

钨纤维增强金属玻璃复合材料长杆弹对陶瓷靶的 侵彻性能

张钰忠^{1,2}, 陈建良^{2,3}, 李继承^{2,3}, 陈军红^{2,3}, 邓勇军^{2,4}, 杜成鑫⁵

(1.西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010;

2.工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621010;

3.中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999;

4.西南科技大学航空航天学院, 四川 绵阳 621010;

5.南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为探究钨纤维增强金属玻璃复合材料长杆弹针对陶瓷靶的侵彻性能和弹靶材料变形破坏特征, 采用有限元-光滑粒子自适应耦合算法(FE-SPH), 结合相关穿甲试验, 对复合材料长杆弹撞击陶瓷靶开展数值模拟, 对比分析了钨合金长杆弹侵彻陶瓷靶及复合材料弹体侵彻钢靶的作用过程, 详细讨论了相应弹靶变形和破坏特征的异同, 分析了撞击速度、弹头形状和陶瓷靶材性能等对复合材料长杆弹穿甲陶瓷靶弹道特性和靶板损伤演化特征的影响。研究结果表明, 复合材料长杆弹撞击陶瓷靶时头部钨纤维容易过早发生屈曲分散, 难以形成如侵彻金属靶情形的自锐效应, 其侵彻能力显著低于钨合金弹; 撞击速度、弹头形状和陶瓷靶强度均对弹靶响应特征具有显著影响, 其中撞击速度提高有助于抑制钨纤维分散, 从而增强弹体侵彻能力, 平头弹体可诱发陶瓷靶内部更广范围的裂纹扩展, 半球头弹体因曲面接触导致冲击应力降低, 进而使得侵彻性能减弱。陶瓷靶强度越低, 复合材料弹体可引发更宽的内部损伤区域并显著提升侵彻深度。相关研究可有效评估钨纤维增强金属玻璃复合材料长杆弹针对陶瓷靶等高强脆性材质靶板的侵彻/穿甲性能, 以及认识该新型材料弹体的适用场景。

关键词: 钨纤维增强金属玻璃复合材料; 陶瓷靶; 侵彻; 损伤; FE-SPH 自适应耦合方法

中图分类号: O385

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Penetration performance of tungsten fiber / metallic glass matrix composite long rods onto ceramic targets

ZHANG Yuzhong^{1,2}, CHEN Jianliang^{2,3}, LI Jicheng^{2,3}, CHEN Junhong^{2,3}, DENG Yongjun^{2,4}, DU Chengxin⁵

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China;

2. Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang 621010, Sichuan, China;

3. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China;

4. School of Aeronautics and Astronautics, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China;

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

Abstract: In order to investigate the penetration performance of tungsten fiber / metallic glass matrix (WF/MG) composite long rods onto ceramic targets as well as the deformation and failure characteristics of both the projectile and target materials, the adaptive coupling algorithm with finite element method and smoothed particle hydrodynamics (FE-SPH) was employed to conduct related simulations integrated with related experiments, and comparative analysis was conducted between the ballistic performances of tungsten alloy long rods impacting onto ceramic targets and those of WF/MG composite long rods onto steel targets, and the corresponding similarities and differences in the deformation and failure features of long rods and targets were discussed. Furthermore, the effects of several key factors, including impact velocity, rod nose shape, and mechanical properties of ceramic materials, on the ballistic characteristics and damage evolution features of ceramic targets, were analyzed in detail, and the corresponding mechanism for related ballistic behaviors was also discussed in depth. Related results demonstrates that during the impact onto ceramic targets, severe dispersion of tungsten fibers occurs in the rod nose region, leading to that the 'self-sharpening' performance like that in the penetration into a metallic target is difficult to occur, and thus the penetration capability of WF/MG composite long rods is significantly lower than that of tungsten alloy long rods against ceramic targets. Impact velocity, rod nose shape, and the strength of ceramic material all have significant influences on the dynamic response characteristics of composite long rod and ceramic target. Increasing the impact velocity helps to suppress the dispersion of tungsten fibers, thereby enhances the penetration capability of composite long rod; the flat-nosed long rod can induce broader region of crack initiation and propagation within the ceramic target; due to the lower impact stress resulting from contact with curved surfaces, the hemispherical-nosed long rod behaves the lowest penetrating capability; lower ceramic strength leads to wider inner damage regions within the target, and then it induces significant increase in penetration depth of composite long rod. Related research is beneficial to predicting and evaluating the penetration performance of WF/MG composite long rods against high-strength brittle targets such as ceramic targets, and also to recognize the applicable scenarios for this new kind of long rod.

Keywords: Tungsten fiber / metallic glass matrix composite; Ceramic target; Penetration; Damage; FE-SPH adaptive coupling algorithm

钨合金弹体穿甲时头部易墩粗，贫铀弹虽具备良好的穿甲“自锐”能力，却会产生放射性污染。为此，军事领域不断在探索具有“自锐”特性而无放射性危害的环保型动能穿甲弹芯材料。其中，金属玻璃材料具备极高的剪切敏感性^[1-2]，通过在金属玻璃基体中引入延性钨纤维增强相后所制备的弹体也可产生“自锐”特性且无放射性危害，因而有望成为贫铀弹的理想替代材料^[3-5]。20余年来国内外开展了大量研究，早期美国加州理工学院 Johnson 课题组开展复合材料弹体高速侵彻/穿甲铝靶和钢靶的试验^[6-7]；随后国内多个高校和科研院所也开展了相应侵彻/穿甲试验研究^[8-20]；作者课题组结合相关穿甲试验开展了系列有限元模拟分析，结合应力波传播等内变量演化特性研究了撞击速度、撞击姿态、靶材强度、弹头形状和弹体钨纤维尺寸等因素对弹体“自锐”特性及侵彻/穿甲性能的影响^[21-28]。相关研究显示钨纤维增强金属玻璃复合材料长杆弹针对金属靶具有优异的侵彻/穿甲性能。

在现代防护装甲结构中，为满足轻质高强等性能需求，陶瓷装甲得到了广泛应用^[29]。陶瓷装甲最显著的性能为其高强度、低密度和脆性等特征，相应地在高速侵彻/穿甲过程中的冲击响应特性将同金属靶情形发生显著不同^[30]。金属靶在弹体穿甲过程中以塑性变形为主，陶瓷靶则易发生明显的断裂和破碎，进而影响弹道特征，并导致弹靶变形和破坏特性将远较金属靶情形复杂。除常规侵彻/穿甲现象之外，弹体穿甲陶瓷靶板过程中还可能发生界面击溃、先发生界面击溃之后转变为穿甲等多种弹道特性^[30-39]。目前，针对陶瓷靶穿甲的研究同样主要局限于均质合金弹体。金属玻璃复合材料弹体内部微细观结构复杂，在侵彻陶瓷靶板时的弹靶变形和破坏行为势必更为复杂，其能否保持较好的“自锐”性能和较高侵彻能力亟需开展深入研究。

如前期研究所述，有限元模拟分析可作为相关侵彻/穿甲试验的有效补充，且逐渐成为强有力的研究手段。近年来有限元-光滑粒子自适应耦合算法(FE-SPH)得到显著发展^[40-44]。该算法借助有限元网格单元与光滑粒子流体动力学 SPH 计算域的动态切换，可充分发挥有限元方法在小变形区域计算中的高效性以及 SPH 算法在大变形问题处理中的显著优势。前期的研究中显示^[45]，FE-SPH 耦合算法可较好地体现钨合金长杆弹撞击陶瓷靶在界面击溃阶段、侵彻阶段等过程中的弹体材料塑性流动行为、脆性陶瓷靶材内部的裂纹萌生及扩展等特征，进而可较准确地预测相应弹道行为。

本文继续沿用 FE-SPH 自适应耦合算法，对钨纤维增强金属玻璃复合材料长杆弹冲击陶瓷靶开展有限元仿真，分析弹体与靶板的动态变形和破坏演化特性，并与相同撞击条件下钨合金弹对陶瓷靶的侵彻/穿甲性能、复合材料弹体对金属靶的“自锐”特性和相应弹道行为进行对照研究。之后再全面分析撞击速度、弹头形状、陶瓷靶材强度等因素对复合材料长杆弹撞击陶瓷靶侵彻效能的影响规律及其机制。相关研究可有效预测复合材料弹体撞击陶瓷靶弹道特性，也可为复合材料弹体的构型设计和穿甲条件优化、陶瓷靶的材料和结构设计等提供有效参考。

1 数值仿真模型

1.1 有限元模型

复合材料长杆弹撞击陶瓷靶的数值模拟主要参考 Lundberg 等^[46]的 SiC 陶瓷靶撞击试验，相应有限元模型如图 1 所示，结合前期研究^[21,45]，为节约计算求解成本，建立二维轴对称模型开展相关分析，相关模拟也可较好地体现弹靶的主要变形与破坏特征。长杆弹整体尺寸为 $\phi 5\text{mm}\times 60.95\text{mm}$ ，头形为平头构型，相应有限元模型如图 2 所示，参照前期工作^[21]，模型中网格尺寸设置为 0.1mm，钨纤维直径为 0.3mm，均匀分布于金属玻璃基体中，其体积分数约为 80%。靶板为圆柱形 SiC 陶瓷靶，其尺寸为 $\phi 35\text{mm}\times 20\text{mm}$ ，靶板外围利用 4340 钢箍进行约束，钢箍外径为 40mm，总长为 44mm，其前端 20mm 深区域开有直径为 35mm 柱形槽以装载陶瓷靶。陶瓷靶结构网格划分采用渐变网格方式，撞击中心半径 10mm 区域内网格尺寸与弹体一致，为 0.1mm，其余部分设为 0.3mm；钢箍部分也采用相同网格划分处理方法。此外，弹体与陶瓷靶中心区域半径 10mm 范围区域的结构采用 FE-SPH 自适应耦合方法进行建模，具体算法设置过程及其相关分析可参见相关文献^[40]及此前工作^[45]。

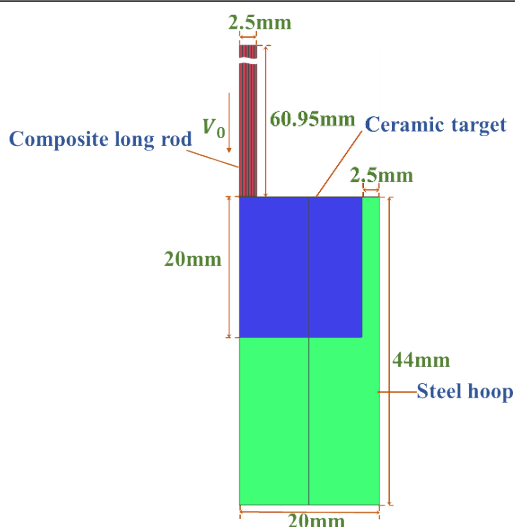


图1 金属玻璃复合材料弹体撞击陶瓷靶有限元模型示意图
Fig.1 Sketch of tungsten fiber / metallic glass matrix composite long rod impacting onto ceramic targets

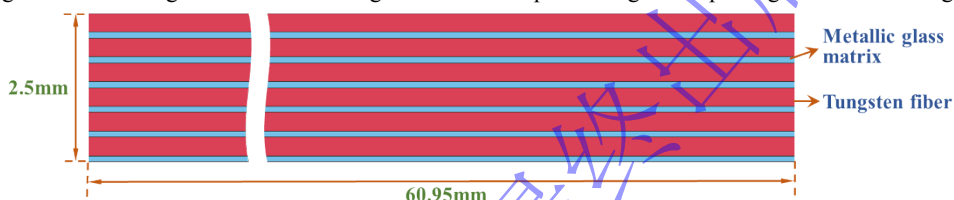


图2 复合材料弹体的二维有限元模型
Fig.2 2D finite element geometrical model of a composite long rod

1.2 材料模型

相关材料本构模型和破坏准则沿用前期相关工作^[21-26,45]中的模型和参数，其中弹体基体材料金属玻璃属于非晶态合金材料、弹体钨纤维和陶瓷靶钢箍为传统金属材料、陶瓷为高强脆性材料，三类材料的具体本构模型和参数如下述所示。

1.2.1 金属玻璃材料

金属玻璃材料利用修正的力-热-自由体积耦合本构模型和临界自由体积浓度的失效准则来描述其力学特性，模型具体表达式及其参数说明可参见此前工作^[47-48]，复合材料弹体中的锆基金属玻璃基体材料参数如表1所示^[21-26]。

表1 锆基金属玻璃的修正热力耦合模型参数^[21-26]

Table1 Parameters in the modified coupled thermo-mechanical constitutive model for Zr-based metallic glass^[21-26]

| 参量 | 符号 | 单位 | 数值 |
|------------|--------------|----------------------------------|------------------------------|
| 弹性模量 | E | GPa | 96 |
| 泊松比 | ν | - | 0.36 |
| 玻璃转变温度 | T_g | K | 625 |
| 熔点温度 | T_m | K | 993 |
| 密度 | ρ | kg/m ³ | 6125 |
| 定容比热 | C_v | J/(kg·K) | 400 |
| 原子振动频率 | f | s ⁻¹ | 1×10^{13} |
| 平均原子体积 | Ω | 10 ⁻³⁰ m ³ | 25 |
| 临界体积 | ν^* | 10 ⁻³⁰ m ³ | 20 |
| 初始温度 | T_0 | K | 300 |
| 初始自由体积浓度 | ξ_0 | - | 0.05 |
| 临界破坏自由体积浓度 | ξ_c | - | 0.065 |
| 几何因子 | α | - | 0.05 |
| 运动激活能 | ΔG^m | eV | $\Delta G^m(\dot{\epsilon})$ |
| 所需跃迁次数 | n_D | - | 3 |
| 静水应力敏感因子 | Λ | - | $\Lambda_c = 0.05$ |

1.2.2 金属材料

金属材料利用 Johnson-Cook(JC)本构模型^[49]结合累积损伤失效模型^[50]来表征相应材料的力学性能, 并利用 Grüneisen 状态方程^[51]计算侵彻过程中的压力状态。结合相关试验^[46]和有限元模拟研究^[37,21-22,45], 得到钨合金与 4340 钢的相应模型参数如表 2 所示^[37,21-22,45]。

表 2 钨合金和 4340 钢 Johnson-Cook 模型参数^[37,21-22,45]
Table2 Johnson-Cook model parameters of tungsten alloy and 4340 steel ^[37,21-22,45]

| 材料 | $\rho /(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | G / GPa | ν | $C_v /(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{k}^{-1})$ | T_r / K | T_m / K | $\dot{\epsilon}_0 / \text{s}^{-1}$ |
|--------|---------------------------------------|------------------|-------|--|------------------|------------------|------------------------------------|
| 钨合金 | 17700 | 160 | 0.28 | 150 | 293 | 1723 | 1 |
| 4340 钢 | 7830 | 77 | 0.29 | 477 | 300 | 1793 | 1 |
| 材料 | A / MPa | B / MPa | N | C | m | D_1 | D_2 |
| 钨合金 | 631 | 1258 | 0.092 | 0.014 | 1.00 | 3.00 | 0 |
| 4340 钢 | 792 | 510 | 0.260 | 0.014 | 1.03 | 0.05 | 3.44 |
| 材料 | D_3 | D_4 | D_5 | $C_0 /(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | S | γ_0 | α |
| 钨合金 | 0 | 0 | 0 | 4029 | 1.237 | 1.54 | 0 |
| 4340 钢 | -2.12 | 0.002 | 0.61 | 4569 | 1.49 | 2.17 | 0.46 |

1.2.3 陶瓷材料

对于 SiC 陶瓷靶, 采用 JH2 模型来描述陶瓷材料在弹体撞击过程中从完整状态到完全损伤不同阶段的力学响应特征, 具体表达式可参见文献^[52-53], SiC 陶瓷的相应 JH2 模型参数列出如表 3 所示^[45]。此外, 为后续分析陶瓷靶材强度对复合材料长杆弹侵彻性能的影响规律, 进一步引入材料强度更低的 B₄C 陶瓷作为对比工况, 其 JH2 本构模型参数同样列于表 3 中^[54-55]。

表 3 陶瓷材料 JH2 模型参数^[45,54-55]
Table3 JH2 model parameters of ceramic materials ^[45,54-55]

| 参量 | $\rho /(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | G / GPa | A | E | C | M | N | T / MPa |
|------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|---------|-------|-------|--------------------|--------------------|
| SiC | 3215 | 193 | 0.96 | 0.35 | 0.009 | 1 | 0.65 | 750 |
| B ₄ C | 3215 | 193 | 0.96 | 0.35 | 0.009 | 1 | 0.65 | 260 |
| 参量 | $SFMAX$ | HEL / MPa | PHL / MPa | β | D_1 | D_2 | K_1 / GPa | K_2 / GPa |
| SiC | 0.11 | 11700 | 5130 | 1.0 | 0.48 | 0.48 | 220 | 0 |
| B ₄ C | 0.11 | 19000 | 8710 | 1.0 | 0.48 | 0.48 | 220 | 0 |

2 复合材料弹体和陶瓷靶损伤破坏特性

本节将对复合材料长杆弹撞击陶瓷靶板的变形破坏特性进行分析, 并同钨合金长杆弹撞击陶瓷靶(参见^[45])、复合材料长杆弹侵彻钢靶(参见^[21])等条件下的相应弹靶变形破坏特性进行对比分析, 重点关注复合材料长杆弹对陶瓷靶的穿甲性能是否仍优于钨合金弹, 以及复合材料弹体侵彻陶瓷靶时是否像侵彻金属靶情形表现出穿甲“自锐”性能等。结合此前针对钨合金弹体撞击陶瓷靶的相关研究, 选取 1022m/s 和 1293m/s 两种典型撞击速度开展相关分析。

复合材料弹体以 1022m/s 速度撞击陶瓷靶的弹靶变形破坏历程如图 3 所示。可看出弹体材料在陶瓷靶板表面发生塑性流动, 整个撞击过程弹体未能侵入靶板内部, 呈现出同钨合金弹撞击情形类似的“界面击溃”现象(参见^[45])。同时, 复合材料弹体也表现出与钨合金弹体不同的变形破坏特征, 弹体在撞击过程中内部钨纤维较早发生分散和断裂, 进而未能形成有效侵彻, 弹体侵彻深度仅约 1mm。对于陶瓷靶板, 在撞击初期($t=2\mu\text{s}$)靶板已出现明显损伤, 弹体撞击区域附近出现倒圆锥状的密集裂纹汇聚区(图 3(a)), 其形态明显区别于钨合金弹体撞击产生的椭球状裂纹区(参见^[45]); 随着撞击过程进行, 裂纹进一步扩展并延伸至靶板底部, 至 $t=20\mu\text{s}$ 时, 靶板底部由于反射拉伸波的作用, 出现向上延伸的轴向裂纹; 在撞击后期(图 3(c-d)), 陶瓷靶中的裂纹数量并未继续明显增加, 表明弹体在后期撞击过程中对靶板的冲击作用相对较弱, 图中的确显示复合材料长杆弹中钨纤维的分散现象进一步加剧, 最终在 $t=65\mu\text{s}$ 时弹体完全停止侵彻。相关研究^[45-46]表明, 在 1022m/s 撞击速度下, 钨合金长杆弹在陶瓷靶体表面发生界面击溃现象, 开坑深度也仅为 1.2mm。

因此可知, 在相对较低速度下, 复合材料弹体和钨合金弹体均难以对陶瓷靶形成有效侵彻。弹体材料在靶板表面发生分散并向侧面流出, 且复合材料的结构特性导致弹体材料的分散和流失较钨合金

弹更为严重, 进而对陶瓷靶板造成的损伤程度较钨合金弹撞击损伤情形有所减小。

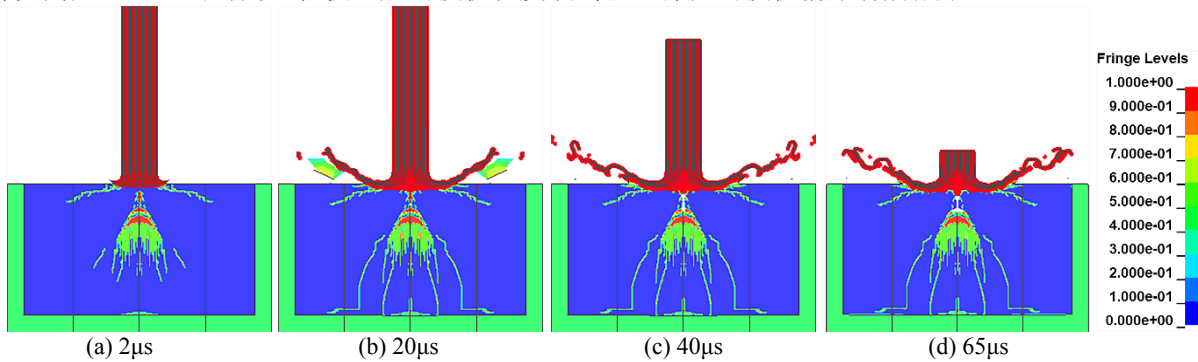


图3 复合材料长杆弹在 1022m/s 速度条件下撞击陶瓷靶的弹靶变形和破坏历程

Fig.3 Development of deformation and failure in the projectile and target materials during the impact of composite long rod onto ceramic target at $V_0 = 1022\text{m/s}$

类似地, 在 1293m/s 撞击速度下的弹靶响应特征如图 4 所示。在此高速工况下, 复合材料长杆弹对陶瓷靶的侵彻能力仍然有限。弹体材料主要在靶体表面发生塑性流动, 其反向流动角低于低速工况中相同时刻的情形(参见图 3), 但在侵彻过程中并未减小至零, 表明弹体未能类似钨合金弹侵入靶体内部(参见^[46])。此外, 与低速撞击情形类似, 复合材料弹体在侵彻后期($t \geq 40\mu\text{s}$)再次出现钨纤维分散和断裂加剧现象, 导致对靶体的冲击作用显著降低, 弹体最终驻留于靶体表面。再者, 从陶瓷靶体的损伤演化来看, 在 $t = 2\mu\text{s}$ 时靶体中心区域已形成范围更广的倒圆锥状主裂纹区及伴随的次级裂纹分布网络; $t = 20\mu\text{s}$ 时, 主裂纹进一步扩展至靶体背面, 同时靶体底部产生比低速撞击情形(图 3)数量更多的轴向裂纹。然而, 在后续侵彻过程中, 陶瓷靶中的裂纹分布未再发生明显变化(参见图 4(b-d))。最终弹体于 $t = 46\mu\text{s}$ 左右停止运动, 相应侵彻深度仅为 1.5mm, 也未能形成有效侵彻。

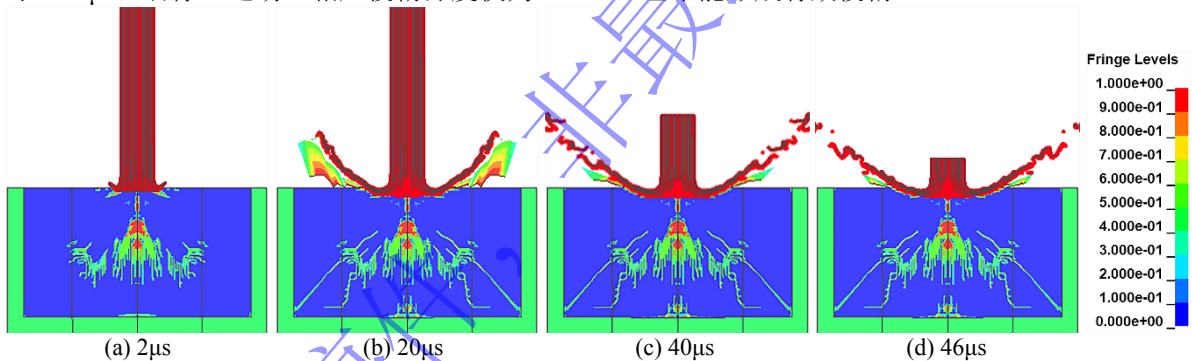


图 4 复合材料长杆弹在 1293m/s 速度条件下撞击陶瓷靶的弹靶变形和破坏历程数值模拟结果

Fig.4 Development of deformation and failure in the projectile and target materials during the impact of composite long rod onto ceramic target at $V_0 = 1293\text{m/s}$

前期研究^[45]表明, 在撞击速度 $V_0 = 1293\text{m/s}$ 条件下, 钨合金弹体在撞击初始阶段即引起陶瓷靶体的剧烈变形与破坏, 并迅速侵入靶体, 同时, 陶瓷靶内迅速形成高密度损伤区, 并由此向靶体后端辐射出多级锥形裂纹并快速向靶体尾端方向扩展, 最终形成贯穿性损伤通道, 弹体的最终侵彻深度超过 14mm^[45]; 此外, 在 $V_0 > 900\text{m/s}$ 条件下, 复合材料弹体正撞击金属靶均可达到较好的侵彻效能^[21]。为具体对比分析复合材料弹体和钨合金弹体针对陶瓷靶侵彻性能的差异, 将两种弹体在不同速度下的侵彻深度随时间演化曲线列于图 5(a) 所示; 同时, 为对比分析复合材料长杆弹针对金属靶与陶瓷靶侵彻性能的同, 同时开展复合材料长杆弹在 $V_0 = 1022\text{m/s}$ 与 1293m/s 两种速度下侵彻 4340 钢靶的数值模拟分析, 相应弹靶变形和破坏历程同此前相关分析类似, 也即复合材料弹体头部经历初期轻微墩粗之后逐渐锐化的过程(参见^[21]), 相应侵彻深度随时间变化历程列于图 5(b) 所示。

观察图 5(a) 可知, 当撞击速度较低时(1022m/s), 钨合金弹与复合材料长杆弹均表现为“界面击溃”特征, 其侵彻深度较浅($< 1.5\text{mm}$)。而在撞击速度增大之后(1293m/s), 钨合金弹的侵彻深度随侵彻过程逐渐增加, 最终达到约 14mm。复合材料弹体侵彻深度变化特征则同低速情形相似, 侵彻后期基本未发生变化。因此可知, 对于陶瓷靶体, 复合材料长杆弹的侵彻性能较钨合金弹有所弱化, 同针对金属靶的侵彻性能增强特征相反, 其原因主要为撞击高强度陶瓷靶板时, 复合材料弹体在金属玻璃基体

快速发生破坏之后钨纤维容易分散(参见图3和图4), 导致弹体整体刚度减小, 且弹体质量损失较快, 从而削弱了其侵彻能力。

图5(b)中则显示, 在两种撞击速度条件下, 复合材料弹体的侵彻深度均逐渐增加。其中在 $V_0=1022\text{m/s}$ 条件下达到25mm, 在 $V_0=1293\text{m/s}$ 速度下则穿透44mm厚金属靶体, 相应侵彻深度均显著高于相同速度条件下的陶瓷靶侵彻深度, 也即复合材料长杆弹对陶瓷靶的侵彻性能显著低于对金属靶的侵彻能力。相关差异主要源于金属靶体强度显著低于陶瓷靶情形, 且在弹体撞击条件下易发生塑性变形和破坏, 进而导致复合材料长杆弹在侵彻过程中容易发生“自锐”效应^[21], 最终减小侵彻阻力并提高侵彻效能。相比之下, 陶瓷材料具有高硬度和脆性等特征, 复合材料弹体难以顺利侵入靶板内部, 且容易在陶瓷靶表面发生破碎和纤维飞散(参见图3和图4), 最终表现为“界面击溃”现象而未能形成有效侵彻。

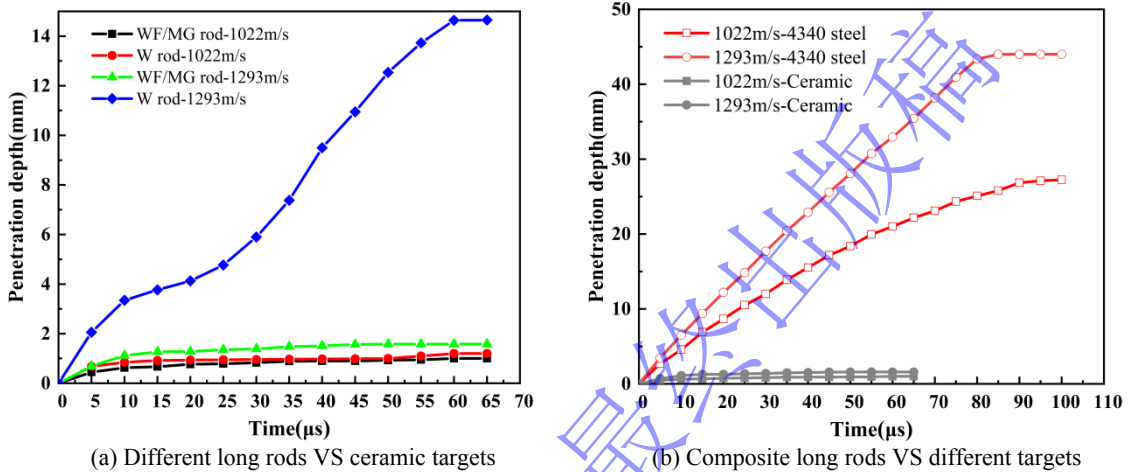


图5 不同材质弹体在不同速度下撞击陶瓷靶和钢靶过程中的侵彻深度变化历程曲线

Fig.5 Variations of penetration depth corresponding to different kinds of long rods impacting onto ceramic and steel targets

以下再进一步深入弹靶材料的变形破坏机制, 不同材质弹体在 $V_0=1293\text{m/s}$ 速度下撞击不同靶板初期的弹头变形和破坏形貌如图6所示。从图6(a)中可看出, 复合材料弹体撞击陶瓷靶板时, 由于陶瓷材料的高强度, 弹体难以快速侵入靶体内部, 此外, 受限于金属玻璃基体高剪切敏感性和低塑性特点, 弹体高速冲击时弹头区域基体材料会快速破坏, 导致头部区域钨纤维发生分散, 在高压陶瓷靶的阻碍作用下发生显著弯折变形, 使得弹体整体刚度较低, 且在后续撞击过程中也难以侵彻陶瓷靶内部(参见图4); 而钨合金弹在同样速度下撞击陶瓷靶时, 弹头区域墩粗为“蘑菇头”形状过程中, 头部区域材料未发生分散, 而是保持为相对完整的整体结构(参见图6(b)), 因此弹体整体刚度相对较高, 进而可逐渐侵入陶瓷靶体内部(参见图5(a)); 相对比地, 复合材料弹体撞击钢靶时, 由于钢靶强度较陶瓷靶明显降低, 弹体撞击初期即快速侵入靶体(参见^[21-22,27-28]), 之后钢靶材料对弹头区域材料形成较强的挤压作用, 加上复合材料弹头内部金属玻璃基体高局域化剪切带和剪切裂纹对钨纤维造成的损伤和破坏, 复合材料弹头未发生显著墩粗(参见图6(c)), 且在后续侵彻过程中逐渐发生“自锐”行为, 因此弹体可较容易穿透钢靶(参见图5(b))。

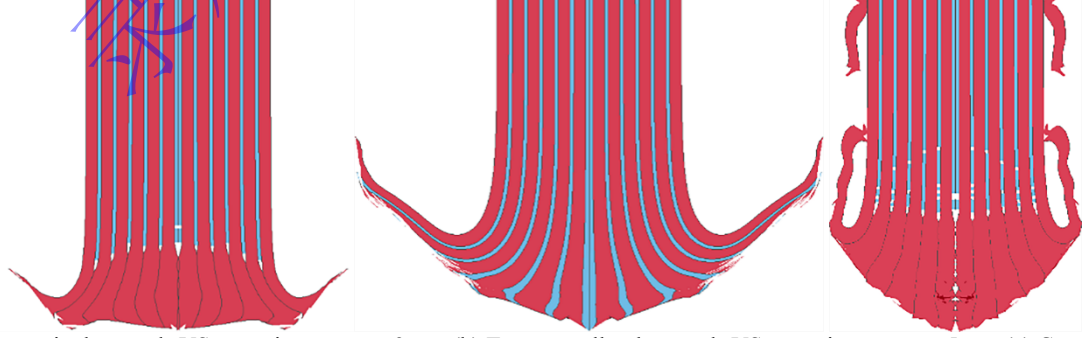


图6 不同材质弹体在 $V_0=1293\text{m/s}$ 速度下撞击不同靶板初期的弹头变形和破坏形貌

Fig.6 Deformation and failure morphologies of different long rods in the early impact stage onto different targets at V_0

3 不同因素对侵彻性能的影响

本小节再具体讨论不同因素对复合材料弹体撞击陶瓷靶弹道行为和侵彻特性的影响，将针对撞击速度、初始弹头形状和陶瓷靶材强度等3方面内外部因素展开讨论。

3.1 撞击速度

结合前期对复合材料长杆弹侵彻/穿甲钢靶“自锐”特性的速度敏感性分析^[21]，以及钨合金弹撞击陶瓷靶条件下界面击溃、直接侵彻及界面击溃向侵彻转变等三种变形破坏模式的临界撞击速度阈值^[45]，同样选取500m/s(低速)和1450m/s(高速)作为典型工况进行对比分析，相应数值模拟结果列出如图7-图8所示。

从图7中可看出，在500m/s低速撞击条件下，撞击过程中弹头后端区域的钨纤维与金属玻璃基体结构保持相对完整，但头部区域外围的钨纤维逐渐发生弯曲并分散(图7(b-d))，整个撞击过程中弹体始终在靶体表面驻留，陶瓷靶前端面未出现宏观凹陷变形或破坏。观察陶瓷靶内的损伤演化特性则发现，受到弹体撞击之后陶瓷靶内部从弹靶接触区域萌生出两条主裂纹并向靶体后端倾斜扩展，同时靶体中心区域也萌生小范围微裂纹；此外还可看出，锥形主裂纹在侵彻初期($t=20\mu\text{s}$)扩展到约10.2mm之后就基本停止进一步扩展，直到后期($t=130\mu\text{s}$)弹体停止侵彻时主裂纹均未再发生显著变化。因此可知，在500m/s低速冲击条件下，弹体冲击强度未达到陶瓷靶临界损伤阈值。前期研究显示，在500m/s的撞击速度下，复合材料长杆弹侵彻钢靶时尽管也难以形成有效侵彻，但可在靶体前端形成相对较浅的开坑^[21]。同图7中陶瓷靶体变形损伤形貌对比可知，由于陶瓷材料具有高硬度和高强度特性，复合材料长杆弹相对更难以对陶瓷靶形成有效侵彻，而仅能驻留于陶瓷靶体表面。

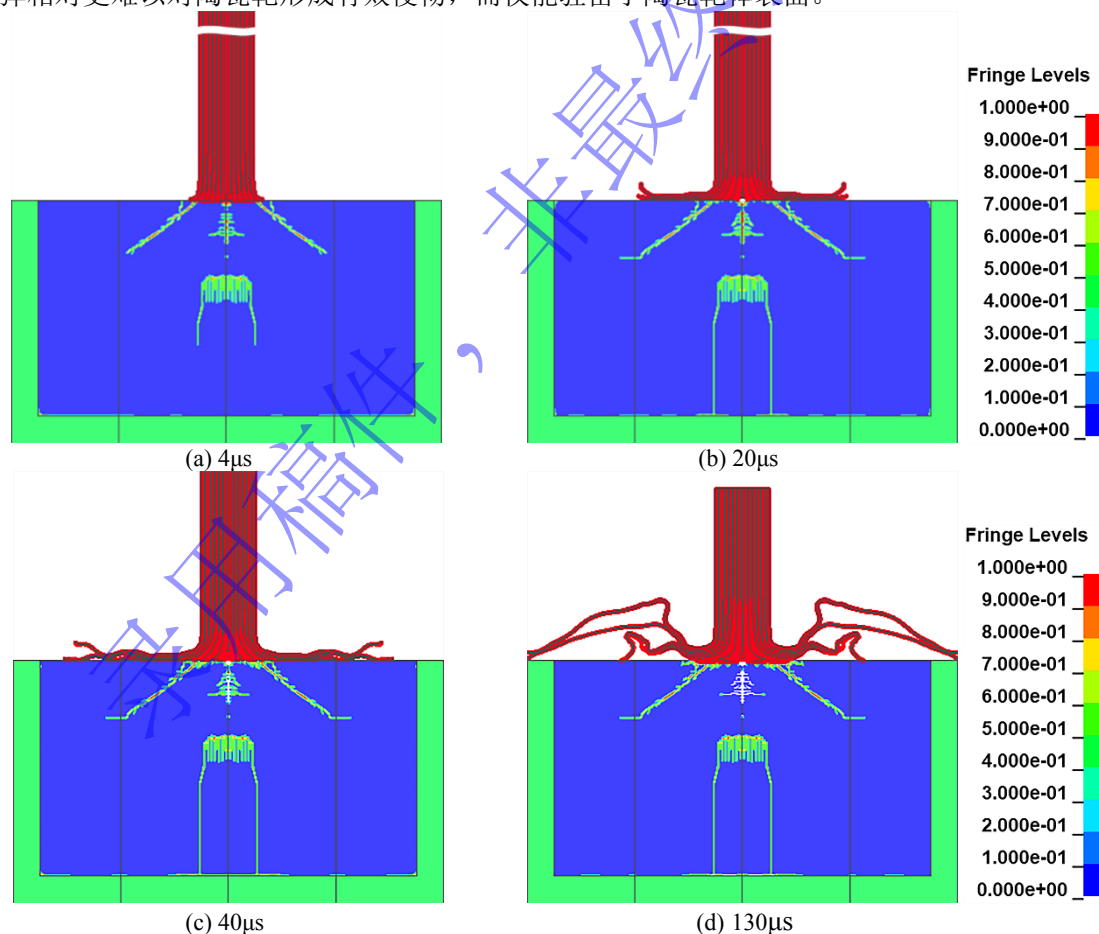


图7 复合材料长杆弹在500m/s速度条件下撞击陶瓷靶的弹靶变形和破坏历程

Fig.7 Development of deformation and failure in the projectile and target materials during the impact of composite long rod onto ceramic target at $V_0=500\text{m/s}$

在1450m/s高速撞击条件下，复合材料长杆弹对陶瓷靶的侵彻能力显著提升。在侵彻初始阶段($t=2\mu\text{s}$)，陶瓷靶表面已形成约1.5mm深的弹坑(参见图8(a))。随着侵彻过程持续，弹体在 $t=10\mu\text{s}$ 时刻开

始侵入陶瓷靶内部,弹体材料呈放射状从坑道两侧反向流出,流动的弹体材料因受到陶瓷靶材的挤压逐渐向弹轴方向靠近,相应地反向流动角逐渐减小(参见图8(b-c)),在 $t=20\mu\text{s}$ 时反向流动角已减小至零。 $t=45\mu\text{s}$ 时,弹体速度已显著下降,相应地金属玻璃基体对钨纤维的约束作用明显降低,因此钨纤维分散更为显著,复合材料弹体难以形成进一步侵彻,且残余弹体相对较短。同时还可看出,在弹体高速撞击条件下,陶瓷靶前端面发生剧烈破碎,形成碎块并反向飞溅,与低速撞击情形(图7)存在明显区别。再观察陶瓷靶内部损伤演化特征,可看出在高速撞击条件下靶体中心区域萌生的微裂纹数量更多、分布范围也更宽;再者,在 $t=10\mu\text{s}$ 时刻,靶体内两条主裂纹已扩展至靶体后端面(图8(b)),而在后续侵彻过程中,由于复合材料弹头区域钨纤维发生分散并导致陶瓷靶前端面区域逐渐产生更多碎块,靶体破碎锥内部裂纹数量的增加相对较少(图8(c-d))。

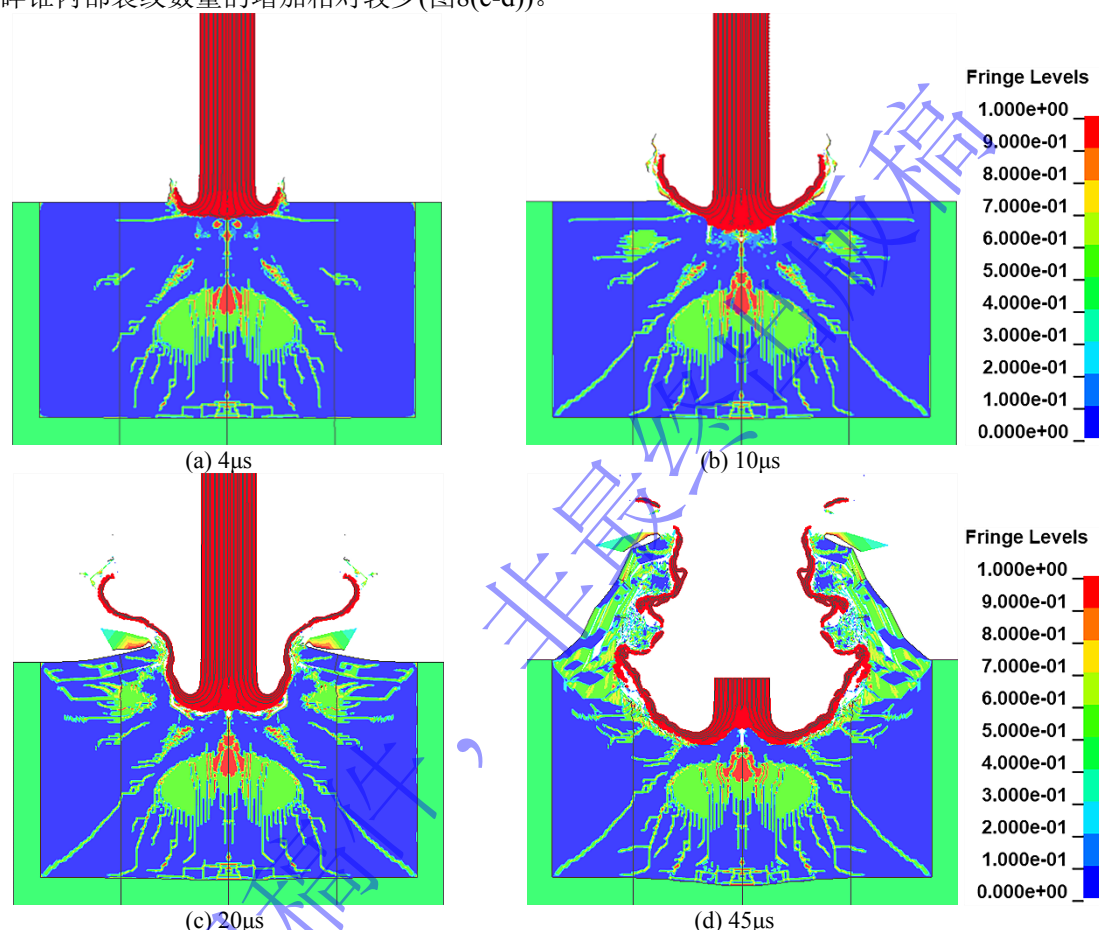


图8 复合材料长杆弹在 1450 m/s 速度条件下撞击陶瓷靶的弹靶变形和破坏历程

Fig.8 Development of deformation and failure in the projectile and target materials during the impact of composite long rod onto ceramic target at $V_0=1450\text{m/s}$

相对比地,此前研究^[21]表明,在1446m/s高速条件下, $\phi 8\text{mm}\times 88\text{mm}$ 复合材料长杆弹可成功穿透50mm厚30CrMnMo钢靶,且弹体剩余速度(1250m/s)和剩余弹长(44mm)均相对较大,其主要原因在于在高速条件下金属玻璃基体的高强度使得复合材料弹体结构完整性保持较好,同时高剪切敏感性使得弹头发生显著“自锐”行为。然而,与金属材料相比,陶瓷具有更高的硬度和强度,导致弹体钨纤维向两侧分散的程度远高于侵彻金属靶情形,弹头区域发生严重破坏且发生显著的质量侵蚀,从而削弱了对陶瓷靶的持续侵彻能力,导致其侵彻效能显著低于金属靶情形。

由图8可见,弹体与靶体接触区域的陶瓷材料在高速冲击下产生压缩冲击波。该冲击波在靶体中快速传播,到达陶瓷靶边界后反射为拉伸波,导致靶体外围边缘区域因拉伸应力形成很多“放射状裂纹”(参见图8(c-d))。这使得靶体施加于弹体的侧向挤压作用减小,导致弹头区域的钨纤维不再容易发生剪切断裂,而是从靶孔向后端流动并发生分散。因此弹头区域未发生类似侵彻金属靶时出现“自锐”现象。

以下再将弹体在不同速度下撞击陶瓷靶过程中侵彻深度随时间变化的曲线列出如图9所示。可看

出, 当 $V_0=500\text{m/s}$ 时, 侵彻深度基本维持为零值, 也即弹体始终驻留于靶体表面; $V_0=1300\text{m/s}$ 时, 弹体虽引起靶体表面凹陷, 但未能实现有效侵彻, 也基本滞留于靶体表层, 最终侵彻深度仅为 1.5mm ; 当 V_0 提高至 1450m/s 时, 撞击前期侵彻深度近似线性增长, 但后期随着弹体钨纤维逐渐分散, 导致侵彻深度增加明显放缓, 也即此阶段弹体对陶瓷靶的侵彻能力下降, 最终侵彻深度未达到靶体厚度的一半; 而在 $V_0=1500\text{m/s}$ 的高速情形下, 侵彻深度曲线始终保持近似线性增长, 表明弹体对陶瓷靶持续具有显著的破坏能力。

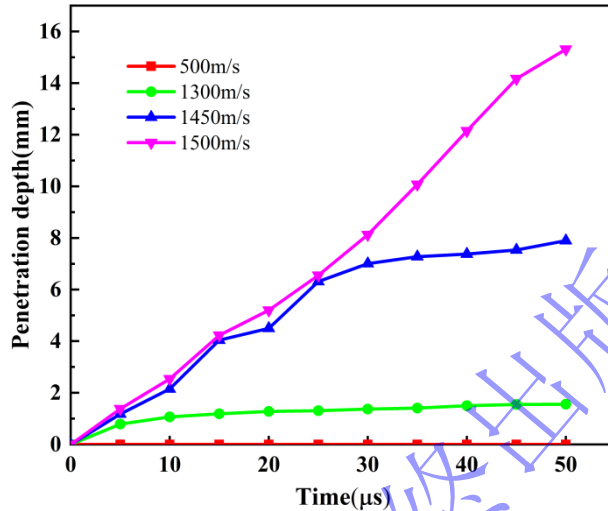


图9 复合材料长杆弹在不同速度条件下撞击陶瓷靶过程中的侵彻深度变化曲线

Fig.9 Variations of penetration depth corresponding to composite long rods impacting onto ceramic target at different impact velocities

3.2 弹头形状

Lundberg 等的试验^[46]和前期研究^[34,36]表明, 平头弹撞击陶瓷靶时发生界面击溃/侵彻转变的临界速度高于尖锥头弹, 表明弹头形状是影响长杆弹侵彻能力的关键因素; 此前研究^[21]针对不同头形复合材料弹体侵彻金属靶的数值模拟结果显示, 弹头形状对金属靶体的侵彻深度影响则相对较小。如上所述, 复合材料长杆弹对陶瓷靶的侵彻性能受到复合材料与陶瓷材料两者力学性能的耦合影响, 其弹靶响应机制相较金属靶侵彻情形更为复杂。以下将具体讨论弹头形状对复合材料长杆弹侵彻陶瓷靶响应特征的影响, 选择尖卵头、平头和半球头三种头形开展对比分析。三种头形弹体设为相同初始质量, 相应地各头形弹体具体尺寸参数如表 4 所示。弹体撞击速度选取 1450m/s 取值, 不同头形弹体相应的弹靶变形破坏历程列于图 10-图 12 所示。

表 4 不同头形复合材料长杆弹参数

Table 4 Dimensions of composite long rods with different nose shapes

| 弹头形状 | 弹身半径 R/mm | 弹头长度 L_1/mm | 总长度 L/mm |
|--------------|--------------------|----------------------|-------------------|
| $\psi=3$ 尖卵头 | 2.5 | 8.29 | 66.47 |
| 平头 | 2.5 | - | 60.95 |
| 半球头 | 2.5 | 2.5 | 61.75 |

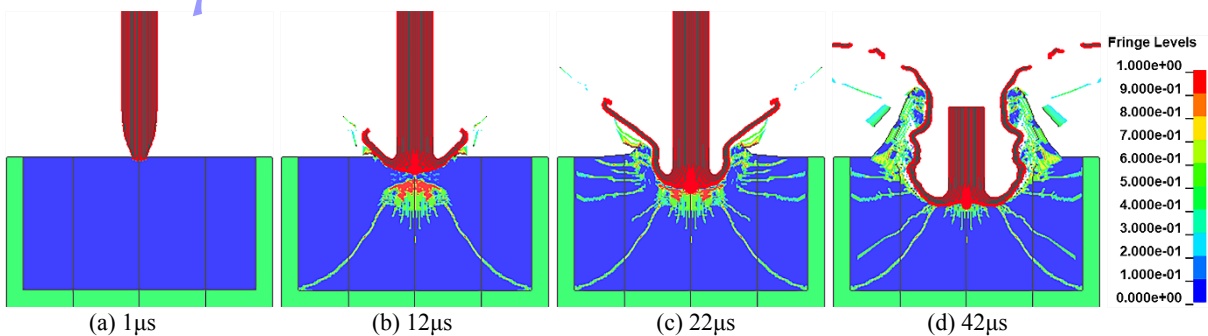


图 10 尖卵头形复合材料长杆弹在 1450m/s 速度条件下撞击陶瓷靶的弹靶变形和破坏历程

Fig.10 Development of deformation and failure in the projectile and target materials during the impact of conical-nosed composite long rod onto ceramic target at $V_0 = 1450\text{m/s}$

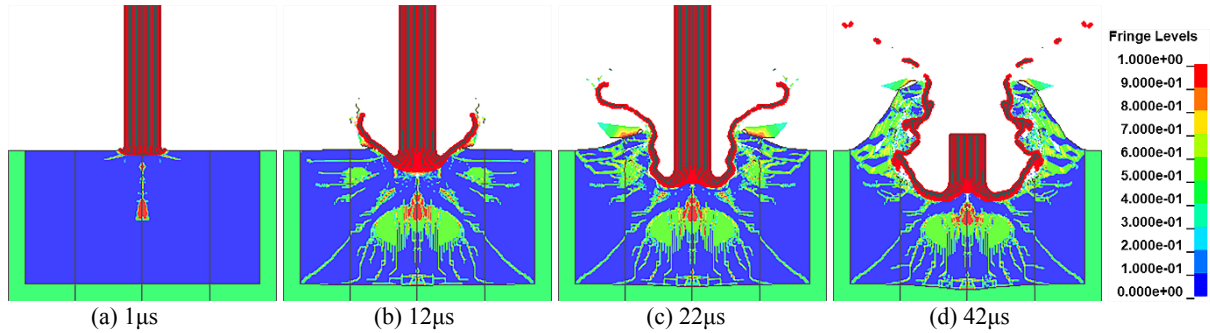


图 11 平头复合材料长杆弹在 1450m/s 速度条件下撞击陶瓷靶的弹靶变形和破坏历程

Fig.11 Development of deformation and failure in the projectile and target materials during the impact of flat-nosed composite long rod onto ceramic target at $V_0 = 1450\text{m/s}$

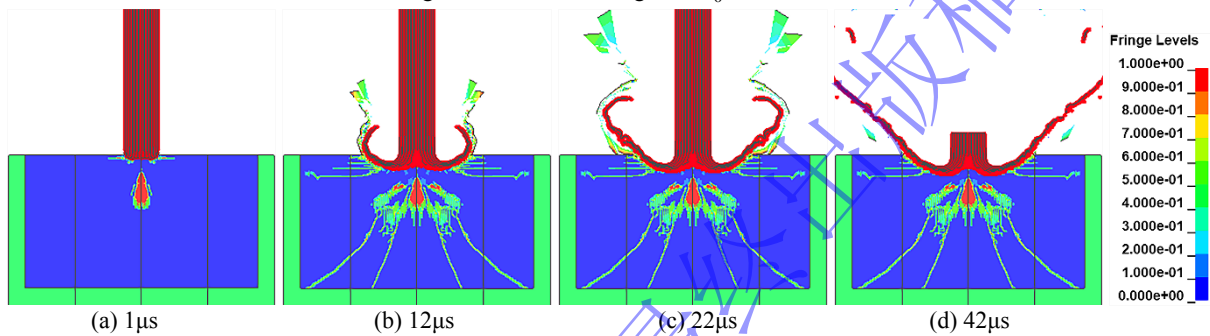


图 12 半球头复合材料长杆弹在 1450m/s 速度条件下撞击陶瓷靶的弹靶变形和破坏历程

Fig.12 Development of deformation and failure in the projectile and target materials during the impact of hemispherical-nosed composite long rod onto ceramic target at $V_0 = 1450\text{m/s}$

如图10所示,尖卵头形弹体在撞击陶瓷靶初期($t=1\mu\text{s}$)并未引起靶体明显损伤,之后随着侵彻过程进行,靶体表面形成渐进式开坑; $t=12\mu\text{s}$ 时,弹体材料以一定角度向外喷溅,陶瓷靶中出现显著损伤区并伴随周边裂纹分布。由于能量较为集中,损伤与裂纹主要分布于弹道附近,仅两条主裂纹从损伤区扩展至靶体尾端,形成典型陶瓷破碎锥结构(图10(b));到 $t=22\mu\text{s}$ 时,弹体材料受陶瓷靶侧向挤压作用,反向流动角减小至零,并逐渐朝靶体前端沿两侧扩散,此时陶瓷靶前端面裂纹数量显著增多,而靶体后端面裂纹数量基本不变;至 $t=42\mu\text{s}$,弹体滞留于陶瓷靶内部弹孔前端,部分破碎陶瓷材料随弹体破片向外飞溅(图10(d))。

图11(a)显示,平头弹撞击时,在弹靶接触瞬间靶体中心即出现明显损伤,这是由于平头弹初始接触面积较大所致。在 $t=12\mu\text{s}$ 时刻,陶瓷靶中心区域的裂纹密度显著高于尖卵头形弹体撞击情形(参见图11(b)),且底端出现轴向裂纹(图11(b));随着侵彻过程继续,平头弹的反向流动角同样减小为零(图11(c));至 $t=42\mu\text{s}$,靶体材料在弹体冲击下向前端发生剧烈飞溅,其飞溅量明显高于尖卵头形弹体撞击情形(参见图11(d)),此外还可发现,此时金属背板也产生一定塑性变形(参见图11(d))。最终弹体滞留于靶孔底端并停止侵彻。

半球头弹体的初期响应与平头弹类似,撞击初期导致陶瓷靶中心区域即出现损伤,如图12(a)显示,这也是缘于较大的初始接触面积;在 $t=12\mu\text{s}$ 时,半球头弹的开坑深度小于尖卵头形弹体和平头弹体情形,在后续侵彻过程中,弹体材料反向流动角未因靶体挤压而减小,而是持续向外扩散(参见图12(b-c));最终弹体在 $t=42\mu\text{s}$ 时滞留于靶体浅层,直至侵彻过程停止。

以下再分析相应陶瓷靶损伤演化特征。半球头弹体整个侵彻过程中陶瓷靶底部未出现轴向裂纹(图12(a-d))。在侵彻中期,裂纹数量基本不再增加,靶体前端面也未形成密集裂纹网络,明显区别于尖卵头形弹体和平头弹撞击情形(参见图10和11)。由此可见,半球头弹对陶瓷靶的侵彻能力相对较弱。其原因主要是半球形弹头初始接触时形成凸状局部接触,冲击载荷作用分散、应力峰值较低,导致弹体材料易于在靶体表面发生流动和扩散,增大了弹靶接触面积,使得作用于靶体的有效冲击压力有所降低,难以突破陶瓷材料的临界破碎强度;此外,侵彻过程中高应变率下半球头弹头材料呈喷射状外流,缺少对弹道的持续挤压扩孔作用,且相较尖卵头和乎头长杆弹其纤维分散更为严重,弹体有效侵彻质量损失更快(参见图12),进一步降低了冲击应力,最终弹体仅在靶体表面形成浅层弹道(图

12(d))。因此可知, 复合材料弹体在撞击陶瓷靶和撞击金属靶(参见文献[21])时弹体头形的影响规律也存在差异。

以下再具体对比分析不同头形弹体的侵彻深度变化特征, 三种头形弹体侵彻深度随时间变化历程如图13所示。可看出半球头弹体在侵彻过程中, 弹道深度变化范围不大, 弹体近似在靶体表面产生驻留现象, 侵彻深度较浅; 尖卵头形弹体和平头弹的侵彻深度变化曲线较为接近, 随弹体速度逐渐减小, 侵彻深度增加逐渐变得平缓, 最终两者侵彻深度也相近。

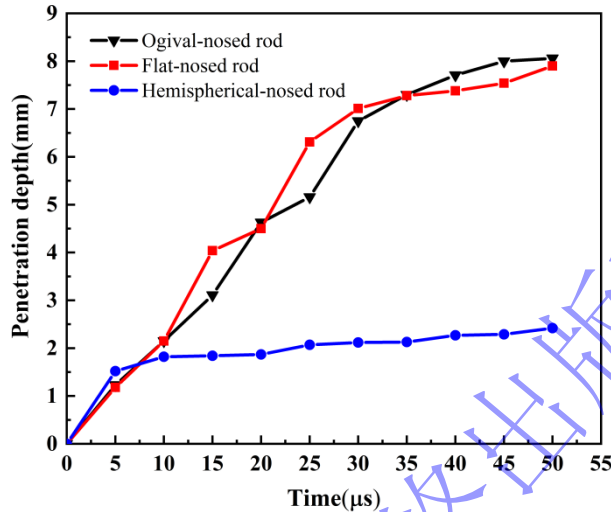


图 13 不同头形复合材料长杆弹在 1450m/s 速度条件下撞击陶瓷靶过程中的侵彻深度变化曲线

Fig.13 Variations of penetration depth corresponding to composite long rods with different nose shapes impacting onto ceramic target at $V_0=1450\text{m/s}$

3.3 靶材强度

如前所述, 复合材料长杆弹针对陶瓷靶的侵彻能力显著受到陶瓷材料强度的影响。不同强度的陶瓷材料不仅影响弹体材料的变形和流动行为, 也决定了靶体在冲击过程中的裂纹分布和损伤模式。为系统分析靶材强度对侵彻响应的影响, 再选取强度稍低的 B_4C 陶瓷作为对比材料, 相应的材料参数也列于表 3 中^[54-55]。为便于对比分析, 弹体选取采用 0.3mm 钨纤维直径复合材料平头长杆弹, 撞击速度选取 1022m/s 和 1450m/s 两种典型速度, 针对 B_4C 陶瓷靶的相应模拟结果如图 14-图 15 所示。

观察图 14 可知, 弹体与靶体接触瞬间($t=2\mu\text{s}$), 陶瓷靶已发生明显凹陷变形(图 14(a))。随着侵彻过程持续, 至 $t=15\mu\text{s}$ 时, 弹体在靶体表面形成深度约 4.1mm 的弹坑。 $t=40\mu\text{s}$ 时, 弹体材料反向流动角减小至零, 弹体成功侵入靶体内部, 并保持较长的剩余弹长。最终弹体于 $t=77\mu\text{s}$ 时停止侵彻, 侵彻深度达 12.7mm, 同时可观察到分散的钨纤维与陶瓷靶前端面材料共同向前喷溅, 相应响应行为明显区别于弹体撞击强度较高的 SiC 陶瓷靶情形中的界面击溃现象(参见图 3)。从陶瓷靶损伤演化特征来看, 对于强度较低的 B_4C 陶瓷靶, 弹靶接触初期靶体内部即出现大范围损伤区, 其外围分布有密集的小范围裂纹网络, 同时从接触区域扩展出数条主裂纹(参见图 14(a)), 该特征与 SiC 陶瓷靶中形成的中心裂纹集中区显著不同(参见图 3(a))。随着侵彻过程进行, B_4C 陶瓷靶主裂纹及周边裂纹网络进一步扩展至靶体背部(图 14(b)), 至侵彻后期靶体前端面裂纹数量显著增加, 而背部裂纹分布与数量则不再发生明显变化(参见图 14(c-d))。

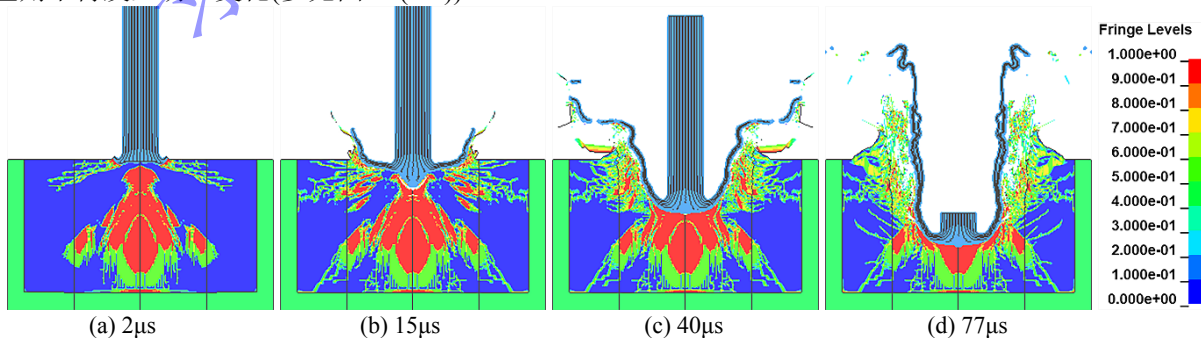


图 14 复合材料长杆弹以 1022 m/s 撞击 B_4C 陶瓷靶的弹靶变形和破坏历程

Fig.14 Development of deformation and failure in the projectile and target materials during the impact of composite long rod

onto B₄C ceramic target at $V_0 = 1022\text{m/s}$

相对地, 在 1450m/s 撞击速度下, 侵彻初期陶瓷靶开坑深度显著增大(图 15(a)). $t=20\mu\text{s}$ 时, 弹体已成功侵入靶体内部, 侵彻深度达到 13mm(图 15(b)), 且未出现 SiC 陶瓷靶情形中的靶内驻留现象(参见图 8(c-d)). $t=30\mu\text{s}$ 时, 弹体进一步侵彻到达陶瓷靶底部区域, 此时金属背板已发生明显塑性变形, 弹体即将穿透陶瓷层进入金属钢箍部分(图 15(c)), 还可看出陶瓷靶内的弹道孔径明显小于 SiC 陶瓷靶情形(参见图 8). 最终弹体完全贯穿陶瓷靶并侵入金属背板, 并可看出金属背板区域的开孔直径小于前端陶瓷靶孔洞直径, 与复合材料长杆弹弹身直径更为接近(图 15(d)). 再来对比分析陶瓷靶内部损伤演化特征. 在高速撞击下靶体损伤区范围更大, 且在初始撞击阶段已扩展至陶瓷靶后端(参见图 15(a)). $t=20\mu\text{s}$ 时, 裂纹损伤已延伸至陶瓷靶与金属靶交界面处, 且随着侵彻过程继续, 损伤范围与裂纹网络继续进一步扩展. 至 $t=68\mu\text{s}$, 靶体前端面陶瓷材料的破碎程度相比低速撞击工况(参见图 14(d))更为剧烈, 形成大量碎块并向前端飞溅.

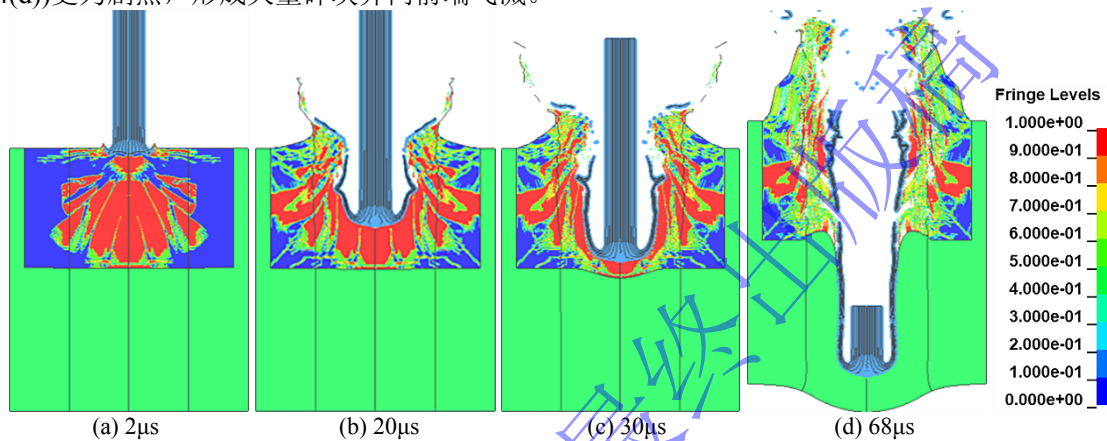


图 15 复合材料长杆弹以 1450 m/s 撞击 B₄C 陶瓷靶的弹靶变形和破坏历程

Fig.15 Development of deformation and failure in the projectile and target materials during the impact of composite long rod onto B₄C ceramic target at $V_0 = 1450\text{m/s}$

因此可知, 在复合材料长杆弹撞击条件下, B₄C 陶瓷靶内部损伤演化特征及其所导致的弹体流动模式与 SiC 陶瓷情形存在明显差异. 强度相对较低的 B₄C 陶瓷靶的弹道开坑范围较小, 且内部损伤区域和裂纹扩展范围均显著大于高强 SiC 陶瓷靶情形, 表明复合材料长杆弹对强度较低的 B₄C 陶瓷, 其侵彻能力相对更强.

4 结论

本文结合相关试验, 基于 FE-SPH 自适应耦合算法, 研究了钨纤维增强金属玻璃复合材料长杆弹针对陶瓷靶的侵彻/穿甲性能, 并同钨合金长杆弹侵彻陶瓷靶、复合材料长杆弹侵彻/穿甲金属靶等工况下弹靶变形和破坏行为的差异进行对比分析. 之后深入探究撞击速度、弹头构型、靶材强度等参数, 对弹体侵彻/穿甲性能和陶瓷靶损伤演化的影响规律.

(1)、复合材料长杆弹撞击陶瓷靶时, 金属玻璃基体快速失效后钨纤维易发生屈曲分散和断裂, 无法维持侵彻金属靶时的自锐特性, 其质量损失较钨合金弹更为严重, 导致其对陶瓷靶的侵彻性能较钨合金弹有所下降, 也较复合材料弹体侵彻钢靶的性能明显减弱.

(2)、在 500m/s 低速撞击条件下, 复合材料弹体在整个侵彻过程中未能导致陶瓷靶表面出现明显变形或破坏; 而在 1450m/s 高速条件下, 在侵彻初期弹体可顺利侵入靶体内部, 但侵彻后期弹体钨纤维的分散程度又逐渐增强, 致使弹体总体侵彻深度较浅.

(3)、半球头弹体可导致作用于陶瓷靶体的有效冲击压力有所降低, 其侵彻深度小于尖卵头形弹体与平头弹情形; 而平头弹由于弹靶接触面相对较大, 所导致的陶瓷靶裂纹数量显著高于其他两种头形弹体撞击情形.

(4)、随陶瓷强度降低, 复合材料长杆弹在陶瓷靶内的开坑范围有所减小, 且靶体内部的损伤区域与裂纹扩展范围较高强陶瓷靶情形明显增大, 进而导致弹体侵彻能力逐渐增强.

(5)、总体来说, 钨纤维增强金属玻璃复合材料长杆弹目前还不适合应用于针对陶瓷等高强高硬脆性靶体的侵彻/穿甲.

参考文献

- [1] DAI L H, BAI Y L. Basic mechanical behaviors and mechanics of shear banding in BMGs[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(8): 704-716. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2007.10.007.
- [2] GREER A L, CHENG Y Q, MA E. Shear bands in metallic glasses[J]. *Materials Science and Engineering: R* 2013, 74(4): 71-132. DOI: 10.1016/j.mser.2013.04.001.
- [3] 李继承, 陈小伟. 块体金属玻璃及其复合材料的压缩剪切特性以及侵彻穿甲“自锐”行为[J]. *力学进展*, 2011, 41(5): 480-518. DOI: 10.6052/1000-0992-2011-5-lxjzJ2011-056.
LI J C, CHEN X W. Compressive-shear behavior and self-sharpening of bulk metallic glasses and their composite materials[J]. *Advances in Mechanics*, 2011, 41(5): 480-518. DOI: 10.6052/1000-0992-2011-5-lxjzJ2011-056.
- [4] QIAO J, JIA H, LIAW P K. Metallic glass matrix composites[J]. *Materials Science and Engineering R*, 2016, 100: 1-69. DOI: 10.1016/j.mser.2015.12.001.
- [5] DONG Q, TAN J, LI C, et al. Room-temperature plasticity of metallic glass composites: A review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 280: 111453. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111453.
- [6] CONNER R D, DANDLIKER R B, SCRUGGS V, et al. Dynamic deformation behavior of tungsten-fiber /metallic-glass matrix composites[J]. *International Journal of Impact Engineering*. 2000, 24: 435-444. DOI: 10.1016/S0734-743X(99)00176-1.
- [7] CHOI-YIM H, CONNER R D, SZUECS F, et al. Quasistatic and dynamic deformation of tungsten reinforced Zr57Nb5Al10Cu15.4Ni12.6 bulk metallic glass matrix[J]. *Scripta Materialia*, 2001, 45: 1039-1045. DOI: 10.1016/S1359-6462(01)01134-4.
- [8] 王志华. Wf/Zr 基块体金属玻璃复合材料及其高速冲击行为[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [9] 雷波. 钨纤维复合材料穿甲弹芯自锐行为的试验研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2008.
- [10] 荣光, 黄德武. 钨纤维复合材料穿甲弹芯侵彻时的自锐现象[J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(4): 351-355. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)04-0351-05.
RONG G, HUANG D W. Self-sharpening phenomena of tungsten fiber composite material penetrators during penetration[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29 (4): 351-355. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)04-0351-05.
- [11] RONG G, HUANG D W, YANG M C. Penetrating behaviors of Zr-based metallic glass composite rods reinforced by tungsten fibers[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2012, 58: 21-27. DOI: 10.1016/j.tafmec.2012.02.003.
- [12] 夏龙祥. 钨纤维增强块体金属非晶复合材料侵彻行为研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [13] 陈小伟, 李继承, 张方举, 等. 钨纤维增强金属玻璃复合材料长杆弹穿甲钢靶的实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(4): 346-354. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)04-0346-09.
CHEN X W, LI J C, ZHANG F J, et al. Experimental research on the penetration of tungsten-fiber /metallic glass-matrix composite material penetrator into steel target[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(4): 346-354. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)04-0346-09.
- [14] CHEN X W, WEI L M, LI J C. Experimental research on long rod penetration of tungsten fiber/Zr-based metallic glass matrix composite into Q235 steel target[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 79: 102-116. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.11.007.
- [15] 杜成鑫. Wf/Zr 基非晶复合材料杆弹准细观侵彻机理及优化设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- [16] DU C, SHU D, DU Z, et al. Effect of L/D on penetration performance of tungsten fibre/Zr-based bulk metallic glass matrix composite rod[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2019, 85: 105042. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2019.105042.
- [17] DU C, DU Z, WANG K, et al. Effect of tungsten fiber diameter on the dynamic compression properties of tungsten fiber/Zr-based bulk metallic glasses matrix composite[J]. *International journal of impact engineering*, 2022, 164: 104185. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104185.
- [18] ZHOU F, DU C, DU Z, et al. Penetration Gain Study of a Tungsten-Fiber/Zr-Based Metallic Glass Matrix Composite[J]. *Crystals*, 2022, 12(2): 284. DOI: 10.3390/cryst12020284.
- [19] ZHOU F, DU C, CHENG C, et al. Penetration performance and fragmentation mechanism behind target of tungsten fibre/zirconium-based bulk metallic glass matrix composite rod[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2023, 112(000):10. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2023.106160.
- [20] 吴烁昱, 杜成鑫, 周峰, 等. 钨丝/锆基非晶复合材料与 93W 合金弹芯侵彻靶板的损伤特征[J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(4): 043302-1-11. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0312.
WU S G, DU C X, ZHOU F, et al. Damage characteristic of target penetrated by WF/Zr-MG and 93W rods[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(4): 043302-1-11. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0312.
- [21] LI J C, CHEN X W, HUANG F L. FEM analysis on the “self-sharpening” behavior of tungsten fiber/metallic glass matrix composite long rod[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 86: 67-83. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.07.006.
- [22] LI J C, CHEN X W, HUANG F L. FEM analysis on the deformation and failure of fiber reinforced metallic glass matrix composite[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 652: 145-166. DOI: 10.1016/j.msea.2015.11.051.
- [23] 陈建良, 李继承. 钨纤维增强金属玻璃复合材料分段弹体侵彻性能研究[J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(6): 063201-1~12. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0379.
CHEN J L, LI J C. Ballistic behavior of tungsten fiber/metallic glass matrix composite segmented rods[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(6): 063201-1~12. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0379.
- [24] 章浪, 赵丰鹏, 张钰忠, 等. 钨纤维增强金属玻璃复合材料的长杆弹斜侵彻/穿甲性能[J]. *爆炸与冲击*, 2025, 45(3): 033302-1-15. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0158.
ZHANG L, ZHAO F P, ZHANG Y Z, et al. Ballistic performance of tungsten fiber-reinforced metallic glass composite in the long rod oblique penetration/perforation[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2025, 45(3): 033302-1-15. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0158.

- 10.11883/bzycj-2024-0158.
- [25] 任杰, 章浪, 李继承, 等. Wf/Zr 基复合材料长杆弹在不同速度下的头形转变规律[J]. 包装工程, 2024, 45 (19): 134-143. DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.19.013.
REN J, ZHANG L, LI J C, et al. Nose Shape Transition Characteristics with Impact Velocity in Tungsten Fiber Reinforced Metallic Glass Composite Long Rod[J]. Packaging Engineering, 2024, 45 (19): 134-143. DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.19.013.
- [26] 任杰, 章浪, 李继承, 等. 不同直径钨纤维增强金属玻璃复合材料长杆弹“自锐”行为及侵彻/穿甲性能[J/OL]. 爆炸与冲击, 1-17 [2025-0139].
REN J, ZHANG L, LI J C, et al. ‘Self-sharpening’ behavior and penetration / perforation property of tungsten fiber / metallic glass composite long rods with different fiber diameters[J/OL]. Explosion and Shock Waves, 1-17 [2025-0139].
- [27] LI J C, ZHANG L, CHEN J L, et al. Non-ideal penetration / perforation performance of tungsten fiber reinforced metallic glass matrix composite long rod. International Journal of Impact Engineering, 2026; 210: 105609.
- [28] LI J C, CHEN J L, ZHAO F P, et al. Ballistic performance of tungsten fiber reinforced metallic glass matrix composite segmented rod projectiles. Composite Structures, 2026; 377: 119873-1-22.
- [29] 尹飞, 纪伟, 王智慧. 陶瓷复合装甲的研究现状及发展[J]. 兵器材料科学与工程, 2024, 47(01): 106-111. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20231218.002.
YIN F, JI W, WANG Z H. Research status and development of ceramic composite armor[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2024, 47(01): 106-111. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20231218.002.
- [30] 陈小伟, 陈裕泽. 脆性陶瓷靶高速侵彻/穿甲动力学的研究进展[J]. 力学进展, 2006, 36(1): 18. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0992.2006.01.014.
CHEN X W, CHEN Y Z. Review on the penetration/perforation of ceramics targets[J]. Advances in Mechanics, 2006, 36(1): 18. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-0992.2006.01.014.
- [31] HAUSER G E, RAPACKI E J, NETHERWOOD P H, et al. Interface defeat of long rod projectiles by ceramics armor[R]. U.S. Army Research Laboratory Technical Report. USA, 2005, Report No. ARL-TR-3590.
- [32] LUNDBERG P, LUNDBERG B. Transition between interface defeat and penetration for tungsten projectiles and four silicon carbide materials[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31: 781-792. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2004.06.003.
- [33] ANDERSON J C E, BEHNER T, HOLMQUIST T J, et al. Interface defeat of long rods impacting oblique silicon carbide[R]. SwRI Report. Report No. 18.12544/029. USA; Southwest Research Institute, San Antonio, TX, USA; 2011. p. 1-36. DOI: 10.1007/978-3-642-19665-2_4.
- [34] LI J C, CHEN X W, NING F, et al. On the transition from interface defeat to penetration in the impact of long rod onto ceramic targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 83: 37-46.
- [35] LI J C, CHEN X W. Theoretical analysis of projectile-target interface defeat and transition to penetration by long rods due to oblique impacts of ceramic targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 106: 53-63.
- [36] LI J C, CHEN X W. Theoretical analysis on transition from interface defeat to penetration in the impact of conical-nosed long rods onto ceramic targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 130: 203-213. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.04.005.
- [37] 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): 8. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.04.008.
TAN M T, ZHANG X F, HE Y, et al. Numerical simulation on interface defeat of ceramic armor impacted by long-rod projectile[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(4): 8. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.04.008.
- [38] ZHAI Y X, WU H, FANG Q. Interface defeat studies of long-rod projectile impacting on ceramic targets[J]. Defence Technology, 2020, 16: 50-68. DOI: 10.1016/j.dt.2019.05.021.
- [39] ZHANG X F, TAN M T, XIONG W, et al. Inelastic deformation of ceramic and transfer from dwell/interface defeat to penetration[J]. Impact Mechanics of Ceramic Armor, 2025: 169-189.
- [40] HE Q G, CHEN X W, CHEN J F. Finite element-smoothed particle hydrodynamics adaptive method in simulating debris cloud[J]. Acta Astronautica, 2020, 175: 99-117. DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.05.056.
- [41] HE Q G, CHEN X W. Simulation method of debris cloud from fiber-reinforced composite shield under hypervelocity impact[J]. Acta Astronautica, 2023, 204: 402-417. DOI: 10.1016/j.actaastro.2023.01.008.
- [42] YU S X, FAN Q B, CHENG X W, et al. Numerical simulation of the process of Zr58Nb3Cu12Ni12Al15 bulk glasses fragment penetrating into two separated plates and forming debris cloud[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19: 2115-212. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.05.142.
- [43] 叶纪元, 杨扬, 徐绯, 等. 基于自适应 FEM-SPH 耦合算法的飞机典型部位破片冲击战伤的数值研究[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(6): 132-143. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0252.
YE J Y, YANG Y, XU F, et al. Numerical research on fragment impact damage of typical aircraft structures based on an adaptive FEM-SPH coupling algorithm[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(6): 132-143. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0252.
- [44] 位国旭, 崔浩, 周昊, 等. 钨合金弹丸侵彻钢靶的数值模拟方法[J]. 爆炸与冲击, 2025(8). DOI: 10.11883/bzycj-2024-0147.
WEI G X, CUI H, ZHOU H, et al. Research on numerical simulation method of tungsten alloy projectile penetrating steel target[J]. Explosion and Shock Waves, 2025(8). DOI: 10.11883/bzycj-2024-0147.
- [45] 张钰忠, 郑昊, 赵丰鹏, 等. 基于 FE-SPH 自适应方法的长杆弹撞击陶瓷靶数值模拟分析[J]. 兵器装备工程学报, 2026 (BG250720800).
ZHANG Y Z, ZHENG H, ZHAO F P, et al. Numerical simulation on impact response of long rods onto ceramic targets

- based on FE-SPH adaptive method[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2026 (BG250720800).
- [46] LUNDBERG P, RENSTROM R, LUNDBERG B. Impact of conical tungsten projectiles on flat silicon carbide targets: transition from interface defeat to penetration[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32: 1842-56. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.04.004.
- [47] LI J C, WEI Q, CHEN X W, et al. On the mechanism of deformation and fracture in bulk metallic glasses[J]. Materials Science and Engineering A, 2014; 610: 91-105. DOI: 10.1016/j.msea.2014.04.106.
- [48] LI J C, CHEN X W, HUANG F L. Inhomogeneous deformation in bulk metallic glasses: FEM analysis[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015; 620: 333-351. DOI: 10.1016/j.msea.2014.10.013.
- [49] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperature[C]. In: Proceedings of the seventh International Symposium of Ballistics, Hague, Netherlands: International Ballistics Committee; 1983: pp: 541-547.
- [50] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures[J]. Engineering. Fracture Mechanics, 1985; 21 (1): 31-48. DOI: 10.1016/0013-7944(85)90052-9.
- [51] WANG L L, YANG L M, DONG X L, et al. Dynamics of materials: experiments, models and applications (1st Edition)[M]. Academic Press: London, United Kingdom, 2019.
- [52] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R. Characterization and evaluation of silicon carbide for high-velocity impact[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(9): 5858-753. DOI: 10.1063/1.1881798.
- [53] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R. Response of boron carbide subjected to high-velocity impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35: 742-752. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2007.08.003.
- [54] JOHNSON G R, HOLMQUIST T J. Response of boron carbide subjected to large strains, high strain rates, and high pressures[J]. Journal of Applied Physics, 1999, 85(12): 8060-8073. DOI: 10.1063/1.370643.
- [55] CRONIN D S, BUI K, KAUFMANN C, et al. Implementation and validation of the Johnson-Holmquist ceramic material model in LS-DYNA[J]. 2003.