

文章编号:1000-6893(2010)10-2109-06

铁磁构件残余寿命评估方法

李新蕾, 任吉林, 任尚坤, 陈曦, 付任珍

(南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 江西 南昌 330063)

Residual Life Assessment of Ferromagnetic Components

Li Xinlei, Ren Jilin, Ren Shangkun, Chen Xi, Fu Renzhen

(Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education,

Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

摘要: 为研究磁记忆检测技术评估铁磁材料早期损伤的可行性,以磁记忆检测技术为手段,对40Cr钢三点弯曲SE(B)试样进行了常温疲劳裂纹扩展试验,分别测量了试样在相同载荷条件下不同循环周次 N 时的磁场数据。定义了一种新的磁记忆特征参量,分析并探讨了疲劳裂纹扩展过程中该特征参量的阶段性特征,结果表明该特征参量较传统的磁记忆特征参量变化明显。通过分析磁记忆信号与裂纹扩展寿命、累积疲劳损伤之间的关系,建立了基于磁记忆信号的损伤参量模型,利用该模型可以很好地评估材料的残余寿命,可为磁记忆检测技术在铁磁性材料早期损伤以及残余寿命评估方面的应用提供借鉴作用。

关键词: 磁记忆检测; 无损评估; 裂纹扩展; 残余寿命评估; 损伤参量模型

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A

Abstract: By means of magnetic memory technology, a fatigue crack propagation test is carried out at room temperature for the standard SE(B) specimen of 40Cr steel. The magnetic field distributions of the specimen are investigated with the same load and different cycle numbers N . A new characteristic parameter for magnetic memory testing is defined, and the phase characteristics of the characteristic parameter in the process of fatigue crack growth are analyzed and discussed. The results show that the characteristic parameter changes more markedly than the traditional parameters. By analyzing the relations between the magnetic memory signals, the crack growth life and the cumulative fatigue damage, a new damage parameter model is established by using magnetic memory signals. According to this model, the residual life of ferromagnetic components can be evaluated excellently. This research provides a reference value for the application of magnetic memory testing technology in aspects of early damage and residual life assessment of ferromagnetic materials.

Key words: magnetic memory testing; nondestructive evaluation; crack propagation; residual life assessment; damage parameter model

疲劳破坏是机械零部件早期失效的主要形式,随着现代机械向高速和大型化方向发展,许多零部件在高温、高压、重载和腐蚀等恶劣工况下运行,疲劳破坏事故更是层出不穷。因此,工程技术人员必须认真考虑可能的疲劳断裂问题。疲劳失效的基本特征表现为:材料在低于其静强度极限的交变应力(或应变)持续作用下,萌生多种类型的内部缺陷(如位错、滑移、孔洞、微裂纹、应力诱发相变等),并逐渐演化成为宏观裂纹,以及由于裂纹扩展而最终导致结构破坏的过程。金属的疲劳破坏过程可分为3个阶段,即疲劳裂纹萌生阶

段、疲劳裂纹扩展阶段和失稳断裂阶段^[1]。

目前,疲劳裂纹扩展的无损检测方法主要有超声波检测、涡流检测和渗透检测等,这些方法只能检测具有一定大小的宏观缺陷,不适用于早期疲劳损伤的检测^[2]。研究发现,疲劳累积损伤过程中,伴随有磁记忆效应的累积^[3]。铁磁性金属构件在加工和运行时,在地磁场和内部应力的共同作用下,材料应力集中区会发生具有磁致伸缩性质的磁畴组织定向和不可逆的重新取向,这种状态在载荷消除后仍然保留,称之为磁记忆效应^[4]。可利用铁磁性构件在应力和变形集中区域内产生磁状态的不可逆变化这一自然现象,对金属材料应力集中程度和构件的累积损伤程度进行研究,并根据这一原理对铁磁性金属构件进行早期诊断和残余寿命评估^[5-7]。本文主要研究在疲

收稿日期:2009-10-26; 修订日期:2010-03-24

基金项目:航空科学基金(06ZF56009);江西省自然科学基金(2007GZC1587);无损检测技术教育部重点实验室开放基金(ZD200629001)

通讯作者:任吉林 E-mail: jlren@tom.com

劳裂纹扩展过程中磁记忆信号的变化规律,通过分析磁记忆信号与材料扩展寿命、应力强度因子范围、累积疲劳损伤之间的关系,建立了基于磁记忆信号的损伤参量模型,利用该模型可以很好地评估材料的残余寿命,对于铁磁性材料的残余寿命评估具有重要意义。

1 试验测试

1.1 试验材料与试样设计

试验材料为40Cr钢,其化学成分与力学性能列于表1和表2。试样设计为标准三点弯曲SE(B)试样,试样简图见图1,其中厚度 $B=20$ mm,高度 $W=40$ mm,跨距 $S=4W$, a 为裂纹长度, P 为试验力。

表1 试样的化学成分

Table 1 Composition of specimen

wt%			
C	Si	Mn	Cr
0.37~0.45	0.17~0.37	0.50~0.80	0.80~1.10
S	P	Ni	
≤0.03	≤0.03	≤0.25	

表2 试样的力学性能参数

Table 2 Mechanical properties of specimen

参数	数值	参数	数值
抗拉强度 σ_b /MPa	1 106	断后伸长率 δ /%	16.4
屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	970	断面收缩率 ψ /%	56.8

波动度为±0.5% FS,加载载荷为:静载4.5 kN,动载2.5 kN;正弦加载频率为130 Hz。对漏磁场的测量采用的是美国Lakeshore公司生产的弱磁场测量仪Lakeshore 421,其分辨率为0.001 Gauss,精确度±0.25%,用于精确测量试样表面的漏磁场。试验过程测量路径为试样上表面中线以裂纹为中心长60 mm的直线,如图1所示。裂纹观测工具是53X正置金相显微镜。

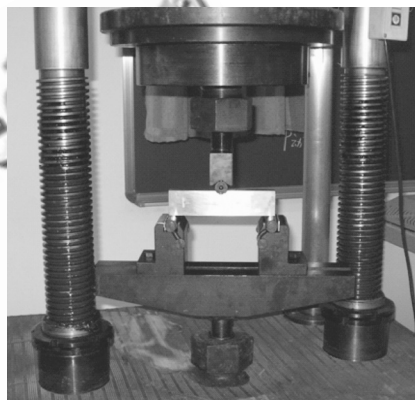


图2 三点弯曲常温裂纹扩展试验

Fig. 2 Three-point bend fatigue crack growth test at room temperature

试验开始前,分别测量各试样的初始磁场,作为对比。在疲劳裂纹扩展试验过程中,试样每加载5万次将其卸载并测量磁场分布以及裂纹长度 a ,直至试样失效。

2 试验数据分析

2.1 磁场分布

图3所示为试样1不同循环周次条件下的磁场分布情况,由图可知:在没有加载($N=0$)之前,试样的初始磁场分布很小并且较为均匀,其分布近似一条直线;加载后,试样磁场分布变化剧烈,在裂尖所对应的顶部区域,磁场信号出现极大值。为验证试样在同样条件下的可重复性,对成分相同的4个试样进行了试验,如图4所示,可以看出,随着循环周次的增加,裂纹长度随之增加。通过统计分析发现,静态载荷下磁记忆的特征参量^[8-12](包括法向磁场最大值 $H_p(y)_{\max}$ 、法向磁场最小值 $H_p(y)_{\min}$ 、法向磁场最大值与最小值差值 $H_p(y)_{\text{sub}}$ 以及法向磁场梯度最大值 K_{\max} 、法向磁场梯度最小值 K_{\min} 和法向磁场梯度范围 K_{range})随着循环周次的增加与裂纹的扩展,其变化规律并不明显,如图5所示,由图可知,金属磁记忆检测

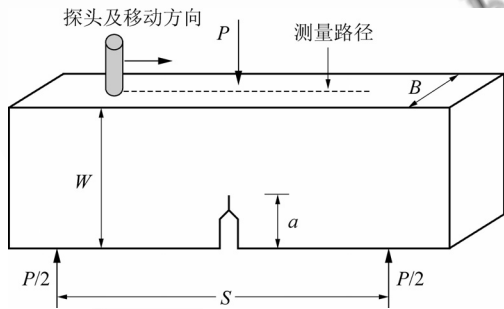


图1 试样形状及测量路径

Fig. 1 Geometry of specimen and measuring line

考虑到加工过程中产生的残余应力,所有试样均进行了去应力退火,以消除残余应力的影响,所有试样亦全部进行了退磁处理。

1.2 试验方案

三点弯曲常温裂纹扩展试验是在QBG-100型高频疲劳试验机上进行的,如图2所示,其负荷

特征值 K_{\max} 、 K_{\min} 和 K_{range} 在疲劳裂纹扩展过程中,仅在初始阶段有一定的变化,随后变化则较为杂乱,无一定的规律可循。因此静态载荷下磁记忆的特征参量并不能很好地表征疲劳裂纹扩展过程中材料的损伤状况。

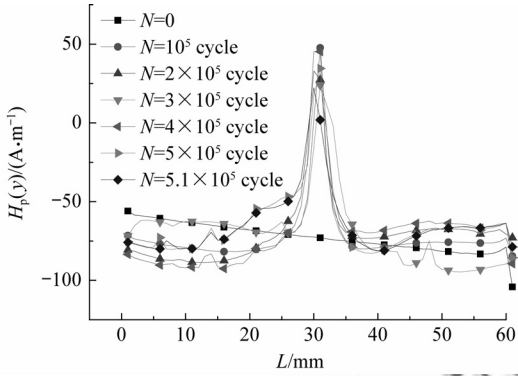


图 3 试样 1 磁场分布

Fig. 3 Magnetic field distribution of Specimen 1

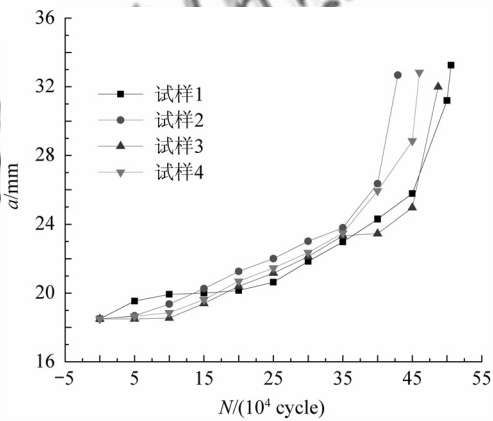


图 4 裂纹长度随循环周次的变化

Fig. 4 Change of crack length with cycle number

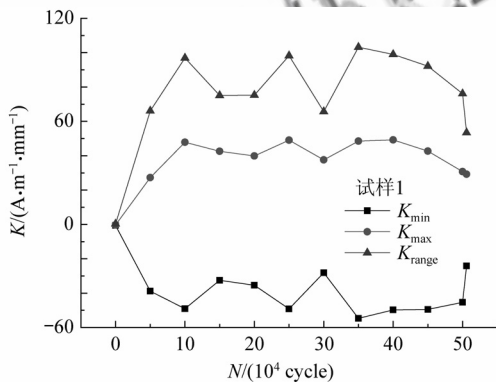


图 5 磁记忆特征值 K_{\max} 、 K_{\min} 和 K_{range} 随循环周次的变化
Fig. 5 Change of K_{\max} 、 K_{\min} and K_{range} with cycle number

在此定义磁记忆特征参量 $H_p(y)_{\text{avg}}$ 为测量路径上磁场信号的平均值,如式(1)所示,并以 $H_p(y)_{\text{avg}}$ 作为疲劳损伤的磁记忆特征参量。

$$H_p(y)_{\text{avg}} = \frac{1}{n} \sum_{i=x_0}^{x_n} H_p(y)_{x_i} \quad (1)$$

式中: x_0 和 x_n 分别为测量路径的起点与终点坐标; $H_p(y)_{x_i}$ 为横坐标为 i 处的 $H_p(y)$ 值。

图 6 即为试样 1 的磁记忆特征参量 $H_p(y)_{\text{avg}}$ 随循环周次变化的规律。图 7 为采用 Paris 公式表征的疲劳裂纹扩展速率曲线^[1], $da/dN-\Delta K$ 曲线分为 I 区、II 区、III 区 3 个区段,分别表示疲劳裂纹初始扩展阶段、中速扩展阶段、失稳扩展阶段。

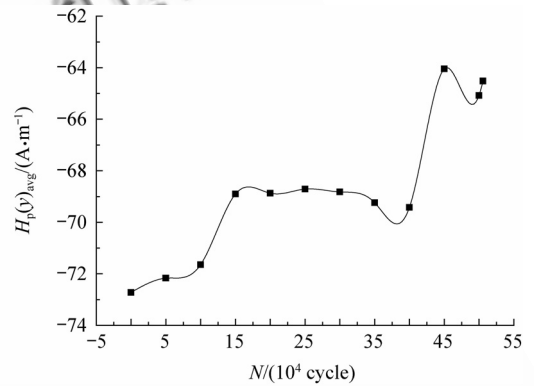


图 6 磁记忆特征参量 $H_p(y)_{\text{avg}}$ 随循环周次的变化
Fig. 6 Change of $H_p(y)_{\text{avg}}$ with cycle number

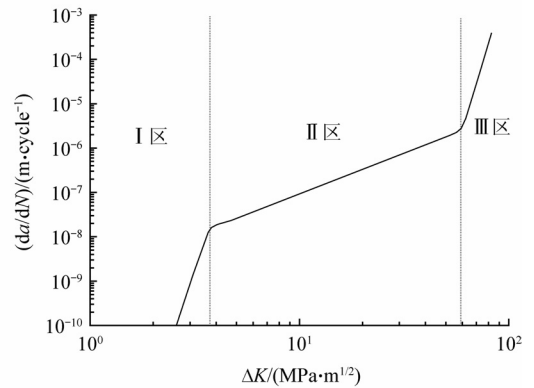


图 7 $da/dN-\Delta K$ 曲线

Fig. 7 $da/dN-\Delta K$ curve

由图 6 可知:特征参量 $H_p(y)_{\text{avg}}$ 随循环周次的变化明显地分为 3 个阶段,分别对应 $da/dN-\Delta K$ 曲线的 I 区、II 区、III 区。第 1 阶段, $H_p(y)_{\text{avg}}$ 随着循环周次的增加而剧烈增加,此阶段 $da/dN < 10^{-9}$ m/cycle,是低速率区;第 2 阶段,随着循环周次的增加 $H_p(y)_{\text{avg}}$ 并没有增加,而是进入了一个平台期, $H_p(y)_{\text{avg}}$ 在这一阶段较为稳定,此阶段 da/dN 为 $10^{-8} \sim 10^{-5}$ m/cycle,占据疲劳裂纹亚稳扩展阶段的绝大部分,是决定疲劳裂纹扩展的主要组成部分, ΔK 变化范围大,扩展寿命长;第 3 阶段,

$H_p(y)_{\text{avg}}$ 有一个跃迁, 随后 $H_p(y)_{\text{avg}}$ 减小, 此阶段对应疲劳裂纹扩展的失稳阶段。

2.2 应力强度因子范围 ΔK

当施加在试样上的疲劳应力足够小, 疲劳裂纹扩展前缘的塑性变形区对弹性应力场的干扰很微弱时, 可以利用线弹性断裂力学解来对疲劳断裂作合理的连续介质描述。本次试验, 试样平面尺寸在试验力下保持弹性占优势, 试样厚度足以防止屈曲, 同时, 通过式(2)对试验数据进行有效性检验, 以保证线弹性断裂力学描述的有效性。

$$W - a \geq \left(\frac{12WP_{\text{max}}}{2B\sigma_{P0.2}} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中: P_{max} 为最大试验力; $\sigma_{P0.2}$ 为规定非比例伸长 0.2% 应力。

应力强度因子表达了裂纹尖端附近的应力场强弱程度, 是衡量线弹性裂纹体断裂强度的有效力学参量。Paris 等在 1961 年提出利用应力强度因子范围 ΔK 对疲劳裂纹扩展速率进行描述, 即著名的 Paris 公式^[1]:

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (3)$$

式中: C 和 m 为材料常数。应力强度因子范围 ΔK 是最大应力强度因子与最小应力强度因子之差, 可由式(4)计算^[13]。

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{BW^{1/2}} \left[\frac{6\alpha^{1/2}}{(1+2\alpha)(1-\alpha)^{3/2}} \right] \cdot$$

$$[1.99 - \alpha(1-\alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)] \quad (4)$$

式中: $\alpha = a/W$, 且 $0.3 \leq \alpha \leq 0.9$, a 为裂纹长度, W 为试样高度。 ΔP 为最大力与最小力之差, $\Delta P = P_{\text{max}} - P_{\text{min}}$ 。

图 8 为试样 2 磁记忆特征参量 $H_p(y)_{\text{avg}}$ 与应

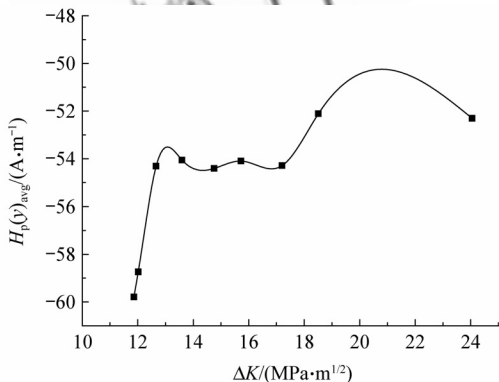


图 8 $H_p(y)_{\text{avg}}$ 与应力强度因子范围 ΔK 之间的关系
Fig. 8 Change of $H_p(y)_{\text{avg}}$ with stress intensity factor range ΔK

力强度因子范围 ΔK 之间的关系曲线, 曲线进一步验证了在疲劳加载情况下, $H_p(y)_{\text{avg}}$ 的 3 个阶段分布特征, 并且从曲线可知对于给定的加载条件, 在 $\Delta K > 18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 时, 试样就进入了失稳扩展阶段, 此时的磁场值会有较大的跃迁, 利用此现象可以判定试样失效。

2.3 损伤寿命评估模型

损伤参量是一种用于描述材料内部损伤状态变化发展及其对材料力学作用影响的内部状态参量^[14]。在连续损伤力学中, 塑性应变能损伤参量的表达式为

$$D = 1 - \Delta S_0 / \Delta S_N \quad (5)$$

式中: ΔS_0 为初始无损伤时的应力-应变曲线面积; ΔS_N 为材料在加载 N 个循环周次时的应力-应变曲线面积。

定义 ΔH_{SN} 为 N 次循环加载后的磁场分布 $H_p(y)_N$ 与初始状态的磁场分布 $H_p(y)_0$ 两曲线所围成的面积, 如图 9 所示, 并可表示为

$$\Delta H_{SN} = \int_{x_0}^{x_n} |H_p(y)_N - H_p(y)_0| dx \quad (6)$$

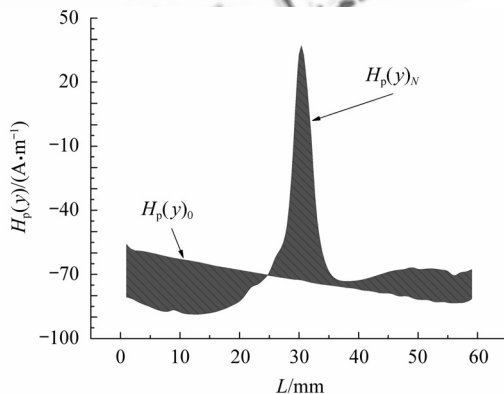


图 9 $H_p(y)_N$ 与 $H_p(y)_0$ 两曲线所围成的面积
Fig. 9 Area surrounded by Curve $H_p(y)_N$ and Curve $H_p(y)_0$

对比式(5)损伤力学中塑性应变能损伤参量 D 的定义, 定义以磁信号特征参量 ΔH_{SN} 为参数的材料损伤参量 D_H , 可表示为

$$D_H = 1 - \Delta H_{S1} / \Delta H_{SN} \quad (7)$$

图 10 为试样 2 的 ΔH_{SN} 随循环周次 N 的变化规律, 可见在试样失稳扩展之前, ΔH_{SN} 随着循环周次的增加是匀速增加的, 在进入失稳扩展时, ΔH_{SN} 出现跃迁, 随后 ΔH_{SN} 减小。

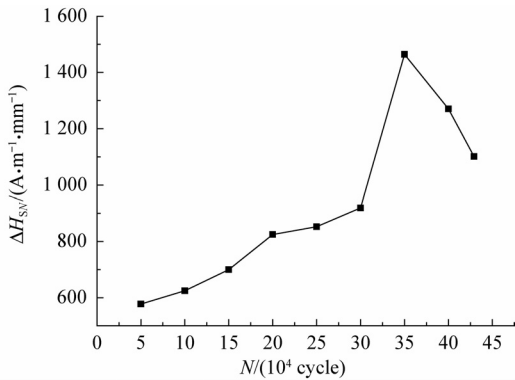
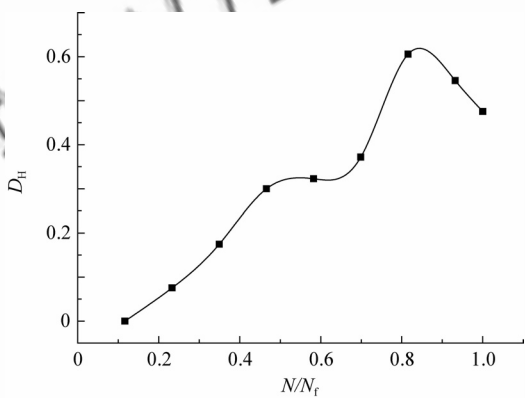
图 10 ΔH_{SN} 随循环周次的变化Fig. 10 Change of ΔH_{SN} with cycle number

图 11 给出了试样 2 损伤参量 D_H 与归一化寿命 N/N_f (N_f 为试样断裂时的寿命) 之间的关系, 由图可以看出在损伤度 $D_H=0.6$ 时, 材料的扩展寿命已经达到了 80% 并开始进入失稳扩展阶段。在检测过程中, 通过计算 D_H 值和材料已经使用的寿命, 就可以得到材料的残余寿命。

图 11 损伤参量 D_H 与归一化寿命 N/N_f 之间的关系Fig. 11 Relationship between damage parameter D_H and normalized life N/N_f

3 机理探讨

对铁磁构件施加载荷, 动态应力的存在会使物体产生应变, 导致位错产生滑移运动, 引起晶体内位错密度的增加, 从而产生很高的应力能, 并形成应力集中区。为了使铁磁构件内总的自由能趋于最小, 磁畴将在磁机械效应的作用下, 产生不可逆的重新取向排列, 主要以增加磁弹性能的形式来抵消应力能的增加, 从而在铁磁构件内部产生远高于地球磁场的磁感应强度, 这种状态在载荷消除后仍然保留^[4]。

$H_p(y)_{avg}$ 随循环周次的变化, 明显地分为 3 个阶段, 分别对应 $da/dN-\Delta K$ 曲线的 I 区、II 区、

III 区。在第 1 阶段, 裂尖的局部塑性区内积聚了很高的应力能, 由于 da/dN 很小, 不足以将应力能释放, 因此必然以增加磁弹性能的形式来抵消应力能的增加, 表现为漏磁场剧烈增加。在第 2 阶段, da/dN 缓慢增加, 裂纹扩展所释放掉的应力能与裂尖的局部塑性区内积聚的应力能持平, 因此磁弹性能不再继续增加, 表现为漏磁场稳定在一定数值。在第 3 阶段, da/dN 剧烈增加, 裂纹进入失稳扩展阶段, 裂尖大范围进入塑性阶段, 磁弹性能剧烈增加, 漏磁场出现跃迁, 随着裂纹进一步失稳, 在试样断裂之前所积聚的应力能将不断释放, 因此磁弹性能减小, 表现为在失稳断裂之前漏磁场减小。

4 结论

(1) 分析了磁记忆特征参量 $H_p(y)_{avg}$ 随循环周次 N 的变化, 发现磁记忆特征参量 $H_p(y)_{avg}$ 可以表征铁磁材料疲劳裂纹扩展速率; 其曲线明显地分为 3 个阶段, 分别对应 $da/dN-\Delta K$ 曲线的初始扩展阶段、中速扩展阶段、失稳扩展阶段。

(2) 计算了线弹性断裂力学力学参量 ΔK , 并分析了磁记忆特征参量 $H_p(y)_{avg}$ 随应力强度因子范围 ΔK 的变化; 对于给定的加载条件, 在 $\Delta K > 18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 时, 试样进入失稳扩展阶段, 此时的磁场值会有较大的跃迁, 利用此现象可以判定试样是否已经失稳扩展。

(3) 建立了基于磁记忆信号 ΔH_{SN} 的损伤参量模型 $D_H = 1 - \Delta H_{S1} / \Delta H_{SN}$, 该模型较好地反映了铁磁构件的疲劳损伤程度, 可以较好地评估材料的残余寿命, 为采用金属磁记忆检测技术定量评估材料残余寿命提供了借鉴。

参 考 文 献

- [1] Suresh S. Fatigue of materials[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [2] Jiles D C. Review of magnetic methods for nondestructive evaluation (Part 2)[J]. NDT International, 1990, 23(2): 83-92.
- [3] Dubov A. Technical diagnostics of equipment and constructions with residual life assessment using the method of metal magnetic memory[C]//Proceedings of the 17th World Conference on Nondestructive Testing. 2008.
- [4] 任吉林, 林俊明. 电磁无损检测[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 370-377.
Ren Jilin, Lin Junming. Electromagnetic nondestructive testing[M]. Beijing: Science Press, 2008: 370-377. (in Chinese)

- [5] Wang X, Qin Y, Chen M. Feasibility research on fatigue damage evaluation based on magnetic memory method[J]. Journal of Donghua University: English Edition, 2005, 22(5): 9-11.
- [6] Sipeky A, Ivanyi A. Magnetic hysteresis under applied stress[J]. Physica B, 2006, 372(1): 177-180.
- [7] Yang E, Li L M. Magnetic field aberration induced by cycle stress[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2007, 312(1): 72-77.
- [8] Roskosz M, Gawrilenko P. Analysis of changes in residual magnetic field in loaded notched samples[J]. NDT International, 2008, 41(1): 570-576.
- [9] Pal'a J, Stupakov O. Magnetic behaviour of low-carbon steel in parallel and perpendicular directions to tensile deformation[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2007, 310(1): 57-62.
- [10] Dong L H, Xu B S, Dong S Y. Monitoring fatigue crack propagation of ferromagnetic materials with spontaneous abnormal magnetic signals[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(1): 1599-1605.
- [11] Chen X, Li L M, Hu B. Magnetic evaluation of fatigue damage in train axles without artificial excitation[J]. Insight, 2006, 48(6): 342-345.
- [12] Leng J C, Xu M Q, Xu M X. Magnetic field variation induced by cyclic bending stress[J]. NDT International, 2009, 42(5): 410-414.
- [13] GB/T 6398—2000 金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法[S].
GB/T 6398—2000 Standard test method for fatigue crack growth rates of metallic materials[S]. (in Chinese)
- [14] Xing H Y, Xu M Q, Wang R X. MMM fatigue damage evaluation and life prediction modeling for ferromagnetic materials[J]. Fracture and Damage Mechanics V: Key Engineering Materials, 2006, 324(1-2): 619-622.

作者简介:

李新蕾(1985—) 男, 硕士研究生。主要研究方向: 电磁无损检测技术。

E-mail: xinlei_1985@163.com

任吉林(1949—) 男, 教授, 中国无损检测学会副理事长、江西省无损检测学会理事长。主要研究方向: 电磁无损检测技术。

Tel: 0791-3953491

E-mail: jlren@tom.com

(编辑: 蔡斐, 杨冬)