

铁磁形状记忆合金的力学行为研究进展*

朱玉萍[†] 兑关锁

北京交通大学工程力学研究所, 北京 100044

摘 要 铁磁形状记忆合金是一种新型的多功能材料, 它除了具有传统的温控和应力控制记忆合金的一般特点外, 还可以在磁场的作用下输出应变, 极大地拓展了传统的形状记忆合金应用前景. 材料力学行为的研究是材料得以广泛应用的前提. 本文对铁磁形状记忆合金力学行为的研究文献进行了综述, 着重介绍了铁磁形状记忆合金力学行为的研究现状, 系统阐述了晶体的成分、磁场强度、外应力以及温度等因素对力学行为的影响, 并概述了铁磁形状记忆合金本构模型的研究进展.

关键词 铁磁形状记忆合金, 力学行为, 本构模型, 磁场, 应力, 应变

1 引言

形状记忆合金 (shape memory alloy, SMA) 是一种重要的功能材料, 具有自感知、自诊断和自适应的功能, 其记忆效应和伪弹性是在温度或应力作用下, 由奥氏体相到马氏体相的相变和逆相变过程来实现的^[1~3]. 多晶体的形状记忆合金可以产生 6%~10% 的应变, 远大于其他功能材料的输出应变, 其回复应力也达到数百兆帕. 但是当其形状记忆效应受温度控制时, 提供加热和散热冷却的条件都是不可缺少的, 在实际应用过程中, 与加热时间相比, 散热所要的时间要更长些. 因此, 为了尽快返回原状态, 常常需要利用空气或水进行强制冷却, 热损失大, 效率较低; 热驱动的形状记忆材料普遍还存在响应频率低 (1 Hz 左右) 的问题. 所以, 在一定程度上和某些场合下限制了它们的更广泛应用.

自 1996 年以来, 以 Ni_2MnGa 为代表的铁磁形状记忆合金 (ferromagnetic shape memory alloy, FSMA) 已成为功能材料领域的研究热点. Ullakko 等人^[4,5] 首先报道了在 Ni_2MnGa 单晶体中观察到 0.2% 的磁场诱导应变 (magnetic field induced strain, MFIS). 此后, 关于这个领域的研究逐年大幅度增加, Ni_2MnGa 单晶的磁诱导应变值发展到 6% 和 10%^[6~10], 远远大于传统的磁致伸缩材料的磁致应变变量. 人们

还相继开发出许多种类的铁磁形状记忆合金材料, 如: FePd ^[11~17], FePt ^[18~19], CoNiGa ^[20~22], NiFeGa ^[23~26], CoNiAl ^[27~31], CoNi ^[32] 等. 并对 FSMA 的晶体结构^[33~41]、磁畴演化^[42~45]、相变特征^[46~50]、力学性能^[51~55]、应变机理^[5,56~65] 等方面进行了大量的研究. 通过分析可知, 可以观察到的宏观应变主要是由于单晶马氏体变体再取向产生的, 铁磁形状记忆合金除了具有传统的温控和应力控制记忆合金的一般特点外, 还可以在磁场的作用下输出应变. 与普通的形状记忆合金和磁致伸缩材料相比, FSMA 具有强铁磁性、大磁致伸缩、温控与磁控形状记忆效应, 响应频率接近压电陶瓷, 输出应变与应力接近温控形状记忆合金等特点, 可以把磁能转化为机械能, 极大地拓展了形状记忆合金的应用前景, 是一种理想的多功能材料.

在多晶体的铁磁形状记忆合金中也存在磁场诱导应变, 但是相应的应变数值较小^[66~69]. 然而, 从生产和应用的角度来看, 如在驱动器、制动器的应用方面, 往往需要的是多晶体材料. 为了提高多晶体铁磁形状记忆合金的磁场诱导应变, 目前在这个方面人们已做了一些研究工作^[70~72], 但尚需进一步进行研究.

此外, 对于铁磁形状记忆合金复合材料 (ferromagnetic shape memory alloy composite, FSMAP) 也有了一些研究进展^[73~78], 研究了 FSMAP 的生产

收稿日期: 2007-09-18, 修回日期: 2008-02-14

* 国家自然科学基金 (50539030, 90205007 和 10772021) 和教育部留学回国人员科研启动基金资助项目

[†] E-mail: zhuyuping@126.com

制备、形状记忆效应等. 目前我国从事材料研究和力学研究的人员对这类多功能材料也做了大量的研究工作, 在材料的制备工艺、材料性能、相变特性以及应用等方面进行了研究, 取得了一些阶段性重要成果 [79~87].

在铁磁形状记忆合金的开发和利用中, 其力学性能的研究是一个很重要的方面. 为了进一步促进国内对铁磁形状记忆合金力学性能的研究, 又因为 Ni_2MnGa 是铁磁形状记忆合金的主要代表, 本文将以 Ni_2MnGa 为主, 比较全面地综述国内外有关的研究文献, 并对今后该材料力学性能的研究提出展望.

2 应变机理

Ni_2MnGa 是 Heusler 型合金中最早被发现且兼有铁磁性和热弹性马氏体相变特征的材料. Ni_2MnGa 很脆, 塑性差, 其中一个原因就是多晶的准金属间存在着各向异性的结构 [59]. 母相奥氏体相是面心立方结构 {fcc} [56,57], 马氏体相变为替换原子经无扩散位移、并伴有形状改变和表面浮凸、呈不平平面应变特征的一级、形核 - 长大型相变. 根据马氏体相变的 Bain 晶体学模型, 母相的立方晶体沿其中一个晶轴收缩, 同时沿另外两个立方晶轴稍稍伸长, 形成具有四方结构的马氏体相. 按照相变晶体学理论, 相变可以产生 24 种位向的马氏体变体, 通常等价于 3 种变体 (见图 1). 变体之间存在自协作效应, 该效应将使变体在空间均匀取向, 以保持系统具有最低的自由能.

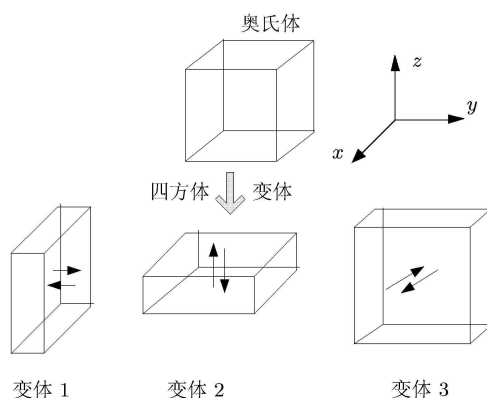


图 1 Ni_2MnGa 奥氏体相和马氏体变体示意图 [58]

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, 而再取向应变是和材料的磁化过程有关的, 见图 2. 冷却或者施加压应力, 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. 当外磁场 H 垂直于压应力方向作用时, 发生畴壁运动和磁化旋转. 一般情况下, 如果磁晶各向异性比退孪晶所需的能量大, 那么易磁化轴沿着磁场方向的马氏体变体 2 就会产生, 由一种取向的变体转变成另一种取向, 孪晶界发生移动, 对外输出应变.

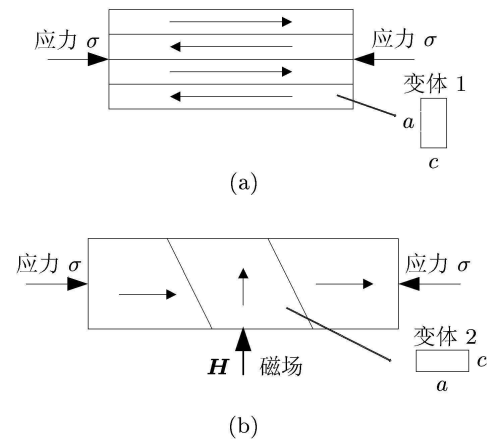


图 2 磁场诱导应变的微观机制图 [58]

研究表明 [61,65], 马氏体变体的转化有可能是不完全的, 转化所得到的变体的体积分数与材料的性能、所加的磁场强度和外加的压应力的大小有关. 如果施加的压应力在某一较大的范围内, 孪晶接触界面的运动受到限制, 磁场诱导的形状记忆效应会大大降低; 当压应力足够大且超过某一定程度时, 无论所加的磁场强度有多大, 马氏体变体的再取向也不会发生.

我们的研究工作表明, 当压应力不超过某一极限, 即 $|\sigma| \leq |\sigma_1^{\text{crit}}|$ 时, 变体 1 能全部转化为变体 2; 压应力处于 $|\sigma_1^{\text{crit}}| < |\sigma| < |\sigma_2^{\text{crit}}|$ 时, 变体 1 能部分转化为变体 2; 当压应力 $|\sigma| \geq |\sigma_2^{\text{crit}}|$, 无论所加的磁场强度有多大, 变体 1 不能转化为变体 2, 即马氏体变体再取向不会发生.

3 力学行为的研究

3.1 材料弹性常数的研究

材料的宏观应变与材料的弹性模量的大小是密不可分的. 关于 Ni_2MnGa 单晶体的弹性常数, 人们做了大量的研究工作 [51~55], Ni_2MnGa 单晶体表现为各向异性, 其奥氏体相为面心立方, 有 3 个独立的弹性常数, 马氏体相为四方体, 有 6 个独立的弹性常数, 这些弹性常数与测试时的温度、合金的组分有关系.

Mañosa [53] 等人用超声测量出近化学计量

Ni_2MnGa 在室温时的弹性常数 (奥氏体相) $C_{11}=136 \pm 3 \text{ GPa}$, $C_{44}=102 \pm 3 \text{ GPa}$, $C_L=(C_{11}+C_{12}+2C_{44})/2=222 \pm 9 \text{ GPa}$, 并绘出了在一定的温度范围内弹性常数随温度的变化曲线, 见图 3. 该材料的相变温度 $M_s=175 \text{ K}$, $A_s=230 \text{ K}$, 居里温度 $T_c=381 \text{ K}$. 由图 3 可知, 随着温度的增加, 剪切弹性模量 C_{44} 和 $C'=(C_{11}-C_{12})/2$ 不断降低, 在相变点附近 (230 K), 剪切弹性模量 C_{44} 和 C' 有急剧的变化, 其中 C' 下降的比 C_{44} 快, 当相变结束后, 随温度的增加 C_{44} 和 C' 略降低. 纵向的弹性模量 C_{11} 和 C_L 随温度变化不大, 随着温度的降低, C_{11} 和 C_L 略有增加.

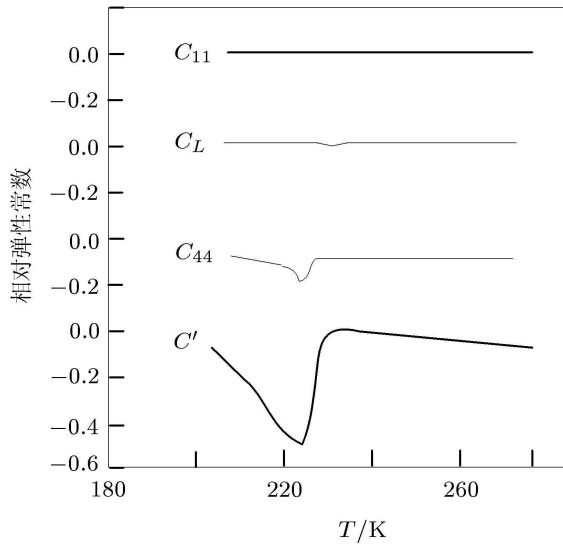


图 3 Ni_2MnGa 的相对弹性常数随温度的变化曲线^[53]

Dai^[54] 等人用连续波的方法测出近化学计量 Ni_2MnGa 单晶体奥氏体相和马氏体相的弹性模量, 材料的相变温度为: $M_s=40^\circ\text{C}$, $A_s=50^\circ\text{C}$, $M_f=42^\circ\text{C}$, $A_f=52^\circ\text{C}$. 在奥氏体相 (测试温度 $T=60^\circ\text{C}$): $C_{11}=43 \text{ GPa}$, $C_{12}=36 \text{ GPa}$, $C_{44}=40 \text{ GPa}$. 在马氏体相 (测试温度 $T=22^\circ\text{C}$): $C_{11}=39 \text{ GPa}$, $C_{12}=30 \text{ GPa}$, $C_{13}=27.6 \text{ GPa}$, $C_{33}=28 \text{ GPa}$, $C_{44}=51 \text{ GPa}$, $C_{66}=49 \text{ GPa}$.

Dai^[55] 等人用连续超声波的方法测量出 $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{28.4}\text{Ga}_{21.6}$ 单晶体在马氏体相时弹性常数随温度的变化情况, 在 20°C 时弹性常数为: $C_{11}=165 \text{ GPa}$, $C_{12}=150 \text{ GPa}$, $C_{13}=105 \text{ GPa}$, $C_{33}=150 \text{ GPa}$, $C_{44}=35 \text{ GPa}$, $C_{66}=40 \text{ GPa}$.

由以上分析可知, Ni_2MnGa 单晶体的材料弹性常数与 Ni_2MnGa 的成分、测试时的温度等因素有关, 材料成分不同, 弹性常数也不同, 即使是同一材料, 在不同的测试温度, 所得的弹性常数也不相同.

3.2 材料成分与加工方法的影响

化学计量的 Ni_2MnGa 是一种标准的 Heusler 合金, 具有锰铝铜 Cu_2MnAl 型晶体结构. 它的标准化学式为 $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{25}$. 一般马氏体相变温度 $M_s=202 \text{ K}$, 居里温度 $T_c=367 \text{ K}$. 由于形状记忆效应和磁致应变是在马氏体相变过程中和马氏体状态下才存在, 化学计量 Ni_2MnGa 合金的相变温度远低于室温, 所以不具有实用性. 在化学计量 Ni_2MnGa 成分基础上, 适当改变成分得到非化学计量 Ni_2MnGa , 这时马氏体相变温度可以在 $160 \text{ K} \sim 450 \text{ K}$ 较大的温度区间内变化.

实验研究^[59,88,89]表明, 非化学计量的 Ni_2MnGa 马氏体相变温度随成分的变化非常敏感, 合金各成分的微小变化都会引起马氏体相变温度、居里温度和磁晶各向异性常数的变化, 也会引起磁滞应变的变化, 而合金的哈斯勒型 L_{21} 晶体结构保持不变, 见表 1^[59]. 表 1 中 K_1 和 K_2 表示磁晶各向异性常数. 由表 1 可知, Ni_2MnGa 合金成分的微小变化, 会导致磁场诱导应变的很大变化.

此外, 铁磁形状记忆合金的相变温度和逆相变的温度与磁场强度、退火温度和冷却速度有关^[90~93]. 由文献 [92] 可知 CoNiGa 的相变温度与退火温度和冷却速度有关, 随退火温度的增加而大幅度增加. 由文献 [93] 可知, 对多晶 $\text{Ni}_{43}\text{Co}_7\text{Mn}_{39}\text{Sn}_{11}$, 随磁场强度的增加, 相变和逆相变的温度呈下降趋势.

表 1 马氏体的材料特性随成分的变化情况^[59]

成分	A_s/K	M_s/K	T_c/K	K_1/kG^2	K_2/kG^2	磁滞应变
$\text{Ni}_{48.4}\text{Mn}_{29.4}\text{Ga}_{22.5}$	272	270	333	-0.54	0.48	0.3%
$\text{Ni}_{49.6}\text{Mn}_{28.4}\text{Ga}_{22.5}$	310	306	372	-0.56	0.65	5.0%
$\text{Ni}_{49.7}\text{Mn}_{28.7}\text{Ga}_{22}$	311	305	375	-0.70	0.89	5.3%
$\text{Ni}_{48.2}\text{Mn}_{30.8}\text{Ga}_{21}$	315	307	367	-0.57	0.78	7.3%

3.3 外磁场和外应力的影响

通过分析可知,再取向应变与所施加的磁场强度、外应力的性质和测试点的温度等因素有关.

文献 [63,94~100] 研究了铁磁形状记忆合金在不同的常磁场强度时的应力 - 应变关系曲线. 如图 4^[94] 为 Straka 等人在室温时,测量出了 $\text{Ni}_{49.7}\text{Mn}_{29.1}\text{Ga}_{21.2}$ 单晶体在不同的外磁场作用下的应力 - 应变曲线. 从图中可知,随外磁场强度的增大,最大的轴向应变越来越小. 当磁场强度

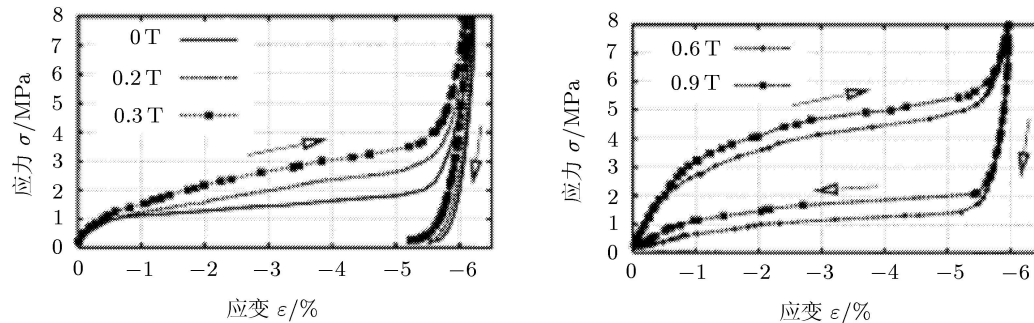


图 4 在不同大小的磁场作用下的应力 - 应变曲线^[94]

不同的常应力时磁场诱导应变关系曲线. 随压应力的增加,最大的轴向应变越来越小,变体再取向的临界磁场强度增加,见图 5. 这是因为当施加垂直方向磁场后,沿磁场方向被磁化的孛晶出现并得以生长,引起试样逆着外加应力方向生长,应力越小,越容易产生应变. 由图可知压应力越小,残余应变越大. 图 6 为在拉、压应力作用下,应变随磁场强度的变化曲线比较图. 随拉应力数值的增加,变体再取向的临界磁场强度减小,在 0.8 MPa 拉应力作用下,孛晶边界运

动所需的临界磁场强度约为 43 kA/m, 大约是在 0.4 MPa 拉应力作用下的一半. 在 0.4 MPa 拉应力作用下,孛晶边界运动所需的临界磁场强度为 86 kA/m,而在 0.4 MPa 压应力作用下,临界磁场强度为 175 kA/m, 将近是拉应力时的两倍. 这些都说明,拉应力有助于孛晶边界运动,压应力阻碍孛晶边界运动. 所以,在 FSMA 复合材料中,如把 FSMA 嵌入聚合物基体,可以给 FSMA 加预拉应力,从而可以使 FSMA 复合材料在磁场作用下很容易产生较大的应变.

文献 [101~112] 研究了铁磁形状记忆合金在

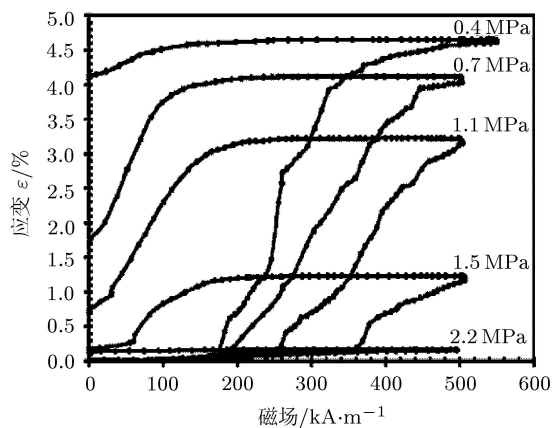


图 5 在不同的压应力作用下,应变随磁场强度的变化曲线^[112]

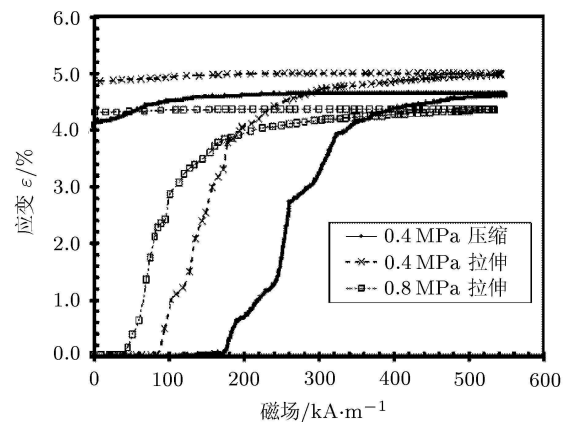


图 6 在拉、压应力作用下,应变随磁场强度的变化曲线^[112]

文献 [113~117] 研究了在不同的温度时磁场诱导应变关系曲线, 如图 7. Straka 等 [117] 人测出了 $\text{Ni}_{49.7}\text{Mn}_{29.1}\text{Ga}_{21.2}(\text{at.}\%)$ 单晶体在不同的温度时, 应变随磁场强度的变化曲线, 材料处于完全马氏体状态, 为 5M 调制结构. 从图中可知, 随温度的增加, 再取向应变呈减少趋势. 当温度为 307 K

时, 随磁场强度减少到零, 没有残余应变, 表现出伪弹性, 在温度为 223 K 和 288 K 时, 都存在残余应变, 而且温度越低, 残余应变越大.

此外, 人们还研究了在互相垂直的磁场作用下的磁场诱导应变行为 [118], 以及磁场的频率对应变的影响 [119~121] 等.

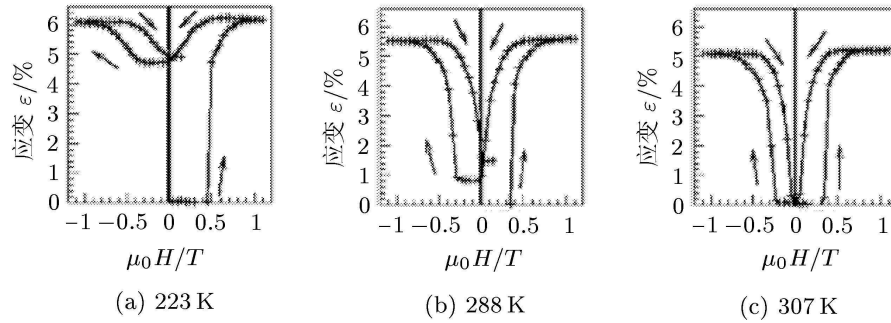


图 7 在不同的温度时, 应变随磁场强度的变化曲线 [117]

3.4 铁磁形状记忆合金复合材料的力学行为

由于诱导铁磁形状记忆合金马氏体相变需要很大的磁场, 尽管马氏体变体再取向所需磁场较小, 可以获得较大的应变, 但是其恢复力很小, 通常只有几个 MPa, 而且铁磁形状记忆合金很脆, 难以加工成型等等, 这些因素都限制了铁磁形状记忆合金在工程中的进一步应用. 为此, 人们涉猎于铁磁形状记忆合金复合材料 (FSMAP) [73~78], 研究了 FSMAP 的生产制备、形状记忆效应等. 图 8 为

图 [73], 铁磁形状记忆合金为单晶颗粒夹杂. 由图可知, 纯聚合物延展性很好, 但是屈服应力低, 大概为 1.8 MPa. 加了铁磁形状记忆合金夹杂后, 复合材料的屈服应力得到了很大提高, 延展性降低, 但是相对于单晶铁磁形状记忆合金而言, 延展性得到提高.

4 MSMA 的本构模型的研究

为了更好地发展这类材料, 研究其潜能, 人们根据不同的理论建立本构模型来描述铁磁形状记忆合金力学行为, 本文主要介绍有影响的几个模型.

4.1 James 和 Wuttig 模型

在 1999 年, James 和 Wuttig [122,123] 基于微观磁学, 研究了铁磁形状合金中磁场诱导应变的理论, 能量表达式为

$$G_{\text{total}} = \min \left\{ -h_0 \cdot \langle m \rangle - \sigma_0 \cdot \langle E \rangle + \frac{1}{2} \langle m \rangle \cdot D \langle m \rangle \right\} \quad (1)$$

其中 h_0 代表外磁场强度, m 代表磁化矢量, σ_0 代表恒定外负载下的应力, $\langle E \rangle$ 代表晶体中各变体的应变状态矩阵, D 代表孪晶或磁畴的去磁矩阵. 该模型中能量项包括塞曼能、退磁场能和恒定外负载下的机械能.

这种微观磁学的方法分析了磁场、磁畴重新分布以及材料常数之间的关系. 它分析了在磁场

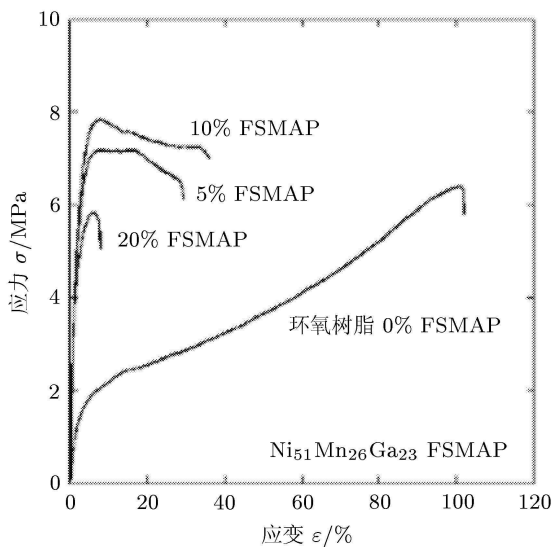


图 8 $\text{Ni}_{51}\text{Mn}_{26}\text{Ga}_{23}$ /聚合物复合材料拉伸的应力 - 应变图 [73]

$\text{Ni}_{51}\text{Mn}_{26}\text{Ga}_{23}$ /聚合物复合材料拉伸的应力 - 应变

影响下的大变形铁磁马氏体再取向, 该理论能预测确定的外加磁场和应力场下所产生的形变, 但预测的数值偏高, 该微观磁学模型也不能提供解析模型的一些内在机制.

4.2 O'Handley 模型

在 2000 年, O'Handley^[124,125] 提出了解析热力学分析模型. 该模型是把单个可动孪晶界分成两个单变体构成的铁磁形状记忆合金, 自由能表达式包括 Zeeman 能、磁晶各向异性能和内部储存弹性能, 是一个二维模型, 自由能的表达式为

$$g_i = -M_i \cdot H + K_u \sin^2 \theta_i + \frac{1}{2} C \varepsilon^2 + \sigma \cdot \varepsilon \quad (2)$$

式中 i 表示单变体 1 或 2, c 轴的方向和局部磁矩的方向定义了角度 θ_i , 弹性能密度代表储存在不响应单变体中的能量, C 表示存在可动孪晶界时马氏体的刚度, H 为所作用的磁场强度, M 为磁化强度, K_u 为磁晶各向异性能. 磁滞应变也是每个变体的体积分数变量的函数

$$\varepsilon(H) = \varepsilon_0 \delta f(H), \quad \delta f(H) = f_1 - \frac{1}{2} \quad (3)$$

其中, ε_0 为晶体的最大应变, f_1 为变体 1 的体积分数. 并设试样初始处于平衡态, 即 $f_1 = f_2 = 1/2$.

若初始试样全部为某一变体, 在磁场作用下, 磁场诱导应变的方程可以采用 Murray 与 Henry 等人给出的方程^[126,127]

$$\varepsilon(H_{nd}) = \varepsilon_0 \left(\frac{2K_u H_{nd}(1 - H_{nd}/2) - \sigma \varepsilon_0}{C \varepsilon_0^2} + \frac{1}{2} \right) \quad (4)$$

其中, σ 为所作用的应力, C 为孪晶状态的弹性模量, 那么

$$H_{nd} = \frac{M^{sat} H}{2K_u} \quad (5)$$

其中 M^{sat} 为饱和磁化矩, H 为所作用的磁场强度.

这个模型说明了相界的移动也会导致应变, 并能对最大应变值进行估算. 然而在该模型中没有考虑磁畴的演化和运动的影响.

4.3 Likhachev 和 Ullakko 模型

在 2000 年, Likhachev 和 Ullakko^[128] 通过热力学的一般方法, 推导出磁致应变的表达式. 按照一般的热力学原理, 积分 Maxwell 关系式

$$\frac{\partial \sigma}{\partial m} = -\frac{\partial h}{\partial \varepsilon} \quad (6)$$

其中 h 为热流密度, m 为磁化矢量. 通过一系列变换, 有

$$\varepsilon^{msm}(h) = \left(\frac{d\sigma_0}{d\varepsilon} \right)_{\varepsilon=0}^{-1} \left(\frac{\partial}{\partial \varepsilon} \int_0^h dh m(\varepsilon, h) \right)_{\varepsilon=0} \quad (7)$$

Likhachev 和 Ullakko 模型假设从等单变体状态出发, 1/3 的材料容易磁化, 2/3 的材料将在外磁场方向磁化困难. 当施加外磁场时, 孪晶界迁动将打破等变体状态, 磁矩和应变可表示为等轴变体分数 x 的函数, 这样就能获得在孪晶马氏体状态磁化矢量与宏观应变的关系

$$m(\varepsilon, h) = \left\{ \frac{1}{3} m_a(h) + \frac{2}{3} m_t(h) \right\} + \frac{2}{3} (\varepsilon/\varepsilon_0) [m_a(h) - m_t(h)] \quad (8)$$

这个方程模拟了实验磁化曲线的主要特性, 通过计算可知模型与实验值有较好的一致性, 但是一些数据主要依赖于实验, 是一种半经验的模型.

4.4 Glavatska 统计学模型

在 2003 年, Glavatska^[129] 用统计学方法推导出磁致应变的模型. 在外磁场的作用下, 马氏体变体的体积分数函数可以用样品中的有效应力表达. 若外加应力的方向平行于 y 轴, 外磁场垂直于应力的方向, 那么磁致应变的表达式为

$$\varepsilon_y(H) = -S^{-1} [\sigma^{eff}(\sigma, H) - \sigma^{eff}(\sigma, 0)] + (c/a - 1) [\alpha_y(\sigma, H) - \alpha_y(\sigma, 0)] \quad (9)$$

其中 S 是刚度系数, $(c/a - 1)$ 是样品的最大应变, α_y 是 y 向马氏体变体的体积分数.

由于磁致弹性的相互作用, 在该模型中假设磁场诱导应变与马氏体的内应力有关系, 使用该方法可以求出在常磁场时应力 - 应变关系及超弹性行为.

另一个统计学方法由 Buchelnikov 与 Bosko 在 2003 年提出^[130]. 该方法描述在外磁场、应力场以及温度影响下, 马氏体变体转换的计算模型. 这个模型与马氏体体积变化率, 形变概率 P , 体积分数以及加载频率等有关. 其中的一个重要结论就是马氏体模量越低磁场的的影响更强.

4.5 Hirsinger 与 Lexcellent 的热力学模型

在 2003 年, Hirsinger 与 Lexcellent^[131,132] 提出以不平衡热力学为基础模型. 该模型中自由能包括化学能 ϕ_{chem} 、机械能 ϕ_{Mech} 以及磁场 ϕ_{Mag} 和温度 ϕ_{Ther} 引起的能量, 即

$$\Phi(H, \varepsilon, z, \alpha, T) = \Phi_{chem} + \Phi_{Mech} + \Phi_{Mag} + \Phi_{Ther} \quad (10)$$

选取了马氏体变体体积分数和磁畴体积分数两个内变量, 表示细观结构的影响. 根据内部耗散和 Clausius-Duhem 不等式, 推导出孛晶边界和畴壁的运动函数, 即

$$\begin{aligned}\pi^f &= -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial z} \\ \pi^h &= -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial \alpha}\end{aligned}\quad (11)$$

其中 π^f 和 π^h 分别为孛晶边界和畴壁的运动函数, z 为变体 2 的体积分数, α 为畴 2 的体积分数. 分析了外磁场方向夹角对 π^f 和 π^h 的影响.

在 2004 年, 他们又基于热力学框架以马氏体体积分数为内变量, 建立了描述奥氏体向马氏体相变的宏观唯象模型^[133], 并模拟了在 $\langle 110 \rangle$ 方向加压应力时的两次马氏体相变, 即奥氏体 - 5M 马氏体 - 7M 马氏体.

4.6 Kieer 和 Lagoudas 唯象模型

在 2005 年, Kieer 和 Lagoudas^[134] 以热力学状态演化为基础建立了唯象模型. 引入了 3 个独立的状态变量, 来描述材料的热力学状态. 假设磁晶各向异性能够足够大, 能控制磁化矢量的方向沿着易轴, 并假设只有一个磁畴, Gibbs 自由能表达式为

$$\begin{aligned}G &= -\frac{1}{2\rho} \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{S} \boldsymbol{\sigma} - \frac{\mu_0}{\rho} \boldsymbol{M}^{\text{sat}} [(1 - \xi) \boldsymbol{e}_x + \xi \boldsymbol{e}_y] \cdot \\ &\quad \boldsymbol{H} + \frac{1}{\rho} f^\xi(\xi, \boldsymbol{\varepsilon}^r) + G_0(T)\end{aligned}\quad (12)$$

其中 $G_0(T)$ 为参考状态的 Gibbs 自由能, \boldsymbol{S} 为材料的等效柔度张量, $\boldsymbol{M}^{\text{sat}}$ 为饱和磁化矢量, ξ 为马氏体变体 2 的体积分数, $f^\xi(\xi, \boldsymbol{\varepsilon}^r)$ 为硬化函数, 表示各变体之间的相互作用. 马氏体变体再取向时, 整体的应变为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{S} \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{A}^r \xi + \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{tr}} \quad (13)$$

其中 $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{tr}}$ 为相变应变, \boldsymbol{A}^r 为再取向应变张量.

由于材料的热力学状态不仅与状态变量的当时值有关, 还与状态变量的变化过程有关, 所以该模型较好地体现了材料细观结构的演化对宏观特性的影响. 然而, 晶体的材料特性和变体的形态是材料细观结构演化过程中的重要本质特性. 若不考虑这些本质特性, 仅仅根据热力学的方法是难以很好地描述材料的本构关系.

笔者基于细观力学的理论和热力学原理, 通过选取适当的状态变量, 推导马氏体变体再取向时铁磁形状记忆合金的本构模型^[135,136], 求解了铁磁形状记忆合金的有效模量, 以及由于相变、再

取向、温度变化等因素引起的总的非弹性应变, 得到了非弹性应变的全量表达式和马氏体变体体积分数的动力学方程. 该模型体现了应力的性质、磁场、温度、材料的性能和夹杂形状等因素对磁控形状记忆合金的宏观响应的影响.

4.7 Pei 和 Fang 模型

在 2007 年, Pei 和 Fang^[137] 基于相变动力学, 应用等同原理, 建立了磁场诱导应变模型. 设马氏体体积分数为应力和磁场强度的函数, 并将其加到传统的相变动力学关系中, 建立适用于磁场诱导相变的动力学方程. 用 α 表示 $[100]$ 方向马氏体变体的体积分数, 令

$$\sigma_{\text{eq}} = \sigma_{\text{mech}} + \sigma_{\text{mag}}(H) \quad (14)$$

则有

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\alpha_L - \alpha_0}{2} \cos \left[\frac{\pi}{\sigma_s^{\text{cr}} - \sigma_f^{\text{cr}}} (|\sigma_{\text{eq}}(H, \sigma)| - \sigma_f^{\text{cr}}) \right] \\ \quad + \frac{\alpha_L + \alpha_0}{2}, \quad \sigma_s^{\text{cr}} < \sigma_{\text{mech}} < \sigma_f^{\text{cr}} \text{ 时} \\ \alpha_0, \quad \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

其中 σ_s^{cr} 和 σ_f^{cr} 分别表示马氏体孛晶再取向开始和结束时的临界应力, α_0 为马氏体变体再取向时初始的体积分数, α_L 与晶格参数和外应力的性质有关, $\sigma_{\text{mag}}(H)$ 为磁场诱导的单轴向应力. σ_{mech} 为沿 $[100]$ 方向加的单轴向应力. 磁场诱导的总应变为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^r(\alpha) - \boldsymbol{\varepsilon}^r(\alpha_0) + \boldsymbol{\varepsilon}^e \quad (16)$$

其中 $\boldsymbol{\varepsilon}^e$ 为弹性应力引起的弹性应变. 通过该方法可以预测磁化行为和磁场诱导形状记忆效应. 但是只考虑了磁晶各向异性, 在马氏体变体再取向时, 没有考虑磁畴分数和易轴磁化方向的影响.

除了以上介绍的主要模型外, 还有一些其他的模型, 如文献^[138~142]. 此外, 人们还研究了多晶体铁磁形状记忆合金的本构模型. Miguel 等人^[143] 在 O'Handley's^[124,125] 单晶体模型的基础上, 对于有织状结构的多晶体, 建立一个简单的模型, 分析了磁场诱导应变的上限值. Liang^[144] 等人应用细观力学的方法, 建立模型计算了 Fe-Pd 多晶体的应力 - 应变关系.

5 结束语

综上所述, 铁磁形状记忆合金作为一种新型功能材料, 具有其它材料难以取代的独特优点, 应

用前景十分广阔. 经过这些年的努力, 人们在微结构、相变机理及形状记忆效应等方面取得一些研究成果, 并采用多种本构模型来模拟铁磁形状记忆合金在不同条件下的力学行为, 但有许多问题尚需作深入的研究:

(1) 铁磁形状记忆合金由于质地太脆、价格昂贵和相变温度较低等原因, 难以付诸实用. 所以改善其韧性和提高相变温度是迫切需要解决的问题.

(2) 现有力学行为的研究主要集中在材料受简单外载的情况, 如磁场和单轴向应力垂直. 在复杂受载时的力学行为有待于进一步的研究.

(3) 现有的 MSMA 的本构模型或多或少都存在一定的缺陷, 如何克服这些缺点建立一个准确且易于应用的本构模型, 来模拟 MSMA 的材料行为是当前研究的热点.

参 考 文 献

- 高山, 沈亚鹏, 许德刚. 形状记忆合金及其工程应用中的力学分析. *力学进展*, 1997, 27: 301~312
- 任勇生, 王世文, 李俊宝, 沈亚鹏. 形状记忆合金在结构主被动振动控制中的应用. *力学进展*, 1999, 29: 19~33
- 刘芹, 任建亭, 姜节胜, 郭运强. SMA 本构模型及其应用的研究进展. *力学进展*, 2007, 37: 189~204
- Ullakko K, Huang J K, Kantner C, et al. Large magnetic-field-induced strains in Ni₂MnGa single crystals. *Appl Phys Lett*, 1996, 9: 1966~1973
- Ullakko K, Huang J K, Kokorin V V, O'Handley R C. Magnetically controlled shape memory effect in Ni₂MnGa intermetallics. *Scripta Mater*, 1997, 36: 1133~1140
- Tickle R, James R D, Shield T, et al. Ferromagnetic shape memory in the NiMnGa system. *IEEE Trans Magn*, 1999, 35: 4301~4310
- Heczko O, Sozinov A, Ullakko K. Giant field-induced reversible strain in magnetic shape memory NiMnGa alloy. *IEEE Trans Magn*, 2000, 36: 3266~3273
- Murray S J, Marioni M, Allen S M, et al. 6% magnetic-field-induced strain by twin-boundary motion in ferromagnetic Ni-Mn-Ga. *Appl Phys Lett*, 2000, 77: 886~893
- Sozinov A, Ezer Y, Kimmel G, et al. Large magnetic-field-induced strains in Ni-Mn-Ga alloys in rotating magnetic field. *J Physique Coll IV*, 2001, 11: 311~316
- Sozinov A, Likhachev A A, Lanska N, Ullakko K. Giant magnetic-field-induced strain in NiMnGa seven-layered martensitic phase. *Appl Phys Lett*, 2002, 80: 1746~1753
- Kato H, Liang Y, Taya M. Stress-induced FCC/FCT phase transformation in Fe-Pd alloy. *Scripta Mater*, 2002, 46: 471~475
- Liang Y, Wada T, Kato H, et al. Straining of a polycrystal of Fe-Pd with martensite structure by uniaxial loading. *Mater Sci and Eng A*, 2002, 338: 89~96
- Mehaddene T, Zemirli M, Pierron-Bohnes V, et al. Inelastic neutron scattering and migration energies in Fe-Pd. *Catalysis Today*, 2004, 89: 313~318
- Ahluwalia R, Lookman T, Saxena A. Dynamic strain loading of cubic to tetragonal martensites. *Acta Mater*, 2006, 54: 2109~2120
- Al-Ghaferi A, Müllner P, Heinrich H, et al. Elastic constants of equiatomic L10-ordered Fe-Pd single crystals. *Acta Mater*, 2006, 54: 881~889
- Liang Y, Kato H, Taya M. Model calculation of 3D-phase transformation diagram of ferromagnetic shape memory alloys. *Mech Mater*, 2006, 38: 564~570
- Mitsuka M, Ohba T, Fukuda T, Kakeshita T, et al. Martensitic transformation in FePd alloy revealed by synchrotron radiation. *Mater Sci Eng A*, 2006, 438-440: 332~335
- Lee Y, Chen J H, Guo M S, et al. Structure and magnetic properties of Fe-Pt nanograins embedded in amorphous carbon films. *J Magn Magn Mater*, 2004, 282: 15~18
- Kakeshita T, Fukuda T, Takeuchi T. Magneto-mechanical evaluation for twinning plane movement driven by magnetic field in ferromagnetic shape memory alloys. *Mater Sci Eng A*, 2006, 438-440: 12~17
- Wuttig M, Li J, Craciunescu C. A new ferromagnetic shape memory alloy system. *Scripta Mater*, 2001, 44: 2393~2397
- Li Y X, Liu H Y, et al. Magnetic field-controlled two-way shape memory in CoNiGa single crystals. *Appl Phys Lett*, 2004, 84: 3594~3596
- Liu J, Xie H, Huo Y, et al. Microstructure evolution in CoNiGa shape memory alloys. *J Alloy Compd*, 2006, 420: 145~157
- Morito H, Fujita A, Fukamichi K, et al. Magnetic-field-induced strain of Fe-Ni-Ga in single-variant state. *Appl Phys Lett*, 2003, 83: 4993~4995
- Dai X F, Wang H Y, Chen L J, et al. Growth and characterization of ferromagnetic shape memory alloy Co₅₀Ni₂₀FeGa₂₉ single crystals. *J Crystal Growth*, 2006, 290: 626~630
- Brown P J, Gandy A P, Ishida K, et al. Crystal structures and magnetization distributions in the field dependent ferromagnetic shape memory alloy Ni₅₄Fe₁₉Ga₂₇. *J Phys Condens Matter*, 2007, 19: 016201
- Morito H, Fujita A, Oikawa K, Ishida K. Stress-assisted magnetic-field-induced strain in Ni-Fe-Ga-Co ferromagnetic shape memory alloys. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 062505
- Oikawa K, Wulff L, Iijima T, et al. Promising ferromagnetic Ni-Co-Al shape memory alloy system. *Appl Phys Lett*, 2001, 79: 3290~3292
- Murakami Y, Shindo D, Oikawa K, et al. Magnetic domain structures in Co-Ni-Al shape memory alloys studied by Lorentz microscopy and electron holography. *Acta Mater*, 2002, 50: 2173~2184
- Karaca H E, Karaman I, Lagoudas D C, et al. Recoverable stress-induced martensitic transformation in a ferromagnetic CoNiAl alloy. *Scripta Mater*, 2003, 49: 831~836
- Karaca H E, Karaman I, Chumlyakov Y I, et al. Compressive response of a single crystalline CoNiAl shape memory alloy. *Scripta Mater*, 2004, 51: 261~266
- Efstathiou C, Sehitoglu H, Johnson A J W, et al. Large reduction in critical stress in Co-Ni-Al upon repeated transformation. *Scripta Mater*, 2004, 51: 979~985
- Liu Y, Zhou W M, Qi X, et al. Magneto-shape-memory effect in Co-Ni single crystals. *Appl Phys Lett*, 2001, 78: 3660~3662
- Brown P J, Crangle J, Kanomata T, et al. The crystal structure and phase transitions of the magnetic shape memory compound Ni₂MnGa. *J Phys Condensed Matter*, 2002, 14: 10159~10171
- Enkovaara J, Ayuela A. Structural, thermal, and magnetic properties of Ni₂MnGa. *Appl Phys Lett*, 2002, 91: 7798~7800
- Straka L, Heczko O, Lanska N. Magnetic properties of various martensitic phases in Ni-Mn-Ga Alloy. *IEEE Trans Magn*, 2002, 38: 2835~2837
- Virgil C S, David J S. Microstructural characterization of Ni-Mn-Ga ferromagnetic shape memory alloy powders. *Appl Phys Lett*, 2004, 95: 6954~6956
- Ohba T, Miyamoto N, Fukuda K, et al. Fundamental structure of a Ni₂MnGa intermediate phase having an orthorhombic lattice. *Smart Mater Struct*, 2005, 14: S197~S200

- 38 OHezcko Y, Söderberg O, Hannula S P, Lindroos V K. Investigation of magnetic domains in Ni-Mn-Ga alloys with a scanning electron microscope. *Smart Mater Struct*, 2005, 14: S211~S215
- 39 Ge Y, Jiang H, Sozinov A, Söderberg O. Crystal structure and macro-twin interface of five-layered martensite in Ni-Mn-Ga magnetic shape memory alloy. *Mater Sci Eng A*, 2006, 438-440: 961~964
- 40 Planes A, Porta M, Castàn T, Saxena A. Magnetostructural tweed in ferromagnetic Heusler shape-memory alloys. *Mater Sci Eng A*, 2006, 438-440: 916~918
- 41 Murakami Y, Shindo D, Kobayashi K, et al. TEM studies of crystallographic and magnetic microstructures in Ni-based ferromagnetic shape memory alloys. *Mater Sci Eng A*, 2006, 438-440: 1050~1053
- 42 Heczko O, Jurek K, Ullakko K. Magnetic properties and domain structure of magnetic shape memory Ni-Mn-Ga alloy. *J Magn Magn Mater*, 2001, 226-230: 996~998
- 43 Ge Y, Heczko O, Söderberg O V K, Lindroos. Various magnetic domain structures in a Ni-Mn-Ga martensite exhibiting magnetic shape memory effect. *J Appl Phys*, 2004, 96: 2159~2163
- 44 Matthew R S, Chopra H D. Temperature and field-dependent evolution of micro magnetic structure in ferromagnetic shape-memory alloys. *Phys Rev B*, 2004, 70: 094427
- 45 Ge Y, Heczko O, Söderberg O, Hannula S P. Magnetic domain evolution with applied field in a Ni-Mn-Ga magnetic shape memory alloy. *Scripta Mater*, 2006, 54: 2155~2160
- 46 Hyatt C V, Farrell S, Armstrong B, et al. Comparison of martensite transformation temperatures in a NiMnGa alloy determined with hot/cold stage optical microscopy and differential scanning calorimetry. *Proc SPIE*, 2003, 5053: 576~585
- 47 Khovailo V V, Oikawa K, Abe T. Entropy change at the martensitic transformation in ferromagnetic shape memory alloys $Ni_{2+x}Mn_{1-x}Ga$. *J Appl Phys*, 2003, 93: 8483~8485
- 48 Jiang C, Muhammad Y, Deng L, et al. Composition dependence on the martensitic structures of the Mn-rich Ni-Mn-Ga alloys. *Acta Mater*, 2004, 52: 2779~2785
- 49 Farrell S P, Dunlap R A, Cheng L M, et al. Magnetic properties of single crystals of Ni-Mn-Ga magnetic shape memory alloys. *Proc SPIE*, 2004, 5387: 186~197
- 50 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. *Smart Mater Struct*, 2005, 14: S236~S238
- 51 Worgull J, Petti E, Trivisonno J. Behavior of the elastic properties near an intermediate phase transition in Ni_2MnGa . *Phys Rev B*, 1996, 54: 15695~15699
- 52 Kokorin V V, Chernenko V A, Pons J, et al. Acoustic phonon mode condensation in Ni_2MnGa compound. *Solid State Communications*, 1997, 101: 7~9
- 53 Mañosa L, González-Comas A, et al. Anomalies related to the TA_2 -phonon-mode condensation in the Heusler Ni_2MnGa alloy. *Phys Rev B*, 1997, 55: 11068~11071
- 54 Dai L, Cui J, Wutting M. Elasticity of austenitic and martensitic Ni-Mn-Ga. *Proc SPIE*, 2003, 5053: 595~602
- 55 Dai L, Cullen J, Wuttig M. Intermartensitic transformation in a Ni-Mn-Ga alloy. *J Appl Phys*, 2004, 95: 6957~6959
- 56 Webster P J, Ziebeck K R A, et al. Magnetic order and phase transformation in Ni_2MnGa . *Phil Mag B*, 1984, 49: 295~310
- 57 Chernenko V A, Vitenko I N. Structural characterization and properties of the Ni_2MnGa ribbon transforming martensitically. *Mater Sci Forum*, 1994, 1: 166~169
- 58 Tickle R. Ferromagnetic shape memory materials: [dissertation]. University of Minnesota, 2000
- 59 Shanina B D, Konchitsa A A, et al. Ferromagnetic resonance in non-stoichiometric $Ni_{1-x-y}Mn_xGa_y$. *J Magn Magn Mater*, 2001, 237: 309~326
- 60 Liu G, Chen J, Cui Y, et al. Characterization of preferential orientation of martensitic variants in a single crystal of Ni-Mn-Ga. *Solid State Communications*, 2004, 130: 687~690
- 61 Hirsinger L. Ni-Mn-Ga shape memory alloys: Modelling of magneto-mechanical behaviour. *Int J Appl Electromagnetic Mech*, 2004, 19: 473~477
- 62 Wang J, Jiang C, Xu H B. Preferential reorientation of twin variants in Ni-Mn-Ga single crystal. *Mater Sci Eng A*, 2006, 438-440: 1022~1025
- 63 Karaca H E, I. Karaman B, Basaran Y I, Chumlyakov H J. Magnetic field and stress induced martensite reorientation in NiMnGa ferromagnetic shape memory alloy single crystals. *Acta Mater*, 2006, 54: 233~245
- 64 Wang Y D, Brown D W, Choo H, et al. Experimental evidence of stress-field-induced selection of variants in Ni-Mn-Ga ferromagnetic shape-memory alloys. *Phys Rev B*, 2007, 75: 174404
- 65 Ma Y F, Li J Y. Magnetization rotation and rearrangement of martensite variants in ferromagnetic shape memory alloys. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 172504
- 66 Pasquale M, Sasso C, Besseghini S, et al. Ni-Mn-Ga polycrystalline magnetically activated shape memory alloys. *IEEE Trans Magn*, 2000, 36: 3263~3265
- 67 Ullakko K, Ezer Y, Sozinov A, et al. Magnetic-field-induced strains in polycrystalline Ni-Mn-Ga at room temperature. *Scripta Mater*, 2001, 44: 475~480
- 68 Jeong S, Inoue K, Inoue S, et al. Effect of magnetic field on martensite transformation in a polycrystalline Ni_2MnGa . *Mater Sci Eng A*, 2003, 359: 253~260
- 69 Bennett J C, Hyatt C V, Gharghoury M A, et al. In situ transmission electron microscopy studies of directionally solidified Ni-Mn-Ga ferromagnetic shape memory alloys. *Mater Sci Eng A*, 2004, 378: 409~414
- 70 Marioni M A, O'Handley R C, Allen S A. Analytical model for field-induced strain in ferromagnetic shape-memory alloy polycrystals. *J Appl Phys*, 2002, 91: 7807~7809
- 71 Dubowik J, Gościańska I, Kudryavtsev Y V. NiMnGa ferromagnetic shape memory films. *J Phys*, 2004, 54: D213~D216
- 72 Kustov S, Corró M, Cesari E. Stress-induced magnetization in polycrystalline Ni-Fe-Ga ferromagnetic shape memory alloy. *Appl Phys Lett*, 2007, 91: 141907
- 73 Hosoda H, Takeuchi S, Inamura T, Wakashima K. Material design and shape memory properties of smart composites composed of polymer and ferromagnetic shape memory alloy particles. *Sci Technol Advan Mater*, 2004, 5: 503~509
- 74 Kusaka M, Taya M. Design of ferromagnetic shape memory alloy composites. *J Compos Mater*, 2004, 38: 1011~1035
- 75 Feuchtwanger J, Griffin K, Huang J K, et al. Mechanical energy absorption in Ni-Mn-Ga polymer composites. *J Magn Magn Mater*, 2004, 272: 2038~2039
- 76 Hosoda H, Takeuchi S, Inamura T, et al. Shape memory behavior of NiMnGa/epoxy smart composites. *Mater Sci Forum*, 2005, 475-479: 2067~2070
- 77 Feuchtwanger J, Marc L R. Large energy absorption in Ni-Mn-Ga/polymer composites. *J Appl Phys*, 2005, 97: 10M319
- 78 Scheerbaum N, Hinz D, Gutfleisch O, Müller K H, Schultz L. Textured polymer bonded composites with Ni-Mn-Ga magnetic shape memory particles. *Acta Mater*, 2007, 55: 2707~2713
- 79 王文洪, 柳祝红等. 铁磁形状记忆合金 $Ni_{52.5}Mn_{23.5}Ga_{24}$ 马氏体相变热滞后的研究. *物理学报*, 2002, 51: 635~639
- 80 柳祝红, 吴光恒, 王文洪等. 内应力对铁磁性形状记忆合金 Ni-Mn-Ga 马氏体相变路径的影响. *物理学报*,

- 2002, 51: 640~644
- 81 高淑侠, 王文洪等. 铁磁形状记忆合金 $\text{Ni}_{52.2}\text{Mn}_{23.8}\text{Ga}_{24}$ 的马氏体相变及其物理表征. 物理学报, 2002, 51: 332~335
- 82 李养贤, 孟凡斌等. 单晶 Ni_2MnGa 中取向内应力对变体分布规律的研究. 物理学报, 2003, 52: 672~676
- 83 蒋成保, 刘敬华, 张涛, 徐惠彬. 定向凝固铁磁形状记忆合金 Ni_2MnGa 的固-液界面形态. 金属学报, 2004, 40: 975~980
- 84 邓丽芬, 李岩, 蒋成保, 徐惠彬. 铁磁形状记忆合金 Ni-Mn-Ga 单晶的马氏体孪晶再取向应力应变行为. 金属学报, 2004, 40: 1290~1294
- 85 崔玉亭, 胡海宁等. 单晶 $\text{Ni}_{52}\text{Mn}_{24}\text{Ga}_{24}$ 中马氏体变体择优取向的物理表征. 物理学报, 2004, 53: 1450~1455
- 86 谢华, 刘剑, 霍颜秋, 李建国. 定向凝固铁磁形状记忆合金 Co-Ni-Ga 的择优取向及其组织演化. 金属学报, 2007, 43: 417~421
- 87 张庆新, 王凤翔等. 磁控形状记忆合金直线驱动器. 中国机械工程, 2004, 15: 1787~1789
- 88 Vasil'ev A N, Bozhko A D, et al. Structural and magnetic phase transitions in shape-memory alloys $\text{Ni}_{2+x}\text{Mn}_{1-x}\text{Ga}$. *Phys Rev B*, 1999, 59: 1113~1120
- 89 Jiang C, Muhammad Y, et al. Composition dependence on the martensitic structures of the Mn-rich NiMnGa alloys. *Acta Mater*, 2004, 52: 2779~2785
- 90 Kim J H, Fukuda T, Kakeshita T. Effects of magnetic field and hydrostatic pressure on the martensitic transformation temperature of Ni-Mn-Ga ferromagnetic. *Mater Sci Eng A*, 2006, 438-440: 952~956
- 91 Kim J H, Inaba F, Fukuda T, Kakeshita T. Effect of magnetic field on martensitic transformation temperature in Ni-Mn-Ga ferromagnetic shape memory alloys. *Acta Mater*, 2006, 54: 493~499
- 92 Liu J, Xia M, Huang Y, et al. Effect of annealing on the microstructure and martensitic transformation of magnetic shape memory alloys CoNiGa . *J Alloy Compd*, 2006, 417: 96~99
- 93 Kainuma R, Imano Y, Ito W, et al. Metamagnetic shape memory effect in a Heusler-type $\text{Ni}_{43}\text{Co}_7\text{Mn}_{39}\text{Sn}_{11}$ polycrystalline alloy. *Appl Phys Lett*, 2006, 88: 192513
- 94 Straka L, Heczko O. Superelastic response of Ni-Mn-Ga martensite in magnetic fields and a simple model. *IEEE Trans Magn*, 2003, 39: 3402~3404
- 95 Mullner P, Chernenko V A, Kosterz G. A microscopic approach to the magnetic-field-induced deformation of martensite (magnetoplasticity). *J Magn Magn Mater*, 2003, 267: 325~334
- 96 Sozinov A, Likhachev A A, et al. Stress- and magnetic-field-induced variant rearrangement in Ni-Mn-Ga single crystals with seven-layered martensitic structure. *Mater Sci Eng A*, 2004, 378: 399~402
- 97 Straka L, Novák V, Landa M, Heczko O. Acoustic emission of Ni-Mn-Ga magnetic shape memory alloy in different straining modes. *Mater Sci Eng A*, 2004, 374: 263~269
- 98 Heczko O. Magnetic shape memory effect and magnetization reversal. *J Magn Magn Mater*, 2005, 290-291: 787~794
- 99 Straka L, Heczko O. Magnetization changes in Ni-Mn-Ga magnetic shape memory single crystal during compressive stress reorientation. *Scripta Mater*, 2006, 54: 1549~1552
- 100 Sarawate N, Dapino M. Experimental characterization of the sensor effect in ferromagnetic shape memory Ni-Mn-Ga . *Appl Phys Lett*, 2006, 88: 121923
- 101 James R D, Tickle R, Wuttig M. Large field-induced strains in ferromagnetic shape memory materials. *Mater Sci Eng A*, 1999, 273-275: 320~325
- 102 Wu G H, Yu C H, Meng L Q, et al. Giant magnetic-field-induced strains in Heusler alloy Ni-Mn-Ga with modified composition. *Appl Phys Lett*, 1999, 75: 2990~2992
- 103 Heczko O, Sozinov A, Ullakko K. Giant field-induced reversible strain in magnetic shape memory NiMnGa alloy. *IEEE Trans Magn*, 2000, 36: 3266~3268
- 104 Murray S J, Allen S M, O'Handley R C. Magneto-mechanical performance and mechanical properties of Ni-Mn-Ga ferromagnetic shape memory alloys. *Proc SPIE*, 2000, 3992: 387~395
- 105 Murray S J, Marioni M, et al. Giant magnetic-field-induced strain in Ni-Mn-Ga crystals: experimental results and modeling. *J Magn Magn Mater*, 2001, 226-230: 945~947
- 106 Malla A, Dapino M, Lograsso T, Schlagel D. Effect of composition on the magnetic and elastic properties of shape-memory Ni-Mn-Ga . *Proc SPIE*, 2003, 5053: 147~158
- 107 Sozinov A, Likhachev A A, Lanska N, et al. Effect of crystal structure on magnetic-field-induced strain in Ni-Mn-Ga . *Proc SPIE*, 2003, 5053: 586~594
- 108 O'Handley R C, Allen S M, Paul D I, Henry C P. Magnetic field-induced strain in single crystal Ni-Mn-Ga . *Proc SPIE*, 2003, 5053: 200~206
- 109 Heczko O, Straka L, Hannula S P. Stress dependence of magnetic shape memory effect and its model. *Mater Sci Eng A*, 2006, 438-440: 1003~1006
- 110 Hirsinger L, Creton N. Stress effect on field-induced detwinning strain hysteresis loops in 5M martensite of $\text{Ni}_{49.9}\text{Mn}_{28.5}\text{Ga}_{21.6}$ alloy. *Mater Sc Eng A*, 2006, 438-440: 1026~1029
- 111 Karaman I, Karaca H E, Basaran B, et al. Stress-assisted reversible magnetic field-induced phase transformation in Ni_2MnGa magnetic shape memory alloys. *Scripta Mater*, 2006, 55: 403~406
- 112 Gans E, Henry C, Carman G P. Reduction in required magnetic field to induce twin-boundary motion in ferromagnetic shape memory alloys. *J Appl Phys*, 2004, 95: 6965~6967
- 113 O'Handley R C, Allen S M, et al. Magnetic-field-induced strain in single-crystal Ni-Mn-Ga . *Proc SPIE*, 2003, 5053: 200~206
- 114 Chen F, Gao Z Y, Cai W, Zhao L C. Strains induced by magnetic field and phase transformation in $\text{Ni}_{50.5}\text{Mn}_{26.2}\text{Ga}_{23.4}$ ferromagnetic shape memory alloy. *J Mater Sci Lett*, 2003, 22: 1241~1242
- 115 Heczko O, Straka L. Temperature dependence and temperature limits of magnetic shape memory effect. *J Appl Phys*, 2003, 94: 7139~7143
- 116 Liang T, Jiang C, Xu H B. Temperature dependence of transformation strain and magnetic field-induced strain in $\text{Ni}_{51}\text{Mn}_{24}\text{Ga}_{25}$ single crystal. *Mater Sci Eng A*, 2005, 402: 5~8
- 117 Straka L, Heczko O, Hannula S P. Temperature dependence of reversible field-induced strain in Ni-Mn-Ga single crystal. *Scripta Mater*, 2006, 54: 1497~1500
- 118 Tickle R, James R D, Shield T, et al. Ferromagnetic shape memory in the NiMnGa system. *IEEE Trans Magn*, 1999, 35: 4301~4310
- 119 Peterson B W, Feuchtwanger J, et al. Acoustic assisted, field-induced strain in ferromagnetic shape memory alloys. *J Appl Phys*, 2004, 95: 6963~6964
- 120 Henry C P, Feuchtwanger J, et al. AC magnetic-field-induced strain of single crystal Ni-Mn-Ga . *Proc SPIE*, 2002, 4699: 164~171
- 121 Faidley L E, Dapino M J, et al. Analytical and experimental issues in Ni-Mn-Ga transducers. *Proc SPIE*, 2003, 5049: 1~12
- 122 James R D, Wuttig M. Magnetostriction of martensite. *Philos Mag A*, 1998, 77: 1273~1299
- 123 DeSimone A, James R. A constrained theory of magnetoelasticity. *J Mech Phys Solids*, 2002, 50: 283~320
- 124 O'Handley R C. Model for strain and magnetization in magnetic shape-memory alloys. *J Appl Phys*, 1998, 83: 3263~3270

- 125 O'Handley R C, Murray S J, Marioni M, et al. Phenomenology of giant magnetic-field-induced strain in ferromagnetic shape-memory materials. *J Appl Phys*, 2000, 87: 4712~4717
- 126 Henry C P, Feuchtwanger J, et al. AC performance and modeling of ferromagnetic shape memory actuators. *Proc SPIE*, 2001, 4333: 151~162
- 127 Murray S J, Marioni M, Tello P G, et al. Giant magnetic-field-induced strain in Ni-Mn-Ga crystals: experimental results and modeling. *J Magn Magn Mater*, 2001, 226: 945~947
- 128 Likhachev A A, Ullakko K. Magnetic-field-controlled twin boundaries motion and giant magneto-mechanical effects in Ni-Mn-Ga shape memory alloy. *Phys Lett A*, 2000, 275: 142~151
- 129 Glavatska N I, Rudenko A A, Glavatskiy I N, et al. Statistical model of magnetostrain effect in martensite. *J Magn Magn Mater*, 2003, 265: 142~151
- 130 Buchelnikov V D, Bosko S I. The kinetics of phase transformations in ferromagnetic shape memory alloys Ni-Mn-Ga. *J Magn Magn Mater*, 2003, 258-259: 497~499
- 131 Hirsinger L, Lexcellent C. Modelling detwinning of martensite platelets under magnetic and (or) stress actions on Ni-Mn-Ga alloys. *J Magn Magn Mater*, 2003, 254-255: 275~277
- 132 Hirsinger L, Lexcellent C. Internal variable model for magneto-mechanical behaviour of ferromagnetic shape memory alloys Ni-Mn-Ga. *J Physique IV France*, 2003, 112: 977~980
- 133 Hirsinger L, Creton N, Lexcellent C. Stress-induced phase transformations in Ni-Mn-Ga alloys: experiments and modeling. *Mater Sci Eng A*, 2004, 378: 365~369
- 134 Kieer B, Lagoudas D C. Magnetic field-induced martensitic variant reorientation in magnetic shape memory alloys. *Phil Mag*, 2005, 85: 4289~4329
- 135 Zhu Y P, Dui G S. Micromechanical modeling of the stress induced superelastic strain in magnetic shape memory alloy. *Mech Mater*, 2007, 39: 1025~1034
- 136 Zhu Y P, Dui G S. Model for field-induced reorientation strain in magnetic shape memory alloy with tensile and compressive loads. *J Alloys Compd*, 2008, 459(1-2): 55~60
- 137 Pei Y M, Fang D N. A model for giant magnetostrain and magnetization in the martensitic phase of NiMnGa alloys. *Smart Mater Struct*, 2007, 16: 779~783
- 138 Chernenko V A, L'vov V A, Cesari E, et al. Stress-strain behaviour of Ni-Mn-Ga alloys: experiment and modeling. *Mater Sci Eng A*, 2004, 378: 349~352
- 139 Tan H H, Elahinia M H. Dynamics modeling of ferromagnetic shape memory alloys (FSMA) actuators. *Proc SPIE*, 2006, 6173: 617308
- 140 Arndt M, Griebel M, Novák V, et al. Martensitic transformation in NiMnGa single crystals: Numerical simulation and experiments. *Int J Plasticity*, 2006, 22: 1943~1961
- 141 Stoilov V. A multiscale model of reorientation in magnetic shape memory alloys. *Smart Mater Struct*, 2007, 16: S1~S10
- 142 Couch R N, Chopra I. A quasi-static model for NiMnGa magnetic shape memory alloy. *Smart Mater Struct*, 2007, 16: S11~S21
- 143 Marioni M A, O'Handley R C, Allen S M. Analytical model for field-induced strain in ferromagnetic shape-memory alloy polycrystals. *J Appl Phys*, 2002, 91: 7807~7809
- 144 Liang Y, Wada T, Tagawa T, Taya M. Model calculation of stress-strain relationship of polycrystalline Fe-Pd and 3D phase transformation diagram of ferromagnetic shape memory alloys. *Proc SPIE*, 2002, 4699: 206~216

DEVELOPMENTS IN RESEARCH ON MECHANICAL BEHAVIOR OF FERROMAGNETIC SHAPE MEMORY ALLOYS*

ZHU Yuping[†] DUI Guansuo

Institute of Mechanics, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract Ferromagnetic shape memory alloy (FSMA) is a new class of functional material. In addition to the general behaviors of traditional temperature-controlled and stress-controlled shape memory, FSMA can produce large strains under an external application in moderate magnetic fields. This ability makes FSMA suitable for a wide range of applications. This paper reviews the research on mechanical behaviors of FSMA. It focuses on the study of the mechanical behavior, and also includes the topic of the application of the materials. It summarizes the effects of the crystal component, the magnetic field, the stress, and the temperature on the mechanical behavior of the material. It also summarizes the developments of a constitutive model for ferromagnetic shape memory alloy.

Keywords ferromagnetic shape memory alloy, mechanical behavior, constitutive model, magnetic field, stress, strain

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (50539030, 90205007, 10772021) and the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, State Education Ministry

[†] E-mail: zhuyuping@126.com