文章编号：1000-5773(2009)02-0155-06

伸出式侵彻体攻角侵彻靶板的数值模拟研究*

李长顺，刘天生，王凤英，高永宏

（中北大学，山西太原 030051）

摘要：利用 LS-DYNA3D 软件，对有攻角条件下伸出式侵彻体侵彻单层靶板及等厚度双层间隔靶板进行了数值模拟研究，从靶后动能和靶板破坏程度的角度对比了伸出体与同质量、同外径的基准杆侵彻单/双层靶板的能力。得出了侵彻体动能随时间变化的规律，分析了侵彻过程中攻角、速度及靶板分层 3 个重要因素对侵彻体侵彻能力的影响。结果表明：当攻角小或速度大时，伸出式侵彻体相对基准杆有较明显的优势；当双层靶板的间隔与基准杆长度相等时，靶板的分层对伸出体的侵彻性能几乎无影响，而对基准杆有较大影响，说明伸出体侵彻多层间隔防护结构的能力明显优于基准杆。

关键词：爆炸力学；侵彻；数值模拟；伸出式侵彻体；基准杆；攻角；间隔靶

中图分类号：TJ410.33；O347.1 **文献标识码**：A

1 引 言

在研究穿甲问题时，影响靶板破坏的因素主要包括弹、靶的材料，弹体结构、长径比，靶板的厚度、层数，弹体速度（大小、方向）以及由此所形成的着靶角、攻角等。这些因素的不同组合，使穿甲问题的研究具有复杂性和多样性。近几十年来，越来越多的军事目标开始采用大间隔薄装甲结构来提高自身的防护能力。因此动能侵彻体对多层间隔靶侵彻问题的研究日益受到国际弹药领域的广泛重视，对穿甲弹的要求也越来越高，研究新型穿甲弹——伸出式侵彻体具有十分重要的意义[1-3]。由于发射和弹托分离过程中的扰动和弹丸本身的质量偏差及弹丸自身空气动力稳定性的不足，在较多的情况下穿甲弹并非垂直侵彻靶板，而是具有一定的攻角。为了探讨攻角对伸出式侵彻体侵彻双层间隔靶板能力的影响，本研究利用 LS-DYNA3D 动力有限元程序，对有攻角条件下伸出式异型侵彻体和同材料、同质量、同外径的基准杆侵彻双层间隔靶板的问题进行了数值模拟研究。

2 有限元计算模型

2.1 计算基本假设

根据穿甲工程力学理论[4]，弹体和靶板为均匀连续介质，忽略变形或摩擦热对材料性能的影响；不计空气阻力，不考虑重力和靶板的侧边效应，忽略靶板的刚体运动，假设伸出体和靶板的初始应力为零。

2.2 计算模型及材料参数

为了研究弹体及靶板结构对侵彻性能的影响，不考虑材料的影响，将弹体与靶板选为相同的材料，即 4340 钢。单层靶板是尺寸为 100 mm×40 mm×10 mm 的长方体。双层靶板是 2 块尺寸为100 mm×40 mm×5 mm、间隔为 40 mm 的长方体。弹体的具体尺寸如图 1、图 2 所示。计算模型的网格划分采用 Langrange 法。侵彻体和靶板单元类型采用 SOLID164，网格单元形状为 8 结点六面体，靶板与弹丸直接作用区域网格加密。在对称边界上施加对称约束，侵彻体和靶均采用 Johnson-Cook 材料模型和

* **收稿日期**：2008-07-14；**修回日期**：2008-09-23

作者简介：李长顺（1983－），男，硕士研究生，主要从事弹药工程及数值模拟研究. E-mail：lchsh8888@126.com

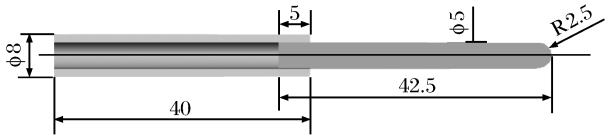


图 1 伸出式侵彻体模型

Fig. 1 Model of extended penetrator



图 2 基准杆模型

Fig. 2 Model of baseline rod

Grüneisen 状态方程。侵彻体和靶板之间的接触算法采用的是:Eroding-Surface-to-Surface,在靶板边界处施加非反射边界,采用 cm-g-μs 单位制。计算时间为 120 μs,每 2 μs 输出一个结果数据文件。由于所研究问题具有对称性,在模拟计算过程中采用对称面方法,侵彻体和靶板均取 1/2 原型。

Johnson-Cook 模型的应力应变关系[5]为

$$\sigma_y = [A + B(\bar{\varepsilon}^p)^n](1 + c\ln\varepsilon^*)(1 - T^{*m}) \tag{1}$$

式中:A 为屈服应力,B 为应变硬化,c 为应变率相关常数,n 为应变硬化指数,m 为温度相关系数(计算时忽略温度影响),$\bar{\varepsilon}^p$ 为等效塑性应变,ε^* 为相对等效塑性应变率,T^* 为相对温度。计算时采用 Grüneisen 状态方程,对于可压缩材料,压应力表达式如下

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu\left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2}\right)\mu - \frac{a}{2}\mu^2\right]}{[1 - (S-1)\mu]^2} + (\gamma_0 + a\mu)E \tag{2}$$

式中:ρ_0 为初始密度;E 为材料内能;$\mu = \rho/\rho_0 - 1$ 为体积变化率,ρ 为当前密度;C 为 u_s-u_p(冲击波速度-质点速度)曲线的截距;S 为 u_s-u_p 曲线斜率的系数;a 为 Grüneisen 系数的一阶体积修正;γ_0 为 Grüneisen 系数。侵彻体和靶板材料的参数见表 1[6]。

表 1 弹材料和靶材料的参数

Table 1 Material parameters of projectile body and target

Material	ρ/(g/cm^3)	E/(GPa)	μ	A/(MPa)	B/(MPa)	C	n	m	a	S	γ_0
4340 steel	7.85	210	0.220	910	580	0.016	0.26	1.03	0.46	1.49	2.17

3 实验研究

实验用的弹靶尺寸与模拟值一致,材料都为 4340 钢。发射装置为海-25 加长身管弹道炮,将靶板放置在距炮口 60 m 处,这样既能保证侵彻体的杆与管能够充分伸展,又能获得所要的攻角。实验最主要的工作是如何使出膛后的弹丸产生所需要的攻角,并且准确测量出弹体的初速度 v_0、穿过第一层靶的剩余速度 v_1 和穿过第二层靶的剩余速度 v_2。攻角控制采用锉尾翼法[7]。本实验采用 4 组测速靶测速,其中测速靶 1 和 2 用于测量 v_0,测速靶 3 用来测 v_1,测速靶 4 用来测 v_2。同时,利用弹体在测速靶 1 和 2 上留下的弹痕长度还可以得到弹体着靶时的攻角。

4 数值模拟结果与实验结果的比较

用ANSYS/LS-DYNA软件计算的结果如表2所示。从表中可以看出,模拟结果与实验结果基本

表 2 实验结果与模拟结果

Table 2 Experimental results and calculated results

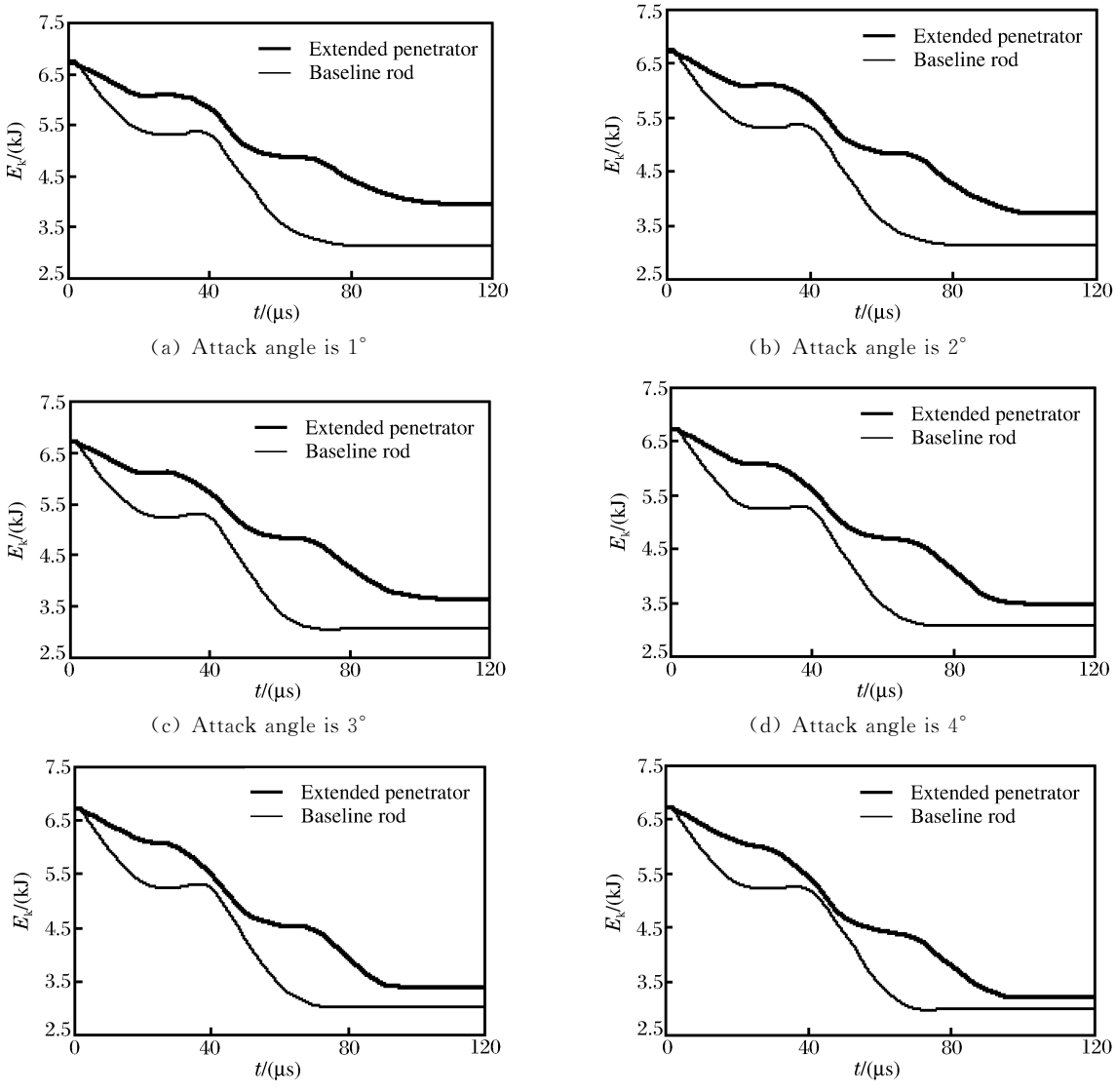
Projectile	Attack angle /(°)	Experimental results			Calculated results			Error /(%)
		v_0/(m/s)	v_1/(m/s)	v_2/(m/s)	v_0/(m/s)	v_1/(m/s)	v_2/(m/s)	
Baseline rod	1	1 310	1 132	928	1 310	1 160	973	4.8
Extended penetrator	1	1 306	1 193	1 074	1 306	1 225	1 120	4.2
Extended penetrator	2	1 290	1 146	1 021	1 290	1 195	1 084	6.1

一致,说明所建立的有限元模型、模型中材料参数的选择以及边界条件的施加是合理有效的。采用该方法对伸出式侵彻体攻角侵彻靶板的情况进行详细地仿真研究,将节省大量的人力和物力,显示了数值模拟的优势。

5　数值模拟结果分析

5.1　攻角对伸出体侵彻性能的影响

为了探讨攻角对伸出体侵彻双层靶板性能的影响,在初始侵彻速度为 1 300 m/s 的条件下,改变侵彻体的初始攻角,分别对初始攻角为 1°～6°的情况进行了数值模拟。通过后处理软件得出了 6 种攻角情况下伸出体与基准杆的动能随时间变化的规律,如图 3 所示。从图 3 可以看出,攻角对伸出体的侵彻性能是有一定影响的。随着攻角的增大,剩余动能将减小,说明在侵彻过程中伸出体消耗了一定的能量;而基准杆的剩余动能也在减小,但是减小得较慢,说明小攻角对基准杆的侵彻性能影响不大。从整体的剩余动能可以看出:在小攻角情况下,伸出体侵彻性能要明显优于基准杆侵彻性能,并且随着攻角的减小伸出式侵彻体的优势越来越明显。在攻角为6°时,剩余动能的增益(两种结构弹体的初始动能



(a) Attack angle is 1°　(b) Attack angle is 2°

(c) Attack angle is 3°　(d) Attack angle is 4°

(e) Attack angle is 5°　(f) Attack angle is 6°

图 3　不同攻角下伸出体与基准杆的动能-时间曲线(v_0=1 300 m/s)

Fig. 3　Kinetic energy versus time at various attack angle for extended penetrator and baseline rod respectively (v_0=1 300 m/s)

相同，都是 E_0；动能增益为侵彻结束时两者的剩余动能差值与 E_0 的比值，即$(E_2^s-E_2^b)/E_0\times100\%$，其中：$E_2^s$ 为伸出体的剩余动能，E_2^b 为基准杆的剩余动能）为 6 %；而攻角为 1°时，剩余动能的增益为 26 %。在较多情况下，攻角一般很小或零攻角，说明伸出式侵彻体是有应用价值的。

5.2 初始速度的变化对伸出体侵彻性能的影响

为了更好地研究初速度的变化对伸出体侵彻性能的影响，取攻角为 5°，对初速度为 1 200 ～ 2 500 m/s时伸出体和基准杆的动能进行了分析，如图 4 所示。从图中可以看出：侵彻刚刚开始时，基准杆的动能损失得较快，而伸出体的动能损失得较慢；当弹体穿过第 1 层靶板时，在速度较低的情况下，两种弹体的剩余动能在某一时刻几乎相等，这说明攻角为 5°时，在弹体初速度较低的情况下，伸出体和基准杆侵彻单层靶板的威力差不多；随着侵彻的进行，当穿过第 2 层靶板时，可以看到即使在初速度较低的情况下，伸出体的剩余动能也会大于基准杆的剩余动能，说明伸出体的二次开坑、侵彻能力要优于基准杆。当初速度为 2 500 m/s 时，伸出体的侵彻性能就更加明显地优于基准杆了，其剩余动能增益达到 24.4 %。

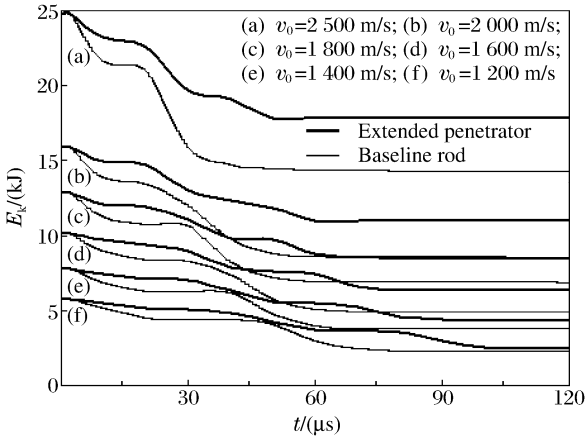


图 4 伸出体和基准杆侵彻双层靶板时的动能-时间曲线(攻角为 5°)

Fig. 4 Kinetic energy versus time for extended penetrator and baseline rod penetrating into two-layer target respectively (attack angle is 5°)

5.3 靶板结构对两种弹体侵彻性能的影响

为了研究靶板的分层对弹体侵彻性能的影响，分别对 10 mm 厚的单层靶板和 5 mm 厚、间隔为 40 mm的双层靶板的侵彻进行了模拟，得到了两种弹体的动能随时间变化的规律，如图 5、图 6 所示。

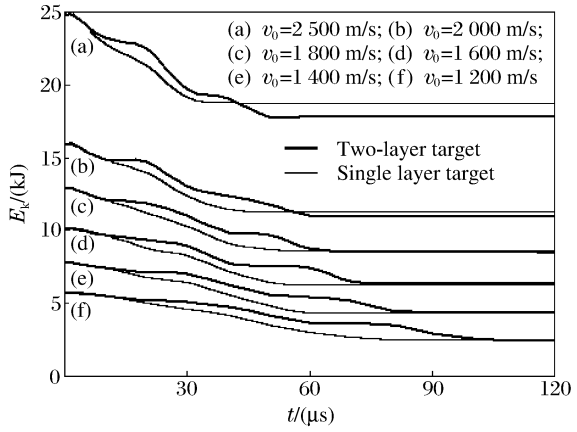


图 5 不同初速度下伸出体的动能-时间曲线(攻角为 5°)

Fig. 5 Kinetic energy versus time for extended penetrator at various velocity (attack angle is 5°)

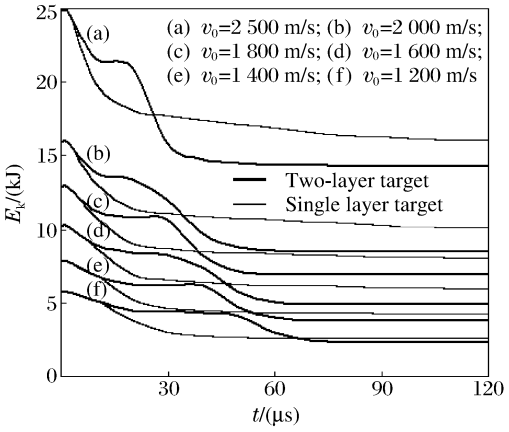


图 6 不同初速度下基准杆的动能-时间曲线(攻角为 5°)

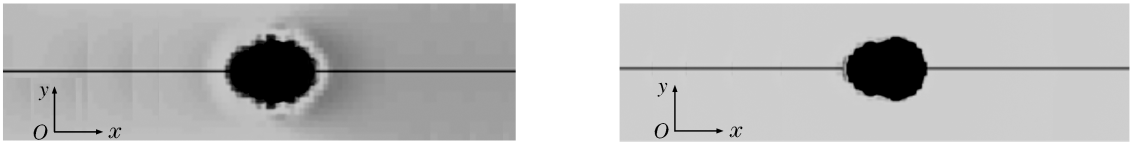
Fig. 6 Kinetic energy versus time for base line rod at various velocity (attack angle is 5°)

从图 5 可以看出，速度在 2000 m/s 甚至 2500 m/s 时，伸出体对双层靶板的侵彻性能开始弱于对单层靶板的侵彻性能，说明只有在弹体初速度很高的情况下靶板的分层才对伸出体有影响。从图 6 可以看出，即使在弹体初速度较低的时候，靶板的分层对基准杆的侵彻性能也是有影响的，并且在高速情况下影响将更加明显。从两幅图的比较可以得出：双层靶板的间隔与基准杆或发射前伸出体的长度相等时，伸出体的侵彻性能几乎不受靶板分层的影响，而基准杆受到的影响较大。这是因为靶板的间隔距离

与基准杆长度相等,在基准杆穿过第 1 层靶时产生了偏转,影响了对第 2 层靶的侵彻;而伸出体在发射后,弹体的长度增加,撞靶前完全展开的长度接近发射前的 2 倍,远大于靶板间隔,这就导致了当伸出体入射第 2 层靶时,其后端管体仍有一部分留在第 1 层靶板的弹孔内,阻碍了伸出体在第 2 层靶上的偏转,保证了伸出体有更好的侵彻性能。因此,这种伸出式侵彻体具有很好的实用价值,是未来穿甲领域的研究重点;同时,也对防护工程提出了更高的要求。

5.4　侵彻结束时靶板破坏程度的比较

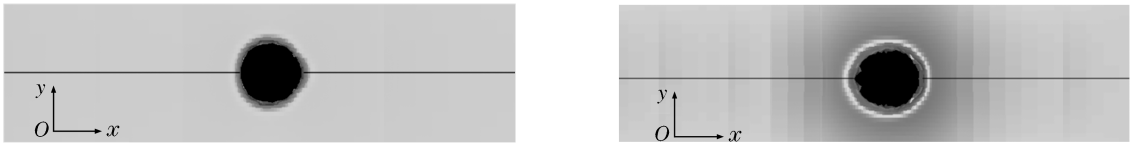
侵彻结束时弹坑的正面图像,如图 7、图 8 所示。从图中可以看出:伸出体弹坑面积比基准杆的大;在 y 方向的孔径大小相等,而在 x 方向上伸出体的孔径要比基准杆的大。原因是:弹坑在 x 方向上的大小取决于弹体沿速度方向在靶板上的投影,因为伸出体的长度比基准杆长,所以在靶板上的投影要大于基准杆。根据 5.1 节的研究知道,在攻角为 5°、$v_0=1\,300$ m/s 时,伸出体的剩余动能大于基准杆的剩余动能,说明伸出体比基准杆有更大的侵彻和毁伤能力。



(a) The first target　　(b) The second target

图 7　伸出体弹坑正面图像 (攻角为 5°,$v_0=1\,300$ m/s)

Fig. 7　Front graph of extended penetrator crater (attack angle is 5°, $v_0=1\,300$ m/s)



(a) The first target　　(b) The second target

图 8　基准杆弹坑正面图像(攻角为 5°,$v_0=1\,300$ m/s)

Fig. 8　Front graph of baseline rod crater (attack angle is 5°, $v_0=1\,300$ m/s)

5　结　论

侵彻体有攻角侵彻间隔靶板的过程是一个较为复杂的过程,利用三维有限元程序 LS-DYNA 对这一侵彻过程进行了数值模拟,模拟结果与实验结果基本一致。从靶后动能和靶板破坏程度的角度对比了伸出体与同质量、同外径的基准杆侵彻单/双层靶板的能力。结果表明:在攻角较小或速度较大时,伸出体不但剩余动能大,而且坑径的面积也比基准杆的大;当双层靶板的间隔与基准杆长度接近时,靶板的分层结构对伸出体的侵彻性能几乎无影响,对基准杆则有较大影响,说明伸出体侵彻多层间隔防护结构的能力明显优于基准杆。研究此课题为研制新型穿甲弹提供了一个理论依据,为装甲防护的研究和设计提供了线索,对国防建设具有重要的理论和实践意义。

References:

[1] Han Y Y. The Mechanism of Long-Tube Penetration Normal into Semi-Infinite Homogeneous Target [A]//International Conference on Mechanical Engineering and Mechanics [C]. Nanjing, 2005: 1150-1153.

[2] Han Y Y, Zhao G Z, Fang Q, et al. Numerical Simulation of Extending Penetrator Penetrating Perpendicularly into Semi-Infinite Target [J]. Journal of Ballistics, 2007, 19(1): 64-67. (in Chinese)
韩永要,赵国志,方　清,等. 伸出式侵彻体垂直侵彻半无限靶数值模拟 [J]. 弹道学报, 2007, 19(1): 64-67.

[3] Lynch N J. The Influence of Penetrator Geometry and Impact Velocity on the Formation of Cater Volume in Semi-Infinite Targets [A]//19th International Symposium on Ballistics [C]. Interlaken, Switzerland, 2001: 1265-1271.

[4] Zhao G Z. Penetration Engineering Mechanics [M]. Beijing: Weapons Industry Publishing House, 1992: 106-107. (in Chinese)
赵国志. 穿甲工程力学 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992: 106-107.

[5] LS-DYNA Keyword User's Manual: Nonlinear Dynamic Analysis of Structures in Three Dimensions [M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2001: 60-63.

[6] Li X J, Jiang L, Zhao Z, et al. Numerical Study on Penetration of a High-Speed-Rotating Bullet into the Moving Sheet-Metal Plate [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(1): 57-61. (in Chinese)
李晓杰, 姜 力, 赵 铮, 等. 高速旋转弹头侵彻运动金属薄板的数值模拟 [J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(1): 57-61.

[7] Zhang J X. The Yawed Rod Penetration into Semi-Infinite Rolled Homogeneous Armor (RHA) Targets at Normal Incidence [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2002. (in Chinese)
张巨香. 大攻角长杆体垂直侵彻半无限靶的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2002.

Numerical Simulation of Extended Penetrator with Attack Angle Penetration into Spaced Targets

LI Chang-Shun, LIU Tian-Sheng, WANG Feng-Ying, GAO Yong-Hong

(*North University of China, Taiyuan* 030051, *China*)

Abstract: The extended penetrator penetrating single layer and two-layer spaced targets with attack angle were simulated with LS-DYNA3D, which were compared to that of the baseline rod with the same mass and outer radius. The variation of kinetic energy with time were obtained for extended penetrator and baseline rod respectively. It was demonstrated that the attack angle, velocity and target delamination have effects on the ability of extended penetrator penetrating targets. The advantage of extended penetrator is obvious at high velocity or little attack angle. When the space of the targets equals to the length of the baseline rod, the influence of the target delamination on the penetrating power of expended penetrator is weak, but the influence on the baseline rod is strong, which indicates that the ability of the extended penetrator penetrating two-layer spaced targets is stronger than that of baseline rod.

Key words: mechanics of explosion; penetration; numerical simulation; extended penetrator; baseline rod; attack angle; spaced targets