

填塞长度对岩体爆破损伤效果的影响研究^①

魏可心¹, 徐振洋¹, 王雪松², 闫祎然¹, 任碧琦¹

(1. 辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114051; 2. 沈阳工业大学 建筑与土木学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 采用数值模拟方法建立单孔装药的爆破模型, 采取不同填塞长度模拟并利用 Otsu 算法进行阈值分割后, 提取岩体的破裂面积比、孔隙分形维数、块度数据等进行对比分析, 研究填塞长度对深孔爆破损伤效果的影响。结果表明, 分形维数和破裂面积比随填塞长度增加呈现先增后降的变化趋势, 填塞长度 3.0 m 时分形维数达到最大值, 填塞长度 1.7 m 时破裂面积比达到极大值。填塞长度 2.2 m 左右时碎块数量取得最大值, 填塞长度 2.0 m 时碎块平均面积为最小, 填塞长度 2.0~2.2 m 时可达较优的岩石破碎效果。随着填塞长度增加, 抛出的岩石从小块为主转向大块, 位移距离降低。研究成果对爆破作业填塞参数选取具有一定参考价值。

关键词: 深孔爆破; 填塞长度; 岩体爆破; 裂纹扩展; 图像分析; 损伤效果

中图分类号: TD235

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.03.004

文章编号: 0253-6099(2024)03-0016-06

Influence of Stemming Length on Damage Effect of Rock Blasting

WEI Kexin¹, XU Zhenyang¹, WANG Xuesong², YAN Yiran¹, REN Biqi¹

(1. School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, Liaoning, China;
2. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China)

Abstract: The numerical simulation was used to establish a single-hole blasting model, which was then used to simulate the blasting effect with different stemming length. Otsu thresholding technique was adopted for image segmentation, and the data, such as percentage of cracked rock area, fractal dimension of pore structure, and fragmentation of rock mass, were extracted for comparative analysis, so as to explore the influence of stemming length on damage effect under deep-hole blasting. The results show that fractal dimension and percentage of cracked rock area are in an uptrend before falling down as stemming length increases. The fractal dimension reaches the maximum value with stemming length of 3.0 m, and the percentage of cracked rock area reaches the maximum value with stemming length of 1.7 m. Stemming length of 2.2 m can bring the highest number of fragments, and stemming length of 2.0 m can result in the smallest average area of fragments. It is found that the blasting with the stemming length of 2.0–2.2 m can lead to better rock fragmentation effect. As the stemming length increases, the flyrock becomes bigger, and the displacement distance decreases. The research results can be taken as reference in selection of stemming parameters for blasting operation.

Key words: deep-hole blasting; stemming length; rock blasting; crack propagation; image analysis; damage effect

爆破技术广泛应用于露天矿开采、地下空间建设和隧道开挖等作业中, 改善爆破效果、提高爆破效率和控制有害影响是目前爆破作业的重要关注点^[1-2]。合理的炮孔填塞不仅可以防止爆轰气体过早溢出, 使爆炸产生的能量更好地作用于岩体, 并且可以有效防止爆炸产生的乱石飞溅^[3-5]。

合理的填塞长度可有效改善爆破效果和岩石破碎

程度^[6]。LS-DYNA 被广泛应用于研究爆破过程中填塞长度、起爆位置^[7]、微差时间^[8]等因素对爆破效果的影响。现有深孔爆破研究多集中在现场测试, 针对不同填塞长度对岩石内部产生损伤效果的研究较少。本文利用 LS-DYNA 软件进行数值模拟, 分析不同填塞长度下岩体的裂纹扩展、破碎程度和岩石抛出状况, 并结合图像处理进行定性和定量分析。

① 收稿日期: 2023-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(51974187); 辽宁省教育厅重点项目(LJKZ0282)

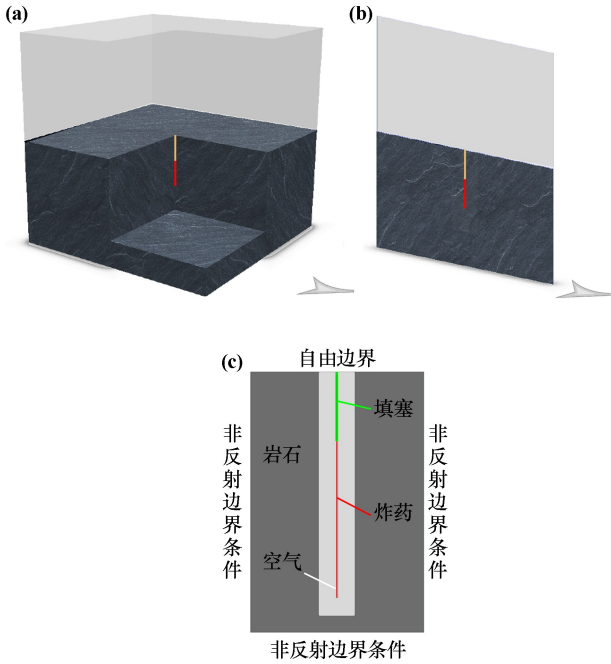
作者简介: 魏可心(1998—), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事工程爆破方面的研究。E-mail: weikexin13@163.com

通信作者: 徐振洋(1982—), 男, 河南洛阳人, 博士, 教授, 主要从事爆炸力学与工程爆破方面的研究。E-mail: xuzhenyang10@foxmail.com

1 数值模拟设置

1.1 物理模型

以露天矿深孔爆破为对象建立模型。为避免临近炮孔影响,物理模型采用单孔爆破,如图1(a)所示。为观察裂纹扩展和避免计算量的骤升,选取包含炸药、填塞等组成的二维切片,如图1(b)所示。模型由四部分组成:岩石、填塞材料、空气和炸药,空气作为耦合介质。岩石尺寸设置为长10 m、高15 m;炮孔直径150 mm、



(a) 岩石爆破三维示意图; (b) 岩石爆破二维示意图;
(c) 模型边界条件设置

图1 物理模型

深13 m;选用底部起爆方式,炸药直径100 mm、深9 m。岩石上边界设置为自由边界,左侧、右侧和下侧设置为非反射边界条件,如图1(c)所示。在现场深孔爆破过程中,装药后炮孔剩余长度一般在4 m以内。最佳填塞长度一般为炮孔长度的10%~50%^[9]。最佳填塞长度随填塞材料不同而不同,为确定合理的填塞长度,选取填塞长度分别为炮孔剩余长度的四等分(1 m、2 m、3 m、4 m),探究0.5 s内岩石爆破损伤效果。

1.2 材料模型及状态参数

炸药材料模型选用2号岩石乳化炸药,采用底部起爆方式。在软件中使用内置高能爆轰模型(*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN)和JWL状态方程(*EOS_JWL)来描述,具体参数设置见表1。空气作为耦合介质被广泛应用于爆破模拟中,在LS-DYNA软件的材料库中选择的空材料模型(*MAT_NULL)作为空气材料模型,具体参数设置见表2,结合状态方程(*ESO_LINEAR_POLYNOMIAL)进行应用。岩石和炮泥选用塑形随动硬化模型^[10-12],具体参数设置分别见表3和表4。该材料模型可以有效体现爆破过程中岩石在极大冲击下的应变率效应^[11]。塑形随动硬化模型表示岩体屈服应力和应变率关系可表示为:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{SRC} \right)^{1/SRP} \right] \left(\sigma_{y0} + \beta \frac{E_0 E_{tan}}{E_0 - E_{tan}} \epsilon_p^{eff} \right) \quad (1)$$

式中 E_0 、 E_{tan} 分别为岩石的杨氏模量、切线模量; $\dot{\epsilon}$ 、 σ_{y0} 、 ϵ_p^{eff} 分别为加载应变率、初始屈服应力、有效塑性应变; SRC 、 SRP 和 β 分别为Cowper-Symonds应变率参数和硬化参数。

表1 炸药材料模型参数

密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	爆速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	P_{e-j} /GPa	A /GPa	B /GPa	R_1	R_2	ω	E_0 /GPa
1300	4100	5.15	215	0.184	4.16	0.92	0.15	4.2

表2 空气材料模型参数

密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	C_0 /MPa	C_1 /MPa	C_2 /MPa	C_3 /MPa	C_4 /MPa	C_5 /MPa	C_6 /MPa	E_0 /MPa
1.2	0	0	0	0	0.4	0.4	0	0.25

表3 岩石材料模型参数

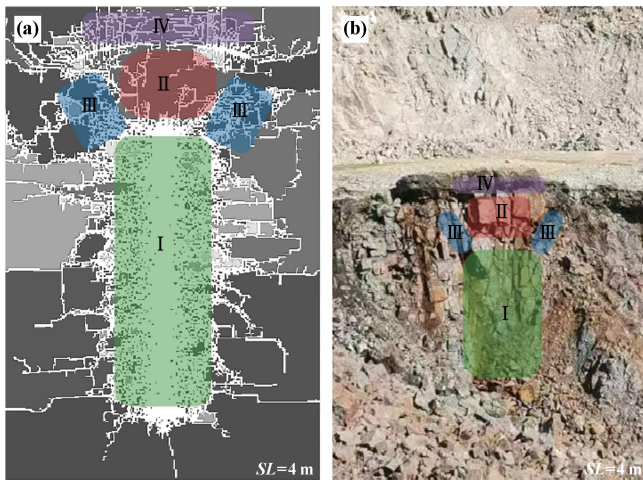
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏模量/GPa	泊松比	屈服应力/MPa	切线模量/GPa	应变率参数 C	应变率参数 P	失效应变 f_s	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
2650	68	0.228	75	40	2.5	4	0.8	150	11.2

表4 炮泥材料模型参数

密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏模量/GPa	泊松比	屈服压力/MPa	切线模量/MPa	应变率参数 C	应变率参数 P	失效应变 f_s
1900	3.3	0.33	0.65	0.45	2.5	4	0.5

1.3 模型验证

结合现场实际参数,选取填塞长度 4 m 模拟岩石在爆破时裂纹扩展情况,同时对现场实际爆破产生的断面情况,如图 2 所示。I 区域在爆破时产生的较强冲击波作用下产生较大变形,发生压缩损伤,在爆破时产生较小碎块,形成的压缩破碎区为粉碎区域。应力波的拉伸分量造成的拉伸损伤表现为径向损伤裂纹的进一步扩展。II 区域在现场和模拟结果中都以较大块的形式出现,III 和 IV 区域裂纹形成贯通,围绕大块形成损伤区域。应力波在上方自由边界发生反射,应力波的叠加在 IV 区域产生环向裂纹。数值模拟结果可较好地反映现场爆破时的岩石损伤情况。



(a) 爆破模拟结果; (b) 现场实际爆破断面

图 2 爆破模拟结果与现场实际爆破断面比较

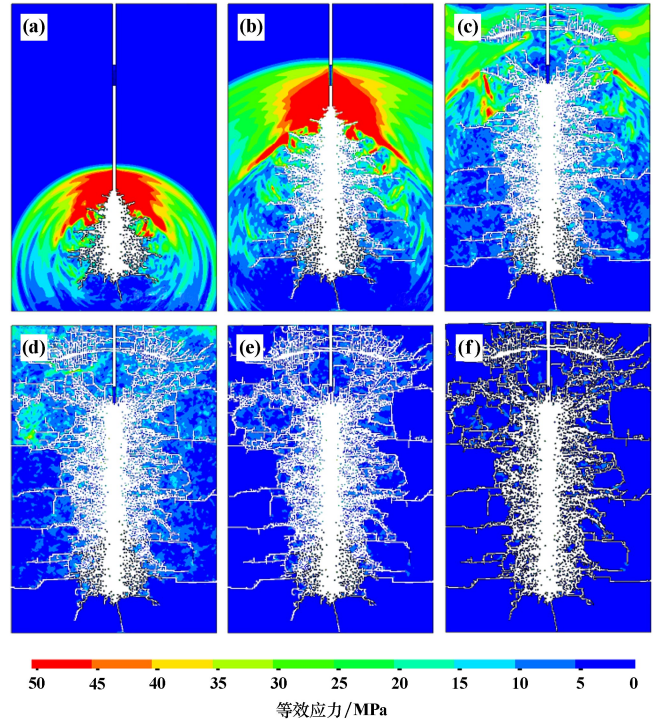
1.4 图像处理与分析

为分析岩石的破碎效果,将 LS-DYNA 模拟结果导出,利用 Otsu 算法^[13]进行阈值分割再次划分为岩体和裂隙两部分,分别得到两部分的定量数据。提取裂隙数据计算破裂面积比并利用盒计数法可对分形维数^[14]进行计算。对爆破后岩石进行块度分析并进行着色,提取并分析不同体积的岩块数量和体积占比等。

2 不同填塞长度对爆破的影响

2.1 裂纹分析

为了研究不同时间和不同填塞长度下裂纹的扩展演化情况,分别对填塞长度 1 m、2 m、3 m、4 m 在 0~0.5 s 进行岩石爆破模拟。为了直观观察等效应力变化,将等效应力上限约束为 50 MPa,提取了填塞长度 1 m 时在 1 ms、2 ms、3 ms、4 ms、10 ms、20 ms 时刻的等效应力云图和裂纹扩展情况,如图 3 所示。



(a) $t=1$ ms; (b) $t=2$ ms; (c) $t=3$ ms;

(d) $t=4$ ms; (e) $t=10$ ms; (f) $t=20$ ms

图 3 填塞长度 1 m 时岩石爆破裂纹扩展

从图 3 可以看出,炸药在底部起爆后,临近岩石在高压应力作用下破裂粉碎,应力波在岩石中开始传播;2 ms 时,炸药产生的能量继续传入岩石,沿炸药引燃方向能量进行叠加,岩石在冲击波的作用下产生的变形超过压缩破坏准则,压缩损伤产生,粉碎区形成;3 ms 时高应力区基本消失,应力波的拉伸分量导致裂纹进一步向岩体扩展,并且在上自由面反射形成的叠加波作用下形成环向裂纹;4 ms 时裂纹布局基本形成,高应力区基本消失;10 ms 时裂纹扩展基本停止,与 20 ms 时扩展情况相一致。

10 ms 时,填塞长度 SL 分别为 1 m、2 m、3 m、4 m 的 Otsu 算法处理后的裂纹分布、分形维数、破裂面积比分别如图 4 和图 5 所示。由图 4 可见,炸药起爆后瞬间产生的高压应力作用于炸药炮孔附近,粉碎区的破碎程度基本一致。填塞长度 2~4 m 时岩体中下部裂纹扩展情况基本相同,均优于填塞长度 1 m 时。从岩体上部的裂纹可以看出,岩体损伤情况和裂纹扩展的连通性在填塞长度 2~3 m 时优于 1 m 和 4 m 时。分形维数是描述随机分布的不规则形状缺陷的方法,可以间接表征损伤的情况^[15],由图 5(a)可见,分形维数随着填塞长度增加呈现先增加后降低的趋势,填塞长度 3 m 时分形维数达到最大值。填塞长度 3 m 时,裂纹的覆盖范围和裂纹的连通程度优于其他填塞长度

(图4(c)),即过短或过长的填塞长度都会影响爆破效果。由图5(b)可发现,破裂面积比随着填塞长度增加呈现先增加后降低再增加的趋势。使用较长的填塞长度可达到较好的破裂面积比,但使用过长的填塞长度对裂纹的连通性和复杂程度产生影响。从图5可以看出,破裂面积比在填塞长度1.7 m时达到极大值、在填塞长度3.6 m左右时达到极小值。研究结果印证了文献[6]的分析结果。

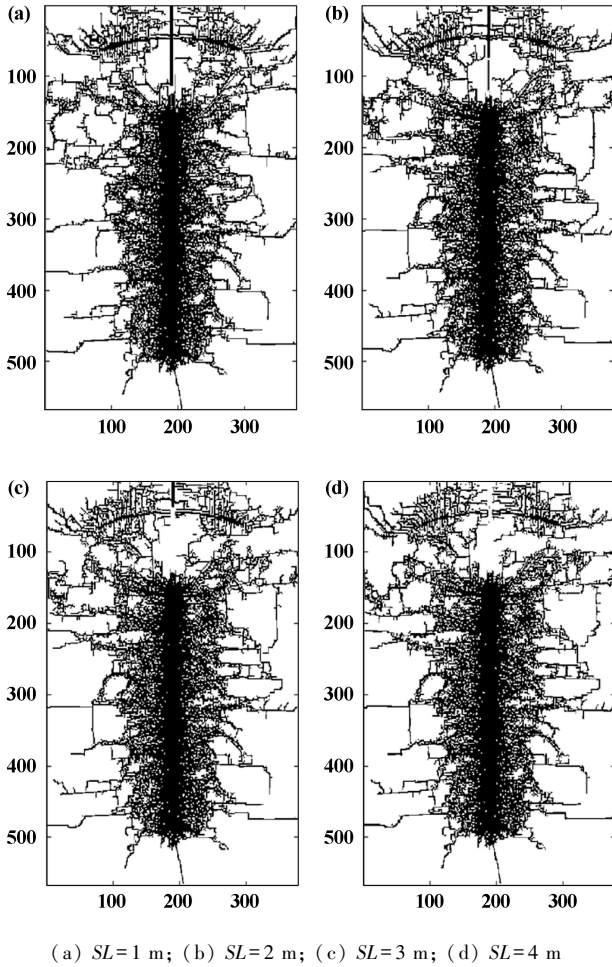


图4 不同填塞长度下爆破岩石裂纹分布

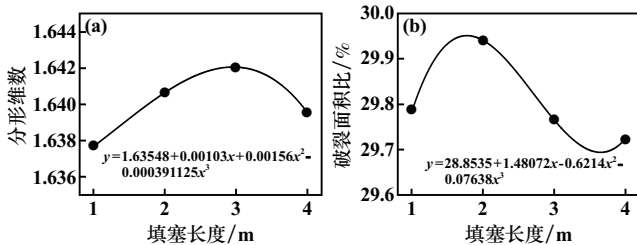


图5 爆破岩石裂纹图像处理结果

2.2 块度分析

为了更好地观察岩石爆破后形成的碎块,通过

对块随机施加不同颜色来增强区分,结果如图6所示。由于爆破模拟采用二维模拟,块度大小采用面积来区分。

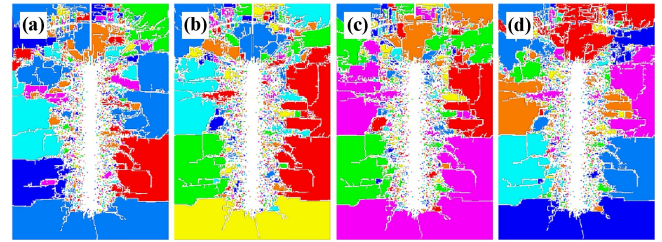


图6 岩石爆破块度着色

图7为以面积 $A>1\text{ m}^2$ 、 $A>0.5\text{ m}^2$ 、 $A>0.1\text{ m}^2$ 、 $A>0\text{ m}^2$ 划分的填塞长度分别为1 m、2 m、3 m、4 m的岩石爆破产生的碎块数量对比。从碎块数量上, $A>1\text{ m}^2$ 的碎块呈现凹字形,较大的岩石破碎块度会影响岩石爆破爆堆质量。填塞长度2 m和3 m时,爆破产生的较大块数量小于填塞长度1 m和4 m时,即过短或过长的填塞长度都会产生较大的碎块。 $A>0.5\text{ m}^2$ 的碎块在填塞长度4 m与3 m时大致相同,相较于填塞长度1 m时有较大区别。而在中小块上,即 $A>0.1\text{ m}^2$ 和 $A>0\text{ m}^2$,填塞长度2 m和3 m时都有较好的爆破效果,在所有碎块上,填塞长度2.2 m左右时可取得最大值,爆破效果较优。

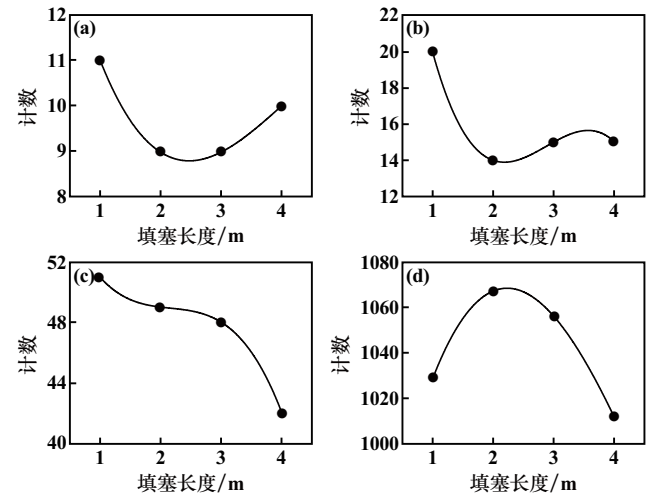
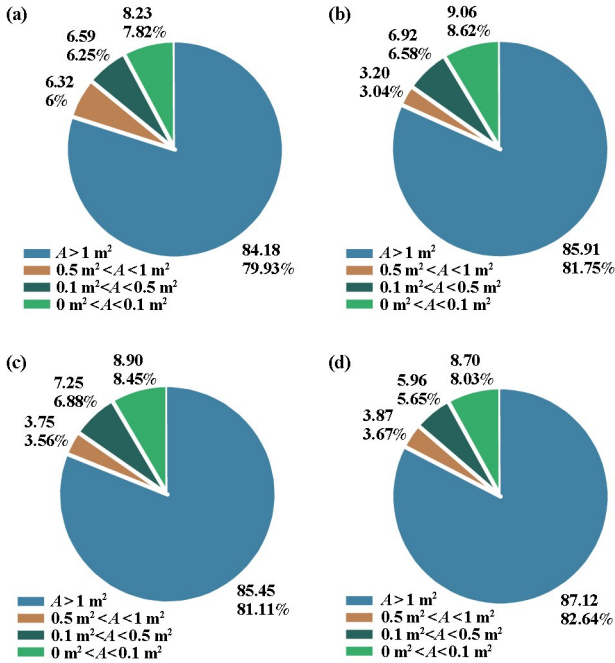


图7 不同填塞长度下岩石爆破碎块面积统计分析

图8为不同填塞长度下岩石爆破碎块以 $A>1\text{ m}^2$ 、 $0.5\text{ m}^2<A<1\text{ m}^2$ 、 $0.1\text{ m}^2<A<0.5\text{ m}^2$ 、 $0\text{ m}^2<A<0.1\text{ m}^2$ 的面积占比。大块占比在4种填塞长度下都保持在80%左右, $0.5\text{ m}^2<A<1\text{ m}^2$ 的碎块面积占比与 $A>0.5\text{ m}^2$ 的面积占比变化趋势大致相同,面积占比随填塞长度

增加先降低后微小波动上升。对于中小块,即 $0.1\text{ m}^2 < A < 0.5\text{ m}^2$ 和 $0\text{ m}^2 < A < 0.1\text{ m}^2$, 填塞长度 2~3 m 时明显大于填塞长度 1 m 和 4 m 时的面积占比。不同填塞长度下岩石爆破碎块面积统计分析结果如表 5 所示。从表 5 可见,填塞长度 2 m 时碎块平均面积最小。填塞长度 2~4 m 时碎块面积的最小值更小,岩石块的最大值发生在填塞长度 3 m 时。



(a) $SL=1\text{ m}$; (b) $SL=2\text{ m}$; (c) $SL=3\text{ m}$; (d) $SL=4\text{ m}$
图 8 不同填塞长度下岩石爆破碎块面积占比

表 5 不同填塞长度下岩石爆破碎块面积统计分析结果

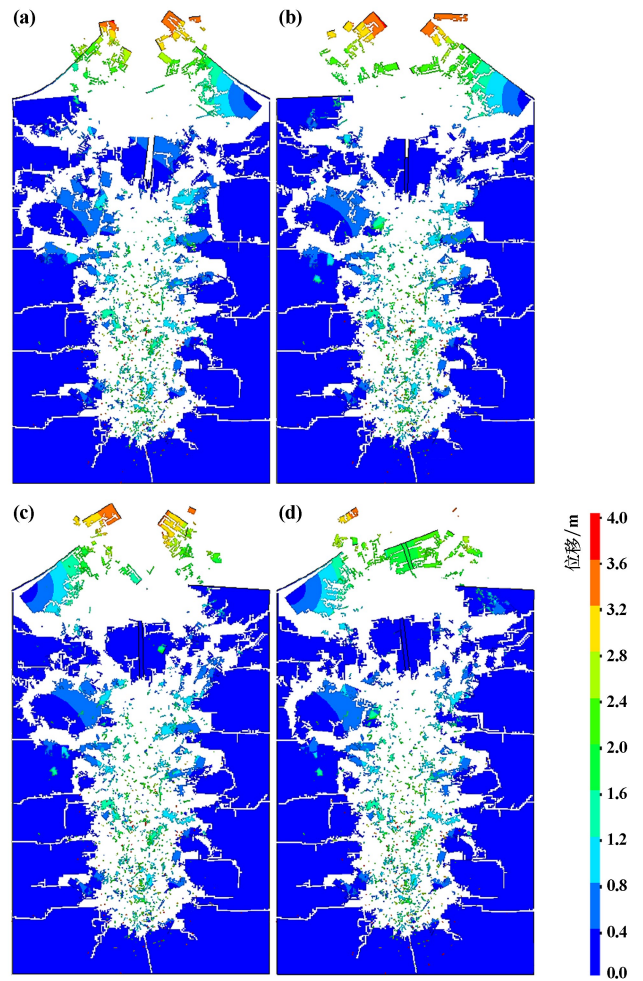
填塞长度/m	岩石爆破碎块面积/ m^2				
	平均值	最小值	最大值	中值	方差
1	0.102 300	0.001 4	21.889 0	0.003 7	0.972 9
2	0.098 490	0.000 7	23.103 3	0.003 9	1.277 5
3	0.099 765	0.000 7	33.814 7	0.003 6	1.487 8
4	0.104 166	0.000 7	22.395 7	0.003 4	1.099 5

2.3 岩块抛掷

合理控制岩块抛掷能量有助于形成生产所需的抛掷距离与爆堆形态。为了研究岩石爆破时岩石的抛出情况,对不同填塞长度进行数值模拟,模拟时间选取 0.5 s,为了便于观察岩石的抛出程度,选用位移云图并约束上限值为 4 m,模拟结果如图 9 所示。随着填塞长度增加,岩石向外抛出程度减弱。从图 9 可以看出,岩石的位移距离随填塞长度增加逐渐变小。

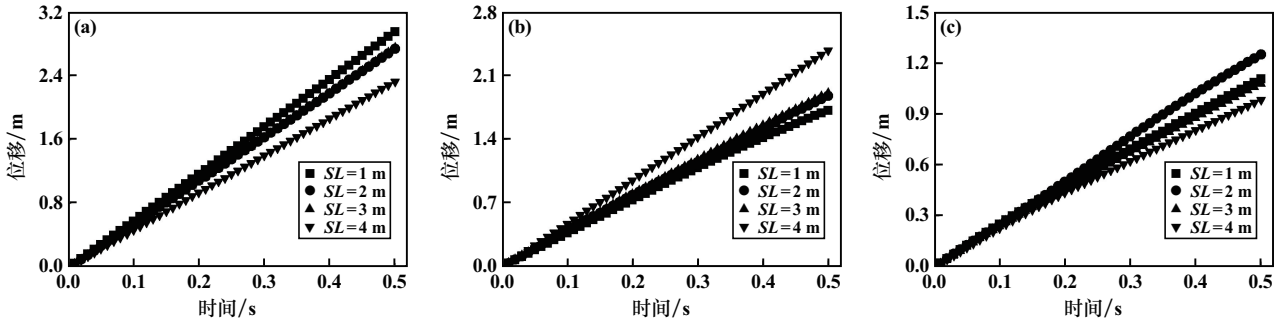
由于填塞长度 1 m 和 2 m 与填塞长度 3 m 和 4 m 时岩块炸出的主要岩块位置有偏差,填塞长度 1 m 和 2 m 时沿中轴线向右分别每间隔 1 m 取一个监测点,

填塞长度 3 m 和 4 m 时沿中轴线向左分别每间隔 1 m 取一个监测点,分别标记为 A、B、C,其位移变化情况如图 10 所示,速度变化情况如图 11 所示。靠近中轴线的 A 点,位移随着填塞长度增加而减小,填塞长度 2 m 和 3 m 时的差异较小,与填塞长度 1 m 和 4 m 时有明显差值,差值也随着填塞长度增加而增大。速度表现出相同的变化趋势。在 B 点处,岩石碎块在填塞长度较短时沿着中线向两侧抛出,填塞长度较长时,填塞和岩石伴随以较大整块向上抛出,位移和速度变化趋势相同。距离中轴线较远的 C 点处,填塞长度 1 m 与 3 m 时变化相似。除填塞长度 1 m 外,仍保持随填塞长度增加位移和速度均减小的趋势。



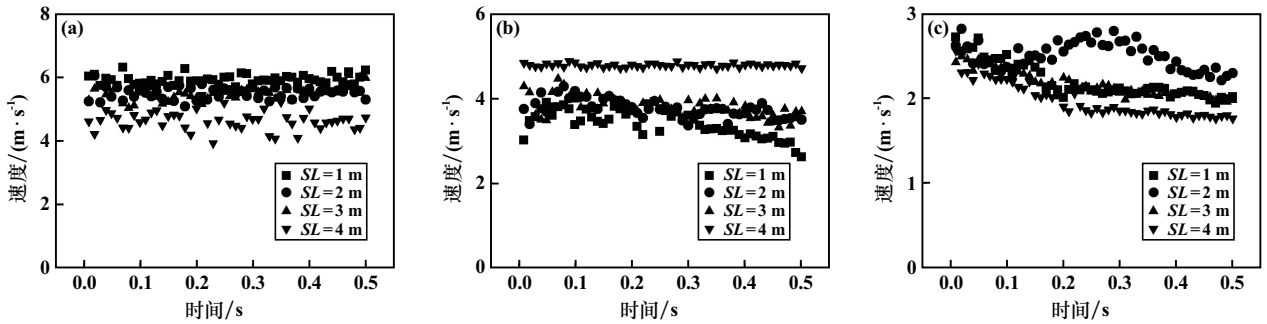
(a) $SL=1\text{ m}$; (b) $SL=2\text{ m}$; (c) $SL=3\text{ m}$; (d) $SL=4\text{ m}$
图 9 不同填塞长度下岩石的抛出情况

从模拟结果可以看出,随着填塞长度增加,炸药引爆后产生的岩石中大块数量减少,岩块体积明显增大,岩石的抛出程度显著降低。从岩石碎块抛出程度和监测点位移和速度数据可以看出,增加填塞长度可抑制岩块的抛掷。



(a) A点; (b) B点; (c) C点

图10 不同填塞长度下爆破岩石监测点位移变化



(a) A点; (b) B点; (c) C点

图11 不同填塞长度下爆破岩石监测点速度变化

3 结 论

采用数值模拟方法建立单孔装药的爆破模型, 采取不同的填塞长度进行模拟并利用 Otsu 算法进行阈值分割后, 分析了岩体的裂纹扩展、破碎程度和岩石抛出状况等情况, 得出以下结论:

1) 与现场岩石爆破断面损伤情况进行对比发现, 岩石不同区域的损伤程度一致, 验证了爆破模拟的有效性。对4种填塞长度进行模拟, 利用 Otsu 算法对模拟结果进行阈值分割, 并对数据进行分析, 结果表明, 岩石在粉碎区的破碎程度基本一致, 填塞长度 2~4 m 时岩体中下部的裂纹扩展优于填塞长度 1 m 时, 上部的裂纹在填塞长度 2~3 m 时优于填塞长度 1 m 和 4 m 时。提取裂隙数据并利用盒计数法对分形维数进行计算, 可以得出, 填塞长度 3 m 时分形维数达到最大值, 填塞长度 1.7 m 时破裂面积比达到极大值, 分形维数和破裂面积比随填塞长度增加呈现先增后降的变化趋势, 即过短或过长的填塞长度都会影响爆破效果。

2) 提取爆破后岩石的块度数据并进行着色处理, 发现在4种填塞长度下大于 1 m² 的碎块数量均呈现凹字形分布规律, 在中小块数量上, 填塞长度 2 m 和 3 m 都有较好的爆破效果。填塞长度 2.2 m 左右时爆

破碎块数量取得最大值。填塞长度 2.0 m 时的碎块平均面积最小。填塞长度 2.0~2.2 m 时可达到较优的岩石破碎效果, 即过短或过长的填塞长度都会产生较大的碎块。模拟时间 0.5 s 时的爆破飞石抛掷效果可以看出, 随着填塞长度增加, 抛出的岩石从小块为主转向大块, 中大块数量减少, 岩块体积明显增大, 抛出的岩石位移距离逐渐变小, 抛出程度显著降低。

参考文献:

- [1] 温 晨, 乔秋秋, 邱贤阳, 等. 深井扇形组合孔短延时爆破裂纹扩展模拟研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(1): 26-31.
- [2] 付 俊, 周 罕, 徐继刘, 等. 露天矿山石灰岩边坡爆破振动特性及规律研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(1): 32-34.
- [3] YAN Y, HOU X, FEI H. Review of predicting the blast-induced ground vibrations to reduce impacts on ambient urban communities[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 260: 121135.
- [4] CHEN M, YE Z, WEI D, et al. The movement process and length optimization of deep-hole blasting stemming structure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 146: 104836.
- [5] 陆 文, 张志呈. 钻孔爆破中炮孔堵塞作用机理研究[J]. 爆破, 2001(1): 16-18.
- [6] 李廷春, 刘洪强. 一次成井掏槽爆破炮孔合理封堵长度研究[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(3): 384-389.

5) 根据安全系数变化“加速度”在降雨、停雨阶段的变化规律,可认为降雨条件下边坡基本会经历较为安全阶段、内部剧烈变化阶段、极易滑坡阶段及相对安全阶段共4个阶段。

参考文献:

- [1] 赵芝,王登红,王成辉,等. 离子吸附型稀土矿及研究新进展[J]. 地质学报, 2019,93(6):1454-1465.
- [2] 丁一汇,王遵娅,宋亚芳,等. 中国南方2008年1月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系[J]. 气象学报, 2008(5):808-825.
- [3] 罗仙平,翁存建,徐晶,等. 离子型稀土矿开发技术研究进展及发展方向[J]. 金属矿山, 2014(6):83-90.
- [4] 巫辅宇,饶运章,石亮,等. 强降雨条件下离子型稀土矿山边坡稳定性分析[J]. 有色金属科学与工程, 2022,13(5):148-154.
- [5] 谢韬,蔡军,范理云,等. 强降雨条件下隧道洞口边坡开挖渗流特征以及支护方案研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(1):12-15.
- [6] 邱祥,蒋焯斌,欧健,等. 降雨条件下边坡暂态饱和区形成条件与演化特征数值分析[J]. 水利学报, 2020,51(12):1525-1535.
- [7] 杨世豪,苏立君,张崇磊,等. 强降雨作用下昔格达边坡渗流特性及稳定性分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020,42(4):19-27.
- [8] CHANG Z, HUANG F, HUANG J, et al. Experimental study of the failure mode and mechanism of loess fill slopes induced by rainfall[J]. Engineering Geology, 2021,280:105941.
- [9] 杨校辉,陆发,郭楠,等. 多级黄土高边坡稳定性计算及数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2022,44(增刊1):172-177.
- [10] WU D, GAO Y, CHEN X, et al. Effects of soil strength nonlinearity on slip surfaces of homogeneous slopes[J]. International Journal of Geomechanics, Reston: Asce-Amer Soc Civil Engineers, 2021,21(1):06020035.
- [11] 김민석, Sagong M, Sam K S. Slope stability analysis under rainfall condition g multiple slip surfaces[J]. Journal of the Korean Geo-Environmental Society, 2007,8(2):11-18.
- [12] 魏保义. 用非饱和渗流理论研究降雨入渗的特性及对边坡稳定的影响[D]. 南京:河海大学, 2002.
- [13] 邹广电,魏汝龙. 土坡稳定分析普遍极限平衡法数值解的理论及方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(2):363-370.
- [14] 李萍,李同录,王红,等. 非饱和黄土土-水特征曲线与渗透系数 Childs & Collis-Gerge 模型预测[J]. 岩土力学, 2013,34(增刊2):184-189.
- [15] 彭珂,彭红霞,梁峰,等. 赣州市地质灾害分布特征及孕灾环境分析[J]. 安全与环境工程, 2017,24(1):33-39.
- [16] 吴宏伟,陈守义,庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩土力学, 1999(1):2-15.

引用本文: 饶国柱,饶运章,高中泉,等. 不同降雨强度下离子型稀土矿边坡渗流特性与临界滑移面变化分析[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):22-27.

(上接第21页)

- [7] 宋子岭,杨星辰,范军富,等. 露天矿采空区爆破合理孔底填塞长度与起爆位置确定[J]. 安全与环境学报, 2017,17(5):1828-1832.
- [8] 姜琳婧,金爱兵,姚宝顺,等. 微差时间和填塞长度对临近充填体的影响研究[J]. 金属矿山, 2022(11):36-43.
- [9] XIE Z, HUANG C, ZHAO Z, et al. Review and prospect the development of dust suppression technology and influencing factors for blasting construction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022,125:104532.
- [10] 郭云龙,孟海利,孙崔源,等. 炮孔填塞材料对岩石爆破的影响模拟分析[J]. 铁道建筑, 2019,59(6):89-92.
- [11] LI Haibo, XIA Xiang, LI Jianchun, et al. Rock damage control in bedrock blasting excavation for a nuclear power plant[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(2):210-218.
- [12] 谢理想. 深埋隧洞岩石爆破破碎演化机制与钻爆优化设计[D]. 武汉:武汉大学, 2017.
- [13] 汪恩良,徐雷,韩红卫,等. 基于 OTSU 算法提取寒区河流流冰密度研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021,29(6):1429-1439.
- [14] 范楠. 煤孔隙结构多尺度表征及其对瓦斯运移特性影响的实验研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2021.
- [15] 李静,刘晨,刘惠民. 基于数字岩心的页岩储层岩石细观损伤机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022,41(6):1103-1113.

引用本文: 魏可心,徐振洋,王雪松,等. 填塞长度对岩体爆破损伤效果的影响研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):16-21.

版权声明

本刊已许可国内外文献检索系统或数据库在其官网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。同时矿冶工程杂志官网已实行论文全文免费开放获取。本刊按矿冶工程杂志相关规定向作者一次性支付稿酬及著作权使用费后,本刊及相关合作单位不再向作者支付其他费用。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意本刊上述声明。

矿冶工程杂志编辑部
2024年6月