

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2022.08.004

磁场下磁致伸缩材料制备过程控制及器件研发

董 蒙^{1,2}, 刘 源^{1,2}, 陈 祥^{1,2}

(1. 清华大学 材料学院, 北京 100084; 2. 清华大学 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 磁致伸缩材料的发展是新型磁结构被不断发现, 材料制备与改性方法被不断改进, 磁致伸缩系数被不断提高的过程。相应的, 以新兴磁致伸缩材料为设计基础的磁致伸缩式器件也在不断涌现。磁场作为一种物理场, 经常被应用于优化材料微观结构和性能。本文综述了磁场辅助材料制备过程对各类磁致伸缩材料微观结构和磁致伸缩性能的影响。同时, 介绍了以磁致伸缩材料为核心开发的各类磁致伸缩式器件。根据应用场景, 有针对性地设计磁致伸缩式器件的输出形式、选择磁致伸缩材料种类, 已经成为拓宽各类磁致伸缩材料及其器件应用领域的有效途径。

关键词: 磁场; 磁致伸缩材料; 凝固; 晶体取向; 换能器; 超声导波无损检测

中图分类号: TB34; TG156.97

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2022)08-0605-10

Preparation Process Control and Device Development of Magnetostrictive Materials under Magnetic Field

DONG Meng^{1,2}, LIU Yuan^{1,2}, CHEN Xiang^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology (Ministry of Education), Beijing 100084, China)

Abstract: The development of magnetostrictive materials is a process in which new magnetic structures are constantly discovered, material preparation and modification methods are constantly improved, and magnetostrictive coefficient is constantly increased. Accordingly, magnetostrictive devices based on new magnetostrictive materials are emerging. As a kind of physical field, magnetic field is often used to optimize the microstructure and properties of materials. In this paper, the effects of the preparation process of magnetic field assisted materials on the microstructure and magnetostrictive properties of various magnetostrictive materials were reviewed. At the same time, various magnetostrictive devices based on magnetostrictive materials are introduced. According to the application scenarios, designing the output form of magnetostrictive devices and selecting the types of magnetostrictive materials have become an effective way to broaden the application fields of various magnetostrictive materials and devices.

Key words: magnetic field; magnetostrictive materials; solidification; crystal orientation; transducer; ultrasonic guided wave nondestructive testing

磁致伸缩材料是在其磁化过程中自身长度或体积发生变化的一类材料, 是磁功能材料的一种。利用磁致伸缩材料可实现电/磁能-机械能/声能的相互转换, 因此利用该特性制造换能器、致动器、传感器等功能性器件, 可应用在搅拌除杂、海洋勘探、

超声焊接、导波无损检测等领域, 是具有广泛应用价值的功能材料^[1]。自发现磁致伸缩效应以来的一个多世纪, 是材料制备工艺不断优化, 磁致伸缩性能不断提升, 力学性能不断改善的过程, 研究者们相继开发了过渡族金属基^[2]、稀土-铁基^[3]、钴铁氧体基^[4]、磁相变材料^[5]等多个体系的磁致伸缩材料; 而又基于不同类型的磁致伸缩材料开发了相应的磁致伸缩式器件。磁致伸缩材料与其器件呈现相辅相成的关系, 磁致伸缩材料的性能是磁致伸缩式器件研发的基础, 磁致伸缩式器件的应用情况是磁致伸缩材料的价值体现。

作为一种磁功能材料, 磁致伸缩材料亦是微观结构敏感的, 其磁致伸缩性能受到微观结构的影响。随着电磁理论、超导材料和低温技术的发展, 磁场发生装置, 甚至是磁感应强度大于 2 T 级别的强磁场发生装置在材料改性过程中的应用越来越广泛。磁

收稿日期: 2022-07-10

基金项目: 北京市科技计划(Z201100006720003)

作者简介: 董 蒙(1989—), 博士, 助理研究员/博士后, 研究方向: 磁致伸缩材料与器件的研究工作。

电话: 18602412049, Email: dongmeg@outlook.com

通讯作者: 刘 源(1974—), 博士, 副教授, 研究方向: 稀土超磁致伸缩材料及器件、先进金属功能材料如铝镁合金、轻量化电子封装材料(碳化硅/铝、硅/铝、金刚石/铝)、超轻泡沫铝金属等新材料的基础研究和应用开发等的研究工作。电话: 01062789765,

Email: yuanliu@mail.tsinghua.edu.cn

场与物质的相互作用可诱发磁力矩^[6-9]、磁化力^[10-12]、磁极间相互作用^[13-14]、洛伦兹力^[15-17]和磁化能^[18]等效应,影响材料制备过程中的晶体取向^[7,19]、相/溶质/颗粒的迁移^[20-21]、金属液对流^[22-24]和磁畴结构^[25]等。磁场辅助材料制备过程,如磁场下的热处理、半固态等温处理和凝固等,可高效控制磁晶各向异性晶体的晶体取向、相排列和磁畴结构等微观结构特征,因此逐渐成为制备高性能磁致伸缩材料的新手段。本文介绍了磁场辅助材料制备过程对各类磁致伸缩材料微观结构和性能的影响,综述了以磁致伸缩材料为核心的不同类型磁致伸缩式器件的最新研究进展。

1 磁场下磁致伸缩材料的改性

1.1 过渡族金属基磁致伸缩材料

19世纪,焦耳(Joule)观察到铁丝磁化时其自身长度的变化,进而发现物质的磁致伸缩现象。后来人们以过渡族铁磁性元素为基础,相继开发了纯Ni、Fe-Al基、Fe-Ga基、Fe-Co基磁致伸缩材料等,几种过渡族金属基磁致伸缩材料的性能参数可参考文献[1]中表1-1。这类材料中存在类似的固溶体相,如bcc结构的A2(无序)、B2(有序)、D0₃(有序)固溶体相和hcp结构的D0₁₉有序固溶体相等^[1,26],其中A2相、B2相和D0₃相的易磁化方向均为<100>方向^[27]。以Fe-Ga二元合金为例,其主要相的晶体结构如图1所示。

20世纪50年代,Hall^[28-29]在研究中指出Fe-Al

合金随着Al含量的增高,沿<100>方向的磁致伸缩系数($\lambda_{<100>}$)逐渐增大,Fe-18 at.%Al合金的饱和磁致伸缩系数(λ_s)约 1.40×10^{-4} ;但是,该合金的力学性能较差。有学者将Fe-Al合金颗粒与聚合物材料在磁场下复合以期提高成型性和 λ_s ,在磁场下复合后的具有颗粒取向特征的Fe-Al颗粒/聚合物复合材料的 λ_s 也在 5.0×10^{-5} 以下^[30]。后期,新型高 λ_s 磁致伸缩材料被不断研发,而针对Fe-Al合金的研究逐渐减少。本节将以Fe-Ga基和Fe-Co基合金为主,介绍磁场下过渡族金属基磁致伸缩材料的研究进展。

1.1.1 Fe-Ga基磁致伸缩材料

2000年,Clark等^[31]开发了Fe-Ga体系磁致伸缩材料,Fe-Ga合金具有高机械强度、良好的延展性、较高的低场磁致伸缩系数和较低的价格,引起研究者的广泛关注。在Fe-10~35 at.%Ga体系合金中提升无序相或bcc结构有序相含量是提升 λ 的有效方法^[32-33]。Fe-Ga合金内部的异质结构带来的晶格畸变以及合金磁畴结构的改变,也将导致磁致伸缩性行为的变化^[34-36]。磁场热处理可影响Fe-Ga合金的晶体取向、相含量、原子扩散和磁畴分布情况等,合适的磁场热处理工艺将有效改善Fe-Ga合金的磁致伸缩性能^[37]。

Wen等^[38]在0~10 T强磁场下热处理了铸态Fe₈₁Ga₁₉合金,强磁场改变了合金的晶体取向和磁畴结构;10 T强磁场提高了合金在<100>方向取向度,综合调控了磁畴宽度和形貌(图2),使Ga原子从沉淀相扩散至母相而引起晶格畸变,其 λ_s 提升至 9.039×10^{-5} 。Li等^[39]通过磁场下短时间热处理<100>取向的

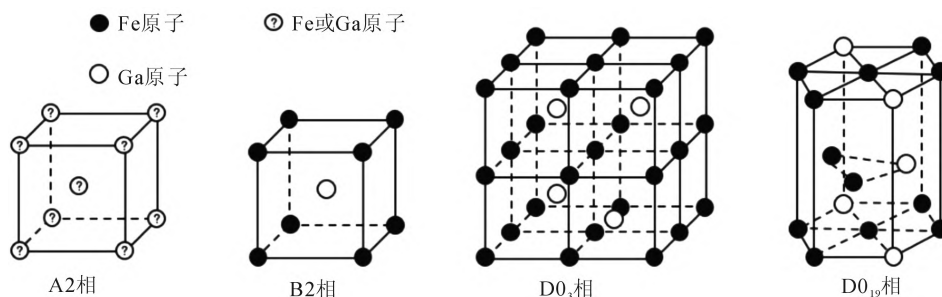


图1 Fe-Ga二元合金中存在的相的晶体结构示意图

Fig.1 Schematic of the crystal structure of the phases in Fe-Ga binary alloys

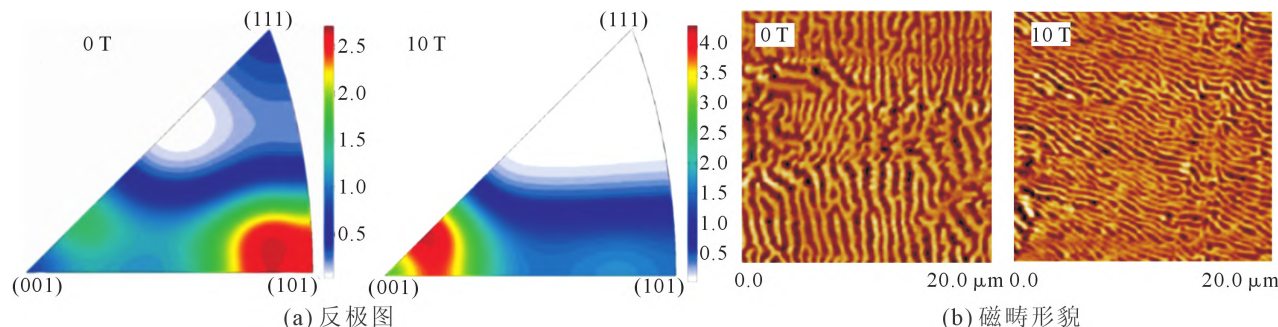


图2 Fe₈₁Ga₁₉合金在10 T磁感应强度条件热处理前后的反极图和磁畴形貌图^[38]

Fig.2 Inverse pole figures and magnetic domain morphology Fe₈₁Ga₁₉ alloys annealed without and with 10 T magnetic field^[38]

Fe₇₃Ga₂₇合金,将合金的低场(测试磁场为800 Oe时)磁致伸缩系数提升至 3.70×10^{-4} ,磁场引起的晶格畸变和纳米颗粒在bcc基体中析出所带来的结构不均匀性是合金具有大磁致应变的原因。Yoo等^[40-41]在12 kOe磁场和475~500 °C条件下处理了Fe₈₂Ga₁₈和Fe_{82.5}Ga_{17.5}合金,并用理论计算和实验验证方式获得了合金的 λ_s ;磁场退火引起合金的磁致伸缩各向异性和磁畴重新排列,具有沿<100>方向织构和晶粒定向排列特征的合金 λ_s 较高,约 2.76×10^{-4} 。Wang等^[42]用与样品轴向呈45°的磁场热处理Fe₈₀Ga₁₆Al₄合金,研究了磁场热处理角度、磁畴结构和磁致伸缩性能之间的关系;45°磁场退火后磁畴数量、方向和尺寸发生重排,在垂直和平行<100>方向上磁畴数量近似相等,使45°磁场退火后的Fe₈₀Ga₁₆Al₄合金表现为近磁晶各向同性,其 λ_s 约为 2.24×10^{-4} 。

1.1.2 Fe-Co基磁致伸缩材料

Fe-Co基合金具有较高的饱和磁化强度、磁导率和稳定性,常作为软磁材料制成电磁铁极头,或用于电机转子、小型变压器中^[43];该系合金也具有一定的磁致伸缩性能,被应用在磁致伸缩式器件中。Fe-Co合金沿<100>方向磁致伸缩系数 $\lambda_{<100>}$ 随着Co含量的增加而增加,Fe-50 wt.%Co的 $\lambda_{<100>}$ 可达 1.50×10^{-4} ^[44]。Fe-Co合金的 λ_s 对材料成型工艺和热处理工艺敏感,难以控制材料微观结构及性能。为实现合金相组成优化,提升加工性能和磁性能,学者们在合金中添加多组元和对合金进行磁场热处理等^[1]。

朱芳镇等^[45]将Fe-Co合金在再结晶温度以上进行磁场热处理,达到设定热处理温度后,励磁冷却至300 °C;其 λ_s 随着热处理温度的升高呈先下降后升高的趋势。针对非晶态的(Fe_{1-x}Co_x)_{73.5}Si_{13.5}B₉Nb₃Cu₁^[46]、(Fe_{0.5}Co_{0.5})_{73.5}Cu₁Mo₃Si_{13.5}B₉^[47]和(Fe_{0.5}Co_{0.5})_{73.5}Cu₁Nb₃Si_{13.5}B₉^[48]等合金在磁场下纳米晶化的研究发现,随晶化温度增加,合金的 λ_s 亦呈下降趋势;而在无磁场下晶化后的合金 λ_s 随温度升高而升高。非晶Fe-Co基合金在晶化后 λ_s 升高是由于生成的晶体相的磁致伸缩系数是正的,且大于非晶相的磁致伸缩系数;而在磁场下晶化后 λ_s 降低,可能由于磁场晶化过程在合金内部形成单一方向排列的磁畴结构,磁化矢量方向与磁场方向平行且被180°畴壁隔开,180°畴壁对磁致应变过程无贡献,因此降低了 λ_s 。若Fe-Co合金中添加少量V元素可增加A1和A2两相共存区域,减少了B2有序相析出导致的合金脆性^[1],以期将Fe-Co-V合金制成薄带用在超声导波检测换能器中。Hasani等^[49-50]通过热轧→冷轧→

不同温度退火的工艺流程制备Fe-Co-V合金薄带,提升了合金的软磁性能,但是在磁场条件下Fe-Co-V合金制备过程的研究较少。

1.2 稀土-铁基磁致伸缩材料

20世纪70年代,学者通过研究Tb、Dy等稀土金属(R)与3d过渡族金属化合物成分、居里温度和磁致伸缩系数的关系,不断提升稀土-过渡族金属基磁致伸缩材料的居里温度,如文献[1]中表4-4所示,使其在室温环境服役成为可能^[4,51-54]。具有Laves磁性相结构的TbFe₂和Tb_{1-x}Dy_xFe_y($x=0.27 \sim 0.33$, $y=1.90 \sim 2.10$)等稀土-铁基合金室温磁致伸缩系数较高,磁晶各向异性较低^[55-57],Tb_{1-x}Dy_xFe_y合金的微观结构如图3所示,合金中包含包晶(Tb, Dy)Fe₂相和富稀土相。将磁场技术引入到稀土-铁基合金的制备过程中,通过优化磁场作用效果,控制稀土-铁基合金制备过程中的晶体取向、溶质流动及溶质分布来调控Laves相的晶体取向和晶粒生长方向,可实现磁性相沿易磁化方向(<111>)择优取向和晶粒的定向排列,进而改善稀土-铁基合金的磁致伸缩性能。

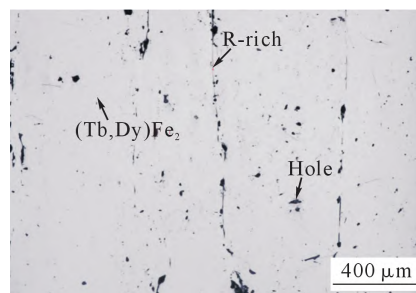


图3 Tb_{1-x}Dy_xFe_y合金的微观结构图
Fig.3 Microstructure of Tb_{1-x}Dy_xFe_y alloy

Liu等^[58]研究了Tb_{0.30}Dy_{0.70}Fe_{1.95}合金在强磁场下的自由凝固行为,施加4.4 T磁场使晶粒沿强磁场方向定向排列,且磁性相沿<111>方向择优取向,因此磁致伸缩系数由 6.00×10^{-4} 提高至 1.350×10^{-3} 。Dong等^[59]通过调整TbFe₂合金凝固过程中的磁感应强度,制备了不同晶体择优取向和晶粒生长方向的合金,揭示了晶体取向和晶粒排列与合金磁致伸缩行为之间的关系。定向凝固法可有效控制晶体生长、熔体流动和热流方向等,若在定向凝固过程中引入强磁场,则有可能在控制热流传递的基础上控制晶粒旋转,从而调控稀土-铁基合金的晶体择优取向和形貌择优取向。Dong等^[60]将强磁场与定向凝固法相结合,在50 μm/s抽拉速率和6 T磁感应强度条件下使Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.95}合金中的磁性相(Tb, Dy)Fe₂相沿<111>方向择优取向的同时,其晶粒沿定向凝固方向规则排列,从而提高合金的磁致伸缩性能,如图4所示。Dong等^[61]研究了强磁场作用下稀土-铁

基合金的晶体择优取向和包晶反应过程,如图5所示。强磁场首先诱导初生相旋转取向,进而导致后续包晶相的晶体生长行为,阐明了该系合金在强磁场下定向凝固过程中的晶体择优取向和定向排列的机制。通过调整磁场参数和定向凝固参数,可实现不同晶体择优取向和晶粒定向排列程度的 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.95}$ 合金的制备;并且,在适当的磁场参数和凝固参数下制备的 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.95}$ 合金具有更高的抗压强度^[62]。

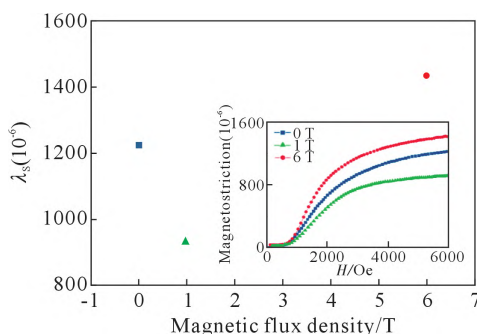


图4 $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.95}$ 合金在 0、1 和 6 T 磁场条件下定向凝固后的磁致伸缩曲线(小图)及饱和磁致伸缩系数随磁感应强度变化曲线(大图)^[60]

Fig.4 Magnetostriction curves (small figure) and dependence of λ_s on the magnetic flux density (large figure) of $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.95}$ alloys directionally solidified with various high magnetic fields of 0, 1, and 6 T^[60]

1.3 钴铁氧体磁致伸缩材料

铁氧体是氧化铁(Fe_2O_3)和其他金属氧化物组成的复合氧化物^[63]。20 世纪 50 年代,Bozorth 和 Walker 报道了 Co^{2+} 取代 Fe^{2+} 所组成的 $\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{2.2}\text{O}_4$ 钴铁氧体单晶的饱和磁致伸缩系数为 -5.15×10^{-4} ^[64],远高于其他金属的铁氧体材料^[63,65-66]。钴铁氧体($\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$, $x=0\sim 1.0$)通常采用粉末冶金法制备,在压力成型后进行磁场退火处理,钴铁氧体内部磁畴结构和磁性离子的重新排布将导致其磁致伸缩行为的优化。

Bozorth 等^[67]用平行于 [010] 方向的磁场在 275 °C 退火 $\text{Co}_{0.3}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_{2.2}\text{O}_4$, 发现磁场退火后 $\text{Co}_{0.3}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_{2.2}\text{O}_4$ 的各向异性增加,其饱和磁致伸缩

系数也相应增加。Muhammad 等^[68]用热等静压法在 87~278 MPa 压力条件下制备了 CoFe_2O_4 , 在 1350 °C 热处理 24 h 后又在 10 T 磁场和 300 °C 条件下磁场热处理 3 h。结果显示在磁场热处理后 CoFe_2O_4 的 λ_s 和 $d\lambda/dH$ 都比未经过磁场热处理的高,在 150 MPa 热等静压条件制备的样品,经处理后的 λ_s 达 -4.00×10^{-4} 。Zheng 等^[69]用溶胶-凝胶法制备多晶 CoFe_2O_4 粉末,经压制成型和烧结后,在 400 °C 和 4.6 kOe 磁场条件中退火 30 min,其磁致伸缩系数较无磁场退火样品提高了 41%。磁场退火通过在 $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ 中形成磁畴织构^[67]和感生 Co^{2+} 的定向分布导致 $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ 的单轴各向异性^[70-71],此为引起磁致伸缩性能提升的原因。

1.4 磁相变材料的磁致伸缩性

由磁场作为驱动力而诱发相变的材料被称为磁相变材料,与传统磁致伸缩效应不同,这些材料通过磁场诱导的相变使材料在宏观尺度发生变化^[72]。例如 Ni-Mn-Ga 基铁磁形状记忆合金的马氏体相和奥氏体相的磁性差异较大,在磁场作用下诱发磁结构转变,同时伴随着较大的磁致应变效应^[5,73]。Mn-Co-Si 基合金在温度降低时发生无扩散位移型结构相变,在磁场作用下由螺旋反铁磁态转变为铁磁态,并伴随着一定的晶格畸变,因此也具有较大的磁致应变效应^[74-75]。

相变材料制备过程中会经历至少 1 次相变过程,样品中会残留较大内应力,如 Mn-Co-Si 合金铸锭脆性很大,可徒手将其破碎^[76]。Gong 等^[76]将 Mn-CoSi_{1-x} 合金在 6 T 强磁场下经过一系列缓慢凝固过程后,再经过 60 h 保温和冷却过程,MnCoSi_{1-x} 合金中无裂纹产生,表明合金成型性大幅提高,且合金抗压强度增加至 270 MPa。在强磁场下凝固后的 Mn-CoSi_{1-x} 合金中产生沿 <111> 方向的强织构,进而合金的磁致伸缩性能也较高,在 270 K 的 $\lambda_{s//}$ 和 $\lambda_{s\perp}$ 分别达到 3.000×10^{-3} 和 -4.700×10^{-3} 。虽然 Mn-Co-Si 基磁致伸缩材料的饱和磁致伸缩系数较高,但该系合金

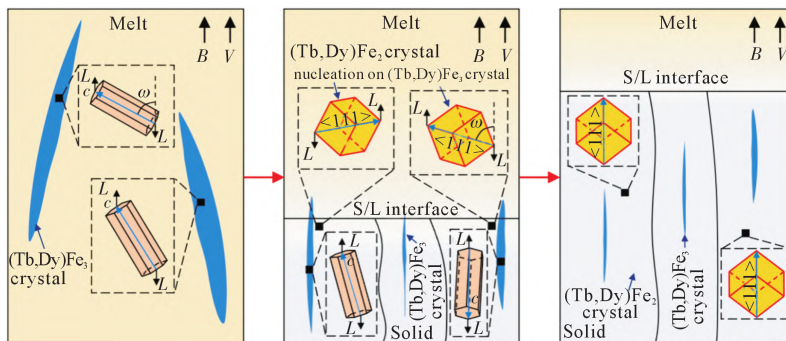
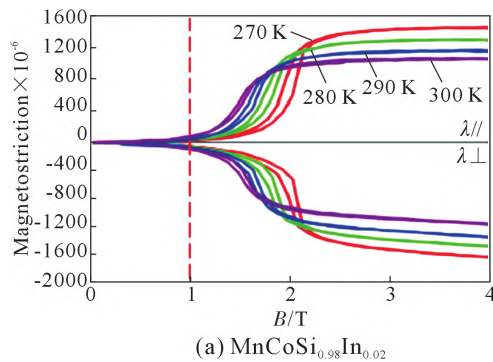


图5 强磁场定向凝固过程中 Tb-Dy-Fe 合金的晶体取向过程示意图^[61]

Fig.5 Schematic of the crystal orientation process of the Tb-Dy-Fe alloy during directional solidification under high magnetic fields^[61]

在外部磁场小于 1 T 时的磁致伸缩系数非常低,如图 6(a)所示,意味着该系合金使用过程中需要施加较大驱动磁场^[77]。因此,提高磁相变材料的低场磁致伸缩性能,是实现该材料实际应用的关键。Hu 等^[78]优化了 Mn-Co-Si 基合金成分,将 $\text{Mn}_{0.97}\text{Fe}_{0.03}\text{CoSi}$ 和 $\text{Mn}_{0.88}\text{CoSi}$ 在 6 T 强磁场下缓慢凝固,诱导合金内部产生织构,优化了低场磁致伸缩性能,在低场范围内获得了磁致伸缩系数相对于测试磁场的线性增长区,如图 6(b)所示,提升了合金的实际应



用价值。

2 基于磁致伸缩材料的磁致伸缩式器件研发

磁致伸缩材料除了在磁场下产生磁致应变外,还具有 Villari 效应、Weidemann 效应、Weidemann 逆效应和阻尼效应等,利用磁致伸缩材料的这些效应可实现电/磁能与机械能的相互转换、扭转力矩与电/磁能的相互转换,机械能转换为热能等功能特

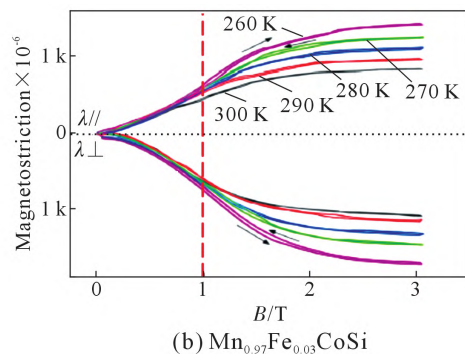


图 6 Mn-Co-Si 基合金的磁致伸缩曲线^[77-78]

Fig.6 Magnetostriction of the Mn-Co-Si-based alloys^[77-78]

性^[1]。因此,学者们根据磁致伸缩材料的功能特性,并结合应用场景研发了不同类型的换能器、致动器、传感器等磁致伸缩式器件。

2.1 磁致伸缩式换能器和致动器

磁致伸缩式换能器是利用磁致伸缩材料的功能性研发的能量转换器件,是一种将电/磁能转换为机械能/声能的装置,振动频率在人耳可感知范围内的为电声换能器,此外为超声换能器^[79],其性能参数主要是振动幅值、频率和振动模态等。磁致伸缩式换能器结构如图 7 所示,包括磁致伸缩棒材、提供偏置磁场的永磁体、提供激励磁场的线圈、提供预应力的载荷施加系统、防止温度过高的水冷装置和输出端的变幅杆等^[4]。磁致伸缩式换能器研发主要包括换能器机械结构设计、换能器磁滞非线性模型分析、阻抗频率特性分析、换能器动态输出特性测试分析等^[80-81]。

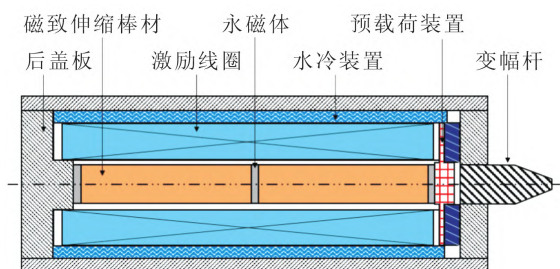


图 7 换能器结构示意图^[4]

Fig.7 Schematic of transducer^[4]

闫存恒等^[82]从优化换能器机械结构角度出发,

设计了由双磁致伸缩棒材驱动的换能器,以期解决换能器在高频条件下磁场分布不均和能量损耗严重的问题;分别针对磁致伸缩材料种类、磁路结构和激励线圈等方面进行优化设计并制作换能器样机,其在 6.4 kHz 频率激励下可稳定输出 48 μm 振幅和 15 N 的输出力。Zhou 等^[83-84]针对换能器磁滞非线性模型进行分析,提出考虑负载效应的换能器输出振幅模型,也根据等效动力学模型建立了换能器振幅预测模型,预测了不同激励信号的磁致伸缩超声换能器输出振幅。余昌筠等^[85]基于磁致伸缩材料的磁畴理论、换能器的磁滞非线性模型和倍频现象等,提出具有缓冲坡度的驱动信号,这种驱动信号优于方波等其他信号,提升了磁致伸缩式换能器的输出性能。翁玲等^[86]研究了由 Fe-Ga 合金制作的换能器的输出位移与驱动电流频率之间的关系,用麦克斯韦方程组并结合动力学模块分析了合金内的磁场分布情况,其换能器的共振频率为 700 Hz,此时输出位移为 6 μm 。汤文卓^[87]以 Tb-Dy-Fe 合金为核心,设计一种超声大功率换能器,首先采用传输矩阵法设计换能器结构,之后用有限元方法进行换能器的磁场分析、动力学分析和模态分析等,以验证换能器机械结构的准确性;加工并组装了大功率换能器样机,其在 19.25 kHz 时实现谐振输出。

磁致伸缩式致动器与换能器的机械结构类似,只把输出端设计成可移动的顶杆,实现致动器的位移和力输出。如 Zhou 等^[88]设计了通过施加方波信号

使致动器的夹紧机构和驱动机构交替工作的机械结构,采用有限元分析并结合实验研究了致动器的输出性能,其峰值角速度和输出扭矩分别可达 57.75 mrad/s 和 250 N·mm。Xue 等^[89]设计一种驱动高压共轨喷油器球阀的新型超磁致伸缩致动器,在特殊设计的输出杆作用下,磁致伸缩棒材的伸长转化为致动器的缩短以使该器件适用于常闭喷油器。Liu 等^[90]针对磁致伸缩式致动器位移小的问题,提出杠杆柔性铰链微位移放大机构,通过理论计算和有限元软件验证了柔性铰链的合理性。致动器的初始输出微位移约为 60 μm ,带有柔性铰链放大机构的致动器可将输出微位移提高到 315.61 μm ,使其可应用在更多场景。如上,根据应用需求有针对性的设计换能器、致动器的输出方式,亦是磁致伸缩式器件的设计关键。

2.2 磁致伸缩式传感器

磁致伸缩式传感器通过对磁致伸缩材料施加脉冲电流作为激励信号,激励信号与偏置磁场耦合产生扭转磁场而使磁致伸缩材料发生变形产生磁弹性波,检测装置和信号分析装置即可对相应信号进行处理,从而获得待测物体位移、负载、受力等参数变化,完成物理量的测量^[91-92],磁致伸缩式传感器种类较多,图 8 为结构简单的磁致伸缩式位移传感器的原理示意图。

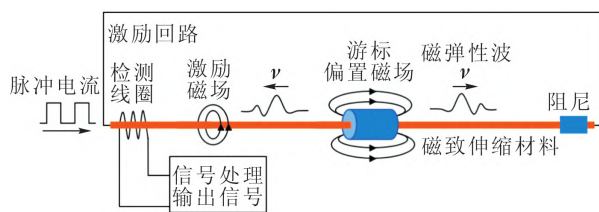


图 8 磁致伸缩位移传感器原理示意图

Fig.8 Schematic of magnetostrictive displacement sensor

对于磁致伸缩式位移传感器的研究,Seco 等^[93]发现,磁致伸缩材料固有磁滞现象将转化为传感器的测量磁滞,解释了两种磁滞现象的联系;并提出基于聚焦超声波产生的补偿技术提高了传感器的测试性能。后来 Seco 等^[94]采用时间延迟计算位置信息,在磁致伸缩材料总激励扭转波和接受信号采用压电效应等方式优化了磁致伸缩式位移传感器,提高了传感器的灵敏度。Deng 等^[95]利用磁致伸缩材料的磁畴自由旋转和磁源波动效应,研发了磁致伸缩式位移传感器信号增强机制模型,提出从磁屏蔽材料选择和波导线必须放在线圈中心等方面将改善磁致伸缩式位移传感器的信号强度,为更好地设计相关器件提供基础。对于其他类型的磁致伸缩式传感器,Weng 等^[96]开发了一种用于力和刚度检测的触觉传

感器,主要由 Fe-Ga 合金、永磁体、和霍尔传感器组成,传感器测力范围为 0~3 N,灵敏度为 126 mV/N,测量误差小于 8.3%,为机器人的抓取和控制功能提供可能。Mirzamohamadi 等^[97]提出基于 Fe-Ga 合金的非接触式静态力-力矩传感器,首先用有限元方法分析了材料在不同机械载荷和磁场条件下的磁-机特性,之后用等效电路法设计并结合数值模拟评估传感器的机械结构,最后制造并测试了传感器的灵敏度、精度和线性误差等,其轴向载荷和扭矩测量的最大灵敏度分别为 0.7349 mV/kgf 和 2.24 mV/Nm。

2.3 磁致伸缩式超声导波无损检测系统

工业管道,如石油运输管道、天然气管道、供暖管道、水管等,在长期服役时会产生不同类型的损坏,及时检测工业管道的服役情况可避免泄露、断裂、甚至爆炸等事故。图 9 超声导波无损检测系统原理示意图功率放大器通过紧贴待测物体表面的磁致伸缩材料向导波传感器传输脉冲信号,在待测物体上形成的超声导波沿物体长度方向传播,物体的缺陷处导波将反射和透射;导波传感器收集反射信号,再传输到采样器中,经处理后的反射信号将呈现物体的缺陷位置信息。超声导波无损检测可在各种结构设施施工过程中安装在工件表面,实现长期的实时在线监测重要部件的服役情况,无需定期定点检测,从而降低检测成本,在长距离、大范围的结构件无损检测中具有广阔应用前景^[98-99]。

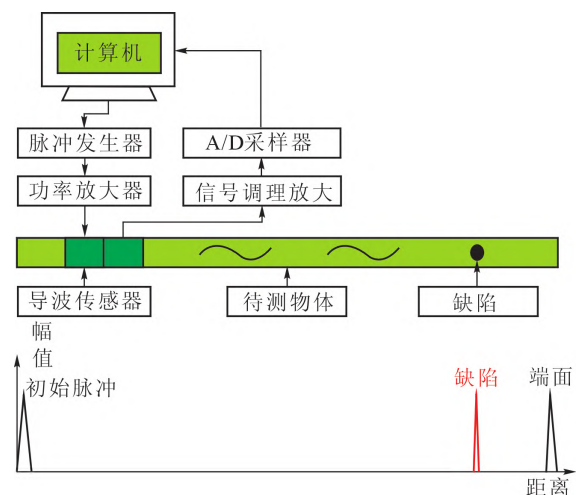


图 9 超声导波无损检测原理示意图

Fig.9 Schematic of ultrasonic guided wave nondestructive testing

研究者们通过探究超声导波的模态、偏置磁场大小和施加方式、激励/接收线圈参数、阻抗匹配等,优化磁致伸缩式超声导波检测系统。Jacob 等^[100]研究了纵向导波 $L(0, n)$ 模态和阻抗匹配与收集信号幅值之间的关系,当在实心圆柱体中激发纵向对称模

式 $L(0, 3)$ 导波时,可显著改善纵向导波在待测样品的传输幅值。Kwon 等^[101]用 3 组导波换能器组成伸缩式导波检测传感器,该结构有利于在高频范围内传输扭转波模态。竺冉等^[102]设计了一种可调节偏置磁场结构等的纵向导波传感器,通过有限元方法验证了该结构的准确性,该结构可调节导波传感器测试信号的幅值,适用于不同类型待测样品的无损检测。张喆斯等^[103]研究了纵向超声导波传感器的阻抗匹配问题,接收器的阻抗匹配角影响导波信号幅值,当接收器串联电路中的电容值为 1.0 nF 时,阻抗匹配角 ≈ 0 ,导波信号幅值最大。

为了获得更好的超声导波检测结果,除了对导波传感器进行设计与优化,还需要对磁致伸缩材料进行改性。Qi 等^[104]以不同退火工艺的 Fe-Al 涂层作为超声导波传感器的振动材料,考察了退火工艺、涂层微观结构和导波回声振幅强弱之间的关系;其 A2 和 D_{03} 相含量、再结晶晶粒大小和残余应力大小相互制约,共同影响着涂层的磁致伸缩行为,在 500 °C 热处理后的 Fe-Al 涂层由于具有较少的 D_{03} 相含量、较低的残余应力和较少的缺陷,其有较高的低场磁致伸缩系数,故导波检测的回声振幅较高。Qi 等^[105]以 Fe-Ga 薄带作为超声导波传感器振动材料进行研究,发现适当的热处理工艺会增加 $\{100\} <001>$ 织构和 $(d\lambda/dH)_{\max}$ 值,进而提高饱和磁致伸缩系数,也提高了导波检测的灵敏度。

3 结论与展望

本文对磁场在磁致伸缩材料制备过程中诱发的磁力矩、磁化力、磁极间相互作用、洛伦兹力和磁化能等效应对材料微观结构和性能产生影响的机制进行了总结和分析。磁场对大多数磁致伸缩材料的性能有提升作用,磁场辅助材料制备过程是一种微观结构和性能可控的材料制备方法。未来需进一步完善磁场下材料微观结构的控制理论,优化磁场辅助材料制备的中试生产技术和工艺,使其满足大规模生产需求,为后续磁致伸缩式器件提供材料基础。

综上所述,磁场下磁致伸缩材料的制备及相应磁致伸缩式器件的研制仍处在不断发展和扩大生产的阶段。磁致伸缩式器件研发涉及材料学、超声学、电气工程、机械设计与仿真等诸多领域,要求磁致伸缩式器件研发学者具有多学科交叉的研究背景,从提升磁致伸缩材料性能、根据需求合理设计磁致伸缩式器件机械结构、器件的机械结构仿真与验证、器件输出性能测试分析等方面研制适用于不同领域的磁致伸缩式器件。

参考文献:

- [1] 周寿增,高学绪 著. 磁致伸缩材料[M]. 北京:冶金工业出版社, 2017.
- [2] 宛德福,罗世化 著. 磁性物理[M]. 北京:电子工业出版社,1987.
- [3] ENGDAHL G. Handbook of giant magnetostrictive materials[M]. Sa Diego: Academic Press, 2000.
- [4] 王博文,黄淑瑛,黄文美 著. 磁致伸缩材料与器件[M]. 北京:冶金工业出版社,2008.
- [5] KAKESHITA T, ULLAKKO K. Giant magnetostriction in ferromagnetic shape-memory alloys[J]. MRS Bulletin, 2002, 27: 105-109.
- [6] SUGIYAMA T, TAHASHI M, SASSA K, et al. The control of crystal orientation in non-magnetic metals by imposition of a high magnetic field[J]. ISIJ International, 2003, 43(6): 855-861.
- [7] DE RANGO P, LEES M, LEJAY P, et al. Texturing of magnetic materials at high temperature by solidification in a magnetic field [J]. Nature, 1991, 349: 770-772.
- [8] MA Y W, WANG Z T. To enhance J_c of Bi-2223 Ag-sheathed superconducting tapes by improving grain alignment with magnetic field[J]. Physica C: Superconductivity and its Applications, 1997, 282-287: 2619-2620.
- [9] FARRELL D E, CHANDRASEKHAR B S, DEGUIRE M R, et al. Superconducting properties of aligned crystalline grains of $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ [J]. Physical Review B, 1987, 36: 4025-4027.
- [10] HIROTA N, ANDO T, TAKANO T, et al. In-situ observation of particles deposition process on a ferromagnetic filter during high-gradient magnetic separation process[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2017, 427: 296-299.
- [11] LIU T, WANG Q, GAO A, et al. Fabrication of functionally graded materials by a semi-solid forming process under magnetic field gradients[J]. Scripta Materialia, 2007, 57(11): 992-995.
- [12] WU M X, LIU T, DONG M, et al. Directional solidification of Al-8 wt.%Fe alloy under high magnetic field gradient[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121: 064901.
- [13] LIU T, WANG Q, ZHANG C, et al. Formation of chainlike structures in an Mn-89.7 wt.%Sb alloy during isothermal annealing process in the semisolid state in a high magnetic field[J]. Journal of Materials Research, 2009, 24(7): 2321-2330.
- [14] MIKELSON A E, KARKLIN Y K. Control of crystallization processes by means of magnetic fields[J]. Journal of Crystal Growth, 1981, 52: 524-529.
- [15] UTECH H P, FLEMINGS M C. Elimination of solute banding in indium antimonide crystals by growth in a magnetic field[J]. Journal of Applied Physics, 1966, 37(5): 2021-2024.
- [16] BERGMAN M I, FEARN D R, BLOXHAM J. Suppression of channel convection in solidifying Pb-Sn alloys via an applied magnetic field[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1999, 30: 1809-1815.
- [17] HOSHIKAWA K. Czochralski silicon crystal growth in the vertical magnetic field[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1982, 21 (9): L545-L547.
- [18] ZHAO Y, LI D, WANG K, et al. The accelerating effect of high magnetic field annealing on the interdiffusion behavior of Co/Ni

- films[J]. *Materials Letters*, 2013, 106: 190-192.
- [19] ASAI S, SASSA K S, TAHASHI M. Crystal orientation of non-magnetic materials by imposition of a high magnetic field [J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2003, 4(5): 455-460.
- [20] WANG Q, LIU T, WANG K, et al. Progress on high magnetic field-controlled transport phenomena and their effects on solidification microstructure[J]. *ISIJ International*, 2014, 54(3): 516-525.
- [21] LI Y, TENG Y, FENG X, et al. Effects of pulsed magnetic field on microsegregation of solute elements in a Ni-based single crystal superalloy[J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2017, 33(1): 105-110.
- [22] YASUDA H, OHNAKA I, FUJIMOTO S, et al. Fabrication of aligned pores in aluminum by electrochemical dissolution of monotectic alloys solidified under a magnetic field[J]. *Scripta Materialia*, 2006, 54(4): 527-532.
- [23] GEL'FGAT Y M, GORBUNOV L A. An additional source of forced convection in semiconductor melts during single-crystal growth in magnetic fields[J]. *Soviet Physics Doklady*, 1989, 34: 470.
- [24] WANG Q, LI D G, WANG K, et al. Effects of high uniform magnetic fields on diffusion behavior at the Cu/Al solid/liquid interface[J]. *Scripta Materialia*, 2007, 56(6): 485-488.
- [25] YU C, WANG C, DENG H, et al. Characteristics of magnetic domain deflection of Tb_{0.5}Dy_{0.5}Fe₂ alloy[J]. *Journal of Rare Earths*, 2016, 34(9): 882-888.
- [26] IKEDA O, OHNUMA I, KAINUMA R, et al. Phase equilibria and stability of ordered BCC phases in the Fe-rich portion of the Fe-Al system[J]. *Intermetallics*, 2001, 9(9): 755-761.
- [27] KUMAGAI A, FUJITA A, FUKAMICHI K, et al. Magnetocrystalline anisotropy and magnetostriction in ordered and disordered Fe-Ga single crystals[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2004, 272-276: 2060-2061.
- [28] HALL R C. Magnetostriction of aluminum-iron single crystals in the region of 6 to 30 atomic percent aluminum [J]. *Journal of Applied Physics*, 1957, 28(6): 707-713.
- [29] HALL R C. Single crystal anisotropy and magnetostriction constants of several ferromagnetic materials including alloys of NiFe, SiFe, AlFe, CoNi, and CoFe[J]. *Journal of Applied Physics*, 1959, 30(6): 816-819.
- [30] RIESGO G, CARRIZO J, ELBAILE L, et al. Magnetostrictive properties of FeAl/polyester and FeAl/silicone composites[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2017, 215: 56-63.
- [31] GURUSWAMY S, SRISUKHUMBOWORNCHAI N, CLARK A E, et al. Strong, ductile, and low-field-magnetostrictive alloys based on Fe-Ga[J]. *Scripta Materialia*, 2000, 43: 239-244.
- [32] IKEDA O, KAINUMA R, OHNUMA I, et al. Phase equilibria and stability of ordered b.c.c. phases in the Fe-rich portion of the Fe-Ga system[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2002, 347(1-2): 198-205.
- [33] SRISUKHUMBOWORNCHAI N, GURUSWAMY S. Influence of ordering on the magnetostriction of Fe-27.5 at.%Ga alloys[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 92: 5371-5379.
- [34] VIJAYANARAYANAN V, BASUMATARY H, RAJA M M, et al. Effects of Ga on the microstructure and magnetostriction of Fe-Ga alloys for actuators[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 59: 216-219.
- [35] JIN T, WANG H, CHEN Y, et al. Evolution of nanoheterogeneities and correlative influence on magnetostriction in FeGa-based magnetostrictive alloys[J]. *Materials Characterization*, 2022, 186: 111780.
- [36] HAN Y, WANG H, ZHANG T, et al. Exploring structural origin of the enhanced magnetostriction in Tb-doped Fe₈₃Ga₁₇ ribbons: Tuning Tb solubility[J]. *Scripta Materialia*, 2018, 150: 101-105.
- [37] BROOKS M, SUMMERS E, RESTORFF J B, et al. Behavior of magnetic field-annealed Galfenol steel[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111: 07A907.
- [38] WEN S, MA Y, WANG D, et al. Magnetostriction enhancement by high magnetic field annealing in cast Fe₈₀Ga₁₉ alloy[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, 442: 128-135.
- [39] LI X, BAO X, YU X, et al. Magnetostriction enhancement of Fe₇₃Ga₂₇ alloy by magnetic field annealing[J]. *Scripta Materialia*, 2018, 147: 64-68.
- [40] YOO J H, NA S M, RESTORFF J B, et al. The effect of field annealing on highly textured polycrystalline Galfenol strips[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, 45(10): 4145-4148.
- [41] YOO J H, RESTORFF J B, WUN-FOGLE M, et al. The effect of magnetic field annealing on single crystal iron gallium alloy [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103: 07B325.
- [42] WANG X L, LIU Y, CHEN X. Tailoring magnetostriction and magnetic domains of <100>-oriented Fe₈₀Ga₁₆Al₄ alloy by magnetic field annealing[J]. *Rare Metals*, 2021, 40: 563-569.
- [43] 何开元, 张雅静 著. 软磁合金及相关物理专题研究[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2018.
- [44] BOZORTH R M. *Ferromagnetism*[M]. New York: D. Van Nostrand Company, Inc., 1951.
- [45] 毕晓昉, 张善庆, 朱芳镇, 等. 真空与磁场热处理改善 FeCo 合金的软磁性能[J]. *北京航空航天大学学报*, 2004, 30(10): 944-948.
- [46] LIU M, WANG Z, XU Y C. Influence of magnetic field annealing methods on soft magnetic properties for FeCo-based nanocrystalline alloys[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, 51(11): 2004704.
- [47] ZHANG H, WANG Z, WEN Z, et al. Influence of magnetic field annealing on magnetic properties for nanocrystalline (Fe_{0.5}Co_{0.5})_{73.5}-Cu₁Mo₃Si_{13.5}B₉ alloy [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014, 50(3): 2001304.
- [48] SHI R M, WANG Z, JIA Y Y, et al. Influence of magnetic field annealing on saturation magnetostriction and μ_i -T curves for Fe-Co-based nanocrystalline alloy[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109: 07A328.
- [49] HASANI S, SHAMANIAN M, SHAFYEI A, et al. Influence of annealing treatment on micro/macro-texture and texture dependent magnetic properties in cold rolled FeCo-7.15V alloy[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, 378: 253-260.
- [50] HASANI S, SHAMANIAN M, SHAFYEI A, et al. Nano/sub-micron crystallization of Fe-Co-7.15V alloy by thermo-mechanical process to improve magnetic properties[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2014, 190: 96-103.
- [51] CHAVE R G, WISEMAN T A J, BARMATZ M B, HAHN I, et al.

- Facility for interferometric measurement of linear displacement in actuators and calibration of sensors at cryogenic temperatures between 4.2 K and 77 K[C]//Actuator Technology and Applications. Denver: SPIE's 1996 International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation, 1996. 58-65.
- [52] DOOLEY J A, LINDENSMITH C A, CHAVE R G, et al. Magnetostriction of single crystal and polycrystalline $\text{Tb}_{0.60}\text{Dy}_{0.40}$ at cryogenic temperatures[J]. Journal of Applied Physics, 1999, 85(8): 6256-6258.
- [53] WUN-FOGLE M, RESTORFF J B, CLARK A E, et al. Magnetization and magnetostriction of dendritic $[\text{Tb}_x\text{Dy}_y\text{Ho}_z\text{Fe}_{195} (x+y+z=1)]$ rods under compressive stress[J]. Journal of Applied Physics, 1998, 83: 7279-7281.
- [54] CLARK A E, WUN-FOGLE M, RESTORFF J B, et al. Magneto-mechanical properties of single crystal $\text{Tb}_x\text{Dy}_{1-x}$ under compressive stress[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1992, 28(5): 3156-3158.
- [55] Wohlfarth E P. Handbook of ferromagnetic materials[M]//CLARK A E. Chapter 7 Magnetostrictive rare earth- Fe_2 compounds. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1980.
- [56] CLARK A E, CULLEN J R, SATO K. Magnetostriction of single crystal and polycrystal rare earth- Fe_2 compounds[C]//AIP Conference Proceedings. New York: AIP Publishing, 1975. 670-671.
- [57] CLARK A E, BELSON H S, TAMAGAWA N. Huge magnetocrystalline anisotropy in cubic rare earth- Fe_2 compounds[J]. Physics Letters A, 1972, 42(2): 160-162.
- [58] LIU T, LIU Y, WANG Q, et al. Microstructural, magnetic and magnetostrictive properties of $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_{1.95}$ prepared by solidification in a high magnetic field[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(12): 125005.
- [59] DONG M, LIU T, GUO X, et al. Magnetostriction induced by crystallographic orientation and morphological alignment in a TbFe_2 -based alloy[J]. Journal of Applied Physics, 2019, 125(3): 033901.
- [60] DONG S L, LIU T, DONG M, et al. Enhanced magnetostriction of Tb-Dy-Fe via simultaneous $\langle 111 \rangle$ -crystallographic orientation and -morphological alignment induced by directional solidification in high magnetic fields [J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(5): 053903.
- [61] DONG M, LIU T, GUO X, et al. Crystal orientation induced by high magnetic fields during peritectic reaction of alloys[J]. Materials Characterization, 2022, 183: 111608.
- [62] DONG M, LIU T, GUO X, et al. Enhancement of mechanical properties of $\text{Tb}_{0.27}\text{Dy}_{0.73}\text{Fe}_{1.95}$ alloy by directional solidification in high magnetic field[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 785: 139377.
- [63] 夏德贵, 陆柏松, 王洪奎 著. 软磁铁氧体制造原理与技术[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2010.
- [64] BOZORTH R M, WALKER J G. Magnetostriction of single crystals of cobalt and nickel ferrites[J]. Physical Review, 1952, 88: 1209-1209.
- [65] LICCI F, RINALDI S. Magnetostriction of some hexagonal ferrites [J]. Journal of Applied Physics, 1981, 52: 2442-2443.
- [66] DIONNE G F. Magnetic-anisotropy and magnetostriction constants of substituted lithium ferrites at 300°K [J]. Journal of Applied Physics, 1969, 40: 4486-4490.
- [67] BOZORTH R M, TILDEN E F, WILLIAMS A J. Anisotropy and magnetostriction of some ferrites[J]. Physical Review, 1955, 99(6): 1788-1798.
- [68] MUHAMMAD A, SATO-TURTELLI R, KRIEGISCH M, et al. Large enhancement of magnetostriction due to compaction hydrostatic pressure and magnetic annealing in CoFe_2O_4 [J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111: 013918.
- [69] ZHENG Y X, CAO Q Q, ZHANG C L, et al. Study of uniaxial magnetism and enhanced magnetostriction in magnetic-annealed polycrystalline CoFe_2O_4 [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110: 043908.
- [70] NA J G, LEE T D, KIM E C, et al. Mössbauer study on the distribution change and charge conversion of cations in CoFe_2O_4 [J]. Journal of Materials Science Letters, 1993, 12: 361-362.
- [71] NA J G, LEE T D, PARK S J. Migration path and charge conversion of cations in Co-substituted spinel ferrite thin films during magnetic annealing[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1994, 33: 6160-6163.
- [72] VASIL'EV A N, BUCHEL'NIKOV V D, TAKAGI T, et al. Shape memory ferromagnets[J]. Physics-Uspekhi, 2003, 46: 559-588.
- [73] CHERNENKO V A, BESSEGHINI S. Ferromagnetic shape memory alloys: Scientific and applied aspects[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 142(2): 542-548.
- [74] SANDEMAN K G, DAOU R, ÖZCAN S, et al. Negative magnetocaloric effect from highly sensitive metamagnetism in $\text{CoMn-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ [J]. Physical Review B, 2006, 74: 224436.
- [75] BARCZA A, GERCSI Z, MICHOR H, et al. Magnetoelastic coupling and competing entropy changes in substituted CoMnSi metamagnets[J]. Physical Review B, 2013, 87(6): 064410.
- [76] GONG Y Y, WANG D H, CAO Q Q, et al. Textured, dense and giant magnetostrictive alloy from fissile polycrystal[J]. Acta Materialia, 2015, 98: 113-118.
- [77] LIU J, GONG Y, ZHANG F, et al. Large, low-field and reversible magnetostrictive effect in MnCoSi -based metamagnet at room temperature [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2021, 76: 104-110.
- [78] HU Q B, HU Y, ZHANG S, et al. Large reversible magnetostrictive effect of MnCoSi -based compounds prepared by high-magnetic-field solidification[J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(5): 052404.
- [79] 曾庚鑫. 超磁致伸缩功率超声换能器理论分析与实验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [80] 翁玲, 梁淑智, 李薇娜, 等. 铁镓合金阻抗频率特性测量与分析 [J]. 计量学报, 2018, 39(6): 768-770.
- [81] 翁玲, 王博文, 孙英, 等. 超磁致伸缩致动器的输出位移与其控制研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(7): 800-803.
- [82] 闫存恒, 黄文美, 郭萍萍, 等. 双棒型磁致伸缩换能器的结构设计和特性分析[J]. 现代制造工程, 2021(1): 114-120.
- [83] ZHOU H, ZHANG J, FENG P, et al. An output amplitude model of a giant magnetostrictive rotary ultrasonic machining system considering load effect[J]. Precision Engineering, 2019, 60: 340-347.

- [84] ZHOU H, ZHANG J, FENG P, et al. An amplitude prediction model for a giant magnetostrictive ultrasonic transducer[J]. *Ultrasonics*, 2020, 108: 106017.
- [85] 余昌筠, 张伟光, 王国荣, 等. 超磁致伸缩换能器磁滞非线性分析及驱动信号探究[J]. *传感器与微系统*, 2021, 40(1): 26-29.
- [86] 翁玲, 胡秀玉, 赵青, 等. Fe-Ga 合金换能器动态输出特性分析[J]. *传感技术学报*, 2017, 30(6): 836-840.
- [87] 汤文卓. 基于 TbDyFe 合金的超声换能器的设计与仿真[D]. 焦作: 河南理工大学, 2021.
- [88] ZHOU J, HE Z, RONG C, et al. A giant magnetostrictive rotary actuator: Design, analysis and experimentation[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 287: 150-157.
- [89] XUE G, ZHANG P, HE Z, et al. Displacement model and driving voltage optimization for a giant magnetostrictive actuator used on a high-pressure common-rail injector [J]. *Materials & Design*, 2016, 95: 501-509.
- [90] LIU X, GAO L, WU Y, et al. Micro-displacement amplifier of giant magnetostrictive actuator using flexure hinges[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, 556: 169415.
- [91] 丛沫岳. 磁致伸缩传感器的灵敏度提升方法及实验研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2021.
- [92] HUBER T, BERGMAIR B, VOGLER C, et al. Magnetoelastic resonance sensor for remote strain measurements[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(4): 042402.
- [93] SECO F, MARTÍN J M, PONS J L, et al. Hysteresis compensation in a magnetostrictive linear position sensor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2004, 110(1-3): 247-253.
- [94] SECO F, MARTÍN J M, JIMÉNEZ A R, et al. A high accuracy magnetostrictive linear position sensor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, 123-124: 216-223.
- [95] DENG C, KANG Y, LI E, et al. A new model of the signal generation mechanism on magnetostrictive position sensor[J]. *Measurement*, 2014, 47: 591-597.
- [96] WENG L, XIE G, ZHANG B, et al. Magnetostrictive tactile sensor array for force and stiffness detection[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 513: 167068.
- [97] MIRZAMOHAMADI S, SHEIKHI M M, KARAFI M R, et al. Novel contactless hybrid static magnetostrictive force-torque (CHSMFT) sensor using Galfenol [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, 553: 168969.
- [98] 唐志峰, 吕福在 著. 超声导波管道无损检测技术及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2019.
- [99] CHO S H, KIM H W, KIM Y Y. Megahertz-range guided pure torsional wave transduction and experiments using a magnetostrictive transducer[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2010, 57(5): 1225-1229.
- [100] ANTONY JACOB A, RAJAGOPAL P, BALASUBRAMANIAM K. Selective modal excitation for optimization of waveguide based bulk ultrasonic transducers[J]. *NDT & E International*, 2018, 94: 47-55.
- [101] KWON Y E, KIM H W, KIM Y Y. High-frequency lowest torsional wave mode ultrasonic inspection using a necked pipe waveguide unit[J]. *Ultrasonics*, 2015, 62: 237-243.
- [102] 竺冉, 吕福在, 唐志峰, 等. 磁致伸缩纵向导波传感器中偏置磁场的优化设计[J]. *传感技术学报*, 2011, 24(3): 371-375.
- [103] 张喆斯, 马延鋆, 宋振华, 等. 磁致伸缩式纵向超声导波传感器的阻抗匹配设计[J]. *无损检测*, 2015, 37(8): 43-47.
- [104] QI Q, LI J, MU X, et al. Microstructure evolution and magnetic properties of annealed magnetostrictive $\text{Fe}_{81}\text{Al}_{19}$ coatings and their ultrasonic guided wave transducing performance [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 367: 19-29.
- [105] QI Q, SHEN G, ZHENG Y, et al. The microstructural evolution and ultrasonic guided wave transduction performance of annealed magnetostrictive $(\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17})_{99.9}(\text{NbC})_{0.1}$ thin sheets [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, 548: 168938.