

# 金属磁记忆技术检测低碳钢静载拉伸破坏的实验研究

Study on Metal Magnetic Memory Signals of Low Carbon Steel Under Static Tension Test Condition

董丽虹<sup>1,2</sup>, 徐滨士<sup>1</sup>, 董世运<sup>1</sup>, 尹大伟<sup>1</sup>

(1 装甲兵工程学院 武器装备再制造技术国家重点实验室, 北京 100072;

2 军械工程学院 基础部, 石家庄 050003)

DONG Li-hong<sup>1,2</sup>, XU Bin-shi<sup>1</sup>, DONG Shi-yun<sup>1</sup>, YIN Da-wei<sup>1</sup>

(1 National Key Laboratory for Remanufacturing of Armored Force Engineering

Institute, Beijing 100072, China; 2 Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**摘要:** 为探索磁记忆现象的物理机制, 在地磁场环境中, 静载拉伸低碳钢板状试件。对应试件加载前、静载拉伸过程中不同的载荷水平以及断裂后等不同阶段, 分别采用 EMS-2003 磁记忆诊断仪检测试样表面磁场强度垂直分量信号的变化。结果发现, 加载前各试件初始磁状态对试件断裂后信号有影响。试件拉伸过程中塑性变形阶段内磁信号无较大数值变化, 断裂后信号突变。拉伸过程中过零点漂移, 最后集中在断口处。过零点对判定损伤破坏的铁磁构件危险区域具有一定意义。  
**关键词:** 磁记忆; 静载拉伸; 磁信号; 过零点  
**中图分类号:** TG 115. 28    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381(2006)03-0040-04

**Abstract:** Low carbon steel samples were tested under static tension conditions in quest of physical mechanism in geomagnetic field. Normal component of surface magnetic field intensity signals were measure by EMS-2003 metal magnetic memory instrument in the whole tensile process. The results showed that the initial magnetic signals of specimens influenced the signals after fracture. The magnetic signals were hardly varied during elastic and plastic deformation periods but changed after frae-  
ture rapidly. Zero-crossing points of magnetic signals lay in the fracture position. It is helpful some meaning on inspecting the dangerous zones of ferromagnetic materials.  
**Key words:** magnetic memory; static tension; magnetic signal; zero-crossing point

金属磁记忆技术是一种崭新的无损检测方法<sup>[1-4]</sup>, 该项技术对铁磁构件应力集中非常敏感(应力集中区域往往是缺陷萌生位置), 无需外加激励磁场, 检测速度快, 灵敏度高, 因在工程实践中具有广阔的应用前景而获得极大关注。  
由于磁记忆技术发展时间很短, 现有的磁记忆理论只是笼统的指出该方法是基于磁机械效应, 在地磁场环境中, 由于工作载荷的作用导致铁磁材料表面应力集中区域产生漏磁信号, 其水平分量  $H_p(x)$  具有最大值, 法向分量  $H_p(y)$  过零点, 目前国内外基本都以漏磁信号法向分量过零及磁场梯度最大作为铁磁构件应力集中区域定性评价判据<sup>[5]</sup>。磁记忆技术在工程应用中检测信号定量化、检测标准通用化方面还存在许多问题尚未解决, 仅能作为重要结构先期无损检测手段使用, 检测结果随机性较大, 为提高检测精度, 必须

辅助其他的无损检测技术<sup>[6]</sup>。  
本工作通过分析低碳钢静载拉伸过程中磁信号的变化规律, 初步探索磁记忆现象本质, 推动该技术在工程界的推广和应用。

## 1 实验

### 1.1 试件

实验材料选用低碳钢, 加工成如图 1 所示板状拉伸试样, 试样表面粗糙度  $R_a$  为  $1.6\mu\text{m}$ , 屈服强度 350MPa, 抗拉强度 500MPa。在试样表面画 4 条水平测量线, 分别以 1, 2, 3, 4 等标号代表。14 条垂直测量线与水平线交叉成 56 个测量点。水平及垂直测量线间隔均为 10mm。实验时探头垂直接触试件表面, 沿水平测量线分别检测各测点磁信号值。试件共加工 7

件,选取其中 3 件进行分析,分别以 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup> 试件表示。其余试件变化趋势相似。

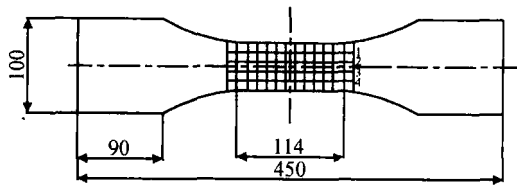


图 1 试件形状及测量线示意图  
Fig. 1 Specimen shape and measured lines

1.2 实验仪器

静载拉伸实验在 MTS810 型液压伺服试验机上

进行,试验机静态载荷误差±0.5%。试件表面磁信号的测量使用 EMS-2003 金属磁记忆与涡流检测诊断仪。为避地磁及试验环境干扰,试验过程中所有试件的检测均无磁性工作台上在同一位置以相同放置方向检测。

2 实验结果及分析

2.1 试件加载前与断裂后表面磁信号的变化

拉伸加载前沿各试件表面的 4 条水平测量线检测,表面各点的漏磁场法向分量信号  $H_p(y)$  值与位移之间关系如图 2 所示。

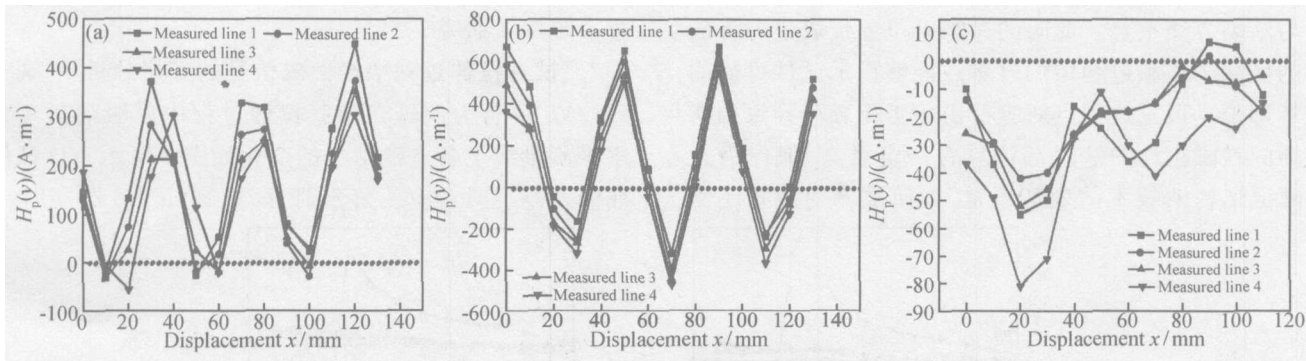


图 2 试件加载前表面磁信号示意图  
(a) 试件 1; (b) 试件 2; (c) 试件 3  
Fig. 2  $H_p(y)$  distribution of specimens surface before application of tension  
(a) specimen 1; (b) specimen 2; (c) specimen 3

由各测量点的检测结果可知,各试件表面初始磁状态不同,1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup> 试件存在多个过零点,且过零点位置各异。3<sup>#</sup> 试件过零点较少。各试件表面磁信号  $H_p(y)$  值在一定范围内变化,其中 2<sup>#</sup> 件表面漏磁信号最强烈,最大值达 670 A/m,最小值达 -471 A/m。而 3<sup>#</sup> 件表面漏磁信号最弱,  $H_p(y)$  值在 7 ~ -81 A/m 之间变动。造成各试件表面磁信号分布不均匀的原因是由于机加工会导致试件表面产生残余应力,试件尽管为同一种材料制成,但内部组织、成分等存在微观不均匀性,相同的工序机加工后,表面残余应力不同,使得各试件表面初始磁状态不同。更有资料报道<sup>[7]</sup>,同一种材料制作的试件,即使经过退火消除残余应力处理后,表面磁信号的分布仍然不同。

为观察初始磁状态对受载过程中磁信号变化的影响,本实验研究中对试件不作退火处理。

由于实验材料塑性韧性良好,各试件断裂后均呈现较大塑性变形,延伸率达 33% 左右。将各试件断口对紧后重新检测各测量点磁信号值,其漏磁信号与位移之间关系如图 3 所示。

由图 3 可知,初始磁信号较强的 2<sup>#</sup> 件断口处磁场强度信号依旧最大,最高值达 2000 A/m。而初始磁信号最小的 3<sup>#</sup> 件断口两侧的磁信号最弱。这表明初始磁信号对断口处磁信号的强弱有一定影响,需要进一步补充实验进行分析。

断口处磁信号相比较受载前急剧增强,远离断口处漏磁信号数值趋于一致,断口两侧极性相反。

拉伸受载前试件检测距离段内存在的多个过零点在拉伸过程中向断口处漂移汇聚,最终只在断口处存在唯一过零点,试件表面初始磁信号的过零点消失。

目前磁记忆技术在工程应用中对过零点是否作为铁磁构件危险部位的表征参量存有异议,一般要结合磁场梯度  $K$  值进行综合分析。本实验结果表明,试件断裂位置与其表面初始过零点并不对应,说明对于未受载的铁磁试件,过零点与加工历史相关,初始信号中的过零点并不能确定该部位为潜在的危险区域。试件受载后零点逐渐漂移向某一位置聚拢,尤其当试件发生明显颈缩后停机检测,零点已移至颈缩处,继续加载颈缩处断裂。断裂部位磁场强度急剧改变极性,零值

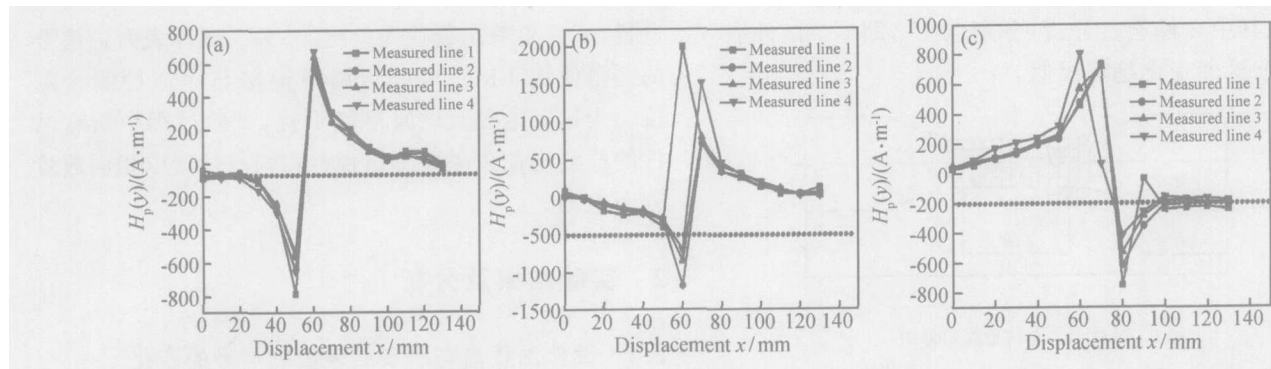


图 3 试件断裂后表面磁信号分布示意图

(a) 试件 1; (b) 试件 2; (c) 试件 3

Fig. 3 Magnetic signal distribution from specimens surface after fracture

(a) speimen 1; (b) speimen 2; (c) speimen 3

线与断裂界线重合。此时的过零点位置代表了即将破坏的区域。加载过程中的过零点能够指示试件可能的破坏部位。可见过零点对表征由于工作载荷导致损伤破坏的铁磁构件的危险部位具有一定意义, 但作为金属磁记忆检测技术的表征参量, 如何准确使用它还需

进一步深入研究。

2.2 试件拉伸过程中表面磁信号的变化分析

以 3<sup>#</sup> 件为例研究静载拉伸过程中屈服前后 4 条水平测量线上各点磁信号的变化如图 4 所示。该试件屈服及断裂时对应载荷分别为 70, 100kN。

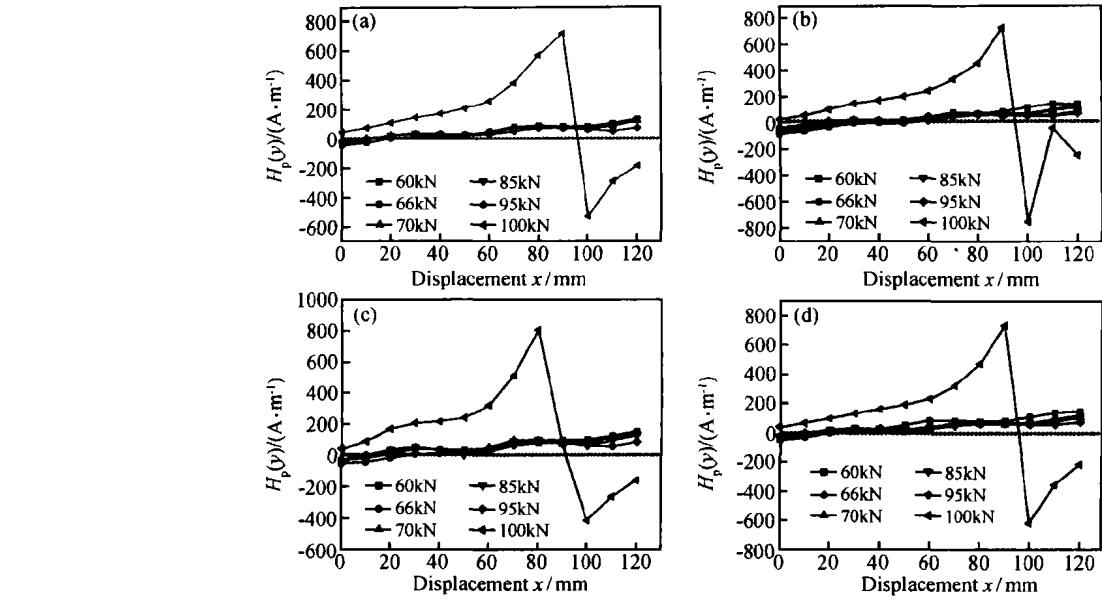


图 4 3<sup>#</sup> 件拉伸过程中表面测量线磁信号曲线变化图 (a) 测量线 1; (b) 测量线 2; (c) 测量线 3; (d) 测量线 4

Fig. 4 Magnetic signal curves of all measured lines (a) line 1; (b) line 2 (c) line 3 (d) line 4

由图 4 可见, 在 60~ 95kN 载荷下, 4 条水平测量线上各点的漏磁信号具有相似的变化趋势。试件屈服前后各测量点磁信号均比较接近, 无明显波动变化。试件表面波动强烈的初始磁信号逐渐被“拉平”, 趋近零值线, 即使试件出现明显颈缩后, 漏磁场值依然变化不大。信号的急剧改变发生在试件断裂后, 由初始的数十安米剧增到数百安米。

有关铁磁材料塑性变形后漏磁信号的变化已有研究报导, 但磁信号会增强亦或减弱的说法不统一<sup>[8, 9]</sup>。

本次实验结果表明, 试件在拉伸载荷作用下, 当由弹性变形阶段进入塑性变形阶段, 磁信号由初始无规律状态转变为较有规律磁状态。尤其进入塑性阶段后, 对应载荷的增加, 磁信号曲线相似, 数值波动很小, 只在断裂时才发生磁信号的激变。

在外载荷的作用下, 铁磁材料首先发生弹性变形, 此时其内部结构中晶格格点上原子相互位置改变, 偏离平衡位置, 晶格扭曲变形, 但原子移动距离通常小于无外力时的两原子的平衡间距, 直达到一个新的平

衡。弹性变形均匀发生在整个试件长度范围内。拉伸载荷的作用使得磁场强度矢量的方向逐渐转向平行于张力的方向,使得试件表面加载前波动较大的初始漏磁信号逐渐趋向一致,曲线变平缓。载荷的继续加大,铁磁材料进入塑性变形阶段后,原子错动距离加大,变形开始集中于拉伸距离段的某一部位。位错的滑移在晶界产生位错塞积,使晶体内部应力增加。施加的轴向载荷做功为试件继续变形提供所需能量,同时使磁畴结构改变,逐渐形成磁有序的平衡排列。当载荷达到其强度极限时,试件断裂,断口处有序排列的磁极被拉断,该部位形成正负磁极,磁信号发生激变。

3 结论

- (1) 试件受载前的初始磁状态对断裂后的试件信号有影响,初始磁信号不同的试件拉断后断口处磁信号亦有较大差别。
- (2) 初始磁信号中的过零点在拉伸过程中发生漂移汇聚,最终集中在断口处。磁记忆信号的过零点对判断缺陷具有一定意义。
- (3) 试件拉伸过程中磁信号相比较初始磁状态信号变平缓。塑性变形阶段内表面磁信号变化很小,而断裂后信号激变,两侧改变极性。

参考文献

[ 1 ] 任吉林,林俊明.金属磁记忆检测技术[ M ].北京:中国电力出版社,2000.

[ 2 ] DUBOV A A. Study of metal properties using the method of magnetic memory [ J ]. Metal Science and Heat Treatment, 1997, 39 ( 9- 10 ): 401- 402.

[ 3 ] DUBOV A A. Express method of quality control of a spot resistance welding with usage of metal magnetic memory [ J ]. Welding in the World, 2002, 46( SPEC ): 317 - 320.

[ 4 ] DUBOV A A. Diagnostics of Metal Items and Equipment by Means of Metal Magnetic Memory[ A ]. Proceedings of NDT' 99 and UK Corrosion' 99 Conference[ C ]. Poole, Dorset, 1999. 287- 293.

[ 5 ] 任吉林,高春法,宋凯.电站铁磁构件的磁记忆检测[ J ].仪器仪表学报. 2003, 24( 5 ): 470- 476.

[ 6 ] DUBOV A A. A Technique for monitoring the bends of boiler and steam-line tubes using the magnetic memory of metal [ J ]. Thermal Engineering, 2001, 48( 4 ): 289 - 295.

[ 7 ] 张卫民,刘红光,孙海涛.中低碳钢静拉伸的磁记忆效应的试验研究[ J ].北京理工大学学报, 2004, 24( 7 ): 571 - 574.

[ 8 ] 周克印,张静,姚恩涛,等.构件隐性损伤的磁记忆检测方法研究[ J ].南京航空航天大学学报, 2004, 36( 6 ): 713 - 717.

[ 9 ] 陈玉玲,葛森,关森.应力集中引起的金属磁记忆现象的研究[ J ].中国矿业大学学报, 2004, 33( 5 ): 592 - 595.

基金项目: 自然科学基金资助项目( 50235030 );“十五”预先研究项目( 41327030202 )

收稿日期: 2005-03-28; 修订日期: 2005-07-15

作者简介: 董丽虹( 1972- ),女,讲师,博士研究生,研究方向为焊接冶金及无损检测,联系地址:北京装甲兵工程学院再制造国家重点实验室( 100072 )。

( 上接第 39 页 )

的预成型体的回弹比粉末法的回弹小,因溶液法定型时,织物纤维都被定型剂浸润、固定。但采用粉末法定型时,只是织物表面的一部分被定型剂固定,大部分纤维束内的纤维并没受影响,因此回弹较大,定型效果较差。

3 结论

- ( 1 ) ES-T321 可以制备成丙酮溶液或粉末定型材料,定型使用方便。ES-T321 的熔点比 3266 树脂的 RTM 注射温度窗口高,因此具有较好的抗冲刷性能,能够保证定型织物在树脂注射时不被冲散。
- ( 2 ) ES-T321 在 3266 树脂的固化温度下能溶解在树脂中,并与 3266 的固化剂反应。加入定型剂对树脂混合体系的热性能几乎没有影响。
- ( 3 ) 粉末处理的织物中的定型剂大部分在织物外表面的纤维束表面,而溶液法处理的织物中定型剂在织物的纤维束内外都有。

- ( 4 ) 采用定型剂定型处理的预成型体的回弹效应小,并且溶液法定型的预成型体的回弹比粉末法更小。

参考文献

[ 1 ] HASKO G, DEXTER H B, LOOS A. Application of science-based RTM for fabricating primary aircraft structural elements [ J ]. Journal of Advanced Material, 1994, ( 10 ): 9- 15.

[ 2 ] 继植. 新技术在 RAH-66 设计和制造中的应用[ J ]. 航空制造工程, 1994, ( 6 ): 6- 9.

[ 3 ] SAMUEL P GARBO, KENNETH M ROSEN. Composites usage on the RAH-66 comanche[ J ]. Vertiflite, 1992, 38( 2 ): 8- 13.

[ 4 ] Q/6S 1963- 2004, EST- 21 低成本用定型剂[ S ].

[ 5 ] 许亚洪,邢军,益小苏. RTM 工艺用环氧树脂 3266 固化工艺的研究及其应用[ A ]. 第十三届全国复合材料学术会议论文集[ C ]. 北京: 航空工业出版社, 2004. 483- 487.

收稿日期: 2005-06-07; 修订日期: 2005-11-20

作者简介: 乌云其其格( 1969- ),女,博士研究生,主要从事先进复合材料树脂基体及预浸料方面的研究.联系地址:北京 81 信箱 12 分箱( 100095 )。