

反铁磁耦合记录介质的一级翻转曲线

阴津华^{1)†} C.H. Hee²⁾ 潘礼庆¹⁾

1) 北京科技大学物理系, 北京 100083)

2) Data Storage Institute, 5 Engineering Drive 1, Singapore 117608)

(2008 年 3 月 10 日收到, 2008 年 5 月 12 日收到修改稿)

用实验测量和微磁计算的方法得到了反铁磁耦合记录介质的一级翻转曲线. 利用微磁计算的目的是便于正确地理解一级翻转曲线分布图. 因为它可以把一级翻转曲线分布图中不同部分与相应的磁化翻转联系起来. 这样一级翻转曲线就能被用来分析复杂磁化翻转及其相互作用的细节, 而这种手段可以提供比通常用的 ΔM 方法更多的信息.

关键词: 反铁磁耦合记录介质, 一级翻转曲线, 微磁学模拟

PACC: 7550S, 7540M, 7560E

1. 引 言

一级翻转曲线是 1999 年由 Pike 等提出的一种表征磁性材料回线特性的新方法^[1,2]. 这种方法被用来研究各种材料如纳米复合永磁^[3], SpinGlass^[4], 甚至是铁电体^[5]等. 对于磁性材料来说, 这种方法与其他的回线测量手段相比能提供更多磁化翻转的细节. 一级翻转曲线是由一系列如图 1 所示的小回线组成^[1], 测量的过程是首先将样品沿正磁场方向饱和和磁化, 然后减小外场至 H_r 后, 测量从 H_r 到正向饱和场的回线. 接着不断地降低 H_r , 继续测量新的 H_r 到正向饱和场的回线. 如此反复, 直至 H_r 达到反向的饱和场. 通常这样的回线要 100 条左右. 这 100 条回线就被称之为一级翻转回线. 这样对应于一级翻转回线上的每一点都可以由 $M(H_r, H_a)$ 来表征. 其中 H_r 为该点所对应的那条一级翻转回线的起始磁场, H_a 为该点所对应的外磁场, M 为该点的磁化强度. 一级翻转曲线经过下式的转换可以得到 $\rho(H_u, H_c)$, 即

$$\rho(H_u, H_c) = -\sigma^2 M(H_r, H_a) \chi \partial H_r \partial H_a. \quad (1)$$

由上式可知, $\rho(H_u, H_c)$ 的物理意义是样品中在从饱和到 H_r 附近发生磁化翻转然后从 H_r 到 H_a 附近再次发生磁化翻转的磁矩多少. 它可以描述样品

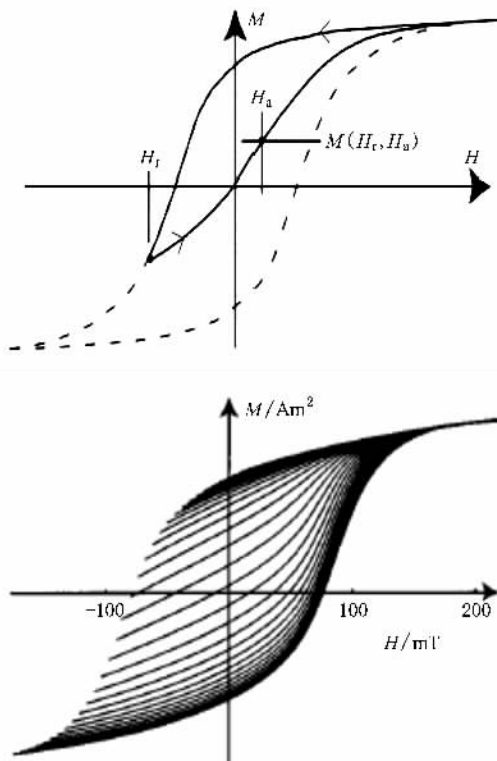


图 1 一级翻转曲线的测量和参数的定义

中具有不同磁性的磁矩分布. 然后通过下面两个坐标转换得到 $\rho(H_u, H_c)$. 这个 $\rho(H_u, H_c)$ 就是一级翻转曲线分布图. 其中 H_u 和 H_c 分别是描述了交换耦合场和矫顽力^[1]. $\rho(H_u, H_c)$ 实际上描述了磁性材料

† 通讯联系人. E-mail: yinjinhua@sas.ustb.edu.cn

的磁性分布.

$$\begin{aligned} H_u &= (H_r + H_a)/2, \\ H_c &= (H_a - H_r)/2. \end{aligned} \quad (2)$$

由以上的介绍可以看出,一级翻转曲线与 Preisach 模型有类似之处.但是一级翻转曲线是由样品的测量结果直接得到的,没有借助于任何模型.而 Preisach 模型是建立在任何回线都是由具有不同偏置场和矫顽力的矩形基元加权重构成的假设基础上的一种 Black-Box 理论^[6]. Preisach 模型可以通过与实验测量结果的比较来确定模型中的参数.反铁磁耦合磁记录介质是目前平面磁记录介质的新结构.它是由两个铁磁层 M_1 和 M_2 以及夹在其中的非磁层 Ru 组成.铁磁层 M_1 和 M_2 分别是记录层和稳定层. M_1 和 M_2 之间通过 0.8 nm 厚的非磁性 Ru 层产生了反铁磁交换耦合.它具有高的热稳定性和小的晶粒尺寸,因此具有较高的记录密度.尽管垂直磁记录具有更高的记录密度,但是由于平面磁记录介质中没有使用软磁底层和比较昂贵且较厚的中间层 Ru,因此具有价格上的优势.在本文中主要研究的

是反铁磁耦合磁记录介质一级翻转曲线的分布图,并与微磁计算结果比较从中得到两个铁磁层间的反铁磁交换耦合,以及两个铁磁层内交换耦合及矫顽力分布.

2. 实验与计算方法

样品由直流磁控溅射的手段制备.使用 8.89 cm 的 Al-Mg 合金基板.基板温度为 200℃ 左右,使得记录层中的 Cr 从 Co 的磁性合金中析出,并在 Co 合金的晶粒边界性形成非磁性层,从而达到降低晶粒间交换耦合的作用.底层由 20 nm 的非磁 Cr 合金构成.样品 a 和 b 的记录层相同为 15 nm 但稳定层分别为 1 和 5 nm.一级翻转曲线是用交变梯度磁强计测量的.这是因为交变梯度磁强计结合了快速测量和较高精度两方面的特点.使用交变梯度磁强计的情况下,通常一级翻转曲线的测量时间大约为 1—2 h.测量前将样品和样品杆放入酒精中用超声波清洗 10 min.利用 LLG 微磁学动力学方程,对易磁化轴在

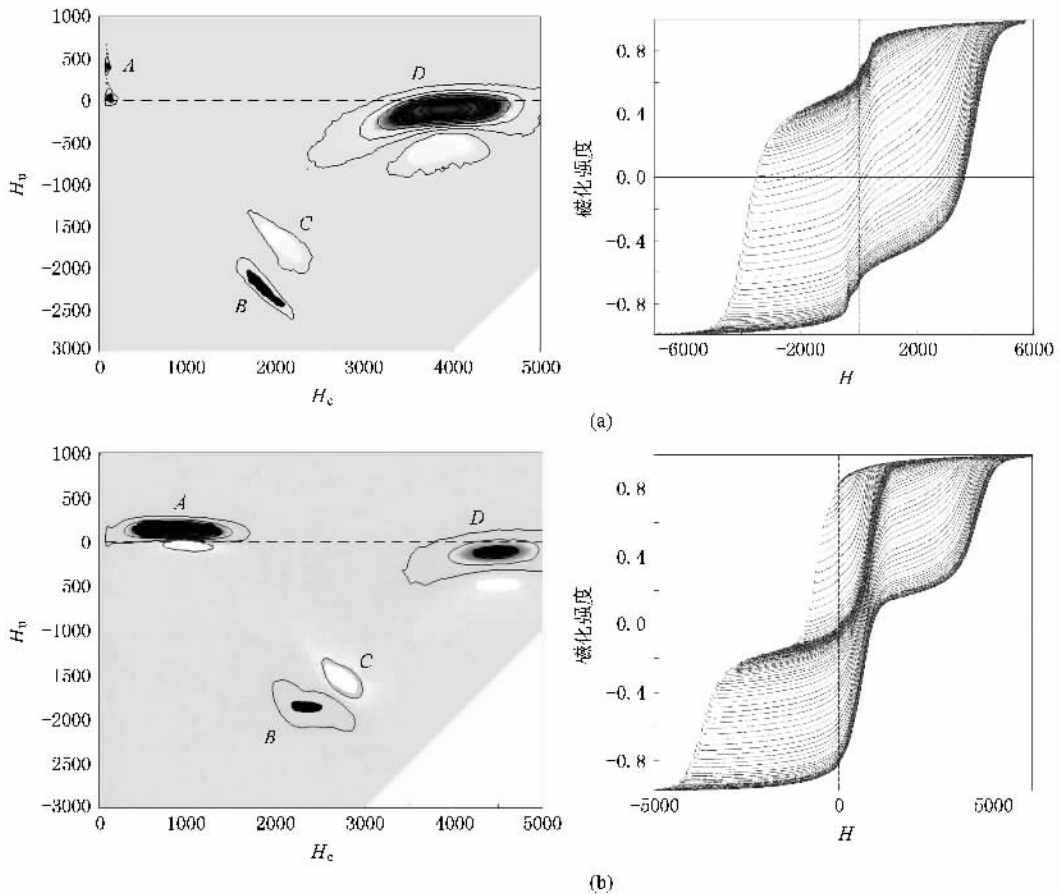


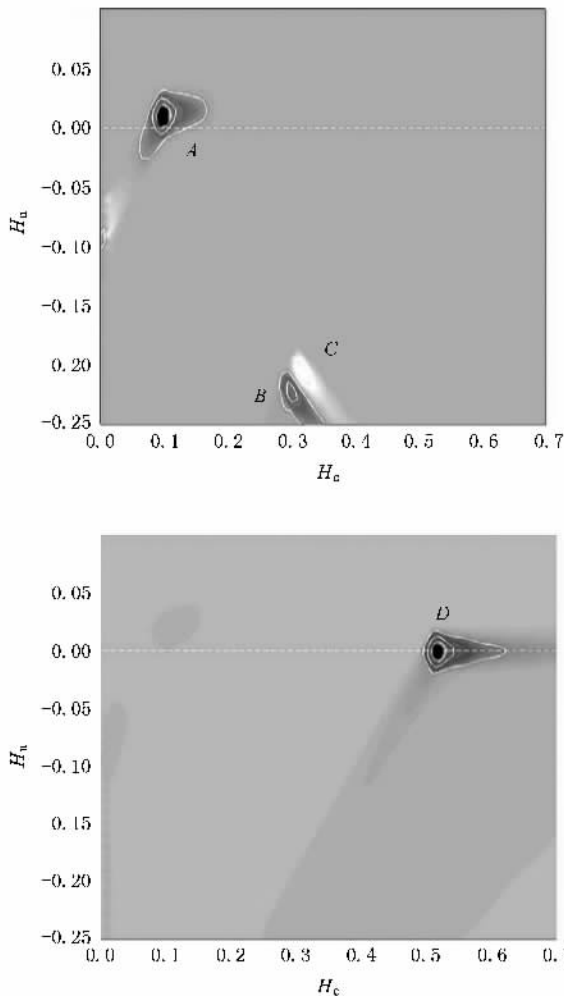
图 2 (a)为样品 a 的一级翻转曲线及其分布图;(b)为样品 b 的一级翻转曲线及其分布图(图中磁场和矫顽力及交换耦合场的单位为 Oe)

面内随机分布的反铁磁耦合磁记录介质进行了磁化过程的模拟. 其中假设晶粒尺寸为 9 nm 均匀分布, 层内晶粒间没有交换耦合, 铁磁层间的反铁磁交换耦合常数为 $J = -0.1 \text{ erg/cm}^2$ ($1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$). M_s 为 300 emu/cm^3 , K_u 为 $1 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$.

3. 结果和讨论

3.1. 实验一级翻转曲线的分布图

图 2 给出了样品 a 和 b 的一级翻转曲线及其分布图. 由一级翻转曲线我们可以看出这两个样品具有典型的反铁磁耦合回线的特征. 一级翻转曲线分布图的横轴和纵轴分别表示矫顽力和交换耦合场, 等高线描述了样品中具有等高线处的矫顽力和交换耦合场的磁矩分布的多少. 从两个样品的一级



翻转曲线分布图中, 可以发现一些共同点. 即分布图主要由分布 A, B, C 和 D 组成. 其中 A, B 和 D 是正分布, C 是负分布. 样品 a 和 b 的分布 D 的下方都有一个小的负分布, 样品 b 的分布 A 的下方也有一个小的负分布. 我们发现两个分布图在高 H_c ($> 2000 \text{ Oe}$, $1 \text{ Oe} = 79.5775 \text{ A/m}$) 的部分比较一致, 而低 H_c ($< 2000 \text{ Oe}$) 的部分完全不同. 所以可以断定低 H_c 的部分应该对应于稳定层. 为了正确地理解这一复杂体系的磁化过程, 我们运用微磁学计算对整个体系的一级翻转曲线进行了模拟.

3.2. 反铁磁耦合磁记录介质一级翻转曲线分布图的微磁学模拟

图 3 和图 4 分别给出了记录层和稳定层各自的一级翻转曲线及其分布图和整个体系的一级翻转曲线及其分布图. 如图 4 所示, 高矫顽力的正分布(深

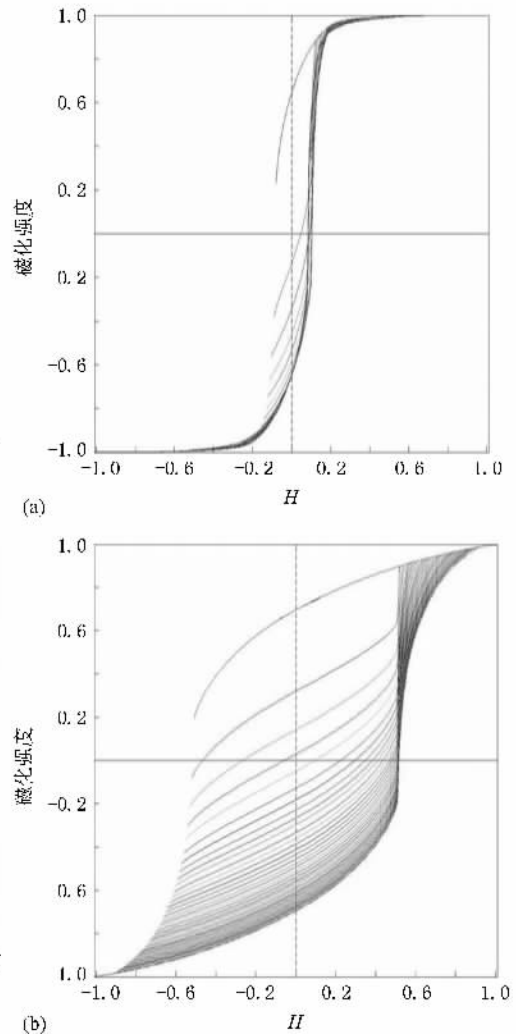


图 3 微磁学模拟的稳定层 (a) 和记录层 (b) 的一级翻转曲线及其分布图(图中磁场和矫顽力及交换耦合场的单位为 T)

色的分布)D 对应于记录层,低矫顽力的两个正分布 A 和 B 以及一个负分布(浅色的分布)C 对应于稳定层.如图 4 所示,这些分布的位置是相互关联的.记录层的分布 D 和稳定层分布中分布 B 和 C 的连线,与 H_c 坐标轴的正方向成 45° 角.稳定层的分布 A 和 C 的连线与 H_c 坐标轴的正方向成 135° 角.经过比较稳定层的小回线和稳定层分布中分布 A 的位置,我们发现 H_u 和 H_c 分别对应于稳定层的反铁磁相互作用场和矫顽力.正的 H_u 表明稳定层和记录层之间为反铁磁耦合.在模拟中我们可以将记录层和稳定层分开,这是通过实验手段难以完成的.而正是这个原因,才使我们能够很清楚地理解一级翻转曲线分布图的意义.进而获得普通磁测量难以得到的信息.通过改变模拟的参数,我们还可以分析这些参数对一级翻转曲线分布图的影响.所以一级翻转曲线分布图必须与微磁学模拟结合才能很好地理解一级翻转曲线分布图给我们提供的信息.

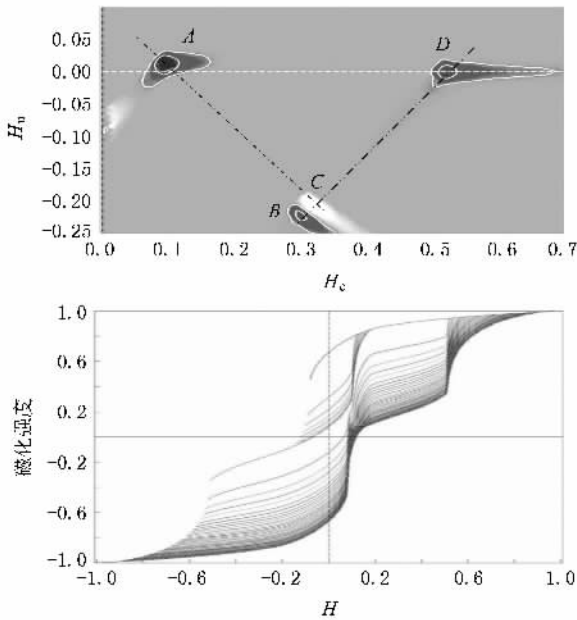


图 4 微磁学模拟的整个体系的一级翻转曲线及其分布图(图中磁场和矫顽力及交换耦合场的单位为 T)

现在我们反过来分析样品 a 和 b 的一级翻转曲

线分布图,通过对比两个一级翻转曲线分布图,我们发现样品的一级翻转曲线分布图中记录层和稳定层分布位置间的关系仍然成立.仔细观察样品 a 稳定层的分布 A,可以发现稳定层中有部分晶粒的 H_u 为零,这表明这部分稳定层不具有与记录层的反铁磁耦合作用.另外一部分具有 500 Oe 左右的 H_u ,与样品 b 100 Oe 左右的 H_u 相比高很多,这是由于 H_u 与稳定层厚度成反比^[7]:

$$H_u = J(M_s t), \quad (3)$$

其中 J 为反铁磁交换耦合常数, M_s 和 t 分别为稳定层的饱和磁化强度和厚度.

稳定层和记录层的矫顽力分布也可以从一级翻转曲线分布图中得到.另外两个样品的记录层分布以及样品 b 稳定层分布 A 的下方都有一个小的负分布.仔细地比较这些分布与各自下方负分布的 H_a 大小,发现负分布的 H_a 比其上方正分布的 H_a 小,这表明这些层中的晶粒间相互作用以交换耦合为主^[8].而微磁学模拟的一级翻转曲线分布图中稳定层和记录层分布的下方没有负分布,这可能是由于我们在微磁学模拟中假定层内晶粒间不存在交换耦合相互作用所致.

4. 结 论

一级翻转曲线分布图与微磁学模拟结合,用于分析反铁磁耦合记录介质内部复杂的磁化过程,以及相互作用和矫顽力分布.在多相耦合磁性材料中,单相的一级翻转曲线分布可能不局限于一个点附近,可能在多个区域存在有多个分布,这与不同磁性相间的相互作用有关.与通常用的 ΔM 方法相比^[9],一级翻转曲线分布图可以将磁性材料中不同的磁性相分开,并对其单独进行分析.而 ΔM 方法只能描述一个全部磁性相叠加的效应,不能对各个磁性相单独分析.此外一级翻转曲线分布图可以对磁性相的磁性分布进行表征,这对于磁记录材料来说十分重要,甚至比透射电镜和磁力显微镜更能确切地描述磁记录材料的性能.

[1] Pike C R, Roberts A P, Verosub K L 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 6660

[2] Roberts A P, Pike C R, Verosub K L 2001 *J. Geophys. Res.* **145**

[3] Saccone F D, Pampillo L G, Oliva M I, Bercoff P G, Bertorello H R, Sirkin H R M 2007 *Physica B: Condensed Matter* **398** 313

- [4] Katzgraber H G , Pázmándi F , Pike C R , Liu Kai , Scalettar R T , Verosub K L , Zimányi G T 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 257202-1
- [5] Stancu A , Ricinschi D , Mitoseriu L , Postolache P , Okuyama M 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 3767
- [6] Sellmyer David J , Liu Yi , Shindo D 2005 *Handbook of Advanced Magnetic Materials Volume II Advanced Magnetic Materials : Characterization and Simulation* (Tsinghua University Press)
- [7] Hee C , Wang J , Piramanayagam S , Chong T 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 1646
- [8] Stancu A , Pike C , Stoleriu L , Postolache P , Cimpoesu D 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 6620
- [9] Zhang H W , Rong C B , Du X B , Zhang J , Zhang S Y , Shen B G 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 4098

First order reversal curves of laminated antiferromagnetically coupled media

Yin Jin-Hua^{1)†} C. H. Hee²⁾ Pan Li-Qing¹⁾

¹ *Department of Physics , University of Science and Technology Beijing , Beijing 100083 , China*

² *Data Storage Institute , 5 Engineering Drive 1 , Singapore 117608*

(Received 10 March 2008 ; revised manuscript received 12 May 2008)

Abstract

First order reversal curves (FORC) were simulated and experimentally measured for the first time for laminated antiferromagnetically coupled (LAC) media. Micromagnetic simulation was effectively utilized in order to understand correctly the various peaks in the FORC contours. The result of the simulation was used to assign the experimentally observed FORC contour peaks to different magnetization reversals. It was observed that the FORC could provide more information than the interactions measured by the conventional delta-*M* method.

Keywords : antiferromagnetic exchange coupling , first order reversal curves , micromagnetic simulation

PACC : 7550S , 7540M , 7560E

† Corresponding author. E-mail : yinjinhua@sas.ustb.edu.cn