

文章编号: 1001-1455(2013)06-0601-07

超高性能水泥基复合材料抗多次侵彻性能研究^{*}

赖建中, 朱耀勇, 徐 升, 过旭佳

(南京理工大学材料科学与工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 采用普通混凝土成形工艺和热水养护制度, 制备出了抗压强度 120~250 MPa 的超高性能水泥基复合材料。在获得优异静态力学性能的基础上, 进行了超高性能水泥基复合材料抗多次侵彻研究, 分析了侵彻过程中的靶体破坏形态。根据获得的侵彻深度数据, 在 J. T. Gomez 等提出的多次侵彻模型基础上, 修正了与靶体抗压强度有关的多次侵彻深度计算经验方程。

关键词: 爆炸力学; 多次侵彻; 经验方程; 超高性能水泥基复合材料; 侵彻深度

中图分类号: O385

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

随着现代武器的不断升级换代, 对军事防护工程提出了更高的要求, 如何提高未来军事指挥中心的生存率成了亟待解决的难题。混凝土作为重要的建筑材料, 在重要军事建筑和安全设施的建设中发挥着不可替代的作用, 如何提高它的抗侵彻性能已成为国防工程研究的一个重要课题。

经过多年的研究, 混凝土抗侵彻领域已经获得了很大的发展, 专家们在不同实验条件下提出了许多相关的模型和经验公式。M. J. Forrestal 等^[1-2]基于空腔膨胀理论给出了弹丸侵彻混凝土的侵彻阻力模型, 并由侵彻实验得到一个半经验半解析模型。J. T. Gomez 等^[3]研究了半无限靶条件下的多次侵彻情况, 并提出了与侵彻次数和实验因子相关的多次侵彻深度经验方程。陈小伟等^[4-5]在动能弹侵彻混凝土靶的基础上, 开展了动能深侵彻弹弹体结构和混凝土靶体的力学设计和研究。王明洋等^[6]对侵彻过程中的力学特性、能量变化和材料破坏机理进行了研究, 提出了侵彻和贯穿问题的比例换算关系, 并对国外的侵彻深度经验公式进行了修正和补充。何翔等^[7]利用高速侵彻设备进行了不同条件下弹体高速侵彻混凝土系列实验, 探讨了高速撞击条件下弹体侵彻能力、弹体侵彻稳定性、弹体变形和破坏等问题。对多次侵彻过程中混凝土侵彻深度问题的研究还比较少, 本文中旨在研究超高性能水泥基复合材料在多次侵彻下的破坏过程和侵彻深度, 并提出相关的计算公式, 从而达到预测多次侵彻深度的目的。

本文中选取 6 组混凝土靶体进行侵彻对比实验分析, 从不同尺度和不同体积率钢纤维、高强粗骨料等方面研究超高性能水泥基复合材料的抗侵彻性能, 分析多次侵彻条件下不同靶体的破坏形态和侵彻深度。并在 J. T. Gomez 等研究的基础上, 通过拟合实验数据, 得到符合实际情况的强度因子, 并利用回归分析等数学手段对强度因子进行修正, 提出超高性能水泥基复合材料的多次侵彻深度计算经验方程。

1 实验方法

1.1 原材料和配合比

原材料为: P·II 52.5 硅酸盐水泥, 最大粒径 2.5 mm 的普通黄砂, 比表面积为 22 000 m²/kg 的硅灰, 比表面积大于 1 000 m²/kg 的矿渣微粉, 减水率≥40% 的聚羧酸高效减水剂, 最大粒径 16 mm 的玄武岩粗骨料以及长度为 6、13 mm 的镀铜钢纤维(纤维直径为 0.2 mm)。根据静态力学实验, 最终优选了表 1 所示的 6 组不同配合比的靶体, 进行抗多次侵彻实验研究。表中 w_{ce} 、 w_{si} 、 w_{ore} 分别表示水泥、硅

^{*} 收稿日期: 2012-07-05; 修回日期: 2012-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278249, 50808101); 南京理工大学自主科研专项计划(2011YBXM36); 江苏省土木工程材料重点实验室开放基金项目(2012CEM03)

作者简介: 赖建中(1978—), 男, 博士, 副教授。

灰和矿粉的质量分数; φ_{SF} 表示长 13 mm 钢纤维的体积分数; φ_{DSF} 表示长 6 mm 短钢纤维的体积分数; $m_{\text{G}}/m_{\text{b}}$ 表示玄武岩粗骨料与胶凝材料的质量比, $m_{\text{S}}/m_{\text{b}}$ 表示黄沙与胶凝材料的质量比, $m_{\text{W}}/m_{\text{b}}$ 表示水胶比, $m_{\text{SP}}/m_{\text{b}}$ 表示减水剂与胶凝材料的质量比; f_{c} 表示静态抗压强度。

表 1 超高性能水泥基复合材料的配合比

Table 1 Mix proportions of ultra high performance cementitious composites

靶体材料编号	$w_{\text{ce}}/\%$	$w_{\text{si}}/\%$	$w_{\text{ore}}/\%$	$\varphi_{\text{SF}}/\%$	$\varphi_{\text{DSF}}/\%$	$m_{\text{G}}/m_{\text{b}}$	$m_{\text{S}}/m_{\text{b}}$	$m_{\text{W}}/m_{\text{b}}$	$m_{\text{SP}}/m_{\text{b}}$	f_{c}/MPa
M ₀	50	20	30	0	0	0	1.2	0.19	0.02	123.6
MSF3	50	20	30	3	0	0	1.2	0.19	0.02	231.6
MDSF3	50	20	30	0	3	0	1.2	0.19	0.02	201.4
MG1.2	50	20	30	0	0	0.6	0.6	0.19	0.02	150.7
MG1.2SF3	50	20	30	3	0	0.6	0.6	0.19	0.02	247.5
MG1.2DSF3	50	20	30	0	3	0.6	0.6	0.19	0.02	206.7

1.2 侵彻实验方法

图 1 为侵彻实验布置图,子弹冲击超高性能水泥基复合材料圆柱靶体,靶体采用周向钢圈约束,钢圈通过焊接固定在支架上,靶体几何尺寸为 $\varnothing 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 。弹体采用标准的 $\varnothing 7.62\text{ mm}$ 子弹,子弹由铅套和钢芯组成的。弹体垂直入射靶板,入射速度为 800 m/s。弹丸直径 7.62 mm,弹体质量 9.68 g,弹头曲率半径 400 mm。侵彻实验在南京理工大学军工实验中心靶场内进行。

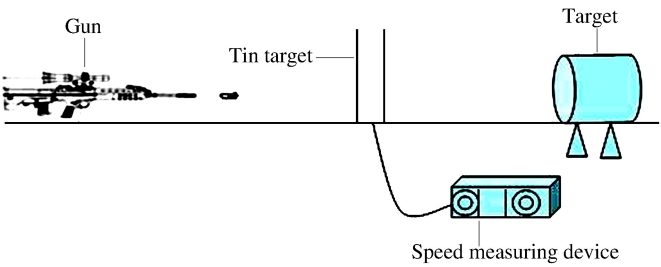


图 1 侵彻实验布置图

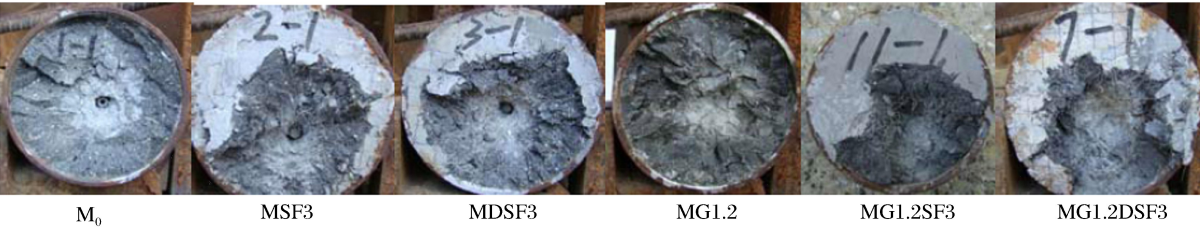
Fig. 1 Setup of penetration experiments

2 侵彻实验结果与分析

2.1 靶体破坏形态

分别对 6 种不同材料的靶体进行多次侵彻实验。各混凝土靶材具有不同的强度,靶体抵御子弹冲击的能力不同,在宏观上表现为不一样的破坏形态。图 2~4 为各靶体侵彻后的正面及背面破坏形态。

(a) The front



(b) The back

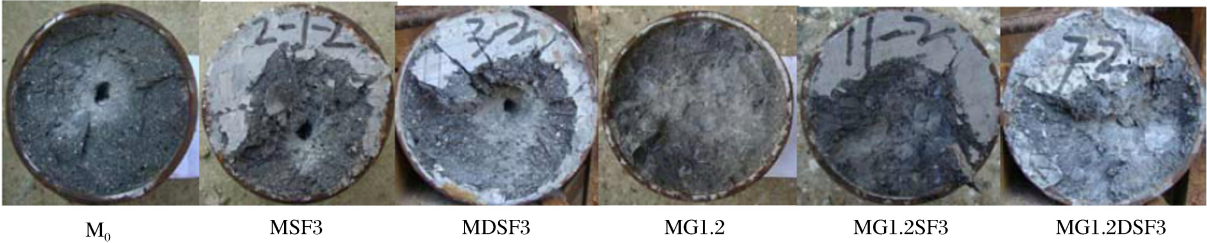


图 2 第 1 次侵彻后不同靶体破坏形态

Fig. 2 Damage of targets subjected to the first impact

从图 2(a)中第 1 次侵彻正面破坏形态可以发现,没有加入钢纤维的 M_0 和 MG1.2 在侵彻中出现了大面积的崩落,其他靶体则出现了不同程度的宏观裂纹和面积不等表面破坏。从图 2(b)中第 1 次侵彻背面破坏来看,除 M_0 和 MG1.2 的背面出现裂纹和少量层裂外,其他靶体的背面都表现完好。接着对所有靶体进行第 2 次侵彻,侵彻后的破坏形态如图 3 所示。

(a) The front



(b) The back

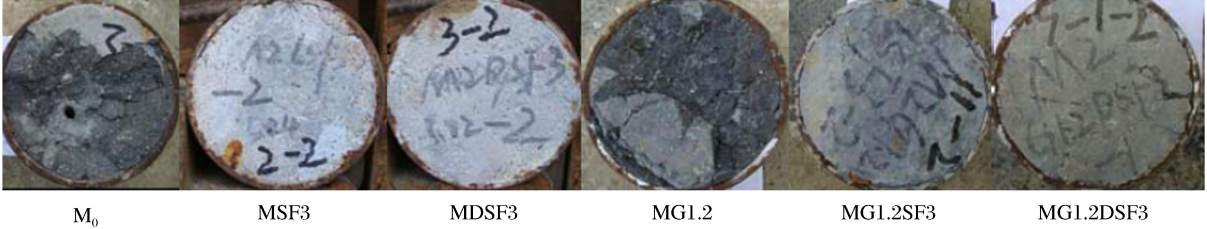
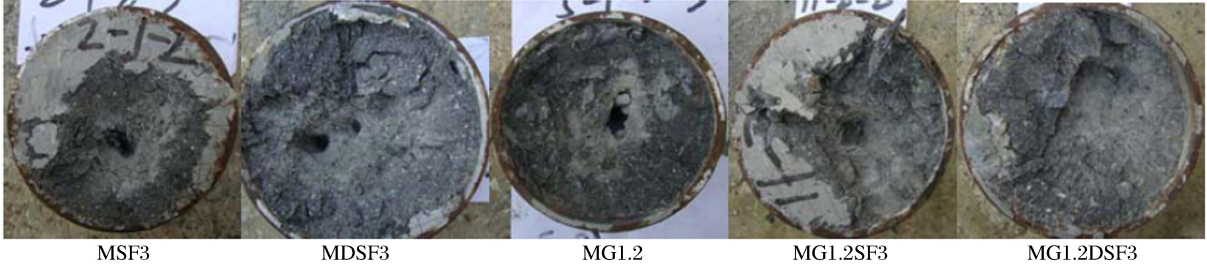


图 3 第 2 次侵彻后不同靶体破坏形态

Fig. 3 Damage of targets subjected to the second impact

第 2 次侵彻实验后,靶体 M_0 被击穿,无法进行第 3 次侵彻实验。其他靶体的正面损坏程度均有所增加。 M_0 和 MG1.2 的背面出现大面积的剥落。而含钢纤维的靶体中, MG1.2SF3 和 MG1.2DSF 的背面出现少量微细裂纹; MSF3 和 MDSF3 的背面依然完好。接着对未击穿靶体进行第 3 次侵彻实验,破坏形态如图 4 所示。

(a) The front



(b) The back

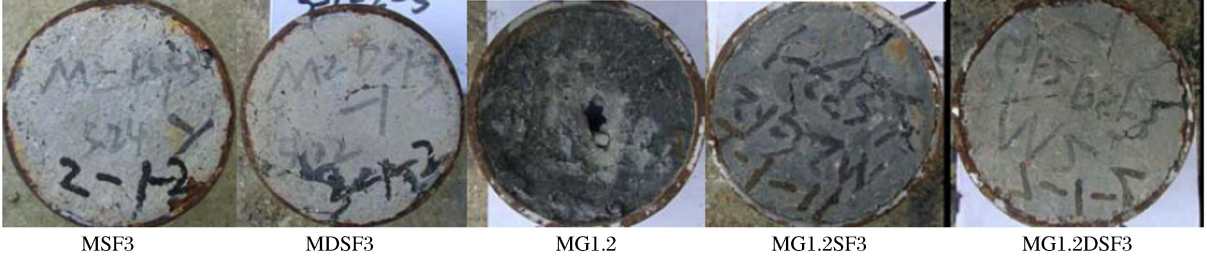


图 4 第 3 次侵彻后不同靶体破坏形态

Fig. 4 Damage of targets subjected to the third impact

第 3 次侵彻后,靶体 MG1.2 被击穿,其他靶体的正面也发生了严重的破坏,背面均出现不同程度的裂纹。总体来看,含钢纤维的靶体在抗多次侵彻时有明显的优势。

从破坏形态分析得出,各靶体材料均能充分抵抗第 1 次侵彻冲击。含有钢纤维的靶体,弹丸镶嵌在靶材中,含玄武岩粗骨料的靶体 MG1.2 中没有弹体嵌入。 M_0 和 MG1.2 在侵彻后,靶体的正面都出现了大范围的剥落,但是 MG1.2 侵彻深度较 M_0 小。

第 1 次侵彻后,对于含有相同钢纤维体积率的 MSF3 和 MDSF3 靶体,含有长 13 mm 钢纤维的靶体表面剥落的面积小于含有长 6 mm 钢纤维的靶体。含有粗骨料的 MG1.2SF3、MG1.2DSF3 靶体的正面剥落面积小于不含粗骨料的 MSF3 和 MDSF3 靶体。

第 2 次侵彻后,各靶体的破坏程度增大,正面开坑的面积增加,少量靶体背面出现了裂纹,靶体 M_0 甚至被贯穿,背面出现了大量崩塌。

第 3 次侵彻后,靶体正面开坑的区域进一步增大,背面的微裂纹也逐渐增多。MG1.2 靶体在第 3 次侵彻过程中被击穿,背面剥落程度最大。含有钢纤维的靶体背面出现少量的微细裂纹;同时含有粗骨料和钢纤维的靶体,背面出现了较大的宏观裂纹,并且部分靶体材料与钢圈脱离。加入长 13 mm 钢纤维的靶体破坏程度小于加入长 6 mm 钢纤维的靶体。

综上所述,钢纤维的长度对靶体的抗侵彻性能有较大的影响,在保证混凝土工作性和均匀性的基础上,加入较大长径比钢纤维的靶体能更好地抵抗子弹的侵彻冲击。钢纤维长径比是影响靶体强度的重要因素,较大的长径比能显著改善基体与纤维之间的连接作用,有利于吸收弹体在冲击时的能量。在冲击作用下,较长的钢纤维能起到更好的传递和承受分散载荷的作用,并且不易脱粘拔出。

玄武岩粗骨料的加入使得靶材的抗压强度得到较大提高,使子弹侵彻过程中遇到较大阻力,从而难以嵌入到基体中。当子弹侵彻中遇到玄武岩粗骨料时,子弹会发生偏转,改变运动方向,最终减小了子弹对靶体的冲击损伤。经过多次侵彻后,基体的损伤逐渐增加,子弹冲击引发的应力波作用到靶体背面,使得靶体背面出现明显裂纹或大面积的剥落。在没有纤维增强的情况下,多次侵彻后靶体被击穿。

2.2 靶体多次侵彻深度

每次侵彻后测量了不同混凝土靶体的侵彻的深度 h ,如表 2 所示。从表 2 中可见,靶体 M_0 的抗多次侵彻能力最低,而钢纤维能显著提高靶体抗多次侵彻的能力。从 MSF3、MDSF3 靶的数据可以看出,对于相同体积含量的钢纤维,钢纤维的长度不同,侵彻的深度也不同。3 次侵彻过程中,MSF3 靶体子弹侵彻深度比 MDSF3 靶体子弹侵彻深度分别减少了 3.8%、6.9%、17.8%。

表 2 靶体的多次侵彻深度

Table 2 Penetration depth of targets subjected to multiple impacts

材料编号	h/mm		
	第 1 次侵彻	第 2 次侵彻	第 3 次侵彻
M_0	54	77	
MSF3	51	54	60
MDSF3	53	58	73
MG1.2	31	64	66
MG1.2SF3	24	43	60
MG1.2DSF3	28	33	63

从 M_0 、MG1.2 靶体实验结果对比可得,玄武岩粗骨料能显著提高靶体的抗侵彻性能, M_0 靶体经过 2 次冲击就被贯穿,而 MG1.2 靶体还能承受第 3 次冲击。从 MSF3、MG1.2SF3 靶体对比和 MDSF3、MG1.2DSF3 靶体对比可以看出,钢纤维和粗骨料的复合能极大地提高材料第 1 次抗侵彻的能力。第 1 次侵彻时,在相同纤维长度和含量的情况下,加入粗骨料后靶体的侵彻深度分别减少了 52.9%和 47.2%。第 1 次侵彻时,高强粗骨料对子弹起到了偏转效应,显著降低了侵彻深度。然而靶体经过多次冲击后,结构中损伤逐渐积累,粗骨料和基体间的粘结减弱,粗骨料对抗侵彻的作用逐渐减小。

3 超高性能水泥基复合材料多次侵彻深度方程

在 Forrestal 单一侵彻模型的基础上, J. T. Gomez 等^[3]发展了多次侵彻半无限靶的经验公式

$$h = \frac{m}{2\pi a^2 \rho N} \ln \left(1 + \frac{N \rho v_1^2}{S f_c} \right) + 4a \tag{1}$$

式中: h 为侵彻深度, m 为子弹质量, a 为子弹半径, ρ 为靶体密度, v_1 为子弹初始速度, f_c 为靶体静态抗压强度, S 为强度因子。 N 由下式表示

$$N = \frac{8\Psi - 1}{24\Psi^2} \tag{2}$$

式中: Ψ 为弹体头部形状系数, 等于弹体头部弧形半径与弹体直径之比。

利用 J. T. Gomez 等^[3]发展的公式, 再结合本文的相关数据, 可以得到第 1 次侵彻时 S 与靶体静态抗压强度 f_c 之间的关系, 如图 5 所示。

由图 5 可知, 当知道材料的静态抗压强度时, 可以计算出对应的强度因子, 则由经验公式(1), 可以求出对应的第 1 次侵彻深度。那么理论预测侵彻深度最关键的一步是得出较为准确的强度因子公式, 图 5 中得到的强度因子公式是以 J. T. Gomez 等^[3]提出的侵彻深度公式为基础, 结合本实验的数据推导计算而得到的。从图中可见, 不含粗骨料和含有粗骨料的靶体的强度因子变化有着显著的区别, 这与靶体结构组成有关。子弹在侵彻两种靶体时侵彻机理不一样, 粗骨料会对子弹产生更大的偏转作用, 进而影响子弹的侵彻路径、破坏力等。为了更准确地反映两种不同结构组成的材料对子弹侵彻时的抗侵彻性能, 把强度因子随抗压强度变化关系用 2 个独立的公式表现出来,

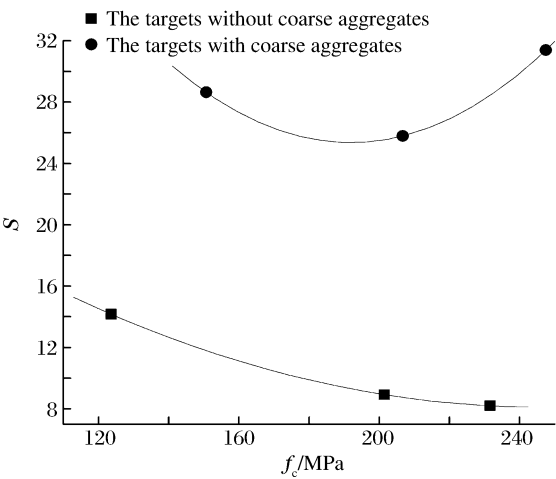


图 5 第 1 次侵彻时 S 与 f_c 的变化关系
Fig. 5 The varying relationship between S and f_c on the first impact

不含粗骨料的靶体 $S = 32.5 - 0.20f_c + 4.0 \times 10^{-4} f_c^2$ (3)

含有粗骨料的靶体 $S = 96.8 - 0.75f_c + 0.002f_c^2$ (4)

随着侵彻次数的增加, 混凝土靶体内部结构出现了损伤破坏, 抗侵彻能力逐渐下降, 用初始静态抗压强度来衡量抗侵彻能力已不合适。 J. T. Gomez 等^[3]提出了与侵彻次数 n 有关的修正公式, 修正了强度因子 S , 这相当于调整初始静态抗压强度到一个合理的数值。参考 J. T. Gomez 等^[3]的思路, 假设 $S' = S(\alpha \times \ln(n) + 1)$, 其中 n 为冲击次数, α 为待确定常数。

通过对不同类型靶体的数据进行非线性回归分析, 可以得到较为稳定的 α 值, 同时发现对于含有粗骨料的靶体, 仅仅修正 S 还不能达到满意的要求, 还需对整体方程进行修正。由于本实验中不同类型靶体的初始强度因子不一样, 因此常数 α 也是不同的。最终确定不含粗骨料靶体的侵彻深度方程为

$$h = \frac{m}{2\pi a^2 \rho N} \ln \left(1 + \frac{N \rho v_1^2}{S' f_c} \right) + 4a \tag{5}$$

式中: $S' = S(-0.26\ln(n) + 1)$ 。

对于含有粗骨料的靶体, 其侵彻深度方程为

$$h = \frac{m}{2\pi a^2 \rho N} \ln \left(1 + \frac{N \rho v_1^2}{S' f_c} \right) + 6a \tag{6}$$

式中: $S' = S(-0.62\ln(n) + 1)$ 。

接下来比较了这种方法得到的公式计算值与实验值的差别, 对比结果如图 6 和图 7 所示。从图中

可以发现,对于不含粗骨料的靶体,用公式计算得到的侵彻深度与实验数据误差较小。但对于含有粗骨料的靶体,特别是低强度的条件下,差别比较大。主要原因是含粗骨料靶体内部骨料分布的不均匀性以及多次冲击作用下内部结构的不对称受力破损,其抗多次侵彻性能与抗压强度并没有很好的对应特性,另外就是实验数据不可避免地存在着一定的测量误差。

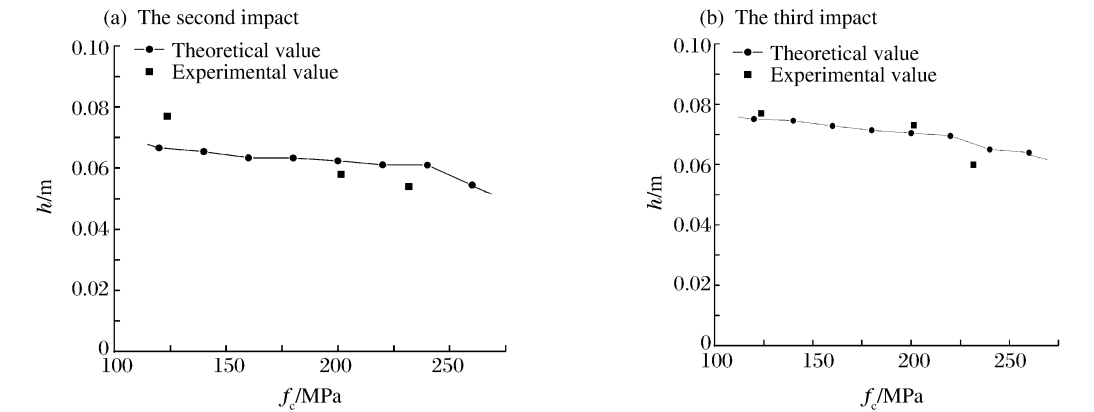


图 6 不含粗骨料靶体的侵彻深度与抗压强度的关系

Fig. 6 Penetration depth versus static compressive strength of the targets without coarse aggregates

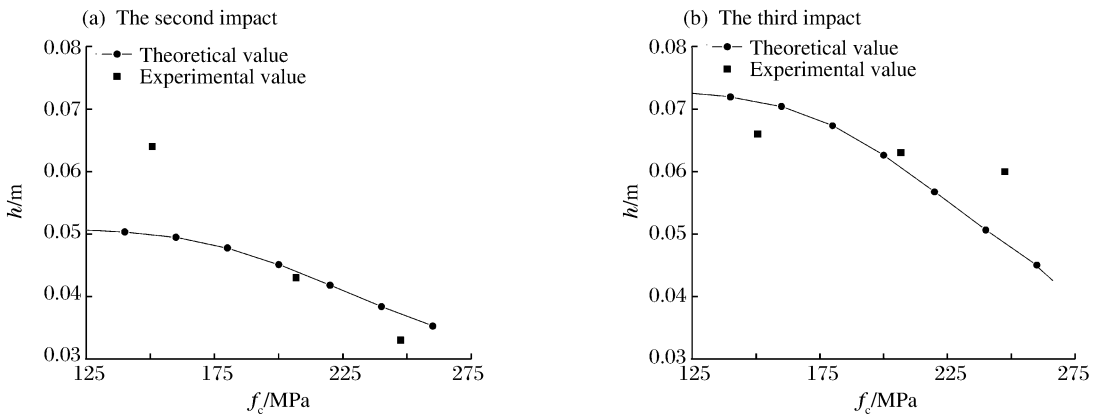


图 7 含有粗骨料靶体的侵彻深度与抗压强度的关系

Fig. 7 Penetration depth versus static compressive strength of the targets with coarse aggregates

4 结 论

(1)在靶体中掺入钢纤维和粗骨料都能极大地提高靶体的抗侵彻能力,但它们有着不一样的增强机理。粗骨料对第 1 次侵彻有很好的抵抗能力,甚至优于钢纤维,但在一次侵彻后,靶体结构发生了变化,后续抗侵彻能力减弱;在保证钢纤维能较好地分散在混凝土基体中的前提下,长钢纤维较之于短钢纤维能更好地提高靶体的抗侵彻能力。

(2)侵彻深度与靶体静态抗压强度有关,在 J. T. Gomez 等^[3]公式的基础上,得到了适用于本文中超高性能水泥基复合材料的强度因子 S ,利用这一参数可以得到第 1 次冲击时的侵彻深度。通过对该参数的修正,可以得到多次侵彻时靶体的侵彻深度。

参考文献:

[1] Forrestal M J, Tzou D Y. A spherical cavity-expansion penetration model for concrete targets[J]. International Journal of Solids and Structures, 1997,34(31/32):4127-4146.

[2] Forrestal M J, Altman B S, Cargile J D, et al. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1994,15(4):395-405.

[3] Gomez J T, Shukla A. Multiple impact penetration of semi-infinite concrete[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001,25(10):965-979.

[4] 陈小伟. 动能深侵彻弹的力学设计(I):侵彻/穿甲理论和弹体壁厚分析[J]. 爆炸与冲击, 2005,25(6):499-505.
Chen Xiao-wei. Mechanics of structural design of EPW(I): The penetration/perforation theory and the analysis on the cartridge of projectile[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(6):499-505.

[5] 陈小伟, 金建明. 动能深侵彻弹的力学设计(II):弹靶的相关力学分析与实例[J]. 爆炸与冲击, 2006,26(1):71-78.
Chen Xiao-wei, Jin Jian-ming. Mechanics of structural design of EPW(II): Analyses on the design of EPW projectiles, concrete targets and examples[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(1):71-78.

[6] 王明洋, 郑大亮, 钱七虎. 弹体对混凝土介质侵彻、贯穿的比例换算关系[J]. 爆炸与冲击, 2004,24(2):108-114.
Wang Ming-yang, Zheng Da-liang, Qian Qi-hu. The scaling problems of penetration and perforation for projectile into concrete media[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(2):108-114.

[7] 何翔, 徐翔云, 孙桂娟, 等. 弹体高速侵彻混凝土的效应实验[J]. 爆炸与冲击, 2010,30(1):1-6.
He Xiang, Xu Xiang-yun, Sun Gui-juan, et al. Experimental investigation on projectiles high-velocity penetration into concrete targets[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(1):1-6.

**Resistance of ultra-high-performance cementitious
composites to multiple impact penetration ***

Lai Jian-zhong, Zhu Yao-yong, Xu Sheng, Guo Xu-jia
(School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of
Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: The ultra-high-performance cementitious composites (UHPCC) with the compressive strength of 120~250 MPa were prepared by using the ordinary concrete molding process and the hot water curing treatment. The behaviors of the UHPCC with excellent static mechanical properties were researched by multiple impact penetration tests. The damage of the UHPCC targets during penetration was analyzed. And based on the multiple penetration model proposed by J. T. Gomez, et al, an empirical formula of penetration depth in relation to the target compressive strength was modified according to the experimental data.

Key words: mechanics of explosion; multiple impact; empirical equation; ultra high performance cementitious composites; depth of penetration

* Received 5 July 2012; Revised 10 December 2012
Supported by the National Natural Science Foundation of China (51278249,50808101)
Corresponding author: Lai Jian-zhong, jzh-lai@163.com

(责任编辑 曾月蓉)