

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.01.005

基于岩石爆破损伤的炮孔布置优化研究*

张理维,王卫华,戴怡文

(中南大学资源与安全工程学院,长沙410083)

摘要:为改善焦家金矿巷道掘进爆破效果,采用数值模拟方法对爆破方案中的炮孔布置进行优化。利用ANSYS/LS-DYNA建立2组掏槽及光面爆破数值模型并进行计算,获得了爆破过程中岩石产生的损伤,通过损伤因子D对爆破效果进行评价。结果表明空孔有利于掏槽孔间岩石的破碎,使各个掏槽孔产生的空腔连成片;比较外圈掏槽孔间距为90 cm、100 cm及110 cm时的掏槽效果,当间距为100 cm时所形成的掏槽空腔范围大且相互连通;分析光爆孔间距为50 cm、60 cm及70 cm时的爆破效果,发现随着孔间距增大,炮孔连线间的损伤程度减小,连线间的损伤区由贯通变为不贯通,最后确定光爆孔间距为60 cm。将优化后的爆破方案用于现场试验,取得了较好的效果,说明根据岩石损伤演化规律对炮孔布置进行优化是可行的。

关键词: 炮孔布置优化;数值模拟;岩石爆破损伤;炮孔间距

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)01-0036-07

Blast Hole Arrangement Optimization based on Rock Blasting Damage

ZHANG Li-wei, WANG Wei-hua, DAI Yi-wen

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: To improve the blasting effect of roadway excavation in Jiaojia Gold Mine, the method of numerical simulation was adopted to optimize blast-hole arrangement in a blasting design. ANSYS/LS-DYNA was used to establish two sets of cut and smooth blasting models, and the rock damage during blasting was obtained. Damage factor D was adopted to evaluate the blasting effect. Results show that the hollow holes are beneficial to the rock breakage between the cutting holes and make the cavities generated by each cutting hole connect into a whole part. The cut cavity connect with each other with a wider range when the cut hole spacing in the outer ring is 100 cm compared with that of 90 and 110 cm. Analyzing the blasting effect when the spacing between smooth blasting holes is 50 cm, 60 cm and 70 cm, it reveals that as the blast-hole spacing rises, the damage degree between the blast-hole connection decreases, and the damage zone becomes disconnected. The distance between smooth blasting holes is determined to be 60 cm. The final blasting scheme was applied to the field test and achieved good results, indicating that it is feasible to optimize the hole layout according to the law of rock damage evolution.

Key words: blast-hole arrangement optimization; numerical simulation; rock blasting damage; blast-hole spacing

焦家金矿目前巷道掘进爆破中存在着循环进尺小、超欠挖严重等问题,现场调查后发现炮孔布

置不合理是主要原因。为改善爆破效果,需要对炮孔布置进行优化。中外学者围绕爆破参数优化进行了大量研究。戴俊、付玉华等、SK Mandal等从爆破机理出发,提出了不同条件下周边控制爆破参数计算方法^[1-3];单仁亮等、郭进平等、Kaiyun Liu等将数学理论与方法用于优化炮孔布置^[4-6];众多学者结合数值模拟,分析得到最优爆破参数,并通过现场

收稿日期:2019-02-27

作者简介:张理维(1994-),男,硕士,从事岩石力学、爆破等方面研究,(E-mail)994423077@qq.com。

通讯作者:王卫华(1976-),男,教授、博士,从事岩体动力学、爆破及安全工程研究,(E-mail)50973993@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41372278)

试验进行验证^[7,8]。爆破过程中周围岩石会受到不同程度的损伤,李新平等利用爆破振动测试和数值模拟研究了具体工程中的爆破损伤范围^[9];胡英国等建立了拉压损伤模型^[10];JH Yang 等利用自建的岩石损伤模型对动态地应力重分布和爆破荷载对隧道围岩的破坏作用进行了探究^[11];张西良等对高围压条件下岩石爆破损伤范围进行了探究,认为围压对岩石损伤具有抑制作用^[12]。建立掏槽及光面爆破数值模型,获得了爆破过程中岩石的损伤,并分析了不同炮孔布置方案的岩石损伤演化规律。根据模拟结果对炮孔布置进行优化。

1 巷道掘进爆破方案

由于循环进尺的大小主要受控于掏槽爆破效果,巷道壁面是否平整取决于光面爆破参数的选取是否合理,而深入调研后发现原爆破方案中的装药

量及装药结构是合理的,故要改善焦家金矿巷道掘进爆破效果,关键在于优化掏槽孔及光爆孔的布置。为此,在充分考虑焦家金矿施工条件并借鉴原有爆破方案的基础上制定了新的炮孔布置图(图1)。采取全断面开挖方案,微差起爆。炸药为2#岩石乳化炸药,炮孔直径为42 mm。采用五星掏槽并在外圈增加四个掏槽孔的掏槽方式以获得更大的掏槽空腔。帮眼和拱顶眼采用光面爆破,光爆层厚度为60 cm。掏槽孔及光爆孔布置之后再对辅助孔进行均匀排布。方案中仍有外圈掏槽孔间距a、光爆孔间距b未最终确定,并需对五星掏槽孔布置的合理性进行验证。根据以往经验及现场条件,分别给出了三种a、b的取值,即a取90 cm、100 cm及110 cm,b取50 cm、60 cm及70 cm。

后文中将采用数值模拟的方法验证五星掏槽孔的相对位置是否合理并确定a、b取值。

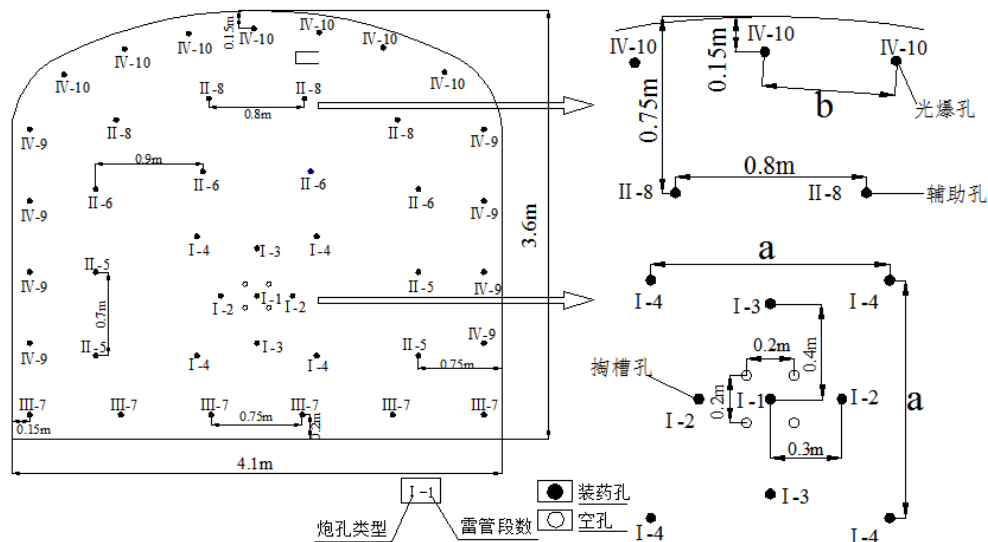


图 1 炮孔布置图

Fig. 1 blast hole pattern

表 1 炸药材料参数

Table 1 Explosive material parameter

$\rho/(kg \cdot m)$	$D/(m \cdot s^{-1})$	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa
1300	4000	214.4	0.182	4.2	0.9	0.15	4.192

2 材料模型及损伤阈值选取

2.1 材料模型

2.1.1 炸药材料模型

LS-DYNA 使用高能炸药模型 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 来模拟实际的炸药材料,采用JWL状态方程来描述高能炸药爆炸后其体积与压力的关系

$$P = \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中:P为爆轰压力;V为相对体积; E_0 为单位体积内能。参数A、B、 R_1 、 R_2 、 ω 为材料常数。2#岩石乳化炸药的材料参数如表1所示^[13]。

2.1.2 空气材料模型

采用空物质材料模型模拟空气,其关键字为 *MAT_NULL, 使用 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL

状态方程来表征材料的热力学性质,其线性多项式状态方程为

$$P = (C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3) + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E_0 \quad (2)$$

式中: μ 为比体积; $C_0 \sim C_6$ 为常数。空气的材料参数如表2所示。

2.1.3 岩石材料模型

岩石采用HJC本构模型^[14],该模型可以反映岩石材料高围压、高速应变率及大应变条件下材料的损伤失效,主要包括屈服面方程、损伤演化方程和状态方程。

屈服面方程为

$$\sigma^* = [A(1 - D) + Bp^{*N}](1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (3)$$

式中: σ^* 为标准化等效应力; p^* 为标准化静水压力; D 为损伤变量; $\dot{\epsilon}^*$ 为无量纲应变率; A 、 B 、 N 和 C 为由实验确定的常数。

其损伤演化方程可以表示为

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \mu_p}{\varepsilon_p^f + \mu_p^f} \quad (4)$$

$$\varepsilon_p^f + \mu_p^f = D_1(p^* + T^*)^{D_2} \geq EF_{\min} \quad (5)$$

式中: $\Delta \varepsilon_p$ 和 $\Delta \mu_p$ 分别为等效塑性应变增量和塑性体积应变; $\varepsilon_p^f + \mu_p^f$ 为常压下材料发生破坏时的塑性应变; T^* 为材料所能承受最大标准化抗拉强度; D_1 和 D_2 为材料损伤因子; EF_{\min} 为材料发生断裂时最小塑性应变。

HJC模型采用分段式状态方程,包括线弹性阶段、过渡阶段和压密阶段。其中压密阶段的加卸载方程如下

$$p = K \bar{\mu} + K_2 \bar{\mu}^2 + K_3 \bar{\mu}^3 \text{ (加载)} \quad (6)$$

$$p = K_1 \bar{\mu} \text{ (卸载)} \quad (7)$$

式中: K_1 为塑性体积模量; K_2 和 K_3 为材料的压力常数; $\bar{\mu}$ 为修正后的体积应变。岩石材料参数的取值由力学实验并参考文献[15]选取,其取值见表3。

表2 空气材料参数

Table 2 Air material parameter

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E_0/kPa
1.29	0	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5

表3 岩石材料参数

Table 1 Rock material parameters

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	G/GPa	A	B	N	f_c/MPa	f_t/MPa	D_1
2815	21.5	0.3	2.5	0.79	65.76	7.49	0.04
D_2	p_c/MPa	p_t/GPa	K_c/GPa	K_t/GPa	K_c/GPa	EF_{\min}	
1.0	22	1.2	12	25	42	0.01	

2.2 损伤阈值确定

炸药爆炸后会在岩石中产生损伤,表现为岩石被压碎、出现裂纹,可由损伤因子 $D(0 < D < 1)$ 来表征,数值越大表示岩石损伤越严重。在分析掏槽爆破对岩石产生的损伤时,本文参考Grady及Kipp的研究^[16],掏槽爆破时将损伤阈值取为0.2,认为 $D > 0.2$ 时岩石破碎,并以此确定掏槽空腔的范围。光面爆破旨在使光爆孔爆炸产生的裂隙区贯通,故光面爆破损伤阈值应较掏槽爆破时小。文献[17]认为 $D < 0.05$ 的区域为弹性区,本文拟将损伤阈值取为0.1,认为 $D > 0.1$ 时岩石产生裂隙,并以此确定裂隙圈范围,下面将进行验证。

炸药在岩石中爆炸后,以炮孔为中心由近及远产生压碎区、裂隙区和弹性振动区^[18]。不耦合装药条件下,压碎圈半径为^[19]

$$R_c = \left(\frac{\rho_0 D^2 n K^{-2\gamma} l_e B}{8\sqrt{2} \sigma_{cd}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} r_b \quad (8)$$

裂隙圈半径为

$$R_p = \left(\frac{\sigma_R B}{\sqrt{2} \sigma_{td}} \right)^{\frac{1}{\beta}} R_c \quad (9)$$

式中: D 为岩石中的声速,取4000 m/s; n 为压力增大系数,取8; γ 为膨胀绝热系数,一般取3; l_e 为装药轴向系数,根据矿山实际情况取为0.22; r_b 为炮孔半径,取21 mm。 α 、 β 为载荷传播衰减系数。 σ_{td} 、 σ_{td} 为岩石动态单轴抗压强度和动态抗拉强度, $B = [(1+b)^2 + (1+b^2) - 2\mu_d(1+b^2)(1-b)^2]^{1/2}$, μ_d 为动泊松比。这些参数的取值与计算参见文献[19]。计算得到裂隙圈半径 R_c 为26.7 cm。建立单孔爆破1/4模型如图2,采用 z 方向只有一个单元厚度的三维薄板模型,并约束 z 方向

位移,这种模型适用于 z 方向约束很大的情况,虽然实际光爆孔中炸药 z 方向所受约束较小,但本节旨在大致确定裂隙圈范围,故认为这样的简化是可以接受的。采用流固耦合算法进行模拟,单元类型取为SOLID164,建模过程中采用 $g\text{-cm-}\mu\text{s}$ 单位制。查看损伤因子 D 的分布范围,并筛选出 $0.1 < D < 1$ 的损伤云图,如图3所示。损伤范围分布在半径为25.3 cm的圆形域中,即可认为单孔爆破损伤范围为25.3 cm。数值模拟估算的裂隙圈半径和理论计算值非常接近,说明本文取损伤阈值为0.1是合理的。

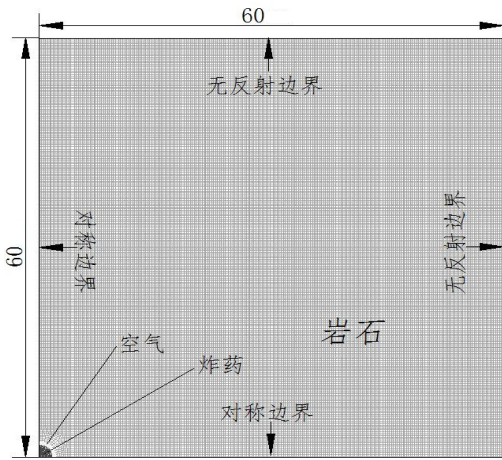


图2 单孔爆破数值模型/cm

Fig. 2 Numerical model of single hole blasting

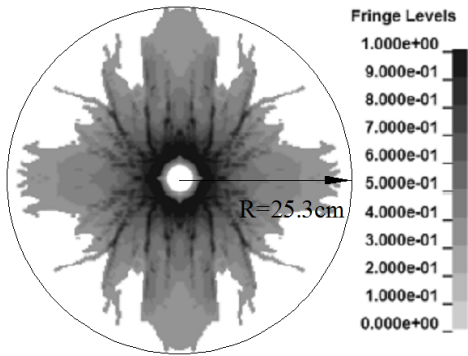


图3 单孔爆破损伤云图

Fig. 3 Nephogram of single hole blasting

3 掏槽及光面爆破数值计算模型

建立两组三维薄板模型,用于模拟掏槽及光面爆破。保持五星掏槽孔的位置不变,建立外圈掏槽眼间距 a 为90 cm、100 cm和110 cm的三种模型。实际情况中炮孔直径42 mm,药卷直径32 mm,为防止单元变形过大导致计算终止,忽略掏槽孔中空气的影响,模型中空孔直径为42 mm,掏槽孔直径

为32 mm。建立1/4模型模型如图4,左、上边界为对称边界,右、下边界为无反射边界。采用微差起爆方式,分四段起爆,I~IV代表起爆顺序,为减小运算时间,每段的微差时间设置为1 ms,计算总时间为4 ms。建立间距 b 为50 cm、60 cm、70 cm的光面爆破数值模型如图5,为1/2模型。左边为对称边界,右、上边界为无反射边界,下边为自由边界,对应于自由面,抵抗线为60 cm。采用的材料参数及炮孔、炸药尺寸与前文相同,计算总时间为1 ms。

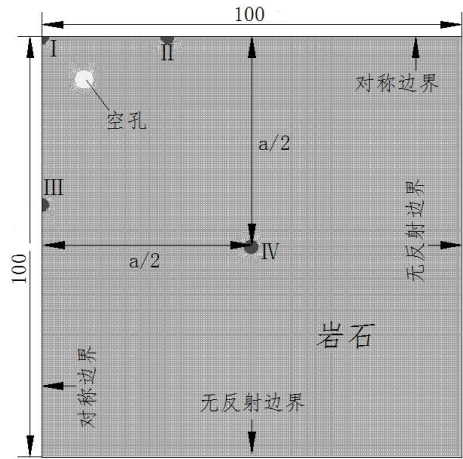


图4 掏槽爆破数值模型/cm

Fig. 4 Numerical model of cut blasting

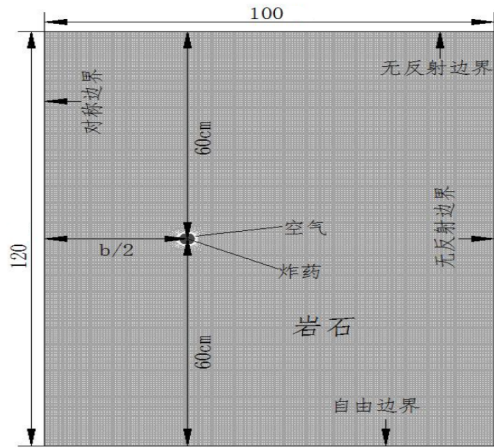


图5 光面爆破数值模型/cm

Fig. 5 Numerical model of smooth blasting

4 模拟结果分析

4.1 掏槽爆破周围岩石损伤演化

各时刻岩石损伤云图如图6所示。由图知,中心掏槽孔爆炸后,周边岩石的损伤范围及损伤程度迅速增大,到40 μs 时,四个空孔间的区域已出现不同程度损伤;80~120 μs 过程中,空孔间岩石的损伤云图变深,表明岩石被压碎。由于空孔的存在,一

部分爆炸产生的能量被消耗,进入空气中,导致空孔远离炮孔一侧的岩石损伤很小,但是其他方向损伤增大。整体来看,空孔提供了额外的自由面,有利于岩石损伤范围的扩大,这与实际情况一致;120~500 μs ,空孔间岩石的损伤基本稳定,爆炸产生的能量依次传到左右和上下方向的掏槽孔,此时,这四个掏槽孔发挥了与空孔相同的作用,引导岩石损伤向掏槽孔方向扩展,并引起这些掏槽孔后方的岩石产生损伤,爆炸能量在传播过程衰减幅度很大,导致掏槽孔后方的岩石损伤很小,并在边缘处以条状裂纹的形式存在。且由于左右两个掏槽孔距中心掏槽孔更近,造成它们后方的裂纹较上下两个掏槽孔后方的裂纹长;之后,中心掏槽孔爆破造成的周围岩石损伤趋于稳定。1000 μs 时左右两个掏槽孔爆炸,由1040 μs 和1500 μs 时

刻的损伤云图知损伤向各方向扩展,损伤区域逐渐连通,炮孔中心处出现压碎区,损伤区边缘处产生裂纹。由于中心区域的岩石已经破碎,失去承载能力,故更多的能量用于破坏远离中心炮孔一侧的岩石;2000 μs 时上下两个掏槽孔爆炸,周围岩石损伤演化规律与左右两个掏槽孔爆炸时相似。比较2040 μs 和3000 μs 时的损伤云图可知,损伤区边缘处裂纹数量及长度进一步增加,这是由于各个掏槽孔爆炸后能量迅速衰减,但是它们的能量叠加起来依然能使岩石产生损伤;到3000 μs 时五星掏槽孔爆炸产生的岩石损伤基本稳定,掏槽孔间产生的损伤区连通,说明掏槽孔布置合理。周围四个掏槽孔附近仍存在部分岩石未能破坏,为获得更大、互相连通的掏槽空腔,最外圈掏槽眼的间距选择显得尤为重要。

前文已确定了 a 取 90 cm、100 cm 和 110 cm 的三种方案。外圈四个掏槽孔在 3000 μs 时刻起爆,为展示三种方案最终的掏槽成腔效果,截取 4000 μs 时刻的各方案损伤云图,通过 LS-PREPOST 剔除 $0.2 < D < 1$ 的部分,即产生最终的空腔,如图 7 所示。

由图可直观看出间距为 90 cm 和 100 cm 时能形成互相连通的掏槽空腔,且间距 100 cm 时形成的空腔更大。虽然中间有少部分岩石未能破碎,但是这不影响掏槽效果,因为实际情况下这部分岩石会在重力作用下掉落。间距为 110 cm 时掏槽腔内部残留着大量未破碎岩石,将会使岩石的大块率增大,实际中可能造成掏槽腔不连通。综合考虑,将外圈掏槽孔间距选为 100 cm。

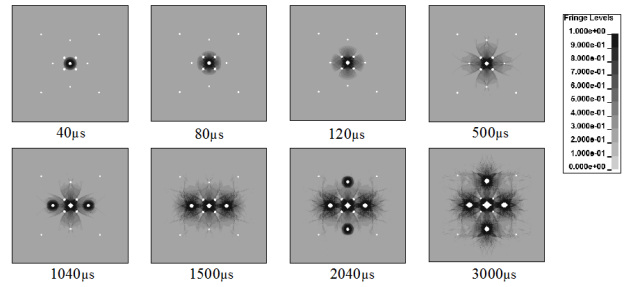


图 6 掏槽爆破过程中部分时刻损伤云图

Fig. 6 Nephogram of damage at some time during cut blasting

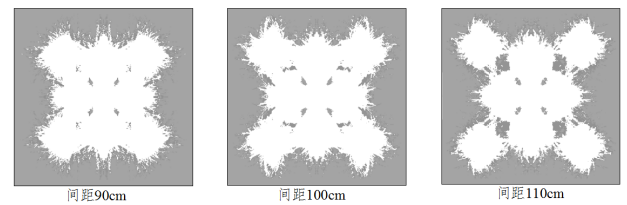


图 7 各掏槽方案最终爆破效果

Fig. 7 Final blasting effect of each gutter scheme

4.2 光面爆破周围岩石损伤演化

将孔距为 50 cm、60 cm、70 cm 三种模型编号为方案 1~3,截取三种方案在 100 μs 、250 μs 、500 μs 、1000 μs 时刻的损伤云图如图 8,分析不同孔距情况下周边孔爆破岩石损伤演化过程。

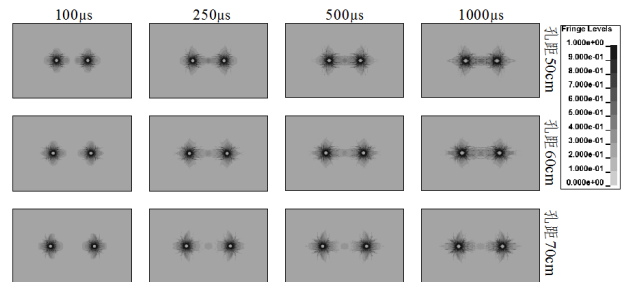


图 8 不同方案的光面爆破周围岩石损伤演化

Fig. 8 Damage evolution of surrounding rock of different smooth schemes

由图 8 可知,炸药爆炸后,炮孔周围岩体损伤范围以炮孔为中心向各个方向迅速增大。直至 100 μs 时,相邻炮孔周边岩石的损伤范围各自扩展,互不影响,单个炮孔周围的损伤云图与单孔爆破时相似;在 100~250 μs 时,损伤范围继续扩大,不过扩展速率已经放缓,两孔连线方向的损伤增长最快,其他地方的损伤区边缘增加了许多细长的裂纹。在 250 μs 时刻方案 1 和方案 2 中两炮孔中间的岩石损伤云图已经连通。方案 1 中两炮孔联线间岩石损伤云图的颜色较方案 2 的深,即表明此时刻前者的损伤程度较后者大。方案 3 在两孔连线中心位置出现小片损伤区,因为两炮孔

爆炸产生的应力波在这个地方相遇,应力波叠加使中心附近的岩石处于应力增强状态,引起了该处岩石的损伤;250~500 μs 过程中,三个方案两孔间的损伤区在原有的基础上继续增大,损伤程度也渐渐加深,而其他方向的损伤区增长缓慢,裂缝增多。由于炮孔的导向作用,使损伤在两炮孔连线方向获得优先发展;500 μs 到1000 μs ,损伤区基本稳定。

为直观反映不同方案的光面爆破成型效果,截取各方案形成的最终空腔。由图9可知,方案一、二炮孔连线间的空腔完全贯通,壁面光滑;方案三炮孔连线间残留部分岩石,空腔未能完全贯通,壁面粗糙。

形成光滑的壁面及减少周围岩石的损伤是光面爆破的主要目的,分析损伤云图及爆后空腔可知,适宜于本工程的周边孔间距为60cm。

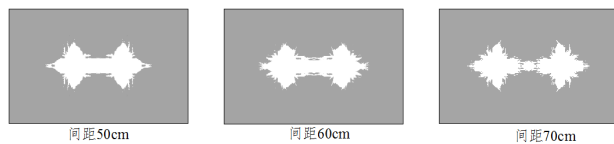


图9 各光面爆破方案最终爆破效果

Fig. 9 Final blasting effect of each smooth blasting scheme

5 现场试验

以数值模拟结果为依据,将 a 定为100 cm, b 定为60 cm,以此确定优化后的炮孔布置图。将完善之后的炮孔布置图用于现场试验,与原方案对比,进路爆破后巷道超宽9.3%降为3.4%,超高由10.3%降为2.9%,炮孔利用率由83.0%提高到90.6%。优化前后巷道顶板爆破效果如图10、图11,对比可知,优化之后顶板壁面更为平整光滑。说明原爆破方案存在的主要问题得到了解决。

6 结论

(1)采用数值模拟方法获得了不同掏槽孔及光爆孔布置时的炮孔周围岩石损伤云图,分析不同炮孔布置时的岩石损伤演化规律并以此为依据对炮孔布置进行优化。验证了五星掏槽孔布置的合理性并确定了炮孔布置图中关键参数,外圈掏槽眼间距取100 cm、光爆孔间距取60 cm。将优化后的炮孔布置图应用于现场试验,取得了较好的爆破效果。

(2)数值模拟及现场试验结果表明依据岩石损

伤演化规律对炮孔布置进行优化是可行的。

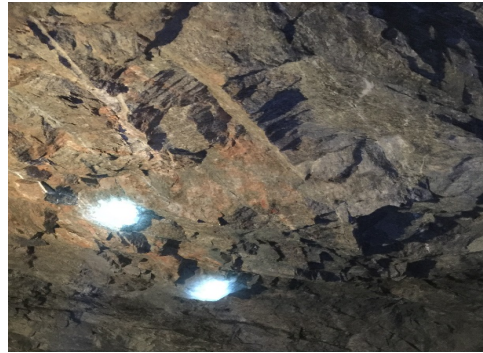


图10 原爆破效果

Fig. 10 Original blasting effect



图11 改进炮孔布置方案后的爆破效果

Fig. 11 Blasting effect after improving the hole arrangement

参考文献 (References)

- [1] 戴俊. 深埋岩石隧洞的周边控制爆破方法与参数确定[J]. 爆炸与冲击, 2004(6): 493-498.
- [1] DAI Jun. The controlled contour blasting technique and its parameter determination for rock tunnel at depth [J]. Explosion and Shock Waves, 2004(6): 493-498. (in Chinese)
- [2] 付玉华, 李夕兵, 董陇军. 损伤条件下深部岩体巷道光面爆破参数研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1420-1426.
- [2] FU Yu-hua, LI Xi-bing, DONG Long-jun. Analysis of smooth blasting parameters for tunnels in deep damaged rock mass [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1420-1426. (in Chinese)
- [3] MandalSK, SinghMM, DasguptaS. Theoretical concept to understand plan and design smooth blasting pattern [J]. Geotechnical & geological Engineering, 2008, 26(4): 399-416.
- [4] 单仁亮, 黄宝龙, 高文蛟, 等. 岩巷掘进准直眼掏槽爆破新技术应用实例分析[J]. 岩石力学与工程学报,

- 2011,30(2):224-232.
- [4] SHAN Ren-liang, HUANG Bao-long, GAO Wen-jiao, et al. Case studies of new technology application of quasi-parallel cut blasting in rock roadway drivage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2):224-232. (in Chinese)
- [5] 郭进平,王靖,李角群. 中深孔爆破炮孔布置优化设计研究[J]. 爆破,2017,34(3):79-84,89.
- [5] GUO Jin-ping, WANG Jing, LI Jiao-qun. Study on optimum design of blasting hole arrangement in medium-length hole blasting[J]. Blasting, 2017, 34(3):79-84, 89. (in Chinese)
- [6] LIU Kai-yun, LIU Bao-guo. Optimization of smooth blasting parameters for mountain tunnel construction with specified control indices based on a GA and ISVR coupling algorithm[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 70:363-374.
- [7] ParkDOHYUN, JeonSEOKWON. Reduction of blast-induced vibration in the direction of tunneling using an air-deck at the bottom of a blasthole[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2010, 47:752-761.
- [8] 胡建华,杨春,周炳任,等. 巷道压顶光面爆破裂隙扩展模拟及参数优化[J]. 黄金科学技术, 2017, 25(2):45-53.
- [8] HU Jian-hua, YANG Chun, ZHOU Bing-ren, et al. Simulation of fracture propagation and optimization of parameters for smooth blasting of coping in roadway[J]. Gold Science and Technology, 2017, 25(2):45-53. (in Chinese)
- [9] 李新平,陈俊桦,李友华,等. 溪洛渡电站地下厂房爆破损伤范围及判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010,29(10):2042-2049.
- [9] LI Xin-ping, CHEN Jun-hua, LI You-hua, et al. Study of criterion and damage zone induced by excavation blasting of underground power-house of Xiluodu hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29(10):2042-2049. (in Chinese)
- [10] 胡英国,卢文波,陈明,等. 岩石爆破损伤模型的比选与改进[J]. 岩土力学,2012,33(11):3278-3284.
- [10] HU Ying-guo, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. Comparison and improvement of blasting damage models for rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11):3278-3284. (in Chinese)
- [11] YANG J H, YaoC, JiangQ H, et al. 2D numerical analysis of rock damage induced by dynamic in-situ stress re-distribution and blast loading in underground blasting excavation[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2017, 70:221-232.
- [12] 张西良,汪禹,崔正荣,等. 深部围压对岩体爆破损伤范围影响数值分析[J]. 爆破,2018,35(2):56-60.
- [12] ZHANG Xi-liang, WANG Yu, CUI Zheng-rong, et al. Numerical analysis on influence of deep confining pressure on blasting damage range of rock mass[J]. Blasting, 2018,35(2):56-60. (in Chinese)
- [13] LI H B, XIA X, LI J C, et al. Rock damage control in bedrock blasting excavation for a nuclear power plant[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2011, 48(2):210-218.
- [14] HOLMQUIST TJ, JOHNSON GR, COOK WH. A computational constitutive model for concrete subjective to large strain, high strain rates, and high pressure [C]// 1st International Symposium on Ballistic, Quebec City, Canada, 1993: 591-600.
- [15] 方秦,孔祥振,吴昊,等. 岩石Holmquist-Johnson-Cook模型参数的确定方法[J]. 工程力学, 2014,31(3):197-204.
- [15] FANG Qin, KONG Xiang-zhen, WU Hao, et al. Determination of Holmquist-Johnson-Cook constitutive model parameters of rock[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(3):197-204. (in Chinese)
- [16] GRADY DE, KIPP ME. Continuum modeling of explosive fracture in oil shale[J]. International Journal of Rock and Mining Science, 1980,17(3):147-157.
- [16] 黄佑鹏,王志亮,毕程程. 岩石爆破损伤范围及损伤分布特征模拟分析[J]. 水利水运工程学报, 2018(5):95-102.
- [17] HUANG You-peng, WANG Zhi-liang, BI Cheng-cheng. Simulation analysis of blast-induced damage scope and its distribution characteristics of rocks[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(5):95-102. (in Chinese)
- [18] 王玉杰. 爆破工程[M]. 武汉:武汉理工大学出版社, 2007: 142-146.
- [19] 戴俊. 柱状装药爆破的岩石压碎圈与裂隙圈计算[J]. 辽宁工程技术大学学报,2001,20(2):144-147.
- [19] DAI Jun. Calculation of rock crushed circle and fracture circle by column charge blasting[J]. Journal of Liaoning Technical University,2001,20(2):144-147. (in Chinese)