

高压物理学报

侵彻双层靶板过程中PBX装药的宏-细观损伤数值模拟研究

张晓微 赵河明 郑晓波 张巧 王志军 肖有才

Numerical Simulation Study on Macro-Microscopic Damage of PBX Charge during Penetration of Double-Layer Targets

ZHANG Xiaowei, ZHAO Heming, ZHENG Xiaobo, ZHANG Qiao, WANG Zhijun, XIAO Youcai

引用本文:

张晓微, 赵河明, 郑晓波, 等. 侵彻双层靶板过程中PBX装药的宏-细观损伤数值模拟研究[J]. 高压物理学报, 2024, 38(6):064201. DOI: 10.11858/gywlxb.20240795

ZHANG Xiaowei, ZHAO Heming, ZHENG Xiaobo, et al. Numerical Simulation Study on Macro-Microscopic Damage of PBX Charge during Penetration of Double-Layer Targets[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38(6):064201. DOI: 10.11858/gywlxb.20240795

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20240795>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

非均质岩石动态断裂损伤细观特征模拟分析

Simulation Analysis of Mesoscale Characteristics in the Dynamic Fracture Damage of Heterogeneous Rock

高压物理学报. 2023, 37(4): 044204 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230638>

不同类型装药侵彻安全性数值模拟

Numerical Simulation for PBX Charges Safety of Different Types During Penetration

高压物理学报. 2021, 35(6): 065101 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20210754>

基于固有型内聚力模型模拟双层夹胶玻璃冲击断裂行为

Simulation of the Impact Fracture Behavior of Double Laminated Glass Based on Intrinsic Cohesive Model

高压物理学报. 2019, 33(6): 064105 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190718>

拉伸加载下PBX炸药力学性能的分子动力学模拟

Molecular Dynamics Simulation of Mechanical Properties of Polymer Bonded Explosive under Tension Loading

高压物理学报. 2022, 36(4): 044201 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20220521>

HMX晶体热致相变对损伤的影响

Effects of Heating-Induced Phase Transition on Damage for HMX Crystal

高压物理学报. 2022, 36(3): 030105 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20220545>

HMX晶体高温相变及裂纹对点火的影响

Influence of High Temperature Phase Transformation and Cracks on Ignition of HMX Crystal

高压物理学报. 2022, 36(3): 030104 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20220550>

DOI: 10.11858/gywlxb.20240795

侵彻双层靶板过程中 PBX 装药的 宏-细观损伤数值模拟研究

张晓微¹, 赵河明¹, 郑晓波², 张巧¹, 王志军¹, 肖有才¹

(1. 中北大学机械与动力工程学院, 山西 太原 030051;
2. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 针对高速战斗部侵彻双层目标时装药的损伤问题, 基于内聚力模型开展了 PBX 装药战斗部侵彻双层靶板的数值模拟研究。采用内聚力模型计算装药损伤的出现与演化, 分析了侵彻速度与损伤发生的关系, 通过损伤比对侵彻结束后 PBX 装药的损伤进行了量化, 建立了 PBX 装药细观损伤仿真模型, 研究了侵彻双层靶板过程中 PBX 装药细观损伤机制。结果表明: 当弹体垂直侵彻双层靶板时, 在压-拉反复作用下, 装药尾部形成了垂直于加载方向的贯穿裂纹, 且装药的损伤程度随着侵彻速度的增大而增大; 在侵彻双层靶板过程中, PBX 装药的主要损伤模式是界面脱粘, 微裂纹最先出现在颗粒边角处, 并且逐渐增多, 最终界面微裂纹失稳扩展并汇聚为连续的主裂纹。

关键词: 双层靶板; PBX 装药; 内聚力模型; 宏-细观损伤模拟; 微裂纹

中图分类号: O381; O521.9

文献标志码: A

高速侵彻战斗部在攻击多层目标时, 装药受高频循环脉冲载荷作用而产生损伤积累, 影响弹药侵彻能力和装药安定性。李媛媛等^[1]开展了装药侵彻安定性试验, 通过回收试验弹, 发现内部装药没有发生点火反应, 含能颗粒未产生明显的破碎和穿晶断裂等微观损伤。陈文等^[2]对侵彻试验后的回收装药开展了冲击起爆隔板试验, 发现严重损伤区域主要分布于装药的头部和尾部, 中间区域几乎不发生损伤, 装药损伤越严重, 冲击感度越高。Li 等^[3-4]基于 Visco-SCRAM 损伤模型和热点模型开展了钻地战斗部侵彻混凝土的数值模拟, 由于钻地弹头部主要承受三轴压缩载荷, 裂纹处于自锁状态, 因此, 钻地弹的头部损伤不严重, 装药尾端承受拉-压反复载荷, 裂纹易发生扩展, 尾部装药损伤严重。赵生伟等^[5]通过逆弹道试验测试和数值模拟, 得到了弹体侵彻的应力波峰值和等效脉宽。成丽蓉等^[6]基于微裂纹摩擦和孔洞塌缩机制, 开展了钻地战斗部侵彻单层和多层靶板数值模拟, 发现严重损伤区域主要分布于装药头部和尾部, 并解释了相应的试验现象。此外, 不同学者也采用内聚力方法对不同工况下装药侵彻靶板时装药的损伤开展了研究, 获得了不同工况下装药的损伤模式^[7-10]。

准确掌握侵彻战斗部装药在循环脉冲载荷作用下的损伤演化机制, 是预测其攻击多层目标安全性的关键。当前, 循环脉冲载荷作用下战斗部装药的损伤演化机制研究缺乏实验数据, 尚无准确的理论模型, 大多数研究都是通过宏观实验和计算粗略地估计发生损伤的位置, 并不能分析炸药在循环脉冲载荷作用下的细观变形机制和局部响应。主要原因是侵彻战斗部装药的损伤行为具有多尺度的特点, 需要从细观至宏观多个层次上进行关联分析, 单一尺度的模拟方法只能对一定尺度范围内的损伤问题

* 收稿日期: 2024-04-18; 修回日期: 2024-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(11802273, 12372368); 山西省基础研究面上项目(202303021211142); 国防科工局基础科研重点项目(JCKY2017207B055)

作者简介: 张晓微(1986—), 女, 博士研究生, 主要从事弹药安全研究. E-mail: hgdzhangxiaowei@163.com

通信作者: 肖有才(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要从事材料动态力学、损伤力学、爆炸与冲击相关问题研究. E-mail: xiaoyoucai@nuc.edu.cn

进行研究。因此,本研究将对 PBX 装药侵彻双层靶板过程中的宏-细观损伤进行数值模拟,建立弹体侵彻双层靶板的内聚力模型,探讨弹体侵彻双层靶板时 PBX 装药的损伤演化规律,结合 PBX 装药细观损伤模型,分析 PBX 装药侵彻双层靶板过程中的细观损伤演化特征。

1 有限元模型

1.1 几何模型

图 1 为建立的弹-靶仿真分析有限元模型。图 2 给出了弹体尺寸,弹头曲径比(caliber radius head, CRH)约为 2.5。靶板为 2 层,厚度为 10 mm,宽度为 600 mm,靶板间隔为 250 mm,靶板宽度与弹体外径之比大于 10,可以忽略侵彻过程中靶板边界效应的影响^[11-12]。

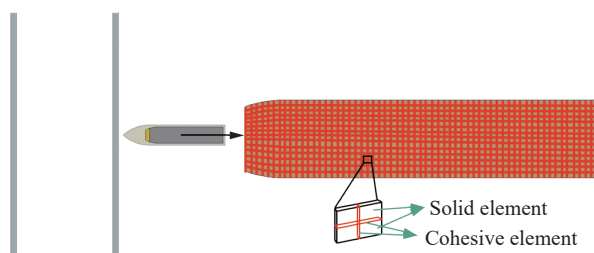


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

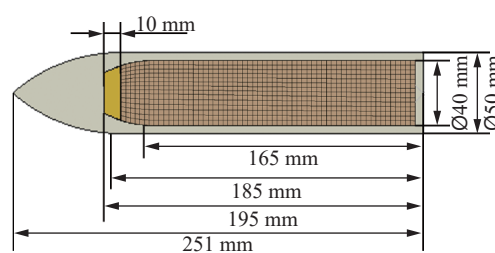


图 2 弹体几何参数

Fig. 2 Geometric parameters of the projectile

弹-靶有限元模型中所有单元类型均为 C3D8。弹壳网格尺寸为 2.5 mm,缓冲层和装药网格尺寸均为 2 mm,靶板中心区域为侵彻接触区,网格尺寸约为 1 mm,非侵彻接触区域的网格自然过渡,逐渐增大。采用自编的内聚力单元插入程序,在每个装药的实体单元之间全部插入零厚度内聚力单元,用以模拟侵彻过程中裂纹的萌生和扩展,并验证所有网格的收敛性。在不影响零厚度内聚力单元对损伤模拟的条件下,为提升计算效率,在计算模型中采用了缩减积分,导致出现微小的沙漏现象。

1.2 材料模型

弹壳、靶板和缓冲层材料分别为 35CrMnSi 钢、45 钢和聚碳酸酯,采用 Johnson-Cook 模型描述其在不同应变率下的力学性能,表达式为

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中: σ_y 为屈服应力, A 、 B 、 n 、 C 和 m 为材料的常数, ε_p 为等效塑性应变, $\dot{\varepsilon}^*$ 为无量纲的等效塑性应变率, T^* 为无量纲温度。弹壳^[13]、靶板^[14]、缓冲层^[15]的主要材料参数见表 1,其中: ρ 为密度, μ 为泊松比, E 为弹性模量, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率。

表 1 弹壳、靶板和缓冲层的材料参数

Table 1 Parameters of projectile shell, target, and buffer layer

Material	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	μ	E/GPa	A/MPa	B/MPa	n	C	m	$\dot{\varepsilon}_0/\text{s}^{-1}$
35CrMnSi steel	7830	0.30	204	1440	1501	0.4403	0.039	0.404	10^{-3}
45 steel	7830	0.33	210	496	434	0.2600	0.014	1.030	1.0
Polycarbonate	1190	0.38	3.6	84	3228	3.1456	0.089	1.010	0.1

靶板的损伤参数 D 与等效塑性应变增量 $d\varepsilon_p$ 之间的关系采用 Johnson-Cook 损伤模型描述

$$D = \int \frac{d\varepsilon_p}{\varepsilon_f} \quad (2)$$

式中: ε_f 为失效应变。

$$\varepsilon_f = \left[d_1 + d_2 \exp\left(\frac{d_3 \sigma_p}{\sigma_y}\right) \right] (1 + d_4 \ln \varepsilon^*) (1 + d_5 T^*) \quad (3)$$

式中: d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 和 d_5 为材料的损伤参数,分别为 0.10、0.76、1.57、0.005 和-0.84; σ_p 为静水压力。

采用各向同性弹塑性模型描述 PBX 装药的力学性能,其密度、泊松比、弹性模量、屈服强度和硬化模量分别为 1650 kg/m^3 、0.3、4.5 GPa、49 MPa 和 1 GPa。另外,采用双线性内聚力模型描述 PBX 装药的损伤产生与演化过程,结合文献 [7, 16–18] 得到侵彻条件下 PBX 装药的内聚力单元参数,结果见表 2,其中: K_{coh} 为内聚力单元刚度, σ 为内聚力单元强度, G 为内聚力单元断裂能。

表 2 PBX 装药的内聚力单元参数
Table 2 Cohesive elements parameters of PBX charge

$K_{\text{coh}}/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	σ/MPa	$G/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$
1 700	23	0.17

1.3 装药细观损伤模拟方法

从宏观模型中提取危险位置信息作为边界条件施加到细观模型上,根据侵彻靶板过程中载荷传递特点^[1],将细观模型一端固定,并在固定端的对边施加提取到的载荷,如图 3 所示^[19],在细观模型中 2 个相邻网格单元表面之间插入内聚力单元。由于 PBX 装药是一种高颗粒填充材料,通常采用双线性牵引-分离规律描述黏性模型中牵引与分离之间的非线性关系^[20–22]。图 4 为双线性内聚力法则的示意图,其中: δ_n^0 和 δ_t^0 分别为法向和切向临界张开位移, δ_n^f 和 δ_t^f 分别为法向和切向失效位移, δ_n 和 δ_t 分别为法向和切向位移, σ_{nm} 和 σ_{tm} 分别为内聚力单元的法向和切向临界强度。在驱动力作用下,相对的单元面逐渐分离,正应力和剪应力线性增长,其斜率就是内聚力单元刚度,当应力达到临界强度 σ_{nm} 和 σ_{tm} 时,单元开始产生损伤,损伤的起始法则为

$$\max\left\{\frac{\langle\sigma_n\rangle}{\sigma_{\text{nm}}}, \frac{\langle\sigma_t\rangle}{\sigma_{\text{tm}}}\right\} = 1 \quad (4)$$

式中: σ_n 和 σ_t 分别为内聚力单元的法向和切向应力;“ $\langle \rangle$ ”为 Macaulay 括号,定义为

$$\langle\sigma\rangle = \begin{cases} \sigma & \sigma \geq 0 \\ 0 & \sigma < 0 \end{cases} \quad (5)$$

内聚力单元的分离过程由如下方程控制

$$\sigma_n = \begin{cases} \sigma_{\text{nm}} \frac{\delta}{\delta_n^0} & 0 \leq \delta \leq \delta_n^0 \\ \sigma_{\text{nm}} \frac{\delta_n^f - \delta}{\delta_n^f - \delta_n^0} & \delta_n^0 < \delta \leq \delta_n^f \end{cases} \quad (6)$$

$$\sigma_t = \begin{cases} \sigma_{\text{tm}} \frac{\delta}{\delta_t^0} & 0 \leq \delta \leq \delta_t^0 \\ \sigma_{\text{tm}} \frac{\delta_t^f - \delta}{\delta_t^f - \delta_t^0} & \delta_t^0 < \delta \leq \delta_t^f \end{cases} \quad (7)$$

当张开位移达到失效位移 δ_n^f 和 δ_t^f 后,内聚力单元完全失效。

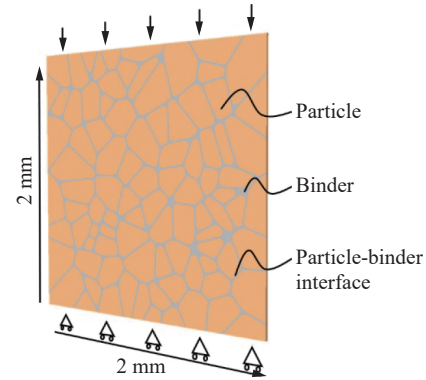


图 3 有限元模型中的载荷施加

Fig. 3 Loading configuration in the finite element model

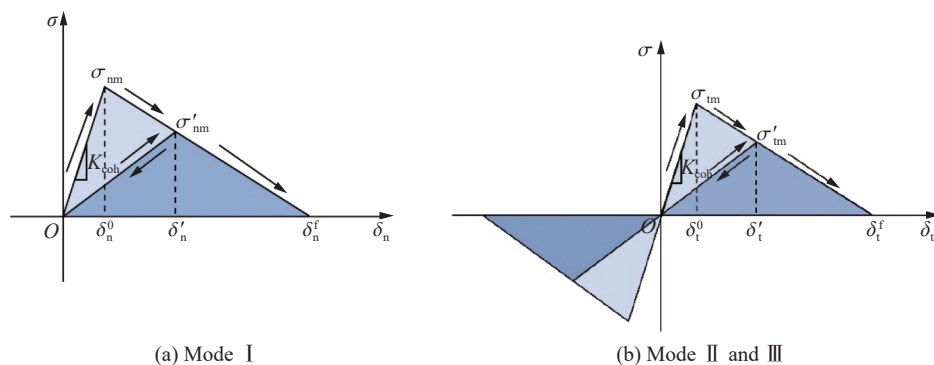


图 4 内聚力单元的双线性力-位移定律模型

Fig. 4 Bilinear traction-separation law model of cohesive element

针对 PBX 装药颗粒的细观形貌特征, 通过 Voronoi 方法生成的泰森多边形构建细观几何模型, 如图 5 所示, 其中, 颗粒含量为 87.39%, 粒径在 50~300 μm 之间。采用线弹性模型描述含能颗粒的力学性质, 其杨氏模量和泊松比分别为 18.4 GPa 和 0.25, 聚合物黏结剂采用线黏弹性本构模型^[14] 描述。RVE 模型的长和宽均为 2 mm, 为了解决单元入侵问题, 设定其厚度为 0.02 mm^[19]。图 5(b)、图 5(c) 和图 5(d) 显示了嵌在 PBX 装药颗粒单元边界、黏结剂单元边界及颗粒-黏结剂界面上的内聚力单元模型, 其中: 红色表示插入不同区域的零厚度内聚力单元。

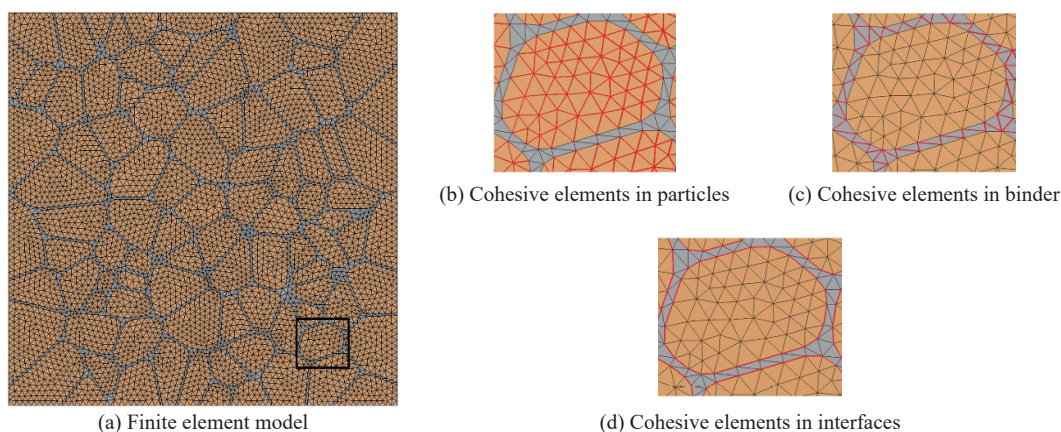


图 5 有限元模型中的内聚力单元

Fig. 5 Cohesive elements in the finite element model

PBX 装药的黏结性能强烈依赖于黏结参数。在双线性模型中, 每个界面都包括黏结强度、临界位移和初始刚度 3 个参数, 对于 3 个界面, 则共有 9 个参数。因此, 需要一种适应性强、收敛速度快、精度高的逆算法来获取 PBX 装药的内聚参数。常用的内聚力单元参数获取方法包括 L-M 算法^[23]、梯度优化算法^[24]、反演分析法^[25]、分子动力学模拟法^[26], 然而, 这些方法都仅针对某一种加载条件, 具有一定的局限性。改进后的卡尔曼滤波 (Kalman filter, KF) 算法是一种适应性较强的最优递归算法, Xu 等^[27] 对其进行了详细的描述, 但是 KF 算法在处理复杂的非线性问题时难以保证精度。Hook-Jeeves 算法是一种直接搜索方法^[28-30], 具有很高的收敛速度和计算精度, 但前提是初始参数接近准确值。结合 2 种算法的优点, 可以得到一种杂交反演方法^[19], 能够确保模型在相应的应变率范围内体现 PBX 装药的力学性能。

图 6 显示了 PBX 装药在 2 000 s^{-1} 应变率下的应力-应变曲线。以该曲线为目标函数, 采用 KF 与 Hook-Jeeves 杂交算法^[19] 进行优化求解, 表 3 列出了优化后 PBX 装药的内聚力单元参数。

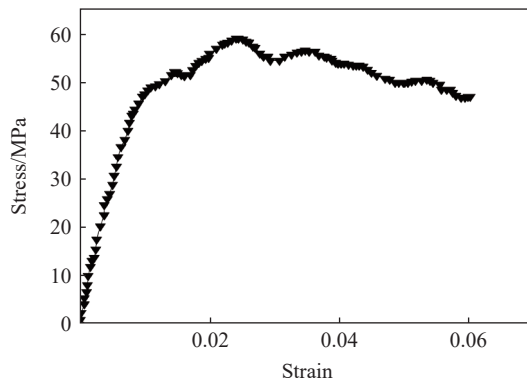
图 6 PBX 在 2000 s^{-1} 应变率下的应力-应变曲线Fig. 6 Stress-strain curves of PBX at the strain rate of 2000 s^{-1}

表 3 PBX 装药颗粒、黏结剂和界面内聚力单元参数

Table 3 Cohesive elements parameters of particle, binder and interface

Cohesive element	$K_{\text{coh}}/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	σ/MPa	$G/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$
Particle	1800	6.00	0.010
Binder	900	7.50	0.150
Particle-binder interface	800	2.75	0.012

2 结果与讨论

2.1 装药损伤特征

基于内聚力单元的弹体侵彻双层靶板数值模拟可以准确得到侵彻过程中裂纹的扩展位置、时间历程等信息。图 7 给出了以 400 m/s 的速度垂直侵彻双层靶板时装药损伤区域随时间的演化, 损伤度为 1.0 时代表完全损伤。弹体撞击靶板会形成压缩波, 并以不同的速度在壳体和装药中传播; 当装药中的压缩波到达弹体尾部时, 将在装药与壳体界面处发生反射形成拉伸波进入装药, 拉伸波在装药中会衰减, 因此, 装药尾部的拉伸波强度最大, 当拉伸应力超过装药内聚力单元强度时开始出现裂纹, 最终在装药尾部出现 2 道垂直轴向的贯穿裂纹。

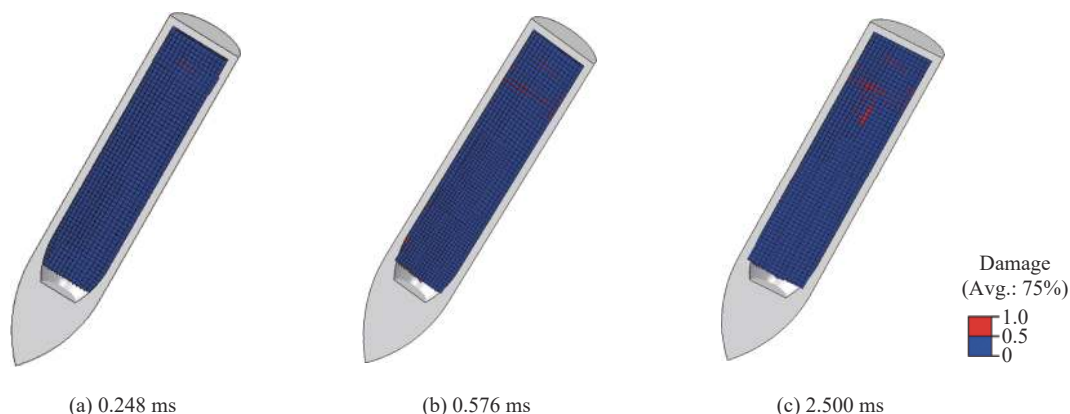


图 7 数值模拟得到的装药内部损伤演化历程

Fig. 7 Damage evolution contour of explosive charge obtained from numerical simulation

图 8 给出了侵彻实验结束后装药的 CT 扫描重构图像^[8]。可以发现, 装药尾部存在与加载方向垂直的裂纹, 并且装药头部因挤压而发生变形和损伤, 同时, 在药柱中心位置出现了裂纹。这些损伤结果与数值模拟结果一致, 验证了弹体侵彻靶板模型及参数的正确性, 确保了后续模拟结果的准确性。

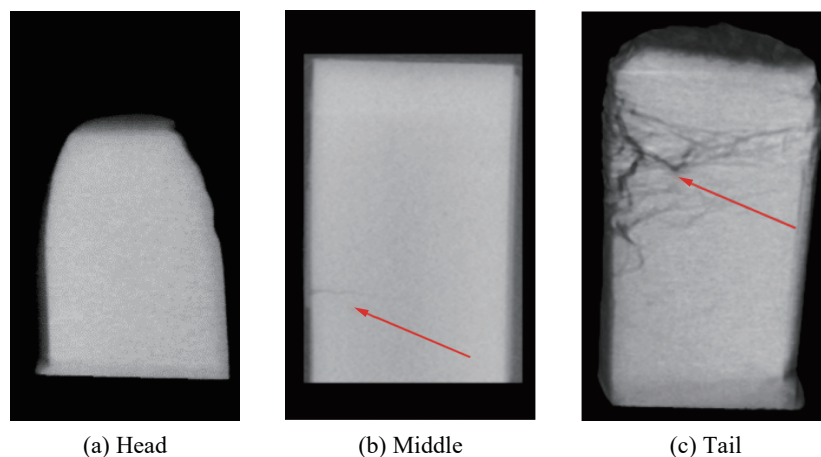


图 8 侵彻结束后装药 CT 扫描重构图像

Fig. 8 Reconstruction of CT scan of the charge after penetration

2.2 侵彻速度对装药损伤的影响

为了探究侵彻速度对装药损伤的影响,开展了侵彻速度分别为 400、600 和 800 m/s 时装药弹体侵彻双层靶板数值模拟。如图 9 所示,当侵彻速度从 400 m/s 增大到 800 m/s 时,拉伸和压缩载荷反复作用形成的垂直于轴向的贯穿裂纹明显增多。通过损伤比(内聚力单元损伤失效数与总内聚力单元数的比值)定量表征装药损伤。当侵彻速度分别为 400、600 和 800 m/s 时,损伤比分别为 3.7%、5.9% 和 11.6%,显然,侵彻速度增大,损伤比明显增大。

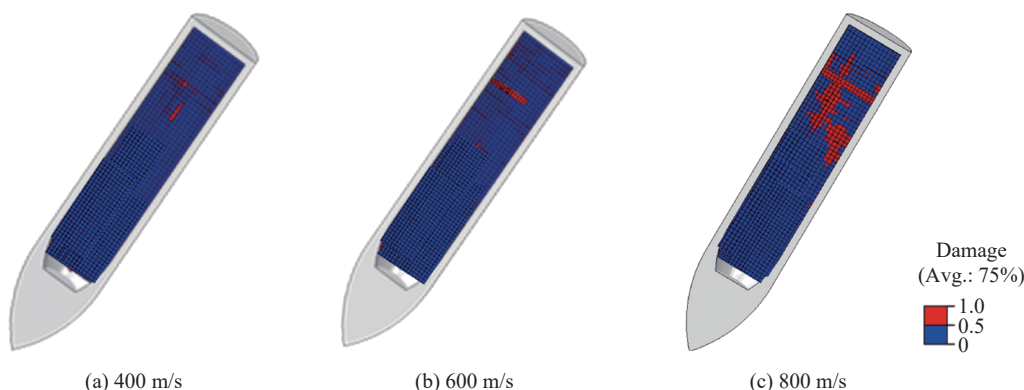


图 9 不同侵彻速度侵彻后装药的损伤

Fig. 9 Damage contour of explosive charge after penetration at different velocities

2.3 装药细观损伤机制

为进一步分析侵彻双层靶板过程中 PBX 的细观损伤特征,对以 400 m/s 的速度侵彻靶板时装药尾部易损伤区域的边界载荷进行提取,将其作为细观模型的加载载荷。为提高数值计算效率,并获取直观的损伤形式和分布,采用二维细观模型。

图 10(a) 为提取到的轴向和径向应力时程曲线,以图 10(b)所示方式施加于细观模型,其中,下边界将加载方向的自由度进行约束以消除刚体位移。图 11 给出了不同时刻细观模型中主应变的分布情况。可见,应变主要分布于黏结剂中,且在颗粒边角处出现应变集中区域。虽然 PBX 装药中黏结剂的占比很少,但是黏结剂对材料整体宏观力学性能的影响非常大,而且 PBX 的应变率效应正是来自于黏结剂的黏弹性。

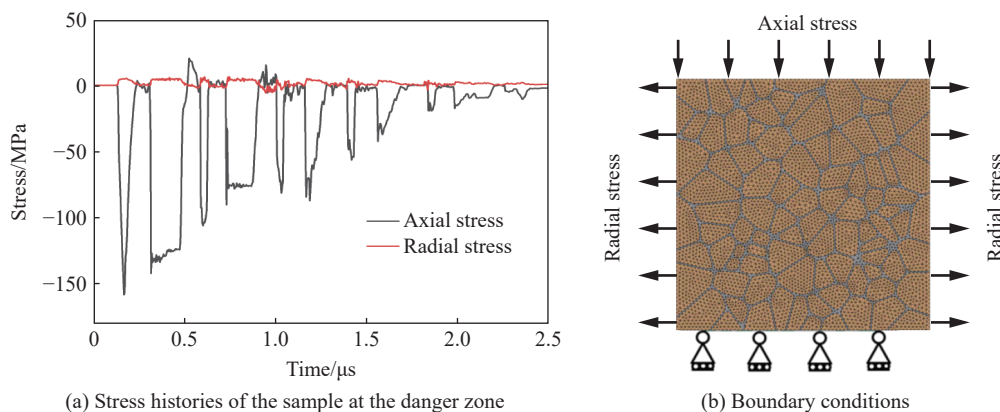


图 10 装药尾部易损伤区域的轴向和径向应力时程曲线及边界条件

Fig. 10 Axial and radial stress histories and boundary conditions at the danger zone of the charge tail region

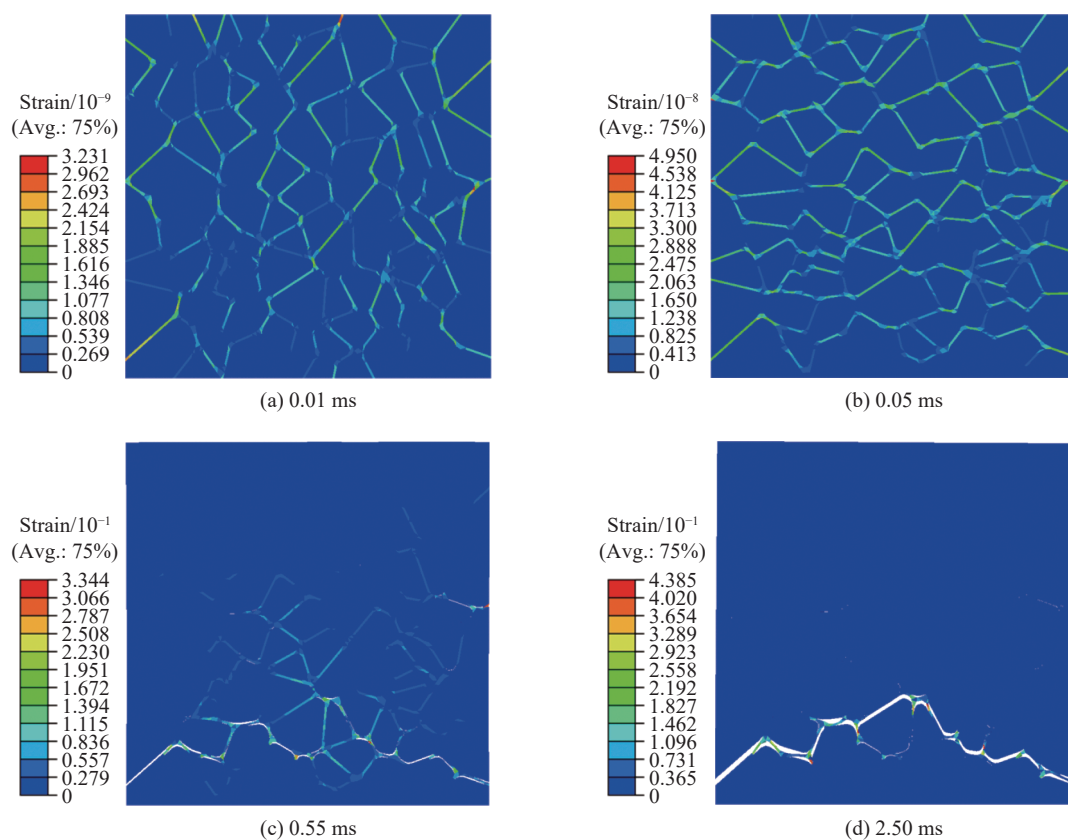


图 11 侵彻双层靶板过程中 PBX 装药细观结构的主应变分布

Fig. 11 Principal strain distributions for microscopic model during the penetration of double-layer target

图 12 给出了细观模型的损伤演化过程。脱粘产生的微裂纹(图 12 中红色箭头)最先出现在颗粒边角处,并且逐渐增多,之后微裂纹沿着颗粒-黏结剂界面扩展,并逐渐汇聚形成贯穿的主裂纹(图 12 中红色方框),而非主裂纹区域的微裂纹在压缩与拉伸载荷的反复作用下出现重新黏结现象,最终形成了一条与轴向加载方向垂直的贯穿裂纹。

PBX 装药侵彻双层靶板过程中,其细观损伤可分为 3 个阶段。在第 1 阶段,装药细观结构发生弹性变形,由于黏结剂的弹性模量较小,PBX 装药结构的压缩变形一般由黏结剂承担,晶体几乎不变形。在第 2 阶段,结构发生非线性响应,此时,晶体仍基本不变形,当黏结剂颗粒表面的应力超过其脱粘强度时,微裂纹开始成核,结构刚度开始退化。同时,应变能开始向微裂纹尖端流动,剪切应变和拉伸应

变也开始向裂纹尖端附近集中, 剪切滑移带逐渐形成。黏结剂柔性链之间的相对剪切滑移会导致塑性变形和应变软化^[31], 因此, 结构的刚度进一步降低。在第 3 阶段, 黏结剂无法承受塑性变形, 微裂纹失稳扩展并汇聚为连续的主裂纹, 最终使结构失去刚度。

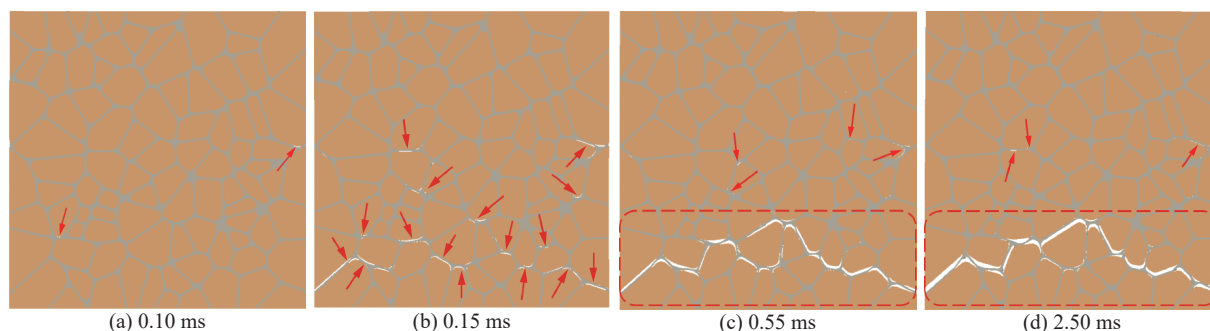


图 12 侵彻双层靶板过程中 PBX 装药的损伤演化

Fig. 12 Damage evolution process of PBX during penetration of double-layer target

3 结 论

基于内聚力单元建立了装药弹体侵彻双层靶板的有限元模型, 研究了弹体侵彻双层靶板过程中 PBX 装药的损伤特征, 分析了不同侵彻速度下装药的损伤演化和损伤比的变化趋势, 并对侵彻载荷作用下 PBX 装药细观损伤进行了分析, 得到如下主要结论:

(1) 弹体以不同速度侵彻靶板时, 装药损伤程度随着侵彻速度的增大而增大, 在拉伸和压缩载荷的反复作用下, 装药尾部形成了垂直于轴向的贯穿裂纹;

(2) 弹体侵彻双层靶板过程中, PBX 装药的主要损伤模式是界面脱粘, 界面脱粘而产生的微裂纹最先出现在颗粒边角处, 随后逐渐增多, 接着微裂纹沿着颗粒-黏结剂界面扩展, 并逐渐汇聚形成贯穿的主裂纹。

参考文献:

- [1] 李媛媛, 高立龙, 李巍, 等. 抗过载炸药装药侵彻安全性试验研究 [J]. *含能材料*, 2010, 18(6): 702–705.
LI Y Y, GAO L L, LI W, et al. Experiment research on security of insensitive explosive charge during penetration [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2010, 18(6): 702–705.
- [2] 陈文, 张庆明, 胡晓东, 等. 侵彻过程冲击载荷对装药损伤实验研究 [J]. *含能材料*, 2009, 17(3): 321–325.
CHEN W, ZHANG Q M, HU X D, et al. Experimental study on damage to explosive charge by impact load in the process of penetration [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2009, 17(3): 321–325.
- [3] LI X, LIU Y Z, SUN Y. Dynamic mechanical damage and non-shock initiation of a new polymer bonded explosive during penetration [J]. *Polymers*, 2020, 12(6): 1342.
- [4] 李晓. 侵彻过程中 PBX 装药的损伤与点火机制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
LI X. Investigations on damage and initiation mechanism of PBX charge during penetration [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [5] 赵生伟, 初哲, 李明. 抗侵彻过载战斗部装药安定性实验研究 [J]. *兵工学报*, 2010, 31(Suppl 1): 284–287.
ZHAO S W, CHU Z, LI M. Experiment investigation on stability of explosive in anti-overload warhead [J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(Suppl 1): 284–287.
- [6] 成丽蓉, 汪德武, 贺元吉. 侵彻单层和多层靶时战斗部装药损伤及热点生成机理研究 [J]. *兵工学报*, 2020, 41(1): 32–39.
CHENG L R, WANG D W, HE Y J. Research on the damage and hot-spot generation in explosive charges during penetration into single- or multi-layer target [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(1): 32–39.
- [7] 毕超, 郭翔, 屈可朋, 等. 斜侵彻靶板过程中装药损伤的数值模拟 [J]. *火炸药学报*, 2022, 45(3): 383–387.

- BI C, GUO X, QU K P, et al. Numerical simulation of charge damage during oblique penetration [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2022, 45(3): 383–387.
- [8] 崔云霄. 冲击载荷作用下 PBX 炸药的损伤破坏研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
- CUI Y X. Research on damage and destruction of PBX explosive under impact load [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.
- [9] 石啸海, 戴开达, 陈鹏万, 等. 战斗部侵彻过程中 PBX 装药动态损伤数值模拟 [J]. *中国测试*, 2016, 42(10): 138–142.
- SHI X H, DAI K D, CHEN P W, et al. Numerical simulation of dynamic damage of PBX charge during the warhead penetration process [J]. *China Measurement & Test*, 2016, 42(10): 138–142.
- [10] 石啸海, 余春祥, 戴开达, 等. 侵彻过程中弹头形状对 PBX 炸药损伤的影响 [J]. *弹箭与制导学报*, 2019, 39(3): 81–85, 89.
- SHI X H, YU C X, DAI K D, et al. The influence of nose shape to dynamic damage of PBX charge during the penetration process [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2019, 39(3): 81–85, 89.
- [11] 张学伦, 汪衡, 谭正军, 等. 混凝土靶边界效应与弹丸长径比关联性的研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2018, 39(4): 11–13, 18.
- ZHANG X L, WANG H, TAN Z J, et al. Relevance between aspect ratio of projectile and boundary effect of concrete target [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2018, 39(4): 11–13, 18.
- [12] 孙宝平, 段卓平, 万经伦, 等. 基于 Visco-SCRAM 模型的侵彻装药点火研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(5): 689–695.
- SUN B P, DUAN Z P, WAN J L, et al. Investigation on ignition of an explosive charge in a projectile during penetration based on Visco-SCRAM model [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(5): 689–695.
- [13] 李硕. 强冲击载荷下 35CrMnSi 动态力学行为与断裂机理研究 [D]. 太原: 中北大学, 2015.
- LI S. Study on dynamic mechanical behavior and fracture mechanism of 35CrMnSi under impact loads [D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- [14] 赵丽俊, 郝永平, 黄晓杰, 等. 杆式射流侵彻 45 钢靶数值分析及试验研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2023, 44(8): 147–153.
- ZHAO L J, HAO Y P, HUANG X J, et al. Numerical simulation and experimental research on jetting projectile charge penetrating 45 steel target [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2023, 44(8): 147–153.
- [15] 于鹏. 航空聚碳酸酯动态力学性能及本构关系研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- YU P. Investigation on the dynamic characteristics and constitutive model of polycarbonate of aircraft [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [16] XIAO Y C, ZHANG Q, FAN C Y, et al. Numerical analysis of the damage and failure behavior of polymer-bonded explosives using discrete element method [J]. *Computational Particle Mechanics*, 2024, 11(2): 579–598.
- [17] XIAO Y C, ZHANG Q, GONG T Y, et al. Experimental analysis and multi-scale simulation of the fracture behavior of polymer-bonded explosives based on the dynamic notched semi-circular bend method [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2024, 291: 112690.
- [18] BI C, GUO X, WANG A H, et al. Strain-rate-dependent cohesive zone modelling of charge damage behavior when a projectile penetrates multilayered targets [J]. *Acta Mechanica*, 2023, 234(7): 2869–2887.
- [19] XIAO Y C, GONG T Y, ZHANG X W, et al. Multiscale modeling for dynamic compressive behavior of polymer bonded explosives [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 242: 108007.
- [20] YANG Z, KANG G, LIU R, et al. Predicting the mechanical behaviour of highly particle-filled polymer composites using the nonlinear finite element method [J]. *Composite Structures*, 2022, 286: 115275.
- [21] BARUA A, KIM S, HORIE Y, et al. Prediction of probabilistic ignition behavior of polymer-bonded explosives from microstructural stochasticity [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(18): 184907.
- [22] HARDIN D B, ZHOU M. Effect of viscoplasticity on ignition sensitivity of an HMX based PBX [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2017, 1793(1): 080005.
- [23] CHEN X, DENG X M, SUTTON M A, et al. An inverse analysis of cohesive zone model parameter values for ductile crack growth simulations [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2014, 79: 206–215.
- [24] AIROLDI A, DÁVILA C G. Identification of material parameters for modelling delamination in the presence of fibre bridging [J]. *Composite Structures*, 2012, 94(11): 3240–3249.
- [25] VALOROSO N, SESSA S, LEPORÉ M, et al. Identification of mode- I cohesive parameters for bonded interfaces based on DCB test [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2013, 104: 56–79.
- [26] YAMAKOV V, SAETHER E, GLAESSGEN E H. Multiscale modeling of intergranular fracture in aluminum: constitutive

- relation for interface debonding [J]. *Journal of Materials Science*, 2008, 43(23/24): 7488–7494.
- [27] XU Y J, ZHAO S, JIN G H, et al. Ductile fracture of solder-Cu interface and inverse identification of its interfacial model parameters [J]. *Mechanics of Materials*, 2017, 114: 279–292.
- [28] FENG T, XU J S, HAN L, et al. Modeling and simulation of the debonding process of composite solid propellants [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 220: 012020.
- [29] CUI J Y, QIANG H F, WANG J X. Experimental and simulation research on microscopic damage of HTPB propellant under tension-shear loading [J]. *AIP Advances*, 2022, 12(8): 085214.
- [30] CUI H R, SHEN Z B, LI H Y. A novel time dependent cohesive zone model for the debonding interface between solid propellant and insulation [J]. *Meccanica*, 2018, 53(14): 3527–3544.
- [31] 胡静. Janus 粒子对硅胶类热力学不相容体系相容性的影响及其应用研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2021.
- HU J. The effect and application of Janus particles on the compatibility of inherent immiscible blends composed of silicone rubber [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2021.

Numerical Simulation Study on Macro-Microscopic Damage of PBX Charge during Penetration of Double-Layer Targets

ZHANG Xiaowei¹, ZHAO Heming¹, ZHENG Xiaobo², ZHANG Qiao¹, WANG Zhijun¹, XIAO Youcai¹

(1. *School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;*

2. *Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, Sichuan, China*)

Abstract: To study the charge damage evolution process when a high-velocity warhead penetrated a double-layer target, a numerical simulation study was conducted using a cohesive zone model to investigate the penetration of double-layer target. The cohesive zone model was utilized to calculate the occurrence and evolution of PBX damage, as well as to analyze the relationship between the penetration velocity and damage evolution. The quantification of damage was conducted by means of the damage ratio. Furthermore, a micro-damage finite element model for PBX was established to examine the microscopic damage mechanisms during penetration into a double-layer target. The results show that when the projectile penetrates the target plate vertically, the extent of damage of the charge increases with the increase of penetration velocity. From a microscopic perspective, it was observed that cyclic tensile and compressive loads induced the formation of vertical cracks perpendicular to the loading direction. The primary mechanism of damage in PBX charge penetration into double-layer target is interface debonding. Additionally, the microcracks destabilize, propagate, and converge into a continuous main crack.

Keywords: double-layer target; PBX charge; cohesive zone model; macroscopic and microscopic damage simulation; microcrack