

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.01.001

接触爆炸作用下 UHTCC-R-RAC 叠合板 动态响应试验与数值模拟研究*

彭胜^{1a,2}, 张成喆^{1a}, 谢先启², 何理^{1b}, 蔡路军^{1b}

(1. 武汉科技大学 a. 城市建设学院; b. 理学院, 武汉 430065; 2. 江汉大学 精细爆破国家重点实验室, 武汉 430056)

摘要: 为了研究接触爆炸作用下超高韧性水泥基复合材料-钢筋再生混凝土 (ultra-high toughness cementitious composites-reinforced recycled aggregate concrete, UHTCC-R-RAC) 叠合板的抗爆性能, 设计了 0 mm、10 mm 厚度 UHTCC 层与 25%、75% 再生粗骨料取代率等级梯度的 3 组 UHTCC-R-RAC 试件, 并开展了 3 次不同工况下的 200 g 乳化炸药接触爆炸破坏试验。随后, 基于 ANSYS/LS-DYNA 软件的拉格朗日-欧拉法 (ALE) 与流固耦合算法建立了 UHTCC-R-RAC 叠合板的整体 10 mm 网格划分与局部 5 mm 网格精细化数值模型。研究结果表明: 随着再生粗骨料取代率从 25% 增至 75%, R-RAC 叠合板迎爆面的应变峰值和加速度峰值分别降低了 11.7% 和 6.4%, 说明再生粗骨料取代率增加对 R-RAC 叠合板抗爆性能提升是不利的; UHTCC-R-RAC 叠合板的应变峰值提升了 64.7%, 说明涂覆 10 mm 的 UHTCC 有利于 R-RAC 叠合板抗爆性能的提升。与整体 10 mm 网格模型结果比较, 局部 5 mm 精细化网格模拟的精度较高, 计算效率更高。

关键词: 超高韧性水泥基复合材料-钢筋再生混凝土; 叠合板; 抗爆性能; 精细化; 数值模拟

中图分类号: TU528.58 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)01-0001-10

Dynamic Response and Numerical Simulation of UHTCC-R-RAC Composite Slab under Contact Explosion

PENG Sheng^{1a,2}, ZHANG Cheng-zhe^{1a}, XIE Xian-qi², HE Li^{1b}, CAI Lu-jun^{1b}

(1. a. College of Urban Construction; b. College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 2. State Key Laboratory of Precision Blasting, Jiangnan University, Wuhan 430056, China)

Abstract: To investigate the blast resistance of Ultra-High Toughness Cementitious Composites-Reinforced Recycled Aggregate Concrete (UHTCC-R-RAC) composite slabs under contact explosion, three sets of UHTCC-R-RAC specimens with varying UHTCC layer thicknesses (0 mm and 10 mm) and recycled coarse aggregate substitution rates (25% and 75%) were designed and subjected to contact explosion tests using 200 g emulsion contact-explosions under different working conditions. Subsequently, a numerical model was developed using the Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method and a fluid-structure coupling algorithm in ANSYS/LS-DYNA, incorporating both a global (10 mm) and a locally refined (5 mm) mesh configuration for the UHTCC-R-RAC composite panels. The experimental results indicate that increasing the replacement rate of recycled coarse aggregate from 25% to 75% re-

收稿日期 (Date of reception): 2025-08-06

网络首发日期 (Published online): 2025-10-27

作者简介: 彭胜 (1989-), 男, 湖南益阳人, 博士, 副教授, 主要从事工程爆破理论及技术研究, (E-mail) pengsheng@wust.edu.cn。

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目 (2022CFB662); 武汉市知识创新专项项目曙光计划项目 (2023020201020403); 江汉大学精细爆破国家重点实验室开放基金 (PBSKL2022D05)

About the author: PENG Sheng (1989-), male, born in Yiyang city, Hunan province, Ph. D, associate professor, mainly engaged in research on engineering blasting theory and technology, (E-mail) pengsheng@wust.edu.cn.

Fund Programs: Natural Science Foundation of Hubei Province funding project (2022CFB662), Wuhan Knowledge Innovation Special Project Dawn Plan Project (2023020201020403), Open Fund of State Key Laboratory of Precision Blasting, Jiangnan University (PBSKL2022D05)

duces peak strain by 11.7% and peak acceleration by 6.4% on the blast-exposed surface of the R-RAC composite slab, demonstrating a negative correlation between RCA content and blast resistance. Conversely, the application of a 10 mm UHTCC layer significantly improved blast resistance, evidenced by a 64.7% increase in peak strain. Numerical simulations further confirmed that the locally refined 5 mm mesh model outperformed the global 10 mm mesh model in both computational accuracy and efficiency.

Key words: ultra-high toughness cementitious composites-reinforced recycled aggregate concrete; laminated slab; blast resistance; refinement; numerical simulation

再生骨料混凝土 (recycled aggregate concrete, RAC) 常用于承载能力要求不高的路基、楼梯、楼面板等结构,既能实现大宗固废建材的再利用,又能避免因天然砂石过度使用引发的环境问题。超高韧性水泥基复合材料 (ultra-high toughness cementitious composites, UHTCC) 具有高韧性、高强度、耐腐蚀、抗开裂、抗冲击等优点,均匀涂覆在钢筋再生骨料混凝土 (reinforced-recycled aggregate concrete, R-RAC) 表面,能够提升防护工程的抗爆防爆功能,提高建筑物的抗炸药击打能力。

霸权国家的 GBU-57 巨型钻地弹能够穿透 8 m 厚的超强加固 RC 板,严重威胁着国家的防护安全^[1]。战地 R-RAC 板的防护措施包括拆除重建、增强增厚修复等,因战区防护工程的特殊性,增强增厚修复更适宜^[2]。银星等基于机器学习开展了 UHTCC 板在近场爆炸作用下的损伤预测^[3],发现基于极端梯度提升 (XGBoost) 算法建立的机器学习模型在分层 10 折交叉验证中表现优秀。徐世焯等开展了 UHTCC 功能梯度板接触爆炸数值模拟^[4],与 UHPC 功能梯度板比较,UHTCC 功能梯度板有效减少了爆炸荷载下的开坑、震塌及靶体损伤,吸收更多的爆炸冲击波。吴平等比较了 UHTCC 和 UHPC 在内埋炸药下的抗爆性能^[5],发现增强 UHTCC 的韧性有效防止了靶体的整体性破坏,增大 UHTCC 的抗拉强度可以减小靶体迎爆面的开坑直径,增大 UHTCC 的抗压强度对减小开坑直径效果不明显。吴平等完成了 UHTCC-纤维混凝土组合靶体抗两次打击试验研究^[6],发现弹体二次侵彻深度大于弹体一次侵彻深度,靶体在二次冲击下的开坑面积小于靶体初次冲击下的开坑面积。Xu 等发现 UHTCC 有效减少了弹体高速冲击荷载作用下混凝土构件飞溅碎片的数量与迎面坑洞尺寸的大小^[7]。由上可知,UHTCC 的应变硬化特性和多缝开裂机制显著提升了混凝土结构的抗爆性能,但与再生骨料混凝土的协同防护机制仍需研究。

研究通过 200 g 乳化炸药下 UHTCC-R-RAC 叠合板的接触爆炸试验和精细数值模拟,揭示了其动

态响应规律,分析了再生骨料取代率 (25% ~ 75%) 对 R-RAC 动态力学性能的劣化效应,验证了 10 mm 厚 UHTCC 层通过裂纹桥接效应对应变峰值的增强机制,建立了基于 ALE 流固耦合算法的局部 5 mm 网格优化模型,其计算精度较传统 10 mm 网格提升显著。研究成果可为战区防护工程的快速修复提供了思路。

1 试验概况

1.1 试件制备

三组 R-RAC 板的强度等级为 C40,板厚为 90 mm,尺寸为 650 mm × 650 mm。采用钢筋单层双向配置的方式,布设在距混凝土顶部 30 mm 的距离处,钢筋型号采用 HRB400 ϕ 8@155。体积配筋率为 0.74%,截面配筋率为 0.39%,保护层厚度为 15 mm,如图 1 所示。钢筋的性能见表 1。配合比、抗压强度见表 2。试验组为再生粗骨料取代率为 25% 和 75% 的 R-RAC 板,标号为 RC-25、RC-75;对照组为 UHTCC-R-RAC 叠合板,标号为 URC-25,即在 R-RAC 板的迎爆面涂覆有 10 mm 厚的 UHTCC 层,其中聚乙烯醇纤维体积掺量为 2% (Polyvinyl Alcohol, PVA)。PVA 产至上海臣启化工科技有限公司,PVA 体性能见表 1,外观如图 2 所示。UHTCC 配合比见表 3。试验工况见表 4。

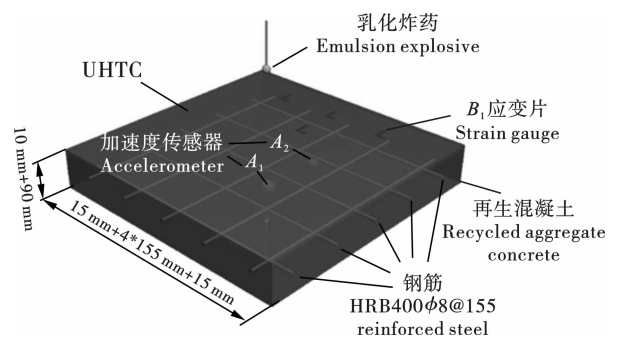


图 1 UHTCC-R-RAC 叠合板构造图

Fig. 1 Diagram of UHTCC-R-RAC composite slab

1.2 试验及测试方案

接触爆炸试验在武汉科技大学校内中铁广州工

程局-武科大爆破技术研究中心的空气爆炸罐中进行进行,试验装置见图 3。将试件运送于爆炸罐中筒支悬空固定在钢架上,炸药采用乳化炸药,将炸药通过罐顶支架悬吊于混凝土板迎爆面几何中心处,采用毫秒一段导爆管雷管进行引爆,爆炸方式为接触爆炸,炸药药量均为 200 g 乳化炸药。此外,如图 1

所示板背爆面的几何中心 A_1 处与距离 A_1 测点 163 mm 的 A_2 处安装 2 个加速度计,用于测量试件的加速度;在迎爆面距离几何中心 230 mm 的 B_1 处粘贴 1 组型号为 BMB120-20AA 的混凝土应变片用于测量爆炸过程中的动态应变。试件起爆前用 PVC 管和棉被对加速度计、应变片的传输线进行防护。

表 1 各材料性能参数

Table 1 Performance parameters of various materials

材料 materials	密度 density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 modulus of elasticity/MPa	泊松比 Poisson's ratio	屈服强度 Yield strength/MPa
PVA	1.30×10^3	4.0×10^4	-	1.60×10^3
钢筋 Reinforced steel	7.86×10^3	2.0×10^5	0.3	4.0×10^2

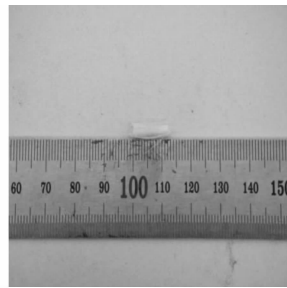
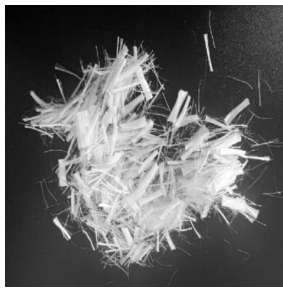


图 2 聚乙烯醇纤维
Fig. 2 PVA-fiber

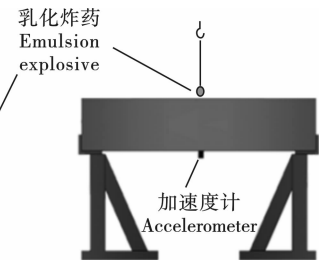
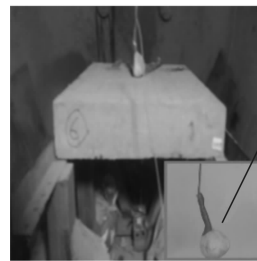


图 3 试验装置
Fig. 3 Test setup

表 2 再生粗骨料混凝土配合比

Table 2 Mix proportion of recycled coarse aggregate concrete

取代率 Replacement rate/%	水泥 Cement/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	砂 Sand/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	天然粗骨料 Natural coarse aggregate/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	再生粗骨料 Recycled coarse aggregate/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水 Water/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗压强度 Compressive strength/MPa
25	4.36×10^2	5.64×10^2	8.36×10^2	2.79×10^2	2.05×10^2	42.4
75	4.36×10^2	5.64×10^2	2.79×10^2	8.36×10^2	2.05×10^2	37.6

表 3 UHTCC 配合比

Table 3 UHTCC mix ratio

名称 Name	水泥 Cement	砂 Sand	粉煤灰 Fly ash	微硅粉 Silica fume	水 Water	减水剂 Water-reducing admixture	PVA 掺量 PVA dosage
配比 Mix ratio	1.0	0.40	2.50	9.30×10^{-2}	1.12	0.11	2%

表 4 试验工况

Table 4 Experimental group design

试件标号 Test piece number	UHTCC 层 UHTCC layer thickness/mm	再生粗骨料取代率 Recycled coarse aggregate replacement rate/%
RC-25	0	25
RC-75	0	75
URC-25	10	25

1.3 应变、加速度结果分析

为了测量爆炸荷载作用下混凝土板的变形情况,在试件背爆面 B_1 处粘贴了电阻应变片。为消除

环境温度影响,应变片采用抗干扰半桥接法连接。在乳化炸药爆炸荷载作用下,从起爆时刻开始,应变约在 200 ms 后达到峰值,随后迅速下降并逐步趋于

稳定。

表5展示了试件的动态响应峰值的绝对值。三

块板在 B_1 、 A_1 测点所采集到的应变与加速度时程曲线详见图4。

表5 试件的应变峰值和加速度峰值

Table 5 Maximum strain and acceleration observations of the specimen

试件标号 Test piece number	破坏形态(直径×深度) Damage pattern(diameter×depth)/mm	应变峰值 Peak Strain/ $\mu\epsilon$	加速度峰值 Peak acceleration/g	
			A_1	A_2
RC-0-25	95×12	2.66×10^4	5.38×10^2	5.28×10^2
RC-0-75	130×20	2.35×10^4	5.75×10^2	5.67×10^2
URC-10-25	75×10	4.39×10^4	4.94×10^2	4.65×10^2

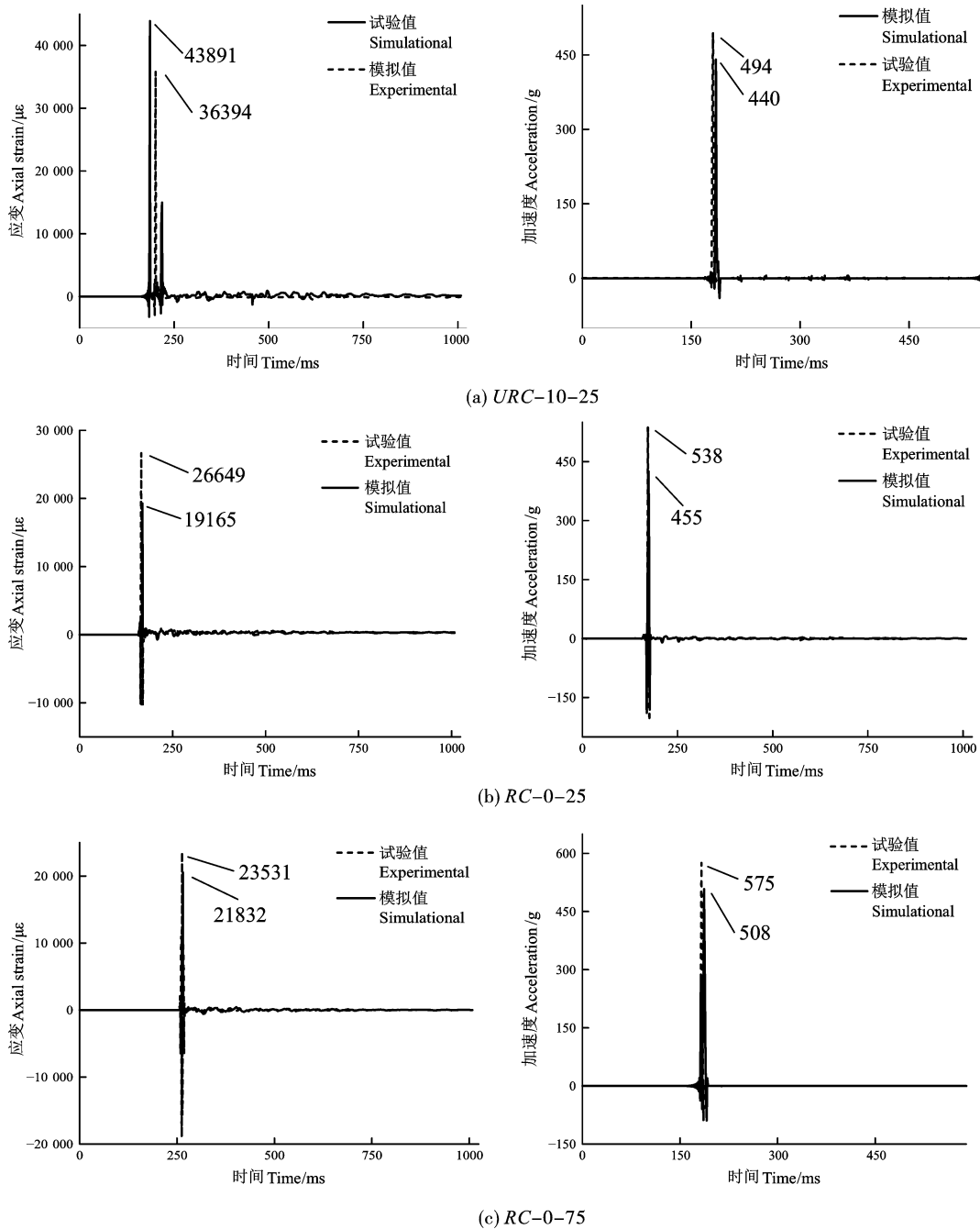


图4 B_1 与 A_1 测点的应变与加速度测量曲线和数值模拟曲线

Fig. 4 Strain and acceleration measurement curves and numerical simulation curves of B_1 and A_1

通过表 5 中 B_1 测点应变峰值数据表明,在同为 25% 再生粗骨料取代率的前提下,与表面没有涂覆 UHTCC 材料的试件相比,在迎爆面涂覆有 10 mm 厚 UHTCC 材料的试件 B_1 测点的峰值应变值增加了 64.7%,这说明添加了 PVA 纤维的 UHTCC 材料的加入,能够有效的改善 R-RAC 板在爆炸荷载下的动态性能,由于迎爆面涂覆有 UHTCC,使结构具有一定的韧性,在受到爆炸荷载冲击时,应力波能量先被加入的聚乙烯醇纤维所分散,削弱了由入射面传播至背爆面的反射拉伸效应,使整体结构体现出更强的抗裂抗爆性;在试件迎爆面没有涂覆 UHTCC 层时,再生粗骨料取代率 75% 的试件 B_1 测点相比于再生粗骨料取代率 25% 的试件应变降低了 11.7%。这说明再生粗骨料取代率的增加会削弱混凝土的动态性能,但由于增加 10 mm 厚度 UHTCC 层动态性能提升显著,因此再生粗骨料混凝土板在与 UHTCC 材料结合后仍具有较好的动态性能。

从表 5 中 $A_1 \sim A_2$ 测点加速度曲线的最大观测值可以看出,各曲线的加速度峰值随着 UHTCC 层厚度的增加而减小,说明测点的加速度值与 UHTCC 厚度呈负相关,但其并非与 UHTCC 厚度成比例。同时,由于测点 A_1 相较于 A_2 更接近爆源中心,同一试件上测点 A_1 的加速度峰值全都大于 A_2 测点的加速度峰值,说明随着距离的增加,加速度有着不同程度的减小。 A_1 测点的加速度曲线在爆炸开始后的 200 ms 左右还会出现较大幅度的波动,说明离炸药越近的加速度曲线抗干扰能力越弱。在再生粗骨料取代率相同的情况下,与表面没有涂覆 UHTCC 材料的试件相比,在迎爆面涂覆有 10 mm 厚 UHTCC 材料的试件 A_1 测点的峰值加速度降低了 8.26%;在试件迎爆面没有涂覆 UHTCC 层时,再生粗骨料取代率 25% 的试件 A_1 测点相比于再生粗骨料取代率 75% 的试件降低了 6.40%。

1.4 破坏现象分析

炸药在混凝土板上方引爆时,产生的冲击波作用于板的迎爆面,生成高压压缩应力,导致结构发生以承压破坏为特征的局部破坏。部分冲击波能量被反射,其余部分则穿过板厚传播。当该应力波抵达板背面时,压缩波反射形成拉伸波,在背面引发张力反弹,造成混凝土从后表面剥落。试验中,R-RAC 板和 UHTCC-R-RAC 板均遭破坏,前者迎爆面形成直径 9.5 cm 的坑洞,表面可见明显的近似方形周向裂纹。然而,UHTCC-R-RAC 板的裂纹数量明显多于 R-RAC 板,同时裂纹宽度则显著减小。其由爆炸产生的坑洞直径仅有 7.5 cm,相比前者降低了

21%。

上述现象表明,加入 PVA 纤维的 UHTCC 改变了应力波传播过程:首先,应力波通过纤维与混凝土基体间的界面层传递,界面摩擦消耗了大部分能量;其次,部分 PVA 纤维发生拉断。这两个过程共同作用,有效减小了应力波对基体的直接损伤破坏,延缓了结构的拉伸开裂行为,从而增强了复合材料的抗爆性能。

综合应变、加速度结果与破坏现象分析对于 UHTCC-R-RAC 板而言,相比于再生粗骨料取代率,UHTCC 厚度是测点应变、加速度值与破坏大小的关键因素;试件耗能能力主要体现在 UHTCC 材料优异的耗能能力上。

2 UHTCC-R-RAC 在爆炸荷载作用下的数值分析方法

2.1 计算模型

通过 SolidWorks 建立钢筋混凝土板几何模型。混凝土板长和宽均为 650 mm,厚度 100 mm;钢筋直径 8 mm,间距 155 mm;混凝土强度等级 C40。LS-DYNA 求解器适用于爆炸荷载下大变形的结构响应求解。利用 LS-DYNA,采用拉格朗日-欧拉(ALE)方法研究了钢筋混凝土板在接触爆炸荷载作用下的动态响应^[8]。详细几何模型如图 5 所示。有限元模型由空气、UHTCC、混凝土、钢筋 4 部分组成,均采用 8 节点六面体实体单元。爆炸荷载采用流固耦合(FSI)算法实现。空气和炸药通过关键字 *SECTION_SOLID_ALE 定义为 ALE 算法。钢筋网格通过使用 HyperMesh 中的 Hughes-Liu 二维梁单元进行建模以使模型符合具有应变率效应的各向同性和运动硬化塑性。钢筋混凝土板通过关键字 *SECTION_SOLID 定义为拉格朗日算法。通过关键字 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID,将试件与空气耦合。由于爆炸荷载压力大,通过命令 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 实现钢筋与混凝土之间不滑动。采用欧拉-拉格朗日界面相互作用来求解叠合板与空气和 TNT 之间的相互作用。通过 *BOUNDARY_NON_REFLECTING 命令将欧拉网格的边界条件设置为流出边界。通过设置支撑体固定叠合板模型 x 、 y 、 z 的位移。使用关键字 *MAT_ADD_EROSION 命令模拟混凝土和 UHTCC 破碎、剥脱等损伤过程。根据 Ranade 等的建议^[9],UHTCC 材料在受到拉伸作用时的最大破坏应变设置为 0.04,压缩破坏时最大静水压力设置为 400 MPa。除上述外,本次数值模拟的所有输入数据如表 6 所示。

Li 等对于用于爆炸模拟的有限元模型单元网格尺寸在 3 mm 和 10 mm 之间可以得到较为可靠的结果^[10]。因此,为了同时保证计算效率和可信结果,

本次数值模拟使用整体 10 mm 网格尺寸和将爆炸中心 150 mm × 150 mm 的局部细化 5 mm 网格尺寸模型。网格模型如图 6、图 7 所示。

表 6 数值模拟输入值

Table 6 Input of numerical simulations

(a) 本构模型输入 (a) Constitutive model input									
a_0	a_1	a_2	a_{0y}	a_{1y}	a_{2y}	a_{0f}	a_{1f}	a_{2f}	
17.10	0.54	1.70×10^{-3}	12.38	0.73	6.40×10^{-3}	0	0.54	1.70×10^{-3}	
b_1	b_2	b_3	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7
2.40	-11.30	3.0×10^{-2}	0	8.0×10^{-6}	2.40×10^{-5}	4.0×10^{-5}	5.60×10^{-5}	7.20×10^{-5}	8.80×10^{-5}
λ_8	λ_9	λ_{10}	λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}	η_1	η_2	η_3	η_4
3.2×10^{-4}	3.2×10^{-4}	5.7×10^{-4}	1.0	100	1×10^{10}	0.0	0.85	0.97	0.99
η_5	η_6	η_7	η_8	η_9	η_{10}	η_{11}	η_{12}	η_{13}	
1.0	0.99	0.97	0.50	0.10	0.0	0.0	0.0	0.0	
(b) 状态方程(EOS)输入 (b) Equation of State(EOS) input									
μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ_6	μ_7	μ_8	μ_9	μ_{10}
0	1.50×10^{-3}	8.43×10^{-3}	0.01	3.10×10^{-2}	5.13×10^{-2}	7.26×10^{-2}	9.43×10^{-2}	1.74	2.08
Kav_1	Kav_2	Kav_3	Kav_4	Kav_5	Kav_6	Kav_7	Kav_8	Kav_9	Kav_{10}
Kv	Kv	$1.01Kv$	$1.07Kv$	$1.27Kv$	$1.47Kv$	$1.67Kv$	$1.83Kv$	$4.11Kv$	$5.0Kv$
P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
0	$Kv \times \mu_2$	$2.18 P_2$	$3.50 P_2$	$6.65 P_2$	$10.03 P_2$	$14.23 P_2$	$21.77 P_2$	$127.1 P_2$	P_2

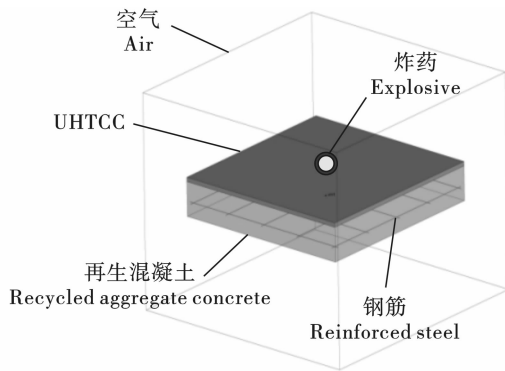


图 5 几何模型

Fig. 5 Geometric model

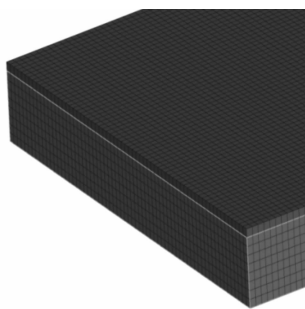


图 6 10 mm 网格模型

Fig. 6 10 mm Mesh model

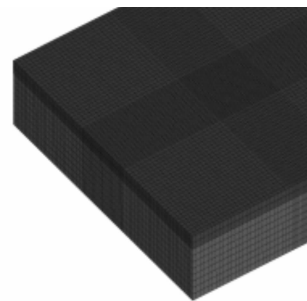


图 7 局部细化模型

Fig. 7 Local refinement model

2.2 材料模型

2.2.1 RAC

RAC 在爆炸、冲击等高应变率动态荷载的作用下产生的变形机制较为复杂,而 RAC 的动态材料模型暂不成熟,根据 Zhang 等的建议^[11],K&C 模型在描述混凝土复杂变形行为和预测混凝土试件在爆炸荷载下的动态响应方面精度更高。因此,采用 K&C 模型作为 RAC 的动态材料描述模型。K&C 模型是 LS-DYNA 材料库中的 MAT72R3 模型,在 K 文件中定义关键字 * MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3。其优点在于仅需输入材料密度(RO)、静态单轴抗压强度(Fc)等基本材料性能参数即可自动

生成其他相关材料参数。表 7 列出了 K&C 模型中 所需的 RAC 材料性能参数。

表 7 RAC 参数

Table 7 Recycled aggregate concrete parameters

$RO/(kg \cdot m^{-3})$	A	B	C	N	F_c/MPa
2.42×10^3	0.27	1.86	6.0×10^{-3}	0.84	39.3

注:RO 为密度;A、B、C、N 为材料强度参数;F_c 为静态单轴抗压强度

2.2.2 钢筋

由于钢筋的动态屈服强度、瞬时应力等材料性能随着应变速率的增加而增加的特性,采用 LS-DY-NATM 中的 P-K 模型(* MAT_PLASTIC_KINEMAT-IC)来描述钢筋的动态特性^[12]。采用 Cowper-Symonds 模型计算不同应变速率下钢的屈服强度,钢材的动态因子(Dynamic Increase Factor, DIF)关系表达式为

$$DIF_s = 1 + \left(\frac{I_{\mu_s}}{C} \right)^{1/P} \quad (1)$$

式中: I_{μ_s} 为应变速率;C、P 为对应应变速率参数^[13]。表 8 列出了使用 PLASTIC_KINEMATIC 模型的钢筋材料参数。

表 8 钢筋材料参数

Table 8 Reinforcement material parameters

材料 material	$RO/(kg \cdot m^{-3})$	E/GPa	PR	FY/MPa	G/GPa	β	C	P	FS
钢筋 Reinforced steel	7.86×10^3	2.0×10^2	0.3	4.0×10^2	2.0	0	40	5	0.16

注:RO 为密度;E、G 分别为弹性模量和剪切模量;PR 为泊松比;FY 为材料屈服强度;C 和 P 为考虑应变速率效应的 Cowper-Symonds 模型参数;FS 为材料失效时最大塑性应变。

表 9 空气材料参数

Table 9 Air material parameters

初始密度 Initial density $\rho_0/$ ($kg \cdot m^{-3}$)	截断压力 Cut off pressure	动态粘滞度 Dynamic viscosity	$C_0 \sim C_3$	C_4	C_5	C_6	初始能量 Initial energy $E_0/$ ($J \cdot mm^{-3}$)
1.29	0	0	0	0.40	0.40	0	0.25

2.2.4 炸药

由于本次试验使用的炸药类型为 2 号岩石乳化炸药,以 0.75 为折算系数^[14],转换为对应的 TNT 当量。在建立炸药数值模型时,通过设置 * INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY 的关键字来改变爆源处空气部分的材料属性并定义为 TNT 炸药的方法以取代直接建立球形炸药。通过 LS-DYNA 库中的状态方程 * EOS_JWL 和 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型定义 TNT 炸药。JWL 状态方程的 p-V 关系为

$$p = A[1 - \omega/(R_1 V)]e^{-R_1 V} + B[1 - \omega/(R_2 V)]e^{-R_2 V} + \omega E_0/V \quad (3)$$

2.2.3 空气

本次模拟中将空气理想化为无粘连气体以进行简化,压强与比内能有关。通过 LS-DYNA 材料模型关键字 * MAT_NULL 和状态方程 * EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 对其进行描述。

该状态方程表示为

$$P = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2)E \quad (2)$$

式中:P 为爆轰压力;E 为空气内能;当采用线性方程描述空气时, $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0, C_4 = C_5 = \gamma - 1, \mu = \rho/\rho_0 - 1$,其中 γ, ρ_0, ρ 分别为空气的绝热指数、初始密度和气流密度。空气的材料参数如表 9 所示。

式中:p 为爆轰压力;E₀ 为单位体积炸药初始内能;V 为相对体积; ω, A, B, R_1, R_2 均为 TNT 材料性能参数,各项参数取值如表 10 所示^[15]。

2.2.5 UHTCC

本次数值模拟采用 Malvar 开发并改进的混凝土损伤模型 * MAT_072R3_CONCRETE_DAMAGE_REL3 模拟 UHTCC 在爆炸荷载作用下的动态响应^[16]。有必要说明的是该模型最初是针对普通混凝土开发的,为使其适用于本次数值模拟,已根据先前研究中的试验数据对模型中的各项材料性能参数进行了校准。

表 10 炸药材料参数

Table 10 Explosive material parameters

初始密度 Initial density $\rho_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	爆轰速度 Detonating velocity/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	爆轰波阵面压力 Detonation wave front pressure/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	初始能量 Initial energy $E_0/(\text{J} \cdot \text{mm}^{-3})$
1.63×10^3	6.93×10^3	21.0	3.71×10^2	3.20	4.15	0.95	0.30	7.0×10^3

2.3 数值模拟有效性验证

比较了3组试件在不同网格尺寸下的数值模拟结果。在模拟结果中,试件在迎爆面中心处均产生

了大小不一的弹坑,其中以RC-0-75顶面损伤最大、RC-0-25次之、URC-10-25最小,具体弹坑直径和深度详见图8与表11。

表 11 迎爆面弹坑尺寸数值模拟值对比

Table 11 Comparison between numerical simulation values and experimental measurements of crater size on the blast facing surface

试件标号 Test piece number	10 mm 网格 10 mm mesh		5 mm 网格 5 mm mesh		误差 Error	
	直径 Diameter D/mm	深度 Depth L/mm	直径 Diameter D/mm	深度 Depth L/mm	10 mm 网格 10 mm mesh/%	5 mm 网格 5 mm mesh/%
RC-0-75	145.0	24.0	140.0	22.80	15.80	10.80
RC-0-25	92.0	13.4	96.0	11.40	7.40	6.10
URC-10-25	70.0	7.80	73.0	9.40	14.30	4.30

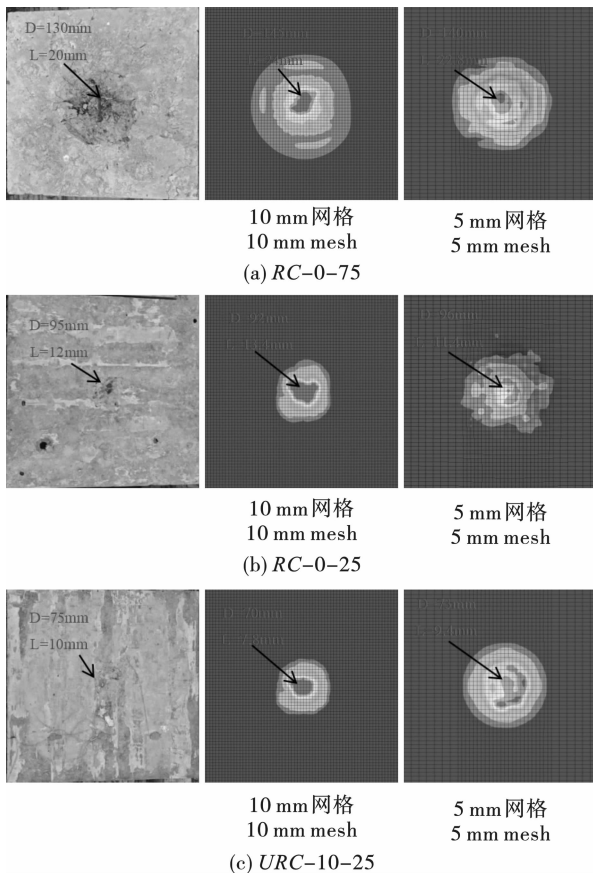


图 8 数值损伤图的比较

Fig. 8 Comparison between experimental and numerical damage diagrams

通过图8和表11中的数据可以得出,除试件

RC-0-25外,在局部5 mm网格加密条件下的数值模拟结果相比于整体10 mm网格的数值模拟结果降低的误差均超过5%;试件URC-10-25降低的误差在10%以上;说明局部网格细化在保持较高的计算效率的同时能有效的提高模拟结果的精度。数值模拟与试验得到的最终损伤高度相似。综合图8中 A_1 、 B_1 测点试验与数值模拟得到的应变与加速度峰值大小十分接近,峰值出现时间与时程曲线走势基本一致。说明本文中采用的数值模拟方法较为可靠。

3 参数分析

通过板的宏观破坏对比分析,验证了数值模拟方法的有效性和可靠性。在此基础上,以爆炸弹坑的大小为依据,通过有限元数值模拟的方法继续分析再生骨料取代率、UHTCC厚度参数对接触爆炸作用下钢筋再生混凝土板破坏程度的影响。

3.1 再生粗骨料取代率

建立了再生粗骨料取代率25%、50%、75%三种工况下的数值模型,研究再生骨料取代率对爆破漏斗尺寸的影响。由于缺乏成熟的RAC材料模型,通过改变混凝土抗压强度以反映本研究中再生骨料取代率的变化。对应RAC的抗压强度实测值分别为42.4 MPa、39.3 MPa、37.6 MPa。图9中的曲线表明,随着再生骨料取代率的增加,爆炸坑的深度也随之增加。随着再生骨料取代率的增加,深度分别

增加 5.4 mm、6 mm;结果表明:在相同的爆炸荷载下,再生骨料取代率越高,再生骨料混凝土的抗压强

度越低,这使得混凝土更容易变形,从而产生的破损更大。

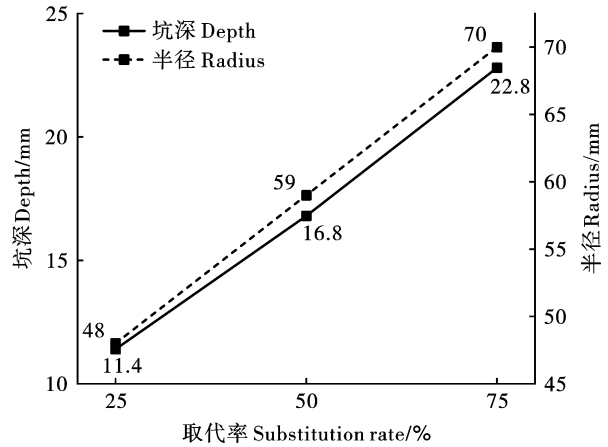
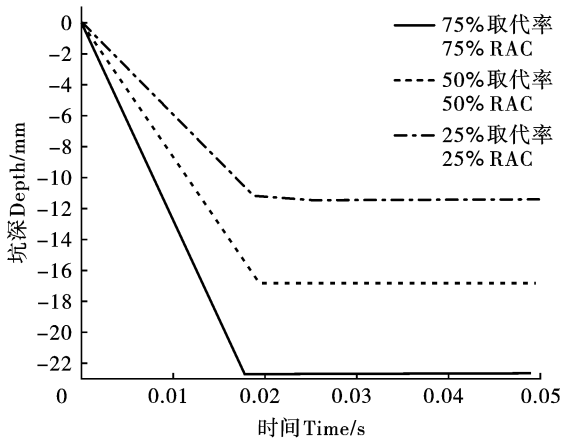


图 9 再生粗骨料取代率对爆炸弹坑尺寸的影响

Fig. 9 The influence of the replacement rate of recycled coarse aggregate on the size of explosion craters

3.2 UHTCC 层厚度

采用 Malvar 开发的混凝土损伤模型 * MAT_072R3_CONCRETE_DAMAGE_REL3 模拟 UHTCC 在爆炸荷载作用下的动态响应^[16]。建立了厚度为 0、10 mm、20 mm 共 3 种工况下的 UHTCC 层数值模型,不同 UHTCC 层下钢筋混凝土板爆炸坑深度和直径见图 10。由图 10 中的曲线可知,铺设了 UHTCC 材料试件的最大弹坑深度出现时间点比未铺设的试件晚;UHTCC 材料厚度越厚,最大弹坑深度出现时间点越晚,这得益于其材料本身良好的塑性,可以改善再生混凝土在爆炸荷载的冲击下的脆性破坏。随

着 UHTCC 层厚度的增加,爆炸坑的深度分别减小了 2 mm、3 mm;爆炸坑的直径分别减小了 11.5 mm、15 mm,爆炸坑大小随 UHTCC 层厚度的变化而变化,说明材料具有良好的吸能性。当 UHTCC 层厚度为 0 mm 时,试件爆炸弹坑尺寸较大,受损情况显著;当 UHTCC 层厚度为 10 mm 和 20 mm 时,爆炸坑尺寸明显减小,但两者之间的爆炸坑尺寸变化不明显。结果表明:在近场爆炸荷载作用下,在试件迎爆面涂覆 UHTCC 层能显著提高再生混凝土板的抗爆性能,但 UHTCC 层厚度过大提高效果会削弱。

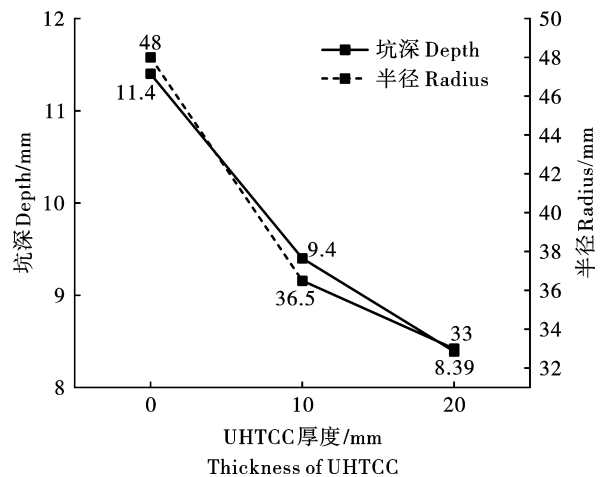
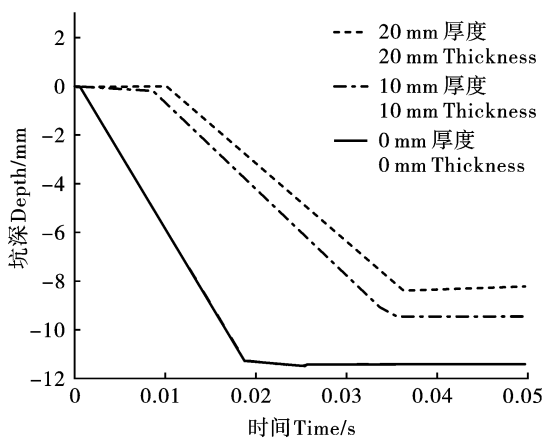


图 10 UHTCC 厚度对爆炸弹坑尺寸的影响

Fig. 10 The influence of UHTCC thickness on the size of explosion craters

4 结论

本文利用现场试验与 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件显示动力学模块的方法研究了在近场爆炸荷载

下 UHTCC-R-RAC 叠合板的抗爆性能,得到以下结论:

(1) 现场试验结果表明,当试件再生粗骨料取代率从 25% 增至 75% 时,未涂覆 UHTCC 的试件 B₁

测点峰值应变降低 11.7%, A_1 测点加速度峰值仅减少 6.4%, 表明取代率升高会降低抗变形能力, 但对加速度影响较小。涂覆有 10 mm 厚 UHTCC 材料的试件 B_1 测点的峰值应变值增加了 64.7% 且其弹坑直径与深度均下降 20% 左右, 这说明 UHTCC 材料的加入, 能够显著改善再生混凝土板在爆炸荷载下的动态性能并且有效降低再生混凝土板在爆炸荷载下产生的损伤。再生粗骨料取代率的影响弱于是否涂覆 UHTCC 层, 原因为 UHTCC 的高耗能特性可抵消高取代率的负面影响, 在工程应用中, 建议优先调整 UHTCC 厚度可有效调控动态响应, 以支持高取代率再生混凝土在结构抗爆领域的应用。

(2) 基于数值模拟结果可以发现, 对于钢筋再生混凝土板中心发生接触爆炸的工况下, 使用局部细化的 5 mm 网格进行数值模拟相较于整体 10 mm 网格与试验测量值之间的误差成倍降低, 试件中心网格局部细化后能够在保证计算速度较高的条件下有更高的精度, 提高了整体计算效率。同时, 本文中用于定义 UHTCC 材料的 * MAT_072R3_CONCRETE_DAMAGE_REL3 关键字在用于爆炸荷载作用下材料的数值模拟中较好地体现了材料本身良好的塑性、吸能性等物理特性, 说明本文用于描述 UHTCC 的混凝土损伤模型 (MAT72 R3) 和所采用的数值模拟方法是有效可靠的。

(3) 在原数值模型基础上继续分析了多种工况下 UHTCC-R-RAC 叠合板的破坏情况。结果表明: 在相同的爆炸荷载下, 再生骨料取代率越高, 再生骨料混凝土的抗压强度越低, 这使得混凝土更容易变形, 从而产生的破损更大。在近场爆炸荷载作用下, 在试件迎爆面设置 UHTCC 层能显著提高再生混凝土板的抗爆性能, 但因此造成的提升是收敛的, UHTCC 层厚度过大提高效果会削弱。

参考文献 (References)

- [1] 马 阳. 钻地弹对典型地下指挥中心的毁伤效应研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2022.
- [1] MA Yang. Destructive effects study of borehole bombs on the typical underground command center [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2022. (in Chinese)
- [2] 何 勇, 徐天涵, 张效晗, 等. 钻地弹侵彻深度尺寸效应分析与实用计算公式 [J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(4): 93-110.
- [2] HE Yong, XU Tian-han, ZHANG Xiao-han, et al. Analysis of the size effect on the penetration depth of earth-penetrating projectiles and practical calculating formula [J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(4): 93-110. (in Chinese)
- [3] 银 星, 李庆华. 基于机器学习的超高韧性水泥基复合材料板在近场爆炸荷载作用下的损伤预测 [J]. 工程力学, 2025: 1-14. [2025-09-30]. <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2024.10.0791>.
- [3] YIN Xing, LI Qing-hua. Machine learning based damage prediction of ultra-high toughness cementitious composite panels under near range explosion [J]. Engineering Mechanics, 2025: 1-14. [2025-09-30]. <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2024.10.0791>. (in Chinese)
- [4] 徐世焯, 李 锐, 李庆华, 等. 超高韧性水泥基复合材料功能梯度板接触爆炸数值模拟 [J]. 工程力学, 2020, 37(8): 123-133, 178.
- [4] XU Shi-lang, LI Rui, LI Qing-hua, et al. Numerical simulation of functionally graded slabs of ultra-high toughness cementitious composites under contact explosion [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(8): 123-133, 178. (in Chinese)
- [5] 吴 平, 徐世焯, 李庆华, 等. 内埋炸药下超高韧性水泥基复合材料的抗爆性能 [J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(7): 137-150.
- [5] WU Ping, XU Shi-lang, LI Qing-hua, et al. Anti-explosion tests and numerical simulations of ultra-high toughness cementitious composites subjected to blast by embedded explosives [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(7): 137-150. (in Chinese)
- [6] 吴 平, 周 飞, 李庆华, 等. 超高韧性水泥基复合材料—纤维混凝土组合靶体抗两次打击试验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(3): 53-65.
- [6] WU Ping, ZHOU Fei, LI Qing-hua, et al. Experimental study on the resistance of the ultra high toughness cementitious composites material-fiber concrete composite targets subjected to twice projectiles impact [J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(3): 53-65. (in Chinese)
- [7] XU Shi-lang, ZHOU Fei, LI Qing-hua, et al. Comparative study on performance of UHTCC and RPC thick panels under hard projectile impact loading [J]. Cement and Concrete Composites, 2021, Volume 122: 104134.
- [8] WU Ke-chiang, LI Bing, TSAI KC. The effects of explosive mass ratio on residual compressive capacity of contact blast damaged composite columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(4): 602-612.
- [9] RAVI Ranade, VICTOR C Li. Tensile rate effects in high strength-high ductility concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2014, 68: 235-242.