

文章编号: 1001-1455(2010)01-0065-05

可变形战斗部弹体变形型面的理论模型*

龚柏林, 卢芳云, 李翔宇

(国防科学技术大学理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 为了从理论上得到给定初始条件下可变形战斗部的弹体变形型面, 将战斗部变形部分的结构简化为辅助装药对单层圆柱壳体作用的结构, 将圆柱壳体作为理想刚塑性材料, 建立圆柱壳体的五塑性铰位移模式, 应用刚塑性动力学原理, 得到战斗部弹体变形型面的理论模型, 模型计算结果与实验结果吻合较好。

关键词: 爆炸力学; 变形型面; 塑性变形; 圆柱壳; 定向战斗部; 塑性铰

中图分类号: O383 **国标学科代码:** 130·35 **文献标志码:** A

1 引言

可变形破片战斗部是一种新型高效毁伤战斗部。它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, 一定延时后再在目标方位的另一边起爆主装药, 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的关键因素, 因此弹体变形型面的研究对战斗部实验设计、结构优化均具有重要意义。

很多学者对圆柱壳体承受均匀对称径向冲击载荷以及轴向载荷作用下的动力屈曲问题进行了研究, 但对径向非对称载荷作用的研究不多。有些采取不同的方法分析了圆柱壳体在非对称载荷下的响应特征^[1-3], 所采取的研究方法虽不能从根本上解决可变形战斗部变形的理论问题, 但其中径向非均匀、非对称载荷作用于单层圆柱壳体的模型可以借鉴。

本文中, 针对可变形战斗部一次起爆的特点, 将战斗部在辅助装药爆轰驱动下的弹体变形问题等效为单层圆柱壳在径向非对称冲击载荷下的塑性动力响应问题, 建立圆柱壳体的五塑性铰位移模式, 应用刚塑性动力学理论, 求解出弹体的位移速度场, 得到战斗部弹体变形型面的理论模型。

2 理论分析

可变形战斗部主要由主装药、辅助装药、内外壳体、破片层和上下端盖组成, 主装药中心留有中心孔, 为弹体在辅助装药一次起爆后的压缩变形提供空间。战斗部结构模型如图1所示, 其中上下端盖未标示。其中为了分析可变形定向战斗部的弹体变形型面, 需要对战斗部结构进行简化。考虑到可变形战斗部一次起爆作用过程的特点, 且结构中含有中心孔, 因此将战斗部变形结构模型等效为辅助装药对单层圆柱壳体的作用, 并做以下基本假设:

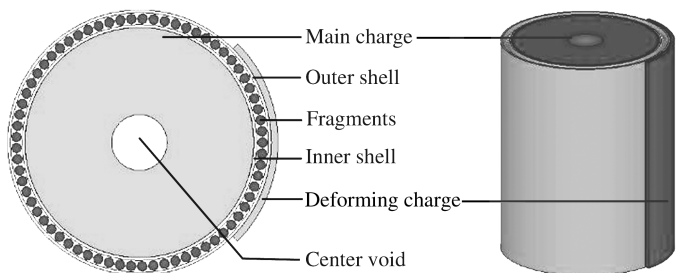


图1 可变形战斗部结构模型示意图

Fig. 1 Schematic configuration of deformable directional warhead

(1) 壳体材料为理想刚塑性,

忽略变形的弹性部分。

* 收稿日期: 2008-10-16; 修回日期: 2009-03-26

作者简介: 龚柏林(1982—), 男, 博士研究生。

(2) 辅助装药瞬时爆轰, 爆轰产物的压力、密度均匀分布。与辅助装药相接触壳体的变形初速瞬时获得, 且各点初速大小相等, 方向相同。

(3) 战斗部沿轴向方向不同横截面状态相同, 且壳体质量集中在中线上。在径向载荷作用下, 忽略轴力对屈服条件的影响, 认为在壳体截面在达到极限弯矩 M_0 时屈服。

圆拱的静态极限分析指出^[4], 圆拱在极限状态下会形成 3 个塑性铰, 圆柱壳体的动力分析参考这种位移模式, 即圆柱壳体五塑性铰位移模式。考虑到对称性, 只讨论圆柱壳的一半结构。以圆柱壳体截面下端点 O 为原点建立坐标系 xOy (如图 2 所示), 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。辅助装药爆轰驱动作用下的壳体结构在点 A 、 B 、 O 处形成塑性铰。其中 AA' 为与辅助装药相接触壳体; ω_1 为壳体 OB 绕铰 O 转动的角速度, ω_2 为壳体 AB 绕速度瞬心 C 转动的角速度; θ 为辅助装药的半分位角; ϵ 为塑性铰 A 和铰 B 之间的圆心角。

由图 2, 有

$$\frac{v_A}{AC} = \frac{v_B}{BC} = \omega_2 \quad (1)$$

$$\frac{v_B}{OB} = \omega_1 \quad (2)$$

$$v_A = \frac{2\cos\frac{\theta}{2}\cos\left(\frac{\theta+\epsilon}{2}\right)}{\sin\left(\theta+\frac{\epsilon}{2}\right)}\omega_1 R \quad (3)$$

$$\omega_2 = \frac{\cos^2\left(\frac{\theta+\epsilon}{2}\right)}{\sin\left(\theta+\frac{\epsilon}{2}\right)\sin\frac{\epsilon}{2}}\omega_1 \quad (4)$$

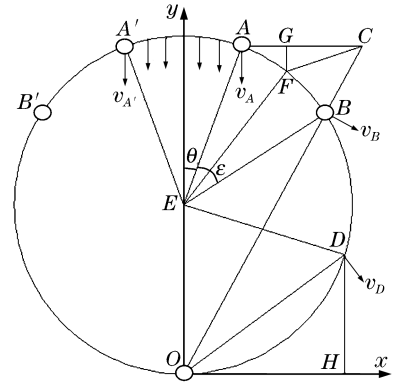


图 2 理论模型分析示意图

Fig. 2 Schematic sketch for analyzing theoretical model

式中: R 为圆柱壳的半径; v_A 为与辅助装药相接触壳体的变形初速。

当圆柱壳半径 R 无限大时, 辅助装药对圆柱壳的作用即近似为平板辅助装药作用于平板壳体的模型。因此在实际结构中, 辅助装药对战斗部弹体的爆轰驱动作用可简化为平板辅助装药作用于质量等效后的金属平板的 1 维平面对称模型。再通过 1 维爆炸驱动能量守恒方程可求得辅助装药爆轰驱动弹体的速度^[5], 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^[3], 即初始输入能的 $2/3$ 将转化成壳体的塑性变形能, 其余的用于壳体的刚性运动, 最终可求得

$$v_A = \frac{\sqrt{6}}{3} \sqrt{\frac{0.11556D^2 - 0.99015M/m}{A}} \quad A = \frac{M}{m} + \frac{1 + (1 + 2M/m)^3}{6(1 + M/m)} \quad (5)$$

式中: D 为辅助装药的爆速; m 、 M 分别为炸药质量和等效弹体质量。

如战斗部结构中辅助装药外围含承重壳体, 与辅助装药相接触壳体的初速同样可以参考能量分配规则, 并基于非对称平面夹心构型的古尼公式, 可得

$$v'_A = \frac{\sqrt{6}}{3} \sqrt{2E} \left[\frac{1 + A'^3}{3(1 + A')} + \frac{N}{m} A'^2 + \frac{M}{m} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad A' = \frac{1 + 2M/m}{1 + 2N/m}$$

式中: $\sqrt{2E}$ 为辅助装药的古尼能; N 为承重壳体的质量。

在塑性铰处, 速度必须连续, 加速度可以间断。将式(3)、(4)对 t 求导, 并略去 $\dot{\epsilon}$ 项 ($\dot{\epsilon} = 0$), 得 A 点做减速运动的加速度和壳体 AB 的角加速度

$$a_A = - \frac{2\cos\frac{\theta}{2}\cos\left(\frac{\theta+\epsilon}{2}\right)}{\sin\left(\theta+\frac{\epsilon}{2}\right)} \dot{\omega}_1 R \quad (6)$$

$$\dot{\omega}_2 = \frac{\cos^2\left(\frac{\theta + \epsilon}{2}\right)}{\sin\left(\theta + \frac{\epsilon}{2}\right) \sin \frac{\epsilon}{2}} \dot{\omega}_1 \tag{7}$$

设圆柱壳体右半圆上任意点至 y 轴的圆心角为 α , 则当 $0 \leq \alpha \leq \theta$ 范围内圆柱壳上任意点的速度为

$$v_x = 0, \quad v_y = -\frac{2\cos \frac{\theta}{2} \cos\left(\frac{\theta + \epsilon}{2}\right)}{\sin\left(\theta + \frac{\epsilon}{2}\right)} \omega_1 R \quad 0 \leq \alpha \leq \theta \tag{8}$$

对式(8)求导即得该段壳体上任意点的加速度

$$a_x = 0, \quad a_y = \frac{2\cos \frac{\theta}{2} \cos\left(\frac{\theta + \epsilon}{2}\right)}{\sin\left(\theta + \frac{\epsilon}{2}\right)} \dot{\omega}_1 R \quad 0 \leq \alpha \leq \theta \tag{9}$$

F 为壳体 AB 内任意点 ($\theta \leq \alpha \leq \theta + \epsilon$), G 为 F 在 AC 上的投影, 由图 2 有

$$\frac{v_x}{GF} = \frac{v_y}{GC} = \omega_2 \tag{10}$$

由式(1)、(4)解出该点的速度为

$$\begin{cases} v_x = \frac{\cos^2\left(\frac{\theta + \epsilon}{2}\right) (\cos\theta - \cos\alpha)}{\sin \frac{\epsilon}{2} \sin\left(\theta + \frac{\epsilon}{2}\right)} \omega_1 R \\ v_y = \frac{(\sin\alpha - \sin\theta) \cos^2\left(\frac{\theta + \epsilon}{2}\right) - 2\sin \frac{\epsilon}{2} \cos\left(\frac{\theta + \epsilon}{2}\right)}{\sin \frac{\epsilon}{2} \sin\left(\theta + \frac{\epsilon}{2}\right)} \omega_1 R \end{cases} \quad \theta \leq \alpha \leq \theta + \epsilon \tag{11}$$

对式(11)求导即得该段壳体上任意点的加速度

$$\begin{cases} a_x = \frac{\cos^2\left(\frac{\theta + \epsilon}{2}\right) (\cos\theta - \cos\alpha)}{\sin \frac{\epsilon}{2} \sin\left(\theta + \frac{\epsilon}{2}\right)} \dot{\omega}_1 R \\ a_y = \frac{(\sin\alpha - \sin\theta) \cos^2\left(\frac{\theta + \epsilon}{2}\right) - 2\sin \frac{\epsilon}{2} \cos\left(\frac{\theta + \epsilon}{2}\right)}{\sin \frac{\epsilon}{2} \sin\left(\theta + \frac{\epsilon}{2}\right)} \dot{\omega}_1 R \end{cases} \quad \theta \leq \alpha \leq \theta + \epsilon \tag{12}$$

D 为壳体 BO 内任意点 ($\theta + \epsilon \leq \alpha \leq \pi$), H 为 D 在 x 轴上的投影, 由图 2 有

$$\frac{v_x}{DH} = \frac{v_y}{OH} = \omega_1 \tag{13}$$

该点的速度为

$$v_x = (1 + \cos\alpha) \omega_1 R, \quad v_y = -(\sin\alpha) \omega_1 R \quad \theta + \epsilon \leq \alpha \leq \pi \tag{14}$$

对式(14)求导即得该段壳体上任意点的加速度

$$a_x = -(1 + \cos\alpha) \dot{\omega}_1 R, \quad a_y = -(\sin\alpha) \dot{\omega}_1 R \quad \theta + \epsilon \leq \alpha \leq \pi \tag{15}$$

根据位移加速度最小值原理^[4,6], 真实的加速度场在每个时刻都将使下列泛函取极值

$$J = \int_0^\pi \frac{1}{2} \rho (a_x^2 + a_y^2) R d\alpha + 4M_0 (\dot{\omega}_1 + \dot{\omega}_2) \tag{16}$$

式中: ρ 为壳体轴线方向的线质量; M_0 为壳体的塑性极限弯矩。

将式(6)、(7)、(9)、(12)、(15)代入式(16)积分之后, 令 $\partial J / \partial \omega_1 = 0, \partial J / \partial \epsilon = 0$, 即可得到壳体的动力响应基本方程。根据该方程可求得 ϵ 和 $\dot{\omega}_1$, 进而根据式(6)可求得 a_A 和点 A 的位移 s_A 。

3个区段的速度表达式(8)、(11)、(14)可改写为关于 v_A 的表达式,并对 t 积分可得圆柱壳体上任意点在 x 、 y 方向上的位移

$$\begin{cases} s_x = 0 \\ s_y = s_A \end{cases} \quad 0 \leq \alpha \leq \theta \quad (17)$$

$$\begin{cases} s_x = \frac{\cos\alpha - \cos\theta}{2} \left(\cot \frac{\epsilon}{2} - \tan \frac{\theta}{2} \right) s_A \\ s_y = \left[\frac{\sin\alpha - \sin\theta}{2} \left(\cot \frac{\epsilon}{2} - \tan \frac{\theta}{2} \right) - 1 \right] s_A \end{cases} \quad \theta \leq \alpha \leq \theta + \epsilon \quad (18)$$

$$\begin{cases} s_x = \frac{1 + \cos\alpha}{2} \frac{\sin\left(\theta + \frac{\epsilon}{2}\right)}{\cos \frac{\theta}{2} \cos\left(\frac{\theta + \epsilon}{2}\right)} s_A \\ s_y = \frac{\sin\alpha}{2} \frac{\sin\left(\theta + \frac{\epsilon}{2}\right)}{\cos \frac{\theta}{2} \cos\left(\frac{\theta + \epsilon}{2}\right)} s_A \end{cases} \quad \theta + \epsilon \leq \alpha \leq \pi \quad (19)$$

圆柱壳体上任意点的平面位移基于壳体 AA' 的位移 s_A ,初始坐标已知,根据初始加载条件求得 s_A 后,即可得到圆柱壳体上任意点在 xOy 坐标系上的坐标,即可变形战斗部弹体的变形型面。

3 计算算例及模型实验

基于以上理论模型,对战斗部弹体外径为200 mm、辅助装药分位角为 90° 的情况下弹体的变形型面进行了计算。计算求得 $s_A = 1.1$ cm, $\epsilon = 11^\circ$ 。图3所示为弹体在不同节点的变形型面图,其中各节点代表根据圆柱壳体 AA' 在 y 方向的不同位移所导出的圆柱壳体的型面。由计算结果可以看出,在弹体纵向方向不断内陷变形的同时,横向方向不断外凸变形,但变形量增加缓慢,且横向方向位移比纵向方向小。由于辅助装药能量较低,且一面外露,辅助装药起爆后爆轰产物迅速向空气中扩散,对弹体作功能力有限,弹体变形较小。

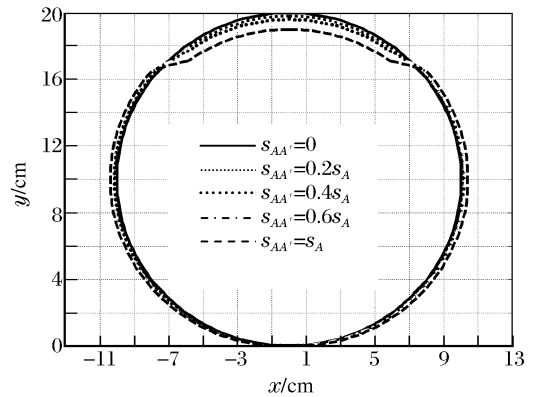


图3 计算所得弹体不同节点变形型面

Fig. 3 Calculated deformation shape at various time

为了验证理论模型的合理性,进行了相应的实验。采用的战斗部弹体外径为200 mm,辅助装药分位角为 90° 。实验分有、无承重壳体2种情况。在辅助装药外围增加承重壳体的约束后,辅助装药起爆产生的爆轰产物作功显著增强,弹体顶部变形初速提高,弹体纵向位移增大,变形更明显。图4~5为回收弹体与计算所得弹体型面的对比图,吻合较好。

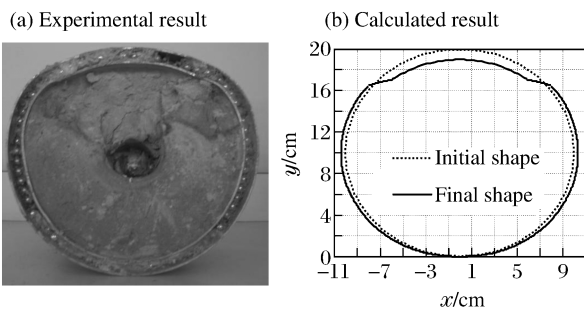


图4 无承重壳体时弹体变形型面对比图

Fig. 4 Final deformation shape without cover shell

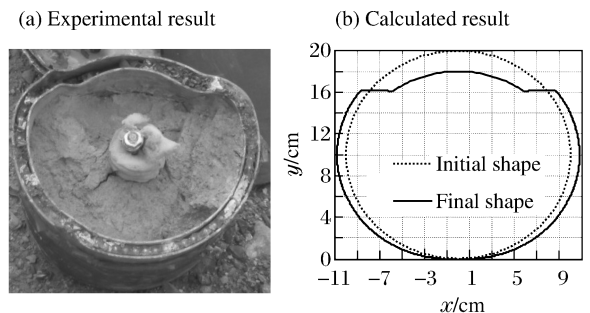


图5 含承重壳体时弹体变形型面对比图

Fig. 5 Final deformation shape with cover shell

4 结 论

将可变形战斗部变形部分的结构简化为辅助装药对单圆柱壳体作用的结构,将圆柱壳体作为理想刚塑性材料,建立圆柱壳体的五塑性铰位移模式,应用刚塑性动力学原理,得到战斗部弹体变形型面的理论模型。经实验验证,圆柱壳体的五塑性铰位移模式能很好地反映可变形战斗部一次起爆过程的弹体变形特征。该模式所建立的变形型面理论模型能准确预测分析弹体的变形型面,可为可变形战斗部实验提供参考,也可为战斗部破片定向飞散控制与战斗部优化结构设计提供理论基础。

参考文献:

- [1] Pédrón C, Combescure A. Dynamic buckling of stiffened cylindrical shells of revolution under a transient lateral pressure shock wave[J]. *Thin-walled Structures*, 1995(23):85-105.
- [2] 黄承义,郑际嘉,刘土光. 圆柱壳在侧向非对称冲击载荷下的塑性动力屈曲[J]. *爆炸与冲击*, 1995, 15(1):82-90.
HUANG Cheng-yi, ZHENG Ji-jia, LIU Tu-guang. Dynamic plastic buckling of cylindrical shells under nonuniform local radial impulsive loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1995, 15(1):82-90.
- [3] 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.
SUN Tao, FENG Shun-shan. Damage of free-free plastic cylinders under lateral impulsive loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1998, 18(2):103-111.
- [4] 杨桂通,熊祝华. 塑性动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1984:290-303.
- [5] 恽寿榕,赵衡阳. 爆炸力学[M]. 北京:国防工业出版社,2005:153-162.
- [6] 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.
CHEN Fang, MA Xiao-qing, WANG Peng. A Study on parameters of a deformable directional warhead[J]. *Acta Armamentarii*, 2004, 25(6):757-760.

A theoretical model for forecasting deformation shapes of deformable warheads*

GONG Bai-lin, LU Fang-yun, LI Xiang-yu

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

Abstract: In order to forecast theoretically the deformation shape of a deformable directional warhead on the given initial conditions, the structure of the deformable directional warhead on deforming phase was simplified as the single-layer cylindrical shell with a deforming charge, and the cylindrical shell was regarded as rigid-perfectly plastic material. A model for analyzing the deformation shape of the deformable directional warhead was established by using the five-plastic-hinge displacement mode of the cylindrical shell and the principle of rigid-perfectly plastic. The theoretical results by this model agree well with the experimental results.

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

* Received 16 October 2008; Revised 26 March 2009

Corresponding author: GONG Bai-lin, gongbl4321@163.com