

Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂ 合金磁畴偏转的滞回特性研究

严柏平 张成明 李立毅 吕福在 邓双

Study on hysteresis characteristics of magnetic domain rotation in Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂ alloy

Yan Bai-Ping Zhang Cheng-Ming Li Li-Yi Lü Fu-Zai Deng Shuang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 067501 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.067501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.067501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I6>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂ 合金的本构参数辨识方法研究

Method of identifying constitutive parameter in Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂ Alloy

物理学报.2015, 64(2): 027501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.027501>

磁性应力监测中力磁耦合特征及关键影响因素分析

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

物理学报.2013, 62(17): 177501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.177501>

高斯型非均匀应力对铁磁薄膜磁化性质的影响

Gaussian type inhomogeneous stress and strain effects on the magnetic properties in ferromagnetic thin films

物理学报.2013, 62(16): 167503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.167503>

Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂ 合金磁畴偏转研究

Study on magnetic domain deflection in Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂ alloy

物理学报.2012, 61(16): 167506 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.167506>

偏置电压对磁致伸缩/压电层合换能结构磁电性能影响

Effect of adjustable bias voltage on magnetolectric properties of magnetostrictive/piezoelectric laminated transducer structure

物理学报.2012, 61(13): 137504 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.137504>

Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂合金磁畴偏转的滞回特性研究*严柏平^{1)†} 张成明²⁾ 李立毅²⁾ 吕福在¹⁾ 邓双¹⁾

1) (浙江大学, 流体动力与机电系统国家重点实验室, 杭州 310027)

2) (哈尔滨工业大学电磁与电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

(2015年11月23日收到; 2016年1月4日收到修改稿)

研究了不同载荷作用下 Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂ 合金在压磁和磁弹性效应中磁畴偏转的滞回特性. 基于 Stoner-Wohlfarth 模型的能量极小原理, 采用绘制自由能-磁畴偏转角度关系曲线的求解方法, 研究了压磁和磁弹性效应中载荷作用下的磁畴角度偏转和磁化过程, 计算分析了不同载荷作用下磁畴偏转的滞回特性. 研究表明, 压磁和磁弹性效应中磁畴偏转均存在明显的滞回、跃迁效应, 其中磁化强度的滞回效应来源于磁畴偏转的角度跃迁; 压磁效应中预加磁场的施加将增大磁化强度的滞回, 同时使滞回曲线向大压应力方向偏移; 磁弹性效应中磁畴偏转的滞回存在两个临界磁场强度, 不同磁场强度下合金具有不同的磁畴偏转路径和磁化滞回曲线, 临界磁场强度的大小取决于预压应力的施加. 理论分析对类磁致伸缩材料磁畴偏转模型的完善和材料器件的设计应用非常有意义.

关键词: Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂ 合金, 各向异性, 磁畴偏转, 滞回特性

PACS: 75.80.+q, 75.60.-d, 75.60.Ej, 75.30.Gw

DOI: 10.7498/aps.65.067501

1 引言

区别于其他磁性材料, 超磁致伸缩材料 (giant magnetostrictive material, GMM) 在磁场和应力作用下具有非常优越的磁-机耦合效应, 在制动和传感领域均具有较好的应用, 例如精密加工、阀门应用和传感器等^[1-3], 其中 TbDyFe 合金 (Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂, 又称 Terfenol-D) 是国内外超磁致伸缩材料商品化应用较广的一种产品, 其优越的压磁和磁弹性效应是合金具有较好应用的关键^[4-6]. 超磁致伸缩材料具有较大的各向异性, 反复磁化过程中, 磁场和应力作用下材料内磁畴的偏转非常复杂^[7-9], 磁化过程和磁状态的描述较为困难, 载荷 (磁场和应力) 作用下磁畴偏转模型的建立完善和磁化滞回特性的数学描述是材料在驱动和传感领域更好应用的关键.

大量实验表明, 超磁致伸缩材料在反复磁化过

程中, 磁化曲线和应变量曲线都存在明显的滞回现象, 载荷作用下磁化过程的数学描述和磁状态的应用设计较为困难, 目前对材料磁化过程的理论解释和数学描述较简单, 主要通过单畴偏转模型中磁畴角度的偏转来研究^[10-15], 文献集中于采用磁畴偏转分析方法研究材料的磁致伸缩机理, 其中 Jiles 和 Thoelke^[16] 指出磁化过程中的大磁致伸缩效应来源于 90° 磁畴偏转, 但其对磁畴偏转的描述和各向异性的分析较为简单; 文献^[17-19] 通过能量极值问题的数学求解, 分析对比了 TbDyFe 和 FeGa 合金的各向异性, 但求解过程非常复杂, 且求解只针对单个极值问题, 对磁化过程的进一步研究较困难; 文献^[20] 通过绘制能量关系曲线的方法, 直观有效地求解了 Terfenol-D 材料的极值问题, 解释分析了压磁和磁弹性效应中的磁致伸缩机理, 但其研究集中于分析方法的提出和验证, 只是简单描述了单次加载下的磁状态, 并未分析反复磁化过程中磁畴偏转的路径和跃迁、滞回效应, 对磁畴偏转的磁

* 国家自然科学基金 (批准号: 51407157, 51307027) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: d_enip@163.com

状态和滞回过程描述较为简单.

磁化过程中, 滞回特性的存在使超磁致伸缩材料在某一载荷作用下存在多个磁状态稳定点, 不同的磁状态使材料具有不同的磁化曲线和磁化特性, 通过求解 TbDyFe 合金自由能的极值问题, 研究压磁和磁弹性过程中载荷作用下的磁畴角度偏转, 建立完善磁畴偏转的数值模型, 以描述超磁致伸缩材料磁化过程中的磁状态和滞回特性.

本文基于 Stoner-Wohlfarth (S-W) 模型的能量极小原理, 通过求解分析超磁致伸缩材料单畴自由能的极值问题, 研究了压磁和磁弹性效应中磁畴的偏转和磁化过程, 以研究分析超磁致伸缩材料在不同载荷下磁畴偏转的跃迁、滞回特性, 为超磁致伸缩材料在传感和制动领域应用的拓展提供理论依据.

2 磁畴偏转的数值模型

不同载荷作用下超磁致伸缩材料的滞回特性可通过磁畴的偏转路径来进行研究. 取 Terfenol-D 材料内一单畴颗粒作为磁畴偏转模型 (S-W 模型)^[21] 的研究对象, 通过材料内单畴颗粒自由能非线性方程组极值问题的求解, 来研究 TbDyFe 合金内磁畴偏转的有效路径, 进而描述材料的磁化过程和滞回特性. 在外在载荷 (应力 σ 和磁场 H) 作用下, 考虑各向异性^[22] 的影响, 单畴颗粒的自由能^[23,24] 可表示为

$$E = K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_1^2\alpha_3^2) + K_2(\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2) - \frac{3}{2}\lambda_{100}\sigma(\alpha_1^2\beta_1^2 + \alpha_2^2\beta_2^2 + \alpha_3^2\beta_3^2) - \lambda_{111}\sigma(\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2 + \alpha_2\alpha_3\beta_2\beta_3 + \alpha_1\alpha_3\beta_1\beta_3) - \mu_0\mathbf{M}_s H_e(\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2 + \alpha_3\beta_3), \quad (1)$$

其中磁晶各向异性能 E_k (第一、二项), 应力各向异性能 E_σ (第三、四项) 和磁化能 E_H (第五项) 都会影响磁畴角度的偏转角度和路径. $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 为磁化强度 \mathbf{M} 的方向余旋; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 为外加应力 σ 的方向余旋; K_1 和 K_2 为磁晶各向异性常数; $\lambda_{100}, \lambda_{111}$ 分别为材料在 $\langle 100 \rangle$ 和 $\langle 111 \rangle$ 方向的磁致伸缩系数, H_e 为材料内部的有效磁场强度.

图 1 为超磁致伸缩晶体颗粒中磁畴矢量 \mathbf{M} 与各晶轴间的关系示意图, 图中所示立方晶体为超磁致伸缩材料的单一晶体颗粒, \mathbf{M} 为一个易磁

化方向, 在各晶轴方向上的投影分别为: $\alpha_1\mathbf{M}, \alpha_2\mathbf{M}, \alpha_3\mathbf{M}$; [112] 方向为应力和磁场的加载方向, 应力/磁场的作用将使得磁畴 \mathbf{M} 向 [112] 载荷方向偏转. 为了方便非线性方程组极值的求解和后文磁畴偏转的跃迁、滞回特性分析, 本文提取磁畴从易磁化方向所偏转的角度 θ 作为研究对象, 颗粒的自由能可表示为 $E(\theta)$, 则材料的磁化强度 \mathbf{M} 可通过 (2) 式来分析, 其中 θ_0 为无载荷作用下易磁化方向与磁场强度的夹角, \mathbf{M}_s 为材料的饱和磁化强度.

$$\frac{\mathbf{M}}{\mathbf{M}_s} = \alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2 + \alpha_3\beta_3 = \cos(\theta_0 - \theta). \quad (2)$$

由 S-W 模型能量极小原理可知, 磁畴偏转角度 θ 可通过非线性方程 (1) 极值问题的求解得到, 即 $\partial E(\theta)/\partial \theta = 0$ 求解得到, 由于方程 (1) 极值求解困难且可能同时存在多个极值解, 为了便于极值的求解和有效极值的判断选取, 在此绘制 $E(\theta)-\theta$ 的关系曲线, 通过计算机编程进行数值的逼近求解, 此方法可直观有效地描述不同载荷下磁畴的偏转和极值的选取, 进而分析磁畴偏转的磁化过程和滞回特性.

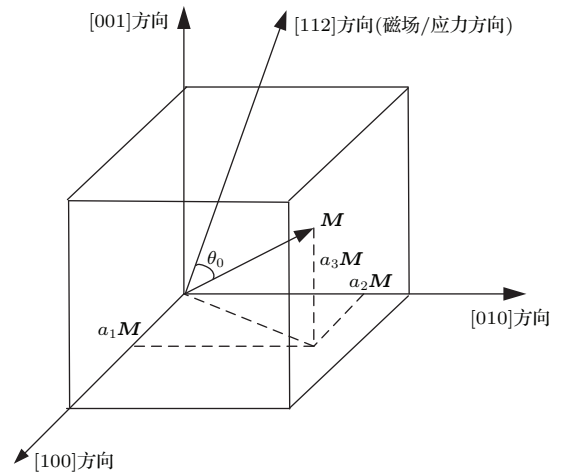


图 1 超磁致伸缩晶体颗粒中磁畴矢量关系示意图
Fig. 1. Vector diagram of the magnetic domain in the crystal particle of GMM.

在超磁致伸缩材料中, 外应力 σ 和磁场强度 H 施加于方向 [112] 上, 材料的主要参数 (文献 [17]) $K_1 = -0.06 \times 10^6 \text{ J/m}^3, K_2 = 0 \text{ J/m}^3, \lambda_{100} = 50 \times 10^{-6}, \lambda_{111} = 1640 \times 10^{-6}$. 其中, Terfenol-D 材料具有非常大的磁晶各向异性常数 (且为负值), 这是超磁致伸缩材料区别于其他铁磁材料的关键特性. 在无应力和磁场载荷作用时, 材料的易磁化方向为 $\langle 111 \rangle$, 包括 $[111], [\bar{1}11], [\bar{1}\bar{1}\bar{1}], [\bar{1}\bar{1}1], [11\bar{1}], [1\bar{1}\bar{1}], [1\bar{1}1]$ 和 $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ 8 个方向, 各易磁化

方向角度 θ_0 参见表 1. 考虑易磁化方向具有对称性, 只需研究 $[111]$, $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$, $[\bar{1}11]$, $[1\bar{1}\bar{1}]$ 四个方向磁畴的偏转特性 (其中 $[\bar{1}11]$ 和 $[1\bar{1}\bar{1}]$ 方向磁畴偏转特性一致). 材料的磁化强度 M/M_s 可通过磁畴偏转角度计算得到:

$$\frac{M}{M_s} = \sum_i^4 \frac{\cos(\theta_0 - \theta_i)}{4}. \quad (3)$$

表 1 超磁致伸缩材料易磁化方向角度 θ_0 大小
Table. 1. Values of angle θ_0 in differ easy axis direction $\langle 111 \rangle$.

磁畴方向	$\theta_0/(\circ)$
$[111]$	19.46
$[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ $[\bar{1}11]$	61.87
$[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ $[1\bar{1}\bar{1}]$	90
$[1\bar{1}\bar{1}]$ $[\bar{1}11]$	118.13
$[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$	160.54

3 分析与讨论

3.1 压磁效应中的滞回特性

压磁效应是超磁致伸缩材料在传感器中应用的主要效应, 压应力的施加会使材料的磁化发生改变, 进而实现材料的传感应用. 各向异性的存在使得压应力作用下磁畴的偏转较为复杂, 反复压应力的加载将使得磁畴偏转具有跃迁和滞回效应. 图 2 为根据自由能方程绘制得到的不同预加磁场下 $[111]$ 方向 $E-\theta$ 关系曲线, 从图中可知, 在无载荷 (磁场和应力) 作用下, 磁畴角度不发生偏转 ($\theta = 0$), 压应力的增大将使得各方向磁畴的自由能增大, 从而需寻找新的能量极值点, 磁畴发生相应的偏转. 但不同预加磁场下 $[111]$ 方向磁畴偏转的差异较为明显, 在无预加磁场作用下时, 小压力的作用使得磁畴发生小角度偏转, 当压应力达到 -8 — -9 MPa 时, 磁畴的偏转将发生跃迁, 跳跃到能量更小更稳定的极值点, 此跃迁能储存大量的 90° 磁畴. 考虑应力反复加载的作用, 当应力减小到 0 MPa 时, 由于能量势垒的存在, 磁畴不可能回到原始平衡位置 ($\theta = 0$), 而是停留在新的平衡位置 ($\theta = -1.232$), 此后压应力的作用将使磁畴偏转角度 θ 在 $[-1.389, -1.232]$ 间变化, 不存在磁畴偏转的跃迁和滞回现象; 在施加 17.2 kA/m 和 34.4 kA/m

预加磁场作用时, 磁畴的偏转将同时具有跃迁和滞回效应, 其中 17.2 kA/m 预加磁场作用下, 当压应力增大到 -16 — -17 MPa 时, 磁畴将跃迁到能量更小、更稳定的极值位置, 此时磁畴偏转的有效极值在新的平衡区域中选取, 而当压应力减小到

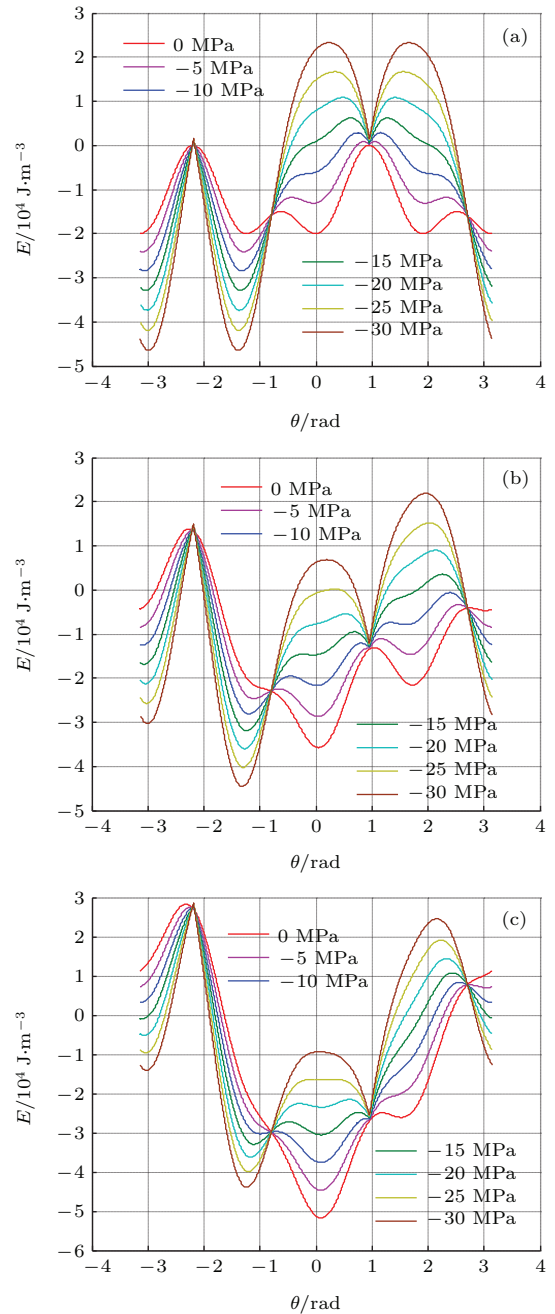


图 2 (网刊彩色) 不同压应力下 $[111]$ 方向磁畴自由能 E 与磁畴偏转角度 θ 关系 (a) 无预加磁场; (b) 17.2 kA/m 预加磁场; (c) 34.4 kA/m 预加磁场

Fig. 2. (color online) Relation between the free energy E and magnetic rotation angle θ for the $[111]$ direction domain with differ compressive stress: (a) No basic magnetic field; (b) 17.2 kA/m basic magnetic field; (c) 34.4 kA/m basic magnetic field.

-1—-2 MPa 时, 磁畴将回到原始平衡区域, 整个过程呈现明显的滞回效应, 预加磁场的增大会使滞回效应发生偏移, 34.4 kA/m 预加磁场下的磁畴跃迁值为 -25—-26 MPa 和 -8—-9 MPa. 采用绘制能量关系曲线的求解方法不仅能够直观有效地确定极值解, 且有利于研究磁畴的偏转过程和滞回特性.

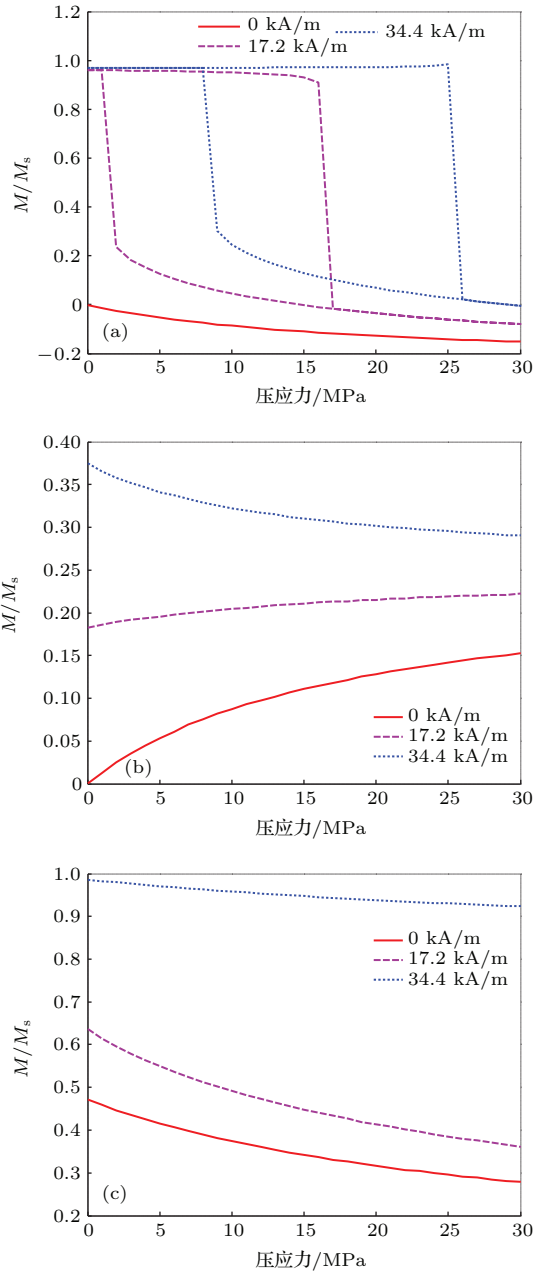


图3 (网刊彩色) 不同预加磁场下单方向磁畴偏转的磁化强度滞回曲线 (a) [111] 方向; (b) $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ 方向; (c) $[\bar{1}\bar{1}1][\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ 方向

Fig. 3. (color online) Hysteretic loop of the magnetization for the rotation of magnetic domain with differ basic magnetic field: (a) Domain in [111] direction; (b) domain in $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ direction; (c) domain in $[\bar{1}\bar{1}1][\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ direction.

图3为通过磁畴偏转角度所绘制的磁化强度 M 的滞回曲线, 方向 [111] 在预加磁场 (17.2 kA/m 和 34.4 kA/m) 下, 压应力和磁化强度间存在较大的滞回现象, 其中预加磁场的增大会使滞回向大压应力方向偏移, 且滞回区域也将有所增大, 且滞回曲线中磁畴偏转的跃迁 (M/M_s 在 0—1 间跃迁) 是大磁致伸缩效应的关键, 无磁场作用下 [111] 方向压应力和磁化强度呈简单的单调关系; $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ 方向在小预加磁场下, 磁化强度 M 随着压应力的增大而增加, 中磁场 (34.4 kA/m) 下, 磁化强度 M 随着压应力的增大而减小, 其主要是因为磁场对磁畴的偏转作用大于应力的作用, 预加 34.4 kA/m 磁场使得磁畴具有大角度偏转, 偏离压应力作用的平衡位置, 此时压应力的施加会使磁化强度较小; $[\bar{1}\bar{1}1]$ 和 $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ 方向磁畴的磁化强度曲线在预加磁场 34.4 kA/m 下变化很小, 进一步验证了磁场对磁畴的偏转作用大于应力的作用.

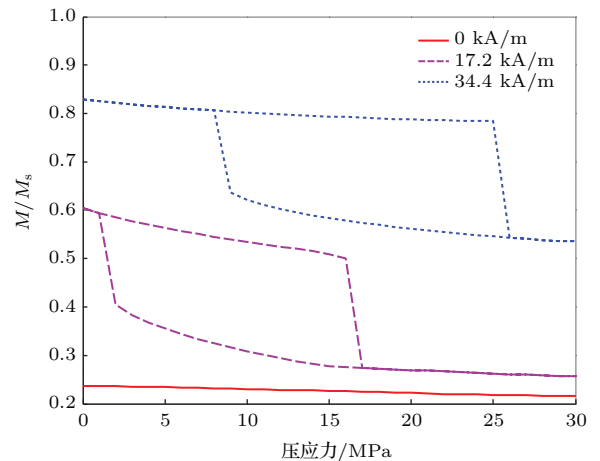


图4 (网刊彩色) 压应力作用下磁化强度滞回特性
 Fig. 4. (color online) Hysteretic loop of the magnetization with differ pre-compressive stress.

通过图3计算的结果和(3)式可计算得到超磁致伸缩材料压磁效应中磁化强度的滞回曲线, 考虑磁畴偏转的对称性, 计算中, [111] 方向磁化强度 M 为负的数据需进行绝对值处理, 结果如图4所示. 在无预加磁场作用时, 磁化强度和压应力间呈单调线性关系, 但是由于压应力作用下磁化强度的变化数值较小, 不利于传感器应用中精度的选取设计, 预加磁场的增加使磁化强度的变化数值增大, 有利于传感器的应用设计, 但是磁场的增加将增大磁化强度的滞回特性, 所以传感器设计应用时需选定某一线性工作区域, 此分析方法可用于压磁效应中磁

化强度滞回特性的研究和实际传感器应用设计的理论指导.

通过以上研究可知, 预加磁场的施加使得超磁致伸缩材料磁化强度出现滞回效应, 其主要来源于压应力作用下 [111] 方向磁畴的跃迁, 滞回曲线随着预加磁场的增加而增大, 且向大压应力方向偏移; 适当预加磁场的施加有利于材料传感应用的设计和工件点的选取.

3.2 磁弹性效应中的滞回特性

磁弹性效应是指材料在磁化过程中具有大的磁致伸缩效应, 是其在致动器中应用的关键, 作为一种磁性材料, 磁场的反复作用会使超磁致伸缩材料具有磁滞效应, 本文通过磁畴偏转的数值模型对磁弹性过程中反复磁化的滞回效应展开研究, 以明确不同载荷下的磁畴的偏转路径、磁化过程和滞回效应.

图 5 是 [111] 方向磁畴在 -10 MPa 压应力下单畴自由能的关系曲线, 从图中可知, 自由能 E 是磁畴偏转角度的周期函数, 其周期为 2π . 与压磁效应中的磁畴偏转类似, 压磁效应中磁畴的偏转也存在跃迁和滞回现象, 但其过程更加复杂, 压磁效应中只存在压应力的作用, 磁畴偏转的路径较为简单. 滞回和跃迁现象主要集中于两个区域间的磁畴角度偏转, 在磁弹性过程中, 以 [111] 方向磁畴偏转为例, 将磁畴偏转角度 θ 的取值处于 $[-0.5, 0.5]$, $[-2.5, -3]$, $[2.5, 3.5]$ 分别记作区域 A, B, C. 磁畴偏转的路径将在某一个或多个区域中变化, 比如在单磁化和反复磁化两个过程中, 磁化的极值选取和磁化路径存在明显差异, 在单磁化过程中, 无磁场作用时, 磁畴偏转角度 $\theta = -1.319$ (靠近 B 区域), 当磁场强度增加时, 磁畴偏转角度将向 A 区域变化, 可以将此单磁化过程简单视为由 B 区域向 A 区域磁畴的偏转. 但在反复磁化过程中, 当磁场强度达到正的最大值 (103.2 kA/m) 时, 磁畴偏转角度为 $\theta = -0.2073$ (A 区域); 当磁场强度由正向负减小时, 材料内部自由能将逐渐增大, 同时磁畴偏转角度将由区域 A 向区域 B 变化, 以寻找稳定的极值点, 在 0 kA/m 和 -60.2 kA/m 时发生磁畴跃迁; 当磁场强度减为 -103.2 kA/m 时, 磁畴偏转角度为 $\theta = -2.948$ (B 区域), 当磁场强度由负值开始增加时, 在能量关系曲线中磁畴的偏转将依旧向左运动; 考虑能量关系曲线的周期性, 区域 B 可与区域

C 进行等效分析, 所以磁场强度的增加将使磁畴偏转角度由区域 C 回到区域 A 完成循环. 所以反复磁场作用下的磁滞回线将经历 A—B(C)—A 过程, 而此循环中的磁化过程为由 C 区域向 A 区域磁畴偏转, 路径与单一磁化过程完全不同.

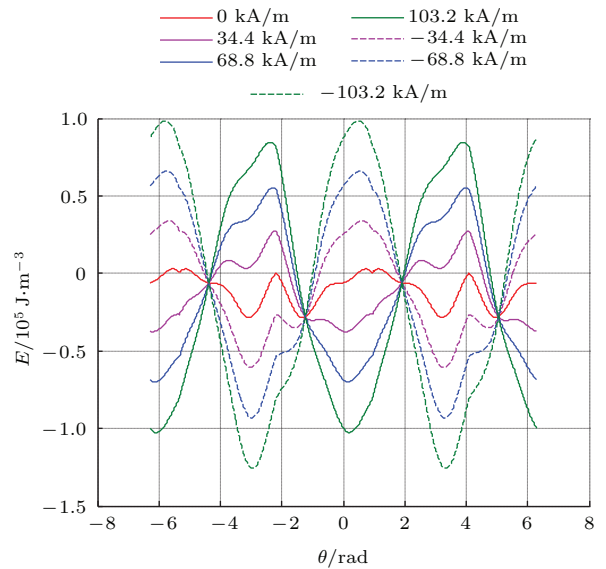


图 5 (网刊彩色) 压应力 -10 MPa 下 [111] 方向的能量关系曲线

Fig. 5. (color online) Curves of the free energy for the domain in [111] direction with -10 MPa compressive stress.

在大幅值磁场作用下, [111] 方向磁畴的偏转将经历 A—B(C)—A 过程, 且该过程中将发生几次磁畴偏转的跃迁. 而对于中小磁场作用下磁畴的偏转相对较为复杂, 因为在磁畴偏转的跃迁过程中, 中小磁场不足以提供足够大的能量以跨越能量势垒, 来完成磁畴偏转的跃迁, 导致反复磁化过程停留在 A—B, C—A 或单一的 A, B, C 区域. 图 6 是三个不同磁场 (34.4, 58.48, 103.2 kA/m) 下磁化强度的滞回曲线. 在 34.4 kA/m 幅值磁场作用时, 磁畴偏转在反复磁化过程中路径惟一 (单一的 A, B, C 区域), 磁化强度为一单调变化曲线; 当磁场强度幅值增大到 58.48 kA/m 时, 磁畴偏转具有滞回效应 (路径在 A—B 或 C—A 区域间变化), 其中 [111] 方向在 34.4 kA/m 具有滞回跃迁, $[\bar{1}\bar{1}1]$ 方向, $[\bar{1}11]$ 和 $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ 方向在 -34.4 kA/m 时发生滞回跃迁; 当磁场强度幅值增大到 103.2 kA/m 时, 各方向磁畴的滞回曲线将进一步扩大, 磁畴偏转经历 A—B(C)—A 过程. 所以, 在超磁致伸缩材料磁畴偏转的过程中, 34.4 kA/m 和 58.48 kA/m 是两个磁畴偏转路径的

临界磁场, 当磁场强度幅值小于 34.4 kA/m 时, 磁畴偏转存在于某一单区域, 不存在滞回现象; 当磁场强度幅值小于 58.48 kA/m 时, 磁畴偏转集中于某两区域间转换, 存在磁畴偏转的跃迁和小角度滞回; 当磁场强度幅值大于 58.48 kA/m 时, 磁畴偏转在三区域间循环, 磁化强度具有非常大的跃迁、滞回效应。

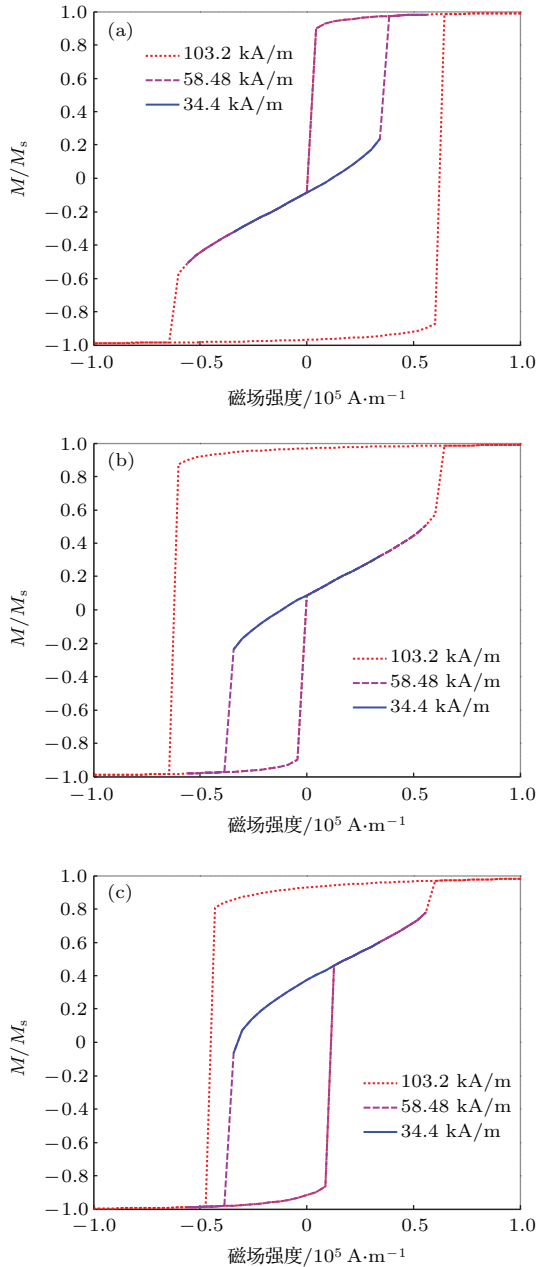


图6 (网刊彩色) 压应力 -10 MPa 下, 不同幅值磁场下单方向磁畴偏转的滞回曲线 (a) [111] 方向; (b) $[\bar{1}\bar{1}1]$ 方向; (c) $[\bar{1}\bar{1}1][111]$ 方向
Fig. 6. (color online) Hysteretic loop of the magnetization with -10 MPa compressive stress and differ basic magnetic field: (a) Domain in [111] direction; (b) domain in $[\bar{1}\bar{1}1]$ direction; (c) domain in $[\bar{1}\bar{1}1][111]$ direction.

图7和图8为超磁致伸缩材料磁畴偏转的滞回曲线. 其中图7为 -10 MPa 下不同磁场幅值作用下磁畴偏转的滞回曲线, 从图中可知, 小幅值磁场 (≤ 34.4 kA/m) 下磁化强度与磁场呈正比例关系, 不存在滞回跃迁现象; 中幅值磁场 (≤ 58.48 kA/m) 下磁化强度出现滞回现象, 且滞回曲线中存在多个跃迁点, 负磁场作用下的滞回现象大于正磁场的作用; 大幅值磁场 (> 58.48 kA/m) 作用时, 磁化强度的滞回现象更加明显. 图8为不同压应力下磁化强度的滞回曲线, 从图中可知, 压应力的增大将增加磁畴偏转的跃迁点, 且滞回曲线更加平滑。

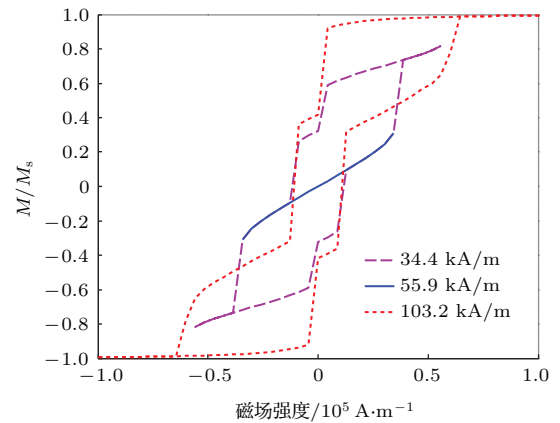


图7 (网刊彩色) 不同幅值磁场下磁畴偏转的滞回曲线
Fig. 7. (color online) Hysteretic loop of the magnetization with differ basic magnetic field.

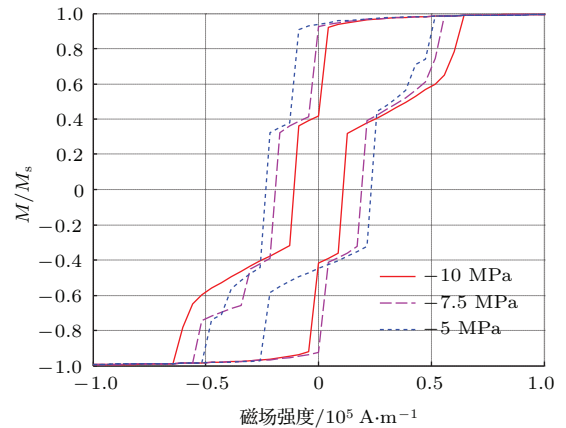


图8 (网刊彩色) 不同压应力下磁畴偏转的滞回曲线
Fig. 8. (color online) Hysteretic loop of the magnetization with differ pre-compressive stress.

图9为计算和实验测试得到的超磁致伸缩材料在反复磁化过程中退磁曲线的剩磁结果对比, 其中, 拟合曲线为根据理论计算数据 (不包含 5 MPa 以下结果) 的拟合结果, 实验结果 (1) 来自于文献 [25], 实验结果 (2) 为本课题组的实测结果 (由于目

前市场上并不存在绝对标准的单晶超磁致伸缩材料, 实验选用纯度较高的准单晶超磁致伸缩材料, 其 {112} 方向晶轴取向颗粒百分比大于 0.85). 从图 8 中可知, 拟合曲线结果与实验结果 (1) 和 (2) 符合较好, 验证了理论计算结果的正确性, 同时拟合曲线能够较好地描述压应力下的剩磁曲线特性. 需要指出的是, 拟合曲线并不包含 5 MPa 压应力下的剩磁结果, 这主要是因为 5 MPa 压应力附近存在一个不稳定的磁畴角度跃迁点 (见文献 [20]), 在未考虑磁畴壁、磁畴偏转间相互影响及理论模型修正的前提下, 易导致较大的理论计算误差. 参照图 9 与文献 [24—26] 中的实验测试结果可知, 压应力的作用将使得材料退磁过程中的剩磁减小, 其中 15 MPa 压应力内剩磁数值减小明显, 表明在 0—15 MPa 压应力内超磁致伸缩材料具有较大的磁变化效应, 这与磁致伸缩器件工程应用中 5—15 MPa 的压应力设定相一致. 且从计算与实验结果的对比可知, 在小压应力 (10 MPa 内) 作用下, 剩磁的计算结果与实验结果相差较大, 5 MPa 压应力下的理论和实验结果误差尤为明显, 且理论计算的数值高于实验测试结果, 这主要是因为理论模型研究中并未考虑畴壁和磁畴偏转间的相互影响, 所选用的磁畴模型为理想状态下的磁畴偏转模型, 导致计算过程中 5 MPa 压应力附近出现较大的磁畴跃迁现象, 而从图 9 中实验测试结果可知, 0—10 MPa 压应力内剩磁的下降较为平缓; 当压应力 ≥ 10 MPa 时, 剩磁的计算与实验结果符合较好, 论证了理论计算方法的正确性. 考虑磁畴壁、磁畴间相互作用等因素对磁畴偏转/跃迁现象的影响, 完善本文所提磁畴偏转模型的修正是本课题组未来工作的重点.

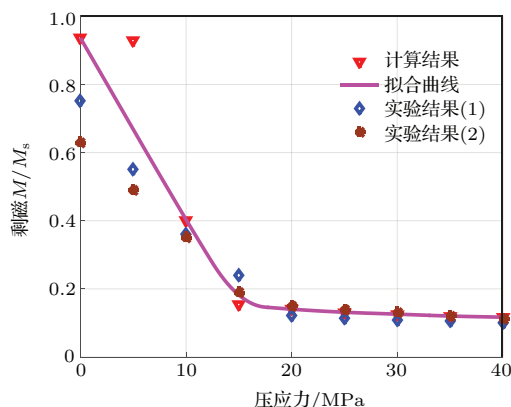


图 9 (网刊彩色) 不同压应力下剩磁的计算与实验结果比较
Fig. 9. (color online) Comparison of the magnetic remanence between calculation and experiment with differ pre-compressive stress.

与压磁效应中的磁畴偏转的滞回特性相似, 在磁化过程中, 磁化强度的滞回依旧来自磁畴偏转的跃迁, 但磁弹性效应中磁畴偏转的跃迁较为复杂, 且存在两个临界磁场强度和多个磁畴跃迁点, 不同幅值磁场作用下磁畴偏转的路径不一, 导致磁化曲线有明显差异; 压应力的增加将增大临界磁场强度, 同时使得磁化强度滞回曲线趋于平滑.

4 结 论

通过求解 $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$ 合金单畴自由能的极值问题, 研究了压磁效应和磁弹性效应中磁畴偏转的跃迁、滞回效应. 理论结果表明, 载荷作用下磁畴偏转角度的跃迁是磁化强度具有滞回效应的关键; 压磁效应中预加磁场的施加将增大磁化强度的滞回效应, 且使滞回曲线发生偏移, 预加磁场的施加将改善磁化强度-压应力间的线性关系, 有利于合金在传感器中的设计应用; 在材料磁弹性效应中, 磁畴偏转的滞回特性存在两个临界磁场强度, 不同幅值磁场作用下磁畴偏转的路径不同, 小磁场下磁化强度为单调曲线, 中磁场下磁化强度具有小滞回曲线, 在大磁场强度下磁化强度的滞回曲线非常明显, 临界磁场强度的大小取决于预加压应力的施加. 计算方法直接有效地研究了超磁致伸缩材料内磁畴偏转的路径和磁化强度的滞回特性, 对材料在传感、执行中的应用拓展和其他铁磁材料磁化特性的描述、数值模型的建立非常有意义.

参考文献

- [1] Eason G, Noble B, Sneddon I N 2000 *Sensors and Actuators* **81** 275
- [2] Bottauscio O, Roccatto P E, Zucca M 2010 *IEEE Trans. Magn.* **46** 3022
- [3] Zucca M, Roccatto P E, Bottauscio O, Beatrice C 2010 *IEEE Trans. Magn.* **46** 183
- [4] Grunwald A, Olabi A G 2008 *Sensors and Actuators A* **144** 161
- [5] Karunanidhi S, Singaperumal M 2010 *Sensors and Actuators A* **157** 185
- [6] Davino D, Giustiniani A, Visone C 2010 *IEEE Trans. Magn.* **46** 646
- [7] Cullity B D, Graham C D 2009 *Introduction to Magnetic Materials* (New Jersey: Wiley) p258
- [8] Zheng L, Jiang C B, Shang J X, Xu H B 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1647
- [9] Wang Z B, Liu J H, Jiang C B 2010 *Chin. Phys. B* **19** 117504
- [10] Clark A E, Yoo J H, Cullen J R, Fogle M W, Petculescu G, Flatau A 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 07A913

- [11] Yan J C, Xie X Q, Yang S Q, He S Y 2001 *J. Magn. Mater.* **223** 27
- [12] Mei W, Umeda T, Zhou S, Wang R 1997 *J. Alloys Compd.* **248** 151
- [13] Liu J H, Wang Z B, Jiang C B, Xu H B 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 033913
- [14] Chen Y H, Jiles D C 2001 *IEEE Trans. Magn.* **37** 3069
- [15] Clark A E, Savege H T, Spano M L 1984 *IEEE Trans. Magn.* **20** 1443
- [16] Jiles D C, Thoenke J B 1994 *J. Magn. Mater.* **134** 143
- [17] Zhang H, Zeng D C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2808 (in Chinese) [张辉, 曾德长 2010 物理学报 **59** 2808]
- [18] Zhang H, Zeng D C, Liu Z W 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 067503 (in Chinese) [张辉, 曾德长, 刘仲武 2011 物理学报 **60** 067503]
- [19] Zhang H, Zeng D C 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 123918
- [20] Li L Y, Yan B P, Zhang C M, Cao J W 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 167506 (in Chinese) [李立毅, 严柏平, 张成明, 曹继伟 2012 物理学报 **61** 167506]
- [21] Stoner E C, Wohlfarth E P 1948 *Philos. Trans. Roy. Soc. London. A* **240** 599
- [22] Mei W, Okane T, Umeda T 1998 *J. Appl. Phys.* **84** 6208
- [23] Armstrong W D 2002 *J. Inter. Mater. Syst. Struct.* **13** 137
- [24] Armstrong W D 1997 *J. Appl. Phys.* **81** 3548
- [25] Zhao X G, Lord D G 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 7276
- [26] Zhang H 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 232505

Study on hysteresis characteristics of magnetic domain rotation in $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_2$ alloy*

Yan Bai-Ping^{1)†} Zhang Cheng-Ming²⁾ Li Li-Yi²⁾ Lü Fu-Zai¹⁾ Deng Shuang¹⁾

1) (State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

2) (Institute of Electromagnetic and Electronic Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(Received 23 November 2015; revised manuscript received 4 January 2016)

Abstract

In this paper, the rotation effects of magnetic domain with different pre-compressive stress and basic magnetic field in the $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_2$ alloy have been studied, the curves of magnetization induced by the rotation of magnetic domains are calculated, and the hysteresis characteristics of magnetization in the process of piezomagnetic and magnetoelastic effects are summarized. Based on the minimal value principle of three-dimensional Stoner-Wohlfarth (S-W) model, the total free energy of magnetostrictive particles (including magneto-crystal line anisotropy energy, stress-induced anisotropy energy, and magnetic field energy) is calculated, the curve of free energy is plotted as a function of domain rotation angle for various compressive stresses and magnetic fields. Then, the values of rotation angle for the magnetic domains in the eight easy axial directions $\langle 111 \rangle$ are given, and the summation values of magnetization induced by the rotations of magnetic domain angle are analyzed, the hysteresis characteristics and the hysteresis loops of magnetic domain rotations are calculated and discussed. All the above results indicate that the rotations of magnetic domains in the TbDyFe alloy have hysteresis and transition effects in its piezomagnetic and magnetoelastic processes, and the hysteresis effect of magnetization is always induced by the irreversible transitions of domain angle rotation. Due to the load of magnetic field and compressive stress, the angle of the eight easy axial domains $\langle 111 \rangle$ will rotate to the more suitable free energy directions, the reversible and irreversible transitions of domain rotation appear in this rotation, and irreversible transition will induce a larger value of changes in the magnetization existing as a hysteresis loop. Also, in the piezomagnetic effect, magnetization hysteresis loop appears with the load of basic magnetic field, and the increase of magnetic field will help to enhance its hysteresis loop and lead to the hysteresis curve deflected toward the greater compressive stress direction. Thirdly, the hysteresis effects of magnetic domain rotation have two important critical magnetic fields in the magnetoelastic process: the magnetostrictive materials will have different domain rotation paths and hysteresis curve in different basic magnetic fields, and the value of critical field will be influenced by the load of pre-compressive stress. Lastly, the experimental testing is used to verify the model and calculations, and the test results of magnetic remanence are in good agreement with the calculated results, especially in the larger values of pre-compressive stress loads. The above computations have a significance for perfecting magnetic domain deflection model and the results are helpful for designing and analyzing of magnetostrictive materials in application.

Keywords: $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_2$ alloy, anisotropy, domain deflection, hysteresis characteristics

PACS: 75.80.+q, 75.60.-d, 75.60.Ej, 75.30.Gw

DOI: 10.7498/aps.65.067501

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51407157, 51307027).

† Corresponding author. E-mail: d_enip@163.com