

两枚破片同时侵彻靶板间距效应及形状影响研究

张孟杨, 马佳佳*, 范天峰, 吉庆, 刘欢
(西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712009)

摘要: **目的** 探究破片着靶距离对侵彻行为及破片剩余速度的影响规律, 为多破片冲击条件下的防护材料优化设计提供理论依据。**方法** 利用有限元仿真方法, 以单破片侵彻靶板行为为基础, 研究不同形状破片的侵彻性能规律, 并以 2 枚破片在 10 mm 间距内同时撞击目标为例, 分析间距对目标抗穿透能力及破片侵彻行为的影响。**结果** 不同形状破片在 10 mm 间距内撞击目标时表现出显著的力学响应差异, 其中圆柱体破片穿透能力最强。当 2 枚破片的间距 $<0.5\sim 1$ 倍弹径时, 应力波叠加效应增强, 导致靶板局部损伤加剧, 形成集中破坏区域。**结论** 2 枚破片近距离同时穿靶时剩余速度的变化是靶板变形、应力波叠加、流体动力学效应耦合作用的结果, 可为破片侵彻性能评估及防护结构优化设计提供理论支持。

关键词: 破片侵彻; 剩余速度; 有限元仿真; 动力学

中图分类号: TB31

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)07-0290-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.07.034

Spacing Effect and Shape Effect of Two Fragments Simultaneously Penetrating a Target Plate

ZHANG Mengyang, MA Jiajia*, FAN Tianfeng, JI Qing, LIU Huan

(Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi Xianyang 712009, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the effect of fragment impact distance on the penetration behavior and fragment residual velocity to provide theoretical basis for the optimal design of protective materials under the condition of multi-fragment impact. By the finite element simulation method, based on the penetration behavior of a single fragment, the penetration performance of different shapes of fragments was studied, and the effect of the spacing on the penetration resistance and the penetration behavior of the target was analyzed with the example of two fragments impacting the target at the same distance of 10 mm. The mechanical responses of the fragments with different shapes were significantly different when they impacted the target at a distance of 10 mm, and the penetrating ability of the cylindrical fragment was the strongest. When the distance between the two fragments was less than 0.5-1 times the bullet diameter, the superposition effect of stress waves was enhanced, which led to the local damage of the target plate and the formation of a concentrated damage area. The variation of residual velocity when two fragments penetrate the target at a close distance at the same time is the result of the deformation of the target plate, the superposition of stress waves and the coupling effect of fluid dynamics. This study can provide theoretical support for the evaluation of fragment penetration performance and the optimal design of the protective structure.

KEY WORDS: fragment penetration; residual velocity; finite element simulation; dynamics

在现代防护材料的设计与评估中, 破片冲击侵彻问题具有重要的研究价值。破片类杀伤武器广泛应用

于军事领域及航天领域, 如战斗部效能评估、车辆装甲与人员防护设计、太空碎片撞击航天器外壳等, 研

收稿日期: 2025-01-17

*通信作者

究破片对目标的冲击侵彻行为对军事防护和航空航天等领域具有重要意义。

传统的破片冲击侵彻研究大多集中于单枚破片对目标的穿透能力等特性。舒张忆男等^[1]研究不同形状、质量和速度的钨合金破片侵彻钢靶板的过程, 并通过试验和数值模拟修正了穿甲深度计算公式, 为破片侵彻性能的预测提供更准确的模型。Iqbal 等^[2-3]通过试验和数值模拟方法重点研究弹丸形状、冲击速度和靶板厚度对靶板变形行为的影响, 分析靶板在不同冲击条件下的失效模式。刘铁磊等^[4]提出钨合金球形破片侵彻低碳钢的弹道极限速度计算模型, 并通过试验验证了模型精度, 为高速侵彻问题提供新的理论支撑。夏静雯等^[5]通过试验与仿真方法, 研究 93W 钨合金破片对铝合金靶板的弹道极限影响规律, 发现立方体破片的极限穿透速度小于球体, 且着靶姿态对立方体穿透速度具有显著影响。

国内外大量研究^[6-13]表明, 不同形状的破片在侵彻过程中的动态响应差异明显, 形状和着靶条件对靶板的破坏行为具有重要影响。但对多枚破片的交互效应, 如应力波叠加、破坏模式耦合的机制尚未系统揭示, 尤其是 AHEAD 弹 (含 152 枚子弹丸) 及其衍生同类型的子母弹的发展带来新的着靶情况^[14-21]。多枚破片同时作用于目标的相近区域时, 会因应力波叠加与靶板破坏模式的改变产生显著的交互效应, 对破片效能评估和防护材料的优化提出新的挑战。在实际应用中, 深入研究破片的力学性能与靶板破坏行为, 不仅可以完善破片冲击理论, 还能为防护材料设计与效能评估提供数据支持。

为了探究多破片同时侵彻目标靶板的损伤规律, 本文对 3 种不同形状的破片在不同着靶距离下的侵彻行为进行仿真分析, 重点研究破片剩余速度的变化规律, 不仅揭示了破片形状和间距对穿靶效果的耦合作用机制, 还能为防护结构的设计提供参考。

1 侵彻理论分析

用于评价防护装备的抗侵彻性能指标一般包括极限穿透速度和靶板破坏形貌等。其中, 极限穿透速度是指破片穿透靶板的临界速度, 用 V_{50} 表示, 即破片穿透靶板的概率为 50% 时破片的着靶速度。极限穿透速度 V_{50} 与破片及靶板的材料、形状、密度和厚度等密切相关。破片撞击靶板后, 靶板的破坏形态通常表现为局部塑性变形、剪切失效、穿孔扩展等。随着破片数量、形状、入射角度的不同, 靶板的破坏形貌会发生显著变化, 从而影响靶板的抗侵彻能力。常见的破坏形貌包括局部裂纹与塑性变形、穿孔扩展、靶板崩落等。破片接触到靶板时, 靶板表面通常会产生局部裂纹及塑性变形, 如果破片形状尖锐, 则变形更加集中; 当破片近距离同时作用时, 靶板可能出现多个穿孔, 若破片间距足够小, 穿孔区域会连通, 形成

大范围损伤。在侵彻过程中, 尤其是当靶板材质较脆时, 会在靶板背面发生崩落现象, 崩落的碎片可能形成新的毁伤元。

为了深入分析破片的侵彻行为, 数值仿真是重要的研究手段。LS-DYNA 是基于有限元方法的仿真软件, 适用于复杂的静动态问题求解, 广泛应用于爆炸工业等领域, 可用于材料性能评估、爆炸效应分析和武器系统设计等, 其高效的仿真能力能够有效缩短研发周期, 降低研发成本, 为行业技术发展提供支持。

2 破片侵彻过程仿真分析

本文利用 LS-DYNA, 采用有限元方法建立破片侵彻靶板的数值模型, 分析破片在不同间距条件下的侵彻行为及靶板损伤特性。通过调整破片形状和破片间距, 评估 2 枚破片侵彻过程中的剩余速度变化。

2.1 材料模型参数

本文建立不同形状破片侵彻靶板的有限元模型, 模型均采用拉格朗日算法和 SOLID164 三维实体单元。其中, 破片材料为钨合金, 靶板材料为 Q235A 钢, 均采用 Johnson-Cook 本构方程和 Mie-Gruneisen 状态方程来描述, 此模型考虑了靶板的非线性变形和破片的高速冲击行为。将靶板四边设置为非反射边界条件及固定约束条件, 破片与靶板的接触方式为面面侵蚀接触。破片的材料模型参数^[22]如下: 密度为 17.5 g/cm^3 , E 为 300 GPa , A 为 $1\,500 \text{ MPa}$, B 为 177 MPa , n 为 0.12 , C 为 1.6×10^{-3} , m 为 1 , D_1 为 3 , D_2 为 0.27 , D_3 为 -3.4 , D_4 和 D_5 为 0 , 体积声速为 $0.403 \text{ } \mu\text{s/cm}$, S_1 为 1.23 , S_2 和 S_3 为 0 , γ_0 为 1.67 , α 为 0 。钢靶的材料模型参数如下: 密度为 7.85 g/cm^3 , E 为 200 GPa , A 为 320 MPa , B 为 580 MPa , n 为 0.382 , C 为 $0.025\,5$, m 为 0.55 , D_1 为 0.3 , D_2 为 0.9 , D_3 为 2.8 , D_4 和 D_5 为 0 , 体积声速为 $0.456\,9 \text{ } \mu\text{s/cm}$, S_1 为 1.49 , S_2 为 0.6 , S_3 为 0 , γ_0 为 2.17 , α 为 0 。

2.2 网格无关性验证

为了探究靶板在破片侵彻时的力学响应, 捕捉侵彻过程中的应力传播、破坏及失效等力学行为, 划分 5 组尺寸不同的网格进行无关性验证。图 1 为不同网格尺寸的有限元模型, 表 1 为模型的网格尺寸与数量分布。

除网格尺寸不同, 其余设置均相同。其中, 破片尺寸为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, 破片初速为 $1\,000 \text{ m/s}$, 计算结束时间设置为 $50 \text{ } \mu\text{s}$, 利用后处理软件监测破片的侵彻过程及剩余速度。图 2 为不同网格尺寸下破片剩余速度的分布。

由图 2 可得, 当网格尺寸缩小时, 破片的剩余速度呈现先上升后逐渐平稳的趋势。随着网格尺寸的缩小, 破片的剩余速度由 682 m/s 增加到 806 m/s 。当破片

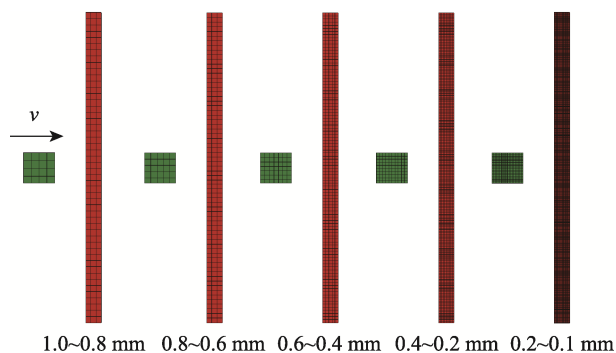


图1 不同网格尺寸的有限元模型

Fig.1 Finite element models with different mesh sizes

表1 模型的网格尺寸及数量
Tab.1 Mesh sizes and number of models

组别	破片网格尺寸/mm	靶板网格尺寸/mm	网格数量
1	1.0	0.8	3 782
2	0.8	0.6	6 708
3	0.6	0.4	25 147
4	0.4	0.2	200 500
5	0.2	0.1	1 604 000

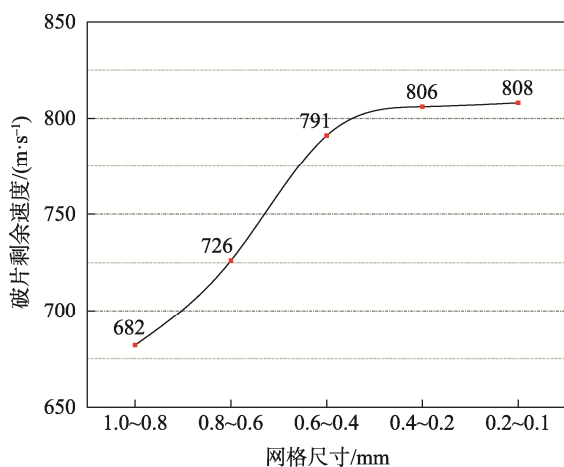


图2 不同网格尺寸下破片的剩余速度分布

Fig.2 Residual velocity distribution of fragments under different mesh sizes

和靶板的网格尺寸分别为 0.4 和 0.2 mm 时, 破片的平均速度逐渐趋于稳定。因此, 在保证计算效率的前提下, 后续仿真计算均采用 <0.4 mm 的网格尺寸进行数值模拟分析, 且对侵彻位置的靶板进行网格加密, 保证计算精度。

3 仿真结果及分析

3.1 单破片侵彻行为分析

首先, 分析单破片的侵彻行为, 统计不同形状破片在相同初速及边界条件下的剩余速度, 提取剩余速度、破片受力及靶板变形等关键特征, 然后以 2 枚破片 10 mm 距离内同时撞击为例, 研究不同撞击条件下破片穿靶能力的规律。假设破片均以正侵彻方式撞击靶板, 为了对比不同形状破片的穿靶能力, 调整破片的尺寸, 使得破片初速和质量均相同。表 2 为 3 种不同形状破片的尺寸和质量。

表2 不同形状破片的尺寸和质量

Tab.2 Size and weight of the fragments of different shapes

破片形状	半径/cm	底边长/cm	高度/cm	单枚质量/g
立方体		0.40	0.40	
圆柱体	0.22		0.42	1.12
球体	0.248			

当不同形状破片以 1 000 m/s 的初速对 2 mm 钢制靶板进行正侵彻时, 从破片接触到靶板开始计时, 破片侵彻过程的 Von-Mises 应力如图 3 所示。

不同形状破片侵彻靶板的过程中均会发生冲蚀和塑性变形, 其中破片发生镦粗变形, 边缘向外向上扩散弯曲, 并存在一定质量耗损; 靶板迎弹面发生翻边现象, 并产生充塞破坏, 破片侵彻形成的充塞块与破片以相同速度向外飞出。监测不同形状的破片侵彻靶板的剩余速度, 如图 4 所示。

结果显示, 在破片速度和质量相同的情况下, 圆柱体破片的剩余速度最高 (824 m/s), 其次是球体破

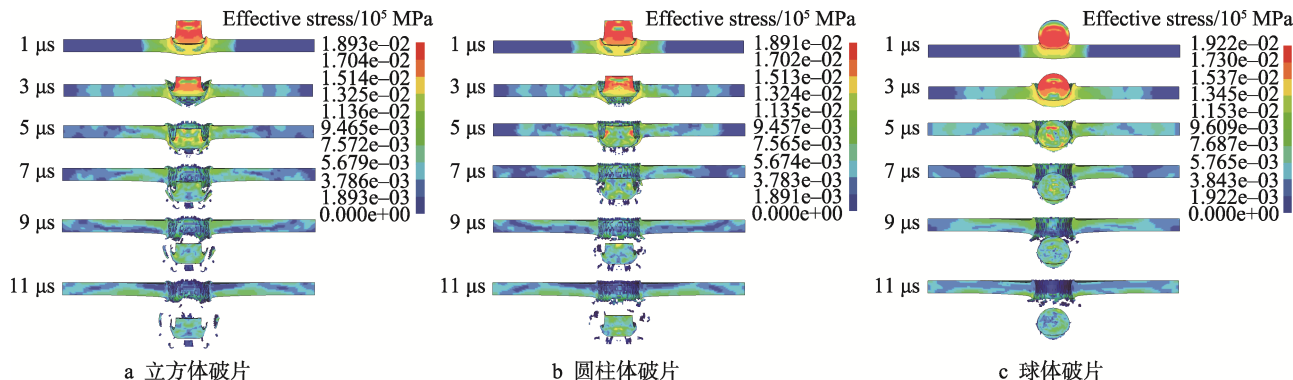


图3 不同形状破片在不同时刻侵彻靶板的 Von-Mises 应力分布

Fig.3 Von-Mises stress distribution of different shapes of fragments penetrating the target plate at different time

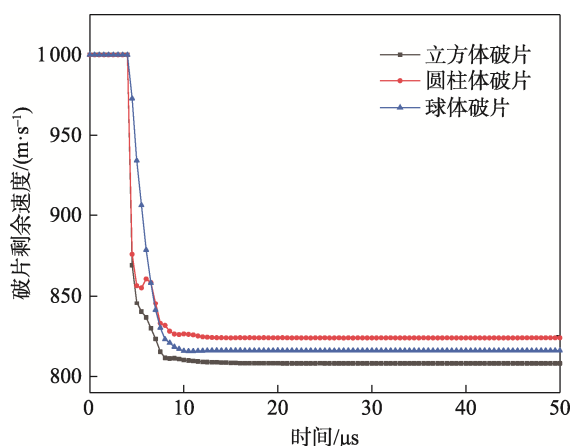


图 4 不同形状破片侵彻过程中的速度变化
Fig.4 Velocity change of different shaped fragments during the penetration

片 (816 m/s), 最后是立方体破片 (808 m/s)。因此, 初始动能保持相同的情况下, 圆柱体破片的侵彻性能最好。主要原因是圆柱体破片在侵彻过程中头部面积较小, 侵彻能量更集中, 能够形成有效的剪切破坏; 立方体破片侵彻靶板时, 4 个棱角会发生不规则的变形和侵蚀, 导致姿态发生偏转, 从而降低侵彻能力。

3.2 2 枚破片同时撞击分析

以 2 枚破片同时着靶为例, 探究着靶距离对破片侵彻效果的影响, 在研究单枚破片侵彻能力的基础上, 建立 2 枚间距不同的破片同时侵彻靶板的模型。以破片距离为 1~10 mm 设置 10 组不同的工况, 如图 5 所示。

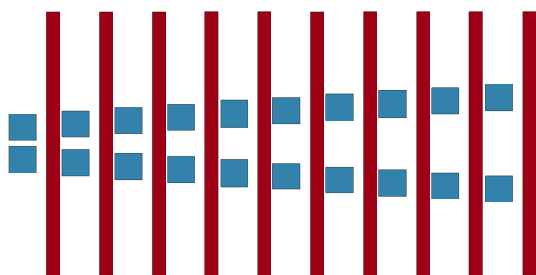


图 5 不同着靶距离的立方体破片侵彻模型
Fig.5 Cube fragment penetration model with different target distance

由于 2 枚破片在侵彻过程中受力完全相同, 其速度变化情况也相同, 因此对 2 枚破片的平均速度进行分析。破片的平均剩余速度随破片间距不同的变化趋势如图 6 所示。

为了对比 2 枚破片同时侵彻与单枚破片侵彻时的不同效果, 在图 6 中添加绿色划线作为单枚破片侵彻时的剩余速度, 可见立方体破片的着靶间距为 1 或 2 mm 时, 其剩余速度小于单枚破片侵彻时的剩余

速度, 其中间距为 1 mm 时剩余速度最小, 为 804 m/s; 当破片间距 ≥ 3 mm 时, 其剩余速度均大于单枚破片侵彻时; 当破片间距为 8 mm 时, 其剩余速度达到最大值, 为 812 m/s。这说明 2 枚破片同时侵彻靶板时产生相互影响, 造成一定的增强效应。随着破片间距的持续增大, 破片的剩余速度总体呈逐渐降低的趋势, 间距 >10 mm 时, 2 枚破片之间的影响逐渐减弱。

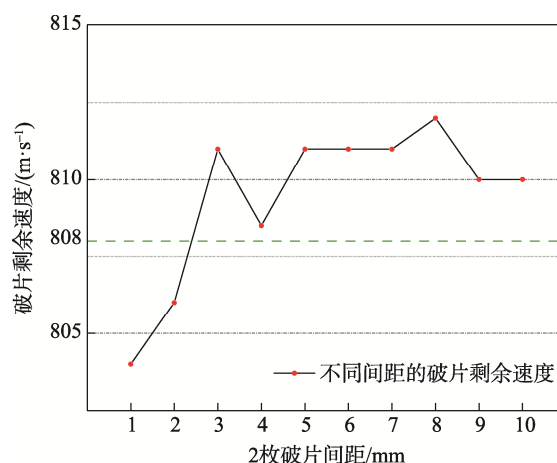


图 6 不同间距对立方体破片速度变化的影响趋势

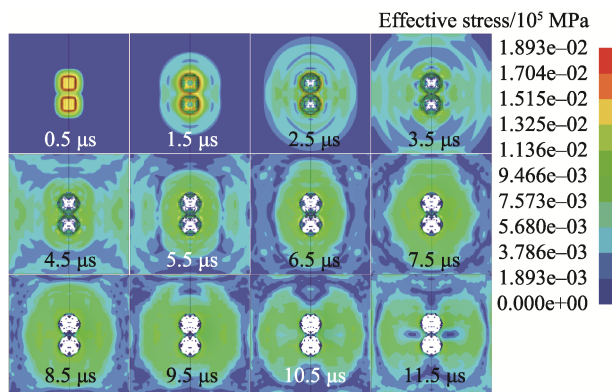
Fig.6 Effect trend of different spacing on the change of cube fragment velocity

从破片接触到靶板开始计时, 对间距为 3 mm 的立方体破片侵彻过程中靶板迎弹面的 Von-Mises 应力进行监测, 如图 7 所示。

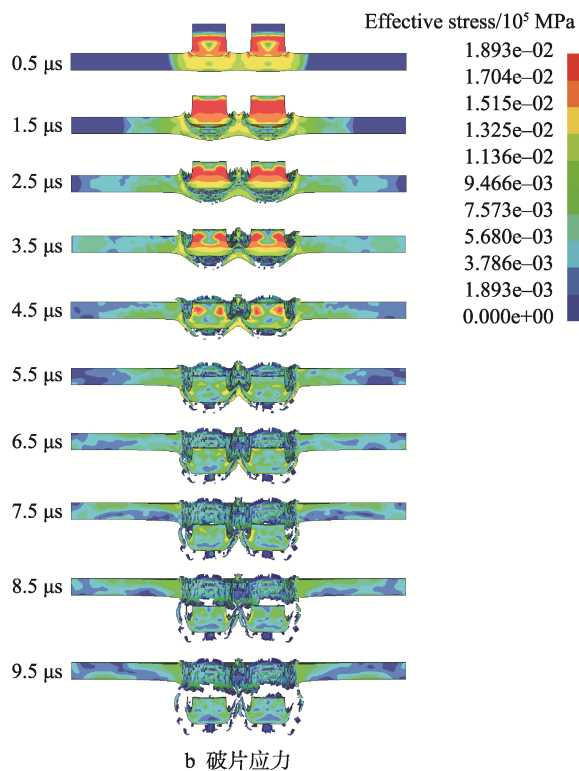
由图 7 可得, 间距为 3 mm 的 2 枚破片以 1 000 m/s 的速度侵彻靶板, 在 0.5 μ s 时破片接触靶板, 应力波开始相遇叠加, 冲击过程中破片头部发生墩粗变形, 靶板在高过载作用下发生剪切失效和部分冲塞破坏, 破片之间的靶板位置发生部分失效 (图 8), 破片形成的 2 个开孔为“临界相连”状态。

分别对圆柱体破片及球体破片进行侵彻仿真分析, 如图 9 所示。由图 9 可知, 圆柱体破片的剩余速度随着间距不同呈现周期性变化, 破片间距为 4 mm 时, 其剩余速度为 822 m/s, 小于单枚破片侵彻时; 其余间距下均 ≥ 824 m/s, 最大剩余速度在间距为 5、6 和 9 mm 时达到 831 m/s。球体破片间距为 1 mm 时剩余速度最小, 为 814 m/s; 破片间距为 3 mm 时, 其剩余速度与单枚破片侵彻时相同; 破片间距为 3、5、6、7、8、9 mm 时, 其剩余速度均为 818 m/s; 破片间距 >9 mm 时, 破片之间的影响逐渐减弱。

从破片接触到靶板开始计时, 分别对间距为 2 和 3 mm 的圆柱体破片及球体破片的 Von-Mises 应力进行监测, 如图 10~11 所示。



a 靶板应力



b 破片应力

图7 间距为3 mm的立方体破片侵彻过程中靶板迎弹面的 Von-Mises 应力

Fig.7 Von-Mises stress on the impact surface of the target plate during the penetration of cube fragments with a spacing of 3 mm

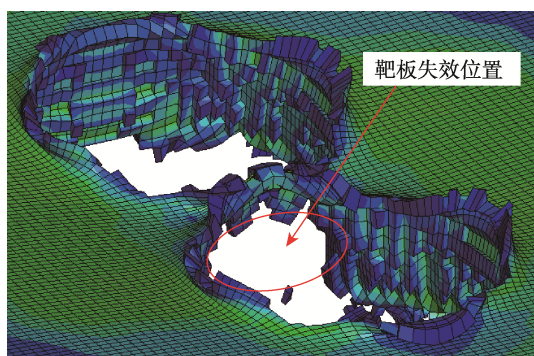
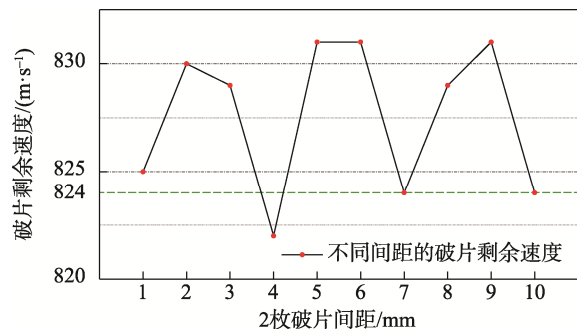
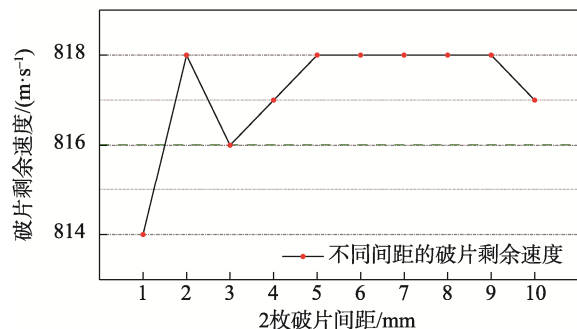


图8 靶板失效位置

Fig.8 Failure location of the target plate



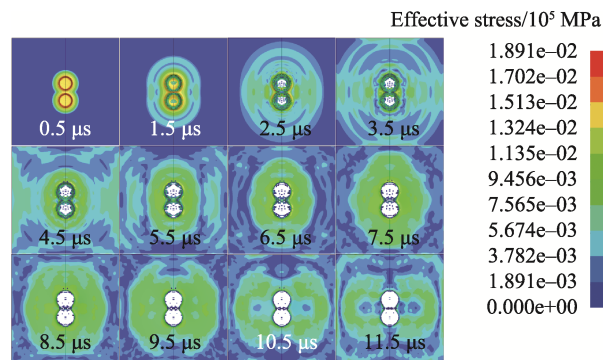
a 圆柱体破片



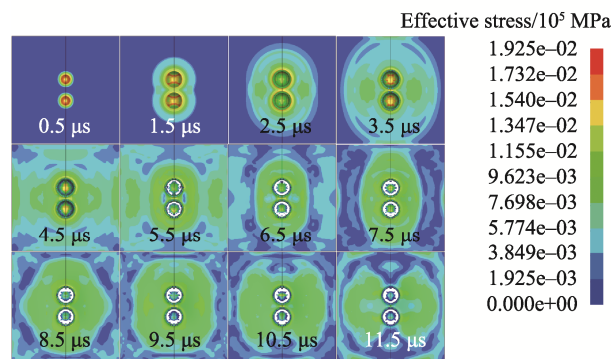
b 球体破片

图9 不同间距对圆柱体破片和球体破片速度变化的影响趋势

Fig.9 Effect trend of different spacing between the target on the velocity of cylindrical fragment and spherical fragment



a 圆柱体破片



b 球体破片

图10 间距为2 mm的圆柱体和球体破片侵彻靶板过程的 Von-Mises 应力

Fig.10 Von-Mises stress map of cylindrical fragment and spherical fragment during the penetration at a spacing of 2 mm

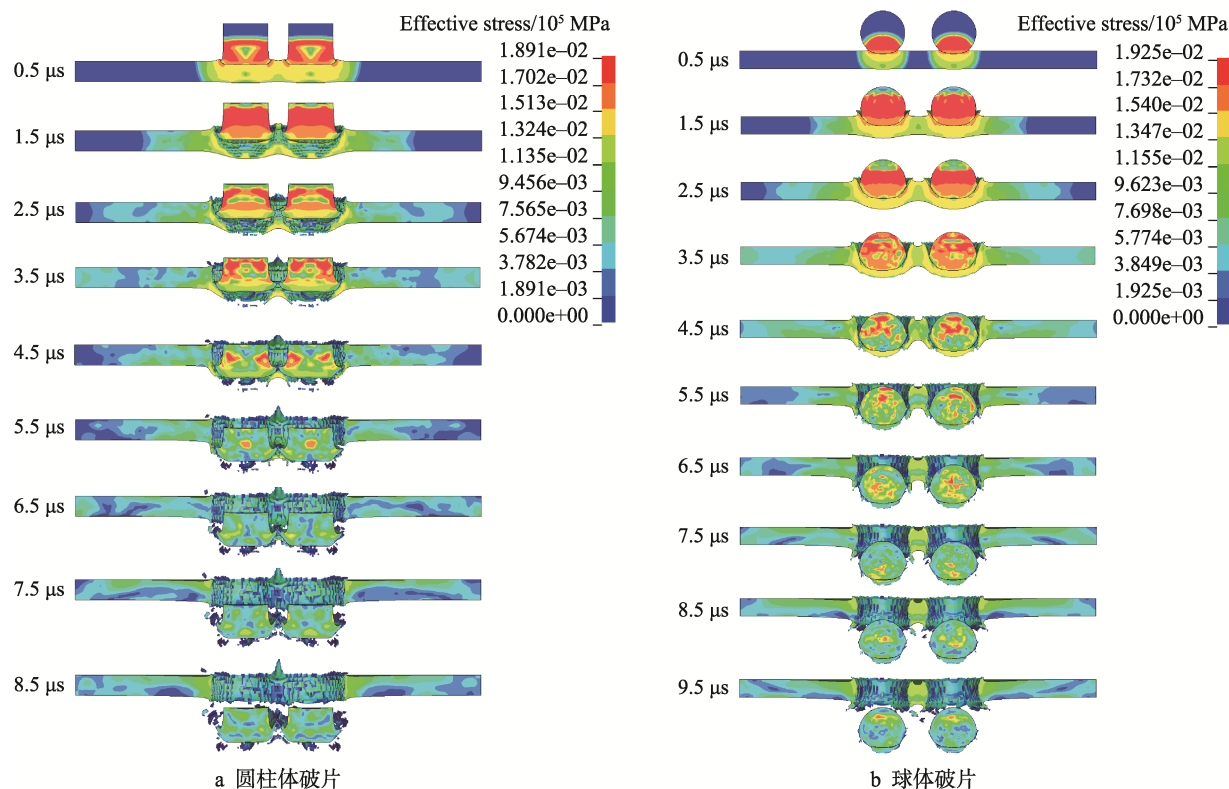


图 11 间距为 3 mm 的圆柱体和球体破片侵彻靶板过程的 Von-Mises 应力

Fig.11 Von-Mises stress map of cylindrical fragment and spherical fragment during the penetration at a spacing of 3 mm

由图 10 可知, 间距为 2 mm 的圆柱体破片侵彻靶板时, 初始阶段为侵彻的 0.5~1.5 μs 时, 应力集中于破片和靶板接触的区域, 迅速达到最大值, 破片与靶板的接触使得靶板局部发生塑性变形; 中间阶段为 1.5~5.5 μs 时, 破片的动能持续向靶板传递, 导致靶板内部逐渐出现应力扩展, 发生更加显著的塑性变形, 部分网格因失效被删除; 在 5.5~11.5 μs 时, 高应力区域仍在扩大, 小部分未失效但发生断裂的靶板被破片挤出, 与破片具有相同的初速向外飞出, 破片侵彻形成的 2 个孔最终因中间靶板单元失效形成集中损伤区域。

由图 11 可知, 球体破片与圆柱体侵彻的 3 个阶段均较为类似, 但与间距为 2 mm 的圆柱体破片相比, 球体破片穿过靶板需要的时间更长; 间距为 3 mm 的球体破片产生的孔径并未相连, 且被破片挤出的部分靶板质量较大。

3.3 破片间距及形状对侵彻效应的影响分析

本文通过数值仿真方法研究 3 种典型形状的破片在不同间距时侵彻靶板的规律, 发现影响破片侵彻能力的主要原因为破片使靶板局部材料发生塑性变形, 导致应力集中。这种变形在短时间内引起材料局部硬化, 从而增加破片的穿透阻力。破片在侵彻过程中导致靶板发生弯曲或凹陷, 可改变后续侵彻的靶板

厚度, 使穿透路径更长或更不规则, 从而降低侵彻能力。2 枚破片引发的应力波在靶板上叠加, 会改变局部靶板的抗冲击性能。

统计发现, 当 2 枚破片间距过小即 <1 mm 时, 破片之间产生负面影响, 降低破片的侵彻能力; 当破片间距为 2~9 mm 时, 破片侵彻能力均有一定提升, 且在 0.5~1 倍弹径间距内, 孔洞容易相连, 使得开孔面积扩大; 当破片间距 ≥ 10 mm 时, 破片耦合作用逐渐减弱, 其剩余速度接近单枚破片的撞击水平。不同的破片形状对侵彻效果具有显著影响, 由数值仿真结果可知, 圆柱体破片的长轴方向导致其发生周期性的应力波传播, 表现出明显的周期性变化, 但在球体破片中并未发现此现象。

综上所述, 可将破片间距对侵彻行为的影响分为 3 个阶段。

1) 小间距阶段。在破片间距 <1 mm 时, 较小的间距会导致破片在靶板上形成较大的局部损伤区域, 破片的剩余速度降低。这是由于破片之间相互作用造成靶板局部裂纹快速扩展, 从而减弱了破片的侵彻能力。

2) 临界间距阶段。在破片间距为 2~9 mm 时, 破片的相互作用减弱, 靶板的损伤区域逐渐趋向于独立, 不同形状的破片呈现不同规律, 其中正面碰撞的圆柱体呈现周期性变化规律。

3) 大间距阶段。在间距为 10 mm 及以上时, 破片逐渐表现为独立侵彻靶板, 剩余速度及损伤形态与单破片的侵彻状态基本一致。

4 结论

本文开展 3 种不同形状钨合金破片在不同间隔下正面侵彻钢制靶板的仿真分析, 得出以下主要结论。

1) 不同形状破片在近距离正面撞击条件下呈现明显的力学响应差异, 其中圆柱体破片的穿透能力最强, 其次是球体破片, 最后是立方体破片。

2) 2 枚破片间距越小, 应力波叠加效应越显著, 导致靶板局部损伤加剧。当着靶距离在 1 倍弹径内时, 侵彻形成的孔相连形成更大的毁伤面积; 当破片间距 ≤ 1 mm 时, 侵彻能力有所降低。

3) 按侵彻效果不同将破片间距分为 3 个区间 (1 mm 以内的小间距, 2~9 mm 的临界间距, >10 mm 的大间距), 揭示了不同间距破片的侵彻特点。

4) 通过调整破片的排布提高多破片打击的协同效应, 为防护材料的设计研究提供一定参考。

参考文献:

- [1] 舒张忆南, 梁争峰, 阮喜军, 等. 多种因素影响下钨合金破片的穿甲深度研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(4): 25-30.
SHU Z Y N, LIANG Z F, RUAN X J, et al. Research on Penetration Depth of Tungsten Alloy Fragments under Influence of Many Factors[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(4): 25-30.
- [2] IQBAL M A, KHAN S H, ANASRI R, et al. Experimental and Numerical Studies of Double-Nosed Projectile Impact on Aluminum Plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 54: 232-245.
- [3] IQBAL M A, TIWARI G, GUPTA P K, et al. Ballistic Performance and Energy Absorption Characteristics of Thin Aluminium Plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 77: 1-15.
- [4] 刘铁磊, 徐豫新, 王晓锋, 等. 钨合金球形破片侵彻低碳钢的弹道极限速度计算模型[J]. 兵工学报, 2022, 43(4): 768-779.
LIU T L, XU Y X, WANG X F, et al. Ballistic Limit Calculation Model of Tungsten Alloy Spherical Fragments Penetrating into Low Carbon Steel Plate[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(4): 768-779.
- [5] 夏靖雯, 陈智刚, 顾敏辉, 等. 钨合金破片侵彻 2024 铝靶的数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(15): 156-162.
XIA J W, CHEN Z G, GU M H, et al. Numerical Simulation for Tungsten Alloy Fragments Penetrating 2024 Aluminum Target[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(15): 156-162.
- [6] SCHONBERG W, RYAN S. Predicting Metallic Armour Performance when Impacted by Fragment-Simulating Projectiles-Model Review and Assessment[J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 158: 104025.
- [7] NISHIDA M, HIRAIWA Y, HAYASHI K, et al. Scaling Laws for Size Distribution of Fragments Resulting from Hypervelocity Impacts of Aluminum Alloy Spherical Projectiles on Thick Aluminum Alloy Targets: Effects of Impact Velocity and Projectile Diameter[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 109: 400-407.
- [8] ZHAI C L, CHEN X W. Damage Assessment of the Target Area of the Island/Reef under the Attack of Missile Warhead[J]. Defence Technology, 2020, 16(1): 18-28.
- [9] 张霄, 李德聪. 不同形状破片对 945 钢靶的侵彻性能的影响规律分析[J]. 船舶与海洋工程, 2022, 38(6): 68-74.
ZHANG X, LI D C. An Analysis on the Influence of Fragment Shape on the Penetration Performance to 945 Steel Target[J]. Naval Architecture and Ocean Engineering, 2022, 38(6): 68-74.
- [10] STERGIOU T, BAXEVANAKIS K P, ROY A, et al. Mechanics of Ballistic Impact with Non-Axisymmetric Projectiles on Thin Aluminium Targets. Part II: Energy Considerations[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 143: 106818.
- [11] TIWARI G, IQBAL M A, GUPTA P K. Influence of Target Span and Boundary Conditions on Ballistic Limit of Thin Aluminum Plate[J]. Procedia Engineering, 2017, 173: 169-174.
- [12] TEIXEIRA P, PINA L, ROCHA R, et al. Parametric Analysis of Energy Absorption Capacity of Thin Aluminum Plates Impacted by Rigid Spherical Projectiles[J]. Thin-Walled Structures, 2021, 159: 107240.
- [13] MOHAMMAD Z, GUPTA P K, BAQI A. Experimental and Numerical Investigations on the Behavior of Thin Metallic Plate Targets Subjected to Ballistic Impact[J].

- International Journal of Impact Engineering, 2020, 146: 103717.
- [14] 王歌, 张春, 林智伟, 等. 多束定向预制破片弹开舱距离研究[J]. 兵工学报, 2022, 43(增刊 1): 115-120.
WANG G, ZHANG C, LIN Z W, et al. Study on Ejection Distance of Multi-Beam Directional Prefabricated Fragment[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(Sup.1): 115-120.
- [15] ZHU F L, CHEN Y, ZHU G L, et al. Numerical Simulation Study on Penetration Performance of Depleted Uranium (DU) Alloy Fragments[J]. Defence Technology, 2021, 17(1): 50-55.
- [16] TSIROGIANNIS E C, DASKALAKIS E, HASSAN M H, et al. Ballistic Design and Testing of a Composite Armour Reinforced by CNTS Suitable for Armoured Vehicles[J]. Defence Technology, 2024, 32: 173-195.
- [17] GRISARO H Y, DANCYGIER A N. Characteristics of Combined Blast and Fragments Loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 116: 51-64.
- [18] XU Y X, HAN X G, ZHAO X X, et al. Experimentation Research on Failure Behavior of Tungsten Alloy Penetrating Low Carbon Steel Plate at High Projectile Velocity[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(1): 122-126.
- [19] HONG D, LI W B, ZHENG Y, et al. Ballistic Performance of Spherical Fragments Penetrating PCrNi₃MoV Target Plates[J]. Defence Technology, 2024, 33: 295-307.
- [20] RAI R, KUMAR G, DAGAR S, et al. Numerical Simulation of Ballistic Impact on Aluminium 5083-H116 Plate with Johnson Cook Plasticity Model[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 10619-10627.
- [21] LI L, ZHANG Q C, LU T J. Ballistic Penetration of Deforming Metallic Plates: Experimental and Numerical Investigation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2022, 170: 104359.1-104359.14.
- [22] 辛春亮, 朱星宇, 薛再清, 等. 有限元分析常用材料参数手册[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2022: 17-131.
XIN C L, ZHU X Y, XUE Z Q, et al. Handbook of Common Material Parameters for Finite Element Analysis[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2022: 17-131.