文章编号：1000-5773(2006)04-0429-05

准球形爆炸成型弹丸的形成、飞行及侵彻过程的数值模拟*

杨 军，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：应用 AUTODYN-2D 软件，对准球形爆炸成型弹丸的形成、飞行及侵彻过程进行数值模拟。分析了爆炸成型弹丸的形成过程，药型罩曲率半径对其成型影响；应用拉格朗日/欧拉混合方法对飞行过程进行模拟计算，利用对速度-位移曲线拟合的方法求出衰减系数；并对弹丸侵彻靶板过程作了简要分析。

关键词：爆炸成型弹丸；侵彻；数值模拟

中图分类号：TJ410 **文献标识码**：A

1 引 言

爆炸成型弹丸(Explosively Formed Projectile，简称 EFP)战斗部是一种新型的反装甲目标的战斗部，可广泛应用于炮兵弹药、航空弹药、工程兵弹药以及单兵反装甲弹药[1]。通过改变不同的装药结构，人们可获得球形 EFP、带尾裙 EFP 和长杆 EFP 等，其中球形 EFP 弹丸的飞行稳定性最好，几乎不受飞行姿态影响，在工程实践中有很高的应用价值。EFP 的研究主要涉及到 EFP 成型的爆炸力学、EFP 飞行的飞行力学以及 EFP 对装甲目标侵彻的终点弹道学领域，EFP 战斗部的设计是一个相对复杂的过程，而且仅用试验方法不能对 EFP 弹丸的形成、飞行及侵彻过程进行细致的研究。先进的数值模拟方法提供了一种新的研究手段，前人的工作主要集中在 EFP 弹丸形成及侵彻方面[2]，本工作则尝试应用拉格朗日/欧拉混合方法对准球形 EFP 弹丸飞行过程进行模拟，实现了准球形 EFP 弹丸形成、飞行及侵彻的全过程数值模拟。计算结果表明，通过数值模拟方法不仅对 EFP 弹丸的形成及侵彻过程有清晰的认识，而且对飞行过程模拟计算得到的速度衰减系数也与经验公式计算结果相吻合。

2 EFP 成型过程数值模拟

2.1 计算模型

为得到准球形 EFP 弹丸，计算模型采用如图 1 所示的变壁厚球缺罩 EFP 战斗部装药结构，主要由壳体、装药及药型罩组成。装药直径为 20 mm，药型罩中心厚度 4.38 mm，外曲率半径(靠近装药面曲率定义为外曲率)为 14 mm，壳体厚度 2 mm。

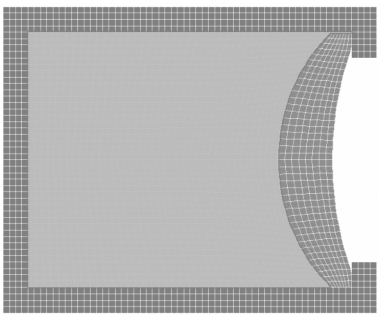


图 1 EFP 战斗部计算模型

Fig. 1 Gridding model of EFP warhead

采用非线性动力软件 AUTODYN-2D[3] 进行 EFP 形成过程数值模拟，用拉格朗日算法。装药选

* **收稿日期**：2005-11-16；**修回日期**：2006-04-28

作者简介：杨 军(1980—)，男，硕士研究生，主要从事弹药仿真技术研究.

通讯作者：蒋建伟(1962—)，男，教授，博士生导师，主要从事弹药工程仿真技术与研究. E-mail：bitjjw@bit.edu.cn

用 JH-2 炸药,药型罩、端盖和壳体材料及各部分选用的材料模型如表 1 所示,材料模型参数取自 AUTODYN 数据库。

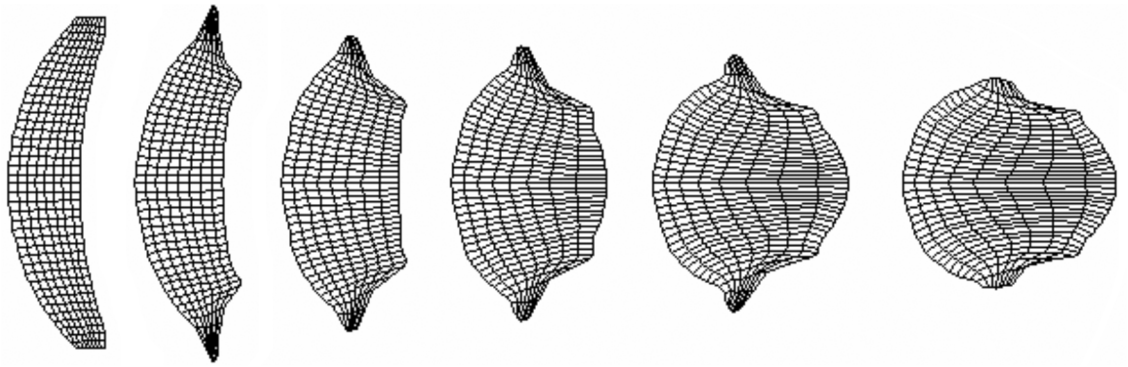
表 1 数值模拟中采用的材料模型

Table 1 Material model for numerical simulation

Title	Material	Equation of state	Constitutive model
Liner	Ingot	Grüneisen	Johnson-Cook
Shell	45 steel	Shock	von Mises
Cover	45 steel	Shock	von Mises
Charge	JH-2	JWL	Hydro

2.2 准球形 EFP 成型过程模拟分析

应用数值模拟方法,可对各个时期 EFP 的形状及变化趋势进行分析,有利于找出各参数对 EFP 成型的影响规律,进而选取合理参数优化战斗部结构。将 EFP 形成过程中不同时刻的形状排列如图 2 所示。



(a) 0 μs (b) 6 μs (c) 10 μs (d) 14 μs (e) 20 μs (f) 30 μs

图 2 EFP 成型过程模拟

Fig. 2 Simulation of EFP formation

通过数值模拟方法,可直观地看出 EFP 的成型过程。当传爆药柱引爆主药柱后,近似球面波形的爆轰波首先传至罩顶,几十万个大气压的爆轰压力作用使得罩顶首先轴向变形,随着爆轰波的继续推进,罩面依次变形。对球缺罩径向变形速度分量较小,罩内表面不会发生碰撞,仅产生挤压,挤压的结果使得靠近罩轴心外壁质点轴向运动受阻,而内壁质点轴向运动加剧,因而罩顶加厚,当爆轰波到达罩外缘时,该边界质点受压而产生径向向外运动,这种运动随着罩体轴向运动显得更加明显。最终罩体由于轴向拉伸及径向挤压运动形成了准球形 EFP 弹丸。

2.3 药型罩曲率对 EFP 成型的影响

对球缺型药型罩,曲率半径是决定 EFP 形状的关键因素。对于变壁厚药型罩,在不改变罩中心厚度的情况下仅改变罩外曲率,分析罩曲率变化对 EFP 成型的影响。图 3 为不同外曲率半径下形成 EFP 的最大速度及最大速度时所对应的外形。

计算结果表明,随着药型罩曲率的变化,EFP 的最大速度和形状将产生很大的变化:

(1) 随着药型罩外曲率半径的减小,爆轰能量向 EFP 转化的动能逐渐增多,而形成 EFP 的质量又逐渐减小,从而使 EFP 的速度逐渐提高;

(2) 随着外曲率半径减小,最终形成的 EFP 长径比逐渐增大,可见改变外曲率半径是形成准球形 EFP 比较有效的办法。

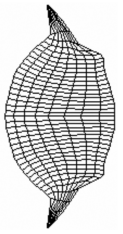
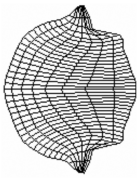
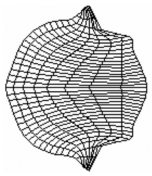
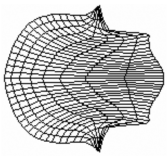
Outer curvature	1.4 cm	1.28 cm	1.25 cm	1.2 cm
v	864.0 m/s	899.4 m/s	901.6 m/s	918.6 m/s
Shape of EFP				

图 3　外曲率半径与 EFP 速度及外形的关系

Fig. 3　The relationship curvature with velocity and shape of EFP

3　EFP 飞行过程数值模拟

EFP 弹丸获得初速并脱离爆轰产物气体的作用之后在空气中飞行时,将受到两种力的作用:重力和空气阻力。因 EFP 弹丸速度较高可忽略重力影响,空气阻力会造成弹丸速度衰减。通过对 EFP 弹丸在空气介质的飞行过程的模拟计算,可得弹丸飞行过程速度与位移的关系曲线,将速度衰减公式与该曲线拟合最终求出 EFP 弹丸飞行过程的速度衰减系数。计算过程采用拉格朗日/欧拉混合方法,空气介质采用欧拉网格,理想气体状态方程,边界条件设为流出。EFP 弹丸采用拉格朗日网格,被赋予初速并置于欧拉网格中。图 4 为 $t=70\ \mu$s 时 EFP 弹丸飞行速度场。弹丸在飞行过程中,弹尾部有气流与弹体分离,形成大量的涡流,由于弹丸超音速飞行,弹头部和尾部又会出现激波,使得弹丸阻力明显增加[4-5]。

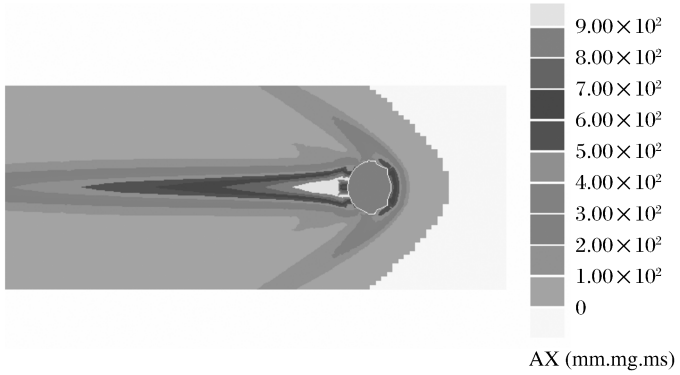


图 4　$t=70\ \mu$s 时 EFP 弹丸飞行速度场

Fig. 4　Velocity field of EFP when $t=70\ \mu$s

通过对 EFP 弹丸在空气中飞行的模拟计算可得到图 5、图 6 所示 EFP 弹丸速度 v 和位移 x 随时间 t 变化曲线。弹丸在空气中飞行的速度衰减公式为

$$v_x = v_0 \mathrm{e}^{-\alpha x} \tag{1}$$

式中:x 为位移,α 为弹丸速度衰减系数,v_x 为 x 位移处弹丸速度。

由于(1)式反映的是位移与速度关系,因此首先将图 5、图 6 转化为速度-位移曲线,在 Origin 软件[6]中选用方程 $y=a\mathrm{e}^{bx}$ 对该曲线进行拟合,可得 $a=899.94$,$b=-0.000\,01$,将其转化为国际单位最终得 $v_0=899.94$ m/s,$\alpha=1\times10^{-2}$ m^{-1}。

为了初步检验数值模拟计算得到的弹丸衰减系数是否可信,这里与经验公式计算结果进行对比。将准球形 EFP 弹丸等效为球形,气动阻力系数 $C_\mathrm{D}=0.97$[7],当地空气密度 $\rho_{a0}=1.226$ kg/m^3,形状系数 $\varphi=3.07\times10^{-3}$,EFP 弹丸质量 $m=7.03$ g。

$$\alpha=\frac{C_\mathrm{D}\rho_\mathrm{a}\varphi m^{2/3}}{2m}=9.53\times10^{-3}\ \mathrm{m}^{-1} \tag{2}$$

数值模拟结果与经验公式计算结果对比可知，通过数值模拟方法对 EFP 弹丸飞行过程进行仿真并求解衰减系数的方法是可行的。

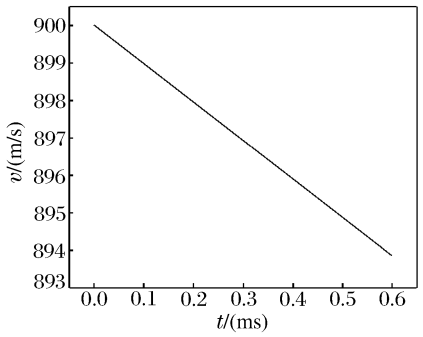


图 5 EFP 弹丸速度与时间关系

Fig. 5 The relationship EFP velocity with time

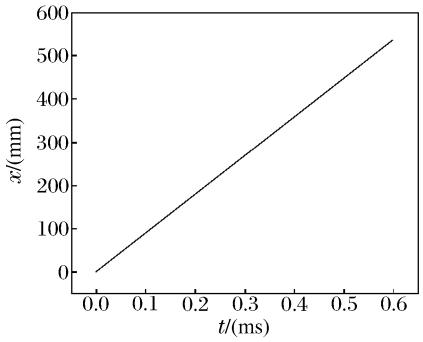


图 6 EFP 弹丸位移与时间关系

Fig. 6 The relationship EFP displacement with time

4 EFP 侵彻过程数值模拟

4.1 计算模型

EFP 弹丸侵彻计算模型如图 7 所示，靶板厚度为 6 mm，材料为 A3 钢，计算选用拉格朗日算法，材料本构关系采用 Johnson-Cook 模型，侵蚀模型采用几何应变模型。图 8 为计算得到的 $t=25\ \mu s$ 时弹丸和靶板变形状态图。

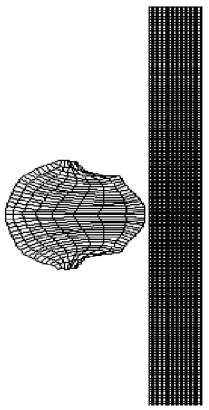


图 7 侵彻计算模型

Fig. 7 Computational model for penetration



图 8 $t=25\ \mu s$ 时弹丸及靶板变形状态

Fig. 8 Distortion of EFP and target when $t=25\ \mu s$

4.2 计算结果分析

记录 EFP 弹丸及冲塞中心速度与时间变化的关系曲线，如图 9 所示。侵彻过程中的变形情况表明，在侵彻初始阶段，EFP 弹丸发生明显的塑性变形，此后弹丸变形进一步增大，并有一定质量侵蚀出现。对于靶板，在侵彻过程中形成剪切冲塞破坏。Johnson-Cook 模型是一种描述材料应变硬化、应变率硬化和热软化的热粘塑性本构关系。从理论上讲，上述本构关系能基本反映由冲击波侵彻引起材料破坏的主要物理特性，但也需要通过试验进一步检验和修正。

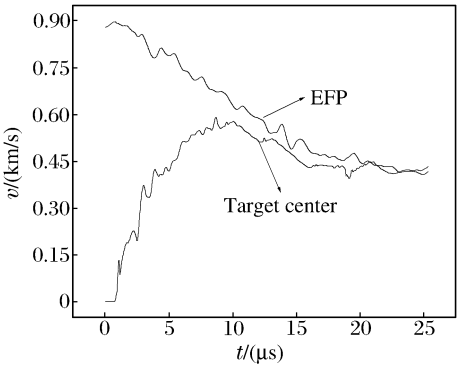


图 9 弹丸和冲塞中心速度与时间关系

Fig. 9 The relationship velocities of EFP and target center with time

5 结　论

运用 AUTODYN-2D 软件对准球形 EFP 弹丸的形成、飞行及侵彻全过程进行数值模拟,分析了 EFP 弹丸的形成过程,药型罩曲率半径对其成型影响;应用拉格朗日/欧拉混合方法对 EFP 弹丸飞行过程进行模拟计算,利用对速度-位移曲线拟合的方法求出衰减系数,与经验公式计算结果相吻合;对弹丸侵彻靶板过程作了简要分析。通过模拟计算可加深对 EFP 的认识,但计算结果与实际吻合程度有待试验验证。

References:

[1] Ci M S. Design Characteristic of EFP Warhead [A]//China Enginery Industry Acad Rocket and Missile Lodge (Volume 11) [C]. 2000:411-428. (in Chinese)
慈明森. EFP 战斗部的设计特点 [A]//中国兵工学会火箭导弹分会(总第 11 卷) [C]. 2000:411-428.

[2] Ci M S. Optimizing the Shape of EFP from Forming Aerodynamics and Terminal Ballistic Trajectory [J]. Projectile & Rocket Technology,1998,3:25-31. (in Chinese)
慈明森. 从成型、空气动力学和终点弹道方面优化 EFP 的形状 [J]. 弹箭技术,1998,3:25-31.

[3] Interactive Non-Linear Dynamic Analysis Software AUTODYNTM User Manual(Revision 3.0) [Z]. [S.l.]:Century Dynamics Inc,1997.

[4] Lei Y B,Niang D W. Numerical Study of Shock Wave Turbulent Boundary Layer Interaction in Supersonic Flows [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2004,36(1):1-5. (in Chinese)
雷雨冰,梁德旺. 超声速流中激波湍流附面层干扰数值模拟 [J]. 南京航空航天大学学报, 2004,36(1):1-5.

[5] Jin Y D. Conspectus of Missile and Spaceflight Technology [M]. Haerbin:Haerbin Institute of Technology Press, 2002. (in Chinese)
金永德. 导弹与航天技术概论 [M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002.

[6] Hao H W. Instance Tutorial of Origin6.0 [M]. Beijing:China Electric Power Press,2000. (in Chinese)
郝红伟. Origin6.0 实例教程 [M]. 北京:中国电力出版社,2000.

[7] Sui S Y,Wang S S. Terminal Ballistics [M]. Beijing:National Defence Industry Press,2000. (in Chinese)
隋树元,王树山. 终点效应学 [M]. 北京:国防工业出版社,2000.

Numerical Simulation for Formation Flight and Penetration of Sphericity EFP

YANG Jun,JIANG Jian-Wei,MEN Jian-Bing

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

Abstract: With AUTODYN-2D code, the formation, flight and penetration processes of sphericity explosively formed projectile(EFP) are simulated. The influence of curvature of liner impose on formation of EFP is studied, and the flight velocity field of EFP is revealed. By analyzing the v-t curve, the attenuation coefficient could be obtained, and then the penetration process of EFP to armor plate are simply analyzed.

Key words: explosively formed projectile; penetration; numerical simulation