文章编号：1000-5773(2010)02-0102-05

可变形战斗部弹体变形型面研究*

龚柏林，卢芳云，李翔宇

（国防科技大学理学院，湖南长沙 410073）

摘要：基于炸药瞬时爆轰理论，将战斗部变形阶段的结构简化为辅助装药，对等效圆柱壳体实施爆轰加载，并在等效壳体上的加载段引入若干个塑性铰，相应地将辅助装药划分成与塑性铰相对应的若干个独立微元。针对均匀加载下等效壳体的原始位移分布，采用具有能量分布梯度的辅助装药加载进行匹配，设计出能实现 D 型型面的辅助装药形状，最后通过数值模拟进行验证。结果表明，采用该形状的辅助装药能实现较理想的 D 型弹体变形型面。

关键词：爆炸力学；变形型面；塑性屈曲；圆柱壳；定向战斗部

中图分类号：O347.3；TJ410.2 **文献标识码**：A

1 引 言

可变形定向战斗部是一种新型高效毁伤破片战斗部，主要由主装药、辅助装药、内外壳体、承重壳体、破片层以及端盖组成。其结构模型如图 1 所示，其中端盖未示出。主装药中心留有中心孔，为弹体在辅助装药起爆后的变形提供空间。战斗部首先通过起爆弹体外层的辅助装药使弹体在目标方位上凹陷变形，一定延时后再起爆主装药，使更多破片飞向目标方向。辅助装药爆轰驱动下弹体的变形型面是影响主装药起爆后破片飞散规律及其对目标毁伤效能的关键因素。D 型变形型面与非 D 型型面战斗部相比，如图 2 所示，前者目标方向的弹体面较平坦，近似于一个平面，后者则向外凸起，呈圆鼓形。D 型型面战斗部破片飞散角较非 D 型小（$\theta_1<\theta_2$）[1]，因而在目标方向上有较高的破片分布密度，对目标杀伤效果亦更好。可见就定向效率而言，D 型型面是一种较理想的弹体变形型面，因此需要建立实现变形型面为 D 型的设计方法。

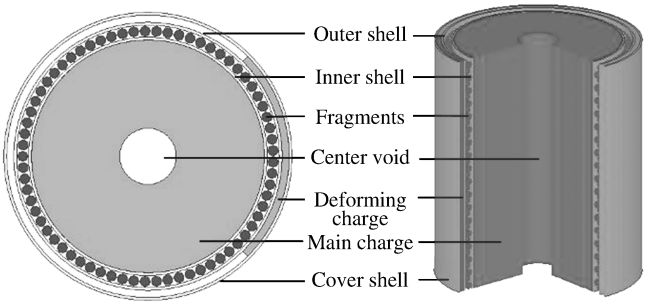


图 1 可变形定向战斗部结构模型示意图

Fig. 1 Schematic configuration of deformable directional warhead

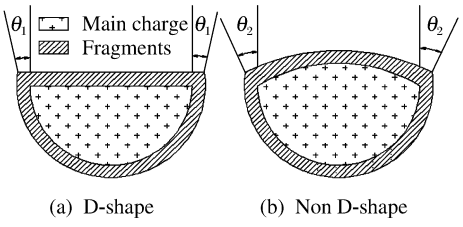


图 2 可变形战斗部两种不同弹体变形型面

Fig. 2 Two different shapes of deformable warhead

外径∅200 mm 的可变形战斗部变形实验结果表明，辅助装药覆盖的分位角为 90°，且辅助装药厚

* **收稿日期**：2009-03-17；**修回日期**：2009-05-07

作者简介：龚柏林（1982－），男，博士研究生，主要从事常规战斗部技术研究. E-mail：gongbl4321@163.com

度均为 5 mm 时,弹体的最终变形型面在目标方向向外凸起,这显然不利于破片的聚焦,如图 3 所示。为了实现战斗部的 D 型弹体变形型面,本研究将爆轰加载能量均匀分布的辅助装药结构设计成有能量分布梯度的辅助装药结构,即通过辅助装药厚度沿加载面按一定规律分布,最终获得弹体的 D 型变形型面设计。总体思路是:基于陈放等人[2]建立的在非对称爆炸冲击载荷作用下自由圆柱壳体的分析模型,将战斗部变形阶段的结构简化为辅助装药,对等效圆柱壳体实施爆轰加载,在等效壳体上的加载段引入若干个塑性铰,并相应地将辅助装药划分成与塑性铰相对应的若干个独立微元,对辅助装药和等效壳体微元进行研究。针对均匀加载下等效壳体的原始位移分布,匹配以相应的具有能量分布梯度的辅助装药加载,设计出能实现 D 型型面的辅助装药形状,最后通过数值模拟进行验证。



图 3　实验后的弹体变形型面

Fig. 3　Final deformation shape after experiment

2　理论分析

为了将问题简化,同时考虑到可变形战斗部一次起爆的特点,将辅助装药分位角为 90°的战斗部的结构模型等效为辅助装药对内、外两层单层圆柱壳体的作用,并做以下基本假设。

(1) 假设内、外壳体材料均为理想刚塑性,忽略变形的弹性部分。由于在辅助装药的爆轰加载下,内、外壳体上的加载段呈现流体特性,因此假设两层壳体上的加载段在辅助装药的作用下形成若干个塑性铰,这些塑性铰将该两段壳体划分成若干个微元,各微元大小相等,质量分别为 ΔM 和 ΔN。

(2) 假设辅助装药瞬时爆轰,与辅助装药相接触的壳体上任一点均做匀减速运动,且加速度相同,均为 a_0。将辅助装药划分成与壳体微元相对应的炸药微元,微元宽度均为 Δh。

(3) 假设战斗部沿轴向方向的不同横截面状态相同,且壳体质量集中在中线上。

(4) 不考虑辅助装药边界处稀疏波的影响。

由于问题存在对称性,因此建立 1/2 模型,并以圆柱壳体中心 O 点为原点建立坐标系 Oxy,如图 4 所示,图中承重壳体未示出。在该坐标系下进行理论分析时,可只考虑壳体的塑性变形,不考虑壳体的刚性运动。图中 $KJAE$ 段为圆柱壳体段,$AEE'A'$ 为辅助装药段,其覆盖的分位角 $\angle AOE=45°$。

图 4 标出了与 Ox 轴夹角为 α 的壳体微元 BCD 段以及与之对应的辅助装药微元 $BDD'B'$,BCD 段壳体通过塑性铰 B、D 与其它壳体段相连,且用中点 C 代替该段壳体。$FGHIA'$ 为调整辅助装药厚度后

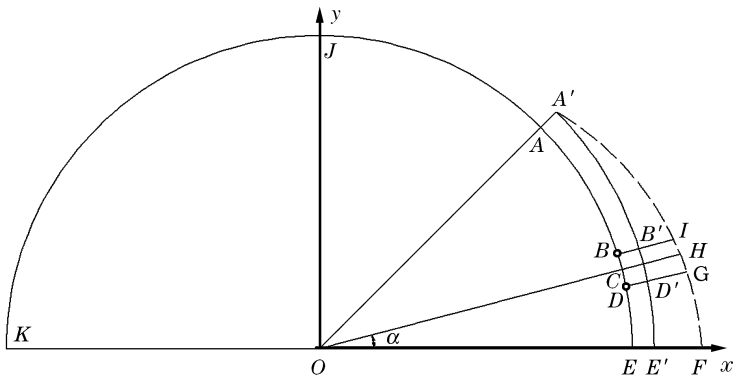


图 4　理论分析模型

Fig. 4　Theoretical analysis model

的截面边界，$BDGI$ 为调整后的辅助装药微元。当辅助装药微元足够小时，其厚度可以近似认为相同，即 $\overline{BI}=\overline{DG}=\overline{CH}$，且用中线 CH 代替该辅助装药微元。A 点为壳体上受辅助装药覆盖的边界，此处辅助装药厚度设为原始厚度 l_0。由于承重壳体紧贴辅助装药，不妨用点 H 代替承重壳体上夹角为 α 的承重壳体微元。

辅助装药起爆后，与辅助装药相接触的壳体段 $ABCDE$ 上各点均沿所在辅助装药段的法线方向运动。为了实现弹体变形型面为 D 型，在相同时间内，壳体上 C 点 x 轴方向的位移 S_{Cx} 应等于 A 点 x 轴方向的位移 S_{Ax}，即

$$S_{Cx}=S_{Ax}+(\cos\alpha-\cos 45^\circ)R \tag{1}$$

式中：R 为圆柱壳体的半径。

由于与辅助装药相接触的壳体上任一点均做匀减速运动，且加速度均为 a_0，则壳体上 A 点、C 点在 x 轴方向的位移分别为

$$S_{Ax}=\frac{v_{A0}^2}{2a_0}\cos 45^\circ \tag{2}$$

$$S_{Cx}=\frac{v_{\alpha 0}^2}{2a_0}\cos\alpha \tag{3}$$

式中：v_{A0} 为壳体上 A 点的初速度，$v_{\alpha 0}$ 为壳体上 C 点的初速度。

由(1)式～(3)式，得

$$\frac{v_{\alpha 0}^2}{v_{A0}^2}\,\frac{\cos\alpha}{\cos 45^\circ}=1+\frac{(\cos\alpha-\cos 45^\circ)R}{S_{Ax}} \tag{4}$$

对于壳体微元、承重壳体微元和辅助装药微元，当微元足够小时，可将该结构简化为非对称平板夹心构型[3]，同时参考矩形理想脉冲载荷作用下壳体变形模式的能量分配规则[4]，即初始输入能的 2/3 转化成壳体的塑性变形能，其余的能量用于壳体的刚性运动，最终可求得 v_{A0} 和 $v_{\alpha 0}$。

$$v_{A0}=\frac{\sqrt{6}}{3}\sqrt{2E}\left[\frac{1+A^3}{3(1+A)}+\frac{\Delta N}{\Delta m_A}A^2+\frac{\Delta M}{\Delta m_A}\right]^{-1/2} \tag{5}$$

$$v_{\alpha 0}=\frac{\sqrt{6}}{3}\sqrt{2E}\left[\frac{1+A'^3}{3(1+A')}+\frac{\Delta N}{\Delta m_\alpha}A'^2+\frac{\Delta M}{\Delta m_\alpha}\right]^{-1/2} \tag{6}$$

$$A=\frac{1+2\,\dfrac{\Delta M}{\Delta m_A}}{1+2\,\dfrac{\Delta N}{\Delta m_A}} \tag{7}$$

$$A'=\frac{1+2\,\dfrac{\Delta M}{\Delta m_\alpha}}{1+2\,\dfrac{\Delta N}{\Delta m_\alpha}} \tag{8}$$

式中：$\sqrt{2E}$ 为辅助装药的格尼能，Δm_A 为 AA' 处辅助装药的质量，Δm_α 为 CH 处辅助装药的质量。用长方体近似代替各辅助装药微元，则

$$\Delta m_A=\rho_0 l_0\Delta h H \tag{9}$$

$$\Delta m_\alpha=\rho_0 l_\alpha\Delta h H \tag{10}$$

式中：ρ_0 为辅助装药的密度，H 为辅助装药沿弹轴线方向的高度，l_α 为 CH 处辅助装药的厚度。

因此可求出调整辅助装药厚度后，与 x 轴夹角为 α 的辅助装药微元点 H 的坐标

$$\begin{cases}x_\alpha=(l_\alpha+R)\cos\alpha\\ y_\alpha=(l_\alpha+R)\sin\alpha\end{cases}\qquad 0\leqslant\alpha\leqslant 45^\circ \tag{11}$$

基于陈放等人的壳体变形分析模型[2]，根据初始加载条件，可求得 A 点 x 轴方向的位移 S_{Ax}，各微元质量根据计算精度要求调整划分方法得到。综合以上各式，可求得在辅助装药分位角范围内调整厚度分布后辅助装药端面上任一点的坐标，据此可得到实现 D 型弹体变形型面的辅助装药横截面形状。

3　计算结果及数值模拟验证

为实现战斗部弹体变形型面为 D 型,对辅助装药横截面的形状进行计算拟合。模型战斗部弹体外径∅200 mm,辅助装药厚 5 mm,且分位角为 90°。为方便计算,划分壳体和装药微元时按圆周方向每一度划分一个微元,计算结果如图 5 所示。图中实线为设计出的满足要求的辅助装药横截面边缘曲线。

计算得到的在新设计的辅助装药加载下弹体的最终变形型面如图 6 所示。计算结果表明,具有能量分布梯度的加载能使壳体实现 D 型变形型面。辅助装药厚度越大,加载于壳体上的能量越大,壳体沿加载方向的位移也越大。通过对位移分布为圆鼓形的原始壳体施加相应的能量分布进行匹配,使壳体上与辅助装药相接触的壳体段在 y 方向上的位移相同,最终形成了 D 型型面。

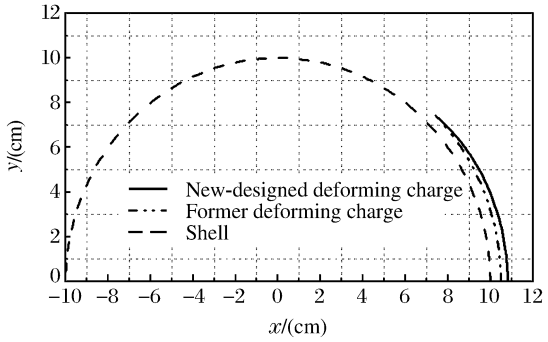


图 5　辅助装药横截面边缘曲线的计算结果

Fig. 5　Calculated edge curve of the cross-section for deformation charge

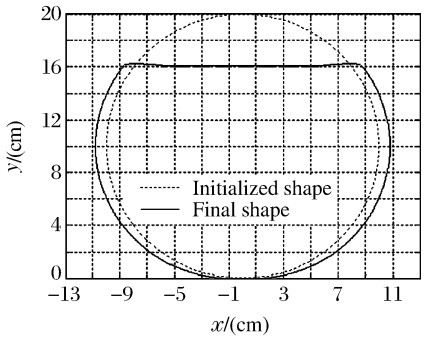
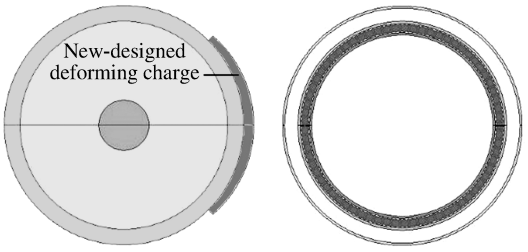


图 6　调整辅助装药后弹体变形型面

Fig. 6　Calculated deformation shape with new-designed deforming charge

采用数值模拟的方法对上述计算结果进行验证。对调整厚度分布后的辅助装药进行建模,利用有限元计算软件 LS-DYNA 模拟战斗部的变形过程。计算有限元模型如图 7 所示,模型结构包括主装药、辅助装药、内外壳体、承重壳体、破片层以及上下端盖,图中上下端盖未示出。计算采用流固耦合方法,对炸药及其它流体材料采用 Euler 算法,对其它的结构采用 Lagrange 算法。

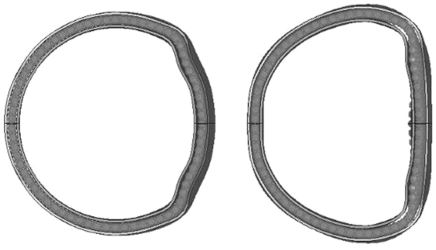
计算结果如图 8 所示。比较图 8(b)和图 6 所示的弹体型面,可以看出两者吻合较好,且都近似于 D 型型面。计算结果表明,理论计算得到的调整辅助装药厚度分布是合理的,采用调整后的辅助装药能够实现 D 型弹体变形型面。



(a) Eulerian model　　(b) Lagrangian model

图 7　有限元计算模型

Fig. 7　Finite element model



(a) 100 μs　　(b) 310 μs

图 8　弹体变形过程计算结果

Fig. 8　Simulation result of the deforming process

4　结　论

基于炸药瞬时爆轰理论,在等效壳体上与辅助装药相接触的部分引入若干个塑性铰,并相应地将辅助装药划分成与塑性铰相对应的若干个独立微元,对辅助装药和等效壳体微元进行研究,得出实现 D

型弹体变形型面对辅助装药沿加载面厚度分布的要求，设计出了满足要求的辅助装药横截面形状，最后通过数值模拟进行了验证。结果表明，采用该形状的辅助装药能实现较理想的 D 型弹体变形型面，进而可有效改善可变形战斗部的破片聚焦效果和毁伤效能。

References:

[1] Richard M L. Conventional Warhead Systems Physics and Engineering Design [M]. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1998: 193-212.

[2] Chen F, Ma X Q, Wang P. A Study on Parameters of a Deformable Directional Warhead [J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(6): 757-760. (in Chinese)
陈 放，马晓青，王 鹏. 爆炸变形定向战斗部壳体变形分析 [J]. 兵工学报，2004，25(6)：757-760.

[3] Kennedy J E. Behavior and Utilization of Explosive in Engineering Design [A]//The 12th Annual Symposium on American Society of Mechanical Engineers [C]. Albuquerque, New Mexico, 1972.

[4] Sun T, Feng S S. Damage of Free-Free Plastic Cylinders under Lateral Impulsive Loading [J]. Explosion and Shock Waves, 1998, 18(2): 103-111. (in Chinese)
孙 韬，冯顺山. 自由圆柱壳体在侧向非对称脉冲载荷下的塑性破坏 [J]. 爆炸与冲击，1998，18(2)：103-111.

Research on Deformation Shape of Deformable Warhead

GONG Bai-Lin, LU Fang-Yun, LI Xiang-Yu

(*College of Science, National University of Defense Technology, Changsha* 410073, *China*)

Abstract: Basing on the detonation theory, the structure of the deformable warhead was simplified to be double layer cylindrical shells under the detonation. Plastic hinges were introduced into the loading section of the shell, which contacted with the deforming charge, and the deforming charge was divided into small segments accordingly. Loading and movement of these segments were analyzed. Deforming shape of the cylindrical shell under the loading with equal distribution was bulgy, and the displacement of shell segments was obtained. Deforming charge with different thickness, according to the displacement of the segment, was set up to realize the same displacement of the shell segments on the loading direction. The D-shape was achieved theoretically, and the shape of deforming charge was designed accordingly. Numerical simulation validated the feasibility of the designed plan. The results indicate that the deformable warhead with the new-designed deforming charge can realize the D-shape.

Key words: explosion mechanics; deformation shape; plastic buckling; cylindrical shell; directional warhead