

镍钛形状记忆合金热机械循环变形行为试验研究

姜 晗^{1,2}, 徐 祥^{1,2}, 王莅辰^{1,2}, 阚前华^{1,2}, 康国政^{1,2}

(1. 应用力学与结构安全四川省重点实验室, 成都 610031; 2. 西南交通大学力学与工程学院, 成都 610031)

摘 要:镍钛形状记忆合金在应用过程中,不可避免地承受热机械循环载荷作用,进而导致材料的结构性和功能性疲劳失效。热力学循环变形试验在自主开发的热机械循环试验平台上开展,并实时采集力、位移和温度信号,提取循环应力、应变和温度演化曲线,研究热机械循环变形对形状记忆效应的劣化作用。试验结果表明:机械循环载荷将轻微降低镍钛形状记忆合金在升温过程中的应变回复能力;同时,形状记忆效应随着热机械循环和温度循环次数的增加出现显著劣化。研发的热机械循环变形试验平台可用于揭示镍钛形状记忆合金功能性退化机理,为进一步对形状记忆合金器件的性能评估提供有益参考。

关键词:形状记忆合金;热机械循环;形状记忆效应;循环变形

中图分类号:TG139.6

文献标志码:A

引 言

镍钛形状记忆合金(SMA)具有独特的超弹性、形状记忆效应以及生物相容性,因此广泛应用于微机电系统、生物医学、机械和土木工程等领域。镍钛形状记忆合金在应用过程中,不可避免的热机械循环变形行为会引起合金的疲劳甚至是失效。为此,国内外学者开展了广泛研究。例如,在热机械循环方面,Miyazaki等^[1]首先对镍钛合金丝的循环变形行为进行了研究,揭示了循环载荷对相变应力和残余应变等均产生很大的影响;Nemat-Nasser和Guo^[2]研究了在不同应变率和温度下,镍钛形状记忆合金的超弹性和循环变形响应特征;在热机械循环方面,罗洪艳等^[3]采用了四种典型的热机械循环训练方法获取具有双程形状记忆效应的镍钛合金丝,从双程形状回复量、高温相形状、低温相形状和相变温度的变化等方面系统研究了训练方法对双程形状记忆效应训练效果的影响;谭冀等^[4]研究了热机械循环对镍

钛形状记忆合金的回复应变、应力诱发马氏体的临界应力以及马氏体相变温度的影响;Suresh等^[5]采用电子回散射衍射研究了富镍镍钛形状记忆合金在热循环和热机械循环过程微观组织的变化;Abbasi等^[6]通过实验评价了冷轧退火中的热机械处理对纳米结构形状记忆合金的微观结构和形状回复的影响;Saikrishna等^[7]发现,热机械循环中奥氏体残余变形和回复应变发生变化,这些变化在最初的几个周期是显著的,并在一定的循环周次下达到稳定状态;Li等^[8]发现,在热机械循环初始的200周期内,镍钛记忆合金丝的回复应变和疲劳寿命发生显著变化,在随后的循环里,回复应变逐渐趋于稳定;Bo和Lagoudas^[9]对多晶镍钛形状记忆合金在循环热诱导的相变周期进行了研究,在循环100~300圈,合金的性能逐渐稳定,当循环超过2000圈时,塑性应变继续开始积累;此外,Kang和Song^[10]通过实验对纯粹的机械和热机械疲劳特性的合金进行了概述,并提出了建设的疲劳失效模型;Tadayon等^[11]研究了退火对富钛镍钛形状记忆

收稿日期:2016-03-31

基金项目:国家自然科学基金(11532010;11572265);国家大学生创新训练项目(201510613053)

作者简介:姜 晗(1995-),女,湖北枣阳人,主要从事形状记忆合金热力学疲劳失效方面的研究,(E-mail)308562793@qq.com;

康国政(1969-),男,贵州遵义人,教授,博士,主要从事先进材料本构关系方面的研究,(E-mail)guozhengkang@126.com

合金的显微组织演变与力学性能的影响;Yu等^[12]针对超弹性 NiTi 形状记忆合金的应变率相关的循环变形,建立了描述三维热-力学耦合和物理机制为基础的本构模型。

尽管镍钛合金的热机械循环变形行为引起了很大的重视,但由于大部分的实验都集中在对镍钛形状记忆合金的机械循环和热机械循环变形的研究,对热机械循环及循环变形历史对形状记忆效应影响的研究还不完善。因此,为了更好地了解镍钛形状记忆合金形状记忆效应的退化机制,研究热机械循环变形及其历史对形状记忆效应的影响十分必要。本文拟通过自主研发的热机械实验平台在应变控制下对镍钛形状记忆合金进行不同热机械循环历史的实验,研究循环周次与升温回复时的残余应变之间的关系,揭示形状记忆效应的退化机制。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

实验所用镍钛形状记忆合金(Ni 原子分数 50.9%)为 1.5 mm 厚薄板(购自江阴法尔胜佩尔新材料科技有限公司),设计试样如图 1 所示,总长度为 68 mm,工作段长度为 40 mm,宽度为 4 mm,工作段与夹持段过渡圆弧直径为 4 mm。经过同步热分析仪测定,马氏体相变完成温度 $A_f = 35\text{ }^\circ\text{C}$,奥氏体相变完成温度 $A_c = 80\text{ }^\circ\text{C}$ 。试验温度为 $T_0 = 28\text{ }^\circ\text{C}$,即室温下该材料为马氏体相。

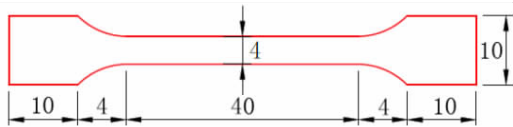


图 1 试样示意图

1.2 试验方法

1.2.1 试验装置

自主开发了热机械循环试验平台,如图 2 所示。该平台机械加载通过 MTS 试验机完成,试验机与计算机连接,通过 Flex-Test 40 控制系统对整个实验过程进行控制和数据的采集。

通过电流发生器对试样进行升温处理,并在 MTS 夹持试样的部位和引伸计夹持部位设计如图 3 所示的聚碳酸酯绝缘套;通过热电偶对温度进行实时测量,将热电偶采集的温度信号传输到 Flex-Test 40 的信号控制器。通过以上设计,可实现对力、位移和温度的同步实时采集。

1.2.2 试验程序

为了揭示加载模式和不同循环历史对形状记忆效

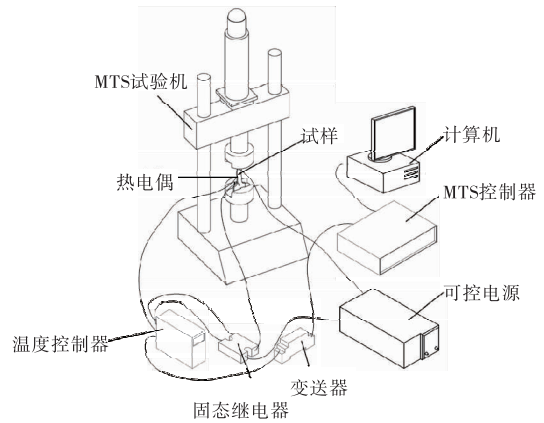


图 2 试验装置连接示意图

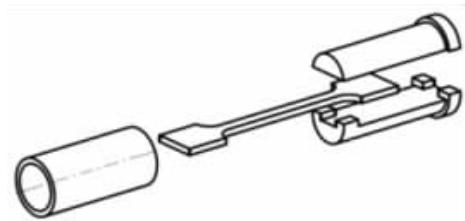


图 3 试件的绝缘处理示意图

应的影响,设计如下三类试验工况:

(1) 应变控制机械循环训练后的形状记忆循环试验。如图 4 所示,镍钛形状记忆合金在室温 $T_0 = 28\text{ }^\circ\text{C}$ 加载到最大应变 $\epsilon_{\max} = 8\%$,加载的应变速率为 0.001 s^{-1} ;然后卸载至应力为零,卸载应力率为 10 MPa/s ,循环 50 周次后再升温到 $T_{\max} = 120\text{ }^\circ\text{C}$,然后降温至 T_0 。

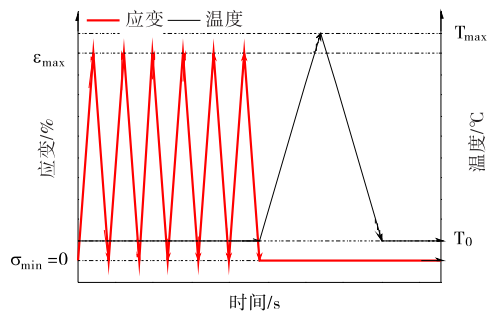


图 4 第一类工况加载示意图

(2) 应变控制下的热机械循环试验。如图 5 所示,镍钛形状记忆合金在室温 $T_0 = 28\text{ }^\circ\text{C}$ 加载到最大应变 $\epsilon_{\max} = 8\%$,加载的应变速率为 0.001 s^{-1} ;然后通过卸载至应力为零,应力率为 10 MPa/s ,再升温到 $T_{\max} = 120\text{ }^\circ\text{C}$,升温速率为 $10\text{ }^\circ\text{C/s}$,然后降温至 T_0 ,进行 10 个循环周次。

(3) 保持应力的温度循环试验。如图 6 所示,将试样加载至 $\sigma_h = 50\text{ MPa}$ 并保持,此时进行升温,升温速率为 $10\text{ }^\circ\text{C/s}$,加热试样至 $T_{\max} = 120\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,然后降低至

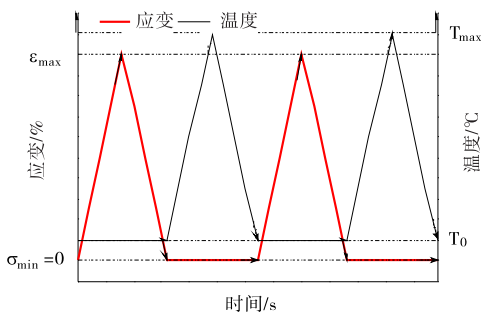


图 5 第二类工况加载示意图

室温 $T_0 = 28\text{ }^\circ\text{C}$, 循环升温 - 降温过程 30 个周次。

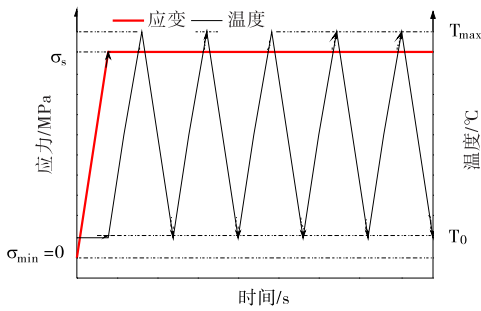


图 6 第三类工况加载示意图

2 试验结果及讨论

2.1 应变控制机械循环对形状记忆效应的影响

在应变控制下对形状记忆合金进行机械循环训练, 最大加载应变 $\varepsilon_{\max} = 8\%$ 进行试验, 进行机械循环训练, 再升温到 $T_{\max} = 120\text{ }^\circ\text{C}$, 然后降温至 $T_0 = 28\text{ }^\circ\text{C}$, 得到如图 7 所示的应力 - 温度 - 应变曲线。

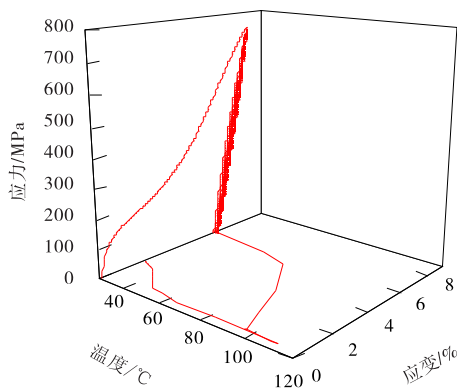


图 7 应力 - 温度 - 应变曲线

由图 7 可知, 在加载 - 卸载循环 50 周以后, 镍钛合金的残余应变并未发生明显累积, 在进行升温 - 降温处理之后, 残余应变大部分都可以回复。升温 - 降温回复阶段, 在温度升高初期, 应变并未回复太多, 当温度继续升高, 应变迅速回复并基本稳定, 当温度升高至 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 后, 温度回复至室温, 在此过程中, 应变会稍微变大最终

形成残余应变。由此可见, 通过此热机械循环试验平台, 可以探究机械循环对于合金形状记忆效应的影响。

2.2 应变控制热机械循环对形状记忆效应的影响

在应变控制下进行热机械循环试验, 加载到最大应变 $\varepsilon_{\max} = 8\%$, 进行拉伸 - 卸载 - 升温 - 降温循环 10 周次再升温到 $T_{\max} = 120\text{ }^\circ\text{C}$, 升温速率为 $10\text{ }^\circ\text{C/s}$; 然后降温至 $T_0 = 28\text{ }^\circ\text{C}$, 如此进行 10 个循环。图 8 显示了 10 个热机械循环后的应力 - 应变曲线, 可以看出, 在相同峰值应变下, 响应的应力随着循环次数的增加均逐渐变小; 残余应变不断累积。

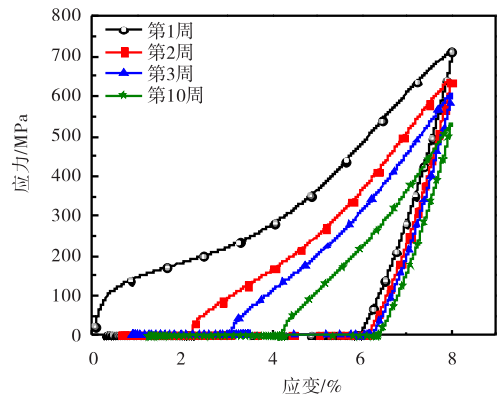


图 8 应力 - 应变图

如图 9 所示, 在拉伸 - 卸载循环后, 合金只能回复小幅度的应变, 而对其进行升温 - 降温处理后, 残余应变随着循环周次的增加而增加, 并逐渐趋于稳定。由此可知, 循环热机械训练将大大劣化镍钛形状记忆合金的形状记忆效应。

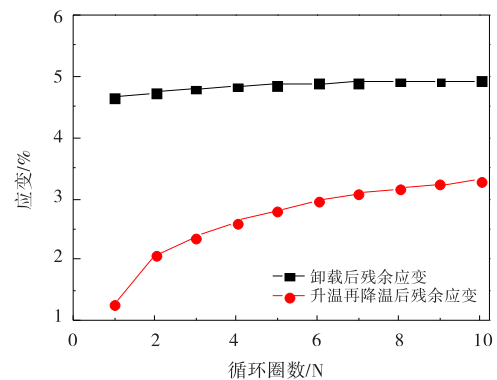


图 9 残余应变与循环圈数关系图

2.3 温度循环对形状记忆效应的影响

将试件加载至 50 MPa 并保持不变, 然后进行升温, 升温速率为 $10\text{ }^\circ\text{C/s}$, 加热试样至 $T_{\max} = 120\text{ }^\circ\text{C}$ 以上, 然后降低至室温 $T_0 = 28\text{ }^\circ\text{C}$, 重复上述升温 - 降温过程 10 次, 得到如图 10 所示的温度 - 应变图循环演化曲线。由图 10 可以看出, 在保持应力的情况下产生一定应变, 当

温度升高,应变回复,降温后应变变大,且温度循环会导致应变的不可逆累积。当保持应力不变进行温度循环时,每一次升温-降温后的残余应变随着循环圈数的增加而增加,循环圈数越大,残余应变的增加量越小。

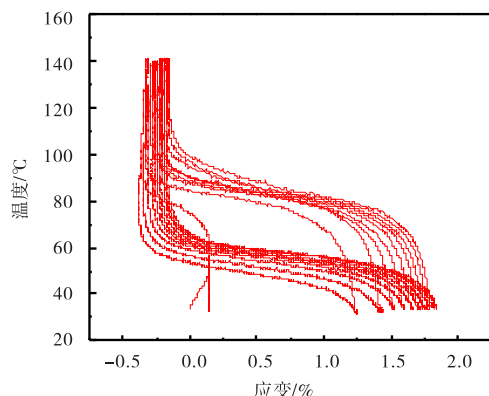


图10 温度-应变图(保持应力50 MPa)

由图11可看出,随着循环圈数的增加,奥氏体相和马氏体相状态下的残余应变都会增加,然后趋于稳定状态。由上述结果可知,恒定应力下的温度循环也将导致形状记忆效应的劣化。

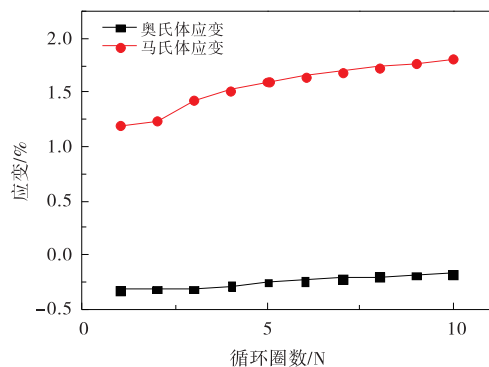


图11 不同相的残余应变与循环圈数的关系

3 结束语

本实验自主开发的热机械循环试验平台,该装置由MTS试验机、计算机、Flex-Test 40控制系统、电流发生器、引伸计、热电偶和夹持部位绝缘套组成,可实现对力、位移和温度数据的同步实时采集。通过对镍钛形状记忆合金开展三类循环变形可知:合金的形状记忆效应对预先的机械循环不敏感,热机械循环和温度循环均会显著降低合金的形状记忆回复能力。

参考文献:

[1] MIYAZAKI S, OTSUKA K. Deformation and transition behavior associated with the R-phase in Ti-Ni alloys

[J]. Metallurgical Transactions A, 1986, 17(1): 53-63.

[2] NEMAT-NASSER S, GUO W G. Superelastic and cyclic response on NiTi SMA at various strain rates and temperatures [J]. Mechanics of Materials, 2006, 38 (5-6): 463-474.

[3] 罗洪艳, 牟波, 廖彦剑, 等. 热机械循环方法对训练 NiTi 合金双程形状记忆效应的影响 [J]. 材料导报, 2009, 23(12): 55-58.

[4] 谭冀, 李艳锋, 高宝东, 等. 热机械循环对 Ti49.8Ni50.2 形状记忆合金相变行为的影响 [C]// 中国有色金属学会第十二届材料科学与合金加工学术年会论文集, 2007: 284-288.

[5] SURESH K S, BHAUMIK S K, SUWAS S. Effect of thermal and thermo-mechanical cycling on the microstructure of Ni-rich NiTi shape memory alloys [J]. Materials Letters, 2013, 99(20): 150-153.

[6] ABBASI M, KERMANPUR A, EMADI R. Effects of thermo-mechanical processing on the mechanical properties and shape recovery of the nanostructured Ti50Ni45Cu5 shape memory alloy [J]. Journal of Experimental Zoology India, 2015, 11(1): 61-66.

[7] SAIKRISHNA C N, RAMAIAH K V, BHAUMIK S K. Effects of thermo-mechanical cycling on the strain response of Ni-Ti-Cu shape memory alloy wire actuator [J]. Materials Science & Engineering A, 2006, 428 (1-2): 217-224.

[8] LI Y F, MI X J, TAN J, et al. Thermo-mechanical cyclic transformation behavior of Ti-Ni shape memory alloy wire [J]. Materials Science & Engineering A, 2009, 509 (1-2): 8-13.

[9] BO Z, LAGOUDAS D C. Thermo-mechanical modeling of polycrystalline SMAs under cyclic loading, Part III: Evolution of plastic strains and two-way memory effect [J]. International Journal of Engineering Science, 1999, 37(9): 1175-1203.

[10] KANG G Z, SONG D. Review on structural fatigue of NiTi shape memory alloys: Pure mechanical and thermo-mechanical ones [J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2015, 5(6): 245-254.

[11] TADAYYON G, MAZINANI M, GUO Y N, et al. The effect of annealing on the mechanical properties and

- microstructural evolution of Ti-rich NiTi shape memory alloy[J].Materials Science & Engineering A, 2016,662:564-577.
- [12] YU C,KANG G Z,KAN Q H,et al. Rate-dependent cyclic deformation of super-elastic NiTi shape memory alloy: thermo-mechanical coupled and physical mechanism-based constitutive model[J].International Journal of Plasticity,2015,72:60-90.

Experimental Observation on Thermo-mechanically Cyclic Deformation of NiTi Shape Memory Alloy

JIANG Han^{1,2}, XU Xiang^{1,2}, WANG Lichen^{1,2}, KAN Qianhua^{1,2}, KANG Guozheng^{1,2}

(1. Applied Mechanics and Structure Safety Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610031, China ;

2. School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: NiTi shape memory alloy is often subjected to the thermo-mechanically cyclic loadings in applications, which leads to structural and functional fatigue failures of the alloy. The thermo-mechanically cyclic deformation tests were carried out by using the self-developed thermo-mechanically cyclic test platform; the signals of force, displacement and temperature were collected in real time. By extracting the evolution curve of cyclic stress, strain and temperature, the influences of the thermo-mechanically cyclic deformation on shape memory effect were investigated. Results show that a pre mechanically cyclic loading reduces slightly the strain recovery capacity during heating process, but the shape memory effect decreases remarkably with the increasing number of cyclic under the thermo-mechanically cyclic loading and temperature cycling loading. The developed platform using for the test of thermo-mechanically cyclic deformation can be used to indicate the functional degradation mechanism of NiTi shape memory alloy. It is a useful reference for the further performance evaluation of shape memory alloy based devices.

Key words: shape memory alloy; thermo-mechanical cycle; shape memory effect; cyclic deformation