

文章编号: 1001-4888(2017)03-0407-07

# 应变幅值对循环载荷下 NiTi 合金力学性质的影响<sup>\*</sup>

张振华<sup>1</sup>, 刘宁<sup>1</sup>, 绳飘<sup>1</sup>, 张爱蒙<sup>2</sup>, 薛飞<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 河南焦作 454000; 2. 西北工业大学 力学与土木建筑学院, 陕西西安 710072)

**摘要:** 实验研究了应变幅值对循环载荷下 NiTi 合金伪弹性退化特征的影响规律, 结果表明: 当卸载发生在 NiTi 合金应力诱发马氏体相变阶段时, 应变幅值对马氏体相变开始应力的退化规律影响较小, 但此时应变幅值的增加会显著增大奥氏体弹性模量的退化程度, 而其大变形可回复能力和阻尼特性在应变幅值大于 6% 时才有大幅度降低。对各参数退化程度进行定量分析, 得到了 NiTi 合金具有较强可回复能力和阻尼性能的应变幅值范围。该研究可为 NiTi 合金阻尼器的设计提供参考。

**关键词:** 形状记忆合金; NiTi 合金; 伪弹性; 应变幅值; 循环载荷

**中图分类号:** TB381; TU502<sup>+</sup>.6 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-16-270

## 0 引言

利用形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)伪弹性的大变形自回复能力和阻尼能力构造的阻尼器在建筑结构振动控制方面的应用是目前的研究热点之一<sup>[1, 2]</sup>, 特别是可修复、可自愈建筑结构概念的提出, 伪弹性 SMA 的优秀性质使其成为能实现自康复结构的理想材料之一<sup>[3, 4]</sup>。建筑结构在风载和地震等动载作用下, 作为阻尼和自定心元件的 SMA 会经历不同应变幅值的加卸载循环, 因此有必要研究不同应变幅值下 SMA 的加卸载循环力学性能。目前国内外对于 SMA 的伪弹性退化的实验研究主要是从宏观和微观上同时开展的。在宏观方面的研究已经表明 SMA 会随着循环次数增加而出现显著的退化现象<sup>[5-9]</sup>, 同时学者们采用透射电镜(TEM)等技术对 SMA 循环载荷下的微观组织进行了详细的研究<sup>[10-12]</sup>, 研究表明 SMA 伪弹性的退化是由于其晶相界面和微缺陷处的滑移造成的。笔者用宏观实验研究了直径尺度对伪弹性形状记忆合金在循环载荷下退化特征的影响<sup>[13]</sup>, 结果表明 SMA 伪弹性的主要参数指标与循环次数的关系均可用指数关系描述; 而 SMA 丝的直径越大, 其伪弹性越差, 且伪弹性随循环次数的退化程度也随着直径尺度的增大而增加。而目前关于应变幅值对 SMA 在循环载荷作用下伪弹性退化特性影响的定量分析方面还比较少。

NiTi 合金是一种常用的 SMA 材料, 本文通过对 NiTi 合金丝的加卸载循环实验, 研究应变幅值对循环载荷下 NiTi 合金的马氏体相变开始应力、奥氏体弹性模量、单周滞回等效阻尼比以及可回复应变比等伪弹性参数退化特征的影响规律; 通过对等效阻尼比和可回复应变比等参数的定量分析, 得到 NiTi 合金具有良好回复能力和阻尼效果的应变幅值范围, 可为该材料在阻尼器中的设计应用提供参考。

## 1 实验方案及参数定义

### 1.1 实验概况

实验所用材料为西安赛特金属材料开发有限公司生产的直径 1mm NiTi(Ni 49%, Ti 51%)合金丝

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2016-12-13; 修回日期: 2017-01-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308195); 河南省科技厅科技攻关项目(132102210252)

通讯作者: 张振华(1981-), 男, 博士, 副教授, 从事智能结构振动控制方面的研究。Email: zhangzh@hpu.edu.cn

(简称 NiTi 丝),通过示差扫描热量计测得材料的相变温度为:  $M_s = -42^\circ\text{C}$ ,  $M_f = -28^\circ\text{C}$ ,  $A_s = -11^\circ\text{C}$ ,  $A_f = 2^\circ\text{C}$ 。本次实验在电子万能试验机上进行,其力传感器量程范围为  $0 \sim 5000\text{N}$ 。应力和应变根据实验实际所用 SMA 丝的直径和标距换算得到,实验过程中采用控制应变幅值的方法来控制合金丝加卸载循环。

把 NiTi 丝制作成长度为  $180\text{mm}$ 、标距为  $100\text{mm}$  的试件,实验前将试件在开水中热浴 5 分钟,然后自然冷却至室温( $10^\circ\text{C}$ ),从而保证在自然温度下 SMA 为完全奥氏体相。在应变速率为  $6.67 \times 10^{-4}/\text{s}$  下对直径  $1\text{mm}$  的 SMA 试件分别做应变幅值为  $1.8\%$ ,  $4\%$ ,  $6\%$ ,  $8\%$ ,  $10\%$  的加卸载循环实验 30 次。

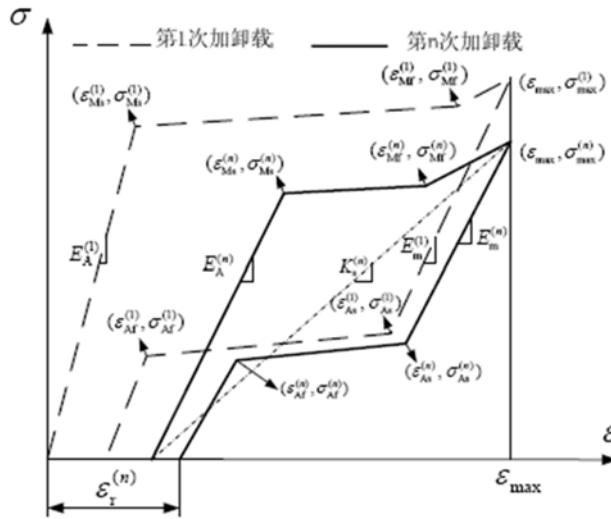


图 1 SMA 典型的应力—应变曲线  
Fig. 1 SMA typical stress-strain curve

## 1.2 参数说明

NiTi 丝典型的加卸载应力—应变曲线如图 1 所示,其中虚线表示 NiTi 丝的第 1 次加卸载应力应变曲线,实线表示 NiTi 丝的第  $n$  次加卸载应力应变曲线。图中  $E_A^{(n)}$  表示 NiTi 丝奥氏体弹性模量,  $E_m^{(n)}$  表示卸载模量,  $\epsilon_r^{(n)}$  表示加卸载循环结束后的累积残余应变,应力  $\sigma_{Xy}^{(n)}$  和  $\epsilon_{Xy}^{(n)}$  表示相变应力和应变(下标  $X = M, A$ , 其中  $M$  表示马氏体相变,  $A$  表示奥氏体相变;  $y = s, f$ , 其中  $s$  表示相变开始,  $f$  表示相变结束),  $\epsilon_{\max}^{(n)}$  和  $\sigma_{\max}^{(n)}$  分别为应变、应力峰值,  $K_s^{(n)}$  为应力峰值处的割线刚度。加卸载应力—应变曲线所围成的面积表示单周期加卸载循环耗能密度  $W_D^{(n)}$ 。所有参数的上标  $(n)$  表示第  $n$

次加卸载循环。

割线模量  $K_s^{(n)}$  的计算公式为

$$K_s^{(n)} = \frac{\sigma_{\max}^{(n)}}{\epsilon_{\max}^{(n)} - \epsilon_r^{(n-1)}} \quad (1)$$

定义第  $n$  次加卸载循环的等效阻尼比  $\xi_{eq}^{(n)}$  如式(2),表示 NiTi 丝的阻尼性能:

$$\xi_{eq}^{(n)} = \frac{W_D^{(n)}}{2\pi K_s^{(n)} (\epsilon_{\max}^{(n)} - \epsilon_r^{(n-1)})^2} \quad (2)$$

定义可回复应变比  $H_r^{(n)}$  如式(3),表示 NiTi 丝的变形可回复性能:

$$H_r^{(n)} = 1 - \frac{\epsilon_r^{(n)}}{\epsilon_{\max}^{(n)}} \quad (3)$$

定义参数的退化系数如式(4),表示 NiTi 丝伪弹性参数的退化程度:

$$\eta_X^{(N)} = 1 - \frac{X^{(N)}}{X^{(1)}} \quad (4)$$

式中,  $X = \sigma_{Ms}, E_A, \xi_{eq}$  或  $H_r$ ;  $N$  表示训练循环次数的最大值。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 NiTi 丝在循环载荷下的应力—应变关系

应变幅值对 NiTi 合金在循环载荷下的应力应变关系有显著的影响。图 2 比较了应变幅值分别为  $1.8\%$ ,  $4\%$ ,  $6\%$ ,  $8\%$  和  $10\%$  时 NiTi 丝加卸载循环实验的第 1, 7, 15 和 30 次循环的应力—应变曲线。由图 2(a)可知,应变幅值为  $1.8\%$  时,卸载发生在 NiTi 合金马氏体相变的初期阶段,此时应力—应变曲线没有完全进入马氏体相变平台;应变幅值为  $4\%$ ,  $6\%$  和  $8\%$  时,卸载发生在 SMA 马氏体相变阶段;而应变幅值为  $10\%$  时,卸载发生在 SMA 已完成马氏体相变阶段。不同应变幅值下 NiTi 丝加载曲线的相

变平台相近,但并不重合,并且在应变幅值为 4%~10%时都出现了应力突然下降现象,这是因为在相变阶段随着宏观马氏体带的形成,马氏体带内应力软化导致了带外残存奥氏体的弹性卸载,从而导致了整个 NiTi 丝的宏观应力下降<sup>[15, 16]</sup>。由图 2(b)(c)(d)可知,随着循环次数的增加,马氏体相变平台逐步降低,但是不同应变幅值时的降低程度不同。应变幅值为 1.8%时相变平台降低较慢,应变幅值为 4%,6%和 8%时相变平台保持同步降低,而 10%的相变平台降低较快;应变幅值为 1.8%时,逆相变结束应力有所增大,而应变幅值为 4%,6%和 8%时的逆相变平台无明显变化,但是 10%时的逆相变屈服平台有较大幅度的降低。并且随着循环次数的增加,应变幅值为 4%,6%和 8%时在首次加载出现马氏体相变平台的地方出现了类似强化的现象,而不是相变平台的整体降低,且这种现象随循环次数的增加越来越明显,此种现象在现有文献中也有报道,但是并未引起关注<sup>[17]</sup>,对于其形成机理需要结合宏、微观实验做进一步研究。

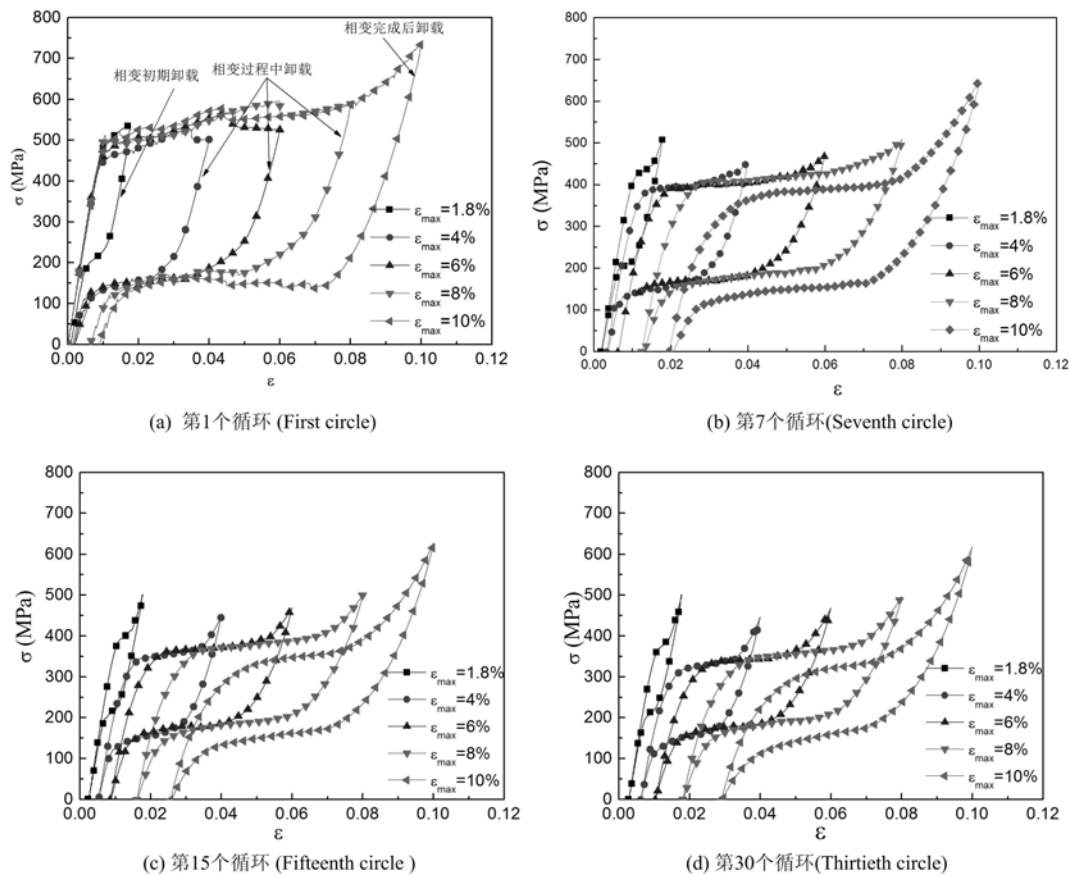


图2 NiTi 丝循环加载卸载应力—应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of NiTi alloy wires under cyclic loading

## 2.2 NiTi 合金伪弹性参数分析

### 2.2.1 马氏体相变开始应力和奥氏体弹性模量

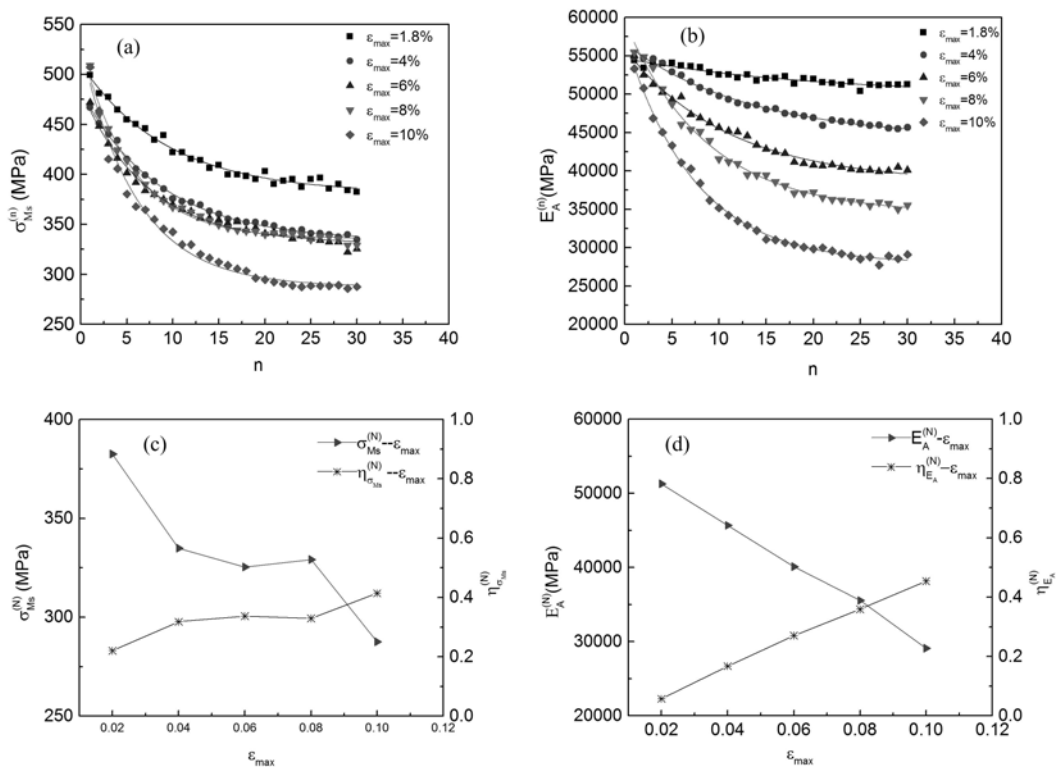
应变幅值对 NiTi 合金的伪弹性相变应力特征具有显著的影响。如图 3(a)所示,在应变幅值为 1.8%时,卸载时 NiTi 正处于马氏体相变的初期阶段,此时 NiTi 合金的马氏体相变开始应力  $\sigma_M^{(n)}$  随循环次数的增加而降低缓慢;应变幅值为 4%, 6%和 8%时,卸载时 NiTi 合金正处于马氏体相变阶段,三者马氏体相变开始应力  $\sigma_M^{(n)}$  随循环次数降低的规律基本一致,即 3 条曲线基本重合;而应变幅值为 10%时,卸载时 NiTi 合金已进入马氏体相变完成后的再次强化阶段,马氏体相变开始应力  $\sigma_M^{(n)}$  随循环次数的增加有较大幅度的降低。

应变幅值对循环载荷下 NiTi 合金的奥氏体弹性模量  $E_A^{(n)}$  有显著的影响。如图 3(b)所示,  $E_A^{(n)}$  随循环次数增加而降低,最后趋于稳定;而应变幅值的增大使  $E_A^{(n)}$  的降低程度增加,而这和应变幅值对马

氏体相变开始应力的影响规律的不同之处在于:当 NiTi 合金在马氏体相变阶段卸载时,应变幅值对马氏体相变开始应力的退化规律没有显著影响。

马氏体相变应力和奥氏体弹性模量随循环次数降低的原因可解释如下:在应力诱发马氏体相变过程中,材料内部的位错滑移会造成自平衡的残余内应力场,局部区域内的残余内应力可促使马氏体相变形核,从而产生残余马氏体相,所以在宏观上就表现出相变开始应力随循环次数逐步降低<sup>[14]</sup>,同时,由于有残余马氏体相的存在,使 NiTi 合金再次加载时处于马氏体和奥氏体的混相状态,从而导致  $E_A^{(n)}$  随循环次数的增加而降低。而应变幅值对循环载荷下 NiTi 合金相变应力的影响机理可初步分析如下:在应变峰值为 1.8% 时,卸载发生在马氏体相变的初始阶段,晶相间和微缺陷处的位错未充分发育,在材料内部应力自平衡作用下产生的内应力较小,在逆相变时残余的马氏体相比比较少,故其相变应力随循环次数降低较缓慢;而在相变幅值为 4%, 6% 和 8% 时, SMA 已完全进入相变阶段,从应力—应变曲线可看出在相变过程中 SMA 应力几乎保持恒定,虽然随应变幅值增加 NiTi 合金内部参与滑移的界面增加,但参与滑移界面的滑移临界应力趋同,故在应力自平衡的作用下 SMA 内部附加的残余内应力相同;当应变幅值为 10% 时马氏体相变完成,出现类似强化的阶段,在此阶段有滑移临界应力更高的界面参与滑移,从而会造成更高的残余内应力,这是相变完成后卸载时相变应力随循环次数降低较快的原因。

马氏体相变开始应力和奥氏体弹性模量退化的定量分析如图 3(c)和(d):应变幅值从 1.8% 增加到 10% 时,马氏体相变开始应力的退化系数由 22% 增加到 41%,而在应变幅值为 4%~8% 的区间内,相变开始应力退化系数保持在 32% 左右;训练稳定后的奥氏体弹性模量随应变幅值线性减小,而其退化系数随应变幅值线性增加,应变幅值为 10% 时达到了 45%。



(a)  $\sigma_{Ms}^{(n)}$ - $n$ , (b)  $E_A^{(n)}$ - $n$ , (c)  $\sigma_{Ms}^{(n)}$  和  $\eta_{\sigma_{Ms}}^{(n)}$ - $\epsilon_{\max}$ , (d)  $E_A^{(n)}$  和  $\eta_{E_A}^{(n)}$ - $\epsilon_{\max}$

图 3 NiTi 合金马氏体相变开始应力、奥氏体弹性模量与循环次数的关系

Fig. 3 Relationship of starting stress of martensitic transformation and austenite elastic modulus of NiTi alloy with cycle numbers

### 2.2.2 滞回阻尼和可回复变形特性

阻尼特性是研究 NiTi 合金伪弹性的重要性质之一, 衡量阻尼特性的指标为单周期的滞回耗能量  $W_d^{(n)}$  和等效阻尼比  $\xi_{eq}^{(n)}$ , 且二者之间由式(2)相互关联。图 4 表明 NiTi 合金等效阻尼比随着循环次数的增加呈指数关系减小, 最后趋于稳定。应变幅值对等效阻尼比的影响不是单调的, 应变幅值为 1.8% 时阻尼比最小, 而应变幅值为 4%, 6% 时最大, 应变幅值为 8% 和 10% 时次之, 此结果表明当 SMA 的应变幅值处于马氏体相变中段时具有较好的阻尼特性。

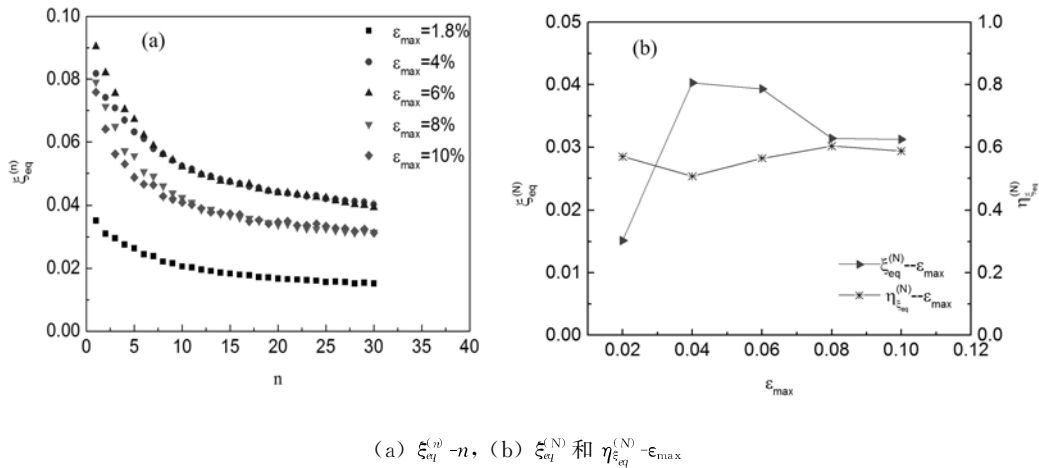


图 4 单周循环耗能和等效阻尼比与循环次数的关系

Fig. 4 Relationship of energy consumption and equivalent damping ratio and cycle numbers

如图 5(a) 所示, 可回复应变比也随着循环次数的增加而降低, 当应变幅值为 1.8%, 4% 和 6% 时可回复应变比基本相同且较高, 而应变幅值为 8% 和 10% 时, 可回复应变比有较大的减小。如图 5(b) 所示, 在应变幅值小于 6% 时, 循环稳定后的 NiTi 合金可回复应变比保持在 82% 以上, 应变幅值大于 6% 时, 可回复应变比有一定程度降低。

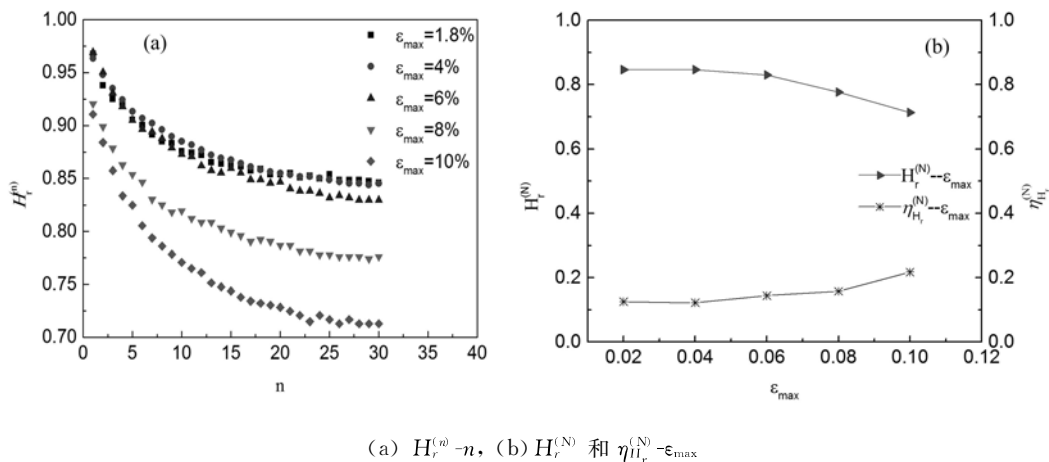


图 5 残余应变和可回复应变比与循环次数的关系

Fig. 5 Relationship of residual strain and recoverable strain rate with cycle numbers

从整体上看, 应变幅值在 4%~6% 范围时材料具有较好的可回复变形能力和阻尼性能, 结合 2.2.1 节的分析, 此时材料在循环载荷后还可以提供较高的弹性模量和屈服应力。

## 3 结论

(1) 应变幅值越大, NiTi 合金循环载荷后马氏体相变开始应力、奥氏体弹性模量和可回复应变比的退化程度均会增加。

(2) 当卸载发生在马氏体相变阶段时,应变幅值对马氏体相变开始应力的退化规律没有显著影响,而应变幅值的增加对奥氏体弹性模量的退化产生较大的影响;随着循环次数的增加,曲线在卸载前的变形表现出类似强化的情形,而不是相变平台的整体降低;如何从机理上解释这种现象需要从宏观和微观上开展详细的理论和实验研究。

(3) 从伪弹性参数的定量化分析可知,在应变幅值小于 6% 时,循环稳定后的 SMA 可回复应变比达到 82% 以上;在应变幅值为 4%~6% 之间,循环稳定后的 SMA 的等效阻尼比最大,因此可认为当应变幅值为 4%~6% 时材料兼具良好的阻尼特性和变形可回复能力,而此时材料还可提供较高的弹性模量和相变应力;当应变幅值大于 8% 时,循环稳定后的可回复应变比、等效阻尼比、马氏体相变的开始应力、奥氏体弹性模量均有较大幅度的降低。

#### 参考文献:

- [1] 任文杰,王利强,穆蒙蒙. SMA 阻尼器控制单自由度结构在地震激励下的平稳随机振动研究[J]. 工程力学, 2016, 33(4):98—103 (REN Wenjie, WANG Liqiang, MU Mengmeng. Research on stationary random vibration of single-degree-of-freedom structure with shape memory alloy damper subjected to earthquake excitation[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(4):98—103 (in Chinese))
- [2] Qian H, Li H, Song G. Experimental investigations of building structure with a superelastic shape memory alloy friction damper subject to seismic loads[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(12):125026.
- [3] 狄生奎,李慧,杜永峰,等. SMA 混凝土梁的裂缝监测及自修复[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(1):27—31 (DI Shengkui, LI Hui, DU Yongfeng, et al. Self-monitoring and repairing based on crack of concrete beam embedded with SMA[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(1):27—31 (in Chinese))
- [4] Shajil N, Srinivasan S M, Santhanam M. An experimental study on self-centering and ductility of pseudo-elastic shape memory alloy (PESMA) fiber reinforced beam and beam-column joint specimens[J]. Materials and Structures, 2016, 49(3):783—793.
- [5] 左晓宝,李爱群,倪立峰,等. 超弹性形状记忆合金丝 (NiTi) 力学性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(12):10—16 (ZUO Xiaobao, LI Aiqun, NI Lifeng, et al. An experimental study on the mechanical behavior of superelastic NiTi shape memory alloy wires[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(12):10—16 (in Chinese))
- [6] Wang X M, Wang Y F, Lu Z Z, et al. An experimental study of the superelastic behavior in NiTi shape memory alloys under biaxial proportional and non-proportional cyclic loadings[J]. Mechanics of Materials, 2010, 42(3):365—373.
- [7] Gloanec A L, Bilotta G, Gerland M. Deformation mechanisms in a TiNi shape memory alloy during cyclic loading[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 564:351—358.
- [8] Kan Q, Yu C, Kang G, et al. Experimental observations on rate-dependent cyclic deformation of super-elastic niti shape memory alloy[J]. Mechanics of Materials, 2016, 97:48—58.
- [9] 李帅,郭大伟,殷惠光,等. 镍钛形状记忆合金塑性屈服后力学行为研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(2):274—279 (LI Shuai, GUO Dawei, YIN Huiguang, et al. Investigation on post-yielding behavior of Ni-Ti shape memory alloy[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2):274—279 (in Chinese))
- [10] Brinson L C, Schmidt I, Lammering R. Stress-induced transformation behavior of a polycrystalline NiTi shape memory alloy: micro and macromechanical investigations via in situ optical microscopy[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2004, 52(7):1549—1571.
- [11] Hamilton R F, Sehitoglu H, Chumlyakov Y, et al. Stress dependence of the hysteresis in single crystal NiTi alloys[J]. Acta Materialia, 2004, 52(11):3383—3402.
- [12] Polatidis E, Zotov N, Bischoff E, et al. The effect of cyclic tensile loading on the stress-induced transformation mechanism in superelastic NiTi alloys: an in-situ X-ray diffraction study[J]. Scripta Materialia, 2015, 100:59—62.
- [13] 张振华,李倩倩,王磊,等. NiTi 合金伪弹性退化规律及尺度效应的实验研究[J]. 实验力学, 2016, 31(5):707—714 (ZHANG Zhenhua, SHENG Piao, WANG Lei, et al. Experimental research of deterioration law and scale

- effect of pseudoelasticity characteristics of NiTi alloy wires[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(5): 707—714 (in chinese))
- [14] 康国政, 于超, 阚前华. NiTi 形状记忆合金热—力耦合循环变形行为宏微观实验和理论研究进展[J]. 固体力学学报, 2015(6):461—480 (KANG Guozheng, YU Chao, KAN Qianhua. Progress in thermo-mechanical cyclic deformation of NiTi shape memory alloy: macroscopic/microscopic experiments and theory[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2015(6):461—480 (in Chinese))
- [15] Sun Q P, Li Z Q. Phase transformation in superelastic NiTi polycrystalline micro-tubes under tension and torsion from localization to homogeneous deformation[J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39:3797—3809.
- [16] 皮文丽. NiTi 形状记忆合金的伪弹性特性及其微结构机理的研究[D]. 重庆大学, 2007 (PI Wenli. A research on pseudoelastisity behavior and its microstructure mechanism of NiTi SMAs [D]. Chongqing University, 2007 (in Chinese))
- [17] 巩建鸣, 户伏寿照, 高田和幸, 等. 循环加载条件下 TiNi 形状记忆合金超弹性变形特性分析与模拟[J]. 航空材料学报, 2002, 22(4):6—12 (GONG Jianming, TOBUSHI Hisaaki, TAKATA Kazuyuki, et al. Analysis and simulation on cyclic superelastical deformation behavior of TiNi shape memory alloy subjected to loading and unloading[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2002, 22(4):6—12 (in Chinese))

## On the Influence of Strain Amplitude on Mechanical Properties of Niti Alloy Subjected to Cyclic Loading

ZHANG Zhen-hua<sup>1</sup>, LIU Ning<sup>1</sup>, SHENG Piao<sup>1</sup>, ZHANG Ai-meng<sup>2</sup>, XUE Fei<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering of Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China;

2. School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture of Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shanxi, China)

**Abstract:** The influence of strain amplitude on pseudoelasticity degradation characteristics of NiTi alloy subjected to cyclic loading was experimentally studied. Results indicate that when the unloading occurs on the stage of NiTi alloy martensite transformation, which is induced by stress, strain amplitude has little influence on degradation characteristics at the beginning of the martensitic transformation; but at the same time, the increase of strain amplitude may significantly increase the degradation degree of austenite elastic modulus; and the large deformation resilience and damping capability can be reduced significantly only when the strain amplitude is larger than 6%. Through quantitative analysis of degradation degree, the strain amplitude range corresponding strong resilience and damping property of NiTi alloy was obtained. Above results can provide reference for design of NiTi alloy damper.

**Keywords:** shape memory alloy; NiTi alloy; pseudoelasticity; strain amplitude; cyclic loading