

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.03.029

## 采场爆破对充填体损伤破坏与控制技术研究<sup>\*</sup>

李冰<sup>1</sup>, 史秀志<sup>1</sup>, 李延龙<sup>2</sup>, 卢禹然<sup>3</sup>, 邱贤阳<sup>1</sup>, 李小元<sup>4</sup>

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083; 2. 中色非洲矿业有限公司, 赞比亚 基特韦 22592;  
3. 恩菲雄安科技发展有限公司, 雄安新区 071800; 4. 广西中金岭南矿业有限责任公司, 来宾 546100)

**摘要:** 矿山爆破作业在提高开采效率的同时, 会对相邻充填体产生显著动力损伤, 进而影响采场稳定性, 这一问题在二步骤回采过程中尤为突出。为揭示爆破作用下充填体的损伤演化机制, 优化爆破参数以实现充填体防护, 对边孔距、预留保护层厚度进行优化以实现爆破能量的有效控制, 基于爆炸动力学理论, 采用 LS-DYNA 开展数值模拟研究, 数值模型分别设计了四种边孔距方案(0.2 m、0.4 m、0.6 m、0.8 m)与四种预留保护层厚度方案(0.3 m、0.4 m、0.5 m、0.6 m), 系统分析了不同参数下充填体的损伤分布、破坏机制及应力波在岩-充界面的传播衰减规律, 以损伤变量 $\geq 0.6$ 作为充填体损伤判定标准。结果表明: 应力波通过岩-充界面时因两种介质弹性模量差异显著而大幅衰减, 随着边孔距与预留保护层厚度增加, 充填体损伤范围呈指数级减小。当平行边孔距充填体 $\geq 0.8$  m 或扇形孔预留保护层厚度 $\geq 0.6$  m 时, 充填体损伤程度很小, 整体稳定性显著提升。在谦比希铜矿 1040-1-4 采场开展现场工业试验, 采用优化后的爆破参数进行作业, 进一步证实了参数的工程适用性。研究成果为井下爆破参数优化、充填体保护提供了理论依据与实用技术参考。

**关键词:** 爆破损伤; 充填体; 爆炸作用理论; 边孔距; 保护层厚度

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2026)03-0282-13

## Study on Damage and Failure of Backfill Induced by Stope Blasting and Control Technologies

LI Bing<sup>1</sup>, SHI Xiu-zhi<sup>1</sup>, LI Yan-long<sup>2</sup>, LU Yu-ran<sup>3</sup>, QIU Xian-yang<sup>1</sup>, LI Xiao-yuan<sup>4</sup>

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;  
2. Africa Mining PLC of China Nonferrous Metals Co., Ltd., Kitwe 22592, Zambia; 3. Enfi Xiongan  
Technology Development Co., Ltd., Xiongan New Area 071800, China; 4. Guangxi Zhongjin  
Lingnan Mining Co., Ltd., Laibin 546100, China)

**Abstract:** Mining blasting operations improve extraction efficiency while simultaneously causing substantial dynamic damage to adjacent backfill structures, which significantly threatens working face stability, especially during secondary mining operations. This study investigates the damage evolution mechanisms of backfill materials under blasting effects and optimizes blasting parameters for backfill protection using LS-DYNA for numerical simulations

收稿日期 (Date of reception): 2025-12-01

网络首发日期 (Published online): 2025-12-22

作者简介: 李冰 (1999-), 男, 广西梧州人, 硕士研究生, 主要从事矿山控制爆破研究, (E-mail) 452607141@qq.com。

通信作者: 史秀志 (1966-), 男, 河北邢台人, 教授、博士生导师, 主要从事爆破理论与技术研究, (E-mail) baopo@csu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52374152); 广西重点研发项目 (2022AB31023)

**About the author:** LI Bing (1999-), male, born in Wuzhou city, Guangxi province, master degree, mainly engaged in research on mine controlled blasting, (E-mail) 452607141@qq.com.

**Corresponding author:** SHI Xiu-zhi (1966-), male, born in Xingtai city, Hebei province, professor, doctoral supervisor, mainly engaged in research on blasting theory and technology, (E-mail) baopo@csu.edu.cn.

**Fund Programs:** National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52374152), Guangxi Key Research and Development Project (2022 AB31023)

based on explosion dynamics principles. The numerical analysis examines four parallel perimeter hole spacing configurations (0.2 m, 0.4 m, 0.6 m, 0.8 m) and four protective layer thickness schemes (0.3 m, 0.4 m, 0.5 m, 0.6 m). A systematic analysis was conducted of damage distribution patterns, failure mechanisms, and stress-wave attenuation characteristics at rock-backfill interfaces across varying parameters, using a damage variable threshold of  $\geq 0.6$  as the failure criterion. Results demonstrate that stress waves undergo significant attenuation at rock-backfill interfaces due to pronounced differences in elastic modulus between the materials. Both increasing parallel perimeter hole spacing and increasing the reserved protective layer thickness induce an exponential reduction in backfill damage. When parallel perimeter hole spacing of the backfill exceeds 0.8 m, or the reserved protective layer thickness of the fan holes reaches 0.6 m, the backfill exhibits minimal damage with markedly improved stability. Field validations at Chambishi Copper Mine's 1040-1-4# stope, implementing optimized blasting parameters, confirmed their engineering feasibility. These outcomes establish theoretical foundations and practical guidelines for optimizing underground blasting and preserving backfill.

**Key words:** blasting damage; backfill; explosion theory; perimeter hole spacing; protective layer thickness

矿山爆破技术作为一种高效便捷的工程手段,在带来显著经济效益的同时也呈现出明显的双刃剑效应<sup>[1,2]</sup>。其能量瞬时释放的特性不仅会产生飞石、噪声等常规负面效应,更会对围岩及充填体造成复杂的动力损伤:在爆破近区,冲击波引发的非弹性力作用将直接形成破碎圈;而在中远区,持续传播的地震波与应力波则会诱发剧烈振动,导致次生结构破坏<sup>[3]</sup>。这种动力损伤具有显性与隐性双重特征,在后期爆破扰动与地压活动的共同作用下,损伤区可能持续扩展,对矿山的安全生产构成重大威胁,尤其在进二步回采时,采场两侧为一步骤充填体,爆破所带来的应力波会严重损害充填体的稳定性,削弱充填体的承载能力,导致采场结构的破坏,同时,充填块体掉落会直接降低矿石品位,加剧贫化现象,因此,研究爆破对充填体的影响、减少充填体爆破损伤是一个重要的课题。

Hu KX 建立了充填开挖与多裂纹岩体相互作用的断裂力学模型<sup>[4]</sup>,研究了爆破振动对充填体的损伤破坏影响。姜琳婧对井下爆破振动进行了监测和拟合<sup>[5]</sup>,确定了地震波传播规律,分析了不同微差时间的爆破模拟效果来研究充填体稳定性。Emad 等建立了爆破过程中充填体稳定性的校准模型<sup>[6,7]</sup>,对充填体破坏结果进行了分析。梅佳伟通过 LS-DYNA 模拟探究了边孔距、养护龄期和微差时间等因素对胶结充填体爆破损伤演变过程的影响规律<sup>[8]</sup>。宋飞利用模型试验研究了爆破荷载下地震波对相邻充填体的破坏损伤情况<sup>[9]</sup>。Li 针对相邻采场爆破扰动<sup>[10]</sup>,探讨了爆破方式、灰砂比及分层充填等因素对充填体的损伤影响。王慎贤在李楼铁矿进行了现场爆破振动监测<sup>[11]</sup>,结合扇形孔爆破数值模拟,研究了爆破应力波衰减规律以及应力波对充填体的影响。Zeng 研究了应力波在岩-充间的传

播规律<sup>[12]</sup>,通过 LS-DYNA 建立了微差爆破模型,分析不同爆破参数的模拟结果并提出控制措施。苏勇基于结构动力学理论构建了分层胶结充填体矿柱的爆破扰动失稳模型<sup>[13]</sup>,并利用 MATLAB 分析了多种分层充填工况下爆破扰动对充填体的影响。姜立春建立了分层充填体动力响应模型和方程<sup>[14]</sup>,将理论计算结果与数值模拟和现场监测数据对比验证了模型可靠性,最终获取了远场爆破扰动下充填体动态响应机制。本文通过理论分析、数值模拟和现场工业试验,研究充填体在采场爆破作用下的损伤情况,并建立了充填体保护层与充填体损伤之间的关系<sup>[15]</sup>。

## 1 爆炸作用理论分析

### 1.1 爆炸应力波在岩充界面传播特征

在爆炸源近区,岩体中产生的冲击荷载超过岩石冲击变形的临界应力后,会在岩体内激起冲击波,冲击波位于药包半径的 3~7 倍的范围<sup>[16]</sup>,并逐渐衰减变为应力波,一般距爆源 150 倍炸药半径时转变为地震波<sup>[17]</sup>,因此作用于岩充界面的是应力波,当应力波垂直入射岩充交界面时,会产生正应力  $\sigma$  和剪应力  $\tau$ ,如图 1 所示,A-A 为岩充交界面,矿体岩石波阻抗为  $\rho_1 C_{p1}$ ,充填体波阻抗为  $\rho_2 C_{p2}$ 。

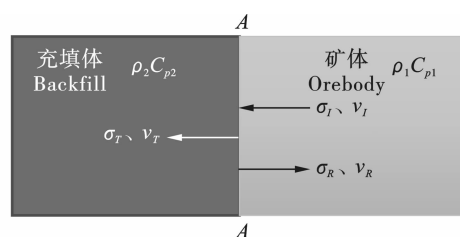


图1 应力波传播于岩充界面

Fig. 1 Stress wave propagation at rock-backfill interfaces

当入射应力波通过交界面时会产生反射波和透射波,设入射波、反射波、透射波引起的质点应力分别为  $\sigma_I$ 、 $\sigma_R$  和  $\sigma_T$ ,引起的质点振动速度为  $v_I$ 、 $v_R$  和  $v_T$ ,同时由能量守恒可得反射波和透射波引起的质点应力为

$$\begin{cases} \sigma_R = \frac{\rho_2 C_{p2} - \rho_1 C_{p1}}{\rho_2 C_{p2} + \rho_1 C_{p1}} \sigma_I \\ \sigma_T = \frac{2\rho_2 C_{p2}}{\rho_2 C_{p2} + \rho_1 C_{p1}} \sigma_I \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $C_p$  为纵波速度;  $C_s$  为横波速度。

而纵波传播速度可用下式表示<sup>[18]</sup>

$$C_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (2)$$

式中:  $E$  为介质材料的弹性模量;  $\mu$  为介质材料的泊松比。

分析式(1)和(2),矿体岩石的密度、泊松比与充填体数值差距较小,但两者弹性模量相差两个数量级,导致透射波应力远小于入射波应力,因此矿体中的应力波通过岩充界面后强度会大大降低,不一定会对充填体造成破坏。

## 1.2 爆破破坏分区及范围

根据爆炸动力学理论,炸药起爆后产生的高能冲击波与高温高压气态产物共同作用于周围岩体,其破坏机制呈现明显的空间分异性,由爆心向外依次形成压碎区、裂隙区和弹性震动区<sup>[19,20]</sup>。压碎区、裂隙区半径计算方法如下

### (1) 压碎区半径

在压碎区内,岩石处于冲击波作用下,冲击波的衰减速度很快,其峰值压力  $p_r$  随距炮孔中心距离  $r$  变化为

$$\begin{cases} p_r = \frac{p_0 r_b^3}{r^3} \\ p_0 = \frac{\rho_r \rho_e C_p D^2}{2(\rho_r C_p + \rho_e D)} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $p_0$  是应力波初始压力;  $r$  为距炮孔中心距离;  $r_b$  为炮孔半径;  $\rho_b$  为岩石密度;  $\rho_r$  为炸药密度;  $D$  为炸药爆速。

在压碎区边界处,岩石内冲击波波速  $D_0 = C_p$ ,  $p_r = \sigma_c$ ,因此压碎区半径为

$$r = r_b \left[ \frac{b \rho_r \rho_e C_p D^2}{2 \rho_r C_p (\rho_r C_p + \rho_e D) (C_p - a)} \right]^{1/3} \quad (4)$$

式中,  $a$ 、 $b$  是与岩石性质相关的常数。

### (2) 裂隙区半径

在裂隙区,应力波和爆生气体共同作用引起岩石发生拉剪破坏从而出现大量裂纹,裂隙区半径为

$$r_f \leq r_b \left[ \frac{\mu \rho_r \rho_e C_p D^2}{2(1-\mu)(\sigma_l - \sigma_g)(\rho_r C_p + \rho_e D)} \right]^{1/n} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_l$  为岩石抗拉强度;  $\sigma_g$  为爆生气体产生的环向拉应力。

大量研究表明<sup>[21-23]</sup>,压碎区半径为炮孔半径的 2~5 倍,裂隙区半径为炮孔半径的 70~100 倍,因此,为了保护充填体不受冲击载荷的破坏,炮孔距离充填体应大于压碎区半径。

## 2 数值模型及模拟方案

### 2.1 平行边孔距离充填体模型

通过上述分析可知平行边孔距离充填体应至少大于压碎区半径,取压碎区半径为炮孔半径的 5 倍,炮孔半径为 38 mm,即边孔距离充填体需大于 0.19 m,因此将边孔距充填体为 0.2 m、0.4 m、0.6 m 和 0.8 m 设为四种方案,分别进行数值模拟,分析在不同边孔距离条件下,爆破作用对充填体的破坏损伤,以确定合理距离指导井下爆破施工。

参照谦比希铜矿井下采场爆破情况,建立的模型中充填体长 8 m,宽 5 m,矿体长 7.2 m,模型高度设置为 2 m,在矿体中建立 3 个平行边孔,炮孔采用耦合装药,边孔孔间距为 1.8 m,炮孔直径 76 mm,为了达到类似光面爆破效果,靠边帮的一列平行炮孔滞后起爆,右侧炮孔先起爆,因此矿体右侧为自由面,由于现场采用双机芯凿岩,机芯距离为 1.5 m,因此边孔距离右侧自由面为 1.5 m。网格单元为三维实体单元 SOLID164,模型都采用 m-kg-s 单位制,为消除人为边界影响,除自由面外,其他边界均设置为无反射边界,数值模型如图 2,网格划分如图 3,为了显示炮孔周围网格,隐藏了 3 号炮孔周围的空气虚拟单元。

爆破过程采用流固耦合算法,即在炸药外环绕一层空气单元,定义炸药、空气为 ALE 单元算法,炸药和空气共节点,而矿石材料和充填体则采用 Lagrange 单元算法,通过 \*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID 关键字实现不同算法间的能力传递作用。

### 2.2 扇形孔预留保护层数值模型

谦比希矿山爆破回采中,除了采用一侧为平行孔的上向扇形炮孔,还有将凿岩巷道布置于采场底部中间的扇形炮孔布置形式,为确保地下开采过程中充填结构的完整性,通常采取设置保护层的技术措施,保护层厚度即为炮孔孔底装药面到充填体的垂直距离,如图 4 所示。

一般矿体回采工艺采用的预留保护层矿体厚度

为 0.4 m 左右,为了研究合适的预留保护层厚度,设置 0.3 m、0.4 m、0.5 m 和 0.6 m 四种方案,通过

ANSYS/LS-DYNA 进行数值模拟以确定对充填体影响较小的方案。

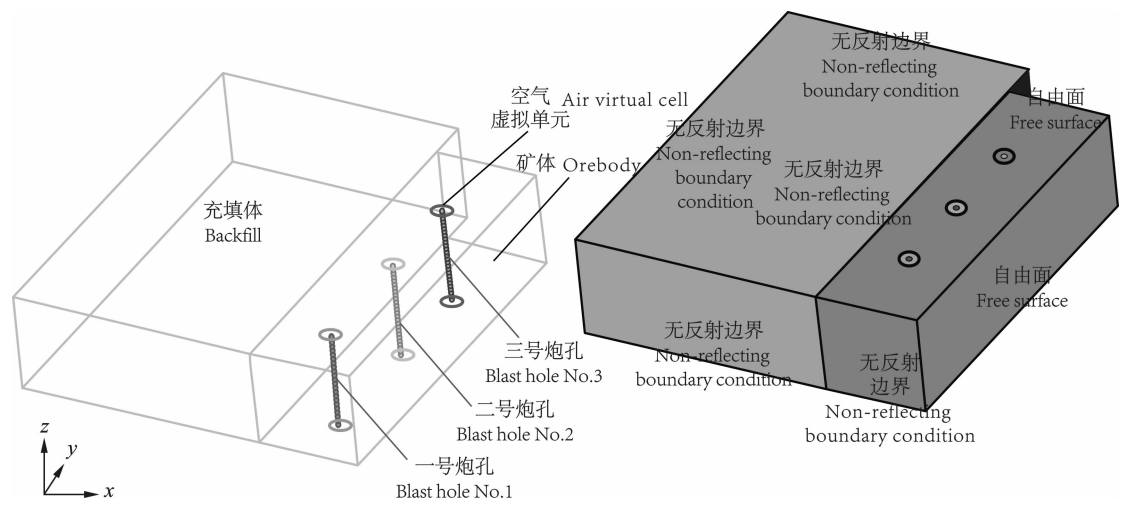


图 2 边孔爆破模型示意图  
Fig. 2 Schematic of perimeter hole blasting model

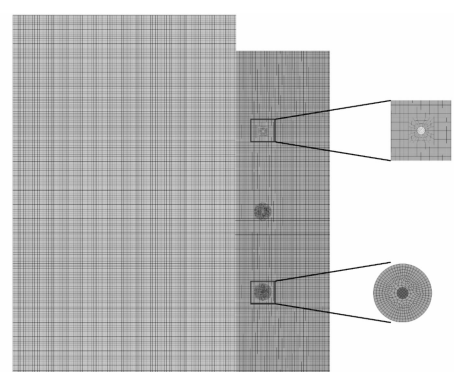


图 3 模型网格划分示意图  
Fig. 3 Mesh division schematic diagram of the model

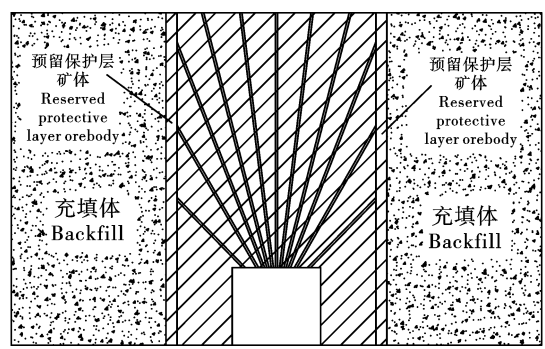


图 4 预留保护层示意图  
Fig. 4 Schematic of reserved protective layer

建立数值模拟模型如图 5 所示,模型采用准二维模型建模(即模型厚度为一个单元格厚度),以现场具体尺寸、爆破参数和孔网设计参数为工程背景,按照 1:1 比例建立模型,考虑到模型的对称性,建立二分之一模型进行计算,模型中矿体和充填体高

22.5 m,矿体宽 6.25 m,充填体宽 5 m,凿岩巷道高 4.5 m,考虑到现场实际情况只有侧边 3 个斜孔靠近充填体,会对充填体造成较大影响,因此模型中只建立 3 个斜孔,炮孔采用耦合装药,炮孔直径 76 mm,炮孔底部进行堵塞,堵塞长度 1.5 m。为消除人为边界影响,除矿体右侧建立对称边界约束外,其他边界均采用无反射边界。

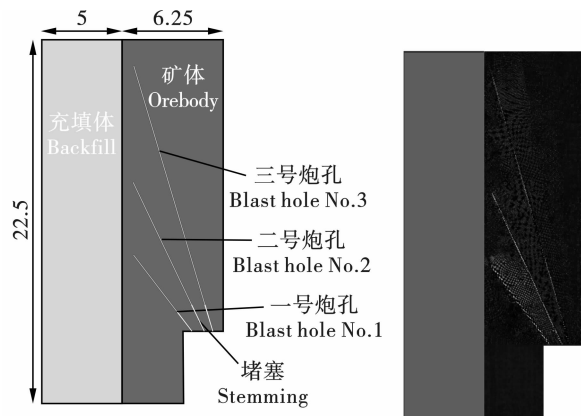


图 5 数值模型及网格划分图  
Fig. 5 Numerical model and mesh schematics

在模拟计算中三号炮孔到一号炮孔依次起爆,现场实际采用的延期时间为 25 ms,研究表明爆炸引起的岩石质量损伤基本上是在爆炸后 3 ms 内形成的<sup>[24]</sup>,为了降低计算时间提升效率,3 个炮孔孔间延期间隔设置为 3 ms。

2.3 模型材料选取

RHT 本构模型适用于脆性材料的破裂模式的描述,特别是在涉及到高应变率、大变形的情况下表

现良好<sup>[25]</sup>,因此本文对于矿体和充填体材料选用 RHT 模型材料进行分析。

ANSYS/LS-DYNA 中 RHT 模型除了材料名称以及默认的三个参数外还需要填写 35 个参数。本

文参考李洪超与 Xie LX 的论文进行计算<sup>[26,27]</sup>。结合谦比希铜矿矿岩和充填体的物理力学参数,确定矿体 RHT 模型详细参数见表 1,充填体 RHT 模型参数见表 2。

表 1 矿体 RHT 模型参数

Table 1 Orebody RHT model parameters

| $f_c/\text{MPa}$      | $\alpha_0$     | $\rho_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | $A_1/\text{GPa}$        | $A_2/\text{GPa}$        | $A_3/\text{GPa}$      | $\beta_c$             | $\beta_t$ | $T_1/\text{GPa}$ |
|-----------------------|----------------|------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|------------------|
| 127.92                | 1.1            | 2817                                     | 35.53E9                 | 49.74E9                 | 18.48E9               | 0.0099                | 0.0135    | 35.53E9          |
| $T_2/\text{GPa}$      | $G/\text{GPa}$ | $P_{et}/\text{MPa}$                      | $\dot{\varepsilon}_0^c$ | $\dot{\varepsilon}_0^t$ | $\dot{\varepsilon}^c$ | $\dot{\varepsilon}^t$ | $D_2$     | $B$              |
| 0.0                   | 21.19          | 85.28                                    | 3.0E-5                  | 3.0E-6                  | 3.0E25                | 3.0E25                | 1.0       | 0.050            |
| $g_t^*$               | $N$            | $Q_0$                                    | $f_s^*$                 | $A_f$                   | $n_f$                 | $f_t^*$               | $g_c^*$   | $\xi$            |
| 0.70                  | 0.725          | 0.680                                    | 0.22                    | 1.60                    | 0.61                  | 0.11                  | 0.53      | 0.5              |
| $p_{comp}/\text{GPa}$ | $A$            | $\varepsilon_p^m$                        | $D_1$                   | $N_p$                   | $B_0$                 | $B_1$                 | GAMMA     |                  |
| 6.0                   | 2.503          | 0.01                                     | 0.04                    | 3                       | 1.4                   | 1.4                   | 0         |                  |

表 2 充填体 RHT 模型参数

Table 2 Backfill RHT model parameters

| $f_c/\text{MPa}$      | $\alpha_0$     | $\rho_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | $A_1/\text{GPa}$        | $A_2/\text{GPa}$        | $A_3/\text{GPa}$      | $\beta_c$             | $\beta_t$ | $T_1/\text{GPa}$ |
|-----------------------|----------------|------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|------------------|
| 1.00                  | 1.0            | 2100                                     | 13.13                   | 16.02                   | 3.37                  | 0.1739                | 0.0952    | 13.13            |
| $T_2/\text{GPa}$      | $G/\text{GPa}$ | $P_{et}/\text{MPa}$                      | $\dot{\varepsilon}_0^c$ | $\dot{\varepsilon}_0^t$ | $\dot{\varepsilon}^c$ | $\dot{\varepsilon}^t$ | $D_2$     | $B$              |
| 0.0                   | 0.12           | 0.67                                     | 3.0E-5                  | 3.0E-6                  | 3.0E25                | 3.0E25                | 1.0       | 0.050            |
| $g_t^*$               | $N$            | $Q_0$                                    | $f_s^*$                 | $A_f$                   | $n_f$                 | $f_t^*$               | $g_c^*$   | $\xi$            |
| 0.70                  | 0.56           | 0.680                                    | 0.18                    | 1.60                    | 0.61                  | 0.20                  | 0.53      | 0.5              |
| $p_{comp}/\text{GPa}$ | $A$            | $\varepsilon_p^m$                        | $D_1$                   | $N_p$                   | $B_0$                 | $B_1$                 | GAMMA     |                  |
| 6.0                   | 3.44           | 0.01                                     | 0.04                    | 3.0                     | 1.22                  | 1.22                  | 0         |                  |

炸药材料及状态方程采用 LS-DYNA 内置的 8# 材料“\* MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN”对炸药单元进行定义,炸药的爆轰过程即炸药从固体转变为高温高压状态的急速膨胀气体的过程可以用 \* EOS \_JWL 模拟进行模拟,JWL 状态方程将压力定义为

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega e}{V} \quad (6)$$

式中: $P$  为爆轰产物压力; $V$  为相对比容; $e$  为炸药比内能; $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  和  $\omega$  为状态方程参数。JWL 状态方程可由炸药爆轰产物的  $\gamma$  律状态方程拟合得出, $\gamma$  律状态方程如下

$$P = \frac{\gamma^\gamma}{(1 + \gamma)^{1+\gamma}} \frac{\rho_e V_d^2}{V^\gamma} \quad (7)$$

炸药参数及 JWL 状态方程参数见表 3。

表 3 炸药材料及 JWL 状态方程参数

Table 3 Explosive and JWL equation of state parameters ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

| $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | $D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $P_{CJ}/\text{GPa}$ | $A/\text{GPa}$ | $B/\text{GPa}$ | $R_1$ | $R_2$ | $\omega$ | $e/\text{GPa}$ |
|----------------------------------------|------------------------------------|---------------------|----------------|----------------|-------|-------|----------|----------------|
| 1050                                   | 4000                               | 4.6                 | 177            | 9.9            | 5.78  | 2.08  | 0.03     | 7              |

空气材料及状态方程采用 LS-DYNA 中的 9# 材料 \* MAT\_NULL 为软件内置的空气材料,其状态方程可以选择线性多项式方程 \* EOS\_LINEAR\_POLY-

NOMIAL,其压力由以下公式确定

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E \quad (8)$$

式中: $C$  为多项式系数; $E$  为初始内能。其参数 取值见表 4。

表 4 空气材料及状态方程参数

Table 4 Air and its equation of state equation parameters

| $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | $C_0$ | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ | $C_5$ | $C_6$ | $E/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$ |
|----------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------------------|
| 1.29                                   | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.4   | 0.4   | 0     | $2.5 \times 10^5$                  |

堵塞材料采用关键字 \* MAT\_SOIL\_AND\_FOAM,该材料模型具有流体性质,其主要用于模拟土或泡沫材料被限制在结构中或有几何边界的情况,其参数取值见表 5。

表 5 堵塞材料参数表

Table 5 Stemming material model parameters

| 参数<br>Parameter                    | 数值<br>Numerical value | 单位<br>Unit                      |
|------------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| 密度<br>Density                      | 1800                  | $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ |
| 剪切模量<br>Shear modulus              | 63.85                 | MPa                             |
| 体积模量<br>Bulk modulus               | 30                    | GPa                             |
| 屈服常数 $A_0$<br>Yield constant $A_0$ | 0.034                 | N/A                             |
| 屈服常数 $A_1$<br>Yield constant $A_1$ | 70330                 | N/A                             |
| 屈服常数 $A_2$<br>Yield constant $A_2$ | $3 \times 10^{10}$    | N/A                             |

3 数值模拟结果分析

3.1 不同边孔距模拟结果分析

(1)炸药爆炸应力波传播过程

由于不同方案爆炸应力波在矿体和充填中的传播过程是类似的,以边孔距离充填体 0.2 m 的方案一为例,取不同时刻的 XY 平面有效应力云图如图 6。

从图 6 中可以看出,炸药起爆产生强烈的爆炸应力波,炸药在传播过程中类似于“球状”扩散,在 100  $\mu\text{s}$  时,应力波传播至矿体和充填体交界面,应力波发生透射和反射,由于两种材料模型参数差异较大,透射的应力波强度很低,有效应力云图中不能观察到充填体中的应力波传播情况,在 250  $\mu\text{s}$  时,3 个炮孔的应力波贯通产生应力叠加,随后 500  $\mu\text{s}$  时应力场外轮廓达到右侧自由面,后续应力波在自由面发生透射和反射,以低应力状态进行传播直至结束。

为了观察应力波在充填体中的传播情况,隐藏矿体单元,得到有效应力云图如图 7 所示,可以看

到,充填体中有效应力远低于矿体中有效应力,3 个炮孔相邻充填体处出现应力峰值,高应力区等值线呈现“波浪形”分布,充填体内的应力波相对于在矿体中传播的速度较慢,随着应力波朝着充填体内部传播,应力波能量逐渐衰减。

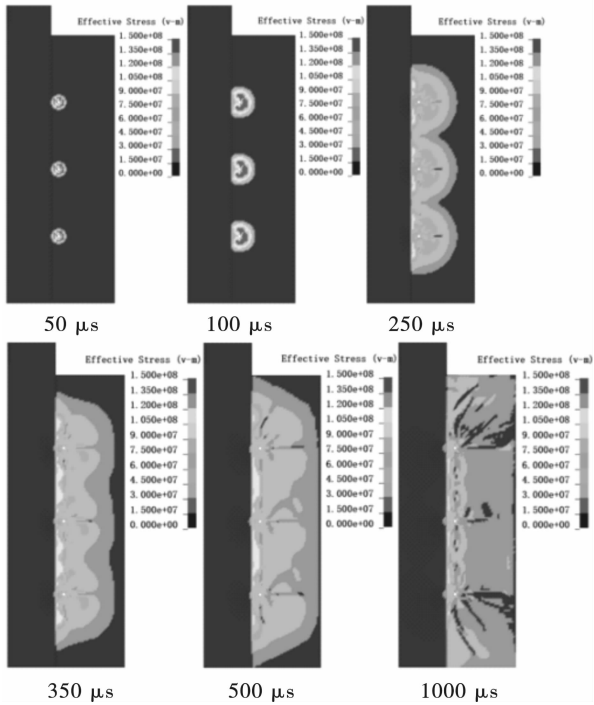


图 6 矿体中应力波传播

Fig. 6 Stress wave propagation in orebody

(2)充填体损伤破坏范围

矿体和充填体采用的 RHT 模型,当充填体损伤变量大于 0.6 时认定其已经产生了损伤,从图 8 和图 9 中可以看出,四种方案中矿体由于反射拉伸应力波出现大量破坏裂隙,表明矿体均能完成爆落,而充填体出现不同程度破坏,随着边孔距的不断加大,充填体损伤范围逐渐减少,方案一中充填体损伤范围相互连接,即会出现充填体大面积垮落破坏,方案二中各炮孔水平方向充填体有较深的损伤破坏,但是范围较小,炮孔间由于应力叠加会造成充填体出现圆弧形破坏,方案三中充填体损伤破坏范围进一步减少,由于 3 号炮孔 Y 轴方向为自由面,应力波会发生反射造成拉伸破坏,所以 3 号炮孔附近充填体出现损伤裂隙,而方案四由于距离充填体较远,应力

波逐渐衰减,未对充填体造成明显损伤。

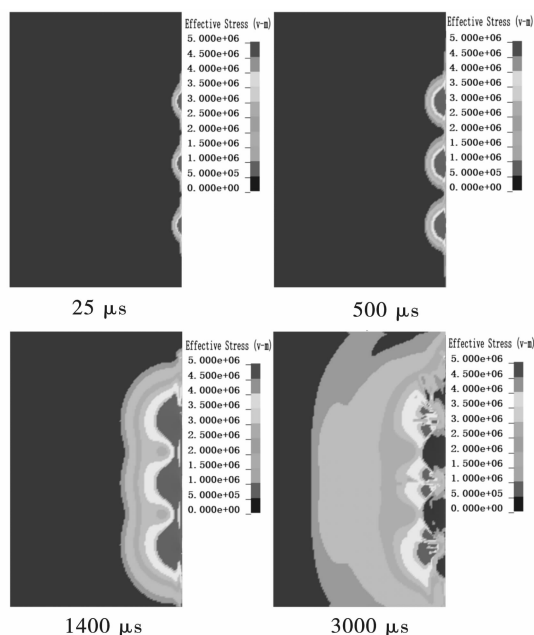


图 7 充填体中应力波传播

Fig. 7 Stress wave propagation in backfill

RHT 模型研究爆破裂纹损伤时通常将损伤水平 0.6 作为岩石破坏的阈值,为进一步观察充填体破坏情况,将损伤大于 0.6 的单元删除,同时隐藏矿体单元,观察充填体和岩石交界面处如图 10,删除失效单元数量如图 11。

由图 10、图 11 可见,方案一充填体破坏量远大于其他方案,孔边距从 0.2 到 0.8 m,充填体损伤失效部分呈指数级降低,方案三和方案四充填体失效单元相差不大,但是在方案三应力波造成裂隙仍深入充填体内,可能会造成充填体大块掉落,而方案四中充填体损伤均在表面,且损伤程度很浅,充填体基本上不发生垮塌和片落,充填体基本保持稳定,满足工程要求,因此,在爆破施工过程中,应该保持孔边距大于等于 0.8 m。

### 3.2 不同预留保护层厚度模拟结果分析

#### (1) 爆破裂纹拓展过程

如图 12 所示为方案一即保护层厚度为 0.3 m 的爆破裂纹拓展过程,0.5 ms 时,3 号炮孔正在爆炸,从孔底向孔口传播,3.5 ms 时 3 号炮孔已经完成爆破,与 3 号炮孔孔底相邻的充填体出现了损伤破坏,此时 2 号炮孔传爆了 0.5 ms,6.5 ms 时 2 号炮孔已完成爆破,孔底附近充填体出现了破坏,1 号炮孔开始了传爆,其产生的应力波会在已遭到损伤破坏的围岩和充填体介质内持续传播并产生叠加效应,随着时间进行充填体的损伤程度虽会进一步加剧,但由于先前爆破已形成了网状裂隙和弱化带,使得后续爆破释放的爆破能量优先沿既有的裂隙网络进行耗散传导,因此不会对未受影响的充填体区域产生显著的额外破坏,9 ms 时整体爆破结束,三个炮孔附近充填体均出现大量损伤破坏。

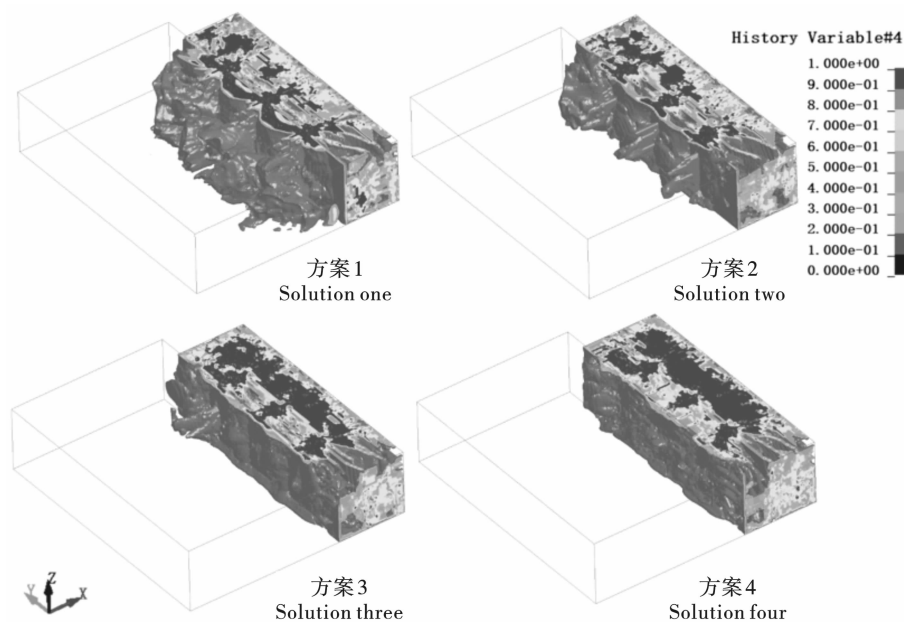


图 8 不同方案爆破损伤云图

Fig. 8 Damage contour plots for different blasting schemes

#### (2) 爆破最终裂纹分布

四种不同方案模型最终损伤如图 13 所示,由图

可见,充填体破坏主要还是集中在各炮孔底部位置,在方案一即预留保护层厚度为 0.3 m 的情况下,爆

破对充填体的影响较大,3 号炮孔和 2 号炮孔爆破造成的充填体破坏裂隙出现相连的情况,可能会导致充填体边帮出现大块脱落,增加矿石贫化率,随着保护层厚度的增加,充填体损伤破坏量逐渐减少,在方案四即保护层厚度为 0.6 m 时,可以看到充填体基本已经不出现高度损伤的红色区域。

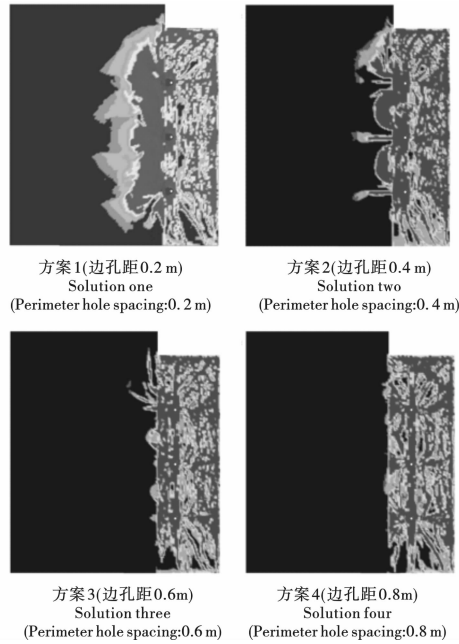


图 9 不同方案爆破损伤平面图  
Fig. 9 Damage distribution plan for different blasting schemes

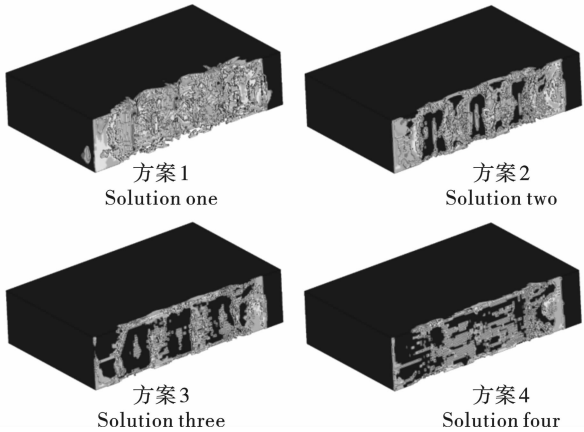


图 10 充填体损伤图  
Fig. 10 Damage diagram of backfill

(3) 充填体损伤破坏量

同样将损伤大于 0.6 的单元删除,同时隐藏矿体单元,观察充填体和岩石交界面处如图 14,删除失效单元数量如图 15。

从图 14,图 15 可以看到,四种方案中充填体失效单元逐渐减少,方案三中充填体内还存在失效集中区域,失效区与边帮相连通,导致充填体掉落,而方案四中仅有很少的失效部分,且失效部分互不贯

通,充填体整体较为稳定,因此,在采用扇形炮孔回采过程中,为了保护充填体不受边孔爆破的破坏,应保证预留保护层厚度大于等于 0.6 m。

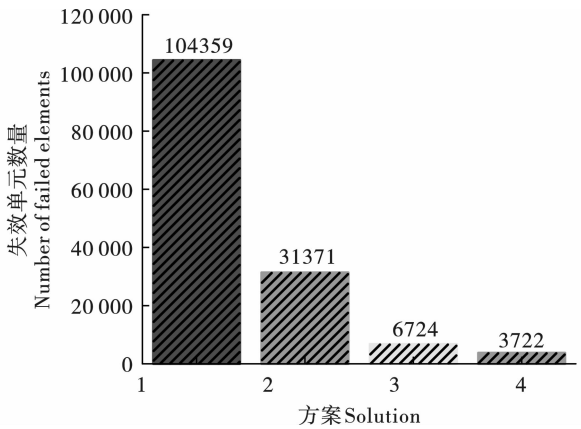


图 11 不同方案失效单元数量  
Fig. 11 Number of failed units for different schemes

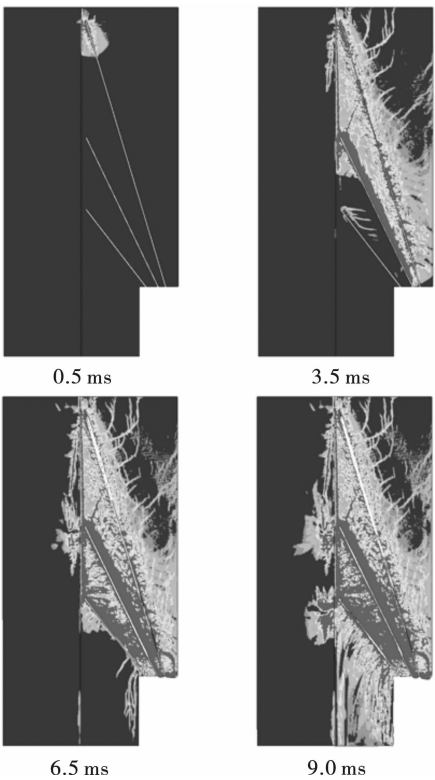


图 12 方案一爆破裂隙拓展过程  
Fig. 12 Process variables of crack propagation in blasting for scheme 1

4 工业试验

选取谦比希铜矿东南矿体 1040-1-4 采场进行现场工业试验以验证优化后的参数是否合理。1040-1-4 试验采场位于谦比希东南 1 号矿体 0#勘探线与 59#勘探线、980 ~ 1080 mL 中段之间,矿体走向北西,基本与褶皱构造轴向一致,倾向北东,采场

位置矿体平均厚度 16 m, 采场长 75 m, 宽 12.5 m, 其两侧 3# 和 5# 采场已完成回采并充填。炮孔孔径 76 mm, 排距为 1.8 m, 孔底距不大于 2.2 m, 采场炮孔平面图如图 16 所示。

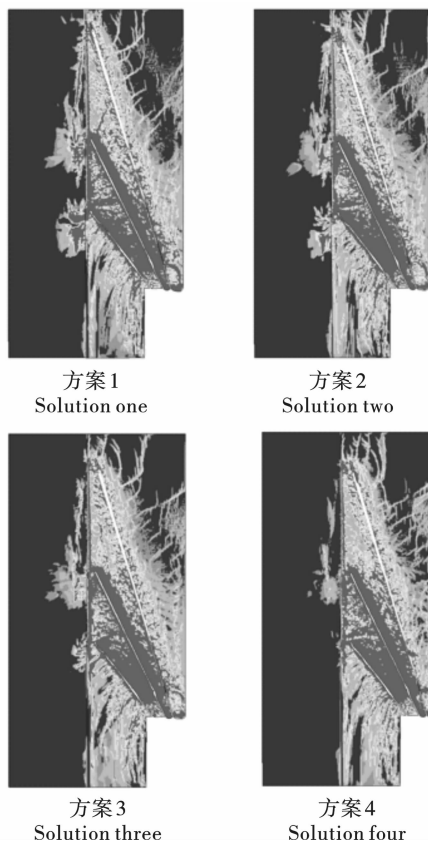


图 13 不同方案裂纹拓展图

Fig. 13 Crack propagation patterns for different schemes

炮孔布置如图 17 所示, 每排布置 11 个炮孔, 将充填体边界轮廓向外延伸设置扇形孔预留保护层 0.6 m, 由于 3# 采场只回采 62 m, 因此 1040-1-4 采场后部只有单侧充填体, 无充填体侧扇形斜孔施工至采场设计边界。

炮孔使用装药台车向炮孔泵入 AEL 混装乳化炸药, 采用堵孔器堵孔, 起爆方式采用多段位延期起爆。每个炮孔孔内均插入 500 ms 雷管, 通过孔外采用 25 ms、100 ms 雷管实现延期, 每排中间 5 孔设置一个段位同时起爆, 产生应力叠加区增强矿体破碎效果且不会对充填体稳定性造成较大影响, 之后两侧 3 孔延期 25 ms 依次起爆, 排间通过 100 ms 雷管保证延期, 如图 18 所示。

爆破出矿作业完成后, 采用三维激光扫描技术对采空区实施高精度数字化采集, 构建的空区数字模型如图 19 所示。通过对比分析 1040-1-4 试验采场与 732-1-1 常规扇形中深孔采场的空区形态可以

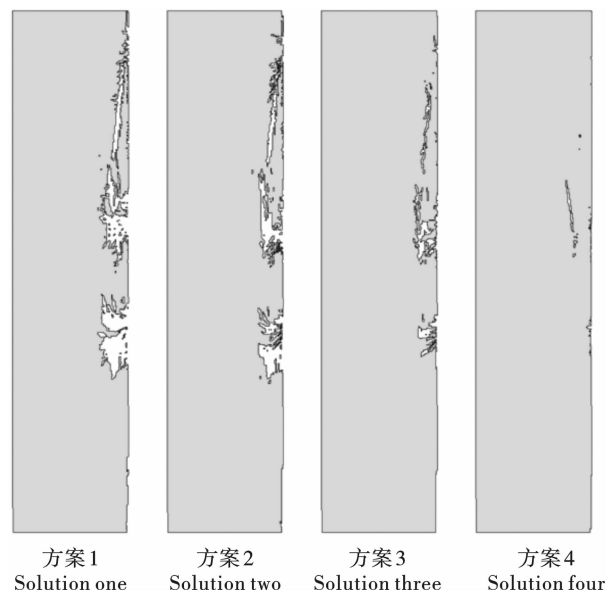


图 14 充填体损伤图

Fig. 14 Damage diagram of backfill

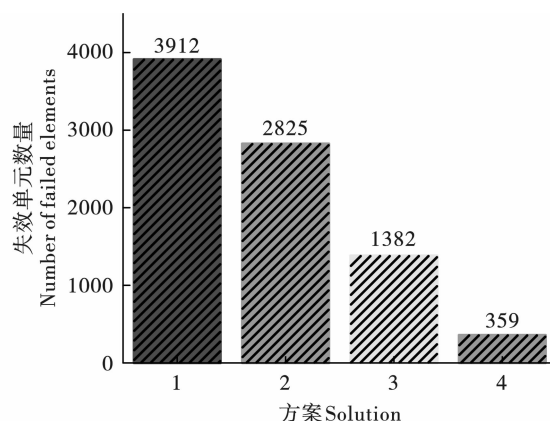


图 15 不同方案充填体失效单元数量

Fig. 15 Number of failed backfill units for different schemes

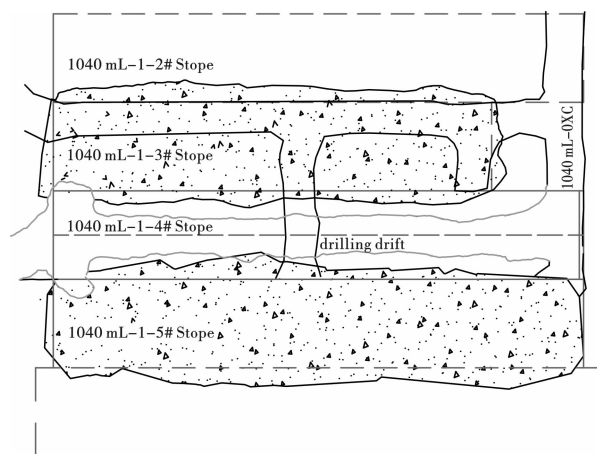


图 16 1040-1-4 采场平面图

Fig. 16 Plan view of 1040-1-4# stope

发现,试验采场在两侧帮区域呈现出显著优化的轮廓特征:相较于传统工艺形成的凹凸状边帮,试验采

场的侧帮形态更为平顺规整。这表明优化方案降低了对两侧充填体的破坏,达到了较好的工业效果。

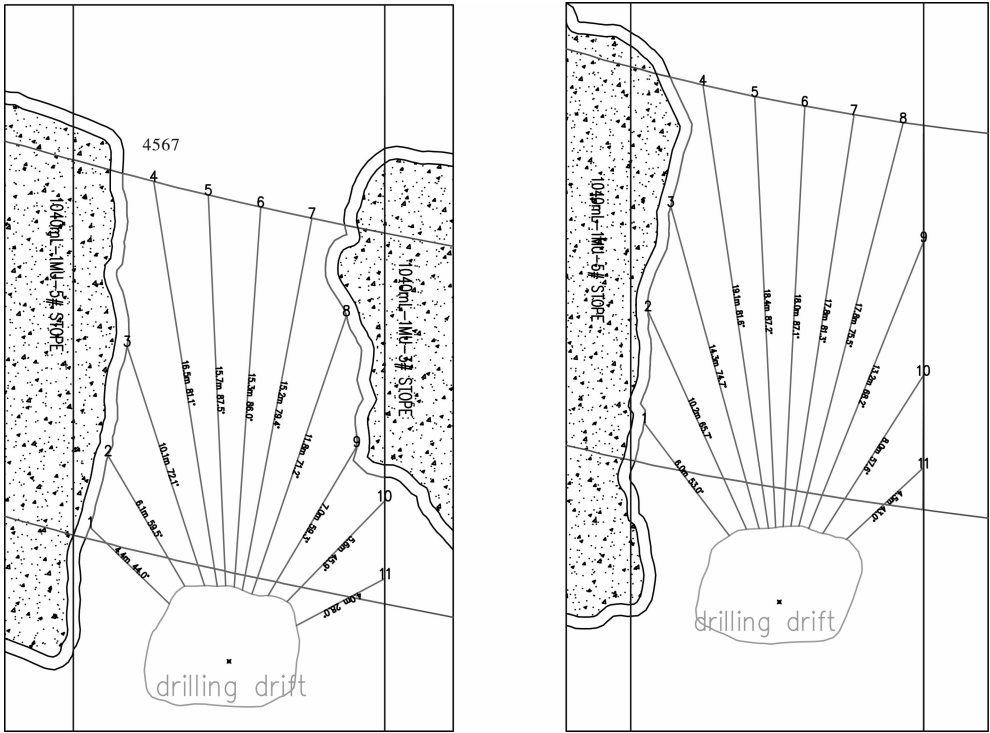


图 17 扇形炮孔示意图  
Fig. 17 Schematic diagram of fan holes

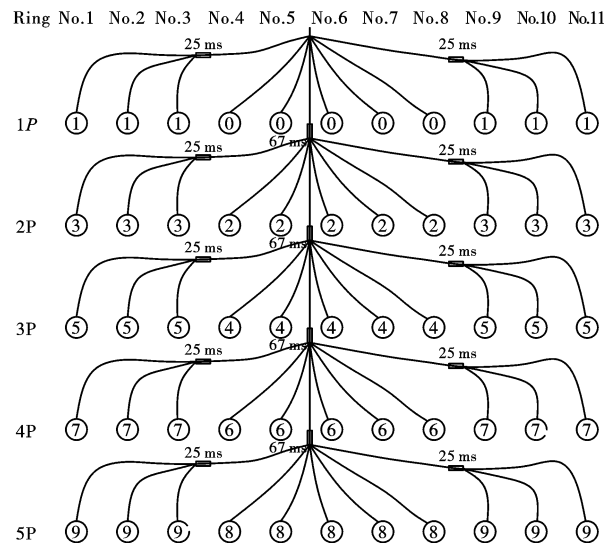


图 18 起爆网路示意图  
Fig. 18 Schematic diagram of blasting network

为了直观分析采场边帮轮廓的平整度以及超欠挖量,对采空区模型进行剖切操作,将切片和设计边界做对比如图 20 所示,红色曲线为空区切片,可以看出无明显超、欠挖现象,与设计相符,充填体边帮控制效果较好。

爆破后矿石如图 21 所示,可以看到矿石块度适

中,未发现明显充填块体掉落,较好地验证了研究结论的正确性。

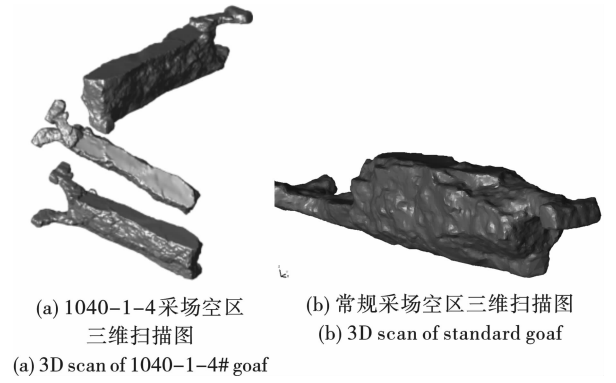


图 19 采场空区三维扫描图  
Fig. 19 3D scan of goaf

## 5 结论

通过理论分析、数值模拟和现场工业试验,分析在不同边孔距和不同预留保护层厚度条件下,采场爆破对充填体损伤破坏,得到能保证充填体稳定的边孔距和预留保护层厚度参数,并进行工业试验验证。得出以下结论:

(1) 由于充填体弹性模量远低于岩石弹性模

量,导致充填体和岩石波阻抗相差较大,应力波透射过岩充界面时强度会显著降低,爆炸作用下充填体中有效应力远低于矿体中有效应力。压碎区内介质

处于冲击波作用下,为保护充填体,炸药到充填体距离应大于压碎区半径。

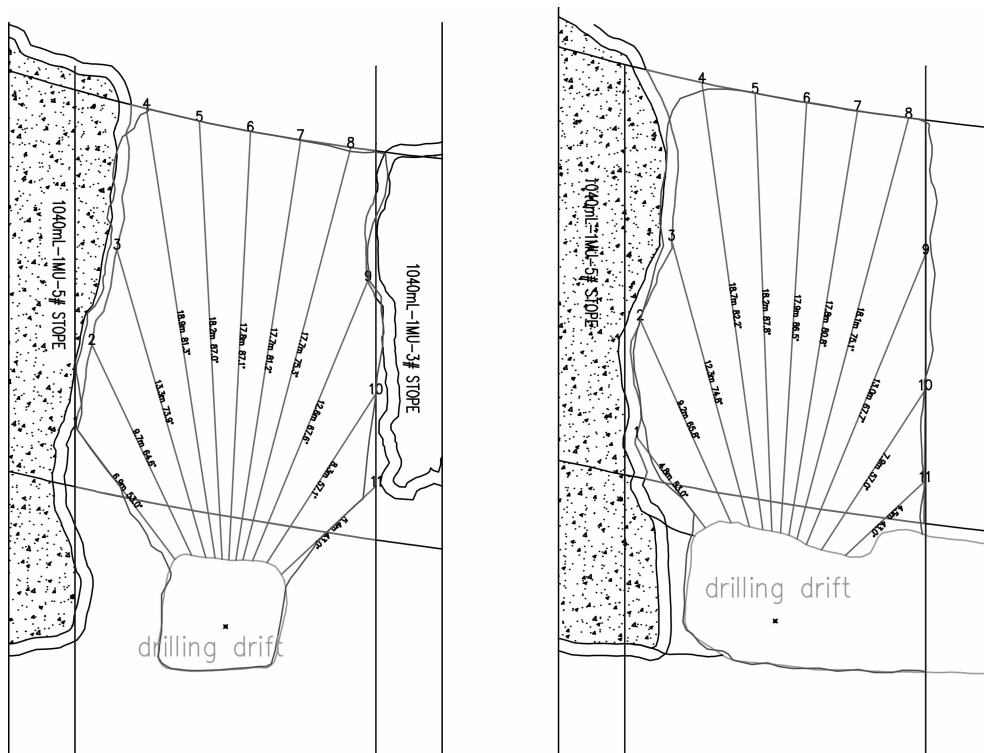


图 20 采场切片与设计边界对比

Fig. 20 Comparison of stope slices with design boundaries



图 21 爆堆照片

Fig. 21 Picture of blast muck pile

(2) 计算了充填体和矿体的 RHT 模型材料参数,采用 ANSYS/LS-DYNA 软件对平行边孔和扇形边孔分别进行爆破模拟,炮孔相邻充填体出现较大损伤破坏,平行炮孔间充填体由于应力叠加出现圆弧形破坏,随着边孔距的不断加大,充填体损伤范围逐渐减少,采用扇形炮孔爆破时,充填体整体损伤破坏量随着保护层厚度增加而减少,为保证充填体稳定性,基于模拟确定出平行孔边孔距需大于 0.8 m,扇形孔保护层厚度需大于 0.6 m。

(3) 在谦比希铜矿东南矿体 1040-1-4 采场开展工业试验,试验采场为上向扇形炮孔,设置预留保护层 0.6 m,采用多段位延期起爆,对爆破后采场三维

扫描模型以及模型切片进行分析,充填体边帮较为平整,下部硐室不再出现破碎充填大块,充填体稳定性得到了保障,验证了控制措施的有效性和实用性。

### 参考文献 (References)

- [1] 史秀志,周 健,崔 松,等.露天采矿爆破振动对民房危害预测的 DDA 模型及应用[J].中南大学学报(自然科学版),2011,42(2):441-448.
- [1] SHI Xiu-zhi, ZHOU Jian, CUI Song, et al. Distance discriminant analysis model and its application for prediction residential house's damage against blasting vibration of open pit mining[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(2): 441-448. (in Chinese)
- [2] ROY M P, SINGH P K, SARIM M, et al. Blast design and vibration control at an underground metal mine for the safety of surface structures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 83: 107-115.
- [3] 吴 浩. 基于充填体稳定性分析的深孔控制爆破参数优化[D]. 长沙:中南大学,2023.
- [3] WU Hao. Optimization of deep hole controlled blasting pa-

- rameters based on stability analysis of filling body [D]. Changsha: Central South University, 2023. (in Chinese)
- [4] HU K X, Kemeny J. A fracture mechanics analysis of the effect of backfill on the stability of cut and fill mine workings [C] // International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts. Pergamon, 1994, 31(3): 231-241.
- [5] 姜琳婧. 金鼎铁矿嗣后充填采场稳定性及结构参数优化研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- [5] JIANG Lin-jing. Study on stope stability and optimization of structure parameters in Jinding Iron Mine [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023. (in Chinese)
- [6] EMAD M Z, MITRI H, KELLY C. Dynamic model validation using blast vibration monitoring in mine backfill [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 107: 48-54.
- [7] EMAD M Z. Numerical modelling approach for mine backfill [J]. Sādhanā, 2017, 42(9): 1595-1604.
- [8] 梅佳伟. 爆破动载作用下充填体损伤力学特性及控制技术 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2024.
- [8] MEI Jia-wei. Damage mechanical characteristics and control technology of fill body under blasting dynamic load [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2024. (in Chinese)
- [9] 宋飞. 爆破对相邻胶结充填体损伤破坏规律研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- [9] SONG Fei. Study on damage and failure law of adjacent cemented backfill under blasting [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [10] LI G, DENG G, MA J. Numerical modelling of the response of cemented paste backfill under the blasting of an adjacent ore stope [J]. Construction and Building Materials, 2022, 343: 128051.
- [11] 王慎贤. 高分段采场爆破振动衰减规律及对充填体影响研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2022.
- [11] WANG Shen-xian. Study on the attenuation law of blasting vibration in high-section quarry and its influence on the filling body [D]. Changsha: Central South University, 2022. (in Chinese)
- [12] ZENG Q T, LIU K W, LI X H, et al. Blasting parameter optimization for room adjacent to cemented filling pillar [J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2016, 9(4): 185-191.
- [13] 苏勇. 胶结充填体矿柱的爆破扰动失稳及控制研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [13] SU Yong. Study on blasting disturbance instability and control of cemented backfill pillars [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [14] 姜立春, 苏勇, 代庆松. 远场爆破水平应力波扰动下分层胶结充填体矿柱的动力响应机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 34-44.
- [14] JIANG Li-chun, SU Yong, DAI Qing-song. Dynamic response mechanisms of layered cemented backfill pillars under horizontal stress wave disturbance of far-field blasting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 34-44. (in Chinese)
- [15] 王梦想. 围压作用下的爆炸应力场及岩石损伤破坏机理模型试验研究 [D]. 合肥: 安徽理工大学, 2019.
- [15] WANG Meng-xiang. Experimental study on explosion stress field and damage mechanism of rock under confining pressure [D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [16] 卢珊珊. 爆破荷载作用下隧洞围岩动力响应及破坏模式研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [16] LU Shan-shan. Research on dynamic response and failure mode of tunnel surrounding rock under blasting loading [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [17] 刘爱兴. 充填采矿法二步回采深孔爆破参数优化研究 [D]. 唐山: 华北理工大学, 2016.
- [17] LIU Ai-xing. Optimization study of the second step mining deep hole blasting parameters in the filling mining method [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [18] 朱万字. 改良高液限土在拓宽填方路基中的应用研究 [D]. 北京: 北方工业大学, 2023.
- [18] ZHU Wan-yu. Study on the application of improved high liquid limit soil in the widening of fill road base [D]. Beijing: North China University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [19] 丁晨曦. 爆炸动静破岩作用与高应力状态下爆破动力学行为研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2020.
- [19] DING Chen-xi. Study on dynamic-static rock fracture mechanism of blasting and blasting dynamic behavior under high stress condition [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2020. (in Chinese)
- [20] DICK R A, FLETCHER L R, D'ANDREA D V. Explosives and blasting procedures manual [M]. US Department of the Interior, Bureau of Mines, 1982.
- [21] 刘广鑫. 岩石爆破中的爆炸能量传输与破碎过程控制 [D]. 武汉: 武汉大学, 2021.

- [21] LIU Guang-xin. Explosion energy transmission and fragmentation process control in rock blasting[D]. Wuhan: Wuhan University, 2021. (in Chinese)
- [22] ESEN S, ONEDERRA I, BILGIN H A. Modelling the size of the crushed zone around a blasthole[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(4): 485-495.
- [23] 高金石, 张继春. 爆破破岩机理动力分析[J]. 金属矿山, 1989(9): 7-12, 6.
- [23] GAO Jin-shi, ZHANG Ji-chun. Dynamic analysis of rock fragmentation mechanism by blasting[J]. Metal Mine, 1989(9): 7-12, 6. (in Chinese)
- [24] HUO X, SHI X, QIU X, et al. Rock damage control for large-diameter-hole lateral blasting excavation based on charge structure optimization[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 106: 103569.
- [25] 马昊阳. 高地应力下岩石爆破应力波传播及裂纹扩展规律研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- [25] MA Hao-yang. Study on stress wave propagation and crack extension law of rock blasting under high in-situ stress[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [26] 李洪超, 刘殿书, 赵磊, 等. 大理岩 RHT 模型参数确定研究[J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(8): 801-806. DOI: 10.15918/j. tbit1001-0645. 2017. 08. 006.
- [26] LI Hong-chao, LIU Dian-shu, ZHAO Lei, et al. Study on parameter determination of marble RHT Model[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(8): 801-806. DOI: 10.15918/j. tbit1001-0645. 2017. 08. 006. (in Chinese)
- [27] 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, 2017, 66: 19-33.

## 《爆破》论文网络首发及著作权使用声明

《爆破》为使录用论文首发权及时获得确认, 自 2019 年 12 月起与中国知网合作启动“网络首发”在线优先数字出版项目, 即《中国学术期刊(网络版)》(简称 CAJ-N), 统一连续出版物号 ISSN 2096-418/CN 11-6037/Z。

作者稿件经审稿录用后, 将会以“录用定稿”模式第一时间上传至中国知网“网络首发”平台发布。每篇网络首发论文均可下载一份“中国知网学术期刊网络首发论文出版证书”, 其效力等同于纸质出版论文。

为避免出现一稿多投的现象, 凡已投《爆破》的稿件, 在未确认录用或退稿前, 请勿再投他刊!

《爆破》是中文核心期刊要目总览、中国科学引文数据库(CSCD)、科技期刊世界影响力指数(WJCI)报告、高质量科技期刊分级目录总汇、中国科技核心期刊、中国学术期刊评价研究报告(RCCSE)、中国应用型期刊评价研究报告(CACJ)等评价体系收录期刊。《爆破》还是 Scopus 科研检索分析和学科规划管理数据库、SciFinder CAS 美国化学文摘数据库、Ulrich's 乌利希国际期刊指南、JST 日本科学技术振兴机构数据库、中国知网知识发现网络平台、万方数据知识服务平台、超星期刊域出版平台、维普资讯中文期刊服务平台、SciOpen 平台、SciEngine 发布平台、Researching 中国光学期刊网、楚天科技期刊论文在线开放平台等数据库和平台收录期刊。本刊已许可上述机构以数字化方式网络传播本刊全文。所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议, 请在投稿时说明, 本刊将按作者说明处理。