

NiTi 合金中应力诱导的 I/C 相变 及其界面动力学研究

张 进 修 李 江 宏

(中山大学物理系, 材料科学研究所)

1985 年 12 月 31 日收到; 1987 年 3 月 12 日收到修改稿

提 要

在改装了的拉力试验机上,以不同的拉伸速率 $\dot{\epsilon}(0.79-18 \times 10^{-3}\text{s}^{-1})$ 进行加、卸载试验,并用中间扭摆和四端电位法同时测量了 Ni-49at%Ti 合金丝在应力诱导 I/C 相变过程的内耗 Q^{-1} 、模量 M/M_0 、电阻率 ρ/ρ_0 和应力-应变曲线。研究了应力循环和应变速率的影响。在 $Q^{-1}-\epsilon$ 曲线上出现 Q^{-1} 峰,而在 $P-\epsilon$ 曲线上出现与之相对应的模量极小。内耗峰的高度 Q_0^{-1} 和模量亏损值均随 $\dot{\epsilon}$ 增大而增大。

根据界面动力学模型和内耗的实验数据,计算得应力诱导 I/C 相变过程界面的动力学关系为

$$V = V^*(\Delta G - \Delta G_R)^m,$$

V^* 和 m 为动力学参数, ΔG_R 为相变过程中运动相界面所受的阻力, 计算得 $\Delta G_R \approx 1 \text{ cal/mol}$ 。

讨论了内耗和模量亏损、软模效应之间的关系。

一、引 言

NiTi 合金是目前性能最好并进入了工业实用领域的形状记忆材料。20 多年来,人们对 NiTi 的马氏体相变和“预马氏体”相变进行了大量研究。60 年代后期发现 NiTi 在马氏体相变之前出现一系列反常行为,在 X 射线、电子、中子衍射图上出现额外反射斑点,电阻、比热、声速等物理性能均出现异常。当时认为这种反常行为是马氏体相变的前期表现,因而称之为“预马氏体相变”。经过许多人的工作才确认“预马氏体相变”其实是独立于马氏体相变的另一相变^[1-3]。1982 年, Hwang, Mercjle, Salamon 和 Wayman 用 X 射线、电子和中子衍射,以及透射电子显微镜观察等方法详细地研究了 $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{47}\text{Fe}_3$ 合金的“预相变”,认为“预相变”过程存在两个相变,并与电荷密度波 (CDW) 的形成有关。首先是母相 CsCl (B2) 结构转变为无公度 I 相的二级相变 (N/I), 产生与点阵周期不配比的无公度电荷密度波;然后在温度稍低处晶格点阵畸变,形成菱形相,电荷密度波与点阵配比,这是从无公度 I 相转变为公度 C 相的一级相变 (I/C)^[3]。

近年来,人们已认识到 NiTi 合金的形状记忆效应不只是来自马氏体相变, I/C 相变也可产生较大的形状记忆效应^[4,5], 说明应力可诱导或帮助 I/C 相变的进行。文献[6]和[7]的结果表明,应力可诱导试样中的 I/C 相变并使试样具有超弹性,亦即加载时应力

诱导使母相转变为 C 相并由相变应变提供所需的变形,而不会产生通常由于位错运动引起的范性形变。卸载时,应力诱导的相变朝相反方向进行 ($C \rightarrow I$), I/C 相变提供的应变逐渐消失。应力为零时,由应力诱导产生的 C 相全部变回 I 相,全部应变回复至零。

对于 NiTi 合金的马氏体相变和 I/C 相变变温过程的内耗,已有许多报道。1968 年 Hasiguti 等人首先观察到 NiTi 在马氏体相变范围内的内耗峰^[8]。1979 年 Mercier 等人报道了在 NiTi 的马氏体相变内耗峰前出现“预马氏体”转变峰^[9]。后来有人作过类似报道^[10]。但在 NiTi 合金的加、卸载过程中,即应力诱导相变过程中能否观测到与变温过程类似的内耗过程,迄今未见报道。

马氏体相变过程内耗 Q^{-1} 有以下实验规律:

1) 恒定变温速率 $\dot{T}$ 测量时, $Q^{-1} \propto \dot{T}/f$, 即与变温速率有正变关系,与测量频率有反变关系;

2) 在中等应力振幅下,内耗与振幅无关,高低振幅区,内耗随振幅增大而增大;

3) 恒温测量时,变温过程的特征内耗消失。已提出多种理论或模型,均可定性解释相变过程内耗峰的出现。Delormen-Dejongh 模型从实验关系出发,得到与变温速率正比的内耗^[11]; Mercier 理论认为相变过程内耗与模量软化有关^[9];王业宁等人提出静滞后的损耗机制,认为相变内耗与应力感生界面位错的运动有关^[12]。最近,作者之一与其他研究工作者从相变热力学和界面动力学出发,提出了相变过程内耗的界面动力学模型,研究了内耗与相变驱动力、相变阻力、界面运动速度之间的关系,可从内耗的实验数据获得界面运动速度的具体表达式。

本文在超弹性 NiTi 合金试样的可逆应力诱导 I/C 相变过程中,同时测量试样的内耗 Q^{-1} 、模量 M 、电阻 R 和应力-应变 (σ - ϵ) 曲线,观测到了正反 I/C 相变过程的内耗峰和与其相对应的模量极小,并用界面动力学模型分析了实验数据,获得了应力诱导 I/C 相变过程中界面运动的有关信息。

二、实 验

1. 试样

本工作所用试样是上海钢铁研究所提供的 $\text{Ni-49at\%Ti}$ 合金丝,试样直径为 0.8mm,有效长度为 150mm。试样最后的热处理规范为 500℃ 保温 1h 后空冷。热处理时用夹具将试样夹直。试样处理完成后,用 10% 稀盐酸清洗,以消除表面氧化层。

2. 实验装置

在经过改装的拉力试验机上对试样进行加、卸载试验、拉伸变形的速率可在 10^{-6} — $10^{-4}/\text{s}$ 范围内改变。采用中间扭摆测量内耗,频率约为 1Hz。用 LSY-2 型力学三用仪测量频率,有效数字为四位。测量载荷的精度为 0.2kg。用 LVDT-I 型位移传感器测量试样的应变,精度为 0.02%。采用四端电位法测量电阻,所用恒定电流为 30mA,在试样两端引出导线连至高灵敏度 X-Y 记录仪,记录电压的精度为 0.01mV,换算为电阻后测量精度为 0.3mΩ。合金丝电阻在几百毫欧量级, I/C 相变时电阻变化约为 10%,即使

考虑了恒定电流的波动, 四端电位法也足以精确地反映相变时电阻的变化。形变和电阻信号分别连在记录仪的 X 和 Y 轴, 可自动记录电阻-应变曲线。

3. 测量过程

为了获得完全可逆的应力诱导 I/C 相变, 先以一定的拉伸速率对试样进行加、卸载的“训练”, 在“训练”过程中最大应变保持为 $2\% \pm 0.3\%$, 同时测量 $Q^{-1}-\varepsilon$, $R-\varepsilon$, $f^2-\varepsilon$ 以及 $\sigma-\varepsilon$ 曲线随循环周数的变化, 大约在第 25 次循环后, $\sigma-\varepsilon$ 回线和 $R-\varepsilon$ 回线均不再随应变循环而单向变化, 表明在试样中获得了完全可逆的转变, 此时开始正式的测量。

选择了五个拉伸速率进行拉伸试验。最大应变量为 2.2% 。在加、卸载过程中同时测量 Q^{-1} , R , $M(f)$ 和 σ 随 ε 的变化。由于在拉伸时试样长度增加, 横截面积变小, 所以计算模量和电阻时考虑了形状因子修正, 模量计算公式为 $M = f^2(1 + \varepsilon)^{3[13]}$, 电阻相对变化的计算公式为 $\Delta\rho/\rho = (R - R_0)/R_0(1 + \varepsilon)^2 - 1^{[14]}$ 。在 D/max-IIIAX 射线衍射仪上做了部分试样的 X 射线衍射实验。拉伸实验在室温 ($20-23^\circ\text{C}$) 进行。

三、实验结果与分析

图 1 给出 Ni-49at%Ti 试样在升降温过程中的电阻变化曲线。降温过程在 30°C 附近开始出现电阻的反常升高, 表征由 B_2 母相转变为无公度 I 相的二级相变^[5]。此后电阻继续升高表明已开始 $I \rightarrow C$ 的相变。在 -10°C 附近电阻达到极大值而开始下降, 表征马氏体相变的开始^[6]。由于滞后现象, 升温过程 I/C 逆转变的转变点高于正转变, 升温过程电阻变化幅度也小于降温过程。上述结果与文献[6]的报道类似。

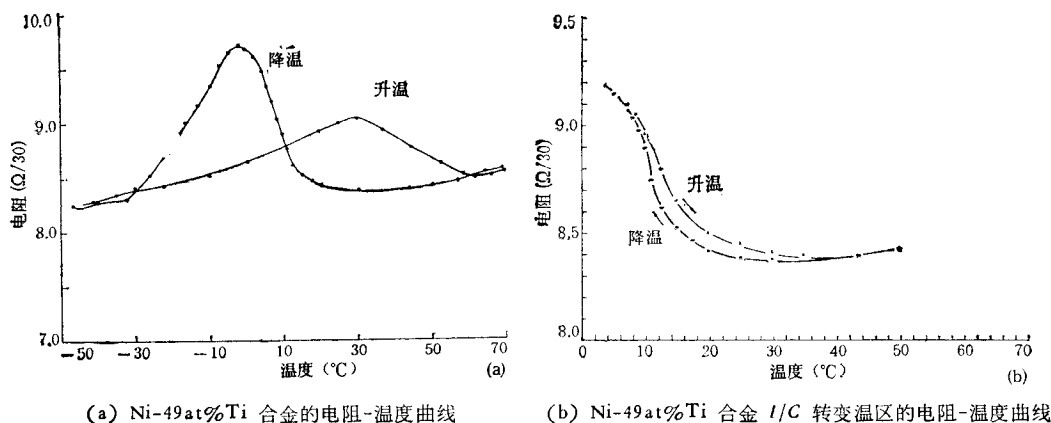


图 1

在开始进行的若干次应力循环中, 试样具有超弹性, 即加载时应力诱导相变产生的应变在卸载过程发生逆转变而回复至零。但试样的如下行为表明应力诱导的正反转变不是完全可逆的相变:

- 1) 卸载后的电阻高于加载前;
- 2) 卸载后的模量低于加载前;
- 3) 随循环次数增加,电阻的变化量减少;
- 4) σ - ϵ 曲线的迴线面积随循环次数增加而减小;
- 5) 加、卸载过程的内耗随循环进行而增大。

上述的不完全可逆相变过程表明每次循环中的相变情况有差异,这对利用内耗来进行界面动力学研究带来困难。实验结果表明,试样的 T_p 点、 T_d 点(分别表示 N/I , I/C 相变温度)及 M_s 点对从 500°C 空冷的冷却速度十分敏感,即使从同一炉冷却的试样也有差异。因此,室温时不同试样内部各相比例就会有所不同,在室温应力诱导相变时表现出的行为就会不一致。对定量计算而言,不同试样的实验结果可比性较差,难以进行界面动力学关系的计算。另外,试样对于初始的应力、应变状况也十分敏感,不同试样因装样时的操作也会带来差异。如果用同一试样反复测量则可消除上述误差,大大提高实验结果的可比性和可靠性。但这要求在各次应变循环中所进行的是完全可逆的相变,以使后继的测量不受前次测量的影响。

经过 $N = 25$ 次应力循环的“训练”后,试样达到完全可逆的转变,循环次数 $N \leq 25$ 以后,各次循环所测得的 Q^{-1} , R , f , σ 等物理量已趋于一个稳定值,不再有单向的增大或减小, σ - ϵ , R - ϵ , Q^{-1} - ϵ , f - ϵ 曲线可在 $N > 25$ 的各次应力循环中重复得到,卸载后的电阻、模量与加载前一样,如图 2 至图 5 所示。

由图 2 至图 5 可以看出,在完全可逆的相变中,试样有如下特征:

- 1) 拉伸至 2.2% 后卸载,应变回复到零,在此应变范围,试样具有超弹性,加载过程的应变由可逆 I/C 相变提供。应力-应变迴线的形状和面积基本上不再随循环而改变。

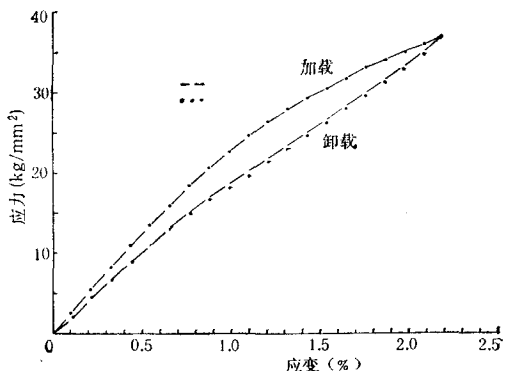


图 2 “训练”后的应力-应变迴线
--- 为 $N = 36$; 为 $N = 27$

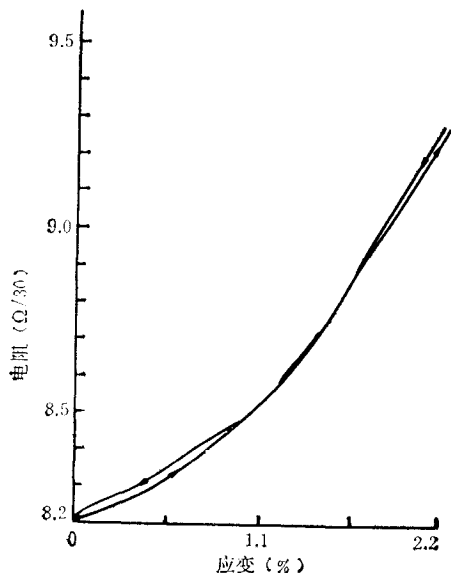


图 3 “训练”后的电阻-应变迴线
 $N = 36$

- 2) 卸载后模量基本上恢复到加载前的值,正反相变过程均出现由于软模效应和界面运动导致模量亏损引起的模量极小值。

- 3) 内耗的大小不再受应力循环的影响。加载时内耗随应变增大而增大,曲线在应变

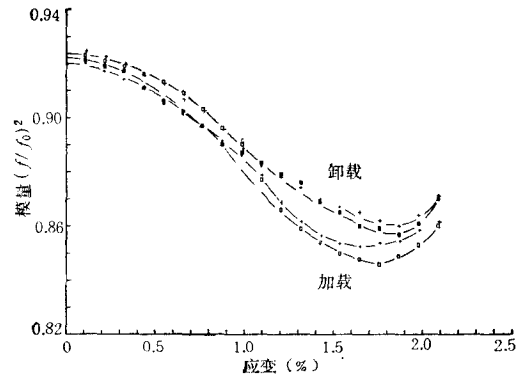


图4 “训练”后的模量-应变迴线 ++++为 $N=27$; $\square\square\square$ 为 $N=36$

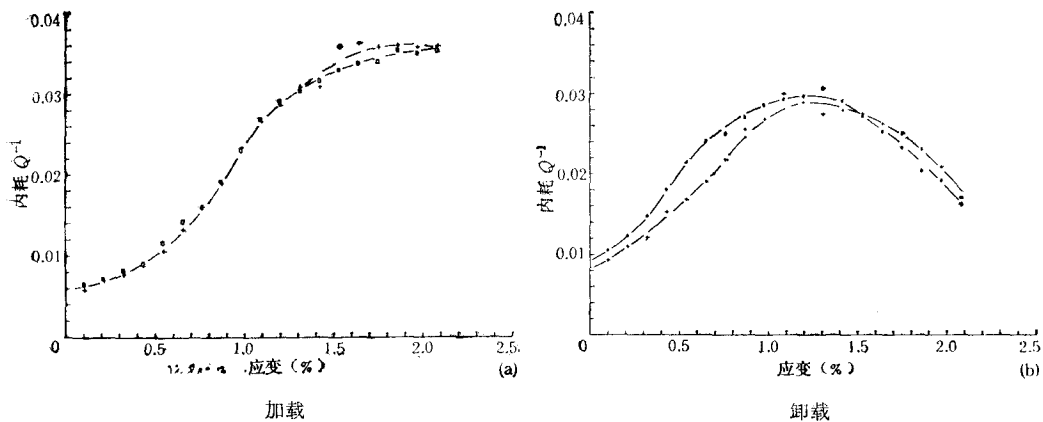


图5 “训练”后的内耗-应变迴线 ++++为 $N=41$; $\square\square\square$ 为 $N=27$

为 1.5% 后趋于平缓。卸载时有一宽散的内耗峰,极大值位置在应变为 1.1% 附近。加、卸载过程的模量极小虽然不太明锐,但都显然在内耗极大值之前出现。加、卸载过程模量极小对应的应变分别约为 1.7% 和 1.9%。

文献[6]用与本文相同的试样(热处理条件亦相同)所作的X射线衍射分析结果(该图8)表明:在照相温度为 32℃ 时,刚热处理好的超弹性试样中只出现母相 B_2 衍射线, $d(110) = 2.127 \text{ \AA}$; 经 28℃ 的应力循环并卸载至零后,该衍射线分裂成表征 I 相 ($d_I = 2.114 \text{ \AA}$) 及 C 相 ($d_C = 2.10 \text{ \AA}$) 的特征线。随着应力循环的增加, C 相线和 d 相线的强度增大,所以每次加载后残留的电阻增加。但经过若干次循环之后,卸载试样中的各相比例保持不变,因此残留电阻不再增加。

图6给出了卸载后的残留电阻值 ΔR (卸载后的电阻减去循环前的初始电阻值)随循环次数 N 的变化,加载过程 ($\dot{\epsilon}$ 相同)的内耗最高值 Q^{-1} 随 N 的变化以及第 n 次循环卸载至 $\epsilon = 0$ 后的相对模量与初始模量之比 M_{n0}/M_0 (残留模量亏损)随 N 的变化曲线。由图6可见,在 $N > 25$ 之后,残留各相之比不再发生变化,但在加、卸载过程中则发生 I/C 的相互转变。

达到了完全可逆的 I/C 相变后,对试样进行反复的加、卸载试验,同时测量试样的

内耗、电阻、模量和应力随应变变化的曲线,取得足够的数据进行界面动力学的计算。

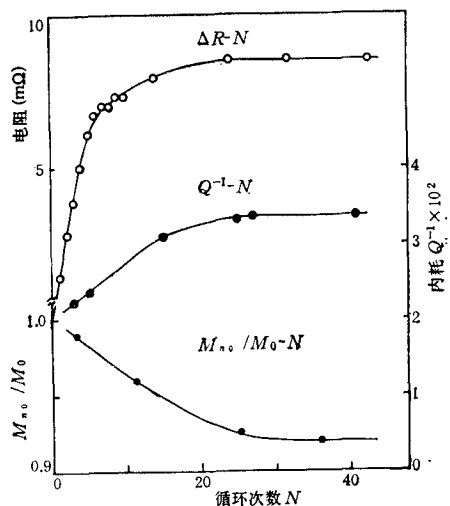


图6 残留电阻 ΔR , 加载过程最大内耗 Q^{-1} 以及残留模量亏损随应变循环次数 N 的变化曲线

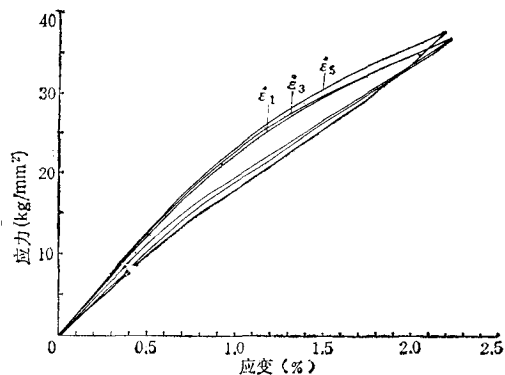


图7 不同应变速率下的应力-应变曲线

四、界面动力学的计算

在 $N = 25$ 至 $N = 43$ 的 18 次应力循环中,用五个不同的拉伸速率对试样进行形变。表 1 给出了应变速率值和与此应变速率对应的循环次数。对不同应力循环,同一应变速率下测得的数据取平均,即得出这一应变速率下的结果。由表 1 可见,同一应变速率的测量在次数相差较大的应力循环中进行以进一步消除应力循环的影响,并同时观察这种影响的大小。实验表明,这种影响在测量的误差以内,可以忽略。

表 1 计算界面动力学关系所用的应变速率 $\dot{\epsilon}$ 及其相应的循环次数 N

应变速率 $\dot{\epsilon}(10^{-5}/s)$	应变循环次数 N
$\dot{\epsilon}_1$ 0.79	38
$\dot{\epsilon}_2$ 1.51	37, 40
$\dot{\epsilon}_3$ 3.40	33, 34, 35, 39
$\dot{\epsilon}_4$ 6.20	25, 26, 27, 36, 41
$\dot{\epsilon}_5$ 17.7	28, 29, 30, 32, 42, 43

图 7 至图 9 给出五个应变速率下测得的内耗、模量和应力-应变曲线。

最近,文献[15]从相变热力学和界面动力学出发提出相变过程变温内耗的界面动力学模型。认为界面平均运动速度 V 与相变驱动力 ΔG 及相变阻力 ΔG_R 之间存在确定的函数关系 $V = \varphi(\Delta G - \Delta G_R)$, 其中 $\Delta G - \Delta G_R = \Delta G'$ 为净驱动力,计算得应力诱导相变过程中的内耗为

$$Q^{-1} = n^2/2 [d \ln \varphi(\Delta G') / d \Delta G'] dF / d\epsilon \mu \dot{\epsilon} / \omega, \quad (1)$$

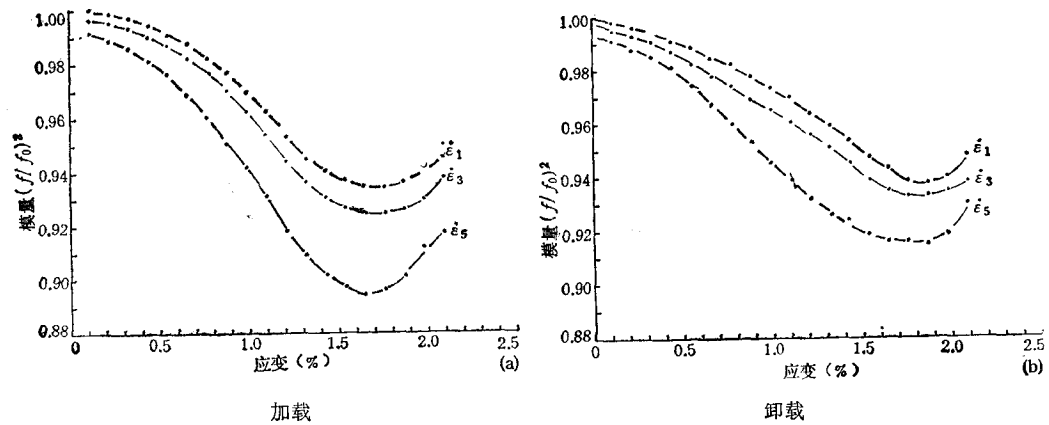


图 8 不同形变速率下的模量-应变曲线

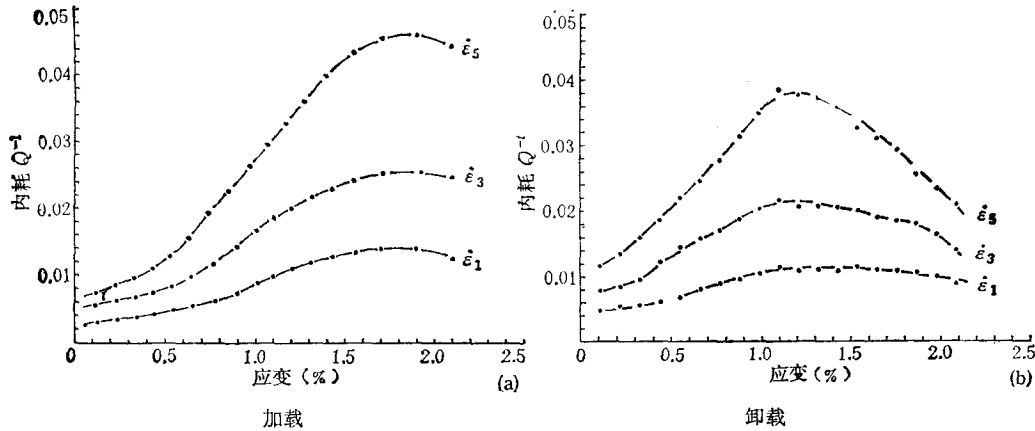


图 9 不同形变速率下的内耗-模量曲线

式中 $\dot{\varepsilon}$ 为实验条件, Q^{-1} , ω 为实验值. 转变量与电阻变化量成正比, $dF \propto d\rho$, $dF/d\varepsilon \propto d\rho/d\varepsilon$, 可由 $\Delta\rho/\rho-\varepsilon$ 曲线上得到.

应力诱导相变过程的相变驱动力可由热力学方法求得^[16]

$$\Delta G(\sigma) = G'(\sigma) - G(\sigma) = (\sigma - \sigma_0)\varepsilon_0, \quad (2)$$

σ_0 为两相平衡时的应力, ε_0 为相变应变, σ_0 可近似地取为加、卸载应力差值的中点^[16], ε_0 为常数. 取 $\sigma-\varepsilon$ 曲线上某一 ε 处加、卸载的 σ 差值 $\Delta\sigma$ 的一半再乘以 ε_0 , 即可得到该应变时的 ΔG .

由(1)式整理得

$$\Phi(\Delta G') = n^2/2 \, d \ln \varphi(\Delta G')/d\Delta G' = Q^{-1}\omega/\mu\dot{\varepsilon} \cdot (dF/d\varepsilon), \quad (3)$$

将 $\Phi(\Delta G')$ 展开成 $\Phi(\Delta G') = \sum_{\beta=-\infty}^{\infty} A_{\beta}(\Delta G')^{\beta}$, 其中 β 取为整数. 当 $\beta \geq 0$ 时, V 随 $\Delta G'$ 的增大而指数式增大, 因不合理而舍去. 当考虑一个单一过程时有

$$\Phi(\Delta G') = A_{\beta}(\Delta G')^{\beta} \quad (\beta \leq -1), \quad (4)$$

$$\ln \Phi(\Delta G') = \ln A_{\beta} + \beta \ln(\Delta G') = \ln [Q^{-1}\omega/\mu\dot{\varepsilon}(dF/d\varepsilon)]. \quad (5)$$

将某一 ε 处的数据代入(5)式等号右边即可得到 $\ln \phi(\Delta G')$ 的值, 用线性回归法可由计算机定出误差为最小时的 β 和 ΔG_R 值. 图 10 给出了这些结果.

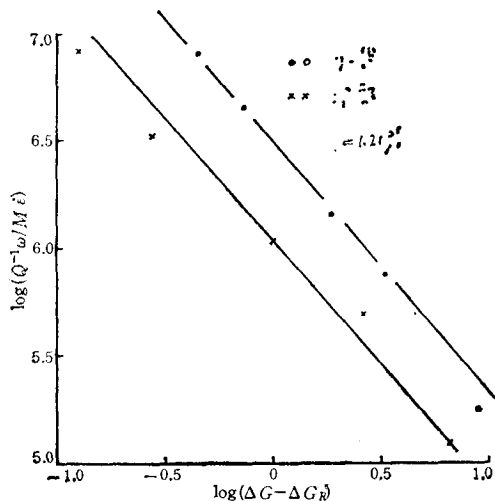


图 10 $\ln \phi(\Delta G') - \ln(\Delta G - \Delta G_R)$ 关系图
· · · 为加载; $\times \times \times$ 为卸载; $\varepsilon = 1.21\%$

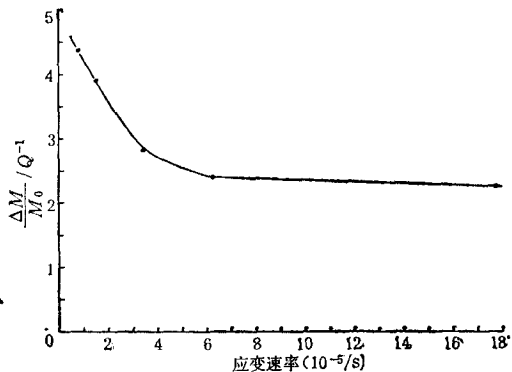


图 11 $(\Delta M / M_0) Q^{-1} - \dot{\varepsilon}$ 关系图

1. 由于所得 β 值均为 -1 , 即 $\ln \phi(\Delta G') = A' - \ln \Delta G'$. 积分可得

$$V = \varphi(\Delta G - \Delta G_R) = A(\Delta G - \Delta G_R)^m, \quad (6)$$

式中 A, m 为动力学参数. (6)式对应于文献[15]中 $\alpha = 0, \beta \approx 0$ 的情形. 此式与位错动力学中的 Gilman 公式 $V = B\sigma^m$ 类似. 由于本文考虑了阻力 ΔG_R 的作用, 所以只有当 $\Delta G > \Delta G_R$ 时界面的速度才不为零. 这种相似性还表明: 在应力作用下, I/C 相界的动力学特征与离子晶体中位错运动类似.

2. I/C 界面的运动阻力 ΔG_R 为 1 cal/mol 数量级, 与充分“训练”试样的变温测量结果大致相符, 这说明 I/C 相变的阻力远小于马氏体相变, 后者对本文的试样约为 10 cal/mol 的数量级^[17].

3. ΔG_R 与应变有关, 亦即与两相的比例及界面组态有关, 在相变过程中是变化的.

4. 卸载过程 ΔG_R 略大, 这与卸载过程内耗小于加载过程内耗的实验结果一致, 因为较小的内耗表明界面动性小, 即界面阻力大.

由界面动力学可推导出应力诱导相变过程界面运动导致的模量亏损^[15]:

$$\Delta M' / M = M_0 n_0 \varepsilon_0 / \omega \dot{\varepsilon} (dF/d\varepsilon) [d \ln \phi(\Delta G') / d \Delta G']. \quad (7)$$

(7)式除以(3)式得

$$(\Delta M' / M_0) / Q^{-1} = \varepsilon_0 / 2n,$$

式中 ε_0 为相变提供的应变, n 为外加应力与界面运动的耦合因子, 通过上式可求出 n 值.

如果考虑软模效应引起的模量亏损, 设为 $\Delta M'' / M_0$, 则有

$$\begin{aligned} (\Delta M / M_0) / Q^{-1} &= \varepsilon_0 / 2n + (\Delta M'' / M_0) / Q^{-1} \\ &= \varepsilon_0 / 2n + (\Delta M'' / M_0) / [n^2 / 2(\dot{\varepsilon} \mu / \omega) (dF/d\varepsilon) d \ln(\Delta G') / \Delta G']. \end{aligned} \quad (8)$$

取实验数据作 $(\Delta M / M_0) / Q^{-1} - \dot{\varepsilon}$ 图, 如图 11 所示. 曲线形式满足(8)式, 表明应力诱导 I/C 相变极小来自软模效应和界面运动引起模量亏损的共同贡献.

五、讨 论

1. 以恒变形速率进行的应力诱导 I/C 相变过程中的内耗与以恒变温速率进行的变温过程内耗具有类似的实验规律: 与 $\dot{\epsilon}/\omega$ 有正变关系, 与振幅无关, 形变停止时, 特征内耗消失. 以往只是在变温相变过程中观察到模量软化, 本文结果表明, 应力诱导相变过程也有模量软化现象出现, 但模量变化相对较小. 这主要是由于相变不充分所致, 应力诱导相变过程并非所有 I 相全部转变为 C 相, 而是部分转变.

2. 文献中讨论相变过程模量的极小值时, 通常认为是软模效应引起的. 本文结果表明, 测量内耗过程由频率变化换算的模量软化来自软模效应和界面运动导致模量亏损的共同贡献. 由于应力和界面存在耦合作用, 界面运动导致与内耗相关的模量亏损的推论是合理的.

3. 相变过程内耗峰的产生原因一直未有圆满的解释. 界面动力学模型在未考虑相变细节而只是将相变看成界面推移的前提下, 已在定性上很好地与实验结果符合: 1) 相变过程内耗与 $\dot{\epsilon}/\omega$ 有正变关系, 界面动力学的计算[(1)式]正确地给出了这一结果; 2) 随着 $\dot{\epsilon}$ 的增大, σ - ϵ 曲线的迴线面积增大, 表明转变快时要求较大的相变驱动力; 3) 认为相变内耗来源于界面的动性, 因此可同时计算内耗和模量亏损, 可将软模效应和界面运动引起的模量亏损区分开. 定量计算也得出了有益的结果. 如界面运动平均速度的形式, 界面阻力的大小, 在理论和实用上都有一定的意义.

4. 温度和应力复合诱导的 I/C 相变过程使试样具形状记忆性能, 应力诱导 I/C 相变过程试样具有超弹性, 进一步证实 I 相和 C 相两相共存时的界面可以在自协作变形中运动. 因此可以认为, 大块试样中的 I/C 转变是通过界面运动而不是公度差的消失或增加来完成的.

参 考 文 献

- [1] F. E. Wang, W. J. Buehler and S. J. Pickart, *J. Appl. Phys.*, **36**(1965), 3232.
- [2] K. Otsuka, T. Sawamura and K. Shimizu, *Phys. Stat. Sol.*, **5**(1975), 457.
- [3] C. M. Hwang, M. Meicic, M. B. Salamon and C. M. Wayman, *Phil. Mag.*, **47**(1983), 9.
- [4] 林光明、黄元士、李江宏、张进修, 国际形状记忆合金学术讨论会文集(1986), 科学出版社, 第 164 页.
- [5] 罗来忠等, 同上, 第 115 页.
- [6] 张进修等, 中山大学学报(自然科学版), (4)(1984), 1.
- [7] 李江宏, 中山大学硕士论文, (1985 年 4 月).
- [8] R. R. Hasiguti and K. J. Iwasaki, *J. Appl. Phys.*, **39** (1968), 2182.
- [9] O. Mercier and K. N. Melton, *Acta Met.*, **27**(1979), 1461.
- [10] 刘盛炎、周小平, 武汉大学学报, (1)(1982), 30.
- [11] De Joghe, *Scripta Met.*, **10** (1976), 1125.
- [12] 杨照金等, 金属学报, **18**(1982), 21.
- [13] N. S. Nowick, B. Berry, *Anelastic Relaxation in Crystalline Solid*, Academic Press, (1972), p. 28.
- [14] 李修宏、王运新, 中山大学学报(自然科学版), (2)(1965), 190.
- [15] 张进修、李燮均, 物理学报, **36**(1987), 847.
- [16] 大家和弘、清水谦一, 马氏体相变讨论会文集, 上海, (1984), p. 55.
- [17] 张进修、罗来忠, 物理学报, **37**(1988), 353.

THE STUDIES OF STRESS-INDUCED I/C TRANSITION AND INTERFACE DYNAMICS IN NiTi ALLOY

ZHANG JIN-XIU LI JIANG-HONG

(Department of Physics, Institute of Materials Science Research, Zhongshan
University, Guangzhou)

ABSTRACT

The internal friction (IF) Q^{-1} , modulus f^2 , electrical resistance R and stress σ of superelastic Ni₅₁Ti₄₉ alloy in the process of stress induced incommensurate/com-mensurate (I/C) transition was measured as a function of strain ε by a middle torsion pendulum on a tensile testing machine modified with a four-terminal potential equipment. The effects of number of stress cycles and strain rate $\dot{\varepsilon}$ (in the range of $7 \times 10^{-7}/s$ to $1 \times 10^{-4}/s$) were studied. An IF peak and a minimum of modulus were observed respectively in the $Q^{-1}-\varepsilon$ and $f^2-\varepsilon$ curves. The IF peak height Q_p^{-1} and modulus defect $\Delta M/M$ increase with an increasing of $\dot{\varepsilon}/\omega$, where ω is angular frequency of measuring.

By utilizing an expression obtained from phase interface dynamics and experi-mental data of Q_p^{-1} (as a function of $\dot{\varepsilon}/\omega$ and amount of phase transition F), an explicit functional relationship of average I/C phase interface velocity V and effective phase transition driving force $\Delta G' = \Delta G - \Delta G_R$ (where ΔG_R is resistance) was derived as

$$V = V^*(\Delta G - \Delta G_R)^m,$$

where V^* and m are dynamic parameters and ΔG_R is a resistance force exerting on the moving interface, which has the order of 1 cal/mol for stress-induced I/C transition of superelasticity NiTi alloy.

The relationship between Q^{-1} and modulus defect $\Delta M/M$ and soft modulus effect are discussed.