

文章编号: 1006-9941(2011)03-0321-04

# 炸药爆炸驱动壳体破裂及液体喷射过程试验研究

蒋治海<sup>1</sup>, 龙新平<sup>2</sup>, 韩勇<sup>1</sup>, 蒋红彬<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 采用高速分幅照相技术对炸药爆炸驱动不同壁厚抛撒装置的壳体变形、裂纹产生、液体射流形成及其发展过程进行了试验研究, 获得了清晰的试验图像。对回收破片观察和统计分析, 发现两种厚度壳体的破裂方式存在较大差别: 壳体厚度为 3 mm 时形成的破片面积较大, 数量少, 以长条形为主, 而厚度为 1.5 mm 时破片面积较小, 数量多。利用扫描电镜对破片断面进行分析, 发现破片的形成主要由剪切断裂造成。试验结果表明, 爆炸抛撒形成的射流破碎过程可分为三个阶段: 射流整体喷射、界面紊乱及其膨胀破碎、小液滴形成。

**关键词:** 爆炸力学; 分幅照相; 抛撒装置; 膨胀破裂

**中图分类号:** TJ55; O389

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.03.017

## 1 引言

液体在炸药爆轰驱动下的变形、破碎及雾化过程是流体动力学具有广泛应用背景的领域。在军事应用中, 云爆武器(FAE 武器)是典型的应用范例, 在国内国外得到了广泛的应用。然而, 对 FAE 武器的基础研究工作主要集中在比药量、长径比、燃料配方、延迟起爆时间等对云团抛撒半径、冲击波超压的影响, 侧重于炸药爆炸驱动液体抛撒整体效果及其毁伤效应的研究, 而对爆轰产物驱动燃料膨胀挤压金属壳体的破裂机理, 造成液体从裂缝中喷射及其扩展过程等细节方面的研究鲜有文献报道。

对于金属壳体的膨胀或压缩破裂过程, 大多数研究工作集中在炸药直接爆炸加载。1944 年, G. I. Taylor<sup>[1]</sup>研究了爆炸载荷下金属柱壳的破碎过程, 提出了著名的 Taylor 断裂判据。后来, D. L. Wesenberg<sup>[2]</sup>、D. E. Grady<sup>[3]</sup>、M. A. Meyers<sup>[4]</sup>等研究者从微观或宏观两方面来解释金属壳体的断裂模式及机理。在国内, 胡八一<sup>[5]</sup>、陈大年<sup>[6]</sup>、汤铁钢<sup>[7-8]</sup>等对爆轰加载(膨胀或压缩)下金属柱壳的断裂过程进行了试验研究, 并对壳体膨胀或压缩过

程中的断裂机理进行了分析。然而, 采用炸药爆炸后驱动液体膨胀, 挤压金属壳体导致其破裂的研究报道较少。

综合上述两个方面的因素, 本试验借助于高速分幅 FJZ-250 相机, 利用阴影照相技术研究了炸药爆炸驱动不同壁厚容积为 1 L 抛撒装置的壳体破裂、液体喷射及其扩展过程, 并对回收破片进行了宏观观察和扫描电镜分析。

## 2 壳体破裂试验

爆炸抛撒装置、试验布局及其测试系统如图 1 所示。抛撒装置的容积为 1 L, 壳体材料为 Q235 钢, 厚度分别为 1.5 mm、3 mm, 内装的液体介质为水, 中心装药为 B 炸药, 尺寸为  $\Phi 20 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 。试验采用高速转镜式 FJZ-250 相机对壳体膨胀及其破裂过程进行前照明分幅照相。前照明光源为两个光源弹(由激发炸药和氩气筒组成), 采用铅导爆索对光源弹进行延时处理, 通过瞬态高压电雷管对中心装药和铅导爆索进行起爆。转镜式高速分幅相机的工作频率为  $1 \mu\text{s}/\text{幅}$ 。

由于抛撒装置中部受两端稀疏作用影响较小, 试验中选取装置中部作为基准位置, 试验前在装置外壳画上三条标记线, 以确定观察的准确位置。试验获得 1 L 抛撒装置壳体膨胀的典型分幅照片如图 2 所示。从图 2 可以看出, 中心炸药爆炸后, 壳体的中部首先向外隆起, 然后整体不断地膨胀, 壳体出现裂纹; 随着时间的推移, 裂纹宽度不断增大。此外, 照片清楚地显示, 壳体裂纹的产生和断裂首先出现在轴向方向。

收稿日期: 2010-06-08; 修回日期: 2010-09-20

基金项目: 国家自然科学基金 NSAF 联合基金重点项目(10676120)

作者简介: 蒋治海(1978-), 男, 助理研究员, 主要从事炸药爆轰性能研究。e-mail: jiangzh\_ocean@163.com

通讯联系人: 龙新平(1961-), 男, 研究员, 主要从事爆炸力学、火炸药性能及状态方程研究。e-mail: longxinping@vip.sina.com

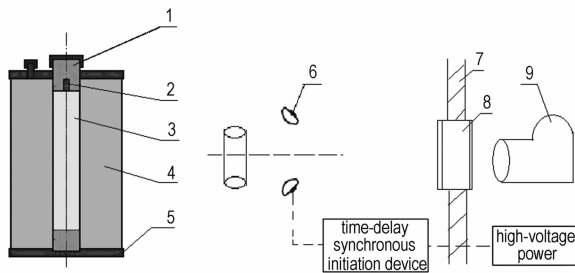


图1 试验装置、布局及其测试系统示意图

1—缓冲材料, 2—雷管, 3—炸药, 4—水介质, 5—弹体, 6—光源弹, 7—防护墙, 8—光学窗口, 9—高速分幅相机

Fig. 1 Sketch of experimental set-up

1—cushion materials, 2—detonator, 3—explosive, 4—water, 5—bomb shell, 6—argon bomb, 7—protecting wall, 8—optical window, 9—high-speed framing camera

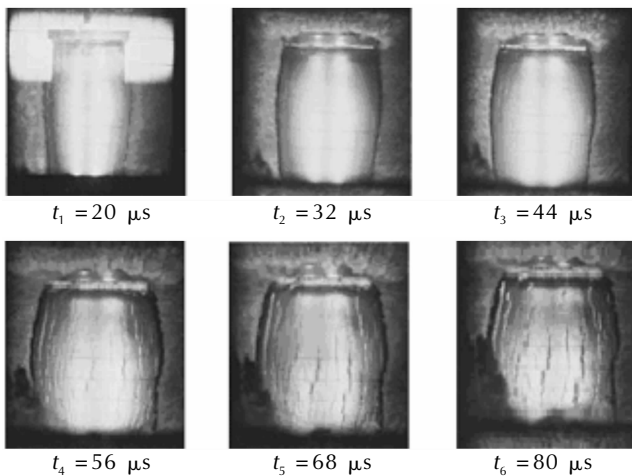


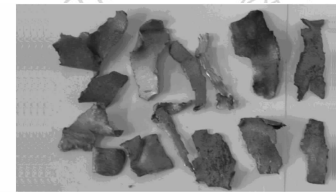
图2 壳体膨胀及裂纹发展过程照片

Fig. 2 High-speed photographs of expanding and crack developing process of shell cylinder

试验过程中,采用软回收方法对壳体破片进行了部分回收,得到不同厚度壳体的典型破片形状如图3所示。由图3可知,当壳体厚度为3 mm时,抛撒装置膨胀破裂后形成的破片面积较大,数量少,主要是由轴向裂纹形成的长条形状;当壳体厚度为1.5 mm时,产生的破片面积较小,数量多,呈现出轴向断裂为主导、周向断裂为辅的共同作用结果。出现这种情况的可能原因为:在材料的局部缺陷、金属晶粒等非均匀、非各向同性因素的影响下,绝热剪切带导致的裂纹在大趋势上轴向占主导,但在某些局部会沿周向断裂;在外壳膨胀前期,受内部炸药爆轰驱动,绝热剪切带为主导断裂机制,而在外壳膨胀后期,主要靠惯性驱动,颈缩为主导断裂机制,类似于膨胀圆环的情况。获得的试验结果可为炸药爆炸抛撒数值仿真模型中壳体断裂方式及其特性参数的选择提供参考。



a. fragments produced by the 3 mm-thickness shell



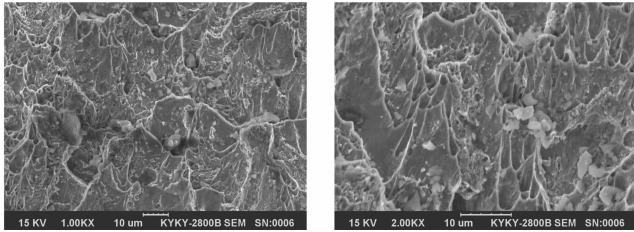
b. fragments produced by the 1.5 mm-thickness shell

图3 不同厚度壳体断裂后的破片图像

Fig. 3 Fragments photographs of different thickness shell after explosion

对回收的破片进行了扫描电镜(SEM)分析,得到壳体厚度为3 mm和1.5 mm破片轴向断面的SEM图像分别如图4、图5所示。从图中可以发现,两种厚度的破片断口上都有明显的擦痕,且条纹主要沿断口的径向。在放大1000倍的照片(图4a,图5a)中,3 mm的破片断面以较大面积的空穴交错分布为主,而1.5 mm的破片断面除了小面积的空穴外,还形成了一系列的微空洞结构,且断面出现了明显的烧蚀痕迹。在放大2000倍的照片(图4b,图5b)中,可观察到经历严重摩擦后断口的微观形貌,3 mm的破片断面在空穴上出现了少量的棉絮状特征组织;而1.5 mm的破片断面以棉絮状特征组织为主,且其径向尺度比轴向大,说明断口面上的棉絮状特征组织在壳体的膨胀断裂过程中经历了径向力的拉伸作用。同时,由于圆筒壳体受到水的高压作用不断向外作扩张运动,壳体在变形过程中生成大量的热,尤其是在壳体本身的微缺陷(晶界、位错、夹杂等)附近生成的热会更多,导致壳体在膨胀断裂时断口面出现了一定程度的熔化,熔融状的金属在受摩擦力作用时形成了棉絮状特征组织,且聚集的热量来不及扩散而使壳体断面出现了局部烧蚀。断口经历径向摩擦的特征说明破片的形成主要由剪切断裂所致<sup>[8]</sup>。

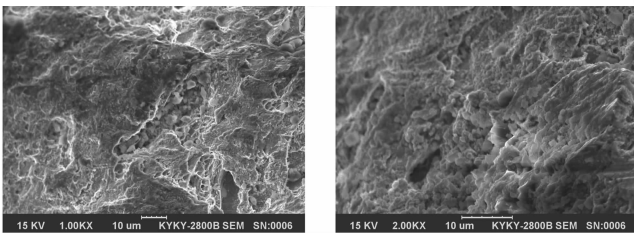
壳体厚度为3 mm和1.5 mm破片周向断面的SEM照片如图6所示。3 mm破片断面的断裂条纹仍然以径向为主,断面的微观结构与轴向断面相似;而1.5 mm破片断面的烧蚀程度比径向更加明显,主要由金属熔化后凝固成的不规则空穴和孔洞组成,断面呈现灰褐色。



a. ×1000 b. ×2000

图4 3 mm厚破片轴向断面的SEM图像

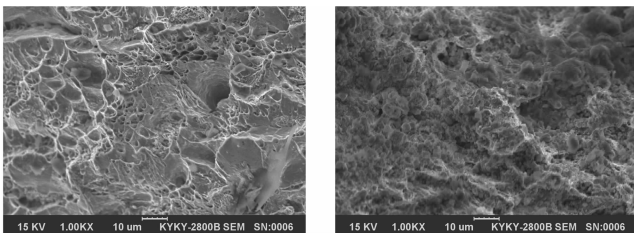
Fig.4 SEM photographs of fractures in axial direction for 3 mm thickness fragments



a. ×1000 b. ×2000

图5 1.5 mm厚破片轴向断面的SEM图像

Fig.5 SEM photographs of fractures in axial direction for 1.5 mm thickness fragments



a. 3 mm b. 1.5 mm

图6 3 mm,1.5 mm厚破片周向断面的SEM图像

Fig.6 SEM photographs of fractures in circumferential direction for different thickness fragments

### 3 液体喷射试验

以1 L抛撒装置为研究对象,采用高速分幅照相技术,对壳体破裂后的射流形成及其发展过程进行了试验研究,试验布局及测试系统如图7所示。为了获得清晰的试验图像,试验前在水中加入墨汁搅拌均匀。抛撒装置与光源弹之间放置网格为3 cm×3 cm的参照比例尺,以抛撒装置侧面一定距离为测试的中心。为了得到不同时期的射流发展过程,试验中采用了不同的侧向测试距离。

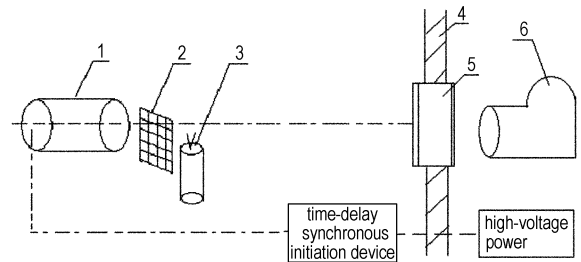


图7 1 L抛撒试验测试系统示意图

1—光源弹,2—参考比例尺,3—抛撒装置,4—防护墙,5—光学窗口,6—高速分幅相机

Fig.7 Sketch map of arrangement and measurement system for one liter explosion scattering experiment

1—bomb shell, 2—reference comparing rule, 3—scattering mechanism, 4—protecting wall, 5—optical window, 6—high-speed framing camera

试验得到壳体破裂后水射流形成及其扩展过程的分幅图像如图8所示。图8a中,壳体破裂后,水介质

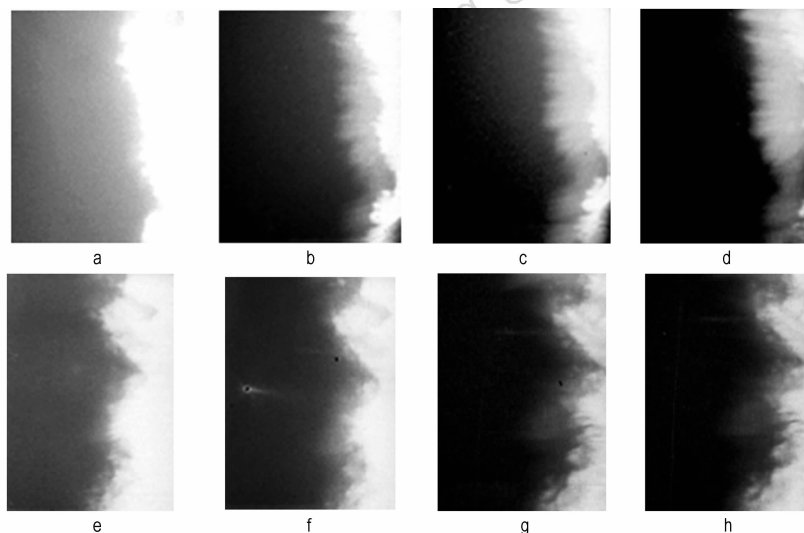


图8 水射流形成及其演变过程的分幅图像

Fig.8 Framing photographs of forming and developing process of water jets

在高压作用下,形成的射流形状规则有序,整体均匀地向外喷射;由图 8b 可知,水射流出现了分层情况,上层界面变得不规则,出现了隆起现象,内层的母体逐步向外扩展;在图 8c、图 8d 中,射流界面分层现象更加显著,两层之间的距离逐渐增大,外层界面隆起加剧。由图 8e、图 8f 可知,在水射流不断向外喷射过程中,主要以后面形成的内层界面为主,形状变得更加不规则,形成了明显的尖顶形状;在最后两幅图中,液体界面逐渐发生了破碎,射流界面已经变得相当紊乱,呈现出絮状结构,部分射流的尖刺逐渐从母体脱离,形成不规则的小水滴。由试验可知,爆炸抛撒形成的射流破碎过程分为三个阶段:早期是射流整体规则地向外喷射的阶段,中期是射流界面紊乱,界面膨胀破碎的阶段;后期是界面发生进一步破碎,形成小液滴的阶段。

#### 4 结 论

(1) 采用阴影照相技术能够可靠获得炸药爆炸驱动壳体膨胀破裂及液体喷射扩展过程的试验图像。

(2) 回收破片的分析表明,不同厚度壳体的破裂方式存在较大的差别,扫描电镜观察发现断口受到径向摩擦,破片形成主要是由剪切断裂所致。

(3) 爆炸抛撒形成的射流破碎过程分为三个阶段:射流整体喷射、界面紊乱及其膨胀破碎、小液滴形成。

#### 参考文献:

- [1] Taylor G I. Science papers of Sir G I Taylor[M]. London: Cambridge University Press, 1963: 387.
- [2] Wesenberg D L, Sagartz M J. Dynamic fracture of 6061-T6 aluminum cylinders[J]. *J Appl Mechanics, Trans ASME*, 1977, 44: 643-646.
- [3] Grady D E. Properties of an adiabatic shear band process zone [J]. *J Mech Phys Solids*, 1992, 40(6): 1197-1215.
- [4] Meyers M A, Nesterenko V F. High-strain-rate deformation of tantalum: The thick-walled cylinder method [C] // Murr L E, Staudhammer K P, Meyers M A. Metallurgical and materials applications of shock-wave and high-strain-rate phenomena. The Netherlands, 1995: 487-494.
- [5] 胡八一. 金属圆筒在内部爆轰加载下的膨胀断裂机理研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院研究生部, 1992.  
HU Ba-yi. Studies of expansion and fracture of metal cylinder under internal explosive loading [D]. Mianyang: Post-Graduate Department of CAEP, 1992.
- [6] 陈大年, 尹志华. 对膨胀壳体材料失稳的一种简化处理[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(3): 193-198.  
CHEN Da-nian, YIN Zhi-hua. A simplified approach to material instability of expanding shells [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1999, 19(3): 193-198.
- [7] 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 Tie-gang, GU Yan, LI Qing-zhong, et al. Expanding fracture of steel cylinder shell by detonation driving [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(6): 529-533.
- [8] 汤铁钢, 胡海波, 李庆忠. 高应变率压缩加载下 LY12 铝圆管的剪切断裂研究[J]. 高压物理学报, 2003, 17(2): 529-533.  
TANG Tie-gang, HU Hai-bo, LI Qing-zhong. Shear fractures of LY12 aluminum cylinder under high-strain-rate impulsive loading [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2003, 17(2): 529-533.

### Experimental Studies on Shell Fracturing and Jet Forming and Developing Process Driven by Detonation

JIANG Zhi-hai<sup>1</sup>, LONG Xin-ping<sup>2</sup>, HAN Yong<sup>1</sup>, JIANG Hong-bin<sup>1</sup>

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China; 2. CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The high-speed framing photography was applied to observe the shell distorting, expanding fracture mechanism of different thickness shell driven by detonation, and jet forming, developing process of explosion scattering. Scanning electron microscopy (SEM) photographs of fractures in axial and circumferential directions for different thickness fragments were obtained. There are different fracturing modes of the two thickness shells from macroscopic analysis and the collected fragments. Results show that the fragments of 3 mm thickness shell are much bigger, longer and less than that of 1.5 mm. SEM analysis of fragments section show that their formation is mostly caused by the shear fracture. And jet fracturing process of explosion scattering can be divided into three stages: integral injection, interface appearing in flocculent and breaking, small water droplets forming.

**Key words:** explosion mechanics; framing photography; scattering mechanism; expanding fracture

**CLC number:** TJ55; O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.03.017