



分段 PELE 弹体冲击多层靶板数值分析

周敬辕, 丁亮亮, 汤文辉, 冉宪文

引用本文:

周敬辕, 丁亮亮, 汤文辉, 等. 分段 PELE 弹体冲击多层靶板数值分析 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(5): 054101.

ZHOU Jingyuan, DING Liangliang, TANG Wenhui, et al. Numerical Analysis of Segmented PELE Penetrating Multi-layer Target [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(5): 054101.

[当期更多内容>>](#)

您可能感兴趣的其他文章:

[环型聚能装药侵彻靶板能力多因素分析](#)

马焱, 赵挥东, 黄鑫

DOI: 10.11858/gywlxb.2017.04.015

[分段杆弹侵彻效率的数值模拟](#)

胡静, 邓云飞, 孟凡柱, 姜颖

DOI: 10.11858/gywlxb.2015.06.002

[PELE 弹丸壳体的损伤断裂模型](#)

梁民族, 李翔宇, 覃金贵, 卢芳云, 王马法

DOI: 10.11858/gywlxb.2014.06.011

[分段弹侵彻效率的数值模拟研究](#)

邓云飞, 张伟, 曹宗胜, 陈勇

DOI: 10.11858/gywlxb.2011.03.010

[弹体斜撞击单层金属薄靶的数值仿真](#)

郭子涛, 郭钊, 张伟

DOI: 10.11858/gywlxb.20180503

分段 PELE 弹体冲击多层靶板数值分析^{*}

周敬轅, 丁亮亮, 汤文辉, 冉宪文

(国防科技大学文理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 为了实现侵彻体对多层靶板的高效毁伤, 采用数值模拟方法研究了分段式横向效应增强体(PELE)对4层金属靶的侵彻效应, 获得了弹体侵彻速度和靶板厚度对弹体终点效应的影响。结果表明, 分段 PELE 弹侵彻4层靶的靶后效果优于普通 PELE 弹。与金属杆相比, 分段 PELE 弹侵彻多层靶后的弹孔直径更大。弹丸贯穿各层靶板后壳体的径向速度峰值随着靶板厚度的增加而增大, 而壳体破碎长度并不随之线性变化。提高弹丸侵彻速度时, 弹丸穿过第1层靶板后壳体破碎长度的变化趋势与径向速度峰值的变化相似, 穿过第2层和第3层靶板后壳体破碎长度和径向速度峰值在侵彻速度为1.4 km/s时达到极大值, 随后下降, 而穿过第4层靶板后壳体破碎长度和径向速度峰值随着初速度的增加而增大。

关键词: 横向效应增强体(PELE); 分段弹体; 多层靶板; 侵彻

中图分类号: O389; TJ41

文献标识码: A

为应对日益复杂的战场环境, 需要不断创新毁伤模式。横向效应增强体(Penetrator with Enhanced Lateral Effect, PELE)是一种新型侵彻弹, 最早由法德圣路易斯研究所于1996年提出^[1]。PELE 弹的典型结构特点是采用密度不同的外壳和内芯, 无需引信和装药, 其中: 外壳一般为高密度材料, 如合金钢、钨合金; 弹芯为低密度材料, 如铝、尼龙、聚乙烯等。弹丸侵彻目标时, 由于低密度弹芯的侵彻能力弱, 弹芯被压缩产生径向膨胀, 弹体内部压力迅速上升; 弹丸穿过目标后, 内外压力差使壳体断裂, 形成破片。由此可见, PELE 弹兼具穿甲和破片杀伤效果, 具有结构简单、低成本、弹体使用安全等优点, 可出色地完成高效毁伤^[2-3]。

传统侵彻弹的毁伤机理和作用特点研究已经相当成熟^[4], 而 PELE 弹不同于一般的侵彻弹, 需要在靶后形成有效破片, 其弹体结构的侵彻规律也有自己的特点, 因此学者们开展了大量的研究工作。张谋等^[5]通过数值仿真技术分析 PELE 弹内芯与横向效应的关联; 朱建生等^[6]对 PELE 弹的破碎机理和弹体结构进行了理论分析; 杜忠华等^[7]通过理论分析与数值仿真, 认为 PELE 弹撞击金属薄板时, 壳体的横向速度随着弹丸着靶速度和装填材料声阻抗的增大而增大。

在现代战场上, 随着目标防护性能的增强, 单一功能的弹丸很难达到理想的破坏效果, 这就要求进攻模式多元化。为此, 本研究提出分段式 PELE 弹的概念, 期望通过分段式 PELE 弹体结构增强毁伤能力, 尤其是应对多层目标。然而, 分段式 PELE 弹的穿靶过程受多种因素影响, 本研究采用数值模拟方法重点探讨弹体的侵彻速度和靶板厚度对其终点效应的影响规律, 以实现分段式 PELE 弹应对不同目标时发挥出最强的优势性能。

1 数值方法与模型

利用非线性动力学软件 LS-DYNA 进行数值模拟。弹体采用两段 PELE 结构, 用螺纹连接, 其结构

^{*} 收稿日期: 2018-02-04; 修回日期: 2018-03-27

作者简介: 周敬轅(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事材料力学动态性能研究. E-mail: zhoujingyuan12@163.com

通信作者: 汤文辉(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事高压物理与工程力学研究. E-mail: wenhuitang@163.com

如图 1 所示,有限元模型见图 2。第 1 段和第 2 段弹体的长度分别为 32 和 40 mm,外径 10 mm,弹芯尺寸为 $\varnothing 6\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ 。靶板为 4 层,每层靶的材料和厚度均相同,设靠近弹丸一侧为第 1 层。弹壳均采用钨合金,内芯材料为铝,弹尾采用钨合金。弹体材料参数列于表 1,其中 ρ_0 为密度, E 为弹性模量, G 为剪切模量, ν 为泊松比。

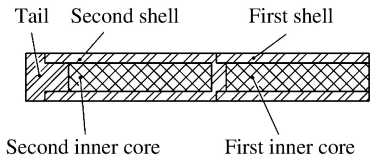


图 1 弹体结构
Fig. 1 Projectile structure

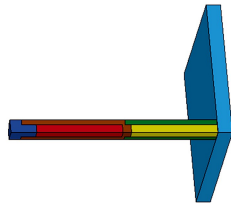


图 2 有限元模型
Fig. 2 Finite element model

表 1 材料参数
Table 1 Material parameters

Material	$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/GPa	G/GPa	ν	Constitutive model
Tungsten alloy	17.67	354	138	0.28	Johnson-Cook
Aluminum	2.70	69		0.33	Plastic_Kinematic
921 steel	7.85	210	78	0.30	Johnson-Cook

为了提高计算效率,采用 1/4 模型模拟,约束对称面的位移和转动,设置为轴对称状态。靶板周围边界采用固定约束,限制所有方向的运动。网格尺寸为 0.1~0.5 mm,弹体经过区域网格加密,其他区域采用渐变网格。网格单元均采用 SOLID164 单元,为八节点六面体^[8]。靶板和壳体均采用 Johnson-Cook 模型和 Grüneisen 状态方程描述,弹芯采用 Plastic_Kinematic 模型描述。同时添加 Add_Erosion,以控制材料的失效。弹体内部采用 Contact_Automatic_Surface_To_Surface 接触算法,弹体与靶板之间采用 Contact_Eroding_Surface_To_Surface 接触算法。

2 模拟结果与分析

2.1 分段 PELE 弹与一般 PELE 弹对比

设计一个尺寸与分段 PELE 弹一致的普通 PELE 弹进行模拟,入射速度为 1.4 km/s,单层靶板厚度为 8 mm。两类弹体的轴向速度(v_a)变化曲线如图 3 所示。可见:穿过第 1 层靶时,两种弹的轴向速度变化基本一致;180 μs 左右两类弹体穿过第 2 层靶,轴向速度产生分离;此后,普通 PELE 弹的轴向速度降幅明显大于分段 PELE 弹。两类弹穿过 4 层靶板后,弹壳未破碎长度 L_r 如表 2 所示。结果显示,分段 PELE 弹主要在第 1 层与第 2 层靶板之间以及第 3 层与第 4 层靶板之间形成破片。在侵彻多层靶板过程中,由于分段 PELE 弹在弹芯之间设置壳体间隔保护,能够在一定程度上限制每次

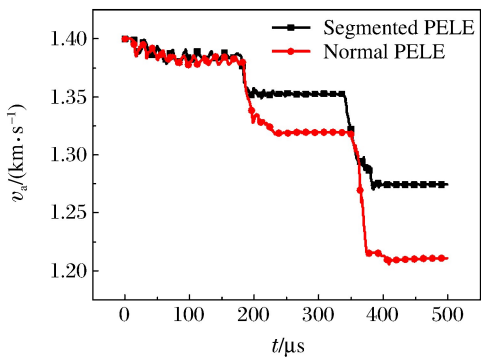


图 3 弹体轴向速度-时间曲线
Fig. 3 Axial velocity-time curve for projectile

穿靶后弹体的破碎长度,保留其后续侵彻和产生破片的能力,因此分段 PELE 弹在侵彻多层靶过程中的破片分配更合理。相比之下,普通结构的 PELE 弹在穿过前两层靶板后,弹体基本全部破碎,难以对后续目标产生有效毁伤。对比表明:分段 PELE 弹相较普通 PELE 弹,具有更强的侵彻能力。

表 2 弹壳未破裂长度

Table 2 Length of unbroken PELE shell after penetration

Projectile type	L_r/mm			
	1st layer	2nd layer	3rd layer	4th layer
Segmented PELE	39.75	22.82	5.12	0
Normal PELE	31.49	8.71	0	0

2.2 靶板厚度对分段 PELE 弹终点效应的影响

一般来说,PELE 弹主要打击较薄的防护壳体及其后方的目标,而靶板厚度对弹丸的终点效应有重要影响^[9]。设弹丸的初始侵彻速度为 1.4 km/s,改变单层靶板厚度 H (4、5、6 和 8 mm),进行数值模拟。不同 H 下,弹丸穿过各层靶板后壳体径向速度峰值 v_r 以及壳体破裂长度 L 如图 4 所示。

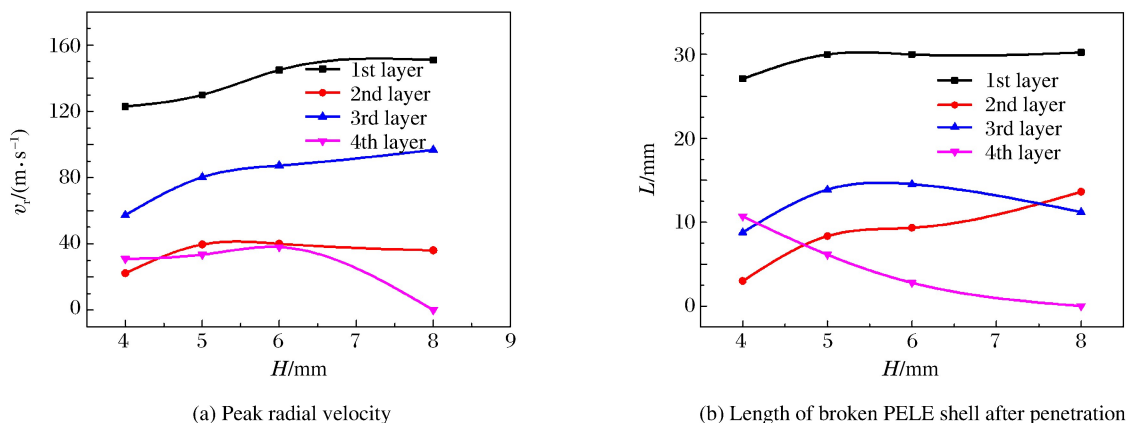


图 4 不同靶板厚度条件下壳体的径向速度峰值和破裂长度

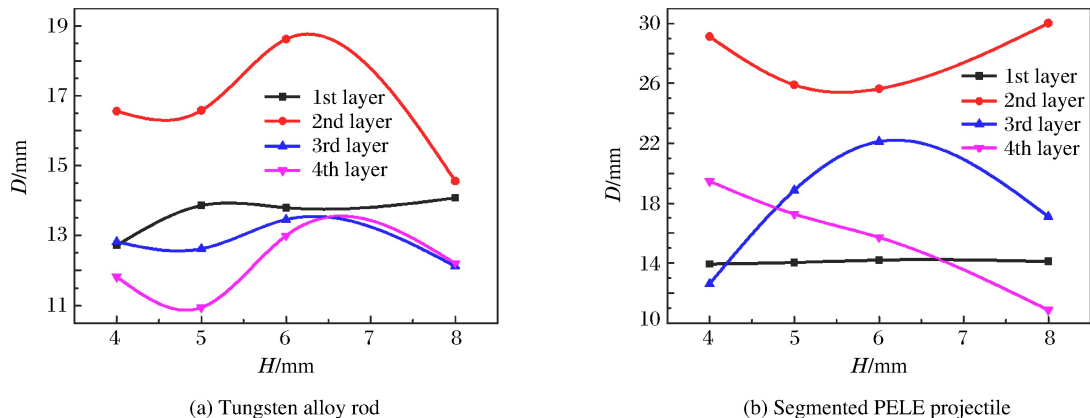
Fig. 4 Peak radial velocity and crushing length of shell under different thicknesses of target plate

如图 4(a)所示,随着 H 的增加,分段 PELE 弹穿过各层靶板后壳体的径向速度峰值呈现增加趋势;只有当靶板厚度 H 为 8 mm 时,弹丸在侵彻第 4 层靶板过程中完全被侵蚀消耗,无破片产生,速度为零。在 H 不同的条件下,弹丸穿过多层靶板后壳体径向速度峰值基本逐层递减,但穿过第 2 层靶时例外,其壳体径向速度峰值最低。由图 4(b)可知,弹丸穿过第 1 层靶板后第 1 段弹体几乎完全破碎,表明该阶段产生的破片最多。故而弹体侵彻第 2 层靶板时,由于破片提前对靶板进行破坏,导致穿靶后弹壳的径向速度峰值相对其他 3 次较低。

H 对弹壳破碎的影响主要体现在后 3 层靶板的侵彻过程中。增加 H 会使弹丸在穿过第 2 层靶板后的破碎长度 L 增加;穿过第 3 层靶板后, L 多数情况大于穿过第 2 层靶后,且此时 L 先随 H 的增加而增加,当 $H=8$ mm 时,因前两次穿靶时 L 较大,导致第 3 次穿靶后 L 反而减少;穿过第 4 层靶后, L 随着 H 的增加而逐渐变小。由此可见,当 H 处于 5~6 mm 区间时,弹丸穿透各层靶后 L 的分配比较均匀合理。

虽然增加 H 可使穿靶后壳体的径向速度峰值更大,但也会使弹体在前几次穿靶过程中壳体破碎过多,不利于后续侵彻和毁伤目标。总体而言, H 在 5~6 mm 时,本弹体结构每次穿靶后的壳体径向速度峰值较高,破碎长度均匀,效果最好。

设计一个与分段 PELE 弹相同尺寸的钨合金杆,以相同的速度侵彻多层靶板。得到两种弹体侵彻不同厚度靶板后的弹孔直径(D),如图 5 所示。从图 5(b)中可以看到,分段 PELE 弹侵彻不同厚度靶板时,在第 2 层靶上的弹孔最大。随着 H 的增加,分段 PELE 弹在每层靶板上的开孔规律并不一致:对于第 1 层靶, D 随着 H 的增加略微增大;第 2 层靶中, H 在 5~6 mm 时 D 有极小值;第 3 层靶板中,靶板厚度为 6 mm 时 D 达到极大值;而第 4 层靶板中, D 随着 H 的增加而减小。



(a) Tungsten alloy rod

(b) Segmented PELE projectile

图5 两种弹体侵彻不同厚度靶板的弹孔直径

Fig. 5 Layer thickness effect on diameter of crater on multi-layer targets

图6中 e 表示分段PELE弹与钨合金杆侵彻靶板后弹孔直径的相对偏差, $e>0$ 表示分段PELE弹的弹孔直径更大。数据显示:第1层靶板中的 e 值均较低, $H=4$ mm时达到最大值,但此时分段PELE弹的 D 相对钨合金杆仅有8.67%的提升;对于不同厚度的靶板,分段PELE弹侵彻第2层靶板的 D 值均远大于钨合金杆,即使对于 e 最低的6 mm厚靶板, D 也增加27.68%,而 $H=8$ mm时, D 的增幅达到54.1%;第3层靶板的 e 值在 $H=6$ mm时取极大值;第4层靶板的 e 值随着 H 的增加而减小。

综合来看,当 H 为5~6 mm时,分段PELE弹侵彻各层靶板时的弹孔均大于钨合金杆,即就相对开孔能力而言,本研究中的分段PELE弹适应的最佳靶板厚度依然是5~6 mm。

2.3 侵彻速度对分段PELE弹终点效应的影响

根据以上分析结果,选定靶板厚度为5 mm,改变弹丸初始速度 v_0 (0.8、1.1、1.4和1.7 km/s),进行数值模拟,所得 v_r 和 L 随 v_0 的变化曲线如图7所示。

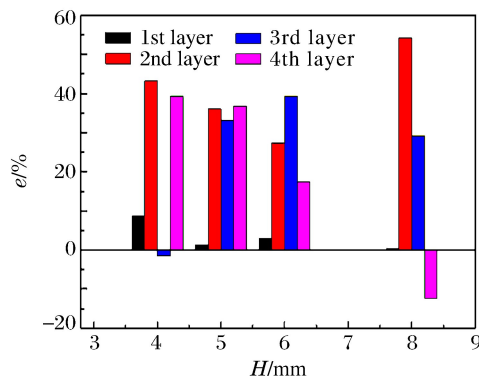
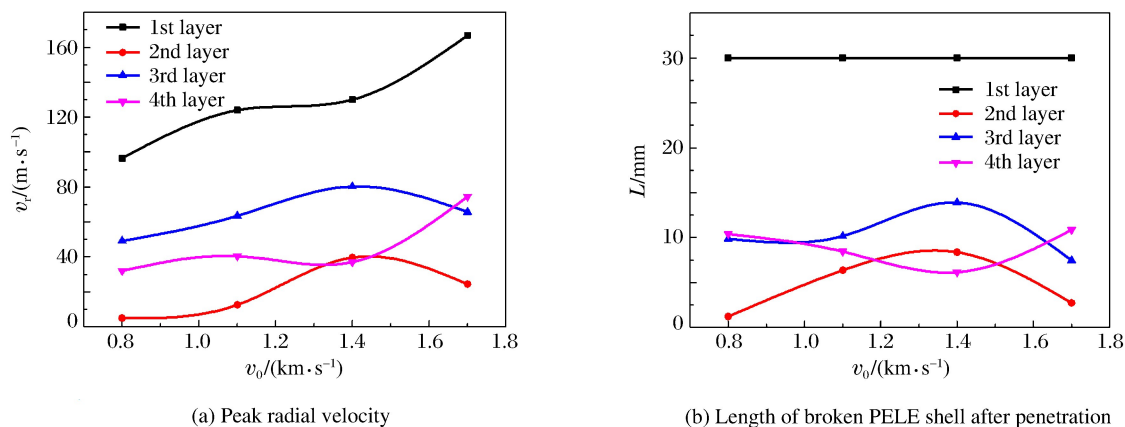


图6 钨合金杆和分段PELE杆在多层靶中造成的开孔大小差异

Fig. 6 Relative difference in diameters of craters caused by tungsten alloy rod and segmented PELE penetration



(a) Peak radial velocity

(b) Length of broken PELE shell after penetration

图7 不同侵彻速度下壳体的径向速度峰值和破裂长度

Fig. 7 Peak radial velocity (a) and length of broken PELE shell (b) after different velocity penetration

图 7(a) 显示,弹丸以不同的 v_0 侵彻靶板时,穿过第 1 层和第 4 层靶板后,壳体径向速度峰值随着 v_0 的增加而增大;而穿过第 2 层靶板后,壳体径向速度峰值相对较低;穿过第 2 层和第 3 层靶板后,壳体径向速度峰值在 $v_0 = 1.4 \text{ km/s}$ 时出现极大值,在 $v_0 = 1.7 \text{ km/s}$ 时反而降低。从图 7(b) 中也可以看到,当 v_0 达到 1.7 km/s 时,弹丸穿过第 2 层和第 3 层靶板后壳体破裂很少,此时弹丸的横向效应不显著。这表明在一定的靶板厚度条件下,分段 PELE 弹的 v_0 过高反而不利于其在侵彻多层薄靶后产生适量破片。

当 $H = 5 \text{ mm}$ 、 v_0 在 $0.8 \sim 1.7 \text{ km/s}$ 范围内时:弹丸穿过第 1 层靶板后前段弹体完全破裂, L 均为 30 mm ,体现分段 PELE 弹可在一定程度上控制破碎范围;之后的几层靶板侵彻过程中,随着侵彻速度的变化, L 与 v_r 的变化趋势一致,径向速度峰值越高,破碎长度越长。综合考虑后认为弹丸以 1.4 km/s 的初始速度侵彻最佳。

3 结 论

(1) 相对普通 PELE 弹,分段 PELE 弹侵彻多层靶板时,壳体破裂产生的破片分布更合理,侵彻能力更强。

(2) 分段 PELE 弹在侵彻多层金属薄靶后,各层靶的弹孔直径普遍大于相同金属杆侵彻形成的弹孔直径,特别是第 2 层靶板,其弹孔直径增大超过 26% ;分段 PELE 弹在侵彻不同厚度靶板时,均在第 2 层靶上的弹孔直径最大。

(3) 随着靶板厚度的增加,弹丸贯穿各层靶板后的壳体径向速度峰值一同增加,弹丸侵彻第 2 层至第 4 层靶时壳体随靶板厚度的增加而产生更多破碎。随着弹丸初速度的增加,弹丸在穿过第 2 层和第 3 层靶板后壳体径向速度峰值和破碎长度均在初始速度为 1.4 km/s 时达到极大值。一定范围内改变靶板厚度和弹丸初始速度,弹丸贯穿第 2 层靶后的壳体径向速度峰值最低,而穿过第 1 层靶板后的弹体破碎长度基本保持不变。

(4) 此分段 PELE 弹在单层靶板厚度接近一半弹丸口径、初始速度在 1.4 km/s 附近时有较好的终点效应。

参考文献:

- [1] PAULUS G, SCHIRM V. Impact behaviour of PELE projectiles perforating thin target plates [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 33: 566-579.
- [2] PAULUS G, CHANTERET P Y, WOLLMANN E. PELE: a new penetrator-concept for the generation of lateral effects [C]//21st International Symposium on Ballistics. Adelaide, Australia: IBC, 2004: 104-110.
- [3] KESBERG G, SCHIRM V, KERK S. PELE-the future ammunition concept [C]//21st International Symposium on Ballistics. Adelaide, Australia: IBC, 2004: 1134-1144.
- [4] 钱伟长. 穿甲力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [5] 张谋, 蒋建伟, 门建兵, 等. 钨合金壳体 PELE 的侵彻膨胀效应数值模拟 [J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(2): 110-113.
ZHANG M, JIANG J W, MEN J B, et al. Numerical simulation of lateral effect of tungsten shell PELE [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(2): 110-113.
- [6] 朱建生, 张敬修. 横向效应增强型侵彻体作用机理研究进展 [J]. 兵器材料科学与工程, 2014(4): 116-120.
ZHU J S, ZHANG J X. Review on functional mechanism of penetrator with enhanced lateral effect [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2014(4): 116-120.
- [7] 杜忠华, 宋丽丽. 横向效应增强型侵彻体撞击金属薄靶理论模型 [J]. 南京理工大学学报, 2011, 35(6): 822-826.
DU Z H, SONG L L. Theoretical model of penetrator with enhanced lateral effect impacting thin metal target [J].

- Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2011, 35(6): 822-826.
- [8] YE X J, DU Z H, HU C H, et al. Simulation studies on the influence of impact velocity on the PELE penetrated and broken reinforced concrete [J]. Advanced Materials Research, 2013, 690: 3108-3111.
- [9] 叶小军, 杜忠华, 姚方堂. 钢筋混凝土靶厚度影响 PELE 侵彻效果的数值分析 [J]. 含能材料, 2014(5): 612-616.
- YE X J, DU Z H, YAO F T. Numerical simulation on influence of reinforced concrete thickness on PELE penetration [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014(5): 612-616.

Numerical Analysis of Segmented PELE Penetrating Multi-layer Target

ZHOU Jingyuan, DING Liangliang, TANG Wenhui, RAN Xianwen

(College of Liberal Arts and Sciences, National University of Defense Technology,
Changsha 410073, China)

Abstract: To achieve efficient damage, we simulated the penetration of segmented penetrator with enhanced lateral effect (PELE) on the 4-layer metal target and analyzed the influence of projectile velocity and layer thickness on the terminal effect. The results showed that the segmented PELE projectile performed better penetration than the normal PELE projectile and the diameter of crater produced by segmented PELE projectile was larger than that produced by its rod counterpart. When the projectile passed through the targets, the peak radial velocity of PELE shell increases with the increasing target layer thickness while the length of broken shell did not change with it. The peak radial velocity and length of broken shell was found to increase with increasing segmented PELE projectile velocity after penetrating the first layer and reach a maximum when the projectile velocity was 1.4 km/s after penetrating the second and third layer. After penetrating the fourth layer, the peak radial velocity and the length of broken shell increased with increasing projectile velocity.

Keywords: penetrator with enhanced lateral effect; segmented projectile; multi-layer target; penetration