

文章编号: 1003-1480(2025)01-0089-08

地应力影响下的五孔掏槽爆破岩石损伤效应研究

杨赛群¹, 葛立芳², 李洪伟³, 夏治园¹

(1.安徽江南爆破工程有限公司, 安徽 宣城, 242000; 2.安徽江南化工股份有限公司, 安徽 合肥, 230088; 3.安徽理工大学 化工与爆破学院, 安徽 淮南, 232001)

摘要: 在地下矿山开采过程中, 地应力对巷道掘进效率的影响日益显著。本研究以某地下铁矿为研究对象, 采用有限元软件 LS-DYNA 模拟不同地应力条件下五孔掏槽爆破掏槽孔孔间延期时间对岩石损伤程度的影响。通过现场爆破实验和块度识别软件验证模拟结果, 探究了地应力、孔间延期时间与岩石损伤程度之间的关系。研究表明, 地应力由 0 MPa 增加到 10 MPa, 五孔掏槽爆破掏槽孔最佳延期时间由 60 ms 减少为 10 ms, 相应的岩石损伤程度降低 79%。地应力对爆破远区岩石裂纹的发育影响较大, 而对近区影响较小。现场实验进一步证实了数值模拟的结论, 表明可以根据实际地应力大小合理设置延期时间, 有效降低大块率, 提高爆破效率。

关键词: 五孔掏槽爆破; 地应力; 延期时间; LS-DYNA; 损伤程度

中图分类号: TJ451 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2025.01.015

Study on the Rock Damage Effect of Five-Hole Cutting Blasting under In-Situ Stress Influence

YANG Sai-qun¹, GE Li-fang², LI Hong-wei³, XIA Zhi-yuan¹

(1. Anhui Jiangnan Blasting Engineering Co. Ltd., Xuancheng, 242000; 2. Anhui Jiangnan Chemical Industry Co. Ltd., Hefei, 230088; 3. School of Chemical and Blasting Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, 232001)

Abstract: In the process of underground mining, the impact of in-situ stress on the efficiency of tunnel excavation has become increasingly significant. This study, taking an underground iron mine as the research object, used the finite element software LS-DYNA to simulate the influence of the delay time between the five-hole cutting blasting holes on the degree of rock damage under different in-situ stress conditions. By conducting on-site blasting experiments and using block size recognition software to verify the simulation results, this study explored the relationship between in-situ stress, delay time, and the degree of rock damage. The research findings indicate that when the in-situ stress is increased from 0 MPa to 10 MPa, the optimal delay time for the five hole excavation blasting is reduced from 60 ms to 10 ms, resulting in a 79% reduction in rock damage. In-situ stress has a greater impact on the development of rock cracks in the far blasting area, while it has a smaller impact on the near blasting area. On-site experiments further confirm the conclusions of numerical simulation, showing that reasonable delay time can be set according to the actual in-situ stress to effectively reduce the block rate and improve blasting efficiency.

Key words: Five-hole cutting blasting; In-situ stress; Delay time; LS-DYNA; Damage degree

随着地下矿产资源的不断开发, 矿山采深的增加使得地应力对巷道掘进效率的影响日益显著。地应力作为一种天然存在的场力, 其大小和方向对岩石的力学行为和破坏模式有着深刻的影响。因此, 深入研究地应力条件下的爆破技术, 对于优化爆破参数、提高

爆破效率、降低大块率以及保障矿山安全具有重要的理论和实践意义。

近年来许多学者对地应力条件下的岩石爆破损伤过程进行了研究。陈啸林等^[1]通过数值模拟结合动焦散相似试验研究了深部岩石裂纹扩展与不耦合系

收稿日期: 2024-05-24

作者简介: 杨赛群 (1997-), 男, 硕士, 主要从事岩石爆破技术研究。

引用本文: 杨赛群, 葛立芳, 李洪伟, 等. 地应力影响下的五孔掏槽爆破岩石损伤效应研究[J]. 火工品, 2025(1): 89-96.

数之间的关系,为深部开采过程中参数设计提供一定的参考意义;解北京等^[2]借助 Design-Expert 12.0 软件设计双孔爆破试验,探究地应力、抗拉强度、不耦合系数对岩体爆破特征的影响,得出岩体有效损伤面积与地应力、抗拉强度、不耦合系数均呈负相关趋势的结论;魏晨慧等^[3]通过研究侧压力系数和节理角度之间的关系,得到裂纹萌生、扩展、贯通过程的演化规律;陈明等^[4]基于爆生裂隙形成机制,研究了地应力对爆生裂隙区比例半径的影响;岳中文等^[5]采用新型数字激光动态焦散实验系统结合 ANSYS/LS-DYNA,分析了应力对爆炸应力场的影响;李清等^[6]基于控制爆破振动和改善岩石破碎效果的作用机理,提出了多因素相关的孔间延期时间计算方法,并在工程中得到验证;刘浩杉等^[7]基于数值模拟对楔形掏槽合理延期时间进行优化;项荣军等^[8]通过对爆破现场实测信号进行分析和研究,得出了最佳的掏槽孔延期时间;刘翔宇等^[9]基于 Anderson 理论提出隧道爆破在单自由面形成双自由面过程中主掏槽和辅助掏槽间的最佳延期时间;宋森森等^[10]通过优化掏槽爆破方案降低了炸药用量和超欠挖现象。以上研究均是单纯考虑地应力或者延期时间对爆破效果的影响,而对于具有地应力条件下的五孔掏槽爆破掏槽孔孔间延期时间的设置并未进行相关研究。

本研究以某地下铁矿为工程背景,通过有限元软件 LS-DYNA 进行数值模拟,结合现场爆破实验,探讨了不同地应力条件下,掏槽孔孔间延期时间对岩石损伤程度的影响规律。研究旨在揭示地应力与爆破参数之间的耦合作用机制,为地下矿山巷道掘进爆破设计提供理论依据和技术支持。

1 工程概况

以某地下铁矿为背景,将数值模拟与现场实验相结合开展研究。矿体南部近南北走向,倾向西,倾角 40~70°;北部走向逐渐转为北东 25°,倾向北西,倾角稍缓 40~50°;矿体主要为石英磁铁矿,较坚硬、完整;矿体顶、底板主要为片岩片麻岩,岩石坚硬,整体性好,稳固性中等。

2 数值模拟及方案

2.1 实验方案

该工程在地下-220 m 水平至-390 m 水平进行爆破开采和掘进,其掘进主要方式为五孔掏槽爆破法。首先根据现场实际的炮孔布局参数构建了数值模型,通过调整地应力和炮孔间的延期时间,模拟了不同的爆破效果。为验证模拟结果,在-220、-300 m 水平进行了现场爆破实验,并通过块度分析软件对爆破效果进行了评估。掏槽孔及空孔的布局如图 1 所示。

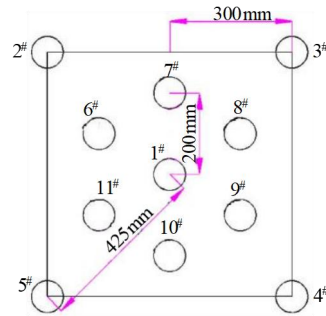


图 1 掏槽孔及空孔分布

Fig.1 Distribution of cutting holes and voids

由图 1 可见,1#~5#为掏槽孔,6#~11#为空孔,均围绕中心的 1#掏槽孔均匀布置。1#掏槽孔与空孔的距离为 200 mm,与其它掏槽孔的距离为 425 mm,2#~5#掏槽孔之间的距离为 600 mm,空孔直径为 78 mm,炮孔直径为 35 mm。

2.2 材料模型及参数设定

岩石材料采用 *MAT_RHT 本构模型进行模拟,该模型综合考虑了爆炸动态载荷作用下脆性材料破坏强度的影响因素,包括冲击压力、应变率、应变硬化和损伤程度,有效模拟了混凝土、岩石等脆性材料在爆炸冲击载荷下的损伤过程^[11-14]。RHT 模型的状态方程如下:

$$p(\rho, e) = A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)\rho_0 e, \mu > 0 \quad (1)$$

$$p(\rho, e) = T_1\mu + T_2\mu^2 + B_0\rho_0 e, \mu < 0 \quad (2)$$

式(1)~(2)中: $\mu = \rho/\rho_0 - 1$,表示体积应变,当 $\mu > 0$ 时为体积压缩状态,当 $\mu < 0$ 时为体积膨胀状态; ρ_0 为岩石初始密度; ρ 为材料在受压过程中的密度; e 为初始内能; A_1 、 A_2 、 A_3 、 B_0 、 B_1 、 T_1 和 T_2 为状态方程参数,具体模型参数及取值见表 1。

表 1 岩石 RHT 模型参数

Tab.1 RHT model parameters of rock

参数符号	参数解释说明	取值	参数符号	参数解释说明	取值
ρ_0 /(kg·m ⁻³)	物质密度	3 390	A_2 /GPa	雨贡纽系数	39.58
p_{el} /GPa	孔隙压缩时压力	0.023 3	A_3 /GPa	雨贡纽系数	9.04
p_{comp} /GPa	孔隙压实时压力	0.6	B_0	状态方程参数	1.22
N	空隙度指数	3.0	B_1	状态方程参数	1.22
α_0	初始孔隙度	1.188 4	T_1 /GPa	状态方程参数	35.27
A_1 /GPa	雨贡纽系数	35.27	T_2 /GPa	状态方程参数	0
f_c /MPa	单轴抗压强度	115	$\dot{\epsilon}l$ /(m·s ⁻¹)	参考拉伸应变率	3.0E-9
f_t^*	拉压强度比	0.1	$\dot{\epsilon}l$ /(m·s ⁻¹)	失效压缩应变率	3.0E22
f_s^*	剪压强度比	0.38	$\dot{\epsilon}l$ /(m·s ⁻¹)	失效拉伸应变率	3.0E22
G	剪切模量	16.7	g_c^*	压缩屈服面参数	0.53
A	失效面参数	1.6	g_t^*	拉伸屈服面参数	0.7
n	失效面指数	0.61	ζ	剪切模量缩减系数	0.5
Q_0	拉压子午比	0.68005	D_1	初始损伤参数	0.04
B	罗德角相关系数	0.010 5	D_2	损伤参数	1
β_c	压缩应变率指数	0.032	ϵ_p^m	最小失效应变	0.01
β_t	拉伸应变率指数	0.036	A_f	残余应力强度参数	1.6
$\dot{\epsilon}l$ /(m·s ⁻¹)	参考压缩应变率	3.0E-8	n_f	残余应力强度指数	0.61

炸药材料模型通过 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 关键字定义,爆轰特性通过 JWL 方程描述。炸药产物的体积、压力和能量之间关系由式 (3) 进行表述:

$$P_J = A_e \left(1 - \frac{\omega_e}{R_1 V_e} \right) e^{-R_1 V_e} + B_e \left(1 - \frac{\omega_e}{R_2 V_e} \right) e^{-R_2 V_e} + \frac{\omega_e E_0}{V_e} \quad (3)$$

式 (3) 中: P_J 为爆轰压力; A_e , B_e , R_1 , R_2 和 ω_e 为炸药的材料参数; E_0 为爆轰产物的初始内能; V_e 为爆轰产物的相对体积。具体参数值如表 2 所示。

表 2 炸药相关参数

Tab.2 Related parameters of explosive materials

密度/(kg·m ⁻³)	爆速/(m·s ⁻¹)	A_e /GPa	B_e /GPa	R_1	R_2	ω_e	E_0 /GPa
1 100	3 500	219.8	0.131	6.88	2.42	0.2	1.57

空气作为流体与岩体部分重叠,在数值模拟中是关系着流固耦合的重要组成部分。空气模型采用 *MAT_NULL 定义,并利用 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 线性多项式状态方程描述空气在爆炸载荷下的压力响应:

$$\begin{cases} P_a = C_0 + C_1 u + C_2 u^2 + C_3 u^3 + (C_4 u + C_5 u^2 + C_6 u^3) E_1 \\ u = \rho_a / \rho_c - 1 \end{cases} \quad (4)$$

式 (4) 中: P_a 为空气压强; $C_0 \sim C_6$ 为状态方程参数; u 为动力粘滞系数; E_1 为初始内能; ρ_c 为当前状态下的空气密度; ρ_a 为标准状态下的空气密度。

空气材料参数如表 3 所示。

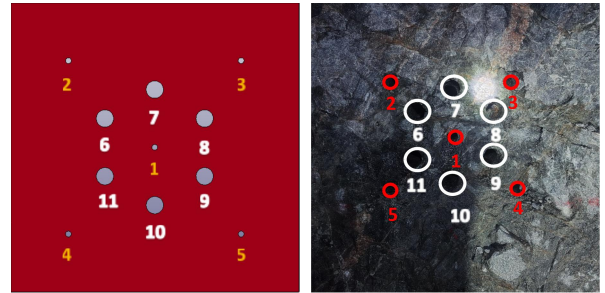
表 3 空气材料参数

Tab.3 Material parameters of air

密度/(kg·m ⁻³)	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
1.225	0	0	0	0	0.4	0.4	0

2.3 数值模型的建立

根据现场实际情况,利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件建立五孔掏槽区域的整体 2D 数值模型,为便于分析并减少计算时间,模型的孔网参数与现场施工保持一致,单元通过映射法划分。模型尺寸为 100.0 cm × 100.0 cm × 0.5 cm,中间炮孔周围的空孔和其余掏槽孔对称分布。分布图如图 2 所示。



(a) 数值模拟的炮孔分布图 (b) 爆破现场的炮孔布置图

图 2 有限元模型及现场炮孔布置

Fig.2 Finite element model and on-site borehole layout

图 2 (a) 为建立的数值模拟模型的炮孔分布图,图 2 (b) 为爆破现场实际炮孔布置图。模型边界设置为无反射界面,垂直方向施加法向约束,主要通过 *BOUNDARY_NON_REFLECT 和 *SET_SEGMENT 关键字进行设置。

通过 dynain 文件法在模型周围施加载荷 $\sigma_x = \sigma_y$,地应力随着时间的增加先增加后保持稳定。地应力加载情况及炮孔分布如图 3 所示。

在地应力稳定后,控制其大小分别为 0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 MPa, 并按照 1#至 5#掏槽孔的顺序逐孔起爆,同时控制掏槽孔孔间的延期时间分别为 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 ms, 以 10 ms 为间隔,观察这些参数对岩体损伤程度影响。

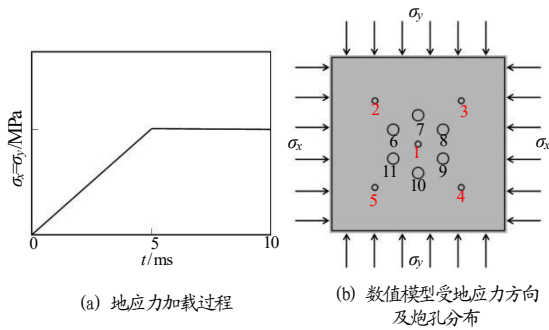


图 3 模型加载示意图
Fig.3 Loading diagram of model

3 数值模拟分析

RHT 模型在爆炸冲击作用下会在岩石中形成显著的损伤区域，损伤区域面积的大小直接关联到岩石的损伤程度。为了精确评估不同地应力条件和炮孔间延期时间对岩石损伤程度的影响，用 MATLAB 软件对模拟结果进行灰度处理和二值化，进而计算裂纹面积比例，以此定量描述岩石的损伤程度。具体过程如图 4 所示。

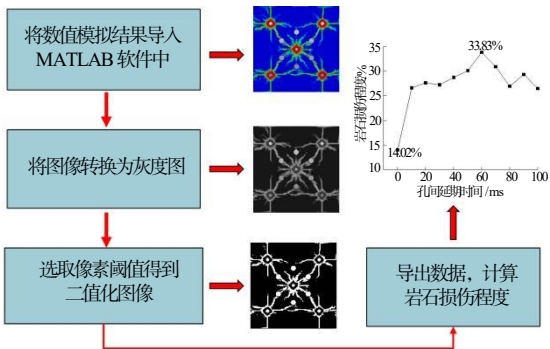


图 4 基于 MATLAB 处理的岩石爆破损伤程度统计流程图
Fig.4 Statistical flowchart of rock blasting damage degree based on MATLAB processing

3.1 无地应力条件下的损伤分析

孔间延期时间为 0~100 ms（以 10 ms 为间隔递增）条件下的岩石损伤状况如图 5 所示，岩石损伤程度随孔间延期时间变化的趋势如图 6 所示。

由图 5~6 可知，在无地应力的环境下，岩石的损伤程度随着孔间延期时间的延长先增加后减少。当炮孔同时起爆时，岩石的损伤程度最低，仅为 14.02%；而当炮孔间延期时间设置为 60 ms 时，损伤程度最高，达到 33.83%。由 0 ms 增至 60 ms 时，岩石的损伤面积增大了 2.4 倍。这是由于 5 个炮孔在爆炸瞬间产生

的冲击波和爆生气体共同作用于空孔，产生的最大压力达到 40.6 MPa。但由于每个炮孔仅有一个自由面，无法对岩石造成更深层次的破坏。在孔间延期时间为 60 ms 时，先爆炸的炮孔与后续爆炸的炮孔相互作用，使得空孔附近的质点压力达到最大值 14.5 MPa，仅为同时起爆条件下的 1/3，然而，先爆炸的炮孔不仅为后续爆炸孔提供了更多的自由面，也为整个爆破区域建立了大小为 3 MPa 左右的应力状态，因此能够对岩石产生更大的破坏作用。

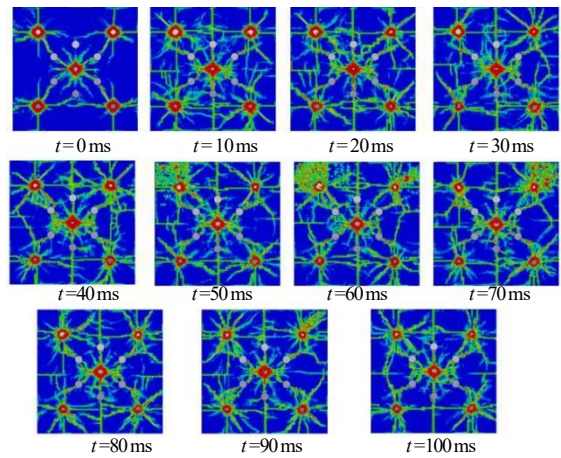


图 5 无地应力条件下掏槽孔孔间延期时间对爆破效果的影响
Fig.5 The influence of delay time between cutting holes on blasting effect under the condition of no in-situ stress

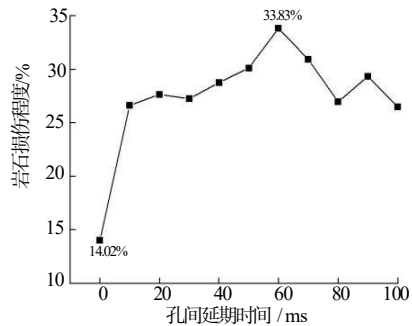


图 6 无地应力条件下岩石的损伤程度随孔间延期时间的变化关系

Fig.6 The relationship between the degree of rock damage and the delay time between boreholes under stress free condition

3.2 地应力为 2.5 MPa 条件下的损伤分析

相比于无地应力状态，在施加大小为 $\sigma_x=\sigma_y=2.5$ MPa 的地应力后，岩石的损伤程度明显降低。孔间延期时间为 0~80 ms（以 10 ms 为间隔递增）条件下的岩石损伤状况如图 7 所示，岩石损伤程度随孔间延期时间变化的趋势如图 8 所示。

由图 7~8 可知，炮孔同时起爆时岩石的损伤程

度最低,为 11.30%;而当孔间延期时间为 40 ms 时岩石的损伤程度最大,达到了 18.87%,是同时起爆的 1.7 倍。地应力的存在导致岩石的整体损伤程度下降,最佳的孔间延期时间由 60 ms 变为 40 ms,损伤程度减少了 14.96%。这是由于地应力的存在为岩石在爆破开挖前就具有了一个与地应力大小相当的初始应力场,这使得炸药爆炸瞬间产生的冲击波首先要克服地应力做功,从而消耗了一部分爆炸能量。因此,地应力对爆破过程中裂纹的扩展和发育有一定的抑制作用,降低了岩石的整体损伤程度。

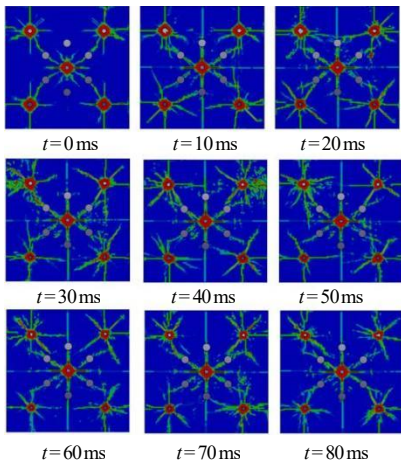


图 7 $\sigma_x=\sigma_y=2.5$ MPa 时掏槽孔孔间延期时间对爆破效果的影响

Fig.7 The influence of delay time between cutting holes on blasting effect at $\sigma_x=\sigma_y=2.5$ MPa

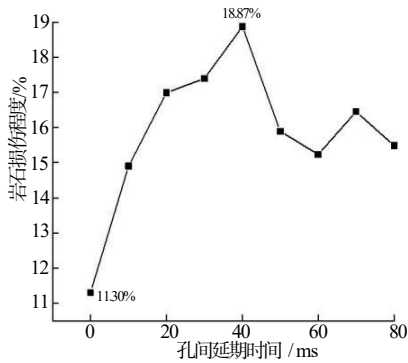


图 8 $\sigma_x=\sigma_y=2.5$ MPa 时岩石的损伤程度随孔间延期时间的变化关系

Fig.8 The relationship between the degree of rock damage and the delay time between boreholes at $\sigma_x=\sigma_y=2.5$ MPa

3.3 地应力为 5.0 MPa 条件下的损伤分析

孔间延期时间为 0~70 ms(以 10 ms 为间隔递增)条件下的岩石损伤状况如图 9 所示,岩石损伤程度随孔间延期时间变化的趋势如图 10 所示。

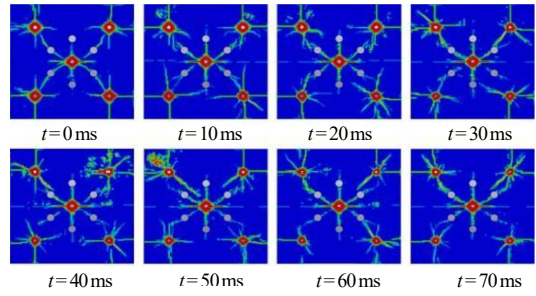


图 9 $\sigma_x=\sigma_y=5.0$ MPa 时掏槽孔孔间延期时间对爆破效果的影响

Fig.9 The influence of delay time between cutting holes on blasting effect at $\sigma_x=\sigma_y=5.0$ MPa

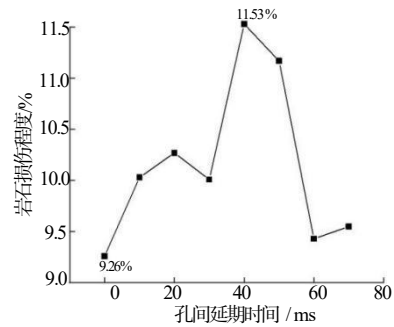


图 10 $\sigma_x=\sigma_y=5.0$ MPa 时岩石的损伤程度随孔间延期时间的变化关系

Fig.10 The relationship between the degree of rock damage and the delay time between boreholes at $\sigma_x=\sigma_y=5.0$ MPa

由图 9~10 可知,地应力对爆破效果的影响尤为显著,岩石损伤面积大幅度降低,炮孔周围的细小裂纹数量降低,但炮孔之间仍然存在贯通裂纹。此时的最佳孔间延期时间为 40 ms,岩石的损伤程度为 11.53%,是同时起爆条件下的 1.2 倍。随着地应力的增加,裂纹扩展需要消耗更多能量,因此需要缩短孔间延期时间来增加炮孔之间的相互作用,从而增大损伤范围。尽管如此,岩石的整体损伤程度仍在持续下降。

3.4 地应力为 7.5 MPa 条件下的损伤分析

孔间延期时间为 0~60 ms(以 10 ms 为间隔递增)条件下的岩石损伤状况如图 11 所示,岩石损伤程度随孔间延期时间变化的趋势如图 12 所示。

由图 11~12 可知,当地应力增加至 7.5 MPa 时,孔间延期时间为 30 ms 时岩石的损伤程度最大。当孔间延期时间大于 40 ms 时,爆生裂纹的发展受到限制,4#和 5#炮孔未能与其他炮孔之间形成有效的贯通裂纹,导致岩石的损伤程度大幅降低。

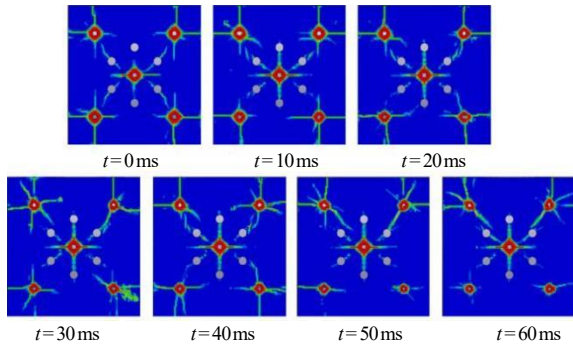


图 11 $\sigma_x=\sigma_y=7.5$ MPa 时掏槽孔孔间延期时间对爆破效果的影响

Fig.11 The influence of delay time between cutting holes on blasting effect at $\sigma_x=\sigma_y=7.5$ MPa

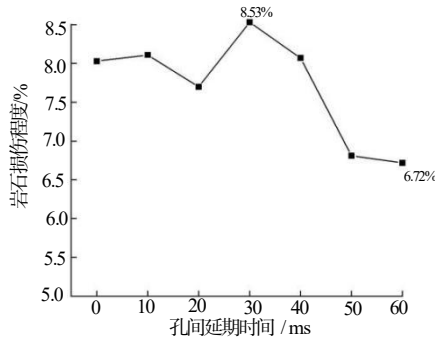


图 12 $\sigma_x=\sigma_y=7.5$ MPa 时岩石的损伤程度随孔间延期时间的变化关系

Fig.12 The relationship between the degree of rock damage and the delay time between boreholes at $\sigma_x=\sigma_y=7.5$ MPa

爆生裂纹的发育是爆炸冲击波和爆生气体联合作用下的结果，其中爆生气体的准静态作用要滞后于冲击波的动态作用。然而，在较高的地应力状态下，由爆炸冲击波所产生的裂纹扩展受到抑制，部分微小裂纹处于闭合状态，只有主裂纹得到发展，岩石整体损伤程度降低。孔间延期时间在 0~40 ms 时，炮孔间普遍形成裂纹贯通。这是由于在较短的延期时间内，先爆炸的炮孔产生的应力波和爆生气体能够部分抵消地应力，减少了后续炮孔的爆炸压力，进而对岩石造成更大的损伤。如图 11 所示，在孔间延期时间为 30 ms 时，3[#]炮孔周围的损伤范围明显超过其他炮孔。

3.5 地应力为 10 MPa 条件下的损伤分析

孔间延期时间为 0~60 ms(以 10 ms 为间隔递增)条件下的岩石损伤状况如图 13 所示，岩石损伤程度随孔间延期时间变化的趋势如图 14 所示。

由图 13~14 可知，当地应力增至 10 MPa 时，岩石在爆炸作用下的损伤程度大幅度降低，爆生裂纹主

要分布在炮孔周围，未能有效向外扩展，炮孔与空孔之间的贯穿裂纹数量减少，且随着孔间延期时间的增加，岩石的损伤程度逐步降低。孔间延期时间为 10 ms 时岩石的损伤程度最大，但与同时起爆相比，相差仅为 0.11%。随着孔间延期时间的增加，岩石的损伤程度进一步降低，表明炮孔之间的相互作用力在减弱。

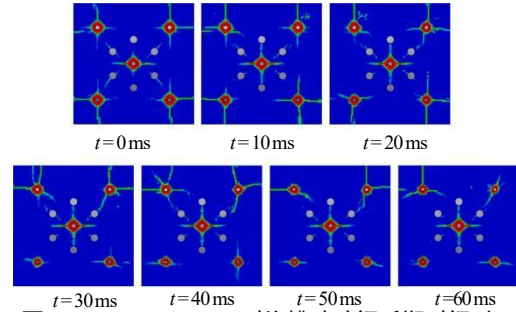


图 13 $\sigma_x=\sigma_y=10$ MPa 时掏槽孔孔间延期时间对爆破效果的影响

Fig.13 The influence of delay time between cutting holes on blasting effect at $\sigma_x=\sigma_y=10$ MPa

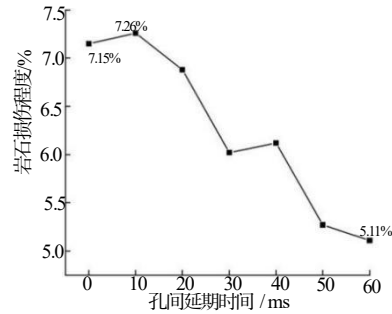


图 14 $\sigma_x=\sigma_y=10$ MPa 时岩石的损伤程度随孔间延期时间的变化关系

Fig.14 The relationship between the degree of rock damage and the delay time between boreholes at $\sigma_x=\sigma_y=10$ MPa

不同地应力下五孔掏槽爆破孔间最佳延期时间及相对应的损伤程度如图 15 所示。

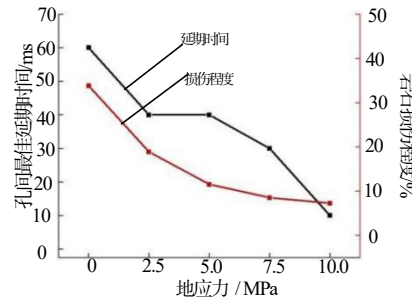


图 15 不同地应力下的最佳延期时间及岩石损伤程度
Fig.15 The optimal delay time and the degree of rock damage under different in-situ stresses

由图 15 可知，随着地应力的增加，最佳孔间延期时间及相应的岩石损伤程度均随之降低。地应力从

0 MPa 增加至 2.5 MPa 时, 岩石的损伤程度减少了 14.59%; 而从 7.5 MPa 增加至 10 MPa 时, 岩石的损伤程度仅降低了 1.27%。地应力的增加导致岩石的损伤程度降低的趋势放缓, 这是因为地应力的存在大幅减少了远离炮孔的裂纹数量, 而炮孔近区在爆破瞬间的爆炸应力波作用较强, 地应力对其影响较小。

4 工程实例分析

该工程在地下-385, -300, -295, -220 m 水平层进行巷道掘进作业。所处岩层坚硬且完整性良好, 工程区域地应力大致呈现静水压力特性。采用全断面开挖方式, 通过钻爆法施工。以-300, -220 m 水平凿岩硐室为例, 开挖尺寸 6.0 m × 3.8 m (宽 × 高), 断面面积 20.9 m², 采用数码电子雷管进行爆破, 设定掏槽孔孔间的延期时间为 30 ms, 炮孔直径 45 mm, 空孔直径 78 mm, 炮孔长度 3 m, 每个断面布置 68 个炮孔。地应力与埋深之间的关系如式 (5) 所示:

$$\sigma_x = \sigma_y = 2.5 + 0.0226H \quad (5)$$

式 (5) 中: σ_x , σ_y 为水平应力, MPa; H 为埋深, m。

-300, -220 m 水平对应的地应力分别为 9.3, 7.5 MPa。通过对比不同埋深下, 相同孔间延期时间后的岩石爆破块度分布, 可以一定程度上反映地应力与孔间延期时间对爆破效果的影响。

该工程在-220, -300 m 水平进行的两次采场掘进爆破产生的爆堆如图 16 (a) 和图 16 (c) 所示。由于现场空间有限且光线不足, 难以使用过筛法等方法获得爆堆的块度分布, 因此使用 WipFrag 软件对爆堆图像进行块度分析^[15-16]。使用 WipFrag 块度识别软件对爆堆处理后的结果分别如图 16 (b) 和图 16 (d) 所示。

由图 16 可见, 埋深 300 m 处岩石爆破后的块度均匀度较差, 相同尺寸下其累计频率均小于埋深 220 m 岩石爆破。不同埋深岩石爆破块度分布曲线如图 17 所示。由图 17 可知, 当岩石尺寸小于 200 mm 时, 两种埋深下的累计频率差异较小, 仅为 4%; 而岩石尺寸达到 600 mm 时, 累计频率的差异最大, 达到 16%。

可以说明地应力对小块岩石的影响有限, 但会导致大岩石数量显著增加, 进而影响爆破块度的均匀性。根据矿房溜井设计和现场使用的铲运设备的规格, 将尺寸超过 900 mm 的岩石定义为大块, 需要通过破碎锤进行二次破碎。-220 m 水平与-300 m 水平的大块率分别为 4% 和 15%, 表明随着埋深的增加, 大块率也随之上升, 与数值模拟结果具有较好的一致性。

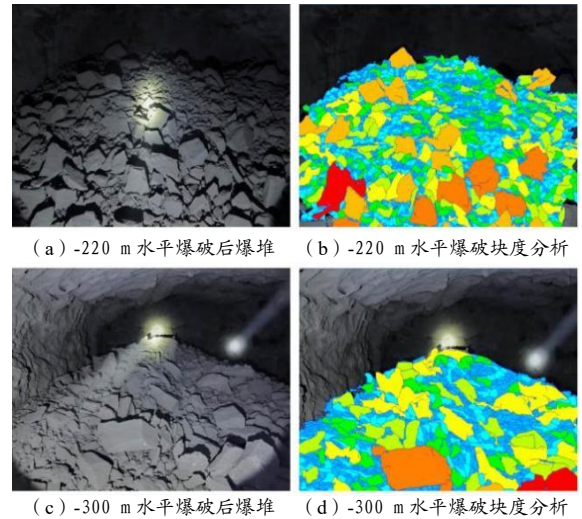


图 16 不同水平掘进爆破后的爆堆及块度分析

Fig.16 Blast pile after excavation and blasting at different levels and fragmentation analysis

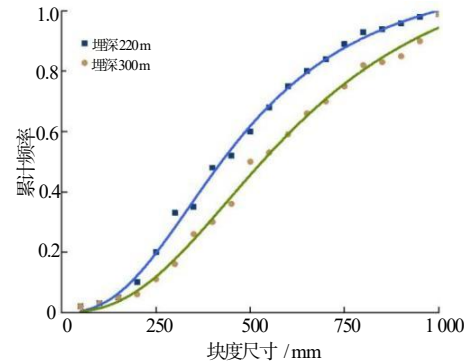


图 17 不同埋深岩石爆破块度分布曲线

Fig.17 Distribution curves of rock blasting fragmentation for the blasts at different depths

5 结论

通过数值模拟结合现场实验, 可以得到如下结论:

(1) 地应力对爆生裂纹有明显的抑制作用, 随着地应力从 0 MPa 增加至 10 MPa, 五孔掏槽爆破孔间最佳延期时间由 60 ms 降低至 10 ms, 岩石的最

大损伤程度降低了 79%。

(2) 地应力的增加使得岩石损伤程度的降幅减缓, 主要影响爆破远区的岩石裂纹发展, 而对爆破近区的影响相对较小, 因为爆炸应力波通常远大于地应力。

(3) 在-220, -300 m 水平层的现场实验显示, 在相同的延期时间设置下, 由于地应力的差异, -220 m 水平的大块率比-300 m 水平降低 11%, 与数值模拟结果一致。因此, 在实际工程中, 可以根据地应力的实际情况合理设置孔间延期时间, 以减少大块率, 提高爆破效率。

参考文献:

- [1] 陈啸林,张智宇,王凯,等.深部岩石爆破裂纹扩展与不耦合装药系数的关系[J].高压物理学报,2023,37(05):137-150.
- [2] 解北京,栾铮,李晓旭,等.岩体双孔爆破损伤特征的影响因素研究[J].中国安全生产科学技术,2023,19(09):20-26.
- [3] 魏晨慧,朱万成,白羽,等.不同地应力条件下含节理岩体爆破的数值模拟[J].工程科学学报,2016,38(01):19-25.
- [4] 陈明,卢文波,周创兵,等.初始地应力对隧洞开挖爆生裂隙区的影响研究[J].岩土力学,2009,30(08):2 254-2 258.
- [5] 岳中文,田世颖,张士春,等.单向围压作用下切缝药包爆破爆生裂纹扩展规律的研究[J].振动与冲击,2019,38(23):186-195.
- [6] 李清,于强,张迪,等.地铁隧道精确控制爆破延期时间优选及应用[J].振动与冲击,2018,37(13):135-140,170.
- [7] 刘浩杉,侯江,张智宇,等.复杂环境下隧道楔形掏槽合理延期时间优化研究[J].中国安全生产科学技术,2023,19(08):116-123.
- [8] 项荣军,刘传鹏,李胜林,等.隧道内部爆破振动传播规律与降振技术研究[J].爆破,2023,40(04):82-88,200.
- [9] 刘翔宇,龚敏,吴昊骏,等.自由面变化条件下隧道电子雷管爆破参数确定方法[J].爆炸与冲击,2021,41(10):153-165.
- [10] 宋森森,霍润科.铁路隧道空孔直线掏槽爆破方案优化研究及应用[J].爆破,2023,40(04):66-72,81.
- [11] 杨赛群.基于电子雷管条件下台阶爆破合理延期时间的优选及应用[D].淮南:安徽理工大学,2023.
- [12] 李洪超.岩石 RHT 模型理论及主要参数确定方法研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2016.
- [13] 秦昊,茅献彪.应力波扰动诱发冲击矿压数值模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2008,85(02):127-131.
- [14] 聂铮玥.三种典型岩石材料的 RHT 模型参数研究[D].长沙:国防科技大学,2021.
- [15] 曹泽铭,杨建华,叶志伟,等.地应力对岩体爆破块度分布特征的影响研究[J/OL].岩土工程学报,2024-02-20[2024-07-03].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20240208.1547.006.html>.
- [16] 洪国敏,盛晓雅,韩建文.基于 WipFrag 软件在某石灰石矿爆破堆块度分析的应用研究[J].采矿技术,2020,20(02):152-154.