

文章编号 1004-924X(2012)10-2161-09

基于 NiTi 合金丝的反射镜柔性支撑结构的应力补偿

曹乃亮*, 徐 宏, 辛宏伟, 袁 野, 李志来, 杨会生

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:针对大口径反射镜柔性支撑结构中柔性槽根部的应力集中问题,提出将 NiTi 记忆合金丝复合于柔性槽周边的结构方案,借助其预应变产生的拉应力来降低柔性槽根部的应力并保证支撑结构柔性。首先,建立了柔性槽根部的应力分布方程,得出了柔性槽危险截面位置。然后,建立了 NiTi 合金丝的一维本构方程,设计了桥型和 U 型两种复合方案,并对其进行了有限元分析。结果表明,采用 U 型复合的柔性支撑结构的应力改善明显优于桥型复合结构,且对结构柔性影响较小。以 NiTi 合金丝的拉力 F 为设计变量,以支撑结构的最大应力 p 及变形量 δ 为优化目标,对 U 型复合结构进行了参数优化设计。优化结果表明,在 F 为 200 N 时有最优解, p 由 76 MPa 降到 37.9 MPa, δ 由 0.031 mm 微降到 0.028 mm,并且最大应力位置偏离柔性槽根部危险区域。对所提出的 U 型复合方案进行了随机振动试验,试验结果表明,该应力补偿设计有效降低了柔性支撑结构的最大应力。

关键词:大口径反射镜;柔性支撑;应力集中;记忆合金;应力补偿

中图分类号:TH751;TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122010.2161

Stress compensation of flexible supporting structures for mirrors using NiTi shape memory alloy

CAO Nai-liang*, XU Hong, XIN Hong-wei, YUAN Ye, LI Zhi-lai, YANG Hui-sheng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: caonailiang@hotmail.com

Abstract: For the stress concentration regularly occurred in the flexible supporting structures for large-aperture mirrors, a new method that composed the NiTi Shape Memory Alloy (SMA) around the flexible slots of the supporting structures was proposed, by which the tensile stress caused by pre-strain of the SMA can reduce the stress concentration greatly without decreasing the flexibility of the structure. Firstly, the stress distribution equation for the flexible supporting structure was established, and the dangerous cross-sections were analyzed. Then, the one-dimensional constitutive equation of the NiTi alloy wires was derived, and two composition schemes, cross-type layout and U-type layout, were designed accordingly. The finite element analysis was applied to the two schemes, and the results show that the U-type composition is superior to the cross-type one in both peak stress and structural flexibility. A parameterized optimization was applied to the U-type layout by taking the ten-

收稿日期:2012-05-10;修订日期:2012-06-15.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA7020107)

sion F of NiTi alloy wires as design variable and the maximum stress p and the distortion δ as optimization objectives. The results demonstrate that the optimum solution is obtained when F is 200 N, which shows that the p is reduced from 76.0 MPa to 37.9 MPa while δ from 0.031 mm to 0.028 mm slightly, and the maximum stress occurs away from the flexible slots. Random vibration tests were conducted for the U-type composition scheme, and the results verify the effectiveness of this method for the stress compensation.

Key words: large aperture mirror; flexible supporting; stress concentration; Shape Memory Alloy (SMA); stress compensation

1 引言

随着现代航空、航天等领域向高速重载方向发展,解决结构的振动破坏问题成为确保结构安全性和可靠性的重要条件,设计具有感应控制能力的自适应结构于是成为一个新的研究领域^[1]。以形状记忆合金为基础的材料变形主动控制是近年来该领域的研究热点之一。

在材料的变形主动控制方面,国内外普遍采用记忆合金来进行应力补偿。王晓宏等制作了形状记忆合金驱动主动变形波纹板结构,分析了不同温度下波纹板结构的变形相应曲线^[2];Rogers等将形状记忆合金埋入复合材料中,利用其记忆特性对基体的应力、应变特性进行调整^[3];Paine等将 NiTi 记忆合金丝缠绕在压力容器外面,利用其预应变产生的拉应力缓解容器壁承受的内压力^[4];Thamburagia 等分析了 NiTi 记忆合金的超弹性行为,给出其在静力载荷作用下的一些基本力学特性^[5];左晓宝等对超弹性记忆合金丝力学性能进行了实验研究^[6]。

空间光学遥感器正向着长焦距、大口径的方向发展,为了增强大口径反射镜的空间环境适应性,确保成像质量,一般采用柔性支撑结构,而其柔性槽根部的应力集中一直是困扰结构设计人员的主要问题。Cohen 等分析了钱德拉 X 射线望远镜反射镜的支撑问题,每片镜子采用 12 个钛合金柔性支撑结构^[7];欧洲航空航天局正在研制的超新星加速探测望远镜(SuperNova/Acceleration Probe Telescope, SNAP)的主镜采用了在支杆端部开柔性槽的支撑结构,并分析了其应力分布^[8];李琳等设计了一种空间曲线切口式柔性铰链支撑结构,推导了该柔性铰链的一般计算公式,分析了设计参数对柔度的影响,并用有限元法进行了强

度校核^[9];YAN Yong 等分析了柔节的柔度过大导致结构破坏,以及柔度过小导致在温度梯度下的面形误差过大的原因,并设计了一种柔性结构^[10];Richard 等将钛合金柔性支撑用在空间红外望远镜 SIRTf1 m 主镜的支撑上,使它具有良好的温度载荷适应性,可抵抗恶劣的发射环境,装配公差有更好的适应性^[11];John 等建立了开普勒望远镜主镜组件的有限元模型,并分析了其柔性支撑结构的应力分布^[12]。

以上研究主要针对柔性支撑的柔度设计、应力分析等的研究,关于柔性支撑应力补偿的研究较少。本文针对某大口径反射镜的柔性支撑结构,探讨了一种 NiTi 合金丝复合于柔性槽周边的应力补偿方案,借助记忆合金的形状记忆特性来进行应力集中的主动控制。

2 记忆合金的机理

金属中的形状记忆效应是由于合金中热弹性或应力诱发的马氏体和奥氏体的相互转变,如图 1 所示。当奥氏体冷却到马氏体转变开始温度 M_s 以下时,转变为孪晶马氏体,每片马氏体的形成都在其周围的基体中造成一定方向应力场,同时产生的另一个马氏体片体将绕过该方向,沿阻力最小的方向生长,因此,宏观上看其总应变能为零,这即为马氏体相变的自适应现象。在单向外力作用下,马氏体沿外力方向进行再取向,造成其择优取向,表现为明显的变形,在对其加热到奥氏体转变温度 A_s 以上时,会形成几个奥氏体相的原来位向,当奥氏体相为长程有序时,奥氏体形成的趋势将沿奥氏体原来位相的方向发展,宏观变形也就完全回复。

NiTi 合金是一种应用最广泛的记忆合金,对该金属在马氏体状态下进行一定限度的变形后,

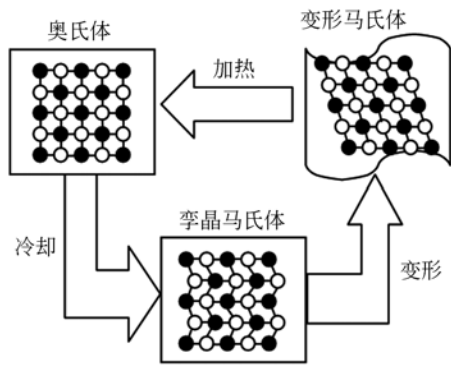


图 1 形状记忆效应的微观机理

Fig. 1 Microscopic mechanism of shape memory alloy

在随后的加热并超过马氏体的消失温度时,材料能完全恢复到变形前的形状,其可恢复量达 7%~8%。

3 柔性支撑结构的应力分析

柔节是柔性支撑结构的关键环节,如图 2 所示。圆柱筒的半径为 R ,在圆柱筒的不同高度,分别开了相互垂直的 4 个柔性槽,柔性槽根部为 $r = 1 \text{ mm}$ 的圆弧,柔性槽的宽度为 1 mm ,相同高度上左右对称的两个柔性槽间距为 7 mm ,下端固定,上平面施加 $F = 240 \text{ N}$ 的均匀拉力。该结构使得柔性槽处应力较大,因此下面只针对柔性槽的应力分布进行分析。

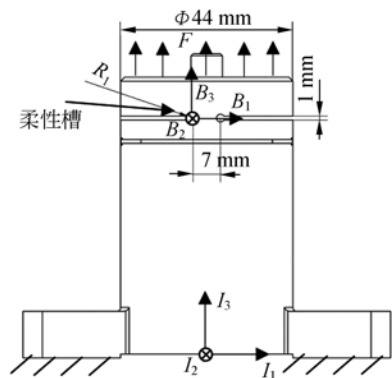


图 2 柔节示意图

Fig. 2 Flexible supporting structure

建立柔节笛卡尔坐标系 $I(I_1, I_2, I_3)$,柔性槽局部坐标系 $B(B_1, B_2, B_3)$,如图 2 所示,局部坐标系到笛卡尔坐标系的坐标变换为: $(B_1, B_2, B_3) \rightarrow (B_1 - 3.5, B_2, B_3 + 61.5)$ 。对于柔性槽上的一

点 $B_i = (r \cos \theta, y, r \sin \theta)$, $(\theta \in (-90^\circ, 90^\circ))$ 变换到笛卡尔坐标系为:

$$I_{B_i} = (r \cos \theta - 3.5, y, r \sin \theta + 61.5), (\theta \in (-90^\circ, 90^\circ)), \quad (1)$$

因为 $(r \cos \theta - 3.5)^2 + y^2 = R^2$, $y = \sqrt{R^2 - (r \cos \theta - 3.5)^2}$, 带入式(1)得:

$$I_{B_i} = (r \cos \theta - 3.5, \sqrt{R^2 - (r \cos \theta - 3.5)^2}, r \sin \theta + 61.5), (\theta \in (-90^\circ, 90^\circ)). \quad (2)$$

从柔性槽圆心依次引出一系列线,与柔性槽的交点记为: B_1, B_2, \dots, B_i ,如图 3 所示,过点 B_i 的圆柱周向长度 L 为:

$$L = 2\pi R \times 2(270 - \beta) / 360, \quad (3)$$

因为 $r \cos \theta - 3.5 = R \cos \beta$, $(\beta \in (180^\circ, 360^\circ))$, 即:

$$\beta = \arccos \left\{ \frac{r \cos \theta - 3.5}{R} \right\}, (\beta \in (180^\circ, 360^\circ)). \quad (4)$$

把作用在 B_i 点的力分解为沿 I_3 方向的拉力 F ,在平面 $I_1 I_3$ 弯矩,沿 I_1 轴的扭矩 M_{I_1} 。沿 I_3 方向的拉应力为:

$$\sigma_i = \frac{F}{L \Delta d}, \quad (5)$$

其中 Δd 为圆柱筒壁厚。

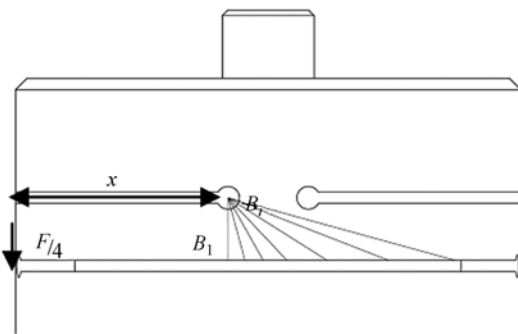


图 3 柔性槽示意图

Fig. 3 Slot of flexible supporting structure

为了得到柔性槽根部的应力分布,对该结构进行以下等效:

(1) 柔性槽等效为受弯扭组合作用的梁结构,如图 4 所示,其横截面为矩形;

(2) 载荷可以等效为沿圆柱旋转 90° 后沿 I_3 方向的力,大小为 $F/4$,施加到如图 4 所示位置;

(3) 柔性槽 B_i 位置等效为悬臂梁的固定端。沿 I_1 轴的扭矩:

$$M_{I_1} = F l_y / 4, \quad (6)$$

其中 $l_y = R - \Delta d / 2$ 。

这里直接引用弹性力学的一些结果,矩形截

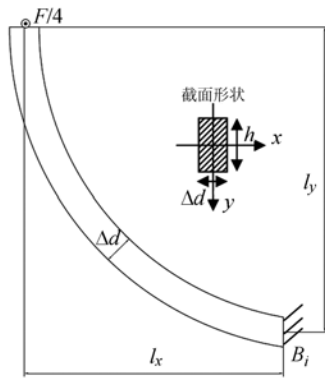


图 4 柔性槽等效截面图

Fig. 4 Equivalent section of slot in flexible supporting structure

面最大扭转切应力发生在矩形长边的中点,为:

$$\tau_{\max} = \frac{M_{I_1}}{\alpha h \Delta d^2}, \quad (7)$$

其中: α 是与比值 $h/\Delta d$ 有关的系数,本文取 $\alpha = 0.282$ 。

$$\sigma_{r_3} = \sqrt{\sigma_{\max}^2 + 4\tau_{\max}^2} = \sqrt{\left[\frac{3F(R - \Delta d/2 + (r \cos \theta - 3.5))}{2\Delta d(r \sin \theta + 5.5)^2} \right]^2 + 4 \left[\frac{F \left(R - \frac{\Delta d}{2} \right)}{4\alpha(r \sin \theta + 5.5)\Delta d^2} \right]^2} \leq [\sigma], \quad (12)$$

若 $F, R, \Delta d, r$ 已知,则 σ_{r_3} 为自变量 θ 的单值函数。通过计算可知,当 $\theta = -90^\circ$ 时, σ_{r_3} 有最大值。

在柔性槽根部圆弧上,拉应力为沿圆弧的切向,此处的应力集中,会导致微裂纹在交变载荷的作用下沿薄弱环节扩大,最终导致疲劳断裂。理论分析可知,在弯扭组合作用下,切应力沿圆弧径向,剪切断裂将在最短的路径发生,即图 3 所示 B_1 点对应的线。因此沿圆弧切向的拉应力导致裂纹的形成和扩大,而沿圆弧径向的切应力使裂纹的扩大进一步加剧,最终导致断裂。

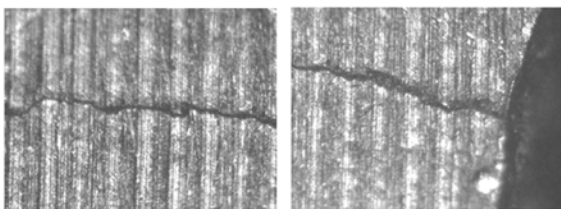


图 5 柔性槽根部断裂显微结构

Fig. 5 Fracture structure of flexible supporting structure at microscope

在 B_1 点处的截面尺寸 $h = r \sin \theta + 5.5$, 带入式(7)得:

$$\tau_{\max} = \frac{M_{I_1}}{\alpha h \Delta d^2} = \frac{F \left(R - \frac{\Delta d}{2} \right)}{4\alpha(r \sin \theta + 5.5)\Delta d^2}. \quad (8)$$

在平面 $I_1 I_3$ 弯矩为:

$$M_{I_1 I_3} = Fl_x/4, \quad (9)$$

其中: $l_x = R - \Delta d/2 + (r \cos \theta - 3.5)$ 。

矩形截面的中性轴为 x 轴, 因此:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{I_1 I_3} h/2}{I_x} = \frac{Fl_x/4h}{2\Delta d h^2/12} = \frac{3Fl_x}{2\Delta d h^2}. \quad (10)$$

同理,将 $h = r \sin \theta + 5.5$ 代入式(10),得:

$$\sigma_{\max} = \frac{3F(R - \Delta d/2 + (r \cos \theta - 3.5))}{2\Delta d(r \sin \theta + 5.5)^2}. \quad (11)$$

最大弯曲应力发生在短边的中间,与最大扭转应力位置重合,即图 3 所示的 B_1 位置为危险点,只要对该点进行校核即可。

按第三强度理论,强度条件为: $\sigma_{r_3} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \leq [\sigma]$, 所以有:

在某次试验中,该反射镜组件在随机振动条件下柔性槽根部发生断裂,在 100X 显微镜下观察其断裂特性如图 5 所示。由纹理特性可知,断裂形态为剪切断裂。

4 NiTi 合金丝复合于钛合金柔节

4.1 NiTi 合金丝在提高柔节性能方面的作用

将预应变 NiTi 合金丝复合于柔节(一般采用拉伸方式进行预应变),对 NiTi 合金丝进行通电加热(或者在低于使用温度的条件下进行预应变,然后在工作温度下使用),当温度高于 A_s 时,在无约束状态下, NiTi 合金丝恢复到原来长度,由于受到基体材料的限制, NiTi 合金丝将产生一个回复应力,从而在材料内部形成压应力,使得材料的拉伸性能提高,从而使材料内部微裂纹减小或闭合。柔节的柔性槽根部有较大的应力集中,该处的微裂纹在正弦或随机振动条件下不断扩大,最终导致断裂。因此 NiTi 合金丝复合于柔节,可有效提高其拉伸强度和可靠性。

NiTi 合金丝提高柔节的冲击韧性。将 NiTi 合金丝复合于柔性槽周边,当超过 NiTi 合金马氏体相变临界应力时,首先发生应力诱发 P→M 相变而吸收能量,提高了冲击韧性。

4.2 NiTi 合金丝材料参数

NiTi 合金丝的镍成分每增加 0.1%,可使相变温度降低 12 °C,由于空间反射镜的工作温度为 (20±2) °C,因此合理调整 NiTi 合金丝的成分,

使其相变温度为 12 °C,从而保证在工作温度下, NiTi 合金丝全部为奥氏体相。

NiTi 合金丝的可恢复应变量为 8%,考虑到可靠性要求,在 0 °C 条件下,对直径为 1 mm,长度为 40 mm 的 NiTi 合金丝进行 2% 的拉伸,对于受限约束,在 (20±2) °C 的工作温度下,该 NiTi 合金丝产生 (200±22) N 的拉力。本文使用的 NiTi 合金丝的材料参数如表 1 所示。

表 1 NiTi 合金丝的材料参数

Tab. 1 Parameters of NiTi alloy thread

E_{sa}/GPa	E_{sm}/GPa	$\alpha_s/10^{-6}$	$\epsilon_t/\%$	$M_f/^\circ\text{C}$	$M_s/^\circ\text{C}$	$A_s/^\circ\text{C}$	$A_f/^\circ\text{C}$	$C_M/(\text{MPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	$C_A/(\text{MPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$
67.0	26.3	8.2	6.7	9.0	18.4	34.5	49	8.0	13.8

注: E_{sa} , E_{sm} 分别为在纯奥氏体和纯马氏体下的弹性模量, α_s 为单向应力下的热胀系数, ϵ_t 为应变率, M_f , M_s 分别为马氏体的初始、结束相变温度, A_s , A_f 分别为奥氏体的初始、结束相变温度, C_M , C_A 分别表示马氏体向奥氏体和奥氏体向马氏体转变时的应力与温度的等效转换系数

4.3 NiTi 合金丝铺层设计

采用焊接方式,将 NiTi 合金丝复合于柔性槽周边,如图 6 所示。对柔节进行有限元分析,其最大应力发生在柔性槽的根部。因此在此处进行 NiTi 合金丝的铺层设计,共设计了两种结构方案:

方案一: NiTi 合金丝为 U 型结构,合金丝的走向沿 U 型进行,如图 6(a) 所示。

方案二: NiTi 合金丝为桥型结构,合金丝的走向跨槽进行,如图 6(b) 所示。



(a) U 型铺层

(b) 桥型铺层

(a) U-type layout

(b) Cross-type layout

图 6 两种 NiTi 合金丝与柔性支撑结构的复合方式

Fig. 6 Two ways to deploy NiTi alloy thread on surface of flexible supporting structure

4.4 NiTi 合金丝的本构方程

NiTi 合金丝的本构方程是仿真分析的基础。NiTi 合金丝的马氏体相变一维本构关系可以表示为:

$$\dot{\sigma} = E\dot{\epsilon} + \theta\dot{T} + \Omega\dot{\zeta}, \quad (13)$$

其中: $\dot{\sigma}$, $\dot{\epsilon}$ 分别为 NiTi 合金丝的应力、应变对时间的导数; \dot{T} 为温度对时间的导数; $\dot{\zeta}$ 为马氏体含量对时间的导数; E 为弹性模量, θ 为热弹性系数, Ω 为相变系数。

$$E(\zeta) = \frac{E_{sa} - E_{sm}}{2} [\cos(\zeta\pi) + 1] + E_{sm}. \quad (14)$$

在应力作用下,马氏体相变过程的马氏体含量 ζ 与 T , σ 有关,奥氏体向马氏体转变 (P→M) 过程中, ζ - T - σ 关系为:

$$\zeta = \frac{1 - \zeta_A}{2} \cos[a_M(T - M_f) + b_M\sigma] + \frac{1 + \zeta_A}{2}. \quad (15)$$

马氏体向奥氏体转变 (M→P) 过程中, ζ - T - σ 关系为:

$$\zeta = \frac{\zeta_M}{2} \{ \cos[a_A(T - A_s) + b_A\sigma] + 1 \}, \quad (16)$$

其中: ζ_A , ζ_M 分别为在 T_A 和 T_M 温度下马氏体的含量。

$$a_A = \pi / (A_f - A_s), \quad (17)$$

$$a_M = \pi / (M_s - M_f), \quad (18)$$

$$b_A = -a_A / C_A, \quad (19)$$

$$b_M = a_M / C_M. \quad (20)$$

将式(13)积分可得:

$$\bar{\sigma} - \bar{\sigma}_0 = E(\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_0) + \theta(T - T_0) + \Omega(\zeta - \zeta_0). \quad (21)$$

对 NiTi 合金丝本构关系的应用分 3 种情况: 自由回复、受限回复、控制回复。本文中 NiTi 合金丝与基体紧密结合,因此属于受限回复。对于受限回复,应变没有变化,上式变为:

$$\bar{\sigma} - \bar{\sigma}_0 = \theta(T - T_0) + \Omega(\zeta - \zeta_0), \quad (22)$$

由式(16)和(22)可得受限约束的本构方程为:

$$\bar{\sigma} - \bar{\sigma}_s = \theta(T - A_s^m) + \frac{\Omega\zeta_M}{2} \{ \cos[a_A(T - A_s) + b_A\sigma] - 1 \}, \quad (23)$$

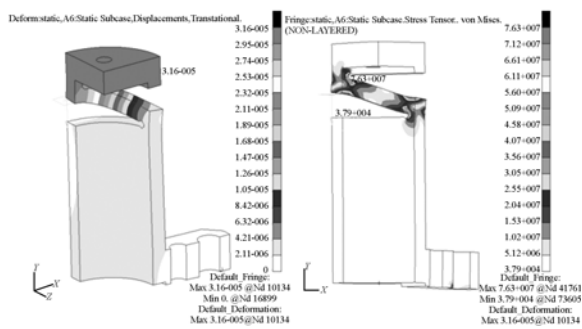
其中： $A_s^m = \frac{C_A A_s - \theta T_M}{C_A - \theta}$, $\sigma_s^r = \theta(A_s^m - T_M)$ 。

5 仿真分析

利用上节中建立的 NiTi 合金丝一维本构模型进行仿真分析。

5.1 未采用该结构之前

柔节材料选用钛合金,施加静态拉应力(240 N)后,柔节的最大变形量为:0.031 mm;最大应力出现在柔性槽根部,为 76.0 MPa,如图 7 所示。



(a) 变形图 (b) 应力图

(a) Deformation graph (b) Stress graph

图 7 柔节的应力变形图

Fig. 7 Deformation and stress of flexible supporting structure

对其进行模态分析,一阶频率为 589.1 Hz。分析频率响应结果,重点关注柔性槽周边节点的变形量与频率的关系可知,由于柔节的一阶频率,二阶频率振型与载荷施加方向不同,三阶频率振

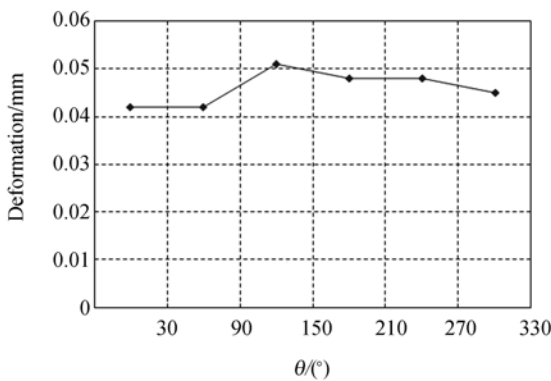


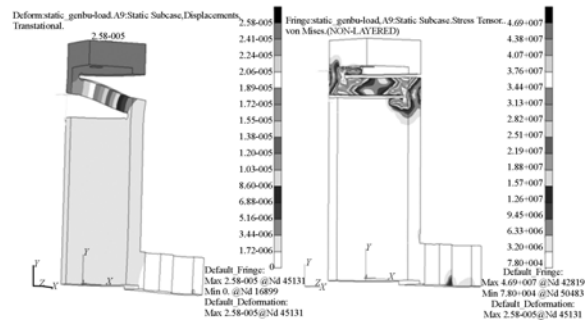
图 8 三阶频率处柔性槽周向变形分布曲线

Fig. 8 Deformation distribution around slot at third-order natural frequency

型与载荷方向吻合,在三阶频率(1 801 Hz)处,柔性槽周向变形量分布如图 8 所示,峰值为 0.051 mm。

5.2 U 型结构仿真分析

将 NiTi 合金丝复合于柔节,在原有载荷的基础上,在柔节根部周边施加 U 型压应力,如图 9 所示,其最大变形量为 0.026 mm,与 U 型载荷施加前的 0.031 mm 变化不大,保证了适当的柔性;最大应力为 46.9 MPa,远离柔性槽位置且该应力为压应力,有效提高了柔节的可靠性。相同位置的最大应力降为 39.4 MPa。



(a) 变形图 (b) 应力图

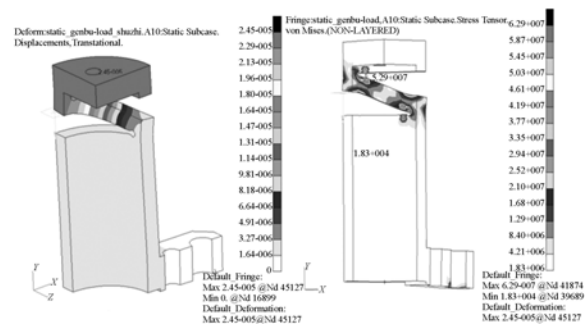
(a) Deformation graph (b) Stress graph

图 9 U 型结构应力变形图

Fig. 9 Deformation and stress of U-type layout

5.3 桥型结构仿真分析

在原有载荷的基础上,在柔性槽处施加桥型压应力,如图 10 所示,其最大变形量为 0.025 mm,与桥型载荷施加前的 0.031 mm 变化不大,保证了适当的柔性;最大应力为 62.9 MPa,远离柔性槽位置。相同位置的最大应力降为 56.8 MPa。



(a) 变形图 (b) 应力图

(a) Deformation graph (b) Stress graph

图 10 桥型结构应力应变形图

Fig. 10 Deformation and stress of cross-type layout

5.4 施加静态压应力仿真分析

施加静态压应力 240 N 后,柔节的最大变形量为 0.031 mm。本文选用的钛合金的压缩屈服强度为 969 MPa,拉伸屈服强度为 802 MPa。在振动条件下,柔节的受力是双向的,这时柔性槽根部的应力是同向的压力和预应力的叠加,对其进行复核计算,得到最大压应力为 65.8 MPa,小于材料的屈服强度,因此不会引起材料本身的塑性变形。

5.5 结果分析

分析对比结果如表 2 所示,两种方案对结构的一阶频率影响不大,从最大 Mises 应力的降低量、对结构柔性影响较小两方面,U 型结构都要优于桥型结构,因此采用方案一。

表 2 三种方法的结果比较

Tab. 2 Comparison of three structures

	最大 Mises 应力/MPa	最大变形 量/mm	一阶频率 /Hz
贴片前	76.0	0.031	589.1
U 型结构	39.4	0.026	592.6
桥型结构	56.8	0.025	593.4

5.6 优化设计

以 NiTi 合金丝的拉力 F 为变量,支撑结构的最大应力 P ,变形量 δ 为优化目标,对 U 型结构进行参数优化设计,如图 11 所示。分析表明,在 F 为 200 N 下有最优解, P 由 76.0 MPa 降到 37.9 MPa, δ 由 0.031 mm 微降到 0.028 mm,变化量为 9.7%,符合温度载荷对结构柔性的要求,并且最大应力位置偏离柔性槽根部危险区域。

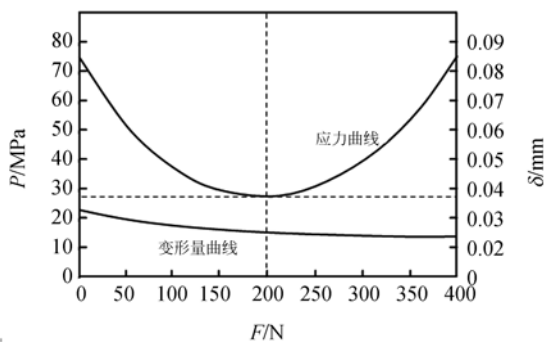


图 11 拉力 F 与最大应力和变形量关系

Fig. 11 Curves of maximum stress and deformation with respect to force

5.7 力学解释

最大 von Mises 应力准则也称抗剪能量理论,设主应力为 σ_1, σ_2 和 σ_3 ,则最大 von Mises 应力可表示为:

$$\sigma_{\text{vonMises}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (24)$$

该理论表示,当 von Mises 应力等于应力极限时,延性材料开始屈服。取沿柔性槽根部圆弧切向力为 σ_1 ,即式(11)所示的 σ_{max} ,沿圆弧的径向力为 σ_2 ,由右手定则确定 σ_3 方向,近似取 $\sigma_2 = 0, \sigma_3 = 0$,整理上式得:

$$\sigma_{\text{vonMises}} = \sigma_{\text{max}} \quad (25)$$

设 NiTi 合金丝的拉应力为 σ_{NiTi} ,则残余 von Mises 应力为:

$$\sigma'_{\text{vonMises}} = \sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{NiTi}} \quad (26)$$

由该式可以得出,在 NiTi 合金丝附近区域,由于 σ_{NiTi} 的存在,残余 von Mises 应力降低,从而解释了 NiTi 合金丝的柔节应力补偿机理。

6 试验验证

为了验证该应力补偿设计和仿真分析的正确性,进行了试验验证,试验装置如图 12 所示。

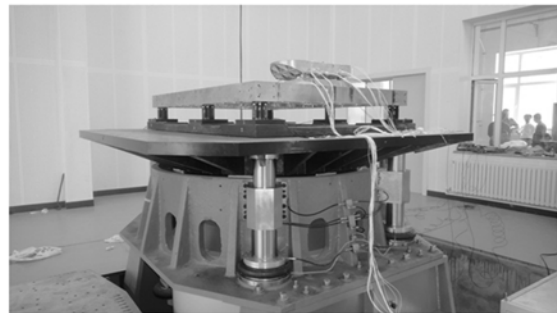


图 12 柔性支撑结构振动试验装置

Fig. 12 Photograph of vibration test of flexible supporting structure

大载荷随机振动试验的试验条件如表 3 所示,反射镜采用模拟件,为背部 3 点柔性支撑,其中两个柔节采用复合记忆合金的结构形式,另一个不用。经 3 次随机振动试验后,没有采用复合记忆合金形式的柔节在柔性槽根部发生断裂,从而验证了该柔节应力补偿设计的有效性。

表 3 随机振动试验条件

Tab. 3 Test conditions of random vibration

频率/Hz	功率谱密度/($g^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$)
20~190	+3 dB/oct
190~500	0.038
500~750	0.029
750~2 000	-9 dB/oct
总均方根加速度	5.7 g
时间	120 s

7 结 论

通过建立柔性槽的应力分布方程,确定了柔

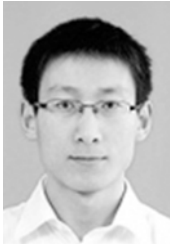
性槽危险截面位置,采用预应变 NiTi 合金丝复合于柔性槽周边的方案,设计了 U 型和桥型两种复合方案,建立了 NiTi 合金丝的一维本构方程。仿真分析结果表明,采用 U 型复合的柔性支撑结构的应力改善明显优于桥型复合结构,且对结构柔性影响较小。对 U 型复合结构进行参数优化设计,优化结果表明,在 F 为 200 N 时有最优解, P 由 76 MPa 降到 37.9 MPa, δ 由 0.031 mm 微降到 0.028 mm,并且最大应力位置偏离柔性槽根部危险区域。这种应力补偿设计满足了在确保支撑机构柔性的基础上,降低应力集中的要求。

参考文献:

- [1] 王振清,王永军,周博. 形状记忆合金复合梁的振动特性[J]. 哈尔滨工程大学学报,2011,32(4):434-438.
WANG ZH Q,WANG Y J,ZHOU B. Study on the vibration properties of a shape memory alloy composite beam [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2011,32(4):434-438. (in Chinese)
- [2] 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 X H,ZHANG B M,DU SH Y, *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)
- [3] ROGERS C A. Structural modification of simple-support laminated plates using embedded shape memory alloy fibers [J]. *Computer & structure*, 1991, 38:569-580.
- [4] JEFFREY S N PAINE, ROGERS C A, SMITH R A. Adaptive composite materials with shape memory alloy actuators for cylinder and pressure vessels [J]. *SPIE*,1994,2190:390-401.
- [5] THAMBURAGA P, ANAND L. Super elastic behavior in tension torsion of an initially textured Ni-Ti shape memory alloy [J]. *International Journal of Plasticity*, 2002, 18:1607-1617.
- [6] 左晓宝,李爱群,倪立峰. 超弹性记忆合金丝(NiTi)力学性能的实验研究[J]. 土木工程学报,2000,37(12):10-16.
ZUO X B, LI A Q, NI L F. An experimental study on the mechanical behavior of superelastic NiTi shape memory alloy wires [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2000,37(12):10-16. (in Chinese)
- [7] COHEN L M, CERNOCK L, MATHEWS G, *et al.* Structural considerations for fabrication and mounting of the AXAF HRMA optics [J]. *SPIE*, 1990,1303:162.
- [8] SHOLL M, LAMPTON M, ALDERING G, *et al.* SNAP telescope [J]. *SPIE*, 2004, 5487: 1473-1483.
- [9] 李琳,杨勇. 空间曲线切口式柔性铰的设计[J]. 光学精密工程,2010,18(10):2192-2198.
LI L, YANG Y. Design of flexure hinges with space curve notches [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(10):2192-2198. (in Chinese)
- [10] YAN Y, JIN G G, YANG H B. Design and analysis of large spaceborne light-weighted primary mirror and its support system [J]. *SPIE*,2007,6721: 67210V-1-67210V-7.

- [11] RICHARD R M, VUKOBRATOVICH D, CHO M, *et al.*. The flexure assembly design for the SIRTf one-meter primary mirror [C]. *Conference on Cryogenic Optical Systems and Instruments III in Conjunction with SPIE's 32. Annual International Technical Symposium on Optical and Opto-electronic Applied Science and Engineering*, 1989:79-85.
- [12] ZINN J W, JONES G W. Kepler primary mirror assembly; FEA surface figure analyses and comparison to metrology [J]. *SPIE*, 2007, 6721: 667105-1-667105-11.

作者简介:



曹乃亮(1984—),男,山东泰安人,研究实习员,2007年于山东大学获得学士学位,2010年于浙江大学获得硕士学位,主要从事空间光学遥感器的结构设计。E-mail: caonailiang@hotmail.com



袁野(1984—),男,吉林长春人,硕士,研究实习员,2007年、2010年于北京航空航天大学分别获得学士、硕士学位,主要从事空间光学遥感器结构设计方面的研究。E-mail: yuanye080888@163.com



徐宏(1961—),女,吉林长春人,高级工程师,1983年于长春光学精密机械学院(现长春理工大学)获得学士学位,主要从事空间光学遥感器结构方面的研究。E-mail: xuhongciomp@sohu.com



李志来(1965—),男,吉林镇赉人,研究员,1986年于吉林工学院获得学士学位,主要从事空间光学遥感器结构技术及精密机械方面的研究。E-mail: lizl2004@sohu.com



辛宏伟(1970—),男,吉林长春人,研究员,硕士生导师,2003年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事空间相机光机结构的研究。E-mail: xinhwciomp@sina.com



杨会生(1982—),男,河北献县人,硕士,助理研究员,2007年、2009年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事空间光学遥感器光机结构及精密机械等方面的研究。E-mail: yanghuisheng@126.com