

# 轻金属填充材料 PELE 的数值仿真研究

李干<sup>1</sup>, 王志军<sup>1</sup>, 李运禄<sup>1</sup>, 魏波<sup>2</sup>

(1. 中北大学 机电工程学院, 太原 030051; 2. 海军大连舰艇学院, 大连 116018)

**摘要:** 为了研究铝镁等轻金属作为弹芯对横向效应增强型侵彻体(PELE)的影响, 采用显式非线性动力分析软件 AUTODYN 对内装不同轻金属材料弹丸进行侵彻靶板数值模拟, 获得了不同弹体对靶板的毁伤效应。结果表明: 填充材料硬度越低, PELE 壳体残留越少, 锂镁合金适宜作为 PELE 的填充材料。

**关键词:** 横向效应增强型侵彻体; 填充材料; 轻金属; 数值模拟

**本文引用格式:** 李干, 王志军, 李运禄, 等. 轻金属填充材料 PELE 的数值仿真研究[J]. 兵器装备工程学报, 2016(9): 54-57.

**Citation format:** LI Gan, WANG Zhi-jun, LI Yun-lu, et al. Numerical Calculation of Light Metal Filling Material PELE[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016(9): 54-57.

中图分类号: TJ411

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2016)09-0054-04

## Numerical Calculation of Light Metal Filling Material PELE

LI Gan<sup>1</sup>, WANG Zhi-jun<sup>1</sup>, LI Yun-lu<sup>1</sup>, WEI Bo<sup>2</sup>

(1. College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;  
2. Dalian Naval Academy of the PLA, Dalian 116018, China)

**Abstract:** In order to analyze the influence of the light metal filling material on the Penetrator with Enhanced Lateral Efficiency (PELE), AUTODYN explicit nonlinear dynamic analysis software was used to simulate the penetration of PELE filled with different light metal materials against target plate, and the damage effects of different projectile on target plates were obtained. The simulation results shows that the lower hardness of filling material is, the short the length of residual jacket is. Mg-Li alloy is suitable for filling material of PELE.

**Key words:** penetrator with enhanced lateral efficiency; filling material; light metal; numerical calculation

PELE(Penetrator with Enhanced Lateral Effect)是基于物理效应的新型弹药<sup>[1-2]</sup>,关于弹芯材料的研究是近年来PELE比较热门的方向,其填充物主要有聚乙烯、特氟龙等为代表的塑料类、金属铝及其他轻金属等为代表的金属类、橡胶类及活性材料。朱建生等<sup>[3]</sup>对装填聚乙烯、橡胶、铝合金等材料弹芯的PELE侵彻钢靶进行数值计算和实验验证。结果表明,弹芯装填材料对横向效应有重要影响,其对横向效应的影响因素主要是弹性模量和泊松比,弹性模量或泊松比越大,横向效应越强。关于工程塑料的弹芯目前已经研究了很多<sup>[4-14]</sup>,但对以铝、镁等为代表的轻金属及其合金研究

较少。该类金属密度小、弹性模量和泊松比较大,硬度低,因此亦可作为PELE的弹芯。本文利用数值模拟的方法,研究铝、镁等轻金属及其合金作为弹芯对PELE的影响,为实际研究提供一定参考。

### 1 数值计算模型

利用显式非线性动力分析软件AUTODYN,对装填不同弹芯的PELE垂直侵彻均质装甲钢板进行了数值计算。

PELE为理想的短圆柱杆,外径12.7 mm,内径10.16 mm,

后端密封部长为 5 mm,全长 50.8 mm,填充物长 45.8 mm,靶板长与宽均为 40 mm,厚 8 mm。由于弹杆对靶板侵彻具有对称性,所以建立 1/4 计算模型,对称面设置对称约束。计算对象为钨合金外壳装填不同填充材料的 PELE 垂直侵彻装甲钢靶板,着靶速度为 900 m/s,计算时间为 100  $\mu$ s。模拟过程中忽略热能损失。图 1 即为采用显式非线性动力分析软件 AUTODYN 建立的 PELE 垂直侵彻靶板的数值计算模型。

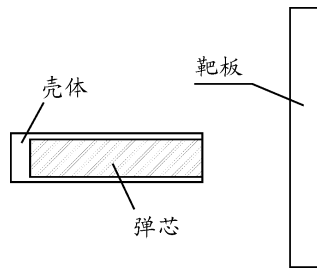


图 1 数值计算模型

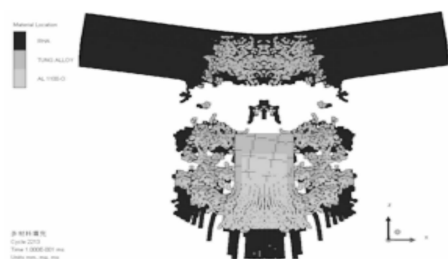
为了能够较为全面展示 PELE 侵彻靶板后的破片情况,采用 SPH 算法,弹丸和靶板材料参数均来自 AUTODYN 材料库,具体参数见表 1。

表 1 计算所用材料参数及模型

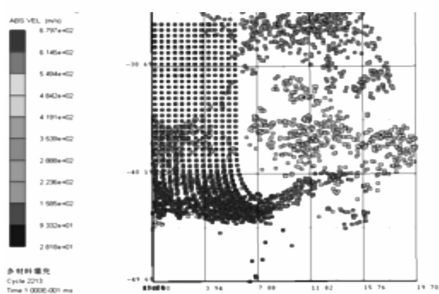
部件	材料	密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	硬度 (HBS)	泊松比	状态 方程	强度 模型	破坏 准则	侵蚀
外壳	钨合金	17.0	281	0.28	Shock	Johnson Cook	None	None
	工业纯铝(1100 铝)	2.707	25	0.33	Shock	Steinberg Guinan	None	None
内芯	镁合金(AZ31B)	1.780	35	0.35	Puff	von Mises	Hydro (Pmin)	None
	2024 铝	2.785	85	0.33	Shock	Johnson Cook	None	None
	锂镁合金 <sup>[14]</sup>	1.403	12	0.39	Shock	None	None	None
靶板	装甲钢(RHA)	7.86	183	0.22	Shock	von Mises	None	None

## 2 结果与分析

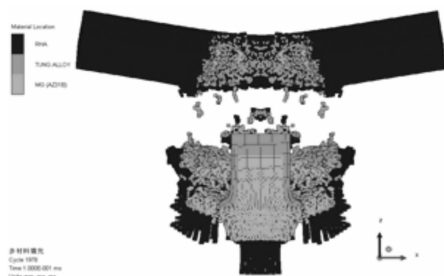
图 2~图 5 分别是弹芯装填材料为工业纯铝、镁合金(AZ31B)、2024 铝与锂镁合金弹芯时,射弹穿透靶板后  $t = 100 \mu$ s 时外壳纵剖面侧视图和破片速度云图。



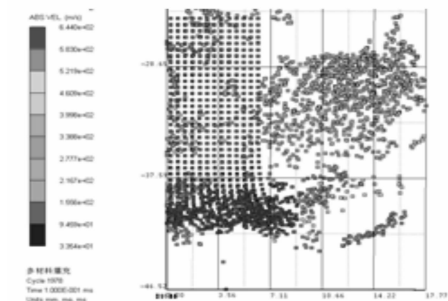
(a) 侧视图



(b) 破片速度云图



(a) 侧视图



(b) 破片速度云图

图 3 弹芯装填材料为镁合金(AZ31B)时  
弹丸侵彻靶板

图 2 弹芯装填材料为工业纯铝时弹丸侵彻靶板

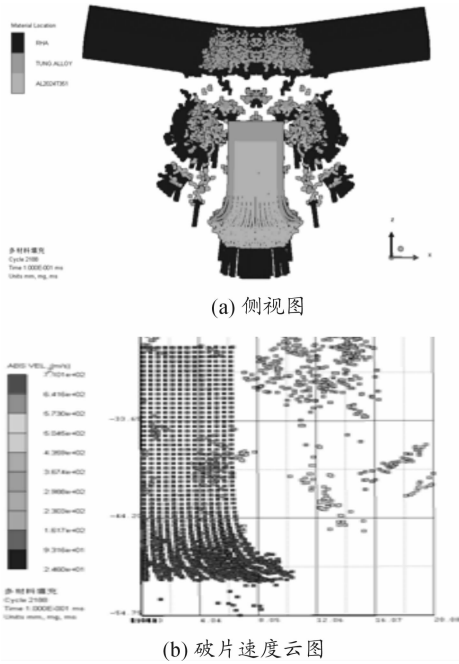


图4 弹芯装填材料为2024铝时弹丸侵彻靶板

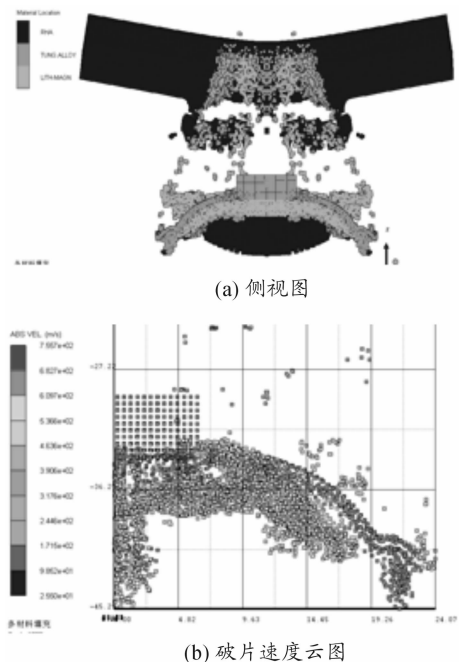


图5 弹芯装填材料为锂镁合金时弹丸侵彻靶板

从上述各图可以看出,PELE在穿透靶板后产生具有横向速度的破片,形成横向效应。以装填工业纯铝弹芯的侵彻体为例,在弹丸穿透靶板 $t=100\ \mu\text{s}$ 时,破片沿弹丸轴线方向的最大速度为 $491.68\ \text{m/s}$ ,最大横向速度达到 $19.71\ \text{m/s}$ 。显然,只要满足一定的质量要求,这类破片即具有一定的杀伤和破坏能力。

比较分析还可得到如下结论:弹芯装填材料为工业纯铝、镁合金(AZ31B)和锂镁合金时,横向效应明显,其中装填有锂镁合金的弹体穿透靶板后产生的横向效应最为显著。

弹丸内装填2024铝时,横向效应不明显,但是从图4(b)可以看出,破片同样具有一定的横向速度。运用AUTODYN对数值计算结果进行分析,可以绘出装填材料与破片横向速度之间的关系,如图6所示。

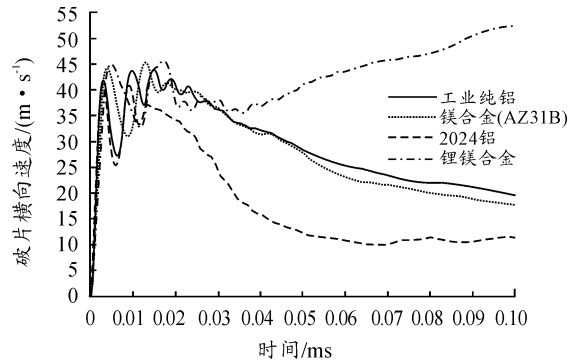


图6 各弹芯材料的破片横向速度变化

弹芯材料的不同直接影响到PELE在侵彻靶板后的各项性能,因此其对PELE横向效应的发挥影响很大。通过数值模拟,获得了不同弹芯材料的PELE侵彻靶板的参数,即破片最大速度、横向效应区域、残余壳体长度与靶板开口半径,如表2所示。

表2 不同弹芯材料PELE的结果参数

弹芯材料	工业纯铝	镁合金(AZ31B)	2024铝	锂镁合金
破片最大速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	614.5	583.0	573.0	682.7
横向效应区域/mm	19.70	17.77	20.08	24.07
残余壳体长度/mm	17.81	17.88	23.74	0
靶板开孔半径/mm	16.24	16.28	16.23	16.28

从表2可以看出,4种弹体靶板开孔半径差别不大。破片最大速度,2024铝的速度最低,锂镁合金最高,工业纯铝与镁合金介于二者之间。2024铝的残余壳体长度占原壳体长度的51.8%,远高于另外3种材料,工业纯铝与镁合金残余壳体长度相差无几。这是由于2024铝的泊松比较小且硬度较高,导致材料压缩性较差,无法产生较大的径向力,壳体无法撑开形成破片。虽然2024铝在横向效应区域上仅次于面积最大的锂镁合金,但破片稀疏,速度也低。

从图6可看出,工业纯铝、镁合金(AZ31B)和2024铝3种弹芯的PELE在靶后横向速度下降均很快,尤其2024铝的降幅最高,到结束时( $t=100\ \mu\text{s}$ ),横向速度仅有约 $12\ \text{m/s}$ 。因此,工业纯铝、镁合金(AZ31B)和2024铝这3种弹芯材料横向效应均比较差。

在4种材料中以锂镁合金为弹芯的PELE效果最好,不仅壳体全部破碎,而且破片最大速度和横向效应区域也比前3种高。在图6中,破片在横向始终处于加速状态,说明在结束时弹芯因轴向挤压而具有的能量仍未完全释放。锂镁合

金密度小(仅  $1.403 \text{ g/cm}^3$ )、泊松比大、硬度低,吸能性好,虽为金属但力学性质与聚乙烯等工程塑料相似,可以作为 PELE 弹芯。

### 3 结论

弹芯材料硬度对 PELE 靶后壳体破碎情况有较大影响,弹芯材料硬度越小则壳体破碎程度越高,壳体利用率越高。在 4 种轻金属中,锂镁合金最适宜做 PELE 的弹芯,其密度和泊松比小,硬度低,着靶后破片速度快且壳体完全破碎。

### 参考文献:

- [1] PAULUS G, CHANTERET P Y, WOLLMANN E. PELE: A new penetrator concept for the generation of lateral effects [C]//The 21st International Symposium on Ballistics. Adelaide, Australia: IBC, 2004: 104 - 110.
- [2] KESBERG G, SCHIRM V, KERK S T. PELE-The future ammunition concept [C]//The 21st International Symposium on Ballistics. Adelaide, Australia: IBC, 2004: 1134 - 1144.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 朱建生,赵国志,杜忠华,等. PELE 垂直侵彻靶板的机理分析[J]. 爆炸与冲击,2009,29(3):281 - 288.
- [6] 朱建生,范智,杜忠华. 壳体材料对 PELE 作用效果的影响[J]. 兵器材料科学与工程,2010,33(6):14 - 16.
- [7] 朱建生,赵国志,杜忠华. 弹体结构对横向效应增强型侵彻体作用效果的影响[J]. 系统仿真学报,2009,21(1):39 - 42.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 朱建生,赵国志,杜忠华,等. 靶板厚度对 PELE 作用效果的影响[J]. 南京理工大学学报(自然科学版),2009,33(4):474 - 479.
- [11] 尹建平,王志军,魏继允. 内外径比对 PELE 横向效应影响的数值模拟[J]. 弹道学报,2010,22(1):79 - 82.
- [12] 尹建平,王志军,魏继允. 长径比对侵彻膨胀弹横向效应的影响[J]. 火箭与制导学报,2010,30(2):87 - 89.
- [13] 蒋建伟,张谋,门建兵,等. 不同内核材料 PELE 弹丸对多层靶穿甲实验研究[J]. 北京理工大学学报,2010,30(9):1098 - 1012.
- [14] 涂胜元,王军波,安振涛,等. 壳体和弹芯的材料特性对 PELE 侵彻后效的影响[J]. 中北大学学报(自然科学版),2009,30(3):213 - 216.
- [15] 徐丹丹. 镁锂合金力学与阻尼性能的研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.

(责任编辑 周江川)