

## 磁性应力监测中力磁耦合特征及关键影响因素分析\*

章鹏<sup>†</sup> 刘琳 陈伟民

(重庆大学光电工程学院, 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

(2013年5月2日收到; 2013年5月22日收到修改稿)

针对磁性应力监测研究中力磁耦合关系有多种变化趋势且一直没有合理理论解释这一问题, 从磁性材料的微观磁畴运动出发, 根据磁致磁化过程, 详细分析了两种不同磁化状态下力致磁化的变化规律, 揭示出力磁耦合关系的变化特征, 进而提出磁化状态是导致力磁耦合关系差异的本质因素; 对工程上实际缆索用镀锌钢丝在不同磁化状态下进行了力磁耦合试验, 结果与理论一致: 力磁耦合关系随磁化状态的不同而不同, 本质上有效地解释了已有研究中力磁耦合关系的矛盾多样性.

**关键词:** 应力监测, 磁化状态, 力磁耦合, 磁畴运动

**PACS:** 75.80.+q, 75.60.-d

**DOI:** 10.7498/aps.62.177501

## 1 引言

杆/索钢构件因具有质轻性柔、承力大等优点, 已广泛应用于各种大型结构, 如斜拉桥、悬索桥、机场等. 作为承力或传力构件, 杆/索件的拉伸应力大小是评价整个结构安全状况的关键参数<sup>[1,2]</sup>. 而目前针对在役杆/索钢构件的应力监测技术仍面临挑战, 已有方法都存在各自的发展瓶颈, 只有磁性应力监测方法因耐腐蚀、实际应力测量、无损监测和长寿命等优势而备受关注, 被认为是一种极具发展潜力的方法<sup>[3,4]</sup>. 杆/索钢构件是铁磁性材料, 当其在一定磁化条件下受到外界应力作用时, 其磁导率、磁感应强度等磁性参数将发生相应变化, 通过常规的电测技术将这些磁特性参数转换为电参数, 则可实现构件的应力测量<sup>[5]</sup>.

然而, 在杆/索钢构件磁性应力监测技术的现有报道中, 杆/索件应力引起的磁特性变化差异极大, 出现了多种相互矛盾的力磁耦合关系: 既有磁导率随拉伸应力的增大而单调增大<sup>[6]</sup>, 也有随拉伸应力的增大而单调减小<sup>[7,8]</sup>, 还有磁导率随拉伸应力的增大先减小后增大, 或者先减小后增大再减小<sup>[9,10]</sup>等. 即使对于同种铁磁性杆/索钢构件, 在相

同的拉伸试验条件下, 磁导率随应力变化的形式也呈现出多样性, 其趋势似乎没有规律可循. 各企业和研究机构虽然分别在激励磁场大小和传感器优化、温度特性等方面开展了较深入的研究<sup>[11-15]</sup>, 但并没有从本质上统一这种矛盾的力磁耦合关系, 这已成为磁性应力测量中一个共性问题, 严重制约了此技术的发展, 人们在实际应用中不得不对具体的杆/索钢构件进行大量的实际标定以确定其力磁耦合关系<sup>[16-18]</sup>, 这虽然能够保证一定的测量精度, 但并没有根本性地突破这个瓶颈. 对此, 本文通过从微观上探讨铁磁材料力磁耦合的变化特征, 旨在找出影响杆/索钢构件力磁耦合关系的内在关键因素, 以有效统一已有研究结果中力磁耦合关系的矛盾多样性, 突破磁性应力监测技术的理论瓶颈, 为其实用化奠定基础.

## 2 力磁耦合变化特征分析

为探索力磁耦合关系种种相互矛盾结果的内在原因, 将文献<sup>[6-10]</sup>的结果进行对比可得图1所示的三种典型情况. 进一步分析这三种典型结果的研究思路, 发现其主要是针对杆/索钢构件的应力监测需求, 在磁场激励条件确定的情况下, 研究磁

\* 中央高校基本科研业务费 (批准号: CDJXS11122218, CDJZR10120004) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: zhangpeng@cqu.edu.cn

参数随应力变化的趋势. 显然这些研究都是基于力磁耦合关系为单调函数的假设, 在应力与磁化强度的变化关系是确定的前提下, 研究如何将杆/索件受力的转换为电参数输出. 从图 1 可看出, 虽然其表面形式是杆/索件的受力与电参数输出的关系, 但它们的实质却是杆/索件的受力与磁导率的关系, 即力磁耦合关系的外在表现, 但是这个外在表现彼此差异巨大、相互矛盾, 难以作为指导磁性应力测量工程实践的理论支撑. 因此需要深入研究力磁耦合关系的内在特征.

根据磁性应力测量的原理, 将力磁耦合关系分为如图 2 所示微观的内在变化和宏观的外在测量两个过程, 即铁磁性构件受应力作用时导致磁畴的变化过程和通过电测技术获取磁特性参数的变化过程. 力磁耦合关系的微观内在变化是内因、是关键, 而其宏观外在测量仅是结果、是形式, 只有深入理解其微观内在变化, 才能正确解释其宏观外在表现, 才可能解释图 1 所示的矛盾结果.

基于磁畴假说, 铁磁材料可看成是由许多磁畴组成. 在磁畴内部, 原子磁矩平行取向, 自发磁化强度为  $M_s$ . 当受外磁场和外应力作用时, 铁磁材料内部某些能量发生变化, 为维持稳定的磁状态, 将发生磁畴运动, 原有的磁畴消失, 新的磁畴产生, 宏观上显磁性. 由此可看出, 磁畴运动改变了磁化状态和磁化强度. 根据热力学原理, 稳定的磁状态一定对应于铁磁体内总自由能的极小值状态. 铁磁体内存在五种相互作用的能量: 外磁场能  $E_H$ , 退磁场能  $E_d$ , 交换能  $E_{ex}$ , 磁各向异性能  $E_K$  和磁弹性能  $E_\sigma$ , 则总自由能  $E$  表示为

$$E = E_H + E_d + E_{ex} + E_K + E_\sigma, \quad (1)$$

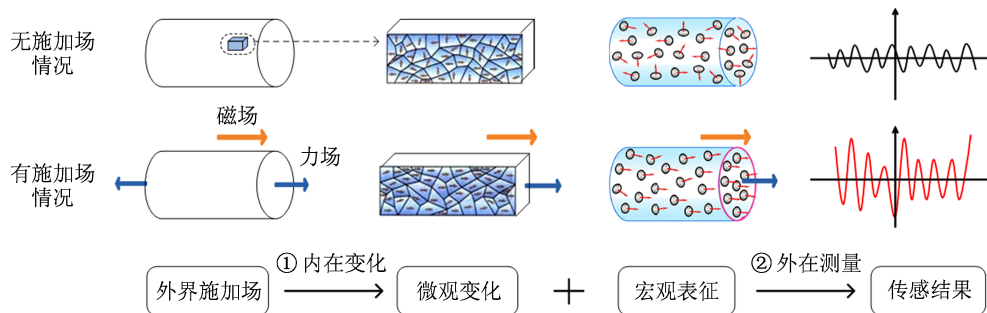


图 2 磁性应力测量中力磁耦合关系的内外两个过程

为保持系统自由能最小, 则要求  $dE = 0$ .

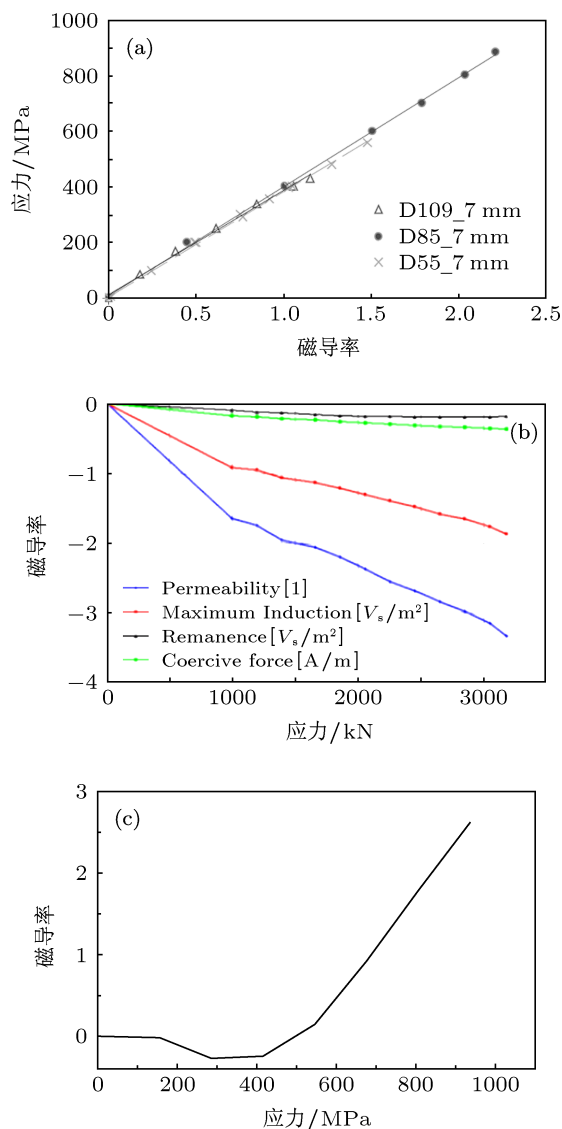


图 1 力磁耦合关系研究结果 (a) 磁导率随应力增大而增大; (b) 磁导率随应力增大而减小; (c) 磁导率随应力增大先减小后增大

### 2.1 磁致磁化

当铁磁材料只受外磁场作用, 在未加外磁场时, 如图 3(a) 所示, 外磁场  $H = 0$ , 外磁场能  $E_H = 0$ , 铁磁体处于宏观退磁状态, 对外不显磁性, 此时铁磁体内磁化强度  $M$  的分布完全受其他能量, 如磁晶各向异性、应力各向异性、交换能以及退磁能的最小条件所决定. 当施加如图 3(b) 所示水平向右的外磁场时,  $H \neq 0$ , 铁磁体在外磁场中被磁化, 外磁场能增加, 假设外磁场  $H$  与磁化强度  $M$  之间的角度为  $\theta$ , 则外磁场能为<sup>[19]</sup>

$$E_H = -\mu_0 M H \cos \theta, \quad (2)$$

式中,  $\mu_0$  是真空磁导率. 此时, 自由能主要由外磁场能组成, 即  $E = E_H$ . 满足能量最小原则, 则

$$\frac{dE}{d\theta} = \frac{dE_H}{d\theta} = \mu_0 M H \sin \theta = 0. \quad (3)$$

从 (3) 式可知,  $\theta = 0$  时,  $E_H$  和  $E$  最小. 根据 (2) 式可画出自由能随应力的变化如图 4 所示, 磁化强度与外磁场之间的夹角  $\theta$  越小,  $E$  越小.

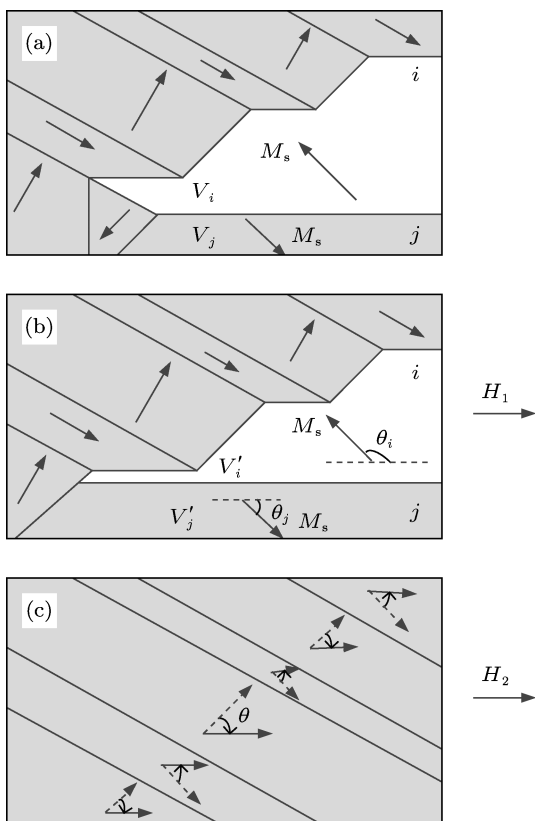


图 3 外磁场引起的磁畴运动 (a) 无外磁场; (b) 畴壁移动; (c) 磁畴转动

观察图 3(b) 中两个由畴壁分开的磁畴  $i$  和  $j$ ,  $i$  磁畴内自发磁化强度  $M_s$  与磁场强度  $H$  的夹角为

$\theta_i$ ,  $j$  畴内  $M_s$  与  $H$  的夹角为  $\theta_j$ . 在外磁场  $H$  的作用下,  $i$  畴和  $j$  畴的外磁场作用能可分别表示为

$$\begin{aligned} E_{Hi} &= -\mu_0 M_s H \cos \theta_i, \\ E_{Hj} &= -\mu_0 M_s H \cos \theta_j. \end{aligned} \quad (4)$$

由于  $\theta_i > \theta_j$ , 且  $\theta \in [0^\circ, 180^\circ]$ ,  $j$  畴的磁化方向更接近于外磁场方向, 因此  $i$  畴的磁位能高, 而  $j$  畴的磁位能低. 根据能量最小原理的要求,  $i$  畴内的磁矩将转变为  $j$  畴一样的取向. 即在外磁场的作用下,  $i$  畴逐步向  $j$  畴过渡, 对比图 3(a) 和 (b),  $i$  畴和  $j$  畴的体积分别由  $V_i$  和  $V_j$  变成为  $V_i'$  和  $V_j'$ ,  $i$  畴的体积变小,  $j$  畴的体积变大, 这相当于  $i$  畴和  $j$  畴间的畴壁向  $i$  畴移动了一段距离, 发生了畴壁位移. 若进一步增大外磁场, 为维持能量最小状态, 磁化方向与磁场方向最接近的磁畴体积增大, 图 3(b) 中阴影区面积增大, 直至畴壁位移结束, 最终只剩下两种磁畴. 此时, 若再继续增大外磁场, 外磁场能继续增大, 如图 3(c) 所示. 根据能量最小原理, 为阻止外磁场能的增大, 根据 (2) 式, 只有逐渐减少磁化强度与外磁场之间的夹角  $\theta$ , 磁畴的磁化强度将偏离原来的方向, 转动到外磁场方向, 磁畴发生转动.

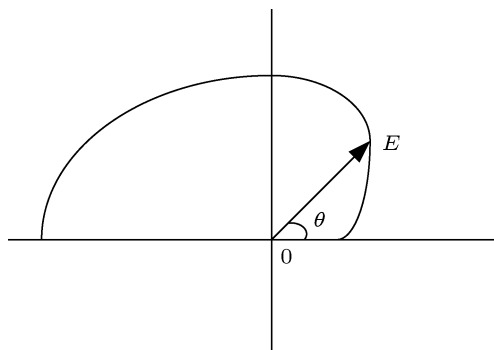


图 4 磁致磁化过程中自由能  $E$  随  $\theta$  的变化

因此, 为维持系统自由能最小, 阻止外磁场能的增加, 铁磁材料向着外磁场方向发生畴壁位移或磁畴转动. 当外磁场不同时, 材料处于不同的磁化状态, 磁畴结构不同, 磁畴运动的程度和方式不同. 畴壁移动改变了磁畴体积, 磁畴转动改变了自发磁化的方向, 从而改变磁化状态和磁化强度. 假设  $V_0$  为块状铁磁材料的总体积,  $V_i$  为材料内第  $i$  个磁畴的体积,  $\theta_i$  为第  $i$  个磁畴的  $M_s$  与  $H$  之间的夹角, 则磁化强度的改变  $\Delta M$  为

$$\begin{aligned} \Delta M &= f(H) = f_V(H) + f_\theta(H) \\ &= \sum_i \left[ \frac{M_s \cos \theta_i \Delta V_i}{V_0} + \frac{M_s V_i \Delta \cos \theta_i}{V_0} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

虽然从微观上不能写出磁化强度随外磁场变化的显示关系式,但磁化曲线经研究已被熟知,如图5示.

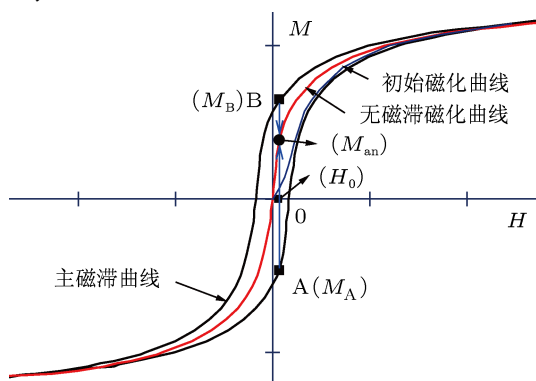


图5 磁化曲线

## 2.2 力致磁化

### 2.2.1 微观特征

当铁磁材料受外界拉伸应力作用时,不仅会产生弹性应变,还会产生磁致伸缩性质的应变,进而增大磁各向异性能  $E_K$  和磁弹性能  $E_\sigma$ . 此时,为保持系统自由能最低,就需阻止  $E_K$  和  $E_\sigma$  的增大,磁畴将发生运动. 进一步简化讨论,假定外加应力  $\sigma$  较大,  $E_K$  远小于  $E_\sigma$ ,并可忽略不计. 若铁磁材料受到与外磁场同轴的应力,外加应力与磁化矢量方向之间的夹角也为  $\theta$ ,假设材料饱和磁致伸缩系数为  $\lambda_s$ ,则各向同性的铁磁性材料的磁弹性能  $E_\sigma$  为<sup>[19]</sup>

$$E_\sigma = -\frac{3}{2}\lambda_s\sigma\cos^2\theta, \quad (6)$$

铁磁性材料受拉伸应力时,  $\lambda_s\sigma > 0$ ,只有  $\theta = 0$  或  $\pi$  才能使磁弹性能  $E_\sigma$  最小,则畴壁移动和磁畴转动都将使磁化强度与应力方向平行. 那么,在某个磁场下施加应力时,材料自由能主要由磁弹性能和外磁场能组成:

$$E = E_\sigma + E_H = -\frac{3}{2}\lambda_s\sigma\cos^2\theta - \mu_0MH\cos\theta. \quad (7)$$

磁化强度最终的平衡方向可根据能量最小原则来获得

$$\frac{dE}{d\theta} = 3\lambda_s\sigma\cos\theta\sin\theta + \mu_0MH\sin\theta = 0. \quad (8)$$

从(8)式可得,  $\theta = 0$  或  $\arccos\left(-\frac{\mu_0MH}{3\lambda_s\sigma}\right)$  时,自由能  $E$  出现极小值,如图6所示.  $\theta_1 = 0$  时  $E$  最小,而  $\theta_2 = \arccos\left(-\frac{\mu_0MH}{3\lambda_s\sigma}\right)$  时  $E$  达到局部极小. 当磁化方向与应力和磁场的夹角接近  $\theta_2$  的磁畴可先达到局部能量最小,最终达到全局的能量最小.

根据磁致磁化变化,由于不同磁化状态下磁畴结构不同,相应的磁畴运动也不同,现讨论在两种不同磁化状态下铁磁材料受到外应力的情况. 如图5所示的磁场  $H_0$  对应着两种不同的磁化状态 A 和 B,磁化强度分别为  $M_A$  和  $M_B$ ,  $M_A < 0$ ,  $M_B > 0$ . 这两种磁状态在微观上对应不同的磁畴结构,如图7(a)和(b)的上图所示. A 位于主磁滞回线上升支,磁场从负饱和增加至  $H_0$ ,磁化强度从负饱和增加至  $M_A$ ,根据磁致磁化变化过程,此时以磁化方向与磁场方向最接近的磁畴即阴影部分磁畴的畴壁位移为主,畴壁位移结束后进而发生磁畴转动;而 B 位于主磁滞回线下降支,磁场从正饱和减少至  $H_0$ ,磁化强度从正饱和减少至  $M_B$ ,此时磁畴转动已完成,以白色部分磁畴的畴壁位移为主.

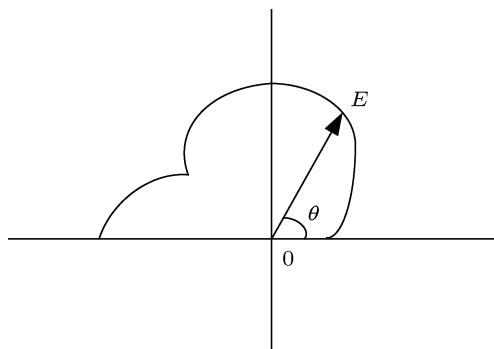


图6 力致磁化过程中自由能  $E$  随  $\theta$  的变化

分别对以上两种磁化状态下的材料施加拉伸应力,则磁畴发生运动,如图7所示,图7(a)和(b)分别表示磁化状态 A 和 B 受外应力前后磁畴运动的情况. 根据上述力致磁化过程中的能量变化特征,图7(a)中磁畴  $i$  磁化方向与应力的夹角  $\theta_i$  与  $\theta_2$  接近,而磁畴  $j$  的夹角  $\theta_j \in [0^\circ, 90^\circ]$  并远离  $\theta_1$ ,因此  $E_i < E_j$ ,则磁畴  $j$  的畴壁位移停止,但为使系统总自由能最小,磁畴将朝  $\theta_1 = 0$  的方向发生转动,磁化强度的改变  $\Delta M$  由外磁场和外应力共同决定,可写成

$$\begin{aligned} \Delta M &= f(H) + g(\sigma) = f_\theta(H) + g_\theta(\sigma) \\ &= \sum_i \frac{M_s V_i \Delta \cos \theta_i}{V_0} + \sum_j \frac{M_s V_j \Delta \cos \theta_j}{V_0}. \end{aligned} \quad (9)$$

从(9)式可知,当  $\theta_i$  与  $\theta_j$  逐渐减小时,则磁化强度的变化量为正,磁化强度逐渐增大.

同理,图7(b)中磁畴  $i$  和  $j$  的能量关系为  $E_i < E_j$ ,为达到稳定的能量最小状态,磁畴  $i$  的畴壁位移继续,磁化强度的改变  $\Delta M$  为

$$\Delta M = f(H) + g(\sigma) = f_v(H) + g_v(\sigma)$$

$$= \sum_i \frac{M_s \cos \theta_i \Delta V_i}{V_0} \quad (10)$$

从(10)式可知,因  $\cos \theta_i < 0$ ,当  $V_i$  逐渐增大时,则磁化强度的变化量为负,磁化强度逐渐减小.

综上所述,在不同磁化状态下施加外应力时,微观上磁畴运动的方式和程度不同引起了不同的磁化强度变化.这说明铁磁材料所处的磁化状态对力磁耦合关系有重要的影响作用.

### 2.2.2 宏观特征

力致磁化的微观特征仅能说明磁化状态对力磁耦合关系有影响,并没有指出磁化强度在应力的作用如何变化.应力的作用始终是为了促使材料趋于最小能量的稳定状态,某个磁场下最终的能量最小状态就是相应的无磁滞磁化状态<sup>[20]</sup>,无磁滞磁化曲线如图5红线所示.在应力作用下,微观上畴壁移动和磁畴转动使材料趋于能量最小状态,即磁化状态逐渐趋于无磁滞磁化状态,而在宏观上则表

现为磁化强度  $M$  始终朝无磁滞磁化强度  $M_{an}$  的方向变化,即  $M + \Delta M \rightarrow M_{an}$ .因此,应力引起磁化强度变化的方向则由  $\Delta M$  变化的符号,即  $M_{an}$  与  $M$  的相对大小来决定:

$$\frac{dM}{d\sigma} \propto M_{an} - M. \quad (11)$$

在图5所示的磁化状态A时,  $M_A$  朝  $M_{an}$  变化,因  $M_{an} - M_A > 0$ ,则磁化强度随应力的增大而增大;而在磁化状态B时  $M_{an} - M_B < 0$ ,则磁化强度随应力的增大而减小,这与微观上的分析是一致的,但从宏观上力磁耦合关系更加显而易见,如图8所示.  $M_{an}$  与  $M$  的相对大小与磁化状态位于磁滞回线上的位置有关,即与磁化状态有关,进一步说明了磁化状态是影响力磁耦合关系的关键因素.需要注意的是,即使在同一个磁场下,铁磁材料因磁化历程不同和磁滞的存在而处于不同的磁化状态,施加相同的应力后,也会出现不同的力磁耦合关系.

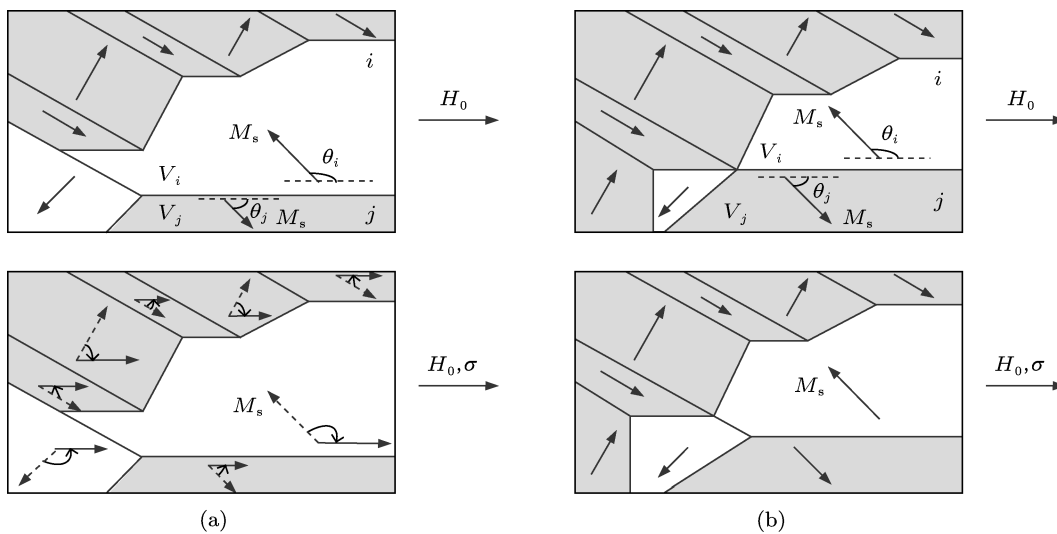


图7 不同磁化状态下外应力引起的磁畴运动 (a) 磁化状态A; (b) 磁化状态B

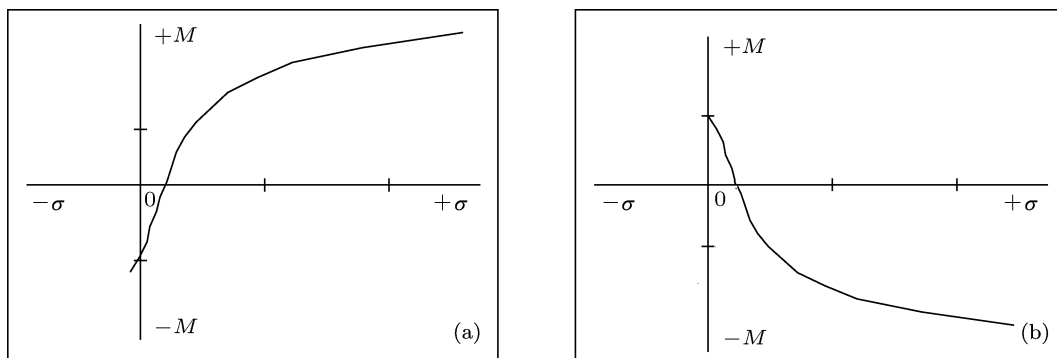


图8 不同磁化状态下的力磁耦合关系 (a) 磁化状态A; (b) 磁化状态B

若  $M_{an}$  仅是  $H$  的函数, 则只要磁化状态一定, 力磁耦合关系就非常明晰. 但实际情况不然, 随着应力  $\sigma$  的加载,  $M$  朝  $M_{an}$  变化, 同时  $M_{an}$  本身也随  $\sigma$  变化<sup>[21]</sup>, 且在不同的磁化状态下, 变化的形式不同. 这使得  $M_{an}$  与  $M$  的相对大小时刻都在发生变化, 变化量的符号可能改变, 力磁耦合关系的变化趋势也随之改变. 因此, 在不同的磁化状态下, 力磁耦合关系可能单调递减, 也可能单调递增, 也可能先减小再增大, 也可能先减小再增大最后减小等. 这可很好地统一已有研究中出现的力磁耦合关系的矛盾多样性.

### 3 磁化状态影响试验

为验证理论的正确性, 对工程上实际缆索用镀锌钢丝进行不同磁化状态下的力磁耦合试验, 试验系统如图 9 所示. 由于铁磁性材料存在磁滞特性, 被测钢丝因经历不同的磁化过程而处于不同的磁化状态. 通过调节缠绕在被测钢丝上的励磁线圈中通过的激励电流, 从而得到所需的磁化状态, 激励电流由 PC 机编程控制数据采集卡模拟输出信号,

再经功率放大后而获得. 被测钢丝经由夹具夹持于拉力机上, 在某个磁化状态下, 拉力机对被测钢丝施加拉伸应力, 磁场与应力同轴, 与此同时, 黏贴于钢丝表面的磁阻传感器感知其磁参数的变化, 并将磁参数转换成电参数, 经放大、滤波等处理后输入至 PC 机显示和保存.

镀锌钢丝的标准强度为 1860 MPa, 实际应用中常用的范围为标准强度的 20%—40%, 因此试验中主要关注钢丝的受力为标准强度的 0%—50%, 应力为 0—885 MPa. 试验开始前, 对被测钢丝进行 3 次预张拉以消除夹具夹持带来的影响. 试验中分别测试了磁化状态 A, B, C 三种情况下的力磁耦合关系, 每种情况均重复测试 3 次. 磁化状态 A, B, C 分别如图 10(a), (b), (c) 黑线所示, 红线为无磁滞磁化曲线. 达到磁化状态 A 所经历的磁化历程为: 从被测钢丝退磁状态逐渐增大励磁电流, 使磁场从 0 增大至饱和  $H_s = 15000$  A/m, 再逐渐减少励磁电流, 使磁场从  $H_s$  减少至  $H_1 = 350$  A/m, 即  $0 \rightarrow H_s \rightarrow H_1 = 350$ . 同样的方法, 磁化状态 B, C 的磁化历程分别为:  $0 \rightarrow H_s \rightarrow -H_s \rightarrow H_1 = 350$ ,  $0 \rightarrow H_s \rightarrow H_s \rightarrow H_1 = 1300 \rightarrow H_2 = 150$ .

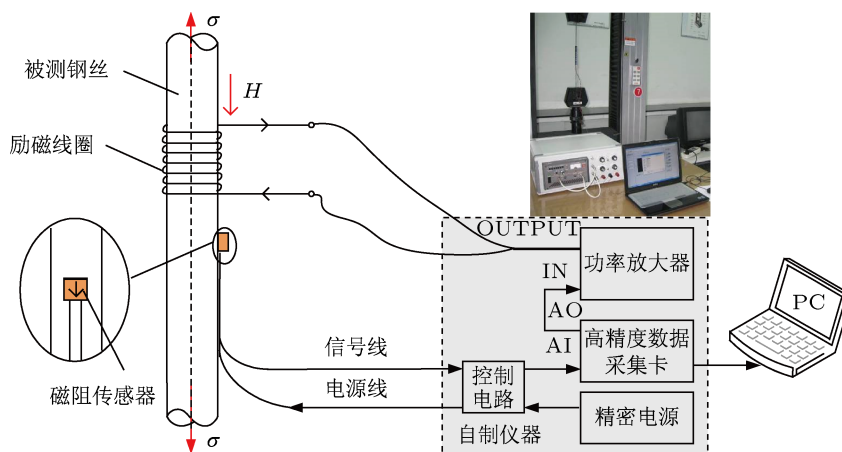


图9 试验系统图

力磁耦合关系的试验结果如图 11 所示, 为便于比较, 电压绝对测量值换算为相对变化量. 从结果可知, 当被测构件所处的磁化状态不同时, 其力磁耦合关系也不同. 在磁化状态 A 时,  $M_A(H_1)$  大于  $M_{an}(H_1)$ , 并远离  $M_{an}(H_1)$ , 施加应力后,  $M_A(H_1)$  逐渐朝  $M_{an}(H_1)$  变化即  $M_A(H_1)$  逐渐减小, 磁化强度随应力的增大而减小; 由于  $M_A(H_1)$  和  $M_{an}(H_1)$  都随应力的变化而变化, 随着应力增大到足够大时, 这两者的相对大小关系有可能始终保持不变

直至饱和, 力磁耦合关系的变化趋势不变, 也有可能发生变化, 从而使力磁耦合关系的变化趋势反向, 这还有待进一步的深入研究. 在此次试验的应力范围内, 力磁耦合关系的变化趋势没有改变. 在磁化状态 B 时,  $M_B(H_1)$  小于  $M_{an}(H_1)$ , 并远离  $M_{an}(H_1)$ , 施加应力后,  $M_B(H_1)$  逐渐朝  $M_{an}(H_1)$  变化即  $M_B(H_1)$  逐渐增大, 磁化强度随应力的增大而增大, 由于  $M_B(H_1) \ll M_{an}(H_1)$ , 在试验应力范围内力磁耦合关系始终没有改变. 在磁化状态 C

时,  $M_C(H_2)$  略大于  $M_{an}(H_2)$ , 施加应力后,  $M_C(H_2)$  逐渐朝  $M_{an}(H_2)$  变化即  $M_C(H_2)$  逐渐增大, 磁化强度随应力的增大而增大; 但因  $M_C(H_2)$  只略大于

$M_{an}(H_2)$ , 随着应力的增大两者的相对大小很快发生变化, 在试验应力范围内力磁耦合关系先减小后增大。

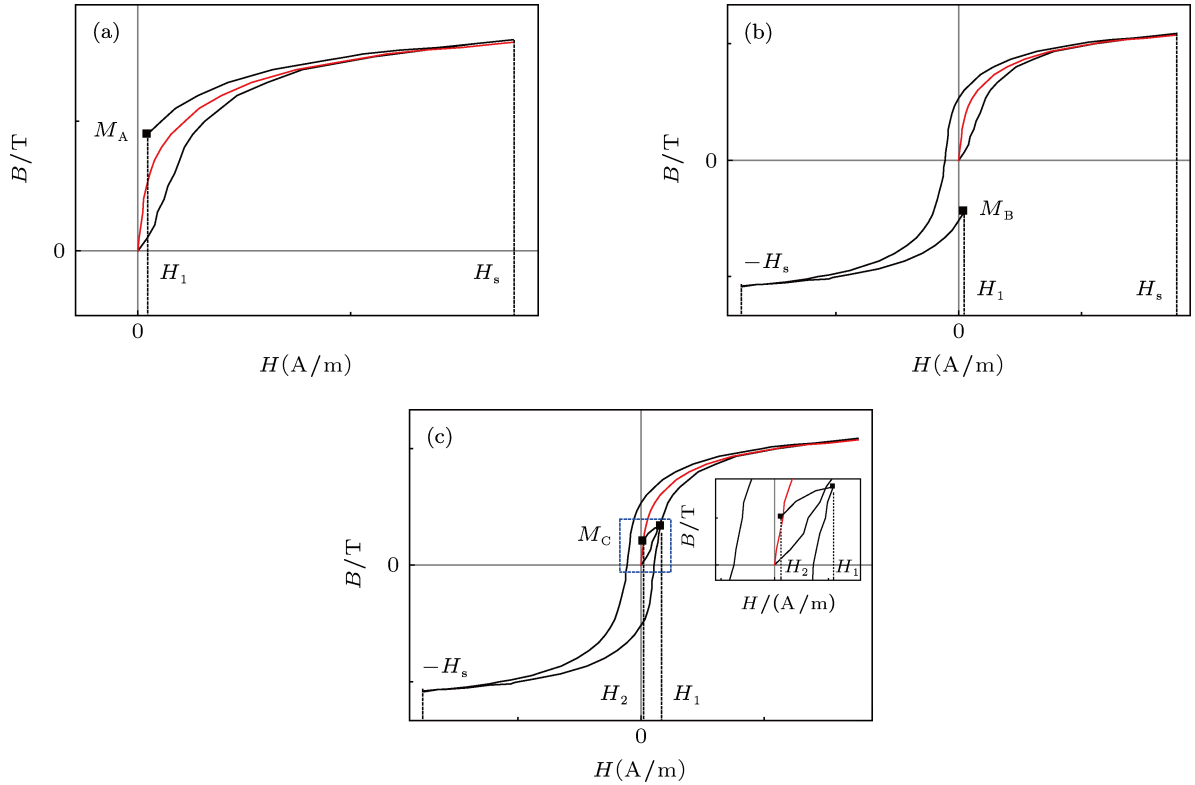


图 10 磁化状态 (a) 磁化状态 A; (b) 磁化状态 B; (c) 磁化状态 C

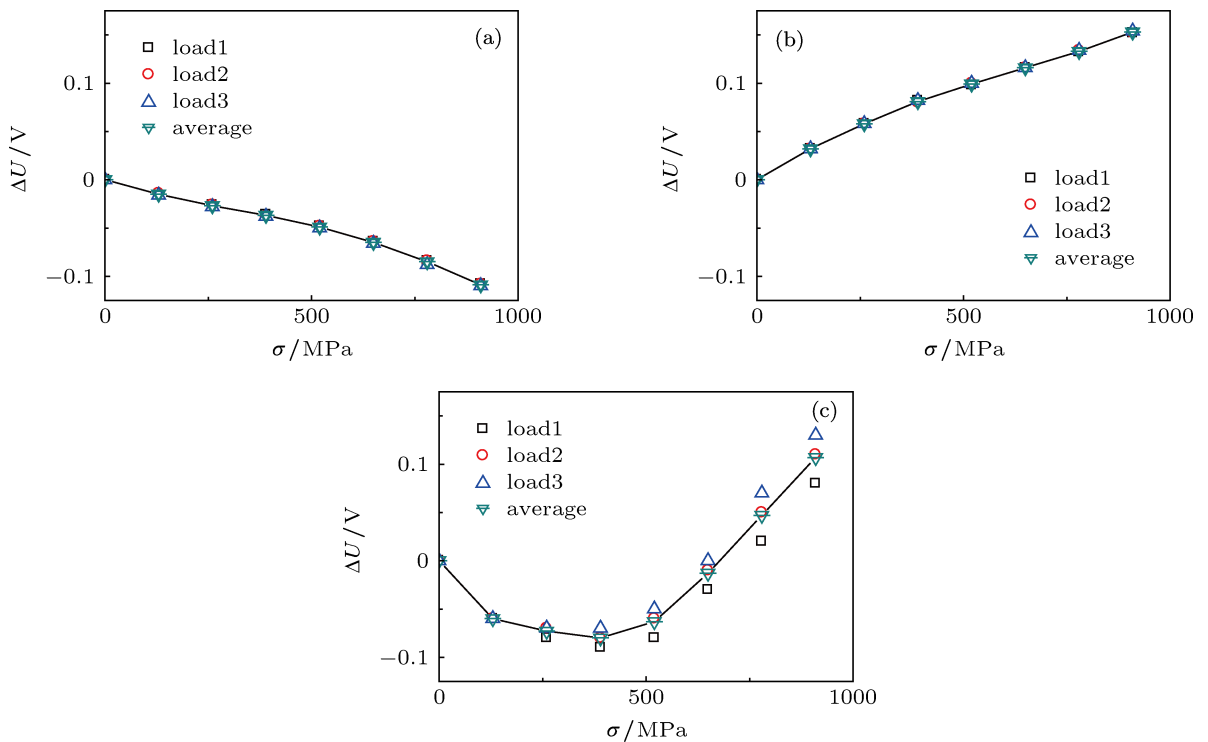


图 11 不同磁化状态下的力磁耦合关系 (a) 磁化状态 A; (b) 磁化状态 B; (c) 磁化状态 C

从上述分析可知, 试验结果与理论一致, 并与已有的研究结果也是符合的. 因此, 从磁化状态这个角度可以很好地解释力磁耦合关系的矛盾多样性, 为磁性应力监测方法在实际工程中的应用提供了有效的理论指导. 在实际工程应用中, 必须考虑到被测构件磁化状态的影响, 才能确保测量的一致性和精度.

#### 4 结论

对力磁耦合变化特征的探讨表明, 微观上应力

引起的磁畴运动始终使材料趋于自由能最小的稳定状态, 宏观上则表现为应力引起的磁化强度始终朝无磁滞磁化强度变化. 在此基础上, 指出磁化状态是影响力磁耦合关系的关键因素. 通过对工程中实际缆索用镀锌钢丝在不同磁化状态下进行力磁耦合试验, 结果表明: 不同的磁化状态下, 力磁耦合关系不同. 这为解释磁性应力监测研究中力磁耦合关系有多种完全不同的变化趋势找到了理论依据, 有效统一了其矛盾多样性, 但磁化状态对力磁耦合关系的具体影响还需进一步建模分析.

- [1] Li K, Ju Y, Han J, Zhou C 2009 *Mater. Struct.* **42** 923
- [2] Ko J M, Ni Y Q 2005 *Eng. Struct.* **27** 1715
- [3] Kvasnica B, Fabo P 1996 *Meas. Sci. Technol.* **7** 763
- [4] Sumitro S, Kurokawa S, Shimano K, Wang M L 2005 *Smart. Mater. Struct.* **14** 68
- [5] Atherton D L, Coathup L W, Jiles D C 1983 *IEEE. T. Magn.* **19** 1564
- [6] Wang G D, Wang M L, Zhao Y, Chen Y, Sun B N 2005 *Proceedings of SPIE: Smart Structures and Materials-Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems* San Diego, United States, March 7-10, 2005 p 395
- [7] Sumitro S, Wang M L 2005 *Struct. Control. Hlth.* **12** 445
- [8] Wichmann H J, Holst A, Budelmann H 2009 *Non-Destructive Testing in Civil Engineering* Nantes, France, June 30-July 3
- [9] Liu L, Chen W M, Liu X M, Zhang P 2012 *Adv. Sci. Lett.* **11** 295
- [10] Wang W 2005 *Ph.D. dissertation* (Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology) (in chinese) [王威 2005 博士学位论文 (西安: 西安建筑科技大学)]
- [11] Guo Z Z, Hu X B 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 057501 (in Chinese) [郭子政, 胡旭波 2013 物理学报 **62** 057501]
- [12] Singh V, Lloyd G M, Wang M L 2004 *NDT & E. Int.* **27** 525
- [13] Tang D D, Huang S L, Chen W M, Jiang J S 2008 *Smart. Mater. Struct.* **17** 19
- [14] Zhang P, Liu X L, Chen W M, Liu L 2010 *J. Sci. Instrum.* **31** 2467 (in Chinese) [章鹏, 刘小亮, 陈伟民, 刘琳 2010 仪器仪表学报 **31** 2467]
- [15] Xia A L, Fang Y K, Guo Z H, Li W, Han B S 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 1289
- [16] Wang M L, Chen Z L, Koontz S S, Lloyd G M 2000 *Proceedings of SPIE: Non-destructive Evaluation of Highways, Utilities and Pipelines* Newport Beach, United State, March 5-9, 2000 p492
- [17] Lloyd G M, Singh V, Wang M L, Hovorka O 2003 *IEEE. Sens. J.* **3** 708
- [18] Jarosevic A 1998 *Smart Struct. Syst.* **35** 107
- [19] Jiles D C 1991 *Introduction to magnetism and magnetic materials* (London, UK: Chapman and hall) pp69-98
- [20] Liorzou F, Phelps B, Atherton D L 2000 *IEEE. T. Magn.* **36** 418
- [21] Jiles D C 1995 *J. Phys. D Appl. Phys.* **28** 1537



# Analysis of characteristics and key influencing factors in magnetomechanical behavior for cable stress monitoring\*

Zhang Peng<sup>†</sup> Liu Lin Chen Wei-Min

(College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Key Lab. for Optoelectronic Technology & Systems of Ministry of Education, Chongqing  
400044, China)

(Received 2 May 2013; revised manuscript received 22 May 2013)

## Abstract

Until recently the magnetomechanical behavior has been rather poorly understood with contradictory results and interpretations from different investigators in the study of stress monitoring by magnetic method. Based on the domain motion and field-induced magnetization process of magnetic material, the stress-induced magnetization process in two different magnetization states is analyzed in detail. Characteristics of the magnetomechanical behavior are revealed. Domain motion caused by stress always makes materials tend to stable state of free energy minimum and accordingly the magnetization will approach the anhysteretic magnetization. Moreover, it can be concluded that magnetization state is an essential factor influencing the magnetomechanical behavior. Experiments of magnetomechanical behavior for galvanized steel wire have been conducted for different magnetization state, and the results are in accord with the theoretical analyses. The magnetomechanical behavior is changed with magnetization state, which can be effectively used to explain the existing complex and diverse research results.

**Keywords:** stress monitoring, magnetization state, magnetomechanical behavior, domain motion

**PACS:** 75.80.+q, 75.60.-d

**DOI:** 10.7498/aps.62.177501

---

\* Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant Nos. CDJXS11122218, CDJZR10120004).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: zhangpeng@cqu.edu.cn