

〈110〉取向 $Tb_{0.36}Dy_{0.64}(Fe_{0.85}Co_{0.15})_2$ 合金的 磁机械阻尼特性*

张昌盛 马天宇 严密

(浙江大学材料科学与工程系硅材料国家重点实验室, 杭州 310027)

裴永茂

(北京理工大学理学院, 北京 100081)

高旭

(清华大学工程力学系, 北京 100084)

摘要 采用区熔定向凝固方法, 以 480 mm/h 速度制备了 〈110〉取向 $Tb_{0.36}Dy_{0.64}(Fe_{0.85}Co_{0.15})_2$ 合金棒. 通过测试在 0—0.325 T 磁场范围内合金棒的应力—应变回线, 计算了应力幅 σ_m 分别为 -10, -30 和 -50 MPa 的阻尼系数 $\Delta W/W$. 结果表明, 零磁场下的 $\Delta W/W$ 最大; 随磁场强度增大, 同一 σ_m 条件下的 $\Delta W/W$ 逐渐降低. 在低磁场中, $\Delta W/W$ 随 σ_m 的增加而降低; 在高磁场中, $\Delta W/W$ 随 σ_m 的增加而升高. 利用不同预压应力下的磁致伸缩—磁化强度关系曲线, 分析了磁场—应力复合加载条件下非 180° 磁畴和畴壁的运动形式. 依据局部内应力理论, 解释了合金棒的磁机械阻尼系数随外磁场强度和应力幅值变化的规律.

关键词 Tb—Dy—Fe 合金, 磁致伸缩, 磁机械阻尼, 磁化强度

中图法分类号 TG113

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2009)06-0749-05

MAGNETOMECHANICAL DAMPING CAPACITY OF 〈110〉 ORIENTED $Tb_{0.36}Dy_{0.64}(Fe_{0.85}Co_{0.15})_2$ ALLOY

ZHANG Changsheng, MA Tianyu, YAN Mi

State Key Laboratory of Silicon Materials, Department of Materials Science and Engineering,
Zhejiang University, Hangzhou 310027

PEI Yongmao

School of Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081

GAO Xu

Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084

Correspondent: MA Tianyu, Tel: (0571)87952366, E-mail: maty_zju@163.com

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.50701039), New Century Program
for Excellent Talents in University (No.05-0526), and Program for Changjiang Schol-
ars and Innovative Research Team in University (No.0651)

Manuscript received 2008-11-10, in revised form 2009-02-03

ABSTRACT During the mechanical loading and unloading process, Tb—Dy—Fe giant magnetostrictive materials can dissipate a mass of elastic energy due to the irreversible movements of non-180° domain walls, which is of interest to be applied in passive damping control systems. The magnetomechanical damping capacity of Tb—Dy—Fe compound is strongly sensitive to the stress magnitude as well as the external magnetic fields. As a new member of the Tb—Dy—Fe family, quaternary $Tb_{0.36}Dy_{0.64}(Fe_{0.85}Co_{0.15})_2$ compound has been developed as a good candidate in wide operating temperature range applications. In order to realize the application of $Tb_{0.36}Dy_{0.64}(Fe_{0.85}Co_{0.15})_2$ compound in passive damping control system, it is important to systemically investigate its damping capacity under coupled magnetomechanical loadings. In the present work, 〈110〉 oriented $Tb_{0.36}Dy_{0.64}(Fe_{0.85}Co_{0.15})_2$ crystal was prepared with a growth velocity of 480 mm/h by zone melting directional solidification method. The damping capacity was studied by quasi-static stress-strain measurements under a series of constant magnetic fields up to 0.325 T. Stress ranges from 0 to -10,

* 国家自然科学基金项目 50701039, 新世纪优秀人才支持计划项目 05-0526 及长江学者和创新团队发展计划项目 0651 资助

收到初稿日期: 2008-11-10, 收到修改稿日期: 2009-02-03

作者简介: 张昌盛, 男, 1985 年生, 硕士生

-30 and -50 MPa were used at room temperature. The results show that maximum damping capacity ($\Delta W/W$) is obtained at zero field. Under certain stress amplitude σ_m , $\Delta W/W$ decreases with the increase of magnetic field. A critical magnetic field exists in the damping capacity-magnetic field ($\Delta W/W-H$) curves, and seems independent on the stress magnitude. Under coupled magnetic-stress loadings, the magnetostriction-magnetization curves were measured to analyze the switching process of domains and movements of domain walls, by which an explanation on the variation of damping capacity was given.

KEY WORDS Tb-Dy-Fe alloy, magnetostriction, magnetomechanical damping, magnetization

铁磁材料内部的非 180° 磁畴在应力和磁场驱动下运动, 造成材料尺寸变化, 不仅包含弹性应变, 还包含由于磁化状态改变而导致的非弹性应变. 此非弹性应变相对应力的弛豫过程便引起能量损耗, 即磁机械阻尼^[1]. 具有超磁致伸缩性能的 Tb-Dy-Fe 合金在应力加载-卸载过程中, 由于非 180° 磁畴壁的不可逆运动而形成滞后, 从而能够耗散大量的机械能, 因此在被动振动控制中具有重要的应用前景^[2,3]. Hathaway 等^[4] 通过研究磁致伸缩传感器的应力-应变滞后回线, 认为 Tb-Dy-Fe 合金的磁机械阻尼属于 Stoner-Wohlfarth 型滞后. Teter 等^[5] 通过测量 Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂ 合金在准静态条件下的应力-应变半滞后环, 在零场条件下得到了最大的阻尼系数 $\Delta W/W = 1.75$ (相应的内耗 Q^{-1} 值为 0.28). Pei 和 Fang^[6] 研究了〈110〉取向 Tb-Dy-Fe 合金在多轴磁场条件下的磁机械阻尼特性, 发现其阻尼系数随外加磁场方向的改变而显著变化.

在磁机械复合加载条件下, 初始磁化状态发生改变, 造成材料内部磁畴和畴壁的运动变得极为复杂, 表现出不同的宏观响应. 比如, 沿 Tb-Dy-Fe 合金取向材料的轴向施加预压应力时, 其磁致伸缩性能会显著提高^[7,8], 即磁致伸缩“跳跃”效应 (“Jump” 效应); 另外, 当外磁场强度变化时, 其 Young's 模量也会发生明显变化, 即 “ ΔE ” 效应^[9]. 由此可见, Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂ 合金的初始磁化状态对其磁机械行为有重要影响.

本研究的前期工作^[10] 发现, 通过增大 Tb/Dy 比例可以降低 Tb-Dy-Fe 合金电子自旋再取向温度, 同时用 Co 元素部分替换 Fe, 可以提高 Curie 温度, 开发出了宽温域 Tb_{0.36}Dy_{0.64}(Fe_{0.85}Co_{0.15})₂ 四元合金. 采用区熔定向凝固技术制备的 Tb_{0.36}Dy_{0.64}(Fe_{0.85}Co_{0.15})₂ 合金〈110〉取向晶体不仅在 -80 至 100 °C 宽温域内具有优异的磁致伸缩性能, 而且具有与 Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe₂ 合金取向晶体相似的 “Jump” 效应, 在大温度变化环境中具有重要的应用价值^[11]. 为实现该合金在被动阻尼器件中的实际应用, 需要对其在磁机械复合加载条件下的阻尼系数进行系统研究. 因此, 本工作采用准静态测试方法, 研究了宽温域 Tb_{0.36}Dy_{0.64}(Fe_{0.85}Co_{0.15})₂ 合金〈110〉取向晶体在不同的磁场和应力下的磁机械阻尼特性, 为该合金在被动振动控制技术中的应用提供参考.

1 实验过程

以高纯 (99.9%) Tb, Dy, Fe 和 Co 原材料, 配制

Tb_{0.36}Dy_{0.64}(Fe_{0.85}Co_{0.15})₂ 母合金, 在真空电弧炉中反复熔炼 4 次后铸成直径为 6.8 mm 的铸棒. 在高温梯度区熔定向凝固设备上, 以 480 mm/h 晶体生长速度使其定向凝固. 用日本理学 D/Max-2200PC X 射线衍射仪 (XRD, Cu K_{α}), 确定其轴向晶体学取向为 〈110〉. 采用线切割获得直径为 7 mm, 长度为 25 mm 的样品, 并采用准静态测试方法, 测量样品在不同磁场中的应变-应力关系曲线, 磁场和压应力施加方向均沿合金棒的轴向. 每次实验前, 先将样品在 0.8 T 磁场中磁化, 然后降低至设定的磁场强度, 再按一定速率加载到设定的最大应力值 σ_m 后开始卸载. 设定的磁场大小分别为 0, 0.036, 0.053, 0.13 和 0.325 T; 设定的应力幅 σ_m 分别为 -10, -30 和 -50 MPa. 要获得完整的应变-应力环 (strain-stress hysteresis loop), 还需要对试棒施加拉伸应力; 但是由于 Laves 相的脆性, 试棒的拉伸强度极低, 约为 28 MPa^[12], 因此, 本实验中只测量压缩应力条件下的应变-应力半环 (strain-stress half loop). 样品的磁化强度由拾取线圈测得, 磁致伸缩及应力-应变曲线均由电阻应变计测得. 需要指出的是每条曲线均在首次加载-卸载过程中得到. 由于采用液压伺服系统加载方式, 很难控制试棒所受的实际应力等于 σ_m 的设定值, 具体的应力值可由有效载荷除以试棒的横截面积算得. 实验中的压磁效应与所施加的实际磁场相比很弱, 因此不予考虑.

2 实验结果

2.1 不同磁场中的应力-应变曲线

图 1 为不同磁场条件下〈110〉取向 Tb_{0.36}Dy_{0.64}(Fe_{0.85}Co_{0.15})₂ 合金棒的应力-应变回线. 为了保证每次实验时样品具有相同的初始退磁状态, 测试前都经 0.8 T 磁场饱和和磁化处理. 由图可见, 零磁场中得到的应变-应力曲线是“开口的”, 即在完全卸载后存在一残余应变 ϵ_r ; 随磁场增加到 0.036, 0.13 和 0.325 T, ϵ_r 消失, 得到“闭合的”应变-应力滞后环. 由于材料本身的铁弹性, 应变-应力曲线是非线性的; 同时, 由于弹性模量变化效应, 应力-应变曲线的非线性特征也在随磁场增加而变化. 此外, 合金棒的阻尼区中心 (即卸载-加载过程中应变滞后的最大值) 随磁场增加向高应力水平移动.

2.2 磁机械阻尼系数

磁机械阻尼系数 $\Delta W/W$ (即单个周期内的机械能损耗 ΔW 与最大弹性能 W 的比值) 可由应变-应力回线 (图 1) 计算得到^[5]

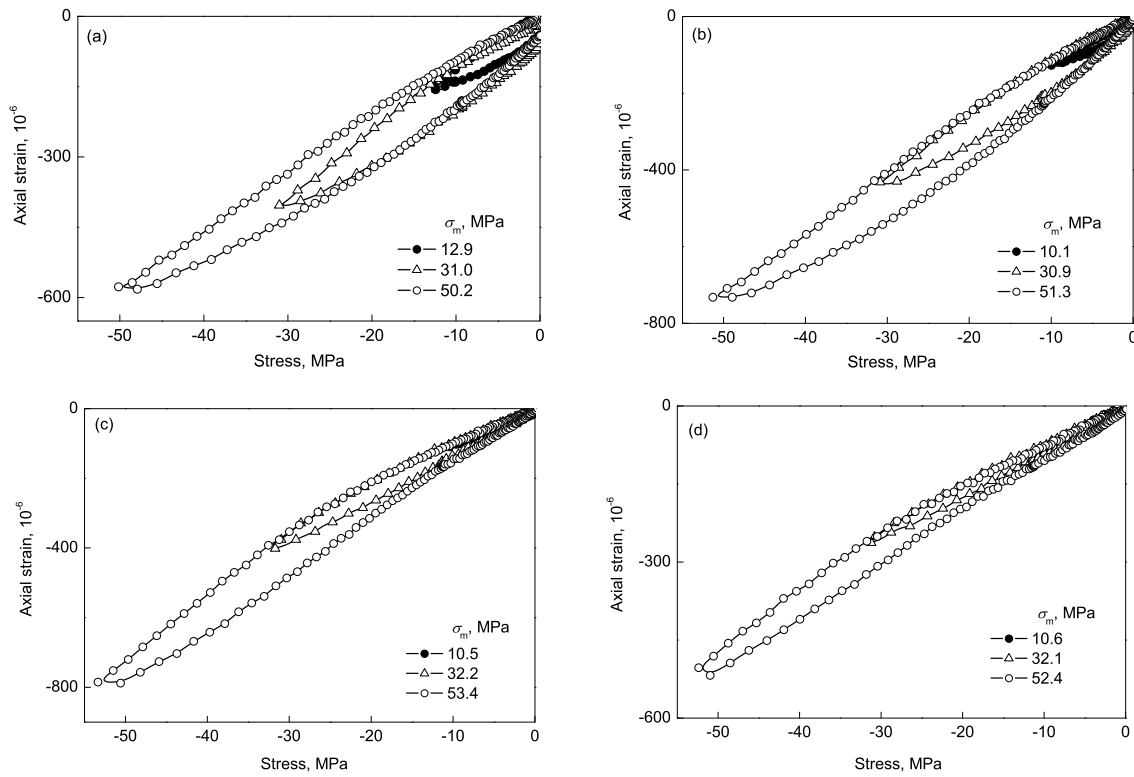


图 1 $\langle 110 \rangle$ 取向 $\text{Tb}_{0.36}\text{Dy}_{0.64}(\text{Fe}_{0.85}\text{Co}_{0.15})_2$ 合金棒在不同磁场下的应变 - 应力回线

Fig.1 Compressive strain-stress half loops of $\langle 110 \rangle$ oriented $\text{Tb}_{0.36}\text{Dy}_{0.64}(\text{Fe}_{0.85}\text{Co}_{0.15})_2$ rod in magnetic fields $\mu_0H=0$ T (a), $\mu_0H=0.036$ T (b), $\mu_0H=0.13$ T (c) and $\mu_0H=0.325$ T (d) at different stress amplitudes σ_m , showing the evolution of non-linear stress-strain relation with increasing magnetic field

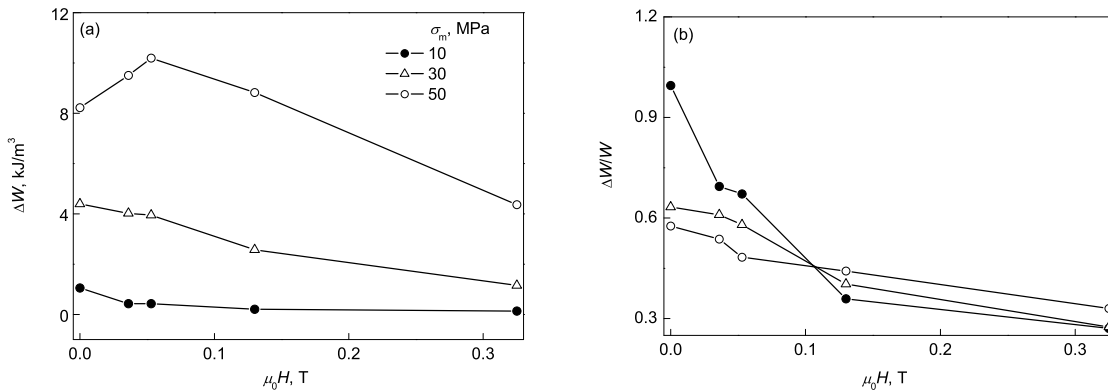


图 2 $\langle 110 \rangle$ 取向 $\text{Tb}_{0.36}\text{Dy}_{0.64}(\text{Fe}_{0.85}\text{Co}_{0.15})_2$ 合金棒的能量损耗和阻尼系数

Fig.2 Field dependence of energy loss per cycle ΔW (a) and damping capacity $\Delta W/W$ (b) for $\langle 110 \rangle$ oriented samples at different stress amplitudes σ_m

$$\Delta W/W = 4A/(\sigma_m \cdot \varepsilon_m) \quad (1)$$

式中, A 为每个应变 - 应力回线的积分面积, ε_m 为应力幅值 σ_m 对应的应变值. 图 2a 和 b 分别为 $\langle 110 \rangle$ 取向 $\text{Tb}_{0.36}\text{Dy}_{0.64}(\text{Fe}_{0.85}\text{Co}_{0.15})_2$ 合金棒的机械能损耗 ΔW 和阻尼系数 $\Delta W/W$ 随磁场强度 μ_0H 的变化关系. 由图 2a 可以看出, 在 σ_m 分别为 10 和 30 MPa 时, ΔW 均随磁场增加而接近线性减少; 在 σ_m 为 50 MPa 时, ΔW 随磁场增加而先增加、后减少. 这表明机械能损耗与应力幅值有密切关系, 反映了不同类型的磁畴运动和畴壁移动.

由图 2b 可以看出, $\Delta W/W$ 在零磁场中最大, 随磁场强度增加而逐渐降低, 这与文献 [5] 的报道一致. 值得注意的是, 在零磁场和低磁场中, $\Delta W/W$ 随 σ_m 增大而减少; 在临界磁场 (~ 0.105 T) 中, 出现与 σ_m 值无关的交点; 在高磁场中, $\Delta W/W$ 随 σ_m 增大而增加.

3 讨论

Tb-Dy-Fe 合金的磁机械阻尼系数不仅受到外加载荷的影响, 还与材料的内禀磁性及微观组织有关. Teter 等 [5] 认为, 其阻尼系数与材料的本征磁致伸缩系数 λ_{111} ,

磁晶各向异性常数 K , Young's 模量 E 等有关. 其中, Young's 模量受到材料晶粒取向、尺寸以及内部缺陷的影响. 与 $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_2$ 合金相比, $\text{Tb}_{0.36}\text{Dy}_{0.64}(\text{Fe}_{0.85}\text{Co}_{0.15})_2$ 合金的 λ_{111} 略低, 而 K_1 略高^[10]. 由于实际晶体生长条件的不同, 二者的 Young's 模量很难比较. 因此, 难以就 $\text{Tb}_{0.36}\text{Dy}_{0.64}(\text{Fe}_{0.85}\text{Co}_{0.15})_2$ 合金 $\langle 110 \rangle$ 取向晶体与已有的 $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_2$ 合金取向材料的阻尼系数进行定量地比较. 所以, 本工作仅从外加载荷条件的变化讨论其阻尼系数的变化.

铁磁材料在准静态下的阻尼特性, 可以看作是振动频率足够低的情况下引起的静滞后型阻尼, 其机制主要是应力诱导的由畴壁不可逆移动引起的机械能量损耗^[2]. 根据局部内应力理论 (即 Smith-Birchak 理论), 铁磁性合金的阻尼主要归因于非 180° 畴壁的不可逆移动^[13]. 这是外磁场和应力对于 180° 畴壁移动分别产生不同作用的结果: 在较低外磁场中磁化强度的增加主要源自于 180° 畴壁移动, 而在较高外磁场中 180° 畴壁保持相对稳定; 压应力并不能够使 180° 畴壁的状态发生改变. 由于 $\text{Tb}_{0.36}\text{Dy}_{0.64}(\text{Fe}_{0.85}\text{Co}_{0.15})_2$ 合金的易磁化方向为 $\langle 111 \rangle$ ^[14], 其内部的非 180° 畴壁包含 71° 和 109° 两种畴壁. 为方便讨论, 仅就 71° 畴壁的运动情况加以探讨. 在轴向磁场作用下, 合金棒内部 71° 磁畴的磁化强度趋向于轴向排列; 在轴向压缩应力作用下, 其磁化强度趋于与轴向垂直的易磁化方向排列, 因此, 这两种互相竞争的物理作用力使得 71° 畴壁的运动随外加载荷不同而变化.

根据局部内应力理论, 铁磁合金内部存在大量不连续的大小不等的局部内应力 σ_{loc} , 只有当外加应力 $\sigma_m > \sigma_{\text{loc}}$ 时, 才会引起这一局部的 71° 畴壁发生不可逆移动并造成能量损耗 ΔW ^[13]. 图 3a 和 b 分别为不同预压应力幅值条件下的磁滞回线和磁化率曲线. 由图可见, 随预压应力 σ_m 增加, $\langle 110 \rangle$ 取向 $\text{Tb}_{0.36}\text{Dy}_{0.64}(\text{Fe}_{0.85}\text{Co}_{0.15})_2$ 合金棒的磁化强度在更高磁场中才趋近饱和, 其最大磁化率随之降低. 这表明, 要使样品达到相同的磁化状态, 应力幅值越高, 所需的外磁场强度越大; 而磁场强度越高, 低应力越难于驱动 71° 磁畴的磁化强度转向垂直方向. 因此, 局部内应力 σ_{loc} 随磁场强度增加而增大, 表明需要更大应力才能使 71° 畴壁发生不可逆移动, 这充分解释了阻尼区在高磁场中移向高应力水平的现象. 在本实验条件下, 阻尼系数随磁场增加而降低, 这也与局部内应力增大有关.

在不同的磁场和应力幅值条件下, 畴壁的移动方式也不相同. 图 4 为不同预压应力幅值条件下的磁致伸缩 - 磁化强度关系曲线. 由图可见, $\langle 110 \rangle$ 取向 $\text{Tb}_{0.36}\text{Dy}_{0.64}(\text{Fe}_{0.85}\text{Co}_{0.15})_2$ 合金棒具有明显的磁致伸缩 “Jump” 效应: 随 σ_m 增加, 磁致伸缩性能显著增大, 而且磁致伸缩呈线性增长段. 从磁致伸缩 - 磁化强度 ($\lambda - \mu_0 M$) 曲线上分析, 在无应力状态, 出现 “初始平台”, 主要是 180° 畴壁移动 (或称 180° 畴变) 的结果: 磁化强度快速增加, 而对

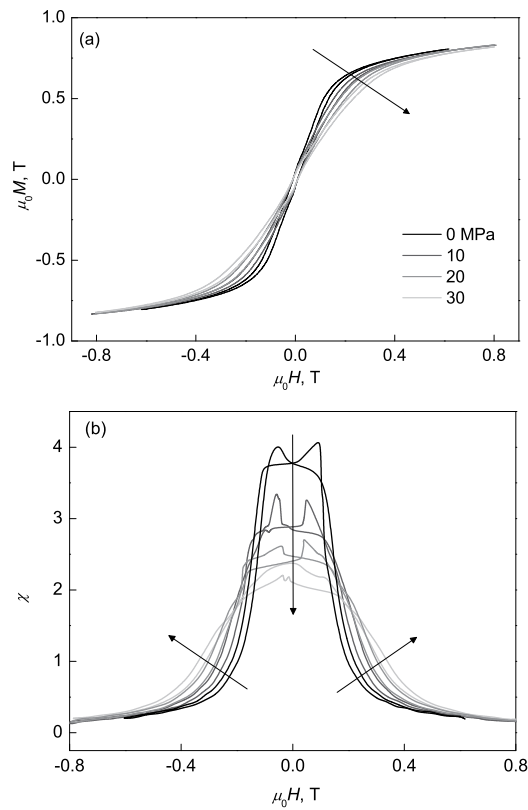


图 3 $\langle 110 \rangle$ 取向 $\text{Tb}_{0.36}\text{Dy}_{0.64}(\text{Fe}_{0.85}\text{Co}_{0.15})_2$ 合金棒的磁滞回线和磁化率曲线

Fig.3 Magnetization hysteresis loops (a) and susceptibilities χ (b) for $\langle 110 \rangle$ oriented $\text{Tb}_{0.36}\text{Dy}_{0.64}(\text{Fe}_{0.85}\text{Co}_{0.15})_2$ rod at different σ_m values (arrows indicating the increase of stress amplitude, $\mu_0 M$ —magnetization, $\mu_0 H$ —field strength)

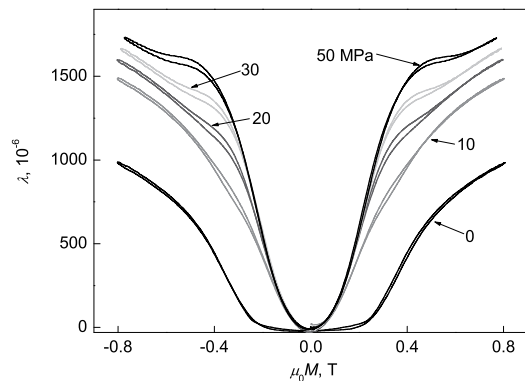


图 4 $\langle 110 \rangle$ 取向 $\text{Tb}_{0.36}\text{Dy}_{0.64}(\text{Fe}_{0.85}\text{Co}_{0.15})_2$ 合金棒的磁致伸缩 - 磁化强度关系

Fig.4 Magnetostriction-magnetization curves for $\langle 110 \rangle$ oriented $\text{Tb}_{0.36}\text{Dy}_{0.64}(\text{Fe}_{0.85}\text{Co}_{0.15})_2$ rod under different amplitudes, showing different domain switching processes (λ —magnetostriction)

外不显示明显的磁致伸缩. 随 σ_m 增加, $\lambda - \mu_0 M$ 曲线由 U 型变为 V 型: “初始平台” 消失, 初始磁化阶段为 71° 畴壁移动 (或称 71° 畴变). 随 σ_m 进一步增加, $\lambda - \mu_0 M$ 曲线由 V 型变为 γ 型: 在低磁场阶段, 磁致伸缩仍保持线性; 在高磁场阶段, 线性增长段结束后出现 “准平台”,

表明在 71° 畴壁移动 (71° 畴变) 结束后出现 180° 畴壁移动 (180° 畴变); 在更高磁场中, 重新出现 71° 畴壁移动 (71° 畴变). 因此, 可以归纳出磁场驱动下的畴壁移动规律: (i) 在低应力时, 主要是 71° 畴壁移动 (71° 畴变); (ii) 在低磁场 - 高应力时, 同时包含 71° 畴壁移动 (71° 畴变) 和 180° 畴壁移动 (180° 畴变); (iii) 在高磁场 - 高应力时, 均为 71° 畴壁移动 (71° 畴变). 所以, 在不同磁场和不同应力条件下, 畴壁的不可逆移动造成机械能损耗和阻尼系数表现出不同的变化趋势.

4 结论

(1) $\langle 110 \rangle$ 取向 $\text{Tb}_{0.36}\text{Dy}_{0.64}(\text{Fe}_{0.85}\text{Co}_{0.15})_2$ 合金棒在外磁场中表现出不同的应力 - 应变行为. 由于磁矩在平行磁场和轴向应力作用下趋向不同的方向转动, 随磁场强度增大, 局部内应力增大, 导致阻尼区向高应力水平移动; 同时, 应力 - 应变非线性特征在高磁场中变得不明显.

(2) $\langle 110 \rangle$ 取向 $\text{Tb}_{0.36}\text{Dy}_{0.64}(\text{Fe}_{0.85}\text{Co}_{0.15})_2$ 合金棒的磁机械阻尼系数随磁场强度和应力大小而变化, 主要是由于不同磁机械加载条件造成不同的畴壁移动. 随磁场强度增大, 使磁矩在应力作用下转向垂直方向变得困难, 因而卸载过程中不可逆移动的 71° 畴壁数量减少, 导致阻尼系数随外磁场增加而减小.

参考文献

- [1] Ge T S. *Physics*, 1988; 71: 1
(葛庭燧. 物理, 1988; 71: 1)
- [2] Degauque J. *Mater Sci Forum*, 2001; 366-368: 453
- [3] Jiang C B, Zhao Y, Xu H B. *Acta Metall Sin*, 2004; 40: 373
(蒋成保, 赵岩, 徐惠彬. 金属学报, 2004; 40: 373)
- [4] Hathaway K B, Clark A E, Teter J P. *Metall Mater Trans*, 1995; 26A: 2797
- [5] Teter J P, Hathaway K B, Clark A E. *J Appl Phys*, 1996; 79: 6213
- [6] Pei Y M, Fang D N. *Chin Phys Lett*, 2007; 24: 1611
- [7] Clark A E, Teter J P, McMasters O D. *J Appl Phys*, 1988; 63: 3910
- [8] Zhao Y, Jiang C B, Zhang H, Xu H B. *J Alloy Compd*, 2003; 354: 263
- [9] Clark A E. *Ferromagnetic Materials*. Vol.1, Amsterdam: North-Holland, 1980: 531
- [10] Ma T Y, Jiang C B, Xu X, Zhang H, Xu H B. *J Magn Magn Mater*, 2005; 292: 317
- [11] Ma T Y, Jiang C B, Xu H B. *Appl Phys Lett*, 2005; 86: 162505
- [12] Peterson D T, Verhoeven J D, McMasters O D, Spitzig W A. *J Appl Phys*, 1989; 65: 3712
- [13] Smith G W, Birchak J R. *J Appl Phys*, 1969; 40: 5174
- [14] Ma T Y, Yan M, Chen X Y, Jiang C B, Xu H B. *Physica*, 2008; 403B: 3677