

doi: 10.7690/bgzd.2025.02.015

基于 FEM-SPH 耦合算法的子弹侵彻复合装甲数值模拟

李福强¹, 史彦飞², 黄敬如¹, 刘润华¹, 赵亮¹

(1. 海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军 92154 部队, 山东 烟台 264000)

摘要: 为研究 7.62 mm 穿甲子弹对陶瓷/芳纶/超高分子量聚乙烯 (ultra-high molecular weight polyethylene, PE-UHMW) 复合装甲的毁伤效应, 对子弹侵彻复合装甲问题进行模拟研究。通过分析毁伤效应中陶瓷锥的形成、裂纹扩展和破碎飞溅过程, 分析弹体对芳纶和 PE-UHMW 的破坏模式, 并研究不同的弹速对复合装甲毁伤效能的影响规律。结果表明: FEM-SPH 耦合算法可很好地模拟弹体侵彻陶瓷/芳纶/PE-UHMW 复合装甲的过程; 在弹速小于弹道极限时, 复合装甲吸能和背板最大变形值都随着弹速的增大而增大; 当弹速大于弹道极限时, 复合装甲吸能增加的速率开始下降。

关键词: 陶瓷/芳纶/超高分子量聚乙烯; 复合装甲; FEM-SPH 耦合算法; 陶瓷锥; 毁伤效能

中图分类号: TJ413 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Bullet Penetration into Composite Armor Based on FEM-SPH Coupling Algorithm

Li Fuqiang¹, Shi Yanfei², Huang Jingru¹, Liu Runhua¹, Zhao Liang²

(1. College of Coast Guard Academy, Naval Aviation University, Yantai 264001, China;

2. No. 92154 Unit of PLA, Yantai 264000, China)

Abstract: In order to study the damage effect of 7.62 mm armor-piercing bullet on ceramic/aramid/ultra-high molecular weight polyethylene (PE-UHMW) composite armor, the penetration of the bullet into composite armor was simulated. By analyzing the formation, crack propagation and splashing process of the ceramic cone in the damage effect, the damage mode of the projectile body to the aramid fiber and PE-UHMW was analyzed, and the influence of different projectile velocities on the damage effectiveness of the composite armor was studied. The results show that the FEM-SPH coupling algorithm can well simulate the process of projectile penetrating ceramic/aramid/PE-UHMW composite armor. When the projectile velocity is less than the ballistic limit, the energy absorption and the maximum deformation of the back plate of the composite armor increase with the increase of the projectile velocity. When the projectile velocity is greater than the ballistic limit, the rate of energy absorption of the composite armor begins to decrease.

Keywords: ceramic/aramid/ultra-high molecular weight polyethylene; composite armor; FEM-SPH coupling algorithm; ceramic cone; damage effectiveness

0 引言

目前, 评价装甲材料性能的 2 项指标是轻量化和防护能力。随着武器装备的跨越式发展, 现代战争对装甲的性能提出了更高的要求; 因此, 必须研究出密度更小、防护能力更强的新型复合装甲^[1]。陶瓷材料和纤维增强复合材料是最常用的装甲组元材料, 陶瓷材料具有高强度、高硬度和密度小等特点^[2], 在弹体侵彻过程中可以通过钝化作用, 快速降低弹体的侵彻性能, 但其最大问题在于毁伤过程中会产生大量陶瓷碎片, 很容易造成二次杀伤; 而纤维增强复合材料具有高比强度和高比模量等特点^[3], 在钝头弹低速侵彻条件下抗弹性能较好, 具有非常好的吸能性; 因此, 可将以上材料组合成复合装甲, 装甲材料各组分在性能上可以相互取长补短

短, 产生协同效应, 相对于单一均质材料其综合性能会大大提高^[4]。

针对复合装甲的研究方法, 主要有试验研究、理论研究与数值模拟研究 3 种^[5]。王长利等^[6]通过穿深试验研究, 分析了碳化硅、氧化铝和碳化硼装甲在 3 000 m/s 速度侵彻下装甲的质量防护系数。郭婷婷等^[7]通过理论研究, 建立了理论研究模型, 研究抗弹性能与弹靶材料参数之间的关系。高华等^[8]利用数值模拟研究的方法, 分析了陶瓷/复合材料装甲的抗弹机理, 为复合装甲性能预测提供理论分析的依据。谈梦婷等^[9]模拟研究了弹体头部形状、复合装甲盖板的厚度以及陶瓷靶预应力效应对界面击溃效应的影响。郭英男^[10]进行了陶瓷复合装甲的试验与数值模拟研究, 研究发现当弹着点位于陶瓷

收稿日期: 2024-07-05; 修回日期: 2024-08-06

第一作者: 李福强(1993—), 男, 山东人, 硕士。

靶板边缘时,弹体的姿态将会发生倾斜。在这些研究方法中,数值模拟具有极大优势,例如降低成本、提高效率。随着仿真软件和计算机技术的快速发展,数值模拟愈加成为有效、准确的研究分析方法。在模拟研究过程中,由于陶瓷属于脆性材料,传统的有限元法(finite element method, FEM)很难模拟陶瓷材料的断裂失效问题^[11],而光滑粒子流体动力学法(smooth particle hydrodynamics, SPH)是一种无网格数值计算方法,既不存在网格畸变问题,又不存在网格失效删除问题,能够模拟材料的断裂,并且能很好地描述物体的边界,更适合模拟高速碰撞、侵彻和破坏等问题^[12]。笔者利用 LS-DYNA 有限元分析软件,采用有限元法和光滑粒子流体动力学法相结合的计算方法,即 FEM-SPH 耦合算法,对 7.62 mm 穿甲子弹侵彻复合装甲问题进行模拟研究,分析不同的弹体侵彻速度对复合装甲毁伤效能的影响规律。

1 FEM-SPH 耦合计算模型及材料参数

1.1 计算模型

笔者基于有限元分析软件 LS-DYNA,建立 7.62 mm 穿甲子弹侵彻陶瓷/芳纶/PE-UHMW 复合装甲的数值计算模型。复合装甲的组元材料从面板到背板依次为六边形碳化硅陶瓷、芳纶和 PE-UHMW。

穿甲子弹采用的是 53 式 7.62 mm 穿甲燃烧弹,为提高计算效率,简化计算模型,忽略子弹中的铅套结构,其中背甲和弹芯的计算网格采用六面体单元建模,如图 1 所示^[13]。

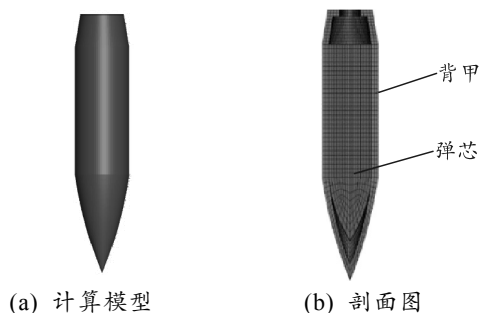


图 1 穿甲子弹有限元模型

陶瓷面板由对边距为 30 mm 的正六边形陶瓷块拼接而成,陶瓷块厚度为 10 mm,陶瓷块之间的间距为 0.5 mm,建立 19 块陶瓷块组成的陶瓷面板计算模型,其中,中心 7 块陶瓷块为光滑粒子模型,周围 12 块陶瓷块采用六面体单元建模如图 2 所示^[12]。

芳纶层合板尺寸为 300 mm×300 mm×4.3 mm, PE-UHMW 层合板尺寸为 300 mm×300 mm×12 mm,芳纶层合板和 PE-UHMW 层合板的计算网格选用六面体单元。芳纶层合板和陶瓷面板之间、芳纶层合板和 PE-UHMW 层合板之间粘接方式,拉脱强度为 5 MPa。为约束芳纶层合板和 PE-UHMW 层合板的边界,对靶板边界周边各个方向的位移施加约束。7.62 mm 穿甲子弹侵彻陶瓷/芳纶/PE-UHMW 复合装甲计算模型如图 3 所示,子弹垂直侵彻复合装甲,弹着点为陶瓷块中心区域,即 SPH 算法区域。

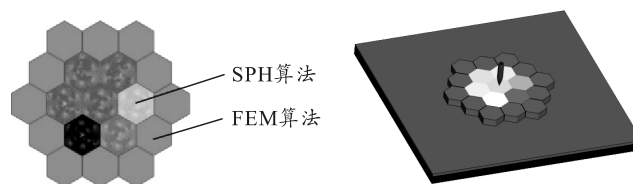


图 2 陶瓷面板计算模型 图 3 复合装甲计算模型

1.2 FEM-SPH 耦合算法

为有效模拟冲击过程中陶瓷脆性材料的破碎问题,提高数值模型的计算效率和计算精度,将陶瓷面板中心的 7 块陶瓷块离散为光滑粒子,其中,粒子间距设为 0.5 mm,共划分 468 783 个粒子,中心陶瓷块采用 SPH 算法,周围剩余陶瓷块、子弹、芳纶层合板和 PE-UHMW 层合板离散成连续的有限单元,采用 FEM 算法。光滑粒子模型底面的 SPH 粒子与芳纶层合板迎弹面的接触类型采用绑定接触,SPH 粒子与邻近单元距离设为 0.25 mm,定义有限单元与 SPH 粒子连接处的单元表面为主表面,定义 SPH 粒子为从节点,保持节点相对位置不变,通过这种绑定接触来传递力学特性^[14]。图 4 为 SPH 与有限单元表面的绑定接触。

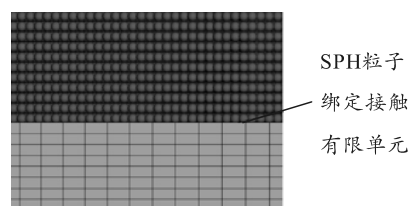


图 4 SPH 粒子与有限单元耦合

图 5 为 SPH 粒子与有限单元接触时接触力的施加情况,其中,小的实线圆代表 SPH 粒子,大的虚线圆代表了 SPH 粒子 i 的支持域,小的虚线圆代表设置在有限元节点处的背景粒子^[14]。该背景粒子具有 SPH 粒子相同的属性,包括质量、位置、速度、应力,均与相应有限元节点保持一致。当有限元节点与 SPH 粒子的间距达到 2 倍光滑长度时,此时产

生接触力。

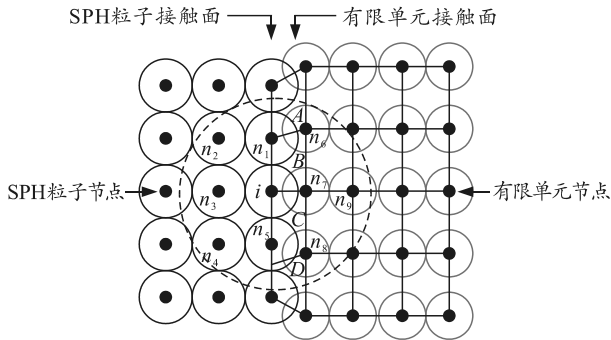


图 5 SPH 粒子与有限单元接触

在复合装甲 FEM-SPH 耦合算法中，中心区域的 SPH 陶瓷粒子与周围的陶瓷块、子弹、芳纶层合板和 PE-UHMW 层合板有限单元之间的接触计算采用侵蚀接触算法，将 SPH 粒子定义为从节点，将与 SPH 粒子接触的界面上的单元表面定义为主表面，在每个时间步，对 SPH 粒子是否穿透有限单元表面进行检测，并采用预测-修正的方式在有限单元的法向施加约束以防止法向的穿透，而 SPH 粒子与有限单元之间可以产生切向的滑移；有限元陶瓷块之间的接触设置为侵蚀面面接触，芳纶层合板和 PE-UHMW 层合板的四周边界条件设置为无反射边界，避免应力波在边界上的反射^[15]。

FEM-SPH 耦合算法计算流程描述如下：1) 在每个时间步长开始前，将相关有限元节点的质量、位置、速度、应力等传递给相应的背景粒子；2) SPH 粒子以背景粒子的方式搜索临近的有限元节点，计算施加在 SPH 粒子上的接触力；3) 有限元节点搜索临近的 SPH 粒子，计算施加在有限元节点上的接触力；4) SPH 粒子采用跳蛙格式求解 Navier-Stokes 方程，有限元采用中心差分法求解显示动力学方程；5) 更新所有 SPH 粒子和有限单元数据，结束该时间步长。

1.3 材料参数

由于侵彻过程中包含弹靶结构的变形和破坏，是一个极其复杂的过程。在数值模拟研究中，材料模型和参数的正确定义是数值模拟研究的必要前提。笔者研究的重点是 7.62 mm 穿甲子弹侵彻陶瓷/芳纶/PE-UHMW 复合装甲的过程，其中包括弹体的磨蚀、靶板的变形和破坏；因此，笔者采用 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC 材料模型定义子弹的本构关系，采用 *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CERAMICS 损伤模型和本构模型描述陶瓷的破坏特性和非线性变化^[16]，采用 *MAT_COMPOSITE_

DAMAGE 描述 PE-UHMW 层合板和芳纶层合板的本构关系。其中陶瓷材料、芳纶和 PE-UHMW 的具体材料参数如表 1 和 2 所示^[2, 17]。

表 1 陶瓷材料参数

材料参数	G/GPa	$\rho_0/(g/cm^3)$	A	N	B	M
陶瓷	183	3.163	0.96	0.65	0.35	1

表 2 芳纶和 PE-UHMW 材料参数

材料参数	芳纶	PE-UHMW	材料参数	芳纶	PE-UHMW
$\rho_0/(g \cdot cm^{-3})$	1.35	0.970	S_c/GPa	0.25	0.36
E_1/GPa	21.0	30.700	X_f/GPa	1.20	3.00
E_2/GPa	21.0	30.700	Y_f/GPa	1.20	3.00
E_3/GPa	4.6	1.970	Y_c/GPa	0.80	2.50
ν_{12}	0.31	0.008	G_{12}/GPa	1.20	0.73
ν_{13}	0.14	0.044	G_{13}/GPa	1.20	0.67
ν_{23}	0.14	0.044	G_{23}/GPa	1.20	0.67

2 数值模拟结果分析

2.1 复合装甲破坏过程分析

为分析 7.62 mm 穿甲子弹对陶瓷/芳纶/PE-UHMW 复合装甲的毁伤效应，以 800 m/s 的弹速侵彻复合装甲为例，图 6 为该工况下弹体的侵彻过程。在弹体侵彻陶瓷块的过程中，当弹体与陶瓷面板接触时，弹体内部生成了极高的压缩应力，远高于其屈服强度与破坏强度，弹体发生磨蚀和破碎，从而耗散了弹体一部分动能。对于陶瓷面板，弹体冲击会在其内部产生强大的压缩波，并生成极高的压缩应力，因为陶瓷材料易碎，断裂韧性低，抗拉强度低；因此，陶瓷基体会产生裂纹，并形成陶瓷锥，陶瓷锥内质点不断被加速并进一步压碎，部分陶瓷碎片开始逆向向弹道飞溅。

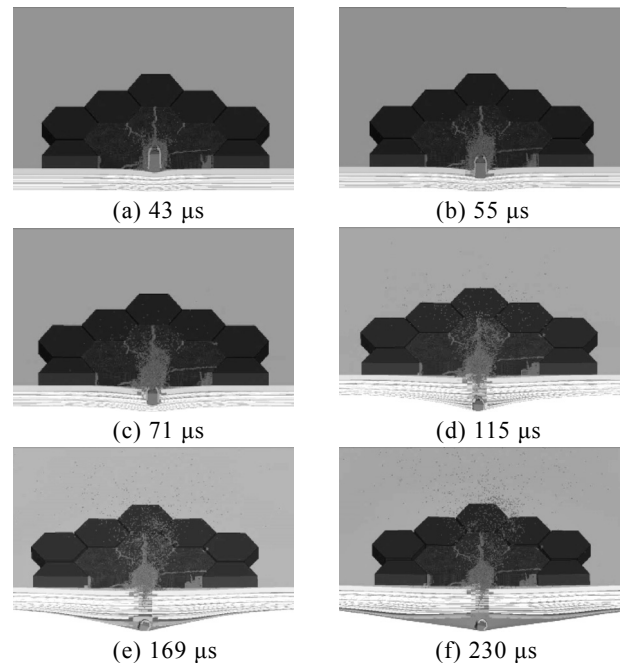


图 6 弹速为 800 m/s 时子弹的侵彻过程

陶瓷碎块将原本集中的冲击载荷分散到芳纶层合板，伴随着弹体继续侵彻芳纶层合板，芳纶层合板出现了大面积的损伤区域，由于应力波在芳纶层合板层间反射叠加，导致芳纶层合板被分层剪切破坏，抵抗力降低，并产生了弯曲变形，纤维拉伸断裂，最终芳纶层合板被弹体穿透，进一步消耗了弹体、陶瓷碎块的动能。

残余的弹体继续侵彻 PE-UHMW 层合板，在 PE-UHMW 层合板的迎弹面，主要是压缩和剪切破坏；关于 PE-UHMW 层合板背弹面，PE-UHMW 层合板变形破坏模式主要是整体弯曲变形、纤维层的拉伸破坏以及大面积的层间分层。当残余弹速较低时，PE-UHMW 层合板只有少量纤维层被弹体穿透，未穿透部分由于纤维的拉伸作用而产生。

整体的弯曲变形：当残余的弹速较大时，PE-UHMW 层合板的破坏程度会逐渐向局部破坏转变，破坏模式主要为迎弹面的压缩剪切破坏和背层纤维的小范围分层拉伸破坏。

2.2 不同弹速对复合装甲毁伤效能分析

图 7 是基于 FEM-SPH 耦合算法的不同弹速下最终时刻的仿真结果。从图 7 中可以看出：弹靶接触区域附近的陶瓷破坏极为严重，形成了锥形破坏区域；弹着点周围陶瓷块形成了碎块区，距撞击区域较远的陶瓷块形成了径向裂纹，如图 8 所示；相邻的陶瓷块由于互相挤压，部分陶瓷块边缘出现破坏。随着弹速的增大，陶瓷锥现象越加明显，弹体磨蚀更加严重，陶瓷块径向裂纹增多，芳纶层合板和 PE-UHMW 层合板的侵彻深度加深；当弹速为 800 m/s 时，弹体先后穿透了陶瓷面板和芳纶层合板，PE-UHMW 层合板利用大变形和断裂吸收消耗了弹体的残余动能，最终弹体停留在 PE-UHMW 层合板最后一层纤维层附近；当弹速为 1 000 m/s 时，弹体完全穿透复合装甲。

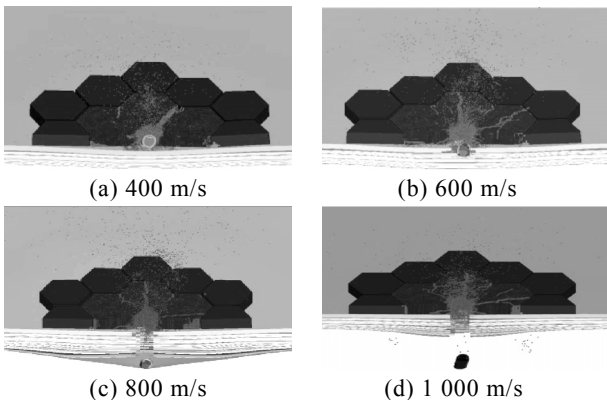


图 7 不同弹速下最终时刻的复合装甲仿真结果

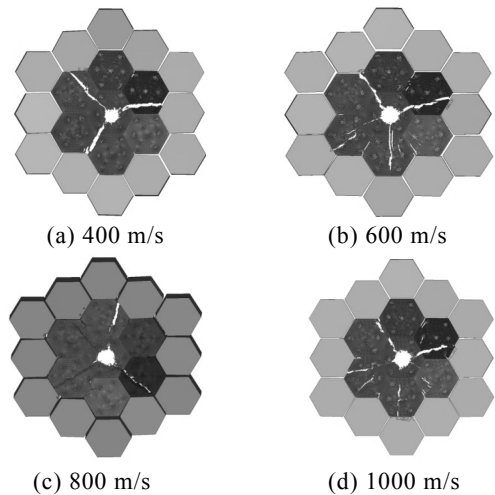


图 8 不同弹速下陶瓷面板破坏情况

图 9 和 10 分别为弹体的速度历程曲线和加速度历程曲线。以 800 m/s 的弹速侵彻复合装甲为例，结合图 9 和 10 中的数据可知：在侵彻陶瓷面板阶段，由于陶瓷面板对弹体的冲击起到了硬阻抗作用，弹速衰减曲线斜率较大，降速很快，加速度峰值大幅度增大；在侵彻芳纶层合板阶段，因为芳纶层合板的吸能作用，弹体速度继续衰减，曲线斜率减小，加速度曲线继续处于波动状态，但峰值有所降低；在侵彻 PE-UHMW 层合板阶段，利用层合板的剪切破坏、分层破坏和大变形进一步衰减弹速，曲线斜率继续降低，直至弹速衰减为 0，最终残余弹体镶嵌在 PE-UHMW 层合板的纤维层中。当弹速低于 400 m/s 时，弹体速度历程曲线比较光滑，弹体在侵彻陶瓷面板过程中，弹速衰减为 0；当弹速超过 900 m/s 时，弹体将穿透复合装甲，弹体仍存有较高的残余弹速。

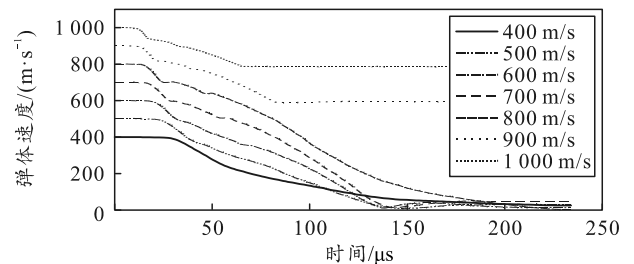


图 9 弹体速度历程曲线

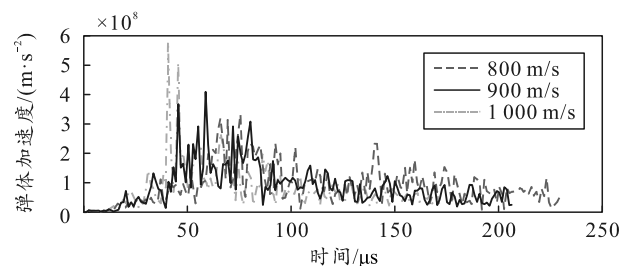


图 10 弹体加速度历程曲线

在不改变复合装甲结构的情况下, 复合装甲吸收的能量随着弹速的增大而增大, 背板最大变形值也随着弹速的增大而增大, 如图 11 所示。当弹速增大至 800 m/s 时, 吸收能量增加的速率开始下降, 而且背板最大变形值达到最大值; 当弹速增大至 900 m/s 时, 背板的最大变形值开始下降, 而且存在较高的残余弹速, 弹体最终穿透复合装甲。综上所述, 说明该复合装甲的弹道极限值应该在 800~900 m/s。

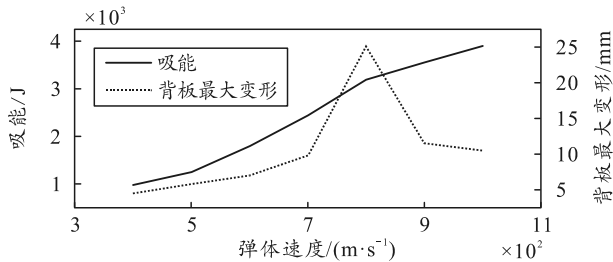


图 11 弹体速度变化与复合装甲吸能和背板变形关系

3 结论

笔者基于 FEM-SPH 耦合计算方法, 研究了 7.62 mm 穿甲子弹对复合装甲的毁伤效应, 该算法可准确描述陶瓷材料的破碎和飞散现象, 以及毁伤效应中陶瓷锥的形成和裂纹扩展过程。

1) 在侵彻陶瓷面板过程中, 陶瓷面板经过钝化、破碎弹体以及面板破碎等方式吸收弹体的部分动能;

2) 在侵彻芳纶层合板阶段, 陶瓷碎块将原本集中的冲击载荷分散到芳纶层合板, 利用芳纶层合板的分层剪切破坏、弯曲变形和纤维拉伸断裂, 进一步消耗了弹体、陶瓷碎块的剩余动能;

3) 在侵彻 PE-UHMW 层合板阶段, 当弹体的残余弹速较低时, PE-UHMW 层合板只有少量纤维层被弹体穿透, 未穿透部分由于纤维的拉伸作用而产生整体的弯曲变形; 当弹体的残余的弹速较大时, PE-UHMW 层合板的破坏程度会逐渐向局部破坏转变, 破坏模式主要为迎弹面的压缩剪切破坏和背层纤维的小范围分层拉伸破坏;

4) 在弹速小于弹道极限时, 陶瓷/芳纶/PE-UHMW 复合装甲吸能和背板最大变形值都随着弹速的增大而增大; 当弹速大于弹道极限时, 复合装甲吸能增加的速率开始下降。

参考文献:

[1] 高华, 熊超, 殷军辉, 等. 陶瓷复合靶板抗侵彻性能试

验及数值研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(3): 38-42.

[2] 王亚进, 王陶, 王良模, 等. 陶瓷/芳纶纤维复合靶板防弹性能研究及结构改进[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2020, 47(2): 74-80.

[3] 叶腾钊, 徐豫新, 杨胜, 等. 钢、陶瓷和 PE-UHMW 纤维层合结构抗破片侵彻最佳组合方式[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(8): 787-791.

[4] 赵晓旭, 徐豫新, 王树山. 抗破片侵彻钢/芳纶纤维叠层复合结构优化设计方法[J]. 振动与冲击, 2017, 36(8): 179-249.

[5] 陈宗兵. 钢/陶瓷/凯夫拉复合装甲弹道冲击响应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.

[6] 王长利, 周刚, 马坤, 等. 爆炸成型弹丸对陶瓷材料的侵彻实验研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2017, 40(3): 94-97.

[7] 郭婷婷, 任会兰, 宁建国. 陶瓷复合靶板的抗侵彻模型[J]. 高压物理学报, 2014, 28(5): 551-556.

[8] 高华, 熊超, 殷军辉. 纤维增强复合材料防弹装甲抗侵彻性能研究[J]. 飞航导弹, 2018(2): 91-95.

[9] 谈梦婷, 张先锋, 何勇, 等. 长杆弹撞击装甲陶瓷的界面击溃效应数值模拟[J]. 兵工学报, 2016, 37(4): 627-634.

[10] 郭英男. 陶瓷面板复合装甲抗冲击性能及其构型设计研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016: 39-49.

[11] 王志远, 王凤英, 刘天生, 等. 基于 FEM/SPH 算法弹丸侵彻多孔陶瓷板的数值模拟[J]. 高压物理学报, 2017, 31(1): 35-41.

[12] 刘赛, 张伟贵, 吕振华. 穿甲燃烧弹侵彻陶瓷复合装甲和玻璃复合装甲的 FEM-SPH 耦合计算模型[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(1): 105-116.

[13] 王婉莹, 王显会, 彭兵, 等. Si₃N₄ 陶瓷动态力学特性及抗弹性能研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(9): 273-279.

[14] 纪冲, 龙源, 方向. 基于 FEM-SPH 耦合的弹丸侵彻钢纤维混凝土数值模拟[J]. 振动与冲击, 2010, 29(7): 69-74.

[15] 李小军, 王维占, 张银, 等. 7.62mm 穿甲子弹斜侵彻复合装甲仿真研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2018, 32(5): 71-75.

[16] 王维占, 赵大勇, 冯顺山, 等. 12.7 mm 动能弹斜侵彻复合装甲的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(12): 81-90.

[17] 胡年明, 陈长海, 侯海量, 等. 高速弹丸冲击下复合材料层合板损伤特性仿真研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2017, 40(3): 66-69.