

# 基于电子雷管精微差孔内分段—二次封堵爆破 破岩机制优化应用

贾尚伟<sup>1</sup>,徐壮飞<sup>2\*</sup>,刘 苏<sup>2</sup>,贺富领<sup>1</sup>,宋祖光<sup>1</sup>

(1. 河南省地质局地质灾害防治中心; 2. 山东黄金矿业(玲珑)有限公司)

**摘要:**针对玲珑金矿井下巷道掘进过程中,爆破效率低,爆破成本高,爆破振动大等问题,提出了一种孔内分段—二次封堵炮孔的新型装药结构及起爆方式,采用新型堵塞材料作为炮泥,充分利用电子雷管的优势,进行孔内精微差分段。掏槽中心孔由原装填1发雷管调整为2发,并进行孔内精微差分段,时间间隔53 ms;对炮孔二次封堵,形成2个独立空腔,延长冲击波孔内作用时间;并采用新型材料聚氨酯发泡胶+高效水炮泥封堵炮孔外口。实践应用表明:技术方案优化后,采用新型炮泥封堵不仅能降低粉尘和CO浓度,缩短通风时间,降低炸药单耗,还能提高生产效率,经济效益显著,为类似矿山爆破提供参考借鉴。

**关键词:**电子雷管;孔内分段;二次封堵;聚氨酯发泡胶;高效水炮泥;爆破效率

中图分类号:TD235

文章编号:1001-1277(2025)11-0029-05

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20251105

## 引言

在金属非金属矿山开采中,钻爆法依然是最主要的开采方法之一,其具有施工成本低、效率高的优点。钻爆法适用范围广泛,未来很长一段时间内仍将作为巷道掘进的主流技术<sup>[1-4]</sup>。数码电子雷管是一种可以任意设定并准确实现延期发火时间的新型电子雷管,其本质是采用一个微电子芯片取代普通电雷管中的化学延期药与电点火元件,不仅大大提高了延时精度,而且控制了通往引火头的电源,从而保证了雷管的安全。电子延期在延期精度和延期时间上远比药剂延期精确,延期精度在0.1%内<sup>[5-8]</sup>。数码电子雷管与传统雷管相比,具有精度高、稳定性强、安全性高、便于管理的优点<sup>[9-11]</sup>,能够有效提高爆破效率。

山东黄金矿业(玲珑)有限公司(下称“玲珑金矿”)矿岩硬度大,掘进开采时爆破效率低,单耗高,爆破后生成大量有害气体、粉尘等,严重影响下一步施工。为降低有害气体、粉尘浓度和爆破炸药单耗,本文针对玲珑金矿原爆破技术方案进行了优化,采用新型堵塞材料作为炮泥,充分利用电子雷管的优势,进行孔内精微差分段。研究结果可为玲珑金矿创造较高的经济效益,具有一定的推广应用价值。

## 1 工程概况

玲珑金矿试验矿块位于采区二十六中段,该区域

发育蚀变岩型金矿脉,平均金品位2.21 g/t,矿块矿石量为5 439 t,构造走向约13.5°,倾角约28°,倾角局部有较大变化,倾向NE。矿石以含黄铁矿化绢英岩及含黄铁矿化绢英岩化碎裂状花岗岩为主,矿床开采部位岩石属坚硬块状侵入岩和坚硬黄铁绢英岩化碎裂岩。坚硬块状侵入岩岩性单一,地质构造简单,矿岩主要技术参数为:矿岩松散系数1.6,普氏硬度系数 $f=6\sim 11$ ,矿石密度 $2.8\text{ t/m}^3$ ,岩石密度 $2.6\text{ t/m}^3$ 。

## 2 技术方案

为提高爆破效率,本文对该矿块原有爆破技术方案、炮孔参数,炮孔布置,延时时间及炮孔封堵方式堵塞材料等方面进行了优化调整,具体为:

1)掏槽中心孔孔深增加10~20 cm,即由3.3 m加深至3.4~3.5 m。

2)掏槽中心孔由原装填1发雷管调整为2发并进行孔内精微差分段,时间间隔53 ms。

3)优化各炮孔之间延时时间,掏槽孔与辅助孔延时时间调整为500 ms,辅助孔与辅助孔延时时间调整为200 ms,辅助孔与周边孔延时时间调整为250 ms。

4)炮孔二次封堵,形成2个独立空腔,以延长冲击波孔内作用时间。

5)采用新型材料聚氨酯发泡胶+高效水炮泥封堵炮孔外口。

6)增加一圈(4个)辅助孔,形成4层辅助,同时第

收稿日期:2025-06-13; 修回日期:2025-07-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC2907400)

作者简介:贾尚伟(1988—)男,工程师,硕士,从事矿山开采和安全方向的研究工作;E-mail:824704301@qq.com

\*通信作者:徐壮飞(1987—)男,工程师,硕士,从事矿山压力与岩层控制方向的研究工作;E-mail:1979336896@qq.com

三层辅助孔与第四层辅助孔不处于一条线上,第四层辅助孔处于边孔与第三层辅助孔之间,减小孔距。

7)掏槽中心孔与空孔打穿或迎头遇断层距离掏

槽中心孔 150 mm 处增加 2 个抬孔。

具体方案如图 1 所示。

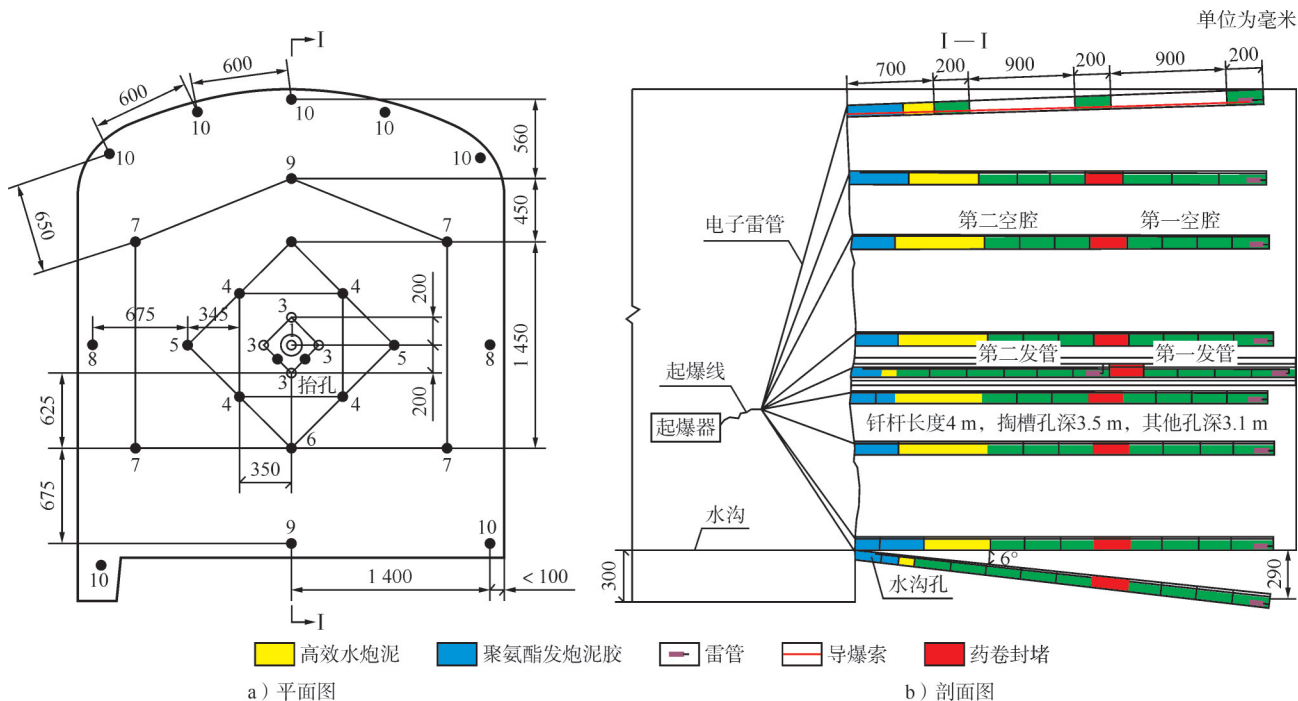


图 1 优化后炮孔布置示意图

Fig. 1 Blast hole layout after optimization

## 2.1 掏槽中心孔内精微差分段时间设计

掏槽孔是影响爆破效果的关键因素,而传统爆破作业时,中心孔采用 1 发雷管,炸药置于炮孔底部,受夹制作用大,爆破效果差。数字电子雷管的出现使孔内分段爆破成为可能,它可以随意设置起爆间隔,最短延时时间可设置为 1 ms,满足更多段的爆破需要。

孔内分段爆破工艺,采用 2 个阶段的延时起爆方式,在掏槽中心孔插入 2 发雷管。爆破时,孔口附近的雷管最先爆开,先爆破的矿岩率先被抛出,降低后爆部位特别是孔底岩层的夹制力,使被爆块石顺利地排出空腔;二次爆破所产生的空腔较大,为下一步爆破提供了较大的自由面;而且采用分段爆破,可降低爆破扰动及能量损耗<sup>[12-14]</sup>。

孔内分段延时起爆技术的关键在于延时时间的确定,通过实践验证,该方法可有效提高爆破效果,用来指导现场爆破参数的设计。延时时间计算公式为:

$$\begin{cases} \Delta t \geq \max(t_1, t_2) \\ t_1 = \frac{l_1}{(\sin \theta v_p)} + \frac{l_1}{(v_r \sin \theta \cos \frac{\beta}{2})} + k_p S / v_p \\ t_2 = k_i \ln R \end{cases} \quad (1)$$

式中: $t_1$ 为外首段炸药的起爆时间(s); $t_2$ 为外槽腔质心距爆源引发振动波的正相位发生时间(s); $l_1$ 为掏槽孔长度,取 2.41 m; $v_p$ 为岩石内的纵波波速,取 3 200 m/s;

$v_r$ 为裂隙的扩展速度,取 481 m/s; $\theta$ 为掏槽孔倾角,取 75°; $\beta$ 为破碎角,取 30°; $S$ 为破碎岩石脱离基岩的距离,取 1~2 cm; $v_p$ 为碎岩石运动速度,取 2~5 m/s; $k_p$ 为与掌子面现场条件相关的系数,根据掌子面围岩情况可取 1~10; $k_i$ 为爆破条件决定的系数,对岩石 $k_i$ 一般取 0.01~0.03,本文取 0.02; $R$ 为外槽腔质心距爆源距离,取 14 m。

根据式(1),结合现场实际数据,掏槽中心孔分段爆破延时时间 $\max(t_1, t_2)=53$  ms。单孔内部的分段爆破相对一次爆破可有效降低孔底炮孔残留的现象。

## 2.2 炮孔封堵设计

为了延长冲击波作用于岩壁的时间,减少能量损失,将中间一节药卷捅碎形成第一次封堵,孔口采用聚氨酯发泡胶+高效水炮泥形成第二次封堵(如图 2 所示),炮孔内形成 2 个独立空腔,延长冲击波孔内作用时间。

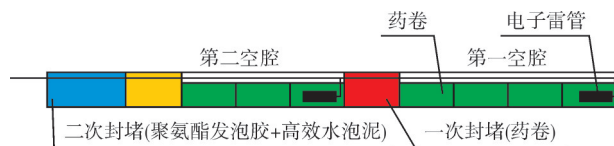


图 2 炮孔封堵示意图

Fig. 2 Schematic diagram of blast hole sealing

## 2.3 孔间延时时间与辅助孔设计

优化各炮孔之间延时时间,掏槽孔与辅助孔延时

时间调整为 500 ms,延长爆破时间,可充分形成自由空间;辅助孔与辅助孔延时时间调整为 200 ms,使崩落岩石互相碰撞,减少大块;辅助孔与周边孔延时时间调整为 250 ms;同时增加一圈(4 个)辅助孔,形成 4 层辅助,且第三层辅助孔与第四层辅助孔不处于一条线上,第四层辅助孔处于边孔与第三层辅助孔之间,通过调整各炮孔位置,减小了孔距,缩短了最小抵抗线,更容易爆破。

2.4 补充孔设计

施工掏槽孔时受环境和工人技术水平影响较大,很容易将中心孔与空孔打穿或迎头遇断层,若不采取补救措施正常装药爆破,会导致爆生高压气体及冲击波从空孔逸散,降低爆破威力,影响爆破效果,通过距掏槽中心孔 150 mm 处增加 2 个抬孔可使掏槽空间顺利形成,保证爆破效果。

2.5 炮泥方案设计

2.5.1 炮泥特性

目前,矿山爆破炮孔封堵采用传统炮泥、高效水泡泥、聚氨酯发泡胶等 3 种主流炮泥进行封堵。3 种炮泥爆破封堵特性为:

1)传统炮泥。传统的固体炮泥材料为黏土、砂、黄泥,它们在受到压力后,与孔壁形成摩擦,当冲击波向外传播时,炮泥受到阻力,冲击力不易散失,从而提高了爆破时孔口的抵抗力。同时,固态炮泥可以防止爆生气体从炮孔逸出,并在原装药体积中蓄积压缩能

量,从而提高了爆破冲击波的威力。此外,它还能使炸药在爆炸过程中被充分地氧化,在很短的时间里,产生大量爆生气体,增强炸药的爆炸效果。

2)高效水泡泥。在高温、高压爆炸冲击波作用下,大量水分蒸发,再凝聚为微细雾滴,与生成的矿物粉尘发生接触,形成雾滴冷凝核,进而达到降尘的目的,降低采场爆破产生量<sup>[15-17]</sup>。由于纯水具有较高的表面张力,在爆炸后很难或不易被雾化,所以不能对灰尘进行足够的润湿,很难达到良好的除尘效果。将洗衣粉(肥皂、洗洁精、酒精)添加到水泡泥中,使水的表面张力减小,制得高效能的水炮泥,爆炸时的爆发力大,与灰尘的撞击速率大,因此,在爆炸冲击作用下,水泡泥浆的雾化程度、润湿能力和捕集灰尘的能力都会得到很大提升<sup>[18-20]</sup>。

3)聚氨酯发泡胶。聚氨酯发泡胶膨胀性和黏结性高,导热系数低,吸水性弱,绝缘性能好,而且还具有很好的防水、保温、隔音、防震、抗压等性能。其采用气雾技术及聚氨酯泡沫技术,在喷射气体过程中,泡沫材料会快速膨胀,并与空气或与其接触的水反应生成泡沫,其具有高膨胀性、防水性、抗震性、抗压强度高等优异性能,因此便于封堵爆炸孔。

2.5.2 不同炮泥方案选择

根据采场爆破炮孔布置形式及装药方式,采用 3 组方案进行对比试验,确定最优方案,布置方式如图 3~5 所示。

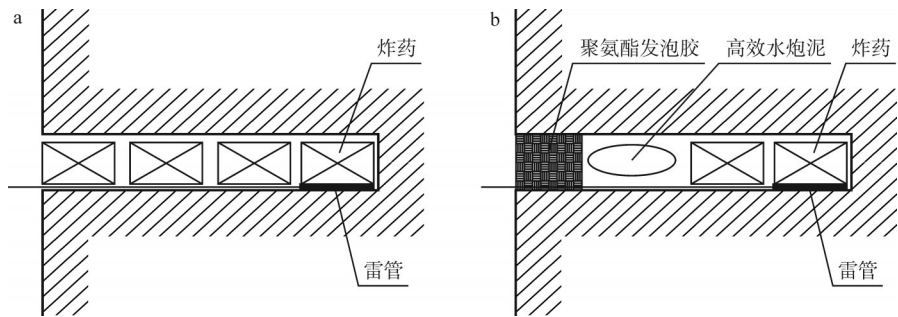


图 3 方案一(聚氨酯发泡胶+高效水泡泥与不填塞)布置示意图

Fig. 3 Layout scheme 1: Polyurethane foam adhesive + high-efficiency water cannon mud and no filling

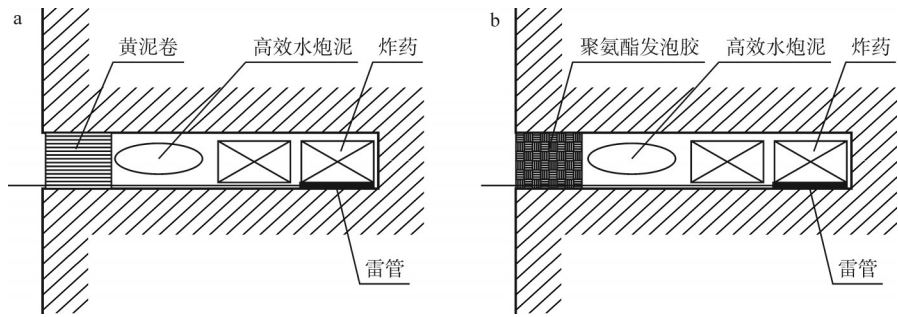


图 4 方案二(聚氨酯发泡胶+高效水泡泥与传统炮泥+高效水泡泥)布置示意图

Fig. 4 Layout scheme 2: Polyurethane foam adhesive + high-efficiency water cannon mud and traditional cannon mud + high-efficiency water cannon mud



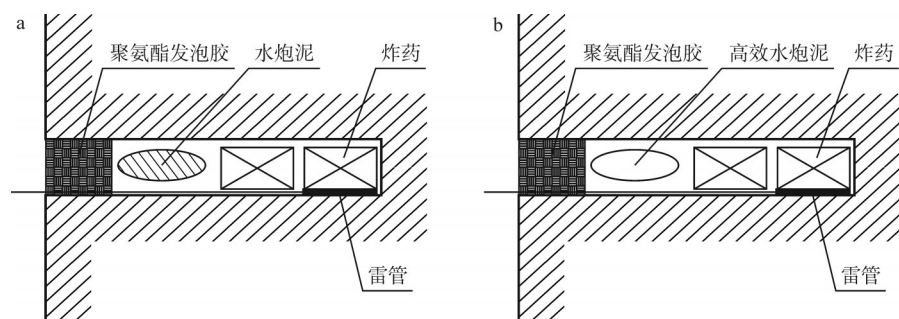


图5 方案三(聚氨酯发泡胶+水炮泥(纯水)与聚氨酯发泡胶+高效水炮泥)布置示意图

Fig. 5 Layout scheme 3: Polyurethane foam adhesive + water cannon mud (pure water) and polyurethane foam adhesive + high-efficiency water cannon mud

### 2.5.3 爆破技术优化后炮泥方案确定

试验时,严格按照方案一、方案二、方案三的顺序进行施工,采用YT-28型凿岩钻机,钻头直径38 mm,钻杆4.0 m,炮孔深3.1 m,掏槽中心孔孔深3.5 m,炮孔直径38 mm,采用直径32 mm、长度30 cm的2号岩石乳炸药,不耦合连续反向装药。

水炮泥填塞长度约为炮孔深度的1/5,聚氨酯发泡胶填塞长度为25~35 cm。首先试验无填塞情况,其次是传统炮泥(黄泥等)+高效水炮泥,然后是聚氨酯发泡胶+水炮泥(纯水),最后是聚氨酯发泡胶+高效水炮泥。每种填塞情况下均爆破10炮,记录有害气体CO浓度、粉尘浓度、矿石抛掷距离、炸药单耗、爆破进尺,取平均值。爆破后每隔3 min用粉尘浓度检测仪测定一次粉尘浓度,记录粉尘浓度降到50 mg/m<sup>3</sup>所需要的时间。试验结果如表1所示。

表1 改进前后各项技术指标对比

Table 1 Comparison of various technical indicators before and after improvement

指标	改进前	改进后	变化
有害气体CO浓度/ $\times 10^{-6}$	72	41	-31
矿石抛掷距离/m	20	15	-5
爆破进尺/m	2.65	2.90	0.25
炮孔利用率/%	85.48	93.55	8.07
炸药单耗/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	2.54	1.87	-0.67

由表1可知:不进行堵孔时有害气体CO浓度最高达到 $72\times 10^{-6}$ ,普通水炮泥堵孔时有害气体CO浓度最高达到 $63\times 10^{-6}$ ,高效水炮泥堵孔时有害气体CO浓度最高达到 $41\times 10^{-6}$ ,随时间推移有害气体CO浓度逐渐降低,因此高效水炮泥可有效吸附有害气体CO,降低其浓度。现场观察,爆堆呈斜坡型由里向外高度逐渐降低,堵孔后爆堆更集中,抛掷距离减小,矿石最远抛掷距离由20 m减小至15 m。爆破进尺由2.65 m提高至2.90 m,炮孔利用率提高至93.55%。采用聚氨酯发泡胶+高效水炮泥堵孔,炸药单耗由 $2.54\text{ kg/m}^3$ 降至 $1.87\text{ kg/m}^3$ ,降低了26.38%,减少了炸药用量,提高

了爆破效率。

## 3 结 论

由于国家对民用爆破物品管控力度逐渐加大,矿山爆破物品供应短缺,因此,降低爆破炸药单耗、提高爆破能效显得尤为重要。

1)对原有爆破技术方案进行优化:掏槽中心孔孔深增加10~20 cm,且分段爆破延时时间53 ms,优化各炮孔之间的延时时间,增加辅助孔和周边孔设计,采用了新的炮孔封堵方式及堵塞材料。

2)对3种炮泥封堵方案按顺序逐步进行了爆破试验,记录粉尘浓度、有害气体CO浓度、矿石抛掷距离、炸药单耗、爆破进尺等主要参数,取平均值进行比较分析,最终确定采用聚氨酯发泡胶+高效水炮泥堵孔爆破更合理。

3)该爆破优化方案的应用降低了粉尘和有害气体CO浓度,缩短了通风时间,加快了循环率,降低了炸药单耗,提高了生产效率;同时节约的爆破物品可调拨给关键工程使用,保障工程进度,为玲珑金矿创造更大的经济效益。该方法具有较好的推广应用价值。

### [参 考 文 献]

- [1] 刘少伟,隋纪胜,贾后省,等.深埋底抽巷炮掘水间隔装药结构与炮眼布置优化[J].采矿与岩层控制工程学报,2023,5(6):5-16.
- [2] 李芹涛,袁永忠,李明辉,等.深部复杂工况巷道混合起爆网络周边成形控制应用研究[J].黄金,2024,45(8):46-51.
- [3] 赵玉报,陈寿根,谭信荣.长大隧道施工中干式除尘机理及应用[J].现代隧道技术,2014,51(3):200-205.
- [4] 汪志国,贾旭峰,赵龙,等.中深孔爆破振动传播特性分析与控制[J].黄金,2023,44(9):36-40.
- [5] 吴健康,钱明渊,王明,等.数码电子雷管在神山灰岩矿精准延期控制爆破的应用研究[J].现代矿业,2024,40(6):63-66.
- [6] 陈刚,陈资南,党建东,等.高阶大直径深孔爆破动载下二步骤采场稳定性研究[J].黄金,2023,44(11):23-27.
- [7] 李启秀.一种新型数码电子雷管引火药剂安全应用研究[J].煤矿爆破,2024,42(1):25-28.
- [8] 邵明伟,姜凤,徐要森.中深孔爆破成井在逊克金矿的应用[J].黄金,2023,44(3):31-33,42.

- [9] 李志周. 某巷道掘进数码电子雷管微差分段爆破方案研究[J]. 现代矿业, 2024, 40(2): 17-20.
- [10] 褚洪涛, 王德民, 夏晨辉, 等. 锦丰金矿进路掘进凿岩爆破优化试验研究[J]. 黄金, 2022, 43(11): 47-50.
- [11] 杨利军, 王江. 爆破作业点多面广、环节多、管难度较大, 怎么办? 余吾煤业准备队: 数码雷管提升安全性和管理效率[J]. 班组天地, 2023(9): 36-37.
- [12] 王亚雄. 电子数码雷管与掏槽眼分段装药延时爆破技术在小净距超大跨径隧道的应用[J]. 黑龙江交通科技, 2023, 46(1): 106-108.
- [13] 李芹涛, 李明辉, 杨建明, 等. 大直径超深竖井基岩段中深孔爆破参数优化及应用[J]. 黄金, 2023, 44(2): 4-7, 13.
- [14] 李欢, 曹艳武. 电子-导爆索雷管混合起爆网络在黄金洞金矿的应用[J]. 黄金, 2024, 45(3): 20-23.
- [15] 欧阳丹, 王鹏飞, 李石林, 等. 矿山采场水压爆破降尘技术研究进展[J]. 化工矿物与加工, 2023, 52(3): 60-68.
- [16] 王天暘, 金龙哲, 郭敬中, 等. 铁矿采场多组份水炮泥抑制爆破烟尘试验研究[J]. 金属矿山, 2020(4): 194-199.
- [17] 上官剑铭, 叶亦杰. 高效水炮泥+聚氨酯发泡胶新型炮孔堵塞材料试验研究[J]. 采矿技术, 2019, 19(1): 114-116.
- [18] 彭剑平, 邹常富. 高效水炮泥降尘技术的应用研究[J]. 矿业安全与环保, 2018, 45(6): 29-31.
- [19] 付宏宁, 刘海洋, 侯志永, 等. 基于爆破漏斗试验的深孔爆破参数选择[J]. 铀矿冶, 2023, 42(4): 8-12.
- [20] 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 blasting and rock-breaking mechanism using precise short-delay in-hole decking and two-stage stemming with electronic detonators

Jia Shangwei<sup>1</sup>, Xu Zhuangfei<sup>2</sup>, Liu Su<sup>2</sup>, He Fuling<sup>1</sup>, Song Zuguang<sup>1</sup>

(1. *The Prevention and Control Center for the Geological Disaster of Henan Geological Bureau;*

2. *Shandong Gold Mining (Linglong) Co., Ltd.*)

**Abstract:** To address issues such as low blasting efficiency, high blasting costs, and significant blast-induced vibrations during underground roadway excavation at Linglong Gold Mine, a novel charging structure and initiation method involving in-hole decking and two-stage stemming was proposed. This approach utilized new stemming materials and fully leveraged the advantages of electronic detonators to achieve precise short-delay in-hole decking. The cut center hole was modified from originally being charged with one detonator to two detonators, with precise short-delay in-hole decking of 53 ms. Two-stage stemming was applied to form two independent air chambers, prolonging the action time of shock waves within the hole. Additionally, polyurethane foam glue + high-efficiency water-based stemming material was used to seal the outer end of the blast holes. Practical application demonstrates that after technical optimization, the use of new stemming material reduces dust and CO concentrations, shortens ventilation time, decreases explosive consumption per unit, and enhances production efficiency, generating significant economic benefits. This study provides a valuable reference for similar mining blasting operations.

**Keywords:** electronic detonator; in-hole decking; two-stage stemming; polyurethane foam glue; high-efficiency water-based stemming material; blasting efficiency