

NiTi 合金丝主要特征参量的测试和表征

石家庄铁道学院 杜彦良*
北京航空航天大学 聂景旭

【摘要】 对 NiTi 合金丝的相变与施加应力、温度的关系, NiTi 合金丝的应力-应变与温度的相互关系, NiTi 合金丝的回弹力-温度-应变之间的关系和 NiTi 合金丝的弹性模量随温度的变化关系等进行了测试, 并且导出了相应的表征公式。这些特征参量和表征公式是进行 NiTi 合金丝智能复合构件研究的前提和基础。

主题词: 形状记忆合金 特征测定 表示(数学)
分类号: TG115 V 252. 3

1 试件及试验设备

NiTi 形状记忆合金作为一新型功能材料, 由于它的特殊力学和物理性能及其特殊作用, 许多专家学者对其特性进行了广泛的研究^[1,2]。但是, 将 NiTi 合金应用于工程实际, 尤其是将其复合于本体材料(或构件)内, 利用 NiTi 合金的特殊性能对构件振动、噪声和裂纹的主动控制时, 所需要的一些材料特征参量和本构关系至今研究和测试的还很少。特别是对 NiTi 合金主要特征参量的表征研究的还不够, 甚至有些特性也还未见有研究过。因此本文对 NiTi 合金丝的一些主要特征参量进行了测试与表征分析, 这些分析结果是智能材料结构研究中迫切需要的。

试验材料选取长 100 mm, 直径为 0.46 mm 的 NiTi 合金丝(材料成份 Ni、Ti 各占 50%)。试验测试在 AG-25TA 电液伺服拉伸试验机上进行。图中, 1-电源, 2-计算机, 3-记录打印机, 4、6-夹头, 5-试件, 7-加热冷却部, 8-测力仪, 9-试验机, 10-加热冷却控制机, 11-电位计, 12-热电偶。

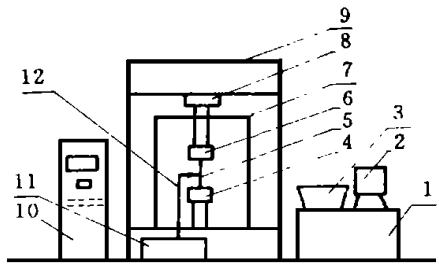


图 1 试验测试系统示意图

2 NiTi 合金丝主要特征参量的测试和表征方法

2.1 NiTi 合金材料的相变与施加应力、温度的测试

分别测试 NiTi 合金丝的应变量 $\epsilon = 2\%、6\%、8\%、10\%$ 时, 其电阻率 ρ 随温度 T 的变化关系。并且绘制各种应变条件下的 $\rho-T$ 曲线, 如图 2 表示的是 $\epsilon = 2\%$ 时 NiTi 合金的相变与温度的关系曲线。在所绘制的各应变条件下的 $\rho-T$ 曲线上, 找到 ρ 出现拐点时所对应的温度值, 例如, 从低温到高温状态可确定出奥氏体开始转变的温度点 A_s 和相转变结束点 A_f , 当达到一定

温度后,随着温度 T 的下降,可确定出马氏体相开始转变的温度点 M_s 和相转变结束点 M_f 。试验发现,在不同载荷状态下,材料的相变温度值是不同的。例如, $\sigma = 0$ 时, M_s 、 M_f 、 A_s 和 A_f 值分别为 62、41、60 和 80°C。而当 $\sigma = 271 \text{ MPa}$ ($\epsilon = 2\%$) 时,各相应的相变点分别为 73、45、68 和 91°C。各值均比 $\sigma = 0$ 时升高(便于与无应力状态下相变点比较,在外载荷作用下的 M_s 、 M_f 、 A_s 和 A_f 分别用 M_s^m 、 M_f^m 、 A_s^m 和 A_f^m 表示)。

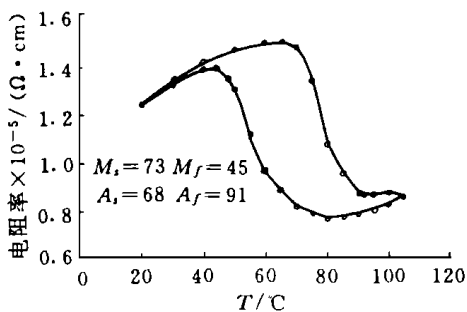


图 2 相变与温度的关系

2.2 NiTi 合金马氏体函数(ζ)的计算表征

在 NiTi 丝主要特征参量的关系中,需要用表达式来描述马氏体含量随应力和温度的变化关系,根据资料介绍^[4],在应力诱导下的马氏体含量(ζ 可用余弦函数表示。则在某一温度下马氏体向奥氏体转化过程中(M-A),其 ζ 与温度 T 和应力 σ 的关系表示为:

$$\zeta = \zeta_0 \{ \cos[\alpha_A (T - A_s) + b_A \sigma] + 1 \} / 2 \quad (1)$$

反之,当奥氏体向马氏体转化时(A-M), ζ - T - σ 的关系式可表示为:

$$\zeta = [(1 - \zeta) / 2] \{ \cos[\alpha_m (T - M_f) + b_m \sigma] \} + [(1 + \zeta) / 2] \quad (2)$$

式中: ζ_0 、 ζ_m 分别表示在某一温度 T_A 、 T_m 下的马氏体含量,而 α_A 、 α_m 、 b_A 、 b_m 分别为新的材料参数:

$$\alpha_A = \pi / (A_f - A_s) \quad \alpha_m = \pi / (M_s - M_f) \quad (3)$$

$$b_A = -\alpha_A / C_A \quad b_m = -\alpha_m / C_m \quad (4)$$

式中 C_A 、 C_m 为与材料有关的参数。如果没有外力作用,便没有应力诱发马氏体的产生,则(1)、(2)式中应力分别为零。此时 ζ 仅与 T 有关,在此种情况下,如果当 M → A 转化时,其加热温度是从 A_s 点以下某一值开始上升则 ζ 可表示为:

$$\zeta = 1/2 \{ \cos[\alpha (T - A_s)] + 1 \} \quad (5)$$

反之,如果 A → M 转化时,其温度是从高于 M_s 以上某一值开始下降,则:

$$\zeta = 1/2 \{ \cos[\alpha_m (T - M_f)] + 1 \} \quad (6)$$

上式说明马氏体含量在无应力作用下随温度的变化关系。但是,如果有外加应力作用,其环境温度条件同(5)、(6)式,则 ζ 除与温度有关外,还与外加应力有关。 ζ 表示为:

$$\text{当 } M \rightarrow A \quad \zeta = 1/2 \{ \cos[\alpha_A (T - A_s) + b_A \sigma] + 1 \} \quad (7)$$

$$\text{当 } A \rightarrow M \quad \zeta = 1/2 \{ \cos[\alpha_m (T - M_f) + b_m \sigma] + 1 \} \quad (8)$$

根据上述,在各种应变状态下, ζ 随温度的变化情况便可计算出来^[3]。

2.3 NiTi 合金丝的应力-应变与温度相互关系的测试与表征

图 3 所表示的是在几种不同温度状态下材料的 $\sigma \sim \epsilon$ 关系曲线。根据 Tanka 等人的分析结果^[5,6],对于形状记忆合金系统,其应力、应变、环境温度和马氏体函数构成了一个基本关系式:

$$\bar{\sigma} - \bar{\sigma}_0 = D(\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_0) + \theta(T - T_0) + \Omega(\zeta - \zeta_0) \quad (9)$$

D 为材料在线弹性载荷条件下马氏体弹性模量; θ 为热弹性因子,其值可通过试验确定; Ω 为与温度和外加载荷有关的材料常数; $\bar{\sigma}_0$ 、 $\bar{\epsilon}_0$ 、 T_0 和 ζ_0 为初值。如果环境温度低于 A_s 点,而且加载过程是在一恒定的环境中进行,则没有 T 项的影响,在此种条件下,没有应力诱发马氏体的产

生, $\zeta = 0$ 。此时, 假设初始条件为:

$$\bar{\sigma}_0 = \bar{\sigma}_{in}, \quad \bar{\epsilon}_0 = \bar{\epsilon}_{in}, \quad \zeta = 0 \quad (10)$$

在此条件下其应力-应变关系是线性的, 则 $\bar{\epsilon}_{in} = \bar{\sigma}_{in}/D$, 由(9)式 $\bar{\sigma}$ 可表示为:

$$\bar{\sigma} = D\bar{\epsilon} \quad (11)$$

如果所施加的应力大于 $\bar{\sigma}_{in}$, 则 $\zeta > 0$, 此时 δ 变化除与 ϵ 有关外, 还与 ζ 有关, 则 $\bar{\sigma}$ 表示为:

$$\bar{\sigma} = D\bar{\epsilon} + \Omega\zeta \quad (12)$$

由此式表示的 $\sigma \sim \epsilon$ 关系如图 4 所示。 D 、 Ω 和 ζ 之间的相互关系为:

$$\bar{\epsilon}_{es} = -\zeta\Omega/D \quad (13)$$

式中 $\bar{\epsilon}_{es}$ 表示在 $0 \leq \zeta \leq 1$ 的范围内, 当材料卸载发生变形时, 卸载后其变形不能完全恢复的马氏体残余变形量, 并且定义当 $\zeta \leq 1$ 时, 只要对材料加热, 则 $\bar{\epsilon}_{es}$ 可完全消失。当 $\zeta = 1$ 时, $\bar{\epsilon}_{es} = \bar{\epsilon}$, $\bar{\epsilon}$ 称为可回复的最大残余变形量, $\bar{\epsilon}$ 可表示为:

$$\bar{\epsilon} = -\Omega/D \quad (14)$$

当材料一定时, $\bar{\epsilon}$ 可通过试验测出。如果在某一恒定环境温度下, $\bar{\epsilon}$ 和 D 一定时, Ω 便可由(14)式计算出, 相应(12)式内各系数参量便可计算出。例如, 采用本文所选 NiTi 合金丝, 当环境温度为 50°C 时, D 为 14 GPa , 所测出的 $\bar{\epsilon} = 0.028$, 由(14)式计算出 $\Omega = -392 \text{ MPa}$ 。如果卸载是在 $\zeta = 1$ 以前发生, 则(12)式可表示为:

$$\sigma = 14000\epsilon - 392\zeta \quad (15)$$

2.4 回复力(F)-温度(T)-应变(ϵ)的测试和表征公式^[3]

对 F - T - ϵ 的关系和参量进行研究, 对实现构件的主动控制是非常重要的。测试方法仍选用图 1 所示的测试系统。将 NiTi 合金在不同应变状态下所测得的回复力随温度的变化值绘制成 F - T 曲线, 如图 5 所示。由图可以看出, 当 NiTi 合金丝的变形量为 8% (环境温度为 185°C) 时, 所产生的回复力最大。

根据试验测试结果, NiTi 合金的回复力主要与加热温度和应变有关, 其变化规律如图 6 所示。在一定的应变条件下, 材料的回复力随温度的变化规律可用两直线来表示, 其交点为 A_f^m , 并且分别通过 A_s^m 或 A_{max}^m (产生最大回复力时的温度点), 如果分别用 $T_0(\epsilon)$ 、 $T_1(\epsilon)$ 和 $T_2(\epsilon)$ 表示上述各温度点 (如图 5 所示), 则当材料性质一定时, 可将回复力(F)随材料变形 (ϵ) 和环境温度 (T) 变化关系表示为下述形式

$$\text{当 } T_0(\epsilon) \leq T_m \leq T_1(\epsilon) \text{ 时, } \sigma_{F1} = K_1(\epsilon)(T_m - A_1(\epsilon)) \quad (16a)$$

$$\text{当 } T_1(\epsilon) \leq T_m \leq T_2(\epsilon) \text{ 时, } \sigma_{F2} = K_2(\epsilon)(T_m - A_2(\epsilon)) \quad (16b)$$

式中 $K_1(\epsilon)$ 、 $K_2(\epsilon)$ 、 $A_1(\epsilon)$ 、 $A_2(\epsilon)$ 均为与材料变形有关的函数, 各系数可用方程组来求解, 即分

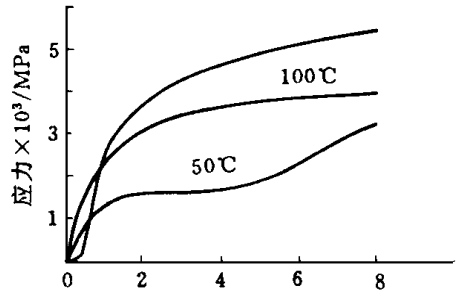


图 3 不同温度下的应力-应变曲线

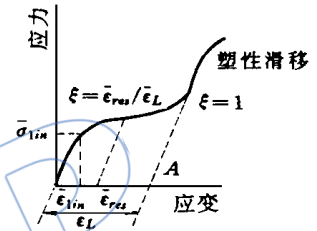


图 4 应力-应变关系

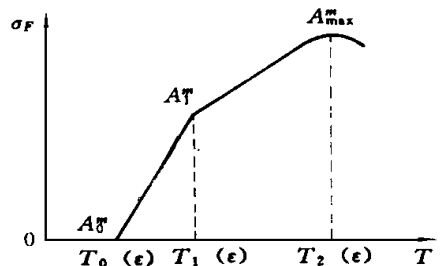


图 5 回复力随温度变化

别表示为与应变有关的三元一次方程组, 这样当需要得已知应变条件下的回复力时, 只要将已知应变代入各方程式内, 则各系数参量便可求出。例如, 当 NiTi 合金的变形量 $\epsilon = 0.07$ 时, 利用该方法所计算出的回复力随温度的变化关系与试验值表示于图 7 中, 可以看出其计算结果与测试值完全吻合。计算与测试结果表明, 利用上述回复力的计算公式, 可以方便的计算出不同应变状态下产生最大回复力的温度范围和在此范围内回复力随温度的变化关系。

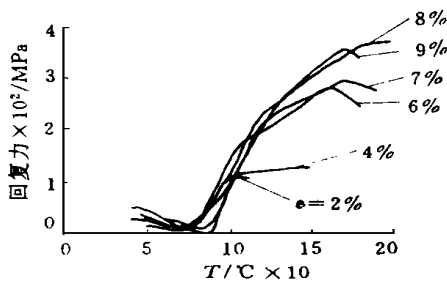


图 6 回复力随材料变形和温度的变化

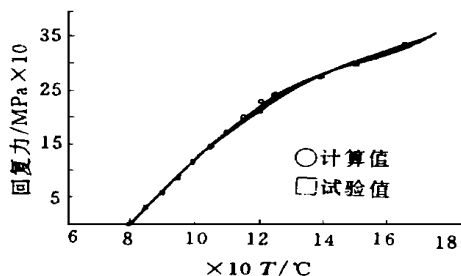


图 7 回复力随温度的变化

2.5 弹性模量随温度的变化关系

NiTi 合金的另一主要特征是弹性模量在一个很小的温度范围内将发生较大变化, 图 8 所表示的是本文所选用 NiTi 合金弹性模量随温度变化的测试结果, 根据此变化规律, 弹性模量随温度的变化关系可用下式表示:

$$\text{当 } 75 \leq T_m \leq 130 \text{ 时, } E = (3T_m/11) + 34.885 \quad (17a)$$

$$\text{当 } 130 \leq T_m \leq 200 \text{ 时, } E = (T_m/7) + 51.77 \quad (17b)$$

将计算结果绘制于图 8 上, 可以看出其计算结果与测试结果完全吻合。

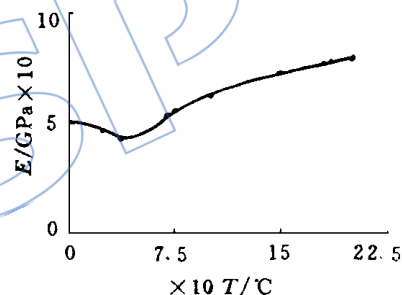


图 8 弹性模量随温度的变化

结论 试验测试表明, 当 NiTi 合金的材质一定时, 其主要性能受环境温度和应力的影响较大, 这些特征参量对于具有一定控制功能的 NiTi 合金智能复合构件的计算分析和试验研究均有重要作用。

参 考 文 献

- 1 Schwartzbart H. and Schetky L M. Advance Technology in Materials and Processes. Anaheim: 1017~1025
- 2 Lionnet R. and Poncet P. Met. Mater. Electer. 1984, (406): 28~33
- 3 杜彦良. 主动探测和控制裂纹扩展的智能材料结构研究: [学位论文]. 北京航空航天大学, 1993: 23~42
- 4 Muiler, I. IMA Preprint, 1985, (169)
- 5 Tanka K. and Iwasaki R. Engineering Fracture Mechanics. 1985, 21(4): 709~720
- 6 Liang C. and Rogers C A. Proceeding of the 31st Structures, Structural Dynamics and Materials Science, AIAA - 90-1027

damage strength, we can determine its overall fatigue quantity in the working life. And based on the fatigue cumulative damage probabilistic model, the part's fatigue reliability and life can be predicted. An aeroengine compressor is taken for example to show how to use the surplus fatigue damage strength for predicting the blade's fatigue reliability and life.

Key words Compressors Blades Reliability Fatigue life

A NEW RELIABILITY ANALYTICAL METHOD FOR BENDING FATIGUE STRENGTH OF GEARS

Peng Xiongqi, Liu Geng, Wu Liyan

(5th Dept. Northwest Polytechnical University, Xian 710072)

ABSTRACT

Based on the three-parameters reliability analysis model and the fatigue theory of gears, a new reliability analytical method for the bending fatigue strength of tooth root is proposed by use of blending stochastic finite element method. This method takes into account such random factors for the reliability of gears, as load, fatigue limit, the material parameters and radius chamfer of tool. Analyses completed with this method indicate: The radius chamfer of tool has unignorable effect on the reliability of gears' bending fatigue strength; In the linear elastic problems, the Young's modulus has no effect on the structure reliability; The Poisson ratio has a little leverage on the gears' reliability; But the gears' reliability reduces with the increase of variation coefficients of the above mentioned random factors; So the gear's reliability will increase as the skewnesses of fatigue limit and the radius chamfer of tool rise. But the skewness of load has an inverse influence. This paper also considers the modified coefficient's (no random factor) effect on the gears' reliability.

Key words Stochastic finite element method Reliability Gears Bending fatigue

MEASUREMENT AND EXPRESSION OF MAIN CHARACTERISTICS OF NiTi SHAPE MEMORY ALLOY WIRES

Du Yanliang and Nie Jingxu

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

Experiments and analyses of the main characteristics of NiTi alloy wires were completed to research their ability in active detection and control of cracks growth as the special requirements of the intelligent material structures. The expressions of the main characteristics as recovery force and other parameters are deduced on the basis of measurements. The research results show that the NiTi alloys wires are very good functional materials for manufacturing the intelligent structures capable of actively detecting and controlling the growth of cracks and vibration.

Key words Shape memory alloys Characteristic measurement Recovery effect

OPTIMIZATION FOR REDUCING VIBRATION OF ENGINE PIPELINE

Li Lin

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

The paper deals with structural optimization for reducing vibration of engine pipeline. The method can give the best position, stiffness and damping of clips to be attached on condition that pipe system's structure has been given. Based on the finite element analysis of original structure, the analytical process is limited between the locations where are to be attached clips, excited points and dangerous points. It is not necessary to make again a finite element analysis for the improved system. An example for reducing the vibration of an engine pipeline is presented.

Key words Optimization Engine Pipelines Vibration