

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.02.003

爆速与填塞长度对压渣爆破效果影响分析*

王涛^{1,2}, 任高峰¹, 汪祯², 康普林¹, 王其洲¹, 赵明生²

(1. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 武汉 430070; 2. 宏大爆破工程集团有限责任公司, 广州 510000)

摘要: 为了揭示压渣爆破中爆速与填塞长度对爆破效果的影响机制, 优化爆破参数设计, 提升炸药能量利用效率与作业安全性。通过建立模糊数学-熵权-层次分析体系, 分析出符合现场施工要求的最优爆速、填塞长度区间; 借助离散元软件 PFC 构建压渣爆破力学模型, 分析不同爆速与填塞长度组合下的应力波传播、裂隙扩展及能量传递规律, 通过现场实时采集爆破振动参数、岩体破碎块度分布、爆堆形态特征等核心技术指标, 与模拟结果的对比分析, 验证最优参数区间的工程适配性及数值模拟结果的准确性与可信度。结果表明: 压渣爆破下现场混装乳化炸药爆速存在最优区间, 位于 4500 m/s 左右时与花岗岩较为匹配, 爆速过低炸药能量释放不足导致大块率升高, 爆速过高则因应力波峰值压力高导致粉矿率升高; 填塞长度与台阶高度存在临界匹配关系, 填塞长度为台阶高度 20% ~ 26% 时, 可平衡上下部破碎效果; 通过采取针对性技术措施、推行精细化爆破施工, 合理调整炸药爆速与填塞长度, 可有效改善台阶爆破在既有孔网参数下爆破效果。研究明确了爆速-填塞长度的耦合作用机制, 为露天矿山压渣爆破参数优化提供理论依据与工程参考。

关键词: 露天矿山; 压渣爆破; 数值模拟; 岩体损伤

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)02-0026-08

Analysis of Effects of Detonation Velocity and Stemming Length on Muck Pile Blasting Performance

WANG Tao^{1,2}, REN Gao-feng¹, WANG Zhen², KANG Pu-lin¹, WANG Qi-zhou¹, ZHAO Ming-sheng²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Hongda Blasting Engineering Group Co., Ltd., Gangzhou 510000, China)

Abstract: This study investigates the mechanism by which detonation velocity and charge length influence blasting performance in muck pile blasting, aiming to optimize blast design parameters while enhancing explosive energy utilization efficiency and operational safety. By establishing a comprehensive evaluation system integrating fuzzy mathematics, the entropy weight method, and the analytic hierarchy process, this study analyzes the optimal ranges of detonation velocity and charge length that meet field construction requirements. Additionally, a mechanical model of muck pile blasting was developed using the discrete element software PFC. The study systematically examined stress wave propagation, fracture propagation, and energy transfer characteristics across various combinations of detonation

收稿日期 (Date of reception): 2025-11-08

网络首发日期 (Published online): 2025-12-11

作者简介: 王涛 (1988-), 男, 博士研究生, 高级采矿工程师, 从事露天矿山开采研究, (E-mail) 724561437@qq.com。

通信作者: 任高峰 (1979-), 男, 教授、博士, 从事矿山工程研究, (E-mail) rgfwhut@163.com。

基金项目: 非煤露天矿山安全智能开采国家矿山安全监察局重点实验室重点专项课题 (项目编号: 2024-K09) 非煤露天矿山节理化高陡边坡爆破累积损伤特性及缓冲减损机理; 国家自然科学基金 (52174087)

About the author: WANG Tao (1988-), male, doctoral student, senior mining engineer, mainly engaged in research on open-pit mining, (E-mail) 724561437@qq.com.

Corresponding author: REN Gao-feng (1979-), male, professor, Ph. D, mainly engaged in mine engineering research, (E-mail) rgfwhut@163.com.

Fund Programs: Key Special Project of the Key Laboratory of Safety and Intelligent Mining of Non-coal Open-pit Mines of the State Administration of Mine Safety (Project Number: 2024-K09) Cumulative Damage Characteristics and Buffering and Loss Reduction Mechanism of High and Steep Slopes with Physical and Chemical Conservation in Non-coal Open-pit Mines, National Natural Science Foundation of China (52174087)

velocity and stemming length. Field measurements of critical parameters, including blast vibration parameters, rock fragmentation distribution, and muck pile morphology, were conducted and cross-validated with simulation outputs, confirming both the engineering adaptability of optimal parameter ranges and the reliability of numerical modeling predictions. The experimental results demonstrate an optimal detonation velocity range (approximately 4500 m/s) for bull emulsion explosive in muck pile blasting operations, showing optimal compatibility with granite formations. Below this critical velocity threshold, insufficient explosive energy occurs, leading to increased oversize fragment generation in blasted rock masses. Excessive detonation velocities lead to elevated fine ore production rates due to disproportionately high peak stress-wave pressures. Furthermore, a critical correlation exists between charge length and bench height. Optimal fragmentation balance between the upper and lower bench sections is achieved when the charge length is 20% to 26% of the total bench height. Through targeted technical interventions, refined blasting implementation, and optimized adjustment of explosive detonation velocity coupled with charge length, significant enhancement of bench blasting performance can be achieved under existing burden and spacing. This research elucidates the coupling mechanism between detonation velocity and stemming length, establishing both theoretical foundations and practical guidelines for optimizing blasting parameters in open-pit mine muck pile blasting.

Key words: open-pit mine; muck pile blasting; numerical simulation; rock mass damage

压渣爆破又称为留渣爆破或挤压爆破,是在爆破过程中,按设计的爆破顺序,以前次爆破的爆堆为预留“渣体”,作为下次爆破控制爆破应力发展的约束体,从而改变原有“自由面”爆破过程中应力在岩土内的作用条件^[1-3]。同时,作为原位爆破技术的一种方法,在爆破后既可有效保持原始的矿岩边界,便于爆后的分采分装,又能有效降低矿石的损失和贫化,还可以提高预爆量,均衡生产^[4,5]。压渣爆破技术已成熟应用于德兴铜矿、霍林河南露天矿、长久神山矿、后布连露天煤矿、大孤山铁矿、白云鄂博铁矿等大型露天矿山,并取得很好的效果^[6-10]。

目前,多数学者对于压渣爆破的研究多集中于控制爆破位移、形态、块度的分布特征、降低粉矿率以及铲装效率等方面研究,对于压渣爆破下爆速、填塞长度等因素对爆破效果影响研究较少。如:王文韬通过建立压渣爆破数值模拟模型,重点研究了压渣厚度对爆破应力分布、岩石损伤和运动规律及爆堆形态的影响^[11],并通过现场试验进行验证;刘玉龙通过开展大区块压渣爆破试验^[12],测定和统计了试验区块爆堆形态、装载效率、爆破块度以及底板标高偏差等指标,并与同期清渣爆破区块进行对比分析;谢烽通过对压渣爆破爆后电铲铲装效率的统计^[13],同时分析爆破块度分布及爆堆高度,确定了最佳的压渣爆破厚度,同时,首次将压渣爆破技术推广至多排孔大区块爆破中;黄磊通过实验研究了复杂矿体大方量压渣爆破在纵深方向上的爆破质量变化和矿废混合情况^[14],提出采取“一个爆破区块,两套爆破参数”的策略。

综上,已有研究成果对于既定孔网参数下压渣爆破中炸药爆速与填塞长度对压渣爆破效果影响分

析较少。本文通过构建压渣爆破效果评价体系,在原有露天台阶深孔爆破参数的情况下,分析压渣爆破最佳爆速、填塞长度区间,并借助离散元软件 PFC 构建平行黏结模型,开展了压渣爆破数值模拟研究,重点研究了区间内爆速、填塞长度对岩石损伤和运移规律的影响,并通过现场试验进行验证。

1 工程概况

1.1 矿区概况

矿区位于珠江三角洲西缘,属低丘陵地貌,面积 0.906 km²,设计开采深度由 +242 m 至 -60 m 标高。如图 1 所示,矿区整体上呈现出北西高,南东低趋势,且南北呈狭长状分布,最窄处宽度仅 20 m,同时采场高差较大,为典型的高陡边坡露天开采砂石骨料矿山。



图1 矿区鸟瞰图

Fig. 1 Bird's-eye view of the mining area

矿体主体由晚白垩世黑云母二长花岗岩组成,呈岩基状产出,并向四周及深部延出矿区外,岩性单一,岩相多样,普氏硬度系数 f 为 12~15,质地坚硬。

节理裂隙较为发育,向深部发育程度逐渐降低,未见大规模断裂或破碎带形迹。

1.2 生产现状

矿山遵循“采剥并举,剥离先行”原则,采用自上而下分层开采,为实现资源合理开发利用、经济效益最大化,采用台阶爆破方式,爆破作业满足以下指标:大块率(大块指矿石最大边尺寸(1 m)不超过5%,粉矿率(粉矿指矿石粒度直径 ≤ 0.5 mm)不超过18%。

台阶高度15 m,采用梅花型垂直布孔,穿孔直径 $\phi 140$ mm,孔网参数 $6.5\text{ m} \times 4.0\text{ m}$,超深1.5 m,填塞长度5.0 m,底盘抵抗线4.0 m;采用混装乳化炸药车现场装药,成品乳化炸药作为起爆药柱,工业电子雷管逐孔起爆。

矿区可采范围有限,工作面狭窄。随着矿山开采纵深增加,矿石硬度显著增加,且局部区域含水量大。为满足供矿与配矿需求,需多平台协同开采。穿孔作业超前完成,部分区域因矿石未及时完成挖装,实施压渣爆破;出入沟开拓时,采用延道路坡度分段爆破,为提升开拓效率,实施压渣爆破。

2025年9月,在南山1#坑+30平台爆破作业,爆区自由面两侧及前方均存在未挖掘矿石,爆后爆堆形态如图2所示。爆破后上部岩体未发生有效位移,出现连续拉裂的顶部大块,且爆堆整体呈现高低不连续分布特征。挖装后,爆堆内部粉矿率约22%,压渣爆破效果不佳。



图2 爆堆形态分布特征

Fig. 2 Muck pile morphology

2025年10月,在南山1#坑+15平台开拓沟掏槽爆破作业,爆后爆堆形态如图3所示。本次爆破压渣厚度约为6.0 m,底部受水持续影响,爆后顶部大块率高,爆堆坡面块度不均匀。

为了优化此类特殊工况下爆破效果,开展了既定孔网参数条件下,压渣爆破炸药爆速、填塞长度对爆破效果的影响分析,探寻最佳匹配参数。



图3 掏槽爆破作业爆堆整体形态

Fig. 3 Overall muck pile shape cut blasting operation

2 爆破参数区间的选取

2.1 评价体系的构建

引入模糊综合评价法^[15]、层次分析法、熵权法进行分析,选取爆速、填塞长度等变量因素作为主控指标,以半孔率、裂隙降低系数^[16]、块度等作为重要影响因素,构建模糊数学-熵权-层次分析模型,建立爆破效果评价体系,具体如下:

①按照模糊数学原理,通过模糊映射确定对应的模糊关系 R ,从而构建单因素模糊集,可表示为

$$R = (r_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, r_{ij} 是各评价因素的隶属函数,是一种用于描述模糊概念的数学函数,它可以将输入值映射到一个 $[0,1]$ 之间的隶属度值^[17]。

②构建专属评判矩阵

$$r(x) = \begin{cases} 0, s_{i0} \leq x \leq s_{i(j-1)} \\ \frac{x - s_{i(j-1)}}{s_{i(j-1)} - s_{i(j-2)}}, s_{i(j-2)} \leq x \leq s_{i(j-1)} \\ 1, s_{i(j-1)} \leq x \leq s_{ij} \\ \frac{s_{i(j+1)} - x}{s_{i(j+1)} - s_{ij}}, s_{ij} \leq x \leq s_{i(j+1)} \\ 0, s_{i(j+1)} \leq x \leq s_{im} \end{cases} \quad (2)$$

式中: s 为单一因素的数值解; m 为评价等级分级数量。

③利用层次分析法理论,对上述评判矩阵进行层次单排序和一致性检验

$$C = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

为了消除判断矩阵不一致程度影响,建立一致性指标 RI

$$RI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

式中: $\lambda_{\max}$ 为多个 n 阶随机正反矩阵最大特征值的平均值;定义 $CR = C/RI$ 为随机一致性比例,若 CR 小于 0.1,此时判断矩阵的不一致性仍可接受,否则判断矩阵不成立。

④利用熵权法理论对单一指标信息熵的数值与离散程度进行评价,从而判断其所占权重,某一单一因素比重 p 及其熵值 e 可通过下式确定

$$p_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^n y_{ij}} \quad (5)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (6)$$

⑤综合权重 F 的确定

$$F_j = \frac{w_j p_j}{\sum_{j=1}^n w_j p_j}; W_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (7)$$

式中: F_j 为第 j 个因素的综合权重; p_j 为第 j 个因素基于层次分析法计算的权重; w_j 为第 j 个因素基于熵权法计算的权重。

因此,压渣爆破效果评价最终的判定公式为

$$D = \sum_{i=1}^n F_{ij} R_{ij} \quad (8)$$

2.2 最佳参数的确定

结合矿区以往爆破经验,综合确定评价标准如下:当 $0 \leq D \leq 0.5$ 时,爆破后容易产生大块或岩石过于破碎从而导致粉矿率增加,不满足现场生产要求,爆破效果较差;当 $0.5 \leq D \leq 1$ 时,岩石分选性及大块率、粉矿率满足现场生产要求,爆破效果较好。

分别对爆速、堵塞长度两大因素对压渣爆破效果影响进行评价,绘制爆速 V - D 、堵塞长度 H - D 压渣爆破效果方格分区图,如图 4、图 5 所示。可知,当混装乳化炸药爆速控制在 $4000 \sim 5000$ m/s、堵塞长度在 $3.0 \sim 4.0$ m 时,爆破效果最佳。

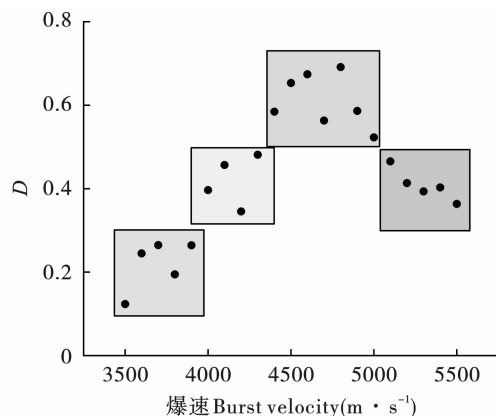


图 4 V - D 方格图

Fig. 4 V - D grid diagram

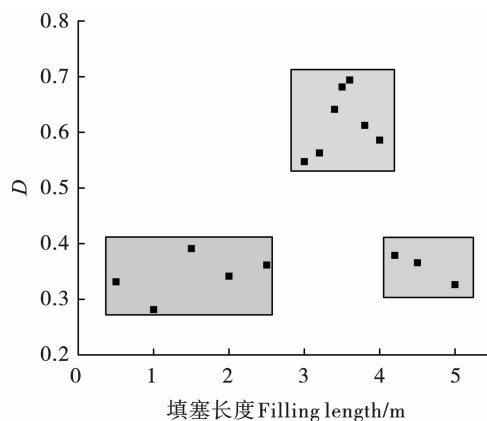


图 5 H - D 方格图

Fig. 5 H - D grid diagram

3 数值模拟

3.1 模型构建

基于离散元软件 PFC^{2D} 开展数值模拟分析,采用平行黏结模型模拟花岗岩岩体,并通过改变颗粒间的细观参数实现岩体宏观力学特性的模拟,其单轴抗压模拟试验如图 6 所示,采用“试错法”标定细观参数,结果如表 1 所示。

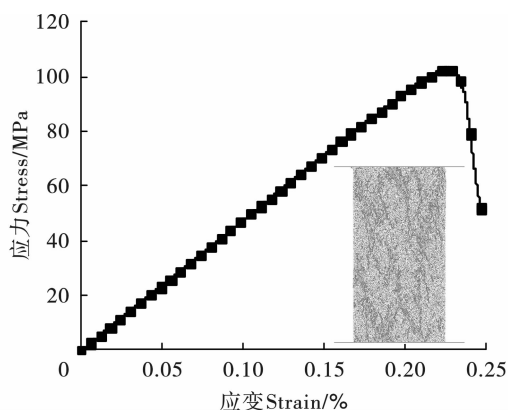


图 6 单轴抗压模拟试验

Fig. 6 Uniaxial compressive simulation test

其中,模拟结果的弹性模量、抗压强度分别为 46.01 GPa、103.42 MPa,而实验室测试结果的弹性模量、抗压强度分别为 46.70 GPa、102.20 MPa,两者误差保持在 2% 以下,故该细观参数足以反映试验区域岩体的力学特性。

建立二维离散元压渣爆破模型如图 7 所示。其中,模型灰色颗粒为岩体部分,台阶左侧黄色颗粒为压渣部分,模型中间空区及彩色颗粒为炮孔及炮孔壁;模型左右两侧及底部设置无反射边界,降低应力波反射引起的误差,顶部不设置边界条件,模拟爆破自由面;模型尺寸为 $65.0 \text{ m} \times 30.0 \text{ m}$ (宽 $\times$ 高),台阶高度为

15 m,药包采用耦合装药,装药直径 ϕ 140 mm,超深 1.5 m,填塞长度 3~4 m,炮孔最小坡底线 4.5 m,孔

距 6.5 m;在各炮孔中部每隔 3 m 位置处设置监测点 1~4,监测各点速度变化。

表 1 平行黏结模型的细观参数

Table 1 Mesoscopic parameters of the parallel bonding model

颗粒密度 Particle density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	颗粒最大 半径 The maximum radius of the particle $R_{\max}/\text{mm}$	颗粒最小 半径 The minimum radius of the particles is $R_{\min}/\text{mm}$	颗粒摩擦 因数 Coefficient of particle friction	颗粒接触 弹性模量 Particle contact elastic modulus/GPa	颗粒 刚度比 Particle stiffness ratio	平行黏结 弹性模量 Parallel bonding elastic modulus/GPa	黏结 刚度比 Bonding stiffness ratio	平行黏结 抗拉强度 Parallel bonding tensile strength/MPa	平行黏结 黏聚力 Parallel bonding cohesion/MPa
2600	166	100	0.58	26.7	1.74	26.7	1.74	77.6	31.0

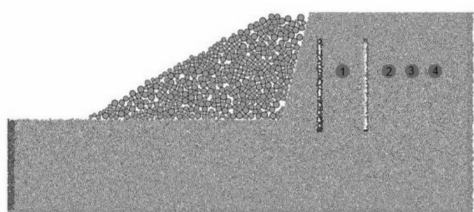


图 7 压渣爆破模型

Fig. 7 Muck pile blasting model

对于爆炸载荷,Ye 等对三角波载荷进行了修正^[18],添加了爆生气体载荷,如图 8 所示。式中: t 为时间; t_u 为应力波峰值时间; t_d 为爆生气体开始加载时间; t_s 为爆炸载荷加载结束时间,参考相关研究^[19,20],设置 t_u 为 10 μs , t_d 为 40 μs , t_s 为 1000 μs 。 P 为载荷, P_m 为应力波峰值应力^[21], P_d 为爆生气体初始加载应力

$$P_m = \frac{\rho_c v_c^2}{k+1} \frac{2\rho_r v_r}{\rho_r v_r + \rho_c v_c} \quad (9)$$

$$P_d = P_m/3 \quad (10)$$

式中: ρ_r 为岩体的密度,这里取 2600 kg/m^3 ; v_r 为应力波在岩体内传播的纵波波速,开展相关实验,取 3200 m/s ; ρ_c 为炮孔内炸药的密度; v_c 为炸药的爆速; k 为绝热指数,近似取 3。

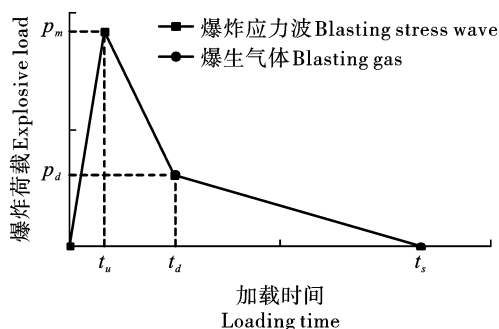


图 8 爆炸载荷模型

Fig. 8 Explosion load model

应力波在岩体内传播的过程中不断衰减,加载在模型炮孔壁上的载荷为

$$P_b = P/(R/R_0)^n \quad (11)$$

式中: P_b 为应力波传播距离 R 后的载荷, n 为衰减指数,可由下式求得

$$n = 2 \pm \frac{\mu}{1-\mu} \quad (12)$$

式中: μ 为岩石的泊松比,取 0.22,冲击波影响范围内取正号,应力波影响范围内取负号。

3.2 模拟结果分析

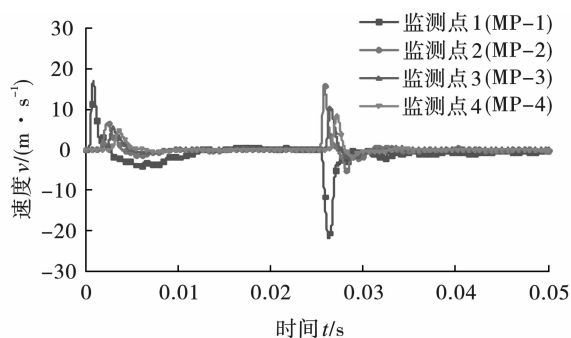
现场混装乳化炸药可以调整方案进而改变炸药的爆速,改变爆破效果,参考王基禹的研究^[22],设置不同爆速与装药密度开展模拟,爆破载荷参数如表 2 所示。根据模型中炮孔壁的位置范围,取 R/R_0 为 2.71,衰减指数 n 取 2.28,加载在模型炮孔壁上的峰值载荷分别为 0.67 GPa、0.78 GPa、0.99 GPa,各监测点 X 方向速度如图 9 所示,统计其峰值如表 3 所示。

对比不同方案下监测点振动速度可知,爆速越高,爆炸载荷越大,对应位置的振动速度越快;前排炮孔起爆时监测点 1 的振动速度与后排炮孔起爆时监测点 2 的振动速度基本一致,可以认为距炮孔相同距离的位置上爆破振动速度基本相同。但后排炮孔起爆时监测点 1 振动速度大于监测点 2 的振动速度,说明爆破载荷的能量在散体中更多的转化为动能。

另外,两炮孔中间的岩体受到多次破坏,若爆破载荷过大,会引起该区域破坏严重,增加粉矿率,降低矿山的收益。各方案下裂纹发育情况如图 10 所示,其数量统计如图 11 所示。

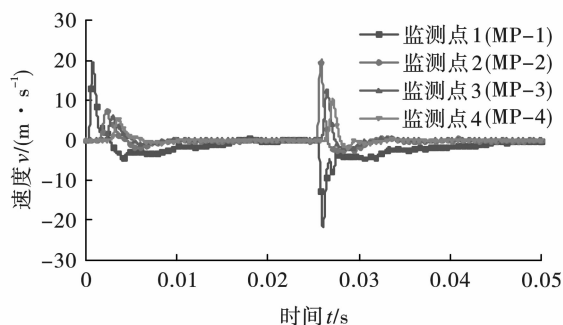
其中,方案 I 裂纹发育较差,大块率较高,爆破效果较差;方案 II 裂纹发育较好,整体爆破效果较好;方案 III 裂纹发育较广,破坏范围较大,整体粉矿

率较高,爆破效果较差。因此,采用方案Ⅱ开展爆破效果较好。为减少台阶顶部大块,可以采用空气间隔装药,同时减少堵塞长度,设置堵塞长度为4.0 m、3.5 m、3.0 m,开展数值模拟,分析台阶顶部的爆破效果,如图12所示。



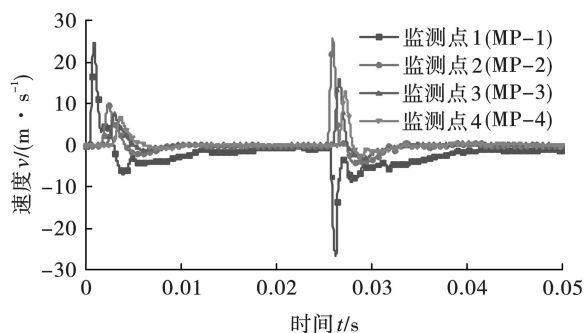
(a) 方案Ⅰ各监测点x向速度

(a) X-direction velocity at each monitoring point of scheme I



(b) 方案Ⅱ各监测点x向速度

(b) X-direction velocity at each monitoring point of scheme II



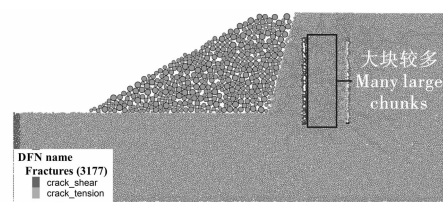
(c) 方案Ⅲ各监测点x向速度

(c) X-direction velocity at each monitoring point of scheme III

图9 各方案不同监测点振动速度

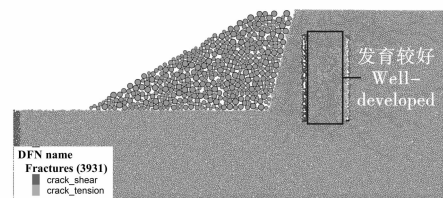
Fig. 9 Vibration velocity of different monitoring points in each scheme

各模型顶部粘结数量与裂纹数量如表4所示,计算各模型的破坏率,堵塞长度为4.0 m时,岩体破坏率较低,台阶顶部大块率较高,爆破效果差。堵塞长度3.5 m,岩体破坏率较高,台阶顶部爆破效果较好;堵塞长度为3.0 m时,岩体破坏率极高,台阶顶部粉矿率较高,爆破效果较差。因此,堵塞长度选择3.5 m(台阶高度的23%)为佳。



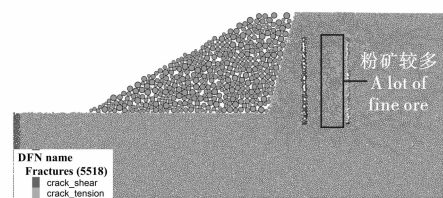
(a) 方案Ⅰ裂纹发育

(a) Scheme I crack development



(b) 方案Ⅱ裂纹发育

(b) Scheme II crack development



(c) 方案Ⅲ裂纹发育

(c) Scheme III crack development

图10 不同配方裂纹发育

Fig. 10 Crack development in different formulations

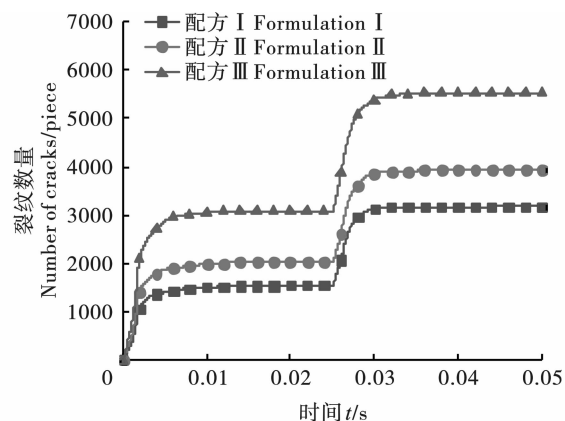


图11 不同配方裂纹统计

Fig. 11 Crack statistics of different formulations

4 现场试验

为了验证既定孔网参数下,数值模拟所揭示的最优爆速区间、堵塞长度对压渣爆破效果控制作用,选取同一开采平台开展现场压渣爆破试验研究。本次试验采取如下措施:

(1)按照既定孔网参数进行布孔,自由面坡角处压渣厚度约为6.0 m,堵塞长度从4.0 m调整至3.5 m。

表 2 不同方案乳化炸药的爆炸载荷

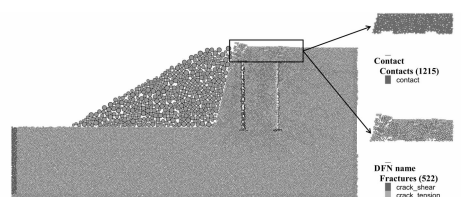
Table 2 Explosion loads of different emulsion explosives schemes

编号 Number	爆速 Blast velocity/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	装药密度 Charge density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	应力波峰值 Stress wave peak value P_m/GPa	爆生气体初始应力 Initial stress of explosive gas P_d/GPa
I	4138	1220	6.50	2.17
II	4539	1230	7.58	2.53
III	5262	1240	9.62	3.21

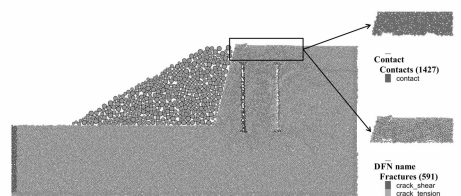
表 3 各监测点峰值

Table 3 Peak values of each monitoring point

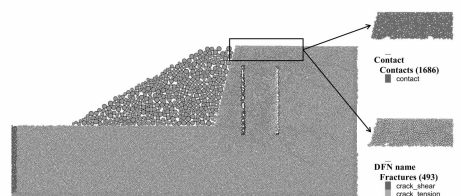
编号 Number	前排炮孔起爆 The front blast hole is detonated				后排炮孔起爆 The rear blast hole detonates			
	监测点 1 Monitoring Point 1	监测点 2 Monitoring Point 2	监测点 3 Monitoring Point 3	监测点 4 Monitoring Point 4	监测点 1 Monitoring Point 1	监测点 2 Monitoring Point 2	监测点 3 Monitoring Point 3	监测点 4 Monitoring Point 4
	16.90	6.64	5.21	4.67	21.90	16.14	10.37	8.89
I	16.90	6.64	5.21	4.67	21.90	16.14	10.37	8.89
II	19.70	7.60	5.91	5.31	21.80	20.35	12.84	10.33
III	24.78	9.96	7.41	6.73	26.48	25.58	15.90	13.12



(a) 填塞长度 4.0 m 时顶部破坏
(a) Top damage when the stemming length is 4.0 m



(b) 填塞长度 3.5 m 时顶部破坏
(b) Top damage when the stemming length is 3.5 m



(c) 填塞长度 3.0 m 时顶部破坏
(c) Top damage when the stemming length is 3.0 m

图 12 不同填塞长度下台阶顶部破坏特征

Fig. 12 Damage characteristics at the bench top with different stemming lengths

(2) 控制基质温度不低于 60°C , 按工艺配比适量增加敏化剂, NaNO_2 最佳浓度控制范围为 $1.3\% \pm 0.1\%$, 此时发泡均匀, 密度稳定性好。混装乳化炸药装入孔后, 先测量并记录初始药柱高度; 经

15 min 静置后, 再次测量药柱高度, 待药柱高度达到设计装药高度时, 实施炮孔填塞。

(3) 针对含水炮孔, 混装乳化炸药装填后受水影响导致其发酵效果差, 15 min 静置期后, 若药柱高度仍未达到设计装药高度, 需在炮孔内装填成品乳化 $\phi 90$ 药卷, 使其与设计装药高度一致。

(4) 现场采用直径 $\phi 140$ mm 透明管模拟炮孔装药, 发现药渣混合长度达到 6 ~ 10 mm, 炸药失效。为此, 在回填炮孔时, 先向孔内装入隔离装置, 再进行炮孔回填。

表 4 模型顶部粘结数量与裂纹数量

Table 4 The number of bonds and cracks at the top of the model

填塞长度 Filling length/m	粘结数量 Bonding quantity/ pieces	裂纹数量 Number of cracks/ pieces	破坏率 Failure rate/%
4.0	1686	493	29.24
3.5	1427	591	41.42
3.0	1215	522	42.96

现场进行爆速测定, 将混装乳化炸药装填至长度 1.2 m 的 PVC 管内 ($\phi 90$ mm), 将其监测应变片与导线连接至孔外爆速仪, 实测爆速 4637 m/s, 较此前实测爆速 5137 m/s 相比, 明显降低。因此, 在一定温度下, 增加敏化剂占比, 炸药密度降低, 爆速随之降低。

通过以上措施及精细化爆破手段,爆破质量得以提升,爆破效果优良。如图13所示。爆后爆堆集中且松散度适宜,块度均匀性较好,且坡顶线整齐,无拉裂,二次破碎量减少30%,挖装效率提升20%以上。



图13 爆堆局部分布图

Fig. 13 Local distribution of the muck pile

试验结果表明:在既有孔网参数下,通过调整填塞长度、炸药爆速,使爆破能量在矿岩中均匀分配,充分传递,取得理想爆破效果。

5 结论

(1)通过建立模糊数学-熵权-层次分析模型,构建了爆破效果评价体系,初步确定研究区压渣爆破最佳爆速区间位于4000~5000 m/s、填塞长度最佳区间3.0~4.0 m,爆破效果最优。

(2)数值模拟结果表明:当炸药爆速为4539 m/s、填塞长度为3.5 m时,前后排炮孔起爆后各测点震动幅度基本一致,表明此状态下爆炸载荷适中,且裂纹发育较好,爆破效果最优。填塞长度从3.5 m调整至3.0 m时,微观裂纹数量基本一致,岩石破坏率相差甚微。因此,考虑到经济效益及安全效益,压渣情况下堵塞长度3.5 m较为合适。

(3)将数值模拟确定的最优参数应用于现场,通过采取针对性技术措施、推行精细化爆破施工,合理调整炸药爆速与填塞长度,可有效改善台阶爆破在既有孔网参数下的爆破效果。

(4)本文提出的通过调整敏化剂占比降低混装乳化炸药密度,从而降低爆速的方法,因受施工环境及爆速测量方式的影响,实测爆速存在一定偏差,有待进一步深入研究。

参考文献 (References)

[1] 张福星,闫鹏里,高学伟,等. 分层深孔压渣爆破技术在原地爆破浸出中的应用探索[J]. 铀矿冶, 2016,

35(1):1-5.

- [1] ZHANG Fu-xing, YAN Peng-li, GAO Xue-wei, et al. Exploration on the application of stratified deep hole muck pile blasting technology in in-situ blasting leaching[J]. Uranium Mining & Metallurgy, 2016, 35(1): 1-5. (in Chinese)
- [2] 杨建华,代金豪,姚池,等. 岩石高边坡爆破开挖损伤区岩体力学参数弱化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(5): 968-975.
- [2] YANG Jian-hua, DAI Jin-hao, YAO Chi, et al. Research on the weakening law of rock mass mechanical parameters in the damage area of blasting excavation of high rock slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 968-975. (in Chinese)
- [3] 刘维信,王劲翔,王其杰,等. 多排孔微差松动挤压爆破陷落柱技术研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(10): 61-65.
- [3] LIU Wei-xin, WANG Jin-xiang, WANG Qi-jie, et al. Research on the technology of multi-row hole micro-differential loosening extrusion blasting collapse column[J]. China Coal Engineering, 2020, 52(10): 61-65. (in Chinese)
- [4] 赵渤. 压渣爆破在降低某矿损失贫化率中的应用[J]. 现代矿业, 2017, 33(2): 92-93, 96.
- [4] ZHAO Bo. Application of ballast blasting in reducing the loss and dilution rate of a certain mine[J]. Modern Mining, 2017, 33(2): 92-93, 96. (in Chinese)
- [5] 汪旭光. 爆破手册[M]. 北京:冶金工业出版社, 2010.
- [6] 林超,赵富强,吴晓平. 挤压爆破在霍林河南露天矿的应用[J]. 露天采矿技术, 2008(5): 25-26, 28.
- [6] LIN Chao, ZHAO Fu-qiang, WU Xiao-ping. Application of compression blasting in huolinhe south open-pit mine[J]. Open-pit Mining Technology, 2008(5): 25-26, 28. (in Chinese)
- [7] 王文才. 露天矿合理挤压爆破参数的确定与应用[J]. 中国矿业, 2000(3): 48-50.
- [7] WANG Wen-cai. Determination and application of reasonable compression blasting parameters in open-pit mines[J]. China Mining, 2000(3): 48-50. (in Chinese)
- [8] 盛晓雅,张飞,梁浩然. 挤压爆破在白云鄂博铁矿的应用实践[J]. 包钢科技, 2016, 42(2): 1-3.
- [8] SHENG Xiao-ya, ZHANG Fei, LIANG Hao-ran. Application practice of compression blasting in BAIYUNBO iron mine[J]. Baotou Iron and Steel Science and Technology, 2016, 42(2): 1-3. (in Chinese)
- [9] LIN Chao, ZHAO Fu-qing, WU Xiao-ping. Application of squeeze blasting in Huolinhe South Open pit Min[J]. Opencast Mining Technology, 2008(5): 25-28.