

# 不同应力集中系数下磁记忆信号影响因素研究

## Study on Influence Factors of Magnetic Memory Signals Under Different Stress Concentration Factors

王慧鹏,董世运,董丽虹,徐滨士

(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)

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

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

**摘要:**以 45CrNiMoVA 钢为实验材料,加工不同应力集中系数的试件进行拉拉疲劳实验,采用磁记忆检测仪检测不同载荷及疲劳周次时试件不同位置的磁记忆信号。结果表明:载荷及疲劳周次的增加,均会使磁曲线顺时针转动,且载荷的影响明显强于疲劳周次;不同位置磁记忆信号特征不同。出现疲劳裂纹后,在一定范围内异变峰峰值显著增大。

**关键词:**磁记忆检测;磁记忆信号;应力集中;拉拉疲劳;异变峰

中图分类号: TG115.28 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)12-0035-04

**Abstract:** The tension-tension fatigue tests were carried out with specimens under different stress concentration factors made of 45CrNiMoVA steel. The magnetic memory signals of different scan lines under different loads and fatigue cycles were measured by magnetic memory instruments. The results showed that the signal curves rotated clockwise as the increase of load and cycle, and load played a much more important role in the rotation. The magnetic memory signals showed different characteristics on the different measured lines. The peak-to-peak value of abnormal peaks increased dramatically in a certain range after fatigue crack initiation.

**Key words:** magnetic memory testing; magnetic memory signal; stress concentration; tension-tension fatigue; abnormal peak

机械设备中许多关键零部件大多由铁磁性材料制成,它们在制造和运行过程中,往往由于各种微观或宏观的应力作用而产生应力集中。在应力集中区域,极易萌生各种类型的微观内部裂纹(如位错滑移变形),导致腐蚀、疲劳和蠕变的加速,逐渐演化成为宏观裂纹,最终由于裂纹扩展而导致工件破坏,造成灾难性后果<sup>[1]</sup>。因此,金属构件应力集中程度的无损检测研究,对构件失效预防及性能评估具有重要意义。

常规的无损检测方法(超声、涡流、磁粉、X射线等)只能对业已形成的裂纹进行检测,而对应力集中所造成的疲劳损伤却无能为力。金属磁记忆检测技术(Metal Magnetic Memory Testing, MMMT)则较好地弥补了这个不足,该方法能够准确地检测以应力集中为特征的危险部件和部位,是迄今为止能够对铁磁工件进行早期损伤诊断的较好的无损检测方法<sup>[2-4]</sup>,已经广泛地应用于机械、电力、航天航空及石油化工等领域<sup>[5-7]</sup>。近些年来,一些学者对疲劳过程中磁记忆信号的变化展开了研究,并取得了重要进展<sup>[8,9]</sup>。

本工作通过对不同应力集中系数试件在不同载荷水平及疲劳周次下不同检测位置的磁记忆检测,研究了载荷、疲劳周次及检测位置对不同应力集中程度工件的磁记忆信号的影响,不仅可以为磁记忆技术评估铁磁材料应力集中程度提供理论依据和指导,而且具有实际工程应用价值。

## 1 实验方案

### 1.1 试件

试件材料选用具有优良抗疲劳性能的 45CrNiMoVA 合金结构钢,其化学成分与力学性能如表 1、2 所示。加工应力集中系数为 1~5 的 5 种试件。试件为板状,两侧预置切口,随应力集中系数增大,预置切口的尖锐程度增加,试件形状及检测线布置如图 1 所示。其中 A、B 表示检测线位于中心线的上、下方,其后数字则表示该检测线与中心线的距离,单位为 mm。检测线长为 100mm。

表1 实验材料的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of experimental material (mass fraction/%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Fe
45CrNiMoVA	0.42-0.49	0.17-0.37	0.50-0.80	≤0.030	≤0.030	0.80-1.10	1.30-1.80	0.20-0.30	0.10-0.20	Bal

表2 实验材料的力学性能

Table 2 Mechanical properties of experimental material

Steel	$\sigma_s$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\delta_5$ /%	$\psi$ /%	$\alpha_k$ /(J·cm <sup>-2</sup> )
45CrNiMoVA	1323	1470	17	35	39

他铁磁性工件,环境磁场是相对恒定的地磁场。

## 2 结果与讨论

### 2.1 载荷及疲劳循环周次对磁记忆信号的影响

分析检测结果发现,各检测线磁记忆信号的幅值不同,但是呈现相同的变化规律,本工作只选取具有代表性的检测信号及其特征进行分析。

图2为在不同载荷及疲劳周次下,应力集中系数分别为2,5(简记为 $K_t=2, K_t=5$ )的试件B10检测线的磁记忆信号曲线,其横坐标为检测距离,纵坐标为磁记忆信号。实验过程, $K_t=2$ 试件未出现裂纹; $K_t=5$ 试件在最大载荷为40kN加载条件下,循环1000次后,下侧切口根部出现裂纹,循环至5000次时,裂纹长至5mm,停止实验。

从图2可以看出,试件初始磁记忆信号的幅值均处于地磁场信号幅值范围内,显示试件具有纯净的初始状态。加载后,每条磁曲线均是左侧信号为正,右侧信号为负。检测线的中间位置呈现波峰波谷的分布特征,而在此区域之外,曲线基本是一条直线,载荷及疲劳周次的增加,均能使磁曲线逆时针转动。相同载荷下,随着疲劳周次的增加,曲线逆时针转动,但是这种转动并不明显(见图2(a),(c));相同疲劳周次时,随着载荷增大,曲线逆时针转动效果显著,但转动幅度逐渐减小(见图2(b),(d))。虽然磁记忆曲线随着载荷及疲劳周次的增加而发生逆时针转动,但是在应力集中区域(40~60mm区域内)出现的异变峰幅值并未发生显著的改变,只是在试件出现裂纹后,异变峰才会显著地增大。

施加轴向载荷前,由于经过真空热处理退磁,试件内部磁畴结构的磁矩取向是随机分布的,其对外作用相互抵消,因而试件宏观上显示极微弱的磁性<sup>[10]</sup>。施加轴向载荷后,由于磁致伸缩逆效应和压磁效应,试件的磁弹性性能发生变化,导致磁畴结构按照“畴壁运动(可逆)→畴壁兼并(不可逆)→磁畴转动(可逆)”的顺序变化,试件初始磁畴结构杂散分布的状态被打破,逐步向有序状态转变,表现为:在轴向载荷和疲劳周次的作用下,磁记忆信号曲线显示正负极性,随着两者的增加,磁畴结构的磁矩不断转向拉伸应力的方向,试件的自磁化程度不断提高,磁极性不断增强。

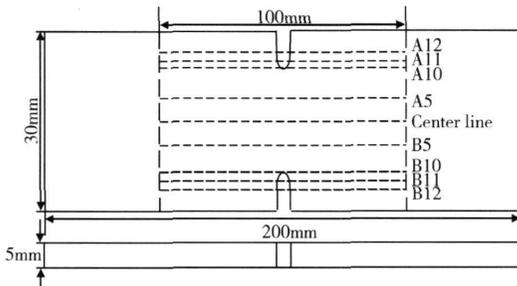


图1 试件尺寸及检测线布置示意图

Fig. 1 Sketch map of specimens and scan lines

实验前,所有试件均采用真空度为 $8 \times 10^{-1}$  Pa的WZG-30型真空热处理炉进行真空热处理退磁,将试件置于真空热处理炉中加热至850℃,保持30min,随炉冷却至室温。

### 1.2 实验设备

拉拉疲劳实验在国产JNT150471型电液伺服动静万能试验机上进行,实验机的最大动态实验力为50kN,动态载荷误差为1%,加载频率范围为0.01~40Hz。加载的动态载荷为正弦恒幅波。

选用EMS-2003型智能磁记忆/涡流检测仪,使用二通道笔式探头在非磁性的三维电控平台上采集试件表面的磁记忆信号。

### 1.3 实验方法

试件在进行疲劳试验之前,先检测其初始磁记忆信号,检测方法:将试件以固定方式置于三维电控平台,探头由三维电控平台驱动,以恒定的检测速度和提高高度,采集试件表面各检测线的磁记忆信号。

将试件竖直夹持于试验机的上下夹头之间,采用四级递增恒幅载荷对试件进行拉拉疲劳试验,各级最大载荷(简记为 $P_{max}$ )分别为10,20,30kN和40kN,应力比为0.1,加载频率为5Hz。在各级载荷下分别循环1000,3000,6000,11000疲劳周次。达到预定循环周次后,取下试件,按照相同方式采集试件各检测线的磁记忆信号。

疲劳试验在实验室进行,检测过程中,试件远离其

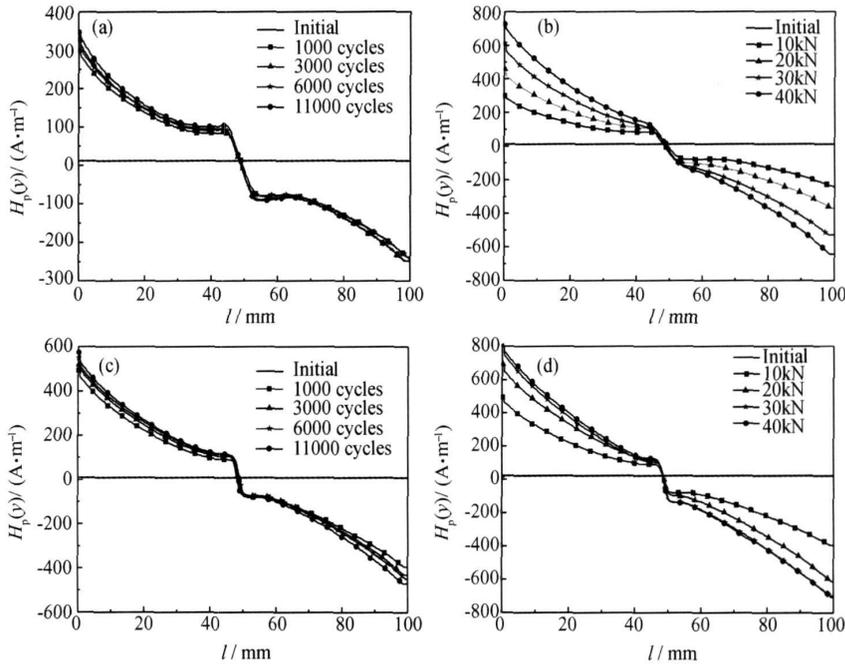


图2 不同载荷及循环周次时试件 B10 检测线的磁记忆信号

(a)  $K_t = 2, P_{\max} = 10\text{kN}$ ; (b)  $K_t = 2, 1000$  周次;(c)  $K_t = 5, P_{\max} = 10\text{kN}$ ; (d)  $K_t = 5, 1000$  周次

Fig. 2 Magnetic memory signals on measured line B10 of specimens with different loads and cycles

(a) specimen  $K_t = 2, P_{\max} = 10\text{kN}$ ; (b) specimen  $K_t = 2, 1000$  cycles;(c) specimen  $K_t = 5, P_{\max} = 10\text{kN}$ ; (d) specimen  $K_t = 5, 1000$  cycles

应力对磁场的作用可以分为可逆和不可逆两部分<sup>[11]</sup>, 其中不可逆部分是由试件上的最大应力作用决定的。实验中施加的是正弦恒幅载荷, 在各级载荷的疲劳周次中, 轴向应力产生的磁场的不可逆部分相同, 均由各级载荷的最大载荷决定, 而疲劳周次改变的则是磁场的可逆部分。因此, 同级载荷下, 各疲劳周次的磁记忆信号变化不大, 而不同载荷时, 磁记忆信号变化则十分明显。

试件在中部上下两侧的预制切口处不连续, 由于空气的磁导率远小于试件材料的磁导率, 切口处地磁场磁力线通路被截断, 切口上下表面积累极性相反的磁荷, 缺陷位置处的磁场强度增大, 磁记忆曲线在切口位置附近出现异变峰。出现裂纹之前, 由于载荷与疲劳周次的作用, 试件内部的滑移线(和/或滑移带)不断增加<sup>[12]</sup>, 异变峰信号增强, 由于滑移线/带的运动是试件内部微观的运动, 因此, 它对异变峰信号的影响不如宏观缺陷的影响强烈。当疲劳达到一定程度, 绝大部分滑移线(和/或滑移带)就基本停止运动, 异变峰信号基本不变。出现疲劳裂纹后, 试件在裂纹位置开裂, 形成了新的裂纹面, 基于相同的原理, 磁荷在裂纹(含预制缺口)位置迅速累积, 异变峰的峰峰值骤

然增大。

## 2.2 不同检测位置对磁记忆信号的影响

最大载荷为 40kN, 疲劳周次为 1000 次和 5000 次时  $K_t = 5$  试件各检测线的磁记忆信号如图 3 所示, 图 3 左下角是 40~60mm 检测区域磁的记忆信号。疲劳周次为 1000 次时, 试件尚未出现裂纹; 疲劳周次为 5000 次时, 试件左侧根部裂纹长为 5mm。

从图 3(a) 可以看出, 在出现裂纹前, 试件各检测线的磁记忆信号关于中心线对称分布, 随着与中心线距离的增大, 信号幅值不断增加, 信号异变峰的峰峰值变大。

不同位置磁记忆信号异变峰的峰峰值的变化规律是<sup>[13]</sup>: 沿裂纹扩展方向, 距裂纹尖端越近, 异变峰信号越微弱; 沿裂纹扩展的相反方向, 距裂纹尖端越远, 异变峰信号越强烈。疲劳周次为 1000 次时, 9 条检测线中, 上下 10, 11, 12mm 6 条经过切口, 其中 10mm 检测线经过切口根部。依此理论, 上述检测线上异变峰的峰峰值由大到小排列为: 12, 11, 10mm, 与实验结果相符。上下 5mm 检测线虽然不经过切口, 但亦能够“感应”到切口的存在, 磁记忆信号有微弱的波动, 略显波峰波谷形状, 指示附近裂纹的存在。

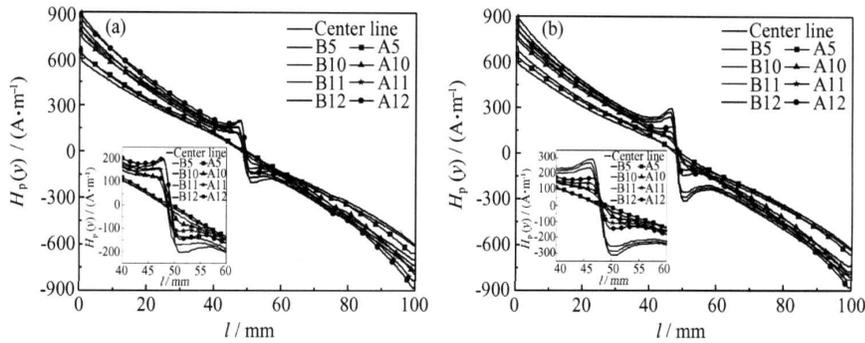


图3  $K_{I1} = 5$  试件各检测线  $P_{\max} = 40\text{kN}$  时不同循环周次的磁记忆信号

(a) 1000 周次; (b) 5000 周次

Fig. 3 Magnetic memory signals of different scan lines under different cycles when  $P_{\max} = 40\text{kN}$

(a) 1000 cycles; (b) 5000 cycles

疲劳周次为 5000 时, 左侧切口根部裂纹长为 5mm, 试件不同检测位置的磁记忆信号如图 3(b) 所示。可以看出, 磁曲线如图 3(a) 所示的对称性不复存在, 有裂纹一侧检测线信号异变峰的峰峰值比无裂纹一侧对应异变峰的峰峰值大。裂纹从左侧切口根部向右扩展了 5mm, 此时, 左 5mm 检测线恰好经过裂纹尖端, 左侧其各检测线距裂纹尖端的距离则增加了 5mm。因此, 左侧所有检测线异变峰的峰峰值均增大。该过程中, 试件右侧部分并未发生明显的变化, 故右侧检测线异变峰的峰峰值变化不大。

从图 3(b) 可以看出, 检测位置距离裂纹较远时, 磁记忆信号变化不明显, 无法指示缺陷的存在。因此, 实际检测工件时, 必须选择合适的位置, 否则可能造成缺陷的漏检。

### 3 结论

(1) 载荷与疲劳周次的增加, 均会使磁曲线顺时针转动, 同级载荷下, 疲劳周次对曲线转动的作用不明显, 而载荷对曲线的转动则有显著影响。

(2) 裂纹导致磁记忆信号出现异变峰的范围是有限的, 使用磁记忆方法检测工件时, 必须选择适当的检测位置。

#### 参考文献

[1] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.  
 [2] 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.  
 [3] DUBOV A A. Diagnostics of metal items and equipment by means of metal magnetic memory[A]. Proceedings of the NDT'99 and UK Corrosion'99 Conference[C]. UK: Poole, 1999. 287-293.

[4] DU BOV A A. A study of metal properties using the method of magnetic memory[J]. Metal Science and Heat Treatment, 1997, 39(9-10): 401-402.  
 [5] 于润桥, 徐长英, 龙盛蓉. 金属磁记忆检测在钻具评价中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(1): 191-193.  
 [6] 毕凤琴, 王文江, 戴光, 等. 压力管道焊缝的磁记忆检测[J]. 大庆石油学院学报, 2007, 31(1): 58-60.  
 [7] 邱新杰, 李午申. 油气管道焊接裂纹金属磁记忆定量分析系统[J]. 电焊机, 2008, 38(9): 94-96.  
 [8] DONG Li hong, XU Bir 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.  
 [9] SHI Chang liang, DONG Shi yun, XU Bir shi, et al. Stress concentration degree affects spontaneous magnetic signals of ferromagnetic steel under dynamic tension load[J]. NDT & E International, 2010, 43: 8-12.  
 [10] 宛德福, 罗世化. 磁性物理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1987.  
 [11] ATHERTON D L, SZQUNAR J A. Effect of stress on magnetization and magnetostriction in pipeline steel[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1986, 22(5): 514-516.  
 [12] 王翔, 陈铭, 徐滨士. 48MnV 钢拉压疲劳过程中的磁记忆信号变化[J]. 中国机械工程, 2007, 18(15): 1862-1864.  
 [13] DONG Li hong, XU Bir shi, DONG Shi yun, et al. Study on the magnetic memory signals of medium carbon steel specimens with surface crack pre-cut during loading process[J]. Rare metals, 2006, 25(spec): 431-435.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50735006); 国家自然科学基金资助项目(50975287; 50975283)

收稿日期: 2009-06-28; 修订日期: 2010-05-10

作者简介: 王慧鹏(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事金属磁记忆检测方面的研究, E-mail: wanghuipeg1983@126.com

通讯作者: 董世运, 联系地址: 北京市丰台区杜家坎 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: syd422@sohu.com