

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2024.0136

超高强钢弹侵彻陶瓷复合靶数值模拟研究

赵永青^{1,2}, 余毅磊³, 高光发³, 王永刚^{1,2}, 蒋招绣^{1,2*}

(1.宁波大学 冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211;

2.宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 3.南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 穿甲动能弹通常以硬钢作为弹芯材料, 为此针对超高强钢材料进行了不同应变率与应力状态的力学特性实验, 构建了超高强钢弹体的本构与损伤模型, 并将模型嵌入到 LS-DYNA 商用软件中, 分别采用有限元法(Finite Element Method, FEM)、光滑粒子流体动力学(Smooth Particle Hydrodynamics, SPH)和光滑粒子伽辽金(Smooth Particle Galerkin, SPG)算法对钢弹侵彻陶瓷复合靶行为进行模拟, 探索不同算法对模拟结果的影响. 结果表明: (1)建立的材料模型和 3 种算法均能实现钢脆性弹芯侵彻陶瓷复合靶板的模拟. (2)受 FEM 质量损失不守恒的影响, 弹体未形成飞溅的碎块, 弹体侵彻能力集中强化, 计算获得弹体的剩余弹体速度与质量均高于 SPH 和 SPG 算法; SPH 算法存在拉伸不稳定的问题, 模拟过程的弹芯质量侵蚀加剧, 获得终态剩余弹体质量最小, 陶瓷靶体损伤程度最大. (3)SPG 算法弥补了前 2 种算法的问题, 能够更精确地模拟弹体的剩余质量.

关键词: 侵彻; 超高强度钢; 断裂模型; 陶瓷复合装甲

中图分类号: TJ012.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2025) 01-0054-09

陶瓷复合装甲主要用于小型武器与重机枪类穿甲动能弹的防护, 这类武器使用的穿甲弹(AP弹)通常以硬钢作为弹芯材料^[1-4], 也有采用更硬的碳化钨材料^[5-6]. 子弹的侵彻能力通常由弹体材料性能控制. 随着钢材冶炼及热处理技术水平的提升, 材料的力学性能逐级提升. 如近年常用的 12.7 mm 穿燃弹弹芯材料, 其强度已超过 3 000 MPa^[7-10]. 在侵彻过程中, 金属弹体材料的蘑菇头化是一种典型的变形模式, 但是在超高强度钢与陶瓷复合装甲相互作用时, 弹体材料的破坏与陶瓷类似, 呈现出碎裂现象. 这种脆性碎裂特性对弹体的突防能力影响很大. 如王晓东等^[9]、余毅磊等^[10]在穿燃弹侵彻陶瓷/铝合金复合靶板实验中发现, 弹体的破碎程度随着速度的增大而增加, 而剩余碎片质量的降低是子弹侵彻能力降低的主要因素. 然而, 弹体对陶瓷复合靶板的侵彻是一种高速冲击响应

过程, 其破坏行为只能通过侵彻后样品的回收进行分析, 现有测试手段仍难以获取材料的破坏演化信息.

数值模拟是分析弹靶破坏演化过程及其毁伤评估的主要手段, 在工程上具有重要的应用价值. 在弹体侵彻陶瓷复合靶板的数值模拟中, 常用算法主要有: 有限元法(Finite Element Method, FEM)、光滑粒子流体动力学(Smooth Particle Hydrodynamics, SPH)算法以及 FEM 和 SPH 两者的耦合算法. Khan 等^[11]通过 FEM 研究了双层陶瓷金属靶板在不同径长比的射弹冲击载荷下的弹道行为. Xiao 等^[12]使用 SPH 算法再现了靶板和弹体的破碎行为, 并预测了弹体侵彻陶瓷靶板后的残余质量和剩余速度. 在 FEM-SPH 耦合算法方面, 刘赛等^[13]利用该算法结合 JH-2 弹体本构模型模拟了穿甲燃烧弹弹芯破碎行为, 结果表明: 耦合计算模型可以有效模拟弹

收稿日期: 2024-01-25.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(12102213, 11972202).

第一作者: 赵永青, 硕士研究生, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: 1518642998@qq.com

*通信作者: 蒋招绣, 助理研究员, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: jiangzhaixiu@nbu.edu.cn

体的碎裂现象,减少了 FEM-SPH 耦合算法的计算工作量。然而,类似刘赛等^[13]采用的 JH-2 模型,虽然能够模拟出弹体材料的破碎行为,但是仍缺少有效的材料力学特性实验数据的支撑。同时,在弹靶相互作用方面,传统的数值模拟算法,如常用的 FEM 和 SPH 算法,虽然能够实现弹靶破碎行为的模拟,但 FEM 是以位移不连续单元侵蚀的形式应对材料的损伤破坏,存在质量、动量和能量不守恒等问题;SPH 算法则存在拉伸不稳定性等问题^[14],两者从物理上均难以实现对失效模式的捕捉,限制了有限元法在材料失效分析及工程毁伤评估上的应用。光滑粒子伽辽金(Smooth Particle Galerkin, SPG)算法是众多无网格方法中的一种,该算法解决了质量不守恒、低能量模态、拉伸不稳定性以及应变局域化等问题。如 Wu 等^[15]利用 SPG 算法在模拟中成功捕捉到了混凝土在高速侵彻下的剥落和穿孔行为。但是目前尚未见 SPG 算法模拟侵彻陶瓷复合靶板的报道。

本文首先针对超高强度钢进行了不同应变率、应力状态下力学性能实验,然后基于实验数据构建了弹体材料的本构与损伤模型,最后利用 LS-DYNA 软件对超高强钢侵彻陶瓷复合靶板的剩余弹体速度与质量进行计算,探讨了 FEM、SPH 和 SPG 这 3 种算法的优劣势。研究结果可为穿燃弹/陶瓷复合装甲的设计与毁伤评估提供参考。

1 弹体材料力学特性实验

弹体材料为 CDX2 超高强马氏体钢,其力学特性实验分别采用 MTS 810 万能试验机和分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB),具体装置如图 1 和图 2 所示。在准静态压缩与拉伸实验中,通过与数字图像相关法(Digital Image Correlation, DIC)测试系统结合的方式^[16],获得材料在加载过程中的应力—应变曲线。

图 3 为弹体材料力学特性的实验试件。在准静态压缩实验中,采用高 8 mm、直径 6 mm 的圆柱样品;拉伸实验则采用狗骨头形状样品,有效长度 11 mm,直径 2 mm;实验中依据有效标距,准静态压缩与拉伸加载应变率控制在 0.001 s^{-1} ,在实验前对试件进行喷漆和散斑;在动态压缩实验中,试件采用高、直径均为 4 mm 的圆柱,加载应变率控制

约为 2500 s^{-1} ;最终采集的数据通过三波法处理,并获得应力—应变曲线。为了获得不同应力三轴度下材料的等效断裂应变,在准静态实验中补充了帽型剪切与缺口圆棒拉伸实验,剪切试件的剪切区域的 2 个矩形横截面为 $4 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,厚度为 1 mm。实验中试件增加限位器以避免泊松效应引起拉伸耦合破坏。缺口圆棒试件的缺口半径为 1.5 mm,最小横截面半径为 1 mm,缺口圆棒试件同单轴拉伸试件一致,均采用螺纹转接口与万能试验机连接。

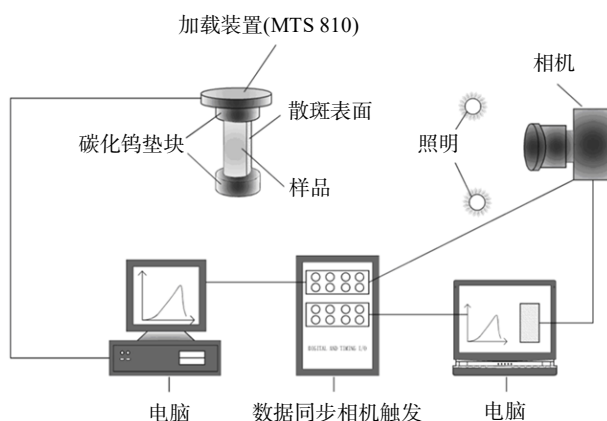


图1 准静态拉、压实验系统

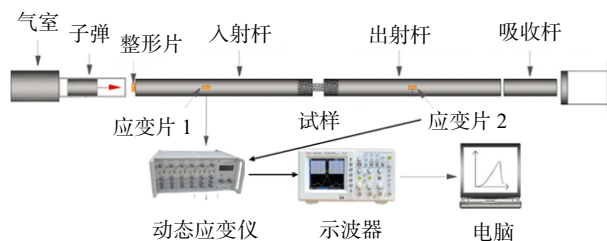


图2 动态压缩加载系统

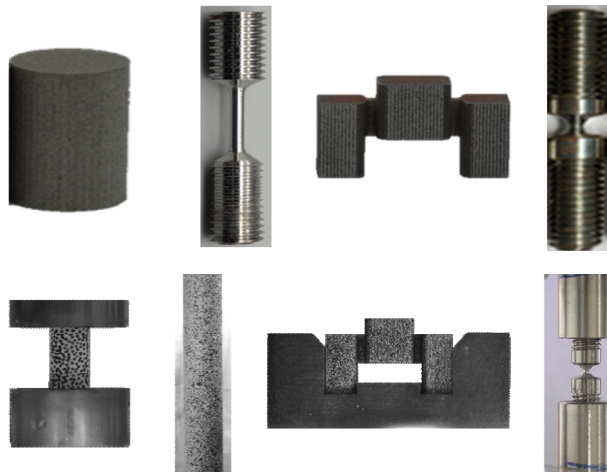


图3 弹体材料力学特性的实验试件

图 4 为准静态拉伸与压缩实验的真应力—应变曲线。该图显示, 超高强钢弹体材料是一种典型拉压不对称材料, 压缩屈服强度达到了 3 544 MPa, 拉伸强度为 1 720 MPa, 拉伸断裂应变为 1.38%, 在拉伸载荷下呈现出脆性断裂特征。此外, 通过图 4 结合 DIC 测量系统^[16], 可以得到弹体材料的弹性模量 E 为 197.57 GPa, 泊松比 ν 为 0.295。

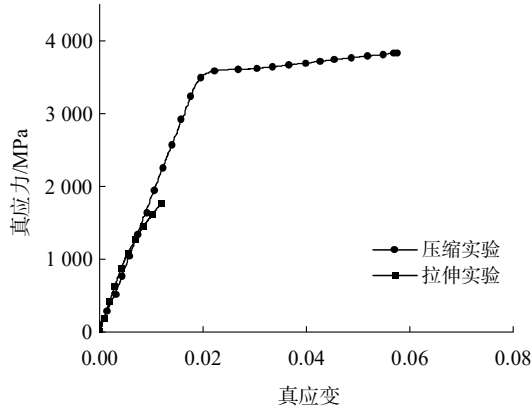


图 4 准静态拉、压实验的真应力—真应变曲线

图 5 为弹体材料在不同应变率下的压缩真应力—真应变曲线。为保证动态压缩实验结果的可靠性, 动态实验进行了 3 组测试, 结果表明超高强钢是一种应变率不敏感材料。

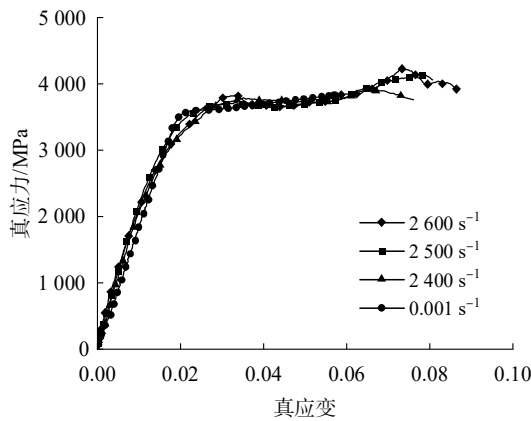


图 5 不同压缩应变率下真应力—真应变曲线

依据准静态拉压与动态压缩实验, 超高强钢弹材料是一种典型拉压不对称材料。因此, 构建该材料断裂模型需要考虑应力状态的影响。不同应力状态下等效断裂应变的测试, 主要包括帽型剪切与缺口圆棒实验, 其中缺口圆棒试件主要通过加载力—位移关系以及断裂后样品的几何形态, 获取材料断裂时的应力三轴度和等效断裂应变^[17]。

$$\eta = \frac{1}{3} + \ln\left(1 + \frac{a_f}{2R}\right), \quad \varepsilon_f = 2 \ln\left(\frac{a_0}{a_f}\right), \quad (1)$$

式中: η 为应力三轴度; a_f 为最小横截面断裂时半径; R 为试件缺口半径; ε_f 为等效断裂应变; a_0 为最小横截面半径。

图 6 为圆棒缺口试件获得的力—位移曲线, 依据式(1)计算得到应力三轴度为 0.66, 断裂应变为 0.002。

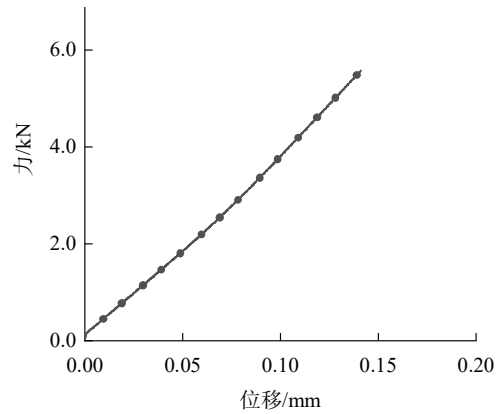


图 6 高应力三轴度实验的应力—位移曲线

图 7 为剪切实验获得的等效应力与等效应变的关系, 去除线弹性段变形, 得到等效剪切断裂应变为 0.086。

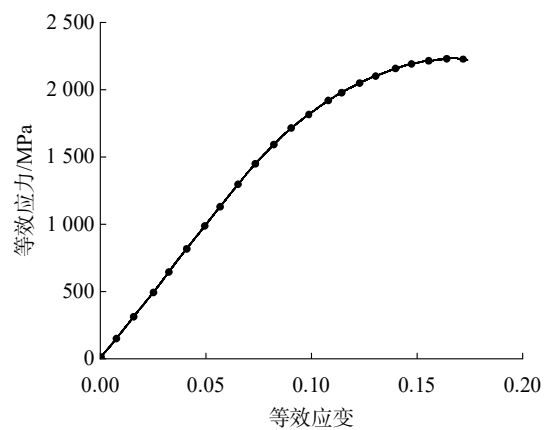


图 7 纯剪切实验的等效应力—应变曲线

2 本构模型的构建

依据上述实验结果, 超高强钢弹是一种应变率不敏感性材料, 同时该材料在侵彻过程中呈现出脆性碎裂特征^[7,10]。因此, 构建该材料的本构模型主要考虑硬化行为, 可忽略应变率和温度软化效应($C=0, m=0$), 即采用随动硬化模型进行描述:

$$\sigma = A + B \varepsilon^n, \quad (2)$$

式中: σ 为等效应力; ε 为等效塑性应变.

具体参数拟合结果如图 8 所示, 其中 A 为 3 544 MPa, B 为 5 606 MPa, n 为 0.85.

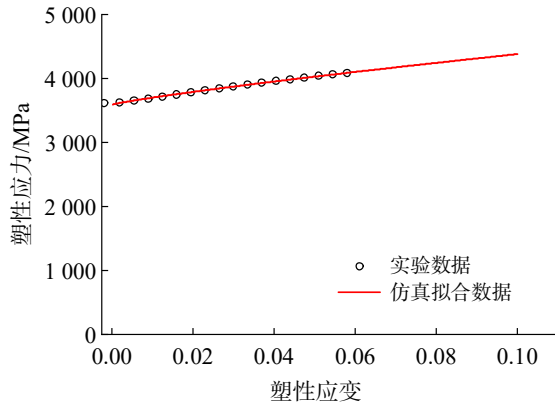


图 8 准静态压缩情况下塑性应力—应变关系的仿真拟合与实验结果

由于超高强钢弹表现出拉伸脆性、压缩塑性的特征, 在断裂模型构建中采用一种同时考虑应力三轴度与 Lode 角参数的断裂失效模型^[18]:

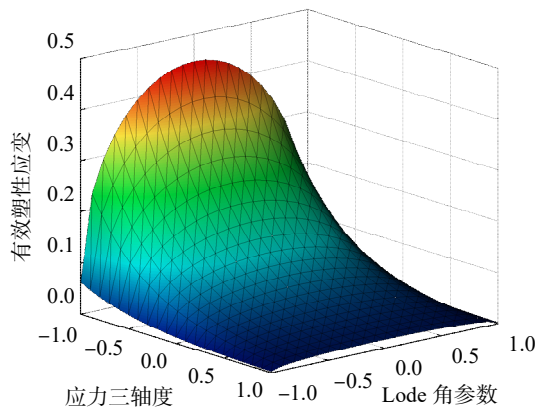
$$\varepsilon_f^p = [C_1 - (C_1 - C_2)(1 - \xi^2)^{(1/2)}] \times 3^{-1.5\eta}, \quad (3)$$

式中: C_1 和 C_2 为 Lode 角参数与应力三轴度相关的材料常数; ε_f^p 为断裂时的等效塑性应变; ξ 为 Lode 角参数, 其定义为:

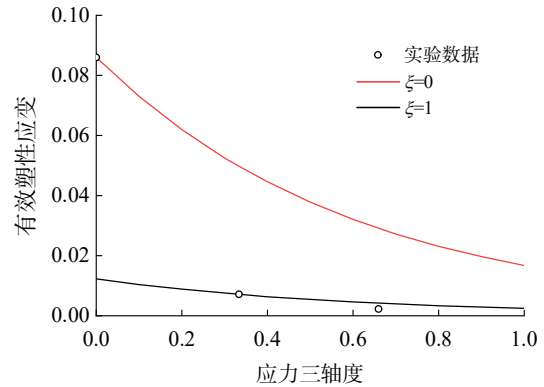
$$\xi = \frac{27 J_3}{2 \bar{\sigma}^3} = \frac{3\sqrt{3} J_3}{2 J_2^{3/2}}, \quad (4)$$

式中: $\bar{\sigma}$ 为等效应力; J_2 和 J_3 分别为应力偏张量的第二和第三不变量.

依据模型断裂时的塑性应变与应力三轴度关系(图 9), 拟合标定获得 C_1 为 0.012, C_2 为 0.086.



(a) 应力三轴度 Lode 角参数相关的断裂面



(b) 应力三轴度相关的断裂面参数

图 9 钢弹在应力三轴度、Lode 角参数和等效塑性应变空间下的断裂面

3 有限元模拟

3.1 数值模型构建

弹体侵彻陶瓷复合靶板的数值模拟主要通过 FEM、SPH、SPG 这 3 种算法进行计算. FEM 多用于固体结构的应力应变分析, 其网格与结构形状变化一致, 能够精准描述结构边界的运动. 但是对于大变形问题, FEM 会出现严重的网格畸变, 不利于计算. 超高强钢弹是脆性材料, 不易出现这种问题. SPH 算法是一种基于 Lagrange 的无网格方法, 使用一系列点代替节点和单元, 适用于流体分析和固体材料在高速冲击状态下碎片化过程. SPG 算法则是一种真正意义上的无网格方法^[19-21], 使用键应变失效机理来模拟材料的破坏现象, 即直接在节点上进行积分, 避免了通过背景网格进行积分的局限性, 整个模拟过程可以保持模型动量和质量守恒. 依据文献[7]实验, 建立了有限元模型, 如图 10 所示.

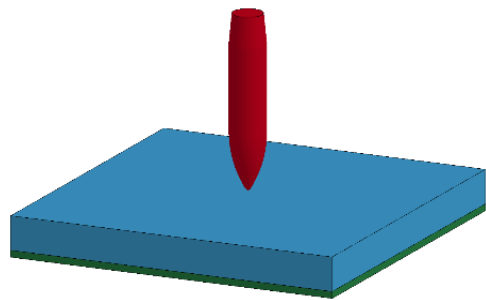


图 10 钢弹侵彻陶瓷-铝合金复合靶板计算模型

钢弹使用 12.7 mm 子弹的弹芯尺寸, 碳化硅和 7075 铝合金靶板尺寸均为 100 mm×100 mm, 厚度

分别为 12 mm 和 2 mm. 此外, 在构建材料模型中, 式(3)失效模型嵌入 LS-DYNA 商用软件, 碳化硅和铝合金靶板分别采用 JH-2^[22]和 J-C 模型^[23-24], 靶板之间采用共节点方式连接, 四周为无反射边界, 弹体材料参数见表 1, 其他材料参数见表 2 和表 3.

3.2 模拟结果与讨论

钢弹侵彻陶瓷复合靶板模拟分别采用 FEM、

SPH 和 SPG 算法进行计算, 3 种算法均能实现模拟, 结果如图 11 所示.

图 12 为弹体在不同算法下的剩余速度、能量耗散和接触力的历程曲线. 从图 12 可见, 较其他 2 种算法, FEM 模拟过程弹体剩余速度衰减明显弱于 SPH 和 SPG 算法. Becker 等^[14]认为对于变形和材料小侵蚀, 如泰勒实验过程中材料发生的侵蚀

表 1 钢弹的主要材料参数

材料	E/GPa	ν	A/MPa	B/MPa	n	C	m	C_1	C_2
超高强钢	197.57	0.295	3 544	5 606	0.85	0	0	0.012	0.086

表 2 碳化硅陶瓷材料参数^[22]

材料	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	G/GPa	A	B	C	M	N	$\dot{\epsilon}_0/\text{s}^{-1}$	T/GPa	SFMAX
碳化硅	3 130	183	0.96	0.35	0	1	0.65	1	0.2	0.8
材料	HEL/GPa	PHEL/GPa	β	D_1	D_2	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa	FS	
碳化硅	14.57	5.9	1	0.48	0.48	220	0	0	0.8	

注: ρ 为密度; G 为剪切模量; A 、 B 、 C 、 M 、 N 、 $\dot{\epsilon}_0$ 、 T 、SFMAX、HEL、PHEL 为强度常量; β 、 K_1 、 K_2 、 K_3 为状态方程常量; D_1 、 D_2 为损伤系数; FS 为单元删除准则系数.

表 3 铝合金材料参数^[23-24]

材料	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	G/GPa	A/MPa	B/MPa	n	C	M	T_m/K
铝合金	2 810	26.8	473	210	0.381 3	0.033	1	1 200
材料	T_r/K	$\dot{\epsilon}_0/\text{s}^{-1}$	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	
铝合金	298	0.001	0.371 4	-0.123 3	-1.935 4	0.010 1	0	

注: C 和 M 为应变速率系数和温度系数; T_m 和 T_r 为材料的熔点和室温; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变速率; $D_1\sim D_5$ 为损伤系数.

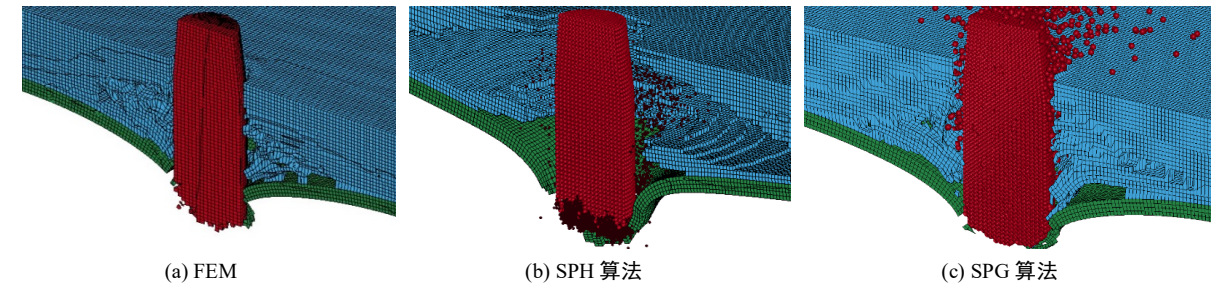


图 11 不同算法仿真计算结果剖视图

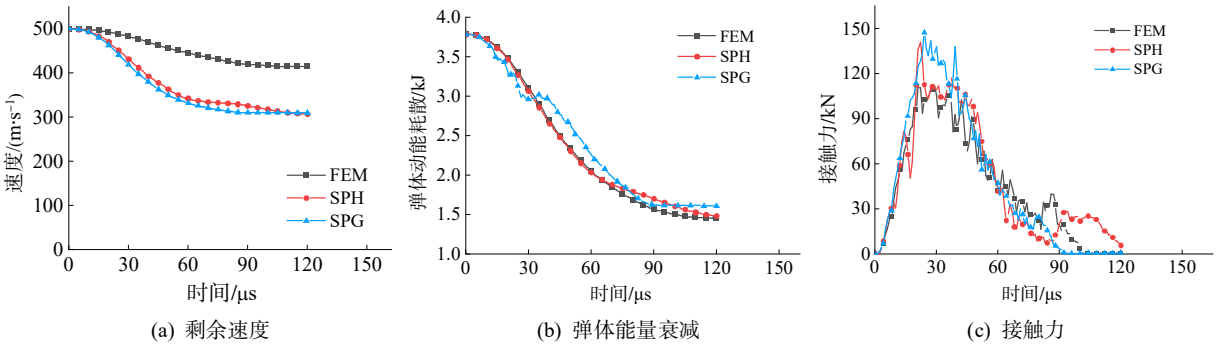


图 12 不同算法得到的弹体剩余速度、弹体能量衰减和接触力随时间变化曲线

行为(不发生大质量损失), FEM 仍具有较高的计算精度, 而对于更高的侵彻速度, 材料侵蚀的增加, 能量和质量的守恒不再保留. 正如 Wu 等^[15]研究表明: 在 FEM 中存在质量损失不守恒问题, 弹体未形成飞溅的碎块, 即模拟中弹体动能未能转移, 能量集中在剩余弹体上并发生侵彻能力强化的现象, 因此计算获得弹体的剩余弹体速度高于 SPH 和 SPG 算法. 图 12(b)为弹体能量耗散历程, 其中 SPH 与 SPG 算法描述的弹体总体的能量耗散主要包括剩余弹体的动能和碎块飞溅出的碎块动能, 而 FEM 中虽然剩余速度高于其他 2 种算法, 但是受网格失效删除的影响, 即能量发生损失, 其弹体总体能量耗散仅包括剩余弹体的动能, 因此整体弹体的能量耗散要略高于其他 2 种算法. 同时, 在接触力历程曲线中, FEM 在初始时刻的峰值与 SPG 算法基本保持一致, 但是受网格删除的影响, 后期弹体侵蚀中局部卸载行为致使接触力出现衰减现

象. 对于 SPH 和 SPG 算法, 在整个计算过程中能够满足质量与能量的守恒, 正如图 12 计算获得的剩余速度历程曲线, 2 种算法模拟获得的结果基本保持一致, 且弹体的剩余速度值小于 FEM. 然而, 对于 SPH 算法, 如图 12(c)中给出的弹体接触力历程曲线, 在初始接触时刻, SPH 和 SPG 算法获得的峰值接触力较为接近, 且均大于 FEM; 然而随着时间的演化, 这种接触力出现明显衰减现象, 甚至接近于 FEM, 原因可能是受 SPH 算法拉伸不稳定性影响^[25], 即弹体在计算过程中发生不稳定性失效, 使得弹体在加载过程中发生失效卸载, 致使最终接触力出现减小现象.

图 13 和图 14 为弹体在侵彻时的质量侵蚀演化以及终态形貌. 对于 FEM(图 13(a)), 在弹体接触靶板过程中, 其单元在发生破坏后直接删除, 以此达到子弹侵蚀效果. 这种在单元损伤到达极值后, 网格呈现删除状态的计算方式, 往往存在参数不收

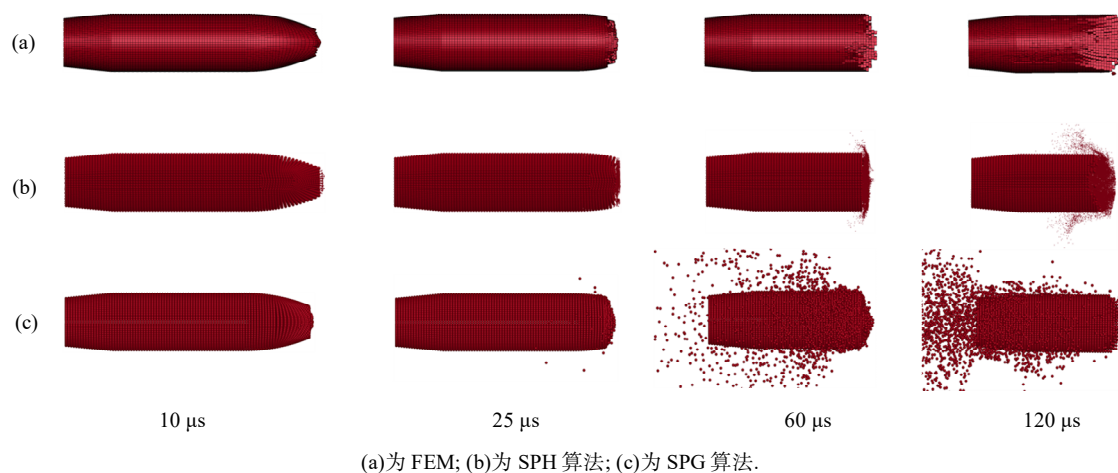


图 13 不同算法在不同时刻弹体的损伤

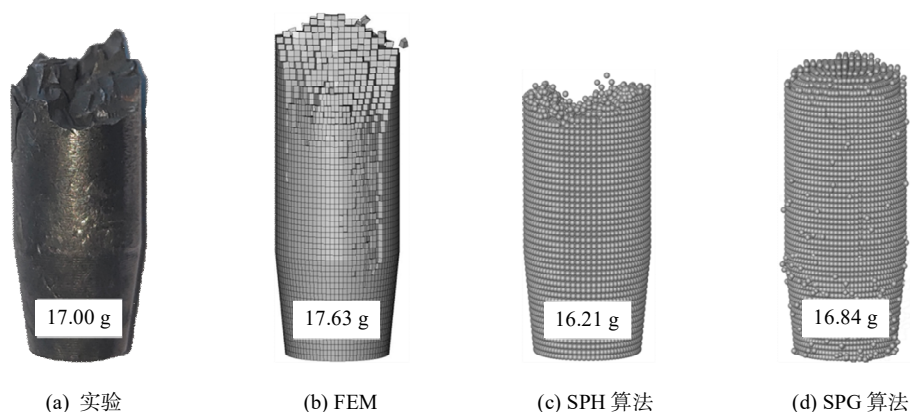


图 14 不同方法得到的弹体剩余大质量碎块(初始质量 30.1 g)

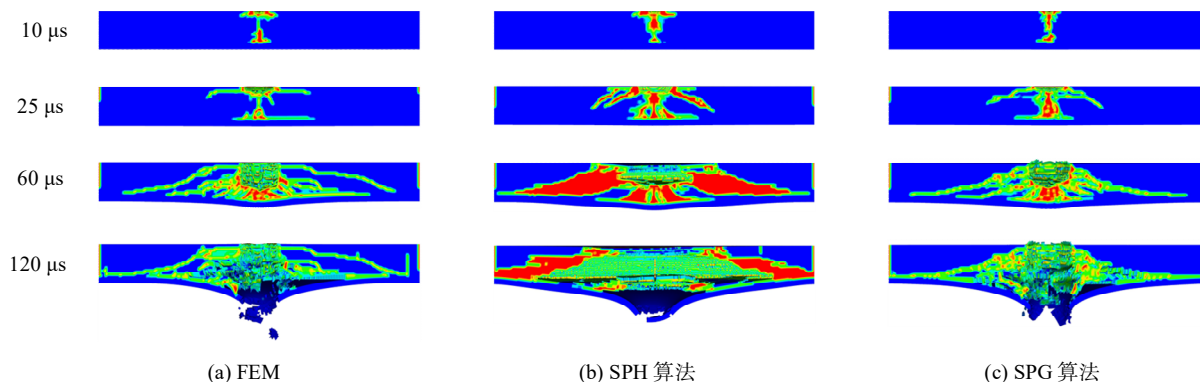


图 15 不同算法得到的复合靶板损伤云图

敛以及网格畸变的现象. 因此, FEM 在侵彻模拟中通常是在力学实验基础上构建损伤模型, 如用 Johnson-Cook 损伤模型, 同时添加并调整耦合失效判据^[13], 以此实现与实验结果的比对. 以往在弹体侵彻陶瓷靶体模拟研究中^[26-29], 为了减少计算工作量, 很多研究会采用轴对称或四分之一 FEM 模型, 但从建立的全尺寸模型中不难看出, FEM 不对称性对模拟结果会产生较大的影响或差值, 如图 13 和图 14 所示. 对比 SPG 和 SPH 算法, FEM 计算获得子弹的侵蚀过程的损伤较为随机, 最终剩余弹体的形貌对称性较差. 而 SPH 算法虽然避免了单元畸变问题, 但由于其拉伸不稳定性的影响, 同样对子弹终态的形貌有影响, 即 SPH 算法获得的子弹终态形貌对称性不如 SPG 算法. 此外, 从图 14 可见: SPG 算法剩余弹体质量更接近实验结果, 两者仅差 0.14 g, 而 FEM 因受侵彻能力强化的影响, 计算得到的剩余弹体质量高于实验值.

图 15 为陶瓷裂纹扩展及陶瓷锥的形成过程. 弹体与陶瓷相互作用时, 陶瓷因压剪作用产生裂纹, 同时形成多条锥形裂纹并向背板方向延伸, 另一部分受背板自由面反射卸载波的影响, 使多条拉伸应力引起的裂纹在陶瓷内部形成^[8,26], 最终在剪应力和拉应力共同作用下, 陶瓷沿着一定的角度形成陶瓷锥(图 16). 虽然 3 种算法均能获得类似的结果, 但弹体与陶瓷靶的相互作用过程是一个耦合行为, 弹体损伤破坏行为势必会影响靶板最终的破坏效果. 从图 15 可见, 3 种算法下陶瓷锥角分别为 70.8°(FEM)、73.1°(SPH 算法)、71.2°(SPG 算法), 而实验结果获得的陶瓷锥角为 72.1°(图 16). 表明 SPG 算法的陶瓷锥角与实验结果吻合相对较

好, FEM 获得的损伤程度以及陶瓷锥角大小均小于 SPH 算法, 这与弹体质量损失侵彻能力强化的结果吻合. 从图 15 子弹破坏行为可见, 在 SPG 算法模拟过程中大量碎块从陶瓷靶板中产生飞溅现象, 而 SPH 算法模拟只有少量的子弹碎块从陶瓷靶板内部飞出, 多数碎块残留仍在陶瓷靶板内部, 说明在 SPG 算法中大量碎块因飞溅发生动能转移, 使得作用在陶瓷靶体内部的能量减小. 同时 SPH 算法中残留在陶瓷内部的碎块增大了子弹与陶瓷靶板的接触面积, 致使 SPH 算法获得的陶瓷锥角和破碎程度高于 SPG 算法与 FEM.

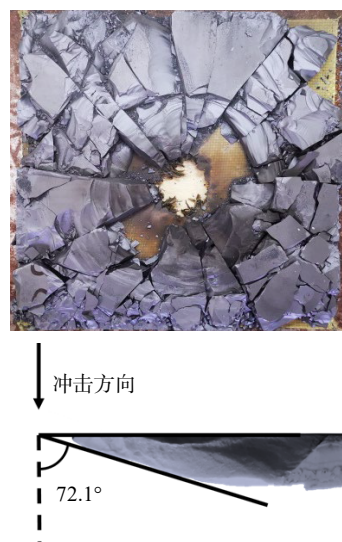


图 16 碳化硅陶瓷靶板损伤情况及陶瓷锥角示意图

4 结论

针对超高强刚脆性钢侵彻陶瓷复合装甲的问题, 在不同应力状态与应变率实验数据基础上, 构建弹体材料的本构与损伤模型, 同时采用了 FEM、

SPH 和 SPG 算法进行数值模拟, 并对模拟结果进行了对比, 结论如下: (1)超高强刚脆性钢是一种应变率不敏感、拉压不对称的脆性材料, 模拟中采用考虑应力三轴度与 Lode 角参数相关的失效模型以及 3 种算法, 均能实现钢脆性弹芯侵彻陶瓷复合靶板的模拟. (2)模拟中 FEM 单元侵蚀引起的质量不守恒问题, 使得计算中弹体侵彻能力存在强化现象, 计算获得的剩余弹体速度高于 SPH 和 SPG 算法. (3)SPH 算法存在拉伸不稳定性, 致使弹芯质量侵蚀加剧, 获得的终态剩余弹体质量最小, 靶损伤程度最大. (4)SPG 算法弥补了 FEM、SPH 算法中的质量不守恒与拉伸不稳定等问题, 在超高强钢侵彻陶瓷靶中能更精确模拟出弹体的剩余速度和质量, 可为工程毁伤评估提供数据支撑.

参考文献:

- [1] DI BENEDETTO G, MATTEIS P, SCAVINO G. Impact behavior and ballistic efficiency of armor-piercing projectiles with tool steel cores[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 115:10-18.
- [2] FRAS T, MURZYN A, PAWLOWSKI P. Defeat mechanisms provided by slotted add-on bainitic plates against small-calibre 7.62 mm×51 AP projectiles[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 103:241-253.
- [3] KILİÇ N, BEDİR S, ERDIK A, et al. Ballistic behavior of high hardness perforated armor plates against 7.62 mm armor piercing projectile[J]. *Materials & Design*, 2014, 63:427-438.
- [4] DEMİR T, ÜBEYLİ M, YILDİRIM R O. Investigation on the ballistic impact behavior of various alloys against 7.62 mm armor piercing projectile[J]. *Materials & Design*, 2008, 29(10):2009-2016.
- [5] ABDELSALAM O R, FAYED A. Tungsten carbide core 12.7×99 mm AP projectiles ballistic behavior against high hardness steel armor[J]. *Journal of Physics*, 2022, 2299(1): 012017.
- [6] MOXNES J, TELAND J A, SKRIUDALEN S, et al. Development of material models for semi-brittle materials like tungsten carbide[BE/OL]. [2023-11-10]. <https://www.ffi.no/en/publications-archive/development-of-material-models-for-semi-brittle-materials-like-tungsten-carbide>.
- [7] WANG X D, YU Y L, ZHONG K, et al. Effects of impact velocity on the dynamic fragmentation of rigid-brittle projectiles and ceramic composite armors[J]. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2021, 18(8): e410.
- [8] 余毅磊, 蒋招绣, 王晓东, 等. 轻型陶瓷/金属复合装甲抗垂直侵彻过程中陶瓷碎裂行为研究[J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(11):82-91.
- [9] 王晓东, 余毅磊, 蒋招绣, 等. 不同撞击速度下穿燃弹侵彻陶瓷/铝合金复合靶板时弹芯破碎失效特性研究[J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(2):83-91.
- [10] 余毅磊, 王晓东, 任文科, 等. 陶瓷/金属复合靶受 12.7 mm 穿甲燃烧弹侵彻时弹靶破碎特征[J]. *兵工学报*, 2022, 43(9):2307-2317.
- [11] KHAN M K, IQBAL M A, BRATOV V, et al. A numerical study of ballistic behaviour of ceramic metallic bi-layer armor under impact load[J]. *Materials Physics and Mechanics*, 2019, 42(6):699-710.
- [12] XIAO Y H, WU H C, PING X C. On the simulation of fragmentation during the process of ceramic tile impacted by blunt projectile with SPH method in LS-DYNA[J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2020, 122(3):923-954.
- [13] 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.
- [14] BECKER M, SEIDL M, MEHL M, et al. Numerical and experimental investigation of SPH, SPG and FEM for high velocity impact applications[BE/OL]. [2023-11-25]. https://www.dynalook.com/conferences/12th-european-ls-dyna-conference-2019/high-speed-impact/becker_isl.pdf.
- [15] WU C T, WU Y C, CRAWFORD J E, et al. Three-dimensional concrete impact and penetration simulations using the smoothed particle Galerkin method[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 106:1-17.
- [16] 蒋招绣, 辛铭之, 申海艇, 等. 多孔未极化 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})\text{O}_3$ 铁电陶瓷单轴压缩力学响应与相变[J]. *物理学报*, 2015, 64(13):236-245.
- [17] 贾东, 黄西成, 莫军. 缺口试件拉伸试验中的应力三轴度确定方法[BE/OL]. [2023-11-20]. <https://wenku.baidu.com/view/0b6b86707c1cfad6185fa70c.html>.
- [18] 周琳, 文鹤鸣. 金属材料失效分析的新方法[J]. *高压物理学报*, 2019, 33(1):92-101.
- [19] WU C T, GUO Y, HU W. An introduction to the LS-DYNA[®] smoothed particle galerkin method for severe deformation and failure analyses in solids[BE/OL]. [2023-11-20]. <https://lsdyna.ansys.com/wp-content/uploads/attachments/an-introduction-to-the-ls-dyna-r-smoothed-particle-galerkin-method-for-severe-deformation-and-failu>

- re-analyses-in-solids.pdf.
- [20] WU Y C, WU C T, HU W. Parametric and convergence studies of the smoothed particle galerkin (SPG) method in semi-brittle and ductile material failure analyses[BE/OL]. [2023-11-18]. <https://www.dynalook.com/conferences/15th-international-ls-dyna-conference/spg/parametric-and-convergence-studies-of-the-smoothed-particle-galerkin-spg-method-in-semi-brittle-and-ductile-material-failure-analyses>.
- [21] WU Y, HU W, PAN X, et al. Recent developments of smoothed particle Galerkin (SPG) method for joint modeling[BE/OL]. [2023-11-15]. <https://lsdyna.ansys.com/wp-content/uploads/attachments/t10-2-e-spg-065.pdf>.
- [22] CRONIN D, BUI K, KAUFMANN C, et al. Implementation and validation of the Johnson-holmquist ceramic material model in LS-dyna[BE/OL]. [2023-11-20]. <https://www.dynalook.com/conferences/european-conf-2003/implementation-and-validation-of-the-johnson.pdf>.
- [23] ZHANG D N, SHANGGUAN Q Q, XIE C J, et al. A modified Johnson-Cook model of dynamic tensile behaviors for 7075-T6 aluminum alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 619:186-194.
- [24] 胡俊, 廖凯, 罗鹏博, 等. 喷丸对铝合金亚表面裂纹闭合修复的影响与试验[J]. 表面技术, 2024, 53(7):180-189.
- [25] SWEGLE J W, HICKS D L, ATTAWAY S W. Smoothed particle hydrodynamics stability analysis[J]. Journal of Computational Physics, 1995, 116(1):123-134.
- [26] 李永鹏, 徐豫新, 张健, 等. SiC 陶瓷/UHMWPE 纤维复合结构抗 12.7 mm 穿甲燃烧弹试验与仿真[J]. 兵工学报, 2022, 43(6):1355-1364.
- [27] 潘志威, 印立魁, 易荣成, 等. 双曲面陶瓷复合靶抗 12.7 mm 穿燃弹侵彻性能研究[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(12):168-176.
- [28] 葛朋鹏, 张先锋, 谈梦婷, 等. 长杆弹高速撞击陶瓷复合靶的斜侵彻过程与响应特性研究[J]. 北京理工大学学报, 2023, 43(12):1249-1264.
- [29] 邓佳杰, 章健, 张先锋, 等. YAG 透明陶瓷复合靶抗弹机理研究[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(6):620-628.

Numerical simulation study on penetrating ceramic composite target by ultra-high strength steel bullets

ZHAO Yongqing^{1,2}, YU Yilei³, GAO Guangfa³, WANG Yonggang^{1,2}, JIANG Zhaoxiu^{1,2}

(1.Key Laboratory of Impact and Engineering of Ministry of Education, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

3.School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Armor-piercing kinetic energy projectiles typically use hardened steel as the core material. This paper presents mechanical property experiments conducted on ultra-high-strength steel materials with various strain rates and stress states. Constitutive and damage models for ultra-high-strength steel projectiles were developed based on these experiments and integrated into LS-DYNA commercial software. Finite Element Method (FEM), Smooth Particle Hydrodynamics (SPH), and Smooth Particle Galerkin (SPG) algorithms were used to simulate the behavior of steel projectiles penetrating ceramic composite targets, with which the influences of different algorithms on simulation results were explored. The results indicate: (1) The established material models and three algorithms can all simulate the penetration of brittle steel cores into ceramic composite targets. (2) Due to the non-conservation of mass loss in FEM, the projectiles failed to form splintered fragments, leading to a concentrated enhancement in penetration capability. The calculated velocity and mass of the residual projectile obtained by FEM were both higher than those obtained by the SPH and SPG methods. However, the SPH method exhibited instability in tension, exacerbating core mass erosion during the simulation process, resulting in the smallest mass of the final residual projectile and the greatest damage to the ceramic target. (3) The SPG algorithm addressed the issues of the SPH and SPG methods, thus more accurately simulated the residual projectile mass.

Key words: penetration; ultra-high strength steel; fracture model; ceramic composite armor

(责任编辑 史小丽)