高载旋转弯曲疲劳损伤的磁记忆检测

徐明秀，徐敏强，赵 帅，李建伟

（哈尔滨工业大学 飞行器动力学与控制研究所，哈尔滨 150001，xmxyippee@126.com）

摘 要： 为寻找高载旋转弯曲疲劳破坏前的特征信号，基于磁机械效应及磁场叠加原理进行理论研究，在此基础上，对带环形缺陷的45号钢试件进行高载旋转弯曲疲劳试验，研究疲劳过程中试件表面的磁信号的法向分量的分布变化. 理论分析表明，疲劳裂纹附近的磁信号分布随裂纹扩展而变化. 实验结果显示在进入裂纹快速扩展前后，缺口两边的磁信号大小顺序发生变化；名义应力及应力集中系数、环境磁场和提离值影响检测效果，但有对应的解决方法. 磁记忆技术用于高载旋转弯曲疲劳损伤检测是可行的.

关键词： 高载疲劳；旋转弯曲；磁记忆；损伤检测；剩余寿命

中图分类号： O346.2；O441.2 **文献标志码：** A **文章编号：** 0367－6234(2010)03－0348－04

Magnetic memory testing for high load rotating bending fatigue damage

XU Ming-xiu, XU Min-qiang, ZHAO Shuai, LI Jian-wei

(Division of Vehicle Dynamics & Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, xmxyippee@126.com)

Abstract: In order to research the character signal of high load rotating bending fatigue before the fracture of specimens, the theoretical study was conducted based on magnetomechanical effect and magnetic field superposition, and the high load rotating bending fatigue experiment was carried out on 45# steel specimens with annular notch. The distribution variation of normal magnetic signals was analyzed. Theoretical analysis indicates that the magnetic signal distribution near the fatigue crack changes as the crack propagates. Experimental results show that, before and after the rapid crack propagation, the size order of signal near the crack changes. The detection effect is impacted by nominal stress, stress concentration factor, environmental magnetic field and sensor liftoff, then the corresponding strategies are put forward. So it is feasible to detect high load rotating bending fatigue damage using metal magnetic memory technique.

Key words: high load fatigue; rotating bending; magnetic memory; damage detection; residual life

金属材料广泛应用于车辆、建筑、航空、航天等重要领域，然而金属构件在长期运行中容易产生各种疲劳损伤，致使整个结构面临失效、断裂、爆炸等严重威胁，可能造成灾难性的后果[1-2]. 及时地进行可靠的疲劳损伤评估、防止重大事故发生，是人们渴望解决的问题. 金属磁记忆技术是1997年由俄罗斯学者杜波夫[3]提出的一种无损检测方法. 该技术基于铁磁材料在循环应力和地磁场共同作用下的磁机械效应，通过检测表面磁场分布就可以分析构件的应力集中和损伤情况，在疲劳损伤评估方面具有极大的发展潜力. 因此，本文以磁记忆技术进行疲劳损伤检测为目的进行研究. 在理论分析的基础上，以高载旋转弯曲疲劳实验为平台，研究高载旋转弯曲疲劳过程中磁记忆信号的变化特点.

1 理论研究

金属磁记忆检测的物理基础是磁机械效应（包括磁致伸缩效应、压磁效应等）和金属疲劳. 在单一循环周期内，当外磁场使自发磁化受迫增强时，该铁磁体就会发生形变，即发生磁致伸缩. 同时当外加应力使铁磁体形变时，其自发磁化发

收稿日期： 2009－03－26.
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(10772061).
作者简介： 徐明秀(1983—)，女，博士研究生；
徐敏强(1960—)，男，教授，博士生导师.

生改变，即发生压磁效应. 若磁致伸缩仅仅为各向同性的体积磁致伸缩时，可由热力学方程[4]导出压磁效应关系式为

$$\left(\frac{\partial \omega}{\partial H}\right)_{P,T} = \rho\left(\frac{\partial m}{\partial P}\right)_{H,T}. \qquad (1)$$

式中：ω 为单位体应变，H 为外磁场强度，P 为外加压力，T 为物体热力学温度，ρ 为铁磁体的密度，m 为单位质量的磁化强度. 式(1) 表明由于磁致伸缩现象(等号左边)，在磁场中对铁磁试件施加力的作用时，磁化强度要发生变化(等号右边)，产生磁感应增量. 虽然每次循环产生的磁感应增量很小，但多次循环之后磁感应增量可累积达到相当大的量值，表现为金属的磁记忆性[5-6]. 并且，大量实验结果显示，若干循环之后磁感应增量累积之和趋于稳定[7-8].

磁记忆现象产生的过程即是工件在外部磁场的作用下被磁化的过程[9-10]. 若材料表面有缺陷，缺口区域会形成一个高磁阻区，磁力线通过该区域时受阻，内部磁场会在缺陷处“泄漏”到缺口外面，形成漏磁场. 因此，试件近表面的磁场是环境磁场、磁感应磁场和漏磁场的矢量叠加，如图 1 所示. 疲劳破坏是疲劳裂纹萌生及不断扩展、直至断裂的过程. 随着疲劳裂纹的扩展，缺陷变深变宽，漏磁场强度变大，合磁场分布也随之变化.

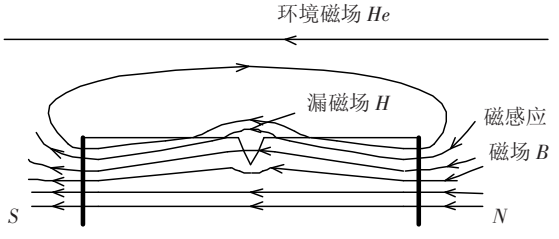


图 1　缺口附近的磁场分布

2　试　验

在理论研究的基础上，研究高载疲劳损伤过程中磁信号特点. 根据 GB 4337 - 84 金属旋转弯曲疲劳实验标准，在 PQ1 - 6 纯弯曲疲劳试验机上对中间带环形沟槽的圆杆试件进行旋转弯曲疲劳试验. 试验材料为 45 号中碳钢，试件草图及测量位置如图 2 所示. 考虑各试件的应力集中大小来加载，使得缺陷处的最大应力大于材料的屈服强度 355 MPa[11]，即试件属于高载疲劳. 在实验中，每隔一定循环次数停止实验机，用 TSC-1M-4 型应力集中磁指示仪测量图 2 中所示位置的法向磁信号分布曲线 $Hp(y) - L$，并且测量 9 个测点的法向磁信号. 其中在缺口附近的测点间隔稍微密一些，以便于着重研究缺口附近的信号特征. 测 $Hp(y) - L$ 曲线时，传感器离测量位置的距离是 2 mm；测 9 个点的信号时，传感器贴着试件表面.

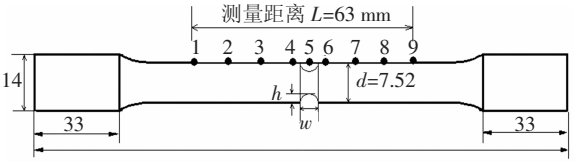


图 2　试件示意图及测量位置分布

TSC-1M-4 型应力集中磁指示仪是俄罗斯动力诊断公司生产的磁记忆信号专用检测仪表，使用霍尔元件作为传感器，量程为 ± 2000 A/m，基本绝对误差为 ±5%，附加相关误差为 ±1%. 该仪表经俄罗斯国家标准委员会[12-13]批准并列入测量仪表在册目录. 俄罗斯动力诊断公司[14]生产的 TSC-1M-4 型应力集中磁指示仪已经广泛用在磁记忆检测技术的实验研究和工业检测中.

3　结果及分析

各个试件 $Hp(y) - L$ 曲线及 9 个测点的磁信号值随循环次数的增加有明显规律，以 p14 为例，如图 3、图 4 所示，其中，p14 的寿命为 17 200 r. 图 3 中显示：1) $Hp(y) - L$ 曲线在初始阶段，随着循环次数的增加快速变化；经过 100 ~ 200 次循环后曲线幅值和形状趋于稳定，呈“ ~ ”形，曲线中心在 - 200 A/m 处；疲劳破坏前 1 200 r，中间位置(对应缺口位置)曲线形状有波动，即图3中的a

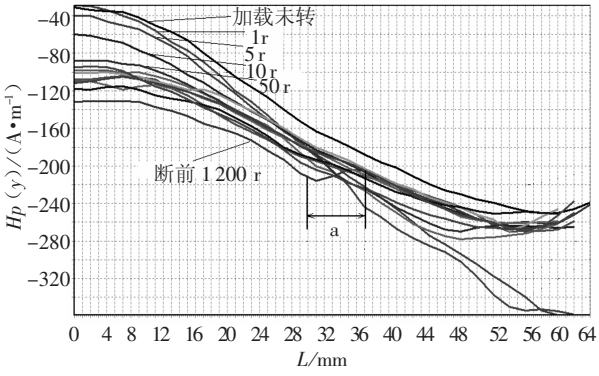


图 3　p14 的 $Hp(y) - L$ 曲线

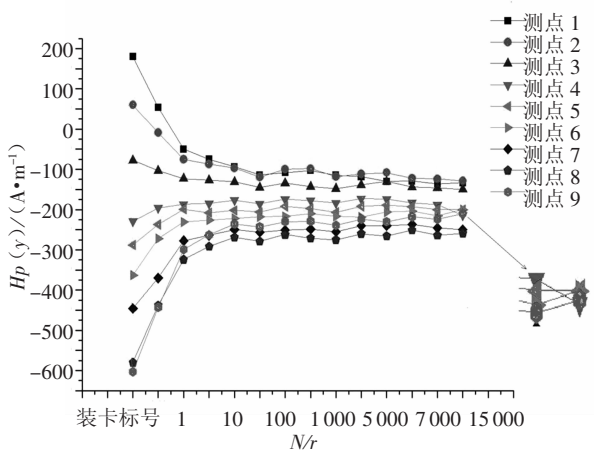
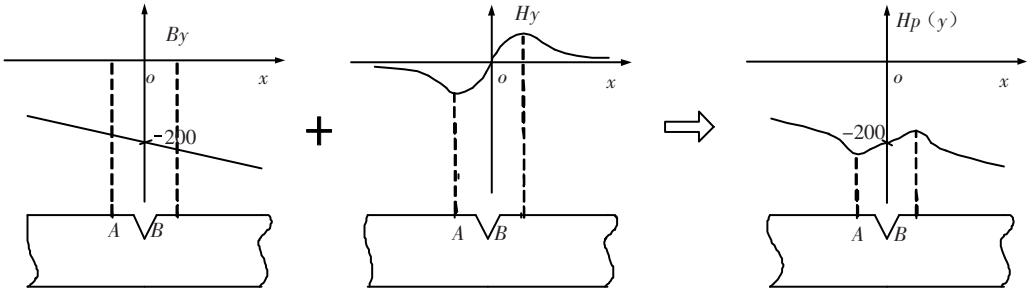


图 4　9 个测点的磁信号变化图

部分. 2)各测点的信号逐渐向 -200 A/m 附近靠拢,离缺陷越远的点变化得越快,之后信号值稳定在一个区域,9 个测点的信号变化图形呈喇叭状;断裂前 4、5、6 点的曲线出现交叉,而之前这 3 个测点的数值是从大到小的排列的. 其中,断裂前 4、5、6 测点的交叉情况对应 $Hp(y) - L$ 曲线上 a 部分,但是由于提离值小,它比 $Hp(y) - L$ 曲线上的波动更容易检测.

在初始的若干循环载荷下 $Hp(y) - L$ 曲线快速变化趋于稳定及各测点信号快速稳定,是磁感应增量累积之和逐渐增加并且趋于稳定的原因. 由理论分析知,磁记忆仪采集到的信号是环境磁场信号、磁感应磁场信号和漏磁场信号的矢量叠加. 环境磁场主要有地磁场和试验机夹头被磁化后产生的夹头磁场. 地磁场是均匀磁场,其值约为 40 A/m. 对本实验使用 PQ1 -6 纯弯曲疲劳试验机,多次实验发现沿测线位置的夹头磁场和地磁场之和近似呈斜直线分布,中间位置磁信号大小为 -200 A/m,且曲线随时间变化很小. 感应磁场沿测线位置也是直线分布,且在中间过零点. 因此,缺陷附近的磁场分布为图 5 所示. 但是由于环境磁场很大,而漏磁场相对较弱,所以只有裂纹扩展到比较大时才能看到上图所示的特征信号,即如图 3 所示的 a 部分及图 4 所示的 4、5、6 点的曲线交叉.



(a)环境磁场和感应磁场之和的法向分量 (b)漏磁场的法向分量 (c)合磁场的法向分量

图 5 缺口附近的磁场叠加示意图

表 1 所示为实验所得的各试件的总寿命 N 及 4、5、6 点的变化曲线出现相交时试件的剩余寿命 N_r. 分析表 1 发现:1)检测到特征信号时各试件处在进入裂纹快速扩展前后. 因为表 1 中 $N/N_r = 6.3\% \sim 34.4\%$,而从裂纹缓慢扩展往往占构件总寿命的 80% ~90%,而宏观裂纹快速扩展、脆断所经历的时间一般仅占构件总寿命的 10% ~20%. 2)不同缺陷出现特征信号时剩余寿命占总寿命的比例不同,缺陷越宽越深,比例越大. 因此,用磁记忆技术进行疲劳损伤诊断来防止突然的疲劳断裂、减少疲劳破坏造成的损失对本实验条件是可行的.

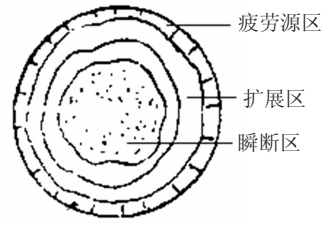
表 1 各试件 4、5、6 点出现曲线交叉时的剩余寿命

试件编号	缺陷尺寸 L/ mm	S/ MPa	N/ r	N_r/ r	(N_r/N) /%
p03	$h = 0.1, w = 0.2$	431.4	9 900	900	9.1
p04	$h = 0.1, w = 0.2$	388.2	20 600	1 600	7.8
p12	$h = 0.1, w = 0.2$	474.5	13 200	1 200	9.1
p13	$h = 0.1, w = 0.2$	474.5	3 200	200	6.3
p14	$h = 0.1, w = 0.2$	474.5	17 200	1 200	7.0
p05	$h = 0.2, w = 0.4$	287.6	69 600	9 600	13.8
p06	$h = 0.2, w = 0.4$	287.6	70 900	10 900	15.4
p07	$h = 0.2, w = 0.4$	287.6	42 400	12 400	29.2
p08	$h = 0.2, w = 1$	287.6	30 500	10 500	34.4
p09	$h = 0.2, w = 1$	287.6	69 400	19 400	28.0

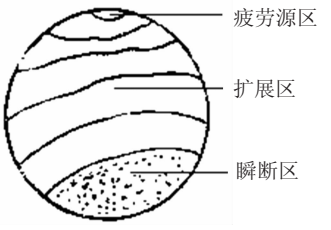
4 讨 论

本实验是高载旋转弯曲疲劳,而且应力集中系数是 $K_T = 1.71 \sim 2.75$[15]. 试件的名义应力大、应力集中大,其断口宏观形貌如图 6(a)所示,瞬断区在中间,疲劳裂纹从整个环形缺陷萌生并同时向中心扩展[16]. 即按照本文叙述的检测方法,只要检测时间间隔合理,疲劳破坏前总能检测到图 4 中 a 部分的信号波动及图 5 中几个测点的信号交叉. 对于名义应力小、应力集中小的情况,

断口形状如图 6(b)所示，疲劳源从一点萌生并扩展. 如果按照本文的方法进行检测，当测线不在疲劳源附近的时候，断前特征信号的检测就很困难.



(a)名义应力大、应力集中大



(b)名义应力小、应力集中小

图 6　两种疲劳断口示意图

实验结果及分析表明：磁记忆现象产生的磁感应磁场和漏磁场相比环境磁场很弱；环境磁场虽然不掩盖特征信号，但影响观察特征信号的灵敏性. 因此，有效防止环境磁场的影响对检测很重要. 本文采取了一些措施，如每次测量时取下试件远离试验机进行信号采集以防止夹头磁场的影响[17]；采集各试件的环境磁场分布，用总的信号除去环境磁场部分进行研究；现阶段正在研究对试件进行磁屏蔽测量，以防止环境磁场及其他干扰磁场的影响.

因为漏磁场相对较弱而且分布范围只在缺陷部位很小区域，其强度对传感器离试件表面的距离很敏感. 因此，为了使测得的信号分散性小，测量同一类数据时探头的提离值要固定；为了保证测量信号的准确性，探头的提离值要尽量小一些. 文中测 $Hp(y)-L$ 曲线和 9 个点信号采用了不同的提离值，但是提离值较大的 $Hp(y)-L$ 曲线只用于试验现象的分析，数据分析用的是试验效果更好的测点信号，避免了信号的分散性又保证了信号的准确性.

5　结　论

1) 从磁机械效应出发分析了金属在地磁场和循环载荷的作用下会表现磁记忆现象，并且从漏磁的角度分析了疲劳裂纹附近的磁场会随着裂纹的扩展而变化并表现特征现象，理论上阐明了磁记忆技术进行金属疲劳损伤检测是可行的.

2) 从高载、带环状缺口的旋转弯曲疲劳实验中得出，进入裂纹快速扩展前后，缺口两边的法向磁信号大小顺序发生变化，实验上证明了磁记忆技术进行金属高载旋转弯曲疲劳损伤检测是可行的.

参考文献：

[1] 徐章遂，徐英. 裂纹漏磁定量检测原理与应用[M]. 北京：国防工业出版社，2005：1－10，115.

[2] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉：华中科技大学出版社，2002：4－5.

[3] DUBOV A A. Study of metal properties using metal magnetic memory method[C]//7th European Conference on Non-destructive Testing. Copenhagen：7th ECNT Committee，1997：920－927.

[4] 姜寿亭. 凝聚态磁性物理[M]. 北京：科学出版社，2003：19－23.

[5] DUBOV A. The method of metal magnetic memory-The new trend in engineering diagnostics[J]. Welding in the World，2005，49(9)：314－319.

[6] 王丽，冯蒙丽，丁红胜，等. 金属磁记忆检测的原理和应用[J]. 物理测试，2007，25(2)：25－30.

[7] 董丽虹，徐滨士，董世运，等. 拉伸及疲劳载荷对低碳钢磁记忆信号的影响[J]. 中国机械工程，2006，17(7)：742－745.

[8] 尹大伟，徐滨士，董世运，等. 中碳钢疲劳试验的磁记忆检测[J]. 中国机械工程，2007，43(3)：60－65.

[9] 任尚坤，杨雅玲，任吉林，等. 含小孔铁磁平板单项拉伸的漏磁场和应力分布[J]. 钢铁研究学报，2008，20(8)：55－58.

[10] 徐明秀. 基于磁记忆技术的铁磁性材料旋转弯曲疲劳损伤诊断研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2008.

[11]《机械工程材料性能数据手册》编委会. 机械工程材料性能数据手册[M]. 北京：机械工业出版社，1995：83－91.

[12] 俄罗斯动力诊断公司. TSC-1M-4 应力集中检测[EB/OL]. [2009－08－05]. http://www.energodiagnostika.cn/production/device/tsc1m.html.

[13] DUBOV A A，DUBOV Al A，KOLOKOLNIKOV S M. Method of metal magnetic memory (MMM) and inspection devices[J]. Training Handbook，2003：320.

[14] DUBOV A A. The totals of application of the metal magnetic memory method to industry in russia and other countries [EB/OL]. [2009－08－05]. http://www.energodiagnostika.cn/about_mmm/article/about_mmm_totals.html.

[15] 航空工业部科学技术委员会. 应力集中系数手册[M]. 北京：高等教育出版社，1990：84－86.

[16] 崔约贤. 金属断口分析[M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，1998：80－84.

[17] 王坤. 铁磁性材料拉伸疲劳的磁记忆信号研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2009.

(**编辑**　张　红)