

文章编号: 1001-4888(2009)06-0525-07

TiNi 相变圆柱壳的径向压缩特性实验研究^{*}

张会杰, 唐志平, 李丹

(中国科学技术大学 中科院材料力学行为和设计重点实验室, 合肥 230027)

摘要: 对不同几何尺寸和边界约束条件的 TiNi 合金圆柱壳进行了准静态径向压缩实验研究, 利用数字摄像和图像处理技术得到了不同位置柱壳的变形特征和应变分布, 结果表明, 在柱壳表面受压处先出现相变铰, 随着名义应变的增大, 相变铰将发展成相变铰区; 在柱壳表面受拉处出现相变铰, 但此处材料先进入马氏体相。当径厚比和边界约束不变时, 随着名义应变的增大, 柱壳的耗能率和比能不断增加。当名义应变不变时, 柱壳的耗能率和比能随边界约束个数的增多而增加, 吸能效果更好, 随径厚比的增加而减小, 吸能效率下降。

关键词: TiNi 合金柱壳; 径向; 相变铰; 耗能率; 比能

中图分类号: O344

0 引言

研究形状记忆合金(SMA)圆柱壳在径向载荷作用下的大变形问题, 对于了解它的力学响应和隔振吸能装置的设计具有重要意义, 因为多个圆柱壳组合成的蜂窝结构, 是一种较为理想的吸能元件。Kahn 等^[1,2]曾利用 MTS 对两平板间的单个伪弹性 SMA 圆柱壳进行了准静态实验, 得到了最大相对压缩量为 70% 的可恢复的载荷位移曲线, 并发现环境温度的变化对载荷位移曲线的影响不明显。Rivin 等^[3]对径厚比为 33.8 的 TiNi 合金圆柱壳进行了类似实验, 发现相对压缩量为 50% 时柱壳呈典型的 8 字型变形模态, 柱壳最大可恢复相对压缩量为 62%。Lagoudas 等^[4]利用 MTS 对 TiNi 合金多管结构进行了横向准静态实验, 相对压缩量小于 40% 时圆管可以完全恢复, 加卸载曲线呈现较大滞回, 因此可以利用该结构进行记忆合金耗能阻尼器的研究。董寅生等^[5]利用疲劳试验机对 TiNi 合金环作为耗能元件的被动减振装置进行了力学和减振性能的研究, 结果表明, 水平约束使滞回环面积增大, 增加环的数量, 位移相同时装置耗能明显增加。

上述研究仅限于单个或者多个相变柱壳组合的整体承载力的准静态实验研究, 缺乏不同边界条件及几何尺寸对柱壳承载性能和吸能效率影响的系统研究、研究机理方面的分析。SMA 材料的大变形机理在于奥氏体-马氏体相变, 本文利用 MTS 对不同径厚比和边界条件的伪弹性 TiNi 合金圆柱壳进行较为系统的准静态实验研究, 并使用 CCD 高速相机实时跟踪柱壳的变形过程, 目的在于了解它的力学响应特征以及与马氏体相变的关系, 并讨论径厚比和边界条件的影响。

1 实验条件

TiNi 薄壁圆管购自美国 NDC 公司, 其奥氏体相完成温度 $A_f < 1^\circ\text{C}$, 室温下处于伪弹性(PE)状态。试件具有 A、B、C 三种不同尺寸, 外径 $D(\text{mm})$ 、壁厚 $t(\text{mm})$ 和径厚比 D/t 分别为 A: 5.33/0.2/26, B:

^{*} 收稿日期: 2009-06-10; 修订日期: 2009-09-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号 10872196)

通讯作者: 唐志平(1945—), 男, 教授, 博士生导师。主要研究领域: 冲击相变和动测技术。E-mail: zptang@ustc.edu.cn

6.3/0.15/42, C:8.0/0.38/21, 长度均为 9.9mm 左右。试验约束条件有三种:两向、三向和四向约束(图 1), 分别用 2、3 和 4 来表示。因此, 编号为 A2 试件表示在两向约束条件下外径为 5.33 厚度为 0.2 的柱壳, 其他编号类推。建立如图 1(a)中所示的坐标轴, 箭头所指的方向为正, 以方便地定量描述柱壳的变形。

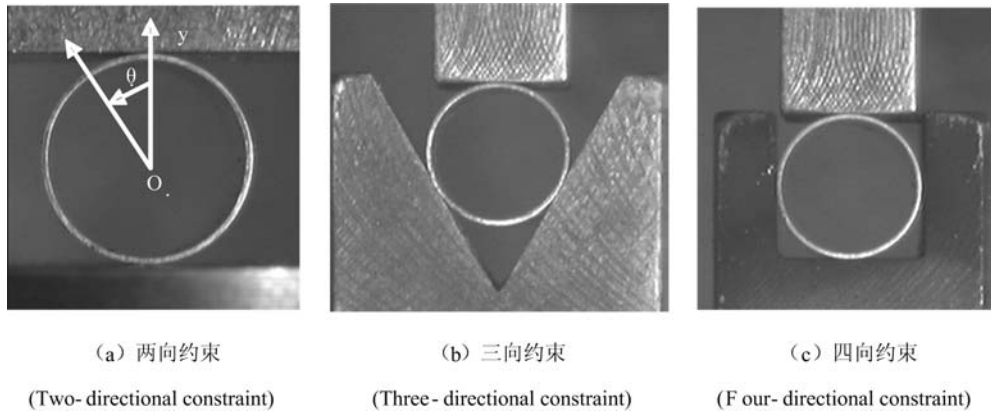


图 1 单个柱壳横向压缩边界条件示意图

Fig. 1 Boundary condition sketch of a single shell under horizontal compression

实验在中国科学技术大学 MTS 809 材料试验机上进行, 上压头为固定端, 下压头为加载端, 压头加载速率为 0.032mm/s, 通过 MTS 809 的载荷和位移传感器得到载荷位移曲线, 同时采用 Panasonic WV-BP310/G 摄像机实时采集图片, 分辨率为 280×570 , 速率为 1 帧/秒。圆柱壳径向相对压缩位移用 δ 来表示, $\xi = \delta/D$ 表示圆柱壳的名义应变, P 表示载荷。

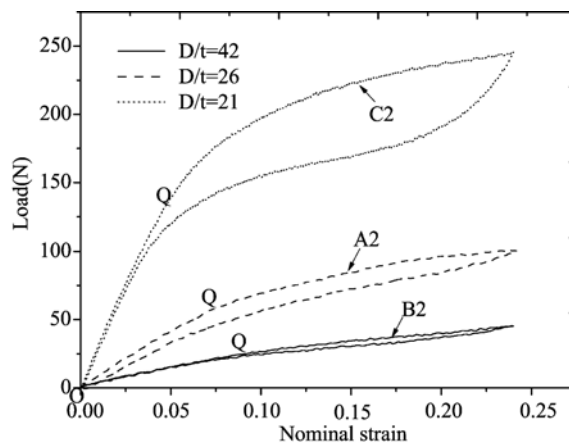


图 2 不同径厚比圆柱壳的载荷名义应变曲线

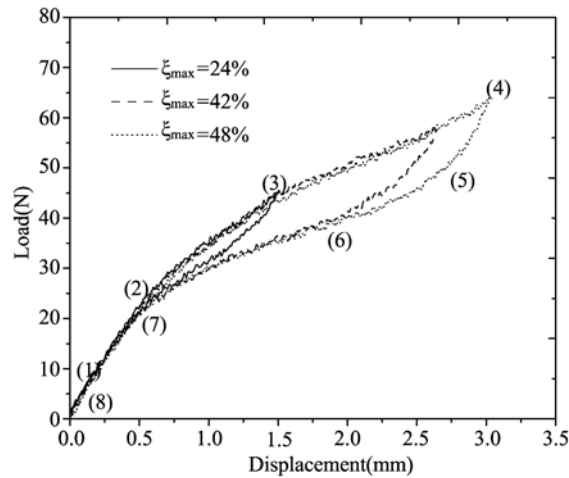
Fig. 2 Load-nominal strain curve of the shell with different radial-thickness ratio

2 两向约束条件下 TiNi 圆柱壳的力学响应特征

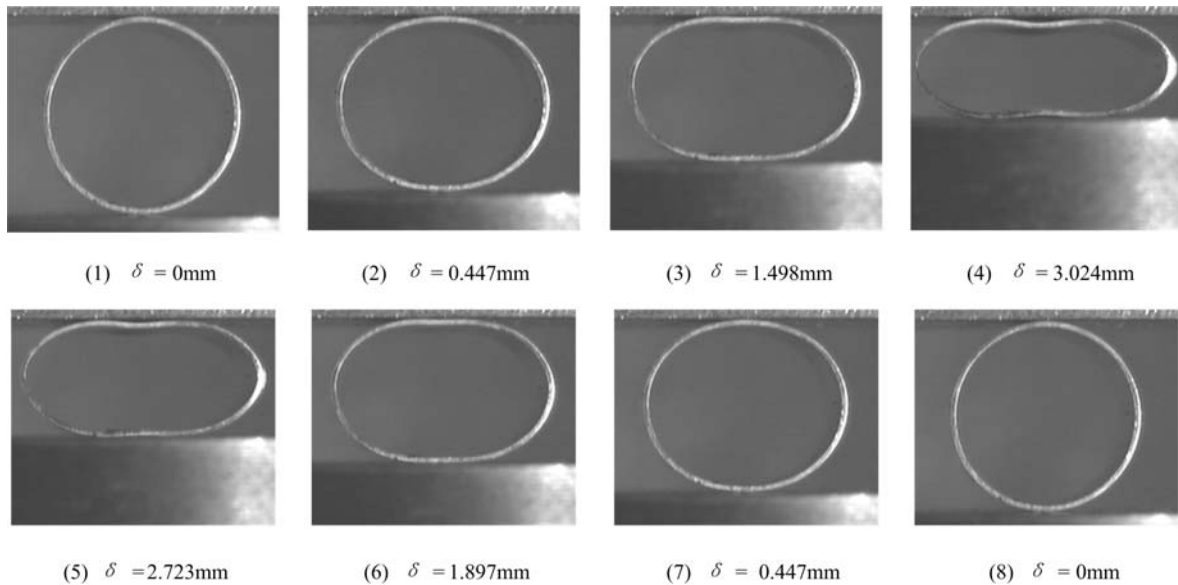
图 2 为在两向约束下, 三种柱壳试样 A2、B2、C2 最大名义应变 $\xi_{\max} = 24\%$ 时的载荷-名义应变曲线。三条曲线的共同特征是存在滞回环, 卸载后应变可以完全回复, 不同的是随着径厚比的减小, 柱壳刚度增强, 承载力提高, 同时滞回环增大, 后者意味着吸能效果更好(详见第 4 节)。当 $\xi_{\max} = 24\%$ 时, 试件 A2、B2 和 C2 的最大载荷分别为 100.54N、45.46N、246N, 等效刚度分别为 78.60kN/m、30.07kN/m 和 128.13kN/m。

从图 2 中可以看出, 曲线具有加载线性段-软化段-线性段和卸载线性段-软化段-硬化段-线性段特点。Q 点是加载线性段和软化段的分界点, 加载线性段的刚度、Q 点的载荷和名义应变分别为, A2: 152.25kN/m、56.81N 和 7%, B2: 45.11kN/m、23.87N 和 8.4%, C2: 371.41kN/m、118.85N 和 4%。随径厚比增加, 拐点的名义应变减小, 载荷增加, 刚度增大。

以试件 B2 为例进一步分析相变柱壳在两向约束下的变形机理。图 3(a) 给出 $\xi_{\max}$ 分别为 24%、42% 和 48% 时的载荷位移曲线, 可见随着名义应变的增大, 滞回面积在增加。图 3(b) 是 $\xi_{\max}=48\%$ 实验的 CCD 记录图片, 图片编号与图 3(a) 中的编号一一对应。



(a) 载荷位移曲线



(b) 柱壳 $\xi_{\max}=48\%$ 时的 CCD 图片

图 3 试件 B2 在两向约束条件下的实验记录

Fig. 3 Experimental record of the specimen B2 in the condition of two-directional constraint

由于柱壳较薄, 在径向压缩过程中柱壳中间层的周长基本不变, 变形可以看做纯弯曲状态(图 4), 图 4(a) 和 (b) 分别表示柱壳变形前后的微元段, 其中纤维 $o_1 o_2$ 和 $o'_1 o'_2$ 是截面中性层, $a_1 a_2$ 和 $a'_1 a'_2$ 是距中性层距离为 y 的纤维层, ρ_0 和 ρ'_0 分别是微元初始和变形后的中性层曲率半径。

由图 4 几何关系得到如下关系式:

$$\widehat{o_1 o_2} = \widehat{o'_1 o'_2} \Rightarrow \rho_0 d\theta = \rho'_0 d\psi \quad (1)$$

$$d\lambda = \widehat{a'_1 a'_2} - \widehat{a_1 a_2} = (\rho'_0 + y)d\psi - (\rho_0 + y)d\theta \quad (2)$$

环向线应变为:

$$\epsilon = \frac{d\lambda}{a_1 a_2} = \frac{\rho_0 - \rho'_0}{\rho'_0 (\rho_0 + y)} y \quad (3)$$

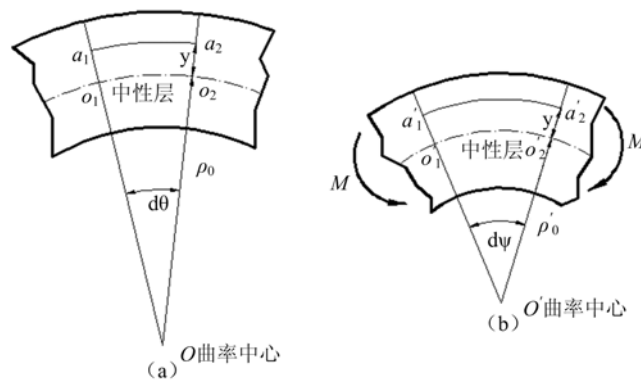


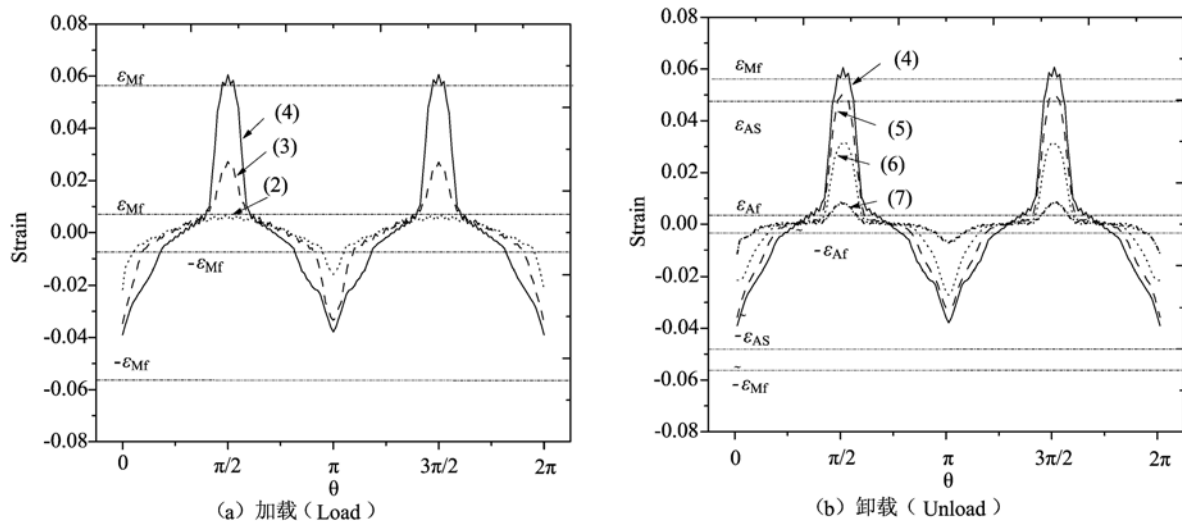
图 4 圆柱壳纯弯曲曲率变化示意图

Fig. 4 Pure bending curvature change sketch of the cylindrical shell

由于中性层位于截面的中部,有: $\rho_0 = \rho_s - t/2$, $\rho'_0 = \rho'_s - t/2$, 代入(3)得:

$$\epsilon_s = \frac{t(\rho_s - \rho'_s)/2}{\rho_s(\rho'_s - t/2)} \quad (4)$$

这里的 ϵ_s 为外表面应变; ρ_s 和 ρ'_s 分别为外表面变形前后的曲率半径。

图 5 试件 B2 在加卸载过程中关键位置的表面应变($\xi_{\max} = 48\%$)Fig. 5 The surface strain of the specimen B2 in the key positions during loading and unloading($\xi_{\max} = 48\%$)

通过数字图像处理提取图 3(b)中柱壳的边界,可以求得柱壳变形后外表面的曲率分布,由(4)式求出的各特征位置的应变分布如图 5 所示。图 5(a)和(b)分别显示加载阶段和卸载阶段柱壳表面应变分布随载荷的变化,图中的曲线编号与图 3 中的编号一一对应。

图 3(a)中(2)点是曲线的加载线性段和软化段的分界点。此时靠近加载端和固定端的壳体逐渐贴紧加载平面,这两处的表面应变分别为 2.2% 和 1.6%,大于马氏体相变起始应变($\epsilon_{Ms} = 0.75\%$),材料进入马氏体—奥氏体的混合相,有明显的局部应力集中,有相变铰产生;柱壳的左端($\theta = \pi/2$)和右端($\theta = 3\pi/2$)的材料刚达到起始相变应变。此时柱壳表面发生相变的部分占整个壳表面的 10%。

图 3(a)中(3)点是曲线的软化段和线性段的分界点。此时靠近固定端($\theta = 0$)和加载端($\theta = \pi$)的柱壳由一点接触变成线接触,呈椭圆形,这两处表面应变明显增大,但材料仍处于混合相;而在柱壳的左端($\theta = \pi/2$)和右端($\theta = 3\pi/2$)处的应变大于起始相变应变,材料进入马氏体—奥氏体混合相,有明显的应变集中,有相变铰产生。此时柱壳共有 4 个相变铰,柱壳表面发生相变的部分占整个壳表面的 40%。

图 3(a)中(4)点是加卸载分界点。靠近固定端($\theta = 0$)处的内凹曲波纹进一步发展,固定端平面和

壳体之间有明显的缝隙,加载端($\theta=\pi$)处壳体也有明显的内凹屈曲波纹,柱壳由线接触变成两点接触,呈8字形变形模态;此两处的表面应变增加缓慢,其附近柱壳的表面应变增加幅度的较大,参与相变的材料明显增多,相变较发展成相变较区,较区的范围分别为 $3\pi/16$ 和 $\pi/5$;左端($\theta=\pi/2$)和右端($\theta=3\pi/2$)的表面应变明显增大,达到的最大值为6.05%,大于马氏体完成应变($\epsilon_{Mf}=5.6\%$),表面材料进入马氏体弹性相。此时柱壳表面发生相变的部分占整个壳表面的57.5%。

图3(a)中(5)点是卸载线性段和卸载软化段的拐点。柱壳的固定端($\theta=0$)和加载端($\theta=\pi$)的内凹屈曲波纹逐渐恢复,但固定端处的内凹屈曲波纹明显可见,加载端处的不明显;柱壳的左端左端($\theta=\pi/2$)和右端($\theta=3\pi/2$)的表面应变为5.08%,接近奥氏体起始应变($\epsilon_{As}=4.78\%$),表面材料处于奥氏体弹性卸载阶段。

图3(a)中(6)点是卸载软化和卸载硬化的分界点,靠近固定端($\theta=0$)和加载端($\theta=\pi$)处的内凹屈曲波纹消失,柱壳由两点接触变回线接触,柱壳的左右两端($\theta=\pi/2, 3\pi/2$)的表面应变迅速减小,材料处于逆相变混合相。图3(a)中(7)点是卸载硬化和卸载线性段的分界点;靠近固定端($\theta=0$)处和加载端($\theta=\pi$)的表面应变继续减小,左右两端和加载端的表面应变接近奥氏体完成应变($\epsilon_{Af}=0.25\%$),相变较进一步卸载。图3(a)中(8)点是柱壳的卸载完成点,柱壳的各个相变较消失,壳体恢复到原来的形状。

综上所述,柱壳表面有局部应变集中的地方(如 $\theta=0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$)就是相变较或相变较区的位置。试件B2在加载过程中,在柱壳固定端处和加载端处先发生相变,产生相变较,然后左右两端发生相变,加载过程中左右两端先进入马氏体弹性相,同时固定端和加载端处的相变较发展成相变较区。试件在卸载过程中,柱壳左右两端先发生马氏体相弹性卸载,逆相变混合相卸载,先于其它较或较区进入奥氏体相;柱壳的固定端和加载端均处于逆相变混合相卸载阶段,最后进入奥氏体弹性卸载。

3 边界条件对 TiNi 圆柱壳变形特性影响

图6是当 $\xi_{\max}=24\%$ 时径厚比为42的TiNi圆柱壳在不同边界条件下的载荷位移曲线。三条曲线的共同特征是存在滞回环,卸载后应变可以完全回复,不同的是随着边界约束个数的增加,柱壳刚度增强,承载力提高,同时滞回环增大。柱壳B2、B3和B4的最大载荷分别为45.46N、102.81N和174.41N,其等效刚度分别为30.07N/mm、68.00N/mm和115.35N/mm。图7中可以看出,随边界约束增多,柱壳变形空间减小,使得柱壳局部变形增大,固定端的内凹屈曲波纹更明显,相变较的数量增多,相变较处的曲率半径越小,相变较处的应变越大。

与二向约束下的曲线(图3(a))不同的是,三向和四向约束下的曲线表现为加载线性段-软化段-硬化段和卸载线性段-卸载软化段-卸载线性段。加载线性段和软化点的拐点Q点的载荷、位移和加载线性段的刚度分别为B3: 143.24kN/m、36.24N和0.253mm, B4: 235.98kN/m、41.06N和0.174mm。柱壳B3和B4的加载软化段和硬化段的拐点Y的名义应变分别为18.1%和22%。曲线中柱壳刚度突然增加的原因是: B3中 $\theta=\pi/3$ 和 $5\pi/3$ 处及B4中 $\theta=\pi/4$ 和 $7\pi/4$ 处的壳体进入马氏体弹性相,材料硬化,承载力提高。

图7是当 $\xi_{\max}=24\%$ 时TiNi圆柱壳不同边界约束下的压缩模态,图中的圆圈表示相变较的位置,不同边界约束会产生不同的相变较分布,相变较处应变是拉压间隔分布的。图7(a)是试件B2在两向

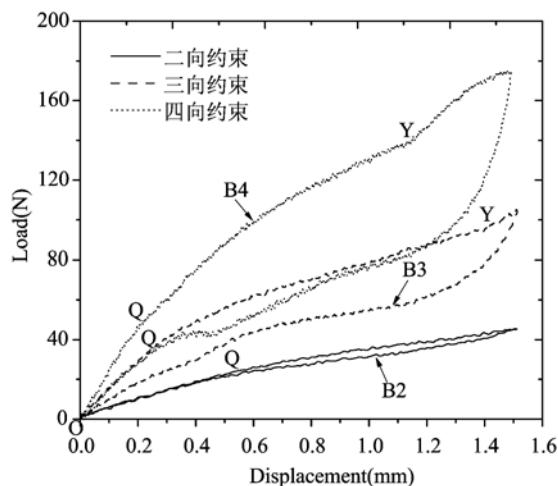


图6 TiNi圆柱壳在不同边界条件下的载荷位移曲线($\xi_{\max}=24\%$)

Fig. 6 Load-displacement curve of the TiNi cylindrical shell in the different boundary conditions ($\xi_{\max}=24\%$)

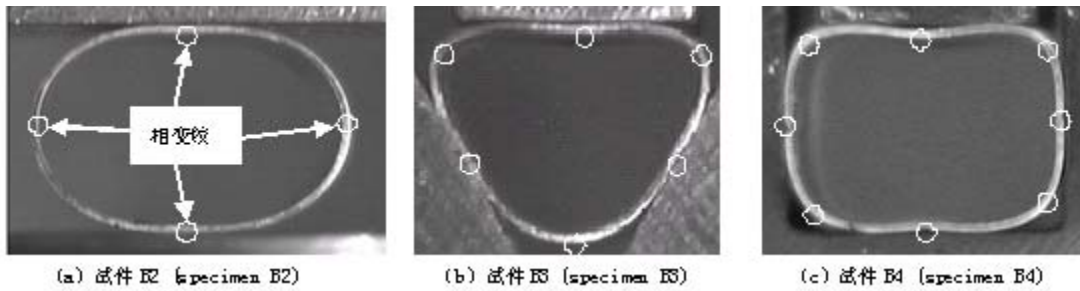


图 7 TiNi 圆柱壳在不同边界条件下的压缩模态($\xi_{\max}=24\%$)

Fig. 7 The buckling mode of the TiNi cylindrical shell under the different boundary conditions($\xi_{\max}=24\%$)

约束条件下的椭圆形模态,分别在 $\theta=0, \pi/2, \pi$ 和 $3\pi/2$ 处产生四个相变铰;图 7(b)是试件 B3 在三向约束条件下时的模态,其模态为靠近固定端的壳体有微小的内凹屈曲,分别在 $\theta=0, \pi/3, 2\pi/3, \pi, 4\pi/3$ 和 $5\pi/3$ 处产生六个铰;图 7(c)是试件 B4 在四向约束条件下的模态,其模态为靠近固定端和加载端的壳体均有明显的内凹屈曲,分别在 $\theta=0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi, 5\pi/4, 3\pi/2$ 和 $7\pi/4$ 处产生八个铰。

4 TiNi 圆柱壳的吸能规律

定义 W_E 为 TiNi 圆柱壳加载过程中外力做的功,可以根据圆柱壳的载荷位移曲线积分求得, W_D 为加卸载过程中耗散的能量,定义 $\eta=W_D/W_E$ 为耗能率, $S_e=W_D/m$ 为比能,即单位质量消耗的能量,其中 m 为 TiNi 圆柱壳的质量。

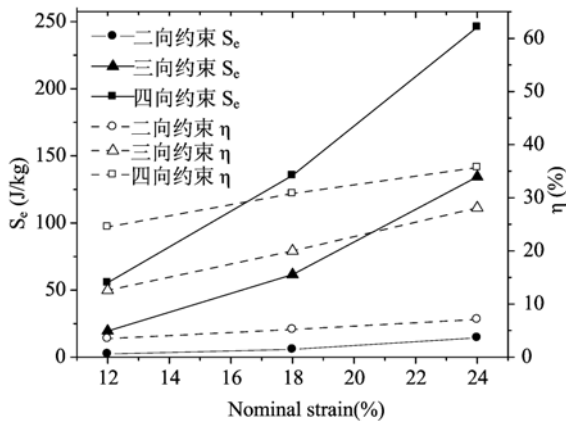


图 8 柱壳的比能和耗能率随名义应变的变化($D/t=42$)

Fig. 8 Variation of specific energy and energy dissipation rate of TiNi cylindrical shells with nominal strain ($D/t=42$)

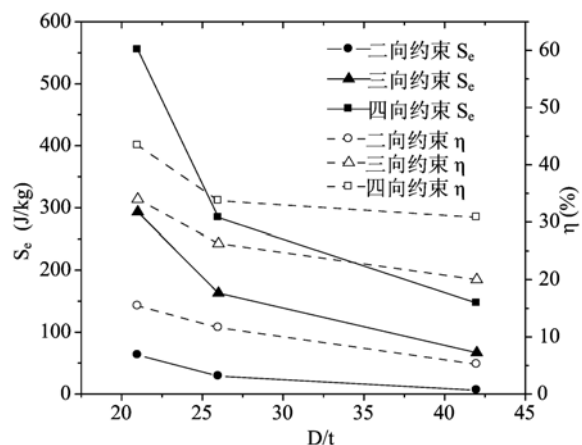


图 9 柱壳的耗能率和比能随径厚比的变化($\xi_{\max}=18\%$)

Fig. 9 Variation of specific energy and energy dissipation rate of TiNi cylindrical shells with diameter-to-thickness ratio ($\xi_{\max}=18\%$)

图 8 为径厚比为 42 的圆柱壳在不同边界条件下比能和耗能率随名义应变的变化规律,图中可见,比能和耗能率均随名义应变和边界约束个数的增加而上升,前者呈非线性关系,后者基本呈线性。图 9 为 $\xi_{\max}=18\%$ 时,不同边界条件下圆柱壳的比能和耗能率随径厚比的变化规律,比能和耗能率均随径厚比的增加而降低,随边界约束个数增多而增加。径厚比为 21 的柱壳在四向约束条件下的比能和耗能率最大,分别为 555.12J/kg 和 43.4% 。

5 结论

通过对不同几何尺寸和边界约束的 TiNi 圆柱壳径向准静态压缩实验研究,得到以下几点认识:

1) 两向约束下柱壳在 $\theta=0, \pi/2, \pi$ 和 $3\pi/2$ 处出现相变铰,其中 $\theta=0$ 和 π 处最先出现,随着名义应变的增大相变铰会发展为相变铰区。

2) 三种不同边界约束实验表明,柱壳产生的相变铰数为边界约束数的两倍,铰处的表面应变拉压交替分布。随边界约束个数的增加,相变铰的数量增多,固定端的内凹屈曲波纹更明显,相变铰处的曲率半径更小,相变铰处的应变增加。

3) 随径厚比的减小,壳的承载力提高,刚度增强,曲线的滞回环更加饱满,吸能效果更好。

4) 当边界约束不变时,随着名义应变的增大,耗能率和比能不断增加。当名义应变不变时,耗能率和比能随边界约束个数的增多而增加,吸能效果更好,随径厚比的增加而减小,吸能效率下降。

参考文献:

- [1] Khan M M, Lagoudas D C, Mayes J J. Pseudo-elastic SMA Spring Element for Passive Vibration Isolation: PartI - Modeling[J]. J. of Intelligent. Material Systems and Structures, 2004, 15: 415—441.
- [2] Lagoudas D C, Khan M M, Mayes J J. Pseudo-elastic SMA Spring Element for Passive Vibration Isolation: PartII- Simulations and Experimental Correlations[J]. J. of Intelligent. Material Systems and Structures, 2004, 15: 443—470.
- [3] Rivin E I, Gautam Sayal, Prithvi Raj Singh Johal. “Giant Super-elasticity Effect” in TiNi Super-elastic Materials and Its Applications[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006, 18(6):851—857.
- [4] Lagoudas D C, Chen Y C, Ravi-Chandar K. Fabrication, Modeling and Characterization of Porous Shape Memory Alloys[J]. Smart Structures and Materials, 2001, 4333: 141—150.
- [5] DONG Yinsheng, XIONG Jiulang, LI Aiqun. Evaluation of properties for a passive damping device with TiNi rings as dissipating element[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2005, 21: 310—313.
- [6] 唐志平. 冲击相变[M]. 北京:科学出版社,2008:174—180 (TANG Zhi-ping. Shock Phase Transformation[M]. Beijing: Science Press, 2008:174—180 (in Chinese))
- [7] 杨伯源. 材料力学(D)[M]. 北京:机械工业出版社,2002:61—62 (YANG bo-yuan, Mechanics of materials (D) [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2002:61—62 (in Chinese))

Experimental Investigation on Radial Compression Characteristics of TiNi Cylindrical Shell

ZHANG Hui-jie, TANG Zhi-ping, LI Dan

(Key Lab of Mechanical Behavior and Design of Materials, CAS, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Quasi-static radial compression responses of TiNi alloy cylindrical shell were experimentally studied with different geometric dimensions and under different boundary constraint conditions in this paper. The deformation characteristics and the strain distribution at different positions on the cylindrical shell were obtained by using digital camera and image processing technique. Results show that phase transformation hinge appears first on the compressed surface of cylindrical shell and then develops into phase transformation region along with the nominal strain increasing. Results also show that phase transformation hinge appears later on the tensile surface of cylindrical shell, but the material here goes into martensite phase first. Keeping the same diameter-thickness ratio and the same boundary constraint condition, the energy dissipation rate and the specific energy of cylindrical shell increase along with the nominal strain increasing. Under the same maximum nominal strain, the energy dissipation rate and specific energy of the cylindrical shell increase with the boundary constraint number increasing and the energy absorption effect of shell become better; but these decrease along with the diameter-thickness ratio increasing, at the same time the energy absorption efficiency decrease.

Keywords: TiNi cylindrical shell; radial; transformation hinge; energy dissipation rate; specific energy