

NiTi 形状记忆合金回复应力-温度模型改进与实验研究

王伊卿¹, 张 腾¹, 郭善光¹, 陈 剑¹, 刘红忠¹, 卢秉恒¹, 徐明龙²

(1. 西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

(2. 西安交通大学 机械结构强度与振动国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘 要: 针对 NiTi 形状记忆合金的马氏体不完全逆转变带来的回复应力模型预测误差, 开展了 NiTi 形状记忆合金一维回复应力-温度模型研究。在 Brinson 的形状记忆合金(SMA)一维本构模型基础上, 增加马氏体回复因子为内变量, 给出了马氏体回复因子与预应变的关系, 综合考虑温度和应力对马氏体体积分数的影响, 构造 NiTi 形状记忆合金回复应力-温度改进模型, 通过实验测试了不同预应变量的 NiTi 合金回复应力与温度关系曲线。研究表明: 本研究提出的改进模型预测的 NiTi 形状记忆合金回复应力-温度曲线, 与实验曲线吻合较好。

关键词: 形状记忆合金; 模型改进; 马氏体回复因子; 回复应力

中图分类号: TG139⁺.6; TH122

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)01-0117-05

NiTi 形状记忆合金(SMA)是集感知和致动双重作用的一种新型功能材料, 具有超弹性及形状记忆效应^[1]。约束有预应变 NiTi 形状记忆合金丝两端, 将其加热到马氏体向奥氏体转变温度之上, NiTi 合金丝内部将产生回复应力, 可达到 500 MPa^[2]。NiTi 合金巨大的回复应力是应用 NiTi 形状记忆合金致动器的关键。已有很多文献报道了预应变、热处理方式、热-机循环对 NiTi 形状记忆合金回复应力的影响^[3-5]。对于单晶 SMA 材料, 回复应力与温度成线性关系, 但是对于多晶 SMA 材料, 回复应力与温度的关系则表现出非线性^[6]。目前, 用于预测 SMA 回复应力的模型有 Tanaka 模型、Liang 模型和 Brinson 模型^[7-9]。在 SMA 初始预应变大于 1%时, 3 个模型的预测值与实验值存在较大误差, 原因在于未考虑回复应力对马氏体逆转变的阻碍作用^[10]。本研究基于 Brinson 的 SMA 一维本构模型, 增加马氏体回复因子 γ 作为内变量, 表征 NiTi 合金在约束回复时马氏体的不完全逆转变现象, 预测 NiTi 合金回复应力随温度变化的非线性关系。

1 NiTi 合金一维回复应力模型建立

NiTi 合金的超弹性和形状记忆效应的基础是马氏体相变。加热有残余应变的 NiTi 合金丝, 当其温度大于马氏体逆转变开始温度 A_s 而小于结束温度 A_f 时, 马

氏体向母相奥氏体转变, 这一过程称为马氏体逆相变; 当温度大于 A_f 时, 马氏体逆转变结束, 残余应变回复至零。当加热的同时完全约束 NiTi 丝两端, 丝内部将产生回复应力, 回复应力的产生又会诱发奥氏体转换为马氏体。综合两者作用, 等价于回复应力的产生阻碍了马氏体向奥氏体的逆转变过程, 并且回复应力越大, 产生的阻碍作用越大。回复应力的存在使得马氏体逆相变的开始和结束温度相应推后至 A_s' 和 A_f' 。

Brinson 将马氏体分为应力诱发马氏体和热致马氏体两部分, 据 Brinson 模型^[9], 回复应力由式(1)计算:

$$\sigma_r - \sigma_0 = (\xi) \varepsilon_0 - E(\xi_0) \varepsilon_0 + \Omega_s(\xi) \xi_s - \Omega_s(\xi_0) \xi_{s0} + \Theta(T - T_0) \quad (1)$$

其中: $E(\xi_0) = E_A + (E_M - E_A)\xi$ (2)

$$\Omega_s(\xi) = -\varepsilon_L E(\xi_0) \quad (3)$$

式中: E_A —NiTi 合金奥氏体弹性模量; E_M —NiTi 合金马氏体弹性模量; ε_L —NiTi 合金最大可回复应变; Ω_s —NiTi 合金的相变模量; Θ —NiTi 合金的热膨胀系数; T_0 —NiTi 合金初始温度; ε_0 —初始应变; ξ 、 ξ_0 —热致马氏体含量、初始热致马氏体含量; ξ_s 、 ξ_{s0} —应力诱发马氏体含量、初始应力诱发马氏体含量; σ_r 、 σ_0 —NiTi 合金回复应力、初始应力。

一般初始残余应力为零, 即 $\sigma_0=0$ 。由于 NiTi 丝两端约束, 应变 ε_0 保持不变且和初始残留预应变相等。Brinson

收稿日期: 2015-12-20

基金项目: 机械结构强度与振动国家重点实验室开放课题(SV2013-KF-03); 陕西省工业攻关项目(2014K06-03)

作者简介: 王伊卿, 男, 1964 年生, 博士, 副教授, 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049, 电话: 029-82665667, E-mail: wyq1102@163.com

模型在预测大初始应变下 NiTi 丝的回应力时有很大误差, 原因在于其假设加热到一定温度时, 由应力诱发的马氏体没有完全转换成母相奥氏体。C. Y. Lei^[11]等研究了 NiTi 合金丝的回应力。在 Ti-15.4V-4.0Al 合金丝预应变为 6% 下, 当温度达到马氏体逆相变结束温度 A_f 之上时, 采用 Brinson 模型计算得到的回应力大于 4000 MPa, 这一值远大于 NiTi 合金的屈服应力。Madan-gopal^[12]研究指出, 有预应变的 NiTi 合金在加热时产生的回应力使得马氏体进一步定向化, Piao^[13]等人的 TEM 观察结果也证实了在加热时 NiTi 合金内部马氏体的变形程度增加, 马氏体变形程度增加阻碍了马氏体向奥氏体转变过程。Cui^[14]等人进一步研究指出, 加热时马氏体向奥氏体转变量与马氏体变形程度的变化成正比。

本研究提出马氏体回复因子 γ , 用于表征有预应变的 NiTi 合金在约束态加热时发生马氏体逆相变的马氏体的分数, 如式 (4):

$$\gamma = \xi_{\text{trans}} / \xi_0 \quad (4)$$

ξ_0 为初始马氏体含量, ξ_{trans} 为发生马氏体逆相变的马氏体含量, 在相变过程中逐渐增大。 γ 为马氏体回复因子, 它与马氏体变形程度的变化成正比^[14], 如式 (5) 所示:

$$\gamma = K \Delta \eta \quad (5)$$

K 为变形系数, $\Delta \eta$ 为马氏体变形程度:

$$\Delta \eta = \frac{\xi_0 \varepsilon_0}{\xi_0 - \xi_{\text{trans}}} - \varepsilon_0 \quad (6)$$

$$\xi_0 = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_L} \quad (7)$$

由此可得:

$$\gamma = K \left(\frac{\xi_0 \varepsilon_0}{\xi_0 - \xi_{\text{trans}}} - \varepsilon_0 \right) \quad (8)$$

因此, 有预应变的 NiTi 合金丝在两端完全约束, 温度升高时的回应力的计算过程可简述如下:

1) 当温度 T 低于马氏体逆转变开始温度 A_s^1 时: 不发生马氏体向奥氏体转变, 回应力 σ_r 大小与温度之间为线性关系, 可表示为:

$$\sigma_r = \theta(T - T_0) \quad (9)$$

当 $T = A_s^1$ 时, 回复力大小如式 (10) 所示:

$$\sigma_r^1 = \theta(A_s^1 - T_0) \quad (10)$$

由于回复力的存在, 马氏体向奥氏体转变的开始温度相应增大, 如式 (11) 所示:

$$A_s^1 = \frac{\sigma_r^1}{C_A} + A_s \quad (11)$$

C_A 为奥氏体的应力影响系数, 可通过实验测定, 如式 (12) 所示:

$$A_s^1 = \frac{C_A A_s - \theta T_0}{C_A - \theta} \quad (12)$$

2) 当温度 T 高于 A_s^1 且低于马氏体逆相变结束温度 A_f^1 时, 马氏体转变成奥氏体。马氏体含量随温度的变化关系用三角函数描述^[9]。采用迭代计算, 当温度为 T_i 时, 计算过程如下式:

$$\xi_i = \frac{\xi_0}{2} \left(\cos \left(\frac{\pi}{A_f^1 - A_s^1} (T_i - A_s^1) \right) - 1 \right) \quad (13)$$

$$\xi_{si} = \xi_{s0} - \frac{\xi_{s0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi_i) \quad (14)$$

$$\xi_{Ti} = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi_i) \quad (15)$$

$$\sigma_{ri} = E(\xi_i) \varepsilon_0 - E(\xi_0) \varepsilon_0 + \Omega_s(\xi_i) \xi_{si} - \Omega_s(\xi_0) \xi_{s0} + \theta(T_i - A_s^1) + \sigma_r^1 \quad (16)$$

下一步迭代计算时, 引入马氏体回复因子 γ_i 。随着温度的上升, NiTi 合金丝内部的回应力增加, 对马氏体逆相变的阻碍作用也越大, 剩余马氏体的变形程度加剧。可定义马氏体回复因子是温度的单调递减函数。当 $T = A_s^1$ 时, 马氏体开始转换成奥氏体, $\gamma_s = 1$; 当 $T = A_f^1$ 时, 马氏体逆转变结束, $\gamma_f = 0$, 因此定义:

$$\gamma_i = 1 - \frac{T_i - A_s^1}{A_f^1 - A_s^1} \quad (17)$$

则下一次迭代可转换的马氏体含量为:

$$\xi_{i+1} = \gamma_i \xi_i \quad (18)$$

将 ξ_{i+1} 代入式 (13) 中继续计算下一温度点的马氏体转换量及回应力。当温度上升到马氏体逆转变结束温度 A_f^1 时, 设回应力 $\sigma_r = \sigma_r^2$, 则:

$$A_f^1 = \frac{\sigma_r^2}{C_A} + A_f \quad (19)$$

3) 当温度 T 高于 A_f^1 时, 马氏体不再转换成奥氏体, 回复力与温度成线性关系, 可表示为式 (20):

$$\sigma_r = \theta(T - A_f^1) + \sigma_r^2 \quad (20)$$

本实验用 TiNi₅₆ 合金丝由西北有色金属研究院提供, 直径为 0.1 mm, 通过 TA-Q200 型差式扫描热像仪测定其相变温度, 升温速率 10 °C/min, 如图 1。通过 DA-Q800 动态机械热分析仪测定 NiTi 合金奥氏体及马氏体的弹性模量, 通过单向拉伸和约束回复实验可测定其他参数, 实验测得的 TiNi₅₆ 的参数在表 1 中列出。

2 NiTi 合金回应力计算结果

图 2 为式 (1) 的 Brinson 模型计算结果, 从图中看出, 在温度高于 60 °C 时, 回应力可达到 1000 MPa 以上, 远远超过了 NiTi 合金的屈服强度。

本研究中, 根据式 (13) 计算不同预应变的 NiTi 合金回应力, 通过实验方法测定 NiTi 合金回应力-温度曲线, 对 NiTi 合金回应力修正模型计算结果进

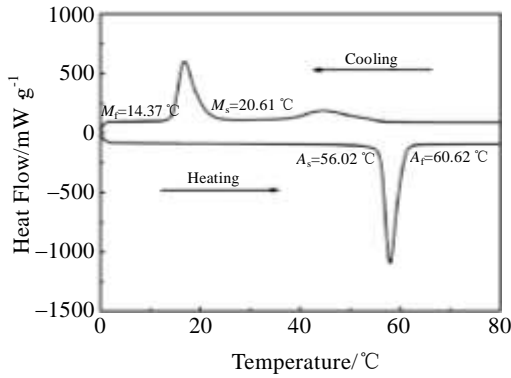


图 1 NiTi 合金相变温度测定

Fig.1 Phase transformation temperatures of NiTi Alloy

表 1 TiNi₅₆ 形状记忆合金参数

Table 1 Parameters of TiNi₅₆

$E_A/$ GPa	$E_M/$ GPa	$M_f/$ °C	$M_s/$ °C	$A_s/$ °C	$A_f/$ °C	$\epsilon_L/$ %	$C_A/$ MPa K ⁻¹	$\Theta/$ MPa K ⁻¹
36	25	14.4	20.6	56.0	60.6	4.75	14	2.54

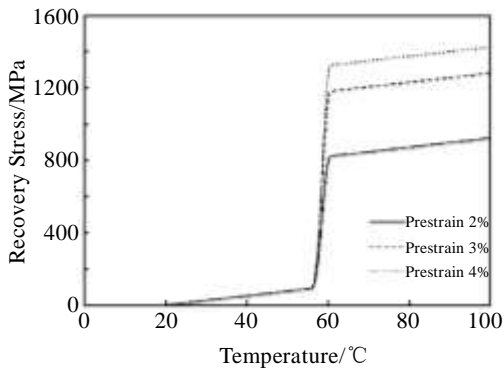


图 2 NiTi 合金 Brinson 回复应力模型计算结果

Fig.2 Calculation result of Brinson restoring stress model of NiTi alloy

行验证。图 3 为初始预应变分别为 2%、3%、4% 的 NiTi 合金回复应力修正模型计算结果与实验测试结果。

在实验测定 NiTi 合金回复应力之前, 反复多次对 NiTi 合金进行拉伸、卸载、升温、冷却循环, 使 NiTi 合金性能趋于稳定。回复应力测定实验设备: AG-IS 5kN 温控拉伸机, NiTi 合金回复应力测定实验过程如下:

- 1) 在 10 °C 下拉伸至产生塑性变形;
- 2) 卸载后得到预应变, 固定夹头两端;
- 3) 升温至 90 °C 测得回复应力-温度曲线。

从图 3 中可看出, 有预应变的 NiTi 合金回复应力与温度关系曲线分 3 个阶段: 第 1 阶段, 当温度低于马氏体逆转变温度 A_s' 时, 回复应力随温度升高而线性增加; 第 2 阶段, 当温度高于 A_s' 而低于 A_f' 时, 回复应力随温度

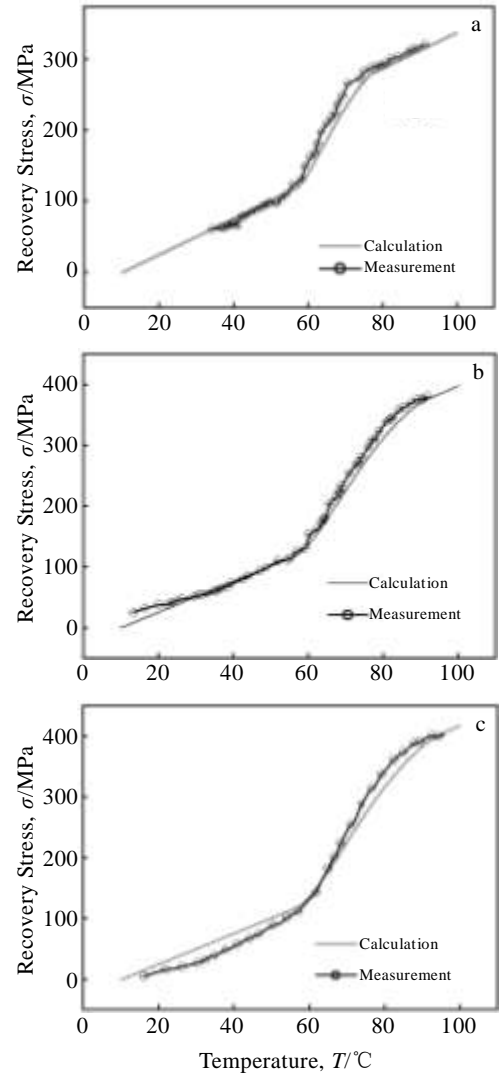


图 3 不同预应变的 NiTi 合金回复应力与温度关系

Fig.3 Relationship between recovery stress and temperature under different prestrain of NiTi alloy: (a) 2%, (b) 3%, and (c) 4%

升高而增加, 是一个非线性增加过程; 第 3 阶段, 当温度高于 A_f' 时, 回复应力随着温度升高而线性增加。

从修正模型预测计算结果和实验值对比可知, 本研究提出的 NiTi 形状记忆合金回复应力一维模型能较准确地描述 NiTi 合金回复应力与温度的关系, 即使在初始预应变较大的情况下, 本研究一维模型预测曲线与实验曲线也符合得较好, 有效地克服了 Brinson 模型在大预应变情况下, 预测的 NiTi 合金回复应力误差较大的不足。

图 4 为本研究改进模型计算的 NiTi 合金在约束加热过程中马氏体含量随温度的变化。从图中可看出, NiTi 合金丝在加热回复时初始马氏体并未完全转化为母相奥氏体, 马氏体逆相变结束后仍残余部分马氏体, 这部分马氏体在回复应力作用下变形程度将有所增加。

随着温度升高, NiTi 合金马氏体相逐步转化为奥氏

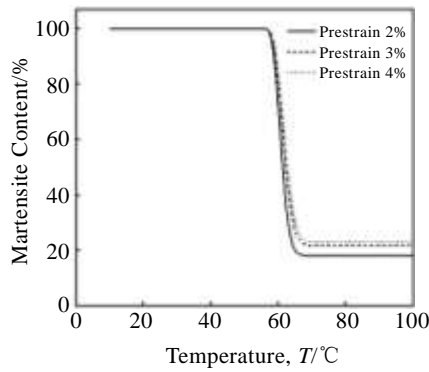


图 4 不同预应变下马氏体含量随温度变化

Fig.4 Relationship between martensite content and temperature under different prestrain of NiTi alloy

体。根据前文定义，马氏体回复因子 γ 是马氏体逆相变过程中转换的马氏体量之和与初始马氏体的比值，可由式(21)计算得到：

$$\gamma = \frac{\xi_{trans}}{\xi_0} = \frac{\int_{A_s}^{A_f} d\xi}{\xi_0} \quad (21)$$

图 5 为本研究改进模型计算的马氏体回复因子与预应变的关系图。可见，马氏体回复因子 γ 随着预应变的增大而减小。

从图 5 曲线可知，马氏体回复因子与预应变的关系近似于一条负斜率的直线。这可以从理论上推导证明，将式(4)代入式(8)可得：

$$\gamma = 1 - K\varepsilon_0 \quad (22)$$

由式(22)可知，马氏体回复因子与 NiTi 合金的初始预应变相关，并且随着初始预应变的增加而线性减小，曲线斜率恰好是和 NiTi 合金材料参数相关的变形系数 K 。由图 5 中曲线斜率可知，对于本研究的 NiTi₅₆ 合金， K 值为 3.35。对于不同的 NiTi 合金，其

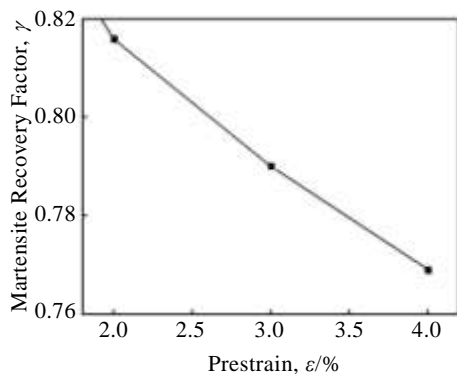


图 5 马氏体回复因子与预应变关系

Fig.5 Relationship between martensite recovery factor and prestrain of NiTi alloy

基本的物性参数不同，对应的 K 值也不同。本研究提出的改进模型，通过定义每步迭代时的马氏体回复因子作为内变量，随着温度升高逐步计算马氏体含量和回复应力大小，直到温度达到马氏体逆转变结束温度之上，不再有马氏体转换为奥氏体。此时可计算得知整个温升过程马氏体回复因子的大小。

3 结 论

1) 有预应变的 NiTi 形状记忆合金在约束态加热时回复应力大小与材料参数和温度等有关。NiTi 合金在约束加热回复时，合金内部马氏体相并未完全转化为母相奥氏体，相变结束后仍有部分马氏体存在，并且这部分马氏体因承受回复应力而变形程度增加，阻碍了 NiTi 合金马氏体向奥氏体转变。

2) 在 Brinson 提出的形状记忆合金一维本构模型的基础上，增加马氏体回复因子作为内变量，考虑马氏体含量与温度和应力之间的关系，提出了 NiTi 合金回复应力一维改进模型。该模型在不同预应变下都能较准确地预测 NiTi 合金回复应力随温度的变化关系。

3) 马氏体回复因子的大小和初始预应变成线性关系。

参考文献 References

[1] Wayman C M. *Progress in Materials Science*[J], 1992, 36: 203
 [2] Schetky L M D. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*[J], 1982, 18(1): 25
 [3] YanX J, Van Humbeeck J. *Functional Materials Letters*[J], 2009, 2(2): 55
 [4] Vokoun D, Kafka V, Hu C T. *Smart Materials and Structures*[J], 2003, 12(5): 680
 [5] Jin W, Wang J, Cao M *et al. Chinese Journal of Materials Research*[J], 2000, 14(6): 573
 [6] Šittner P, Novak V. *International Journal of Plasticity*[J], 2000, 16(10-11): 1243
 [7] Tanaka K, Nagaki S. *Archive of Applied Mechanical*[J], 1982, 51(5): 287
 [8] Liang C, Rogers C A. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*[J], 1990, 1(2): 207
 [9] Brinson L C. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*[J], 1993, 4: 229
 [10] Tang W, Sandström R. *Le Journal de Physique IV*[J], 1995, 5(8): 8
 [11] Lei C Y, Wu M H. *Smart Structures and Materials*[J], 1991, 123(24): 650
 [12] Madangopal K, Ganesh R, Krishnan R *et al. Scripta Metal-*

- lurgica*[J], 1988, 10(22): 1593
- [13] Piao M, Otsuka K, Miyazaki S *et al. Materials Transactions*[J], 1993, 34(10): 919
- [14] Cui L S, Zhang Y J, Zhu D *et al. Journal of Materials Science Letters*[J], 2000, 19(13): 1115

Improvement and Experimental Research on the Recovery Stress-Temperature Model of NiTi Shape Memory Alloys

Wang Yiqing¹, Zhang Teng¹, Guo Shanguang¹, Chen Jian¹, Liu Hongzhong¹, Lu Bingheng¹, Xu Minglong²

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structure, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To eliminate the prediction errors of the recovery stress model of NiTi SMAs caused by the incomplete reverse martensitic transformation, an improved prediction model of recovery stress was developed based on the one-dimensional constitutive behavior model proposed by Brinson for shape memory alloys (SMAs). This model regarded the martensitic recovery factor as an internal variable and took the stress and temperature into account as influencing factors to martensitic content of SMAs. The curve of recovery stress of NiTi SMAs with different initial strains versus temperature was measured by experiments. Compared with the experimental results, the computation result shows that the model has certain accuracy in calculating the recovery stress-temperature curve.

Key words: shape memory alloys; model improvement; martensitic recovery factor; recovery stress

Corresponding author: Wang Yiqing, Ph. D., Associate Professor, State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China, Tel: 0086-29-82665667, E-mail: wyq1102@163.com