DOI: 10.11883/1001-1455-(2015)03-0296-08

TiNi 柱壳在不同约束下的横向冲击实验*

张 科,唐志平
(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, 安徽 合肥 230027)

摘要: 为了解 TiNi 柱壳横向压缩力学性能以制造可重复使用抗冲吸能装置,对有、无侧向约束的 TiNi 柱壳进行了横向冲击实验。利用改进的霍普金森压杆装置(SHPB),配套波形分离方法,实现了较长时间(~3 ms)的波形测量,获得了 TiNi 柱壳在动态加载下的载荷压缩量曲线。通过高速摄影,捕捉了柱壳的动态变形过程。结果表明,无约束试件具有优良的可恢复变形能力,承载力平台段特征明显。侧向约束的引入,可以有效提高柱壳的承载力和耗能能力,可以承受更高速度的冲击。选择合适的约束组合,可望同时实现较大压缩行程和高耗能,制造实用的抗冲吸能装置。

关键词: 爆炸力学;横向冲击;抗冲吸能;TiNi 柱壳
中图分类号: O382 **国标学科代码**: 1303530 **文献标志码**: A

金属管壳的横向压缩是一种有效的能量吸收方式,已被广泛应用于各种碰撞能量吸收装置[1]。不同于传统金属管壳的弹塑性变形,超弹性 TiNi 柱壳在相当范围内变形可以恢复,因而在可重复使用的抗冲器研制方面有很好的应用前景。目前 TiNi 柱壳横向压缩的研究大多集中在准静态方面,主要关注其载荷位移曲线和变形模态[2-4],也出现了利用单个或多个 TiNi 柱壳排列组成的隔振器原型[2-3,5]。Zhang Ke 等[6]对该问题进行了系统的研究,探讨了准静态情况下径厚比和约束方式对滞回曲线和耗能的影响,得到了加卸载过程中壳体的应变、弯矩及两相含量分布;徐薇薇等[7]对柱壳在阶跃载荷和矩形脉冲载荷作用下的动力响应进行了数值模拟;唐志平等[8]结合 SHPB 装置和高速摄影技术对不受侧向约束的单个柱壳的横向冲击性能进行了研究,但其中对 SHPB 杆中反射波形的处理还有待改进。

本文中在前期对 TiNi 柱壳横向静动态压缩实验[6,8]的基础上,使用改进后的 SHPB 装置及波形处理方法对 TiNi 柱壳在不同约束条件下的横向冲击性能进行研究,分析其结构动力响应及抗冲吸能特性。相对文献[8],没有注重于局部的应变及相变演化,而是关心其整体的缓冲、耗能能力,子弹冲击动能的范围有所提高,考虑侧向约束的影响,并和准静态结果进行比较。

1 实 验

1.1 试 件

实验试件为处于伪弹性状态的 TiNi 圆柱壳,外径 $D=8.00$ mm,壁厚 $\tau=0.38$ mm,径厚比 D/τ 为 21,长度为 9.9 mm,质量 $m_0=0.6$ g。材料的杨氏模量为51.9 GPa,密度为6 450 kg/m^3,正相变起始应力、应变分别为 483 MPa 和 0.93%,正相变完成应力、应变分别为621 MPa和 6%,逆相变起始应力、应变分别为 380 MPa 和 5.11%,逆相变完成应力、应变分别为152 MPa和0.27%。

1.2 实验装置

实验在改进后的SHPB装置上进行,如图 1 所示。子弹 2 与试件之间预留一微小间隙,高压气体驱动子弹 1 与等长的子弹 2 相撞,将动量和能量转移给后者,由后者对试件进行加载。子弹 2 上的应变片信号触发高速相机记录柱壳变形过程,透射杆上的半导体应变片记录加载波形。子弹与透射杆均采用铝合金,直径 14.5 mm、弹长 150 mm、透射杆长 3 000 mm。为了便于拍摄,子弹 2 和透射杆端面用黑

* **收稿日期**: 2014-06-28; **修回日期**: 2015-01-20
基金项目: 国家自然科学基金项目(10872196)
第一作者: 张 科(1986—),男,博士研究生; **通讯作者**: 唐志平,zptang@ustc.edu.cn。

色胶带缠绕。侧向约束由透射杆端面凹槽实现，如图 2 所示。高速摄像机型号为 Phantom v12.1，拍摄频率 100 000 s^{-1}，分辨率 256×152。

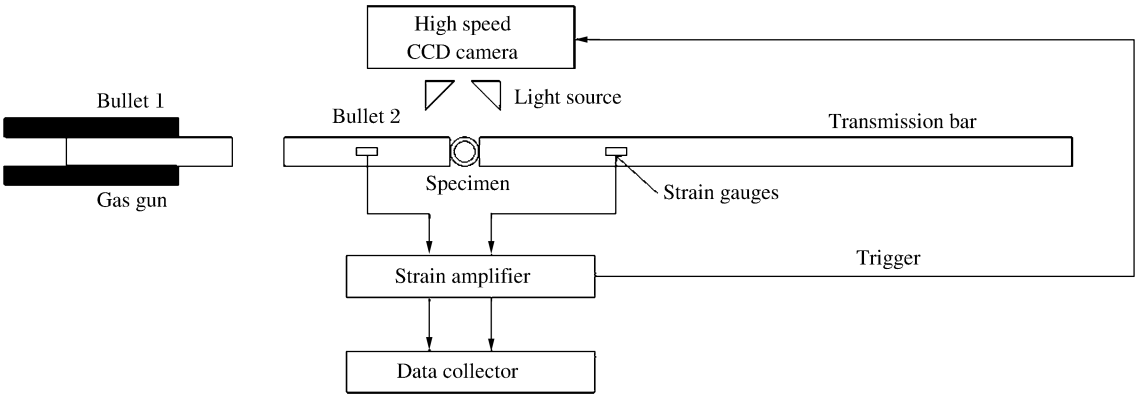

图 1 实验装置简图

Fig. 1 Schematic of experimental arrangement

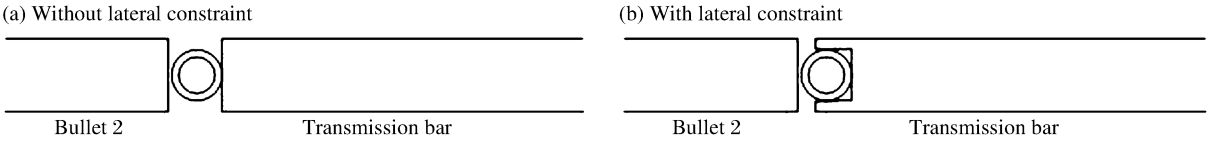

图 2 试件及约束

Fig. 2 Specimen and lateral constraint

1.3 数据处理方法

SHPB 在软材料及结构的实验中，受压杆长度的限制，难以得到较长作用时间的完整的透射波形。为了解决这一问题，很多学者对压杆中的反射叠加波形进行了分析[9-11]，提出了一点及两点应变测量法，还原出原始波形。H. Zhao 等[12]还进一步给出了波形弥散的修正方法。本文中因柱壳试件的刚度小，压缩量大，子弹对其产生持续加载，加卸载过程需要较长的时间，即使采用了 3 000 mm 长的透射杆，所测应变信号仍会受到反射波的影响，因此，需要对测量波形进行处理。采用将透射杆的右侧自由端作为第 2 个测量点的一点测量方法，进行波形分离。由于实验中采用的是小直径的铝杆，可以忽略弥散效应而使处理方法得到简化。图 3 所示为透射杆示意图。

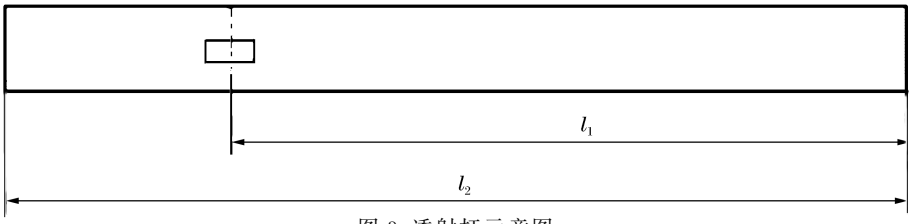

图 3 透射杆示意图

Fig. 3 Schematic of transmission bar

透射杆总长为 l_2，左侧是与试件接触面，右端为自由面，初始杆中无应力。在距右端面 l_1 的位置贴有应变片，其记录的应变为 $G(T)$，则其左侧端面的应变 $\varepsilon(t)$、速度 $v(t)$ 分别为：

$$\begin{aligned}
&\varepsilon(t)=G(T) && T\leqslant l_1/c+l_2/c\\
&\varepsilon(t)-\varepsilon(t-2l_1/c)=G(T) && l_1/c+l_2/c<T\leqslant 2l_2/c\\
&\varepsilon(t)-\varepsilon(t-2l_1/c)=G(T)-G(T-2l_2/c) && T>2l_2/c
\end{aligned}\tag{1}$$

$$\begin{aligned} v(t) &= -cG(T) && T \leqslant l_1/c + l_2/c \\ v(t) - v(t-2l_1/c) &= -cG(T) && l_1/c + l_2/c < T \leqslant 2l_2/c \\ v(t) - v(t-2l_1/c) &= -c[G(T-2l_2/c) + G(T)] && T > 2l_2/c \end{aligned} \tag{2}$$

式中：c 为杆中应力波波速，$t = T - (l_2 - l_1)/c$，为应力波到达透射杆左侧端面的时间，T 是应变片记录的时间，二者相差一恒值。由此，给出透射杆端面与试件的作用力

$$F(t) = E\varepsilon(t)S \tag{3}$$

式中：E 和 S 为透射杆的杨氏模量和截面积。对于子弹 2，相对于透射杆长度很短，应力波来回时间远小于总作用时间，且自身变形远小于柱壳压缩量，可将其近似视为刚体。同时因为柱壳尺寸小、质量轻，可以近似认为柱壳两端作用力一样，则子弹 2 的速度

$$v_2(t) = v_0 + \int a\,\mathrm{d}t = v_0 + \int \frac{F(t)}{m}\mathrm{d}t \tag{4}$$

式中：v_0 为子弹初速度，a 和 m 分别为子弹 2 的加速度和质量。柱壳的压缩量

$$\delta(t) = \int [v_2(t) - v(t)]\mathrm{d}t \tag{5}$$

至此，试件的受力以及横向压缩量都已理论上得到解决。具体处理实例如图 4 所示，图 4(a)为实验 ss-3 中透射杆上应变片记录的原始电压信号，因为应力波反射引起了 1 次信号突降，但这并不意味着柱壳在对应变形下的结构强度会突降。由上述波形处理方法还原并经适当光滑后得到柱壳的受力时程曲线，如图 4(b)所示，相比图 4(a)，曲线的连续性得到极大改善。

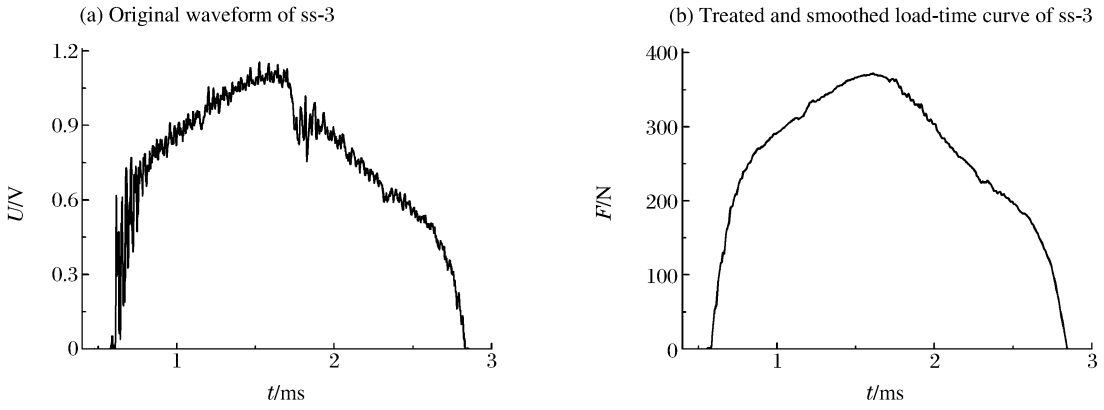

图 4 波形处理实例

Fig. 4 Example of waveform processing

2 实验结果及分析

共进行了 7 次有效实验，具体参数及主要结果列于表 1，实验编号 ss-x 代表无侧向约束，ff-x 代表有侧向约束。

表 1 实验参数和结果

Table 1 Experimental parameters and results under radial impact

No.	$v_0/(\mathrm{m\cdot s^{-1}})$	δ_{max}/mm	δ_{max}/D	F_{max}/N	E_0/J	E_d/J	$\chi/(\mathrm{J\cdot g^{-1}})$	$\eta/\%$
ss-1	3.17	1.59	0.199	287	0.347	0.038	0.58	10.9
ss-2	3.70	2.05	0.256	309	0.473	0.086	0.79	18.2
ss-3	4.69	2.91	0.364	368	0.759	0.162	1.26	21.3
ss-4	6.73	4.20	0.530	659	1.563	0.890	2.60	57.0
ff-1	3.83	1.08	0.135	748	0.506	0.124	0.84	24.5
ff-2	4.74	1.38	0.173	854	0.775	0.238	1.29	30.7
ff-3	5.28	1.50	0.188	1 037	0.962	0.338	1.60	35.1

表中，缓冲能量 E_0 近似取为子弹 2 初动能，除以柱壳试件的质量 m_0 即为缓冲能量密度 χ，耗散能量 E_d 为柱壳载荷位移曲线滞回面积，与缓冲能量 E_0 的比例即为耗能比例 η。实验 ss-4 中，柱壳变形过大而发生破坏，设定的测量时间内未卸载完成，没有记录到完整的响应波形，有关结果为估算值，后文中将详细说明。

2.1　无侧向约束的实验结果及分析

2.1.1　较低冲击速度下的响应

除 ss-4 外，其余 3 次无侧向约束实验回收试件均无任何残留变形，按照前文中的数据处理方法得到其载荷压缩量曲线，如图 5 所示。结果表明，柱壳横向加卸载具有明显的阶段性，受力平台段特征突出。图 6 所示为实验 ss-3 中试件在不同压缩量下的高速摄影照片，主要表现为对称变形模态。图 6 中 5 幅照片分别对应图 5 中 $A\sim E$ 这 5 个点的变形状况。

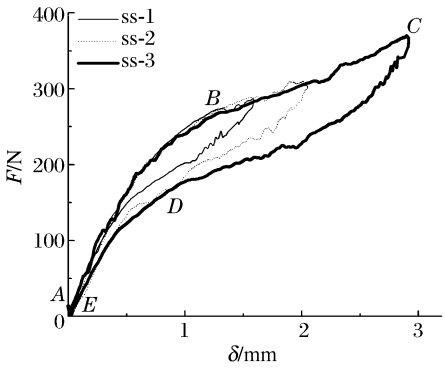

图 5　无侧向约束试件的载荷-压缩曲线

Fig. 5　Load-compression curves without constraint

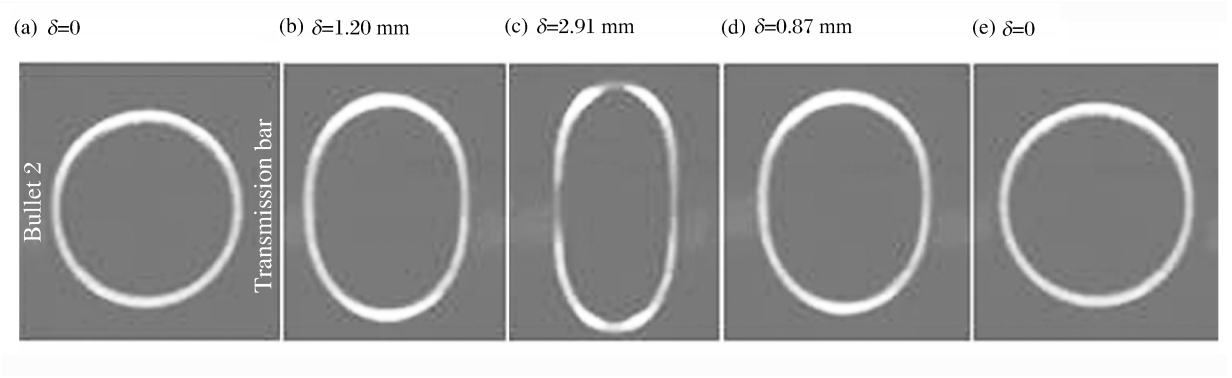

图 6　ss-3 的高速摄影照片

Fig. 6　High speed CCD images of ss-3

2.1.2　较高冲击速度下的响应

图 7(a)所示为实验编号 ss-4 的应变片原始波形，其中 CD 段是试件断裂引起的载荷突降。图 7(b)中 $A\sim G$ 这 7 个点分别对应图 8 中 7 幅高速摄影照片，作为比较，实验 ss-3 的曲线一并绘出。

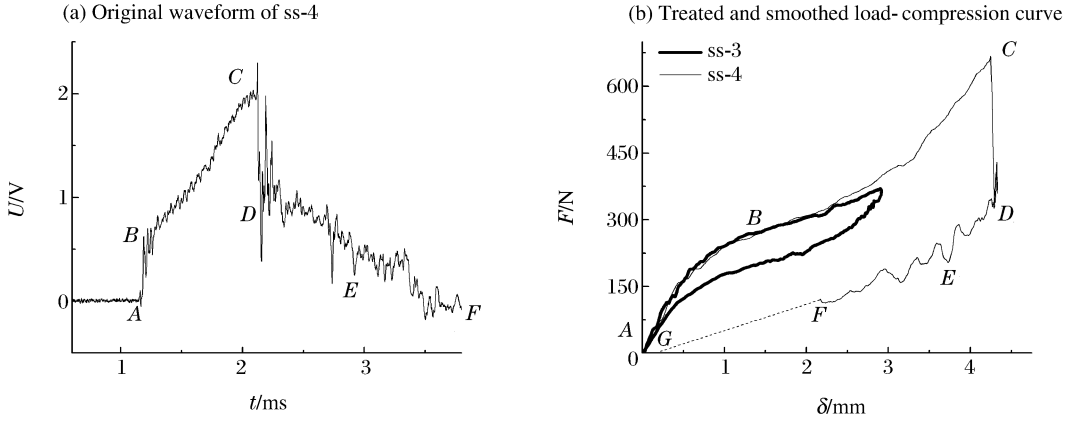

图 7　ss-4 的力学响应结果

Fig. 7　Mechanical response of ss-4

图 8 所示的实验 ss-4 中试件照片处在不同时刻。加载初始阶段,载荷压缩位移曲线与冲击速度较小的 ss-3 重合较好,但变形模态上有一定差距,靠近子弹 2 端变形更加集中。随着进一步的加载,载荷增大变快,变形也趋于对称,当压缩量达到 4.2 mm(相对压缩量为 0.530)时,柱壳发生了破坏,载荷迅速下降,但同时也保持了相当的残余强度,没有被完全压溃,避免了子弹与透射杆间的直接撞击。因为作用时间过长,未能记录到完整的卸载波形,但是由图 8 可知,至作用结束时,柱壳已经恢复了绝大部分变形,按照载荷位移曲线的发展趋势在图 7(b)中假设了 FG 段,用以估算柱壳的耗能。通过比较载荷位移曲线,可知 ss-4 的缓冲能量和耗散能量均远高于 ss-3,折合成缓冲能量密度 χ 和耗能比例 η,其值分别达到了约 2.6 J/g 和 57%。

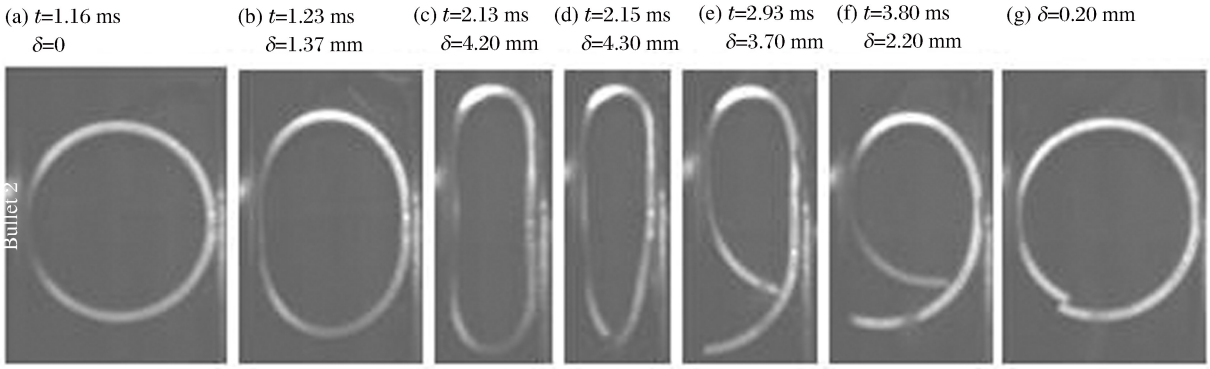

图 8 ss-4 高速摄影照片

Fig. 8 High speed CCD images of ss-4

2.2 有侧向约束实验的结果及分析

图 9 给出了 ff-1、ff-2 和 ff-3 这 3 次实验的力学响应结果,图 10 所示为其中冲击速度最大的实验 ff-3 的高速摄影照片,图中 6 幅照片分别对应图 9 中 A～F 这 6 个点的变形量。

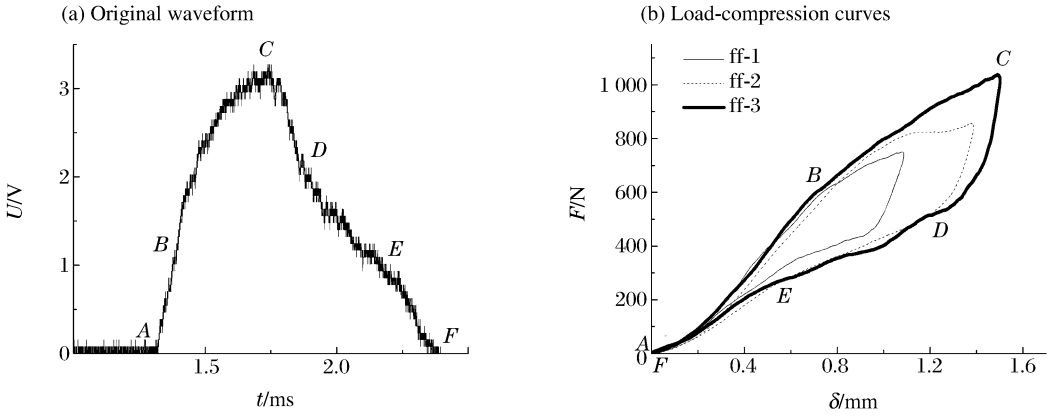

图 9 有侧向约束试件的力学响应结果

Fig. 9 Mechanical response of specimen with lateral constraint

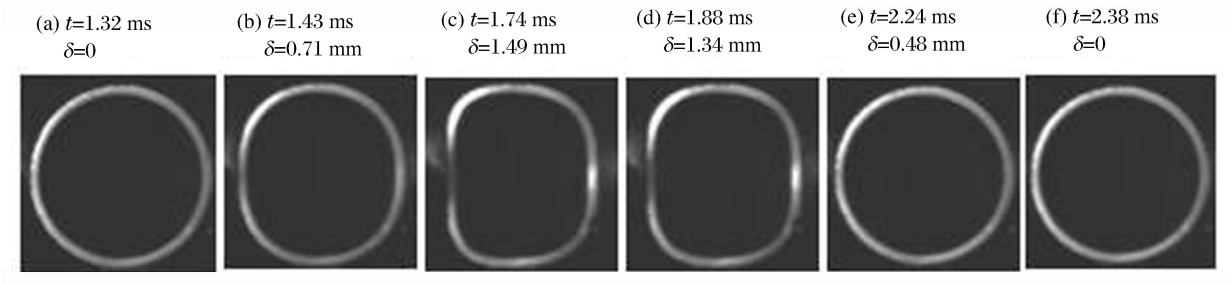

图 10 ff-3 的高速摄影照片

Fig. 10 High speed CCD images of ff-3

与无侧限结果差别较大的是，加载曲线并没有出现明显的平台段，甚至是先有一个硬化的趋势，至变形较大时才出现了一定的软化，而卸载过程则阶段性相对明显。需要注意的是，载荷压缩量曲线，不仅仅是柱壳变形的结果，还包含有约束壁摩擦力的影响，因此可以猜想侧向约束在耗能方面当有一定的优势。变形模态方面，近子弹端在加载时首先发展，卸载时最后恢复，具有明显的不对称性。

2.3　动态实验结果与准静态实验结果比较

图 11 为无侧限情况下，静、动态实验结果的比较。弹性加载阶段，2 条载荷压缩量曲线基本重合，部分材料发生相变以后，动态实验载荷高于准静态实验的。可能的原因是：动态过程中，相变区域潜热释放来不及传递到环境中，造成柱壳材料温度升高，导致 TiNi 合金相变平台升高，从而提高了柱壳的整体强度[13]。图 11(b)～(c)所示为相同压缩量下静、动态实验的变形图片，两者大抵相似，均为对称变形，但是准静态过程中，平板附近的内凹屈曲现象似乎更明显，变形模态的区别也可能带来载荷压缩量曲线的不同。

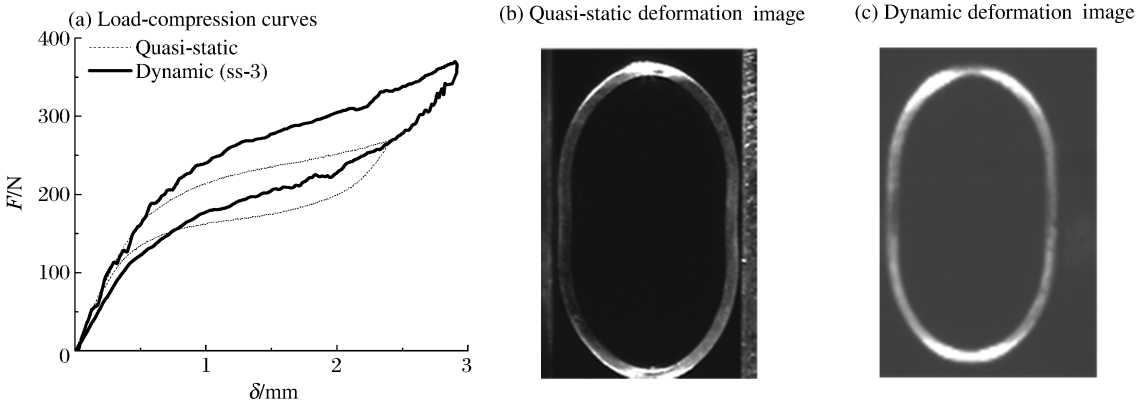

图 11　无约束试件动静态实验结果比较

Fig. 11　Comparsion of quasi-static and dynamic compression without lateral constraint

图 12 所示为带侧向约束情况下，静、动态实验结果的比较。载荷压缩量曲线方面，初始阶段差异显著，静态实验载荷明显大于动态实验的，随着变形的增大，2 条曲线开始趋于一致，动态实验载荷略高于静态值。分析其中原因可能为：动态实验中，柱壳与约束之间属于间隙配合，在变形的初始阶段，横向约束尚未起作用，当变形到一定程度时，横向扩张到约束壁，载荷再迅速增加。这个凹槽加工精度带来的意外结果也给了新的思路：通过调整试件与约束壁间的间隙来实现对载荷位移曲线形状的调节，同时得到大行程和高耗能的效果。动态实验中，变形主要集中在近子弹端，而准静态实验中，则固定端变形更大，但在形状上，二者的表现非常相似，近乎水平镜像关系。

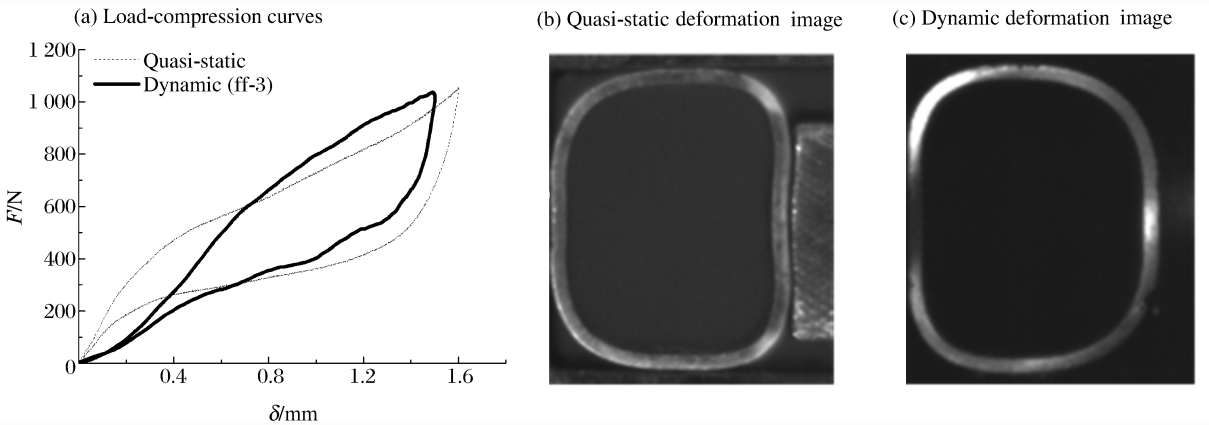

图 12　有约束试件动静态实验结果比较

Fig. 12　Comparsion of quasi-static and dynamic compression with lateral constraint

2.4 缓冲和吸能特性

图 13(a)中同时给出了实验 ss-3 和 ff-3 的载荷位移曲线,可以看出,无侧限的试件,压缩量大,受力小,缓冲性能较好;而有侧限的试件,承载能力较高,压缩量较小,没有明显的平台段。将无侧限的 ss-1、ss-2 和 ss-3,以及有侧限的 ff-1、ff-2 和 ff-3 等波形完整的 6 次实验的相关结果绘制于图 13(b)中,其中横坐标为缓冲能量 ,也即是子弹的初动能,纵坐标为耗散能量 。图 13(b)显示,带侧限组的柱壳耗能要明显高于不带侧限组,其中即包括约束端增加后相变铰区增多的影响[6],也包括摩擦耗能的贡献。经过换算,无侧向约束试件最高缓冲能量密度约为 1.26 J/g,耗能比例约 21%(ss-3);有侧向约束试件最高缓冲能量密度约为 1.6 J/g,耗能比例约 35%(ff-3)。

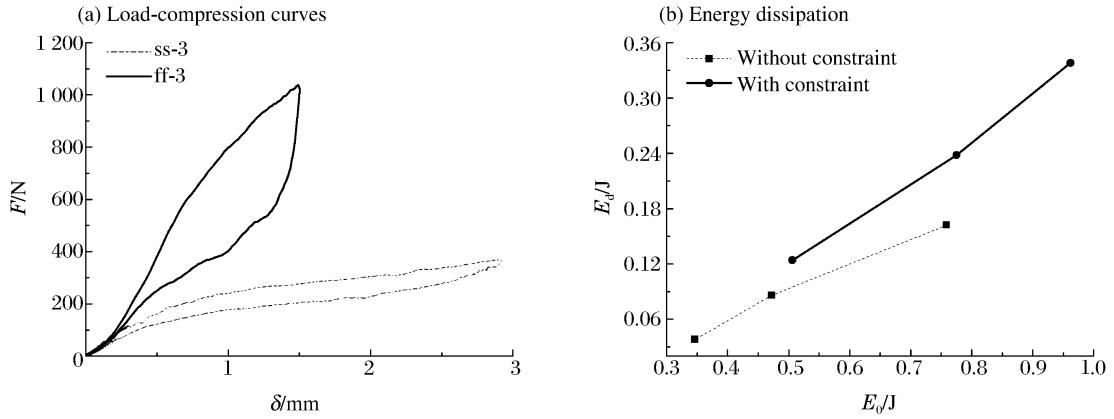

图 13 不同约束下的抗冲吸能性能比较

Fig. 13 Comparison of shock resistance and energy absorption features under various constraints

3 结 论

本文中对单个 TiNi 柱壳在无侧限和有侧限 2 种条件下的横向冲击特性进行了研究,结果表明:

(1)无侧限试件具有良好的缓冲性能,在 36%的相对压缩量范围内可完全恢复,作用力平台段特征明显,TiNi 合金材料最大缓冲能量密度约为 1.26 J/g,耗能比例约 21%。在较高速度冲击下,柱壳在相对压缩量约 0.530 时发生破坏,但残留强度较高,仍然能够完成后续的缓冲、耗能的功效,并恢复了绝大部分变形,其缓冲能量密度和耗能比分别达到了约 2.6 J/g 和 57%。

(2)有侧限情况下,柱壳相对压缩量减小,在约 18%的相对压缩范围可以保证恢复,优点是能够承受更大速度的冲击,耗能能力也大幅提高,其最高缓冲能量密度和耗能比例分别达到 1.6 J/g 和 35%。

(3)采用合理的约束组合,如调节柱壳与约束壁之间的间隔,在压缩的不同阶段实现不同的约束,兼顾无侧限试件的大压缩量和有侧限试件的高耗能特性,有望开发出更加实用的抗冲吸能装置。

参考文献:

[1] 余同希. 利用金属塑性变形原理的碰撞能量吸收装置[J]. 力学进展,1986,16(1):28-39.
Yu Tong-xi. Impact energy absorbing devices based upon the plastic deformation of metallic elements[J]. Advances in Mechanics, 1986,16(1):28-39.

[2] Khan M M, Lagoudas D C, Mayes J J, et al. Pseudo-elastic SMA spring element for passive vibration isolation: Part Ⅰ: Modeling[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2004(15):415-441.

[3] Lagoudas D C, Khan M M, Mayes J J. Pseudo-elastic SMA Spring element for passive vibration isolation: Part Ⅱ: Simulations and experimental correlations[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2004(15): 443-470.

[4] Rivin E I, Sayal G, Johal P R S. "Giant Superelasticity Effect" in NiTi superelastic materials and its applications [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006,18(6):851-857.

[5] Dong Yin-sheng, Xiong Jiu-lang, Li Ai-qun, et al. Evaluation of properties for a passive damping device with TiNi

rings as dissipating elemen[J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2005,21(3):310-313.

[6] Zhang Ke, Zhang Hui-jie, Tang Zhi-ping. Experimental study of thin-walled TiNi tubes under radial quasi-static compression[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011,22(18):2113-2126.

[7] 徐薇薇. 几种基本构件的冲击相变响应的数值模拟研究[D]. 合肥：中国科学技术大学，2009:131-158.

[8] 唐志平，张会杰. 相变柱壳的横向冲击特性[J]. 爆炸与冲击，2013,33(1):47-53.
Tang Zhi-ping, Zhang Hui-jie. Radial impact responses of cylindrical shells with phase transformation[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(1):47-53.

[9] 巫绪涛，胡时胜，张芳容. 两点应变测量法在 SHPB 测量技术上的运用[J]. 爆炸与冲击，2003,23(4):309-312.
Wu Xu-tao, Hu Shi-sheng, Zhang Fang-rong. Application of two-point strain measurement to the SHPB technique [J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(4):309-312.

[10] Lundberg B, Carlsson J, Sundin K G. Analysis of elastic-waves in nonuniform rods from 2-point strain-measurement[J]. Journal of Sound and Vibration, 1990,137(3):483-493.

[11] Park S W, Zhou M. Separation of elastic waves in split Hopkinson bars using one-point strain measurements[J]. Experimental Mechanics, 1999,39(4):287-294.

[12] Zhao H, Gary G. A new method for the separation of waves: Application to the SHPB technique for an unlimited duration of measurement[J]. Journal of The Mechanics and Physics of Solids, 1997,45(7):1185-1202.

[13] Saadat S, Salichs J, Nooriet M, et al. An overview of vibration and seismic applications of NiTi shape memory alloy[J]. Smart Materials & Structures, 2002,11(2):218-229.

Experimental study of TiNi tubes under radial impact with and without lateral constraint

Zhang Ke, Tang Zhi-ping

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

Abstract: TiNi tubes with and without lateral constraint subjected to radial impact were investigated experimentally for the purpose of developing repeatedly used energy absorption devices. By using a modified SHPB apparatus and wave separation technique, the signal recorded was extended to about 3ms, and then the load-compression curves were available. With a high speed CCD camera, the dynamic deformation process of the specimens was captured. The results show that TiNi tubes without lateral constraint have an excellent recoverable deformability with apparent loading platform. The tubes with lateral constraint have a much better performance of energy dissipation and are able to withstand higher speed impact. If properly choosing the combination of two constraints, it may improve its dynamic performance both in the large deformation and high energy dissipation and will be used in the future shock absorbing devices.

Key words: mechanics of explosion; radial impact; shock resistance and energy absorption; TiNi tubes

（责任编辑　王易难）