

活性材料增强 PELE 杀伤效应

孟燕刚, 金学科, 陆盼盼, 王海福

北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081

摘要 采用数值模拟与实验相结合的方法,研究了活性材料增强侵彻膨胀弹(PELE)对金属靶板的作用效应,获得了活性材料增强 PELE 长径比、靶厚、着速对作用效应的影响。结果表明,改变长径比,对活性材料增强 PELE 的横向增强效应以及爆燃效应影响不大,但长径比过小,产生的破片数量和活性材料装填量较少,会导致毁伤效果降低;在 800 m/s 着速下,活性材料增强 PELE 对 10~15 mm 厚度范围内的钢靶板毁伤效应较好,更适合应用于拦截高速来袭目标。

关键词 活性材料;侵彻膨胀弹;终点效应;数值模拟

中图分类号 TJ410.33

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.09.004

Lethality Effects of Enhanced PELE of Reactive Materials

MENG Yangang, JIN Xueke, LU Panpan, WANG Haifu

State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract The numerical simulation and the experiment of the effects of the enhanced PELE of reactive materials on a metal plate are carried out to investigate the influence of the ratio of length to diameter, the thickness of the plate and the impact velocity on the terminal effects. It is shown that the influence of the ratio of length to diameter on the lateral efficiency and the deflagration efficiency of the enhanced PELE of reactive materials is limited, but the damage effect will decline if the ratio of length to diameter is too small. With the speed of 800 m/s, the damage effect of the enhanced PELE of reactive materials on the plate in a range of 10–15 mm is better; The enhanced PELE of reactive materials performs better for intercepting a high speed target.

Keywords reactive materials; penetrator with enhance lateral efficiency; terminal effects; numerical simulation

侵彻膨胀弹 (penetrator with enhance lateral efficiency, PELE) 是近十几年提出的一种新型弹药,其显著特点是无引信和装药,仅依靠弹体和目标碰撞过程的物理作用产生穿甲和破片杀伤双重终点效应。PELE 主要由钢、钨等高密度材料壳体和聚乙烯、铝等低密度材料内芯组成。在弹靶作用过程中,高密度材料壳体实现对靶板的穿透作用,而内芯材料被挤压在壳体与靶板之间,造成内部压力急剧上升,穿透靶板瞬间,靶板约束力突然卸载,壳体及芯材料应力释放,壳体碎裂形成大量向外迸射的破片,使 PELE 兼有穿甲和破片杀伤功能^[1-3]。活性材料增强 PELE 的低密度内芯材料为活性材料,活性材料是一种通过在高聚合物中填充金属、合金、金属间化合物等含能粉体,再经特殊制备而成的复合式固体含能材

料。在活性材料增强 PELE 撞击目标时,活性材料在强冲击载荷下被激发发生爆燃反应,释放大量化学能进一步毁伤目标^[4-9],活性材料增强 PELE 兼有穿甲、破片杀伤和爆燃多重终点效应。近年来国内外文献报道了很多 PELE 研究结果,但尚未见到活性材料作为内芯材料应用于 PELE 的相关研究。

针对不同需求,在合适的弹靶匹配条件下,才能使活性材料增强 PELE 终点效应得到充分发挥。本研究在 AUTODYN-3D 平台下^[10],对活性材料增强 PELE 对金属靶板作用过程进行数值模拟,分析长径比、靶板厚度、着靶速度因素对活性材料增强 PELE 终点效应的影响特性,在此基础上进行炮射试验,验证活性材料增强 PELE 终点效应以及数值模拟的有效性。

收稿日期:2013-09-13;修回日期:2014-01-14

作者简介:孟燕刚,博士研究生,研究方向为高效毁伤弹药技术,电子信箱:397601969@qq.com;王海福(通信作者),教授,研究方向为高效毁伤弹药技术,电子信箱:wanghf@bit.edu.cn

引用格式:孟燕刚,金学科,陆盼盼,等.活性材料增强 PELE 杀伤效应[J].科技导报,2014,32(9):31-35.

1 数值方法及模型

采用 AUTODYN 程序无网格光滑粒子流体动力学 (smoothed particle hydrodynamics, SPH) 方法对活性材料增强 PELE 侵彻均质装甲 (rolled homogeneous armour, RHA) 靶板的力学行为进行数值模拟。SPH 计算域定义及观察点设置如图 1 所示, 活性材料增强 PELE 蓝色壳体为 30 铬锰硅合金钢, 外径 25 mm, 前、后两端厚度均为 4 mm; 红色内核为活性材料, 外径为 17 mm。数值模拟中对活性材料作惰性处理, 以所承载冲击压力为起爆判据。活性材料增强 PELE 和靶板的材料模型均采用 Johnson-Cook 强度模型和 Shock 状态方程, PELE 壳体、PELE 芯和靶板的材料类型及参数见表 1。

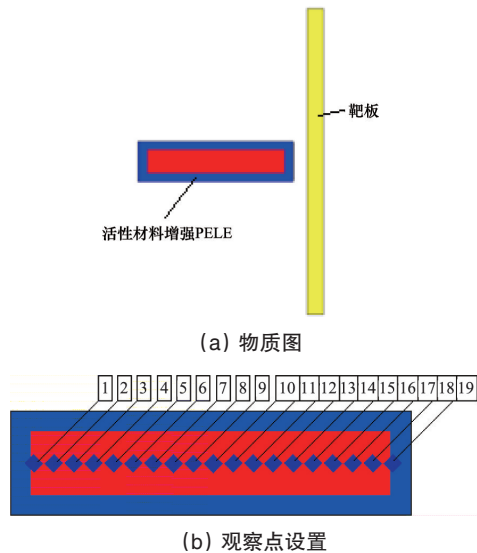


图 1 计算域定义及观察点设置

Fig. 1 Computational model and gauge point locations

表 1 AUTODYN 数值模拟输入参数

Table 1 Input data for AUTODYN simulation

名称	材料	密度/(g·cm ⁻³)	剪切模量/ GPa	屈服强度/ GPa
壳体	30 铬锰硅 合金钢	7.80	80.80	0.88
芯	活性材料	2.83	0.67	0.03
靶板	均质装甲钢	7.86	64.00	1.50

2 数值模拟结果与分析

2.1 长径比对终点效应影响

针对不同长径比 (L/D) 活性材料增强 PELE, 以 1500 m/s 着速侵彻 6 mm RHA 靶板进行数值模拟。PELE 长径比在 1.2~4.0 之间间隔 0.4 取值。在 0.084 ms 时刻活性材料增强 PELE 状态如图 2 所示。由图 2 可以看出, 长径比在 1.2~1.6 情况下, 活性材料增强 PELE 穿透靶板后几乎全部壳体发生膨胀碎裂, 长径比在 2.0~4.0 情况下, 仅壳体前端发生明显膨胀碎裂, 长度稳定在 37 mm 左右。

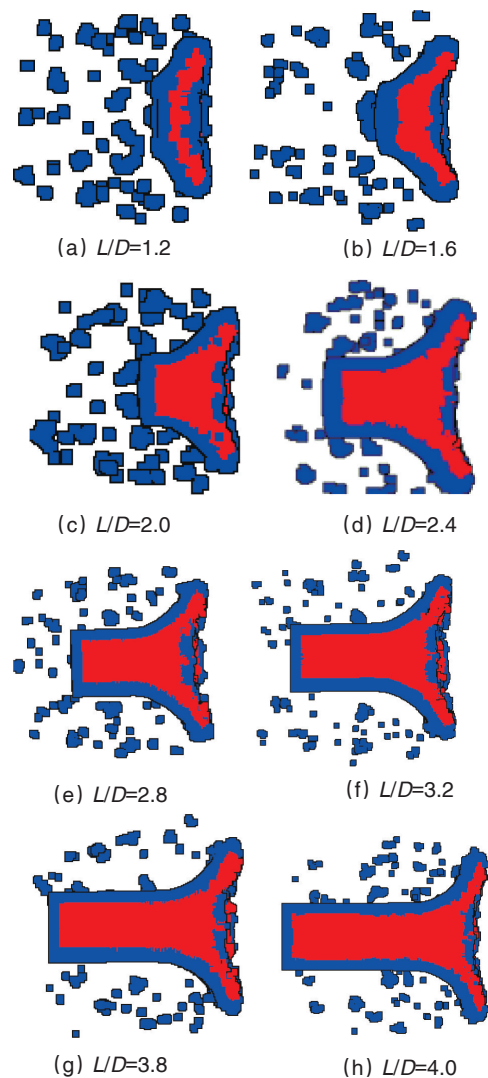


图 2 0.084 ms 时刻不同长径比下活性材料增强 PELE 状态

Fig. 2 Enhanced PELE of reactive materials with different ratios of length to diameter at 0.084 ms

不同长径比条件下壳体膨胀最大直径如图 3 所示。从图 3 可以看出, 在长径比 1.2~4.0 情况下, 壳体膨胀最大直径稳定在 64 mm 左右。

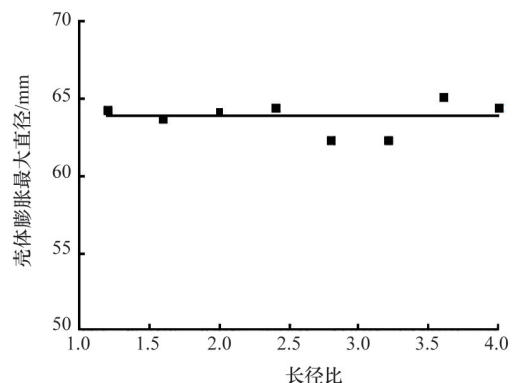


图 3 0.084 ms 时刻不同长径比条件下壳体膨胀最大直径

Fig. 3 Expanded maximum diameter of shell with different ratios of length to diameter at 0.084 ms

不同长径比条件下活性芯内相同位置观察点应力峰值如图4所示。从图4可以看出,不同长径比条件下,相同位置应力峰值相差不大。随着冲击波在活性材料中传播距离增加,应力峰值急剧下降,在小于活性材料临界起爆阈值后,下降趋于平缓。

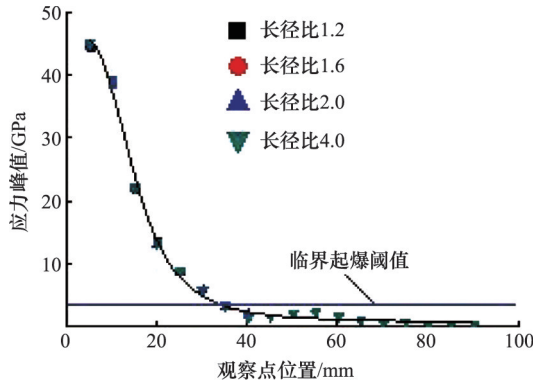


图4 不同长径比下活性芯内观察点应力峰值
Fig. 4 Peak stress at gauge points for different ratios of length to diameter

2.2 靶厚对终点效应影响

对活性材料增强 PELE 对 6、8、10、15、20 mm RHA 装甲钢板作用过程进行了数值模拟,弹体长 100 mm,着速为 800 m/s。在 6 mm 靶厚条件下,只有靠近头部的壳体发生膨胀,大部分壳体没有明显变形;随着靶厚增加,活性材料增强 PELE 壳体膨胀碎裂部分长度及膨胀幅度均显著增加。在 20 mm 靶厚条件下,活性材料增强 PELE 未能穿透靶板。0.085 ms 时刻不同靶厚条件下活性材料增强 PELE 壳体碎裂长度及膨胀最大直径列于表 2。

表 2 0.085 ms 时刻不同靶厚下壳体碎裂长度及膨胀最大直径

Table 2 The broken length and the expanded maximum diameter of shell of different thicknesses at 0.085 ms

靶板厚度/ mm	碎裂长度/ mm	膨胀最大直径/ mm
6	16	35.76
8	20	39.40
10	24	43.22
15	32	52.36
20	未穿透	未穿透

不同靶厚条件下活性芯内相同位置观察点应力峰值如图5所示。可以看出,不同靶厚条件下,相同位置观察点应力峰值相差不大;前部约 23 mm 左右活性材料的满足爆燃条件,由于活性材料只能伴随壳体而碎裂,只有充分碎裂的部分才能够完全爆燃,结合表 2 可知,在靶厚为 10~15 mm 条件下,满足爆燃条件的活性材料能够完全爆燃,效果较好。

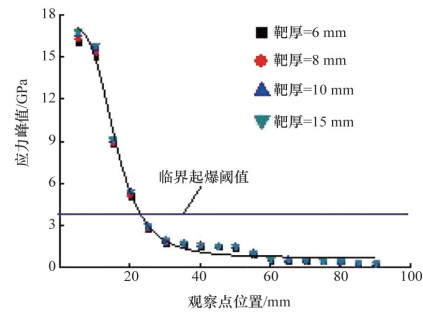


图5 不同靶厚下活性芯内观察点应力峰值
Fig. 5 Peak stress at gauge points for plates of different thicknesses

2.3 着速对终点效应影响

射程为 3100 km 的弹道导弹,最大再入速度为 4.75 km/s,在拦截弹道导弹时,活性材料增强 PELE 与弹道导弹相对速度可以达到 5 km/s。射程更远的弹道导弹,最大再入速度更高,本研究仅对活性材料增强 PELE 以 800~5000 m/s 速度正侵彻 10 mm 厚 RHA 靶板进行数值模拟,弹体长 100 mm。活性材料增强 PELE 在 0.085 ms 时刻的状态如图 6 所示。从图 6 可以看出,活性材料增强 PELE 着速对其终点效应有显著影响。着速为 800 m/s 情况下,活性材料增强 PELE 壳体只在前端发生膨胀碎裂,随着着速增大,活性材料增强 PELE 横向效应愈加显著,壳体碎裂层度依次增加。着速为 5000 m/s 情况下,活性材料增强 PELE 壳体几乎全部碎裂。

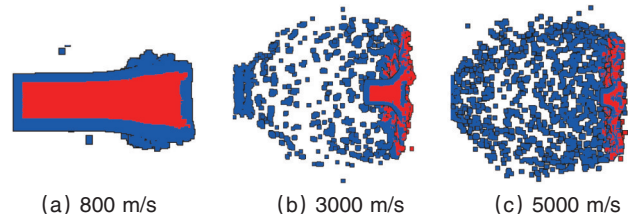


图6 0.085 ms 时刻不同着速下活性材料增强 PELE 状态
Fig. 6 Enhanced PELE of reactive materials for different impact velocities at 0.085 ms

0.85 ms 时刻不同着速下活性材料增强 PELE 壳体膨胀最大直径如图 7 所示。可以看出,活性材料增强 PELE 壳体膨胀最大直径随着速的增加呈线性增加。

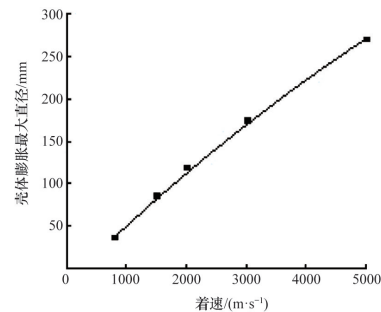


图7 0.085 ms 时刻不同着速条件下壳体膨胀最大直径
Fig.7 Expanded maximum diameter of shell for different impact velocities at 0.085 ms

不同着速下活性材料内,观察点应力峰值如图8所示。可以看出,800 m/s着速条件下,仅PELE前部23 mm活性材料能够爆燃,随着着速增加,活性材料能够爆燃的部分逐渐加长,在5000 m/s着速下,活性材料能够全部爆燃。因此活性材料增强PELE更加适合应用于拦截速度较高的来袭目标。

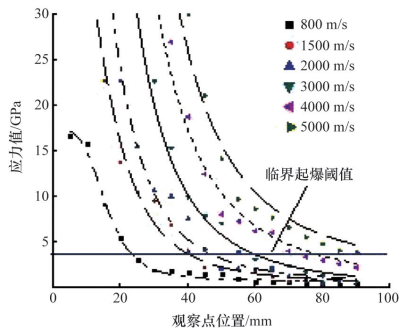


图8 不同着速下观察点应力峰值

Fig. 8 Peak stress at gauge points for different impact velocities

3 试验验证

针对上述数值模拟结果,进行活性材料增强PELE对多层间隔靶板作用的炮射试验。试验采用25 mm线膛炮发射活性材料增强PELE,PELE平均质量为230 g。在距离炮口约80 m处放置间隔靶,首层主靶厚分别为6、8、10、15和20 mm均质装甲钢,其后平行放置3层3 mm厚LY12CZ后效靶板。各靶间隔300 mm。采用天幕靶测量活性材料增强PELE着靶速度,高速摄影仪观测PELE穿靶过程。

试验结果列于表3,可以看出,活性材料均能发生爆燃反应,从后效靶毁伤状况可以看出,在6~8 mm靶厚条件下,后效靶穿孔数量较少,且散布面积较小。在10~15 mm靶厚条件下,后效靶穿孔数量较多,且散布面积较大,毁伤效果较好。在20 mm靶厚条件下,活性材料增强PELE未能穿透靶板,活性材料仅在靶前发生爆炸,毁伤增强效应未能得到有效发挥。实验结果与数值模拟基本吻合,验证了数值模拟预测的有效性。

表3 试验结果

Table 3 Experimental results

靶板厚度/mm	着靶速度/(m·s ⁻¹)	现象	后效靶毁伤状况:孔数,散布面积(mm×mm)
6	789.5	活性材料靶后爆燃	第1层:1孔,58×58
			第2层:2孔,87×57
			第3层:2孔,75×53
8	788.4	活性材料靶后爆燃	第1层:2孔,260×60
			第2层:2孔,380×85
			第3层:1孔,140×60
10	790.0	活性材料靶后爆燃	第1层:7孔,300×230
			第2层:10孔,500×430
			第3层:11孔,520×230
15	793.5	活性材料靶后爆燃	第1层:8孔,350×280
			第2层:16孔,540×530
			第3层:12孔,660×580
20	792.0	活性材料靶前爆燃	未穿透

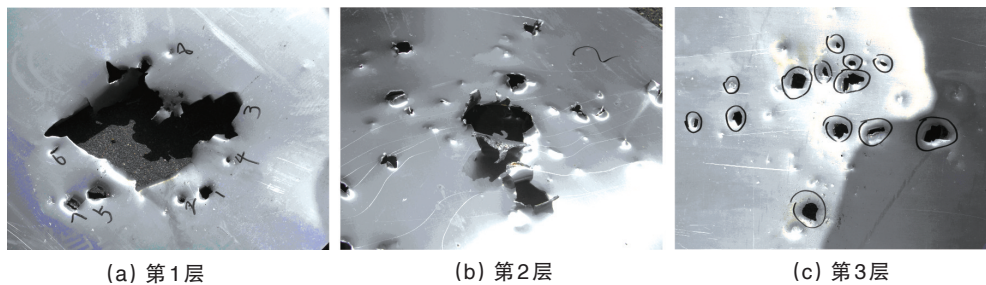
活性材料增强PELE以793.5 m/s速度穿过15 mm前置靶板后,典型时刻的高速摄影照片如图9所示。从图9可以看出,活性材料增强PELE穿过前置靶板后发出十分耀眼的火光,这说明活性材料已经被激活发生剧烈的爆燃反应。

活性材料增强PELE穿透15 mm厚前置靶板后形成的杀伤破片对后效靶板的穿甲效果如图10所示。从图10可以看出,杀伤破片在3层后效靶都形成大量穿孔,这说明杀伤破片具有强烈杀伤作用。



图9 高速摄影照片

Fig. 9 High-speed photograph



(a) 第1层

(b) 第2层

(c) 第3层

图10 后效靶毁伤增强效应典型实验照片

Fig.10 Typical photos of enhanced lethality against witness plates

4 结论

采用AUTODYN软件平台,对活性材料增强PELE侵彻均质装甲钢靶板进行了数值模拟,在此基础上进行了炮射试验。

1) 在给定条件下,长径比对活性材料增强PELE的横向效应和活性材料的爆燃情况影响不大,当长径比过小时,虽然贯穿靶板后活性材料增强PELE壳体几乎完全碎裂,活性材料完全爆燃,因为壳体质量本身较小,形成的杀伤破片和活性材料装填量较少,会导致毁伤效应降低。

2) 随着靶板厚度的增加,活性材料增强PELE壳体碎裂长度与膨胀最大直径均显著增加,但靶厚增加到一定程度,活性材料增强PELE将不能穿透靶板。靶板厚度对活性材料的激发情况影响较小,但靶板过薄,壳体碎裂长度较小,部分受激发的活性材料不能充分碎裂发生爆燃。在800 m/s着速下,活性材料增强PELE对10~15 mm厚靶板毁伤效果较好。

3) 着靶速度对活性材料增强PELE的毁伤效应影响显著,着速越大,PELE穿透靶板后形成的自然破片越多,活性材料爆燃反应越完全。活性材料增强PELE更加适合应用于拦截速度较高的来袭目标。

4) 通过炮射试验结果表明活性材料增强PELE具有穿甲、破片杀伤、爆燃多重终点毁伤效应。不同靶厚条件下实验结果与数值模拟结果基本吻合,验证了数值模拟预测的有效性。

参考文献(References)

[1] Paulus G, Chanteret P Y. PELE: a new penetrator concept for generating lateral effects[C]//Proceedings of 21st International Symposium on Ballistics. Adelaide, Australia: International Ballistics

Committee, 2004: 104-110.

[2] Paulus G, Schirm V. Impact behavior of PELE projectiles perforating thin target plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 33(1): 566-579.

[3] Kesberg G, Schirm V, Kerk S. PELE—the future ammunition concept [C]//Proceedings of 21st International Symposium on Ballistics. Adelaide, Australia: International Ballistics Committee, 2004: 1134-1144.

[4] Ames R G. Energy release characteristics of impact-initiated energetic materials[C]//Proceedings of Materials Research Society Symposium. Boston, USA: Materials Research Society, 2006: 78-83.

[5] Raftenberg M N, Mock W, Kirby G C. Modeling the impact deformation of rods of a pressed PTFE/Al composite mixture[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(12): 1735-1744.

[6] 王海福, 刘宗伟, 俞为民, 等. 活性破片能量输出特性实验研究[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(8): 663-666.

Wang Haifu, Liu Zongwei, Yu Weimin, et al. Experimental investigation of energy release characteristics of reactive fragments[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(8): 663-666.

[7] Wang H F, Zheng Y F, Yu Q B, et al. Impact-induced initiation and energy release behavior of reactive materials[J]. Journal of Applied Physics, 110(7): 074904.

[8] Wang H F, Zheng Y F, Yu Q B, et al. Initiation behavior of covered explosive subjected to reactive fragment[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2012, 21(2): 143-149.

[9] 王海福, 郑元枫, 余庆波, 等. 活性破片引燃航空煤油实验研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(9): 1148-1152.

Wang Haifu, Zheng Yuanfeng, Yu Qingbo, et al. Experimental research on igniting the aviation kerosene by reactive fragment[J]. Acta Armamentarh, 2012, 33(9): 1148-1152.

[10] Century Dynamics Inc. AUTODYN theory manual[M/OL]. [2013-05-31]. <http://www.century-dynamics.com>.

(编辑 田恬)

《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映中国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域中国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。