文章编号：1001-1455(2014)04-0444-07 **DOI**：10.11883/1001-1455(2014)04-0444-07

TiNi 合金圆薄板的横向冲击特性实验*

崔世堂，唐志平，郑 航
（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 230031）

摘要：利用改装的霍普金森压杆装置对周边固支伪弹性 TiNi 合金圆薄板进行了冲击实验，初步得到了该结构在时空 2 个尺度上的动态力学响应的演变发展现象和规律，包括板中弯曲波的传播、相变区的演化和全场的离面位移等，并和 A3 钢做了对比。结果表明，由于圆板的二维扩散效应，冲击过程中仅在 TiNi 板中心很小区域（约 5 mm）内形成相变区和相变铰，卸载后相变铰消失，钢试件则留下明显的残余变形。TiNi 合金圆板的冲击特性受热弹性马氏体相变和逆相变的支配，不同于传统的弹塑性机制。

关键词：固体力学；冲击相变；改装的霍普金森压杆装置；形状记忆合金；相变铰；弯曲波
中图分类号：O347.3 **国标学科代码**：1301515 **文献标志码**：A

形状记忆合金作为一种新型智能材料，具有形状记忆功能以及独特的伪弹性特性。处于伪弹性状态的 TiNi 合金，其相变滞回环可以吸收能量，且没有残余变形，在工程结构抗震防护、冲击吸能方面显示了潜在的优势，已在复合材料抗冲击领域得到较广泛应用。J. S. N. Paine 等[1]发现，尽管形状记忆合金纤维的体积分数仅 2.8%，却能极大地提高复合材料梁的抗冲击破坏能力和吸能能力。V. Birman 等[2]研究表明，低速冲击下含形状记忆合金纤维的碳/环氧层合板的挠度可降低 1/3 左右。对于 TiNi 形状记忆合金结构件在冲击条件下的动态力学行为的研究，十分有限。唐志平等[3]和张兴华等[4-5]对处于伪弹性状态的 TiNi 合金悬臂梁进行了冲击实验研究，发现和普通弹塑性梁迥然不同的运动、变形和吸能特性，并提出“相变铰”的概念。吴会民等[6]和黄赫等[7]对 TiNi 合金固支梁进行了冲击实验，指出由于轴力的作用相变铰成为拉伸侧的单边铰，具有和塑性铰不同的特性。唐志平等[8]研究了 TiNi 合金圆柱薄壳的结构冲击响应和屈曲模态。

本文中，对伪弹性状态 TiNi 形状记忆合金圆薄板进行冲击实验，并和弹塑性钢板比较，了解 TiNi 圆薄板的冲击响应特性以及复杂应力状态下相变区域的传播规律。

1 实 验

1.1 TiNi 合金材料性能

TiNi 合金板成分为 $w(\mathrm{Ti})=49.1\%$，$w(\mathrm{Ni})=50.9\%$，室温下处于伪弹性状态。用 MTS809 试验机测得该材料室温下的拉伸力学参数如下（材料性能测定所用试件与下文实验所用试件取自同一块 TiNi 合金板）：弹性模量为 62 GPa，密度为 6 450 kg/m^3，泊松比为 0.3，相变起始应力和完成应力分比为 465 和 545 MPa；逆相变的起始应力和完成应力分别为 248 和 160 MPa，相变应变为 0.04。

1.2 实验装置

实验在中国科学技术大学经过改造的∅37 mm 分离式 Hopkinson 压杆上进行，实验装置如图 1 所示。TiNi 合金板试样尺寸为 220 mm×220 mm×2 mm，用 12 个 M10 预应力螺栓把试件固定在两块钢板（钢板厚度 10 mm）之间，钢板中间开有∅180 mm 的圆孔（即试件的实际实验尺寸）并固定在支座上。子弹材料为 45 钢，经过热处理以提高表面硬度。子弹的直径为 14 mm，长度分别为 200 和 100 mm，头部呈半球形，确保撞击时近似满足点接触的条件。用高速摄像机 CCD1（Phantom V7.1）拍

* **收稿日期**：2012-11-30；**修回日期**：2013-02-01
基金项目：国家自然科学基金项目（11072240）；安徽省自然科学基金项目（1408085ME84）
作者简介：崔世堂（1978— ），男，博士研究生。

摄子弹撞击过程，拍摄频率为 10 000 s^{-1}，观察子弹和板的相互作用过程。采用阴影云纹法测量加载过程中板的全场挠度分布，光栅置于板前方 10 mm 处，用高速摄像机 CCD2(Phantom V12.1)记录云纹的变化，拍摄频率为 50 000 s^{-1}。为了增加云纹图像的对比度，试件表面喷涂亚光白漆，光源采用脉冲氙灯。第 N 级条纹处的挠度近似计算公式为：

$$w_N = \frac{NL}{D/P - N} \tag{1}$$

式中：参考栅节距 P=0.2 mm，光源与相机之间的距离 D=36 mm，光栅到光源的距离 L=58 cm。

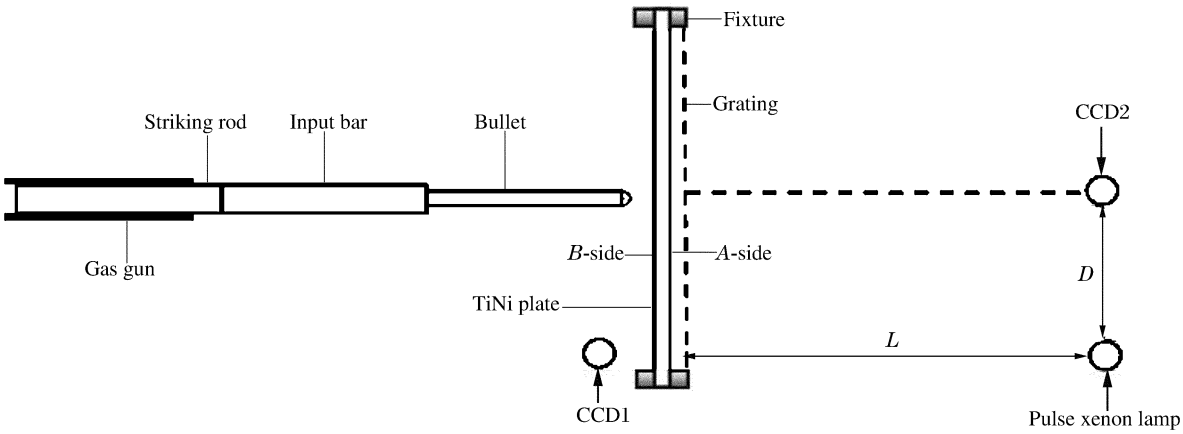

图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Experiment apparatus sketch

板的两侧共粘贴 11 个应变片(黄岩测试仪器厂，BX120-1AA 型，敏感栅尺寸 1mm×1mm，阻值(119.7±0.1) Ω，灵敏度系数 2.08(1±1%))。应变片 A 代表自由侧，应变片 B 代表加载侧。下标第 1 个数字代表应变片所在的位置，位置 1～4 距离板中心的距离分别为 5、30、55 和 85 mm，第 2 个数字 1 和 2 分别代表径向和环向，应变片 A_0 粘贴在 A 侧板中心，如图 2 所示。

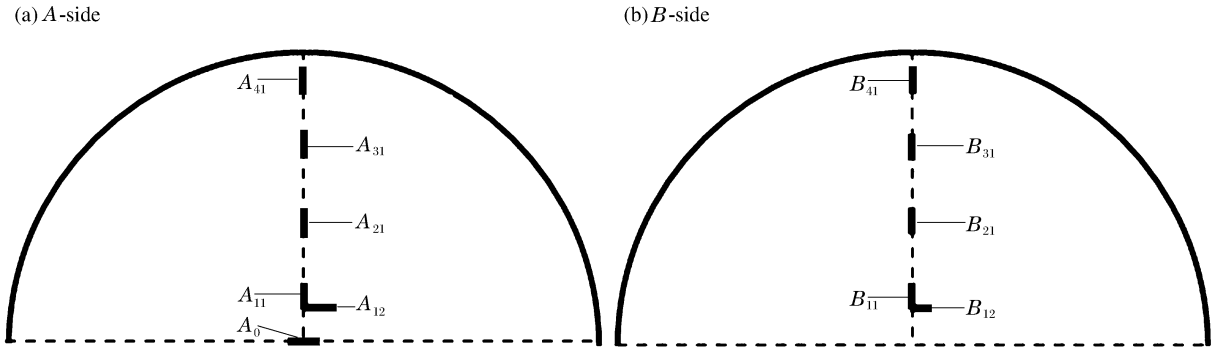

图 2 应变片位置示意图

Fig. 2 Sketch of strain gauge location

2 实验结果

共进行了 6 次实验，主要的实验结果见表 1。l 为子弹长度，v_1 和 v_2 分别为子弹撞击前的瞬间速度和撞击后的回跳速度，由 CCD1 拍摄的图像判读。w_m 为板中心最大挠度，通过处理 CCD2 上拍摄的云纹图像得到。w_{re} 为剩余挠度扰度。e_d 为耗散能，是撞击前后子弹损失的动能。实验后 TiNi 试件观测不到残余挠度，而回收的 A3 钢试件测量到明显的残余挠度。图 3 是实验 1 中典型时刻的云纹记录图像，图 4 是根据云纹图像得出不同时刻沿径向的挠度曲线。

表 1 主要实验结果

Table 1 Experimental results

实验	试件	材料	l/mm	v_1/(m·s^{-1})	v_2/(m·s^{-1})	w_m/mm	w_{re}/mm	e_d/J
1	1	TiNi	200	4.74	3.56	3.01	—	1.162
2	2	TiNi	200	5.33	4.23	3.98	—	1.247
3	2	TiNi	100	6.52	4.30	2.36	—	1.408
4	3	TiNi	100	6.78	3.91	2.51	—	1.799
5	4	A3	200	4.74	2.70	2.24	0.47	1.801
6	5	A3	100	8.64	5.45	2.53	0.49	2.635

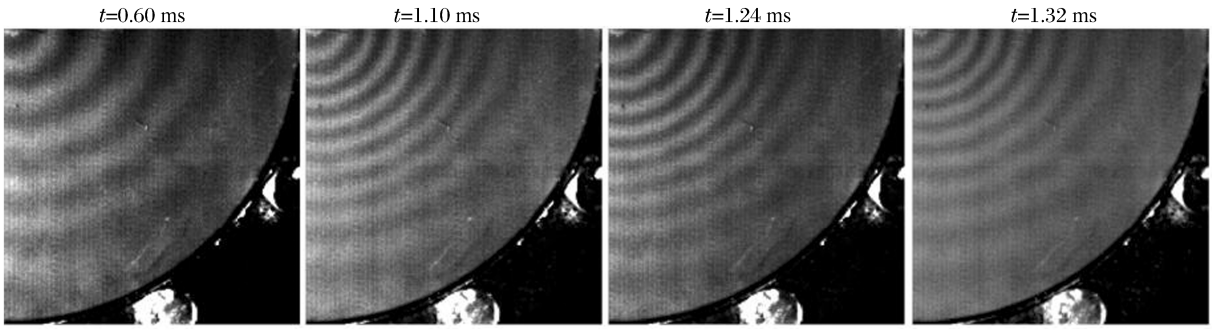

图 3 实验 1 云纹图

Fig. 3 The moire patterns of experiment 1

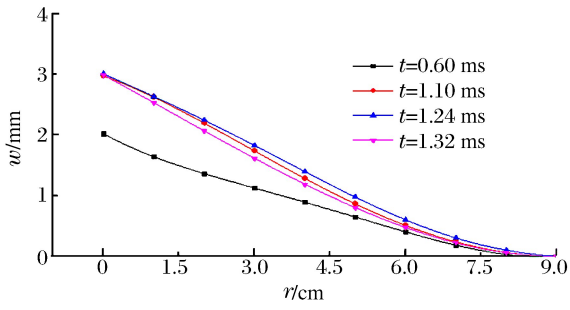

图 4 挠度曲线

Fig. 4 The deflection curves

2.1 TiNi 合金板的横向冲击行为

子弹以一定速度和板发生碰撞后，将向板内传入一道弯曲波和一道剪切波，使板发生运动和变形，同时向子弹内传入一道压缩波，使子弹的运动速度减小。由于剪切波的幅值比较小，板的变形主要由弯曲波引起。子弹和板的响应以及碰撞点的接触状态，取决于波在子弹和板内的传播和作用。

图 5 是实验 1 测得的 5 ms 内的应变波形，仔细观察该记录波形，可见如下特征：(1)AB 两侧 1、2、3 和 4 处对称粘贴的应变波形呈现对称结构，只是应变幅值上稍有差别，表明主要呈现动态弯曲响应。(2)所有波形均叠加周期约 77 μs 的高频震荡，该周期和波在子弹中往返一次的时间基本相同，说明这种高频振荡是由于波在子弹中传播所致。(3)从空间分布看，2、3 和 4 处的应变信号比较小(小于 0.002)，远低于相变临界应变 0.007 5，可以推测整个冲击过程中，离板中心 30 mm 以外的区域都处于弹性状态，并没有发生相变。中心 A_0 处最大应变信号远超过相变临界应变，A_{12} 信号则略高于相变临界应变，说明相变区分布可能略大于 5 mm 以内。(4)从时域过程看，尽管板内波系复杂，按 A_0 处的应变信号可以把冲击过程板的动态结构响应划分为 3 个阶段：阶段 1(0～1.24 ms)为加载段，A_0 应变信号呈现总体上升态势，阶段 2(1.24～2.36 ms)为卸载段，A_0 应变信号呈现总体下降态势，其中 1.80 ms 后应变信号的波动增加由板和子弹再次撞击产生，阶段 3(2.36 ms后)为自由振动段，A_0 的应变信号呈现周期性的变化。

我们进一步分析加载段的响应，A_0 在约 1.24 ms 时径向应变达到最大值为 0.022 8，A 侧 1 处应变最大值仅为 0.006 7，时间略有延迟。可以看出，弯曲波自中心向外传播，由于二维效应沿径向迅速衰减。由于冲击过程中板内波系比较复杂且相互作用，弯曲波自中心向外传播的过程中，很难保证不受干扰，实验中 2、3 和 4 处的应变信号则是波系综合作用的结果。

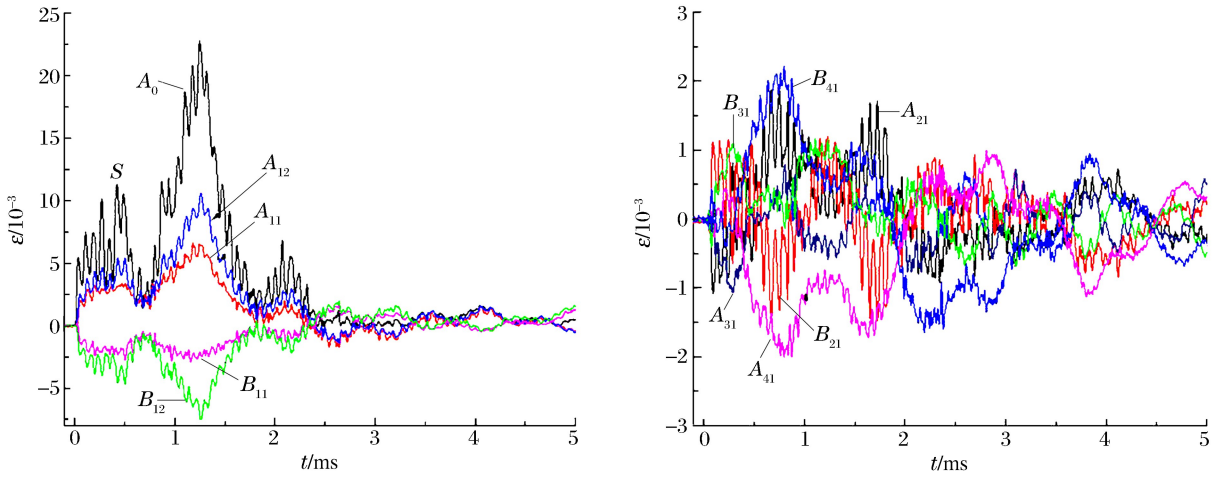

图 5　实验 1 中测得的应变波形

Fig. 5　Strain wave profiles of experiment 1

图 6 是 0.2 ms 内的应变波形，可见每个应变信号头部均出现正负交替变化，而且幅值逐渐增大，周期逐渐变长，这正反映了弯曲波的弥散特性。利用实验测得的材料参数，可以计算 TiNi 合金弹性弯曲波头波速为 1 783 m/s[9]。根据图 6 中 A_0 与 A_{21}、A_{21} 与 A_{31}、A_{31} 与 A_{41} 的起跳时间，可以得到 3 个区段内弯曲波速 c_{02}、c_{23} 和 c_{34} 分别为 1 739、1 732 和 1 698 m/s，似乎有下降趋势，平均为 1 723 m/s，略小于理论波速，基本相符。弯曲波从碰撞中心至板的边界往返一次约 100 μs，一般往返 3～5 次后（约 0.3～0.5 ms，对应于图 5(a)中的点 S），可以认为试件从波动响应为主过渡到以动态结构响应为主，即点 S 把板的响应时域划分为波动响应阶段和结构响应阶段。有趣的是，紧跟点 S 后波形有一个明显跌落，意味着子弹和靶板有短暂分离。图 7 是高速 CCD1 记录得到的子弹位移和速度曲线，相应时刻（0.5～0.8 ms）子弹速度变化很小，也说明两者有短暂脱离。

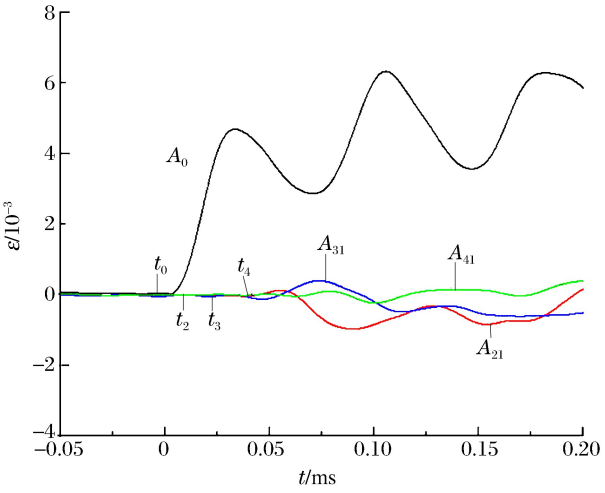

图 6　局部应变波形

Fig. 6　Local strain wave profiles

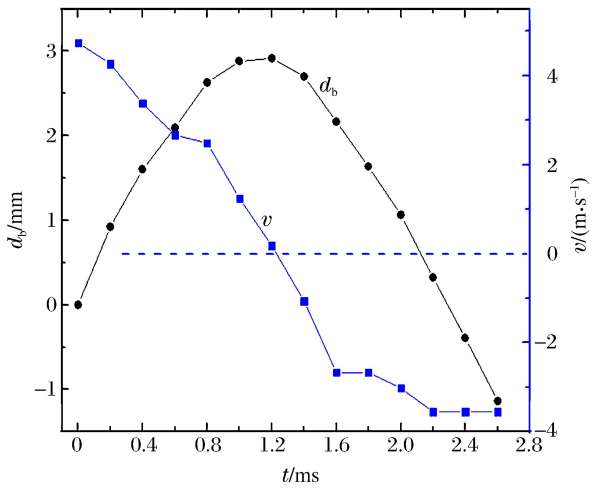

图 7　实验 1 子弹的位移和速度

Fig. 7　Displacement and velocity of bullet in expriment 1

由于板内材料处于复杂应力状态，仅凭径向或环向应变无法判断材料是否发生相变，我们采用等效应变观察[10-11]。图 8 是 A_0 以及 AB 两侧 1 处 3 ms 内的等效应变图，可以看出：(1)在 0.260 ms（点 a）时，A_0 处的等效应变首次超过相变临界应变，表明 A 侧中心表层材料开始发生奥氏体至马氏体的转变。由于子弹和板短暂脱离，0.5 ms 左右应变下降，到 0.854 ms 时（点 b），A_0 处的等效应变值再次超过 0.007 5，表明中心材料重新进入相变状态。随后板在子弹推动下，A 侧 A_0 和 1 处的等效应变均呈上升趋势，表明相边界自中心向外传播。在 1.256 ms 时，A 侧 1 处的等效应变最大值为 0.007 9，超过相变

临界应变，说明 A 侧相变区已经传播到距中心 5 mm处，由此可以初略的算出撞击下薄板的相变区(相边界)平均传播速度为约 12.4 m/s。(2)B 侧 1 处等效应变最大值仅为 0.005，表明还未发生相变，两侧相变区呈现非对称性，拉伸侧大于压缩侧，这是由于材料的拉压不对称性以及局部膜力导致的。(3)A_0 处的等效应变最大值为 0.018(点 d)，而 1 处仅为 0.007 9，可见由于板的二维效应幅值有很大的衰减。(4)1.092 ms(点 c)时，A_0 处的等效应变达到 0.015，超过 2 倍等效相变临界应变，表明在 A 侧中心处形成了相变铰[8]，相变铰区将承受主要变形和吸能作用。

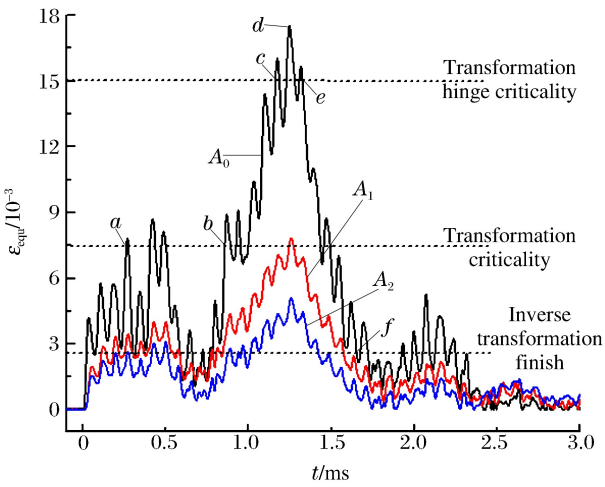

图 8 等效应变

Fig. 8 Equivalent strain

卸载段持续的时间为约 1.10 ms，和加载时间基本持平。卸载过程中板推动子弹向回运动，子弹有一个反向加速的过程。由图 8，A_0 和 A、B 两侧 1 处的应变减小，相变区收缩。1.325 ms(点 e)时，A_0 处的等效应变开始低于 0.015，A 侧中心区的相变铰消失，相变铰存在的时间为约 0.24 ms。1.650 ms 时，A_0 处的等效应变小于等效逆相变完成应变 0.002 6，表明逆相变完成，板处于纯奥氏体相。2.34 ms 后，卸载完成，整个板进入自由振动状态。

2.2 钢板的横向冲击行为

钢板试件上贴有 8 个应变片，1、2 和 3 处离板中心的距离分别为 5、45 和 85 mm，应变片命名规则以及测量方法和 TiNi 合金板相同。

图 9 是实验 5 记录的应变波形，比 TiNi 板波形平滑，A、B 两侧相同位置处的应变波形基本对称，A 侧幅值稍大，两侧环向应变明显大于径向应变。两侧 2 和 3 处的径向应变比较小(小于 0.002)，可推测 2 和 3 处仍处于弹性状态。子弹冲击钢板的动态响应过程也可以分为 3 个阶段，加载段(0～0.894 ms)、卸载段(0.894～1.865 ms)和自由振动段(1.865 ms 后)，如图 10 所示。

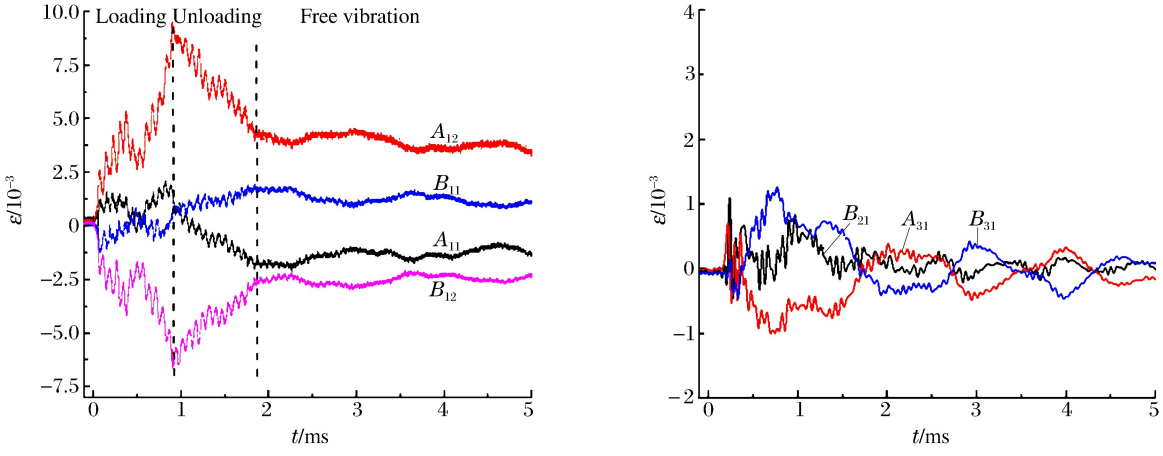

图 9 实验 5 中测到的应变波形

Fig. 9 Strain wave profiles of expriment 5

图 10 给出了钢板 A、B 两侧 1 处 3 ms 内等效应变随时间变化曲线，可以看出，从约 0.5 ms 开始，A 侧的应变开始比 B 侧的大，这主要是由于该处的膜力较大所致。0.894 ms 时，A、B 两侧等效应变达到最大值分别为 0.005 7 和 0.004 6，远大于临界塑性等效应变，可推测加载过程中板中心形成塑性区的半径超过 5 mm，塑性区一旦形成，它将承担板中主要的变形和能量的吸收。在 0.5 ms 左右，1 处应变突然下降，是由于子弹和板有短暂脱离造成的。

卸载阶段持续时间为 0.971 ms，比加载时间略长。到 1.865 ms 时，卸载过程结束，此时 A、B 两侧 1 处的残余等效应变分别为 0.003 4 和 0.002 6，形成永久塑性区，可推测塑性区的半径不小于 5 mm。1.865 ms 后，从高速 CCD1 的图像可以看出，子弹和板已经完全脱离，板处于自由振动状态。回收样品具有残余挠度，见表 1。

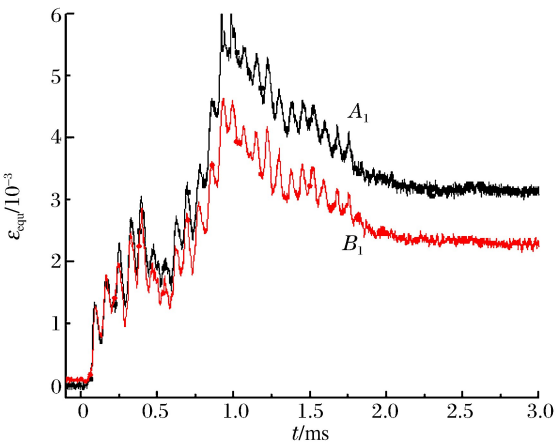

图 10　等效应变

Fig. 10　Equivalent strain

3　结论与讨论

对处于伪弹性状态 TiNi 合金圆薄板和圆薄钢板，在相同约束条件下进行了横向冲击实验，并对比了两种材料板的动态响应，结果表明：

(1)冲击加载条件下，TiNi 合金板的早期响应以弯曲波传播的波动响应为主，弯曲波在板内往复传播 3～5 次(约 0.5 ms)后，板逐渐过渡到以整体结构响应为主。

(2)相变首先发生在撞击点附近的中心区域并形成相变铰，相变区以及相变铰区具有明显的可回复性并承担了大部分的变形和能量吸收。钢板中心区域进入塑性状态并形成塑性铰区。冲击完成后 TiNi 试件没有残余变形，而钢试件明显存在残余应变。TiNi 合金固支圆薄板的响应特性受其热弹性马氏体相变和逆相变支配，与钢试件的弹塑性行为有根本的不同。

(3)从实验结果看，钢试件的吸能效率优于 TiNi 合金试件，这是由于 TiNi 材料弹性模量比钢低而相变临界应力远大于钢的屈服应力，使在相同撞击条件下 TiNi 合金板中心的最大挠度比钢板大，TiNi 试件相变区的范围远小于钢试件塑性区的范围。

参考文献：

[1] Paine J S N, Rogers C A. The response of SMA hybrid composite materials to low velocity impact[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1994,5(4):530-535.

[2] Birman V, Chandrashekhara K, Sain S. An approach to optimization of shape memory alloy hybrid compositeplates subjected to low velocity impact[J]. Composites Part B: Engineering, 1996,27(5):439-446.

[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 bears 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. 横向冲击载荷下伪弹性 TiNi 合金举行悬臂梁结构响应的实验研究[J]. 实验力学，2008,23(1):44-52.
Zhang Xing-hua, Tang Zhi-ping, Li Dan, et al. Experimental study of the dynamic structural response of pseudo-elastic TiNi alloy rectangular cantilever beam upon a transversal impact[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008,23(1):44-52.

[5] Zhang Xing-hua, Tang Zhi-ping. Experimental study on the dynamic behavior of TiNi cantilever beams with rectangular cross-section under transversal impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010,37(7):813-827.

[6] 吴会民，汪玉，唐志平. 落锤冲击下伪弹性 TiNi 合金固支梁的响应特性研究[J]. 振动与冲击，2009,28(3):40-45.
Wu Hui-min, Wang Yu, Tang Zhi-ping. Response of a TiNi end-clamped beam under dropping hammer shock[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009,28(3):40-45.

[7] 黄赫，唐志平. 子弹冲击下 TiNi 固支梁的结构动态响应特性研究[J]. 实验力学，2012,27(1):93-101.
Huang He, Tang Zhi-ping. Investigation on structural dynamic response of a TiNi end clamped beam under transversal impact[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012,27(1):93-101.

[8] Tang Zhi-ping, Li Dan. Experimental investigation of axial impact buckling response of pseudo-elastic NiTi cylindrical shells[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012,39:28-41.

[9] Mindlin R D. Influence of rotatory inertia and shear on flexural motions of isotropic, elastic pates[J]. Journal of Applied Mechanics, 1951,18:31-38.

[10] Auricchio F, Taylor R L. Shape-memory alloys: Modeling and numerical simulations of the finite-strain superelastic behavior[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1997:143(1/2):175-194.

[11] Auricchio F, Taylor R L, Lubliner J. Shape-memory alloys: Macro modeling and numerical simulations of the super-elastic behavior[J]. Computational Methods in Applied Mechanical Engineering, 1997,146:281-312.

Experimental study on dynamic behavior of thin circular plate of TiNi alloy subjected to transversal impact*

Cui Shi-tang, Tang Zhi-ping, Zheng Hang

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

Abstract: The experimental investigation of thin circular plate of pseudo-elastic TiNi alloy under fixed supports and transversal impact loading was conducted using a revised apparatus of Hopkinson bar. The experimental result of pseudo-elastic TiNi alloy was compared with that of A3 steel. The nature of dynamic mechanical response of the structure in spatio-temporal scale, including the propagation of flexural wave in the plate, evolution of transformation zones and full-field out-of-plane displacement were derived. The results show that transformation zones and transformation hinge may generate near the center of the plate (about 5 mm) because of two-dimensional diffusion effect of the circular plate under impact loading. After unloading, the transformation hinge disappeared, and obvious residual deformation was observed in the A3 steel plate. The impact response of thin circular plate of TiNi alloy is controlled by the thermo-elastic martensite phase transformation and inverse transformation, which differs from the conventional elastic-plastic mechanism.

Key words: solid mechanics; shock-induced phase transition; revised Hopkinson bar apparatus; shape memory alloy; transformation hinge; flexural wave

---

* Received 30 November 2012; Revised 1 February 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (11072240)
Corresponding author: Tang Zhi-ping, zptang@ustc.edu.cn

(责任编辑 丁 峰)