

金属磁记忆检测技术用于再制造毛坯寿命预测的试验研究*

董世运, 徐滨士, 董丽虹, 王 丹

(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)

摘 要: 为探讨金属磁记忆无损检测技术预测再制造毛坯的剩余寿命, 采用金属磁记忆技术检测了拉-拉疲劳过程中45钢光滑试件和预制缺陷试件表面的磁记忆信号变化规律。结果表明: 45钢光滑试件疲劳试验过程中, 在试件断裂之前, 随疲劳载荷作用循环次数的增加, 试件表面磁信号的分布规律变化不大, 试件断裂后断口处磁信号发生激变; 表面预制槽型缺陷的45钢试件在疲劳试验过程中, 其表面磁信号在预制缺陷扩展后发生变化, 且缺陷部位磁信号峰峰值随裂纹长度增加而持续增大。研究分析认为, 金属磁记忆检测技术对疲劳裂纹的扩展情况有较好的反映, 有望通过建立磁记忆信号峰峰值——疲劳裂纹长度 a 的关系模型, 实现金属磁记忆技术对再制造毛坯剩余寿命的定量方法。但是, 采用金属磁记忆技术预测疲劳裂纹萌生前铁磁材料的损伤程度尚需进一步探索。

关键词: 金属磁记忆技术; 再制造毛坯; 寿命预测; 试验研究

中图分类号: TH16

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2006)05⁺-0071-05

Experiment Research on Metal Magnetic Memory methods for Life Prediction of Remanufacturing Old Parts

DONG Shi-yun, XU Bin-shi, DONG Li-hong, WANG Dan

(National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing, 100072 China)

Abstract: Metal Magnetic Memory (MMM) method was employed to detect the magnetic sign variation for 1045 steel samples in the fatigue tests in order to study the technology that MMM method predicts residual life of the remanufacturing old parts. Results showed that the magnetic sign distribution on surface of the 1045 steel smooth sample varied a little with loading cycles before the sample ruptured, though the sign near the ruptured line varied abruptly. As for the 1045 steel sample with a prefabricated groove, the surface magnetic sign distribution varied with the groove expanded, i.e., the sign value near the groove increased. It was concluded that MMM method can disclose growing of the fatigue cracks, and it is possible to predict residual life of the remanufacturing old parts after upsetting the relationship of magnetic sign and fatigue crack length, a . However, MMM method still needs further researches to predict the fatigue extent of the metal without fatigue cracks initiating.

Key words: metal magnetic memory methods; remanufacturing old parts; life prediction; experiment research

0 引言

一般而言, 采用再制造技术对毛坯(失效零部件)进行再制造之前, 需要对毛坯进行失效分析及寿命预测, 明确毛坯的损伤失效情况和剩余寿命, 为再制造方案制定和再制造技术手段优选提供指

导。但是, 采用无损检测手段对毛坯进行寿命预测一直是一个难题。金属磁记忆(Metal Magnetic Memory, MMM)检测技术为铁磁性金属零件的无损寿命预测带来了希望。金属磁记忆技术最初由俄罗斯学者 Doubov Anatoli A 于1997年提出, 其技术原理可以表述为: 处于地磁环境下的铁磁构件受工作载荷的作用, 其内部会发生具有磁致伸缩性质的磁畴组织定向的和不可逆的重新取向, 并在应力与变形集中区形成的漏磁场的变化, 即磁场的切向分量 $H_p(x)$ 具有最大值, 而法向分量 $H_p(y)$ 改变符号且

收稿日期: 2006-08-01

修回日期: 2006-09-20

基金项目: *国家自然科学基金资助项目(50505052); 武器装备预研基金项目(编号略)。

作者简介: 董世运(1973-), 男(汉), 山东曹县人, 副教授。

具有零值点。这种磁状态的不可逆变化在工作载荷消除后继续保留。从而通过漏磁场法向分量 $H_p(y)$ 的测定,便可推断工件的应力集中部位^[1-2]。该技术因为具有对金属损伤早期进行检测的能力和对金属进行寿命预测的潜力而受到极大关注,国内外许多研究者对此竞相开展了研究工作^[2-6]。

文中通过 45 钢试样的疲劳试验和金属磁记忆检测试验,研究金属磁记忆检测信号与预测铁磁性,探讨采用金属磁记忆技术对铁磁性材料再制造毛坯进行寿命预测的无损检测方法。

1 试验

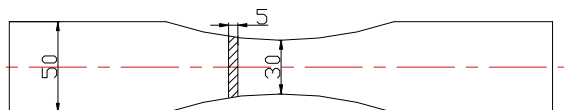
1.1 试件制备

选用 45 钢材料作为试验材料,材料的力学性能见表 1。按照航空标准制成板状光滑疲劳试件和人工预制槽型缺陷的板状光滑疲劳件,各试件形状见图 1。

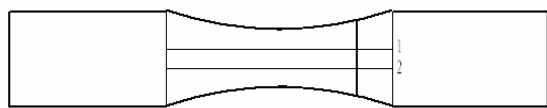
表 1 试验材料的力学性能

Table 1 Machenic properties of the expetimental steels

钢牌号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
45	400	667



(a) 45 钢板状光滑疲劳试件



(b) 疲劳缺陷件

图 1 试验试件形状示意图

Fig.1 sketches of the samples

1.2 试验仪器和试验方法

疲劳试验在 MTS-810 型液压伺服疲劳试验机上进行,试验机静态载荷误差 $\pm 0.5\%$,动态载荷误差 $\pm 1.0\%$ 。试件表面磁记忆信号的测量采用 EMS-2003 金属磁记忆/涡流检测诊断仪。检测时,为避免人工操作的误差,使用非磁性三维电控平移台控制检测探头的移动。

试验中,针对试件选取不同的应力水平进行试验,跟踪试件从未加载直至断裂的整个过程磁记忆信号的变化。采集的数据包括两部分:①沿试件长度方向的两条水平测量线上的所有磁信号;②每条测量线上 10 个等间距测量点的磁信号。检测方式分为在线(试件在实验机上未卸载状态)与离线(试件已卸载并远离铁磁性物体)两种方式交互进行。

2 试验结果及讨论

2.1 光滑试件疲劳试验过程中磁记忆信号变化规律

光滑试件拉-拉疲劳试验所施加载荷应力比 $R = 0.1$,载荷作用频率 $f = 10$ 。试验研究了四级应力水平(533 MPa、400 MPa、267 MPa、133 MPa)条件下试件表面检测磁记忆信号的变化规律,结果表明疲劳试验过程中不同应力水平下试件表面磁记忆信号具有相同的变化规律。图 2 给出了 400 MPa 条件下试件表面各测量点磁信号随循环次数变化关系。由图 2 可见,仅经过 1 次循环后,时间表面磁信号即与初始磁信号有很大差异;此后,随载荷循环周次增加,磁信号值无显著改变,直至断裂后磁信号才发生激变,断口处形成正负磁极。

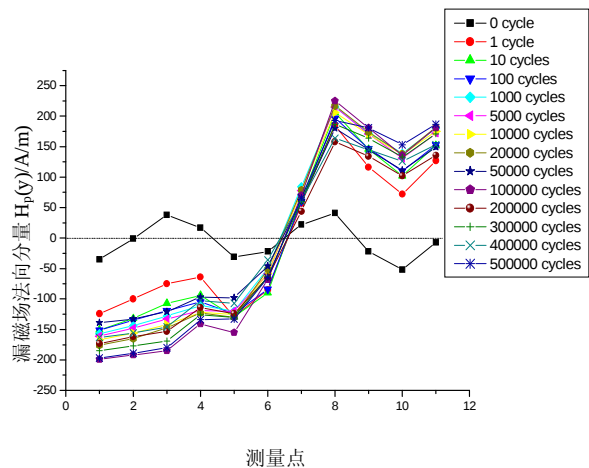


图 2 各点磁信号随循环次数变化曲线

Fig.2 Magnetic signal vs stress cycles

为明确疲劳加载过程中试件整个检测表面磁信号的变化,利用非磁性三维电控平移台控制检测探头沿 x 方向平行线扫描试件检测段整个区域,并每隔 2.5mm 采集磁记忆检测信号,作出扫描区域磁信号与载荷循环次数的三维曲线图,如图 3 所示。

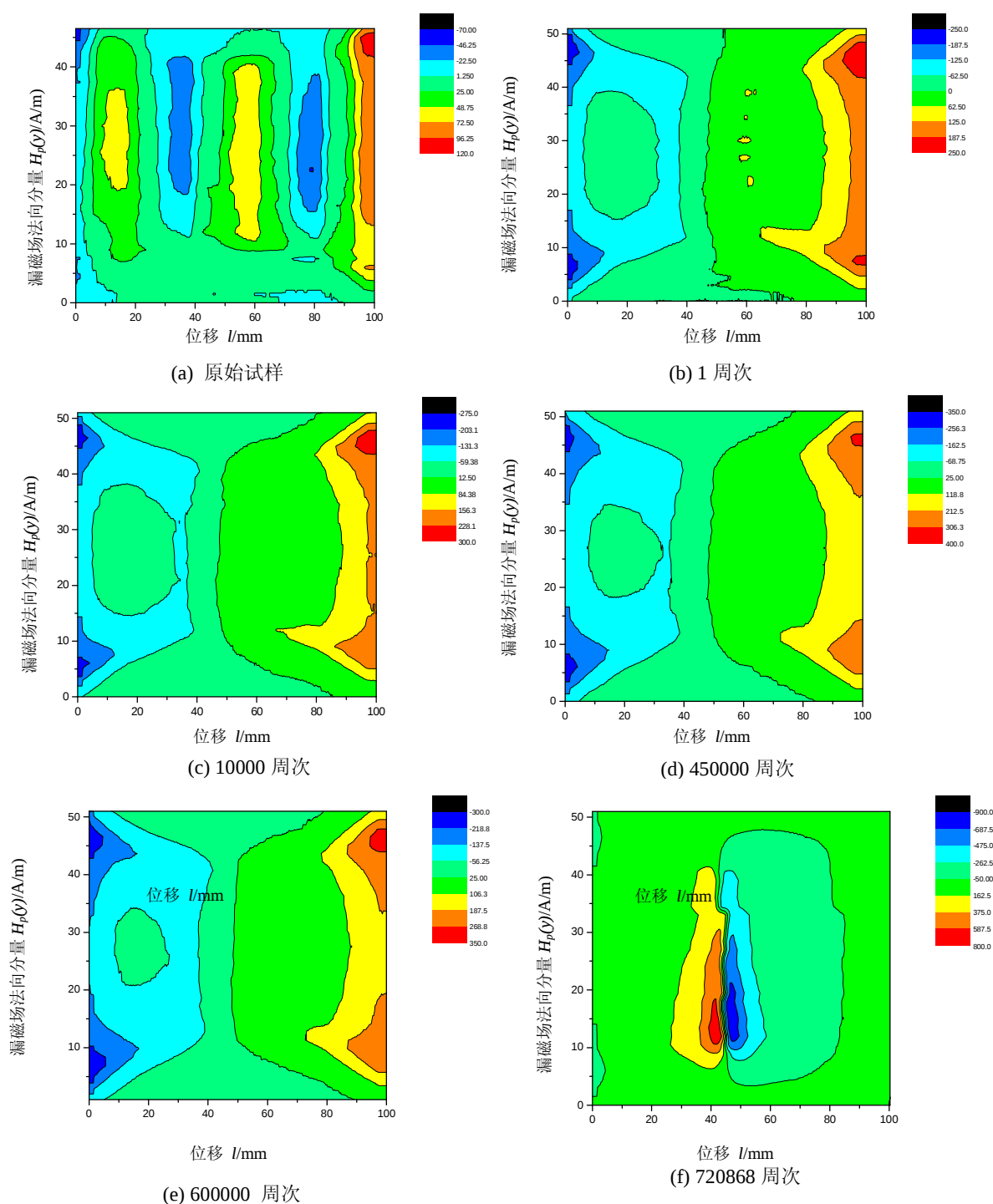


图 3 疲劳试件检测表面磁信号变化
Fig.3 Magnetic signals in the fatigue sample surface

试件未受载前具有初始磁信号, 该信号随机分布。经 1 次循环疲劳加载后, 检测的磁信号出现有规律分布, 即呈现磁有序状态, $H_p(y)$ 零值点出现在试件的中央, 以零值点为界, $H_p(y)$ 值左侧为负值, 右侧为正值, $H_p(y)$ 零值点成为正负磁极的交界点。

随循环次数的增加, 磁信号的分布规律基本相同。720868 次循环后试件断裂, 断口处磁信号激变。针对拉-拉疲劳破坏形式, 采用磁记忆技术预测疲劳裂纹萌生前铁磁材料的损伤程度尚需进一步深入探索。

2.2 表面开槽缺陷试件疲劳试验中磁记忆信号变化规律

为明确磁记忆信号对试件表面缺陷的反映,探索金属磁记忆技术应用于预测铁磁部件剩余寿命的方法,采用图 1 (b) 形状的人工预制表面缺陷的 45 钢试件进行拉-拉疲劳试验。该类型试件共制作两件 (编号分别为 F1 # 和 F2#), 表面开槽缺陷尺寸, 即长度×宽度×深度分别为: F1 # 件缺陷 0.5 mm×39.5 mm×0.5 mm, F2#件缺陷 0.5 mm×39.5 mm×1.5 mm。

F1 # 件分别检测正面一条水平测量线 (标记为 P) 及反面相对应的水平测量线 (标记为 N)。试验结果表明: F1 # 试件表面具有一定的初始磁信号, 范围在 $-40 \text{ A/m} \sim +80 \text{ A/m}$ 内, 磁信号曲线具有波峰波谷的变化, 存在许多干扰峰值信号。根据追踪的机加工工艺过程中磁记忆信号的变化结果可以判断, 这些干扰峰值信号应为磨削加工引入。疲劳加载后, 经几周次循环后磁信号曲线分布特征即稳定, 不再随载荷循环周次增加而改变。图 4 给出了疲劳循环 60 万次后的磁信号检测曲线, 图中红色虚线指示为试件上人工预制缺陷的位置。可以看出, F1 # 件正反面的检测曲线在缺陷位置均有明显指示, 该位置磁信号曲线有异常峰值并且曲线斜率 K 值有突变。检测试件反面时, 缺陷距离检测面约 4.5 mm, 磁记忆信号对缺陷位置同样有明确显示, 该位置磁信号峰值大于其它位置。

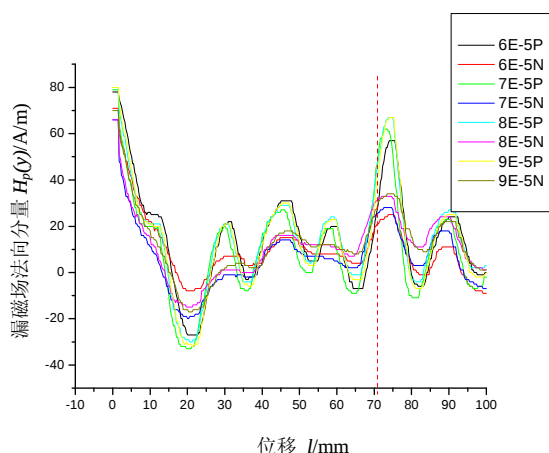
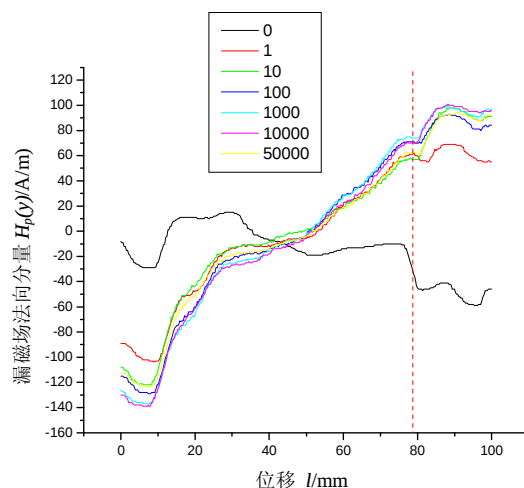


图 4 F1# 试件 60 万次后正反面测量曲线

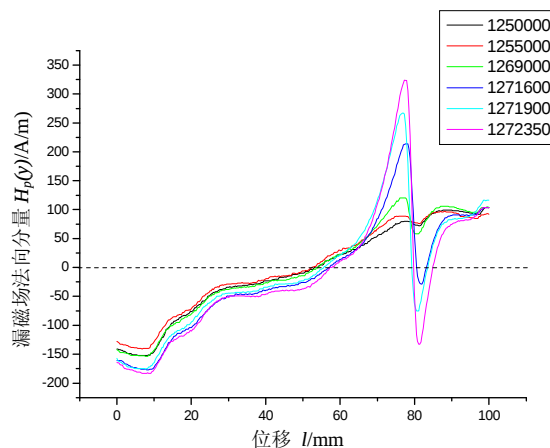
Fig.4 Magnetic signals from two sides of F1# sample after 600 thousand cycles

F2#件试件疲劳试验追踪到了预制缺陷扩展成贯穿性裂纹直至断裂的过程。F2 # 件在疲劳加载前

经过振动退磁, 其表面初始磁信号较 F1 # 件纯净。看磁信号曲线分布特征, 正反面的磁记忆信号对缺陷都有明确指示 (红线指示位置), 该部位峰值有比较清楚的变化, 如图 5 所示。试件未加载前表面具有一定的初始磁信号, $H_p(y)$ 值较小, 但依然有波峰波谷的变化。疲劳循环几周次后磁信号曲线特征即稳定, 不再随循环次数的增加而改变。加载循环至 125 万周次后, 预制的表面缺陷开始扩展, 疲劳裂纹萌生, 此时磁信号曲线发生变化, 随裂纹长度增加, 缺陷部位磁曲线的峰峰值持续增加, 直至试件最后断裂。这说明, 在裂纹扩展阶段, 磁信号曲线的峰峰值可以指示裂纹的长度。由图 5 (b) 可知, 金属磁记忆检测技术对疲劳裂纹的扩展情况有较



(a) 寿命前期



(b) 裂纹扩展阶段

图 5 F2# 试件疲劳加载过程中磁信号变化

Fig.5 Magnetic signal changes during fatigue of the sample F2 #

好的反映, 随裂纹扩展, 预制缺陷部位磁曲线的峰峰值及变化梯度 K 值持续增加, 通过建立磁记忆检测信号法向分量 $H_p(y)$ 峰峰值——疲劳裂纹长度 a 的实验室模型并进行修正, 有望建立金属磁记忆技术对再制造毛坯剩余寿命的定量检测方法。

5 结 论

采用金属磁记忆无损检测技术检测了拉—拉疲劳过程中 45 钢试件表面的磁记忆信号变化规律。

(1) 针对 45 钢光滑试件, 随疲劳载荷作用循环次数的增加, 试件表面磁信号的分布规律基本相同; 直至试件断裂, 断口处磁信号才发生激变。针对拉—拉疲劳破坏形式, 采用金属磁记忆技术预测疲劳裂纹萌生前铁磁材料的损伤程度尚需进一步深入探索。

(2) 针对表面预制槽型缺陷的 45 钢试件, 在疲劳载荷循环作用下试件表面预制缺陷开始扩展后, 磁信号发生变化, 且随裂纹长度增加, 缺陷部位磁曲线的峰峰值持续增加, 直至试件最后断裂。这说明, 在预制缺陷部位的裂纹扩展阶段, 磁信号曲线的峰峰值可以指示裂纹的长度, 即金属磁记忆检测技术对疲劳裂纹的扩展情况有较好的反映, 有望通过建立磁记忆检测信号 $H_p(y)$ 峰峰值——疲劳裂纹长度 a 的关系模型, 实现金属磁记忆技术对再制造毛坯剩余寿命的定量检测方法。

- [1] Doubov Anatoli A. Diagnostics of metal items and equipment by means of metal magnetic memory [C]. Proc of ChSNDT 7 Conference on NDT and International Research Symposium, Shantou : 1999. 181-187.
- [2] 林俊明, 林春景, 林发炳, 等. 基于磁记忆效应的一种无损检测新技术 [J]. 无损检测, 2000, 22 (7) : 297-299.
- [3] 任吉林, 郭冠华, 宋凯, 等. 金属磁记忆检测机理的探讨 [J]. 无损检测, 2002, 24(1): 29-31.
- [4] 董丽虹, 徐滨士, 董世运, 等. 拉伸载荷作用下中碳钢磁记忆信号的机理 [J]. 材料研究学报, 2006, 20(4): 440-443.
- [5] 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.
- [6] 尹大伟, 董世运, 徐滨士, 等. 金属磁记忆无损检测方法研究进展 [J]. 无损探伤, 2005, 29(2) : 1-5.

作者地址: 北京丰台长辛店杜家坎 21 号 100072
再制造工程系
Tel: (010)66718541 Fax: (010)66717144
E-mail: syd422@sohu.com

参考文献: