

文章编号: 1006-9941(2014)05-0612-05

钢筋混凝土靶厚度影响 PELE 侵彻效果的数值分析

叶小军¹, 杜忠华², 姚方堂³

(1. 南昌陆军学院, 江西 南昌 330014; 2. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094; 3. 白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001)

摘要: 为研究钢筋混凝土靶厚度对横向效应弹(Penetrator with Enhanced Lateral Effect, PELE)侵彻效果的影响, 采用 ANSYS/LS-DYNA 3D 软件, 对 PELE 侵彻破坏不同厚度的钢筋混凝土(Reinforced Concrete, RC)靶进行了数值计算。计算结果表明: 利用质量和结构都相同的 PELE 以 $800 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度垂直撞击混凝土靶板, PELE 可最大穿透 80 cm 厚的靶板, 在该范围内, 靶板由薄变厚时, 弹体破碎愈加严重, 弹体剩余轴向速度逐渐降低; 对靶的侵彻随靶厚的增加, 靶破坏效应先增强, 然后减弱; 当靶厚超过 80 cm 时, 弹体的动能全部消耗于侵彻过程中。为验证仿真结果, 进行了实弹实验, 实验结果也表明: 对靶的侵彻随靶厚的增加, 破坏效应先增强, 然后减弱, 35 cm 厚的靶板破坏最严重; 验证了模拟结果的正确性和可靠性。

关键词: 侵彻力学; 数值模拟; 横向效应弹; 侵彻; 钢筋混凝土靶

中图分类号: TJ55; TJ410.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.05.007

1 引言

横向效应弹是一种依靠物理作用攻击目标的新概念弹药, 其弹丸由高密度管状金属壳体和低密度弹芯组成, 无引信和装药。该弹药利用横向效应和动能转换原理, 可对薄金属靶和不同厚度钢筋混凝土类目标实现不同的毁伤效果。在对钢筋混凝土靶侵彻时, 该弹能有效开洞扩孔, 便于人员穿过; 并将藏身于目标后的恐怖分子杀伤, 可广泛应用于城镇地区的反恐作战。

目前, 国内外对横向效应弹(Penetrator with Enhanced Lateral Effect, PELE)的研究逐渐活跃, 但主要集中在侵彻金属薄靶机理及对金属薄靶侵彻影响因素等方面^[1-7]; 随着对在高压、大变形和大应变率条件下混凝土材料的研究增多, 对 PELE 弹丸侵彻混凝土的研究也逐渐增多^[8-10]。为分析钢筋混凝土靶板厚度对 PELE 侵彻效果的影响, 利用 ANSYS/LS-DYNA 软件对 PELE 侵彻钢筋混凝土靶进行数值分析, 并进行试验验证, 试验结果与计算结果吻合良好, 表明本计算模型和参数可以为分析靶板厚度影响 PELE 侵彻效果提供参考。

2 计算模型及材料

2.1 有限元模型

PELE 弹外径 10.5 cm, 内径 8.0 cm, 弹体长 45.0 cm, 为增强弹靶撞击过程中对弹芯的挤压效应, 在弹芯前部加装了预制塞块, 整体结构如图 1 所示。

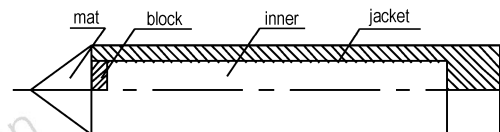


图 1 PELE 结构示意图

Fig. 1 The PELE Geometry

钢筋混凝土靶为长方体(图 2), 正面尺寸为 $2.0 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$, 为分析靶厚的影响, 分别取靶厚为 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50 m。混凝土的设计抗压强度为 35 MPa。钢筋直径 12 mm, 材料为 Q235, 钢筋网格 $12 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$, 共两层, 正、反面混凝土保护层厚度均 2.5 cm。

建模时, 钢筋混凝土采用分离式有限元模型, 即钢筋与混凝土单元分别建模, 并把混凝土和钢筋作为不同的单元来处理, 模型中弹体与混凝土靶板采用八节点六面体实体单元(SOLID164)^[11], 钢筋采用梁单元(BEAM161)^[11], 按照混凝土和钢筋不同的力学性能, 选择多种不同的单元形式, 可真实反映混凝土的非线

收稿日期: 2013-06-15; 修回日期: 2014-01-26

基金项目: 安徽省自然科学基金项目(1208085QE83)

作者简介: 叶小军(1976-), 男, 博士, 主要从事高效毁伤战斗部设计与仿真研究。e-mail: yexiaojun0512@126.com

性效应;分网格时,混凝土和钢筋各自被划分为足够小的单元,在钢筋的纵向上,混凝土与钢筋网格数量及大小相同,用 GERGE ITEMS 命令将钢筋的节点与混凝土的节点相融合,即节点共享。

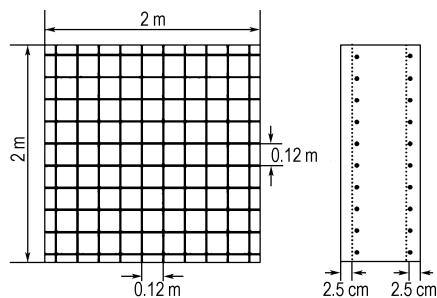


图2 钢筋混凝土靶示意图

Fig.2 Structure diagram of reinforced concrete target

网格单元采用 Lagrange 算法,这种算法中单元网格附着在材料上,随着材料的流动而产生单元的变形。该算法可实现对于 PELE 侵彻钢筋混凝土靶的力学动态行为的描述。PELE 与靶板之间采用 ERODING_SURFACE_TO_SURFACE 的接触方式。

2.2 材料模型及参数

PELE 的壳体及塞块的材料为钢,头部风帽及弹芯体的材料为尼龙,钢及尼龙均采用 Johnson-Cook 材料模型。根据 Johnson-Cook 模型基本参数的确定方法^[12-13],各材料基本参数如表 1 所示^[14]。

表 1 材料模型参数

Table 1 Parameters of materials

material	$\rho/g \cdot cm^{-3}$	E/GPa	ν	G/GPa	K/GPa
steel	7.85	210	0.29	77	
Nelon	1.09	2.8	0.4	1	0.472

Note: ρ is mass density; E is Young's Modulus; ν is Poisson's ratio; G is shear Modulus; K is bulk modulus.

考虑到冲击荷载作用下钢筋的受力特点,钢筋采用 PLASTIC_KINEMATIC 材料模型。其具体参数:密度 $\rho = 7.5 \times 10^3 kg \cdot m^{-3}$,弹性模量 $E = 210 GPa$,泊松比 $\nu = 0.284$,抗压强度 $\sigma_m = 100 MPa$,失效塑性应变 $\epsilon_p = 1.1$ 。

混凝土材料采用混凝土损伤模型,该模型可在一定程度上模拟混凝土材料的破碎和崩落现象。当混凝土材料单元的变形满足失效准则时,单元删除,质量重新分布,以此模拟靶板开孔现象。混凝土材料参数:无约束抗压强度 $f_c = 35.0 MPa$,弹性模量 $E_c = 27 GPa$,泊松比 $\nu = 0.2$,密度 $\rho = 2.4 g \cdot cm^{-3}$,抗拉强度 $f_t = 3.4 MPa$ 。

3 计算结果分析

3.1 数值仿真结果

利用有限元软件 LS-DYNA 对 PELE 垂直侵彻不同厚度的钢筋混凝土靶进行数值模拟,PELE 以 $800 m \cdot s^{-1}$ 的着速垂直撞击不同厚度钢筋混凝土靶,在穿透靶板后弹体破碎情况如图 3 所示。图 4 为该时刻靶板破坏情况。

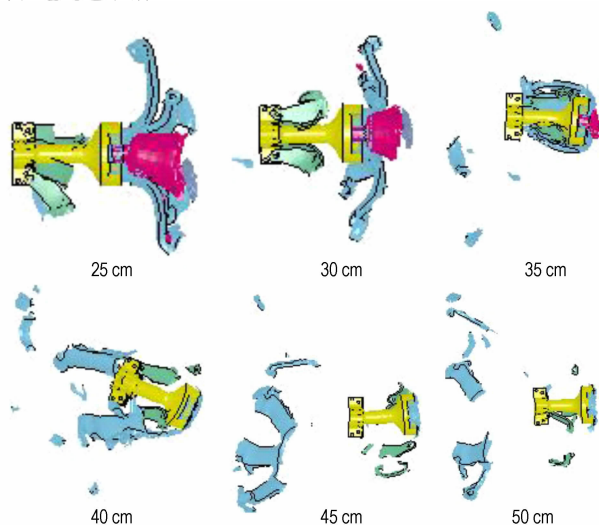


图3 PELE 垂直撞击不同厚度靶板弹体破碎情况

Fig.3 Simulation jacket broken state after PELE penetrate the different thickness targets

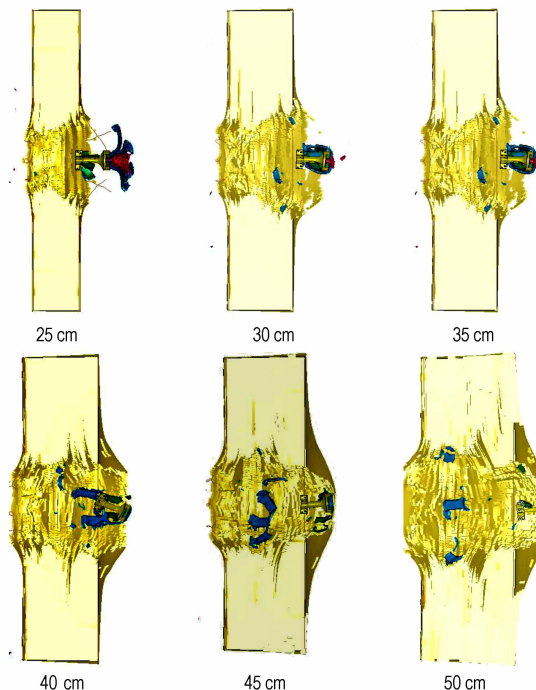


图4 PELE 垂直撞击不同厚度靶板破坏情况

Fig.4 Simulation target broken state after PELE penetrate the different thickness targets

从图3与图4可以看出, PELE以 $800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的着速垂直撞击不同厚度的钢筋混凝土靶时, 随着靶板厚度的增加, 穿透靶板后, 壳体残留长度逐渐变短, 破片数量也呈现先增多后减少的趋势。而随着靶板厚度的增加, 靶板破坏也同样出现先逐渐来严重后逐渐缓解的趋势, 当靶厚为35 cm时, 靶板破坏最严重。

图5为PELE垂直侵彻装钢筋混凝土靶后破片最大径向速度随靶厚变化图。图6为PELE对不同靶厚侵彻时动能随时间变化曲线。

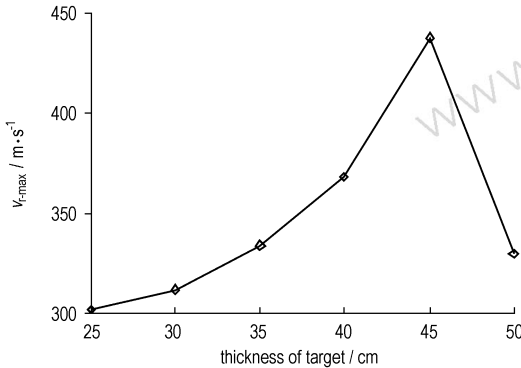


图5 破片最大径向速度随靶厚的变化

Fig. 5 Curve of fragment maximum radial velocity vs target's thickness

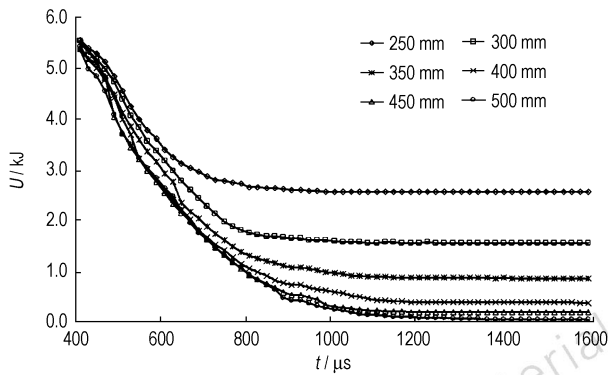


图6 PELE对不同靶厚侵彻时动能随时间的变化

Fig. 6 PELE kinetic energy vs time for different target thickness

由图5及图6可以看出, 在一定厚度范围内, 随着

靶板厚度的增加, 侵彻后破片最大径向速度先增大后减小, 破片轴向剩余速度、外弹体剩余质量和弹体动能逐渐减小。轴向剩余速度对靶板厚度不敏感, 随着靶板厚度的增加, 轴向剩余速度下降缓慢。壳体剩余质量和弹体动能则随着靶板厚度的增加下降较快, 当靶板厚度由25 cm增至50 cm时, 壳体剩余质量由初值的 $5/6$ 下降到 $1/2$, 而弹体动能在图6中可看出由初值的约 $1/2$ 下降到接近为零。

其主要原因为: 在侵彻靶板的过程中, 由于PELE壳体的侵彻能力优于弹芯, 弹芯在靶板和壳体的共同作用下受压而膨胀。在弹体结构相同、靶板材料及着靶速度相同条件下, 靶板厚度就影响弹芯膨胀力的大小。在弹体可贯穿靶板时, 随靶板厚度增加, 弹芯产生的膨胀力也随之增加, 直至到一临界值; 之后随靶板厚度增加弹芯产生的膨胀力逐渐减小。由于弹芯膨胀产生的压力作用在壳体内表面从而在弹体穿透靶板瞬间壳体破片产生径向速度, 因而破片径向速度会先增大后减小。

在仿真中还发现, 对于一定厚的钢筋混凝土靶, 若增加PELE的初速, 其破坏效果会好一些。

4 实验研究

为了验证数值仿真结果可靠性, 针对PELE在一定速度范围内进行PELE垂直撞击不同厚度混凝土靶板的实验研究。实验中弹体壳体为钢材料, 内部弹芯材料为尼龙。实验所采用靶板为钢筋混凝土靶, 厚度依次为25, 35, 50 cm, 弹体着靶速度为 $(800\pm 30)\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

实验中为检测PELE的横向效应, 在钢筋混凝土靶的侧后方, 用一白布做为后效靶区, 当PELE撞击靶后, 横向飞行的破片及钢筋混凝土的崩落块就会穿过该后效靶, 在相同的位置设置相同大小的后效靶, 当破片入靶速度相近时, 破片横向速度越大, 则散布面积越大。实验结果如表2所示。

图7为初速 $800\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ PELE分别对25, 35, 50 cm厚钢筋混凝土靶的仿真与实验结果。

表2 PELE侵彻不同厚度的钢筋混凝土靶的实验结果

Table 2 The experimental results of the PELE penetration different thickness reinforced concrete target

b / mm	$v_0 / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	n	A / m^2	area of RC broken (D / mm)		steel bars fracture state	
				impact crater	spalling pit	the first	the second
250	819	52	5	70×92	88×86	none	none
350	823	75	7.5	90×94	90×88	cut	cut
500	809	67	7	84×86	72×78	cut	cut

Note: b is target's thickness, v_0 is impact velocity, n is number of hole on aftereffect target, A is the spread area on aftereffect target, D is the diameter of target.

因实验条件限制,破片横向速度不易测量。但在后效靶距相等、破片轴向速度接近的情况下,易知破片数量越多,则散布面积越大。从表 2 可以看出,PELE 在后效靶板上产生的破片数量、覆盖面积,随靶板厚度变化有一定差异。靶厚为 35 cm 时,破片横向速度、散布面积和破片数量明显大于靶厚为 25 cm 和 50 cm 时的对应情况。

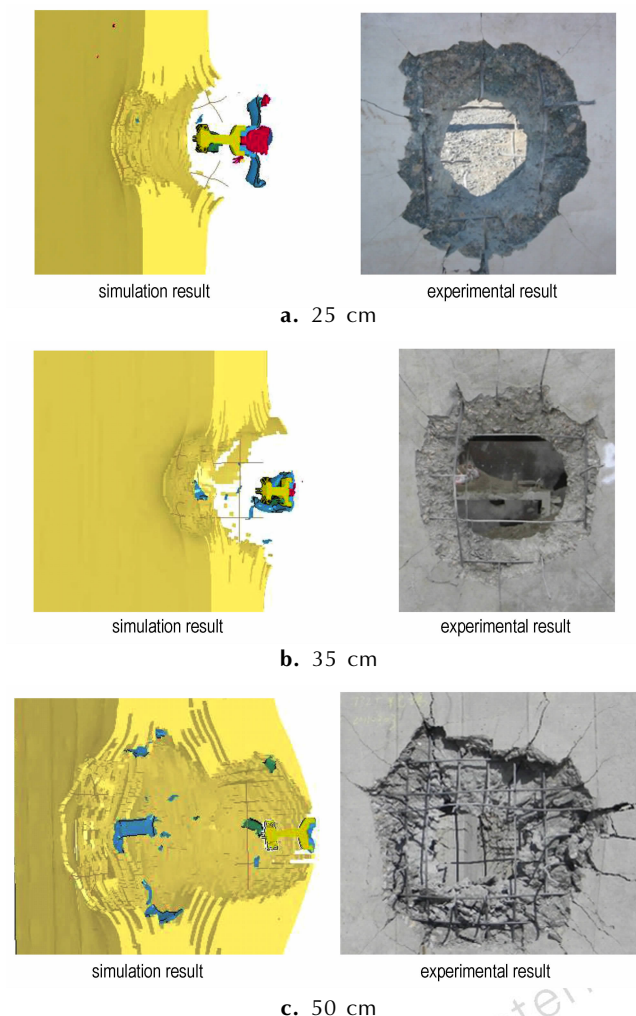


图 7 靶厚 25,35,50 cm 时仿真效果与实验结果对比
 Fig.7 Comparison of the simulated and experimental results with target thickness of 25 cm,35 cm and 50 cm

比较图 7 中实验结果与仿真结果,发现二者比较一致。说明数值模拟能够准确地反映出 PELE 侵彻不同厚度靶板的物理过程。

5 结 论

通过对 PELE 侵彻不同厚度靶板的数值模拟和实验,揭示了靶板厚度与 PELE 横向效应之间的关系。对

于质量和结构相同的弹体,以 $800 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度垂直撞击混凝土靶板时,最大可穿透 80 cm 厚的靶板,在此范围内,随靶板厚度不同,PELE 撞击靶板后产生的横向效应变化较大。当 PELE 可穿透靶板时,在靶板由薄变厚的过程中,弹壳体残留长度逐渐缩短;剩余轴向速度逐渐降低;对靶的侵彻随靶厚的增加,破坏效应先增强,然后减弱;当靶厚超过 800 cm 时,PELE 不能穿透,弹体的动能全部消耗于侵彻过程中。

对 PELE 侵彻钢筋混凝土靶的数值计算进行验证试验,试验结果与计算结果吻合良好,表明本计算模型和参数可以为分析钢筋混凝土靶板厚度影响 PELE 侵彻效果提供有益的参考。

参考文献:

- [1] 宋成俊,宋丽丽,叶小军,等. 横向效应增强型侵彻体对不同材料靶板的作用性能[J]. 含能材料, 2012, 20(6): 705-709. SONG Cheng-jun, SONG Li-li, YE Xiao-jun, et al. Interaction performance of PELE penetrating target plate with different materials[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(6): 705-709.
- [2] G Kesberg. PELE: The Future Ammunition Concept [C] // The 21st International Symposium on Ballistics. Adelaide: IBC, 2004: 1134-1144.
- [3] Paulus G, Schirm V. Impact behavior of PELE projectiles perforating thin target plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 33(1-15): 566-579.
- [4] 张洪成,尹建平,王志军. 半预制破片 PELE 弹丸效能的数值分析 [J]. 兵器材料科学与工程. 2013, 35(1): 104-106. ZHANG Hong-cheng, YIN Jian-ping, WANG Zhi-jun. Numerical study on the damage efficiency of half-premade fragmented PELE [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2013, 35(1): 104-106.
- [5] 朱建生,赵国志,杜忠华,等. 小口径 PELE 作用薄靶板影响因素的实验研究 [J]. 实验力学, 2007, 22(5): 505-510. ZHU Jian-sheng, ZHAO Guo-zhi, DU Zhong-hua, et al. Experimental study of the influence factors on small caliber PELE impacting thin target [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2007, 22(5): 505-510.
- [6] 崔晋,刘朝阳,王春林. 弹体和弹芯对穿甲爆裂弹毁伤效果的影响 [J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(2): 75-77. CUI Jin, LIU Chao-yang, WANG Chun-li. Influence of body and penetrator on damage effectiveness of PELE [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2011, 31(2): 75-77.
- [7] 涂胜元,王军波,安振涛,等. 壳体和内芯的材料特性对 PELE 侵彻后效的影响 [J]. 中北大学学报, 2009, 30(3): 213-216. TU Sheng-yuan, WANG Jun-bo, AN Zhen-tao, et al. Influence of the material characteristic of shell and core on the penetration after effect of PELE [J]. *Journal of North University of China*, 2009, 29(2): 110-113.
- [8] 叶小军,杜忠华,胡传辉,等. PELE 弹侵彻破坏钢筋混凝土靶仿真与试验研究 [J]. 火炸药学报, 2012, 35(4): 90-94. YE Xiao-jun, DU Zhong-hua, HU Chuan-hui, et al. Simulation and experiment of PELE penetrated and broken reinforced concrete targets [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*,

- 2012, 35(4): 90-94.
- [9] 叶小军. 风帽对 PELE 破坏钢筋混凝土目标效果的影响仿真研究[J]. 炮兵学院学报, 2012(3): 106-109.
- YE Xiao-jun. Numerical study for cap fluence PELE broken reinforced concrete target[J]. *Journal of Artillery Academy*, 2012, 3: 106-109.
- [10] 范少博, 陈智刚, 郭光全, 等. 装填材料对 PELE 侵彻混凝土效能影响研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2012, 34(5): 47-50.
- FAN Shao-bo, CHEN Zhi-gang, GUO Guang-quan, et al. Influence of filling material on penetration of PELE into concrete target[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2012, 34(5): 47-50.
- [11] LSTC. LS DYNA Keyword User's Manual, version 970[M]. California: LSTC, 2003.
- [12] 张凤国, 李恩征. 大应变、高应变率及高压强条件下混凝土的计算模型[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(3): 198-202.
- ZHANG Feng-guo, LI En-zheng. A computational model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(3): 198-202.
- [13] 王琳, 王富耻, 王鲁, 等. 空心弹体垂直侵彻混凝土靶板的应变测试研究[J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(4): 53-56.
- WANG Lin, WANG Fu-chi, WANG Lu, et al. Strain measurement in hollow projectiles impacting concrete targets[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2002, 22(4): 53-56.
- [14] 孟阳, 文鹤鸣. 钢筋混凝土靶板在弹丸冲击及爆炸载荷下响应的数值模拟[J]. 高压物理学报, 2011, 25(4): 70-78.
- MENG Yang, WEN He-min. Numerical simulation of the response of reinforced concrete slabs to projectile impact or explosive loading[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2011, 25(4): 70-78.

Numerical Simulation on Influence of Reinforced Concrete Thickness on PELE Penetration

YE Xiao-jun¹, DU Zhong-hua², YAO Fang-tang³

(1. Nanchang Military Academy, Nanchang 310103, China; 2. Mechanical and Engineering College, NUST, Nanjing 210094, China; 3. Baicheng Ordnance Test Center, Baicheng 137001, China)

Abstract: In order to study the influence of the reinforced concrete target (RC) thickness on penetrator with enhanced lateral effect (PELE) penetrating, the different thickness RC impacted with the velocity of $800 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ was simulated by LS-DYNA 3D software. Results show that PELE can penetrate the 80 cm thickness target at large. In this range, PELE body shell residual length is shorter with the target getting thicker when PELE could penetrate the targets, and the residual axial velocity of PELE decreases at the same time. With increase of target thickness, the undermining effect of penetration first increases, then decreases. The kinetic energy consumes totally in the penetration process when the targets thickness is over 80 cm. The experiment was carried to verify the simulation results. The experimental and simulated results both show that the 35 cm thickness target is damaged most severely, implying that the simulation are correct and reliable.

Key words: penetration mechanics; numerical simulation; penetrator with enhanced lateral effect (PELE); penetrate; reinforced concrete target

CLC number: TJ55; TJ410.1

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.05.007