

Micromagnetic Analysis on Leakage Magnetic Field of Defects

Meiquan Liu, Bin Lang, Nan Ma, Tianchen Huang

Department of Electrical Engineering, Army Engineering University (Shijiazhuang Campus), Shijiazhuang Hebei
Email: liumqyh@163.com

Received: Jul. 2nd, 2020; accepted: Jul. 20th, 2020; published: Jul. 27th, 2020

Abstract

The change included the domain structure inside the ferromagnetic materials and two side of the defect and the energy of the domain walls were analyzed. It can be concluded that the defect in the ferromagnetic materials can fix the domain wall; the reverse potential wall in the side of the defect blocks the movement of the domain walls; then the micromagnetic fixed knot comes into being around the defect. The direction of the magnetization whose normal component is discontinuous in the micromagnetic fixed knot deciding the character of the flux magnetic field which contains the information of the defect. By testing this flux magnetic field, we can realize the defect testing.

Keywords

Magnetization, Defect, Domain, Domain Wall Fixed, Micro-Magnetic Testing

基于微磁学的损伤缺陷检测研究

刘美全, 郎 宾, 马 南, 黄天辰

陆军工程大学石家庄校区, 车辆与电气工程系, 河北 石家庄
Email: liumqyh@163.com

收稿日期: 2020年7月2日; 录用日期: 2020年7月20日; 发布日期: 2020年7月27日

摘 要

从外磁场作用下铁磁材料内部磁畴结构变化尤其是材料存在缺陷时缺陷两侧磁畴以及磁畴壁的变化分析以及畴壁能量计算出发, 得出当材料中存在缺陷时, 由于缺陷对畴壁形成钉扎, 使得缺陷两侧形成反向势垒, 阻碍了畴壁运动, 在缺陷边缘附近形成微磁固定结点, 微磁结点内磁化方向的变化决定了缺陷区的泄漏微磁场特性, 由于微磁固定结点内磁化强度的法向分量不连续, 缺陷区形成泄漏微磁场, 泄漏微

磁场的奇异特征包含了缺陷信息, 通过检测这个泄漏场信息, 可以实现微磁缺陷检测。

关键词

磁化, 缺陷, 磁畴, 畴壁钉扎, 微磁检测

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前, 利用铁磁材料出现缺陷时的磁性变化进行缺陷检测和识别的磁性无损检测方法在实际工程检测中应用较多[1] [2] [3]。这些检测都是利用了铁磁材料出现缺陷时的外在磁性变化特征进行缺陷检测的, 对铁磁材料出现缺陷时的磁性变化机理还不是十分清楚, 致使在实际检测中遇到一些与现有检测理论不符甚至相互矛盾的现象。如根据磁记忆检测理论, 检测结果应与被检工件的放置方向有关系, 但是实际检测中不论工件如何放置均有缺陷特征信号产生[4] [5] [6] [7]。另外, 磁记忆检测不能对应力集中和裂纹等缺陷进行有效识别, 致使在缺陷检测中对缺陷的最终识别和判断存在较多的争议。微磁检测时遇到的如对工件退磁后出现的对原有缺陷误检、磁化方向的强烈改变是否引起相变等奇异现象和问题还不能从理论上进行系统解释。因此, 深入研究铁磁材料损伤缺陷生成过程中的微磁形成机理成为微磁检测发展亟待解决的问题。本文通过研究分析铁磁物质出现缺陷时内部磁特征的变化, 得出微磁检测外在磁特征产生的内部形成机理, 为进一步提高微磁检测水平进而实现智能检测和定量检测提供理论基础。

2. 铁磁物质的磁化

物质的磁化是由外加磁场引起的。所谓磁化就是物体从不表现磁性变为具有一定的磁性, 磁化过程一般由物质的磁化曲线表示[8] [9]。磁化的实质就是把物体中原来方向凌乱的磁矩在外加磁场的作用下整齐排列起来的过程。当所有磁矩都排列得很整齐时, 再加强磁场也不能增强磁化, 即达到饱和了。已知铁磁性材料(铁、钴、镍等金属)以及亚铁磁性物质(各种铁氧体)在很弱的外加磁场下就可以磁化, 并显示出强磁性。有些软磁物质在 10^{-4} T 以下的磁场中就可以磁化到饱和。因此, 地磁场环境下的铁磁材料应该在地磁场作用下由自发磁化对外显示磁性, 但实际情况却并非如此。这是由于地磁场环境下的铁磁材料内部的磁有序状态发生了改变, 其内部形成了多个磁化方向不同的磁畴区域, 其总体效果是对外不显示磁性。但是当铁磁材料出现缺陷或内部材质分布不均匀时, 在缺陷区域的磁畴结构将发生变化, 对外显示磁性, 以抵消由于缺陷存在而增加的材料表面能。

3. 缺陷材料的磁化

对铁磁材料的技术磁化过程是通过铁磁体内畴壁位移和磁化矢量转动进行的。在磁场较弱时, 一般通过畴壁的移动达到系统内能最小化, 但是当畴壁的移动不能抵消不断增加的外磁场能时, 只能通过畴壁内磁化矢量的转动来实现系统能量的最小化, 达到能量的平衡态[10]。外加一个磁场, 缺陷两侧那些在 H 方向上有最大 M 分量的磁畴体积扩大, 畴壁发生位移; 当磁场增加时, 原磁畴内的磁化矢量方向发生转动, 当原磁畴内磁化矢量方向与相近磁畴内的磁化矢量方向趋于一致时, 原磁畴壁消失, 相邻磁畴发生合并; 当外磁场足够大时, 畴壁移动和磁化矢量转动两个过程完成, 畴的宽度趋于稳定, 试样处于磁

饱和状态。

在没有外磁场情况下，均匀材料内部的磁畴相间分布，其磁化矢量方向及强度相互抵消，对外不显示磁性，如图 1(a)。随着外磁场的作用，铁磁表面磁畴内磁化矢量与外磁场相同的磁畴体积增大，反向的磁畴体积减小，在铁磁内部，相互反平行的磁畴由于磁矩相反相互抵消而没有改变。为了在表面不产生磁荷，故在块状畴的两端出现了封闭畴。当外加磁场小于封闭畴消失的临界场 H_1 时，反向封闭畴的畴壁发生位移，位移方向使与外磁场方向一致的磁畴体积增大，与外磁场方向相反的磁畴体积减小，如图 1(b)。当外加磁场等于或大于封闭畴消失的临界场时，反向封闭畴畴壁进一步移动，直到反向封闭畴消失，如图 1(c)。

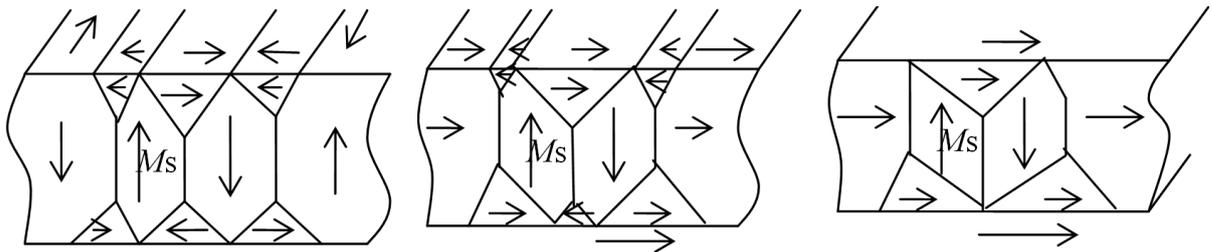


Figure 1. The change of the domain under external magnetic field
图 1. 外加磁场下磁畴结构变化

由于当外加一定磁化场时缺陷表面处的封闭畴消失，因此缺陷材料的磁化过程不会是平滑连续的，而是阶梯状的。这种跳跃式的位移过程称为巴克豪森跳跃。因此，铁磁材料的磁化曲线呈现阶梯状。假设一个包含 10 个铁磁原子的系统，其体系能量为：

$$E = -\sum J_{ij} (S_i \cdot S_j) - \sum (H \cdot S_i) \tag{1}$$

式(1)中， S 为铁磁原子的自旋角动量， J^i 为原子间的交换积分常数， H 为外磁场。去磁状态下铁磁物质对外不显磁性，所以向上和向下自旋的原子数在局部达到平衡，如图 2 所示。其中 J_F 表示同向自旋铁磁原子间的交换常数， J_{AF} 表示异向自旋铁磁原子间的交换常数。设同向自旋铁磁原子间的交换能为 1，异向自旋铁磁原子间的交换能为 -1。

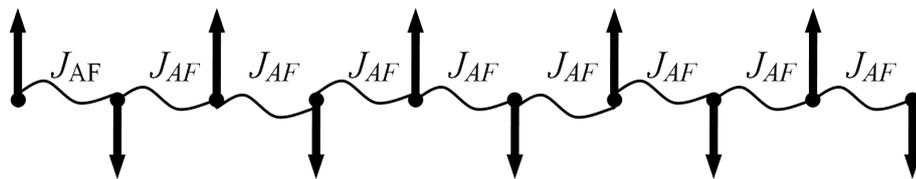


Figure 2. Atomic Spin and its energy in the Ferromagnetic Material
图 2. 铁磁物质内原子自旋与能量

在不加外磁场的情况下系统能量为：

$$E_0 = -9J_{AF} \times (-1) \tag{2}$$

设外磁场的方向与自旋向上的铁磁原子的方向一致，当加上外磁场后，自旋向下的铁磁原子将发生“翻转”，设只有一个自旋向下的原子发生翻转，则系统能量变为：

$$E_1 = -2J_F \times 1 - 7J_{AF} \times (-1) - 2H \tag{3}$$

要使自旋向上翻转有效，则系统能量必须减小，即要求：

$$E_1 - E_0 = -2J_F - 2J_{AF} - 2H < 0 \tag{4}$$

即 $H > -2J_F - 2J_{AF}$ 。

从上面分析可以看出,当磁场增大到一定值使原子自旋方向发生翻转时,铁磁物质内部磁化强度发生跳跃式变化,磁化强度在缺陷边缘处的法向不连续性导致缺陷处磁场强度的奇异变化,这个奇异变化是检测缺陷的一个磁性特征。

4. 缺陷对畴壁的钉扎

缺陷对畴壁的钉扎是由于它们的磁性参数如磁导率等与基体不同造成的。考虑在铁磁材料中出现矩形缺陷的情形,在去磁状态下,在材料表面附近形成封闭畴,其净磁化强度为零,对外不显示磁性,但是其中每一个畴内的 M 是沿着结晶学的易磁化方向。当施加外磁场 H 时,在远离缺陷的均匀铁磁材料区,磁化方向与外磁场方向一致的磁畴变大,磁化方向与外磁场方向相反的磁畴变小,畴壁向磁畴变小的磁畴区位移,在缺陷附近区域,由于缺陷的存在,畴壁不能位移,形成对畴壁的钉扎,如图 3 所示。

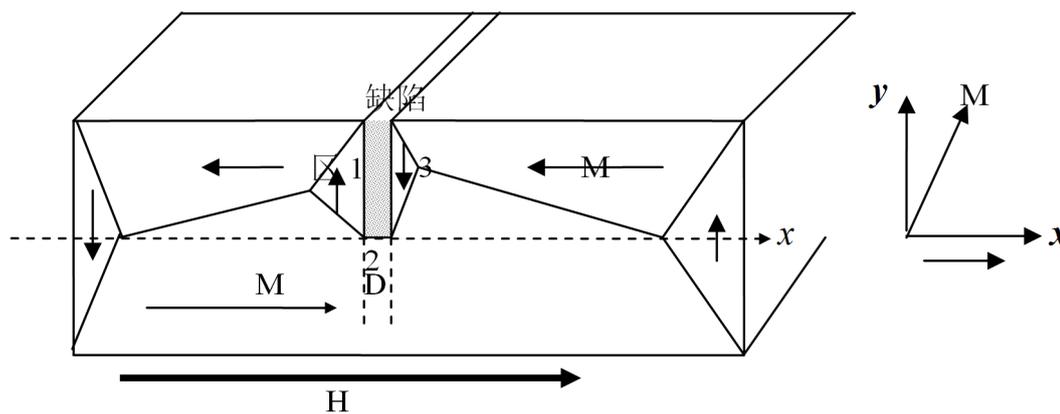


Figure 3. The pin of domain wall on defects
图 3. 缺陷对畴壁的钉扎

磁畴内的磁化矢量要转向外磁场方向,外磁场与缺陷附近磁畴内磁化强度矢量的相互作用,打破了原来去磁状态下的能量平衡,在缺陷边缘出现不能被相邻磁畴内磁化强度抵消的磁化强度,形成不可逆微磁固定结点,出现磁极,开始对外显示磁性。由于缺陷边缘封闭畴的形成,宏观上,外磁场对缺陷两侧磁畴的 Zeeman 能之差表示缺陷两侧的磁场感生势能之差为 $2M_s H$ 。而在缺陷底部,由于封闭畴内磁化方向与外磁场方向一致,所以不会在缺陷底部出现磁荷聚集。在上述系统中封闭畴与平行与外磁场的畴之间的畴壁内的磁化矢量发生旋转,由于外磁场的作用,缺陷两侧与外磁场方向不一致的磁畴区的磁化方向趋向外磁场方向,因而在缺陷的棱缘上也会出现磁极,正如仲维畅描述的在缺陷的各棱上出现磁荷聚集的现象[11]。由于外磁场的作用,缺陷两侧与外磁场方向不一致的磁畴区的磁化方向趋向外磁场方向。

5. 畴壁钉扎下缺陷两侧磁化方向的变化

对于铁磁材料内部的畴壁,外磁场虽无扭矩作用于磁畴的磁化,但对组成畴壁的自旋尤其是封闭畴与相邻畴之间的畴壁却作用一个磁矩,使之与外磁场一致,在仅有外磁场作用下,封闭畴与相邻畴之间的畴壁发生位移或旋转时。为了研究外磁场作用下缺陷内部磁畴变化,可分析系统内部能量密度 F 包括交换能、各项异性能和外磁场能[12]:

$$F = \int \left[A_i \left(\frac{d\theta}{dx} \right)^2 + K_i \sin^2 \theta - \mu_0 H M_i \cos \theta \right] dx \quad (5)$$

其中,磁化强度与易轴之间的夹角 θ 是每一项位置 x 的函数,第一项为交换能,第二项为磁晶各向异性

能, 第三项为外磁场能。根据能量极小原则, 由式(5)可得材料内部磁化强度方向与外磁场之间的欧拉方程:

$$-2A_i \frac{d^2\theta}{dx^2} + 2K_i \sin\theta \cos\theta + \mu_0 HM_i \sin\theta = 0 \quad (6)$$

对上式积分一次后可得:

$$-A_i \left(\frac{d\theta}{dx} \right)^2 + K_i \sin^2\theta - \mu_0 HM_i \cos\theta = C_i \quad (7)$$

$i=1,2,3$ 分别表示图 3 中的区域 1, 2, 3。 C_i 为积分常数, 在区域 1, 2, 3 有不同的值。在 1, 3 均匀区的边界条件为:

$$\left. \begin{aligned} \theta(x=-\infty) = 0, \theta(x=+\infty) = \pi \\ \left(\frac{d\theta}{dx} \right)_{x=-\infty} = 0, \left(\frac{d\theta}{dx} \right)_{x=+\infty} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将式(8)带入式(7)可求得 1, 3 区的积分常数分别为:

$$C_1 = -\mu_0 HM_1, C_3 = \mu_0 HM_1$$

因此, 适用于 1, 3 区的欧拉方程分别为:

$$\begin{aligned} -A_1 \left(\frac{d\theta}{dx} \right)^2 + K_1 \sin^2\theta - \mu_0 HM_1 \cos\theta + \mu_0 HM_1 &= 0 \\ -A_1 \left(\frac{d\theta}{dx} \right)^2 + K_1 \sin^2\theta - \mu_0 HM_1 \cos\theta - \mu_0 HM_1 &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

适用于 2 区的欧拉方程为:

$$-A_2 \left(\frac{d\theta}{dx} \right)^2 + K_2 \sin^2\theta - \mu_0 HM_2 \cos\theta = C_2 \quad (10)$$

显然, 1, 2 区的欧拉方程同时满足在 x_1 处的边界条件: $\theta = \theta_1$; 2, 3 区的欧拉方程同时满足在 x_2 处的边界条件: $\theta = \theta_2$, 假定在 x_1 和 x_2 两个交界处磁矩变化的连续条件为:

$$\begin{aligned} A_1 \frac{d\theta}{dx} \Big|_{x=x_1} &= A_2 \frac{d\theta}{dx} \Big|_{x=x_1} \\ A_1 \frac{d\theta}{dx} \Big|_{x=x_2} &= A_2 \frac{d\theta}{dx} \Big|_{x=x_2} \end{aligned} \quad (11)$$

令 $h = \frac{\mu_0 HM_1}{K_1}, a = 1 - \frac{M_2 A_2}{M_1 A_1}, b = 1 - \frac{A_2 K_2}{A_1 K_1}$, 根据上述连续性条件, 可消去 2 区中的积分常数 C_2 , 得到:

$$\left(\cos\theta_1 + \frac{ha}{2b} \right)^2 - \left(\cos\theta_2 + \frac{ha}{2b} \right)^2 = \frac{2h}{b} \quad (12)$$

上述不同区域的欧拉方程反映了外磁场作用下, 缺陷内部磁化强度方向与易磁化轴夹角的变化, 夹角的变化反映了在外磁场作用下磁畴的变化, 磁畴大小的变化导致畴壁处磁化强度的变化, 被钉扎畴壁处磁化场外泄, 形成反映缺陷边缘的漏磁场信号, 检测这个泄漏场并分析其特征变化可实现缺陷的定量分析, 为提高微磁检测质量与水平提供了理论依据。为了直观理解外磁场作用下缺陷内部磁化强度方向与易磁化轴夹角的变化, 假设在铁磁体内(以铁为例)的缺陷区 $a=1, b=1, A_1 = 2.4 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$,

$K_1 = 4.8 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$, $M_1 = 1707 \text{ G}(290\text{K})$ 。则由式 $h = \frac{\mu_0 H M_1}{K_1}$ 可计算得 h , 根据式(12), 作出 θ_1 和 θ_2 随外磁场 H 不断增大时二者之间的变化曲线, 如图 4 所示。

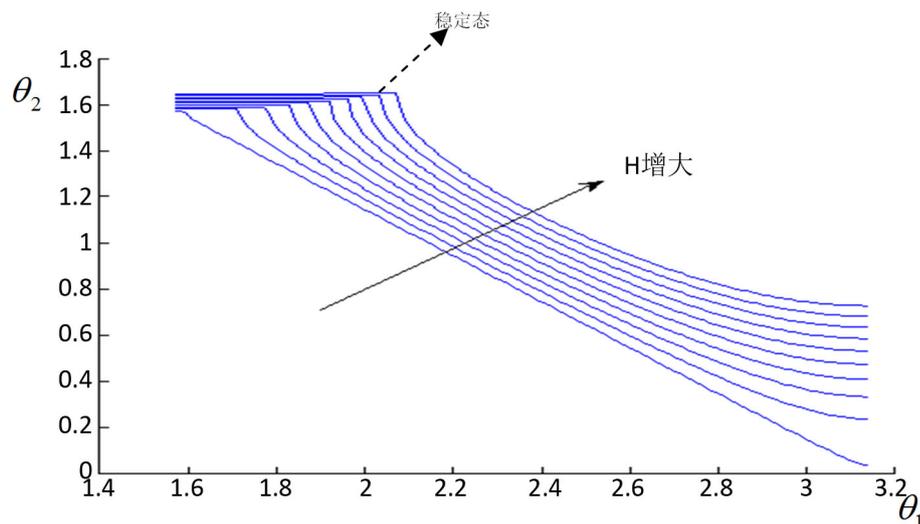


Figure 4. The relation of magnetization direction at two side of pinned domain wall
图 4. 钉扎畴壁两侧磁化方向之间的关系

由 θ_1 随 θ_2 的变化关系可知, 在一定外磁场下, 铁磁体内与外磁场方向一致的磁畴体积增大, 与外磁场方向反向的磁畴体积缩小, 通过畴壁的移动达到系统能量的平衡, 畴壁方向最终趋向与一个稳定态, 即两侧的磁化强度方向不再发生变化, 这时缺陷形成对畴壁的钉扎, 当畴壁被钉扎后, 畴壁有发生转动的倾向, 即一侧的磁化强度与外磁场的夹角减小的同时, 另一侧的磁化强度与外磁场的夹角有增大的趋势, 畴壁两侧畴内的磁化强度与外磁场的夹角对应着多个局部稳定态。在零磁场时, 存在能量最小的稳定解。对于不同的外磁场, 畴壁方向的最终稳定态不同, 随着外磁场的增大, 稳定态的建立时间逐步变短, 当外磁场增加一定程度, 达到封闭畴消失的临界场, 封闭畴消失, 形成新的多畴和畴壁。这种变化是不可逆的, 在外磁场撤去后得以保留, 形成不可逆固定微磁结点[13] [14]。但是, 当外加反向磁场时, 由于上述解的局部稳定性, 有可能使钉扎的畴壁发生位移和转向, 因而有可能使局部的稳定性消失, 这就是在进行微磁检测时, 对工件进行退磁后短时间内检测不到缺陷的原因。在外磁场作用下, 由于缺陷对畴壁的钉扎, 会同时发生畴壁位移和畴转, 因此, 缺陷存在时, 即使外磁场较弱, 铁磁材料在缺陷区域也会表现出较强的磁化特征, 这也是微磁检测不需要人工磁化而得以进行缺陷检测的原因之一。

6. 结论

通过上述对于外磁场下铁磁材料内部磁畴结构变化尤其是材料存在缺陷时缺陷两侧磁畴以及磁畴壁的变化分析以及畴壁能量计算, 可以看出当材料中存在缺陷时, 由于缺陷对畴壁形成钉扎, 使得缺陷两侧形成反向势垒, 阻碍了畴壁运动, 在缺陷边缘附近形成微磁固定结点, 微磁结点内磁化方向的变化决定了缺陷区的泄漏微磁场特性, 由于微磁固定结点内磁化强度的法向分量不连续, 缺陷区形成泄漏微磁场, 泄漏微磁场的奇异特征包含了缺陷信息, 成为微磁缺陷检测的基础。

参考文献

- [1] 冷建成, 刘扬, 周国强, 吴泽民, 闫天红. 铁磁性材料早期损伤的磁无损检测方法综述[J]. 化工机械, 2013,

40(2): 139-145.

- [2] 张轩睿. 基于磁性技术的无损检测方法研究[J]. 商品与质量, 2016(27): 206.
- [3] 李冲冲, 董丽虹, 王海斗. 疲劳损伤磁性无损评估技术研究现状及发展前景[J]. 材料导报, 2015(15): 107-113.
- [4] 任吉林, 林俊明, 等. 著. 金属磁记忆检测技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000: 20-50.
- [5] 葛静. 磁记忆检测技术[J]. 建筑工程技术与设计, 2018(25): 405.
- [6] 马惠香, 周建庭, 等. 基于金属磁记忆技术的钢筋应力无损检测试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 349-354.
- [7] 杨茂, 周建庭, 等. 混凝土内部钢筋锈蚀的磁记忆检测[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(2): 345-350.
- [8] 姜寿亭, 李卫, 编著. 凝聚态磁性物理[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 1-100.
- [9] 钟文定. 铁磁学(中册)[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-120.
- [10] 奥汉德利. 现代磁性材料原理和应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 20-60.
- [11] 仲维畅. 方钢纵向磁化时各棱上的磁荷线密度[J]. 无损检测, 2002, 24(8): 332-335.
- [12] 田民波. 磁性材料[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 1-120.
- [13] 祖瑞丽, 任尚坤, 等. 基于微磁学的金属磁记忆检测机理分析[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2017, 31(3): 34-39.
- [14] 徐章遂, 等. 裂纹漏磁定量检测原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 22-24.