第 49 卷第 11 期
2021 年 11 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 11
November，2021

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

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20210350

超高性能混凝土梯度材料抗超高速侵彻性能数值模拟

尹雪祥，赖建中，周捷航，康柠宇，杜龙雨

(南京理工大学材料科学与工程学院，南京 210094)

摘　要：制备了以不同超高性能混凝土(UHPC)为基础的功能梯度混凝土(FGC)靶，研究了提高混凝土材料抵抗超高速射流的方法，开展了功能梯度混凝土防护工程材料抗超高速侵彻性能实验及数值模拟。通过射流侵彻试验，采集靶体的损伤分布、子弹破碎程度、侵彻破坏深度和破坏形态等各个方面的实验数据，进而分析功能梯度混凝土靶体的抗超高速侵彻性能；采用 ANSYS/AUTODYN 建立有限元计算模型，并与射流毁伤实验数据对照，验证了模型正确性；利用 AUTODYN 软件预测了射流和超高速弹体侵彻耦合破坏的结果。结果表明：功能梯度混凝土靶板能够有效阻挡超高速射流侵彻，侵彻深度为 241 mm；通过数值模拟对射流形成以及侵彻靶板过程进行了分析并验证其有效性，误差为 3.7%。

关键词：超高性能混凝土；功能梯度混凝土；超高速侵彻；射流；有限元模拟
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)11–2435–15
网络出版时间：2021–10–11



Numerical Simulation on Anti-Hypervelocity Penetration Performance of Ultrahigh Performance Concrete Gradient Material

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

Abstract: Functionally graded concrete(FGC) targets composed of different kinds of ultra-high performance concrete (UHPC) were prepared. Some methods to improve the resistance of concrete materials to ultra-high speed jet were investiaged. The hypervelocity penetration resistance experiment and numerical simulation of functionally graded concrete protective engineering materials were performed. The anti-penetration performance of the functionally graded concrete targets was analyzed according to the aspects of damage distribution, bullet fragmentation degree, penetration damage and fracture pattern of the target by the jet penetration test. The simulated data by a finite element calculation model, established by a software named ANSYS/AUTODYN, were verified with the experimental results of jet penetration. The results show that the FGC targets can effectively block the penetration of hypervelocity jet and the penetration depth is 241 mm. The process of jet formation and penetration was analyzed by numerical simulation and its effectiveness was verified. The simulation error is 3.7%. In additon, the result of coupling damage of jet and hypervelocity projectile penetration was also predicted by a software named AUTODYN.

Keywords: ultra-high performance concrete; functionally graded concrete; hypervelocity penetration; jet; finite element simulation

功能梯度混凝土材料是一种由 2 类或 2 类以上材料复合而成且其成分和结构呈连续梯度变化的新型复合材料[1–2]。目前功能梯度混凝土的抗侵彻行为已有诸多研究，Bai 等[3]研究了功能梯度发泡聚苯乙烯(EPS)混凝土的抗冲击性能，比较了 4 种不同 EPS 梯度分布模式下混凝土的动态响应，结果表明梯度模式可用于设计材料的最佳耗能能力，减少受保护结构的损坏。Moghadam 等[4] 采用自密实混凝土制备了 3 层结构的功能梯度混凝土板，在纤维总体积率相同的情况下，功能梯度混凝土板与纤维均匀分

收稿日期：2021–05–21。　修订日期：2021–07–19。
基金项目：国家自然科学基金项目(52078253，51678308)。
第一作者：尹雪祥(1995—)，男，博士研究生。
通信作者：赖建中(1978—)，男，博士，教授。

Received date: 2021–05–21.　**Revised date:** 2021–07–19.
First author: YIN Xuexiang (1995–), male, Doctoral candidate.
E-mail: 985782495@qq.com
Correspondent author: LAI Jianzhong (1978–), male, Ph. D., Professor.
E-mail: jzh-lai@163.com

布的混凝土板相比具有较低的侵彻深度和破坏体积，以及较高的破坏强度和能量吸收能力。Li 等[5]制备出了功能梯度超高性能水泥基复合材料，所设计的材料具有优异的弯曲性能和抗冲击性，且没有显示任何界面结合问题。Quek 等[6]通过聚乙烯纤维增强钢丝网水泥、粗骨料混凝土和常规水泥砂浆的复合制备了功能梯度水泥板，研究结果表明功能梯度水泥板具有优异的抗冲击性能。在现阶段的大多数研究中，功能梯度混凝土的假想敌仍然是高速(1 000 m/s)以下的动能武器[7]，然而世界各国的武器装备都竞相朝着向着超高速的方向发展，串联战斗部武器就是其中极具代表性的一支。串联战斗部采用前级聚能装药形成射流侵彻与后级随进弹药内部毁伤的模式。高能射流从前级战斗部中产生，对目标进行超高速侵彻，并为后级战斗部形成通道；后级战斗部产生动能之后，借助前级打开的通道，进入目标内部进行爆破，损毁目标[8–10]；聚能射流[11–13]具有高温，高压及高应变率的特点，其形成爆轰波易造成连续均质靶体的较大钻深破坏。

在我国国防工程的基础建设中仍然保留了很大一部分传统的钢筋混凝土结构，这使防护工程的生存形势越发严峻。在面对超高速射流头部最大速度超过 5 000 m/s 的冲击时，普通混凝土已经不足以保护防护工程内部的安全，可能发生贯穿破坏。对于减少射流侵彻深度的研究中，除了提高防护材料的自身强度[14]外，还有利用不同介质间隔的方式。梁争锋等[15]、Wang 等[16]的射流试验和数值模拟结果表明，间隔靶抗射流侵彻性能要明显优于连续靶体。郭萌萌等[17]、史进伟等[18]对金属射流侵彻水介质间隔靶过程进行了数值仿真，研究表明基于水介质的间隔等效靶对金属射流衰减效果较好。基于间隔靶体的抗射流侵彻效果更优的结果，可以推断出多层介质材料对射流的速度衰减能起到一定的作用，因此采用梯度分层方式制备功能梯度混凝土靶抵抗超高速射流侵彻。

现阶段的功能梯度混凝土实验[19–22]所采用的侵彻弹速大多是 1 000 m/s 以下的，对于抵抗超高速侵彻方面的研究少有涉及。因此，重点研究时速为 7 000 m/s 左右的铜粒子射流和 1 300 m/s 的子弹对功能梯度混凝土靶的破坏效应，通过超高速射流和超高速子弹的联合破坏模拟串联战斗部武器的毁伤效应。为了提高材料抗侵彻性能，功能梯度混凝土靶采用 3 种性能优越的超高性能混凝土材料作为功能层，优化“间隔靶体”设计方案，达到功能梯度靶在射流和超高速子弹联合破坏下仍不被贯穿的设计目的，从而保证防护工程内部的安全。与此同时，在实验验证有效性的基础上，引用 ANSYS 有限元数值模拟软件中的 AUTODYN 功能模块，研究超高速侵彻下功能梯度混凝土靶的毁伤效应。

1 实验

1.1 原材料与配合比

功能梯度混凝土(FGC)靶采用标准养护制度，养护温度为(20±2) ℃，相对湿度>90%，标准养护龄期为 90 d。原料配合比如表 1 所示。主要原材料如下：型号 P·II52.5 硅酸盐水泥，比表面积 362 m^2/kg；最大粒径 1.25 mm 的黄砂；最大粒径 0.2 μm 的硅灰，比表面积 22 000 m^2/kg；直径 0.2 mm、长度 6 mm 和 20 mm 的镀铜钢纤维，抗拉强度≥1.8 GPa；长度 20 mm 超细玄武岩纤维；粒径 2~16 μm 的超细矿粉，比表面积 800 m^2/kg；自来水；聚羧酸高效减水剂，减水率≥40%；直径 20 mm 氧化铝陶瓷骨料，密度为 3 970 kg/m^3，堆积空隙率为 43.92%，测试方法依据 JTGE42—2005《公路工程集料试验规程》中 T0309—-2005 粗集料堆积密度及空隙率实验。

FGC 通过不同 UHPC 组合获得功能梯度结构层，UHPC 的水灰比均为 0.2。其中阻裂层 S1 中 6 mm 和 20 mm 2 种钢纤维的体积率各为 3%，20 mm 玄武岩纤维体积率为 1%，流动度为 150 mm；抗侵彻层 S2 采用密排 60%体积率的高强骨料并配合浇筑钢纤维体积率为 2%的 UHPC 而成，测试的流动度为 210 mm；抗剥落层 S3 混凝土的流动度为 240 mm，采用 20 mm 钢纤维，其纤维体积率为 4%，具体制备工艺可参阅文献[23]。

表 1 功能梯度混凝土靶的配合比和结构组成

Table 1 Mix proportions and structure of each layer of functionally graded concrete

Sample No.	Target layer	Mix proportion/(kg·m^{-3})										Strength/MPa	
		C	SIF	Slag	S	W	SP	DA	G	SF	BF	Flexural	Compressive
S1	Crack resistance layer	489	196	293	978	196	14.6	0.4		468	33	75.9	172.3
S2	Anti- penetration layer	200	80	120	400	80	6.0	0.2	2382	156		21.7	180.9
S3	Spalling resistance layer	505	202	303	1010	202	15.0	0.4		312		58.3	165.4

Note: C, SIF, SLAG, S, W, SP and DA are cement, silica fume, slag, sand, water, water reducer and defoaming agents respectively; G, SF and BF are coarse aggregate, steel fiber and basalt fiber respectively.

1.2　界面结合强度试验

多种材料叠加组合而成的试件界面往往是力学性能薄弱环节，为减少因界面结合强度不足造成的靶体受冲击时开裂失效的情况，采用连续浇筑的工艺制备 FGC 靶。为了证明 FGC 靶的界面并非材料薄弱环节，采用四点抗折实验对采用相同成型工艺的 75 mm×75 mm×150 mm 棱柱体 J1 和 J2 试件进行性能测试。试件分为左右 2 层结构(如图 1a 所示)，每层的理想形状尺寸为 75 mm×75 mm×75 mm 的棱柱体，各层对应着不同的 UHPC，具体情况如表 2 所示.界面粘结强度公式见式(1)。

$$f_b = \frac{Pl}{bh^2} \tag{1}$$

式中：f_b 为不同材料间界面粘结强，MPa；P 为试样损伤时破坏载荷，N；l 为跨距，mm；b 为试样截面宽度，mm；h 为试样截面高度，mm。具体可见 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》抗折强度试验。

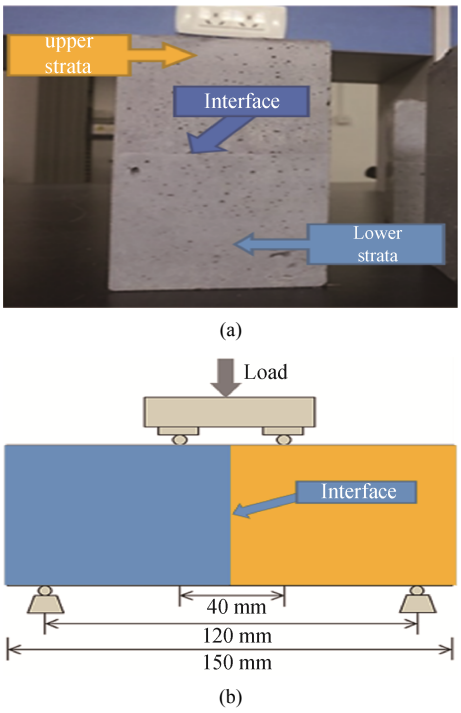


图 1　界面检测试件(a)和界面强度测试示意图(b)

Fig. 1　Schematic diagram of interface test sample (a) and strength test (b)

表 2　界面检测试样的组成结构

Table 2　composition and structure of interface test sample

Sample No.	Number of layers	Materials used for each layer		Interfacial bonding strength/MPa	
		Upper	lower	7 d	28 d
J1	2	S2	S1	9.7	>12.1
J2	2	S2	S3	9.4	>11.6

1.3　靶体尺寸和结构

功能梯度混凝土靶体整体结构呈圆柱形，靶体尺寸为 ϕ300 mm×300 mm，采用 10 mm 厚的钢制圆桶约束包裹靶体外壁，如图 2 所示。FGC 靶体的梯度层级结构按照从迎弹面向背弹面分布：阻裂层 20 mm、抗侵彻层 80 mm 和抗剥落层 100 mm。

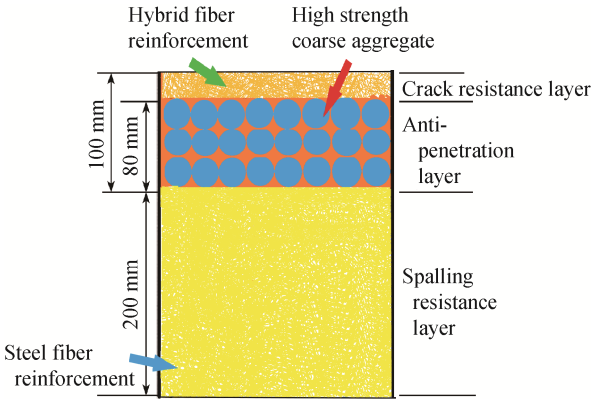


图 2　FGC 靶结构

Fig. 2　Structure of FGC target

FGC 靶体采用分层连续浇筑的制备工艺，通过前置实验已经证明各层界面的结合稳定性。在振动成型过程中，各层纤维在界面处互相交融形成局部梯度变化，同时界面结合强度会随着养护龄期增加而增强。

1.4　射流实验

侵彻采用的炸药类型为 8701 炸药，它是目前常用的高性能炸药，具有当量大，威力足的特点，爆炸威力高于普通的 TNT 炸药，从而获得更高的射流速度，药型罩设计符合 GJB 1012A—2007《破甲弹通用规范》；药型罩结构材料采用紫铜，其具体参数如下表 3 所示。炸药和药型罩的形状和几何参数如图 3 所示。

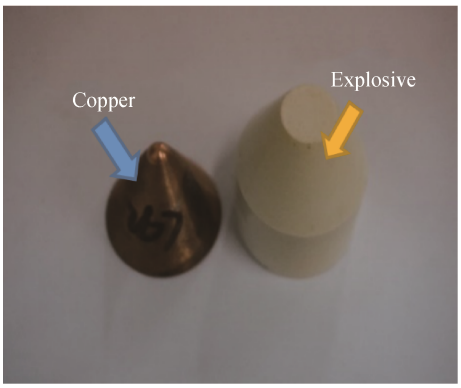
表 3　药型罩参数

Table 3　Parameters of shaped charge liner

ρ / (g·cm^{-3})	D/mm	θ/(°)	d/mm	σ/MPa	E /GPa	H /mm	m /g
8.9	37	46.3	0.8	120	46.4	60	60

ρ is density. D is outer diameter. θ is contacte angle. σ is yoeld strength. E if shear modulus. H is explosive height. m is explosive quality. d is thickness. Explosive type is 8701.

在炸药爆炸时，聚能装药形成的爆轰波压垮紫铜药型罩，迫使其加速熔融从而变为超高速高能金属射流。射流侵彻功能梯度靶体的装置示意图如图 4 所示。



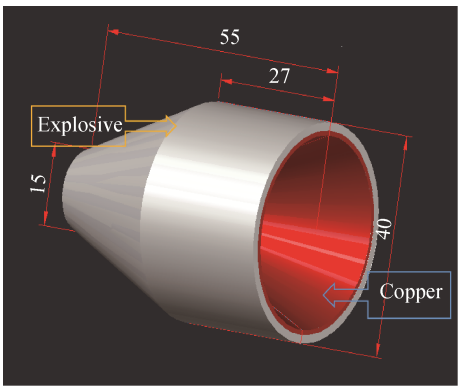


图 3 药型罩和炸药形状和参数

Fig. 3 Shape and parameters of shaped charge liner and explosive

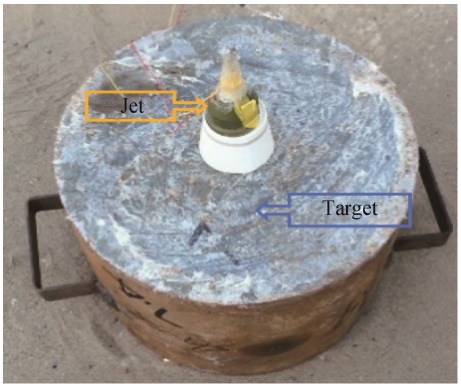


图 4 射流侵彻装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of jet penetration device

像素法采用图像分析系统计算 FGC 靶体开坑面积，其操作如图 5 所示。

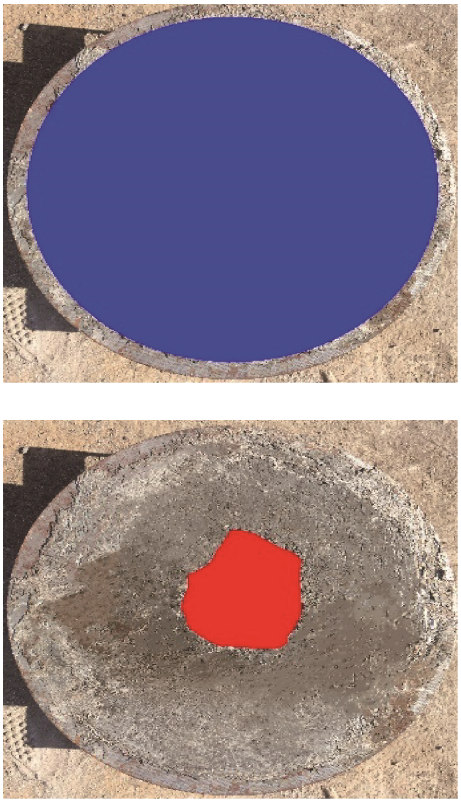


图 5 开坑面积计算方法

Fig. 5 Calculation method of crater area

开坑面积是评价 FGC 靶体延展性以及破坏损伤程度的主要指标之一[24]。对 FGC 靶体的开坑面积采用像素分析法测量并计算靶体开坑占比，测试结果得到：射流侵彻的开坑占比为 10.1%，开坑面积为 7 139.27 mm^2。

像素分析法[25]是利用 Photoshop 软件对图像进行灰度模式处理，一般利用套索工具选取闭合区域，从而计算得出开坑区域像素以及靶体迎弹面像素，二者像素值之比即为射流损伤的开坑占比，结合靶体迎射流面面积得到开坑面积。测试结果如表 4 所示。

表 4 FGC 靶体开坑占比与开坑面积

Table 4 Proportion and area of target crater

Failure type	Pixel of crater surface	Pixel of the front surface	Proportion of crater to surface/%	Surface area of target /mm^2	Area of crater /mm^2
Jet penetration	5 973	59 166	10.1	70 685.83	7 139.27

1.5 数值模拟实验

1.5.1 材料模型及参数 建立射流侵彻功能梯度混凝土以及超高速随进子弹二次侵彻模型，需要先确定各材料的状态方程、本构模型以及失效模型如下表 5 所示[26–31]。

FGC 靶体材料采用 Palpha 状态方程，强度模型和失效模型均为 RHT Concrete 模型，侵蚀失效应变为几何应变，模型参数见表 6。聚能引爆的炸药类型为 8701，状态方程采用 JWL。形成射流的紫铜采

用 shock 状态方程，强度模型采用的是 Piecewise J C，模型参数见表 7。高强骨料材料选取的是氧化铝陶瓷球，采用 shock 状态方程和 von Mises 强度模型。超高速冲击的弹体材料为 35CrMnSi，运用 Linear 状态方程和 Johnson Cook 强度失效模型，模型参数见表 8。详细材料参数，见文献[23]。

表 5　部分材料模型[27−32]

Table 5　Material model

Material model	Equation	Formula
State equation	Shock equation of state	$P=\dfrac{\rho_0 C_0^2\mu(1+\mu)}{[1-(S-1)\mu^2]}+\Gamma\rho\left[\mathrm{e}-\dfrac{P_\mathrm{H}}{2\rho_0}\left(\dfrac{\mu}{1+\mu}\right)\right];\ P_\mathrm{H}=\dfrac{\rho_0 C_0^2\mu(1+\mu)}{[1-(S-1)\mu^2]}$;
	JWL(Jones-Wilkins-Lee) equation of state	$P=A\left(1-\dfrac{\omega}{R_1\bar{V}}\right)\mathrm{e}^{-R_1\bar{V}}+B\left(1-\dfrac{\omega}{R_2\bar{V}}\right)\mathrm{e}^{-R_2\bar{V}}+\dfrac{\omega E}{\bar{V}}$
Constitutive model	Johnson-Cook model	$\sigma_\mathrm{Y}=(A+B\varepsilon^n)(1+C\ln\dot{\varepsilon}^*)(1-T^{*m});\ T=\dfrac{T-T_\mathrm{r}}{T_\mathrm{m}-T_\mathrm{r}}$
Failure model	RHT model	$\sigma_\mathrm{Yhard}=\sigma_\mathrm{e}+\dfrac{3G}{R_\mathrm{G}}\varepsilon_\mathrm{P};\ \sigma_\mathrm{Yhard}=(1-D)\sigma_\mathrm{f}+D\sigma_\mathrm{r}$

表 6　混凝土模型参数[33]

Table 6　Parameters of concrete model[33]

ρ/(g·cm^{-3})	Bulk modulus A_1/GPa	Shear modulus/GPa	f_c/GPa	Specific heat capacity/(J·kg^{-1}·K^{-1})	Tensile strain rate	Breaking strength constant	Breaking strength index	Reference temperature/K
2.75	35.27	22.06	0.180	654	0.0125	1.6	0.61	300

表 7　紫铜模型参数

Table 7　Parameters of copper model

ρ/(g·cm^{-3})	Yield stress/GPa	Shear modulus/GPa	Gruneisen coefficient	Parameter C_1/(m·s^{-1})
8.9	0.12	46.9	2	3.958×10^3

表 8　35CrMnSi 子弹参数

Table 8　Parameters of 35CrMnSi bullet

Diameter/mm	Length/mm	Head shape	Radius of curvature/mm	Velocity/(m·s^{-1})	ρ/(g·cm^{-3})	Bulk modulus/GPa	Specific heat capacity/(J·kg^{-1}·K^{-1})	Shear modulus/ GPa	Yield strength/GPa	Melting point/K
20	80	Oval	30	1 300	7.76	203	477	98.5	1.59	1 793

1.5.2　建立射流侵彻模型　　为减少计算量提高运行速度，数值模拟采用 Eluer 网格建立采用的是 2D 对称轴模型，如图 6 所示。对整体计算空间填充空气材料，材料边界设置 FLOW-OUT 类型，即空气和炸药气体可以在边界正常逸出。

聚能射流的形成过程如图 7 所示。引爆点选取红色区域最左端的对称原点，炸药爆炸后，在 30 μs 内截选 4 个时刻的射流瞬间状态，各颜色部分表示材料如图例所示。

考虑到数值模拟射流侵彻实验需要实验数据结果输出稳定，因此选取 t=18 μs 时刻的射流数据，此时射流形状成型且还未发生断裂，射流速度稳定在 6 690 m/s。FGC 靶体模型如图 8 所示，靶体数据参照实际实验结果。在靶体内部沿轴线方向等距设 7 个监测 Gauge 节点，便于输出靶体内部受侵彻时的压力变化。界面强度实验已经证明在功能梯度混凝土靶体内部每层之间的界面不再是性能薄弱层，实验中因冲击波造成损伤裂纹大多只发生在骨料与基体之间，而并非是在界面处。因此，在数值模拟研究中，模型分为陶瓷和超高性能混凝土 2 种材料部分，混凝土材料采用整体参数设计。

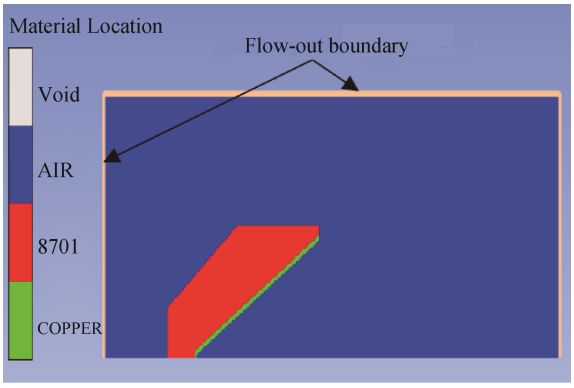
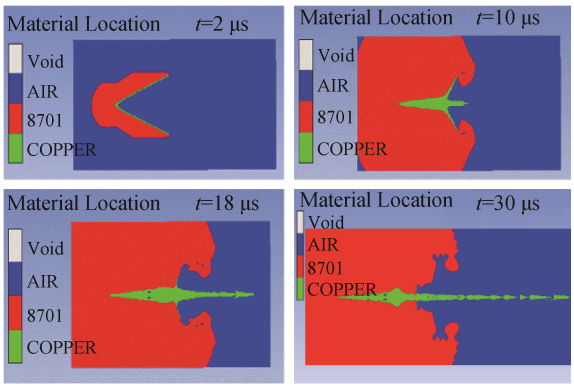
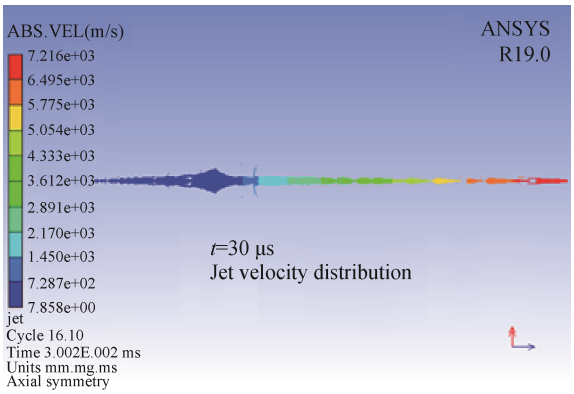


图 6　聚能射流形成过程计算模型

Fig. 6　Calculation model of shaped charge jet formation process



(a)



(b)

图 7 炸药爆轰过程计算示意图

Fig. 7 Calculation diagram of explosive detonation process

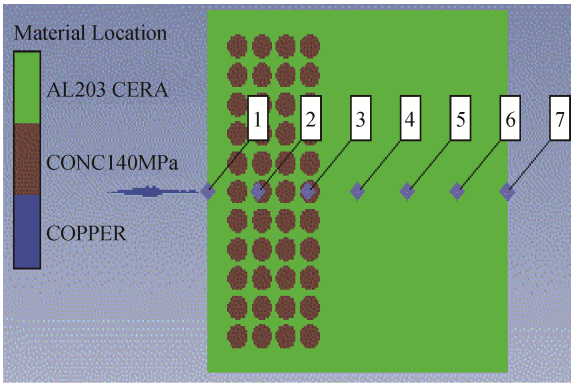
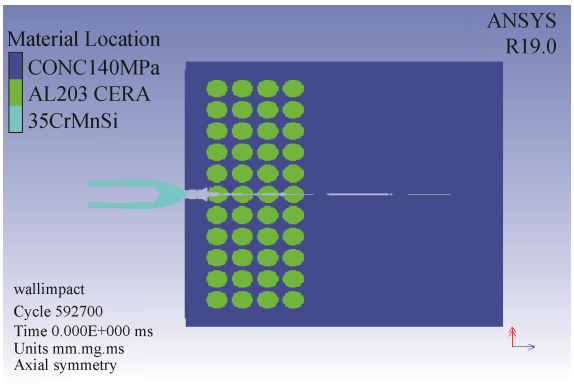


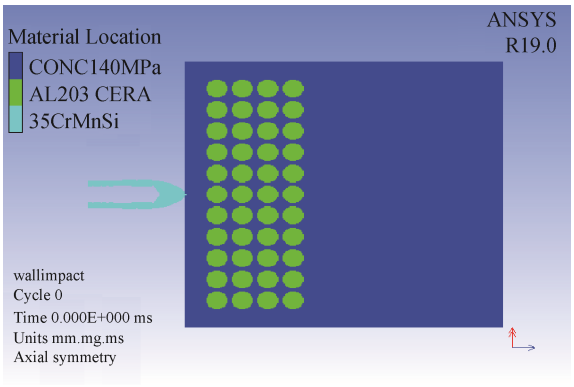
图 8 射流侵彻数值模拟模型

Fig. 8 Numerical simulation model of jet penetration

1.5.3 建立子弹侵彻模型 为了研究功能梯度混凝土抵抗射流和超高速子弹耦合破坏的能力。在射流实验的基础上，设计超高速子弹侵彻靶体试验，子弹模型采用 SPH 方法建立，子弹初始速度设为 1 300 m/s。AUTODYN 数值模拟子弹侵彻过程实验共设置 2 组，如图 9 所示，分别为射流子弹耦合破坏模型 FG-1 和单一子弹侵彻破坏 FG-2[23]。为了检测数据变化，在靶体靠近中心位置同样设置 7 个 Gauge 点，编号为 Gauge#8-14。



(a) FG-1



(b) FG-2

图 9 射流子弹耦合破坏模型和无损伤子弹侵彻破坏模型

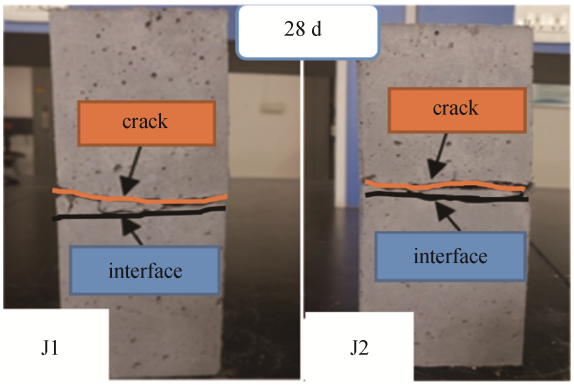
Fig. 9 Jet bullet coupling failure model and undamaged bullet penetration failure model

2 结果与讨论

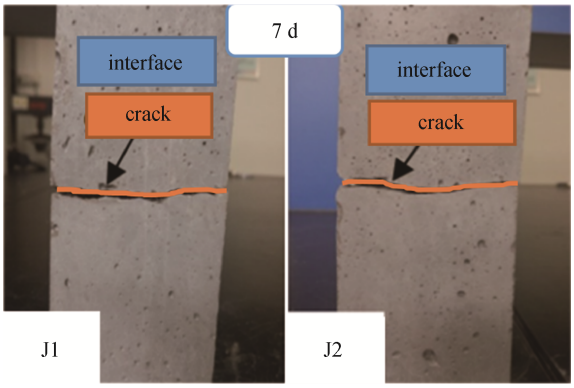
2.1 界面结合强度实验

标准养护 7 d 和 28 d 后，J1 和 J2 试样界面强度检测后破坏形貌如图 10 所示。

由于结合强度低，发生断裂时，界面往往即是断裂面，因此在抗折实验中界面处是否产生裂纹以及裂纹扩展是否途经界面是判断不同种类超高性能混凝土之间的粘结力强弱的重要标准。不同 UHPC 界面之间结合能力通过比较界面结合强度与测得的抗折强度来获得。结合表 2 与图 10 分析，在 7 d 时，J1 和 J2 试件的抗折强度都达到或超过 9.4 MPa，界面结合强度小于基体的抗折强度，此时界面即断面，发生断面破坏的抗折强度即界面结合强度；在养护龄期达到 28 d，2 种试件的裂纹产生位置均已发生改变，断裂位置转移到界面附近或者远离界面，这正好印证王信刚等[32]随着养护龄期的延长而界面结合强度得到加强的观点，此时界面结合强度大于测得的抗折强度。



(a)



(b)

图 10　界面检测试样 7 d 和 28 d 破坏形貌

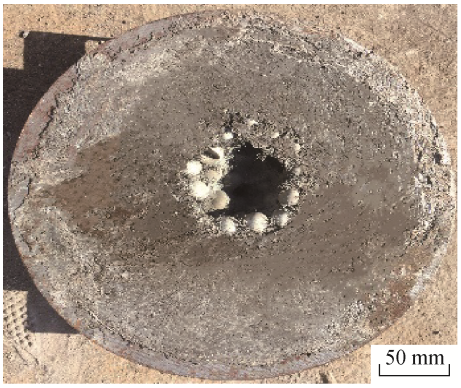
Fig. 10　Interface failure morphology of 7 d and 28 d samples

从试样断裂发生位置来看，裂纹总出现在 S2 层即纤维体积率少的一侧，体现了纤维对界面的显著增强作用。J1 试件的情况也恰恰说明了：在相邻 2 层纤维梯度变化较大(纤维体积率相差 3 倍)的情况下，连续浇筑工艺仍然能保证界面结合的可靠。

2.2　FGC 靶射流实验

FGC 靶体实验结果均为计算平均值，射流造成的开坑面积计算方法如图 5 所示。靶体被射流侵彻后破坏形态如图 11 所示。

由图 11a 可见，炸药 8701 梯形圆台在靶体表面接触爆炸形成的爆坑其最大直径为 94 mm，药型罩射流侵入造成深且窄的侵彻通道，侵彻破坏深度为 241 mm。张晓伟等[33]研究铜材射流侵彻抗压强度为 200 MPa 的高强混凝土靶材时，侵彻深度最深达到 425 m，由此可以推断：混凝土靶采用均质结构对降低射流侵彻深度作用有限，而采用功能梯度结构设计可以有效降低这一数值。由图 11b 可见，背射流面无明显裂纹和凸起，仍保持完整性。为了探究在抵抗射流侵彻后 FGC 靶内部的损伤程度，采用超声声速测试的方法，分别对 FGC 靶射流侵彻前后进行测试。侵彻前超声测试声速为 5 282 m/s，侵彻后超声测试声速为 5 054 m/s，两次差值幅度仅为 4.3%，结果表明：FGC 靶体受射流冲击影响较小，靶体整体仍完好，损伤较小。射流侵彻造成的损伤主要表现在较大的侵彻深度，但 FGC 靶未被贯穿。



(a) Front surface



(b) Rear surface

图 11　混凝土靶体破坏形态

Fig. 11　Failure morphology of concrete target

2.3　聚能射流数值模拟

2.3.1　射流成型过程及速度分布　　金属射流的最高速度(头部)和最低速度(尾部)2 个部分的时程曲线如图 12 所示。

在聚能射流成型过程，炸药引爆后的极短时间内形成爆炸冲击波能量的聚拢并向紫铜药型罩挤压，药型罩材料受高温高压作用被迫向中线突进，形成高能铜粒子集束射流。在 $0< t <10$ μs 时段内，药型罩结构被炸药爆炸冲击波压垮，所有铜材料被爆炸压力聚集在对称中心线附近；在 $10\ \mu s \leqslant t < 30\ \mu s$ 时段内，铜粒子被爆炸压力向前推进，射流形态初现，通过监测点数据可知，聚能射流的最高时速达到 7 080 m/s，头部速度最快呈尖针状，“针身”直径为 2 mm；在 $t \geqslant 30$ μs 时段内，由于射流各部分产生

速度梯级，射流会发生断裂，并且射流伸长时间越长，颈缩和断裂情况越明显。PER 理论(Pugh，Eichelberger，Rostoker Theory)表明[34]：聚能射流的速度由头部向尾部快速衰减，两者速度梯度巨大，同时聚能射流的塑形变形有限，拉伸到一定程度必然会发生形态上的断裂。聚能射流具有极高的动能内能，在惯性的作用下，虽然射流流体形态断裂，但是依旧极具杀伤力。从图 13 可知，射流的动能在 t=8.3 μs 时最大，高达 38 kJ。当炸药爆炸结束后，系统内能量暂时稳定。

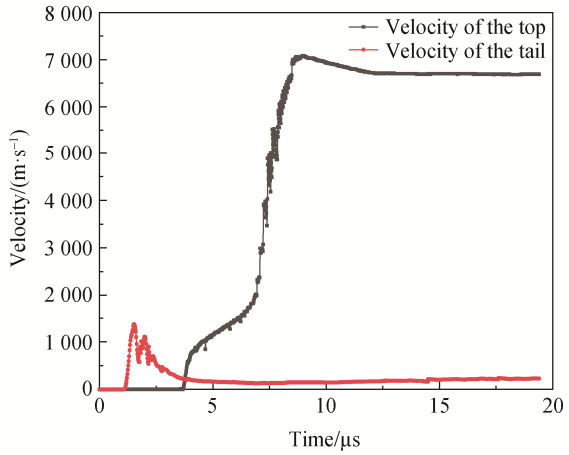


图 12 射流头部和尾部速度时程曲线

Fig. 12 Velocity-time curve of jet top and tail

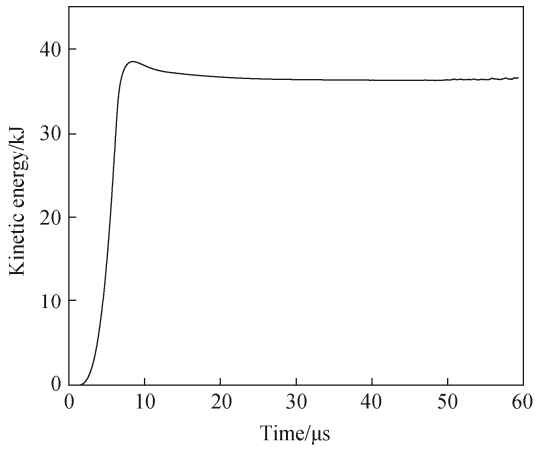
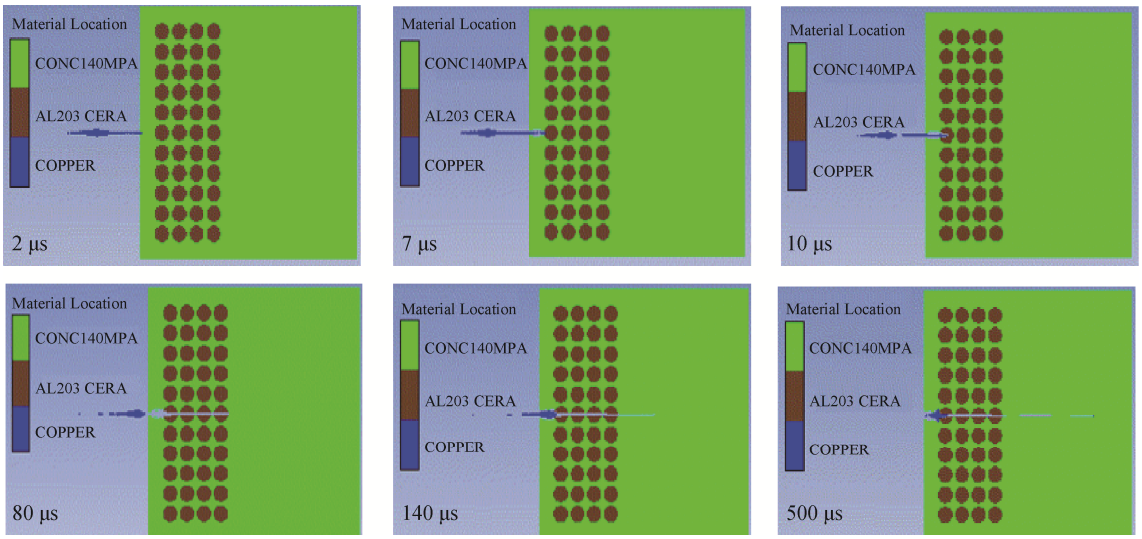


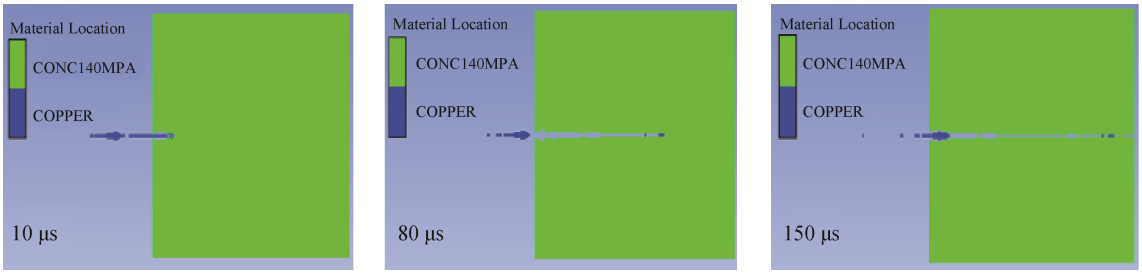
图 13 聚能射流的动能变化曲线

Fig. 13 Kinetic energy curve of shaped charge jet

2.3.2 射流侵彻过程及破坏形态 FGC 靶体的射流侵彻过程以及靶体破坏形态如图 14a 所示。设置模拟均匀材质的超高性能混凝土靶体 UHPC 对照实验，如图 14b 所示。



(a) FGC



(b) UHPC

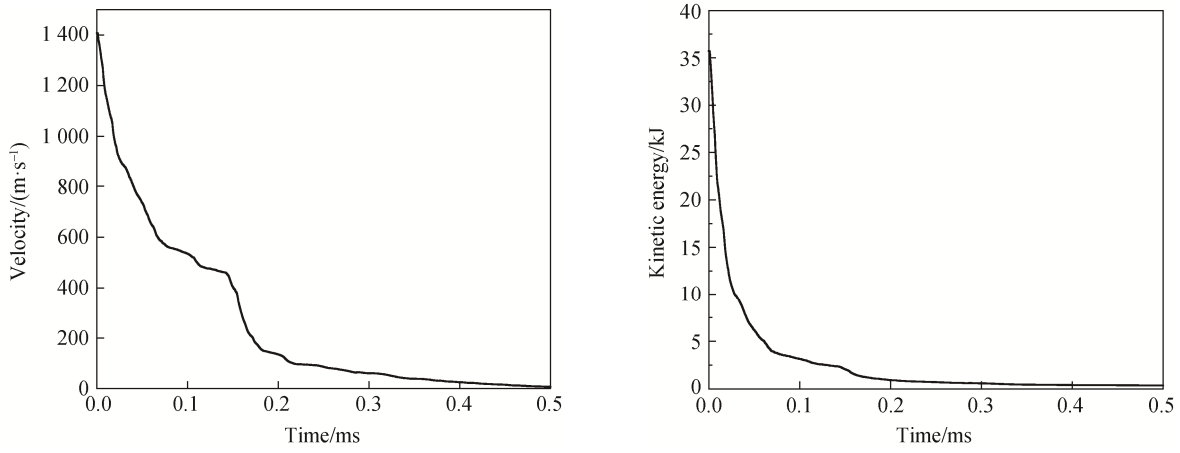
图 14 射流侵彻混凝土靶体过程以及靶体破坏形态

Fig. 14 Process of jet penetration into concrete target and failure mode

在超高速射流侵彻中，图 14b 的超高性能混凝土靶体在 150 μs 时已经被贯穿破坏，而图 14a 中的功能梯度结构材料未被穿透。常规的射流侵彻过程可以分为 3 个阶段：在开坑阶段，射流接触到 FGC 靶体后形成高压、高温以及高应变率的三重区域，互有重叠；在准定常阶段主要是高能铜粒子快速深入靶体，侵彻通道深度增加而孔径变化不大；在终止阶段，整个系统能量稳定，射流侵彻逐步停止。

数值模拟过程中选取了 6 个不同时刻 FGC 靶体的破坏形态，结合各功能结构层抵抗射流的情况，将 FGC 靶体抗射流侵彻过程分为 4 个阶段。在 0 μs＜t＜2 μs 时段为第 1 阶段，此时射流仍未接触 FGC 靶体，射流形态继续伸长，头部速度保持在 6 690 m/s；在 2 μs≤t＜7 μs 时段为第 2 阶段，射流速度最快的头部与靶体的 S1 层发生碰撞，阻裂层具有高的纤维体积率，裂纹扩展不明显，侵彻开坑呈现漏斗状，侵彻速度快速下降，在到达 S2 层时降为 1 255 m/s，与前一阶段相比降幅为 81.2%；在 7 μs≤t＜80 μs 时段为第 3 阶段，此时抗侵彻层开始发挥作用，由于射流沿轴线中心深入且直径仅为 2 mm，远小于高强骨料直径，因此射流冲击能量被高强骨料消耗，在接触到 S3 层时头部速度降为 560 m/s，速度降幅为 55.4%；在 80 μs≤t≤500 μs 时段为第 4 阶段，射流头部进入抗剥落层，此阶段射流侵彻速度下降放缓，直至侵彻终止，功能梯度靶体有效抵抗超高速射流。

图 15 为射流材料的整体速度，其头部、尾部以及杵体存在速度梯级，侵入靶体的射流尾部，在 t=140 μs 时刻撞击陶瓷骨料，导致在图 15a 中射流整体速度大幅下降。从图 15b 可知，射流动能在 0≤t≤80 μs 即前 3 个阶段耗能最多，紫铜材料动能整体降幅达到 89.9%，这也证明了 FGC 靶的阻裂层和抗侵彻层有效阻碍了射流的冲击能量的传递。



(a) Velocity-time curve　　(b) Kinetic energy-time curve

图 15　射流时程曲线

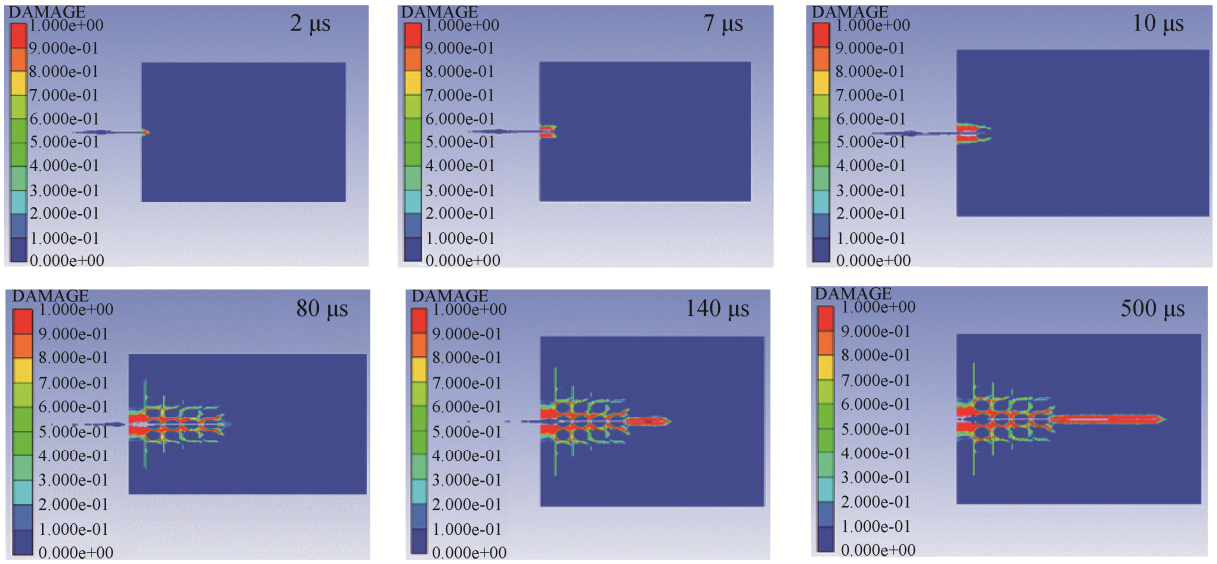
Fig. 15　Jet time history curves

2.3.3　靶体损伤分布　　FGC 靶体以及 UHPC 靶体内部的损伤发展及分布云图如图 16 所示。

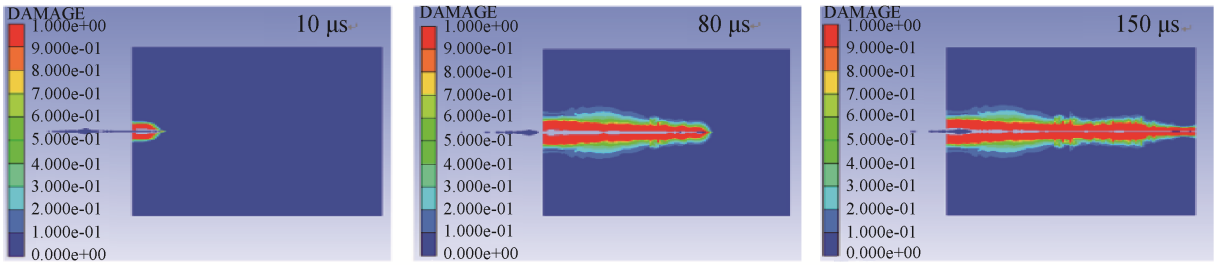
图 16 中在 t=150 μs 时射流已经贯穿 UHPC 靶体，损伤均匀分布在射流通道周围，红色损伤严重区域的破坏通道直径达到 44 mm。对于 FGC 靶来说，射流损伤分布呈现区域性，轴向主要集中在 S1 和 S2 层区域，在这区域内裂纹主要沿着骨料间隙向靶体边缘方向扩展，同时损伤在射流冲击波方向上环绕高强骨料呈现“树状”生长；在 S3 层区域，射流通道窄而深，损伤严重区域直径稳定在 16 mm，小于均质 UHPC 靶。

2.3.4　FGC 靶体内部应力　　FGC 靶体沿轴向方向的内部应力分布如图 17 所示。

对比各个 Gauge 点的峰值压力，FGC 靶体的压力沿轴线向内部迅速降低，监测节点采集的最大峰值压力在 Gauge2 点，可以认为靶体内最大压力值至少为 33.15 GPa。从最大内部应力 Gauge2 点作为前项起，后项 Gauge 点采集的峰值压力相较于前项 Gauge 点的峰值压力的降幅分别为 25.19%、91.13%、4.37%、52.37%和 93.37%。结果说明：在抗剥落 S3 层中吸收冲击压力最快，峰值压力降幅最大，压力值仅为 2.20 GPa，究其原因可能是由于 S3 层的抗压强度较低和抗拉强度适中造成材质相较而言更“软”，对射流冲击压力有更好的衰减作用。



(a) FGC



(b) UHPC

图 16 损伤分布形态

Fig. 16 Simulation damage distribution of targets

2.3.5 仿真有效性 AUTODYN 数值模拟射流侵彻 FGC 靶体的模拟计算侵彻深度为 250 mm，相较于前置侵彻试验的实际射流侵彻深度为 241 mm，两者误差仅为 3.7%，误差范围较小，说明数值模拟结果与实验结果吻合，数值模拟所建立的射流侵彻 FGC 靶体模型具有有效性，见表 9。

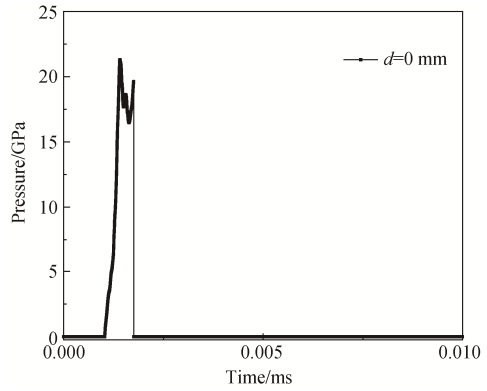
2.3.6 能量转换角度分析 通过射流数值模拟数据采集，可以得到混凝土靶体的各部分能量转换情况，如图 18 所示。

功能梯度混凝土靶体的抗侵彻层高强骨料在射流侵彻过程中吸收转化超高速金属流体的大量能量，有效阻碍射流的深入。由图 18 所示，在 0.2 ms 时刻系统各部分能量基本趋于稳定，系统内部初始总能量即射流初始总能量 47.27 kJ，射流的动能和内能各占 75.6%和 24.4%。由图 18b 可知，混凝土部分吸收转换总能量 12.03 kJ，其中大部分由内能消耗占比 84.9%，射流部分仍存有 5.42 kJ 动能造成贯穿损伤。

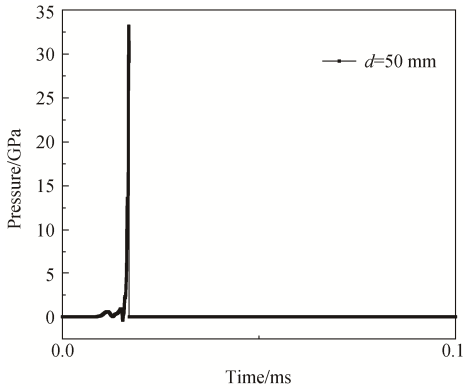
由图 18a 可知，射流与功能梯度混凝土靶碰撞时消磨了大半约占总能量的 87.7%，射流动能基本降为零，其中高强陶瓷球骨料发挥巨大作用，其吸收转化能量占整个功能梯度混凝土靶体吸能的 50.5%。

2.4 超高速子弹侵彻数值模拟

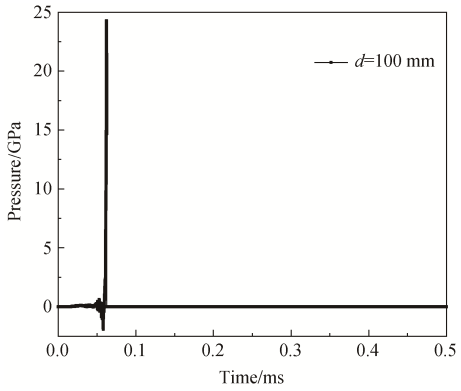
2.4.1 子弹侵彻破坏形态 子弹以超高速侵彻射流破坏后的靶体，在 0.1 ms 时刻速度基本降为 0，子弹的目标位置是靶体正中心的高强骨料陶瓷球，射流破坏样的子弹速度变化趋势与对照样基本一致。混凝土靶体内部的破坏形态如图 19 所示。图 19 显示了超高速子弹侵彻过程以及靶体破坏形态，对于 FG-1 靶体截选了 6 个不同时刻靶体的破坏形态，子弹侵彻深入过程耗时极短，在模拟过程经历了子弹侵入开坑阶段，弹坑扩孔阶段以及碎片云逸散终止阶段。韩卫卫等[35]以多层复合防护结构中应力波的传播特性为理论依据，实验证明了梯度功能结构材料优异的抗侵彻性能。图 19 中模拟表明 FG-1 和 FG-2 靶体在超高速子弹冲击后仍能保持其完整



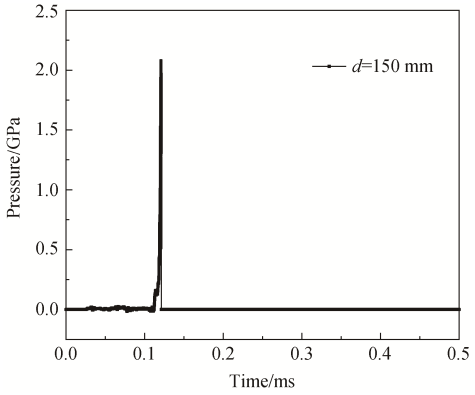
(a) Gauge1



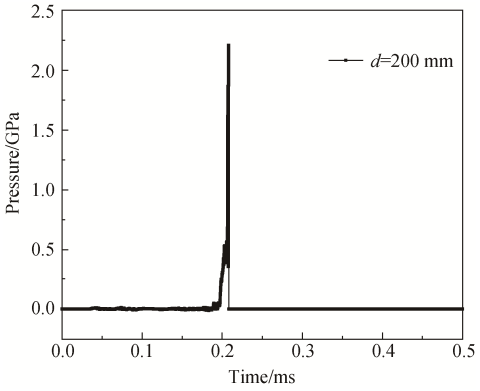
(b) Gauge2



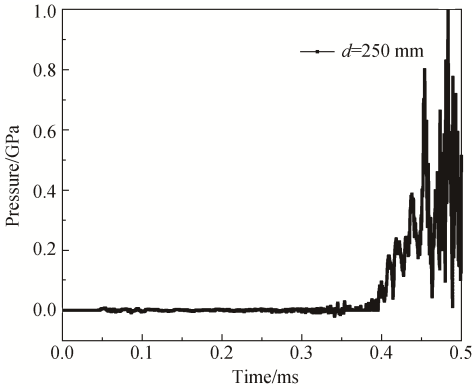
(c) Gauge3



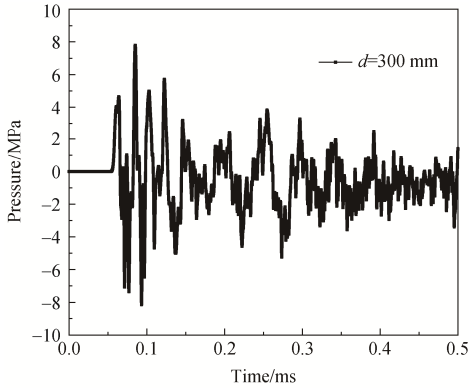
(d) Gauge4



(e) Gauge5



(f) Gauge6



(g) Gauge7

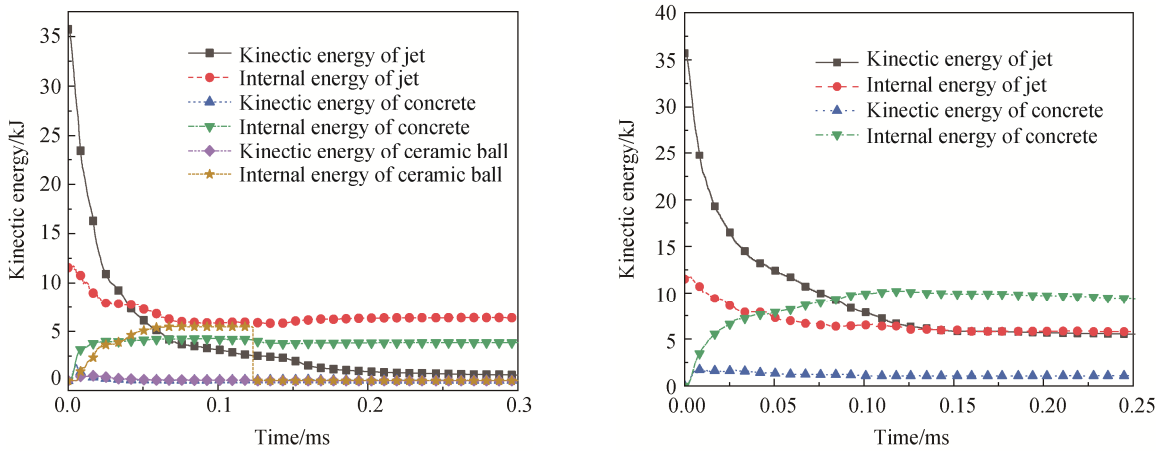
图 17　FGC 靶体内部应力分布

Fig. 17　Stress distribution inside FGC target

表 9 射流侵彻实验结果与模拟结果对比

Table 9 Comparison of jet penetration experiment and simulation results

Target type	Initial supersonic velocity/(m·s^{-1})	Supersonic velocity after penetration/(m·s^{-1})	Experimental failure depth/mm	Simulated failure depth/mm	Error/%
FGC	5 282	5 054	241	250	3.7



(a) FGC (b) UHPC

图 18 射流侵彻过程中能量转化

Fig. 18 Energy conversion during jet penetration

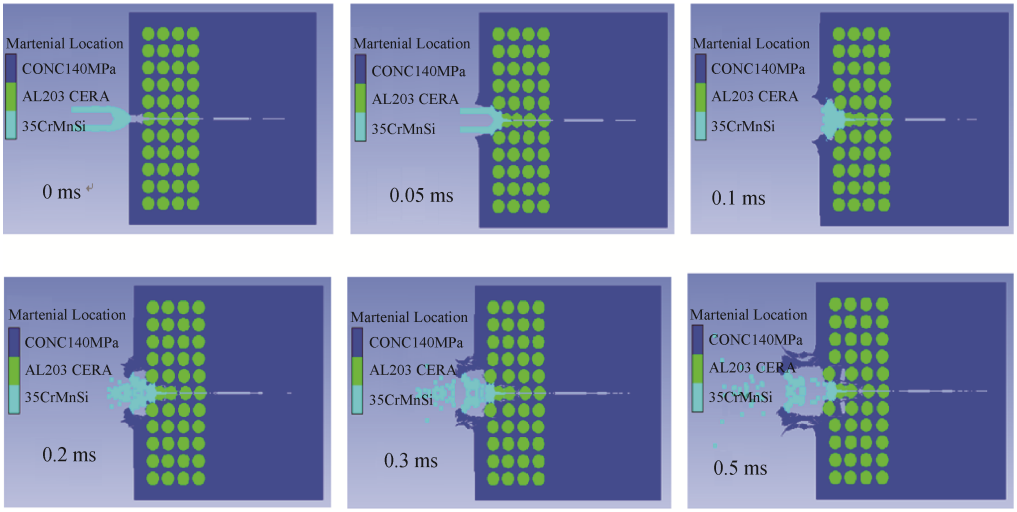
性，弹体在侵彻过程中与高强骨料冲击产生显著变形和质量侵蚀[36]。在 0.1 ms 时段以内，侵彻深度增长最快，图 19a 中，FG-1 靶材在迎弹面中心位置的损伤最重，初期弹坑呈现圆锥状，在抗侵彻层第一层骨料处深度增加的速度变慢，子弹失去原有尺寸和形态。相较于图 19b 中单一的子弹侵彻，弹体变形碎片更为集中，有沿着射流通道侵入的趋势，但是功能梯度靶体的抗钻层结构仍然成功阻止了子弹侵入。

FG-1 靶体在侵彻速度变化的 3 个阶段内的破坏形态：第 1 阶段 $0 \leqslant t < 15$ μs 为抗剥落层与弹体接触阶段，子弹的侵彻速度变化不大，在超高速冲击挤压过程中留下同弹径大小的弹道孔。第 2 阶段 15 μs $\leqslant t \leqslant 100$ μs 为抗侵彻层与子弹接触阶段，高强骨料发挥作用阻碍子弹继续侵入，子弹降速最快，前排骨料在冲击过程中碎裂，受冲击的陶瓷球位置明显后移，相较于骨料颗粒完整的 FG-2 靶，侵彻深度略有增大，此阶段结束后，子弹速度基本降为零。第 3 阶段 $t \geqslant 100$ μs 为弹体碎片反射扩散阶段，由于靶体强度较大，子弹彻底变形并被反弹。在冲击应力波的共同作用下，在弹坑内碎片飞溅反射，因为射流通道的存在，子弹与靶体接触点不同，反射角度也不尽相同，碎片云更为集中。

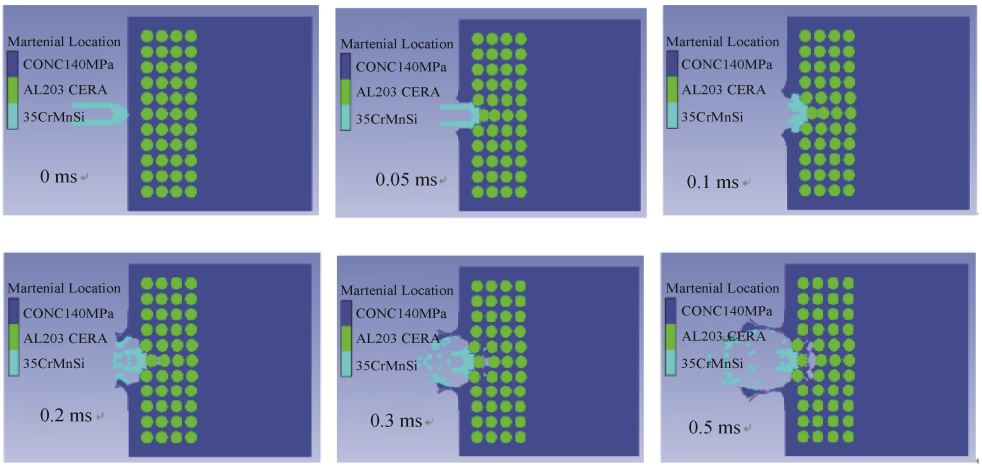
2.4.2 损伤分布状态 在实验过程中，靶体损伤的发展难以数值化表示。Autodyn 软件模拟的损伤云分布，由图例说明不同的损伤等级，最终以损伤云图形式显示。混凝土靶体内部的损伤发展如图 20 和图 21 所示。

由图 20 和图 21 可以看出，FG-1 靶的超高速子弹造成的损伤绝大部分仍停留在 S1 层和 S2 层，侵彻冲击由高强骨料传导，裂纹在高强骨料间扩展。子弹在侵彻过程中，弹体先发生大变形，随着深度增加，弹体头部彻底破碎。超高速撞击对迎弹面造成冲击弹坑，但高纤维掺量的阻裂层未发生大面积脱落倾向。功能梯度层有效将损伤控制在抗侵彻层，在射流和超高速子弹冲击后，FG-1 靶的损伤程度仅比 FG-2 靶略增加，弹坑面积稍有增大，靶体结构仍保持完整性。

Dashtian 等[37]以普通混凝土为研究对象，分析对比了有无射流损伤的 2 种情况下，高速弹丸的侵彻模拟结果如下：后续射弹在受损预钻孔普通混凝土中的侵彻深度比未损坏的预钻混凝土高 34%，穿孔靶体所需的最小侵彻速度要小 42%。在本实验的数值模拟中，在超高速子弹侵彻后，经前级射流破坏过的 FG-1 内部形成的子弹孔通道深度(侵彻终止时弹尖停留位置深度)为 74 mm；无损伤的 FG-2 内部子弹孔深度为 67 mm。相较而言，子弹通道深度仅增加了 10.4%。模拟结果表明：射流损伤对于功能梯度混凝土靶体抵挡随进弹侵入性能影响不大，抗侵彻层仍能有效阻碍弹体深入从而保护防护目标的安全。



(a) FG-1



(b) FG-2

图 19　靶体侵彻破坏形态

Fig. 19　Failure mode of targets subjected to penetration

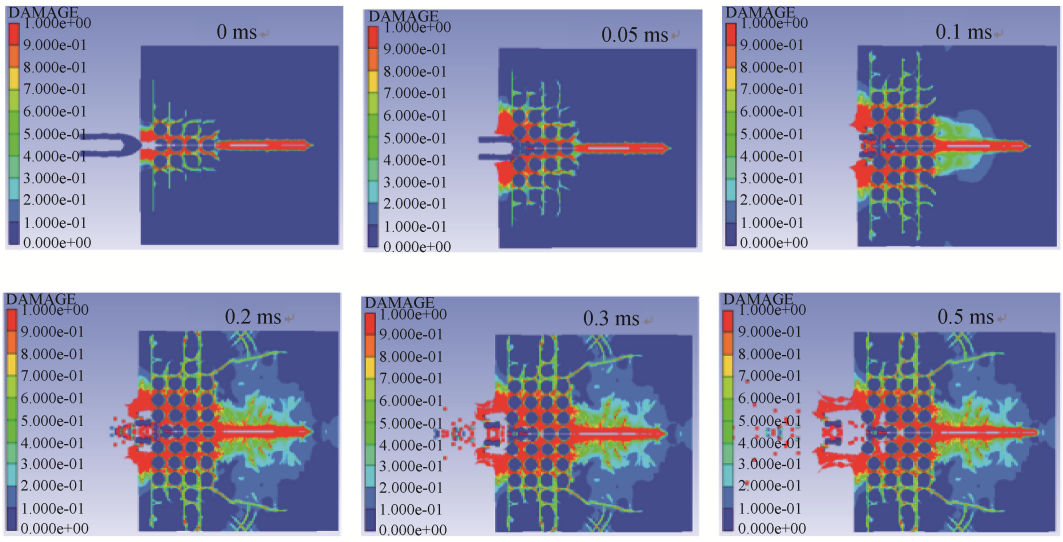


图 20 FG-1 的靶体侵彻损伤分布

Fig. 20　Damage distribution of targets subjected to penetration of FG-1

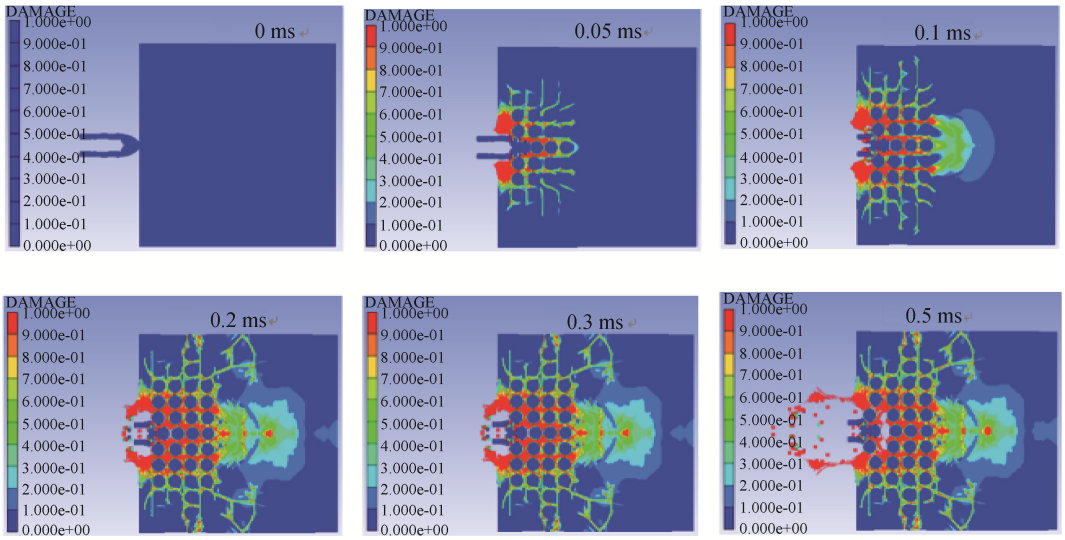


图 21 FG-2 的靶体侵彻损伤分布

Fig. 21 Damage distribution of targets subjected to penetration of FG-2

3 结论

1) 功能梯度混凝土各层级界面结合强度会随养护时间增加而增强，最终能满足设计需要。

2) 功能梯度结构能够有效阻碍射流侵入并保护好防护目标安全，侵彻深度为 241 mm 达到实验目的，开坑占比仅为 10.1%，损伤后的功能梯度混凝土靶体结构完整，仍具有防护能力。

3) 射流侵彻数值仿真结果具有有效性，侵彻深度误差仅为 3.7%。射流对功能梯度混凝土靶体造成的破坏形态和损伤分布表现出明显区域性，与均质靶对比，其损伤破坏主要集中于阻裂层和抗侵彻层，破坏形态呈现沿轴向的树状分布，抗剥落层侵彻通道直径为 16 mm。

4) 功能梯度混凝土靶体的功能层对射流减速作用明显。聚能射流最高速度为 7 090 m/s，射流模拟的初始头部速度为 6 690 m/s，在功能梯度靶体中射流速度在阻裂层降幅最大达到 81.2%，在经过抗侵彻层之后，速度仅为 560 m/s。

5) 功能梯度混凝土靶中抗压强度较低的抗剥落层对靶体内传导压力削减最明显，高强骨料吸收转换能量最高，其占功能梯度混凝土靶体吸能的 50.5%。

6) 预测功能梯度混凝土靶体经射流和超高速子弹双重破坏的效果，与子弹侵彻无损功能梯度靶相比，二次侵彻后所造成的子弹通道深度仅增加了 10.4%。经对比发现，功能梯度靶在射流未完全贯穿情况下，仍能有效抵抗超高速子弹冲击。

参考文献:

[1] 黄海涛, 郎建峰, 付占达. 水泥基梯度功能材料的研究进展[J]. 山西建筑, 2007, 33(7): 174–175.
HUANG Haitao, LANG Jianfeng, FU Zhanda. Shanxi Arch (in Chinese), 2007, 33 (7): 174–175

[2] 海然, 吴科如, 杨久俊. 活性集料梯度分布对水泥基材料性能的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(6): 786–789.
HAI ran, WU kelu, YANG Jiujun. J Tongji Univ : Nat Sci Ed (in Chinese), 2006, 34 (6): 786–789.

[3] BAI Z, LIU Y X, Yang J T, et al. Exploring the dynamic response and energy dissipation capacity of functionally graded EPS concrete [J]. Constr Build Mater, 2019, 227: 116574.

[4] MOGHADAM AS, OMIDINASAB F, DALVAND A, et al. Experimental investigation of (FRSC) cementitious composite functionally graded slabs under projectile and drop weight impacts [J]. Constr Build Mater, 2020, 237: 117522.

[5] LI P P, SLUIJSMANS M J C, BROUWERS H J H, et al. Functionally graded ultra-high performance cementitious composite with enhanced impact properties [J]. Compos Part B, 2020, 183:107680.

[6] QUEK S T, LIN V W J, MAALEJ M . Development of functionally-graded cementitious panel against high-velocity small projectile impact [J]. Int J Impact Eng, 2010, 37(8): 928–941.

[7] 王剑青, 郑楷, 宁建国. 弹体高速侵彻混凝土的数值模拟及实验研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(4): 349-356.
WANG Jianqing, ZHENG Kai, NING Jianguo. Sci Sin (Technol) (in Chinese), 2016, 46 (4): 349–356.

[8] 赵聘, 陈朗, 李金河, 等. 聚能射流侵彻隔板形成的前驱冲击波起爆不同温度炸药特性[J]. 兵工学报, 2021, 42(1): 45–55.
ZHAO Pin, CHEN Lang, LI Jinhe, et al. T Act Armament (in Chinese), 2021, 42(1): 45–55.

[9] YI J Y, WANG Z J, YIN J P, et al. Reaction characteristics of polymer expansive jet impact on explosive reactive armour [J]. E-polymers, 2020, 20(1): 292–302.

[10] 王文琛. 串联随进战斗部侵彻钢筋混土威力性能研究[D]. 山西: 中北大学, 2018.
WANG Wenchen. Research on the performance of Series-in-flight Warhead Penetrating Reinforced Concrete (in Chinese, dissertation).

Shanxi: North University of China, 2018.

[11] 黄正祥. 聚能装药理论与实践[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2014.

[12] EVANS W M, et al. The hollow charge effect [J]. Bull Inst Min Metal , 1950, 520.

[13] 徐文龙, 王成, 徐斌. 超聚能射流形成过程机理研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(2):261–268.
XU Wenlong, WANG Cheng, XU Bin. Act Armament (in Chinese), 2018, 39(2):261–268.

[14] ELSHENAWY T, ELBEIH A, LI Q M. Influence of target strength on the penetration depth of shaped charge jets into RHA targets [J]. Int J Mechan Sci, 2018, 136: 234–242.

[15] 梁争峰, 胡焕性, 孙建, 等. 间隔靶对射流侵彻影响的数值模拟和实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(4): 381–386.
LIANG Zhengfeng, HU Huanxing, SUN Jian, et al. Expl Sch Wav (in Chinese), 2002, 22(4): 381–386.

[16] WANG C, XU W J, et al. Penetration of shaped charge into layered and spaced concrete targets [J]. Int J Impact Eng, 2018, 112: 193–206.

[17] 郭萌萌, 张玉令, 高泓超. 金属射流侵彻水介质间隔靶数值模拟[J]. 兵工自动化, 2018, 37(12): 85–88.
GUO Mengmeng, ZHANG Yuling, GAO Hongchao. Ordnance Ind Autom (in Chinese), 2018, 37(12): 85–88.

[18] 史进伟, 罗兴柏, 蒋建伟, 等. 射流侵彻水夹层间隔靶的理论和实验研究[J]. 工程爆破, 2015, 21(5): 19–36.
SHI Jinwei, LUO Xingbai, JIANG Jianwei, et al. Eng Blast (in Chinese), 2015, 21(5): 19–36.

[19] 杨久俊, 海然, 董延玲, 等. 组分梯度复合对水泥基材料力学性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2002, 30(6): 803–806.
YANG Jiujun, HAI ran, DONG Yanling, et al. J Chin Ceram Soc, 2002, 30 (6): 803–806.

[20] SHEN B, HUBLER M, PAULINO G H, et al. Functionally-graded fiber-reinforced cement composite: Processing, microstructure, and properties [J]. Cem Concr Compos, 2008, 30(8): 663–673.

[21] XU S L, LI Q H. Theoretical analysis on bending behavior of functionally graded composite beam crack-controlled by ultrahigh toughness cementitious composites [J]. Sci Chin, 2009, 52(2): 363–378.

[22] PARK K, PAULINO G H, ROESLER J. Cohesive fracture model for functionally graded fiber reinforced concrete [J]. Cem Concr Res, 2010, 40(6): 956–965.

[23] 赖建中, 尹雪祥, 李宏基, 等. 基于功能梯度原理的超高性能混凝土抗侵彻爆炸性能[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(8): 1188–1200.
LAI Jianzhong, YIN Xuexiang, LI Hongji, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48 (8): 1188–1200.

[24] 李宏基. 不同混凝土防护工程材料抗侵彻爆炸性能研究及数值模拟[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
LI Hongji. Performance and numerical simulation of different concrete protective engineering materials subjected to penetration and explosion (in Chinese e, dissertation). Nanjing: Nanjing University of technology, 2020.

[25] 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. Sci Survey Map (in Chinese), 2008, 33 (1): 224–225.

[26] 石少卿, 汪敏, 孙波, 等. AUTODYN 工程动力分析及应用实例[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011: 4–21.

[27] GRUJICIC M, PANDURANGAN B, MOCKO G M, et al. A combined multi-material euler/lagrange computational analysis of blast loading resulting from detonation of buried landmines [J]. Multidiscipline Model Mater Struct, 2008, 4(2): 105–124.

[28] FAIRLIE G E. The numerical simulation of high explosives using AUTODYN-2D&3D [J]. Inst Explos Eng, 1998, 4: 34–46.

[29] 孙江龙, 杨文玉, 杨侠. 拉格朗日、欧拉和任意拉格朗日-欧拉描述的有限元分析[C].全国水动力学学术会议. 2008.
SUN Jianglong, YANG Wenyu, YANG Xia. Finite element analysis of Lagrangian, Eulerian and arbitrary Lagrangian Eulerian description [C]. National Conference on hydrodynamics. 2008

[30] DEMANGE J J, PRAKASH V, PEREIRA J M, et al. Effects of material microstructure on blunt projectile penetration of a nickel-based super alloy [J]. Int J Impact Eng, 2009, 36(8): 1027–1043.

[31] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperature[C]. Proceedings of 7"Int. Symposium on Balistics, ThcHague, The Neltherland, 1983.

[32] 王信刚, 马保国, 付洪波. 梯度结构混凝土的界面力学性能与微观结构[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(1): 100–104.
WANG Xingang, MA Baoguo, FU Hongbo. J Build Mater (in Chinese), 2010, 13 (1): 100–104.

[33] 张晓伟, 肖强强, 黄正祥, 等. 药型罩材料对射流侵彻高强度混凝土影响研究[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(5): 1–9.
ZHANG Xiaowei, XIAO Qiangqiang, HUANG zhengxiang, et al. J Projectiles, Rockets, Missiles Guid (in Chinese), 2020, 40 (5): 1–9.

[34] 纪国剑. 聚能装药形成射流的仿真计算与理论研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
JI Guojian. Simulation calculation and theoretical research on jet formed by shaped charge (in Chinese e, dissertation). Nanjing: Nanjing University of technology, 2004.

[35] 韩卫卫, 宋素亚, 陈友治, 等. 梯度功能混凝土复合防护结构抗侵彻性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(2): 367–375.
HAN Weiwei, SONG Suya, CHEN Youzhi, et al. Bull Chin Ceram Soc(in Chinese), 2020, 39 (2): 367–375.

[36] 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 yang Hao, CHEN Xiao Wei. Explos Sch Wav(in Chinese), 2019, 39 (7): 64–73.

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