

应力诱发铁磁材料预制切口产生的二维弱磁场信号特征研究

Character of Stress-induced Two-dimensional
Low Intensity Field on Precut Notch Zone
of Ferromagnetic Material

董丽虹, 徐滨士, 王慧鹏, 董世运

(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)

DONG Li-hong, XU Bin-shi, WANG Hui-peng, DONG Shi-yun

(Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, Academy
of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

摘要: 为研究应力诱发切口部位产生的二维自发弱磁场信号特征, 制作 45CrNiMoVA 特种钢板状切口试件, 在 MTS810 型液压伺服实验机上施加轴向拉应力, 采用 EMS2003 磁记忆仪和 RM-1 磁记忆仪采集不同应力水平下切口部位法向分量 $H_p(y)$ 信号、水平分量 $H_p(x)$ 信号, 分析弹性变形阶段内二维弱磁信号特征及变化规律。结果表明: 拉应力诱发切口部位 $H_p(x)$ 信号呈现正向磁尖峰特征, $H_p(y)$ 信号呈现磁异变波峰波谷特征; $H_p(x)$ 信号的尖峰值和水平基线幅值、 $H_p(y)$ 信号的峰峰值和峰间斜率 K 值与工作应力存在线性相关性。

关键词: 预制切口; 轴向拉应力; 二维弱磁场; 法向分量; 水平分量

中图分类号: TG115.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2011)12-0016-04

Abstract: In order to investigate the signal character of two-dimensional low intensity field, sheet specimens of 45CrNiMoVA steel were made. Axial stresses were applied to the specimens on a MTS 810 hydraulic servo machine, and an EMS-2003 metal magnetic memory apparatus and an RM-1 metal magnetic memory apparatus were used to collect horizontal component $H_p(x)$ signals and normal component $H_p(y)$ signals. The variations of the two-dimensional low intensity field signals in the elastic deformation stage were analyzed. The results showed that $H_p(x)$ signal curves presented a character of magnetic positive peak, while $H_p(y)$ signal curves presented abnormal magnetic wave crest and hollow under the effect of applied tensile stress. There were linear relationships between the peak values, horizontal baseline mean values of $H_p(x)$ signal curves and the applied tensile stress respectively, in the same way there existed linear relationships between the peak-to-peak value, the peak-to-peak slope coefficient of $H_p(y)$ signal curves and the applied tensile stress respectively.

Key words: precut notch; axial stress; two-dimensional low intensity field; horizontal component; normal component

铁磁材料是广泛应用的重要结构材料, 由铁磁材料制作的零部件是机械装备主要的承载结构件, 获知铁磁零件的服役载荷信息对机械强度设计极为重要^[1,2], 借助先进的无损检测技术评估铁磁零件的应力状态是解决这一问题的有效方法^[3]。

金属磁记忆技术 20 世纪 90 年代末期由俄罗斯学者正式提出, 依靠铁磁材料在服役过程中形成的自发漏磁场信号来发现应力集中部位, 该技术是利用过去被忽略的铁磁材料自身所具有的微弱磁性而形成的新

方法, 在铁磁材料早期损伤评估中极具潜力而受到工程界关注^[4-6]。在前期针对金属磁记忆技术开展的基础研究中已经发现, 工作应力作用下, 光滑的板状铁磁试件会逐渐产生磁有序化现象, 试件表面自发磁化场强度与应力具有相关性^[7,8]。工程实际中使用的铁磁构件很多都存在切口、键槽等局部截面突变部位, 服役载荷导致这些区域局部应力增大, 易萌生裂纹等缺陷, 是机械零件潜在的危险部位, 需监测其应力状态以保证服役可靠性。

俄罗斯开发的磁记忆检测仪采集单一的自发漏磁场法向分量 $H_p(y)$ 信号, 受此影响, 我国开展的金属磁记忆技术的理论与应用的研究工作也基本采用 $H_p(y)$ 信号来评价铁磁材料的损伤部位及程度^[9-12], 忽视了对自发漏磁场的另一分量, 即水平分量 $H_p(x)$ 信号的分析研究。在金属磁记忆技术工程应用的推广过程中, 为提高检测评价的准确性, 需要获取尽可能丰富的自发漏磁场信息, 为此有必要开展二维弱磁信号的特征研究。

本工作通过在平板试件表面加工预制切口, 模拟实际零件的截面突变状态, 在单调拉应力作用下, 采集预制切口区域二维弱磁信号, 研究二维弱磁场信号与应力相关性。

1 实验材料及方法

实验材料选用 45CrNiMoVA 钢, 其化学成分: C 0.42~0.49, Si 0.17~0.37, Mn 0.50~0.80, P ≤ 0.030, S ≤ 0.030, Cr 0.80~1.10, Ni 1.30~1.80, Mo 0.20~0.30, V 0.10~0.20, 余量为 Fe。其力学性能: 屈服强度 1323MPa, 抗拉强度 1470MPa, 伸长率 7%, 截面收缩率 35%。加工厚度为 6mm 的平板试样, 在试样表面采用线切割技术加工一系列不同宽度和深度的人工预制切口, 垂直切口等间隔布置检测线, 试件及预制切口的形状尺寸如图 1 所示。预制切口具有一系列的宽度和深度, 长度均与试件等宽。沿试件表面等间隔布置检测线, 检测线垂直穿过预制切口, 扫描长度 70mm。

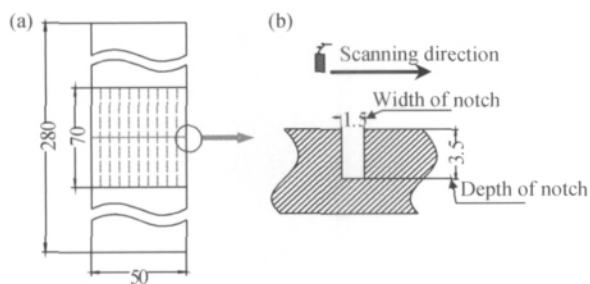


图 1 试件扫描线布置(a)及沿扫描线方向预制切口剖面图(b)

Fig. 1 Scanning lines on the surface of specimen (a) and the cross-section of precut notch along scanning lines of precut notch (b)

采用 MTS810 型液压伺服实验机进行静载拉伸实验, 实验机静态误差为 $\pm 0.5\%$ 。实验过程中, 采用 EMS-2003 型金属磁记忆检测仪测量表面自发弱磁场法向分量 $H_p(y)$ 信号; 采用 RM-1 型磁记忆检测仪测量弱磁场垂直于试件受力方向的水平分量 $H_p(x)$ 信号。

实验时, 试件夹持在实验机的上下夹头之中, 当施加的拉伸载荷达到某一预定值时, 保持载荷一定时间, 然后小心取下试件, 沿南北方向放置于非磁性三维扫描平台上。控制扫描架带动探头保持固定的提离值, 按扫描方向扫描检测线, 采集各检测线上的 $H_p(y)$ 信号。检测结束后试件装夹于实验机上重新加载至更高载荷, 重复上述检测步骤, 为保证试件处于弹性变形阶段, 最大加载载荷远小于材料的屈服极限。

2 实验结果

为深入分析预制切口产生的二维弱磁场信号特征, 以宽度 1.5mm、深度 3.5mm 的预制切口为例, 选取试件中心扫描线的检测结果进行分析, 与其他检测线的信号特征一致。

2.1 自有漏磁场水平分量 $H_p(x)$ 信号变化规律

试件承受轴向载荷前, 探头扫描试件预制切口及其附近区域, 采集自有漏磁场水平分量信号。实验结果显示, 初始状态下, 预制切口部位呈现磁异变尖峰, 指示出切口的存在。切口两侧光滑材料表面的 $H_p(x)$ 信号幅值比较一致, 信号均匀连续, 基本呈水平线分布特征。施加 30MPa 的轴向拉应力后, 磁曲线中对应切口部位的 $H_p(x)$ 信号尖峰的峰值降低, 两侧光滑材料部位信号幅值升高; 继续加大载荷, 检测受载 60MPa 后试件表面信号, 发现切口部位磁异变尖峰峰值增加。随后加大载荷, 异变尖峰变得更加锐利, 峰值不断增加, 尖峰两侧磁曲线水平部分幅值持续升高。检测结果如图 2 所示。

2.2 自有漏磁场法向分量 $H_p(y)$ 信号的变化规律

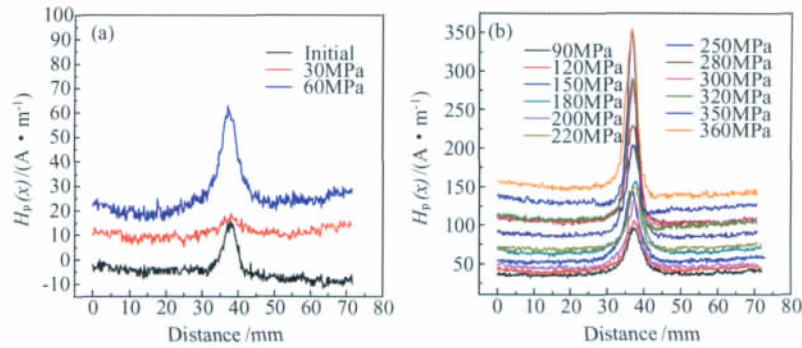
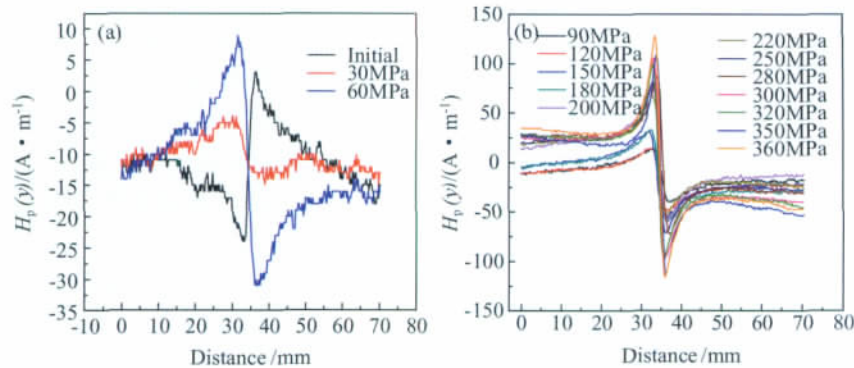
实验过程中检测试件表面法向分量 $H_p(y)$ 信号, 其变化规律与水平分量不同(图 3)。

初始状态下, 在预制切口部位呈现磁异变峰谷跃变的形貌特征, 左侧为波谷, 右侧为波峰; 施加 30MPa 的拉应力后, 切口部位的异变峰发生反转, 变为左侧波峰, 右侧波谷。随后载荷继续增加, 磁异变峰仍然保持这一形貌特征, 只是波峰波谷之间的峰峰值不断增大。切口两侧光滑材料部位信号趋向均匀一致, 呈水平线分布特征。

3 分析与讨论

3.1 应力导致的信号反转

应力作用下自有漏磁场法向分量 $H_p(y)$ 信号的磁异变峰发生反转的现象, 前期已有文献报导。外加应力施加在铁磁材料上, 将产生一个等效磁场使铁磁

图 2 试件表面 $H_p(x)$ 信号与拉应力关系曲线Fig. 2 $H_p(x)$ signals on the surface of specimen under different tensile stress图 3 试件表面 $H_p(y)$ 信号与拉应力关系Fig. 3 $H_p(y)$ signals on the surface of specimen under different tensile stress

材料的磁性改变,其等效磁场的表达式如下:

$$H_s = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial E_s}{\partial M} = \frac{3}{2} \frac{\sigma}{\mu_0} \left(\frac{\partial \lambda}{\partial M} \right)_\sigma (\cos^2 \theta - \nu \sin^2 \theta) \quad (1)$$

式中: λ 为磁致伸缩系数; μ_0 为真空磁导率; M 为磁化强度; E_s 为磁弹性能; σ 为外加应力; θ 为外加应力与磁场方向夹角; ν 为泊松比。

依据文献[13,14],磁致伸缩系数 λ 可描述为 $\lambda = \gamma M^2$, 式中 γ 是一个与应力 σ 有关的系数,

$$\gamma = \gamma_{11} + \gamma_{12}\sigma = 7 \times 10^{-18} - 1 \times 10^{-25}\sigma \quad (2)$$

试件检测时南北方向放置,忽略地磁偏角的影响,可设 $\theta=0$,将式(2)带入(1)式,则等效磁场的表达式:

$$H_s = \frac{3\gamma\sigma}{\mu_0} M = \frac{3\sigma M}{\mu_0} (7 \times 10^{-18} - 1 \times 10^{-25}\sigma) \quad (3)$$

由式(3)可知,当铁磁材料承受外加应力作用时,应力性质及大小将影响磁性的变化。外加应力为拉应力,拉应力值小于 70MPa 时,其产生的等效磁场将与地磁场的磁化方向相同;当拉应力大于 70MPa 时,等效磁场将与地磁场的磁化方向相反。由现有的磁机械效应的理论分析可知,70MPa 的拉应力值是铁磁材料表面出现磁性反转现象的阈值。

预制切口的二维弱磁信号检测结果显示, $H_p(y)$ 信号受载 30MPa 后,即出现磁异变波峰波谷的反转,

左侧波谷变为波峰,右侧的波峰转变为波谷,表明磁性变换(图 3(a))。 $H_p(x)$ 信号的初始状态与受载 30MPa 相比,磁异变尖峰峰值降低,显示 30MPa 的拉应力降低了预制切口部位的原有磁性。实验结果显示, $H_p(x)$ 信号和 $H_p(y)$ 信号在拉应力作用下产生的磁性反转特征不同,并且在较理论计算值更低的应力水平下,磁性即改变,表明前述的理论计算值偏于保守,有待深入分析应力诱发磁性变化的根源。

3.2 应力与 $H_p(y)$ 信号和 $H_p(x)$ 信号特征值之间的关系

根据铁磁试件预制切口的二维信号特点,提取 $H_p(x)$ 信号磁异变尖峰值和两侧水平基线信号值,做出两个特征量与工作应力之间的关系曲线,如图 4 所示。

由图 4 可知, $H_p(x)$ 信号的尖峰值与水平基线幅值均随工作应力的增大而增加,除个别数据点波动外,考虑检测误差,两个特征量与工作应力之间基本呈线性相关性,表明两个特征量均可表征工作应力的大小。对特征参量的数据点进行拟合,得到线性拟合公式:

$$y = -0.9378 + 0.54779x \quad (4)$$

式中: y 为 $H_p(x)$ 信号的特征值; x 为工作应力。

提取 $H_p(y)$ 信号磁异变峰峰值和正负峰之间的

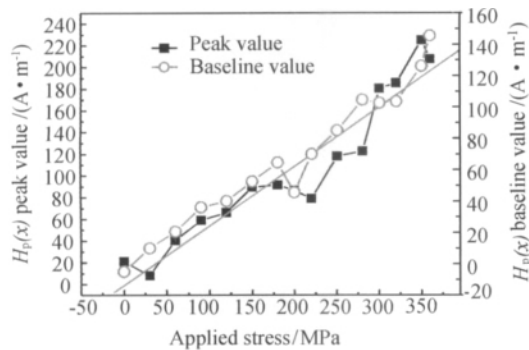
图4 $H_p(x)$ 信号特征值与工作应力之间的关系

Fig. 4 Relationship between the eigenvalue of $H_p(x)$ signals and applied stress

斜率 K 值,做出两个特征量与工作应力之间的关系曲线,如图5所示。

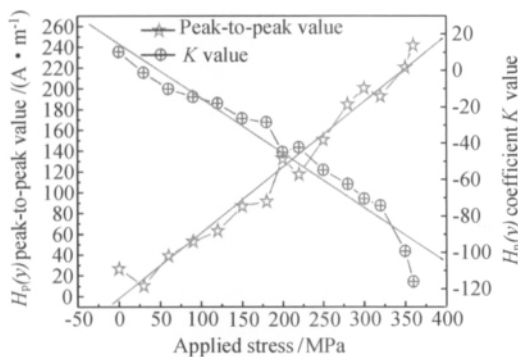
图5 $H_p(y)$ 信号特征值与工作应力之间的关系

Fig. 5 Relationship between the eigenvalue of $H_p(y)$ signals and applied stress

$H_p(y)$ 信号的两个特征参量变化趋势相反,磁异变峰峰值随工作应力的增大而增加,正负峰间斜率 K 值随工作应力增加而降低,两个特征参量与工作应力之间呈现线性相关性。对特征参量数据点进行线性拟合,得到磁异变峰峰值及正负峰间斜率拟和公式:

$$\text{峰峰值: } y = -1.92969 + 0.63207x \quad (5)$$

式中: y 为 $H_p(y)$ 信号的峰峰值; x 为工作应力。

$$K \text{ 值: } y = 14.73056 - 0.30047x \quad (6)$$

式中: y 为 $H_p(y)$ 信号的正负峰间斜率值; x 为工作应力。

综上所述, $H_p(x)$ 信号的尖峰值和水平基线幅值及 $H_p(y)$ 信号的峰峰值和峰间斜率 K 值等特征量均能表征铁磁试件工作应力。

4 结论

(1) 轴向应力能够激励铁磁材料自发磁化。工作应力能够诱发预制切口部位生成二维弱磁场, 水平分量 $H_p(x)$ 信号呈现磁异变尖峰形貌, 法向分量 $H_p(y)$

信号呈现磁异变波峰波谷形貌特征。

(2) $H_p(x)$ 信号的特征量磁尖峰值和水平基线值均随轴向拉应力的增加而增大; $H_p(y)$ 信号的特征量磁异变峰峰值随拉应力增加而增大, 而峰间斜率 K 值的变化趋势相反。

(3) 二维弱磁信号的特征量与工作应力具有线性相关性。

参考文献

- [1] 机械设计手册编委会. 疲劳强度设计/机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [2] 童团刚, 张华全, 谢崇全, 等. 机械零件静强度可靠性设计[J]. 机械研究与应用, 2009, (3): 89—91.
- [3] 尹何迟, 颜焕元, 陈立功, 等. 磁巴克豪森效应在残余应力无损检测中的研究现状及发展方向[J]. 无损检测, 2008, 30(1): 34—41.
- [4] DOUBOV A A. Screening of weld quality using the magnetic metal memory effect[J]. Welding in the World, 1998, 41: 196—198.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] DONG Li-hong, XU Bin-shi, DONG Shi-yun, et al. Variation of stress-induced magnetic signals during tensile testing of ferromagnetic steels[J]. NDT&E International, 2008, 41: 184—189.
- [8] DONG Li-hong, XU Bin-shi, DONG Shi-yun, et al. Stress dependence of the spontaneous stray field signals of ferromagnetic steel[J]. NDT&E International, 2009, 42: 323—327.
- [9] 于风云, 张川绪, 吴森. 检测方向和提高值对磁记忆检测信号的影响[J]. 机械设计与制造, 2006, (5): 118—120.
- [10] 李路明, 王晓凤, 黄松岭. 磁记忆现象和地磁场关系[J]. 无损检测, 2003, 25(8): 387—389.
- [11] 池永滨, 刘宇哲, 胡先龙, 等. 汽轮机叶片金属磁记忆诊断技术[J]. 无损检测, 2002, 24(10): 440—442.
- [12] 万升云, 熊腊森. 磁记忆技术在铸钢件检测中的应用研究[J]. 铸造技术, 2006, 27(12): 1289—1292.
- [13] LO C C H, LEE S J, LI L, et al. Modeling stress effects on magnetic hysteresis and barkhausen emission using a hysteretic-stochastic model[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(5): 2418—2420.
- [14] 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.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975283, 50975287)

收稿日期: 2011-05-30; 修订日期: 2011-09-05

作者简介: 董丽虹(1972—), 女, 博士, 讲师, 研究方向为无损检测与再制造寿命预测, 联系地址: 北京市丰台区长辛店杜家坎21号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: lihong.dong@126.com