

文章编号:1006-9941(2008)06-0731-03

准球形 EFP 成型影响因素的数值模拟

王树有, 蒋建伟, 门建兵

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要:采用非线性动力学程序 AUTODYN 数值模拟了准球形爆炸成型弹丸(EFP)压垮成型过程,研究了药型罩外曲率半径(R_2)和壁厚(h)等结构参数对 EFP 长径比和速度的影响,并对 $R_2 = 0.76D_k$, $h = 0.136D_k$ 的 EFP 进行了脉冲 X 光摄影实验。结果表明,随着药型罩外曲率半径和壁厚的增大,EFP 的长径比逐渐减小,EFP 速度逐渐降低;获得了形成准球形 EFP 的药型罩外曲率半径与壁厚对应关系;数值模拟结果与实验结果吻合较好。

关键词:爆炸力学;爆炸成型弹丸;准球形;结构参数;数值模拟

中图分类号:TJ414; O385

文献标识码:A

1 引言

爆炸成型弹丸(explosively formed projectile, EFP),是一种反装甲目标战斗部,一直受到各国弹药领域的重视。通过采用不同装药结构和起爆方式,可以获得长杆体 EFP、带尾裙(尾翼)EFP 和球形 EFP 等。长杆体 EFP 的侵彻能力较高,目前应用较广;带尾裙 EFP 的气动稳定性较好,可使 EFP 在更远的距离发挥作用^[1],是中大口 EFP 的发展趋势。而对于小口径 EFP,若采用长杆体 EFP 或带尾裙 EFP 形式,易因加工误差和装配误差而形成不对称 EFP,致使 EFP 飞行不稳定、侵彻能力差。而采用密实的球形 EFP 或准球形 EFP(长径比接近 1)其飞行稳定,对靶板侵彻一致性好。

随着计算机软、硬件技术的不断发展,数值模拟在 EFP 成型研究中得到广泛应用。其中,研究结构参数对长杆体 EFP 和带尾裙 EFP 成型影响居多^[2-6],而利用数值模拟方法对球形 EFP 的研究很少^[7-8]。本文采用非线性动力学程序研究结构参数对准球形 EFP 成型的影响规律,获得形成准球形 EFP 结构参数的对应关系,并将数值模拟结果与 X 光摄影实验结果进行对比。

2 准球形 EFP 计算方案

准球形 EFP 成型过程采用非线性动力学程序 AUTODYN^[9]进行计算。AUTODYN 程序有拉格朗日(Lagrange)、欧拉(Euler)、ALE、SHELL 等多种计算方法供选择,在爆炸与冲击领域应用广泛。本研究采用

拉格朗日(Lagrange)算法。图 1 为 EFP 战斗部方案结构图, D_k 为战斗部直径, R_1 、 R_2 、 h 分别为药型罩的内曲率半径、外曲率半径和罩顶壁厚。

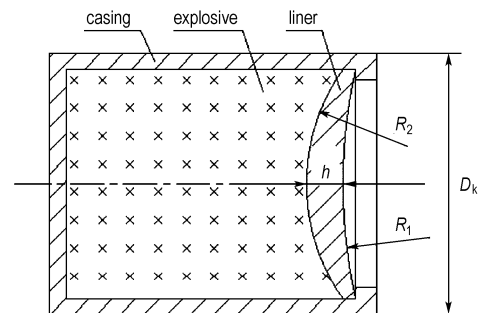


图 1 EFP 战斗部方案结构图

Fig. 1 EFP and computation sketch

计算材料模型选取如下:药型罩材料选用紫铜,选用 Linear 状态方程,Johnson-cook 强度模型;JH-2 炸药选用 JWL 状态方程;壳体和压环简化为一体,选用 Shock 状态方程,Von-mises 强度模型。所有材料参数取自 AUTODYN 材料库。

3 数值模拟结果及分析

EFP 有三种成型模式:向后翻转型、向前压拢型和介于二者之间的压垮型。前二者形成杆形 EFP,而压垮型可以形成准球形、球形 EFP。对具体设计来讲,压垮型形成球形 EFP 有两种方法可以实现:第一,药型罩设计成“W”罩,依靠“W”药型罩被压垮折叠形成,此方法的缺点是折叠过程使 EFP 不够密实;第二,药型罩设计为变壁厚药型罩(如图 1 所示),药型罩在径向挤压和轴向拉伸过程中“点聚焦”^[7],形成密实的

收稿日期:2008-02-14;修回日期:2008-07-21

基金项目:国家部委基础科研项目(D3320060259)

作者简介:王树有(1977-),男,讲师,博士,主要从事新型弹药技术与毁伤机理研究。e-mail: wangshuyou@163.com

准球形、球形 EFP。图 2 为本文采用第二种方法设计的准球形 EFP 的成型过程示意图。

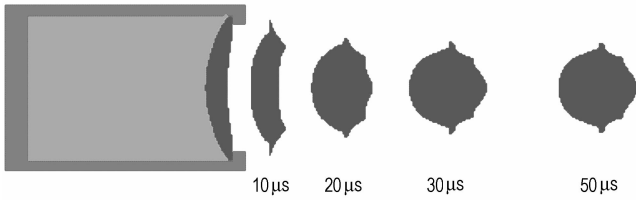


图 2 准球形 EFP 的成型过程

Fig. 2 Formation process of quasi-spherical EFP

选取不同药型罩罩顶厚(以下简称壁厚, h)、外曲率半径(R_2)的 EFP 结构方案进行数值模拟计算,目的是获得上述参数对 EFP 长径比、EFP 速度的影响规律,得到形成准球形 EFP 的结构参数对应关系。两个参数范围如下: $h = 0.140D_k \sim 0.152D_k$, (分别取 $0.140D_k$, $0.144D_k$, $0.148D_k$, $0.152D_k$); $R_2 = 0.68D_k \sim 0.80D_k$ (分别取 $0.68D_k$, $0.72D_k$, $0.76D_k$, $0.80D_k$), 共计 16 个计算方案。

图 3、图 4 给出了药型罩外曲率半径对 EFP 长径

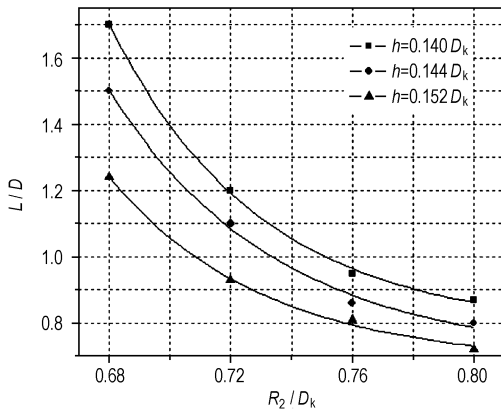


图 3 外曲率半径对 EFP 长径比的影响

Fig. 3 Effect of outer curvature radius on L/D of EFP

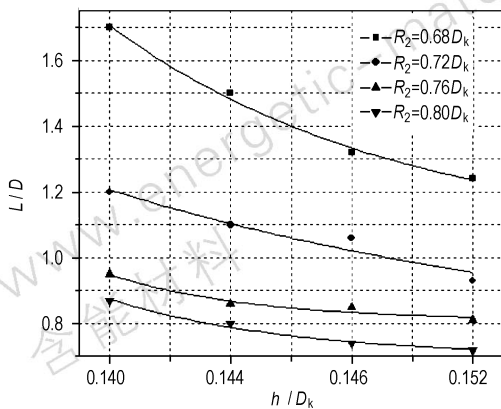


图 5 罩顶厚对 EFP 长径比的影响

Fig. 5 Effect of linear top thickness on L/D of EFP

比、速度的影响规律。从计算结果来看,随着药型罩外曲率半径的增大,EFP 的长径比逐渐减小,速度逐渐降低。曲率半径对速度影响与文献[3]计算结果相反。准球形 EFP 药型罩外曲率半径增大,药型罩口部厚度增加,微元速度降低。而文献[3]的 EFP 成型方式为向后翻转,曲率越大,易于翻转,速度增加。

图 5、图 6 给出了药型罩壁厚对 EFP 长径比、速度的影响规律。从计算结果来看,随着药型罩壁厚的增大,EFP 的长径比减小,速度逐渐降低,这与壁厚对长杆 EFP 的影响趋势一致^[3-5]。

通过数值模拟计算得到了药型罩外曲率半径、罩顶厚两参数对 EFP 长径比和速度影响规律,从中获得准球形 EFP 的结构参数(外曲率半径与罩顶厚)的对应关系,如图 7 所示,图中曲线上的每个点即为形成准球形 EFP 的结构参数组合。图 8 为某一 EFP 方案的数值模拟结果与 X 光实验结果的对比。从图中可以看出,二者吻合较好,表明本文所采用的计算方法和材料模型是正确的。

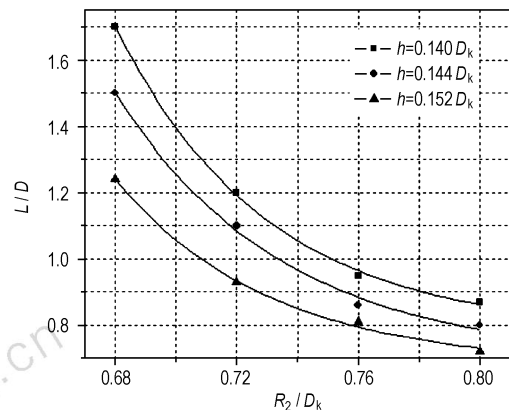


图 4 外曲率半径对 EFP 速度的影响

Fig. 4 Effect of curvature radius on EFP velocity

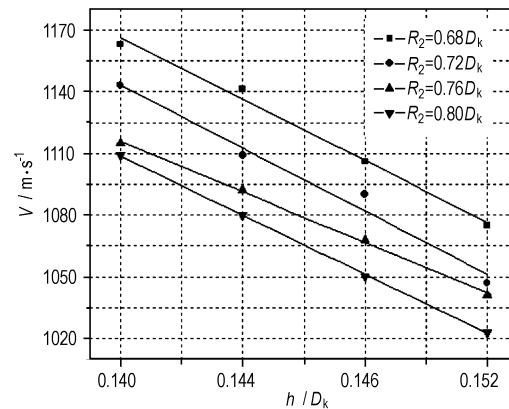


图 6 罩顶厚对 EFP 速度的影响

Fig. 6 Effect of linear top thickness on EFP velocity

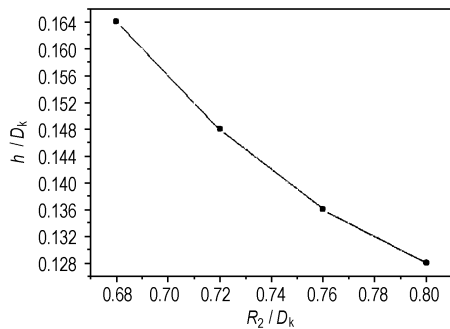
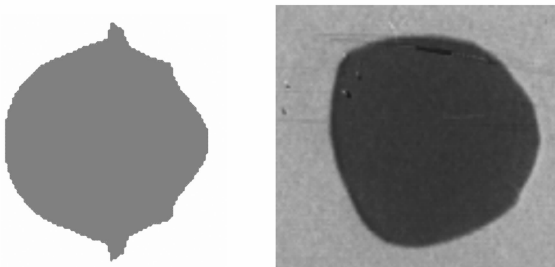


图7 准球形 EFP 壁厚与外曲率半径的对应关系
Fig. 7 Relationship between linear thickness and outer curvature radius of quasi-spherical EFP



numerical simulation prediction flash radiograph

图8 EFP 数值模拟成型图与 X 光实验结果对比
Fig. 8 Comparison of numerical simulation prediction with experimental result of EFP formation shape

4 结论

利用数值模拟方法研究了药型罩结构参数对准球形 EFP 成型结果的影响。随着药型罩外曲率半径和壁厚的增大, EFP 的长径比逐渐减小; EFP 的速度逐渐降低。获得了形成准球形 EFP 的药型罩结构参数对应关系。相关试验验证了所采用的计算方法与材料模型的正确性。

Numerical Simulation of Parameters on Formation of Quasi-spherical EFP

WANG Shu-you, JIANG Jian-wei, MEN Jian-bing

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The collapse and formation process of quasi-spherical explosively formed projectile (EFP) was simulated by nonlinear dynamic software AUTODYN. Effects of structure parameters of liner outer curvature radius (R_2) and liner thickness (h) on the velocity and length/diameter ratio of EFP were studied. Results show that as the increasing of outer curvature radius and liner thickness, velocity and length/diameter ratio of EFP decrease. The relationship between outer curvature radius and liner thickness of the quasi-spherical EFP is obtained. X flash radiographs of EFP with structure parameters $h = 0.136D_k$ and $R_2 = 0.76D_k$ are obtained. The results of numerical simulation are well agreement with X flash radiographs.

Key words: explosion mechanics; explosively formed projectile (EFP); quasi-spherical; structure parameter; numerical simulation

参考文献:

- [1] 赵慧英, 沈兆武, 李成兵, 等. 带尾翼爆炸成型弹丸的新技术[J]. 含能材料, 2006, 14(2): 102-104.
ZHAO Hui-ying, SHEN Zhao-wu, LI Cheng-bing, et al. A new way of explosively formed projectile with stabilizing fins[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(2): 102-104.
- [2] 蒋建伟, 杨军, 门建兵, 等. 结构参数对 EFP 成型影响的数值模拟[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(11): 939-941.
JIANG Jian-wei, YANG Jun, MEN Jian-bing, et al. Numerical simulation for the parameter study of explosively formed projectile with aluminum case[J]. *Transaction of Beijing Institute of Technology*, 2004, 24(11): 939-941.
- [3] 李裕春, 杨万江, 沈蔚. 药型罩曲率半径对爆炸成型弹丸参数的影响[J]. 火工品, 2003(1): 45-48.
LI Yu-chun, YANG Wan-jiang, SHEN Wei. Influence of liner curvature radius on parameters of explosively formed projectile[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2003(1): 45-48.
- [4] 顾文彬, 刘建青, 苏青笠, 等. 药型罩壁厚对 EFP 成型性能影响试验[J]. 解放军理工大学学报, 2005, 6(2): 162-165.
GU Wen-bin, LIU Jian-qing, SU Qing-li, et al. Experimental investigation of liner thickness influences on EFP characters[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2005, 6(2): 162-165.
- [5] 周翔, 龙源, 岳小兵. 76 mm 口径 EFP 成型过程数值模拟及影响因素研究[J]. 弹道学报, 2003, 15(2): 59-63.
ZHOU Xiang, LONG Yuan, YUE Xiao-bing. Numerical simulation and effects of the formation of EFP with 76 mm diameter[J]. *Journal of Ballistics*, 2003, 15(2): 59-63.
- [6] 张志春, 孙新利, 孟会林, 等. EFP 成型影响因素的数值模拟[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(1): 227-228.
ZHANG Zhi-chun, SUN Xin-li, MENG Hui-lin, et al. Numerical simulation for the parameter study of explosively formed projectile[J]. *Journal of projectile, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006, 26(1): 227-228.
- [7] Joseph Carleone. Tactical Missile Warheads[M]. 1993.
- [8] 杨军, 蒋建伟, 门建兵. 准球形爆炸成型弹丸的形成、飞行及侵彻过程的数值模拟[J]. 高压物理学报, 2006, 20(4): 429-433.
YANG Jun, JIANG Jian-wei, MEN Jian-bing. Numerical simulation for formation flight and penetration of sphericity EFP[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2006, 20(4): 429-433.
- [9] Century Dynamic Inc. AUTODYN User Manual, Revision 4.2[M]. San Ramon: Century Dynamics Inc., 2001.