

基于 UMAT 的形状记忆合金驱动 波纹板结构的数值分析

王志勇, 周 博*, 薛世峰

(中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 青岛 266580)

摘 要:形状记忆合金 SMA 主动驱动波纹板效率高,且性能稳定,在设计自适应智能结构上具有可观的前景。为有效利用有限元法对 SMA 波纹板结构进行计算分析,基于已有 SMA 本构模型推导了增量型 SMA 本构模型,据此编写了可由 ABAQUS 调用的用户材料(UMAT)子程序;利用该 UMAT 子程序对 SMA 主动驱动波纹板结构进行了数值模拟计算,与实验结果的对比验证了计算结果的有效性;在 SMA 波纹板原始结构基础上,提出了 SMA 短带错落布置型新结构,并进行了数值模拟分析与验证;提出了新结构的温度控制方案和提高驱动效果的措施,可为 SMA 驱动波纹板驱动器的设计与应用提供参考与借鉴。

关键词:形状记忆合金;UMAT;波纹板;驱动器;数值模拟

中图分类号:TG139⁺.6;O242.1

文献标志码:A

文章编号:1007-4708(2019)03-0370-05

1 引 言

形状记忆合金 SMA(Shape Memory Alloy)是一种新型智能材料,由于其独特的形状记忆效应和超弹性,大量应用于新型设备的研发和制造中。SMA 的可恢复应变大,回复能力强,且性能稳定,可采用电流加热,易于控制,在制造驱动装置中具有可观的前景。

目前,研究者们设计了多种利用 SMA 主动驱动的方式。邓宗才等^[1]将具有一定预应变的 SMA 丝偏心埋置于混凝土构件,通过实验说明了 SMA 主动驱动可以对混凝土梁的挠度进行一定程度上的控制和调整;王明义等^[2]通过在平板上布置 SMA 丝,利用 SMA 产生的回复力作为驱动力,改变平板的结构刚度,并利用遗传算法对驱动器的布局进行优化;李明东等^[3]为了在有限的空间内达到更大的输出位移,将 SMA 丝缠绕在螺旋槽内,设计了 SMA 丝螺旋驱动器。除了直接利用 SMA 丝进行主动驱动外,研究者们更多是采用偏动或差动的方式设计 SMA 驱动器。偏动式 SMA 驱动器由单程记忆元件和偏动装置组成,通过对 SMA 元件加热和冷却,可以实现结构的双程记忆。任秉银等^[4]设计了一种模糊增益自调整复合控制方案,对

偏动式 SMA 驱动器中 SMA 元件的加热电流进行控制,并对驱动器响应进行了数值模拟。差动式驱动器将 SMA 作为偏置机构,采用拮抗的方式布置 SMA 构件,可以弥补 SMA 冷却较慢的缺点。何建慧等^[5,6]通过对仿生学的研究,对称布置了 SMA 驱动器,制作了仿生鲫鱼尾鳍,并进行了相关实验测试;于冬等^[7]利用 SMA 的单程记忆效应,通过铰链装置,以形状记忆合金作为偏置机构,设计了一种双向旋转驱动结构;Shi 等^[8]利用相互拮抗的三根 SMA 丝设计了一种双自由度链接铰,并利用模糊逻辑控制方法对 SMA 丝的加热电压进行控制;Koh 等^[9]利用多个相互拮抗的 SMA 螺旋弹簧作为驱动装置,设计了一种欧米伽形状的蠕动爬行机器人;杨天夫等^[10]设计了一种由比例积分控制系统控制的 SMA 弹簧驱动机械抓手,SMA 弹簧根据差动方式安装。

为了预测 SMA 结构的响应,研究者们提出了 SMA 的本构关系,Tanaka 等^[11]较早地系统提出了 SMA 的热力学本构方程;Brinson 等^[12]使用了内变量马氏体体积分数,并且将其分为应力诱发和温度诱发两部分,用于描述 SMA 晶体的演化过程;周博等^[13]在文献[12]的基础上,定义了一个新的内变量形状记忆因子,建立了考虑马氏体择优取向过程的三维 SMA 本构模型。但是,由于形状记忆合金的本构关系呈极强的非线性,使得理论推导难以得到较为精确的解,尤其是当形状记忆合金主

收稿日期:2018-07-09;修改稿收到日期:2018-10-28.

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0307604)资助项目.

作者简介:周 博(1972-),男,博士,教授,博士生导师

(E-mail:zhoubo@upc.edu.cn).

动驱动装置结构较为复杂时,很难做到对 SMA 结构的响应预测。此外,现有的通用有限元软件没有 SMA 的材料本构模型。为了对 SMA 结构进行有限元计算与分析,王晓宏等^[14]提出负热应变的方法,在试验基础上推导不同温度下杨氏模量以及负热应变,进而利用商用有限元软件已有的金属材料模型,建立 SMA 驱动波纹板的有限元模型进行分析,取得了不错的效果。但是,这种方法对 SMA 结构的数值模拟具有一定的局限性。

SMA 驱动波纹板能够提供较大的可控变形,具有效率高和性能稳定的特点,为设计自适应结构如自适应飞机机翼奠定了基础^[15]。为了能够较为准确地利用有限元研究该结构的力学行为,本文基于文献[13]的 SMA 本构模型,推导了增量型 SMA 本构模型,据此编写了可由 ABAQUS 调用的 UMAT 子程序。基于编写的 UMAT 子程序,对 SMA 主动驱动波纹板结构进行了数值分析,并与文献[14]的试验结果进行了对比验证。在 SMA 驱动波纹板原始结构上,提出了 SMA 短带错落布置型驱动波纹板新结构,并对其进行了数值模拟与验证。

研究表明,本文编写的 UMAT 子程序能有效对 SMA 结构进行有限元模拟计算,提出 SMA 短带错落布置型波纹板驱动器新结构,在保证驱动效果的前提下,能有效降低成本,减轻结构重量,可为 SMA 驱动器的设计提供参考。

2 SMA 本构模型

2.1 SMA 本构方程

在不考虑塑性变形的情况下,SMA 的总应变 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 分为弹性应变 $\boldsymbol{\varepsilon}^e$ 、相变应变 $\boldsymbol{\varepsilon}^{tr}$ 和热应变 $\boldsymbol{\varepsilon}^a$ 三个部分,可表示为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^e + \boldsymbol{\varepsilon}^{tr} + \boldsymbol{\varepsilon}^a \quad (1)$$

式中 相变应变张量 $\boldsymbol{\varepsilon}^{tr}$ 和热应变张量 $\boldsymbol{\varepsilon}^a$ 分别为

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{tr} = \frac{3\eta}{2\bar{\sigma}} \boldsymbol{\varepsilon}_L \boldsymbol{\sigma}', \quad \boldsymbol{\varepsilon}^a = \alpha(T - T_0) \quad (2,3)$$

式中 η 是形状记忆因子, $\bar{\sigma}$ 是 Mises 等效应力, $\boldsymbol{\sigma}'$ 是偏应力张量。 α 是热膨胀系数,与马氏体体积分数 ξ 的关系为

$$\alpha(\xi) = (1 - \xi)\alpha^A + \xi\alpha^M \quad (4)$$

式中 α^A 和 α^M 分别是奥氏体和马氏体材料的热膨胀系数。马氏体体积分数 ξ 与形状记忆因子 η 之间的关系为

$$\xi = \xi_0 + (1 - \xi_0)\eta \quad (5)$$

式中 ξ_0 为马氏体体积分数在加载过程的初始值。

根据文献[13],SMA 的本构关系可描述为

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} : \left[\boldsymbol{\varepsilon} - \frac{3\eta}{2\bar{\sigma}} \boldsymbol{\varepsilon}_L \boldsymbol{\sigma}' - \alpha(T - T_0) \right] \quad (6)$$

式中 $:$ 表示张量计算的双点积, $\mathbf{D}$ 为四阶张量形式的弹性刚度矩阵,取决于马氏体体积分数 ξ ,

$$\mathbf{D}(\xi) = \mathbf{D}^A + \xi(\mathbf{D}^M - \mathbf{D}^A) \quad (7)$$

式中 $\mathbf{D}^A$ 和 $\mathbf{D}^M$ 分别是奥氏体和马氏体材料的弹性刚度矩阵。

根据 SMA 本构方程(6),将 SMA 的应力增量近似描述为

$$d\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}(\xi) : \left[d\boldsymbol{\varepsilon} - \frac{3\boldsymbol{\varepsilon}_L \boldsymbol{\sigma}'}{2\bar{\sigma}} d\eta - \alpha(\xi) dT \right] \quad (8)$$

式(8)即为用于编写 SMA 的 UMAT 子程序的 SMA 增量型本构方程。

2.2 SMA 相变方程

SMA 的马氏体相变分为两个阶段,即形状记忆因子的产生过程和形状记忆因子消退过程。

在形状记忆因子的产生过程中,即马氏体相变过程或马氏体择优取向过程中,当

$$\sigma_s^{cr} + C_M(T - M_s)_+^1 < \bar{\sigma} < \sigma_f^{cr} + C_M(T - M_s)_+^1$$

$$\text{有 } \eta = \frac{3}{4} \left[\frac{\bar{\sigma} - s_0 - C_M(T - M_s)_+^1}{s} \right] - \frac{1}{4} \left[\frac{\bar{\sigma} - s_0 - C_M(T - M_s)_+^1}{s} \right]^3 + \frac{1}{2} \quad (9a)$$

在形状记忆因子的消退过程中,即马氏体的逆相变过程中,当 $C_A(T - A_s) > \bar{\sigma} > C_A(T - A_f)$ 且 $T > A_s$, 则

$$\eta = \eta_u \left\{ \frac{3}{4} \left[\frac{\bar{\sigma} - C_A(T - a_0)}{C_A a} \right] - \frac{1}{4} \left[\frac{\bar{\sigma} - C_A(T - a_0)}{C_A a} \right]^3 + \frac{1}{2} \right\} \quad (9b)$$

式中 η_u 是卸载开始时形状记忆因子的初始值, T 是环境温度, M_s 和 M_f 是马氏体相变开始温度和相变结束温度, A_s 和 A_f 是奥氏体相变开始温度和相变结束温度, C_A, C_M, σ_s^{cr} 和 σ_f^{cr} 均为形状记忆合金的材料特性常数。 s 和 s_0 为

$$\begin{cases} s = (\sigma_f^{cr} - \sigma_s^{cr})/2 \\ s_0 = (\sigma_f^{cr} + \sigma_s^{cr})/2 \end{cases} \quad (10)$$

$(T - M_s)_+^n$ 为跳跃函数,

$$(T - M_s)_+^n = \begin{cases} (T - M_s)^n & (T > M_s) \\ 0 & (T \leq M_s) \end{cases} \quad (11)$$

SMA 增量型本构方程和相变方程共同构成了考虑马氏体择优取向的 SMA 增量型本构模型。利用该增量型本构模型可以编写用于 ABAQUS 调用的 UMAT 子程序。

3 SMA 用户子程序

根据文献[14]的材料数据,推得 SMA 波纹板的材料参数列入表 1。其中, E_A 和 E_M 分别是奥氏体和马氏体弹性模量, μ 是材料泊松比。

图 1 为 SMA 的 UMAT 子程序流程,在子程序开始时定义材料参数、传入应力状态和状态变量,并假设每个增量步中材料参数保持不变。根据弹性刚度矩阵计算试探应力,将试探应力与该温度下的临界应力比较,判断是否发生相变。如果发生相变,则利用牛顿迭代法计算等效应力和形状记忆因子等状态变量,计算弹性矩阵,更新应力;如果未发生相变,则利用弹性矩阵更新应力。

4 波纹板有限元分析

图 2 是 SMA 波纹板驱动器的结构示意图,该结构中间是一块层板,中心板两侧对称放置一层波纹板,最外层为具有一定初始预应变的 SMA 条带。当对其中一侧 SMA 带加热时,由于具有一定的预应变,马氏体发生逆相变,转化为奥氏体,表现出形状记忆效应,应变减小,拉动波纹板结构向该侧弯曲;若要使该结构向另一侧弯曲,则停止对收紧一侧的 SMA 带加热,同时对另一侧的 SMA 条带进行加热,同样由于形状记忆效应,使得 SMA 条带收缩,进而拉动波纹板弯曲。

表 1 NITI 形状记忆合金材料参数
Tab. 1 NITI SMA material parameters

E_A/GPa	E_M/GPa	$M_s/^\circ\text{C}$
46.1	16.9	-1.83
$M_f/^\circ\text{C}$	$A_s/^\circ\text{C}$	$A_f/^\circ\text{C}$
-15.47	49.09	57.43
$C_A/\text{MPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	$C_M/\text{MPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$	μ
6.48	6.48	0.33

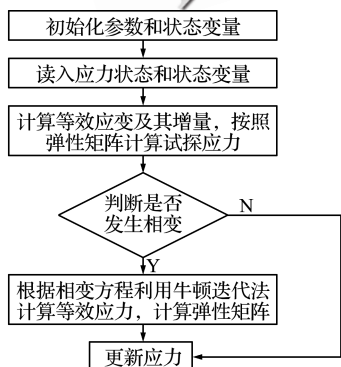


图 1 UMAT 子程序流程
Fig. 1 UMAT subroutine process

由于该 SMA 波纹板驱动器两侧相对应的 SMA 条带形成拮抗关系,只对其中一侧 SMA 带加热,便可拉动另一侧 SMA 带,与传统偏动式 SMA 驱动器^[4]相比,该驱动器中 SMA 条带的冷却过程可以忽略,从而提高了 SMA 驱动器的响应频率,增强了驱动效果,更便于工程实际应用。

利用商用有限元软件 ABAQUS 建立 SMA 波纹板的模型,中心层板和波纹板采用同一种材料。中心层板厚度为 0.40 mm,波纹板厚度为 0.25 mm,波纹板结构特征尺寸如图 3 所示。SMA 条带的尺寸为 300 mm×4 mm×2 mm。

建成的 SMA 波纹板驱动器有限元模型如图 4 所示,有限元模型中的中心层板、波纹板及 SMA 带均采用壳单元,接触的地方采用绑定连接,一端固定,另一端自由。中心层板与波纹板的材料属性包括弹性模量(200 GPa)和泊松比(0.3)。在计算中,SMA 材料模型采用第 3 节编制的 UMAT 子程序,并且设置一定预应变。

在 SMA 的初始应变设置为 3%时,数值模拟了 SMA 波纹板驱动器自由端位移随温度的变化情况,并与文献[14]的试验结果和负热应变法的计算结果进行对比,自由端位移与温度的关系如图 5 所示。由于试验装置中存在装配间隙,导致试验结果低于数值模拟结果。温度介于 50 °C~60 °C 时,UMAT 子程序计算结果高于负热应变法计算结

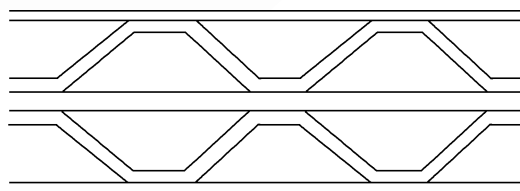


图 2 SMA 波纹板简化示意图
Fig. 2 SMA corrugated sheets structure simplified schematic

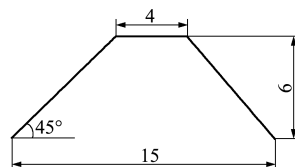


图 3 波纹板截面特征尺寸
Fig. 3 Corrugated sheets feature size

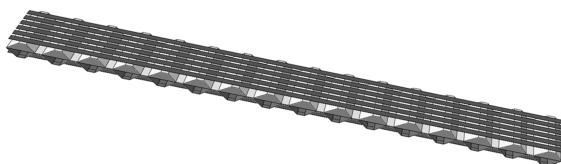


图 4 SMA 波纹板结构三维模型
Fig. 4 SMA corrugated sheets structure 3D model

果;温度介于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,UMAT 子程序计算结果低于负热应变法计算结果。

为降低成本、减轻重量和便于装配,在图 4 所示 SMA 波纹板驱动器中,将细长型 SMA 条带替换为多个较短且宽度与厚度不变的 SMA 条带,错落安装于波纹板上,如图 6 所示。利用上述 UMAT 子程序法对其进行数值模拟计算,并与图 4 所示原始结构的计算结果进行对比,自由端位移与温度关系曲线如图 7 所示。

数值模拟结果表明,SMA 短带错落布置结构的自由端最大位移约为原始结构的自由端最大位移的 79.3%。可见在降低成本、减轻重量和便于装配的情况下,SMA 短带错落布置结构驱动器仍具有明显的驱动效果。在实际应用中,可以通过导线将多个短 SMA 条带连接在同一个电路,对多个短 SMA 条带进行同步温度控制。此外,还可以通过增加短 SMA 条带的厚度,以提高驱动器的驱动效果。

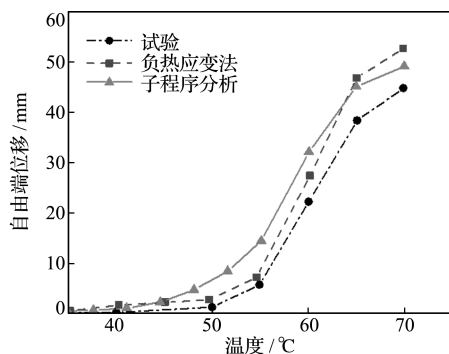


图 5 自由端位移随温度变化曲线

Fig. 5 Free end displacement-temperature curves

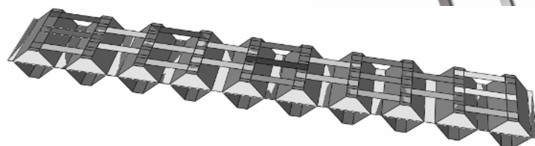


图 6 SMA 短带错落布置波纹板结构模型

Fig. 6 Structure model of SMA short-band staggered arrangement corrugated sheets

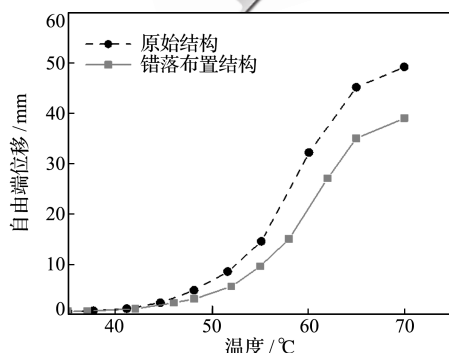


图 7 两种结构自由端位移温度曲线

Fig. 7 Free end displacement-temperature curves of two structures

5 结 论

本文开发了可由 ABAQUS 调用的 SMA 的 UMAT 子程序,实现了 SMA 波纹板驱动器的有限元数值模拟;设计了一种 SMA 波纹板驱动器的新型结构,给出了温度控制方法和提高驱动效果的措施。主要结论总结如下。

(1) 基于已有 SMA 本构模型推导了增量型 SMA 本构模型,据此编写了可由商用有限元软件 ABAQUS 调用的 UMAT 子程序,实现了对 SMA 结构的有限元模拟。

(2) 利用编写的 UMAT 子程序对 SMA 主动驱动波纹板进行了数值模拟计算,通过与试验结果的对比验证了 UMAT 子程序和计算结果的有效性。

(3) 为降低成本、减轻重量和便于装配,提出了 SMA 短带错落布置型波纹板驱动器新结构,并对其进行了数值分析与验证。

(4) 针对 SMA 短带错落布置型波纹板驱动器新结构,给出了 SMA 短带的温度控制方法和提高驱动器驱动效果的措施。

参考文献 (References):

- [1] 邓宗才,李庆斌.形状记忆合金对混凝土梁驱动效应分析[J].土木工程学报,2002,35(2):41-47. (DENG Zong-cai, LI Qing-bin. Actuating effects of embedded shape memory alloy on concrete beam[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(2): 41-47. (in Chinese))
- [2] 王明义,季宏丽,裴进浩,等.形状记忆合金对平板的刚度主动控制及优化布置研究[J].振动与冲击,2014,33(23):30-36. (WANG Ming-yi, JI Hong-li, QIU Jin-hao, et al. Plate stiffness active control with shape memory alloys and layout optimization[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(23): 30-36. (in Chinese))
- [3] 李明东,马培荪,储金荻,等.适用于有限空间的微型形状记忆合金丝驱动器[J].上海交通大学学报,2000,34(3):366-369. (LI Ming-dong, MA Pei-sun, CHU Jin-di, et al. Micro shape memory alloy wire actuator applied in limited space[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, 34(3): 366-369. (in Chinese))
- [4] 任秉银,陈本清.偏动式形状记忆合金驱动器系统建模与仿真[J].哈尔滨工业大学学报,2009,41(1):58-61. (REN Bing-yin, CHEN Ben-qing. Modeling and simulation of bias-type shape memory alloy actuator system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(1): 58-61. (in Chinese))
- [5] 何建慧,章永华.基于形状记忆合金驱动的仿生鲫鱼尾鳍的设计和分析[J].工程设计学报,2012,19(1):

- 9-15, 29. (HE Jian-hui, ZHANG Yong-hua. Mechanism design and analysis of a bionic crucian caudal fin driven by shape memory alloy actuator[J]. *Journal of Engineering Design*, 2012, **19**(1): 9-15, 29. (in Chinese))
- [6] 章永华,何建慧,张世武,等. 仿生鱼鳍中形状记忆合金驱动器的水下变形精度分析[J]. 机器人, 2007, **29**(4): 320-325. (ZHANG Yong-hua, HE Jian-hui, ZHANG Shi-wu, et al. Underwater deformation precision analysis of shape memory alloy actuators used in biomimetic fish fin[J]. *Robot*, 2007, **29**(4): 320-325. (in Chinese))
- [7] 于东,张博明,金龙学,等. 形状记忆合金旋转驱动器结构设计方法[J]. 机械工程学报, 2010, **46**(14): 91-94, 100. (YU Dong, ZHANG Bo-ming, JIN Long-xue, et al. Structural design method of rotation gear actuated by shape memory alloys[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, **46**(14): 91-94, 100. (in Chinese))
- [8] Shi Z Y, Wang T M, Liu D, et al. A fuzzy PID-controlled SMA actuator for a two-DOF joint [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, **27**(2): 453-460.
- [9] Koh J S, Cho K J. Omega-shaped inchworm-inspired crawling robot with Large-Index-and-Pitch (LIP) SMA spring actuators[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, **18**(2): 419-429.
- [10] 杨天夫,阎绍泽,刘夏杰. 形状记忆合金弹簧驱动的机械手运动分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, **53**(10): 1441-1447. (YANG Tian-fu, YAN Shao-ze, LIU Xia-jie. Kinematic analysis of a gripper actuated by shape memory alloy springs[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2013, **53**(10): 1441-1447. (in Chinese))
- [11] Tanaka K, Kobayashi S, Sato Y. Thermomechanics of transformation pseudoelasticity and shape memory effect in alloys[J]. *International Journal of Plasticity*, 1986, **2**(1): 59-72.
- [12] Brinson L C. One-dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: thermomechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1993, **2**(2): 229-242.
- [13] 周博,王振清,梁文彦. 形状记忆合金的细观力学本构模型[J]. 金属学报, 2006, **42**(9): 919-924. (ZHOU Bo, WANG Zhen-qing, LIANG Wen-yan. A micromechanical constitutive model of shape memory alloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2006, **42**(9): 919-924. (in Chinese))
- [14] 王晓宏,张博明,杜善义,等. 形状记忆合金驱动主动变形波纹板结构的有限元分析[J]. 机械工程学报, 2009, **45**(8): 287-291. (WANG Xiao-hong, ZHANG Bo-ming, DU Shan-yi, et al. Finite element analysis of corrugated sheets structure deforming initiatively with shape memory alloy actuators[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, **45**(8): 287-291. (in Chinese))
- [15] 陶梅贞. 现代飞机结构综合设计[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2014. (TAO Mei-zhen. *Comprehensive Design of Modern Aircraft Structure*[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2014. (in Chinese))

Numerical analysis on corrugated sheet structure of shape memory alloy actuator based on UMAT

WANG Zhi-yong, ZHOU Bo*, XUE Shi-feng

(School of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: The corrugated sheet structure of shape memory alloy (SMA) actuators has high efficiency and stable performance. So it has good prospects in the design of adaptive intelligent structures. In order to calculate and analyze the SMA structure using the finite element method, an incremental constitutive model of SMA is developed based on the existing constitutive models of SMA. A user material (UMAT) subroutine, which can be used in ABAQUS, is created according to the developed incremental constitutive model. The corrugated sheet structure of an SMA actuator is numerically simulated using the UMAT subroutine, and the validity of numerical results is verified by the comparison with the experimental results. In addition, a new structure of SMA short band for a corrugated sheet actuator is designed based on the original structure of SMA corrugated sheet actuator, and numerical analysis and verification are carried out. The temperature control scheme of the new structure and the measures to improve the driving effect are put forward, which can provide reference for the design and application of SMA corrugated sheet actuators.

Key words: shape memory alloy; UMAT; corrugated sheet; actuator; numerical simulation

引用本文/Cite this paper:

王志勇,周博,薛世峰. 基于 UMAT 的形状记忆合金驱动波纹板结构的数值分析[J]. 计算力学学报, 2019, **36**(3): 370-374.

WANG Zhi-yong, ZHOU Bo, XUE Shi-feng. Numerical analysis on corrugated sheet structure of shape memory alloy actuator based on UMAT[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2019, **36**(3): 370-374.