

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.04.011

基于三维激光扫描的掏槽爆破效果优化*

周磊¹,张祥²,陈树林³,王国豪²,高德瑞³,赵建彬³,李晓婕³

(1. 宏大爆破工程集团有限责任公司,广州 510000;2. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院,北京 100083;
3. 攀钢集团矿业有限公司,攀枝花 617067)

摘要: 掏槽爆破是地下岩石工程中单自由面爆破的关键环节,直接决定着巷道掘进速度。本研究聚焦于地下矿巷道掘进常用的直眼掏槽形式,首先通过现场掏槽爆破试验,借助三维激光扫描仪,从腔体深度(L)与截面面积(S)的关系角度定量表征了爆后腔体特征,发现存在底部空间狭小、破碎岩石堆积等问题。为提高掏槽爆破效果,提出在空孔底部装药的优化方法。进而,基于光滑粒子流体动力学-有限元法(SPH-FEM),对该方法的可靠性进行了数值模拟研究。结果表明:采用空孔底部装药后,掏槽区中轴线的损伤区域形状由W形转变为U形,损伤区域面积显著增大;岩石碎块(粒子)的总体抛掷数量增多,且炮孔内部不同位置碎块的抛掷距离明显增大。

关键词: 掏槽爆破;直眼掏槽;三维激光;SPH-FEM;空孔底部装药

中图分类号: TD853;TD235 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2025)04-0097-07

Optimization of Cut Blasting Effect based on 3D Laser Scanning

ZHOU Lei¹,ZHANG Xiang²,CHEN Shu-lin³,WANG Guo-hao²,GAO De-ru³,ZHAO Jian-bin³,LI Xiao-jie³

(1. Hongda Blasting Engineering Group Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and

Technology(Beijing), Beijing 100083, China;3. Pangang Group Mining

Co., Ltd., Panzhihua 617067, China)

Abstract: Cut blasting serves as a critical technique for single-sided blasting in underground rock engineering, directly governing the rate of tunnel excavation progress. This article examines the conventional burn-cut excavation method used in underground tunnel construction. Firstly, field cut blasting experiments were conducted, and the post-blasting cavity characteristics were quantitatively characterized from the L - S perspective using 3D laser scanning technology. The cut blasting cavity exhibits limitations, including a narrow bottom space and the accumulation of fractured rocks. To enhance blasting effectiveness, a bottom-charging method for hollow holes was proposed. Subsequently, the reliability of the process was investigated using the Smoothed Particle Hydrodynamics-Finite Element Method (SPH-FEM). The results demonstrated that implementing empty hole bottom charging transformed the damage zone morphology in Section(II) from W-shaped to U-shaped while significantly expanding the affected area. Moreover, the total ejected particle count increased substantially, with notable enhancements in particle ejection distances at various borehole positions.

Key words: cut blasting; burn cut; 3D laser scanning; SPH-FEM; empty hole bottom charging

收稿日期(Date of reception):2025-05-26

网络首发日期(Published online):2025-10-15

作者简介:周磊(1990-),男,安徽淮北人,本科,工程师,主要从事爆破、民用爆炸物品安全技术方面的研究工作,(E-mail)1043204176@qq.com。

通信作者:张祥(1997-),男,黑龙江齐齐哈尔人,在读博士,主要从事工程爆破方面的研究,(E-mail)3153075532@qq.com。

About the author: ZHOU Lei(1990-), male, born in Huaibei city, Anhui province, bachelor's degree, engineer, mainly engages in research on blasting and safety technology for civilian explosives, (E-mail)1043204176@qq.com.

Corresponding author: ZHANG Xiang(1997-), male, born in Qiqihar city, Heilongjiang province, doctoral candidate, mainly engaged in research on engineering blasting, (E-mail)3153075532@qq.com.

钻孔爆破技术作为地下空间开挖应用广泛的施工方法在操作流程^[1-4]、经济成本以及开挖效率方面具有明显优势,所以被广泛应用于国内地下工程开挖中。巷道掘进速度的关键在于掏槽爆破,合理的掏槽爆破方式有利于掏槽腔内岩体的破碎和投掷,为后续爆破提供额外自由面和补偿空间。因此,掏槽爆破通常被认为是获得好的爆破效果和大的循环进尺的关键技术。相较于隧道开挖,巷道掘进多属小断面爆破,受限于巷道断面尺寸,钻机难以实施倾斜钻孔,因此直眼(平行孔)掏槽成为金属矿山巷道开挖工程中最常用的掏槽形式^[5,6]。

过去几十年间,众多学者对掏槽爆破技术进行了广泛研究。Langefors 等提出了一种基于掏槽抛掷和变形特性的隧道大直径钻孔施工方法^[7],为后续大直径孔洞掏槽爆破研究奠定了基础。张召冉等以含大空孔的直眼掏槽为研究对象^[8],在分析掏槽空孔效应的基础上进行了掏槽参数的理论分析,并结合算例验证了掏槽爆破参数设计的有效性。Kai 等在一井式天井掘进研究中^[9],通过小尺度现场试验对比了螺旋孔间距法和观测孔法,确定了适宜的空孔直径、孔间距和装药长度,并将螺旋间距法的实验参数成功应用于现场,取得了良好的爆破效果。Xie 等基于 RHT 模型通过实验确定了岩石本构参数^[10],分析了高地应力条件下掏槽爆破过程中围岩应力的各向异性及损伤传播方向,并进一步提出了一种改进的掏槽爆破技术以应对深部岩体开挖的困难。张浩等提出了掏槽孔与抛掷技术^[11],通过在中心孔底部填充少量炸药,增加孔内爆生气体压力,从而提高了破碎岩石的抛掷能力。周传波在深孔爆破一次成井研究中^[12],针对九孔掏槽、单螺旋掏槽和双孔菱形掏槽方式进行了模型试验。结果表明:在爆破平均块度、爆破大块率、成井体积及炮孔利用率等主要指标上,单螺旋掏槽均优于其他掏槽方式。

综合上述研究可见,目前针对深孔掏槽技术的研究主要集中于模型试验、理论分析和数值模拟,然而对现场掏槽试验爆后腔体形状、腔体大小的定量描述相对较少。本文针对攀枝花尖山地下矿采用的七星掏槽布孔形式,利用 GeoSLAM Zeb-Horizon 激

光扫描仪对掏槽爆破效果进行三维扫描,定量评价了掏槽爆破效果。针对现场试验揭示的问题,采用 SPH-FEM 数值模拟方法研究了掏槽爆破成腔过程,提出了优化方案(空孔底部装药),并探究了其可行性。

1 实验装置

三维激光扫描技术(3D laser scanning technology)是一种近年来兴起的先进、全自动高精度立体扫描技术。该技术利用高速激光扫描测量方法,可非接触、高分辨率地快速获取大范围被测对象表面的三维坐标 (x, y, z) 、反射率及 (R, G, B) 颜色信息,为快速重建真彩色 1:1 三维点云模型提供了一种全新手段^[13]。它突破了传统单点测量的局限,以点云形式采集并存储空间物体表面的三维几何信息与纹理数据^[14],可快速重构目标模型及其线、面、体、空间等各类三维数据,真实再现客观物体的形态特征。目前,该技术已在公路隧道、地铁隧道、暗涵检测、矿山溜井、边坡工程场景中成功应用,取得了精细探测和辅助分析的显著效果。本文采用手持式 GeoSLAM Zeb-Horizon 三维激光扫描仪,其点云数据处理的核心方法如下式所示

$$\begin{cases} x = S \cos \theta \cos \alpha \\ y = S \cos \theta \sin \alpha \\ z = S \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: S 表示点云数据与扫描仪的距离; θ 表示纵向扫描角度观测值; α 表示每个激光脉冲横向扫描角度观测值。

2 实验及实验结果

根据现场地质条件选定试验场地,基于补偿空间理论设计掏槽爆破方案,实施钻孔、装药与爆破。为实现掏槽爆破效果的量化分析,利用三维激光扫描仪采集爆后槽腔的三维点云数据并构建完整模型。将扫描重建的腔体模型沿其深度 L 方向,以 150 mm 为间隔切割成系列切片,计算每个切片的面积 S ,绘制不同掏槽形式下的 $S-L$ 关系曲线。实验方案设计见表 1。

表 1 实验方案设计

Table 1 Experimental scheme design

装药孔直径 Charging hole diameter/mm	空孔孔直径 Empty hole diameter/mm	孔间距 Hole spacing S_1 /mm	孔间距 Hole spacing S_2 /mm	孔深 Hole depth/mm
40	80	250	350	3000

现场试验掏槽爆破炮孔布置方案如图 1 所示。

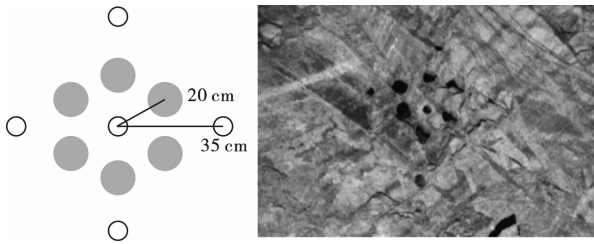


图 1 现场炮孔布置图

Fig. 1 Layout of on-site blast holes

现场实验结果如图 2 所示。

实验结果表明:掏槽爆破形成的腔体呈现明显的底部小、上部大的喇叭状形态,且腔体底部存在破碎岩石堆积问题。掏槽爆破作为掘进速度的关键环节,其底部空间狭小和碎石堆积势必导致后续炮孔

补偿空间不足,进而影响整体掘进效率。为定量表征掏槽爆破效果,对爆后槽腔三维点云模型进行分析。定义槽腔底部为起点(0 m),选取距底部 2.75 m 范围内数据作图。图 3 左侧展示了沿槽腔深度 L 方向间隔 150 mm 切割所得典型切片位置的腔体轮廓图,右图为爆后槽腔整体形态示意图。整体槽腔特征分析如下:本次掏槽爆破采用连续装药、孔底反向起爆方式。不同深度切片轮廓图显示,槽腔整体呈底部小、上部大的漏斗状。由于槽腔底部岩体夹持作用显著,底部表现为面积较小的深漏斗形态。随着深度 L 增加,槽腔形态趋于规则,逐渐接近掏槽孔布置形状,腔体面积随之增大。临近掌子面(自由面)区域,由于爆炸应力波在掌子面处发生反射,加之岩石类脆性材料抗压强度远高于抗拉强度,导致掌子面附近形成更大的损伤区域,该区域面积约 1.4 m^2 。

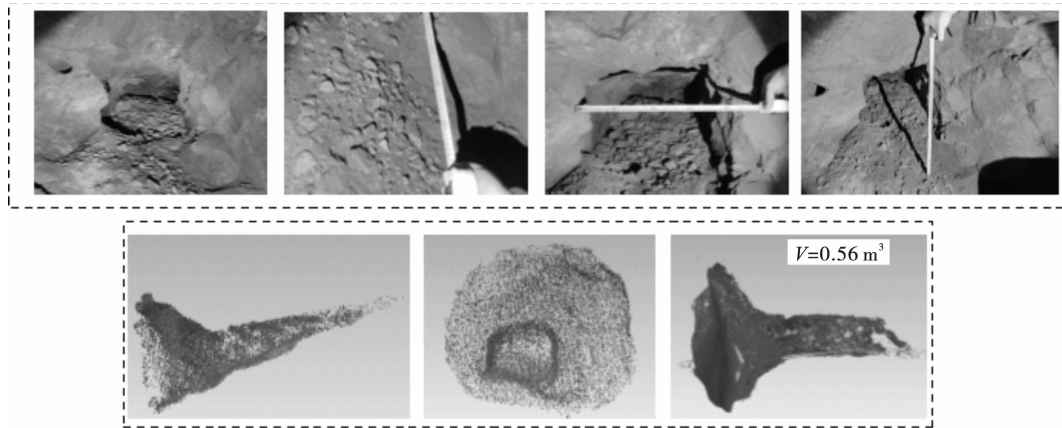


图 2 现场试验结果

Fig. 2 On site test results

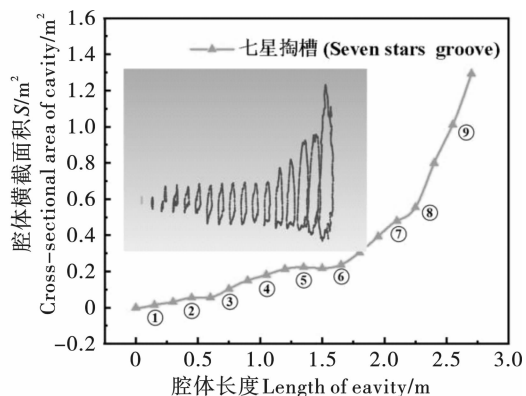
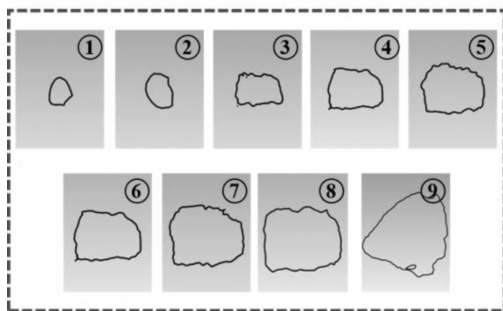


图 3 现场掏槽爆破量化分析

Fig. 3 Quantitative analysis of on-site cut blasting

3 现场掏槽爆破优化方案

为进一步优化掏槽爆破效果,本研究提出空孔底部装药方案,并采用光滑粒子流体动力学-有限元

法(SPH-FEM)耦合数值模拟方法,从掏槽爆破损伤区域形态与面积、岩石碎块(粒子)抛掷数量以及抛掷距离三个方面,分析该方案的影响,评价其优化效果。

3.1 平滑粒子流体动力学-有限元法 (SPH-FEM)

SPH 是一种基于拉格朗日框架的无网格粒子流体动力学方法。其基本原理是将连续体离散为一系列相互作用的粒子。每个粒子携带质量、速度等物理属性,通过求解动力学方程和追踪粒子运动轨迹来模拟材料的力学行为^[15,16]。SPH 方法特别适用于模拟大变形、破碎等固体力学问题,能够有效描述掏槽爆破过程中岩石破碎、碎块抛掷及成腔轮廓的形成。然而,SPH 方法在处理复杂边界条件时往往计算耗时较长。为克服此问题,本研究采用有限元法(FEM)处理边界问题,形成 SPH-FEM 耦合方法。

该联合方法已在相关领域得到应用验证^[17,18]。

3.2 模型及材料参数

由于爆破模型中空孔分布与中心掏槽区呈中点对称,为节省计算资源,建立 1/4 对称模型。模型总体尺寸为 2.3 m × 2.3 m × 4.5 m。其中 SPH 区域尺寸为 1.8 m × 1.8 m × 4.0 m,包含岩石、炸药及堵塞材料。将 SPH 区域与 FEM 区域耦合,并在 FEM 区域的外边缘施加无反射边界条件以模拟无限岩体。对称面上施加法向约束。模型中 SPH 部分和 FEM 部分的粒子总数分别为 110 958 和 86 760。模型示意图见图 4。

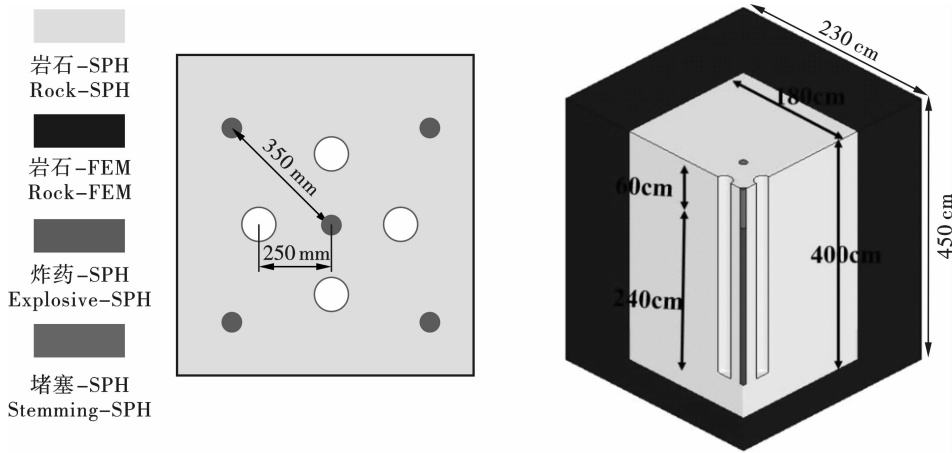


图 4 模型设计图

Fig. 4 Model design diagram

针对中心掏槽孔爆破存在的槽腔底部小,破碎岩石堆积问题。在原方案基础上进行优化,具体做法为:(1)考虑到岩石堆积位置,将炮孔布置设计成图五所示,即空孔在掏槽区域呈菱形布置(存在一

个空孔在整个掏槽区的底部),增加空孔底部装药抛掷效果。(2)空孔深度增加 30 cm,底部装药,并用炮泥堵塞,优化方案图如图 5 所示。

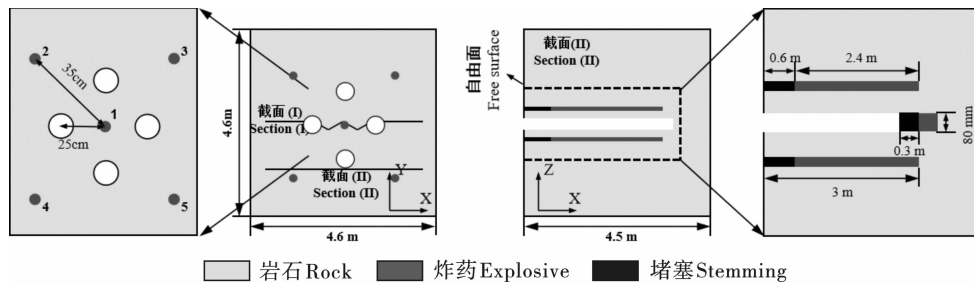


图 5 现场优化方案设计

Fig. 5 Design of on-site optimization plan

1) 岩石材料

霍尔姆奎斯特-约翰逊-库克模型 (HJC) 能够有效地定义脆性材料在动态载荷作用下的断裂行为。该模型主要由强度方程、损伤模型和状态方程组成。强度方程表示如下

$$\begin{cases} \sigma^* = [A(1 - D) + Bp^{*N}][1 + C \ln(\epsilon'^*)] \\ \sigma^* = A + Bp^{*N} \end{cases} \quad (2)$$

式中: A 为黏性强度系数, $A = c/f_c$, c 为粘聚力, 根据莫尔-库伦准则, 粘聚力 c 可由 $\sigma_1 = \sigma_3(1 +$

$\sin \theta) + 2c \cos \theta / (1 - \sin \theta)$ 得出; B 为压力硬化系数; N 为标准化静水压力的指数; p^* 为无量纲的静水压力, $p^* = p/f_c, p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$; σ^* 为无量纲的等效应力, $\sigma^* = \sigma/f$, 等效应力 $\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$; ε'^* 为归一化应变率, $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$, $\dot{\varepsilon}$ 为实际应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; C 为应变率强化系数。

损伤模型表示为

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \mu_p}{\varepsilon_p^f + \mu_p^f} \quad (3)$$

$$\varepsilon_p^f + \mu_p^f = D_1(P^* + T^*) \quad D_2 \geq EF_{\min} \quad (4)$$

式中: $\Delta \varepsilon_p$ 和 $\Delta \mu_p$ 分别表示一个积分周期中的等效塑性应变和塑性体积应变。 ε_p^f 和 μ_p^f 分别表示恒压至断裂时的等效塑性应变和塑性体积应变。 D_1 和 D_2 为损伤常数, 材料常数 EF_{\min} 表示用于抑制弱拉伸波断裂的最小塑性应变。 $T^* = T/f_c$ 为归一化的最大拉伸静水压力。研究表明: D_2 和 EF_{\min} 的取值对结果的影响可几乎忽略不计, 并进行多次试算, 令 $D_2 = 1, EF_{\min} = 0.01$ 代入式后确定 $D_1 = 0.05$ 。

状态方程分为弹性压缩、压实变形和压实后变形三个阶段。这三个阶段可以用以下表达式来表示

$$\begin{cases} P = K\mu & , P \leq P_{crush} \\ P = P_{crush} + K_{lock}(\mu - \mu_{crush}), P_{crush} \leq P \leq P_{lock} \\ P = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 & , P \geq P_{lock} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $K = P_{crush}/\mu_{crush}$ 为弹性体积模量, 其中 P_{crush} 和 μ_{crush} 分别表示材料发生塑性变形开始时的压力和体积应变, $P_{crush} = f_c/3$; $\mu_{lock} = \rho_g/\rho_0 - 1, \rho_g = \rho_0/(1 - q)$, ρ_g 为材料没有空隙时的密度, 岩石孔隙度 q 为 1.2%; K_1, K_2 和 K_3 均为材料常数, 均是按照经验

公式拟合得到; μ_{crush} 代表体积应变; $P_{lock} = 1.2 \text{ GPa}$ 。其余参数对模拟结果不敏感, 取用软件默认值

2) 炸药材料

用 JWL 状态方程进行模拟, 表示为

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

式中: P 为爆轰产物的压力; V 为爆炸产物与初始产物的相对体积; E 为单位质量的内能。 A, B, R_1, R_2, ω 是与爆炸性产品相关的 JWL 参数。炸药选用二号乳化炸药, 炸药密度为 1.1 g/cm^3 , 爆速 4000 m/s 。

3) 堵塞材料

本研究以土壤作为加固材料。采用完全插拔方式, 材料参数参考文献[9]。

3.3 实验结果对比分析

图 6 显示了通过 1/4 模型的爆破过程; 有效塑性应变轮廓代表了使用 HJC 模型模拟中岩石爆破的损伤程度^[20]。共捕获三个 1、3、5、7、9 ms 的典型时间实例进行观察。随着时间的推移, 切割爆破的过程经历了三个阶段: 岩石的破碎和穿孔、自由表面的膨胀、岩石碎片的投掷。在第一阶段, 在没有混杂压力的情况下, 自由表面会发生一定的损伤。由于空孔的引导和应力波的叠加, 损伤分布优先向切割区域的中心发展, 空孔处的岩石破坏明显增加。在第二阶段, 电荷上方的岩石被来自自由表面的反射波打破, 爆炸膨胀压力推动顶部岩石运动。在第三阶段以后, 不同大小的岩石碎片从切割腔向任何方向抛出。

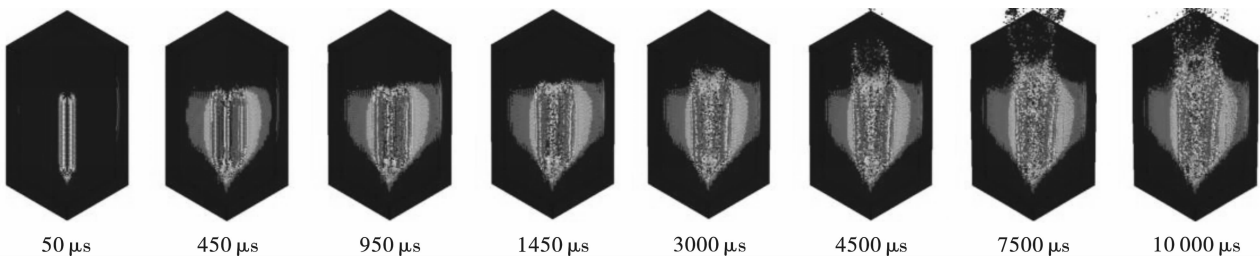


图 6 粒子抛掷过程

Fig. 6 Particle throwing process

图 7 的模拟结果显示了通过生成 1/4 模型的一个镜像进行的爆破过程, 对截面 (I) 和截面 (II) 处的损伤程度展开分析。图 7(a) 显示, 首爆孔起爆后, 造成爆破孔周围的岩石破坏, 底部破碎的岩石向周围空孔扩散, 顶部岩石在爆生气体的作用下抛出腔体, 形成空腔为后续爆破提供补偿空间, 整个过程

中首爆孔的损伤区范围均未跨过空孔。第二段雷管起爆后, 破碎岩石通过首爆孔提供的空腔抛出, 截面 (II) 的损伤区域整体呈 W 形分布。采用空孔底部装药时, 当空孔炸药引爆后, 首先在爆生气体作用下会加快上部岩石的移动速度, 同时对堆积在底部的破碎岩石有一定的推动作用; 其次增加了一段底部

炸药的雷管段别,相当于增加了前两段炮孔的抛掷时间,这样也会增多抛掷的粒子数量,图7截面

(II)的损伤区域整体呈U形分布,损伤区域范围要明显大于原始方案。

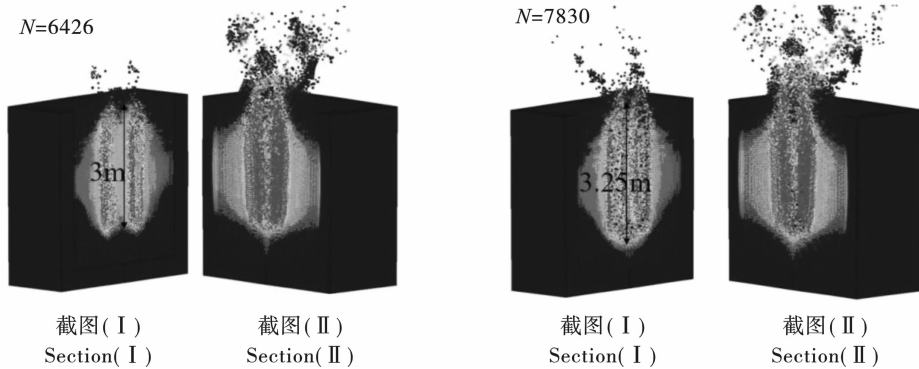


图7 损伤区域及粒子总抛掷数量

Fig. 7 Damage area and total number of particles thrown

当孔深为3 m时,原始方案爆破后 Section(I) 孔口位置抛掷粒子数较少,主要是因为爆破能量不足以向外推出更多的岩石碎片,导致岩石碎片留在腔中。因此,增加电荷量 δ 的比例是克服这一效应的有效措施。当空孔装药长度为30 cm时,孔口位置被抛掷的粒子数明显增多,两炮孔之间的损伤区域明显大于原始方案,且腔体底部、中部和上部的粒子移动距离也明显增大,根据粒子移动距离的增长趋势,粒子仍处于移动状态。见图8、图9。

用,空孔底部装药后,腔体不同深度处的粒子数均有明显增多。

为了评价方案优化后对粒子抛掷作用的影响,选取了深300 cm到自由面之间的8处平面,分别计算脱离该平面的粒子数目,并进行了不同方案的对比分析。图10表示传统方案与优化后方案腔体某一位置处平面上方的粒子数。根据图10可知:空孔底部装药对掏槽爆破的整体抛掷效果具有正向作

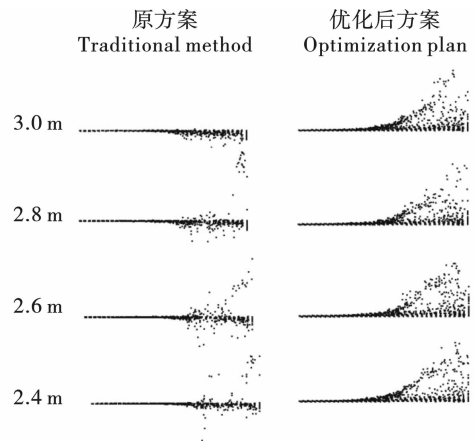


图8 不同位置粒子抛掷数量

Fig. 8 Number of particles thrown at different positions

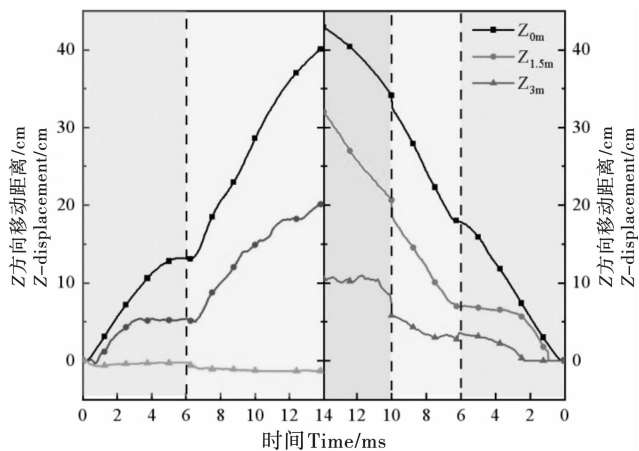
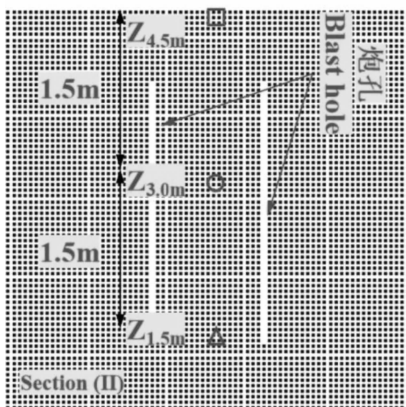


图9 不同位置粒子抛掷距离

Fig. 9 Particle throwing distance at different positions

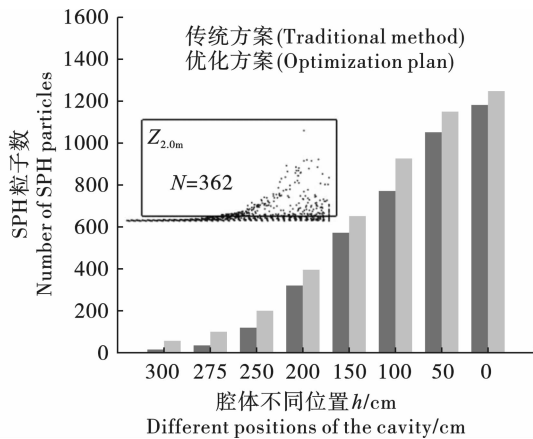


图10 实验结果对比分析

Fig. 10 Comparative analysis of experimental results

4 结论

文章通过现场掏槽爆破试验,定量描述了掏槽爆破成腔的L-S特征,发现掏槽爆破存在底部腔体狭小,破碎岩石抛掷困难等问题,通过数值模拟方法,探究了空孔底部装药的可行性,但仍存在不足,由于进行现场掏槽爆破实验相对困难,所以并未对其进行现场验证。本研究得到以下结论:

1)对于金属矿巷道掘进中,直眼掏槽爆破容易出现腔体底部孔间狭小,且碎石堆积问题,这也是影响巷道掘进速度的关键。掏槽爆破腔体形状呈底部小、上部大的喇叭状,扩大掏槽爆破底部槽腔、减少腔体内部碎石堆积是提高掏槽爆破效率的关键。

2)空孔底部装药增大了腔体整体的损伤区域,增加了整体岩石的抛掷效果、增加了不同位置粒子的抛掷距离,对于提高整体掏槽爆破效果起着至关重要的作用。

参考文献 (References)

- [1] 杨仁树. 我国煤矿岩巷安全高效掘进技术现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 18-23.
- [1] YANG Ren-shu. Present status and outlook on safety and high efficient heading technology of mine rock roadway in China[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 18-23. (in Chinese)
- [2] 杨仁树,李成孝,陈骏,等. 我国煤矿岩巷爆破掘进发展历程与新技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 224-241.
- [2] YANG Ren-shu, LI Cheng-xiao, CHEN Jun, et al. Development history and new technology research progress of rock roadway blasting excavation in coal mines in China[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 224-241. (in Chinese)
- [3] 李清,杨仁树,汤增陆,等. 深部大断面岩巷快速掘进技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(10): 1-4.
- [3] LI Qing, YANG Ren-shu, TANG Zeng-lu, et al. Research on rapid excavation technology for deep mine large cross sectional rock roadway[J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(10): 1-4. (in Chinese)
- [4] 龚敏,王灿华,梁立勋,等. 硬岩掘进中主要爆破参数的确定与作用[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1526-1533.
- [4] GONG Min, WANG Can-hua, LIANG Li-xun, et al. Function analysis and confirming method of key blasting parameters for excavating in hard rock[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1526-1533. (in Chinese)
- [5] 林大能,陈寿如. 直眼掏槽效率敏感因子的理论与试验分析[J]. 煤炭学报, 2005(1): 40-43.
- [5] LIN Da-neng, CHEN Shou-ru. Theoretical and testing study on factors affecting parallel hole cut blasting[J]. Journal of China Coal Society, 2005(1): 40-43. (in Chinese)
- [6] 龚敏,文斌,王华. 掏槽参数对煤矿岩巷爆破效果的影响[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(4): 576-584.
- [6] GONG Min, WEN Bin, WANG Hua. Influences of cut parameters on blasting effect in rock roadway of coal mine[J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(4): 576-584. (in Chinese)
- [7] LANGEFORS U, B Kihlström, KS Kenkyüjo. The modern technique of rock blasting[M]. Almquist and Wiksell, 1963.
- [8] 张吉冉,陈华义,矫伟刚,等. 含空孔直眼掏槽空孔效应及爆破参数研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 791-800.
- [8] ZHANG Zhao-ran, CHEN Hua-yi, JIAO Wei-gang, et al. Rock breaking mechanism and blasting parameters of straighthole cutting with empty-hole[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 791-800. (in Chinese)
- [9] LIU Kai, LI Qi-yue, WU Cheng-qing, et al. A study of cut blasting for one-step raise excavation based on numerical simulation and field blast tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 109: 91-104.
- [10] XIE Li-xiang, LU Wen-bo, ZHANG Qian-bing, et al. Analysis of damage mechanisms and optimization of cut blasting design under high in-situ stresses[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2017, 66: 19-33.