

# 台阶爆破孔内起爆点位优化及应用

汪伟<sup>1,2</sup>, 彭定潇<sup>2</sup>, 兰明<sup>3</sup>

(1. 江西铜业集团有限公司; 2. 江西铜业技术研究院有限公司; 3. 南华大学资源环境与安全工程学院)

**摘要:**某大型露天矿山在进行310 mm孔径爆破推广试验时,出现较为突出的台阶底部过破碎、上部破碎效果不佳等问题。考虑应力波在岩体中的传播速度与炸药爆轰波速度为同一数量级,开展孔内不同起爆点位对爆炸应力波传播影响的数值模拟。分析表明:孔底起爆在台阶上部产生的应力波峰值最大,但作用时间最短;孔口起爆在下部产生的应力波峰值最大,但作用时间最短;孔中起爆在上下部产生的应力波峰值与作用时间介于二者之间,在中部产生的应力波峰值最大。综合考虑应力波峰值和载荷作用时间,现场试验时将孔内第一发起爆弹上提,使起爆点位于药柱底部和中部之间(距孔底0.5~4.5 m),显著改善了台阶上部破碎效果,验证了分析结论的正确性。

**关键词:**露天开采;台阶爆破;孔内起爆;起爆点位;数值模拟;应力波;现场试验

中图分类号:TD854 TD235.4

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)08-0019-05

doi:10.11792/hj20250804

## 引言

露天台阶爆破生产效率高、经济效益好,广泛应用于矿山、铁路、公路、水利水电等领域<sup>[1-2]</sup>。21世纪以来,随着凿岩钻孔、铲装运输等设备大型化发展,数字矿山技术的快速进步,以及数码电子雷管、现场混装炸药技术的推广应用,露天台阶爆破的硬件水平显著提升<sup>[3-5]</sup>。与此同时,围绕露天台阶爆破技术,相关科研和工程技术人员也开展了大量研究。付强等<sup>[6]</sup>利用破岩移动理论计算和LS-DYNA模拟,优选微差延期时间方案,通过现场试验确定金堆城露天矿爆破孔间延期36 ms、排间延期80 ms。李章超等<sup>[7]</sup>基于爆破模拟软件JKSimBlast,开展露天台阶爆破装药结构优化研究,得出随空气间隔向下移动,大块率呈现先减小后增大的趋势,最终确定炸药能量利用最佳的装药结构,现场大块率降低近10%。张智宇等<sup>[8]</sup>针对不同粒径岩屑抗剪性能及水孔堵塞效果开展研究,得出一定粒径范围内的岩屑颗粒能很好地解决露天水孔堵塞爆破问题,通过现场试验将冲孔率降低20%,爆破大块率降低8%。李荣兴<sup>[9]</sup>采用颗粒流软件对爆破矿岩运动规律进行模拟,根据爆堆集中顺序对起爆顺序进行优选,铲装效率提升10%。洪勇等<sup>[10]</sup>综合采用逐孔起爆、挖掘减振沟、延期时间优化等手段,有效降低爆破振动及对最终边坡的损伤。李长权等<sup>[11]</sup>基于爆破漏斗理论,在大黑山钨矿试验提升炮孔密集系数的“宽孔距、小抵抗线”爆破技术,取得了大块率降

低5%、铲装效率提高10%的效果。露天台阶爆破领域的研究取得了丰硕成果,但爆破过程极为复杂<sup>[12]</sup>,导致爆破仍然是一门理论滞后于实践的技术<sup>[13-14]</sup>。因此,针对具体工程问题,仍需针对性深入研究<sup>[15-17]</sup>。

某大型露天矿山位于江西省境内,其矿产资源储量大且集中,开采剥采比小、矿石可选性好,采选综合能力约为13万t/d。矿山台阶高度15 m,穿孔采用250 mm孔径牙轮钻机,爆破超深一般为2.5 m。为提高穿爆效率,该矿山于2019年引进1台310 mm孔径牙轮钻机,并开展310 mm孔径爆破试验。经过较长时间的现场试验,孔网、炸药单耗、装药结构、延期时间等爆破参数基本稳定。但是由于310 mm孔径延米装药量较250 mm孔径提高了50%以上,造成310 mm孔径较250 mm孔径的装药高度下降、堵塞高度上升,因此出现了较为突出的台阶底部过破碎、上部破碎效果不佳的情况。针对此问题,考虑开展孔内起爆点位对爆炸应力波作用的影响分析,并应用于现场实践,以期改善台阶上部破碎效果。

## 1 孔内起爆点位试验方案

目前,在该矿山生产过程中,为保证炸药可靠起爆,单孔内放置2发起爆弹。一发位于药柱底部(孔底),一发位于药柱上部(距孔底约7 m),孔内起爆顺序为孔底起爆弹提前25 ms起爆。考虑到炸药爆轰波传播速度一般大于4 000 m/s,若孔底正常起爆,则传

收稿日期:2025-04-11; 修回日期:2025-05-19

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(12005099);湖南省教育厅重点项目(19A425)

作者简介:汪伟(1990—),男,高级工程师,博士,研究方向为采矿工程、爆破与岩石力学;E-mail:csu424@163.com

爆整个装药段(约9 m长)的时间在3 ms内,故可认为实际情况为孔底起爆。

柱状装药爆轰在岩体内产生应力波的传播,由于岩体应力波传播速度(一般可达3 000 m/s以上)与爆轰波传播速度处于同一数量级,因此应当考虑爆轰波在药柱传播过程中对应力波作用的影响。基于此,开展了不同起爆点位的数值模拟,模拟分析方案包含3种情况,分别是起爆点位于装药段的底部、中部和上部,即孔底起爆、孔中起爆和孔口起爆。孔内不同起爆点位布置如图1所示,为更好地展示方案细节,图1未完全遵循真实比例。

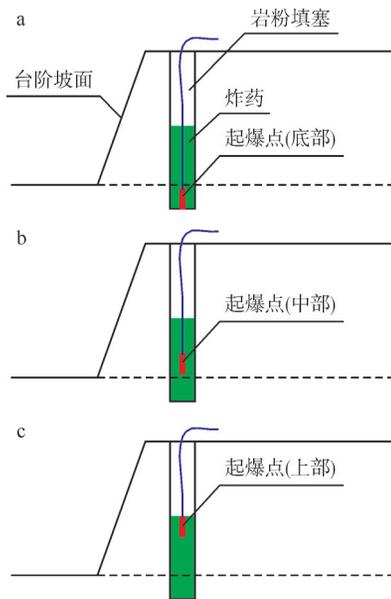


图1 孔内不同起爆点位布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of detonation point layout inside the hole

## 2 孔内起爆点位试验数值模拟分析

采用数值模拟计算软件对孔内不同起爆点位的

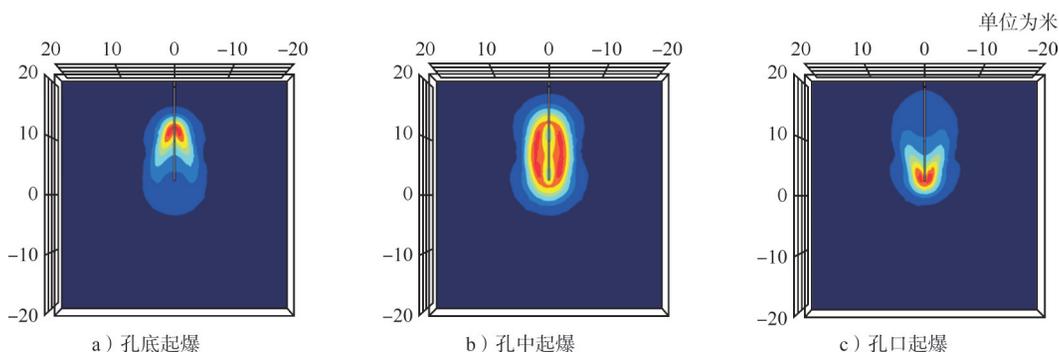


图3 不同孔内起爆点位形成的应力波波阵面作用范围

Fig. 3 Action range of stress wavefronts generated by different detonation point locations inside the hole

能力相对较弱。为此,分析岩体中拉应力分布特征,结果如图4所示。在应力波传播初期,孔底起爆的拉应力区主要在中下部,孔中起爆的拉应力区主要在中部,而孔口起爆的拉应力区主要在中上部,且拉应力最早作用于上部自由面。3种起爆点工况下,岩体上

爆破响应特征进行模拟,爆破载荷采用指数型衰减曲线(峰值3 000 MPa、正压时间0.2 ms、持续时间0.7 ms)模拟,模型四周为无反射边界条件,底部为固定边界条件。岩石材料参数为:弹性模量30 GPa、密度2.7 g/cm<sup>3</sup>、泊松比0.25;炮孔深度取17.5 m、装药长度9 m。

### 2.1 应力波传播特征

3种起爆点位工况下,起爆炮孔初始产生的冲击波经岩石粉碎区衰减后转化为应力波,随着时间推移由近及远传播,形成明显的波阵面(如图2所示),并发展为沿着岩体内部传播的纵波与横波、沿着岩体表面传播的面波,应力波强度随着传播距离的增加而衰减。

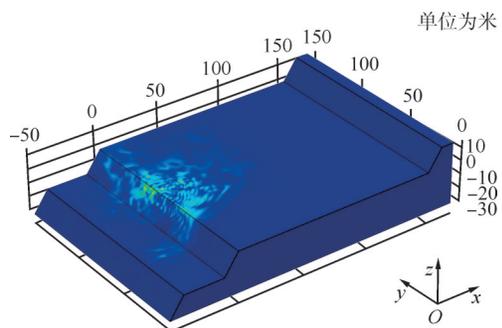


图2 应力波在岩体表面传播

Fig. 2 Propagation of stress waves on the surface of rock mass

不同孔内起爆点位形成的应力波波阵面作用范围如图3所示。在应力波传播初期,孔底起爆的波阵面特征为底部范围大、上部小,逐渐向上传播。孔中起爆的波阵面特征为上下对称分布,逐渐由中部向上下部传播。孔口起爆的波阵面特征为上部范围大、底部小,逐渐向下传播。

### 2.2 应力波作用特征

岩石材料通常抗压能力较好,但抗拉和抗剪切的

部产生拉应力区的范围都更大,这与上部为爆破自由面有关。装药段完全起爆后一段时间,孔底起爆引起的应力波在岩体下部逐渐衰减,而刚传播到上部的应力波处于较强作用阶段。孔中起爆引起的应力波上下分布比较均匀。孔口起爆引起的应力波在岩体上

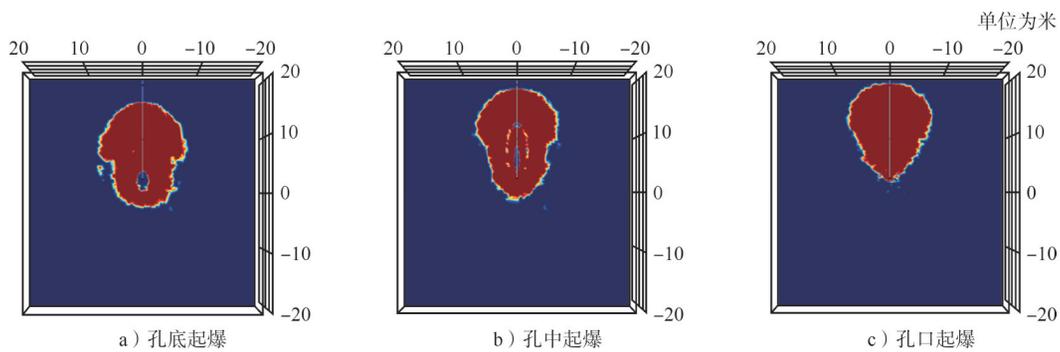


图4 应力波传播初期拉应力区分布特性

Fig. 4 Distribution characteristics of tensile stress zones in the early stage of stress wave propagation

部逐渐衰减,而刚传播到底部的应力波处于较强作用阶段。

### 2.3 应力作用强度

根据需要在炮孔周围设置若干监测点(如图5所示),用于获取力学指标随时间变化的规律。

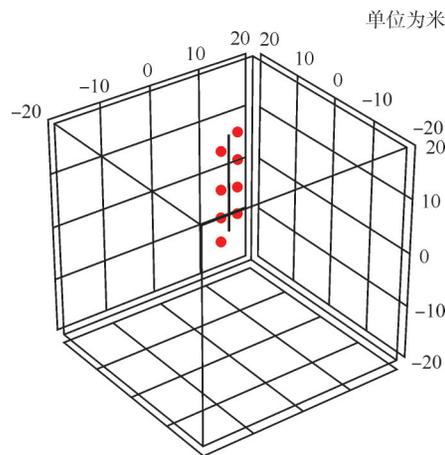


图5 模拟监测点布置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of simulated monitoring point layout

分析起爆点位对等效应力(Von Mises应力,考虑了剪切作用)作用强度的影响,结果如图6所示。由图6可知:在接近上部自由面处,孔口起爆最早达到应力峰值,其次为孔中和孔底起爆,说明孔口起爆时应力波最早作用于上部自由面,但是,孔底起爆在接近上部自由面处产生的应力峰值最大。装药区上部岩体内(距孔底9~10 m),应力峰值和应力作用时间的规律与接近上部自由面处相同,但峰值强度明显高于接近上部自由面处,这与该区域更接近装药段有关,说明离装药段越近,所受应力作用越强。装药区中部岩体范围内,孔中起爆最早达到应力峰值,且峰值最大,这与孔中起爆的应力均匀分布有关。装药区底部岩体范围内,孔底起爆最早达到应力峰值,其次为孔中和孔口起爆,与上部相反,此处孔口起爆产生的应力峰值最大。

由数值模拟分析可知:孔口起爆时上部岩体最早

受到应力波作用,其次是孔中起爆和孔底起爆。孔口起爆在上部产生的应力波特征是先强后弱,在下部产生的应力波特征是先弱后强;孔底起爆在上部产生的应力波特征是先弱后强,在下部产生的应力波特征是先强后弱;孔中起爆产生的应力波特征是上下分布比较均匀。孔底起爆在上部产生的应力波峰值最大,但作用时间最短;孔口起爆在下部产生的应力波峰值最大,但作用时间最短;孔中起爆在上下部产生的应力波峰值与作用时间介于二者之间,在中部产生的应力波峰值最大。

### 3 现场爆破试验

应力波的作用效果应同时考虑应力波峰值和载荷作用时间,在数值模拟分析的指导下,可以考虑将孔内起爆点位适当提高,位于药柱底部和中部之间(距孔底0.5~4.5 m)。这样既可以使上部岩体更早受到应力波作用,也延长了上部岩体受应力波作用的时间。试验不增加现场施工难度,只需在放置第一发起爆弹时,将其适当上提。

试验地点为矿山某采区440 m台阶(钻机位于450 m平台),爆破孔网为排距8 m、孔距11 m,单孔装药量为950 kg,延米装药量为110 kg/m,采用逐孔起爆(孔间延期42 ms、排间延期100 ms)。将爆破区域划分为试验区(起爆位置上提)和对比区(无操作),2个区域的其他爆破参数均一致。试验过程中,要求现场操作人员将第一发起爆弹的位置上提至距孔底约1 m处(如图7所示),其他操作不变。爆后情况如图8所示,可见爆堆隆起集中,表面破碎、无明显大块。经现场跟踪反馈,爆堆铲挖顺利,松散性和破碎效果均较好。通过卡车调度系统,收集电铲的生产作业指标,结果如图9所示。比较可知,试验区电铲台效为2 325 t/h,对比区电铲台效为2 101 t/h,较对比区提高10.6%,反映优化孔内起爆点位有助于改善破碎效果。

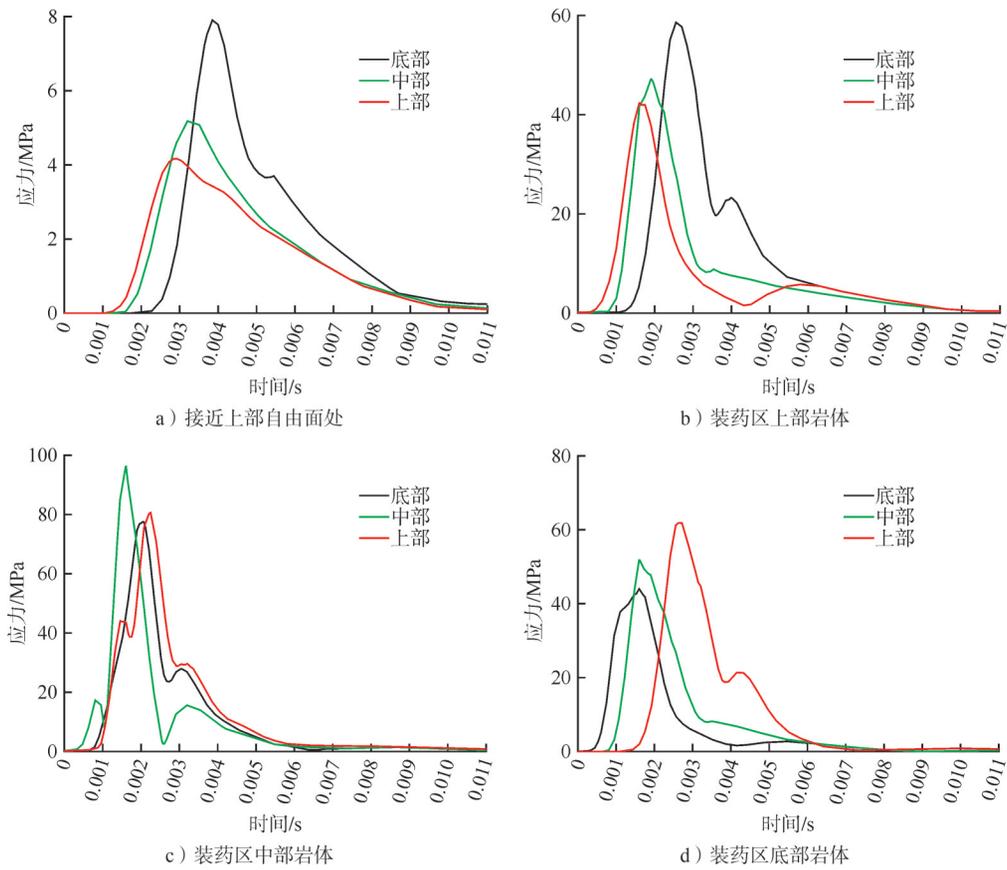


图6 起爆点位对等效应力作用强度的影响

Fig. 6 Effect of detonation point location on the intensity of equivalent stress



图7 上提第一发起爆弹

Fig. 7 Pulling up the first detonation bomb



图8 爆堆破碎情况

Fig. 8 Fragmentation of the blast pile

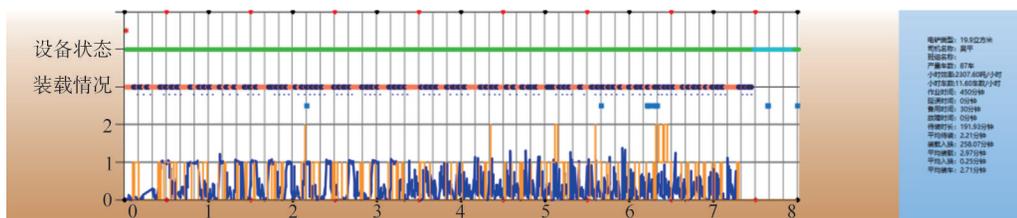


图9 电铲台效(某一班)

Fig. 9 Productivity per shovel (for a certain shift)

### 4 结论

1)数值模拟表明,孔口起爆时上部岩体最早受到应力波作用,其次是孔中起爆和孔底起爆。孔口起爆

在上部产生的应力波特征是先强后弱,在下部产生的应力波特征是先弱后强;孔底起爆在上部产生的应力波特征是先弱后强,在下部产生的应力波特征是先强后弱;孔中起爆产生的应力波特征是上下分布比较均

匀。孔底起爆在上部产生的应力波峰值最大,但作用时间最短;孔口起爆在下部产生的应力波峰值最大,但作用时间最短;孔中起爆在上下部产生的应力波峰值与作用时间介于二者之间,在中部产生的应力波峰值最大。

2)现场爆破试验表明,将孔内起爆点位置适当提高,位于药柱中部和底部之间(距孔底0.5~4.5 m),既可以使上部岩体更早受到应力波作用,也延长了应力波对上部岩体的作用时间,明显改善台阶上部破碎效果。试验不增加现场施工难度,只需在孔内放置第一发起爆弹时,将其适当上提。

#### [参考文献]

- [1] SHARMA S, RAI P. Investigation of crushed aggregate as stemming material in bench blasting: A case [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2015, 12: 1 449-1 463.
- [2] 谢先启, 黄小武, 姚颖康, 等. 露天深孔台阶精细爆破技术研究进展[J]. *金属矿山*, 2022(7): 7-18.
- [3] WU C P, YU B, YANG X C. Intelligent mine blasting and its components [C] // CRC press taylor & francis group. *Proceedings of the 10th international symposium on rock fragmentation by blasting (frag-blast 10)*. London: CRC press taylor & francis group, 2012: 627-629.
- [4] 郭飞高, 郝亚飞, 曹进军, 等. 现场混装炸药预装药爆破关键技术研究与应用[J]. *矿业研究与开发*, 2020, 40(1): 60-63.
- [5] 颜景龙. 中国电子雷管技术与应用[J]. *中国工程科学*, 2015, 17(1): 36-41.
- [6] 付强, 杨军军, 张伟, 等. 基于数码电子雷管的露天矿山爆破延期时间研究及应用[J]. *现代矿业*, 2023, 39(2): 92-95, 99.
- [7] 李章超, 徐帅, 李金平, 等. 基于JKSimBlast的露天台阶爆破空气间隔装药结构优化研究[J]. *爆破*, 2023, 40(1): 50-56, 68.
- [8] 张智宇, 张全龙, 曾继鹏, 等. 不同粒径岩屑抗剪性能及水孔堵塞效果研究[J]. *工程爆破*, 2022, 28(1): 54-62.
- [9] 李荣兴. 露天台阶爆破爆堆集中控制技术研究[J]. *露天采矿技术*, 2023, 38(1): 24-28.
- [10] 洪勇, 李禹锡. 露天矿山爆破振动控制技术的综合评价研究[J]. *工程技术研究*, 2022, 7(20): 26-28.
- [11] 李长权, 戚文革, 李延春, 等. 宽孔距、小排距爆破技术在大黑山钼矿的应用[J]. *黄金*, 2011, 32(7): 36-39.
- [12] LIU J, SUN P Y, LIU F X. Design and optimization for bench blast based on Voronoi diagram [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 66: 30-40.
- [13] 汪旭光, 于亚伦. 台阶爆破[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2017.
- [14] 周科礼, 熊国雄. 铜绿山矿中深孔爆破参数优化试验研究[J]. *黄金*, 2023, 44(7): 96-100.
- [15] 李萍丰, 张兵兵, 谢守冬. 露天矿山台阶爆破技术发展现状及展望[J]. *工程爆破*, 2021, 27(3): 59-62.
- [16] 罗时军, 刘建国, 何月华, 等. 提高德兴铜矿泗洲选矿厂铜回收率的途径[J]. *金属矿山*, 2018(12): 119-122.
- [17] 闵忠鹏, 王柏平, 张永亮, 等. 金山金矿掘进爆破参数优化及应用[J]. *黄金*, 2024, 45(6): 16-22.

## Optimization and application of detonation point location in blast holes for bench blasting

Wang Wei<sup>1,2</sup>, Peng Dingxiao<sup>2</sup>, Lan Ming<sup>3</sup>

(1. Jiangxi Copper Corporation Limited; 2. Jiangxi Copper Technology Institute Co., Ltd.;  
3. School of Resources, Environment and Safety Engineering, University of South China)

**Abstract:** During the promotion test of 310 mm blasthole blasting at a large open-pit mine, issues such as over-fragmentation at the bench toe and insufficient breakage in the upper part of the bench were observed. Considering that the propagation velocity of stress waves in rock mass and the blasting wave velocity of explosives are of the same order of magnitude, numerical simulations were conducted to investigate the influence of different detonation point locations within the blast hole on stress wave propagation. The analysis showed that bottom detonation produced the highest stress wave peak in the upper bench with the shortest duration, while top detonation (at the hole collar) produced the highest peak in the lower bench, also with the shortest duration. In-hole detonation resulted in intermediate stress wave peaks and durations in both upper and lower sections, with the stress wave peak occurring in the middle part of the bench. Based on a comprehensive assessment of stress wave peak values and load duration, field trials were carried out by lifting the first detonator charge to a position between the hole bottom and middle (0.5-4.5 m above the hole bottom). This significantly improved fragmentation in the upper bench and validated the simulation results.

**Keywords:** open-pit mining; bench blasting; in-hole detonation; detonation point location; numerical simulation; stress wave; field trial