

新型磁驱动 Galfenol合金研究进展*

王璐¹, 丁雨田^{1,2}, 胡勇^{1,2}, 刘妍妍¹, 王国斌¹, 周质光¹

(1. 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 温州泵阀工程研究院 浙江 温州 325105)

摘要: 磁驱动 Galfenol合金具有电磁能与机械能的互换功能,是重要的能量与信息转换功能材料。针对 Galfenol材料的研究现状,着重从影响 Fe-Ga合金磁致伸缩性能的制备工艺、合金成分、微观相结构、磁致伸缩模型等方面进行阐述,同时对当前最新研究进展进行了介绍。

关键词: Galfenol合金;磁致伸缩;研究进展

中图分类号: TG113, TM273

文献标识码: A

文章编号: 1006-4414(2011)03-0001-06

Recent progress in new magnetic field controlled Galfenol alloys

Wang Lu¹, Ding Yu-tian^{1,2}, Hu Yong^{1,2},

Liu Yan-yan¹, Wang Guo-bin¹, Zhou Zhi-guang¹

(1. State key laboratory of Gansu advanced non-ferrous metal materials Lanzhou university of technology

Lanzhou Gansu 730050, China; 2. Wenzhou pump & valve engineering research institute

Lanzhou university of technology, Wenzhou Zhejiang 325105, China)

Abstract: Magnetic drive Galfenol alloy which has the conversion function between electromagnetism and mechanical energy is widely used as an important energy and information conversion materials. Due to their reversible strains in the presence of an applied magnetic field and changes in magnetic properties on the application of stress, the preparation process, alloy composition, micro-phase structure, magnetostrictive model are elaborated, which all affect the magnetostrictive properties. Meanwhile the latest research on the current progress is introduced.

Key words: galfenol alloy; magnetostrictive; research development

1 前言

磁致伸缩材料具有电磁能与机械能的互换功能,是重要的能量与信息转换功能材料。区别于传统的磁致伸缩材料,压电陶瓷(PZT或PMN)或稀土超磁致伸缩材料 Tb-Dy-Fe 新型磁驱动 Galfenol(Fe-Ga)合金因为在较低磁场(200 oe)下具有大的饱和磁致伸缩值(400 ppm)、较高的机械强度(500 MPa)、良好的延展性(延伸率为 0.8%~1.6%)和温度特性,更加适用于器件的设计和制备,因而受到了人们越来越多的关注^[1]。

研究发现,当非磁性元素 Ga 掺入 Fe 中形成替代式固溶体时,可以使 Fe 的磁致伸缩增加十倍乃至几十倍,替代式 Ga 原子在固溶体中的不同占位形式,主要取决于合金的成分、制备方法和热处理条件^[2],进而直接决定着该合金有序、无序的程度,并对原子磁矩的大小造成影响,最终使材料的磁致伸缩性能发生改变。目前为止,对该合金不同制备条件及热处理情况下的微观组织结构和磁致伸缩性能人们已经开展了广泛的研究^[3~5]。

针对 Galfenol 材料的研究现状,着重从影响 Fe-Ga 合金磁致伸缩性能的制备工艺、合金成分、微观相结构、磁致伸缩模型等方面进行阐述,同时对当前最新研究进展进行了介绍。

2 影响 Fe-Ga 合金磁致伸缩性能的因素

2.1 结构与相

根据 Massalski TB 等人研究工作可知,在室温下, Ga 在 Fe 中的平衡固溶度为 11%,在 1037°C 时为 36%,在亚稳态过饱和固溶体中 Ga 的含量可达到 30% 以上。室温下纯 Fe 的磁致伸缩值只有 $\lambda_{100} = 20 \text{ ppm}$, $\lambda_{111} = -16 \text{ ppm}$, 加入非磁性元素 Ga 后,形成替代式固溶体, Ga 原子在固溶体中的占位直接影响着合金的有序、无序程度,从而决定 Fe-Ga 合金的磁致伸缩性能,参考 Ikeda 和 Kawamuya 等人^[6]的相图研究工作可知,当合金中 Ga 原子百分含量在 15%~30% 的范围内变化时,不同的制备条件下可能出现 A2、B2、DO₃、L1₂、DO₁₉ 和类 B2 等多种相结构,其中 A2 相是无序 α -Fe 相,而其他相均为有序相。其点阵结构如图 1 所示, A2、B2 和 DO₃ 相属于体心立方结

* 项目: 国家自然科学基金项目(11004091); 浙江省自然科学基金项目(Y4090219); 甘肃省自然科学基金项目(0916RJZA025)

收稿日期: 2011-04-07

作者简介: 王璐(1984-), 男, 甘肃兰州人, 硕士, 主要从事功能材料研究工作。

构, $L1_2$ 相为面心立方相, DO_{19} 相属于六方晶系结构。当 Ga含量在 $0\sim 36\text{at}\%$ 范围, 在 1037°C 以上为 A2单相固溶体, 在低 Ga范围内以 $\alpha\text{-Fe}$ 结构固溶体的形式存在, 稳定态为无序的 A2和有序的 B2、 DO_3 相。

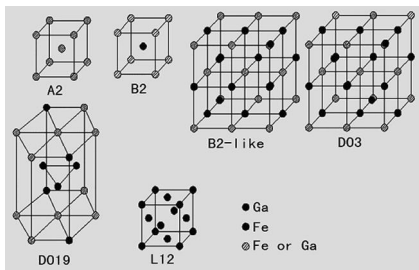


图 1 A2、B2、 DO_3 、 $L1_2$ 、 DO_{19} 和 B2-like 晶体结构图

图 2 为 Fe-Ga 合金相图。图 2(a)为实验得到的 Fe-Ga 合金平衡相图, 对比两个平衡相图可见, 除了 $L1_2$ 、 DO_{19} 和 Fe_8Ga_8 相区间明显不同外, 其他相区都有很好的符合。图 2(b)为 Ikeda 等人获得的 Fe-Ga 合金亚稳相图。从图上可以看出亚稳相图与平衡相图的差异比较明显, 尤其是在 55°C 以下的温度相区, 无法得到 $L1_2$ 相, 而 DO_3 相成为室温稳定相。

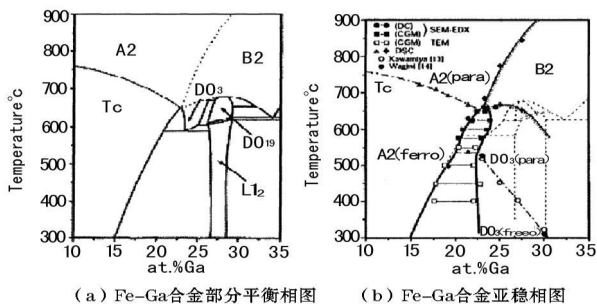


图 2 Fe-Ga 合金相图

A. E. Clark 在文献中利用悬浮区融法制备出了 A2、B2 以及 DO_3 相的单晶 $Fe_{1-x}Ga_x$ ($x=0.24\sim 0.25$) 并研究了他们的磁致伸缩性能后发现: 在平行于磁场方向, A2 相的磁致伸缩值最大, B2 次之, DO_3 相最小。T. A. Lograsso^[7]等对无序结构如何提高磁应变方面进行的研究发现, 淬火态单晶进行 (100)和 (111)面扫描时在 $2\theta=44^\circ$ 处有明显衍射峰, 该峰与无序 bcc 相、有序 DO_3 、 $L1_2$ 相均没有对应关系。他们认为这是由于合金中出现了新的四方相, 该相有类似 DO_3 晶体结构, 又区别于 DO_3 结构, 称为 modified- DO_3 结构 (也叫 B2-like 结构), 其内部有沿 [100]方向排列的 Ga-Fe 原子对。认为这种结构是在淬火时从无序 bcc 相中通过马氏体转变形成的, 该相降低了剪切模量, 因而提高了磁致伸缩性能。

通过上述的研究表明: 在 Fe-Ga 合金的制备与后期处理工艺的选择上面, 应该考虑到如何最大程度

的保留无序 A2 相和获得 modified- DO_3 结构 (也叫 B2-like 结构), 抑制亚稳有序 DO_3 相和稳定 $L1_2$ 相的出现以有利于获得大的磁致伸缩。

2.2 合金成分

Clark 系统制备了各成分的 $Fe_{100-x}Ga_x$ 合金, 并获得了不同热处理条件下 Fe-Ga 合金的磁致伸缩性能与 Ga 含量的关系。图 3 为 Fe-Ga 合金 [100]方向磁致伸缩系数与 Ga 含量的变化示意图。从图中可以发现不同热处理条件下 λ_{100} 随 Ga 含量的变化, 无论在炉冷或水淬情况下, 饱和磁致伸缩系数都成双峰变化, 第一个峰值在 $x=17\sim 19$, 第二个峰值在 $x=27\sim 29$, 水淬样品的磁致伸缩要大于炉冷样品。炉冷样品当 $x=17$ 时, λ_{100} 达到最大值 203ppm; 水淬样品在 $x=19$ 时, λ_{100} 达到最大值 265ppm。研究 $Fe_{100-x}Ga_x$ 合金 [111]方向的磁致伸缩系数与 Ga 含量的关系发现, 在低 Ga 含量时, 磁致伸缩系数与 Fe 的磁致伸缩相当, 为负磁致伸缩, 在 19at% Ga 时, 磁致伸缩符号突变, 然后随着 Ga 含量增加磁致伸缩系数基本保持不变, 这源自于材料内部的结构变化引起了磁致伸缩符号的突变, 材料的磁致伸缩系数变化与合金内部结构变化密切相关。

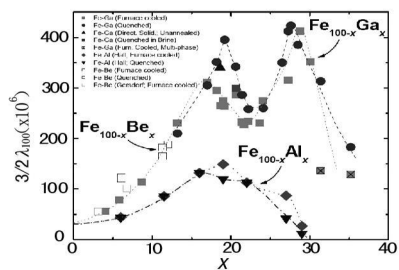


图 3 $Fe_{100-x}Ga_x$ 合金 [100]方向 λ 随 Ga 含量的变化

2.3 Fe-Ga 合金的晶体取向 (织构)

大量的研究工作表明, 磁致伸缩材料只有在单晶或取向晶体的状态下沿易磁化方向或沿与其相近的方向磁化时才具有较好的磁致伸缩性能, 而当材料中存在第二相或晶体缺陷时, 材料的磁致伸缩性能都将降低, 所以最理想的试样应当是无缺陷的单晶材料。Fe-Ga 合金为体心立方结构, 它具有大的磁致伸缩各向异性, 根据 Kumagai 等^[8]的研究, [100]方向有最大的磁致伸缩系数, 偏离 [100]方向的 [110]和 [111]晶系磁致伸缩系数较低。因此材料的轴向织构对磁致伸缩性能有非常重要的影响。目前 Clark 等采用改进的布里吉曼法, 分别制备出了具有 [100], [110]和 [111]取向的单晶 Fe-Ga 合金, 其中具有 [100]取向的单晶 $Fe_{81}Ga_{19}$ 合金, 磁致伸缩已接近 400ppm。虽然单晶材料具有优异的磁致伸缩性能, 但是单晶的制备工艺复杂、成本高、室温机械性能不如

多晶,同时尺寸也受到限制,因而在器件上广泛应用的还是取向多晶材料,Summers等人采用浮区法以350 mm/h的生长速度制备出了饱和磁致伸缩为220 ppm的[110]取向多晶Fe-Ga合金。Srisukhumbowomchai等人采用无籽晶的垂直布里奇曼方法,以22.5 mm/h的速度,首次制备出了与棒材轴向大约有14°偏差的[001]择优取向 $Fe_{72.5}Ga_{27.5}$ 合金棒材,该多晶棒材的饱和磁致伸缩达到271 ppm。韩志勇等人采用定向凝固的方法制备出了棒状[110]轴向取向多晶 $Fe_{83}Ga_{17}$ 合金样品,经过淬火处理后,其饱和磁致伸缩应变 λ 达到242 ppm。作为使用器件,技术磁化过程中施加的驱动磁场通常沿着棒材的轴向,因此,如何制备沿棒材纵向具有特定晶体择优取向,并且该取向磁致伸缩性能最强,是制备磁致伸缩相关材料的关键所在。制备[001]单晶或[001]和[110]织构的取向多晶被同时用于Fe-Ga合金的研究。

3 Fe-Ga合金的制备技术与热处理工艺

3.1 Fe-Ga单晶和取向多晶的制备

Fe-Ga合金单晶材料的制备方法主要采用定向生长技术,该技术是根据晶体生长时晶粒竞争生长的现象,通过晶粒淘汰,获得具有一定择优取向的材料。应用该技术,可获得单方向生长的柱状晶,甚至单晶,制备过程中不产生横向晶界,极大的提高了材料的磁致伸缩性能。现在常用于制备磁致伸缩单晶棒材的方法有布里奇曼(Bridgman method BM)法,悬浮区熔法(Flat zone melting ZM)和丘克拉斯基法(Czochralski method CM)。高温梯度真空定向凝固常用于制备Fe-Ga取向织构多晶,该法制备试样尺寸大、表面规整、沿轴向成分和性能均匀一致,通过控制温度梯度和定向凝固速度可获得需要的凝固组织。

3.2 Fe-Ga多晶块体的制备

Fe-Ga合金多晶块体的制备主要采用真空电弧炉或者真空感应炉熔炼而获得,为了保证样品内部的均匀性,反复熔炼多次得到多晶合金。通常熔炼后的多晶合金放置于抽真空并密封的石英管内,在高温条件下进行均匀化处理,热处理条件依据样品成分的不同而有差异。另外,也有采用粉末冶金法、电爆法、碾压法来制备Fe-Ga磁致伸缩多晶材料^[9]。

3.3 Fe-Ga低维样品制备

低维材料科学是近年来研究的热点,低维材料具有独特的表面效应、体积效应、量子尺寸和宏观隧道效应等,因而在电学、力学、热学、磁学、光学等方面表现出异于传统材料的各种性能。随着研究的深入,已有部分工作扩展到低维Fe-Ga合金的制备和性质研究领域,已有关于用电化学沉积的方法制备Fe-Ga合金的一维纳米线和磁控溅射方法制备Fe-Ga合金

纳米薄膜的报道。

3.4 快速凝固法

(1) 熔液自旋法 应用熔体快淬法可制备磁致伸缩薄带材料^[10]。该方法将母合金放入石英管内,采用感应加热,使合金处于熔融状态,再以一定的气压将熔融的合金液喷射到高速旋转的辊轮表面,以得到具有一定结构的薄带样品。采用这种方法制备的Fe-Ga合金薄带的磁致伸缩性能较块体材料有较大的提高。通过对不同成分Fe-Ga合金快淬薄带的磁致伸缩行为及其与晶体结构、磁特性之间相关性的研究发现,薄带样品大的磁致伸缩效应主要来源于析出的畸变 DO_3 结构相和薄带样品具有大的形状各向异性,由于薄带样品具有较大的磁致伸缩和延展性,对于磁场的滞后性小,因而适于在磁传感器、制动器方面进行应用。

(2) 吹铸法 吹铸是一种非平衡态凝固(急冷)方法,利用这一方法可将只有在高温才能存在的相保留到室温。为了使吹铸样品均匀。一般采用电弧熔炼后的同成分多晶为原料。具体方法是:将电弧熔炼的锭子放入一底部带有小孔的石英管内,安放到吹铸机炉腔内,抽真空到 10^{-3} Pa量级。采用感应加热,使合金处于熔融状态,然后从石英管上部吹入具有一定压力的高纯氩气使熔融合金液体从小孔中喷射到有循环水冷却的铜模内。这种方法制备的合金由于冷却速度快,使合金更多的保持了液态金属无序的相结构,在磁性材料的制备中得到了更多应用。

3.5 其他方法

(1) 粉末冶金法 粉末冶金法可获得形状较复杂的超磁致伸缩材料样品,尽管其性能不如定向凝固样品性能高,但由于其独特的制备工艺,仍引起研究者的广泛关注。合金粉采用球磨粉、快淬粉、氢化-歧化-脱氢工艺(HDD)制粉,由粉末烧结或粉末粘结成型,在成型中应用高压烧结和磁场处理可提高性能。粉末法的优点是可加工制备复杂形状的材料。

(2) 轧制法 这种制备工艺主要用于Fe-Ga合金箔的制备。通过轧制,可以赋予Fe-Ga合金一定的变形织构。Na等^[11]将 $(Fe_{81.3}Ga_{18.7}) + 0.5\% B$ 轧制成具有 $\langle 100 \rangle$ 取向的薄片,在120°C下退火2h后淬冷,得到的最大磁致伸缩系数为200 ppm。Gunswany等^[12]对 $(Fe_{85}Ga_{15})_{99}(NbC)_1$ 进行热轧和温轧后得到具有 $\langle 110 \rangle$ 织构的薄片,轴向方向最大磁致伸缩系数为110 ppm。

3.6 热处理对Fe-Ga合金磁致伸缩性能的影响

由于Fe-Ga合金的磁致伸缩性能与其相结构有着非常敏感的联系,而材料的制备方法和热处理历史直接决定了材料具有何种相结构,应此研究Fe-Ga

合金的热处理工艺对提高其磁致伸缩性能、讨论大磁致伸缩来源有着重要的意义。

Clark等发现 Ga含量在 17~27at% 范围内,冷却速度的提高明显改善磁致伸缩性能,淬火后的 Fe₈₁Ga₁₉合金结构变化对磁性能所起的决定性作用。T. A. Lograsso]等人对 Ga含量较高的 Fe-Ga合金的结构特点进行分析发现,在 570°C以上,Fe₈₁Ga₁₉应为 Ga原子无序占位的 A2结构,当合金慢冷至室温时则进入两相区 A2+L₂,其中 L₂为有序的面心结构 Fe₃Ga相,但动力学研究表明,L₂相沉淀析出的速率很慢,因而在冷却过程中一般趋向形成有序的亚稳 DO₃相,因此合金淬火可能得到无序的 A2相,抑制有序的 DO₃相。淬火态合金磁致伸缩得到改善的根本原因是 Ga原子在 bcc结构替代 Fe的位置出现短程有序的 modified-DO₃结构,这种对称性有缺损的点缺陷修正 DO₃结构包含沿 [100]方向分布的 Ga-Ga原子对,对磁晶各向异性有直接的影响,造成了四方晶格常数的畸变,减低了剪切模量,提高了材料的磁致伸缩性能。韩智勇研究了热处理对定向凝固 Fe-Ga合金微结构和磁致伸缩性能的影响,发现 Fe-Ga合金经过快速冷却后,性能有明显的改善。水中淬火能够提高 Fe-Ga合金的磁致伸缩性能是由于合金中 DO₃相的形成被有效地抑制。

4 Fe-Ga合金大磁致伸缩的理论模型

目前提出的用于解释 Fe-Ga合金大磁致伸缩的模型有两种:一种为 T. A. Lograsso^[9]提出的 modified-DO₃模型(B2-like),即在无序 A2相的 Fe中,存在由于发生晶格畸变的亚稳 DO₃相,这种发生晶格畸变的 DO₃相不同于传统意义上的 DO₃相,其 Ga-Ga原子对沿 [100]晶体学方向非对称性排列,形成有序的 Ga-Ga原子对模型,这种排列方式中的短程有序的 Ga-Ga原子对使得四方晶体具有低的剪切模量,因而造成磁致伸缩应变的提高。Ruqian Wu^[13]从第一性原理出发利用 FLAPW法计算得到 Fe₃Ga的 modified-DO₃、DO₃和 L₂结构的磁致伸缩系数 λ₁₀₀分别为 +380ppm、107ppm、-298ppm,均大于纯 Fe的 λ₁₀₀,引起磁致伸缩系数如此大的区别仅仅是近邻位置的 Ga原子占据状态发生变化,从另一个角度说明材料的相结构尤其是对称性的不同会导致电子结构发生很大的变化。通过他的研究发现,modified-DO₃结构虽然不是稳定相,但它对磁致伸缩性能起决定性的作用

另一种用于解释 Fe-Ga合金大磁致伸缩的模型由 N. Srisukhumbowomchai提出^[14],他认为如果要在 Fe-Ga合金中得到大的磁致伸缩,保持无序分布的 A2相是关键,从 Srisukhumbowomchai的大量实验结

果中可以看到,无序 A2相磁致伸缩值比有序 DO₃、DO₁₉和 L₂相更大,能够得到大磁致伸缩的 Fe-Ga合金所具有的晶体结构均为 A2相。但遗憾的是,他并没有关注前面讨论过的 modified-DO₃(B2-like)结构,因而,目前无法确定他所得大磁致伸缩的 Fe-Ga合金的关键晶体结构是否完全为无序 A2相。

综上所述,虽然国际上已有一些关于 Fe-Ga合金磁致伸缩机理的研究,但并没有一个把理论和实验结果统一起来的完整的结论。R. Wu的研究中没有涉及很重要的无序 A2相的计算,而且在 DO₃结构中仍存在理论与实验的差距。N. Srisukhumbowomchai则忽略了 modified-DO₃结构,究竟是 A2结构还是 modified-DO₃(B2-like)结构导致 Fe-Ga合金的大磁致伸缩并没有给出一个合理的统一的解释。

5 Fe-Ga合金研究的最新进展

5.1 添加元素对 Fe-Ga合金的影响

虽然 Fe-Ga合金表现出优异的磁致伸缩性能,但是与稀土材料 Terfenol-D相比还有一定差距,为了改善 Fe-Ga合金的磁致伸缩性能和开发新型的铁基磁致伸缩材料,研究人员对添加第三元素对 Fe-Ga合金的影响展开了大量的研究。

Hall等人研究发现,过渡族金属 V、Cr、Mo添加到金属 Fe中提高了 Fe的磁致伸缩系数 λ₁₀₀,因而人们便希望验证过渡金属的替代是否可以提高 Fe-Ga合金的磁致伸缩系数。Kawamiya和 Nishino等研究指出无论添加电子数多于或少于 Fe原子的过渡元素都将起到稳定 DO₃结构的作用,而 DO₃结构的产生被认为是降低磁致伸缩系数 λ₁₀₀的主要原因。Click等人的研究结果表明,添加 C、B和 N这样的小原子与添加 Ni、Rh、Co、Cr、Mo和 V这样的过渡族元素对 Fe-Ga合金的原子磁矩和磁性能的影响不同。小原子添加后主要进入原子的空隙位置,形成间隙式固溶体,过渡族金属元素添加,主要是进行取代,形成替代式固溶体。对于镓含量大于 18%的 Fe-Ga-C三元合金的研究表明,C的添加抵制了三元合金中 DO₃相的形成,增加了缓慢冷却时合金的磁致伸值。同时研究发现,碳进入铁镓合金间隙后引起立方结构畸变,这些立方结构的畸变在改善铁镓合金磁致伸缩性能方面起了很重要作用。添加 B和 N与添加 C有类似的作用,含 Ga量为 18.7%的缓慢冷却 Fe-Ga-B合金的磁致伸缩值与具有相同 Ga成分的淬火态二元合金相似,Fe-Ga-B合金的淬火试样的磁致伸缩值高于淬火态二元合金大约 20%。

Srisukhumbowomchai等人对 Fe-Ga-Al合金进行的相关研究认为,Ga和 Al在 Fe的 bcc结构中的作用相似,在一定程度上可相互替代,d层全满或全空的

非磁性元素通过影响 Fe 原子自旋-轨道耦合,提高了材料的磁致伸缩性能。Al 和 Sn 因原子半径关系被用来替代 Fe-Ga 合金中的 Ga 原子,而 Al, Sn, Ga 在 p 轨道都有未成对电子 (Al-3p¹, Sn-5p², Ga-4p¹)。高芳等人^[15]通过研究添加 Si, Ge, Sn 对 Fe-Ga 合金相结构和磁致伸缩的影响后,认为 Sn 溶入 A2 相中造成的晶格畸变及对 Fe 原子自旋-轨道耦合的影响对合金的磁致伸缩性能有利;李纪恒^[16]等人研究了铸态及轧制 Fe-Ga-B 合金的磁致伸缩性能后认为样品的织构影响了合金的磁致伸缩性能。

元素的添加无疑增加了合金的复杂性,目前对于不同元素如何影响合金磁致伸缩性能的研究还在继续,获得的结论存在不同甚至截然相反。Fe-Ga 磁致伸缩材料的性能对合金成分及微观结构十分敏感,所以,添加元素研究对于改善 Fe-Ga 合金的综合性能力及丰富磁性物理学的理论都具有一定的意义。

5.2 深过冷熔体定向激发

利用定向凝固、定向生长方法制取的单晶或者取向多晶 Fe-Ga (Galfenol) 合金具有平衡凝固相结构和特定的晶粒取向,其磁致伸缩实验测量值 λ_{100} 虽然较传统磁致伸缩材料有了较大的提高,但与稀土类磁致伸缩材料比较还有着数量级上的差距。同时,单晶的生长成本较高,机械性能不如多晶材料,目前仅适用于实验室研究。利用熔体快淬方法制备的 Fe-Ga 合金薄带及薄膜具有远离平衡凝固组织的亚稳无序和部分有序相结构及强烈的生长感生磁各向异性,虽然呈现出“巨”磁致伸缩效应,但是快淬薄带、沉积薄膜通常宽度、厚度有限,限制了其在工程领域的应用。

综合现有的研究成果表明,快速凝固和取向生长是制备高性能 Fe-Ga 材料的先决条件,深过冷快速凝固技术通过各种有效的净化手段尽可能消除金属和合金液中的异质晶核的形核作用,获得了在常规凝固条件下难以达到的过冷,实现了具有一定尺寸大体积合金液的宏观负温度梯度快速定向凝固或单晶生长。该法具有无偏析、高效率 and 远离平衡等特征,通过施加在大过冷度合金液上一定方向的定向激发,可控制生长晶体的取向和微观组织。李建国在文献^[17]中发现使用深过冷熔体定向激发的 Fe₈₁Ga₁₉ 合金棒材的磁致伸缩值高达 820 ppm,是先前报道过 Fe-Ga 体材料的两倍,用此法制备的 Fe-Ga 合金具有沿着棒材轴向具有 <100> 取向的快速定向凝固组织,在获得易磁化方向的同时,保留了大量的无序 A2 和修正 DO₃ 相,因此材料的磁致伸缩性能有较大改善。

6 结语

Galfenol 合金目前已成为磁致伸缩材料研究领域中的热点,作为重要的能量与信息转换功能材料,其

结合了传统磁致伸缩材料和超磁致伸缩材料两者的优点,而且价格低廉,特别适用于具有强震动、冲击、大负荷、腐蚀强等恶劣条件下的使用,有着广阔的应用前景。近年来,人们在影响 Galfenol 合金磁致伸缩性能的制备工艺、合金成分、微观相结构、磁致伸缩模型等方面做了大量细致的工作,发现了许多新奇的物理现象,同时也揭示出部分内在的物理机制,成绩巨大,但面临的挑战也是严峻的,对该材料的性能研究还尚未成熟,故还有许多问题需要研究和解决。在今后的研究中主要面临如下的困惑和挑战。

(1) Fe-Ga 合金的磁致伸缩机理研究中,结论很不一致,甚至有些相互矛盾。目前还无法确定 Fe-Ga 合金大磁致伸缩产生的关键晶体结构及理论模型,也没有一个把理论和实验结果统一起来的完整的结论,这些为理论分析和器件设计带来困难。

(2) 尽管单晶 Fe-Ga 合金的磁致伸缩已经接近 400 ppm,但与 Terfenol-D 以及 NiMnGa 合金相比,其磁致伸缩性能并不算高。磁致伸缩材料只有在单晶或取向晶体的状态下,沿易磁化方向或沿与其相近的方向磁化时才具有较好的磁致伸缩性能,单晶材料的制造成本高,同时尺寸也受到限制,难以广泛应用,因而在器件上广泛应用的还是多晶材料。如何通过材料成分设计和采取新的制备工艺来提高多晶材料磁致伸缩特性成为推动该材料发展的关键。

(3) 在强化 Fe-Ga 合金磁致伸缩理论研究的同时,进一步侧重于力学性能、动态参数、抗腐蚀性、焊接性能等方面的应用基础研究,为今后该材料在各个领域的广泛应用奠定坚实的基础。

参考文献:

- [1] A. E. Clark, J. B. Restorff, M. Wu, Fogle, et al. Magnetostriction of ternary Fe-Ga-Xx=C, V, Cr, Mn, Co Rh alloys [J]. J Appl Phys. 09C507, 2007(101); 09C507-1-09C507-3.
- [2] Clark A. E., Wu, Fogle M., Restorff J. B., et al. Magnetostrictive Galfenol/Alfenol single crystal alloys under large compressive stresses [J]. Actuator 2000 Conference, Bremen, Germany, 2000(6); 19~21.
- [3] Srisukhumbowomchai, N., Gunswany, S. Large magnetostriction in direction alloy solidified FeGa and FeGaAl alloys [J]. J Appl Phys. 2001, 90(11); 5680~5688.
- [4] J. R. Cullen, A. E. Clark, M. Wu, Fogle, et al. Magnetoelasticity of Fe-Ga and Fe-Al alloys [J]. J Magn. Magn. Mater. 2001(226-230); 948~949.
- [5] 韩志勇. 磁致伸缩材料 Fe-Ga 合金的研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2004.
- [6] O. Ikeda, R. Kainuma, I. Ohnuma, et al. Phase equilibria and stability of ordered bcc phases in the Fe-rich portion of the Fe-Ga system [J]. J Alloys Compd. 2002(347); 198-205.

(下转第 15 页)

态,保证直流电能及时地回送到交流电网。

高效抑制高次谐波是能源再生技术的核心亮点,将电梯在轻载上行、重载下行或制动运行过程中的势能,通过变频器转化为高质量、清洁无污染且符合国家用电标准电能反馈回电网输入侧,为电网中的其它用电设备提供电能。能源再生技术与无齿轮驱动技术相匹配,节能效果比传统的无齿轮电梯产品更为显著,这又是我国在节能环保电梯领域的重大突破。

当前“节能减排、全民行动”在全社会如火如荼的展开,这是利在千秋的伟大工程。低能耗、低噪声、无漏油、无电磁干扰、无井道导轨油渍污染、采用尼龙合成纤维曳引绳或钢皮带等无润滑污染曳引方式、电梯装潢采用无(少)环境污染材料等环保绿色概念将会成为市场主流。能源再生技术与无齿轮驱动技术相匹配,将是未来一段时期中国电梯拖动系统的潮流和方向,并将覆盖当今几乎所有的交/直流、有/无齿轮

曳引驱动电梯。超导电力拖动技术和磁悬浮驱动技术在电梯上应用也许数十年后会成为现实。

4 结 语

随着中国成为世界最大的电梯市场,电梯的配置满足最低使用要求、价格低廉、故障率低、可靠性高、经久耐用、维修率低、且使用方便,采用高新技术和新材料制作的电梯标准零部件以及流水线生产方式大大提升产量等质优价廉的简单普及型电梯将受到市场的青睐。这种质优价廉的中国制造更能满足当前我国市场甚至是国际市场的迫切需求,而电梯的中国制造也必将大放异彩。

参考文献:

[1] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统 [M]. 北京:机械工业出版社, 1992.
 [2] 唐任远. 现代永磁电机 [M]. 北京:机械工业出版社, 2006.

(上接第 5 页)

[7] T. A. Lognasso, A. R. Ross, D. L. Schlagel et al. Structural transformations in quenched Fe-Ga alloys [J]. *J Alloys Compd* 2003 (350): 95-101.
 [8] Kumagai A, Fujita A, Fukunichi K, et al. Magnetocrystalline anisotropy and magnetostriction in ordered and disordered Fe-Ga single crystals [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 2004 (272-274): 2060-2061.
 [9] 徐世峰. 新型 Fe-Ga 磁致伸缩合金物性研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2008.
 [10] Liu G D, Liu L B, Liu Z H, et al. Giant magnetostriction on Fe₈₅Ga₁₅ stacked ribbon samples [J]. *Applied Physics Letters* 2004, (84)12: 2124-2126.
 [11] Na suok-M in Flatau Alison B. Magnetostriction and surface energy induced selective grain growth in rolled Gallenol doped with sulfur [J]. *Smart Structures and Materials* 2005; *Active Materials*

Behavior and Mechanics 2005 (5761): 192-195.

[12] Gunswamy S, Srisukumbowonchai N, Clark A E, et al. Strong ductile and low-field-magnetostrictive alloys based on Fe-Ga [J]. *Scripta Mater* 2000 (43): 239-242.
 [13] Ruqian Wu. Origin of large magnetostriction in FeGa alloys [J]. *Appl Phys* 2002, 10(91): 7358-7360.
 [14] 张光睿, 江丽萍, 吴双霞, 等. 新型磁致伸缩材料 Fe-Ga 合金的研究现状 [J]. *金属功能材料*, 2007, 4(14): 36-39.
 [15] 高芳, 蒋成保, 刘敬华, 等. 第三组元添加对 Fe-Ga 合金相组成和磁致伸缩性能的影响 [J]. *金属学报*, 2007, 7(43): 683-687.
 [16] 李纪恒, 高学绪, 朱洁, 等. Fe-Ga-B 合金室温塑性及轧制材料磁致伸缩性能 [J]. *功能材料*, 2009, 40(8): 1251-1254.
 [17] J K. Zhou, J G. Li. An approach to the bulk textured Fe₈₁Ga₁₉ rods with large magnetostriction [J]. *Applied Physics Letters* 2008 (92): 141915-1-141915-3.

(上接第 11 页)

4.3 工序能力分析

引起质量波动的异常因素可以通过控制图检测并改善,减少或消除波动。但是要控制偶然因素引起的质量波动,就必须对产品的生产工序进行深入分析,并采取有效措施进行改善,提高工序能力指数。

5 结 语

现代质量管理已经不再是结果控制,而是过程控制。只检测产品是否合格是远远不够的,产品的质量应该由生产过程的质量来保证。采用 SPC 技术实现了在统计分析的基础上持续改进产品质量。分析了 SPC 技术和控制图,并在此基础上利用 .net 平台和 SQL Server 2005 开发出了基于 SPC 的 ERP 质量管理体系,在实际中得到了应用,降低了产品不合格率,满

足了企业提高产品质量的需求。

参考文献:

[1] 郭钧, 郭顺生. 制造企业工序质量控制系统的研究与开发 [J]. *机械制造*, 2008, 46(523): 48-50.
 [2] 路春光, 孟丽丽, 王振中, 等. 统计过程控制 SPC 系统的设计与实现 [J]. *先进管理技术*, 2010(1): 108-112.
 [3] 谭爱红, 许常武. 面向中小企业 ERP 系统质量管理模块的设计 [J]. *现代制造工程*, 2009(12): 24-26.
 [4] 李勇, 高建民, 陈富民. 统计过程控制 (SPC) 与 ERP 质量系统结合方法 [J]. *计算机应用*, 2004(24): 149-152.
 [5] 李益兵, 郭顺生, 赵春阳. 统计过程控制 SPC 在 ERP 质量管理中的应用研究 [J]. *武汉理工大学学报 (交通科学与工程版)*, 2007, 31(6): 1094-1097.
 [6] A. J. Donnell & S. C. Singhal. SPC implementation for improving product quality [C]. *Electronics manufacturing technology symposium. Nineteenth IEEE/CPMT* [A]. 1996(10): 416-421.