

# 基于力磁耦合的金属磁记忆检测机理与仿真

李龙军<sup>1</sup>, 王晓锋<sup>1</sup>, 杨宾峰<sup>1</sup>, 张辉<sup>2</sup>, 崔文岩<sup>1</sup>, 柏雪倩<sup>1</sup>

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

**摘要** 针对金属磁记忆检测技术目前尚不能对微观缺陷进行定量检测的问题, 在分析基于力磁耦合的金属磁记忆检测机理的基础上, 利用 Jiles 力磁耦合准则及宛福德的磁性物理学, 推导出了磁导率与应力之间的数值关系, 并通过 ANSYS 有限元仿真软件建立了二维力磁耦合模型, 研究了微观缺陷深度和宽度对构件表面空间中磁记忆信号的影响规律。仿真结果表明: 通过提取磁记忆信号法向分量峰峰值之间的间距可以对微观缺陷的宽度进行定量, 提取磁记忆信号法向分量的峰值可以对微观缺陷的深度进行定量。

**关键词** 微观缺陷; 金属磁记忆; 力磁耦合; 有限元仿真; 定量评估

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.03.018

**中图分类号** TG115 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)03-0085-06

金属磁记忆检测技术是一种利用金属磁记忆效应来检测铁磁性金属构件应力集中和早期缺陷部位的新型无损检测技术<sup>[1]</sup>。它克服了传统无损检测技术无法对金属构件早期损伤进行诊断的缺点<sup>[2-3]</sup>, 能够对金属构件内部的应力集中区和微观缺陷进行定位检测, 防止因疲劳损伤导致的突发性断裂, 造成灾难性后果, 对财产和人身安全造成极大的威胁。

自 1999 年俄罗斯学者杜波夫提出金属磁记忆检测技术以来, 国内外多所高等院校和科研单位的相关学者对其检测机理、仿真计算以及实验数据处理进行了探索研究, 并取得了一些成果。Bertram 教授研究了磁化过程中磁化率由可逆向不可逆转变过程的条件, 并得到了磁化率变化量的平均值与铁磁性材料内自由能的数值关系<sup>[4]</sup>, 但该关系式较为复杂, 且部分参数难以得到, 不利于实际应用。任吉林教授从应力对铁磁构件磁畴组织影响的角度研究了金属磁记忆效应的微观机理, 并验证了利用金属磁记忆效应可以实现对应力集中区的定位检测<sup>[5]</sup>。

国内外目前对于磁记忆检测的研究还处于初期阶段, 缺少有效的力-磁效应数值模拟, 对磁记忆检测定量评估问题的研究还不成熟, 尚未得出统一的结论。

## 1 基于力磁耦合的金属磁记忆检测机理

对于金属磁记忆应力检测微观机理解释, 目前被普遍接受的基于铁磁学理论的“能量最小学说”。其认为磁记忆效应产生的内在原因是外加应力载荷使铁磁性构件产生很高的应力能, 为了抵消应力能, 会使构件磁能发生相应的变化, 使构件整体能量达到最小。宏观表现为磁记忆信号切向分量出现极大值, 而法向分量改变极性并出现过零点, 通过分析磁记忆信号的特征可以对微观缺陷进行定位检测。

根据“能量最小学说”提出的基于力磁耦合的金属磁记忆检测机理, 是指铁磁材料置于外界磁场(地磁场)环境中, 没有外应力作用时, 材料内部磁矩的矢量和为零, 宏观不表现磁性, 其磁导率均匀分布, 不会产生磁记忆信号。当材料受到外力作用时, 外应力引起的应力集中会导致磁畴组织定向和不可逆的重新取向,

\* 收稿日期: 2012-02-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50807053; 51107149); 陕西省自然科学基金资助项目(2011JQ6010)

作者简介: 李龙军(1988-), 男, 江西南昌人, 硕士生, 主要从事测试计量技术及仪器研究。

E-mail: lilongjunboy@126.com

表现为磁导率的变化。由于材料的磁导率分布不再均匀,在应力集中区,地磁场磁力线受到阻断,产生磁通的泄漏,在铁磁材料表面形成漏磁场。此时材料的磁导率分布与其应力分布之间存在着一定的对应关系。基于此,利用磁学和力学的相关知识,从能量的角度研究构件应力对磁导率的影响,并通过对构件早期损伤区域的磁导率进行赋值,来模拟材料微观缺陷的应力分布情况,这样就可以采用仿真计算的方法得到微观缺陷对构件表面空间磁记忆信号的影响,这就是基于力磁耦合的磁记忆检测机理。

## 2 应力与磁导率之间的关系

根据铁磁学的相关研究可知,在无外部磁场无应力作用的情况下,处于稳定状态的磁晶体内总的自由能为<sup>[6-11]</sup>:

$$E = E_u = E_k + E_{ms} + E_{el} + E_h + E_d \quad (1)$$

式中: $E_k$ 为磁晶体各向异性能; $E_{ms}$ 为磁弹性能; $E_{el}$ 为弹性能; $E_h$ 为外磁场能; $E_d$ 为退磁能。

当铁磁构件受到外界应力的作用时,晶体将发生相应的应变,产生较大的应力能,此时晶体内总的自由能为:

$$E = E_k + E_{ms} + E_{el} + E_h + E_d + E_\delta = E_u + E_\delta \quad (2)$$

式中: $E_u$ 为无外应力载荷作用时材料总自由能; $E_\delta$ 为材料受到外界应力时产生的应力能。根据文献[10]可知,当铁磁性构件受到应力大小为 $\delta$ 的载荷的作用时,铁磁性构件内部产生的应力能 $E_\delta$ 为:

$$E_\delta = -\frac{3}{2}\delta[\lambda_{[100]}(\cos^2\theta_1 + \cos^2\theta_2 + \cos^2\theta_3) + 2\lambda_{[111]}(\cos\theta_1\cos\theta_2 + \cos\theta_2\cos\theta_3 + \cos\theta_3\cos\theta_1)] \quad (3)$$

式中: $\lambda_{[100]}$ 、 $\lambda_{[111]}$ 为材料的各向磁致伸缩系数; $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 为方向与磁化方向的夹角。当材料为磁致伸缩各向同性时,即 $\lambda_{[100]} = \lambda_{[111]} = \lambda_\delta$ ,上式可以进一步简化为:

$$E_\delta = -\frac{3}{2}\delta\lambda_\delta\cos^2\theta \quad (4)$$

式中: $\theta$ 为应力方向与磁化方向的夹角, $\cos\theta = \sum_{i=1}^3 \cos\theta_{ii}$ 。当应力方向与磁化方向平行,即 $\cos\theta = 1$ 时:

$$E_\delta = -\frac{3}{2}\delta\lambda_\delta \quad (5)$$

由电磁场理论可知<sup>[12]</sup>:

$$\Delta E_u = \frac{1}{2}(B_\delta - B)H \quad (6)$$

式中: $\Delta E_u$ 为磁能变化量; $B$ 为无外应力作用时材料的磁感应强度; $B_\delta$ 为外应力作用下构件的磁感应强度。根据能量守恒定律:

$$\frac{1}{2}(B_\delta - B)H = \frac{3}{2}\delta\lambda_\delta \quad (7)$$

式中: $\delta$ 为构件应力值的大小; $H$ 为地磁场场强; $B = \mu H$ ; $B_\delta = \mu_\delta H$ , $\mu$ 为材料初始未受外力条件下的磁导率; $\mu_\delta$ 为应力值 $\delta$ 时构件的磁导率,式(7)也可写为:

$$\frac{\mu_\delta - \mu}{\mu_\delta \mu} B_\delta B = 3\delta\lambda_\delta \quad (8)$$

由胡克定律,在弹性阶段对于实心铁磁材料有:

$$N\lambda_\delta \Delta x \Delta y = BB_\delta \quad (9)$$

式中: $N$ 为材料的弹性模量; $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 分别为钢构体单元的长和宽。当磁化状态达到饱和时,此时 $B = B_\delta = B_m$ ,式(8)可写为:

$$N\lambda_m \Delta x \Delta y = B_m^2 \quad (10)$$

式中: $B_m$ 为饱和磁感应强度; $\lambda_m$ 为饱和磁致伸缩系数。式(9)与式(10)相比可得:

$$\lambda_\delta = \lambda_m \frac{BB_\delta}{B_m^2} \quad (11)$$

将式(11)代入式(8)可得:

$$\mu_{\delta} = \mu + \frac{3\lambda_m \mu^2 \delta}{B_m^2 + 2\lambda_m \mu \delta} \quad (12)$$

式中:  $B_m$  为饱和磁感应强度;  $\lambda_m$  为饱和磁致伸缩系数;  $\mu$  为材料初始未受外力条件下的磁导率;  $B_m$ 、 $\lambda_m$ 、 $\mu$  与选取的材料有关;  $\mu_{\delta}$  为应力值  $\delta$  时构件的磁导率,  $\delta$  为材料的应力值。以 X60 管线钢为例, 其应力 - 磁导率关系曲线见图 1。

当铁磁性构件进入塑性阶段, 由于磁畴组织发生了不可逆的重新取向, 出现大量的滑移带, 构件内部的磁导率发生剧烈的变化, 并产生一个很大的矫顽场, 此时矫顽场成为影响构件表面漏磁场场强的主要影响因素, 磁导率的变化对磁记忆检测的影响不大。故本文只研究了弹性阶段应力与磁导率的关系, 对塑性阶段应力与磁导率的关系不再研究。

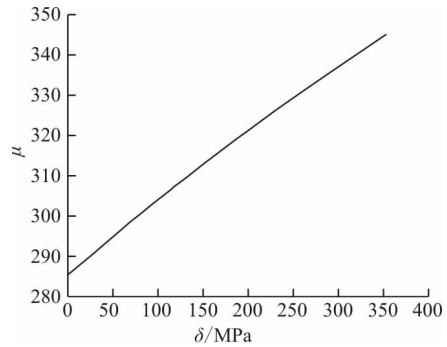
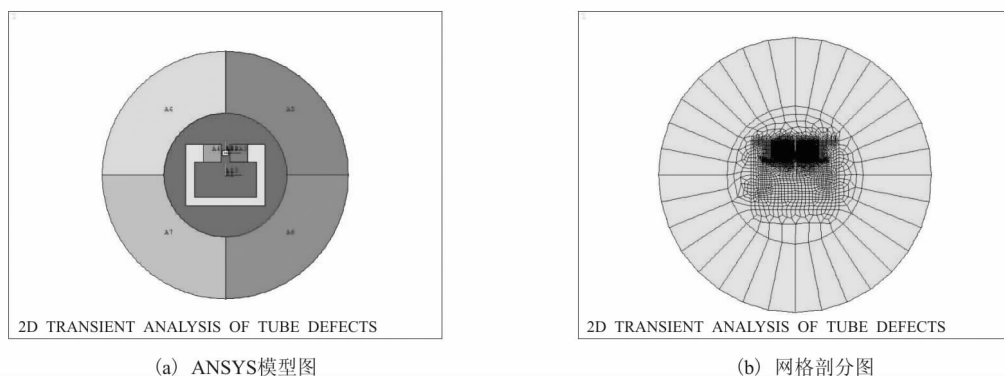


图1 应力 - 磁导率关系曲线

Fig. 1 Curve of stress vs magnetic permeability

### 3 力磁耦合模型的建立

本文利用有限元仿真分析软件 ANSYS, 建立了二维力磁耦合仿真模型<sup>[13]</sup>。通过对平板金属构件设置不同参数的应力集中区, 分析应力与平板构件表面空间磁记忆信号的数值关系。本文所建的模型采用的是 8 节点, 适用于二维平面磁场问题的 plane 53 单元以及 INFIN110 远场单元。金属磁记忆检测技术是基于弱磁环境的漏磁检测技术, 所以本文建立了 2 块尺寸为  $800 \times 800 \text{ mm}^2$ , 矫顽力为 46 A/m, 相对磁导率为 1.08 的永磁体, 用来模拟地磁场。设置相对磁导率为 190 000 的衔铁用以形成规则的闭合磁力线。由于有限元的计算结果与采用的单元形式和划分网格的方法有很大的关系, 若不能正确选用则得不到准确的计算结果。为了保证构件表面空间磁记忆信号的计算精度, 划分网格时应该尽可能在构件周围区域细化单元网格, 而且要求单元划分尽可能均匀。鉴于此, 为了提高仿真计算精度与时间, 在对模型进行网格剖分的时候, 衔铁均匀划分为 20 等分, 永磁体划分为 50 等分, 构件划分为 50 等分, 外层空气为 32 等分, 包构件空气为 200 等分, 设置单元类型为三角形单元后进行自由网格划分, 有限元模型见图 2, 整个模型分为 27 629 个单元, 共计节点数为 82 822 个。网格划分好后, 对最外层边界施加远场单元约束, 对模型进行求解。



(a) ANSYS模型图

(b) 网格剖分图

图2 有限元模型图

Fig. 2 Finite element model

### 4 力磁耦合模型的仿真结果

设材料为 X60 管线钢, 在弹性阶段范围内, 本文预设了 8 组应力值, 代入式 (12) 计算可以得到这 8 组应力值对应的磁导率的数值, 见表 1。

表1 弹性阶段不同应力所对应的磁导率

Tab.1 Relative permeability dependent on the elastic stress

应力/MPa	0	50	100	150	200	250	300	350
磁导率	285	294.53	303.64	312.37	320.73	328.75	336.44	343.84

在实际仿真中,本文假设微观缺陷的应力值为 100 MPa,此时材料对应的磁导率为 303.64。通过对材料预置区域赋予 303.64 磁导率特性,来模拟应力值为 100 MPa 的微观裂纹区域,通过设置不同尺寸的微观缺陷,提取该区域表面空间磁记忆信号的法向分量和切向分量来研究微观缺陷的尺寸对磁记忆信号的影响。

#### 4.1 微观缺陷宽度对磁记忆信号的影响

为了研究微观缺陷宽度对磁记忆信号的影响,仿真中分别设置了 5 组不同宽度的微观缺陷,其宽度分别为 2 mm、3 mm、4 mm、5 mm、6 mm,缺陷磁导率为 303.64 的恒定值,对应 100 MPa 的应力值。提取缺陷表面上方 3 mm 处的磁记忆信号,得到的仿真结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看到,在应力集中区的表面上方,磁记忆信号的切向分量有极大值,磁记忆信号的法向分量出现过零点,并出现正负峰值。从图中可以看出,随着微观缺陷宽度的增加,构件表面上方磁记忆信号法向分量和切向分量的峰值都有明显的增大。从图 3(a)中可以看到,当缺陷宽度逐步增加时,漏磁场信号切向分量的峰值也不断增大,但是峰值的变化量与微观缺陷的宽度之间没有明确的对应关系。从图 3(b)中可以看出,当微观缺陷宽度增加时,磁记忆信号法向分量的峰值增大,同时其峰峰值间距也发生了明显的变化,峰峰值的宽度与缺陷宽度刚好相等,因此,提取微观缺陷表面空间磁记忆信号法向分量峰峰值之间的距离可以实现对缺陷宽度的定量评估。

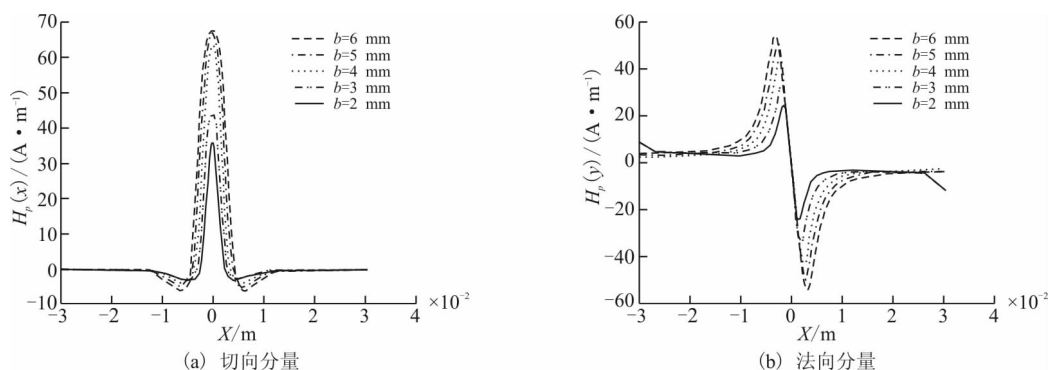


图3 不同宽度微观缺陷对应的磁记忆信号

Fig.3 The data of MMM under different width

#### 4.2 微观缺陷深度对磁记忆信号的影响

微观缺陷深度的检测往往相对来说会比较困难。为了研究微观缺陷深度对磁记忆信号的影响,仿真中设置了深度分别为 1 mm、1.5 mm、2 mm、2.5 mm、3 mm 的缺陷,设定缺陷磁导率为 303.64 的恒定值,对应 100 MPa 的应力值。提取缺陷表面上方 3 mm 处的磁记忆信号,仿真结果见图 4。

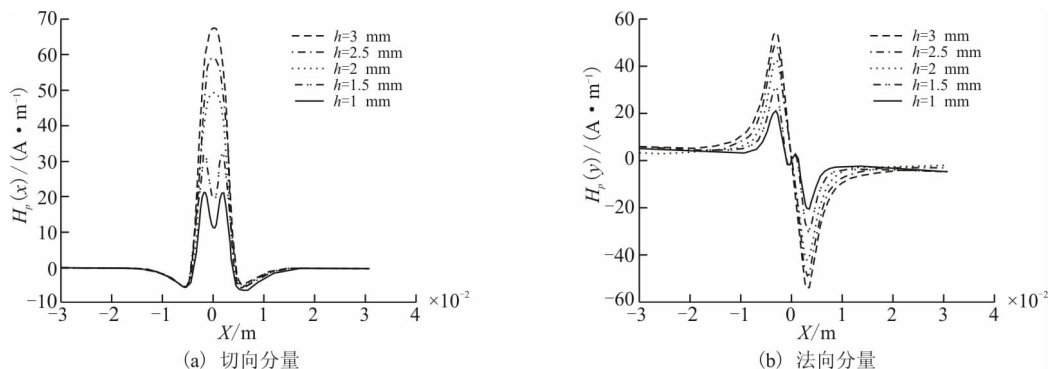


图4 不同深度微观缺陷对应的磁记忆信号

Fig.4 The data of MMM under different depth

从图 4(a)可以看出,当微观缺陷深度增加时,磁记忆信号的切向分量峰值有明显的增大,当缺陷深度为 1 mm 和 1.5 mm 切向漏磁场出现 2 个极大值,当缺陷深度等量增加时,切向漏磁场峰值并没有呈规律性增

加,因此磁记忆信号的切向分量难以对微观缺陷的深度进行定量。从图4(b)可以看出,当微观缺陷深度以0.5 mm 等间隔增加时,法向漏磁场的峰值也以4 A/m 等量增加。若用 $L$ 表示缺陷的深度, $F$ 表示磁记忆信号法向分量的峰值,对结果进行归一化处理,可得到 $F$ 与 $L$ 存在线性关系 $F = 8L + 14$ ,其中 $F$ 的单位为A/m, $L$ 的单位为mm,根据此关系式,通过提取微观缺陷表面空间漏磁场法向分量的峰值可以实现对缺陷深度的定量检测。

## 5 结束语

由于金属磁记忆检测技术目前还只能对应力集中区或微观裂纹进行定位,尚无法对早期损伤进行定量检测,因此在使用过程中,往往要结合其他无损检测技术,这严重制约了磁记忆检测在工程领域中的应用。本文在探究了应力与磁导率之间的关系的前提下,利用大型有限元仿真软件 ANSYS 对构件进行有限元仿真,研究了早期损伤宽度及深度与磁记忆信号之间的关系。从仿真结果可以看出,微观缺陷的宽度与磁记忆信号法向分量的峰峰值的间距成对应关系;微观缺陷的深度 $L$ 与磁记忆信号法向分量的峰值 $F$ 之间存在线性关系 $F = 8L + 14$ 。本文的研究结果对于推进金属磁记忆定量检测技术的研究具有重要意义。

### 参考文献(References):

- [1] Doubov 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(6):317-320.
- [2] 杨宾峰,张辉,赵玉丰,等. 基于新型脉冲涡流传感器的裂纹缺陷定量检测技术[J]. *空军工程大学学报:自然科学版*,2011,12(1):73-77.  
YANG Bin Feng, ZHANG Hui, ZHAO Yufeng, et al. Quantification of crack defect using a new pulsed eddy current sensor [J]. *Journal of air force engineering university: natural science edition*, 2011,12(1):73-77. (in Chinese)
- [3] 张辉,杨宾峰,王晓锋,等. 脉冲涡流检测中参数影响的仿真分析与实验研究[J]. *空军工程大学学报:自然科学版*,2012,13(1):52-57.  
ZHANG Hui, YANG Bin Feng, WANG Xiaofeng, et al. Simulation analysis and experimental research on parameter influence in pulsed eddy current nondestructive testing technique [J]. *Journal of air force engineering university: natural science edition*, 2012,13(1):52-57. (in Chinese)
- [4] Bertram H N, Liu A D. Conditions for infinite reversible susceptibility as magnetic systems reach Irreversible switching[J]. *Journal of magnetism and magnetic materials*,2005,247:279-295.
- [5] 任吉林,邬冠华,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)
- [6] Jiles D C. A new approach to modeling the magnetomechanical effect [J]. *Journal of applied physics*,2004,95(11):7058-7060.
- [7] Jiles D C, Atherton D L. Theory of the magnetisation process in ferromagnets and its application to the magnetomechanical effect [J]. *Journal of applied physics*, 1984,17(6):1265-1281.
- [8] Jiles D C. Magnetic properties and microstructure of AISI 1000 series carbon steels[J]. *Journal of applied physics*,1988,21(7):1186-1195.
- [9] Jiles D C, Suominen L. Effects of surface stress on barkhausen effect emissions; model predictions and comparison with X-ray diffraction studies [J]. *IEEE transactions on magnetics*,1994,30(6):4924-4926.
- [10] Jiles D C. Theory of the magnetomechanical effect[J]. *Journal of applied physics*,1995,28(8):1537-1546.
- [11] 宛德福. 磁性物理学[M]. 北京:电子工业出版社,1999.  
WAN Defu. *Physics of magnetism*[M]. Beijing: Publishing house of electronics industry,1999. (in Chinese)
- [12] 王威. 钢结构磁力耦合应力检测基本理论及应用技术研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2005.  
WANG Wei. *The basic theory and application technology of stress NDT & E based on magnetic-mechanical coupling effects for steel structure*[D]. Xi'an: Xi'an university of architecture & technology, 2005. (in Chinese)
- [13] 邓博. 铁磁材料不同变形阶段自发漏磁场信号特征研究[D]. 北京:北京交通大学,2011.  
DENG Bo. *Investigation of SMFL signals of ferromagnets under different deformation stages*[D]. Beijing: Beijing jiaotong university,2011. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

## The Basic Theory and Simulation Research on Metal Magnetic Memory Based on Stress – Magnetization

LI Long – jun<sup>1</sup>, WANG Xiao – feng<sup>1</sup>, YANG Bin – feng<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>2</sup>, CUI wen – yan<sup>1</sup>, BAI Xue – qian<sup>1</sup>  
(1. School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. Department of Scientific Research, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Aimed at the problem of metal magnetic memory that the microcosmic cracks cannot be evaluated quantitatively by the metal magnetic memory testing method at present, the numerical value relation between the magnetic conductivity and stress is derived based on the analysis of the metal magnetic memory testing mechanism by using the theory of Jiles, who discussed the physical mechanism of the stress – magnetization effect. The finite element analysis of stress – magnetization effect is done on steel plate specimen with a microcosmic crack using ANSYS. Through the analysis, using an applicable magneto – elastic coupling model and distilling the peak value's distance and peak value of metal magnetic memory can evaluate the breadth and deepness of microcosmic cracks quantitatively.

**Key words:** microcosmic cracks; metal magnetic memory; stress – magnetization; finite element simulation; quantitative evaluation

.....  
(上接第 49 页)

## Micro – Doppler Effect Analysis of Rotating Target and Three – Dimensional Micro – motion Feature Extraction in Netted Radar

LI Dong – wei<sup>1</sup>, LUO Ying<sup>2</sup>, ZHANG Qun<sup>2</sup>, LI Tian – peng<sup>1</sup>  
(1. School of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China; 2. School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an, 710077, China)

**Abstract:** The micro – motion feature extraction for micro – motion target has attracted great attention in recent years. The micro – Doppler (m – D) effect of rotating target is introduced in the netted radar techniques in the paper. The m – D effects are separately analyzed and the parameterized expressions are deduced in the netted radars that transmit different forms of signals. Making use of the multi – view of netted radar, the parameters of the radars' different forms of echo signals those come from different locations are extracted, the three – dimensional micro – motion features are obtained by solving nonlinear multivariable equation systems. Simulation results validate the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** netted radar; micro – Doppler (m – D); three – dimensional micro – motion features; rotating target