

文章编号: 1006-9941(2016)08-0742-05

壳体切缝的结构参数对 PELE 横向效应的影响

徐立志, 杜忠华, 杜成鑫, 张明丛, 李兵

(南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了研究壳体切缝结构参数(切缝的周向个数 N 、径向深度 H 和轴向长度 L)对横向效应增强型侵彻体(PELE)侵彻钢筋混凝土靶开孔尺寸的影响,利用数值仿真方法对具有不同壳体切缝结构参数的 PELE 侵彻钢筋混凝土靶进行正交优化分析,通过定义横向效应贡献值对弹丸轴向动能转化为钢筋混凝土靶因壳体膨胀破坏损失的能量进行研究。结果表明,壳体切缝参数为 $N=8$ 、 $H=5.5\text{ mm}$ 、 $L=150\text{ mm}$ 时,钢筋混凝土靶破坏的开孔尺寸最大为 409 mm ,横向效应贡献值最大,并且 PELE 的横向效应效果最佳。同时,壳体切缝结构参数对 PELE 横向效应的影响程度: L 最大, N 次之, H 最小。

关键词: 钢筋混凝土; 横向效应增强型侵彻体(PELE); 切缝; 结构参数

中图分类号: TJ413

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.08.003

1 引言

横向效应增强型侵彻体(Penetrator with Enhanced Lateral Effect, PELE)主要是由高密度壳体和低密度装填物两部分组成的一种无引信、无装药新型侵彻体,当与目标靶相互作用时,低密度装填物受挤压发生径向膨胀,使壳体对目标靶形成一定的扩孔效应;当贯穿目标靶后,装填物的能量瞬间释放,使壳体破碎为破片形成靶后杀伤。可见,壳体和装填物的性能匹配程度决定着 PELE 的横向效应。目前,针对壳体和装填物性能匹配程度的影响因素,主要从目标靶参数^[1-2]、着靶参数^[3-4]和弹丸参数^[5]等方面进行了定性研究,发现目标靶参数(靶板的厚度、密度、体积模量)、着靶参数(着靶速度、角度、转速)和弹丸参数(长径比、内外径比、壳体材料压拉强度比和密度、装填物材料弹性模量和泊松比)等主要通过影响壳体和装填物的性能匹配程度,进而影响 PELE 的横向效应。Jimmy Verreault^[6]应用 Rankine-Hugoniot 关系定量分析了目标靶参数、着靶参数和弹丸参数对 PELE 横向效应的影响,解释了应力波在壳体与装填物以及弹丸与靶板之间的作用过程,发现 PELE 壳体破碎产生的破片大

小不规则。文献[7]基于钢靶目标通过内刻槽技术削弱壳体强度并且预使壳体破碎产生较均匀的破片,结果发现对壳体进行内刻槽可是壳体破碎更充分且破片较均匀。然而,基于大口径 PELE 侵彻钢筋混凝土靶的横向效应不同于小口径 PELE 作用于金属靶,大口径 PELE 侵彻钢筋混凝土靶主要应用装填物受挤压产生横向膨胀,致使壳体横向运动,对钢筋混凝土产生大的扩孔破坏。因此,对壳体采用预裂技术^[8],改善壳体和装填物性能匹配程度,控制壳体均匀膨胀,减少用于使壳体开裂的能量损失,增大 PELE 对钢筋混凝土靶的扩孔尺寸。目前,国内外对大口径 PELE 壳体进行预处理的报道未见。为此,本研究通过切缝技术对壳体进行预处理,PELE 在侵彻钢筋混凝土靶过程中,壳体的膨胀程度明显增强;同时,切缝的壳体在装填物挤压作用下周向均匀膨胀,使 PELE 的横向效应明显增强。应用 ANSYS/LS-DYNA 软件,结合正交优化设计方法^[9-10],研究切缝周向个数、轴向长度和径向深度等结构参数对 PELE 侵彻钢筋混凝土靶横向效应的影响,探究结构参数对横向效应的影响规律和最佳结构参数组合,为 PELE 的设计提供一定参考价值。

2 数值仿真

2.1 建立数值仿真模型

通过 ANSYS/LS-DYNA 软件建立弹丸和钢筋混凝土靶数值仿真模型,数值仿真模型尺寸及速度条件均与试验条件相符。弹丸模型尺寸:内外径分别为

收稿日期: 2016-01-27; 修回日期: 2016-04-15

作者简介: 徐立志(1990-)男,硕士研究生,主要从事弹药设计及毁伤研究。e-mail: 13770318390@163.com

通信联系人: 杜忠华(1971-)男,博士,教授,主要从事弹药设计及撞击动力学研究。e-mail: duzhonghua@aliyun.com

80 mm和 105 mm,壳体 and 装填物长度分别为 320 mm 和 300 mm,后端底厚为 20 mm,切缝的周向个数 N 、径向深度 H 和轴向长度 L 尺寸根据正交优化方案进行相应调整,切缝 PELE 结构示意图如图 1 所示。钢筋混凝土靶板模型尺寸为: 2 m×2 m×0.24 m,钢筋的分布情况如图 5 所示,钢筋直径为 12 mm,含筋率为 2.83%。建立 1/2 模型,对称面设置对称约束,非对称边界设置固定边界约束。弹靶各部分组件的材料参数及材料模型如表 1 所示。弹丸以 $800 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 垂直侵彻钢筋混凝土靶中心位置。

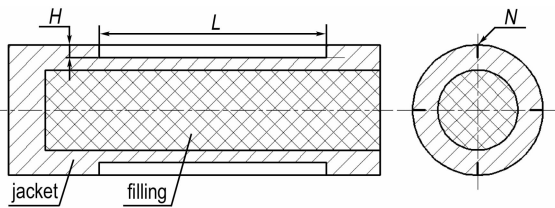


图 1 切缝 PELE 结构示意图

Fig.1 Configuration of the lancing PELE

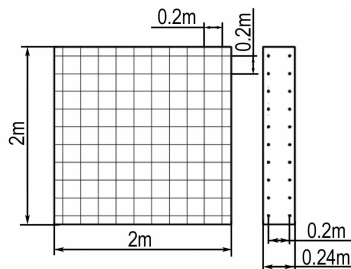


图 2 钢筋混凝土靶结构示意图

Fig.2 Configuration of reinforced concrete

表 1 材料参数及材料模型

Table 1 Material type and model

components	material models	material types	ρ /g · cm ⁻³	E /GPa	μ
jacket	johnson-cook	30GrMnSi	7.83	2.10	0.29
filling	johnson-cook	nylon	1.09	2.83	0.40
concrete	concrete-damage	concrete	2.45	-	-
steel	plastic-kinematic	Q235	7.89	210	0.284

Note: ρ is the density; E is the modulus of elasticity; μ is the poison ratio.

2.2 正交优化切缝结构参数设计

正交优化设计需综合考虑多影响因素和多水平变量之间的关系,在因素变化范围内均衡抽样以获得均匀的试验点,在保证全面试验要求的同时减少试验数量^[10]。通过数值仿真和相应的试验结果分析发现,壳体切缝的 N 、 H 、 L 是影响 PELE 侵彻钢筋混凝土靶横向效应的主要因素,因此,将 N 、 H 、 L 作为研究对象,

采用正交优化设计方法进行研究分析,确定水平变量:周向个数 N 取 4、6、8,径向深度 H 取 2、5.5、12.5 mm,轴向长度 L 取 150、210、260 mm。建立 3 因素 3 水平取值表,见表 2。

表 2 正交优化因素水平表

Table 2 Factors and levels of orthogonal optimization

level	factor		
	N	B H/mm	C L/mm
1	4	2	150
2	6	5.5	210
3	8	12.5	260

105 mm PELE 侵彻钢筋混凝土靶可以实现开孔破坏,其开孔尺寸可以反映 PELE 的横向效应。因此,可以将钢筋混凝土靶破坏的通孔直径(均径) D (mm) 作为优化目标, X 、 Y 分别为开孔的最小和最大尺寸,通孔直径(均径) D (mm) 为 X 和 Y 的均值。根据正交优化设计方法,建立 $L_9(3^4)$ 正交表,如表 3 所示。采用直观分析法对每个指标分别进行计算分析。

对表 3 计算结果进行分析,可以发现各因素对指标的影响:(1)通过 9 组数值仿真结果对比发现,第 8 组仿真结果得到的钢筋混凝土靶破坏通孔直径(均径) D 取最大值,其值为 409 mm。因此,初步认为 $A_3B_2C_1$ 是最优组合。

表 3 正交优化仿真方案及计算结果

Table 3 Simulation schemes and calculated results of orthogonal optimization

projects	A	B	C	D/mm	$X \times Y/\text{mm} \times \text{mm}$
1	1	1	1	362	360.2×362.8
2	1	2	2	370	363.6×375.7
3	1	3	3	380	377.0×382.6
4	2	1	2	365	359.8×370.0
5	2	2	3	378	371.7×384.3
6	2	3	1	383	381.5×383.6
7	3	1	3	389	377.3×400.4
8	3	2	1	409	406.0×412.4
9	3	3	2	357	348.4×366.5
K_1	1112	1116	1154		
K_2	1126	1157	1092		
K_3	1155	1120	1147		
k_1	370.7	372.0	384.7		
k_2	375.3	385.7	364.0		
k_3	385.0	373.3	382.3		
R	14.3	13.7	20.7		

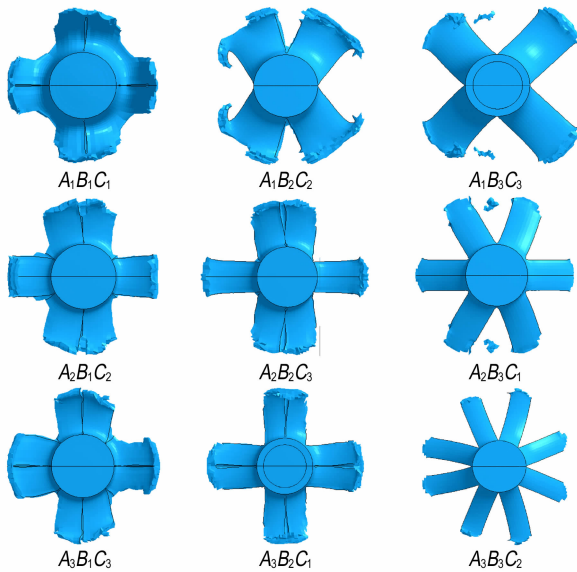


图3 正交方案仿真结果

Fig.3 The simulation results of orthogonal scheme

(2) 极差值表征了各因素对优化目标的影响程度,其值越大,影响程度越大。对比分析3个影响因素极差值发现, L 是对钢筋混凝土靶破坏通孔直径(均径) D 的主要影响因素, N 次之, H 最小。

(3) 对 k_1 、 k_2 、 k_3 平均值对比分析发现,对于因素 A (切缝的周向个数 N): $k_1 < k_2 < k_3$, 由于 D 值越大,钢筋混凝土靶的破坏程度越大,PELE 的横向效应效果越佳。因此, N 取 8 时, D 取最大值效果最佳。同样,对于因素 B (切缝的径向深度 H) 和 C (切缝的轴向长度 L): $k_1 < k_3 < k_2$, $k_2 < k_3 < k_1$ 。因此, H 和 L 分别取 5.5 mm 和 150 mm 时, D 取最大值效果最佳。综上所述,壳体切缝的结构参数为 $A_3B_2C_1$ 方案时,钢筋混凝土靶的破坏程度最大,PELE 的横向效应效果最佳。该方案恰好为第 8 组仿真方案,故确定 $A_3B_2C_1$ 为最佳方案。

2.3 横向效应贡献值分析

弹丸轴向剩余速度是衡量弹丸轴向动能转化为其它形式能量的重要参数。对于 PELE 侵彻钢筋混凝土靶,弹丸的轴向动能主要转化为侵彻阻力做功损失的能量、壳体破碎损失的能量、壳体膨胀对钢筋混凝土破坏损失的能量以及部分内能。为了衡量弹丸轴向动能转化为壳体膨胀对钢筋混凝土破坏损失的能量,本研究通过定义横向效应贡献值 $T = D / (v_0 - v_r)$, v_0 和 v_r 分别为弹丸初速度和轴向剩余速度,即单位衰减速度对通孔尺寸贡献值,表征该部分能量转化情况,图 5 为

9 组仿真方案的横效应贡献值曲线,揭示了壳体切缝结构参数对轴向动能转化为壳体膨胀对钢筋混凝土破坏损失能量的影响。图 4 为 9 组仿真方案的轴向剩余速度曲线,通过与表 3 通孔尺寸 D 值对比发现, D 值并不会随着 v_r 的减小而增大;与图 3 壳体的破坏情况对比分析发现:(1) 方案 $A_1B_1C_1$ 、 $A_1B_2C_2$ 、 $A_1B_3C_3$ 的切缝周向个数均为 4,其切缝的径向深度和轴向长度依次增大,图 4 中 3 个方案弹丸的轴向剩余速度逐渐减小,表 3 中对应的通孔尺寸逐渐增大,而图 5 中对应的横向效应贡献值却减小,说明 $A_1B_1C_1$ 、 $A_1B_2C_2$ 、 $A_1B_3C_3$ 三种方案的 PELE 弹丸与钢筋混凝土靶板的作用过程中,壳体破碎损失的能量减少,但壳体的强度降低,导致壳体发生卷边现象增大侵彻阻力,从而增加侵彻阻力做功损失的能量,壳体膨胀对钢筋混凝土破坏损失的能量只是随弹丸动能较少量增加而增加,其横向效应贡献值却减小。(2) 方案 $A_1B_1C_1$ 、 $A_2B_1C_2$ 、 $A_3B_1C_3$ 的切缝径向深度均为 2 mm,其切缝的周向个数和轴向长度依次增大,同样,轴向剩余速度逐渐减小,通孔尺寸逐渐增大,同时图 5 中对应的横向效应贡献值也在增大,说明弹丸轴向动能减少量的增加,转化为壳体膨胀对钢筋混凝土破坏损失能量的比值增大。

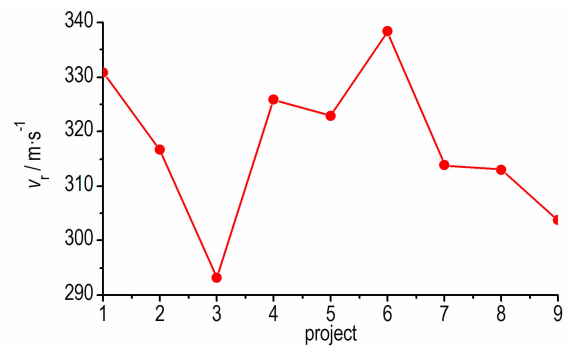


图4 各仿真方案的轴向剩余速度

Fig.4 Axial residual velocity of every simulation scheme

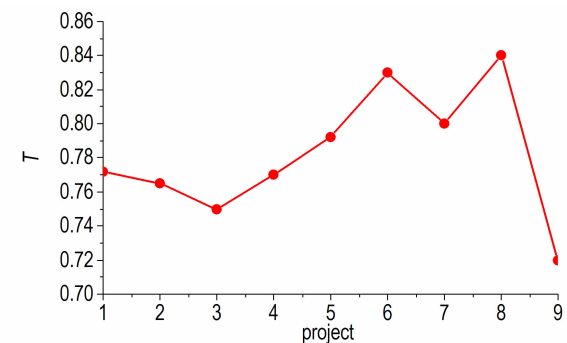


图5 各仿真方案的横向效应贡献值

Fig.5 Lateral effect contribution value of every simulation scheme

(3)方案 $A_3B_2C_1$ 的横向效应贡献值 T 在 9 组方案中最大,其动能减小量非最大值,但减少的动能转化为壳体膨胀对钢筋混凝土破坏损失能量的比值大,致使钢筋混凝土靶的开孔尺寸最大,PELE 的横向效应效果更佳。

综上所述,壳体切缝结构参数会影响弹丸轴向动能转化为其他形式能量的分配情况。通过正交优化法对壳体切缝结构参数进行正交优化获得的最佳方案 $A_3B_2C_1$ 与第 8 组仿真方案重合。同时,通过定义横向效应贡献值对 9 组方案分析发现第 8 组仿真方案弹丸轴向动能更多的转化为壳体膨胀对钢筋混凝土破坏损失能量,横向效应效果最佳,与正交优化最佳方案相符。因此,确定 $A_3B_2C_1$ 为最佳方案,即壳体切缝个数为 8、深度为 5.5 mm、长度为 150 mm。该方案使壳体和装填物之间的性能匹配更优,将弹丸轴向动能转化为壳体膨胀对钢筋混凝土破坏损失能量,减少因侵彻阻力做功损失的能量和壳体破碎消耗的能量。

3 试验验证

3.1 试验装置

为了验证本文数值仿真的正确性,对具有不同壳体切缝结构参数的 105 mm PELE 侵彻钢筋混凝土靶进行试验,试验采用 105 mm 滑膛炮和分装式药筒,通过改变发射药量控制弹丸速度,在距离炮口 200 m 处放置 2 m×2 m×0.24 m 的钢筋混凝土靶,采用网孔靶测量弹丸速度,在钢筋混凝土靶的一侧布置高速摄像机,拍摄弹丸侵彻目标靶的整个过程。试验布置如图 6 所示。

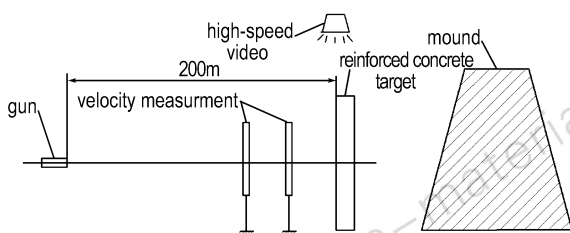


图 6 试验布置示意图

Fig. 6 Configuration of experimental arrangement

3.2 试验与数值仿真结果对比

为了验证壳体切缝结构参数对 PELE 横向效应影响数值仿真研究方法的正确性,共进行了 4 组不同壳体切缝结构参数的试验,其试验方案和结果如表 4 所示。图 7 为试验与数值仿真钢筋混凝土靶通孔尺寸(均径)对比图。

表 4 试验方案及结果

Table 4 Testing schemes and results

projects	N	H/mm	L/mm	$X \times Y/mm \times mm$
1	6	2	210	390×400
2	6	4	210	370×420
3	6	5.5	210	365×400
4	6	8	210	320×380

对图 7 进行分析:弹丸壳体切缝周向个数和轴向长度一定的条件下,随着壳体切缝径向深度的增加,钢筋混凝土靶开孔尺寸逐渐增大,说明随着壳体切缝径向深度增加,壳体的强度减弱易于壳体产生径向膨胀,对钢筋混凝土产生扩孔破坏。同时,为了验证本文数值仿真的正确性,通过建立与试验相同的壳体切缝结构参数数值仿真模型,与试验结果进行对比,发现相应数值仿真结果与试验结果具有相同的增加趋势,试验第 2、3、4 组钢筋混凝土靶通孔(均孔)尺寸结果均大于数值仿真结果,主要由于数值仿真计算时为节省计算资源没有计算出足够长崩坍形态,并且采用失效准则,单元因失效被删除,单元间的相互作用没有完全完成,崩坍现象缩短,而导致结果偏小,但每组试验结果与数值仿真结果之间的误差均在 5% 范围之内,说明数值仿真结果与试验结果吻合较好,本文数值仿真方法和结果得到相应试验结果的验证,通过数值仿真对壳体切缝结构参数进行正交优化所得到的结果具有可靠性。

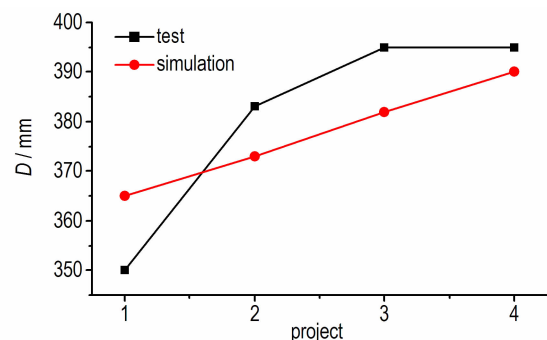


图 7 试验与仿真结果对比

Fig. 7 Results of test and simulation

4 结论

(1)应用正交优化法对壳体切缝结构参数:周向个数 N 、径向深度 H 和轴向长度 L 进行优化分析发现,壳体切缝个数为 8、深度为 5.5 mm、长度为 150 mm 时,钢筋混凝土靶的开孔尺寸最大为

409 mm, PELE 的横向效应效果最佳。同时, 通过定义横向效应贡献值衡量弹丸轴向动能转化为壳体膨胀对钢筋混凝土破坏损失的能量, 对 9 组仿真方案分析发现, 其最佳横向效应效果, 与正交优化最佳方案相符。

(2) 基于正交优化计算结果, 对极差值分析发现, L 是对钢筋混凝土靶破坏穿孔直径(均径) D 的主要影响因素, N 次之, H 最小。

(3) 在壳体切缝周向个数、轴向长度一定的条件, 对不同径向切缝深度进行了试验研究, 试验结果与相应壳体切缝结构参数数值仿真结果对比分析发现, 两者具有相同的增加趋势, 并且结果误差小于 5%, 吻合度较高, 验证了壳体切缝结构参数对 PELE 横向效应影响数值仿真研究方法的正确性。

参考文献:

- [1] 叶小军, 杜忠华, 姚方堂. 钢筋混凝土靶厚度对 PELE 侵彻效果的数值分析[J]. 含能材料, 2014, 22(5): 612-616.
YE Xiao-jun, DU Zhong-hua, YAO Fang-Tang. Numerical simulation on influence of reinforced concrete thickness on PELE penetration[J]. *Chinese Journal of Energetic Material (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(5): 612-616.
- [2] 宋成俊, 宋丽丽, 杜忠华, 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, DU Zhong-hua, et al. Interaction performance of PELE penetrating target plate with different material[J]. *Chinese Journal of Energetic Material (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(6): 705-709.
- [3] 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 Jian-sheng, ZHAO Guo-zhi, DU Zhong-hua, et al. The influence of impact velocity on the penetrator with enhanced lateral effect[J]. *Mechanics in Engineering*, 2007, 29(5): 12-16.
- [4] 张洪成, 尹建平, 王志军. 着靶角对 PELE 横向效应的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2012, 35(4): 46-49.
ZHANG Hong-cheng, YIN Jian-ping, WANG Zhi-jun. Influence of impact angle on the lateral efficiency of PELE[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2012, 35(4): 46-49.
- [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): 505-509.
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): 505-509.
- [6] Jimmy Verreault. Analytical and numerical description of the PELE fragmentation upon impact with thin target plates[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 10: 196-206.
- [7] 尹建平, 刘同鑫, 张洪成, 等. 结构参数对半预制破片 PELE 弹丸毁伤性能的影响[J]. 含能材料, 2014, 22(2): 226-229.
YIN Jian-ping, LIU Tong-xin, ZHANG Hong-cheng, et al. Influence of structure parameters on damage efficiency of half-premade fragmented PELE[J]. *Chinese Journal of Energetic Material (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(2): 226-229.
- [8] 叶小军. 横向效应弹贯穿钢筋混凝土目标机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
YE Xiao-jun. Functional mechanism of penetrator with enhanced lateral effect penetrating reinforced concrete[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [9] 陈奎, 李伟兵, 王晓鸣, 等. 双模战斗部结构正交优化设计[J]. 含能材料, 2013, 21(1): 80-84.
CHEN Kui, LI Wei-bing, WANG Xiao-ming, et al. Orthogonal design configuration parameters of dual mode warheads[J]. *Chinese Journal of Energetic Material (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(1): 80-84.
- [10] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 65-78.
CHEN Kui. Experimental designs and analyses[M]. Beijing, Tsinghua university press, 1996: 65-78.

Effect of Structure Parameters of the Jacket Breakage on Lateral Effect of PELE

XU Li-zhi, DU Zhong-hua, DU Cheng-xin, ZHANG Ming-cong, LI Bing

(School of Machinery Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To study the effect of structure parameters (the peripheral number N , radial depth H and axial length L of breakage) of the jacket breakage on the penetrated hole size for penetrating reinforced concrete target of penetrator with enhanced lateral effect (PELE), the orthogonal optimization analysis of PELE which has different structure parameters of the jacket breakage penetrating reinforced concrete targets was performed by means of numerical simulation method and the study of translating the axial kinetic energy of projectile as the lost energy which jacket expanding breaks reinforced concrete targets was carried out by defining lateral effect contribution value. Results show that the largest size of the reinforced concrete penetrated hole is 409 mm, the lateral effect contribution value is the largest, and the lateral effect of PELE is the best, when the structure parameters of the jacket breakage of $N=8$, $H=5.5$ mm, $L=150$ mm are taken. At the same time, the influencing degree of structure parameters of the jacket breakage on the lateral effect of PELE is that L is maximum, N is second, H is minimum.

Key words: reinforced concrete; penetrator with enhanced lateral effect (PELE); breakage; structure parameter

CLC number: TJ413

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.08.003