

# 基于金属磁记忆信号垂向特征分析的损伤状态识别\*

陈海龙,王长龙,左宪章,朱红运

(军械工程学院无人机工程系 石家庄 050003)

**摘要:**金属磁记忆是一种可对铁磁材料早期微观损伤进行有效诊断的无损检测技术。为消除磁记忆信号不确定影响因素,提高损伤状态识别的准确率,引入了磁梯度张量和磁场垂向特征分析方法。首先,利用磁梯度张量测量方法获取磁场完整的变化信息,为克服检测方向选取对检测信号的影响,利用磁场不变特征量-总梯度模量来判断损伤及损伤区的边界位置;然后,通过测量不同高度下总梯度模量的平面分布,得到总梯度模量的垂向分布特征;最后,分析了不同损伤的边界处总梯度模量的垂向分布特征差异。理论分析和实验结果表明,在提高高度逐渐增大过程中,裂纹边界处的磁梯度张量振幅的衰减速度和幅度远大于应力集中作用的结果,根据磁记忆信号的垂向特征,可有效地识别损伤状态。

**关键词:**金属磁记忆;垂向分布特征;磁场梯度张量;裂纹;应力集中

中图分类号: TG115.28 TH878 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 430.25

## Damage state recognition based on metal magnetic memory signal vertical distribution feature analysis

Chen Hailong, Wang Changlong, Zuo Xianzhang, Zhu Hongyun

(Department of Unmanned Aerial Vehicles Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** Metal magnetic memory (MMM) technology is a nondestructive testing method, which can conduct effective diagnosis of early microscopic damage of ferromagnetic material. In order to eliminate the uncertain influence factors of magnetic memory signal and improve the accuracy of damage state recognition, the magnetic gradient tensor and magnetic field signal vertical distribution feature analysis methods are introduced. Firstly, the magnetic gradient tensors of the MMM signals on the crack fracture zone and stress concentration zone are measured using a tri-axis magnetometer. From the measured results, both the plane and vertical characteristics of the MMM signal distributions are obtained. To remove the influence of the measuring direction selection on experiment results, a new magnetic field invariant characteristic parameter - the magnetic total gradient modulus is introduced to determine the location and boundary of the damage and damage zone. Then, the vertical distribution features of the magnetic total gradient modulus are acquired by measuring the plane distribution of the magnetic total gradient modulus under different lift offs. Finally, the difference of the vertical distribution features of the magnetic total gradient modulus at the boundaries of different types of defects is analyzed. Theoretical analysis and experiment result show that as the lift off increases gradually, the attenuation velocity and amplitude of the magnetic total gradient modulus on the boundary of the crack are far greater than the ones caused by stress concentration, and the vertical distribution features of the magnetic total gradient modulus can be used to identify the defect state effectively.

**Keywords:** metal magnetic memory; vertical distribution feature; magnetic gradient tensor; crack; stress concentration

## 1 引言

磁记忆检测技术可以诊断铁磁材料的早期微观损伤

及其位置,但还无法对损伤状态做出准确判断<sup>[1-2]</sup>。

针对损伤状态识别问题,目前通常采用以下两类方法:一类是阈值分类法,即通过求取适合的磁信号特征值与阈值进行比较,判断试件的损伤状态。如 Yan T. J. 等

人<sup>[3]</sup>采用磁记忆信号梯度  $K$  值特征识别炉管疲劳损伤区域,当  $K$  值大于  $12 \text{ A}/(\text{m} \cdot \text{mm})$  时则认为炉管出现裂纹缺陷;黄海鸿等人<sup>[4]</sup>利用法向磁场峰-谷值  $\Delta H_p(y)$  和梯度最大值  $K_{\text{max}}$  表征 510L 钢疲劳损伤,指出宏观裂纹处的磁信号特征量变化要明显大于应力集中处;邢海燕等人<sup>[5]</sup>基于李萨如图提取焊缝损伤特征,认为试件出现宏观断裂时李萨如图局部闭合面积达到最大值。由于单一特征很难全面而准确的描述应力集中和缺陷信息,且阈值的选择目前还只能依靠实验和操作人员的经验,阈值分类法在工程应用中受到的限制条件较多。另一类是神经网络法,即利用多个磁信号特征值作为神经网络输入,实现损伤状态的智能识别。如邸新杰等人<sup>[6]</sup>将磁记忆信号的小波包能量特征作为 BP (back propagation) 神经网络输入特征量,对焊缝中的裂纹缺陷进行智能识别;刘书俊等人<sup>[7]</sup>将信号峰-峰值、谷-谷值、磁场梯度、检测信号宽度作为神经网络输入特征量,对油气管道缺陷进行识别。神经网络法综合利用多个磁信号特征,降低了漏判、误判的偶然性,但神经网络法的识别效果与训练样本数量及质量有关。

目前难以建立统一的损伤状态判定准则,主要原因在于提取的损伤特征值存在两个局限性。一是测得磁记忆信号受测量参数(检测方向、提离值)选取影响<sup>[8,9]</sup>。当检测方向与缺陷方向垂直时,信号对损伤较为敏感,平行时则不敏感。提离值选取不同时,对磁场强度的大小、分布及其梯度也会有较大影响。实际检测时无法保证检测方向与缺陷方向垂直,提离值选取也无统一标准。二是被测试件的物理状态的不确定性问题<sup>[2]</sup>。当试件的剩磁强度、尺寸、材料等状态不同时,相同类型损伤引起的磁记忆信号也会有较大区别<sup>[10]</sup>。因此,要实现损伤状态的准确识别,首先需要消除上述不确定因素的干扰,分析裂纹和应力集中磁记忆信号分布特征的差异。本文利用磁梯度张量测量方法获取磁记忆信号变化信息,提取出磁场的不变信号特征,消除检测方向的影响。同时,通过测量不同提离值下的磁记忆信号平面分布,获得损伤区域磁场垂向分布特征,消除提离值和试件物理状态因素的影响。根据裂纹和应力集中的磁记忆信号垂向分布差异,实现损伤状态的准确识别。

## 2 基于磁梯度张量的磁记忆信号不变特征提取

### 2.1 磁记忆信号梯度张量描述

磁记忆信号是具有方向和幅值的矢量场,在三维空间中,可以用 9 个(3×3 的矩阵)空间梯度组成的张量来表示为<sup>[11]</sup>:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \partial H_x / \partial x & \partial H_x / \partial y & \partial H_x / \partial z \\ \partial H_y / \partial x & \partial H_y / \partial y & \partial H_y / \partial z \\ \partial H_z / \partial x & \partial H_z / \partial y & \partial H_z / \partial z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{xx} & H_{xy} & H_{xz} \\ H_{yx} & H_{yy} & H_{yz} \\ H_{zx} & H_{zy} & H_{zz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{G}$  为磁梯度张量。磁记忆信号的磁场矢量、磁场分量以及磁梯度张量 9 个元素在直角坐标系中的关系如图 1 所示。

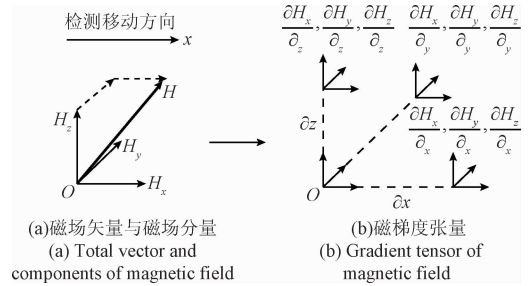


图 1 磁场矢量、磁场分量和磁梯度张量  
Fig. 1 Magnetic total vector, magnetic components and magnetic field gradient tensor

由 Laplace 方程组可知,在无源位场的检测区域内,磁记忆信号的散度和旋度都为零,即  $\sum H_{ii} = 0, H_{ij} + H_{ji} = 0 (i, j = x, y, z)$ 。这两个性质表明,磁梯度张量  $\mathbf{G}$  是迹为零的实对称矩阵,在梯度张量中只有 5 个元素是独立的。实际测量时只需要测量两个方向上磁场梯度,就可以得到完整的磁梯度张量。

### 2.2 磁记忆信号的梯度模量特征

磁记忆信号梯度张量的 3 个方向磁场梯度都可以一定程度上描述磁场变化,但各个分量的分布特征和幅值会随检测方向发生变化。

总梯度模量又称解析信号振幅,是磁梯度张量的一种缩并运算,其计算公式为<sup>[12]</sup>:

$$C = \sqrt{\sum (H_{ij})^2} (i, j = x, y, z) \quad (2)$$

对于空间任意一测量点,假设在不同检测方向下得的磁记忆信号梯度张量分别为  $\mathbf{G}_1$  和  $\mathbf{G}_2$ ,总梯度模量为  $C_1$  和  $C_2$ ,不同检测方向之间坐标系转换矩阵为  $\mathbf{R}$ 。由于  $\mathbf{R}$  是单位正交矩阵,根据单位正交矩阵性质可以得到:

$$(\mathbf{G}_1)^T \mathbf{G}_1 = (\mathbf{R} \mathbf{G}_2)^T \mathbf{R} \mathbf{G}_2 = \mathbf{G}_2^T \mathbf{G}_2 \quad (3)$$

总梯度模量  $C_1$  和  $C_2$  分别为  $(\mathbf{G}_1)^T \mathbf{G}_1$  和  $(\mathbf{G}_2)^T \mathbf{G}_2$  矩阵的对角线元素之和。因此,根据式(3)可以得到:

$$C_1 = C_2 \quad (4)$$

式(4)表明,总梯度模量是不受检测方向变化影响、可反映磁场梯度的变化程度的标量。其平面分布特征如图 2 所示,根据极值点位置可以确定损伤的位置和宽度。

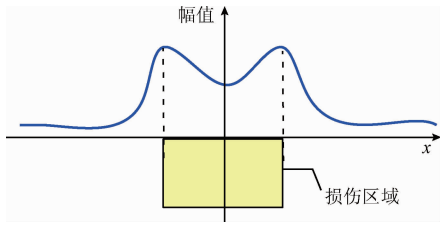


图2 磁场总梯度模量平面分布特征

Fig. 2 Magnetic gradient tensor modulus plane distribution

### 3 不同损伤状态磁记忆信号分布特征差异分析

磁记忆信号分布特征包括平面分布特征和垂向分布特征两个方面。平面分布特征指由传感器距离被测试件表面同一高度测得的磁场分布特征,垂向特征是指由不同高度平面分布组成的断面特征。

现有的拉伸和疲劳试验<sup>[1,13-14]</sup>表明,试件在应力或者循环应力作用下,损伤区域的磁记忆信号会出现切向磁场取极大值和法向磁场过零点特征。增加应力载荷或者循环应力次数,法向磁场过零点会发生一定的漂移,并逐步接近最终的裂纹断裂位置。当在试件出现裂纹时,裂纹断口两侧的磁记忆信号会发生激变。

如图3所示,从磁荷的观点来看,试件发生塑性变形时,会有大量正磁荷、负磁荷分别聚集在损伤区域的两端( $Q_1$ 、 $Q_2$ ),形成N极和S极,使得损伤区域形成内部磁源向外散射磁场<sup>[15]</sup>。当试件上表面或者侧面出现裂纹时,裂纹处空气的磁导率远小于铁磁体本身的磁导率,导致磁力线绕行,在裂纹两侧( $Q_3$ 、 $Q_4$ )也会聚集磁荷形成正负磁极<sup>[16]</sup>。但由于裂纹缺陷已出现强断面,根据磁荷体系的磁性自由能最低原则<sup>[17-18]</sup>,在库伦作用力下,裂纹边界面上的磁荷会向凸棱线位置聚集(图3中A线)。而应力集中的两侧近似为连续介质,磁荷分布则会相对比较均匀。

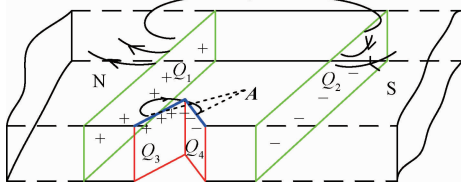


图3 损伤区域漏磁场示意图

Fig. 3 The schematic diagram of damage zone magnetic field leakage

从平面分布特征角度来看,平面分布特征反映的是磁记忆信号横向综合变化。当传感器沿试件表面检测磁记忆信号时,由于应力集中和裂纹的边界均形成正负磁极,测得的磁记忆信号都会出现法向磁场过零点和切向

磁场取极值特征,应力集中和裂纹损伤的磁记忆信号平面分布特征并无明显差异。从垂向分布特征角度来看,垂向特征反映的是不同磁场垂直方向磁场变化。由于裂纹和应力集中边界处磁荷分布特征不同,损伤边界位置处的信号垂向特征必然存在差异。

磁记忆检测关心的是磁极位置信号的变化信息,为能简单说明问题,又不失其普遍性。假设损伤边界处磁记忆信号由点磁荷 $q$ 产生,如图4所示,传感器所在位置为 $p$ 点,传感器到试件表面距离为提离值 $H$ ,传感器与点磁荷水平距离为 $l$ ( $l^2 = x^2 + y^2$ ),点磁荷到试件上表面距离为埋深 $S$ 。

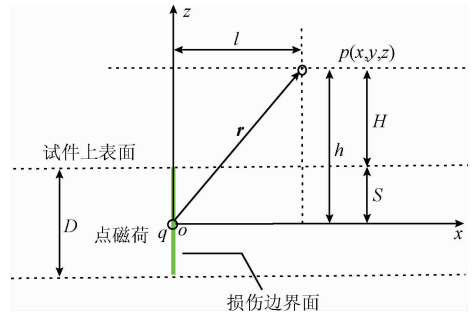


图4 点磁荷模型

Fig. 4 Point magnetic charge model

运用静磁学知识可知,点磁荷 $q$ 在测量点 $p$ 处产生的磁场为<sup>[19]</sup>:

$$\mathbf{H} = \frac{q}{r^3} \mathbf{r} = \frac{q}{(l^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} [x, y, z] \quad (5)$$

式中: $r$ 为点磁荷 $m$ 到测量点 $p$ 的距离, $h$ 为点磁荷距离测量点的垂直距离。

将 $\mathbf{H}$ 代入到式(1)求解测量点 $p$ 处的磁梯度张量矩阵后,代入到式(2)中,可得到测量点 $p$ 处的总梯度模量表达式为:

$$C = \sqrt{\frac{5q^2}{r^6}} \quad (6)$$

式(6)说明,总梯度模量幅值只与测量点相对磁荷的距离及磁荷大小相关。

在损伤边界正上处( $l=0$ ),假设在提离值为 $H_1$ 和 $H_2$ ( $H_2 > H_1$ )时测得的总梯度模量分别为 $C_{H_1}$ 和 $C_{H_2}$ ,根据式(6)可以得到 $C_{H_1}$ 和 $C_{H_2}$ 分别为:

$$C_{H_1} = \frac{\sqrt{5}q}{(S + H_1)^3} \quad (7)$$

$$C_{H_2} = \frac{\sqrt{5}q}{(S + H_2)^3} \quad (8)$$

为更清楚地描述磁记忆信号垂向变化,可将 $H_1$ 高度测得的梯度模量作为参考值,定义 $H_2$ 高度梯度模量的相对衰减系数为 $\beta$ ,计算公式为:

$$\beta = \frac{C_{H_2}}{C_{H_1}} = \left( \frac{S + H_1}{S + H_2} \right)^3 \quad (9)$$

由式(9)可以看出,磁梯度模量的相对衰减系数 $\beta$ 只与提离值 $H_1$ 、 $H_2$ 和埋深 $S$ 相关。分析相对衰减系数 $\beta$ ,可以消除被测试件物理状态不确定对单个平面特征量幅值的影响。与对于不同埋深磁荷,以提离值 $H = 1$  mm的总梯度模量为参考值,相对衰减系数 $\beta$ 随提离值变化的曲线如图5所示。

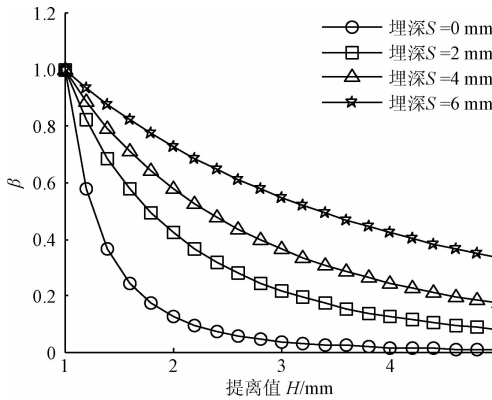


图5 相对衰减系数 $\beta$ 随提离值的变化

Fig. 5 Relative attenuation coefficient  $\beta$  vs. lift-off value

从图5中可以看出,不同埋深点磁荷的总磁梯度模量 $C$ 衰减速度和幅度有着较大差异。埋深越小衰减的速度越快、幅度也越大,埋深越大则衰减越慢、幅度越小。裂纹边界处的磁荷会向试件表面处的凸棱线位置聚集,磁荷埋深较小,而应力集中的磁荷分布相对均匀,磁荷埋深相对较大。因此,从垂向分布特征角度来看,随着提离值增大,裂纹边界处的磁记忆信号变化特征量衰减速度和幅度会远大于应力集中。

### 4 实验验证

#### 4.1 实验设计

实验选用3个C45刚制成的板状试件作为检测对象。如图6所示,试件长为100 mm、宽50 mm、厚9 mm。逐级增大载荷 $F_3$  (60、80、100 kN),在区域A位置,试件1发生了明显的塑性变形但无裂纹出现,试件2和试件3发生了不同程度的断裂。

磁记忆信号采集在三维移动平台上进行,磁场由HMC5883L型号三轴磁敏传感器测得(量程 $\pm 8$  Gs,分辨率5 mGs),检测方向沿试件缺陷垂直方向进行。为测量不同高度磁记忆信号磁梯度张量,设置提离值 $H$ 分别设为1.0 mm(1.1 mm)、2.0 mm(2.1 mm)、3.0 mm(3.1 mm)、4.0 mm(4.1 mm)4组不同高度,信号的水平采样长度40 mm,采样间隔设为0.1 mm。检测系统实物如图7所示。

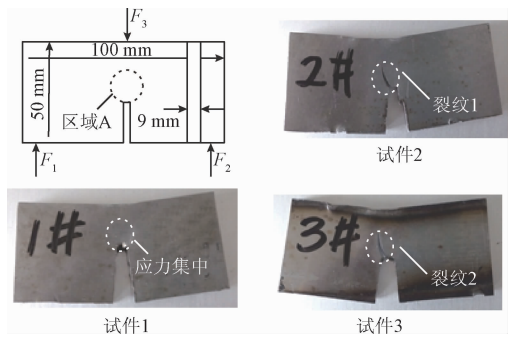


图6 裂纹和应力集中试件

Fig. 6 Crack and stress concentration specimen

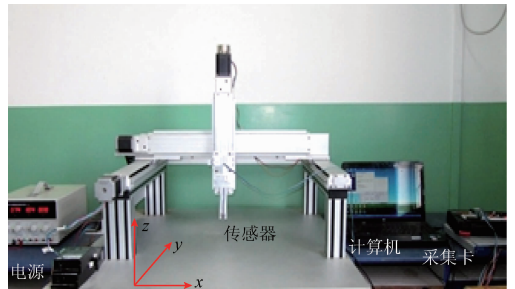
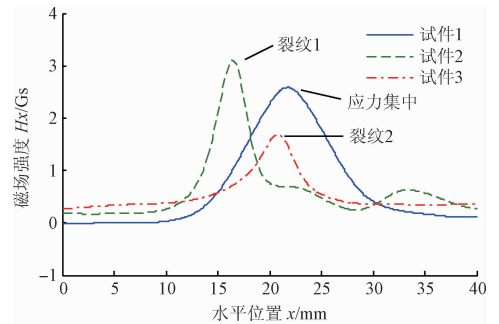


图7 实验检测系统

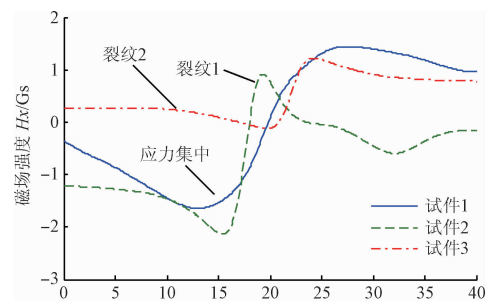
Fig. 7 The photo of the magnetic memory test system

#### 4.2 实验结果及分析

提离值为1 mm时,试件1(应力集中)、试件2(裂纹1)和试件3(裂纹2)测得磁记忆信号 $x$ 轴方向(切向)和 $y$ 轴方向(法向)磁场分量及梯度的分布如图8所示。



(a) 磁场切向分量分布  
(a) Magnetic field tangential component distribution



(b) 磁场法向分量分布  
(b) Magnetic field normal component distribution

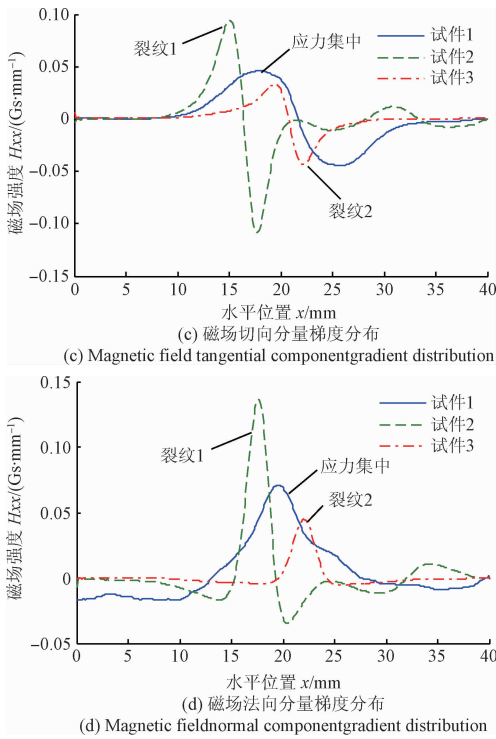


图8 磁记忆信号平面分布

Fig. 8 The plane distribution of metal magnetic memory signals

现有的损伤分类方法主要分析的是单个磁记忆信号平面分布。从图8可以看出,裂纹和应力集中的磁场及梯度的单个平面分布并无明显特征差异,相同材料和尺寸的被测试件,应力集中的磁记忆信号梯度位于裂纹1和裂纹2之间。阈值分类法识别损伤类型时,根据磁场梯度幅值大小区分应力集中和裂纹,但实际检测中存在应力集中区域磁场梯度大于裂纹的情况,而且阈值的选取只能依靠人工经验,很容易出现误判。而利用神经网络分类法区分损伤类型存在相似的问题,由于单个磁记忆信号平面分布提取的信号变化特征量幅值,易受多种不确定因素干扰,很难保证损伤类型识别的准确率。

求解不同提高值下  $x$  轴方向和  $z$  轴方向磁场的梯度,获得完整的磁梯度张量信息后,根据式(2)计算得到的总梯度模量  $C$  的垂向分布如图9所示。

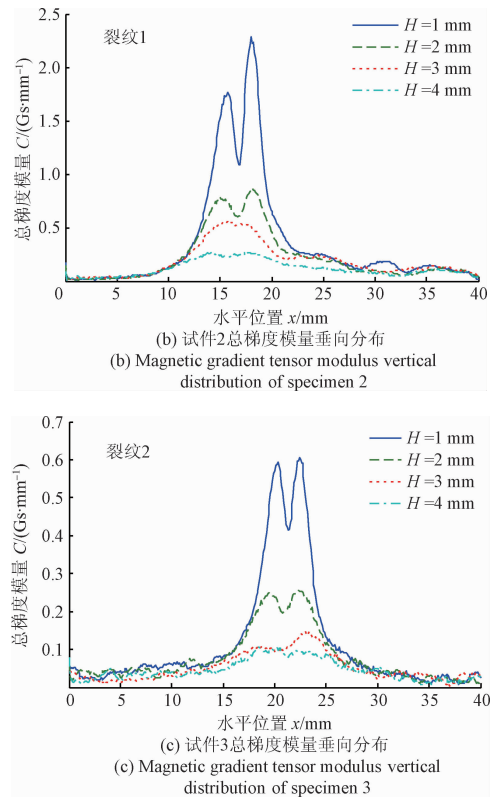
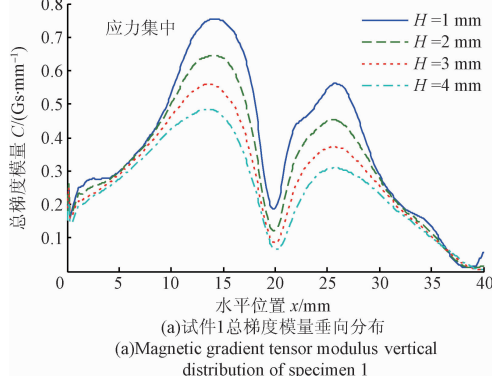


图9 总梯度模量垂向分布

Fig. 9 Magnetic gradient tensor modulus vertical distribution

图9所示为试件表面不同高度平面分布组成的总梯度模量的垂向分布图。从单个平面分布来看,在提高值高度较小时,磁记忆信号总梯度模量会在应力集中和裂纹的边界处出现明显的极大值,根据总梯度模量极大值可以判断应力集中和裂纹(裂纹1、裂纹2)的损伤边界位置。而从垂向特征角度来看,随提高值增大,应力集中和裂纹边界处总梯度模量出现不同程度的衰减,总梯度模量的相对衰减系数  $\beta$  变化如10所示。

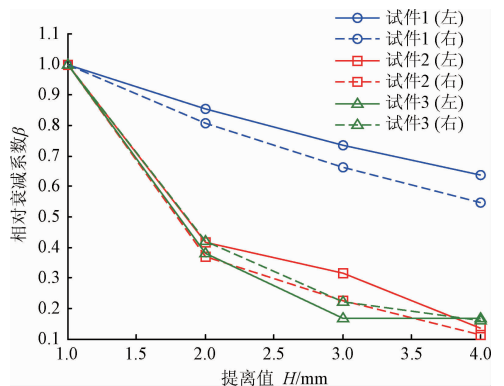


图10 相对衰减系数  $\beta$  变化曲线

Fig. 10 The curve of relative attenuation coefficient  $\beta$

从图10的不同高度的总梯度模量相对衰减曲线中可以看出,应力集中和裂纹边界处总梯度模量衰减速度和幅度存在较大差异。相对提高值 $H=1\text{ mm}$ 的参考值,当提高值 $H=2\text{ mm}$ 时,应力集中两边界面处总梯度模量相对衰减系数 $\beta$ 均值为83.02%,裂纹两边界面处总梯度模量相对衰减系数均值分别为39.23%和39.98%。当提高值 $H=4\text{ mm}$ 时,应力集中总梯度模量衰减了40.76%,裂纹衰减了87.62%和83.81%。实验结果与理论分析一致,裂纹边界处的总梯度模量衰减速度和幅度都要远大于应力集中。通过测量不同提高值下的磁记忆信号的平面分布,得到磁记忆信号的垂向分布特征,分析损伤边界处总梯度模量的衰减情况,可以准确地地区分裂纹和应力集中缺陷。

## 5 结 论

本文通过分析不同损伤边界处的磁记忆信号垂向特征差异,对裂纹和应力集中区分方法进行了研究,得到以下结论:

1) 总梯度模量是磁记忆信号的一个旋转不变的特征量。利用磁梯度张量测量方法提取的总梯度模量特征,可以克服标量分析方法中检测结果受检测方向影响以及测得信号出现多个极值点(过零点)位置判断不准的问题。

2) 磁记忆信号的平面分布,只包含了损伤区域磁场的部分有用信息。受被测试件物理状态、损伤规模、提高值等因素影响,根据单个磁记忆信号分布特征,难以对损伤状态做出准确判断。

3) 由于裂纹出现限宽度的强断面,其边界处的磁记忆信号的垂向分布特征与应力集中存在明显的差异。通过测量不同提高高度下的磁记忆信号,获取磁记忆信号垂向分布特征,可对试件的损伤状态做出准确判断。

## 参考文献

[1] 唐继红,潘强华,任吉林,等. 静载拉伸下磁记忆信号变化特征分析[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(2): 336-341.  
TANG J H, PAN Q H, REN J L, et al. Characteristic analysis of magnetic memory signals of 20# steel under static loading tensile[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(2): 336-341.

[2] 张卫民,邱忠超,袁俊杰,等. 关于利用金属磁记忆方法进行应力量化评价问题的讨论[J]. 机械工程学报, 2015, 51(8): 9-13.  
ZHANG W M, QIU ZH CH, YUAN J J, et al. Discussion on stress quantitative evaluation using metal magnetic memory method [J]. Journal of Mechanical

Engineering, 2015, 51(8): 9-13.

- [3] YAN T J, ZHANG J D, FENG G D, et al. Early inspection of wet steam generator tubes based on metal magnetic memory method [J]. Procedia Engineering, 2011, 15(1): 1140-1144.
- [4] 黄海鸿,刘儒军,张曦,等. 面向再制造的510L钢疲劳裂纹扩展磁记忆检测[J]. 机械工程学报, 2013, 49(1): 135-141.  
HUANG H H, LIU R J, ZHANG X, et al. Magnetic memory testing towards fatigue crack propagation of 510L steel [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(1): 135-141.
- [5] 邢海燕,王彝,王学增,等. 基于双正交法的焊缝早期隐性损伤临界状态磁记忆特征[J]. 机械工程学报, 2015, 51(16): 71-76.  
XING H Y, WANG B, WANG X Z, et al. Metal magnetic memory critical characteristics of early hidden damage of welded joints based on the Biorthogonal Method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(16): 71-76.
- [6] 邱新杰,李午申,白世武,等. 焊接裂纹金属磁记忆信号的神经网络识别[J]. 焊接学报, 2008, 29(3): 13-16.  
DI X J, LI W SH, BAI SH W, et al. Metal magnetic memory signal recognition by neural network for welding crack [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(3): 13-16.
- [7] 刘书俊,蒋明,张伟明,等. 基于BP神经网络的油气管道缺陷磁记忆检测[J]. 无损检测, 2015, 37(7): 25-28.  
LIU SH J, JIANG M, ZHANG W M, et al. Magnetic memory testing on oil and gas pipeline based on BP neural network [J]. Nondestructive Testing, 2015, 37(7): 25-28.
- [8] 任吉林,王进,范振中,等. 一种磁记忆检测定量分析的新方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 431-436.  
REN J L, WANG J, FAN ZH ZH, et al. New method for metal magnetic memory quantitative analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(2): 431-436.
- [9] 高庆敏,丁红胜,刘波. 金属磁记忆信号的有限元模拟与影响因素[J]. 无损检测, 2015, 37(6): 86-91.  
GAO Q M, DING H SH, LIU B. The finite element simulation and influence factors of metal magnetic memory signals [J]. Nondestructive Testing, 2015, 37(6): 86-91.
- [10] 王嘉明,姚恩涛. 基于振动法的磁记忆检测系统研究与设计[J]. 电子测量技术, 2016, 39(8): 37-42.

- WANG J M, YAO EN T. Research and design of magnetic memory testing system based on vibration method[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(8): 37-42.
- [11] 陈海龙, 王长龙, 朱红运. 基于磁梯度张量的金属磁记忆检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(3): 602-609.  
CHEN H L, WANG CH L, ZHU H Y. Method of magnetic memory testing based on magnetic gradient tensor[J], Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(3): 602-609.
- [12] 王万银. 位场解析信号振幅极值位置空间变化规律研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(4): 1288-1299.  
WANG W Y. Spatial variation law of the extreme value position of analytic signal amplitude for potential field data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(4): 1288-1299.
- [13] 钱正春, 黄海鸿, 姜石林, 等. 铁磁材料拉/压疲劳磁记忆信号研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(4): 506-517.  
QIAN ZH CH, HUANG H H, JIANG SH L, et al. Research on magnetic memory signal of ferromagnetic material under tensile and compressive fatigue loading[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(4): 506-517.
- [14] 金宝, 邸新杰, 张建军, 等. 疲劳裂纹扩展的金属磁记忆信号特征[J]. 材料工程, 2014(11): 102-106.  
JIN B, DI X J, ZHANG J J, et al. Metal magnetic memory signal feature of fatigue cracking propagation[J]. Journal of Materials Engineering, 2014(11): 102-106.
- [15] 尹大伟, 董世运, 徐滨士, 等. 特种钢的磁记忆检测研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(11): 1483-1488.  
YIN D W, DONG SH Y, XU B SH, et al. Study on magnetic memory testing for special steel[J], Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(11): 1483-1488.
- [16] 徐明秀, 尤天庆, 徐敏强, 等. 磁记忆信号的量化描述[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2015, 46(4): 1215-1223.  
XU M X, YOU T Q, XU M Q, et al. Quantitative representation of magnetic memory signal[J]. Journal of Central South University :Science and Technology, 2015, 46(4): 1215-1223.
- [17] 仲维畅. 磁粉探伤中另一种反常显示的成因[J]. 无损检测, 2003, 25(7): 349-351.  
ZHONG W CH. The cause of formation for another abnormal indication in magnetic particle inspection[J]. Nondestructive Testing, 2003, 25(7): 349-351.
- [18] 柴健, 孙京, 雷电流作用下铁件剩磁量的规律分析[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(8): 71-75.  
CAI J, SUN J. Regularities analysis of the residual magnetic of the iron casting under the lightning current[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(8): 71-75.
- [19] 王长龙, 陈自力, 马晓琳. 漏磁检测的缺陷可视化技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.  
WANG CH L, CHEN Z L, MA X L. Visualization technology of defect in magnetic flux leakage testing[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.

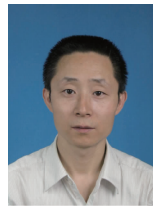
### 作者简介



**陈海龙**, 分别在 2011 年和 2014 年于军械工程学院获得学士学位和硕士学位, 现为军械工程学院博士研究生, 主要研究方向为电磁无损检测。

E-mail: chen hailong151@163.com

**Chen Hailong** received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Ordnance Engineering College in 2011 and 2014, respectively. Now, he is a Ph. D. candidate in Ordnance Engineering College. His main research interest is electromagnetic nondestructive testing.



**王长龙**(通讯作者), 1987 年于解放军电子工程学院获得学士学位, 1992 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 2006 年于西安交通大学获得博士学位, 现为军械工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为电磁无损检测。

E-mail: wang-oec@126.com

**Wang Changlong** (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 1987 from Electronic Engineering Institute of PLA, M. Sc. degree in 1992 from Harbin Institute of Technology and Ph. D. degree in 2006 from Xi'an Jiaotong University. Now he is a professor and doctoral supervisor in Ordnance Engineering College. His main research interest is electromagnetic nondestructive testing.