

高压物理学报

基于RHT本构模型的连续装药预裂爆破孔距优化研究

张伟 王建国 王勉 陶家龙

Optimization Study of Pre-Splitting Hole Spacing for Continuous Charging Based on RHT Constitutive Model

ZHANG Wei, WANG Jianguo, WANG Mian, TAO Jialong

引用本文:

张伟, 王建国, 王勉, 等. 基于RHT本构模型的连续装药预裂爆破孔距优化研究[J]. 高压物理学报, 2025, 39(1):015201. DOI: 10.11858/gywlb.20240834

ZHANG Wei, WANG Jianguo, WANG Mian, et al. Optimization Study of Pre-Splitting Hole Spacing for Continuous Charging Based on RHT Constitutive Model[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(1):015201. DOI: 10.11858/gywlb.20240834

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240834>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

某露天矿山预裂爆破参数优选与试验研究

Optimization and Experimental Study of Pre-Splitting Blasting Parameters in a Certain Open-Pit Mine

高压物理学报. 2023, 37(6): 065301 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230692>

残矿回采挤压爆破参数优化的数值模拟

Numerical Simulation on Optimization of Extrusion Blasting Parameters for Residual Ore Recovery

高压物理学报. 2023, 37(3): 035301 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20220694>

电子雷管起爆条件下隧道掏槽孔与辅助孔的延时优化试验研究

Experimental Study on Delay Time Optimization of Tunnel Cutting Holes and Caving Holes under Electronic Detonator Initiation Condition

高压物理学报. 2023, 37(1): 015301 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20220638>

花岗岩板双基火药切槽爆破破坏过程研究

Damage Process of Double Base Propellant Grooved Blasting on Granite Slab

高压物理学报. 2024, 38(4): 045302 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240711>

自由边界影响下定向断裂爆破裂纹尖端应力分布与扩展机理

Stress Distribution and Propagation Mechanism of Crack Tip in Directional Fracturing Blasting under the Influence of Free Boundary

高压物理学报. 2024, 38(5): 054104 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240799>

岩体可爆性的模糊决策理论及炸药单耗预测

Fuzzy Decision Theory of Rock Mass Explodability and Prediction of Explosive Unit Consumption

高压物理学报. 2023, 37(6): 065303 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230700>

基于 RHT 本构模型的连续装药 预裂爆破孔距优化研究

张 伟¹, 王建国^{1,2}, 王 勉¹, 陶家龙¹

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;
2. 云南省教育厅爆破新技术工程研究中心, 云南 昆明 650093)

摘要:为解决北衙金矿在使用预裂爆破技术时整体爆破效果不佳的问题,基于 RHT 损伤本构模型,利用 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟软件,开展了不同孔距下预裂爆破的数值模拟研究。结果表明:当预裂孔炮孔间距为 120 cm 时,孔间裂纹存在较为明显的分叉,且裂纹扩展范围较大;当炮孔间距为 130 cm 时,裂纹向四周扩展的范围减小,且炮孔周围岩石的损伤程度明显降低;当炮孔间距增加至 140 cm 时,相邻预裂孔连线上的裂纹仅在局部连通,无法实现孔间贯穿。上述结果说明,130 cm 的炮孔间距在降低预裂爆破自身对岩体的扰动与实现有效爆破成缝之间达到了平衡。基于数值模拟试验结果开展了现场试验,爆破效果良好。研究结果可为矿山的预裂爆破设计和施工提供参考。

关键词: 预裂爆破; 连续装药; 孔距优化; RHT 本构模型

中图分类号: O346; O521.9

文献标志码: A

预裂爆破是指在设计开挖边界线上密集打孔,在主爆孔起爆前形成一条能够反射应力波的预裂缝,从而降低主爆区爆破对邻近岩体和结构的影响^[1]。过去几十年中,预裂爆破在各类露天矿山和其他大型工程项目中得到了广泛应用。爆破参数和装药结构是影响预裂爆破效果的关键因素^[2-3]。王卫华等^[4]通过自定义变量(即有效损伤率)探究了爆破过程中炮孔间距对岩体损伤的影响,研究发现:炮孔间距较小时,炮孔周边岩体损伤范围小,损伤程度大;反之,炮孔周边岩体损伤范围大,损伤程度小。王子琛等^[5]等基于正交设计的相似模型试验,深入分析了影响预裂爆破效果的关键因素,确定了最佳起爆方法和爆破参数,并通过模拟试验验证了其有效性。Ma 等^[6]基于理论研究结果,确定了预裂爆破相关参数,并在现场开展了常规预裂爆破和精确延时逐孔起爆预裂爆破的对比试验,结果表明:与常规预裂爆破相比,逐孔起爆预裂爆破的平均最大振幅降低了 41.45%。陈啸林等^[7]采用数值模拟、相似实验及现场验证相结合的方式发现,当炮孔间距为 0.8 m、不耦合系数为 3.00、起爆延时为 12 ms、最大单响药量为 11.25 kg 时,预裂爆破效果最佳。李祥龙等^[8]通过模型试验模拟预裂孔爆破过程,对影响预裂孔成缝效果的多个因素进行正交分析,给出了对应于最佳爆破效果的预裂孔参数。崔年生^[9]运用数值模拟软件进行了矿山预裂爆破的数值模拟计算,着重研究了不耦合系数对预裂爆破效果的影响,并基于计算结果开展了现场试验,研究结果为露天采矿生产提供了有效指导。

目前,学者们^[10-11]通过室内试验获取岩石的基础力学参数后,多是基于 HJC 模型,在 LS-DYNA 软

* 收稿日期: 2024-06-25; 修回日期: 2024-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(52274083); 云南省基础研究计划(202201AT070178); 云南省重大科技专项计划项目(202102AG050024)

作者简介: 张 伟(1999—),男,硕士研究生,主要从事爆炸与冲击理论、爆破技术与应用研究。

E-mail: 18304123916@163.com

通信作者: 王建国(1987—),男,博士,副教授,主要从事岩石动力学、爆炸与冲击理论、爆破技术与应用研究。

E-mail: wangjg0831@163.com

件中进行相关预裂爆破的数值模拟计算。HJC 模型主要用于描述材料在冲击压缩阶段的力学行为,而岩石爆破时,裂纹的扩展往往以拉伸破坏为主^[12],此时,HJC 模型无法对裂纹进行较好的描述。RHT 模型弥补了 HJC 模型在偏应力张量第三不变量上的缺失,可以很好地解决这类问题^[13]。目前,RHT 模型已被广泛应用于岩石领域相关问题的研究中。本研究将通过室内静力学试验获取岩样的基础力学参数,基于 RHT 本构模型,采用 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟软件,开展露天矿山预裂爆破孔距优化,并基于模拟结果开展现场试验,验证优化效果。

1 RHT 模型参数

1.1 灰岩的基础力学参数

利用取芯钻机采集矿区的主要岩体——灰岩,采用一体化切磨机(如图 1(a)所示)对灰岩进行双面切割和打磨,制成试件。使用万能试验机(图 1(b)所示)及声波测试仪(图 1(c)所示)等开展室内力学测试,得到的灰岩的主要静力学参数见表 1,为后续灰岩的 RHT 参数标定做准备。表 1 中: ρ_0 为初始密度, f_c 为单轴抗压强度, f_t 为单轴抗拉强度, E 为弹性模量, ν 为泊松比, c_0 为纵波声速。

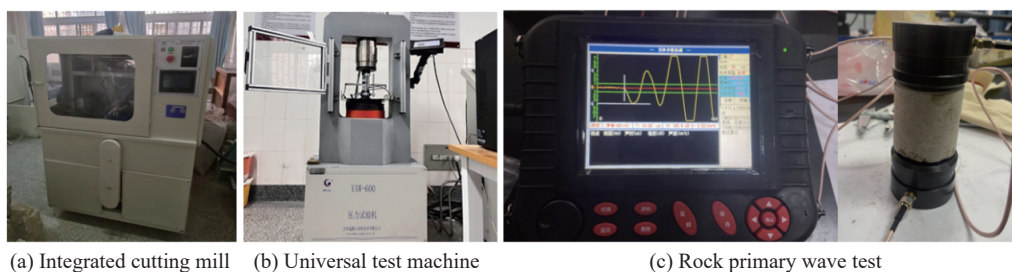


图 1 试件加工及测试的仪器

Fig. 1 Instrument of specimen processing and testing

表 1 灰岩的静力学参数
Table 1 Limestone's statics parameters

$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	f_c/MPa	f_t/MPa	E/GPa	ν	$c_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
2.68	51.95	2.62	5.08	0.28	3 605

1.2 p - a 状态方程参数

压缩状态下的 p - a 状态方程参数 A_1 、 A_2 、 A_3 、 B_0 、 B_1 以及拉伸状态下状态方程参数 T_1 、 T_2 可根据 Rankine-Hugoniot 方程和 Mie-Grüneisen 状态方程求解^[14]

$$A_1 = \rho_0 c_0^2 \quad (1)$$

$$A_2 = \rho_0 c_0^2 (2s - 1) \quad (2)$$

$$A_3 = \rho_0 c_0^2 (3s^2 - 4s + 1) \quad (3)$$

$$T_1 = \rho_0 c_0^2 = A_1 \quad (4)$$

$$T_2 = 0 \quad (5)$$

$$B_0 = B_1 = 2s - 1 \quad (6)$$

式中: s 为不同材料的经验系数,本研究中取 1.3。

结合表 1 中的基本力学参数,得到 A_1 、 A_2 、 A_3 、 B_0 和 B_1 。

1.3 RHT 本构方程参数

RHT 本构方程中的压缩应变率指数 β_c 和拉伸应变率指数 β_t 分别为

$$\beta_c = \frac{4}{20 + 3f_c} \quad (7)$$

$$\beta_t = \frac{2}{20 + f_c} \quad (8)$$

根据弹性波理论^[15]得到剪切模量

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (9)$$

拉伸子午线半径与压缩子午线半径之比为

$$Q = Q(p^*) = Q_0 + Bp^* \quad (10)$$

式中: Q_0 为拉压子午比参数, B 为罗德角相关系数, p^* 为岩石的抗剪强度。

为求解 Q_0 和 B , 需获得剪切罗德角因子 R_3^* 。受现有实验条件所限, R_3^* 极难获得。根据文献^[16]所述, Q_0 和 B 对数值模拟结果的敏感性较低, 本研究选用 Thomas^[17] 推荐的参考值, 即 $Q_0=0.6805$, $B=0.0105$ 。

当 $3p_m^* \geq F_r$ (p_m^* 为材料所受压力, F_r 为动量增量因子) 时, 可根据模型的破坏面曲线得到失效面参数 A 和失效面指数 N

$$\sigma_f^*(p_m^*, F_r) = A[p_m^* - F_r/3 + (A/F_r)^{-1/N}]^N \quad (11)$$

式中: $\sigma_f^*(p_m^*, F_r)$ 为相对于抗压强度的归一化强度。

当材料处于准静态加载条件时, $F_r=1$, 此时有

$$\sigma_f^* = A(p_0^* - 1/3 + A^{-1/N})^N \quad (12)$$

同时

$$p_0^* = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3f_c \quad (13)$$

故

$$\sigma_f^* = \sigma_f/f_c = \sigma_1 - \sigma_3/f_c \quad (14)$$

式中: p_0^* 为归一化压力, σ_f^* 为归一化强度。

为得到归一化压力与强度, 基于 Hoek-Brown 准则经验公式^[18] 获得 5 组不同围压梯度下岩石的三轴抗压强度

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + f_c \left(m_i \frac{\sigma'_3}{f_c} + s \right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

式中: σ'_3 为围压; σ'_1 为不同围压下岩石的抗压强度; m_i 为完整岩石常数, $m_i=19.8$ ^[19]。将所得数据代入式 (13) 和式 (14), 得到不同围压梯度下的 p_0^* 及 σ_f^* (见表 2)。

表 2 不同围压下岩石的力学参数

Table 2 Mechanic parameters of rock under different confining pressures

σ_1/MPa	σ_2/MPa	σ_3/MPa	p_0^*	σ_f^*
51.95	0	0	0.33	1.00
188.84	20	20	1.47	3.25
271.18	40	40	2.25	4.45
340.01	60	60	2.95	5.39
401.57	80	80	3.60	6.19

利用 Origin 软件, 采用式 (12) 对表 2 中的数据进行拟合, 拟合结果如图 2 所示, 得到失效面参数 $A=2.605$ 、失效面指数 $N=0.689$ 。

在进行数值模拟时, 参考压缩应变率 $\dot{\varepsilon}_0^*$ 、参考拉伸应变率 $\dot{\varepsilon}_0^*$ 、失效压缩应变率 $\dot{\varepsilon}^*$ 、失效拉伸应变率 $\dot{\varepsilon}^*$ 及损伤指数 D_2 一般为定值; 结合 RHT 本构以及 RHT 岩石本构参数标定理论、试验与数值模拟研究^[14, 16-17, 20] 可知, 不同岩性岩石的拉伸屈服面参数 g_t^* 对模拟结果的影响极小, 故取恒定值 0.7, 剪切模量缩减系数 X_1 取混凝土初始值 0.5; 此外, 对于数值结果较为敏感的未标定参数, 包括压缩屈服面参数 g_c^* 、剪压强度比 f_s^* 、残余应力强度参数 A_f 、残余应力强度指数 N_f , 采用分离式霍普金森压杆 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 冲击试验与 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟相结合的方法进行调整和优化。

1.4 RHT 参数调整及优化

采用 SHPB 室内冲击试验与 SHPB 数值模拟相结合的方法, 进一步对灰岩的 RHT 模型本构参数进行调整和优化。

在开展室内冲击前先进行预冲试验, 灰岩试件加载的冲击气压先定为 0.3 MPa, 图 3 为灰岩试件的预冲试验结果。根据灰岩的破碎情况, 确定冲击气压分别为 0.3、0.4、0.5、0.6 和 0.7 MPa。正式冲击试验的布局如图 4 所示。试验前, 在试件两端涂抹凡士林, 以使试件与冲击杆的接触面贴合。因没有对试件施加轴向静压, 为防止试验过程中试件发生移位或滑脱, 特在试件下方放置垫块和抹布以支撑试件, 使其与冲击杆的中心轴线处在同一水平线上。每个气压下重复 4 次试验, 以排除偶然性。



图 3 0.3 MPa 下灰岩的破碎情况

Fig. 3 Limestone crushing under 0.3 MPa



图 4 室内冲击试验布局

Fig. 4 Layout of indoor impact test

按照试验中采用的 SHPB 设备尺寸进行 SHPB 的数值模拟建模, 并将室内试验得到的入射波直接作为数值模拟的输入波形, 计算获得三波数据。基于 Zheng 等^[10] 在大量试验基础上得出的 RHT 模型的部分剩余参数敏感度排序及相应取值范围, 本研究选取剩余参数 f_s^* 、 g_c^* 、 A_f 、 N_f 并对其不断调整和优化, 以使 SHPB 室内冲击试验 (图 5) 与数值模拟所得的三波的波形 (图 6) 基本相同。

当模拟三波波形与试验三波波形基本相似时, 运用三波法对数值模拟和试验结果进行处理, 获得了应力-应变曲线, 如图 7 所示。从图 7 可以看出, 2 条曲线的变化规律一致, 加载段曲线基本重合, 数值模拟所得的应力峰值较试验结果略低, 说明数值模拟中应变率增强效应略低, 但仍处于误差范围内。至此, 灰岩 RHT 模型的参数标定完毕, 标定的参数结果列于表 3, 其中: D_1 为损伤参数, f_t^* 为相对抗压强度, p_{el} 为孔隙开始压碎时压力, p_{comp} 为孔隙完全压碎时压力, n_p 为孔隙度指数, ε_p^m 为最小失效应变。

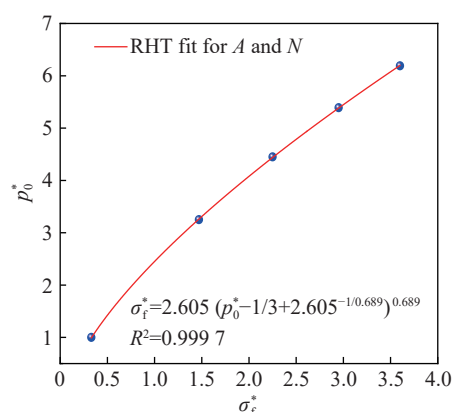


图 2 失效面参数拟合曲线

Fig. 2 Failure surface parameter fitting curve

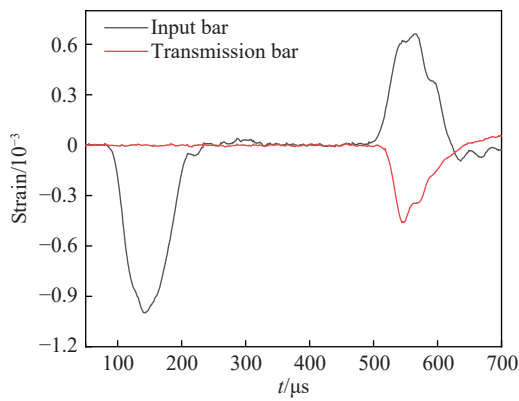


图 5 SHPB 冲击试验波形

Fig. 5 Waveforms obtained by SHPB impact test

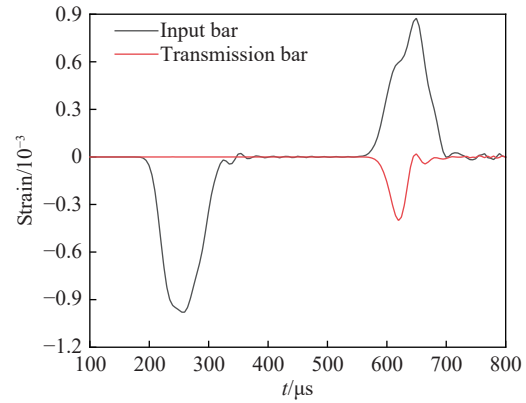


图 6 数值模拟得到的波形

Fig. 6 Waveforms obtained by numerical simulation

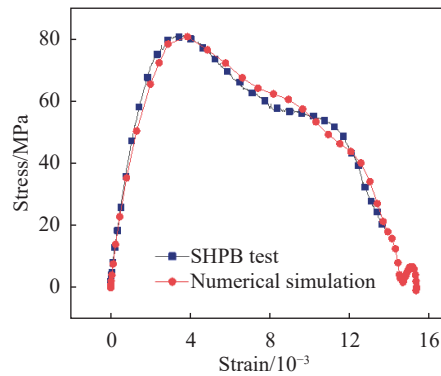


图 7 调整优化后的应力-应变曲线对比

Fig. 7 Comparison of stress-strain curves after adjustment and optimization

表 3 灰岩的 RHT 本构参数

Table 3 RHT constitutive parameters of limestone

f_c/MPa	f_t^*	D_1	G	ε_p^m	p_{cl}/MPa	X_1	A	N	Q_0
51.95	0.05	0.04	1.98	0.01	39.93	0.5	2.605	0.689	0.68
B	β_c	β_t	B_1	B_0	n_p	g_t^*	A_f	f_s^*	T_1/GPa
0.05	0.02	0.025	1.6	1.6	3	0.7	0.27	0.17	34.83
A_1/GPa	A_2/GPa	A_3/GPa	g_c^*	N_f	p_{comp}/MPa	T_2			
34.83	55.73	30.3	0.8	0.63	0.06	0			

1.5 其他材料模型及参数

1.5.1 炸药的本构模型参数

高能炸药材料(其材料属性与乳化炸药更相似),相关物理力学参数见表 4,其中: D 为炸药爆速, p_1 为爆轰压力, e_0 为炸药初始化内能, A_e 、 B_e 、 R_1 、 R_2 、 ω 为材料常数。

表 4 2#岩石乳化炸药物理力学参数

Table 4 Physical and mechanical parameters of 2# rock emulsion explosive

$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	p_1/GPa	A_e/GPa	B_e/GPa	R_1	R_2	ω	e_0/GPa
1.25	3200	9.53	276.2	8.44	5.2	2.1	0.57	3.87

1.5.2 空气的本构模型参数

空气采用*MAT_NULL 空白材料模型, 并采用 LINER_POLYNOMIAL 线性多项式描述其状态方程, 表达式为^[20]

$$p = C_0 + C_1\mu_0 + C_2\mu_0^2 + C_3\mu_0^3 + (C_4 + C_5 + C_6\mu_0^2)E_a \quad (16)$$

式中: C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 为空气的状态方程参数, 均取 0; μ_0 为比体积, 取 1.4; E_a 为空气的单位体积内能。

2 数值模拟

2.1 模型及参数

鉴于分析重点的不同、模型网格数量的限制和数值模拟对高质量网格的要求, 在研究岩石损伤和爆破振动效应时, 分别建立了近区和中远区数值模型。近区的数值模型尺寸为 $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 14\text{ m}$ 。为了更好地观察其损伤区域, 将网格进行密集划分, 单元尺寸设置较小。中远区数值模型的尺寸同样为 $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 14\text{ m}$, 网格尺寸较近区更大。在所有数值模型中, 装药直径为 0.032 m, 炮孔直径为 0.115 m, 炮孔深 12 m (填塞长度 3 m, 装药高度 9 m), 装药方式为连续装药。引爆点均设置在炸药的几何中心。为了避免反射波的影响, 除模型上表面设为自由面外, 模型的底部和周围均设置为非反射边界条件。单孔爆破模型如图 8 所示。

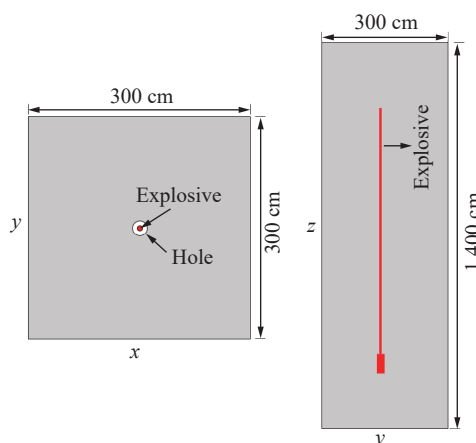


图 8 单孔爆破模型

Fig. 8 Single-hole blasting model

2.2 连续装药单孔爆破下岩体的损伤规律

单孔爆破下近区岩体的损伤云图如图 9 所示, 数值模拟的计算时间为 1 ms, 起爆方式为孔底起爆。在此不研究单孔爆破的爆破过程, 只讨论最终的爆破结果, 从而为后续研究预裂爆破孔间距的优化提供参考。从损伤结果可以看出, 连续装药结构下, 由于孔底为加强装药, 单孔爆破的损伤直径沿孔底往上呈减小趋势。对单孔爆破的损伤直径做算数平均, 得到该装药结构下单孔爆破的平均损伤直径为 121 cm, 约为 11 倍炮孔直径。

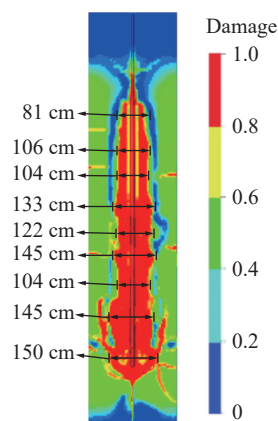


图 9 单孔爆破近区损伤结果($y=0$)

Fig. 9 Near-field damage results of single-hole blasting ($y=0$)

2.3 连续装药逐孔预裂爆破孔间距优化

鉴于获得的单孔爆破损伤直径为 121 cm, 为此, 设置孔间距为 120、130、140 cm, 并对其进行优化。

2.3.1 模型参数

建立的模型如图 10 所示, 模型尺寸为 $6\text{ m} \times 3\text{ m} \times 14\text{ m}$, 采用 g-cm- μs 单位制。为了避免反射波的影响, 在模型的底部和周围设置非反射边界条件, 模型的上表面为自由边界。为避免因结构变形导致单元网格畸变, 进而造成计算无法正常进行, 岩石采用 Lagrange 算法, 空气、炸药采用任意拉格朗日-欧拉算法, 即流固耦合算法, 计算时间设置为 1 ms。

2.3.2 预裂面损伤效果分析

模拟了炮孔间距为 120 cm 时预裂爆破孔间裂纹的扩展情况, 预裂面损伤演化和孔间裂纹扩展规律分别如图 11 和图 12 所示, 其中: 图 11 显示了模型截面 $y=0$ cm 上的损伤情况, 图 12 显示了截面 $z=-750$ cm 处的损伤情况。

如图 11 所示, 当 $t=150 \mu\text{s}$ 时, 孔 1 中的炸药被引爆, 炮孔周边裂纹开始发育扩展; 当 $t=300 \mu\text{s}$ 时, 孔 1 中的炸药造成的损伤范围已基本稳定, 损伤效果与单孔爆破的结果大致相当。当应力波传播到孔 2 时, 在孔 2 左侧的炮孔壁发生反射产生拉应力, 当拉应力达到岩石的抗拉强度时, 孔 2 左侧孔壁产生损伤。当 $t=450 \mu\text{s}$ 时, 由于空孔的导向作用, 孔 2 中的炸药爆炸产生的损伤与孔 1 中的炸药产生的损伤相互连接; 当 $t=600 \mu\text{s}$ 时, 孔 2 中的炸药形成的损伤范围基本稳定, 但由于应力的叠加效应, 孔 2 右侧的损伤范围明显大于单孔爆破时的损伤半径; 当 $t=750 \mu\text{s}$ 时, 孔 3 的炸药被陆续引爆, 整个预裂面形成, 而此时孔 3 内的炸药爆炸所产生的能量继续作用于周边岩体, 损伤面积继续扩大; 当 $t=1\,000 \mu\text{s}$ 时, 计算结束, 损伤范围基本稳定。

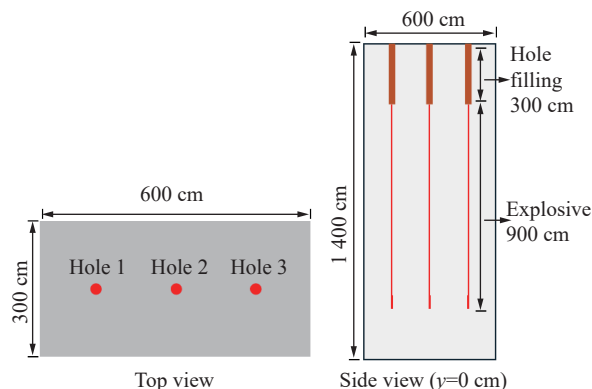


图 10 模型示意图

Fig. 10 Model diagram

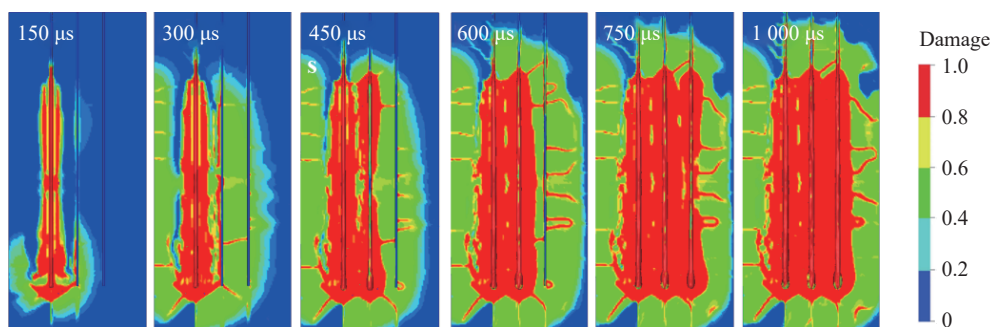


图 11 炮孔间距为 120 cm 时预裂面的损伤情况

Fig. 11 Pre-splitting surface damage at hole spacing of 120 cm

图 12 为孔距为 120 cm 时预裂孔孔间裂纹的扩展情况。可见, 当炮孔间距设置为 120 cm 时, 孔间裂纹出现较为明显的分叉, 且裂纹扩展范围较大, 说明预裂孔自身的爆炸将导致岩体产生较为严重的损伤, 可以推断此时预裂孔自身爆炸带来的爆破振动有可能对被保护侧的岩体造成严重扰动。

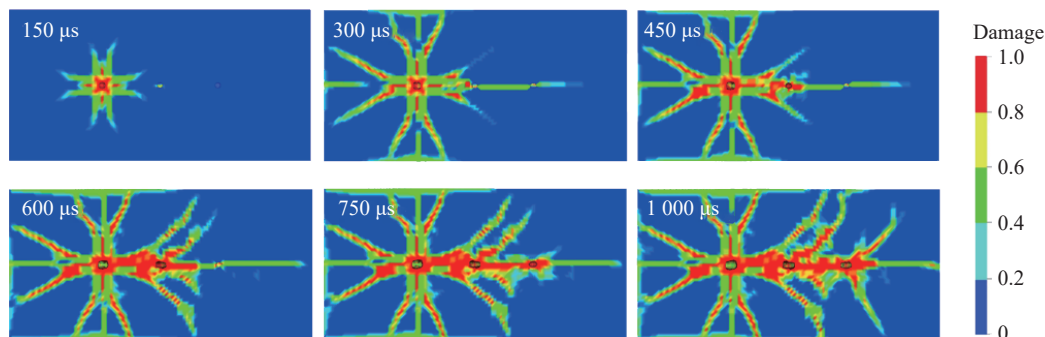


图 12 炮孔间距为 120 cm 时孔间裂纹的扩展情况

Fig. 12 Inter-hole crack propagation at hole spacing of 120 cm

将炮孔间距 D 设置为 130 和 140 cm, 分别进行数值模拟, 获得的岩石损伤情况如图 13 所示(炮孔间距为 120 cm 的损伤情况也置于其中, 以便比较)。可以发现, 当炮孔间距为 130 cm 时, 炮孔间裂纹仍

能发育并贯通,但相比于 120 cm 炮孔间距时的情况,裂纹范围减小,且炮孔周围岩石损伤明显较小,表明炮孔周边岩石未遭到过度的破坏。当炮孔间距增加至 140 cm 时,由于孔距设置过宽,爆炸产生的应力波在炮孔连线附近产生的拉应力达不到岩石的抗拉强度,因而,此时相邻预裂孔连线上的裂纹仅在局部连通,并未在孔间贯穿。130 cm 的炮孔间距在降低预裂爆破自身对岩体的扰动与实现有效爆破成缝之间达到了平衡。图 14 为删除损伤阈值超过 0.7 的无效单元之后得到的裂缝情况,也很好地说明了 130 cm 的炮孔间距在降低预裂爆破自身对岩体的扰动和实现有效爆破成缝间的平衡。

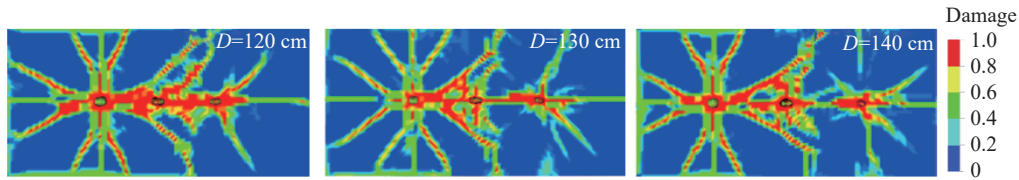


图 13 不同炮孔间距下孔间岩石的损伤情况
Fig. 13 Inter-hole rock damage under different hole spacings

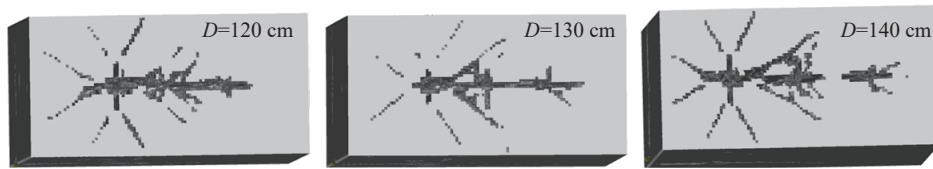


图 14 不同炮孔间距下预裂缝的贯穿情况
Fig. 14 Pre-crack penetration under different hole spacings

3 现场试验

基于数值模拟研究结果,确定以 130 cm 的预裂爆破炮孔间距开展现场试验,验证参数优化效果。根据矿山生产实际,选用 2 号潜孔钻机进行预裂孔钻孔,装药结构为连续装药,起爆方式为逐孔起爆,孔间延时设置为 5 ms。具体的爆破参数见表 5,其中: d 为炮孔直径, H 为炮孔深度, L 为装药长度, l 为填塞长度。装药结构及现场爆后效果如图 15 所示,可以看到,预裂爆破后边坡表面平整,且有明显半孔留下,爆破效果良好,大大降低了后期“刷帮”工作,验证了优化后爆破参数的合理性。

表 5 预裂爆破的爆破参数

Table 5 Blasting parameters of pre-splitting blasting

d/mm	D/cm	H/m	L/m	l/m
115	130	12	9	3



图 15 装药结构与现场爆后效果
Fig. 15 Charging structure and on-site post-explosion effect

4 结 论

(1) 通过室内实验获取了灰岩的静力学参数, 基于 RHT 模型及相关理论, 结合 SHPB 冲击试验与 SHPB 数值模拟, 成功标定了灰岩 RHT 模型的完整本构参数。

(2) 数值模拟结果显示: 预裂孔炮孔间距为 120 cm 时, 预裂面的损伤情况异常严重, 孔间裂纹存在明显分叉, 且扩展范围较大; 130 cm 孔间距在保护岩体结构完整性与实现裂纹贯穿之间达到了平衡; 140 cm 孔间距使爆炸形成的应力波在炮孔连线附近产生的拉应力未达到岩石的抗拉强度, 孔间裂纹仅在局部连通, 难以贯穿形成裂缝。最终确定连续装药预裂最优裂爆破炮孔间距为 130 cm。

(3) 现场试验显示, 基于 RHT 本构模型的连续装药预裂爆破孔距优化研究所得结果的应用效果良好, 可为相关预裂爆破参数优化设计与施工提供参考。

参考文献:

- [1] 唐海, 李海波, 周青春, 等. 预裂爆破震动效应试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2277–2284.
TANG H, LI H B, ZHOU Q C, et al. Experimental study of vibration effect of presplit blasting [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(11): 2277–2284.
- [2] 许守信, 黄绍威, 李二宝, 等. 复杂破碎岩体矩形聚能药包预裂爆破试验研究 [J]. 金属矿山, 2021(11): 55–63.
XU S X, HUANG S W, LI E B, et al. Experimental study on pre-splitting blasting of rectangular shaped charge in complex fractured rock mass [J]. Metal Mine, 2021(11): 55–63.
- [3] ZHANG Z X, HOSSEINI S, MONJEZI M, et al. Extension of reliability information of z-numbers and fuzzy cognitive map: development of causality-weighted rock engineering system to predict and risk assessment of blast-induced rock size distribution [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2024, 178: 105779.
- [4] 王卫华, 刘洋, 张理维, 等. 基于 RHT 模型双孔同时爆破均质岩体损伤的数值模拟 [J]. 黄金科学技术, 2022, 30(3): 414–426.
WANG W H, LIU Y, ZHANG L W, et al. Numerical simulation of homogeneous rock mass damage caused by two-hole simultaneous blasting based on RHT model [J]. Gold Science and Technology, 2022, 30(3): 414–426.
- [5] 王子琛, 李祥龙, 王惠芬, 等. 基于正交设计模拟实验的预裂爆破参数优化方法研究 [J]. 有色金属工程, 2021, 11(5): 96–101.
WANG Z C, LI X L, WANG H F, et al. Study on optimization method of pre-splitting blasting parameters based on orthogonal design simulation experiment [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(5): 96–101.
- [6] MA J, LI X L, WANG J G, et al. Experimental study on vibration reduction technology of hole-by-hole presplitting blasting [J]. Geofluids, 2021, 2021(1): 5403969.
- [7] 陈啸林, 张智宇, 王凯, 等. 某露天矿山预裂爆破参数优选与试验研究 [J]. 高压物理学报, 2023, 37(6): 065301.
CHEN X L, ZHANG Z Y, WANG K, et al. Optimization and experimental study of pre-splitting blasting parameters in a certain open-pit mine [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(6): 065301.
- [8] 李祥龙, 杨长辉, 王建国, 等. 基于模型试验的预裂孔爆破参数优选 [J]. 高压物理学报, 2022, 36(2): 025301.
LI X L, YANG C H, WANG J G, et al. Parameter optimization of presplitting blasting based on model test [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(2): 025301.
- [9] 崔年生. 不耦合装药系数对预裂爆破效果影响的数值模拟研究 [J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(4): 10–13.
CUI N S. Numerical simulation of the influence of uncoupled charge coefficients on presplitting blasting effect [J]. Mining Research and Development, 2018, 38(4): 10–13.
- [10] ZHANG C, CHEN Y H, WANG Y L, et al. Discrete element method simulation of granular materials considering particle breakage in geotechnical and mining engineering: a short review [J]. Green and Smart Mining Engineering, 2024, 1(2): 190–207.
- [11] ZUO T, LI X L, WANG J G, et al. Insights into natural tuff as a building material: effects of natural joints on fracture fractal characteristics and energy evolution of rocks under impact load [J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 163: 108584.
- [12] 张若棋, 丁育青, 汤文辉, 等. 混凝土 HJC、RHT 本构模型的失效强度参数 [J]. 高压物理学报, 2011, 25(1): 15–22.

- ZHANG R Q, DING Y Q, TANG W H, et al. The failure strength parameters of HJC and RHT concrete constitutive models [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2011, 25(1): 15–22.
- [13] 黄永辉, 孙博, 张智宇, 等. 岩石 RHT 本构的爆破碎裂判定方法优化及验证 [J]. *北京理工大学学报*, 2023, 43(6): 565–574.
- HUANG Y H, SUN B, ZHANG Z Y, et al. Optimization and verification of blasting fragmentation judgment method for RHT constitutive model of rock [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2023, 43(6): 565–574.
- [14] 李洪超, 陈勇, 刘殿书, 等. 岩石 RHT 模型主要参数敏感性及其确定方法研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2018, 38(8): 779–785.
- LI H C, CHEN Y, LIU D S, et al. Sensitivity analysis determination and optimization of rock RHT parameters [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2018, 38(8): 779–785.
- [15] 杨宝俊. 弹性波理论 [M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- YANG B J. Elastic wave theory [M]. Beijing: Science Press, 1990.
- [16] 王宇涛. 基于 RHT 本构的岩体爆破破碎模型研究 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2015.
- WANG Y T. The study of the broken model for rock mass blasting based on RHT constitutive equations [D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2015.
- [17] THOMAS B. The RHT concrete model in LS-DYNA [C]//Proceedings of the 8th European LS-DYNA Users Conference. Strasbourg, 2011.
- [18] BROWN E T, HOEK E. Underground excavations in rock [M]. London: CRC Press, 1980.
- [19] DEGHAN BANADAKI M M, MOHANTY B. Numerical simulation of stress wave induced fractures in rock [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 40/41: 16–25.
- [20] XIE L X, LU W B, ZHANG Q B, et al. Analysis of damage mechanisms and optimization of cut blasting design under high *in-situ* stresses [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 66: 19–33.

Optimization Study of Pre-Splitting Hole Spacing for Continuous Charging Based on RHT Constitutive Model

ZHANG Wei¹, WANG Jianguo^{1,2}, WANG Mian¹, TAO Jialong¹

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology,

Kunming 650093, Yunnan, China;

2. Advanced Blasting Technology Engineering Research Center of Yunnan Province Education Department,

Kunming 650093, Yunnan, China)

Abstract: In order to solve the problem of poor overall blasting effect when using pre-splitting blasting technology in Beiya gold mine, based on RHT damage constitutive model, numerical simulation research on pre-splitting blasting under different hole spacings was carried out by using ANSYS/LS-DYNA numerical simulation software. The results show that when the hole spacing of pre-splitting hole is set to 120 cm, the crack between holes has obvious bifurcation and the crack propagation range is large. When the hole spacing is set to 130 cm, the crack propagation range decreases within the surrounding area, and the rock damage around the blast hole is obviously reduced. When the hole spacing is further increased to 140 cm, it is found that the cracks on the connecting line of adjacent pre-splitting holes are only locally connected and cannot penetrate through holes. It shows that the 130 cm hole spacing has reached an ideal balance between reducing the disturbance of the pre-splitting blasting itself to the rock mass and achieving effective blasting. Based on the results of numerical simulation, the site test has achieved good blasting effect. The research results can provide reference for the design and construction of pre-splitting blasting in similar mines.

Keywords: pre-splitting blasting; continuous charge; hole spacing optimization; RHT constitutive model