文章编号：1000-5773(2012)02-0199-06

爆炸成型弹丸战斗部不同侵彻着角下的毁伤能力研究*

樊 菲[1]，李伟兵[1]，王晓鸣[1]，李文彬[1]，韩 玉[2]

(1. 南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室，江苏南京 210094；
2. 总装备部沈阳军事代表局，辽宁沈阳 110015)

摘要：利用 LS-DYNA 仿真软件，对爆炸成型弹丸(EFP)毁伤能力与 EFP 侵彻着角关系进行了研究。结果表明：随着 EFP 着角从 0°增加到 40°，EFP 侵彻靶板的垂直侵彻深度减小了 34.2%，开孔处孔径大小增加了 18.2%。侵彻过程中，EFP 头部速度与时间呈线性规律变化，并且当 EFP 着角越大时，头部速度下降趋势越快；EFP 垂直侵彻深度与时间先呈线性增长，随后上升趋势变得缓慢；不同侵彻着角下的侵彻参数与时间的关系趋势一致。基于 EFP 的垂直侵彻理论和杆式弹的斜侵彻理论，结合仿真拟合曲线，得到了 EFP 垂直侵彻深度与侵彻着角的修正计算公式。

关键词：爆炸成型弹丸；侵彻着角；毁伤能力；侵彻深度；数值模拟

中图分类号：O385 **文献标识码**：A

1 引 言

爆炸成型弹丸(EFP)是利用聚能原理，通过炸药的爆轰作用，使药型罩压垮、翻转变形而形成的一种高速弹丸。目前，国内外对 EFP 的成型及垂直侵彻过程研究较多[1-6]，而对 EFP 斜侵彻问题研究得较少，但在实际作战使用中，斜侵彻是 EFP 更常见的着靶姿态，而不同侵彻着角对 EFP 的毁伤能力有何影响尚有待研究。

鉴于当前未见有针对 EFP 斜侵彻问题研究的报道，本研究结合杆式弹的斜侵彻机理来研究 EFP 对钢靶的斜侵彻，采用 LS-DYNA 仿真软件对 EFP 的成型及侵彻过程进行三维数值模拟，找出侵彻着角与 EFP 毁伤能力的关系，结合仿真和理论得到 EFP 着角与垂直侵彻深度的计算公式。

2 数值模拟计算

2.1 仿真模型建立

本工作研究的是 100 mm 口径弧锥结合罩所形成 EFP 的斜侵彻问题，装药为船尾形聚能装药结构，靶板为圆柱体结构，其 1/2 模型如图 1 所示。药型罩由两部分组成，顶部为球缺形，口部为锥形，弧锥结合部分光滑连接。弧锥罩尺寸采用优化尺寸[7]，圆弧半径为 0.45 倍装药口径，锥角为 145°。药型罩材料为紫铜，密度 8.96 g/cm^3；装药选 8701 炸药，密度 1.69 g/cm^3。靶板选 45 钢，密度 7.83 g/cm^3。图 1 中，L 为成型装药到靶板的距离，为 5 倍装药口径；θ 为 EFP 着角。

* **收稿日期**：2010-09-07；**修回日期**：2011-12-02

基金项目：国家部委基金项目(A2620060253)；江苏省 2009 年度普通高校研究生科研创新基金(CX09B_087Z)；南京理工大学自主科研专项计划资助项目(ZDJH02)

作者简介：樊 菲(1986—)，女，硕士研究生，主要从事弹丸的终点效应与目标毁伤技术研究. E-mail：lizzywhite@163.com

仿真中考虑到空气对 EFP 飞行过程中的影响以及网格的畸变问题，采用 ALE-Lagrange 耦合算法，其中炸药、药型罩和空气采用 ALE 算法，靶板采用 Lagrange 算法，ALE 单元与 Lagrange 单元进行耦合。

2.2 计算方案选取

如图 2 所示，本研究选取 EFP 着角 θ 从 0°变化到 40°，每间隔 5°确定一个仿真计算方案，研究各方案侵彻结束后 EFP 的垂直侵彻深度和开孔处孔径大小与 EFP 着角 θ 的关系，同时对 EFP 侵彻参数头部速度和垂直侵彻深度与时间 t 的关系进行研究。

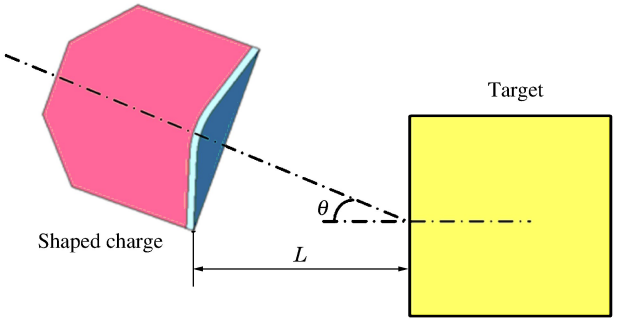


图 1 1/2 模型

Fig. 1 1/2 model

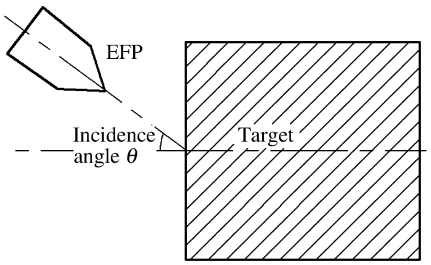


图 2 EFP 侵彻靶板示意图

Fig. 2 Schematic diagram for EFP penetrating target

2.3 仿真计算过程

仿真步骤为：

(1) 进行 EFP 的成型仿真，计算到 170 μs 时 EFP 速度达到稳定状态，其成型参数见表 1。将仿真图与实验结果进行对比(如图 3 所示)，可以看出 EFP 的成型仿真结果与实际较为吻合；

(2) 添加靶板，且保证 EFP 的炸高为 5 倍成型装药口径；

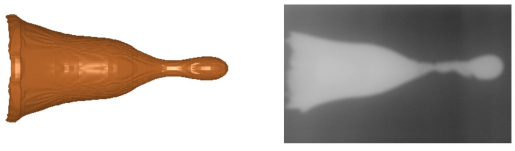
(3) 修改 K 文件(用于 LS-DYNA 的计算)参数，利用 LS-DYNA 中的完全重启动功能计算 EFP 对靶板的侵彻；

(4) 整理计算结果，选取典型着角方案的侵彻结果列于图 4 中。

表 1 EFP 仿真与实验结果的对比(170 μs)

Table 1 The comparison between simulation results and experimental results of EFP(170 μs)

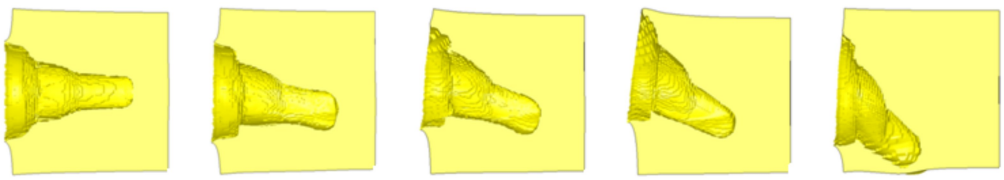
Method	Velocity v_0 /(km/s)	Diameter d /(mm)	Length l_0 /(mm)
Simulation	2.360	24.8	94.2
Experiment	2.417	28	109



(a) Simulation (b) Experiment

图 3 EFP 仿真图与实验结果的对比(170 μs)

Fig. 3 The comparison between simulation picture and experimental results of EFP(170 μs)



(a) 0° (b) 10° (c) 20° (d) 30° (e) 40°

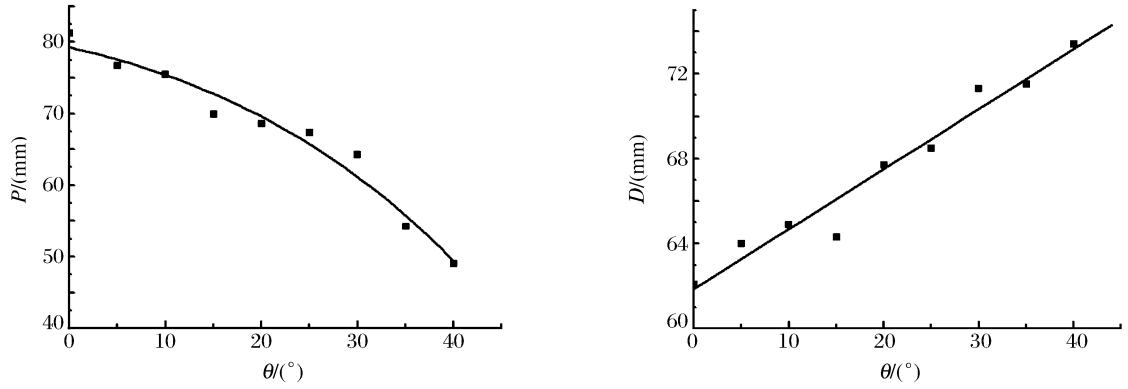
图 4 靶板的侵彻状况随 EFP 着角的变化

Fig. 4 The change of target penetration situation with EFP incidence angle

2.4　仿真结果及分析

分析各方案计算结果,着角对侵彻结果的影响如图 5 所示。从图 5 中可以看出,随着着角 θ 的增大,EFP 侵彻结束后的垂直侵彻深度逐渐减小,且减小的趋势越来越快,与杆式弹的斜侵彻规律一致。斜侵彻时垂直侵彻深度是弹丸沿其自身速度方向的侵彻深度的分量,随着着角 θ 的增大,此分量的所占的比例越来越小。EFP 侵彻结束后开孔处的孔径大小呈线性增加规律变化,这是由于 EFP 与靶板端面的接触宽度因 EFP 侵彻时的倾斜而增大,但增加的量非常小,近似为常量。当着角 θ 从 0°增加到 40°时,EFP 侵彻结束后的垂直侵彻深度下降了 34.2%,孔径增加了 18.2%。

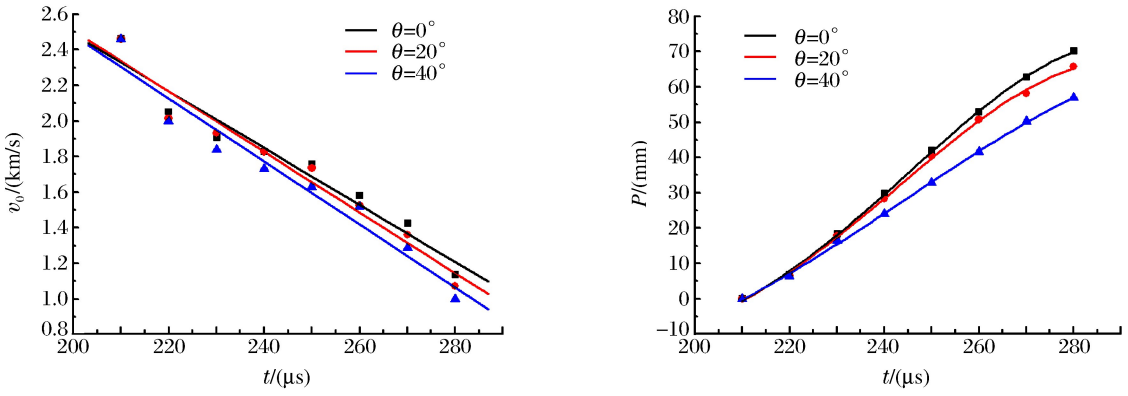
图 6 为 EFP 侵彻参数头部速度和垂直侵彻深度随侵彻时间的变化曲线,着角 θ 从 9 个值中选取 0°、20°和 40°进行研究,从图 6(a)可以看出,在不同着角下 EFP 头部速度与时间的关系趋势一致,都呈线性变化,并且当 EFP 的着角 θ 越大时,头部速度下降趋势越快;图 6(b)给出了 EFP 垂直侵彻深度与时间的关系,在不同着角下这种关系趋势一致,即刚开始时 EFP 垂直侵彻深度与时间基本呈线性关系,随后上升趋势变得缓慢,并且 EFP 的着角 θ 越大,垂直侵彻深度越小。



(a) P-θ　　(b) D-θ

图 5　侵彻结果参数随着角 θ 的变化曲线

Fig. 5　The change curve of penetration parameters with incidence angle(θ)



(a) v_0-t　　(b) P-t

图 6　EFP 侵彻参数与时间的关系

Fig. 6　The change curve of EFP penetration parameters with times

3　实验验证

图 7 为入射角为 5°时 EFP 侵彻钢靶后的实验与仿真结果,从图 7 中可以看出,两者的垂直侵彻深

度值基本吻合，而实验照片与仿真图的开孔孔径相差较大，其主要原因是：实验时由于空气阻力 EFP 在飞行过程中尾部易断裂，在仿真中虽然也考虑了空气阻力，但与实际仍存在差距。



(a) Experiment(P_0=74.4 mm)　　(b) Simulation(P_0=75.5 mm)

图 7　实验结果与仿真结果的对比

Fig. 7　The comparison between simulation picture and experimental result

4　理论分析及仿真修正

4.1　斜侵彻原理分析

EFP 是一种介于射流和普通杆式穿甲弹之间的固体高速柔性侵彻体，温度在 400～500 ℃之间。相对于普通射弹而言，其主要特点[5]为：(1) 侵彻速度高，着靶速度处于 1500～2500 m/s；(2) 弹体材料强度较低，通常已发生较大的塑性变形；(3) 弹体形状通常不规则，弹体中后部存在空腔。文献[4]给出了 EFP 垂直侵彻深度的工程计算公式(药型罩材料为紫铜，靶板为 45 钢)

$$P_0 = \frac{v_0 - \sqrt{1.031v_0^2 - 3278}}{-1.031v + \sqrt{1.031v_0^2 - 3278}}(l_0 - 0.5d) \tag{1}$$

式中：P_0 为垂直侵彻深度，v_0 为侵彻速度，l_0 和 d 分别为 EFP 侵彻前的初始长度和直径。

EFP 对靶板的侵彻既与常规弹丸侵彻有相似性，又具有独特性[5]，依据文献[6]可以将本工作所研究的 EFP 的侵彻归类于破碎穿孔模式。鉴于此，可以参照杆式弹的斜侵彻理论研究 EFP 的斜侵彻。杆式弹斜侵彻时弹杆断面与靶板的接触非同时，弹杆受力不对称，以至弹杆发生偏转，此后弹杆按入射角方向推进，并遵循正侵彻的侵彻过程，即瞬时冲击阶段、稳定侵彻阶段、坑化阶段和回弹阶段。

瞬时冲击发生在界面附近，作用区域很小，同时由于高温高压，伴随有闪光现象；随着弹杆的推进，弹杆的碎屑从坑内往外喷溅，靶内冲击波使靶板发生变形、破碎和径向流动，自由表面的稀疏波使靶内冲击波迅速衰减，同时引起破碎的靶材朝外飞溅，导致靶内形成弹坑，此为稳定阶段；坑化阶段是在弹杆被完全磨蚀后，由于惯性作用弹坑将继续扩大，直至冲击波衰减成塑形波或弹性波；弹坑体积达到最大后，坑壁的回弹将导致坑壁发生脆性破坏。实验研究表明[8]，杆式弹长径比较小时(小于 10)，在弹速一定的情况下，垂直侵彻深度与斜侵彻的侵彻深度在垂直分量之间满足

$$P = P_0\cos\theta \tag{2}$$

式中：P_0 为弹丸垂直侵彻时的侵彻深度，θ 为弹丸着角。

结合(1) 式和(2)式，可近似得到 EFP 斜侵彻的侵彻深度公式

$$P = \frac{v_0 - \sqrt{1.031v_0^2 - 3278}}{-1.031v + \sqrt{1.031v_0^2 - 3278}}(l_0 - 0.5d)\cos\theta \tag{3}$$

4.2　理论与仿真计算结果对比

在 EFP 对靶板的垂直侵彻中，300 μs 时 EFP 已完全侵蚀，其对靶板的侵彻深度经测量为76.8 mm；根据 2.3 节中表 1 的参数，由公式(1)可求得 EFP 对钢靶侵彻的理论计算深度

$$P_0 = \frac{2360 - \sqrt{1.031 \times 2360^2 - 3278}}{-1.031 \times 2360 + \sqrt{1.031 \times 2360^2 - 3278}}(94.2 - 0.5 \times 24.8) = 77.5\ \text{mm}$$

可以看出,在垂直侵彻时理论计算值与仿真结果相近,说明本研究建立的仿真模型能够相对真实地反映所要研究的斜侵彻问题。

仿真中 EFP 的着角从 0°变化到 40°,间隔 5°,通过仿真结果得出不同着角对应的 EFP 垂直侵彻深度,再根据数据绘制图 8 所示的红色曲线,即仿真拟合曲线。图 8 中黑色曲线是不同着角对应的理论值所形成的曲线,即 $P = P_0\cos\theta$,其中 $P_0 = 77.5$ mm。两个蓝色的点是实验值。从图 8 可以看出,在 EFP 的着角较小时,仿真值与理论值和实验值吻合很好,而当 EFP 的着角较大时,仿真值与理论值相差较大。

4.3　EFP 斜侵彻计算公式修正

观察图 8 的两条曲线,在理论的基础上对仿真拟合曲线进行修正。两条曲线的变化规律相似,可以借用理论公式,即 $P = P_0\cos\theta$,而仿真拟合曲线明显比理论曲线下降趋势快,故假设 EFP 垂直侵彻深度 P 与着角 θ 的关系为

$$P = P_0(\cos\theta)^n \tag{4}$$

因为 $\cos\theta<1$,显然 $n>1$。

经过对 n 值的探索,最后得出当 $n=1.5$ 时,修正后的理论曲线与仿真拟合曲线最为吻合。图 9 为修正后 P 与 θ 的关系曲线,最后得到 EFP 斜侵彻垂直侵彻深度的计算公式((5)式)

$$P = \frac{v_0 - \sqrt{1.031v_0^2 - 3278}}{-1.031v + \sqrt{1.031v_0^2 - 3278}}(l_0 - 0.5d)(\cos\theta)^{1.5} \tag{5}$$

此公式仅针对特定的成型装药结构及药型罩材料所形成的 EFP 的斜侵彻问题。

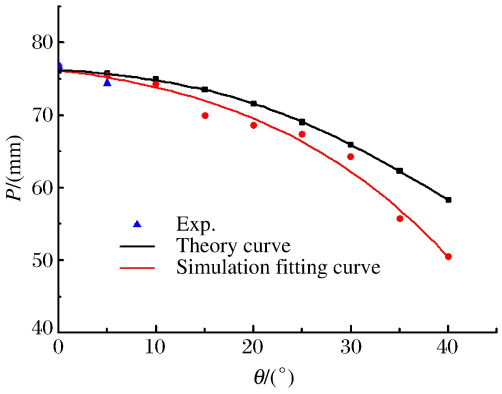


图 8　EFP 垂直侵彻深度随 EFP 着角的变化

Fig. 8　The change of EFP vertical penetrationdepth with incidence angle

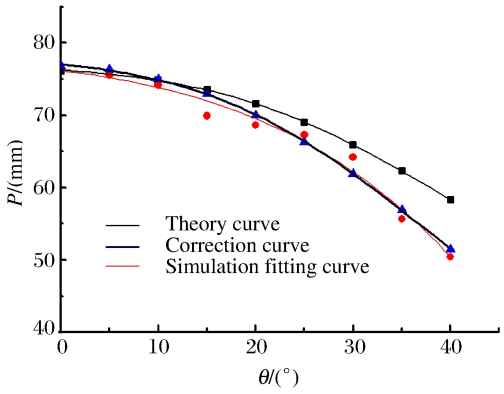


图 9　修正后 P 与 θ 的关系曲线

Fig. 9　The curve of P-θ after correction

5　结　论

(1) 仿真研究了 EFP 对钢靶的斜侵彻过程,得到了 EFP 的垂直侵彻深度和开孔处孔径大小与 EFP 着角的关系曲线,随着 EFP 着角的增大,EFP 垂直侵彻深度逐渐减小,且减小的趋势越来越快,EFP 开孔处的孔径大小与着角呈线性增加关系。

(2) 当 EFP 着角从 0°增加到 40°时,EFP 侵彻靶板的垂直侵彻深度减小了 34.2%,开孔处的孔径大小增加了 18.2%。

(3) 研究了不同侵彻着角时 EFP 侵彻参数随时间 t 的变化规律,其中 EFP 速度与时间呈线性规律变化,并且 EFP 着角越大时,头部速度下降趋势越快;在侵彻刚开始时 EFP 垂直侵彻深度与时间呈线性增长,随后上升趋势变得缓慢,且 EFP 着角越大,垂直侵彻深度越小;不同侵彻着角下的侵彻参数与时间的关系趋势一致。

(4) 分析了 EFP 斜侵彻原理,基于 EFP 的垂直侵彻理论和杆式弹的斜侵彻理论,结合仿真拟合曲线,得到了 EFP 垂直侵彻深度 P 与着角 θ 的修正计算公式。

References:

[1] Li W B, Wang X M, Li W B. The effect of annular multi-point initiation on the formation and penetration of an explosively formed penetrator [J]. Int J Impact Eng, 2010, 37(4): 414-424.

[2] Song M L, Li W B, Wang X M, et al. Numerical research on explosively formed projectiles influenced by liner material [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2009, (4): 16-19. (in Chinese)
宋梅利, 李伟兵, 王晓鸣, 等. 药型罩材料影响 EFP 成型的数值计算研究 [J]. 火工品, 2009, (4): 16-19.

[3] Zheng Y, Wang X M, Li W B, et al. Effects of liner curvature radius on formation of double layered spherical segment charge liner into tandem explosively formed projectile (EFP) [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009, 23(3): 229-235. (in Chinese)
郑 宇, 王晓鸣, 李文彬, 等. 曲率半径对双层球缺罩形成串联爆炸成型弹丸的影响 [J]. 高压物理学报, 2009, 23(3): 229-235.

[4] Lin J J. Research on the formability of EFP and its terminal effect [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)
林加剑. EFP 成型及其终点效应研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.

[5] Liu F. The explosively formed penetrator and its engineering damage effects research [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006. (in Chinese)
刘 飞. 爆炸成型弹丸(EFP)研制及其工程破坏效应研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.

[6] Li W, Fan N J, Wang Z J. Analysis on damage probability of EFP warhead missile system [J]. Journal of Ballistics, 2008, 20(2): 60-63. (in Chinese)
李 炜, 范宁军, 王正杰. EFP 定向战斗部导弹系统毁伤概率分析 [J]. 弹道学报, 2008, 20(2): 60-63.

[7] Li W B, Wang X M, Li W B, et al. Design optimization of the configuration parameters of multimode warhead [A]//Proceedings of the 25th International Symposium on Ballistics [C]. Beijing, 2010: 629-637.

[8] Li D H, Wu Q, Zhang H Z, et al. Research of oblique penetration by rod projectile [J]. Explosion and Shock Waves, 1996, 16(2): 158-165. (in Chinese)
李大红, 吴 强, 张汉钊, 等. 钨杆弹斜侵彻研究 [J]. 爆炸与冲击, 1996, 16(2): 158-165.

Research on the Damaging Ability of EFP Warhead at Different Incidence Angle

FAN Fei[1], LI Wei-Bing[1], WANG Xiao-Ming[1], LI Wen-Bin[1], HAN Yu[2]

(1. *ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *China*;
2. *The Military Representative Bureau of Shenyang, Shenyang* 110015, *China*)

Abstract: Using LS-DYNA simulation software, we studied the relationship of the EFP's damaging ability with the penetration incidence angle of explosively formed projectile (EFP). It was found that, with the incidence angle changing from 0° to 40°, the depth of vertical penetration of EFP reduced 34.2%, and the pore size of openings increased 18.2%. During the penetration, the head velocity of EFP changed as lines with time, and with the incidence angle increasing, the head velocity of EFP decreased more quickly. At first, the depth of vertical penetration of EFP changed as lines with time, then it showed slow upward trend. The relationship between penetration parameters and time was consistent under different penetration incidence angles. Based on 0° penetration theory of EFP and oblique penetration theory of rod projectile, according to fitting curve of simulation, the correction formula of depth of vertical penetration of EFP and angle was obtained.

Key words: explosively formed projectile (EFP); penetration incidence angle; damaging ability; penetration depth; numerical simulation