

冷轧变形对 Ni-43.5Ti-0.5V 形状记忆合金超弹性和显微组织的影响

刘光磊, 司乃潮, 翟玉敬

(江苏大学 材料科学与工程学院, 镇江 212013)

摘 要: 通过恢复率实验、拉伸实验和显微组织分析, 研究冷轧变形对 Ni-43.5Ti-0.5V 形状记忆合金超弹性和显微组织的影响。结果表明: 冷轧变形对 NiTiV 形状记忆合金超弹性具有显著影响。随变形量的增加, 合金超弹性呈现先增加后减小的变化规律。当变形量大于 15.4% 后, 大量位错产生, 马氏体变体和形变孪晶组织增多且分布致密, 起到强化母相、抑制滑移变形的作用, 使合金超弹性显著提高。当变形量大于 29.1% 时, 剧烈的组织畸变导致出现过饱和的高密度位错, 促使组织非晶化, 超弹性开始减小。当变形量在 23%~25% 范围内变化时, 合金获得最佳的非线性超弹性。单独依靠冷轧变形不能使 NiTiV 合金呈现完全非线性超弹性。另外, 恢复率实验能够改善合金的超弹性, 并发现了超弹性的稳定性变化规律。

关键词: Ni-43.5Ti-0.5V 合金; 形状记忆合金; 冷轧变形; 超弹性; 显微组织

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

Effect of cold deformation on superelasticity and microstructure of Ni-43.5Ti-0.5V shape memory alloy

LIU Guang-lei, SI Nai-chao, ZHAI Yu-jing

(School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The effects of cold deformation on the superelasticity and microstructure of Ni-43.5Ti-0.5V shape memory alloys (SMA) were investigated by recovery rate test, tensile test and microstructure observation. The results indicate that cold deformation has an evidence influence on the superelasticity of NiTiV SMA. With the increase of the deformation, the superelasticity of the alloy increases first and then decreases. When the deformation is more than 15.4%, a large number of dislocation appears, and the microstructures of martensite variants and deformation twins increase with their compacted distribution, which can strengthen the parent phase, inhibit slip deformation and make the superelasticity of the alloy improved significantly. When the deformation is more than 29.1%, the serious distortion of microstructure makes the supersaturated high density dislocation generated, which promotes the microstructure to turn to the amorphous. The superelasticity of the alloy begins to decrease. When deformation is in the range of 23%–25%, the best non-linear superelasticity of the alloy can be obtained. In a word, non-linear superelasticity of the alloy cannot be obtained only under the condition of cold deformation. In addition, the recovery rate test can improve the superelasticity of the alloy and the variation of the stability of superelasticity was found.

Key words: Ni-43.5Ti-0.5V alloy; shape memory alloy; cold deformation; superelasticity; microstructure

在各种形状记忆合金(SMA)中, NiTi 基 SMA 除了具有优越的形状记忆效应、力学性能及生物相容性

外, 还具有优良的超弹性。SMA 的超弹性是指处于母相或 R 相状态的 SMA 在外力作用下产生远大于其弹

性极限应变量的应变,卸载后应变可自动恢复的现象。超弹性优良的 SMA 具有高应变、强耐恒应力、高弹性模量和非线性阻尼的特征,可用在医疗器械、储能器材、通讯设备、抗振机构和耐磨零件等,广泛应用在航空航天、机械、电子、化工、能源、建筑等工程领域以及医学和民用领域^[1-4]。

目前,对 NiTi 二元合金超弹性方面的研究已经比较广泛和深入,主要包括:合金成分及制备、热处理方式、冷加工、应力应变循环以及实验条件等因素对其超弹性的影响^[5-6]。绝大多数 NiTi 二元 SMA 要在常温以上温度才能表现出超弹性,但是在人们日常生活以下的温度(尤其是室温以下)具备优良的超弹性才更有实际应用意义。为此,在 TiNi SMA 中添加第三种元素,如 Cr、V、Fe 和 Co 等^[7-11],可以降低合金的相变温度,用来满足零件在低温甚至 0℃ 以下仍具有超弹性的要求。其中, Ni-43.5Ti-0.5V SMA 具有较低相变温度,是性能优良的低温超弹性合金。当前,对 NiTiV SMA 的相变行为和形状记忆效应等方面已有较为系统的研究,关于超弹性特性方面的研究仅集中在固溶和时效处理的影响^[12-14],而关于冷轧变形对 NiTiV SMA 的超弹性和组织变化尚缺深入系统的研究。基于此,本文作者研究冷轧变形对 Ni-43.5Ti-0.5V SMA 超弹性和显微组织的影响,探讨恢复率实验对合金超弹性稳定性的影响,为进一步改善其超弹性提供理论依据,拓展了镍基形状记忆合金的应用范围。

1 实验

实验材料的名义成分为 Ni-43.5Ti-0.5V(质量分数,%),合金原料是纯度分别为 99.7%、99.9%和 99.7%的海绵 Ti、电解 Ni 和 V 片。合金铸锭采用真空感应炉熔炼,铸锭需经退火、去除表面氧化皮、压锻、轧制和拉拔等多道工序制成合金丝材。实验丝材试样的直径为 (1.17 ± 0.06) mm,长度为 (11 ± 0.001) cm,试样编号如表 1 所示。试样先进行固溶处理:800℃保温 40 min 后水冷,然后室温下在 YJ-450 液压成型机上进行冷轧变形处理,压力分别为 6、9、11、12、14 和 16 MPa。一方面,冷轧变形后的丝材进行恢复率实验,即将直线状丝材($A'O A''$)围绕直径为 5 mm 的圆柱弯曲 180°($A'O A$),松开后试样自然回弹,每次弯曲后测量恢复稳定后弯曲角 $\angle A'' O B$ 的大小,如图 1 所示;另一方面,将冷轧变形后的试样在液压万能拉伸试验机上进行拉伸实验,其加载速率为 1 kN/min,加载到

0.7 kN 时保持 5 s 后卸载,以观察冷轧变形对合金超弹性的影响。在试样上截取长度为 10~16 mm 的丝材,在 XQ-2 型试样镶嵌机上镶嵌,得到的镶嵌样经过打磨和抛光后,利用体积比为 1:2.5 的 HF 和 HNO₃ 混合液进行腐蚀,在 Leica DM 2500M 型光学显微镜(OM)下观察试样组织。

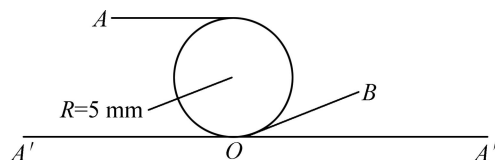


图1 试样弯曲和测量弯曲角的方法

Fig. 1 Method of bending specimen and measuring bending angle

2 结果与讨论

2.1 变量与恢复率

利用如下公式计算经冷轧变形处理后试样的变形量(d):

$$d = \frac{d_1 - d_2}{d_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: d_1 为受压前丝材的直径; d_2 为受压后丝材的厚度(使用精度为 0.02 mm 的游标卡尺在试样上的 3 个不同位置进行测量,其平均值作为 d_1 和 d_2 的最终值)。试样的变形量和一次恢复率实验后的弯曲角如表 1 和图 2 所示。

弯曲角度越小,恢复率越高,合金的超弹性性能越好。从表 1 和图 2 可以看出,当试样在室温下的冷轧变形量小于 15.4%时,试样的弯曲角变化不大,说

表 1 试样在不同压力下的变形量和一次恢复率实验后的弯曲角

Table 1 Deformation and bending angle after one restoration rate test of samples at different pressures

Sample No.	Pressure/MPa	Thickness after deformation/mm	Deformation/%	Bending angle/(°)
1	0	1.17	0	44.6
2	6	0.99	15.4	43.2
3	9	0.94	19.7	42.5
4	11	0.91	22.2	41.1
5	12	0.89	23.9	40.2
6	14	0.86	26.5	39.8
7	16	0.83	29.1	40.2

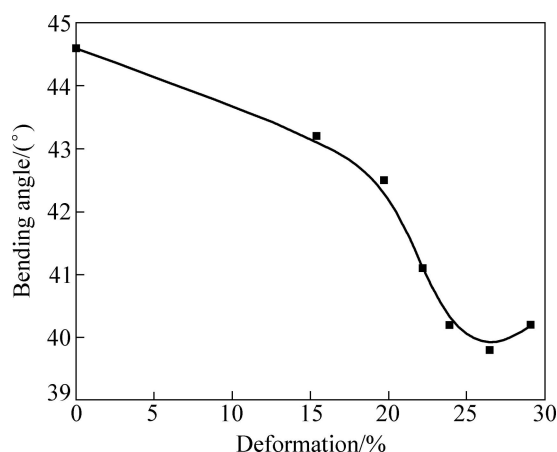


图2 变形量对NiTiV记忆合金一次恢复率实验后弯曲角的影响

Fig. 2 Effect of deformation on bending angle of NiTiV SMA after one restoration rate test

明变形量小于15.4%对合金超弹性的提高有限。当变形量在15.4%~26.5%范围时,弯曲角急剧减小,合金的超弹性开始显著增长。当变形量大于26.5%时,弯曲角出现小幅增大,合金的超弹性不再继续提高。总之,单独依靠冷轧变形处理来提高NiTiV SMA的超弹性具有一定的局限性,在实际应用中应配合其他工艺,如热处理来提高NiTiV SMA的超弹性。

表2所列为弯曲角与一次恢复率实验测得弯曲角相比减小1°时所需的最少恢复率实验次数。从表2中可以发现:一方面,经过冷轧变形处理后,恢复率实验次数的增加使得合金试样的弯曲角度减小,超弹性得到进一步提高;另一方面,随着冷轧变形量的增加,试样的弯曲角度减小1°时所需的实验次数越来越少,当变形量大于22.2%后,实验次数趋于恒定值,即改

表2 弯曲角度减小1°所需最少恢复率实验次数

Table 2 Least number of restoration rate test after bending angle decreasing 1°

Deformation/%	Bending angle/(°)	Number of restoration rate test
0	43.6	8
15.4	42.2	6
19.7	41.5	5
22.2	41.1	4
23.9	40.2	4
26.5	39.9	4

善合金超弹性所需的恢复率实验次数与冷轧变形量存在一定关系,当实验次数达到一定数目时,合金的超弹性不再随着实验次数的变化而变化,这种现象称为超弹性的稳定性。在变形量较小的情况下,稳定性较差;随着变形量的增加,稳定性也逐渐改善。值得注意的是,冷轧变形量过大后,试样的弯曲角减小速度很快,如变形量为29.1%时合金超弹性的稳定性不再存在,故表2中没有列出该组数据。总之,NiTiV SMA超弹性的稳定性与冷轧变形量有着密切的关系。

2.2 冷轧变形对合金超弹性的影响

SMA的超弹性是指试样在外力作用下产生远大于其弹性极限应变量的应变,在卸载时应变可自动恢复的现象。按照呈现超弹性所对应的应力-应变曲线特点,可将超弹性分为线性超弹性和非线性超弹性。对于前者,应力-应变曲线中应力与应变接近线性关系,而后者由于在加载与卸载过程中分别发生应力诱发马氏体相变及其逆相变,产生应力-应变曲线平台而呈非线性关系。另外,应力诱发马氏体相变临界应力(σ_M)和残余应变(ϵ_R)是反映SMA超弹性的重要指标。 σ_M 越大,合金超弹性的恒应力越大。 ϵ_R 则决定了合金超弹性的类型,当 $\epsilon_R=0$ 时,合金呈现完全超弹性; $\epsilon_R>0$ 时,合金呈现部分超弹性; ϵ_R 越大,合金的超弹性越差。

图3和4所示分别为变形量对合金试样超弹性曲线、应力诱发马氏体相变临界应力和残余应变的影响。从图3和4中可以看出:1)未施加冷轧变形时,应力诱发马氏体相变产生的曲线平台不明显, σ_M 较小,为275 MPa; ϵ_R 较大,达到了2.24%。2)随着变形量的增加,合金的超弹性呈现先增大后减小的变化规律。当变形量为15.4%时,试样的超弹性曲线没有什么变化,超弹性的提高不大;当变形量增加至23.9%时,出现了规范的应力诱发马氏体相变产生的曲线平台,超弹性达到最大值;当变形量大于26.5%时,曲线平台又变得不明显,超弹性开始减小。3)随着变形量的增加, σ_M 呈现先增大后减小的变化规律,当变形量为23.9%时, σ_M 为503 MPa,与未变形的试样相比提高了近1倍;合金的超弹性得到显著提高。4) ϵ_R 随着变形量增加呈现先减小后增加的变化规律,当变形量为22.2%时, ϵ_R 为0.26%,与未变形的试样相比减小了近6倍;当变形量在22%~26%范围时, ϵ_R 的值较小。从图4(b)可知,无论变形量为多少, ϵ_R 始终大于0,仅借助冷轧变形的的方法不能使NiTiV SMA获得完全非

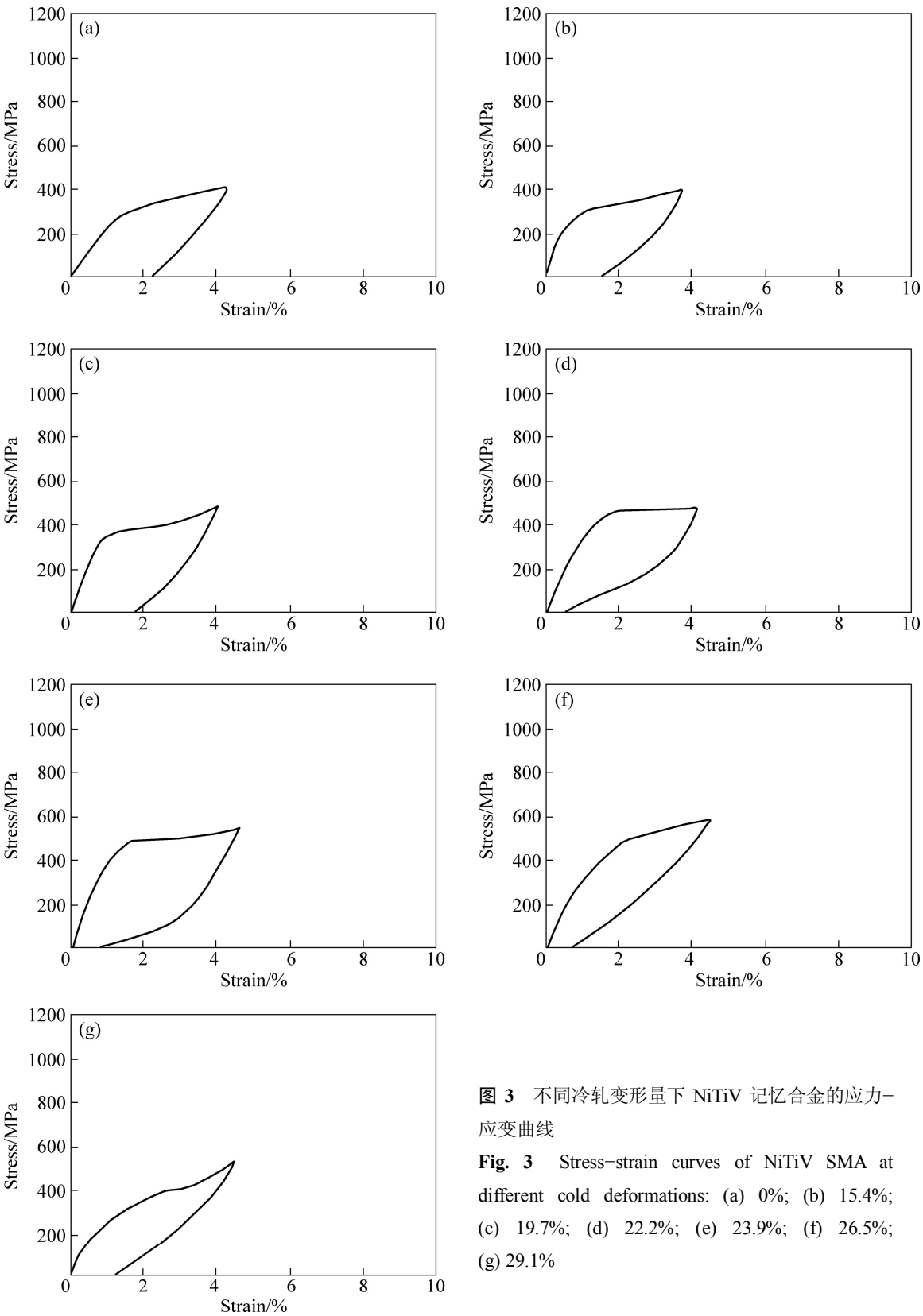


图 3 不同冷轧变形量下 NiTiV 记忆合金的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of NiTiV SMA at different cold deformations: (a) 0%; (b) 15.4%; (c) 19.7%; (d) 22.2%; (e) 23.9%; (f) 26.5%; (g) 29.1%

线性超弹性。

能耗(ΔW)是指具有超弹性的合金在加载-卸载过程中所吸收的能量, 其大小正比于应力-应变曲线的滞后回线面积。滞后回线面积越大, ΔW 越大, 记忆合金的阻尼、减震性能越好。从图 3 可以发现, 冷轧变形量对 ΔW 也有一定的影响。随着变形量的增加,

ΔW 呈现先增大后减小的变化规律, 当变形量为 23.9% 时, ΔW 达到最大值; 继续增大变形量, ΔW 虽有减小趋势, 但减小趋势缓慢。

综上所述, 冷轧变形对 NiTiV SMA 的超弹性具有显著的影响。当变形量小于 15.4% 时, 对合金超弹性的提高作用有限。当变形量大于 15.4% 时, 对合金超弹性的作用显著, 但是变形量过大则会降低合金的超弹性。其中, 变形量在 23%~25% 范围内时, NiTiV SMA 的超弹性性能最佳。这个实验结果与前面恢复率实验结果一致。

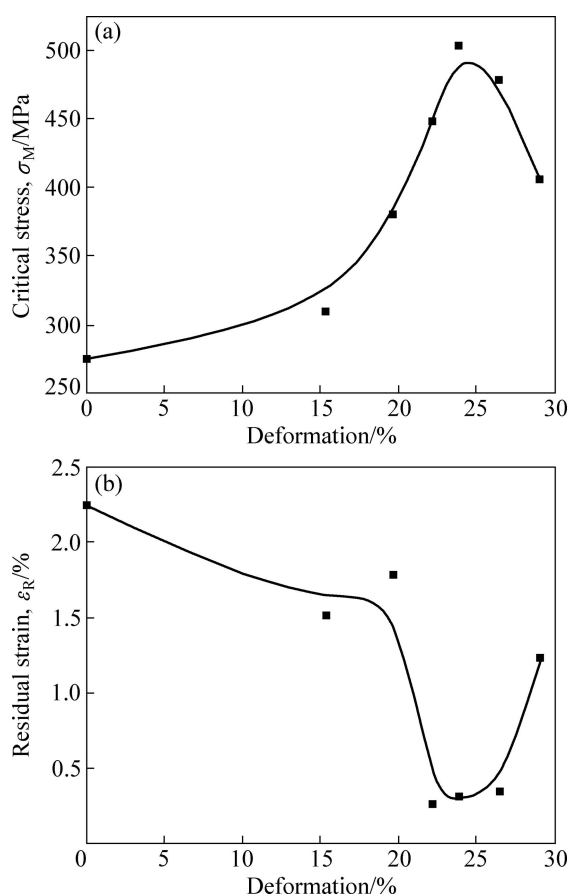


图4 变形量对 NiTiV 记忆合金应力诱发马氏体相变临界应力和残余应变的影响

Fig. 4 Effect of deformation on critical stress of inducing martensitic transformation (a) and residual strain (b) of NiTiV SMA

2.3 冷轧变形对合金显微组织的影响

NiTi SMA 马氏体变体间的共格界面和自协作特性使马氏体的变形过程通过孪晶界面运动来实现, 因而具有较高的可逆性, 呈现良好的记忆效应和超弹性^[15]。

图 5 所示为变形量对 NiTiV 记忆合金显微组织的影响。图 5 中呈白色针状和块状的是马氏体, 这种马氏体变体的产生是为了协调那些不同的自协作群变体长大至相互接触阶段时产生的一种弹性应变。由于 NiTiV 合金的奥氏体转变温度在 0° 以下, 其在室温下为奥氏体, 因此试样受冷变形过程中产生的应力诱发马氏体在受力结束后自动恢复到母相(奥氏体)状态, 但为了协调应力诱发马氏体中不同的自协作群变体长大, 这种弹性应变会保存下来。从图 5(a)中可以看到比较稀疏且长轴方向基本平行于冷轧方向的白色板条状马氏体, 其内部存在一些尺寸较小且方向分布混乱的条块状的马氏体变体和形变孪晶组织。这些少量的马氏体变体和形变孪晶组织是 NiTiV 合金丝材在生产过程中发生塑性变形产生的。所以, 未经过冷轧变形处理的合金也具有一定的超弹性。当变形量为 19.7% 时, 如图 5(b)所示, 与未经过冷轧变形的试样相比, 板条状马氏体不再平直, 发生了弯曲, 尺寸变小且方向杂乱, 马氏体变体和形变孪晶组织增多且分布更加密集。说明试样经过冷轧变形处理, 使基体内部的位错和形变孪晶组织增多, 合金的超弹性得到一定程度的提高。当变形量增加到 23.9% 时, 如图 5(c)所示, 与图 5(b)所示的试样相比, 板条状马氏体几乎全部变成马氏体变体且尺寸进一步减小, 同时形变孪晶组织增多, 二者排列更加紧密。说明随着变形量的增加, 应力诱发马氏体相变, 内部位错不断增多, 起强化母相的作用。但是, 当变形量达到饱和状态时, 超弹性性能的提高也相应达到了极限。当变形量继续增加至 29.1% 时, 如图 5(d)所示, 较大的变形量使得组织畸变程度十分剧烈, 导致内部出现过饱和的高密度位错。各种位置处的位错塞积是非晶化的主要驱动力, 当试样部分区域位错密度过高时, 导致非晶相组织的产生^[16-18]。图 6 所示为两种合金的 XRD 谱。与典型的非晶态合金的“馒头峰”XRD 谱(见图 6(a))相比, 当变形量为 29.1% 时 NiTiV 记忆合金的 XRD 谱(见图 6(b))具有相同特征, 说明已经出现非晶组织, 只是没有完全非晶化, 还存在少量 Ni_4Ti_3 和 Ni_3Ti 相。因此, 位错并不增加反而由于形成非晶相组织而降低, 不再继续强化母相, 即变形量继续增加, 试样的超弹性变化不大甚至下降。

文献[19-20]研究结果表明, NiTi 二元形状记忆合金经过冷轧变形处理后, 超弹性的产生是由于加载过程中弹性微孪晶的形核和长大。弹性微孪晶与基体间界面在推移过程中将与冷轧变形在基体中引入的位错

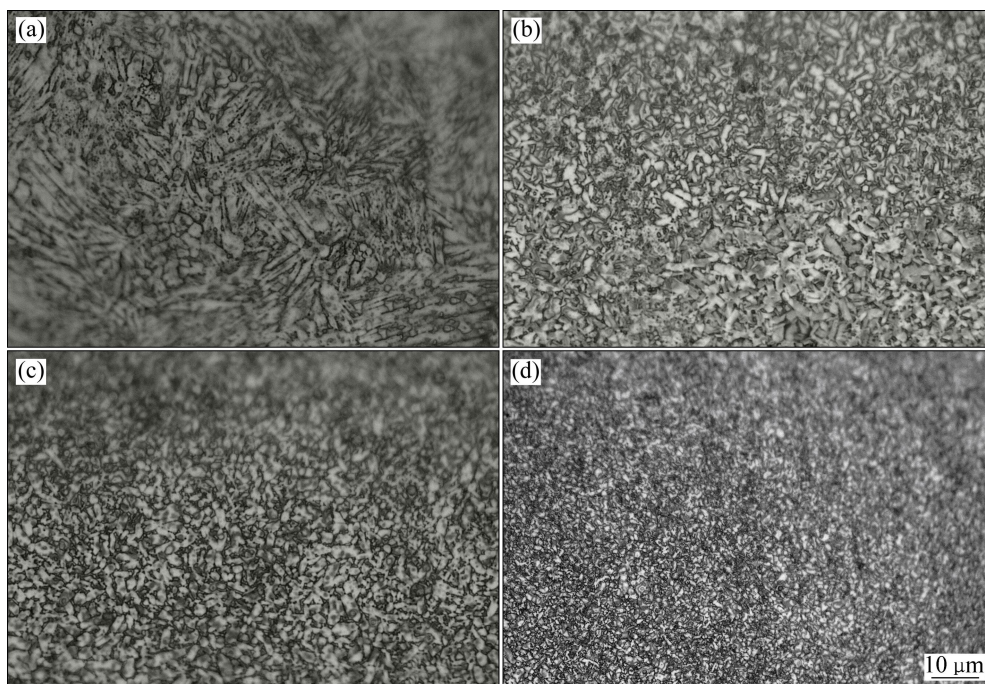


图 5 变形量对 NiTiV 记忆合金显微组织的影响

Fig. 5 Effect of deformation on microstructure of NiTiV SMA: (a) 0; (b) 19.7%; (c) 23.9%; (d) 29.1%

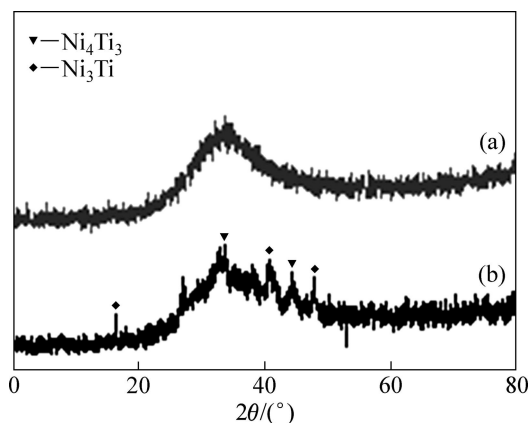


图 6 两种合金的 XRD 谱

Fig. 6 XRD patterns of two different alloys: (a) Typical amorphous alloy; (b) TiNiV SMA with deformation of 29.1%

等晶体缺陷发生交互作用, 使晶体缺陷消除或者是重新组合。在卸载时, 弹性微孪晶虽发生收缩, 但难回到原始位置。因此, 试样在卸载时产生了一定的残留变形。这也是前述应力-应变曲线中残余应变大于 0 的原因。因此, 对于 NiTiV 三元形状记忆合金, 要获得完全非线性超弹性, 必须结合其他工艺共同作用来实现。

总之, 冷轧变形对 NiTiV SMA 的超弹性具有显著的影响。简而言之, NiTiV SMA 的超弹性随着冷轧变

形量的增加呈现先增加后减小的变化规律。当试样受到较小的变形量时, 冷变形引入的位错较少, 对合金超弹性的影响程度较小。当冷变形量逐渐增大时, 试样受外力变形而引入大量的位错, 马氏体变体和形变孪晶组织越来越多且分布紧密, 起到强化母相、抑制滑移变形的作用, 试样的超弹性越来越好, 促使应力诱发马氏体相变, 形成非线性超弹性。当变形量增加到引入的位错密度达到饱和状态时, 合金的非线性超弹性最好。继续增大变形量, 过饱和的高密度位错会促进组织非晶化, 合金的超弹性性能下降。以上结论通过恢复率实验、拉伸实验以及显微组织分析这 3 个方面得到了一致验证。

3 结论

1) NiTiV SMA 的超弹性与冷轧变形密切相关。随变形量的增加, 合金的超弹性呈现先增加后减小的变化规律。单纯的冷轧变形不能使 NiTiV SMA 的超弹性达到完全非线性超弹性。

2) 当冷在变形量小于 15.4% 时, 对合金超弹性的影响较小; 当变形量大于 15.4% 时, 超弹性开始有显

著变化;但当变形量大于 29.1%时,剧烈的组织畸变导致出现过饱和的高密度位错,促使组织非晶化,超弹性开始减小。当变形量在 23%~25%范围内时,NiTiV SMA 获得最佳的非线性超弹性。

3) 经冷轧变形处理后,通过恢复率实验能够改善 NiTiV SMA 的超弹性。随变形量的增大,提高合金超弹性所需的恢复率实验次数减少。

4) NiTiV SMA 超弹性的稳定性随着变形量的增加而增加,当变形量达到一定程度时,超弹性的稳定性将不存在。

REFERENCES

- [1] 王 启, 贺志荣, 王 芳, 刘 艳, 杨 军. TiNi 形状记忆合金超弹性的研究进展[J]. 材料导报, 2010, 24(7): 85-88.
WANG Qi, HE Zhi-rong, WANG Fang, LIU Yan, YANG Jun. Research progress of superelasticity in TiNi shape memory alloy[J]. Materials Review, 2010, 24(7): 85-88.
- [2] 司乃潮, 武 英, 司松海, 张志敏. 不同热处理条件下 TiNiCr 形状记忆合金的超弹性[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2011(6): 24-28.
SI Nai-chao, WU Ying, SI Song-hai, ZHANG Zhi-min. Superelastic of TiNiCr shape memory alloys under different heat treatment[J]. Nonferrous Metals: Extractive Metallurgy, 2011(6): 24-28.
- [3] LI Yong-hua, LI Yu-hai, ZHAO Zhong-xing, JIA Wei, DENG Zi-yu. Recent research development of temperature memory effect in TiNi based shape memory alloy[J]. Journal of Functional Materials, 2006, 37(4): 650-652, 657.
- [4] 任文杰, 李宏男, 王利强. 基于神经网络的超弹性形状记忆合金循环本构模型[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(S2): 243-246.
REN Wen-jie, LI Hong-nan, WANG Li-qiang. Cyclic model for superelastic shape memory alloy based on neural network[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(S2): 243-246.
- [5] 贺志荣, 王 芳. TiNiV 形状记忆合金的循环形变特性[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(7): 1866-1872.
HE Zhi-rong, WANG Fang. Cyclic deformation characteristics of Ti-Ni-V shape memory alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(7): 1866-1872.
- [6] 颜 莹, 金 伟, 周亭俊. 热轧 Ni47Ti44Nb9 形状记忆合金板材的组织及其对拉伸和恢复性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(11): 2148-2153.
YAN Ying, JIN Wei, ZHOU Ting-jun. Texture and its influence on tensile and recoverable properties of hot-rolled Ni47Ti44Nb9 shape memory alloy sheet[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(11): 2148-2153.
- [7] 司乃潮, 赵培根, 司松海, 李 镭, 余松林. 预变形对 TiNiCr 形状记忆合金超弹性及显微组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(4): 695-700.
SI Nai-chao, ZHAO Pei-gen, SI Song-hai, LI Lei, YU Song-lin. Effect of pre-deformation on superelasticity and microstructure of TiNiCr shape memory alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(4): 695-700.
- [8] 司乃潮, 张志敏. 冷变形对 NiTiCr 形状记忆合金超弹性的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(1): 185-188.
SI Nai-chao, ZHANG Zhi-min. Effect of cold deformation on superelastic of NiTiCr shape memory alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(1): 185-188.
- [9] 贺志荣, 王 启, 邵大伟. 时效对 Ti-50.8Ni-0.3Cr 形状记忆合金组织和超弹性的影响[J]. 金属学报, 2012, 48(1): 56-62.
HE Zhi-wei, WANG Zhi, SHAO Da-wei. Effect of aging on microstructure and superelasticity in Ti-50.8Ni-0.3Cr shape memory alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(1): 56-62.
- [10] 任文杰, 王利强, 贾俊森, 贾 茹. 超弹性形状记忆合金棒力学性能的实验研究[J]. 功能材料, 2013, 44(2): 258-261.
REN Wen-jie, WANG Li-qiang, JIA Jun-sen, JIA Ru. Experimental study on mechanical behavior of superelastic shape memory alloy bar[J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(2): 258-261.
- [11] JIANG Shu-yong, ZHANG Yan-qiu, FAN Hong-tao. Fracture behavior and microstructure of as-cast NiTi shape memory alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(6): 1401-1406.
- [12] 贺志荣, 刘曼倩, 王 芳, 张永宏, 王永善. 时效工艺对 TiNiV 形状记忆合金显微组织和超弹性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(5): 1301-1306.
HE Zhi-rong, LIU Man-qian, WANG Fang, ZHANG Yong-hong, WANG Yong-shan. Effect of aging process on microstructure and superelasticity of Ti-Ni-V shape memory alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(5): 1301-1306.
- [13] ZHANG Zhi-jian, SI Nai-chao, LIU Guang-lei, SI Song-hai. Study on superelasticity and microstructure of TiNiV shape memory alloy by medium-temperature treatment[J]. Advanced Materials Research, 2012, 418/420: 222-227.
- [14] LIN H C, YANG C H, LIN M C, LIN C S, LIN K M, CHANG L S. Aging effect on a Ti_{47.25}Ni_{48.75}V₄ shape memory alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 449: 119-124.
- [15] 司乃潮, 张志敏, 司松海, 吴 强, 郭 毅, 白高鹏. 冷变形对 TiNiCr 形状记忆合金超弹性和组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2007, 27(12): 979-981.
SI Nai-chao, ZHANG Zhi-min, SI Song-hai, WU Qiang, GUO Yi, BAI Gao-peng. Effects of cold deformation on superelasticity

- and microstructure of TiNiCr shape memory alloys[J]. Journal of Special Casting & Nonferrous Alloys, 2007, 27(12): 979-981.
- [16] LI Da-sheng, ZHANG Yu-peng, XIONG Zhi-peng, ZHANG Xin-ping. Preparation of NiTi shape memory alloys with low density and high strength and their superelasticity[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(8): 995-1000.
- [17] 刘晓山, 何国求, 陈成澍, 胡 魏. TiNiAl 合金形状记忆及超弹性效应研究[J]. 功能材料, 2006, 37(6): 912-914.
- LIU Xiao-shan, HE Guo-qiu, CHEN Cheng-shu, HU Wei. The research of shape memory effect and superelasticity of a TiNiAl alloy[J]. Journal of Functional Materials, 2006, 37(6): 912-914.
- [18] ZHOU Hai-jun, HUANG Hong-hong, ZHANG Hua. An experimental study on mechanical behavior of superelastic NiTi shape memory alloy bar subjected to torsion[J]. Advanced Materials Research, 2011, 163/167: 3992-3995.
- [19] 徐祖耀, 江伯鸿, 杨大智, 赵连城. 形状记忆材料[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000: 18-84.
- XU Zu-yao, JIANG Bo-hong, YANG Da-zhi, ZHAO Lian-cheng. Shape memory material[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2000: 18-84.
- [20] MITWALLY M E, MAHMOUD F. Effect of cold work and annealing on the structure and characteristics of NiTi alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 519(1/2): 155-166.
- (编辑 陈卫萍)