

文章编号: 1001-4888(2013)04-0416-06

铁磁形状记忆合金双轴向力—磁耦合实验研究^{*}

陈艳, 骆英, 朱玉萍, 刘红光

(江苏大学 力学与工程科学系, 江苏镇江 212013)

摘要: 对磁场和应力场共同作用下的单晶铁磁形状记忆合金的力学特性进行了实验测试与分析, 分别获得了单晶 Ni_2MnGa 试样在不同的压应力时、两个不同角度的磁场作用下的磁场—应变曲线。结果表明, 当磁场垂直于应力时, 磁场方向的磁致应变要远小于应力方向的磁致应变; 当磁场平行于应力时, 磁场方向的磁致应变要小于垂直于磁场方向的磁致应变, 其磁致应变滞回环的面积远小于磁场垂直于应力时的滞后环面积。这为铁磁形状记忆合金在工程中的应用提供一定的指导作用。

关键词: 铁磁形状记忆合金; 力—磁耦合; 磁致应变; 实验测试

中图分类号: O341; O348.2

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-13-001

0 引言

近年来, 铁磁形状记忆合金 (Ferromagnetic Shape Memory Alloy, 简称 FSMA) 已成为材料科学、凝聚态物理学和力学等领域的研究热点之一。铁磁形状记忆合金 Ni_2MnGa 单晶的磁致应变已经从最初报道的 0.2%^[1] 发展到 10%^[2-4]。铁磁形状记忆合金具有铁磁性和形状记忆效应, 其形状记忆效应可以分别由温度、应力和磁场控制。在磁场控制下表现出大输出应变、响应频率快和可以精确控制的综合特性, 使其可能在振动和噪声控制、微波器件和智能结构等领域有重要应用。因此, 铁磁形状记忆合金的实验研究、理论分析以及开发和应用受到了人们的日益重视^[5-9], 成为未来新一代驱动器和传感器材料。

迄今为止, 国内外学者在力—磁耦合时 FSMA 的磁畴演化、相变特征、力学性能、应变机理^[10-14] 等方面相继开展了研究。通过实验研究可知, 铁磁形状记忆合金具有极其丰富的细观结构, 存在磁畴、畴壁、难易磁化方向等, 还表现为磁晶各向异性。然而, 现有的实验研究主要测量了力—磁耦合作用下, 当应力与磁场垂直时应力场方向的应变, 而磁场方向产生的应变, 以及应力与磁场平行时的磁致应变鲜见报道。

因此, 为了更好地揭示铁磁形状记忆合金复杂的力学行为, 为其理论研究提供基础, 很有必要对该材料进行广泛的实验研究, 并总结得到相关规律, 从而更好地促使该材料在工程实际中得到广泛的应用。本文以代表性的单晶 Ni_2MnGa 为研究对象, 开展了不同压应力下、力—磁耦合时的相关实验研究, 并获得了两个互相垂直方向产生的磁场—应变曲线, 总结得到了相关规律。

1 变形机理

Ni_2MnGa 兼有铁磁性和热弹性马氏体相变的特征。奥氏体相是面心立方结构, 马氏体相为四方结

^{*} 收稿日期: 2013-01-10; 修订日期: 2013-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 10972027, 11272136)和江苏大学校基金项目(11JDG066)资助

通讯作者: 朱玉萍(1968—), 女, 博士后, 副教授。研究方向: 智能材料本构关系。E-mail: zhuyuping@126.com

构,相变可以产生 24 种位向的马氏体变体,通常等价于三种变体,见图 1。变体之间存在自协作效应。

铁磁形状记忆合金的宏观应变主要是由马氏体变体再取向而产生的,这与材料的磁化过程有关,见图 2。施加压应力可以得到单个马氏体变体,记为变体 1,此时磁畴的磁化方向沿着易磁化轴。在外磁场 H 作用下,如果磁晶各向异性比退孪晶所需的能量大,则产生马氏体变体 2,孪晶界发生移动,对外输出应变。

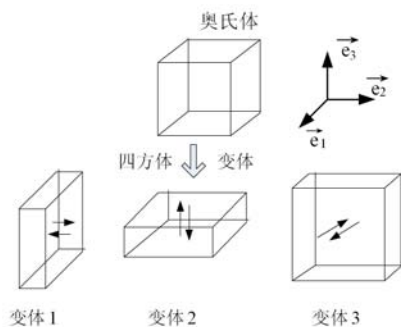


图 1 Ni_2MnGa 奥氏体和马氏体示意图^[2]

Fig. 1 Schematic of austenitic and martensite in Ni_2MnGa

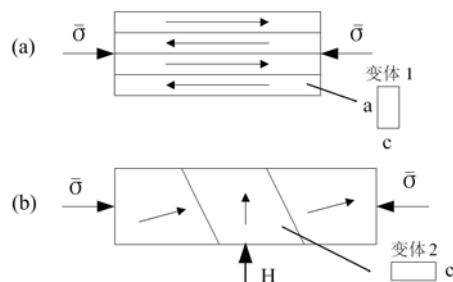


图 2 磁场诱导应变的微观机制图^[2]

Fig. 2 Schematic of variants reorientation

2 实验

本文实验材料购于芬兰的 Adaptamat Ltd 公司,试样的形状和尺寸见图 3。通过能谱分析(EDS)测定材料的化学成分为: $\text{Ni}_{49.41}\text{Mn}_{26.77}\text{Ga}_{23.82}\text{at. \%}$,其中 at. % 表示原子比。生长后的单晶经两步退火工艺处理,以消除晶体内的杂散内应力,使铸锭组织均匀化。样品用电弧线切割方法切割,长轴 x 方向为 $[100]$ 取向,试样的另两个边 y 方向为 $[010]$ 取向, z 方向为 $[001]$ 取向,表面抛光。

根据马氏体相变的热效应,采用 DSC 来测量马氏体相变点。由 DSC 曲线可知相变点温度为: $M_s=37.1^\circ\text{C}$, $M_f=24.9^\circ\text{C}$, $A_s=38.3^\circ\text{C}$, $A_f=48.2^\circ\text{C}$ 。居里温度为: $T_c=98.3^\circ\text{C}$ 。通过 X 射线衍射实验可知该材料在室温下呈现为 5M 调制结构。

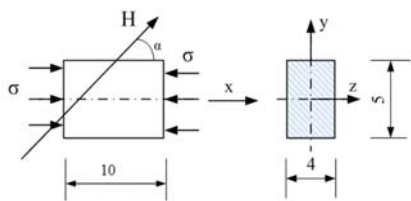


图 3 实验试样

Fig. 3 Experimental specimens



图 4 实验设备

Fig. 4 Experimental installation

实验设备为磁-电-力-热耦合系统,见图 4。实验环境温度室温,由该材料的相变点温度可知,实验时该材料完全处于马氏体相。

实验时在试样表面沿长度和宽度方向各贴一个应变片。先沿 x 方向预加压应力,保持不变约 2 分钟,以便得到单个变体。然后降低压应力到不同值,保持不变,再沿与应力场方向呈不同夹角方向加磁场,测量磁场-应变曲线。

3 结果与讨论

3.1 应力与磁场垂直时

由图 3, 当 α 为 90° , 即应力与磁场垂直时, 测量了两个互相垂直方向的磁场—应变曲线, 见图 5 和图 6。

图 5 中, 上方曲线为磁场产生的 x 方向应变, 与文献^[1-4]的规律相同, 说明本文实验数据是可靠的。下方曲线为磁场产生的 y 方向应变。其中蓝色曲线表示在 0.4MPa 压应力作用下的磁场—应变曲线, 绿色曲线表示在 0.6MPa 压应力作用下的磁场—应变曲线, 红色曲线表示在 0.8MPa 压应力作用下的磁场—应变曲线。由图可知, 两个方向的磁致应变分布规律基本相同, 随着压应力增大, 磁致应变减小。在 0.6MPa 和 0.8MPa 压应力作用时, 这两个方向的磁致应变曲线很接近。

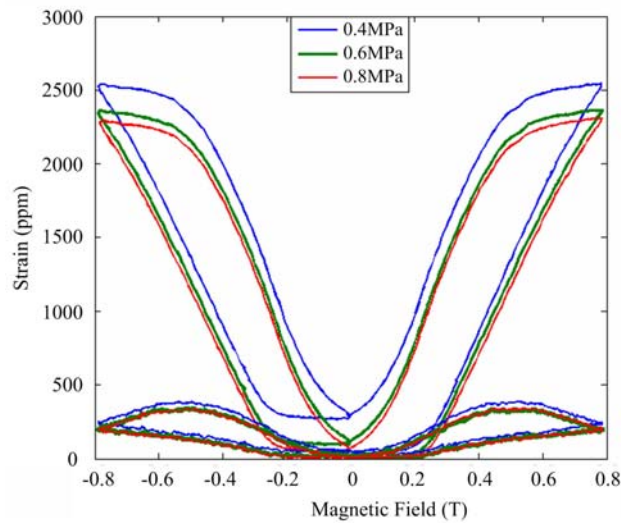


图 5 $\alpha=90^\circ$ 时, 在不同常压应力下的磁场—应变曲线

Fig. 5 Magnetic field-strain curves under different compressive stress at $\alpha=90^\circ$

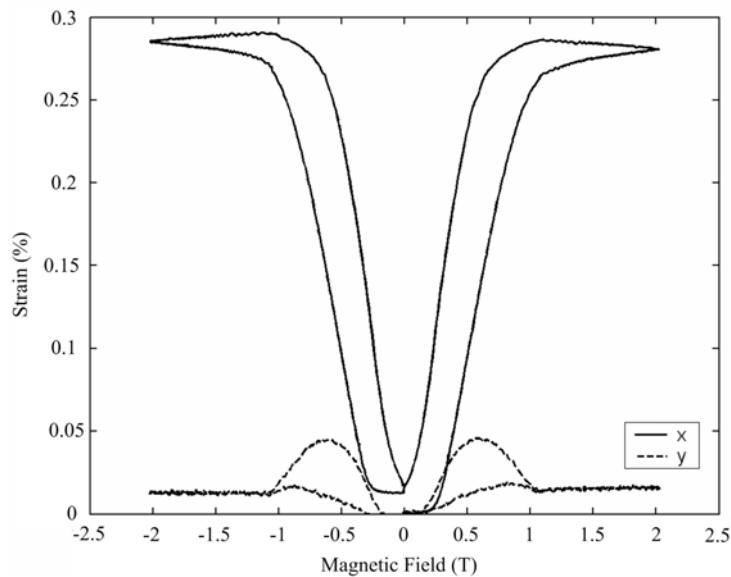


图 6 $\alpha=90^\circ$ 时, 在自由状态下的磁场—应变曲线

Fig. 6 Magnetic field-strain curves under free stress at $\alpha=90^\circ$

图 6 是压应力卸载到 0 时, 再沿 y 方向加磁场直到磁场饱和时的磁场—应变曲线。其中, x 曲线表示垂直于磁场方向的应变, y 曲线为平行于磁场方向产生的应变。由图可知, 随着磁场的增大, 两个方

向的应变均增大。由图5和图6可知,在相同的磁场下,当应力与磁场垂直时, x 方向产生的应变要远大于 y 方向的应变。

3.2 应力与磁场平行时

由图3,当 $\alpha=0^\circ$,即应力与磁场平行时,先预加压应力7.5MPa得到单个变体。压应力再降到不同值时,分别测量 x 方向和 y 方向的磁场-应变曲线,见图7和图8。

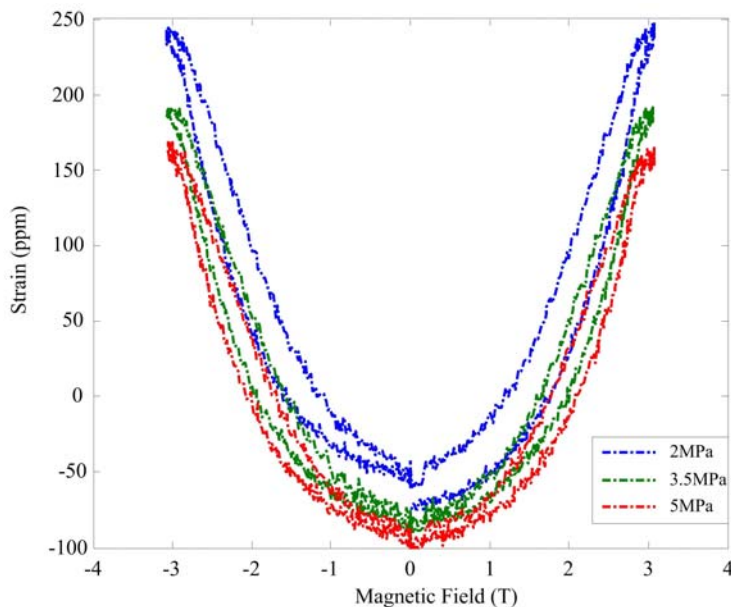


图7 $\alpha=0^\circ$ 时 x 方向的磁场-应变曲线

Fig. 7 Magnetic field-strain curves at $\alpha=0^\circ$ along x direction

图7为 x 方向的磁场-应变曲线,蓝色曲线表示在2MPa压应力作用下的磁场-应变曲线,绿色曲线表示在3.5MPa压应力作用下的磁场-应变曲线,红色曲线表示在5MPa压应力作用下的磁场-应变曲线。由图可知,随着压应力增大,在相同的磁场时,磁致应变越小。在3.5MPa和5MPa压应力作用时,磁致应变曲线很接近。

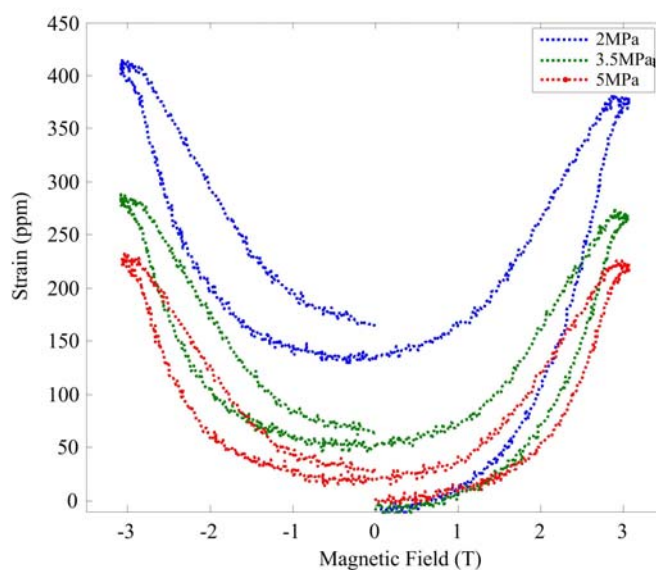


图8 $\alpha=0^\circ$ 时 y 方向的磁场-应变曲线

Fig. 8 Magnetic field-strain curves at $\alpha=0^\circ$ along y direction

图8为 y 方向的磁场-应变曲线。蓝色曲线表示在2MPa压应力作用下的磁场-应变曲线,绿色

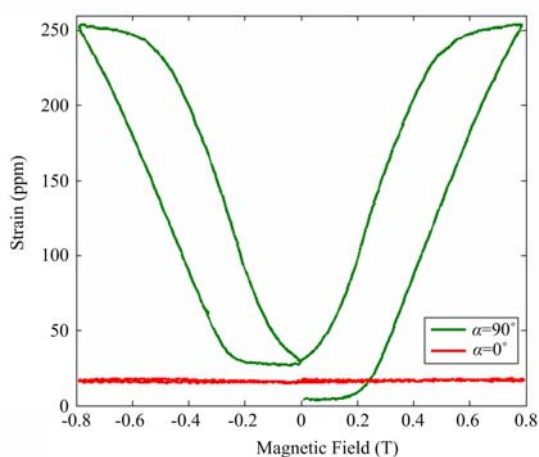


图 9 不同磁场方向时的磁场—应变曲线

Fig. 9 Magnetic field-strain curves under different magnetic direction

曲线表示在 3.5 MPa 压应力作用下的磁场—应变曲线,红色曲线表示在 5 MPa 压应力作用下的磁场—应变曲线。由图可知,在相同的磁场强度时,常压应力越大,磁场产生应变越小。当磁场最终降低到零时,试样内部存在残余应变,应变随着压应力的增大而减小。比较图 7 和图 8 可知, $\alpha=0^\circ$ 时,在相同的常压应力、相同的磁场强度时,y 方向产生的磁致应变要大于 x 方向的应变。

先预加压应力 3 MPa 保持 2 分钟,然后压应力降到 0.4 MPa 保持不变时,不同磁场方向的磁场—应变曲线见图 9。其中绿色曲线表示 $\alpha=90^\circ$ 时, x 方向的磁场—应变曲线;红色曲线表示 $\alpha=0^\circ$ 时, x 方向的磁场—应变曲线。由图 9 可知,磁场与压应力垂直时, x 方向产生的

应变增长幅度明显,应变所能达到的最大值也远远大于磁场与压应力平行的磁致应变。由图 9 还可知,当磁场平行于应力时,几乎没有磁致应变滞后环,而当磁场垂直于应力时,磁致应变曲线围成的面积,即滞后环面积相比大得多。这表明在此种加载方式下,材料对能量的吸收小,抗震效果差。

4 结论

本文对 Ni_2MnGa 单晶试样进行了一系列实验,得到了该材料材料性能、磁场—应变曲线,总结得到相关规律,这些规律可为铁磁形状记忆合金在工程中的应用提供指导作用。基本结论可归结为:

- (1) 当磁场垂直于应力时,磁场方向和应力场方向的磁致应变分布规律基本相同,压应力越大,磁致应变越小。磁场方向的磁致应变要远小于应力场方向的磁致应变。
- (2) 当磁场平行于应力时,压应力越大,磁场方向以及垂直于磁场方向的磁致应变越小。在相同的常压应力、相同的磁场强度时,磁场方向产生的磁致应变要小于垂直于磁场方向的应变。
- (3) 当磁场平行于应力时,磁致应变滞后环的面积远小于磁场垂直于应力时的滞后环面积。

致谢:衷心感谢北京大学裴永茂老师和北京理工大学许奎雪同学对本文实验提供的大力支持和帮助。

参考文献:

- [1] Ullakko K, Huang J K, Kantner C, et al. Large Magneto-mechanical properties and applications of Ni-Mn-Ga ferromagnetic shape memory alloy [J]. Applied Physics Letters, 1996, 69(13):1966—1973.
- [2] Tickle R. Ferromagnetic Shape Memory Materials [D]. University of Minnesota, 2000.
- [3] Heczko O, Sozinov A, Ullakko K. Giant field-induced reversible strain in magnetic shape memory NiMnGa alloy [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(5):3266—3273.
- [4] Murray S J, Marioni M, Allen S M, et al. 6% magnetic-field-induced strain by twin-boundary motion in ferromagnetic Ni-Mn-Ga [J]. Applied Physics Letters, 2000, 77(6): 886—893.
- [5] 邓丽芬,李岩,蒋成保,徐惠彬.铁磁形状记忆合金 NiMnGa 单晶的马氏体孪晶再取向应力应变行为[J].金属学报,2004,40(12):1290—1294 (DENG Lifan, LI Yan, JIANG Chengbao, XU Huibin. Martensite twin reorientation behavior in ferromagnetic shape memory alloy Ni-Mn-Ga single crystal [J]. Metal Journal, 2004, 40(12):1290—1294 (in Chinese))
- [6] 彭志明,金学军,徐祖耀. Ni_2MnGa 合金结构及磁控形状记忆机制的研究进展[J].功能材料,2004,2(2):135—138(PENG Zhiming, JIN Xuejun, XU Zuyao. The study of Ni_2MnGa alloy structure and magnetic-field-controlled shape memory mechanism[J]. Functional Materials, 2004, 2(2):135—138(in Chinese))

- [7] 王省哲, 何宝明. 铁磁形状记忆合金 Ni_2MnGa 多晶的磁-力特性[J]. 功能材料, 2008, 39(8):1272—1275 (WANG Shengzhe, HE Baoming. Magneto-mechanical effects in ferromagnetic shape memory alloy Ni_2MnGa polycrystal[J]. Functional Materials, 2008, 39(8): 1272—1275(in Chinese))
- [8] Pei Y M, Fang D N. A model for giant magnetostrain and magnetization in the martensitic phase of NiMnGa alloys [J]. Smart Materials & Structures, 2007, 16(3):779—783.
- [9] Zhu Y P, Yu K. Anisotropic modeling of magnetic-field-induced superelastic strain in magnetic shape memory alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 550:308—313.
- [10] Virgil C S, David J S. Microstructural characterization of Ni-Mn-Ga ferromagnetic shape memory alloy powders [J]. Applied Physics Letters, 2004, 95(11):6954—6956.
- [11] Guo S, Zhang Y, Quan B, et al. The effect of doped elements on the martensitic transformation in Ni-Mn-Ga magnetic shape memory alloy [J]. Smart Materials & Structures, 2005, 14(5):S236—S238.
- [12] Ge Y, Heczko O, Söderberg O, Hannula S-P. Magnetic domain evolution with applied field in a NiMnGa magnetic shape memory alloy [J]. Scripta Materialia, 2006, 54(12):2155—2160.
- [13] Gauthier J Y, Lexcellent C, Hubert A, et al. Magneto-thermo-mechanical modeling of a magnetic shape memory alloy Ni-Mn-Ga single crystal [J]. Annals of Solid and Structural Mechanics, 2011, 2(1):19—31.
- [14] Monroe J A, Karaman I, Basaran B, et al. Direct measurement of large reversible magnetic-field-induced strain in Ni-Co-Mn-In metamagnetic shape memory alloys [J]. Acta Materialia, 2012, 60(20):6883—6891.

Experimental Study of Biaxial Force-Magnetic Coupling for Ferromagnetic Shape Memory Alloy

CHEN Yan, LUO Ying, ZHU Yu-ping, LIU Hong-guang

(Institute of Mechanics & Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Experimental test and analysis of mechanical characteristics of single crystal ferromagnetic shape memory alloy was carried out under the combined action of magnetic field and stress field. The magnetic field-strain curves of single crystal Ni_2MnGa specimen were obtained under different compressive stress and at two different magnetic field angles, respectively. Results indicate that when magnetic field is perpendicular to stress, the magnetically-induced strain along magnetic field direction is much less than that along stress direction. It also shows that when magnetic field is parallel to stress, the magnetically-induced strain along magnetic field direction is less than that along the direction perpendicular to magnetic field, and the magnetically-induced strain hysteresis loop area is much smaller than that of magnetic field perpendicular to the stress. This provides some guidance for engineering application of ferromagnetic shape memory alloy.

Keywords: ferromagnetic shape memory alloy; magneto-mechanical coupling; magnetically induced strain; experimental test