

# 弯曲应变下 $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Cr}_2\text{Si}_{12}\text{B}_{16}$ 非晶态合金带 应力阻抗效应

鲍丙豪, 张金卫, 张琳

(江苏大学, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** 对具有负磁致伸缩系数的  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Cr}_2\text{Si}_{12}\text{B}_{16}$  非晶合金带在制备态下及经脉冲电流退火下的应力阻抗效应进行了研究。结果表明: 长为 50 mm 的非晶带, 在仅 5 mm 挠度的弯曲应变作用下材料可显示显著的应力阻抗效应, 输出电压幅值变化率大于 40%。非晶材料经电流密度为  $35 \text{ A/mm}^2$ , 频率为 2 Hz, 持续时间为 30 s 的脉冲电流退火处理后, 可改善应力阻抗效应灵敏度。该非晶材料受张应力作用时阻抗减小, 受压应力作用时阻抗增大, 弯曲应变下的应力阻抗效应可用于制作具有高应变因子的力传感器及新型智能材料。

**关键词:** 弯曲应变; 应力阻抗效应; 负磁致伸缩; 脉冲电流退火

中图分类号: TG 139<sup>+</sup>.8

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)01-0068-04

在弯曲  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Cr}_2\text{Si}_{12}\text{B}_{16}$  钴基材料内发现可呈现大的应力阻抗(SI)效应, 这是以前的研究中常被忽视的或未曾注意到的现象。人们认为, 应力阻抗效应发生在具有大磁滞伸缩系数的非晶态合金材料上, 实际上影响 SI 效应的因素很多, 其中感生各向异性场的大小对 SI 效应的影响较大, 通常磁致伸缩系数大的材料, 各向异性场值也大, 因此必有大的 SI 效应。而对于磁致伸缩系数小的材料, 特别是对于一些具有负磁致伸缩系数的材料, 因磁各向异性场值较小, 通常可呈现大的 SI 效应。另外, 纯张应力作用的非晶丝<sup>[1]</sup>及横向退火的非晶带<sup>[2]</sup>、多层膜<sup>[3]</sup>及在有感应绕组下悬臂梁结构的非晶带的应力阻抗效应<sup>[4]</sup>已有研究。但直接将非晶带粘贴于能产生弯曲的弹性材料上, 研究其在弯曲应变下的张应力及压应力的阻抗随应力变化的效应, 却少有人进行过研究报道。研究结果表明, 向不同方向弯曲时对应的一个阻抗随弯曲程度的增大而增大, 而另一个随弯曲程度的增大而减小, 且 2 种对应的阻抗变化率均较大。研究结果还表明, 弯曲时显示的 SI 效应远高于材料无弯曲时的结果。该项研究所得结果可望在研制新型传感器件方面获得广泛应用, 还可望用于对结构损伤进行探测的智能材料, 仅需将非晶带粘贴于待测结构中, 当材料内部及表面出现应力变化时, 非晶带的阻抗即会发生变化, 因 SI 效应灵敏度很高, 因此微小的应力变化即可被检测出来, 因此该项研究具有很好的实际应用价值。

## 1 应力阻抗效应理论

应力阻抗效应的定量理论十分复杂, 其定性的理论解释是: 当非晶带中通入正弦交变电流时, 非晶带即被励磁, 非晶带存在一交流阻抗; 当非晶带受应力作用时, 非晶带的有效磁导率因应力作用而变化, 磁导率的变化导致与涡流有关的趋肤深度的变化, 从而改变了材料的阻抗。

Peng 等<sup>[5]</sup>给出了解决 SI 效应的一般方法, 而较系统地推出了 SI 效应的理论<sup>[6]</sup>。由 Maxwell 方程组及边界条件, 可给出非晶带的阻抗  $Z$  的一般表达式为:

$$Z = \frac{kdR_{dc}}{2} \frac{e^{kd/2} + e^{-kd/2}}{e^{kd/2} - e^{-kd/2}} \quad (1)$$

式中,  $R_{dc}$  代表非晶带的直流电阻值,  $d$  为非晶带的厚度,  $k = (i\mu_0\mu_r\sigma\omega)^{1/2}$ ,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $\mu_0$ 、 $\mu_r$ 、 $\sigma$ 、 $\omega$  分别为真空磁导率、相对有效磁导率、电导率和通入非晶带的交变电流的角频率。

由阻抗表达式可知, 若能求出材料的相对有效磁导率  $\mu_r$ , 则可给出阻抗的理论表达式。通过建立非晶带的畴结构简化模型, 考虑材料的各种各向异性场, 并通过求解带阻尼项的 Landau-Lifshitz 方程, 得到非晶带材料在受到外应力作用时  $\mu_r$  的计算表达式为:

$$\mu_r = 1 + \frac{\gamma M_s (\gamma H_{eq2} + 2\gamma M_s + i\omega\alpha) A}{(\gamma H_{eq1} + i\omega\alpha)(\gamma H_{eq2} + 2\gamma M_s + i\omega\alpha) - \omega^2} \quad (2)$$

式中:  $A = \sin^2(\theta + \theta_0 + \phi_0)$

收稿日期: 2008-01-26

基金项目: 安徽省自然科学基金(01042309)及江苏大学高级人才基金(JDG03-012)

作者简介: 鲍丙豪, 男, 1963 年生, 教授, 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013, 电话: 0511-88780171, E-mail: binghaobao@ujs.edu.cn

$$\begin{cases} H_{\text{eq1}} = [\mu_0 M_s H_{\text{uk}} \cos 2(\theta + \phi_0) - 3\lambda_s \sigma_e \cos 2(\theta + \theta_0 + \phi_0) - B] / (\mu_0 M_s) \\ H_{\text{eq2}} = [\mu_0 M_s H_{\text{uk}} \cos^2(\theta + \phi_0) + 3\lambda_s \sigma_e \sin^2(\theta + \theta_0 + \phi_0) + C] / (\mu_0 M_s) \\ B = 3\lambda_s \sigma_i \cos 2(\theta + \theta_0 + \phi_0 + \beta_0) \\ C = 3\lambda_s \sigma_i \sin^2(\theta + \theta_0 + \phi_0 + \beta_0) \end{cases}$$

式中： $\lambda_s$ 、 $\sigma_i$ 、 $\sigma_e$  分别为材料的饱和磁致伸缩系数、材料受到的内应力和沿带长方向的外应力， $H_{\text{uk}}$  为材料的磁各向异性常数。

## 2 实验

为测量非晶带弯曲时的 SI 效应，设计了一套加载变形装置，它利用螺旋测微计检测测微计杆向下移动位移，最小位移可准确到 0.01 mm，通过轴承巧妙地将原来的边转边产生位移转换成直线位移（无转动），改变位移量可使粘贴在塑料板上的非晶带连续地改变弯曲状态。图 1 给出了该装置的原理图，该装置实现了加载及对非晶带弯曲挠度的测量。注意力是直接加载于弹性形变体上，而不是加在非晶带上。

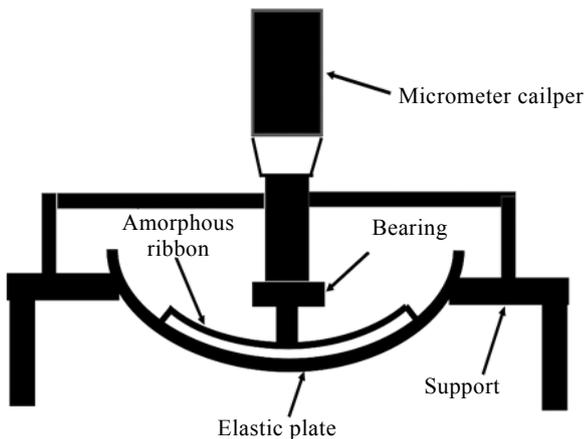


图 1 加载及测量装置原理图

Fig.1 Schematic diagram of the loading and device for measuring

取制备态  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Cr}_2\text{Si}_{12}\text{B}_{16}$  钴基非晶带一段，长为 55 mm，平均厚度 35  $\mu\text{m}$ ，宽为 2 mm，在非晶带上制作两电极及铜膜（厚度为 30  $\mu\text{m}$ ）作为引线，用于连接信号发生器。该部分制作非常关键，不能由此引入接触电阻，否则将影响测量准确性，既要保证非晶带与铜膜良好接触，又不能使非晶带处于高温状态（即不能用焊接方法），否则温度沿非晶带传播，整条非晶带的性能都将受到影响。用同样的方法在非晶带上选取相距为 50 mm 的两点制作引线，用于取非晶带的输出信号。将非晶带与具有极好弹性性能的塑料片粘贴，

粘贴时让非晶带的贴辊面朝外。

非晶带激励高频信号由信号发生器产生，激励信号频率及电流连续可调；非晶带两端电压信号采用数字存储示波器读出，在励磁电流一定的情况下，幅值变化即反映了阻抗变化；为使非晶带阻抗变化不影响信号发生器的输出电流，取一较大电阻与非晶带串联；为减小地磁造成的影响，非晶带轴向与地磁场垂直，其中地磁方向由磁针确定。

为给出退火对 SI 效应的影响，将非晶带用脉冲电流退火，脉冲退火电流密度为 35  $\text{A}/\text{mm}^2$ ，脉冲电流频率 2 Hz，脉冲持续作用时间 30 s。

## 3 结果及讨论

非晶带受到弯曲时则会受到外加的应力作用，因此非晶带的阻抗将会发生变化，图 2 反映了制备态非晶带向一边弯曲(受压应力)时输出电压的幅值  $V_p$  随弹性体弯曲时产生的最大挠度  $h$  的变化关系（这关系可反映阻抗与应力的关系，因为  $V_p = |Z| \cdot I_p$ ， $|Z|$  为材料的阻抗值， $I_p$  为励磁电流幅值）。而图 3 给出了当制备态非晶带向相反方向弯曲(受张应力)时阻抗随弯曲程度的变化关系，励磁电流的有效值  $I_{\text{rms}}$  设定为 15 mA，频率分别为 2 和 7 MHz。由结果可知，随频率增大，阻抗  $|Z|$  随应力的变化率增加。对该种非晶带，阻抗随压应力的灵敏度高于随张应力的灵敏度，这与理论预测的结论是相符的。但理论结果指出对具有负磁致伸缩系数的材料，阻抗先随压应力增大而增大，但当压应力到一定值后继续增大时阻抗又随压应力增大而减小，而本研究实验结果未出现后一种情况，这可能是由于没法通过这种方式加上更大压应力的缘故。这

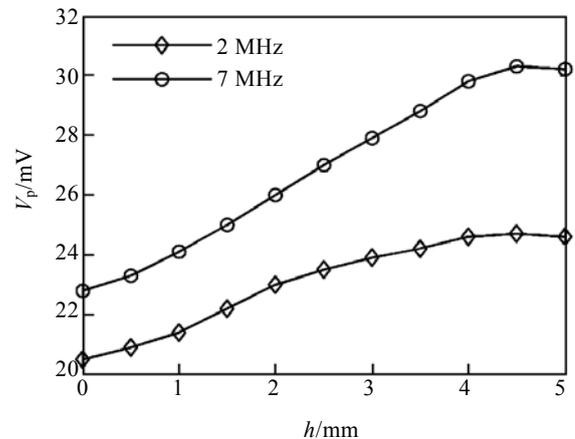


图 2 制备态非晶带在压应力作用下输出电压与挠度的关系  
Fig.2 The relationship between output voltage and deflection in as-cast amorphous ribbon under compression stress

种非晶带在制备态下即可显示较大的应力阻抗效应。经分析可知，这是由于该非晶带具有小的负磁致伸缩系数所致，制备时在脱离高速转动的辊轮时受离心及气流产生的张力作用，使其磁畴排向接近垂直于带长方向，并且具有小的磁各向异性场，因此易于产生应力阻抗效应。

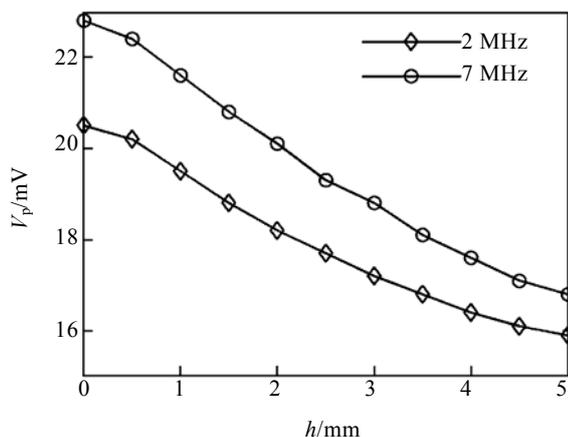


图 3 制备态非晶带在张应力作用下输出电压随挠度的变化关系

Fig.3 The output voltage change with the deflection of the as-cast amorphous ribbon under tensile stress

图 4 与图 5 分别对应着经脉冲电流退火处理后的非晶带应力阻抗效应的实验结果，励磁电流参数与图 3 相同。可以看出，退火后的材料呈现更大的应力阻抗灵敏度，这是由于电流退火一方面减小了制备过程中材料内形成的内应力，即减小了横向各向异性场的大小，另一方面使材料内磁畴进一步向垂直于带长方向排列<sup>[7]</sup>，因此改善了应力阻抗效应。

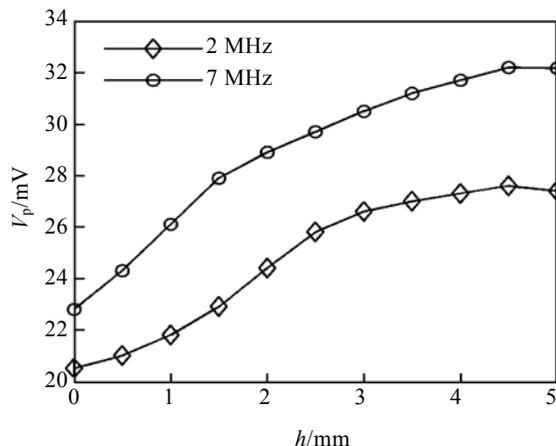


图 4 退火非晶带电压与压应力下挠度关系

Fig.4 The output voltage versus deflection of annealed amorphous ribbon under compression stress

与以上结果进行比较，还测试了非晶带在不粘贴的情况下，受弯曲时的阻抗变化。结果显示，此时非晶带受力弯曲时，无论向哪边弯曲，其两端电压幅值均随弯曲程度增大而减小，不呈现向一边弯曲幅值增大，而向另一边弯曲幅值减小的现象。

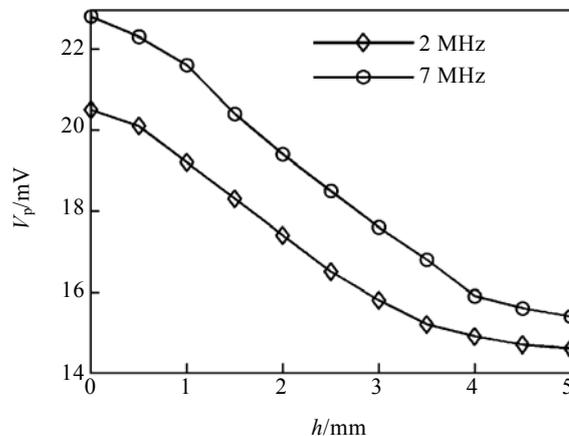


图 5 张应力作用下退火非晶带输出电压与挠度关系

Fig.5 The relationship between output voltage and deflection in the annealed amorphous ribbon applied by tensile stress

### 4 结 论

1) 制备态钴基非晶态合金带在弯曲应变下可呈现应力阻抗效应，制备态下已具有较大的应力阻抗变化率，说明该制备态非晶带存在横向畴，磁各向异性场偏向横向。

2) 经脉冲电流退火处理，可明显改善非晶带的应力阻抗变化率。

3) 对负磁致伸缩系数的材料，阻抗先随压应力增大而增大，而阻抗随张应力增大而减小。

### 参考文献 References

[1] Shen L P, Uchiyama T, Mohri K et al. *IEEE Trans Mag*[J], 1997, 33(5): 3355

[2] Tomka G T, Milne J, Tweed S et al. *J Magn Magn Mater*[J], 2004, (272~276): 1355

[3] Zhou Yong, Mao Xinhui, Chen Jian et al. *J Magn Magn Mater*[J], 2005, 292: 255

[4] Bao Binghao(鲍丙豪), Song Xuefeng(宋雪丰). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(2): 208

[5] Peng B, Zhang W L, Zhang W X et al. *J Magn Magn Mater*[J], 2005, 288: 326

[6] Bao Binghao(鲍丙豪), Ren Naifei(任乃飞), Wan Guoyu(王国

余). *Acta Physica Sinica*(物理学报)[J], 2008, 57(4): 2519

*Mater*[J], 2007, 308: 273

[7] Tannous C, Gieraltowski J, Valenzuela R. *J Magn Magn*

## Stress Impedance Effect in $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Cr}_2\text{Si}_{12}\text{B}_{16}$ Amorphous Ribbon under Bending Strain

Bao Binghao, Zhang Jingwei, Zhang lin

(Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** The stress impedance effect is studied for the  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Cr}_2\text{Si}_{12}\text{B}_{16}$  amorphous ribbons under bending strain. One of the amorphous ribbons is in as-cast state and the other is treated by pulse current, and the both amorphous ribbons are of the negative magnetostriction. The experimental result shows that the amplitude ratio of the output voltage from the two ends is larger than 40% for the pulse current annealed amorphous ribbon of 50 mm in length only under a bending strain of 5 mm deflection. The stress impedance sensitivity can be improved by the pulse current annealing at  $35 \text{ A/mm}^2$  and 2 Hz for 30 s. The bending impedance increases with the applied compressive stress, and decreases with the tensile stress, and can be used to develop a new force sensor with large gauge factor and some novel smart materials.

**Key words:** bending strain; stress impedance effect; negative magnetostriction; pulse current anneal

---

Biography: Bao Binghao, Professor, School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, P. R. China, Tel: 0086-511-88780171, E-mail: binghaobao@ujs.edu.cn