

# PELE 侵彻破坏钢筋混凝土靶的数值计算与试验

叶小军<sup>1,3</sup>, 杜忠华<sup>2</sup>, 胡传辉<sup>3</sup>, 唐佑辉<sup>3</sup>, 张跃林<sup>3</sup>

(1. 解放军陆军军官学院, 安徽 合肥 230031; 2. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

3. 南昌陆军学院, 江西 南昌 330014)

**摘 要:**采用 ANSYS/LS-DYNA 3D 软件, 对横向效应增强型侵彻体 (PELE) 侵彻破坏钢筋混凝土靶进行数值计算, 得到 PELE 弹对钢筋混凝土靶侵彻破坏效应及开坑直径、崩落直径、通孔直径、钢筋断裂等参数。为验证数值计算结果, 利用火炮进行了试验, 试验结果与计算结果吻合良好, 并利用实验结果进一步分析了高速撞击条件下 PELE 弹侵彻破坏钢筋混凝土的能力、PELE 的横向效能、弹体变形和破坏等问题。

**关键词:**爆炸力学; 横向效应增强型侵彻体; 侵彻; 破坏; 钢筋混凝土; 数值计算; 试验研究

中图分类号: TJ55; TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1007-7812(2012)04-0086-05

## Numerical Calculation and Experiment of PELE Penetrated and Broken Reinforced Concrete Targets

YE Xiao-jun<sup>1,3</sup>, DU Zhong-hua<sup>2</sup>, HU Chuan-hui<sup>3</sup>, TANG You-hui<sup>3</sup>, ZHANG Yue-lin<sup>3</sup>

(1. Army Officer Academy of PLA, Hefei 230031, China; 2. Mechanical and Engineering College, NUST,

Nanjing 210094, China; 3. Nanchang Military Academy, Nanchang 310103, China)

**Abstract:** Penetration process of penetrator with enhanced lateral effect (PELE) into reinforced concrete (RC) target was simulated by the ANSYS/LS-DYNA 3D software. The destructive effect, dimension of the impact crater, diameter of hole, dimension of spalling pit and rebar cut were obtained. In order to verify the calculated results, the PELE penetration into and broken RC was test by gun. The results show that the test results are in agreement with the calculated results. The PELE projectile penetration damage of reinforced concrete ability, enhanced lateral effect, deformation and damage problems under high speed impact were further analyzed by experimental results.

**Key words:** explosion mechanics; penetrator with enhanced lateral effect; penetrated; broken; reinforced concrete; numerical calculation; experiment study

## 引 言

横向效应增强型侵彻体 (PELE) 是一种不含炸药和引信的新概念弹药, 利用横向效应和动能转换原理可对不同厚度钢筋混凝土类目标实现不同的毁伤效果。对较薄的钢筋混凝土靶侵彻时, PELE 利用横向效应可实现破墙和靶后杀伤作用; 对较厚的钢筋混凝土靶侵彻时, 该弹可将外部壳体动能转化为中间侵彻体的动能实现攻坚和靶后杀伤作用。

目前, PELE 的研究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<sup>[1-7]</sup>。而钢

筋混凝土是一种在防护结构中广泛应用的材料, 许多学者对各种动能弹丸侵彻混凝土进行了大量研究<sup>[8-15]</sup>。PELE 是一类特殊的动能弹, 其独特的结构使得它在侵彻钢筋混凝土靶时的力学现象与普通动能弹有相似之处, 但又有其自身的特点。目前, 国内外对 PELE 研究的时间均很短<sup>[1]</sup>, 特别是关于混凝土侵彻的研究较少, 且该问题涉及材料在高压、大变形和大应变率条件下的强非线性和动力作用。本研究用 ANSYS/LS-DYNA 软件对 PELE 侵彻钢筋混凝土靶进行了数值计算, 再利用火炮装置进行验证试验, 用高速摄像机记录弹体侵彻破坏靶体的全过程。试验结果与计算结果相吻合, 表明

收稿日期: 2012-03-31; 修回日期: 2012-05-22

作者简介: 叶小军 (1976—), 男, 博士研究生, 从事武器系统与运用工程研究。

本计算模型和参数可以为 PELE 侵彻混凝土的机理分析提供参考。

## 1 数值计算

### 1.1 数学模型的建立

#### 1.1.1 几何模型

PELE 结构示意图如图 1 所示, 弹长 450mm, 弹径 105mm, 内径 80 mm, 壳体材料为钢, 内芯材料为尼龙。

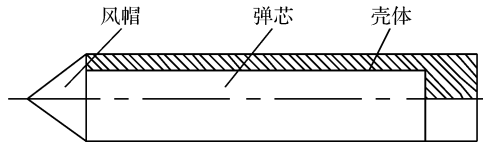


图 1 PELE 弹结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the PELE geometry

钢筋混凝土靶为长方体(如图 2 所示), 尺寸为 2.0 m×2.0 m×0.25 m, 混凝土的设计抗压强度为 35 MPa, 配筋率 0.72%。钢筋直径 12 mm, 材料为 Q235, 钢筋网格 120 mm×120 mm, 层间距 200 mm, 正、反面混凝土保护层厚度均为 25 mm。

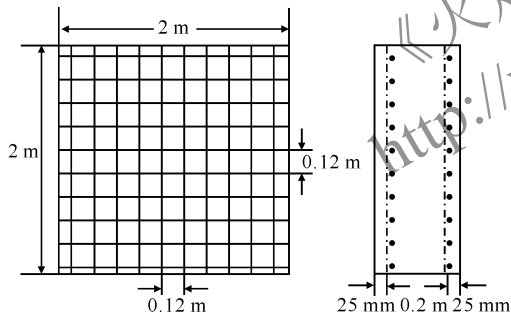


图 2 钢筋混凝土靶示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the RC target geometry

建模时, 钢筋混凝土采用分离式有限元模型, 可真实反映混凝土的非线性效应。模型中弹体与混凝土靶体采用八节点六面体实体单元 (SOLID164)<sup>[16]</sup>, 钢筋采用梁单元 (BEAM)<sup>[16]</sup>, 钢筋与混凝土单元分别建模, 采用节点共享的方式。考虑问题的轴对称性及计算的速度, 数值计算中所有计算模型采用原始物理模型的 1/4, 如图 3 所示, 并且施加了对称面和固定边界条件。

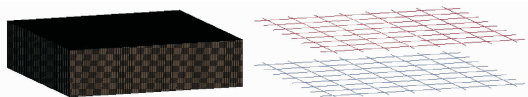


图 3 混凝土与钢筋的有限元模型

Fig. 3 Finite element models of concrete and steel bars

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 弹破坏钢筋混凝土靶的力学动态行为的描述, 且计算稳定。PELE 弹与靶板之间采用 ERODING\_SURFACE\_TO\_SURFACE 的接触方式。

#### 1.1.2 材料模型

PELE 的壳体材料为钢, 头部风帽材料为铝, 弹芯材料为尼龙, 钢、铝及尼龙均采用 Johnson-Cook 材料模型。根据 Johnson-Cook 模型基本参数的确定方法<sup>[9-10]</sup>, 各材料基本参数如表 1 所示<sup>[8]</sup>。

表 1 材料模型参数

Table 1 Parameters of materials

材料	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$E / \text{GPa}$	$\nu$	$G / \text{GPa}$	$K / \text{GPa}$
壳体	7.85	210	0.29	77	
头部风帽	2.77	69	0.33	26	
弹芯	1.09	2.8	0.4	1	0.472

注:  $\rho$  为密度;  $E$  为弹性模量;  $\nu$  为泊松比,  $G$  为剪切模量;  $K$  为体积模量。

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。具体参数: 密度  $\rho$  为  $7.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 弹性模量  $E$  为 2.1GPa, 泊松比  $\nu$  为 0.284, 抗压强度  $\sigma_m$  为 100 MPa, 失效塑性应变  $\epsilon_p$  为 0.8。

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  $f_c$  为 35.0 MPa, 弹性模量  $E_c$  为 27GPa, 泊松比  $\nu$  为 0.2, 密度  $\rho$  为  $2.4 \text{ g/cm}^3$ , 抗拉强度  $f_t$  为 3.4 MPa。

### 1.2 计算结果

图 4 为 PELE 以 800m/s 的速度贯穿破坏钢筋混凝土靶板不同时刻的穿靶数值计算结果。

从图 4 可以看出, PELE 撞击钢筋混凝土靶后, 在弹着靶位置的材料断裂破碎而飞溅, 形成正面漏斗坑。随着 PELE 的侵入, 冲击开坑阶段结束后, 强大的冲击波逐渐衰减为塑性波, 弹体周围的靶体介质受到挤压而形成塑性区; 在 PELE 侵彻至靶板背弹面, 靶板开始出现小裂纹, 随着损伤的进一步扩大, 靶板背面的破坏区不断扩展, 直到弹体完全穿透混凝土靶, 最终形成上下表面呈漏斗状的穿孔特征, 且靶板背面的破坏区域大于正面的破坏区。

域,靶板表面的破坏区域直径是 4~8 倍弹体直径。

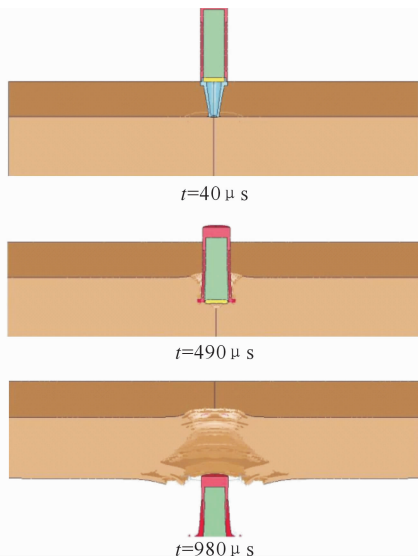


图 4 PELE 对钢筋混凝土靶板贯穿过程的计算结果  
Fig. 4 Numerical calculation results of PELE penetrating the RC target

## 2 试 验

### 2.1 试验布置

PELE 侵彻钢筋混凝土试验布置见图 5, 钢筋混凝土靶放置在距炮口 200 m 处, 混凝土靶后方堆一小土堆, 以便收集破片和 control 破片的飞散范围, 确保安全。在靶前 4 m 及 8 m 处布置测速用的锡箔靶。

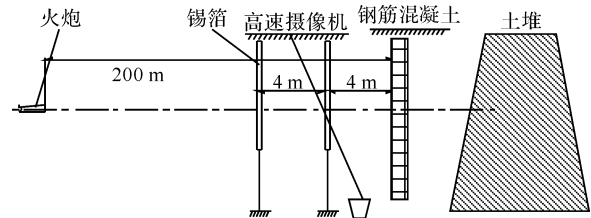


图 5 试验场地布置图

Fig. 5 The disposal of proving ground

实验用 PELE 和钢筋混凝土靶的结构、尺寸及材料与数值计算中的弹、靶相同。

表 2 PELE 弹侵彻钢筋混凝土试验结果

Table 2 Test results of PELE projectiles penetrating RC

序号	$m_{弹}/kg$	$v/(m \cdot s^{-1})$	靶体破坏情况/(cm×cm)			钢筋断裂情况	
			靶前破坏区	穿孔尺寸	靶后破坏区	前层	后层
1	11.5	840	70×70	45×45	90×100	一横	一横两纵
2	11.6	840	70×70	50×50	90×100	一横一纵	三横三纵
3	11.7	840	70×90	50×50	90×100	一横	一横两纵
4	11.8	800	80×80	55×50	110×120	一横一纵	三横两纵
5	12.0	800	80×80	55×55	90×110	严重变形	两横两纵
6	11.0	800	80×90	45×45	100×100	一横	两横两纵

### 2.2 试验结果

试验共发射 PELE 弹 7 发, 除 1 发弹提前破裂外, 其余弹体着靶平均速度为 820m/s, 结果见表 2。

用高速摄影机拍摄 PELE 侵彻破坏靶体过程, 部分照片如图 6 所示。

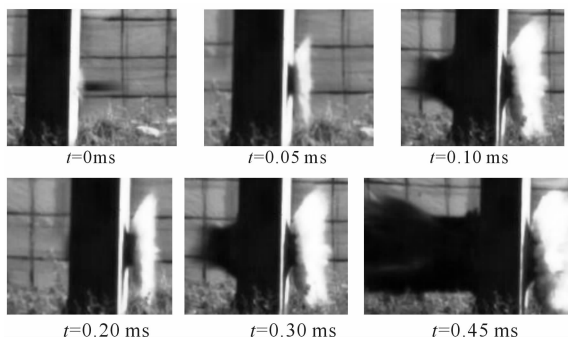


图 6 PELE 侵彻破坏钢筋混凝土过程照片

Fig. 6 Photos of process about PELE penetrating the RC target

### 2.3 结果分析

#### 2.3.1 PELE 弹对靶体的作用过程分析

从图 6 可以看出, 在 0 ms, PELE 头部刚接触到靶; 0.05 ms 时, 头部已经进入到靶中, 但在靶的背面还看不到任何混凝土块的飞落; 0.10 ms 时, PELE 正处于穿透靶的瞬间, 靶背面的混凝土开始隆起; 0.20 ms 时, 靶背面的混凝土块已经开始飞溅, 0.30 ms 时, 随着 PELE 的横向效应的作用, 靶背面的混凝土迅速崩塌飞散开, 形成尘暴。在 0.45 ms 之后, 没有发现 PELE 大块残留物飞行, 可以判断在侵彻过程中, 壳体受弹芯的膨胀力而分裂成大量的破片(如图 7 所示), 同时弹体的动能部分转化为破片的横向速度, 部分能量消耗于对靶体的开洞扩孔, 使得靶体的开孔扩大。

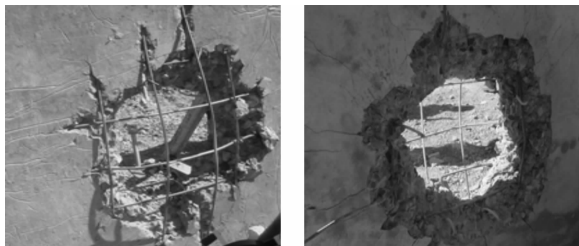
#### 2.3.2 靶板破坏形式

图 8 给出 5 号靶板被穿透后靶板的破坏模式。

图 9 为钢筋断裂状态及形式。结合试验结果(见表 2), 认为 PELE 对钢筋混凝土靶的破坏主要包括以下两个方面。



图 7 PELE 弹侵彻破坏钢筋混凝土后回收的部分碎片  
Fig. 7 Recycle fragment of broken RC by PELE



(a) 靶板正面 (b) 靶板背面

图 8 被破坏的 5 号钢筋混凝土靶

Fig. 8 The No. 5 broken RC

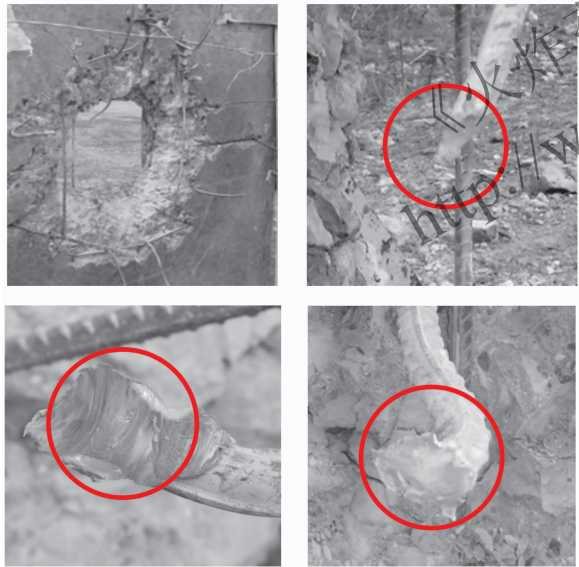


图 9 钢筋断裂状态及形式

Fig. 9 The state of cut steel bar

(1)对混凝土体的破坏。PELE 穿透靶板的过程中,一方面靶板正(迎弹面)、背(背弹面)两面的崩落呈现大漏斗形,靶体正面弹坑主要是由于材料的压缩和剪切破坏造成的,而背面崩落坑主要是由于靶体中的冲击压缩波反射形成拉伸波造成材料拉伸破坏形成的,这与常规弹丸对钢筋混凝土靶的破坏形式相似;另一方面,混凝土靶前的崩落区面积平均为  $75\text{ cm} \times 80\text{ cm}$ ,靶后的崩落区面积平均为  $95\text{ cm} \times 110\text{ cm}$ ,靶后的崩落区面积约为靶前崩落区

面积的 2 倍,靶体被侵彻破坏部分中间最小直径部位为通孔,其大小约为弹径的 4~5 倍,与数值计算结果非常接近,这是常规弹丸侵彻钢筋混凝土靶所不能达到的效果,表现出 PELE 弹横向增强扩展性的特点。

(2)对钢筋的破坏。从图 8 可以看出,PELE 在穿透靶板过程中,前排钢筋严重变形(图 8(a)),后排钢筋两横两纵断裂(图 8(b)),前排钢筋破坏情况不如后排钢筋,其他靶的情况也基本相同。主要原因是:在侵彻钢筋混凝土过程中,弹体与钢筋混凝土之间发生剧烈的相互作用,钢筋的变形、断裂消耗了弹体大量的能量,从而对混凝土起到了较好的约束作用。从图 9 也可以看出,钢筋的断裂形式主要是被膨胀的混凝土冲击力弯曲拉断和被弹体击中切割断。

### 3 结 论

(1)PELE 侵彻破坏钢筋混凝土靶,外壳体开裂,有大量碎片产生,并具有明显的横向增强效应。

(2)PELE 以  $800\text{ m/s}$  的速度侵彻撞击钢筋混凝土靶时,25 cm 厚的钢筋混凝土靶被完全贯穿破坏,靶板背面的破坏程度比正面严重。破坏模式为拉伸断裂、弯曲断裂及剪切断裂。

(3)对 PELE 侵彻钢筋混凝土靶进行了数值计算,计算结果在侵彻过程、开坑直径、崩落直径、通孔直径和钢筋断裂现象等方面得到了试验验证,说明计算方法可行。通过数值计算可以减少试验次数,缩短研究周期和降低成本。

#### 参考文献:

- [1] Kesberg G. PELE: The future ammunition concept [C]//The 21st International Symposium on Ballistics. Adelaide: IBC, 2004:1134-1144.
- [2] Paulus G, Chanteret PY, Wollmann E. PELE: A new penetrator concept for generating lateral effects[C]//The 21st International Symposium on Ballistics. Adelaide: IBC, 2004:104-110.
- [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] 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): 281-28. ZHU Jian-sheng, ZHAO Guo-zhi, DU Zhong-hua, et al. Mechanism of PELE projectiles perpendicularly



- impacting on thin target plates [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(3): 281-288
- [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] 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 Jian-bing, et al. Numerical simulation of lateral effect of Tungsten shell PELE[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2009, 29(2): 110-113.
- [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] 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-ming. 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 纪冲, 龙源, 万文乾. 动能弹丸冲击侵彻混凝土靶数值模拟分析[J]. *混凝土*, 2006, 2: 6-8.  
JI Chong, LONG Yuan, WAN Wen-qian. Numerical simulation of kinetic energy projectile penetrating two kinds of concrete targets[J]. *Concrete*, 2006, 2: 6-8.
- [12] Li Q M, Chen X W. Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non deformable projectile[J]. *Int J Impact Eng*, 2003, 28(1): 93-116.
- [13] Chen X W, Fan S C, Li Q M. Oblique and normal perforation of concrete targets by a rigid projectile[J]. *Int J Impact Eng*, 2004, 30: 617-637.
- [14] 马爱娥, 黄风雷, 李金柱, 等. 钢筋混凝土抗贯穿数值模拟[J]. *北京理工大学学报*, 2007, 27(2): 103-107.  
MA Ai-e, HUANG Feng-lei, LI Jin-zhu, et al. Simulation on the perforation of reinforced concrete[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2007, 27(2): 103-107.
- [15] Corbett G G, Reid S R, Johnson W. Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles a review[J]. *Int J Impact Eng*, 1996, 18: 141-230.
- [16] LSTC. LS DYNA keyword user's manual, version 970[M]. California: LSTC, 2003.