

# SMA 纤维复合材料变截面板簧的刚度特性研究

徐晓明,任勇生,杜向红

(山东科技大学机械电子工程学院,山东 青岛 266510)

**摘要:**研究了嵌入形状记忆合金(SMA)纤维复合材料变截面板簧的刚度性能。首先分析一类常用 SMA 材料的基本力学性能,讨论了基于 Brinson 本构模型下的受限回复特性。在建立具有 SMA 纤维的各向异性层合梁的本构方程的基础上,利用瑞利-利兹能量法求板簧的挠度,给出板簧刚度的表达式。最后,运用 MATLAB 进行数值计算,得到了 SMA 纤维复合材料变截面板簧刚度随温度、铺层角、SMA 含量的变化关系曲线,揭示了 SMA 纤维复合材料变截面板簧的刚度可调节机理。

**关键词:**形状记忆合金;纤维复合材料;变截面板簧;瑞利-利兹法;刚度

中图分类号:TB381

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)01-0096-07

## Study on the Stiffness Property of Section-changed Plate Spring with SMA Fiber Composite Materials

XU Xiaoming, REN Yongsheng, DU Xianghong

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China)

**Abstract:** The stiffness property of the section-changed plate spring with fiber composite materials embedded shape memory alloy (SMA) was studied. First, basic mechanical properties of the SMA material most in use was analyzed and restrained recovery characteristics based on the Brinson constitutive model were discussed. Based on the establishment of constitutive equation of SMA fiber anisotropic laminated beam, the deflection of the plate spring is derived by means of Rayleigh-Ritz energy method, and then, the stiffness expression of plate spring was given. At last, the numerical calculation was conducted by using MATLAB and the relational curves of stiffness of section-changed plate spring with SMA fiber composite materials as the temperature, ply angle and SMA content varied were obtained, revealing the adjustable mechanism of stiffness of section-changed plate spring with SMA fiber composite materials.

**Key words:** shape memory alloys (SMA); fiber composite materials; section-changed plate spring; Rayleigh-Ritz method; stiffness

悬架是现代汽车的重要组成部分,起着连接车架与车轮,并传递一切力与力矩的作用,对乘坐舒适性和行驶安全性有着重要影响。半主动悬架是指悬架减振器的阻尼系数和弹性元件的刚度可以根据需要进行调节的悬架。通过实时调节悬架系统元件的阻尼和刚度,可以改变减振器的阻尼系数和系统的固有频率,降低和避免车辆的共振。半主动悬架相比被动悬架,增加了自动调节装置,能通过合适的控制策略实时调节悬架的刚度与阻尼;而相比主动悬架来说,又是一种无源控制,作动器价格低、能耗小、结构简单,且其控制品质接近主动悬架<sup>[1]</sup>。因此,半主动悬架,特别是基于智能材料的半主动悬架系统的研究与开发,具有重要的理论价值与实际意义。

目前,智能材料在汽车半主动悬架可调减振系统中的应用研究,绝大多数采用电、磁流变液为工作介质

收稿日期:2010-11-08

作者简介:徐晓明(1985—),男,山东济南人,硕士研究生,主要从事汽车悬架方面的研究。E-mail: xrayxray@126.com.

任勇生(1956—),男,山西太原人,教授,博士,主要从事智能材料与结构、振动理论及其控制方面的研究。

来调节减振器的阻尼系数。而通过调节减振器可控环节的刚度系数,改变悬架刚度的研究报道相当少见。事实上,电、磁流变半主动悬架还存在性能稳定性、维护等方面的缺陷。

迄今为止,形状记忆合金(shape memory alloys,SMA)智能材料在复合材料梁、板类结构的刚度性能调节方面的应用研究,获得了很大的进展。将 SMA 纤维埋入复合材料,设计变截面板簧半主动悬架,在理论与实践方面,存在一定的可行性。王洪礼等<sup>[2]</sup>对带有 SMA 智能材料的刚度可调汽车半主动悬架进行随机振动的可靠性分析,其中的 SMA 以螺旋弹簧的形式出现,着重研究半主动悬架车辆随机振动以及控制策略,而没有考虑 SMA 弹簧的刚度调节性能。李磊等<sup>[3]</sup>以调节汽车板簧的刚度为目的,提出利用 SMA 纤维改变汽车半主动悬架刚度的设想,初步建立了弹簧刚度随温度变化的函数模型。虽然对于将 SMA 智能复合材料应用于汽车悬架的可行性进行了分析,但是没有进行具体的量化分析。李磊等<sup>[4]</sup>建立了具有预应变的 SMA 纤维复合材料板簧的分析模型,导出了板簧刚度的数学表达式,并且通过数值计算得到板簧的刚度随温度、SMA 纤维体积分数、铺层方式等参数的变化曲线。但是,文献[4]所采用的复合材料板簧模型是等截面的,而实际的现代汽车复合材料板簧具有变截面的特点。此外,文献[4]仅限于研究复合材料板簧在升温过程的刚度变化规律,没有考虑降温过程的影响。

本研究根据 Brinson 提出的 SMA 本构关系理论,结合复合材料力学理论和经典的材料力学理论,建立 SMA 纤维复合材料变截面板簧的力学分析模型,应用瑞利-利兹数值近似计算方法,计算和分析了板簧刚度在一个完整的升温-降温过程中的变化规律,以及 SMA 纤维铺层角度和含量的影响,揭示了 SMA 纤维复合材料变截面板簧的刚度调节机理。

## 1 SMA 完全约束回复的数值计算

SMA 材料具有“智能”特性,它既有传感功能(感知和接收应力、应变、电、热等信号),又具有驱动功能(对激励产生响应)<sup>[5]</sup>。将具有初始残余变形并完全约束的 SMA 升温,会产生很大的形状回复力。这个 SMA 完全约束回复应力可以由 Brinson 模型描述如下<sup>[6]</sup>,模型中涉及符号的意义如表 1 所示。

当  $T < A_s^\sigma$  时没有新的奥氏体产生,回复应力与温度之间呈线性关系:

$$\sigma^r - \sigma_0 = \Theta(T - T_0). \quad (1)$$

当  $A_s^\sigma \leq T \leq A_f^\sigma$  时,温度诱发马氏体向奥氏体的相变:

$$\sigma^r - \sigma_1 = E(\xi)\epsilon_0 - E(\xi_0)\epsilon_0 + \Omega(\xi)\xi_s - \Omega(\xi_0)\xi_{s0} + \Theta(T - A_s^\sigma). \quad (2)$$

当  $T > A_f^\sigma$  时,马氏体向奥氏体的转变结束:

$$\sigma^r - \sigma_2 = \Theta(T - A_f^\sigma)\sigma. \quad (3)$$

降温时,当  $M_f^\sigma \leq T \leq M_s^\sigma$  时,温度诱发奥氏体向马氏体的相变:

$$\sigma^r - \sigma_3 = E(\xi)\epsilon_0 - \epsilon_A\epsilon_0 + \Omega(\xi)\xi + \Theta(T - M_s^\sigma). \quad (4)$$

升温 and 降温的相变动力学方程分别为:

$$\xi_{M-A} = \frac{\epsilon_0}{2} \left\{ \cos \left[ \frac{\pi}{A_f - A_s} \left( T - A_s - \frac{\sigma^r}{C_A} \right) \right] + 1 \right\}, \quad (5)$$

$$\xi_{A-M} = \frac{1 - \xi_{s0}}{2} \times \cos \left\{ \frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} \left[ \sigma^r - \sigma_f^{cr} - C_M(T - M_s) \right] \right\} + \frac{1 + \xi_{s0}}{2}. \quad (6)$$

取  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $\sigma_0 = 122.43 \text{ MPa}$ ,  $\xi_{s0} = 0.046$ ,  $\xi_{T_0} = 0$ ,  $\epsilon_0 = 0.5\%$ 。由 SMA 本构方程(1)~方程(6),通过数值计算得到 SMA 完全约束回复曲线,如图 1 所示,计算所采用的 SMA 纤维的基本力学参数见文献[6]。从图中可以看到,升温 and 降温时路径不一致,出现迟滞循环效应。OA,BC,BD 段的过程没有发生相变,回复应力随温度的变化不大;AB和DO段,分别是奥氏体相变和马氏体相变的过程,回复应力随温度发生剧烈变

表 1 本构方程中的术语表

Tab. 1 The terminology of constitutive equation

符号	意义	符号	意义
$\sigma^r$	回复应力	$\Theta$	热弹性模量
$\sigma_0$	初始应力	$\Omega$	相变张量
$\sigma_1$	M→A 相变开始时的应力	$A_s^\sigma$	M→A 相变开始时的温度
$\sigma_2$	M→A 相变结束时的应力	$A_f^\sigma$	M→A 相变结束时的温度
$\sigma_3$	A→M 相变开始时的应力	$M_s^\sigma$	A→M 相变开始时的温度

化,板簧刚度的调节也正是利用了 SMA 的相变特性。

## 2 嵌入 SMA 纤维的复合材料变截面板簧

### 2.1 具有 SMA 纤维的各向异性层合梁的本构方程

SMA 纤维混杂各向异性层合梁的本构方程为<sup>[7]</sup>

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N} \\ \mathbf{M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}^0 \\ \boldsymbol{\kappa} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{N}^{\Delta T} \\ \mathbf{M}^{\Delta T} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{N}^r \\ \mathbf{M}^r \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{e}^0, \boldsymbol{\kappa}$  分别表示中面应变矢量和曲率矢量,  $\mathbf{e}^0 = [e_x^0 \ e_y^0 \ r_{xy}^0]^T, \boldsymbol{\kappa} = [\kappa_x \ \kappa_y \ \kappa_{xy}]^T; \mathbf{N}^{\Delta T} = [N_x^{\Delta T} \ N_y^{\Delta T} \ N_{xy}^{\Delta T}]^T, \mathbf{M}^{\Delta T} = [M_x^{\Delta T} \ M_y^{\Delta T} \ M_{xy}^{\Delta T}]^T$  为基体材料热膨胀产生的力和力矩;  $\mathbf{N}^r = [N_x^r \ N_y^r \ N_{xy}^r]^T, \mathbf{M}^r = [M_x^r \ M_y^r \ M_{xy}^r]^T$  为 SMA 回复时产生的力和力矩, 因为梁模型只须考虑轴向力学性能, 因此  $y$  和  $xy$  方向的参量为 0。拉伸刚度、耦合刚度和弯曲刚度矩阵  $\mathbf{A}, \mathbf{B}$  和  $\mathbf{D}$  分别为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix}, \mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$[A_{ij} \ B_{ij} \ D_{ij}] = b \int_{-h/2}^{h/2} \bar{Q}_{ij} [1 \ z \ z^2] dz. \quad (9)$$

其中,  $b$  表示板簧的宽度,  $h = h(x)$  为板簧在轴向  $x$  处的厚度。若板簧关于中面对称, 则  $B_{ij}$  为 0, 弯曲刚度  $\bar{D}_{11} = D_{11}$ ; 若不对称则  $B_{ij}$  不为零, 弯曲刚度<sup>[8]</sup>  $\bar{D}_{11} = \frac{A_{11}D_{11} - B_{11}^2}{A_{11}}$ 。  $\bar{Q}$  是单层复合材料经转轴变换后的刚度矩阵。

$N_x^r, N_x^{\Delta T}$  表述如下<sup>[3,7]</sup>:

$$N_x^r = bV_s \int_{-h/2}^{h/2} \sigma^r dz, N_x^{\Delta T} = b \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x^{\Delta T} dz \quad (10)$$

### 2.2 单层纤维复合材料的刚度矩阵

单层纤维复合材料的刚度矩阵为

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

利用刚度系数与工程常数的关系

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, Q_{12} = Q_{21} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, Q_{66} = G_{12}. \quad (12)$$

对于基体本身就是纤维增强复合材料的情形, 有<sup>[7]</sup>

$$E_1 = E_{1m}(1 - V_s) + E_s V_s, \quad E_2 = \frac{E_{2m}E_s}{E_{2m}V_s + E_s(1 - V_s)},$$

$$G_{12} = \frac{G_{12m}G_s}{G_{12m}V_s + G_s(1 - V_s)}, \quad \nu_{12} = \nu_{12m}(1 - V_s) + \nu_s V_s, \nu_{12}/E_1 = \nu_{21}/E_2. \quad (13)$$

其中: 下标  $m, s$  分别表示复合材料基体与 SMA;  $E, G, \nu$  分别表示杨氏模量、剪切模量和泊松比;  $V_s$  和  $V_m$  分别为所含形状记忆合金与基体材料的体积比含量,  $V_s + V_m = 1$ 。

### 2.3 转轴变换

转轴变换矩阵为<sup>[8]</sup>

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} n^2 & m^2 & -2mn \\ m^2 & n^2 & 2mn \\ mn & -mn & n^2 - m^2 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

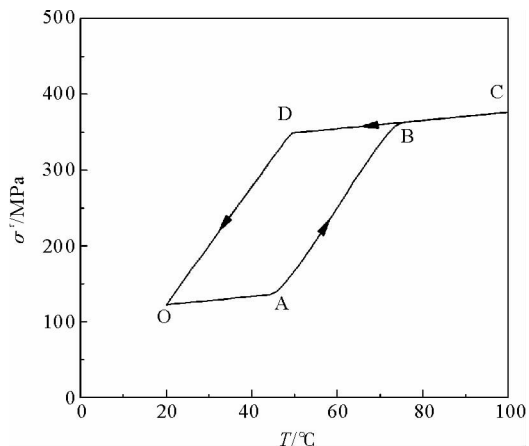


图 1 SMA 受限回复曲线图

Fig. 1 The restrained recovery curves of SMA

其中,  $n = \cos \theta$ ,  $m = \sin \theta$ ,  $\theta$  为单层材料主方向与板簧轴向的夹角。利用方程(15) 可以把单层纤维复合材料的刚度矩阵变换为以板簧轴向为参考坐标方向的层合材料的刚度矩阵:

$$\bar{Q} = TQT^T \quad (15)$$

通过转轴变换将复合材料每一层的各参量转换到以板簧轴向为参考的坐标系上, 极大地方便了后续的推理与计算。

### 2.4 温度对复合材料基体的影响

方程(10) 的  $N^{\Delta T}$  由基体材料热膨胀产生的力, 表述如下:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x^{\Delta T} \\ \sigma_y^{\Delta T} \\ \tau_{xy}^{\Delta T} \end{bmatrix} = \bar{Q} \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix} \Delta T = \bar{Q}(T^{-1})^T \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T \quad (16)$$

其中,  $\alpha_1, \alpha_2$  为基体材料的热膨胀系数。

### 3 利用瑞利-利兹法求解板簧的挠度

对于板簧, 其位移边界条件和力边界条件分别为:

$$\omega(0) = \omega(L) = 0; \frac{d^2\omega(0)}{dx^2} = \frac{d^2\omega(L)}{dx^2} = 0.$$

采用式(17) 表示其变形<sup>[9]</sup>

$$\omega = a_1 \sin \frac{\pi x}{L} + a_2 \sin \frac{2\pi x}{L} + \dots + a_N \sin \frac{N\pi x}{L} \quad (17)$$

其中,  $a_1, a_2, \dots, a_N$  为待定系数。显然, 式(17) 满足板簧的边界条件。

下面根据假定的位移函数计算板簧的总势能  $\Pi = U + V_1 + V_2$ 。

$$U = \int_0^L \frac{\bar{D}_{11}}{2} \left( \frac{d^2\omega}{dx^2} \right)^2 dx, V_1 = \int_0^L \frac{1}{2} (N^r - N^{\Delta T}) \left( \frac{d\omega}{dx} \right)^2 dx, V_2 = -P\omega \left( \frac{1}{2} \right) \quad (18)$$

其中,  $U$  为弯曲应变能,  $V_1$  为 SMA 回复力与基体材料热膨胀产生的势能<sup>[10-11]</sup>,  $V_2$  为 1/4 车体的重力产生的势能。

使  $\Pi$  为极小:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial a_1} = \frac{\partial \Pi}{\partial a_2} = \dots = \frac{\partial \Pi}{\partial a_N} = 0 \quad (19)$$

由此得出  $a_1, a_2, \dots, a_N$  的值, 可得板簧中间的挠度  $\omega$ , 然后利用公式  $K = P/\omega$  即可确定板簧的刚度。

## 4 计算结果及结论分析

### 4.1 基本参数

表 2 为 SMA 与基体材料的参数, 板簧结构尺寸如图 2 所示<sup>[12]</sup>, 总共铺设 20 层, 每层厚度 1 mm。其中上面等截面部分为 12 层, 下面变截面部分为 8 层, SMA 纤维复合材料沿板簧轴向铺设于等截面部分, 并且与石墨 / 环氧隔层铺设; 石墨 / 环氧基体以  $-\theta/\theta$  的方式铺设其余各层。如文献[12], 取 1/4 车体的重量产生的垂直力  $P = 1\,270\text{ N}$ 。

根据板簧形状在  $x$  方向的对称性, 取一半进行计算。对于式(18) 弯曲应变能  $U$  中  $\bar{D}_{11}$  的求解, 要用到式(8)、式(9), 其中式(9) 的  $h$  是随  $x$  而变化的, 如图 2 所示, 板簧厚度表达式为:

$$h(x) = \begin{cases} 12, & 0 < x < 100 \\ \frac{4x}{185} + \frac{364}{37}, & 100 \leq x \leq 470 \\ 20, & 470 < x < 510 \end{cases} \quad (20)$$

表 2 材料参数表

Tab. 2 The parameters table of materials

形状记忆合金(Nitinol)		石墨 / 环氧	
参数	取值	参数	取值
$E_A / \text{MPa}$	$6.7 \times 10^4$	$E_{1m} / \text{GPa}$	$2.5 \times 10^{-2}$
$E_M / \text{MPa}$	$2.63 \times 10^4$	$E_{2m} / \text{GPa}$	$1.0 \times 10^{-3}$
$\sigma_s^r / \text{MPa}$	100	$G_{12m} / \text{GPa}$	$0.5 \times 10^{-3}$
$\sigma_f^r / \text{MPa}$	170	$\nu_{21m}$	0.25
$\epsilon_L$	0.067	$\alpha_{1m} / ^\circ\text{C}^{-1}$	$2.0 \times 10^{-7}$
$\theta / (\text{MPa}/^\circ\text{C})$	0.55	$\alpha_{2m} / ^\circ\text{C}^{-1}$	$1.6 \times 10^{-5}$
$M_f / ^\circ\text{C}$	9		
$M_s / ^\circ\text{C}$	18.4		
$A_s / ^\circ\text{C}$	34.5		
$A_f / ^\circ\text{C}$	49		
$C_M / (\text{MPa}/^\circ\text{C})$	8.0		
$C_A / (\text{MPa}/^\circ\text{C})$	13.8		

### 4.2 板簧刚度随温度的变化规律

图 3 所示为  $V_s = 0.5, \theta = 45^\circ$ , 挠度方程取 1 项时, 板簧刚度随温度的变化曲线。由于  $T < A_s^\sigma$  和  $T > A_f^\sigma$  时 SMA 没有发生相变, 所以刚度随温度的变化不大, 如图中 OA, BC 段所示; 在奥氏体相变  $A_s^\sigma \leq T \leq A_f^\sigma$  和 马氏体相变  $M_f^\sigma \leq T \leq M_s^\sigma$  时, 回复应力随温度急剧变化, 相应地, 板簧刚度随温度的变化也非常大, 如图 3 中 AB 和 DO 所示。

为提高计算精度, 同时验证板簧刚度随式(17) 截取项数增加的收敛性, 在挠度表达式(17) 中, 取不同项数计算并进行比较, 结果如图 4 所示。由图 4 可知, 随着项数  $N$  的增大, 刚度 - 温度曲线之间越来越接近, 说明刚度 - 温度曲线随  $N$  的增加具有收敛性。为提高精度, 在后面的计算中取  $N = 7$ 。

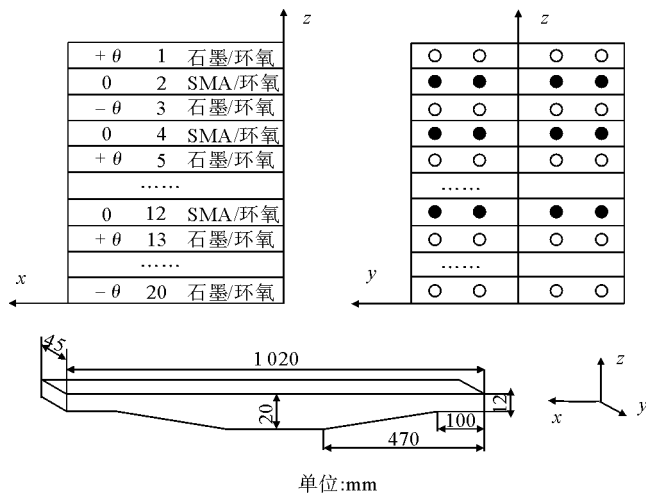


图 2 变截面板簧尺寸结构图

Fig. 2 The dimension structure of section-changed plate spring

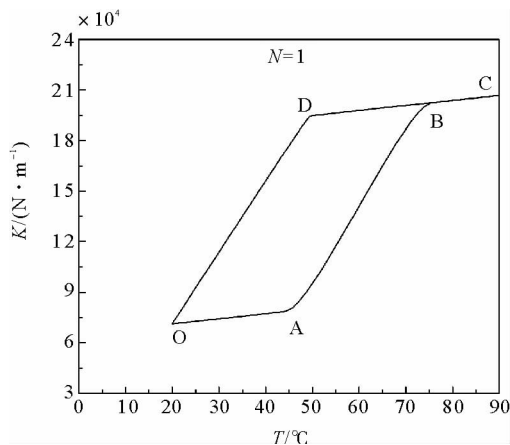


图 3 板簧刚度随温度的变化曲线(N = 1) 图

Fig. 3 The stiffness change of plate spring with temperature (N = 1)

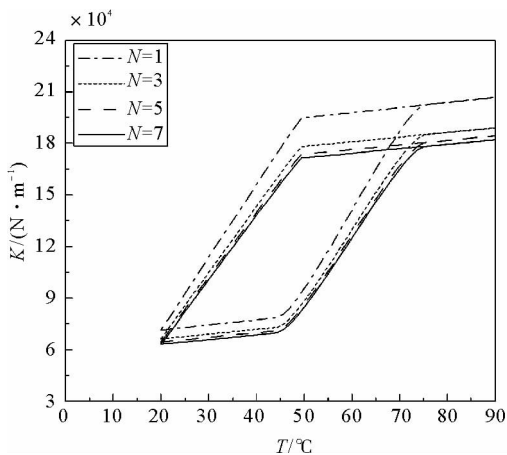


图 4 板簧刚度随温度的变化曲线图

(N 代表式(17) 中的项数)

Fig. 4 The stiffness change of plate spring with temperature

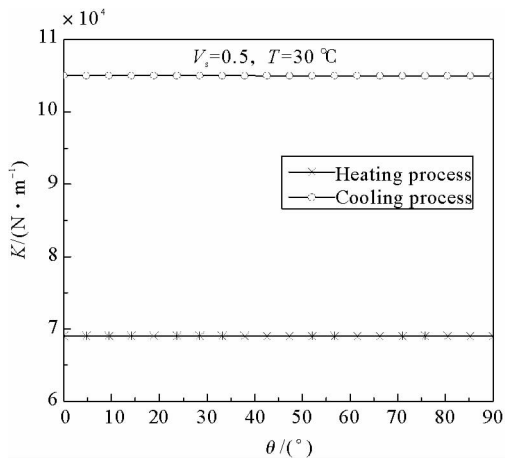


图 5 30°C 升温与降温过程的刚度随铺层角变化的曲线图

Fig. 5 The stiffness change with ply angle during heating and cooling processes at 30°C respectively

### 4.3 板簧刚度随铺层角的变化规律

图 5—图 7 表示 SMA 体积含量分数为 0.5, 温度分别为 30, 60, 80 °C 时, 升温过程与降温过程的刚度随角度变化的曲线。板簧刚度随基体材料铺层角在  $[0^\circ, 90^\circ]$  区间逐渐增大而减小。另外,  $T < A_f^\sigma$ , 同温同含量的情况下, 降温过程的刚度始终比升温过程的刚度大, 这是因为 SMA 的受限回复力在降温过程中比升温过

程大,如图 1 的 SMA 受限回复滞回曲线所示。

#### 4.4 板簧刚度随 SMA 含量的变化规律

图 8 表示铺层角为  $45^\circ$  时,不同的 SMA 体积含量情况下的刚度-温度关系曲线。分别取 SMA 含量为 0.1, 0.3, 0.5,可见 SMA 含量越大,板簧的刚度越高,板簧刚度随 SMA 含量有明显的变化。当 SMA 含量为 0.1 时,在升温过程  $T < 44.3^\circ\text{C}$  和  $T > 75.3^\circ\text{C}$ ,降温过程的  $T > 49.5^\circ\text{C}$  时,刚度随温度的变化很小,近似与温度轴平行,这是因为当 SMA 含量很小时,SMA 对板簧的“刚化”效应与基体材料本身的“软化”效应相抵消,从而导致刚度随温度变化不大。

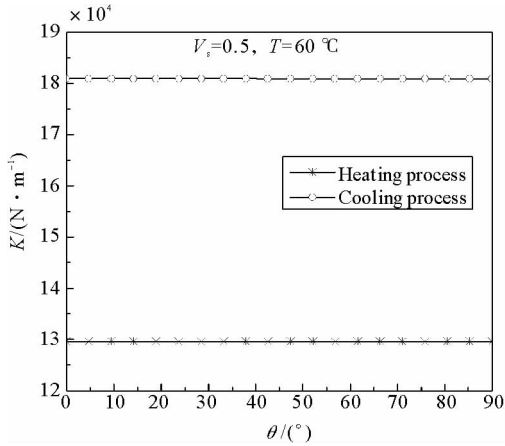


图 6 60°C 升温与降温过程的刚度随铺层角变化的曲线图

Fig. 6 The stiffness change with ply angle during heating and cooling processes at 60°C respectively

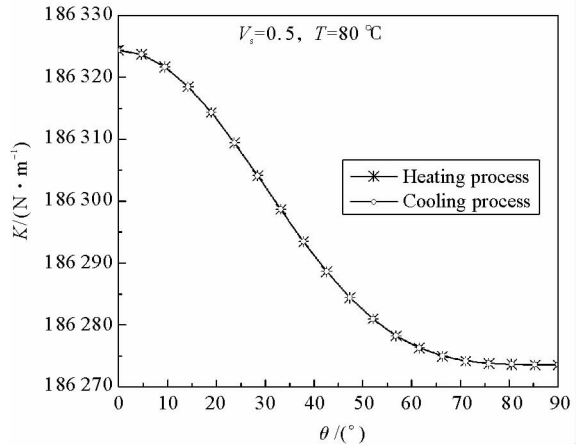


图 7 80°C 升温与降温过程的刚度随铺层角变化的曲线图

Fig. 7 The stiffness change with ply angle during heating and cooling processes at 80°C respectively

## 5 结论

基于 SMA 的完全受限回复本构理论,复合材料结构力学理论和瑞利-利兹能量法,建立了嵌入 SMA 纤维的复合材料变截面板簧的力学模型,通过数值计算得到了板簧刚度随温度的升高和降低的变化规律,以及给定温度下铺层方式和 SMA 纤维含量对板簧刚度的影响。分析结果表明,板簧的刚度在 SMA 相变过程中随温度的变化效果显著,这就为基于 SMA 智能复合材料板簧刚度调节的半主动悬架的研究与设计提供了理论依据。此外,改变 SMA 含量也会有效地影响板簧刚度,因此,SMA 纤维复合材料板簧的设计有多种途径可供选择。本文的理论分析结果对基于 SMA 智能材料的半主动悬架板簧的设计有一定的参考价值。需要特别说明的是,由于 SMA 升温 and 降温路径不一致,使得板簧的刚度特性随之出现迟滞循环效应<sup>[3]</sup>。由于板簧的升降温难以瞬间实现,所以发展新型的热传导技术是非常必要的。

#### 参考文献:

[1] 任勇生,周建鹏.汽车半主动悬架技术研究综述[J].振动与冲击,2006,25(3):162-165.

REN Yongsheng,ZHOU Jianpeng. Vehicle semi-active suspension techniques and its applications[J].Journal of Vibration and Shock,2006,25(3):162-165.

[2] 王洪礼,沈宇航,许佳,等.带有形状记忆合金弹簧的汽车半主动悬架随机振动的可靠性和最优控制[J].机械工程学报,2010,

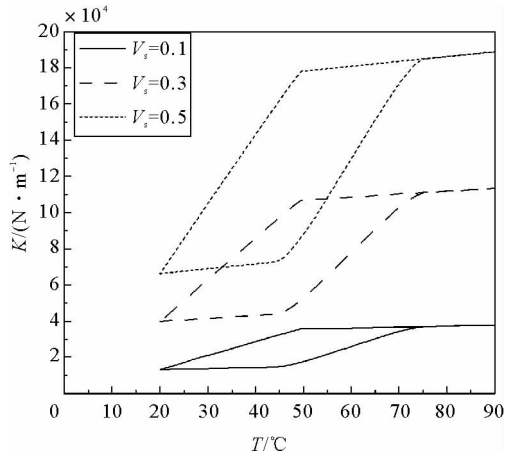


图 8 不同 SMA 含量的刚度-温度曲线对照图

Fig. 8 The contrast of stiffness-temperature curves with different SMA contents

46(12): 93-98.

WANG Hongli, SHEN Yuhang, XU Jia, et al. Reliability and control on vehicle stochastic vibration based on semi-active suspension system with shape memory alloy spring[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(12): 93-98.

[3] 李磊, 任勇生, 孙爱芹. 嵌入形状记忆合金的新型智能悬架[J]. 机电产品开发与创新, 2007, 20(1): 27-29.

LI Lei, REN Yongsheng, SUN Aiqin. New active suspension based on SMA material[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical products, 2007, 20(1): 27-29.

[4] 李磊, 任勇生, 孙爱芹, 等. SMA 纤维复合材料板簧刚度性能分析[J]. 机械设计与研究, 2008, 24(3): 57-61.

LI Lei, REN Yongsheng, SUN Aiqin, et al. Stiffness analysis of SMA fiber composite leaf spring[J]. Machine Design and Research, 2008, 24(3): 57-61.

[5] 任勇生, 王世文, 李俊宝, 等. 形状记忆合金在结构主被动振动控制中的应用[J]. 力学进展, 1999, 29(1): 19-33.

REN Yongsheng, WANG Shiwen, LI Junbao, et al. Shape memory alloy and its application in active and passive vibration control [J]. Advances in Mechanics, 1999, 29(1): 19-33.

[6] 付小华. 嵌入形状记忆合金丝复合材料梁热屈曲分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2003.

[7] 任勇生, 孙双双. 形状记忆合金纤维正交各向异性层和矩形板的非线性弯曲振动[J]. 复合材料学报, 2007, 24(4): 185-192.

REN Yongsheng, SUN Shuangshuang. Large amplitude flexural vibration of the orthotropic composite plate embedded with shape memory alloy fibers[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(4): 185-192.

[8] 陈烈民, 杨宝宁. 复合材料的力学分析[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2006.

[9] TAUCHERT T R. 结构力学能量原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 1984.

[10] RO J, BAZ A. Nitinol-reinforced plates: part III dynamic characteristics[J]. Composites Engineering, 1995, 2(1): 91-106.

[11] 付宝连. 弹性力学中的能量原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

[12] 薛元德, 徐咏梅. 复合材料板簧的有限元应力分析及其设计[J]. 同济大学学报, 1998, 26(4): 393-395.

XUE Yuande, XU Yongmei. Stress analysis and design study on composite leaf spring[J]. Journal of Tongji University, 1998, 26(4): 393-395.

## (上接第 91 页)

精密度水平“相同”, 证明了半微量开氏法测定固体生物质燃料中氮的准确性。

2) 半微量开氏法测定固体生物质燃料中氮含量的重复性限约 0.06%~0.07% (质量分数), 可满足测定固体生物质燃料中氮的需要。

3) 通过样品放置一定时间后重新测定, 证明了半微量开氏法测定固体生物质燃料中氮含量的结果复现性好, 稳定可靠。

## 参考文献:

[1] 李刚. 生物质气化过程中氮污染物形成机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.

[2] 韩奎华, 刘志超, 高攀, 等. 生物质再燃脱硝特性的试验研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(5): 570-574.

HAN Kuihua, LIU Zhichao, GAO Pan, et al. Experimental study on characteristics of nitrogen oxides reduction by biomass reburning [J]. Journal of Coal Society, 2008, 33(5): 570-574.

[3] 任强强, 赵长遂, 梁财, 等. 麦秆热解过程中氮迁移特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(23): 99-104. REN Qiangqiang, ZHAO Changsui, LIANG Cai, et al. Experimental research on formation behavior of fuel-nitrogen during wheat straw pyrolysis[J]. Proceeding of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2008, 28(23): 99-104.

[4] Comité Européen de Normalisation. CEN/TS 15104:2005, Solid biofuels- Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen-Instrumental methods[S].

[5] 中华人民共和国国家标准. GB/T 19227—2008, 煤中氮的测定方法[S].

[6] International Organization for Standardization. ISO333:1996, Coal-Determination of nitrogen-Semi-micro Kjeldahl method[S].

[7] International Organization for Standardization. ISO/TS 11725:2002, Solid mineral fuels-Determination of nitrogen-Semi-micro gasification[S].

[8] International Organization for Standardization. ISO/TS 12902:2001, Solid mineral fuels-Determination of total carbon, hydrogen and nitrogen-Instrumental methods[S].