

文章编号: 1004-0609(2004)07-1168-03

应变速率对 TiNi 形状记忆合金压缩力学行为的影响^①

黄学文¹, 董光能¹, 周仲荣², 谢友柏¹

(1. 西安交通大学 润滑理论及轴承研究所, 西安 710049; 2. 西南交通大学 摩擦学研究所, 成都 610031)

摘 要: 考察了中温时效处理后的 Ti-50.9% Ni (摩尔分数) 合金在实验温度为 20 ℃, 不同应变速率下的轴向压缩应力—应变力学行为。实验结果表明: 随着应变速率的增加, 合金的应力诱发马氏体相变临界应力逐渐增加, 相变平台逐步消失, 卸载后的残余应变减小, 加载—卸载变形曲线的应力(应变)滞后也减小; 在较高加载速率下, 合金表现出类线性超弹性变形行为, 可获得高达 4.5% 的类线性超弹性。

关键词: 形状记忆合金; 相变; 超弹性; 应变速率; 应力—应变曲线

中图分类号: TB 301

文献标识码: A

Influence of strain rate on mechanical behavior of TiNi shape memory alloy under compression

HUANG Xue-wen¹, DONG Guang-neng¹, ZHOU Zhong-rong², XIE You-bai¹

(1. Theory of Lubrication and Bearing Research Institute,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Tribology Research Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The mechanical behavior of aged Ti-50.9% Ni (molar fraction) alloy under axial compression dynamic load was investigated under different strain rates at 20 ℃. The experimental results indicate that with the strain rate increasing, the critical stress for inducing martensitic transformation rises and the plateau of phase transformation disappears, while the stress (strain) hysteresis becomes smaller and the residual strain decreases. At higher strain rate, the alloy exhibits linear-like pseudoelasticity, which is up to 4.5%.

Key words: shape memory alloy; phase transformation; pseudoelasticity; strain rate; stress—strain curve

金属间化合物 TiNi 合金在众多形状记忆材料中因其突出的力学性能^[1]、良好的耐磨损耐腐蚀性能^[2, 3]、生物相容性^[4]以及高阻尼性能^[5]而得到人们的极大关注, 其应用范围也越来越广泛。作为一种新型的摩擦学材料, TiNi 合金的机敏性摩擦学行为和相变超弹特性与其综合力学性能密切相关。TiNi 合金的超弹性能受合金成分、热处理方式、实验温度和应力的影响很大^[6-8], 本文作者以 Ti-50.9% Ni (摩尔分数) 合金为研究对象, 考察中温时效

后合金在室温时不同压缩应变速率下的力学行为, 为 TiNi 合金的工程应用奠定基础。

1 实验

实验用材料为北京有色金属研究院提供的 Ti-50.9% Ni (摩尔分数) 合金, 采用真空感应法熔炼, 锭材经 1 000 ℃, 4 h 均匀化处理锻造、轧制、旋锻、拉拔成棒材, 再经 500 ℃, 1 h 时效处理。通过

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50075072); 西南交通大学四川省摩擦学和表面工程重点实验室基金资助项目

收稿日期: 2003-10-16; 修订日期: 2003-12-15

作者简介: 黄学文(1972-), 男, 博士研究生。

通讯作者: 黄学文, 电话: 029-2669083; E-mail: huangxuewen@tlbi.xjtu.edu.cn

线切割并机械磨光制成尺寸为 $d\ 5\ \text{mm} \times 14\ \text{mm}$ 的试样。

合金相变温度测试在 DSC2910 型差示扫描量热仪上进行, 实验温度范围为 $-70\ ^\circ\text{C} \sim 100\ ^\circ\text{C}$, 升温速率和降温速率均为 $3\ ^\circ\text{C}/\text{min}$, 合金的相变温度如表 1 所示。

表 1 中温时效处理的 Ti-50.9% Ni 合金的相变温度

Table 1 Phase transformation temperature of aged Ti-50.9% Ni alloy($^\circ\text{C}$)

Alloy	M_f	M_p	M_s	A_s	A_p	A_f
Ti-50.9% Ni	-18.3	-1.9	2.9	6.4	15.3	38.5

M_p and A_p are exothermic peak and endothermic peak respectively.

压缩实验在美国 MTS 858Mini Bionix 试验机上进行。采用位移控制, 加载应变速率分别为 $3\ \text{mm}/\text{min}$, $15\ \text{mm}/\text{min}$, $30\ \text{mm}/\text{min}$ 和 $50\ \text{mm}/\text{min}$, 实验温度为 $20\ ^\circ\text{C}$ ($293\ \text{K}$)。忽略实验过程中由于压缩造成的试样横截面积的变化, 将载荷(kN)转化为应力(MPa), 实验过程中每一时刻的试样长度与原始长度之比即为轴向平均应变。

2 结果与讨论

图 1 所示为 Ti-50.9% Ni 合金在 $20\ ^\circ\text{C}$ 时, 不同应变速率下的压缩应力—应变曲线。由图 1(a) 可以

看出在缓慢加载情况下, 开始时应力随应变上升较快, 曲线斜率较大; 当应力约为 $350\ \text{MPa}$ 时合金开始“屈服”, 出现一个较宽的应力缓慢上升阶段, 而应变增加较快。加载到 $650\ \text{MPa}$ 时卸载, 发现同加载时的情形类似, 开始应力下降较快, 应变变化不大, 应力下降到约 $200\ \text{MPa}$ 时, 应力下降趋势变缓, 而应变急剧减小。最后当负载降为零时, 合金残留有 1.2% 的应变不能恢复, 因而加载应力—应变曲线和卸载曲线形成了一个较大的封闭区域, 该曲线反映了合金的相变非线性超弹性能力。室温状态下, 中温时效处理过的 Ti-50.9% Ni 合金因其 A_f 较高($38.5\ ^\circ\text{C}$), 显微组织为奥氏体母相和马氏体低温相两相共存。开始加载时, 马氏体在应力作用下重新取向排列, 大约 1.5% 的应变主要为马氏体的再取向而产生, 奥氏体相的弹性变形量很小; 当应力达到 $350\ \text{MPa}$ 时, 奥氏体母相发生应力诱发马氏体相变, $350\ \text{MPa}$ 即为诱发马氏体相变的临界应力 σ_M , 相变对变形的贡献较大; 卸载后, 合金发生马氏体逆相变, 大部分变形恢复, 1.2% 的应变由于合金发生塑性滑移, 形成永久变形而不能恢复。随着应变速率的增加, 合金应力—应变曲线形状发生变化(如图 1(b), (c) 和 (d) 所示)。首先是临界应力逐渐提高, 应力(应变)滞后减小, 相变阶段应力—应变曲线的斜率增加, 特别是在较高的应变速率下, 加载曲线和卸载曲线没有明显的相变平台。

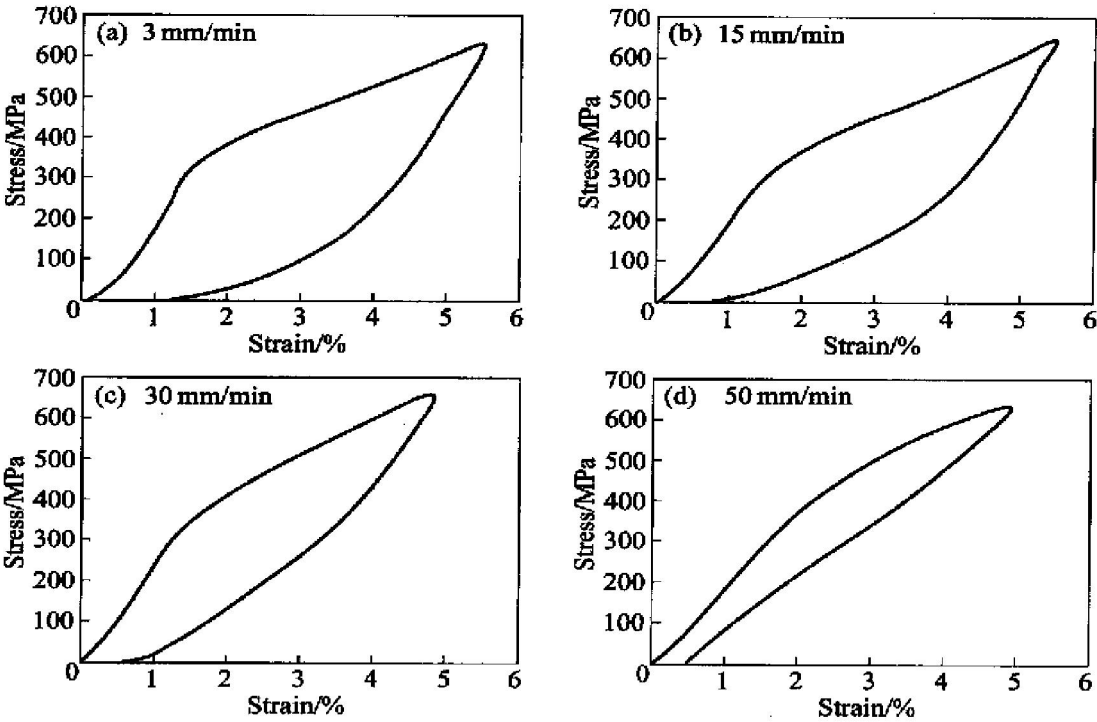


图 1 Ti-50.9% Ni 合金在不同的压缩应变速率下的应力—应变曲线
Fig. 1 Stress—strain curves of Ti-50.9% Ni alloy at different strain rates

加载曲线与应变轴所围面积表示材料的变形能, 卸载曲线与应变轴所围面积表示释放能, 加载—卸载曲线所包围的面积则代表一个应力循环中的能量耗散。从图 1 可以看出, 应变速率的提高对 TiNi 合金的力学特性的影响表现在 4 个方面: 1) 提高了相变临界应力; 2) 增大了释放能, 降低了耗散能; 3) 应力(应变)滞后减小, 相变非线性超弹性向类线性超弹性转化, 合金表现出类线性超弹性; 4) 减小了残余应变。这种现象可能与合金良好的快速应变硬化性能以及材料的微观组织有关。应变速率越高, 合金的应变硬化效果越明显, Lin 等^[9]在实验中也发现, 随着 TiNi/SUJ-2Cr 摩擦副相对滑动速度的增加, TiNi 合金的硬度上升。合金的硬度高, 受应力作用时, 不易发生塑性滑移, 表现出较好的超弹性; 而且硬度的变化同样会影响合金的阻尼性能, 因为阻尼的产生来源于位错和晶界/相界的运动, 硬度的增高自然会降低合金的耗散阻尼性能。随着应变速率的增大, 相变时的屈服平台逐步消失, 这是由于时效过程中析出的细小弥散的 Ti_3Ni_4 相对基体的强化作用与应力诱发马氏体相变相叠加, 以至通常出现的相变屈服平台被 Ti_3Ni_4 相的沉淀强化现象所掩盖。

3 结论

随着应变速率的增加, 合金的应力诱发马氏体相变临界应力逐渐增加, 相变平台逐步消失, 卸载后的残余应变减小, 阻尼性能降低, 而可释放能上升; 在较高应变速率下, 合金表现出类线性超弹性, 应变速率为 50 mm/min 时, 可获得高达 4.5% 的类线性超弹性。

REFERENCES

[1] Otsuka K, Wayman C M. Shape Memory Materials

[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

- [2] LI D Y. A new type of wear-resistant material: pseudoelastic TiNi alloy[J]. Wear, 1998, 221: 116 - 123.
- [3] LIU Rong, LI D Y. Experimental studies on tribological properties of pseudoelastic TiNi alloy with comparison to stainless steel 304[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2000, 31A(11): 2 773 - 2 783.
- [4] 陈万才, 尚秋立. 形状记忆合金在医学上的应用[J]. 鞍山钢铁学院学报, 1995, 18(4): 61 - 64.
CHEN Wan-cai, SHANG Qiu-li. Applications of TiNi shape memory in medicine[J]. Journal of Anshan Institute of Iron & Steel Technology, 1995, 18(4): 61 - 64.
- [5] Lin H C, Wu S K, Yeh M T. Damping characteristics of TiNi shape memory alloys[J]. Metallurgical Transactions A, 1993, 24A: 2 189 - 2 194.
- [6] 黄兵民, 王永前, 程建霞, 等. 近等原子比 NiTi 形状记忆合金的超弹性[J]. 中国有色金属学报, 1996, 6(4): 136 - 139.
HUANG Bing-min, WANG Yong-qian, CHENG Jian-xia, et al. Pseudoelasticity of near-equiatomic NiTi shape memory alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1996, 6(4): 136 - 139.
- [7] 巩建鸣, Tobushi H. 循环加载下 TiNi 合金超弹性变形行为[J]. 南京工业大学学报, 2002, 24(1): 52 - 56.
GONG Jian-ming, Tobushi H. Study on superelastic deformation behavior of TiNi shape memory alloy under cyclic loading[J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2002, 24(1): 52 - 56.
- [8] Tobushi H, Shimeno Y, Hachisuka T, et al. Influence of strain rate on superelastic properties of TiNi shape memory alloy[J]. Mechanics of Materials, 1998, 30: 141 - 150.
- [9] Lin H C, Liao H M, He J E, et al. Wear characteristics of TiNi shape memory alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1997, 28A: 1871 - 1877.

(编辑 杨 兵)