

金属磁记忆量化评价的三维仿真分析与实验

张辉¹, 李龙军², 杨宾峰², 王晓锋², 崔文岩²

(1. 空军工程大学科研部, 陕西西安, 710051; 2. 空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077)

摘要 早期损伤是导致金属构件发生突发性断裂的主要因素。针对大多数常规无损检测方法都只能对已成形的宏观缺陷进行检测, 不能检测尚未成形的微观缺陷或应力集中区, 以及金属磁记忆检测技术目前只能对早期微观缺陷进行定位, 无法定量的问题, 利用仿真与实验相结合的方法, 建立了三维力磁耦合模型, 仿真计算了微观缺陷表面空间三维磁场的分布, 研究了应力、微观缺陷长度及扫描路径对磁记忆信号的影响, 在此基础上, 构建了金属磁记忆检测系统, 实验研究了外加载荷、扫描路径与金属磁记忆信号的关系。研究表明: 利用金属磁记忆检测技术可以实现对早期微观缺陷进行定量检测。

关键词 早期损伤; 金属磁记忆; 有限元仿真; 实验研究; 定量检测

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.01.013

中图分类号 TG115 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)01-0057-05

Dimensional Finite Element Simulation and Experimental Study of Metal Magnetic Memory Quantitative Evaluation

ZHANG Hui¹, LI Long-jun², YANG Bin-feng², WANG Xiao-feng², CUI Wen-yan²

(1. Department of Scientific Research, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Early damage is the main factor that causes the metal structures fracture suddenly. Aimed at the condition that most of the non-destructive testing methods can only be used to detect the macro-defect formed already, but cannot be used to detect yet to microscopic defects, the metal magnetic memory testing technology can only be used to qualitatively determine the location of the zone of stress concentration but can't be used to perform quantitative evaluation of the stress concentration zone, a method of combining simulation and experiment together is adopted to the research on the metal magnetic memory quantitative detection technology. A three dimensional force of Magnetic coupling model is established to simulate the three dimensional magnetic field distribution of the microscopic defects and research on the relationship between the stress, microstructure defect size, scan path of magnetic and magnetic memory signals. A metal magnetic memory testing system is constructed and the study of the relationship between the scan path and magnetic memory signals is performed. The experimental results and simulation conclusions are basically the same, and the use of the metal magnetic memory test technology can realize quantitative detection of the early microscopic defects.

Key words: early damage; metal magnetic memory; finite element simulation; experimental research; quantitative evaluation

金属磁记忆检测是指当铁磁性构件受到外界拉力或压力载荷和地磁场共同作用时, 在构件的应力

收稿日期: 2012-09-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51107149); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2011JQ6010)

作者简介: 张辉(1977-), 男, 河南开封人, 讲师, 博士, 主要从事电磁无损检测及信号处理研究。

E-mail: zhydhcg@126.com

集中区位置,磁畴组织会发生磁致伸缩性质的定向和不可逆的重新取向,导致构件磁导率不再为常量,磁导率的变化改变了通过应力集中区的磁场分布,其表面产生漏磁场,漏磁场的特征与应力集中区有关,检测该漏磁场便能够无损、准确地确定应力集中区的位置,即设备容易发生断裂的地方^[1-2]。

由于金属磁记忆检测具有广阔的应用前景,被誉为 21 世纪新型无损检测技术。文献[3]研究了在给定应力情况下构件表面空间磁场的分布规律,但由于信号处理方法还不成熟,并不能得到两者的量值关系;文献[4]利用实验研究了应力状态对磁记忆信号的影响,验证了利用磁记忆信号对应力集中区进行评价是可行的;文献[5]从能量学的角度推导了应力与磁导率之间的数学关系,建立了二维力磁耦合模型,仿真研究了金属磁记忆信号与应力集中区尺寸之间的关系。

但是,目前对于金属磁记忆检测技术的研究大部分都集中于检测机理的探讨与验证,对金属磁记忆定量评估技术的研究相对较少,且主要进行二维有限元仿真分析,因而无法模拟出实际微观缺陷表面三维空间磁场的分布情况,本文着重对金属磁记忆检测的三维有限元仿真进行了研究。

1 金属磁记忆检测原理

当铁磁性构件在外界磁场和拉力载荷的共同作用下,在材料应力集中区域表面上方,磁场的切向分量 $H_p(x)$ 具有最大值,法向分量 $H_p(y)$ 改变符号且有零点。根据这 2 个宏观现象可以实现对早期微观缺陷进行定位或定量检测,这就是金属磁记忆检测的基本原理。但由于磁记忆信号非常微弱,约为 $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{ T}$ 的数量级,很容易受到外界磁场的干扰,如果只利用切向分量有极大值或法向分量过零点来对缺陷进行定位,则容易出现漏判或误判。针对这个问题,本文在仿真和实验中对有无缺陷构件表面空间磁场进行了差分处理,并从差分信号中提取相关特征量对金属磁记忆检测技术进行研究。

2 三维仿真模型的建立

采用三维静态磁场标量法来建立仿真模型,模型采用 SOLID96 的六面体八节点单元,自由度为磁标量位。模型以 X60 管线钢平板为研究对象,平板大小为 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,其初始磁导率为 285。在试样的中心位置建立长方体形状的微观缺陷,微观缺陷长度方向平行 Z 轴,宽度方向平行 X

轴,见图 1。为了提取微观缺陷表面空间磁记忆信号,建立外层空气将平板包裹,为了模拟地磁环境,需在整个模型上施加 60 A/m 的恒定磁场。

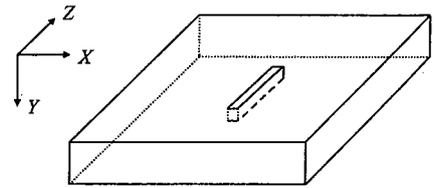


图 1 平板模型示意

Fig. 1 Sketch map of flat model

3 仿真结论分析

由文献[5]可知,当被测构件为 X60 管线钢时,可以给模型赋予不同的磁导率来模拟具有不同应力的微观缺陷。其微观缺陷的应力值为 0、50、100、150、200、250、300、350 MPa 时,磁导率分别为 285.00、294.53、303.64、312.37、320.73、328.75、336.44、343.84。

仿真中设定微观缺陷的宽度 b 为 4 mm,深度 h 为 3 mm,长度 L 为 10 mm,提高值为 1 mm。提取路径上各点的切向磁场 $H_p(x)$ 和法向磁场 $H_p(y)$,可以得到磁记忆信号切向分量 $H_p(x)$ 和法向分量 $H_p(y)$ 的三维分布图,将有应力作用时平板表面空间磁场与无应力作用时构件表面空间磁场作差分处理,结果见图 2。

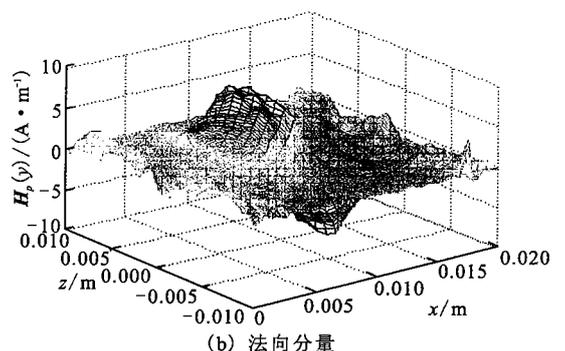
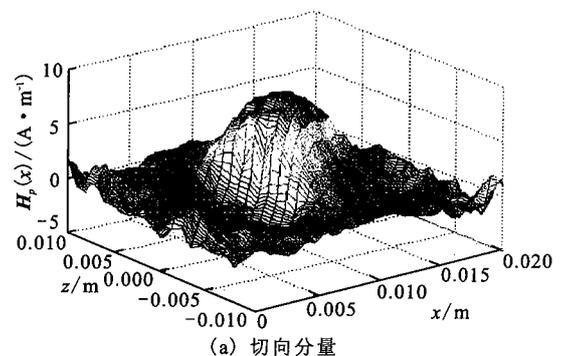


图 2 微观缺陷表面空间磁记忆信号分布

Fig. 2 Magnetic memory signal distribution of microscopic defects in the surface space

由图 2(a)可知,在微观缺陷中心位置,空间切向磁场出现最大值;观察图 2(b)可以发现,在微观缺陷中心位置表面空间法向磁场改变方向且过零值点,在微观缺陷两端法向分量有极大值和极小值。这与磁记忆检测的宏观现象是一致的,证明了本文基于力磁耦合效应建立的三维仿真模型的正确性。

3.1 微观缺陷应力值对磁记忆信号的影响

为了研究微观缺陷应力值与其表面空间磁记忆信号之间的关系,设定微观缺陷区域的磁导率为 294.53、303.64、312.37、320.73、328.75,其分别对应的是应力值为 50 MPa、100 MPa、150 MPa、200 MPa、250 MPa 的微观缺陷。微观缺陷长度为 10 mm,宽度为 4 mm,高为 3 mm,提离值为 1 mm,仿真结果见图 3。

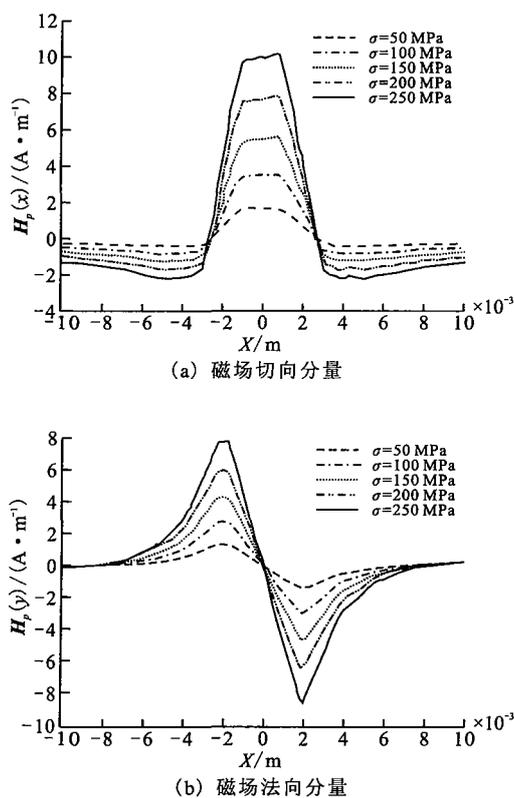


图3 不同应力状态下试件表面空间磁记忆信号

Fig. 3 Numerical curves of metal magnetic memory under elastic stresses

由图 3可知,当微观缺陷的应力值增大时,磁记忆信号切向分量和法向分量的幅值都会增大。这是由于应力值增加时,应力集中区的磁导率也相应地增大,使得磁记忆信号的幅值随之增大。这就说明可以提取磁记忆信号的法向分量或切向分量的峰值作为特征量,对构件中出现的微观缺陷即应力集中区的应力集中程度进行定量检测,继而对构件的剩余寿命进行评估。

3.2 微观缺陷长度对磁记忆信号的影响

为了研究微观缺陷长度对磁记忆信号的影响,

仿真中设计了 5 组不同长度的微观缺陷,其长度 L 分别为 3 mm、4 mm、5 mm、6 mm、7 mm,宽度为 4 mm,深度为 3 mm,微观缺陷的应力值为 200 MPa,对应的磁导率为 320.73,提离值为 1 mm,选取微观缺陷中心位置为扫描路径,可以得到不同长度微观缺陷磁记忆信号分布的差分结果,结果见图 4。

分析图 4(a)可以发现,当微观缺陷长度增加时,切向分量的峰值近似成等间隔增加,图 4(b)中知,当微观缺陷长度增加时,磁记忆信号法向分量变化并不明显。由此可知,提取磁记忆信号切向分量差分信号的峰值作为特征量对微观缺陷长度进行定量检测的效果更好。

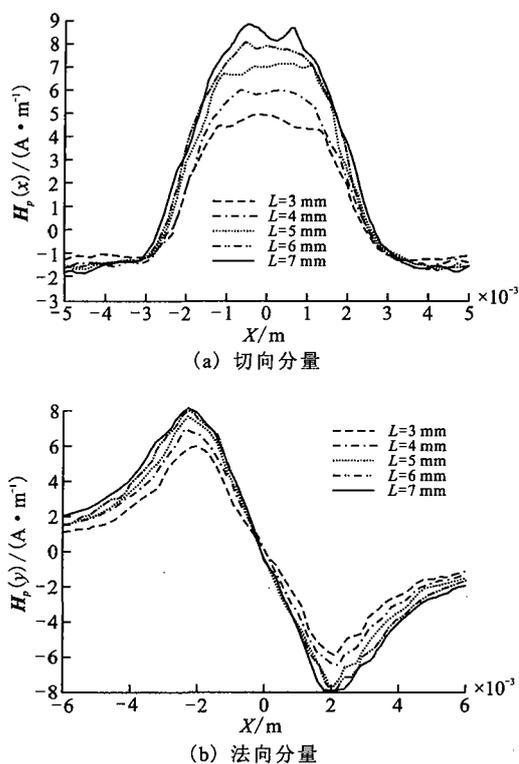


图4 不同长度情况下磁记忆信号

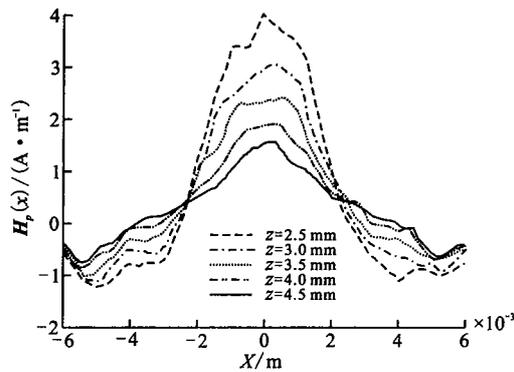
Fig. 4 Numerical curves of metal magnetic memory under different length

3.3 扫描路径对磁记忆信号的影响

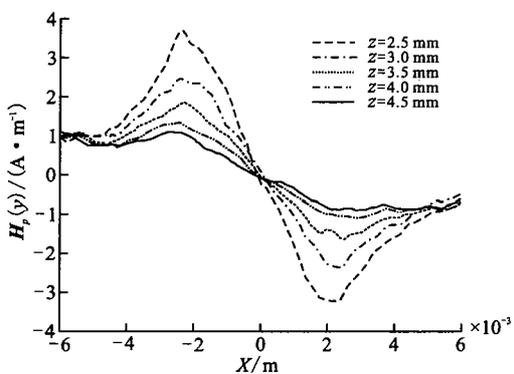
设置长为 5 mm、宽为 4 mm、高为 3 mm、应力值为 200 Mpa 的微观缺陷,选取距离微观缺陷边沿 0 mm、0.5 mm、1 mm、1.5 mm、2 mm 的 5 条扫描路径,提离值 t 为 1 mm。提取该路径上磁记忆信号的切向分量与法向分量,对其进行差分处理后的结果见图 5。

从图 5(a)、(b)中可以看出,当扫描路径与微观缺陷之间的距离逐渐增加时,磁记忆信号切向分量幅值随之减小。这是由于微观缺陷表面的磁场在传播过程中是向周围发散的,因而在微观缺陷表面空间处的磁场信号是最大的,因此,在实际检测过程

中,磁记忆信号最强的位置就是构件容易发生断裂的地方。



(a) 切向分量



(b) 法向分量

图5 不同路径情况下磁记忆信号

Fig. 5 Numerical curves of metal magnetic memory under different scan path

4 实验系统设计及结果分析

4.1 实验系统的设计

金属磁记忆检测系统由硬件和软件两部分组成,在构建系统硬件部分和编写系统软件程序时,均采用集成化、模块化的设计思想。系统硬件框图见图6,传感器照片见图7。

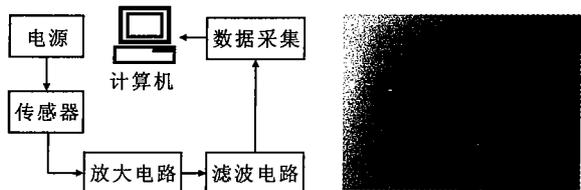


图6 系统硬件整体框图

图7 传感器照片

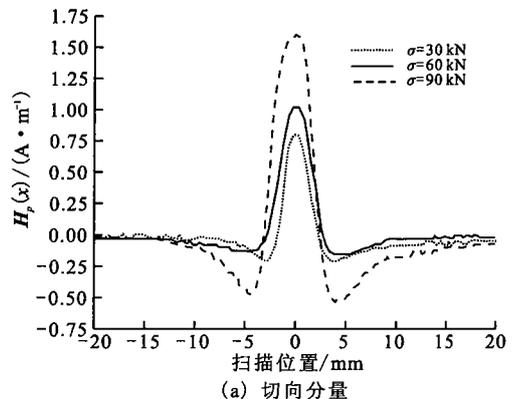
Fig. 6 System overall block diagram Fig. 7 Photo of sensor

传感器采用线性霍尔传感器 AH49E, TO-92S封装,5 V 直流供电,AH49E 具有高灵敏度、输出噪声低及响应速度快等特点,静态输出电压为 2.5 V,灵敏度为 1.6 mV/GS。放大电路部分采用两级 AD620 进行放大,滤波电路采用四阶巴特沃兹带通

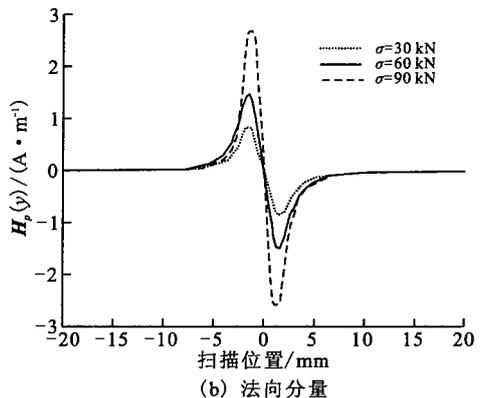
滤波器,其高通频率为 0.4 Hz,低通截止频率为 480 Hz。数据采集卡的采集频率为 100 kHz。

4.2 实验结果分析

选取一块长为 100 mm,宽为 50 mm,板厚为 8 mm 的铁磁性平板,在平板中心位置加工一道长为 20 mm,宽为 2 mm 的长条形裂纹。为了研究不同应力的微观缺陷表面空间磁场分布,需对平板构件作以 30 kN、60 kN、90 kN 为载荷量的静拉伸加载,由文献[6]可知,此时构件的裂纹尖端处的应力值最大,所以可以利用金属磁记忆检测系统检测裂纹尖端处的磁记忆信号,检测结果见图 8。



(a) 切向分量



(b) 法向分量

图8 不同载荷情况下磁记忆信号的实验值

Fig. 8 Experimental data of MMM under different loading

由图 8 可知,当载荷增加时,裂纹尖端表面空间磁记忆信号的峰值会相应的增大。由图 8(a)可知,当所加载荷由 30 kN 增加至 60 kN 时,磁记忆切向分量峰值会增加 25%,当载荷增至 90 kN 时,磁记忆信号切向分量会大幅度增加,这表明此时构件已经接近屈服或已进入塑性阶段。从图 8(b)可以看出,磁记忆信号法向分量峰值的变化规律与磁记忆切向分量峰值变化规律相类似,在载荷为 90 kN 时,其峰值会大幅度增加,这与仿真结果基本一致。

为了检测不同路径上磁记忆信号,以受载 30 kN 的平板为研究对象,在提高为 1 mm 的情况下,对距离裂纹尖端边沿 2 mm、4 mm、6 mm 路径上的

磁记忆信号进行检测,其结果见图9。由图9可知,当传感器逐渐远离裂纹尖端时,磁记忆信号随之减小,这就证明构件在裂纹尖端处的应力值是最大的,远离裂纹尖端时,应力值逐渐减小。

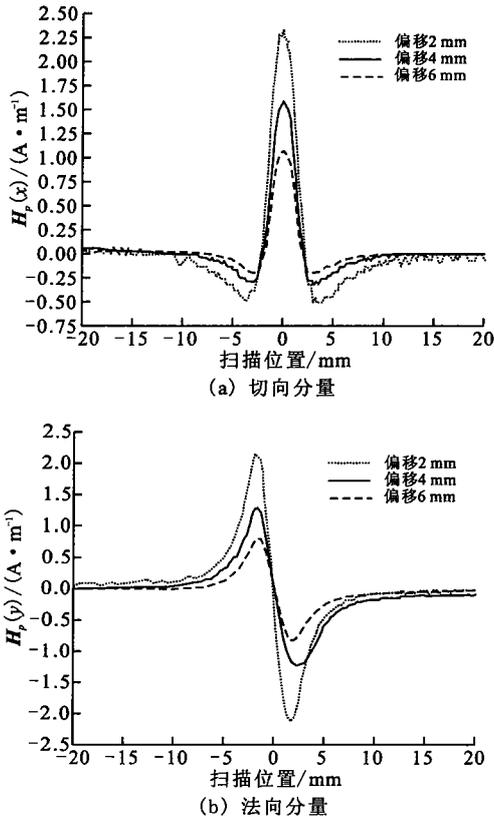


图9 不同扫描路径情况下磁记忆信号实验值

Fig. 9 Experimental data of MMM under different scan path

5 结语

针对二维磁记忆仿真研究对象受限,无法模拟微观缺陷空间实际磁场分布的问题,首先建立了三维力磁耦合模型,利用应力与磁导率的关系,仿真研究了不同应力、不同长度的微观缺陷空间的磁场分布,分析了扫描路径对磁记忆信号的影响,仿真结果表明,当应力等间隔增加时,磁记忆信号法向分量与切向分量都是成近似线性增加,当微观缺陷长度增加时,磁记忆信号切向分量峰值的变化比法向分量明显,提取切向分量峰值可以实现对微观缺陷长度进行定量检测,在微观缺陷位置处的磁记忆信号最强,在实际检测过程中,磁记忆信号最强的地方就是构件最容易发生断裂的地方。其次,设计了金属磁记忆检测的实验系统,实验研究了不同载荷及扫描路径情况下裂纹尖端表面空间磁场的分布,实验结果与仿真结果基本相符,证明了仿真结果的正确性。

参考文献(References):

- [1] Doubov A. A. The express-technique of welded joints examination with use of metal magnetic memory [J]. NDT&E international welding in the world, 2000, 33(6): 351-362.
- [2] 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.
REN Jilin, WU Guanhua, SONG Kai, et al. Study on the mechanism of metal magnetic memory testing[J]. Nondestructive testing, 2002, 24(1): 29-31. (in Chinese)
- [3] Sipeky A, Ivanyi A. Magnetic hysteresis under applied stress[J]. Physica B, 2006, 37(2): 177-180.
- [4] 宋凯, 任吉林, 任尚昆, 等. 基于磁畴聚合模型的磁记忆效应机理研究[J]. 无损检测, 2007, 29(6): 354-359.
SONG Kai, REN Jilin, REN Shangkun, et al. Mechanism based on magnetic memory effect of magnetic domain aggregation model[J]. Nondestructive testing, 2007, 29(6): 354-359. (in Chinese)
- [5] 李龙军, 王晓峰, 杨宾峰, 等. 金属磁记忆定量检测技术的仿真分析[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2012, 13(6): 62-67.
LI Longjun, WANG Xiaofeng, YANG Bin Feng, et al. The basic theory and simulation research on metal magnetic memory which based on stress-magnetization [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2012, 13(6): 62-67. (in Chinese)
- [6] 张英, 宋凯, 任吉林. 铁磁构件应力集中的计算机模拟和磁记忆检测[J]. 南昌航空工业学院学报: 自然科学版, 2002, 18(1): 64-69.
ZHANG Ying, SONG Kai, REN Jilin. Application of ANSYS software in metal magnetic memory testing [J]. Journal of Nanchang institute of aeronautical technology: natural science edition, 2002, 18(1): 64-69. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)