

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0132

弹体对混凝土材料先侵彻后爆炸损伤破坏效应的数值模拟研究*

王 银¹, 孔祥振^{1,2}, 方 秦¹, 洪 建¹, 翟阳修¹

(1. 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;

2. 东南大学爆炸安全防护教育部工程研究中心, 江苏 南京 211189)

摘要: 基于 Kong-Fang 混凝土材料模型和 LS-DYNA 的流固耦合和重启动算法, 开展了某新型钻地武器先侵彻后爆炸对混凝土靶体的毁伤破坏效应研究。通过模拟大口径缩比弹侵彻实验和预制孔爆炸实验, 验证了材料模型及其参数的可靠性。在此基础上, 进一步对预制孔装药爆炸建模、不考虑弹壳的重启动建模和考虑弹壳的重启动建模 3 种方法进行了比较。数值计算结果表明, 由于爆轰产物的外泄, 不考虑侵彻预损伤的预制孔装药爆炸方法得到的爆坑直径仅为 3 倍弹径, 且损伤破坏模式与其他 2 种方法得到的损伤破坏模式区别较大。重启动建模方法继承了弹体侵彻过程中累积的损伤, 爆坑直径在原有侵彻损伤破坏的基础上明显增大; 且由于弹壳变形破碎消耗部分能量, 考虑弹壳时模拟得到的爆坑直径(约 14.5 倍弹径)略小于不考虑弹壳时模拟得到的爆坑直径(约 16 倍弹径); 但由于破碎弹头的二次侵彻作用, 考虑弹壳时模拟得到的爆坑深度比不考虑弹壳时模拟得到的爆坑深度增加约 5%。上述研究结果可为进一步开展钻地武器先侵彻后爆炸毁伤破坏效应的实验研究提供参考。

关键词: 先侵彻后爆炸; 混凝土损伤破坏; 预损伤; 二次侵彻

中图分类号: O385

国标学科代码: 1303530

文献标志码: A

Numerical investigation on damage and failure of concrete targets subjected to projectile penetration followed by explosion

WANG Yin¹, KONG Xiangzhen^{1,2}, FANG Qin¹, HONG Jian¹, ZHAI Yangxiu¹

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact,

Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, Jiangsu, China;

2. Engineering Research Center for Safety and Protection of Explosion & Impact of Ministry of Education,

Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China)

Abstract: Based on the recently proposed Kong-Fang concrete material model and the fluid structure interaction (FSI) and restart algorithms available in the LS-DYNA, the damage and failure of concrete targets subjected to projectile penetration followed by explosion were numerically investigated. The numerical model, material models along with the corresponding parameters were firstly validated by comparing the numerical simulation results of the large-caliber projectile penetration experiment and the charge explosion test of a concrete target with a precast hole to the corresponding test data in terms of the penetration depth and scabbing depth, respectively. Then numerical simulations of the damage and failure in concrete targets struck by a typical warhead were conducted using three different modeling methods, i.e., charge explosion in a concrete target with a precast hole, charge explosions without and with projectile shell using the restart algorithm. The numerical results demonstrate that the crater diameter of the concrete target caused by explosion is only three times the projectile diameter when

* 收稿日期: 2021-04-14; 修回日期: 2021-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(51808550); 中国博士后科学基金(2020M671296)

第一作者: 王 银(1991—), 男, 博士研究生, wangyin1107@163.com

通信作者: 孔祥振(1988—), 男, 博士, 副教授, ouckxz@163.com

the pre-damage during the penetration process is not considered, and the damage and failure patterns are different from those using the other two methods. The numerically predicted crater diameter is very large when considering the pre-damage during the penetration process, as expected. However, the final crater diameter when the projectile shell is considered (about 14.5 times the projectile diameter) was slightly smaller than that without the consideration of projectile shell (around 16 times the projectile diameter), which mainly because part of the explosion energy is dissipated by the deformation and fracture of the projectile shell. The predicted crater depth with the consideration of projectile shell is increased by 5% compared with that ignoring the projectile shell, mainly due to the secondary penetration of the fragmentized warhead. The present numerical results can provide a reliable reference for further experimental investigation on the damage and failure of concrete targets subjected to projectile penetration followed by explosion.

Keywords: penetration followed by explosion; concrete damage and failure; pre-damage; secondary penetration

我国重要军民用防护结构面临新型钻地武器高精度、深侵彻、大当量打击的严峻威胁。钻地武器通过精确制导系统侵彻至预定位置,而后引爆弹药对防护结构进行毁伤破坏。已有对钻地武器毁伤破坏效应的研究多针对侵彻能力方面,取得了较为系统的成果^[1-2],并获得了设计计算方法,但相对忽视了侵彻后弹药爆炸引起的破坏效应。探讨上述钻地武器先侵彻后爆炸对防护结构的毁伤破坏效应需明确 2 个问题:(1)侵彻对结构的预损伤对后续爆炸毁伤破坏的影响;(2)弹壳对爆炸毁伤破坏的影响。

已有对先侵彻后爆炸毁伤破坏效应的实验研究方法,主要有预制孔装药爆炸和考虑侵彻预损伤的装药爆炸。预制孔装药爆炸是在已知弹体侵彻深度的基础上,在靶体浇筑时预留或钻孔挖取与弹道尺寸相应大小的孔洞并埋置装药,模拟先侵彻后爆炸的毁伤破坏效应。基于弹体对岩石靶体的单次侵彻深度和 2 次重复打击的侵彻深度,左魁等^[3-4]采用预制孔装药对岩石靶体开展了爆炸实验研究,从实验数据发现,在装药量相等的前提下,二次预制孔装药爆炸和一次预制孔装药爆炸形成的爆坑直径近似相等。Lai 等^[5]首先对超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)靶体开展了多次重复侵彻实验,然后基于得到的侵彻深度,开展了不同相应埋深的预制孔装药爆炸实验;实验结果表明,装药埋深对 UHPC 靶体损伤破坏影响较大,掺入钢纤维和玄武岩粗骨料可有效提高抗重复打击和预制孔装药爆炸的性能。预制孔装药爆炸方法无法考虑侵彻过程产生的预损伤对靶体损伤破坏的影响,基于此对防护结构的设计计算是偏于危险的。考虑预损伤的装药爆炸方法是在侵彻结束后先将弹体取出,然后在弹坑内填充装药进行爆炸实验。基于上述思想,左魁等^[6-7]对岩石靶体进行了考虑预损伤的装药爆炸实验,发现最终靶体损伤破坏主要取决于侵彻速度、装药量和岩石力学特性。邓国强等^[8]采用新型半穿甲弹对山体劈坡靶进行了实弹实验,实验中先进行侵彻,由于侵彻后弹体已破碎无法取出,因此直接在侵彻形成的弹坑中埋置装药进行装药爆炸实验。上述考虑预损伤的装药爆炸,虽然可考虑侵彻预损伤对后续爆炸毁伤破坏的影响,但对于弹壳对爆炸过程的影响缺乏定量的考虑,无法准确评估实际钻地武器对靶体的损伤破坏效应。

弹体先侵彻后爆炸的实验研究受测试技术和经费限制,高精度数值模拟提供了另外一种可靠的研究手段。已有针对于先侵彻后爆炸对结构损伤破坏的数值模拟主要可分为 2 类方法:(1)预制孔装药模拟方法;(2)侵彻爆炸一体化计算方法。预制孔装药模拟方法,即不考虑侵彻的预损伤效应,直接在靶体预制开孔装填炸药进行计算。Lai 等^[5]采用该方法,开展了不同预制孔尺寸装药爆炸对 UHPC 靶体损伤破坏的数值模拟。侵彻爆炸一体化计算方法,即在侵彻结束后引爆炸药,继续进行计算。梁龙河等^[9]利用 LS-DYNA,进行了弹体对 C30 混凝土靶体先侵彻后爆炸破坏效应的一体化数值模拟研究。基于 LS-DYNA,曾亮等^[10]通过设置装药延时起爆时间,进行了大口径钻地战斗部对地下洞库防护结构先侵彻后爆炸破坏效应的数值模拟研究;数值计算结果表明,考虑侵彻预损伤得到的爆坑尺寸明显大于不考虑侵彻预损伤得到的爆坑尺寸。杨广栋等^[11]、Yang 等^[12]利用 AUTODYN,分别进行了预制孔装药和侵彻爆炸一体化对混凝土靶体损伤破坏的数值模拟研究,探讨了侵彻预损伤对爆炸毁伤破坏效应的影响,发现

弹体侵彻仅造成混凝土结构的局部破坏, 而先侵彻后爆炸作用下混凝土结构发生严重破坏。上述研究中, 为简化数值计算, 炸药采用拉格朗日网格描述, 单元畸变问题严重, 且均未考虑弹壳对爆炸毁伤破坏的影响。冯春等^[13]基于自主研发的有限元和离散元结合的数值计算软件, 采用二维模型定性模拟了钻地武器先侵彻后爆炸的毁伤破坏效应, 数值模拟中采用侵彻和爆炸一体化计算方法(侵彻过程在 16.5 ms 结束, 炸药在此时刻起爆); 结果表明钻地武器爆炸效应是诱发岩体破裂及地下构筑物失效的主要原因。基于自主研发的计算流体动力学软件, 邓国强等^[14]进行了弹体对天然非均质岩体多次侵彻爆炸损伤破坏的数值模拟研究, 模型中考虑了侵彻预损伤的影响, 但由于考虑弹壳破碎的爆炸破坏效应模拟耗时繁琐, 提出了半经验半理论的爆炸效应估算公式, 嵌入到数值计算模型中用于模拟岩石损伤破坏区域, 数值模拟结果与实验结果吻合较好。

可以看出, 目前对弹体先侵彻后爆炸毁伤破坏效应的实验研究, 主要采用预制孔装药爆炸方法, 忽略了侵彻预损伤和弹壳对爆炸毁伤破坏的影响。数值模拟研究通常基于侵彻爆炸一体化计算方法, 虽能考虑侵彻预损伤的影响, 但针对弹壳对爆炸毁伤破坏的影响缺乏考虑, 且已有的数值模拟研究多是定性研究, 无法定量给出上述 2 种因素对爆炸毁伤破坏的影响程度, 从而无法反哺于工程设计计算。本文中, 基于 Kong-Fang 混凝土材料模型^[15-17]和 LS-DYNA 轴对称建模方式, 结合流固耦合算法和重启算法, 开展某新型弹体对混凝土靶体先侵彻后爆炸损伤破坏效应的数值模拟研究, 着重探讨侵彻预损伤和弹壳对混凝土靶体最终毁伤破坏的影响。

1 数值模型及验证

首先, 对弹体对混凝土靶体先侵彻后爆炸的材料模型和有限元模型进行详细介绍; 然后, 通过大口径缩比弹体侵彻实验和预制孔爆炸实验对数值模型进行验证。

1.1 材料模型

1.1.1 混凝土

混凝土材料选用 Kong-Fang 混凝土材料模型^[15-17], 该材料模型为流体弹塑性模型, 已被推广应用于岩石材料^[18]、UHPC 材料^[19], 并可考虑自由水效应^[20]。在几年应用的基础上, 近期对 Kong-Fang 混凝土材料模型进行了有针对性的完善和改进^[17], 主要包括引入应变硬化, 综合考虑拉伸损伤、剪切损伤和静水压缩损伤、修正的应变率效应模型^[21]等方面, 本文数值模拟采用改进后的 Kong-Fang 混凝土材料模型。

(1) 当前加载面与状态方程

当前加载面通过与等效塑性应变 λ 有关的比例因子 η 插值屈服强度面、最大强度面和残余强度面得到, 即:

$$Y(\sigma_{ij}, \eta) = \sqrt{3J_2} = \begin{cases} r' \theta_{\text{dir}} [\eta(\sigma_m - \sigma_y) + \sigma_y] & \lambda \leq \lambda_m \\ r' \theta_{\text{dir}} [\eta(\sigma_m - \sigma_r) + \sigma_r] & \lambda > \lambda_m \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_{ij} 为应力张量; J_2 为应力偏张量第二不变量; r' 为当前子午面与压缩子午面的比值; θ_{dir} 为动态增强因子; σ_y 为屈服强度面; σ_m 为最大强度面; σ_r 为残余强度面; λ_m 为峰值应力时对应的 λ , 经大量计算, λ_m 取 8.7×10^{-5} 。

具体地, 屈服强度面 σ_y 、最大强度面 σ_m 和残余强度面 σ_r 的表达式分别为:

$$\sigma_y = \begin{cases} 1.35(r_p + T) & r_p \leq 0 \\ \left(3 - 9\frac{T}{f_c}\right)r_p + 1.35T & 0 < r_p \leq \frac{f_{yc}}{3} \\ f_{yc} + \frac{r_p - f_{yc}/3}{a_{1y} + a_{2y}r_p} & \frac{f_{yc}}{3} < r_p \leq Nf_c \\ f_{yc} + \frac{Nf_c - f_{yc}/3}{a_{1y} + a_{2y}Nf_c} & r_p > Nf_c \end{cases} \quad (2)$$

$$\sigma_m = \begin{cases} 3[r_p/(1-D)+T] & r_p \leq 0 \\ 1.5(r_p+T)/\psi & 0 < r_p \leq f_c/3 \\ f_c + \frac{r_p - f_c/3}{a_1 + a_2 r_p} & r_p > f_c/3 \end{cases} \quad (3)$$

$$\sigma_r = \begin{cases} 0 & r_p \leq 0 \\ 0.7f_c \left(\frac{3r_p}{f_c}\right)^{a_3} & 0 < r_p \leq \frac{f_c}{3} \\ 0.7f_c + \frac{r_p - f_c/3}{a_{1y} + a_{2y} r_p} & r_p > \frac{f_c}{3} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $r_p = p/\theta_{dif}$, p 为压力; f_c 为混凝土单轴抗压强度; f_{yc} 为混凝土屈服强度; D 为总损伤; T 为混凝土单轴抗拉强度; ψ 为拉、压子线的比值; N 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_{1y} 和 a_{2y} 为混凝土强度面参数, 具体取值见表 1。

状态方程的具体表达式为:

$$p = C(\mu) + \gamma_0 \chi(\mu) E_0 \quad (5)$$

式中: $C(\mu)$ 和 $\chi(\mu)$ 分别表示压力和温度与体积

应变 μ 之间的关系, E_0 为体积内能, γ_0 为特征温度因子。Kong-Fang 模型中不考虑材料温度变化, 采用多段线性描述, 即输入 10 组体积应变和压力关系以及 10 组体积应变和卸载模量关系, 当前压力和卸载模量由上述 10 组数据插值得到。

(2) 损伤累积

已有混凝土材料模型(如 K&C、RHT 等模型)均忽略了高围压下材料内部孔隙压实引起的静水压缩损伤和不同损伤机制之间相互影响关系, 如剪切损伤对拉伸损伤的影响(表现在剪切裂纹在拉伸状态下继续扩展)、静水压缩损伤对非三向压缩应力状态的影响等。为表述各损伤之间的相互影响关系, Kong-Fang 模型中引入总损伤, 即:

$$D = 1 - (1 - \delta_s D_t)(1 - D_s)(1 - \delta_h D_h) \quad (6)$$

式中: D_t 、 D_s 和 D_h 分别为拉伸损伤、剪切损伤和静水压缩损伤, δ_s 和 δ_h 为与应力状态相关的变量。 δ_s 和 δ_h 的表达式如下:

$$\delta_s = \begin{cases} 0 & r_p \geq 0 \\ 1 & r_p < 0 \end{cases}, \quad \delta_h = \begin{cases} 1 & \text{三向压缩向非三向压缩变化} \\ 0 & \text{其他应力状态} \end{cases} \quad (7)$$

各损伤累积参考混凝土规范^[22], 即:

$$D_i = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n - 1 + (\lambda_i/\lambda_m)^n} & \lambda_i \leq \lambda_m \\ 1 - \frac{\rho_c \lambda_i/\lambda_m}{m(\lambda_i/\lambda_m - 1)^k - \lambda_i/\lambda_m} & \lambda_i > \lambda_m \end{cases} \quad i = t, s, h \quad (8)$$

式中: λ_i 为各应力状态下等效塑性应变, ρ_c 、 n 、 m 和 k 为损伤参数。参考混凝土规范^[22], $\rho_c = f_c/(E\varepsilon_{cr})$, E 为弹性模量, $n = (E\varepsilon_{cr})/(E\varepsilon_{cr} - f_c)$, 应变峰值 $\varepsilon_{cr} = 8.26 \times 10^{-6} f_c^{0.307}$ (f_c 的单位为 MPa), m 和 k 分别取 0.29 和 1.86。

各应力状态下等效塑性应变 λ_i (包括拉伸等效塑性应变 λ_t 、剪切等效塑性应变 λ_s 和静水压缩等效塑性应变 λ_h) 表达式如下:

$$\lambda_t = \sum \frac{d\bar{\varepsilon}_p}{(1 - r_p/T)^{b_1}} \quad r_p < 0 \quad (9)$$

$$\lambda_s = \sum \frac{d\bar{\varepsilon}_p}{\theta_{dif}(1 + r_p/T)^{b_2}} \quad r_p \geq 0 \quad (10)$$

表 1 Kong-Fang 混凝土材料模型参数

Table 1 Parameters of the Kong-Fang concrete material model

a_1	a_2	a_3	a_{1y}	a_{2y}	N
0.585 7	0.025/ f_c	0.5	0.908 8	0.075/ f_c	1.0
b_1	b_2	b_3	λ_m	状态方程来源	
1.6	1.0	1.0	8.7×10^{-5}	文献[15-17]	

$$\lambda_h = \sum \frac{d\mu_p}{(1+r_p/T)^{b_3}} \quad r_p \geq 0 \quad (11)$$

式中: $d\bar{\epsilon}_p$ 为等效塑性应变增量; $d\mu_p$ 为塑性体积应变增量; b_1 、 b_2 和 b_3 为控制等效塑性应变增长速率的参数, 取值如表 1 所示。

(3) 应变率效应

已有研究表明, 应变率效应对准确预测强动载作用下混凝土材料的损伤破坏至关重要^[23-24], Kong-Fang 模型中应变率效应通过对当前加载面的径向放大实现(见式(1)), 且在应变率计算中采用等效应变率模型^[21]:

$$\bar{\epsilon}_{n+1} = \begin{cases} \dot{\epsilon} & \lambda \leq 0 \\ \frac{\bar{\epsilon}_n + (\Delta t/\eta_0)\bar{\epsilon}_{n+1}}{1 + \Delta t/\eta_0} & \lambda > 0 \end{cases} \quad (12)$$

可较好地描述应变率突变条件下引起的应力延迟响应。式(12)中: $\dot{\epsilon}$ 为瞬时应变率, $\bar{\epsilon}_n$ 为当前等效应变率, $\bar{\epsilon}_{n+1}$ 为下一时步的等效应变率, Δt 为时间步增量, η_0 为时间松弛因子, $\eta_0=0.1$ ms。表 1 中给出了 Kong-Fang 模型参数的取值。

除表 1 中的参数外, 混凝土的其他参数, 如单轴抗拉强度、弹性模量、剪切模量和体积模量, 均可利用混凝土单轴抗压强度自动生成^[15-17], 此处不再赘述。

1.1.2 弹体

在本文关注的某新型弹低速侵彻(340 m/s)情况下, 已有实验数据表明弹体不变形, 因此为提高计算效率, 侵彻过程中弹体视为刚体。而爆炸过程需考虑弹壳的破碎, 此时采用 Johnson-Cook 本构模型和 Grüneisen 状态方程描述^[25], 并引入单元删除模拟弹壳破碎, 弹体材料模型参数选自文献^[26]。

1.1.3 炸药及空气

对 TNT 炸药采用 JWL 状态方程描述^[25], 即:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega e_0}{V} \quad (13)$$

式中: 材料参数 $A=37.120$ GPa, $B=3.231$ GPa, $R_1=4.15$, $R_2=0.95$, $\omega=0.3$, $e_0=70$ GPa, 取值均来自文献^[27]。

将空气视为理想气体, 其状态方程如下:

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (14)$$

式中: $C_0=C_1=C_2=C_3=C_6=0$, $C_4=C_5=0.4$, $E=2.5$ kJ/kg。

1.2 模型验证

为保证某新型弹先侵彻后爆炸对混凝土靶体毁伤破坏效应数值模拟的准确性, 对已有大口径缩比弹体侵彻实验和预制孔爆炸实验进行数值模拟, 验证 1.1 节中材料模型及其参数的可靠性。

1.2.1 大口径缩比弹侵彻实验

开展了大口径缩比弹侵彻 C40 靶体实验, 实验中弹体直径为 105 mm, 质量为 20 kg, 初速度为 325 m/s, 实验后测量弹体侵彻深度为 515 mm, 且弹体变形较小, 因此模拟中弹体被视为刚体。采用轴对称建模, 有限元模型如图 1 所示, 其中网格尺寸为 10 mm×10 mm, 靶体宽 2 500 mm, 厚 2 000 mm。

数值模拟结果如图 2 所示, 侵彻深度为

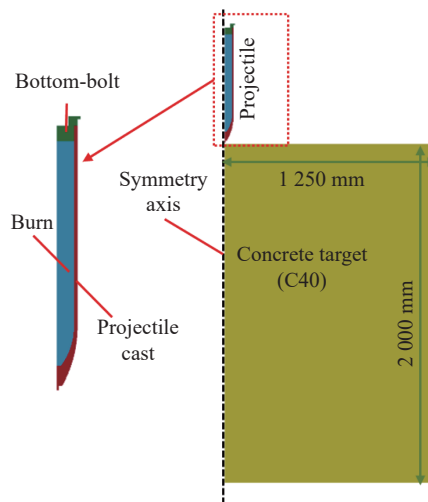


图 1 弹靶有限元模型

Fig. 1 The finite element model of the projectile and target

536 mm(相对误差 4%), 开坑直径为 350 mm。图 2 中展示了混凝土靶体拉伸损伤、剪切损伤和静水压缩损伤的云图, 可以看出: 拉伸损伤主要在开坑及径向裂纹处; 剪切损伤和静水压缩损伤发生在隧道区弹靶交界面附近, 该区域内混凝土近似处于三向围压的应力状态。数值模拟得到的侵彻深度以及损伤破坏效果与实验结果及上述分析一致, 验证了侵彻过程模型参数的可靠性。

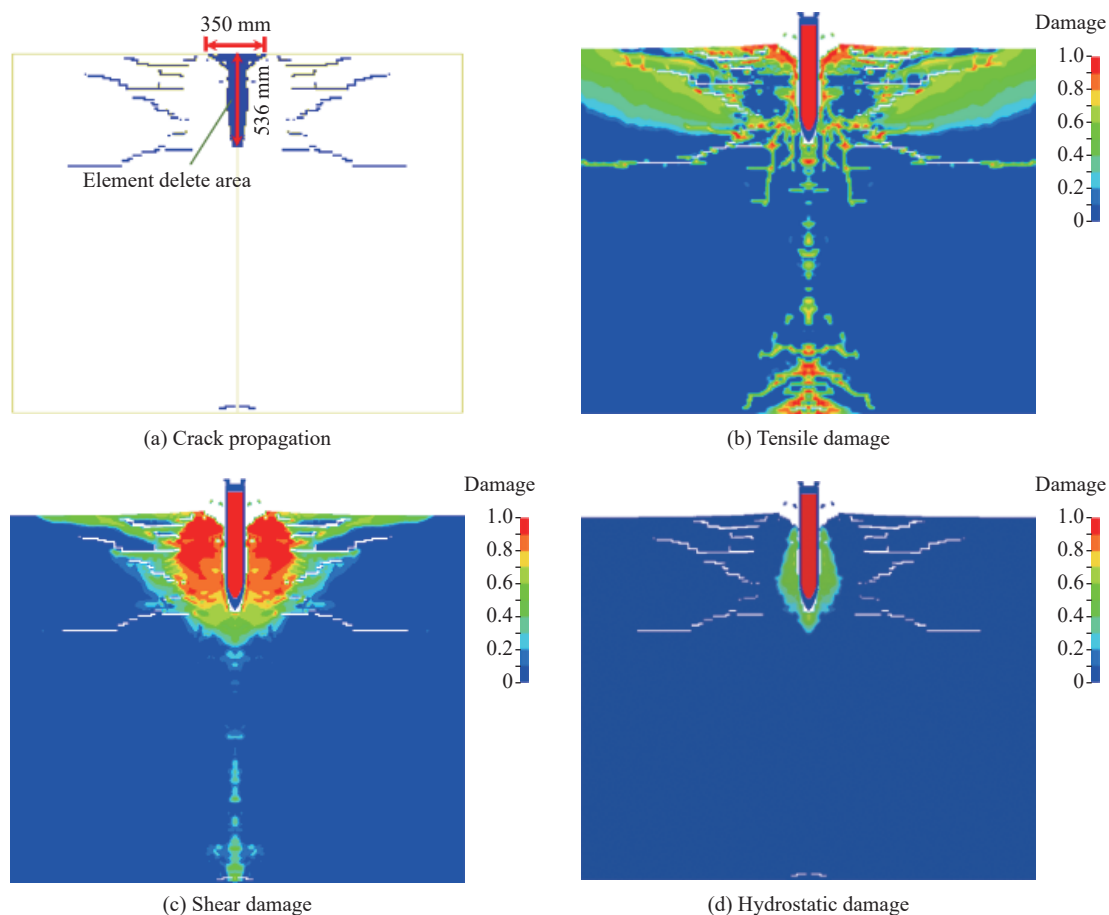


图 2 数值预测的靶体损伤破坏

Fig. 2 Numerically-predicted damage and failure in the concrete target

1.2.2 预制孔爆炸实验

张海英等^[28]对有限厚度 C35 混凝土靶体进行了预制孔装药爆炸的实验研究: 混凝土靶体的宽度为 1 500 mm, 厚度为 700 mm; 预制孔的深度为 400 mm, 直径为 30 mm; TNT 装药质量为 120 g, 长度为 110 mm, 置于预制孔底端并在顶部中心点起爆; 实验后测得震塌块的高度为 230 mm。

建立轴对称有限元模型, 如图 3 所示: 网格尺寸为 10 mm×10 mm; 空气和 TNT 采用欧拉网格, 空气域外边界为无反射边界; 混凝土采用拉格朗日网格; 欧拉网格和拉式网格通过流固耦合相互作用。

数值模拟得到的靶体损伤破坏情况及其与实验结果的对比如图 4 所示, 可以看出, 数值模

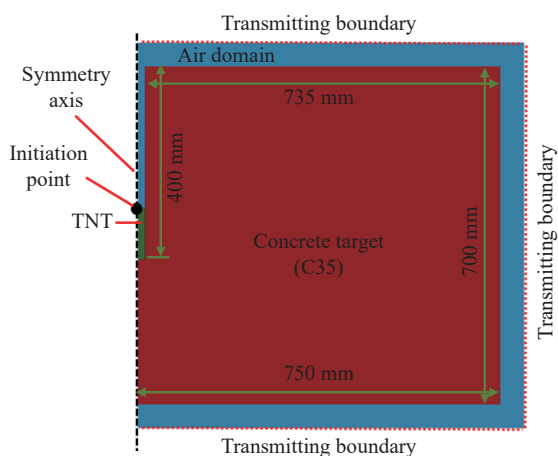


图 3 靶体有限元模型

Fig. 3 The finite element model for the target

拟得到的震塌块尺寸与实验数据一致, 且无流体渗入固体的问题, 因此认为上述模型及参数对于装药爆炸对混凝土损伤破坏模拟可靠。

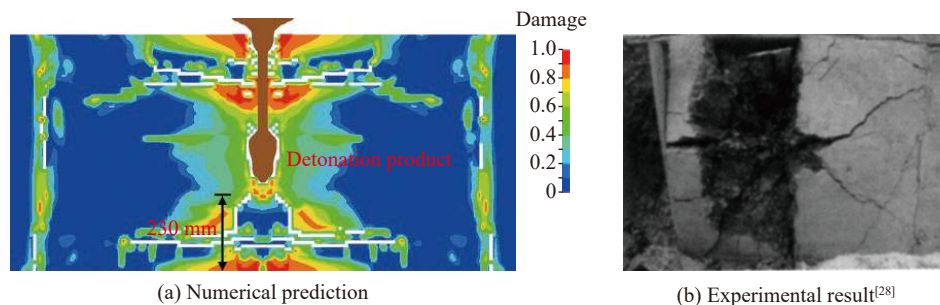


图 4 数值预测靶体的损伤云图和实验结果^[28]

Fig. 4 Numerically-predicted damage in the concrete target and the experimental result^[28]

2 某新型弹先侵彻后爆炸的 3 种模拟方法

基于上述已验证的数值模型和材料参数, 对某新型弹先侵彻后爆炸对混凝土靶体的毁伤破坏效应进行数值模拟研究。为明确侵彻预损伤对后续爆炸毁伤破坏的影响以及弹壳对爆炸毁伤破坏的影响, 采用如下 3 种建模方式: (1) 预制孔装药爆炸建模方式; (2) 基于重启的考虑侵彻预损伤、但忽略弹壳的爆炸建模方式; (3) 基于重启的同时考虑侵彻预损伤和弹壳影响的爆炸建模方式。

2.1 某新型弹侵彻混凝土靶体的数值模拟

如图 5 所示, 某新型弹直径为 234 mm, 长为 2 400 mm, 弹头曲径比为 9; 装药直径和长度分别为 151 mm 和 1 955 mm; 弹壳质量为 400 kg, TNT 装药质量为 54 kg; 考虑弹体初速度为 340 m/s, 靶体为 C100 混凝土。

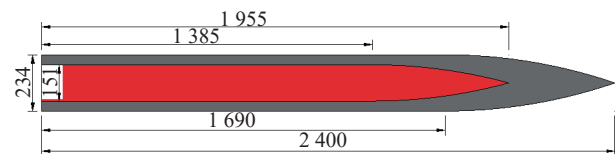


图 5 弹体尺寸(单位为 mm)

Fig. 5 The projectile dimensions (unit in mm)

仍采用轴对称建模, 为消除边界效应, 靶体直径和厚度分别取为 6 000 mm 和 4 000 mm, 网格尺寸取为 10 mm×10 mm(与第 2 节中保持一致), 侵彻过程中忽略弹体变形, 视为刚性弹。数值预测结果如图 6 所示, 侵彻深度为 2 110 mm, 隧道区直径约为 240 mm, 开坑直径约为 1 700 mm, 图 6(b)~(d) 中分别展示了混凝土侵彻后的拉伸损伤、剪切损伤和静水压缩损伤。

2.2 爆炸的 3 种建模方法

在 2.1 节计算得到的侵彻深度基础上, 对于装药爆炸采用如图 7 所示的 3 种建模方式。

方法 1: 预制孔装药爆炸建模。基于计算得到的侵彻深度和弹坑直径, 在混凝土靶中预制相应尺寸的孔洞, 炸药位置与侵彻最终时刻弹体内装药位置相同, 建立局部空气域确保冲击波传播, 空气域直径为 2 000 mm, 厚度为 3 000 mm, 且边界为透射边界。

方法 2: 不考虑弹壳的重启动建模。首先进行侵彻计算, 为提高计算效率, 弹壳采用刚性模型描述, 装药采用 plastic_kinematic (PK) 模型仅提供质量; 侵彻结束后(本算例中结束时间为 12.0 ms)删除弹壳有限元网格, 同时建立与方法 1 中相同的空气域, 并将装药改用 JWL 状态方程描述, 通过 stress initialization 关键字^[25] 继承混凝土靶体侵彻最终损伤破坏状态, 并在 12.0 ms 时引爆炸药。

方法 3: 考虑弹壳的重启动建模。首先进行侵彻计算, 同样为提高计算效率, 弹壳和装药分别采用刚性和 PK 模型描述; 侵彻结束后, 为描述弹壳的破碎断裂, 改用 Johnson-Cook 本构模型和 Grüneisen 状态方程描述, 参数取值见文献 [26], 并将装药改用 JWL 状态方程描述, 同时建立与方法 1 中相同的空气域, 通过 stress initialization 关键字^[25] 继承混凝土靶体侵彻最终损伤破坏状态, 并在 12.0 ms 时引爆炸药。

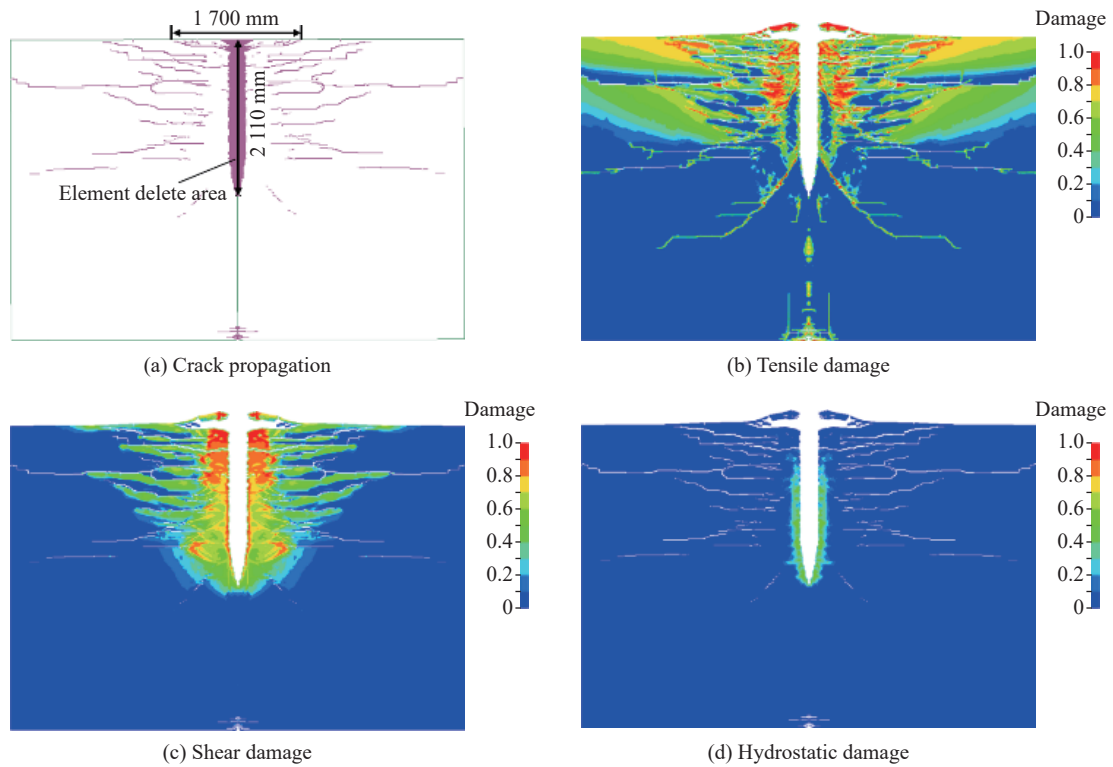


图 6 数值预测的靶体损伤破坏

Fig. 6 Numerically predicted damage and failure in the concrete target

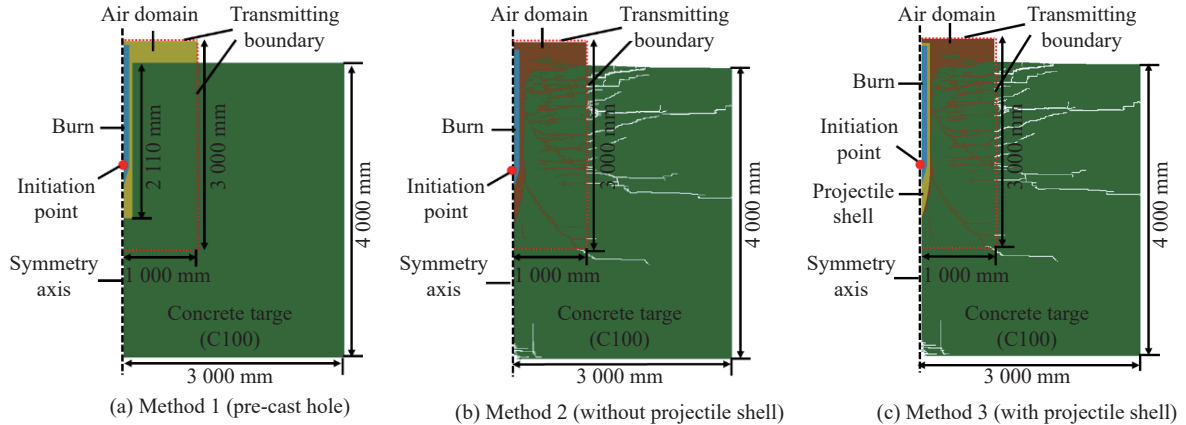


图 7 爆炸的 3 种建模方法

Fig. 7 Three methods for modeling the charge explosion

3 种建模方法中, 空气和炸药网格尺寸均为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ (与 1.2.2 节中的保持一致), 起爆点均在弹尖装药位置 (见图 7), 炸药和空气 (流体) 与混凝土和弹壳 (固体) 之间采用流固耦合算法 (除初始和终止时间外, 参数设置与 1.2.2 节中的保持一致)。

3 计算结果与讨论

3.1 数值模拟结果

3.1.1 预制孔装药爆炸建模

基于预制孔装药爆炸建模预测的靶体损伤破坏情况如图 8 所示, 可以看出最终形成的爆坑直径约

为 650 mm, 约为 3 倍弹径; 由于起爆点在底部, 大部分爆炸能量向上传播, 因此最终爆坑深度与预制孔深度相当。靶体损伤破坏主要集中于预制孔附近的剪切和静水压缩损伤破坏, 以及靶体侧面和顶面由于反射产生的拉伸波造成拉伸破坏。

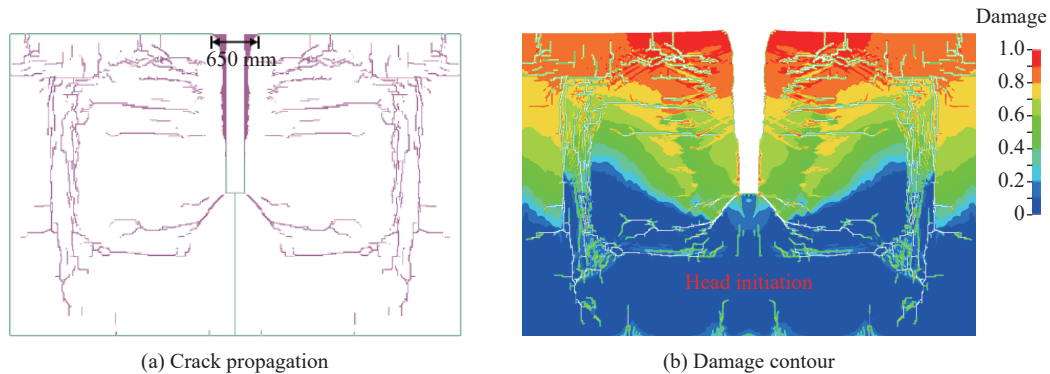


图 8 基于预制孔建模方式的靶体损伤破坏情况

Fig. 8 Numerically predicted damage and failure in the concrete target by the pre-cast hole method

3.1.2 不考虑弹壳的重启动建模

基于不考虑弹壳的重启动建模, 预测得到的靶体损伤破坏情况如图 9 所示, 可以看出, 由于考虑了侵彻初始损伤, 最终形成的爆坑直径远大于 3.1.1 节中的预测结果(爆坑直径为 3 820 mm, 约 16 倍弹径); 而爆坑深度仅在原侵彻深度基础上增加了 5%(2 200 mm), 主要由于大部分爆炸能量向上传播引起。靶体最终损伤破坏集中于爆坑附近的剪切和静水压缩损伤破坏以及由侵彻预损伤引起的裂缝的继续发展, 与 3.1.1 节中的损伤破坏模式明显不同。注意到, 侵彻结束后靶体底部及对称轴已有轻微损伤破坏(见图 6), 主要是由于轴对称数值计算误差引起。基于重启动的建模方法, 继承了侵彻产生的损伤, 由装药爆炸产生的压缩波在底部反射拉伸波, 进一步引起底部的损伤破坏, 如图 9 所示。

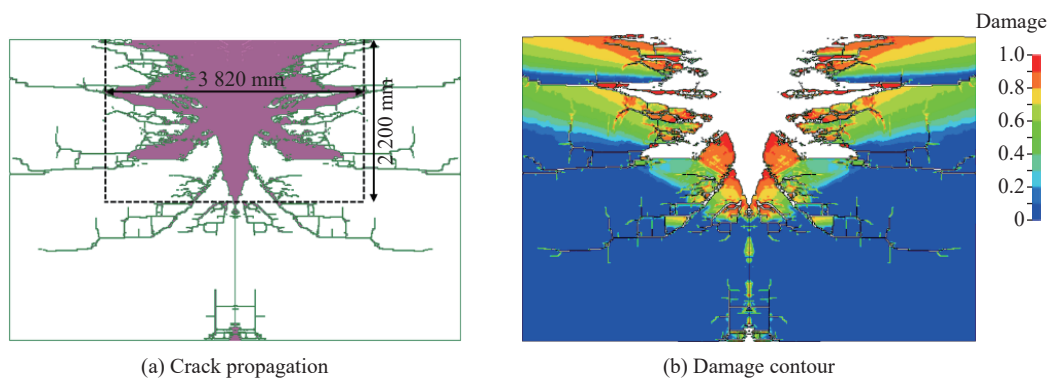


图 9 基于不考虑弹壳的重启动建模的靶体损伤破坏情况

Fig. 9 Numerically-predicted damage and failure in the concrete target by the restart method without projectile shell

3.1.3 考虑弹壳的重启动建模

基于考虑弹壳的重启动建模预测的靶体损伤破坏情况如图 10 所示, 可以看出, 最终形成的爆坑直径约为 3 400 mm(约 14.5 倍弹径), 由于考虑了预损伤, 远大于方法 1 的预测结果, 而由于弹壳破碎影响, 略小于方法 2 的预测结果。值得注意的是, 由于弹头部分质量大, 在爆轰产物作用下会对靶体进行二次侵彻, 最终爆坑深度达到 2 310 mm, 约为侵彻深度的 1.1 倍。靶体中的损伤破坏模式与方法 2 预测的基本一致, 不再赘述。

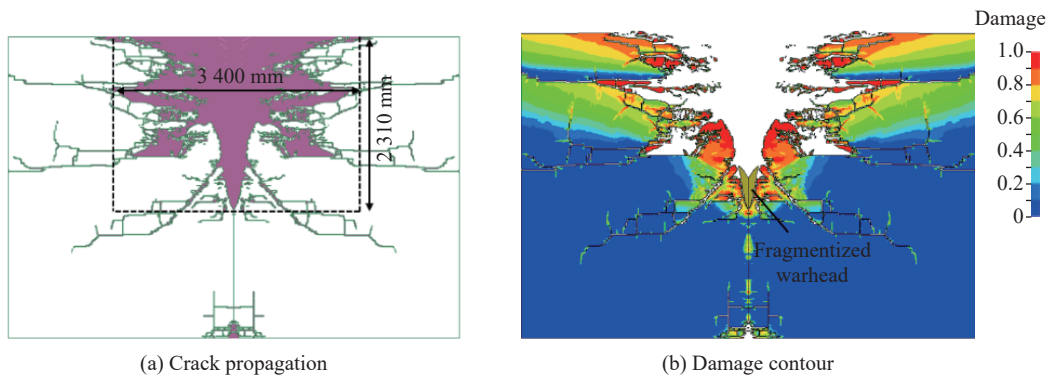


图 10 基于考虑弹壳的重启动建模的靶体损伤破坏情况

Fig. 10 Numerically-predicted damage and failure in the concrete target by the restart method with projectile shell

3.2 分析与讨论

图 11~16 展示了 3 种建模方法预测得到的在典型时刻的爆轰产物分布、混凝土靶体中的压力分布云图(压力幅值范围为 0~100 MPa)及损伤破坏情况。综合图 8~16 可以看出,采用重启动建模方法(方法 2 和方法 3)预测得到的靶体损伤破坏区域,远大于预制孔装药爆炸建模方法(方法 1)的预测结果。原因在于,预制孔装药爆炸建模方法虽预留了与侵彻弹道一致的孔洞,但未考虑侵彻过程对靶体的预损伤,如裂纹扩展及不同损伤(拉伸、剪切和静水压缩)的累积等,此时靶体为均匀介质,爆炸冲击波在靶体中较均匀传播,在边界处由于冲击波反射形成拉伸波,造成靶体明显的拉伸裂纹(见图 8、11~16),最终爆坑直径小是由于挖孔截面平滑,爆轰产物沿孔洞截面向外流出(类似于图 4(a))。而对于重启动建模方法(方法 2 和方法 3),靶体继承了侵彻过程结束时的损伤破坏状态(弹道周围损伤最严重,见图 6 和 11~16),内部裂纹较多,弹道附近凹凸不平,爆炸产生的冲击波大部分被弹道附近凹凸不平表面的来回反射所消耗,因此大部分能量消耗在弹道附近,使得爆坑直径在原有侵彻损伤破坏的基础上明显增大。

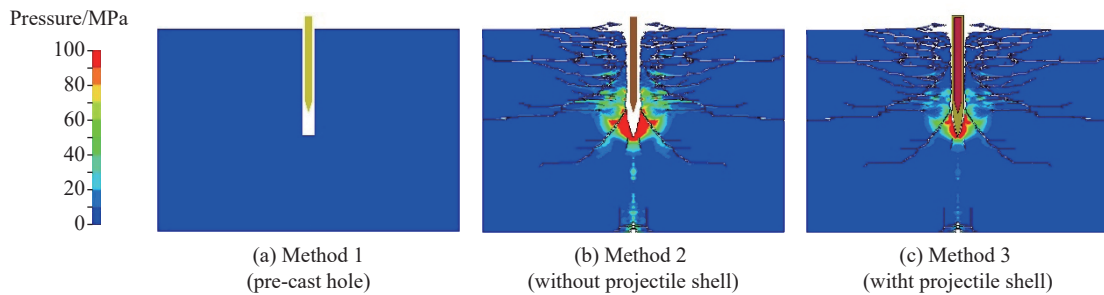


图 11 先侵彻后爆炸典型时刻的数值计算结果($t=12.0$ ms)

Fig. 11 Numerical predictions of damage and failure due to penetration followed by explosion at a typical time ($t=12.0$ ms)

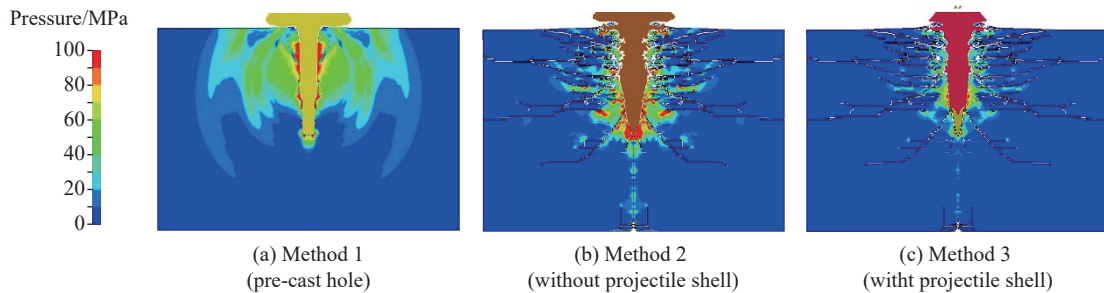


图 12 先侵彻后爆炸典型时刻的数值计算结果($t=12.5$ ms)

Fig. 12 Numerical predictions of damage and failure due to penetration followed by explosion at a typical time ($t=12.5$ ms)

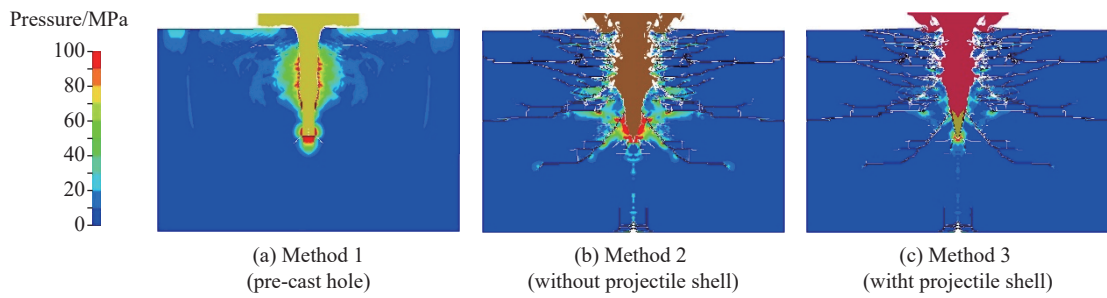


图 13 先侵入后爆炸典型时刻的数值计算结果($t=13.0$ ms)

Fig. 13 Numerical predictions of damage and failure due to penetration followed by explosion at a typical time ($t=13.0$ ms)

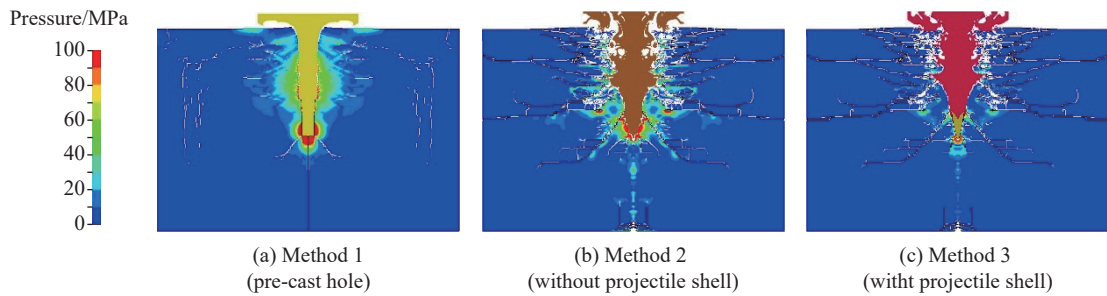


图 14 先侵入后爆炸典型时刻的数值计算结果($t=13.5$ ms)

Fig. 14 Numerical predictions of damage and failure due to penetration followed by explosion at a typical time ($t=13.5$ ms)

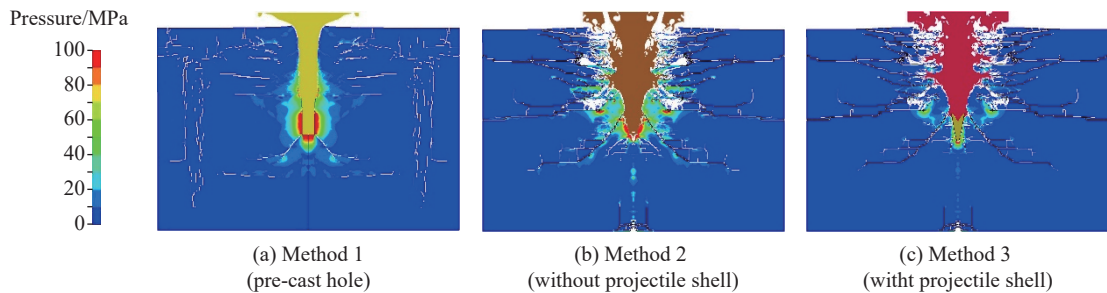


图 15 先侵入后爆炸典型时刻的数值计算结果($t=14.0$ ms)

Fig. 15 Numerical predictions of damage and failure due to penetration followed by explosion at a typical time ($t=14.0$ ms)

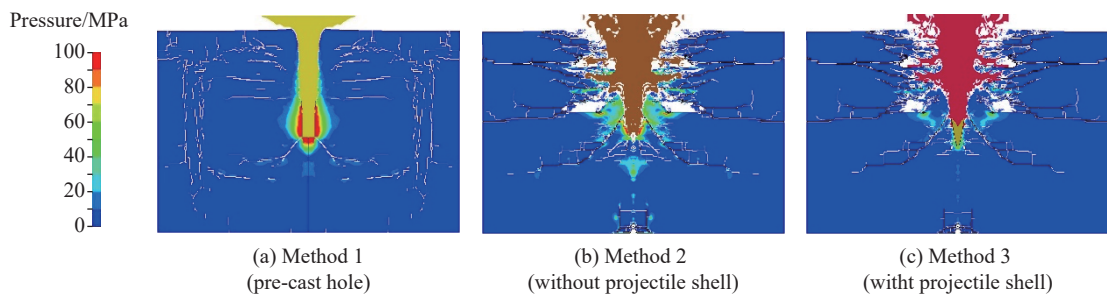


图 16 先侵入后爆炸典型时刻的数值计算结果($t=15.0$ ms)

Fig. 16 Numerical predictions of damage and failure due to penetration followed by explosion at a typical time ($t=15.0$ ms)

考虑弹壳的重启动建模方法(方法 3)预测得到的爆坑直径(见图 10~16)比不考虑弹壳的重启动建模方法(方法 2)预测得到的爆坑直径(见图 9、11~16)略小。原因在于,当考虑弹壳时,弹壳的塑性变形和破碎(见图 11~16)会消耗部分爆炸能量,使得用于形成爆坑的能量减少。但考虑弹壳时预测得到的

爆坑深度增加,是由于弹头部分体积大且质量集中,难以发生破碎断裂,在爆炸荷载作用下会进一步向下侵彻靶体(二次侵彻),造成最终爆坑深度的增加。二次侵彻中弹头侵彻速度和位移的时程曲线如图 17 所示,可以看出,最高侵彻速度约为 104 m/s,由于爆轰产物对弹头的持续推动作用,二次侵彻过程速度衰减较低,最终侵彻深度约为 200 mm。

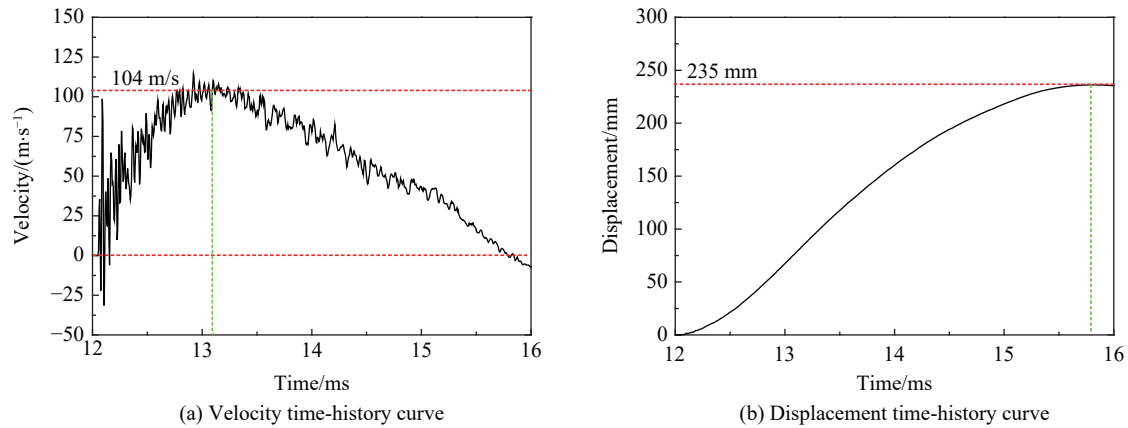


图 17 弹头破片二次侵彻时程曲线

Fig. 17 Time-history curves of the projectile nose fragment during secondary penetration

4 结 论

基于 Kong-Fang 混凝土材料模型,结合 LS-DYNA 中的流固耦合和重启动算法,开展了某新型弹体对混凝土材料先侵彻后爆炸损伤破坏效应的数值模拟研究。通过模拟大口径缩比弹侵彻实验和预制孔爆炸实验,验证了材料模型及其参数的可靠性,在此基础上,进一步对预制孔装药爆炸建模、不考虑弹壳的重启动建模和考虑弹壳的重启动 3 种建模方法进行了比较,获得主要结论如下。

(1)由于忽略了侵彻产生的预损伤,预制孔装药爆炸建模方法得到的靶体损伤破坏程度最低,且破坏模式与其他 2 种方法得到的破坏模式有较大区别;重启动建模方法继承了弹体侵彻过程中累积的损伤,爆坑直径在原有侵彻损伤破坏的基础上明显增大。因此,采用预制孔装药爆炸实验模拟钻地武器先侵彻后爆炸的毁伤破坏效应是不可靠的。

(2)由于弹壳的塑性变形和破碎的耗能作用,考虑弹壳的重启动建模方法预测得到的爆坑直径比不考虑弹壳的重启动建模方法预测得到的爆坑直径小约 12%;但由于破碎弹头的二次侵彻作用,考虑弹壳时预测得到的爆坑深度比不考虑弹壳时预测得到的爆坑深度增加约 5%。因此,通过先侵彻、而后取出弹体、最后在弹坑装药起爆的实验,仍不能完全反映钻地武器先侵彻后爆炸的真实毁伤破坏效应,应基于数值模拟做进一步修正,才可用于工程设计。

(3)考虑弹壳的重启动建模中,破碎弹头的二次侵彻问题应引起重视,需进一步研究。

参考文献:

- [1] FANG Q, WU H. Concrete structures under projectile impact [M]. Singapore: Springer, 2017: 255–321.
- [2] WU H, PENG Y, KONG X Z. Notes on projectile impact analyses [M]. Singapore: Springer, 2019: 167–240.
- [3] 左魁,张继春,曾宪明,等.重复爆炸条件下地冲击效应试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(S1):3378–3383. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2007.zl.119.
ZUO K, ZHANG J C, ZENG X M, et al. Experimental study on underground shock effects under repeated explosions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 3378–3383. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2007.zl.119.
- [4] 左魁,张继春,王启睿,等.重复爆炸条件下岩石介质破坏效应试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(1):2675–

- 2680.
- ZUO K, ZHANG J C, WANG Q R, et al. Experimental research on rock breakage effect under repeated explosions [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(1): 2675–2680.
- [5] 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.
- [6] 左魁, 曾宪明, 王启睿, 等. 钻地模型弹对岩石模拟材料二次侵入试验 [J]. *解放军理工大学学报 (自然科学版)*, 2007, 8(6): 626–629. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2007.06.012.
- ZUO K, ZENG X M, WANG Q R, et al. Second time penetration of earth-penetrating model projectile in rock medium [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 8(6): 626–629. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3443.2007.06.012.
- [7] 左魁, 张继春, 曾宪明, 等. BLU-109B 模型弹在岩石介质中成坑效应试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(S1): 2767–2771. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2007.z1.027.
- ZUO K, ZHANG J C, ZENG X M, et al. Experimental study on formation of craters in rock with BLU-109B earth penetrating model projectiles [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(S1): 2767–2771. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2007.z1.027.
- [8] 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.
- [9] 梁龙河, 王政, 曹菊珍. 长杆弹对混凝土的侵爆效应 [J]. *爆炸与冲击*, 2008, 28(5): 415–420. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)05-0415-06.
- LIANG L H, WANG Z, CAO J Z. Damaging effect of concrete by penetration and explosion of a long-rod projectile [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(5): 415–420. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)05-0415-06.
- [10] 曾亮, 王伟力, 朱建方. BLU-113 钻地战斗部侵彻爆炸联合效应数值模拟 [C]//第七届全国工程结构安全防护学术会议论文集. 宁波: 中国力学学会, 2009: 210–214.
- [11] 杨广栋, 王高辉, 卢文波, 等. 侵入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.
- [12] YANG G D, WANG G H, LU W B, et al. Combined effects of penetration and explosion on damage characteristics of a mass concrete target [J]. *Journal of Vibroengineering*, 2018, 20(4): 1632–1651. DOI: 10.21595/jve.2017.18522.
- [13] 冯春, 李世海, 郝卫红, 等. 基于 CDEM 的钻地弹侵入爆炸全过程数值模拟研究 [J]. *振动与冲击*, 2017, 36(13): 11–18; 26. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.13.002.
- FENG C, LI S H, HAO W H, et al. Numerical simulation for penetrating and blasting process of EPW based on CDEM [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(13): 11–18; 26. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.13.002.
- [14] 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 Waves*, 2014, 34(3): 361–366. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)03-0361-06.
- [15] KONG X Z, FANG Q, CHEN L, et al. A new material model for concrete subjected to intense dynamic loadings [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 120: 60–78. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.05.006.
- [16] ZHANG S B, KONG X Z, FANG Q, et al. Numerical prediction of dynamic failure in concrete targets subjected to projectile impact by a modified Kong-Fang material model [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 144: 103633. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103633.
- [17] WANG Y, KONG X Z, FANG Q, et al. Modelling damage mechanisms of concrete under high confinement pressure [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 150: 103815. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.103815.

- [18] HUANG X P, KONG X Z, CHEN Z Y, et al. A computational constitutive model for rock in hydrocode [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 145: 103687. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103687.
- [19] YANG S B, KONG X Z, WU H, et al. Constitutive modelling of UHPCC material under impact and blast loadings [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 153: 103860. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.103860.
- [20] HUANG X P, KONG X Z, HU J, et al. The influence of free water content on ballistic performances of concrete targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 139: 103530. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103530.
- [21] KONG X Z, FANG Q, ZHANG J H, et al. Numerical prediction of dynamic tensile failure in concrete by a corrected strain-rate dependent nonlocal material model [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 137: 103445. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103445.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 209-215.
- [23] KONG X Z, FANG Q, WU H, et al. Numerical predictions of cratering and scabbing in concrete slabs subjected to projectile impact using a modified version of HJC material model [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 95: 61-71. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.04.014.
- [24] KONG X Z, FANG Q, LI Q M, et al. Modified K&C model for cratering and scabbing of concrete slabs under projectile impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 108: 217-228. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.02.016.
- [25] MAY P I, FORMATN K. LS-DYNA® keyword user's manual: version 971 [M]. Livermore, USA: Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [26] 逢高伟, 方秦, 孔祥振, 等. WDU-34/B 战斗部侵彻块石遮弹层的数值模拟研究 [J]. *防护工程*, 2020, 42(4): 15-22.
PANG G W, FANG Q, KONG X Z, et al. Numerical simulation of WDU-34/B warhead penetrating into rubble burster layer [J]. *Protective Engineering*, 2020, 42(4): 15-22.
- [27] RABCZUK T, BELYTSCHKO T. A three-dimensional large deformation meshfree method for arbitrary evolving cracks [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2007, 196(29/30): 2777-2799. DOI: 10.1016/j.cma.2006.06.020.
- [28] 张海英, 段卓平, 刘彦, 等. 有限厚混凝土靶内部爆炸震塌贯穿研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2013, 33(5): 441-444; 550. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0645.2013.05.001.
ZHANG H Y, DUAN Z P, LIU Y, et al. Study on the collapse perforation of thick concrete targets under internal explosion [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2013, 33(5): 441-444; 550. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0645.2013.05.001.

(责任编辑 张凌云)