

反铁磁耦合硬磁-软磁-硬磁三层膜体系的不可逆交换弹性反磁化过程*

郭光华[†] 张光富 王希光

(中南大学物理科学与技术学院,长沙 410083)

(2010年8月9日收到;2011年1月11日收到修改稿)

采用一维原子链模型研究了反铁磁耦合的硬磁/软磁/硬磁三层膜体系的反磁化过程. 研究表明,当考虑了软磁层的磁晶各向异性后,软磁层厚度和界面交换耦合强度的改变都有可能引起软磁层的交换弹性反磁化过程由可逆过程转变为不可逆过程. 对软磁层很薄的体系,其反磁化过程是典型的可逆交换弹性反磁化过程. 然而,当软磁层厚度超过某一临界厚度 t_c 时,反磁化过程转变为不可逆的交换弹性反磁化过程. 软磁-硬磁界面交换耦合强度 A_{sh} 对反磁化行为也有很大的影响. 对于软磁层厚度小于临界厚度 t_c 的体系,也存在一个临界界面交换耦合强度 A_{sh}^c . 当 A_{sh} 大于 A_{sh}^c 时,软磁层的反磁化过程是可逆的交换弹性反磁化过程;而当 A_{sh} 小于 A_{sh}^c 时,这一过程变为不可逆. 给出了体系的可逆与不可逆交换弹性反磁化过程随软磁层厚度和界面交换耦合强度变化的磁相图. 同时还研究了偏转场随软磁层厚度的变化关系.

关键词: 反铁磁耦合三层膜, 交换弹性反磁化过程, 反磁化机理, 磁相图

PACS: 75.60.Jk, 75.60.Ch, 75.75.+a

1. 引言

由于理论上预言交换耦合的软-硬磁纳米双相磁体拥有高达 120 MGOe ($1 \text{ Oe} = 79.5775 \text{ A/m}$) 的磁能积^[1,2], 因此, 自从其被提出以来, 就受到人们广泛关注, 是目前磁学以及磁性材料领域中一个重要的研究领域. 然而由硬、软磁构成的颗粒复合体系, 由于其微结构难于满足理论的要求, 到目前为止实验上制备的软-硬磁纳米双相磁体的磁能积一般都远小于其理论值. 相对于纳米双相复合颗粒体系而言, 由铁磁或反铁磁交换耦合的软-硬磁双层或多层膜体系, 由于其结构参数和磁参数易于调制, 在实验上更易于实现理论上所预言的超高磁能积. 此外, 通过对结构参数和磁参数(如硬、软磁层的厚度, 界面交换耦合强弱等)的控制, 也更容易从理论上研究这类交换弹性磁体的性质, 如反磁化机理, 矫顽力性质等^[3-7]. 已有的研究表明^[1,2,8,9], 对铁磁交换耦合的软-硬磁双层或多层膜, 存在一个临界软磁层厚度 t_s , 当软磁层厚度小于 t_s 时, 软、硬磁层之

间完全耦合, 在反磁化过程中软、硬磁同时反转. 对于软磁层厚度大于 t_s 的体系, 反磁化过程通过两步完成, 首先是在软磁层中发生交换弹性反磁化过程 (exchange-spring process), 即当外场大于软磁层的偏转场 H_b 时^[10] (有的文献中称这个场为形核场或交换偏置场), 在软磁层中沿着膜厚度的方向形成螺旋式的磁结构, 在界面处的软磁磁矩由于界面交换耦合被硬磁层钉扎住. 当外场进一步增大到硬磁层的反转场时, 硬磁层发生不可逆的磁反转. 一般认为, 软磁层中发生的交换弹性反磁化过程是一个可逆过程, 且当软磁层界面磁矩完全钉扎时, 偏转场 H_b 与软磁层厚度的平方成反比^[10,11].

我们对反铁磁交换耦合的软磁-硬磁双层膜体系的研究发现, 当考虑软磁层的磁各向异性时, 交换弹性反磁化过程表现出新的特性^[12]. 存在另一个软磁层临界厚度 t_c , 当软磁层厚度 t 小于 t_c 时, 其反磁化过程表现出典型的可逆交换弹性反磁化过程; 而当 $t > t_c$ 时, 软磁层中的交换弹性反磁化过程转变为不可逆过程. 实验上这种不可逆交换弹性反磁化过程在铁磁和反铁磁交换耦合的双层膜中

* 国家自然科学基金(批准号:60571043)和湖南省自然科学基金(批准号:07JJ3103)资助的课题.

[†] E-mail: guogh@mail.csu.edu.cn

都被观察到^[3,13,14].

除了软磁层的厚度外,软、硬磁界面交换耦合强度也是影响交换耦合双层膜或多层膜体系磁性能的一个重要参数^[5,15]. 在本文中我们较详细的研究了反铁磁耦合的硬磁-软磁-硬磁三层膜体系中界面交换耦合强度和软磁层厚度对交换弹性反磁化过程的影响,发现在这一体系中,如果考虑软磁层的磁各向异性性能,不仅软磁层的厚度,界面交换耦合强度的改变也会引起交换弹性反磁化过程由可逆向不可逆过程的转变.

2. 理论模型

对于交换耦合的软-硬磁双层或多层膜体系,在反磁化过程中,由于塞曼能和软、硬磁界面交换耦合能之间的相互竞争导致沿软磁层厚度方向磁化强度出现连续偏转,形成布洛赫畴壁形式的螺旋磁结构(即交换弹簧). 因此,一维连续介质微磁学模型^[8-10]或一维原子链模型^[3,11,16,17]常用来描述这种交换弹性反磁化过程. 基于一维连续介质微磁学模型,在某些近似下可以得到软磁层的偏转场或硬磁层的不可逆反转场的解析表达式,但对于一般情况仍需要进行数值解,而且当软磁层非常薄时,连续介质模型不再适应. 相反,一维原子链模型可以用来描述只有几个原子层厚度的体系. 根据这一模型,多层膜可以看作由原子层叠加而成,每一原子层内的磁化强度均匀分布. 体系能量由每层的磁各向异性性能、塞曼能和相邻原子层之间的交换能构成,可表示为^[3, 16]

$$\begin{aligned}
 E_{\text{tot}} = & -2 \sum_{i=1}^{N_h-1} \frac{A_h}{d^2} \mathbf{m}_i \cdot \mathbf{m}_{i+1} - 2 \sum_{i=1}^{N_h} K_h (\mathbf{m}_i \cdot \mathbf{e}_i)^2 \\
 & - 2 \sum_{i=1}^{N_h} M_h \mathbf{H} \cdot \mathbf{m}_i - \sum_{i=N_h+1}^{N_h+N_s-1} \frac{A_s}{d^2} \mathbf{m}_i \cdot \mathbf{m}_{i+1} \\
 & - \sum_{i=N_h+1}^{N_h+N_s} K_s (\mathbf{m}_i \cdot \mathbf{e}_i)^2 - \sum_{i=N_h+1}^{N_h+N_s} M_s \mathbf{H} \cdot \mathbf{m}_i \\
 & - 2 \frac{A_{sh}}{d^2} \mathbf{m}_{N_h} \cdot \mathbf{m}_{N_h+1}, \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中 M_s (M_h), A_s (A_h) 和 K_s (K_h) 是分别是软磁层(硬磁层)的饱和磁化强度,交换常数和磁各向异性常数. A_{sh} 是软-硬磁层间交换耦合常数. \mathbf{m}_i 和 \mathbf{e}_i 分别是第 i 原子层磁化强度的单位矢量和易磁化轴方向单位矢量. 假设软磁和硬磁层具有相同的易磁化方向. d 是相邻两个原子层之间的距离. N_h 和 N_s 分

别是硬磁层和软磁层的原子层数(总原子层数 $N = 2N_h + N_s$). H 是外磁场且沿易磁化方向. 由能量取极小值的条件可以得到平衡态时磁矩的分布状态,从而计算出磁结构随外磁场的变化以及退磁曲线.

数值计算时取软磁层和硬磁层的磁参数如下: $M_s = 557 \text{ emu/cm}^3$, $A_s = 1.46 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$ ($1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$), $K_s = 1 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$, $M_h = 1085 \text{ emu/cm}^3$, $A_h = 1.46 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$, $K_h = 1 \times 10^8 \text{ erg/cm}^3$, $d = 2.5 \times 10^{-8} \text{ cm}$. 这些磁参数与 YFe_2 和 DyFe_2 的磁参数接近^[4]. 界面交换耦合常数 A_{sh} 与界面微结构密切相关,通过改变界面微结构可有效调制 A_{sh} 的大小^[5, 18],此外,通过在软磁层和硬磁层之间塞入非磁层也可控制 A_{sh} 的值. 所以,在计算时 A_{sh} 的取值从零到与层内交换耦合相同的值 ($1.46 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$). 在本文中我们主要研究软磁层的反磁化过程,所以计算时两个硬磁层的厚度均固定为 30 个原子层. 无外场时软磁层和硬磁层的磁化强度均匀分布且两者反平行排列.

3. 结果与讨论

利用上述一维原子链模型,研究了反铁磁耦合的硬磁-软磁-硬磁三层膜体系中软磁层厚度和界面交换耦合强度对体系反磁化过程的影响. 图 1(a), (b) 和 (c) 分别给出了界面交换耦合常数 $A_{sh} = 1.46 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$, 软磁层厚度为 $N_s = 50$ 和 100 时以及 $A_{sh} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ erg/cm}$, $N_s = 50$ 时体系的退磁曲线. 由图 1(a) 可以看出,对于 $A_{sh} = 1.46 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$, $N_s = 50$ 的体系反磁化过程是典型的可逆交换弹性反磁化过程. 当外磁场反向增大到偏转场 H_{b1} 时,磁化强度均匀分布的初始磁状态开始变得不稳定,随后各原子层的磁矩开始发生偏转,由于界面反铁磁交换耦合能和塞曼能间的相互竞争,导致软磁层中界面磁矩偏转小,而离界面越远的原子层磁矩角度偏转越大,这样形成螺旋式分布的磁结构,或布洛赫畴壁. 随着外场的增大,磁矩偏转角度也随之逐渐增大,畴壁逐渐向硬磁层方向压缩. 这一交换弹性反磁化过程是一可逆过程,当外场逐渐减小返回到零时,软磁层的螺旋磁结构也逐渐回到初始的均匀分布状态. 而对于 $A_{sh} = 1.46 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$, $N_s = 100$ 和 $A_{sh} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ erg/cm}$, $N_s = 50$ 的体系则表现出不同的反磁化过程(图 1(b) 和图 1(c)). 反向外场增大到偏转场 H_{b1} 时,磁化强度突

然减小,表明这是个一级磁相变过程. 这一反磁化过程是不可逆的,减小外场,在 H_{b1} 后形成的螺旋磁结构在另一较小的偏转场 H_{b2} 处才回到初始的均匀分布磁结构状态. 这种可逆的和不可逆的交换弹性

反磁化过程也可从与原子层磁矩的角度随外场变化曲线上清晰看出. 图 1(a), (b) 和 (c) 中的插图给出了软磁层的正中间和界面处磁矩与易磁化方向的夹角 θ_1 和 θ_{N_s} 随外场的变化曲线. 可以看出,对于 $A_{sh} = 1.46 \times 10^{-6}$ erg/cm, $N_s = 50$ 的体系,外场超过偏转场 H_{b1} 后,角度开始发生偏转且随外场的增大偏转角逐渐增大,表明螺旋似畴壁结构的逐渐形成和压缩过程. 而对于 $A_{sh} = 1.46 \times 10^{-6}$ erg/cm, $N_s = 100$ 和 $A_{sh} = 1.0 \times 10^{-7}$ erg/cm, $N_s = 50$ 的体系,在 H_{b1} 处, θ_1 和 θ_{N_s} 突然发生大的偏转,表明 H_{b1} 处一个大角度畴壁结构突然形成,导致不可逆交换弹性反磁化过程的出现.

从原理上分析,交换弹性反磁化过程是可逆还是不可逆过程取决于体系的能量曲面 $E(H, \theta_i)$ (θ_i 代表所有原子磁矩的方向) 随外场 H 的变化. 反磁化过程中的每一状态对应能量曲面上的一个极小值点. 外场小于 H_{b1} 时,体系处于初始的磁化强度一致分布状态,此时, $\partial E / \partial \theta_i |_{\theta_i=0} = 0$ 且 $\partial^2 E / \partial \theta^2 |_{\theta_i=0} > 0$. 当 $H = H_{b1}$ 时,如果不仅上述能量的一阶导数为零,而且其二阶导数也为零,体系就可能滑向离初始的磁化强度一致分布状态较远的一个平衡态,从而形成一个大角度畴壁,对应的反磁化过程是不可逆过程. 反之,就是一个可逆过程. 一般情况下只有通过数值计算才能确定出现可逆和不可逆交换弹性反磁化过程的条件,然而当软磁层厚度接近或超过 2 倍的 180° 畴壁厚度时(在软磁层中形成两个对称的畴壁),在软磁层中形成的 180° 畴壁一定是个不可逆的,因为靠近软磁层中间的磁矩更接近与初始态反方向的易磁化方向,软磁层的磁晶各向异性将对这些磁矩形成钉扎作用,从而形成磁滞现象.

图 2(a) 给出了当 $A_{sh} = 1.46 \times 10^{-6}$ erg/cm 时,在 $H = H_{b1}$ 处软磁层正中间和界面处磁矩的偏转角 θ_1 和 θ_{N_s} 随软磁层厚度的变化关系(为便于讨论,这里将软磁层厚度 N_s 以 180° 畴壁所对应的原子层数 $N_\delta = \frac{\pi}{d} \sqrt{A_s/K_s} \approx 150$ 为单位作进行了约化). 可以看出,对于给定的 A_{sh} , 存在一个临界厚度 N_{sc} (图中箭头所指), 当 $N_s < N_{sc}$ 时, $\theta_1(H_{b1})$ 和 $\theta_{N_s}(H_{b1})$ 都为零,表明交换弹性反磁化过程是可逆过程; 当 $N_s > N_{sc}$ 时, $\theta_1(H_{b1})$ 和 $\theta_{N_s}(H_{b1})$ 突然增大,表明不可逆交换弹性反磁化过程的出现. 需要指出的是,引起可逆和不可逆反磁化过程的临界软磁层厚度

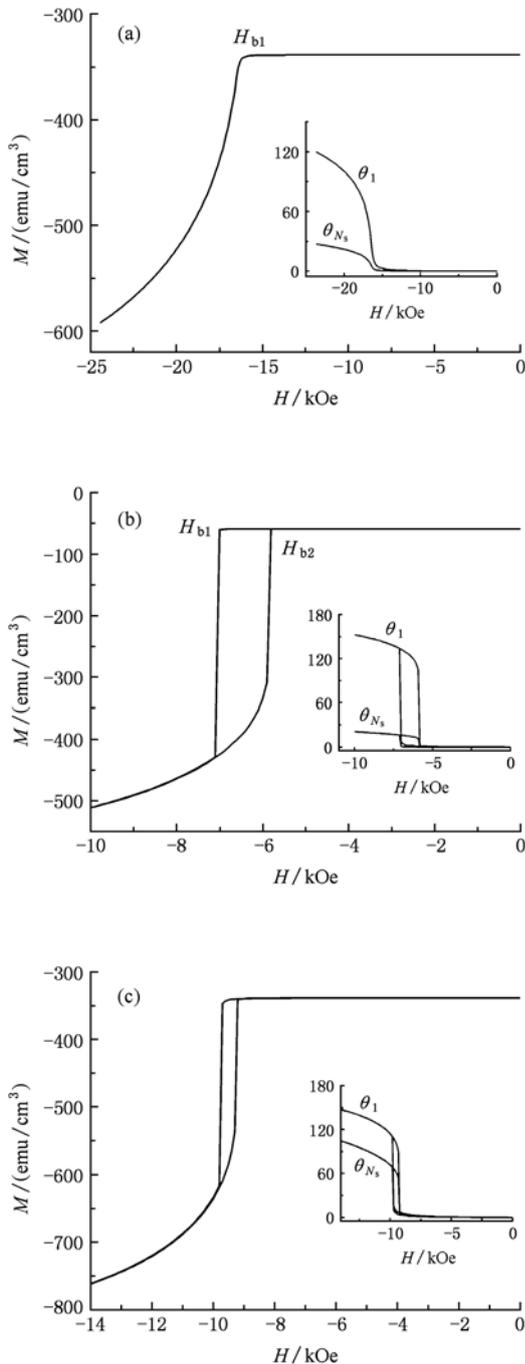


图 1 反铁磁交换耦合硬磁-软磁-硬磁三层膜体系的退磁曲线 (插图是角度 θ_1 和 θ_{N_s} 随外磁场的变化曲线) (a) $A_{sh} = 1.46 \times 10^{-6}$ erg/cm, $N_s = 50$; (b) $A_{sh} = 1.46 \times 10^{-6}$ erg/cm, $N_s = 100$; (c) $A_{sh} = 1.0 \times 10^{-7}$ erg/cm, $N_s = 50$

比 $2N_\delta$ 小很多,这是因为在 $H = H_{bl}$ 处软磁层中所形成的两个畴壁并不是 180° 畴壁. 随着软磁层厚度的增加,畴壁的角度也逐渐增大,当厚度接近或大于 $2N_\delta$ 时, $\theta_1(H_{bl})$ 增大到 180° ,表明两个完整的 180° 畴壁在软磁层中形成. 图 2(b) 是 $N_s = 50$ 三层膜结构的 $\theta_1(H_{bl})$ 和 $\theta_{N_s}(H_{bl})$ 随界面交换耦合常数 A_{sh} 的变化关系(A_{sh} 以软磁层内交换耦合常数 A_s 为单位进行了归化). 与图 2(a) 的结果类似,界面交换耦合强度的减小也导致交换弹性反磁化过程由可逆转变为不可逆. 同样存在一个临界界面交换耦合常数 A_{sh}^c (图中箭头所指). 当 A_{sh} 大于 A_{sh}^c 时, $\theta_1(H_{bl})$ 和 $\theta_{N_s}(H_{bl})$ 均为零,对应着可逆的交换弹性反磁化过程;当 $A_{sh} < A_{sh}^c$, $\theta_1(H_{bl})$ 和 $\theta_{N_s}(H_{bl})$ 均突然增大,标志着不可逆交换弹性反磁化过程的开始. 随着 A_{sh} 的减小, $\theta_1(H_{bl})$ 和 $\theta_{N_s}(H_{bl})$ 逐渐增大,

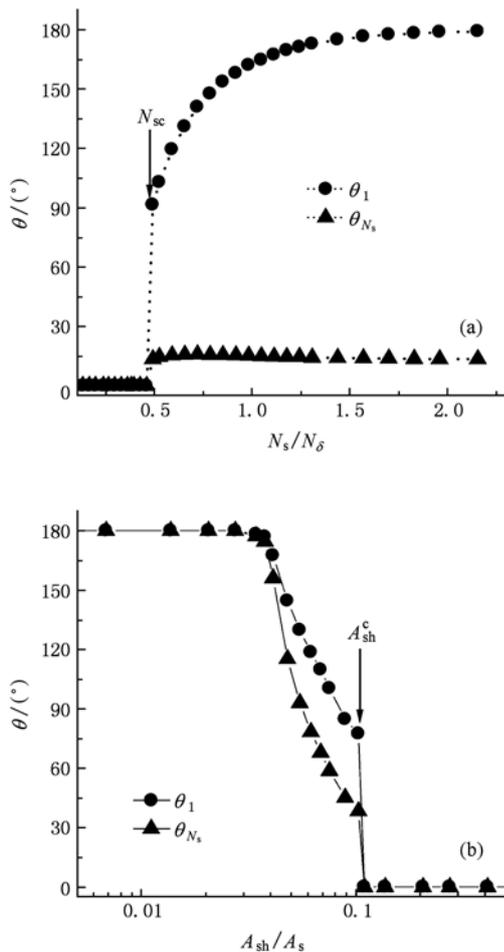


图 2 偏转场 H_{bl} 处的磁矩角度 θ_1 和 θ_{N_s} 随软磁层厚度和界面交换耦合强度的变化曲线 (a) 随厚度的变化; (b) 随耦合强度的变化

但 $\theta_{N_s} - \theta_1$ 逐渐减小. 此外,当界面交换耦合强度远小于层内交换耦合强度 A_s , 既 $A_{sh} \leq A_{sh}^u = 0.034A_s$ 时,软磁层界面磁矩已不能被硬磁层所钉扎,软磁层的反磁化过程转变为一致反转,对应着 $\theta_{N_s} = \theta_1 = 180^\circ$.

由此可见,对于反铁磁交换耦合的硬磁-软磁-硬磁三层膜体系,当考虑了软磁层的磁各向异性性能时,随着软磁层厚度的增大或界面交换耦合强度的减弱,软磁层中的交换弹性反磁化过程由可逆过程转变为不可逆过程. 详细的计算可以得到体系的可逆和不可逆交换弹性反磁化过程随软磁层厚度和界面交换耦合常数变化的磁相图,如图 3 所示. 图中曲线 1 对应着可逆 \rightarrow 不可逆交换弹性反磁化过程转变的临界条件,曲线 2 是由不可逆交换弹性反磁化过程向一致反转过程转变的临界条件. 由曲线 1 可以看出,临界界面交换耦合常数 A_{sh}^c 随着软磁层厚度的增加而增大,当软磁层厚度接近临界厚度 N_{sc}^{max} (N_{sc}^{max} 对应软磁层的界面磁矩完全被硬磁层钉扎时,即 $A_{sh} \rightarrow \infty$ 时的可逆 \rightarrow 不可逆反磁化过程转变的临界厚度, $N_{sc}^{max} \approx 69$), A_{sh}^c 迅速增大且趋近于无穷. 对于 $N_s > N_{sc}^{max}$ 的体系,只有不可逆的反磁化过程存在. 从图 3 还可看出,标示体系由不可逆交换弹性反磁化过程向一致反转过程转变的临界界面交换耦合常数 $A_{sh}^u = 0.034A_s$ 几乎与软磁层的厚度无关.

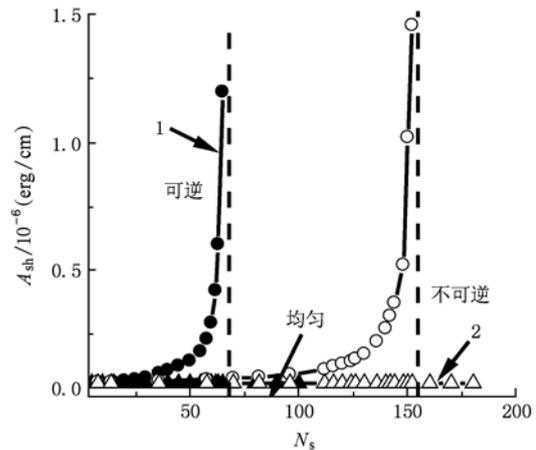


图 3 硬磁-软磁-硬磁三层膜体系的可逆和不可逆交换弹性反磁化过程的磁相图(其中实心点对应 $K_s = 1 \times 10^6$ erg/cm³ 的计算结果,空心点对应 $K_s = 1 \times 10^6$ erg/cm³ 的计算结果)

需要指出的是,软磁层的磁参数对软磁层的反

磁化过程也有影响. 为此,我们计算了 K_s 和 M_s 取不同值时软磁层的反磁化过程以及相应的可逆→不可逆交换弹性反磁化过程磁相图. 图3给出了 $K_s = 2 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$ (其他磁参数不变)时软磁层的可逆→不可逆交换弹性反磁化过程磁相图. 可以看出,当 K_s 取不同值时,可逆→不可逆交换弹性反磁化过程转变临界曲线的整体变化趋势基本一致,但导致可逆→不可逆反磁化过程相变的临界厚度 N_{sc}^{\max} 增大许多 ($N_{sc}^{\max} \approx 153$). 图4给出了临界厚度 N_{sc}^{\max} 随 K_s/M_s (相当于软磁层的磁晶各向异性场)的变化曲线. 可见, N_{sc}^{\max} 随 K_s/M_s 的减小而增大,当 $K_s/M_s \rightarrow 0$ 时, N_{sc}^{\max} 迅速增大且趋近于无穷,表明当忽略软磁层的磁晶各向异性能时,只有典型的可逆交换弹性反磁化过程存在. 此外, $\ln(N_{sc}^{\max}) - \ln(K_s/M_s)$ 呈现出线性变化关系(图4中的插图),线性拟合得到斜率为 $-1/2$,说明临界厚度正比于软磁层的 180° 畴壁厚度 $N_\delta = (\pi(A_s/K_s))^{1/2}/d$.

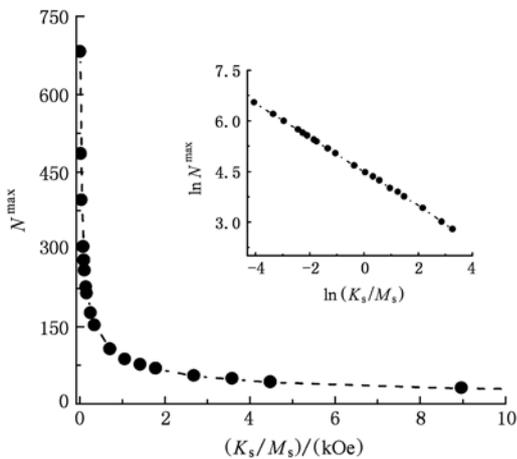


图4 临界厚度 N_{sc}^{\max} 随 K_s/M_s 的变化曲线(插图是它们对数变化关系)

偏转场 H_b 是描述交换耦合多层膜体系的一个很重要的物理量. 在某些特殊情况或某种近似下可以得到 H_b 的解析表达式,而一般情况下 H_b 只有数值解. 当界面交换耦合强度非常强以至于界面软磁磁矩完全被硬磁层所钉扎的情况下,偏转场具有如下的形式: $H_b = \pi^2 A_s / 2M_s t^{10,11,16}$, 其中 $t = N_s d$. 如果考虑软磁层的磁各向异性,还需要加上各向异性场 $H_a = 2K_s/M_s$. 在一般情况下,一个简单的经验公式 $H_b = H_{b0}/t^n$ 常常用来描述交换耦合多层膜体系的偏转场随软磁层厚度的变化关

系^[8], 其中 H_{b0} 和 n 是与体系有关的常数. Leinweber 和 Kronmüller 等^[8]对硬磁-软磁-硬磁三层膜体系的研究给出,当软磁层非常厚的情况下, n 近似等于 1.75. 在此,我们研究了不同界面交换耦合强度下软磁层的偏转场随厚度的变化关系. 图5给出了界面耦合常数 $A_{sh} = 1.46 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$ 时软磁层的偏转场随厚度的变化曲线. 可以看出在整个厚度范围内, $\ln H_b - \ln N_s$ 不满足线性关系,表明 $H_b = H_{b0}/(N_s d)^n$ 不能完全描述 $H_b - N_s$ 的变化关系;但在 $N_s < N_{sc}$ 的厚度范围内, $\ln H_b$ 随 $\ln N_s$ 线性变化,说明可逆交换弹性反磁化过程的偏转场满足上述经验公式. 对于 $A_{sh} = 3.0 \times 10^{-7} \text{ erg/cm}$ 时,可以得到类似的结果. 通过对 $N_s < N_{sc}$ 范围内 $\ln H_b - \ln N_s$ 线性拟合可以得到当 $A_{sh} = 1.46 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$ 和 $3.0 \times 10^{-7} \text{ erg/cm}$ 时 $n = 1.46$ 和 1.22, 可见 n 是与界面交换耦合强度相关的参数,且随着耦合强度的减弱而减小. 图5中也给出了由公式 $H_b = \pi^2 A_s / 2M_s (N_s d)^2$ 计算所得的 $\ln H_b - \ln N_s$ 曲线,与数值计算结果有很大的差别. 这是因为上述公式成立的条件是软磁层界面处磁矩完全被硬磁层所钉杂,且忽略了软磁层的磁晶各向异性能,显然我们所研究的体系不满足这些条件. 计算表明在不可逆交换弹性反磁化过程,界面处软磁层磁矩发生偏转(如图2所示),且界面交换耦合强度越弱,角度偏转越大.

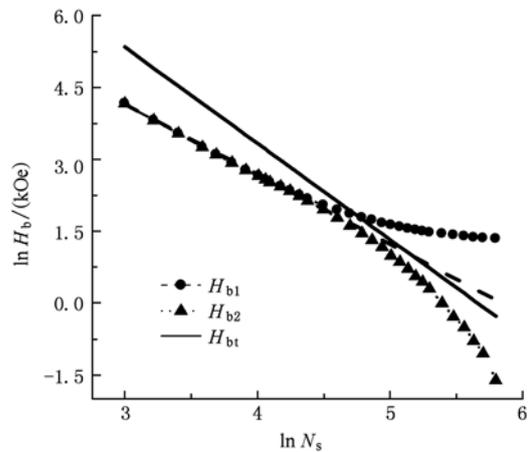


图5 偏转场 H_{b1} 和 H_{b2} 随软磁层厚度 N_s 的对数变化曲线

当 $A_{sh} < A_{sh}^u$ 时,界面交换耦合强度远小于软磁层内交换耦合强度,软磁层的反磁化过程转变为一致反转,可以推出一致反转场有如下的解析表达

式: $H_{\text{unif}} = 2A_{\text{sh}}/M_s N_s d^2 + 2K_s/M_s$. 数值计算结果与这个解析式基本一致. 图 6 给出了 $A_{\text{sh}} = 5 \times 10^{-8}$ erg/cm 时一致反转场随软磁层厚度的倒数 $1/N_s$ 的变化曲线. 对数值计算结果的线性拟合给出曲线斜率为 279 kOe (1 Oe = 79.5775 A/m), 与解析式给出的值 $2A_{\text{sh}}/M_s d^2$ (= 287 kOe) 非常接近; 数值计算曲线在纵坐标的截距是 3 kOe, 对应解析式的 $2K_s/M_s = 3.5$ kOe. 两者的差别可能是由于计算时取外场方向偏离易磁化方向一个小角度所引起的.

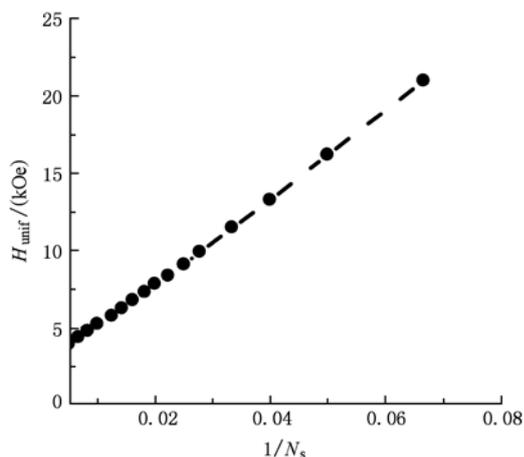


图 6 一致反转场 H_{unif} 随软磁层厚度的倒数 $1/N_s$ 的变化曲线

4. 结 论

采用一维的原子链模型研究了反铁磁耦合的硬磁-软磁-硬磁三层膜体系的反磁化过程以及软磁层厚度和界面交换耦合强度对反磁化过程的影响. 计算结果表明, 当考虑了软磁层的磁晶各向异性后, 软磁层厚度和界面交换耦合强度的变化都有可能导致软磁层的交换弹性反磁化过程由可逆过程转变为不可逆过程. 对于一给定的界面交换耦合常数 A_{sh} , 存在一个临界软磁层厚度 N_{sc} , 对于 $N_s < N_{\text{sc}}$ 的薄软磁层体系, 交换弹性反磁化过程是可逆的; 而当 $N_s > N_{\text{sc}}$ 时, 这种交换弹性反磁化过程变为不可逆. N_{sc} 随 A_{sh} 的增大而增大, 当软磁层界面磁矩完全被硬磁层钉扎住时, N_{sc} 达到最大值 $N_{\text{sc}}^{\text{max}}$. 对于 $N_s < N_{\text{sc}}^{\text{max}}$ 的体系, 存在一个临界界面交换耦合常数 A_{sh}^{c} , 当 A_{sh} 由大变小越过 A_{sh}^{c} 时, 软磁层的交换弹性反磁化过程由可逆过程转变为不可逆过程. 在 N_s - A_{sh} 平面上给出了体系的可逆与不可逆交换弹性反磁化过程的磁相图. 研究了偏转场随软磁层厚度的变化关系, 发现在整个厚度范围内 H_b 随 t 的变化不满足经验公式 $H_b = H_{10}/t^n$, 但在可逆的交换弹性反磁化过程范围内上述公式很好的描述 H_b - t 关系.

- [1] Kneller E F, Hawig R 1991 *IEEE Trans. Magn.* **27** 3588
- [2] Skomski R, Coey J M D 1993 *Phys. Rev. B* **48** 15812
- [3] Fullerton E E, Jiang J S, Grimsditch M, Sowers C H, Bader S D 1998 *Phys. Rev. B* **58** 12193
- [4] Sawicki M, Bowden G J, de Groot P A J, Rainford B D, Beaujour J M L 2000 *Phys. Rev. B* **62** 5817
- [5] Choi Y, Jiang J S, Ding Y, Rosenberg R A, Pearson J E, Bader S D, Zambano A, Murakami M 2007 *Phys. Rev. B* **75** 104432
- [6] McCord J, Henry Y, Hauet T, Montaigne F, Fullerton E E, Mangin S 2008 *Phys. Rev. B* **78** 094417
- [7] Xian C H, Zhao G P, Zhang Q X, Xu J S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3509 (in Chinese) [鲜承伟、赵国平、张庆香、徐劲松 2009 物理学报 **58** 3509]
- [8] Leineweber T, Kronmüller H 1997 *Phys. Stat. Sol.* **201** 291
- [9] Asti G, Solzi M, Ghidini M, Neri F M 2004 *Phys. Rev. B* **69** 174401
- [10] Goto E, Hayashi N, Miyashita T, Nakagawa K 1965 *J. Appl. Phys.* **36** 2951
- [11] Bowden G J, Beaujour J M L, Gordeev S, de Groot P A J, Rainford B D, Sawicki M 2000 *J. Phys.: Condens. Matter* **12** 9335
- [12] Guo G H, Zhang G F, Song S Y, Wang D W, Bowden G J, de Groot P A J 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 102505
- [13] Mangin S, Bellouard C, Andrieu S, Montaigne F, Ohresser P, Brookes N B, Barbara B 2004 *Phys. Rev. B* **70** 014401
- [14] Mangin S, Thomas L, Montaigne F, Lin W, Hauet T, Henry Y 2009 *Phys. Rev. B* **80** 224424
- [15] Feng Q, Huang Z G, Du Y W 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2906 (in Chinese) [冯倩、黄志高、都有为 2003 物理学报 **52** 2906]
- [16] Fitzsimmons M R, Park S, Dumesnil K, Dufour C, Pynn R, Borchers J A, Rhyne J J, Mangin Ph 2006 *Phys. Rev. B* **73** 134413
- [17] Guslienko K Yu, Chubykalo-Fesenko O, Mryasov O, Chantrell R, Weller D 2004 *Phys. Rev. B* **70** 104405
- [18] Zhang A G, Wang Y J, Han X F, Zhan W S 2004 *Chin. Phys.* **13** 2153

Irreversible exchange-spring processes of antiferromagnetically exchange coupled hard-soft-hard trilayer structures*

Guo Guang-Hua[†] Zhang Guang-Fu Wang Xi-Guang

(School of Physics Science and Technology, Central South University, Changsha 410083, China)

(Received 9 August 2010; revised manuscript received 11 January 2011)

Abstract

The demagnetization processes of antiferromagnetically exchange-coupled hard-soft-hard trilayer structures are studied based on the one-dimensional atomic chain model. It is found that when the magnetic anisotropy of soft layer is taken into account, the change of the soft layer thickness or the interfacial exchange coupling strength may lead to a transition from the reversible exchange-spring process to the irreversible process. For the trilayer structures with very thin soft layer, the demagnetization process exhibits typical reversible magnetic exchange-spring behavior. However as the thickness of soft layer increases, there appears a crossover point t_c , after which the process becomes irreversible. There occurs also a critical interfacial exchange constant A_{sh}^c , above which the exchange-spring process is reversible. When $A_{sh} < A_{sh}^c$, the irreversible exchange-spring process is realized. The phase diagrams of reversible and irreversible exchange-spring process are mapped in the plane of the interfacial exchange coupling A_{sh} and soft layer thickness N_s . The dependences of the bending field on the soft layer thickness for different interfacial exchange couplings are numerically examined.

Keywords: antiferromagnetically exchange coupled trilayer, exchange-spring process, demagnetization mechanism, magnetic phase diagram

PACS: 75.60.Jk, 75.60.Ch, 75.75.ta

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No 60571043), and the Natural Science Foundation of Hunan Province, China (Grant No 07JJ3103).

[†] E-mail: guogh@mail.csu.edu.cn