

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0471

双空孔间距对爆破槽腔断面大小的影响*

李祥龙^{1,2}, 张志平¹, 王建国^{1,2}, 李强¹, 王子琛³

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

2. 昆明理工大学云南省中-德蓝色矿山与特殊地下空间开发利用重点实验室, 云南 昆明 650093;

3. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 为了探究空孔间距对巷道掘进掏槽爆破效果的影响, 基于大红山铜矿某巷道建立有限元数值模型, 计算双大直径空孔不同布孔间距条件下的掏槽爆破成腔断面面积, 并对最优方案开展现场验证。研究表明: 空孔间距 $d_v=15$ cm 时, 槽腔断面面积为 0.1641 m²; 当 d_v 增加到 $d_v=25$ cm 时, 槽腔断面面积为 0.2116 m², 断面面积增大 28.94%; 当 d_v 增加到 35 cm 时, 槽腔断面面积为 0.2436 m², 断面面积增大 15.1%; 但当 d_v 增大到 45 cm 时, 槽腔面积为 0.1740 m², 断面面积减小 17.8%; 当 d_v 增大到 55 cm 时, 槽腔面积为 0.0951 m², 断面面积减小 45.3%。对成腔断面面积最大的空孔间距 $d_v=35$ cm 的布孔方案进行现场试验, 2 号现场试验测得槽腔断面宽度、高度及断面面积分别比模拟结果小 4.0%、3.4% 和 4.98%, 多次试验与模拟结果误差均在 5% 以内, 能够为地下巷道掏槽爆破成腔体积预测的数值方法构建提供数据参考。

关键词: 掏槽爆破; 数值模拟; 空孔间距; 空孔效应; 槽腔断面

中图分类号: O389

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Influence of double empty hole spacing on section size of blasting chamber

LI Xianglong^{1,2}, ZHANG Zhiping¹, WANG Jianguo^{1,2}, LI Qiang¹, WANG Zichen³

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

2. Yunnan Key Laboratory of Sino-German Blue Mining and Utilization of Special Underground Space, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

3. Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an, 710077 Shaanxi, China)

Abstract: In order to explore the influence of double empty hole spacing on the tunnel excavation blasting effect, the range of empty hole spacing is calculated according to the compensation space theory and the theoretical formula of hole deviation. A finite element numerical model of a roadway of Dahongshan Copper Mine is established based on the HJC constitutive model of concrete and multi-material ALE algorithm of LS-DYNA. By adding the *MAT_ADD_EROSION keyword, the damaged rock elements are observed, and the cross-section area of the cavity for cut blasting with large-diameter double empty holes of different spacing is calculated. The results show that when the hole spacing d_v is 15, 25, 35, 45 and 55 cm, the cavity section area is 0.1641, 0.2116, 0.2436, 0.1740 and 0.0951 m², respectively. When the hole spacing increased by 10 cm each from 15 cm to 55 cm, the cavity section area increased by 18.94% and 15.1% and decreased by 17.8% and 45.3%, respectively. Thus, with the increase of empty hole spacing, the section area increases first and then decreases. When $d_v = 35$ cm, it reaches its maximum. This case was tested in the field. The width, height, and area of the cavity section measured by the No. 2 field test

* 收稿日期: 2021-11-11; 修回日期: 2022-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(52274083); 云南省重大科技专项(202202AG050014); 云南省基础研究计划(202201AT070178)

第一作者: 李祥龙(1981—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, lx100014002@163.com

通信作者: 王建国(1987—), 男, 博士, 副教授, wangjg0831@163.com

are 4.0%, 3.4%, and 4.98%, respectively, smaller than the simulation results. The error between multiple tests and simulation results is within 5%, indicating that the test results are in good agreement with the simulation results, which can provide data reference for the construction of a numerical method for predicting the cavity volume of underground tunnel cutting blasting.

Keywords: cutting blasting; numerical simulation; empty hole spacing; empty hole effect; groove cavity section

巷道掘进爆破中,一般只有一个自由面,所受夹制作用较大,通常会留有空孔为岩石破碎提供补偿空间^[1]。而空孔数目、间距等参数是提高掘进进尺和掏槽取得成功的关键。目前一致认可的是补偿空间越大,掏槽效果越好,即增加空孔数量或空孔直径,然而大的补偿空间需要牺牲的是钻孔成本。那么,如何让有限的空孔实现最佳的爆破空间补偿效果,是掏槽爆破研究的热点问题。

就掏槽爆破参数优化问题,主要从数值模拟、现场实验等方面进行了研究。Li 等^[2]利用数值模拟手段验证了中空孔应力集中效应的存在; Zhang 等^[3]提出了掏槽爆破的一种先进的掏槽抛片(CCFT)概念; Sui 等^[4]研究了无限岩体在有自由面条件下裂纹扩展过程; 单仁亮等^[5]模拟研究了不同空孔孔径的直眼掏槽爆破效果,得出孔径对掏槽爆破的效果和振动均有重要影响; 汪海波等^[6]认为增大空孔直径可提高应力峰值和延长作用时间,空孔周围峰值为无空孔时的 2.2 倍; Li 等^[7]利用数值模拟手段研究得出两空孔间距越短,止裂作用越强,当两孔间距小于一定值时,可完全阻止外向裂纹; 钟波波等^[8]利用数值模拟方法,分析得出空孔有导向作用,且与空孔大小无明显相关; 材料的非均匀性,对裂纹的扩展方式有显著影响; 张召冉等^[9]针对含空孔直眼掏槽参数确定没有可靠依据的问题,提出了动态碎胀系数的概念; Gao 等^[10]采用 ANSYS/LS-DYNA 软件对不同侧压力系数的复杂五孔掏槽爆破进行二维优化模拟研究,结果表明,设置延迟爆轰和孔径以及优化炮眼间距可以优化破岩效果; 柴修伟等^[11]利用数值模拟软件 LS-DYNA 模拟了不同数量的空孔情况下裂纹扩展情况。

鉴于以上研究成果,本文以在研的矿山巷道掏槽爆破掘进效率优化项目为依托,选择双大直径空孔(孔径 100 mm)、侧向两孔起爆的掏槽方案,研究同等起爆条件下大直径空孔距离对掏槽槽腔断面大小的影响,以期确定最优的掏槽布孔方式,保证矿山巷道掘进进尺的同时,减少空孔钻凿数量。

1 掏槽爆破的空孔效应

1.1 空孔的自由面作用

起爆后,冲击波随着传播的距离不断衰减,应力也不断下降,逐渐变为压缩波,当压缩波传到空孔孔壁会反射形成拉伸波,与应力波传到自由面的作用相同,因此空孔充当了自由面的作用,有利于岩石破碎。

根据动量守恒定律可推出^[12]:

$$\sigma = \rho c_p v_p \quad (1)$$

$$\tau = \rho c_s v_s \quad (2)$$

式中: σ 为纵波应力, MPa; τ 为横波应力, MPa; ρ 为岩石密度, kg/m^3 ; c_p 为纵波波速, m/s; c_s 为横波波速, m/s; v_p 和 v_s 分别为质点在波的传播方向和垂直与波的传播方向上的运动速度, m/s。

1.2 空孔的应力集中作用

力学计算和实验研究表明: 当应力波传到空孔孔壁时,将产生反射拉应力波并在空孔附近形成拉应力区,最大拉应力峰值将出现在的两孔连心线方向上^[13-14]。因此,空孔具有应力集中作用^[6]。在某测点的径向压应力峰值为:

$$\sigma_{r\max} = p_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-a} \quad (3)$$

式中: $\sigma_{r\max}$ 为某点的爆炸径向应力, MPa; p_0 为孔壁初始应力峰值, MPa; r_0 为炮孔半径, m; r 为某点到炮孔距离, m; a 为应力波衰减指数。

切向拉应力峰值可通过径向压应力峰值得到:

$$\sigma_{\theta\max} = b\sigma_{r\max} \quad (4)$$

式中: b 为系数, 在爆炸近区 $b \approx 1$, b 值与应力波传播距离成反比, 并逐渐趋于稳定。

$$\sigma_{\theta\max} = \frac{\mu}{1-\mu}\sigma_{r\max} \quad b = \frac{\mu}{1-\mu} \quad (5)$$

式中: μ 为岩石泊松比。

耦合装药时, 孔壁初始应力峰值为^[15-16]:

$$p_0 = \frac{1}{4}\rho_e D_0^2 \frac{2\rho_m c_p}{\rho_e D_0 + \rho_m c_p} \quad (6)$$

式中: ρ_e 、 ρ_m 分别为炸药和岩石密度, kg/m^3 ; D_0 为爆速, m/s ; c_p 为纵波波速, m/s 。

计算可得到某一点切向拉应力峰值 $\sigma_{\theta\max}$, 若切向拉应力峰值 $\sigma_{\theta\max}$ 大于岩石的动态抗拉强度 σ_θ , 即满足岩石拉裂破坏条件, 岩石破碎。

1.3 空孔的卸压作用

在复杂地压下, 根据厚壁圆筒理论, 爆炸与原岩应力场耦合为:

$$\sigma'_{rr} = \frac{1}{2}(\sigma_h + \sigma_v) \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(\sigma_h - \sigma_v) \left(1 - \frac{4r_0^2}{r^2} + \frac{3r_0^4}{r^4}\right) \cos 2\theta + p_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \quad (7)$$

$$\sigma'_{\theta\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_h + \sigma_v) \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma_h - \sigma_v) \left(1 + \frac{3r_0^4}{r^4}\right) \cos \left[2\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)\right] - p_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \quad (8)$$

式中: σ'_{rr} 、 $\sigma'_{\theta\theta}$ 分别为计算点的耦合径向和切向应力, MPa ; σ_h 、 σ_v 分别水平和垂直地应力, MPa ; θ 为点和炮孔中心连线与水平方向的夹角, r 为点到炮孔距离, m 。

若 $\sigma_h = \sigma_v = 0$ (即无地压情况), 则

$$\sigma'_{rr} = p_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \quad (9)$$

$$\sigma'_{\theta\theta} = -p_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \quad (10)$$

空孔使炮孔在径向的抵抗线要远小于轴向的抵抗线, 因此, 破碎岩体在爆生气体的推动作用下, 优先向空孔方向移动, 空孔提供的空间可以消掉一定的碎胀压力, 有利于岩石抛掷出腔, 即空孔的卸压作用。

由上文可知, 大直径空孔直眼掏槽机理是应力集中、自由面、空孔的卸压作用共同作用的结果。当爆炸气体产生时, 空孔起到自由面作用, 为破碎岩体提供一定的碎胀空间, 有利于破碎岩体在爆生气体的推动作用下抛出, 形成槽腔, 即实现空孔卸压作用。下文利用数值模拟手段研究双空孔间距对爆破效果的影响。

2 数值分析模型的建立

2.1 模型尺寸及试验方案

(1) 补偿空间理论

补偿空间应满足矿岩碎胀后所需要的体积, 不然就会发生挤死的现象, 从而影响爆破效果。其应满足如下关系式:

$$S_1 \times K \leq S_1 + S_2 + S_3 \quad (11)$$

式中: S_1 为预爆岩体面积; S_2 为空孔面积; S_3 为装药孔面积; K 为岩石碎胀系数, $K = 1.5$ 。

根据图 1, 可推导出装药孔与空孔距离的关系:

$$\left(L \frac{D+d}{2} - \frac{\pi D^2}{8} - \frac{\pi d^2}{8} \right) K \leq \frac{D+d}{2} L + \frac{\pi D^2}{8} + \frac{\pi d^2}{8} \quad (12)$$

$$L \leq \frac{\pi (D^2 + d^2) (K+1)}{4 (D+d) (K-1)} \quad (13)$$

式中: L 为空孔与装药孔的距离; d 为装药孔直径; D 为空孔直径。计算得到 $L < 32.7$ cm。

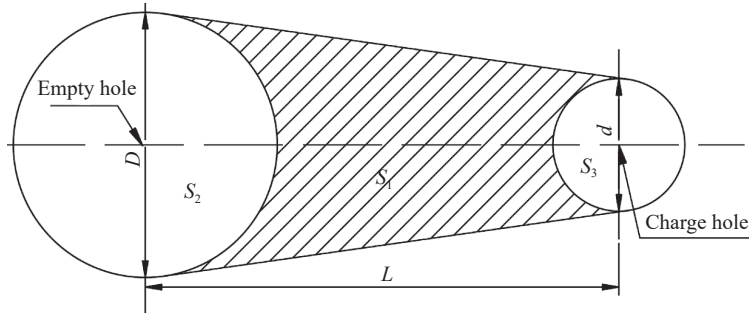


图 1 装药孔与空孔的距离关系

Fig. 1 Distance between charge hole and empty hole

(2) 炮孔偏斜理论

为防止炮孔间贯穿, 需要满足:

$$L > \frac{D+d}{2} + 2H \sin a \quad (14)$$

式中: H 为炮孔深度, a 为炮孔偏斜度。

现场使用 KJ311 型全液压掘进钻车, 炮孔偏斜角度在 1° 以内, 经计算得: $L > 18.9$ cm。所以装药孔与空孔之间的距离范围为: $18.9 \text{ cm} < L < 32.7 \text{ cm}$ 。

运用 ANSYS/LSDYNA 建立有限元二维模型, 模型尺寸为 $4000 \text{ mm} \times 4000 \text{ mm}$, 边缘定义为无反射边界, 装药炮孔直径为 50 mm , 大直径空孔直径为 100 mm , 装药方式为耦合装药。沿模型中心横向设置两个装药炮孔, 同时起爆, 孔距为 40 cm , 两空孔按模型中心竖向布置, 空孔孔距用 d_v 表示, 通过上式计算装药孔与空孔之间孔距 $18.9 \text{ cm} < L < 32.7 \text{ cm}$ 。根据勾股定理原则可计算出 d_v 最大为 51.7 cm , 本文将空孔孔距 d_v 设置为 15 、 25 、 35 、 45 和 55 cm , 定义两空孔连心线的中点为 P , 各炮孔位置及模型网格划分如图 2 所示。

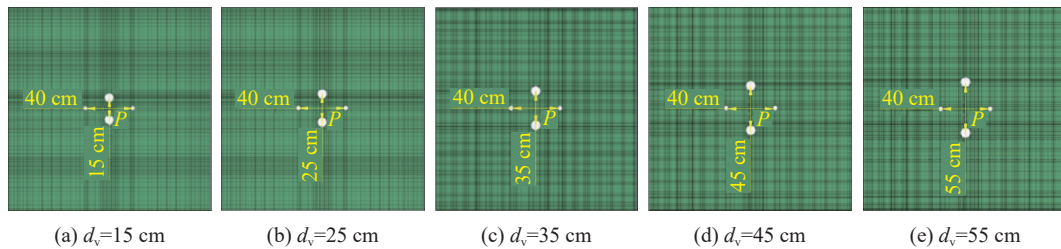


图 2 炮孔布置及二维模型网格划分图

Fig. 2 Layout of blast holes and meshing of the two-dimensional model

2.2 岩石模型

结合相关文献, 本岩石模型选用更加适合岩体的爆炸冲击数值模拟的 HJC 本构模型^[17-18]。根据大红山铜矿试验区域参数^[19], 确定 HJC 本构模型中的矿岩参数见表 1。

表 1 大红山大理岩 HJC 本构模型参数

Table 1 Dahongshan marble HJC constitutive model parameters

$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	f_c/MPa	A	B	C	S_{\max}	G	T	D_1	D_2
2941	70.59	0.52	1.17	0.0163	4	22.27	7.68	0.036	1
$p_{\text{crush}}/\text{MPa}$	μ_{crush}	$p_{\text{lock}}/\text{GPa}$	μ_{plock}	K_1	K_2	K_3	E_{Fmin}	N	F_s
23.65	0.00076	0.159	0.012	13	23	60	0.01	0.79	0.085

注: ρ_0 为岩石密度, f_c 为静态单轴抗压强度, T 为岩石最大拉应力, A 为无量纲粘性强度系数, B 为无量纲压力硬化系数, C 为应变率系数, N 为压力硬化指数, S_{\max} 为最大无量纲的等效应力, D_1 、 D_2 为损伤常数, E_{Fmin} 为岩石最小塑性应变, μ_{crush} 为等效塑性应变增量, μ_{plock} 塑性体积应变增量, K_1 、 K_2 和 K_3 分为压力常数, p_{lock} 为压实后的静水压力, p_{crush} 为弹性极限时静水压力值, G 为剪切模量, F_s 失效参数。

2.3 炸药模型参数及状态方程

矿山作业使用的是 1 号岩石乳化炸药, 选用 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型, 采用 EOS_JWL 状态方程模拟炸药状态^[20-21]

$$p_1 = A_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_2 V} + B_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (15)$$

式中: p_1 为爆轰产物内部压力, V 为相对体积, A_1 、 B_1 、 R_1 、 R_2 和 ω 为炸药相关常数, E_0 为初始比内能。

本文采用的炸药模型参数见表 2。

表 2 炸药的状态方程参数

Table 2 HJC constitutive model parameters of explosive

$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$D_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	A_i/GPa	B_i/GPa	R_1	R_2	ω
1.3	4500	214.4	0.182	4.2	0.9	0.15

注: D_0 为炸药爆速。

3 数值计算结果及分析

3.1 爆破应力场分布情况

为了研究双空孔对直眼掏槽爆炸应力场的影响, 模拟试验设置两个垂直掏槽孔装药起爆, 炮孔直径 50 mm, 空孔直径 100 mm, 仅改变双空孔孔距, 得到 $d_v=15\text{ cm}$ 、 $d_v=25\text{ cm}$ 、 $d_v=35\text{ cm}$ 、 $d_v=45\text{ cm}$ 和 $d_v=55\text{ cm}$ 五种情况下不同时刻的等效压力云图, 见图 3~图 7, P 点处应力时程曲线如图 8 所示。

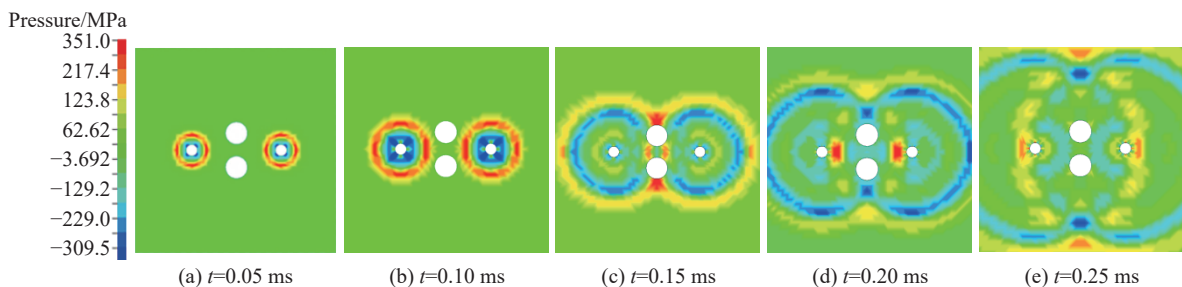


图 3 当 $d_v=15\text{ cm}$ 时模型压力云图

Fig. 3 Pressure contours of the model when $d_v=15\text{ cm}$

分析压力云图可知: 在应力波到达空孔前, 五种模型压力云图的应力峰值基本一致; 在应力波传播至空孔附近时, 可明显观察出两空孔连线方向出现应力集中现象, 应力波传播到中心 P 点处时两炮孔产生的应力波相互叠加, 应力波在空孔壁形成反射拉伸波, 随后出现不同的应力波叠加扰动, 直至传播出视野。

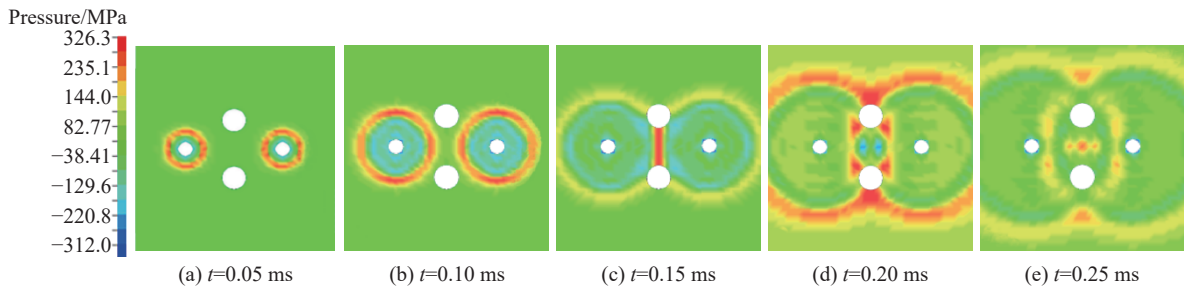


图 4 当 $d_v=25$ cm 时模型压力云图

Fig. 4 Pressure contours of the model when $d_v=25$ cm

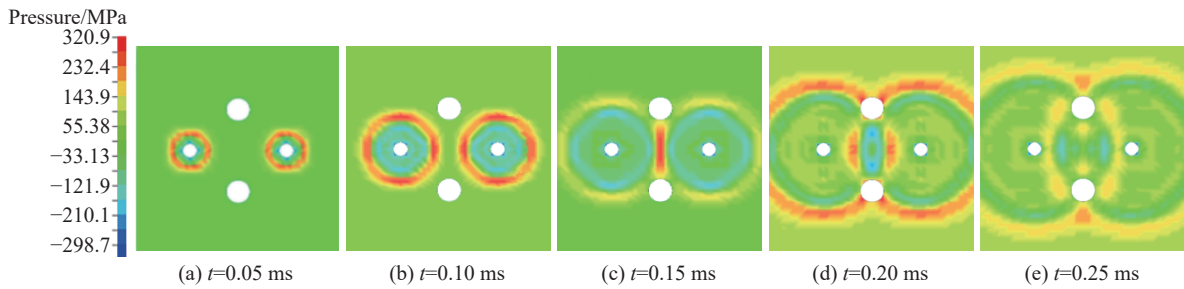


图 5 当 $d_v=35$ cm 时模型压力云图

Fig. 5 Pressure contours of the model when $d_v=35$ cm

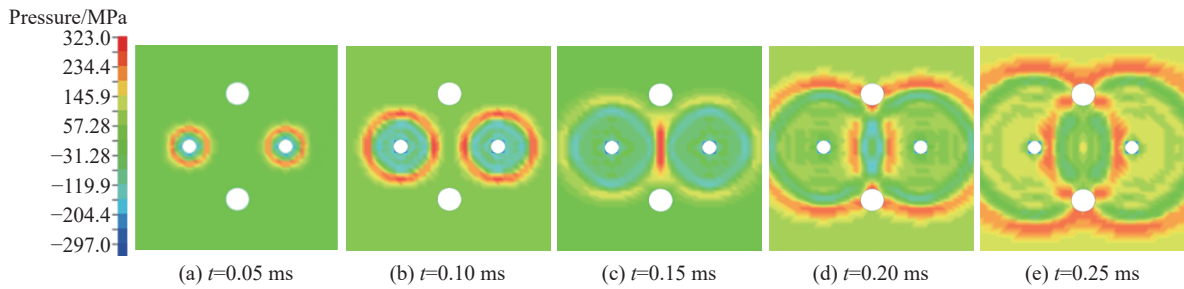


图 6 当 $d_v=45$ cm 时模型压力云图

Fig. 6 Pressure contours of the model when $d_v=45$ cm

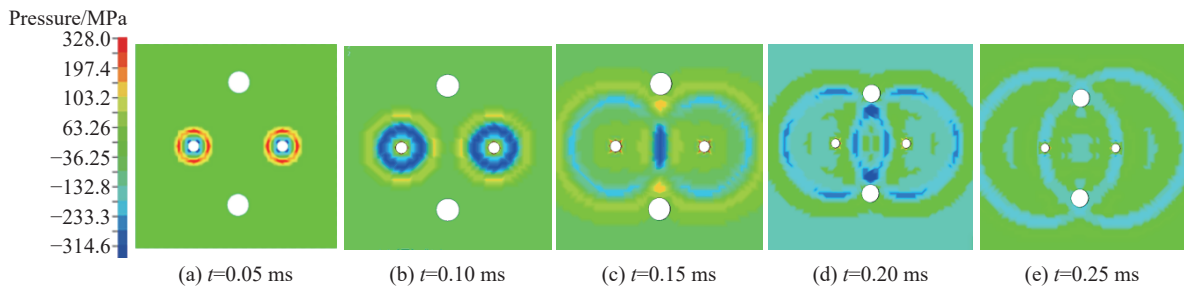
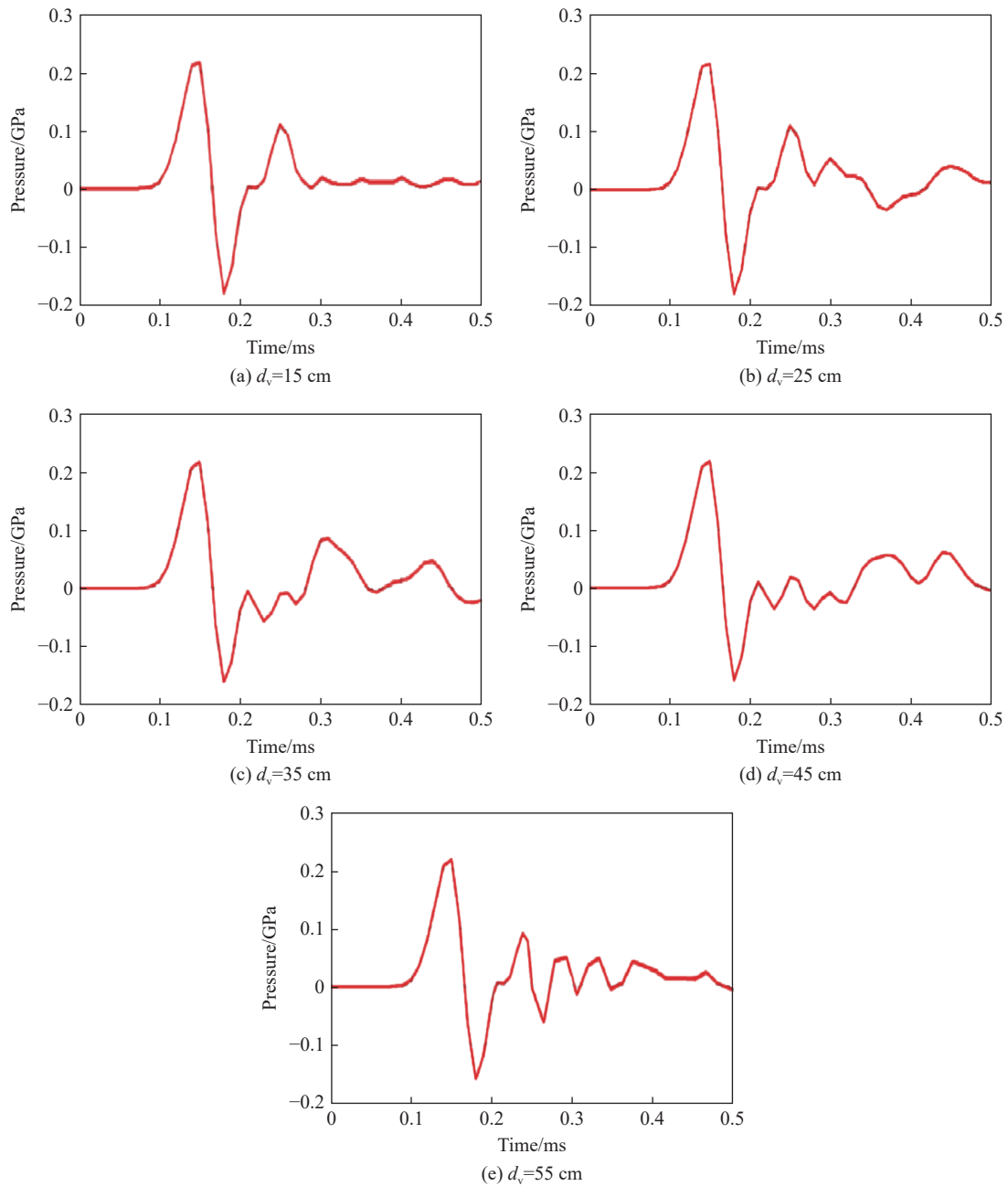


图 7 当 $d_v=55$ cm 时模型压力云图

Fig. 7 Pressure contours of the model when $d_v=55$ cm

通过观察不同 d_v 模型 P 点处的应力时程曲线可以看出: 受到的压应力峰值均为 217 MPa, $d_v=15$ cm、 $d_v=25$ cm、 $d_v=35$ cm、 $d_v=45$ cm、 $d_v=55$ cm 时 P 点处拉应力峰值分别为 197、180、165、160 和 156 MPa; 即 d_v 由 15 cm 增大到 25 cm, 拉应力峰值减小 8.62%; d_v 由 25 cm 增大到 35 cm, 拉应力峰值减小 8.3%; d_v 由 35 cm 增大到 45 cm, 拉应力峰值减小 3.03%; d_v 由 45 cm 增大到 55 cm, 拉应力峰值减小 0.25%。说明 d_v 越小, P 点受到的反射拉应力越大, 这跟空孔自由面的距离有关。

图 8 P 点处的应力时程曲线Fig. 8 Stress time history curve at point P

3.2 岩石损伤破坏情况

只考虑双大直径空孔间距对爆破效果的影响时,空孔间距越小, P 点处受到的拉应力峰值越大,中心岩体越容易破坏。为方便研究槽腔断面破坏情况,在k文件中添加*`MAT_ADD_EROSION`关键字^[1],设定压力强度大于本文实际岩石力学参数,即单轴抗压、单轴抗拉、变形模量等时,模拟岩体的损伤与破坏,如图9~图13所示。

如图9所示, $d_v=15$ cm时,空孔距离太近,补偿空间导向作用不明显;当 $d_v=25$ cm时(图10),在 $t=0.05$ ms时,装药孔周围岩石单元受压破坏,应力波刚刚达到空孔壁,在 $t=0.1$ ms时应力波持续向外传播,装药孔周围岩石破坏向外扩展,空孔壁处应力波发生反射开始受拉破坏,出现空孔导向现象,使空孔与以破坏单元连接形成初步槽腔轮廓,在 $t=0.15$ ms时,两装药孔与空孔之间完全贯穿,在 $t=0.2$ ms时,槽腔轮廓面基本形成,直至0.25 ms时刻破坏终止。

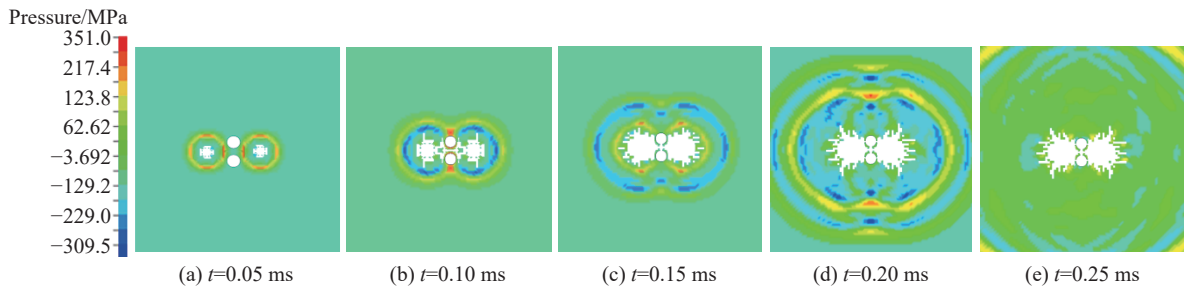


图 9 $d_v=15$ cm 时损伤破坏图

Fig. 9 Damage failure diagram when $d_v=15$ cm

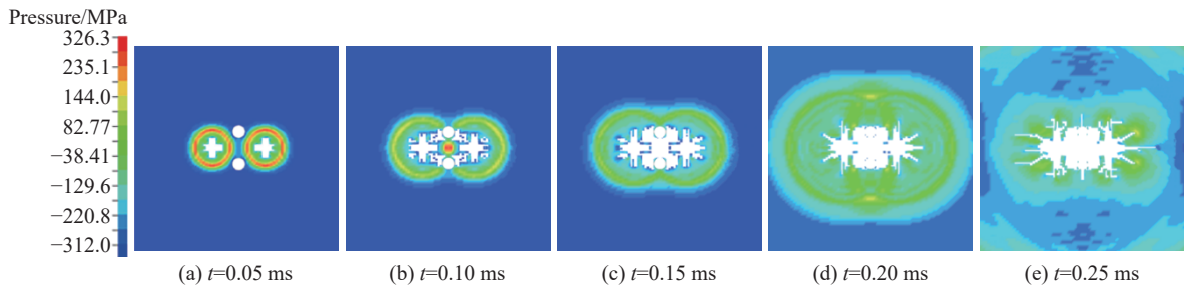


图 10 $d_v=25$ cm 时损伤破坏图

Fig. 10 Damage failure diagram when $d_v=25$ cm

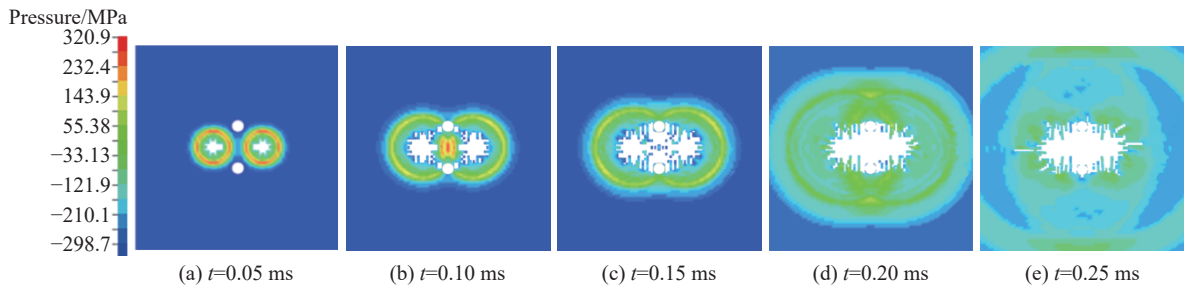


图 11 $d_v=35$ cm 时损伤破坏图

Fig. 11 Damage failure diagram when $d_v=35$ cm

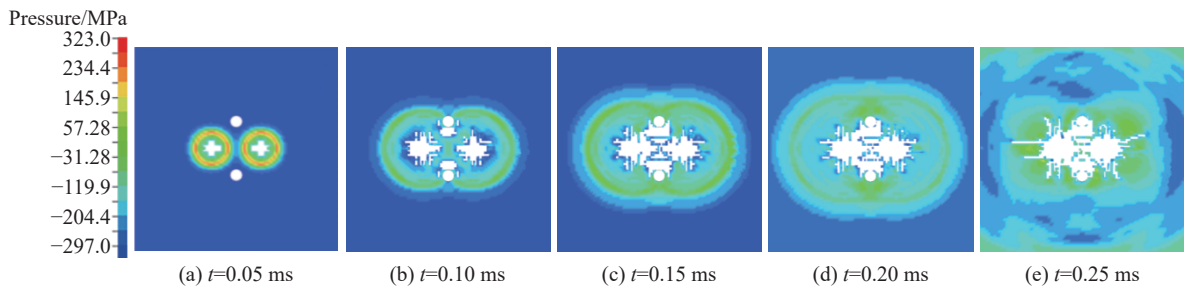


图 12 $d_v=45$ cm 时损伤破坏图

Fig. 12 Damage failure diagram when $d_v=45$ cm

当 $d_v=35$ cm 时(图 11), 炮孔周围裂纹发展更加充分, 同时反射应力波对岩石的拉伸破坏减小, 爆破后得到的槽腔轮廓面积较 $d_v=25$ cm 时有所增大, 中心区域虽有少量岩体, 但基本贯通形成槽腔轮廓面。

当 $d_v=45$ cm 时(图 12), 由 0.25 ms 时刻损伤破坏图可以看出两装药孔之间基本贯穿, 但槽腔外断面仍存在大量未失效单元, 说明掏槽区域仍有大量岩体存留, 若应用于现场会出现补偿空间不够的情况, 不能保证掏槽效果; 当 $d_v=55$ cm 时(图 13), 空孔距离太大, 爆生裂纹无法贯穿, 无法形成有效槽腔。

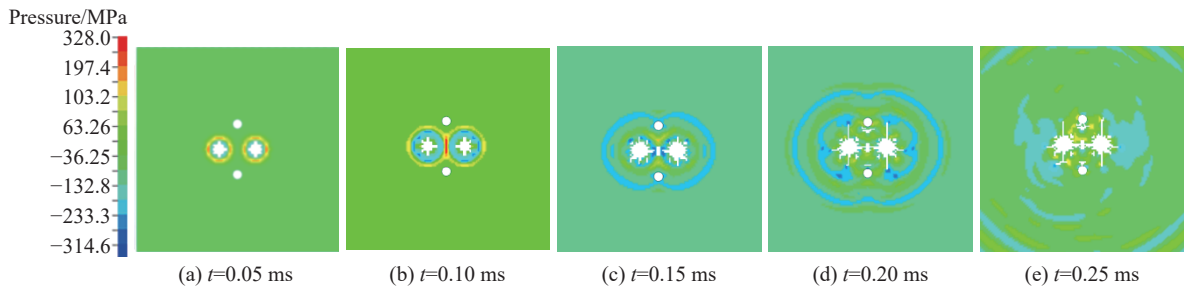


图 13 $d_v=55$ cm 时损伤破坏图
Fig. 13 Damage failure diagram when $d_v=55$ cm

岩石破碎区域若存在宽度为 1 单元的细长区域, 即将该区域判定为裂隙, 统计破碎区域面积时不计入统计。对模拟结果得到的槽腔外断面进行提取, 即 CAD 等比例绘图计算, 得到图 14。根据图 14 可知, $d_v=15$ cm 模型爆破后形成槽腔断面宽度为 63.03 cm, 形成的槽腔断面面积为 0.164 1 m²; $d_v=25$ cm 模型爆破后形成槽腔断面宽度为 68.6 cm, 形成的槽腔断面面积为 0.211 6 m²; $d_v=35$ cm 模型爆破后形成的槽腔断面为 67.4 cm, 形成的槽腔断面面积为 0.243 6 m²; $d_v=45$ cm 模型爆破后槽腔断面内存在大量未失效岩石单元, 面积为 0.1740 m², $d_v=55$ cm 模型爆破后形成槽腔断面宽度为 62.27 cm, 高度仅为 16.65 cm, 形成的槽腔断面面积为 0.095 1 m²。可见双空孔方案中 d_v 由 15 cm 增加到 25 cm 时, 形成的槽腔断面增大了 28.94%; d_v 由 25 cm 增加到 35 cm 时, 槽腔断面增大 15.1%; 但当 d_v 由 35 cm 增加到 45 cm 时, 槽腔面积为 0.1740 m², 形成的槽腔断面减小了 17.8%; d_v 增大到 55 cm 时, 槽腔面积为 0.095 1 m², 形成的槽腔断面减小了 45.3%; 即槽腔面积随空孔间距的增大先增加后减小, $d_v=35$ cm 时槽腔面积最大, 确定为现场验证方案。

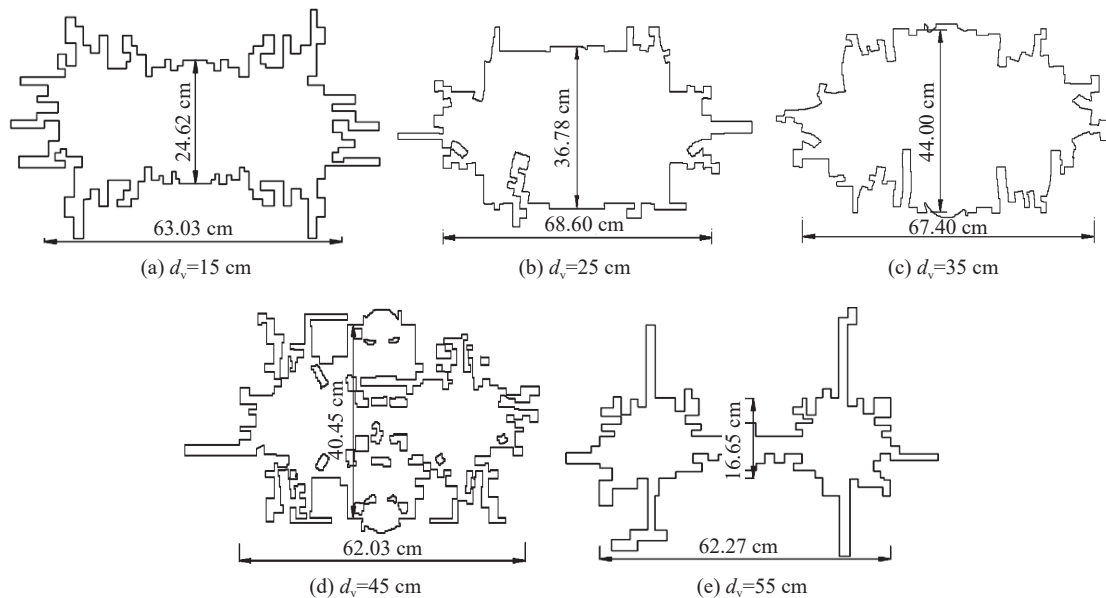


图 14 炸后槽腔外断面
Fig. 14 The external section of the explosion cavity after explosion

4 爆破现场验证

4.1 炮孔布置

试验地点为大红山铜矿 285 中段、370 水平, 根据大红山铜矿已有资料显示, 矿岩主要为大理岩, 岩石力学参数见表 1。装药孔直径为 50 mm, 空孔直径为 100 mm, 孔深为 3.2 m。由于上述模拟得出 $d_v=$

35 cm 时形成的槽腔断面最大, 故对 $d_v=35$ cm 方案进行现场验证。掏槽区域炮孔布置方案如图 2(c) 所示。炸药为 1 号岩石乳化炸药, 采用耦合装药, 孔底起爆; 所有炮孔均用炮泥填塞, 炮泥长度为 0.6 m。两个装药孔共需要 1 号岩石乳化炸药 3.2 kg。

4.2 爆破成腔效果及分析

通过数值模拟计算分析, 选择空孔间距 $d_v=35$ cm, 两装药孔距离 40 cm 的掏槽方案进行现场试验, 具体试验结果见表 3, 由于篇幅原因本文只对 2 号试验爆破后形成的槽腔进行分析, 如图 15 所示。由于未进行全断面开挖爆破, 实际上形成锥台型槽腔, 测量槽腔底部断面宽度与高度并绘制槽腔断面轮廓, 以此计算槽腔面积, 并与模拟结果对比, 如图 16。现场试验槽腔断面宽度比模拟结果小 4.0%, 槽腔断面高度比模拟结果小 3.4%, 槽腔断面积比模拟结果小 4.98%, 多次现场试验与模拟结果误差均在 5% 以内。

表 3 现场试验结果

Table 3 Field test results

试验	高度/cm	宽度/cm	面积/m ²	模拟面积误差/%
1	46.6	63.9	0.2491	2.26
2	42.5	64.7	0.2315	-4.98
3	42.1	66.3	0.2392	-1.8
4	51.5	62.7	0.2554	4.84

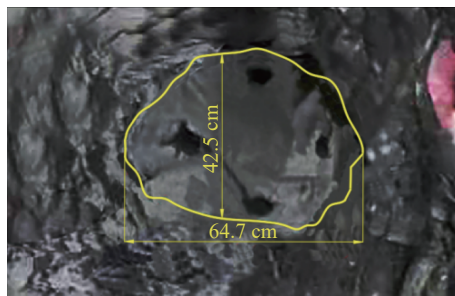


图 15 现场掏槽爆破槽腔断面图

Fig. 15 Cross-sectional view of the cavity of the on-site cutting blasting cavity

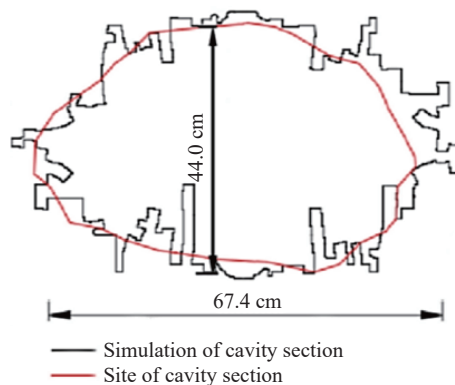


图 16 现场断面与模拟结果对比

Fig. 16 Comparison of the site section with the simulation results

5 结 论

以大红山铜矿地下某巷道为试验场地, 并根据围岩力学性质和实际爆破条件进行数值模拟计算对比分析, 得到如下结论:

(1) 两等间距掏槽孔同时起爆条件下, 掏槽区域中心点的压应力峰值不变, 反射拉应力峰值随着大直径空孔间距的增加而减小;

(2) 当空孔间距 d_v 为 15 cm、25 cm、35 cm、45 cm、55 cm 时, 模拟所得槽腔面积分别为 0.164 1 m²、0.211 6 m²、0.243 6 m²、0.174 0 m²、0.095 1 m², 表明存在一个最佳的空孔间距;

(3) 模拟预测的槽腔断面宽度、高度、断面积分别比现场试验结果大 4.0%、3.4% 和 4.98%, 多次现场试验与模拟结果误差均在 5% 以内, 说本文预测爆破槽腔断面积的数值模拟方法具有一定可靠性。

因此, 可进一步将此数值模拟方法从二维拓展至三维, 研究不同掏槽方式下的成腔体积并选择性开展现场试验验证, 以期找到预测地下巷道掏槽爆破成腔效果的数值方法。

参考文献:

- [1] SUN B, ZHANG Z Y, MENG J L, et al. Research on deep-hole cutting blasting efficiency in blind shafting with high in-situ Stress environment using the method of SPH [J]. *Mathematics*, 2021, 9(24): 3242. DOI: 10.3390/math9243242.
- [2] LI X L, LI Q, WANG J G, et al. Influence of hole arrangement on the section of cavity formed by cutting blast [J]. *Geofluids*, 2021, 2021: 9080560. DOI: 10.1155/2021/9080560.
- [3] ZHANG H, LI T C, DU Y T, et al. Theoretical and numerical investigation of deep-hole cut blasting based on cavity cutting and fragment throwing [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 111: 103854. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103854.
- [4] SUI J B, REN F Y, CAO J L, et al. Numerical analysis for the caving characteristics of rock mass with inclined joints in caving mining [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 9917744. DOI: 10.1155/2021/9917744.
- [5] 单仁亮, 黄宝龙, 高文蛟, 等. 岩巷掘进准直眼掏槽爆破新技术应用实例分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(2): 224–232.
SHAN R L, HUANG B L, GAO W J, et al. Case studies of new technology application of quasi-parallel cut blasting in rock roadway drivage [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(2): 224–232.
- [6] 汪海波, 宗琦, 赵要才. 立井大直径中空孔直眼掏槽爆炸应力场数值模拟分析与应用 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S1): 3223–3229. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0296.
WANG H B, ZONG Q, ZHAO Y C. Numerical analysis and application of large diameter cavity parallel cut blasting stress field in vertical shaft [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S1): 3223–3229. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0296.
- [7] LI M, ZHU Z M, LIU R F, et al. Study of the effect of empty holes on propagating cracks under blasting loads [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 103: 186–194. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.01.043.
- [8] 钟波波, 李宏, 张永彬. 爆炸荷载作用下岩石动态裂纹扩展的数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(6): 825–831. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)06-0825-07.
ZHONG B B, LI H, ZHANG Y B. Numerical simulation of dynamic cracks propagation of rock under blasting loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(6): 825–831. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)06-0825-07.
- [9] 张召冉, 陈华义, 矫伟刚, 等. 含空孔直眼掏槽空孔效应及爆破参数研究 [J]. *煤炭学报*, 2020, 45(S2): 791–800. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.1591.
ZHANG Z R, CHEN H Y, JIAO W G, et al. Rock breaking mechanism and blasting parameters of straight-hole cutting with empty-hole [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S2): 791–800. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.1591.
- [10] GAO J, XIE S Z, ZHANG X T, et al. Study on the 2D optimization simulation of complex five-hole cutting blasting under different lateral pressure coefficients [J]. *Complexity*, 2020, 2020: 40639518. DOI: 10.1155/2020/40639518.
- [11] 柴修伟, 李建国, 习本军, 等. 等体积空孔直眼掏槽槽腔形成过程及其分析 [J]. *爆破*, 2020, 37(4): 48–52. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2020.04.008.
CHAI X W, LI J G, XI B J, et al. Formation process and analysis of cavity by burn cut with equal volume empty hole [J]. *Blasting*, 2020, 37(4): 48–52. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2020.04.008.
- [12] 李启月, 吴正宇, 黄武林. 直眼掏槽空孔效应的计算模型改进与分析 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(5): 925–930. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2018.05.007.

- LI Q Y, WU Z Y, HUANG W L. Improvement and analysis of calculation model for empty hole effect in parallel cut [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(5): 925–930. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2018.05.007.
- [13] 关振长, 朱凌枫, 俞伯林. 隧道掘进排孔爆破的精细化数值模拟 [J]. *振动与冲击*, 2021, 40(11): 154–162. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.11.022.
- GUAN Z C, ZHU L F, YU B L. Fine numerical simulation of row-hole blasting in tunnel excavation [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(11): 154–162. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.11.022.
- [14] MA J, LI X L, WANG J G, et al. Numerical simulation on selection of optimal delay time for precise delay blasting [J]. *Shock and Vibration*, 2021, 2021: 4593221. DOI: 10.1155/2021/4593221.
- [15] 张学民, 周贤舜, 王立川, 等. 大断面隧道钻爆冲击波的衰减规律 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(2): 025101. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0045.
- ZHANG X M, ZHOU X S, WANG L C, et al. Attenuation of blast wave in a large-section tunnel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(2): 025101. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0045.
- [16] 左进京, 杨仁树, 肖成龙, 等. 煤矿井巷中空孔掏槽爆破模型实验研究 [J]. *矿业科学学报*, 2018, 3(4): 335–341. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2018.04.003.
- ZUO J J, YANG R S, XIAO C L, et al. Model test of empty hole cut blasting in coal mine rock drivage [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2018, 3(4): 335–341. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2018.04.003.
- [17] 冷振东, 范勇, 卢文波, 等. 孔内双点起爆条件下的爆炸能量传输与破岩效果分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(12): 2451–2462. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0474.
- LENG Z D, FAN Y, LU W B, et al. Explosion energy transmission and rock-breaking effect of in-hole dual initiation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(12): 2451–2462. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0474.
- [18] 雷振, 黄永辉, 陈文梦, 等. 爆炸冲击荷载下扩腔体积和能耗随抵抗线的变化规律研究 [J]. *振动与冲击*, 2021, 40(4): 66–71. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.04.010.
- LEI Z, HUANG Y H, CHEN W M, et al. A study on the variation of cavity volume and energy dissipation with resistance line under blast impact load [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(4): 66–71. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.04.010.
- [19] 李广涛, 乔登攀, 余贤斌, 等. 劈裂拉伸条件下大红山铜矿矿岩变形特性的试验研究 [J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(2): 463–467. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2017.02.013.
- LI G T, QIAO D P, YU X B, et al. Experimental investigation on the tensile deformation as a result of the brazilian test for the rocks of Dahongshan copper mine [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(2): 463–467. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2017.02.013.
- [20] WANG S, LI D Y, MITRI H, et al. Numerical simulation of hydraulic fracture deflection influenced by slotted directional boreholes using XFEM with a modified rock fracture energy model [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 193: 107375. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107375.
- [21] 吴再海, 安龙, 齐兆军, 等. 基于 LS-DYNA 与 PFC 联合的岩体爆破数值模拟方法分析 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(3): 609–614. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2020.0133.
- WU Z H, AN L, QI Z J, et al. The numerical simulation method of rock mass blasting based on PFC combined with LS-DYNA [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(3): 609–614. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2020.0133.

(责任编辑 王小飞)