

# SMP 复合壳结构力学性能的有限元分析

张称称 刘朝阳 冯文龙 袁 韬

(北京航天时代光电科技有限公司,北京 100094)

**文 摘** 基于建立的三维 SMP 本构方程,采用有限元的方法对 SMP 壳结构的弯曲和展开性能进行了建模和仿真,重点研究了该壳的高温加载,降温固形,低温卸载和升温恢复的形状记忆过程,并进一步分析了金属壳片对 SMP 壳的增强效应。通过本构方程和有限元方法有效地描述了三维复杂应力状态下 SMP 壳的形状记忆行为,模拟得出了壳的反向弯曲的弯矩大于正向弯曲的弯矩以及弯矩-转角曲线具有明显的非线性,得出金属薄壳能够有效的提高壳结构的刚度和形状恢复力。

**关键词** SMP,有限元分析,复合壳结构,形状记忆效应

中图分类号:TB3

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.04.004

## Finite Element Analysis of Mechanical Property of SMP Composite Shell Structure

ZHANG Chenchen LIU Zhaoyang FENG Wenlong YUAN Tao

(Beijing Aerospace Times Optical-Electronic Co.Ltd.,Beijing 100094)

**Abstract** Based on provided three-dimensional SMP constitutive equation, the mechanical properties of bending and expanding on SMP hinge structure have been modeled and simulated, with emphasize on shape memory behavior of the structure. The enhancement effect of the metal diaphragm on SMP hinge is further analyzed. The constitutive equations and finite element method can effectively describe the shape memory behavior of SMP hinge under the three-dimensional complex stress state. Simulated reverse bending moment is larger than the forward hinge bending moment and the moment-rotation curve has obvious nonlinear features. Metal film can effectively improve the stiffness and shape recovery force of the hinge structure.

**Key words** SMP, Finite element analysis, Composite shell structure, Shape memory effect

### 0 引言

SMP 材料在空间展开结构中有重要的应用<sup>[1]</sup>。传统壳结构利用折叠处的应变能实现结构的展开。这种结构刚度大,设计简单,成本低廉,折叠效率高且伸直后不容易变形。但传统的壳结构展开的过程会出现较大的振动,不能有效地控制。壳结构采用 SMP 材料,从而对结构展开过程实现有效的控制,避免过冲振动。SMP 壳在空间展开结构中的使用过程为:在地面时 SMP 壳结构是折叠状,结构被发射到空间后被加热,壳结构由折叠状态平稳展开。在过程中,壳结构的展开速度和展开程度是通过温度可调节的。该结构也适用于太阳能阵列的展开,其工作原理

基本如上所述。此外还有许多基于 SMP 的空间展开结构的其他应用<sup>[2-4]</sup>。

本文对 SMP 壳结构的形状记忆效应展开研究。采用数值分析的方法对 SMP 壳及复合壳结构的有限元模型进行模拟和分析,具体为:(1)针对该结构简化模型,利用 UMAT 子程序,对 SMP 壳结构的反向与正向形状记忆过程进行数值模拟,并对其变形过程进行详细分析;(2)对 SMP 复合壳的正向与反向弯曲过程进行了详细分析,重点分析了金属片对 SMP 壳的增强效应。

### 1 SMP 可展开壳结构的形状记忆效应的数值模拟

依据弹塑性和固体力学相关知识,时等<sup>[5]</sup>发展了一种三维分段式的 SMP 热力学本构方程:

收稿日期:2016-05-16

作者简介:张称称,1988 年出生,助理工程师,主要从事组合结构设计工作。E-mail:chencz10@163.com

$$\dot{\varepsilon}_{ij} + \frac{5\nu-1}{3(1-2\nu)}\delta_{ij}\dot{\varepsilon}_{kk} = \begin{cases} \left(\frac{(1+\nu)\dot{\sigma}_{ij}}{E} + \frac{\sigma_{ij}}{\mu} - \frac{\varepsilon_{ij}}{\lambda} - \frac{1}{3}\left(\frac{E}{\mu(1-2\nu)} - \frac{1}{\lambda}\right)\delta_{ij}\varepsilon_{kk} + \alpha\dot{T}\delta_{ij}\right) & \bar{\varepsilon}^c(t) < \varepsilon^l(T) \\ \left(\frac{(1+\nu)\dot{\sigma}_{ij}}{E} + \frac{\sigma_{ij}}{\bar{\mu}} - \frac{\varepsilon_{ij} - \bar{\varepsilon}^s(T, C)\delta_{ij}}{\bar{\lambda}} - \frac{1}{3}\left(\frac{E}{\bar{\mu}(1-2\nu)} - \frac{1}{\bar{\lambda}}\right)\delta_{ij}\varepsilon_{kk} + \alpha\dot{T}\delta_{ij}\right) & \bar{\varepsilon}^c(t) \geq \varepsilon^l(T), \dot{\bar{\varepsilon}}^c(t) > 0 \\ \left(\frac{(1+\nu)\dot{\sigma}_{ij}}{E} + \frac{\sigma_{ij}}{\mu} - \frac{\varepsilon_{ij} - \varepsilon^s(t_1, T)\delta_{ij}}{\lambda} - \frac{1}{3}\left(\frac{E}{\mu(1-2\nu)} - \frac{1}{\lambda}\right)\delta_{ij}\varepsilon_{kk} + \alpha\dot{T}\delta_{ij}\right) & \dot{\bar{\varepsilon}}^c(t) \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $E$ 、 $\nu$ 、 $\mu$ 、 $\lambda$  和  $\varepsilon^s$  分别代表弹性模量、泊松比、黏性系数、延迟时间和蠕变残余应变。本文采用此本构方程, 利用非线性分析软件 ABAQUS 的二次开发功能, 对 SMP 结构进行有限元分析。

### 1.1 壳结构简化模型

在航空航天领域将形状记忆复合材料设计为空间可展开结构及变体飞机的关键部件受到越来越多的重视。如图 1 所示, 以壳结构为例, 利用 SMP 复合材料设计的激励器包括三部分: EMC 壳、电阻加热器和固定装置<sup>[6]</sup>。EMC 壳是由结构相同的两部分组成, 这里取出一部分, 将其简化为图 2。壳结构的几何参数包括: 厚度  $t$ 、长度  $L$ 、截面半径  $R$ 。



图 1 EMC 壳结构  
Fig.1 The shell structure

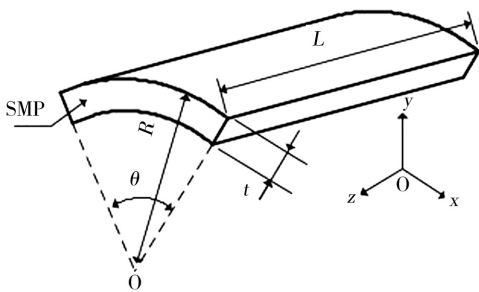


图 2 壳结构简化模型  
Fig.2 The simple structure of hinges

### 1.2 SMP 壳结构正向和反向弯曲研究

由于壳是开口圆柱壳, 正向和反向弯曲的力学性能不同, 因此需要对壳的正反向弯曲进行研究。简化壳的材料被认为是 SMP, 利用上述本构方程 (1), 对

其弯曲的形状记忆过程进行数值模拟。

使用 Abaqus 建立几何模型, 结构参数  $R$ 、 $L$ 、 $\theta$  及  $t$  分别被设置为 50 mm、300 mm、90° 及 2 mm。参考类似模型的计算方法, 采用 Static General 中的 Newton-Raphson 求解方法, 开启非线性 (Nlgeom) 增量分析, 自动稳定函数 “\* SPECIFY DISSIPATED ENERGY FRACTION = 0.0002”。在施加位移处采用 MPC-beam 约束, 将控制点 Rf1 和 Rf2 设置在两端的形心。采用的边界条件是约束 Rf1 上的  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$ 、 $UR_2$ 、 $UR_3$  的全部自由度, 同时在  $UR_1$  上施加 90°/-90° 的转角位移, 用来模拟纯弯曲; 约束 Rf2 上的  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $UR_2$ 、 $UR_3$  的全部自由度, 同时在  $UR_2$  上施加 90°/-90° 的转角位移, 用来模拟纯弯曲。由于形状记忆效应与温度有关, 因此施加的高温温度场为 343 K, 低温温度场为 313 K。网格采用适用于分析大位移小应变问题的 S4R 壳单元, 网格单元的尺寸为 2 mm, 单元数量为 6 190。整个过程包括: 高温加载、降温保载、低温卸载、升温恢复四个步骤。

SMP 壳在反向、正向弯曲, 展开过程中弯矩随弯曲角度的变化曲线如图 3 和图 4 所示。在结构温度为 343 K 时, 由于壳的材料呈近半圆柱结构, 弯矩随着转角度的增加而非线性增长。当弯曲变形结束后, 保持壳结构的临时形状不变, 将结构的温度从 343 K 降低至 313 K, 在降温过程中, 弯矩随着温度降低有所升高。在结构温度为 313 K 时, 去掉加载载荷, 残余应变被冻结, 壳结构保持临时形状。最后, 将 SMP 壳结构的温度从 313 K 升高至 343 K, 随着温度的升高, 壳结构中的残余应变逐渐恢复, 壳结构从临时形状恢复至初始形状。

可以看出反向与正向整个加载过程弯矩的峰值是不同的, 加载过程有明显非线性特征, 但形状记忆的过程是类似的。壳结构的失稳特性没有影响弯曲和展开过程。该结构具有明显的可设计性, 可以根据工作要求对其进行相应的设计。

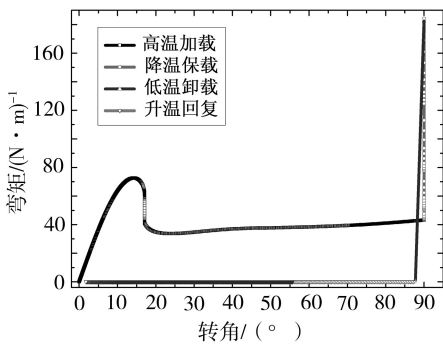


图3 反向弯曲展开过程中弯矩随弯曲角度的变化曲线

Fig.3 Bending moment-angle displacement curve in shape memory process in reverse loading

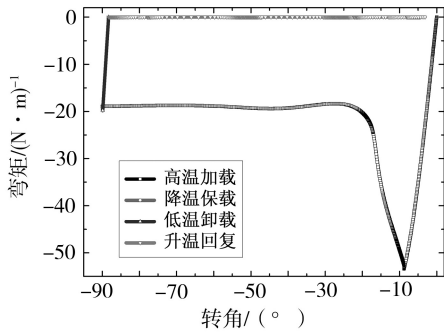


图4 正向弯曲展开过程中弯矩随弯曲角度的变化曲线

Fig.4 Bending moment-angle displacement curve in shape memory process in forward loading

## 2 SMP 复合壳弯曲过程模拟

金属薄层/SMP 基体复合壳结构的正向和反向折叠过程被模拟。结构的金属材料采用铝材料,材料参数为: $E=69 \text{ GPa}$ , $\nu=0.33$ 。铝制材料薄板的厚度  $t=0.5 \text{ mm}$ 。结构的其他几何参数与以上相同。图5给出了在SMP 复合壳的反向折叠变形过程中,Mises 应力分布状态和壳结构的变形过程。壳结构变形前,结

构无形变,各处应力值为0。当施加较小的转角后,结构开始产生弯曲变形,应力增加,在两个侧边出现拉压变形区域。随着转角位移的增大,结构即将到达失稳状态时,在结构的中部出现应力集中区。随着弯曲变形的继续,壳体度过失稳状态。壳体两个侧边的应力迅速减小,并且应力集中区域逐渐变长。图6所示SMP 复合壳的正向折叠变形过程中,Mises 应力分布状态和壳结构的变形过程。当壳结构的两端被施加转角位移时,结构两个侧边出现明显的应力集中。随着弯曲变形的进一步发生,壳结构截面的曲率半径变大,两个侧边的应力集中到两个侧边的中部,这表明结构已经过了失稳状态。随后,随着弯曲变形的继续增大,失稳区域变大,但失稳区域的曲率半径不变。

用弯矩和应变能的变化来描述屈曲状态的变化。如图7和图8所示,壳的应变能-转角曲线和弯矩-转角位移曲线在线性增长之后会发生一次突降,在这个时间节点发生了屈曲,弯矩达到最高点的位置就是临界弯矩。临界弯矩代表着是机构的抗干扰能力。弯矩随后会到达一个平稳的数值,这个数值就是稳态弯矩,它也是壳展开时的驱动弯矩,稳态弯矩体现的是机构的展开能力。壳在变形过程中存在弯曲变形以及拉伸变形,变形所需的能量就是积储在变形处的应变能。变形时,应变能的释放使壳恢复到初始形状。如图7弯矩-转角曲线所示,壳发生了极值点屈曲。在反向加载的初始阶段,应变能和弯矩随着位移转角呈线性增加;当转角达到  $15^\circ \sim 20^\circ$  时,壳发生屈曲,应变能和弯矩发生突降,曲线斜率为零时所对应的弯矩就是临界弯矩;屈曲后,应变能随着弯曲角度呈线性的增加,但此时的增大速度小于屈曲之前。

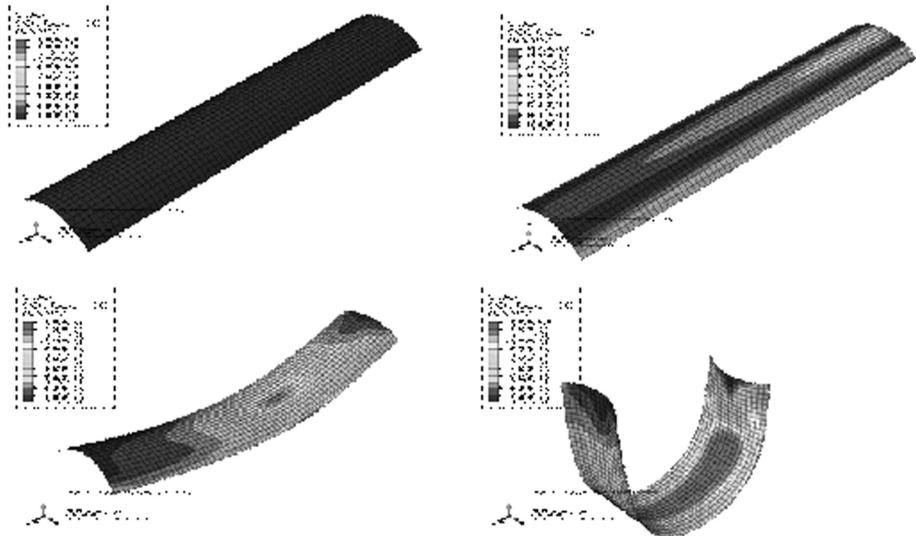


图5 壳反向加载过程中 Mises 等效应力的变化及壳的变形图

Fig.5 Variation of Mises equivalent stress and deformation patterns in the reverse loading process of hinge structure

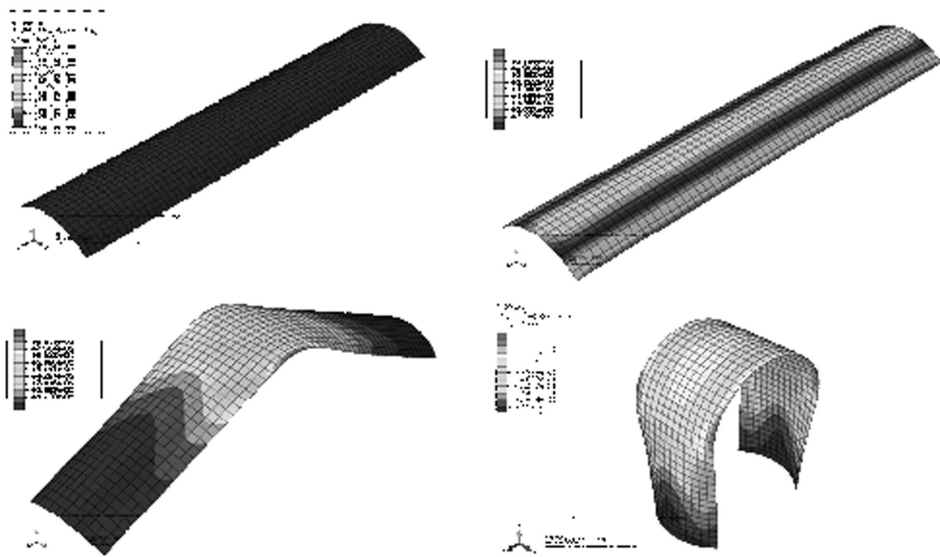


图6 壳正向加载过程中 Mises 等效应力的变化及壳的变形图

Fig.6 Variation of Mises equivalent stress and deformation patterns in the forward loading process of hinge structure

从图7、图8可以看出:在壳结构正向弯曲和反向弯曲的变形过程中,弯矩-转角和应变能-转角曲线的变化过程类似,正向弯曲的应变能小于反向弯曲应变能,反向弯曲的弯矩大于正向弯曲的弯矩。

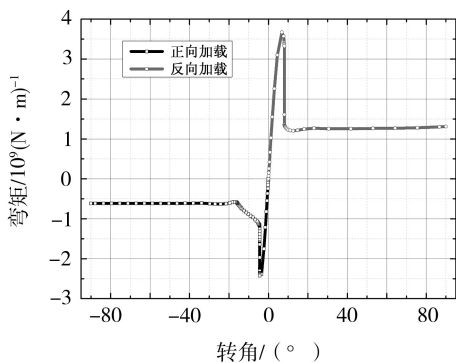


图7 正向和反向弯曲过程中弯矩随弯曲角度的变化曲线

Fig.7 Bending moment-angle displacement curves for shape memory cycle in reverse and forward loading

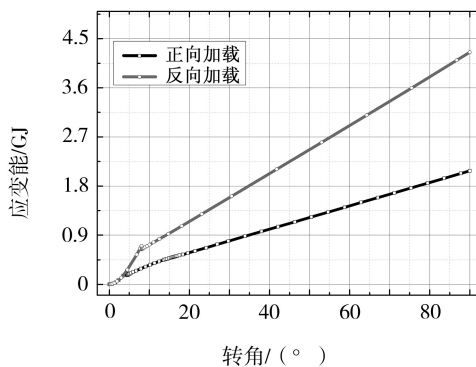


图8 在正向和反向弯曲过程中应变能随弯曲角度的变化曲线

Fig.8 Strain energy-angle displacement curves in reverse and forward loading

(1) 利用本构方程能够模拟三维应力状态下的 SMP 壳结构的形状记忆行为,能够为工程应用提供理论和数值方法的分析。

(2) SMP 壳结构具有可设计性和可控制性,可根据工作性质要求对其结构的几何参数、加载环境和升温过程进行相应的分析和调整。

(3) SMP 壳结构正向和反向的加载弯曲变形,具有明显的屈曲特征,其弯矩-转角曲线具有明显的非线性。

### 参考文献

[1] FRANCISCO R. Development of an elastically deployable boom for tensioned planar structures [C]. Aiaa/asme/asce/ahs/asc Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. 2007.

[2] 房光强,李文晓,彭福军.基于形状记忆复合材料的空间可展桁架结构研究[C]//2008 SAMPE 中国国际先进材料与工艺技术展览暨研讨会,2008.

[3] 张晓岚.航天智能复合材料的发展与应用[J].上海航天,2010,27(3):40-45.

[4] LAN X, LIU Y, LV H, et al. Fiber reinforced shape-memory polymer composite and its application in a deployable hinge[J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18: 24002

[5] SHI G, YANG Q, HE X, et al. A Three-dimensional constitutive equation and finite element method implementation for shape memory polymers[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2013, 90(5):339-358.

[6] ARZBERGER S C, TUPPER M L, LAKE M S, et al. Elastic memory composites (EMC) for deployable industrial and commercial applications [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2005, 5762:35-47.