

DOI: 10.3901/JME.2013.02.008

地磁场中应力对磁畴组织结构影响的试验研究*

任文坚¹ 孙金立² 陈曦¹ 王振¹ 任吉林¹

(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063;

2. 海军航空工程学院青岛分院 青岛 266041)

摘要: 金属磁记忆检测技术是一种能对铁磁构件早期损伤进行有效诊断的无损检测技术。为进一步探索研究金属磁记忆检测的机理,选用粉纹法对 Q235 平板试样的磁畴结构进行观察,研究地磁场中不同应力状态下该铁磁材料的磁畴结构的变化特征,并且利用高精度弱磁检测装置获取其试件表面的漏磁信号规律。试验结果表明:随外载荷的改变,被观察部位的磁畴类型、畴壁形态有显著性变化,且不同区域的磁畴转变快慢不同但变化趋势相近;同时,随外载荷的增大,试件表面漏磁信号增大。验证了地磁场中铁磁材料的磁畴结构受应力作用发生磁畴移动与转向,并且在应力撤出后这种改变得以保留的规律。为铁磁材料磁记忆检测微观机理的进一步探索研究提供可靠、有效的试验依据。

关键词: 磁记忆检测 粉纹法 不同应力状态 磁畴结构 漏磁信号

中图分类号: TG115

Experimental Study on Effect of Stress on Magnetic Domain Structure under Geomagnetic Condition

REN Wenjian¹ SUN Jinli² CHEN Xi¹ WANG Zhen¹ REN Jilin¹

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education,

Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063;

2. Qingdao Branch, Naval Aeronautical Engineering Academy, Qingdao 266041)

Abstract: Metal magnetic memory testing technology is an effective way of the non-destructive testing techniques for early damage diagnosis of ferromagnetic materials. To further explore the mechanism of metal magnetic memory testing, the magnetic domain structure of Q235 tablet samples are observed by bitter pattern, the characteristics changes of magnetic domain structure under the different stress states in earth magnetic are researched, and the high-precision weak magnetic detection devices are used to obtain the magnetic flux leakage signal of the specimen surface. The results show that the magnetic domain types and domain wall morphology change significantly with the change of external loads; and different regions have different change speed of magnetic domain, but they have a similar trend; the same time, the magnetic flux leakage signal of specimen surface increases with the external loads increases. The magnetic domain of ferromagnetic materials move by stress and preserve such changes after the withdrawal of the stress in earth magnetic are verified. Thus it provides reliable and effective experimental basis for further study of the microscopic mechanism of ferromagnetic materials magnetic memory testing.

Key words: Magnetic memory testing Bitter pattern Different stress states Magnetic domain structure

Magnetic flux leakage signal

0 前言

近年来兴起的金属磁记忆检测技术可弥补传统无损检测技术不能发现早期损伤的缺点,利用金属磁记忆效应可以快速地检测出铁磁性金属构件表

面的应力集中部位,能够在对铁磁构件损伤进行预诊断与寿命评估方面发挥重要作用^[1-2]。目前,该项技术已在基础理论及试验研究、仪器设备研发、工程应用等各方面获得了大量的研究及应用成果^[3-6]。然而,由于铁磁材料性质影响因素的多样性,至今,在磁记忆检测机理的研究方面尚未取得突破性的进展及比较统一的认识^[7-8],仍是被广泛关注的研究课题。

* 国家自然科学基金(51065022)和无损检测技术教育部重点实验室开放基金(ZD200929006)资助项目。20120802 收到初稿,20121205 收到修改稿

磁畴观察是研究磁记忆检测微观机理的主要方法之一。由于粉纹法观察磁畴技术成熟、设备简单、操作方便,只要掌握好磁悬液配置与试件表面处理技术,便能得到可靠的试验研究结果^[9]。为此,利用此法研究不同受力程度的无取向硅钢片、20 钢和 45 钢的磁畴结构,发现应力的存在改变试件表面磁畴结构,引起磁化状态改变,从而导致磁性发生变化的现象^[10-12];在此基础上,进而采用粉纹法来观察铁磁材料 Q235 试样经过静载荷拉伸后其试样表面的磁畴组织的变化特征。试验中,选取在不同应力状态下的试件的三个部位进行观察研究,同时测量出试件表面漏磁信号随应力作用的变化情况进行对比分析。从而为铁磁材料磁记忆检测微观机理的进一步探索研究提供了可靠、有效的试验依据。

1 试样制备和试验方案

选用国产 Q235 钢作为试验材料,该材料的强度适中,具有良好的承载性,较好的塑性、韧性、可焊性和加工性,被广泛地应用在工业生产中,其力学性能见下表。经机械加工取样后,进行铣削处理并加工中心圆孔,试件尺寸如图 1 所示,试件厚度为 3 mm。为消除机械加工使试件带有残余应力而对试验结果造成影响,对试样进行去应力退火处理。

表 该材料常规力学性能

钢材牌号	屈服强度 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ (%)
Q235	235	365	26

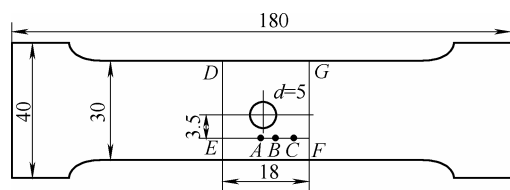


图 1 试件尺寸图

试验装置包括如下部分。

(1) 化学试剂、机械搅拌机、恒温箱等,用于磁悬液的配置。

(2) 微机控制电子式万能试验机,主要用来对试样进行加载。

(3) 金相试样镶嵌机,对试样进行镶嵌处理。

(4) 试样抛光机,用于对样品进行抛光处理。

(5) 高精度弱磁信号检测仪器,用于检测试件表面漏磁信号。

试验步骤及参数如下所述。

(1) 在传统的化学共沉淀法^[13]配制磁悬液的基础上,利用正交法^[14]经过反复试验配置出适合本试验磁畴观察的磁悬液。

(2) 根据所选材料的屈服强度与抗拉强度,通过 WDW-E100D 微机控制电子式万能拉伸试验机进行静载荷拉伸,在材料的弹性阶段、屈服阶段、强化阶段、局部变形断裂阶段分别设载荷为 100 MPa、235 MPa、295 MPa、355 MPa,加载速率均设为 0.15 mm/min,对试件进行反复两次加载-卸载的拉伸以产生不同程度的残余应力。

(3) 每次加载前后利用高精度弱磁信号检测仪器对试件表面法向与切向漏磁信号进行检测。

为了科学有效地选取试验所需的磁畴观察部位,根据该试样参数及加载参数进行 ANSYS 软件有限元力-磁模型试验仿真。仿真结果如图 2 所示,在中心圆孔受拉试件上,中心圆孔旁的 A、B、C 三点(其中,A、B、C 线与圆孔中心位置线相距 3.5 mm,B 与 A、C 均相隔 2.5 mm,如图 1 所示)在相同的载荷作用下其应力集中程度依次降低且差别明显。因此,选择试件表面的该三个部位作为磁畴组织观察区域符合本试验研究要求。

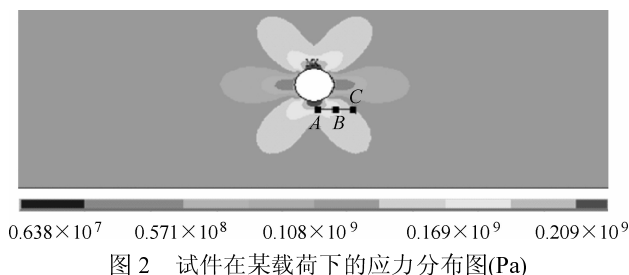


图 2 试件在某载荷下的应力分布图(Pa)

金相试样制作时,分别沿左边线 DE、右边线 FG 进行线切割;选取试样中间 30 mm×18 mm 的长方形小块(图 1)进行镶嵌;镶嵌时保证 A、B、C 三点处于被抛光面,并进行标记;记录以镶嵌后的金相试样圆心为参考点,记录 A、B、C 三点坐标并对试样进行机械抛光;最后在抛光后试样表面滴加磁悬液,通过金相显微镜对 A、B、C 三点及附近区域进行磁畴图像观察。从而可获得各试件不同应力集中程度下的磁畴组织的变化情况。

试验是在地磁场环境下进行,外加应力的方向与地磁场的方向垂直。由于地磁场既是引发铁磁材料产生磁记忆效应的激励源,又是磁记忆效应的影响因素,所以,在试验的磁畴观察以及漏磁信号检测中,均将被检测试件东西方向水平放置,以减小地磁场对检测结果的影响^[15]。

2 试验结果讨论与分析

2.1 不同载荷作用下磁畴组织的变化特征分析

图3~5分别为试样经过0 MPa(未加载)、100 MPa、235 MPa、295 MPa、355 MPa加载后A、B、C三点处的磁畴形貌图。图3~5中试样拉应力方向平行于水平方向,如图3~5中箭头所示,设从左至右为 x 正方向。

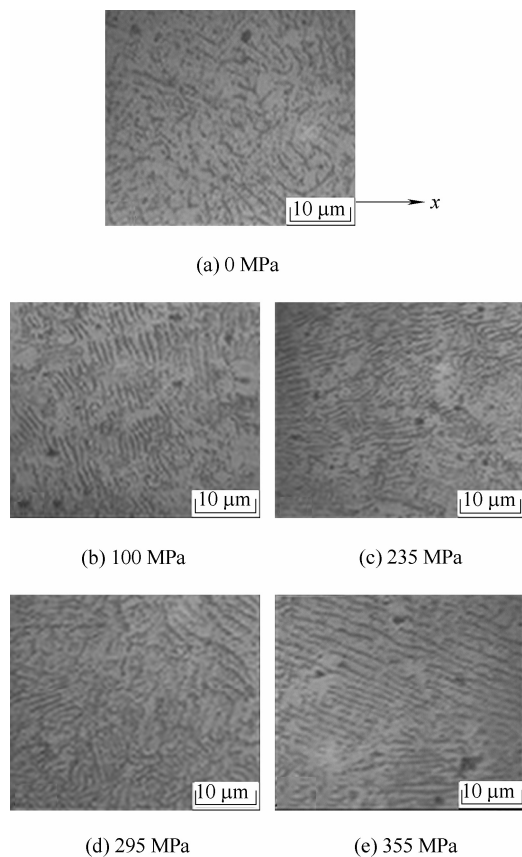


图3 不同载荷作用后A点处的磁畴形貌

由图3可知,未加载情况下A点表面的磁畴形式比较复杂,存在 180° 片状畴、树枝状畴等多种磁畴结构形式;磁畴宽度不均匀;畴壁较短,且排列无序。试样经100 MPa拉伸后,发生弹性变形,此时A点处的磁畴形式变得较为有序,同一区域的磁畴数量有所增多,畴壁的间距变小;部分畴壁发生了转向,且 180° 的片状畴明显地增多,树枝状畴消失。经235 MPa静载荷拉伸后,试样进入屈服阶段,相同区域的磁畴数目进一步增多,相邻畴壁间距进一步减小;部分畴壁发生 90° 转向,并且磁畴结构总体趋势向着拉应力方向转变;另外,畴壁也有明显地变长。试样经295 MPa拉伸后,发生塑性变形,圆孔周围应力集中区域出现微小形变,材料内部各晶粒及晶界都发生了一系列复杂地变化;磁

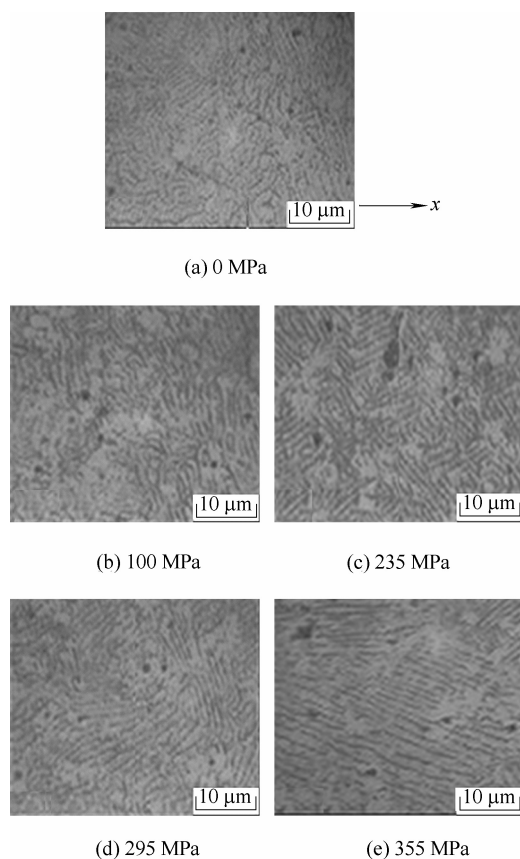


图4 不同拉应力下B点处的磁畴形貌

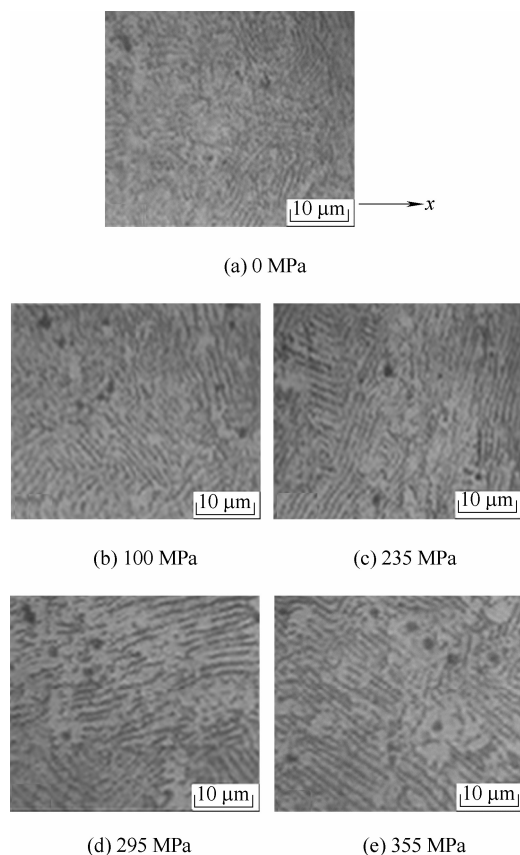


图5 不同拉应力下C点处的磁畴形貌

畴数目不再有明显的增加,大量的畴壁发生了转向;畴壁间距及壁厚都有增大;由于材料内部在此阶段

变化相对复杂,使得磁畴结构也相应地出现了规律性不明显的现象。试样在经过 355 MPa 加载后,已进入局部变形断裂阶段;此阶段的磁畴排列整齐,磁畴形式表现为 180° 的片状主畴占 80%以上,仅有少量的其他附加畴;并且畴壁方向与应力方向夹角大致为 45°;畴壁长度增长,畴壁与畴壁之间的间距增大。

由图 4 可得,未受载状态下 B 点处的磁畴同样存在片状畴、迷宫畴等多种磁畴结构形式,且磁畴排列凌乱。弹性应变后,磁畴产生大范围的偏转,磁畴的形态以片状畴与树枝状畴为主。当样品屈服后产生一定地塑性变形,其表面的磁畴以 180° 与 90° 片状畴为主,畴壁分布比较均匀。在不均匀塑性变形后,随着各个晶粒中的磁畴经过不断协调,大部分磁畴有向着应力方向转动且取向一致的趋势。试样进入局部变形断裂阶段后,其表面磁畴的形态变得比较单一,90%以上均为片状畴,且畴壁方向与应力方向夹角大致为 30°。

由图 5 分析可得,未受载状态下 C 点处的磁畴亦存在多种磁畴形态且排列紧密。弹性应变后,大部分磁畴产生偏转,磁畴形态以片状畴为主。当试样到达屈服后产生一定的塑性变形,其表面的磁畴出现不稳定状态,以 180° 与 90° 片状畴为主。而在不均匀塑性变形后,大部分磁畴有向着应力方向转动且取向一致的趋势。当试样进入局部变形断裂阶段,其表面磁畴发生 90° 偏转,大部分磁畴的畴壁方向与应力方向夹角大致为 45°。

试验结果表明,在拉伸过程的各个阶段,应力作用下引起磁畴偏转的取向各不相同。其中,在弹性阶段与屈服初期,磁畴取向在原始取向和应力方向之间有反复波动,材料中应力能和磁晶各向异性能两者相对能量的高低决定着磁畴的取向。这一结果与文献[16]得出的结论一致。进入屈服阶段后,随着应力的增加,材料中的应力能逐渐增大,从而在抵消了磁晶各向异性能后,使磁畴偏转的取向性增强,其偏转的趋势趋向于外加载荷方向。但最终能否达到与拉应力方向平行,还有待作进一步的深入研究。

由于相同载荷下 A、B、C 三点所处的位置不同,其应力集中程度不同,其中 A 点为三点中应力最大点, B 点次之, C 点应力最小^[17]。横向比较图 3~5 可知,试件不同受力区域的变化快慢不同但变化趋势相近;试件的应力集中部位,磁畴取向趋于一致的程度高于其他部位。

2.2 拉应力对试件表面漏磁信号的影响

文献[18]研究表明,外加应力作用于铁磁材料上,将产生一个等效磁场使铁磁材料的磁性改变,其等效磁场强度

$$H_{\sigma} = \frac{3\sigma}{2\mu_0} \left(\frac{\partial \lambda}{\partial M} \right)_{\sigma} (\cos^2 \theta - \nu \sin^2 \theta)$$

式中, σ 为外加应力; λ 为磁致伸缩系数; μ_0 为真空磁导率; M 为磁化强度; θ 为 σ 与 M 之间的夹角; ν 为泊松比^[18]。

图 6、7 所示为不同载荷作用下,试件上 A、B、C 三处的表面漏磁场信号的变化情况。测量结果显示, A 处的法向分量磁场强度的变化范围为 -55.68~4.80 A/m, 切向分量磁场强度的变化范围为 4.48~28.32 A/m; B 处的法向分量磁场强度的变化范围为 5.12~69.20 A/m, 切向分量磁场强度的变化范围为 4.24~28.96 A/m; C 处的法向分量磁场强度的变化范围为 5.20~58.56 A/m, 切向分量磁场强度的变化范围为 3.60~28.96 A/m。

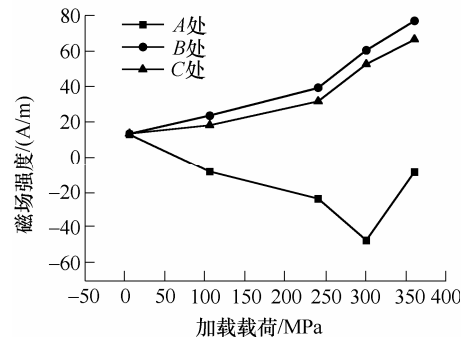


图 6 不同载荷下试样 A、B、C 三处的漏磁信号法向分量

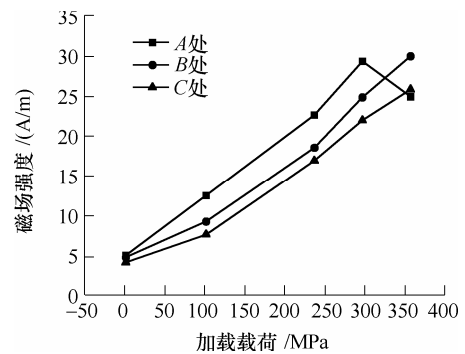


图 7 不同载荷下试样 A、B、C 三点处的切向漏磁信号

随着载荷的增大,试样 B、C 处的表面法向与切向磁场强度均增大,但法向分量相比切向分量变化得更明显,数值及变化量更大。A 点的磁场在弹性、屈服、不均匀塑性变形三个阶段与 B、C 类似,而局部断裂变形后 A 点处的法向与切向磁信号均有显著减小,原因是该阶段试件出现微裂纹,引起一定的应力释放,导致了塑性局部断裂阶段 A 点不

一定是应力最大值位置。

由等效磁场表达式可知,等效磁场 H_e 将随着拉应力的增大而增强。试验结果也表明,除不考虑最后局部断裂阶段外,铁磁试件表面磁记忆信号随拉应力增大而增大,且在 A 、 B 两点间的漏磁信号法向分量出现“过零”的现象、同时 A 、 B 、 C 三处的切向分量依次降低,如图 8、9 所示。由此可知漏磁信号法向与切向分量的改变一定程度上能反映出试件应力集中程度的变化情况。

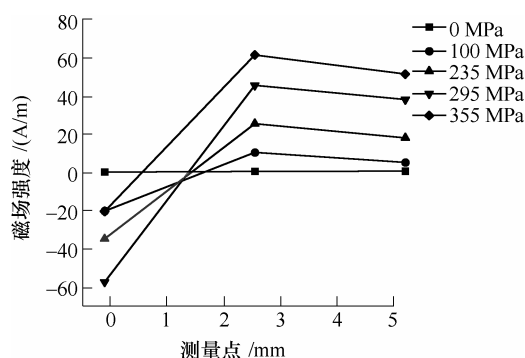


图8 试样 A 、 B 、 C 三处在不同载荷下的法向漏磁信号

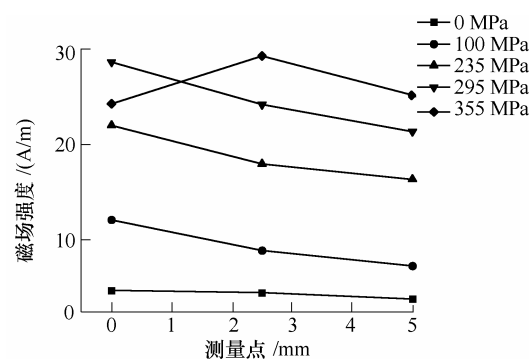


图9 试样 A 、 B 、 C 三处在不同载荷下的切向漏磁信号

3 结论

为了进一步探索金属磁记忆检测技术的微观机理,通过试验研究 Q235 钢在静载荷拉伸过程中其表面磁畴组织的变化特征及表面漏磁信号的变化规律,可以得出如下结论。

(1) 在地磁场环境下,试件在未加载,其表面的磁畴结构复杂,存在 180° 片状畴、树枝状畴等多种磁畴结构,且排列不均匀。

(2) 试件在加载后,大部分畴壁会发生移动或转向;且由于 Q235 钢是一种正磁致伸缩系数的铁磁材料,其磁畴的磁化矢量将向平行于拉应力的方向转动,所以随着载荷的逐渐增大,磁畴向着应力方向转动且有取向一致的趋势。

(3) 试件不同受力区域的磁畴组织变化快慢不

同但变化趋势相近;且试件的应力集中部位,磁畴取向趋于一致的程度高于其他部位。

(4) 随着载荷的增大,表面漏磁信号法向分量与切向分量均增大,但法向分量相比切向分量变化得更明显。

(5) 试件表面磁畴组织变化与漏磁信号变化均反映了试件应力集中程度的变化情况。从微观角度证实了磁记忆检测的本质是力-磁效应,即应力导致铁磁材料磁畴组织变化进而引发在试件表面产生漏磁场,而漏磁信号的变化是磁记忆检测过程的特征表现。

此研究结果从微观角度证实了拉应力对试件的宏观磁性能的影响,为解释在外加载荷和地磁场的共同作用下,铁磁体内产生的逆磁致伸缩效应,引起磁畴组织定向和不可逆转的重新取向,以致在宏观上表现为磁特性的改变的现象提供了可靠、直观的试验依据,并可为磁记忆检测机理的进一步研究提供有效的技术支持。

参 考 文 献

- [1] 任吉林,林俊明. 电磁无损检测[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
REN Jilin, LIN Junming. Electromagnetic nondestructive testing[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [2] 李新蕾,任吉林,任尚坤,等. 铁磁构件残余寿命评估方法[J]. 航空学报, 2010, 31(10): 2109-2114.
LI Xinlei, REN Jilin, REN Shangkun, et al. Residual life assessment of ferromagnetic components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(10): 2109-2114.
- [3] 任吉林,林俊明,任文坚,等. 金属磁记忆检测技术研究现状与发展前景[J]. 无损检测, 2012, 34(4): 3-10.
REN Jilin, LIN Junming, REN Wenjian, et al. Metal magnetic memory testing technology development status and prospects[J]. Nondestructive Testing, 2012, 34(4): 3-10.
- [4] 尹大伟,徐滨士,董世运,等. 中碳钢疲劳试验的磁记忆检测[J]. 机械工程学报, 2007, 43(3): 60-65.
YIN Dawei, XU Binshi, DONG Shiyun, et al. Magnetic memory testing for medium carbon steel under the condition of fatigue experiment[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(3): 60-65.
- [5] 蹇兴亮,周克印. 基于磁场梯度测量的磁记忆试验[J]. 机械工程学报, 2010, 46(4): 15-21.
JIAN Xingliang, ZHOU Keyin. Magnetic memory experiment based on magnetic gradient measurement[J].

- Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(4): 15-21.
- [6] DONG Lihong, XU Binshi, DONG Shiyun, et al. Effect of tensile stress and residual stress on the spontaneous stray field signals from the surface of 0.45%C steel[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 20(6): 29-31.
- [7] 周莉, 胡伟利, 陈曦, 等. 铁磁材料磁记忆检测微观机理研究[J]. 失效分析与预防, 2011, 6(3): 144-148.
- ZHOU Li, HU Weili, CHEN Xi, et al. Study of the micro-cosmic mechanism of magnetic memory testing on ferromagnetic material[J]. Failure Analysis and Prevention, 2011, 6(3): 144-148.
- [8] 任尚坤, 李新蕾, 任吉林, 等. 金属磁记忆检测技术的物理机理[J]. 南昌航空大学学报, 2008, 22(2): 11-17.
- REN Shangkun, LI Xinlei, REN Jilin, et al. Studies on physical mechanism of metal magnetic memory testing technique[J]. Journal of Nanchang Hangkong University, 2008, 22(2): 11-17.
- [9] HUBERT A, SCHOFER R. Magnetic domains: The analysis of magnetic microstructures[M]. Berlin: Springer Press, 2008.
- [10] 陈曦, 任吉林, 王伟兰, 等. 金属磁记忆微观机理试验研究[J]. 南昌航空工业学院学报, 2006, 20(3): 45-49.
- CHEN Xi, REN Jilin, WANG Weilan, et al. Experimental research on the microcosmic mechanism of magnetic memory testing[J]. Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology, 2006, 20(3): 45-49.
- [11] 任吉林, 陈晨, 刘昌奎, 等. 磁记忆检测力-磁效应微观机理的试验研究[J]. 航空材料学报, 2008, 28(5): 41-44.
- REN Jinlin, CHEN Chen, LIU Changkui, et al. Experimental research on microcosmic mechanism of stress-magnetic effect for magnetic memory testing[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2008, 28(5): 41-44.
- [12] 任吉林, 潘强华, 唐继红, 等. 应力对铁磁构件磁畴组织的影响[J]. 无损检测, 2010, 32(3): 157-159.
- REN Jilin, PAN Qianghua, TANG Jihong, et al. Experimental research of magnetic memory testing on the effect of stress on the magnetic domains[J]. Nondestructive Testing, 2010, 32(3): 157-159.
- [13] 钟文定. 铁磁学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- ZHONG Wending. Ferromagnetism[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [14] 陈兵, 樊玉光, 周三平. 共沉淀法制备 Fe_3O_4 纳米粉体工艺的优化[J]. 机械工程材料, 2006, 30(9): 61-63.
- CHEN Bing, FAN Yuguang, ZHOU Sanping. Optimization Fe_3O_4 nanosized powder preparing technology[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2006, 30(9): 61-63.
- [15] 曾寿金, 江吉彬, 陈丙三, 等. 地球磁场对磁记忆检测信号的影响研究[J]. 重庆科技学院学报, 2011, 13(3): 186-189.
- ZENG Shoujin, JIANG Jibin, CHEN Bingsan, et al. Research on magnetic memory signals affected by magnetic field[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology, 2011, 13(3): 186-189.
- [16] 张登宇. 压力容器用钢单轴拉伸过程中显微结构与磁畴研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2011.
- ZHANG Dengyu. Investigations of microstructure and magnetic domain during uniaxial tensile for pressure vessel steel[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011.
- [17] 王辉, 刘蔚倩. 平板中心圆孔边应力集中的有限元分析[J]. 湘潭师范学院, 2004, 26(2): 5-7.
- WANG Hui, LIU Weiqian. Finite element analysis of the stress concentration around a hole[J]. Journal of Xiangtan Normal University, 2004, 26(2): 5-7.
- [18] CHEN Y, JILES D C. The magnetomechanical effect under torsional stress in a cobalt ferrite composite[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(5): 3244-3247.
-
- 作者简介: 任文坚, 男, 1986 年出生。主要研究方向为电磁检测技术。
E-mail: jj060811@126.com
- 任吉林(通信作者), 男, 1949 年出生, 教授, 中国无损检测学会副理事长。主要研究方向为电磁检测技术。
E-mail: jlren@tom.com