

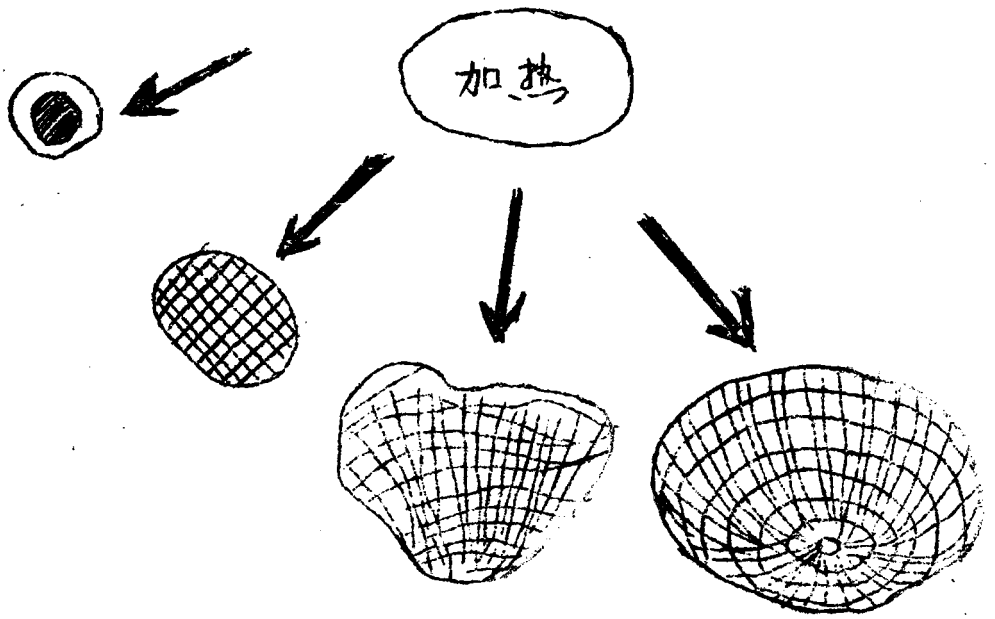
国外形状记忆效应合金的研究工作现状及其应用

李明芳、刘列义、周宏利

一、前言

近几年来，在金属材料领域中对一种现象引起了广泛的注意，它就是美国海军武器实验室 Buehler 取名的“形状记忆效应”(SME)。所谓形状记忆效应就是能使一种马氏体状态明显塑性变形的材料在加热到某一较高温度时会恢复其变形前的原来的形状。图 1 示出了 Nitinol 合金的形状记忆效应。它是有母相(或奥氏体相)状态的 Nitinol 合金线材制成的天线。随着由母相转变为马氏体相，原来张开的天线“压缩了”。但加热到 50°C 以上时，它又恢复了原来的形状。这种现象使科学研究和工程应用均感兴趣。许多研究者对这种神秘的有趣的现象通过透射电子显微镜、光学显微镜，以及扫描电子显微镜等实验手段从金相学和结晶学方面给予评定。发现这种形状记忆效应取决于热弹性马氏体相变的发生，而马氏体热弹性行为的产生则归因于母相和马氏体的有序化。已经发现具有这种形状记忆效应的合金已达几十种之多，其中 NiTi 等合金已作工程应用。

自七十年代初期开始，美国、苏联、英国、西德、日本等国均在重视这方面的研究，其中美国、苏联首当其冲。自那时以来，有关形状记忆效应的科学文献日益增多，这也充分说明了国外对此课题的兴趣之大。对此实感兴趣不只是因它具有广泛的潜在应用，而有些应用则属于科学幻想范畴，还因为提出了许多有关马氏体相变问题的缘故。



254 mm直径的半球形天线,10密耳直径Nitinol合金线材焊接结构件

张开条件——加热或通电

记忆温度=1200°F(500°C)

张开温度=150~200°F(83°C~111°C)

图1: 由NiTi线材材料制成的可张开的天线。该装置先在奥氏体状态加工并在转变为马氏体之后被压缩。

二、形状记忆效应合金的发展历史

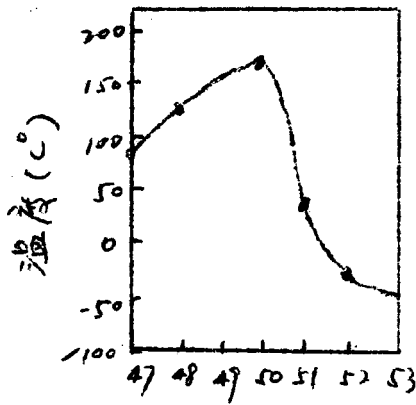
形状记忆效应是由美国海军武器实验室 (U.S. Naval Ordnance Laboratory, 缩写成 NOL) 的 William J. Buehler 冶金研究员发现的。他曾在一篇文章中回忆了这种偶然的发现。事情的经过是这种的: Buehler 冶炼并铸造了一些“指状”的近等原子 NiTi 合金棒, 想把这些棒热旋锤成条材并随后拉拔成线材。他拿了四根“指状” NiTi 合金棒用砂轮剥去不规则的表面。期间, 他发现其中的两根棒在近室温下敲击时发出沉闷的声音, 而另外两根仍热的棒敲击时却发出铜铃般的锐耳的声音。将这四根棒扔在水泥地上同样发现了它们的阻尼性的不同, 但仍不能使他相信阻尼性和温度间会有任何关系。于是他去向冶炼的人这些棒的成份是否有变化。在证实这些棒的成份未变之后, 他把这两根仍热的棒放在水池边冷却到室温, 再次将这两根棒扔在水泥地上, 这时却发出了沉闷的声音。而后, 他又将这些已冷却的棒在即将沸腾的水中加热, 这时敲击它们又发出响亮的声音了。因而他意识到 Nitinol 合金的电阻和弹性发生了变化。有关近似化学计算的 NiTi 合金的阻尼曲线示于图 2。后来他又做了试验, 并发现了这种形状记忆效应。这种稀罕的形状记忆效应因此而闻名于世。

其实, 这种形状记忆效应并不是 Buehler 的新发现, 它可追溯到 1938 年。钢的马氏体相变已为大家所熟知之后, Kurdjumov 和他的同事们在 1938 年观察到某些 Cu-Zn 和 Cu-Al 合金在冷却及加热时有一种可逆的马氏体相变。还有人认为, 这类可逆的马氏体相变合金具有“热弹性”平衡, 其特点是降低温度或在 M_s 温度 (马氏体开始生成的温度) 以上的某一温度下加应力时会转变成马氏体。同样地, 当升高温度或移去外应力时会使马氏体相逆转变。

1951 年, Chang 和 Read 在 Au-Cd 合金中也观察到了这种热弹性行为。此外, 他们还发现 Au-47.5 (原子)% Cd 合金

在马氏体状态下非常软，变形极其容易，而且在由马氏体相逆转变为母相的过程中业已变形的形状能够获得恢复。在逆转变过程中形状回复之后，无残余永久变形。这就是现在已众所周知的形状记忆效应。

自 Chang 和 Read 的研究以来，现已报导了一系列具有形状记忆效应的合金系，它们有：Ti-Ni, Ti-Nb, Au-Cd, Au-Cu-Zn, In-Tl, Cu-Al-Ni, Cu-Zn, Cu-Al-Zn, Cu-Zn-Ni, Cu-Zn-Sb, Cu-Zn-Si, Cu-Al, Cu-Al-Co, Cu-Fe, Cu-Mn, Cu-Sn, Cu-Zn-Sn, Cu-Zn-Ga, Ag-Cd, Ag-Zn-Cd, Ag-Zn, U-Nb, Ni-Al, Ni-Al-Co, Ni-Al-Ga, Ni-Al-Ti, Ni-Al-Zn, Co, Co-Ni, Ti, Zr, Fe-Ni-C, Ni-Pd-Ti-Zr, Fe-Mn, Fe-Pt, 不锈钢等等。



(原子)% Ni

图 2: 近似化学计算 Ti Ni 合金的阻尼曲线。曲线的上面，合金的阻尼性能低；曲线的下面，合金的阻尼性能是高的。

三、形状记忆效应的先决条件

已为大家所公认的合金具有形状记忆效应的先决条件是：(1)热弹性的马氏体相变；(2)母相（或高温相，或奥氏体相）和马氏体相（低温相）的有序化；(3)马氏体相内部孪生。上述这些合金均具有马氏体相变，而且形状记忆效应均与马氏体相变有着千丝万缕的联系。

1. 马氏体相变的热弹性行为：

一个晶粒内可能生成的马氏体片变量的最大数量取决于母相的晶体对称。对于一个立方体母相来说，可生成24个马氏体片变量，如图3所示。马氏体的形成常常以部分自适应或完全自适应即马氏体以Z字形（粹发马氏体）、板条（大块马氏体）、群或带条状而生成。这类马氏体形成之特点是宏观形状变形达到最小值，甚至为零。因而在没有外应力以及体积变化可忽略不计时，马氏体将会继续形成，且无外形变化。相反地，如果一个外应力场帮助了马氏体的形成，则只有数目有限的马氏体片变量可望会生长，或在马氏体自适应形成的情况下某些马氏体片变量会在不同的马氏体片群里起着主导作用，这样就导致了外形的变化。

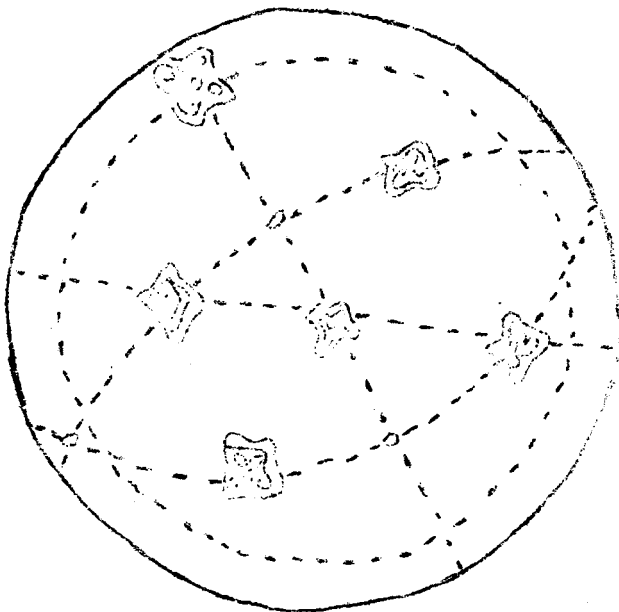


图3：这是Cu—11.6（重量）%Al合金β单晶通过淬火而生成的β马氏体(0018)基面的X光极象图。最多有24个不同的马氏体片变量（共六组，每组四个），

(0018)反射只有一个多重性。示出了β相晶格的四位及二位轴。

在人们所熟知的铁基合金中，单个马氏体片会在1毫秒和1微秒间的某一时刻生成，而且基本上长大到全尺寸，尽管马氏体的体积仍与冷却过程中的所持温度成函数关系。例如在Fe—Ni合金中，常常是一群马氏体片通过一种联合的剪切耦合一致地生成，即为上面提到的马氏体的“猝发效应”。在此情况下，电阻率和温度的关系曲线有一个大的热磁滞迴线。而另一方面，像AuCd、CuAlNi、CuZn以及Fe₃Pt等具有形状记忆效应的合金，它们的热磁滞迴线极小。图4为Cu—40%Zn及Au—47.5%Cd合金的电阻率—温度曲线。在这些情况下，一定的马氏体或马氏体区在温度降低或升高时就会生长或收缩，而生长之速度似乎仅受温度变化速度的支配，也就是说，马氏体是以热弹性方式形成的。那末，什么是热弹性马氏体相变呢？所谓热弹性马氏体相变，即为某些合金在M_s以上的某一温度范围内，当施加应力时即发生马氏体相变，而一旦应力撤去，又会发生逆转变。有人认为某些合金的马氏体相变如能满足下述诸条件中的大部分即可发生热弹性马氏体相变。这些条件是：(1)相变驱动力小；(2)相变时的切变量小；(3)相变时的体积变化小；(4)为此，M_s—A_s的温差要小（A_s是加热时开始生成高温相的温度）；(5)母相的屈服应力越高越好，这就是说母相和马氏体相界面上的共格性要好，施加应力时，界面容易移动。

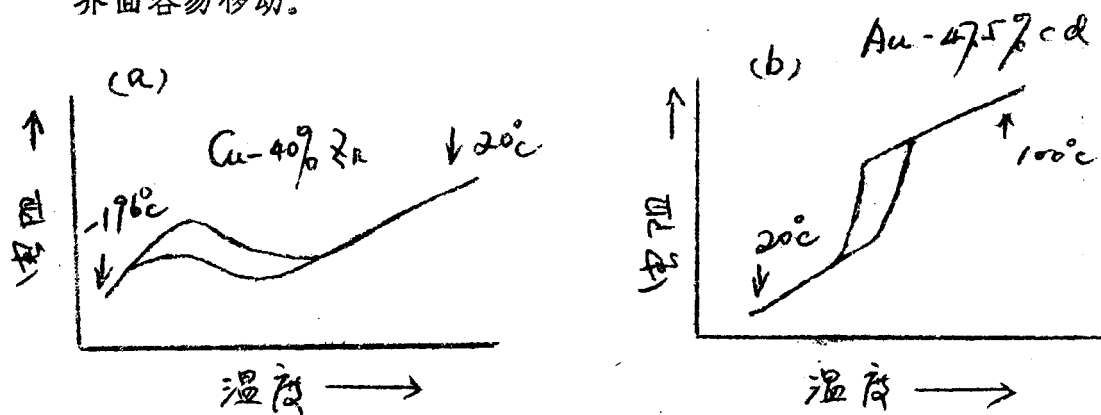


图4、图(a)和(b)分别为Cu—Zn及Au—Cd合金中与马氏体相变有关的电阻率—温度曲线。

业已证实TiNi、CuAlNi和CuZn等合金中的马氏体是热弹性的。In—Tl、NiAl、CuZnSn、CuZnSi、CuAl以及AgCd等合金也具有热弹性马氏体。过去有人认为Zn含量低的AgZn合金(在43(原子)%以下)虽有马氏体相形成,但在冷却到液He温度也无马氏体相变,是贵金属β相合金通常相变行为中的一个例外。然而,最近Cornelis和Wayman等人报导了Zn含量在39.5(原子)%以下的AgZn合金在冷却时也发生马氏体相变,且具有形状记忆效应。一般来说,凡具有热弹性马氏体形成的材料均显示出形状记忆效应。普遍认为铁基合金中较少见到热弹性马氏体不过在Fe—Ni—C合金中出现的薄片状马氏体与热弹性马氏体极为相似。此外,日本的稔野宋次等人说,他们已发明了Fe66~95(重量)%、余量为Ni的形状记忆合金;Fe70~90(重量)%、余量为Mn,以及Fe40~45(重量)%、余量为Pt的形状记忆合金,并已申请到了专利权。根据Wayman的报导,在有序化的Fe—25(原子)%Pt合金中马氏体相变具有典型的热弹性行为,而且用电阻率测定法获得的冷却和加热相变的磁滞迴线很小。马氏体状态变形的FePt合金试样在整个逆转变范围里加热时回复了它变形前的原来形状,显示出了形状记忆效应。然而,当FePt合金的马氏体是由无序化或部分序化母相生成时,相同组成的FePt合金的马氏体内却不产生形状记忆效应,这和Fe—32(重量)%Ni合金中的内部孪生(及无序化的)马氏体一样,均属典型的非热弹性行为。所有这些观察均认为热弹性马氏体行为是与形状记忆效应有关的,而且是形状记忆效应合金的共同特点。

为了证明一种以非热弹性方式形成的马氏体并经过变形的合金不能完善地回复到它原始的形状,Kesslen和Pitsch研究了Fe—32.5%Ni合金马氏体的逆转变。这两位研究者发现,面心立方的

奥氏体片在原来的体心立方马氏体内以马氏体方式形成。他们认为合金中的马氏体片是由剪切机理形成的(表面倾斜),且具有各种惯习平面。他们观察到这种惯习平面的多重性,因而表明了取向的多重性,因为这是一种马氏体的逆转变。由此可见,一些马氏体晶体是逐渐逐渐地回复到不同取向的奥氏体的,因而在逆转变过程中产生不出单一的马氏体取向,完全的形状恢复也就不可能实现。这种情况类似于弯曲的奥氏体晶体,它们不可能在马氏体转变过程中“变直”。

上述行为与热弹性马氏体所具有的行为迥然不同。在热弹性马氏体中,单一取向的马氏体片通过“收缩”过程回复到单一取向的奥氏体,即回复到原始取向。这就雄辩地证明只有那些马氏体以热弹性方式生成的合金才能具有形状记忆效应。

2. 有序化效应:

当马氏体片以热弹性方式形成时,基体—马氏体界面应是弹性相连的。这种状态意味着结合应变相当少,以便在冷却或加热过程中界面可前后移动。整个界面的向后移动也会产生逆转变。如前所述,有序化的FePt合金有热弹性马氏体相变和形状记忆效应,然而同样组成的无序化FePt合金试样却两者均不具备。这表明有序化的原子排列与热弹性行为有着密切的关系,同样地,它也与形状记忆效应关系甚密。

根据马氏体相变的现象学理论,所谓惯习平面,是平均畸变为零的平面,它是通过晶格的切变量来完成的。虽然晶格切变量引起的细的孪生或滑移使得在宏观上看不出局部化的畸变,但局部化的畸变的确在界面处存在着。估计这种微细的畸变不会超出有序化合金基体的弹性极限。然而,在那些无序化的合金中,这种微细的畸变显然地超出了基体弹性极限,这样,由于马氏体形状应变而产生的局部化应变或塑性变形最终使得基体和马氏体界面分离。图4为假设的无序化及有序化马氏体的应力/应变曲线,它被用来解释奥氏体有序化对FePt合金热弹性行为

的影响。换句话说，有序化增加了强度，阻止了通常的塑性变形效应和界面卡住，并使母相—马氏体相界面保持着弹性相连。这就是有序化提高弹性极限的道理。由此可见，热弹性马氏体片的可逆性生长及收缩归因于原子的有序化排列。

这种有序化的原子排列对于加热时马氏体会逆转变为母相也同样很重要。在有序化的合金中马氏体似乎以整体回复到原来的奥氏体取向的。而无序化合金，如Fe—Ni合金却并非发生整体逆转变，因为无序化合金中的许多奥氏体变量（取向）都是从单个的马氏体取向产生的。但也应考虑到有序化合金的“无序化”逆转变的可能性。

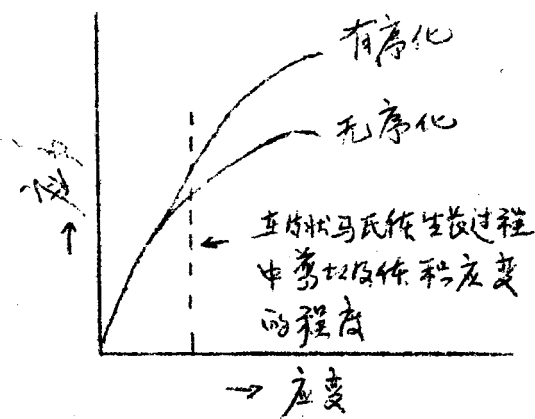


图5、假设的有序化及无序化马氏体的应力—应变曲线。后者的转变应变超过了基体（或马氏体）的弹性极限并失去了界面的相干性。

以前曾对有序化和晶格相应作了许多评论。现已清楚，TiNi、AuCd及CuZn合金的马氏体是由CsCl母相（高温相）形成的；Cu—Al—Ni系合金的马氏体是由Fe₃Al超结构变来的；而Fe₃Pt合金的马氏体都是由Cu₂Au型的母相产生的。Guard和Turkalo在把Ni—3.5（原子）%Al合金从高温β₁（B2型结构）区淬火时观察到了马氏体转变。随后，Roson和Goebel报导这种马氏体有一种有序化的CuAuI型结构。后来，

Enami和Nanno对Ni—36.8(原子)%Al合金进行研究,证实它具有形状记忆效应,而且母相具有CsCl型结构。由上述例子可见,尽管不同的合金有序化类型各有所异,但它们的马氏体均为有序化的,而且这些材料也都具有形状记忆效应及热弹性行为。

由此认为只有有序化的合金方能发生热弹性马氏体相变。In—Tl合金中的面心立方—面心四方转变似乎是一个明显的例外,不过该合金的贝茵畸变的主要应变量极小($\eta_1 = \eta_2 = 0.99$, $\eta = 1.02$),况且转变时的体积变化也仅为0.1%,所以也可视为热弹性的,再则它也具有形状记忆效应。此外,Christian还认为In—Tl固溶体中的固溶原子似有特殊(有序化)的位置,如这是事实的话,那末In—Tl合金也跨入了有序化合金的行列。不管怎样,仍可得出结论,即具有马氏体相变的有序化合金应具有热弹性行为和形状记忆效应。

3. 马氏体的内部孪生:

形状记忆效应是一种变形过的试样加热时能恢复其原有状态的现象。这意味着变形过程是可逆的。但滑移变形是不可逆的,所以难于观察到滑移变形的材料能回复其原来的未变形的状态。也就是说形状记忆效应材料不应有可移动的位错。根据现象结晶学理论,晶格不变量变形的结果使马氏体有一种内部的亚结构。经过透射电子显微镜研究,证明马氏体里有内部孪晶、层错和位错,假定它们是晶格不变量剪切之结果。但形状记忆合金不应有“不可逆的缺陷”;所以认为形状记忆合金中的晶格不变量变形是内部的孪生。变形产生于选择性的去孪生过程中,按此过程两种双晶取向中的一种取向在变形时会生长并将另一种取向“消灭”。

Otsuka, Wang, Dautovich, Mameinkowski, Nagasawa, 及Sandrock等提出了各种形状记忆合金的内部非匀性和晶体结构(见表一)。对某些晶体结构仍有争议。但通过电子衍射花样及相应的显微照片业已确立了马氏体片内部双晶的鉴别。在AuCd, InTl, CuAlNi,

FePt, 及NiAl合金的马氏体内也观察到了内部双晶。Pops和Sato等人认为含Zn量较低的Cu—Zn合金具有一种有内部堆垛层错的斜方或9R长周期的堆垛结构但含Zn较高的合金可能有内部双晶, 与Cu—Al合金中的情况相似。大量的实验证据表明所有形状记忆效应合金均由内部孪生的马氏体组成的。

表一 形状记忆效应合金马氏体的结晶学数据

合 金	晶体结构	内部非匀性	孪 晶 面
TiNi (~50原子%Ni)	单斜晶 (无序B19)	孪晶	{ 11 $\bar{1}$ } ({10 $\bar{1}1$ }六方指数)
AuCd (47.5原子%Cd)	底心正交晶 (B19)	孪晶	{ 11 $\bar{1}$ } ({10 $\bar{1}1$ }六方指数)
InTl (23原子%Tl)	面心四方晶	孪晶	{ 011 }
CuAlNi (14.2%Al, 4.8%Ni)	正交晶 (有序六面体)	孪晶	{ 1 $\bar{1}1$ } ({10 $\bar{1}1$ }六方指数)
CuZn (~40%Zn)	?	孪晶? 堆垛层错?	
FePt	底心四方晶 (无序化时为体心立方)	孪晶	{ 111 } ({ 112 }立方指数)
NiAl (36.8原子%Al)	面心四方晶 (CuAuI)	孪晶	{ 111 }

除了去双晶过程能产生变形外，记忆合金还可通过外加应力使原有的马氏体片生长或收缩来实现变形。也就是说，形状应变方向有利于同外应力分剪切相互作用的那些惯习平面会生长，而那些取向较为不利的“逆平行”的变量就会收缩。另一种可能性是应力逆转变马氏体片所产生的奥氏体区域因仍处于应力下而再次转变为取向更有利的马氏体变量。马氏体片在应力下的生长或收缩是热弹性转变的直接结果，亦即热弹性马氏体中的应力和温度是当量，而“反平行”的应力在效果上相当于温度的升高。

由此可得出两个重要的结论，即(1)、那些在应力下会生长或收缩的片状马氏体必定使界面前后运动。从结晶学理论来看，这使双晶的相对厚度保持相等，结果使惯习平面在宏观上保持不变量；(2)、片状马氏体在应力下的生长或收缩程度为施加应力时的温度的函数，亦即因温度和应力为当量，所以在稍低于 M_f 温度下就会发生应力诱发逆转变。但在大大低于 M_f 温度下就不大可能产生逆转变，此时就可能发生诸如去双晶之类的马氏体内的变形。

去双晶本身就包含着双晶的存在，所以很难想象应力诱发逆转变会在内部孪生的马氏体以外的结构中发生。因此，马氏体状态下的变形和形状记忆效应取决于内部孪生的马氏体，也就是说，马氏体的记忆效应取决于记忆着未变形状态的经受了变形的马氏体状态。这种效应只是在加热过程中逆转变发生时才明显地产生。但是，在发生了去双晶的地方的记忆只有在逆转变之前双晶重新调节到它们所必需的“不变量—平面”厚度时才能恢复。

综上所述，具有形状记忆效应的合金的基本及共同特点是：(1)、一种热弹性马氏体转变；(2)、一种是有顺序化的原子排列；(3)、马氏体内存在着内部双晶。在具有形状记忆效应的其他合金中，诸如： $CuAlMn$

CuZnAu等等可望都有这些特点。

4. 形状记忆效应的其它机理:

Delange和Zijderfeld解释了NiTi合金的形状记忆效应,认为残余奥氏体转变为马氏体影响着可回复的塑性变形,而可回复的变形效应可通过加热时的变形诱发马氏体逆转变来实现,因而达到了形状的恢复。这个模式虽适用不完全转变试样的变形,但明显地不适用于完全马氏体试样的变形,因为在后一种试样中记忆效应仍发生。为此, Otsuka和Shimizu分别对NiTi和CuAlNi提出了别的解释。用光学及透射电镜研究了CuAlNi合金,研究表明完全马氏体合金的可回复变形受去孪生机理的影响,此外还产生了可逆性的机械双晶。而部分马氏体的合金在应力下现有马氏体片生长起来,同时还新产生了马氏体片。有人对这种解释持保留态度。因为在自由面上观察到的效应并不一定代表多数行为。经过研究, Otsuka和Shimizu提出了形状记忆效应所必需的条件:(1)、马氏体的热弹性行为;(2)、晶格不变量变形的原因是孪生,并非位错;(3)、原子的有序化排列;(4)、母相和马氏体相分别为体心立方和六角密排结构(无须有序化)。前面三个是通用的,但第四个条件却不可能是通用的,因为形状记忆效应也存在于Fe—Pt和In—Tl合金。

Wasilewski在观察超弹性效应时还观察到了记忆效应。他认为在应力下取向不利的马氏体区会转变为母相,然后重新转变为取向有利的马氏体。这个解释的根据是:(1)、孪晶晶界在应力下可以不是典型的移动;(2)、根据Laves的假设,有序化可用孪生来破坏;(3)、 M_s 、 M_f 、 A_s 和 A_f 可在 M_d 和 A_d 之间。但对此假设也有异议,首先所观察到的转变孪生并未破坏有序化;再则AuCd合金的行为说明 A_d 无须低于 M_s 、 M_f 、 A_s 、及 A_f 温度仍具有形状记忆效应;另外,

此假设也无法说明完全马氏体试样中的记忆效应。

Nagasawa和Kawachi也提出了一种假设。他们认为：(1)、在纯金属，如Ti、Co、Zr以及Fe—Ni、Co—Ni及Cu—Al（有序化）中也发生记忆效应；(2)、形状记忆效应与马氏体相变及其逆相变有关；(3)、凡是马氏体转变的材料均会显示出典型的形状记忆行为。这个模式遭到Wayman和Shimizu的反对。他们两认为，能以位错运动变形的材料不可能完全回复到原来的奥氏体取向，即纯金属材料及无序化合物一般不具备形状记忆效应。在这些材料中，有些马氏体可能以相似记忆的方式转变为母相，但其余的马氏体却如同Fe—Ni合金中那样慢慢地转变，无序化的合金中甚至也会产生部分的记忆效应就是一个明显的例子。因此，必须将这种部分记忆效应和真实的记忆效应区别开来。目前所谓的记忆效应均认为是具有完善记忆合金。

由此可见，并已提出的机理五花八门，但三个先决条件却是形状记忆效应的基本而共同的机理。

四、形状记忆合金的应用

钢中的马氏体相变已在工艺学上获得了积极的应用，诸如：淬火硬化，马氏体时效，形变热处理等等。虽然有色金属合金中发生马氏体相变早已被人们所知了，但工艺学上未曾得益。现已知道大多数形状记忆合金均为有色合金，可望这些材料中的马氏体相变定会发挥越来越大的作用。事实上，这种材料已在工业上获得了应用，并显示强大的生命力。形状记忆效应已有的及可能的应用如下：

(1)、前面已谈到，马氏体状态通常均为内部孪生的马氏体片，孪晶晶界会在应力下移动，所以有效地阻尼了外加的应力。因此，可制造出“无噪音”的移动部件，如汽车的制动器等。

(2)、形状记忆效应合金的变形特点是通过马氏体相变实现的，即使内禀脆性的奥氏体材料也会呈现延性。例如，马氏体CuZn合金的延

性极好，而奥氏体相的 β 黄铜较脆。 $NiTi$ 合金也是如此。因此，马氏体状态产生的延性的提高使材料可作许多低温应用。

(3)、由于有关的各种晶界(孪晶与孪晶，马氏体与奥氏体)在应力下都具有移动性，所以提高了材料的冲击强度和总的断裂韧性，延长了疲劳寿命。

(4)、形状记忆效应已在工艺上获得应用。Reyche^r公司已经生产了取名为“Cryofit”的 $Ni-Ti$ 合金水管接头。这些接头在低温下于马氏体状态给予予先变形，当它们加热到奥氏体状态时套在管子上的接头“收缩”，从而达到管子连接之目的。此外，在通常用普通材料孟兹合金制作的管子和阀门配件方面也获得应用。还用作航天器，舰艇上的铆钉，销插，及类似的紧固件。在精密仪器上用作机械或电气的继电器，火警警报器，定时装置等。美国的Goodyear航空公司已生产了宇航用天线，它可在马氏体状态折叠起来，但一旦受热发生逆转变，折叠起来的天线重新张开，恢复其原来的工作状态。还有人作飞机上的垂直天线。

(5)、加利福尼亚大学的Lawrence Berkeley实验室发展了取名为Banks的发动机，此发动机的输出功率已达7瓦特。该实验室提出了发展一台功率达1瓦的发动机这一设想。

(6)、形状记忆合金在生物材料领域中的应用似乎前途如锦，因为记忆效应行为从根本上说来是一种人造肌肉或“发动机”的行为。 $NiTi$ 合金由于在马氏体状态下变形而贮存了能量，所以在马氏体逆转变为母相过程中，形状记忆会产生非同寻常的力。因而可用此类材料制造人造心脏(外激励心定)人造肌肉、下颌骨，甚至在牙齿矫正术方面的应用也在取得进展。无疑，将来会有更多的应用。

五、展望,

虽然形状记忆效应合金早在六十年代初就已发现了,和往常一样它被怠慢了约十年时间。其原因是多方面的,但对它的机理缺乏了解以及工程设计人员在未获得可靠的数据之前不敢大胆设想是基本的原因。不过,近年来形势已发生了根本的变化,对它的了解已在日益加深,对它的应用也在日趋扩大,人们业已觉察到形状记忆效应合金的前途是光明灿烂的。为达此目的,国外似乎在下述几个方面作出努力:

(1)、要进一步研讨形状记忆效应之机理。虽然大多数人认为此类效应之先决条件为热弹性马氏体相变有序化以及马氏体内部孪生,但也有不少的研究者提出了其他机理。这说明形状记忆效应的机理确实是复杂的,需花更多的精力研究。

(2)、因形状记忆效应合金的转变温度对化学成份非常敏感。这就涉及到如何控制合金成份的均匀性,以获得所要求的合金的转变温度范围。

(3)、努力寻求改进提高形状回复温度的方法。改进回复温度的最直截了当之方法是改进化学成份。例如在NiTi合金中,假如在富Ti方向稍偏离化学计算就能使Nitinol合金的回复温度约提高115°C方法之二是添加第三种或第四种元素。经实验表明如在NiTi合金中添加不等量的Co或Fe来代替Ni用Al和Mn代替Ti会使合金的回复温度降低,而以Zr代替Ti或用Au代替Ni时却提高了回复温度。

(4)、当前的重要任务之一是努力发展合金系。其中包括探索新的形状记忆合金;另一方面是在原来的形状记忆合金中添加三元、四元元素发展三元及四元合金系,原来认为纯金属及铁基合金如Fe-Ni合金中不具备形状记忆效应,但有人则认为它们也有这种效应,日本的稔野宗次已经发展了Fe-Ni、Fe-Ni、Fe-Pt等铁基合金,发

展了许多三元、四元合金系，并已获得了专利权。

(5)、对有些形状记忆效应合金进行各种性能的测定，以及革新测试，加工设备已成了当务之急。

随着上述几个方面的深入研究，形状记忆效应合金定将在金属材料中占有一定的地位，在其发展史上出现一个全盛时期。