DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-0946-06

约束层对金属柱壳膨胀变形影响的数值模拟*

任国武,温上捷,张 茹,郭昭亮,汤铁钢
(中国工程物理研究院流体物理研究所,四川 绵阳 621999)

摘要: 对金属铝和硬质聚氨酯泡沫组合的约束层对 45 钢柱壳膨胀断裂性能的影响进行了数值模拟,得到三种约束条件下 45 钢柱壳在膨胀过程中表面的速度和位移历史剖面,对比分析了在约束层作用下 45 钢柱壳膨胀变形动态行为。利用高速分幅相机及中能 X 光机获得了多个时刻 45 钢柱壳的动态图像和柱壳膨胀后的工程应变,实验结果与数值模拟结果吻合。结果可对爆轰加载下约束层对 45 钢柱壳膨胀变形的物理规律进行定量认识。

关键词: 柱壳;约束层;膨胀变形;X 光机
中图分类号: O347.3 **国标学科代码**: 13015 **文献标志码**: A

爆轰加载下典型轴对称柱壳会发生均匀膨胀变形、裂纹萌生、断裂直至破碎的动力学现象。发生在不同阶段力学现象的物理规律认识对于高应变率条件下物理模型的发展以及工程结构设计有着重要的指导意义。早在二战时期,R. W. Gurney[1] 基于经验的理论分析方法估算了内填炸药金属柱壳的极限膨胀速度,G. Z. Taylor[2] 和 R. H. Hoggatt 等[3] 考虑柱壳膨胀变形过程中壁厚内压拉应力转换理论,分别估算拉伸和剪切断裂模式的断裂应变。Al-Hassani 等[4] 进一步推广至球壳,并提出依赖于应变率的断裂应变模型。D. E. Grady 等[5-6] 和 A. G. Ivanov 等[7] 基于能量守恒观点研究柱壳的动态破碎并分别导出断裂应变与加载应变率的关系,建立系统描述柱壳失效过程的理论,奠定了对该过程开展数值模拟的基础。近年来,由于多种诊断工具(比如高速分幅相机、X 光机以及光学测速仪等[8-10])的出现,实验上获得了丰富的关于柱壳膨胀断裂物理过程的信息,比如高速分幅相机可获得间隔微秒量级多幅柱壳表面的动态图像,X 光机则拍摄到柱壳内部状态,光学测速仪能准确地测量到柱壳膨胀的速度信息以及回收金属破片的微观表征等。这些全面而又细致的实验数据极大地提高了对金属柱壳膨胀断裂过程物理行为的认知,完善了相关宏观物理模型。

事实上,对于工程上某些武器结构[11],内装炸药的金属柱壳装置外面还附加了缓冲层以及薄壁的金属壳(统称为约束层),约束层对所关注的金属柱壳膨胀断裂过程以及爆轰形成的冲击波在金属柱壳内传播都有着较大的影响。附带约束层的金属柱壳膨胀断裂行为是工程应用中非常关心的,但由于金属柱壳被包裹使得高速分幅相机或光学测速仪无法使用,X 光机则受限于穿透能力,因此要获得约束条件下金属柱壳膨胀断裂性能是比较困难的。

本文中利用光滑粒子方法(SPH)开展 LY12 铝和硬质聚氨酯泡沫组合的约束层对 45 钢金属柱壳爆轰条件下膨胀断裂性能影响的数值模拟,着重给出没有约束及两种厚度铝柱壳约束下 45 钢柱壳表面速度和位移剖面差异比较。同时结合中能 X 光机拍摄给出的不同时刻金属柱壳变形特征,讨论约束层对 45 钢金属柱壳膨胀变形性能的影响。

1 数值模型及方法

采用的模拟软件为动力学有限元程序 Autodyn 6.1,其包括了 Euler-Lagrangian、任意 Lagrange Euler(ALE)和光滑粒子动力学(SPH)等主要算法,适合于模拟涉及高应变率条件下非线性变形、断裂

* **收稿日期**: 2016-04-27; **修回日期**: 2017-01-22
第一作者: 任国武(1981—),男,博士,副研究员; **通信作者**: 郭昭亮,glogos@caep.cn。

破碎等动态物理过程。为研究爆轰加载下各种材料的动态失效问题，比如断裂、层裂、破碎等，该软件所含有的光滑粒子算法是最适合的。

带约束层金属柱壳模型如图 1 所示，包括主炸药、金属柱壳以及约束层（硬质聚氨酯泡沫和 LY12 铝）。爆轰加载采用一端起爆。主炸药为 JOB-9003，尺寸为∅40 mm×120 mm，密度1.874 g/cm^3；金属柱壳为 45 钢，外径 48 mm，内径 40 mm，长 140 mm，壁厚 4 mm，密度 7.85 g/cm^3；填充物为硬质聚氨酯泡沫，外径 62 mm，内径 48 mm，长 140 mm，壁厚 7 mm，密度大约 0.72 g/cm^3；约束金属柱壳为 LY12 铝，密度 2.785 g/cm^3，内径 62 mm，长 140 mm，但壁厚 w_{A1}分别选择为 1.1、4.0 mm。需要注意的是模型中置于 45 钢柱壳和铝柱壳之间的硬质聚氨酯泡沫在某些工程应用中作为一种重要的缓冲层，该材料具有优良的抗变形力学性能。除此之外，模型还包括只有主炸药及 45 钢的柱壳结构（无约束情形）。因而，所有模拟考虑多种情形：没有约束层的金属柱壳结构，标记为 C_0；铝柱壳壁厚 w_{A1}=1.1 mm，标记为 C_1；w_{A1}=4.0 mm，标记为 C_2。

数值模拟采用二维轴对称模型。Lagrange 网格代表着炸药和 SPH 粒子用于描述 45 钢、硬质聚氨酯泡沫和 LY12 铝。炸药与金属柱壳间的相互作用通过该软件的间隙接触算法来实现。考虑到模拟结果的合理性并参考文献[13]，SPH 粒子的大小最终选择为 0.25 mm，生成的 SPH 粒子数目为 26 880，Lagrange 网格数目为 11 200。

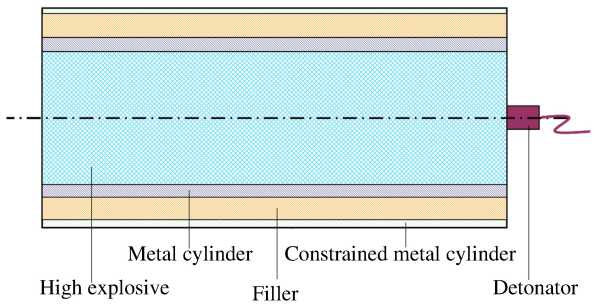

图 1　约束柱壳模型示意图

Fig. 1　Schematic of constrained cylinder model

对于爆轰加载下无约束 45 钢柱壳的膨胀断裂过程，即 C_0 情形，任国武等[13]早前已开展该过程的数值模拟，获得的表面速度或膨胀位移历史都较好地与实验结果吻合，表明该数值模拟中使用的炸药 JOB-9003 及 45 钢的状态方程和强度模型比较可靠，详细的参数可引自该文献。接下来将主要列出硬质聚氨酯泡沫和 LY12 铝的参数。

实验结果表明不同密度（密度范围 0.3～1.2 g/cm^3）下硬质聚氨酯泡沫的状态参数差异很大，根据文献[14]展示不同密度硬质聚氨酯泡沫的 Hugoniot 参数拟合出密度为 0.72 g/cm^3 的硬质聚氨酯泡沫 Hugoniot 状态参数。声速 c_0=0.269 km/s，冲击波速度与粒子速度的斜率 S_e=1.621，Grüneisen 系数 γ=2.57。

LY12 铝采用国外提供的 Al2024 参数，本构方程由 J-C 强度模型描述，表示为：

$$\sigma=(A+B\varepsilon^n)(1+C\ln\dot{\varepsilon}^*)(1-T^{*m}) \tag{1}$$

式中参数的物理意义见文献[13]，该材料的参数值为：A=265 MPa，B=426 MPa，n=0.34，C=0.015，m=1.0。

2　模拟结果及讨论

图 2 给出了 C_0、C_1 及 C_2 三种情形下 45 钢柱壳的动态膨胀过程，每种状态列出四个时刻（横向），不同状态间对应的时刻基本相同（纵向），不同的颜色代表不同的压力值。对于无约束的 C_0 情形，炸药爆轰后形成的冲击波以一定的角度斜入射 45 钢柱壳，然后经由 45 钢柱壳到达表面导致柱壳表面速度迅速上升至一个极大值，自由面形成稀疏波并反射回 45 钢柱壳和炸药。由于界面的存在导致冲击波沿柱

壳内外壁多次反射使表面速度逐渐增加，但稀疏波的衰减效应导致速度增加幅值在减小，这在图 2(c)中可以看出，压力在柱壳壁厚沿纵向呈现锯齿特征。注意到由于模型采用的一端起爆，所以爆轰波前沿是中心突出，不同于平面透镜获得垂直于柱体轴向的平面爆轰波。

在 45 钢柱壳外施加一定厚度的约束层(C1、C2)后，如图 2(e)、(i)所示。斜入射的冲击波达到 45 钢柱壳外表面后透射冲击波进入低波阻抗的硬质聚氨酯泡沫，同时反射稀疏波进入 45 钢柱壳。由于 45 钢的波阻抗远大于硬质聚氨酯泡沫，因此 45 钢柱壳的第一起跳速度与无约束层条件下(C_0)的比较差异不大。当透射冲击波穿过硬质聚氨酯泡沫和铝柱壳，到达铝柱壳表面后，铝柱壳表面速度也迅速上升，但由于铝柱壳厚度不同导致达到铝柱壳表面的冲击波强度也不同，壁越厚冲击波强度越小，所以厚壁铝柱壳的上升速度小于壁薄铝柱壳的同时也影响了反射稀疏波的强度，造成了在爆轰产物内的稀疏角度增加，如图 2(f)、(j)所示。图 3(a)、(b)分别展示了图 2(h)、(l)的较大变形位置处的局部放大图，由于硬质聚氨酯泡沫的失效强度低，在爆轰形成三角波的拉伸作用下发生了层裂损伤。

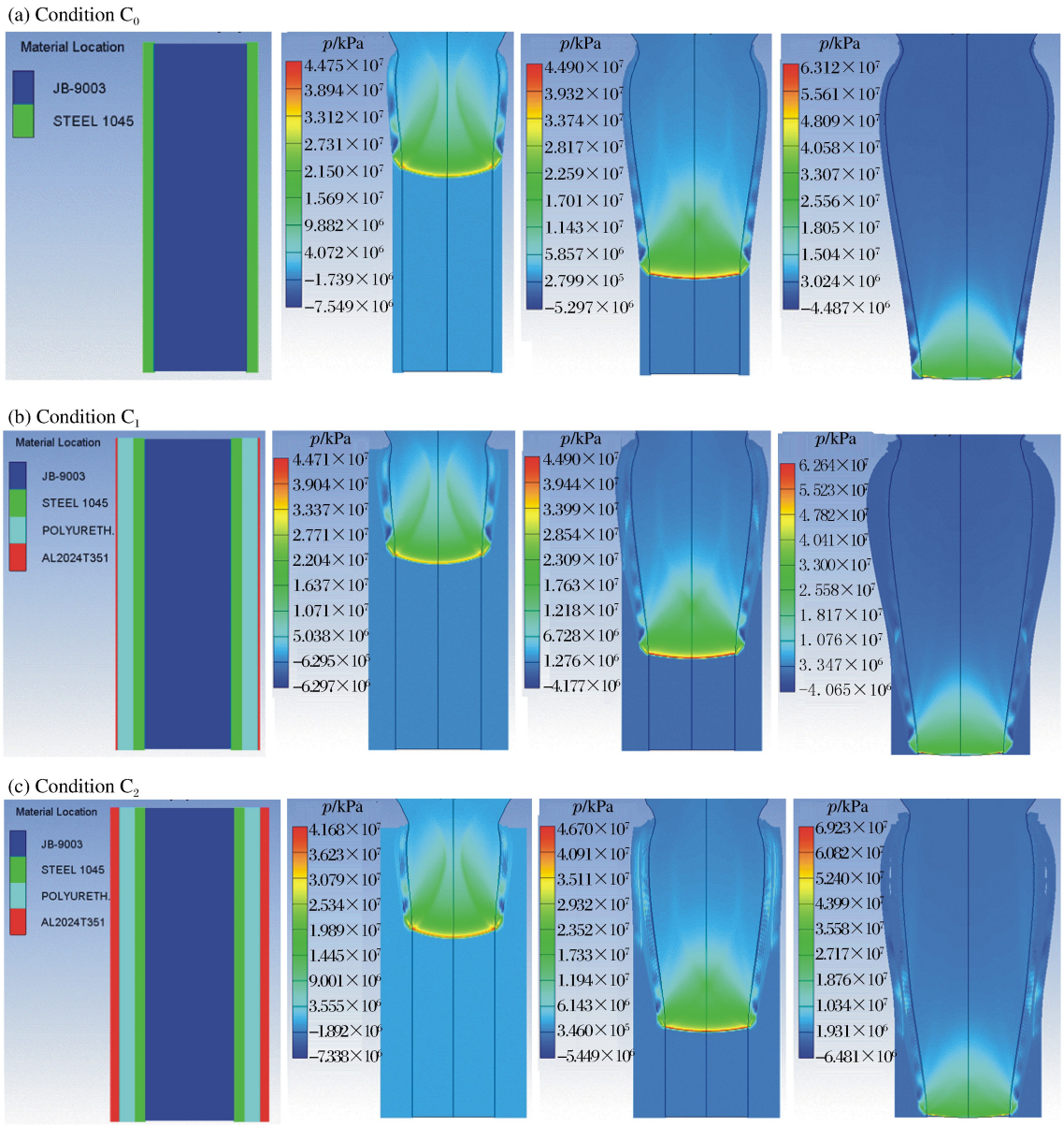

图 2 三种状态条件下不同时刻的柱壳膨胀过程

Fig. 2 Expansion of cylindrical shell at different moments

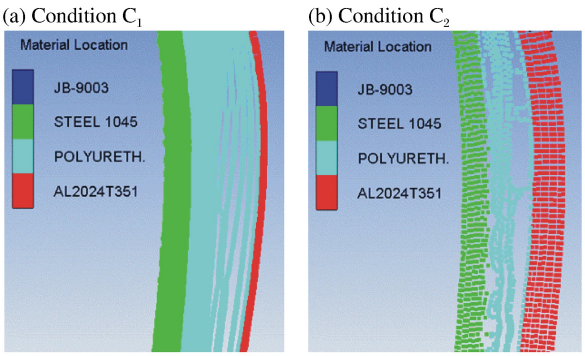

图 3　图 2(h)和(l)的局部放大图

Fig. 3　Magnified image of Fig. 2(h) and (l)

图 4 展示了三种状态下 45 钢柱壳表面的速度和位移历史剖面。在初始加载阶段(第一个冲击波来回振荡一次)，三种状态下的金属柱壳速度和膨胀位移基本重合，这段时间持续大约 2 μs。之后约束层的作用阻挡了 45 钢柱壳的继续往外膨胀，膨胀速度大约下降了 200 m/s，此时约束效果仅来源于硬质聚氨酯泡沫，不同厚度的铝柱壳约束效果还未体现，因此在此时间内(大约从 10 μs 到 13 μs)，带约束层后的金属柱壳膨胀速度基本一致。一旦冲击波到达约束铝柱壳外界面后反射回金属柱壳，柱壳的速度继续下降，尤其是铝柱壳越厚速度下降得越多，膨胀位移也有明显的降低。

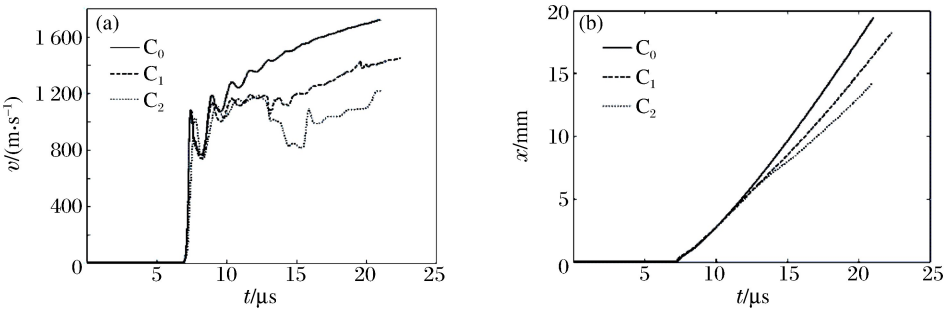

图 4　三种状态下 45 钢柱壳的速度及位移历史剖面

Fig. 4　Velocity and displacement profiles of 45 steel cylindrical shell

不同厚度铝柱壳的速度和位移历史剖面如图 5 所示，速度起跳时间比金属柱壳(见图 4)晚了大约 4 μs。显然，约束铝越薄，膨胀速度和位移就越大。但从速度剖面上观察到铝柱壳速度上升到最大位置后，后续速度基本没变化，这是由于硬质聚氨酯泡沫在此阶段已完全破碎造成了铝柱壳与金属柱壳脱离，铝柱壳速度维持不变。但由于模型的局限性，暂时无法给出 45 钢和铝柱壳在环向拉伸下的动态断裂特征。

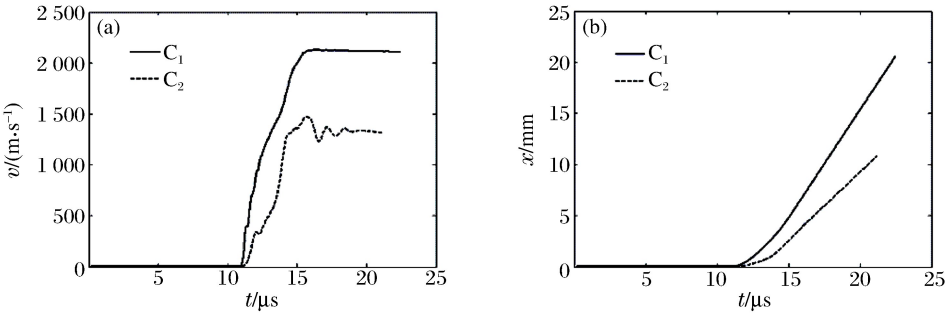

图 5　C_1 及 C_2 状态下铝柱壳的速度及位移历史剖面

Fig. 5　Velocity and displacement profiles of LY12 Al cylindrical shell

3　数值模拟与实验结果比较

针对上述数值模拟建立的三个模型，开展对应的实验研究。对于无约束层(C_0)的情形，主要使用高速转镜式分幅相机获得 45 钢柱壳在爆轰加载下的动态膨胀断裂过程。该相机能连续拍摄到微秒量级的 40 幅照片，因而整个 45 钢柱壳的表面形貌都能清晰地获得。对于带约束层(C_1、C_2)的情形，转镜

式分幅相机无法获得 45 钢柱壳的膨胀断裂等行为，只能通过 X 光机穿透约束层获得 45 钢柱壳的变形特征。这里采用近来发展的 2 台 1MV X 光机，布局如下：2 台 X 光机的夹角为 30°，光机离底片盒的距离为 3 m，装置离底片盒大约 0.87 m，放大比大约为 1.41。注意到为避免金属柱壳断裂后形成高速的破片对 X 光机或底片盒的损伤，需要在 X 光机以及底片盒前放置一定厚度的铝板，但又不能影响防护铝板对 X 光能量的吸收，降低拍摄图片的质量。

图 6 给出了时间 $t\approx19.0$ μs 三种状态下实验和数值模拟的动态图像，通过参考图像的初始尺寸或静止样品尺度，利用工程应变的定义，获得 45 钢柱壳较大变形位置处(图 6(a)、(b)和(c)中箭头所示的位置)的工程应变值，从 C_0、C_1 直到 C_2，工程应变 ε 从 0.65、0.53 下降到 0.44。因此约束层抑制了 45 钢柱壳向外径向膨胀，但是约束层和 45 钢的表面特征无法获得。事实上基于分幅图像我们观察了工程应变 $\varepsilon=0.53$ 或 0.44 时，无约束 45 钢柱壳的表面只有大量的裂纹但无爆轰产物漏出。图 6(d)～(f)给出相同时刻的数值模拟结果，最大变形位置处(图中箭头所示)的工程应变与实验结果吻合较好。

图 7 给出了时间 $t=24.0$ μs 时刻的实验与数值模拟图形，但只展示了 C_0 和 C_1 两种状态，C_2 状态的实验图象由于 X 光机原因未被得到。但从实验结果看出，在此时刻 45 钢柱壳表面已出现爆轰产物泄漏，而 C_1 状态下的 X 图像也显示出了大量裂纹的张开，说明此种情形下，对于 C_0 和 C_1 状态，45 钢柱壳都已完全断裂，但是工程应变差异较大，前者 $\varepsilon=1.03$ 而后者 $\varepsilon=0.79$。数值模拟与实验结果也吻合较好，但数值模拟则发现硬质聚氨酯泡沫材料出现层裂，由于该材料密度很低，所以 X 光机没法拍摄到。

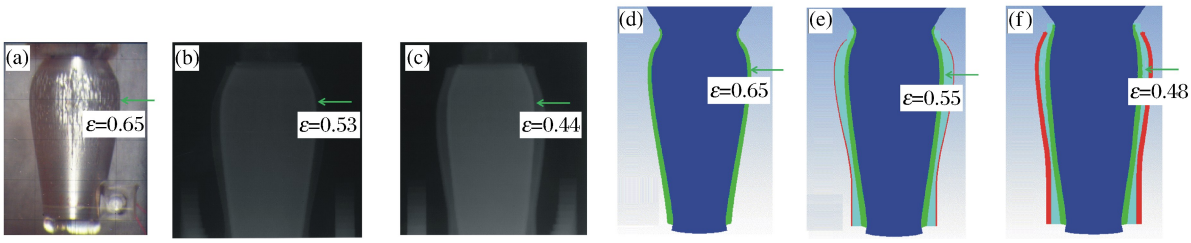

图 6 不同约束条件下实验与数值模拟比较($t=19.0$ μs)

Fig. 6 Comparison of deformation between experiments and simulations at $t=19.0$ μs

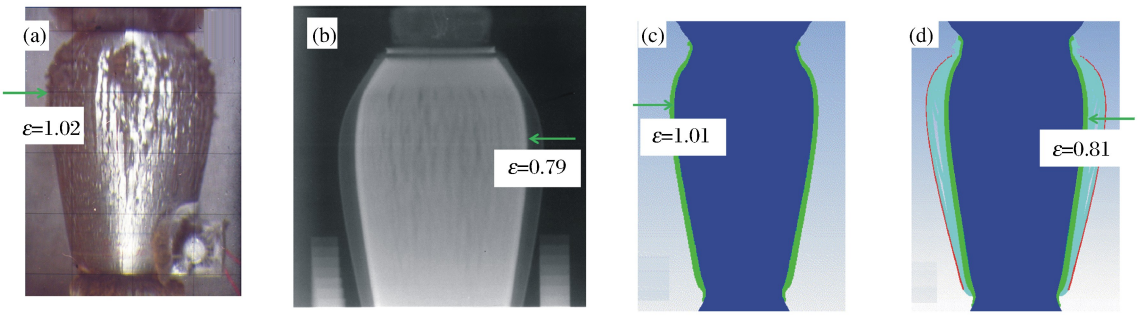

图 7 不同约束条件下实验与数值模拟比较($t=24.0$ μs)

Fig. 7 Comparison of deformation between experiments and simulations at $t=24.0$ μs

4 结 论

为满足工程应用需要，开展了由金属铝和硬质聚氨酯泡沫组合的约束层对 45 钢柱壳在内置炸药爆轰加载下的膨胀变形数值模拟，模拟结果显示，约束铝壳厚度的增加较大影响了 45 钢柱壳的膨胀变形，柱壳表面速度下降很快，一定程度上抑制了 45 钢的整体膨胀。利用高速分幅相机和中能 X 光机进一步获得了相应的实验动态图像，清晰地得了到最大变形处的工程应变，与数值模拟预测相符。

参考文献：

[1] Gurney R W. The initial velocity of fragment from bombs, shells and grenades[R]. Army Ballistic Research La-

boratory Report No. 405, 1943.
[2] Taylor G I. Analysis of the explosion of a long cylindrical bomb detonated at one end[M]. Scientific Papers of G. I. Taylor, vol. III. Cambridge: Cambridge University Press, 1963:277-286.
[3] Hoggatt R H, Recht R F. Fracture behavior of tubular bombs[J]. Journal of Applied Physics, 1968,93(3):1856-1862.
[4] Al-Hassani S T S, Johnson W. The dynamics of the fragmentation process for spherical shells containing explosives [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1969,11(10):811.
[5] Grady D E. Fragmentation of rings and shells: the Legacy of N. F. Mott[M]. New York: Springer, 2006.
[6] Grady D E, Olsen M L. A statistics and energy based theory of dynamic fragmentation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,29(10):293-306.
[7] Ivanov A G. Dynamic rupture of thin-walled cylindrical shells[J]. Journal de Physique IV, 1991(C3):759-768.
[8] Goto D M, Becker R, Orzechowski T J, et al. Investigation of the fracture and fragmenation of explosively driven rings and cylinders[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008,35(12):1547-1556.
[9] Zhang H, Ravi-Chandar K. On the dynamics of localization and fragmentation—IV: expansion of Al 6061-O tubes [J]. International Journal of Fracture, 2010,163(1/2):41-65.
[10] Bolis C, Counilh D, Lagrange J M, et al. Fragmentation of a titanium alloy shell in expansion: from experiments to simulation[J]. Procedia Engineering, 2013,58:672-677.
[11] 汤铁钢，谷岩，李庆忠，等. 爆轰加载下金属柱壳膨胀破裂过程研究[J]. 爆炸与冲击，2003，23(6)：529-533.
Tang Tiegang, Gu Yan, Li Qingzhong, et al. Expanding fracture of steel cylinder shell by detonation driving[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(6):529-533.
[12] 陈马旭，乐贵高. 带泡沫缓冲的导弹跌落仿真[J]. 兵工自动化，2014，33(3)：34-36.
Chen Maxu, Le Guigao. Simulation of missile drop with foam cushions[J]. Ordnance Industry Automation, 2014,33(3):34-36.
[13] 任国武，郭昭亮，张世文，等. 金属柱壳膨胀断裂的实验与数值模拟[J]. 爆炸与冲击，2015，35(6)：895-900.
Ren Guowu, Guo Zhaoliang, Zhang Shiwen, et al. Experiment and numerical simulation on expansion deformation and fracture of cylindrical shell[J]. Explosion and Shock Waves, 2015,35(6):895-900.
[14] Dattelbaum D M, Robbins D L, Gustavsen R L, et al. Shock compression of polyurethane foams[J]. EPJ Web of Conferences, 2012,26:02014.

Numerical simulation of influence of constrained layer on expanding deformation of metal cylindrical shell

Ren Guowu, Wen Shangjie, Zhang Ru, Guo Zhaoliang, Tang Tiegang
(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: In this work we investigated the influence of the constrained layer, composed of metal aluminum and polyurethane foam, on the expanding deformation of a metal cylindrical shell using numerical simulation, obtained the velocity and displacement profiles for 45 steel and aluminum affected by shock wave, and compared its simulated dynamic behaviors under the influence with those from the corresponding experiments performed using a high-speed framing camera and medium-energy X-ray photography and found them in good agreement. The findings obtained here provide a quantitative understanding of the constrained layer in terms of its influence on the expanding deformation of the metal cylindrical shell subjected to the high explosive loading.

Keywords: cylindrical shell; constrained layer; expanding deformation; X-ray

(责任编辑　曾月蓉)