

Heusler 合金中的磁性相变材料

张玉洁¹ 张亚九² 吴光恒^{3,†}

(1 河北工业大学材料科学与工程学院 天津 300401)

(2 广州大学土木工程学院 广州 510006)

(3 中国科学院物理研究所 北京凝聚态物理国家研究中心 北京 100190)

2022-08-10收到

† email: ghwu@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20220907

1 引言

Heusler 合金是一类材料的总称。大约在1996年,从这个古老的材料家族中兴起了一个引人注目的研究热点:磁性相变材料。针对它在磁、热、力等多重物理作用下可以反馈相变物性的特点,人们把它归属于智能材料之列。全球参与研究磁性相变材料的课题组前前后后总共有五六十个之多,开发出了几十种新材料亚种,展示了很多新奇有趣的物理现象,揭示了各种相变结构演绎,发现了一个全新的合金体系,并尝试了一些器件应用。相关研究持续了近30年,这是电子学、信息社会、物联网的飞速发展,以及人工智能的美好愿景所共同促成的科研活动。

2 Heusler 合金

虽然被称为“合金”,Heusler合金实际上是原子择优占位的金属间化合物。它是德国化学家Fritz Heusler (1866—1947)在1903年发现的^[1]。

Heusler合金的分子通式是 X_2YZ ,其中 X 和 Y 是两种过渡族元素, Z 是主族元素。Heusler合金具有体心立方结构,如图1所示。原子的占位特点可以解析为:如果 X 元素的电负性比 Y 强(周期表位置相对靠右), X 就自占一层, Y 与主族元素相互间隔着占据另一层,以此

周期排列;如果 Y 在周期表上相对偏右,则 Y 就与一半 X 占一层,另一半 X 与主族元素占一层。因此,Heusler合金有两种结构,前者是 $L2_1$ 结构,后者为 Hg_2CuTi 结构。

Heusler合金的原子比较容易通过热处理换位,这为调控电子结构和磁性提供了便利条件,是开发新材料的理想物构。

3 Heusler 型磁性相变材料

Heusler型磁性相变材料指的是Heusler合金中兼有磁性和马氏体相变特性的那些材料。

马氏体相变是一种晶体结构变化。由于外界物理作用,比如温度、外力或者磁场的变化,一些材料的晶体结构会失去稳定性,原子发生短距离(通常是晶格常数的百分之几)的移动,导致结构畸变(图2(a))。这是一种非原子扩散型的结构变化,称为马氏体相变。

在发生马氏体相

变时,结构畸变将带来很大的晶格弹性性能。系统为了降低这些能量,会产生很多马氏体变体,变体借助相互之间的孪晶界滑移,自动协调排列成能量较低的状态,同时在材

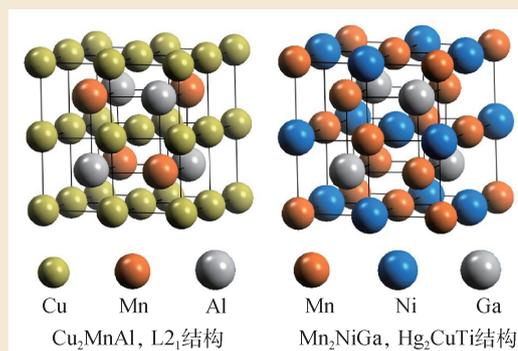


图1 Heusler合金的两种晶体结构

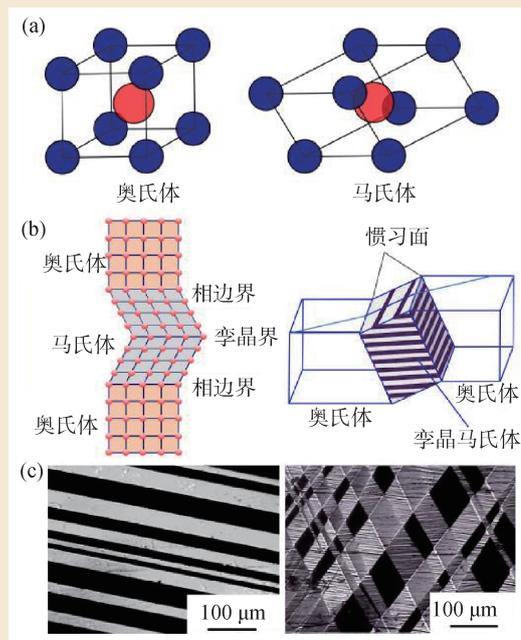


图2 马氏体相变的结构变化(a)、变体生成(b)、表面浮凸(c)

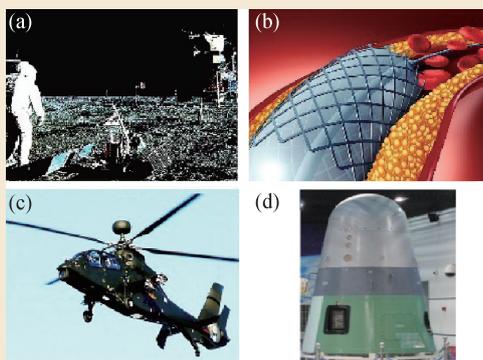


图3 形状记忆合金的用途。利用形状记忆一次性动作的太阳电池板展开(a)、血管支架(b);利用超弹性效应的直升机桨叶减震(c);利用材料的双向形状记忆效应,根据温度的反复变化而开闭卫星窗口的“无源”驱动器(d)(图片(a)–(c)来源于网络)

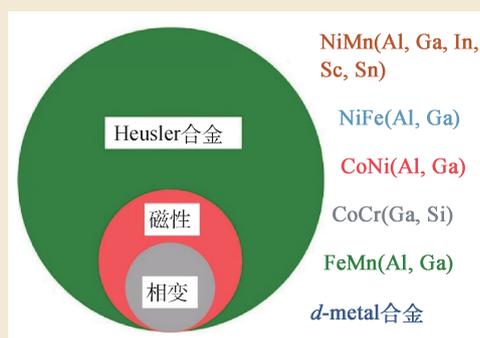


图4 Heusler型磁性相变材料

料的表面形成千奇百怪的浮凸(图2(b), (c))。

结构变化会带来很多物理效应。例如,电阻和磁性的变化、吸热放热反应、形状变化、能带重构,等等。马氏体相变的一个重要特性是形状记忆效应:由于两种结构相互转变和变体滑移,材料外形发生明显变化并恢复原态。如果形变是应力诱发的,也称为超弹性。

形状记忆合金已经有了很多用途(图3)。目前应用较为成熟的材料是NiTi合金,但它是没有磁性的。而Heusler型磁性相变材料则兼有磁性和形状记忆特性,所以也被称为磁性形状记忆合金(magnetic shape memory alloys, MSMAs)。

并不是所有Heusler合金都有磁

性,具有马氏体相变的Heusler合金则更少。值得注意的是,目前已知的Heusler型相变材料都是有磁性的(图4)。目前已知有6个磁性相变材料体系,每个体系的种类多少不一,一共有十多种。

Heusler型磁性相变材料的高温母相是体心立方结构,相变使之转变为低温马氏体相,结构变成四方、正交、单斜等。磁性与结构耦合在一起,相变过程中,磁性跟着结构变。

第一个发现的Heusler型磁性相变合金是Ni₂MnGa^[2]。在20世纪80年代,人们已经详细描述了它的结构变化和磁性变化。截至目前,最后一个发现的是“全d金属Heusler合金”(all-d-metal Heusler alloys, 后文简称d-metal合金)^[3]。

4 物理特性

这里介绍Heusler型磁性相变材料一些有趣的物理特性。

4.1 相变导致的物性突变

一般说来,奥氏体与马氏体的物理性质总是不一样的。因此,测量这些物理参数的温度关系,常常可以获得带有拐点的曲线。图5是Heusler合金Ni₂FeGa的测量结果。奥氏体是高温相,马氏体是低温相;从高到低的相变称为马氏体相变,而反过来称为马氏体逆相变。可以看到,由于马氏体的电阻高于奥氏体,所以电阻曲线在降温相变

时“上跳”,逆相变时“下跳”。马氏体的饱和磁化强度高于奥氏体(图5(a)插图),但低场磁化强度却相反。所以图5中的低场磁化曲线在降温相变时是“下跳”的。从磁和电的相变曲线可以测得,相变和逆相变之间的温度滞后仅为25 K。窄滞后是Heusler型磁性相变材料的一个特点。图5(b)是形状记忆的示意图^[4]。

4.2 磁场驱动相变

传统马氏体相变可以由温度变化和外加应力来驱动,而磁性相变材料则带来了第三种驱动作用,即磁驱动。这是因为磁化时,磁场拉动磁矩沿磁场方向运动,磁矩又通过自旋—轨道耦合牵动晶格,导致结构变化。研究表明,磁化使结构趋向于磁性强的相,磁场支持强磁相的存在。因此,磁场驱动的结果只能发生在对弱磁相加场,使体系向强磁相转变的场合。被驱动的可以是相变,也可以是逆相变,由哪个相磁性更强决定。磁场驱动相变可以从热力学的Clausius—Clapeyron方程唯象地理解:

$$\frac{dT}{dH} = -\frac{\Delta M}{\Delta S}, \quad (1)$$

其中, T 是马氏体相变温度, H 是磁场, ΔM 是两相的饱和磁化强度差值, ΔS 是相变时的熵变。公式表明,磁场 H 可以“移动”相变温度 T ,幅度的大小由 $\Delta M/\Delta S$ 的值决定,方向则是朝着低磁性相所在的温区移动。可以想象为,在低磁性相施加磁场,相变温度从高磁性相温区移动过来,当相变温度跨越所在温度时,此处就变成高磁性相存在的温区了,系统即可能发生相变。

图6(a)是四元Heusler合金单晶样品的磁场驱动相变。样品的成分

是为了获得较大的 $\Delta M/\Delta S$ ，突出磁场作用特别设计的^[5]。马氏体是亚铁磁的弱磁性，而奥氏体是强铁磁性， ΔM 高达80 emu/g，磁化在马氏体相温区进行。可以看到，在磁化的升温过程中，磁化强度出现了一个陡峭的升高，这对应着磁场驱动马氏体变成了奥氏体(逆相变)。在退磁过程中，磁化曲线经过一个滞后，然后陡峭地下降，对应着奥氏体恢复为马氏体的“正”相变。如图6(a)所示，越接近相变温度，临界磁场就越低，相变驱动就越容易。图6(b)是磁场驱动相变时磁电阻的变化。磁场驱动相变也会带来宏观形状的变化，称为磁场驱动的相变应变。在NiMnCoIn合金中曾经测量到3%的应变值^[6]。

4.3 磁应变

磁应变是马氏体变体被磁场驱动的滑移引起的宏观形变。变体中的磁畴取向各有不同，磁化导致的畴壁移动会产生内应力，推动变体滑移。这将导致材料外形的变化，称为磁应变。退磁时，滑移产生的内应力再把变体拉回原位。图7(a)是在NiMnGa <001>取向单晶上测量到的磁应变，形变量最高可达1.2%。宏观看，这像是磁致伸缩效应，不过形变量要大得多。图7(b)是磁场作用下变体移动的示意图^[4]。

4.4 磁场诱导的形状记忆效应

Heusler型磁性相变材料与NiTi合金一样，具有形状记忆特性。但由于它有磁性，使得形状记忆可以进一步被磁场调控。图8展示了NiMnGa合金<001>取向单晶在磁场下的形状记忆测量。可以看到，零磁场下样品降温相变，长度收缩-1.2%；升温逆相变膨胀同样的形

变量，恢复原形，完成了普通的形状记忆。但如果在<001>方向加上磁场，则形变值会随着磁场的增强而增大，最高可达4%，并在大约1.0 T时饱和。如果把磁场转个方向，施加在<010>方向(样品的侧面)，则原本的初始形状变化从收缩变成了伸长。这就是磁场的诱导作用：磁场可以增减变体的滑移距离，可以改变变体的滑移方向。磁场诱导形状记忆是磁应变(图7)作用在变温相变中的体现。

4.5 动力学阻止

动力学阻止(dynamic arrest)是相变的反动力，也就是我们常说的势垒。一般把马氏体相变的势垒考虑成相边界移动的阻力。在相变的滞后区里，虽然两相已经有了自由能差，但因为系统尚未具备足够的动力学能量来克服势垒，相变并不发生，这就是动力学阻止。我们这里讨论的是Heusler型磁性相变合金经过磁场干预之后，在早已满足相

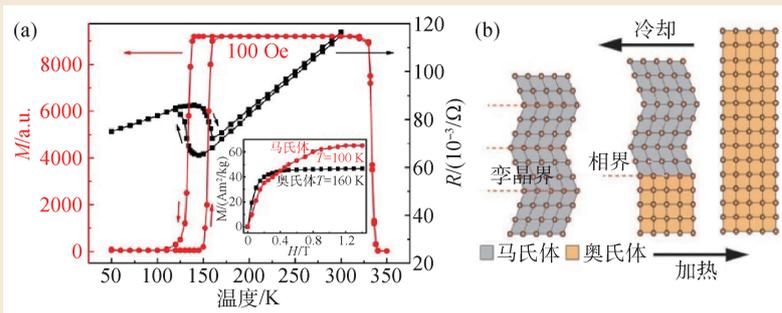


图5 (a) Ni₂FeGa合金的磁化强度和电阻随温度的变化，插图为奥氏体与马氏体的磁化曲线；(b)形状记忆示意图(图b的绘制模仿了文献[4])

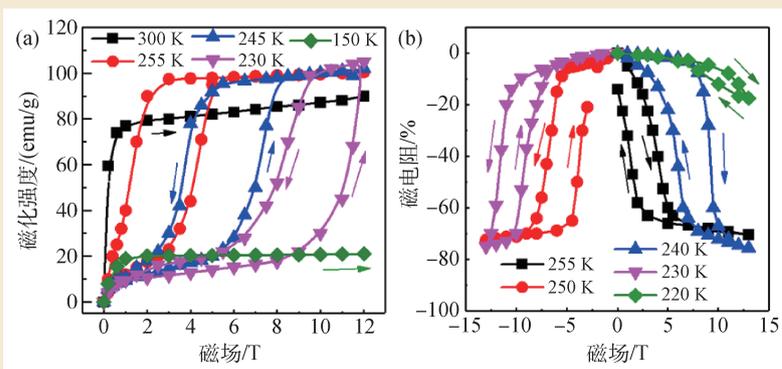


图6 Ni₄₁Co₉Mn₃₁Sb₁₁合金的磁场驱动相变过程中磁化(a)和磁电阻行为(b)(材料的自然相变温度大概为260 K)

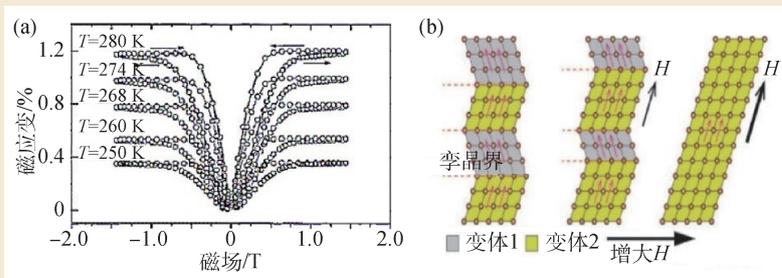


图7 (a)NiMnGa单晶的磁应变；(b)磁场推动变体滑移的示意^[4]

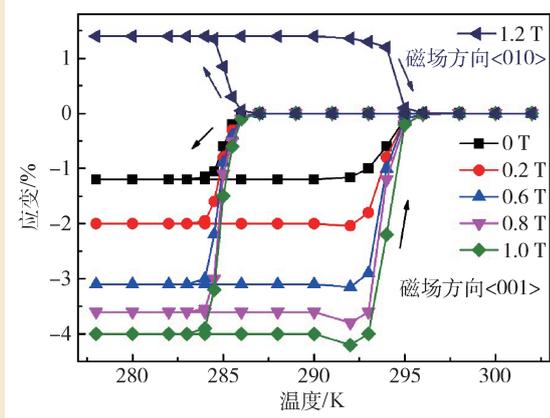


图8 NiMnGa合金$\langle 001 \rangle$取向单晶样品的磁诱导形状记忆效应(负值表示收缩)

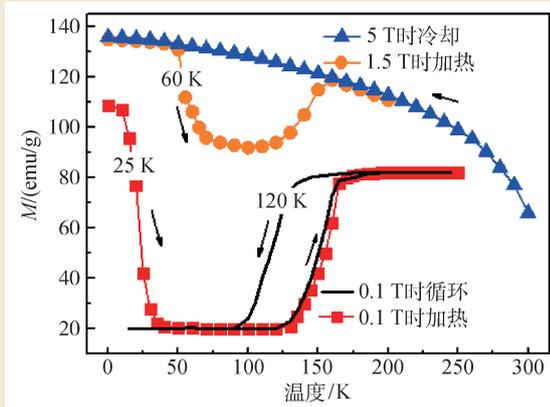


图9 四元Heusler合金NiMnCoSb的动力学阻止行为

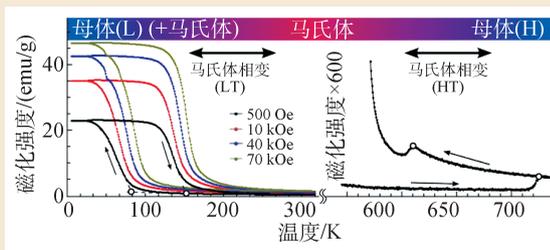


图10 CoCrSiGa中的再入式马氏体相变。降温时100 K附近的磁化强度值增加对应马氏体到奥氏体的逆相变^[7]

变热力学条件的状态下反而“按兵不动”，表现出热激活能依赖的动力学条件主导的现象。

图9是磁场干预磁性相变材料导致动力学阻止的实验结果。先测量一个0.1 T低磁场的温度循环(黑线)，可以看到样品在120 K之下即可发生马氏体相变。由于奥氏体为高磁性，马氏体为低磁性， ΔM

120 K发生的马氏体相变，反倒是在升温过程中，在25 K的温度发生了。这是因为升温使晶格振动加强，热激活能增加，动力学条件得以满足，系统最终得以翻越势垒，表现出了动力学依赖现象。如果升温时施加适中的1.5 T磁场(橙线)，相变则要在更高的60 K才能发生。这说明此时磁场的作用是增高相变势垒

很大，加上5 T的高场降温(蓝线)，相变温度就被一直推移下去(公式(1))，直至5 K相变也没有发生。此时再把磁场降低到0.1 T(以保证磁测量)，样品仍然保持着奥氏体才有的100 emu/g的高磁化强度(红线)，说明样品在5 K温度下并没有因为撤去了磁场而发生马氏体相变。

这就是动力学阻止现象。被高场“带”到低温的奥氏体，因为低温下(5 K)的晶格振动太弱，系统没有足够的热激活能越过势垒，所以撤掉磁场样品仍然保持奥氏体状态。此时再把样品升温(红线)，在大约25 K时磁化强度突降。这对应着奥氏体到马氏体的相变，说明本该在降温过程中

的，与一般认为的磁场改变的是热力学条件的概念正相反。由此可见，动力学阻止研究可以把热力学和动力学的作用相互剥离开来，同时又表明热力学和动力学条件之间是可以相互转换的。这是一个研究马氏体相变机制的好方法。

4.6 磁性相关再入式马氏体相变

Heusler型磁性相变合金CoCrSiGa是日本东北大学Kainuma教授团队发现的新材料，表现出特有的再入式马氏体(逆)相变现象^[7]，如图10所示。

CoCrSiGa在大约730 K时即发生了马氏体相变，因此室温下是马氏体相。但继续降温到大约100 K，马氏体却发生了逆相变，变成了奥氏体(图10)。这个材料有两个结构相同的奥氏体，一个在730 K以上，一个在100 K以下，降温时材料两次进入同一结构。这是因为降温过程中奥氏体的磁化强度不断增强，降低了自由能，与马氏体的热力学能量差不断增大，最终导致了逆相变。从图中可见，如果在降温时加上磁场，则再入式相变的温度向高温漂移，这就是前面提到的外加磁场支持高磁性相的作用。CoCrSiGa的再入式马氏体相变强烈地暗示着结构的稳定性与磁性的密切关系，是深入研究磁与相变关系的合适对象。

4.7 d-metal 合金

d-metal合金是在2015年发现的全新磁性相变金属间化合物^[3]。它的晶体结构与传统Heusler合金一致，只是成分中主族元素被过渡族金属中的Ti或V所代替，它们的价电子数目少，可以起到类似主族元素的共价作用，所以称之为“全d金属Heusler合金”。在传统Heusler合金中，主族与过渡族元素以p-d

电子杂化的方式实现共价作用；而在 d -metal 中，Ti 和 V 与其他过渡族元素的 $d-d$ 电子杂化与之异曲同工（图 11）。从图中的电子结构计算结果可以看到，价电子都集中在 Ga 或 Ti 周围，这是典型的共价键形态。 d -metal 的价电子聚集比较“散”，意味着共价作用相对较弱。

将 NiMn 基 Heusler 型磁性相变材料的主族用 Ti 或 V 取代以后，所有磁性相变物理特性在这个合金体系全盘复现，包括磁场驱动相变、磁驱相变应变、磁熵变、相变电阻和磁驱相变电阻等^[3]。 $d-d$ 弱共价作用带来了一些独特的物性，最显著的是良好的力学性能，压缩强度高，相变体积变化可达 -2.54% ^[8]，以及可观的热效应，相变熵变可达 $-53 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ^[9, 10]。弱共价作用会导致 Mn 原子更多的错占位，造成反铁磁结构，解决的方法是掺入交换作用强的 Co 或 Fe 以加强铁磁性^[11]。

5 应用研究示例

Heusler 型磁性相变材料的应用研究很多，这里举两个例子略加讨论。

5.1 驱动器

图 12 是笔者在一次学术会议上见到的芬兰某公司用磁相变材料 NiMnGa 合金制作的供演示用的驱动器。这个器件的核心部分是一根 NiMnGa 合金棒，施加变化的磁场，合金棒就在磁场的驱动下变化自身的长度。工作原理就是前面图 7 所示的磁应变。驱动它的是交变电磁场，动力通过中心轴的上下运动输出。输入电流并不很大，所以连续运行时外壳并不热。这说明器件大概有个内置永磁体，使材料处于最佳的工作状态，最大限度发挥电磁

场的作用，有效地降低了能量损耗。这种器件可以用于各种小型机械，比如机械手、关节等的动作驱动。

有一种看法认为，马氏体变体很容易滑移，因而输出的能量密度不高，即材料表现很“软”。这种说法来源于仅考虑了材料本身，而忽略了器件结构。马氏体在自由滑移被约束后，会像液压传动那样定向输出大驱动力。虽然制造者没有说明输出力的具体数值，但笔者当时故意用力按压输出轴，并不能妨碍输出动作，没有想象中“软”的感觉。

5.2 应力诱发的 BCC—FCC 相变

前面提到 Heusler 合金天生脆脆，变形加工困难，成为推广应用的瓶颈之一。但在 FeMnGa 合金中发现了一种应力诱发的结构相变，可以用来解决这个问题。如图 13 所示，在冷轧的切应力作用下，硬脆的体心立方(BCC)结构奥氏体发生相变，转变为柔韧的面心立方(FCC) γ 相，避免了碎裂，实现了变形。变形后的 γ 相再通过一次热处理，即可恢复体心立方结构且使原子占位更加有序(即 B_2)，具有了马氏体相变功能^[12]。把 FeMnGa 的应力相变原理弄清楚后，或许能够用来解决其他材料的脆性问题。

20 多年来，尽管研究者做出了很大努力，但 Heusler 型磁性相变材料在应用方面的进展并不大。其中原因有材料缺点、器件设计、领域需求和商业规律等诸多因素。作为智能材料的磁性相变材料，目前主

要处于基础研究阶段，研究内容主要包括新材料开发、材料改性、器件研究，以及相变起源等。

6 研究展望

Heusler 型磁性相变材料的特性引起了许多研究者的兴趣。从 20 世纪末以来，先后引起了全世界不下 50 个研究组的跟进研究。将 Heusler 家族中磁相变的成员从一两个增加到十几个，并进行了深入细致的研究^[13]。研究很快超出了 Heusler 合金范围：包括 FePd/FePt，六角 $MM'X$ (M, M' 为过渡族金属， X 为主族元素)等磁性相变合金，开发出了 MnAs 合金^[14]，以及发现了全新的 d -metal 合金^[3]。在 Fe 基磁性形状记忆合金中发现了宽温区等值超弹性等新奇的物理现象^[15]。差不多与此

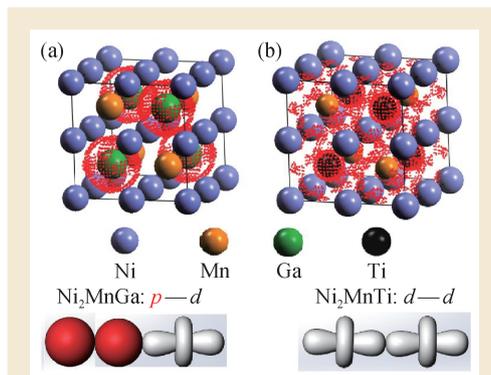


图 11 Heusler 合金 Ni_2MnGa (a) 和 d -metal 合金 Ni_2MnTi (b) 的电子结构，以及电子杂化



图 12 用 NiMnGa 制作的磁驱动器

同时，国际上开始重视磁熵变的研究^[16]，磁性相变材料一级相变的大熵变与磁场驱动相变的特点吸引了很多研究团队，做出了许多高水平的研究成果。有关详情可见相关文献^[17, 18]。

Heusler 合金研究得越多，显现出的科学问题也越多。有眼光的研究者不会因为一时看不到应用前景就认为基础研究没得做。下面列举一些粗略的展望，供读者参考。

(1) 发现新材料是永恒的话题。众多 Heusler 合金，只有少量有相变。如果能够发现结构失稳的“密钥”，就可以对其他材料赋予相变能力，新材料会多得多。图 4 中显示的“会”相变的都有磁性并非偶然。前面我们也多次看到磁性干预相变的例子。磁性应该是涉及结构稳定性的一个重要因素。我们的团

队曾经发现过磁性导致原子错占位影响晶体结构形成的证据^[19, 20]。有意识地研究相变起源，可以避免盲目“炒菜”，更多地利用已有的物理经验。

(2) 新材料到哪里去找？过去 20 多年磁性相变新材料的出现目不暇接。它们的“出身”都有个共同点：它们的雏形都是在 20 世纪 60—80 年代发现的。笔者曾经问过荷兰阿姆斯特丹大学的 Bruck 教授，是怎么发现 MnFePAs 这个材料的？他告诉我：“查手册”。笔者相信，仍有新材料的原型埋藏在过去的文献中等待发掘，比如 Co_2NbSn ^[21]。

(3) *d*-metal 合金是 3 个 3*d* 元素的简单组合。人类的冶金史尽管悠久，但周期表中即使我们最熟悉的区域也并没有被彻底地排列组合，研究完毕。其实，*d*-metal 的“蛛丝

马迹”在很久以前已经出现过：图 1 中的 Heusler 合金结构之一， Hg_2CuTi 是不是已经在暗示人们，可以用 Ti 来代替主族元素了呢？另外，既然 Heusler 合金的“*d*-metal 化”可以成功，那么是不是应该到其他含有主族元素的合金中去尝试一下呢？实践证明，发现新材料并不特别地依赖高端设备和雄厚资源，重要的倒是敬畏、平和和耐心等人格因素，以及调动科研第一线学生的热情。

(4) Heusler 型磁性相变材料的周边成分趋于多相化，即出现多种其他结构的物相。出于物理研究的习惯，它们往往被当做“杂相”去除，以便获得单纯的物性。但是，很少看到这些杂相被系统地研究。怎么知道它们中间不会出现新的磁性材料呢？另外，“杂相”能够被消除的事实，意味着可以在同一成分中，经由不同的动力学途径，调控特定物相的出现、消失、混合及编织。这也许是今后材料改性的思路之一。

(5) 马氏体相变过程中，许多物理性质，如变体滑移、磁畴排列、磁性转变、输运性质、共价作用等都会展现一个变化过程。变化速度在现在的测量技术面前相当于“慢放镜头”，是研究电子云分布和能带构建等微观过程的理想平台。而目前的研究往往集中在相变结果，较少关注相变过程。比如，从铁磁变成反铁磁的磁结构转变是在晶格畸变的哪个阶段发生的？至今尚未见到详细的研究结果。只要测量速度在声速量级，比如用脉冲磁场来驱动相变，就有可能把磁矩旋转从晶格畸变中剥离出来。观察结构和磁性的变化过程，是研究相变起源和

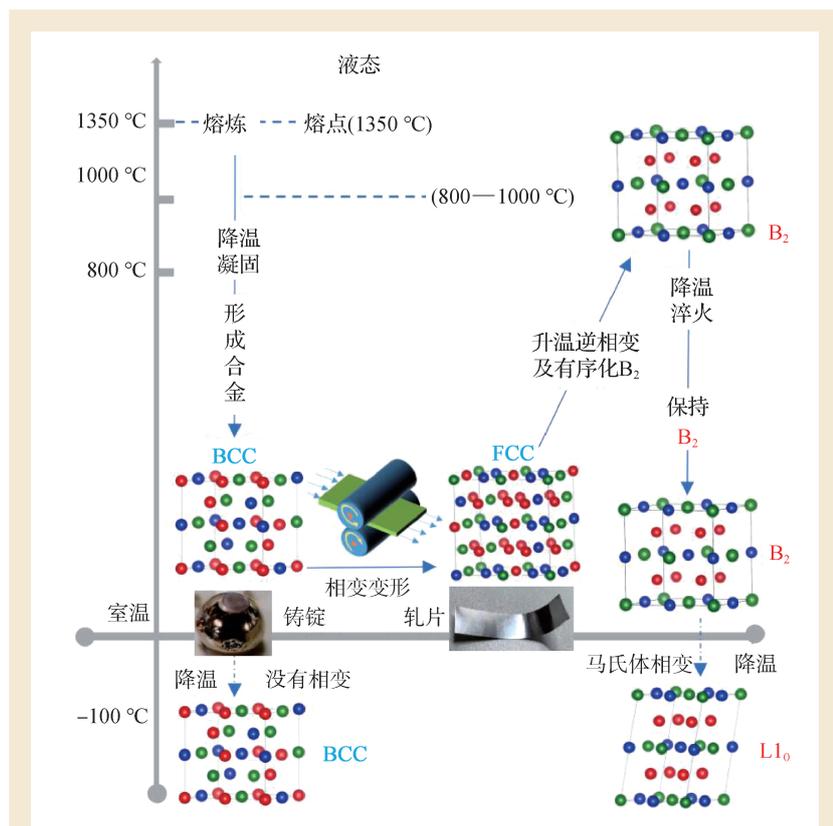


图 13 FeMnGa 的 BCC—FCC 应力相变和性能恢复工艺过程

交换作用的一个新视角。

(6) 前面提到的阅读文献、筛选材料, 以及脉冲磁场测量, 都是并不特别费钱和依赖大型设备的科研课题, 无论体量大小和资源厚薄的科研团队都能做。不“拼”条件的课题, 更考验研究人员善于观察思考、“坐得住板凳”和“眼里有活”的科研素质。从这个意义上来说, 在新材料面前, 所有科研团队都站在同一起跑线上。

参考文献

- [1] Heusler F. Verh. Dtsch. Phys. Ges., 1903, 5:219
- [2] Webster P J, Ziebeck K R A, Town S L *et al.* Phil. Mag. B, 1984, 49:295
- [3] Wei Z Y, Liu E K, Chen J H *et al.* Appl. Phys. Lett., 2015, 107:022406
- [4] 左良, 李宗宾, 闫海乐等. 金属学报, 2021, 57(11):1396
- [5] 于淑云. 中国科学院物理研究所博士论文, 2008
- [6] Kainuma R, Imano Y, Ito W *et al.* Nature, 2006, 439:957
- [7] Xu X, Omori T, Nagasako M *et al.* Appl. Phys. Lett., 2013, 103:164104
- [8] Wei Z Y, Liu E K, Li Y *et al.* Appl. Phys.

7 结语

Heusler 合金已经有 120 年的历史了, 至今仍然新事物不断。不仅仅是磁性相变, 每当人们有了新的物理灵感, 往往都会发现 Heusler 合金里本就存在着对应的材料。比如, 半金属、拓扑绝缘体、磁性拓扑材料, 以及磁性斯格明子等等。Heusler 型磁性相变材料的研究过程告诉我们, 新材料是人类新理念的物

质体现, 新材料存在于已知的结构之中, 等待着自身科研素质的提升和实验发现。

致谢 笔者对本文写作过程中刘恩克、魏志阳、曾庆祺、柳祝红、刘俊明以及张西祥给予的有益讨论和热情帮助深表谢意。文中较多参考了于淑云博士论文中的图片, 对此也一并致谢。

- Let., 2016, 109:071904
- [9] Wei Z Y, Sun W, Shen Q *et al.* Appl. Phys. Lett., 2019, 114:101903
- [10] 刘恩克, 魏志阳, 王文洪等. 一种磁相变材料. 中国专利公开号: CN105986322B, 2018. 以及在美国(2019)、日本(2018)和欧盟(2020)的相同专利
- [11] Zeng Q Q, Shen J L, Zhang H N *et al.* J. Phys.: Condens. Matter, 2019, 31:425401
- [12] Zhang Y J, Wu Z G, Hou Z P *et al.* Appl. Phys. Lett., 2021, 119:142404
- [13] 蒋成保, 花慧, 王敬民. 稀有金属, 2017, 41(5):505
- [14] Tegus O, Bruck E, Buschow K H J *et al.* Nature, 2002, 415:150
- [15] Xia J, Noguchi Y, Xu X *et al.* Science, 2020, 369:855
- [16] Zhang X X, Wei H L, Zhang Z Q *et al.* Phys. Rev. Lett., 2001, 87:157203
- [17] 沈俊, 莫兆军, 李振兴等. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51(6):15
- [18] Liu E K, Wang W H, Feng L *et al.* Nat. Commun., 2021, 3:873
- [19] Zhang Y J, Li G J, Liu E K *et al.* Phys. B: Condens. Matter, 2014, 454:1
- [20] 朱伟, 刘恩克, 张常在等. 物理学报, 2012, 61:027502
- [21] Terada M, Fujita Y, Endo K. J. Phys. Soc. Japan, 1974, 36:620

新书推荐

《磅礴为一》是中国科学院物理研究所曹则贤研究员继《一念非凡》和《惊艳一击》之后创作的“科学教育一字系列”的第三本, 书名语出庄子《逍遥游》“磅礴万物以为一”, 副标题“通才型学者的风范”则明确了本书的主角为科学史上一些被称为 polymath 的巨擘。本书包括序言、引子(庄周与李白——兼论学者的气象)以及正文十二篇, 正文每篇介绍一位通才型学者, 内容包括小传、主要学术

成就分析及其在科学史上的影响等, 力图揭示这些科学巨擘做出改变世界的发现背后的思想渊源, 涉及人物有伽利略、帕斯卡、欧拉、托马斯·杨、克里福德、格拉斯曼、哈密顿、勒庞、庞加莱、薛定谔、彭罗斯等。本书力求传达一个观念: 渊博, 渊博, 欲成渊之深, 必先为其博。认真探讨通才型学者的教育过程、成长过程及其创造生涯, 对于未来学者的培养或有些许启发意义。

读者和编者

