

# 不同应力状态下 Q235 钢板件磁信号变化的试验 及金相图谱研究

苏三庆, 胡敬余, 王 威, 郭 欢, 马小平

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:**通过对 Q235 钢板件进行静载拉伸试验, 采集并分析了其在零载、弹性状态、塑性状态、强化状态、颈缩状态及断裂破坏后的法向磁信号  $H_p(y)$ 。试验表明, 随着荷载的增加, 法向磁信号  $H_p(y)$  曲线呈顺时针旋转, 且  $H_p(y)$  零值点在试件中心位置附近;  $H_p(y)$  零值点可以指示断裂位置但不够准确。比较分析磁场梯度值  $K$ , 可以发现  $K$  值随荷载增加单调递减, 在塑性状态到强化状态时变化幅度最大, 而在强化状态到颈缩状态变化幅度最小。另外, 通过对不同应力状态的试件取样, 进行金相图谱分析, 发现随着荷载的增加, 铁素体沿受力方向, 由不规则形状逐渐变为纺锤形, 在此过程中, 法向磁信号  $H_p(y)$  的绝对值逐渐变大。

**关键词:** 金属磁记忆检测; 不同应力状态; 法向磁信号; 磁场梯度; 金相组织

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)05-0617-06

## Experimental study and metallographic schematic on magnetic signal changes of Q235 steel at different stages

SU Sanqing, HU Jingyu, WANG Wei, GUO Huan, MA Xiaoping

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The normal magnetic signal  $H_p(y)$  at zero loading, elastic stage, plastic stage, strengthening stage, necking stage and fracture failure were collected and analyzed respectively by the static tensile experiment of Q235 steel. Test result exhibits that with the increase of loading, the normal magnetic signal  $H_p(y)$  curve rotates counter clockwise, and the magnetic zero value point of  $H_p(y)$  is near the center of the specimen. The zero value of  $H_p(y)$  can indicate the location of fracture but not accurately. Comparative analysis of the gradient value  $K$ , magnetic  $K$  value can be found monotone decreasing with the loading increasing. Magnetic gradient  $K$  has the biggest change from the plastic phase to strengthening stage, but it has a minimal vitiate from strengthening phase to necking stage. In addition, metallographic schematic of specimens are analyzed at different stress states, indicate that the ferrite of specimens in irregular shape gradually becomes a spindle along the tensile direction with the increase of loading, and in the process, the absolute value of the magnetic signal  $H_p(y)$  increases gradually.

**Key words:** metal magnetic memory testing; stress stage; magnetic signals; magnetic field gradient; metallographic microstructure

钢材作为一种重要的建构筑物材料, 因其质量轻、强度高、延性好等特点, 被广泛应用于高层及大跨结构中。但在实际工程中, 由于受动、静荷载作用以及环境因素影响, 导致钢结构的突发性破坏事件屡屡发生。因此, 对钢结构在服役期间的健康检测及寿命评估就显得尤为重要。

目前, 应用于建筑钢结构的无损检测技术主要有超声检测<sup>[1]</sup>、磁粉检测<sup>[2]</sup>、射线检测<sup>[3]</sup>、涡流检测<sup>[4]</sup>等。这些虽然比较成熟, 但仅能够识别较为明显的宏观缺陷, 对未形成明显物理不连续状态

的裂纹源以及微小裂纹还无法检测。

20 世纪 90 年代末, 金属磁记忆检测技术被俄罗斯学者 Doubrov<sup>[5]</sup> 提出。该技术具有如下优点: (1) 该技术能够对材料内部损伤以及微观缺陷进行识别; (2) 检测前不需要清理被检测构件表面铁锈油污, 较为方便; (3) 检测时仅利用地球磁场作为激励磁化场, 不需要专门的磁化设备; (4) 检测传感器与被检构件可直接接触, 也可具有一定脱离值; (5) 仪器设备体积小, 操作简便灵活<sup>[6]</sup>。目前, 大量国内外学者对力-磁关系进行了试验研究。董

收稿日期: 2018-07-30

修改稿日期: 2019-09-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878548, 51578449), 陕西省自然科学基金研究计划(2018JZ5013)

第一作者: 苏三庆(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事结构抗震设计、结构健康监测方面的研究。E-mail: sussq@xauat.edu.cn

丽虹等<sup>[7]</sup>通过光滑板件的静载拉伸试验以及疲劳加载试验对磁记忆检测参量及影响因素进行了研究;邢海燕等<sup>[8]</sup>对焊缝与磁信号之间的关系进行了研究.梁志芳等<sup>[9]</sup>针对时间空间上焊接裂纹磁记忆信号的有效性进行了研究.以上学者虽然对弹-塑性状态的磁记忆信号进行了分析研究,但对其加载过程中,不同应力状态下磁记忆信号的变化规律并没有明确的定论,而钢结构内部损伤主要产生于屈服之后,并且在变形较小的情况下难以确定结构应力状态.本文主要研究 Q235 钢在不同应力状态下磁信号的关系规律,并对加载至不同状态的试件进行金相分析,从微观角度分析二者之间关系.

## 1 金属磁记忆检测的基本理论

磁记忆检测技术的物理基础源自磁弹性效应和磁机械效应、应力集中区中位错壁上磁畴边界的固锁效应以及金属天然磁化强度条件下组织和机械强度不均匀性造成的漏磁场效应<sup>[10]</sup>.铁磁性材料在弹性应力作用下的弹性效应理论目前比较成熟.在无外应力和外磁场作用下铁磁晶体内关于磁化状态的自由能为

$$E = E_k + E_{ms} + E_{el} \quad (1)$$

其中:  $E_k$  为磁晶体各项异性能;  $E_{ms}$  为磁弹性能;  $E_{el}$  为弹性能.

当有外应力或其内部存在内应力时,总自由能应加上由应力引起的形变.

$$E = E_k + E_{ms} + E_{el} + E_{\delta} \quad (2)$$

其中,  $E_{\delta}$  为材料受到外界应力时产生的应力能.

真实系统实际存在状态总是使总能量达到最低,改变磁化矢量方向可以减小应力能,从而使总自由能最小<sup>[11]</sup>.应力的存在会导致弹性能和磁弹性能的增加,而且为抵消应力能,该区域由磁机械效应作用引发的磁畴组织取向会发生不可逆改变,形成磁极,构件表面产生漏磁场.应力集中部位的漏磁场具有过零点性质<sup>[12]</sup>.金属磁记忆检测原理如图 1 所示.

## 2 试验方案

### 2.1 试验设计

本试验采用广泛应用于建筑结构的 Q235 钢.加工制作 6 个试件,分别编号为 S-1、S-2、S-3、S-4、S-5、S-6.试件尺寸如图 2 所示.检测区域长 60 mm,检测点间距为 15 mm,每个试件有一条检测线,检测线有 5 个检测点,检测点以中间检测点为

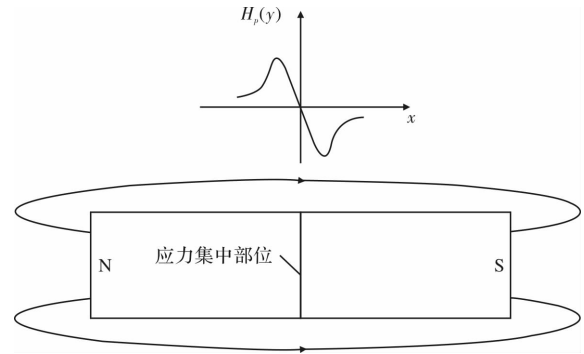


图 1 金属磁记忆检测技术检测原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of detection principle of metal magnetic memory detection technology

0 mm, 向左依次为 -15 mm, -30 mm; 向右依次为 15 mm, 30 mm. 其试件基本属性见表 1.

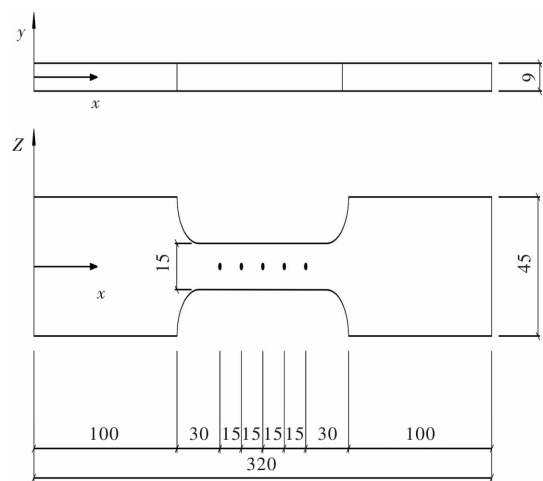


图 2 Q235 试件及检测点(单位: mm)

Fig. 2 Q235 specimen and detection point (Unit: mm)

表 1 试件基本参数

Tab. 1 Basic parameters of the specimen

材料	弹性模量 / MPa	泊松比	屈服强度 / MPa
Q235	$2.10 \times 10^5$	0.3	283

### 2.2 试验仪器及方法

利用 DNS300 电子万能试验机对板件进行静载拉伸试验,其主要技术参数为:最大试验力 300 kN,试验空间宽度 0~600 mm,试验横梁行程 1 200 mm,力测量精度  $\pm 0.5\%$ ,变形测量精度  $\pm 0.5\%$ .

磁记忆信号测量设备采用爱德森 EMS-2003 智能磁记忆/涡流检测仪,探头使用磁记忆双通道笔式探头(EPEMS/B2),设置为内时钟模式,显示模式为数字显示. CH1 显示数据为大地磁场, CH2 数据为试件表面磁信号值,选择背景磁场为减 CH1,如图 3 所示即为实际磁信号值.

为了探究试件在不同应力状态法向磁信号的变化, S-1 只检测初始状态下的磁信号法向分量

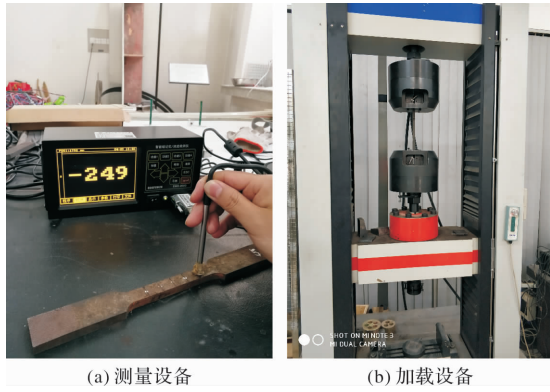


图 3 加载设备及测量设备

Fig. 3 Loading equipment and detection system

$H_p(y)$  值, S-2 检测弹性及之前状态下  $H_p(y)$  值, S-3 检测塑性及之前状态下  $H_p(y)$  值, S-4 检测强化及之前状态  $H_p(y)$  值, S-5 用于检测颈缩后及之前状态  $H_p(y)$  值. 具体检测方式如表 2 所示.

表 2 法向磁信号检测方式

Tab. 2 Detection method of normal magnetic signal

	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6
零载状态	✓	✓	✓	✓	✓	✓
弹性状态		✓	✓	✓	✓	✓
塑性状态			✓	✓	✓	✓
强化状态				✓	✓	✓
颈缩状态					✓	✓
破坏状态						✓

注: “✓”表示对应板件在该状态时采集法向磁信号

试验过程中对试件进行离位检测, 试件南北放置, 从南到北逐点检测. 笔式探头垂直于试件表面, 探头端部接触试件, 保证其提离值不变.

最后, 将加载至不同状态的试件切割打磨进行金相分析, 从微观角度分析磁信号变化与微观结构变化之间的联系.

### 3 试验结果分析

#### 3.1 零载

如图 4 所示, 为试件在零载状态下法向磁信号变化曲线. 可以看出, 各板件磁信号法向分量  $H_p(y)$  波动范围较小, 数值范围为  $-28 \sim 22 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ , 与参考文献[13]所示零载状态下磁信号法向分量  $H_p(y)$  相比, 离散性较小, 但无明显规律出现. 其原因可能是试件在零载状态时, 试件表面法向磁信号受其加工制造过程中试件内部所产生的剩磁场影响.

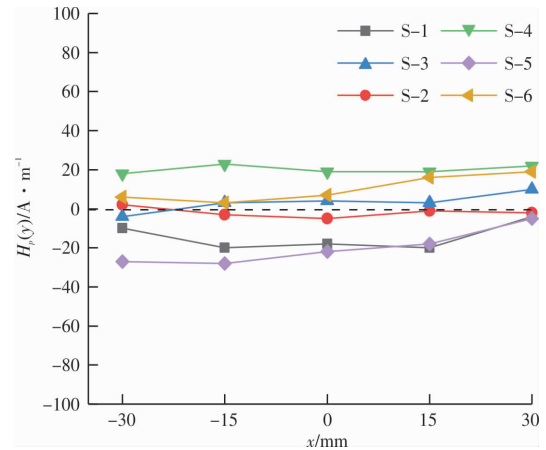


图 4 零载状态试件法向磁信号变化曲线

Fig. 4 Normal magnetic signal curve at initial stage

#### 3.2 弹性状态

如图 5 所示, 为 S-2~S-6 在弹性状态法向磁信号的变化曲线. 可以看出, 各板件  $H_p(y)$  信号值均过零点,  $H_p(y)$  值以各自零值点为界, 左正右负, 从左向右递减, 两端  $H_p(y)$  数值绝对值较大, 试件中间部位  $H_p(y)$  数值较小. 铁磁性材料本身作为一个弱磁体, 可以将其简单看作为一个具有南极和北极的磁铁, 磁铁磁感应强度的强弱主要决定于磁感线的密集程度, 在磁铁外部磁感应强度是两端强中间弱, 与试验结果有相似之处. 图 5 中 S-3~S-6 法向磁信号沿长度方向呈线性递减. S-2 的  $H_p(y)$  值较 S-3~S-6 波动较大, 但总体趋势仍然为左正右负, 从左向右逐渐减小. 试件受到荷载作用后, 内部的磁畴结构发生定向的不可逆变化, 随着磁畴结构定向移动的完成, 磁信号由之前的无规律性变得统一, 并有“捏拢”现象出现.

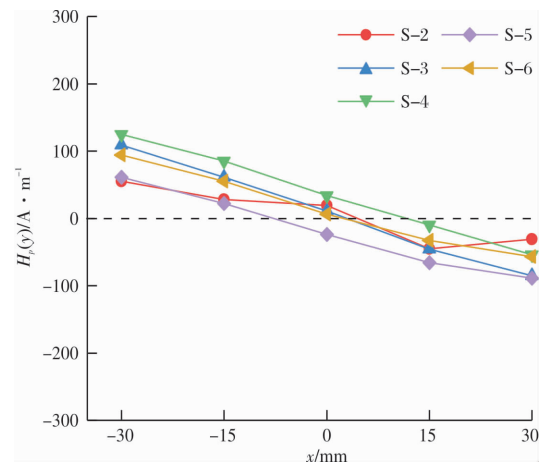


图 5 弹性状态试件法向磁信号变化曲线

Fig. 5 Normal magnetic signal curve at elastic stage

#### 3.3 塑性状态和强化状态

如图 6 所示, 为 S-3~S-6 在塑性状态时法向磁信号变化曲线. 可以看出, 法向磁信号值的波

动有所增加,不同板件之间离散性也相对于弹性状态有所增大.各板件  $H_p(y)$  零值点分布不集中, S-3 和 S-6 零值点在 0 mm 附近, S-4 和 S-5 的  $H_p(y)$  零值点距离 0 mm 较远. 但是由图 7 可以看出, 进入强化状态后 S-4 和 S-5 的  $H_p(y)$  零值点回归到 0 mm 附近, S-4~S-6 号板件表现出较好的线性.

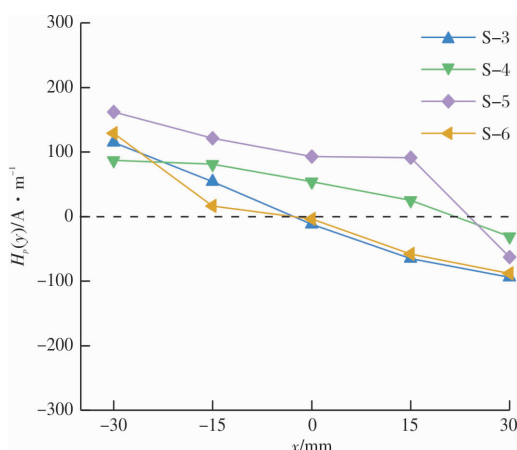


图 6 塑性状态试件法向磁信号变化曲线

Fig. 6 The normal magnetic signal curve at plastic stage

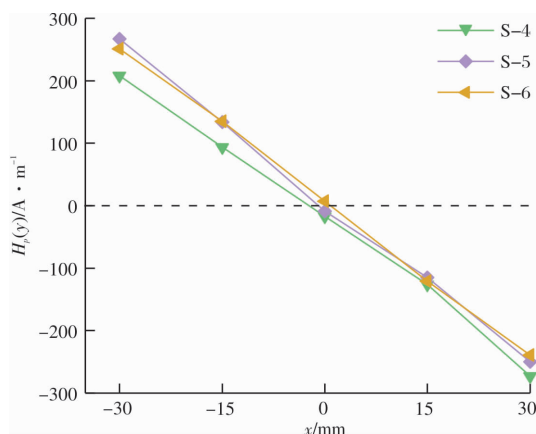


图 7 强化状态试件法向磁信号变化曲线

Fig. 7 Normal magnetic signal curve at hardening stage

### 3.4 颈缩状态和破坏状态

如图 8 所示, S-5、S-6 颈缩状态法向磁信号变化曲线, 可以看出, S-5 和 S-6 在颈缩状态依然呈现出较好的线性,  $H_p(y)$  零值点在试件中心附近. 图 9 为 S-6 在断裂状态下的法向磁信号变化曲线, 可以看出, 断裂破坏状态  $H_p(y)$  波动性增大, 零值点由试件中心附近移至 A 位置, 与断裂位置基本吻合. S-6 具体断裂位置如图 10 所示.

### 3.5 磁信号全过程分析

试验中, S-5、S-6 经历了从零载到颈缩全过程, 其不同状态下的法向磁信号如图 11 和图 12 所示. 可以看出, 自零载开始, 一直到颈缩状态, 法向磁信号曲线基本成线性变化,  $H_p(y)$  零值点在

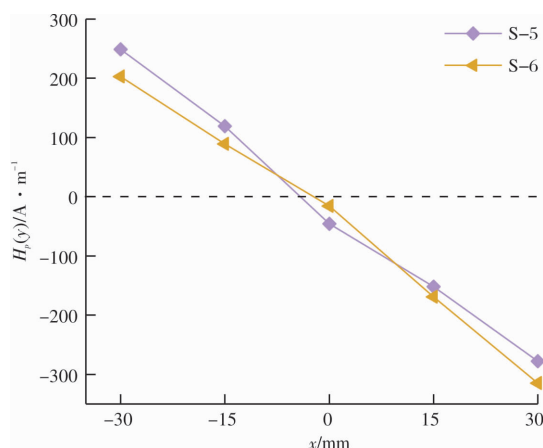


图 8 颈缩状态试件法向磁信号变化曲线

Fig. 8 Normal magnetic signal curve at necking stage

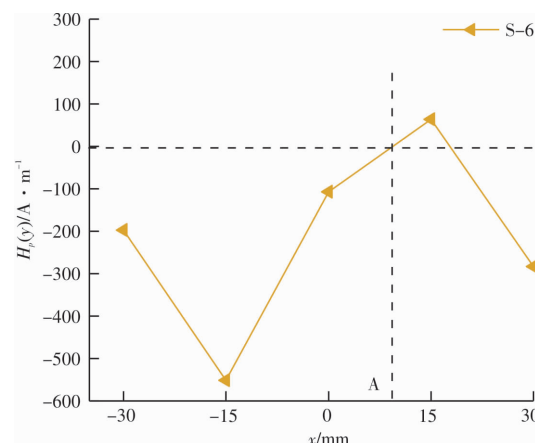


图 9 破坏状态试件法向磁信号变化曲线

Fig. 9 Normal magnetic signal curve at fracture stage



图 10 S-6 件断裂位置

Fig. 10 Fracture position of Specimen 6

0 mm 附近. 且在颈缩状态之前, 随着荷载的增加,  $H_p(y)$  值曲线以零值点为中心呈现顺时针旋转现象. 6 号试件断裂后,  $H_p(y)$  零值点由试件中心附近移至 A 位置, 与断裂位置基本吻合. 对于早期损伤部位的判断, 基于法向磁信号过零点的损伤判别方法效果不佳. 但是该判别方法对宏观破坏表征效果较好.

图 13 所示为 S-5、S-6 在不同状态磁信号法向分量的梯度值, 不考虑 S-6 的断裂破坏状态. 可以明显的看出, 随着试件由零载状态加载至颈缩状态, 梯度值的绝对值逐渐增大; 从弹性状态到塑性状态梯度值变化幅度较小, 只增大了约 47%; 从塑性状态到强化状态梯度值变化幅度迅速增大, 增大了约 128%; 又在强化状态到颈缩状态迅速变

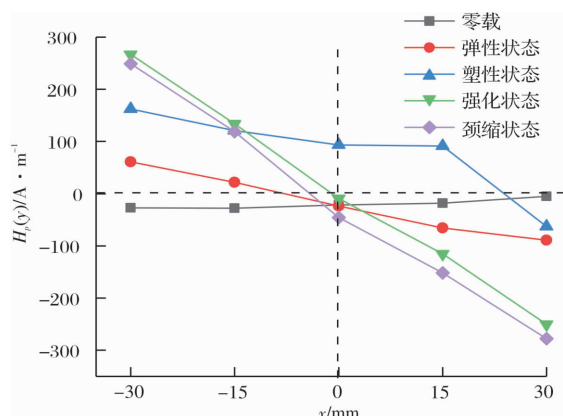


图 11 5号板件不同状态法向磁信号变化曲线

Fig. 11 Normal magnetic signal curve at different stages of Specimen 5

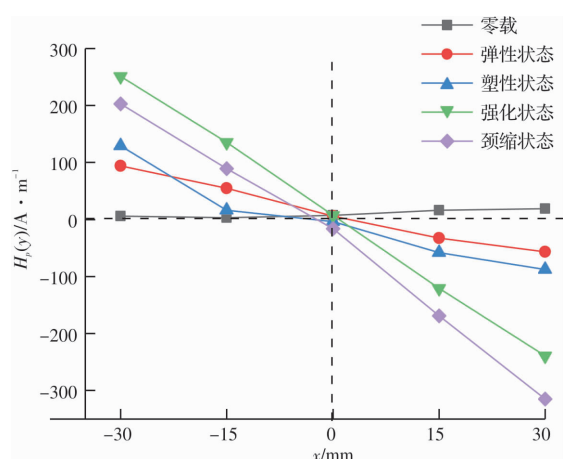


图 12 6号板件不同应力状态法向磁信号变化曲线

Fig. 12 Normal magnetic signal curve at different stages of Specimen 6

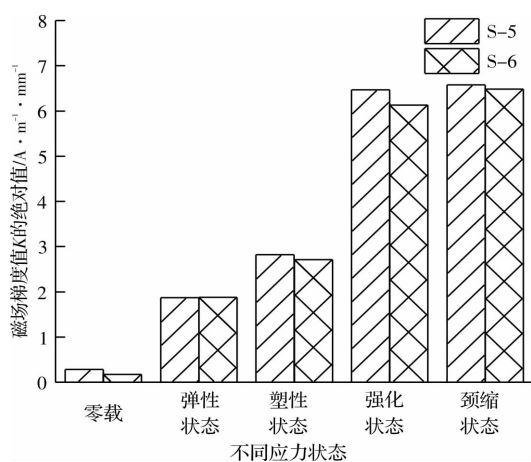
图 13 不同应力状态磁场梯度  $K$  的绝对值

Fig. 13 Gradient curve of normal magnetic signal at different stages

缓,几乎呈水平状态,仅增大了4%左右。如果将  $H_p(y)$  曲线近似看作一条直线,则  $K$  值表示其斜率。虽然有些测点的  $H_p(y)$  值会有一些波动,但是直线的斜率的性质比较稳定,随着荷载的增加,

斜率的绝对值一直在增大。

### 3.6 金相分析

对零载状态、弹性状态、塑性状态、强化状态、颈缩状态的试件金相组织进行分析。如图 14 所示,为板件在各个状态下的金相组织, Q235 钢材主要由铁素体和珠光体组成,图中白色部分为铁素体,黑色部分为珠光体<sup>[14]</sup>。由图 14(a)和图 14(e)比较可以看出,随着荷载的增加,试件中的铁素体由不规则形状逐渐变为纺锤形,且沿着受力方向逐渐被拉长。在此过程中,磁场梯度  $K$  的绝对值一直在增大。

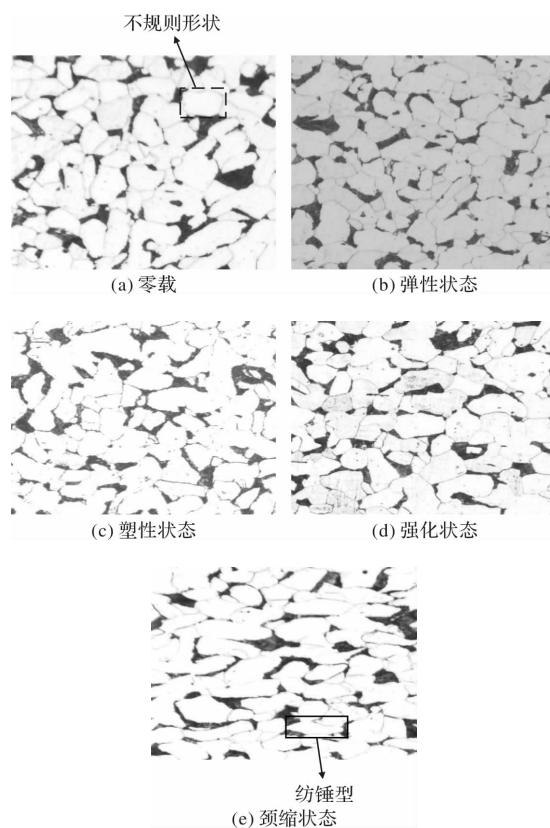


图 14 不同应力状态下的金相组织

Fig. 14 Metallographic structures in different stress states

磁场和应力对磁畴运动的影响如图 15 所示,图 15(a)为无外部磁场时,应力对磁畴运动的影响;图 15(b)为外部磁场激励下,应力对磁畴运动的影响。其中,  $H$  为外部磁场,  $\sigma$  为外应力。

在外部磁场和外应力共同作用下,磁畴组织沿外应力方向发生不可逆的定向移动,随着磁畴定向移动的完成,导致材料宏观磁特性的不连续分布,即磁导率、矫顽力等磁特性参数发生改变,从而使构件在应力应变集中及缺陷位置处的自发漏磁场信号产生变化。可见,外部磁场和荷载是产生磁记忆效应必不可少的条件<sup>[15]</sup>。在零载状态,磁畴结构取向杂乱无规则,因此磁信号在初始阶



段呈无规律的浮动,这与金相试验得到的试件中的铁素体在零载状态下形状不规则现象相似(如图14(a)所示)。实际上,零载状态下所检测到的磁信号主要为试件加工制造过程中内部所产生的剩磁场。但随着荷载的增加,试件所受外应力增大,应力所产生的有效场逐渐增大,以克服剩磁场使磁畴发生定向移动,因而磁信号曲线浮动较小,规律性增强。这与金相试验得出的试件中的铁素体随着荷载的增加由不规则形状逐渐沿受力方向变为纺锤形的规律相似(如图14(e)所示)。由以上分析可见,铁素体变化与磁畴变化之间可能存在一定的相关性。

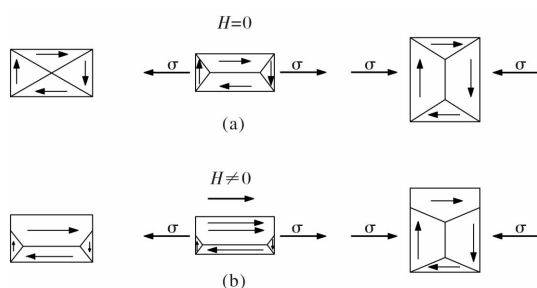


图15 磁场和应力影响磁畴运动的示意图

Fig. 15 Schematic representation of field and stress affecting the movement of magnetic domains

## 4 结论

(1)随着荷载的增加,磁信号法向分量  $H_p(y)$  曲线基本按顺时针旋转,  $H_p(y)$  零值点位置在 0 mm(中心位置)附近。

(2)  $H_p(y)$  零值点在颈缩状态基本位于试件中心,未能准确的指示最终断裂破坏位置。基于法向磁信号过零点的应力集中区域判别依据并不能适用所有状况。

(3)在试件由零载状态加载至破坏过程中,磁场梯度值的绝对值逐渐增加。从弹性状态到塑性状态梯度值变化幅度较小,只增大了约 47%;从塑性状态到强化状态,增加幅度明显变大,增大了约 128%;而强化状态到颈缩状态,增加幅度迅速变缓,仅增大了 4%。

(4)随着轴向拉伸荷载的增加,试件内部微观组织,如铁素体由零载状态下的不规则形状沿受力方向变成纺锤形,在此过程中磁畴也会发生变化。因此,铁素体变化和磁畴变化之间一定的相关性。

## 参考文献 References

- [1] 田玉滨,莫青城,杜文森,等. 基于非线性超声技术损伤钢筋混凝土无损检测的适用性研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(2): 192-195.  
TIAN Yubin, MO Qingcheng, DU Wenmiao, et al. Research of applicability of non-destructive testing for damaged reinforced concrete based on nonlinear ultrasonic technology[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2017, 49(2): 192-195.
- [2] 宋鹏. 磁粉检测原理及应用[J]. 中国房地产业, 2015(13): 255.  
SONG Peng, Principle and application of magnetic particle detection[J]. Real Estate Information of China, 2015(13): 255.
- [3] 倪培君,王俊涛,闫敏,等. 数字射线检测技术理论研究进展[J]. 机械工程学报, 2017, 53(12): 13-15.  
NI Peijun, WANG Juntao, YAN Min, et al. Research progress on digital radiography theory[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(12): 13-15.
- [4] 王威,牛晓波,苏三庆,等. 涡流检测用于无粘结预应力钢绞线护套厚度测量的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 48(3): 340-345.  
WANG Wei, NIU Xiaobo, SU Sanqing, et al. Experimental research on the eddy current testing method for sheath thickness measurement of unbonded prestressed steel strand[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2016, 48(3): 340-345.
- [5] DOUBOV A A. A study of mental properties using the method of magnetic memory[J]. Mental Science and Heat Treatment, 1997, 39(9/10): 401-402.
- [6] 王威,易树春,苏三庆,等. 建筑钢试件拉伸应力与其磁记忆效应漏磁场梯度的对应关系研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(3): 341-346.  
WANG Wei, YI Shuchun, SU Sanqing, et al. Research on the relationship between magnetic flux leakage by metal magnetic memory effect and tensile stress of building steel specimen[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(3): 341-346.
- [7] 徐滨士,董丽红. 再制造质量控制中的金属磁记忆检测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.  
XU Bingshi, DONG Lihong. Metalmagnetic memory testing method in remanufacturing quality control[M]. Beijing: Nation Defense Industry Press, 2015.

(下转第 642 页)

- &. Engineering Geology, 2012, 39(2): 37-42.
- [10] 张菊连, 沈明荣, 梁志荣. 不规则结构面剪切特性试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(6): 993-1000.  
ZHANG Junlian, SHEN Mingrong, LIANG Zhirong. Experimental study on shear strength characteristics of irregular rock mass discontinuities[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(6): 993-1000.
- [11] 白世伟, 任伟中, 丰定祥, 等. 共面闭合断续节理岩体强度特性直剪试验研究[J]. 岩土力学, 1999(2): 10-16.  
BAI Shiwei, REN Weizhong, FENG Dingxiang, et al. Research on the strength behaviour of rock containing coplanar close intermittent joints by direct shear test[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999(2): 10-16.
- [12] 夏才初, 肖维民, 丁增志. 非贯通节理 Jennings 强度准则的岩桥弱化和节理面起伏角修正[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 485-492.  
XIA Caichu, XIAO Weimin, DING Zengzhi. Modification of jennings strength criterion for intermittent joints considering rock bridge weakening and joint surface undulating angle[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 485-492.
- [13] 李海波, 刘博, 冯海鹏, 等. 模拟岩石节理试样剪切变形特征和破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2008(7): 1741-1746.  
LI Haibo, LIU bo, FENG Haipeng, et al. Study of deformability behaviour and failure mechanism by simulating rock joints sample under different loading conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(7): 1741-1746.
- [14] 孙辅庭, 余成学, 万利台. 充填水泥浆岩石节理峰值剪切强度模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2481-2489.  
SUN Futing, SHE Chengxue, WAN Litai. A peak shear strength model for cement filled rock joints[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(12): 2481-2489.
- [15] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 结构面剪切破坏特性及其在滑移型岩爆研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1729-1738.  
ZHOU Hui, MENG Fanzhen, ZHANG Chuanqing, et al. Characteristics of shear failure of structural plane and slip rockburst[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(9): 1729-1738.

(编辑 沈波)

(上接第 622 页)

- [8] 邢海燕, 陈鑫彧, 黄保富, 等. 拉压荷载下焊缝的磁记忆表征及热处理评价[J]. 大庆石油学院学报, 2011, 35(1): 100-102.  
XING Haiyan, CHEN Xinyu, HUANG Baofu, et al. MMM characterization of welded joint and heat treating evaluation under tension and compression loading[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2011, 35(1): 100-104.
- [9] 梁志芳, 李午申, 王迎娜, 等. 金属磁记忆检测焊接裂纹的时间空间有效性[J]. 焊接学报, 2006, 27(8): 9-11.  
LIANG Zhifang, LI Wushen, WANG Yingna, et al. Available time and dubious zone size of welding crack by metal magnetic memory method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(8): 9-11.
- [10] DOUBOV A A. Diagnostics of boiler tubes with usage of metal magnetic memory [M]. Moscow: Energoatomizdat, 1995.
- [11] 苏三庆, 马小平, 王威, 等. 基于 ANSYS 有限元模拟的钢丝绳单丝拉伸力-磁耦合研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(3): 309-316, 331.  
SU Sanqing, MA Xiaoping, WANG Wei, et al. Research on magneto-machanical coupling on tensile monofilament steel wire rope based on ANSYS finite element simulation[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2017, 49(3): 309-316, 331.
- [12] 王威, 樊浩, 苏三庆, 等. 钢结构对接焊缝隐性损伤的磁记忆检测试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(4): 497-501.  
WANG Wei, FAN Hao, SU Sanqing, et al. Experimental detection on implicit damage of butt weld of steel structure by magnetic memory testing[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2014, 46(4): 497-501.
- [13] DOUBOV A A. Development of a metal magnetic memory method[J]. Chemical and Petroleum Engineering, 2002, 47(11-12): 837-839.
- [14] 赵鹏, 潘清红, 邹宗树. Q235 钢板表面裂纹形成原因分析[J]. 理化检验(物理分册), 2016, 52(3): 210-212.  
ZHAO Peng, PAN Qingjiang, ZOU Zongshu. Formation cause analysis of crack on the surface of Q235 Steel plate[J]. Physical and Chemical Examination (Physical), 2016, 52(3): 210-212.
- [15] 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.

(编辑 沈波)