

Tb-Dy-Fe 超磁致伸缩合金的动态机电耦合系数*

白夏冰 蒋成保 宫声凯

(北京航空航天大学材料学院 北京 100083)

摘 要 用区熔定向凝固方法制备出成分为 $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.90}$ 的 $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 112 \rangle$ 取向的超磁致伸缩材料,研究了在 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 真空热处理后材料的动态机电耦合系数. 结果表明,定向生长的 $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 112 \rangle$ 取向样品 K_{33} 值比铸态有明显的提高;随着磁场的增大, K_{33} 值先增大后又逐渐减小;外加压力从 0 MPa 增大到 10 MPa , K_{33} 值逐渐增大;继续增大压力, K_{33} 值减小. 适当的热处理使 K_{33} 值明显提高. 热处理后样品 K_{33} 值的提高与样品磁畴结构的改变有关.

关键词 金属材料, TbDyFe, 超磁致伸缩材料, 机电耦合系数 (K_{33}), 交流阻抗

分类号 O482

文章编号 1005-3093(2006)06-0607-04

Electromechanical coupling coefficient (K_{33}) of Tb-Dy-Fe giant magnetostrictive alloy

BAI Xiabing JIANG Chengbao** GONG Shenkai

(School of Material Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

* Supported by aeronautic foundation No.03G5101 and the Trans-century Training Programme Foundation for the Talents of the State Education Ministry of China No.04-0165.

Manuscript received November 8, 2005; in revised form September 5, 2006.

** To whom correspondence should be addressed, Tel:(010)82317117, E-mail: jiangcb@buaa.edu.cn

ABSTRACT The nominal $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.90}$ magnetostrictive material oriented along $\langle 110 \rangle$ and $\langle 112 \rangle$ have been prepared by zone melting unidirectional solidification. Vacuum annealing at $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 4 or 48 h has been carried out. The electromechanical coupling coefficient (K_{33}) is determined by the impedance resonance frequency tested by using AC impedance instrument. K_{33} of the samples oriented along $\langle 110 \rangle$ and $\langle 112 \rangle$ increases comparatively to the as-cast samples. With the increase of DC magnetic field, K_{33} increased initially, and then decreased. With the increase of stress from 0 MPa to 10 MPa , K_{33} increased, but at 15 MPa K_{33} is reduced. K_{33} is sharply improved after proper heat treatment, which can be attributed to the change of the magnetic domain configuration after heat treatment.

KEY WORDS metallic materials, TbDyFe, giant magnetostrictive material, electromechanical coupling coefficient (K_{33}), AC impedance

磁致伸缩材料的动态机电耦合系数 (K_{33}) 表征把电磁能转换成机械贮存能的效率^[1]. 美国 Etrma 公司生产的 Terfenol-D, 其 K_{33} 值为 0.72 ^[2]; 国内生产的同类材料, 其 K_{33} 值随着磁场的增强先增大后减小^[3]. TbDyFe 的 K_{33} 值大小与其工作所处的应力环境和磁场环境有很大的关系^[4]. 本论文模拟 TbDyFe 的实际工作条件, 研究铸态和取向 TbDyFe 样品机电耦合系数 K_{33} 与磁场和压力的关系及其机理.

1 实验方法

采用高纯 (99.99%)Tb, Dy 和 Fe 原材料, 配制成原始成分为 $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.84}$ 的母合金. 将配好的原料在真空电弧炉中反复熔炼 5 次后铸成直径 7.0 mm 的铸棒, 然后使用区熔定向凝固设备制备出直径 7.2 mm 具有 $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 112 \rangle$ 轴向择优取向的样品. 用日本理学 D/Max-2200PC X 射线衍射仪确定样品晶体生长的轴向择优取向. 在 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 管式炉中进行热处理, 通 Ar 气保护. 热处理时间为 4 h 和 48 h ^[5]. 在这些过程中, 每一个步骤后都要测量 TbDyFe 棒的 K_{33} 的变化. 机电耦合系数为 $K_{33}^2 = \pi^2 / 8(1 - (f_r/f_\alpha)^2)$, 其中 f_r 和 f_α 分别为共振与反共振频率. 用英国输力强公司的 1290+1296 交流阻抗分析仪和共振频率^[6,7]

* 航空基金 03G5101 和教育部跨世纪优秀人才培养计划基金 04-0165 资助项目.

2005 年 11 月 8 日收到初稿; 2006 年 9 月 5 日收到修改稿.

本文联系人: 蒋成保, 教授

测量 TbDyFe 棒的 K_{33} , 用直流线圈预加磁场, 用压力包加气压的方法施加预压力.

2 结果与讨论

2.1 铸态和定向凝固 TbDyFe 样品的 K_{33}

图 1 表明, 在直流偏磁场很小的时候, 曲线没有充分展开. 根据曲线上波峰和波谷对应的频率, 可以计算出各个偏置磁场下的 K_{33} 值. 从表 1 可见, 铸态样品和定向生长的 $\langle 110 \rangle$ 取向样品的 K_{33} 值都随着磁场的增强先增大后又逐渐减小^[3]. 定向生长 $\langle 110 \rangle$ 样品的 K_{33} 值比铸态样品有明显的提高, 在本文的条件下, 在 300~500 Oe 最大.

图 2 表明, 磁场为 327 Oe 时, 铸态样品的 K_{33} 值为 0.319, $\langle 110 \rangle$ 取向样品的 K_{33} 值为 0.470, $\langle 112 \rangle$ 取向样品的 K_{33} 值为 0.492; 磁场为 481 Oe 时, 铸态样品的 K_{33} 值是 0.326, $\langle 110 \rangle$ 取向样品的 K_{33} 值是 0.485, $\langle 112 \rangle$ 取向样品的 K_{33} 值是 0.505. 与铸态样品比较, 无论 $\langle 110 \rangle$ 取向还是 $\langle 112 \rangle$ 取向的样品, 其 K_{33} 值都有显著的提高, 但是两种取向样品的 K_{33} 值差别不大. 这表明, 热处理后样品的 K_{33} 值提高与样品

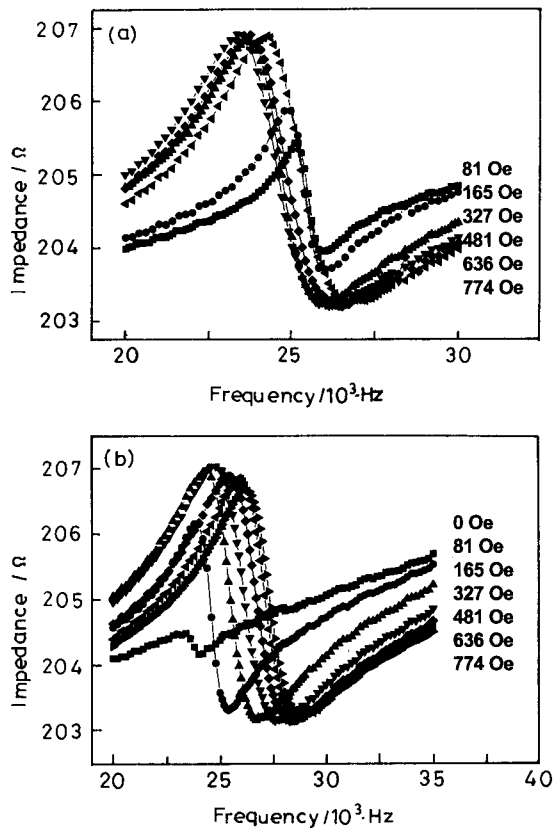


图 1 铸态和 $\langle 110 \rangle$ 定向凝固样品在不同磁场下的交流阻抗曲线

Fig.1 AC impedance curve of the as-cast sample (a) and $\langle 110 \rangle$ oriented sample (b) in the different magnetic field

磁畴结构的改变有关.

2.2 预压力对定向生长样品 K_{33} 的影响

通过压力包对样品施加压力, 然后分别在 320 Oe 和 480 Oe 的磁场下测量样品在 0 MPa, 5 MPa, 10 MPa 和 15 MPa 压力下的 K_{33} (图 3). 可以看出, 压力从 0 MPa 加到 10 MPa, $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 112 \rangle$ 取向样品的 K_{33} 值逐渐增大, 到 10 MPa 时达到最大值, 15 MPa 时的 K_{33} 值比 10 MPa 下有明显减小; 磁场为 320 Oe 和 480 Oe, $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 112 \rangle$ 样品在压力改变时 K_{33} 值的变化规律相同, 磁场为 480 Oe 时 K_{33} 值更大些. 其原因是: 随着预应力的增大, 样品的应变增大. K_{33} 值有一定的提高; 另一方面, 压力越大, 晶体的磁弹性能越大, 磁矩在磁化场作用下较难远离磁弹性能最小的 $\langle 111 \rangle$ 方向. 其结果是, 样品在最大应变提高的同时, 低场性能降低^[8]. 上述两个因素导致样品在 320 Oe 和 480 Oe 激励磁场下随着预压力进一步增大, K_{33}

表 1 铸态样品和 $\langle 110 \rangle$ 取向样品在不同磁场下的 K_{33} 值

Table 1 K_{33} of the as-cast sample and the $\langle 110 \rangle$ oriented sample with different magnetic field

Magnetic field(Oe)	As-cast samples	Samples oriented along $\langle 110 \rangle$
81	0.26	0.371
165	0.298	0.430
327	0.319	0.472
481	0.326	0.485
636	0.295	0.451
776	0.292	0.44

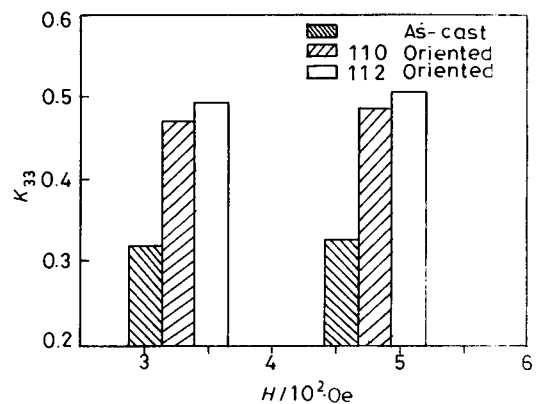


图 2 铸态、 $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 112 \rangle$ 定向凝固样品的 K_{33} 与磁场强度的关系

Fig.2 Relationship between K_{33} of the as-cast, $\langle 110 \rangle$ oriented and $\langle 112 \rangle$ oriented samples and magnetic field

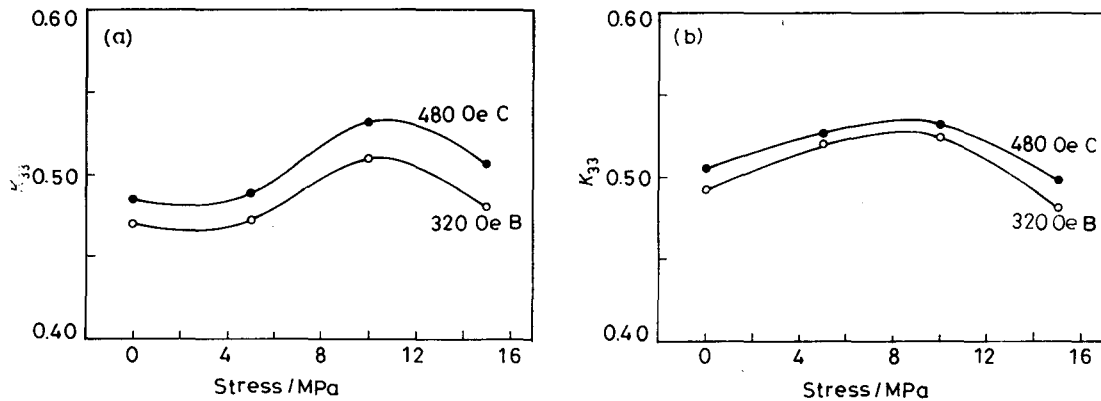


图3 在不同磁场中定向凝固 $\langle 110 \rangle$ 取向和 $\langle 112 \rangle$ 取向样品的 K_{33} 与预压力下的关系

Fig.3 Relationship between K_{33} of the $\langle 110 \rangle$ oriented sample (a) and the $\langle 112 \rangle$ oriented sample (b) and stress in different magnetic field

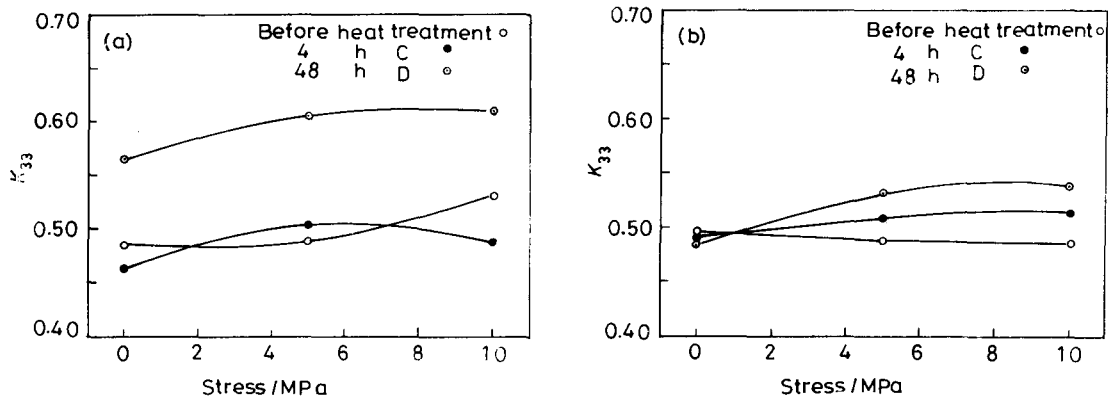


图4 (a) 定向凝固 $\langle 110 \rangle$ 取向和 (b) $\langle 112 \rangle$ 取向样品热处理后 K_{33} 的变化曲线

Fig.4 Relationship between K_{33} of the $\langle 110 \rangle$ oriented sample (a) and the $\langle 112 \rangle$ oriented sample (b) and stress after different heat treatment

值反而下降。

2.3 热处理对定向生长样品 K_{33} 的影响

由图4可见, $\langle 110 \rangle$ 取向样品热处理4 h后 K_{33} 没有明显变化, 但是热处理48 h后有显著提高; $\langle 112 \rangle$ 取向样品热处理4 h和48 h后 K_{33} 变化不明显, 但是加压力使其提高。这表明, 对于 $\langle 110 \rangle$ 取向样品, 足够长的热处理时间导致 K_{33} 值的提高。其原因是, 延长热处理时间能够充分消除定向凝固溶质再分配引起的微观成分偏析; 富稀土相和 REFe_2 相之间的相界面热应力降低; 富稀土相的球化减少其与 REFe_2 相之间的相界面面积, 降低 REFe_2 相在预压应力下初始磁畴的转动阻力。样品热处理后在预压应力作用下初始磁畴的分布是不同的, 随着热处理时间的延长, 垂直于测量方向磁畴的体积分数增加, 外加磁场使 90° 磁畴转动的体积分数增多^[9], K_{33} 明显提高。

同时, 两种取向样品的 K_{33} 值差别不大表明, 热处理后样品的 K_{33} 值提高与样品磁畴结构的改变有关。

3 结 论

1. 定向生长的 $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 112 \rangle$ 取向样品 K_{33} 值比铸态有明显提高, 而取向样品的 K_{33} 值差别不大。随着直流磁场的增大, K_{33} 值先增大后又逐渐变小, 在300 Oe到500 Oe区间的 K_{33} 值最大。随着外加压力从0 MPa加到10 MPa时 K_{33} 值逐渐增大, 到10 MPa时达到最大值, 15 MPa时的 K_{33} 值比10 MPa下有明显减小。

2. 热处理改变样品的磁畴结构, 热处理后显著提高 TbDyFe 合金的 K_{33} 值; 适当热处理的 $\langle 110 \rangle$ 样品在10 MPa压力480 Oe激励下测得的 K_{33} 值达到0.61; 热处理后样品的 K_{33} 值提高与样品磁畴结构的改变有关。

参 考 文 献

- 1 ZHU Houqing, Applied Acoustics, **17**, 5(1998)
(朱厚卿, 应用声学, **17**, 5(1998))
- 2 H.Eda, M.Oyatsu, Z.Nadmi, T.Kobyashi, The 10th International Workshop On Rare-Earth Magnets and Their Applications, Kyoto, Japan 16~19 May, 285(1989)
- 3 YUAN Huiqun, LI Chenying, ZHOU Zhuo, Mechanics in Engineering, **22**, 27(2000)
(袁惠群, 李成英, 周 卓, 力学与实践, **22**, 27(2000))
- 4 L.M.Malkinski, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, **140~144**, 2169(1995)
- 5 JIANG Chengbao, ZHAO Yan, XU Huibin, Acta Metall. Sin., **40**(4), 373(2004)
(蒋成保, 赵 岩, 徐惠彬, 金属学报, **40**(4), 373(2004))
- 6 ZHU Houqing, LIU Jiangguo, WANG Xiuron, XING Yanhong, ZHANG Hongping, Journal of Alloys and Compounds, **258**, 49(1997)
- 7 H.Wakiwaka, M.Nagumo, IEEE Transactions on Magnetics, **28**(5), 2208(1992)
- 8 Han Zhiyong, Gao Xuexu, Zhang Maocai, Zhou Siouzeng, Progress in Natural Science, **13**(6), 655(2003)
- 9 JIANG Chengbao, ZHAO Yan, XU Huibin, Acta Metall. Sin., **40**(4), 378(2004)
(蒋成保, 赵 岩, 徐惠彬, 金属学报, **40**(4), 378(2004))