

金属磁记忆检测技术定量评估构件疲劳损伤研究

Research on Quantitative Assessment of Fatigue Damage by
Metal Magnetic Memory Methods

刘昌奎¹, 陶春虎^{1,2}, 陈 星^{1,2}, 张 兵¹, 董世运³

(1 北京航空材料研究院 中国航空工业失效分析中心, 北京 100095;

2 南昌航空大学, 南昌 330063; 3 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)

LIU Chang-kui¹, TAO Chun-hu^{1,2}, CHEN Xing^{1,2}, ZHANG Bing¹, DONG Shi-yun³

(1 Failure Analysis Center of Aviation Industries of China,

Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2 Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 3 National Key

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

摘要: 对 18CrNi4A 钢缺口试件在三级应力水平下进行疲劳试验和磁记忆信号检测, 研究金属磁记忆信号在疲劳过程中的变化规律和磁记忆检测技术对构件疲劳损伤的定量评估。结果表明: 在稳定循环阶段, 磁信号随疲劳循环周次增加无显著改变, 疲劳裂纹萌生后, 磁信号逐渐增加, 并在断裂后发生激变; 磁信号特征参量 K_{\max} , $H_p(\gamma)_{\max}$, $H_p(\gamma)_{\min}$ 和 $H_p(\gamma)_{\text{sub}}$ 值与应力水平和疲劳损伤程度存在强烈的相关性, 特征参量绝对值随应力水平或疲劳损伤程度的增加而逐渐增加; 磁信号特征参量 K_{\max} 平均值法可较准确地定量评估构件疲劳损伤, 该方法判据为: 当 $m(m = K_{\max}/K_{\max}^{\text{AV}}) > 1$, 试件存在严重的疲劳损伤。

关键词: 金属磁记忆; 应力集中; 疲劳损伤; 定量评估

中图分类号: TG115 28 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2009)08-0033-05

Abstract: Fatigue tests of notched 18CrNi4A steel specimens were carried out under three different fatigue stresses and metal magnetic memory (MMM) signals were detected. The variation of the MMM signals and the quantitative assessment of fatigue damage by MMM methods were investigated. The results show that the variation of the MMM signals is unobvious before the cracks initiate, but the MMM signals increase obviously with the propagation of the cracks and vary abruptly after rupture. There is an inherent relationship between the fatigue stress and the feature parameters K_{\max} , $H_p(\gamma)_{\max}$, $H_p(\gamma)_{\min}$ and $H_p(\gamma)_{\text{sub}}$, the larger the fatigue stress or fatigue damage is, the larger the absolute values of the feature parameters are. The fatigue damage can be assessed effectively by obtaining the average value of K_{\max} . The basis of this method is that if the value of $m(m = K_{\max}/K_{\max}^{\text{AV}})$ is larger than 1, there will be serious fatigue damage.

Key words: metal magnetic memory; stress concentration; fatigue damage; quantitative assessment

疲劳破坏是航空关键构件失效的主要形式之一, 据统计 60% ~ 80% 是属于疲劳断裂失效, 其特点是破坏产生前无明显的塑性变形, 突然发生, 危害性很大。因此, 对构件疲劳损伤的早期检测, 避免构件的疲劳失效非常重要。传统的无损检测方法是通过对构件进行早期检测, 可以有效地发现已发展成形的宏观或大部分微观缺陷, 避免工程应用中各种危害性事故的发生。但是, 对于在役金属设备及构件的疲劳早期损伤, 特别是尚未形成微裂纹的隐性损伤, 难以实施有效的评价, 从而无法避免由于意外的疲劳

损伤发展而引发的恶性事故。

金属磁记忆检测技术是由俄罗斯学者 Doubov^[1] 于 1997 年提出的一种新的损伤检测及表征方法, 其基本原理是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切向分量 $H_p(x)$ 具有最大值, 法向分量 $H_p(\gamma)$ 改变符号且具有零值点, 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 $H_p(\gamma)$ 的测定, 便可推断工件的

应力集中和损伤部位^[1,2]。该技术因具有对金属构件损伤进行早期检测及定量表征的潜力而受到国内外许多研究者的极大关注,并开展了较多的研究工作。但是,由于发展时间较短,目前只能定性的对磁记忆检测结果进行分析,难以达到对构件疲劳损伤程度的定量化表征^[3-6]。

本工作通过对 18CrNi4A 钢缺口试件在三级应力水平下进行疲劳试验和磁记忆信号检测,研究了磁信号在疲劳循环过程中的变化规律,探讨了磁场强度梯度 K 平均值法对于定量评估试件疲劳损伤的可行性。本研究结果为建立定量评估构件疲劳损伤的磁记忆评价模型奠定了基础。

1 实验材料和方法

选用应用广泛的 18CrNi4A 渗碳钢,该钢经淬火(810~830℃,1h,油冷)及低温回火(170~190℃,2h,空冷)后,具有良好的综合性能,材料拉伸性能如表 1 所示。疲劳试件形式及尺寸如图 1 所示,缺口应力集中系数 $K_t=3$ 。试件的初始磁信号受机械加工、热处理状态和运输条件等各种因素的影响较大,为了消除材料本身磁性对结果的影响,实验前对试件进行感应退磁处理。

疲劳试验采用应力控制,选用三级应力水平(最大疲劳应力分别为 $0.93\sigma_{0.2}$, $0.76\sigma_{0.2}$, $0.58\sigma_{0.2}$),正弦波形,应力比 $R=0.1$,加载频率 $f=3$ 。磁信号检测跟踪试件从未加载直至断裂的整个过程的磁信号变化。检测方式采用离线检测,即在预定周次从疲劳试验机上取下试件,按南北方向水平放置于检测平台上,采用三维电控平移台带动磁信号检测探头,以 10mm/s 的移动速率和 0.5mm 提离高度,沿试件上所标的五条检测通道从 A(北)到 B(南)方向进行。五条测量线长度为 60mm,如图 1 虚线所示。

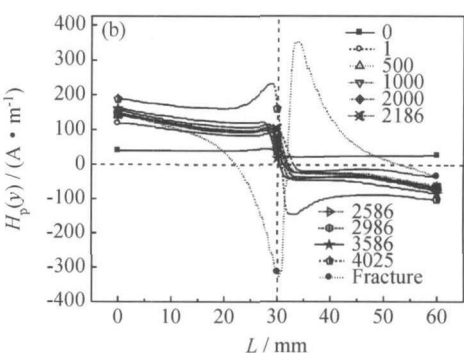
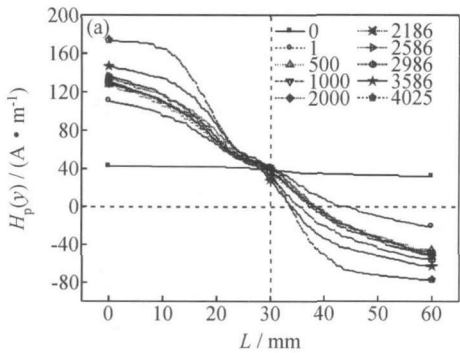


图2 1(a), 3(b)通道不同循环周次磁信号变化规律

Fig 2 MMM signal variation in the process of fatigue testing first line(a) and third line (b)

表 1 实验材料拉伸性能

Table 1 Tensile properties of experimental material

Material	E/GPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa	$\delta_{10}/\%$
18CrNi4A	195	1101	1422	8.9

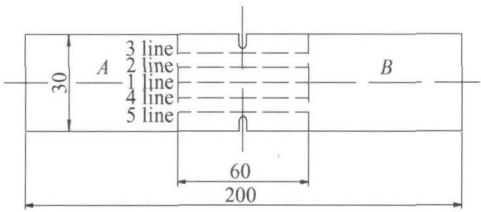


图 1 疲劳试件尺寸及磁信号检测通道

Fig 1 Scheme of notched fatigue specimens and testing lines of MMM signals

疲劳试验于 MT S810 型液压伺服试验机上进行;表面磁记忆信号的检测采用 EMS2003 型智能磁记忆检测仪;采用非铁磁性材料的三维电控平移台控制探头移动。

2 结果与讨论

2.1 磁信号变化特征及应力集中位置判定

在三级应力水平下的疲劳试验过程中,各试件表面磁信号具有相同的变化规律。同时,在各试件的 1-5 检测通道磁信号随循环周次的变化规律中,3 和 5 通道相似,1,2 和 4 通道相似。图 2 给出了 $0.93\sigma_{0.2}$ 条件下试件表面 1,3 通道磁信号随循环周次的变化关系。由图 2 可知,经过 1 次循环后,试件表面磁信号即与初始磁信号有很大差异,磁信号最大值 $H_p(y)_{\max}$ 和最小值 $H_p(y)_{\min}$ 的绝对值急剧增加,并且磁信号曲线出现过零点。在稳定循环阶段,磁信号随疲劳循环周次增加无显著改变,直至寿命裂纹萌生后,磁信号逐渐增大,并在断裂后发生激变,在断口处形成正负磁极。

比较图 2 中 1, 3 通道磁信号变化规律, 1 通道磁信号变化较为平缓, 无信号突变特征。3 通道磁信号在缺口附近出现近似台阶状的突变。1, 3 通道分别位于试件中心和缺口根部, 根据文献[7]的研究结果, 缺口试样在拉应力作用下, 最大应力位于缺口根部, 并呈蝴蝶形对称分布。由此可见, 1, 3 通道磁信号特征的不同, 主要是由于应力集中程度不同所致。从 1, 3 通道磁信号过零点看, 两通道的磁信号过零点均与试件

断裂位置不吻合, 存在一定的位置偏离, 这一特征在应力集中程度较小的 1 通道更为明显, 而这与目前磁记忆技术采用过零点判定应力集中位置的判断准则并不一致^[8]。将疲劳循环过程中试件表面磁信号减去初始磁信号, 其数据处理结果见图 3。可见, 数据处理后, 磁信号过零点与试件断裂位置基本完全重合, 偏离距离很小, 由此可见, 采用该方法处理磁信号后, 磁信号过零点准则判定应力集中位置更为有效准确, 这与文

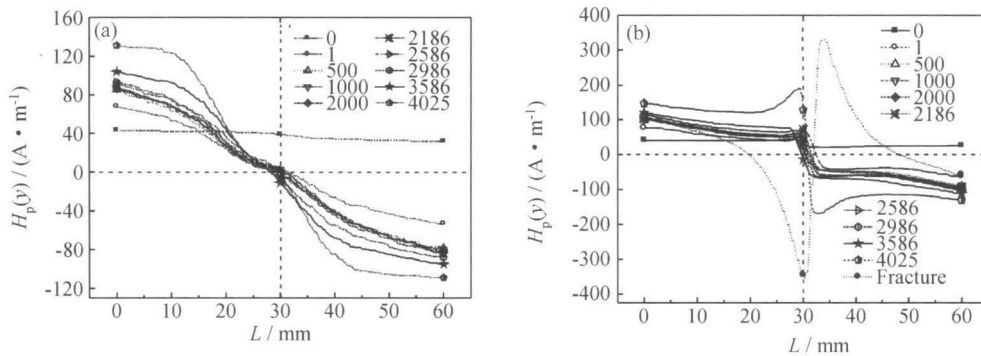


图 3 1(a), 3(b) 通道磁记忆信号处理后过零点位置

Fig 3 Zero-crossing point positions of treated the MMM signal first line(a) and third line (b)

献[9]的研究结果一致。

2.2 磁信号特征参量变化特征

为了定量评估构件损伤程度, 必须提取磁信号的特征参量。目前较为常用的磁信号特征参量是磁场强度梯度 K_{\max} 。本工作经过对磁信号实验数据的分析, 提出了以下三特征参量, 即磁信号最大值 $H_p(y)_{\max}$ 、磁信号最小值 $H_p(y)_{\min}$ 及磁信号最大值与最小值的差值 $H_p(y)_{\sub}$ 。

由于在三级应力水平下试件表面磁信号具有相同的变化规律, 磁信号特征参量 K_{\max} , $H_p(y)_{\max}$, $H_p(y)_{\min}$ 及 $H_p(y)_{\sub}$ 也具有相同的变化规律。图 4 和图 5 分别给出了 0.93 $\sigma_{0.2}$ 条件下试件 1-5 通道特征参量 K_{\max} 值以及 1, 3 通道特征参量 $H_p(y)_{\max}$, $H_p(y)_{\min}$ 及 $H_p(y)_{\sub}$ 随循环周次的变化规律。由图 4 可知, 位于试件中部的 1, 2, 4 通道特征参量 K_{\max} 绝对值基本相同, 并且明显低于试件缺口根部的 3, 5 通道 K_{\max} 绝对值, 而裂纹首先萌生处的 3 通道 K_{\max} 绝对值最大。对于 3 通道 K_{\max} 值, 可分为三阶段: 第一阶段为 K_{\max} 绝对值快速增长阶段, 即在疲劳试验开始的 100 循环周次左右, 这阶段对应材料的循环软化阶段; 当进入材料疲劳稳定循环阶段后, K_{\max} 绝对值基本保持稳定, 为第二阶段; 裂纹萌生后, K_{\max} 绝对值逐渐增大, 直至断裂前的激增, 为第三阶段。磁信号特征参量 $H_p(y)_{\max}$, $H_p(y)_{\min}$ 及 $H_p(y)_{\sub}$ 绝对值也存在类似的变化规律,

如图 5 所示。由此可知, 磁信号特征参量 K_{\max} , $H_p(y)_{\max}$, $H_p(y)_{\min}$ 及 $H_p(y)_{\sub}$ 值存在一定的内在联系, 其绝对值均随应力集中和疲劳损伤程度的加剧而逐渐增加, 反映了构件应力集中和疲劳损伤程度。因此, 通过磁信号特征参量 K_{\max} , $H_p(y)_{\max}$, $H_p(y)_{\min}$ 及 $H_p(y)_{\sub}$ 值的变化特征, 可准确判定构件应力集中及疲劳损伤程度。

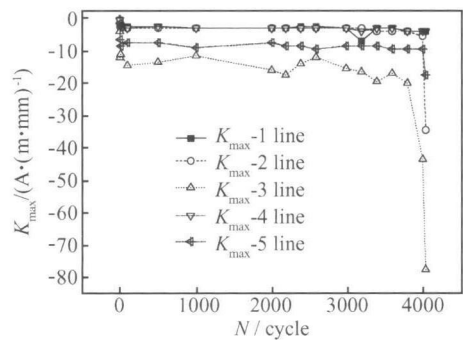


图 4 1-5 通道磁信号特征参量 K_{\max} 值随循环周次变化规律

Fig 4 Variation of the MMM signal feature parameter K_{\max} in the process of fatigue testing

同时, 比较三级应力水平下磁信号特征参量 $H_p(y)_{\sub}$ 值随循环周次的关系, 结果如图 6 所示。由图 6 可知, 最大疲劳应力为 0.93 $\sigma_{0.2}$ 试件 (1[#] 和 2[#] 试件) 的 $H_p(y)_{\sub}$ 值最大, 最大疲劳应力为 0.76 $\sigma_{0.2}$ 试件

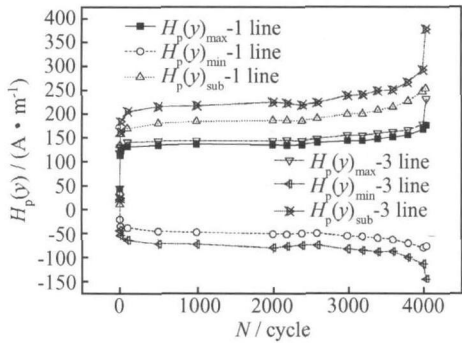


图 5 1, 3 通道磁信号特征参量 $H_p(y)_{\max}$, $H_p(y)_{\min}$ 及 $H_p(y)_{\text{sub}}$ 随循环周次变化规律

g 5 Variation of the M M M signal feature parameters $H_p(y)_{\max}$, $H_p(y)_{\min}$ and $H_p(y)_{\text{sub}}$ in the process of fatigue testing

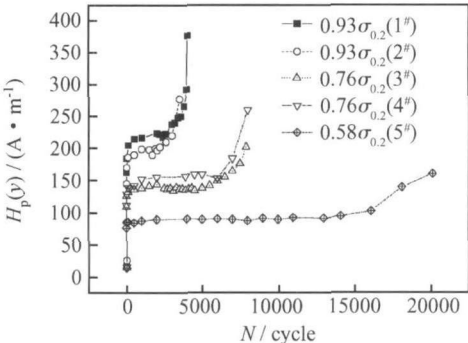


图 6 磁信号特征参量 $H_p(y)_{\text{sub}}$ 与应力水平关系

Fig 6 Relation between the M M M signal feature parameter $H_p(y)_{\text{sub}}$ and fatigue stress

(3[#] 和 4[#] 试件)的 $H_p(y)_{\text{sub}}$ 值居中, 最大疲劳应力为 0.58σ_{0.2} 试件(5[#] 试件)的 $H_p(y)_{\text{sub}}$ 值最小。 $H_p(y)_{\text{sub}}$ 值大小表现出与应力水平存在强烈的相关性, 应力水平越大, $H_p(y)_{\text{sub}}$ 值也越大, 而同一级应力水平下的 $H_p(y)_{\text{sub}}$ 值基本相当。另外, 磁信号特征参量 $H_p(y)_{\max}$, $H_p(y)_{\min}$ 也具有相同的特性。由此可见, 磁信号特征参量 $H_p(y)_{\max}$, $H_p(y)_{\min}$ 和 $H_p(y)_{\text{sub}}$ 可准确表征构件的受力历程。

2.3 损伤定量评估方法

通过对磁信号特征参量的提取以及特征参量随疲劳循环周次的变化特征分析结果可知, 特征参量可定量评估构件的损伤程度。采用磁场强度梯度 K_{\max} 平均值法^[10], 其数据处理方式如下:

对实验过程中首先出现裂纹一侧的磁记忆信号检

测通道上不同疲劳循环周次下的磁场强度梯度 K_{\max} 进行算术平均值计算:

$$K_{\max}^{\text{AV}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{\max}^i \tag{1}$$

式中: n 为构件疲劳试验过程中在不同循环周次采集磁记忆信号的总次数; K_{\max}^i 为第 i 次磁信号检测时磁场强度梯度最大值。

将在不同循环周次下经过磁信号处理所得到的磁场强度梯度 K_{\max} 与式(1)计算结果进行比较, 得到其比值 m :

$$m = K_{\max} / K_{\max}^{\text{AV}} \tag{2}$$

如 $m > 1$, 则构件已存在较为严重的应力集中和损伤^[11]。

根据以上的定量计算方式, 对疲劳试验磁信号数据进行处理, 结果如表 2 所示。

表 2 磁信号特征参量 K_{\max} 定量评估结果

Table 2 Results of quantitative assessment of the M M M signal feature parameter K_{\max}

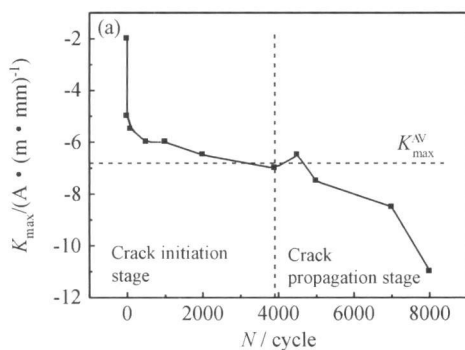
Fatigue stress	K_{\max}^{AV}	Result of quantitative assessment ($m > 1$) / cycle	Crack initiation life/ cycle	Fatigue life/ cycle
0.93σ _{0.2} (1 [#])	- 16 9333	2186	2186	4026
0.93σ _{0.2} (2 [#])	- 8 42308	1500	1900	3572
0.76σ _{0.2} (3 [#])	- 10 46	2700	4300	8078
0.76σ _{0.2} (4 [#])	- 6 77273	3900	3900	8002
0.58σ _{0.2} (5 [#])	- 7. 78947	11000	14109	21670

由表 2 可知, 在不同的应力水平下, 采用磁场强度梯度 K_{\max} 平均值法进行定量计算, 得到当 $m > 1$ 时, 疲劳循环周次基本上接近或等于观察到裂纹萌生时的疲劳循环周次。

以表 2 中最大疲劳应力 0.76σ_{0.2}(4[#]) 和 0.58σ_{0.2}(5[#]) 为例。4[#] 和 5[#] 试样特征参量 K_{\max} 值与循环周次定量评估计算结果如图 7 所示。4[#] 试样疲劳总寿命

为 8002 循环周次, 观察到微小疲劳裂纹的循环周次是 3900 次, 采用磁场强度梯度 K_{\max} 平均值法计算得到 $m > 1$ 时的循环周次是 3900 次, 与观察到微小疲劳裂纹的循环周次一致。5[#] 试样疲劳总寿命为 21670 循环周次, 观察到微小疲劳裂纹的循环周次是 14109 次, 采用磁场强度梯度 K_{\max} 平均值法计算得到 $m > 1$ 时的循环周次是 11000 次, 较观察到的微小疲劳裂纹的循环

周次早 3109 次, 预测误差仅为 22% ($= 3109/14109 \times 100\%$)。由以上结果可知, 疲劳试验结果很好地符合了当 $m > 1$ 时, 构件存在较为严重的应力集中和损伤



的磁场强度梯度 K_{\max} 平均值法判定准则, 并且误差较小。因此, 可采用该方法对构件疲劳损伤程度进行定量评估。

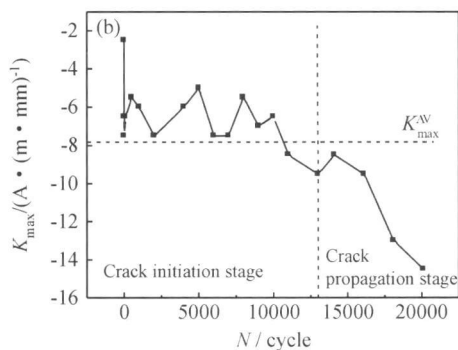


图 7 K_{\max} 值与循环周次的关系 (a) 0 76 $\sigma_{0.2}$; (b) 0 58 $\sigma_{0.2}$

Fig 7 Variation of the MMM signal feature parameter K_{\max} in the process of fatigue testing

(a) 0 76 $\sigma_{0.2}$; (b) 0 58 $\sigma_{0.2}$

3 结论

(1) 缺口疲劳试件经过 1 次循环后, 试件表面磁信号即与初始磁信号有很大差异, 磁信号曲线出现过零点。在稳定循环阶段, 磁信号随疲劳循环周次增加无显著改变, 直至疲劳裂纹萌生后, 磁信号逐渐增大, 并在断裂后发生激变, 在断口处形成正负磁极。

(2) 疲劳循环过程中试件表面磁信号减去初始磁信号后, 磁信号过零点与试件断裂位置重合, 该方法可有效判定应力集中位置。

(3) 磁信号特征参量 $H_p(y)_{\max}$, $H_p(y)_{\min}$ 和 $H_p(y)_{\sub}$ 值与应力水平存在强烈的相关性, 应力水平越大, $H_p(y)_{\sub}$ 值也越大, 而同一级应力水平下的 $H_p(y)_{\sub}$ 值基本相当, 三特征参量可准确表征构件的受力历程。

(4) 磁信号特征参量 K_{\max} , $H_p(y)_{\max}$, $H_p(y)_{\min}$ 和 $H_p(y)_{\sub}$ 值随循环周次的增加, 均表现为三阶段变化特征, 其绝对值均随应力集中和疲劳损伤程度的加剧而逐渐增加, 参量之间存在一定的内在联系, 反映了构件应力集中和疲劳损伤程度。

(5) 磁信号特征参量 K 平均值法可较准确地定量评估疲劳损伤, 该方法判据为: 当 $m (m = K_{\max}/K_{\max}^{AV}) > 1$, 试件存在严重的疲劳损伤。

参考文献

- [1] DOUBOV, ANATOLI A. Diagnostics of metal items and equipment by means of metal magnetic memory [A]. Proc of ChSNDT 7 Conference on NDT and International Research Symposium [C].

Shantou: Shantou University Press, 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] 陈曦, 任吉林, 王伟兰, 等. 地磁场中应力对磁畴组织的影响[J]. 失效分析与预防, 2007, 2(1): 6– 9.
- [4] 杜波夫. 金属磁记忆法诊断管路、设备和结构[M]. 家魁, 张友人, 李延高, 等译. 莫斯科: 动力诊断公司, 2003.
- [5] XING Hai-yan, WANG Ri-xin. Correlation between crack growth rate and magnetic memory signal of X45 steel[J]. Key Engineering Materials, 2007, 3(4): 53– 358.
- [6] 董世运, 徐滨士, 董丽虹, 等. 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[J]. 中国表面工程, 2006, 19(5): 71– 75.
- [7] 任吉林, 陈曦, 宋凯. 金属构件磁记忆效应影响因素研究[J]. 无损检测, 2006, 28(6): 292– 295.
- [8] 任吉林, 宋凯, 邬冠华, 等. 磁记忆检测技术在飞机起落架检测中的应用[J]. 无损检测, 2002, 24(8): 346– 351.
- [9] 王丹, 董世运, 徐滨士, 等. 应力集中部位的金属磁记忆检测研究[J]. 失效分析与预防, 2007, 2(2): 12– 15.
- [10] DOUBOV A A. Diagnostics of equipment and constructions strength with usage of magnetic memory[J]. Inspection Diagnostics, 2001, (6): 19– 29.
- [11] 胡先龙, 池永滨. 磁记忆诊断技术中应力集中水平定量评估方法[J]. 华北电力技术, 2005, (6): 9– 13.

基金项目: 国防科技工业技术基础科研资助项目 (2006036); 教育部无损检测技术重点实验室开放基金资助项目 (ZD200729012)

收稿日期: 2008-12-09; 修订日期: 2009-04-17

作者简介: 刘昌奎 (1976—), 男, 工程师, 博士, 主要从事磁记忆检测技术、材料损伤及失效分析研究. 联系地址: 北京市 81 信箱 4 分箱 (100095), E-mail: chang kuiliu621@sohu.com