

# 非晶和纳米晶软磁丝状样品的环向磁化过程

李印峰<sup>1)†</sup> 尹世忠<sup>2)</sup> M. Vázquez<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, CSIC, Cantoblanco, 28049, Madrid, Spain)

<sup>2)</sup> 邢台学院物理系, 邢台 054054)

(2004 年 8 月 30 日收到, 2004 年 10 月 15 日收到修改稿)

采用阻抗法测定了不同磁结构的软磁丝状样品(非晶及纳米晶合金)的环向磁导率随环向磁场强度和频率的变化. 按照 Chen 等的理论公式计算了样品的环向磁化曲线, 结果发现, 这一实验原理公式对具有较大损耗的磁化过程并不适用. 因此, 将其发展给出了更一般情况下的理论公式. 此外, 通过分析复数磁导率对环向磁场的依赖关系, 确定了两类不同畴结构样品的不同的环向矫顽力机理. 研究了交流频率对磁化过程的影响.

关键词: 非晶和纳米晶软磁丝, 阻抗, 环向磁化曲线

PACC: 7530C, 7550K, 7560E

## 1. 引 言

非晶及纳米晶材料因其独特的结构和优异的磁性能, 近年来一直吸引着人们的研究兴趣. 一方面是因为其本身具有极大的实际应用价值, 另一方面是其为材料科学和基础理论提供了一个新的研究领域<sup>[1, 2]</sup>. 上世纪 80 年代以来, 非晶软磁丝材料的结构、磁性、各种效应及其实际应用是这一研究领域的一个热点, 尤其是巨磁阻抗效应引起了人们极大的兴趣<sup>[3, 4]</sup>. 与条带状样品相比, 丝状样品具有更强的抗折断性, 其轴对称结构使之具有更大的巨磁阻抗效应, 因此可望成为利用这一效应制备各种探针的理想的结构材料<sup>[3, 5]</sup>. 由于磁阻抗效应的大小和变化与材料的软磁性能、磁结构以及横向磁化过程密切相关, 因此对这一效应的研究不仅具有重要的实际应用价值, 也是磁学和磁性材料研究领域用于获得材料的结构和磁化过程信息的一个有力工具<sup>[6]</sup>.

为了研究丝状软磁样品的环向磁化, Chen 等不久前提出了利用阻抗法来确定这种样品的环向磁化曲线的实验原理公式<sup>[7-10]</sup>. 本文首先测定了三个不同磁结构的非晶及纳米晶合金软磁丝的环向磁导率随环向磁场强度和频率的变化. 利用 Chen 等的理论公式得到了样品的环向磁化曲线. 为了合理地解

释测量结果, 我们给出了更一般情况下的原理公式, 并且通过损耗分析, 得出了两类不同畴结构样品具有不同的环向矫顽力机理的结论. 最后研究了交流频率对环向磁化过程的影响.

## 2. 实验原理和方法

### 2.1. 环向磁化曲线的测量原理

利用阻抗法测定丝状样品环向磁化曲线的原理, Chen 等在文献 [7] 中进行了详细地论述. 现给出主要结果如下:

基波环向磁化强度

$$M_{\varphi} = \chi_{DC} H_{\varphi}; \quad (1)$$

基波环向磁化率

$$\chi_{DC} = \frac{8\pi L}{\mu_0 l}; \quad (2)$$

基波环向磁场

$$H_{\varphi} = \frac{3\sqrt{2}I}{16\pi r_0}. \quad (3)$$

其中  $L$  和  $I$  分别为基波电感和基波电流强度,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$  为真空磁导率,  $l$  和  $r_0$  分别为丝状样品的长度和半径.

<sup>†</sup>E-mail: yinfengli2001@yahoo.com

## 2.2. 样品的制备和测量

我们采用旋转水冷却方法制备了  $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  非晶态合金丝, 丝的直径为  $2r_0 = 0.14\text{mm}$ . 测量用样品分别为:

样品 A —— 淬态非晶丝;

样品 B —— 淬态非晶丝经 750mA 直流电流退火 15s;

样品 C —— 淬态非晶丝在 135MPa 的外加应力作用下, 经 750mA 直流电流退火 15s.

取样品中间 8cm 长的一段焊接在测量阻抗的电路中, 并置入 25cm 长的直流磁化螺线管内. 交流电流  $I$  由一台锁相放大器产生, 并由其测量相内和相外的交流电压  $V_{21}$  和  $V_{22}$ . 样品测量段的阻抗为

$$Z = R + jX = R + j\omega L = (V_{21} + jV_{22})/I, \quad (4)$$

而复数环向磁导率  $\mu^* = \mu' - j\mu''$  可由下列关系式得到<sup>[10]</sup>

$$\mu' = \frac{8\pi X}{\omega l}, \quad (5)$$

$$\mu'' = \frac{8\pi(R - R_{DC})}{\omega l}, \quad (6)$$

其中  $R_{DC}$  为样品的直流电阻. 测量用交流电流的幅度和频率范围分别为 0.06—85mA (有效值) 和 0.1—100kHz.

采用磁通计法测量了样品低场下的纵向磁滞回线. 探测线圈长 5cm, 直流磁化螺线管长 25cm, 测量系统由一台计算机控制. 室温下样品的饱和磁化强度由振动样品磁强计测得为  $\mu_0 M_s = 1.2\text{T}$ . 用四端法测定了样品 A, B 和 C 的电阻率依次为  $\rho = 1.41$ , 1.25 和  $1.21 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ .

## 3. 实验结果和讨论

### 3.1. 纵向磁滞回线

为了确定样品的磁结构, 我们首先测量了纵向磁滞回线, 结果示于图 1.

淬态非晶样品 A 的回线为典型的磁致伸缩非晶丝在低场下的矩形回线, 这一特征是由样品内的剩余应力与磁致伸缩相互作用产生的芯壳结构决定的<sup>[11]</sup>. 经过电流退火非晶丝而获得的纳米晶样品 B, 由于纳米晶颗粒与非晶母体的相互作用以及磁致伸缩常数的相互抵消而使其磁各向异性大大地减

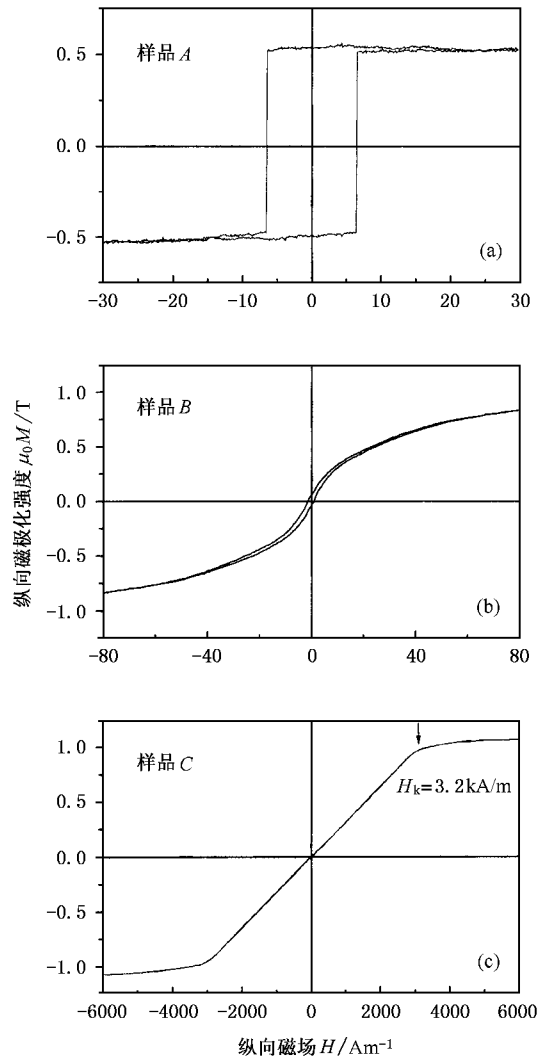


图 1 样品的纵向磁滞回线

小, 从而使其软磁性能得到极大的提高<sup>[12]</sup>. 就其畴结构而言, 由于退磁场和各向异性场的作用, 使其内并非为理想的纵向畴结构, 其磁化强度与纵向成一很小的螺旋角<sup>[13]</sup>. 而在应力作用下经过电流退火非晶丝而得到的纳米晶样品 C, 由于大的横向感生各向异性的存在使其具有横向畴结构的特征. 由其回线可确定出应力退火感生的横向各向异性场为  $H_k = 3.2\text{kA/m}$ . 到目前为止, 对应力退火感生横向各向异性的机理仍有不同的解释<sup>[14]</sup>.

### 3.2. 环向磁化过程

#### 3.2.1. 环向磁化曲线

图 2 给出了由 (2) 式确定的三个不同结构样品的环向磁化率  $\chi_{DC}$  随环向磁场  $H_\varphi$  的变化关系以及由 (1) 式确定的环向磁化曲线.

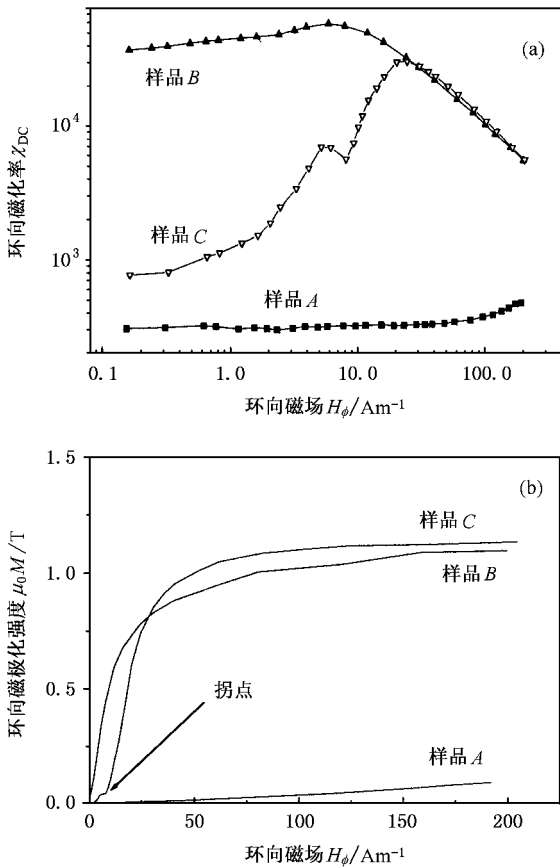


图2 样品 A、B 和 C 的环向磁化率随环向磁场的变化 (a) 及由 (1) 式确定的环向磁化曲线 (b)

非晶样品 A 的  $\chi_{DC}$  几乎在整个测量的磁场范围内保持一稳恒值, 即不随磁场的改变而变化. 这是由于样品内大的磁弹各向异性决定的环向磁化强度的局域转动控制的环向磁化过程的结果<sup>[15]</sup>. 因此, 其磁化曲线近似为一条斜线.

对于经过退火处理得到的纳米晶样品 B 和 C, 其  $\chi_{DC}$  均表现出随  $H_{\phi}$  的增强而增大, 经过一峰值后随  $H_{\phi}$  的增强而减小.  $\chi_{DC}$  随  $H_{\phi}$  的增强而增大相应于畴壁移动的过程, 直到经过大的 Barkhausen 跳跃后而完成. 此后  $\chi_{DC}$  随  $H_{\phi}$  的增强而减小则源于磁化强度的转动过程, 即磁化率与磁场成反比关系. 此外, 比较样品 B 和 C 的  $\chi_{DC}$  还可以看出一个明显的差异, 即样品 C 的  $\chi_{DC}$  在达到其最大值之前有一个突然的下沉, 而样品 B 则没有这一变化, 在扭矩作用下的铁基非晶丝样品中也观察到了类似的现象<sup>[16]</sup>. 文献 [16] 的作者认为阻抗的电感分量的极小起因于磁化强度和磁场之间的  $\pi/2$  相差, 对此本文在 3.2.3 节作不同的解释.

从图 2 可以看出,  $\chi_{DC}$  突然的下沉导致其磁化强度随磁场的变化也有一拐点甚至下凹, 但这是不符合实际的物理过程的, 完全是由于对实验结果的处理不当产生的. 我们在下面对此作更进一步的分析.

### 3.2.2. 合理的结果

标准的动态磁化曲线  $B(H)$  是指在某种对称周期磁化条件下,  $B$  和  $H$  的峰值点 ( $B_m, H_m$ ) 的轨迹. 所以, 基波环向磁化曲线应为

$$B_{\phi} = \mu_a H_{\phi}, \quad (7)$$

这里  $B_{\phi}$  和  $H_{\phi}$  分别为  $B$  和  $H$  的有效值. 基波幅值磁导率  $\mu_a$  可从测量复数磁导率  $\mu^*$  得到, 即由

$$\mu^* = \mu' - j\mu'' = \mu_a e^{-j\delta}, \quad (8)$$

得基波幅值磁导率

$$\mu_a = \sqrt{\mu'^2 + \mu''^2}, \quad (9)$$

及损耗因子

$$\tan\delta = \mu''/\mu'. \quad (10)$$

在极低频率下, 电感  $L$  为常量 (5) 式退化为 (2) 式, 如果损耗  $\mu''$  可忽略不计, 则有  $\mu_a = \mu' = \mu_{DC} \approx \mu_0 \chi_{DC}$ . 由此可见 (1) 式只适用于极低频率下损耗可忽略的情况.

既然磁化曲线的形状决定于幅值磁导率随磁场的变化 (7) 式中的  $H_{\phi}$  我们仍采用 (3) 式, 这样由 (3) (7) 和 (9) 式给出的样品 C 的基波幅值磁导率和环向磁化曲线如图 3 所示. 可以看出, 这一结果是非常合理的.

### 3.2.3. 环向矫顽力机理

前面已经指出, 样品 B 和 C 的  $\chi_{DC}$  随  $H_{\phi}$  的变化有一个明显的差异, 即样品 C 的  $\chi_{DC}$  在达到其最大值之前有一个突然下沉, 而样品 B 没有. 图 4 给出了样品 B 和 C 的环向磁导率的实部  $\mu'$  和虚部  $\mu''$  随  $H_{\phi}$  的变化. 对于样品 B 相应于损耗分量的虚部  $\mu''$  的峰值与相应于磁化分量的实部  $\mu'$  的峰值位于同一磁场处, 这表明磁损耗主要是畴壁脱钉扎跳跃过程的磁滞损耗. 而对于样品 C, 虚部的峰值与实部的极小相对应, 即在畴壁进行大的 Barkhausen 跳跃之前存在一大的损耗峰. 我们认为这一损耗峰主要是磁畴的成核过程产生的巨大的涡流损耗. 因此, 从以上的分析可知, 两个不同磁结构的样品 B 和 C 有不同的矫顽力机理, 样品 B 为畴壁的钉扎, 样品 C 则为磁畴的成核.

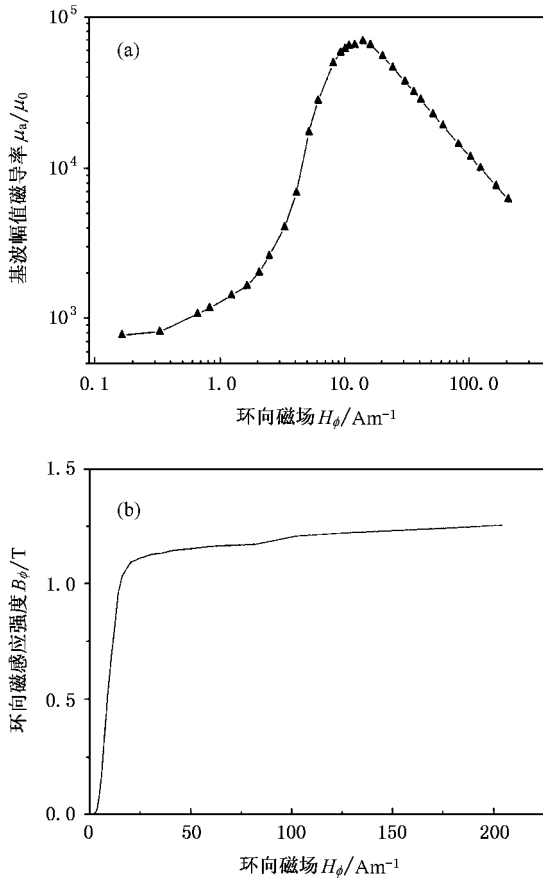


图 3 样品 C 的基波幅值磁导率随环向磁场的变化 (a) 及由 (7) 式确定的环向磁化曲线 (b)

### 3.3. 交流频率效应

应当指出 (1)–(3) 式只适用于低频限以内的频率范围. 所谓低频限频率  $f_c$  是指当趋肤深度等于样品丝的半径时的频率, 即

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu_0\chi_{DC}f}} = r_0 \Rightarrow f_c = \frac{\rho}{\pi r_0^2 \mu_0 \chi_{DC}}. \quad (11)$$

当  $f \leq f_c$  时, 可当作直流情况处理, 而当  $f > f_c$  时, 必须考虑趋肤效应. 由于环向磁化率是环向磁场  $H_\phi$  的函数, 由 (1) 式可知, 低频限频率  $f_c$  也是  $H_\phi$  的函数. 图 5 给出了样品的  $f_c$  对  $H_\phi$  的变化曲线, 样品 A, B 和 C 的  $\chi_{DC}$  的测量频率依次为 11111, 111 和 333 Hz. 样品 B 和 C 在低场下的低频限频率分别为 1 kHz 和 60 kHz, 在矫顽力场附近分别为 400 Hz 和 1000 Hz. 然而样品 A 的  $f_c$  几乎在整个测量场内均为 200 kHz.

图 6 和图 7 分别是样品 B 和 C 在几个不同频率下测得的环向磁导率实部随环向磁场的变化关系.

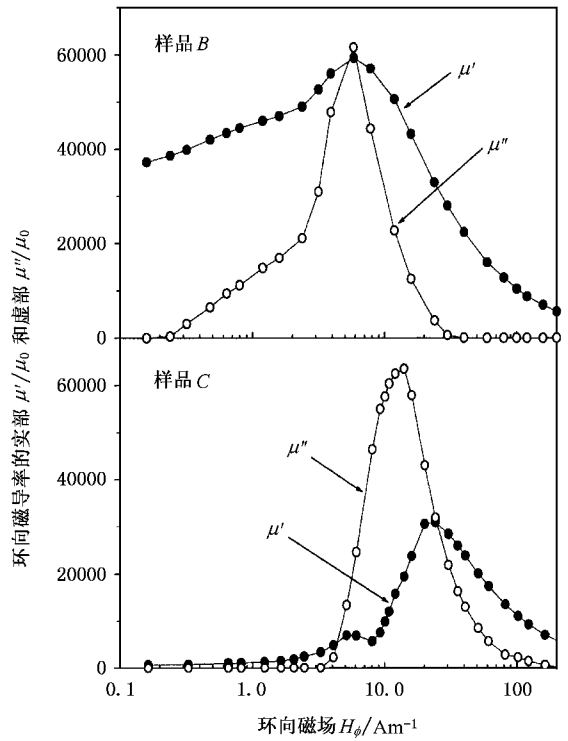


图 4 样品 B 和 C 的环向磁导率的实部  $\mu'$  和虚部  $\mu''$  随环向磁场  $H_\phi$  的变化

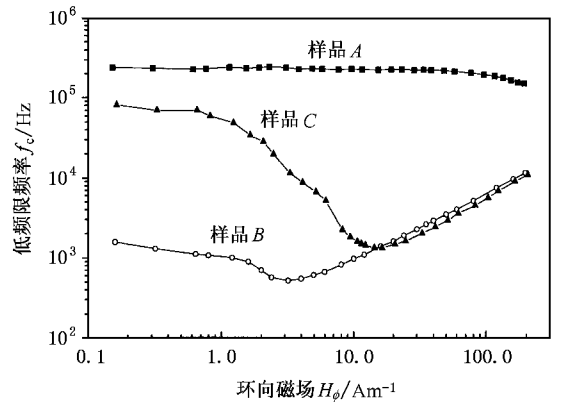


图 5 样品的低频限频率  $f_c$  随环向磁场  $H_\phi$  的变化曲线

对于样品 B, 随频率的升高, 环向磁化率减小, 其峰位向磁场增高的一侧移动并逐渐消失. 这表明随频率的升高, 涡流效应使壁移磁化的贡献越来越小. 当  $f = 11111$  Hz 时, 磁化主要是由转动过程决定的.

对于样品 C, 随频率的升高, 同样, 环向磁化率减小, 其峰位向磁场增高的一侧移动, 但在测量的频率范围内, 壁移磁化始终占主导地位. 然而, 涡流效应对壁移过程的影响是非常明显的. 我们定义矫顽力场  $H_c$  和成核场  $H_n$  分别为环向磁导率实部的峰

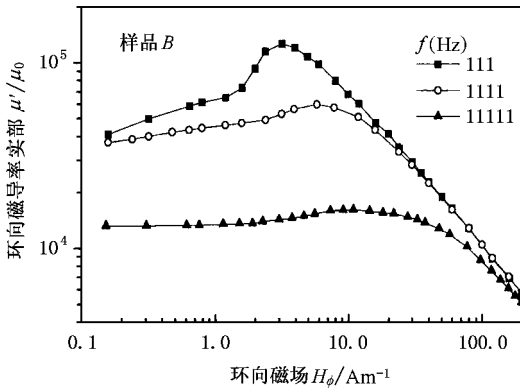


图 6 样品 B 在不同频率下的环向磁导率实部随环向磁场的变化

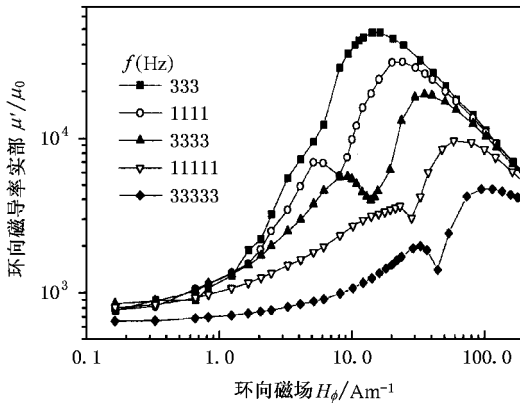


图 7 样品 C 在不同频率下的环向磁导率实部随环向磁场的变化

值和谷值所对应的磁场. 图 8 给出了样品 C 的矫顽力场  $H_c$  和成核场  $H_n$  对频率的依赖关系分别为  $H_c - f^{0.36}$  和  $H_n - f^{0.52}$ .

对于矫顽力随频率的变化, Gyorgy 提出了一个简单的关系为<sup>[17]</sup>

$$H_c = [(\pi f H_0 \beta L) M]^2, \quad (12)$$

这里  $H_0$  为外磁场,  $\beta$  是涡流损耗常数,  $L$  和  $M$  分别为畴壁厚度和饱和磁化强度. 按此模型  $H_c$  与  $f^n$  ( $n$

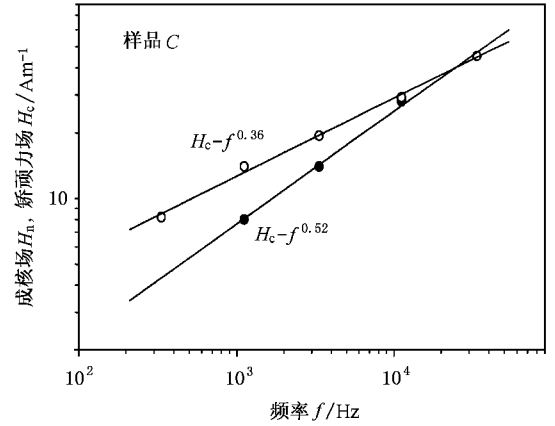


图 8 样品 C 的环向矫顽力场和成核场与频率的对数关系

$= 0.5$ ) 成正比例的关系, 然而, 许多实验观察结果表明,  $n \leq 0.5$ <sup>[18-20]</sup>. 为了解释这一差异, 我们必须注意到畴壁厚度随频率的增高而减小的事实<sup>[21]</sup>. 此外, 根据成核的理论模型<sup>[22, 23]</sup>,  $H_c = H_n$ , 因此二者应有相同的频率关系. 但成核场的大小是由材料的各向异性性能、交换能和退磁能决定的, 与畴壁厚度无关. 所以  $H_n$  和频率的关系与 Gyorgy 的模型是一致的.

## 4. 结 论

利用阻抗测量法研究了几个具有不同磁结构软磁丝状样品的环向磁化过程. 给出了更一般情况下确定环向磁化曲线的理论公式. 由环向磁化率随环向磁场的变化, 分析了两类不同畴结构样品的环向矫顽力机理, 即横向畴样品为成核机理, 而纵向畴结构样品为钉扎机理. 最后, 研究了交流频率对磁化过程的影响. 矫顽力场和成核场对频率的依赖关系与 Gyorgy 的模型是一致的.

感谢西班牙科学技术部对本课题的资助.

[1] O'Handley R C 1987 *J. Appl. Phys.* **62** R15

[2] Mehner M E, Willard M A and Laughlin D E 1999 *Progress in Materials Science* **44** 291

[3] Vázquez M, Knobel M, Sánchez M L, Valenzuela R and Zhukov A P 1997 *Sensors and Actuators A* **59** 20

[4] Kraus L 1999 *J. Magn. Magn. Mater.* **195** 764

[5] Panina L V and Mohri K 1996 *J. Magn. Magn. Mater.* **157/158** 137

[6] Carara M, Baibich M N and Sommer R L 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 331

[7] Bishop J E L 1973 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **6** 97

[8] Chen D X, Pascual L, Fraga E, Vázquez M and Hernando A 1999 *J. Magn. Magn. Mater.* **202** 385

[9] Chen D X, Hernando A and Pascual L 2004 *Meas. Sci. Technol.* **15** 365

[10] Chen D X and Muñoz J L 1999 *IEEE Trans. Magn.* **35** 1906

- [ 11 ] Squire P T , Atkinson D , Gibbs M R J and Atalay S 1994 *J. Magn. Magn. Mater.* **132** 10
- [ 12 ] Hofmann B , Reiningger T and Krommuller H 1992 *Phys. Stat. Sol. ( a )* **134** 247
- [ 13 ] Li Y F , Vázquez M and Chen D X 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 9839
- [ 14 ] Ohnuma M , Hono K , Yanai T , Fukunaga H and Yoshizawa Y 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 2859
- [ 15 ] Li Y F , Chen D X , Guo H Q , Vázquez M and Hernando A 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1594 ( in Chinese ) [ 李印峰、陈笃行、郭慧群 , Vázquez M 和 Hernando A 2000 *物理学报* **49** 1594 ]
- [ 16 ] Bordin G , Buttino G , Cecchetti A and Poppi M 2000 *J. Magn. Magn. Mater.* **222** 257
- [ 17 ] Gyorgy E M 1976 *Metallic Glasses* ( American Society for Metals ) p275
- [ 18 ] Piotrowski C , Yagi M and Sawa T 1991 *J. Appl. Phys.* **69** 5337
- [ 19 ] Vavassori P , Ronconi F , Traldi M and Puppini E 1998 *J. Magn. Magn. Mater.* **177 – 181** 127
- [ 20 ] Zhukov A , Vázquez M , Velásquez J , Gárcia C , Valenzuela R and Ponomarev B 1997 *Mat. Sci. Eng. A* **226 – 228** 753
- [ 21 ] Cullity B D 1972 *Introduction to magnetic materials* ( Massachusetts : Addison-Wesley Publishing Company ) p505
- [ 22 ] Aharoni A and Baltensperger W 1992 *Phys. Rev. B* **45** 9842
- [ 23 ] Skomski R , Liu J P and Sellmyer D J 1999 *Phys. Rev. B* **60** 7359

## Circular magnetization processes in amorphous and nanocrystalline soft magnetic wires

Li Yin-Feng<sup>1,2)</sup> Yin Shi-Zhong<sup>2)</sup> M. Vázquez<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>( Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid , CSIC , Cantoblanco , 28049 Madrid , Spain )

<sup>2)</sup>( Department of Physics , Xingtai College , Xingtai 054054 , China )

( Received 30 August 2004 ; revised manuscript received 15 October 2004 )

### Abstract

The changes of circular permeability with the circular magnetic field and frequency , in amorphous and nanocrystalline soft magnetic wires with different magnetic structure , have been determined from the measurements of impedance. The circular magnetization curve was obtained by using the Chen et al's formulas. We found that these formulas are not suitable for the process with very large magnetic losses , so a general expression has been developed. Additionally , different circular coercivity mechanisms in the wires with longitudinal or transversal domain structure were deduced from analyzing the circular-field-dependent complex circular permeability. Finally , the frequency effect is also discussed.

**Keywords** : amorphous and nanocrystalline wires , impedance , circular magnetization curve

**PACC** : 7530C , 7550K , 7560E