

文章编号: 1006-9941(2012)06-0705-05

横向效应增强型侵彻体对不同材料靶板的作用性能

宋成俊¹, 宋丽丽², 杜忠华², 叶小军^{3,4}, 脱金奎⁵

(1. 海军驻沈阳弹药专业军事代表室, 辽宁 沈阳 110045; 2. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094; 3. 陆军军官学院, 安徽 合肥 230031; 4. 南昌陆军学院, 江西 南昌 330103; 5. 黑龙江北方工具有限公司, 黑龙江 牡丹江 157013)

摘要: 为了研究不同材料的靶板对横向效应增强型侵彻体 (Penetrator with Enhanced Lateral Effect, PELE) 的影响, 采用三维非线性动力学有限元程序 LS-DYNA, 在速度 $900 \sim 1300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内, 对一定弹体结构和材料的 PELE 撞击不同材料的金属薄靶进行数值仿真, 并将仿真结果与实验数据进行比较, 发现两者能较好的吻合。针对仿真和实验结果进行相应的理论分析发现: 惯性压缩阶段是影响横向速度的关键阶段, 并且横向速度随着靶板密度和体积模量的增大而提高。

关键词: 爆炸力学; 靶板材料; 横向速度; 数值仿真

中图分类号: TJ410.1; O389

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.06.010

1 引言

横向效应增强型侵彻体 (PELE) 是近些年发展起来的一种新型弹药^[1-3], 它不需要装定引信及炸药就可以侵彻轻型装甲或钢筋混凝土靶, 且可实现靶后破片杀伤效果。PELE 弹通常由风帽、弹体和弹带三个部分组成。弹体主要由两种密度差别较大的材料组合而成 (见图 1), 外部壳体是高密度材料, 如钨或钢, 内部弹芯则由低密度材料组成, 如塑料或铝。由于没有装填炸药及引信, 弹丸完全惰性^[4], 当其以一定速度撞击靶板时, 壳体因密度较大, 故其侵彻能力较弹芯高, 弹芯则被挤压在壳体和靶板之间, 弹芯因压缩而产生高压作用, 反作用于壳体的内表面, 在该过程中, 壳体外侧有周边靶体平衡弹芯的内压。当弹丸穿透靶板瞬间, 周边靶体平衡弹芯高压的作用力突然消失, 壳体在弹芯膨胀力作用下产生物理性爆炸, 并将壳体破碎成大量破片, 最终实现靶后杀伤效果。在整个撞击过程中, 弹芯材料在超短时间内, 因高压作用发生高速膨胀变形, 该变形为非常规条件下的弹性与塑性变形。

PELE 横向效应与多种弹、靶因素有关^[1], 朱建生博士研究了着靶速度、装填材料、靶板厚度及弹体结构对 PELE 横向效应的影响^[5-9], 涂胜元对壳体和装填材料

对于 PELE 横向效应的影响进行了研究^[10], 张谋分析了装填材料和着靶速度对于 PELE 横向效应的影响^[12]。以上研究都没有考虑不同靶板材料对于 PELE 侵彻后效的影响。本文利用三维非线性动力学有限元程序 LS-DYNA3D, 在上述研究基础上, 对 PELE 侵彻钢、铝两种不同材料的靶板进行数值仿真, 并进行了相应的理论分析, 得到了影响 PELE 横向作用的主要靶板特性。根据文献[13]对“薄靶板”定义: 在弹—靶作用过程中, 整个靶板厚度方向上不存在应力梯度和变形梯度。结合仿真及实验具体数据, 本文所研究的靶板均为薄靶板。

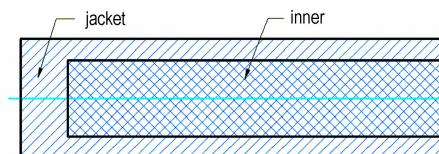


图 1 PELE 结构示意图

Fig. 1 The PELE Geometry

2 计算模型及材料参数

2.1 有限元模型及算法

研究利用 3D 有限元程序 LS-DYNA, 对 PELE 垂直撞击不同材料金属靶板进行数值模拟计算。计算模型: PELE 弹体为理想的圆柱杆, 外壳为钨合金材料, 长为 50 mm, 内、外径分别为 6 mm 和 10 mm, 后端封闭部分长为 5 mm, 弹芯为 A-G3 铝材料, 长为 45 mm; 靶板外形为长方体, 其尺寸为 $100 \text{ mm} \times$

收稿日期: 2012-08-17; 修回日期: 2012-09-28

作者简介: 宋成俊 (1979 -), 男, 大学本科, 工程师, 主要从事弹药工程设计与检测。e-mail: scjren@163.com

通讯联系人: 叶小军 (1976 -), 男, 博士研究生, 主要从事为战斗部设计与仿真研究。e-mail: yexiaojun0512@126.com

100 mm × 3 mm, 材料分别为 A3 钢和 A-U4G 铝。

由于弹丸垂直侵彻靶板具有对称性, 为节约计算运算时间, 计算模型采用原模型的四分之一(见图 2)。弹丸的外壳、弹芯和靶板均采用 8 节点六面体的 SOLID164 单元类型, 采用拉格朗日算法。侵彻体与靶板之间选用侵蚀接触算法, 外壳和弹芯之间选用自动接触算法。

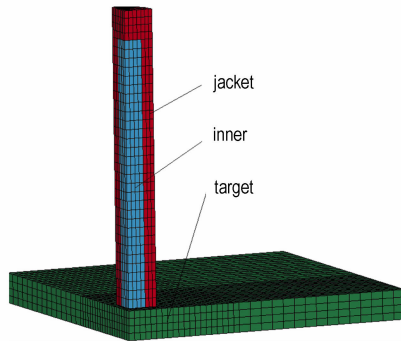


图 2 弹靶有限元模型

Fig. 2 Finite element models of PELE and target

2.2 材料模型及参数

弹丸外壳和弹芯均采用 PLASTIC-KINEMATIC 模型^[14], 该模型可模拟等向和运动强化塑性; 靶板采用 Johnson_Cook 材料模型^[14] (见公式 1) 和 Gruneisen 状态方程 (见公式 2), 该模型可较好地描述高应变率下金属动态行为。

$$\sigma_y = (A + B \bar{\epsilon}^n) (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中, σ_y 为材料的屈服应力; A 为屈服应力; B 为应变硬化系数; C 为应变率相关系数; n 为应变硬化指数; m 为温度相关系数; $\bar{\epsilon}^p$ 为有效塑性应变; $\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0}$,

为有效塑性应变率, $\dot{\epsilon}_0$ 为应变, 一般取 1.0 s^{-1} ; $T^* = \frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}}$, 为相当温度。

$$\rho = \frac{\rho_0 C_f^2 \mu [1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2}) \mu - \frac{a}{2} \mu^2]}{[1 - (s_1 - 1) \mu - s_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - s_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}]^2} + (\gamma_0 + a \mu) U \quad (2)$$

式中, ρ_0 为初始密度; U 为内能; $\mu = (\rho / \rho_0 - 1)$, ρ 为当前密度; C_f, s, γ_0 和 a 为材料参数。 s_1, s_2, s_3 为材料压缩曲线斜率系数。弹丸及靶板材料的主要参数取自参考文献 [8-12], 具体见表 1。

3 仿真结果及分析

PELE 贯穿薄靶过程主要由惯性压缩, 剪切冲塞和靶

后破碎三个阶段组成。仿真中不考虑外壳的断裂过程, 故弹丸外壳碎片的分布情况无法精确模拟; 同时, 文中只选择速度梯度中关键节 $930 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 与 $1280 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 不影响横向效应分析。

表 1 弹丸及靶板材料参数

Table 1 Parameters of PELE and target

materials	ρ /g · cm ⁻³	E /GPa	μ	A /MPa	B /MPa	C	n	m	gruneisen eos		
									C_f /m · s ⁻¹	S_1	S_2
tungsten alloy	17.6	350	0.28								
A-G3 Al	2.65	69	0.33								
A3 Steel	7.83	210	0.22	792	510	0.014	0.26	1.03	4569	1.49	1.27
A-U4G Al	2.80	74	0.33	420	426	0.015	0.34	1.00	5286	1.40	2.00

Note: ρ is Mass density; E is Young's Modulus; μ is Poisson's ratio; $A, B, C, n,$ and m is input constants; C_f is the intercept of the v_s-v_p curve; $S_1, S_2,$ and S_3 are the coefficients of the slope of the v_s-v_p curve; μ is $(\rho/\rho_0) - 1$.

图 3 ~ 图 6 为不同着靶速度和靶板材料条件下 PELE 贯穿靶板弹靶侧视图和壳体横向速度矢量图。分析图 3 与图 4 发现, 在弹丸具有相同的弹体材料、弹体结构和着靶速度的情况下, 仅因靶板材料的不同, 侵彻靶板后弹丸壳体的横向速度分别可达 $189, 108 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 5 和图 6 反应的情况与上述情况一致, 壳体横向速度分别为 $243, 156 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由此可见, 靶板材料在很大程度上会影响弹丸的横向效能。由于壳体的侵彻能力优于弹芯, 因此在贯穿靶板的过程中装填材料在靶板和壳体尾部的共同作用下受压而膨胀, 膨胀产生的压力作用在壳体内表面产生横向速度。

弹丸侵彻不同材料的靶板时, 弹芯和靶板接触瞬间的应力不同, 靶板产生塞块后, 不同材料的塞块对于弹芯装填物的压力也不同, 故弹芯膨胀程度不同, 最后导致壳体的横向速度不同。同时, 由于靶板材料不同, 弹体贯穿靶板的作用时间也不同, 即弹芯受压的时间长短不同, 也同样影响了壳体横向速度的大小。

图 7 为不同靶板时弹丸壳体横向速度随时间的变化曲线图。由图 7 可以看出, 着靶速度为 $1280 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 弹丸撞击钢靶产生的横向速度比撞击铝靶大, 到达最大横向速度需要的时间也较长。

图 8 为不同靶板时间壳体横向加速度随时间变化曲线。由图 8 可以看出, 不同靶板材料时横向加速度的变化趋势相同, 但变化幅值不同。弹丸贯穿钢质靶板产生的横向加速度较大, 即弹丸受到较大横向压力。从时间上看: $t = 5 \text{ } \mu\text{s}$ 时, 弹丸壳体的横向加速度最大, 即壳体此时受到弹芯作用的压力最大。从仿真结

果中可以得知,在 $t = 0 \sim 5 \mu\text{s}$ 是弹丸的惯性压缩阶段,之后为剪切充塞阶段。从而得出:惯性压缩阶段是影响弹丸壳体横向速度大小的关键阶段。

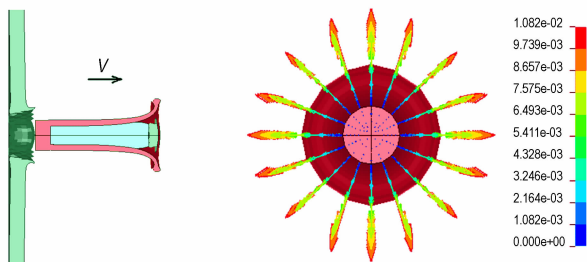


图 3 着速为 $930 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时弹丸贯穿铝靶图(单位: $\text{cm}/\mu\text{s}$)

Fig. 3 PELE penetrating Al-target at $930 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

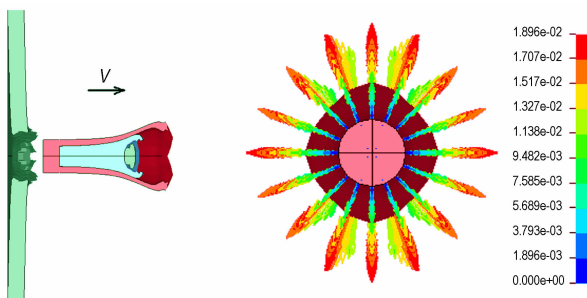


图 4 着速为 $930 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时弹丸贯穿钢靶图(单位: $\text{cm}/\mu\text{s}$)

Fig. 4 PELE penetrating steel-target at $930 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

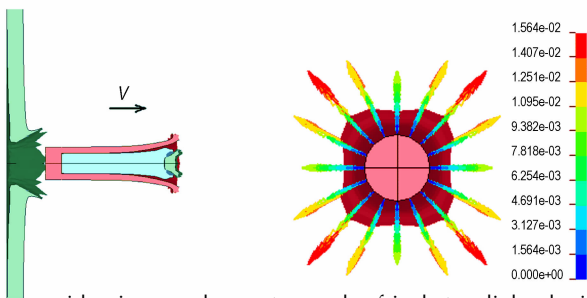


图 5 着速为 $1280 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时弹丸贯穿铝靶图(单位: $\text{cm}/\mu\text{s}$)

Fig. 5 PELE penetrating Al-target at $1280 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

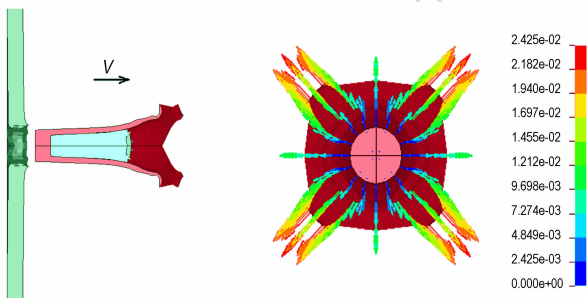


图 6 着速为 $1280 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时弹丸贯穿钢靶图(单位: $\text{cm}/\mu\text{s}$)

Fig. 6 PELE penetrating steel-target at $1280 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

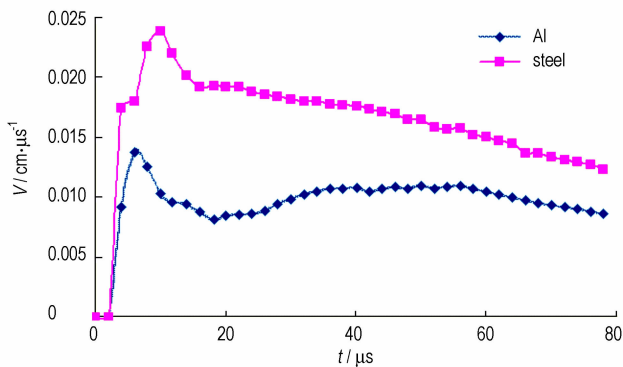


图 7 着速为 $1280 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时弹丸壳体横向速度曲线

Fig. 7 PELE radial velocity curve at $1280 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

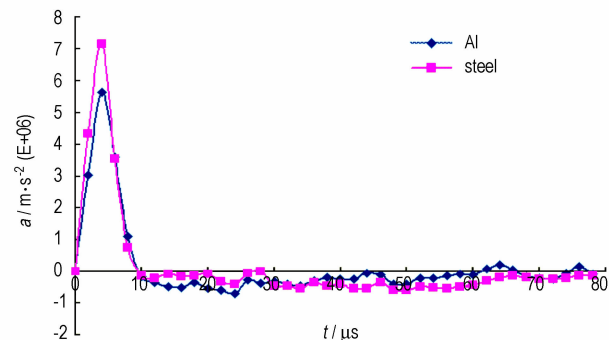


图 8 着速为 $1280 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时弹丸横向加速度曲线

Fig. 8 PELE radial acceleration curve at $1280 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

4 实验验证

在国内各种 PELE 弹的实验中,对于横向作用效果的度量参数仅局限于破片飞散半径和破片数量^[5-11],本文利用国外实验数据来检验靶板材料对横向效应影响的仿真结果。圣路易斯研究所的 G. Paulus 等人利用相同材料和结构的弹丸撞击不同材料的靶板进行了实验研究^[1],该实验中的弹靶材料参数与本文仿真的材料参数相同。将图 3~图 6 仿真计算中的侧视图与国外实验中靶后破碎 X 光照片比较,发现仿真可以较好地模拟出弹丸穿透靶板时壳体的膨胀情况。表 2 为 PELE 撞击不同靶板仿真及实验数据对比,由表 2 可见,仿真中弹丸的剩余速度及横向速度与实验值吻合度较好,横向速度随着靶板密度增大而提高,即该仿真可以正确模拟 PELE 弹贯穿金属薄靶的物理过程。

5 理论分析

本研究考虑着靶速度范围为 $900 \sim 1300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,弹靶材料在该范围内会发生多种现象,如弹性、塑性波

和流体动力学的波传播以及变形和摩擦生热, 研究认为弹靶之间应力波传播的速度为材料的体积声速^[13]。

表 2 PELE 撞击不同靶板仿真及实验数据对比表

Table 2 Data of simulation and experiment of PELE penetrating different target $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

target	velocity		residual velocity		radial velocity	
material /thickness	measured	samulation	measured	samulation	measured	samulation
Al	929	930	914	901	112	108
/3 mm	1275	1280	1261	1255	158	156
steel	925	930	895	887	184	189
/3 mm	1261	1280	1231	1226	243	242

弹体撞击金属薄靶时, 在弹与靶的接触面会产生很大压力, 应力波分别向靶板和弹芯同时传播。在撞击过程中弹丸壳体、弹芯和靶板均视为不可压缩材料, 则应力波在弹芯和靶板中分别以体积声速 $C_F = \sqrt{K_F/\rho_F}$ 和 $C_T = \sqrt{K_T/\rho_T}$ 传播, 其中, K_F, K_T 分别为弹芯和靶板体积模量; ρ_F, ρ_T 为弹芯和靶板的密度, $K = E/3(1 - 2\mu)$ 。弹靶接触面的真实速度 v_1 为:

$$v_1 = v_0 \frac{\rho_F C_F}{\rho_F C_F + \rho_T C_T} \quad (3)$$

式中, v_0 为撞击速度。

由动量守恒定理可得撞击界面产生的压力 $p^{[1]}$:

$$p = v_0 \cdot A \cdot \frac{\rho_F C_F \rho_T C_T}{\rho_F C_F + \rho_T C_T} = v_0 \cdot A \cdot \frac{\rho_F C_F}{\rho_F C_F / \rho_T C_T + 1} \quad (4)$$

式中, A 为弹芯的横截面积。

当应力波从靶板背面反射再次达到弹靶接触面时, 该压力变为零。该过程所经历的时间为 t :

$$t = \frac{2X_T}{C_T + v_1} \quad (5)$$

式中, X_T 为靶板的厚度。

由(4)式可知, 对一定弹体结构和材料的 PELE, 弹芯和靶板之间的作用力与靶板中应力波的传播速度 (C_T) 及靶板密度 (ρ_T) 相关, 而与靶板厚度无关。该作用力对弹芯产生压缩作用, 压缩力越大弹芯的变形就会越大, 从而使作用于壳体上的横向力增大, 产生较大的横向速度。与此同时, 该力持续的时间越长, 则壳体横向速度越大。现引入冲量的概念解释这一力学现象, 弹靶间作用力附于弹芯的冲量为:

$$I = pt$$

$$= v_0 \cdot \frac{2AX_T \rho_F C_F}{\frac{\rho_F C_F + \rho_T C_T}{\rho_T} + v_0 \frac{\rho_F^2 C_F^2}{\rho_F C_F \rho_T C_T + \rho_T^2 C_T^2} + v_0 \frac{\rho_F C_F}{\rho_F C_F + \rho_T C_T}} \quad (6)$$

化简得:

$$I = v_0 \cdot \frac{2AX_T \rho_F C_F}{\frac{\rho_F C_F + \sqrt{K_T \rho_T}}{\rho_T} + v_0 \frac{\rho_F^2 C_F^2}{\rho_F C_F \sqrt{K_T \rho_T} + K_T \rho_T} + v_0 \frac{\rho_F C_F}{\rho_F C_F + \sqrt{K_T \rho_T}}} \quad (7)$$

由式(7)可得, 对于材料和结构相同的弹体, 弹芯受的冲量主要与靶板的密度和体积模量有关, 同时, 随靶板密度的增大, 弹芯受到的冲量也随之增加, 弹芯受到的压缩力也就越大, 进而弹芯的变形也会越大, 从而使作用于壳体上的横向力增大。弹体在穿靶过程中, 壳体外侧有靶体阻止其剧烈外张, 可平衡弹芯的部分外张压力, 当弹丸穿透靶板瞬间, 靶板作用力消失, 壳体在弹芯膨胀力作用下分解破碎成大量破片, 并驱动破片横向运动。因而, 当弹芯因受到更大的冲量时, 其外张力驱动壳体碎片的横向速度也越大。而弹壳体与弹芯材料不定时, 壳体的屈服强度越大或剪切模量越小, PELE 的侵彻后效越好; 内芯材料的剪切模量是侵彻后效的主要影响因素之一^[11]。

而靶板体积模量与弹芯受到冲量之间的关系只能通过图像可反映出来。图 9 为不同着靶速度时靶板体积模量与弹芯受到冲量的变化曲线, 由图 9 可以得到: 弹芯受到的冲量随着靶板体积模量的提高而增加, 即壳体可以获得较大的横向速度。

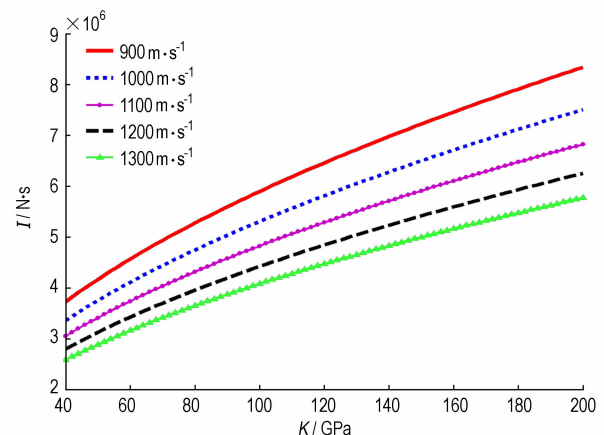


图 9 作用于弹芯上的冲量随靶板体积模量变化曲线

Fig. 9 Impulse of PELE inner changing with the plate bulk modulus

6 结论与展望

研究采用 3D 有限元软件 LS-DYNA, 在一定着靶速度下, 模拟一定结构的 PELE 撞击不同材料的靶板, 仿真结果与国外实验数据进行对比研究, 最后针对上述现象进行理论分析, 结果表明:

(1) 研究的数值仿真方法可以较好地模拟出 PELE 贯穿靶板过程, 仿真结果和试验结果相吻合。

(2) 在 PELE 撞击靶板过程中, 惯性压缩阶段是壳体产生横向速度的关键阶段, 此阶段壳体可形成最大横向加速度。

(3) PELE 撞击不同材料的靶板, 靶后可形成具有显著差别的横向作用效果。靶板的密度和体积模量对于靶板后效有极大的影响。随着靶板密度或体积模量的提高, PELE 横向速度增大。

(4) 本研究理论分析只考虑了 $900 \sim 1300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度范围, 对于其他速度是否适用于仍待验证; 只对装填材料为铝的 PELE 进行了仿真和理论分析, 对于非金属装填物的情况尚未讨论, 这是下一步的主要工作。

参考文献:

- [1] Paulus G, Schirm V. Impact behavior 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. 2004, 104–110.
- [3] Kesberg G, Schirm V, Kerk St. PELE – The Future Ammunition Concept [C] // 21st International Symposium on Ballistics. Adelaide, Australia. 2004: 1134–1144.
- [4] ZHU Jian-sheng, ZHAO Guo-zhi, DU Zhong-hua. Numerical Simulation and Experimental Research of PELE Impacting Target with Different Velocitie [C] // International Conference on mechanical engineering and mechanics, 2007, Vol 2: 1238–1241.
- [5] 朱建生, 赵国志, 杜忠华. 装填材料对 PELE 效应的影响 [J]. *弹道学报*, 2007, 19(2): 62–65.
ZHU Jian-sheng, ZHAO Guo-zhi, DU Zhong-hua. Influence of the filling material on the PELE effect [J]. *Journal of Ballistics*, 2007, 19(2): 62–65.
- [6] 朱建生, 赵国志, 杜忠华, 等. 着靶速度对 PELE 横向效应的影响 [J]. *力学与实践*, 2007, 29(5): 12–16.
Zhu Jiansheng, Zhao Guozhi, Du Zhonghua, et al. The influence of impact velocity on the penetrator with enhanced lateral effects (PELE) [J]. *ACTA and ACT*, 2007, 29(5): 12–16.
- [7] 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.
- [8] 朱建生, 赵国志, 杜忠华, 等. 靶板厚度对横向效应增强型侵彻体作用效果的影响 [J]. *南京理工大学学报*, 2009, 33(4): 474–175.
ZHU Jian-sheng, ZHAO Guo-zhi, DU Zhong-hua. Influence of target thickness on lateral effect of PELE [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science)*, 2009, 33(4): 474–175.
- [9] 朱建生, 赵国志, 杜忠华, 等. PELE 垂直侵彻薄靶的机理分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(3): 281–287.
ZHU Jian-sheng, ZHAO Guo-zhi, DU Zhong-hua, et al. Mechanism of PELE projectiles perpendicularly impacting on thin target plates [J]. *Explosin and Shock Waves*, 2009, 29(3): 281–287.
- [10] 涂胜元, 安振涛, 王军波, 等. 钢合金壳 PELE 作用机理研究 [J]. *弹箭与制导学报*, 2009, 29(2): 114–116.
TU Sheng-yuan, WANG Jun-bo, AN Zhen-tao, et al. Research on the operation mechanism of steel shell PELE [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2009, 29(2): 114–116.
- [11] 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 aftereffect of PELE [J]. *Journal of North University of China*, 2009, 29(2): 110–113.
- [12] 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 Mou, JIANG Jian-wei, MEN Jianbing, et al. Numerical simulation of lateral effect of tungsten shell PELE [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2009, 29(2): 110–113.
- [13] 赵国志. 穿甲工程力学 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.
ZHAO Guo-zhi. *Armour-Piercing engineering mechanics* [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1992.
- [14] LSTC, LS-DYNA Keyword User's Manual, Version 970 [M]. *Nonlinear Dynamic Analysis of Structures in Three Dimensions*. Livermore: LSTC, 2003.

Interaction Performance of PELE Penetrating Target Plate with Different Material

SONG Cheng-Jun¹, SONG Li-li², DU Zhong-hua², YE Xiao-jun^{3,4}, TUO Jin-kui⁵

(1. Military Ammunition in Shengyang Representative Office, Liaoning 110001, China; 2. School of Mechanical Engineering, NUST, Nanjing 210094, China; 3. Officer Academy of PLA, Hefei 230031 China; 4. Nanchang Military Academy, Nanchang 330103, China; 5. Heilongjiang North Tool Co. Ltd, Heilongjiang 157013, China)

Abstract: By use of three-dimensional nonlinear dynamic finite element program LS-DYNA, a series of numerical simulations of penetrator with enhanced lateral effect (PELE), which had the same projectile structure and material, penetrate different metal targets with the same velocities ($900 \sim 1300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) were presented. The simulation results were compared with the experimental and in good agreement with the experimental data. The corresponding theoretical analysis between the results of simulation and experiment shows that the process of the inertia compression has much to do with the effect for PELE, and the PELE has better lateral effect with the increasing of density and bulk modulus of the target.

Key words: mechanics of explosion; material of target; radical velocity; numerical simulation

CLC number: TJ410.1; O389

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.06.010