

静载拉伸 45 钢材料的金属磁记忆信号分析

Metal Magnetic Memory Testing Signals of 45 Carbon

Steel During Static Tension Process

王 丹¹, 董世运¹, 徐滨士¹, 陈群志², 董丽虹¹

(1 装甲兵工程学院 装备再制造技术国防科技重点

实验室, 北京 100072; 2 北京航空技术研究中心, 北京 100076)

WANG Dan¹, DONG Shi-yun¹, XU Bin-shi¹, CHEN Qun-zhi², DONG Li-hong¹

(1 National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armed Forces Engineering,

Beijing 100072, China; 2 Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100076, China)

摘要: 研究了静载拉伸过程中三种规格 45 钢轴状试件表面法向磁场强度 $H_p(y)$ 值的变化规律, 并对 $H_p(y)$ 曲线斜率的绝对值 $|k|$ 与拉应力 σ 之间的对应关系进行了分析。结果表明: 试件规格相同时, $|k|$ - σ 的对应关系相同, 即弹性范围内, $|k|$ 随 σ 的增加而增大; 加载至屈服极限附近时, $|k|$ 出现最大值; 进入塑性变形阶段后, $|k|$ 出现减小的趋势; 拉断后, $H_p(y)$ 曲线在断口附近发生转折, 并在断口两侧出现峰值。试件规格不同时, 受载区域长度对 $|k|$ - σ 关系影响显著, 即所受拉应力相同, 受载区域的长度增大, $|k|$ 减小。

关键词: 金属磁记忆; 静载拉伸; 磁场强度; 斜率; 多规格

中图分类号: TG115.28 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2008)08-0077-04

Abstract: The variations of the magnetic intensity, $H_p(y)$, on the direction perpendicular to the surface of 45 carbon steel tensile specimens with shaft-shaped geometry and three different dimensions were determined during the static tension testing by using the metal magnetic memory. The relationship between the tension stress σ and the absolute value of slope of $H_p(y)$ curve $|k|$ was investigated. In the full elastic range, experimental results showed that, when the dimension of the specimens was given, the magnitude of $|k|$ increased with increasing the loading magnitude. However, near the yield limit in the plastic range, the slope reached a local maximum and then decreased. After abrupture, an abrupt change in $H_p(y)$ curve occurred near the fracture surface. When the dimensions of the specimens were different, the relationship between σ and $|k|$ was significantly influenced by the length of the specimens. Results showed that with increasing of the specimen length, the magnitude of $|k|$ decreased.

Key words: metal magnetic memory; static tension; magnetic intensity; slope; dimension

金属磁记忆检测(Metal Magnetic Memory Testing, 简称 MMT)是一种新兴的无损检测技术。它利用了地磁场中加载铁磁性金属构件所产生的磁记忆效应, 通过对构件表面磁场的法向分量 $H_p(y)$ 进行检测, 确定被测构件表面的缺陷和应力集中区。这种磁记忆检测技术将实现对铁磁构件中, 以应力集中为特征的危险部件和部位的准确探测。因此, MMT 问世便受到世界各国无损检测界的重视, 竞相开展研究, 并已在电力、锅炉压力容器等部门开始了推广应用^[1-3]。

现有对金属磁记忆现象的研究和应用大多是定性的。为了明确工作应力与表面磁场 $H_p(y)$ 之间的关

系, 实现金属磁记忆检测进行定量化表征, 本研究采用形式简单的静载拉伸实验方法, 考察了三种规格 45 钢轴状试件受不同拉应力作用后, 表面磁场法向分量 $H_p(y)$ 的变化规律, 为确定铁磁性材料的力磁关系奠定了实验基础。

1 实验方案

1.1 试件

试件材料选用 45 钢, 按照 GB228—76 标准加工, 并进行 850℃ 的退火处理。试件规格分别为 $L100\phi8$ 、 $L70\phi8$ 和 $L70\phi6$ 三种, 编号见表 1。 $L100\phi8$ 的轴状静

载拉伸试件的实物如图 1 所示, 在试件平行段的一条母线上标记线段 AB ($L100\phi8$ 试件的 AB 长度为 100mm; $L70\phi8$ 和 $L70\phi6$ 试件的 AB 长度为 70mm), 作为固定的测量区域。

表 1 试件编号
Table 1 Specimen number

Number	Dimension	Quantity
A1, A2, A3	$L100\phi8$	3
B1, B2, B3	$L70\phi8$	3
C1, C2, C3	$L70\phi6$	3

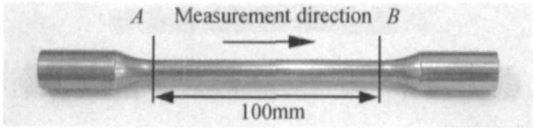


图 1 轴状静载拉伸试件
Fig. 1 The shaft-shaped tensile specimen

1.2 实验设备

静载拉伸实验在美国 MTS810 型液压伺服试验机上进行。

试件表面漏磁场的 $H_p(y)$ 值的测量, 使用厦门爱德森电子有限公司生产的 ESM-2003 型智能磁记忆/涡流检测仪, 配合非铁磁材料的三维电控平移台进行。

1.3 实验方法

试件在拉伸试验机缓慢加载至预定载荷水平(每次载荷增加 1kN)后, 从拉伸试验机上取下, 按固定的方位放置。三维电控平移台带动磁记忆检测探头, 以固定的移动速度和提离高度(0.2mm), 沿试件上所标的一条固定母线从 A 点到 B 点测量。

由于轴状试件为轴对称的旋转体, 因此近似的认为试件任何一条母线的测量结果将等同于其他母线上的测量结果。

检测过程是在实验室条件下进行的, 环境磁场以相对恒定的地磁场为主。

2 结果与分析

2.1 试件拉伸断裂前 $H_p(y)$ 检测曲线特征

由于三种规格试件几乎具有相同的变化规律, 本节只选用规格为 $L100\phi8$ 的试件对此进行分析。从拉伸试验机上的 $P-\Delta$ 曲线可知, 试件在加载到约 20kN (拉伸应力为 400MPa) 时发生屈服。

如图 2 所示, 给出了试件 A1 逐次加载到 1, 5, 10, 20, 30kN 的 $H_p(y)$ 检测曲线。可见, 试件断裂前的 $H_p(y)$ 曲线均近似为斜直线, 且在试件中部具有唯一

的过零点。

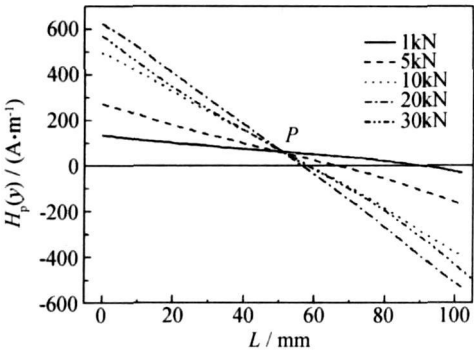


图 2 A1 试件逐级加载后的 $H_p(y)$ 检测曲线
Fig. 2 $H_p(y)$ curves of A1 specimen after each increasing tensile load

众所周知, 拉伸载荷能导致铁磁性材料试件内部在拉应力轴线方向上的磁场增强。也就是说, 应力与环境磁场的共同作用使得受载试件在应力轴线方向上被磁化。由于轴状试件静载拉伸过程中平行部分各个截面所受的应力相同, 所产生的这种力-磁效应也是相同的, 因而将试件的这一磁化视为均匀磁化, 磁化强度记为 \vec{M}_0 ; 卸载就类似于技术磁化中外加磁化磁场的去除, 将卸载后的剩余磁化强度记为 \vec{M}_r , \vec{M}_0 和 \vec{M}_R 的方向均与拉应力轴线方向平行。这样, 经过拉伸的试件就类似于如图 3 所示均匀磁化的条形磁铁的中间部分: 从 N 极向 S 极检测时, $H_p(y)$ 曲线由 $H_p(y)^+$ 向 $H_p(y)^-$ 平缓过渡, 类似直线, 且存在唯一的自然过零点^[5]。

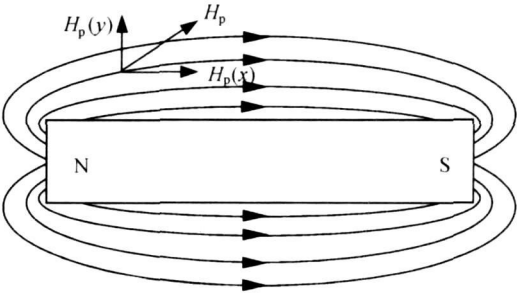


图 3 条形磁铁外围磁场示意图
Fig. 3 The sketch map of an bar magnet

另外, 曲线呈现出绕一固定的中心点 P 对称的分布, 这一点 P 正位于试件的中部。这一现象也说明了试件中磁场的增强也是均匀、对称的。由于检测过程中, 试件受到环境磁场-地磁场的影响, 使得 P 点的 $H_p(y)$ 值不为零。

2.2 静载拉伸过程中 $H_p(y)$ 信号的变化规律

从 2.1 中已知, 试件断裂前 $H_p(y)$ 曲线均近似为

斜直线, 因此对曲线进行线性拟合, 求得直线斜率 k , 并以 k 的绝对值 $|k|$ 作为 $H_p(y)$ 检测曲线的特征参量, 对 $H_p(y)$ 信号的变化进行分析。

图 4 给出了三根 $L100\phi8$ 试件的 $|k|$ 与试件所受拉伸应力 σ 的对应关系曲线。

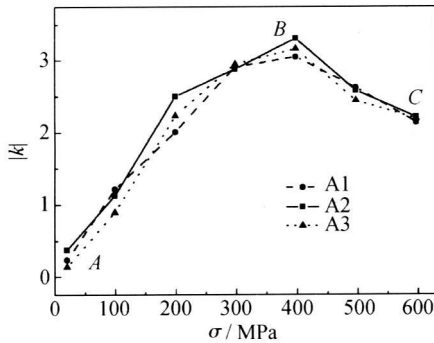


图 4 同规格三试件拉应力 σ 与 $|k|$ 的对应关系
Fig. 4 The relationship between σ and $|k|$ of the same model specimens

(1) 试件在弹性范围内加载, 见如图 4 曲线 AB 段, $H_p(y)$ 曲线斜率的绝对值 $|k|$ 随拉应力的增加而增大, 即 $H_p(y)$ 检测曲线逐渐变陡。

(2) 以往的研究表明, 拉应力为材料内部磁畴组织的转向提供了能量, 对磁畴转向起到了推动作用^[6]。增大载荷, 试件所受应力增大, 也加强了对磁畴转向起的推动作用。此时, 在应力与固定的环境磁场的共同作用下, 磁畴的磁化向量逐渐转到拉应力的作用方向上, 使得该方向上的磁场逐渐增强, 材料内部拉应力轴线上的剩余磁化强度 \vec{M}_r 逐渐增强。因此, 试件表面漏磁场 H_p 也随之增强, $H_p(y)$ 曲线逐渐变陡。

(3) 试件加载至屈服极限 (400MPa) 附近时, 见图 4 曲线的峰值点 B , $H_p(y)$ 曲线斜率的绝对值 $|k|$ 出现最大值, 这表明应力导致材料磁场的增强存在饱和状态。

随着试件进入屈服阶段, 材料中的位错密度增大, 这对磁畴结构起到了强烈的钉扎作用, 阻碍了磁畴运动的进行, 因而试件达到了磁化饱和状态^[6]。此时, 试件材料内部的剩余磁化强度 \vec{M}_r 也达到了一个极大值, $H_p(y)$ 曲线斜率的绝对值 $|k|$ 也表现为最大。

(4) 试件进入塑性变形阶段后, 见图 4 曲线的 BC 段, $H_p(y)$ 曲线斜率的绝对值 $|k|$ 有减小的趋势。

试件进入塑性变形阶段以后, 塑性变形非常显著, 例如拉伸至 30kN (约 600MPa) 卸载后, 试件伸长到了 107mm。这种大的塑性变形将使得原有的磁畴组织发生大的变形, 甚至部分磁畴组织可能因此而发生分割和破坏。因而使得试件中剩余磁化强度 \vec{M}_r 降低,

表面磁场强度降低, $H_p(y)$ 曲线斜率的绝对值 $|k|$ 随着塑性变形的加剧而逐渐减小。

上述结果及分析表明, 试件所受的拉应力 σ 与 $H_p(y)$ 曲线斜率 (即 $H_p(y)$ 变化梯度) 绝对值 $|k|$ 之间存在明确的对应关系。也就是说 $|k|$ 值实际反映了同材料、同热处理状态、同规格试件所受最大拉应力 σ 的大小; 那么, 在判定出试件是否发生屈服后, 就可以通过测定试件的 $|k|$ 值, 推知同类试件所受的最大拉应力 σ 。

2.3 试件拉伸断裂后 $H_p(y)$ 检测曲线特征

A1, A2, A3 三试件均加载到 35kN (约 700MPa) 附近断裂。图 5 给出了 A 型三个试件拉伸断裂后断口对齐的 $H_p(y)$ 检测曲线, 并在曲线上标出了断口位置。

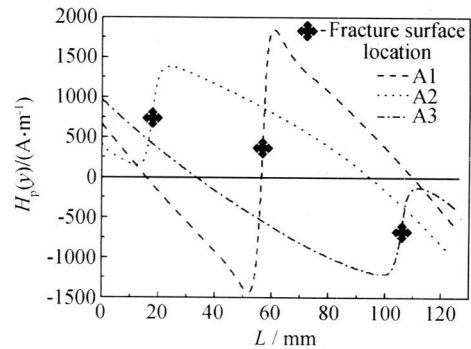


图 5 A 型三个试件断裂后的 $H_p(y)$ 检测曲线
Fig. 5 $H_p(y)$ curves of the three model A specimens after abruption

从图 5 可以看到, 试件拉断后的 $H_p(y)$ 曲线在断口处发生折转, 并在断口的两侧存在峰值。各个试件在断口两侧 $H_p(y)$ 曲线的走势与断裂前相同, 即曲线斜率 k 的正负符号相同, 存在至少一个过零点; 在断口处 $H_p(y)$ 曲线发生折转, 曲线斜率 k 的正负符号改变, 且绝对值 $|k|$ 相对曲线的其他位置明显变大。

经过前面的分析可知, 试件拉伸后已经被均匀磁化, 形成类似条形磁铁的弱磁体。试件拉断后, 断开的两段试件内部的磁化强度方向并没有发生变, 因此 $H_p(y)$ 曲线的走势不变, 但原贯穿试件内部的磁力线将会在断口处“泄漏”, 使得断口两侧形成极性相反的两个磁极, 导致 $H_p(y)$ 曲线在断口两侧出现峰值, 断口处形成与断裂前“反向倾斜的陡峭曲线”。因此, 整条曲线可以看作是断裂前 $H_p(y)$ 曲线与断口处“反向倾斜陡峭曲线”的叠加。图 5 中, A1 试件断裂后的 $H_p(y)$ 曲线的这种“叠加”现象最为典型, 并且几乎在试件断裂处过零。如果将试件对接的更为紧密, 就使得试件断口处“泄漏”出来的磁力线大量减少, 曲线断口处 $[H_p(y)_{\text{峰}} - H_p(y)_{\text{谷}}]$ 值也就相应减小, 即“反向倾斜陡峭曲线”的变化幅度减小。当试件的断口处于

靠近两端的位置时, 曲线叠加的结果就会出现断口处不过零的现象, 就如同图 5 中 A2 和 A3 试件的 $H_p(y)$ 检测曲线。

另外, 从 2.1(1) 中分析已知, 光滑静载拉伸试件断裂前的 $H_p(y)$ 检测曲线只存在一个“自然过零点”, 并且在等拉伸应力作用下该过零点必然处于条型均匀磁体的中部, 而试件发生颈缩断裂位置却是随机的, 并不都是在试件的中部。这也就是说, 静载拉伸试验中试件断裂前的 $H_p(y)$ 检测曲线过零点是不能指示试件的最终断裂位置的。

2.4 试件的规格对 $|k|-\sigma$ 关系的影响

从 2.2 节中已经发现, 同材料、同热处理状态、同规格试件具有固定的 $|k|-\sigma$ 对应关系。但对于材料相同, 热处理状态相同、只有规格不同的试件, $|k|-\sigma$ 关系也发生了变化。

图 6 给出了本次实验采用的三种规格试件 A1 ($L100\phi8$), B1 ($L70\phi8$) 和 C1 ($L70\phi6$) 的 $|k|-\sigma$ 关系曲线。从图 6 可以看出, 长试件 $|k|-\sigma$ 关系曲线的变化幅度显著的小于两种短试件, 即同材料、同热处理状态, 试件受到相同的拉伸应力作用时, 长试件的 $|k|$ 明显低于另外两个短试件。

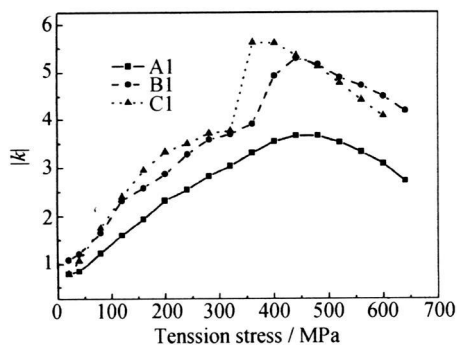


图 6 三种规格试件拉应力载荷 σ 与 $|k|$ 的对应关系

Fig. 6 The relationship between σ and $|k|$ of the three different model specimens

这主要是由于同种材料、同热处理状态的试件受到相同的应力作用时, 产生的力-磁效应也是相同的, 因此各个试件受载部分两端的磁场强度也是相同的, 即 $H_p(y)^+$ 相同、 $H_p(y)^-$ 相同。长试件的轴向受载区域较大, $H_p(y)^+$ 向 $H_p(y)^-$ 过渡相对缓慢, 表现为 $H_p(y)$ 曲线斜率较小; 短试件的轴向受载区域较小, $H_p(y)^+$ 向 $H_p(y)^-$ 的过渡相对加快, 表现为 $H_p(y)$ 曲线斜率较大。也就是说, 在不能确定受载区域长度的情况下, $|k|$ 无法表征试件所受最大拉应力的大小。

另外, 从图 6 中也可以看到, 长度相同, 截面尺寸不同的两根试件的 $|k|-\sigma$ 关系曲线几乎相同。这说明

与拉伸载荷垂直的截面尺寸对金属磁记忆现象的影响不大。这是相同的长度和同样的力-磁效应所产生的结果。

3 结论

(1) 轴状试件拉断前的 $H_p(y)$ 检测曲线近似为斜直线, 且具有唯一的过零点。但此过零点并不能指示试件的最终断裂位置。

(2) 对于固定规格试件, 表面磁场 $H_p(y)$ 值与拉伸载荷存在明确、固定的对应关系: 弹性范围内, $H_p(y)$ 曲线斜率的绝对值 $|k|$ 随载荷的增加而增大; 加载至屈服极限附近时, $|k|$ 出现最大值; 进入塑性变形阶段后, $|k|$ 有减小的趋势; 拉断后, $H_p(y)$ 曲线在断口附近发生折转, 并存在峰值。

(3) 试件拉伸过程中, $H_p(y)$ 检测曲线的斜率绝对值 $|k|$ 反映了该试件所受工作应力的多少。在实际中可以利用 $|k|-\sigma$ 的对应关系, 通过测定 $|k|$ 对固定规格零件的受载情况进行定量检测。

(4) 受载区域长度对 $|k|-\sigma$ 的对应关系影响显著。因此, 对于不能确定受载区域的零部件, $|k|$ 不能直接反映出零件的受载情况, 需要借助其他的检测量, 例如 $[H_p(y)_{\text{峰}} - H_p(y)_{\text{谷}}]$ 值, $H_p(x)$ 值等。

参考文献

- [1] DOUBOV A A. Diagnostics of metal item and equipment by means of metal magnetic memory [A]. Proc of ChSNDT 7th Conference on NDT and International Research Symposium [C]. Shan-tou China: 1999. 181- 187.
- [2] DOUBOV 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.
- [3] DOUBOV 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: 317- 320.
- [4] 张慧三. 大学物理学第三册电磁学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [5] 邱俊. 物理模型及金属试样的磁记忆曲线分析 [A]. 2004 年全国电磁(涡流)检测技术研讨会论文集 [C]. 辽宁鞍山: 108- 114.
- [6] 董丽虹, 徐滨士, 董世运, 等. 金属磁记忆技术检测低碳钢静载拉伸破坏的实验研究 [J]. 材料工程, 2006, (3): 40- 43.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50505052); 再制造重点实验室基金项目 (9140C85010106JS9101); 国家自然科学基金重点项目 (50735006)

收稿日期: 2007-10-15; 修订日期: 2008-02-01

作者简介: 王丹 (1977-), 男, 博士研究生, 主要从事金属磁记忆检测方面的研究工作, 联系地址: 北京长辛店崔村 77# 装甲兵工程学院 装备再制造技术国防科技重点实验室 (100072)。E-mail: loyaknight@163.com 或 paulwind@yeah.net