

文章编号: 1000-4750(2014)02-0225-05

功能梯度形状记忆合金细观力学本构模型

薛立军, 兑关锁, 刘兵飞

(北京交通大学土木建筑学院力学系, 北京 100044)

摘 要: 功能梯度形状记忆合金(Functionally Graded Shape Memory Alloy, 简称 FG-SMA)是一种新型功能梯度复合材料, 它兼备功能梯度材料和形状记忆合金(Shape Memory Alloy)两种材料的优异特性。该文根据细观力学的理论, 考虑材料的微观组成及相互作用, 建立了一个适合于描述 FG-SMA 材料力学性能的细观力学本构模型, 该模型可以准确的描述复杂载荷作用下 FG-SMA 的力学行为。应用这个模型, 该文详细分析了一个由弹性材料和 SMA 组成的 FG-SMA 梁在轴力和弯矩共同作用下的受力变形行为。由数值算例可知, 这种新型材料可显著减小载荷作用下的最大应力, 避免材料由于应力过大而导致的破坏。此外, FG-SMA 还具有一些其它独特的性能, 可满足实际应用中一些特殊的需要。该文的研究结果可为该类材料的进一步研究提供基础, 为该类材料的应用提供依据。

关键词: 功能梯度材料; 形状记忆合金; 细观力学; 轴力; 弯矩

中图分类号: TB33 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.09.0688

A MICROMECHANICAL MODEL FOR THE FUNCTIONALLY GRADED SHAPE MEMORY ALLOY

XUE Li-jun, DUI Guan-suo, LIU Bing-fei

(Department of Mechanics, School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The Functionally Graded Shape Memory Alloy (FG-SMA) is a new kind of functionally graded composite which possesses the excellent properties of both functionally graded materials and Shape Memory Alloys (SMA). Based on the theory of micromechanics, a constitutive model for this new material is established, considering the microstructure of the material. This model can describe the mechanical behavior of the FG-SMA under complex loads accurately. With this model, a FG-SMA beam composed by elastic material and SMA subjected to an axial force and a bending moment is investigated in detail. It can be concluded from the numerical results that FG-SMA can decrease the maximum stress efficiently, preventing the destruction caused by oversize stress. Several other particular features of this new material are also observed, which will content many special requirements in practice applications. This research can provide a base for the in-depth investigation of FG-SMA material.

Key words: functionally graded material; shape memory alloy; micromechanics; axial force; bending moment

功能梯度材料是一种由两相或多相材料组成的成分或结构在某一方向上连续变化从而材料性能也连续变化的复合材料, 它具有许多普通复

合材料不具备的优异性能, 如消除应力集中、减小残余应力、增强连接强度等。近年来, 已有许多文献对功能梯度材料不同方面的性能进行了研究^[1-4]。

收稿日期: 2012-09-21; 修改日期: 2012-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(11172033, 11272044); 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB7321004)

通讯作者: 兑关锁(1963—), 男, 河南清丰人, 教授, 博士, 从事复合材料、土力学等研究(E-mail: gsdui@center.njtu.edu.cn).

作者简介: 薛立军(1984—), 男, 河北唐山人, 博士生, 从事形状记忆合金的研究(E-mail: meilideshijiali@163.com);

刘兵飞(1985—), 男, 河北承德人, 博士生, 从事形状记忆合金的研究(E-mail: liubingfei168-8@163.com).

形状记忆合金(Shape Memory Alloy)是一种新型智能材料,由于其独特的形状记忆性能和伪弹性,已被广泛应用于军事、航天、医疗、生物等领域^[5-7]。SMA 的这些特性,是由于其在载荷或温度作用下,材料内部发生奥氏体和马氏体间的相互转变。为了揭示这种相变的机理,许多学者对 SMA 的多个方面的性能进行了研究,建立了不同的理论模型^[5-10]。

功能梯度形状记忆合金(Functionally Graded Shape Memory Alloy, 简称 FG-SMA)是一种新型复合材料,它既拥有 SMA 独特的形状记忆性能和超弹性,又能消除普通层合 SMA 复合材料中由于材料突变而产生的应力集中。例如一种 SMA 医疗导线,既要保证其后端部分具有足够的可推性和可扭性,使导线能在推力作用下进入肠道,又要保证导线尖端部分具有足够的柔性,使其能自由通过肠道等弯曲部位。通过实现其性能的梯度变化,既可避免由于材料突然变化而产生的应力集中带来的断裂,又可充分发挥 SMA 优良的生物力学性能^[11]。

FG-SMA 在高新技术领域中应用的迅速增加,要求人们对其力学特性进行全面了解,尤其对其本构关系给以正确描述。Tian^[12]介绍了一种热靶喷溅技术制造多层功能梯度 NiTi 薄膜的方法; Birnbaum^[13]提出了一种通过激光照射改变马氏体相变温度,进而控制 FG-SMA 形状记忆效应及其它力学性能的技术; Mahmud^[14]介绍了一种新的温度梯度退火制造功能梯度近等原子 NiTi SMA 的方法,此方法可制造出具有结构梯度的 SMA; Cole^[15]提出一种将富钛 NiTi 合金喷溅到富镍 NiTi 带状基体上制造 FG-SMA 薄膜的方法,并用纳米压痕技术测试了材料的梯度性能。然而,已有研究大多集中在 FG-SMA 的制备及性能测试等方面,至今还没有给出合理的本构模型来描述和预测其力学性能,因此在本构理论方面还有待进一步深入研究。

本文对由弹性材料 A 和 SMA 组成的 FG-SMA 材料进行研究,根据细观力学理论,考虑材料微观组成和相互作用,建立了一个能够描述 FG-SMA 力学性能的细观力学本构模型,该模型可预测 FG-SMA 在外力、弯矩和温度等复杂载荷作用下材料的应力-应变响应。数值算例部分对一 FG-SMA 梁在轴力和弯矩共同作用下的受力变形行为进行了分析,通过数值计算结果可知,FG-SMA 的应力场在相变区与普通 FGM 有着明显的不同,最大应力显著减小。此外,由于 SMA 的相变,梁的中性

轴位置随载荷的变化而不断改变。可见,将 SMA 分布于受力构件合适位置,可有效降低构件的最大应力,保证构件的安全、稳定。本文研究结果可为复杂 FG-SMA 的分析提供基础,也可为类似材料的设计提供依据。

1 理论分析

对于一由弹性材料 A 和 SMA 组成的 FG-SMA 复合材料,为了获得其在载荷作用下的力学响应规律,首先在梯度方向取一薄层进行研究,该薄层内两相材料的体积分数固定不变,可作为均匀 SMA 复合材料处理。得到该薄层的应力-应变关系后,考虑整体材料组成成分梯度变化,即可得到整体材料的力学响应规律。

为了得到代表性薄层的本构关系,这里首先对 SMA 的力学行为进行分析。将 SMA 内的奥氏体作为基体,马氏体作为夹杂,根据细观力学有:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_M = \boldsymbol{\varepsilon}_A + \boldsymbol{\varepsilon}^{pt} \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}_M$ 和 $\boldsymbol{\varepsilon}_A$ 分别为马氏体和奥氏体的应变张量; $\boldsymbol{\varepsilon}^{pt}$ 为扰动应变,可表示为:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{pt} = \boldsymbol{S} : \boldsymbol{\varepsilon}^* \quad (2)$$

式中: \boldsymbol{S} 为 Eshelby 张量; $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ 为本征应变。由等效夹杂理论可知:

$$\boldsymbol{D}_M : \boldsymbol{\varepsilon}_M = \boldsymbol{D}_A : (\boldsymbol{\varepsilon}_M - \boldsymbol{\varepsilon}^*) \quad (3)$$

式中, \boldsymbol{D}_M 和 \boldsymbol{D}_A 分别为马氏体和奥氏体的刚度张量。由式(1)~式(3)可得:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_M = \boldsymbol{A}_M : \boldsymbol{\varepsilon}_A \quad (4)$$

其中, $\boldsymbol{A}_M = [\boldsymbol{I} + \boldsymbol{S} : \boldsymbol{D}_A^{-1} : (\boldsymbol{D}_M - \boldsymbol{D}_A)]^{-1}$ 为应变集中张量, \boldsymbol{I} 为四阶单位张量。

由混合法则可知, SMA 的平均应变 $\boldsymbol{\varepsilon}_1$ 和平均应力 $\boldsymbol{\sigma}_1$ 可表示为:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_1 = \xi \boldsymbol{\varepsilon}_M + (1 - \xi) \boldsymbol{\varepsilon}_A \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_1 = \xi \boldsymbol{\sigma}_M + (1 - \xi) \boldsymbol{\sigma}_A \quad (6)$$

式中: ξ 为马氏体体积分数; $\boldsymbol{\sigma}_M$ 和 $\boldsymbol{\sigma}_A$ 分别为马氏体和奥氏体的应力。

马氏体应变可分解为:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_M = \boldsymbol{\varepsilon}_M^e + \boldsymbol{\varepsilon}_M^t + \boldsymbol{\varepsilon}_M^r \quad (7)$$

其中, $\boldsymbol{\varepsilon}_M^e$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}_M^t$ 和 $\boldsymbol{\varepsilon}_M^r$ 分别为马氏体的弹性应变、热膨胀应变和相变应变。类似地,奥氏体的应变可分解为:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_A = \boldsymbol{\varepsilon}_A^e + \boldsymbol{\varepsilon}_A^t \quad (8)$$

其中, $\boldsymbol{\varepsilon}_A^e$ 和 $\boldsymbol{\varepsilon}_A^t$ 为奥氏体的弹性应变和热膨胀应变。

马氏体和奥氏体的热膨胀应变可分别表示为:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_M^t = \alpha_M(T - T_0)\boldsymbol{\delta} \quad (9)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_A^t = \alpha_A(T - T_0)\boldsymbol{\delta} \quad (10)$$

式中: α_M 和 α_A 分别为马氏体和奥氏体的热膨胀系数; T_0 和 T 分别为材料的初始温度和当前温度; $\boldsymbol{\delta}$ 为二阶单位张量。

马氏体的相变应变可表示为:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_M^r = \xi \boldsymbol{\varepsilon}^P \quad (11)$$

式中, $\boldsymbol{\varepsilon}^P$ 为马氏体最大相变应变。

马氏体和奥氏体的本构方程分别为:

$$\boldsymbol{\sigma}_M = \mathbf{D}_M : \boldsymbol{\varepsilon}_M^e \quad (12)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_A = \mathbf{D}_A : \boldsymbol{\varepsilon}_A^e \quad (13)$$

由式(8)、式(10)和式(13)可将奥氏体的应变表示为:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_A = \mathbf{D}_A^{-1} : \boldsymbol{\sigma}_A + \alpha_A(T - T_0)\boldsymbol{\delta} \quad (14)$$

应用方程式(6), 从式(14)中消去 $\boldsymbol{\sigma}_A$ 可得:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_A = \mathbf{D}_A^{-1} : \frac{\boldsymbol{\sigma}_1 - \xi \boldsymbol{\sigma}_M}{(1 - \xi)} + \alpha_A(T - T_0)\boldsymbol{\delta} \quad (15)$$

类似地, 根据式(7)、式(9)、式(11)和式(12)可将马氏体的应变表示为:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_M = \mathbf{D}_M^{-1} : \boldsymbol{\sigma}_M + \alpha_M(T - T_0)\boldsymbol{\delta} + \xi \boldsymbol{\varepsilon}^P \quad (16)$$

其中, 马氏体体积分数 ξ 的表达式为^[6]:

$$\xi = \frac{1}{2} \cos[a_A(T - A_s - \boldsymbol{\sigma}_1 : \mathbf{C}_A^{-1})] + \frac{1}{2}, M \rightarrow A \quad (17)$$

$$\xi = \frac{1}{2} \cos[a_M(T - M_f - \boldsymbol{\sigma}_1 : \mathbf{C}_M^{-1})] + \frac{1}{2}, A \rightarrow M \quad (18)$$

式中: $a_A = \frac{\pi}{A_f - A_s}$, $a_M = \frac{\pi}{M_s - M_f}$; A_s 和 A_f 分

别为零应力状态下奥氏体相变的起始温度和结束温度; M_s 和 M_f 分别为零应力状态下马氏体相变的起始温度和结束温度; \mathbf{C}_A 和 \mathbf{C}_M 为 SMA 的与应力诱发马氏体相变有关材料常数。

最后, 由式(4)、式(5)、式(15)和式(16)可得 SMA 的本构方程:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_1 = \mathbf{P} : \mathbf{Q} : \mathbf{R} : \boldsymbol{\sigma}_1 + N(T - T_0) - \xi \mathbf{P} : (\mathbf{I} - \mathbf{Q}) : \boldsymbol{\varepsilon}^P \quad (19)$$

其中:

$$\mathbf{P} = [\xi \mathbf{I} + (1 - \xi) \mathbf{A}_M^{-1}]; \quad \mathbf{R} = \frac{\mathbf{A}_M : \mathbf{D}_A^{-1}}{1 - \xi};$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{D}_M^{-1} : \left(\mathbf{D}_M^{-1} + \frac{\xi}{1 - \xi} \mathbf{A}_M : \mathbf{D}_A^{-1} \right)^{-1};$$

$$\mathbf{N} = \mathbf{P} : [\mathbf{Q} : (\alpha_A \mathbf{A}_M : \boldsymbol{\delta} - \alpha_M \boldsymbol{\delta}) + \alpha_M \boldsymbol{\delta}].$$

接下来, 对代表性薄层整体进行分析, 将 SMA

视为夹杂, 弹性材料 A 视为基体, 经过与上述方法类似的推导, 可得代表性薄层的本构方程为:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [V_f \mathbf{I} + (1 - V_f) \mathbf{A}_1^{-1}] : \left\{ \mathbf{P} : \mathbf{Q} : \mathbf{R} : \left(\mathbf{P} : \mathbf{Q} : \mathbf{R} + \frac{V_f}{1 - V_f} \mathbf{A}_1 : \mathbf{D}_0^{-1} \right)^{-1} : \left[\frac{\mathbf{A}_1 : \mathbf{D}_0^{-1}}{1 - V_f} : \boldsymbol{\sigma} + (\alpha_0 \mathbf{A}_1 : \boldsymbol{\delta} - \mathbf{N})(T - T_0) - \xi \mathbf{P} : (\mathbf{I} - \mathbf{Q}) : \boldsymbol{\varepsilon}^P \right] + N(T - T_0) + \xi \mathbf{P} : (\mathbf{I} - \mathbf{Q}) : \boldsymbol{\varepsilon}^P \right\} \quad (20)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}$ 和 $\boldsymbol{\sigma}$ 分别为代表性薄层的平均应变和平均应力; \mathbf{D}_0 为材料 A 的刚度张量; V_f 为 SMA 的体积分数; α_0 为材料 A 的热膨胀系数; $\mathbf{A}_1 = \{\mathbf{I} + \mathbf{S} : \mathbf{D}_0^{-1} : [(\mathbf{P} : \mathbf{Q} : \mathbf{R})^{-1} - \mathbf{D}_0]\}^{-1}$ 为 SMA 和材料 A 之间的应变集中张量。

在 FG-SMA 中, SMA 的体积分数 V_f 沿着梯度方向不断变化, 一般将其假定为一个幂函数或指数函数。将 V_f 的表达式代入式(20)中, 即可得到描述 FG-SMA 材料的细观力学本构方程。

2 数值算例

应用上文得到的本构方程研究 FG-SMA 梁在复杂载荷作用下的受力变形性能。FG-SMA 矩形截面梁受轴力 F 和弯矩 M 作用, 截面宽度为 b , 高度为 h , 如图 1 所示。梁由弹性材料 A 和 NiTi SMA 组成, 其中 SMA 的体积分数沿梁厚度方向 y 服从幂函数 $V_f(y) = (y/h)^n (n > 0)$ 分布, n 为幂指数。随着载荷的增大, 梁将经历一个由弹性变形到相变的过程, 为了研究梁这一过程中的受力变形情况, 这里假设梁在变形过程中横截面始终保持为平面。

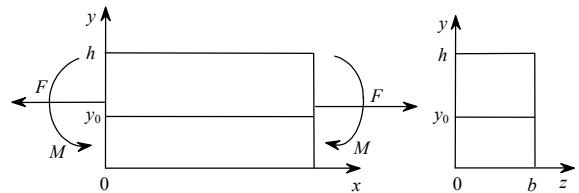


图 1 梁的截面和受力示意图

Fig.1 The load and the cross section of the beam

根据平截面假设, 梁的轴向应变为:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = k(y - y_0) \quad (22)$$

式中: k 为曲率; y_0 为中性轴位置。力和弯矩的平衡方程分别为:

$$\int_0^h \sigma b dy = F \quad (23)$$

$$\int_0^h \sigma y b dy = M \quad (24)$$

联解方程式(22)~式(24)可得载荷 F 和 M 作用下的 k 和 y_0 , 进而可得梁截面上的应力分布。

梁截面高 $h=100$ mm, 宽 $b=50$ mm; 奥氏体、马氏体和材料 A 的弹性模量和泊松比分别为 $E_A=70$ GPa, $E_M=30$ GPa, $E_0=210$ GPa, $\mu_A=0.43$, $\mu_M=0.43$, $\mu_0=0.35$ [16]; 马氏体最大相变应变 $\varepsilon^p=0.069$; 马氏体相变和逆相变的初始、结束温度分别为 $M_s=15^\circ\text{C}$ 、 $M_f=7^\circ\text{C}$ 、 $A_s=45^\circ\text{C}$ 、 $A_f=56^\circ\text{C}$; 奥氏体、马氏体和材料 A 的热膨胀系数分别为 $\alpha_A=11 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, $\alpha_M=6.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 和 $\alpha_0=64.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ [17]。此处暂不考虑温度变化。

2.1 梁截面的应力分布

图 2 为相同的弯矩 M 和不同的轴力 F 作用下, 梁截面上的应力分布图; 图 3 为相同的轴力 F 和不同的弯矩 M 作用下, 梁截面上的应力分布图。由图可知, 梁截面上的最大拉应力显著减小, 这是由于拉伸区的 SMA 发生了马氏体相变, 在较小的应力作用下产生了较大的相变应变, 满足了材料变形的要求。材料的这个性能可以很好的应用于有碰撞作用的构件, 充分发挥其吸能作用, 防止材料发生破坏。此外, 该性能在有局部大变形要求的构件中也可得到有效的应用。

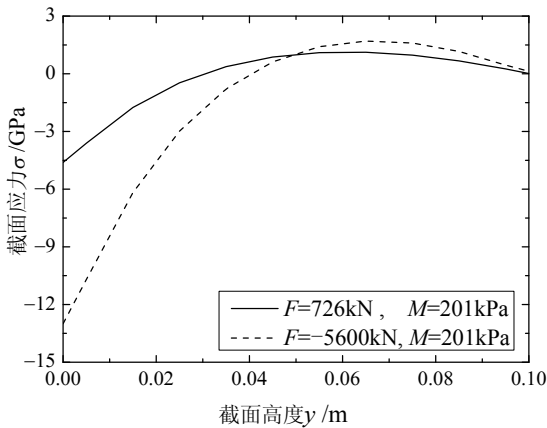


图 2 FG-SMA 梁截面的应力分布(相同 M 不同 F)

Fig.2 The distribution of the stress on the cross section of the beam (the same M with different F)

图 2 和图 3 中的最大压应力并没有减小, 这是因为本文研究的梁中 SMA 的分布函数为 $V_f(y)=(y/h)^n (n>0)$, 即在梁截面受压区底层 ($y=0$ 处) 完全为弹性材料 A 而没有 SMA, 所有的压应力均由材料 A 承担。在实际应用中许多材料具有较高的抗压能力, 但其抗拉性能却较差, 如陶瓷

等。将 SMA 与此类材料复合制成的 FG-SMA 材料, 可充分发挥两种材料各自的优异性能, 且材料内部应力分布连续变化, 避免了应力集中引起的破坏。

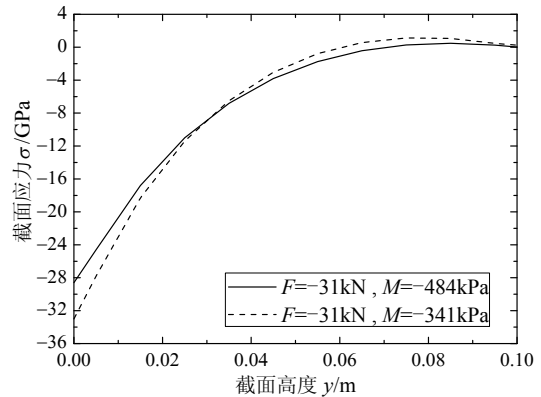


图 3 FG-SMA 梁截面的应力分布(相同 F 不同 M)

Fig.3 The distribution of the stress ON the cross section of the beam (the same F with different M)

2.2 中性轴的位置

图 4 为对于不同的 n 和 F , 梁的中性轴位置 y_0 随弯矩 M 的变化图。由图可知, 随弯矩的增大, 中性轴的位置非线性的降低, 在弯矩较小时降低很快, 弯矩较大时降低变慢。此外, 对于不同的 n 和 F , 中性轴的降低曲线各不相同, 呈现不同的特点。根据 FG-SMA 的这个特性, 选择不同的 SMA 分布函数(不同的 n)可设计出满足不同实际需要的构件。

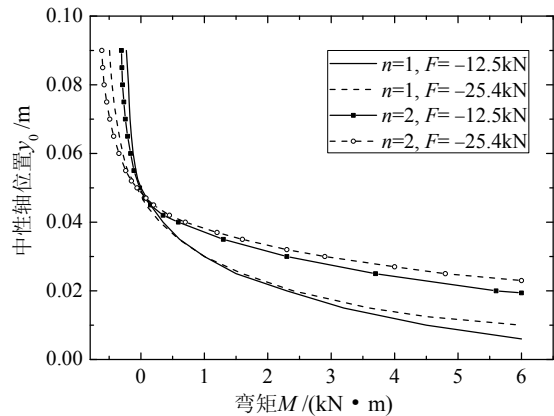


图 4 梁中性轴位置 y_0 随弯矩 M 的变化图

Fig.4 The variation of the position of the neutral axis y_0 with the bending moment M

2.3 曲率和弯矩的关系

图 5 给出了梁截面的曲率 k 与弯矩 M 的变化规律图。不难发现, 曲率 k 随着弯矩 M 的增大而近似线性的增加, 且对于不同的 n , 增加的速率不同, 而 F 的变化对曲率的增加速率影响不大。同时考虑截面曲率和中性轴的位置, 即可得到梁截面的应

变, 进而得到梁的宏观变形情况。

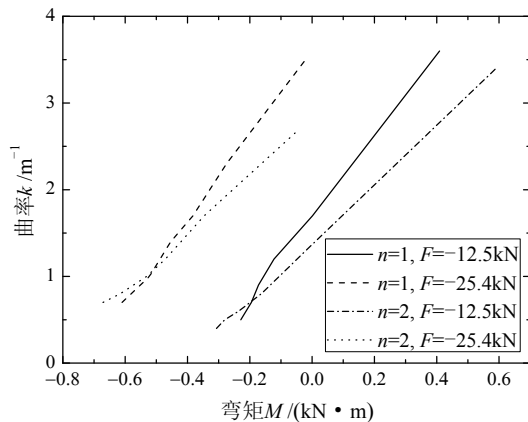


图5 曲率 k 和弯矩 M 的变化规律图

Fig.5 The relation between the curvature k and the bending moment M

3 结论

根据细观力学, 考虑材料微观组成和相互作用, 本文建立了一个适合于描述 FG-SMA 材料力学行为的细观力学本构模型, 并应用此模型对一 FG-SMA 梁在复杂载荷作用下的受力变形行为进行了研究, 得到以下结论:

(1) FG-SMA 梁的最大拉应力显著减小, 即由于 SMA 的相变特性, 较小的应力增量即可满足较大的变形需要, 避免了材料由于应力过大而产生的破坏。

(2) 随着弯矩的增大, 梁的中性轴位置非线性的降低, 通过控制相应部位的材料成分, 选择不同的 SMA 分布函数, 可降低制造构件的成本, 并充分发挥材料的性能。

(3) 不同的组分分布曲线(不同的 n), 会导致不同的应力分布及曲率-弯矩关系, 针对不同的实际需要, 采用不同的分布曲线, 以充分发挥材料的特性。

参考文献:

- [1] Sanaka B V. An elasticity solution for functionally graded beams [J]. Composites Science and Technology, 2001, 61: 689-696.
- [2] Tarn J Q. Exact solutions for functionally graded anisotropic cylinders subjected to thermal and mechanical loads [J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38: 8189-8206.
- [3] Ding H J, Huang D J, CHEN W Q. Elasticity solutions for plane anisotropic functionally graded beams [J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44: 176-196.
- [4] 姚熊亮, 叶曦, 王献忠. 热环境中功能梯度圆柱壳声辐射特性研究[J]. 工程力学, 2013, 30(6): 334-352.

- Yao Xiongliang, Ye Xi, Wang Xianzhong. The acoustic radiation characteristics of functionally graded cylindrical shells in thermal environment [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(6): 334-352. (in Chinese)
- [5] Tanaka K. A thermomechanical sketch of shape memory effect: One-dimensional tensile behavior [J]. Res Mechanics, 1986, 18: 251-263.
- [6] Liang C, Rogers C A. One-dimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory materials [J]. Journal of Intelligent Materials Systems and Structures, 1990, 1: 207-234.
- [7] 陈鑫, 李爱群, 丁幼亮, 刘涛. 空间网架结构形状记忆合金隔震研究[J]. 工程力学, 2010, 27(9): 86-93, 101. Chen Xin, Li Aiqun, Ding Youliang, Liu Tao. Study on isolation of space grid structure using shape memory alloy [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(9): 86-93, 101. (in Chinese)
- [8] Brinson L C. One dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: thermomechanical derivation with non-constant material functions [J]. Journal of Intelligent Materials Systems and Structures, 1993, 4: 229-242.
- [9] Sun Q P, Hwang K C. Micromechanics modelling for the constitutive behavior of polycrystalline shape memory alloys—I. Derivation of general relations [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1993, 41: 1-17.
- [10] Boyd J G, Lagoudas D C. Thermomechanical Response of Shape Memory Composites [J]. Journal of Intelligent Materials Systems and Structures, 1994, 5: 333-346.
- [11] Sutou Y, Omori T, Furukawa A. Development of medical guide wire of Cu-Al-Mn-Base superelastic alloy with functionally graded characteristics [J]. Journal of Biomedical Materials Research Part B-Applied Biomaterials, 2004, 69: 64-69.
- [12] Tian H, Schryvers D. Fabrication and characterization of functionally graded Ni-Ti multilayer thin films [J]. Functional Materials Letters, 2009, 2: 61-66.
- [13] Birnbaum A J, Satoh G, Yao Y L. Functionally grading the shape memory response in NiTi films: Laser irradiation [J]. Journal of Applied Physics, 2009, 106: 043504-1-043504-8.
- [14] Mahmud A S, Liu Y N, Nam T. Gradient anneal of functionally graded NiTi [J]. Smart Materials and Structures, 2008, 17: 015031-1-015031-5.
- [15] Cole D, Bruck H, Roytburd A. Nanoindentation studies of graded shape memory alloy thin films processed using diffusion modification [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103: 064315-1-064315-4.
- [16] Bo Z, Lagoudas D C, Miller D. Material characterization of SMA actuators under nonproportional thermomechanical loading [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1999, 121: 75-85.
- [17] Zhu Y P, Dui G S. A macro-constitutive model of polycrystalline NiTi SMAs including tensile-compressive asymmetry and torsion pseudoelastic behaviors [J]. International Journal of Engineering Science, 2010, 48: 2099-2106.