

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0191

# 混凝土靶侵爆条件下破坏深度的模型实验研究\*

卢浩, 岳松林, 孙善政, 宋春明, 熊自明

(陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏南京 210007)

**摘要:** 为研究混凝土靶侵彻后空腔对爆炸效应的影响, 开展了 450~700 m/s 速度下混凝土靶体侵彻与爆炸模型实验。基于 10 组实验结果, 结合量纲分析等方法, 研究了侵彻结果对爆坑深度的影响。结果表明, 可采用无量纲冲击系数表征侵彻深度、开坑体积以及侵彻损伤值等侵彻效应, 不考虑装药长径比的影响, 侵彻后爆炸带来的破坏深度增量  $h_c$  主要受无量纲冲击系数  $I_p$  与爆炸系数  $I_e$  的影响。利用实验数据获得了长径比为 5 时  $h_c$  的影响规律: (1)  $I_p$  较小时, 侵彻深度较小,  $I_e$  的变化对爆炸弹坑深度  $h_c$  变化影响较小; (2) 随着  $I_p$  的增加,  $h_c$  不断增加, 但增加幅度逐渐变小,  $I_e$  对  $h_c$  的影响不断变大; (3) 随着  $I_p$  增加到一定程度,  $h_c$  趋于常数,  $I_e$  对  $h_c$  的影响趋于稳定。

**关键词:** 侵彻; 爆炸; 混凝土靶; 冲击系数; 破坏深度; 模型实验

中图分类号: O383

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

## Model test study on damage depth of concrete target under penetration and explosion

LU Hao, YUE Songlin, SUN Shanzheng, SONG Chunming, XIONG Ziming

(State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing, 210007, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to study the influence of the cavity on the explosion effect caused by the penetration of concrete target, model tests of penetration and explosion of concrete target at the velocity of 450–700 m/s were carried out. Based on 10 sets of test results and dimensional analysis, the effect of penetration result on the depth of blast hole is studied. Results indicate that the dimensionless impact coefficient  $I_p$  can be used to characterize the penetration effects such as penetration depth, hole volume and penetration damage value, regardless of length-diameter ratio of charge, the increase of damage depth is mainly influenced by dimensionless impact coefficient  $I_p$  and explosion coefficient  $I_e$ . Based on the experimental data, influence rule of the depth of crater is obtained for the length-diameter ratio of 5: (1) when the  $I_p$  is small, the penetration depth is small, the change of  $I_e$  has little influence on the depth of crater  $h_c$ ; (2) with the increase of  $I_p$ ,  $h_c$  increases at a decreasing rate, influence of  $I_e$  on  $h_c$  increases; (3) with the increase of  $I_p$  to a certain extent,  $h_c$  tends to reach saturation value, influence of  $I_e$  on  $h_c$  tends to be stable.

**Keywords:** penetration; explosion; concrete target; impact coefficient; damage depth; model test

混凝土结构广泛应用于现代防护工程的抗毁伤设计中, 战斗部侵爆条件下混凝土破坏深度是防护设计的重要指标。过去几十年, 针对结构抗侵彻作用以及在爆炸作用下的响应问题已有大量研究, Forrestal 等<sup>[1-2]</sup>应用空腔膨胀理论研究弹体侵彻混凝土过程中受到的阻力, 结合实验数据提出一种半经验的侵彻深度计算公式; 王明洋等<sup>[3]</sup>对弹体侵彻混凝土时的比例换算问题进行了研究; 在多种理论分析方法被提出的同时, 侵彻问题的数值模拟也得到了快速发展<sup>[4]</sup>, 多种材料本构模型<sup>[5]</sup>及对混凝土的精细

\* 收稿日期: 2020-06-10; 修回日期: 2021-01-31

基金项目: 国家自然科学基金(51808552)

第一作者: 卢浩(1987—), 男, 博士, 讲师, lh829829@163.com

化建模方法<sup>[6]</sup>被提出。对于介质内部爆炸的研究则主要集中于浅埋爆炸中,如 Sher 等<sup>[7]</sup>基于线性脆性破坏理论研究了地质类材料浅埋爆炸时装药处裂纹的形成及发展,提出了考虑介质特性,装药参数及埋深的爆炸成坑尺寸和形状的计算方法,Fu 等<sup>[8]</sup>考虑爆炸冲击波在钢筋混凝土中传播引起的初始损伤及爆轰产物的作用,得到混凝土及钢筋在浅埋爆炸荷载下的抗力表达式,建立了爆坑计算模型。上述研究将侵彻和爆炸作为两个独立的研究对象,没有考虑侵爆战斗部侵彻后形成的临空区域对爆炸作用的影响。目前已有的侵爆联合作用实验研究常常采用钻孔或预留孔装药的方式进行<sup>[9-10]</sup>,而实际情况中侵爆弹打击目标则是在侵彻爆炸过程中连续完成的。数值模拟方法虽然可以模拟完整的侵爆过程,进而研究侵彻爆炸问题机理和现象<sup>[11-15]</sup>,但使用数值模拟结果进行定量分析得到的结果的准确性还有待验证,目前,在弹体对靶体侵彻后产生爆炸方面的实验研究较少。

为研究混凝土靶侵彻后形成的空腔和破坏区域对爆炸效应的影响,本文中开展 450~700 m/s 速度下的混凝土靶体侵彻实验,测量侵彻数据后将弹体取出,然后在弹坑中装药进行静爆实验。与钻孔或预留孔装药爆炸方式相比,本实验考虑了侵彻漏斗坑、隧道区长度与临空面以及结构损伤对爆炸作用的影响。通过分析实验结果、结合量纲分析等手段,得到爆炸弹坑深度增加值与侵彻结果的主要影响关系,并根据实验数据进行初步拟合。

## 1 模型实验过程

探究侵彻效应对爆炸结果的影响,需要首先获取混凝土靶体在战斗部侵彻后的破坏参数,因此本文中设计了一个两阶段的实验:第一阶段,利用 150 m 靶道开展混凝土靶的正侵彻实验,侵彻实验结束后,利用手持式三维激光扫描仪定量获取侵彻破坏数据;第二阶段,首先利用特制工具,将预留凹槽的弹头取出,将炸药放置在侵彻隧道区底部后进行爆炸实验,实验结束后,利用手持式三维激光扫描仪定量获取最终破坏数据。最后根据实验数据和量纲,找出侵彻造成的表观损伤和材料损伤对爆炸的影响规律,得到爆炸弹坑深度的预测模型。

### 1.1 实验准备

实验靶体选用 C30 和 C40 两种强度不同的素混凝土材料。混凝土靶体选用圆柱形,直径为 40 倍弹体直径,弹体直径为 20 mm,素混凝土外部用钢制套筒约束,靶体厚度 0.5 m,如图 1 所示。实验前对试样强度进行测试,得到 C30 混凝土的抗压强度为 30.6 MPa、弹性模量为 22.8 GPa; C40 混凝土的抗压强度为 40.2 MPa、弹性模量为 26.8 GPa。

实验所用弹体形状为卵形,弹头直径 20 mm、弹长 100 mm,材料为 30CrMnSiNi2A 钢,质量约 168 g,弹头头部曲率半径与直径之比为 2.5,强度约 1.5 GPa,如图 2(a)所示。外置弹托直径 30 mm,采用三瓣式设计。为确保弹体侵入混凝土后可以顺利取出,对弹体做如下处理:弹体尾部预留凹槽,侵彻过后使用 25 mm 钻筒对隧道区进行扩孔,弹尾可见时使用螺丝刀卸下取出;弹身做成圆台状,弹体尾部直径缩小至 14 mm,使弹体正侵彻混凝土靶体后,弹身部分与混凝土没有明显接触,便于取出,如图 2(b)所示。



图 1 实验用素混凝土靶

Fig. 1 Plain concrete target for test purposes



(a) Projectile bodies



(b) Sabot

图 2 实验用弹体

Fig. 2 Projectile for test purposes

炸药选用黑索金, 爆速 8 750 m/s, 爆热 5 215 J/g。炸药制作成直径 20 mm、厚度 20 mm 的药柱, 每个药柱质量为 7.85 g, 以便调整装药量, 如图 3 所示。

### 1.2 实验流程

#### (1) 侵彻实验流程

使用 30 mm 滑膛炮发射弹丸, 弹体飞行以及 与靶体作用过程采用高速摄像机全程记录, 便于观察和验证弹体的飞行姿态, 确保弹体正侵彻靶体, 实验现场如图 4(a) 所示, 弹体飞行速度用测速仪测量。侵彻实验结束后, 使用 3D 扫描仪获得侵彻弹坑的三维点云模型, 通过点云模型, 可以定量获取侵彻弹坑体积  $V_{pc}$  和侵彻深度  $h_p$  以及侵彻隧道区长度  $h_{pt}$ , 如图 4(b)~(c) 所示。



图 3 实验用药柱

Fig. 3 Explosive columns for test purposes

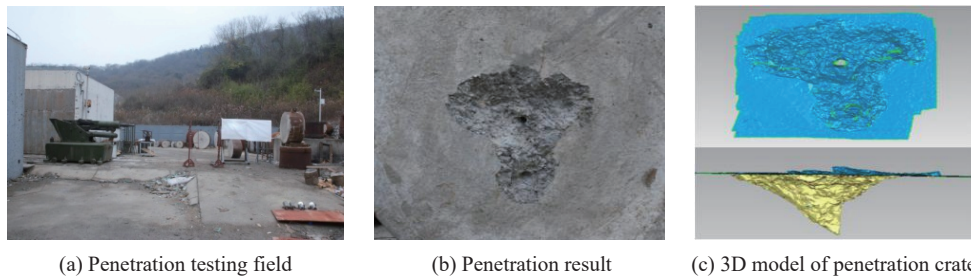


图 4 侵彻实验现场与扫描结果图

Fig. 4 Penetration testing field and 3D model of crater

#### (2) 爆炸实验流程

侵彻实验结束后, 将靶体移至爆炸场地, 如图 5(a) 所示。弹体取出后, 将预先设计的装药量装入侵彻隧道区底部, 爆炸实验结束后, 用 3D 扫描仪扫描爆炸坑获取三维点云模型, 得到侵爆共同作用下终态弹坑的深度  $h_{pe}$ , 如图 5(b)~(c) 所示。

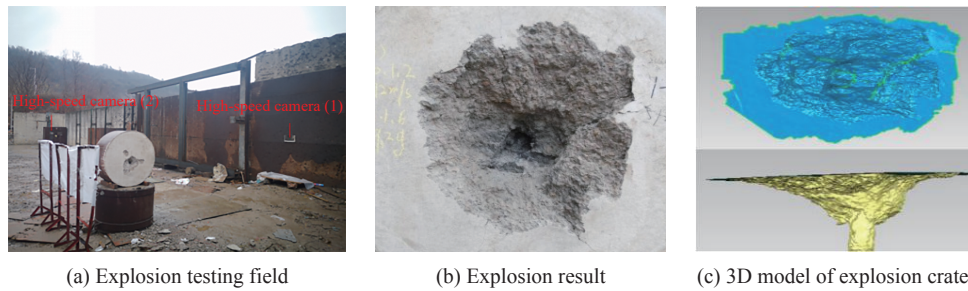


图 5 爆炸实验现场与扫描结果图

Fig. 5 Explosion testing field and 3D model of crater

## 2 模型实验结果

### 2.1 侵彻实验结果

共进行 10 次实验, 其中 C30 混凝土 6 组, 命中速度 479.20~567.47 m/s; C40 混凝土 4 组, 命中速度  $v_p=548.82\sim675.75$  m/s, 见表 1。从实验结果可以看出, 对于 C30 混凝土, 除靶体 1 外, 随着命中速度的不断增大, 其余靶体所形成的侵彻弹坑体积、侵彻深度、侵彻隧道区深度均呈现增加的趋势。与靶体 2 相比, 靶体 1 命中速度较小, 但其形成的侵彻弹坑体积与侵彻隧道区深度较大, 这与靶体材料在浇筑过程

中的均匀性以及破坏时剥落体的随机性有关, 因此后续的分析中也剔除了靶体 1 的实验数据。对于 C40 混凝土, 随着命中速度的不断增大, 侵彻弹坑体积、侵彻深度、侵彻隧道区深度呈现严格增长趋势。

表 1 侵彻实验结果

Table 1 Penetration test data

靶体	材料	$v_p/(m \cdot s^{-1})$	$V_{pc}/cm^3$	$h_p/m$	$h_{pe}/m$	靶体	材料	$v_p/(m \cdot s^{-1})$	$V_{pc}/cm^3$	$h_p/m$	$h_{pe}/m$
1	C30	479.20	299	0.211	0.136	6	C30	567.47	405	0.262	0.172
2	C30	488.73	162	0.221	0.129	7	C40	548.82	168	0.225	0.142
3	C30	512.37	209	0.226	0.151	8	C40	566.25	162	0.234	0.146
4	C30	525.27	207	0.232	0.144	9	C40	612.52	256	0.253	0.178
5	C30	551.13	355	0.267	0.186	10	C40	675.75	338	0.279	0.187

### 2.2 爆炸实验结果

在侵彻实验结果的基础上, 共进行 10 次爆炸实验, 根据常见武器战斗部装药长径比  $L_c/d_c$  确定药柱个数(4~6 个), 为了避免装药长径比对结果的影响, 设计实验装药长径比均为 5, 用于分析  $L_c/d_c$  一定的情况下, 侵彻结果对爆炸的影响。爆炸实验结果如表 2 所示, 表中  $m_e$  为装药质量,  $h_{pe}$  为侵爆联合作用下的破坏深度;  $h_e$  为爆炸作用下破坏深度的增加值, 是  $h_{pe}$  与  $h_p$  的差值。表中靶体 5 为对比实验结果, 在爆炸实验前一天将侵彻产生的破坏区域采用水泥填补, 对比分析侵彻开坑对爆炸效果的影响。

图 6 为部分混凝土靶体侵彻与爆炸实验结果对比图片。

表 2 爆炸实验结果

Table 2 Explosion test data

靶体	$h_p/m$	$m_e/g$	$h_{pe}/m$	$h_e/m$	靶体	$h_p/m$	$m_e/g$	$h_{pe}/m$	$h_e/m$
1	0.211	39.25	0.231	0.020	6	0.262	39.25	0.295	0.033
2	0.221	39.25	0.246	0.025	7	0.225	39.25	0.241	0.016
3	0.226	39.25	0.256	0.030	8	0.234	39.25	0.255	0.021
4	0.232	39.25	0.263	0.031	9	0.253	39.25	0.299	0.025
5	0.267	39.25	贯穿	>0.233	10	0.279	39.25	0.315	0.036



图 6 侵彻爆炸实验结果对比图

Fig. 6 Comparison of penetration explosion test results

### 3 侵彻对爆炸深度的影响分析

混凝土靶体受侵彻后会出现两部分表现损伤区域及不可见的介质内损伤区域, 包括侵彻漏斗坑、侵彻隧道区及隧道区周边径向裂纹及环向裂纹区<sup>[16]</sup>。靶体受内爆炸作用毁伤效果主要取决于装药的堵塞系数、靶体介质的抗爆性能以及装药等效当量大小。侵彻初始损伤对爆炸的影响包括: (1)隧道区深度以及侵彻开坑大小决定了装药堵塞系数。隧道区越深, 爆炸能量越不易耗散至空气中, 堵塞系数越大;



而侵彻开坑体积越大, 爆炸能量越容易耗散至空气中, 填塞系数就越小。隧道区深度及侵彻开坑大小均取决于弹径、弹重、侵彻速度、混凝土强度等弹靶相互作用参数; (2) 侵彻造成的裂纹区会削弱混凝土介质的抗爆性能, 使爆炸效果增强, 裂纹区的范围及裂纹分布密度取决于弹靶相互作用中应力波的传递。

侵彻过程对靶体造成多种破坏, 这些破坏都影响着最终的爆炸效果, 所以战斗部侵爆作用下混凝土材料动力学问题非常复杂, 建立完备的数学和力学模型较困难, 采用量纲分析对问题进行简化, 找到影响爆炸成坑的主要物理量及相关关系, 结合实验数据, 建立爆坑深度预测模型是研究混凝土材料内部爆炸问题的有效方法之一。

### 3.1 侵彻后靶体受爆炸作用的量纲分析

本文中主要研究侵彻后的爆炸深度。影响侵彻后介质内部爆炸作用效果的因素较多, 主要的材料力学参数和模型几何参数如下:

- (1) 炸药几何与材料参数, 柱形装药的长度  $L_c$  和直径  $d_c$ 、装药质量  $m_c$ 、爆热  $Q_v$ 、爆速  $v_D$ ;
- (2) 混凝土几何与材料参数, 靶体厚度  $H_c$ 、密度  $\rho_c$ 、抗压强度  $f_c$ ;
- (3) 侵彻破坏几何参数, 弹体直径  $d$ 、侵彻深度  $h_p$ 、侵彻隧道区深度  $h_{pt}$ 、开坑体积  $V_{pc}$ 。

通过上述参数分析上述因素对爆炸作用下破坏深度的增加值  $h_e$  的影响, 由于弹体直径  $d$  与装药直径  $d_c$  相同, 统一采用  $d$  来表示。用量纲分析的方法获得了 7 个独立的  $\pi$  项:

$$\pi_1 = m_c v_D^2 / (f_c d^3), \quad \pi_2 = Q_v / v_D^2, \quad \pi_3 = L_c / d, \quad \pi_4 = H_c / d, \quad \pi_5 = h_{pt} / d, \quad \pi_6 = \rho_c v_D^2 / f_c, \quad \pi_7 = V_{pc} / d^3 \quad (1)$$

对于炸药因素, 仅考虑与装药质量相关的项, 即  $\pi_1$ , 采用无量纲爆炸系数  $I_e = v_D^2 m_c / (f_c d^3)$  作为影响无因次弹坑深度的因素,  $h_e$  的无量纲表达式为:

$$h_e / d = f(I_e, h_{pt} / d, V_{pc} / d^3) \quad (2)$$

下面将利用模型实验结果对  $h_e$  的各影响因素进行分析。

### 3.2 侵彻作用结果

侵彻作用后, 在混凝土靶体正面会形成侵彻漏斗坑以及隧道区, 从而影响爆炸作用的自由面空间位置, 最后导致爆炸结果的变化。从靶体 5~6 的对比实验可以看出, 两个靶体命中速度、侵彻深度相近, 但靶体 6 没有预先填塞, 爆炸后增加的深度为 3.3 cm, 侵爆联合作用后破坏深度为 29.5 cm; 而靶体 5 在爆炸前一天用水泥填塞, 爆炸后出现了贯穿, 爆炸后增加的深度大于 23.3 cm, 远大于靶体 6。上述对比实验客观验证了侵彻造成的靶体表面开坑会显著影响装药填塞情况, 进而影响爆炸效果。

式(2)中的变量除了与侵彻结果相关外, 还与材料强度有关, 首先采用一元拟合的方法分别对 C30 和 C40 混凝土靶体的侵彻结果与爆炸结果进行回归分析, 分别得到侵彻坑体积、侵彻隧道区深度与爆炸深度的相关性, 如图 7~8 所示。

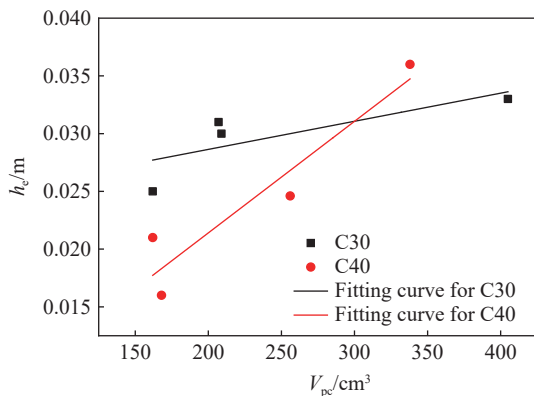


图 7 侵彻坑体积与爆炸深度之间的关系  
Fig. 7 Relationship between penetration crater volume and depth of explosion

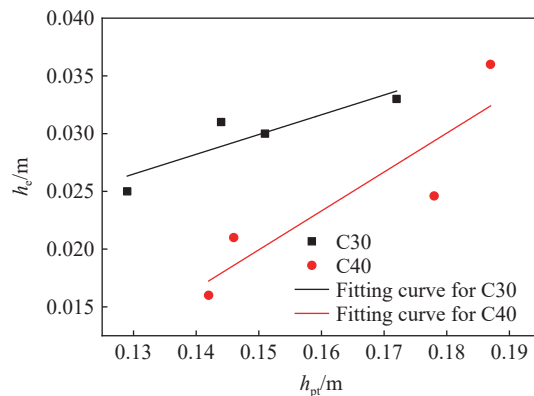


图 8 侵彻隧道区深度与爆炸深度之间的关系  
Fig. 8 Relationship between depth of penetration in the tunnel region and depth of explosion

从线性拟合的结果来看,对于 C30 材料,侵彻坑的体积相对于爆炸深度相关性比较弱,相关系数约为 0.401 54,侵彻隧道区深度与爆炸深度的关系较强,相关系数约为 0.711 8,对于 C40 材料,无论是侵彻坑体积还是隧道区深度都表现出与爆炸深度较强的相关性,其相关系数分别为 0.844 1、0.801 3。总体来说,隧道区深度与爆炸深度的相关性强于侵彻坑体积与爆炸深度的相关性,这一方面与侵彻坑的形成受材料的不均匀性影响较大有关,而隧道区深度受力变形较为单一,结果也相对稳定;另一方面与样本数量有关,样本数量较小时其随机性难以很好地展现。从靶体 5~6 的对比实验可以看出,是否考虑侵彻漏斗坑对于爆炸效果的影响是非常明显的,所以在侵彻因素的分析中有必要考虑侵彻漏斗坑。

为综合考虑侵彻漏斗坑体积以及隧道区深度的影响,采用冲击系数  $I_p$  表征侵彻效果的影响<sup>[17-18]</sup>,计算公式为:

$$I_p = NMv_p^2/(d^3 f_c) \quad (3)$$

式中:  $N$  为弹体形状系数,  $M$  为弹体质量。

首先,基于实验数据分析  $I_p$  与式(2)中的两个侵彻相关参数  $h_{pt}/d$ 、 $V_{pc}/d^3$  的相关性,如图 9 所示。从图 9~10 可以看出,  $I_p$  与两个参数之间具有较强的相关性,利用其表征侵彻影响是可行的,式(2)可表示为:

$$h_e/d = f(I_e, I_p) \quad (4)$$

由侵彻爆炸过程可知,爆炸作用下破坏深度的增加值  $h_e$  取决于填塞系数(装药比例埋深)、侵彻过程对周围介质产生的破坏程度、装药当量及介质抗力,而装药比例埋深及侵彻过程对周围介质的破坏程度与冲击系数相关,装药当量在爆炸系数中得到了体现,介质抗力在两个系数中都有体现。说明式(4)的形式符合钻地弹侵彻爆炸的作用机理。

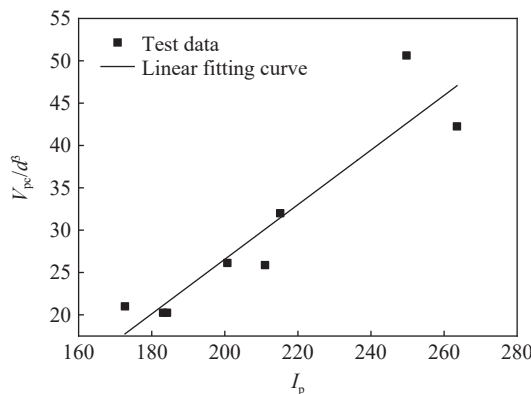


图 9 侵彻坑体积与冲击系数之间的关系

Fig. 9 Relationship between penetration crater volume and impact coefficient

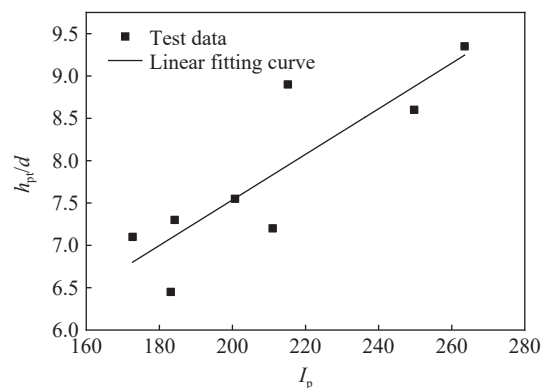


图 10 侵彻隧道区深度与冲击系数之间的关系

Fig. 10 Relationship between depth of penetration in the tunnel region and impact coefficient

### 3.3 冲击系数对爆炸深度的影响

侵彻作用下破坏深度的计算方法已有很多,不再讨论,本文中重点分析侵彻后爆炸作用带来的破坏深度的增加量  $h_e$  的计算。利用模型实验结果,结合式(4),可以得到不同爆炸系数无量纲冲击系数对爆炸深度的影响,如图 11 所示,可以看出:对于不同的无量纲爆炸系数(C30 混凝土  $I_e=12\ 521$ ; C40 混凝土  $I_e=9\ 391$ ),冲击系数  $I_p$  对爆炸作用时深度的增加量  $h_e$  的整体影响趋势是类似的:随着  $I_p$  的不断增大,  $h_e$  不断增大,但  $h_e$  增长的速度不断变小。

侵彻弹坑改变了爆炸作用时靶体的自由面及填塞情况,从而影响了爆炸结果,由于侵彻为中低速,侵彻弹坑及爆炸弹坑形态基本一致,因此将冲击系数作为侵彻对爆炸效果影响的表征量,并以爆炸引起的弹坑深度增加值衡量爆炸效果是合理的。

从图 11 可以看出, 针对半无限混凝土靶侵爆, 无量纲爆炸系数  $I_e$  对  $h_e$  的影响与无量纲冲击系数  $I_p$  的大小有关, 当  $I_p$  较小时,  $I_e$  的变化对  $h_e$  影响较小, 侵彻深度较小, 增加装药量意味着增加药柱的长度, 将会有更多的能量向孔口自由面释放, 增加的装药能量不能作用到混凝土材料上, 因此,  $I_e$  的变化对爆炸弹坑深度变化的影响较小; 随着  $I_p$  不断增大,  $I_e$  的变化对  $h_e$  影响逐渐变大, 弹坑深度随  $I_p$  的增大迅速增大, 这是由于随着  $I_p$  的增大, 侵彻深度增加, 而侵彻成坑体积的增加还比较慢, 增大的炸药埋深和较小的爆炸成坑体积导致了爆炸能量更多地作用到混凝土介质上, 而不是耗散到空气中去; 当  $I_p$  较大时, 爆炸成坑深度的增大变缓, 并趋于稳定, 这是由于  $I_p$  较大时, 虽然侵彻深度不断增加, 使得侵彻弹坑体积和深度增大, 但装药位置与隧道区口部的距离增加不明显, 此外, 不断增加的侵彻开坑体积, 使得没有更多的能量作用在混凝土介质上。

## 4 结 论

(1) 混凝土材料受侵爆作用时, 必须考虑侵彻造成的靶体破坏及损伤对爆炸破坏的影响, 是否考虑侵彻的影响对计算结果的影响较大, 在开展结构毁伤效应分析与评估时, 若不考虑侵彻的影响将难以获得客观真实的结果, 从而影响工程决策。

(2) 采用无量纲冲击系数能够较好地表征侵彻结果, 包括侵彻漏斗坑、侵彻隧道区深度。

(3) 不同装药条件下, 冲击系数对爆炸深度的影响较大, 且具有类似的影响趋势: 爆炸深度随冲击系数增大而增大, 但增大速度变小; 冲击系数同样会影响无量纲爆炸系数与爆炸深度之间的关系, 当冲击系数较小时, 爆炸系数对爆炸深度影响较小, 随着冲击系数的增大, 爆炸因素对爆炸深度的影响增大。

由于实验条件限制, 对于侵彻造成的破坏, 本文中仅分析了可量化的侵彻坑体积和隧道区深度, 没有进一步分析侵彻造成的介质内部损伤对于爆炸的影响, 但分析中采用的冲击系数也含有侵彻损伤的因素; 由于实验选用弹体较小, 靶体背面未出现混凝土靶板的开裂现象, 基于现有实验结果难以分析地冲击效应。此外, 由于实验数据样本有限, 本文中并没有给出具体计算公式。

## 参考文献:

- [1] FORRESTAL M J, ALTMAN B S, CARGILE J D, et al. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1994, 15(4): 395–405. DOI: 10.1016/0734-743X(94)80024-4.
- [2] FORRESTAL M J, FREW D J, HANCHAK S J, et al. Penetration of grout and concrete targets with ogive-nose steel projectiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1996, 18(5): 465–476. DOI: 10.1016/0734-743X(95)00048-F.
- [3] 王明洋, 郑大亮, 白晓燕. 弹体对钢筋混凝土板-钢板的贯穿计算问题 [J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(4): 289–295. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)04-0289-07.  
WANG M Y, ZHENG D L, BAI X Y. Theoretical study on the perforation of reinforced concrete with back-up steel plate(RCBSP) by projectiles [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(4): 289–295. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)04-0289-07.
- [4] 邓国强, 杨秀敏. 工程岩体中多弹重复打击效应的数值模拟分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(3): 361–366. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)03-0361-06.  
DENG G Q, YANG X M. Numerical simulation of the effect of multiply EPW into engineering rock [J]. *Explosion and Shock*

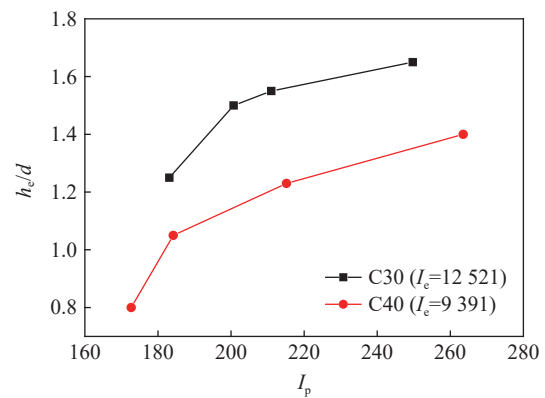


图 11 爆炸作用下坑深增加量  $h_e$  与冲击系数之间的关系

Fig. 11 Relationship between increased depth of crater under explosion and impact coefficient

- Waves*, 2014, 34(3): 361–366. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)03-0361-06.
- [5] GANG H, KWAK H G. A strain rate dependent orthotropic concrete material model [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 103: 211–224. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.01.027.
- [6] 吴成, 沈晓军, 王晓鸣, 等. 细观混凝土靶抗侵彻数值模拟及侵彻深度模型 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(6): 1364–1371. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0123.
- WU C, SHEN X J, WANG X M, et al. Numerical simulation on anti-penetration and penetration depth model of mesoscale concrete target [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(6): 1364–1371. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0123.
- [7] SHER E N, MIKHAILOV A M, CHERNIKOV A G. Brittle failure zone size under the concentrated charge blasting near free surface [J]. *Journal of Mining Science*, 2011, 47(6): 734–740. DOI: 10.1134/S1062739147060050.
- [8] FU Y S, ZHANG Q M, WANG H J. Study on formative mechanism of blasting crater in reinforced concrete under internal blast loading [J]. *Key Engineering Materials*, 2006, 326/328: 1645–1648. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.326-328.1645.
- [9] 王晋平, 刘彦, 段卓平, 等. 带壳装药混凝土中爆炸震塌效应研究 [J]. *兵工学报*, 2014, 35(S2): 207–212.
- WANG J P, LIU Y, DUAN Z P, et al. Collapse effect of concrete under internal explosion of shelled charge [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(S2): 207–212.
- [10] 高全臣. 复合防护结构抗侵彻爆炸性能的试验研究 [C] // 现代爆破理论与技术——第十届全国煤炭爆破学术会议论文集. 北京: 煤炭工业出版社, 2008: 93–98.
- [11] YANG G D, WANG G H, LU W B, et al. A SPH-Lagrangian-Eulerian approach for the simulation of concrete gravity dams under combined effects of penetration and explosion [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2018, 22(8): 3085–3101. DOI: 10.1007/s12205-017-0610-1.
- [12] 宋顺成, 李国斌, 才鸿年, 等. 战斗部对混凝土先侵彻后爆轰的数值模拟 [J]. *兵工学报*, 2006, 27(2): 230–234. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2006.02.010.
- SONG S C, LI G B, CAI H N, et al. Numerical simulation of penetration-then-detonation of concrete target with projectile [J]. *Acta Armamentarii*, 2006, 27(2): 230–234. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2006.02.010.
- [13] 宋顺成, 才鸿年. 模拟战斗部对混凝土侵彻与爆炸耦合作用的计算 [J]. *弹道学报*, 2004, 16(4): 23–28, 47. DOI: 10.3969/j.issn.1004-499X.2004.04.005.
- SONG S C, CAI H N. Computations for coupled actions of simulated projectile penetrating and detonating to concrete [J]. *Journal of Ballistics*, 2004, 16(4): 23–28, 47. DOI: 10.3969/j.issn.1004-499X.2004.04.005.
- [14] 李守苍, 李树强, 闫玉凤, 等. 战斗部侵彻钢筋混凝土靶中爆炸毁伤的数值模拟和试验研究 [J]. *防护工程*, 2016, 38(4): 5–10.
- LI S C, LI S Q, YAN Y F, et al. Numerical simulation and experimental study on warhead explosion damage after penetration into reinforced concrete target [J]. *Protective Engineering*, 2016, 38(4): 5–10.
- [15] 杨广栋, 王高辉, 卢文波, 等. 侵彻与爆炸联合作用下混凝土靶体的毁伤效应分析 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(12): 3284–3292. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2017.12.020.
- YANG G D, WANG G H, LU W B, et al. Damage characteristics of concrete structures under the combined loadings of penetration and explosion [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(12): 3284–3292. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2017.12.020.
- [16] 任辉启, 穆朝民, 刘瑞朝, 等. 精确制导武器侵彻效应与工程防护 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- REN H Q, MU C M, LIU R C, et al. Penetration effects of precision guided weapons and engineering protection [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [17] LI J Z, LV Z J, ZHANG H S, et al. Perforation experiments of concrete targets with residual velocity measurements [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 57: 1–6. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.01.007.
- [18] PENG Y, WU H, FANG Q, et al. Residual velocities of projectiles after normally perforating the thin ultra-high performance steel fiber reinforced concrete slabs [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 97: 1–9. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.06.006.

(责任编辑 曾月蓉)