

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.04.017

基于 FEM-SPH 自适应耦合方法的蓝宝石 DOP 性能研究

吴嘉炜¹, 王新峰¹, 古兴瑾¹, 于健²

(1. 南京航空航天大学航空学院, 南京 210016; 2. 南京航空航天大学通用航空与飞行学院, 南京 211106)

摘要: 为了提高弹丸侵彻类高速冲击仿真的精确度, 本文利用有限元法 (Finite element method, FEM)-光滑粒子流法 (Smooth particle hydrodynamics, SPH) 自适应耦合模型对蓝宝石侵彻深度 (Depth of penetration, DOP) 实验过程开展了数值模拟研究。通过 DOP 实验, 验证了该算法下仿真模型的准确性, 并对比了传统 FEM 算法和 FEM-SPH 固定耦合算法仿真模型的计算结果。研究表明, FEM-SPH 自适应耦合算法在计算精度上有明显优势。

关键词: 高速冲击; 自适应耦合; 蓝宝石; 侵彻深度; 有限元

中图分类号: O385

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2023)04-0711-07

A FEM-SPH Adaptive Coupled Model for Sapphire DOP Performance

WU Jiawei¹, WANG Xinfeng¹, GU Xingjin¹, YU Jian²

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. College of General Aviation and Flight, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to improve the precision of high-speed impact simulation for projectile penetration, the depth of penetration (DOP) process of sapphire is simulated by finite element method and smooth particle hydrodynamics (FEM-SPH) adaptive coupled model. The accuracy is verified by DOP experiment. The calculation results of the traditional FEM model and the FEM-SPH fixed coupled model are compared. The results show that the FEM-SPH adaptive coupled model has obvious advantages in calculation accuracy.

Key words: high-speed impact; adaptive coupling; sapphire; depth of penetration (DOP); finite element

随着各类具备穿甲能力武器性能的提升, 对武装直升机和装甲车等军用载具的装甲防护性能要求越来越严苛^[1]。其中载具的舷窗、观察窗等需要具有一定光学性能的部件往往是整体防护性能比较薄弱的部分, 提高该部分的防弹性能一直都是装甲防护领域的重点研究问题。蓝宝石、多晶镁铝尖晶石、AlON 陶瓷等透明陶瓷材料凭借其低密度、高强度、高硬度等良好的性能, 成为主流的装甲迎弹材料。在评价透明陶瓷材料的抗侵彻能力时, 防护系数法是最为广泛使用的, 多名学者通过该方法来判断装甲的防护性能^[2-3]。通过对比子弹与金属参照靶的侵彻深度 (Depth of pen-

etration, DOP) 与陶瓷靶板后的金属验证靶板的剩余侵彻深度来确定陶瓷的防护系数。因弹靶冲击试验的成本普遍较高, 在研究装甲抗侵彻性能时, 常采取实验和数值仿真结合的方式。

现阶段对于弹体侵彻硬质防弹装甲或透明陶瓷装甲的仿真, 国内外学者^[4-7]普遍采用有限元法 (Finite element method, FEM) 和光滑粒子流法 (Smooth particle hydrodynamics, SPH)。有限元法的优势在于对固体材料的变形和结构响应有比较高的模拟准确度。但有限元法在仿真过程存在两个问题: 一是高速冲击条件下容易出现网格畸变; 二是利用单元删除模拟裂纹损伤存在一定的局限

基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金 (BK20220871)。

收稿日期: 2022-12-21; 修订日期: 2023-05-29

通信作者: 王新峰, 男, 副教授, E-mail: xinfengw@nuaa.edu.cn。

引用格式: 吴嘉炜, 王新峰, 古兴瑾, 等. 基于 FEM-SPH 自适应耦合方法的蓝宝石 DOP 性能研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(4): 711-717. WU Jiawei, WANG Xinfeng, GU Xingjin, et al. A FEM-SPH adaptive coupled model for sapphire DOP performance [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(4): 711-717.

性。SPH^[8]不存在网格畸变,其通过断开粒子间的连接来表示裂纹和损伤。但SPH法更广泛地用于对流体材料的模拟,对于固体材料模拟的误差比较大,并且计算效率远远低于有限元法。近年来部分学者在研究高速冲击类仿真采用了有限元和光滑粒子流结合的方法(FEM-SPH耦合算法)^[9]。FEM-SPH耦合算法可分为两类:一是固定耦合算法^[10],即在仿真开始时就固定不同计算部分是采用有限元法还是光滑粒子流法;二是自适应耦合算法^[11],即在仿真开始时所有计算区域均采用有限元法,当有网格失效时,用SPH粒子代替网格继续参与仿真计算。目前,国内外研究学者^[12-14]对耦合算法的研究已经取得了一定进展,其中,肖毅华等^[15]对自适应耦合算法的原理进行了比较详细的解释。

本文基于ABAQUS的显式动力学模块建立的12.7 mm穿甲燃烧弹侵彻蓝宝石/铝合金复合靶的仿真模型,通过对比有限元法、FEM-SPH固定耦合算法以及FEM-SPH自适应耦合算法的仿真结果与实验结果的误差,明确FEM-SPH自适应耦合算法在计算精度和损伤模拟上所具有的优势。

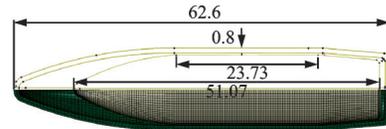
1 DOP实验计算模型

剩余DOP验证系统包括弹丸和靶板两部分,弹丸为12.7 mm穿甲燃烧弹,靶板包括蓝宝石面板和铝合金后效靶。弹丸以488 m/s的速度垂直击中靶板,侵彻结束测量获得铝合金后效靶的剩余侵彻深度。

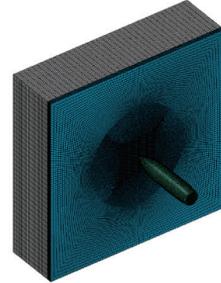
1.1 计算模型

通过测绘实际弹体和查阅相关资料等方式获得12.7 mm穿甲燃烧弹的弹体机构参数,已有学者通过试验验证了弹体中燃烧剂对侵彻深度的影响小^[16],可以忽略不计,所以穿甲燃烧弹包含被甲和弹芯,总体直径13 mm,长度62.6 mm。靶板长和宽均为150 mm,蓝宝石面板厚度分为4 mm、6 mm和8 mm,铝合金后效靶厚度为40 mm。使用基于单元面的通用接触,设置弹体-蓝宝石面板、弹体-铝合金后效靶和蓝宝石面板-铝合金后效靶3个接触对。接触属性添加硬接触法向行为和无摩擦的切向行为,蓝宝石面板背弹面和铝合金后效靶迎弹面采用Tie绑定。采用背弹面四边固支的方式约束靶板,设置弹体初始速度为488 m/s。蓝宝石DOP实验仿真模型如图1所示,各部分的建模方式和网格尺寸如表1所示。

FEM-SPH自适应耦合算法使用添加关键字的方法,实现在材料未失效阶段为FEM算法表示



(a) Bullet size



(b) Mesh division of the model

图1 DOP仿真模型

Fig.1 DOP simulation model

表1 仿真模型的建模类型及材料模型

Table 1 Modeling type and material model of simulation model

| 部件 | 单元(粒子)尺度/mm | 建模类型 |
|--------|-------------|---------------|
| 蓝宝石 | 0.4~4 | FEM/FEM-SPH耦合 |
| 铝合金后效靶 | 0.8~4 | |
| 弹芯 | 0.4 | FEM |
| 被甲 | 0.6 | |

材料力学性能,当材料的有效塑性应变达设定值时,判定材料失效,失效后单元转为SPH粒子,所转换单元的应力、应变与内能等传递给粒子点^[17]。粒子继承原单元的质量、速度与重心位置,粒子速度由转换单元的动量计算得到。通过FEM-SPH自适应转换算法,既可模拟材料的碎裂和粒子对弹芯的冲蚀效果,又保证了整个系统质量守恒和能量守恒。

为对比FEM算法、FEM-SPH固定耦合算法和FEM-SPH自适应耦合算法的仿真结果,对不同算法的仿真模型进行分别设置。FEM算法采用ABAQUS默认的单元删除功能模拟损伤;FEM-SPH固定耦合算法在ABAQUS单元类型功能中设置基于时间的单元粒子化,转变时间设置为0,即仿真初始即转变为粒子,如图2所示。

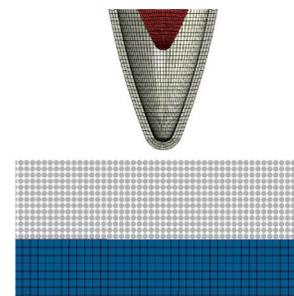


图2 FEM-SPH固定耦合计算模型着弹区

Fig.2 Impact region of FEM-SPH fixed coupled model

1.2 材料模型

蓝宝石材料采用加入强度连续损伤劣化效应的 JH-2 模型^[18]。JH-2 模型由强度模型、损伤累积失效模型和压力-比容关系 3 部分组成,通过损伤因子 D 描述未损伤材料和完全损伤材料的强度。JH-2 模型将蓝宝石在损伤破碎状态下强度表示为

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*)$$

式中: D 为损伤因子, σ_i^* 为未损伤状态($D=0$)时材料的无量纲等效应力, σ_f^* 为完全损伤状态($D=1$)时材料的归一化等效应力。

未损伤状态强度公式为

$$\sigma_i^* = A(p^* + T^*)^N (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*)$$

完全损伤状态强度公式为

$$\sigma_f^* = B(p^*)^M (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \leq \sigma_{fmax}^*$$

式中: A 、 B 、 C 、 M 、 N 和 σ_{fmax}^* (最大破碎强度)均为材料常数; $p^* = p/p_{HEL}$ 为归一化静水压力, p 为实际静水压力, p_{HEL} 为材料处于 Hugoniot 弹性极限时的压力分量; $T^* = T/p_{HEL}$ 为归一化的最大拉伸静水压力,其中 T 为实际状态下的最大拉伸静水压力; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ 为归一化应变率,蓝宝石 JH-2 本构模型参数如表 2 所示^[19]。

表 2 蓝宝石材料参数

Table 2 Sapphire material parameters

| 参数 | $\rho_0/(kg \cdot m^{-3})$ | G/GPa | A | N | B | M | C |
|----|----------------------------|---------|--------------------|---------------|---------|-------|-------|
| 数值 | 3 980 | 155.15 | 0.93 | 0.6 | 0.31 | 0.6 | 0.007 |
| 参数 | $\dot{\epsilon}_0$ | T | σ_{HEL}/MPa | p_{HEL}/MPa | β | D_1 | D_2 |
| 数值 | 1 | 600 | 6 710 | 3 511.7 | 1 | 0.18 | 1 |

对于金属材料本构选取应用最为广泛的 JC 本构模型^[20]。JC 本构模型描述材料的应力应变关系为

$$\sigma_y = (S + W \epsilon_p^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) (1 - T_H^m)$$

式中: ϵ_p^n 为塑性应变, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率, $\dot{\epsilon}_p$ 为塑性应变率, S 为静态屈服强度, W 和 n 表示应变强化效应, m 为温度效应系数, T_H 为无量纲温度。

仿真模型中采用 JC 本构的材料有弹芯硬质合金钢、被甲覆铜钢和 DOP 后效靶铝合金。各材料的 JC 本构参数如表 3 所示^[21-22]。

表 3 金属材料参数

Table 3 Metal material parameters

| 材料 | $\rho_0/(kg \cdot m^{-3})$ | G/MPa | S/MPa | W/MPa | n | C | m |
|-------|----------------------------|---------|---------|---------|------|-------|------|
| 硬质合金钢 | 7 850 | 77 000 | 1 506 | 477 | 0.15 | 0.016 | 1 |
| 覆铜钢 | 7 920 | 115 000 | 300 | 275 | 0.15 | 0.022 | 1.09 |
| 铝合金 | 2 785 | 27 600 | 345 | 462 | 0.25 | 0.015 | 1 |

2 仿真结果分析及实验对比

2.1 FEM-SPH 自适应耦合计算模型计算结果

单元尺寸会对计算效率产生影响,为找到合适的单元尺寸对计算结果以及计算效率的平衡点,以 4 mm 蓝宝石面板的 FEM-SPH 自适应耦合计算模型为例,将弹芯和蓝宝石面板的单元尺寸从 0.6 mm 逐渐减小到 0.3 mm,对比单元尺寸的改变对计算结果的影响,如图 3 所示。结果表明,该模型在单元尺寸小于 0.45 mm 时有较高的计算精度,综合计算时间考虑,0.4 mm 单元尺寸是可以兼顾计算效

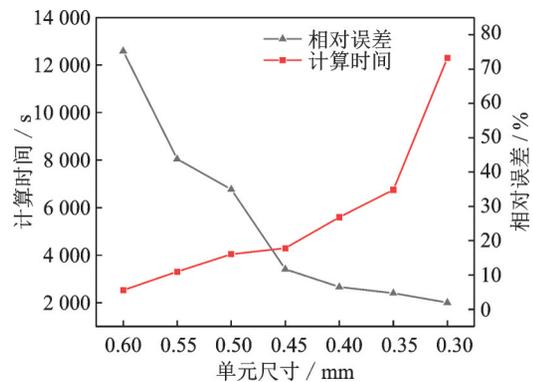


图 3 单元尺寸对计算时间和相对误差的影响

Fig.3 Influence of element size on calculation time and relative error

率和计算精度的。

按照确定的网格尺寸分别进行了 4 mm、6 mm 和 8 mm 厚的蓝宝石面板 DOP 实验仿真,3 种厚度的仿真结果如图 4 所示,并给出了无蓝宝石面板时的计算结果。可以观察到,蓝宝石面板能够有效阻止被甲侵彻,并钝化弹芯的头部,随着蓝宝石面板厚度的增加,钝化效果也更加明显。

图 5 为蓝宝石面板失效云图,其中 4 mm 和 6 mm 蓝宝石面板被弹体穿透,面板损伤明显,着弹区产生数条径向裂纹和大量的碎片粒子,碎裂失效产生的 SPH 粒子会继续侵入铝合金后效靶,并对弹丸头部继续产生冲蚀效果。而弹体对 8 mm 蓝宝石面板的损伤效果较为有限,表现为着弹区碎裂成粒子,无明显裂纹产生。根据图 6 速度曲线可知,8 mm 蓝宝石模型弹体侵彻时间更短,有利于裂纹形成和扩展的反射波作用时间相对更短,所以面板损伤程度较低。

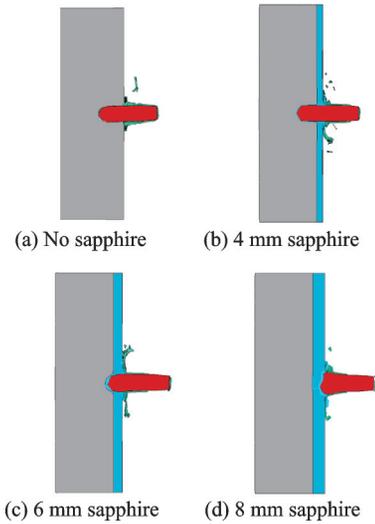


图4 DOP实验仿真结果

Fig.4 Simulation results of DOP experiment

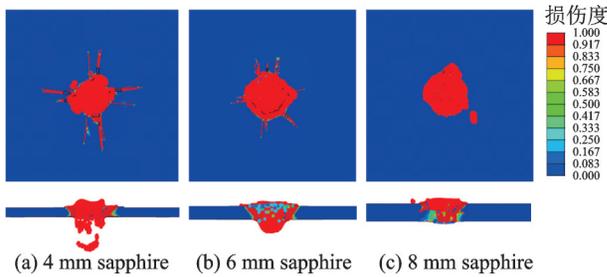


图5 蓝宝石面板单元失效云图

Fig.5 Failure cloud diagram of sapphire panel unit

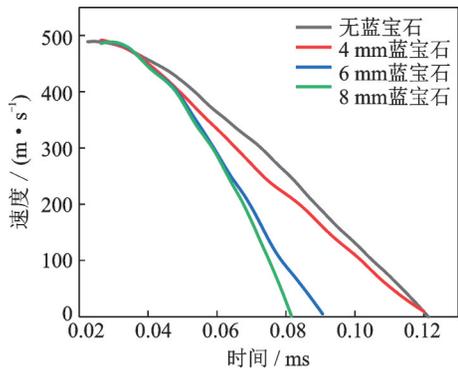


图6 不同厚度蓝宝石面板弹丸侵彻速度历程曲线

Fig.6 Penetration velocity curves of sapphire panel with different thicknesses

3种厚度蓝宝石面板厚度下,弹丸侵彻过程的速度历程曲线如图6所示。根据速度曲线可知,4 mm厚的蓝宝石面板与无蓝宝石面板的弹体速度下降过程较为接近,说明该厚度下,蓝宝石面板的抗侵彻能力较弱,对弹体速度的影响比较有限。当面板厚度达到6 mm或8 mm时,相较4 mm厚度面板,弹体速度下降较为明显,说明在该厚度下,蓝宝石面板具备较强的抗侵彻能力。

本文进行了与仿真模型同等条件下的蓝宝石DOP实验,如图7所示。实验得到的弹丸侵彻深度与



图7 DOP实验现场图

Fig.7 DOP experimental site

仿真模型对比由表4给出,可以看出仿真结果与实验结果符合程度较好,误差均在10%以内。

表4 FEM-SPH自适应耦合模型仿真结果与实验结果对比

Table 4 Comparison of simulation results and experimental results of FEM-SPH adaptive coupled model

| 模型 | 计算模型值/mm | 实验值/mm | 相对误差/% |
|----------|----------|--------|--------|
| 无蓝宝石 | 18.22 | — | — |
| 4 mm 蓝宝石 | 13.85 | 14.81 | 6.50 |
| 6 mm 蓝宝石 | 5.57 | 5.39 | 3.34 |
| 8 mm 蓝宝石 | 0.64 | 0.67 | 4.48 |

2.2 FEM模型和FEM-SPH固定耦合模型仿真结果分析

采用FEM模型和FEM-SPH固定耦合模型同样进行3种厚度蓝宝石的仿真计算,这两种仿真模型的铝合金后效靶剩余侵彻深度如图8所示。与FEM-SPH自适应耦合计算模型相比,FEM-SPH固定耦合模型的剩余侵彻深度更大,和实验结果对比也存在较大的误差。而FEM仿真结果中8 mm蓝宝石面板计算模型误差明显。

如图9所示,对比自适应耦合模型和FEM模型8 mm蓝宝石面板的弹丸速度时间曲线, 5.4×10^{-5} s时弹丸速度开始产生明显差异,

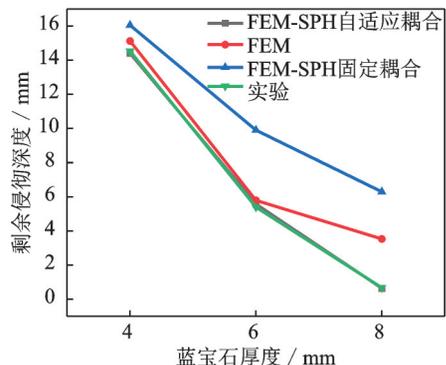


图8 3种计算模型后效靶剩余侵彻深度

Fig.8 Residual DOP of after-effect target of three models

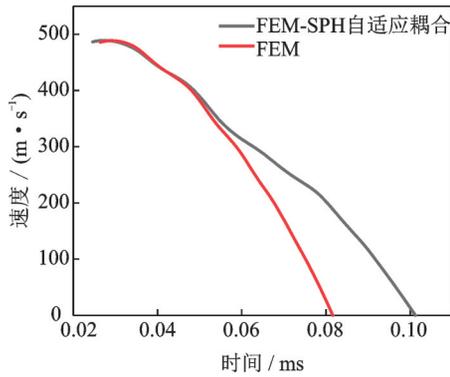


图9 8 mm 蓝宝石面板弹丸侵彻速度对比

Fig.9 Comparison of penetration velocities of 8 mm sapphire panel projectiles

FEM-SPH 自适应耦合算法的弹体速度下降更为显著,说明蓝宝石面板破碎后产生的粒子对弹体产生了冲蚀和阻碍作用。图 10 给出了此时着弹区的应力情况及弹丸变形情况,在 5.4×10^{-5} s 时,着弹区处于破碎区裂纹扩展到裂纹汇聚的过程, FEM-SPH 自适应耦合算法下,有明显的陶瓷界面反射冲击波,这是形成陶瓷锥的主要作用力之一。FEM 算法导致材料的缺失,一定程度上影响了陶瓷破碎锥的形成,且此时的半锥角小于 FEM-SPH 自适应耦合算法的半锥角。同时,此时已经形成的 SPH 粒子会附着于弹丸头部表面,并持续磨蚀弹丸,进一步增大了弹丸的钝化程度,最终造成两种算法的侵彻深度产生较大差异。

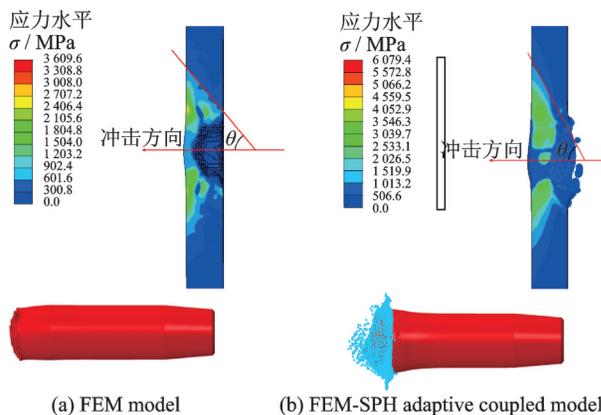


图 10 蓝宝石面板着弹区应力云图和弹丸形变图

Fig.10 Stress nephogram of the impact zone and the deformation diagram of the projectile on the sapphire panel

以 6 mm 厚蓝宝石计算模型为例,如图 11 所示,在蓝宝石面板发生损伤初期阶段的同一时刻, FEM 计算模型和 FEM-SPH 自适应耦合模型的陶瓷面板应力分布相近,均有破碎锥形成,且弹丸头部显著钝化。但 FEM-SPH 固定耦合模型的弹丸变形较小且已侵入蓝宝石面板较深处。

从图 12 弹丸速度时间曲线可以看出,侵彻初

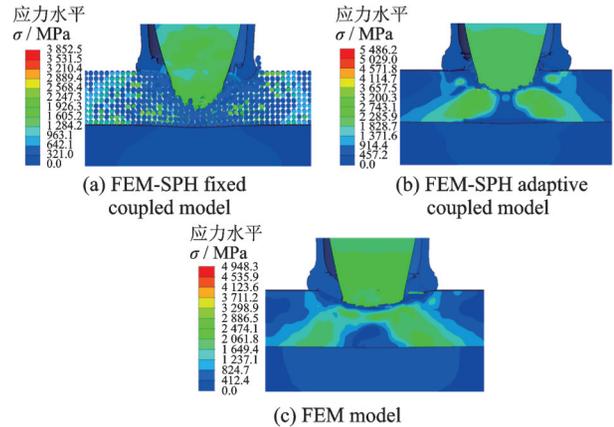


图 11 侵彻初期着弹区应力分布

Fig.11 Stress distribution in the impact zone at the initial stage of penetration

期由于蓝宝石面板还未出现损伤,所以 FEM-SPH 自适应耦合模型与 FEM 模型的速度曲线重合。当面板开始破碎失效时,自适应耦合模型中的弹体因受到 SPH 粒子的冲蚀和阻碍,弹体速度会下降得更为明显。而 FEM 模型随着蓝宝石面板单元删除,弹体受到的阻碍减弱,弹体速度下降变缓。由于 FEM 模型和 FEM-SPH 自适应耦合模型的弹体钝化更为明显,所以弹体速度降至 0 所需的时间更短。FEM-SPH 固定耦合模型的弹丸速度下降得较慢,因为此时蓝宝石材料处于拉应力状态,SPH 粒子的运动将变得不稳定,导致所谓的拉伸失稳。这种不稳定性,与标准 SPH 法的插值技术密切相关,在模拟固体拉伸时尤其明显。这使得粒子趋向于聚集在一起而表现出破碎行为,这种 SPH 粒子的不稳定性影响了蓝宝石面板的抗侵彻性能,伍一顺等^[23]对此进行了详细的解释与验证。

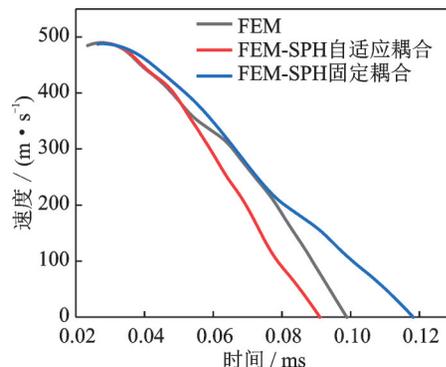


图 12 弹丸速度时间曲线

Fig.12 Velocity-time curves of projectile

如图 13 所示,对比 3 种模型在侵彻结束后,蓝宝石面板的整体损伤情况。FEM 计算模型的损伤区域仅集中在着弹区附近,且产生较短的径向裂纹;FEM-SPH 固定耦合算法的蓝宝石面板有明显的径向裂纹产生,但条数较少;FEM-SPH 自适应

耦合计算模型的中心着弹区单元全部转换为粒子,且有数条径向裂纹产生,比较符合图13(d)余毅磊等^[24]通过实验得到的 Al_2O_3 陶瓷损伤特性。

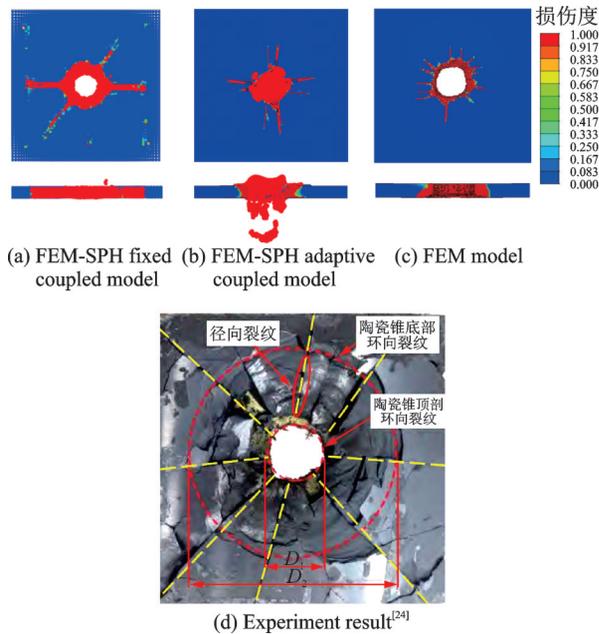


图13 4 mm蓝宝石面板损伤云图

Fig.13 Failure cloud diagram of 4 mm sapphire panel

如图14所示,FEM-SPH自适应耦合算法下弹体被甲受到蓝宝石面板破碎后粒子的阻挡,损伤效果表现为被甲前部呈花瓣状外翻,符合图14(d)刘赛等^[25]在实验中观察到的结果;FEM-SPH固定耦合算法由于存在前文所述的拉伸失稳,导致蓝宝石面板阻碍被甲侵彻的作用较小,从而使得被甲前部嵌入着弹损伤区;FEM模型的被甲会表现轻微的外翻,但由于后续蓝宝石面板损伤引起的单元删除,使得被甲也出现了嵌入着弹区的现象。

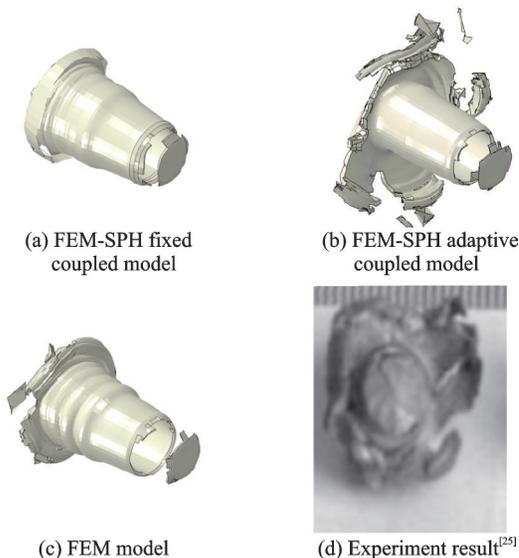


图14 弹体被甲损伤图

Fig.14 Bullet shell damage

3 结 论

本文研究了蓝宝石DOP实验的FEM-SPH自适应耦合计算模型的建立方式,将传统的FEM计算模型添加单元自适应转化SPH粒子的算法,实现对透明陶瓷材料受冲击时的破坏特征的模拟。与FEM方法和FEM-SPH固定耦合方法相比,FEM-SPH自适应耦合方法具有更高的计算精度,其侵彻深度结果与实验结果的相对误差小于10%,并且能够准确地反映材料的损伤效应,与实验观察结果一致。本文研究成果有助于提高穿甲燃烧弹弹道冲击蓝宝石面板的仿真分析精度。

参考文献:

- [1] 杨彬. 军用直升机装甲防护现状与展望[J]. 中国设备工程, 2021(2): 179-182.
YANG Bin. The present situation and prospect of military helicopter armor protection[J]. China Equipment Engineering, 2021(2): 179-182.
- [2] 段士伟. 陶瓷材料的静动态力学性能和损伤特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
DUAN Shiwei. Study on static and dynamic mechanical properties and damage characteristics of ceramic materials[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013.
- [3] 陈贝贝. YAG透明陶瓷复合装甲冲击破坏特性与抗弹性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
CHEN Beibei. Impact damage characteristics and ballistic properties of YAG transparent ceramic composite armor[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [4] HOLMQUIST T J, TEMPLETON D W, BISHNOI K D. Constitutive modeling of aluminum nitride for large strain, high-strain rate, and high-pressure applications[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25(3): 211-231.
- [5] QUAN X, CLEGG R A, COWLER M S, et al. Numerical simulation of long rods impacting silicon carbide targets using JH-1 model[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 33: 634-644.
- [6] 马阳. 复合靶板抗侵彻能力数值仿真研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2022, 41(4): 84-88.
MA Yang. Numerical simulation of anti-penetration ability of composite target[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2022, 41(4): 84-88.
- [7] BARANOWSKI P. Fracture and fragmentation of dolomite rock using the JH-2 constitutive model: Parameter determination, experiments and simulations[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 140: 103543.
- [8] LUCY L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis[J]. The Astronomical Journal,

- 1977, 82: 1013-1024.
- [9] 武玉玉, 何远航, 李金柱. 耦合方法在超高速碰撞数值模拟中的应用[J]. 高压物理学报, 2005(4): 385-389.
WU Yuyu, HE Yuanhang, LI Jinzhu. Application of coupling method in hypervelocity impact numerical simulation[J]. Journal of High Pressure Physics, 2005(4): 385-389.
- [10] 胡德安, 韩旭, 肖毅华, 等. 光滑粒子法及其与有限元耦合算法的研究进展[J]. 力学学报, 2013, 45(5): 639-652.
HU Dean, HAN Xu, XIAO Yihua, et al. Research progress of smoothed particle method and its coupling with finite element method[J]. Journal of Mechanics, 2013, 45(5): 639-652.
- [11] 王吉, 王肖钧, 卞梁. 光滑粒子法与有限元的耦合算法及其在冲击动力学中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(6): 522-528.
WANG Ji, WANG Xiaojun, BIAN Liang. The coupling algorithm of smooth particle method and finite element method and its application in iMPact dynamics[J]. Explosion and Shock, 2007, 27(6): 522-528.
- [12] DE VUYST T, VIGNJEVIC R, CAMPBELL J C. Coupling between meshless and finite element methods[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31(8): 1054-1064.
- [13] SAUER M. Adaptive coupling of the mesh-free sph-method with finite elements for the calculation of impact events[R]. [S.l.]: Universitaet Der Bundeswehr Muenchen Neubiberg, 2000.
- [14] 张志春, 强洪夫, 高巍然. 一种光滑粒子流体动力学-有限元法转换算法及其在冲击动力学中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(1): 105-110.
ZHANG Zhichun, QIANG Hongfu, GAO Weiran. A smooth particle fluid dynamics-finite element method conversion algorithm and its application in impact dynamics[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(1): 105-110.
- [15] 肖毅华, 胡德安, 韩旭, 等. 一种自适应轴对称FEM-SPH耦合算法及其在高速冲击模拟中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(4): 384-392.
XIAO Yihua, HU Dean, HAN Xu, et al. An adaptive axisymmetric FEM-SPH coupled algorithm and its application in high-speed iMPact simulation[J]. Explosion and Shock, 2012, 32(4): 384-392.
- [16] 包阔, 张先锋, 谈梦婷, 等. 子弹撞击碳化硼陶瓷复合靶试验与数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(12): 57-68.
BAO Kuo, ZHANG Xianfeng, TAN Mengting, et al. Experimental and numerical studies on the impact of bullets on boron carbide ceramic composite targets[J]. Explosion and Shock, 2019, 39(12): 57-68.
- [17] 孙占华. 基于FE-SPH自适应耦合方法的弹靶侵彻动态响应分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
SUN Zhanhua. Dynamic response analysis of missile-target penetration based on FE-SPH adaptive coupling method[D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [18] JOHNSON G R, HOLMQUIST T J. An improved computational constitutive model for brittle materials[J]. American Institute of Physics, 1994, 309: 981-984.
- [19] ZHANG B, GUO X, LIU Y. Study of glass laminate configurations on ballistic resistance of novel lightweight sapphire transparent laminated structures[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2021, 4(4): 397-404.
- [20] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. [S.l.]: [s.n.], 1983: 541-547.
- [21] 侯二永. 陶瓷间隙靶抗12.7 mm穿甲燃烧弹机理及性能研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
HOU Eryong. Study on the mechanism and performance of ceramic clearance target against 12.7 mm armour-piercing incendiary bomb[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
- [22] 李娜, 李玉龙, 郭伟国. 3种铝合金材料动态性能及其温度相关性对比研究[J]. 航空学报, 2008(4): 903-908.
LI Na, LI Yulong, GUO Weiguo. Comparative study on dynamic properties and temperature dependence of three kinds of aluminum alloy materials[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008(4): 903-908.
- [23] 伍一顺, 陈小伟. 长杆弹撞击陶瓷靶的一种数值模拟方法[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(5): 74-86.
WU Yishun, CHEN Xiaowei. A numerical simulation method of long rod projectile impacting ceramic target[J]. Explosion and Shock, 2020, 40(5): 74-86.
- [24] 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.
YU Yilei, WANG Xiaodong, REN Wenke, et al. Fragmentation characteristics of ceramic/metal composite targets penetrated by 12.7 mm armour-piercing incendiary projectiles[J]. Journal of Military Engineering, 2022, 43(9): 2307-2317.
- [25] 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.
LIU Sai, ZHANG Weigui, LYU Zhenhua. FEM-SPH coupled calculation model for penetration of armour-piercing incendiary projectile into ceramic composite armor and glass composite armor[J]. Explosion and Shock, 2021, 41(1): 105-116.