

超弹性 TiNi 形状记忆合金棒材力学行为

商泽进^{1,2}, 王忠民², 尹冠生¹, 郑碧玉¹

(1. 长安大学, 陕西 西安 710061)

(2. 西安理工大学, 陕西 西安 710048)

摘要: 基于工程振动控制的角度, 通过 TiNi 形状记忆合金棒材在室温条件下的力学性能试验, 以相变应力、变形模量、残余应变、耗能能力等作为该合金棒材的力学特征参数, 分析了这些特征参数随加载速率、应变幅值、载荷循环等加载工况的变化规律。结果表明: 超弹性 TiNi 形状记忆合金棒材具有良好的耗能能力及阻尼性能, 可满足工程结构振动控制的需要。但在工程应用时, 应考虑加载速率、应变幅值、载荷循环等因素对 TiNi 形状记忆合金棒材力学行为的影响, 根据具体工况合理设计。

关键词: 形状记忆合金; TiNi; 超弹性; 力学行为; 实验研究

中图分类号: TG139+.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)03-0460-05

形状记忆合金(Shape Memory Alloy, 简称SMA)是一类对形状有记忆功能的材料, 本身具有自感知、自诊断和自适应的功能。SMA作为智能材料之一, 最早广泛应用于航空航天、机器人、医疗等精密尖端领域。近年来, 随着材料加工技术和工业化生产能力的提高, SMA在土木工程中的研究与应用也有了较快的发展^[1]。SMA作为结构的被动、半主动或主动控制元件, 与工程结构集成, 可减少由环境或地震等引起的结构破坏及结构的动力响应, 并使结构具有高度的自适应能力, 从而能够解决用传统方法难以解决的实际问题^[2-6]。

超弹性是形状记忆合金最值得注意的力学性能之一, 是指在高于马氏体逆相变终了转变温度 A_f 时, 合金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, 应变可部分或全部自动回复的现象。应变部分回复, 称为部分超弹性; 应变全部回复, 称为完全超弹性^[7]。超弹性现象是应力诱发马氏体相变的表现。在超弹性变形过程中, 发生奥氏体和马氏体两种组织的可逆转变。这两种组织及它们的混合物具有差别很大的阻尼能力, 并且在加、卸载过程中, 应力-应变关系出现迟滞效应。因此, 在超弹性变形过程中, 材料表现出阻尼可调性及较高的能量耗散能力。在工程应用中, 利用 SMA 的超弹性, 可开发基于 SMA 的被动耗能器及阻尼器, 实现工程结构的振动控制。

开发基于 SMA 的被动耗能器及阻尼器等装置, 目

前在工程应用和设计上还没有统一的相关性能参数可供使用, 对形状记忆合金进行实验研究是设计和使用它的前提。研究表明^[8-12], 温度、加载速率、应变幅值及载荷循环等因素对 SMA 的力学行为将产生影响。但上述研究, 基本都是以 SMA 丝或弹簧作为研究对象, 而对尺寸较大的 SMA 棒材的力学行为研究较少。为此, 本实验针对一种超弹性 TiNi 形状记忆合金棒材, 研究了室温状态下该合金棒材的力学行为。分析其相变应力、变形模量、残余应变、耗能能力等有关力学特征参数随加载速率、应变幅值、载荷循环等加载工况的变化规律, 为该合金的工程应用提供参考。

1 实验

选取 TiNi 合金棒材直径为 6.0 mm, 化学成分为 Ti-51at%Ni, 采用 500~550 °C 温加工, 400 °C 保温 30 min 时效处理, 试件长度为 200 mm, 其标距为 100 mm, 相变温度为 $A_f=8$ °C。

为了测量 TiNi 合金棒材在不同加载工况下的力学行为特性, 实验在 WDW-100D 型万能电子试验机上进行, 实验温度为室温 (15 °C)。实验过程中, 载荷由固连在夹头上的力传感器获取, 棒材的变形由标距为 50 mm 的引伸仪测量。采用等位移加、卸载, 加、卸载速率保持一致。实验过程由计算机自动控制, 实验数据由计算机自动采集。为讨论加载速率、应变幅

收稿日期: 2008-06-27

基金项目: 长安大学科技发展基金资助项目(0305-1001)

作者简介: 商泽进, 女, 1972年生, 博士生, 讲师, 长安大学理学院, 陕西 西安 710061, 电话: 029-85262005

值、载荷循环等加载工况对 TiNi 合金棒材力学行为的影响, 制定实验方案如下: 方案一, 分别按 4, 40, 160 mm/min 的加载速率加载到应变幅值为 4% 时卸载, 卸载到应力为 7 MPa 时实验结束; 方案二, 以 4 mm/min 的加载速率, 分别加载到应变幅值 1%, 3%, 5% 时卸载, 卸载到应力为 7 MPa 时实验结束; 方案三, 以 40 mm/min 的加载速率, 加载到应变幅值为 4% 时卸载, 卸载到应力为 7 MPa 时一次循环结束, 循环 20 次。

2 结果与分析

2.1 应力-应变曲线上特征参数说明

一次加、卸载循环对应的典型应力-应变曲线如图 1 实线所示。整个实验曲线由 6 个阶段构成, 分别为: (1) oa 段, 奥氏体弹性拉伸阶段; (2) ab 段, 应力诱发马氏体正相变阶段; (3) bc 段, 马氏体弹性拉伸阶段; (4) cd 段, 马氏体卸载回复阶段; (5) de 段, 应力诱发马氏体逆相变阶段; (6) ef 段, 奥氏体卸载回复阶段。图中, 各特征参数说明如下: σ_{Ms} 、 σ_{Mf} 分别为马氏体相变开始和结束时对应的临界应力; σ_{As} 、 σ_{Af} 分别为马氏体逆相变开始和结束时对应的临界应力; E_1 为加载阶段奥氏体变形模量; E_2 为应力诱发马氏体正相变阶段奥氏体、马氏体混合组织的变形模量; E_3 为加载阶段马氏体变形模量; E_4 为应力诱发马氏体逆相变阶段马氏体、奥氏体混合组织的变形模量; ε_{res} 为一次加、卸载循环后的残余应变; ε_{max} 是实验中设定的应变幅值; ε_{ptr} 为加载时的相变应变。图中应力-应变曲线所围的面积为一次加、卸载循环产生的滞回耗能 W 。

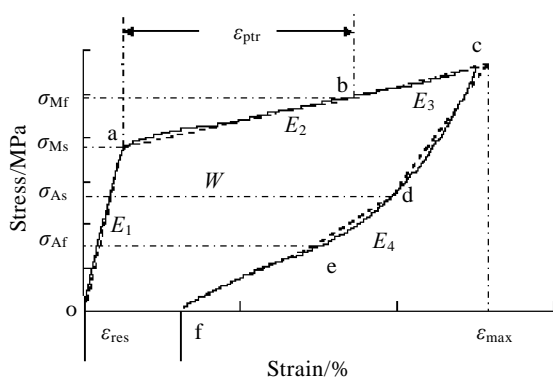


图 1 典型应力-应变曲线及特征参数定义

Fig.1 Typical stress-strain curve and definition of characteristic parameters

2.2 加载速率对 TiNi 合金棒材力学行为的影响

图 2 给出了加载速率对 TiNi 合金棒材力学行为的

影响。随着加载速率的增加, 从图 2a 可以看出, 应力-应变曲线的加、卸载屈服平台上升, 应力-应变曲线构成的滞回环面积增大; 各相变应力发生不同程度的增加。其中, 马氏体相变开始应力和马氏体逆相变开始应力增幅较缓, 而马氏体相变结束应力和马氏体逆相变结束应力增幅较大, 如图 2b 所示; 由图 2c 看出, 各阶段变形模量随加载速率增加变化不大。因此, 在实验加载速率范围内, 可以忽略加载速率对合金各阶段变形模量的影响; 图 2d 表明, 合金加、卸载循环的滞回耗能随加载速率的增加呈现先减小后增大的趋势。出现这种现象主要因为加载速率较小时, 上屈服平台上升幅度很小, 而下屈服平台上升幅度则较大, 且平台长度基本保持不变。加载速率较大时, 上、下屈服平台上升幅度都较大, 且平台长度有所增加; 加载相变应变及加、卸载循环后的残余应变均随加载速率增加而增加, 速率较小时, 增幅较大, 速率较大时, 增幅减缓, 如图 2e、2f 所示。

2.3 应变幅值对 TiNi 合金棒材力学行为的影响

图 3 给出了应变幅值对 TiNi 合金棒材力学行为的影响。随着应变幅值的增加, 从图 3a 可以看出, 应力-应变曲线的加载屈服平台略有下降, 而卸载屈服平台下降显著。应力-应变曲线构成的滞回环面积显著增大; 由于应变幅值较小时, 加载时马氏体相变没有完全进行, 故而只讨论马氏体相变开始应力和马氏体逆相变结束应力随应变幅值的变化。从图 3b 看出, 随应变幅值增加, 马氏体相变开始应力略有下降, 而马氏体逆相变结束应力降幅较大。其原因主要是应变幅值不同, 马氏体相变进行程度不同, 从而加载结束时, 材料的相组成不同, 造成卸载时屈服平台下降显著, 导致马氏体逆相变结束应力降幅较大; 由图 3c 看出, 合金加、卸载循环的滞回耗能随应变幅值的增加几乎线性增加。可以说, 应变幅值是影响合金耗能能力的主要因素; 图 3d 表明, 应变幅值对合金加、卸载循环后的残余应变具有一定的影响。应变幅值较小时, 残余应变随应变幅值增加略有增加, 而应变幅值超过一定值时, 残余应变增幅急剧加大。这主要由于应变幅值超过一定值后, 加载时马氏体相变完全结束, 产生了马氏体组织的部分不可逆变形, 这部分变形在卸载时不能回复。

2.4 载荷循环对 TiNi 合金棒材力学行为的影响

图 4 给出了载荷循环对 TiNi 合金棒材力学行为的影响。从图 4a 可以看出, 循环初期, 马氏体正、逆相变引起的应力-应变曲线的屈服平台明显, 应力-应变曲线构成的滞回环面积较大。随着循环次数的增加, 屈服平台逐渐消失, 滞回环面积不断缩小。起初变化

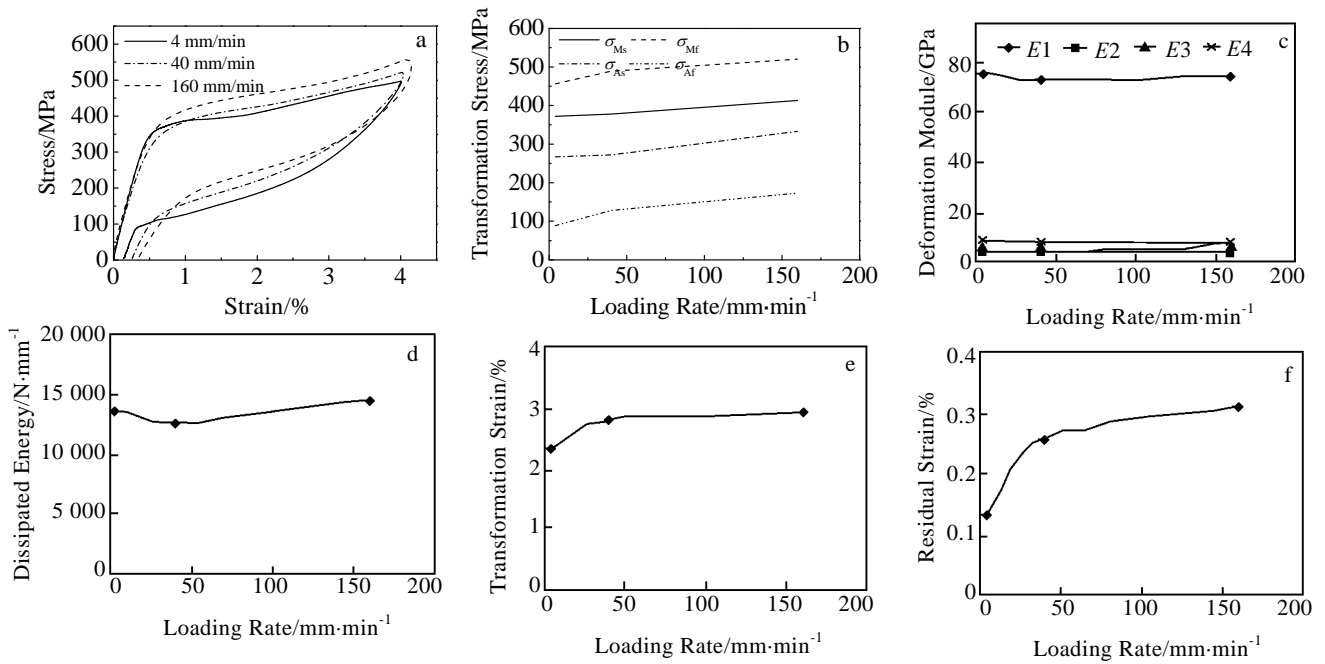


图 2 加载速率对 TiNi 合金棒材力学行为的影响

Fig.2 Effect of loading rate on mechanical behavior of TiNi alloy bar: (a) relationship between loading rate and stress-strain curve, (b) relationship between loading rate and transformation stress, (c) relationship between loading rate and deformation module, (d) relationship between loading rate and dissipated energy, (e) relationship between loading rate and transformation strain, and (f) relationship between loading rate and residual strain

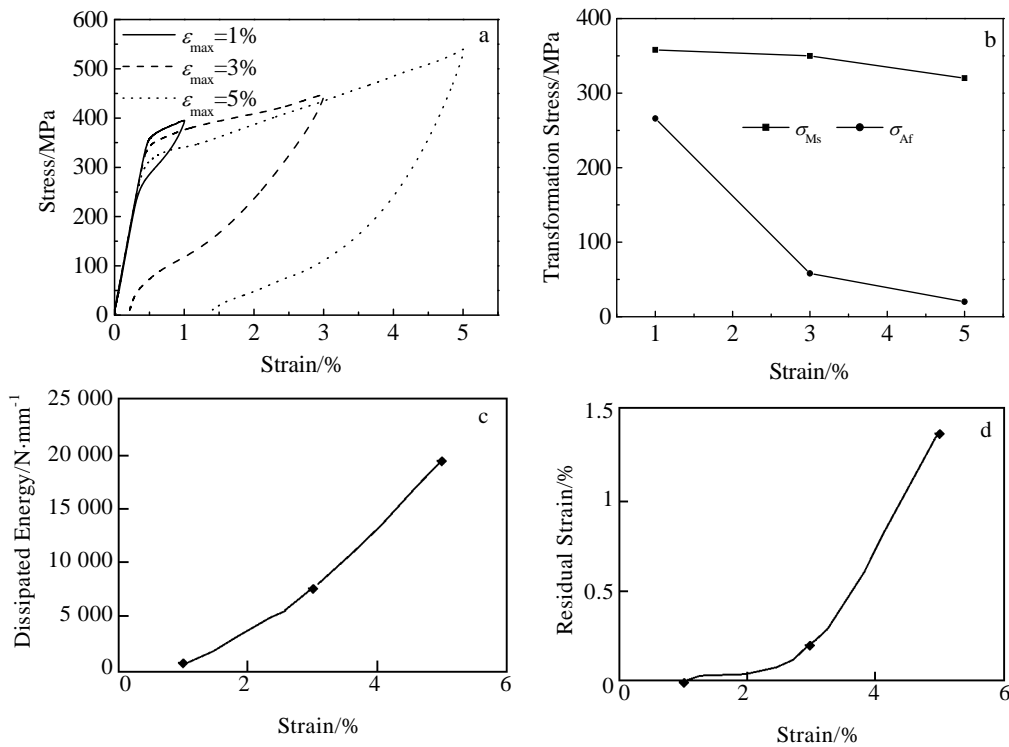


图 3 应变幅值对 TiNi 合金棒材力学行为的影响

Fig.3 Effect of strain amplitude on mechanical behavior of TiNi alloy bar: (a) relationship between strain amplitude and stress-strain curve, (b) relationship between strain amplitude and transformation stress, (c) relationship between strain amplitude and dissipated energy, and (d) relationship between strain amplitude and residual strain

幅度较大, 约循环 13 次后, 变化趋于稳定, 应力随应变按一定斜率变化, 波动很小, 滞回环也呈椭圆树叶形状稳定下来; 由于随着循环次数的增加, 应力-应变曲线的屈服平台逐渐消失, 故而只讨论马氏体相变开始应力 σ_{Ms} 随循环次数的变化。从图 4b 可以看出, σ_{Ms} 随循环次数增加而减小, 最初几次循环, 减幅较大, 循环 10 次后, σ_{Ms} 趋于稳定; 由图 4c 看出, 合金的耗能能力随着循环次数的增加, 有不同程度的降低。最初几次循环中, 滞回耗能很大, 滞回耗能降低幅度也

较大。约循环 13 次后, 合金的耗能能力趋于稳定; 图 4d 表明, 每次循环后, 都保留一定量的残余应变, 最初几次循环, 残余应变较大, 但随着循环次数的增加, 残余应变先急剧减小, 后减副变缓, 约 13 次循环后, 残余应变几乎为零。每次循环后累积的残余应变随循环次数的增加而增加, 最初几次循环, 增幅较大, 约循环 13 次后, 合金的累积残余应变几乎不变, 材料呈现出明显的完全超弹性。

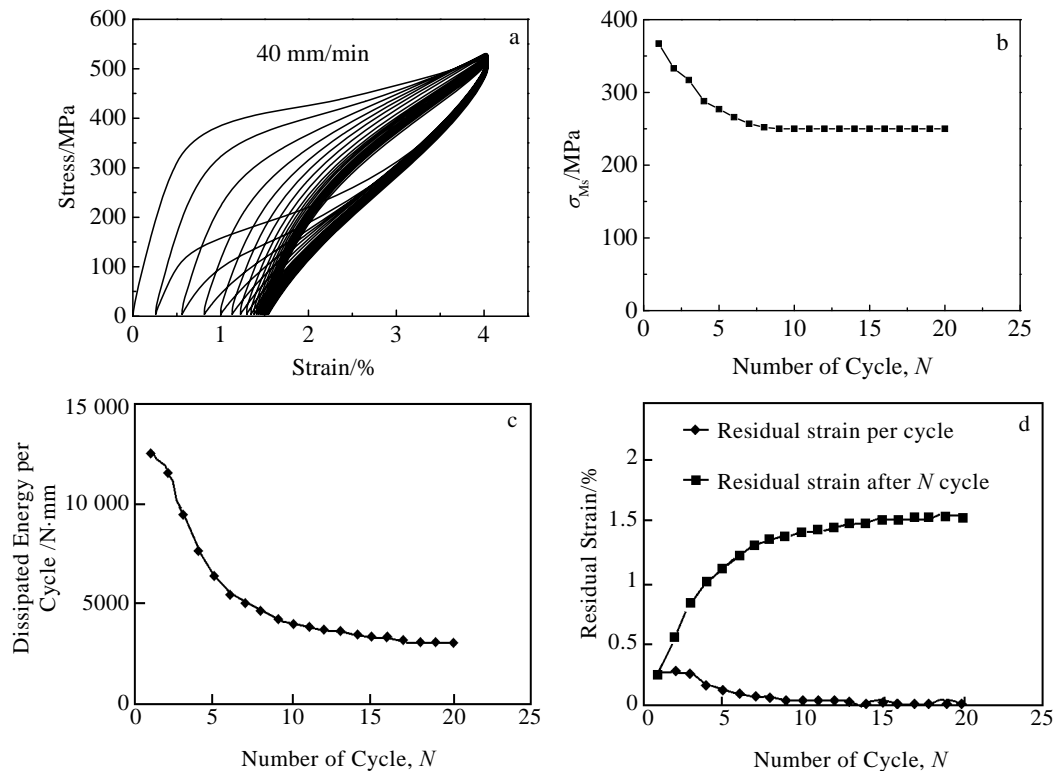


图 4 载荷循环对 TiNi 合金棒材力学行为的影响

Fig.4 Effect of cyclic loading on mechanical behavior of TiNi alloy bar: (a) relationship between cyclic loading and stress-strain curve, (b) relationship between cyclic loading and transformation stress, (c) relationship between cyclic loading and dissipated energy, and (d) relationship between cyclic loading and residual strain

3 结 论

1) TiNi 形状记忆合金棒材在静态和非静态条件下的室温力学行为存在一定差异。

2) 应变幅值是影响 TiNi 形状记忆合金棒材耗能能力的主要因素, 通过调整加载时的应变幅值可以改善合金的耗能能力。同时, 应变幅值对合金加、卸载循环后的残余应变也具有一定的影响。

3) 最初只具有部分超弹性的 TiNi 形状记忆合金棒材, 经过一定次数 (约 13 次) 的循环训练, 可呈现

出明显的完全超弹性, 从而使得合金的力学性能趋于稳定。

参考文献 References

- [1] Song G, Ma N, Li H N. *Engineering Structures*[J], 2006, 28: 1266
- [2] Otero K. *Intelligent Reinforced Concrete Structures Using Shape Memory Alloys*[D]. Houston: University of Houston, 2004
- [3] Saadat S, Salichs J, Noori M *et al. Smart Materials and*

- Structures*[J], 2002, 11: 218
- [4] Sun S, Rajapakse R K N D. *Proceedings of SPIE*[J], 2003, 5053: 262
- [5] Tamai H, Miura K, Kitagawa Y *et al.* *Proceedings of SPIE*[J], 2003, 5057: 169
- [6] Wilde K, Gardoni P, Fujino Y. *Engineering Structures*[J], 2000, 22: 222
- [7] Zhao Liancheng(赵连城), Cai Wei(蔡伟), Zheng Yufeng(郑玉峰). *Shape Memory Effect and Superelasticity in Alloys*(合金的形状记忆效应与超弹性)[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 170
- [8] Toshio Sakuma, Akihiko Suzuki. *Materials Transactions*[J], 2007, 48(3): 4227
- [9] Chen W W, Wu Q, Kang J H *et al.* *International Journal of Solids and Structures*[J], 2001, 38(50~51): 8989
- [10] Tobushi H, Okumura K, Endo M *et al.* *Proc SPIE Int Soc Opt Eng*[J], 2002, 4699: 374
- [11] Nakayama H, Zhao Y, Taya M *et al.* *Proc SPIE Int Soc Opt Eng*[J], 2005, 5761: 355
- [12] Li Shangrong(李尚荣), Ma Ji(马记), Zhang Yonghua(章永华) *et al.* *China Mechanical Engineering*(中国机械工程)[J], 2007, 18(5): 607

An Experimental Study on the Mechanical Behavior of Superelastic TiNi Shape Memory Alloy Bars

Shang Zejin^{1,2}, Wang Zhongmin², Yin Guansheng¹, Zheng Biyu¹

(1. Chang'an University, Xi'an 710061, China)

(2. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on engineering vibration control, an experimental study is completed on the mechanical property of TiNi shape memory alloy bar at room temperature. Phase transformation stress, deformation module, residual strain, dissipated energy and so on, are considered as mechanical characteristic parameters of these specimens. The changes of these parameters with loading rate, strain amplitude and cyclic loading are analyzed. The results indicate that superelastic TiNi shape memory alloy bars have the characteristics of high energy dissipation and damping property, so they are suitable for engineering vibration control. Even so, in order to apply this alloy bars to practice, the influence of loading rate, strain amplitude and cyclic loading on mechanical behavior of TiNi shape memory alloy bars should be considered, and the appropriate design should be proposed according to practical condition.

Key words: shape memory alloy; TiNi; superelasticity; mechanical behavior; experimental study

Biography: Shang Zejin, Candidate for Ph. D., Lecturer, School of Science, Chang'an University, Xi'an 710061, P. R. China, Tel: 0086-29-85262005