

文章编号: 1006-9941(2014)02-0226-04

结构参数对半预制破片 PELE 弹丸毁伤性能的影响

尹建平¹, 刘同鑫¹, 张洪成², 简秋丰³, 尤梅⁴

(1. 中北大学机电工程学院, 山西太原 030051; 2. 重庆红宇精密工业有限责任公司, 重庆 402760; 3. 上海空间电源研究所, 上海 200233; 4. 二炮驻上海地区军事代表室, 上海 200082)

摘要: 为了研究 V 型槽刻槽角度(θ)、刻槽长度(L)和刻槽深度(H)对半预制破片 PELE(HF-PELE)弹丸毁伤性能的影响, 运用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件数值模拟了 HF-PELE 弹丸侵彻 4340 均质钢靶过程。在分析 V 型槽刻槽角度对 HF-PELE 弹丸毁伤性能影响的基础上, 以 V 型槽 θ 、 L 、 H 为变量, 以破片径向速度为目标函数值, 应用正交优化获得了 HF-PELE 弹丸 V 型槽结构参数的最优组合: $\theta=40^\circ$ 、 $L=8\text{ mm}$ 、 $H=3.5\text{ mm}$, 此时, 弹丸的破片最大径向速度最高, 为 $161.82\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。结果表明: 在 HF-PELE 弹丸结构参数中, H 对破片的最大径向速度影响最大, θ 次之, L 最小。

关键词: 爆炸力学; 半预制破片 PELE(HF-PELE)弹丸; V 型槽; 毁伤性能; 最大径向速度

中图分类号: TJ413

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.02.020

1 引言

横向效应增强型弹丸 (PELE, Penetrator with Enhanced Lateral Efficiency), 是一种基于新型毁伤机理的无引信、无装药的新概念弹药, 它由高密度外层壳体和壳体内低密度惰性填充材料组成, 具有良好的穿甲性能^[1]。目前, PELE 的研究主要集中在针对填充材料^[2-3]、弹靶参数^[4-5]、着靶参数^[6]对其横向效应发挥的影响分析方面, 而对通过结构改进提高后效毁伤性能研究的较少。

为了进一步提高 PELE 弹丸的后效毁伤性能, 文献[7]提出了半预制破片 PELE 弹丸概念 (HF-PELE 弹丸), 即通过在弹丸壳体表面设计 V 型槽, 使 PELE 弹丸在侵彻过程中径向膨胀更剧烈, 横向效应更明显, 壳体更易碎裂形成大量具有较高轴向剩余速度和径向飞散速度的破片, 从而大大提高 PELE 弹丸后效毁伤性能。本研究应用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对影响 HF-PELE 弹丸毁伤性能的 V 型槽刻槽角度、刻槽长度、刻槽深度进行了正交优化设计, 获得了结构参数的影响规律和最优结构设计参数, 可为 HF-PELE 弹丸的设计提供参考。

收稿日期: 2013-05-22; 修回日期: 2013-10-30

基金项目: 国家自然科学基金资助(51175481), 山西省高等学校科技创新项目(2013131)

作者简介: 尹建平(1975-), 男, 博士, 教授, 主要从事弹药高效毁伤技术研究。e-mail: yjp123@nuc.edu.cn

2 计算模型

研究设计的 HF-PELE 弹丸结构简图如图 1 所示。

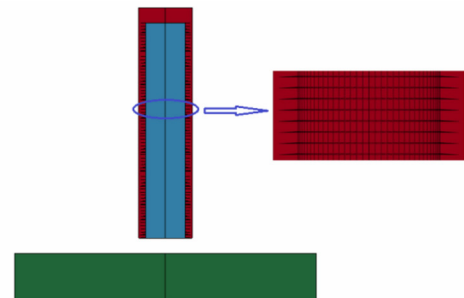


图 1 HF-PELE 弹丸侵彻钢靶模型和壳体 V 型槽示意图

Fig. 1 Structure of HF-PELE and V-shaped cavity

数值模拟时, HF-PELE 弹丸壳体选用高密度 4340 钢, 尺寸为 $\Phi 35\text{ mm}\times 150\text{ mm}$, 底厚为 10 mm , 采用 JOHNSON_COOK 材料模型, V 型槽刻槽长度为 10 mm , 刻槽深度为 3.5 mm ; 弹芯选用低密度尼龙材料, 尺寸 $\Phi 26\text{ mm}\times 140\text{ mm}$, 采用 PLASTIC_KINEMATIC 材料模型; 靶板为 4340 均质钢靶, 尺寸为 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 30\text{ mm}$, 采用 JOHNSON_COOK 材料模型; 弹丸初速为 $1200\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 具体材料参数见表 1^[7]。

表 1 HF-PELE 弹丸壳体、弹芯及靶板材料参数

Table 1 Parameters of half-premade fragmented PELE

materials	$\rho/g \cdot \text{cm}^{-3}$	E/GPa	μ
jacket	7.85	210	0.22
filling	1.14	2.83	0.40
target	7.85	210	0.22

Note: E is the modulus of elasticity, μ is the poisson ratio.

2 HF-PELE 弹丸毁伤性能分析

为分析 V 型槽刻槽角度对 HF-PELE 弹丸毁伤性能的影响,利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件分析了不同 V 型槽刻槽角度(2°、4°和 8°)下, HF-PELE 弹丸侵彻钢靶的毁伤性能,不同角度 V 型槽结构示意图如图 2 所示。

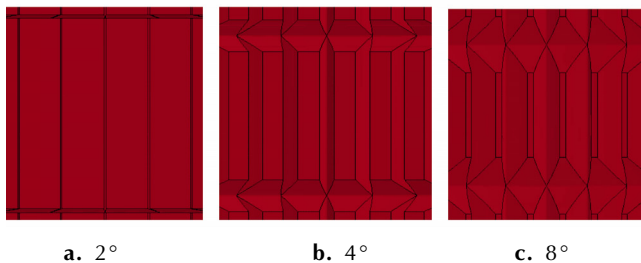


图 2 不同刻槽角度的 V 型槽

Fig. 2 V-shaped cavities with different angles

图 3 为采用不同 V 型槽刻槽角度时, HF-PELE 弹丸侵彻钢靶形成的破片径向速度 v_r 随时间 t 变化的规律。

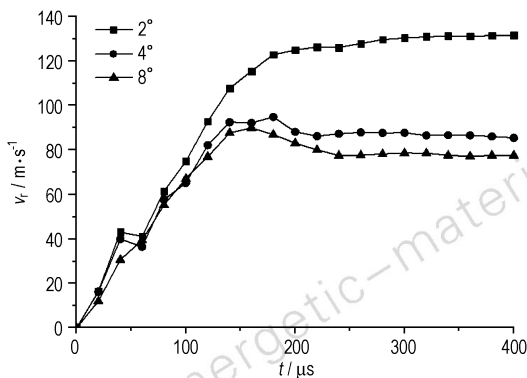


图 3 不同 V 型槽角度时破片径向速度随时间变化规律

Fig. 3 Curves of radial velocity for fragment vs time with different V-shaped cavity angles

由图 3 可知,随着 V 型槽刻槽角度的增大, HF-PELE 弹丸侵彻钢靶形成的破片径向速度逐渐降低,当 V 型槽刻槽角度为 2° 时,破片径向速度最大。

随着时间的增大,不同 V 型槽刻槽角度产生的破片,其径向速度均先增大后减小,最后趋于稳定。当时间小于 150 μs 时,不同 V 型槽刻槽角度产生的破片径向速度相差较小;当时间大于 150 μs 时,随着时间的增加,不同 V 型槽刻槽角度产生的破片,其径向速度先减小,后在 400 μs 左右逐渐趋于稳定。另外,当 HF-PELE 弹丸的 V 型槽刻槽角度设计为 4° 和 8° 时,壳体碎裂程度更完全,因此其破片径向速度先于 V 型槽角度为 2° 时达到最大;但随着碎裂过程的继续进行,破片的径向动能逐渐消耗,致其最大破片径向速度有所降低,最终趋于稳定。

图 4 为破片径向速度趋于稳定时,即 400 μs 时,不同 V 型槽角度时 HF-PELE 弹丸侵彻钢靶形成的破片。

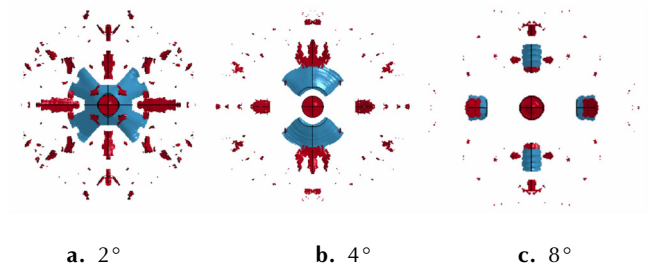


图 4 不同 V 型槽角度时 HF-PELE 弹丸侵彻钢靶所形成破片
Fig. 4 Fragment by HF-PELE penetrating steel target with different V-shaped cavity angles

由图 4 可以看出,不同 V 型槽刻槽角度的 HF-PELE 弹丸壳体碎裂程度、产生破片数量及大小存在较大差别。当刻槽角度为 2° 时,弹丸壳体碎裂面积大,碎裂产生的破片数量多,破片质量较大,散布均匀;随着 V 型槽角度的增加,壳体碎裂程度降低,形成的破片数量逐渐减少,破片质量降低,弹丸后效毁伤性能减弱。

3 PELE 毁伤性能影响因素正交优化设计

正交优化设计是在传统专业设计的基础上发展起来的,以统计的方法定量分析各种参数组合与目标特性之间的关系,从而求出最佳参数组合的一种方法^[8-9]。本研究应用正交优化设计方法对影响 HF-PELE 弹丸毁伤性能的因素: V 型槽刻槽角度 θ 、刻槽长度 L 、刻槽深度 H 进行分析, V 型槽角度取 2°、4° 和 8°, 刻槽长度取 6, 8, 10 mm, 刻槽深度取 1.5, 2.5, 3.5 mm, 正交优化设计因素水平表如表 2 所示。

对于 HF-PELE 弹丸毁伤性能,破片的最大径向速度能较好地反映破片的速度均值和速度趋势,因此将破片最大径向速度 $v_{r,max}$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 作为优化目标。由

于该优化为三因素三水平设计, 选用 $L_9(3^4)$ 正交表, 根据 HF-PELE 弹丸毁伤性能影响因素的具体参数, 设计了三因素三水平的正交设计仿真方案, 各因素水平组合如表 3 所示, 数值仿真结果如图 5 所示。

表 2 V 型槽正交设计因素水平表

Table 2 Factors and levels of orthogonal design of V-shaped cavities

No.	A $\theta / (^\circ)$	B L /mm	C H/mm
1	2	6	1.5
2	4	8	2.5
3	8	10	3.5

表 3 正交设计仿真方案和结果

Table 3 Orthogonal design simulation scheme and results

No.	A	B	C	$V_{r,max}$
1	1	1	1	94.47
2	1	2	2	112.93
3	1	3	3	119.40
4	2	1	2	116.05
5	2	2	3	161.82
6	2	3	1	111.11
7	3	1	3	99.39
8	3	2	1	93.80
9	3	3	2	122.21
K_1	108.93	103.30	99.79	
K_2	129.66	122.85	117.06	
K_3	105.13	117.58	126.87	
k_1	36.31	34.43	33.26	
k_2	43.22	40.95	39.02	
k_3	35.04	39.19	42.29	
R	8.18	6.52	9.03	

从表 3 可以看出, 在 9 个仿真方案中, 第 5 号方案得到的破片最大径向速度最大。初步认为, $A_2B_2C_3$ 为较优组合。

再通过对 k_1 、 k_2 、 k_3 分析, 确定各因素的优水平, 确定最优组合。由表 3 分析可知, 对于因素 1 (V 型槽刻槽角度): $k_{21} > k_{11} > k_{31}$, 因此 V 型槽刻槽角度取 4° 为最佳水平; 对于因素 2 (V 型槽刻槽长度): $k_{22} > k_{32} > k_{12}$, 因此刻槽长度取 8 mm 为最佳水平; 对于因素 3 (V 型槽刻槽深度): $k_{33} > k_{23} > k_{13}$, 因此刻槽深度取 3.5 mm 为最佳水平。

最后根据极差 (R) 大小, 判断因素的主次影响顺序。由表 3 可知, $R_C > R_A > R_B$, 因此, V 型槽刻槽深度对 HF-PELE 弹丸破片径向速度影响程度最大, V 型槽刻槽角度次之, V 型槽刻槽长度的影响最小。

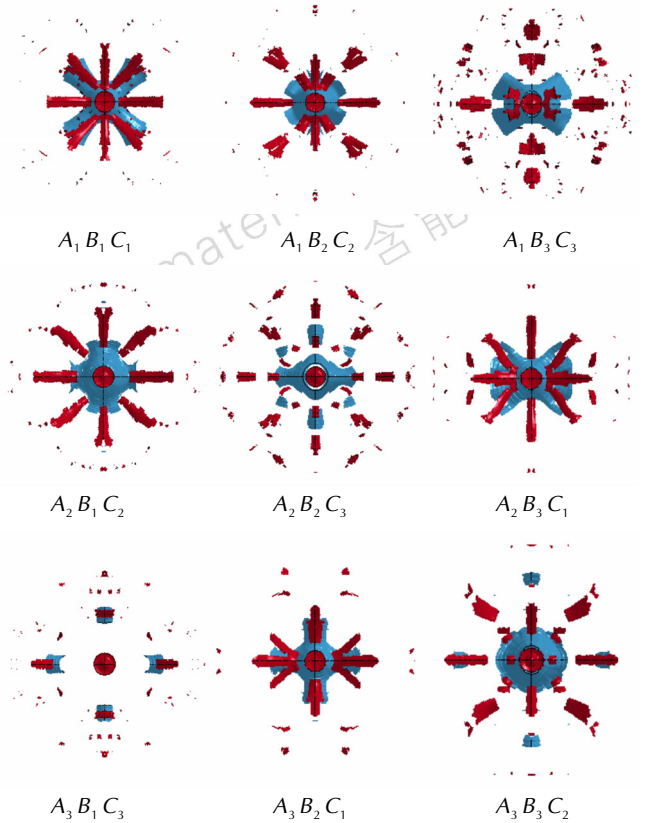


图 5 不同正交优化方案数值仿真结果

Fig. 5 Results of different orthogonal scheme

因此, 综合分析, 当 HF-PELE 弹丸结构参数取最佳组合方案 $A_2B_2C_3$ 时, 即 V 型槽刻槽角度为 4° 、刻槽长度为 8 mm、槽深度为 3.5 mm 时, HF-PELE 弹丸破片径向速度值最大, 正好为第五次仿真结果。图 6 所示为 HF-PELE 弹丸不同正交优化方案下数值仿真获得的破片径向速度变化规律。由此可以看出, HF-PELE 弹丸 V 型刻槽参数不同, 其对产生的破片径向速度影响程度也不尽相同; 但破片径向速度随时间的变化规律均呈现先增大后减小、最后趋于稳定的规律。

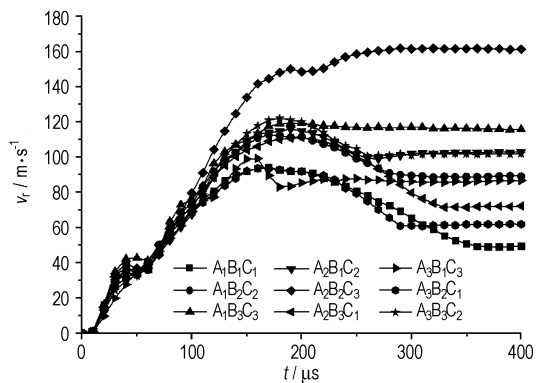


图 6 不同正交优化方案的破片径向速度

Fig. 6 The radial velocity of different orthogonal scheme

4 结 论

运用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对影响 HF-PELE 弹丸毁伤性能的 V 型槽角度进行了数值模拟研究,并对影响 HF-PELE 弹丸毁伤性能的主要因素 V 型槽角度、刻槽长度及刻槽深度进行了正交优化分析,结果表明:

(1) 对于不同 V 型槽刻槽角度,当 V 型槽刻槽角度为 2° 时,弹丸壳体碎裂面积最大,碎裂产生的破片数量多,破片质量相对较大,破片径向速度最大, HF-PELE 弹丸毁伤性能最佳;

(2) 对于本研究设计的 HF-PELE 弹丸,当 V 型槽刻槽角度为 4° 、刻槽长度为 8 mm、刻槽深度为 3.5 mm 时,弹丸的破片最大径向速度最大 ($162.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),可对靶后造成更大面积的毁伤;

(3) 在结构参数对 HF-PELE 弹丸毁伤性能影响的正交优化分析中,V 型槽刻槽深度对弹丸破片的最大径向速度影响最大,V 型槽刻槽角度次之,刻槽长度影响最小。

参考文献:

- [1] 朱建生. 横向效应增强型侵彻体作用机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
ZHU Jian-sheng. Function mechanism study of penetrator with enhanced lateral efficiency[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [2] Paulus G, Schirm V. Impact behavior of PELE projectiles perfora-

ting thin target plates[C] // International Journal of Impact Engineering 33, 2006: 566-579.

- [3] Paulus G, Chanteret P. Y, Wollmann E. PELE: A new penetrator-concept for the generation of lateral effects[C] // 21th International Symposium on Ballistics, Adelaide, Australia, 19 - 23 April, 2004: 104-110.
- [4] Stephan Kerk. PELE - The Future Ammunition Concept[C] // 21th International Symposium on Ballistics, Adelaide, Australia, 2004: 1134-1144.
- [5] Bless S, Pedersen B. PELE at hypervelocity[C] // 26th International Symposium on Ballistic. Miami, Florida, USA, 12 - 16 September, 2011: 209-211.
- [6] 朱建生, 赵国志, 杜忠华, 等. 着靶速度对 PELE 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 efficiency[J]. *Mechanics in Engineering*, 2007, 29(5): 12-16.
- [7] 张洪成, 尹建平, 王志军. 半预制破片 PELE 弹丸性能的数值分析[J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36(1): 104-107.
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, 36(1): 104-107.
- [8] 尹建平, 付璐, 王志军. 网栅切割式多爆炸成型弹丸战斗部正交优化设计[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(2): 69-72.
YIN Jian-ping, FU Lu, WANG Zhi-jun. Orthogonal optimization design of case parameters for intelligent mine[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2012, 32(2): 69-72.
- [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 warhead[J]. *Chinese Journal of Energetic Material(Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(1): 80-84.

Influence of Structure Parameters on Damage Efficiency of Half-premade Fragmented PELE

YIN Jian-ping¹, LIU Tong-xin¹, ZHANG Hong-cheng², JIAN Qiu-feng³, YOU Mei⁴

(1. School of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Chongqing Hongyu Precision Industry Co. Ltd, Chongqing 402760, China; 3. Shanghai Institute of Space-Power Source, Shanghai 200233, China; 4. The Second Artillery Military Resesentative Room in Shanghai, 200082, China)

Abstract: In order to study the influence of V-shaped cavity degree(θ), length(L) and depth(H) on the damage efficiency of half-premade fragmented Penetrator with Enhanced Lateral Efficiency (HF-PELE), numerical simulations of HF-PELE penetrating 4340 steel were carried out by ANSYS/LS-DYNA. Based on the influence of V-shaped cavity degree on damage efficiency of HF-PELE, the optimized structure parameters were acquired by orthogonal test with θ , L and H as variables and maximum radial velocity ($v_{r,max}$) as the objective function: $\theta=40^\circ$, $L=8\text{mm}$, $H=3.5\text{mm}$ and $v_{r,max}=161.82 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Results indicate that the V-shaped cavity depth makes a big difference on the damage efficiency of PELE, the V-shaped cavity degree follows behind, and the V-shaped cavity length's is minimum.

Key words: explosive mechanics; half-premade fragmented penetrator with enhanced lateral efficiency (HF-PELE); V-shaped cavity; damage efficiency; maximum radial velocity

CLC number: TJ413

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.02.020