

Ho_{0.3}Tb_{0.3}Dy_{0.4}Fe_{1.93}化合物的结构、磁性和磁致伸缩

王志业, 时阳光*

南京航空航天大学物理学院, 江苏 南京

收稿日期: 2024年12月20日; 录用日期: 2025年1月17日; 发布日期: 2025年1月24日

摘要

本文采用真空电弧熔炼法制备了Ho_{0.3}Tb_{0.3}Dy_{0.4}Fe_{1.93}Laves相化合物, 研究了其结构、磁性和磁致伸缩性能。X射线衍射实验和能谱分析结果表明, Ho_{0.3}Tb_{0.3}Dy_{0.4}Fe_{1.93}化合物呈现单一的Laves相。根据初始交流磁化率曲线确定Ho_{0.3}Tb_{0.3}Dy_{0.4}Fe_{1.93}化合物有两个自旋重取向温度T_{SR1}和T_{SR2}, 分别对应易磁化方向从<111>到<100>和从<100>到<110>的转变。差示扫描量热法测量出Ho_{0.3}Tb_{0.3}Dy_{0.4}Fe_{1.93}化合物居里温度为643 K。在室温下, Ho_{0.3}Tb_{0.3}Dy_{0.4}Fe_{1.93}化合物在3 kOe和10 kOe磁场下, 磁致伸缩($\lambda_{||}$ - $\lambda_{\perp}$)分别为810 ppm和1332 ppm。变温磁致伸缩研究表明, 在3 kOe和10 kOe磁场下, 磁致伸缩 $\lambda_{3k} \geq 500$ ppm和 $\lambda_{10k} \geq 1000$ ppm的温度跨度分别为155 K和280 K。这表明Ho_{0.3}Tb_{0.3}Dy_{0.4}Fe_{1.93}化合物具有宽温域磁致伸缩性能。

关键词

Laves相, 易磁化方向, 磁致伸缩

Structure, Magnetism and Magnetostriction of Ho_{0.3}Tb_{0.3}Dy_{0.4}Fe_{1.93} Compound

Zhiye Wang, Yangguang Shi*

College of Physics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu

Received: Dec. 20th, 2024; accepted: Jan. 17th, 2025; published: Jan. 24th, 2025

Abstract

In this paper, Ho_{0.3}Tb_{0.3}Dy_{0.4}Fe_{1.93} Laves phase compounds were prepared by vacuum arc melting method, and their structural, magnetic, and magnetostrictive properties were investigated. The results of X-ray diffraction experiments and energy spectroscopic analyses showed that the

*通讯作者。

文章引用: 王志业, 时阳光. Ho_{0.3}Tb_{0.3}Dy_{0.4}Fe_{1.93} 化合物的结构、磁性和磁致伸缩[J]. 应用物理, 2025, 15(1): 64-70.
DOI: 10.12677/app.2025.151007

Ho_{0.3}Tb_{0.3}Dy_{0.4}Fe_{1.93} compounds exhibit a single Laves phase. The Ho_{0.3}Tb_{0.3}Dy_{0.4}Fe_{1.93} compound was determined to have two spin reorientation temperatures, T_{SR1} and T_{SR2}, based on the Initial AC magnetic susceptibility, which corresponds to transitions from <111> to <100> and from <100> to <110> in the easy magnetic direction, respectively. Differential scanning calorimetry measured the Curie temperature of the Ho_{0.3}Tb_{0.3}Dy_{0.4}Fe_{1.93} compound to be 643 K. At room temperature, the magnetostriction ($\lambda_{||}$ - $\lambda_{\perp}$) of the Ho_{0.3}Tb_{0.3}Dy_{0.4}Fe_{1.93} compounds is 810 ppm and 1332 ppm for magnetic fields of 3 kOe and 10 kOe, respectively. Variable-temperature magnetostriction studies have shown that, for magnetic fields of 3 kOe and 10 kOe, the magnetostriction $\lambda_{3k} \geq 500$ ppm and $\lambda_{15k} \geq 1000$ ppm for temperature spans of 155 K and 280 K, respectively. This suggests that the Ho_{0.3}Tb_{0.3}Dy_{0.4}Fe_{1.93} compounds have wide temperature domain magnetostrictive properties.

Keywords

Laves Phase, Easy Magnetic Direction, Magnetostriction

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

RFe₂ (R 是稀土)立方 Laves 相合金在 300 K 附近具备优异的低场磁致伸缩性能, 具有在声学换能器、声纳传感器, 微位移制动物等领域应用的较大潜力[1]-[4]。而在实际应用中, 磁致伸缩材料需要在较小磁场下获得较大的磁致伸缩值, 较大的磁晶各向异性不利于磁致伸缩材料的实际应用[5]-[7]。

在 300 K 附近, 知名的磁致伸缩材料 Terfenol-D (Tb_{0.27-0.3}Dy_{0.73-0.70}Fe_{1.9-2.0})具有较小的磁晶各向异性[8][9], 展现出优越的低场磁致伸缩性能[10][11]。然而 Terfenol-D 具有一些局限性, 如其在磁场增加和降低过程中存在较大磁滞, 磁滞的出现会产生涡流损耗[12][13]。此外, 当温度低于 245 K 时, Terfenol-D 合金磁致伸缩性能迅速降低, 这表明 Terfenol-D 不能满足在低于 245 K 温度下的应用[14]。最近的研究表明, 由 TbDyFe 化合物与 TbHoFe 化合物组成的各向异性补偿体系 Tb-Dy-Ho-Fe 合金能够有效降低 Terfenol-D 的磁滞[15]-[17]。例如, Tb_{0.28}Dy_{0.57}Ho_{0.15}Fe_{1.95} 和 Tb_{0.26}Dy_{0.54}Ho_{0.2}Fe_{1.95} 合金的应变 - 磁场迟滞曲线宽度比原 Tb_{1-x}Dy_xFe_{1.95} 合金分别减小了 23%和 54% [18]。然而, Ho 含量超过 0.3 时磁滞宽度反而上升。为了拓宽 Terfenol-D 工作温域, 有研究指出调节 Tb 和 Dy 的比值, 这可以增大饱和磁致伸缩的温域, 但缺点是牺牲了室温低场磁致伸缩值[19]。除此之外, Zhang 等人发现掺杂 Ho 的 Tb_{0.29}Dy_{0.51}Ho_{0.2}Fe_{1.95} 合金[20]可以拓宽 Terfenol-D 易磁化方向沿<111>的温度范围, 然而该合金在低于 200 K 温度的磁致伸缩还未进行研究。最新研究表明在 Terfenol-D 中引入少量轻稀土 Nd 也可以拓宽材料的使用温域, 例如: Nd_{0.25}Tb_{0.3}Dy_{0.45}(Fe_{0.9}B_{0.1})_{1.93} 合金[21], Nd_{0.2}Tb_{0.3}Dy_{0.5}Fe_{1.93} 合金[14], Tb_{0.7}Nd_{0.3}Fe₂ 化合物[7]。在此背景下, 我们研究了 Ho_{0.3}Tb_{0.3}Dy_{0.4}Fe_{1.93} 化合物的结构、磁性和磁致伸缩性能。该工作将丰富宽温域磁致伸缩材料的研究。

2. 实验方法

以纯度为 99.9%的 Tb、Dy、Ho 以及 99.99%的 Fe 作为起始金属, 采用真空电弧熔炼法制备了 Ho_{0.3}Tb_{0.3}Dy_{0.4}Fe_{1.93}(HTDF)铸锭。随后, 将铸锭在 1273 K 温度下退火 10 h 得到多晶化合物。在室温下, 利用 Cu α (D8 Bruker) X 射线衍射仪对 Ho_{0.3}Tb_{0.3}Dy_{0.4}Fe_{1.93} 进行 XRD 测量。XRD 粉末数据通过 GSAS II 软件[22]进行 Rietveld 精修。此外, 我们使用蔡司 Gemini SEM 500 (Zeiss Gemini SEM 500)背散射电子成

像和能谱分析对化合物成分进行研究。差示扫描量热仪[23]以降温 10 K/min 速率测得居里温度 T_C 。接着测量 10~300 K 温度内初始交流磁化率随温度变化的曲线(χ'_{ac} -T), 得到自旋重定向温度 T_{SR} 。最后, 用标准应变片技术测定 20~300 K 温度范围的磁致伸缩($\lambda = \lambda_{||} - \lambda_{\perp}$)。

3. 结果与讨论

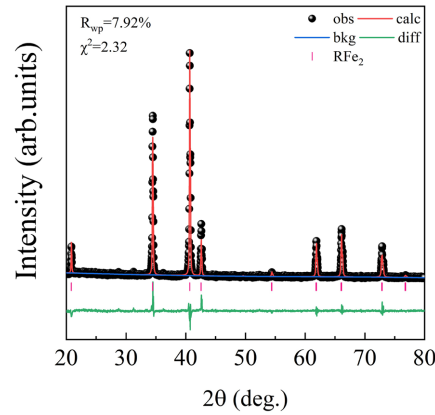


Figure 1. Refined spectra of $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ compound at room temperature
图 1. $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物室温 XRD 精修谱图

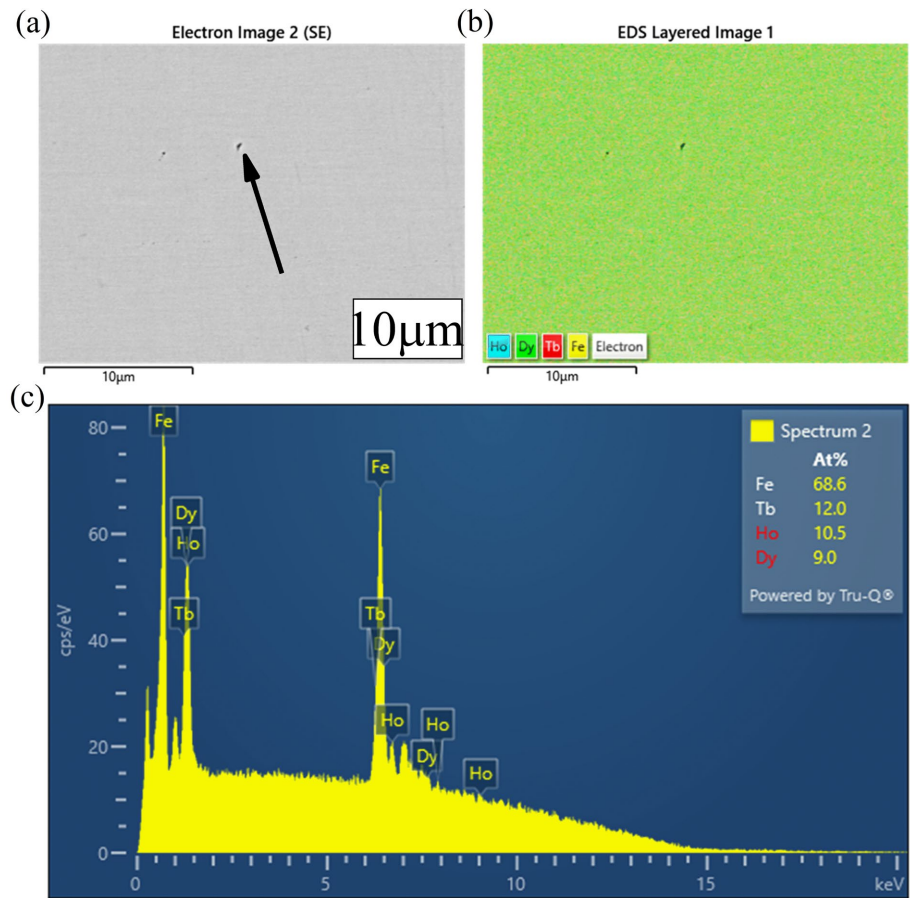


Figure 2. $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ compound, (a) SEM image, (b) EDS image, (c) EDS composition analysis plot
图 2. $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物, (a) SEM 图像, (b) EDS 图像, (c) EDS 成分分析图

图 1 给出了 $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物在室温(300 K)精修 XRD 谱图。借助 GSAS-II 软件精修后的 $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 合金的 $R_{\text{wp}} = 7.92\%$, $\chi^2 = 2.32$ 。 $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物呈现稳定单一的 Laves 相。值得注意的是, $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物不呈现立方对称性, 它们采用了 R-3m 的菱方结构, 这和 TbFe₂ 和 Terfenol-D 的结构相似[24]。 $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物的易磁化方向在室温沿<111>方向。室温下的菱方结构使得化合物呈现较大的磁致伸缩值。因此, XRD 粉末衍射实验表明 $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物呈现单一的 Laves 相且易磁化方向沿<111>。

图 2(a)~(b)分别展示了 $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物的扫描电子显微镜(SEM)形貌图和能谱分析(EDS)图像。扫描电镜观察到样品尺寸为 10 μm , 黑色箭头位置处的小孔可能是 Laves 相太脆, 在抛光过程中样品表面受力不均匀产生。我们发现 HTDF 化合物呈现出单一的 MgCu_2 型 RFe_2 立方 Laves 相, 不含 RFe_3 相。为了进一步确定 $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物的相成分, 我们在样品表面的不同位置进行点扫, 不同位置能谱分析的数据计算出平均值。EDS 能谱分析表明, $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 多晶化合物成分均匀。图 2(c)展示了 EDS 成分分析图, 我们观察到 $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Ho}_{0.3}\text{Fe}_{1.93}$ 多晶化合物元素 Tb, Dy, Ho, Fe 比例分别为 0.38, 0.29, 0.33, 2.18, 与我们配料的标称成分相当接近。SEM 和 EDS 实验表明, $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物呈现单一的 MgCu_2 型 RFe_2 立方 Laves 相。

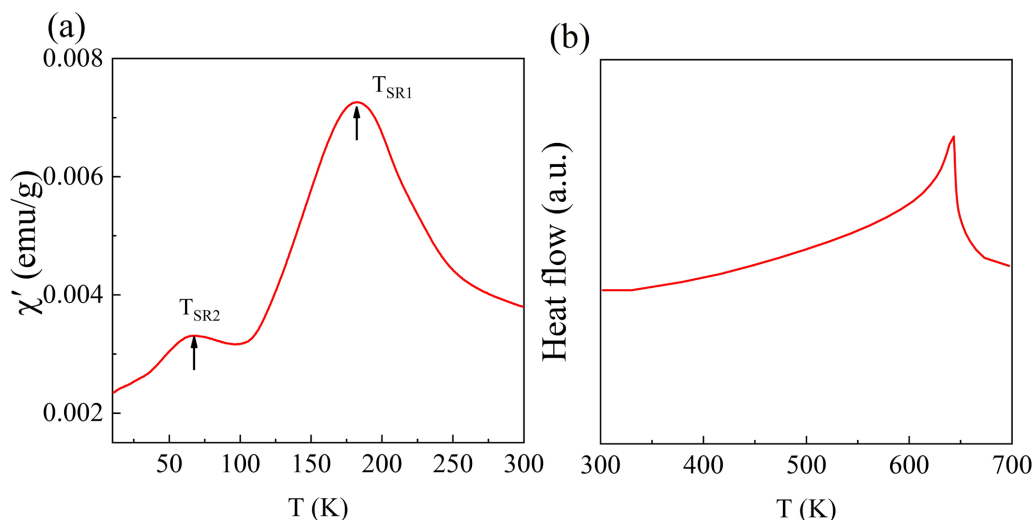


Figure 3. $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ compounds, (a) curves of initial AC magnetisation as a function of temperature ($\chi'_{\text{ac}}-T$) at 10~300 K, (b) DSC curves

图 3. $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物, (a) 在 10~300 K 初始交流磁化率作为温度的函数曲线($\chi'_{\text{ac}}-T$), (b) DSC 曲线

图 3(a)展示了 $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物在 10~300 K 初始交流磁化率(χ'_{ac})随温度(T)变化的曲线。初始交流磁化率曲线中第一个峰值对应着 $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物自旋重取向温度 T_{SR1} , 第二个峰值对应自旋重取向温度 T_{SR2} 。HTDF 化合物的 T_{SR1} 为 181 K, 这与 Zhang 等人在 $\text{Tb}_{0.296}\text{Dy}_{0.472}\text{Ho}_{0.232}\text{Fe}_{1.95}$ 合金[20]中发现了第一个自旋重取向温度 T_{SR1} 为 222 K 相类似。尤为值得关注的是, 还发现了第二个自旋重取向温度 T_{SR2} 约为 66 K。根据 Terfenol-D ($\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_2$)和 TbHoFe_2 的自旋重取向行为[1], 我们可以判定 $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物的 T_{SR1} 和 T_{SR2} 分别对应于易磁化方向从<111>到<100>和<100>到<110>的转变。在 T_{SR1} 温度附近, HTDF 化合物从 R 相到 T 相的转变, 在 T_{SR2} 温度附近, HTDF 化合物从 T 相到 O 相的转变。图 3(b)展示了 $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物的 DSC 曲线, 放热峰对应了其 RFe_2 相的居里温度 T_{C} , T_{C} 约为 643 K, 低于 $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_{1.95}$ 的 T_{C} 约为 658 K [20]。 $\chi'_{\text{ac}}-T$ 和 DSC 实验表明, 重稀土 Ho 取代 Tb 和 Dy 会降低自旋重取向温度 T_{SR1} 和居里温度 T_{C} 。

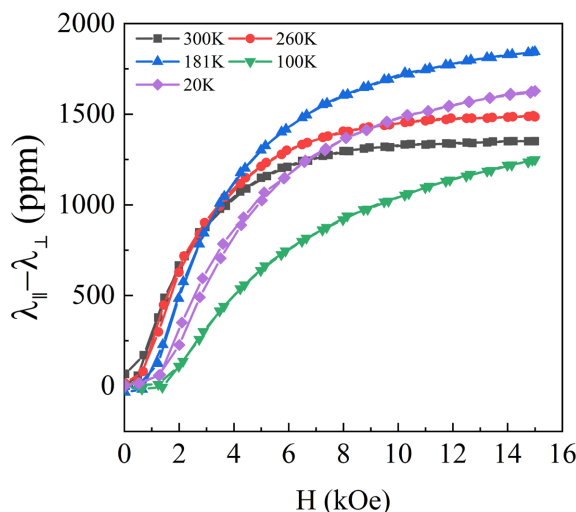


Figure 4. Magnetostriction ($\lambda_{||}-\lambda_{\perp}$) curves of $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ compounds at different temperatures as a function of external magnetic field

图 4. 在不同温度下, $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物磁致伸缩($\lambda_{||}-\lambda_{\perp}$)作为外磁场的函数曲线

图 4 展示了在不同温度下, $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物磁致伸缩($\lambda_{||}-\lambda_{\perp}$)作为外磁场的函数曲线。随着磁场的增加,磁致伸缩($\lambda_{||}-\lambda_{\perp}$)也随之增加,并且在 1.5 T 的磁场下达到最大值。在温度 300 K, 3 kOe 和 10 kOe 磁场下,磁致伸缩($\lambda_{||}-\lambda_{\perp}$)分别为 810 ppm 和 1332 ppm。这与先前 Wang 等人[5]在 $\text{Tb}_{0.26}\text{Dy}_{0.49}\text{Ho}_{0.25}\text{Fe}_{1.9}$ 化合物中发现的在 2 kOe 和 10 kOe 的磁致伸缩分别为 685 ppm 和 1120 ppm 较为接近。随着温度的降低,在 15 kOe 磁场下,磁致伸缩($\lambda_{||}-\lambda_{\perp}$)在 300 K~181 K 的温度范围内大于 1300 ppm,在 181 K 磁致伸缩 λ_{15k} 达到最大值为 1844 ppm。从 181 K 开始,随着温度的降低,易磁化方向的转变导致磁致伸缩减小,在 100 K 附近达到最小为 1250 ppm。100 K 以下,易磁化方向的转变导致磁致伸缩开始上升。不同温度下磁致伸缩随磁场的变化曲线表明,在 15 kOe 磁场下,在 300 K~181 K 温度范围, $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物磁致伸缩($\lambda_{||}-\lambda_{\perp}$)在 300 K~181 K 的温度范围内大于 1300 ppm。

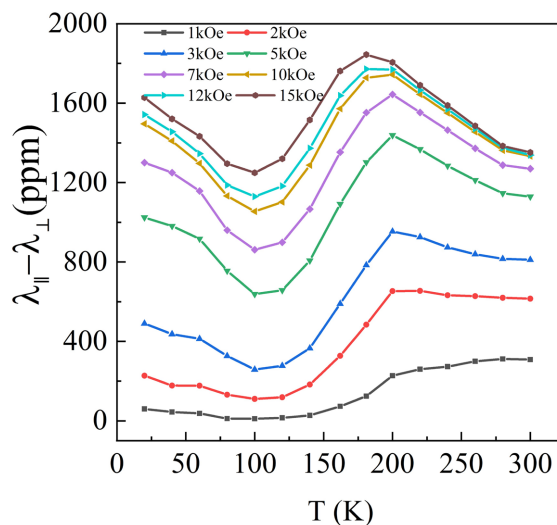


Figure 5. Curves of $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ compounds with temperature for magnetostrictive ($\lambda_{||}-\lambda_{\perp}$) under different external magnetic fields

图 5. 在不同外磁场下, $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物磁致伸缩($\lambda_{||}-\lambda_{\perp}$)随温度变化的曲线

在 20 K~300 K 温度区间内, 对 $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物进行了磁致伸缩测量。图 5 显示了在不同外磁场下, $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物磁致伸缩($\lambda_{\parallel}-\lambda_{\perp}$)随温度的变化。随着温度的降低, 磁致伸缩($\lambda_{\parallel}-\lambda_{\perp}$)开始上升, 在第一个自旋重取向温度 T_{SR1} (181 K)附近达到最优值, 此时对应的易磁化方向沿<111>。随着温度的继续降低, 在自旋重取向温度 T_{SR1} 和 T_{SR2} 之间, 磁致伸缩($\lambda_{\parallel}-\lambda_{\perp}$)开始降低, 此时易磁化方向沿<100>。在 T_{SR2} (66 K)之后, 磁致伸缩又略有上升, 此时易磁化方向沿<110>。磁致伸缩温度曲线表明, 在 20 K~300 K 温度区间, 在 3 kOe 磁场下, 磁致伸缩 $\lambda_{3k} \geq 500$ ppm 的温度范围是 155 K, 在 10 kOe 磁场下, 磁致伸缩 $\lambda_{10k} \geq 1000$ ppm 的温度范围是 280 K。变温磁致伸缩表明 $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物拥有宽温域磁致伸缩特性。

4. 小结

本文采用真空电弧熔炼法制备了 $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 单一 Laves 相合金。结构分析表明, $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物具有稳定且单一的 Laves 相, 菱方结构使得合金在室温下保持优异磁致伸缩值。磁性研究发现, $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物的居里温度 T_C 为 643 K, $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物有两个自旋重取向温度 T_{SR1} (181 K)和 T_{SR2} (66 K), 分别对应易磁化方向从<111>到<100>和<100>到<110>的转变。在室温 300 K, 在 3 kOe 和 10 kOe 磁场下, $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物磁致伸缩($\lambda_{\parallel}-\lambda_{\perp}$)分别为 810 ppm 和 1332 ppm。在 15 kOe 磁场下, 在 181 K, $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 化合物磁致伸缩 λ_{15k} 达到最大值为 1844 ppm。在 20~300 K 温度下, 磁致伸缩温度曲线表明, 在 3 kOe 和 10 kOe 磁场下, $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 合金磁致伸缩 $\lambda_{3k} \geq 500$ ppm 和 $\lambda_{10k} \geq 1000$ ppm 的温度范围分别为 155 K 和 280 K。这表明 $\text{Ho}_{0.3}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.4}\text{Fe}_{1.93}$ 合金具有宽温域磁致伸缩特性。

基金项目

本研究受到了南京航空航天大学研究生科研与实践创新(xexjh20242115)项目的资助。

参考文献

- [1] Clark, A.E. (1980) *Ferromagnetic Materials*. North-Holland Publishing Company.
- [2] Liu, J., Jiang, C. and Xu, H. (2012) Giant Magnetostrictive Materials. *Science China Technological Sciences*, **55**, 1319-1326. <https://doi.org/10.1007/s11431-012-4810-0>
- [3] 张洪平, 杜挺, 王龙妹, 等. 稀土——铁系超磁致伸缩材料水声换能器的研制[J]. 金属功能材料, 1995(3): 107-109.
- [4] Jiang, C., Zhang, H., Wang, Z. and Xu, H. (2008) Magnetostriction and Hysteresis of (1 1 0) Oriented $\text{Tb}_{0.29}\text{Dy}_{0.48}\text{Ho}_{0.23}\text{Fe}_2$ single Crystal. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **41**, Article ID: 155012. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/15/155012>
- [5] Wang, B., Lv, Y., Li, G., Huang, W., Weng, L. and Cui, B. (2015) The Structure, Magnetostriction, and Hysteresis of $(\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_{1.9})_{1-x}(\text{Tb}_{0.15}\text{Ho}_{0.85}\text{Fe}_{1.9})_x$ Alloys. *Journal of Applied Physics*, **117**, 17A912. <https://doi.org/10.1063/1.4916505>
- [6] Bartashevich, A.M., Gerasimov, E.G., Mushnikov, N.V., Inishev, A.A., Terentev, P.B., Gaviko, V.S., et al. (2022) Structural and Magnetoelastic Properties of Non-Stoichiometric $\text{TbFe}_{2\text{mn}}$ Laves Phase. *Journal of Alloys and Compounds*, **923**, Article ID: 166360. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166360>
- [7] Politova, G., Mikhailova, A., Morozov, D., Politov, M., Ganin, M. and Filimonov, A. (2023) Magnetic and Magnetostrictive Properties of (Tb, Nd) Fe_2 Alloys. 2023 *International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech)*, St Petersburg, 19-20 October 2023, 308-311. <https://doi.org/10.1109/eexpolytech58658.2023.10318747>
- [8] Kang, D., Liu, J., Jiang, C. and Xu, H. (2015) Control of Solid-Liquid Interface Morphology and Radial Composition Distribution: TbDyFe Single Crystal Growth. *Journal of Alloys and Compounds*, **621**, 331-338. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.09.106>
- [9] Shi, Y.G., Tang, S.L., Huang, Y.J., Lv, L.Y. and Du, Y.W. (2007) Anisotropy Compensation and Magnetostriction in $\text{Tb}_x\text{Nd}_{1-x}\text{Fe}_{1.9}$ Cubic Laves Alloys. *Applied Physics Letters*, **90**, Article ID: 142515. <https://doi.org/10.1063/1.2721128>

- [10] Ren, W.J., Liu, J.J., Li, D., Liu, W., Zhao, X.G. and Zhang, Z.D. (2006) Direct Experimental Evidence for Anisotropy Compensation between Dy^{3+} and Pr^{3+} Ions. *Applied Physics Letters*, **89**, Article ID: 122506. <https://doi.org/10.1063/1.2356109>
- [11] Wun-Fogle, M., Restorff, J.B., Clark, A.E. and Lindberg, J.F. (1998) Magnetization and Magnetostriction of Dendritic $[\text{Tb}_x\text{Dy}_y\text{Ho}_z\text{Fe}_{1.95} \ (x + y + z = 1)]$ Rods under Compressive Stress. *Journal of Applied Physics*, **83**, 7279-7281. <https://doi.org/10.1063/1.367700>
- [12] 张洪波, 蒋成保, 徐惠彬. $\langle 110 \rangle$ 取向(TbDyHo)Fe₂ 合金磁致伸缩的窄滞后特性[J]. 金属学报, 2007(11): 1217-1220.
- [13] Ding, H., Shi, Y. and Tang, S. (2024) Large Magnetostriction of $\text{Nd}_{0.2}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.5}\text{Fe}_{1.93}$ /Epoxy Composites in a Wide Temperature Range. *Journal of Rare Earths*, **42**, 705-709. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2023.02.007>
- [14] Shi, Y.G., Ding, H.H., Xia, C.R., Ke, X.Q. and Tang, S.L. (2022) Large Magnetostriction over a Wide Temperature Range in a $\text{Nd}_{0.2}\text{Tb}_x\text{Dy}_{0.8-x}\text{Fe}_{1.93}$ Laves Compound. *Applied Physics Letters*, **121**, Article ID: 212401. <https://doi.org/10.1063/5.0120137>
- [15] Wang, B., Cao, S., Huang, W., Sun, Y., Weng, L. and Zhao, Z. (2016) Phase Relationship and Magnetostriction of Tb-Dy-Ho-Fe Alloys. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **26**, 1-4. <https://doi.org/10.1109/tasc.2016.2515091>
- [16] Zhang, H., Pang, Y., Wen, L. and Jiang, C. (2010) Magnetostriction and Hysteresis of $\langle 110 \rangle$ Oriented TbDyHoFe_{1.95} Alloy. *Journal of Rare Earths*, **28**, 403-405. [https://doi.org/10.1016/s1002-0721\(10\)60332-8](https://doi.org/10.1016/s1002-0721(10)60332-8)
- [17] Wun-Fogle, M., Restorff, J.B. and Clark, A.E. (1999) Hysteresis and Magnetostriction of $\text{Tb}_x\text{Dy}_y\text{Ho}_{1-x-y}\text{Fe}_{1.95}$ [112] Dendritic Rods. *Journal of Applied Physics*, **85**, 6253-6255. <https://doi.org/10.1063/1.370127>
- [18] Wang, B., Lv, Y., Li, G., Huang, W., Sun, Y. and Cui, B. (2014) The Magnetostriction and Its Ratio to Hysteresis for Tb-Dy-Ho-Fe Alloys. *Journal of Applied Physics*, **115**, 17A902 <https://doi.org/10.1063/1.4852095>
- [19] Funayama, T., Kobayashi, T., Sakai, I. and Sahashi, M. (1992) Mn Substitution Effect on Magnetostriction Temperature Dependence in $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_2$. *Applied Physics Letters*, **61**, 114-115. <https://doi.org/10.1063/1.107657>
- [20] Zhang, H., Jiang, C., Zhang, T. and Xu, H. (2007) Magnetostriction and Hysteresis of $(\text{Tb}_{0.36}\text{Dy}_{0.64})_{1-x}\text{Ho}_x\text{Fe}_{1.95}$ Alloys. *SPIE Proceedings*, **6423**, 1-7. <https://doi.org/10.1117/12.779603>
- [21] Gao, Z.Q., Guo, W.X., Wang, Z.Y. and Shi, Y.G. (2025) Structure and Magnetostriction in $\text{Nd}_{0.25}\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.45}(\text{Fe}_{0.9}\text{B}_{0.1})_{1.93}$ Compound. *Journal of Alloys and Compounds*, **1010**, Article ID: 177018. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.177018>
- [22] Toby, B.H. and Von Dreele, R.B. (2013) *GSAS-II*: The Genesis of a Modern Open-Source All Purpose Crystallography Software Package. *Journal of Applied Crystallography*, **46**, 544-549. <https://doi.org/10.1107/s0021889813003531>
- [23] Huang, D., Gao, J., Lapidus, S.H., Brown, D.E. and Ren, Y. (2019) Exotic Hysteresis of Ferrimagnetic Transition in Laves Compound TbCo_2 . *Materials Research Letters*, **8**, 97-102. <https://doi.org/10.1080/21663831.2019.1704454>
- [24] Dwight, A.E. and Kimball, C.W. (1974) TbFe_2 , a Rhombohedral Laves Phase. *Acta Crystallographica Section B Structural Crystallography and Crystal Chemistry*, **30**, 2791-2793. <https://doi.org/10.1107/s0567740874008156>