



# Tb<sub>x</sub>Dy<sub>1-x</sub>(Fe<sub>0.6</sub>Co<sub>0.4</sub>)<sub>2</sub>合金的磁性和磁致伸缩性能

杨建林

(辽宁工程技术大学 材料科学与工程学院, 阜新 123000)

**摘要:** 利用电弧熔炼法制备 Tb<sub>x</sub>Dy<sub>1-x</sub>(Fe<sub>0.6</sub>Co<sub>0.4</sub>)<sub>2</sub>合金(0.27≤x≤0.40), 对合金的磁性和磁致伸缩性能进行研究。利用 XRD、交流初始磁化率测试仪、超导量子干涉仪和标准应变测试仪, 对样品的物相组成、居里温度、磁化曲线和磁致伸缩性能进行表征。结果表明: 当 x≤0.27 时合金的易磁化方向为(100)方向, 当 x≥0.30 时合金的易磁化方向变为(111)方向; 合金的居里温度随 x 的增加而增加; x=0.32 附近时合金的磁晶各向异性常数 K<sub>1</sub>有极小值, 室温时合金在 x=0.32 附近时达到各向异性补偿; 当 x=0.32 时饱和磁致伸缩系数达到 9.57×10<sup>-4</sup>; 随 Co 含量的增加, 合金的各向异性补偿点向 Tb 含量高的方向移动。Tb<sub>0.32</sub>Dy<sub>0.68</sub>(Fe<sub>0.6</sub>Co<sub>0.4</sub>)<sub>2</sub>合金具有高磁致伸缩系数和低各向异性, 是一种实用的磁致伸缩候选材料。

**关键词:** 磁致伸缩; Laves 相; 磁性能; 各向异性补偿

**中图分类号:** TG146.4

**文献标志码:** A

以 Tb-Dy-Fe 合金(商品名 Terfenol-D)为代表的室温巨磁致伸缩材料, 在超声传感器和微动制动等领域具有广泛的应用, 巨磁致伸缩材料已成为西方国家重要的战略性功能材料<sup>[1-2]</sup>。由于 Tb<sup>3+</sup>具有负的各向异性常数, 而 Dy<sup>3+</sup>具有正的各向异性常数, 两者之间的各向异性补偿使 Terfenol-D 的磁晶各向异性很小<sup>[3]</sup>。因此, Terfenol-D 合金具有较高的磁致伸缩和较低的各向异性, 综合性能好<sup>[4]</sup>。为进一步提高 Terfenol-D 的磁致伸缩性能, 利用 Mn<sup>[5]</sup>、Co<sup>[5-7]</sup>、Ni<sup>[7-8]</sup>、Al<sup>[9]</sup>等元素对 Terfenol-D 中的 Fe 元素进行掺杂。研究发现: Mn 和 Ni 对 Fe 的掺杂引起居里温度的降低, 但是使用少量 Co 对 Fe 进行掺杂能够提高 Terfenol-D 居里温度<sup>[5, 8, 10-12]</sup>。由于这些掺杂改变了 Terfenol-D 的自旋再取向温度 T<sub>SR</sub>, 并且增加其各向异性, 因此, 几乎所有的这些掺杂降低了 Terfenol-D 在室温的磁致伸缩性能。RFe<sub>2</sub>(R 代表稀土元素)化合物中稀土离子的各向异性通常大于 3d 过渡金属离子的各向异性, RFe<sub>2</sub>化合物的磁晶各向异性主要由稀土离子贡献。对 Terfenol-D 中的 Fe 进行掺杂能够改变 Terfenol-D 的各向异性, 用 Co 对 Fe 掺杂能够提高 T<sub>SR</sub>。考虑到 Tb<sup>3+</sup>(降低 T<sub>SR</sub>)和 Dy<sup>3+</sup>(提高 T<sub>SR</sub>)的各向异性, 如果用 Co 替代 Terfenol-D 中部分 Fe, 相应地应当增加 Tb 的含量,

从而保证 T<sub>SR</sub> 接近室温。由于 Tb 的含量越多, 磁致伸缩材料具有越大的磁致伸缩值, 因此, 如果用 Co 替代部分 Fe, 通过调节 Terfenol-D 中 Tb<sup>3+</sup>和 Dy<sup>3+</sup>的含量, 有可能获得具有更好的室温磁致伸缩性能的材料<sup>[5]</sup>。郭志军等<sup>[13]</sup>发现 Tb<sub>x</sub>Dy<sub>1-x</sub>(Fe<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>)<sub>2</sub>的各向异性补偿成分点向富 Tb 的一端移动(与 Terfenol-D 相比), 然而没有观察到更大的磁致伸缩。磁致伸缩性能对成分非常敏感, 尤其是 Tb<sup>3+</sup>和 Dy<sup>3+</sup>的比值, 由于数据点较少, 各向异性补偿成分点有可能被遗漏了。刘进军等<sup>[14]</sup>对 Tb<sub>x</sub>Dy<sub>1-x</sub>(Fe<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>)<sub>2</sub>合金系进行了详细研究, 发现由于 Tb<sup>3+</sup>和 Dy<sup>3+</sup>的各向异性补偿和 Co 部分替代 Fe 改变了 3d 带电子的填充, Tb<sub>0.30</sub>Dy<sub>0.70</sub>(Fe<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>)<sub>2</sub>具有大的磁致伸缩, 是一种实用的磁致伸缩候选材料。

本文作者利用电弧熔炼制备了 Tb<sub>x</sub>Dy<sub>1-x</sub>(Fe<sub>0.6</sub>Co<sub>0.4</sub>)<sub>2</sub>(0.27≤x≤0.40)合金, 对合金进行了均匀化处理。研究了合金的磁性和磁致伸缩, 希望寻找出一种同时具有大的磁致伸缩和低的磁晶各向异性的磁致伸缩材料。

## 1 实验

按照成分 Tb<sub>x</sub>Dy<sub>1-x</sub>(Fe<sub>0.6</sub>Co<sub>0.4</sub>)<sub>2</sub>(x=0.27, 0.30, 0.32,

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51404136); 辽宁工程技术大学博士科研启动基金资助项目(11-417)

收稿日期: 2015-06-09; 修订日期: 2015-11-10

通信作者: 杨建林, 讲师, 博士; 电话: 0418-3351741; E-mail: jlyanget@163.com

0.35, 0.38, 0.40)称量原料, 原料 Tb、Dy 的纯度均为 99.9%, Fe、Co 的纯度均为 99.8%。样品在高纯氩气保护下用磁控电弧熔炼炉熔炼。为了使样品的成分均匀, 在熔炼过程中施加磁场搅拌使液态金属混合均匀, 所有样品都重复熔炼 3 次。将熔炼好的合金锭用铝片包好放在石英管中抽真空, 然后充入高纯氩气, 将石英管放在马弗炉中在 1093 K 保温 7 d 进行均匀化热处理。

在石油醚保护下将均匀化处理后的  $Tb_xDy_{1-x}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$  样品研磨成粉, 在室温下进行 X 射线衍射实验, 所用仪器为日本理学 Rigaku D/max-2500pc(工作电压为 56 kV, 工作电流为 182 mA), 靶材为 Cu 靶, 石墨单色器。

利用交流初始磁化率测试仪测量样品的交流初始磁化率, 温度范围为 300~800 K。

室温下利用超导量子干涉仪(SQUID)测量样品的磁化强度, 所用最大磁场为  $3.98 \times 10^6$  A/m。

室温下用标准应变测试技术测量多晶样品的磁致伸缩  $\lambda_{\perp}$ (测量方向与外磁场方向垂直)和  $\lambda_{\parallel}$ (测量方向与外磁场方向平行), 从而得到各向异性磁致伸缩  $\lambda_a = \lambda_{\parallel} - \lambda_{\perp}$ , 所用的最大磁场为  $7.96 \times 10^5$  A/m。

## 2 结果与讨论

### 2.1 晶体结构

图 1 所示为均匀化处理后  $Tb_xDy_{1-x}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$  合金的 XRD 谱。图 1 中标出的衍射峰代表  $MgCu_2$  型立

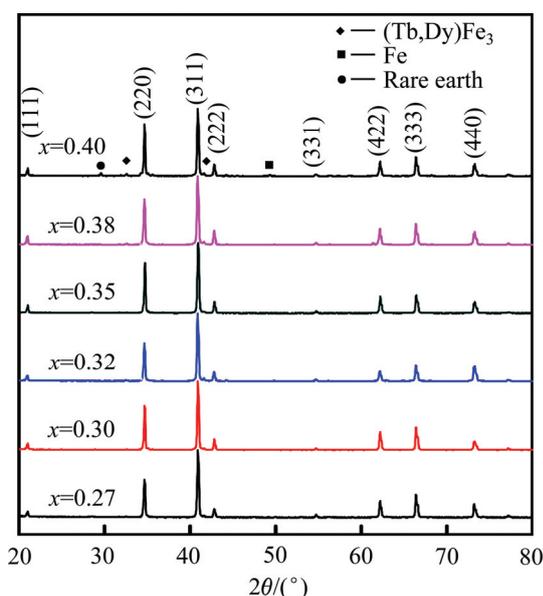


图 1  $Tb_xDy_{1-x}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$  合金的 XRD 谱  
Fig. 1 XRD pattern of  $Tb_xDy_{1-x}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$  alloys

方 Laves 相的衍射峰。随着 Tb 含量的增加合金的衍射峰向低角度方向移动, 表明合金的晶格常数随 Tb 含量的增加而增加(由于  $Tb^{3+}$  的离子半径大于  $Dy^{3+}$  的离子半径)。图 1 中同时给出了 6 个样品的 XRD 谱, 使低含量物相衍射峰的高度很低。若将图 1 放大, 可以看出在  $41.63^\circ$ 、 $35.07^\circ$  和  $32.59^\circ$  附近存在衍射峰 ( $(Tb,Dy)Fe_3$  的三强峰),  $0.27 \leq x \leq 0.38$  样品中这些衍射峰的高度很低, 说明这些样品中  $(Tb,Dy)Fe_3$  的含量很少,  $x=0.40$  样品中  $(Tb,Dy)Fe_3$  衍射峰的高度相对较高, 说明该样品中  $(Tb,Dy)Fe_3$  的含量比  $0.27 \leq x \leq 0.38$  样品的高。此外,  $x=0.40$  的样品中还含有少量的稀土和 Fe 杂相。

用 X 射线对合金的(440)衍射峰进行慢扫, 用标准法扣除  $K\alpha_2$  的衍射峰, 结果如图 2 所示。根据衍射峰的劈裂可以确定合金中 Laves 相的易磁化方向<sup>[15-17]</sup>。从图 2 可以看出, 当  $x \geq 0.30$  时, 合金的(440)衍射峰劈裂成两个峰。这表明这些成分样品中 Laves 相的磁矩方向沿着(111)方向, 沿该方向巨大的磁致伸缩使样品发生了菱方变形。对于  $x=0.27$  的样品, 它的(440)衍射峰为单峰, 磁矩方向为(100)方向; 由于磁致伸缩导致样品的四方变形很小, 用 X 射线衍射方法观察不到(440)衍射峰的劈裂。

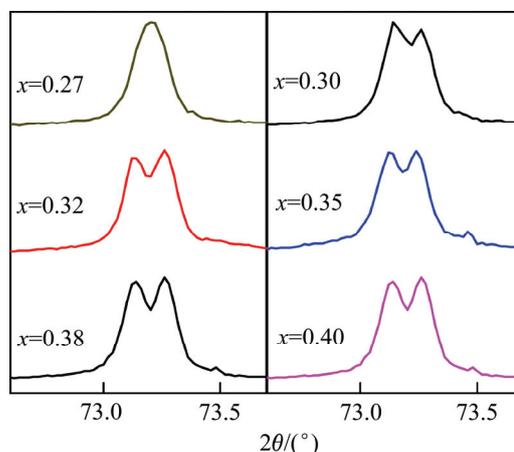


图 2  $Tb_xDy_{1-x}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$  合金中(440)衍射峰的 XRD 谱  
Fig. 2 XRD pattern of (440) reflection of  $Tb_xDy_{1-x}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$  alloys

### 2.2 居里温度和各向异性补偿

利用本实验室自制的交流初始磁化率测试仪测量了室温以上的磁化率随温度的变化关系, 结果如图 3 所示。图 3 中每条曲线都存在拐点, 对应样品的居里温度(图 3 中箭头所指处)。图 4 所示为样品居里温度与 Tb 含量的关系, 可以看出样品居里温度随 Tb 含量的增加而增加, 这是由于  $TbFe_2$  的居里温度高于  $DyFe_2$  的居里温度。

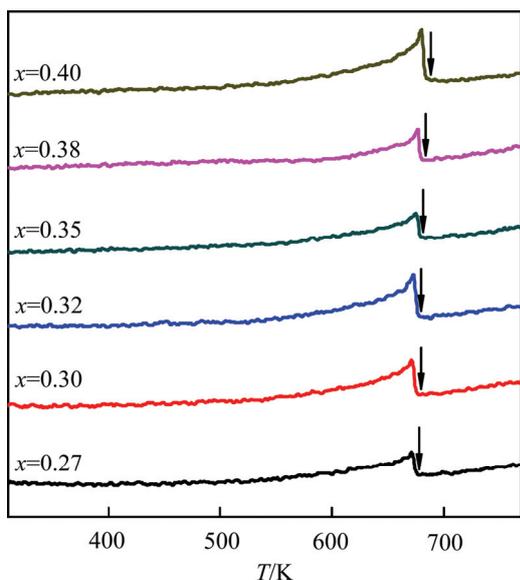


图 3 Tb<sub>x</sub>Dy<sub>1-x</sub>(Fe<sub>0.6</sub>Co<sub>0.4</sub>)<sub>2</sub> 合金的交流初始磁化率随温度的变化曲线

Fig. 3 Temperature dependence of AC initial susceptibility of Tb<sub>x</sub>Dy<sub>1-x</sub>(Fe<sub>0.6</sub>Co<sub>0.4</sub>)<sub>2</sub> alloys

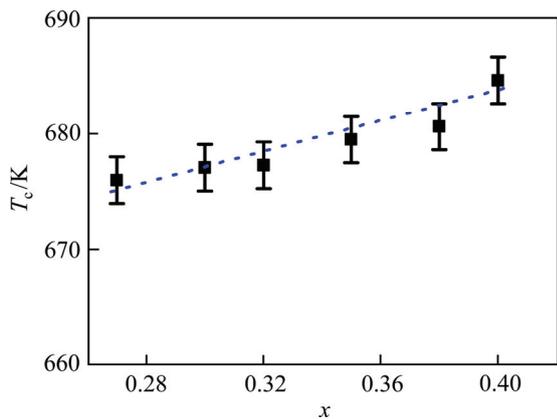


图 4 Tb<sub>x</sub>Dy<sub>1-x</sub>(Fe<sub>0.6</sub>Co<sub>0.4</sub>)<sub>2</sub> 合金的居里温度随 Tb 含量的变化曲线

Fig. 4 Tb content dependence on Curie temperature ( $T_c$ ) for Tb<sub>x</sub>Dy<sub>1-x</sub>(Fe<sub>0.6</sub>Co<sub>0.4</sub>)<sub>2</sub> alloys

稀土过渡金属化合物具有很大的磁晶各向异性能, 尤其是 MgCu<sub>2</sub> 型 C15 立方 Laves 相化合物, 通常的最大磁场很难使该类型的化合物达到真正的饱和磁化。通常利用趋近饱和定律来拟合实验数据得到关于自发磁化的信息<sup>[18]</sup>, 拟合公式如式(1)所示:

$$M = M_s \left( 1 - \frac{a}{H} - \frac{b}{H^2} \right) + \chi_p H \quad (1)$$

式中:  $M_s$  表示饱和磁化强度;  $a$ 、 $b$  为常数;  $\chi_p$  表示顺磁磁化率;  $H$  表示磁场强度。

$\chi_p$  是由于外磁场增加时磁畴内同方向的自旋数目增加引起的。 $a$  称为磁硬度系数, 可能是由于晶体内

小区域应力不均匀引起的, 或与铁磁体的掺杂有关。 $b$  与材料本身的磁晶各向异性常数有关, 来自于磁晶各向异性对磁畴转动过程的阻力。对于立方结构的多晶材料,  $b$  与各向异性常数  $K_1$  的关系为

$$b = \frac{8K_1^2}{105\mu_0^2 M_s^2} \quad (2)$$

式中:  $\mu_0$  为真空磁导率;  $M_s$  为饱和磁化强度。

图 5 所示为 295 K 时样品的磁化曲线。从图 5 可以看出,  $x=0.30$  和  $0.32$  两个样品在低场下迅速地趋近饱和。这表明在这两个成分范围内样品的各向异性较小。利用趋近饱和定律对曲线进行拟合, 得到不同 Tb 含量样品的各向异性常数  $K_1$ , 结果如图 6 所示。

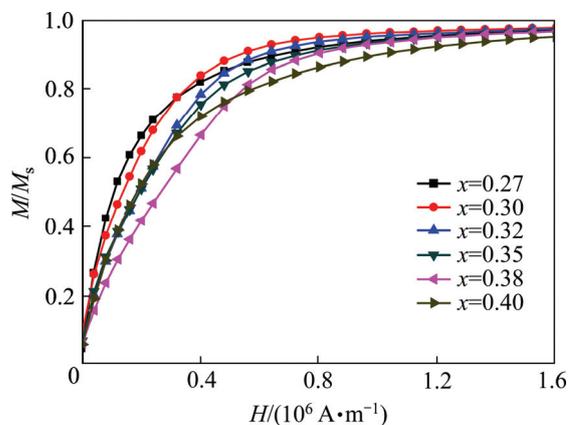


图 5 295 K 时 Tb<sub>x</sub>Dy<sub>1-x</sub>(Fe<sub>0.6</sub>Co<sub>0.4</sub>)<sub>2</sub> 合金的磁化曲线

Fig. 5 Magnetization curves of Tb<sub>x</sub>Dy<sub>1-x</sub>(Fe<sub>0.6</sub>Co<sub>0.4</sub>)<sub>2</sub> alloys at 295 K

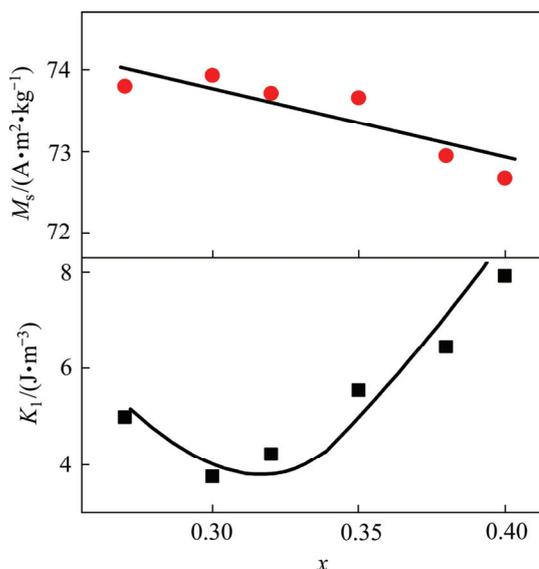


图 6 Tb<sub>x</sub>Dy<sub>1-x</sub>(Fe<sub>0.6</sub>Co<sub>0.4</sub>)<sub>2</sub> 合金的各向异性常数  $K_1$  随 Tb 含量的变化

Fig. 6 Tb content dependence of magnetocrystalline anisotropy constant  $K_1$  of Tb<sub>x</sub>Dy<sub>1-x</sub>(Fe<sub>0.6</sub>Co<sub>0.4</sub>)<sub>2</sub> alloys

从图6中可以看出,在 $x=0.32$ 附近 $K_1$ 有极小值,说明在 $x=0.32$ 附近达到各向异性补偿。

### 2.3 室温磁致伸缩性能

图7所示为各向异性磁致伸缩值 $\lambda_a$ 随磁场强度的变化关系,所用磁场强度最高为 $7.96 \times 10^5$  A/m。样品 $Tb_{0.38}Dy_{0.62}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$ 在 $7.96 \times 10^5$  A/m的磁场下具有最大的各向异性磁致伸缩值 $1.341 \times 10^{-3}$ ,而样品 $Tb_{0.27}Dy_{0.73}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$ 在 $7.96 \times 10^5$  A/m的磁场下具有最小的 $\lambda_a$ 为 $8.12 \times 10^{-4}$ 。从图7中还可以观察到,与 $x < 0.32$ 合金相比, $x=0.32$ 样品的各向异性磁致伸缩值 $\lambda_a$ 随磁场强度的增加迅速增加;并且与 $x > 0.32$ 合金相比, $x=0.32$ 样品的曲线在 $3.18 \times 10^5 \sim 7.96 \times 10^5$  A/m之间曲率较大,说明该样品的各向异性磁致伸缩值达到饱和和所需的磁场强度较小。从图7可以看出,样品的各向异性磁致伸缩随着磁场的增加而增大,在 $7.96 \times 10^5$  A/m的磁场下没有达到饱和。采用与趋近饱和定律类似的过程对曲线进行拟合<sup>[13, 19]</sup>,拟合公式为:

$$\lambda_a = \lambda_{0s} \left( 1 - \frac{a}{H} - \frac{b}{H^2} \right) \quad (3)$$

式中: $\lambda_a$ 为室温各向异性磁致伸缩; $a, b$ 分别为常数; $\lambda_{0s}$ 为 $\lambda_a$ 的饱和值。

样品的饱和磁致伸缩值可以利用式(4)得到:

$$\lambda_s = \frac{2}{3} \lambda_{0s} \quad (4)$$

图8所示为 $Tb_xDy_{1-x}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$ 合金的饱和磁致伸缩值 $\lambda_s$ 随Tb含量 $x$ 的变化曲线。从图8可看出 $0.27 \leq x \leq 0.38$ 时, $\lambda_s$ 随Tb含量的增加而增加,表明

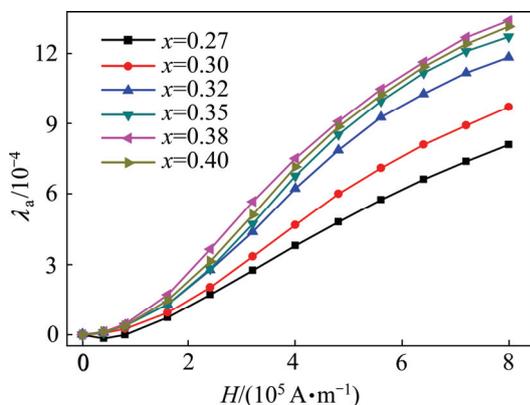


图7 室温时 $Tb_xDy_{1-x}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$ 合金的磁致伸缩随磁场的变化曲线

Fig. 7 Magnetic field dependence of magnetostriction of  $Tb_xDy_{1-x}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$  alloys at room temperature

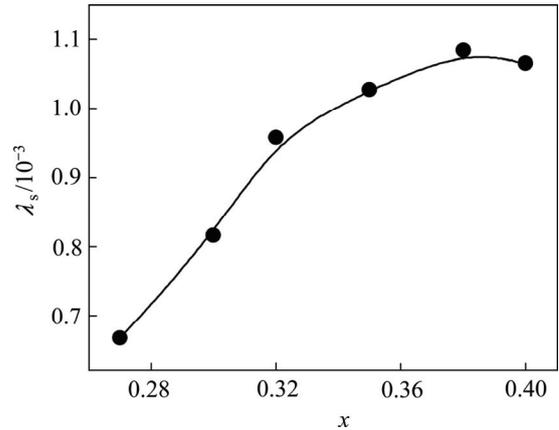


图8  $Tb_xDy_{1-x}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$ 合金的饱和磁致伸缩值 $\lambda_s$ 随Tb的含量 $x$ 的变化曲线

Fig. 8 Composition dependence of saturation magnetostriction  $\lambda_s$  for  $Tb_xDy_{1-x}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$  alloys

Tb对Laves相磁致伸缩的贡献比Dy的大。该变化趋势与 $Tb_xDy_{1-x}Fe_2$ 合金系的变化趋势一致<sup>[20]</sup>。 $x=0.4$ 时样品的饱和磁致伸缩开始下降,这可能由于该样品中 $RFe_3$ 相的含量高于 $x \leq 0.38$ 样品中 $RFe_3$ 相的含量(见图1), $RFe_3$ 为有害相, $RFe_3$ 相的增加会导致合金的磁致伸缩性能降低<sup>[21]</sup>,因此,样品 $Tb_{0.4}Dy_{0.6}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$ 的饱和磁致伸缩值低于 $x=0.38$ 样品的。

利用对(440)衍射峰进行慢扫的结果,计算由(440)峰劈裂出的两个峰所对应的晶面间距,利用公式(5)计算自发磁致伸缩 $\lambda_{111}$ <sup>[22]</sup>:

$$\lambda_{111} = 2 \frac{d_{440} - d_{\bar{4}\bar{4}0}}{d_{440} + d_{\bar{4}\bar{4}0}} \quad (5)$$

式中: $d_{\bar{4}\bar{4}0}$ 表示立方指数(440)的晶面间距; $d_{440}$ 表示立方指数(440)的晶面间距。

多晶样品中的晶粒是随机分布的,将 $\lambda_s$ 和 $\lambda_{111}$ 的值带入单晶的自发磁致伸缩系数 $\lambda_{111}$ 、 $\lambda_{100}$ 与多晶的饱和磁致伸缩值 $\lambda_s$ 之间的关系式,可以计算出 $\lambda_{100}$ <sup>[14]</sup>:

$$\lambda_s = \frac{2}{5} \lambda_{100} + \frac{3}{5} \lambda_{111} \quad (6)$$

图9所示为 $Tb_xDy_{1-x}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$ 合金的自发磁致伸缩系数 $\lambda_{111}$ 和 $\lambda_{100}$ 与Tb含量 $x$ 的关系。 $\lambda_{111}$ 值随 $x$ 的增加有增加的趋势。 $\lambda_{100}$ 值随 $x$ 的增加有减小的趋势。在 $0.35 \leq x \leq 0.40$ 范围内, $Tb_xDy_{1-x}(Fe_{0.8}Co_{0.2})_2$ 的 $\lambda_{100}$ 值均大于 $3 \times 10^{-4}$ <sup>[13]</sup>。按照单离子模型, $MgCu_2$ 型 $RFe_2$ 化合物应有 $|\lambda_{111}| \gg |\lambda_{100}|$ ,小的 $\lambda_{100}$ 来源于R

晶位对称的四面体结构。 $Tb_xDy_{1-x}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$  合金中随着 Co 的加入,更多的 3d 电子填充到导带而改变了化合物的磁晶各向异性,使得该合金系具有相对较大的  $\lambda_{100}$  值。另外,在  $Sm_{0.88}Dy_{0.12}(Fe_{0.8}Co_{0.2})_2$  体系中也观察到了类似的存在较大  $\lambda_{100}$  值的现象<sup>[19]</sup>。由于正的自发磁致伸缩的贡献,  $Tb_xDy_{1-x}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$  表现出巨大的饱和磁致伸缩,结果如图 8 所示。

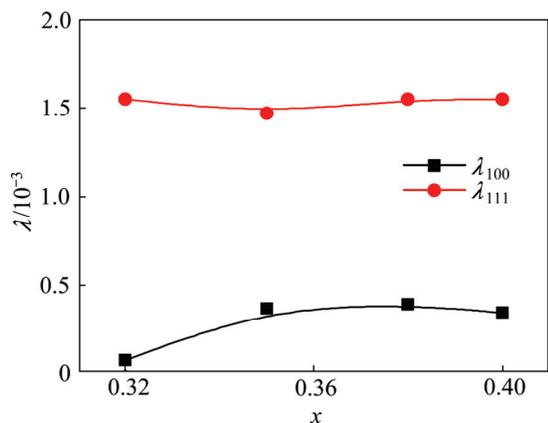


图 9  $Tb_xDy_{1-x}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$  合金的自发磁致伸缩系数  $\lambda_{111}$  和  $\lambda_{100}$  与成分的关系

Fig. 9 Composition dependence of spontaneous magnetostriction  $\lambda_{111}$  and  $\lambda_{100}$  for  $Tb_xDy_{1-x}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$  alloys

图 10 所示为各向异性磁致伸缩系数  $\lambda_a$  与  $K_1$  的比值随 Tb 含量  $x$  的变化关系曲线。从图 10 可以看出,  $\lambda_a/K_1$  在  $x=0.32$  处有一个峰值,表明该成分在室温下具有良好的磁致伸缩性能,其饱和磁致伸缩值  $\lambda_s$  约为

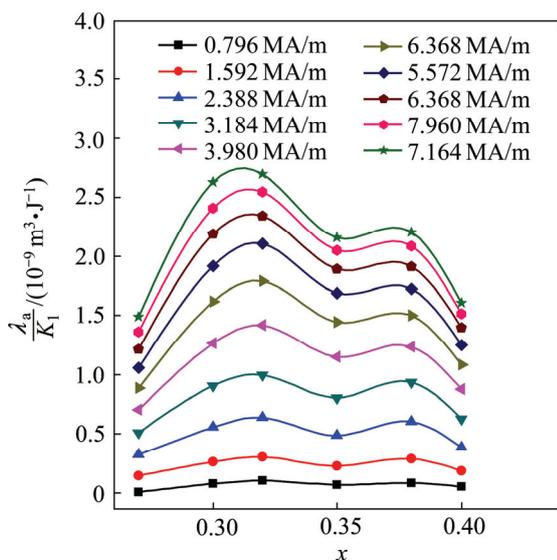


图 10  $Tb_xDy_{1-x}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$  合金的  $\lambda_a/K_1$  随 Tb 含量  $x$  的变化曲线

Fig. 10 Tb composition dependence of  $\lambda_a/K_1$  for  $Tb_xDy_{1-x}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$  alloys

$9.57 \times 10^{-4}$ 。刘进军等<sup>[14]</sup>研究了  $Tb_xDy_{1-x}(Fe_{0.8}Co_{0.2})_2$  合金系的磁致伸缩性能,发现  $x=0.30$  的样品在室温下具有良好的磁致伸缩性能。由于 Co 含量的增加,  $Tb_xDy_{1-x}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$  合金系的各向异性补偿点向 Tb 含量高的方向移动。

### 3 结论

- 1) 当 Tb 的含量  $x \leq 0.27$  时样品的易磁化方向为  $\langle 100 \rangle$  方向,而  $x \geq 0.30$  时样品的易磁化方向变为  $\langle 111 \rangle$  方向。
- 2) 样品的居里温度随  $x$  的增加而增加。
- 3) 在  $x=0.32$  附近合金的磁晶各向异性常数  $K_1$  有极小值,在该成分附近合金达到各向异性补偿。
- 4) 在  $0.32 \leq x \leq 0.40$  的范围内自发磁致伸缩系数  $\lambda_{100}$  为正值。
- 5)  $Tb_{0.32}Dy_{0.68}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$  样品具有良好的磁致伸缩性能,饱和磁致伸缩系数  $\lambda_s$  为  $9.57 \times 10^{-4}$ ,是一种实用的磁致伸缩材料。

### 致谢:

本文的实验工作是笔者在金属研究所时所做工作。

### REFERENCES

[1] 严柏平,张成明,李立毅,唐志峰,吕福在,杨克己.  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$  合金的本构参数辨识方法研究[J]. 物理学报, 2015, 64(2): 027501-8.  
YAN Bai-ping, ZHANG Cheng-ming, LI Li-yi, TANG Zhi-feng, LÜ Fu-zai, YANG Ke-ji. Method of identifying constitutive parameter in  $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$  Alloy[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(2): 027501-8.

[2] 胡勇,丁雨田,王晓莉,李晓诚,王国斌. Al 替代 Fe 对  $\langle 110 \rangle$  取向 Tb-Dy-Fe 合金显微组织、磁致伸缩性能和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(11): 3066-3073.  
HU Yong, DING Yu-tian, WANG Xiao-li, LI Xiao-cheng, WANG Guo-bin. Effects of substituting Al for Fe on microstructure, magnetostriction and mechanical properties of  $\langle 110 \rangle$  oriented Tb-Dy-Fe alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(11): 3066-3073.

[3] 谢海涛,斯永敏,杨德明,刘希从. 超磁致伸缩薄膜材料及其应用[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(S1): 266-270.  
XIE Hai-tao, SI Yong-min, YANG De-ming, LIU Xi-cong. Giant magnetostrictive thin film and its application[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(S1): 266-270.

- [4] 尹鸿运, 刘进军. Pr系MgCu<sub>2</sub>型超磁致伸缩材料研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(5): 1275-1280.  
YIN Hong-yun, LIU Jin-jun. Research progress of MgCu<sub>2</sub>-type giant magnetostrictive materials with Pr[J]. Rare Metal Material and Engineering, 2014, 43(5): 1275-1280.
- [5] CLARK A E, PETER J P, WUNFOGLE M. Anisotropy compensation and magnetostriction in Tb<sub>x</sub>Dy<sub>1-x</sub>(Fe<sub>1-y</sub>T<sub>y</sub>)<sub>1.9</sub> (T=Co, Mn)[J]. Journal of Applied Physics, 1991, 69(8): 5771-5773.
- [6] MA Tian-yu, JIANG Cheng-bao, XU Xiang, ZHANG Hu, XU Hui-bin. The Co-doped Tb<sub>0.36</sub>Dy<sub>0.64</sub>Fe<sub>2</sub> magnetostrictive alloys with a wide operating temperature range[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2005, 292: 317-342.
- [7] WANG Bo-wen, GUO Zhi-jun, ZHANG Zhi-dong, ZHAO Xin-guo, BUSBRIDGE S C. Structure and magnetostriction of Pr<sub>x</sub>Dy<sub>1-x</sub>Fe<sub>2</sub> and Pr<sub>0.4</sub>Dy<sub>0.6</sub>(Fe<sub>1-y</sub>M<sub>y</sub>)<sub>2</sub> alloys (M=Co, Ni)[J]. Journal of Applied Physics, 1999, 85(5): 2805-2809.
- [8] CLARK A E, TETER J P, MCMASTERS O D. Magnetostrictive properties of Tb<sub>0.3</sub>Dy<sub>0.7</sub>(Fe<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub>)<sub>1.9</sub>[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 1987, 23(5): 3526-3628.
- [9] PRAJAPATI K, JENNER A G, SCHULZE M P, GREENOUGH R D. Magnetoelastic effects in rare-earth iron-aluminum compounds[J]. Journal of Applied Physics, 1993, 73(10): 6171-6173.
- [10] TANG Y J, LUO H L, GAO N F, LIU Y Y, PAN S M. Magnetic-properties and magnetostriction in TbFe<sub>2</sub> compound with the addition of manganese or gallium[J]. Applied Physics Letters, 1995, 66(3): 388-390.
- [11] DHILAH A K R, RAMARAO K V S. Investigation of magnetic, magnetomechanical, and electrical-properties of the Tb<sub>0.27</sub>Dy<sub>0.73</sub>Fe<sub>2-x</sub>Co<sub>x</sub> system[J]. Journal of Applied Physics, 1993, 73(3): 1380-1385.
- [12] 崔跃, 蒋成保, 徐惠彬. Tb-Dy-Fe-Co合金本征磁致伸缩性能[J]. 金属学报, 2011, 47(2): 214-218.  
CUI Yue, JIANG Cheng-bao, XU Hui-bin. Intrinsic magnetostriction of Tb-Dy-Fe-Co alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(2): 214-218.
- [13] GUO Zhi-jun, ZHANG Zhi-dong, WANG Bo-wen, ZHAO Xin-guo, GENG Dian-yu, LIU Wei. Anisotropy compensation and spin reorientation in Tb<sub>1-x</sub>Dy<sub>x</sub>(Fe<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>)<sub>2</sub>[J]. Journal of Physics D, 2001, 34(6): 884-888.
- [14] LIU Jin-jun, REN Wei-jun, LI Da, SUN Nai-kun, ZHAO Xin-guo, LI Ji, ZHANG Zhi-dong. Magnetic transitions and magnetostrictive properties of Tb<sub>x</sub>Dy<sub>1-x</sub>(Fe<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>)<sub>2</sub> (0.20≤x≤0.40)[J]. Physical Review B, 2007, 75(6): 064429.
- [15] CULLEN J R, CLARK A E. Magnetostriction and structural distortion in rare-earth intermetallics[J]. Physical Review B, 1977, 15(9): 4510-4515.
- [16] DWIGHT A E, KIMBALL C W. TbFe<sub>2</sub>, a rhombohedral laves phase[J]. Acta Crystallographica Section B, 1974, 30(11): 2791-2793.
- [17] CLARK A E, CULLEN J R, SATO K. Magnetostriction of single crystal and polycrystal rare earth-Fe<sub>2</sub> compounds[J]. AIP Conference Proceedings, 1975, 24: 670-671.
- [18] CHIKAZUMI S. Physics of ferromagnetism[M]. New York: Oxford University Press, 1997: 503-516.
- [19] GUO Hui-qun, GONG Hua-yang, YANG Hong-ying, LI Yun-fei, YANG Lin-yuan, SHEN Bao-gen, LI Ru-qi. Effect of Co substitution for Fe on magnetic and magnetostrictive properties in Sm<sub>0.88</sub>Dy<sub>0.12</sub>(Fe<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>)<sub>2</sub> compounds[J]. Physical Review B, 1996, 54(6): 4107-4112.
- [20] CLARK A E. Magnetostrictive rare earth-Fe<sub>2</sub> compounds in ferromagnetic materials[M]. Amsterdam, 1980(1): 531-589.
- [21] 李晓诚, 丁雨田, 胡勇. Tb<sub>0.3</sub>Dy<sub>0.7</sub>Fe<sub>1.95-x</sub>Ti<sub>x</sub>(x=0, 0.03, 0.06, 0.09)合金的微观组织与磁致伸缩性能[J]. 金属学报, 2012, 48(1): 11-15.  
LI Xiao-cheng, DING Yu-tian, HU Yong. Microstructure and magnetostriction of the Tb<sub>0.3</sub>Dy<sub>0.7</sub>Fe<sub>1.95-x</sub>Ti<sub>x</sub>(x=0, 0.03, 0.06, 0.09) alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(1): 11-15.
- [22] REN Wei-jun, ZHANG Zhi-dong, MARKOSYAN A S, ZHAO Xin-guo, JIN Xi-mei, SONG Xiao-ping. The beneficial effect of the boron substitution on the magnetostrictive compound Tb<sub>0.7</sub>Pr<sub>0.3</sub>Fe<sub>2</sub>[J]. Journal of Physics D, 2001, 34(20): 3024-3027.

## Magnetic and magnetostrictive properties of $Tb_xDy_{1-x}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$ alloys

YANG Jian-lin

(College of Materials Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** The magnetic and magnetostrictive properties of  $Tb_xDy_{1-x}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$  ( $0.27 \leq x \leq 0.40$ ) alloys fabricated by arc melting were investigated. The phase, Curie temperature, magnetization curves and magnetostriction of alloys were tested by X-ray diffractometer, AC initial susceptibility, superconducting quantum interference device (SQUID) magnetometer and standard strain gauge technique, respectively. The results show, the easy magnetization direction at room temperature of alloys lies along the  $\langle 100 \rangle$  axis in alloys with  $x \leq 0.27$ , while it lies along the  $\langle 111 \rangle$  axis as  $x \geq 0.30$ ; Curie temperature increases with increasing terbium content; at room temperature the magnetocrystalline anisotropy constant  $K_1$  reaches the minimum value at  $x=0.32$ , indicating that it is near the composition for anisotropy compensation; the large saturation magnetostriction  $\lambda_s=9.67 \times 10^{-4}$  is observed at  $x=0.32$ ; Co substitution for Fe changes the composition for the anisotropy compensation at room temperature to the Tb-rich side.  $Tb_{0.32}Dy_{0.68}(Fe_{0.6}Co_{0.4})_2$ , with high magnetostriction and low anisotropy, is regarded as a good candidate material for magnetostriction applications.

**Key words:** magnetostriction; Laves phase; magnetic property; anisotropy compensation

**Foundation item:** Project(51404136) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(11-417) supported by the Scientific Research Foundation for Doctors of Liaoning Technical University, China

**Received date:** 2015-06-09; **Accepted date:** 2015-11-10

**Corresponding author:** YANG Jian-lin; Tel: +86-418-3351741; E-mail: jlyanget@163.com

(编辑 龙怀中)