

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.02.013

不同应力条件下组合孔爆破 破岩规律数值模拟研究*

杨海涛^{1,2}, 李二宝^{1,3}, 仪海豹^{1,2}, 戴勇⁴

(1. 中钢集团 马鞍山矿山研究总院股份有限公司, 马鞍山 243000;

2. 金属矿山安全与健康国家重点实验室, 马鞍山 243000;

3. 马鞍山矿山研究院爆破工程有限责任公司, 马鞍山 243000;

4. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘要: 深部矿山爆破开采不可避免的受到初始地应力的作用,为探究高地应力下组合孔破岩规律,对初始应力与组合孔爆炸应力联合破岩机理进行分析,开展不同应力作用下组合孔爆破破岩数值模拟研究。结果表明:初始应力对爆破作用的抑制或者促进取决于其与岩石的弹性极限的对比关系,当初始应力小于岩石的弹性极限时,表现为抑制作用,当初始应力大于岩石的弹性极限时,表现为促进作用。加载不同初始应力时(岩石峰值应力为90.58 MPa),组合孔破坏失效单元个数、裂隙扩展长度均符合“先减小后增大”的趋势,且拐点处应力值为25 MPa,为岩石峰值应力的27.6%,与岩石应力-应变全过程曲线中弹性极限应力值一致;提取分析测点处的有效应力及振动速度可知,随着初始应力的增强(20~50 MPa),测点处耦合应力呈线性增大趋势,表明初始应力与爆炸应力耦合作用下,初始应力占主导作用;组合孔方案中超前致裂孔爆破为前排孔创造新的自由面,监测点处的振动速度监测情况表明,组合孔爆破方案具有很好的减震作用。

关键词: 初始应力; 组合孔; 联合破岩; 数值模拟

中图分类号: TD235.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2021)02-0088-07

Numerical Simulation Research on Rock Breaking Law of Combined Hole Blasting under Different Stress Conditions

YANG Hai-tao^{1,2}, LI Er-bao^{1,3}, YI Hai-bao^{1,2}, DAI Yong⁴

(1. Sinosteel Maanshan Institute of Mining Research Co., Ltd., Maanshan 243000, China;

2. State Key Laboratory of Safety and Health for Metal Mines, Maanshan 243000, China;

3. Maanshan Institute of Mining Research Blasting Engineering Co., Ltd., Maanshan 243000, China;

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

Abstract: Blasting in deep mines is inevitably affected by initial ground stress. In order to explore the rock breaking law of combined holes under high ground stress, the combined rock breaking mechanism of initial stress and combined hole explosion stress was analyzed, and the numerical simulation research on rock fragmentation by combined hole blasting under different stresses was carried out. The results show that the suppression or promotion of the initial stress on the blasting effect depends on the comparison between the initial stress and elastic limit of the rock. When the initial stress is less than the elastic limit of the rock, the effect is inhibited, and when the initial stress is greater than the elastic limit of the rock, the promoting effect is shown. When loading different initial stresses (the rock peak stress is 90.58 MPa), the number of failure units and the crack propagation length of the combined hole are accord with the trend of “decreasing first and then increasing”, and the stress value at the inflection point is 25 MPa, 27.6% peak stress of the rock, which is consistent with the elastic limit stress value in the whole stress-

strain curve of the rock. By extracting and analyzing the effective stress and vibration velocity at the measuring point, it can be seen that the coupling stress at the measuring point increases linearly with the increase of the initial stress (20 ~ 50 MPa), indicating that the initial stress plays a dominant role under the coupling action of the initial stress and the explosion stress. In the combined hole scheme, the advance cracking blasting creates a new free surface for the front row holes, and the vibration velocity monitoring at the monitoring point shows that the combined hole blasting plan has a good shock absorption effect.

Key words: initial load; combination hole; joint breaking rock; numerical simulation

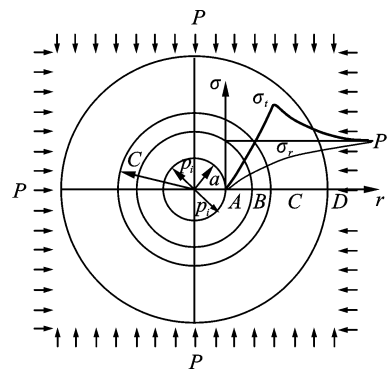
随着深部矿山资源的开采,地应力环境发生改变,矿岩爆破开采规律也发生巨大变化,因此,研究高应力环境下采场爆破破岩作用规律具有重要意义^[1-4]。针对初始应力与爆炸应力耦合作用方面,诸多科研人员开展了大量的研究工作:岳万有等采用数值模拟手段对高地应力区含裂隙岩体进爆破开挖进行研究,研究表明:在各向等压地应力场开采环境下,随着围压增加单元的拉应力逐渐降低而单元的压应力并未得到显著提升^[5],同时靠近裂隙右侧部分单元的压应力达到该测线压应力的峰值,并且压应力随围压增大而增大;张凤鹏等通过开展不同单向压应力条件下砂岩漏斗爆破试验,将爆破漏斗破坏范围分为块状破坏区、过渡区、片状剥落区,进一步研究表明:静应力促进平行其自身方向裂纹的形成^[6];曾庆田等通过开展矿山现场爆破漏斗试验及数值模拟研究,得出爆破漏斗体积、半径等参数受地应力影响较大的结论^[7],并给出了爆破漏斗最佳埋深、临界埋深、最佳埋深比;杨海涛等研究了单向初始应力对爆破漏斗破坏的影响规律,结果表明:外加初始应力对爆破裂隙范围的影响程度取决于爆炸荷载大小和岩石力学参数^[8],距离炮孔中心越近,外加荷载对裂隙的影响越小。上述学者或者采用的应力范围较小,或者仅针对单炮孔爆破荷载作用规律,未见针对具体矿山采场孔网参数环境下初始地应力与爆破荷载耦合作用破坏效应规律研究。

为此,在理论分析的基础上,本文开展初始地应力作用下组合孔爆破破岩规律研究,探究初始地应力与组合孔爆破荷载耦合作用下岩体破坏规律,为深井开采爆破参数优化控制提供理论依据。

1 组合孔爆破破岩机理

根据已有研究结果^[9-15],双向等压作用下圆孔

周边应力分布的基本规律如图 1,由于矿山实际地应力为三向不等压状态,势必引起应力分布状态的变化^[12],导致增压区、减压区的分布宽度发生变化。



P —原始应力; σ_t —一切向应力; σ_r —径向应力;
 p_i —支护阻力; a —圆孔半径; R —塑性区半径;
 A —破裂区; B —塑性区; C —弹性区; D —原始应力区

图 1 塑性条件下圆孔应力分布图

Fig. 1 Stress distribution diagram of a circular hole under plastic conditions

根据圆孔周边应力分布规律,设计地下矿山采场上向中深孔组合孔布孔方案,见图 2,该方案布置 5 个炮孔,按照排数分类分别为前排孔、超前致裂孔、后排孔。起爆顺序为超前致裂孔在 0 ms 时刻起爆,前排孔在 30 ms 时刻起爆,后排孔在 35 ms 时刻起爆。在距离前排孔右侧孔 5 m 处设置监测点。

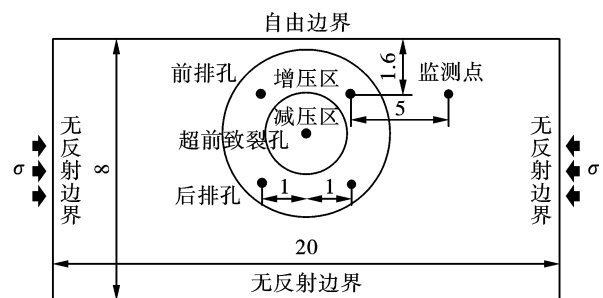


图 2 组合孔布置方案示意图(单位:m)

Fig. 2 Schematic diagram of combined hole layout(unit:m)

组合孔短延时超前致裂的原理主要体现在两个方面。一方面,超前致裂孔起爆后,形成一定的致裂

收稿日期:2021-05-08

作者简介:杨海涛(1981-),男,高级工程师,从事矿山爆破技术研发、设计及有害效应防护等研究,(E-mail)yht03121@163.com。

基金项目:安徽省重点研究和开发计划(编号:201904a07020038);国家重点研发计划(编号:2017YFC0602902)

空间,该空间周边形成破裂区(A)、塑性区(B)、弹性区(C)和原始应力区(D)四个区域,包含减压区、增压区和稳压区三部分。超前致裂孔爆破后,深部岩体内积聚的高应力储能瞬间释放,岩体由三向受力转为两向或单向受力状态,并显著降低了附近区域的岩体强度,同时超前致裂孔既一定程度解除侧向围压的约束,又在致裂空间壁上形成较强的拉应力,由此产生的瞬态卸荷效应有效增大了岩体破坏范围;此外,超前致裂范围为后起爆创造了有利自由面空间,可以改善爆破效果。另一方面,超前致裂爆破诱导地应力发生转移,形成了一定范围的增压区,改变了后起爆炮孔周边的应力和能量分布状态;当后起爆炮孔位于超前致裂爆破形成的增压区范围内时,在爆炸应力与地应力耦合作用下,可以进一步增大爆破破岩量。另外,根据初始地应力对爆破破岩的影响规律,当炮孔径向方向沿着最大地应力方

向布置时,充分利用地应力的导向作用,可以取得更好的破岩效果。

2 应力条件对组合孔爆破影响数值模拟

2.1 数值计算模型的建立

考虑到数值模拟软件计算特性及组合孔模型的复杂性,使用 ANSYS/LS-DYNA 显示动力分析有限元软件建立组合孔二维计算模型^[16-19]。其中岩体 PART 为长 20 m,宽 12 m 的长方形,按照孔距 2 m,排距 2.6 m 在靠近自由边界一侧布置组合孔,前排孔距离自由边界 1.6 m,其中模型三个方向设置无反射边界,一个方向设置自由边界。

2.2 计算力学参数选择

岩石力学参数及炸药参数根据矿山实际岩体参数选取,各项材料参数见表 1 和表 2。

表 1 岩石物理力学参数

Table 1 Physical and mechanic parameters of rock

质量密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	峰值强度/MPa	切线模量/GPa
2682	55.0	0.25	90.58	12.7

表 2 炸药各主要材料参数

Table 2 The main material parameters of explosives

密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	爆速/($\text{cm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$)	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	w	E_0/GPa
1130	0.4	42.4	0.34	3.55	0.36	0.44	3.43

2.3 高应力加载方案

根据岩石力学参数可知,岩石的峰值强度为 90.58 MPa,结合典型岩石应力-应变全过程曲线,选取 20 MPa、25 MPa、30 MPa、35 MPa、40 MPa、45 MPa、50 MPa 7 种初始应力加载方案,见表 3。

表 3 初始应力加载方案

Table 3 Initial load loading scheme

方案	加载应力/MPa
1	20
2	25
3	30
4	35
5	40
6	45
7	50

2.4 计算结果及分析

选取加载应力值 20 MPa 方案,分别在超前致裂孔、前排孔、后排孔爆破后截取不同时刻的应力云图,见图 3。

由图 3 可知,超前致裂孔起爆后,爆炸应力波主要向两侧和自由面方向传播^[20],可以有效提高在自由面方向的破岩范围。径向裂纹产生并逐渐延伸至前、后排炮孔周围,为其爆破破岩创造了有利自由面空间;前排孔起爆后,爆破破岩范围进一步扩大,自由面空间分布进一步改善,为后排孔起爆创造了爆破条件;后排孔起爆后,受前述炮孔破坏范围的影响,爆炸应力波主要向深部和两侧传播,而在自由面方向受到一定制约,有效提高了深部岩体的破岩效果,降低了炸药单耗和爆破成本。

采用失效计算关键字 MAT_ADD_ERRORSION 模拟岩体 PART 单元破坏,统计不同应力载荷加载方案下计算模型失效单元数量,得出高应力对组合孔爆破漏斗体积的影响规律,见图 4~图 6。

结果显示:随着冲击波的传播,组合孔爆破体积逐渐增大、裂隙扩展长度(沿初始应力方向)逐渐增加。岩体失效单元曲线存在三个明显跃升阶段,分别为超前致裂孔、前排孔、后排孔分别在 0 ms、30 ms、35 ms 起爆后造成的岩体单元失效破坏;随

着初始应力逐渐增大,组合孔破坏失效单元个数、裂隙扩展长度均符合“先减小后增大”的趋势,且拐点处应力值为 25 MPa,为岩石峰值应力的 27.6%,与岩石应力-应变全过程曲线弹性阶段弹性极限应力值一致。分析认为:在初始应力小于岩体的弹性极限时,由于岩体的不均匀性,岩体内部微裂隙被逐渐

压密,岩体密实度增强,一定程度上抑制了爆破作用下裂纹的扩展,当初始应力超过岩体的弹性极限时,岩体在初始应力作用下内部微裂隙开始逐渐扩张,并与爆炸应力共同作用,对裂隙扩展具有导向作用,爆破失效单元格数增加,对爆破破岩起到了促进作用。

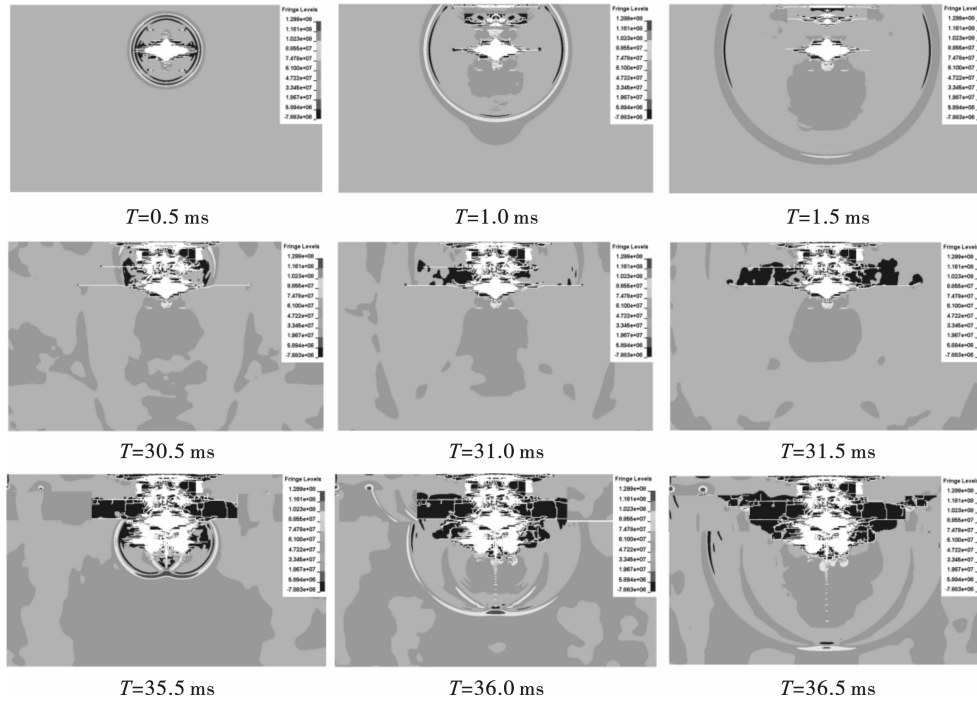


图 3 组合孔爆破典型时刻应力云图

Fig. 3 Stress cloud diagram at typical moments of combined hole blasting

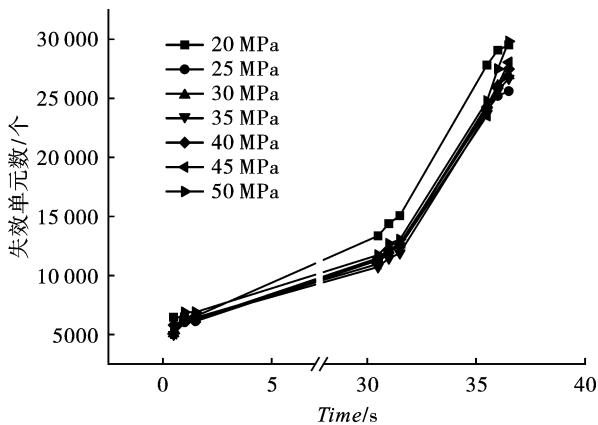


图 4 组合孔爆破失效单元数随时间变化曲线

Fig. 4 Curve of the number of failed units in combined hole blasting with time

为进一步研究不同初始应力对爆破振动速度及应力的影响,按照图 2 选取测点进行分析,分别绘制测点应力随时间、初始应力变化曲线,见图 7 ~ 图 8。

测点处应力是初始应力与爆炸应力耦合的结果,由图 7、8 可知,随着组合炮孔依次起爆,测点处

出现不同程度的应力耦合作用,随着初始应力的增强(20 ~ 50 MPa),测点处耦合应力呈线性增大趋势,表明初始应力与爆炸应力耦合作用下,初始应力占主导作用。

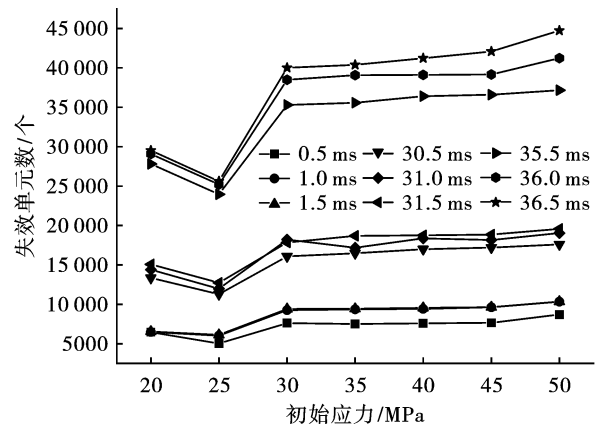


图 5 组合孔爆破失效单元数随初始应力变化曲线

Fig. 5 The change curve of the number of failure units in combined hole blasting with initial stress

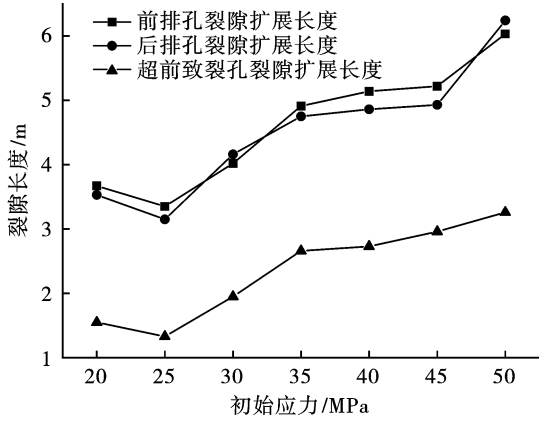


图6 组合孔裂隙扩展长度随初始应力变化规律
Fig. 6 Variation of crack propagation length of combined hole with initial stress

曲线,见图9,三种孔位振动速度波峰值见表4。

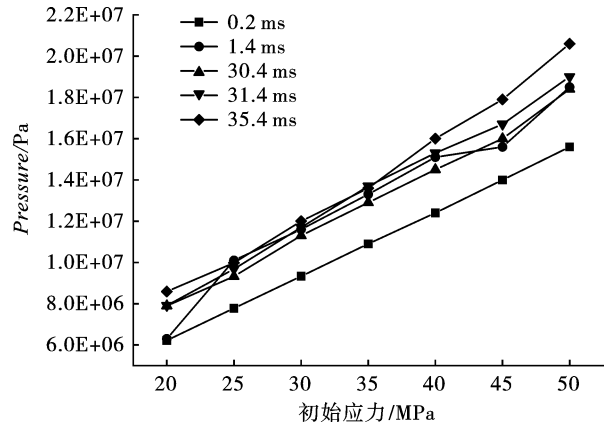


图8 测点应力随初始应力变化图
Fig. 8 The graph of the change of the measured point stress with the initial stress

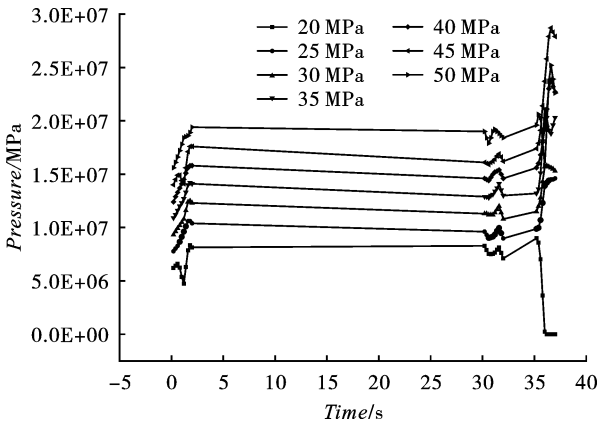


图7 测点应力随时间变化图
Fig. 7 The stress of the measuring point changes with time

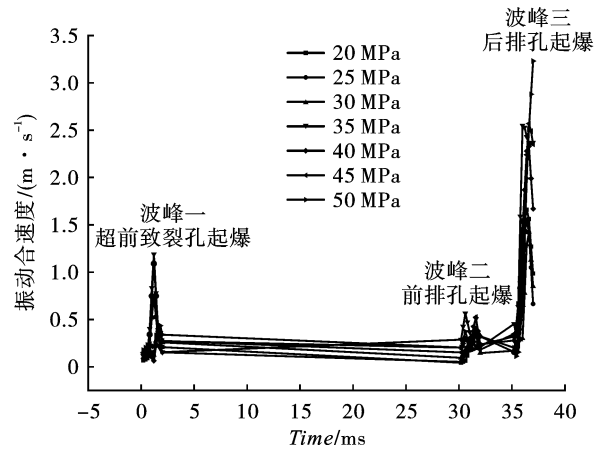


图9 测点振动速度随时间变化图
Fig. 9 Blasting effect diagram

提取测点处振动合速度曲线,分别绘制测点振动合速度随时间作用曲线及三段振动速度波峰变化

表4 各孔位振动速度波峰值表

Table 4 Vibration velocity wave peak table for each hole position

应力/ MPa	孔 位				
	超前致裂孔/ (m·s ⁻¹)	前排孔/ (m·s ⁻¹)	后排孔/ (m·s ⁻¹)	超前致裂孔/ 前排孔	后排孔/ 前排孔
20	0.749	0.396	1.66	1.89	4.19
25	1.090	0.360	1.54	3.03	4.28
30	0.373	0.337	1.42	1.11	4.21
35	1.190	0.565	2.55	2.11	4.51
40	0.520	0.376	2.33	1.38	6.20
45	0.526	0.401	2.57	1.31	6.41
50	0.448	0.322	3.23	1.39	10.03

由图9可知,曲线出现3个明显的波峰,分别对应超前致裂孔、前排孔、后排孔爆破后产生的振动速度。提取不同应力下组合孔各孔位产生的振动速度波峰值,见表4,其中超前致裂孔装药量为前排孔的

一半,而测点处振动速度值为前排孔的1.11~3.03倍;后排孔与前排孔装药量相同,而测点处振动速度值为前排孔的4.19~10.03倍。分析认为,超前致裂孔爆破后,为前排孔创造新的自由面,爆破能量大

部分朝着自由面方向释放,所以其在测点处产生的爆破振动速度减小,分析表明组合孔爆破方案具有很好的减震作用。

3 结论

(1)初始应力对爆破作用的抑制或者促进取决于其与岩石的弹性极限的对比关系,当初始应力小于岩石的弹性极限时,表现为抑制作用,当初始应力大于岩石的弹性极限时,表现为促进作用。

(2)数值模拟结果表明,采用本组合孔爆破方案一方面可形成超前致裂区,将超前致裂孔周边积聚的高储能提前释放,另一方面超前致裂爆破诱导地应力发生转移,形成了一定范围的增压区,改变了后起爆炸孔周边的应力和能量分布状态,可取得良好的爆破效果。

(3)加载不同的初始应力时,组合孔破坏失效单元个数、裂隙扩展长度均符合“先减小后增大”的趋势,且拐点处应力值为25 MPa,为岩石峰值应力的27.6%,与岩石应力-应变全过程曲线弹性阶段弹性极限应力值一致;提取分析测点处的有效应力及振动速度,结果表明:随着初始应力的增强(20~50 MPa),测点处耦合应力呈线性增大趋势,表明初始应力与爆炸应力耦合作用下,初始应力占主导作用;组合孔方案中超前致裂孔爆破后,为前排孔创造新的自由面,爆破能量大部分朝着自由面方向释放,所以其在测点处产生的爆破振动速度减小,表明组合孔爆破方案具有很好的减震作用。

(4)下一步将继续研究孔网参数对其初始应力条件下组合孔破岩机制,并开展矿山采场现场试验,验证数值模拟结果的准确性。

参考文献 (References)

- [1] 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(1):19-25.
- [1] WEI Chen-hui, ZHU Wan-cheng, BAI Yu, et al. Numerical simulation of jointed rock mass blasting under different in-situ stress conditions[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(1): 19-25. (in Chinese)
- [2] 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,2019,30(8):2254-2258.
- [2] CHEN Ming, LU Wen-bo, ZHOU Chuang-bing, et al. Influence of initial in-situ stress on blasting-induced cracking zone in tunnel excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 30(8): 2254-2258. (in Chinese)
- [3] 杨立云,杨仁树,许鹏,等.初始压应力场对爆生裂纹行为演化效应的实验研究[J].煤炭学报,2013,38(3):404-410.
- [3] YANG Li-yun, YANG Ren-shu, XU Peng, et al. Experimental study on the effect of initial compression stress field on blast-induced crack behaviors[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(3): 404-410. (in Chinese)
- [4] 张宇菲.高地应力岩巷掏槽爆破围压效应模型试验研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2018.
- [4] ZHANG Yu-fei. Model test study on confining pressure effect of cut blasting in high geo-stress rock lane[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2018. (in Chinese)
- [5] 岳万友,李建国,柴修伟,等.地应力对含裂隙岩体爆破影响分析研究[J].爆破,2021,38(1):51-57.
- [5] YUE Wan-you, LI Jian-guo, CHAI Xiu-wei, et al. Influence analysis of ground stress on blasting of fractured rock mass[J]. Blasting, 2021, 38(1): 51-57. (in Chinese)
- [6] 张凤鹏,闫广亮,郝琪琪,等.单向压应力对砂岩漏斗爆破过程的影响[J].东北大学学报(自然科学版),2021,42(2):220-225.
- [6] ZHANG Feng-peng, YAN Guang-liang, HAO Qi-qi, et al. Influence of unidirectional compressive stress on the crater blasting of sandstone[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(2): 220-225. (in Chinese)
- [7] 曾庆田,胡正祥,刘科伟.高地应力条件下爆破漏斗实验及数值模拟研究[J].金属矿山,2021(2):36-40.
- [7] ZENG Qing-tian, HU Zheng-xiang, LIU Ke-wei. Experiment and numerical simulation of blasting crater under high in-situ stress[J]. Metal Mine, 2021(2): 36-40. (in Chinese)
- [8] 杨海涛,仪海豹,王广成,等.单向初始荷载下爆破漏斗破坏效应试验研究[J].金属矿山,2021(3):54-60.
- [8] YANG Hai-tao, YI Hai-bao, WANG Guang-cheng, et al. Experimental study on destruction effect of blasting crater under unidirectional initial load[J]. Metal Mine, 2021(3): 54-60. (in Chinese)
- [9] 袁超,张建国,王卫军,等.基于塑性区分布形态的软弱破碎巷道围岩控制原理研究[J].采矿与安全工程学报,2020,37(3):451-460.
- [9] YUAN Chao, ZHANG Jian-guo, WANG Wei-jun, et al. Controlling principles of surrounding rock in soft and broken roadway based on the distribution pattern of plastic zone[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(3): 451-460. (in Chinese)
- [10] 董海龙,高全臣,张赵,等.两向不等压巷道围岩塑性区近似解及数值模拟[J].煤炭学报,2019,44(11):3360-3368.
- [10] DONG Hai-long, GAO Quan-chen, ZHANG Zhao, et al. Approximate solution and numerical simulation for plastic zone of roadway surrounding rock under unequal com-

- pression in two directions[J]. Journal of China coal Society, 2019, 44(11): 3360-3368. (in Chinese)
- [11] 马念杰, 李季, 赵志强. 圆形巷道围岩偏应力场及塑性区分布规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(2): 206-213.
- [11] MA Nian-jie, LI Ji, ZHAO Zhi-qiang. Distribution of the deviatoric stress field and plastic zone in circular roadway surrounding rock[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(2): 206-213. (in Chinese)
- [12] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015.
- [12] WANG Xu-guang. Design and construction of blasting [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [13] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 硬岩应力-应变阈值特点及产生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1513-1521.
- [13] ZHOU Hui, MENG Fan-zhen, ZHANG Chuan-qing, et al. Characteristics and mechanism of occurrence of stress thresholds and corresponding strain for hard rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(8): 1513-1521. (in Chinese)
- [14] 梁昌玉, 李 晓, 王声星, 等. 岩石单轴压缩应力-应变特征的率相关性及其能量机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1830-1838.
- [14] LIANG Chang-yu, LI Xiao, WANG Sheng-xing, et al. Experimental investigations on rate-dependent stress-strain characteristics and energy mechanism of rock under uniaxial compression. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1830-1838. (in Chinese)
- [15] 张晓平, 王思敬, 韩庚友, 等. 岩石单轴压缩条件下裂纹扩展试验研究——以片状岩石为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1772-1781.
- [15] ZHANG Xiao-ping, WANG Si-jing, HAN Geng-you, et al. Crack propagation study of rock based on uniaxial compressive test—a case study of schistose rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(9): 1772-1781. (in Chinese)
- [16] 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.
- [16] 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)
- [17] 崔正荣, 汪禹, 仪海豹, 等. 深部高地应力条件下双孔爆破岩体损伤数值模拟及试验研究[J]. 爆破, 2019, 36(2): 59-64.
- [17] CUI Zheng-rong, WANG Yu, YI Hai-bao, et al. Numerical simulation and experimental study of rock mass damage caused by double-hole blasting deep insitu stress conditions [J]. Blasting, 2019, 36(2): 59-64. (in Chinese)
- [18] 张凤鹏, 彭建宇, 张鑫, 等. 地应力对岩体爆破影响的数值模拟[J]. 金属矿山, 2015(12): 15-18.
- [18] ZHANG Feng-peng, PENG Jian-yu, ZHANG Xin, et al. Numerical simulation of the effect of insitu stress on rock blasting[J]. Metal Mine, 2015(12): 15-18. (in Chinese)
- [19] 王志亮, 郑明新. 基于TCK损伤本构的岩石爆破效应数值模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 230-234.
- [19] WANG Zhi-liang, ZHENG Ming-xin. Numerical simulation of effect of rock blasting based on TCK damage constitutive model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 230-234. (in Chinese)
- [20] 仪海豹, 张西良, 杨海涛, 等. 基于重球触地实验的空区塌落振动分析及治理[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(7): 91-103.
- [20] YI Hai-bao, ZHANG Xi-liang, YANG Hai-tao, et al. Goaf collapse vibration analysis and disposal based on a experiment of heavy ball touchdown [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(7): 91-103. (in Chinese)

英文编辑: 陈东方

《爆破》论文网络首发及著作权使用声明

《爆破》为使录用论文首发权及时获得确认,自2019年12月起与中国知网合作启动“网络首发”在线优先数字出版项目,即《中国学术期刊(网络版)》(简称CAJ-N),统一连续出版物号ISSN 2096-418、CN 11-6037/Z。

作者稿件经审稿录用后,将会以“录用定稿”模式第一时间上传至中国知网“网络首发”平台发布。每篇网络首发论文均可下载一份“中国知网学术期刊网络首发论文出版证书”,其效力等同于纸质出版论文。

为避免出现一稿多投的现象,凡已投《爆破》的稿件,在未确认录用或退稿前,请勿再投他刊!

《爆破》为《中国核心期刊(遴选)数据库》、《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》、《中文科技期刊数据库》、“万方数据——数字化期刊群”、维普网和超星学术期刊“域出版”平台收录期刊。本刊已许可上述机构以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议,请在投稿时说明,本刊将按作者说明处理。