

超弹性NiTi合金在应力诱导相变 过程中的反常应力弛豫

张进修 林云
(物理学系)

摘 要

通常的固体材料在加载或卸载中保持恒应变时, 应力均随时间而降低并逐渐弛豫至其稳定值。在将超弹性Ni51Ti49合金试样拉伸至应变约为4%后卸载, 并保持在某一应变值时, 观测到应力的反常弛豫, 亦即恒应变时的应力随着时间而增加, 逐渐达到其最大值后保持不变。同时测量了恒应变下应力弛豫过程中试样电阻的变化。用恒应变时应力诱导产生的无公度相(I)—公度相(C)转变以及马氏体转变对这一反常现象进行了解释。这一结果可为相界面运动动力学以及传导电子在I/C转变中的能量变化提供信息。

当固体材料在 $t = 0$ 时变形到某一应变值 ϵ_0 并保持 ϵ_0 不变, 则材料中所承受的应力将随时间的增加而减小并趋于某一稳定值。图1示意地表示了这一情形, 这种现象叫恒应变下的滞弹性应力弛豫^[1,2]。如果所加应力小于材料的弹性极限, 则可由应力弛豫实验求出材料的未弛豫模量 M_U 、弛豫模量 M_R 、模量弛豫量 δM 、模量亏损 $\Delta M/M$ 以及应力弛豫方程^[1,2]:

$$M_U = \sigma(0)/\epsilon_0 \quad (1)$$

$$M_R = \sigma(\infty)/\epsilon_0 \quad (2)$$

$$\delta M = M_U - M_R \quad (3)$$

$$\Delta M/M = [\sigma(0) - \sigma(\infty)]/\sigma(\infty) \quad (4)$$

$$M(t) = \sigma(t)/\epsilon_0 = M_R + \delta M \exp(-t/\tau_e) \quad (5)$$

此处 τ_e 称恒应变弛豫时间。

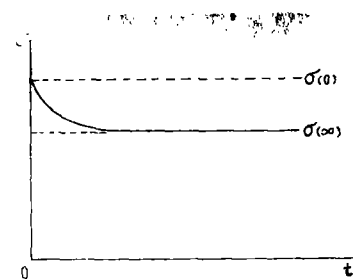


图1 滞弹性固体的应力弛豫。

如果所加应力超过了材料的弹性极限,则固体材料将发生永久变形,在此条件下保持 ϵ_0 不变时,材料所承受的应力亦将随着时间的增加而减小并趋于稳定值。此时虽不能由(1)~(3)式求出 M_L 、 M_F 及 δM ,但能从(4)式求得 $\Delta M/M$ 并可得到应力弛豫方程为

$$\sigma(t) = \sigma(\infty) + [\sigma(0) - \sigma(\infty)] \exp(-t/\tau_\epsilon). \quad (6)$$

迄今为止,文献中所报导的恒应变条件下的应力弛豫均符合(5)式和(6)式,亦即它们都是固体的滞弹性力学弛豫。本文报导一种在应力诱导相变过程中观测到的反常应力弛豫,随着保持恒应变时间的增加,材料所承受的应力将随着时间的增加而增加并趋向稳定值。

所用试样是上海钢铁研究所提供的Ti-51at%Ni丝状试样,直径为0.8毫米,计算长度为150毫米。所用的超弹性热处理工艺为500°C保温一小时,空冷。试验温度为室温(29°C)。所用的拉力试验机为长春第二试验机厂出品的DL-1000型电子拉力试验机,所用的变形速率 $\dot{\epsilon}$ 为 1×10^{-4} /秒。用千分表来测量试样的应变值。

将试样两端的夹头分别与拉力试验机的测力计和下平台用高强塑料绝缘后,就可在拉伸及恒应变过程中用应力计测量试样中应力的变化以及用四端电位法(恒定电流)测量试样的电阻变化。应力和电阻信号均用高灵敏度X-Y记录仪的Y轴记录。

实验程序如下:以拉伸速率 $\dot{\epsilon}$ 将试样拉伸至应变为 ϵ_1 并保持不变,此时应力由零上升至 σ_1 ,电阻变化由零上升至 ΔR_1 ;然后将记录笔的X位置迅速调整至 ϵ_1 处并观测应力和电阻的变化。实验结果表明,经过约5分钟后,应力和电阻都基本上达到了它们的稳定值;此后再将试样变形至应变为 ϵ_2 ,此时 σ 变为 σ_2 , ΔR 变为 ΔR_2 ,将记录笔平移至 ϵ_2 处并观测 σ 和 ΔR 的变化……。如此反复至总应变约为4%后再按同样的程序卸载,直至应力为零时止。所得阶梯式的 $\sigma-\epsilon$ 曲线及 $\Delta R-\epsilon$ 曲线如图2及图3所示。由 ϵ_1 、 ϵ_2 …等处应力或电阻的起始端点连成的就是未弛豫的 $\sigma-\epsilon$ 和 $\Delta R-\epsilon$ “回线(虚线)”;而由末尾端点连成的就是充分弛豫了的 $\sigma-\epsilon$ 和 $\Delta R-\epsilon$ “回线”(点线)。

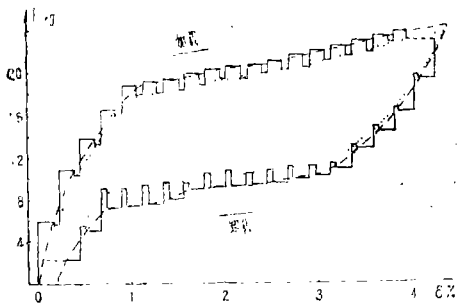


图2 超弹性Ni51Ti49试样在第二应力循环时的未弛豫 $\sigma-\epsilon$ 曲线和充分弛豫(5分钟)后的 $\sigma-\epsilon$ 曲线。

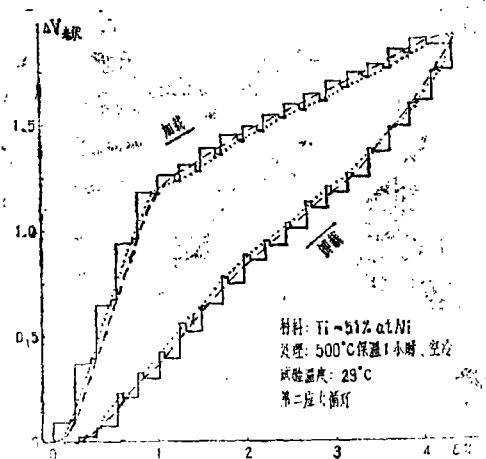


图3 超弹性Ni51Ti49试样在第二应力循环时的未弛豫 $\Delta R-\epsilon$ 曲线和充分弛豫(5分钟)后的 $\Delta R-\epsilon$ 曲线。

由图2可见,(1)加载和卸载时的 $\sigma-\epsilon$ 曲线均可分成明显的两个阶段并组成一条大

体上闭合的 σ - ϵ 回线。加载时,第一阶段($\epsilon \approx 1\%$ 前)的 σ - ϵ 曲线上升较快,而第二阶段($\epsilon \approx 1\%$ 后)的 σ - ϵ 曲线则比较平缓。卸载时,第一阶段($\epsilon \approx 3\%$ 至 4%)的 σ - ϵ 曲线下降较快,而第二阶段($\epsilon \approx 3\%$)的 σ - ϵ 曲线比较平缓,只有当 $\epsilon \approx 0.5\%$ 之后才又出现下降较快的现象。(2)加载过程中的应力弛豫均使应力减小并逐渐达到其稳定值;卸载过程中的应力弛豫均使应力增加并逐渐达到其稳定值。而图3给出的结果亦表明, ΔR - ϵ 曲线也大体上是闭合的。加载时, σ - ϵ 曲线中变化较快的第一阶段对应的弛豫过程的电阻增大,而变化平缓的第二阶段所对应的弛豫过程却使电阻减小。因此 σ - ϵ 变化性质的改变反映了两种性质不同的弛豫过程。卸载时的情况则刚好相反, σ 变化较快时弛豫过程使电阻下降,而应力变化平缓时弛豫过程却使电阻上升。

进一步的实验还表明, $\dot{\epsilon}$ 越大,恒应变下弛豫过程引起的应力变化和电阻变化也越大。当 $\dot{\epsilon} \approx 10^{-6}$ /秒数量级时, σ - ϵ 曲线和 ΔR - ϵ 曲线的形状基本上与 $\dot{\epsilon}$ 无关;因此 $\dot{\epsilon} \approx 10^{-6}$ /秒时,所得的 σ - ϵ 曲线即基本上对应于充分弛豫后的 σ - ϵ 曲线。

闭合的 σ - ϵ 回线说明试样具有完全的超弹性,而这种超弹性变形中的应变都是由应力诱导相变应变来提供的⁽³⁾。我们关于超弹性NiTi合金中应力诱导相变(试样成份与热处理均与本文相同)的研究表明,应力诱导产生的是无公度相I到公度相C的转变和(I+C)相到马氏体相M的转变;I→C转变使试样电阻升高,而(I+C)→M转变使试样电阻降低⁽⁴⁾。本文所报导的恒应变下的应力弛豫可用上述应力诱导相变作出合理的解释。

在加载过程的第一阶段,应变增加时 σ 和 ΔR 均增加,这说明发生了I→C转变,其应变由I→C转变时沿 $\langle 111 \rangle$ 方向伸长的变形来提供⁽⁵⁾。如果在恒应变时有一部分I相继续转变成C相,则还可以提供额外的相变应变以减小试样的弹性变形从而使试样的弹性应力松弛,所以在恒应变弛豫过程中的应力减小,相变停止时应力达到稳定值;但I→C转变使电阻增大,所以弛豫过程的电阻上升。到了第二阶段,加载过程产生的仍主要是I→C转变,所以电阻上升,但在恒应变时,因应力已足够大,因而可在弛豫过程中诱导产生等温的(I+C)→M转变,由M转变时的切变提供相变应变,所以应力和电阻均随保持恒应变的时间的增加而下降。在卸载过程中发生相反的反常相变过程。卸载第一阶段,由于应力与电阻同时减小,所以发生的是C→I转变;但在恒应变时电阻下降,所以发生的主要也是C→I转变,由于此时C相所提供的相变应变继续减小,这部分应变将由试样的弹性形变来提供,因此弛豫过程的应力将增大,直至应力减小使到C→I转变停止时应力才达到其稳定值。到了卸载的第二阶段,由于电阻和应力均在卸载过程下降,所以发生的仍主要是C→I转变;但在恒应变时电阻上升,所以发生的主要是M→(C+I)转变,由于马氏体转变提供的相变应变减小,试样的弹性形变增加,所以弛豫过程的应力增大,试样的电阻也因M→(C+I)转变而增大。由图2及图3可以看出, σ - ϵ 和 ΔR - ϵ 曲线并非完全闭合,因此M→(I+C)转变是不完全的,即使卸载至应力为零,试样中也会残留有M相⁽⁴⁾。

由此可见,图2所表现出恒应变时的反常应力弛豫并非通常的滞弹性力学弛豫,它是一种相变应力“弛豫”。依赖于应力诱导相变的性质和方向,它既可使弛豫过程的应

力增大, 也可使应力减小。

由于 $I \rightleftharpoons C$ 和 $(I + C) \rightleftharpoons M$ 都是一级相变, 因此, 相变应力弛豫都是通过相界面的运动来实现的。求得了由(4)式及(6)式表示的相变应力弛豫的规律, 即弛豫过程中的模量亏损 $\Delta M/M$ 和恒应变弛豫时间 τ_e , 就可了解相界面低速运动的动力学特性。

经过若干次应力循环后, 所用试样将具有完全的超弹性和发生可逆的 $I \rightleftharpoons C$ 转变^[6]。通过测定充分弛豫后的 $\sigma-\epsilon$ 回线面积就可提供正反 $I \rightleftharpoons C$ 转变过程所需的能量。由于超弹性NiTi合金中应力诱导产生的I/C转变是一种无公度—公度电荷密度波的转变^[6], 因此, 充分弛豫的 $\sigma-\epsilon$ 回线面积可提供I/C相变过程中传导电子总能量变化的数据。

由上述讨论可作出如下结论:

- 1、应力诱导相变过程中恒应变下的反常应力弛豫不是通常的滞弹性应力弛豫, 而是相变应力弛豫, 依赖于相变的性质, 应力可在弛豫过程增大或减小并达到其稳定值。
- 2、通过相变应力弛豫规律的研究可提供相界面运动规律的信息。
- 3、通过充分弛豫后应力诱导I/C转变 $\sigma-\epsilon$ 回线的测定可提供传导电子能量变化的信息。

参 考 文 献

- [1] A.S. Nowick, 物理译丛, 1964, 2, P.1.
- [2] A.S. Nowik, B.S. Berry, *Anelastic Relaxation in Crystalline Solids*, Academic Press, 1972, P.8.
- [3] 徐祖耀, 马氏体相变与马氏体, 科学出版社, 1980, P.502—506.
- [4] 张进修、林光明、黄元士等, 中山大学学报(自然科学版), 1985, 3, 1.
- [5] C.M.Hwang et al., *Phil. Mag.*, (1983), 9, 177.
- [6] 李江宏、张进修, ICIFAUS-7, Urbana, 1985, 6.

An Anomalous Stress Relaxation in the Process of Stress-induced Transitions in NiTi Superelasticity Alloy

Zhang Jinxiu Lin Yun

Abstract

When a constant strain ϵ_0 is imposed on a solid material at $t=0$ and maintained for $t \geq 0$, a stress relaxation (stress decreases with time) can be usually observed. But stretching a NiTi superelasticity specimen to $\epsilon \sim 4\%$ and unloading to a constant ϵ ($< 4\%$), an anomalous stress relaxation was observed. The stress increases with time and approach a difinite equilibrium value.

The change of electric resistance of NiTi specimen was also measured simultaneously in the process of stress relaxation under the condition of constant ϵ . The mechanism of this anomalous stress relaxation were discussed and the stress-induced incommensurate/commensurate (I/C) and martensite transitions were associated with this anomalous phenomenon.