

Ni-Ti 合金超弹性各向异性与再结晶织构关系

李颖初, 王轶农, 郑斌

(大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘要: Ni-50.6%Ti 合金具有超弹性各向异性, 本实验从再结晶织构这一方面来估算超弹性。首先在高于 A_f (马氏体逆相变终了温度) 的温度进行应力诱发相变应变测试, 结果显示应变沿 RD 方向最大, TD 方向最小, 45° 方向的居中。相同的拉伸方向上, 500°C 的应变最大, 超弹性性能最好。然后利用母相及马氏体的晶格常数计算得出晶粒中马氏体变体产生的可恢复应变 ε_{im} 来估计 Ni-Ti 合金超弹性的各向异性。对比计算和实测的超弹性结果, 可以看出: 在同一退火温度上, 沿 RD 方向的应变比 TD 方向的应变大, 两种结果相符合; 实测的结果在 500°C 时相变应变最大, 而计算的结果在 600°C 时最大; 同时, 同一温度和方向的实测的相变应变都比计算的要小。

关键词: Ni-Ti 合金; 超弹性各向异性; 再结晶织构

The relationship of super-elastic anisotropy and recrystallization texture of Ni-Ti alloy

Li Yingchu, Wang Yinong, Zheng Bin

(School of Material Science and Engineering Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116028)

Abstract: Ni-50.6%Ti alloy have super-elastic anisotropy. In this study, the effect of recrystallization texture on super-elastic is estimated. First, the paper tested the stress-induced transformation strain at the temperature higher than A_f . The results show that the strain produced along the RD direction is maximum, and the strain along 45° direction is smaller than the RD direction, and the strain obtained along TD direction is minimum. In the same tensile direction, the maximum strain appeared at 500°C , and the sample perform the best super-elastic properties. Then calculated recoverable strain ε_{im} by parent and martensite lattice constant produced by martensite variant to estimate super-elastic anisotropy. By comparison with the calculation and the experiment results, the conclusion is drawn as follows: in the same anneal temperature, the strain along RD direction is bigger than TD direction; the maximum stress-induced transformation strain by calculation and measurement appeared at 500°C and 600°C respectively; and in the same temperature and direction, the measured transformation strain is smaller than calculated result.

Key words: Ni-Ti alloy; Super-elastic anisotropy; recrystallization texture

0 引言

一般变形的金属经过再结晶退火后生成的新晶粒仍然具有择优取向, 称为再结晶织构。再结晶过程中晶体取向分布的变化规律, 主要有两种理论, 即定向形核理论与选择性生长理论^[1-3]。

定向形核理论认为, 再结晶的开始阶段, 形变基体内部会出现某种由回复造成的低密度位错缺陷的亚结构, 这种无应变的亚结构通过合并、粗化形成尺寸较大的亚晶, 并成为潜在的再结晶晶核。选择性生长理论认为, 再结晶晶核在形变基体上随机形核, 晶粒长大依赖于晶体取向, 即具有特定取向的晶粒有利于晶界迁移, 只有那些生长速率大的晶核快速生长, 退火再结晶织构由快速生长的晶核取向来决定^[1-3]。

作者简介: 李颖初 (1985-8), 女, 硕士研究生, Ni-Ti 合金再结晶织构. E-mail: liyingchu@hotmail.com

再结晶之后的晶粒具有择优取向,这就使得板材不同方向的力学性能不同,我们可以利用再结晶组织的反极图来估算不同方向的反相应变,用以总结再结晶组织对超弹性的影响。

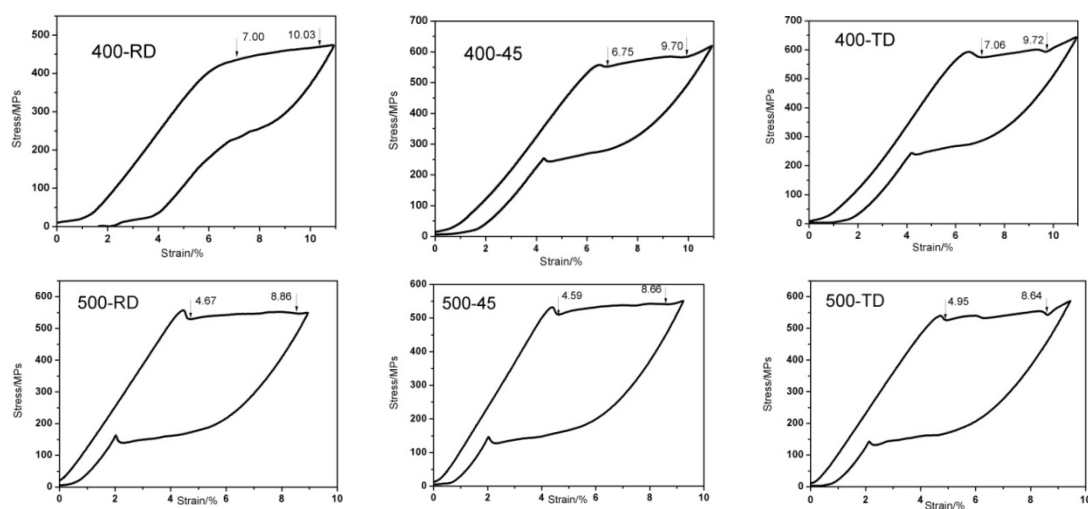
1 实验结果

本文选择的是厚度为 3mm 具有超弹性成分的 Ni-Ti 合金热轧板,其 Ni 含量为 50.6at.%。将此热轧板在 850℃ 下固溶处理 1h,水淬,去除其加工历史。在 500℃ 下保温 20~30min,进行温轧处理,得到厚度为 1.8mm 的板材,变形量为 40%。再将温轧之后的板材分别进行 400℃、500℃、600℃、700℃ 退火 1h 处理。拉伸仪器是长春科新试验仪器有限公司研发设计的多功能拉伸试验机,实验采用的 2KN 的传感器,保温箱温度范围是 -60℃~200℃,控制加热的设备是 GD-300A 型控温箱。织构测定使用的是 Philips PW3040/60 型 X' Pert Pro MRD 衍射仪及 B-7 半自动织构测角台。对每个样品,按照 Schulz 背反射法分别测定 {110}, {200} 和 {211} 三张不完整极图,测量条件为 CuK α 辐射, Ni 滤片,管电压 40 kV,管电流 40 mA,扫描按同心圆步进方式进行, $\alpha=0\sim70^\circ$, $\beta=0\sim360^\circ$, $\Delta\alpha=\Delta\beta=5^\circ$,由计算机采集数据。

1.1 应力诱发相变应变测试

Ni-50.6%Ti 合金具有超弹性的性能。超弹性是指在母相奥氏体态时,合金经受应力(应力为相变驱动力)发生相变,产生马氏体,去除应力后,部分应变因为应力诱发产生的马氏体逆转变为母相而回复^[4]。由此可知,超弹性出现的温度必须高于 A_f (马氏体逆相变为母相的终了温度),合金处于母相状态时,才可发生。由 DSC 测试可知,温轧 Ni-50.6%Ti 合金经 400℃、500℃、600℃、700℃ 退火后的 A_f 温度均低于 60℃,所以,本文所选的应力诱发相变应变测试的温度为 60℃。在此温度,合金处于奥氏体状态,可以显示出超弹性。做此试验时,为保证合金处于 60℃ 的温度,拉伸之前应把样品置于保温箱中保温一段时间,使样品的各个部分均达到此温度,再进行拉伸测试。

图 1 给出了温轧 Ni-50.6%Ti 合金再经 400℃、500℃、600℃、700℃ 退火后在 60℃ 时沿 RD(轧向)、45°、TD(横轧向)三个方向拉伸的应力应变曲线。试验时加载至应力诱发马氏体刚刚结束时卸载,取应力诱发马氏体阶段的相变差为相变应力。



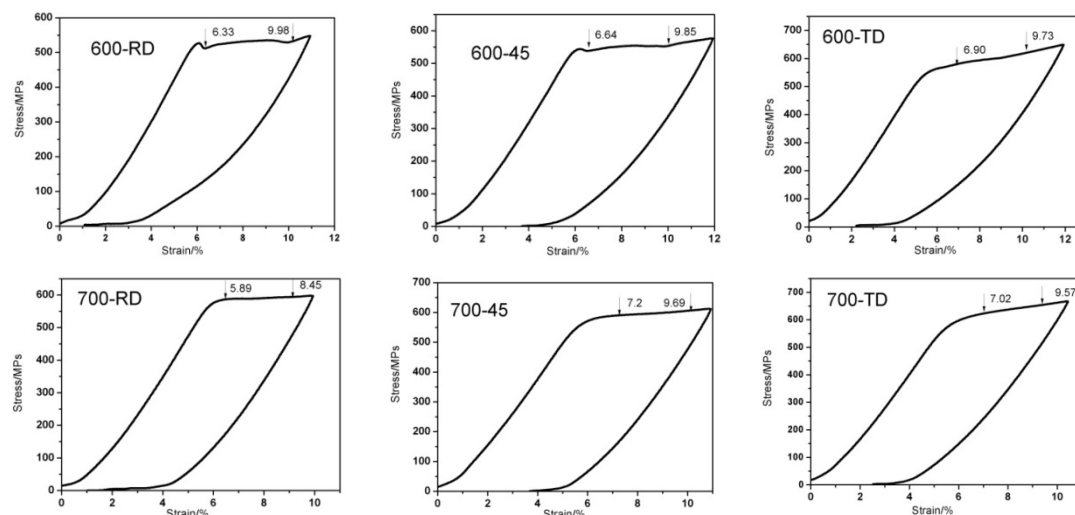


图 1 温轧 Ni-50.6%Ti 合金再 400℃、500℃、600℃、700℃退火后在沿 RD、45°、TD 三个方向拉伸的应力应变曲线

Fig4.1 Stress-strain curves obtained by tensile test along different direction after different annealing temperatures

表 1 不同温度退火后 Ni-Ti 合金相变应变 ε_T 与拉伸取向关系

Table .1 The relationship between transformation strains ε_T and tensile directions after different annealing temperatures

Annealing temperature/℃	$\varepsilon_T/\%$		
	RD	45°	TD
400	3.00	2.95	2.66
500	4.19	4.07	3.69
600	3.65	3.21	2.82
700	2.56	2.49	2.36

表 1 列出了不同温度退火后 Ni-Ti 合金相变应变 ε_T 与拉伸取向关系, 各温度退火后应力诱发的相变应变沿 RD 方向最大, TD 方向最小, 45°方向的居中, 存在各向异性。横向比较时, 即相同的拉伸方向上, 500℃的应变最大, 超弹性性能最好。600℃及 700℃随退火温度升高应变降低, 500℃是个峰值, 从图 2 中可以更好的观察到这一点。

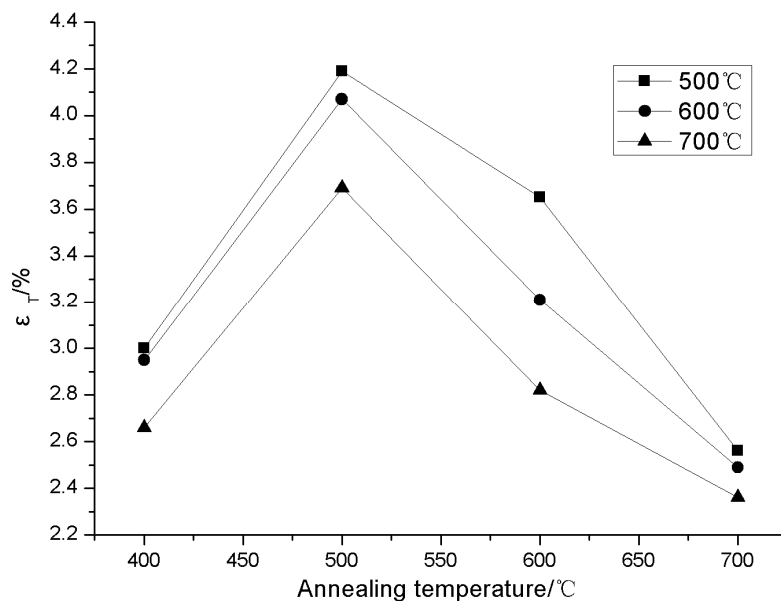


图 2 不同温度退火后 Ni-Ti 合金相变应变 ε_T 与拉伸取向关系

Fig 2 The relationship between transformation strains ε_T and tensile directions after different annealing temperatures

1.2 反极图估算超弹性

Ni-Ti 合金应力诱发马氏体相变存在着各向异性。我们可以利用母相及马氏体的晶格常数来计算得出晶粒中马氏体变体产生的可恢复应变 ϵ_M^i 来估计 Ni-Ti 合金超弹性的各向异性。S. Miyazaki^[5] 等人就利用等高线来表示 [001]-[011]-[111] 标准极射三角形的各个方向的应变计算结果。

图 3 即为 S. Miyazaki 的计算的马氏体相变应变的取向关系，图中标有四个晶向 [001]、[011]、[-111] 及 [-355]，等高线表示相变应变大小。从图中可以看到，Ni-Ti 单晶中相变应变具有各向异性，具体表现为 [-355] 方向最高为 10.5%，其次为 [011] 和 [-111]，应变分别为 8.4% 和 9.9%，[001] 方向最低为 3.0%。这就说明如果高密度的极点偏聚在高相变应变值的方向，则拉伸后所获得的相变应变值就大；反之，若偏聚在低相变应变值的方向，则拉伸后所获得的相变应变值就小。

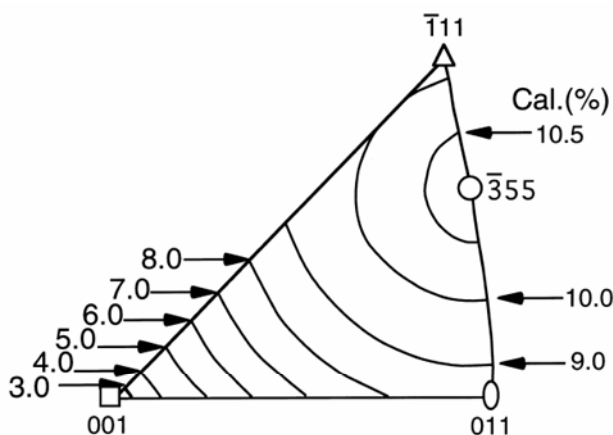


图 3 S. Miyazaki 计算的马氏体相变应变的取向关系^[5]

Fig3 Orientation dependence of the calculated transformation strain associated with the martensitic transformation calculate by S. Miyazaki

在多晶织构分析中，沿拉伸轴的反极图反映了垂直于拉伸轴的不同晶面的分布情况，也表示这些晶粒在多晶体中的相对体积百分比。如果忽略单个晶粒的形状和各晶粒间的相互作用，那么多晶材料的平均相变应变可通过对所有晶粒的相变应变在拉伸轴方向的线性平均来计算^[6]：

$$\bar{\epsilon}_y = \frac{\int R_y(hkl) \epsilon(hkl) ds}{\int R_y(hkl) ds} \quad (1)$$

其中 $\bar{\epsilon}_y$ 是多晶沿拉伸轴方向的平均相变应变； $\epsilon(hkl)$ 是单晶沿晶面 (hkl) 法线的相变应变； $R_y(hkl)$ 是沿拉伸轴的反极图中 (hkl) 极点的极密度，即 (hkl) 晶面法线投影到拉伸轴的体积百分数； ds 是极点 (hkl) 所在的球面单元； S 是总面积，即反极图的极射三角形面积。

为了求解公式(1)，通常可以采用等球面方法对反极图面积做离散处理。可将反极图的总面积按照等面积分成 36 个小单元，每一个小单元我们认为具有相同的 $R_y(h_i k_i l_i)$ 与 $\epsilon_i(h_i k_i l_i)$ 。如图 4 所示。

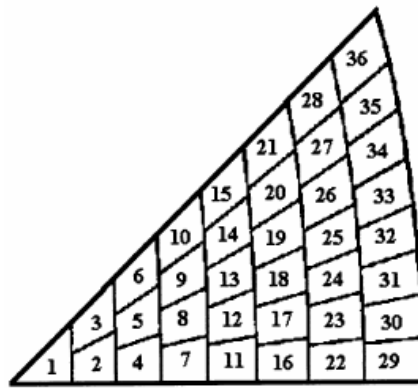
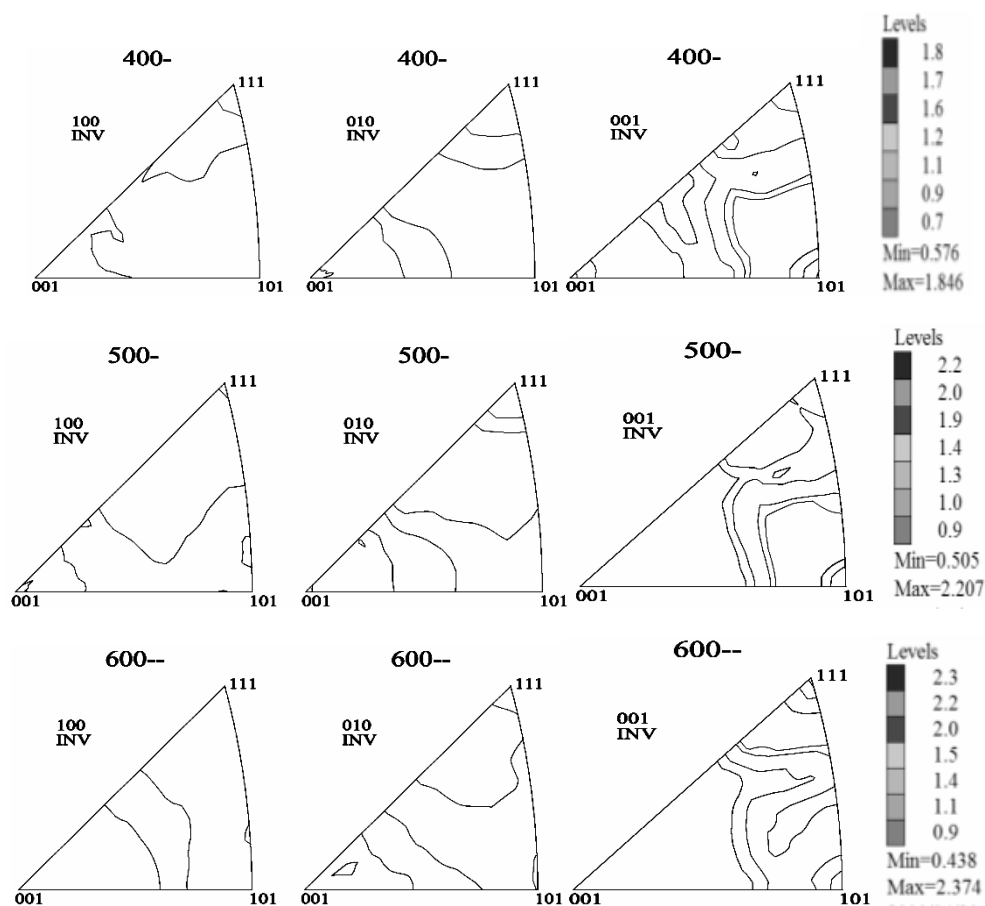


图4 按照等球面法对反极图离散后的36个小单元

Fig. 4 The 36 small domains of inverse pole figure divided according to equal spherical area

利用反极图及上面的等球法我们可以计算得出不同温度退火后的RD(100)和TD(010)方向的相变应变,反极图如5所示,结果如下表2所示。对比计算和实测的超弹性结果,可以看出:在同一退火温度上,沿RD方向的应变比TD方向的应变大,两种结果相符合;实测的结果在500℃时相变应变最大,而计算的结果在600℃时最大;同时,同一温度和方向的实测的相变应变都比计算的要小。这是因为实际上影响超弹性的因素有很多,如晶粒大小、冷变形的程度、测试温度等。本实验仅从再结晶组织一方面来估算超弹性,从图3可知相变应变具有各向异性,在[-355]方向最高,其次为[-111]、[011]方向,[001]方向最小。



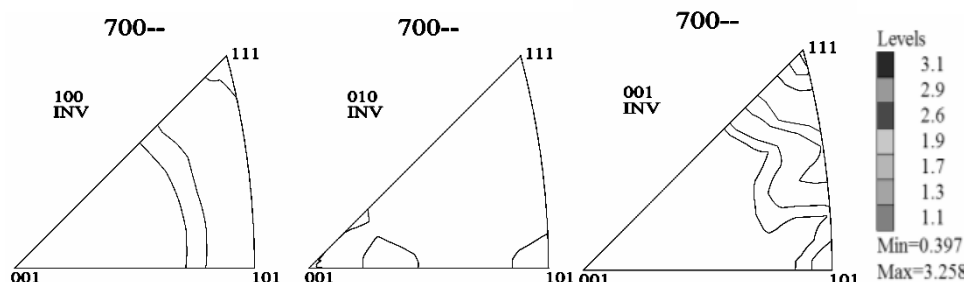


图 5 不同温度退火后的反极图

Fig 5 Inverse pole figures of NiTi alloy after annealed at different temperature

表 2 经不同温度退火后 NiTi 合金沿 RD、TD 方向相变应变计算值

Table 2 Calculated transformation strain of rolling direction and transverse direction after different annealing temperatures

Annealing temperature /°C	$\varepsilon_T/\%$	
	RD	TD
400	9.12	9.08
500	9.12	9.12
600	9.28	9.20
700	9.14	9.05

3 结论

(1) Ni-Ti 合金再结晶退火后应力诱发的相变应变存在各向异性, 应变沿 RD 方向最大, TD 方向最小, 45°方向的居中。横向比较时, 即相同的拉伸方向上, 500°C 的应变最大, 超弹性性能最好。600°C 及 700°C 随退火温度升高应变降低, 400°C 及 500°C 随退火温度降低而降低。

(2) 对比计算和实测的超弹性结果, 可以看出: 在同一退火温度上, 沿 RD 方向的应变比 TD 方向的应变大, 两种结果相符合; 实测的结果在 500°C 时相变应变最大, 而计算的结果在 600°C 时最大; 同时, 同一温度和方向的实测的相变应变都比计算的小。这是因为实际上影响超弹性的因素有很多, 如晶粒大小、冷变形的程度、测试温度等, 本实验仅从再结晶组织构一方面来估算超弹性, 所以有一些偏差。

参考文献

- [1] DOHERTY R D, HUGHES D A, HUMPHREYS F J et al. Current issues in recrystallization: a review [J]. Mater. Sci. Eng. A, 1997, 238: 219-274.
- [2] HUMPHREYS F J, MATHERLY M. Recrystallization and related annealing phenomena [M]. Elsevier Science Ltd. Publications, 1995, 173-178.
- [3] JONAS J J, URABE T. Oriented nucleation and selective growth during the annealing of IF steel [A]. In: Proc Int Forum on Physical Metallurgy of IF Steel[C]. ISIJ, 1994, 77-94.
- [4] 徐祖耀. 形状记忆材料. 2000, 341-348.
- [5] MIYAZAKI S, NO V H, KITAMURA K et al. Texture of Ti-Ni rolled thin plates and sputter-deposited thin films. International Journal of Plasticity [J]. 2000, 16(10-11): 1135 - 1154.
- [6] YUAN W Q, YI S. Pseudo-elastic strain estimation of textured TiNi shape memory alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 1999, 271(1-2): 439-448.