第 48 卷第 8 期
2020 年 8 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 8
August，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200231

基于功能梯度原理的超高性能混凝土抗侵彻爆炸性能

赖建中，尹雪祥，李宏基，周捷航，康柠宇

(南京理工大学材料科学与工程学院，南京 210094)

摘　要：研究了单层结构和功能梯度结构的超高性能混凝土(UHPC)的抗侵彻爆炸性能。制备了 3 种靶体：普通混凝土靶，超高性能混凝土靶，以及不同种类 UHPC 组合而成的功能梯度混凝土靶(FGCC)，并对不同种类混凝土靶体进行了侵彻爆炸实验，利用 AUTODYN 有限元软件进行了数值模拟分析。结果表明：从破坏形态上看，在侵彻爆炸耦合破坏下，FGCC 靶破坏深度最小，弹坑深度不超过抗钻层范围。从损伤分布上看，混凝土损伤主要集中在迎弹面以及弹孔通道周围并向背弹面延对角线方向传递，纤维增强的靶体保持较好的完整性。从能量角度看，抗钻层高强粗骨料吸收子弹动能的能力强于混凝土基体。综合实验和数值模拟证明了功能梯度结构的 UHPC 具有优异的抗侵彻爆炸能力。

关键词：超高性能混凝土；功能梯度；侵彻爆炸；数值模拟
中图分类号：TU528.31　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)08–1188–13
网络出版时间：2020–06–23



Anti-Penetration and Explosion Performance of Ultra-High Performance Concrete Based on the Principle of Functional Gradient

LAI Jianzhong, *YIN Xuexiang*, *LI Hongji*, *ZHOU Jiehang*, *KANG Ningyu*
(School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Ordinary concrete target, ultra-high performance concrete (UHPC) target and functionally graded concrete target composed of different kinds of UHPC were prepared. The penetration and explosion experiments were performed on different types of concrete targets. The numerical simulation analysis was carried out by finite element method. The results show that in terms of the failure mode, the functionally graded concrete target has the smallest fracture depth, and the crater depth does not exceed the range of the anti-penetration layer under the coupled load of penetration and explosion. In terms of damage distribution, the concrete damage is mainly concentrated on the front surface and around the projectile channel and transmitted diagonally on the rear surface. Fiber reinforced targets maintain a good integrity. From the perspective of energy, the ability of absorbing projectile kinetic energy of high-strength coarse aggregates in anti-penetration layer is greater than that of concrete matrix. UHPC with a functionally graded structure has a superior anti-penetration and explosion ability.

Keywords: ultra-high performance concrete; functional gradient; penetration and explosion; numerical simulation

超高性能混凝土(UHPC)是一种超高强高韧性的水泥基复合材料，其静态抗压强度达到 150 MPa 以上，在国内外重要建筑工程已经有广泛应用，例如京沪高速铁路全线的电缆槽盖板都使用超高性能混凝土材料制作。在军事方面，UHPC 因具有出色的动态力学性能，有望替代普通混凝土成为重要的防护工程材料。随着新式武器侵彻速度的提高，以及侵彻和爆炸的协同破坏，防护工程材料面临更严峻的挑战，而研究基于 UHPC 的新型结构材料有望突破现有混凝土防护工程材料的瓶颈。

功能梯度水泥基复合材料(FGCC)是现有水泥基复合材料的潜力军。此材料以内部组分与结构的梯级变化而区别于其他混凝土材料。在防御极具破坏力的深钻地武器攻击时，传统的钢筋混凝土结构显得力不从心。而功能梯度混凝土具有高抗力、防火防爆、可设计性强等特点，能够应对先进钻地弹

收稿日期：2020–03–31。　修订日期：2020–05–04。
基金项目：国家自然科学基金(51678308，51278249)。
第一作者：赖建中(1978—)，男，博士，教授。

Received date: 2020–03–31.　**Revised date:** 2020–05–04.
First author: LAI Jianzhong (1978–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: jzh-lai@163.com

的侵彻爆炸耦合破坏。通过不同种类超高性能混凝土的分层叠加，优化 FGCC 的组成和结构，可使其适应于军事防御、路面跑道和大跨桥梁建设的特殊需要。周楠等[1]综述了以金属复合靶板、陶瓷/金属复合靶板为代表的功能梯度复合靶在弹丸撞击作用下的抗侵彻性能、破坏模式和毁伤机理等的研究现状。李志华等[2]采用国产 PVA 纤维制备了 ECC 材料，通过双面剪切试验，研究了 ECC-RC 功能梯度混凝土的层间界面黏结性能及 3 个参数对其层间界面黏结性能的影响。Pietras 等[3]提出了功能梯度蒸压加气混凝土(FGAAC)的新概念，通过实验对 FGAAC 进行了评估，并给出了描述其力学行为的数值模型。Mastali 等[4]研究了功能梯度钢筋混凝土(FGRC)在落锤和弹丸作用下的抗冲击性能，结果表明功能梯度混凝土的侵彻深度、前后毁伤面积比均匀纤维体积率的混凝土明显减少。

ANSYS/AUTODYN 有限元软件常常被用来解决固体、流体、气体及其相互作用的非线性动力学问题。在涉及高应力、高应变率和大变形的侵彻爆炸问题时，采用 ANSYS/AUTODYN 可以提高分析的效率和质量。本工作针对混凝土靶体的侵彻爆炸问题，采用光滑粒子流体动力学算法(SPH 算法)进行模拟。SPH 是一种应对高速冲击、高应变率的复杂问题时的灵活有效数值计算方法，可以将空间离散成一系列粒子，所以不存在类似 Lagrange 算法网格畸变缺失的问题，从而较为广泛应用在侵彻爆炸模拟上。邓勇军等[5]开展了直径 156 mm 的大尺寸弹体正侵彻钢筋混凝土靶试验，得到了侵彻过程中不同位置的混凝土压力值，结合数值模拟，分析了混凝土的破坏损伤分区，不同位置的钢筋应力状态。Tan 等[6]进行了地下爆炸试验和相应的数值模拟，研究了混凝土板-土双层结构的破坏机理，并基于实验和数值模拟讨论了爆炸深度、爆炸波前和爆炸产物膨胀对失效模式和失效机理的影响。

本实验中制备了普通混凝土靶、单层结构 UHPC 靶和功能梯度结构 UHPC 靶，并对其进行了抗侵彻爆炸实验。采用 20 mm 口径钢弹，炸药类型为 RDX-8701。采用数值模拟方法对不同靶体的侵彻爆炸破坏过程和损伤状态进行了分析，所建立的模型为 AUTODYN-2D 整体模型，对比了仿真与实验结果。

1　实验

1.1　原材料与配合比

所用原料包括：水、P•II52.5 硅酸盐水泥、硅灰、超细矿粉、黄砂、7 mm 氧化铝陶瓷球粗骨料、5~20 mm 玄武岩粗骨料、6~20 mm 超细钢纤维和 20 mm 超细玄武岩纤维、高效减水剂等，具体配合比如表 1 所示。混凝土靶的养护制度为标准养护 90 d，养护条件为温度(20±2) ℃，相对湿度>90%。FGCC 抗钻层的粗骨料体积率较高，制备时采用钢纤维体积率为 3%的 UHPC 浇筑在粗骨料间隙中，并通过振动促进密实。抗裂层中 6 mm 和 20 mm 两种钢纤维的体积含量各为 3%。制备的靶体中 UHPC 流动度 210 mm，FGCC 抗裂层混凝土流动度 150 mm，抗剥落层混凝土流动度 240 mm，抗钻层采用流动度 240 mm 的超高性能混凝土灌注在紧密堆积的粗骨料中，普通混凝土坍落度 150 mm。

1.2　靶体尺寸和结构

所有混凝土靶体为 ϕ300 mm×300 mm 圆柱体，靶体外采用 10 mm 厚的钢制圆桶进行约束，功能梯度 UHPC 靶的结构如图 1 所示。FGCC 靶体采用分层连续浇筑的工艺。在确定各层厚度和配合比的基础上，同时制备各层的混凝土材料，然后在振动台

表 1　不同混凝土靶体的配合比

Table 1　Mix proportions of each layer of different concrete

Target	Target layer	Mass fraction/%			Mass ratio			Volume fraction/%			Strength/MPa	
		C	SIF	Slag	S/B	Sp/B	W/B	G	SF	BF	Compressive	Flexural
OC	Single layer	100	0	0	2	0.004	0.5	56.4	0	0	48	7.4
UHPC	Single layer	50	20	30	1.1	0.016	0.2	0	3	1	180	39.2
	Crack resistance layer	50	20	30	1.0	0.016	0.2	0	6	0	196.8	76
FGCC	Anti- penetration layer	50	20	30	1.2	0.016	0.2	46.2	1.5	0	208.5	42.2
	Spalling resistance layer	50	20	30	1.2	0.016	0.2	0	3	0	198.1	43.2

Note: C, SIF, B, S, Sp and W are cement, silica fume, binder, sand, water reducer and water, respectively; G, SF and BF are coarse aggregate, steel fiber and basalt fiber, respectively. Basalt coarse aggregate and ceramic ball coarse aggregate are used for OC and FGCC respectively. 6 mm and 20 mm hybrid steel fibers (3:3) are used in crack resistant layer, and 13 mm steel fibers are used for the rests. The maximum size of sand for UHPC and FGCC is 1.25 mm.

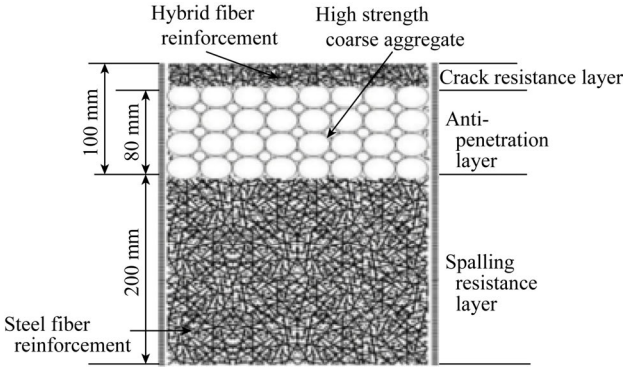


图 1 FGCC 靶结构

Fig. 1 Structure of FGCC target

上依次浇筑各层材料，每浇筑完一层进行振动，确保各层界面相互融合，紧密连接。整个实验过程在振动台上连续不间断进行。同时各层的基体材料配合比相同，从而保证了各层的界面相容性。界面处的材料在振动作用下相互融合，围绕界面形成了局部梯度变化。纤维的存在对界面间的结合形成了有效的增强作用，并且界面间的结合强度会随着养护龄期的增加而提高。

功能梯度 UHPC 靶分为抗裂层、抗钻层以及抗剥落层 3 层结构，分别为混杂纤维增强 UHPC、含高强粗骨料 UHPC 和钢纤维增强 UHPC，每层材料的抗压抗弯强度如表 1 所示。抗钻层单次侵彻深度为 30 mm 左右，为抵抗 3 次重复打击，抗钻层和抗裂层的总厚度要超过 90 mm。由于靶体总厚度为 300 mm，综合考虑成本和性能，最终抗钻层和抗裂层的设计厚度为 100 mm，抗剥落层的设计厚度为 200 mm。抗钻层的粗骨料直径为 7 mm，为达到抗裂的目的，抗裂层的厚度需要大于粗骨料直径的 2 倍，因而采用了 20 mm。最终确定抗裂层、抗钻层、抗剥落层厚度分别为 20、80、200 mm。

1.3 侵彻爆炸实验方法

侵彻实验采用 30 mm 口径滑膛炮，子弹选用 35CrMnSi 材料并经过热处理加工制成，直径为 20 mm。通过调节发射药填装量来控制子弹侵彻速度为 1 290 m/s，具体子弹参数见表 2。侵彻实验装置如图 2 所示，包括滑膛炮，锡箔纸(测速用)和混凝土靶，实验过程中测量靶体的侵彻深度和开坑直径。靶径/弹径比为 15，不属于半无限靶，但是由于高速侵彻的子弹达到 1 290 m/s，同时使用了厚壁钢桶约束条件，可以等效看作半无限靶，边界效应对侵彻深度的影响较小。

爆炸实验是在侵彻实验完成之后，在侵彻留下的漏斗形弹坑中放入压制好的炸药柱，通过引爆器直接引爆炸药。选用 RDX-8701 型炸药，RDX 具有 1.58 倍的 TNT 当量[8]，实验参数如表 3 所示。

表 2 子弹参数

Table 2 Parameters of bullet

Material	Diameter/mm	Length/mm	Head shape	Radius of curvature/mm	Velocity/(m·s^{-1})
35CrMnSi	20	80	Oval	30	1 290

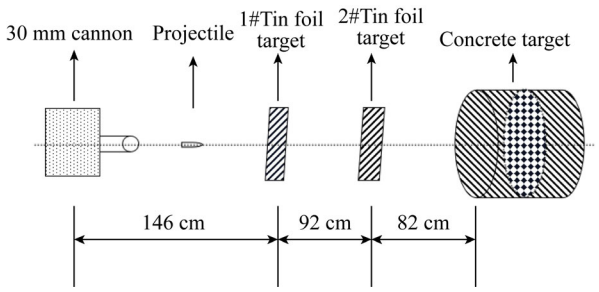


图 2 侵彻实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of penetration experiment

表 3 不同靶体的试验参数

Table 3 Test parameters of different targets

Target number	Penetration velocity/(m·s^{-1})	Mass/g	
		Explosive	Equivalent TNT
OC	1 290	33	52.14
UHPC	1 290	33	52.14
FGCC	1 290	70	110.6

2 结果

2.1 侵彻和爆炸破坏形态

不同靶体在经受子弹高速侵彻过后表现的差异性十分明显。侵彻实验的结果主要从迎弹面受损程度以及背弹面开裂程度来分析。如图 3 所示，OC 靶破坏程度最大，整个迎弹面已经完全剥落，混凝土靶体与约束钢桶产生了几条明显缝隙，同时开坑直径最大，侵彻深度最深，背弹面出现多条明显裂纹，抗弹性能最低。UHPC 靶虽然具有纤维增强增韧的作用，表现出均质材料的优异静态力学性能，但是由于弹体高速冲击下动能瞬时释放，仍然使弹体深深嵌入靶体，留下较深的侵彻孔道。

在相同条件下，功能梯度混凝土靶高速侵彻实验的结果有所不同。从迎弹面能观察到 FGCC 靶中紧密排列的陶瓷球，由于含有高强骨料的抗钻层的存在，有效阻止了子弹侵彻深度的增加。这个结果与王豪[9]研究成果吻合，其基于随机骨料模型的数值建模方法，研究了骨料体积掺量为 0%~65%的混

凝土靶的抗侵彻性能，结果表明骨料的加入可以有效地减小混凝土靶的侵彻深度，且减小的幅度近似与骨料的体积掺量呈线性关系。FGCC 靶的阻裂层中交错分布的钢纤维吸收了子弹撞击靶面的冲击波能量，并将开裂或者快要剥落的部分牢牢固定在靶面，减少了迎弹面的开坑面积，使靶体呈现小开坑、低穿深的特征。如图 4 所示，强度较低的 OC 靶背弹面出现了脆性开裂，其他两类靶的背弹面都没有明显裂纹或损伤。



(a) OC



(b) UHPC



(c) FGCC

图 3　不同靶体迎弹面侵彻破坏情况

Fig. 3　Failure of the front surface of different targets subjected to penetration



(a) OC



(b) UHPC



(c) FGCC

图 4　不同靶体背弹面侵彻破坏情况

Fig. 4　Failure of the rear surface of different targets subjected to penetration

侵彻爆炸后产生的开坑面积是衡量混凝土靶抗侵彻爆炸性能的重要指标。开坑面积描述的是靶体在抗冲击表面上的损伤程度，与侵彻深度相互结合，使破坏形貌更加立体。利用 Photoshop 软件采用像素法计算了迎弹面的开坑面积[10]，开坑区域像素与靶体迎弹面像素之比即为开坑占比。

弹体侵彻会在迎弹面上留下漏斗状的弹坑，为了使爆炸效果更好，在弹坑中心位置安置炸药柱，爆炸后的迎爆面和背爆面如图 5 和图 6 所示。



(a) OC



(b) UHPC



(c) FGCC

图 5 不同靶体迎爆面破坏情况

Fig. 5 Failure of the front surface of different targets subjected to explosion

对于 OC 靶和 UHPC 靶而言，弹坑中心位置爆炸后破坏形态与侵彻破坏形态相似，其破坏面积增大，由于没有高强抗钻层防护，爆炸破坏深度进一步增加，表现为爆炸压缩弹坑。而 FGCC 靶的爆炸破坏主要体现在弹坑面积的扩大上，爆炸冲击波没有明显造成陶瓷骨料层的脱落，抗钻层仍然存在，能量一部分被高强骨料反射，其余向弹坑圆面的径向方向释放，表现为弹坑被炸平。相较于迎弹面压缩应力波的炸平效果，背爆面会形成反射拉伸波，造成背面的拉伸开裂。OC 靶背爆面产生明显的大尺寸裂纹，而含有钢纤维的 UHPC 靶与 FGCC 靶背面只有轻微损伤。



(a) OC



(b) UHPC



(c) FGCC

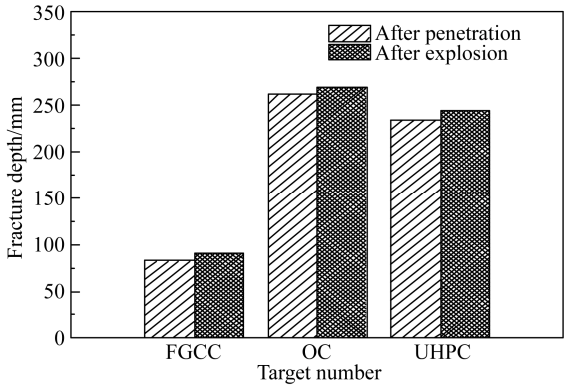
图 6 不同靶体背爆面破坏情况

Fig. 6 Failure of the rear surface of different targets subjected to explosion

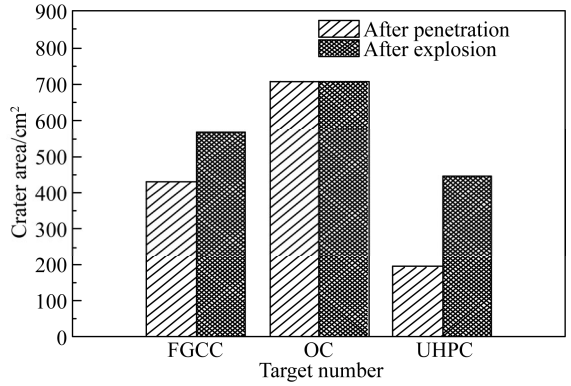
2.2　侵彻爆炸破坏深度和开坑面积

(1) 破坏深度

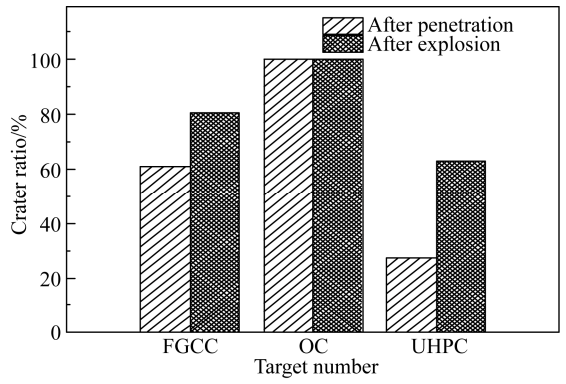
从图 7a 可以发现，OC 靶和 UHPC 靶的侵彻深度都大于 230 mm，而高强度、均质的 UHPC 靶侵彻深度明显小于普通混凝土靶。功能梯度结构的 FGCC 靶的侵彻深度在 90 mm 以内，这得益于含有高强粗骨料的抗钻层的作用，子弹高速撞击粗骨料易发生变形、断裂甚至出现偏转或者被弹开的现象[11]。由于弹体在剧烈的撞击摩擦中其体积和动能快速损耗，导致侵彻深度大幅降低，从而表现出优异的抗侵彻性能，这证明了功能梯度结构的在抗冲击方面的独特作用。实验选用弹坑位置进行爆炸，爆炸冲击能量主要向弹坑径向释放，对 3 种混凝土的破坏深度增加都不明显。



(a)



(b)



(c)

图 7　侵彻爆炸下不同靶体的破坏深度、开坑面积和开坑占比

Fig. 7　Fracture depth, crater area and crater ratio of different targets subjected to penetration and explosion

(b) 开坑面积和开坑占比

如图 7 所示，侵彻后 OC 靶的迎弹面几乎完全破坏，UHPC 靶的开坑面积是最小的。子弹深入靶体内部后，由于 UHPC 整体含有纤维，冲击动能被吸收，未在迎弹面造成大面积破坏，其开坑占比仅为 27.4%。FGCC 靶的开坑面积介于前两者之间，高速侵彻下靶体的开坑占比达到 60.9%，破坏面积为 430.2 mm^2。UHPC 靶采用了直径分别为 0.2 mm 的钢纤维和直径为 17 μm 的玄武岩纤维，通过这两种不同尺度的纤维混杂可以抑制不同尺度裂纹的扩展，减小 UHPC 的开裂面积，提高混凝土的抗冲击性能。因此 UHPC 侵彻和爆炸后的弹坑面积最小。施惠生等[12]对混凝土界面区域微观结构分析表明骨料的掺入会减弱混凝土界面区域的强度。Diamond 等[13]提出大尺寸骨料在距离其表面 80 μm 处水泥粒子才平稳，近骨料表面处水泥粒子存在未水化现象。当爆炸实验完成后，不含粗骨料的 UHPC 的开坑占比最低，为 62.9%。由于 FGCC 靶弹坑较浅，炸药在弹坑内近似于表面爆炸，无约束状态有利于能量消散[14]。FGCC 靶体爆炸后开坑占比达到在 80.4%，但是由于含有纤维的阻裂层和含有高强粗骨料的抗钻层的作用，迎弹面没有像 OC 靶一样完全破坏。

3　混凝土靶侵彻爆炸数值模拟

对不同类型的混凝土靶体抗侵彻和抗爆炸过程进行了数值模拟，采用有限元软件 AUTODYN 模拟不同靶体的毁伤过程，并与实验结果进行对比。

3.1　材料模型参数

子弹采用 35CrMnSi 材料，状态方程为 Linear 状态方程，强度和失效模型采用 Johnson Cook 模型[15]模型参数见表 4。

混凝土采用 Palpha 状态方程[17–18]，强度和失效模型为 RHT Concrete 模型[19–20]，侵蚀应变为几何应变，模型参数见表 5。

陶瓷骨料采用的是氧化铝陶瓷球，其状态方程为 shock 状态方程[22]，强度模型为 von Mises 模型。具体模型参数见表 6。

表 4 子弹模型参数[16]

Table 4 Parameters of bullet model

ρ/(g·cm^{-3})	Bulk modulus/GPa	Specific heat capacity/(J·kg^{-1}·K^{-1})	Shear modulus/GPa	Yield strength/GPa	Strain rate constant	Enhan-cement index	Hardening constant/GPa
7.76	203	477	98.5	1.59	0.014	0.15	3
*D*1	*D*2	*D*3	*D*4	*D*5	Thermal softening index	Melting point/K	Reference temperature/K
0.05	3.44	–2.12	0.002	0.61	1.03	1793	293

Note: *D*1, *D*2, *D*3, *D*4 and *D*5 are damage constants.

表 5 混凝土模型参数[21]

Table 5 Parameters of concrete model

ρ/(g·cm^{-3})	*A*1/GPa	*A*2/GPa	*A*3/GPa	*T*1/GPa	Shear modulus/Ga	f_c/GPa
2.75	35.27	39.58	9.04	35.27	22.06	0.185
Specific heat capacity/(J·kg^{-1}·K^{-1})	Tensile strain rate	Breaking strength constant	Breaking strength index	*D*1	*D*2	Reference temperature/K
654	0.012 5	1.6	0.61	0.04	1	293

Note: *A*1 is bulk modulus. *A*2, *A*3 and *T*1 are material constants. *D*1 and *D*2 are damage constants.

表 6 氧化铝陶瓷模型参数[23]

Table 6 Parameters of alumina model

ρ/(g·cm^{-3})	Gruneisen coefficient	Parameter *C*1/(m·s^{-1})	Shear modulus/GPa	Yield stress/GPa
3..9	0.5	6.9×10^3	100	8

炸药类型为 8701，状态方程采用 JWL，炸药模型具体参数如表 7 所示。

表 7 炸药模型参数[24–25]

Table 7 Parameters of explosive material

Explosive type	ρ/(g·cm^{-3})	*D*/(m·s^{-1})	*A*/GPa	*B*/GPa	R_1	R_2	ω	*E*/(GJ·m^{-3})	$P_{c\text{-}j}$/GPa
8701	1.78	8425	854.5	20.493	4.6	1.35	0.25	9.5	29.66

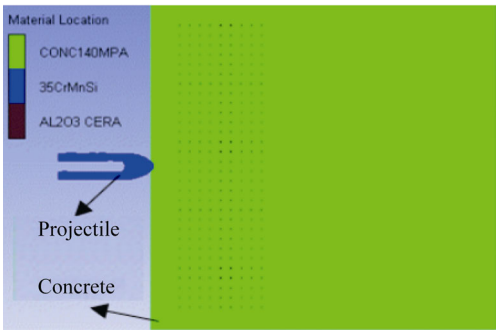
Note: *D* is C-J detonation velocity. *E* is C-J energy per unit volume. $P_{c\text{-}j}$ is C-J pressure. *A*, *B*, *R*1, *R*2 and ω are JWL coefficients.

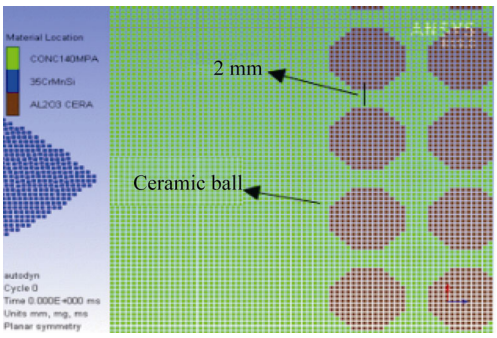
孔祥振等[26]基于 SPH 算法与混凝土动态损伤材料模型，对强动载下均质混凝土结构损伤破坏进行数值模拟，得到了实验的较好验证。在均质混凝土材料基础上采用 SPH 算法研究功能梯度结构的超高性能混凝土靶的侵彻爆炸过程。SPH 粒子大小为 0.5 mm，氧化铝陶瓷球之间的间距为 2 mm，靶体两侧采用固定边界约束，建立的 SPH 模型如图 8 所示。

3.2 侵彻过程模拟

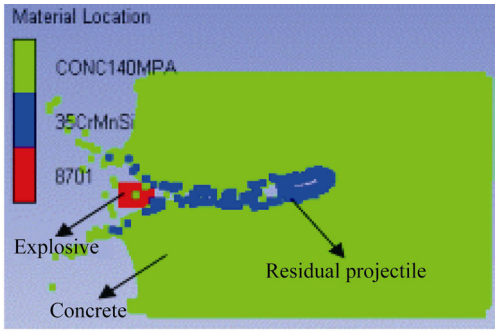
(1) 侵彻模拟误差

在侵彻速度为 1 290 m/s 的情况下，选取 3 种混凝土靶作为模拟对象，并与实测结果比较，验证模拟的可靠性(见表 8)。





(a) Penetration



(b) Explosion after penetration

图 8 SPH 模型

Fig. 8 SPH model

表 8　不同靶体实验与模拟结果对比

Table 8　Comparison of experiment and simulation results of different targets

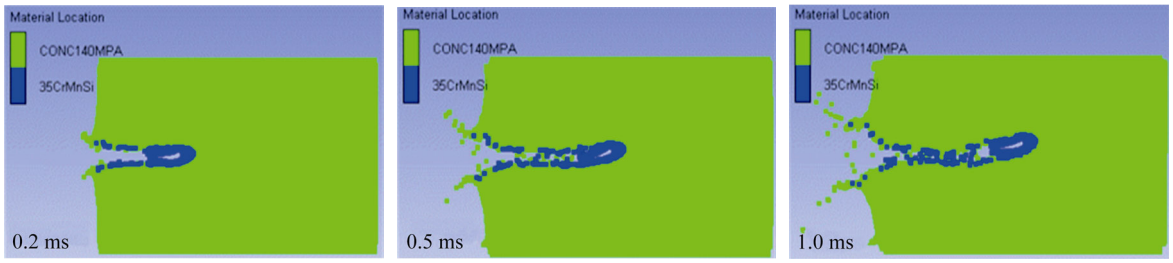
Target	Penetration velocity/(m·s^{-1})	Experimental penetration depth/mm	Simulated penetration depth/mm	Error/%
OC	1 290	261	250	4.2
UHPC	1 290	234	225	3.8
FGCC	1 290	81.6	84	2.9

从表 8 可以看出，OC 靶、UHPC 靶、FGCC 靶模拟侵彻深度与实测结果的误差范围控制在 5%以内，说明模拟结果可靠性较高。

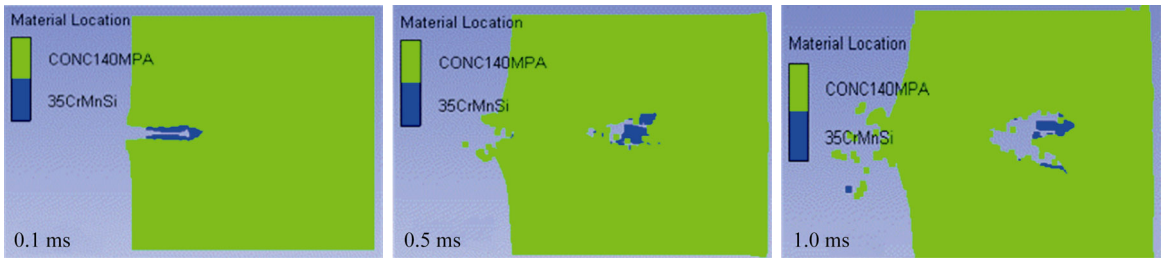
(2) 靶体的侵彻破坏形态

不同类型靶体的模拟侵彻破坏形态如图 9 所示，在侵彻速度为 1 290 m/s 的条件下，实际侵彻时间极短，在模拟过程选取 100、200、300 μs 作为时间节点，观察 3 种类型靶体的瞬时状态。欧阳昊等[27]研究表明：在弹体侵彻过程中，混凝土中的骨料对弹体的质量侵蚀有显著影响，更通过数值模拟准确地表征了影响的过程。OC 靶和 UHPC 靶都形成了狭长侵彻通道。由图 9a 可以看出，OC 靶中子弹仍保持一定的完整性，子弹表面出现明显的侵蚀，子弹在靶体内发生一定程度的偏转，侵彻深度在 100~200 μs 内仍在迅速增加；图 9b 中，由于 UHPC 靶体具有较高的强度，子弹在侵彻过程中迅速损耗，失去自身尺寸形态；图 9c 中，子弹在 FGCC 靶体的抗钻层中产生较大变形，速度快速衰减，陶瓷骨料对弹体的侵蚀和破坏效果显著。结合图 10 可知，FGCC 靶在 0.2 ms 时子弹速度降为零，而 OC 靶和 UHPC 靶到 0.6 ms 时子弹速度才放慢平稳。

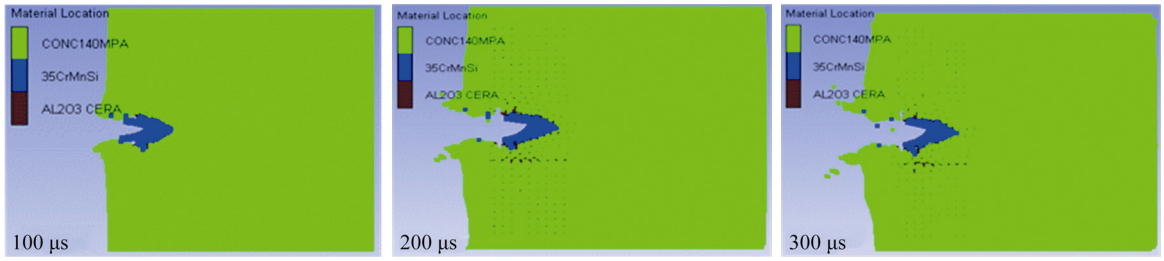
以 FGCC 靶体来看，侵彻过程可以分为 3 个阶段。第 1 阶段为 $0 \leqslant t \leqslant 10$ μs 左右，子弹接触靶体抗裂层，尚未接触到高强骨料，此阶段完成子弹速度下降为 1 000 m/s 左右。第 2 阶段为 10 μs$\leqslant t \leqslant$ 150 μs，子弹开始撞击阻裂层的高强陶瓷骨料，骨料与子弹发生强烈的碰撞与磨蚀，此阶段结束后，子弹速度降为 100 m/s 左右，此阶段速度降低的最迅速。第 3 阶段为 $t \geqslant 150$ μs，子弹减加速度逐渐降为零，此阶段结束后子弹速度接近零。



(a) OC



(b) UHPC



(c) FGCC

图 9　不同靶体的模拟侵彻破坏形态

Fig. 9　Simulation failure modes of different targets subjected to penetration

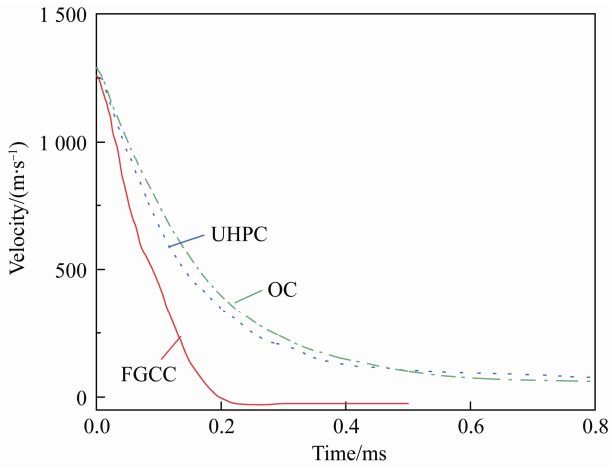


图 10 不同靶体子弹的速度时程曲线

Fig. 10 Velocity-time history of bullets in different targets

(3) 靶体的侵彻损伤发展及分布

在实验过程中，靶体损伤的发展难以数值化表示。Autodyn 软件模拟后的损伤，采用不同颜色代表不同的损伤等级，红色损伤最为严重，最终以云图形式显示。不同靶体的模拟侵彻损伤如图 11 所示。

从图 11 可以看出，UHPC 靶和 OC 靶的损伤程度远大于 FGCC 靶。对于功能梯度靶体，主要是骨料间隙中混凝土基体发生损伤，骨料损伤较小。损伤集中分布在迎弹面以及侵彻通道周围，远离弹着点靠近钢桶边缘的区域以及背弹面损伤较小。损伤的发展主要是由侵彻通道向两侧以及子弹的头部向靶体背弹面两端径向发展。因为侵彻速度大，靶体内部产生的应力较大，所以靶体内部的损伤分布较为广泛。

(4) 侵彻过程的能量转换

郭红梅等[28]从能量角度分析了爆炸荷载作用下超高性能钢筋混凝土柱中能量组成部分及材料组分能量的变化规律，进而研究了爆炸荷载作用下超高性能钢筋混凝土柱耗能机理，结果表明钢筋材料所吸收能量的占比很少。研究了不同靶材能量转换问题，在图 12 显示了不同混凝土靶体抗侵彻过程中

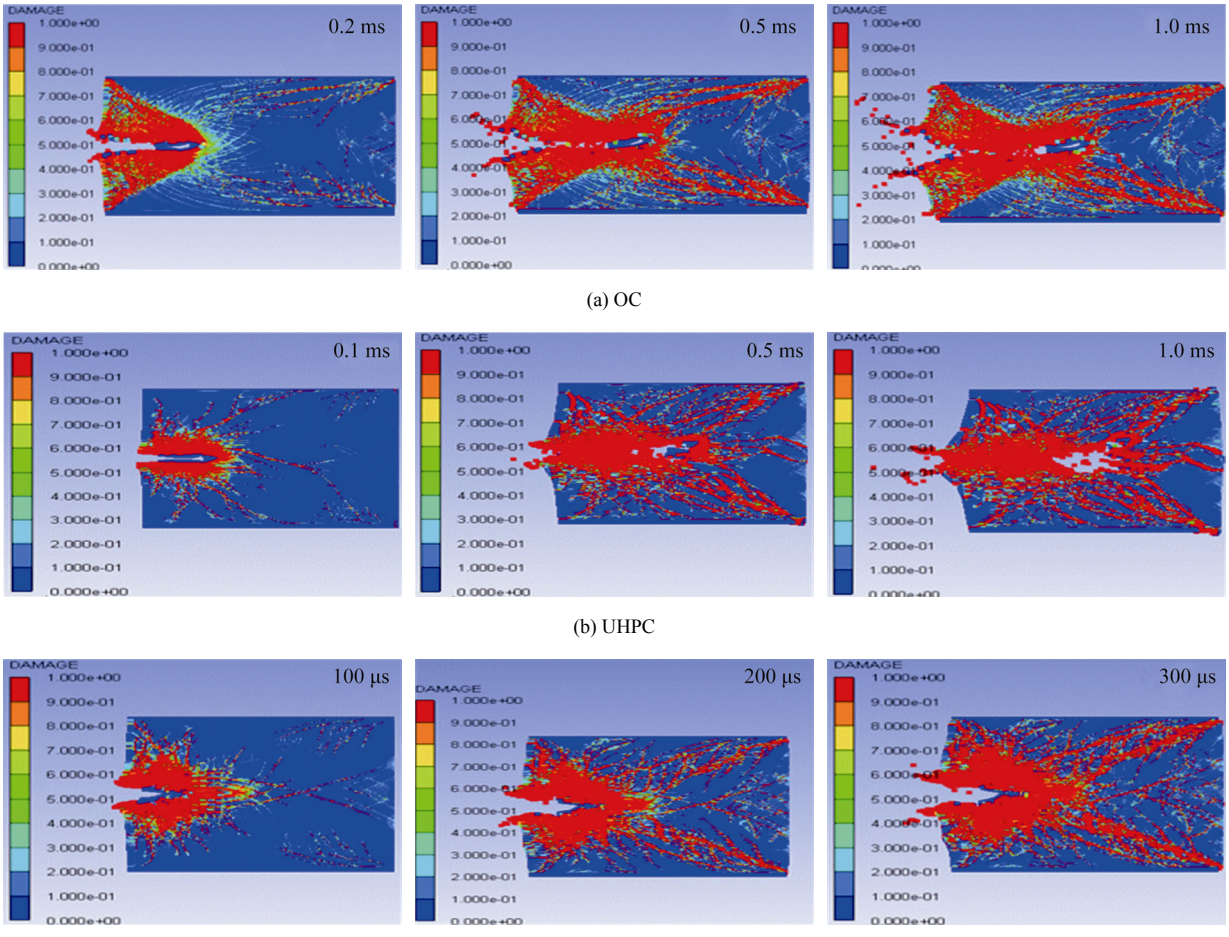
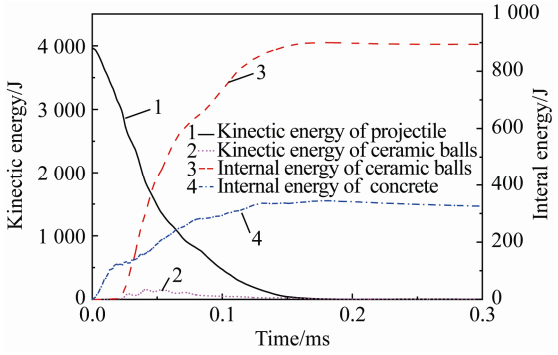


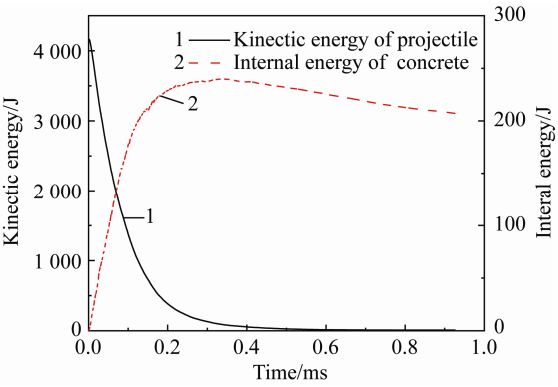
图 11 不同靶体的模拟侵彻损伤分布

Fig. 11 Simulation damage distribution of different targets subjected to penetration

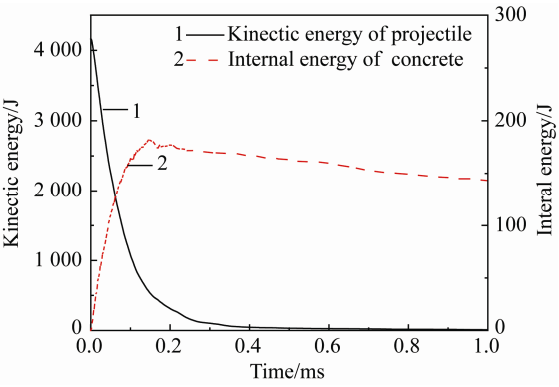
子弹动能、陶瓷球动能和内能以及混凝土内能之间的转换。除上述能量外，侵彻过程产生的摩擦、子弹的断裂等都会消耗子弹动能。从图 12 可以看出，FGCC 靶、UHPC 靶和 OC 靶体的初始能量即子弹动能均为 4 100 J，混凝土内能最大分别为 345 J、240 J 和 182 J。FGCC 靶体陶瓷球内能最大为 894 J，陶瓷球动能最大为 162 J。



(a) FGCC



(b) UHPC



(c) OC

图 12　侵彻过程能量转换

Fig. 12　Energy conversion during penetration

从图 12 可以看出，子弹动能逐渐减小趋于零，并且含有陶瓷粗骨料的 FGCC 靶体的子弹动能下降速率要远大于 UHPC 和 OC 靶体中的子弹。子弹动能被陶瓷球破碎所消耗，并且转换为陶瓷球内能，同时也部分地转换为混凝土内能。

从图 12a 可以看出，当 t=0 ms 时，子弹接触混凝土，侵彻过程受到混凝土阻力，混凝土内能开始增加；当 t=0.025 ms 时，子弹才开始接触到陶瓷球，陶瓷球开始破碎，内能升高。陶瓷球消耗子弹动能的速率要远大于混凝土，并且消耗总能量是混凝土消耗能量的 3 倍以上。陶瓷球动能在 0.04 ms 时才达到最大值，最大仅为 160 J 左右，这是因为陶瓷球碎片的运动很大程度上被钢桶和混凝土所约束，在靶体内部局部移动。结果表明了陶瓷球在子弹冲击下的能量消耗是有效的，可以很大程度上提高靶体抗侵彻性能。

3.3　爆炸过程模拟

在侵彻模拟完成之后，在弹坑内建立炸药模型，所用粒子大小为 0.5 mm，所用算法为 SPH 算法，所建爆炸模型如图 8 所示。FGCC，UHPC 和 OC 3 种靶体侵彻后爆炸模拟结果与实验结果之间的比较如表 9 所示，误差分别为 7.0%，4.6%和 5.6%。结果表明功能梯度混凝土靶在连续侵彻和爆炸破坏后，毁伤深度增加较少，功能梯度结构的前两层发挥了很好的保护作用，有效保证了靶体的完整性。

表 9　混凝土靶体爆炸实验与模拟结果对比

Table 9　Comparison of experiment and simulation results of concrete target subjected to explosion

Target	Penetration velocity/ ($m \cdot s^{-1}$)	Explosive mass/g	Experimental crater depth/mm	Simulated crater depth/mm	Error/%
OC	1 290	33	270	285	5.6
UHPC	1 290	33	260	272	4.6
FGCC	1 290	70	92	98.9	7.0

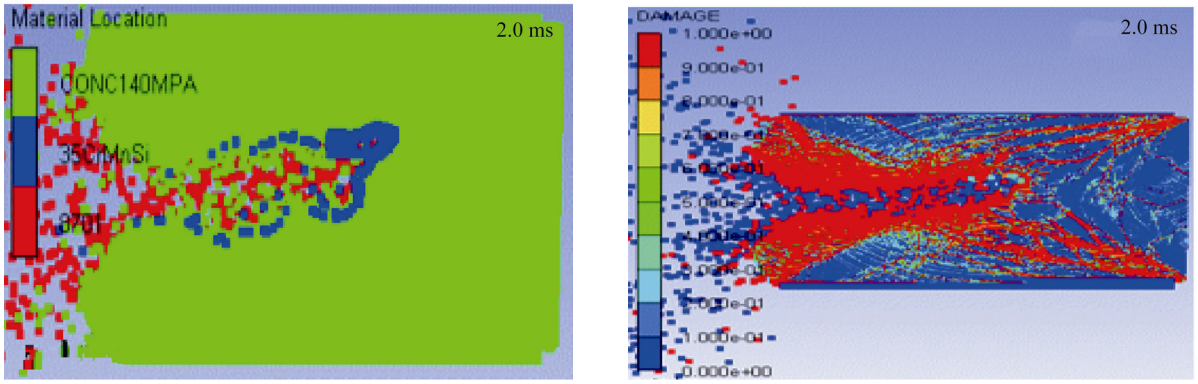
根据实验参数建立有限元仿真计算模型，验证了计算模型的有效性。如图 13 所示 3 种混凝土材料爆炸后破坏形态和损伤分布，目标分别截取了 2.0 ms 时刻 OC 靶，2.0 ms 时刻 UHPC 靶体以及 0.6 ms 时刻 FGCC 靶。

对于 OC 靶，由于在侵彻后形成弹孔通道，随着炸药在弹孔中起爆时，瞬间会形成高压对靶体内部进行破坏，炸药内能释放较快，靶体损伤分布较为广泛，损伤严重区域主要是分布在靶体对角线处，靶体的背弹面开始出现裂纹。OC 靶体爆炸破坏深度较侵彻过程增加了 16.3%，抗爆炸能力较差。UHPC 靶在爆炸过程中开坑直径有所增加，子弹在爆轰波作用下侵彻靶体，使得侵彻深度有所增加。

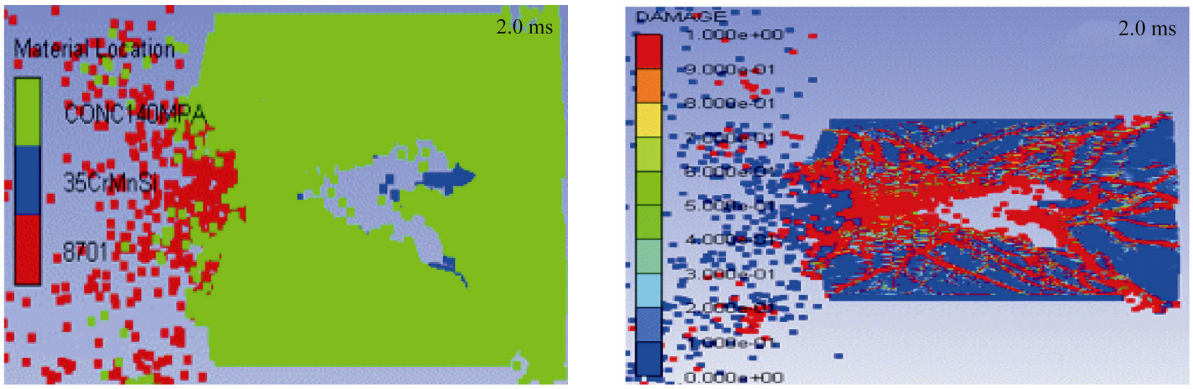
但由于侵彻弹坑初入口较为狭窄，只有少部分能量直击弹孔底部，多数被弹坑通道所吸收和传递，主要表现为爆炸后迎弹面开坑直径的增加。

功能梯度混凝土靶体的炸药量为 70 g，超过前两个靶体炸药量的 2 倍。模拟的侵彻爆炸过程是连续的，侵彻结束后立刻施加爆炸荷载，当 t=0.6 ms 时，爆炸过程结束，功能梯度靶体的形貌没有很大的变化，靶体背弹面损伤较小，增加的毁伤深度较少，功能梯度结构的前两层发挥了很好的保护作用，有效保证靶体的完整性。为了更细致了解 FGCC 所承受的爆炸荷载，采用图 15 显示了 FGCC 靶体中残余子弹的速度时程曲线和炸药能量变化。

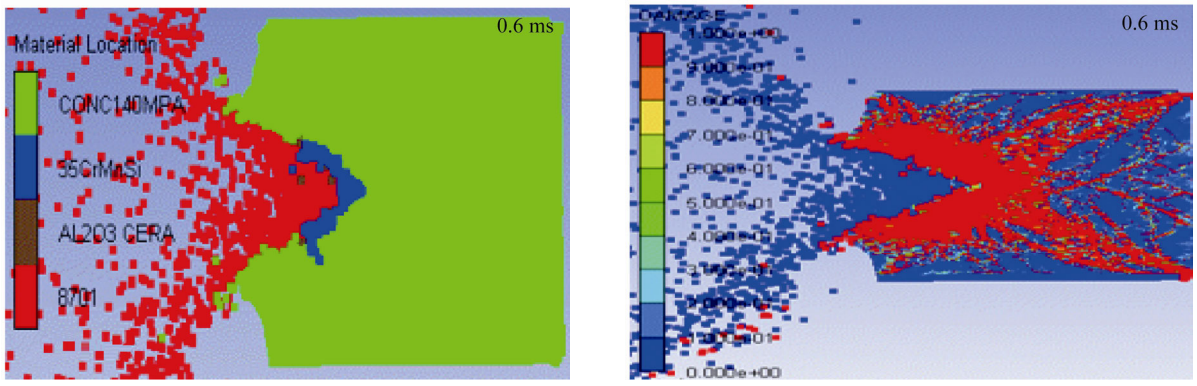
从图 14 可以看出，爆炸过程可以分为 3 个阶段。第 1 阶段，0.3 ms<t<0.32 ms，此时炸药爆炸，炸药能量瞬间上升，产生爆轰波，使得子弹的速度快速增加，最大达到 150 m/s；第 2 阶段，0.32 ms<t<0.5 ms，炸药能量释放完毕，子弹速度也开始持续减小；第 3 阶段，t>0.5 ms，此时炸药能量持平，处于稳定状态，子弹速度趋于零，以此判定爆炸破坏过程终止。破坏过程结束后，靶体外观形态没有发生大的变形，这就表明功能梯度混凝土靶体具有优异的抗侵彻爆炸性能。



(a) OC



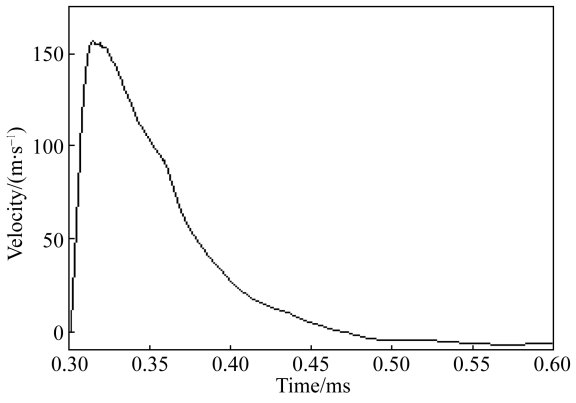
(b) UHPC



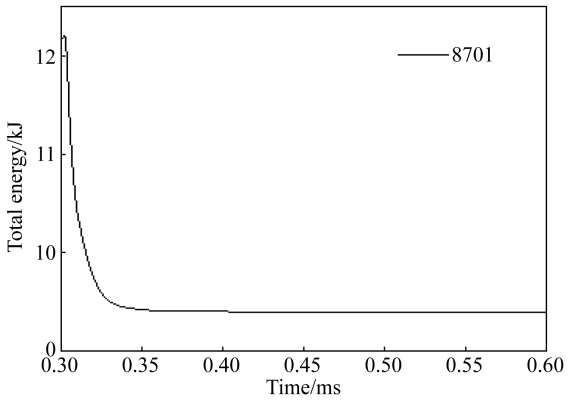
(c) FGCC

图 13 不同靶体爆炸的破坏形态和损伤分布

Fig. 13 Failure mode and damage distribution of different targets subjected to explosion



(a) Bullet velocity-time curve



(b) Explosive energy change

图 14　爆炸作用下 FGCC 靶体中子弹的速度时程曲线和炸药能量变化

Fig. 14　Bullet velocity-time curves and explosive energy change of FGCC target subjected to explosion

4　结论

1) 从破坏深度角度比较不同混凝土靶体抗侵彻爆炸性能：功能梯度混凝土靶>超高性能混凝土靶>普通混凝土靶。功能梯度结构能够很好的抵御侵彻爆炸破坏，冲击损伤主要控制在抗裂层和抗钻层内，侵彻爆炸后仍维持整体的防护功能。

2) 相较于单层结构超高性能混凝土，3 层结构的功能梯度混凝土能够有效阻碍子弹侵彻弹道的形成，抗钻层的设计使子弹发生严重变形或偏转。高速侵彻下，FGCC 靶的侵彻深度是 UHPC 靶的 35.3%，UHPC 靶侵彻深度是 OC 靶的 89.4%，FGCC 靶具有明显的结构优化特征。

3) FGCC 靶爆炸所使用的炸药量为另两种靶体用量的两倍以上，相比于侵彻深度，OC 靶、UHPC 靶和 FGCC 靶爆炸破坏深度增量相差无几，并且 FGCC 靶增量略小于 UHPC 靶。爆炸冲击能量大部分向弹坑径向扩散，由于混凝土界面结合效应，FGCC 靶开坑占比为 80.4%，略大于 UHPC 靶，优于 OC 靶。

4) 数值模拟表明，在 OC 靶和 UHPC 靶中侵彻前期，子弹仍能保持基本尺寸和形貌，然而在 FGCC 靶中抗钻层位置子弹发生了大变形，侵彻速度骤降。侵彻损伤集中分布在迎弹面以及侵彻通道周围，远离弹着点靠近钢桶边缘的区域以及背弹面损伤较小。能量从动能向内能转化，陶瓷球消耗子弹动能的速率要远大于混凝土，并且消耗总能量是混凝土消耗能量的 3 倍以上。

5) 在模拟爆炸过程中，冲击能量有一瞬时峰值，此时材料的强度以及相互间的结合紧密程度对抗爆炸有很大影响。UHPC 靶强度高、内部堆积紧密，在爆炸冲击过程中能保持整体完好。爆炸前后 3 层功能梯度结构的 FGCC 靶体的形貌没有很大的变化，破坏主要集中在弹坑面积扩大方面，靶体背弹面损伤较小，毁伤深度增加较少，功能梯度结构的前两层发挥了很好的防护效果。

6) 采用 SPH 算法模拟出较为复杂的功能梯度混凝土靶在高速侵彻和爆炸耦合作用下的毁伤全过程，揭示了高强粗骨料层的重要作用，模拟结果与实测值吻合度较高。从破坏形态、损伤分布和能量转换角度证明了功能梯度结构 UHPC 优异的抗侵彻爆炸性能。

参考文献:

[1] 周楠, 王金相, 董刚, 等. 功能梯度复合靶冲击毁伤研究进展[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(12): 2752–2761.
ZHOU Nan, WANG Jinxiang, DONG Gang, et al. J Sci Tech Eng (in Chinese), 2011, 11(12): 2752–2761.

[2] 李志华, 崔启飞, 时开龙, 等. 功能梯度混凝土层间界面黏结性能试验研究[J]. 混凝土, 2016, 11: 16–21.
LI Zhihua, CUI Qifei, SHI Kailong, et al. J Concr (in Chinese) , 2016, 11: 16–21.

[3] PIETRAS P, SADOWSKI T. A numerical model for description of mechanical behaviour of a Functionally Graded Autoclaved Aerated Concrete created on the basis of experimental results for homogenous Autoclaved Aerated Concretes with different porosities[J]. Constr Build Mater, 2019, 204: 839–848.

[4] MASTALI M, GHASEMI N M, NAGHIPOUR M, et al. Experimental assessment of functionally graded reinforced concrete(FGRC) slabs under drop weight and projectile impacts[J]. Constr Build Mater, 2015, 95: 296–311.

[5] 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): 26–36.
DENG Yongjun, CHEN Xiaowei, ZHONG Weizhou, et al. J Explos Shock Waves (in Chinese), 2020, 40(2): 26–36.

[6] TAN Z, ZHANG W, CHO C, et al. Failure mechanisms of concrete slab–soil double-layer structure subjected to underground explosion[J]. Shock Waves, 2014, 24(5): 545–551.

[7] 杨简, 陈宝春, 苏家战. 钢纤维对超高性能混凝土弹性模量的影

响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(5): 652–658.
YANG Jian, CHEN Baochun, SU Jiazhan. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(5): 652–658.

[8] 张宝平, 张庆朋, 黄风雷. 爆轰物理学[M]. 第 3 版. 北京: 兵器工业出版社, 2009.
ZHANG Baoping, ZHANG Qingpeng, HUANG Fenglei. Detonation physics[M]. 3rd ed. Beijing: Weapons Industry Press, 2009.

[9] 王豪. 骨料混凝土抗侵彻性能的数值模拟[J]. 低温建筑技术, 2019(9): 13–23.
WANG Hao. J Low Temp Arch Technol (in Chinese), 2019(9): 13–23.

[10] 谭翊, 谭逊, 李榜江. 应用 Photoshop 软件进行小班面积测算方法研究[J]. 测绘科学, 2008, 33(1): 224–225.
TAN Yi, TAN Xun, LI Bangjiang. J Sci Surv Mapp (in Chinese), 2008, 33(1): 224–225.

[11] YALAMANCHILI V K, SANKAR B V. Indentation of functionally graded beams and its application to low-velocity impact response[J]. Compos Sci Technol, 2012, 72(16): 1989–1994.

[12] 施惠生, 孙丹丹, 吴凯. 混凝土界面过渡区微观结构及其数值模拟方法的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(5): 678–685.
SHI Huisheng, SUN Dandan, WU Kai. J Chin Ceram Soc, 2016, 44(5): 678–685.

[13] DIAMOND S. Considerations in image analysis as applied to investigations of the ITZ in concrete[J]. Cem Concr Compos, 2001, 23(2): 171–178.

[14] 邓国强. 重复打击下防护结构地冲击初步分析[C]. 全国结构工程学术会议, 2017.
DENG Guoqiang. Preliminary analysis of ground impact of protective structures under repeated strike[C]. National Academic Conference on Structural Engineering (in Chinese), 2017.

[15] 张元迪. 不同速度撞击下卵形弹侵彻混凝土靶的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
ZHANG Yuandi. Research on the penetration of oval shaped projectile into concrete target under different velocity impact[D]. Hefei: China University of science and technology, 2019.

[16] 晋小超. 弹体侵彻混凝土靶体侵彻深度的数值模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
JIN Xiaochao. Numerical simulation of penetration depth of projectile penetrating concrete target[D]. Taiyuan: Taiyuan University of technology, 2016.

[17] LI J, HAO H. Numerical study of concrete spall damage to blast loads[J]. Int J Impact Eng, 2014, 68: 41–55.

[18] DASHTIAN G N, LIAGHAT G H. The effect of concrete damage on the penetration depth by the tandem projectiles[J]. Mech Eng Sci, 2018, 232(6): 1020–1032.

[19] LIU J, WU C, CHEN X. Numerical study of ultra-high performance concrete under non-deformable projectile penetration[J]. Constr Build Mater, 2017, 135: 447–458.

[20] MCQUEEN R, MARSH S, TAYLOR J. The equation of state of solids from shock wave measurements, High-velocity impact[M]. New York: Academic Press, 1970.

[21] 李浩凯. 基于有限元方法的钢板—混凝土复合结构抗侵彻力学性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
LI Haokai. Study on anti penetration mechanical properties of steel plate concrete composite structure based on finite element method[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology (in Chinese), 2015.

[22] 李硕, 王志军, 孙璐璐. 35CrMnSi 钢弹体对钢板侵彻失效行为的实验研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2015, 38(1): 18–21.
LI Shuo, WANG Zhijun, SUN Lulu. J Ordn Mater Sci Eng (in Chinese), 2015, 38(1): 18–21.

[23] SERJOUEI A. Empirical ballistic limit velocity model for bi-layer ceramic-metal armor[J]. Int J Prot Struct, 2015, 6(3): 509–527.

[24] YALAMANCHILI V K, SANKAR B V. Indentation of functionally graded beams and its application to low-velocity impact response[J]. Compos Sci Technol, 2012, 72(16): 1989–1994.

[25] 朱亮, 李慧子, 王晓鸣. 炸药材料性能参数对 JPC 成型的影响[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(3): 13–16.
ZHU Liang, LI Huizi, WANG Xiaoming. J Sich Ordn (in Chinese), 2011, 32 (3): 13–16.

[26] 孔祥振, 方秦. 基于 SPH 方法对强动载下混凝土结构损伤破坏的数值模拟研究[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2020, 50(2): 25–33.
KONG Xiangzhen, FANG Qin. J Sci Sin (Phys, Mech Astr) (in Chinese), 2020, 50(2): 25–33.

[27] 欧阳昊, 陈小伟. 混凝土骨料对高速侵彻弹体质量侵蚀的影响分析[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(7): 64–73.
OU Yanghao, CHEN Xiaowei. J Explos Shock Waves (in Chinese), 2019, 39(7): 64–73.

[28] 郭红梅, 田慧, 张海. 爆炸荷载作用下超高性能钢筋混凝土柱的耗能机理研究[J]. 混凝土, 2015(9): 54–58.
GUO Hongmei, TIAN Hui, ZHANG Hai. J Concr (in Chinese), 2015(9): 54–58