

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0178

# 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\*

吴 平, 周 飞, 李庆华, 徐世焱, 陈柏锬  
(浙江大学高性能结构研究所, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 超高韧性水泥基复合材料 (ultra high toughness cementitious composites, UHTCC) 具有超高的韧性、良好的耐久性和优异的耗能效果, 这些特性使得 UHTCC 在防护工程中具有广阔的应用前景。为了更好地研究 UHTCC 与纤维混凝土组合结构在二次打击条件下的抗侵彻性能, 首先测量了 UHTCC 和聚乙烯醇纤维增强混凝土 (polyvinyl alcohol fiber reinforced concrete, FRC) 的基本力学参数。然后采用 25 mm 口径的弹道滑膛炮对直径为 750 mm、高为 600 mm 的圆柱形 UHTCC 靶体、FRC 靶体、UHTCC-FRC 组合靶体 (UHTCC-FRC composite target) 进行了弹体速度为 550 m/s 的二次侵彻试验, 得到了弹体和三类靶体的破坏数据, 包括弹体的侵彻深度、弹体的磨蚀、靶体迎弹面的开坑直径和面积、弹坑深度、迎弹面的裂纹数量以及裂纹最大宽度。在此基础上分析了骨料、结构形式和两次打击的间距对 UHTCC-FRC 组合靶体抗侵彻性能的影响。结果表明: 相同试验条件下, 与普通混凝土和超高性能混凝土相比, UHTCC 能够有效的减小迎弹面的开坑直径, 但会增加弹体侵彻深度; 将 50 mm 的 UHTCC 置于组合靶的迎弹面可以有效地减少迎弹面的开坑直径; 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。

**关键词:** 超高韧性水泥基复合材料; 聚乙烯醇纤维增强混凝土; UHTCC 与 FRC 组合靶体; 二次侵彻试验; 开坑面积  
中图分类号: O383 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

## Experimental study on the resistance of the ultra high toughness cementitious composites material-fiber concrete composite targets subjected to twice projectiles impact

WU Ping, ZHOU Fei, LI Qinghua, XU Shilang, CHEN Bokun

(Institute of Advanced Engineering Structures, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

**Abstract:** Ultra high toughness cementitious composites (UHTCC) have ultra-high toughness, good durability and excellent energy consumption effect. These characteristics make UHTCC have broad applications in protection engineering. To better investigate the penetration resistance of UHTCC composite structure subjected to second strike conditions, the basic mechanical parameters of the UHTCC and polyvinyl alcohol fiber reinforced concrete (FRC) were measured first. Then, a 25 mm caliber ballistic smoothbore gun was used against a cylindrical UHTCC, FRC and UHTCC-FRC composite targets with a diameter of 750 mm and a height of 600 mm. The targets were subjected to two-time penetration tests of 550 m/s. The damage data of the projectile and the three types of targets were obtained, including the penetration depth of the projectile, the abrasion of the projectile, the crater diameter and area of the target's strike surface, the crater depth, the number of cracks and the maximum crack width on the strike surface. On this basis, the influence of aggregate, structure type and distance between two strikes on the penetration resistance of UHTCC composite targets was analyzed. The results show that under the same test

\* 收稿日期: 2021-05-08; 修回日期: 2021-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(51678522, 51622811)

第一作者: 吴 平(1993—), 男, 博士研究生, 21712038@zju.edu.cn

通信作者: 李庆华(1981—), 女, 博士, 教授, liqinghua@zju.edu.cn

conditions, compared with the normal concrete and ultra-high performance concrete, the UHTCC can effectively reduce the crater diameter of the strike surface, but the penetration depth of the projectile increases; the 50mm UHTCC placing on the front surface of the functionally graded target can effectively reduce the cratering diameter of the strike surface; the secondary penetration depth of the projectile is greater than the primary penetration depth of the projectile, and the crater area of the target under the secondary impact is smaller than the crater area of the target under the first impact.

**Keywords:** ultra high toughness cementitious composites; polyvinl alcohol fiber reinforced concrete; UHTCC FRC composite targets; second penetration test; crater area

近年来,随着恐怖袭击事件的频繁发生,一些重要的基础设施,特别是需要重点保护的结构以及防御体,可能会在它们服役期间遭受到严重的冲击荷载。这些冲击荷载小到弹体的侵彻,大到飞机的撞击,无不威胁着现有结构的安全。因此,研发出优异的抗冲击材料和结构类型就成为近些年来的研究热点。钢筋混凝土结构是过去几十年应用最为广泛的工程结构类型,通常都是依靠建得“足够厚”来抵抗一些极端的冲击荷载。然而由于这种材料具有脆性大和抗拉强度低等缺点,在冲击荷载下会发生严重的脆性破坏,对结构内部的人员和设施构成了严重的威胁<sup>[1-3]</sup>。近年来发展的高韧性纤维混凝土材料<sup>[4]</sup>,有工程水泥基复合材料(engineering cementitious composite, ECC)<sup>[5-6]</sup>、应变硬化水泥基复合材料(wtrain cardening cementitious composite, SHCC)<sup>[7]</sup>、聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料(polyvinl alcohol fiber reinforced cementitious composites, PVA-FRCC)<sup>[8]</sup>或 UHTCC(ultra-high toughness cementitious composites)<sup>[9]</sup>等,具有优异的拉伸应变硬化能力、能量吸收和裂缝控制能力,将其作为防护材料可以显著减少由于拉伸和压缩应力波引起的碎片飞溅和崩落<sup>[10-11]</sup>。

目前关于 UHTCC 的抗冲击特性研究主要集中于小尺寸、低弹速的弹体单次冲击 UHTCC 靶体或者是通过落锤和霍普金森杆试验来实现对 UHTCC 板的耗能测试。Maalej 等<sup>[12]</sup>对 1.5% 聚乙烯纤维和 0.5% 钢纤维混杂增强的 UHTCC 板进行了弹体速度在 300~700 m/s 的侵彻试验研究,发现混杂纤维可以改善 UHTCC 遮弹板的抗冲击和能量吸收能力,同时减少了遮弹板的迎弹面开坑面积、背弹面的剥落、靶体的碎裂和损伤区域。赵昕<sup>[13]</sup>利用霍普金森杆对 UHTCC 进行了冲击压缩试验,发现 UHTCC 材料的耗能要远优于钢纤维混凝土。另外,Zhang 等<sup>[14]</sup>通过对 UHTCC 板、钢纤维混凝土板和钢筋混凝土板进行落锤实验,发现相较于钢纤维混凝土板和钢筋混凝土板,UHTCC 板具有损伤小、整体性好、吸能效果好的特点,并且能够建成更加轻薄的防护结构。上述这些研究都表明 UHTCC 材料相较于传统钢筋混凝土拥有更加优异的抗冲击能力。抗侵彻实验研究<sup>[15]</sup>表明,尽管 UHTCC 材料在侵彻过程中相较于普通混凝土具有碎片飞溅少、崩落少、能量吸收能力更高的特点,并且靶体不会出现明显的整体破坏,但是其相较于普通混凝土,抗侵彻深度能力没有明显的提高,因此 Quek 等<sup>[16]</sup>在纤维增强水泥基材料抗冲击特性的基础上开发了一种组合板并对其进行了抗冲击试验,试验结果显示,与普通砂浆靶体相比,UHTCC 组合靶具有更好的抗冲击性能。

此外,重要基础设施也可能会遭受到多次冲击的威胁,因此一些学者也对混凝土类结构在多次冲击荷载下的损伤规律进行了研究<sup>[17-24]</sup>。Gomez 等<sup>[25]</sup>基于 Forrestal 等<sup>[26-27]</sup>单次侵彻模型和试验数据提出了多次冲击下弹体侵彻深度的预测模型,并且利用该模型预测了小尺寸弹体多次侵彻半无限混凝土靶体的侵彻深度。赖建中等<sup>[28]</sup>在 Gomez 等<sup>[25]</sup>研究的基础上,修正了与靶体抗压强度有关的多次侵彻计算经验公式。李金城<sup>[29]</sup>进行了两发弹体以不同轴距侵彻混凝土的试验,发现二次侵彻的弹孔偏转方向受两次侵彻弹体的着靶点间距影响。另外,研究发现纤维增强混凝土可以很好地抵抗弹体第二次打击<sup>[30]</sup>。向混凝土中加入钢纤维和玄武岩纤维,超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)对多次打击的抵抗力会显著提高<sup>[31]</sup>。同样采用钢纤维和聚乙烯醇纤维制成的 UHTCC 靶在两次冲击荷载作用下仍然可以保持完整性<sup>[32-33]</sup>。王会芳<sup>[34]</sup>利用 UHTCC 制备出了双层功能梯度靶体,对其进行了多次重复侵彻试验,发现功能梯度靶体在抗侵彻深度方面较 C50 混凝土靶体具有明显的优势。然而,目前关于 UHTCC 材料和组合结构在抗多次冲击荷载下的研究仍然非常有限,因此,研究 UHTCC 材料和 UHTCC 组合靶体在二次打击荷载作用下的破坏规律就显得尤为重要。

本文首先对 UHTCC 靶体、聚乙烯醇纤维增强混凝土 (polyvinyl alcohol fiber reinforced concrete, 简记为 FRC) 靶体和 UHTCC-FRC 组合靶体进行二次打击试验, 获取不同靶体的破坏数据; 然后通过对比普通混凝土、超高性能混凝土, 总结 UHTCC 的抗侵彻性能; 最后, 系统地分析骨料、结构形式和两次打击的间距对 UHTCC 组合靶体抗侵彻性能的影响, 以期为 UHTCC 类材料在抗侵彻结构设计方面提供依据。

## 1 试验方案

### 1.1 侵彻试验方法

图 1 为侵彻试验的现场布置示意图, 子弹冲击圆柱形 UHTCC 组合靶体, 靶体采用周向钢圈约束。发射装置为 25 mm 滑膛炮, 炮口距离靶体 3 m。着靶速度由铝箔靶与电子计时仪测出。靶体安放在支架上, 调整木楔让靶体表面与炮口轴线垂直。弹体始终以 560 m/s 的速度垂直入射靶体。

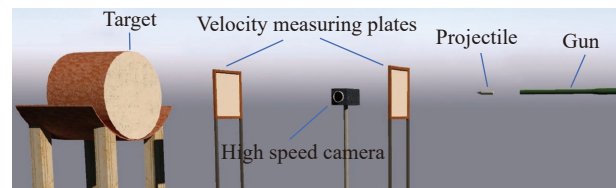


图 1 试验布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test layout

### 1.2 靶体

实验所用原料为: 预先配置好的胶凝材料、减水率大于 40% 的聚羧酸高效减水剂、细度模数为 2.5 的普通砂、粒径为 30 mm-50 mm 的玄武岩 (basalt aggregates, BA) 和刚玉 (corundum aggregates, CA) 骨料、长度为 12 mm、直径为 0.039 mm 的 PVA 纤维、普通自来水。用以上原料按表 1 配合比配制 UHTCC、聚乙烯醇纤维增强玄武岩骨料混凝土 (FRC-BA) 和聚乙烯醇纤维增强刚玉骨料混凝土 (FRC-CA)。

表 1 UHTCC 和 FRC 各组分的质量浓度 (kg/m<sup>3</sup>)

Table 1 Mass concentrations of components (kg/m<sup>3</sup>) in UHTCC and FRC

材料	胶凝材料	砂子	减水剂	玄武岩骨料	刚玉骨料	水	PVA
UHTCC	1 405	281	2	0	0	390	26
FRC-BA	1 405	281	2	1 056	0	390	14.3
FRC-CA	1 405	281	2	0	1 103	390	14.3

UHTCC 浇筑采用强制式卧轴搅拌机搅拌, 先将混合好的胶凝材料 (水泥、粉煤灰、精细砂与减水剂) 干拌 2 min, 随后加入水搅拌 2 min, 然后把 PVA 纤维均匀加入继续搅拌 5 min。聚乙烯醇纤维增强混凝土 (FRC-BA 和 FRC-CA) 用 JZC-150 式搅拌机搅拌, 先将混合好的胶凝材料、粗骨料与水加入并搅拌 5 min, 之后均匀撒入 PVA 搅拌 3 min。以上各组材料按表 1 配合比进行搅拌。复合靶浇筑时, 待已浇筑好的材料层初凝后 (6 h), 再在其上浇筑下一层, 浇筑时先将表面用清水湿润。浇筑好的靶体, 并浇水养护 14 d, 之后在室温下养护至 28 d 龄期。同时浇筑抗压、抗拉试件若干组。

考虑到当靶体直径大于 20 倍弹径时, 可以忽略边界效应, 同时弹体在 560 m/s 初速度下不能贯穿靶体。因此将靶体设计为圆柱体, 具体尺寸为  $\varnothing 750 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ , 侧面用 4 mm 厚钢板箍紧。本次试验一共浇筑了 5 个靶体, 具体设置如图 2 所示。1 号为 UHTCC 靶; 2 号为 FRC-BA 靶体, 一侧表面有 50 mm 厚的 UHTCC 层; 3、4、5 号靶为 UHTCC-FRC 组合靶体, 由 50 mm 厚的 UHTCC 层与 150 mm 厚的 FRC 层交替组成, 其中 3、4 号靶为 UHTCC 和 FRC-BA 组成的组合靶体, 5 号靶为 UHTCC 和 FRC-BA 组成的组合靶体。考虑到侵彻深度较小或着弹点间距较大, 对 2 号、5 号靶正面和背面各进行了二次侵彻试验, 3、4 号靶体相同但打击面不同, 迎弹面共有 7 种不同结构。

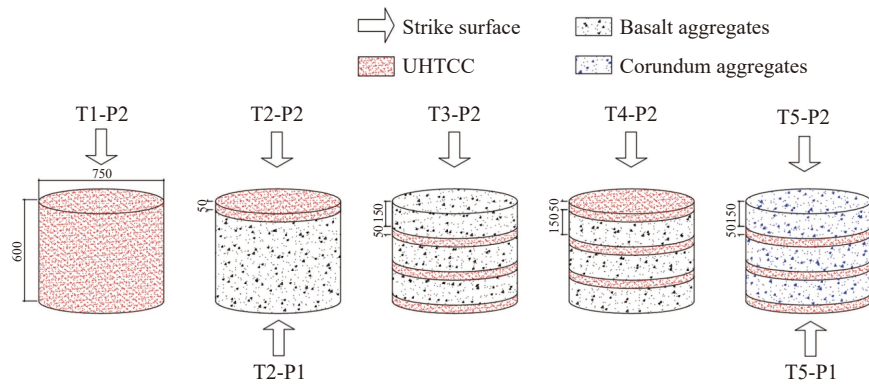


图 2 试验靶体的结构形式

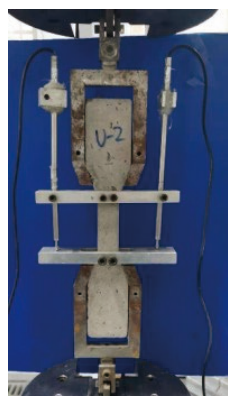
Fig. 2 Structure types of test target

养护 28 天后测得三种材料的抗压强度、抗拉强度和密度如表 2 所示: 其中 UHTCC 的抗压强度试件采用 70.7 mm 的立方体, FRC 的抗压强度试件采用 100 mm 的立方体, 加载速率均为 300 kN/min。UHTCC 的抗拉强度按图 3(a) 所示的装置进行测量, 得到的 UHTCC 拉伸应力应变曲线如图 3(b) 所示, 具体方法按照文献 [35] 中推荐的狗骨头形状以便整个受拉过程保持轴心受拉。FRC 则按照图 4(a) 所示的装置进行测量, 得到 FRC 拉伸应力应变曲线如图 4(b)。两种类型的拉伸加载速率均为 0.2 mm/min。

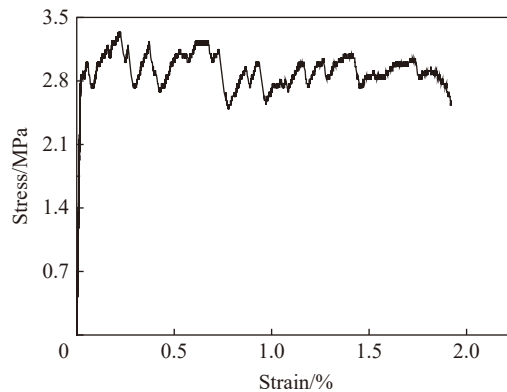
表 2 UHTCC 和 FRC 的力学参数

Table 2 Mechanical parameters of UHTCC and FRC

材料编号	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
UHTCC	30.0	3.5
FRC-BA	41.2	3.1
FRC-CA	42.7	3.0



(a) Uniaxial tensile test system



(b) Uniaxial tensile stress-strain curve

图 3 UHTCC 直接拉伸测试

Fig. 3 UHTCC uniaxial tensile test

### 1.3 弹体

尖卵形弹体材质为 30GrMnSiNi2A 低合金超高强度钢, 淬火后抗拉屈服强度可达 1 650 MPa, 由 25 mm 滑膛炮发射, 并以 580 m/s 的弹速出膛, 弹体外形与尺寸如图 5 所示。弹体直径 25 mm, 头部曲径比(CRH)为 3, 长径比为 6, 壁厚与弹径之比为 0.14, 底托为尼龙材质, 弹体内部填入惰性材料调整弹体质量, 平均发射质量为 352.9 g。

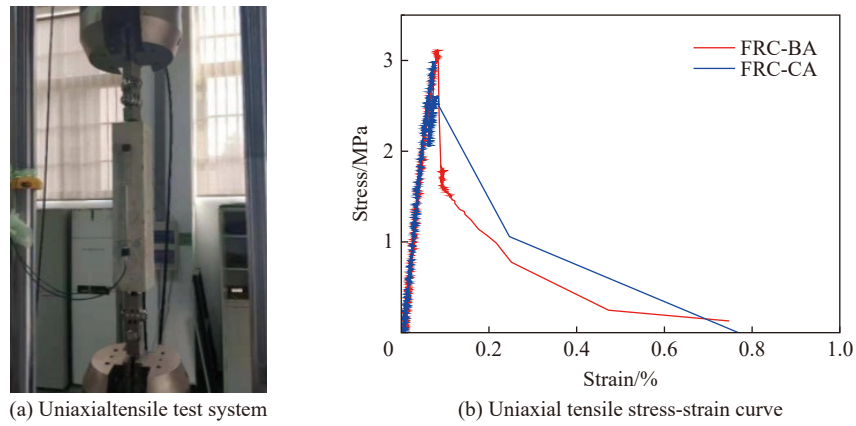


图 4 FRC 直接拉伸测试

Fig. 4 FRC uniaxial tensile test

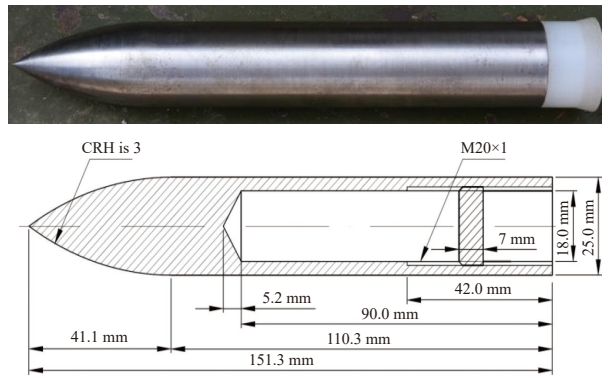


图 5 弹体尺寸

Fig. 5 The size of projectile

## 2 试验结果与 UHTCC 抗侵彻性能

### 2.1 试验结果

采用高速摄影机采集弹体着靶姿态、拍摄弹体飞行、弹体与靶体初始相互作用过程。弹体在撞击到 UHTCC 靶体后, 着弹点附近的 UHTCC 材料在高挤压、剪切和拉伸应力的作用下开始剥落, 并且这些材料介质沿着弹体前进的反方向喷出, 形成了较为规则的弹坑。这一现象可以从图 6 中看到。

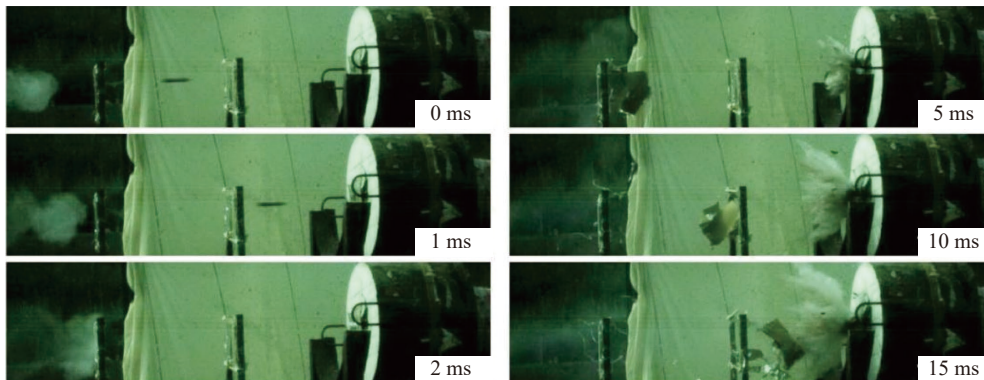


图 6 高速摄影记录弹体撞击靶体过程

Fig. 6 Process of the projectile impacting the target recorded by high-speed photography

每次侵彻后测量了不同 UHTCC、FRC 以及 UHTCC 组合靶体的损伤参数, 具体如表 3 所示:  $m$  为弹体质量,  $v$  为弹体速度,  $r$  为二次打击位置与第一发着弹点之间距离,  $H$  为侵彻深度,  $D_c$  为弹坑深度,  $D$  为弹坑平均直径 ( $D=(D_v+D_h+D_{max}+D_{min})/4$ , 具体如图 7(a) 所示),  $S_1$  与  $S$  为每发弹体造成的弹坑面积 ( $S_1=\pi D^2/4$ ,  $S$  由 Photoshop 软件根据试验照片计算得出, 具体如图 7(b) 所示),  $N$  为迎弹面贯穿裂纹条数,  $w_{max}$  为最大裂纹宽度。实验编号具体含义为: T 代表靶体编号, P 代表弹体打击靶体的迎弹面(其中 1 为下表面, 2 为上表面, 见图 2), 编号最后一位的 1 和 2 分别代表第 1 发和第 2 发打击试验。

表 3 错位打击下不同靶体的侵彻试验结果

Table 3 Penetration test results of different targets subjected to dislocation impact

试验编号	$m/g$	$v/(m/s)$	$r/mm$	$H/mm$	$D_c/mm$	$D/mm$	$S_1/cm^2$	$S/cm^2$	$N$	$w_{max}/mm$
T1-P2-1	353.1	542.3		367	43	103	83.3	78.4	0	0.1
T1-P2-2	354.2	581.4	172	448	46	101	80.1	77.2	0	0.1
T2-P1-1	353.2	582.0		285	89	178	248.8	250.7	9	1.1
T2-P1-2	353.0	566.0	147	344	58	167	219.0	238.1	11	2.5
T2-P2-1	353.8	574.4		311	51	90	63.6	56.2	4	0.7
T2-P2-2	353.2	600.7	158	419	30	72	40.7	38.9	7	2.0
T3-P2-1	352.8	579.1		293	71	169	224.3	257.2	8	1.2
T3-P2-2	352.4	579.0	174	329	67	127	126.7	129.5	9	1.2
T4-P2-1	354.0	580.0		335	46	113	100.2	110.5	3	1.0
T4-P2-2	353.2	581.0	192	329	48	139	151.7	160.7	3	1.0
T5-P1-1	352.3	582.5		312	48	108	91.6	99.7	2	0.1
T5-P1-2	352.4	587.0	122	361	39	89	62.2	47.8	3	0.1
T5-P2-1	351.0	570.0		230	44	106	116	116.6	0	0.15
T5-P2-2	354.0	581.0	144	294	30	84	55.4	49.4	0	0.15

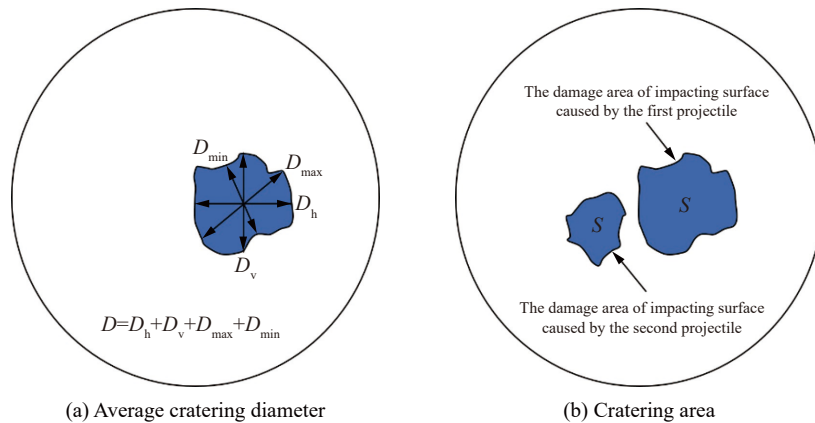


图 7 靶体的迎弹面损伤

Fig. 7 Target impact surface damage

表 3 对比了第一发弹体和第二发弹体所造成靶体的开坑深度, 可以发现: 除了 T1 靶体外, 其他靶体则是第二发弹体引起的开坑深度都小于第一发弹体。造成这一现象的原因是: 弹坑的形成是由弹体的直径、弹体冲击后的应力波和靶体介质的强度共同作用。一方面是因为第一发弹体冲击 UHTCC、UHTCC 和 FRC 组合靶体后, 会在弹坑周围形成很多微观和宏观裂缝面, 这时当第二发弹体再冲击靶体所产生的应力波在穿过这些裂缝面时, 会发生多次反射, 从而降低了应力波的破坏能力, 另一方面, 虽然第一发弹体的冲击会使弹坑周围靶体介质的受损, 但是由于靶体中存在大量的 PVA 纤维, 会阻止靶体介质的强度迅速下降。因此第二发弹体造成的开坑深度要小于第一发弹体所引起的开坑深度。

分别对 5 种不同分层的组合靶体进行错位侵彻实验。由于各种组合靶具有不同分层设置且各层材料的强度也不一样, 因此, 靶体抵御弹体冲击的能力不同, 同时靶体的损伤状况也不一样。图 8 为各个靶体迎弹面的破坏形态: 其中  $H_1$  为第一发弹体侵入靶体的深度、 $H_2$  为第二发弹体侵入靶体的深度、 $D_1$  为第一发弹体所引起的平均弹坑直径、 $D_2$  为第二发弹体所引起的平均弹坑直径。

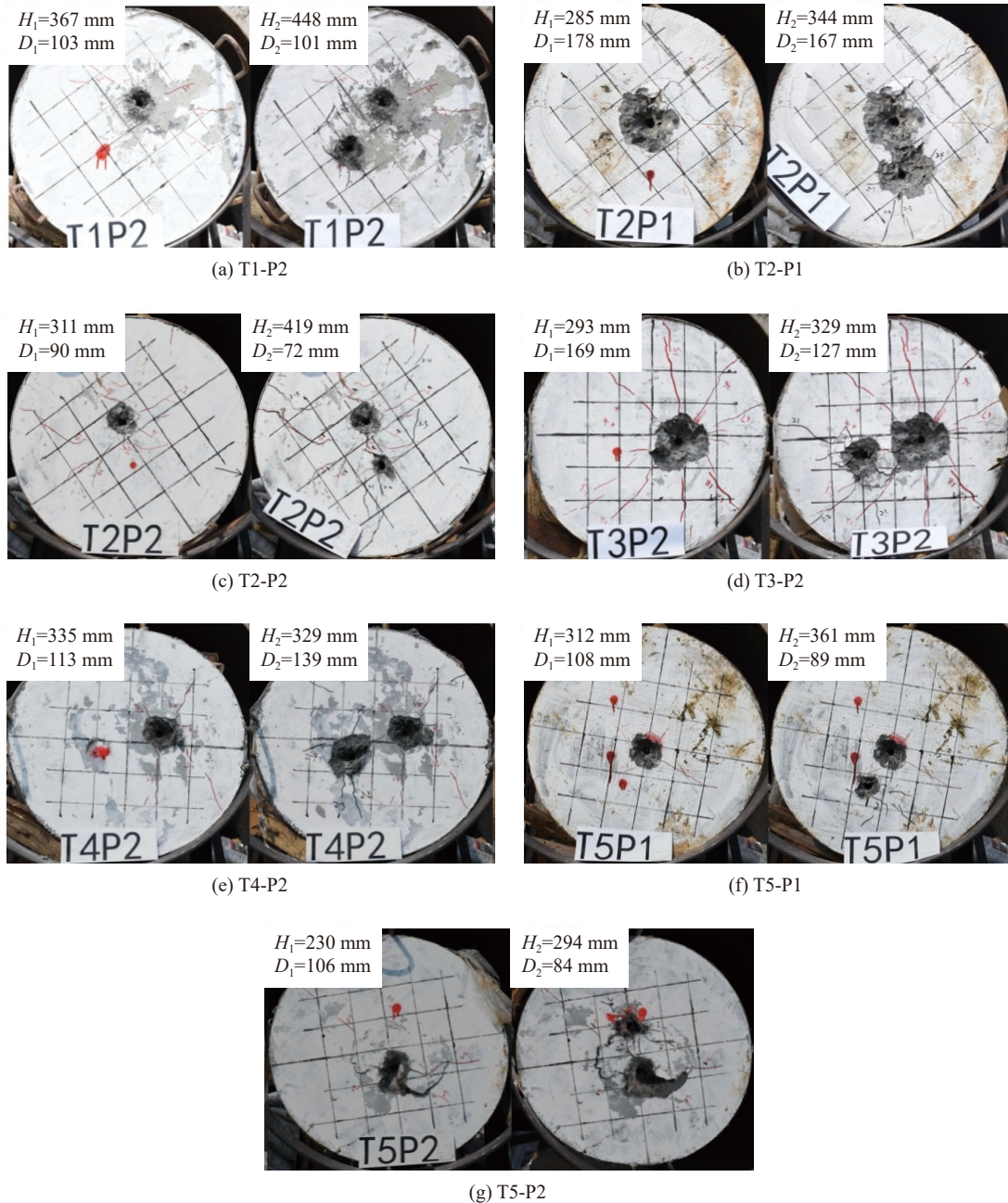


图 8 初次和二次打击下不同靶体的破坏形态

Fig. 8 Destruction morphology of different targets subjected to the first and second strike

从第 1 次和第 2 次侵彻后靶体的破坏形态来看, UHTCC 的迎弹面受损程度要远小于加入粗骨料的 FRC, 具体如图 8(a) 和 8(b) 所示, 这是由于加入粗骨料会增加材料的脆性, 使得 FRC-BA 和 FRC-CA 靶体的迎弹面在高速冲击荷载下会形成较大的弹坑和更多的裂缝。通过 T2-P1、T4-P2、T5-P1 与 T2-P2、T3-P2、T5-P2 的迎弹面损伤程度, 可以看出, 以 UHTCC 为迎弹面的组合靶相较于有骨料的 FRC 为迎弹面的

组合靶在错位打击后具有更小的迎弹面开坑和更少的裂缝,但其裂缝依然多于 UHTCC 靶体,因此将无骨料的 UHTCC 置于迎弹面可以有效降低弹体冲击后的开坑大小和裂纹的扩展。

侵彻试验结束后,从上述靶体中取得弹体如图 9 所示,可以看出侵彻 UHTCC 靶体的弹体整体结构良好,未发生的变形,弹体头部也未出现明显的刮擦痕迹,但是侵彻含有玄武岩和刚玉骨料靶体(FRC-BA 和 FRC-CA)的弹体头部损伤非常严重,并且发生了一定程度的变形。可见 FRC-CA 和 FRC-BA 靶体在抗弹体侵彻方面要优于 UHTCC 靶体。



图 9 试验后回收的弹体

Fig. 9 Recovered projectiles after the test

## 2.2 UHTCC 的抗侵彻性能

图 10 对比了 T1-P2 与 T2-P1 打击面前后弹打击破坏状态,发现 FRC-BA 开坑直径与开坑深度均大于 UHTCC。FRC-BA 开坑直径相较于 UHTCC 增加了 40%,是由于玄武岩骨料的加入使材料韧性下降。而向 UHTCC 中加入玄武岩骨料,以同体积玄武岩取代 UHTCC,会使 FRC-BA 的强度提高 30%,且弹体第 1 次侵入 FRC-BA 靶体深度相较于 UHTCC 靶体会降低 22%,弹体第二次侵入深度会降低 23%。这主要是由于 FRC-BA 靶体的强度高于 UHTCC 靶体,同时弹体接触到高强度的骨料可能会发生一定的角度偏转。

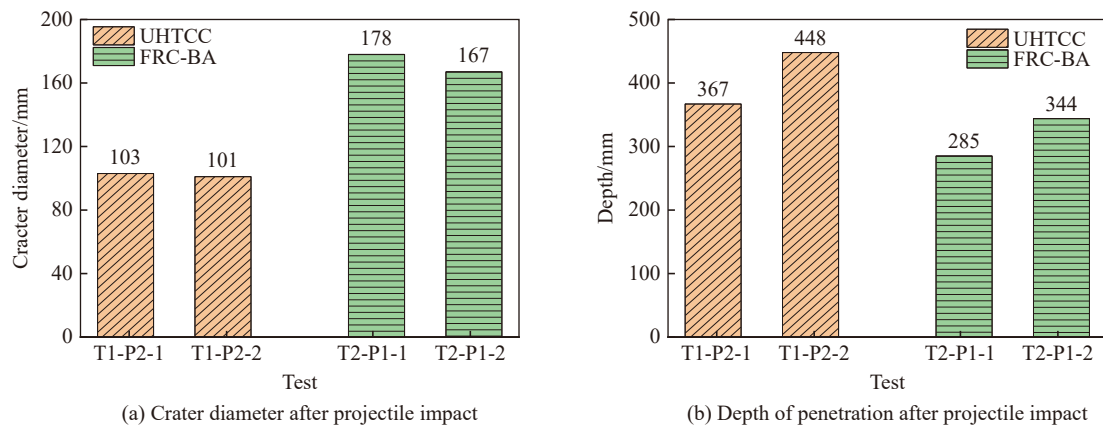


图 10 骨料对弹坑直径和侵彻深度的影响

Fig. 10 Influences of the coarse aggregate on crater diameter and depth of penetration



收集了与本次研究相同弹体冲击情况下相关文献的实验数据, 并对比分析了以不同速度冲击不同类型混凝土靶体后的侵彻深度和迎弹面平均开坑直径, 见图 11 和图 12。从图 11 中可以看出相同弹体速度下 UHTCC 的侵彻深度要远大于高强混凝土(HSC)和超高性能混凝土(UHPC), 这主要是由于 UHTCC 材料本身强度和弹性模量都较低, 以及 UHTCC 靶体中无粗骨料存在。然而, 从图 12 可知: UHTCC 靶体表面打击后几乎没有裂缝, 开坑面积非常小; 有 50 mm 厚 UHTCC 表面层组合靶体的开坑与 UHTCC 靶体基本相同; FRC-BA 表面开坑直径相对 UHTCC 有所增加。与 UHPC-CA/BA、UHPC-SF/PF 和 HSC 等高性能混凝土开坑进行对比, 发现 UHTCC 开坑直径最小, 抗开坑能力最优。而 FRC-BA 开坑面积与 125 MPa 的 UHPC-CA/BA 以及 120 MPa 的 UHPC-PF 相近, 并远小于 61 MPa 和 100 MPa 的 HSC, 显示出 FRC-BA 也具有较好的抗开坑性能。表明强度对于开坑直径影响不显著, 而韧性对于开坑直径影响显著, 韧性越高, 靶体表面开坑越小。

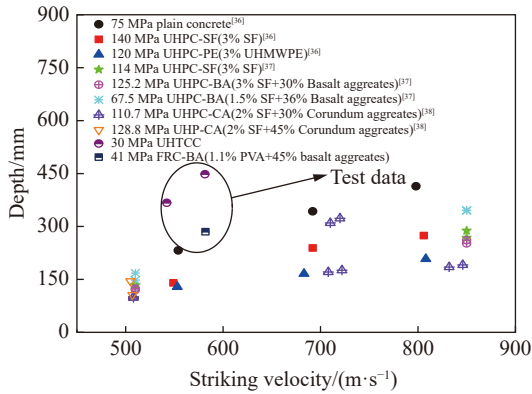


图 11 侵彻深度与弹体的冲击速度<sup>[36-38]</sup>  
Fig. 11 Depth of penetration versus striking velocity of projectile<sup>[36-38]</sup>

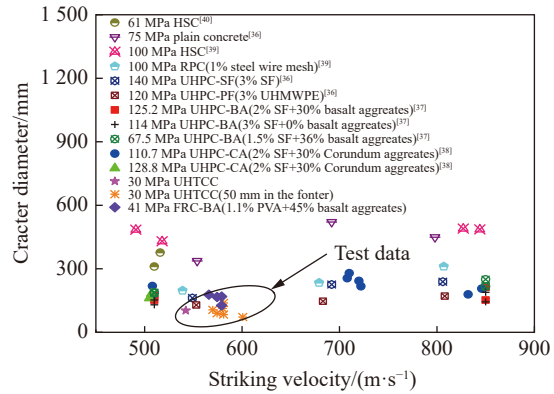


图 12 弹坑直径与弹体冲击速度<sup>[36-40]</sup>  
Fig. 12 Crater diameter versus striking velocity of projectile<sup>[36-40]</sup>

### 3 靶体的抗侵彻性能分析

#### 3.1 抗首发打击性能

T5 靶与 T3、T4 靶具有相同的组合结构, 而采用的粗骨料不同。图 13 对比了弹体分别打击结构形式相同而骨料不同的复合靶体的开坑大小和侵彻深度。可以看出: FRC-CA 和 FRC-BA 具有基本相同的抗压强度和抗拉强度, 弹体初次侵入 FRC-BA 和 UHTCC 组合靶体的深度相较于 FRC-CA 和 UHTCC 组合靶体减小了 27%, 开坑直径也更小。这表明 FRC-CA 抗侵彻性能更好, 这是由于刚玉骨料的硬度要大于玄武岩骨料的硬度。

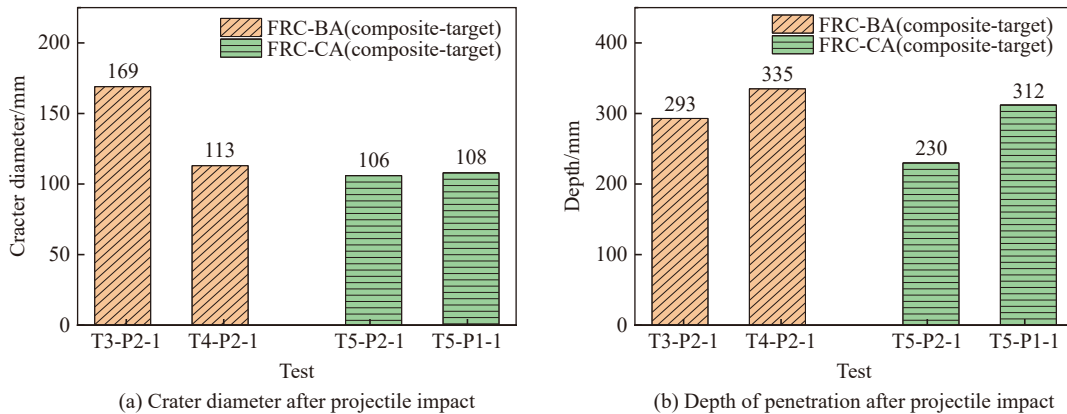


图 13 骨料强度(硬度)对弹坑直径和侵彻深度的影响

Fig. 13 Influences of the coarse aggregate strength (hardness) on crater diameter and depth of penetration

图 14 对比了具有相同靶体结构和骨料但表面层不同的靶体(T2-P1、T2-P2 和 T3-P2、T4-P2)的抗侵彻性能。由图 14 可见, 将 UHTCC 置于组合靶体的迎弹面时, 靶体开坑直径相较于迎弹面无 UHTCC 减小 30%, 但侵彻深度增加约 10%。而 UHTCC 表面层开坑深度都在 50 mm 内, 开坑发生在表面层内。这说明 UHTCC 表面层有效的减小了开坑。由于 UHTCC 本身强度较低, 导致组合靶体整体抗侵彻性能出现一定程度的降低。

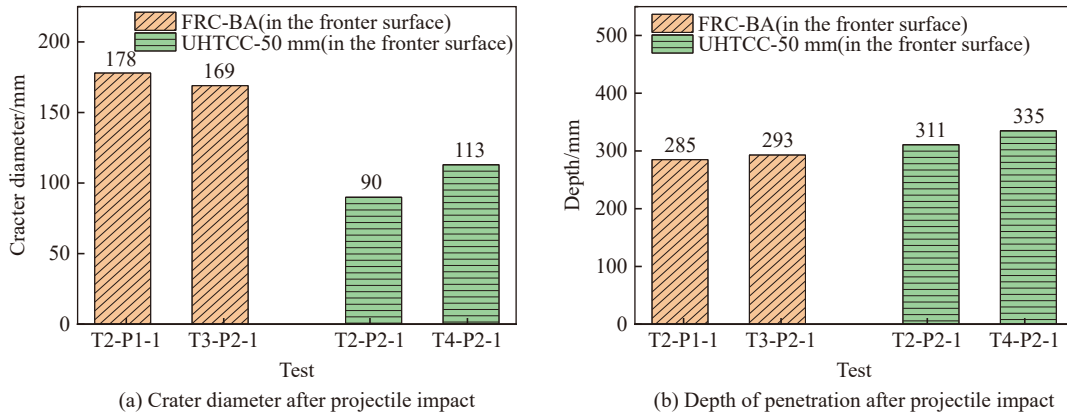


图 14 UHTCC 位于表面层对组合靶的抗侵彻性能的影响

Fig. 14 Influence of UHTCC in the top layer on the penetration resistance of composite targets

图 15 对比了骨料和打击面材料相同但中间层结构不同的靶体的抗侵彻性能。由图 15 可知, 当存在 UHTCC 中间梯度层时靶体开坑直径没有明显影响, 弹体侵彻深度略微增加。这说明将 50 mm 厚的 UHTCC 层置于 FRC-BA 的中间层对组合入靶体的抗侵彻性能没有明显的改善。

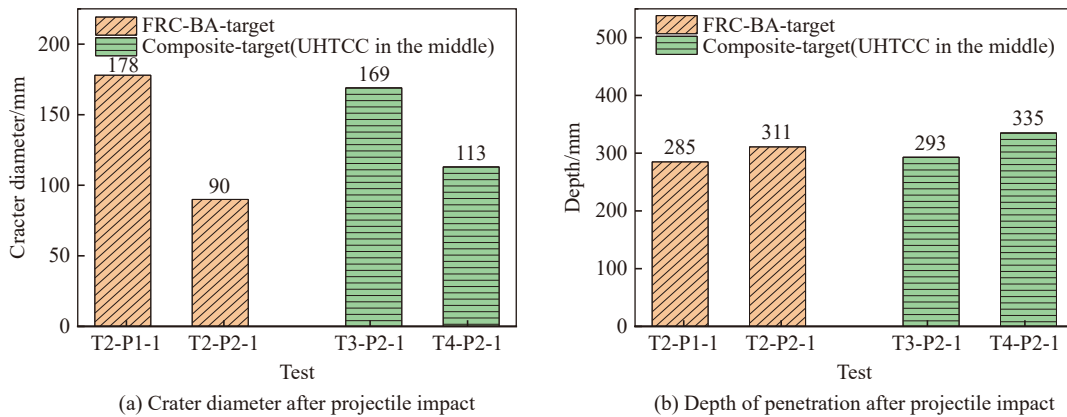


图 15 UHTCC 位于中间层对组合靶的抗侵彻性能的影响

Fig. 15 Influence of UHTCC in the middle layer on the penetration resistance of composite targets

### 3.2 抗二次打击性能

图 16 对比了相同靶体及打击面受到两次打击的开坑面积及侵彻深度。由图 16 可以看出后弹开坑面积普遍小于前弹, 而侵彻深度普遍增加。这说明打击后靶体损伤的存在降低了靶体抗侵彻性能。

图 17 统计了无量纲的二次侵彻深度比( $H_2/H_1$ , 第 2 发弹体侵彻深度与第 1 发弹体侵彻深度的比值)与无量纲的弹着点相对偏差距离( $r/d$ , 其中  $d$  为弹体直径)关系, 发现相同弹速下, 再次打击总侵彻深度不会超过 2 倍的前弹侵彻深度。而且随着弹着点偏差的增加, 再次打击侵彻深度比接近于 1。这表明前弹损伤范围在靶面平面向上有限, 对于本试验靶体, 当弹着点相对偏差距离大于 8 时, 第一发弹体对靶体的影响基本可以忽略。

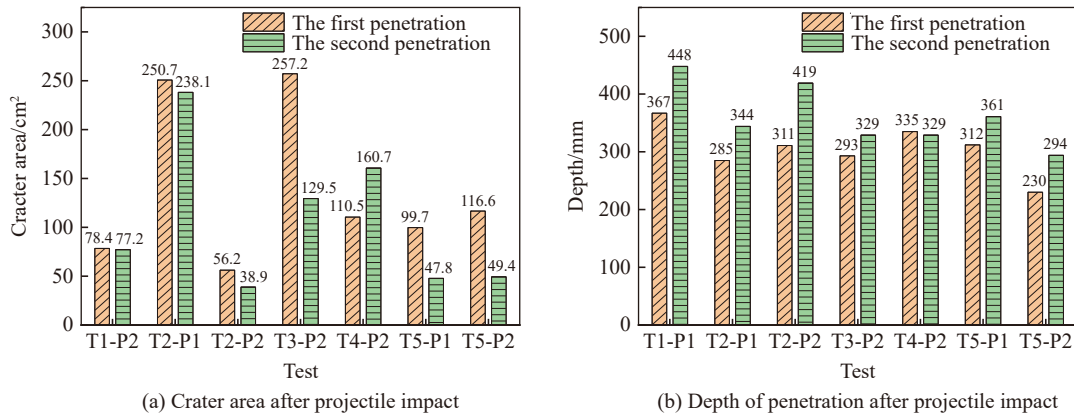


图 16 重复打击对弹坑面积和侵彻深度的影响

Fig. 16 Influences of repeated impacts on craters areas and depth of penetration

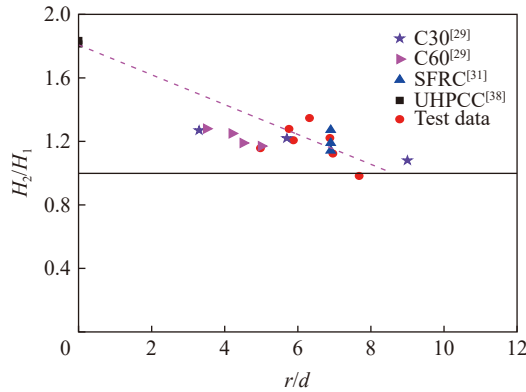


图 17 弹着点相对偏差距离与二次侵彻深度比之间的关系

Fig. 17 Relationship between the relative deviation distance of the impact point and the second penetration depth ratio

## 4 结 论

通过开展对 UHTCC、FRC 和组合靶体的二次打击试验, 获得了各个靶体的破坏数据和迎弹面破坏形态, 经过分析得出了以下结论: (1) 相同试验条件下, 与普通混凝土和超高性能混凝土相比, UHTCC 能够有效的减小迎弹面的开坑直径, 但会增加弹体侵彻深度; (2) 向 UHTCC 中加入粗骨料制成的 FRC 能够使抗压强度提高 30%, 弹体的侵彻深度降低 22%, 但开坑直径增加了 40%; 此外, 加入骨料的硬度越大, 这种降低效果越明显; (3) 将 50 mm 厚的 UHTCC 层置于组合靶体的迎弹面可以有效的减小组合靶体的迎弹面开坑直径, 将 50 mm 厚的 UHTCC 层置于组合靶体的中间层对组合靶体的抗侵彻性能没有明显的改善; (4) 相同靶体, 在相同弹体冲击速度下, 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。

## 参考文献:

[1] HANCHAK S J, FORRESTAL M J, YOUNG E R, et al. Perforation of concrete slabs with 48 MPa (7 ksi) and 140 MPa (20 ksi) unconfined compressive strengths [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1992, 12(1): 1–7. DOI: 10.1016/0734-743X(92)90282-X.

[2] WU H, FANG Q, PENG Y, et al. Hard projectile perforation on the monolithic and segmented RC panels with a rear steel liner [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 76: 232–250. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.10.010.

[3] 邓勇军, 陈小伟, 钟卫洲, 等. 弹体正侵彻钢筋混凝土靶的试验及数值模拟研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(2): 023101.

- DOI: 10.11883/bzycj-2019-0001.
- DENG Y J, CHEN X W, ZHONG W Z, et al. Experimental and numerical study on normal penetration of a projectile into a reinforced concrete target [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(2): 023101. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0001.
- [4] ZOLLO R F. Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development [J]. *Cement and Concrete Composites*, 1997, 19(2): 107–122. DOI: 10.1016/S0958-9465(96)00046-7.
- [5] LI V C, MISHRA D K, WU H C. Matrix design for pseudo-strain-hardening fibre reinforced cementitious composites [J]. *Materials and Structures*, 1995, 28(10): 586–595. DOI: 10.1007/BF02473191.
- [6] LI V C, WANG S X, WU C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC) [J]. *ACI Materials Journal*, 2001, 98(6): 483–492. DOI: 10.1089/apc.2006.20.829.
- [7] LI V C, HASHIDA T. Engineering ductile fracture in brittle-matrix composites [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 1993, 12(12): 898–901. DOI: 10.1007/BF00455611.
- [8] NELSON P K, LI V C, KAMADA T. Fracture toughness of microfiber reinforced cement composites [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2002, 14(5): 384–391. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:5(384).
- [9] LI H D, XU S L, LEUNG C K Y. Tensile and flexural properties of ultra high toughness cementitious composite [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition)*, 2009, 24(4): 677–683. DOI: 10.1007/s11595-009-4677-5.
- [10] MAALEJ M, QUEK S T, ZHANG J, et al. Behavior of hybrid fiber ECC panels subjected to low and high velocity projectile impact: a review [M]// BRANDT A M, OLEK J, GLINICKI M A, et al. *Brittle Matrix Composites 10*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012: 335–344. DOI: 10.1533/9780857099891.335.
- [11] 刘问. 超高韧性水泥基复合材料冲击、断裂、疲劳及疲劳裂纹扩展性能的试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [12] MAALEJ M, QUEK S T, ZHANG J. Behavior of hybrid-fiber engineered cementitious composites subjected to dynamic tensile loading and projectile impact [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2005, 17(2): 143–152. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:2(143).
- [13] 赵昕. 超高韧性水泥基复合材料动态力学性能试验与理论研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- ZHAO X. Experimental and theoretical study on the dynamic properties of ultra high toughness cementitious composites [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [14] ZHANG J, MAALEJ M, QUEK S T. Performance of hybrid-fiber ECC blast/shelter panels subjected to drop weight impact [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2007, 19(10): 855–863. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:10(855).
- [15] BELL J, ZHANG Y X, SOE K, et al. High velocity impact behaviour of hybrid-fiber engineered cementitious composite panels [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 450/451: 563–567. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.450-451.563.
- [16] QUEK S T, LIN V W J, MAALEJ M. Development of functionally-graded cementitious panel against high-velocity small projectile impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(8): 928–941. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.02.002.
- [17] LAI J Z, YANG H R, WANG H F, et al. Penetration experiments and simulation of three-layer functionally graded cementitious composite subjected to multiple projectile impacts [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 196: 499–511. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.154.
- [18] ANTOUN T H, LOMOV I N, GLENN L A. Simulation of the penetration of a sequence of bombs into granitic rock [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 29(1): 81–94. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2003.09.006.
- [19] 邓国强, 杨秀敏. 钻地弹重复打击效应现场试验研究 [J]. *防护工程*, 2012, 34(5): 1–5.
- DENG G Q, YANG X M. Experimental investigation into damage effects of repeated attacks of precision-guided penetration weapons [J]. *Protective Engineering*, 2012, 34(5): 1–5.
- [20] 邓国强, 杨秀敏. 工程岩体中多弹重复打击效应的数值模拟分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(3): 361–366. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)03-0361-06.
- DENG G Q, YANG X M. Numerical simulation of the effect of multiply EPW into engineering rock [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(3): 361–366. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)03-0361-06.
- [21] 潘景龙, 张宝超, 马晓儒, 等. 武器间接命中条件下 FRP 约束混凝土抗多次打击能力 [J]. *复合材料报*, 2004, 21(5): 128–133. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.2004.05.024.
- PAN J L, ZHANG B C, MA X R. Experimental study of resisting multi-hitting capacity on FRP confined concrete on condition of indirect damage by weapons [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2004, 21(5): 128–133. DOI: 10.13801/j.cnki.

- fhclxb.2004.05.024.
- [22] 左魁, 曾宪明, 王启睿, 等. 钻地模型弹对岩石模拟材料二次侵彻试验 [J]. *解放军理工大学学报 (自然科学版)*, 2007, 8(6): 626–629. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2007.06.012.
- ZUO K, ZENG X M. Second time penetration of earth-penetrating model projectile in rock medium [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 8(6): 626–629. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2007.06.012.
- [23] PRAKASH A, SRINIVASAN S M, RAO A R M, et al. The assessment of high velocity multi-impact damage in steel fiber reinforced cementitious composite panels [J]. *WIT Transactions on the Built Environment*, 2014, 141: 243–256. DOI: 10.2495/SUS1140211.
- [24] 蒋志刚, 万帆, 谭清华, 等. 钢管约束混凝土抗多发打击试验 [J]. *国防科技大学学报*, 2016, 38(3): 117–123. DOI: 10.11887/j.cn.201603020.
- JIANG Z G, WAN F, TAN Q H, et al. Multi-hit experiments of steel-tube-confined concrete targets [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2016, 38(3): 117–123. DOI: 10.11887/j.cn.201603020.
- [25] GOMEZ J T, SHUKLA A. Multiple impact penetration of semi-infinite concrete [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 25(10): 965–979. DOI: 10.1016/S0734-743X(01)00029-X.
- [26] FORRESTAL M J, ALTMAN B S, CARGILE J D, et al. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1994, 15(4): 395–405. DOI: 10.1016/0734-743X(94)80024-4.
- [27] FORRESTAL M J, FREW D J, HANCHAK S J, et al. Penetration of grout and concrete targets with ogive-nose steel projectiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1996, 18(5): 465–476. DOI: 10.1016/0734-743X(95)00048-F.
- [28] 赖建中, 朱耀勇, 徐升, 等. 超高性能水泥基复合材料抗多次侵彻性能研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(6): 601–607. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)06-0601-07.
- LAI J Z, ZHU Y Y, XU S, et al. Resistance of ultra-high-performance cementitious composites to multiple impact penetration [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(6): 601–607. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)06-0601-07.
- [29] 李金城. 射弹两次打击混凝土介质的累积侵彻效应研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [30] 梁乔恒. UHMWPE 纤维混凝土动态材料模型参数与抗多发打击研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [31] LAI J Z, GUO X J, ZHU Y Y. Repeated penetration and different depth explosion of ultra-high performance concrete [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 84: 1–12. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.05.006.
- [32] FENG J, GAO X D, LI J Z, et al. Penetration resistance of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete under projectile multi-impact [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 202: 341–352. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.038.
- [33] SOE K T, ZHANG Y X, ZHANG L C. Impact resistance of hybrid-fiber engineered cementitious composite panels [J]. *Composite Structures*, 2013, 104: 320–330. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.01.029.
- [34] 王会芳. 功能梯度水泥基复合材料制备及抗多次侵彻性能研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [35] Japan Society of Civil Engineers. Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks (HPFRCC) [R]. Japan Society of Civil Engineers, 2008.
- [36] LIU J, WU C Q, SU Y, et al. Experimental and numerical studies of ultra-high performance concrete targets against high-velocity projectile impacts [J]. *Engineering Structures*, 2018, 173: 166–179. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.098.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] LIU J, WU C Q, LI J, et al. Experimental and numerical study of reactive powder concrete reinforced with steel wire mesh against projectile penetration [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 109: 131–149. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.06.006.
- [40] 张云升, 张文华, 刘建忠. 超高性能水泥基复合材料 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.

(责任编辑 王小飞)