

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0059

## 内埋炸药下超高韧性水泥基复合材料的抗爆性能\*

吴 平, 徐世焯, 李庆华, 周 飞, 陈柏锬, 蒋 霄, AL MANSOUR Ahmed

(浙江大学高性能建筑结构与材料研究所, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 为研究超高韧性水泥基复合材料 (ultra-high toughness cementitious composites, UHTCC) 在内埋炸药爆炸下的抗爆性能和损伤破坏规律, 对不同炸药埋深下的 UHTCC 和高强混凝土 (high-strength concrete, HSC) 进行了内埋炸药抗爆实验。得到了两种材料靶体的破坏状态, 并利用接触爆炸的实验结果计算出了两种材料的抗爆性能参数。结果表明, 在相同条件下, UHTCC 抗爆性能优于高强混凝土。为了进一步探究 UHTCC 的抗压强度、抗拉强度以及拉伸韧性对靶体在内埋炸药下抗爆性能的影响, 首先, 采用改进的 K&C 模型对炸药埋深为 40 mm 的超高韧性水泥基复合材料靶体进行数值模拟, 模拟结果与实验结果基本吻合, 并根据数值模拟的结果得到了爆炸冲击波沿靶体径向衰减速度大于轴向衰减速度这一规律, 验证了数值模型的有效性; 然后, 通过调整改进 K&C 模型中与抗压强度、抗拉强度以及拉伸韧性相关的参数, 数值预测了不同抗压强度、抗拉强度以及拉伸韧性下 UHTCC 靶体的破坏状态, 发现增强 UHTCC 的韧性可以有效防止靶体发生整体性破坏, 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。

**关键词:** 超高韧性水泥基复合材料; 内埋炸药; 抗爆性能参数; K&C 模型

中图分类号: O383

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

## Anti-explosion tests and numerical simulations of ultra-high toughness cementitious composites subjected to blast by embedded explosives

WU Ping, XU Shilang, LI Qinghua, ZHOU Fei, CHEN Baikun, JIANG Xiao, AL MANSOUR Ahmed

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

**Abstract:** To study the blast resistance and damage rule of ultra-high toughness cementitious composites (UHTCC) subjected to blast by embedded explosives, blast resistance tests of embedded explosives were carried out on UHTCC and high-strength concrete (HSC) with different embedded depths of explosives. The damage patterns of the targets of the two materials were obtained. Using the test results of contact explosion, the blast resistance parameters of the above two materials were calculated. The test results show that UHTCC has better blast resistance than high-strength concrete under the same test conditions. To further explore the influence of compressive strength, tensile strength and tensile toughness on the blast resistance of UHTCC targets to embedded explosives, the improved K&C model was used to numerically simulate the UHTCC target subjected to blast by explosives with an embedded depth of 40 mm. The simulation results were basically consistent with the experimental results. According to the results of numerical simulation, the rule that the attenuation speed of the explosion shock wave along the radial direction of target was greater than that along the axial direction was obtained, which verified the validity of the model. Then, by adjusting the parameters related to the compressive strength, tensile strength and tensile toughness in the modified K&C model, the damage patterns of the UHTCC targets with different compressive and tensile strengths and tensile toughness were predicted. It is found that enhancing the toughness of UHTCC can effectively prevent the target from

\* 收稿日期: 2021-02-07; 修回日期: 2021-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(51678522); 国家自然科学基金优秀青年科学基金(51622811)

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

通信作者: 徐世焯(1953—), 男, 博士, 教授, slxu@zju.edu.cn

undergoing overall damage, increasing the tensile strength of UHTCC can reduce the cratering diameter of the blasting surface, and increasing the compressive strength of the material has no obvious effect on reducing the cratering size. These studies can provide a basis for the application of UHTCC materials in protection engineering.

**Keywords:** ultra-high toughness cementitious composites; embedded explosives; blast resistance parameters; K&C model

近年来,随着恐怖主义事件和局部冲突的频繁发生,出现了各种高精度、超高速以及高智能武器,要求防护结构具有更高的抗侵彻和抗爆炸能力<sup>[1]</sup>,特别是军事防御体、机场跑道、超大型桥梁、大坝等特殊结构。有一类钻地武器,它并不是在接触到靶体后就立刻爆炸,而是先侵入防御体一定深度后再发生爆炸<sup>[2-4]</sup>,这种爆炸现象与接触爆炸不同,接触爆炸的大部分能量都传递到了空气中,而这种爆炸的大部分爆炸能量都作用在了打击目标上,能造成更大的损伤。因此,有必要研究这类炸药埋深爆炸现象。王成等<sup>[5]</sup>通过数值模拟研究了不同炸药埋深下混凝土靶体爆破漏斗坑半径的变化规律,结果表明,随着炸药埋深的增加,爆破漏斗坑的半径会先增大后减小。Lai 等<sup>[6]</sup>对超高性能混凝土进行了不同炸药量的埋深爆炸实验,发现加入玄武岩纤维和钢纤维可以有效提高混凝土的抗爆炸性能。但是钢纤维混凝土本身延性较差,在爆炸荷载作用下,纤维以拔出现象为主,其破坏模式以单一裂缝破坏为主,本质上没有改变混凝土破坏呈脆性破坏这一特点<sup>[7]</sup>。

超高韧性水泥基复合材料 (ultra-high toughness cementitious composites, UHTCC<sup>[8]</sup>, 也被称为 ECC<sup>[9-10]</sup>、SHCC<sup>[11]</sup> 等) 具有多缝开裂、高拉伸韧性、高耐久性以及良好的能量吸收能力<sup>[12-14]</sup>, 在防护工程领域具有广阔的应用前景, 对 UHTCC 动态力学性能的研究也较多。刘问<sup>[15]</sup> 通过落锤实验对普通混凝土和 UHTCC 进行了抗冲击性能研究, 发现 UHTCC 冲击耗能能力是普通混凝土的 47.8 倍, 初裂后吸收能量的能力是普通混凝土的 1089.9 倍。UHTCC 的层裂实验显示<sup>[16]</sup>: 在同等应变率下, UHTCC 与静态抗拉强度相近的混凝土相比, 层裂强度高出 10 MPa 左右, 且破坏过程呈现多缝开裂现象, 表现出明显的韧性。赵昕<sup>[7]</sup> 对超高韧性水泥基复合材料进行了冲击压缩实验, 发现 UHTCC 材料的耗能优于相同实验条件下的钢纤维混凝土。300~750 m/s 的高速冲击实验结果表明<sup>[17]</sup>: 密集的裂缝使得 UHTCC 与普通混凝土相比在减少震塌、剥落和提高能量吸收等方面具有明显的优势。

此外, 数值模拟也是研究混凝土类材料在动态荷载作用下结构力学响应和破坏模式的有效手段。Li 等<sup>[18]</sup> 根据 UHTCC 的拉伸和压缩力学特性调整 K&C 模型中的损伤参数和率效应参数, 建立了可以描述 UHTCC 材料拉伸硬化特性的动态力学模型, 模拟了弹体高速冲击下 UHTCC 靶板的力学响应, 并且与实验结果进行了对比, 结果显示: 调整后的 K&C 模型可以较好地反映 UHTCC 板在高速冲击荷载下的破坏模式。陈超<sup>[19]</sup> 采用 HJC 模型对 PVA-UHTCC 材料进行了霍普金森杆动态压缩和层裂实验数值模拟。发现 PVA-UHTCC 试件的冲击压缩破坏形态与应变率相关, 同时 PVA-UHTCC 的层裂强度与应变率和压缩损伤具有耦合关系。徐世焯等<sup>[20]</sup> 采用 LS-DYNA 对超高韧性水泥基复合材料功能梯度板的接触爆炸进行了数值模拟, 发现 UHTCC 功能梯度板可以有效减少爆炸荷载下的开坑、震塌以及靶体损伤, 同时吸收更多的爆炸冲击波。然而, 目前关于 UHTCC 在内埋炸药爆炸荷载作用下的研究仍然较少, 而这类爆炸对材料损毁破坏更严重, 因此需要进一步的研究。

本文中首先通过对比高强混凝土 (HSC), 研究相同强度的 UHTCC 在不同炸药埋深情况下的抗爆炸性能; 然后, 采用改进的 K&C 模型对炸药埋深为 40 mm 的 UHTCC 靶体进行抗爆数值模拟, 并通过对比靶体迎爆面的开坑直径以及爆腔深度验证模型的有效性; 最后, 数值分析不同抗压强度、抗拉强度和拉伸韧性的 UHTCC 在内埋炸药下靶体的破坏形态和损伤情况, 以期 UHTCC 材料在防护工程中的应用提供依据。

## 1 实验概况

### 1.1 试件制备

实验材料中 UHTCC 主要包括: 预先配置好的胶凝材料、粒径 1.6~2.2 mm 的精细砂、聚羧酸高效减

水剂(SP)、长 11 mm 的 PVA(聚乙烯醇纤维)和普通自来水。HSC 主要包括: 52.5 普通硅酸盐水泥、最大粒径为 20 mm 的石子、粒径 6.2~8.6 mm 的中砂以及普通自来水。其中配制 UHTCC 所用的 PVA 纤维性能指标如表 1 所示。用以上原料按表 2 配合比配制纤维掺量为 2% 的 UHTCC 和高强混凝土(HSC)。UHTCC 靶体的浇筑采用强制式卧轴搅拌机搅拌, 先将干粉与减水剂干拌 2 min, 然后加入水搅拌 2 min, 再将 PVA 纤维均匀加入继续搅拌 5 min, 并浇筑到预先制作好的模具当中。同时浇筑基本力学性能测试试件, 常温养护 28 d 后测试。

表 1 PVA 纤维的性能指标

Table 1 Performance index of PVA fiber

| 纤维  | 直径/ $\mu\text{m}$ | 长度/mm | 弹性模量/GPa | 极限应变/% | 抗拉强度/MPa | 密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) |
|-----|-------------------|-------|----------|--------|----------|--------------------------------------|
| PVA | 39                | 11    | 40       | 6      | 1600     | 1.3                                  |

表 2 UHTCC 和 HSC 混凝土配合比

Table 2 Mix proportions of UHTCC and HSC

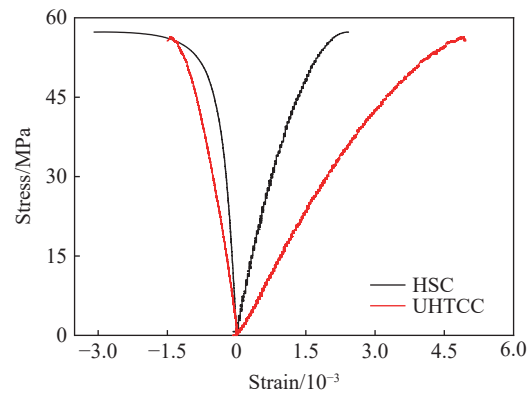
| 材料    | 含量/kg |     |     |       |     |     |
|-------|-------|-----|-----|-------|-----|-----|
|       | 胶凝材料  | 砂子  | 减水剂 | 石子    | 水   | PVA |
| UHTCC | 1 405 | 281 | 2   | 0     | 390 | 26  |
| HSC   | 451   | 544 | 0   | 1 270 | 185 | 0   |

## 1.2 基本力学性能实验

依据 ASTM-C469 规范<sup>[21]</sup>, 采用图 1(a) 所示装置测得 UHTCC 和 HSC 的横向及纵向压缩应力应变曲线, 如图 1(b) 所示(应变小于 0 的部分为横向应变, 应变大于 0 的部分为纵向应变), 其中压缩测试的试件尺寸均为直径 100 mm、高 200 mm 的圆柱体, 加载应变率为  $1\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。最终测得 UHTCC 的抗压强度、弹性模量和泊松比如表 3 所示。



(a) The uniaxial compressive test system



(b) The uniaxial compressive stress-strain curves

图 1 抗压强度、弹性模量和泊松比测试

Fig. 1 Measurements of compressive strength, elastic modulus and Poisson's ratio

表 3 基本力学参数

Table 3 Basic mechanical parameters

| 材料    | 抗压强度/MPa | 抗拉强度/MPa | 弹性模量/GPa | 泊松比   | 密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) |
|-------|----------|----------|----------|-------|--------------------------------------|
| UHTCC | 56.06    | 4.08     | 16.75    | 0.248 | 1900                                 |
| HSC   | 57.32    | 4.20     | 32.00    | 0.190 | 2270                                 |

同时也对 UHTCC 和 HSC 在 25t Instron 试验机上分别进行了如图 2(a) 和图 3(a) 所示的准静态拉伸实验, 其中 HSC 混凝土试件采用两端埋有预埋件、尺寸为 100 mm×100 mm×500 mm 的棱柱体形状, UHTCC 的拉伸则采用文献 [22] 中推荐的狗骨头形状试件, 具体如图 2(a), 以便整个受拉过程保持轴心受拉, 均以 0.1 mm/min 的速率加载。图 2(b) 和图 3(b) 分别给出了 UHTCC 和 HSC 的直接拉伸应力应变曲线, 可以看出 UHTCC 的拉伸延性是 HSC 的 300 倍, 两种材料的抗拉强度如表 3 所示。

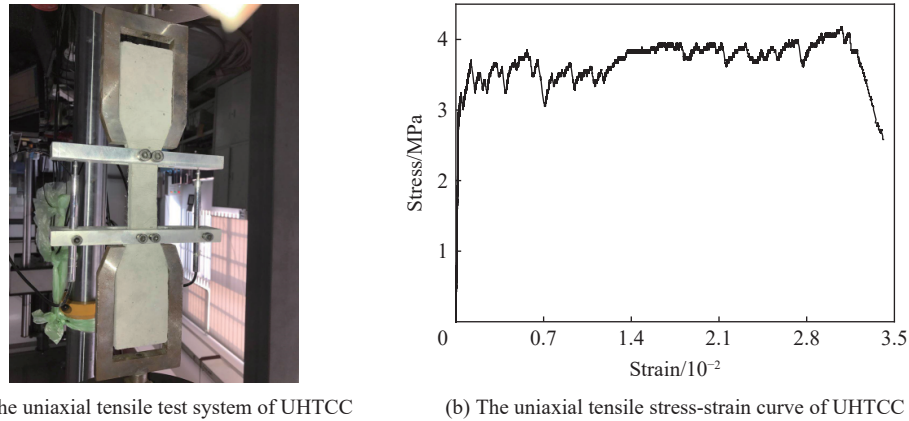


图 2 UHTCC 直接拉伸测试

Fig. 2 Uniaxial tensile test of UHTCC

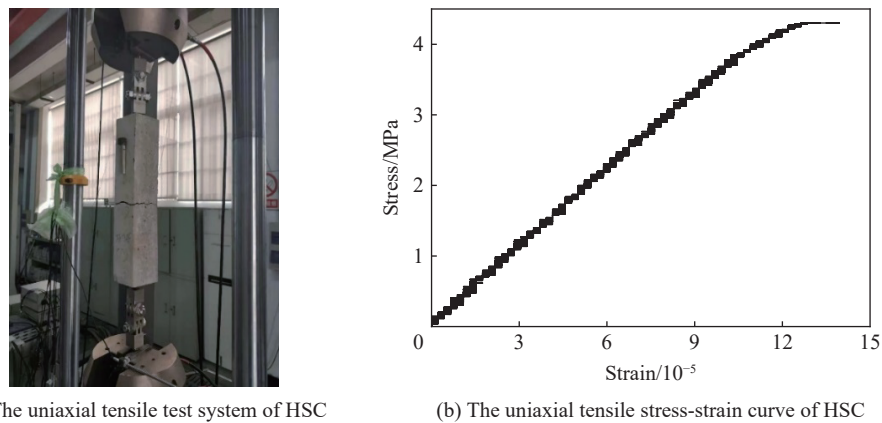


图 3 HSC 直接拉伸测试

Fig. 3 Uniaxial tensile test of HSC

### 1.3 实验方案设计

本次实验是为了观察两种材料在不同炸药埋深下靶体的破坏形态及抗爆性能, 并计算出相应材料的抗爆性能参数。一共浇筑了两组(每组 4 块)靶体, 即炸药埋深(炸药中心点到靶体迎爆面的距离)为 0、40、80、120 mm 的 UHTCC 靶体和 HSC 靶体。根据两种材料的基本力学性能和炸药用量, 选择了最终的实验靶体(见图 4), 并根据实验现场的要求和数值结果获得了靶体的最终尺寸。靶体采用直径 400 mm、高 240 mm 的圆柱体并外加钢箍。靶体中心预留直径 33 mm、不同深度的圆柱形孔。实验采用 50 g 乳化炸



图 4 抗爆炸实验靶体

Fig. 4 A target for anti-blast experiment

药, 药柱直径为 31 mm。放入直径 32 mm 的 PVC 薄管中, 未对其实施任何封堵措施, 使用电雷管从炸药柱的顶点引爆, 并将靶体放置在预先做好的沙土平台上。

## 2 实验结果分析

### 2.1 实验结果

抗爆实验结束后, 根据靶体的破坏形态将实验结果分为两类。一类是靶体表面出现了比较规则的漏斗坑, 为了更加准确地衡量靶体的抗爆性能, 后面将以漏斗坑的尺寸大小作为衡量指标, 漏斗形态如图 5 所示。另一类则是靶体发生整体破坏, 这里用残留靶体占整个靶体的百分比来衡量炸药对靶体的损毁程度。具体爆炸测试数据见表 4~5, 其中  $h$  为炸药中心与靶体迎爆面之间的距离,  $H$  为迎爆面漏斗坑的深度,  $D$  为迎爆面漏斗坑的直径,  $N$  为迎爆面裂缝条数,  $W_{\max}$  为迎爆面最大裂纹宽度,  $S$  为迎爆面损伤率 (采用 Photoshop 中的像素法求得),  $V$  为残留靶体占整个靶体的百分比 (利用排水法求得)。

表 4~5 分别记录了 UHTCC 和 HSC 靶体在炸药埋深为 0、40、80、120 mm 下的破坏参数, 这些参数客观表征了靶体的破坏情况。从表 5 中可知, HSC 靶体在有炸药埋置的条件下都发生了严重的破坏。这是由于混凝土的脆性导致的, 在爆炸发生后混凝土靶体内会产生强烈的冲击波, 这种冲击波会使靶体受到巨大的压缩、剪切和拉伸应力, 从而使靶体破碎成细小的骨料。C-1 靶体之所以没有发生较为严重的破坏, 是因为该靶体产生的是接触爆炸, 大部分爆炸产生的冲击波能量直接传递到了空气中, 因此靶体上仅形成一个较小的弹坑。

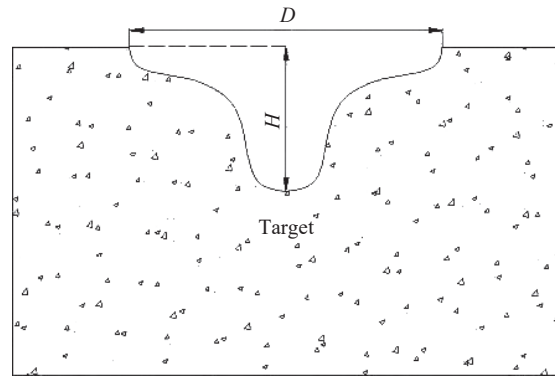


图 5 UHTCC 靶体爆炸破坏形态示意图

Fig. 5 Schematic diagram of explosion damage of the UHTCC target

表 4 UHTCC 靶体在不同炸药埋深下的爆炸实验结果  
Table 4 Explosion experiment results of UHTCC targets under different depths of explosives

| 材料编号 | $h/\text{mm}$ | $H/\text{mm}$ | $D/\text{mm}$ | $N$ | $W_{\max}/\text{mm}$ | $S/\%$ | $V/\%$ |
|------|---------------|---------------|---------------|-----|----------------------|--------|--------|
| U-1  | 0             | 22.22         | 93.20         | 0   | 0                    | 4.67   | 99.99  |
| U-2  | 40            | 69.80         | 240.2         | 7   | 2.7                  | 29.76  | 97.19  |
| U-3  | 80            | 104.70        | 212.0         | 8   | 2.0                  | 26.11  | 96.06  |
| U-4  | 120           |               |               |     |                      | 100.00 | 46.38  |

表 5 HSC 混凝土靶体在不同炸药埋深下的爆炸实验结果

Table 5 Explosion test results of HSC concrete targets under different depths of explosives

| 材料编号 | $h/\text{mm}$ | $H/\text{mm}$ | $D/\text{mm}$ | $S/\%$ | $V/\%$ | 爆炸后靶体的破坏形态                      |
|------|---------------|---------------|---------------|--------|--------|---------------------------------|
| C-1  | 0             | 20.78         | 129           | 10.22  | 98.71  | 迎爆面形成一个较小的弹坑, 无明显的主裂缝产生         |
| C-2  | 40            |               |               | 61.64  | 28.23  | 迎爆面损坏严重, 背爆面有 5 条主裂缝, 较为明显的震塌现象 |
| C-3  | 80            |               |               | 100.00 | 4.84   | 靶体完全破碎成细小的骨料和一个残留的靶体            |
| C-4  | 120           |               |               | 100.00 | 2.98   | 靶体完全被炸成骨料和一些混凝土块体               |

对比表 4 和表 5, 从表面破坏形态来看, HSC 靶体的破坏程度比 UHTCC 靶体更严重。这是由于 UHTCC 这种材料不仅极为密实, 而且它的基体与 PVA 纤维协调得非常好, 使得这种材料具有很高的韧性。一方面, 这会使 UHTCC 靶体在爆炸荷载作用下不会形成明显的主裂缝, 即使产生微裂缝后 PVA 纤维的阻裂作用也会抑制这些微裂缝的进一步扩展; 另一方面, 这种高韧性也会使材料具有很好的能量吸收效果, 这一效果体现在 U-2 和 U-3 靶体的破坏形态上, U-2 靶体的炸药埋置较浅, 一部分能量作用在靶体迎爆面, 另一部分则传递到空气中, 而 U-3 炸药埋置较深, 大部分能量作用在靶体上, 但 UHTCC 优异

的耗能效果使得 U-3 的迎爆面损伤率反而小于 U-2。

## 2.2 抗爆性能参数

爆炸漏斗坑是炸药发生接触爆炸时产生的高温高压的爆轰波直接作用于靶体造成的, 其压力高达几十吉帕, 温度高达 3 350 °C, 速度约 2~7 km/s<sup>[23]</sup>。炸药爆炸后, 靶体受到强烈的冲击压缩, 形成一个漏斗形的空腔。而漏斗坑的大小不仅取决于所用的炸药类型、炸药用量、装药形式、装药位置和起爆点的位置, 还取决于靶体材料自身的特性。接触爆炸时混凝土类材料的漏斗坑直径可由下式计算<sup>[24]</sup>:

$$D = K_a W^{1/3} \quad (1)$$

$$H = K_b W^{1/3} - 0.5e \quad (2)$$

式中:  $W$  为有效炸药量,  $e$  为装药高度,  $D$  为漏斗坑直径,  $H$  为漏斗坑深度,  $K_a$ 、 $K_b$  为介质的抗爆性能参数。

采用 U-1 和 C-1 的实验数据计算两种介质材料的参数  $K_a$  和  $K_b$ , 但需要将乳化炸药换算成 TNT 当量, 换算比例为 1.3 : 1<sup>[25]</sup>。便可得到  $K_a(\text{UHTCC})=0.283$ ,  $K_a(\text{HSC})=0.382$ ,  $K_b(\text{UHTCC})=0.146$ ,  $K_b(\text{HSC})=0.136$ 。

从介质材料的抗爆性能参数  $K_a$  和  $K_b$  的定义来看, 抗爆性能参数越小, 材料的抗爆炸性能就越好。UHTCC 的  $K_a$  要明显低于 HSC 混凝土, 这就说明单从  $K_a$  的大小来看 UHTCC 的抗爆性能要明显优于 HSC。但是对于抗爆性能参数  $K_b$ , HSC 要小于 UHTCC。这就表明 UHTCC 在抗迎爆面开坑深度方面要弱于 HSC。导致这样的结果主要是抗爆性能参数  $K_b$  和靶体开坑深相关。但接触爆炸是在一种高应变率作用下的冲击压缩过程, 靶体的材料越硬, 靶体的迎爆面开坑深度就越浅, 这一结果也与 UHTCC 弹性模量低于 HSC 相对应。

## 2.3 靶体的破坏形态

抗爆炸实验中, 因炸药埋置在靶体中和炸药高速爆炸引起的剪切、拉伸和挤压作用, 靶体的迎爆面会形成一个较为规则的漏斗坑或者被炸成一个不规则的残靶。此外, 两种材料在不同的炸药埋深下, 靶体的破坏形态也不同。炸药埋深为 0、40、80、120 mm 的 UHTCC、HSC 靶体的破坏形态如图 6~7 所示。

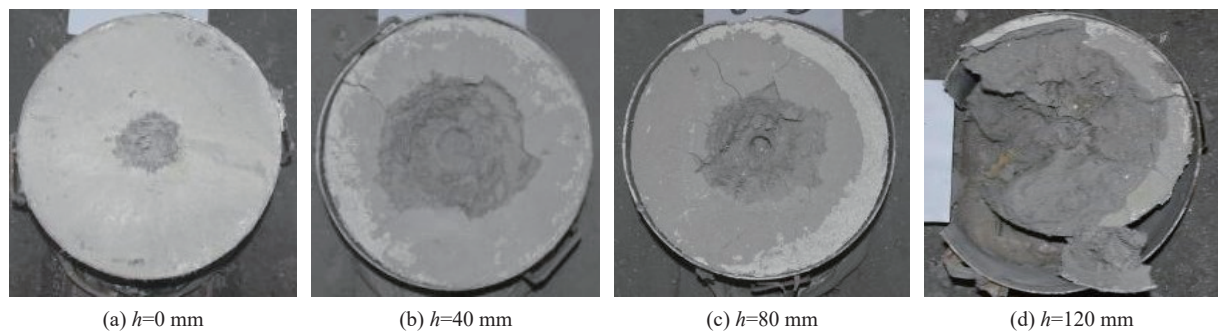


图 6 UHTCC 靶体在不同炸药埋深下的破坏情况

Fig. 6 Damage of UHTCC targets under different explosive depths

当炸药埋深为 0 时, 两类靶体都没有发生很严重的破坏, 表面也没有明显的裂纹, 只是形成了一个较浅的漏斗坑。但是只要炸药埋入靶体一定深度, 不管炸药埋深如何, HSC 靶体的破坏形态都非常严重, 并且钢箍也都发生了不同程度的开裂, 靶体都破裂成不同大小的碎片, 碎片的数量明显多于 UHTCC。这是由于 HSC 混凝土靶体中没有添加任何纤维, 其本身脆性比较大, 再加上混凝土材料的不均匀性, 导致混凝土靶体在爆炸荷载作用下破坏非常严重。相反 UHTCC 靶体很少有碎片崩落和飞出, 靶体的整体性非常好, 裂缝也非常少, 并且 UHTCC 靶体的背爆面以及侧面没有出现任何可见的裂纹。当炸药埋深为 120 mm 时, 两种材料都受到了严重的破坏, 并且两个靶体的钢箍都完全被炸开。U-4 靶体形成了径向和环向的贯穿裂缝, PVA 纤维被拉断, 距离炸药较近的纤维被烧焦。靶体沿裂缝破坏成较大的 UHTCC 块体。C-4 混凝土靶体几乎全部破坏成较小的混凝土块体和骨料, 残留下一个较小的残块。这是由于炸药爆炸时产生了强劲的爆炸冲击波。当炸药放置较深时, 这种冲击波所携带的大量能量不

能快速地传递到空气中, 阻碍了爆轰波的传递, 导致混凝土内壁的压力和空气密度都急速升高, 接着就形成了各种反射冲击波甚至透射波。这些波和流动空气组成的流场和混凝土结构互相耦合并产生作用<sup>[6,26]</sup>, 会对靶体产生很强的压应力、剪切应力及拉应力, 从而造成靶体的大应变、大断裂破坏。因此, 在防护结构中应该注重提升材料的韧性和耗能效果。

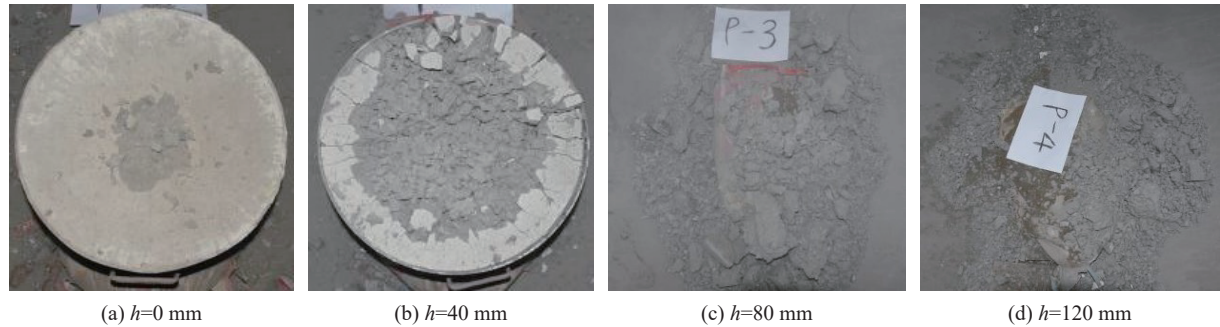


图 7 HSC 靶体在不同炸药埋深下的破坏情况

Fig. 7 Damage of HSC targets under different explosive depths

### 3 数值模拟

#### 3.1 建立有限元模型

由于实验条件限制, 靶体内部的破坏形态无法直接观察, 为了进一步了解靶体内部的破坏情况, 以下采用 ANSYS/LS-DYNA 模拟 UHTCC 靶体的爆炸过程。按照靶体的实际情况建立如图 8(a) 所示的有限元模型, 土、炸药和空气采用 ALE 多物质单元。UHTCC 靶体采用拉格朗日单元。让空气和土包裹住整个 UHTCC 靶体, 并在空气和土外表面施加无反射边界条件, 采用流固耦合算法来考虑炸药、土和空气与靶体之间的相互作用。靶体底部设置竖向约束, 并采用 m-kg-s 单位制。同时通过网格敏感性分析发现, 当靶体单元尺寸小于 4 mm 时, 计算的结果都非常稳定, 但出于计算效率和精度的考虑, 将靶体单元尺寸定为 2 mm, 炸药、空气和土的单元尺寸定为 4 mm。最后考虑到物理模型的对称性和计算效率, 选用四分之一模型进行计算, 其中对称面上设置节点约束, 具体如图 8(b) 所示。

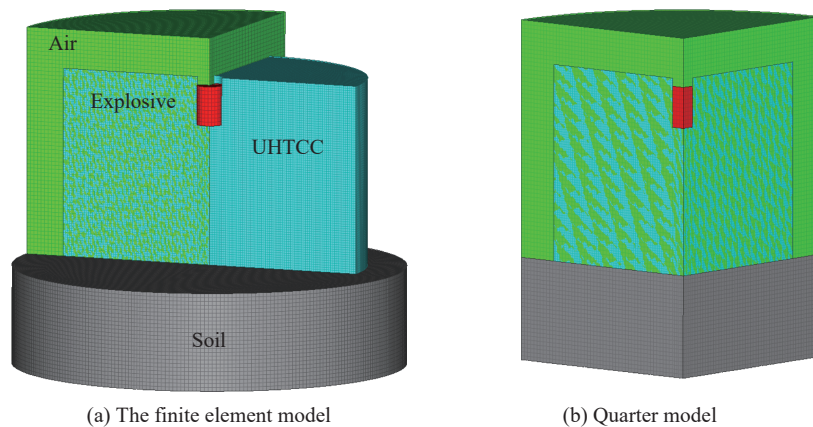


图 8 抗爆实验有限元模型

Fig. 8 The finite element model of anti-blast experiment

#### 3.2 材料模型及参数

##### 3.2.1 材料模型侵蚀准则

在模拟爆炸、冲击和侵彻方面, LS-DYNA 提供了丰富的材料模型可供用户直接选择, 而目前已有的

材料模型大多只适用于普通混凝土。UHTCC 具有明显不同于普通混凝土的拉伸性能, 存在着显著的拉伸应变硬化特征, 同时应变率效应也与普通混凝土不同, 这使得传统的普通混凝土材料模型无法准确描述 UHTCC 力学性能。Xu 等<sup>[27]</sup> 基于现有纤维增强超高韧性水泥基材料的基本力学实验数据, 改进了 K&C 模型损伤参数、动力增强因子模型以及状态方程参数, 使改进的 K&C 模型可以更好地反映 UHTCC 的动态力学特征, 并采用改进的 K&C 模型模拟了 UHTCC 板在冲击和爆炸荷载作用下的破坏形态, 模拟结果与实验结果吻合较好。因此选取改进的 K&C 材料模型来对有炸药埋深的 UHTCC 靶体进行数值模拟。UHTCC 的抗拉强度、抗压强度、泊松比、弹性模量、密度参数采用基本力学性能实验数据, 而本构模型参数、应变率效应参数和状态方程参数按照 Xu 等<sup>[27]</sup> 提出的方法确定, 具体如表 6 所示, 表 6 中未列出的参数采用原始 K&C 模型自动生成的值。图 9 是采用改进的 K&C 模型通过单个单元拉伸和压缩模拟得到的 UHTCC 拉伸和压缩应力应变全曲线(其中应力大于 0 的部分为拉伸应力应变曲线, 应力小于 0 的部分为压缩应力应变曲线), 可以看出, 改进的 K&C 模型相较于自动生成参数的 K&C 模型可以更好地描述 UHTCC 的拉伸韧性和压缩特性。空气模型简化为非黏性理想气体(\*MAT\_NULL) 并搭配线性多项式状态方程(\*EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL), 具体参数参见文献 [28]。炸药爆炸过程采用 LS-DYNA 中自带炸药模型(\*MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN) 关键字和状态方程(\*EOS\_JWL) 关键字进行模拟, 具体参数参见文献 [25]。土体采用(\*MAT\_Soil\_AND\_FOAM) 土与可压缩泡沫模型, 具体参数参见文献 [29]。

表 6 56 MPa 超高韧性水泥基复合材料的 K&C 模型参数

Table 6 K&C model parameters of 56 MPa ultra-high toughness cementitious composites

| 状态方程参数                 |                      |                      |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                       |             |
|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-------------|
| $\epsilon_{v1}$        | $\epsilon_{v2}$      | $\epsilon_{v3}$      | $\epsilon_{v4}$        | $\epsilon_{v5}$        | $\epsilon_{v6}$        | $\epsilon_{v7}$        | $\epsilon_{v8}$        | $\epsilon_{v9}$        | $\epsilon_{v10}$      |             |
| 0                      | -0.0015              | -0.0043              | -0.0101                | -0.0305                | -0.0513                | -0.0726                | -0.0943                | -0.174                 | -0.208                |             |
| $p_1$                  | $p_2$                | $p_3$                | $p_4$                  | $p_5$                  | $p_6$                  | $p_7$                  | $p_8$                  | $p_9$                  | $p_{10}$              |             |
| 0.0                    | $1.417 \times 10^7$  | $3.089 \times 10^7$  | $4.960 \times 10^7$    | $9.423 \times 10^7$    | $1.421 \times 10^8$    | $2.016 \times 10^8$    | $3.085 \times 10^8$    | $1.801 \times 10^9$    | $2.755 \times 10^9$   |             |
| $k_1$                  | $k_2$                | $k_3$                | $k_4$                  | $k_5$                  | $k_6$                  | $k_7$                  | $k_8$                  | $k_9$                  | $k_{10}$              |             |
| $9.444 \times 10^9$    | $9.444 \times 10^9$  | $9.576 \times 10^9$  | $1.006 \times 10^{10}$ | $1.197 \times 10^{10}$ | $1.388 \times 10^{10}$ | $1.579 \times 10^{10}$ | $1.724 \times 10^{10}$ | $3.878 \times 10^{10}$ | $4.72 \times 10^{10}$ |             |
| 本构模型参数                 |                      |                      |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                       |             |
| $\rho_0$               | $f_t$                | $\nu$                | $A_{0y}$               | $A_{1y}$               | $A_{2y}$               | $A_0$                  | $A_1$                  | $A_2$                  | $A_{1f}$              |             |
| 2 000                  | $4.08 \times 10^6$   | 0.24                 | $14.44 \times 10^6$    | 0.7349                 | $5.470 \times 10^{-9}$ | $19.9 \times 10^6$     | 0.5363                 | $1.443 \times 10^{-9}$ | 0.5363                |             |
| $A_{2f}$               | $b_1$                | $b_2$                | $b_3$                  | $\Omega$               | $\lambda_1$            | $\lambda_2$            | $\lambda_3$            | $\lambda_4$            | $\lambda_5$           |             |
| $1.443 \times 10^{-9}$ | 2.4                  | -11.3                | 0.03                   | 0.5                    | 0                      | $8 \times 10^{-6}$     | $2.4 \times 10^{-5}$   | $4 \times 10^{-5}$     | $5.6 \times 10^{-5}$  |             |
| $\lambda_6$            | $\lambda_7$          | $\lambda_8$          | $\lambda_9$            | $\lambda_{10}$         | $\lambda_{11}$         | $\lambda_{12}$         | $\lambda_{13}$         | $\eta_1$               | $\eta_2$              |             |
| $7.2 \times 10^{-5}$   | $8.8 \times 10^{-5}$ | $3.2 \times 10^{-4}$ | $5.2 \times 10^{-4}$   | $5.7 \times 10^{-4}$   | 1.0                    | 100                    | $1 \times 10^{10}$     | 0.0                    | 0.85                  |             |
| $\eta_3$               | $\eta_4$             | $\eta_5$             | $\eta_6$               | $\eta_7$               | $\eta_8$               | $\eta_9$               | $\eta_{10}$            | $\eta_{11}$            | $\eta_{12}$           | $\eta_{13}$ |
| 0.97                   | 0.99                 | 1.0                  | 0.99                   | 0.97                   | 0.5                    | 0.1                    | 0.0                    | 0.0                    | 0.0                   | 0.0         |
| 应变率参数                  |                      |                      |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                       |             |
| $\dot{\epsilon}$       | -100000              | -4786                | -1737                  | -631                   | -380                   | -229                   | -138                   | -83                    | -50                   |             |
| $r_f$                  | 9.97                 | 9.65                 | 9.28                   | 8.61                   | 8.11                   | 7.49                   | 6.77                   | 5.96                   | 5.12                  |             |
| $\dot{\epsilon}$       | -30                  | -18                  | -11                    | -4.0                   | -0.9                   | $-1 \times 10^{-6}$    | $1 \times 10^{-6}$     | 30                     | 50                    |             |
| $r_f$                  | 4.31                 | 3.57                 | 2.94                   | 2.04                   | 1.37                   | 1.0                    | 1.0                    | 1.16                   | 1.26                  |             |
| $\dot{\epsilon}$       | 83                   | 138                  | 229                    | 380                    | 631                    | 1047                   | 1738                   | 4786                   | 100000                |             |
| $r_f$                  | 1.41                 | 1.61                 | 1.86                   | 2.13                   | 2.37                   | 2.56                   | 2.70                   | 2.85                   | 2.94                  |             |



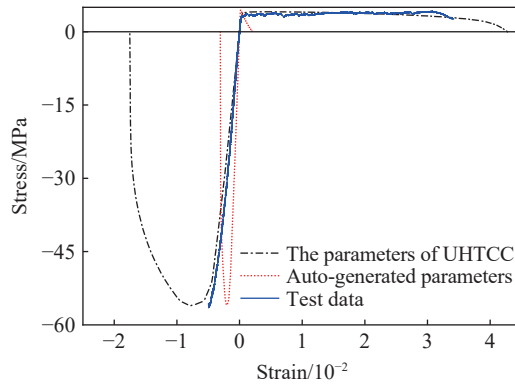


图 9 改进的 K&C 模型参数和自动生成的 K&C 模型参数预测的 UHTCC 拉伸和压缩应力应变曲线  
 Fig. 9 The tensile and compressive stress-strain curves of UHTCC predicted by parameters of modified K&C model and auto-generated parameters of K&C model

### 3.2.2 侵蚀准则

在进行 UHTCC 的爆炸数值模拟时,有必要引入单元删除算法来预测靶体的爆坑大小和裂缝,即,当单元的特定状态达到预设值时,将删除该单元。LS-DYNA 软件提供了各种单元删除准则,包括压力、应力、应变和时间。由于 UHTCC 的应变率效应,爆炸载荷下的极限应力、压力和应力都是非常不稳定的。此外,UHTCC 结构可能会因拉伸或剪切损伤而破裂。因此,许多学者在数值模拟中都以最大主应变为单元侵蚀准则<sup>[30-31]</sup>。对于侵蚀准则的阈值,将以 U-2 实例的模拟结果和实验数据最一致时的值作为本次模拟的侵蚀应变阈值。图 10 比较了使用不同侵蚀应变下靶体的裂纹和损伤云图。可以看出,侵蚀应变阈值对靶体的迎爆面开坑大小和形状有一定的影响。当侵蚀应变的值设置为 0.04 时,迎爆面的开坑直径与实验结果更接近。同时,从 UHTCC 的直接拉伸应力应变曲线可以看出 UHTCC 拉伸断裂应变也在 0.04 左右,这与上述所选的单元侵蚀准则的阈值一致,Hong<sup>[32]</sup>也选用了混凝土的拉伸断裂应变作为侵蚀应变的阈值。因此,最终将侵蚀应变的阈值确定为 0.04。

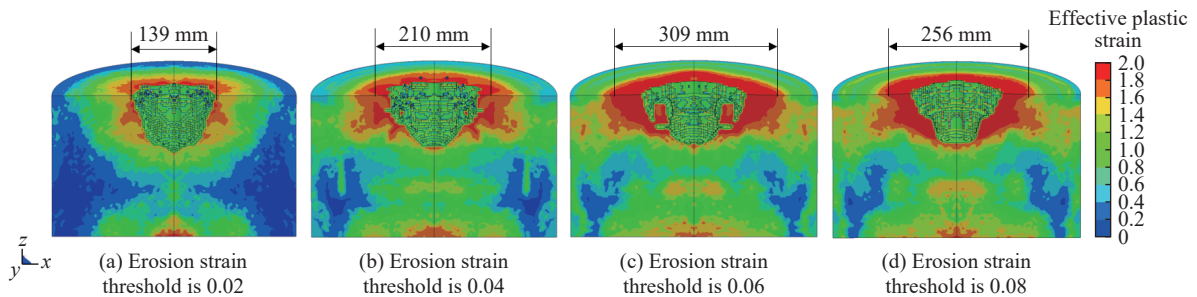


图 10 不同侵蚀应变阈值下 U-2 的模拟结果  
 Fig. 10 Simulation results of target U-2 under different erosion strain thresholds

### 3.3 数值模拟结果分析

在用 LS-DYNA 得到计算结果后,利用 LS-PrePost 对 d3plot 文件进行后处理,可以得到炸药埋深为 40 mm 时 UHTCC 靶体的损伤云图,如图 11 所示。从损伤云图中可以清晰地看到靶体在爆炸作用下的损伤情况,损伤主要集中在迎爆面的漏斗坑附近,这也与实验结果较为一致。

为验证模拟结果的有效性,选取爆炸发生后 5 ms 时的结果作为模拟的最终结果,并通过 LS-PrePost 软件中的测量工具测量模拟结果,得到 UHTCC 靶体的平均开坑直径为(205.75±3)mm,与实验结果基本吻合,弹坑深度为(89.2±5)mm,比实验结果略大,这是因为 K&C 模型将 UHTCC 作为均一材料来考虑,没有考虑 PVA 纤维对基体的阻裂作用的影响,因此导致模拟结果略大于实验结果,但总体上的误

差稳定地保持在 10% 以内, 因此, 采用流固耦合的方法来研究一定炸药埋深下的爆炸工况是可行的, 同时也说明模拟过程中所使用的各种材料参数与各种设置可信。

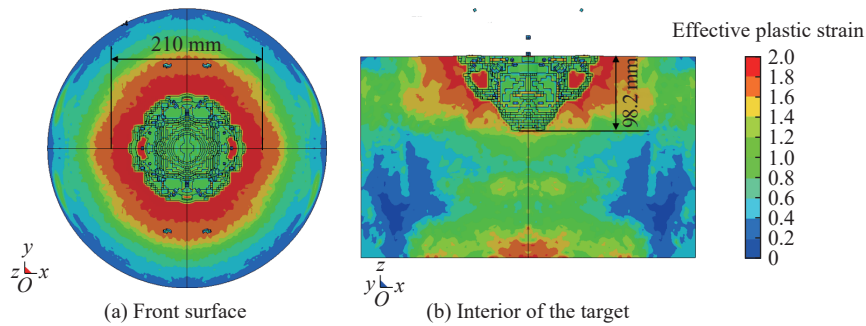


图 11 UHTCC 靶体破坏模式

Fig. 11 Damage modes of a UHTCC target

图 12(a)~(b) 分别为轴向和径向靶体单元的压力-时间曲线, 图中六点分别取为轴向和径向距离炸药中心点 5、10、15 cm 的靶体单元。从图 12(a) 中可以看出, 爆炸冲击波沿轴向的峰值压力衰减非常迅速, 冲击波到达这三点的压力分别为 207.7、24.9、18.6 MPa, 与第一点相比, 第二点和第三点压力分别减少了 88.0%、91.0%, 而冲击波到达径向三点的压力分别为: 61.5、25.8、15.0 MPa, 与轴向第一点压力相比, 第二点与第三点的压力分别减少了 58.0%、75.6%。对比冲击波沿轴向与径向的衰减速率可以发现: 轴向衰减速率大于径向衰减速率。这主要是由于爆炸冲击波的衰减速率和装药形状有关, 即装药尺寸越大的方向应力峰值的衰减也越快<sup>[33]</sup>, 而炸药模型沿轴向尺寸大于沿径向的尺寸, 这也解释了冲击波沿轴向衰减速率大于沿径向衰减速率的现象, 进一步验证了有限元模型的有效性。

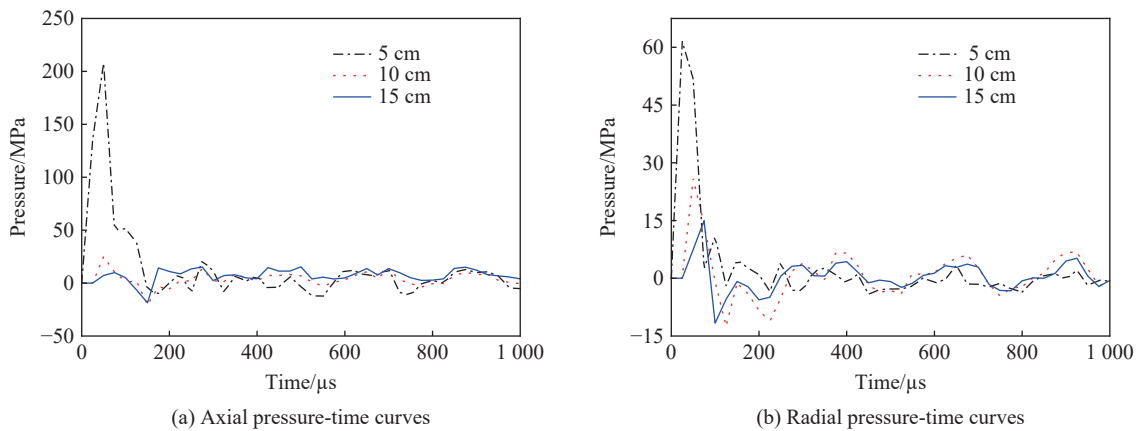


图 12 UHTCC 靶体压力时程曲线

Fig. 12 Pressure-time curves of the UHTCC target

### 3.4 参数分析

鉴于上述模型的可靠性, 采用 3.2~3.3 节中 UHTCC 的 K&C 模型参数和有限元模型, 并以 3.3 节中的模拟结果作为对照组。采用数值模拟的方法探究炸药埋深为 40 mm 时靶体抗压强度、抗拉强度、拉伸韧性对抗爆性能的影响。

#### 3.4.1 抗压强度

图 13 中给出了抗压强度为 40、60、80、100、120 MPa 时靶体破坏形态的预测结果。所有抗压强度下靶体都未发生整体性断裂和震塌现象, 仅背爆面出现了一定单元剥落的现象。此外, 随着靶体材料抗压强度的提高, 靶体迎爆面漏斗坑的尺寸和损伤范围都未发生明显改变。因此单纯提高 UHTCC 靶体的抗压强度对其在埋置炸药深度条件下的抗爆性能影响不大。

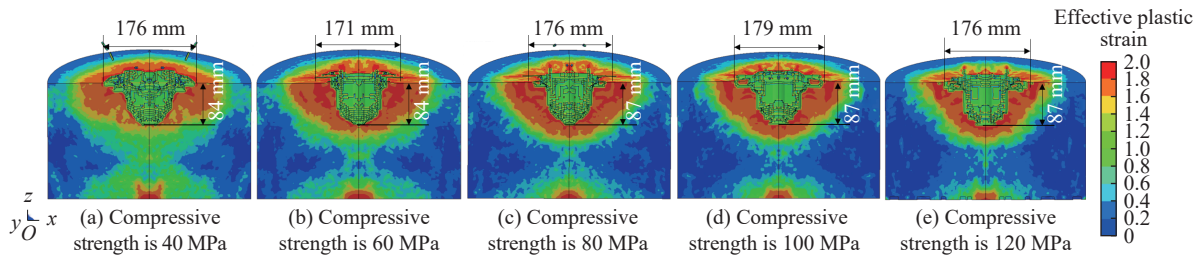


图 13 抗压强度对 UHTCC 靶体破坏形态的影响

Fig. 13 The effect of compressive strength on the damage pattern of UHTCC targets

3.4.2 抗拉强度

UHTCC 抗拉强度对靶体抗爆性能的影响如图 14 所示。从图 14 中可以看出,随着 UHTCC 靶体抗拉强度的提高,靶体迎爆面漏斗坑的尺寸逐渐变小并且背爆面的的损伤程度也有所减轻。这主要是因为当炸药埋置在靶体内部爆炸时,炸药周围的材料会受到巨大的拉伸和剪切破坏作用,同时爆炸产生的爆轰波传递到靶体背面时发生反射,爆轰波立刻变成拉伸波,造成靶体背爆面震塌和崩落。而提高 UHTCC 靶体的抗拉强度可以有效地减少这种拉伸作用对靶体的影响。因此单纯提高 UHTCC 的抗拉强度,可以提高 UHTCC 靶体的抗爆炸性能。

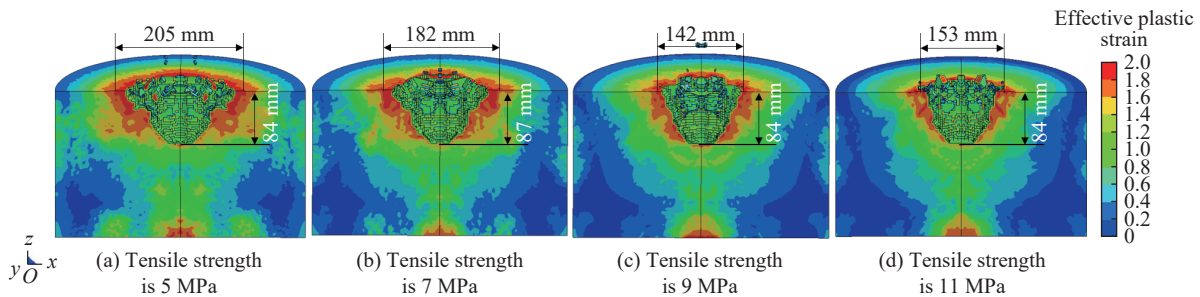


图 14 抗拉强度对 UHTCC 靶体破坏形态的影响

Fig. 14 The effect of tensile strength on the damage pattern of UHTCC targets

3.4.3 拉伸韧性

UHTCC 的 K&C 模型中拉伸韧性主要是通过拉伸参数  $b_2$  来控制,如图 15 所示,当  $b_2=-11.3$  时,该模型预测的结果与 UHTCC 拉伸应力应变曲线更接近。图 16 中展示了不同拉伸韧性下, UHTCC 靶体破坏形态的模拟结果。可以看出,当  $b_2=1.35$  时,靶体发生了严重的整体性破坏,而随着 UHTCC 韧性的提高,靶体的破坏形式也从整体破坏转变为局部破坏。这是由于提高材料的拉伸韧性可以增强材料的吸能效果,从而防止靶体发生脆性破坏。因此提高 UHTCC 的韧性可以增强靶体的抗爆性能。

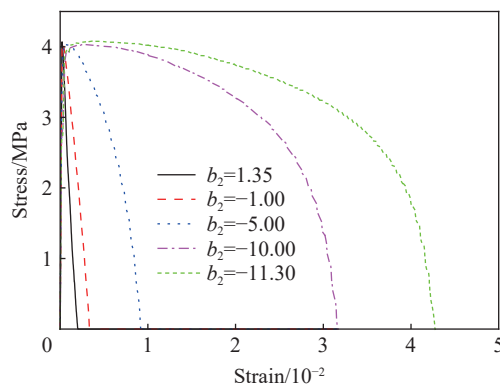


图 15 损伤参数  $b_2$  对单轴拉伸应力应变曲线的影响

Fig. 15 The effect of damage parameter  $b_2$  on uniaxial tensile stress-strain relationship

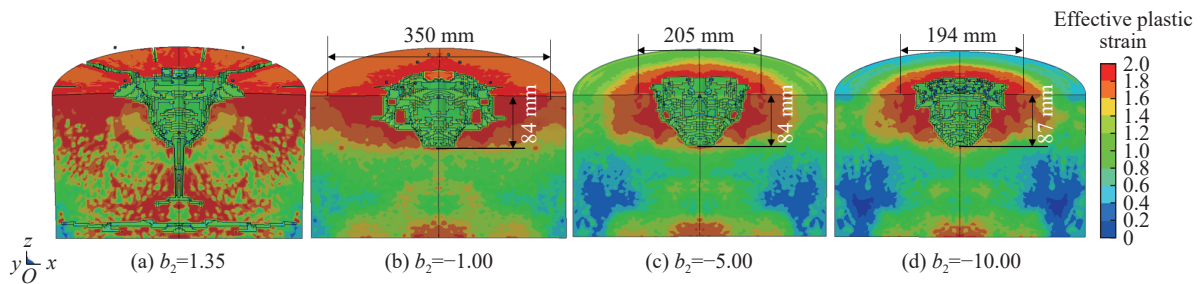


图 16 拉伸韧性对 UHTCC 靶体破坏形态的影响

Fig. 16 The effect of tensile toughness on the damage pattern of UHTCC targets

## 4 结 论

采用实验研究和数值模拟的方法对相同抗压强度的 UHTCC 和 HSC 靶体在不同炸药埋深下的抗爆性能进行了探究, 并利用数值模拟对不同抗压强度、抗拉强度和拉伸韧性的 UHTCC 靶体在炸药埋深为 40 mm 时的破坏形态进行了分析, 得到以下结论。

(1) 在相同炸药量和炸药埋深下, UHTCC 靶体的抗爆炸性能优于普通高强混凝土, 具体体现在: 迎爆面损伤面积小, 爆炸后保持良好整体性(剩余靶体占整个靶体比例更小)。

(2) 内埋抗爆实验结果表明: 同种材料在相同炸药量下, 炸药埋置越深靶体的破坏程度越严重(靶体的破坏形式)。

(3) 接触爆炸实验结果显示, UHTCC 以及 HSC 的抗爆性能参数分别为  $K_a(\text{UHTCC})=0.283$ 、 $K_a(\text{HSC})=0.382$ 、 $K_b(\text{UHTCC})=0.146$ 、 $K_b(\text{HSC})=0.136$ 。

(4) 利用 LS-DYNA 对不同埋置深度下 UHTCC 靶体的抗爆炸实验进行数值模拟, 模拟结果与实验结果吻合较好。模拟结果表明: 爆炸冲击波沿靶体径向的衰减速度大于沿轴向的衰减速度。

(5) 通过参数分析发现, 提高 UHTCC 的抗压强度对一定埋置深度下的抗爆漏斗坑没有明显的变化, 增强 UHTCC 的韧性可以防止靶体发生整体性的脆性破坏, 提升 UHTCC 的抗拉强度可以减小靶体迎爆面的开坑直径。

## 参考文献:

- [1] 巫绪涛. 钢纤维高强混凝土动态力学性质的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006. DOI: 10.7666/d.y919065.
- [2] 王涛, 余文力, 王少龙, 等. 国外钻地武器的现状与发展趋势 [J]. *导弹与航天运载技术*, 2005(5): 51–56. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7182.2005.05.011.  
WANG T, YU W L, WANG S L, et al. Present status and tendency of foreign earth-penetrating weapons [J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2005(5): 51–56. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7182.2005.05.011.
- [3] 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.
- [4] KENNEDY R P. A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1976, 37(2): 183–203. DOI: 10.1016/0029-5493(76)90015-7.
- [5] 王成, 付晓磊, 宁建国. 柱形装药爆炸破坏混凝土的数值模拟分析 [J]. *计算力学学报*, 2007, 24(3): 318–322. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4708.2007.03.012.  
WANG C, FU X L, NING J G. Numerical simulation of cylindrical charge damaging concrete medium [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2007, 24(3): 318–322. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4708.2007.03.012.
- [6] 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.
- [7] 李庆华, 赵昕, 徐世焱. 纳米二氧化硅改性超高韧性水泥基复合材料冲击压缩试验研究 [J]. *工程力学*, 2017, 34(2): 85–93.

- DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.06.0477.
- LI Q H, ZHAO X, XU S L. Impact compression properties of Nano-SiO<sub>2</sub> modified ultra high toughness cementitious composites using a split Hopkinson pressure bar [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(2): 85–93. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.06.0477.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] LI V C, HASHIDA T. Engineering ductile fracture in brittle-matrix composites [J]. *Materials Letter*, 1993, 12(12): 898–901. DOI: 10.1007/BF00455611.
- [12] 徐世焱, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料直接拉伸试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2009, 42(9): 32–41. DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2009.09.005.
- XU S L, LI H D. Uniaxial tensile experiments of ultra-high toughness cementitious composite [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(9): 32–41. DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2009.09.005.
- [13] 徐世焱, 蔡向荣. 超高韧性纤维增强水泥基复合材料基本力学性能 [J]. *水利学报*, 2009, 40(9): 1055–1063. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2009.09.005.
- XU S L, CAI X R. Experimental study on mechanical properties of ultra-high toughness fiber reinforced cementitious composite [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(9): 1055–1063. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2009.09.005.
- [14] 徐世焱, 蔡新华, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料抗冻耐久性性能试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2009, 42(9): 42–46. DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2009.09.006.
- XU S L, CAI X H, LI H D. Experimental study of the durability properties of ultra-high toughness cementitious composites under freezing and thawing cycles [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(9): 42–46. DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2009.09.006.
- [15] 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.
- [16] 李庆华, 舒程岚青, 徐世焱. 超高韧性水泥基复合材料的层裂试验研究 [J]. *工程力学*, 2020, 37(4): 51–59. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.02.0060.
- LI Q H, SHU C L Q, XU S L. Experimental study on spall behavior of ultra-high toughness cementitious composites [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(4): 51–59. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.02.0060.
- [17] 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).
- [18] LI J, ZHANG Y X. Evaluation of constitutive models of hybrid-fibre engineered cementitious composites under dynamic loadings [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 30: 149–160. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.11.031.
- [19] 陈超. 超高韧性水泥基复合材料动态力学性能数值模拟研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [20] 徐世焱, 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. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.09.0548.
- XU S L, LI R, LI Q H, 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. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.09.0548.
- [21] ASTM. Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete: C469 [S]. West Conshohocken, PA: Annual Book of ASTM Standards, 2011.
- [22] Japan Society of Civil Engineers. Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks (HPFRCC) [M]. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 2007.
- [23] 余伟, 张云升, 孙伟, 等. 绿色超高性能纤维增强水泥基防护材料抗侵彻、抗爆炸试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(S1): 2777–2783.
- SHE W, ZHANG Y S, SUN W, et al. Experimental research on anti-penetration and anti-explosion properties of green ultra-

- high performance fiber reinforced cement-based protective materials [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(S1): 2777–2783.
- [24] 戎志丹, 孙伟, 张云升, 等. 超高性能水泥基复合材料的抗爆炸性能 [J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(3): 232–238. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)03-0232-07.
- RONG Z D, SUN W, ZHANG Y S, et al. Characteristics of ultra-high performance cementitious composites under explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(3): 232–238. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)03-0232-07.
- [25] 程扬帆. 基于储氢材料的高能乳化炸药爆轰机理和爆炸性能研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [26] 宁建国, 王成, 马天宝. 爆炸与冲击动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 145–155.
- [27] 徐世娘, 吴平, 李庆华, 等. 超高韧性水泥基复合材料 K&C 模型参数的确定 [J/OL]. *建筑结构学报*, 2021: 1–16[2021-03-09]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?doi=10.14006/j.jzjgxb.2020.0587>. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.0587.
- XU S L, WU P, LI Q H, et al. Determination of K&C model parameters for ultra-high toughness cementitious composites [J/OL]. *Journal of Building Structures*, 2021: 1–16[2021-03-09]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?doi=10.14006/j.jzjgxb.2020.0587>. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.0587.
- [28] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User's manual version 970 [M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2003.
- [29] WANG J. Simulation of landmine explosion using LS-DYNA3D software: benchmark work of simulation of explosion in soil and air: DSTO-TR-1168 [R]. Australia: Weapons Systems Division Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 2001.
- [30] FENG W H, CHEN B Y, YANG F, et al. Numerical study on blast responses of rubberized concrete slabs using the Karagozian and Case concrete model [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 33: 101610. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101610.
- [31] LI J, WU C Q, HAO H. An experimental and numerical study of reinforced ultra-high performance concrete slabs under blast loads [J]. *Materials & Design*, 2015, 82: 64–76. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.05.045.
- [32] HONG J, FANG Q, CHEN L, et al. Numerical predictions of concrete slabs under contact explosion by modified K& C material model [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 155: 1013–1024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.060.
- [33] 赵凯, 王肖钧, 卞梁, 等. 混凝土介质中不同药形装药爆炸波传播特性的数值模拟 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2007, 37(7): 711–716. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2778.2007.07.004.
- ZHAO K, WANG X J, BIAN L, et al. Numerical study on the propagation and damage behavior of the blasting wave with differently shaped explosives in concrete [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2007, 37(7): 711–716. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2778.2007.07.004.

(责任编辑 曾月蓉)