

文章编号: 1001-1455(2009)04-0345-06

圆柱薄壳的动相变屈曲行为*

李 丹, 唐志平, 张会杰

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

摘要: 利用 MTS809 材料试验机对 TiNi 圆柱薄壳进行了轴向动渐进相变屈曲实验, 对轴向冲击下处于伪弹性状态的 TiNi 合金柱壳的动相变屈曲行为进行了数值模拟研究。结果表明, 不同的加载强度将会激发出柱壳不同的动屈曲响应模式。当冲击速度较高时, 柱壳两端首先形成轴对称环形相变屈曲波纹, 并产生应力平台; 随着马氏体含量不断增加, 环形相变屈曲波纹逐渐贯穿整个壳体, 名义应力缓慢抬升; 当名义应变超过一定阈值时, 对称环形屈曲模式突变为非轴对称块状屈曲模式, 名义应力大幅下降。撞击速度为 40 m/s 的算例(含 10% 随机缺陷)与 S. Nemat-Nasser 等的实验结果很好吻合, 说明本文中计算模型、方法和结果的有效性经过了实验的考核。结果还表明, 相变耗能是 TiNi 柱壳吸收冲击能量的主要机制, 适合制作可重复使用的高效吸能元件, 并给出了相应的理想厚径比。

关键词: 固体力学; 动相变屈曲; 轴向加载; TiNi 圆柱薄壳; 伪弹性; 相变吸能

中图分类号: O347

国标学科代码: 130 · 1565

文献标志码: A

1 引 言

形状记忆合金具有伪弹性和形状记忆效应 2 种特殊行为。TiNi 合金是一种典型的形状记忆合金, 在伪弹性状态下, 加载时能产生远大于其弹性极限的应变(可达到 0.06~0.08), 卸载时这种应变可以全部恢复, 远高于一般金属材料。TiNi 合金的这一特性是由材料内部应力诱发的奥氏体-马氏体相变和逆相变过程控制的, 可望应用于承受多次打击的抗冲吸能装置。目前, 有关形状记忆合金结构的动态响应的研究还不多见。在杆和梁方面, D. C. Lagoudas 等^[1]对 TiNi 合金圆杆进行了动态轴向冲击实验, 得到的能量耗散率可达 90%。GUO Yang-bo 等^[2]进行了相变 Taylor 杆碰撞实验, 得到了与弹塑性杆不同的变形和吸能模式。唐志平等^[3]、张兴华等^[4]分别对圆截面和矩形截面的 TiNi 合金悬臂梁进行了横向冲击实验, 研究了变形抗度特性和吸能规律, 特别是发现了相变铰的形成。在壳体方面, D. C. Lagoudas 等^[5]在 MTS 上对 TiNi 薄壁圆管组成的多孔结构进行了横向准静态压缩实验, 圆管呈现多种变形模式, 外力撤消后圆管形状能完全恢复。S. Nemat-Nasser 等^[6]用改进的 SHPB 装置对形状记忆合金薄壁圆柱壳的轴向动态屈曲行为进行了初步的研究, 得到了动态实验名义应力和应变曲线以及不同的动屈曲模式(见图 1)。但有关形状记忆合金圆柱薄壳的动态冲击响应和相变吸能特性尚未有系统的研究报道。

本文中利用 MTS809 材料试验机对处于伪弹性状态下的 TiNi 圆柱薄壳进行轴向动渐进相变屈曲实验, 并用高分辨率 Panasonic CCD 记录压缩过程中 TiNi 圆柱薄壳不同厚径比下的屈曲模式发展。并尝试对 S. Nemat-Nasser 等的 TiNi 圆柱薄壳轴向冲击加载实验进行模拟, 建立相应的模型和数值方法, 在此基础上, 进一步探讨 TiNi 圆柱薄壳的动态相变屈曲的一般规律。

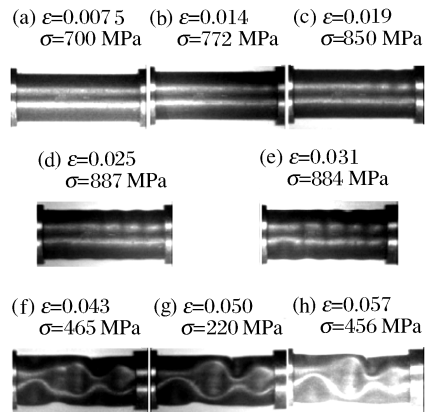


图 1 CCD 记录的 TiNi 圆柱壳动态屈曲演变图^[6]
Fig. 1 CCD photographs of the dynamic buckling of a thin NiTi tube

* 收稿日期: 2008-03-06; 修回日期: 2008-05-09
基金项目: 国家自然科学基金项目(10672158)
作者简介: 李 丹(1975—), 男, 博士研究生。

2 动渐进相变屈曲过程

圆管的低速轴向冲击(小于 5 m/s)可看成准静态过程,此时可忽略薄壳的惯性效应^[7]。利用 MTS809 材料试验机对处于伪弹性状态下的 TiNi 圆柱薄壳进行轴向压缩实验,以便研究低速轴向冲击下的 TiNi 圆柱薄壳动态渐进屈曲过程。TiNi 圆柱薄壳采购自 NDC 公司,其奥氏体相完成温度 $t_A < 1\text{ }^\circ\text{C}$,在室温下处于伪弹性状态,室温 $T_0 = 294\text{ K}$ 。TiNi 管外径 6.3 mm 时,径厚比 $D/t = 42$,外径 8.00 mm 时,径厚比 $D/t = 21$,长径比 $L/D = 2.5$,在 MTS809 上进行两端固支边界条件下的 TiNi 管轴向压缩实验,加载速率为 $4.73\text{ }\mu\text{m/s}$,应变率为 0.0005 。

图 2 为位移控制模式下 TiNi 柱壳载荷-位移曲线,图 3 为对应图 2(a)的屈曲变形状态。从图可以看出,较薄壳体 ($D/t = 42$)一开始呈现非轴对称屈曲模式,载荷开始随着加载位移的增大呈非线性增大,当达到临界屈曲载荷后,载荷随着位移增大逐渐减小,呈现后屈曲特征,皱褶在非加载端部开始依次形成,如图 3 中的(2)~(4)所示。可以看出,在较低速度下的壳体动渐进屈曲有别于较高冲击速度下的壳体屈曲变形,较高轴向动载下因不能忽略惯性效应,壳沿整个管长都发生皱褶,如图 1 所示。较厚的壳体 ($D/t = 21$)则始终呈现轴对称环形屈曲模式,载荷位移曲线类似于伪弹性材料曲线,如图 2(b)。最终 TiNi 圆柱柱壳在完全卸载后,壳体恢复为初始形状,没有发生残余变形,显示出热弹性奥氏体和马氏体相变滞回吸能特性。

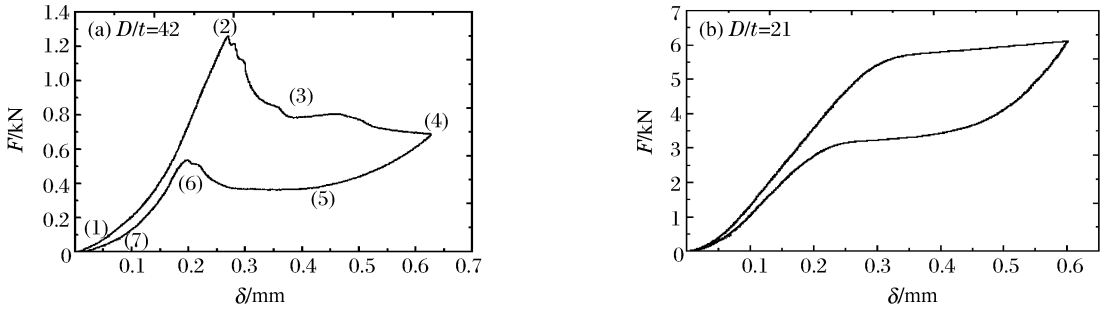


图 2 位移控制模式下 TiNi 柱壳载荷-位移曲线

Fig. 2 Variation of load with displacement for a TiNi tube under a displacement-controlled loading

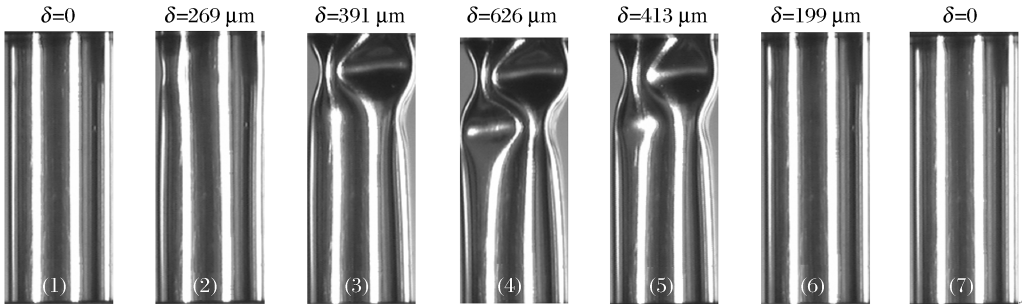


图 3 TiNi 圆柱薄壳动渐进屈曲演变图

Fig. 3 Evolution of dynamic progressive buckling for a TiNi cylindrical shell

3 动相变屈曲数值模型和方法

为了研究更高冲击速度下 TiNi 圆柱薄壳的动态相变屈曲演化过程,对 TiNi 圆柱薄壳轴向冲击加载实验^[6]进行数值模拟,计算采用 ANSYS/DYNA 程序。伪弹性 TiNi 合金室温下的应力应变曲线如图 4 所示。初始相是奥氏体相(简称 A 相),应力作用下转变为马氏体相(简称 M 相),卸载时逆相变至 A 相,并形成应力应变曲线的滞回。材料参数取自文献^[8],其中 A 相、AM 相变段、M 相、MA 逆相变段的模量分别为 $E_1 = 36\text{ GPa}$ 、 $E_2 = 22\text{ GPa}$ 、 $E_3 = 60\text{ GPa}$ 、 $E_4 = 9.7\text{ GPa}$ 。AM 相变起始应力、完成应力、MA 逆相变起始应力和完成应力分别为 $\sigma_{MS} = 720\text{ MPa}$ 、 $\sigma_{MF} = 1.6\text{ GPa}$ 、 $\sigma_{AS} = 640\text{ MPa}$ 、 $\sigma_{AF} = 280\text{ MPa}$,对应图 4 中的 A、B、C、D。密度 $\rho_0 = 6.45\text{ t/m}^3$,泊松比 $\nu = 0.3$ 。假定拉、压对称。

在实验^[6]中,柱壳两端卡入杆端加工的环形槽内,该边界条件相当于壳两端不产生径向转角。为与实验比较,采用与文献^[6]相同的边界条件和各部尺寸(见图 5):入射杆与透射杆长 200 mm,弹长 75 mm,半径均为 2.38 mm,柱壳长 $L = 11.3\text{ mm}$,直径 $D = 4.5\text{ mm}$,壁厚 $t = 0.125\text{ mm}$,径厚比 $D/t = 36$,长径比 $L/D = 2.5$ 。其中柱壳为伪弹性 TiNi 合金,其他为钢。壳体部分划分 672 个节点,644 个壳单元。壳单元选择适合表面翘曲大变形的 shell 163 单元,壁厚方向设

5 个高斯积分点, 以方便捕获壳体的屈曲行为。采用单面自动接触算法 ASSC, 壳体接触面为无摩擦。屈曲判别采用 B-R 准则^[9], 以确定冲击屈曲临界载荷。

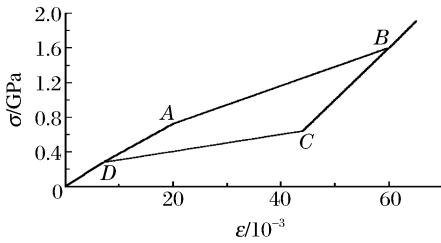


图 4 伪弹性 TiNi 材料模型

Fig. 4 Stress-strain curves of pseudo-elastic TiNi alloy

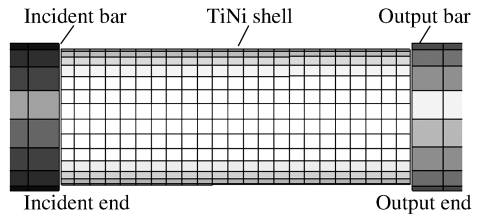


图 5 TiNi 壳体网格图

Fig. 5 FE diagram of a TiNi shell

4 动相变屈曲的模拟和分析

4.1 临界屈曲载荷

由于屈曲, 柱壳内部应力、应变的分布是不均匀的。为此定义试样的轴向名义应力和应变: 名义应力等于 2 个接触端面上的平均作用力除以柱壳的初始截面积, 名义应变等于两端面位移差除以初始长度。

图 6(a) 是弹速 40 m/s 时计算得到的完善 TiNi 柱壳试样的名义应力-应变曲线。图中显示, 壳体所受轴向载荷 $\sigma \approx 1\ 151\ \text{MPa}$ 时, 壳体压缩量显著增长, 基于 B-R 准则可认为该载荷是柱壳试样在弹速 40 m/s 下的初始临界屈曲载荷。然而, 最高强度达到 1 900 MPa, 远高于 S. Nemat-Nasser 等的实验结果 (约 900 MPa)^[6]。这表明实验加工中存在偏差和非均匀性, 导致柱壳实验强度的降低。

为此, 采用随机灰噪声缺陷模型添加初始几何缺陷, 即试件的所有有限元节点随机发生 0.1t 的径向位置偏差。图 7(a) 是有缺陷时计算得到的试样轴向名义应力应变曲线, 图中的初始临界屈曲载荷 $\sigma_{cr} \approx 852\ \text{MPa}$ 、最大强度 $\sigma_{max} \approx 950\ \text{MPa}$, 与 S. Nemat-Nasser 等的实验结果^[6] 十分接近。

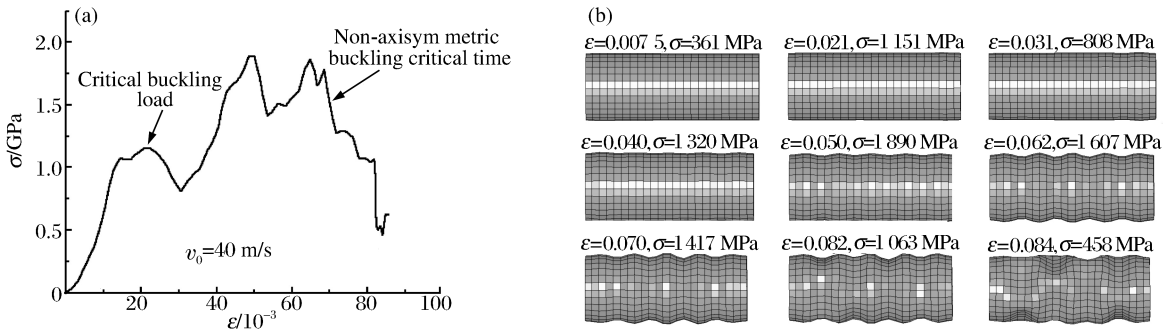


图 6 完善 TiNi 柱壳试样的名义应力应变曲线和动态屈曲演变图

Fig. 6 Nominal stress-strain curve and evolution of the dynamic buckling for a TiNi cylindrical shell without defects

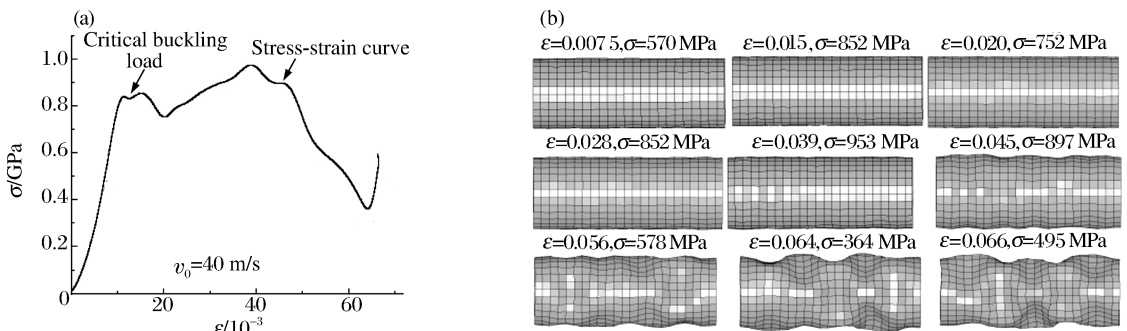


图 7 含缺陷 TiNi 柱壳试样的名义应力应变曲线和动态屈曲演变图

Fig. 7 Nominal stress-strain curve and evolution of the dynamic buckling for a TiNi cylindrical shell with defects

4.2 TiNi 动相变屈曲的模式分析

图 6(b)、图 7(b)分别为计算得到的完善和含缺陷的 TiNi 薄柱壳的动态屈曲演变图,与 S. Nemat-Nasser 等的实验结果(见图 1)^[6]比较,总的发展过程类似,都是先产生对称的环状屈曲波纹,名义应力下降,随后环状波纹逐渐增加,名义应力缓慢上升。当产生非轴对称的块状屈曲图形时,应力大幅度下降。计算得到的含缺陷柱壳的对称环状屈曲和非对称块状屈曲的名义应变临界值和实验很接近,完善柱壳的相应的应变临界值则要比实验结果大 0.01~0.03。

4.3 马氏体含量沿柱壳轴向的分布

图 8 给出了随名义应变的增加完善试样的马氏体含量沿壳轴向的分布。结合图 6 可以看出:当 $\epsilon = 0.019$ 时,在距输入端 0.037L 处开始形成轴对称环形相变屈曲波纹。随着应力波向输出端传播,输出端反射波加强,导致在输出端附近产生相变屈曲波纹。材料逐渐由奥氏体向马氏体转化,当达到 $\epsilon = 0.047$ 时,环形相变屈曲贯穿整个壳体。当 $\epsilon = 0.065$ 时,轴向载荷达到第 3 个峰值,壳体基本上都转化为纯马氏体相区,轴对称相变屈曲波纹数逐渐增多,波纹不断加深。当应变 $\epsilon > 0.065$ 后,壳轴向载荷开始降低,随着轴对称屈曲波纹不断深化发展,壳体开始出现非轴对称屈曲模式。达到 $\epsilon = 0.082$ 时,壳呈明显的非轴对称棋盘状屈曲模式,导致轴向载荷急剧降低,达到 $\epsilon = 0.085$ 时,此时轴向载荷为 458 MPa,等于约 40% 临界屈曲载荷,壳体绝大部分进入纯马氏体相区。由于卸载时将会发生马氏体相向奥氏体相逆向转变,皱折可以完全恢复,不同于动塑性屈曲。利用这一特性,记忆合金壳体可设计为多次使用的吸能基本元件。

以上结果表明,本文中采用的模型和方法能够较好地模拟相变柱壳的动态屈曲行为。当有限元节点发生 0.1 t 的随机缺陷时,模拟结果和实验吻合很好,说明本文的计算模型和方法通过了实验的考核。但由于实验的随机性,这一缺陷值并不具有普适性。完善柱壳结果虽然在名义应力和应变的临界阈值上高于实验值,然而,对于屈曲模态的产生和演化规律,以及马氏体相变的影响,与实验和含缺陷的模拟结果是一致的,并不影响规律性的认识。SHPB 实验中在相变柱壳未完全恢复形状时,冲击加载后期入射杆会多次反复加载。因此,以下将以完善柱壳为对象,讨论相变柱壳的冲击响应,研究其第 1 次加载卸载过程。

5 加载速度和几何尺寸对 TiNi 圆柱壳屈曲过程的影响

5.1 不同冲击速度的影响

提高加载速度,柱壳($L/D=2.5$)的名义应力、应变随之增大,屈曲模式也将不同,模拟结果如图 9 所示。撞击速度 $v \leq 15$ m/s 时,第 1 个峰值载荷为约 463 MPa,柱壳只发生均匀的环向扩张和轴向压缩,没有发生相变屈曲。撞击速度 $v = 15 \sim 20$ m/s 时,柱壳呈现局部轴对称相变屈曲模式,这种模式分为 2 个阶段:弹性压缩阶段和局部轴对称相变屈曲阶段。撞击速度 $v = 20 \sim 40$ m/s 时,柱壳呈现过渡屈曲模式,该模式分为 3 个阶段:弹性压缩阶段、轴对称相变屈曲阶段和非轴对称相变屈曲阶段。随着冲击速度的增加,出现屈曲波纹的时间提前,轴对称和非轴对称的相变屈曲波纹变深。

5.2 不同径厚比的影响

在 TiNi 圆柱薄壳吸能设计中,几何尺寸是一个重要表征。研究表明,当 $D/t > 40$ 的时候,金属管在撞击载荷下容易发生非轴对称模式的破坏^[10]。为了了解径厚比对 TiNi 圆柱薄壳屈曲模式的影响,并选择柱壳吸能元件的合适的几何参数,选取壳直径 4.5 mm,壳长度 11.3 mm,径厚比分别为 26、30、36 和 40 的 TiNi 柱壳进行比较,弹速均为 40 m/s。所得结果如图 10。从图 10~11 中可看出,径厚比为 26 时主要以轴对称的屈曲模式进行吸能,随着时间推移,环形相变屈曲有所增强,但没有非轴对称的棋盘状相变屈曲模式产生,有效压缩行程量较大,轴向总应变达到 0.061。与其他径厚比相比,临界屈曲载荷最大,达到 1 522 MPa,与文献^[6]中 $R/t = 8$ 时的实验结果相似。其他径厚比的压缩行程量虽然较大,但在加载后期都发生了非轴对称变形。根据理想吸能基本元件的选择依据(主要以轴对称屈曲方式吸能,能量吸收较大,屈曲模式稳定,载荷-位移曲线相对平稳),可以认为,TiNi 圆柱薄壳作为吸能基本元件,径厚比 D/t 为约 26 较合适。

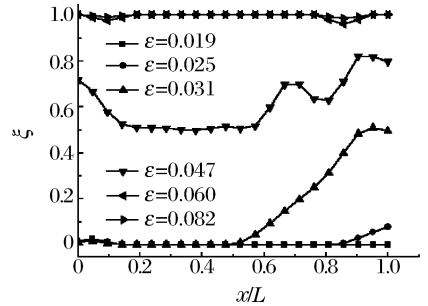


图 8 不同名义应变下马氏体含量沿壳轴向的分布
Fig. 8 Axial distribution of martensitic fraction at different nominal strains

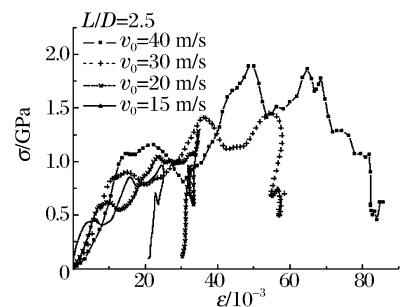


图 9 不同撞击速度下 TiNi 的柱壳名义应力应变曲线

Fig. 9 Nominal stress-strain curves with various impact velocities for a NiTi shell

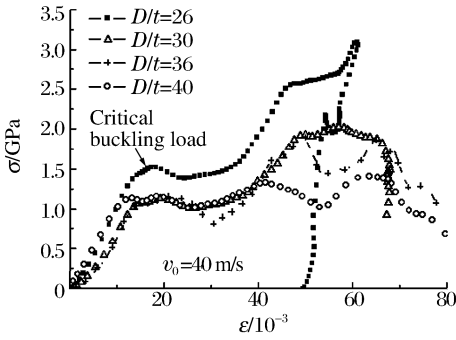


图 10 不同径厚比的 TiNi 圆柱壳名义应力应变曲线
Fig. 10 Nominal stress-strain curves of a NiTi shell under different diameter-thickness ratios

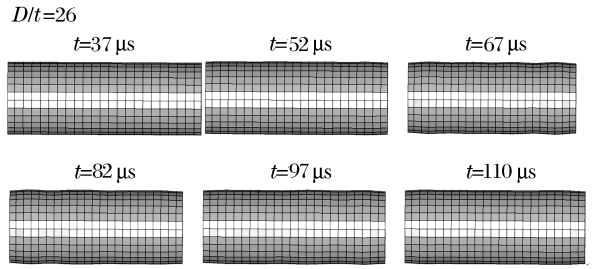


图 11 TiNi 圆柱薄壳不同时刻的轴向动态屈曲行为演变图
Fig. 11 Evolution of the dynamic buckling behaviors of a thin NiTi shell

6 相变能量吸收率

在加载过程中,外力所作的功 $P(\tau)$ 转化为壳整体动能 $H(\tau)$ 、弹性应变能 $\omega(\tau)$ 和相变应变能 3 部分,可得加载过程中相变能量吸收率

$$D(\tau) = \frac{P(\tau) - (H(\tau) + \omega(\tau))}{P(\tau)} \quad (1)$$

式中: $P(\tau)$ 、 $H(\tau)$ 和 $\omega(\tau)$ 公式见文献[1]。计算结果见图 12,相变能量吸收率随着加载载荷逐渐增大,到 45 μ s 时刻,达到 0.419,随着壳中屈曲波纹的逐渐加深和棋盘状不对称屈曲的产生,相变能量吸收率大幅上升,在约 64 μ s 达到 0.89,这说明 TiNi 柱壳相变吸能是其主要吸能机制,适合做高效率的能量吸收元件。

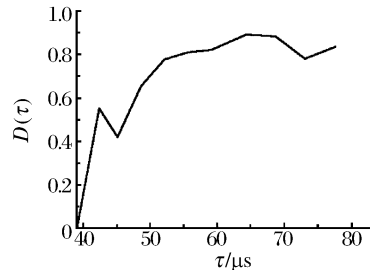


图 12 在冲击加载过程中相变能量吸收率
Fig. 12 Phase transition energy absorption under shock loading

7 结 论

利用 MTS809 材料试验机对处于伪弹性状态下的 TiNi 圆柱薄壳进行了轴向动渐进相变屈曲实验,并用高分辨率 Panasonic CCD 记录了压缩过程中 TiNi 圆柱薄壳不同厚径比下的屈曲模式发展。并利用 ANSYS/DYNA 对文献[6]中的 TiNi 圆柱薄壳轴向冲击加载试验进行数值模拟,在此基础上研究 TiNi 圆柱薄壳的动态屈曲行为、冲击速度和几何尺寸对屈曲行为的影响,TiNi 圆柱薄壳中相变能量吸收率在加载过程中的变化规律。得到以下结论:

- (1) 实验表明,2 种不同径厚比的相变柱壳表现出不同的动态渐进屈曲模式,在卸载后,壳体恢复成初始形状,显示出伪弹性性能。
- (2) 对应不同的加载速度,壳体将会被激发出不同的动屈曲响应模式。受到较高速度撞击时,先在撞击端和反射端附近形成轴对称环形相变屈曲波纹,并逐渐贯穿整个壳体,马氏体含量不断增加。当名义应变超过一定阈值时,屈曲模式转为非轴对称的块状屈曲模式,名义应力大幅下降。
- (3) 计算表明,相变耗能是 TiNi 柱壳吸收冲击能量的主要机制,适合做高效吸能元件。
- (4) 不同径厚比的计算结果表明,TiNi 柱壳做为吸能基本元件时,径厚比为约 26 较合适。

参考文献:

[1] Lagoudas D C, Ravi-Chandar K, Sarh K. Dynamic loading of polycrystalline shape memory alloy rods[J]. Mechanics of Materials, 2003, 35(7):689-716.
 [2] GUO Yang-bo, TANG Zhi-ping, ZHANG Xing-hua, et al. Phase transition Taylor test, WIT transactions on engineering sciences[M]// Alves M, Jones N. Impact loading of lightweight structures. Southampton: Win Press, 2005:241-255.
 [3] 唐志平, 卢艰春, 张兴华. TiNi 相变悬臂梁的横向冲击特性实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(4):289-295.
 TANG Zhi-ping, LU Jian-chun, ZHANG Xing-hua. Experimental study of the dynamic behavior of TiNi cantilever beams with phase transformation subjected to transversal impact[J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(4):

289-295.

- [4] 张兴华,唐志平,李丹,等. 冲击载荷下伪弹性 TiNi 合金矩形悬臂梁结构响应的实验研究[J]. 实验力学, 2008, 23(1):43-52.
ZHANG Xing-hua, TANG Zhi-ping, LI Dan, et al. Experimental study of the dynamic structural response of pseudo-elastic Ti-Ni alloy rectangular cantilever beam upon a transversal impact[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, 23(1):43-52.
- [5] Lagoudas D C, Entchev P B, Vandygriff E L. Fabrication, modeling and characterization of porous shape memory alloys[C]//Lynch C S. Proc SPIE Smart Structures and Materials 2001: Active Materials: Behavior and Mechanics. 2001:141-150.
- [6] Nemat-Nasser S, Choi J Y, Isaacs J B, et al. Quasi-static and dynamic buckling of thin cylindrical shape-memory shells[J]. Journal of Applied Mechanics, 2006, 73(5):825-833.
- [7] Jones N. Structural Impact[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989:249.
- [8] Nemat-Nasser S, GUO Wei-guo. Superelastic and cyclic response of NiTi SMA at various strain rates and temperatures[J]. Mechanics of Materials, 2006, 38(5-6):463-474.
- [9] Budiansky B, Roth R S. Axisymmetric dynamic buckling of clamped shallow spherical shells[R]. NASA Technical Note, D-510, 1962:597-609.
- [10] 杜星文,宋宏伟. 圆柱壳冲击动力学及耐撞性设计[M]. 北京:科学出版社, 2003:217.

Phase transformation dynamic buckling behaviors of pseudo-elastic TiNi shells under axial impact

LI Dan^{*}, TANG Zhi-ping, ZHANG Hui-jie

(CAS Key Laboratory for Materials Behavior and Design, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China)

Abstract: A series of quasi-static axial compression tests were conducted on pseudo-elastic TiNi shells by an MTS 809 material testing system to observe their dynamic progressive buckling responses. And numerical simulations were carried out to analyze phase transformation dynamic buckling behaviors of the pseudo-elastic shape-memory alloy shells under short pulse loading. It is indicated that TiNi shells have different buckling modes under different load levels. The buckling of shells begins with the formation of axisymmetric rings under high load speeds and produces a stress plateau. With the gradual increase of martensite fraction, ring phase transformation buckling travels gradually through the whole shell and the nominal stress increases slowly. When the nominal stress exceeds a certain threshold, the axisymmetric ring buckling mode transforms into a nonsymmetrical massive buckling mode and the nominal stress decreases dramatically. The calculation sample with the impact velocity of 40 m/s and the random defect of 10% is in agreement with the experiments by Nemat-Nasser S, et al. The results show that phase transformation energy dissipation is the main mechanism of TiNi shells absorbing impact energy and TiNi shells are suitable for reusable efficient energy dissipation mechanism. And the corresponding perfect diameter-thickness ratio of TiNi shells was proposed.

Key words: solid mechanics; phase transformation dynamic buckling; axial impact; TiNi thin cylindrical shell; pseudo-elastic; phase transition energy-absorbing

^{*} Corresponding author; LI Dan

E-mail address: daner@mail.ustc.edu.cn