

文章编号: 1006-9941(2014)03-0312-06

# 集束钨丝壳体材料特性参数对 PELE 作用性能影响的数值模拟

朱建生, 范智

(陆军军官学院, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 为克服目前普遍采用的钨合金壳体横向效应增强型侵彻体(PELE)侵彻能力不足、靶后破片形状与数量不可控、横向毁伤效果不理想等不足,采用集束钨丝制作 PELE 壳体,并对其穿甲过程进行了数值模拟。与钨合金壳体 PELE 的作用效果进行对比,发现集束钨丝壳体 PELE 的侵彻能力和横向毁伤性能均优于钨合金壳体 PELE;在本研究所采用 PELE 结构条件下,钨丝直径取 0.5~1 mm、体积分数取 40%~60%、粘结相选用镍铁合金时,集束钨丝壳体 PELE 综合毁伤能力较好。

**关键词:** 冲击动力学; 横向效应增强型侵彻体(PELE); 集束钨丝壳体; 材料参数; 侵彻能力; 横向毁伤性能

**中图分类号:** TJ410

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.03.008

## 1 引言

横向效应增强型侵彻体 (penetrator with enhanced lateral effect, PELE) 是近年提出的一种新概念毁伤元,主要由壳体和弹芯两部分组成。无需装填炸药和引信,PELE 可在穿透目标后产生明显的横向效应,对目标内部进行有效毁伤,实现点、面杀伤的综合效果。其作用原理是壳体与弹芯使用密度、强度不同的材料,壳体通常由钢或钨等制成,在攻击目标时具有良好的侵彻性能;弹芯通常由尼龙、橡胶等惰性材料制成,侵彻性能相对较弱。将这两种材料同时应用于 PELE,当 PELE 击中目标后,壳体侵彻目标,惰性弹芯由于侵彻性能相对较弱,前进缓慢,被挤压在壳体与靶板之间,导致弹芯内压力升高,不断升高的压力使周围壳体持续膨胀。PELE 穿透靶板瞬间,壳体和弹芯中的应力卸载,壳体在拉应力作用下沿径向分解成大量破片,从而在目标内部产生二次杀伤效果,大大提高了毁伤概率<sup>[1-2]</sup>。其作用原理如图 1 所示。

壳体是 PELE 穿透靶板以及在靶后形成毁伤元的基体。现有研究表明,采用不同材料壳体,PELE 的侵彻能力和靶后横向毁伤性能差异较大<sup>[3-4]</sup>。钨合金由于具有高密度、高强度等特性,目前在穿甲弹上应用广泛,目前 PELE 也较多地采用了钨合金壳体。但是,钨

合金强韧性不足,在一定程度上影响了钨合金壳体 PELE 的侵彻性能<sup>[5]</sup>,使 PELE 主要适于对付薄靶,且钨合金壳体在靶后破碎产生自然破片,破片形状与数量不可控,横向毁伤效果不理想。

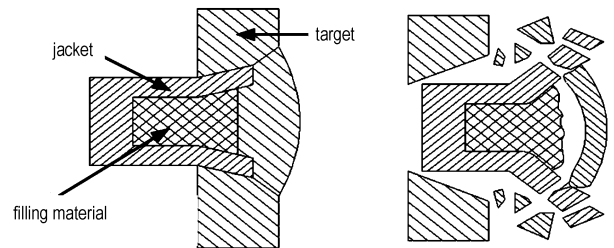


图 1 PELE 作用原理示意图

Fig. 1 Sketch map of functional principle of PELE

集束钨丝是以具有高密度、高强度以及大长径比的钨丝作为增强相,辅以合适的粘结相形成的一种复合材料<sup>[5]</sup>。现有研究表明,集束钨丝侵彻体在穿甲过程中粘结相不断脱落,钨丝起主要穿甲作用;在穿甲过程中钨丝与钨丝之间出现松动现象,主要以单根钨丝为单元进行穿甲,充分发挥了单根钨丝大长径比的优势,使得集束钨丝复合材料穿甲性能优于普通的钨合金<sup>[6-8]</sup>。

若将集束钨丝用于制作 PELE 壳体,利用钨丝高密度和大长径比的优势,集束钨丝壳体 PELE 的侵彻能力将进一步增强;如果粘结相选择恰当,穿透靶板瞬间,在弹芯装填材料径向膨胀作用下,集束钨丝壳体可能发生粘结相破碎、钨丝离散等脆性破坏现象,形成大量

收稿日期: 2013-06-24; 修回日期: 2013-09-21

基金项目: 安徽省自然科学基金(1208085QE83)

作者简介: 朱建生(1979-),男,讲师,主要从事目标毁伤与终点效应研究。e-mail: zhujsheng102526@yahoo.com

钨丝段和粘结相破片,对靶后目标进行有效毁伤。

与实验相比,有限元模拟可以获得实验中无法得到的大量数据,可方便地开展针对不同初始边界条件、不同材料以及不同结构的数值仿真计算,是目前科学研究中一种行之有效的。本研究就钨丝直径、体积分数以及粘结相的种类等因素对 PELE 冲击响应的影响规律进行了数值仿真研究,揭示了集束钨丝壳体 PELE 的作用机理,以期提高 PELE 的整体毁伤性能。

## 2 数值仿真方法

利用有限元程序 ANSYS/LS-DYNA<sup>[9]</sup>,对 PELE 弹的穿甲过程进行了数值仿真计算,计算对象为集束钨丝壳体装填惰性材料垂直侵彻均质装甲钢板,着靶速度为  $1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

已有研究成果表明,壳体内外径比在  $0.5 \sim 0.7$  范围内,横向效应较明显;长径比在  $3 \sim 5$  范围内取值时,PELE 能较好地发挥作用<sup>[10]</sup>。因此,本研究数值仿真计算过程中,壳体内外径比取  $0.6$ ,长径比取  $4$ 。计算模型具体尺寸如下:弹体直径为  $30 \text{ mm}$ ,长度为  $120 \text{ mm}$ ,弹底长度为  $10 \text{ mm}$ ,弹芯长度为  $110 \text{ mm}$ ,壳体厚度为  $6 \text{ mm}$ ;靶板采用  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$  的长方体。由于弹体对靶板垂直侵彻具有对称性,所以计算模型采用原始模型的  $1/4$ ,对称面设置对称约束,非对称边界设置固定边界约束。

由于钨丝较细,如果采用 SOLID164 单元建模,利用基于单元面检测的接触方式来模拟钨丝和粘结相的相互作用,鉴于钨丝被粘结相包围,势必要求粘结相的计算网格非常细以匹配钨丝尺寸,从而使得计算规模过大致使模型难以求解;若钨丝单元过大,钨丝穿过粘结相单元,基于接触面检测提供相互作用的方法可能会失效,从而使计算阻力偏小,影响模拟效果。为此,本研究将钨丝和粘结相分别建模,利用杆单元 LINK160 表征钨丝,利用实体单元 SOLID164 表征粘结相,并通过合适的单元划分,使钨丝和粘结相共用节点,通过节点之间耦合,提供接触应力,来模拟钨丝和粘结相之间的粘结;同时,用实参数控制钨丝的截面积和强度,进一步模拟钨丝直径、体积分数等参数对侵彻的影响,以及钨丝和粘结相之间的开裂与滑移等。

计算时,钨丝及粘结相的变形采用 PLASTIC\_KINEMATIC 本构模型结合 Von Mises 屈服准则描述;通过定义钨丝的屈服强度与失效应变,决定钨丝失效单元删除的时机;弹芯采用 VISCOELASTIC 模型;弹

底和靶板则采用 JOHNSON-COOK 模型和 GRUNELSEN 状态方程共同描述。钨丝、粘结相、弹底、弹芯及靶板的主要力学性能参数如表 1 所示。其中, $\rho$  为密度, $E$  为弹性模量, $\mu$  为泊松比, $\sigma$  为屈服强度, $\varepsilon$  为失效应变, $-$  表示不涉及该项。计算中,钨丝、粘结相、弹底和弹芯定义为一个 PART 组,然后与靶板采用面面侵蚀的接触算法,钨丝与粘结相之间采用自动滑移接触,而粘结相与弹芯之间采用自动面面接触<sup>[9]</sup>。

表 1 钨丝、粘结相、弹底、弹芯及靶板的主要力学性能参数

Table 1 Main mechanical properties parameters of tungsten fiber, bonding phase, projectile base, projectile core and target

material	$\rho$ /g · cm <sup>-3</sup>	$E$ /GPa	$\mu$	$\sigma$ /MPa	$\varepsilon$
tungsten fiber	18.5	410	0.28	2069	0.15
bonding phase	8.1	206	0.26	233	0.05
projectile base	7.8	200	0.30	410	-
projectile core	0.94	0.2	0.41	15	-
target	7.83	210	0.29	792	-

## 3 壳体对比分析

对钨丝直径为  $1 \text{ mm}$ ,体积分数为  $60\%$ ,粘结相采用镍铁合金的集束钨丝壳体 PELE 的穿甲过程进行了数值仿真计算。集束钨丝壳体 PELE 穿透靶板后,壳体破碎及散布情况如图 2 所示。

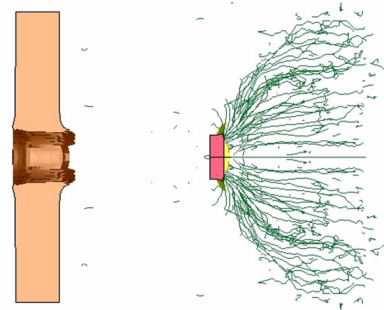


图 2 集束钨丝壳体 PELE 靶后破碎情况

Fig. 2 Lateral effect of PELE with tungsten fiber composite (TFC) jacket

为比较穿甲性能差异,对相同结构与尺寸的钨合金壳体 PELE 穿甲过程也进行了数值仿真,穿甲后壳体破碎及散布情况如图 3 所示。

对比图 2 与图 3 可以发现,与钨合金壳体 PELE 相比,集束钨丝壳体 PELE 穿透靶板后,靶板穿孔直径明显较小的同时却能产生更多形状相对规则的钨丝段,

且钨丝段横向散布角度更大。在着速相同的条件下, 相同作用时间内两种壳体产生破片的轴向速度与最大径向速度变化曲线如图 4 和图 5 所示。

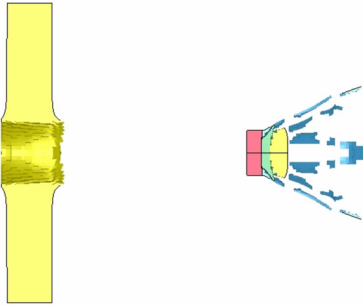


图 3 钨合金壳体 PELE 靶后破碎情况

Fig. 3 Lateral effect of PELE with tungsten alloy (TA) jacket

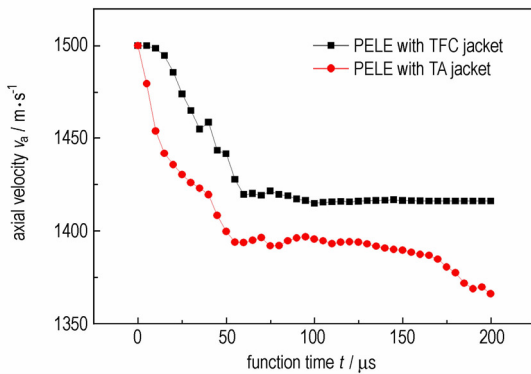


图 4 不同壳体 PELE 的破片轴向速度

Fig. 4 Axial velocity of PELE debris with different jacket

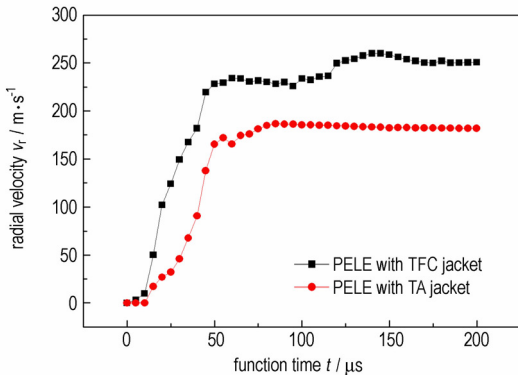


图 5 不同壳体 PELE 的破片最大径向速度

Fig. 5 Radial velocity of PELE debris with different jacket

从图 4 和图 5 可以看出, 集束钨丝壳体 PELE 穿透靶板后破片轴向速度和最大径向速度均大于钨合金壳体 PELE。产生这种现象的原因在于, 钨合金壳体在高应变率加载下, 材料迅速屈服, 晶粒被横向拉长, 使钨合金壳体在侵彻过程中产生了“蘑菇头”(图 6), 随着侵彻深度的增加, “蘑菇头”不断增大, 使得靶板穿孔进一步增大, 并阻碍了钨合金壳体 PELE 侵彻能力的提高; 而对集束钨丝壳体 PELE 而言, 粘结相在侵彻过程

中发生断裂并随着钨丝一起发生弯折, 表现为脆性材料的性质, 钨丝起主要穿甲作用(图 7), 所以在侵彻过程中, 集束钨丝壳体产生自锐行为, 增强了壳体的侵彻威力; 穿透靶板后, 由于粘结相抗拉强度较低, 钨丝在应力卸载产生的拉应力作用下易发生离散, 产生大量具有较高径向速度的钨丝段。

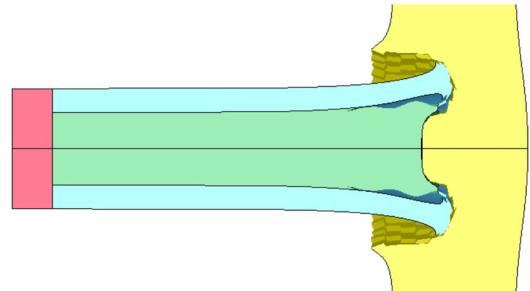


图 6 钨合金壳体侵彻中形成“蘑菇头”

Fig. 6 Mushroom-head of PELE with TA jacket

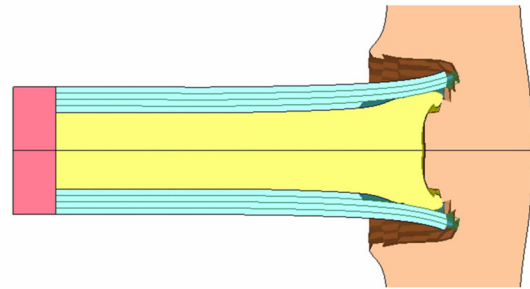


图 7 集束钨丝壳体的自锐效应

Fig. 7 Self-sharpening of PELE with TFC jacket

两种不同材料壳体 PELE 侵彻靶板过程中的动能和内能变化曲线分别如图 8 和图 9 所示。由此可见, 在内能增加相近的情况下, 由于冲塞塞块直径增大, 加上“蘑菇头”的形成, 钨合金壳体 PELE 质量消耗较多, 在侵彻过程中消耗了更多的能量, 使其剩余动能比集束钨丝壳体 PELE 少得多, 这也直接影响了其靶后毁伤性能, 而集束钨丝壳体 PELE 却可以获得更佳的靶后综合毁伤性能。

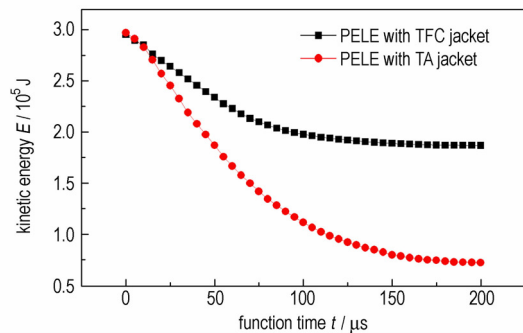


图 8 不同壳体 PELE 动能变化曲线

Fig. 8 Kinetic energy variety of PELE with different jacket

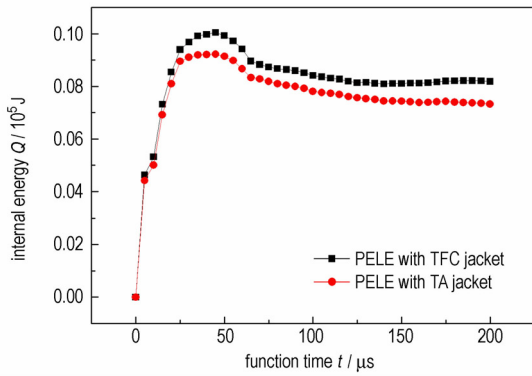


图9 不同壳体 PELE 内能变化曲线  
Fig.9 Internal energy variety of PELE with different jacket

## 4 影响因素分析

### 4.1 钨丝直径的影响

为考查钨丝直径对集束钨丝壳体 PELE 作用效果的影响,对采用相同数量、不同直径钨丝的集束钨丝壳体 PELE 侵彻靶板进行了数值模拟。钨丝直径( $d$ )为 0.25, 0.5, 1 mm, 粘结相采用镍铁合金, 靶板仍采用均质装甲钢, 厚度为 30 mm, 侵彻方式为垂直侵彻。

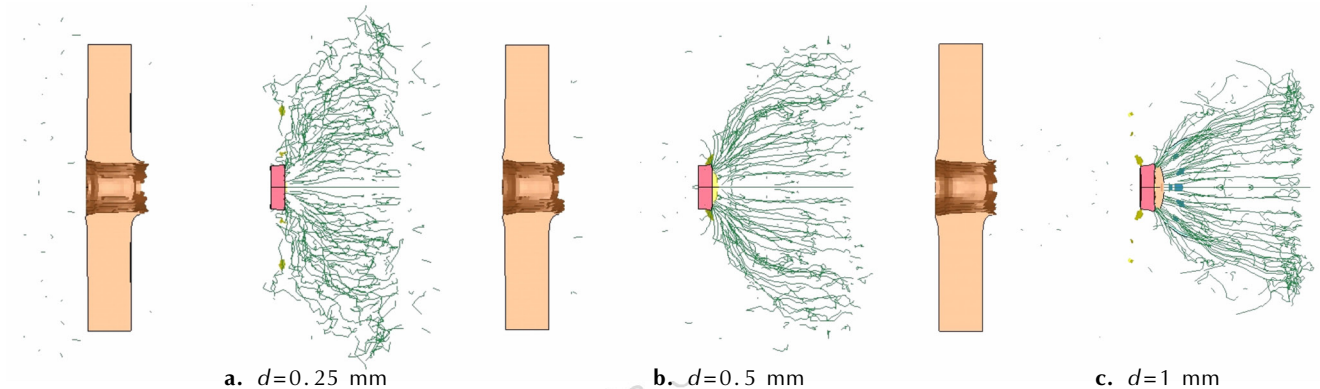


图10 采用不同直径钨丝的集束钨丝壳体 PELE 靶后破碎情况  
Fig.10 Lateral effect of PELE with TFC jacket using different diameter tungsten fibers

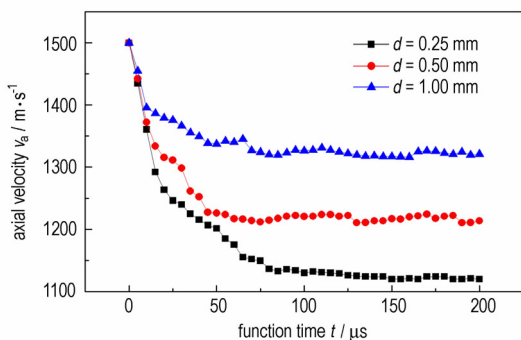


图11 不同直径钨丝 PELE 破片轴向速度  
Fig.11 Axial velocity of PELE debris with different diameter tungsten fibers

采用三种不同直径钨丝的集束钨丝壳体 PELE 穿透靶后,钨丝散布情况如图 10 所示。由图 10 可以看出:钨丝越细,侵彻过程中受弹芯径向膨胀作用越强,穿透靶板后钨丝段横向散布越显著;随着钨丝直径不断增大,靶后钨丝横向散布角逐渐减小。

数值仿真过程中,设定钨丝数量相同,由于直径不同,所以钨丝的体积分数不同,相应地,壳体的密度也不同。采用三种不同直径钨丝的集束钨丝壳体 PELE 穿透靶后破片轴向速度与破片最大径向速度变化曲线如图 11 和图 12 所示。

从图 11 可以看出,在钨丝数量相同的情况下,钨丝直径越大,集束钨丝壳体 PELE 穿透靶板后剩余速度越大,这表明 PELE 壳体侵彻能力越强,这显然与 PELE 壳体密度增大有关;图 12 则表明,随钨丝直径增大,穿透靶板后破片最大径向速度有逐渐减小的趋势,说明 PELE 横向散布能力减弱,这与图 10 所示破片散布相吻合。出现这样现象的原因可能在于,在钨丝直径较小的情况下,体积分数较低,由于壳体侵彻能力较弱,PELE 穿透靶板耗时更长,在弹芯膨胀作用下,更多的轴向动能转化为径向动能,穿靶后钨丝更容易离散。

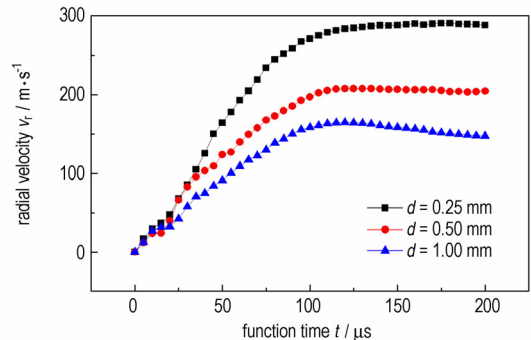


图12 不同直径钨丝 PELE 破片最大径向速度  
Fig.12 Radial velocity of PELE debris with different diameter tungsten fibers

然而,在钨丝直径较小时,虽然散布面积较大,但由于钨丝较细,单个钨丝段破片质量较小,因此动能较小,这影响了其靶后毁伤效果。为兼顾壳体侵彻能力与靶后横向散布能力,对本研究所采用的 PELE 结构而言,钨丝直径取 0.5 ~ 1 mm 较为适宜。

#### 4.2 体积分数的影响

为进一步考查钨丝体积分数对集束钨丝壳体 PELE 作用效果的影响,对采用相同直径、不同体积分数钨丝的集束钨丝壳体 PELE 穿甲过程进行了数值模拟。钨丝体积分数( $P$ )为 20%, 40%, 60%, 粘结相仍采用镍铁合金,穿透靶板后钨丝散布情况如图 13 所示。

由图 13 可以看出,钨丝体积分数不同,集束钨丝壳体 PELE 靶后破碎情况差异较大,随钨丝体积分数增加,靶后破片横向散布逐渐减小。利用后处理软件 LS-PREPOST 对三种不同钨丝体积分数的集束钨丝壳

体 PELE 穿甲后钨丝段的轴向剩余速度与最大径向速度进行分析可以发现,钨丝体积分数越大,穿靶后破片轴向剩余速度越大,而破片径向速度越小,即侵彻能力越强,而横向散布能力越弱。

产生该现象的原因在于,在钨丝体积分数较小时,钨丝在壳体中的分布不均匀,这种不均匀的分布势必会造成每根钨丝周围的应力应变场不同,导致局部的应力集中,使得部分钨丝产生裂纹而失效,这样剩余钨丝承受荷载自然增加,进一步加剧钨丝周围的应力集中,最终导致材料的断裂,降低了材料自身的强度,使得其侵彻能力降低;随钨丝体积分数增大,即粘结相体积分数减小,断裂方式逐渐由以剪切为主转化为以劈裂为主,抗压强度提高,侵彻能力增强。PELE 靶后二次毁伤性能与其轴向速度和径向速度有关,为二者兼顾,对本研究所采用的 PELE 结构而言,钨丝体积分数取 40% ~ 60% 较为适宜。

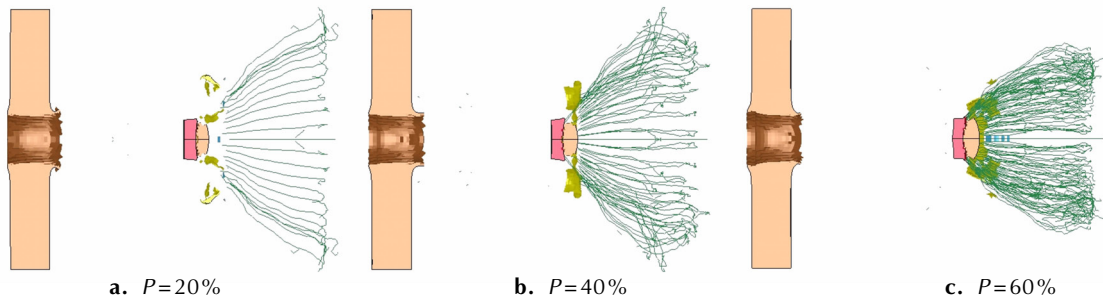


图 13 采用不同钨丝体积分数的集束钨丝壳体 PELE 靶后破碎情况

Fig. 13 Lateral effect of PELE with TFC jacket using different volume ratio tungsten fibers

对相同结构与尺寸的钨合金壳体 PELE 作用过程也进行了数值仿真,通过比较可以发现,当钨丝体积分数较小时,集束钨丝壳体 PELE 的强度低于钨合金壳体 PELE 的强度;只有当钨丝体积分数大于某一值后,集束钨丝壳体 PELE 的强度才超过钨合金壳体 PELE 的强度。

#### 4.3 粘结相种类的影响

纤维增强复合材料中粘结相的作用是传递载荷,并把增强纤维粘接在一起形成一个整体。粘结相通常

应具备成本低、易于获得、不能与增强纤维相互溶解等要求。目前用于钨丝增强的复合材料采用的粘结相材料主要有铝合金、铜合金、镍铁合金等。

为考查粘结相种类对集束钨丝壳体 PELE 作用效果的影响,对采用直径 0.8 mm、体积分数 50% 的钨丝和不同粘结相的集束钨丝壳体 PELE 侵彻靶板进行了数值模拟。粘结相分别采用铝合金、铜合金、镍铁合金,穿透靶板后钨丝散布情况如图 14 所示。

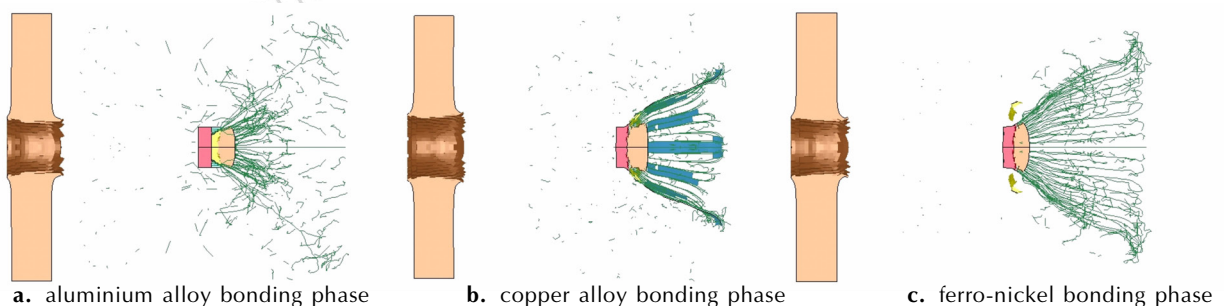


图 14 采用不同粘结相的集束钨丝壳体 PELE 靶后破碎情况

Fig. 14 Lateral effect of PELE with TFC jacket using different bonding phase

从图 14 可以看出,采用镍铁合金粘结相时,集束钨丝壳体 PELE 靶后形成了理想的破片散布。集束钨丝复合材料中粘结相在力学方面有两个作用:一是在增强材料间传递载荷,并使载荷均衡,即将外力传递给分散的增强钨丝;二是适时破碎,使钨丝与粘结相、钨丝与钨丝之间互相剥离。与铝合金粘结相相比,镍铁合金粘结相抗压强度较高,能很好地传递荷载,保持复合材料内部应力状态的均匀,使得材料中增强钨丝不致失效、碎化,提高了侵彻能力;而与铜合金粘结相相比,镍铁合金粘结相抗拉强度相对较低,穿透靶板后能有效地脆断释放钨丝,从而提高了横向散布。因此,粘结相的最优材料为镍铁金属。

## 5 结 论

数值仿真研究表明,与钨合金壳体 PELE 相比,集束钨丝壳体 PELE 侵彻过程中具有自锐能力,既能发挥钨丝高强度、大长径比、侵彻性能好的特点,又能利用粘结相抗拉强度低、易于离散的优势,在靶后产生更显著的横向效应,因此利用钨丝集束方法制作 PELE 壳体在原理上是可行的。

在本研究所采用 PELE 结构条件下,钨丝直径取 0.5 ~ 1 mm、体积分数取 40% ~ 60%、粘结相采用镍铁合金时,集束钨丝壳体 PELE 的综合毁伤性能较好。这些分析结果可以为集束钨丝壳体 PELE 的结构设计和进一步研究提供参考。

### 参考文献:

- [1] Kesberg G, Schirm V. PELE-The Future Ammunition Concept [C] // 21st International Symposium on Ballistics. Australia: Adelaide, 2004: 1134-1144.
- [2] Paulus G, Schirm V. Impact behavior of PELE projectiles perfora-

ting thin target plates[J]. *International Journal of Impact Engineering*. 2006(33): 566-579.

- [3] 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.
- ZHU Jian-sheng, FAN Zhi, DU Zhong-hua. Influence of the jacket material on PELE effect [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2010, 33(6): 14-16.
- [4] 黄德雨,王坚茹,陈兆荣,等. 陶瓷外壳材料对 PELE 作用性能的影响[J]. *爆破器材*, 2011, 40(4): 5-8.
- HUANG De-yu, WANG Jian-ru, CHEN Zhao-rong, et al. Influence of ceramic jacket material on PELE [J]. *Explosive Materials*, 2011, 40(4): 5-8.
- [5] 张存信,秦丽柏,米文字,等. 我国穿甲弹用钨合金研究的最新进展与展望[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2006, 11(3): 125-130.
- ZHANG Cun-xin, QIN Li-bai, MI Wen-yu, et al. Recent research progress and prospect of armor-piercing projectile in China [J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2006, 11(3): 125-130.
- [6] 张朝晖,王富耻,李树奎. 钨丝集束复合材料穿甲弹芯穿甲过程的数值模拟研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2003, 32(6): 440-442.
- ZHANG Zhao-hui, WANG Fu-chi, LI Shu-kui. Numerical simulation on penetrating process of tungsten fiber composites penetrators [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2003, 32(6): 440-442.
- [7] 荣光,黄德武. 钨纤维复合材料穿甲弹芯侵彻时的自锐现象[J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(4): 351-355.
- RONG Guang, HUANG De-wu. Self-sharpening phenomena of tungsten fiber composite material penetrators during penetration [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(4): 351-355.
- [8] 雷波,黄德武,杨明川,等. 钨纤维复合材料穿甲弹芯自锐行为的试验研究[J]. *沈阳理工大学学报*, 2008, 27(1): 72-76.
- LEI Bo, HUANG De-wu, YANG Ming-chuan, et al. An experimental study on the self-sharpening behavior of armor piercer using tungsten fiber composite material [J]. *Transactions of Shenyang Ligong University*, 2008, 27(1): 72-76.
- [9] LSTC, LS-DYNA Keyword User's Manual-Nonlinear Dynamic Analysis of Structures in Three Dimensions [M]. Version 970. Livermore: LSTC, 2003.
- [10] 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. Functional Mechanism of Penetrator with Enhanced Lateral Effect [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.

## Numerical Simulation on Effect of Tungsten Fiber Composite Jacket Material Parameters on Behavior of PELE

ZHU Jian-sheng, FAN Zhi

(Army Officer Academy of PLA, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Tungsten alloy was adopted as the jacket of PELE widely up to now, but it had a series of disadvantages, such as inadequate obdurability, uncontrollable shape and amount of fragments, imperfect lateral damage effect, and so on. To solve the problem, tungsten fiber composite was brought forward to produce penetrator with enhanced lateral effect (PELE) jacket, and numerical simulations was carried out on the penetration process by PELE with tungsten fiber composite jacket. Results show that the penetrating performance and lateral damage effect of PELE with tungsten fiber composite jacket are superior to those of PELE with tungsten alloy jacket. Further, PELE with tungsten fiber composite has better damage performance, when the diameter of tungsten fibers is between 0.5-1 mm, the volume fraction of tungsten fibers is 40%-60%, and the binder phase is ferro-nickel alloy.

**Key words:** impact dynamics; penetrator with enhanced lateral effect (PELE); tungsten fiber composite jacket; material parameters; penetrating performance; lateral damage effect

CLC number: TJ410

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.03.008