

# 功能梯度形状记忆合金材料的热力学行为

刘兵飞<sup>1</sup> 王庆菲<sup>1</sup> 胡世龙<sup>2</sup> 周蕊<sup>3</sup>

(1. 中国民航大学机场学院, 天津, 300300; 2. 中国民航大学中欧航空工程师学院, 天津, 300300;  
3. 中国民航大学航空工程学院, 天津, 300300)

**摘要:**功能梯度形状记忆合金(Functionally graded shape memory alloy, FG-SMA)兼备功能梯度材料和形状记忆材料的双重特性,近年来已经引起科学界的广泛关注。本文根据复合材料力学理论,对功能梯度形状记忆合金复合材料层合板的本构关系进行研究,讨论了变温作用下不同铺层中嵌入形状记忆合金(Shape memory alloy, SMA)夹杂的功能梯度 SMA 复合材料层合板的热力学行为。数值结果与已有文献报导的研究结果基本一致,且本文研究表明:SMA 夹杂嵌入在不同铺层中以及具有不同体积分数的情况下材料展示了不同的热力学行为。

**关键词:**功能梯度材料;形状记忆合金;热力学行为;本构模型;变温作用

**中图分类号:**V25 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2017)S-0045-06

## Thermodynamic Behaviors of Functionally Graded Shape Memory Alloy Actuator

LIU Bingfei<sup>1</sup>, WANG Qingfei<sup>1</sup>, HU Shilong<sup>2</sup>, ZHOU Rui<sup>3</sup>

(1. Airport College, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China;

2. Sino-European Institute of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China;

3. Aeronautical Engineering College, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China)

**Abstract:** A theoretical investigation for a composite laminate embedded the functionally graded shape memory alloy (FG-SMA) actuators is presented. The constitutive models of the FG-SMA composite including the single layer SMA composite, multilayer SMA composite with the same volume fraction of the SMA, are first built. And then an example using such model is discussed on a published SMA hybrid composite under thermo loading to prove the validity of the theoretical work. Finally, the thermo-mechanic behaviors of the FG-SMA composite with different embedded layers and different volume fractions of the SMA are obtained.

**Key words:** functionally graded material; shape memory alloy; thermomechanic behavior; constitutive model; thermo loading

功能梯度材料(Functional graded material, FGM),是近年来发展起来的一种在细观结构和几何尺寸上连续地控制各相材料的组分分布,使各相材料的组分含量在空间位置上呈现梯度变化的新型复合材料<sup>[1]</sup>。这种组分上梯度分布的 FGM 材

料可以满足结构元件不同部位对材料使用性能的不同需求,达到优化结构整体使用性能的目的。材料中各组分相呈连续变化,不存在明显的界面,使材料之间热膨胀失配导致的热应力得到很大程度的缓解。FGM 材料的应用已经渗透到越来越多的

**基金项目:**国家自然科学基金(11502284,51505483)资助项目;中央高校基本科研业务费(3122016C006)资助项目。

**收稿日期:**2017-05-15;**修订日期:**2017-06-20

**通信作者:**周蕊,女,讲师,E-mail:reaterbutter@163.com。

**引用格式:**刘兵飞,王庆菲,胡世龙,等.功能梯度形状记忆合金材料的热力学行为[J].南京航空航天大学学报,2017,49(S):45-50. LIU Bingfei, WANG Qingfei, HU Shilong, et al. Thermodynamic behaviors of functionally graded shape memory alloy actuator[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(S): 45-50.

新型材料研究中<sup>[2]</sup>。

SMA 材料由于具有独特的形状记忆效应和伪弹性,作为智能材料领域备受关注的组元之一,在军事、航空航天、机械、化工、生物医学等领域中有着广泛的应用<sup>[3-4]</sup>。如果将 FGM 材料的特性和 SMA 材料的特性结合到一起,即将 SMA 相和基体相在空间位置上进行组分分数逐渐变化的组合,构成在组分上梯度分布的功能梯度形状记忆合金材料(Functional graded shape memory alloy, FG-SMA)。由于 FG-SMA 材料兼备 SMA 材料和 FGM 材料的双重特性,将会使组分梯度 SMA 智能材料具有更加凸显的优越性。首先,可以根据结构的需要对材料组分进行设计和调节,满足不同部位对材料力学性能的需求<sup>[5]</sup>;其次,由于材料组分的连续性分布,可以缓解材料热膨胀失配所导致的应力突变<sup>[6]</sup>,也可以避免螺栓处的应力集中和螺栓松弛等现象;再者,在热力耦合的复杂条件下,由于温度和应力的变化促使 SMA 相变的产生,将会使材料的最大应力和最大应力强度因子都明显降低<sup>[7]</sup>。正如专家们所说,如果将 FGM 材料与其他智能材料研究领域结合起来,将会给材料科学带来一场全新的革命<sup>[8]</sup>。此外, SMA 材料与另一相材料的复合还可以增加结构构件硬度<sup>[9]</sup>、抗摩擦性<sup>[10]</sup>、抗高温<sup>[11]</sup>、稳定性<sup>[12]</sup>等优良力学特性。

对于 FGM 材料和 SMA 材料的力学性能和本构关系的研究,近几十年已取得了很大进展<sup>[11-13]</sup>。仲政等<sup>[11]</sup>综述了功能梯度材料与结构若干力学问题的最新研究进展,包括功能梯度材料梁、板、壳结构的解析解、半解析解以及简化理论的研究<sup>[12]</sup>和断裂力学研究等<sup>[13]</sup>。对于实体 SMA 材料,无论是实验还是理论研究方面均取得了很大的研究进展<sup>[14-22]</sup>。实验方面主要集中在单轴的拉伸和压缩实验研究、扭转<sup>[14]</sup>、弯曲<sup>[15]</sup>、以及多轴向的比例和非比例加载等实验研究<sup>[16]</sup>。本构模型方面大致可以分为细观力学模型和宏观唯象模型两大类<sup>[17-22]</sup>。自 Sun 和 Hwang 开展研究以来<sup>[17]</sup>,基于细观力学的本构模型已经得到了长足的发展<sup>[18]</sup>;Lagoudas 等人<sup>[19]</sup>也通过选取不同的相变函数,将众多 SMA 的宏观唯象本构模型写成了一个统一的形式;Kan 和 Kang<sup>[20]</sup>,Feng 和 Sun 等人<sup>[21]</sup>还分别讨论了考虑疲劳和失稳等情况下 SMA 的本构关系。此外,对多孔形状记忆合金、铁磁形状记忆合金等智能合金材料<sup>[22]</sup>,以及 SMA 材料与其他材料组成的 SMA 混合材料<sup>[23-24]</sup>,也进行了大量理论和实验研究。

对于 FG-SMA 材料的研究,主要集中于以下几种情况,一种是具有不同组分分数的组分梯度

SMA 材料,如不同组分分数的 NiTi 合金和其他弹性材料的梯度复合<sup>[6-8,25-27]</sup>以及不同组分分数的 Ni 和 Ti 两相材料的梯度复合<sup>[28-31]</sup>;另一种是通过不同的热处理工艺和调节 SMA 材料的细观结构或几何尺寸创建的具有不同相变应力梯度和相变应变梯度的 FG-SMA 材料<sup>[32-34]</sup>。还有一种就是通过不同时效处理得到的具有温度梯度的 FG-SMA 材料<sup>[35]</sup>。然而已有文献对上述 FG-SMA 材料的报导却主要集中在材料制备、实验测试和特性描述等方面<sup>[26-31,33,35]</sup>。已成功制作出 FG-SMA 的方法主要有:爆炸焊接技术<sup>[25,28,31]</sup>、热靶喷溅技术<sup>[26,30]</sup>、磁控溅射技术<sup>[27]</sup>、扩散压合技术<sup>[29]</sup>、激光照射技术<sup>[33]</sup>、温度梯度退火技术<sup>[9,35]</sup>等。而对如何精细刻画其相变机理和微结构演化问题还属于初步探索阶段<sup>[6,32,34]</sup>,在如何建立包含相变的力学本构关系等方面,还有待深入研究,从而在一定程度限制了其进一步的实际应用。

所以,本文主要通过建立一种适合于 SMA 纤维层合板材料的理论模型,讨论 SMA 纤维嵌入不同铺层下材料的热力学行为。拟为功能梯度 SMA 材料的优化设计和工程应用提供理论依据。

## 1 单层 SMA 纤维层合板热弹性本构关系

嵌入单层 SMA 纤维的层合板材料如图 1 所示,其中 1,2 为材料坐标系的两个主轴方向,上下两层为基体材料,中间层为 SMA 纤维夹杂层。根据复合材料力学可得材料在 1 方向和 2 方向上的弹性模量  $E_1$ 、 $E_2$ 、剪切模量  $G_{12}$  以及泊松比  $\nu_{12}$ 、 $\nu_{21}$  分别为

$$E_1 = E_a V_a + E_{1m} V_m \quad (1)$$

$$E_2 = \frac{E_a E_{2m}}{E_{2m} V_a + E_a V_m} \quad (2)$$

$$G_{12} = \frac{G_a G_{12m}}{G_a V_m + G_{12m} V_a} \quad (3)$$

$$\nu_{12} = \nu_a V_a + \nu_{12m} V_m \quad (4)$$

$$\nu_{21} = \frac{E_2}{E_1} \nu_{12} \quad (5)$$

式中: $E_{1m}$ 、 $E_{2m}$ 、 $G_{12m}$ 、 $\nu_{12m}$  分别为基体材料在 1 方向上的弹性模量、在 2 方向上的弹性模量、剪切模量以及泊松比; $V_m$ 、 $V_a$  分别为基体材料和 SMA 夹杂的体积分数。

在变温作用下,SMA 夹杂在 1 方向和 2 方向上的应力分布为

$$\sigma_{1a}(T) = E_a(T) \left[ \epsilon_1 - \int_{T_0}^T \alpha_{1a}(T) dT \right] \quad (6)$$

$$\sigma_{2a}(T) = E_a(T) \left[ \epsilon_2 - \int_{T_0}^T \alpha_{2a}(T) dT \right]$$

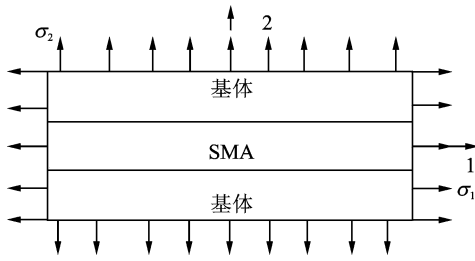


图1 SMA 复合材料单层板示意图

Fig. 1 Diagram of monolayer FG-SMA plate

式中,  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  是单层板在 1 和 2 方向上总的轴向应变,  $\alpha_{1a}(T)$  和  $\alpha_{2a}(T)$  是不同温度下 SMA 纤维在 1 和 2 方向上的有效热膨胀系数。对于基体材料, 同样可以得到其在 1, 2 方向上的应力分布为

$$\sigma_{1m}(T) = E_{1m}(T) \left[ \epsilon_1 - \int_{T_0}^T \alpha_{1m}(\tau) d\tau \right] \quad (7)$$

$$\sigma_{2m}(T) = E_{2m}(T) \left[ \epsilon_2 - \int_{T_0}^T \alpha_{2m}(\tau) d\tau \right]$$

式中,  $\alpha_{1m}(T)$ ,  $\alpha_{2m}(T)$  是不同温度下 SMA 纤维在 1 和 2 方向上的有效热膨胀系数, 可得层合板的有效热膨胀系数  $\alpha_1(T)$  和  $\alpha_2(T)$  为

$$\int_{T_0}^T \alpha_1(T) dT = \frac{E_a V_a \int_{T_0}^T \alpha_{1a}(T) dT + E_{1m} V_m \int_{T_0}^T \alpha_{1m}(T) dT}{E_a V_a + E_{1m} V_m}$$

$$\int_{T_0}^T \alpha_2(T) dT = \int_{T_0}^T [\alpha_{2a}(T) V_a + \alpha_{2m}(T) V_m] dT \quad (8)$$

## 2 多层 SMA 纤维层合板热弹性本构关系

嵌入多层 SMA 纤维的层合板如图 2 所示。

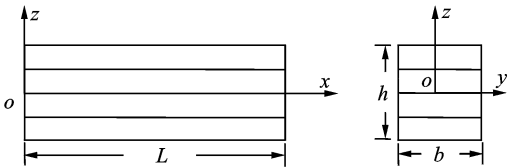


图2 SMA 复合材料多层板示意图

Fig. 2 Diagram of multilayer FG-SMA plate

根据 Von Karman 应变-位移关系, 设复合材料层合板由  $n$  层单层板组成, 根据复合材料力学, 只存在热荷载时复合材料层和板的本构关系可以表示为

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{\epsilon}^T \\ \mathbf{k}^T \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^* & \mathbf{B}^* \\ \mathbf{B}^{*T} & \mathbf{D}^* \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{N}_{\Delta T} \\ \mathbf{M}_{\Delta T} \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中

$$\mathbf{A}^* = \mathbf{A}^{-1} + \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{D}^* \mathbf{B} \mathbf{A}^{-1}, \mathbf{B}^* = -\mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{D}^*$$

$$\mathbf{D}^* = (\mathbf{D} - \mathbf{B} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B})^{-1}, \mathbf{A} = \sum_{k=1}^n \overline{\mathbf{Q}}_k (z_k - z_{k-1})$$

$$\mathbf{B} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \overline{\mathbf{Q}}_k (z_k^2 - z_{k-1}^2)$$

$$\mathbf{D} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n \overline{\mathbf{Q}}_k (z_k^3 - z_{k-1}^3)$$

$$\mathbf{N}_{\Delta T} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left( \overline{\mathbf{Q}}_k \int_{T_0}^T \{\alpha\}_k dT \right) dz$$

$$\mathbf{M}_{\Delta T} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} z \left( \overline{\mathbf{Q}}_k \int_{T_0}^T \{\alpha\}_k dT \right) dz$$

其中  $\overline{\mathbf{Q}}$  为材料主向上折减刚度矩阵  $\mathbf{Q}$  的转换矩阵, 可通过正交异性单层厚板在平面应力下的热弹性本构关系的坐标转换求得。

## 3 数值计算

为了检验模型的正确性, 本文首先对已有文献报导的含有 SMA 纤维的层合板悬臂梁的力学性能进行数值模拟。模型参数如表 1 所示, 而不同温度下 SMA 材料和基体材料的力学参数方程见参考文献[36]进行拟合, 这样就可以将 SMA 材料和基体材料视为弹性材料进行数值计算。

表1 SMA 纤维层合板悬臂梁的参数<sup>[36]</sup>Tab. 1 Parameters of SMA fiber laminated cantilever beam<sup>[36]</sup>

$L/$ mm	$b/$ mm	Layer/ °C	$h/$ mm	$V_a/$ %	$T_0/$ °C	$T_1/$ °C
228.6	20.54	0	11.98	55.38	23.9	120

悬臂梁尖端挠度与温度之间的关系如图 3 所示。图中虚线为本文计算得到的结果, 实线为 Turner<sup>[36]</sup>使用有限元软件 ABAQUS 模拟得到的结果。可以看出, 两条曲线基本一致, 但是有一些差别, 这是因为本文模拟是为了简化计算得到中性面的尖端挠度, 而使得尖端挠度只是一个关于  $x$  的函数, 忽略了在  $y$  方向上的热变形及  $x, y$  方向热变形的耦合作用。所以在小挠度变形的时候两者差别较小; 而当挠度较大时, 两者有一定差距, 但是并不矛盾, 因此本文模拟是合理的。

对于 SMA 纤维含量为 55.38% 且存在于 4 个不同的零度层上时, 数值结果如图 4 所示。如图 4 所示, 当 SMA 纤维存在于第 1 个 0° 铺层时, 悬臂梁的尖端挠度与比 SMA 纤维存在于第 2 个 0° 铺层时要大, 且此时尖端挠度的值接近于后者的两倍; SMA 存在于第 1 个 0° 铺层和第 4 个 0° 铺层时, 以及 SMA 存在于第 2 个 0° 铺层和第 3 个 0° 铺层时的尖端挠度大小相同, 方向相反。

图 5 展示了 SMA 纤维存在于第 2 个 0° 铺层时, SMA 夹杂具有不同体积分数时悬臂梁的尖端

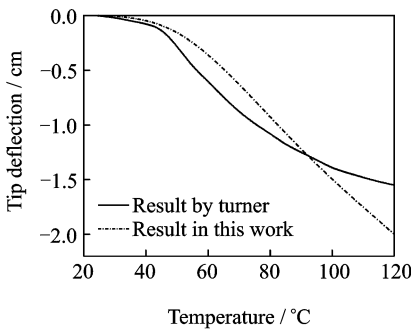


图3 变温作用下尖端挠度与温度载荷的关系

Fig. 3 Relation curve between tip deflection and temperature load under thermo loading

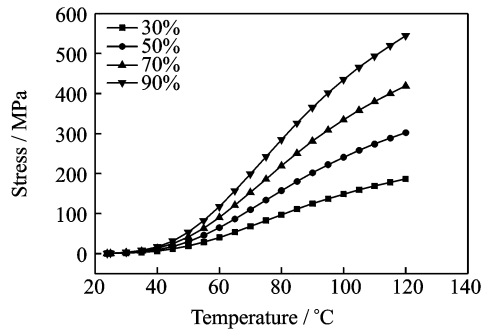


图6 SMA在第二个零度层时x方向上应力与温度关系

Fig. 6 Relationship between stress and temperature in direction  $x$  when SMA fiber exists in the second  $0^\circ$  layer

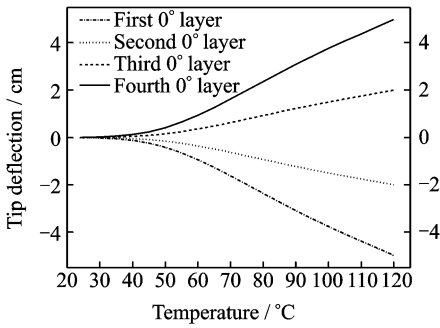


图4 SMA嵌入不同零度层时尖端挠度与温度荷载关系

Fig. 4 Relationship between tip deflection and temperature load when SMA fiber exists in different  $0^\circ$  layers

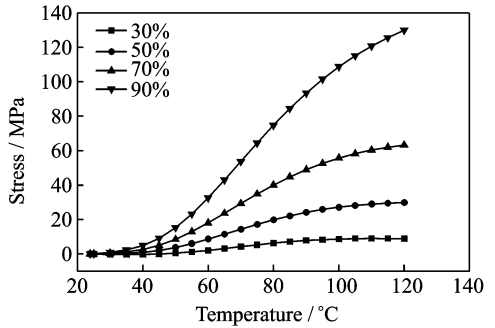


图7 SMA在第二个零度层时y方向上应力与温度关系

Fig. 7 Relationship between stress and temperature in direction  $y$  when SMA fiber exists in the second  $0^\circ$  layer

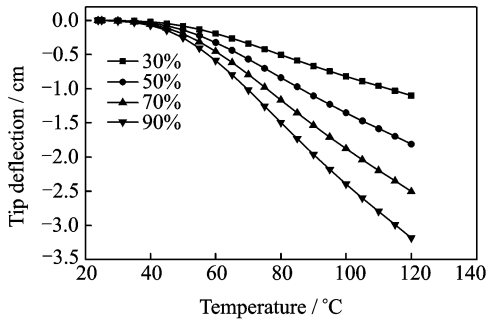


图5 SMA体积分数不同时尖端挠度与温度载荷的关系

Fig. 5 Relationship between tip deflection and temperature load under different volume fraction

挠度与温度荷载的关系,从图中可以看出SMA体积分数不同时尖端挠度区别较大;SMA体积分数越大,悬臂梁的尖端挠度越大且随着温度荷载的增加,变化幅度也越大。

图6,7分别展示了不同体积分数的SMA纤维存在于第2个 $0^\circ$ 铺层中时, $x$ 和 $y$ 方向上正应力与温度的关系。如图所示,随着温度的升高,应力都是不断增大的,且SMA夹杂体积分数越大,应力增长幅度也越大。

图8展示了SMA纤维存在于第2个 $0^\circ$ 铺层中时,温度一定时悬臂梁尖端挠度与SMA体积分数的关系。如图所示,当温度较低时,尖端挠度的变化不明显;温度较高时,SMA夹杂体积分数的越大,尖端挠度也越大。

图9,10分别展示了SMA纤维存在于第2个 $0^\circ$ 铺层中时,温度一定的情况下,悬臂梁在 $x$ 和 $y$

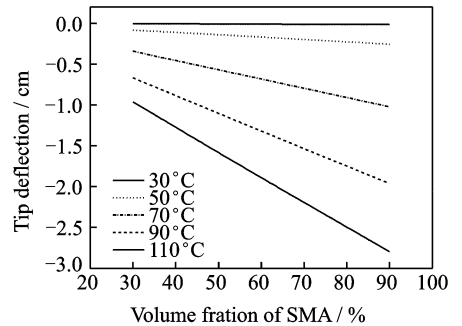


图8 SMA在第2个零度层时,相同温度下尖端挠度与体积分数的关系

Fig. 8 Relationship between tip deflection and SMA volume fraction under a certain temperature when SMA fiber exists in the second  $0^\circ$  layer

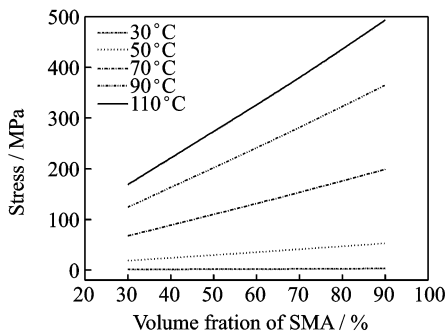


图9 SMA在第2个零度层时,相同温度下 $x$ 方向正应力与体积分数的关系

Fig. 9 Relationship between normal stress and volume fraction under a certain temperature in direction  $x$

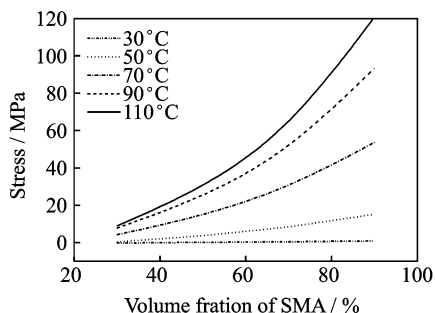


图10 SMA存在于第2个零度层时,相同温度下 $y$ 方向正应力与体积分数的关系

Fig. 10 Relationship between normal stress and volume fraction under a certain temperature in direction  $y$

方向上正应力与SMA夹杂体积分数的关系。从图中可以看出,在各个温度状态下,悬臂梁的正应力随着SMA夹杂体积分数的增加而不断增大,而且温度越高增速越快。

## 4 结束语

本文讨论了变温作用下不同铺层中嵌入SMA夹杂的功能梯度SMA复合材料层合板的热力学行为。主要结论为:当SMA材料存在于不同铺层时,SMA纤维层合板展示了不同的热力学行为。存在于相同铺层时,SMA夹杂的体积分数对材料的尖端挠度和正应力影响较大,SMA夹杂体积分数越高,尖端挠度越大,且温度越高,影响越大。

### 参考文献:

[1] ZHENG Y, WOO C H, WANG B. Controlling dielectric and pyroelectric properties of compositionally graded ferroelectric rods by an applied pressure[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101:116103.

[2] WANG Y, XU R Q, DING H J. Three-dimensional

solution of axisymmetric bending of functionally graded circular plates[J]. Composite Structures, 2010, 92(7):1683-1693.

- [3] MA Y H, ZHANG Q C, ZHANG D Y, et al. A novel smart rotor support with shape memory alloy metal rubber for high temperatures and variable amplitude vibrations[J]. Smart Mater Struct, 2014, 23(12):125016-125023.
- [4] HARTL D, LAGOUDAS D C. Aerospace applications of shape memory alloys[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2007, 221(4):535-552.
- [5] 韩杰才,徐丽,王保林,等. 梯度功能材料的研究进展及展望[J]. 固体火箭技术, 2004, 27(3):207-215. HAN Jiecai, XU Li, WANG Baolin, et al. Progress and prospects of functional gradient materials[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2004, 27(3):207-215.
- [6] LIU B F, DUI G S, YANG S Y. On the transformation behavior of functionally graded SMA composites subjected to thermal loading[J]. European Journal of Mechanics A—Solids, 2013, 40:139-147.
- [7] LESTER B T, CHENISKY Y, LAGOUDAS D C. Transformation characteristics of shape memory alloy composites [J]. Smart Mater Struct, 2011, 20:1-13.
- [8] FU Y Q, DU H J, ZHANG S. Functionally graded TiN/TiNi shape memory alloy films[J]. Materials Letters, 2003, 57:2995-2999.
- [9] MAHMUD A S, LIU Y N, NAM T H. Gradient anneal of functionally graded NiTi[J]. Smart Mater Struct, 2008, 17:1-5.
- [10] BIRMAN V. Stability of functionally graded shape memory alloy sandwich panels [J]. Smart Mater Struct, 1997, 6:278-286.
- [11] 仲政,吴林志,陈伟球. 功能梯度材料与结构的若干力学问题研究进展[J]. 力学进展, 2010, 5:528-541. ZHONG Zheng, WU Linzhi, CHEN Weiqiu. Progress in the study on mechanics problems of functionally graded materials and structures[J]. Advances in Mechanics, 2010, 5:528-541.
- [12] 沈惠申. 功能梯度复合材料板壳结构的弯曲、屈曲和振动[J]. 力学进展, 2004, 34(1):53-60. SHEN Huishen. Bending, bucking and vibration of functionally graded plates and shells[J]. Advances in Mechanics, 2004, 34(1):53-60.
- [13] YONG H D, ZHOU Y H. Analysis of a mode III crack problem in a functionally graded coating-substrate system with finite thickness[J]. International Journal of Fracture, 2006, 141(3/4):459-467.
- [14] SUN Q P, LI Z Q. Phase transformation in superelastic NiTi polycrystalline micro-tubes undertension and torsion—from localization to homogeneous deformation[J]. International Journal of Solids and

- Structures, 2002,39:3797-3809.
- [15] REJZNER J, LEXCELLENT C, RANIECKI B. Pseudoelastic behaviour of shape memory alloy beams under pure bending: Experiments and modeling[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44(4):665-686.
- [16] BOUVET C, CALLOCH S, LEXCELLENT C. Mechanical behavior of a Cu-Al-Be shape memory alloy under multiaxial proportional and nonproportional loadings[J]. Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the ASME, 2002, 124(1):112-124.
- [17] SUN Q P, HWANG K C. Micromechanics modeling for the constitutive behavior of polycrystalline shape memory alloy [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1993,41(1):1-33.
- [18] PENG X, PI W, FAN J. A microstructure-based constitutive model for the pseudoelastic behavior of NiTi SMAs[J]. International Journal of Plasticity, 2008,24:966-990.
- [19] LAGOUDAS D C, ENTCHEV P B. Modeling of transformation-induced plasticity and its effect on the behavior of porous shape memory alloy, Part I: Constitutive model for fully dense SMAs[J]. Mechanics of Materials, 2004,36(9):865-892.
- [20] KAN Q H, KANG G Z. Constitutive model for uniaxial transformation ratchetting of super-elastic NiTi shape memory alloy at room temperature[J]. International Journal of Plasticity, 2010,26:441-465.
- [21] FENG X Q, SUN Q P. Shakedown analysis of shape memory alloy structures[J]. International Journal of Plasticity, 2007,23:183-206.
- [22] LIU B F, DUI G S, ZHU Y P. On phase transformation behavior of porous shape memory alloy[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2012,5:9-15.
- [23] SAMADPOUR M, SADIGHI M, SHAKERI M, et al. Vibration analysis of thermally buckled SMA hybrid composite sandwich plate [J]. Composite Structures, 2015,119:251-263.
- [24] ASADI H, KIANI Y, SHAKERI M, et al. Exact solution for nonlinear thermal stability of hybrid laminated composite Timoshenko beams reinforced with SMA fibers[J]. Composite Structures, 2014, 108: 811-822.
- [25] XUE L J, DUI G S, LIU B F. Theoretical analysis of a functionally graded SMA beam under pure bending[J]. CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2013,93(1):1-16.
- [26] TIAN H, SCHRYVERS D, MOHANCHANDRA K P, et al. Fabrication and characterization of functionally graded Ni-Ti multilayer thin films[J]. Func Mater Lett, 2009,2(2):61-66.
- [27] ZHENG B, XU J, QI M. Preparation of graded DLC film on TiNi SMA by plasma enhanced deposition and behavior of corrosion-resistance[J]. J Funct Mater, 2007,38(1):115-118.
- [28] BELYAEV S, RUBANIK V, RESNINA N, et al. Functional properties of "Ti50Ni50-Ti49.3Ni50.7" shape memory composite produced by explosion welding[J]. Smart Mater Struct, 2014,23:085029.
- [29] LIM J H, KIM M S, NOH J P, et al. Compositionally graded Ti-Ni alloys prepared by diffusion bonding [J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2014,14(12):9042-9046.
- [30] MARTINS R M S, SCHELL N, REUTHER H, et al. Texture development, microstructure and phase transformation characteristics of sputtered Ni-Ti shape memory alloy films grown on TiN<111>[J]. Thin Solid Films, 2010,519(1):122-128.
- [31] YAN Z, CUI L S, ZHENG Y J. Microstructure and martensitic transformation behaviors of explosively welded NiTi/NiTi laminates[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2007,20:168-171.
- [32] SHARIAT B S, LIU Y N, RIO G. Modelling and experimental investigation of geometrically graded NiTi shape memory alloys[J]. Smart Mater Struct, 2013,22:025030.
- [33] MENG Q L, LIU Y N, YANG H, et al. Functionally graded NiTi strips prepared by laser surface anneal [J]. Acta Mater, 2012,60(4):1658-1668.
- [34] SHARIAT B S, LIU Y N, MENG Q, et al. Analytical modelling of functionally graded NiTi shape memory alloy plates under tensile loading and recovery of deformation upon heating [J]. Acta Mater, 2013,61(9):3411-3421.
- [35] RAZALI M F, MAHMUD A S. Gradient deformation behavior of NiTi alloy by ageing treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 618: 182-186.
- [36] TURNER T L, PATEL H D. Analysis of SMA hybrid composite structures in MSC Nastran and ABAQUS[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2007,18(5):435-447.