

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20170323

数字出版日期: 2018-09-19; 数字出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1355.N.20180919.1701.010.html>

功能梯度形状记忆合金圆筒受扭的力学行为分析

薛立军^{1,2}, 穆浩志^{1,2}, 李伟达³, 李建军⁴

(1. 天津市先进机电系统设计与智能控制重点实验室, 天津 300384;

2. 机电工程国家级实验教学示范中心(天津理工大学), 天津 300384;

3. 中铁十八局集团有限公司, 天津 300222; 4. 上海铁路局南京桥工段, 南京 210015)

摘要: 为能简单准确地预测功能梯度形状记忆合金(functionally graded shape memory alloy, FG-SMA)在载荷作用下的力学行为,应用有限元软件 ANSYS 14.0 对 FG-SMA 圆筒在扭矩载荷作用下的受力变形行为进行研究,提出一个适合于模拟 FG-SMA 力学行为的有限元建模、计算方法,得到 FG-SMA 圆筒在扭矩作用下的受力变形特点.数值算例显示:FG-SMA 圆筒的截面最大应力显著减小,可避免材料由于应力过大而导致的破坏.此外,载荷大小、分布函数和筒壁厚度对 FG-SMA 圆筒截面上的应力和应变分布有着很大的影响.

关键词: 功能梯度材料; 形状记忆合金; 圆筒; 扭矩; 有限元

中图分类号: TB33 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2018)06-0058-04

Mechanical Behavior of Functionally Graded Shape Memory Alloy Cylinder Under Torque Load

XUE Lijun^{1,2}, MU Haozhi^{1,2}, LI Weida³, LI Jianjun⁴

(1. Tianjin Key Laboratory of the Design and Intelligent Control of the Advanced Mechatronical System, Tianjin 300384, China; 2. National Demonstration Center for Experimental Mechanical and Electrical Engineering Education

(Tianjin University of Technology), Tianjin 300384, China; 3. China Railway 18th bureau, Tianjin 300222, China;

4. Nanjing Bridge Maintenance Section, Shanghai Railway Bureau, Nanjing 210015, China)

Abstract: In order to predict the mechanical behaviour of functionally graded shape memory alloy (FG-SMA) simply and precisely, the mechanical behavior of a FG-SMA cylinder subjected to torque load was investigated by using the finite element analysis software ANSYS 14.0. A new method for creating a finite element model of FG-SMA was proposed, and the model created this way can simulate the mechanical behavior of FG-SMA very well. The calculating results show that the maximum stress on the cross section of the FG-SMA cylinder decreased significantly, and the destruction caused by too much stress can thus be prevented. At the same time, the distribution of the stress and strain on the cross section of the FG-SMA cylinder was affected greatly by the torque value, the distribution of the volume fraction of SMA, and the thickness of the cylinder wall.

Key words: functionally graded material; shape memory alloy; cylinder; torque; finite element

功能梯度形状记忆合金(functionally graded shape memory alloy, FG-SMA)是一种新兴的既具备功能梯度材料(functionally graded material, FGM)特性又具备形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)特性的功能材料.根据材料的组成成分和结构可将 FG-SMA 分为两大类:一类为通过特殊的工艺对

SMA 进行处理,使其内部微观结构发生变化,以致其宏观性能产生梯度变化的 FG-SMA^[1-2];另一类为将 SMA 与不同的材料复合,两种材料成分比梯度变化,得到具有不同优异性能的 FG-SMA 材料^[3-8].如 NiTi-TiC 功能梯度形状记忆合金, NiTi SMA 可以降低最大应力,适应大变形的需要,而 TiC 具有强度

收稿日期: 2017-11-29; 修回日期: 2018-07-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11502284, 11802206); 天津市“131”创新型人才培养项目(401009002)

作者简介: 薛立军(1984—),男,河北唐山人,讲师, meilideshijiali@163.com

高、耐磨损等特性. 由这两种材料合成的 FG-SMA 一端具有 SMA 的相变特性, 另一端具有 TiC 的抵抗磨损的特性, 而且两种材料成分梯度变化消除了应力集中带来的破坏^[6,8].

FG-SMA 在高新技术领域中应用的迅速增加, 这就要求人们对其力学特性进行全面了解, 近年来, 已有一些专家学者对 FG-SMA 材料进行了研究^[1-8]. Birnbaum 等^[1]介绍了一种应用激光照射改变马氏体的相变温度, 进而控制 FG-SMA 形状记忆效应以及其他力学性能的技术; Mahmud 等^[2]提出了一种通过梯度温度退火制造功能梯度近等原子 NiTi SMA 的方法, 该方法能够制造出具有结构梯度的 SMA; 通过热靶喷溅技术, Tian 等^[4]提出了一种制造功能梯度 NiTi 薄膜的方法; Cole 等^[5]介绍了一种将富钛 NiTi 合金喷溅到富镍 NiTi 带状基体上制造梯度形状记忆合金薄膜的方法, 并采用纳米压痕技术测试了材料的梯度性能. 然而, 已有研究大都集中在 FG-SMA 的制备及性能测试等方面, 至今尚未给出合理的本构模型或方法来描述和预测其力学性能, 因此在 FG-SMA 性能预测方面还有待深入研究.

有限元法是 20 世纪四、五十年代发展起来的一种高效、常用的计算方法, 随着计算机技术的飞速发展, 有限元法的应用范围和应用水平都得到了很大的拓展和提高, 已成为科学研究和工程分析的一种重要手段^[6,9-13]. 本文应用有限元软件 ANSYS 14.0 对由 SMA 和弹性材料 A 组成的 FG-SMA 圆筒在扭矩作用下的受力变形行为进行了研究. 已有的研究 FGM 的有限元文献均采用分层的方法, 假设每层材料的整体性能服从坐标的一个幂函数或指数函数变化. 然而, 由于 FG-SMA 的材料性能不仅沿梯度方向不断变化, 且随着加载过程中应力和温度的改变, 材料的性能亦不断变化, 已有的方法不能很好地模拟 FG-SMA 的力学行为.

针对 FG-SMA 的这两个材料特性, 本文提出了一种分层建模方法, 该方法仅应用两种组分材料各自的力学参数, 既考虑了材料的复合, 又考虑了性能的梯度变化. 最后, 将本文计算结果与文献进行对比, 验证了本文建模、计算方法的有效性.

1 模型的建立与验证

与普通的 FGM 相比, FG-SMA 材料性能不仅沿梯度方向不断变化, 而且随着温度和载荷的变化, 材料的性能亦不断变化. 为了避免繁琐的计算, 又能得

到相对准确的结果, 本文采用分层的方法建立有限元模型, 以此逼近实际的 FG-SMA 材料, 具体方法如下: 将构件沿梯度方向分为等厚度的 m 层, 每层的 SMA 体积分数由分布函数 $f(x)$ 计算得出, 其中 x 为梯度方向坐标; 在每一层内继续划分为两层, 分别代表 SMA 和材料 A, 两层厚度比由 SMA 体积分数 $f(x)$ 确定. 材料 A 的弹性模量 E_0 为定值; SMA 的本构模型采用如图 1 所示的四段线模型. 层数 m 越大, 计算的结果越逼近真实值. 编写可供 ANSYS 14.0 执行的 APDL 命令流, 该命令流可根据任意给定的层数 m 、构件的几何尺寸和材料性质, 自动建立相应的模型、赋予材料相应的属性、划分网格和求解计算. 这种建模方法可避免直接假设材料整体性能的变化函数, 同时考虑 SMA 性能随载荷变化的影响.

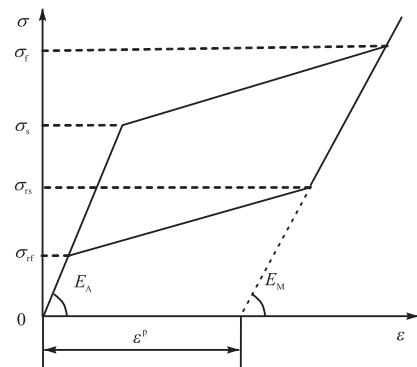


图 1 形状记忆合金的应力应变关系
Fig. 1 Stress-strain relationship of SMA

由于缺少 FG-SMA 圆筒受扭的实验数据, 为验证本文方法的有效性, 首先用本文方法计算文献[7]中的 FG-SMA 纯弯曲梁, 并将计算结果与文献[7]中的结果比较, 见图 2. 其中在划分网格时, 采用 8 节点的 Solid45 单元, 映射划分网格. 由于模型的对称性, 只需取梁长度方向的一半进行有限元分析, 加载时, 梁的一端受固定端约束, 另一端受弯矩 M 作用.

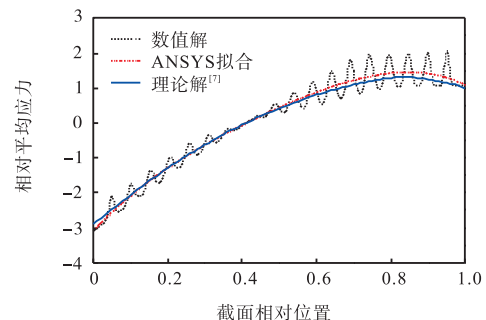


图 2 FG-SMA 梁截面的应力分布图
Fig. 2 Stress distribution on the cross section of FG-SMA beam

图 2 为梁截面的应力分布图,其中蓝线为文献 [7]中的理论解;黑线为有限元计算得到的数值解,由于本文采用分层的方法建立有限元模型,层间材料的突变会导致层界面处产生应力集中,图中曲线显示出上下波动的特点,不过该波动幅度并不大;红线为由数值解经多项式拟合得到的拟合曲线. 不难看出,有限元计算得到的数值解经拟合后与理论计算得到的结果相差非常小,说明本文采用的有限元建模求解的方法是有效的. 为了便于研究,后文中均采用拟合后的有限元计算结果.

接下来,应用本文方法对 FG-SMA 圆筒在扭矩载荷作用下的应力变形行为进行研究. FG-SMA 圆筒长 L , 内径为 R_n , 外径为 R_w , 受扭矩 T 作用, 如图 3 所示. 圆筒由弹性材料 A 和 SMA 组成, 其中 SMA 的体积分数沿半径方向 r 服从幂函数 $f(r) = [(r - R_n)/(R_w - R_n)]^n$ 分布, n 为幂指数, 且 $n > 0$.

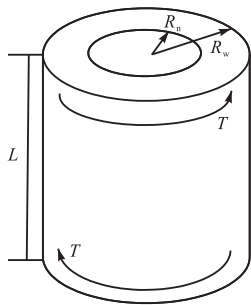
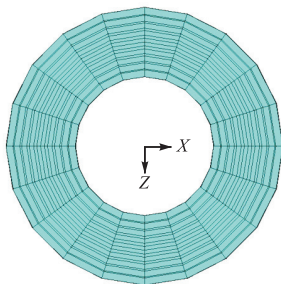


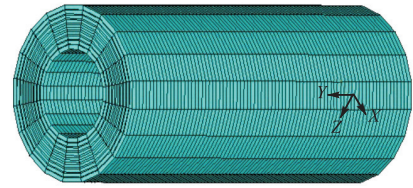
图 3 FG-SMA 圆筒受扭示意图

Fig. 3 Sketch of the FG-SMA cylinder under torque load

随着扭矩的增大,圆筒将经历一个由弹性变形到相变的过程. 建模时,首先建立矩形平面并分层,每层代表不同的材料,赋予材料属性. 用 PLANE183 单元对面划分网格,然后通过扫掠生成圆筒的有限元模型,其中生成的体单元为 Solid45 单元. 加载时,筒的一端固定,另一端受扭矩 T 作用,得到的有限元模型见图 4. 以上建模、加载和求解等过程均通过 APDL 命令流自动实现.



(a) 有限元模型的截面示意图



(b) 有限元模型

图 4 FG-SMA 圆筒有限元模型及截面示意图

Fig. 4 Finite element model and the cross section of the FG-SMA cylinder

2 算例分析

FG-SMA 圆筒长 $L = 500$ mm, 内径 $R_n = 50$ mm, 外径 $R_w = 100$ mm; 材料 A 的弹性模量 $E_0 = 210$ GPa, 奥氏体弹性模量 $E_A = 70$ GPa, 马氏体弹性模量 $E_M = 30$ GPa^[14], 最大相变应变 $\epsilon^P = 0.069$, 马氏体相变的起始和结束临界应力分别为 $\sigma_{st} = 290$ MPa、 $\sigma_{ft} = 380$ MPa^[15]; 马氏体相变的起始临界应变 $\epsilon_{st} = 0.004$; 径向分层数 $m = 20$. 后文计算中未明确提及的算例参数: 扭矩 $T = 200$ kN·m, 壁厚 $t = 50$ mm, 幂指数 $n = 1$.

图 5 为 FG-SMA 圆筒和普通 FGM 圆筒横截面上沿半径方向的平均应力和平均应变分布图, 其中横坐标 $(r - R_n)/(R_w - R_n)$ 表示截面相对位置.

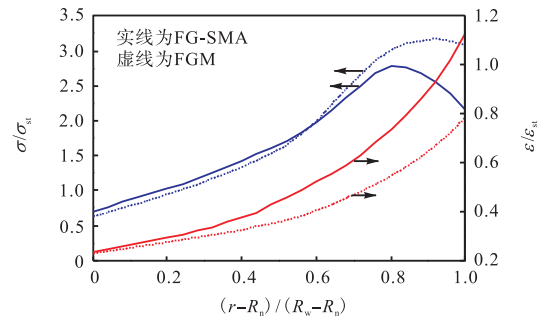


图 5 普通 FGM 筒和 FG-SMA 筒受扭的截面应力、应变分布图

Fig. 5 Stress and strain distribution on the cross section of the FG-SMA and the common FGM cylinder

由图 5 可知: FG-SMA 圆筒截面上的应变沿径向逐渐增大, 且增长速率不断增大, 这是由于本文研究的 FG-SMA 圆筒内层为弹性模量相对较大的材料 A, 外层为弹性模量相对较小的 SMA, 沿半径方向材料的平均弹性模量逐渐减小, 材料逐渐变“软”. 对于均匀材料圆筒, 根据材料力学的理论可知, 该增长是线性的, 而对于本文研究的 FG-SMA 圆筒, 该增长是非线性的, 由筒内径到外径增加速率逐渐变大,

SMA 中产生的马氏体相变尤其加剧了这种非线性的增长。

由图 5 还可得知:FG-SMA 圆筒截面上的应力沿径向逐渐增大,达到一个最大值后开始减小,且应力增长的速率先增大后减小.这是由于受扭圆筒的截面应变沿半径方向不断增大,平均弹性模量不断减小,两者的变化共同作用,导致应力产生如图所示的变化.此外,与普通 FGM 圆筒相比,FG-SMA 圆筒的最大应力明显减小,应变明显增大.在实际应用中合理采用 FG-SMA 可有效的减小构件的最大应力,满足其大变形的需要。

应力和应变为相互关联的物理量,不同因素会同时影响应力和应变协同变化.为了不使文章显得繁杂,后文只给出不同分布函数时的应变分布情况和不同载荷大小、筒壁厚度时的应力分布情况。

图 6 为不同 SMA 分布函数(不同 n)的 FG-SMA 圆筒在相同的扭矩作用下的截面应变分布图.材料中 SMA 沿径向的分布函数为 $f(r) = [(r-R_n)/(R_w-R_n)]^n$, $n > 0$.随着 n 的增大,SMA 的体积分数相对减小,材料的平均弹性模量变大,材料变“硬”.因此在相同的扭矩作用下,随着 n 的增大,筒截面的应变变小。

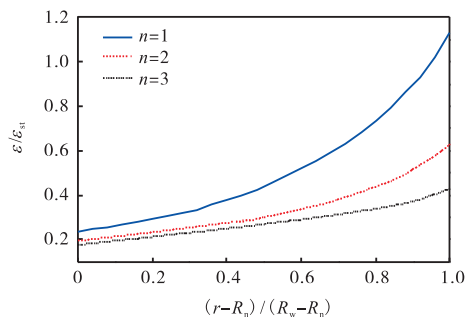


图 6 FG-SMA 圆筒受扭的截面应变分布图(不同 n)

Fig. 6 Strain distribution on the cross section of the FG-SMA cylinder (different n)

图 7 为不同扭矩 T 作用下 FG-SMA 圆筒的截面应力分布图,由图 7 可知:当外加扭矩较小时,材料中的 SMA 只有很少一部分发生了相变,最大应力和应力变化的幅度都相对较小;随着扭矩的增大,材料中发生相变的 SMA 增多,最大应力和应力变化的幅值也相应的变大,且最大应力所在的位置也逐渐向内径方向移动。

图 8 为不同壁厚($t = R_w - R_n$)的 FG-SMA 圆筒受相同扭矩作用时筒截面上的应力分布图,由图 8 可知:随着筒壁厚度的增加,截面上的应力不断减小,且最大应力所在位置向外壁方向移动。

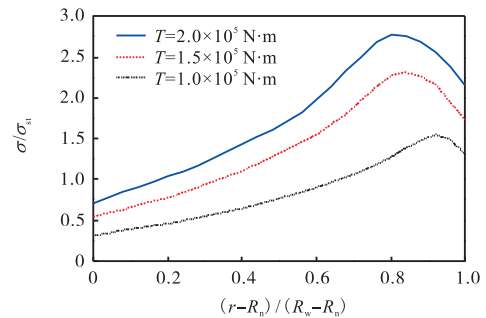


图 7 FG-SMA 圆筒受扭的截面应力分布图(不同 T)

Fig. 7 Stress distribution on the cross section of the FG-SMA cylinder (different T)

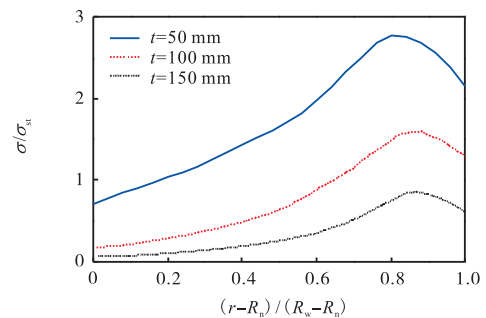


图 8 FG-SMA 圆筒受扭的截面应力分布图(不同 t)

Fig. 8 Stress distribution on the cross section of the FG-SMA cylinder (different t)

3 结 语

本文应用有限元软件 ANSYS 14.0,对一个由弹性材料 A 和 SMA 组成的 FG-SMA 圆筒在扭矩载荷作用下的力学性能进行了研究,给出了一种适合于模拟 FG-SMA 力学行为的有限元建模、计算方法,并得到 FG-SMA 圆筒在扭矩作用下的受力变形特点,通过与已有文献对比可知,本文的方法是有效的。

FG-SMA 圆筒受扭时截面的最大应力明显小于受相同载荷作用的普通 FGM 圆筒,且沿半径方向,应力呈现出先增加后减小的特点,应力增长的速率亦先增后减.与普通 FGM 相比,由于 SMA 的相变,FG-SMA 圆筒的截面应变明显增大,且沿半径方向非线性的增长.载荷大小、SMA 分布函数和筒壁厚度对 FG-SMA 圆筒截面的应力和应变有很大的影响,充分考虑这些因素,合理设计构件,可充分发挥此类材料的优异特性。

参考文献:

- [1] Birnbaum A J, Satoh G, Yao Y L. Functionally grading
(下转第 72 页)