

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0136

典型战斗部侵彻爆炸下块石混凝土的遮弹层设计*

吴昊, 张瑜, 程月华, 岑国华
(同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 针对钻地武器战斗部侵彻爆炸作用下块石混凝土遮弹层的抗力评估与工程设计, 首先, 提出了块石混凝土遮弹层的有限元建模方法, 其可靠性通过含不同粗骨料类型(刚玉和玄武岩)、粒径(5~15 mm、5~20 mm、35~45 mm 和 65~75 mm)和体积率(15%和30%)的超高性能混凝土靶体的准静态和弹体侵彻试验进行验证。然后, 以小直径炸弹 SDB 侵彻半无限厚块石混凝土靶体为基准工况, 定量分析了块石类型(刚玉、玄武岩和花岗岩)和无量纲块石粒径(0.3~2.2 倍弹径)对侵彻深度的影响, 并确定了最优设计原则。最后, 开展了 3 种典型钻地武器(SDB、WDU-43/B 和 BLU-109/B)的侵彻效应分析, 定量对比了普通强度混凝土(normal strength concrete, NSC)、超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)和刚玉块石混凝土(corundum rubble concrete, CRC)的抗侵彻能力, 提出了原型战斗部侵彻爆炸作用下刚玉块石混凝土遮弹层的工程设计方法。结果表明: 粒径为 1.3~1.7 倍弹径的 CRC 遮弹层抗侵彻性能最优; 3 种战斗部侵彻作用下最优设计 CRC 遮弹层的侵彻深度分别为 0.29、0.78 和 0.68 m, 较 NSC 和 UHPC 遮弹层分别降低了 61.8%~69.1% 和 43.3%~58.0%; 3 种战斗部侵彻爆炸作用下 CRC 遮弹层的临界贯穿及震塌厚度分别为 0.55、1.41 和 1.48 m 及 1.11、2.26 和 3.17 m, 与 NSC 和 UHPC 遮弹层相比, 临界贯穿厚度分别降低了 58.5%~61.2% 和 43.2%~58.1%, 临界震塌厚度分别降低了 61.8%~69.2% 和 34.7%~40.5%。

关键词: 块石混凝土遮弹层; 侵彻爆炸; 临界贯穿; 临界震塌; 防护设计

中图分类号: O385 国标学科代码: 1303530 文献标志码: A

Design of rock-rubble concrete shield against the combination of penetration and explosion of warheads

WU Hao, ZHANG Yu, CHENG Yuehua, CEN Guohua
(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Aiming at the resistance evaluation and engineering design of the rock-rubble concrete shield under the combination of penetration and explosion of Earth Penetrating Weapons, firstly, a finite element modeling method for rock-rubble concrete shields was proposed. By conducting numerical simulations of quasi-static and penetration tests on ultra-high performance concrete targets containing different coarse aggregate types (corundum and basalt), particle sizes (5–15 mm, 5–20 mm, 35–45 mm, and 65–75 mm), and volume fractions (15% and 30%), the reliability of the finite element analysis approach was thoroughly verified. Then, using the semi-infinite rock-rubble concrete shield penetrated by the SDB as a case study, the quantitative influence of type (corundum, basalt, and granite) and dimensionless particle size of rock-rubble (ranging from 0.3 to 2.2 times the projectile diameter) on the penetration depth was analyzed, and optimal design recommendations were determined. Furthermore, the penetration analyses of three typical prototype warheads, i.e., SDB, WDU-43/B, and BLU-109/B, were carried out, and the corresponding penetration resistances of normal strength concrete (NSC), ultra-high performance concrete (UHPC), and corundum rubble concrete (CRC) shields against the above three warheads were

* 收稿日期: 2024-05-15; 修回日期: 2024-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(52308522); 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室开放基金(23kfgk01)

第一作者: 吴昊(1981—), 男, 博士, 教授, wuhaocivil@tongji.edu.cn

通信作者: 程月华(1994—), 女, 博士, 讲师, yhcheng@tongji.edu.cn

quantitatively compared. Finally, the engineering design method for the CRC shield under the combined effects of penetration and explosion of prototype warheads was proposed. The results indicate that the CRC shield containing the particle size of 1.3 to 1.7 times the projectile diameter exhibits the most excellent penetration resistance. Under the penetration of three types of warheads, the penetration depths in CRC shield were 0.29, 0.78, and 0.68 m, respectively, which are reduced by 61.8%–69.1% and 43.3%–58.0% compared to those in NSC and UHPC shields. Under the combined effects of penetration and explosion, the perforation limits of the CRC shield are 0.55, 1.41, and 1.48 m, while the scabbing limits are 1.11, 2.26, and 3.17 m. Compared with NSC and UHPC shields, the perforation limits are reduced by 58.5%–61.2% and 43.2%–58.1%, respectively, and the scabbing limits are reduced by 61.8%–69.2% and 34.7%–40.5%, respectively.

Keywords: rock-rubble concrete shield; penetration and explosion; perforation limit; scabbing limit; protective design

含大粒径块石的超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC), 简称块石混凝土, 较普通强度混凝土 (normal strength concrete, NSC) 具有优异的抗钻地武器战斗部侵彻和爆炸性能以及突出的综合性价比^[1-4]。然而, 由于块石混凝土遮弹层构造和材料性能复杂、薄弱面多以及块石形状、大小和位置具有随机性, 已有分析较多依赖于工程经验, 缺乏可靠的计算与设计方法。本文针对块石混凝土遮弹层抗典型战斗部侵彻爆炸效应的计算与工程设计开展研究。

Bludau 等^[5]、Zhang 等^[6-7]、Wu 等^[8-9] 和宫俊等^[10] 开展了小口径弹体侵彻试验, 得出粗骨料类型、粒径和体积率均对混凝土靶体的抗侵彻性能有显著影响。基于同样的思想, 可通过在混凝土遮弹层中添加大粒径块石来提升遮弹层的抗侵彻能力。唐德高等^[11] 开展了 125 mm 坦克炮弹以 340~510 m/s 的速度侵彻 300 mm 厚刚玉块石混凝土靶体试验, 其中形状不规则刚玉块石的粒径为 100~150 mm, 基体为 C40 混凝土, 试验结果表明, 混凝土中掺入高强高硬刚玉块石能够有效提升靶体的抗侵彻性能。此外, 由于块石混凝土遮弹层侵彻爆炸试验成本高、开展周期长且试验数据具有一定的离散性, 部分学者采用数值仿真方法进行分析。穆朝民等^[12] 基于形状规则的立方体浆砌块石建模方法对高强钢弹侵彻整齐排列的浆砌块石遮弹层进行了数值模拟, 结果表明, 浆砌块石尺寸 (厚度、宽度) 和强度的选取需要结合弹体长径比共同考虑, 以确保块石遮弹层具备良好的抗侵彻性能。方秦等^[13-16] 采用基于块石形状随机生成和空间位置随机分布的建模方法, 对块石混凝土遮弹层抗弹体侵彻性能开展了数值仿真分析, 结果表明, 块石粒径、体积率以及混凝土基体强度均对遮弹层抗侵彻性能存在影响, 如 WDU-34/B 战斗部以 320 m/s 速度垂直打击下, 刚玉块石混凝土遮弹层的侵彻深度相比普通强度混凝土 (normal strength concrete, NSC) 和花岗岩块石混凝土遮弹层分别减少 64% 和 57%, 且弹体偏转和破坏更加明显。柳兴旺等^[17] 采用同样的建模方法, 开展了 $\varnothing 234$ mm 弹体以 340 m/s 速度侵彻半无限厚块石混凝土靶体的数值模拟研究, 结果表明, 块石与混凝土基体之间采用面面接触建模方式, 可以较真实地反映弹体的侵彻深度以及遮弹层的损伤破坏。

上述工作表明, 采用块石混凝土遮弹层能够有效提升防护结构的抗侵彻性能, 然而已有研究对于块石混凝土遮弹层数值仿真中材料模型和参数以及相应的有限元分析方法等缺乏充分的验证^[13-15]; 缺乏对于块石类型、粒径和体积率等重要设计参数对遮弹层抗侵彻性能的定量影响分析^[14-17]; 针对典型钻地武器战斗部侵彻爆炸作用, 块石混凝土遮弹层的重要设计参数, 如侵彻深度、临界贯穿和震塌厚度及其与传统 NSC 和 UHPC 遮弹层的对比工作开展较少。针对上述研究不足, 首先, 提出类似于混凝土 3D 细观建模的块石混凝土遮弹层“生成-投放”建模方法, 通过与含不同粗骨料类型 (刚玉和玄武岩)、粒径 (5~15 mm、5~20 mm、35~45 mm 和 65~75 mm) 和体积率 (15% 和 30%) 的 UHPC 靶体的准静态压缩和弹体侵彻试验^[8-9] 进行对比, 对提出的建模方法、骨料和基体材料模型和参数以及有限元分析方法的可靠性进行充分验证; 然后, 以小直径炸弹 SDB 侵彻半无限厚块石混凝土靶体为基准工况, 定量讨论块石类型 (刚玉、玄武岩和花岗岩) 和无量纲块石粒径 (0.3~2.2 倍弹径) 对侵彻深度的影响, 确定块石混凝土遮弹层的最优设计原则; 最后, 开展 3 种典型钻地武器战斗部 (SDB、WDU-43/B 和 BLU-109/B) 的侵彻作用分析, 并结合前期开展的 NSC 和 UHPC 遮弹层抗侵彻爆炸研究工作^[18-19], 定量评估和对比 3 种遮弹层的抗侵彻爆炸能力, 提出抗典型战斗部侵彻爆炸作用的刚玉块石混凝土遮弹层工程设计方法。

1 有限元模型

本节主要介绍原型战斗部侵彻块石混凝土遮弹层的有限元模型, 包括建模方法、材料本构模型及相应参数取值等。

1.1 原型战斗部模型

考虑到典型钻地武器战斗部直径多为 100~400 mm, 本文中选取了弹径(D)分别为 152 mm(SDB)、234 mm(WDU-43/B)和 368 mm(BLU-109/B)的 3 种钻地武器战斗部进行块石混凝土遮弹层抗侵彻爆炸分析, 弹头曲径比分别为 3(SDB)、9(WDU-43/B)、3(BLU-109/B), 弹体侵彻速度均取 340 m/s。图 1 给出了 3 种战斗部的几何尺寸, 质量分别为 113、454 和 874 kg。壳体严格按照几何尺寸进行建模, 内部装药填满壳体空腔, 通过调整装药密度达到目标质量。

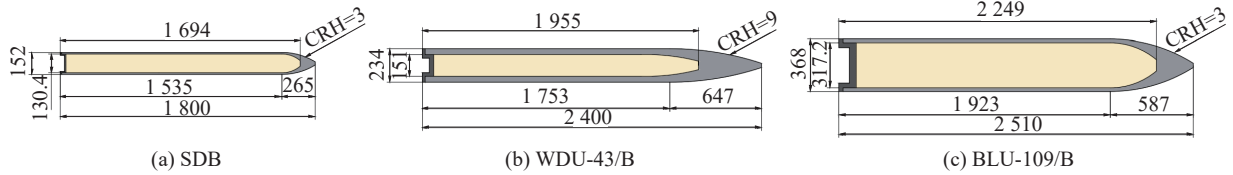


图 1 战斗部几何尺寸(单位: mm)

Fig. 1 Geometric dimensions of warheads (Unit: mm)

钻地弹壳体通常采用高强度材料, 但由于上述战斗部真实壳体材料参数尚无公开资料, 为便于对比, 本文中弹体材料均采用 DT300 高强度钢。块石混凝土遮弹层中, 块石的硬度较高, 会导致弹体呈现磨损、弯曲和断裂等现象, 因此, 弹体材料选用 *MAT_JOHNSON_COOK(JC) 材料模型^[20-21](MAT#015)和 Grüneisen 状态方程^[22]进行描述。DT300 高强度钢的 JC 材料模型参数取值如表 1 所示。表中: ρ 为密度, G 为剪切模量, A 为屈服应力常数, B 为应变硬化常数, N 为应变硬化指数, C 为应变率相关系数, M 为温度相关指数, T_m 为熔化温度, T_r 为室温, c_p 为比定压热容, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率, D_1 为初始失效应变, D_2 为指数函数因子, D_3 为应力三轴度因子, D_4 为应变率因子, D_5 为温度因子, C 为 u_s-u_p 曲线的截距, S_1 、 S_2 、 S_3 分别为第一斜度、第二斜度和第三斜度系数, γ_0 为 Grüneisen 系数, α 为 γ_0 的一阶修正。

表 1 弹体 JC 模型参数^[23-24]

Table 1 JC model parameters of projectile^[23-24]

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	G/GPa	A/MPa	B/MPa	N	C	M	T_m/K	T_r/K	$c_p/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\dot{\epsilon}_0$
7 800	81	792	2 483	0.474	0.009	1.07	1 793	298	477	1.0×10^{-4}
D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	$C/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	S_1	S_2	S_3	γ_0	α
0.692	1.581	-3.053	-0.042	2.98	4 569	1.49	0	0	2.17	0.46

1.2 块石混凝土遮弹层模型

块石混凝土遮弹层中块石和 UHPC 基体的分布规律与混凝土中粗骨料和砂浆基体类似, 因此, 对于块石混凝土遮弹层的建模, 参考混凝土 3D 细观建模方法以准确描述块石形状、大小和位置的随机性以及块石与 UHPC 基体之间的相互作用。混凝土 3D 细观建模方法主要有图像处理法和参数化建模法两大类。图像处理法基于混凝土内部真实结构的计算机断层(computed tomography, CT)扫描图像生成三维细观模型, 而参数化建模法则根据骨料属性在指定空间中生成随机分布的骨料, 其中“生成-投放”法可对骨料形状、级配和体积率进行调控, 更适用于本文中块石混凝土遮弹层建模。该方法的挑战主要包括实现块石形状和空间位置的随机性、提高块石体积率以及有效地表征块石与基体之间的界面过渡区等。

图 2 给出了块石混凝土遮弹层的参数化建模步骤: (1) 根据确定的块石粒径范围(d_i, d_j), 基于 MATLAB 软件, 通过蒙特卡洛算法随机确定块石粒径 $2R_0(d_i \leq 2R_0 \leq d_j)$, 生成直径为 $2R_0$ 的球体。进一步使用延拓法在该球体内接多面体(本文中为 8~24 面体)生成形状随机的块石, 其中假设所有块石在粒径范围内均匀分布且按照粒径从大到小的顺序生成, 通过约束新增顶点的坐标避免生成片状和针状块石; (2) 根据预先设定的投放区域(目标投放区域高度的 2~3 倍)和体积率(约为目标体积率的 1/3), 基于蒙特卡洛算法确定投放时块石中心点位置处的坐标, 通过外接球法判断块石是否投放在指定投放域边界内以及是否与已投放块石发生侵入, 完成块石在指定空间区域内的随机投放; (3) 为提高块石的体积率, 将上述模型导入有限元程序 LS-DYNA, 对投放区域内的块石施加重力使其竖向向密实沉降。同时为避免块石在沉降过程中超出指定区域, 在块石四周和底部建立实体围挡, 在施加重力荷载的过程中对围挡施加双向水平震荡位移以模拟实际工程中块石投放时的振动密实, 从而获得符合真实施工情况的完全密实且达到目标体积率(约 45%)的块石几何模型; (4) 通过几何体布尔运算得到遮弹层中 UHPC 基体, 进一步对块石和 UHPC 基体采用可以很好重现块石真实形状的四面体网格进行划分, 使用零厚度粘结单元表征块石和 UHPC 基体之间的界面过渡区以避免因其网格尺寸较小引起的建模繁琐和计算成本增加等问题。

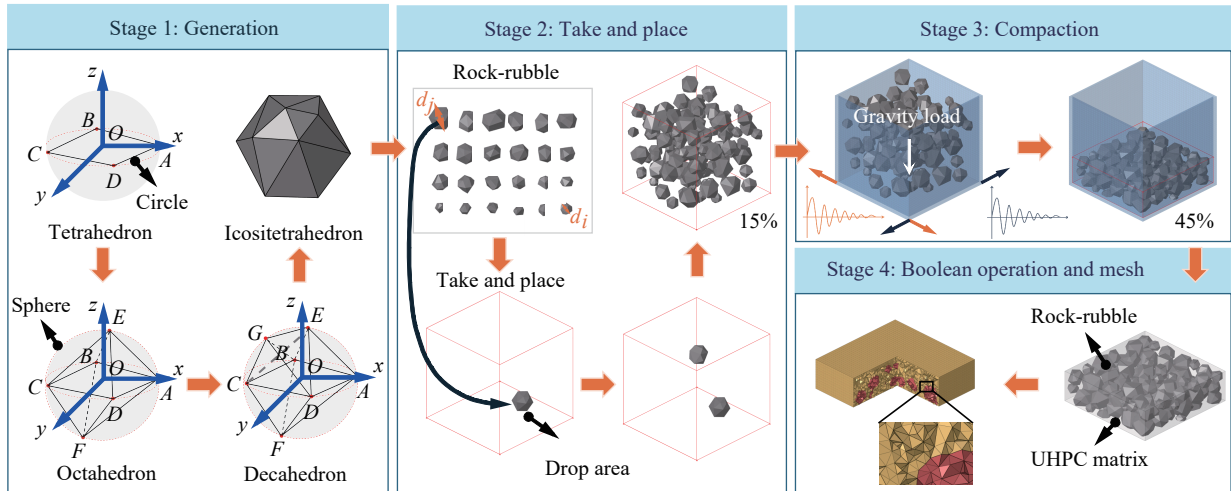


图 2 块石混凝土遮弹层建模

Fig. 2 Modelling of rock-rubble concrete shield

下面分别给出块石、UHPC 基体和二者界面过渡区的材料模型和参数取值, 其可靠性将在第 2 节中基于不同粗骨料类型、粒径和体积率 UHPC 靶体的准静态压缩和弹体侵彻试验进行验证。

本文中, 分别选取刚玉、玄武岩和花岗岩 3 种类型的块石, 并根据 3 种块石的成分和力学特性选择不同的材料模型。其中, 刚玉采用 *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CERAMIC (JH-2) 材料模型^[25] (MAT#110), 玄武岩和花岗岩选用 *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE (HJC) 材料模型^[22, 26] (MAT#111), UHPC 基体采用 HJC 模型描述, 主要材料参数和取值如表 2~3 所示。表中: A_0 为归一化无损伤强度参数, B_0 为归一化断裂强度参数, M_0 为断裂强度参数, N_0 为无损伤强度参数, T 为最大拉伸强度, σ_{HEL} 为弹性极限, p_{HEL} 为弹性极限压力, D_{10} 为损伤系数, D_{20} 为损伤指数, F_s 为失效判据, A_1 为归一化黏聚强度, B_1 为归一化压力硬化系数, N_1 为压力硬化指数, f_c 为准静态单轴压缩强度, T_{max} 为最大拉伸流体静压, ϵ_{min} 为断裂前最小塑性应变, S_{max} 为归一化最大强度, p_c 为压碎压力, μ_c 为压碎体积应变, p_1 为压密压力, μ_1 为压密体积应变, D_{11} 、 D_{21} 为损伤常数, K_1 、 K_2 、 K_3 为压力常数。

由于块石与 UHPC 基体之间的界面过渡区厚度仅约 20~50 μm , 若采用实体单元表征, 需采用极小尺寸网格, 建模较繁琐且大幅增加计算成本^[31]。本文中通过关键字 *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK (OPTION=9) 定义等效于零厚度黏结单元的内聚力接触^[32] 以表征界面过渡

区。参考作者前期工作中混凝土细观模型界面过渡区参数取值方法^[33-34], 块石和 UHPC 基体界面的参数列于表 4。

表 2 刚玉 JH-2 模型参数^[27-28]Table 2 JH-2 model parameters of corundum^[27-28]

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	G/GPa	A_0	B_0	N_0	C	M_0
3 800	152	0.88	0.431	0.64	0.007	0.6
$\dot{\epsilon}_0$	T/GPa	$\sigma_{\text{HEL}}/\text{GPa}$	$p_{\text{HEL}}/\text{GPa}$	D_{10}	D_{20}	F_s
1.0	2.62	6.75	3.65	0.012 5	1.85	1.5

表 3 玄武岩、花岗岩和 UHPC 基体 HJC 模型参数^[29-30]Table 3 HJC model parameters of basalt, granite and UHPC matrix^[29-30]

组分	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	G/GPa	A_1/MPa	B_1/MPa	N_1	C	f_c'/MPa	$T_{\text{max}}/\text{MPa}$	$\dot{\epsilon}_0$	ϵ_{min}
玄武岩	3 000	32.25	0.3	1.73	0.79	0.005	120	6.792	1.0	0.01
花岗岩	2 660	30.50	0.3	1.73	0.79	0.005	154	7.694	1.0	0.01
基体	2 500	24.02	0.3	1.73	0.79	0.005	115	6.649	1.0	0.01
组分	S_{max}	p_0/MPa	$\mu_c/10^{-5}$	p_1/GPa	μ_1	D_{11}	D_{21}	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa
玄武岩	7.0	40	93	3.47	0.1	0.04	1.0	116	-243	506
花岗岩	7.0	51	126	3.47	0.11	0.04	1.0	116	-243	506
基体	7.0	38.33	119.7	3.47	0.08	0.04	1.0	116	-243	506

表 4 块石和 UHPC 基体界面参数

Table 4 Parameters of interface between rock-rubble and UHPC matrix

法向强度/MPa	法向断裂能/(MN·mm ⁻¹)	切向强度/MPa	切向断裂能/(MN·mm ⁻¹)	法向刚度/(GPa·m ⁻¹)	切/法向刚度比	损伤指数
9	1	27	3	5	0.42	-2

2 有限元分析方法及验证

通过对含不同粗骨料参数 UHPC 靶体的准静态压缩以及弹体侵彻试验^[8-9]开展数值仿真, 充分验证第 1 节中提出的建模方法、材料本构模型和参数以及有限元分析方法的可靠性。

首先, 开展不同粗骨料类型(刚玉和玄武岩)、粒径(5~20 mm 和 35~45 mm)及体积率(15% 和 30%)的 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试件单轴压缩试验的数值模拟, 试验工况与结果的对比如表 5 所示。工况命名原则为: 5-20BA15% 代表粗骨料的粒径为 5~20 mm、类型为玄武岩且体积率为 15%。相应的有限元模型如图 3(a) 所示, 其中试件两端与钢板采用面面接触, 约束底部钢板所有自由度, 对顶部钢板进行位移加载, 加载速率为 0.6 mm/s。以工况 5-20CA30% 为例, 图 3(b) 和 (c) 分别给出了立方体试件的应力-应变曲线和剖面有效塑性应变云图。考虑到块石生成的随机性, 对每种工况随机生成了 3 个细观模型进行计算, 计算结果(括号内)及其平均值列于表 5。可以看出: 数值仿真预测的抗压强度与试验值误差小于 2.3%; 加载过程中混凝土内部塑性应变分布不均匀, 强度较弱的砂浆处产生更大的塑性应变; 细观模型较宏观均质模型能够更准确地反映混凝土各组份的受力和破坏过程。

Wu 等^[8-9]开展了一系列 $\phi 25.3$ mm 的 DT300 钢弹以 510 m/s 速度侵彻含粗骨料 UHPC 靶体的试验, 其中靶体尺寸为 $\phi 750$ mm×500 mm, 考虑了不同粗骨料类型(刚玉和玄武岩)和粒径(5~15 mm、5~20 mm、35~45 mm 和 65~75 mm)。每个工况各开展了 2 发试验, 表 6 分别给出了侵彻深度的试验值(括号内)和平均值。

表 5 立方体单轴压缩试验结果
Table 5 Cube uniaxial compression test results

工况	骨料类型	粒径/mm	体积率/%	抗压强度/MPa		误差%
				试验值	模拟值	
5-20BA15%	玄武岩	5~20	15	115.5	115.3 (114/115/117)	-0.1
5-20BA30%	玄武岩	5~20	30	118.9	121.7 (121/121/123)	2.3
5-20CA15%	刚玉	5~20	15	123.0	121.0 (116/127/120)	-1.6
5-20CA30%	刚玉	5~20	30	137.1	138.0 (137/139/138)	0.7
35-45CA30%	刚玉	35~45	30	145.3	148.7 (142/154/150)	2.3

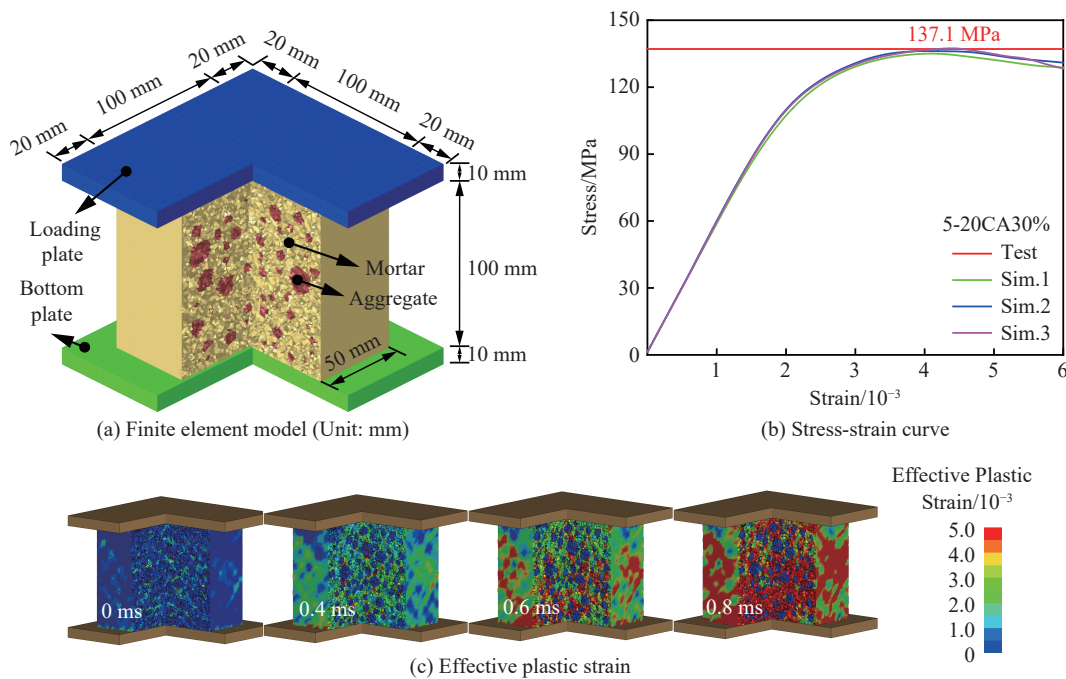


图 3 有限元模型及数值模拟结果

Fig. 3 Finite element model and numerical simulation results

表 6 试验工况及侵彻深度结果
Table 6 Test cases and penetration depths

工况	骨料类型	粒径/mm	体积率/%	侵彻深度/mm		误差/%
				试验值 ^[8-9]	模拟值	
5-20CA30%	刚玉	5~20	30	99.5(98/101)	101.1(92.3/109.5/94.2/113.3/96.2)	1.6
35-45CA30%	刚玉	35~45	30	44.5(21/68)	51.6(45.3/53.3/46.9/56.8/55.8)	16.0
65-75CA30%	刚玉	65~75	30	48.0(59/37)	50.9(56.2/47.8/45.4/50.8/54.2)	6.0
5-15BA30%	玄武岩	5~15	30	122.0(124/120)	124.8(124.9/126.4/126.5/123.0/123.2)	2.3

图 4(a) 给出了弹体侵彻含粗骨料 UHPC 靶体的有限元模型, 其中弹靶均采用拉格朗日算法, 弹靶间相互作用通过关键字*CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE 定义, 添加关键字*MAT_ADD_EROSION 并采用最大主应变准则控制侵彻过程中靶体网格的删除, 以防止单元过度畸变造成计算终止。由于试验中靶体体积较大, 为提高计算效率, 仅对与弹体直接作用的区域(200 mm×200 mm, 称为加密区)采用尺寸为 2 mm 的单元进行 3D 细观建模, 骨料类型、粒径范围和体积率均与试验保持一

致。靶体剩余区域(称为非加密区)视为均质混凝土,单元尺寸由 2 mm 逐渐向边缘扩大至 12 mm。综合考虑弹体直径、壁厚以及计算精度和效率,弹体单元尺寸取为 2 mm。弹靶的本构模型和参数同第 1 节,对 5-20CA30% 工况进行试算,确定刚玉骨料和 UHPC 基体的单元失效准则,即最大主应变分别为 1.5 和 0.4,进一步对 5-15BA30% 工况试算,确定玄武岩骨料最大主应变为 0.4。考虑到块石生成的随机性,各工况下除靶体中心点(O 点)外,在中心点处沿 2 个垂直方向各平移一个弹径距离再取 4 个打击位置(A 、 B 、 C 、 D 点),将 5 个打击位置侵彻深度的平均值与试验结果进行对比(见表 6),其中数值模拟结果分别给出了 5 个打击位置处的计算值(括号内)和平均值。

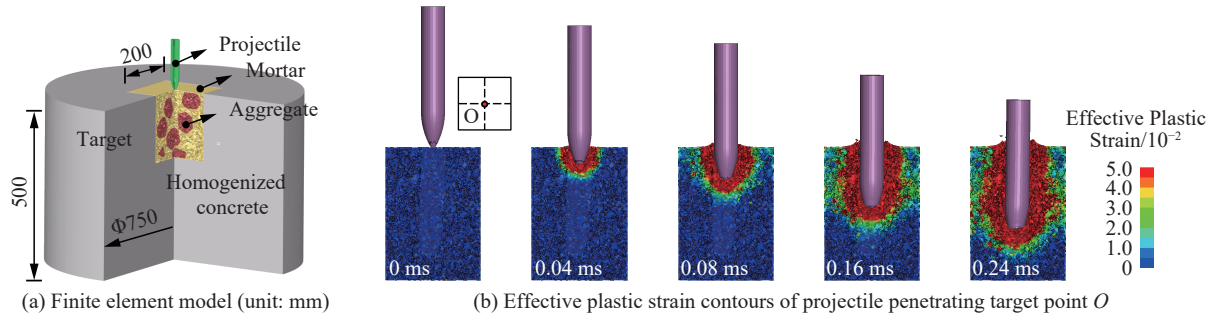


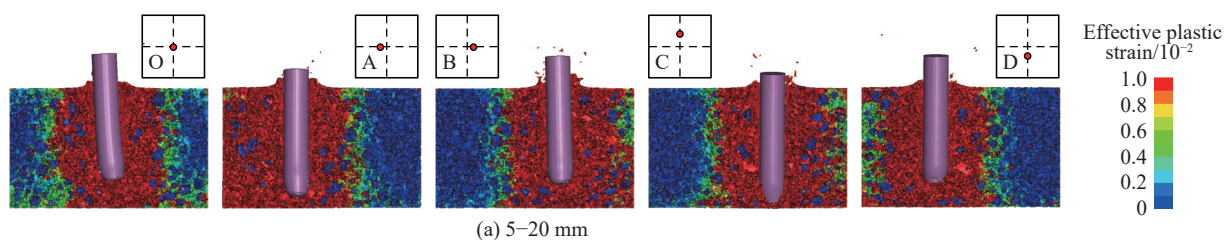
图 4 有限元模型和数值模拟结果

Fig. 4 Finite element model and numerical simulation results

以工况 5-15BA30% 为例,图 4(b) 给出了弹体侵彻含玄武岩骨料 UHPC 靶体 O 点时不同时刻靶体局部剖面的有效塑性应变云图。可以看出:靶体内损伤最先出现在弹靶接触位置,并随着弹体的侵入向四周传播;玄武岩骨料与 UHPC 基体强度接近,靶体内损伤扩展较连续;弹体在侵彻过程中因骨料的存在而发生轻微偏转。

图 5(a)~(c) 分别给出了刚玉骨料粒径为 5~20 mm、35~45 mm 和 65~75 mm 时不同打击位置处靶体局部剖面的有效塑性应变云图。可以看出:由于 UHPC 基体强度弱于刚玉骨料,导致基体处有效塑性应变值远高于骨料;当弹体高速撞击骨料时,出现骨料破碎、弹体变形和偏转等现象;由于粗骨料的不均匀分布导致不同打击位置处的侵彻深度略有差异,相对误差小于 12.2%。结合表 6 可以看出:刚玉骨料粒径为 5~20 mm、35~45 mm 和 65~75 mm 时,侵彻深度计算平均值分别为 101.1、51.6 和 50.9 mm,与试验平均值误差分别为 1.6%、16.0% 和 6.0%,其中 35~45 mm 粒径工况误差偏大的原因为 2 组试验数据离散性较大;粒径为 65~75 mm 时的侵彻深度较粒径为 5~20 mm 和 35~45 mm 时分别降低了 49.7% 和 1.4%,表明随着骨料粒径的增大,靶体的抗侵彻性能显著提升,同时存在最优粒径范围,当粒径进一步增大时,侵彻深度降低不明显;粒径为 5~15 mm 玄武岩骨料的 UHPC 靶体侵彻深度计算平均值为 124.8 mm,与试验平均值误差为 2.3%,较粒径相近的 5~20 mm 刚玉骨料,其侵彻深度增大了 22.6%。

综上所述,通过与不同粗骨料类型、粒径和体积率 UHPC 靶体的准静态压缩以及弹体侵彻试验^[8-9]进行对比,验证了采用的粗骨料随机建模方法、材料本构模型和参数、网格尺寸以及有限元分析方法的准确性。



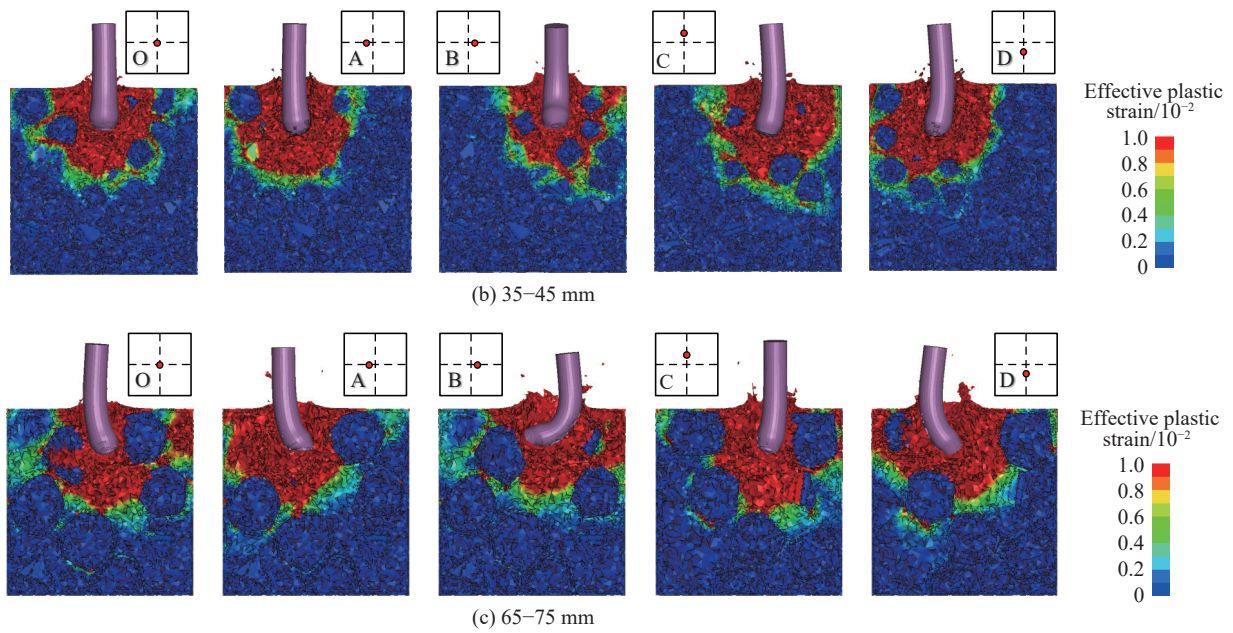


图 5 含刚玉骨料 UHPC 靶体有效塑性应变云图

Fig. 5 Effective plastic strain contours of corundum aggregated UHPC targets

3 块石参数影响分析

基于上述得到验证的有限元分析方法,以 SDB 战斗部为例,进一步讨论块石类型和粒径对块石混凝土遮弹层抗侵彻性能的影响,为块石混凝土遮弹层的工程选型提供建议。

3.1 原型战斗部侵彻数值仿真策略

考虑到沿用第 2 节基于缩尺模型试验验证的 2 mm 尺寸网格开展原型战斗部侵彻作用分析计算成本较高,因此在保证计算精度的前提下,对弹、靶网格尺寸进行适当扩大。如图 6 所示,选取 $\varnothing 60$ mm 弹体以 340 m/s 速度侵彻体积率为 30%、粒径为 55~65 mm 的块石混凝土遮弹层作为基准工况,建立相应的有限元模型进行网格尺寸过渡分析,其中考虑块石投放时的离散性随机生成了 3 个遮弹层模型。首先,采用 2 mm 尺寸网格建立弹靶的有限元模型,材料模型及参数与第 1 节保持一致。进一步,将弹体的网格尺寸扩大至 5 mm,靶体加密区网格扩大至 10 mm。通过试算,调整刚玉块石和玄武岩块石的单元失效准则分别为 0.70 和 0.22 时,扩大网格尺寸后预测的侵彻深度及弹体变形破坏形态与弹靶网格尺寸为 2 mm 时的结果一致。此外,基于张德志等^[35]开展的高强钢弹体侵彻花岗岩靶体试验,确定弹体网格尺寸为 5 mm、靶体网格尺寸为 10 mm 的有限元模型中,花岗岩的失效准则为 0.16。上述计算结果的对比如表 7 所示,可以看出,2 种网格划分策略下预测的侵彻深度和弹体残余长度误差均在 3% 以内,验证了扩大后的网格尺寸和相应失效准则的可靠性,可用于块石混凝土遮弹层抗原型战斗部侵彻作用分析。

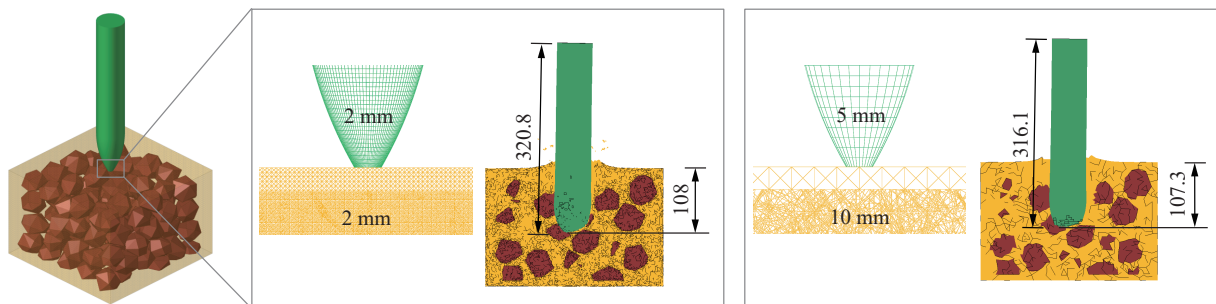


图 6 原型战斗部侵彻块石混凝土遮弹层数值仿真策略

Fig. 6 Numerical simulation strategy for prototype warheads penetrating on rock-rubble concrete shields

表 7 网格尺寸过渡计算结果的对比

Table 7 Comparisons of results for various mesh sizes

块石类型	模型	侵彻深度/mm			弹体残余长度/mm		
		2 mm+2 mm	5 mm+10 mm	误差/%	2 mm+2 mm	5 mm+10 mm	误差/%
刚玉	1	108.0	107.3	0.65	320.8	316.1	1.47
	2	95.1	93.9	1.26	315.4	311.4	1.27
	3	103.7	102.2	1.45	317.5	312.6	1.54
	平均值	102.3	101.1	1.17	317.9	313.4	1.43
玄武岩	1	132.1	130.5	1.21	327.8	334.8	-2.14
	2	117.3	115.7	1.36	320.2	325.9	-1.78
	3	128.3	125.8	1.95	324.6	330.3	-1.76
	平均值	125.9	124.0	1.51	324.2	330.3	-1.89
花岗岩	1	134.0	134.3	-0.22	333.2	331.0	0.66
	2	119.5	118.9	0.50	342.3	345.7	-0.99
	3	130.4	127.9	1.92	337.4	342.6	-1.55
	平均值	128.0	127.0	0.78	337.6	339.8	-0.63

3.2 块石类型

基于 3.1 节确定的网格尺寸及失效准则,建立了 SDB 战斗部侵彻块石混凝土遮弹层的有限元模型。为减小边界效应的影响,遮弹层直径取 $25D$,即 3 800 mm,厚度取 1 400 mm。块石粒径取 $0.8D\sim 1.2D$,体积率约为 43%,加密区取遮弹层中心尺寸为 $600\text{ mm}\times 600\text{ mm}\times 1\ 000\text{ mm}$ 的区域。图 7(a)~(c) 分别给出了刚玉、玄武岩和花岗岩块石混凝土遮弹层的局部剖面图。可以看出:由于刚玉块石强度较高,弹体首先在弹头处出现磨蚀,弹头与弹身弧柱交接位置由于应力集中发生镦粗(0.10 ms),随后镦粗变形加剧进而弹体头部屈曲(0.15 ms)直至最终断裂(0.20 ms)丧失侵彻能力;玄武岩与花岗岩块石混凝土遮弹层侵彻工况中的弹体变形形态相似,由于块石强度较低,弹体仅在弧柱交接处出现轻微镦粗,以及在弹头位置出现少量磨蚀(0.10 ms),随着弹体进一步侵入靶体,镦粗现象更加明显,且发生弹道偏转(0.15 ms)。

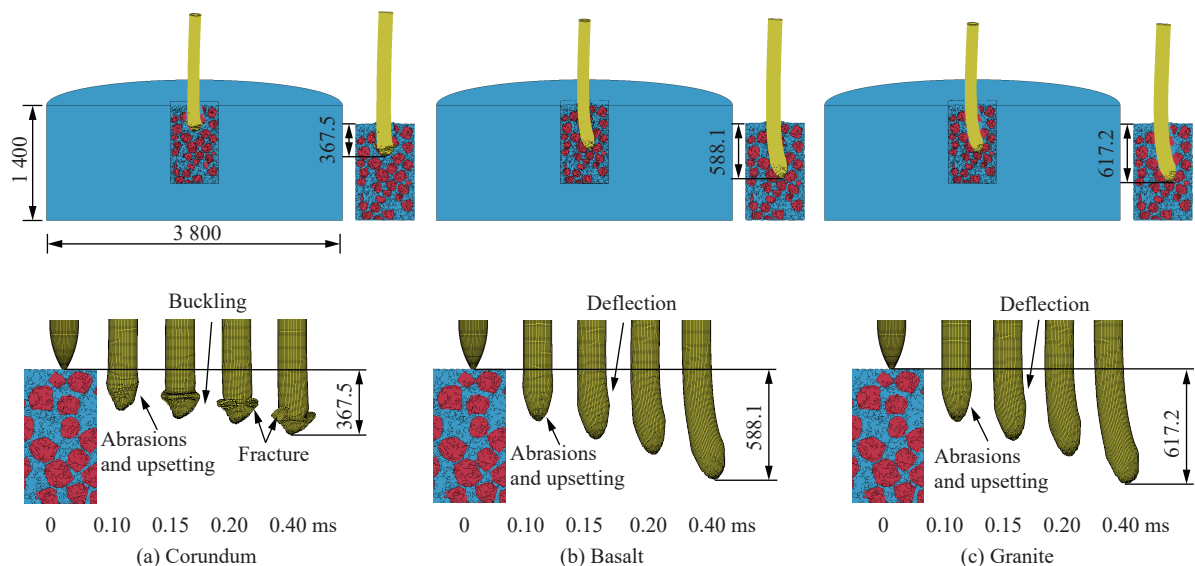


图 7 3 种类型块石混凝土遮弹层侵彻深度(单位: mm)

Fig. 7 Penetration depths of three types rock-rubble concrete shields (Unit: mm)

图 8 给出了 SDB 战斗部打击刚玉、玄武岩和花岗岩块石混凝土遮弹层的弹体破坏形态。可以看出,

弹体侵彻刚玉块石混凝土靶体时发生断裂破碎, 侵彻玄武岩块石混凝土靶体时仅在弹头处出现轻微磨损, 弹体呈现弯曲变形, 与已有试验^[8-9]中弹体的破坏形态吻合。表 8 进一步给出了 3 种工况下的侵彻深度和弹体残余长度。可以看出: 刚玉块石混凝土遮弹层具有更优异的抗侵彻性能, 其中刚玉、玄武岩和花岗岩块石混凝土遮弹层的侵彻深度分别为 367.5、588.1 和 617.2 mm, 刚玉块石混凝土遮弹层较后两者分别降低了 37.5% 和 40.5%; 3 种类型遮弹层对应的弹体残余长度分别较初始长度减少了 17.8%、10.0% 和 9.4%。

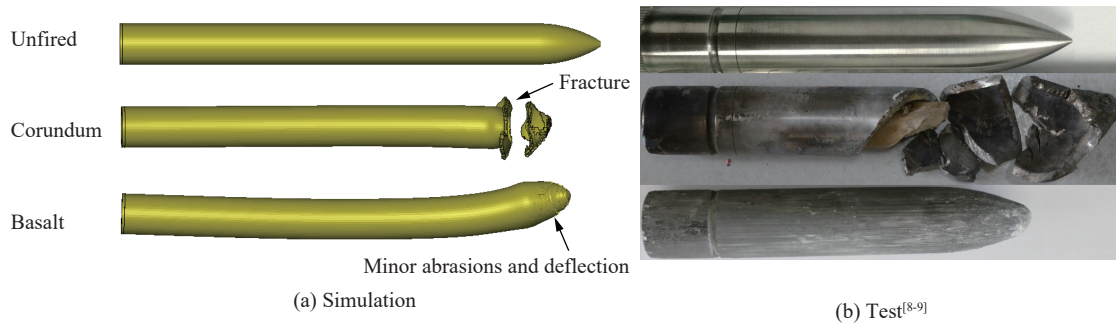


图 8 弹体变形和破坏形态

Fig. 8 Deformation and fracture patterns of projectiles

表 8 不同遮弹层模拟结果

Table 8 Simulation results of different shields

工况	块石类型	无量纲粒径范围	块石体积率/%	侵彻深度/mm	弹体残余长度/mm
0.8-1.2CA43%	刚玉	0.8D~1.2D	43.1	361.5	1 480
0.8-1.2BA43%	玄武岩	0.8D~1.2D	43.1	588.1	1 620
0.8-1.2GA43%	花岗岩	0.8D~1.2D	43.1	617.2	1 630
0.3-0.7CA46%	刚玉	0.3D~0.7D	46.6	664.9	1 585
0.8-1.2CA42%	刚玉	0.8D~1.2D	42.4	369.8	1 505
1.3-1.7CA41%	刚玉	1.3D~1.7D	41.9	289.7	1 415
1.8-2.2CA40%	刚玉	1.8D~2.2D	40.3	275.7	1 300

3.3 块石粒径

基于上述分析结果, 图 9 和表 8 进一步给出了 SDB 战斗部侵彻作用下不同块石粒径(0.3D~0.7D、0.8D~1.2D、1.3D~1.7D 和 1.8D~2.2D)刚玉块石混凝土(corundum rubble concrete, CRC)遮弹层的侵彻深度和弹体残余长度。采用 1.2 节密实方法得到的不同粒径 CRC 遮弹层对应的体积率分别为 46.6%、

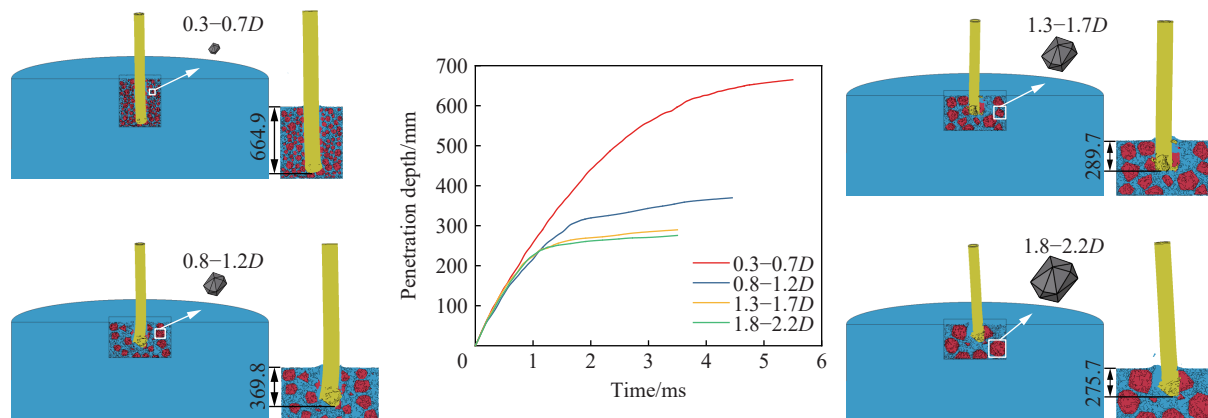


图 9 4 种粒径 CRC 遮弹层侵彻深度(单位: mm)

Fig. 9 Penetration depths of CRC shields with four particle sizes (Unit: mm)

42.4%、41.9% 和 40.3%, 体积率的轻微差异是由于粒径范围不同所致, 粒径小的块石更易被密实。可以看出: 随着块石粒径的增大, 侵彻深度逐渐减小; 当块石粒径范围大于 $1.3D \sim 1.7D$ 后, 侵彻深度减少的幅度降低, 侵彻作用持续时间趋于稳定, 遮弹层抗侵彻性能的提升不再显著。因此, 综合考虑遮弹层的抗侵彻性能以及实际工程中粒径大的块石的可获取性, CRC 遮弹层块石粒径建议取 $1.3D \sim 1.7D$ 。

通过计算可以得出, 块石类型和粒径对块石混凝土遮弹层的抗侵彻性能均有显著影响, 块石混凝土遮弹层的最优设计原则是采用粒径为 $1.3D \sim 1.7D$ 的刚玉块石混凝土, 下节将进一步探讨 3 种典型原型战斗部侵彻爆炸作用下上述最优刚玉块石混凝土遮弹层的设计方法。

4 刚玉块石混凝土遮弹层设计

基于第 3 节中确定的最优块石混凝土遮弹层, 本节针对第 1.1 节中 3 种典型战斗部开展侵彻作用分析, 并与 NSC^[18] 和 UHPC^[19] 遮弹层进行定量比较。进一步结合程月华等^[18-19] 提出的原型战斗部侵彻爆炸作用下 NSC 和 UHPC 遮弹层防护设计方法, 给出侵彻爆炸作用下 CRC 遮弹层的临界贯穿和震塌厚度的设计方法。

图 10(a)~(c) 分别给出了 3 种原型战斗部(SDB、WDU-43/B 和 BLU-109/B)侵彻 $1.3D \sim 1.7D$ 粒径 CRC 遮弹层的局部剖面图。表 9 进一步列出了 3 种战斗部侵彻 CRC 遮弹层的侵彻深度。可以看出: 3 种战斗部的侵彻深度分别为 0.29、0.78 和 0.68 m, WDU-43/B 和 BLU-109/B 战斗部的侵彻深度较 SDB 战斗部分别增加了 169.0% 和 134.5%; 与 BLU-109/B 战斗部相比, WDU-43/B 战斗部虽然质量较小, 但因其弹头形状系数较大, 在侵彻过程中受靶体阻力影响较小, 侵彻深度最大; BLU-109/B 战斗部较 SDB 战斗部侵彻深度显著增加的主要原因是其具有更大的质量和动能; 由于 WDU-43/B 和 BLU-109/B 壳体较厚(图 1(b) 和 (c)), 弹体均未发生断裂, 仅弹头处被少量磨蚀和弧柱交接处出现轻微微粗。

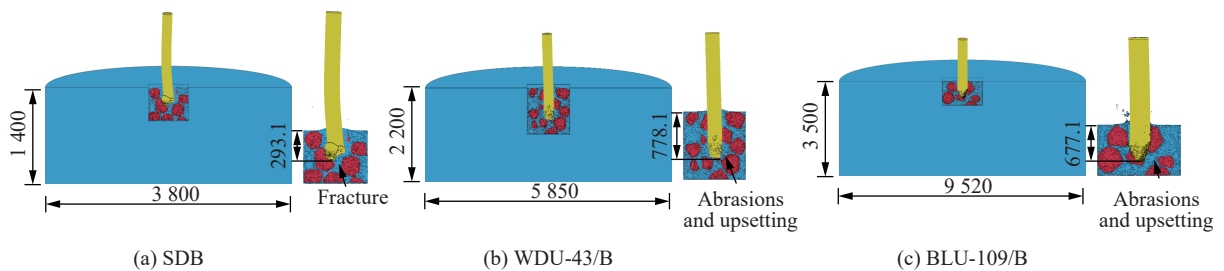


图 10 3 种战斗部侵彻 CRC 遮弹层侵彻深度(单位: mm)

Fig. 10 Penetration depths of CRC shields with three warheads (Unit: mm)

表 9 3 种战斗部的数值模拟结果

Table 9 Numerical simulation results with three warheads

战斗部	侵彻深度/m			临界贯穿系数 ^[18-19]	临界贯穿厚度/m			临界震塌系数 ^[18-19]	临界震塌厚度/m		
	CRC	UHPC ^[19]	NSC ^[18]		CRC	UHPC ^[19]	NSC ^[18]		CRC	UHPC ^[19]	NSC ^[18]
SDB	0.29	0.69	0.94	1.88	0.55	1.30	1.40	3.83	1.11	1.70	3.60
WDU-43/B	0.78	1.41	2.17	1.81	1.41	2.55	3.40	2.90	2.26	3.80	6.30
BLU-109/B	0.68	1.20	1.78	2.17	1.48	2.60	3.80	4.66	3.17	5.00	8.30

上述讨论均基于半无限厚靶体假设, 实际工程中遮弹层均为有限厚且在战斗部侵彻爆炸作用下会出现开坑、震塌和贯穿等典型的局部破坏模式, 因此, 通常将遮弹层侵彻爆炸不贯穿和不震塌作为防护设计指标。结合作者前期给出的原型战斗部侵彻爆炸作用下 NSC 和 UHPC 遮弹层的临界贯穿和震塌系数^[18-19](表 9)以及本文中计算的 CRC 遮弹层侵彻深度, 可得到 CRC 遮弹层的侵彻爆炸临界贯穿厚度分别为 0.55、1.41 和 1.48 m, 侵彻爆炸临界震塌厚度分别为 1.11、2.26 和 3.17 m。需要补充说明的是, 出于保守设计, 本文中选取的临界贯穿和震塌系数为 NSC 和 UHPC 遮弹层中的较大值。

表 9 和图 11 分别给出了 3 种战斗部侵彻爆炸作用下 NSC、UHPC 和 CRC 遮弹层的侵彻深度、临界贯穿和震塌厚度。可以看出, 3 种典型战斗部侵彻 CRC 遮弹层的深度较 NSC 和 UHPC 遮弹层分别降低了 61.8%~69.1% 和 43.3%~58.0%, 侵彻爆炸作用下 CRC 遮弹层的临界贯穿厚度较 NSC 和 UHPC 遮弹层分别降低了 58.5%~61.2% 和 43.2%~58.1%, 临界震塌厚度分别降低了 61.8%~69.2% 和 34.7%~40.5%。上述计算结果和分析方法可直接用于钻地武器战斗部侵彻爆炸作用下块石混凝土遮弹层的抗力评估与工程设计。

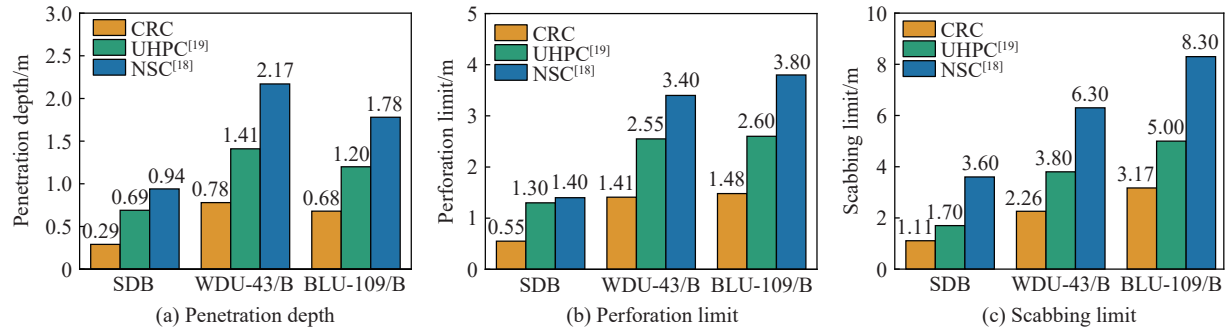


图 11 CRC 与 NSC 和 UHPC 遮弹层的对比

Fig. 11 Comparisons of CRC with NSC and UHPC shields

5 结 论

本文中, 采用数值模拟方法开展了典型战斗部侵彻爆炸作用下块石混凝土遮弹层的分析和设计方法研究, 得到如下主要结论。

(1) 提出了块石混凝土遮弹层的有限元建模方法, 实现了在指定区域内不同粒径和形状块石的随机生成, 以及最大 45% 的目标块石体积率; 通过与试验结果进行对比, 充分验证了所提出的建模方法、骨料和基体的材料模型及参数取值, 以及有限元分析方法的可靠性。

(2) 以 SDB 战斗部为基准工况, 定量分析了块石类型(刚玉、玄武岩和花岗岩)和无量纲块石粒径(0.3~2.2 倍弹径)对遮弹层抗侵彻性能的影响, 得出块石粒径为 1.3~1.7 倍弹径的刚玉块石混凝土遮弹层性能最优。

(3) 确定了 SDB、WDU-43/B 和 BLU-109/B 等 3 种典型战斗部侵彻作用下 CRC 遮弹层的深度分别为 0.29、0.78 和 0.68 m, 较 NSC 和 UHPC 遮弹层分别降低了 61.8%~69.1% 和 43.3%~58.0%。3 种原型战斗部侵彻爆炸作用下 CRC 遮弹层的临界贯穿及震塌厚度分别为 0.55、1.41 和 1.48 m 及 1.11、2.26 和 3.17 m, 与 NSC 和 UHPC 遮弹层相比, 临界贯穿厚度分别降低了 58.5%~61.2% 和 43.2%~58.1%, 临界震塌厚度分别降低了 61.8%~69.2% 和 34.7%~40.5%。

需要指出的是, 由于 JC 模型的局限性, 例如未充分考虑应力状态对材料断裂应变的影响, 本文中数值模拟方法对侵彻过程中弹体断裂失效的描述还存在一定不足, 这也是下一步工作的重点。

参考文献:

- [1] AUSTIM C F, HALSEY C C, CLODT R L. Protection systems development: ESL-TR-83-39 [R]. Florida: Engineering and Services Laboratory, Air Force Engineering and Services Center, Tyndall Air Force Base, 1982.
- [2] GELMAN M D, RICHARD B N, ITO Y M. Impact of armor-piercing projectile into array of large caliber boulders: SL-87-30 [R]. Vicksburg, Mississippi: U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1987.
- [3] ROHANI B. Penetration of kinetic energy projectiles into rock-rubble/boulder overlays [C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Interaction of Nonnuclear Munitions with Structures. Mannheim: Federal Minister of Defense, 1987: 863.
- [4] LANGHEIM H, PAHL H, SCHMOLINSKE E, et al. Subscale penetration tests with bombs and advanced penetration against hardened structures [C]//Proceedings of the 6th International Symposium on Interaction of Nonnuclear Munitions with

- Structures. Panama: Wright Laboratory Air Base Systems Branch, 1993: 12–17.
- [5] BLUDAU C, KEUSER M, KUSTERMANN A. Perforation resistance of high-strength concrete panels [J]. *Structural Journal*, 2006, 103(2): 188–195. DOI: 10.14359/15176.
- [6] ZHANG M H, SHIM V P W, LU G, et al. Resistance of high-strength concrete to projectile impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31(7): 825–841. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2004.04.009.
- [7] ZHANG M H, SHARIF M S H, LU G. Impact resistance of high-strength fibre-reinforced concrete [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2007, 59(3): 199–210. DOI: 10.1680/mac.2007.59.3.199.
- [8] WU H, FANG Q, GONG J, et al. Projectile impact resistance of corundum aggregated UHP-SFRC [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 84: 38–53. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.05.007.
- [9] WU H, FANG Q, CHEN X W, et al. Projectile penetration of ultra-high performance cement based composites at 510–1 320 m/s [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 74: 188–200. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.10.041.
- [10] 宫俊, 吴昊, 方秦, 等. 刚玉骨料超高性能水泥基材料抗侵彻试验和细观数值模拟 [J]. *振动与冲击*, 2017, 36(1): 55–63. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.01.008.
- GONG J, WU H, FANG Q, et al. Test and mesoscale numerical simulation for corundum-aggregate ultra-high performance cementitious composites against projectile penetration [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(1): 55–63. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.01.008.
- [11] 唐德高, 贺虎成, 陈向欣, 等. 刚玉块石混凝土抗弹丸侵彻效应试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2005, 24(6): 37–39. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2005.06.011.
- TANG D G, HE H C, CHEN X X, et al. Experimental study on corundum-rubble concrete against projectile [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2005, 24(6): 37–39. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2005.06.011.
- [12] 穆朝民, 施鹏, 辛凯. 射弹侵彻块石遮弹层的数值模拟 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2012, 35(5): 4–8. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.2012.05.001.
- MU C M, SHI P, XIN K. Numerical simulation on rock anti-penetration layer against penetrating [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2012, 35(5): 4–8. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.2012.05.001.
- [13] 方秦, 张锦华, 还毅, 等. 全级配混凝土三维细观模型的建模方法研究 [J]. *工程力学*, 2013, 30(1): 14–21,30. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.06.0398.
- FANG Q, ZHANG J H, HUAN Y, et al. The investigation into three-dimensional mesoscale modelling of fully-graded concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(1): 14–21,30. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.06.0398.
- [14] 方秦, 杜涛, 彭永, 等. 对遮弹层抗弹体侵彻性能的讨论 [J]. *防护工程*, 2014, 36(5): 31–36.
- FANG Q, DU T, PENG Y, et al. Discussions on the performance of the overlays against the penetration of projectiles [J]. *Protective Engineering*, 2014, 36(5): 31–36.
- [15] FANG Q, ZHANG J H. 3D numerical modeling of projectile penetration into rock-rubble overlays accounting for random distribution of rock-rubble [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 63: 118–128. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.08.010.
- [16] 逢高伟, 方秦, 孔祥振, 等. WDU-34/B 战斗部侵彻块石遮弹层的数值模拟研究 [J]. *防护工程*, 2020, 42(4): 15–22. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1854.2020.04.002.
- PANG G W, FANG Q, KONG X Z, et al. Numerical simulation of WDU-34/B warhead penetrating into rubble burster layer [J]. *Protective Engineering*, 2020, 42(4): 15–22. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1854.2020.04.002.
- [17] 柳兴旺, 邓旭艳, 秦青阳, 等. 块石混凝土遮弹层界面对抗侵彻性能影响的数值模拟研究 [J]. *高压物理学报*, 2023, 37(2): 025101. DOI: 10.11858/gywlx.20220669.
- LIU X W, DENG X Y, QIN Q Y, et al. Numerical investigation on effect of interface modelling of rock-rubble shielding overlays on the anti-penetration capability [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2023, 37(2): 025101. DOI: 10.11858/gywlx.20220669.
- [18] 程月华, 周飞, 吴昊. 抗战斗部侵彻爆炸作用的混凝土遮弹层设计 [J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(4): 045101. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0346.
- CHENG Y H, ZHOU F, WU H. Design of concrete shield against the combination of penetration and explosion of warheads [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(4): 045101. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0346.
- [19] 程月华, 吴昊, 岑国华, 等. 侵彻爆炸联合作用下超高性能混凝土遮弹层设计 [J/OL]. *爆炸与冲击*, 2024[2024-05-15]. <https://www.bzycj.cn/cn/article/doi/10.11883/bzycj-2024-0061>. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0061.
- CHENG Y H, WU H, CEN G H, et al. Design of ultra-high performance concrete shield against combined penetration and

- explosion of warheads [J/OL]. *Explosion and Shock Waves*, 2024[2024-05-15]. <https://www.bzycj.cn/article/doi/10.11883/bzycj-2024-0061>. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0061.
- [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*. Hague: International Ballistics Committee, 1983: 541–547.
- [21] 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.
- [22] Livermore Software Technology Corporation (LSTC). LS-DYNA[®] keyword user's manual: version 971 [R]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [23] 方秦, 罗曼, 张锦华, 等. 弹体侵彻刚玉块石混凝土复合靶体的数值分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(4): 489–495. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)04-0489-07.
- FANG Q, LUO M, ZHANG J H, et al. Numerical analysis of the projectile penetration into the target of corundum-rubble concrete composite overlay [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(4): 489–495. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)04-0489-07.
- [24] CHENG Y H, WU H, JIANG P F, et al. Ballistic resistance of high-strength armor steel against ogive-nosed projectile impact [J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 183: 110350. DOI: 10.1016/j.tws.2022.110350.
- [25] JOHNSON G R, HOLMQUIST T J. An improved computational constitutive model for brittle materials [J]. *AIP Conference Proceedings*, 1994, 309(1): 981–984. DOI: 10.1063/1.46199.
- [26] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R, COOK W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates and high pressures [C]// JACKSON N, DICKERT S. *Proceedings of the 14th International Symposium on Ballistics*. Québec: American Defense Preparedness Association, 1993: 591–600.
- [27] MCLINTOSH G. The Johnson-Holmquist ceramic model as used in LS-DYNA2D: DREV-TM-9822 [R]. Valcartier: Quebec Research and Development Branch Department of National Defence, 1998.
- [28] GAZONAS G A. Implementation of the Johnson-Holmquist II (JH-2) constitutive model into DYNA3D: ARL-TR-2699 [R]. Aberdeen Proving Ground: Army Research Laboratory, 2002.
- [29] 方秦, 孔祥振, 吴昊, 等. 岩石 Holmquist-Johnson-Cook 模型参数的确定方法 [J]. *工程力学*, 2014, 31(3): 197–204. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.10.0780.
- FANG Q, KONG X Z, WU H, et al. Determination of Holmquist-Johnson-Cook constitutive model parameters of rock [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(3): 197–204. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.10.0780.
- [30] REN G M, WU H, FANG Q, et al. Parameters of Holmquist–Johnson–Cook model for high-strength concrete-like materials under projectile impact [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2017, 8(3): 352–367. DOI: 10.1177/2041419617721552.
- [31] BARANOWSKI P, KUCEWICZ M, MAŁACHOWSKI J, et al. Failure behavior of a concrete slab perforated by a deformable bullet [J]. *Engineering Structures*, 2021, 245: 112832. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112832.
- [32] Livermore Software Technology Corporation (LSTC). LS-DYNA[®] keyword user's manual: volume II material models: LS-DYNA R7.1 [R]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2014: 767–771, 1413–1421.
- [33] 章毅, 张湘茹, 吴昊, 等. 混凝土 3D 细观模型及准静态力学行为分析 [J]. *工程力学*, 2024, 41(8): 80–92. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.06.0549.
- ZHANG Y, ZHANG X R, WU H, et al. 3D mesoscale model and quasi-static mechanical analysis of concrete behavior [J]. *Engineering Mechanics*, 2024, 41(8): 80–92. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.06.0549.
- [34] 张湘茹, 程月华, 吴昊. 基于 3D 细观模型的混凝土动态压缩行为分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(2): 023102. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0541.
- ZHANG X R, CHENG Y H, WU H. Analysis on dynamic compressive behavior of concrete based on a 3D mesoscale model [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(2): 023102. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0541.
- [35] 张德志, 张向荣, 林俊德, 等. 高强度弹对花岗岩正侵彻的实验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(9): 1612–1618. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.09.024.
- ZHANG D Z, ZHANG X R, LIN J D, et al. Penetration experiments for normal impact into granite targets with high-strength steel projectile [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(9): 1612–1618. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.09.024.

(责任编辑 蔡国艳)