

FeCuNbSiB 非晶纳米晶带材软磁性能和压磁性能研究

蒋达国¹, 姚爱民¹, 朱正吼²

(1. 井冈山学院 工学院, 江西 吉安 343009)

(2. 南昌大学 材料科学与工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要: 本文主要研究了 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 纳米晶带材在不同的热处理工艺和压应力条件下的软磁性能变化情况。结果表明: 带材在 $550^\circ\text{C} \times 1\text{h}$ 热处理工艺时将晶化成纳米晶材料, 此时带材软磁性能最好; 纳米晶带材的 B_{100} , 受压应力影响大, 尤其是在小于 0.2MPa 压应力作用下, 软磁性能变化非常敏感, B_{100} 随压力增加而迅速下降; 带材 Q 值在小于 0.2MPa 压应力作用下变化非常敏感, Q 值随压力增加而迅速下降。当压应力大于 0.2MPa 时, Q 值随压应力变化不明显, 压应力不影响带材 Q 值随频率的变化规律。

关键词: 纳米晶; 软磁性能; 压磁性能

中图分类号: TG139.8 文献标识码: A 文章编号: 1005-8192(2007)01-0012-04

The Study on Soft Magnetic Properties and Magnetoelastic Properties of FeCuNbSiB Nano-crystal Ribbons

JIANG Da-guo¹, YAO Ai-min¹, ZHU Zheng-hou²

(1. Jinggangshan University, Jian 343009, China; 2. Nanchang University, Nanchang 330031, China)

ABSTRACT: The influence of heat treatment process and pressure on soft magnetic properties and magnetoelastic properties of $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ nanocrystalline ribbons is studied. The results show that soft magnetic properties, such as saturation magnetic induction intensity, are most excellent when anneal process is at 550°C for 1h and ribbons are nano-crystallized. There is a sensitivity zone at pressure. The amorphous ribbon is sensitive at 0 to 0.2MPa. At first, the original magnetor conductivity is rapidly reduced with the increase of pressure in sensitivity zone. The sensitivity of Q value of ribbons is also very high and Q is urgently reduced with the increase of pressure in 0 to 0.2MPa sensitivity zone. Pressure doesn't effect the change law of Q with frequency.

KEY WORDS: nano-crystal; soft magnetic properties; magnetoelastic properties

1 前言

1992 年, 日本名古屋大学 Murillo 教授等人首先报道了铁基(FeCoSiB) 非晶态合金材料在高频交变磁场作用下, 可显示出巨磁阻抗效应及显著的压

磁效应^[1~6]。从材料成分看, 目前文献报道有压磁效应的非晶合金主要有 FeSiB 、 FeCoSiB 、 FeNiSiB 、 FeCoZr 、 TbFeCo 、 GdFeCo 、 CoSiB 、 FePC 、 CoFeSiB 或者添加一些过渡族金属改性的 FeSiB 材料^[1~10]。非晶薄膜的压磁特性不仅与材料的内应力有关, 还

基金项目: 江西省科技攻关项目(2004-3)

作者简介: 蒋达国(1968-10-), 男, 江西吉安人, 副教授, 硕士生, 研究方向复合材料。

电话: 0796-8292286, 13879686417; E-mail: jgsxy-jdg@sohu.com

与材料成分、表面状态、内部质量(尤其是气孔分布)关系密切。例如,薄膜的表面结晶和元素偏聚能够提高材料的磁致伸缩效应。

利用铁基非晶薄膜的压磁效应可制成测量张力及压力的传感器,这些传感器具有较宽的线性测力范围和比传统材料制作的器件具有更好的性能。这是因为非晶软磁材料除具有优异的电磁特性,如高饱和磁通密度、低矫顽力、高磁导率、低磁损耗、高电阻率外,还具有优异的弹性性能、很好的抗腐蚀性能及较好的温度稳定性。也可将一段非晶材料粘贴在其他能产生应变的材料上,可检测出其他材料上所受的应变及应力,这种新型的应变材料在某些方面可表现出比传统的电阻应变材料及半导体应变材料具有更好的性能,因此开展这方面的研究具有很好的应用前景^[7~16]。

本文以典型的 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 非晶合金(Finemet 合金)为研究对象,主要研究:(1)退火温度和退火时间对非晶纳米晶软磁带材磁性能的影响;(2)非晶带材在压力作用下的磁性能变化及 Q 值的变化。

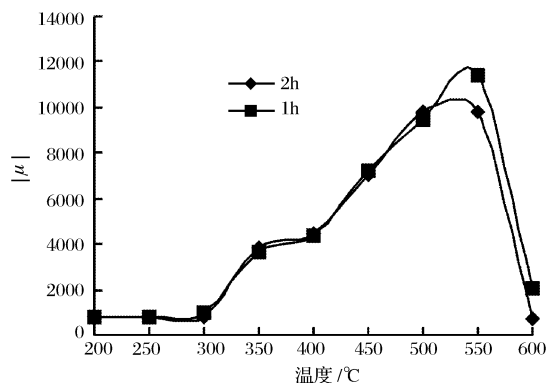
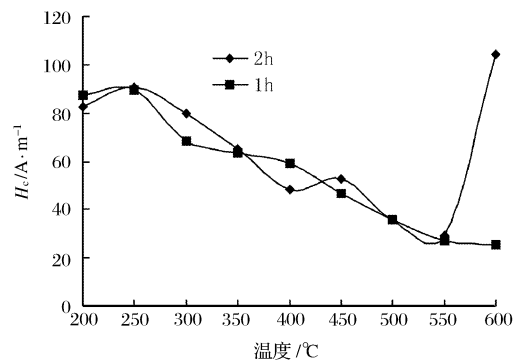
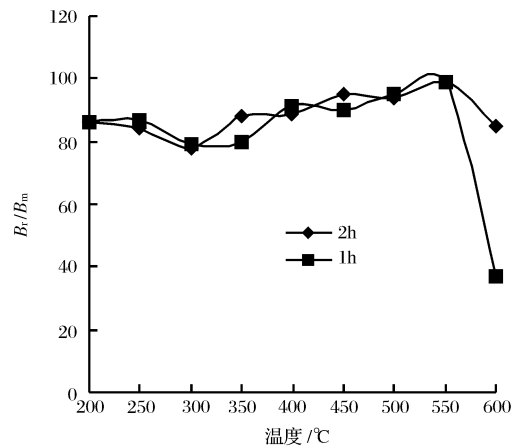
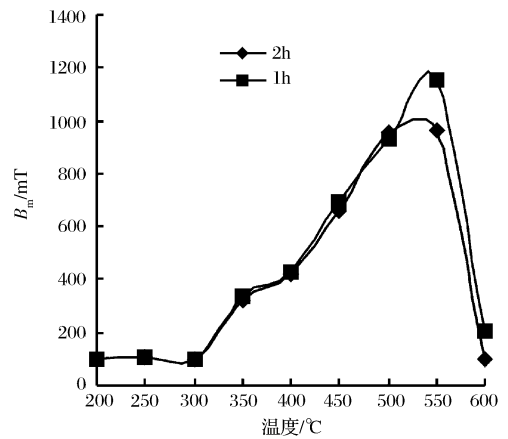
2 工艺实验与分析测试

按照 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 配制合金母料(合金锭),合金锭(江西大有科技股份有限公司)加入到 ZGSL-2.5 真空感应炉中熔化后用单辊快淬得到宽 4.5 mm 厚约 25 μm 的非晶薄带。非晶带材在真空碳管炉中热处理:100~600 $^{\circ}\text{C}$,保温 0.5~2 h,真空度 $6.67 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 。

将薄带卷成内径 9.6 mm,外径 11.2 mm 的磁芯,在磁芯上缠绕固定匝数的漆包铜线,装入不锈钢压力容器中,铜线自压力容器盖上引出与软磁性能测试仪器连接。磁芯在不锈钢压力容器中用橡胶与容器绝缘。充入高压气体,测试不同压力下磁芯的软磁性能变化和 Q 值变化。采用 TDS1002 型 $B-H$ 测试仪测试带材 $B-H$ 曲线,测试励磁线圈:测试线圈 7 匝,铜漆包线直径 $\phi = 0.31 \text{ mm}$,测试频率:100 kHz。采用 QBG-3D 高频 Q 表(中国上海爱仪公司)测试带材损耗情况,测试励磁线圈:测试线圈 5 匝,铜漆包线直径 $\phi = 0.31 \text{ mm}$ 。

3 结果分析与讨论

3.1 带材常压下的软磁性能



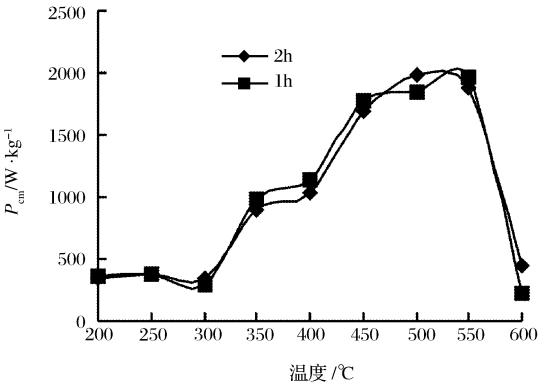


图 1 热处理工艺与带材软磁性能

Fig 1 Heat treatment processes and soft magnetic properties of strips

图 1 表明带材在 550 °C × 1h 热处理工艺时软磁性能最好(表 1)。大量的研究已经表明,在 550 °C × 1h 热处理工艺下,Fe_{73.5}Cu₁Nb₃Si_{13.5}B₉ 非晶合金将晶化成纳米晶材料。

表 1 带材最佳软磁性能(550 °C × 1h)

Table 1 The best soft magnetic properties of strips(550 °C × 1h)

性能指标	软磁性能
饱和磁感应强度	$B_m = 1150\text{mT}$
剩磁比	$B_r/B_m = 99\%$
矫顽力	$H_c = 27.12\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
质量比损耗	$P_{cm} = 1971.09\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$
磁导率的模	$ \mu = 1141$

13 2 带材在压应力下的软磁性能

实验表明,对于未晶化成纳米晶的 Fe_{73.5}Cu₁Nb₃Si_{13.5}B₉ 带材,其软磁性能随压力变化不明显,但是,当经过热处理晶化成纳米晶后,带材的软磁性能受压应力影响明显。压应力主要影响 B_m 、 B_r/B_m 、 P_{cm} 和 $|\mu|$,而 B_m 、 P_{cm} 和 $|\mu|$ 三个性能是相互联系的,即变化规律间相互协调。

表 2 带材软磁性能与压应力的关系(550 °C × 0.5h)

Table 2 Stress dependences of the soft magnetic properties of ribbons(550 °C × 0.5h)

压应力	软磁性能					
/MPa	B_m/mT	B_r/B_m	$H_c/\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	$P_{cm}/\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$	$ \mu $	
0	2462	84%	28.55	12356.07	2144	
0.1	2467	89%	28.55	15390.63	1910	
0.2	2500	84%	28.55	11403.88	2137	
0.3	2496	85%	28.55	12195.30	2174	
0.4	2489	83%	28.55	11540.38	2168	
0.5	2471	80%	28.55	10906.39	2221	
0.6	2460	82%	28.55	11535.93	2143	

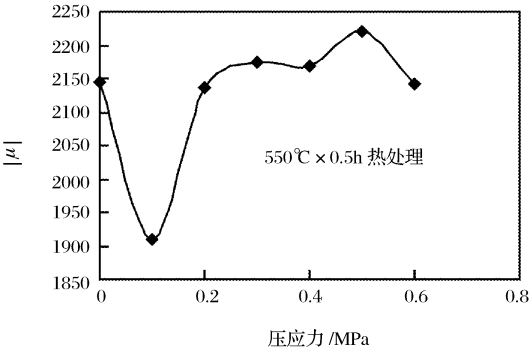


图 2 纳米晶带材的 |μ| 与压应力的关系

Fig 2 Stress dependences of $|\mu|$ of ribbons(550 °C × 0.5h)

图 2 表明纳米晶带材的 $|\mu|$ 受压应力影响大,尤其是在小于 0.2MPa 压应力作用下,软磁性能变化非常敏感,磁导率随压力增加而迅速下降。这一点在纳米晶磁芯生产实践中得到很好验证。在纳米晶磁芯生产时,表面封装胶固化时所产生的微小应力会导致磁芯软磁性能急剧下降。当压应力大于 0.2MPa 时,带材软磁性能随压应力出现微小波动。

3 3 带材在压应力下的 Q 值

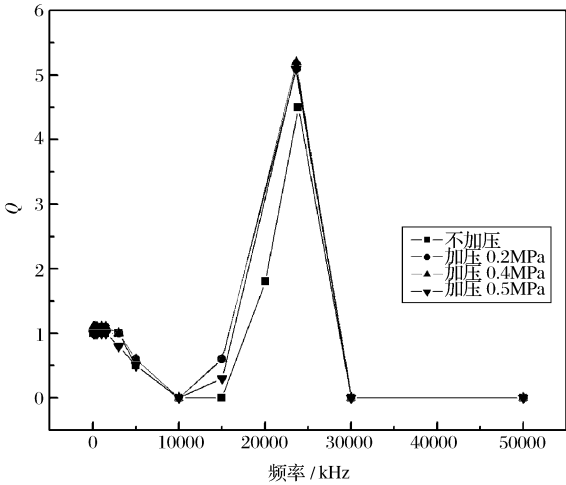


图 3 带材的 Q 值随频率的变化曲线

Fig 3 The change of FeCuNbSiB nano crystal Q

图 3 所示为经 550 °C × 0.5h 热处理带材 Q 值与微波频率的关系。带材的中心频率为 25MHz,在此频率,带材 Q 值达到最大值(5.2)。与 $|\mu|$ 变化规律相同,Q 值在小于 0.2MPa 压应力作用下变化非常敏感,Q 值随压力增加而迅速下降。当压应力大于 0.2MPa 时,Q 值随压应力变化不明显。压应力不影响带材 Q 值随频率的变化规律。

实验测试的 Q 值变化规律与磁导率 μ 的变化规律是一致的,说明实验结果与理论分析是完全吻合

的。理论上, Q 值与 μ 的关系是: $Q = \frac{3\pi\mu + 4H_m}{4\sqrt{H_m}}$, 式中, H_m 为最大外加磁场, ν 为瑞利常量, μ_0 为起始磁导率, μ 为有效磁导率。

实验发现, 采用 Q 值来表征带材的压磁性能更加准确和可靠。

至于非晶带材产生压磁效应的机理, 很多国外文献认为是内应力的影响结果^[1~10]。非晶材料虽然磁畴壁能低, 没有各向异性, 但存在形状和应力各向异性, 相应也具有较高畴壁能。特别对非晶合金薄膜, 合金熔流在铜辊圆周表面急凝固成非晶金属薄膜的过程中, 由于冷却速度差异, 使淬态非晶薄膜在宽度方向存在大的残余应力, 薄膜的外层应力各向异性大于内部, 使薄膜在宽度方向上具有内应力差值。当磁场方向与应力方向一致时, 拉应力能够加大原子间距, 提高材料的磁致伸缩系数; 当磁场方向与应力方向相反时, 压应力使原子间距缩短, 相应提高负磁致伸缩系数的绝对值。

对于纳米晶 Fe_{73.5}Cu₁Nb₃Si_{13.5}B₉ 带材具有显著的压磁性能的机理还有待进一步研究。

4 结 论

(1) Fe_{73.5}Cu₁Nb₃Si_{13.5}B₉ 带材经过 550℃ × 1h 热处理后将晶化成纳米晶材料, 此时带材的软磁性能最好。

(2) 纳米晶带材的磁导率受压应力影响大, 尤其是在小于 0.2MPa 压应力作用下, 软磁性能变化非常敏感, 磁导率随压力增加而迅速下降。

(3) 带材 Q 值在小于 0.2MPa 压应力作用下变化非常敏感, Q 值随压力增加而迅速下降。当压应力大于 0.2MPa 时, Q 值随压应力变化不明显。压应力不影响带材 Q 值随频率的变化规律。

参考文献:

- [1] Murillo N, Gonzalez J. Effect of annealing conditions and grain size on the soft magnetic character of FeCu(Nb/Ta)SiB nanocrystalline alloy[J]. J M M M, 2000, 218: 53; 2000, 31A(2): 555.
- [2] Mohri K, Kawashima K, et al. Magneto inductive effect in amorphous wires[J]. IEEE Trans Magn, 1992, 28(5): 3150.
- [3] Panina L V, Mohri K. Magnetor impedance effect in amorphous wires Appl[J]. Phys Lett, 1994, 65(9): 1189.
- [4] Kitohri T, Mohri K, Uchiyama T. Asymmetrical magnetor impedance effect in twisted amorphous wires for sensitive magnetic sensors[J]. IEEE Trans Magn, 1995, 31(6): 3137.
- [5] Panina L V, Mohri K, et al. Magnetor impedance and magnetor inductive effects in amorphous alloys[J]. J Appl Phys, 1994, 76(10): 6198.
- [6] Mohri K, panina L V, et al. Sensitive and quick response magnetor impedance(MI) sensor using amorphous wire[J]. IEEE Trans Magn, 1995, 31(2): 1266.
- [7] Inada K, Mohri K, Inuzuka. Quick response large current sensor using amorphous MI Resonant Multivibrator[J]. IEEE Trans Magn, 1994, 30(6): 4623.
- [8] Takagi M, Katoh M, et al. Magnet displacement sensor using MI elements for eyelid movement sensing[J]. IEEE Trans Magn, 1993, 29(5): 3340.
- [9] Mohri K, Kawashima, et al. Magnetor inductive effect in tension annealed amorphous wires and MI sensors[J]. IEEE Trans Magn, 1993, 19(6): 3168.
- [10] Senda M, Ishii O. Thin film magnetic field sensor utilizing magnetor impedance[J]. IEEE Trans Magn, 1994, 30(6): 4611.
- [11] Knobel Metal. Giant magnetor impedance effect in nanostructured magnetic wires[J]. J Phys Condens Matter, 1995, 7: L115.
- [12] Sommer R L and Chien C L. Longitudinal, transverse and perpendicular magnetor impedance in nearly zero magnetostrictive amorphous alloys[J]. Phys Rev B, 1996, 53: R5982.
- [13] Beach R S and Berkowitz A E. Sensitive field and frequency-dependent Impedance spectra of amorphous FeCoSiB wire and ribbon(invited)[J]. J Appl Phys, 1994, 76: 6209.
- [14] Ikeda M, Uemura, et al. Factors affecting the output voltage of a magnetostrictive torque sensor constructed from NiFe sputtered films and a Ti alloy shaft[J]. 日本应用磁学会志, 1998, 22(6): 1074.
- [15] Choudhary P, Meydan T. A novel accelerometer design using the inverse magnetostrictive effect[J]. Sensors and Actuators, 1997, A 59(4): 51.
- [16] Chiriacetal H. Comparative study of the giant magnetor impedance effect in CoFeSiB glass covered and cold drawn amorphous wires[J]. IEEE Trans Magn, 1997, 33(5): 3352.

修改稿收到日期: 2006-09-26