

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.01.009

## 分段空场嗣后充填法扇形孔爆破 数值模拟与参数优化\*

任少峰<sup>1</sup>, 吴立波<sup>1</sup>, 王大龙<sup>1</sup>, 彭世刚<sup>1</sup>, 刘 恺<sup>2</sup>, 陶 明<sup>2</sup>, 徐源泉<sup>2</sup>

(1. 贵州福麟矿业有限公司, 福泉 550509; 2. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

**摘 要:** 针对分段空场嗣后充填采矿法中扇形孔爆破易引发充填体损伤及采场边界超欠挖等问题, 以新桥磷矿地下采场为背景, 采用有限元软件 LS-DYNA 构建数值模型, 系统开展不同工况下的扇形中深孔爆破计算分析。将采场实测爆破轮廓与数值模拟结果进行对比, 分析了不同荷载施加方式对爆破损伤预测精度的影响。数值模拟中分别引入实测孔壁压力时程加载及基于炸药材料—JWL 状态方程的加载方法, 实测荷载时程更能准确表征爆破效应。在此基础上, 以两帮距和起爆微差时间为主要变量, 对一步骤回采、二步骤回采及特殊采场条件下的扇形孔爆破过程开展系统模拟分析, 并分析了围岩损伤分布规律及爆破振动特性。结果显示: 一步骤回采两帮距对围岩稳定性影响较小, 而起爆微差时间是控制爆破块度的主导因素。当两帮距在 0.3 m 时, 爆破损伤主要集中于落矿区内, 既能实现岩体整体破碎, 又可显著降低围岩损伤风险。二步骤回采充填体稳定性对孔底距高度敏感, 当孔底距大于 0.6 m 时可显著降低破坏风险, 逐孔起爆虽能改善块度, 但会加剧充填体损伤。特殊采场中, 两帮参数不宜采用对称设计, 应通过优化布孔降低充填体受损概率。基于研究成果, 提出了适用于新桥磷矿  $\alpha$  层矿的扇形孔爆破参数优化方案, 为充填采矿法中的爆破设计提供参考。

**关键词:** 扇形孔爆破; 数值模拟; 参数优化; 孔壁压力

**中图分类号:** TD235.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-487X(2026)01-0074-17

## Numerical Simulation and Parameter Optimization of Fan-shaped Hole Blasting in Backfilled Sublevel Open Stopping

REN Shao-feng<sup>1</sup>, WU Li-bo<sup>1</sup>, WANG Da-long<sup>1</sup>, PENG Shi-gang<sup>1</sup>, LIU Kai<sup>2</sup>, TAO Ming<sup>2</sup>, XU Yuan-quan<sup>2</sup>

(1. Guizhou Fulin Mining Co., LTD., Fuquan 550509, China;

2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** To address the issues of backfill damage and stope boundary irregularities caused by fan-shaped bore-hole blasting in sublevel open stopping with subsequent backfilling, this study focuses on the underground stope of Xinqiao Phosphate Mine as a case study. Numerical models were developed using LS-DYNA finite element software to comprehensively analyze the blasting performance of fan-shaped medium-deep holes under various operational conditions. Field-measured blasting contours of the stope were compared with numerical simulation results to evaluate the influence of different loading application methods on the blasting damage prediction accuracy. The simulations em-

收稿日期 (Date of reception): 2025-10-16

网络首发日期 (Published online): 2026-01-15

作者简介: 任少峰 (1983-), 男, 博士后, 从事采矿和爆破的研究, (E-mail) rensf@chanhen.com。

通信作者: 徐源泉 (1998-), 男, 博士研究生, 主要从事矿山爆破、智慧矿山等方面的研究, (E-mail) yuanquan@csu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52274105)

**About the author:** REN Shao-feng (1983-), male, postdoctoral researcher, mainly engaged in research on mining engineering and blasting, (E-mail) rensf@chanhen.com.

**Corresponding author:** XU Yuan-quan (1998-), male, doctoral candidate, mainly engaged in research on mine blasting and smart mining, (E-mail) yuanquan@csu.edu.cn.

**Fund Programs:** National Natural Science Foundation of China (52274105)

ployed both experimentally recorded borehole wall pressure time-histories and a constitutive explosive material model coupled with the JWL equation, revealing that the measured load time-histories yielded more precise blasting effect representations. Building upon this foundation, the study systematically simulated fan-shaped blasting under one-step mining, two-step mining, and special stope conditions by examining two key variables: inter-sidewall distance and initiation delay time. Subsequent analysis focused on surrounding rock mass damage distribution patterns and blasting-induced vibration characteristics. Results indicate that in one-step mining scenarios, inter-sidewall distance exhibits limited impact on surrounding rock mass stability, while initiation delay time emerges as the predominant factor governing blast fragmentation efficiency. At a 0.3 m inter-sidewall distance, blasting damage primarily concentrated within the ore caving zone, achieving effective bulk fragmentation while substantially mitigating surrounding rock damage risks. In two-step mining scenarios, backfill stability demonstrates high sensitivity to toe burden distance, with damage risks markedly decreasing when exceeding 0.6 m. While sequential hole initiation enhanced fragmentation, it exacerbated backfill damage. Special stope conditions required asymmetric sidewall parameter design and optimized borehole arrangement to minimize backfill impacts. These findings culminate in an optimized fan-shaped blasting parameter system tailored for Xinqiao Phosphate Mine's A-orebody, delivering both theoretical frameworks and practical methodologies for backfill mining blasting operations.

**Key words:** fan-shaped hole blasting; numerical simulation; parameter optimization; borehole wall pressure

随着采矿技术的不断进步以及安全环保意识的提升,充填采矿法已成为当前地下非煤矿山的主要开采方式<sup>[1-3]</sup>。通过利用废石、尾砂等充填采空区,有效缓解了地表塌陷风险,保护了地表建筑、公路等工程设施的安全<sup>[4,5]</sup>。为进一步提高资源回收率,空场嗣后充填采矿法通常不设置永久矿柱,而是将矿体划分为矿房和矿柱两个部分,采用“先采矿房、后采矿柱”的分步回采方式实现充填开采<sup>[6,7]</sup>。

空场嗣后充填采矿法主要分为两个步骤。在一步骤回采中,矿块两帮为尚未分采的二步矿柱,整体性较好,结构结合紧密,因而具有较高的开采安全性。然而在二步骤矿柱回采阶段,两帮已被充填体所替代,矿块与充填体之间主要依靠摩擦力作用,承载能力有限。同时,一步采场在充填过程中大量充填水渗入,削弱了二步矿柱围岩的完整性,使其两侧低强度充填体难以支撑二步矿房上覆矿岩及顶板载荷。由此,二步骤矿柱开采往往处于两帮充填体稳定性不足、顶板结构脆弱的复杂环境。在爆破作业过程中,振动作用极易引发矿柱两侧充填体片帮、垮塌等现象,导致矿石贫化,削弱采场与充填体的整体稳定性,甚至引发安全事故<sup>[8]</sup>。因此,合理优化爆破参数不仅能够改善矿石破碎效果、降低大块率,还能有效控制采场边界,减少超欠挖,保持充填体稳定性<sup>[9,10]</sup>。这一问题的研究是充填采矿法安全高效应用的关键环节。目前,多数学者的研究主要集中于充填体的力学性质、材料组成以及其长期稳定性等方面<sup>[11-13]</sup>。同时,也有部分研究涉及充填体与围岩及顶板的相互作用机理、不同充填方式对采场稳定性的影响以及数值模拟方法在充填体性能预测中的应用<sup>[14,15]</sup>。然而,针对爆破参数对充填体稳定性及

采场边界控制作用的系统研究仍相对不足。

新桥磷矿位于贵州省福泉市道坪镇。矿体南北长 2820 m,东西宽 150 ~ 670 m,矿体规模大。区域内  $\alpha$  矿层主要为灰色薄板状砂质泥质磷块岩组成,厚度 10.72 ~ 30.90 m,厚度变化系数 58.34%。采用垂直走向布置的扇形孔分段空场嗣后充填采矿法,开采过程中对采场边界和矿石块度难以精准控制,尤其是在二步骤矿房回采,采场两帮为充填体时,不仅充填体容易崩落垮塌,造成矿石损失贫化,而且可能导致采场结构失稳引发安全事故。因此,本文基于数值模拟技术,对不同工况条件下的扇形爆破参数进行优化研究,以期合理选择爆破参数提供科学依据,实现改善采场边界超欠挖、提高两帮充填体稳定性。

## 1 新桥磷矿山采场爆破现状

### 1.1 采场爆破工况

根据新桥二号井  $\alpha$  层矿开采现状,其采用垂直走向布置的扇形孔分段空场嗣后充填采矿法,采场结构参数为:阶段高度 55 m,顶柱 5 m,分段高度 15 m,采场跨度 20 m,如图 1 所示。在开采过程中采场存在以下工况:①一步骤开采,采场两帮为矿岩;②二步骤开采,采场两帮为充填体;③由于开采顺序调整导致形成部分特殊采场,一帮为充填体,另一帮为矿岩。部分凿岩爆破参数及实际施工如下:

(1)炮孔底部与两帮距离:当采场边帮为矿岩时,炮孔一般打到采场轮廓边界;当采场边帮为充填体时,炮孔底部距离采场轮廓为 0.5 ~ 1.0 m 左右,也有部分采场炮孔布置在边界,具体根据现场情况确定。

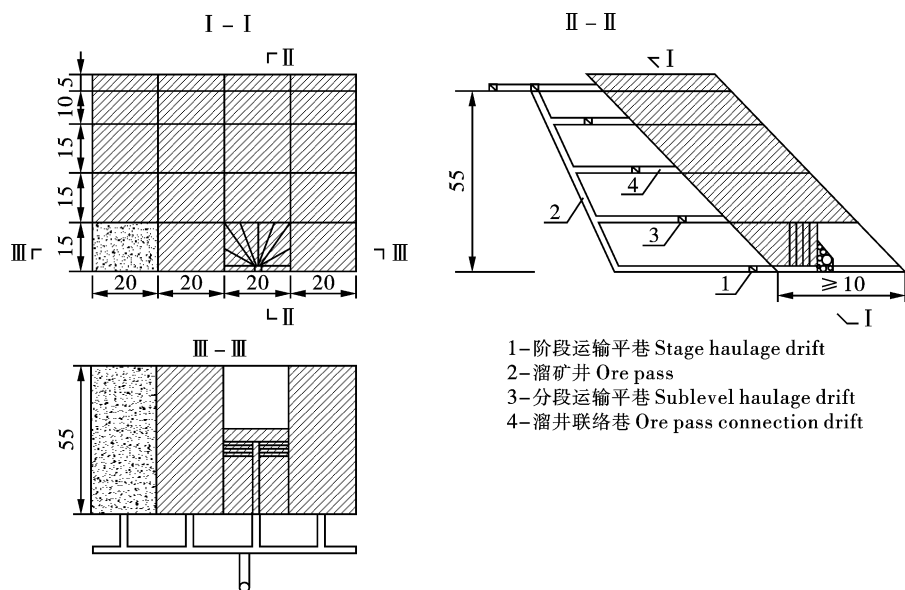


图 1 垂直走向布置的扇形孔分段空场嗣后充填采矿法示意图(单位:m)

Fig. 1 Schematic diagram of the sublevel open stoping with subsequent backfilling method using fan-shaped boreholes arranged perpendicular to the strike(unit:m)

(2)起爆顺序及时间:左右两帮底部 3 个炮孔(孔号 1-3,12-14)先同时起爆,两帮及顶部炮孔(孔号 4-11)后同时起爆,如图 2 所示,间隔时间为 100~200 ms。

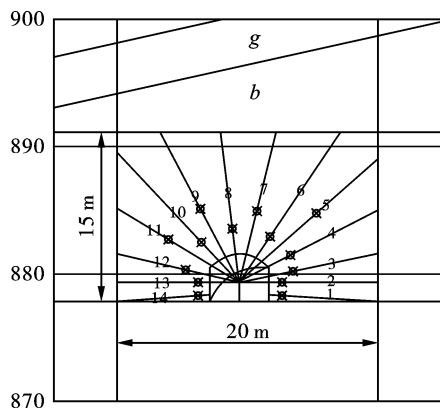


图 2 排面扇形炮孔布置图(单位:m)

Fig. 2 Layout of fan-shaped blast holes on the stope face(unit:m)

(3)采用装药车将散装乳化炸药耦合充填装到炮孔,雷管放置在孔底,采用孔底起爆方式,孔口堵塞结构为 W 形,采用塑料塞堵塞,每个炮孔的深度、堵塞长度及装药量等具体参数如表 1 所示。

## 1.2 爆破边界轮廓扫描

以新桥二号井 875-18 号采场为例,爆破设计如图 3 所示,其中  $b_4 \sim b_7$  排炮孔对应的两帮中一帮为充填体、一帮为岩体,炮孔均布置在采场边界,炮孔底部不与围岩充填体留有距离。爆破时分为两段

微差爆破,底部炮孔(孔号 1-3,12-14)先同时起爆,然后同时起爆两帮及顶部炮孔(孔号 4-11)。爆破出矿后采用无人机搭载三维激光扫描仪对采场轮廓进行扫描, $b_4 \sim b_7$  对应炮孔位置剖面扫描结果如图 4 所示,采场顶底板及两帮存在明显的超欠挖现象。

表 1 排面扇形炮孔堵塞长度  
Table 1 Plugging length of fan-shaped boreholes on the stope face

| 炮孔<br>编号<br>Borehole<br>ID | 炮孔<br>深度/m<br>Borehole<br>depth/m | 堵塞<br>长度/m<br>Stemming<br>length/m | 炮孔<br>角度/ $^{\circ}$<br>Borehole<br>angle/ $^{\circ}$ | 装药量/kg<br>Charge a<br>mount/kg |
|----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------|
| 1                          | 9.6                               | 1.0                                | -3                                                    | 32.1                           |
| 2                          | 8.5                               | 1.0                                | 0                                                     | 28.0                           |
| 3                          | 8.7                               | 2.0                                | 12                                                    | 25.0                           |
| 4                          | 9.7                               | 2.0                                | 27                                                    | 28.7                           |
| 5                          | 12.1                              | 5.7                                | 42                                                    | 23.9                           |
| 6                          | 11.9                              | 2.0                                | 56                                                    | 36.9                           |
| 7                          | 9.9                               | 3.4                                | 76                                                    | 24.2                           |
| 8                          | 9.6                               | 2.0                                | 97                                                    | 28.3                           |
| 9                          | 11.0                              | 4.2                                | 118                                                   | 25.4                           |
| 10                         | 11.6                              | 2.0                                | 133                                                   | 35.8                           |
| 11                         | 8.6                               | 4.0                                | 149                                                   | 17.2                           |
| 12                         | 7.4                               | 1.9                                | 167                                                   | 20.5                           |
| 13                         | 7.2                               | 1.0                                | 180                                                   | 23.1                           |
| 14                         | 8.2                               | 1.0                                | 184                                                   | 26.9                           |

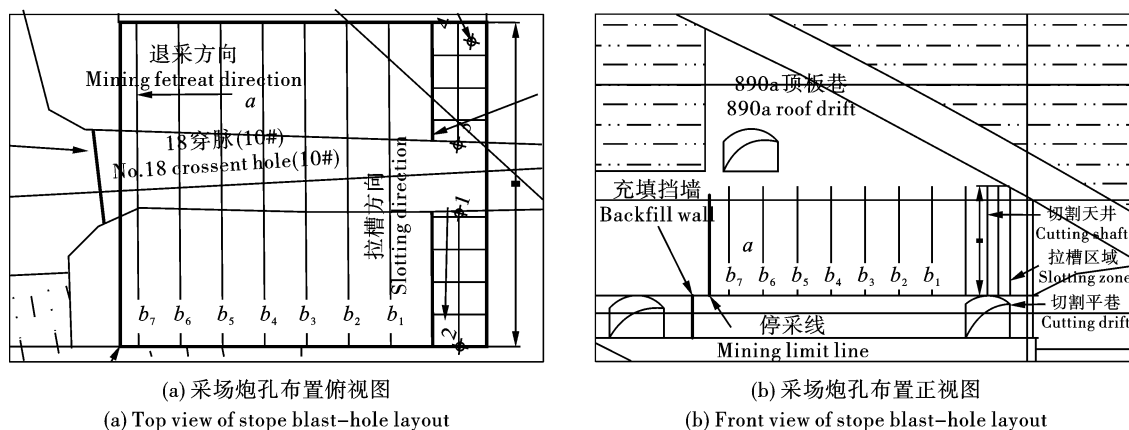


图3 875-18号采场炮孔设计及布置

Fig. 3 Borehole design and layout of Stope 875-18

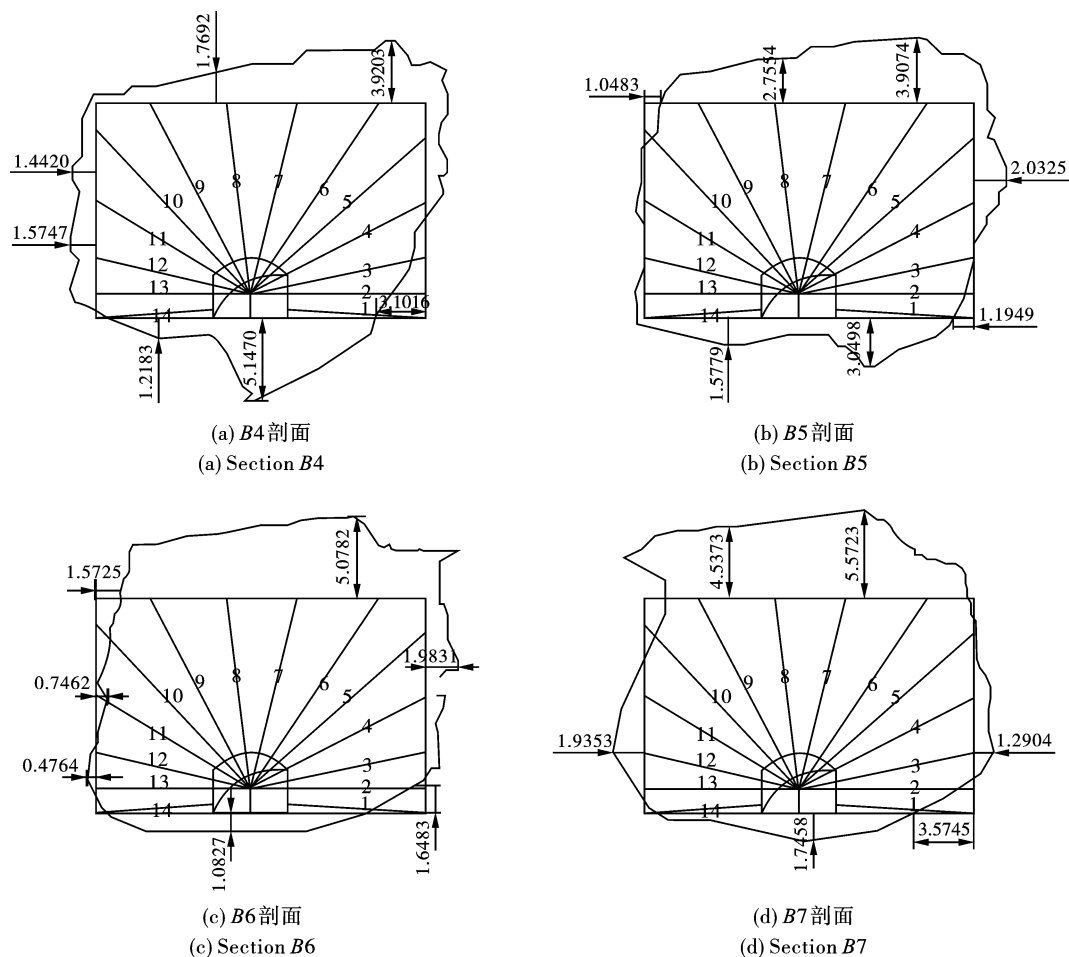


图4 采场轮廓扫描结果(单位:m)

Fig. 4 Scanning results of the stope contour(unit:m)

## 2 扇形孔爆破数值模型

采用数值模拟技术再现爆破过程,将模拟结果与三维激光扫描结果进行对比分析,为后续爆破参数优化数值模拟研究奠定基础。LS-DYNA 作为一

款高性能有限元分析软件,内置多种先进算法以满足复杂工程问题的数值模拟需求。其中,显式时间积分算法在动态分析中表现尤为突出,能有效处理大变形及强非线性行为,特别适用于碰撞、冲击及爆炸等瞬态荷载问题<sup>[16,17]</sup>。

## 2.1 模型建立

根据地下矿山实际矿房与爆破参数设计,建立了模拟扇形孔爆破过程的数值模型,重点研究两帮围岩损伤与破坏,如图 5 所示。模型由岩石材料、两帮材料(矿石、充填体或围岩)、堵塞材料组成,采用随机网格生成技术来反映裂纹扩展的随机性和不确定性。为了更好观测爆破过程,在数值模型上选取了采场左帮 A、B、C、D 四个监测点,对其质点峰值振动速度进行跟踪监测。

根据新桥二号井 a 层矿开采现状,将采场围岩分为三种工况。具体模拟方案如表 2 所示。

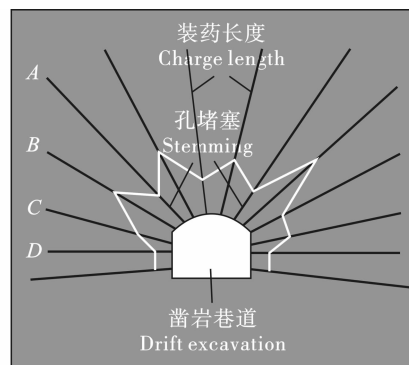


图 5 扇形孔爆破数值模型

Fig. 5 Numerical model of fan-shaped borehole blasting

表 2 数值模拟方案

Table 2 Numerical simulation schemes

| 方案<br>Scheme | 围岩类型<br>Surrounding<br>rock type                                                 | 两帮距/m<br>Distance between<br>the two sidewalls/m | 微差爆破方式<br>Millisecond delay blasting mode            | 孔口堵塞方式<br>Borehole collar<br>stemming method |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 1            | 矿岩<br>Ore rock                                                                   | 0                                                | 整排同时起爆<br>Simultaneous blasting of the entire row    | W 形堵塞<br>W-shaped<br>stemming                |
| 2            |                                                                                  | 0.3                                              | 整排同时起爆<br>Simultaneous blasting of the entire row    |                                              |
| 3            |                                                                                  | 0.5                                              | 整排同时起爆<br>Simultaneous blasting of the entire row    |                                              |
| 4            |                                                                                  | 1                                                | 整排同时起爆<br>Simultaneous blasting of the entire row    |                                              |
| 5            | 充填体<br>Backfill                                                                  | 0                                                | 三个孔同时起爆<br>Simultaneous blasting of three holes      |                                              |
| 6            |                                                                                  | 0                                                | 逐孔起爆<br>Hole-by-hole blasting                        |                                              |
| 7            |                                                                                  | 0                                                |                                                      |                                              |
| 8            |                                                                                  | 0.3                                              | 整排同时起爆<br>Simultaneous blasting<br>of the entire row |                                              |
| 9            |                                                                                  | 0.5                                              |                                                      |                                              |
| 10           |                                                                                  | 1                                                |                                                      |                                              |
| 11           |                                                                                  | 0                                                | 三个孔同时起爆<br>Simultaneous blasting of three holes      |                                              |
| 12           |                                                                                  | 0                                                | 逐孔起爆<br>Hole-by-hole blasting                        |                                              |
| 13           | 一帮围岩、一帮充填体<br>One side with surrounding rock<br>and the other side with backfill | 0                                                | 整排同时起爆<br>Simultaneous blasting of the entire row    |                                              |

注:所有炮孔堵塞长度均按实际工程中的长度,呈 W 形堵塞分布。

Note: All borehole stemming lengths are based on actual engineering practice and are distributed in a W-shaped pattern.

## 2.2 材料模型

在本研究中,通过在孔壁施加现场实测的爆破荷载时程曲线来模拟炸药对岩体的冲击破碎作用。矿岩与充填体材料均采用 JH-2 本构模型,该模型是

一种专用于脆性材料的动态响应模型,已广泛应用于岩石爆炸数值模拟研究。JH-2 模型能够全面表征材料在爆炸载荷作用下的非线性力学行为,涵盖弹性变形、塑性损伤及断裂破坏全过程<sup>[18,19]</sup>。根据

前期在现场钻孔取样,开展室内静力学实验,测定了矿岩、充填体的基本力学参数。

2.2.1 岩石材料

通过关键字 \* MAT\_JOHNSON\_HOLMQUIST\_CE-

RAMICS 定义 JH-2 材料属性,主要参数如表 3 所示。

2.2.2 充填体材料

对于两帮的充填体,同样采用 JH-2 材料进行模拟,主要参数如表 4 所示。

表 3 岩石材料参数  
Table 3 Rock material parameters

| 参数 Parameters                                                                             | 数值 Values |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 密度 Density/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )                                            | 2800      |
| 剪切模量 Shear modulus/GPa                                                                    | 13.88     |
| 最大拉伸静水压力 $T$ Maximum tensile strength $T/\text{MPa}$                                      | 54        |
| 体积模量 $K_1$ First pressure coefficient $K_1/\text{GPa}$                                    | 46.6      |
| 损伤度参数 $D_1$ Parameter for plastic strain to fracture $D_1$                                | 0.005     |
| 损伤度参数 $D_2$ Parameter for plastic strain to fracture(exponent) $D_2$                      | 0.7       |
| 应变率敏感系数 $C$ Strength parameter(for strain rate dependence) $C$                            | 0.005     |
| 破碎强度参数 $M$ Fractured strength parameter(pressure exponent) $M$                            | 0.61      |
| 初始强度参数 $N$ Intact strength parameter(pressure exponent) $N$                               | 0.61      |
| 归一化最大破碎强度 $SF_{\max}$ Maximum normalized fractured strength $SF_{\max}$                   | 0.25      |
| 参考应变率 Reference strain rate/( $\text{s}^{-1}$ )                                           | 1.0       |
| 状态方程参数 $K_2$ Second pressure coefficient $K_2/\text{GPa}$                                 | -18       |
| 状态方程参数 $K_3$ Elastic constants $K_3/\text{GPa}$                                           | 3980      |
| 归一化初始强度参数 $A$ Intact normalized strength parameter $A$                                    | 0.7       |
| 归一化残余强度参数 $B$ Fractured normalized strength parameter $B$                                 | 0.23      |
| 弹性极限 Hugoniot elastic limit HEL/GPa                                                       | 4.5       |
| 弹性极限静水压力分量 Pressure component at the Hugoniot elastic limit PHEL/GPa                      | 2.578     |
| 弹性能量损失转化为流体静力能的比例<br>Fraction of elastic energy loss converted to hydrostatic energy BETA | 1.0       |

表 4 充填体材料参数  
Table 4 Backfill material parameters

| 参数 Parameters                                                                             | 数值 Values |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 密度 Density/( $\text{kg} \cdot \text{m}^3$ )                                               | 1870      |
| 剪切模量 Shear modulus/GPa                                                                    | 0.2168    |
| 最大拉伸静水压力 $T$ Maximum tensile strength $T/\text{MPa}$                                      | 0.5       |
| 体积模量 $K_1$ First pressure coefficient $K_1/\text{GPa}$                                    | 46.6      |
| 损伤度参数 $D_1$ Parameter for plastic strain to fracture $D_1$                                | 0.005     |
| 损伤度参数 $D_2$ Parameter for plastic strain to fracture(exponent) $D_2$                      | 0.7       |
| 应变率敏感系数 $C$ Strength parameter(for strain rate dependence) $C$                            | 0.005     |
| 破碎强度参数 $M$ Fractured strength parameter(pressure exponent) $M$                            | 0.61      |
| 初始强度参数 $N$ Intact strength parameter(pressure exponent) $N$                               | 0.61      |
| 归一化最大破碎强度 $SF_{\max}$ Maximum normalized fractured strength $SF_{\max}$                   | 0.25      |
| 参考应变率 Reference strain rate/ $\text{s}^{-1}$                                              | 1.0       |
| 状态方程参数 $K_2$ Second pressure coefficient $K_2/\text{GPa}$                                 | -18       |
| 状态方程参数 $K_3$ Elastic constants $K_3/\text{GPa}$                                           | 3980      |
| 归一化初始强度参数 $A$ Intact normalized strength parameter $A$                                    | 0.7       |
| 归一化残余强度参数 $B$ Fractured normalized strength parameter $B$                                 | 0.23      |
| 弹性极限 Hugoniot elastic limit HEL/GPa                                                       | 0.5       |
| 弹性极限静水压力分量 Pressure component at the Hugoniot elastic limit PHEL/GPa                      | 0.2       |
| 弹性能量损失转化为流体静力能的比例<br>Fraction of elastic energy loss converted to hydrostatic energy BETA | 1.0       |

### 2.2.3 堵塞材料

\_FOAM 定义材料属性,主要材料参数见表 5。

炮孔的堵塞材料通过关键字 \* MAT\_SOIL\_AND

表 5 堵塞参数  
Table 5 Stemming parameters

| 密度<br>Density/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 剪切模量<br>Shear modulus/<br>GPa | 卸载体积模量<br>Unloading bulk<br>modulus/GPa | $a_0$            | $a_1$               | $a_2$            | 拉伸断裂终止压力<br>Tensile fracture<br>termination stress/kPa | vcr              |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------|------------------|---------------------|------------------|--------------------------------------------------------|------------------|
| 1800                                                  | 63.8                          | 1.34                                    | 3.4E7            | 6.4E3               | 0.3              | -5                                                     | 0                |
| $ref$                                                 | $eps_1$                       | $eps_2$                                 | $eps_3$          | $eps_4$             | $eps_5$          | $eps_6$                                                | $eps_7$          |
| 0                                                     | 0                             | 0.11                                    | 0.17             | 0.22                | 0.26             | 0.29                                                   | 0.36             |
| $eps_8$                                               | $eps_9$                       | $eps_{10}$                              | $p_1/\text{MPa}$ | $p_2/\text{MPa}$    | $p_3/\text{MPa}$ | $p_4/\text{MPa}$                                       | $p_5/\text{MPa}$ |
| 0.41                                                  | 0.46                          | 0.51                                    | 0                | 26.7                | 46.8             | 66.9                                                   | 93.6             |
| $p_6/\text{MPa}$                                      | $p_7/\text{MPa}$              | $p_8/\text{MPa}$                        | $p_9/\text{MPa}$ | $p_{10}/\text{MPa}$ |                  |                                                        |                  |
| 120.2                                                 | 233.3                         | 368.5                                   | 669.2            | 1100                |                  |                                                        |                  |

### 2.3 爆破载荷施加方式

对于炮孔内炸药爆炸所产生的冲击波,数值模拟通常有两种途径:一是对炸药本体采用高能炸药材料模型并结合 JWL 状态方程,直接模拟炸药的高速爆轰过程;二是在炮孔孔壁施加爆破荷载的应力时程曲线,间接再现孔内压力作用。在以往研究中,常用三角形函数、双指数函数等经验型时程来描述孔壁压力变化,但简化数学模型对实际爆破过程的拟合精度存在局限<sup>[20]</sup>。

#### 2.3.1 基于 JWL 状态方程施加

采用 JWL 状态方程描述炸药高速爆轰过程中压力和比容的关系,其表达式如下所示

$$P_J = A_J \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B_J \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e_1^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中: $P_J$  为炸药爆轰产物的压力; $V$  为爆轰产物的相对体积; $E_0$  为初始比内能; $A_J$ 、 $B_J$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  和  $\omega$  为材料常数。现场试验中所采用的炸药为乳化炸药,其相关参数如表 6 所示。

#### 2.3.2 基于孔壁压力测试的炮孔应力曲线施加

为了更为准确地表征爆炸过程中孔壁在爆轰作用下的动力学响应,基于自主研发的孔壁压力测试系统,在试验采场开展了现场测试。试验中每个测点采集的时间长度为 1000 ms,采样频率为每秒 25M 个点,对 -100 ms 到 900 ms 内的数据采用 1000:1 的抽样比例导出处理。经过数据处理后得到的炮孔壁峰值应力达 4908.75 MPa,为此,在测量的应力波的主要波段中选取 500 个主要点位数据导入到 LS-DYNA 软件中并施加在炮孔壁上,模拟炸药起爆后孔壁受到的爆炸冲击波。

表 6 乳化炸药参数  
Table 6 Emulsion explosive parameters

| 密度<br>Density/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 爆速<br>Detonation velocity/<br>( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | $P_{CJ}/\text{GPa}$ | $A_J/\text{GPa}$ | $B_J/\text{GPa}$ | $R_1$ | $R_2$ | $\omega$ | $E_0/\text{GPa}$ |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------|------------------|-------|-------|----------|------------------|
| 1210                                                  | 3800                                                             | 9.7                 | 214.4            | 0.182            | 4.2   | 0.9   | 0.15     | 4.192            |

### 2.4 数值模拟结果校准与对比

由图 2 可知,875-18 号采场顶部存在一条 890a 顶板巷道,位于  $b_5 \sim b_7$  排炮孔上方。基于此,本研究选取  $b_4$  排炮孔作为研究对象建立数值模型。为对比分析高能炸药材料与实测孔壁压力对模拟结果的影响,分别采用炸药材料参数和 JWL 状态方程对爆破过程进行了数值模拟,其结果如图 6 所示。与传统 JWL 状态方程相比,基于实测孔壁压力曲线

的模拟结果显示出了更大范围和更高层次的岩体损伤,传统爆破荷载施加方法与实际情况存在明显差异,而实测孔壁压力能够更为真实、客观地反映岩体在爆破作用下的受荷特征与持续时间。进一步对比爆后裂纹分布发现,在实测孔壁压力模拟方案中,采场顶、底板及两帮均出现不同程度的破坏,且采场轮廓内岩体破碎较为均匀。而在常规模拟方案中,仅左侧充填体一帮出现成片破坏,其余位置仅有少量

裂纹向围岩延伸,同时顶板及两帮裂纹分布不均,易导致大块形成。

进而,将数值模拟结果、三维激光扫描数据与设计开挖轮廓进行对比分析(见图 7)。

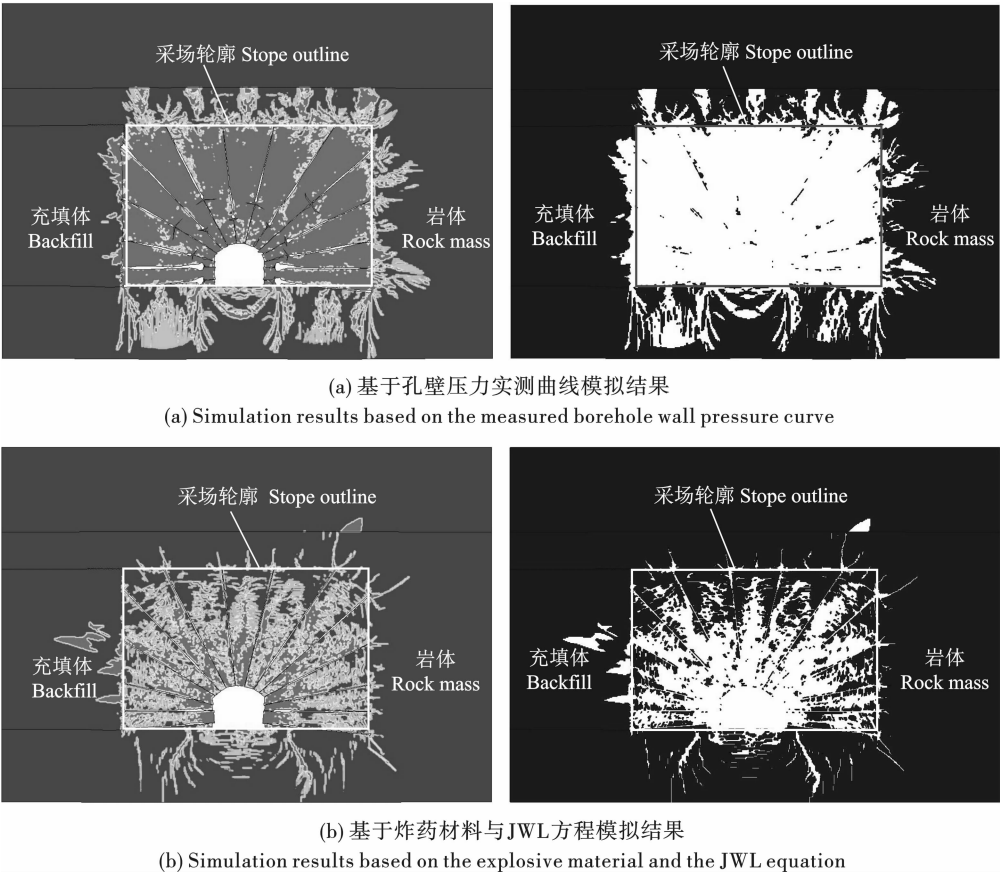


图 6 不同方式模拟结果损伤云图对比

Fig. 6 Comparison of damage contour plots from simulations using different methods

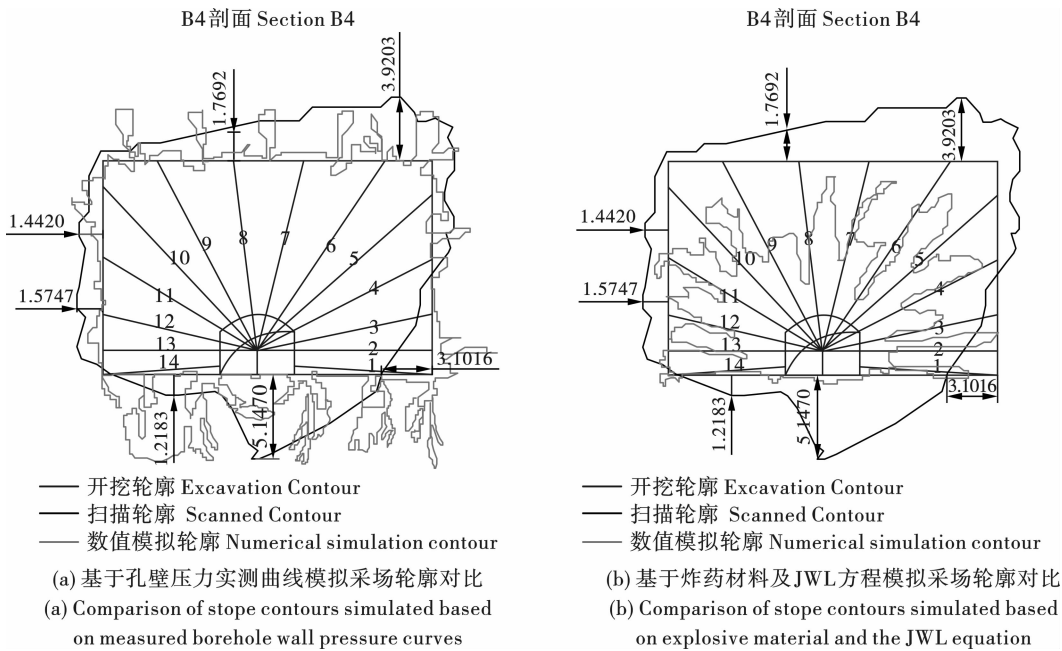


图 7 采场轮廓设计、扫描以及数值模拟结果对比(单位:m)

Fig. 7 Comparison of stope contours: design, scanning, and numerical simulation results(unit:m)

结果表明,基于实测孔壁压力的模拟方案所得采场轮廓与扫描结果高度吻合:左右帮及底板均出现一定程度超挖,顶板局部亦存在超挖,后续可能引发顶板岩体失稳及大块冒落,从而导致扫描结果所示的大范围顶板超挖现象。相比之下,常规模拟方案在顶底板及右帮位置表现出明显欠挖,与实际扫描结果差异较大。这表明,传统爆破荷载施加方法所得模拟结果准确性不足,而引入孔壁压力实测值的模拟方法能显著提升模拟精度,为后续爆破参数优化与数值模拟研究提供了更为合理、科学的技术路径。

### 3 数值模拟结果

#### 3.1 一步骤回采数值模拟结果

##### 3.1.1 不同两帮距对爆破效果影响

以扇形孔爆破参数为对照组,将孔底与两帮的距离分别设置为 0.3 m、0.6 m 和 1.0 m,分析不同

两帮距条件下扇形孔爆破对围岩稳定性的影响。图 8 为数值模拟得到的不同两帮距下中深孔扇形爆破后的岩体损伤分布与裂缝网络图。以采场施工设计为基础,在巷道两侧布置呈扇形辐射状的中深孔爆破孔,孔间距与装药结构均按照工程实际进行设定。图像采用伪彩色方式表征岩体损伤程度,其中红色区域代表高度损伤区,黄色与绿色区域对应中等损伤区,蓝色区域则表示未发生显著损伤的完整岩体。爆破损伤主要沿炮孔方向呈扇形扩展,形成多条典型的射线状高损伤通道,表明爆破波在炮孔轴向具有较高的传播效率,能量集中且损伤效应显著。同时,部分高损伤带在孔间区域发生扩展与叠加,进而形成较为连续的破裂带,邻孔间干扰效应及爆破波干涉作用较为明显,有利于岩体的整体破碎。此外,凿岩巷道两侧区域的损伤分布表现出较强的对称性,说明布孔方案设计合理,能有效控制爆破作用范围,避免对围岩造成过度扰动。

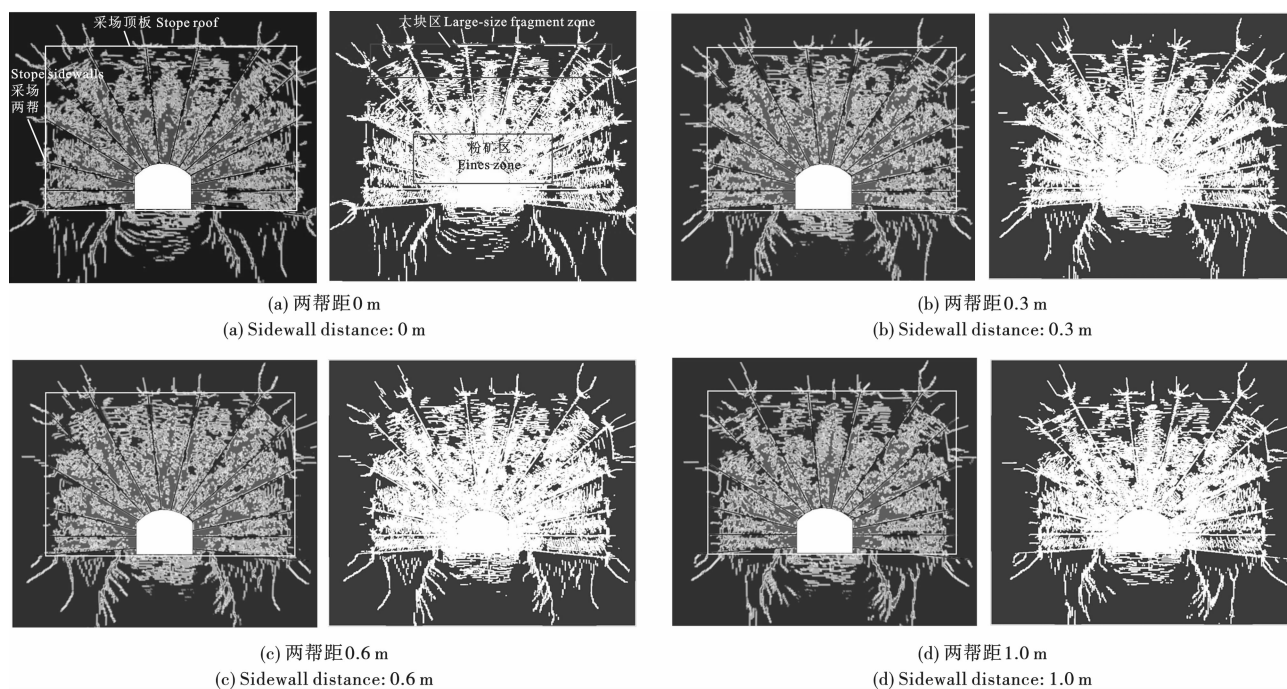


图 8 不同两帮距扇形爆破损伤云图与裂纹分布

Fig. 8 Damage contours and crack distribution of fan-shaped blasting under different sidewall distances

当采场两帮均为矿岩时,即便炮孔孔底与采场两帮相接,损伤破坏区仅有少量延伸至围岩,表明在当前爆破参数条件下,破坏范围能够有效控制在采场设计轮廓内,避免了超挖现象。随着炮孔孔底与两帮距离增大至 0.3 m,延伸至围岩的损伤裂纹显著减少,且损伤破坏主要均匀分布于采场落矿区,说明炸药能量绝大部分被用于矿石破碎。当距离进一步增大至 0.6 ~ 1.0 m 时,岩体损伤范围进一步收

缩,仅有少量孤立裂纹超出采场轮廓,而采场两帮产生大面积低损伤区域,出现欠挖现象。对爆后裂纹分布的进一步分析表明,采场顶部靠近扇形孔底的区域易形成大块,而靠近凿岩巷道的炮孔孔口区域则更易产生粉矿。此外,炮孔孔底与两帮间距的变化对大块区和粉矿区的空间分布影响较小。

##### 3.1.2 起爆延期时间对爆破效果的影响

以同一排炮孔同时起爆为对照,设置排内三个

炮孔划分为一组,分别采用组间微差起爆与逐孔起爆两种方式,分析不同延期起爆对爆破损伤及裂纹分布的影响,由于数值模拟中只考虑了应力波的作用,因此微差时间设置为2 ms,所有炮孔底部与采场两帮的距离均为0 m。图9为不同延期时间下的应力分布云图,反映了延期控制对爆破能量时空释放特征的显著影响,包括应力峰值的位置迁移、应力波传播路径的差异以及潜在破裂区范围的变化。在同时起爆条件下,0.1 ms时所有孔底均产生显著有效应力,岩体破坏由孔底向顶部呈均匀扩展趋势。

8 ms时,应力峰值逐渐传递至孔顶,整体应力场分布趋于均匀。在三孔一排起爆情形下,应力传播呈现明显方向性特征,最先起爆侧的有效应力传播速度更快。6 ms时,应力场出现显著不对称性,左侧应力已基本传递至孔顶,岩体破碎过程明显加速;直至12 ms,岩体整体破碎基本完成,同时凿岩巷道左侧底部出现明显的应力集中区。相比之下,逐孔起爆的有效应力传播最为缓慢。直至28 ms,应力才完全传递到孔顶,且孔底有效应力峰值显著高于其他方案,有利于缓解孔底距过大导致的大块残留问题。

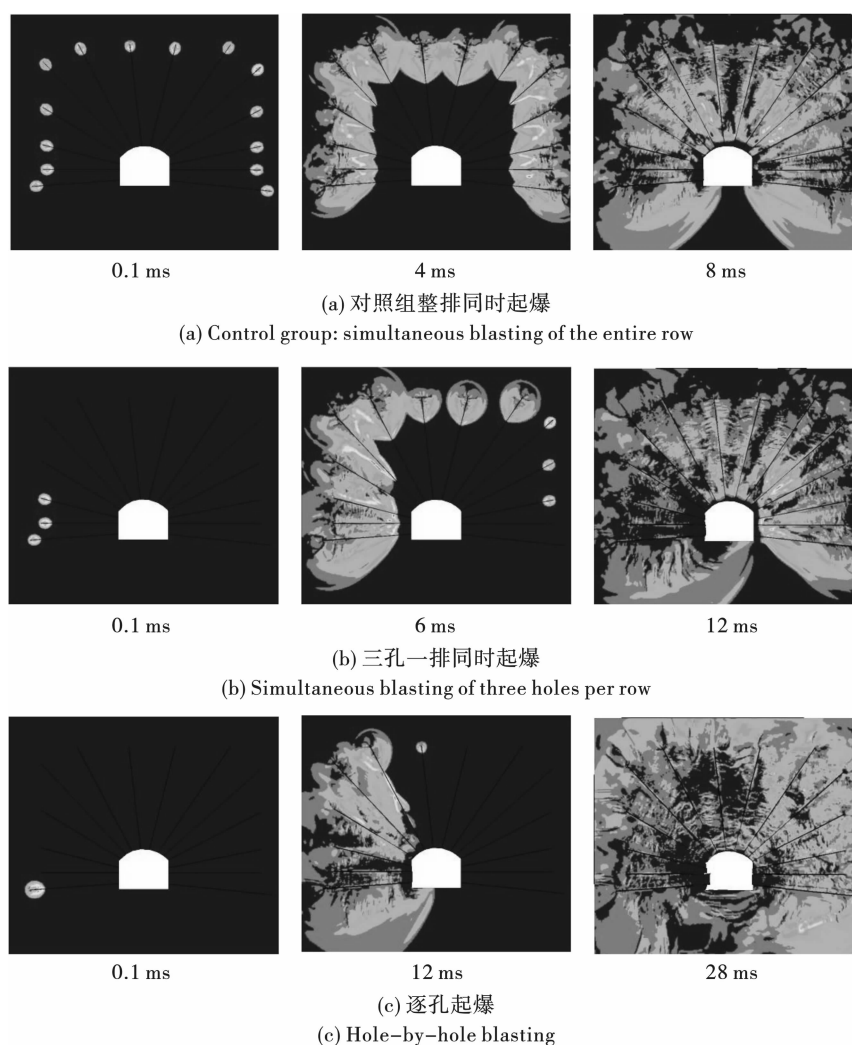


图9 不同延期时间应力分布云图

Fig. 9 Stress distribution contours under different delay times

图10展示了不同延期方案扇形爆破损伤与裂纹分布,三个炮孔同时起爆与整排同时起爆时的岩体损伤分布基本一致。在逐孔起爆条件下,采场顶部损伤范围明显扩大并连片,表明大块率降低。靠近凿岩巷道的岩体损伤区缩小,意味着粉矿率有所降低。当采用整排或三孔同时起爆时,孔口间距较小,爆炸应力波在孔口区发生叠加,导致矿岩发生强

烈压碎破坏并生成大量粉矿;而孔底间距过大,爆炸应力波经衰减叠加后峰值不足以超过岩体动态抗压强度,仅形成环向拉伸裂纹,易产生大块。逐孔起爆技术通过先起爆炮孔为后续炮孔创造新的自由面,避免了孔口区应力叠加引起的粉碎破坏,同时改善了孔底爆破条件,减少大块的形成。进一步从裂纹分布云图分析可见,逐孔起爆后原大块区裂纹数量

明显增多,而粉矿区裂纹减少,说明逐孔起爆技术能够有效降低扇形孔爆破的大块率与粉矿率,显著改

善爆破效果。

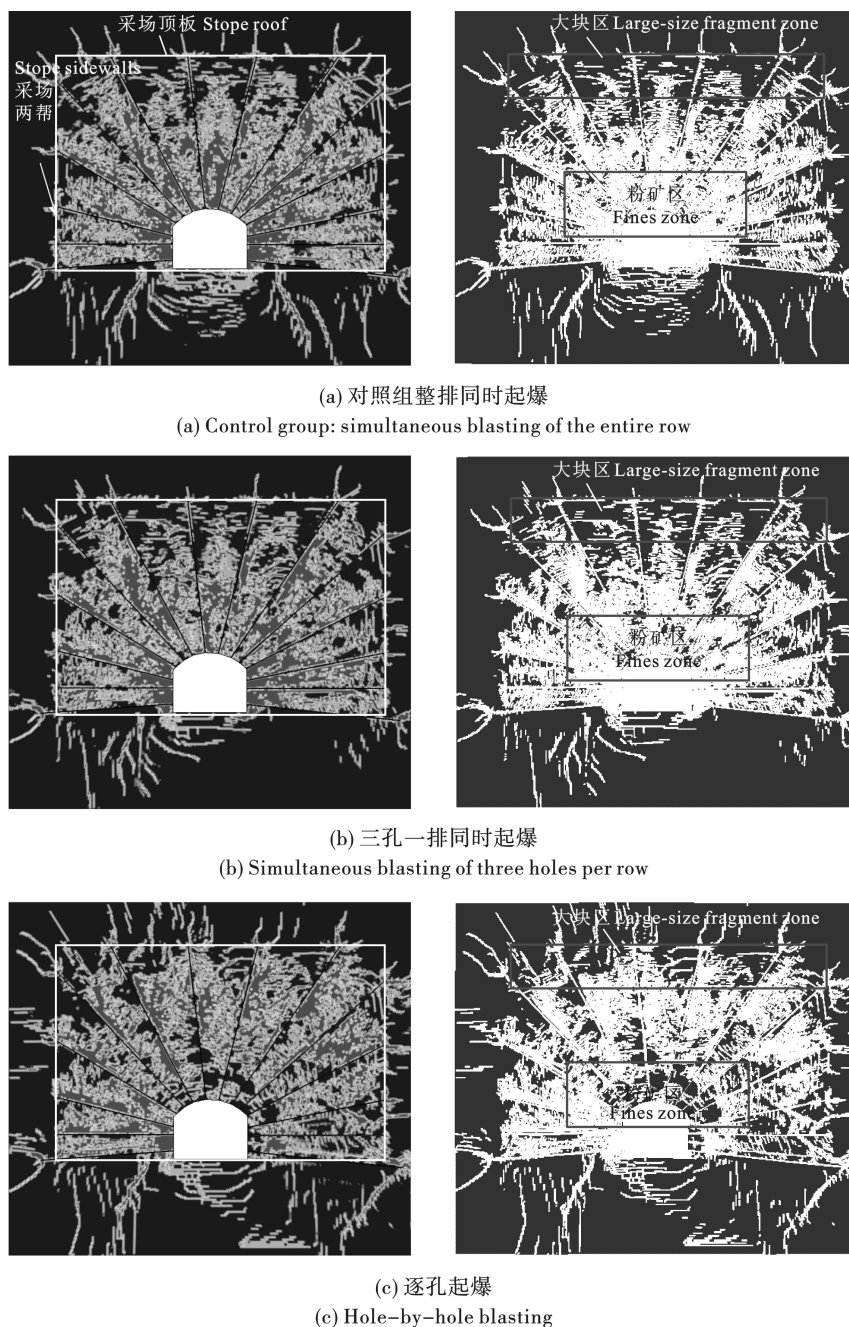


图 10 一步骤不同起爆微差时间扇形爆破损伤与裂纹分布

Fig. 10 Damage and crack distribution of fan-shaped blasting with different initiation delay times in one-step mining

### 3.2 二步骤回采数值模拟结果

#### 3.2.1 不同两帮距对爆破效果影响

由于二步骤回采时充填体作为两帮材料支撑起整个采场结构,在受到爆破振动时充填体易发生损伤破坏甚至垮塌等现象,因此对于采场充填体的稳定性尤为重要。与一步骤开采模拟方案相似,首先研究孔底与两帮不同距离 0、0.3 m、0.6 m、1.0 m 对爆破效果以及充填体的影响,图 11 为岩体损伤与裂

纹分布结果。

当炮孔孔底与充填体边界接触时,扇形孔爆破产生的应力波传播到充填体,由于充填体强度较弱,在靠近采场轮廓的充填体内部形成了大范围的高度损伤区,导致二步骤开采时两帮充填体发生片帮以及大面积垮塌。当两帮距增大到 0.3 m 时,充填体内部损伤破坏区有所减小,但仍存在一定范围的损伤区域。当两帮距为 0.6 m 时,爆破损伤区基本被

限制在采场设计轮廓以内,两帮充填体中未出现明显的损伤破坏。两帮距继续增大到 1.0 m 后,损伤区也继续缩小,甚至在采场两帮出现了欠挖现象。从岩体裂纹分布云图中可以更为清晰地看到在两帮距为 0 和 0.3 m 的两个方案中,两帮出现了大片充

填体破裂垮塌,而当两帮距增大到 0.6 m 以上,两帮充填体中没有产生爆炸裂纹。因此,炮孔底部与两帮的距离增大到 0.6 m 以上能够阻止充填体产生爆破损伤,保持其稳定性。

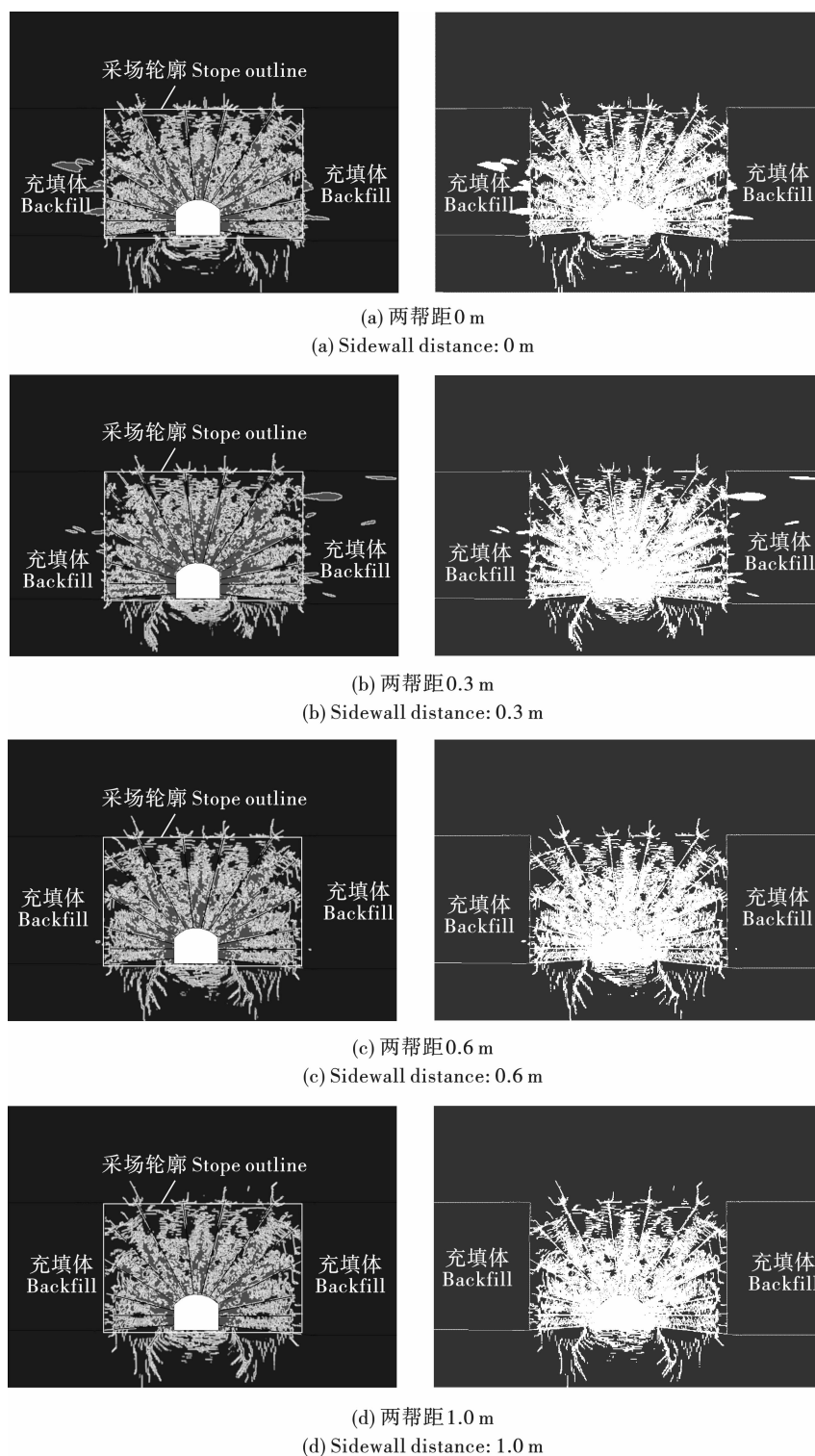


图 11 不同两帮距扇形孔爆破损伤云图

Fig. 11 Damage contours of fan-shaped blasting under different sidewall distances

### 3.2.2 起爆延期时间对爆破效果的影响

与一步骤回采相同,二步骤回采中亦以同一排炮孔同时起爆作为对照组,设置排内三个炮孔划分为一组,采用组间微差起爆及逐孔起爆两种不同的起爆顺序,所有炮孔底部与采场两帮充填体的距离均为 0 m。图 12 展示了二步骤回采在不同延期方案下的应力分布云图。整排同时起爆时,应力波在岩体内部呈均匀传播特征,充填体内的有效应力水

平较低,有利于控制爆破影响范围并减少对充填体的扰动。在三孔一排同时起爆方案中,应力波在岩体中的传播历程更为复杂且持续时间更长,但最终形成的有效应力分布与整排同时起爆基本一致,对充填体的影响仍保持在较低水平。相比之下,逐孔起爆方案使充填体内的有效应力分布范围显著扩大,且应力峰值更高,该起爆方式可能导致充填体发生局部破坏。

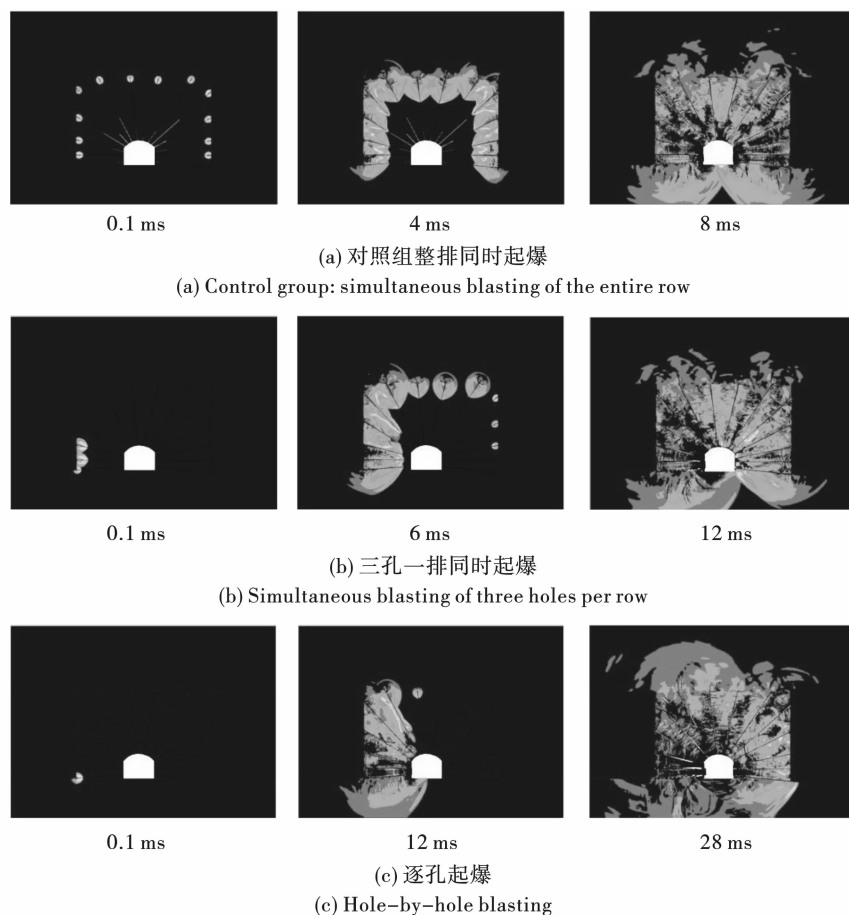


图 12 二步骤不同起爆微差时间扇形爆破损伤与裂纹分布

Fig. 12 Damage and crack distribution of fan-shaped blasting with different initiation delay times in two-step mining

进一步从损伤与裂缝分布图观察(见图 13),由于炮孔底部与两帮充填体直接接触,三种起爆方式均导致充填体发生不同程度的损伤破坏。其中,三孔同时起爆与整排同时起爆条件下的充填体损伤范围差异不大,而逐孔起爆条件下充填体出现了更大范围的破坏。其主要原因在于,逐孔起爆为后续炮孔提供了新的自由面,导致在充填体附近形成新自由面,当后续炮孔起爆时,应力波反射产生拉伸作用,加剧了充填体的破坏。采场内部岩体的损伤分布规律与一步骤开采模拟结果基本一致。当采用逐孔起爆技术时,采场顶部区域的损伤范围扩大并趋于连片,说明顶部大块率有所降低;而靠近凿岩巷道的岩体损伤区减小,表明粉矿率

也随之降低。当采用整排同时起爆或三孔同时起爆时,孔口间距较小,爆炸应力波发生叠加,矿岩在孔口区被压碎破坏,形成大量粉矿。扇形孔孔底距较大,叠加后的应力峰值低于岩体动态抗压强度,仅形成环向拉伸裂纹,易产生大块。采用逐孔起爆方式后,先起爆的炮孔为后续炮孔提供新的自由面,避免了孔口区域应力叠加而形成粉碎区,同时孔底条件得到改善,减少了大块的产生。从岩体裂纹分布云图可见,逐孔起爆条件下原大块区裂纹数量明显增加,而原粉矿区裂纹数量则有所减少,逐孔起爆技术能有效降低扇形孔爆破的大块率和粉矿率,改善爆破效果。但与此同时,该方式对充填体的破坏作用更为显著。

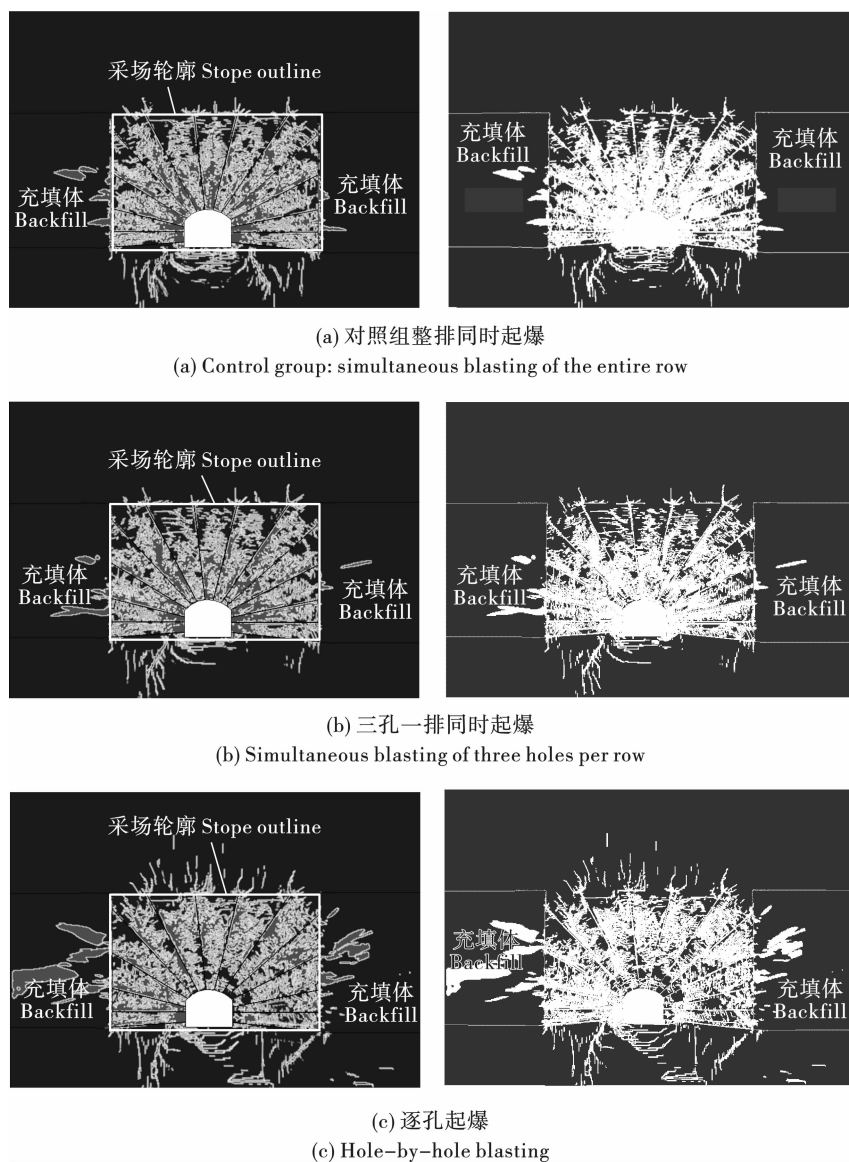


图13 不同起爆微差时间爆破损伤与裂纹分布

Fig. 13 Blasting damage and crack distribution under different initiation delay times

为了更好观测爆破过程,选取了采场左帮A、B、C、D四个监测点,对其质点峰值振动速度进行跟踪监测。不同模拟方案下监测点峰值振动速度如图14所示。整排同时起爆时,四个监测点的振动速度几乎在起爆后同一时间达到峰值,最大值超过40 cm/s。当采用三孔同时起爆方案,最大峰值振动速度有所下降,为38.0 cm/s。采用逐孔起爆技术后,四个监测点的振动速度时间上先后到达峰值,最大质点振动速度为27.2 cm/s,比前两个方案有所下降。逐孔起爆技术能够一定程度上降低爆破振速,维持充填体的稳定性,但是在相同爆破参数下,充填体比围岩的质点峰值振动速度更大,说明充填体容易受到爆破振动的影响,其稳定性更难保持。

**3.3 一帮充填体、一帮岩体采场爆破数值模拟结果**  
在a层矿开采过程中存在部分特殊采场,其一

侧为已充填的一步骤采场,另一侧为待开采的二步骤采场,导致回采空间两帮分别由充填体与围岩构成,呈现不同材料特性。为研究两帮材料差异对爆破效应的影响,建立了相应的数值模型进行分析。模型设计以对照组为基础,即孔底与两帮距离均为0且采用整排同时起爆方式,同时将采场左帮设置为充填体、右帮设置为围岩。

图15展示了左帮为充填体、右帮为围岩条件下扇形孔爆破的损伤与裂纹分布特征。结果表明,左帮充填体内出现大范围连续的损伤破坏区,而右帮围岩中仅产生少量裂纹。在相同爆破参数条件下,围岩的抗爆性能显著优于充填体。从裂纹分布云图分析发现,左帮充填体区域局部发生垮塌,而右帮围岩则仅表现为有限的裂隙扩展。当采场两帮材料不

同时,两侧炮孔参数不宜完全一致,而需针对性地进行优化调整。此外,为有效保护充填体稳定性,可将凿岩巷道布置于充填体一侧,使靠近充填体的边帮采用垂直孔布置,在控制爆破损伤与振动的同时,提高充填体的整体稳定性。

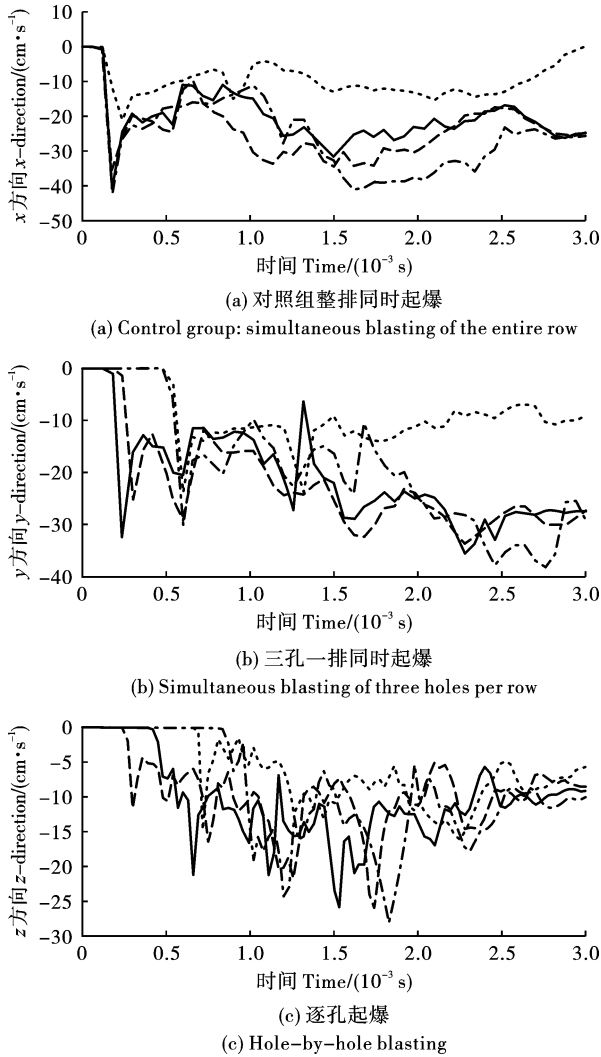


图 14 不同起爆微差时间扇形孔爆破  
质点峰值振动速度对比

Fig. 14 Comparison of peak particle velocities of fan-shaped blasting under different initiation delay times

#### 4 基于数值模拟的爆破参数优化选取

在回采爆破边界与块度控制研究中,一步骤采场因其两帮由围岩组成,整体稳定性较高,研究重点主要在于控制落矿爆破产生的大块与粉矿比例,以实现块度分布的优化。而在二步骤回采时,由于两帮均为充填体,其在爆破振动作用下易发生变形破坏,甚至引发大面积垮塌,不仅会增加矿石损失与贫化率,还可能诱发严重的安全事故。因此,相较于块度控制,二步骤回采研究的核心在于两帮充填体的

稳定性评价与优化。

模拟结果表明:对于一步骤回采,炮孔孔底与两帮的距离对围岩稳定性影响较小。当控制在 0.3 m 以内时,仅有少量裂纹延伸至两帮围岩,不会对其整体稳定性产生影响。当距离增大至 0.6 m 以上时,采场两帮容易出现欠挖现象。对于大块率与粉矿率的控制,则主要依赖于起爆微差时间的优化。在整排同时起爆和三孔同时起爆方案下,孔底大块分布与孔口粉矿分布区域基本一致;而在逐孔起爆条件下,孔底裂纹数量增加、孔口裂纹数量减少,表明逐孔起爆能够有效降低大块率与粉矿率。对于二步骤回采,炮孔孔底与两帮充填体的距离对其稳定性影响显著。当该距离小于 0.3 m 时,充填体中出现大面积损伤破坏,易引发片帮甚至整体失稳。当距离增大至 0.6 m 以上时,两帮充填体中几乎未出现损伤区与爆破裂纹,能较好地维持充填体稳定性。在起爆顺序方面,虽然逐孔起爆在降低大块率与粉矿率方面具有优势,但对充填体的破坏作用更为明显,需予以充分重视。对于一侧为充填体、另一侧为围岩的特殊采场,炮孔布置时两侧爆破参数不宜完全一致,应进行针对性优化。例如,可将凿岩巷道布置在靠近充填体的一侧,并将充填体侧最内排炮孔设计为垂直孔,以减小爆破振动对充填体的破坏。综上,根据数值模拟结果,对新桥磷矿 a 层矿分段空场嗣后充填采矿法扇形孔爆破参数优化提出的建议如表 7 所示。

#### 5 结论

围绕扇形孔爆破对充填体的影响开展了数值模拟研究,重点分析了不同采场条件下爆破参数对围岩稳定性、充填体完整性及爆破块度的影响。基于模拟结果,提出了适用于新桥二号井 a 层矿的扇形孔爆破参数优化方案,为嗣后充填法采矿中的爆破设计与边界控制提供了理论参考与工程指导。主要结论如下:

1) 自主研发的孔壁压力测试系统能准确表征爆破荷载作用特征,获取的时程曲线施加于数值模型后,可有效提高模拟结果与实际情况的一致性。

2) 对于一步骤回采,孔底距对围岩稳定性影响较小,而起爆微差时间是控制爆破块度分布的关键因素,合理的微差起爆能够显著降低大块率与粉矿率。

3) 对于二步骤回采,充填体稳定性对孔底距高度敏感,当孔底距大于 0.6 m 时可有效避免充填体被破坏。逐孔起爆虽有利于块度改善,但会加剧充

填体损伤。

4) 在一侧为充填体、另一侧为围岩的特殊采场中,两帮爆破参数不宜完全一致,需结合围岩与充填体特性优化布孔方式,降低充填体受损风险。

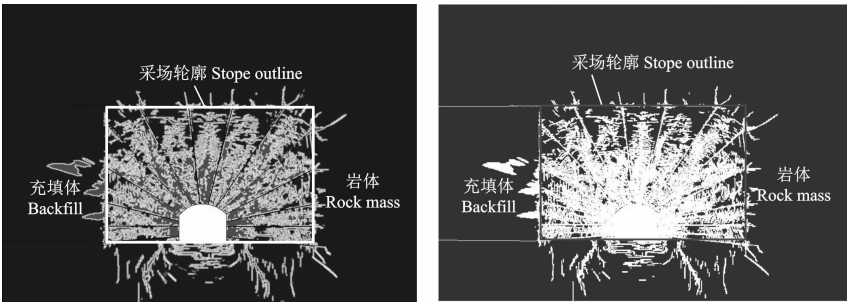


图 15 左帮充填体右帮围岩扇形孔爆破损伤与裂纹分布

Fig. 15 Damage and crack distribution of fan-shaped blasting with backfill on the left sidewall and surrounding rock on the right sidewall

表 7 扇形孔爆破参数优化建议

Table 7 Recommended optimization parameters for fan-shaped borehole blasting

| 两帮围岩类型<br>Types of surrounding rock on both sidewalls                             |                              | 孔底与两帮距离/m<br>Distance between the borehole bottom and the two sidewalls/m | 起爆方式<br>Initiation mode         | 堵塞方式<br>Stemming method    | 备注<br>Remarks                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 岩体 Rock mass                                                                      |                              | 0 ~ 0.3                                                                   | 逐孔起爆<br>Hole-by-hole initiation | W 型堵塞<br>W-shaped stemming | 或将凿岩巷布置在靠充填体一侧,最里面炮孔改为垂直孔保护充填体<br>Alternatively, the drilling drift can be arranged on the backfill side, and the innermost blast hole can be changed to a vertical hole to protect the backfill |
| 充填体 Backfill                                                                      |                              | 0.6 ~ 1.0                                                                 |                                 |                            |                                                                                                                                                                                                  |
| 一帮围岩、<br>一帮充填体<br>One side with surrounding rock and the other side with backfill | 围岩侧<br>Surrounding rock side | 0 ~ 0.3                                                                   | 逐孔起爆<br>Hole-by-hole initiation | W 型堵塞<br>W-shaped stemming |                                                                                                                                                                                                  |
|                                                                                   | 充填体侧<br>Backfill side        | 0.6 ~ 1.0                                                                 | 逐孔起爆<br>Hole-by-hole initiation | W 型堵塞<br>W-shaped stemming |                                                                                                                                                                                                  |

参考文献 (References)

[1] 张 腾,王 超,张少波. 充填采矿技术在金属矿山采矿工艺中的应用[J]. 世界有色金属,2025(11):100-102.

[1] ZHANG Teng, WANG Chao, ZHANG Shao-bo. Application of backfill mining technology in metal mining process [J]. World Nonferrous Metals, 2025(11):100-102. (in Chinses)

[2] 石海军,杨会选,张 睿,等. 局部矿体赋存形态多变时的分段空场嗣后充填采矿方案优化研究[J]. 现代矿业,2025,41(4):43-47.

[2] SHI Hai-jun, YANG Hui-xuan, ZHANG Rui, et al. Research on optimization of sublevel open-stope and subsequent filling mining method after the abrupt change in the occurrence form of local ore bodies[J]. Modern Mining, 2025,41(4):43-47. (in Chinses)

[3] 李 宁,刘海林,王雨波,等. 某铁矿阶段空场嗣后充填采矿法优化[J]. 现代矿业,2025,41(2):36-39.

[3] LI Ning, LIU Hai-lin, WANG Yu-bo, et al. Optimization of stage open stoping subsequent filling mining method in an iron mine[J]. Modern Mining, 2025,41(2):36-39. (in Chinses)

[4] 廖九波,曾令义,王 宇. 机械化上向水平分层充填采矿法在缓倾斜薄矿体中的应用[J]. 矿业研究与开发, 2025,45(1):24-31.

[4] LIAO Jiu-bo, ZENG Ling-yi, WANG Yu. Application of mechanized upward horizontal layered filling mining method in gently inclined thin ore body[J]. Mining Research and Development, 2025,45(1):24-31. (in Chinses)

[5] 李 雪. 搅拌剪切作用下充填料浆流动流变行为的宏观关联研究[D]. 北京:北京科技大学,2025.

[5] LI Xue. Macroscopic and mesoscopic correlation study on the flow and rheological behavior of filling slurry under mixing[D]. Beijing:University of Science and Technology

- Beijing, 2025. (in Chinses)
- [6] 曾令义. 低品位倾斜中厚矿体充填采矿法优选[J]. 黄金, 2023, 44(2): 22-26.
- [6] ZENG Ling-yi. Filling mining method optimization for low-grade medium-thick inclined ore body[J]. Gold, 2023, 44(2): 22-26. (in Chinses)
- [7] 刘光生, 杨小聪, 郭利杰. 基于采充时序的空场嗣后充填体强度要求优化研究[J]. 有色金属工程, 2019, 9(10): 85-94.
- [7] LIU Guang-sheng, YANG Xiao-cong, GUO Li-jie. Optimization research on backfill strength requirement of open stoping with subsequent backfill mining based on excavating and filling sequences[J]. Nonferrous Metals, 2019, 9(10): 85-94. (in Chinses)
- [8] 余 昕, 周家祥, 宋卫东, 等. 分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿工艺及爆破设计[J]. 金属矿山, 2018(8): 7-12.
- [8] YU Xin, ZHOU Jia-xiang, SONG Wei-dong, et al. Mining technology and blasting design of the staged open stope mining with subsequent filling in sublevel drilling process[J]. Metal Mine, 2018(8): 7-12. (in Chinses)
- [9] 王冠男, 袁 野, 高艳鹏, 等. 大直径深孔阶段空场嗣后充填采矿法底部结构优化[J]. 世界有色金属, 2021(17): 31-32.
- [9] WANG Guan-nan, YUAN Ye, GAO Yan-peng, et al. Optimization of bottom structure of large diameter deep hole stage open stope and subsequent filling mining method[J]. World Nonferrous Metals, 2021(17): 31-32. (in Chinses)
- [10] 周华林. 空场嗣后充填采矿法充填体合理强度分布规律研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [10] ZHOU Hua-lin. Reasonable strength and distribution of backfilling material with back-filling mining afterwards open-stope[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012. (in Chinses)
- [11] 车增辉, 周子涵, 辛凤阳, 等. 单轴压缩下胶结充填体-岩石组合体的力学行为和破坏特征[J]. 煤矿安全, 2025, 56(9): 1-15.
- [11] CHE Zeng-hui, ZHOU Zi-han, XIN Feng-yang, et al. Mechanical behavior and damage characteristics of cemented paste backfill-rock composite structure under uniaxial compression[J]. Safety in Coal Mines, 2025, 56(9): 1-15. (in Chinses)
- [12] 王剑南, 戴超群, 彭啸鹏. 细尾砂胶结充填体固结特性与结构稳定性[J]. 矿冶, 2025, 34(4): 550-554.
- [12] WANG Jian-nan, DAI Chao-qun, PENG Xiao-peng. Consolidation characteristics and structural stability of cemented fine tailings backfill[J]. Mining and Metallurgy, 2025, 34(4): 550-554. (in Chinses)
- [13] 任碧琦, 万小军, 向俊宸, 等. 新型固废基胶结超细尾砂充填体的强度机理研究[J]. 金属矿山, 2025(8): 281-288.
- [13] REN Bi-qi, WAN Xiao-jun, XIANG Jun-chen, et al. Strength mechanism study of a novel solid waste-based binder for cementing ultra-fine tailings backfill[J]. Metal Mine, 2025(8): 281-288. (in Chinses)
- [14] 王奕仁, 吴爱祥, 阮竹恩, 等. 胶结充填体-围岩组合体接触面力学特性研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2025, 56(6): 2383-2395.
- [14] WANG Yi-ren, WU Ai-xiang, RUAN Zhu-en, et al. Research on mechanical properties of contact interface between cemented paste backfill-surrounding rock composite[J]. Journal of Central South University( Science and Technology), 2025, 56(6): 2383-2395. (in Chinses)
- [15] 戚庭野, 成思远, 冯国瑞, 等. 碱激发钢渣-粉煤灰固废充填材料的制备及强度形成机理[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 236-249.
- [15] QI Ting-ye, CHENG Si-yuan, FENG Guo-rui et al. Preparation of alkali-activated steel slag-fly ash based full solid waste filling material and strength formation mechanism research[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 236-249. (in Chinses)
- [16] XU Yuan-quan, TAO Ming, LIU Yu-long, et al. Cracking behavior of brittle materials under eccentric decoupled charge blasting[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 8: 108536.
- [17] 陶 明, 徐源泉, 赵 瑞. 深部岩体爆破开挖围岩动态破坏机理研究[J]. 工程爆破, 2024, 30(5): 143-152.
- [17] TAO Ming, XU Yuan-quan, ZHAO Rui. Study on the dynamic failure mechanism of surrounding rock under deep rock blasting excavation[J]. Engineering Blasting, 2024, 30(5): 143-152. (in Chinses)
- [18] 吴 波, 任子明, 刘 聪, 等. JH2 模型参数的确定及动静荷载耦合作用下隧道围岩损伤研究[J]. 爆破, 2023, 40(3): 68-78.
- [18] WU Bo, REN Zi-ming, LIU Cong, et al. Determination of johnson-holmquist- II constitutive model parameters and study on tunnel surrounding rock damage under coupling of dynamic and static loads[J]. Blasting, 2023, 40(3): 68-78. (in Chinses)
- [19] 谢理想. 深埋隧洞岩石爆破破碎演化机制与钻爆优化设计[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [19] XIE Li-xiang. Evolution mechanisms of rock fragmentation under blasting and optimum design of drilling and blasting in deep tunnel[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017. (in Chinses)
- [20] 蒲 磊. 不同加载方式下隧道爆破振动特征分析[J]. 爆破, 2018, 35(1): 42-48.
- [20] PU Lei. Study on vibration characteristics of tunnel blasting under different loading modes[J]. Blasting, 2018, 35(1): 42-48. (in Chinses)