

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0414

基于损伤-虚拟张拉裂纹模型的 地下爆炸围岩破坏规律研究*

程树范, 叶 阳, 曾亚武, 高 睿

(武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 地下洞室作为爆炸危险物的隐蔽贮藏空间, 有潜在的内爆炸风险。为研究内爆炸作用下洞室围岩的动态响应机制, 提出了一种基于岩石 HJC (Holmquist-Johnson-Cook) 模型和节理内聚力单元的损伤-虚拟裂纹模型。分析了模拟方法的可靠性, 并在此基础上, 通过多物质 ALE 算法对球形洞室内爆炸过程进行数值模拟, 分析了围岩损伤范围和分区破坏规律。研究表明: 插入内聚力单元弥补了 HJC 模型无法模拟低静水压力下张拉破坏的不足, 且尺寸效应易于处理。模拟方法同时考虑了岩体内张拉裂纹的扩展和岩石材料的塑性损伤, 能够真实地反映岩石破坏的全过程。以红砂岩为例, 根据数值模拟结果, 填实(耦合装药)爆炸时围岩分区破坏规律明显, 破碎区比例半径为 $0.26 \text{ m/kg}^{1/3}$ 、裂隙区比例半径为 $0.47 \text{ m/kg}^{1/3}$ 。随着洞室尺寸的增大, 空气的间隔作用可以减小爆炸荷载对围岩的损伤作用, 比例半径达到 $0.52 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 可以实现爆炸荷载的完全解耦。

关键词: 抗爆洞室; 节理单元; HJC 模型; 空腔解耦

中图分类号: O389; TU452

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Failure law of surrounding rock under underground explosion based on a new damage-virtual tensile crack model

CHENG Shufan, YE Yang, ZENG Yawu, GAO Rui

(School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)

Abstract: As a hidden storage space for explosive hazards, the underground cavern has a potential risk of an internal explosion. To study the mechanism of the dynamic response of the surrounding rock under an internal explosion load, a new coupled damage and virtual crack model based on the HJC (Holmquist-Johnson-Cook) constitutive model of rock and the tensile failure cohesion element of the joint is proposed. And the quasi-static uniaxial compression, Brazilian splitting experiments, and dynamic SHPB experiments were calibrated. Therefore, this model is available for the simulation of middle-high strain rate problems, such as an underground explosion. Based on the new method, a series of underground explosions in spherical caverns is simulated by the multi-material ALE algorithm. The damage range and zoning failure law of the surrounding rock are analyzed. The research shows that the insertion of cohesive elements compensates for the deficiency of the HJC materials which cannot simulate tensile failure at low hydrostatic pressure. And the size effect of the model proposed in the paper is easy to deal with. The new method in this paper considers both the propagation of tensile crack by cohesive elements and the plastic damage by the HJC model, which can reflect the failure process of rock more accurately and completely. According to the numerical simulation results, the failure law of red sandstone during filling (coupling charge) explosion shows zonal characteristics with crashed zone and fracture zone from inside to outside. The proportional radius of

* 收稿日期: 2021-09-30; 修回日期: 2021-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(41772308); 中国博士后科学基金(2020M672415)

第一作者: 程树范(1992—), 男, 博士研究生, chengsfwhu@126.com

通信作者: 高 睿(1975—), 男, 博士, 教授, gaorui@whu.edu.cn

the crashed zone is about $0.26 \text{ m/kg}^{1/3}$, and that of the fracture zone is $0.47 \text{ m/kg}^{1/3}$. The existence of the air chamber changes the loading form and reduces the load intensity acting on the cavern. Therefore, with the increase of the chamber size, the interval effect of air can reduce the damage of the surrounding rock during the explosion. Taking the red sandstone as an example, when the proportional radius reaches $0.52 \text{ m/kg}^{1/3}$, there was no damage and no fracture generated by the explosion load. The conclusions above can be used as guidance for the anti-explosion design and protection of underground works.

Keywords: explosion-proof cavern; cohesive element; HJC (Holmquist-Johnson-Cook) model; cavity decoupling

球形硐室三维力学性能优越,在军事工程中应用广泛^[1]。开挖形成的球形腔室,不需要复杂的支护即可作为隐蔽空间进行爆炸实验。作为爆炸危险物的贮藏点,硐室存在潜在的内爆炸风险,弄清硐室抗爆性能和爆炸后的围岩损伤规律,对硐室的防护及修复十分重要。

与填实爆炸相比,大型空腔的间隔作用有效规避了爆炸产物对腔壁的直接冲击,并削弱了爆炸冲击波的强度,有利于维持周边岩体的稳定性^[2-3]。李孝兰^[4-5]对空腔解耦效应进行了系统总结,认为随着空腔半径的增大,爆炸荷载最终能够实现解耦。楼涛等^[6]在硬岩场地中进行了球型空腔的间隔爆炸试验,结果表明,半径 1.85 m 的球型硐室基本可以实现 240 kg TNT 炸药的完全解耦;王占江^[7]则进行了微量装药的解耦模拟试验,也验证了空腔解耦的可行性。由于爆炸试验危险性高,且试验结果难以被准确地量测,因此数值模拟被广泛用于地下结构的抗爆设计,如:Wang 等^[8]采用数值模拟研究了多源爆炸条件下地下硐室的动态响应,认为应加强爆炸源中段的防护措施;熊益波等^[9]基于数值模拟技术对抗爆硐室可能存在的高风险区进行了预测,并制定了有针对性的加强方案。对于爆炸问题,在连续介质理论的基础上,针对岩体大变形和高应变率工况,研究人员有针对性地提出并改进了材料模型^[10-12],使得模拟结果更加可靠,然而在模拟脆性开裂时仍存在明显的不足。而离散元方法虽然可以较好地模拟裂纹的形成与扩展^[13-14],但并不适合大尺度的模拟。目前,部分研究基于“生死”单元,在有限元模型中通过单元失效模拟裂纹,取得了较好的模拟效果^[15],但单元删除导致的质量不守恒和能量异常损失仍会降低数值模拟的可靠性,特别是当网格尺寸较大或破碎程度较严重时,该方法的模拟结果将严重失真^[16-17]。

为克服连续介质方法的不足,本文中在岩石 HJC 模型^[10]的基础上,提出一种新型的损伤-虚拟裂纹模型,首先讨论该模型的适用性和尺寸效应,并基于该模型对硐室内爆炸引起的围岩损伤规律进行分析,最后通过与有限元方法的对比,讨论该模型及模拟方法的优越性。

1 数值模拟方法

1.1 岩石材料的 HJC 模型

数值模拟过程中,材料模型的选择是否合理直接决定了数值模拟的可靠性,Holmquist 等^[10]在金属材料 Johnson-Cook 模型基础上提出的 HJC 模型综合考虑了静水压力、应变率和损伤对材料强度及力学性能的影响,是模拟脆性材料动态破坏的一种较理想的模型。HJC 模型有 19 个独立的模型参数,分别为基本力学参数 f_c 、 G 、 T 、 ρ , 极限面参数 A 、 B 、 N 、 S_{\max} , 压力参数 K_1 、 K_2 、 K_3 、 p_c 、 p_1 、 μ_c 、 μ_1 , 应变率参数 C 和损伤参数 ε_f 、 D_1 、 D_2 。HJC 模型虽然包含较多参数,但其物理意义明确,标定方法也已经较为成熟^[18-20]。

本文研究对象为我国西南地区完整性较好的硬质红砂岩,通过单轴及常规三轴压缩实验、巴西劈裂实验,得到自然状态下红砂岩的基础力学参数,见表 1。

表 1 红砂岩的基本力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters of red sandstone

单轴抗压强度	弹性模量	单轴抗拉强度	天然密度	泊松比	黏聚力	内摩擦角
f_c/MPa	E/GPa	T/MPa	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	ν	c/MPa	$\phi/(\text{°})$
75.86	11.05	5.4	2956	0.27	2.6	35

表 1 中单轴压缩实验对应的加载应变率为 10^{-4} s^{-1} , 为标定应变率参数 C , 另外还进行了 3 组不同应变率的单轴压缩实验和 1 组分离式霍普金森压杆 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 实验, 得到应变率为 5×10^{-4} 、 2×10^{-3} 、 10^{-3} 和 87.3 s^{-1} 时硬质砂岩的动态强度分别为 79.18、83.57、85.13 和 100.65 MPa。最后根据文献 [18-19] 中所建议的方法, 得到 HJC 模型参数, 见表 2。

表 2 红砂岩 HJC 模型参数

Table 2 Parameters of the HJC model of red sandstone

极限面参数				基础力学参数				应变率参数	
A	B	N	S_{\max}	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	f_c/MPa	G/GPa	T/MPa	C	
0.034	1.801	0.795	4	2956	75.86	4.72	2.70	0.0023	
损伤参数				压力参数					
ϵ_f	D_1	D_2	p_c/MPa	μ_c	p_l/GPa	μ_l	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa
0.012	0.059	1.0	25.29	0.00453	1.42	0.102	43.18	-90.61	171.50

采用表 2 中的材料参数, 基于有限元方法 (FEM) 在 LS-DYNA 软件平台上进行了单轴压缩的数值模拟, 以验证所标定参数的可靠性。考虑到数值计算的效率, 根据对称性, 将圆柱体试件简化为图 1(a) 所示的二维模型进行分析^[21], 模型尺寸为 $50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 采用非结构化的 Delaunry 网格划分, 网格控制尺寸为 2 mm , 压力板与试件间采用基于罚函数的双向接触, 接触摩擦系数为 0.1。模拟得到的单轴压缩应力-应变曲线和破坏后的形态如图 1(b) 所示。

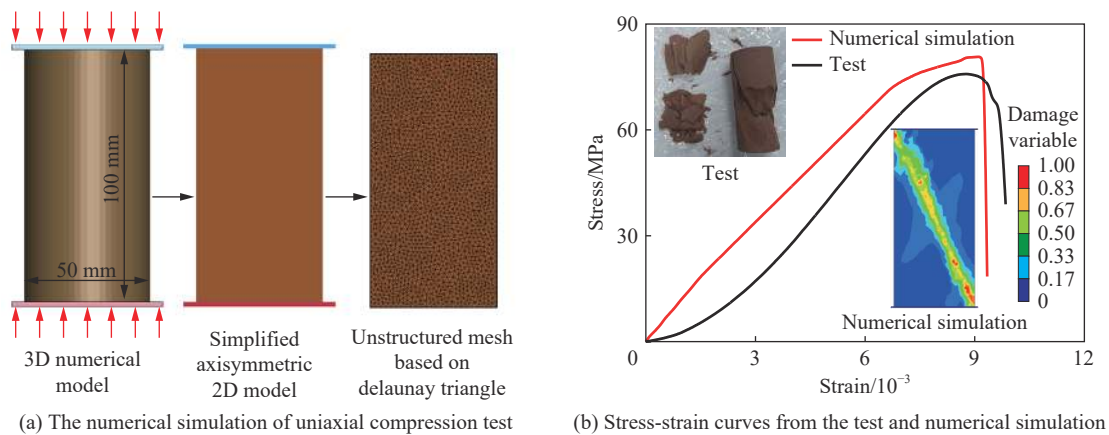


图 1 单轴压缩数值模拟结果

Fig. 1 Numerical simulation results of uniaxial compression

由图 1(b) 可知, 单轴压缩数值模拟得到的应力-应变曲线与实验值一致性较好。虽然 FEM 模型的最终破坏形态与实际状态存在一些差异, 但均以剪切破坏为主, 且模拟得到的破坏倾角与主裂纹倾角十分接近, 对应的破坏机理是一致的。可见经过参数标定的 HJC 模型在模拟岩石准静态单轴压缩时的结果是可靠的。

相应地, 为验证其在动态破坏模拟时的有效性, 还进行了 SHPB 实验的数值模拟, 建立的实验装置几何模型如图 2 所示。

图 2 中的入射杆和透射杆均为低合金钢材质, 弹性模量为 210 GPa , 泊松比为 0.27。入射杆、透射杆的长度分别为 2.5、1.5 m, 直径为 50 mm ; 岩石试件高度和直径均为 50 mm , 杆件和试件的网格尺寸分别为 2、5 mm。对于入射应力波的加载, 采取时程荷载的方式来实现, 即将实验测得的入射波直接施加于入射杆, 因此数值模型中并不包括子弹。实验与数值模拟得到的透射波、入(反)射波以及由三波法^[22]得到的应力-应变曲线如图 3 所示。

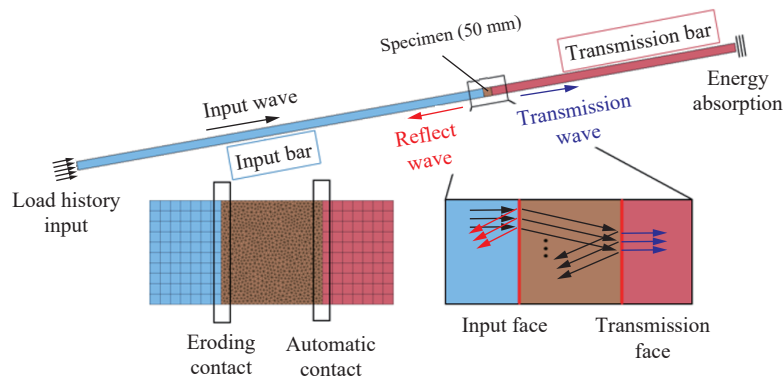


图 2 SHPB 冲击压缩实验的数值模型

Fig. 2 Numerical model of the SHPB impact test

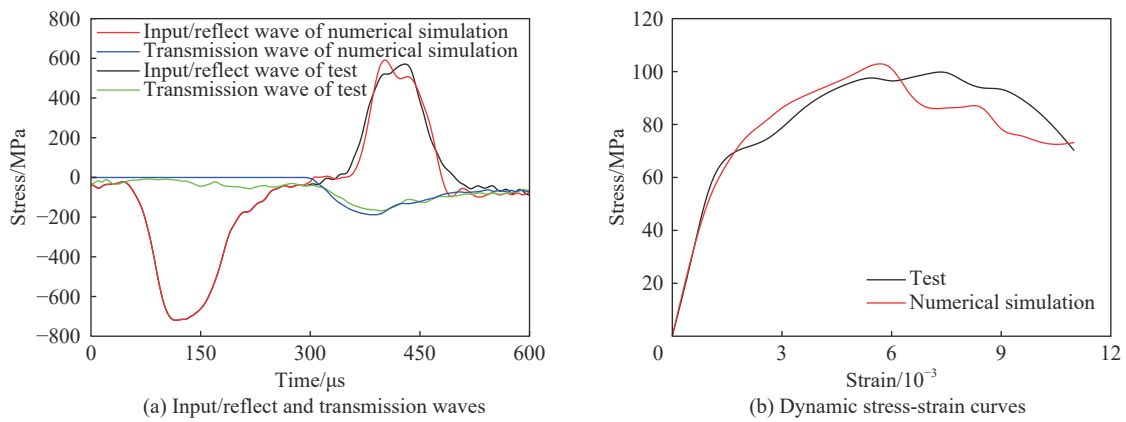


图 3 SHPB 冲击压缩数值实验结果

Fig. 3 Numerical simulation results of the SHPB impact test

由于采用了时程荷载的方式施加入射波, 图 3(a) 中入射波段完全重合, 而模拟得到的反射波和透射波也具有较高的吻合度, 数值模拟得到的加载平均应变率为 90.36 s^{-1} , 动态抗压强度为 103.22 MPa , 相应的实验值分别为 87.3 s^{-1} 和 100.65 MPa , 误差均小于 5%, 说明经标定的 HJC 模型在模拟动态破坏时也具有较为理想的效果。

然而在本构关系方面, 相较于压缩破坏时的分段考虑, HJC 模型在模拟岩石受拉破坏时采用的理想弹塑性本构并不适合描述岩石的脆性断裂。采用表 2 中的参数, 基于 FEM 模拟了巴西劈裂实验, 模拟方法与单轴压缩试验相同。得到的破坏形态及应力-应变曲线如图 4 所示, 与室内实验有较大的差异, 试件最终表现为与单轴压缩相似的斜裂纹破坏。这是由于 HJC 模型仅在受压时考虑了损伤对材料力学性能的影响, 而损伤变量的定义又包含了张拉产生的塑性应变, 在静水压力为拉的情况下, 张拉产生的损伤会导致材料抗压强度快速下降, 产生图 4 所示的异常破坏形式, 这是 HJC 模型的一个重大不足^[20]。

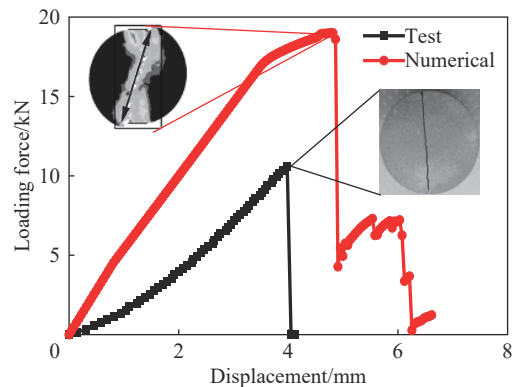


图 4 采用有限元方法进行的巴西劈裂数值模拟

Fig. 4 Numerical test of Brazilian splitting test based on FEM

1.2 考虑张拉失效的虚拟裂纹模型

为克服 HJC 模型在模拟张拉破坏时的不足, 考虑引入虚拟裂纹来模拟张拉破坏, 而不考虑材料本身

的张拉屈服, 即采用如图 5(a) 所示的节理单元连接^[13] 代替 FEM 中所采用的实体单元共节点连接。建模过程中, 首先将单元离散化, 此时节点在空间上重合, 但各自独立, 其后在相邻实体单元间插入一无厚度节理单元, 通过节理单元与实体单元间的共节点连接, 最后将离散单元重新组合为整体。节理单元采用张拉失效的双线性内聚力模型, 内聚力单元受力后可以在法向产生独立的位移, 而在切向不会发生变形, 其法向应力-位移曲线如图 5(b) 所示, 包括无损弹性和损伤软化两个阶段。

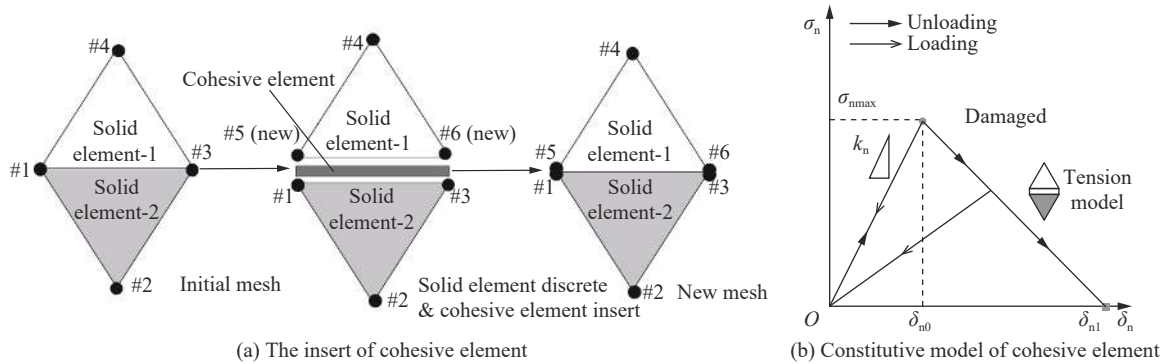


图 5 张拉失效的双线性内聚力模型

Fig. 5 Cohesive model with a tension failure rule

图 5 中, σ_n 为法向应力, k_n 为法向刚度, δ_n 为法向相对位移。 δ_{n0} 为法向的损伤起始位移, 当 $\delta_n < \delta_{n0}$ 时, 内聚力单元完全弹性, 当 $\delta_n > \delta_{n0}$ 时, 损伤演化开始, $\delta_n = \delta_{n0}$ 为极限状态; $\sigma_{nmax} = k_n \delta_{n0}$ 为法向最大应力; δ_{n1} 为法向的失效位移, 当 $\delta_n > \delta_{n1}$ 时, 虚拟裂纹被激活。

根据图 5(b), 损伤起始后, 内聚力单元的本构关系可以表示为^[23]:

$$\sigma_n = k_n \delta_n (1 - D_n) \tag{1}$$

式中: D_n 为法向的损伤变量, 可定义为:

$$D_n = \frac{\delta_n - \delta_{n0}}{\delta_{n1} - \delta_{n0}} \tag{2}$$

由于节理单元在切向不会出现位移, 剪切变形需要通过实体单元来完成, 因此, 在压缩状态下, 本文模型将退化为 FEM 模型。插入节理单元后, 将引入 3 个细观材料参数 k_n 、 δ_{n0} 和 δ_{n1} , 其取值无法通过实验直接得到, 需要通过巴西劈裂的数值模拟反演得到^[24], 即要求模拟得到的荷载-位移曲线以及最终的破坏模式均与实验一致。最终标定的细观参数为: $k_n = 4.2 \text{ GPa/mm}$, $\delta_{n0} = 0.012 \text{ mm}$, $\delta_{n1} = 0.025 \text{ mm}$, 对应的荷载-位移曲线如图 6(a) 所示, 无论是应力-应变曲线, 还是最终的破坏状态, 均与实验高度吻合。根据数值模拟结果, 内聚力单元对单轴压缩过程的模拟结果影响较小, 插入内聚力单元后的应力-应变曲线和破坏形态如图 6(b) 所示。

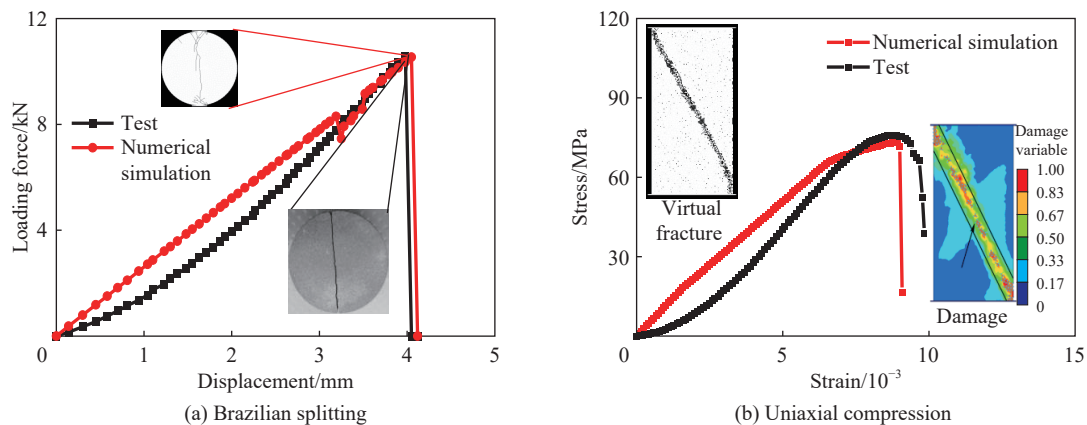


图 6 巴西劈裂及单轴压缩数值模拟

Fig. 6 Numerical simulation of the Brazilian splitting and uniaxial compression based on the proposed method

1.3 模拟方法的可靠性

虚拟裂纹的引入,虽然解决了 HJC 模型在模拟低静水压力时的不足,但虚拟裂纹的插入不可避免地会导致数值模型出现网格依赖性和尺寸效应^[25]。且插入节理单元后,数值模型的计算量将显著增加,对于大型工程尺度的模拟计算,难以实现毫米级的网格划分,增大网格尺寸后,标定的模型参数是否适用,还需要进行专门的讨论^[24-26]。

HJC 模型的材料参数本身与单元尺寸无关,在模型被放大后,理论上不需要重新标定,但内聚力单元的参数与网格尺寸密切相关,对于张拉破坏,由于破坏面较为稳定,可以引入一个比例因子来考虑尺寸效应,即在保持破坏应变不变的情况下,调整模量和位移来控制尺寸效应。当网格尺寸扩大 n 倍后,对应的法向刚度参数 k_n 保持不变,法向位移参数 δ_{n0} 和 δ_{n1} 则同步扩大 n 倍,这样处理即可保持变形模量和破坏应变不变。为验证这一方法的可靠性,在保持网格形式一致的前提下,分别建立 $50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 、 $50\text{ cm}\times 100\text{ cm}$ 、 $50\text{ dm}\times 100\text{ dm}$ 以及 $50\text{ m}\times 100\text{ m}$ 等 4 个尺度的单轴压缩模型和单轴拉伸模型,对应的比例因子分别为 1、10、100 和 1000。将单轴加载速率依次设置为 2.5 mm/s 、 2.5 cm/s 、 2.5 dm/s 和 2.5 m/s ,以保证加载应变率一致,数值模拟得到的应力-应变曲线如图 7 所示。

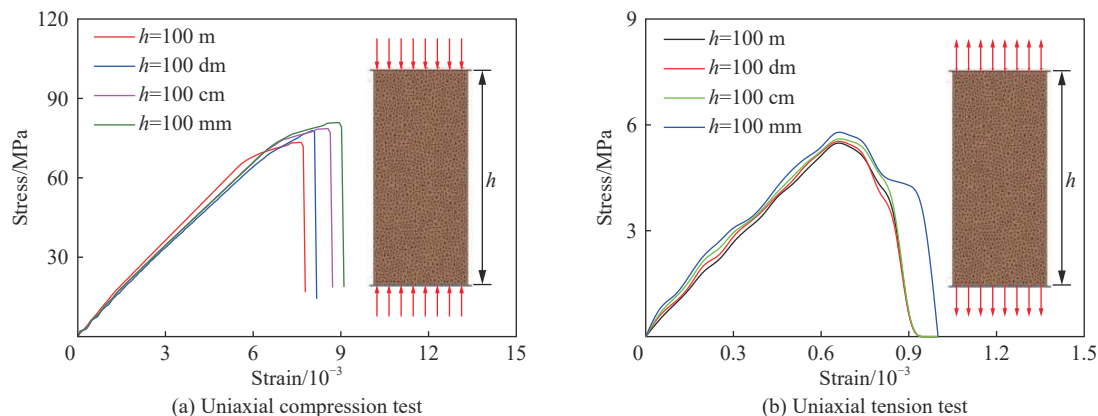


图 7 不同尺度的单轴压缩和单轴拉伸应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of uniaxial compression and uniaxial tension at different scales

由于本文模型的剪切破坏受节理单元的影响较小,在保持网格划分形式不变的基础上,随着网格尺寸的增大,材料强度和变形模量仅出现了小幅度的下降。在图 7(a) 中,当网格尺寸为 2 cm 和 2 dm 时,模型的强度为 2 mm 网格时的 94.55% 和 91.75% ,减小幅度未超过 10% ,因此采用厘米和分米级的网格进行工程模拟也具有较高的可行性,且 10% 以内的误差可以作为安全储备,模拟结果偏于安全。当网格尺寸达到米的量级时,误差仍能保持在 20% 以内,模拟结果尚可用于定性分析和粗略估算。根据图 7(b),当网格尺度由毫米量级增加至米量级后,相应的抗拉强度增加仅为 4.2% ,说明本文模型通过比例因子法较好地解决了虚拟裂纹带来的网格尺寸效应,可适用于多种尺度网格。由于本文方法同时考虑了岩石材料在高静水压力状态下的应变率效应、塑性损伤和低静水压力状态下的脆性断裂,因此适合于大尺度的地下爆炸的模拟。

2 地下填实及空腔爆炸的模拟

2.1 算例及建模方法

根据文献 [6],硬岩硐室的完全解耦(围岩对爆炸荷载的响应为完全弹性)时的比例半径约为 $0.35\text{ m/kg}^{1/3}$,那么当 TNT 炸药装药半径 $R_0=0.5\text{ m}$ (装药量 863 kg)时,解耦半径约为 3.3 m 。据此分别建立填实爆炸模型,和空腔半径 $R=1、2、3.5$ 和 5 m 的 4 个空腔爆炸模型。根据试算,岩体部分模型尺寸取为 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$,空气域范围为 $6\text{ m}\times 6\text{ m}$,即可实现爆炸荷载的有效耦合且虚拟裂纹及损伤均不会超出模型区域,以 $R=2\text{ m}$ 为例,建立的数值模型如图 8 所示。

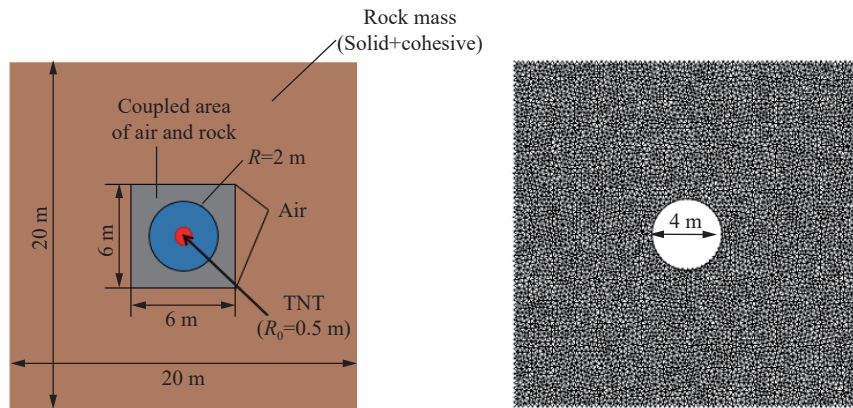


图 8 空腔爆炸数值模型 (R=2 m)

Fig. 8 Numerical model of cavity explosion in LS-DYNA (R=2 m)

数值模拟的建立是在显式动力分析软件 LS-DYNA 中完成, 其中岩体部分包括实体单元和节理单元, 采用基于 Delaunry 三角划分的 Lagrange 网格, 空气域则采用结构化的 Euler 网格划分, 空气域为正方形, 并通过关键字 Initial_Volume_Fraction_Geometry 对炸药材料空间位置进行定义, 以提高网格质量。岩体与空气重叠部分通过罚函数实现流固耦合, 由关键字 Constrained_Lagrange_In_Solid 控制, Lagrange 网格和 Euler 的控制尺寸均为 0.2 m, 且爆炸产物侵蚀岩体时, 不允许网格间出现穿透, 岩体外侧为无反射边界。

LS-DYNA 软件自身拥有丰富的材料库^[27], 其中 High_Explosive_Burn 材料被广泛用于凝聚相炸药的模拟, 以 TNT 炸药为例, 其爆速 $D=6930$ m/s, 爆压 $p_{CJ}=21$ GPa。爆炸产物的扩容过程则通过附加 JWL (Jones-Wilkins-Lee) 状态方程来实现, 其表达式为^[28]:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (3)$$

式中: A 、 B 为线性爆炸系数, 具有压强的量纲; ω 、 R_1 和 R_2 为无量纲爆炸系数; V 为相对体积, 即压强为 p 时气体体积与初始体积之比; E_0 为炸药单位体积爆轰能量。

选取的 TNT 炸药参数见表 3。

表 3 TNT 炸药爆轰产物 JWL 参数

Table 3 JWL EOS parameters of the TNT detonation product

A/GPa	B/GPa	ω	R_1	R_2	$E_0/(\text{GJ}\cdot\text{m}^{-3})$
371.2	3.231	0.3	4.15	0.95	6.6

炸药为中心起爆, 爆炸过程空气可视为理想气体^[27,29], 其状态方程为:

$$P = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E_0 \quad (4)$$

式中: P 为空气压力; ρ/ρ_0 为相对密度, 其中 ρ 为压缩后空气的密度, ρ_0 为空气初始密度, 取为 1.29 kg/m^3 ; γ 为理想气体比热容, 取为 1.4; E_0 为单位体积内能, 取为 250 kJ/m^3 。

在 LS-DYNA 中, 理想气体可用附加多项式状态方程的 Null 材料模拟, 标准状态方程为:

$$P = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_0 \quad (5)$$

式中: $\mu = (\rho - \rho_0) / \rho_0$; $C_0 \sim C_6$ 为多项式系数, 当 $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = 0$, $C_4 = C_5 = \gamma - 1$, $C_6 = 0$ 时, 式 (5) 与式 (4) 完全等效。

2.2 爆炸荷载

对于地下填实爆炸, 爆炸荷载以爆炸产物压力的形式直接作用于岩体, 其峰值压力可达 10 GPa 数

量级;而对于空腔爆炸,由于空气的间隔作用,爆炸荷载多以空气冲击波的形式作用于岩体,数量级相对较低。填实和空腔爆炸在荷载形式上有较大区别,荷载的计算方法也有所差异。

对于填实爆炸,爆炸产物压力可以采用等熵膨胀法进行计算,亨利奇^[30]给出的耦合装药最大压力的计算方法为:

$$P_c = \frac{\rho_c D^2}{2(\gamma + 1)} \quad (6)$$

式中: P_c 为作用于岩体的最大压力; ρ_c 为炸药密度, 取为 1650 kg/m^3 (TNT); D 为炸药爆轰速度, 取为 6930 m/s ; γ 为等熵指数, 取为 3。

而对于空气冲击波压力, 则可以采用最大扩散速度法进行计算, 其表达式为^[31]:

$$P_{\max} = \frac{2n'}{k+1} \rho_0 u^2 \quad (7)$$

式中: ρ_0 为空气密度; u 为岩石内冲击波速, 当冲击波强度较小时, 可取为剪切波速 1264 m/s ; k 为空气绝热指数, 对于双原子分子可取为 1.41; n' 为冲击波压力增大系数, 取值为 $0 \sim 20$ 。

以 $R=0.5$, 5 m 的模型为例, 由式 (6) 计算得到的填实爆炸对应的孔壁最大压力为 9.91 GPa ; 由式 (7) 计算得到的空腔爆炸最大压力范围为 $0 \sim 34.2 \text{ MPa}$ 。而本文数值模拟监测到的孔壁最大压力分别为 8.45 GPa 和 10.3 MPa , 均在理论值附近, 说明 ALE 算法能够较为准确地模拟爆炸荷载作用。

2.3 围岩分区破坏规律

数值模拟结果见图 9, 地下填实爆炸过程中围岩的损伤在时间和空间上都具有很强的分区特征。

在时间上可以分为 3 个阶段: 第 1 阶段为孔壁的外扩, 此阶段内爆炸气体直接冲击岩体, 产生极大的压力, 远超岩石的屈服强度, 岩石表现出一种类似于流体的力学性质, 岩体向外移动形成爆炸空腔, 并激发压缩波; 第 2 阶段为破碎区的形成, 此阶段内压缩波强度大于岩石的屈服强度, 岩体出现大的塑性损伤, 岩体完全破碎; 第 3 阶段为裂隙区的形成和扩展, 此阶段内压缩波压力小于岩体的抗压强度, 但受到泊松效应影响, 环向的拉应力仍可诱发张拉裂纹的扩展。随着压缩波压力下降至不足以诱发裂纹继续扩展后, 爆炸过程结束。相应地, 根据破坏机制, 在空间上则会形成扩容空腔(见图 9(a))、压缩破坏区和张拉破坏区(见图 9(c))。

根据第 1.2 节内容, 内聚力单元的失效可以作为裂纹产生和扩展的可靠判据, 而实体单元的损伤则可以作为岩石屈服的判据。相应地, 对于地下爆炸, 两者可用于裂隙区和破碎区范围的确定。考虑到装药量对爆炸效果的影响, 根据霍普金斯比例定律, 引入比例半径来描述地下爆炸的分区破坏规律。比例半径的定义为:

$$R_0 = DW^{-1/3} \quad (8)$$

式中: D 为爆心距; W 为装药质量, 对于本文模型, 可取 $W=863 \text{ kg}$ 。

如图 9(c) 所示, 耦合装药时破碎区平均半径为 2.0 m , 是炮孔半径的 4 倍; 考虑装药尺寸后的比例半径为 $0.26 \text{ m/kg}^{1/3}$; 而裂隙区半径为 5.0 m , 是炮孔半径的 10 倍, 对应的比例半径为 $0.65 \text{ m/kg}^{1/3}$ 。

2.4 硐室内爆炸的空腔解耦

数值模拟得到的空腔爆炸模型, 其最终的破坏形式如图 10 所示。

对于空腔爆炸, 破碎区的厚度随着空腔尺寸的增大而减小, 说明空腔效应可以减小作用于孔壁上的爆炸压力, 从而提高硐室的抗爆性能^[3]。当硐室半径达到预设的解耦尺寸($R=3.5 \text{ m}$)时, 围岩表面仅出现零星的实体单元损伤, 而壁面附近却分布有密集的短裂纹。分析认为, 当爆炸冲击波在硐室表面反射时会产生反射, 反射波与后续的冲击波叠加使爆炸压力被加强, 并转化为张拉应力波, 由于岩体的抗拉强度远小于抗压强度, 张拉作用仍能引起表层的局部破坏, 这一现象在文献 [10] 中也被观测和验证, 这部

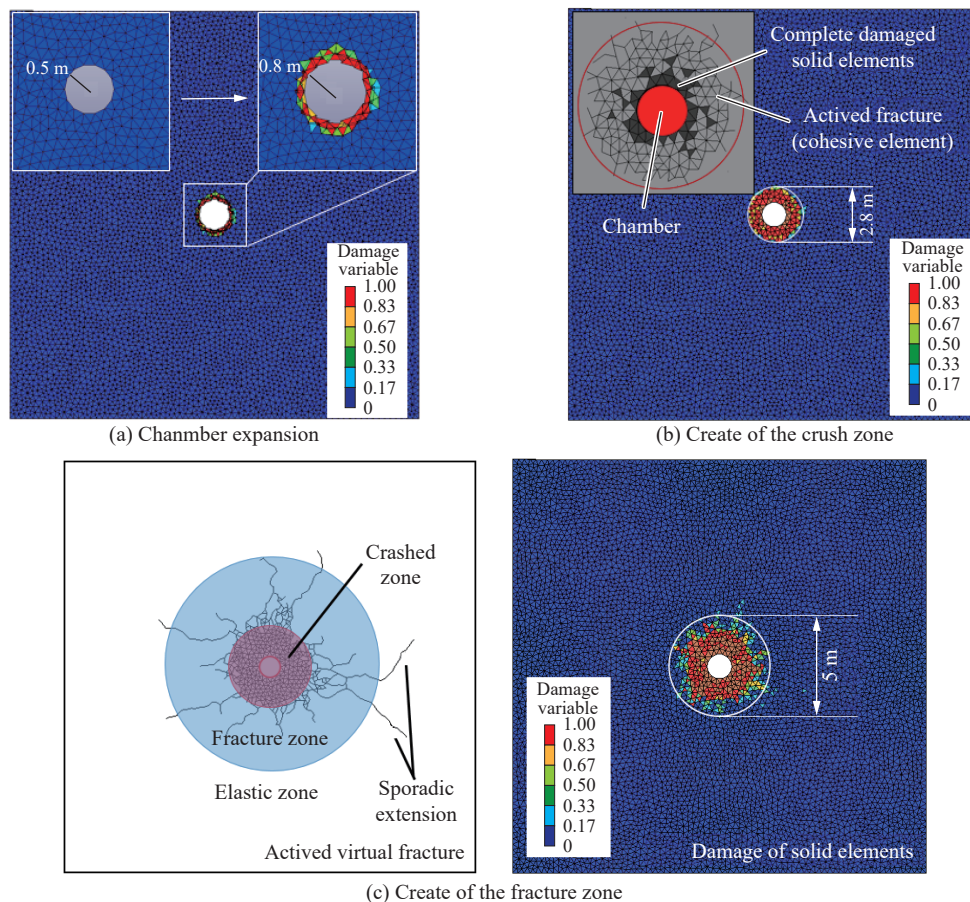


图 9 地下填实爆炸的分区破坏规律
Fig. 9 Zonal failure law of the underground coupled explosion

分由反射波叠加形成的裂纹虽然十分密集但没有扩展的趋势, 因此仍将其归于裂隙区。当洞室半径达到 5 m 后, 裂隙区完全消失, 洞室处于完全弹性状态, 据此认为: 对于硬质砂岩洞室, 比例半径为 $0.52 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时, 可以实现爆炸荷载的完全解耦。

3 讨论

对本文损伤-虚拟裂纹模型与传统 FEM 模型的差异与优劣, 进行简单讨论。

在图 10(a) 所示的耦合装药模型的基础上, 通过调整装药半径, 可以将装药形式转化为不耦合装药, 从而减小围岩损伤, 当装药半径调整为 0.12 m 时, 对应的损伤及虚拟裂纹如图 11(a)~(b) 所示, 围岩中破碎区范围较小, 且出现了多条细长裂纹, 形成半径 2 m 的裂隙区。

图 11(c) 为相同条件(除无黏聚力单元外, 其他条件均与本文模型相同)的有限元方法模拟的损伤云图。对比图 11(b)~(c) 可知: FEM 模型计算得到的损伤具有很强的对称性, 损伤云图近似呈环状, 而本文的损伤-虚拟裂纹模型计算得到的损伤演化受裂纹扩展的影响较明显, 裂纹延伸处的损伤更加严重, 对应云图呈现放射状, 体现了裂纹对损伤演化过程的导向作用, 虚拟裂纹的随机性即可反映出岩石的各向异性特征。由于节理单元失效消耗了一部分能量, 有限元总损伤面积和损伤程度相对较小, 但由于裂纹分布不均匀, 实际的损伤演化范围较有限元模型略大。综上所述, 损伤-虚拟裂纹模型能够考虑到岩体裂纹对损伤分布的导向作用, 综合考虑损伤及裂纹效应后的模拟结果在理论上应该更加真实。

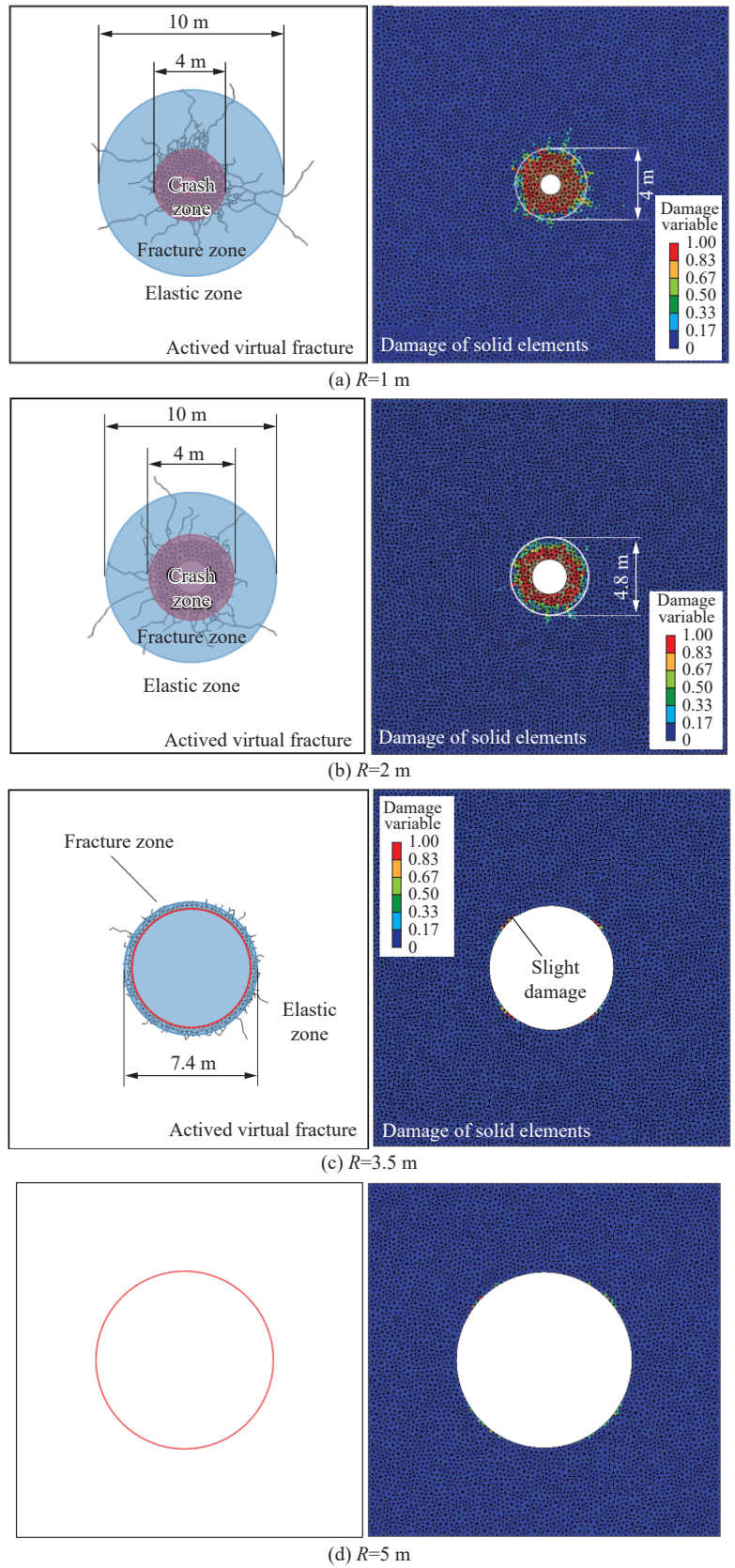


图 10 空腔爆炸模型最终的破坏形态

Fig. 10 Final failure characteristics of the cavity explosion models

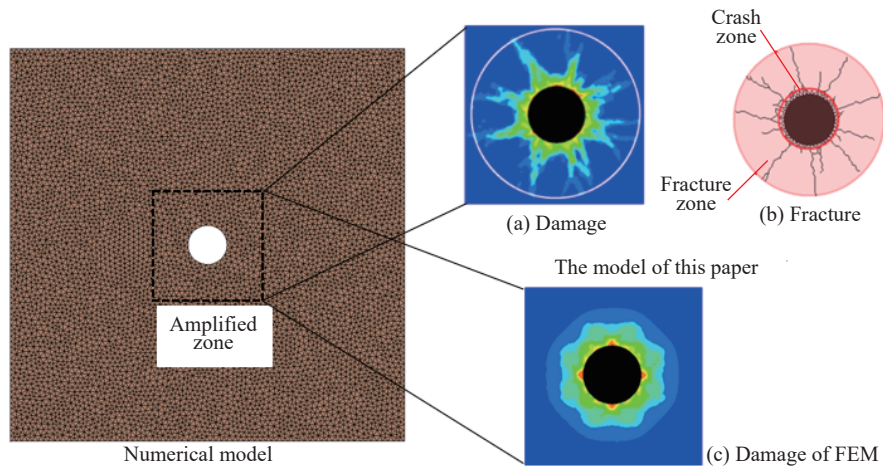


图 11 本文模拟方法与有限元方法的对比

Fig. 11 Comparison between the method in this paper and the FEM

4 结 论

在岩石 HJC 材料模型的基础上, 基于结理内聚力单元, 提出了一种新型的损伤-虚拟裂纹模型。基于该模型进行了地下填实及空腔爆炸的数值模拟, 得到以下结论。

(1) 本文的模拟方法不仅能够很好地模拟岩石的准静态和动态压缩过程, 而且克服了静水压力为拉应力时, HJC 模型破坏形态异常的问题, 扩大了 HJC 模型的适用范围, 且模型中实体单元的损伤和节理单元的失效可以分别作为岩石压碎和开裂的判定依据。

(2) 通过引入比例因子后, 本文模型可以避免不同网格尺寸下对模型参数的重复标定, 使得本文模型可用于工程尺度的分析。同时本文模型能够考虑到岩体裂纹对损伤分布的导向作用, 综合考虑损伤及裂纹效应后的模拟结果在理论上也将更加真实。

(3) 根据模拟结果, 地下填实爆炸具有明显的分区破坏规律, 而随着洞室尺寸的增大, 空腔效应可以减小爆炸荷载对围岩的损伤作用, 对于硬质砂岩洞室, 比例半径为 $0.52 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时可以实现爆炸荷载的完全解耦, 研究结果对地下洞室的防爆抗爆设计有一定的指导作用。

参考文献:

- [1] 周小平, 钱七虎, 张伯虎, 等. 深埋球形洞室围岩分区破裂化机理 [J]. 工程力学, 2010, 27(1): 69–75, 90.
ZHOU X P, QIAN Q H, ZHANG B H, et al. The mechanism of the zonal disintegration phenomenon around deep spherical tunnels [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(1): 69–75, 90.
- [2] LATTER A L, LELEVIER R E, MARTINELLI E A, et al. A method of concealing underground nuclear explosions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1961, 66(3): 943–946. DOI: 10.1029/JZ066i003p00943.
- [3] 朱号锋, 靳平, 肖卫国. 地下爆炸地震耦合效应的静态分析 [J]. 地震学报, 2010, 32(2): 234–241.
ZHU H F, JIN P, XIAO W G. Static analysis on seismic coupling of underground explosions [J]. Acta Seismologica Sinica, 2010, 32(2): 234–241.
- [4] 李孝兰. 空腔解耦爆炸实验研究的基础理论 (I) [J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(2): 186–192.
LI X L. Basic theory of decoupled explosions in cavities (I) [J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(2): 186–192.
- [5] 李孝兰. 空腔解耦爆炸实验研究的基础理论 (II) [J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(3): 283–288.
LI X L. Basic theory of decoupled explosions in cavities (II) [J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(3): 283–288.
- [6] 楼涛波, 张海波, 肖卫国. 岩体中非填实爆炸空腔壁振动状态分析 [J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(3): 237–240.
LOU W T, ZHANG H B, XIAO W G. Study on vibration behaviors of rock-wall in decoupling explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(3): 237–240.
- [7] 王占江. 岩土中填实与空腔解耦爆炸的化爆模拟实验研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2003.

- WANG Z J. Experimental investigation on tamped and cavity decoupled explosion in rock-soil by mili-explosive charge [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003.
- [8] WANG G Y, CAO A S, WANG X Y, et al. Numerical simulation of the dynamic responses and damage of underground cavern under multiple explosion sources [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 120: 105085. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.105085.
- [9] 熊益波, 钟方平, 王万鹏, 等. 硬岩中的可重复使用抗爆洞室结构设计技术 [J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(9): 1759–1766. DOI: 10.11779/CJGE201909022.
- XIONG Y B, ZHONG F P, WANG W P, et al. Structural design technology of reusable blast-resistant caverns in hard rock mass [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(9): 1759–1766. DOI: 10.11779/CJGE201909022.
- [10] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R, COOK W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures [C] // Proceedings of the 14th International Symposium on Ballistics. Quebec, Canada: American Defense Preparedness Association, 1993: 591–600.
- [11] TAYLOR L M, CHEN E P, KUSZMAUL J S. Microcrack-induced damage accumulation in brittle rock under dynamic loading [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1986, 55(3): 301–320. DOI: 10.1016/0045-7825(86)90057-5.
- [12] RIEDEL W, THOMA K, HIERMAIER S, et al. Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500 - numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes [C] // Proceeding of the 9th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures. Berlin, German: ISIEMS, 1999: 315–322.
- [13] 刘文韬, 刘永, 桂荣, 等. 裂纹长度对裂隙岩体力学特性及破坏模式的影响 [J]. *南华大学学报 (自然科学版)*, 2017, 31(4): 53–58, 63. DOI: 10.19431/j.cnki.1673-0062.2017.04.011.
- LIU W T, LIU Y, GUI R, et al. Influence of crack length on mechanics characteristic and damage mode of fractured rock-mass [J]. *Journal of University of South China (Science and Technology)*, 2017, 31(4): 53–58, 63. DOI: 10.19431/j.cnki.1673-0062.2017.04.011.
- [14] YE Y, ZENG Y W, CHENG S F, et al. Numerical investigation of rock sphere breakage upon oblique impact: effect of the contact friction coefficient and impact angle [J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 136: 104207. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104207.
- [15] 张嘉凡, 高壮, 程树范, 等. 煤岩 HJC 模型参数确定及液态 CO₂ 爆破特性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(S1): 2633–2642. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2020.0267.
- ZHANG J F, GAO Z, CHENG S F, et al. Parameters determination of coal-rock HJC model and research on blasting characteristics by liquid CO₂ [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(S1): 2633–2642. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2020.0267.
- [16] WU Z J, ZHANG P L, FAN L F, et al. Debris characteristics and scattering pattern analysis of reinforced concrete slabs subjected to internal blast loads—a numerical study [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 131: 1–16. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.04.024.
- [17] KUCEWICZ M, BARANOWSKI P, MALACHOWSKI J. Dolomite fracture modeling using the Johnson-Holmquist concrete material model: parameter determination and validation [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13(2): 335–350. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.09.007.
- [18] 方秦, 孔祥振, 吴昊, 等. 岩石 Holmquist-Johnson-Cook 模型参数的确定方法 [J]. *工程力学*, 2014, 31(3): 197–204. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.10.0780.
- FANG Q, KONG X Z, WU H, et al. Determination of Holmquist-Johnson-Cook constitutive model parameters of rock [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(3): 197–204. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.10.0780.
- [19] 闻磊, 李夕兵, 吴秋红, 等. 花岗斑岩 Holmquist-Johnson-Cook 本构模型参数研究 [J]. *计算力学学报*, 2016, 33(5): 725–731. DOI: 10.7511/jslx201605011.
- WEN L, LI X B, WU Q H, et al. Study on parameters of Holmquist-Johnson-Cook model for granite porphyry [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2016, 33(5): 725–731. DOI: 10.7511/jslx201605011.
- [20] 孙其然, 李芮宇, 赵亚运, 等. HJC 模型模拟钢筋混凝土侵彻实验的参数研究 [J]. *工程力学*, 2016, 33(8): 248–256. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.12.1094.
- SUN Q R, LI R Y, ZHAO Y Y, et al. Investigation on parameters of HJC model applied to simulate perforation experiments of reinforced concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(8): 248–256. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.12.1094.
- [21] WU Z J, ZHANG P L, FAN L F, et al. Numerical study of the effect of confining pressure on the rock breakage efficiency and

- fragment size distribution of a TBM cutter using a coupled FEM-DEM method [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 88: 260–275. DOI: 10.1016/j.tust.2019.03.012.
- [22] 宋力, 胡时胜. SHPB 数据处理中的二波法与三波法 [J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(4): 368–373. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)04-0368-06.
- SONG L, HU S S. Two-wave and three-wave method in SHPB data processing [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(4): 368–373. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)04-0368-06.
- [23] KAZERANI T. Effect of micromechanical parameters of microstructure on compressive and tensile failure process of rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 64: 44–55. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2013.08.016.
- [24] KONG X X, LIU Q S, ZHANG Q B, et al. A method to estimate the pressure arch formation above underground excavation in rock mass [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 71: 382–390. DOI: 10.1016/j.tust.2017.09.004.
- [25] LIU Q S, DENG P H. A numerical investigation of element size and loading/unloading rate for intact rock in laboratory-scale and field-scale based on the combined finite-discrete element method [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 211: 442–462. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2019.02.007.
- [26] WU Z J, MA L L, FAN L F. Investigation of the characteristics of rock fracture process zone using coupled FEM/DEM method [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, 200: 355–374. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.08.015.
- [27] LS-DYNA keyword user's manual, version 971-R11.1 [Z]. Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation, 2020.
- [28] WESCOTT B L, STEWART D S, DAVIS W C. Equation of state and reaction rate for condensed-phase explosives [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(5): 053514. DOI: 10.1063/1.2035310.
- [29] 吴志军, 张鹏林, 刘泉声, 等. 基于零厚度粘聚力单元的钢筋混凝土板在爆炸荷载下的动态破坏过程分析 [J]. *工程力学*, 2018, 35(8): 79–90, 110. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.04.0270.
- WU Z J, ZHANG P L, LIU Q S, et al. Dynamic failure analysis of reinforced concrete slab based on cohesive element under explosive load [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(8): 79–90, 110. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.04.0270.
- [30] 亨利奇 J. 爆炸动力学及其应用 [M]. 熊建国, 译. 北京: 科学出版社, 1987.
- [31] 吴亮, 卢文波, 钟冬望, 等. 混凝土介质中空气间隔装药的爆破机理 [J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(1): 58–64. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)01-0058-07.
- WU L, LU W B, ZHONG D W, et al. Blasting mechanism of air-decked charge in concrete medium [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(1): 58–64. DOI: 10.11883/1001-1455(2010)01-0058-07.

(责任编辑 曾月蓉)