

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.03.006

露天矿中深孔台阶微差爆破参数优化研究与应用^{*}

张 伟¹, 康 凯¹, 李新民², 付 强¹, 王李朋¹, 黄 刚³, 张春阳³, 张博洋³

(1. 金堆城钼业股份有限公司, 渭南市华州区, 714102; 2. 渭南市公安局治安支队, 渭南市临渭区, 714000;
3. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 武汉 430070)

摘 要: 以金堆城露天钼矿中深孔微差爆破为工程依托, 针对金堆城露天钼矿爆破条件复杂的情况对其爆破参数进行优化, 开展不同孔距、排距、延期时间对爆破效果影响的数值模拟研究。将现场岩石制样, 进行真实岩性实验, 获得岩石的真实力学参数, 使用 RSM 声波测孔分析软件对炮孔声波数据分析岩石波阻抗, 使用十段爆速仪测量炸药实际爆速, 并将岩石与炸药进行匹配。基于岩石真实力学参数及炸药参数确定模拟参数, 利用 LS-Dyna 软件建立了不同孔距、排距、孔间延期时间、排间延期时间的模型, 通过爆破参数优化, 有效改善了该露天钼矿爆破效果, 降低了 6.72% 的大块率及 11.46% 的粉矿率。较为明显地改善了该露天矿大块率和粉矿率高的问题。

关键词: 爆破参数优化; 波阻抗; 爆速; 数值模拟; 块度分析

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)03-0054-10

Research and Application on Parameter Optimization of Medium-deep Hole Bench Blasting with Millisecond Delay in Open-pit Mines

ZHANG Wei¹, KANG Kai¹, LI Xin-min², FU Qiang¹, WANG Li-peng¹,
HUANG Gang³, ZHANG Chun-yang³, ZHANG Bo-yang³

(1. Jinduicheng Molybdenum Co., Ltd., Huazhou District, Weinan 714102, China;
2. Public Security Detachment of Weinan Public Security Bureau, Linwei District,
Weinan 714000, China; 3. School of Resources and Environmental Engineering,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: This study focuses on optimizing blasting parameters for millisecond blasting of medium-deep holes at the Jinduicheng Open-pit Molybdenum Mine, addressing its complex blasting conditions. Through numerical simulations, the research systematically examines how hole spacing, row spacing, and delay time influence blasting effectiveness. Field rock samples were prepared and tested to acquire actual in-situ rock mechanical parameters. Borehole acoustic data were analyzed using RSM acoustic logging software to determine rock wave impedance. A ten-segment deto-

收稿日期 (Date of reception): 2026-01-12

网络首发日期 (Published online): 2026-09-15

作者简介: 张 伟 (1978-), 男, 陕西省渭南市, 高级工程师, 从事采矿设计、爆破设计及施工等, (E-mail) 745810420@qq.com。

通信作者: 张博洋 (2000-), 男, 新疆维吾尔自治区伊犁哈萨克自治州伊宁市, 硕士, 采矿工程专业研究生, (E-mail) zby20000513@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金 (52474108) 动力冲击下冻融裂隙岩体浆-岩动态协同规律及关联匹配机制研究

About the author: ZHANG Wei (1978-), male, Weinan City, Shaanxi Province, Senior Engineer. His research and professional work focus on mining design, blasting design and construction, (E-mail) 745810420@qq.com.

Corresponding author: ZHANG Bo-yang (2000-), male, from Yining City, Ili Kazakh Autonomous Prefecture, Xinjiang Uygur Autonomous Region, master's degree, postgraduate majoring in Mining Engineering, (E-mail) zby20000513@163.com.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (No. 52474108) Study on the dynamic synergetic law and correlation matching mechanism of grout-rock mass in freeze-thaw fractured rock under dynamic impact

nation velocity meter measured explosive detonation velocity, enabling rock-explosive matching. Simulation parameters were established based on measured rock mechanical properties and explosive characteristics. LS-DYNA software was employed to construct numerical models with varying hole and row spacing, inter-hole and inter-row delay times.

Key words: blasting parameter optimization; wave impedance; detonation velocity; numerical simulation; fragmentation analysis

该钼矿位于陕西省渭南市,地处东秦岭山系南缘,直线距离西安约 90 km,随着该矿山的生产开采,矿区已经由开始的山坡露天矿逐步转化为凹陷露天矿,随着开采平台高度的变化,岩体的性质也发生了变化,设计采用的爆破参数已达不到预期的爆破效果,岩石可爆性差异大(从易爆到较难爆),水孔占比超 80%,装药时易出现“水药分层”,导致孔底炸药爆轰不完全,300 mm 以下合格粒径矿石占比仅 61.52%,600 mm 以上大块率 13.92%,粉矿率 13.08%,影响后续铲装与破碎效率爆破参数设计过程中,孔网参数直接影响着岩石的块度与爆堆形态,优化孔网参数是提高爆破效果的基础。近二十年来,伴随数值模拟理论体系的逐步完善及核心技术的迅猛发展,运用数值模拟技术对爆破参数进行辅助优化,已逐步发展成为爆破工程领域一种应用广泛的关键技术手段^[1-4]。段宗银采用数值模拟方法通过改变不耦合系数、炸药单耗、爆破参数和填塞条件^[5],进行模拟爆破试验,对爆破后的块度进行筛分统计分析,以优化爆破参数和实现对爆破块度的控制和预测。徐洪艳等通过理论推导爆炸能量分布规律^[6],揭示大规模爆破能量不均成因,选用理论计算模型确定排除应力波叠

加干扰的合理延期时间;依据不同起爆位置的应力波传播规律,采用中间起爆法破碎正常爆破区,以双点起爆法处理地表硬岩区域。任少峰针对台阶顶部存在凸出的“垛子”^[7],采用深孔、浅孔联合布孔的方式降低大块率,取得了显著的经济效益。Silva 等在爆破中考虑裂隙等多种变量^[8],提出了一种预测爆炸能量对岩石产生损伤作用的实用方法。余业清通过研究证实^[9],毫秒延时起爆技术能显著抑制爆破飞石的生成。该研究综合考虑相邻炮孔间时差过大会加剧飞石抛散的风险,以及岩体挤压破碎效应的需求,经综合优化确定最佳延期时间为 40 ms。此参数设置平衡了破碎效果与安全控制的双重要求。陈鹏辉通过基于 ALE 算法的单孔台阶爆破数值模拟研究^[10],揭示了岩石在炸药爆炸下的破碎及抛掷过程,结果显示炮孔粉碎区半径为装药半径的 3.9 倍。

1 参数获取

1.1 岩石参数获取

本次实验分析该矿山北帮 6#区域的岩石试件,加工后的标准岩样尺寸为 $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 。岩石物理力学性质数据如表 1 所示。

表 1 岩石试件力学参数
Table 1 Mechanical parameters of rock specimens

岩石类型 Rock type	密度 Density/ (g · cm ⁻³)	含水率 Moisture content/%	抗拉强度 Tensile strength/ MPa	抗压强度 Compressive strength/MPa		抗剪强度指标 Shear strength indices		弹性模量 Elastic modulus/GPa		泊松比 Poisson's ratio/ μ	
				饱和 Saturated	天然 Natural	C/MPa	$\phi/^{\circ}$	天然 Natural	饱和 Saturated	天然 Natural	饱和 Saturated
安山玢岩	2.57	1.66	1.6	16.8	20.2	2.73	35.4	3.88	3.24	0.29	0.30
花岗斑岩	2.49	2.01	4.7	40.2	50.5	5.03	42.6	13.01	9.58	0.23	0.24

1.2 岩石波阻抗测试

众多学者研究表明^[11,12],通过调整炸药密度使其与岩石的波阻抗特性相互匹配时,当两者波阻抗值达到相近或一致状态,爆破过程中能量传递效率显著提升。岩石的波阻抗计算方法为岩石中纵波波速(C)与岩石密度(ρ)的乘积,反映的是应力波使岩石质点运动时,岩石阻止波能传播的作用。岩石这一性质与炸药爆炸后传给岩石总能量及传递效率有

直接关系。本次现场试验地点在矿区南帮 5#,南帮 6#区域分别进行,现场声波测试如图 1 所示,对爆区炮孔进行多次测量,统计不同深度的声波速度,结合该矿区岩石密度,以此计算爆区岩石波阻抗。本次实验采用 RSM 声波测孔分析软件对炮孔声波数据进行分析,得到的声波曲线如图 2 所示,不同深度的声波速度如表 2 所示。



图1 现场声波测试

Fig. 1 On-site acoustic wave test

在现场实验过程中,探头每移动0.5 m测量一次,分析图2可知,在测试结果中,纵波波速 V_p 随着孔深的变化呈现出明显的波动,这说明炮孔孔壁的岩石完整性存在变化。由图2的数据可知,炮孔 V_p 平均值分别为2.55 km/s、1.69 km/s、1.81 km/s、2.44 km/s。岩石的密度为 2570 kg/m^3 ,因此矿区岩石波阻抗在 $4.34 \times 10^6 \sim 6.55 \times 10^6$ 之间。

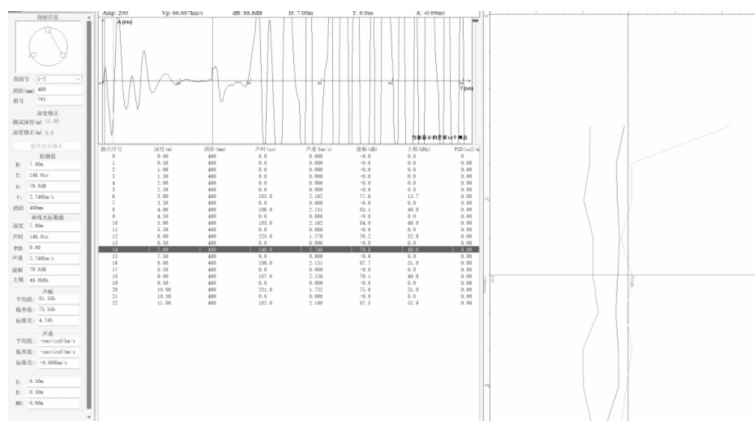


图2 炮区声波图

Fig. 2 Acoustic wave map of the cannon area

表2 声波测试数据统计表

Table 2 Statistical table of acoustic wave test data

孔深 Hole depth 深度 Depth/m	孔1 Hole 1 波速 Wave velocity/ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	孔2 Hole 2 波速 Wave velocity/ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	孔3 Hole 3 波速 Wave velocity/ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	孔4 Hole 4 波速 Wave velocity/ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)
3.0	2.521	*	*	*
3.5	2.521	*	*	*
4.0	2.542	*	*	*
4.5	2.564	*	*	*
5.0	2.532	*	*	*
5.5	2.510	*	*	*
6.0	3.636	*	1.423	*
6.5	2.479	*	1.475	2.429
7.0	2.703	1.702	2.041	2.449
7.5	1.985	1.646	2.083	2.459
8.0	2.927	1.688	1.329	2.459
8.5	2.410	1.709	1.688	2.469
9.0	1.985	1.717	1.702	2.490
9.5	2.107	1.646	1.835	2.419
10.0	2.575	1.709	2.564	1.942
10.5	2.575	1.770	1.702	2.479
11.0	2.586	1.724	2.041	2.667
11.5	2.586	1.709	2.030	2.39
12.0	2.609	1.702	2.030	2.449
12.5	2.521	1.681	1.286	2.500
13.0	2.632	1.581	1.660	2.500
13.5	2.586	1.667	1.739	2.553
14.0	2.575	1.739	2.083	2.521
14.5	2.479	*	*	2.470
15.0	2.597	*	*	2.397

*表示孔内深度不足,无波速数据

1.3 炸药参数获取

矿区统一采用现场混装乳化炸药,该炸药需适配中深孔台阶爆破工艺(炮孔直径 250 mm),其基础物理参数通过实验室测试与现场取样测定,为装药结构设计、能量匹配提供基础依据。本次实验使用 BSS-1 型智能十段爆速仪(计时精度 0.1 μs)测定,通过“双探针触发法”记录爆轰波传播时间与距离,计算爆速。

现场测试照片如图 3 所示。



图 3 现场测试照片
Fig. 3 On-site test photos

爆速测量结果如表 3 所示。

表 3 爆速测量结果
Table 3 Measurement results of explosion rate

	孔 1 Hole 1/ (m · s ⁻¹)	孔 2 Hole 2 (m · s ⁻¹)	孔 3 Hole 3/ (m · s ⁻¹)	孔 4 Hole 4/ (m · s ⁻¹)	孔 5 Hole 5/ (m · s ⁻¹)	平均值 Average valuem/s
干孔(北帮 8# 区域) Dry holes (North slope, No. 8 Area)	5088.8	4689.9	5243.5	5269.3	5191.3	5096.56
水孔(南帮 5#/6# 区域) Wet holes (South slope, No. 5/No. 6 Areas)	4803.5	4948.3	4932.7	4829.6	5013.9	4905.6

炸药密度为 1.15 ~ 1.2 g/cm³(干孔);1.18 ~ 1.2 g/cm³(水孔)。

2 爆破参数优化数值模拟

2.1 模型介绍

为了得到采用不耦合式间隔装药结构下的最优孔网参数,需要对矿山现有的孔距与排距重新模拟研究。采用不耦合式装药结构时,若孔距过大,爆炸气体膨胀的空间过大,岩石抛掷动能分散,爆堆范围外扩,应力波与裂隙扩展范围无法充分重叠,导致岩石破碎不完全,大块率增加。若孔距过小,爆炸能量

过度集中,岩石破碎过细,增加炸药单耗,爆堆集中且高度增加,但抛掷距离缩短,可能引发飞石风险。因此,选择合理的孔距,是应用不耦合式装药结构的重要部分。

因此,在模拟中先研究不同孔距下工况,采用控制变量法,在保持延期时间、单位炸药消耗量和单孔负担面积基本不变的情况下,通过合理增大孔距和减小排距,得到不同参数下的岩石应力云图,分析应力变化,针对该钼矿选取合适的孔排距,以改善爆破效果。具体方案见表 4。

表 4 孔排距优化模拟试验方案
Table 4 Simulation test scheme for optimizing hole spacing

试验方案 Test Plan	孔距 Hole spacing/m	孔间延期 Inter-hole delay/ms	底盘 抵抗线 Toe burden/m	排间延期 Inter-row delay/ms	孔径 Hole diameter/mm	钻孔孔深 Drilling depth/m	堵塞长度 Stemming length/m	台阶坡面角 Bench face angle/°
1	7.25	25	6.7	65	250	13.5	6.0	75
2	7.50	25	6.7	65	250	13.5	6.0	75
3	7.75	25	6.7	65	250	13.5	6.0	75
4	8.00	25	6.7	65	250	13.5	6.0	75
5	8.25	25	6.7	65	250	13.5	6.0	75
6	8.50	25	6.7	65	250	13.5	6.0	75

(1)数值模拟结果分析
完成文件的材料输入和相应参数赋值后,开展

不同条件下数值模拟,炮孔的药柱爆破的应力变化过程如图 4 所示。分别对应时间 $t_1 = 500 \mu s$ 、 $t_2 =$

$1450 \mu s$ 、 $t_3 = 2850 \mu s$ 、 $t_4 = 4000 \mu s$ 。根据应力云图可以分析得出结论:当炸药在底部起爆时,起爆瞬间会释放大量能量,形成高强度冲击波。随后冲击波开始向四周不断传播,使岩石周围产生较高的压应

力,同时随着爆破的不断进行,应力波在传播过程中因能量耗散而逐渐衰减,裂隙开始横向扩展,最后通过爆炸气体持续膨胀做功,实现岩石破碎,符合爆破的实际过程。

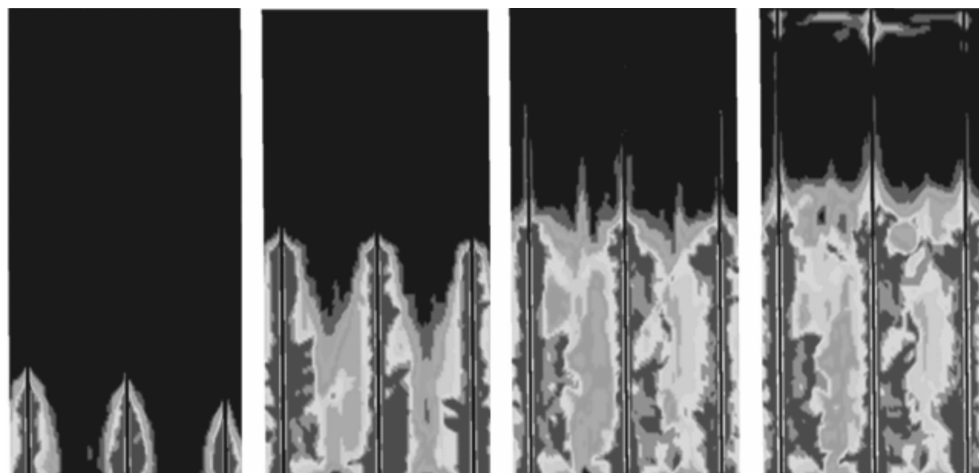


图 4 台阶爆破切面应力变化过程

Fig. 4 Stress variation process of bench blasting cross-section

为直观地比较不同方案下台阶爆破岩石应力分布变化,选取同一时刻的炮孔中心截面作为监测面,不同方案的截面的应力变化如图 5 所示,分析可以看出,当孔距过小时,粉碎区面积过大,易产生大量粉矿,随着孔距不断增大,粉碎区面积占比逐渐减小,当增大至 8.25 m 时,孔间的部分岩石所受应力较小,不能达到有效破碎,当增大至 8.50 m 时,中部岩石大部分都不能有效破碎。综合不同孔距对应的切面应力云图变化,当孔距为 7.75 m 时,应力分布效果较好,粉碎区面积既不会过大,同时整体应力作用范围大,能保证岩石的有效破碎,因此,孔距为 7.75 m ,更有利于岩石整体破碎,应力分布效果更好。

根据图 5 可以得出结论,该矿山孔距为 7.75 m 时,岩石的应力分布面积更为理想,不会产生过多的岩石粉矿区,也不至于孔距过大而降低爆破效果,有利于矿山当前铲装运输设备的生产工作,提高运输效率,因此选定优化后的炮孔孔距为 7.75 m 。

考虑到需要保证单孔负担面积不发生变化,因此根据下式确定炮孔排距。

$$b = \frac{S}{a} \quad (1)$$

式中: a 为孔距, m ; b 为排距, m ; S 为单孔负担面积, 48 m^2 。

代入公式计算得出排距 b 为 6.19 m 。

2.2 排间延期时间优选

(1) 排间延期时间优化方案选取

在实际生产中,排间延期时间往往是通过矿山

的大量生产经验确定的。目前该矿山现场爆破作业中,各排孔之间的起爆延期时间设定为 65 ms 。改变原有的装药结构后,需要对新装药结构下的孔网参数进行重新优选,孔排距选定为 $7.75 \text{ m} \times 6.19 \text{ m}$,在确保其他爆破参数不变的前提下,通过数值模拟对不同排间延时的台阶爆破效果进行对比分析。具体对比方案详见表 5。

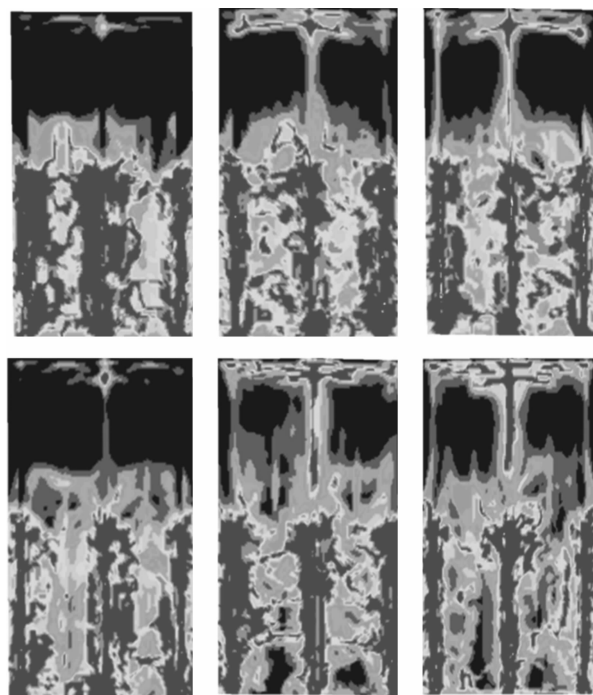


图 5 不同孔距下应力变化云图

Fig. 5 Stress variation cloud diagrams under different hole spacings

表 5 排间延期时间优化模拟试验方案

Table 5 Optimization simulation test scheme for inter-row delay time

试验方案 Test plan	台阶高度 Bench height/m	排距 Row spacing/m	排间延米延期 Inter-row delay per meter/(ms · m ⁻¹)	排间延期 Inter-row delay/ms
1	12	6.19	8	49.52
2	12	6.19	9	55.71
3	12	6.19	10	61.90
4	12	6.19	11	68.09
5	12	6.19	12	74.28

(2) 模拟评价指标

当爆破冲击作用于岩石模型时,材料内部会形成损伤区域,这种损伤演变过程能够有效呈现岩体裂隙的扩展。通过研究裂隙扩展的分布特征,可较为准确地模拟出岩体的破碎形态。

为评估不同起爆延期时间对裂隙扩展的作用效

果,研究采用图像分析法:首先运用 Matlab 对样本图像进行灰度转换,再将灰度图转为黑白二值图像,最终通过计算黑白像素面积所占比例,直观展现爆破参数调整对岩石破坏的影响程度。如图 6 所示,为不同排间延期时间的岩石损伤图。

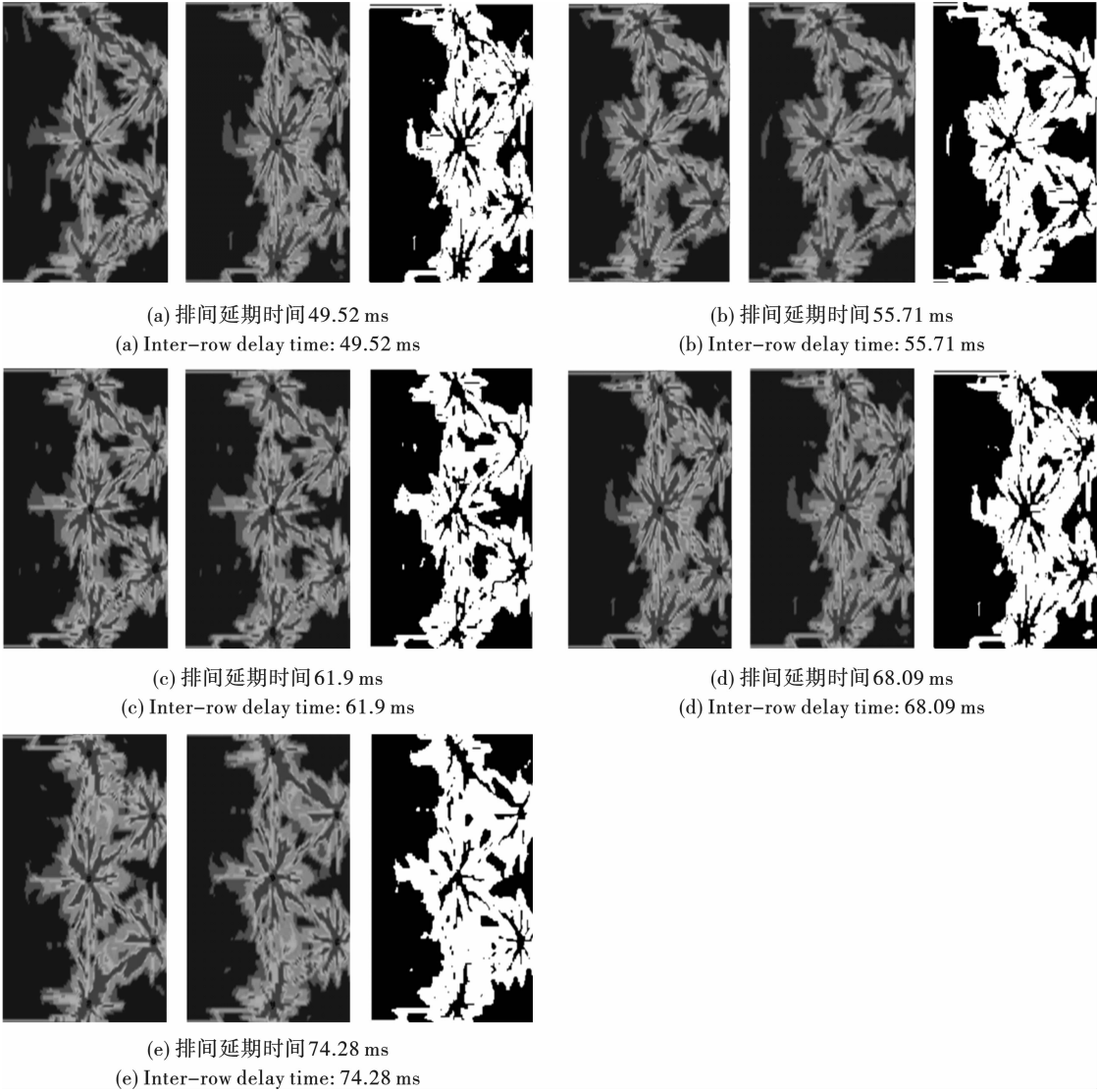


图 6 不同排间延期时间条件下岩体损伤分析

Fig. 6 Analysis of rock mass damage under different inter-row delay times

(3) 岩石破碎程度分析

a) 图像灰度化

图像灰度化本质上是彩色照片转成黑白画面的处理过程。利用 MATLAB 软件 RGB2GRAY 功能可以对彩色图像进行灰阶处理,它的运算原则是:根据色彩的重要程度和其它指数,根据公式(2)对 I_R 、 I_G 和 I_B 进行加权平均,可获得最优的灰度图像,并将其进行灰度化之后,再进行下一步的特征提取。

$$I(x,y) = 0.3I_R(x,y) + 0.59I_G(x,y) + 0.11I_B(x,y) \quad (2)$$

式中: I_R 为彩色图像中某一像素点的红色分量的强度值; I_G 为该像素点的绿色分量的强度值; I_B 为该像素点的蓝色分量的强度值。

b) 灰度图像二值化

灰度图二值化就是把一幅图像中像素点的灰度值设为 0 或者 255,使整个图像具有明显的黑白色,使视觉效果更加直观。这类图像处理需要经历二值化转换阶段,将普通图像转化为仅有纯黑(0)与纯白(255)两种色彩构成的特殊图样,处理后便于图像的识别与处理。

c) 二值化图像分析优化

基于 MATLAB 识别处理后图像,将低于 128 灰度的像素变为黑色,128 以上全部变为白色,并计算出图像中黑、白像素在图像中的比例。利用 MATLAB 仿真软件,对不同排间延时进行了模拟计算,得出了不同排间延期时间对岩体破坏程度的影响。

根据对不同参数的模拟结果,绘制不同排间延期时间的岩体破坏范围的坐标系,通过分析岩石损伤程度与排间延期时间的关系如图 7,可以发现随着排间延期时间的延长,岩体破坏范围整体呈现先增大后减小的规律性变化。这种趋势表明,不同炮

孔间的应力波相互作用效果会随延期时间调整而发生变化,其中当排间延期时间为 61.9 ms,台阶切面的岩体破坏范围所占的比例已经达到了 40.46%,而在此之后,岩体破坏范围随着延期时间的增加,出现了一定范围的下降。同时这也表明了爆破应力波叠加效应存在明显的临界阈值特征。

综上所述,排间延期时间为 61.9 ms 时,岩石破碎面积最大,岩石损伤效果最好。

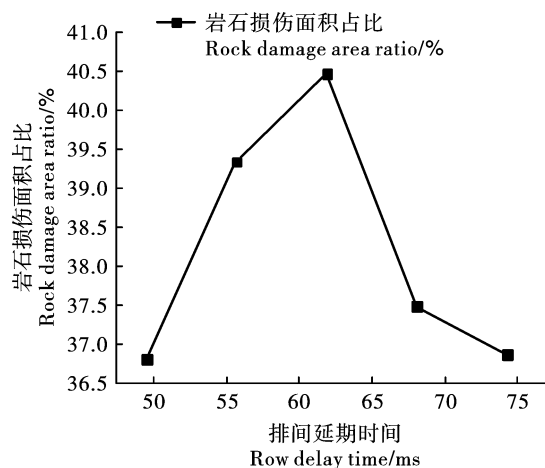


图 7 排间延期时间与岩石损伤程度关系图

Fig. 7 Shows the relationship between the delay time between rows and the degree of rock damage

2.3 孔间延期时间优选

(1) 孔间延期时间优化方案选取

孔间延期时间是爆破参数设置中的一个关键参数,主要控制多孔起爆顺序,直接影响爆破效率、安全性和经济性。孔间延期时间的合理选取需考虑矿区岩石性质、炸药类型、爆堆块度要求等多种因素,孔排距选择优化后的 7.75 m × 6.19 m,具体的试验方案见表 6。

表 6 孔间延期时间优化模拟试验方案

Table 6 Simulation test scheme for optimizing the delay time between holes

试验方案 Test plan	台阶高度 Bench height/m	排距 Row spacing/m	孔距 Hole spacing/m	孔间延期时间 Inter-hole delay per meter/(ms · m ⁻¹)	孔间延期时间 Inter-hole delay/ms
1	12	6.19	7.75	2	15.50
2	12	6.19	7.75	3	23.25
3	12	6.19	7.75	4	31.00
4	12	6.19	7.75	5	38.75

(2) 模拟结果分析

为了评定不同孔间延期时间对裂纹扩展的影响,通过 Matlab 进行应用图像灰度化、灰度图像二值化和计算黑白像素占比等处理方法,可以清楚地

得到岩石的破碎程度,基本理论与上节一致,根据裂纹扩展程度分析岩石破碎情况,模拟结果如图 8 所示。

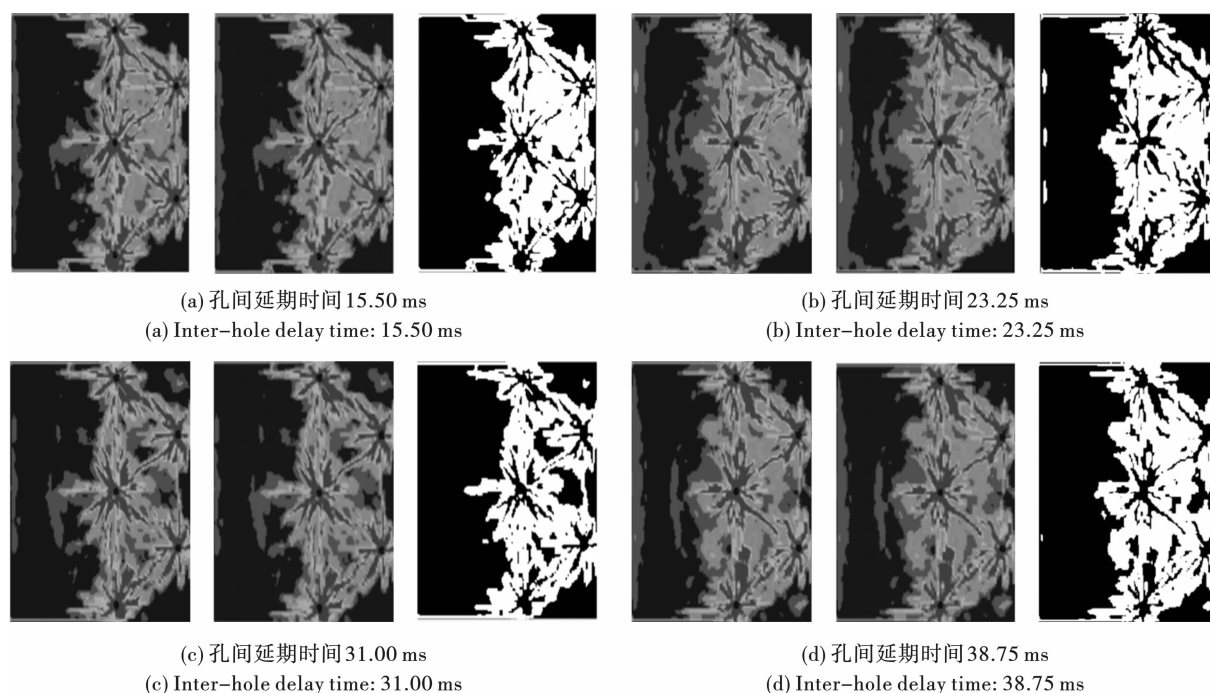


图 8 不同孔间延期时间条件下岩体损伤分析

Fig. 8 Analysis of rock mass damage under different inter-hole delay times

通过对爆破效果分析图中白色像素区域(对应爆破裂隙分布)的面积占比分析,可定量评估不同延期时间下的岩石损伤程度。如图 9 所示,损伤程度随孔间延期时间呈先增后减的变化规律:当延期时间延长至 23.25 ms 时,裂隙扩展范围达到最大,岩石破碎效果最优;超过该阈值后,炮孔间应力波的协同作用减弱,导致破碎效能下降。数值模拟证实,23.25 ms 的延期时间可使相邻炮孔应力场产生最佳叠加效应,此时岩石破碎能量利用率最高。

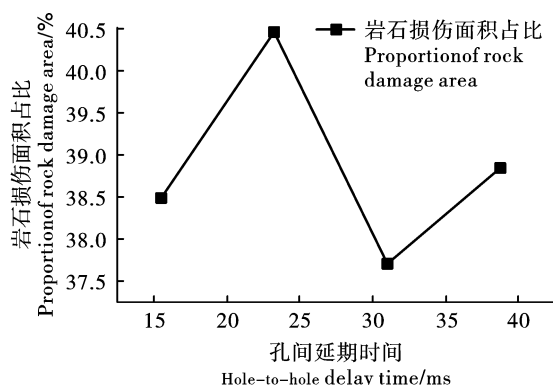


图 9 排间延期时间与岩石损伤程度关系图

Fig. 9 Shows the relationship between the delay time between rows and the degree of rock damage

基于 LS-DYNA 数值模拟,建立不同装药结构的数值计算模型,通过系统的数值模拟研究,开展孔网参数优化研究。数值计算表明,当孔距缩小至 7.75 m、排距

调整为 6.19 m 时,既能避免孔距过小导致的过度破碎产生大量碎屑,又可防止孔距过大引发的破碎不充分问题。随后保持其他孔网参数不变,通过动态裂纹扩展数值模拟,结果表明,采用 23.25 ms 孔间延时与 61.9 ms 排间延时的组合方案时,应力波叠加效应可使岩体裂纹扩展面积明显提升,对岩石作用效果更好。

3 矿山现场爆破试验

为验证爆破参数优化方案的实际应用效果,在现场开展了优化参数对应的爆破试验。试验设计孔排距为 7.75 m × 6.19 m,然而受试验区域前期爆破作业产生的扰动影响,现场实际布孔难以完全契合设计孔排距要求,存在一定偏差。孔间及排间延期时间受电子雷管精度影响,取 23 ms 和 62 ms。具体布孔情况如图 10 所示。

爆破试验参数如表 7 所示。

通过对比优化前及优化后爆破块度进行优化效果验证,优化爆破参数前后爆破后的块度如图 11 所示。

爆后利用 Split-desktop 4.0 块度分析软件分别在爆堆表面和内部选取多个区域对爆堆进行处理分析。优化后的爆破区域的块度统计后拟合曲线如图 12 所示,块度分析后得到优化前后的爆堆不同尺寸块度的占比见表 8。

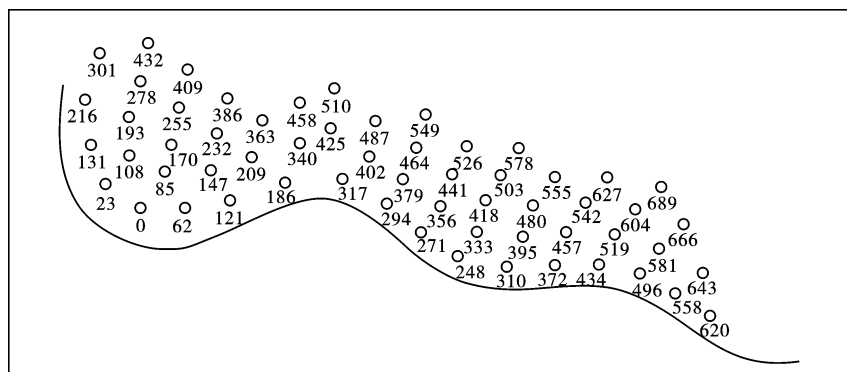


图 10 现场炮孔布置图

Fig. 10 On-site blast hole layout diagram

表 7 爆破试验参数

Table 7 Blasting test parameters

最大孔距 Maximum hole spacing/m	最小孔距 Minimum hole spacing/m	最大排距 Maximum row spacing/m	最小排距 Minimum row spacing/m	钻孔孔深 Drill hole depth/m	超深 Subdrill depth/m
8.3	6.4	5.73	4.56	13.5	1.5
单孔装药量 Charge weight per hole/kg	平均孔距 Average blasthole spacing/m	平均排距 Average row spacing/m	间隔长度 Spacing length/m	前排孔至坡顶线平均距离 Average distance from the front row holes to the slope top line/m	单位消耗量 Powder factor/ ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)
440	7.78	6.09	1.0	2.3	0.28



(a) 爆破参数优化前
(a) Before blasting parameter
optimization

(b) 爆破参数优化后
(b) After blasting parameter
optimization

图 11 爆破后爆堆块度形态

Fig. 11 Shows the shape of the heap size after blasting

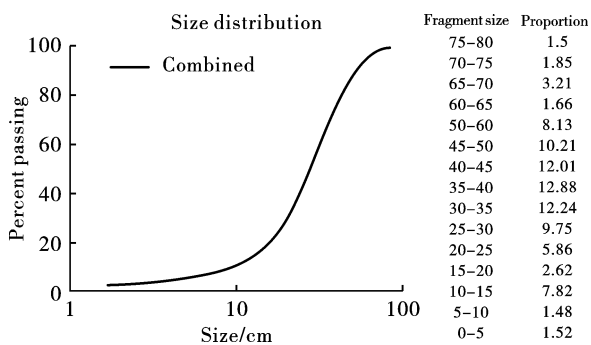


图 12 优化试验下块度分布曲线

Fig. 12 Shows the block size distribution curve
under the optimization experiment

优化前及优化后的爆堆块度分析统计曲线如图

13 所示,可以明显看出优化前的爆破区域,块度尺寸的“波动幅度更大”,尤其是在 10 cm 以下、20 ~ 30 cm 区间出现了明显的“高占比峰值”,说明小粒径和中等粒径的岩石占比较多,但分布不均匀;优化后爆破区域,曲线整体更“平缓”,峰值明显降低,且在 50 cm 以上的大块度区间占比显著减少,说明爆破后的块度分布更均匀,大块岩石的比例被有效控制。

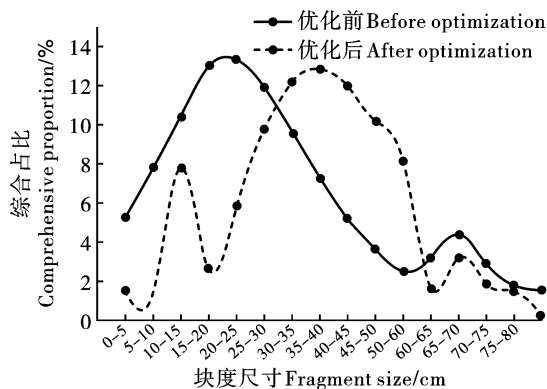


图 13 优化前后爆堆块度分布占比曲线

Fig. 13 Fragmentation distribution
before and after optimization

表 8 参数优化区域爆堆尺寸分布

Table 8 Distribution of detonation size in parameter optimization area

块度 Fragment size/cm	综合占比 Comprehensive proportion/%	爆堆不同位置各块度所占百分比 Percentage of each fragment size at different positions of the muck pile/%					
		上右 UR	上左 UL	中右 MR	中左 ML	下右 LR	下左 LR
>80	0.22	0	0	0	0	0	0.22
75-80	1.50	0	0	1.46	0.72	1.00	0.50
70-75	1.85	0	0	2.32	1.17	0.12	0.85
65-70	3.21	0	0	2.82	1.29	0.85	1.21
60-65	1.66	0.30	0.74	3.07	1.39	1.17	1.66
50-60	2.13	8.72	5.78	10.36	2.82	8.33	6.45
45-50	0.21	10.55	9.08	12.65	4.98	10.32	7.96
40-45	2.01	12.17	12.96	13.62	9.41	12.47	8.89
35-40	2.88	12.82	15.19	13.09	15.90	13.54	9.57
30-35	2.24	11.75	16.27	10.52	19.38	12.76	10.48
25-30	12.75	8.95	14.13	6.31	19.37	10.10	10.65
20-25	15.86	4.82	9.09	2.21	14.01	5.97	8.92
15-20	15.62	1.29	3.44	0.45	5.21	2.09	7.78
10-15	17.82	8.13	7.98	9.71	7.67	8.49	3.44
5-10	11.48	0.12	0.40	1.42	0.61	0.32	6.11
0-5	8.52	2.41	0	1.69	0	0.66	1.80

4 结论

针对某露天钼矿爆破开采中,爆堆大块率及粉矿率高的问题,通过 LS-Dyna 有限元软件进行模拟爆破效果及综合现场优化试验结果,取得以下结论:

针对矿山目前开挖岩石参数,模拟不同孔间距及延期时间的应力分布,发现在孔排距为 7.75 m × 6.19 m 孔间延期时间 23.25 ms,排间延期时间 61.9 ms 时,应力分布效果最优。

通过现场实验发现优化后的爆破参数,显著改善了爆破质量,使爆堆块度分布更加均匀,大块率降低了 6.72%,粉矿率降低了 11.46%。这一调整进一步优化了爆堆破碎形态,不仅提升了后续电铲装运效率,还降低了设备损耗,实现了从爆破到装运环节的协同增效。

参考文献 (References)

[1] 杨懿全,许永权,郭其林,等. 刚果(金)某铜钴矿露天台阶爆破参数优化研究[J]. 矿业研究与开发,2019,39(4):69-72. DOI:10.13827/. 2019.04.015.

[1] YANG Yi-quan,XU Yong-quan,GUO Qi-lin,et al. Study on the parameters optimization of bench blasting for a copper open-pit mine in DR Congo[J]. Mining Research and Development,2019,39(4):69-72. (in Chinese)

[2] LI Qiang,LUO Zhen,HUANG Ming,et al. Control of rock

block fragmentation based on the optimization of shaft blasting parameters[J]. Geofluids,2020,2020(11):1-10.

[3] ADEYEMI R A. Optimization of blast design for quarries: a case study of Zibo quarry, Nigeria[J]. American Journal of Engineering Research,2020,8(8):84-92.

[4] MIAO Yi,ZHANG Yang,WU Da,et al. Rock fragmentation size distribution prediction and blasting parameter optimization based on the muck-pile model[J]. Mining Metallurgy & Exploration,2021,38:1071-1080.

[5] 段宗银,施发伍,张良贵. 爆破块度分布与控制的模拟试验研究[J]. 爆破,2010,27(2):45-48,83.

[5] DUAN Zong-yin,SHI Fa-wu,ZHANG Liang-gui. Study on simulation test of blasting fragment size distribution and control[J]. Blasting,2010,27(2):45-48,83. (in Chinese)

[6] 徐洪艳,陈 辉,张敬刚,等. 露天煤矿规模爆破大块产生机理及块度控制研究[J]. 爆破:1-19. [2025-11-21]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1164.TJ.20251120.1754.008>.

[6] XU Hong-yan,CHEN Hui,ZHANG Jing-gang,et al. Study on the generation mechanism and fragment size control of large boulders in large-scale blasting of open-pit coal mines[J]. Blasting,2025:1-19. [2025-11-21]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1164.TJ.20251120.1754.008>. (in Chinese)