

基于 FEM-SPH 耦合模拟的三维多空孔掏槽结构优化

杨金康¹, 李祥龙^{2,3}, 郇宝乾², 崔光久², 邓万成², 顾迎春⁴, 王小平⁵

(1.昆明理工大学 公共安全与应急管理学院, 云南 昆明 650093;

2.昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093,

3.云南省教育厅爆破新技术工程研究中心, 云南 昆明 650093;

4.玉溪矿业有限公司, 云南 玉溪 653405;

5.金川集团镍钴股份有限公司, 甘肃 金昌 737101)

摘要: 为解决巷道掘进过程中不合理的掏槽结构带来的循环进尺不足和炮孔利用率低等问题。基于空孔效应, 利用 FEM-SPH (Finite Element Method-Smooth Particle Hydrodynamics) 耦合数值模拟构建了三维掏槽爆破模型并进行仿真分析, 分析了不同掏槽布置方式对岩体损伤、抛掷效果及破碎形态的影响, 并结合工程现场试验分析爆后残孔深度与循环进尺进行验证。研究表明: 单中心装药孔+五空孔的掏槽结构的自由面数量适中, 应力波叠加更充分, 爆破效果更好; 五空孔的掏槽结构, 相较于四空孔与六空孔结构, 空孔模型的抛掷效果最佳, 爆后槽腔口尺寸分别提升了 42.5%和 20.3%, 槽腔剖面尺寸分别提升了 52.4%和 34.7%; 现场试验结果表明五空孔结构较四空孔与六空孔的掏槽结构循环进尺分别提升 10.2%和 3.2%。研究揭示了空孔数量与爆破效果之间的非线性关系, 适中的空孔数量可实现应力波叠加与能量集中的最优平衡, 为巷道掘进现场掏槽方案设计与优化提供依据。

关键词: 掏槽爆破; 空孔效应; 数值模拟; FEM-SPH; 现场试验

中图分类号: TD235 **国标学科代码:** 13015 **文献标志码:** A

Optimization and Engineering Application of Three-dimensional Multi-pore Groove Structure Based on FEM-SPH Coupling Simulation

YANG Jinkang¹, LI Xianglong^{2,3}, HUAN Baoqian², CUI Guangjiu², DENG Wancheng², GU Yingchun⁴, WANG Xiaoping⁵

(1. Faculty of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

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

3. Advanced Blasting Technology Engineering Research Center of Yunnan Province Education Department, Kunming 650093, Yunnan, China;

收稿日期: 2026-02-10; 修回日期: 2026-06-04

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);

作者简介: 杨金康 (2002-), 男, 硕士。E-mail: 18326862271@163.com;

通讯作者: 李祥龙 (1981-), 男, 博士, 教授。E-mail: lx100014002@163.com。

Abstract: To address the issues of insufficient cycle advance and low blast-hole utilization resulting from inappropriate cut blasting layouts during roadway excavation, the empty-hole effect was employed to establish a three-dimensional cut blasting model using FEM-SPH (Finite Element Method-Smooth Particle Hydrodynamics) coupled numerical simulation. In the numerical modeling, the rock mass was described by the RHT constitutive model, which accounts for strain-rate sensitivity and confinement effects under high-strain-rate loading. The explosive was modeled using the Jones–Wilkins–Lee equation of state. A central charged hole was surrounded by four, five, or six empty holes with a spacing of 210 mm determined theoretically. SPH particles were applied to the central zone to capture large deformation, fragmentation, and rock ejection, while the FEM was used for the outer region to reduce computational cost. Non-reflecting boundaries were set to avoid stress wave reflection. The model was then used to simulate and analyze the influence of different cut blasting arrangements on rock mass damage, rock throw efficiency, and fragmentation patterns. Furthermore, field engineering tests were conducted in a copper mine roadway to validate the simulation results by examining the residual hole depth after blasting and the cycle advance achieved. The research findings indicate that a cut blasting layout with one central charged hole and five empty holes provides a moderate number of free surfaces, allowing for more sufficient superposition of stress waves and resulting in better blasting performance. Compared to layouts with four or six empty holes, the five-empty-hole configuration demonstrates optimal rock throw effects, with the slot cavity opening size increasing by 42.5% and 20.3%, respectively, and the slot cavity cross-sectional size improving by 52.4% and 34.7%, respectively. Field test results show that the cycle advance achieved with the five-empty-hole layout is 10.2% and 3.2% higher than that of the four-empty-hole and six-empty-hole layouts, respectively. The research reveals a nonlinear relationship between the number of empty holes and blasting effects, demonstrating that a moderate number of empty holes achieves the optimal balance between stress wave superposition and energy concentration, providing a basis for the design and optimization of cut blasting schemes in roadway excavation.

Keywords: cutting out blasting; void effect; numerical simulation; FEM-SPH; field experiment

0 引言

钻爆法作为地下矿山巷道掘进的主要方法，其通过掏槽爆破形成槽腔，为后续爆破作业创造自由面，提供足够的补偿空间^[1]。受地下有限空间作业环境及爆破参数设计的影响，往往存在爆破循环进尺不足，炮孔利用率低等问题^[2]。掏槽爆破的效果决定了爆破循环的能量利用率和爆破效果，合理的掏槽方案不仅能够显著提高炮孔利用率和循环进尺，更有助于高效降低围岩扰动，确保开挖轮廓的稳定。而空孔能够改善槽腔应力场分布，因此探究布置不同数量空孔的掏槽结构对提高爆破效果有重要意义。

国内外学者针对空孔效应与布孔参数优化开展了诸多研究^[3]。在高地应力环境下，张宪堂等^[4]采用二阶分段楔形掏槽破岩，验证了通过增设空孔和空孔底部加装炸药来改善破岩效果。张召冉等^[5]通过理论结合算例验证，确定了含空孔直眼掏槽参数设计中孔距的决定因素。郭学庭等^[6]遵循体积法则对掘进巷道进行爆破方案优化，提高了炮孔利用率和单次循环进尺。李祥龙等^[7]研究了空孔间距对爆后成腔体积的影响并结合数值模拟，揭示了空孔间距与应力波叠加、反射拉伸效应之间的非线性关系；陶子豪等^[8]以空孔效应为基础结合数值模拟，揭示了空孔在应力导向、集中和提供补偿空间方面的作用机理；高轩等^[9]探讨了中心装药孔与两侧空孔的横向距离，确定了应力集中效应与岩石损伤连接性最佳的距离。另有学者借助数字激光动态焦散系统捕捉空孔缺陷对动态断裂的影响^[10, 11]，研究岩体的动态破碎过程。上述研究共同表明，通过对空孔的布置参数进行合理设计可以有效提升掏槽爆破效

果。

越来越多的学者利用数值模拟技术对爆破设计方案的效果开展模拟验证。有限元与离散元模型算法能够呈现爆破过程中应力波的传播以及损伤演化进程，对于探究空孔对爆破效果的影响具有显著成效^[12]。王勉等^[13]针对小断面巷道，构建了以临空面积和最小抵抗线为基础的孔间精确延时计算方法，并通过 GDEM 数值模拟验证了该方案能有效控制应力叠加、减少围岩扰动。何德福等^[14]基于 SPH 粒子法，对比分析直孔掏槽与楔形掏槽的爆破抛掷距离与最大峰值速度，发现楔形掏槽效果更优。ZHANG 等^[15]通过现场实验与数值模拟相结合，创新性提出在空孔底部设置装药并优化了起爆顺序；ZHAO 等^[16]提出了一种创新的“四装药孔、四空孔、一抛掷孔”（FCEO）掏槽爆破方法并验证了方法的可行性；ZHANG 等^[17]通过数值模拟分析了分段装药技术在中深孔直眼掏槽爆破中的应用，发现合理分段能有效提升破岩效果。CHENG 等^[18]提出了一种孔内延时楔形掏槽爆破新技术，研究发现其能有效提升深孔爆破进尺与炮孔利用率。

上述研究表明，现有掏槽爆破中对空孔效应的研究多聚焦于二维平面开展数值模拟与机理分析，基于传统有限元网格法构建数值模拟手段普遍存在，当处于高应力状态或承受剧烈爆破载荷联合作用时，有限元网格极易发生大畸变、沙漏效应乃至单元失效问题，难以精准还原爆破过程中岩体变形的动态行为，空孔周边应力集中、裂纹扩展与能量耗散的三维演化规律也未能得到充分揭示。本文以空孔效应为理论核心，采用有限元-光滑粒子流体动力学耦合（Finite Element Method-Smooth Particle Hydrodynamics, FEM-SPH）数值模拟方法，构建三维掏槽爆破模型，探究不同空孔数量的掏槽布置方式对爆破成腔、岩体破碎及抛掷效果的影响规律，优选出单中心装药孔+五空孔的最优掏槽结构，并通过现场工程试验对模拟结果进行全面验证。

1 空孔效应

掏槽爆破所形成的槽腔，增加了额外的自由面，为后续爆破创造了有利条件^[19]，掏槽形成的槽腔尺寸和深度间接影响整个断面的爆破效果，所以合理布置掏槽结构和进行参数设计对提升爆破效果有重要意义。由于直眼掏槽受岩石的夹制效应明显，因此大直径空孔直眼掏槽技术在地应力和坚硬岩石爆破工程中得到广泛应用^[20]。在爆破作业中，预留的空孔能够形成额外的临空面，引发空孔效应。以下将从应力波传播、自由面效应和应力集中效应对空孔效应进行分析^[21]。

1.1 自由面反射效应

如图 1 所示，依据霍金逊效应^[22]，在含空孔的掏槽爆破过程中，爆轰产生的高压应力波首先从装药孔向四周辐射，空孔作为人工自由面，将压缩应力波在其表面反射生成拉伸波，同时在孔壁周围引发应力集中效应。来自不同方向的应力波在岩石介质中相互叠加、干扰，极大地增强了孔间区域的拉应力场。最终，这种动态的应力叠加与集中效应，优先在装药孔与空孔的连心线方向上诱发并贯通拉伸微裂纹，从而定向引导爆生能量，有效形成初始的槽腔，并为后续岩石的充分破碎创造有利条件。

无论何种自由面，其大小取决于曲率半径，同一装药孔爆炸产生的应力波，在空孔的曲率半径较大的情况下，会产生更长的前波。如图 2 所示，当 $\widehat{ABC} < \widehat{A'B'C'}$ 时，空孔 II 的反射应力波范围更广，周围岩石的拉伸破坏范围也更大；另一方面，当装药孔附近存在线性自由面 l 和弧形自由面 l' ，假设岩石材料均匀，入射角为 α ，装药孔到两种自由面某点的距离相等时，到达自由面的应力波强度相同，同时会发生传播和反射现象，现只考虑反射波。根据应力波传播理论，反射应力波的强度与反射前的强度和入射角有关^[23]。当自由面分别为直线形和弧形时，入射角分别为 α 和 β ，由几何关系可知 $\beta = \alpha + \theta$ 。入射角大小与反射到岩体中的应力波强度成反比，因此直线形自由面比弧形自由面反射的应力波的强度衰减更加显著。随着空孔直径增大，反射应力波强度增大，拉伸破坏程度增加。因此，合理设置空孔的半径和数量可以提升爆破效果。

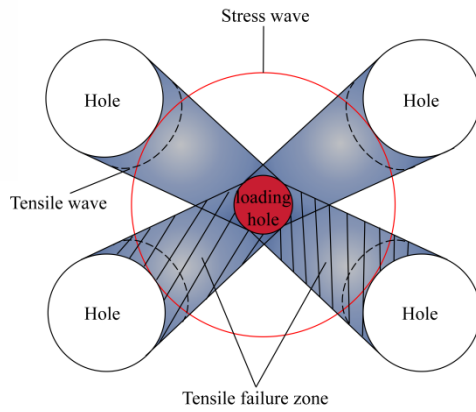


图1 应力波传播过程

Fig.1 Stress wave propagation process

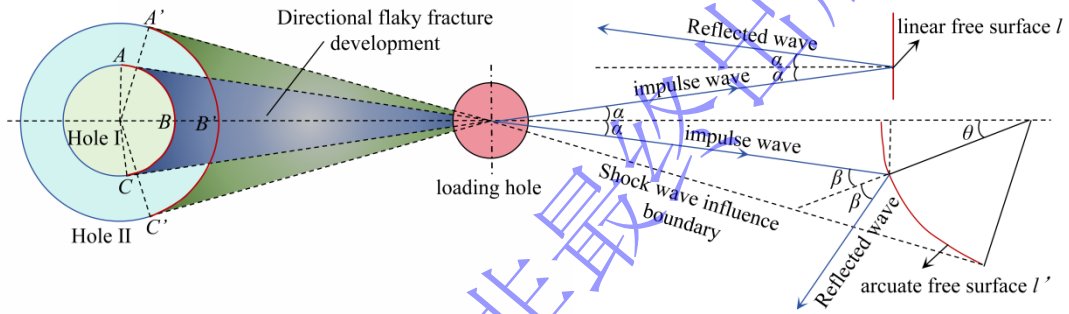


图2 自由面效应

Fig.2 Free surface effect

1.2 应力集中效应

如图3所示，炮孔起爆之后，空孔周围的岩体在爆破荷载的作用下会出现应力重分布现象。当应力波传播到空孔孔壁时，取空孔壁附近岩体单元进行应力状态分析，所选计算单元应力状态如式(1)所示^[24]。

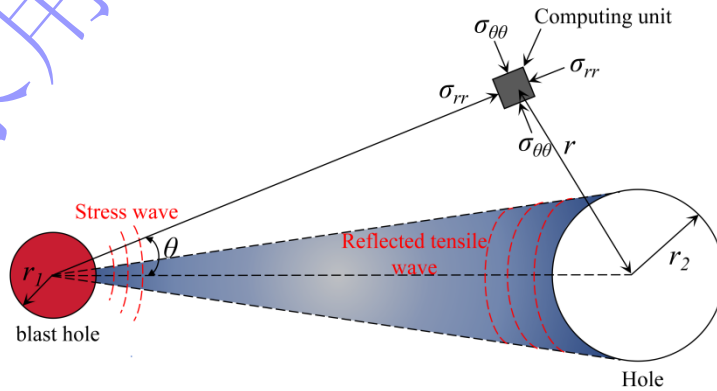


图3 空孔周围岩石单元受力分析

Fig.3 Force diagram of rock unit around pore

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{1}{2}[(1-k^2)(\sigma_\theta - \sigma_r) + (1-4k^2+3k^4)(\sigma_\theta \cos 2\theta + \sigma_r \cos 2\theta)] \\ \sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{2}[(1+k^2)(\sigma_\theta - \sigma_r) - (1+3k^2)(\sigma_\theta \cos 2\theta + \sigma_r \cos 2\theta)] \\ \tau' = \frac{1}{2}(1+2k^2-3k^4)(\sigma_\theta \cos 2\theta + \sigma_r \cos 2\theta) \\ k = \frac{r_2}{r} \end{cases} \quad (1)$$

式中： σ_{rr} 为应力重分布后径向应力； $\sigma_{\theta\theta}$ 为应力重分布后的切向应力； τ' 为应力重分布后的剪切应力； k 为比例系数； σ_θ 、 σ_r 分别为应力重分布前的切向应力和径向应力； θ 为计算单元与两孔间的夹角； r_2 为空孔半径； r 为计算单元与空孔的距离。

当计算单元取在空孔壁上，即 $r=r_2$ ， $\sigma_{rr}=0$ ， $\tau'=0$ ， $k=1$ ，存在切向最大应力 $\sigma_{\theta\theta\max}$ ，其表达式为：

$$\sigma_{\theta\theta\max} = (1-3\lambda_d)p_0 \left(\frac{r_1}{L-r_2} \right)^\alpha \quad (2)$$

式中： λ_d 为炮孔内壁应力系数； p_0 为装药孔初始压力； L 为炮孔与空孔间距； α 为应力波衰减系数。

由式(2)可知，切向应力的最大值受到爆破荷载强度和从装药孔到空孔爆炸面距离的影响。因此，当装药孔半径和爆破荷载不变时，空孔半径越大，装药孔到空孔爆炸面的距离越小。随着切向应力增加，空孔效应更加明显，岩石破坏程度更大。

2 孔间距确定

如图4所示，炮孔与空孔的位置不同对应不同的变形特征，起爆后装药孔与相邻空孔之间的岩体将按顺序经历变形、贯穿、破碎直至抛掷的动态响应过程^[25]。理论上，为保障槽腔内岩石被充分破碎并有效抛出，空孔与装药孔的间距应严格设置在“抛掷区”的作用半径内。

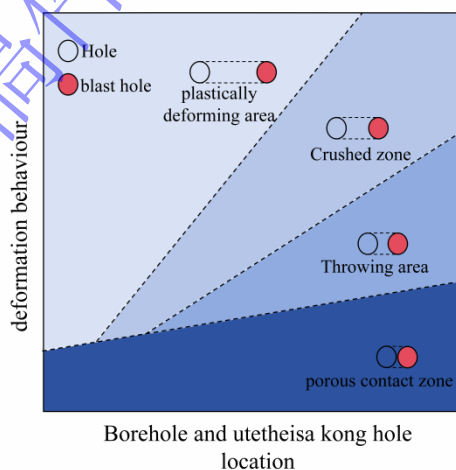


图4 不同孔间距下岩体的变形特征

Fig. 4 Deformation characteristics of rock mass under different hole spacing

装药孔起爆后可以看作等熵绝热膨胀过程，爆生气体产生的压力为^[26]：

$$p_0 = \frac{\rho_e VOD^2}{2(\gamma+1)} \left(\frac{D_e}{D_b} \right)^{2\nu} \quad (3)$$

式中： P_0 为爆生气体产生的压力； ρ_e 为炸药密度； VOD 为爆轰速度； D_e 为药卷直径； D_b 为炮孔直径； γ 为比热容比； ν 为绝热膨胀常数。

起爆后炮孔内某点的压力可以表示为：

$$p = p_0 \left(1 + \frac{4na_0y}{\pi D^2 L_p} \right)^{-\gamma} \quad (4)$$

式中： p 为起爆后炮孔内某点的压力； n 为炮孔周围主裂纹数目； a_0 为裂纹宽度； y 为裂纹长度； D 为起爆后炮孔的直径； L_p 为装药长度。

当 $p \geq \sigma_{id}$ 岩石的动态抗拉强度时裂纹开始扩展，结合式(4)可得爆生气体作用产生的裂纹长度 y 为：

$$y = \frac{1}{4a_0n} \left\{ \pi D^2 \left[\left(\frac{p_0}{\sigma_{id}} \right)^{1/\gamma} - 1 \right] \right\} \quad (5)$$

现场采用 1#乳化炸药，令 $a_0=1.5\text{mm}$ ； $n=8^{[27]}$ ；不耦合装药时 D 等于炮孔直径，取 40mm ； $P_0=590\text{MPa}$ ； $\gamma=3.0$ ，代入式(5)，得 $y \approx 210\text{mm}$ ，故空孔距中心装药孔距离应设置为 210mm 。现场掏槽布置如图 5 所示。

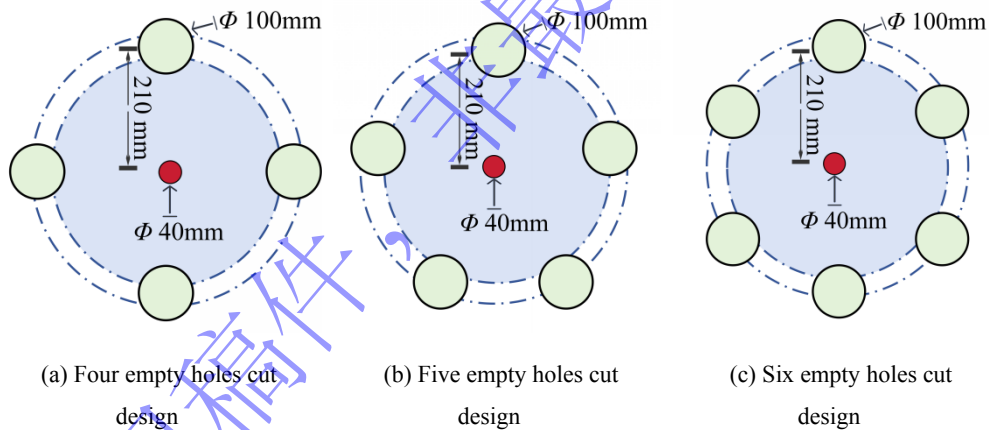


图 5 不同数量空孔掏槽参数

Fig. 5 Cut blasting parameters with different numbers of empty holes

3 数值模拟

基于空孔效应与应力波传播效应提出的掏槽结构和布孔参数是否可行有待验证，在进行现场试验验证前，对三种不同的掏槽结构的爆破效果进行模拟计算，以分析其可行性。本文通过 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件中 FEM-SPH 耦合对不同数量空孔的掏槽结构的爆破损伤效果模拟。

3.1 计算模型与参数

首先在 LS-Dyna 建立 FEM 网格，通过 LS-propost 将包含部分岩石与炸药的网格模型进行粒子化。将 SPH 与 FEM 结合，FEM 模拟外侧岩石部分，SPH 模拟内部岩石、炸药和填塞部分，通过 *CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE_FAILURE 关键字在 SPH 粒子与 FEM 单元间建立接触，确保模拟过程中应力在两部分间的连续传播。在模型外侧通过

*CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE_FAILURE 关键字设置无反射边界条件，避免应力波在边界发生反射干扰模拟结果。

建模过程中，岩石部分采用 RHT 本构模型，该模型能较好地描述岩石材料在高应变率和大变形下力学特性的连续损伤^[28]，不仅考虑了应变率、围压对强度的显著影响，还将损伤演化与塑性变形耦合，能模拟材料在高压下的孔隙压实效应，具有高精度性与可靠性。RHT 本构模型参数中岩石强度、弹性模量和泊松比通过室内试验获得，其他参数引用参考文献^[29]，单位制为 cm-g- μ s，具体参数如表 1 所示。

表 1 RHT 模型计算参数

Table 1 RHT model calculation parameters

$\rho_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	B_0	B_1	T_1/GPa	F_S^*	F_T^*	Q_0	F_C/MPa
2700	1.68	1.68	0.8671	0.38	0.1	0.64	8.3E-4
A	B	N	E_C	D_1	D_2	A_1	A_2
1.6	0.0105	0.6	3.E+19	0.04	1.0	0.8671	1.4567

注： ρ_0 为材料密度； B_0, B_1, T_1 为状态方程参数； F_S^* 和 F_T^* 为剪压强度比和拉压强度比； Q_0 为拉压子午比参数； F_C 为单轴抗压强度； A, B 和 N 分别为失效面参数，罗德角相关系数和失效面指数； E_C 为断裂压缩应变率； D_1 和 D_2 为损伤参数，损伤指数； A_1 和 A_2 为 Hugoniot 多项式参数。

炸药模型通过 JWL 状态方程描述，当炸药在装药孔中引爆时，会立即引发剧烈的化学反应。这些炸药从高密度的固态物质瞬间转化为高温高压的气体。JWL 状态方程^[30]作为一种高能燃烧模型，具备预测爆炸引发的大范围压力变化的能力，故而在数值模拟领域得到广泛应用。JWL 状态方程如下^[31]：

$$P_e = \alpha \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + \beta \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (6)$$

其中 P_e 为爆生压力， V 为爆炸产物相对体积， E_0 为爆炸初始内能， α, β, R_1, R_2 和 ω 为常数。炸药参数如表 2 所示^[32]。

表 2 炸药参数

Table 2 explosive parameters

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	P/GPa	α/GPa	β/GPa
1140	4780	3	3.264	0.058
R_1	R_2	ω	E_0/GPa	V
5.8	1.56	0.57	0.0856	1.0

填塞部分选用 MAT_SOIL_AND_FOAM 材料模型，并依据相关文献确定了其参数，具体数值见表 3^[8]。

表 3 MAT_SOIL_AND_FOAM 材料参数

Table 3 Material parameters of MAT_SOIL_AND_FOAM

$\gamma_{\text{sat}} / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	G_s / MPa	K / MPa	$A_0 \sim A_2 / \text{MPa}$	p_i / MPa
17	2.524	4673	0.001, 0.0049, 0.0079	-0.005

注： γ_{sat} 为饱和容重； G_s 为剪切模量； p_i 为拉伸断裂压力阈值。

三种不同数量空孔的掏槽结构计算模型如图 6 所示，所构建整体模型为 500cm×500cm×400cm 的长方体，粒子化为中心 200cm×200cm×350cm 的区域。中心装药孔深度 340cm，填塞 40cm；周边装药孔孔深 340cm，填塞 70cm。装药孔直径为 4cm，药卷直径 3.2cm，空孔直径 10cm，SPH 粒子半径

为 3cm。

3.2 模拟结果

在 LS-propost 软件中，将模型沿着 X-Z 平面进行切割处理，通过对比岩体损伤大小判断爆破效果；对模拟中抛掷出的粒子数量进行统计对比分析出爆破抛掷效果；依据损伤程度大小对岩体进行选择，对比分析爆后槽腔体积。通过对爆破过程中岩石材料损伤云图和抛掷粒子数量及槽腔尺寸的分析探究不同掏槽结构对掏槽爆破的影响。

3.2.1 岩体损伤演化分析

三种不同数量空孔的辅助掏槽结构爆破后损伤云图如图 7 所示，基于模型的损伤程度对比分析不同掏槽结构的爆破效果。

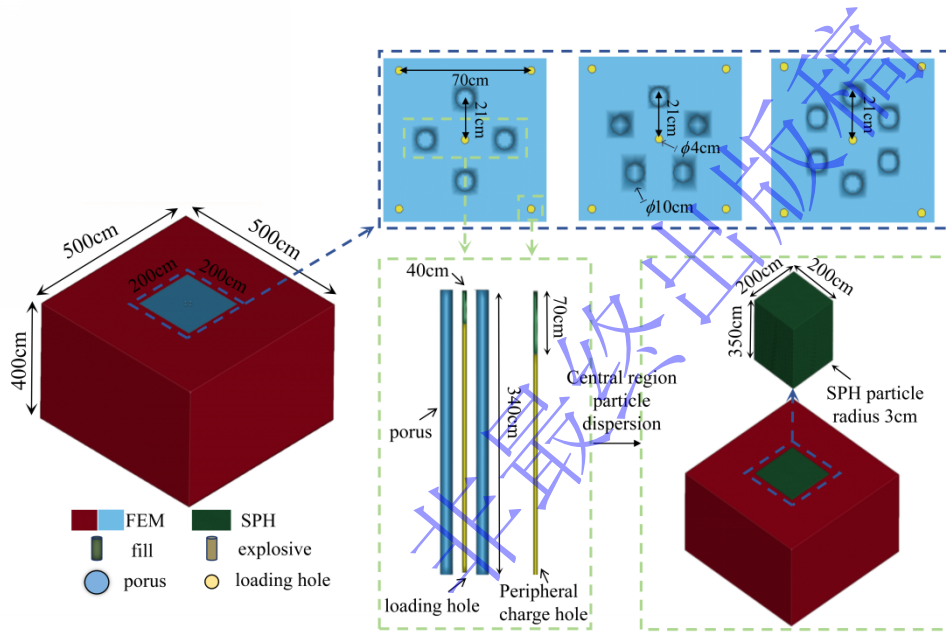


图 6 SPH-FEM 计算模型

Fig. 6 SPH-FEM computational model

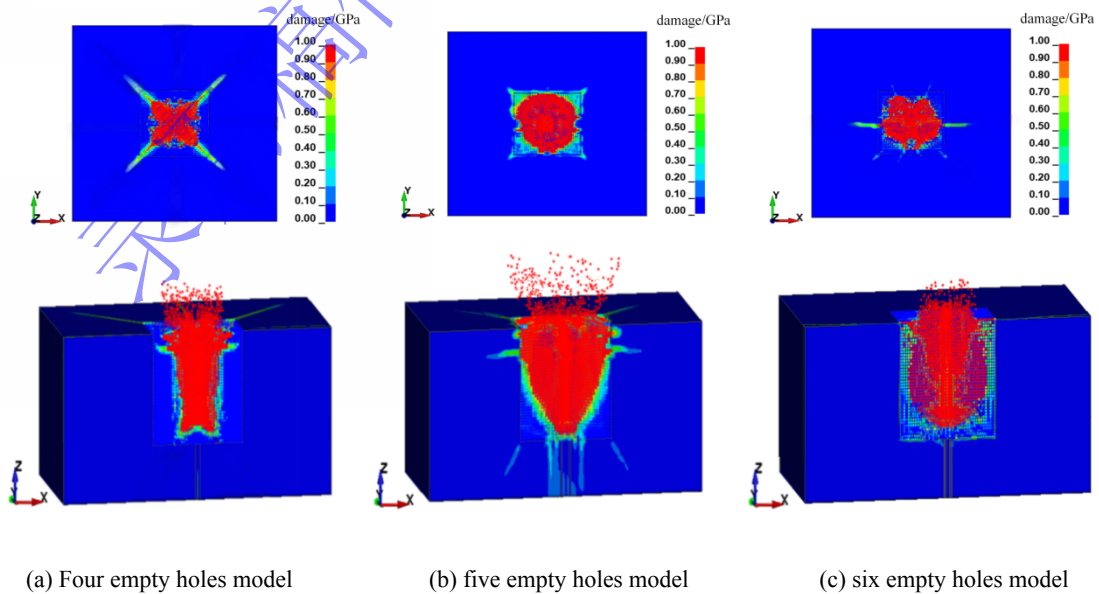


图7 不同空孔数量辅助掏槽结构损伤云图

Fig.7 Damage contours of auxiliary cut structures with different numbers of empty holes

由累积损伤云图对三种掏槽结构爆破模拟结果进行分析可得，四空孔的掏槽结构损伤区域呈放射状，连通性较差，未形成完整的环形破碎带，整体损伤值偏低，累积损伤云图红色区域较小，处于中低损伤水平，掏槽效果不理想，自由面不足导致应力波叠加不充分，掏槽槽腔破碎程度较差；五空孔结构损伤区域连续、均匀且形状规则，形成了完整的环形贯通损伤带，空孔之间的岩体也充分破碎，累计损伤云图中心区域呈现大范围的红色，掏槽槽腔岩石高度破碎，该结构在自由面数量与能量集中达到平衡，应力波反射叠加充分，爆生气体有效作用于破碎岩体的抛掷，有利于形成破碎效果好的槽腔；六空孔损伤区域分布均匀性差，部分区域损伤连通性较弱，累积损伤云图损伤范围较大，但高损伤区域较为分散且不连续，过多的空孔导致爆炸能量过度分散，应力波在多个自由面上耗散，不能集中作用于关键区域，虽然破碎范围大，但能量利用率低，难以形成稳定的抛掷通道，掏槽效果不均衡。

通过对累积损伤云图进行损伤区域的损伤强度和连通、均匀性对比分析可知，五空孔辅助掏槽结构破碎更加充分、均匀，能量利用均衡。

3.2.2 抛掷效果分析

爆后抛掷效果如图8所示，对抛掷出的粒子数量进行统计，以时间为横坐标，自由面上抛掷出的粒子数为纵坐标对三种掏槽模型的抛掷粒子数量进行对比分析。

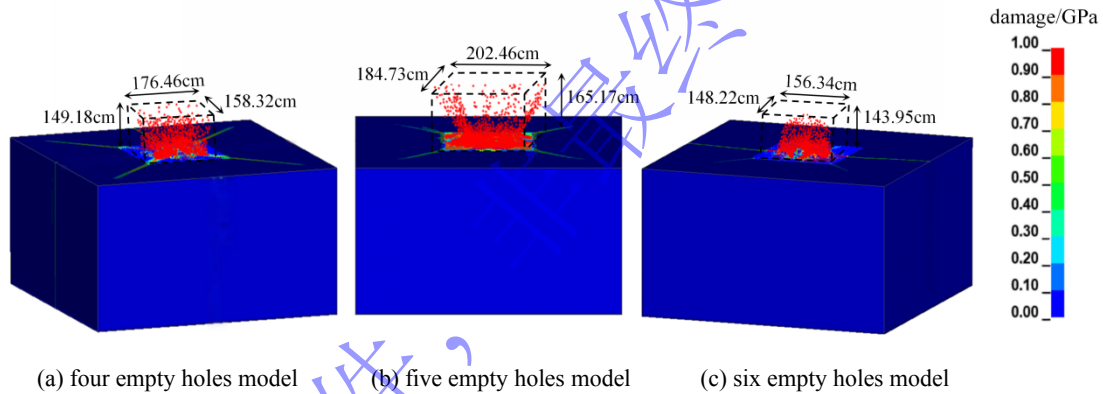


图8 抛掷粒子形态图

Fig.8 Morphology of ejected particles

由图9可以看出，在0~1.2ms内三种模型均无粒子抛出，起爆后爆炸能量以应力波的形式作用于岩石，岩石产生损伤并萌生裂纹，岩石单元经历短暂的损伤累积过程，最后受到爆生气体准静态膨胀压力作用发生抛掷现象。四空孔模型由于空孔数量较少，爆破能量受限，爆破后期抛掷粒子数仅为4749，抛掷效果较差。五空孔模型空孔数量适中，爆破能量使岩体充分破碎，破碎岩石在1.2~13ms内高效抛掷出槽腔，爆破后期同一时间抛掷粒子数达到5492，抛掷效果较四空孔模型提升15.6%，抛掷效果较优。六空孔模型空孔数量最多，自由面较多导致能量难以集中释放，爆生气体的作用时间较短，后期同一时间抛掷粒子数为4967，五空孔模型粒子抛掷效果相较于六空孔提升10.6%，且五空孔的打孔成本更低。

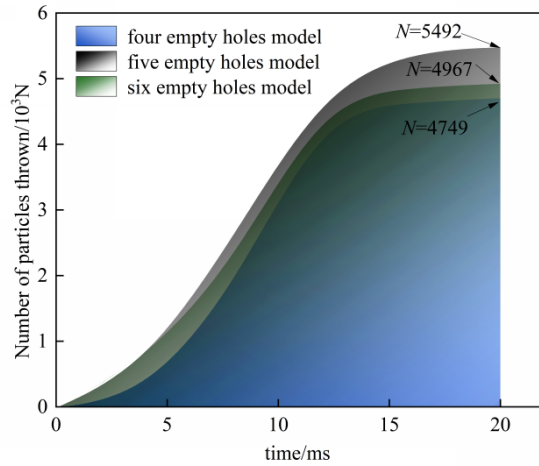


图9 不同时刻抛掷粒子数对比图

Fig. 9 Comparison of ejected particle counts at different times

综合以上分析，五空孔模型的抛掷效果最佳，空孔数量适中，能量利用更加充分，作用时间更长。

3.2.3 爆后槽腔尺寸分析

根据损伤程度对模型进行筛选，如图 10 所示，对损伤程度在 0.9~1.0 的模型区域进行选取，通过比较三种模型的槽腔尺寸，对爆破效果进行评估。为更加清晰对比不同模型的槽腔尺寸差异，分别将三种模型爆后槽腔的槽腔口与槽腔剖面轮廓绘制在同一坐标系中，如图 11 所示。

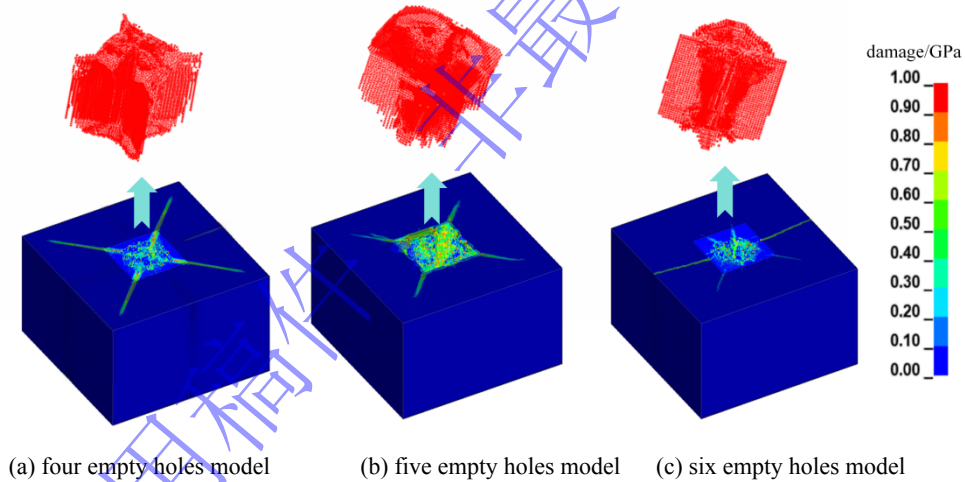


图10 槽腔三维形态

Fig. 10 3D morphology of cut cavity

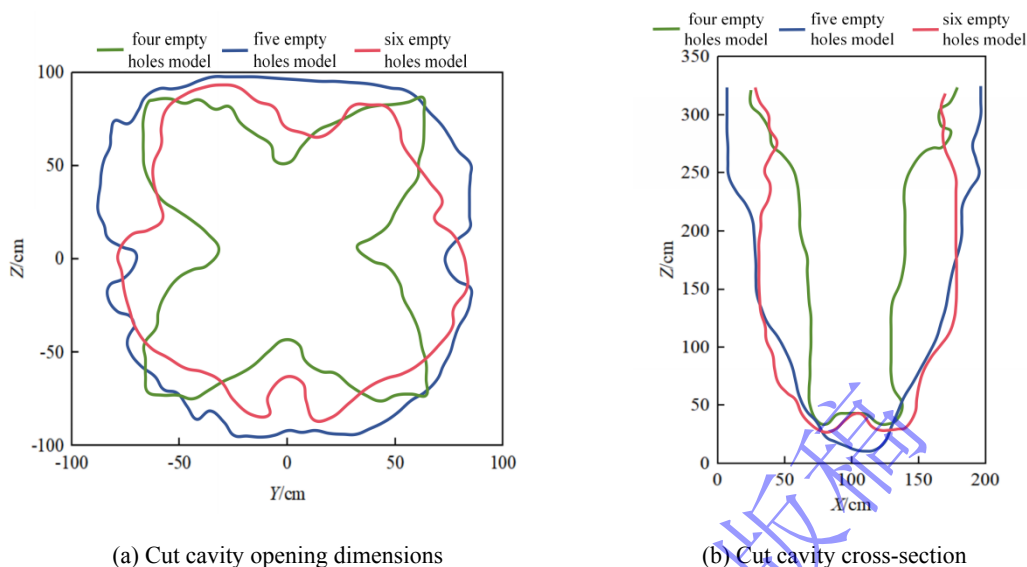


图 11 槽腔口与槽腔剖面形态对比

Fig. 11 Comparison of cut cavity opening and cavity cross-section morphology

对比图 10(a)、(b)、(c)可知四空孔模型槽腔尺寸最小，空孔方向的破碎区未完全贯通，槽腔形态呈放射状，由于自由面不足，爆破产生的能量不能充分作用于岩石，槽腔发育不完全，难以为后续爆破工作形成良好的临空面；五空孔模型槽腔尺寸大且形状规则，应力波充分叠加作用于岩体，使岩体充分破碎，形成理想的槽腔；六空孔模型槽腔尺寸大，但形态不均匀，损伤连通性较差，可能出现局部岩体过破碎，导致能量利用率下降，同时不规则的槽腔会影响后续的爆破工作。

从图 11(a)可以看出四空孔和六空孔模型槽腔口形状不规则，而五空孔模型槽腔口形状较为规则，近似圆形。如图 12 所示，三种模型爆后槽腔口面积分别为 1.62m^2 、 2.31m^2 和 1.92m^2 ，五空孔模型槽腔口面积较四空孔和六空孔模型分别提升 42.5%和 20.3%；图 11(b)显示，四空孔模型的槽腔剖面尺寸最小，五空孔与六空孔模型剖面尺寸相近，但五空孔模型剖面形状更加规则，对三种模型剖面形状面积进行估算，如图 13 所示，得出三种模型的剖面面积分别为 2.88m^2 、 4.39m^2 和 3.26m^2 ，五空孔模型槽腔剖面面积较四空孔和六空孔模型分别提升 52.4%和 34.7%，对比分析可知五空孔模型的槽腔效果最佳。

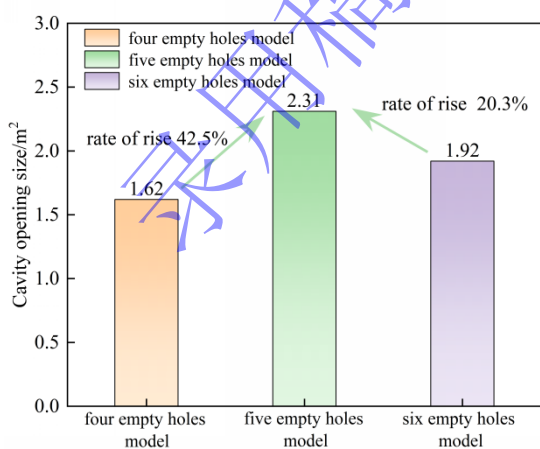


图 12 槽腔口尺寸对比

Fig.12 Comparison of cut cavity opening dimensions

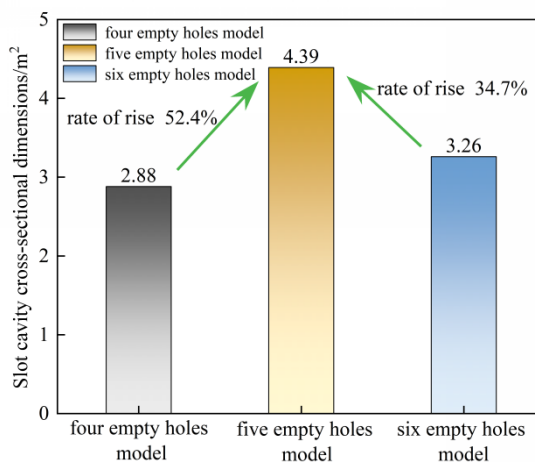


图 13 槽腔剖面尺寸对比

Fig.13 Comparison of cut cavity cross-section dimensions

由图 14 可知，三种不同模型爆后槽腔深度分别为 299cm、330cm 和 309cm，五空孔模型槽腔深

度最大，因此可推测出该掏槽结构循环进尺效果更优。

对比分析三种模型数值模拟结果的损伤云图、抛掷粒子数量和槽腔尺寸，五空孔模型的爆破效果最佳，如表 4 所示，可知五空孔模型自由面数量合理，应力波叠加促使岩体实现充分破碎，爆生气体作用时长较长，此时爆破效果达到最优状态。

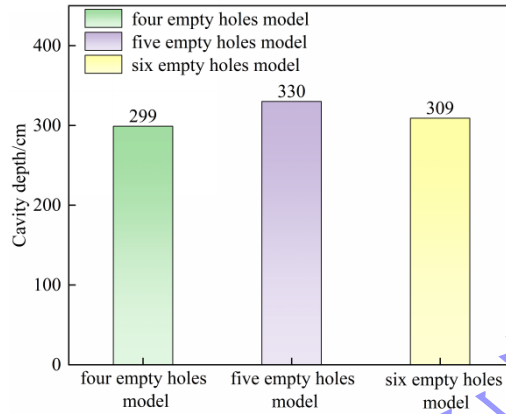


图 14 槽腔深度对比

Fig. 14 Comparison of Slot Cavity Depth

表 4 模拟结果对比

Table 4 Comparison of simulation results

	抛掷粒子数/个	槽腔口尺寸/m ³	槽腔剖面尺寸/m ³	槽腔深度/cm
四空孔模型	4749	1.62	2.88	299
五空孔模型	5492	2.31	4.39	330
六空孔模型	4967	1.92	3.26	309

4 工程验证

4.1 工程概况

试验场地选择在某铜矿西矿段 470 措施干线，岩体的普氏系数 $F=4\sim6$ ，围岩稳定性差，现场试验采用光面爆破进行掘进工作，对三种掏槽结构方案进行验证。

4.2 掏槽爆破试验方案

断面为尺寸为 $4.35\times 3.7\text{m}$ ，打孔方式采用大空孔直眼掏槽，掏槽孔布置如表 5 所示，全断面炮孔布置图如图 15 所示。

表 5 掏槽孔爆破装药参数

Table 5 Blasting charge parameters for cut holes

断面	掏槽孔孔径/mm	空孔孔径/mm	炮孔与空孔的距离/mm	掏槽孔孔深/m	其他孔孔深/m
$4.35\text{m}\times 3.7\text{m}$	40	100	210	3.4	3.3

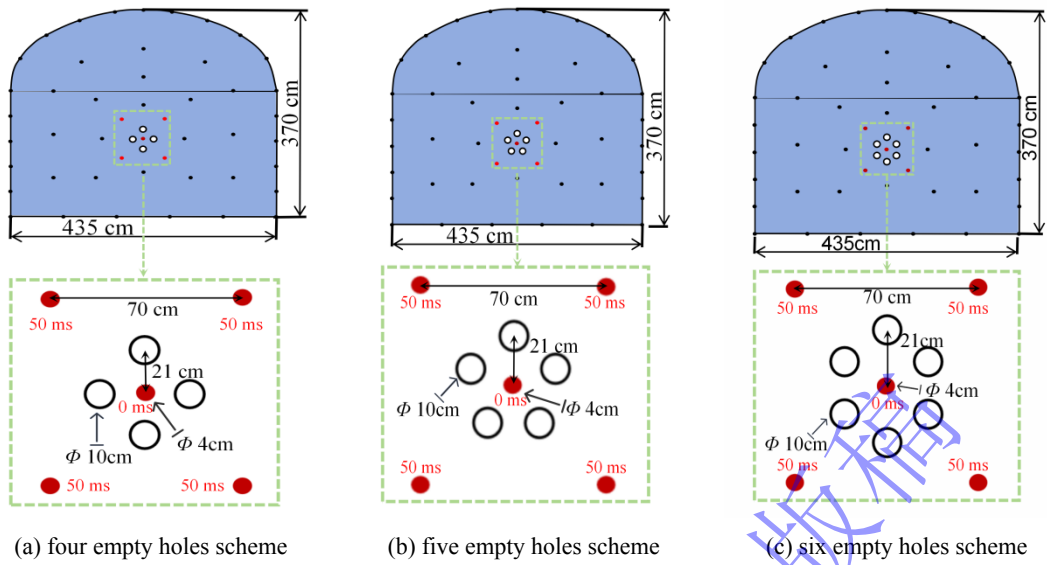


图 15 全断面炮孔布置图

Fig. 15 Full-face borehole layout diagram

使用 1#岩石乳化炸药，炸药参数如表 6 所示，装药完成后用炮泥填塞，中心装药孔及周边装药孔装药结构如图 16 所示。

表 6 炸药性能参数

Table 6 explosive performance parameters

炸药密度/kg·m ⁻³	爆速/m·s ⁻¹	爆压/GPa	猛度/mm	药卷直径/mm	药卷长度/mm	炸药质量/g
1140	4780	3	12	32	300	300

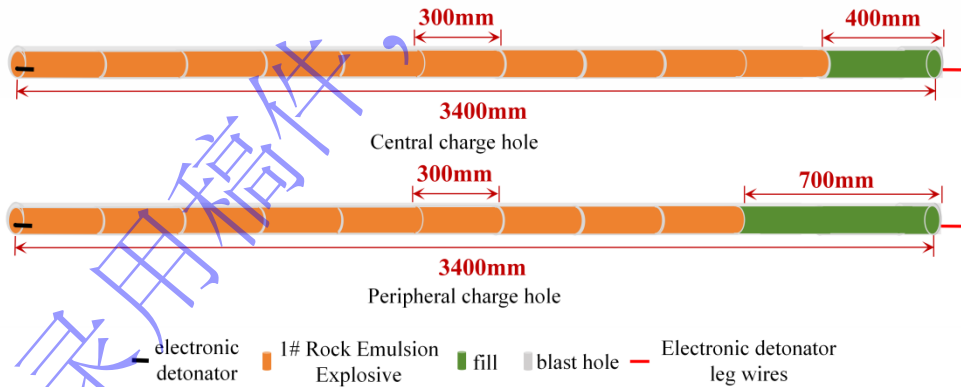


图 16 中心掏槽孔装药结构

Fig. 16 Charging structure of central cut holes

4.3 爆后效果分析

现场掏槽结构及残孔深度测量如图 17 所示，四空孔方案爆后轮廓顶板部分不平整，存在超欠挖现象，残孔数量较多；五空孔方案轮廓平整，残孔数量少，成型效果好；六空孔方案右帮存在超欠挖现象，存在少量残孔。

Cutting hole

Residual hole depth measurement

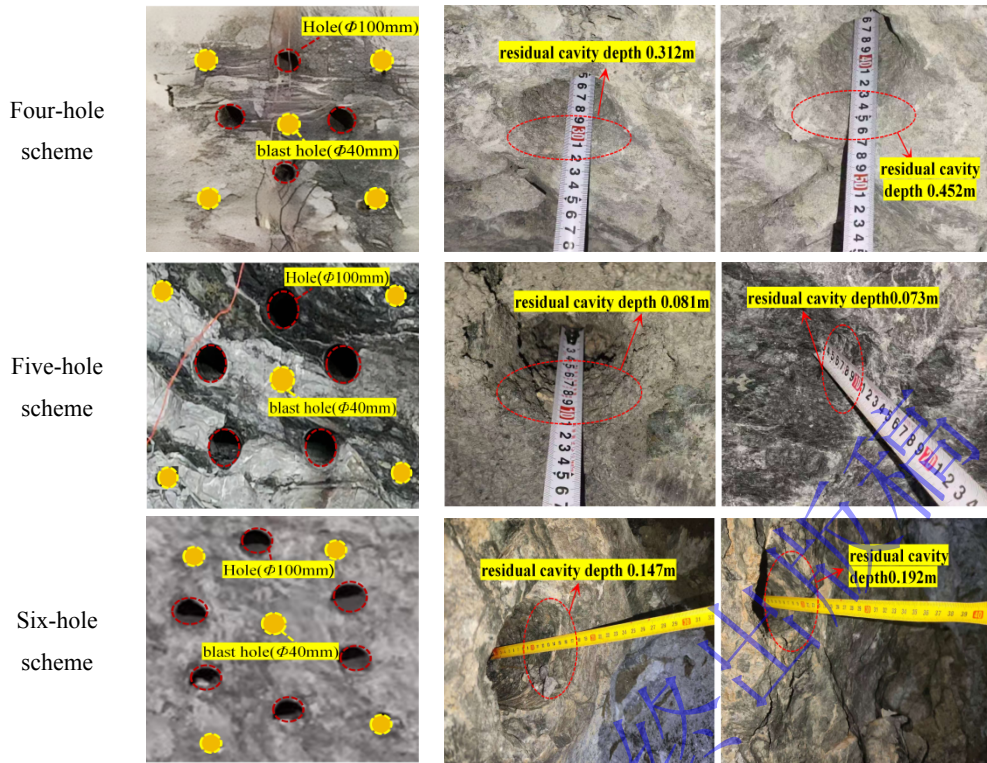
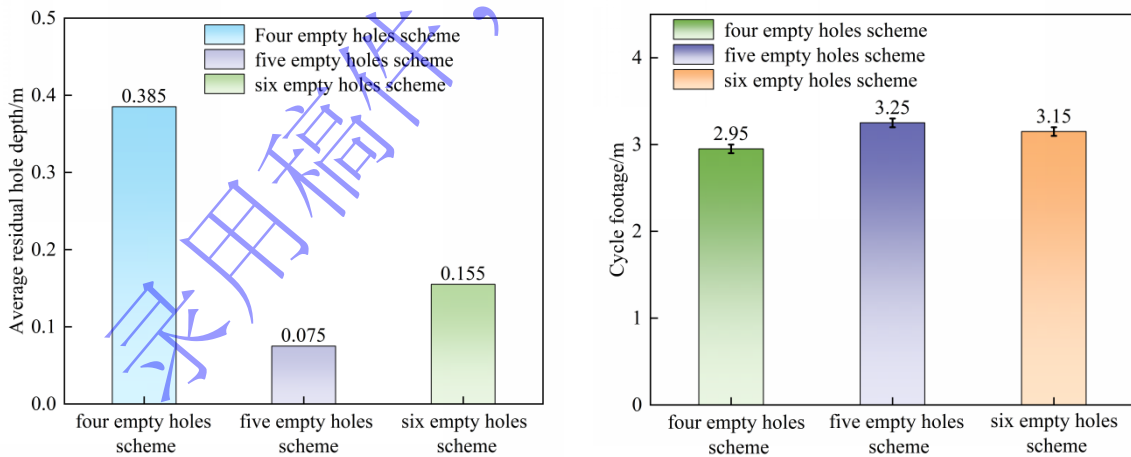


图 17 爆破效果对比

Fig. 17 Comparison of field excavation footage

对残孔深度进行测量得，如图 18 所示，四空孔方案的平均残孔深度为 0.385m，整体的循环进尺 2.9~3.0m；五空孔方案的平均残孔深度为 0.075m，整体的循环进尺 3.2~3.3m；六空孔方案的平均残孔深度为 0.155m，整体的循环进尺为 3.1~3.2m。五空孔方案的循环进尺较四空孔和六空孔方案分别提升 10.2%和 3.2%，爆破效果最佳。



(a) Comparison of average remaining hole depth

(b) Comparison of excavation cycle footage

图 18 不同方案爆破效果对比

Fig. 18 Comparison of blasting effects for different schemes

5 结论

本文采用三维数值模拟与现场试验验证分析方法,研究了三种直孔掏槽方式的空孔数量对掏槽爆破效果的影响特征,得出以下结论:

1) 基于 FEM-SPH 耦合数值模拟,从二维到三维揭示四空孔、五空孔和六空孔的单中心装药孔的掏槽结构对爆破效果的影响。结果表明,五空孔结构的自由面数量适中,应力波叠加更为充分,爆破效果最为理想。

2) 模拟结果显示,五空孔模型的抛掷效果相比于四空孔与六空孔模型分别提升 15.6%和 10.6%,综合抛掷效果最佳。同时,五空孔模型的槽腔口尺寸较其他两个模型分别提升了 42.5%和 20.3%,槽腔剖面尺寸分别提升了 52.4%和 34.7%。

3) 现场试验结果表明,五空孔结构爆后轮廓平整,残孔数量最少,整体循环进尺最大,较四空孔与六空孔的掏槽结构循环进尺分别提升 10.2%和 3.2%,进一步验证了五空孔掏槽结构的优势,提升了掘进的效率,节约了矿山的生产成本,具有显著的工程应用价值。

参考文献

- [1] 王平, 倪世忠, 程爱平, 等. 多空孔直眼掏槽爆破参数优化研究[J]. 爆破, 2025: 1-16. DOI:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.01.001.
WANG P, NI S Z, CHENG A P, et al. Study on Optimization of Blasting Parameters of Multi-hole Straight Cut Blasting[J]. Blasting, 2025: 1-16. DOI:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.01.001.
- [2] KAI L, QIYUE L, CHENGQING W, et al. Influence of In-Situ Stress on Cut Blasting of One-Step Raise Excavation Using Numerical Analysis Based on a Modified Holmquist-Johnson-Cook Model[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2023,16(9). DOI:10.3390/MA16093415.
- [3] 冷振东, 张程娇, 邓小英, 等. 台阶爆破工业电子雷管精确延时爆破设计与应用[J]. 工程爆破, 2024,30(05): 216-225. DOI:10.19931/j.EB.20240178.
LENG Z D, ZHANG C J, DENG X Y, et al. Design and application of precise delayed blasting for bench blasting with industrial electronic detonators[J]. Engineering Blasting, 2024, 30(05): 216-225. DOI:10.19931/j.EB.20240178.
- [4] 张宪堂, 王佃飞, 齐宁宁, 等. 深部岩巷二阶分段楔形掏槽爆破损伤特征与成腔优化研究[J]. 煤炭科学技术, 2025: 1-10. DOI:10.12438/cst.2025-0974.
ZHANG X T, WANG D F, QI N N, et al. Study on damage characteristics and cavity formation optimization of second order piecewise wedge cutting blasting in deep rock tunnel[J]. Coal Science and Technology, 2025: 1-10. DOI:10.12438/cst.2025-0974.
- [5] 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.
- [6] 郭学庭, 李腾, 王乃伟, 等. 掘进巷道节理组分析及爆破参数优化分析[J]. 矿冶工程, 2021,41(04): 24-28. DOI:10.3969/j.issn.0253-6099.2021.04.006.
GUO X T, LI T, WANG N W, et al. Analysis of Joint Group in Excavation Roadway and Optimization of Blasting Parameters[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(04):24-28. DOI:10.3969/j.issn.0253-6099.2021.04.006.
- [7] 李祥龙, 张志平, 王建国, 等. 双空孔间距对爆破槽腔断面大小的影响[J]. 爆炸与冲击, 2022,42(11): 133-144. DOI:10.11883/bzycj-2021-0471.
LI X L, ZHANG Z P, WANG J G, et al. Influence of double empty hole spacing on section size of blasting chamber[J].

- Explosion and Shock Waves, 2022, 42(11): 133-144.**DOI**:10.11883/bzycj-2021-0471.
- [8] 陶子豪, 李祥龙, 胡启文, 等. 掏槽爆破成腔空孔效应数值模拟研究与分析[J]. 兵工学报, 2024,45(12): 4246-4258.**DOI**:10.12382/bgxb.2024.0250.
- TAO Z H, LI X L, HU Q W, et al. Study and Analysis on Numerical Simulation of Empty Hole Effect Induced by Cutting Blasting[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(12): 4246-4258. **DOI**: 10.12382/bgxb.2024.0250.
- [9] 高轩, 尹训江, 王帅帅, 等. 铁路隧道机械化装药掏槽爆破参数的优化[J]. 爆破器材, 2025,54(04): 46-54.**DOI**:10.3969/j.issn.1001-8352.2025.04.008.
- GAO X, YIN X J, WANG S S, et al. Optimization of cut blasting parameters for mechanized charging in railway tunnels[J]. Explosive Materials, 2025, 54(04): 46-54. **DOI**: 10.3969/j.issn.1001-8352.2025.04.008.
- [10] XUDONG L, KEWEI L, JIACAI Y, et al. Numerical study on the effect of in-situ stress on smoothwall blasting in deep tunnelling[J]. Underground Space, 2023,11: 96-115.**DOI**:10.1016/J.UNDSP.2022.11.003.
- [11] MANCHAO H, AIPENG G, ZHIGANG M, et al. Impact and explosion resistance of NPR anchor cable: Field test and numerical simulation[J]. Underground Space, 2023,10: 76-90.**DOI**:10.1016/J.UNDSP.2022.10.001.
- [12] HAO Z, TINGCHUN L, Du Yiteng, et al. Theoretical and numerical investigation of deep-hole cut blasting based on cavity cutting and fragment throwing[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2021,111.**DOI**:10.1016/J.TUST.2021.103854.
- [13] 王勉, 王建国, 马军, 等. 小断面巷道精确延时逐孔起爆技术[J]. 兵工学报, 2025,46(03): 245-256.**DOI**:10.12382/bgxb.2024.0418.
- WANG M, WANG J G, MA J, et al. Precise delay per-hole initiation technology in small cross-section roadway[J]. Acta Armamentarii, 2025, 46(03): 245-256. **DOI**: 10.12382/bgxb.2024.0418.
- [14] 何德福, 张智宇, 王凯, 等. 基于 SPH 粒子法的巷道掘进爆破掏槽方式对比性研究[J]. 工程爆破, 2025,31(04): 85-92.**DOI**:10.19931/j.EB.20240208.
- HE D F, ZHANG Z Y, WANG K, et al. Comparative study on excavation methods of tunnel excavation blasting based on SPH particle method[J]. Engineering Blasting, 2025, 31(04): 85-92. **DOI**: 10.19931/j.EB.20240208.
- [15] ZHANG X, YOU S, YANG Y, et al. Cut Blasting Optimization Using 3D Laser Scanning and Numerical Simulation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024,58(2): 1-20.**DOI**:10.1007/S00603-024-04237-2.
- [16] ZHAO J, LI D, RANJITH P G, et al. Innovative cut blasting method for rock excavation at depth based on numerical simulation and field tests[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2025,155(P1): 106211.**DOI**:10.1016/J.TUST.2024.106221.
- [17] ZHANG X, WANG F, BAI Z, et al. Numerical Simulation on Medium-Deep Hole Straight Cut Blasting Based on the Principle of Segmented Charging[J]. Symmetry, 2024,16(11): 1536.**DOI**:10.3390/sym16111536.
- [18] BING C, QUAN W, HAIBO W, et al. Research on the mechanism and application of wedge cutting blasting with hole-inner delay[J]. Scientific Reports, 2024,14(1): 11383.**DOI**:10.1038/s41598-024-62318-2.
- [19] CHENGXIAO L, RENSHU Y, YANBING W, et al. Theory and numerical simulation of deep hole cut blasting based on dispersed charge and staged detonation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023,169.**DOI**:10.1016/J.IJRMMS.2023.105453.
- [20] 黄宝龙. 大直径中空直眼掏槽技术在隧道救援中的应用[J]. 爆破, 2018,35(04): 74-77.**DOI**:10.3963/j.issn.1001-487X.2018.04.013.
- HUANG B L. Application of Parallel Cut Blasting with Large Empty Hole in Tunnel Rescue[J]. Blasting, 2018, 35(04): 74-77. **DOI**: 10.3963/j.issn.1001-487X.2018.04.013.
- [21] ZHENG YU W, DAYOU L, FENG C, et al. Numerical Simulation of Empty-Hole Effect during Parallel-Hole Cutting under Different In Situ Stress Conditions[J]. Advances in Civil Engineering, 2021,2021.**DOI**:10.1155/2021/8881491.
- [22] CHO S H, OGATA Y, KANEKO K. Strain-rate dependency of the dynamic tensile strength of rock[J]. International

- Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003,40(5): 763-777.**DOI**:10.1016/S1365-1609(03)00072-8.
- [23] 范勇, 吴进高, 冷振东, 等. 爆破漏斗岩石破碎块度实验与仿真[J]. 岩石力学与工程学报, 2023,42(09): 2125-2139.**DOI**:10.13722/j.cnki.jrme.2022.0869.
- FAN Y, WU J G, LENG Z D, et al. Experiment and simulation of rock fragmentation size of blasting crater[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(09): 2125-2139.**DOI**:10.13722/j.cnki.jrme.2022.0869.
- [24] 林大能. 平巷掏槽爆破空孔尺寸效应及围岩频繁震动损伤累积特性研究[D]. 中南大学, 2006.
- LIN D N. Study on size effect of empty hole in drift cut blasting and characteristics of frequent vibration damage accumulation in surrounding rock[D]. Central South University, 2006.
- [25] 李旭东. 地应力作用下控制爆破裂纹扩展及围岩损伤研究[D]. 中南大学, 2024.**DOI**:10.27661/d.cnki.gzhnu.2024.000434.
- LI X D. Study on rock fracturing and surrounding rock damage under combined controlled blasting and in-situ stress[D]. Central South University, 2024.**DOI**:10.27661/d.cnki.gzhnu.2024.000434.
- [26] 王杰. 深孔爆破掘进天井参数优化与应用[D]. 华北理工大学, 2022.**DOI**:10.27108/d.cnki.ghelu.2022.000238.
- WANG J. Optimisation and Application of Deep Hole Blasttrenching Patio Parameters[D]. North China University of Science and Technology, 2022.**DOI**:10.27108/d.cnki.ghelu.2022.000238.
- [27] 韩震宇. 动态荷载作用下岩石裂纹三维扩展特征与机理研究[D]. 东南大学, 2024.**DOI**:10.27014/d.cnki.gdnau.2024.001091.
- HAN Z Y. Study on the three-dimensional crack propagation characteristics and mechanisms of rocks under dynamic loads[D]. Southeast University, 2024.**DOI**:10.27014/d.cnki.gdnau.2024.001091.
- [28] 汪腾, 郑光, 郑宇轩, 等. 基于不同本构模型下的白砂岩动态力学性能仿真分析与实验验证[J]. 爆炸与冲击, 2025,45(12):108-126.**DOI**:10.11883/bzycj-2024-0436.
- WANG T, ZHENG G, ZHENG Y X, et al. Simulation analysis and experimental verification of dynamic mechanical properties of white sandstone based on different constitutive models[J]. Explosion and Shock Waves, 2025,45(12):108-126.**DOI**:10.11883/bzycj-2024-0436.
- [29] 李洪超, 张继, 王富旗, 等. 花岗岩 RHT 模型部分参数确定研究[J]. 材料导报, 2024,38(S2): 292-297.
- LI H C, ZHANG J, WANG F Q, et al. Research on determination of partial parameters of RHT model for granite[J]. Materials Reports, 2024, 38(S2): 292-297.
- [30] GABRIELFARAG, ASHWINCHINNAYYA. On the Jones-Wilkins-Lee equation of state for high explosive products[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2024,49(3).**DOI**:10.1002/PREP.202300223.
- [31] XIE L X, LU W B, ZHANG Q B, et al. Analysis of damage mechanisms and optimization of cut blasting design under high in-situ stresses[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2017,66: 19-33.**DOI**:10.1016/j.tust.2017.03.009.
- [32] 缪玉松, 郭建, 陈翔, 等. 矿用条形药包轴向爆轰波碰撞聚能特性研究[J]. 金属矿山, 2022(07): 113-119.**DOI**:10.19614/j.cnki.jsks.202207015.
- MIAO Y S, GUO J, CHEN X, et al. Study on Propagation Characteristics of Axial Detonation Wave of Mining Linear Charges[J]. Metal Mine, 2022(07): 113-119.**DOI**:10.19614/j.cnki.jsks.202207015.