



磁记忆检测的力磁耦合型磁偶极子理论及解析解

时朋朋 郝帅

Analytical solution of magneto-mechanical magnetic dipole model for metal magnetic memory method

Shi Peng-Peng Hao Shuai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 034101 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20200937

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200937>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于力磁耦合效应的铁磁材料修正磁化模型

A modified model of magneto-mechanical effect on magnetization in ferromagnetic materials

物理学报. 2019, 68(18): 187501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190765>

基于旋转永磁体的超低频机械天线电磁特性分析

Performance analysis of spinning magnet as mechanical antenna

物理学报. 2019, 68(18): 188401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190339>

基于石墨烯加载的不对称纳米天线对的表面等离子激元单向耦合器

Tunable unidirectional surface plasmon polariton coupler utilizing graphene-based asymmetric nanoantenna pairs

物理学报. 2017, 66(14): 145201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.145201>

表面缺陷的方向性对漏磁场分布的影响

Mechanism analysis of influence of surface-breaking orientation on magnetic leakage field distribution

物理学报. 2017, 66(4): 048102 <https://doi.org/10.7498/aps.66.048102>

过渡金属掺杂的扶手椅型氮化硼纳米带的磁电子学特性及力-磁耦合效应

Magneto-electronic properties and mechano-magnetic coupling effects in transition metal-doped armchair boron nitride nanoribbons

物理学报. 2017, 66(23): 238501 <https://doi.org/10.7498/aps.66.238501>

基于Jiles-Atherton理论的铁磁材料塑性变形磁化模型修正

Modeling plastic deformation effect on the hysteresis loops of ferromagnetic materials based on modified Jiles-Atherton model

物理学报. 2017, 66(10): 107501 <https://doi.org/10.7498/aps.66.107501>

磁记忆检测的力磁耦合型磁偶极子理论及解析解*

时朋朋[†] 郝帅

(西安建筑科技大学土木工程学院, 力学技术研究院, 西安 710055)

(2020 年 6 月 18 日收到; 2020 年 9 月 19 日收到修改稿)

磁偶极子理论在缺陷漏磁场解释中被成功广泛使用. 由于磁荷密度等参数不易定量, 磁偶极子理论在应用中常常进行归一化处理, 被认为不适用于对应力相关的磁记忆信号做量化分析. 本文通过建立力磁耦合型磁偶极子理论模型, 以适用于分析磁记忆检测中应力对磁信号的影响. 基于铁磁学理论确定应力和磁场联合作用下的等效场强度, 基于弱磁化状态的一阶近似, 获得了各向同性铁磁材料微弱环境磁场下的应力磁化解析解. 结合磁信号二维问题中矩形和 V 形磁荷分布假定, 建立了光滑与破坏试件表面磁信号、矩形和 V 形表面缺陷所诱导磁信号的力磁耦合型磁偶极子理论分析模型, 并获得其解析解. 基于力磁耦合型磁偶极子理论的解析解, 对拉伸实验中试件破坏前后的信号差异、矩形和 V 形表面缺陷诱导磁信号, 以及磁信号的影响因素和规律等进行了详细分析. 理论研究表明, 基于本文理论模型的解析解可实现对磁记忆检测中的一些基本实验现象和规律的解释.

关键词: 金属磁记忆, 力磁耦合, 磁偶极子, 解析解**PACS:** 41.20.Gz, 51.60.+a, 75.50.Bb, 75.80.+q**DOI:** 10.7498/aps.70.20200937

1 引言

铁磁材料由于具有良好的力学以及机械性能, 被广泛应用于航空航天、铁路、管道、压力容器以及石油化工等行业, 其在制备和使用过程中形成的损伤直接影响工程结构的使用安全, 甚至引发灾难性事故, 严重威胁着人民的生命财产安全, 对社会经济也造成了重大的损失. 如果能及时发现工程结构中损伤的位置以及程度, 采取诸如打磨、焊接、替换等补救措施, 避免由于疲劳损伤发展而引起的恶性事故, 对涉及国民经济的众多领域均有着十分重要的理论以及现实意义. 1997 年, 俄罗斯学者 Doubov^[1] 提出磁记忆检测技术, 被认为是有望实现铁磁材料早期损伤的检测方法. 磁记忆检测的基本原理是, 处于恒定环境磁场中的铁磁材料在受到外力作用时, 材料的磁特性由于力磁耦合效应将发

生改变, 因此通过测量试件表面形成的自发磁场信号能确定材料应力集中和缺陷的位置及程度.

明确应力、缺陷和磁记忆信号的定量关系, 是实现磁记忆检测工程应用必须面对的基础问题. 本文主要研究磁记忆信号的量化理论, 仅对该方面的研究进展进行回顾. 磁信号本质是力磁耦合效应影响了材料的磁特性, 进而改变了磁特性的铁磁材料在地磁场下产生表面磁信号. 学者早期用磁偶极子模型研究缺陷引起的磁记忆信号. Leng 等^[2] 利用 V 形槽的磁偶极子模型解释了沟槽附近的磁记忆信号的非线性形貌. Huang 等^[3] 利用磁荷模型研究了缺陷宽度、深度以及提离值等对表面附近磁记忆信号的影响规律. Minkov 等^[4] 基于磁偶极子模型得到了三维缺陷表面磁信号的解析解. 时朋朋^[5] 通过使用与环境地磁场相关的磁荷密度, 基于磁偶极子模型获得了四种不同形貌的表面缺陷引起的磁记忆信号解析表达式, 讨论了缺陷复杂形状对磁

* 国家自然科学基金 (批准号: 11802225) 和陕西省自然科学基金 (批准号: 2019JQ-261) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: shipengpeng@xjtu.edu.cn

记忆信号的影响, 其模型预测的磁记忆信号幅值和实验信号量级相当. 此外, 学者试图建立应力与材料磁化状态的关系, 这对应了磁记忆信号形成的微观机理. 基于 Jiles 模型, Wang 等^[6]建立了考虑塑性钉扎效应的磁弹塑性耦合模型. Li 和 Xu^[7]进一步考虑拉伸和压缩载荷下的应力磁化行为的不对称性, 提出了修正模型. Shi^[8]在塑性等效场中考虑了磁化强度的影响, 建立了修正的磁弹塑性耦合模型. Avakian 和 Ricoeur^[9]建立了多轴载荷状态下的力磁耦合模型, 可分析载荷加载方向对材料磁化强度的影响.

为了有效地建立应力、缺陷等和磁记忆信号的关系, 学者借助应力磁化关系, 对磁记忆信号进行了理论模拟. Shi 等^[10]通过考虑弹塑性加载过程对磁化的影响, 并基于磁偶极子理论的解析表达式, 解释了铁磁材料拉伸破坏导致的磁记忆信号突变现象. Zhong 等^[11]基于 Jiles 模型和有限元方法, 对圆孔缺陷引起的微磁信号进行了理论分析, 理论结果和实验数据符合得很好. 上述提到的模拟工作均使用了反映应力对材料磁特性影响的力磁模型, 力磁模型的选择将直接影响磁记忆检测的量化水平. Shi 等^[12]从铁磁材料的 Gibbs 自由能出发, 结合铁磁材料磁化的接近原理, 提出了新的非线性力磁耦合模型. 相比经典 Jiles 本构关系, 新建的本构关系的理论结果和经典的 Crack 和 Wood 的实验结果更加符合, 能够准确反映其在磁场与应力共同作用下的磁化强度的变化规律^[12]. 通过与经典的能量守恒模型、Jiles 磁滞模型和 Jiles 磁化模型等的理论结果进行对比, 确定了新建的本构关系在磁记忆信号量化分析上具有显著优势. 该理论也得到进一步发展, 用于讨论磁记忆检测中的缺陷反演识别问题^[13]、环境磁场方向效应^[14]和磁热弹塑性耦合现象^[15]等.

上述提到的工作中, 常常需要借助复杂的有限元分析完成磁记忆信号的定量分析. 磁偶极子模拟方法^[16]常用于解释缺陷漏磁场, 具有简洁方便的特点, 基于静磁学可以简单直观地计算磁偶极子在空间任意点的场强. 本文将建立发展力磁耦合型磁偶极子理论模型, 以适用于描述磁记忆方法中应力载荷对磁信号的影响, 并且使用简单的矩形或 V 形二维磁偶极子假定, 实现力磁耦合型磁偶极子理论模型的解析求解. 本文的理论分析表明, 基于力磁耦合型磁偶极子理论模型的解析解, 可以

对磁记忆检测中的一些基本实验现象和规律进行解释.

2 微弱磁场下的应力磁化解析模型

在恒定的磁场和等温环境下, 各向同性铁磁材料承受外部载荷作用下其磁化强度也将发生变化. 在力磁效应平衡状态下, 铁磁棒材的磁化状态可以表示为

$$M = M_s \left[\coth \left(\frac{H_{\text{total}}}{a} \right) - \frac{a}{H_{\text{total}}} \right], \quad (1)$$

式中 M 为非磁滞磁化强度, M_s 为材料的饱和磁化强度, H_{total} 为等效场强度, a 为磁化模型参数 (单位为 A/m).

H_{total} 为材料受外加载荷和磁场作用下的等效场强度, 表示为^[10]

$$H_{\text{total}} = H_H + H_\sigma^e, \quad (2)$$

其中, H_H 为外加磁场部分诱导的等效场, H_σ^e 为外加载荷由于力磁耦合效应诱导的等效场.

磁畴中的外加磁场部分的等效场被表示为^[10]

$$H_H = H_0 + \alpha M, \quad (3)$$

式中 H_0 为外界环境磁场, α 为反映磁畴间相互影响的材料参数.

使用文献中的磁致伸缩表达式的简化形式^[12], 磁致伸缩可以表示为

$$\lambda(\sigma, M) = \left(1 - \frac{\beta\sigma}{\sigma_s} \right) \frac{\lambda_s M^2}{M_s^2}, \quad (4)$$

式中 σ 为应力, σ_s 为材料屈服应力, β 为控制应力磁化效应程度的参数, λ_s 为材料饱和磁致伸缩应变, M_s 为材料的饱和磁化强度.

对于各向同性的铁磁材料, 其内部由于磁弹性效应导致的磁弹性能密度函数可表示为

$$A_\sigma^e = \frac{3}{2} \sigma \lambda. \quad (5)$$

磁弹性等效场可表示为磁弹性能密度函数关于磁化强度的微分, 计算结果为

$$H_\sigma^e = \frac{1}{\mu_0} \frac{dA_\sigma^e}{dM} = \frac{3\sigma}{\mu_0} \left(1 - \frac{\beta\sigma}{\sigma_s} \right) \frac{\lambda_s M}{M_s^2}, \quad (6)$$

其中 μ_0 为真空磁导率.

综上, 等效场强度可以表示为

$$H_{\text{total}} = H_0 + \alpha M + \frac{3\sigma}{\mu_0} \left(1 - \frac{\beta\sigma}{\sigma_s} \right) \frac{\lambda_s M}{M_s^2}. \quad (7)$$

对 (1) 式中的朗之万函数进行泰勒展开, 得到

$$\coth(x) - \frac{1}{x} = \frac{x}{3} - \frac{x^3}{45} + \cdots + \cdots \quad (8)$$

弱磁化状态下, 可以使用泰勒展开式的一阶近似取代朗之万函数, (1) 式可以简化为

$$M = M_s H_{\text{total}} / (3a). \quad (9)$$

将 (7) 式代入 (9) 式并进行整理, 得到

$$\frac{3aM}{M_s} = H_0 + \alpha M + \frac{3\sigma}{\mu_0} \left(1 - \frac{\beta\sigma}{\sigma_s}\right) \frac{\lambda_s M}{M_s^2}, \quad (10)$$

进一步化简后, 可以得到材料磁化强度 M 的表达式为

$$M(\sigma, H_0) = \frac{\mu_0 H_0 M_s^2}{3a\mu_0 M_s - \alpha\mu_0 M_s^2 - 3\sigma(1 - \beta\sigma/\sigma_s)\lambda_s}. \quad (11)$$

至此, 得到弱磁化状态下, 磁化强度和外加磁场、应力之间的解析表达式。

3 力磁耦合型磁偶极子理论及应用

3.1 拉伸实验中磁信号的基本规律

拉伸实验中, 在铁磁性试件破坏前, 由于应力对铁磁材料的磁化强化效应, 将出现极性相反且密

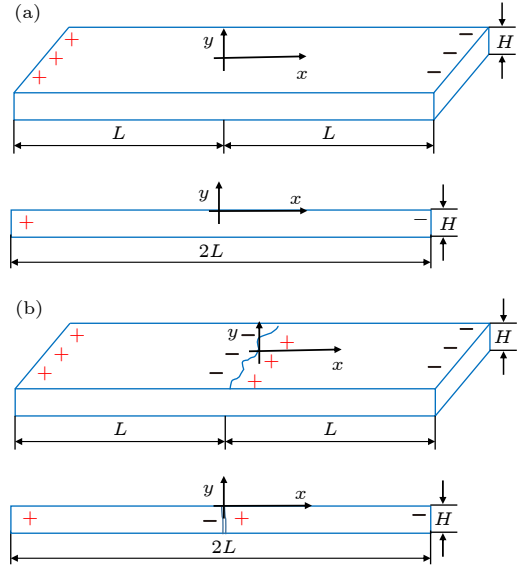


图 1 拉伸实验中的试件破坏前后的磁荷分布 (a) 破坏前磁荷分布; (b) 破坏后磁荷分布

Fig. 1. Magnetic charge distribution before and after failure in tensile experiments: (a) Magnetic charge distribution before failure; (b) magnetic charge distribution after failure.

度相等的磁荷分布在试件的两侧, 如图 1(a) 所示. 建立如图 1 所示坐标系, 基于磁偶极子理论可以得到该磁荷分布下诱导的磁信号的解析解. 铁磁性试件破坏前, 由于应力磁化效应导致的沿 x 方向和 y 方向的磁信号分量分别为^[5]

$$H_x^0 = \frac{\rho_s}{2\pi\mu_0} \left(\arctan \frac{H+y}{L-x} + \arctan \frac{H+y}{L+x} - \arctan \frac{y}{L-x} - \arctan \frac{y}{L+x} \right),$$

$$H_y^0 = \frac{\rho_s}{4\pi\mu_0} \log \left[\frac{(L-x)^2 + y^2 (L+x)^2 + (H+y)^2}{(L+x)^2 + y^2 (L-x)^2 + (H+y)^2} \right], \quad (12)$$

其中, H_x^0 和 H_y^0 分别为破坏前在试件表面附近的 $P(x, y)$ 点处的磁信号的 x 和 y 分量, L 为试件的半长, H 为试件的厚度, ρ_s 为磁荷密度. 基于磁荷理论, 磁荷密度满足 $\rho_s = \mu_0 M(\sigma, H_0)$.

根据磁偶极子理论, 当光滑的铁磁性试件出现裂纹时, 在裂纹两侧形成新的磁极, 所形成的磁极

近似为一对具有相反极性的磁荷面, 这对密度相等且极性相反的磁偶极子在试件表面产生磁信号, 如图 1(b) 所示. 依然基于磁偶极子理论可以得到该磁荷分布下诱导的磁信号的解析解. 这里假设试件出现裂纹的位置位于试件的中心处, 铁磁性试件破坏后, 沿 x 方向和 y 方向的磁信号分量分别为

$$H_x = H_x^0 - \frac{\rho_s}{2\pi\mu_0} \left(\arctan \frac{H+y}{l-x} + \arctan \frac{H+y}{l+x} - \arctan \frac{y}{l-x} - \arctan \frac{y}{l+x} \right),$$

$$H_y = H_y^0 - \frac{\rho_s}{4\pi\mu_0} \log \left[\frac{(l-x)^2 + y^2 (l+x)^2 + (H+y)^2}{(l+x)^2 + y^2 (l-x)^2 + (H+y)^2} \right], \quad (13)$$

式中, l 为裂纹半长, 其他物理量含义与 (12) 式中

物理量含义保持一致.

图2给出了拉伸实验中, 试件破坏前和破坏后的磁信号对比图, 其中磁信号的提离值分别设置为10, 12, 15 mm. 其中模型参数为 $H = 5 \text{ mm}$, $l = 0.2 \text{ mm}$, $M = 1 \times 10^5 \text{ A/m}$, 图2(a)中试件半长为 $L = 100 \text{ mm}$, 图2(b)中试件半长 $L = 1000 \text{ mm}$. 从图2可以看出, 磁信号的 y 方向分量在裂纹位置为零, 即存在过零点现象, 这是由于在裂纹两侧存在密度相等且极性相反的磁偶极子导致的. 从图2还可以看到缺陷诱导的磁信号随着提离值增大而减小, 这符合磁记忆观测实验揭示的磁信号随提离值的变化规律^[17]. 图2(a)和图2(b)分别给出了试件半长 $L = 100 \text{ mm}$ 和 $L = 1000 \text{ mm}$ 时磁偶极子模型的理论预测结果. 在试件破坏前, 可以看到试件表面 y 方向分量的磁信号是线性变化的. 而在试件破坏后, 试件表面 y 方向分量的磁信号是非线性变化的. 理论预测结果揭示出拉伸实验试件破坏前后磁信号形貌存在明显差异, 这与实验观察到的磁记忆信号规律保持一致^[10]. 由图2可知, 当试件长度足够大时, 光滑铁磁材料试件在破坏前的磁信号几乎

为零, 而破坏后缺陷诱导出明显的非线性信号, 并且关于裂纹中心呈现很好的对称. 这意味着实际应用于足够长 ($> 1 \text{ m}$) 管道的检测信号常常和实验室拉伸试件 (长度约 200 mm) 的检测信号存在较明显差异, 这很好地解释了为什么实际管道检测应用中的信号常常优于实验室信号. 这本质上是当结构尺寸较长时, 结构的端部干扰较小, 端部磁荷对缺陷信号的干扰可忽略.

磁记忆拉伸实验中常常发现磁信号随着应力及外磁场大小的变化而变化. 这里基于(12)式对拉伸实验中磁记忆信号进行了理论计算与分析, 结果如图3所示. 图3(a)和图3(b)分别给出了在不同应力和外磁场作用下光滑铁磁试件的磁记忆信号变化. 其中模型参数为 $H = 5 \text{ mm}$, $L = 100 \text{ mm}$, $M_s = 2 \times 10^6 \text{ A/m}$, $\lambda_s = 5 \times 10^{-6}$, $a = 500 \text{ A/m}$, $\beta = 0.5$, $\sigma_s = 250 \text{ MPa}$. 图3(a)中试件外磁场 $H_0 = 40 \text{ A/m}$, 应力的变动范围为 $0\text{--}200 \text{ MPa}$, 图3(b)中应力 $\sigma = 200 \text{ MPa}$, 采用的外磁场的变动范围为 $20\text{--}60 \text{ A/m}$. 从图3可以看出: 试件表面附近的磁

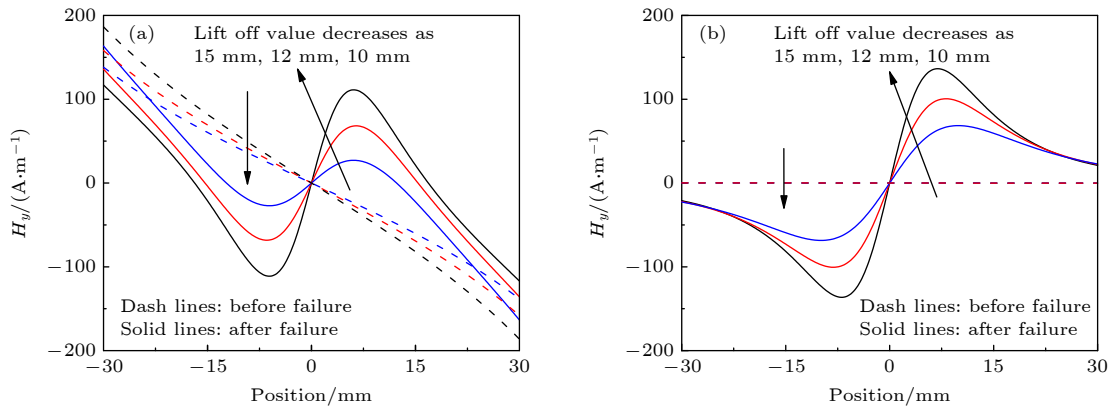


图2 拉伸实验中试件破坏前和后的磁信号差异 (a) $L = 100 \text{ mm}$; (b) $L = 1000 \text{ mm}$

Fig. 2. Difference of magnetic signals of the tensile specimen before and after failure: (a) $L = 100 \text{ mm}$; (b) $L = 1000 \text{ mm}$.

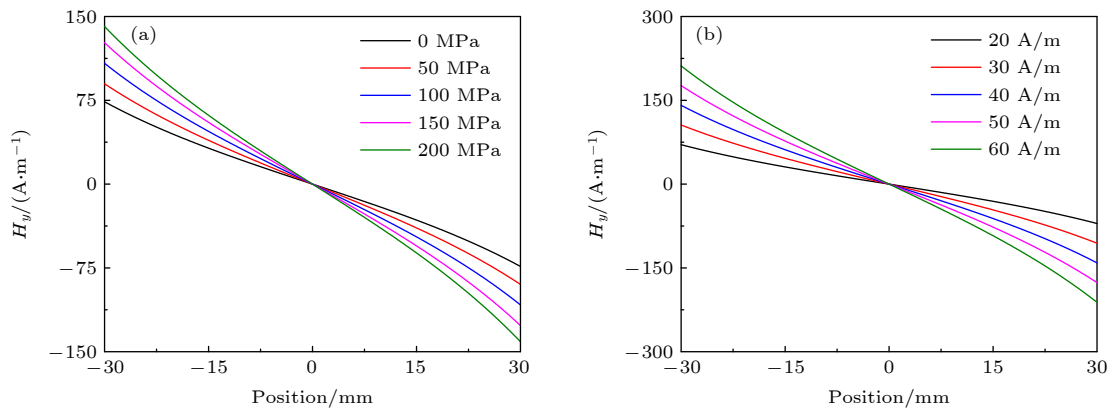


图3 应力和外磁场对磁信号的影响 (a) 应力影响; (b) 外磁场影响

Fig. 3. Effects of stress and external magnetic field on magnetic signals: (a) Stress effect; (b) effect of external magnetic field.

记忆信号 y 方向分量沿着 x 轴呈现几乎线性的变化规律; 反映磁记忆信号强度的特征量, 如 y 方向分量的斜率值随应力的增大而增大, 这是由于应力诱导的材料内部磁化强度增加. 拉伸试件磁记忆测量实验结果^[10]表明, 试件表面 y 方向分量磁记忆信号的斜率值随应力的增大而增大, 本文理论分析结果与这一基本磁记忆实验现象保持一致. 此外, 由于应力对材料磁化强度的影响随着外磁场的增加而增大, 这导致磁记忆信号 y 方向分量的斜率值随外磁场的增加而增大. 地磁场模值约为 50 A/m, 但是地球表面不同纬度的地磁场分量将存在明显差异, 例如北京地磁场垂直向下分量约为 42.6 A/m, 而南昌的地磁场垂直向下分量约为 32.4 A/m, 两者相差达到 30% 左右, 这可能是不同地区磁记忆检测实验信号值存在差异的原因.

3.2 局部缺陷诱导磁信号的基本规律

此处针对矩形和 V 形凹槽两种典型表面缺陷所诱导的磁记忆信号建立理论分析模型及解析解. 根据磁偶极子理论, 表面缺陷的左右两侧形成新的磁极, 所形成的磁极可近似为一对具有相反极性的磁荷面, 进而在试件表面产生磁记忆信号, 如图 4 所示.

假定表面缺陷的左右两侧的磁荷分布均匀, 不随缺陷深度变化, 如图 4 所示. 在该假定下, 基于磁偶极子理论可以得到矩形和 V 形凹槽两种典型表面缺陷所诱导的磁记忆信号的解析解. 这里仍假设表面缺陷位于试件的中心处. 基于磁偶极子理论, 对于矩形凹槽表面缺陷, 沿 x 方向和 y 方向的磁记忆信号分量的解析表达式分别为^[5]

$$\begin{aligned} H_x &= H_x^0 - \frac{\rho_s}{2\pi\mu_0} \left(\arctan \frac{h+y}{l-x} + \arctan \frac{h+y}{l+x} - \arctan \frac{y}{l-x} - \arctan \frac{y}{l+x} \right), \\ H_y &= H_y^0 - \frac{\rho_s}{4\pi\mu_0} \log \left[\frac{(l-x)^2 + y^2}{(l+x)^2 + y^2} \frac{(l+x)^2 + (h+y)^2}{(l-x)^2 + (h+y)^2} \right], \end{aligned} \quad (14)$$

式中, l 为表面矩形凹槽的半长, h 为表面矩形凹槽的深度, (x, y) 为磁信号的测量位置坐标.

基于磁偶极子理论, 对于 V 形凹槽表面缺陷, 沿 x 方向和 y 方向的磁记忆信号分量的解析表达式分别为

$$\begin{aligned} H_x &= H_x^0 - \frac{\rho_s}{2\pi\mu_0} \frac{1}{\sqrt{1+l^2/h^2}} \left[\arctan \frac{l(l+x)-hy}{h(l+x)+ly} \right. \\ &\quad + \arctan \frac{l(l-x)-hy}{h(l-x)+ly} \\ &\quad + \arctan \frac{h(h+y)-lx}{h(l+x)+ly} + \arctan \frac{h(h+y)+lx}{h(l-x)+ly} \\ &\quad \left. + \frac{l}{2h} \log \frac{(l-x)^2 + y^2}{x^2 + (h+y)^2} \frac{(l+x)^2 + y^2}{x^2 + (h+y)^2} \right], \\ H_y &= H_y^0 - \frac{\rho_s}{2\pi\mu_0} \frac{1}{\sqrt{1+l^2/h^2}} \left\{ \frac{l}{h} \left[\arctan \frac{l(l+x)-hy}{h(l+x)+ly} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \arctan \frac{l(l-x)-hy}{h(l-x)+ly} \right] \right. \\ &\quad + \frac{l}{h} \left[\arctan \frac{h(h+y)-lx}{h(l+x)+ly} \right. \\ &\quad \left. \left. - \arctan \frac{h(h+y)+lx}{h(l-x)+ly} \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \log \frac{(l-x)^2 + y^2}{(l+x)^2 + y^2} \right\}, \end{aligned} \quad (15)$$

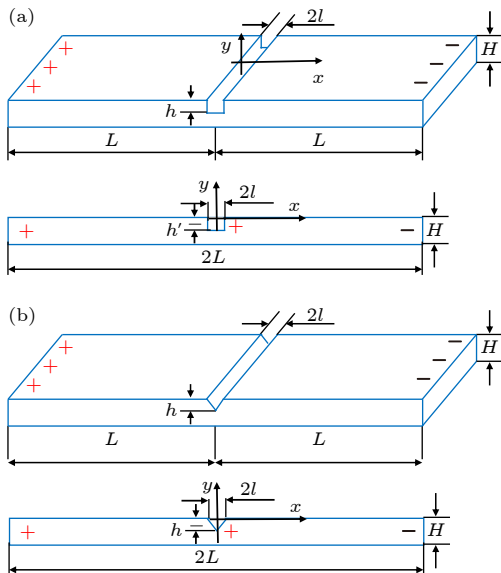


图 4 两种典型表面缺陷的磁荷分布示意图 (a) 矩形凹槽试件; (b) V 形凹槽试件

Fig. 4. Schematic diagram of the magnetic charge distribution for two typical surface defects: (a) Rectangular groove defect specimen; (b) V-groove defect specimen.

式中, l 为表面 V 形凹槽的半长, h 为表面 V 形凹槽的深度.

缺陷的形状类型也对磁信号的大小、分布产生影响. 图 5 描述了缺陷深度对具有不同形貌缺陷的试件表面磁记忆信号的影响. 其中模型参数为 $H = 5 \text{ mm}$, $L = 100 \text{ mm}$, $l = 0.2 \text{ mm}$, $M_s = 2 \times 10^6 \text{ A/m}$, $\lambda_s = 5 \times 10^{-6}$, $a = 500 \text{ A/m}$, $\beta = 0.5$, $\sigma_s = 250 \text{ MPa}$. 图 5(a) 中试件外磁场 $H_0 = 40 \text{ A/m}$, 应力为 $\sigma = 200 \text{ MPa}$, 采用的矩形凹槽缺陷深度分别为 0.2, 0.5, 1 和 2 mm. 图 5(b) 中试件外磁场 $H_0 = 40 \text{ A/m}$, 应力为 $\sigma = 200 \text{ MPa}$, 采用的 V 形凹槽缺陷深度分别为 0.2, 0.5, 1 和 2 mm. 图 5(a) 和图 5(b) 分别给出具有矩形凹槽缺陷和 V 形凹槽缺陷的试件表面磁记忆信号的理论分析结果. 从图 5 可以看出: 对于不同形貌缺陷, 其诱导的磁记忆信号最大峰值均随着缺陷深度的增加而增加; 而且与试件中心距离相同的位置处的磁记忆信号正好满足幅值相同且符号相反. 理论预测结果中, 凹槽缺陷表面磁记忆信号沿着测量线呈现先减小后增大再减小的非

线性变化, 这一非线性变化趋势符合 V 形凹槽缺陷试件磁记忆信号的实验结果 [2]. 此外, 对比不同形貌缺陷的试件表面磁记忆信号值, 可以看出相同的缺陷长度和深度下, 矩形凹槽缺陷诱导的磁记忆信号的幅值和变化程度更为明显, 这表明缺陷形貌等对磁记忆信号存在影响.

图 6 进一步分析了缺陷长度对不同缺陷形貌试件磁信号的影响规律. 其中模型参数为 $H = 5 \text{ mm}$, $L = 100 \text{ mm}$, $h = 1 \text{ mm}$, $M_s = 2 \times 10^6 \text{ A/m}$, $\lambda_s = 5 \times 10^{-6}$, $a = 500 \text{ A/m}$, $\beta = 0.5$, $\sigma_s = 250 \text{ MPa}$. 图 6(a) 中试件外磁场 $H_0 = 40 \text{ A/m}$, 应力为 $\sigma = 200 \text{ MPa}$, 采用的矩形凹槽缺陷半长分别为 0.1, 0.2, 0.3 和 0.5 mm. 图 6(b) 中试件外磁场 $H_0 = 40 \text{ A/m}$, 应力为 $\sigma = 200 \text{ MPa}$, 采用的 V 形凹槽缺陷半长分别为 0.1, 0.2, 0.3 和 0.5 mm. 图 6(a) 和图 6(b) 分别给出具有矩形凹槽缺陷和 V 形凹槽缺陷的试件表面磁记忆信号的理论分析结果. 从图 6

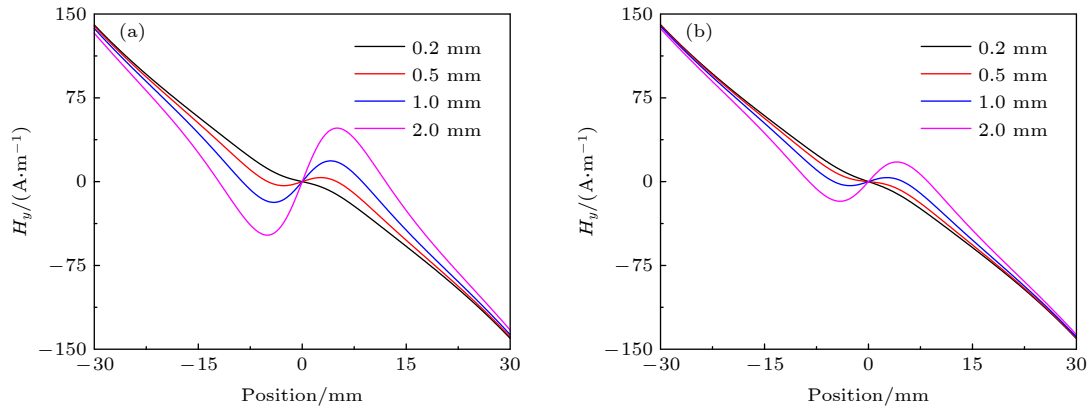


图 5 缺陷深度对不同形貌缺陷诱导磁记忆信号的影响 (a) 矩形凹槽; (b) V 形凹槽

Fig. 5. Effects of defect depth on magnetic signals induced by different shape defects: (a) Rectangular groove defect; (b) V-groove defect.

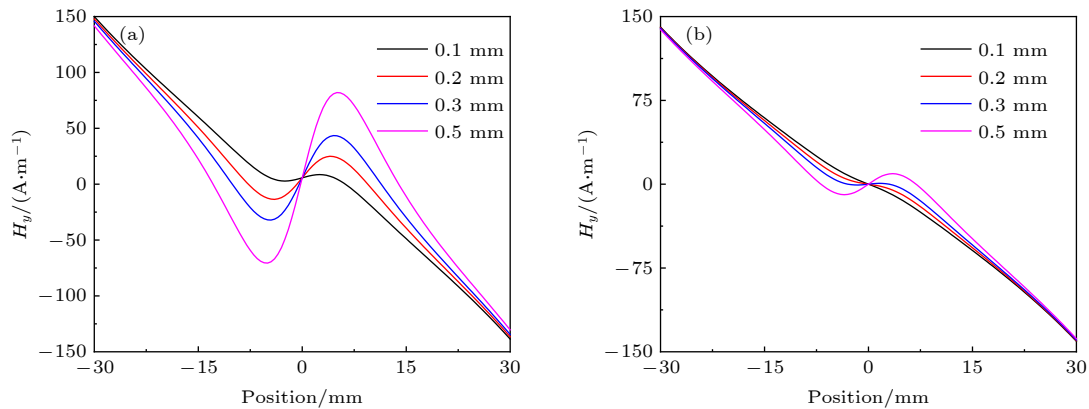


图 6 缺陷长度对不同形貌缺陷诱导磁信号的影响 (a) 矩形凹槽; (b) V 形凹槽

Fig. 6. Effects of defect length on magnetic signals induced by different shape defects: (a) Rectangular groove defect; (b) V-groove defect.

可以看出, 对于不同形貌缺陷, 其诱导的磁记忆信号的非线性变化程度均随着缺陷长度的增加而增强; 磁记忆信号的 y 方向分量在缺陷附近存在先减小后增大的局部信号正负号翻转现象. 图 6 依然可以看到缺陷形貌等对磁记忆信号的影响, 即相同的缺陷尺寸参数下, 矩形凹槽缺陷诱导的磁记忆信号的幅值和变化程度相比 V 形凹槽更为明显.

类似于图 3 对光滑铁磁试件表面磁信号的分析, 这里给出针对表面矩形凹槽缺陷诱导的磁记忆信号的理论分析, 如图 7 所示. 其中模型参数为 $H = 5 \text{ mm}$, $L = 100 \text{ mm}$, $l = 0.2 \text{ mm}$, $h = 1 \text{ mm}$, $M_s = 2 \times 10^6 \text{ A/m}$, $\lambda_s = 5 \times 10^{-6}$, $a = 500 \text{ A/m}$, $\beta = 0.5$, $\sigma_s = 250 \text{ MPa}$. 图 7(a) 中试件外磁场 $H_0 = 40 \text{ A/m}$, 应力的变动范围为 $0 \sim 200 \text{ MPa}$. 图 7(b) 中试件的应力为 $\sigma = 200 \text{ MPa}$, 外磁场的变动范围 $20 \sim 60 \text{ A/m}$. 图 7(a) 和图 7(b) 分别为应力和外磁场对试件表面附近磁记忆信号的影响的理论分析结果. 从图 7(a) 可以看出, 由于材料内部磁化强度随着应力值的增加而增大, 这最终导致了缺陷诱导的磁记忆信号的非线性程度随着应力值的增加而增大. 拉伸试件磁记忆信号测量实验结果^[10]表明, 缺陷试件表面附近磁记忆信号呈非线性变化, 并且非线性程度随着应力值的增加而增大, 本文理论分析结果与拉伸试件磁记忆实验结果^[10]保持一致. 此外, 从图 7(b) 可以看出, 随着外磁场的增加, 缺陷诱导的磁记忆信号的非线性程度也随之增大, 这归因于外加环境磁场对材料磁化的贡献. 本文理论分析揭示的缺陷诱导磁记忆信号随外磁场的变化规律与已有的磁记忆实验结果保持一致^[18]. 综上, 基于本文提出的力磁耦合型磁偶极子理论分析模

型可以初步解释磁记忆的多个实验现象, 分析现象的产生机理.

3.3 磁信号的其他影响因素及规律

图 8 分析了磁记忆检测中的提离效应. 图 8(a) 和图 8(b) 分别分析了提离效应对光滑试件和具有缺陷试件表面磁记忆信号的影响规律. 其中模型参数为 $H = 5 \text{ mm}$, $L = 100 \text{ mm}$, $M_s = 2 \times 10^6 \text{ A/m}$, $\lambda_s = 5 \times 10^{-6}$, $a = 500 \text{ A/m}$, $\beta = 0.5$, $\sigma_s = 250 \text{ MPa}$. 图 8(a) 中光滑试件外磁场 $H_0 = 40 \text{ A/m}$, 应力为 $\sigma = 200 \text{ MPa}$, 提离分别为 $10, 12, 15 \text{ mm}$. 图 8(b) 中矩形凹槽缺陷试件外磁场 $H_0 = 40 \text{ A/m}$, 应力为 $\sigma = 200 \text{ MPa}$, 缺陷半长为 $l = 0.2 \text{ mm}$, 缺陷深度为 $h = 1 \text{ mm}$, 提离分别为 $10, 12, 15 \text{ mm}$. 从图 8(a) 可以看出, 光滑试件表面的磁信号随位置呈线性变化. 从图 8(b) 可以看出缺陷诱导的磁记忆信号的非线性程度随着提离值的增加而减小. 本文理论分析揭示的不同提离值下缺陷诱导的磁记忆信号变化规律与磁记忆实验中信号随提离值的变化规律保持一致^[17]. 比较图 8(a) 和图 8(b) 可以发现, 缺陷的存在导致试件中心位置附近的磁记忆信号存在非线性变动. 随着提离值的减小, 缺陷的存在导致试件中心位置附近的磁记忆信号峰值更显著.

图 9 分析了试件尺寸对磁记忆信号的影响规律. 图 9(a) 和图 9(b) 分别描述了试件的长度和厚度对试件表面磁记忆磁信号的影响. 其中模型参数为 $H = 5 \text{ mm}$, $l = 0.2 \text{ mm}$, $h = 1 \text{ mm}$, $M_s = 2 \times 10^6 \text{ A/m}$, $\lambda_s = 5 \times 10^{-6}$, $a = 500 \text{ A/m}$, $\beta = 0.5$, $\sigma_s = 250 \text{ MPa}$. 图 9(a) 中试件外磁场 $H_0 = 40 \text{ A/m}$, 应

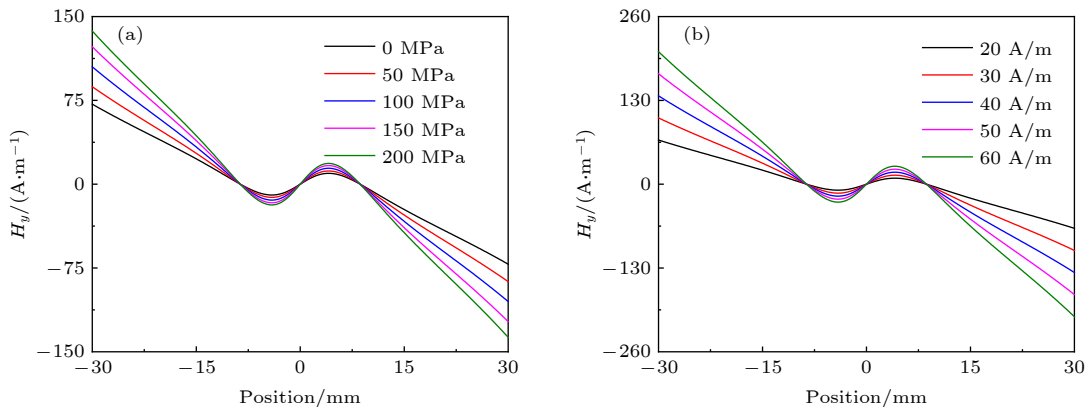


图 7 应力和外磁场对矩形凹槽缺陷诱导磁信号的影响 (a) 应力影响; (b) 外磁场影响

Fig. 7. Effects of stress and external magnetic field on magnetic signals induced by rectangular groove defects: (a) Stress effect; (b) effect of external magnetic field.

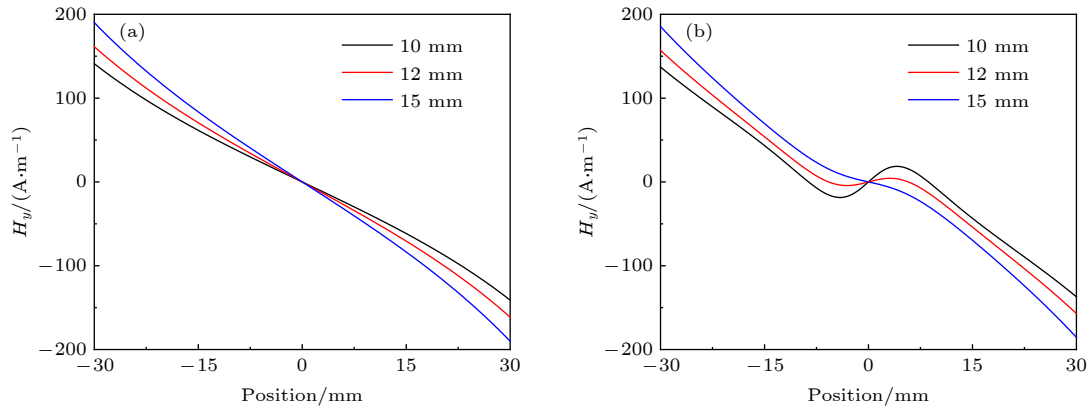


图 8 提离效应对试件磁信号的影响 (a) 光滑试件; (b) 具有矩形凹槽缺陷的试件

Fig. 8. Effects of lift off on magnetic signals of specimen: (a) Smooth specimen; (b) specimen with rectangular groove defect.

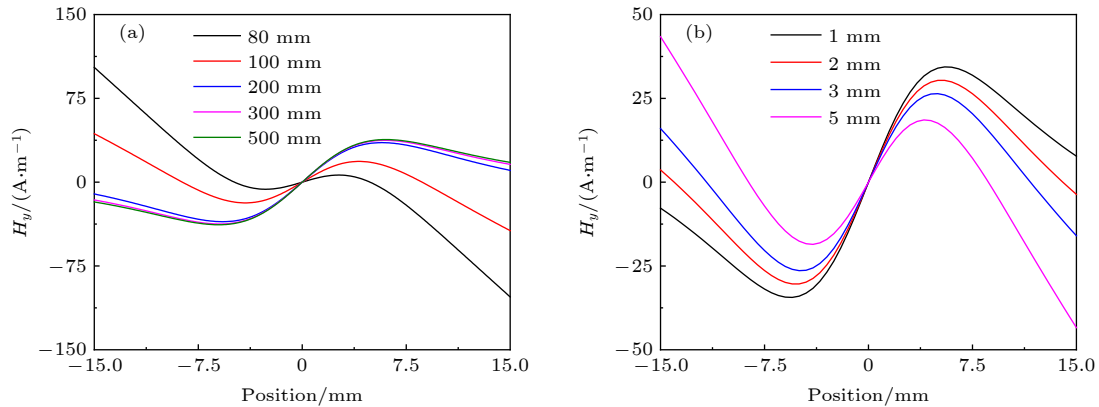


图 9 试件尺寸对矩形凹槽缺陷试件磁信号的影响 (a) 试件长度; (b) 试件厚度

Fig. 9. Effects of specimen size on magnetic signals with rectangular groove defect: (a) Effect of specimen length; (b) effect of specimen depth.

力为 $\sigma = 200$ MPa, 试件长度的变动范围为 80—500 mm. 图 9(b) 中试件外磁场 $H_0 = 40$ A/m, 应力为 $\sigma = 200$ MPa, 试件厚度分别为 1—5 mm. 从图 9(a) 和图 9(b) 可以看出: 当试件长度超过 300 mm 时, 缺陷诱导产生的磁记忆信号几乎不再随着试件长度的增大而变化; 试件长度越大, 在试件中心位置两侧, 缺陷诱导磁记忆信号的局部变化影响越大, 这是因为较长试件的端部距离缺陷较远, 对缺陷附近的磁记忆信号干扰较小; 随着试件厚度的增大, 试件中心位置处缺陷诱导磁记忆信号的局部非线性变化减弱.

4 结 论

磁记忆检测技术具有省时、低成本和易操作的优点, 被广泛应用于铁磁性金属结构和材料的应力与缺陷的检测评价. 然而, 关于磁记忆的理论研究多限于对检测机理的定性分析, 直接面向磁记忆信

号的定性和定量分析模型的相关研究较为匮乏, 现有的磁偶极子解析模型也无法适用于对磁记忆方法中所关心的应力载荷影响等问题进行刻画. 本文建立力磁耦合型磁偶极子理论模型, 并基于二维磁偶极子简化, 实现理论模型的解析求解, 用于对磁记忆信号进行理论分析. 获得了光滑和具不同形貌缺陷的铁磁材料表面磁记忆信号的解析解, 完成了对磁记忆检测中的一些基本实验现象和规律的解释, 特别地, 可以描述应力、环境磁场、缺陷形貌及尺寸、提离效应、试件尺寸等因素对磁记忆信号的影响规律. 本文的解析解模型简洁易用, 可以初步实现对磁记忆检测基本实验现象和规律的解释, 但是针对磁记忆检测实验信号的精确定量分析, 还是需要借助复杂的力磁耦合模型^[19]结合复杂静磁场的有限元分析方法^[20]去实现.

参考文献

- [1] Dubov A A 1997 *Met. Sci. Heat Treat.* **39** 401

- [2] Leng J C, Xu M Q, Li J W, et al. 2010 *Chin. J. Mech. Eng.* **23** 532
- [3] Huang H H, Jiang S L, Yang C, et al. 2014 *Nondestr. Test. Eval.* **29** 377
- [4] Minkov D, Lee J, Shoji T 2000 *J. Magn. Magn. Mater.* **217**
- [5] Shi P P 2015 *Nondestr. Test.* **37** 1 (in Chinese) [时朋朋 2015 无损检测 **37** 1]
- [6] Wang Z D, Deng B, Yao K 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 083928
- [7] Li J W, Xu M Q 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 063918
- [8] Shi P P 2020 *J. Magn. Magn. Mater.* **512** 166980
- [9] Avakian A, Ricoeur A 2017 *J. Appl. Phys.* **121** 053901
- [10] Shi P P, Bai P G, Chen H E, et al. 2020 *J. Magn. Magn. Mater.* **504** 166669
- [11] Zhong L Q, Li L M, Chen X 2013 *IEEE Trans. Magn.* **49** 1128
- [12] Shi P P, Jin K, Zheng X J 2016 *J. Appl. Phys.* **119** 145103
- [13] Shi P P, Jin K, Zhang P C, et al. 2018 *IEEE Trans. Magn.* **54** 6202011
- [14] Zhang P C, Shi P P, Jin K, et al. 2019 *J. Appl. Phys.* **125** 233901
- [15] Shi P P, Zhang P C, Jin K, et al. 2018 *J. Appl. Phys.* **123** 145102
- [16] Shi P P, Zheng X J 2016 *Nondestr. Test. Eval.* **31** 45
- [17] Shi P P, Su S Q, Chen Z M 2020 *J. Nondestr. Eval.* **39**
- [18] Zhong L Q, Li L L, Chen X 2010 *Nondestr. Test. Eval* **25** 161
- [19] Shi P P 2020 *J. Appl. Phys.* **128** 115102
- [20] Shi P P, Jin K, Zheng X J 2017 *Int. J. Mech. Sci.* **124–125** 229

Analytical solution of magneto-mechanical magnetic dipole model for metal magnetic memory method^{*}

Shi Peng-Peng[†] Hao Shuai

(*Institute of Mechanics and Technology, School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China*)

(Received 18 June 2020; revised manuscript received 19 September 2020)

Abstract

Magnetic dipole theory has been widely and successfully used to explain the leakage magnetic field signals. Because the model parameter such as magnetic dipole density is not easy to quantify, magnetic dipole theory often needs normalizing in application, which is considered to be unsuitable for quantitatively analyzing the magnetic memory signals with the stress effect. In this paper, the theoretical model of magneto-mechanical coupling magnetic dipole is established, which is suitable for analyzing the stress effect on magnetic signals in magnetic memory testing method. Based on the ferromagnetic theory, the equivalent field under the combined action of the applied load and the magnetic field is determined. And then, the magneto-mechanical analytical model is obtained for the isotropic ferromagnetic material under the weak magnetic field based on the first-order magnetization approximation in the weak magnetization state. Under the assumptions of rectangular and V-shaped magnetic charge distribution for the two-dimensional magnetic signal problem, the theoretical analytical models of the magnetic memory signals from the smooth and cracked specimens, and the analytical models of the magnetic memory signal induced by the rectangular and V-shaped surface defect are established. Based on the analytical solution of the proposed magneto-mechanical magnetic dipole theory, the difference in signal between before and after the failure of the specimen, the signal from the rectangular and V-shaped defect, and other influencing factors and laws of the magnetic signal are analyzed in detail. In particular, the influence of stress, environmental magnetic field, defect morphology and size, lift-off effect, specimen size and other factors on magnetic memory signals can be described based on the analytical solution of magneto-mechanical magnetic dipole models proposed in this paper. The proposed analytical model of magneto-mechanical magnetic dipole in this paper is simple and easy to use, and the present research shows that the proposed analytical solution in this paper can explain some basic experimental phenomena and laws in magnetic memory testing experiments. In addition, the precise magneto-mechanical coupling quantitative model combined with the finite element analysis method is still needed for accurately analyzing the magnetic memory signals in experiment.

Keywords: metal magnetic memory, magneto-mechanical coupling, magnetic dipole, analytical solution

PACS: 41.20.Gz, 51.60.+a, 75.50.Bb, 75.80.+q

DOI: 10.7498/aps.70.20200937

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11802225) and the Natural Science Basic Research Plan of Shaanxi Province, China (Grant No. 2019JQ-261).

[†] Corresponding author. E-mail: shipengpeng@xjtu.edu.cn