曲线几乎呈现水平状态, 相比于其他外加磁场强度  $B \geq 0 \text{ A/m}$  的变化幅度,  $|B|$  反而变化很小, 本应该在此增大的  $|B|$ , 反而比地磁场下的变化更小, 线性较平缓, 应力集中区也没有出现很大的非线性变化。因此在外加磁场强度不断增大的情况下, 方向和地磁场同向时, 施加磁场与地磁场进行叠加, 让非线性更加明显, 磁信号更强, 便于识别应力集中; 相反的, 方向不一致时, 施加磁场与地磁场进行相互抵消一部分, 磁信号稍弱。这对于不需要外加激励磁场, 单单依靠地磁场进行检

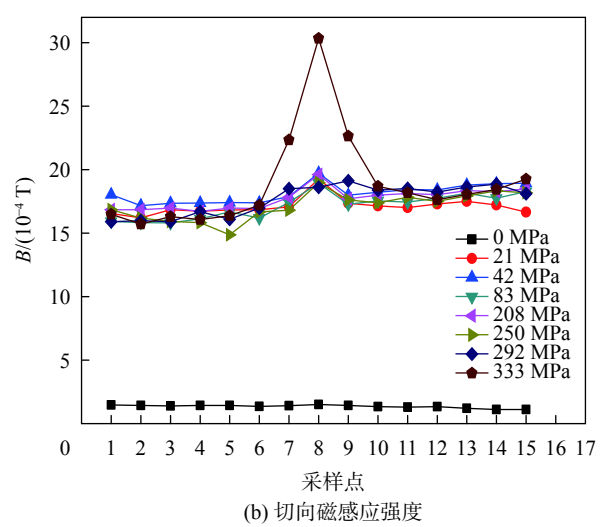
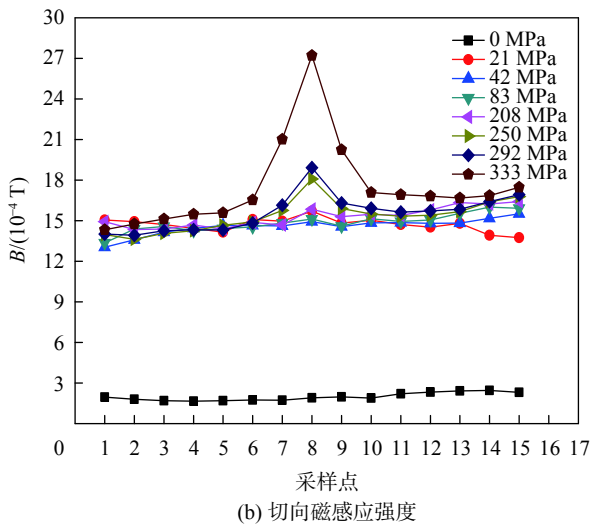
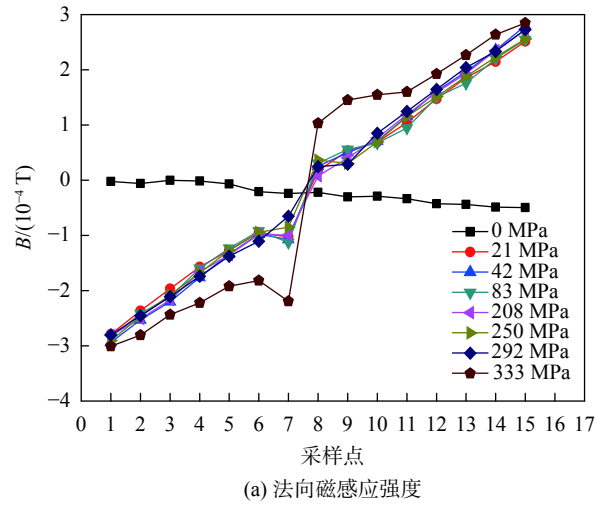
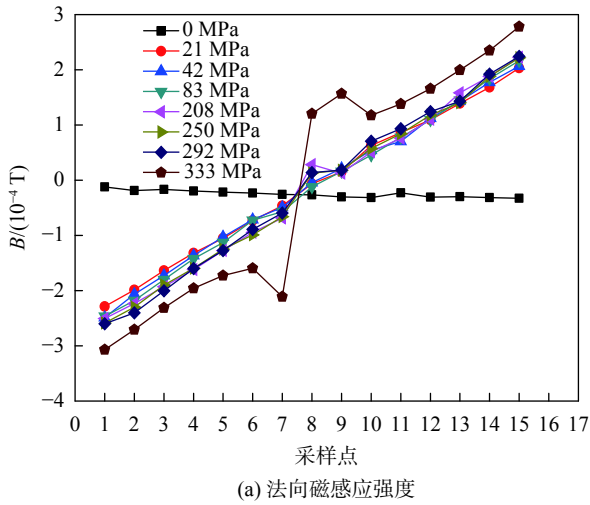


图5 外磁场强度为 400 A/m 时的磁感应强度曲线

图6 外磁场强度为 800 A/m 时的磁感应强度曲线

测的金属磁记忆具有重要的指导意义。

## 2.4 数据分析

由于各磁场环境下,一定拉伸应力阶段下的的法向和切向磁记忆信号变化规律趋向一致,因此以下试验将以弹性阶段拉应力 $\sigma$ 为 83 MPa 和塑性阶段拉应力 $\sigma$ 为 333 MPa 统计的数据为例,并且采用均值和标准差进行数值计算分析。

通过图 8(a)和图 9(a),图 8(b)和图 9(b)对比发现,在拉应力 $\sigma$ 为 333 MPa 的作用下的磁信号,均呈现和 $\sigma$ 为 83 MPa 一样的变化规律,但是数值变化幅度较大。以图 9 为例,在图 9(a)中,进入塑性阶段,在外磁场强度增加的情况下,法向磁记忆信号且呈逆时针方向旋转。图 9(b)中切向磁记忆信号数值随应力增加,且圆孔附近采样点 6、7、8、9 测得磁感应强度构成的三角形面积增加较大,但是峰值出现的位置几乎不发生改变。始终显示出和图 8

一样的规律,说明外加磁场在塑性阶段只对其磁记忆信号大小产生影响,特别是在外加磁场增加到 400 A/m、800 A/m 时,变化比较明显。

设定 $n$ 为高斯计对 $\sigma$ 下采集的数据样本数,这里取 $n=15$ , $\overline{\Delta B^\sigma}$ 计为 $\sigma$ 误差均值, $\Delta B(\sigma,k)$ 为 $\sigma$ 下第 $k$ 个采样点的磁感应强度, $\sigma$ 取值 83 MPa、333 MPa 以及 $k$ 取磁场分别为-80 A/m、地磁场、160 A/m、400 A/m 和 800 A/m, $j=1,2,3,\dots,14,15$ 。

设 $B_j(\sigma,0)$ 为地磁场下在 $\sigma$ 时采样点 $j$ 的磁感应强度, $B_j(\sigma,k)$ 为不同外加磁场下在 $\sigma$ 时采样点 $j$ 的磁感应强度测量值, $\Delta B_j(\sigma,k)=B_j(\sigma,k)-B_j(\sigma,0)$ 则表示在外磁场环境为 $k$ 时,高斯计所测得的磁感应强度与地磁场下所测得的磁感应强度的误差值。

基于以上定义,对 $\sigma$ 下的误差均值和误差标准差有以下统计量:

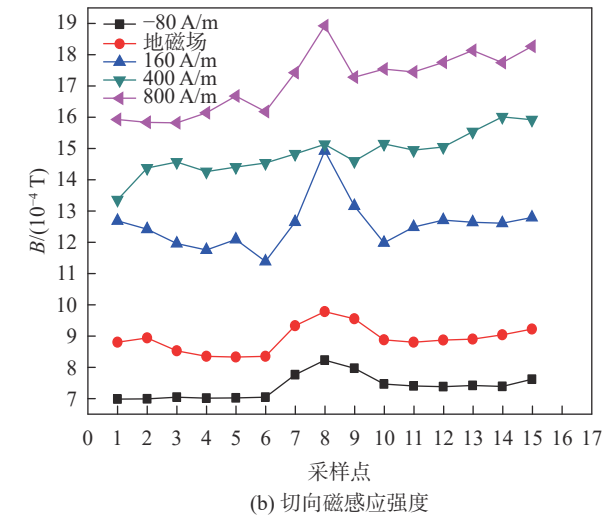
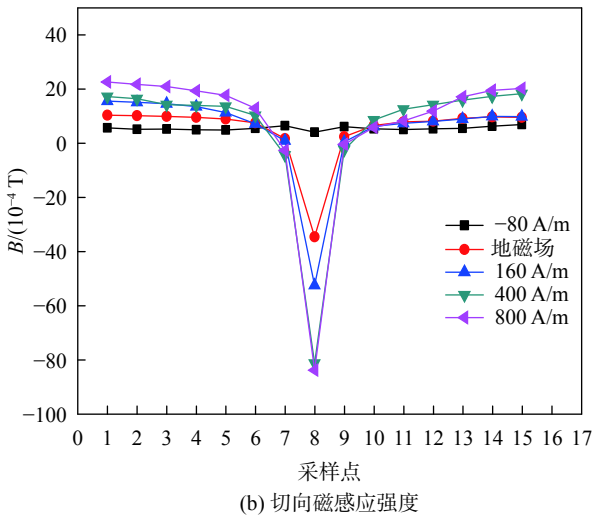
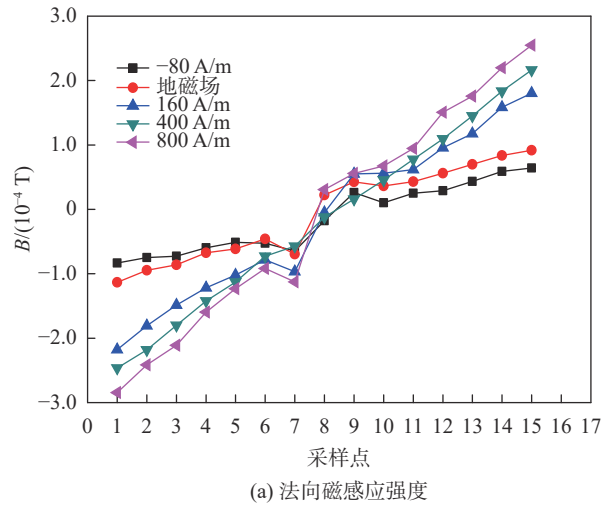
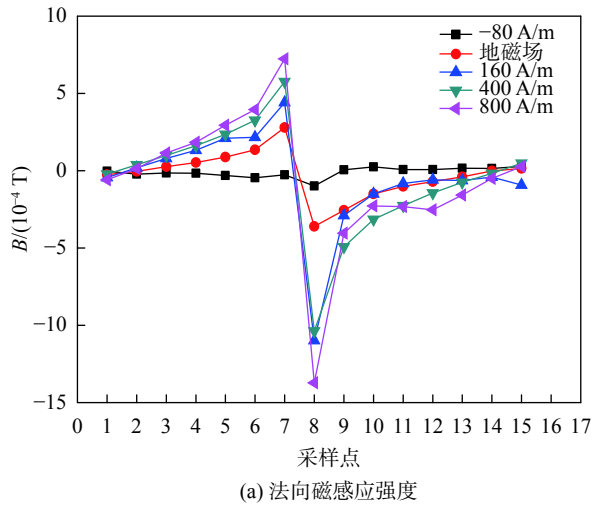


图 7 断裂时磁感应强度曲线分布

图 8 拉应力为 83 MPa 时磁感应强度分布

$$\overline{\Delta B^\sigma} = \frac{1}{n} \sum_j \Delta B_j(\sigma, k) \quad (2)$$

$$D(\Delta B^\sigma) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_j (\Delta B(\sigma, k) - \overline{\Delta B^\sigma})^2} \quad (3)$$

式(2)表示 $\sigma$ 误差均值;式(3)表示 $\sigma$ 误差标准差。

由表 1 数据可以看出,在 $\sigma = 83 \text{ MPa}$ 和 $\sigma = 333 \text{ MPa}$ 时,外加磁场对其法向磁感应强度均值影响不大,基本上在 0 附近震荡;表 2 可以得出外加磁场方向和地磁场方向同向时, $\sigma = 83 \text{ MPa}$  时的标准差均大于 $\sigma = 333 \text{ MPa}$  的标准差,说明弹性阶段外加磁场对法向磁感应强度值的影响要大一些;反向时,则相反。

由表 3 数据可以看出,在 $\sigma = 83 \text{ MPa}$ 和 $\sigma = 333 \text{ MPa}$ 时,外加磁场对其切向磁感应强度平均值

表 1 各外加磁场下 $\sigma$ 的法向磁感应强度误差均值

	$10^{-4} \text{ T}$				
$\sigma/\text{MPa}$	-80 A/m	地磁场	160 A/m	400 A/m	800 A/m
83	-0.140 17	0	-0.144 30	-0.159 24	-0.110 10
333	-0.121 46	0	0.00220	-0.115 40	-0.097 40

表 2 各外加磁场下 $\sigma$ 的法向磁感应强度误差标准差

	$10^{-4} \text{ T}$				
$\sigma/\text{MPa}$	-80 A/m	地磁场	160 A/m	400 A/m	800 A/m
83	0.446 12	0	1.170 07	1.347 07	1.620 55
333	0.644 65	0	0.471 58	0.575 21	0.714 54

均产生影响,同向磁场下,随外加磁场增大而影响越大;表 4 可以得出, $\sigma = 83 \text{ MPa}$  时的标准差均小于 $\sigma = 333 \text{ MPa}$  的标准差,说明相同外加磁场环境下,塑性阶段较弹性阶段影响较大。且在一定应力不同

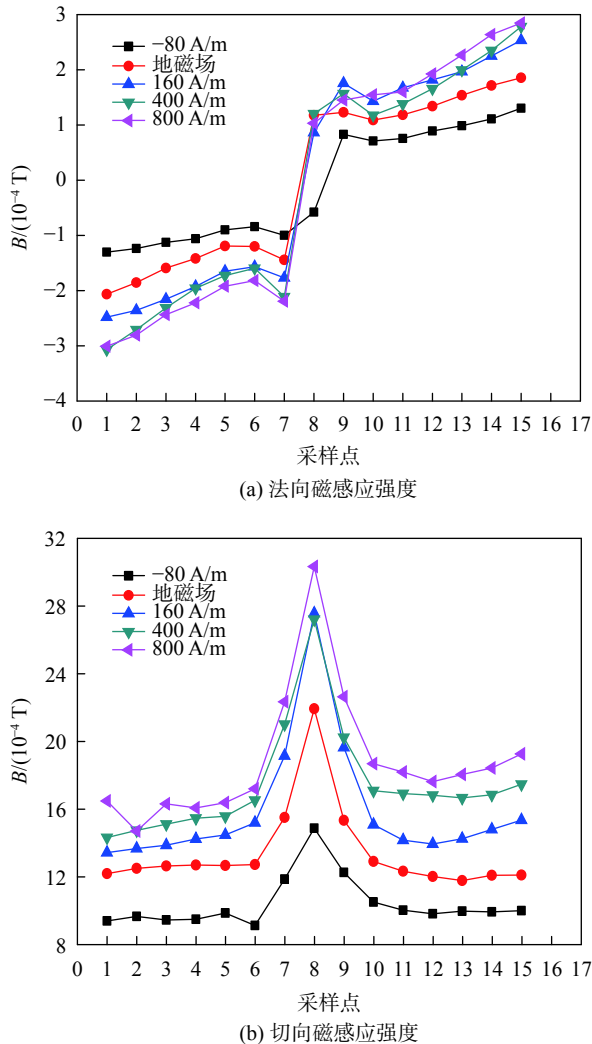


图9 拉应力为333 MPa时磁感应强度曲线分布

表3 各外加磁场下 $\sigma$ 的切向磁感应强度误差均值

$\sigma$ /MPa	$10^{-4}$ T				
	-80 A/m	地磁场	160 A/m	400 A/m	800 A/m
83	6.346 20	0	11.659 50	13.955 50	16.251 50
333	-3.014 00	0	2.492 00	4.036 00	5.414 67

表4 各外加磁场下 $\sigma$ 的切向磁感应强度误差标准差

$\sigma$ /MPa	$10^{-4}$ T				
	-80 A/m	地磁场	160 A/m	400 A/m	800 A/m
83	0.700 50	0	0.741 32	0.638 91	0.925 10
333	1.205 83	0	1.218 67	1.170 41	1.674 08

外加磁场条件下,外加磁场对切向磁感应强度的影响随自身强度的增加影响越大。

### 3 结束语

以各个固定磁场环境下的法向和切向磁记忆信

号变化特征为切入点,研究在不同磁场环境中的力磁耦合关系,并对试件在不同磁场环境中断裂时的磁记忆信号进行了分析,结合数学理论研究可得如下结论:

1)在地磁场环境中,无外加载荷时,初始磁感应强度近似 $B \approx 0$  T,磁记忆信号曲线近似水平直线;在施加外加载荷时,法向和切向磁信号曲线均发生波动,产生非线性变化,弹性阶段变化较小,塑性阶段波动较大。

2)试件断裂处,法向磁感应强度曲线应力集中处呈倒S形,切向磁感应强度曲线呈现倒三角形;在一定外加磁场范围内,对于外加磁场方向与地磁场方向一致时,外加磁场与磁记忆信号呈正相关关系;对于外加磁场方向与地磁场方向相反时,外加磁场与磁记忆信号呈负相关关系。

3)外加磁场越大时,应力集中区力磁效应越明显。外加磁场不改变其法向和切向磁记忆信号曲线变化规律,但影响其 $B$ 和斜率 $K$ 值的大小。

4)外加磁场影响下,其在塑性阶段对法向磁感应强度的影响要比在弹性阶段的大;其在弹性阶段对切向磁感应强度的影响要比在塑性阶段的大。

### 参考文献

- [1] 乔天骄,黄松岭,赵伟,等.磁记忆检测技术研究现状及展望[J].无损检测,2016,38(11):16-20.
- [2] ROSKOSZ M, BIENIEK M. Evaluation of residual stress in ferromagnetic steels based on residual magnetic field measurements[J]. NDT & E International, 2012, 45(1): 55-62.
- [3] ROSKOSZ M. Metal magnetic memory testing of welded joints of ferritic and austenitic steels[J]. NDT & E International, 2011, 44(3): 305-310.
- [4] JILES D C. Review of magnetic methods for nondestructive evaluation[J]. NDT International, 1988, 21(5): 311-319.
- [5] BUBENIK T A, NESTLROTH J B, EIBER R J, et al. Magnetic flux leakage (MFL) technology for natural gas pipeline inspection[J]. NDT & E International, 1992, 30(1): 36-36.
- [6] LI X B, LI X, CHEN L, et al. Numerical simulation and experiments of magnetic flux leakage inspection in pipeline steel[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2009, 23(1): 109-113.
- [7] ZHANG H, LIAO L, ZHAO R, et al. The non-destructive test of steel corrosion in reinforced concrete bridges using a micro-magnetic sensor[J]. Sensors, 2016, 16(9): 1439.
- [8] 尹大伟,董世运,徐滨士,等.金属磁记忆无损检测方法研究进展[J].无损探伤,2005,29(2):1-5.
- [9] XU C, CHENG L, XIE J, et al. Application of metal magnetic

- memory technology on defects detection of jack-up platform[C]//Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Incorporating the European-American Workshop on Reliability of NDE. AIP Publishing LLC, 2016,1706(1): 555-559.
- [10] DUBOV A A. Detection of metallurgical and production defects in engineering components using metal magnetic memory[J]. *Metallurgist*, 2015, 59(1-2): 164-167.
- [11] DUBOV A A. Diagnostics of boiler tubes with usage of metal magnetic memory[M]. Moscow: Ergoatomizdat, 1995, 112.
- [12] 任吉林, 唐继红, 邬冠华, 等. 金属的磁记忆检测技术 [J]. *无损检测*, 2001, 23(4): 154-156.
- [13] 冷建成, 徐敏强, 李建伟, 等. 磁记忆信号与应力之间的关系 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(2): 232-235.
- [14] 邸新杰, 李午申, 白世武, 等. 金属磁记忆信号关联维数与应力关系 [J]. *北京科技大学学报*, 2007, 29(11): 1101-1104.
- [15] 王文科, 何林发. Q345E 钢板应力集中的金属磁记忆检测 [J]. *科技展望*, 2016, 26(28): 134-135.
- [16] 卢杉. 无损检测技术及其进展 [J]. *焦作大学学报*, 2004, 18(1): 73-74.
- [17] HUANG H, YANG C, QIAN Z, et al. Magnetic memory signals variation induced by applied magnetic field and static tensile stress in ferromagnetic steel[J]. *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, 2016, 416(10): 213-219.
- [18] 祖瑞丽, 任尚坤, 段振霞, 等. 磁场对铁磁试件力磁耦合关系的影响研究 [J]. *中国测试*, 2017, 43(10): 127-133.
- [19] 曾寿金, 江吉彬, 陈丙三, 等. 环境磁场对磁记忆检测信号的影响 [J]. *南昌工程学院学报*, 2011, 30(3): 43-46.
- [20] YANG E, LI L M, CHEN X. Magnetic field aberration induced by cycle stress[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, 312(1): 72-77.
- [21] SABLİK M J, YONAMINE T, LANDGRAF F J G. Modeling plastic deformation effects in steel on hysteresis loops with the same maximum flux density [J]. *Magnetics IEEE Transactions on*, 2004, 40(5): 3219-3226.

(编辑:刘杨)

(上接第 45 页)

#### 4 结束语

本文针对传统的光学稳定平台测量方法无法应用于微小型稳定平台性能指标测量的问题, 提出了基于无磁转台的测量方法。本文主要针对微小型稳定平台角度测量误差、角度指向误差、角度稳定误差 3 个性能指标进行测量。采用了无磁转台作为测量仪器, 提供高精度的角度基准, 对微小型稳定平台性能指标进行测量。通过该方法对微小型稳定平台样机进行测量, 得到该样机角度测量误差为  $0.6^\circ$ , 角度指向误差为  $0.73^\circ$ , 角度稳定误差为  $0.1^\circ$ 。通过本实验验证了该测量方法的可行性, 且本方法在工程实践中具有广泛的应用前景。

#### 参考文献

- [1] 许江宁, 朱涛, 卞鸿巍. 航空摄影陀螺稳定平台 [J]. *仪器仪表学报*, 2007(5): 551-557.
- [2] 惯性技术测试设备主要性能测试方法: GJB 1801-1993[S]. 1993.
- [3] NIU X J, LI Y, ZHANG H P, et al. Fast thermal calibration of low-grade inertial sensors and inertial measurement units[J]. *Sensors*, 2013, 13(9): 12192-12217.
- [4] 赵代弟. MARG 姿态测量系统抗干扰算法研究 [D]. 太原: 中北大学, 2015.
- [5] 施嵘嵘. 车载设备视轴稳定与跟踪技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [6] 赵灵. 基于 MEMS 陀螺仪的稳定平台关键技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [7] HIKERT J M. Inertially stabilized platform technology concepts and principles[J]. *Control Systems, IEEE*, 2008, 28(1): 26-46.
- [8] MASTEN M K. Inertially stabilized platforms for optical imaging systems[J]. *Control Systems, IEEE*, 2008, 28(1): 47-64.
- [9] 李锡广. 基于 MEMS 惯性器件的两轴稳定平台研究 [D]. 太原: 中北大学, 2014.
- [10] 田晓春, 李杰, 范玉宝, 等. 基于 FPGA 的 MEMS 陀螺仪 SAR150 实时数据采集系统设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2012, 20(11): 3107-3112.
- [11] 陈国华, 王刚. 基于 ADIS16255 MEMS 芯片陀螺仪的应用研究 [J]. *中国惯性技术学报*, 2008, 16(4): 480-483.
- [12] 高云红, 姜森, 赵丁, 等. 基于虚拟仪器的 MEMS 陀螺仪静态性能测试系统设计 [J]. *自动化应用*, 2013(11): 14-16.

(编辑:商丹丹)