

张应力作用下 FeSiB 合金磁致伸缩的研究*

章 勇 林丽莎

(华侨大学电气技术系, 泉州 362011)

摘要 非晶态 FeSiB 合金在张应力作用一段时间后, 其饱和磁致伸缩系数明显变小; 张应力越大, 变化越明显. 其原因是在张应力作用后材料内应力增加和磁畴结构发生变化所致.

关键词 张力, 磁致伸缩, 干涉, 磁畴

分类号 O 482. 526

非晶态 FeSiB 合金是一种良好的软磁材料. 它有较小的矫顽力和磁各向异性、高的磁饱和强度和磁导率, 以及较高的磁致伸缩系数, 因而具有较高的机电耦合系数. 同时 FeSiB 材料成本低廉, 易形成非晶态, 且耐腐蚀性好, 所以它是一种具有广泛发展前途的非晶材料. 如果利用其磁致伸缩性质来制作磁传感器和压力传感器, 则要设法让材料保持较大的磁致伸缩系数. 这样才有较高的机电耦合系数, 而使仪器具有较高的灵敏度. 因此, 研究 FeSiB 非晶合金的磁致伸缩随应力条件变化的规律, 在材料的开发利用方面具有重要的意义.

1 实验

采用中国有色金属研究总院提供的两种非晶条带: 1* 带为 $\text{Fe}_{80.46} \text{Si}_{7.65} \text{B}_{11.5} \text{Co}_{0.39}$, 厚度 $20 \mu\text{m}$; 2* 带为 $\text{Fe}_{77.84} \text{Si}_{9.2} \text{B}_{12.8} \text{Co}_{0.16}$, 厚度 $30 \mu\text{m}$. 将它们裁成宽度约为 1.5 mm 的条带样品, 用 X 射线衍射验证材料为非晶态. 用光杠杆法和迈克尔逊干涉法, 在室温下分别测定样品在张应力作用前后其磁致伸缩的变化.

1.1 光杠杆法

实验装置如图 1 所示. 待测样品条带的上端固定在横梁中心卡头上, 并穿过螺线管, 下端用圆柱形卡头夹紧. 卡头可随样品条带的伸缩在平台圆孔中移动, 从而带动光杠杆的平面镜旋转. 当螺线管线圈通电时, 在磁场作用下, 样品条带由于磁致伸缩而产生微小形变 ΔL . ΔL 通过光杠杆放大为竖尺上的位移 l ,

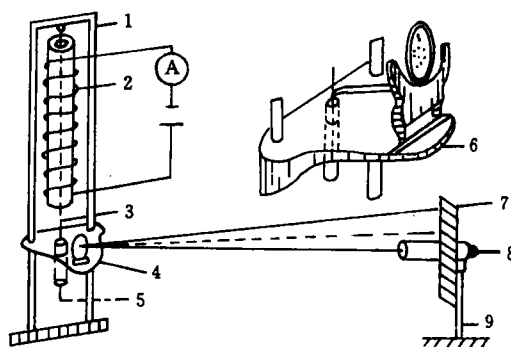


图 1 光杠杆法实验装置示意图

1. 支架; 2. 螺线管(长 66 cm); 3. 非晶条带;
4. 光杠杆平台; 5. 活动卡头; 6. 光杠杆系统;
7. 标尺; 8. 望远镜; 9. 支架

* 本文 1994-05-19 收到; 福建省自然科学基金资助项目

从望远镜上读出镜面上标尺像的位移 l , 则相应的伸缩量为 $\Delta L = Dl/2R$. 光杠杆放大原理如图 2 所示.

利用上述装置分别测量张应力作用前后 1[#] 和 2[#] 样品在磁场作用下的伸长量. (1) 张应力作用前样品条带伸长量如表 1. (2) 1[#] 和 2[#] 样品在一恒定重物(质量 $m = 0.123 \text{ kg}$) 垂直拉伸作用下放置 60 d 左右. 重复以上实验, 结果在望远镜中只能看到标尺稍微有点抖动, 而读数却无明显变化. 显然, 此时的磁致伸缩效应非常微弱, 以致于在精确度范围内无法测量.

表 1 张应力作用前标尺位移 l 与电流 I 的关系

I/A	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
l/mm 1 [#]	0.6	0.9	1.0	1.1	1.1
l/mm 2 [#]	0.7	0.9	1.0	1.0	1.0

1.2 迈克耳逊干涉法

实验装置如图 3. 图中传输光纤的芯径为 $300 \mu\text{m}$, 加保护层外径为 $1070 \mu\text{m}$. 从 He-Ne 激光器发出的激光经半透镜 M 分光并聚焦后, 一束光通过光纤从 A 传到 D; 另一束光通过另一光纤从 B 传到 C 再到 D; BC 段光纤上粘贴上非晶样品条带并穿过螺线管(样品长度约为 66 cm). 两束光在屏幕 p 上产生干涉条纹. 当螺线管线圈通电时, 由于样品的磁致伸缩使两束光的光程差发生变化, 从而在屏幕 p 上可看到干涉条纹的移动. 当电流从最大值减少时, 条纹朝相反方向移动.

重复以上实验, 结果不变. 拉伸以后的 FeSiB 样品条带经 X 射线衍射分析后仍为非晶态.

2 实验结果分析

2.1 光杠杆法的实验机理

在光杠杆法测量实验中, 当螺线管线圈通电时, FeSiB 非晶条带在磁场作用下, 因磁化状态改变, 产生的磁致伸缩通过光杠杆放大. 从望远镜中读出镜面上标尺像的位移 l , 则相应的伸缩量为 $\Delta L = Dl/2R$. 实验时测得 $R = 280 \text{ cm}$, $D = 7.1 \text{ cm}$, 故 1[#] 样品的最大伸长为 $\Delta L_1 = Dl_1/2R = (7.1 \times 0.11)/(2 \times 280) = 1.4 \times 10^{-3} \text{ cm}$. 因为本文所用的 FeSiB 是非晶薄带, 故假设它是各向同性磁致伸缩的材料. 若磁化强度同观测方向之间的夹角为 θ , 则有 $\Delta L/L = 1.5\lambda_s(\cos^2\theta - 1/3)^{(1)}$, 其中 L 是非晶条带的原长, λ_s 是材料的饱和磁致伸缩系数. 实验中 $\theta = 0$, $L = 66 \text{ cm}$. 因此, $\lambda_1 = \Delta L_1/L_1 = 1.4 \times 10^{-3}/66 = 21.2 \times 10^{-6}$. 同理, 2[#] 样品的最大伸长量为 $\Delta L_2 = Dl_2/2R = (7.1 \times 0.10)/(2 \times 280) = 1.3 \times 10^{-3} \text{ cm}$, 故 $\lambda_2 = \Delta L_2/L_2 = 1.3 \times 10^{-3}/66 =$

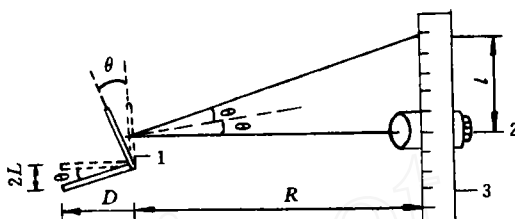


图 2 光杠杆放大原理

1. 光杠杆; 2. 望远镜; 3. 竖尺

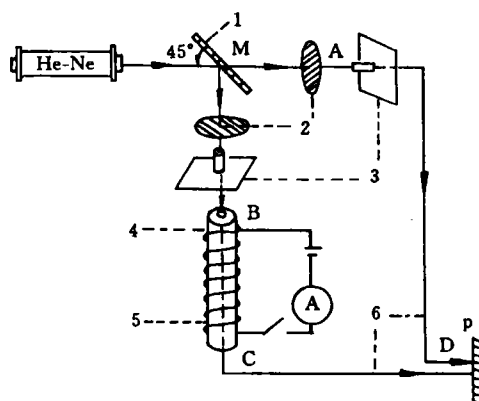


图 3 光干涉法测量装置

1. 半透镜; 2. 透镜; 3. 光纤架; 4. 螺线管;
5. 粘贴非晶条带的光纤; 6. 光纤

19.7×10^{-6} . 从表 1 可以看出, 当线圈电流增至 3.0 A 时, l 趋于稳定. 所以, 我们测得的 λ_s 可认为是饱和磁致伸缩系数. 结果与一般文献所记载的 FeSiB 非晶材料的 $\lambda_s = 40 \times 10^{-6}$ 大致吻合^[2]. 当样品经拉伸一段时间后, 用同样的方法无法测量出其伸长量, 这说明磁致伸缩变得很微小.

2.2 迈克尔逊干涉法的实验机理

用迈克尔逊干涉法测量时, 可观察到干涉条纹的移动. 这是由于非晶带在磁场作用下磁致伸缩而带动光纤形变, 引起两束光的光程差发生改变. 实验结果如表 2 所示. 表中 I_1 为条纹开始移动时电流, I_2 为条纹不再移动时电流, N 为最大的条纹移动数目.

表 2 张应力作用前后干涉条纹移动情况

样 品	样品张应力 作用情况	I_1/A	I_2/A	$N/\text{条}$
1*	作用前	0.24	2.20	6.0
	作用后	0.70	2.20	1.5
2*	作用前	0.10	2.20	9.0
	作用后	0.25	2.20	4.5

显然 FeSiB 非晶条带经拉伸一段时间后, 干涉条纹的移动数目明显减少. 由此说明样品拉伸一段时间后, 磁致伸缩大大变小, 这与用光杠杆法进行测量的结果是一致的.

2.3 张应力作用的影响

两种方法测量的结果都表明, Fe 基非晶磁性材料的 $\lambda_s > 0$, 且在张应力作用一段时间后, 磁致伸缩效应大大降低. 只要任何一种磁性材料的磁致伸缩系数不为零, 对它施加应力就会影响其内部磁畴的排列取向. 对于 $\lambda_s > 0$ 的材料, 加上张应力, 其磁化状态由退磁状态变为 $M \neq 0$ 的状态, 且材料的磁化强度沿着张力的方向^[3]. 也即磁畴将沿张力方向取向而产生磁化, 张力加得越大, 磁化越强. 这时如果沿其磁化方向施加同样的外场, 则对样品而言, 磁化状态的变化减少, 从而其有效磁致伸缩系数 λ_{eff} 也变小. 我们在实验中观察到的正是这种情况. 在极端情况下, 如果张力加得足够大, 以至于材料的磁矩完全排列到张力方向, 也即材料磁化达到饱和. 这时沿其磁化方向的外界磁场将不会改变其磁化状态, 因而导致 $\lambda_{eff} = 0$. 另一方面, A. Inoue 等人在对 FeSiB 非晶丝弹性行为的研究工作中^[4], 指出非晶丝材料的抗拉破断强度 σ_t “随着冷拉的增加, 主要是由于几何形状的均匀性的改进以及非晶合金显示出微弱的加工硬化所致”. 在同一工作中, 他们还研究了非晶丝的杨氏模量 E_s , 与抗拉破断强度 σ_t 和硬度 HV 或晶化温度之间的相互关系, 指出“对于所研究的所有 FeSiB 非晶丝来说, 由 $\epsilon_x = \sigma_t/E_s$ 和 $\epsilon_y = HV/3E_s$ 定义的应变具有一个几乎恒定的值 (~ 0.019)”. 因此, 当 σ_t 增大时, E_s 也必然要有相应的增加. 也就是说, 当非晶丝在长期张应力作用下, 内应力增大造成微弱的加工硬化, 而加工硬化致使抗拉破断强度 σ_t 增加, 又导致杨氏模量 E_s 变大. E_s 增大即意味着在同样应力作用下所产生的应变减小. 综合以上两个因素, FeSiB 非晶薄带在恒定张应力作用一段时间后, 由于材料磁化状态的改变和杨氏模量的增大, 造成材料的饱和磁致伸缩效应大大降低.

2.4 张应力不同对结果的影响

从迈克尔逊干涉法的实验结果还可看出, 1* 样品在拉伸前后磁致伸缩的相对变化量 ($6/1.5 = 4$) 大于 2* 样品的相对变化量 ($9/4.5 = 2$), 这是由于两种样品所受的张应力不同所引起

的. 在同样重物(其质量为 $m=0.123\text{ kg}$)作用下, 1# 样品(宽 1.5 mm , 厚度 $20\text{ }\mu\text{m}$)受的张应力为 $\sigma_1=P/S_1=(0.123\times 9.8\times 10^5)/(1.5\times 0.02)=40\text{ MPa}$, 而 2# 样品(宽为 1.5 mm , 厚度为 $30\text{ }\mu\text{m}$)受的张应力则为 $\sigma_2=P/S_2=(0.123\times 9.8\times 10^5)/(1.5\times 0.03)=27\text{ MPa}$. 对于各向同性的磁致伸缩材料, 当存在应力时, 其应力能为 $F_s=-1.5\lambda_s\sigma\cos^2\theta^{(3)}$, 式中 θ 为张应力和磁化强度之间的夹角. 根据“实际存在的状态必定是能量最小的状态”的原理, 可以推知, 对于 $\lambda_s>0$ 的材料, σ 越大, F_s 越小. 从而导致磁畴的改变越大, 也即磁化越强, λ_{eff} 越小. 同时, 冷拉越大, σ_f 越大, 则 E_s 也越大, 因而材料对外表现出来的磁致伸缩系数也就越小.

3 讨论

非晶态 FeSiB 磁性材料的($\lambda_s>0$), 在张应力长期作用下, 其磁畴结构会因内应力变化而改变. 它的磁化状态会由退磁状态变为 $M\neq 0$ 的状态, 且材料的磁化强度沿着张应力的方向. 另一方面, 在张应力作用下, 杨氏模量也会增大. 由于这两种效应的共同作用, 使得其饱和磁致伸缩能力大大降低. 因此, 在使用作传感器的非晶磁性材料时, 为获得较高的灵敏度, 应尽量避免这种材料长期处于张应力作用下.

参 考 文 献

- 1 樱井良文著. 现代工程磁学. 姜恩永等译. 北京: 机械工业出版社, 1987. 52~55
- 2 王会宗. 磁性材料及其应用. 北京: 国防工业出版社, 1989. 336~337
- 3 钟文定. 铁磁学: 中册. 北京: 科学出版社, 1987. 21~44
- 4 Inoue A, Cheh H S, Krause J T et al. Yong's modulus of FeSiB amorphous wires. Sci. Rep. RITU, 1983, (1): 124~138

A Study of the Magnetostriction of Amorphous FeSiB Alloy under Tensile Stress

Zhang Yong Lin Lisha

(Dept. of Elec. Tech., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract After keeping amorphous FeSiB alloy under tensile stress for a period of time, its saturated magnetostriction coefficient decreases significantly. The larger the tensile stress, the more significant decrease the coefficient. The reason lies in the increased internal stress of the material and the structural change of magnetic domains after the action of tensile stress.

Keywords tension, magnetostriction, interference, magnetic domain