

文章编号 1672-6634(2023)03-0090-06

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2022100016

轻稀土 Pr 基立方 Laves 相超磁致伸缩材料的 超高压合成及其磁弹性能研究

周安航,蔡廷涛,许玉鑫,钟赠鸽,张 浩,范李鹏,战艳虎,胡成超

(聊城大学 材料科学与工程学院,山东 聊城 252059)

摘 要 通过超高压退火方法,成功获得了轻稀土 Pr 基立方 Laves 相 $\text{Pr}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x)_{2.35}$ ($x=0, 0.06, 0.12, 0.17$) 超磁致伸缩合金材料,系统研究了其微结构、磁性转变以及磁致伸缩性能。实验结果表明,高压退火是合成轻稀土 Pr 基立方 Laves 磁致伸缩相结构的有效手段;适度的 Fe 过量可以在磁致伸缩相中引入软磁 α -Fe 相。热重分析表明随着 Ga 含量的增加, $\text{Pr}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x)_{2.35}$ 合金的居里温度呈现单调降低趋势。微量 Ga 掺杂($x=0.06$)和 α -Fe 相的引入可以有效改善样品的软磁性能,使轻稀土 Pr 基立方 Laves 相合金在保持较大磁致伸缩响应的前提下,降低其磁弹响应滞后。本工作可为价格便宜、磁弹相应优异的轻稀土 Pr 基超磁致伸缩材料的开发提供实验和理论指导。

关键词 立方 Laves 相;磁致伸缩;超高压合成

中图分类号 TQ138.1

文献标识码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Ultrahigh-Pressure Synthesis of Light-Rare-Earth Pr-Based Cubic Laves Phase Giant Magnetostrictive Materials and Their Magnetoelastic Properties

ZHOU Anhang, CAI Tingtao, XU Yuxin, ZHONG Zengge, ZHANG Hao,
FAN Lipeng, ZHAN Yanhu, HU Chengchao

(School of Materials Science and Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract The light-rare-earth Pr-based cubic Laves phase $\text{Pr}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x)_{2.35}$ ($x=0, 0.06, 0.12, 0.17$) giant magnetostrictive alloys have been obtained by ultrahigh-pressure annealing method, and their microstructure, magnetic transition, and magnetostrictive properties have also been systematically investigated. The experimental result indicates that high-pressure annealing is an effective method to fabricate light-rare-earth Pr-based cubic Laves phase. And α -Fe phase appears in magnetostrictive phase with the introduction of moderately excessive Fe. Thermogravimetric analysis reveals that the Curie temperature of $\text{Pr}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x)_{2.35}$ decreases monotonically with the increasing Ga concentration. A small amount of Ga doping ($x=0.06$) and the introduction of α -Fe phase can effectively improve the soft magnetic properties of samples, resulting in the low magnetoelastic hysteresis and high magnetostrictive response for light-rare-earth

收稿日期: 2022-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51701091); 山东省大学生创新创业训练计划项目(S202110447083); 聊城大学大学生创新创业训练计划项目(CXCXY2021065, CXCXY2021139, CXCXY2022008)资助

通讯作者: 胡成超, 男, 汉族, 博士, 副教授, 研究方向: 铁性功能材料, E-mail: huchengchao@lccu.edu.cn.

Pr-based cubic Laves phase alloys. This work may provide experimental guidance for developing the light-rare-earth Pr-based giant magnetostrictive materials with low cost and excellent magnetoelastic response.

Key words cubic Laves phase; magnetostriction; ultrahigh-pressure synthesis

1 引言

磁致伸缩效应是指磁性物质在外磁场作用下,其长度发生相应伸长和缩短的现象。作为一种现代战略功能材料,磁致伸缩材料在高精度对地观测卫星、海洋探测开发、微位移驱动机器人、高精度医疗器械等多个智能控制领域具有广泛的应用前景。经过几十年的发展,磁致伸缩家族形成了以稀土磁致伸缩合金^[1]、Fe-Ga 磁致伸缩合金^[2]、铁磁形状记忆合金^[3]、铁磁应变玻璃^[4]等为代表的材料体系。目前,稀土磁致伸缩家族中的 RFe_2 (R=稀土元素) 型立方 Laves 相结构金属间化合物兼具大应变和低滞后特性,成为微控制领域的主流应用材料。

然而,传统 RFe_2 型立方 Laves 相磁致伸缩材料的稀土组分主要集中在价格昂贵的 Tb、Dy、Ho 等重稀土材料,这严重限制了该材料进一步的发展应用。根据单离子模型计算^[1],轻稀土 Pr 基立方 Laves 相 PrFe_2 材料在 0 K 下的本征磁致伸缩可达 5.6×10^{-3} ,这甚至高于 TbFe_2 (4.4×10^{-3}) 和 DyFe_2 (4.2×10^{-3}) 的预测值。较高的理论磁致伸缩值和相对低廉的价格(不及重稀土 Tb/Dy 的 1/10)赋予轻稀土 Pr 基超磁致伸缩材料极大的开发潜力。然而,在 Pr 基磁致伸缩材料合成过程中,当稀土组分中 Pr 摩尔含量大于 30% 时,会有大量 1:3 杂相出现,严重影响材料磁致伸缩性能^[5]。Cannon 等人^[6]研究发现,常压下无法合成纯相 PrFe_2 超磁致伸缩材料是由于 Pr 的离子半径太大,超出了立方 Laves 相的最优离子半径比例,并指出高压退火有望解决轻稀土 Pr 基超磁致伸缩材料的合成难题。

另一方面,由单一稀土与 Fe 构成的 RFe_2 型立方 Laves 相磁致伸缩材料的本征磁致伸缩需要在较大的外磁场驱动下才能诱导出来,因此,进一步改善轻稀土 Pr 基超磁致伸缩材料的软磁性能,并提高低场磁弹响应能力是达成其实际应用的必由之路。大量研究表明,通过掺杂其他稀土或过渡族金属,可以通过各向异性补偿机制有效降低 RFe_2 型超磁致伸缩材料的磁晶各向异性,从而降低驱动场^[7-10]。然而,磁性材料的软磁性能和磁弹响应能力不仅取决于磁晶各相异性等材料的本征参数,还强烈依赖于材料的微组织结构。磁性材料中的析出相会引发局域退磁场并导致局域晶体畸变,进而精细调制材料的矫顽力和磁致伸缩性能。因此,恰当地引入析出相有望开辟调控轻稀土 Pr 基超磁致伸缩材料磁弹响应的新思路。Tarasov 等人在 Pr-Fe-B 合金中发现 α -Fe 相的引入可以提高永磁材料的起始磁化率,改善其软磁性质^[11]。在实验中,立方 Laves 相结构形成所需过渡金属与稀土的合理配比范围为 1.85~2.1。在 Pr-Fe 体系中,可以通过调节 Pr 和 Fe 的物质的量比例大于 2.1 (Fe 过量),在 PrFe_2 相中引入 α -Fe 析出相来实现对轻稀土 Pr 基超磁致伸缩材料软磁性能和磁弹响应的调节^[12]。不仅如此,考虑到 Ga 可以与 Fe 和 Pr 形成多种化合物,引入 Ga 元素有可能实现材料磁性和磁致伸缩性能的调控;另一方面,由于金属元素间互溶度差异,引入 Ga 元素有可能实现 α -Fe 析出相的微结构调控。

本工作利用人工金刚石合成方法的超高压退火工艺,采用过量 Fe 结合 Ga 掺杂的配料方式,成功制备了轻稀土 Pr 基立方 Laves 相 + α -Fe 相 $\text{Pr}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x)_{2.35}$ ($x=0, 0.06, 0.12, 0.17$) 系列合金,并对其结构、组织形貌、热磁性以及磁致伸缩性质进行了系统研究。

2 实验方法

2.1 样品合成

首先,按照比例配备的 $\text{Pr}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x)_{2.35}$ ($x=0, 0.06, 0.12, 0.17$) 原材料置入 Ar 气保护的熔炼炉内。配料时,Pr、Fe 和 Ga 的纯度均为 99.9%,Pr 稀土成分过量 5%,以补偿熔炼过程中的损耗。锭子反复熔炼 4 次,以保证得到均匀的母合金。将母合金分作两部分,一部分封于石英管内进行常压真空退火(常压,退火温度 973 K,退火时间 5 d);另一部分(大约 1 g)粉碎压制成直径 1 cm,厚度为 2 mm 的圆饼,采用钼片包裹后,

置入六面顶液压机石墨炉中进行高压退火(退火压强 6 GPa,退火温度 900 °C,退火时间 30 min),中间高温、高压过程(压力 4 GPa,温度 1 150 °C,时间 10 min)是为了使样品处于熔融状,保证样品高压退火的均匀性。高压退火炉装置的细节描述可参考前期工作^[13]。样品内温度和压强控制流程如图 1 所示。

2.2 性能表征

样品在乙醇保护下研磨成粉末,用传统的 Cu 靶 Rigaku D/Max-gA X-射线衍射仪表征晶体结构。通过场发射扫描电子显微镜(SEM)进行样品微组织形貌表征,结合能谱分析对元素分布进行表征。通过在 NETZSCH STA449 热分析仪上外加磁场测量热重曲线(TG),来确定样品的居里温度。通过振动样品磁强计(VSM)进行样品的磁化强度分析。通过标准电阻应变仪装置测量样品的磁致伸缩性能。

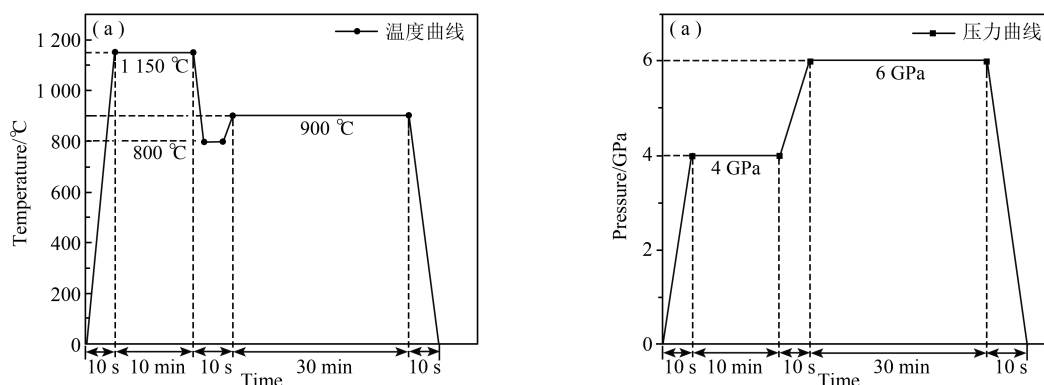


图 1 样品内(a)温度和(b)压强控制流程

3 结果与分析

3.1 相结构表征

图 2 为样品在扫描速度为 6°/min 的步进扫描下得到的 X 射线衍射(XRD)谱图。可以看出对于常压退火下 $x=0$ 的样品,其主要构成为 2:17 相、1:3 相和稀土 Pr 相,没有立方 Laves 相。而具有同样配比的高压退火样品是以 Mg-Cu₂ 型结构的立方 Laves 相为主相,辅以微量的 α -Fe 相。对比以前重稀土基 RFe₂ 超磁致伸缩材料的常压退火工艺(一般需要退火一周左右^[14]),高压退火后合金的立方 Laves 相纯度得到了极大提升,并且合成时间显著地降低(大约 40 min)。这说明高压退火是高效合成轻稀土基立方 Laves 相超磁致伸缩材料的有力手段。分析 Ga 掺杂对样品相结构的影响,可以看出微量的 Ga($x=0.06$)未改变材料立方 Laves 主相。随着 x 的进一步增加,部分 Ga 首先与 Pr 形成 PrGa 相($x=0.12$),富 Ga 相在 $x=0.17$ 时也随之出现。这些非磁致伸缩相的出现降低了立方 Laves 相的体积分数,有可能影响材料的磁致伸缩性能。需要指出的是,整个过程并未出现所期望的 FeGa 相。

3.2 热重分析

根据铁磁材料在外磁场作用下达到居里点 T_c 时有表现失重的特性,可以通过热重法标居里温度。图 3(a)为不同 Ga 掺杂含量的 Pr(Fe_{1-x}Ga_x)_{2.35} 合金样品在 60 Oe 外磁场下,0~650 K 温度范围区间的热重分析曲线。由图 3(b)可知,Pr(Fe_{1-x}Ga_x)_{2.35} 的居里温度随着 Ga 掺杂量的增多而降低。RFe₂ 化合物的居里温度主要由 3d-3d 电子交换作用主导,3d-4f 电子耦合作用调制^[1,15,16]。对于 Pr(Fe_{1-x}Ga_x)_{2.35},由于 Ga 替换 Fe 导致 3d-3d 电子交换作用和 3d-4f 电子耦合作用减弱,居里温度随之降低。类似的实验结果也出现在 Ga 掺杂的重稀土基 Tb(Fe_{1-x}Ga_x)₂ 磁致伸缩材料中^[17]。

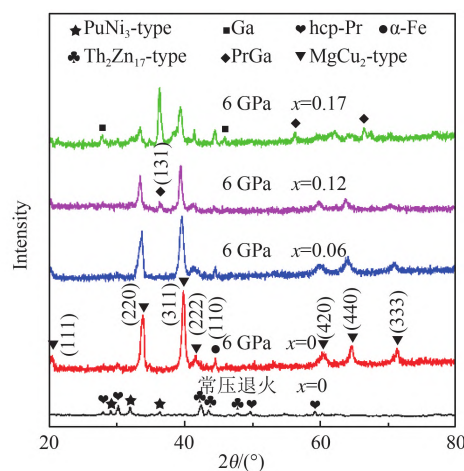


图 2 Pr(Fe_{1-x}Ga_x)_{2.35} ($x=0, 0.06, 0.12, 0.17$) 合金 XRD 图谱

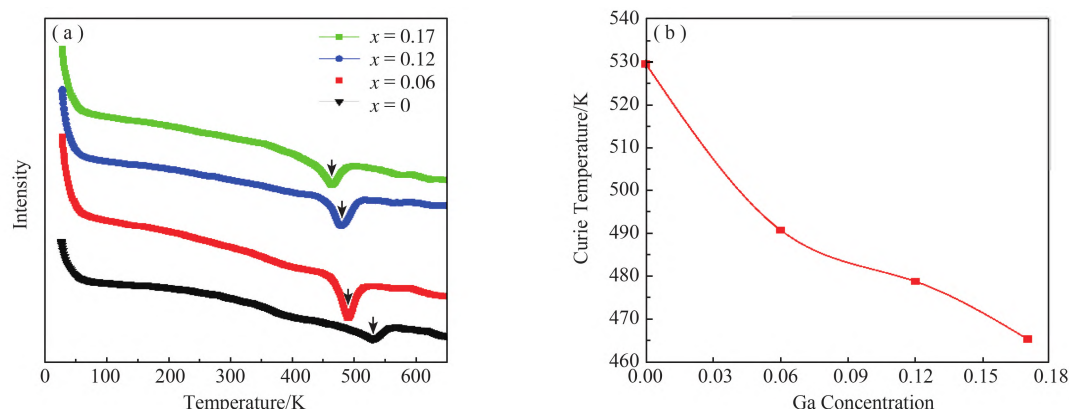


图3 $\text{Pr}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x)_{2.35}$ ($x = 0, 0.06, 0.12, 0.17$) 合金的(a)热重曲线和(b)居里温度随添加量的变化曲线

3.3 组织结构表征

图4左为 $\text{Pr}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x)_{2.35}$ 合金组织的扫描电子显微镜(SEM)照片;右为样品的选区能谱分析(EDS)结果。可以看出,样品主要由浅色基底组织和深色析出组织构成。EDS分析表明:深色析出组织中绝大部分为Fe,浅色基底组织中Pr、Fe和Ga均有分布。结合前面XRD分析可以确定, $x = 0$ 和 $x = 0.06$ 样品基底组织的主要构成为立方Laves PrFe_2 相, $\alpha\text{-Fe}$ 相集中在胞状析出组织中; $x = 0.12$ 和 $x = 0.17$ 样品基底组织构成比较复杂(PrFe_2 相、 PrGa 相、富Ga相、hcp-Pr相、 $\text{Pr}_2\text{Fe}_{17}$ 相、 PrFe_3 相等), $\alpha\text{-Fe}$ 相析出组织由胞状变成树枝状。进一步观察可以看出,与未掺杂Ga的样品相比,微量Ga掺杂($x = 0.06$)的样品中 $\alpha\text{-Fe}$ 相具有更大的球半径,这可能是由于微量Ga掺杂降低了 $\alpha\text{-Fe}$ 的形核功^[18]。胞状软磁 $\alpha\text{-Fe}$ 相与立方Laves相具有更好的磁耦合效应,进而改善材料的软磁性能。增加Ga含量会造成溶质分布不均,引起成分过冷,导致 $\alpha\text{-Fe}$ 相在非平衡凝固过程中的树枝状偏析^[19-21]。Ga过量会促使低熔点组元原子进一步富集在枝间,使得 $\alpha\text{-Fe}$ 相树枝状偏析组织逐渐瓦解成条状。

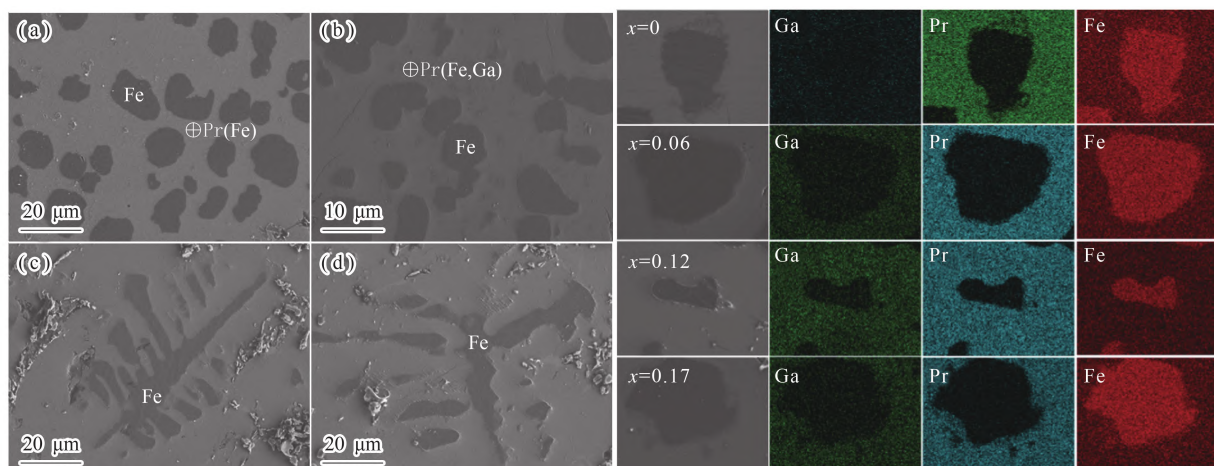


图4 左: $\text{Pr}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x)_{2.35}$ 合金不同样品的SEM图像(a) $x = 0$, (b) $x = 0.06$, (c) $x = 0.12$, (d) $x = 0.17$;右: $\text{Pr}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x)_{2.35}$ ($x = 0, 0.06, 0.12, 0.17$)的选区EDS图像

3.4 磁性分析

图5(a)为室温下 $\text{Pr}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x)_{2.35}$ 合金在 $-30 \sim 30$ kOe外磁场下的磁滞回线。可以看出,所有样品矫顽力都比较小,且在30 kOe磁场强度下几乎都达到饱和磁化。图5(b)为样品在 $0 \sim 30$ kOe磁场下的磁化曲线。可以看出,随着非磁性金属Ga掺杂量的增加,样品饱和磁化强度随之降低。与之不同的是,微量Ga掺杂($x = 0.06$)样品的低场($H \leq 5$ kOe)磁化强度反而高于未掺杂样品。结合XRD晶体结构和SEM组织形貌分析可知,微量Ga掺杂可以在不影响样品立方Laves主相结构的同时改善 $\alpha\text{-Fe}$ 相的组织分布,从而改善了样品的软磁性能。此外, $x = 0.12$ 的样品在低场下磁化强度的提高可归因于顺磁态 PrGa 相和软磁 $\alpha\text{-Fe}$ 相的共同作用^[22]。过多的Ga掺杂($x = 0.17$)会进一步引入非磁性富Ga相,并导致其它 $\text{Pr}_2\text{Fe}_{17}$ 、 PrFe_3 相等

低磁性相的出现,降低基底组织立方 Laves 相的比例;同时,由此引发的无规 α -Fe 相条纹组织也会影响磁化的一致翻转,最终导致材料总磁化强度的下降。

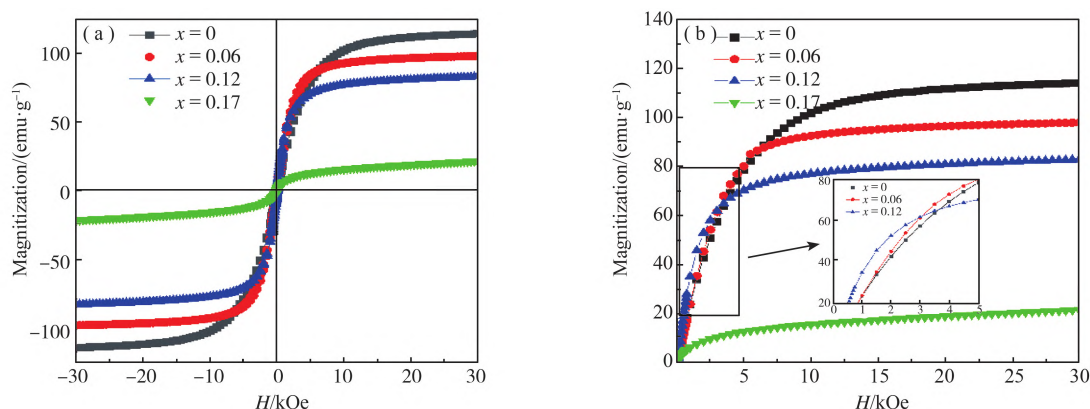


图 5 $\text{Pr}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x)_{2.35}$ ($x=0, 0.06, 0.12, 0.17$) 合金在不同外加磁场下的 (a) 磁滞回线和 (b) 磁化曲线

3.5 磁致伸缩性能

图 6(a) 为 $\text{Pr}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x)_{2.35}$ 合金样品在 0~10 kOe 循环磁场下的平行磁致伸缩半蝴蝶曲线。可以看出,样品在升场和降场循环下合金具有较低的磁弹滞后,且在最大 10 Oe 外场下开始趋近饱和。在本体系中,饱和磁致伸缩系数由样品中不同体积分数各种相磁致伸缩系数的加权平均决定,由于其他相(α -Fe 相、PrGa 相、富 Ga 相、hcp-Pr 相、 $\text{Pr}_2\text{Fe}_{17}$ 相、 PrFe_3 相等)的磁致伸缩效应极小,因此材料饱和磁致伸缩系数主要由磁致伸缩相(立方 Laves 相)的体积分数决定。 $\text{Pr}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x)_{2.35}$ 合金的饱和磁致伸缩值随 x 的增加而降低,表明样品中立方 Laves 相纯度逐步减少,这与 XRD 分析结果一致。从图 6(a) 插图可以看出微量 Ga 掺杂($x=0.06$)样品相较于未掺杂 Ga 的样品磁弹滞后进一步降低。综合 XRD 和 SEM 结果分析,微量 Ga 掺杂可以在保持材料立方 Laves 磁致伸缩主相的同时改善软磁 α -Fe 的组织形态。良好的软磁性能和磁弹耦合使得微量 Ga 掺杂样品具有更低的磁滞和更好的低场磁弹响应效应。图 6(b) 为不同上升磁场下磁致伸缩随 x 变化的拟合曲线。低场磁致伸缩在 $x=0.06$ 时呈现峰值。比如,相较于 $x=0$ 的合金, $x=0.06$ 时合金的低场($H=2$ kOe)磁致伸缩系数达到最大值 8.158×10^{-5} ,实现约 7.7% 的提升。这表明微量的 Ga 掺杂可以有效降低 $\text{PrFe}_{2.35}$ ($\text{PrFe}_2 + \alpha\text{-Fe}$) 合金总的磁各向异性^[23-25],从而改善其低场磁弹性能。

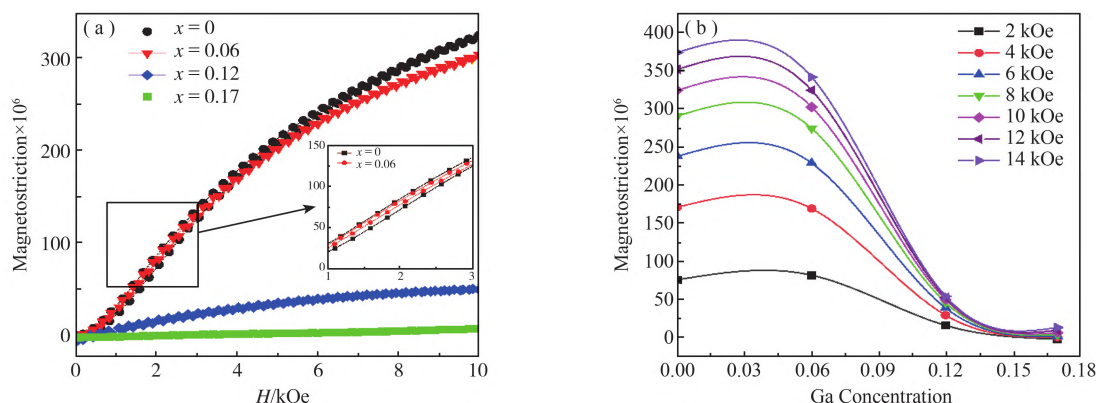


图 6 $\text{Pr}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x)_{2.35}$ ($x=0, 0.06, 0.12, 0.17$) 合金在不同外加磁场下 (a) 平行磁致伸缩性能和 (b) 平行磁致伸缩系数随 Ga 含量变化的拟合曲线

4 结论

综上所述,通过超高压退火合成方式,成功获得轻稀土 Pr 基立方 Laves 相 $\text{Pr}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x)_{2.35}$ ($x=0, 0.06, 0.12, 0.17$) 超磁致伸缩合金材料,系统地研究了 Ga 掺杂和软磁 α -Fe 相引入对轻稀土 Pr 基超磁致伸缩 $\text{Pr}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ga}_x)_{2.35}$ 合金组织结构和磁弹性能的影响,可以得到以下结论:微量 Ga 掺杂可以在保持材料立方

Laves 磁致伸缩主相的同时改善软磁 α -Fe 的组织形态,进而优化 Pr 基超磁致伸缩材料的软磁性能和磁弹响应能力。本工作实现了轻稀土 Pr 基 Laves 相超磁致伸缩材料的高效合成,并为价格相对低廉、低场响应高的磁致伸缩材料开发提供了可能的设计方案。

参 考 文 献

- [1] Clark A E. Chapter 7 Magnetostrictive rare earth-Fe₂ compounds. Handbook of Ferromagnetic Materials[M], Amsterdam: North-Holland Publishing Co, 1980, 1: 531-589.
- [2] Atulasimha J, Flatau A B. A review of magnetostrictive iron-gallium alloys[J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20: 043001.
- [3] Otsuka K, Wayman C M. Shape memory materials[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [4] Wadhawan V K. Ferroelasticity[J]. Bulletin of Materials Science, 1984, 6: 733-753.
- [5] SHIMOTOMAI M, MIYAKE H, DOYAMA M. Magnetic characteristics of Laves phase compound PrFe₂[J]. Journal of Physics F Metal Physics, 1980, 10(4): 707-713.
- [6] CANNON J F, ROBERTSON D L, HALL H T. Synthesis of lanthanide-iron Laves phases at high pressures and temperatures[J]. Materials Research Bulletin, 1972, 7(1): 5-11.
- [7] HE C X, TANG Y M, LI X, et al. Influence of Tb on easy magnetization direction and magnetostriction of PrFe_{1.9} alloy[J]. Chinese Physics B, 2019, 28(11): 337-342.
- [8] TANG Y M, HUANG H F, TANG S L, et al. Dy substitution effect on the temperature dependences of magnetostriction in Pr_{1-x}Dy_xFe_{1.9} alloys[J]. 中国物理 B, 2016, 25(11): 511-514.
- [9] SHI Y G, TANG S L, ZHAI L, et al. Composition anisotropy compensation and magnetostriction in Pr(Fe_{1-x}Co_x)_{1.9} (0 ≤ x ≤ 0.5) cubic Laves alloys[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(21): 147-149.
- [10] ZHANG Z, LU W J, DONG S Z, et al. Design of high resistivity light-rare-earth-based PrFe_{1.93} magnetostrictive alloys: Si doping and high-pressure annealing[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, 471: 64-69.
- [11] TARASOV V P, KRIVOLAPOVA O N, KUTEPOV A V, et al. Investigating the possibility of fabricating Pr₂Fe₁₄B/α-Fe composite materials by oxidation of the Pr-Fe-B alloy in a fluidized-bed jet mill[J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2020, 61(3): 382-386.
- [12] SHI Y G, TANG S L, HUANG Y J, et al. Structure, thermal stability and magnetostrictive properties of PrFe_x (1.5 ≤ x ≤ 3.0) alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2007, 443: 11-14.
- [13] SHI Y G, TANG S L, LV L Y, et al. Magnetic and magnetostrictive properties in high-pressure synthesized Dy_{1-x}Pr_xFe_{1.9} (0 ≤ x ≤ 1.0) cubic Laves alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 506: 533-536.
- [14] HU C C, ZHANG Z, CAI T T, et al. Room-temperature ultrasensitive magnetoelastic responses near the magnetic-ordering tricritical region[J]. Journal of Applied Physics, 2021, 130(6): 063901.
- [15] BUSCHOW K. Intermetallic compounds of rare-earth and 3d transition metals[J]. Reports on Progress in Physics, 1977, 40: 1179.
- [16] 巩雄, 马忠乾, 史广星, 等. 稀土金属化合物的结构和磁性[J]. 化学通报, 1993(10): 13-19.
- [17] TANG Y J, FENG Y B, LUO L L, et al. Ga substitution effect on magnetic and magnetostrictive properties of TbFe₂ compounds[J]. Journal of Applied Physics, 1994, 76: 7145.
- [18] 王海丰, 王慷, 况望望, 等. 非平衡凝固理论的发展[J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(4): 358-376.
- [19] FLEMINGS M C. Solidification Processing[M]. New York: McGraw-Hill, 1974.
- [20] 王武, 舒光冀, 何德坪. 稀土元素在 Al-Mg 合金中的分布及对结晶组织的影响[J]. 中国稀土学报, 1990(3): 252-256.
- [21] 岳帅帅, 叶子天, 郭扬帆, 等. 定向凝固过程中单晶合金枝晶生长的研究进展[J]. 材料研究与应用, 2022, 16(2): 328-336.
- [22] ROBUAKI S. Magnetic properties of rare earth gallium intermetallic compounds[J]. Journal of the Physical Society of Japan, 1977, 42: 1873-1880.
- [23] HU C C, SHI Y G, CHEN Z Y, et al. Synthesis, magnetic properties and magnetostriction of Pr_{0.5}Nd_{0.5}(Fe_{1-x}Co_x)_{1.9} cubic Laves alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 613: 153-156.
- [24] HU C C, SHI Y G, SHI D N, et al. Anisotropy compensation and magnetostrictive properties in Tb_xDy_{1-x}(Fe_{0.9}Mn_{0.1})_{1.93} Laves compounds: experimental and theoretical analysis[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(20): 203906.
- [25] GARCIA J A, CARRIZO J, ELBAILE L, et al. Magnetic anisotropy and magnetostriction in nanocrystalline Fe-Al alloys obtained by melt spinning technique[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2014, 372: 27-32.

(责任编辑:蒲锡鹏)