

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.01.009

中凯矿业大直径深孔爆破落矿装药结构优化研究*

赵兴东¹, 宋景仪¹, 田斌², 范晓苏²

(1. 东北大学 深部金属矿采动安全实验室, 沈阳 110816; 2. 西藏中凯矿业股份有限公司 林周分公司, 拉萨 850000)

摘要: 装药结构对厚大矿体大直径深孔爆破落矿效果具有重要影响。中凯矿业帮中矿区现行装药结构(空气间隔长度比例 24.2%)存在爆破后冲破坏作用严重的问题,造成后一排炮孔堵塞、坍塌甚至报废,严重影响生产效率;而盲目增大空气间隔长度比例则存在爆破大块率增加的风险。以矿山实际的炸药和岩石参数为基础,采用数值模拟软件 LSDYNA 开展大直径深孔爆破落矿装药结构优化研究。选择常用空气间隔器作为间隔材料,以空气间隔长度比例为研究对象设计了 12 种装药结构方案进行数值模拟,得到了装药结构与爆破后冲作用、大块率、自由面质点振动峰值速度以及峰值有效应力等评价指标之间的关系。结果表明:自由面质点振动峰值速度以及峰值有效应力随空气间隔长度比例增加逐渐下降;当空气间隔长度比例小于等于 30.5% 时后冲作用明显,后排炮孔可能出现塌孔现象,当空气间隔长度比例大于等于 45.3% 时,存在大块率增加的风险,最优装药结构的空气间隔长度比例为 44.2%。现场深孔爆破落矿试验表明,优化的装药结构爆破后大块率为 7.1% 且爆破后冲作用得到有效控制。

关键词: 大直径深孔爆破落矿; 装药结构; 数值模拟; 大块率

中图分类号: TD235.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2024)01-0060-07

Optimization Study by Zhongkai Mining on Charge Structure of Large-diameter and Deep-hole Blasting

ZHAO Xing-dong¹, SONG Jing-yi¹, TIAN Bin², FAN Xiao-su²

(1. Laboratory of Safe Mining in Deep Metal Mine, Northeastern University, Shenyang 110816, China;
2. Linzhou Branch of Tibet Zhongkai Mining Co., Lhasa 850000, China)

Abstract: Charge structure has an important impact on deep hole blasting effect with a large diameter in thick and large ore bodies. The current charge structure (24.2% air deck length) used in Bangzhong mine of Zhongkai Mining has a serious problem of post-blast impact damage, resulting in blockage, collapse or even scrapping of the latter row of holes, which seriously affects productivity. However, blindly increasing the air deck length ratio has the risk of increasing the boulder yield. Based on the actual explosives and rock parameters of the mine, a study on charging structure optimization was carried out by using the numerical simulation software LSDYNA. The commonly used

收稿日期 (Date of reception): 2022-11-08

网络首发日期 (Published online): 2023-04-15

作者简介: 赵兴东 (1975-), 男, 博士, 东北大学采矿工程系教授、博士生导师, 从事深部金属矿采动灾害防控研究, (E-mail) zhaoxingdong@mail.neu.edu.cn.

通讯作者: 宋景仪 (2000-), 男, 东北大学博士研究生, 从事工程爆破研究, (E-mail) 2637581519@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (52130403); 国家自然科学基金-山东联合基金资助项目 (编号: U1806208); 中央高校基本科研业务费资助项目 (N2001033); 辽宁省中央引导地方科技发展资金项目 (2023JH6/100100050)

About the author: ZHAO Xing-dong (1975-), male, Ph. D., professor and doctoral supervisor of the Department of Mining Engineering, Northeastern University, mainly engaged in the research on the prevention and control of mining disasters in deep metal mines, (E-mail) zhaoxingdong@mail.neu.edu.cn.

Corresponding author: SONG Jing-yi (2000-), male, Ph. D., candidate of Northeastern University, engaged in engineering blasting research, (E-mail) 2637581519@qq.com.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (52130403); The National Natural Science Foundation of China-Shandong Joint Fund (No. U1806208); Fundamental Research Funds for the Central Universities (N2001033); Liaoning Province Centralized Guided Local Science and Technology Development Funding Program Projects (2023JH6/100100050)

air spacers were selected as the deck materials. Then, 12 charging structure solutions were designed for numerical simulation with respect to the air deck length ratio, and the relationships between the charging structure and the evaluation indexes (such as the back impact effect, boulder yield, peak particle velocity of free surface and peak effective stress) were obtained. The results show that the peak particle velocity of the free surface and the peak effective stress gradually decrease with the increase of the air deck length ratio. The back impact effect is obvious and the back row of holes may collapse when the air deck length ratio is less than or equal to 30.5%. There is a risk that the boulder yield increases when the air deck length ratio is greater than or equal to 45.3%. The optimal air deck length ratio is 44.2%. The deep hole blasting tests show that the boulder yield of the optimized charge structure is 7.1%, and the back impact effect has been effectively controlled.

Key words: large-diameter & deep-hole blasting; charge structure; numerical simulation; boulder yield

大直径深孔爆破落矿技术是 20 世纪采矿技术发展的重要成果,于 1975 年在加拿大国际镍公司 Levack 矿首次成功使用,由于其具有落矿效率高、成本低、安全性好等优点,被广泛应用于厚大矿体回采^[1]。我国于 1977 年开始大直径深孔爆破落矿技术研究,于 1984 年在凡口铅锌矿成功试验了大直径深孔球状药包爆破落矿工艺技术^[2],此后陆续在草楼铁矿、罗河铁矿、铜绿山铜铁矿、安庆铜矿、冬瓜山铜矿、凤凰山铜矿、沂雨沟金矿、柿竹园钨锡钼铋矿、大红山铜矿、大姚铜矿等地下矿山进行推广应用。装药结构对大直径深孔爆破落矿效果具有重要影响作用,按炸药装入炮孔内的集中程度分为连续装药与间隔装药^[3]。连续装药方式作业高效方便,但存在爆破冲击波峰值压力较高,爆破粉碎区能量消耗较大,导致岩石过度破碎和爆破后大块率较高;间隔装药可以通过调整炮孔内炸药能量的分布来提高爆破能量利用率,改善爆破效果,但合适的空气间隔比例难以确定^[4]。开展大直径深孔爆破落矿装药结构的优化研究,设计合理的装药结构,准确控制爆破能量分布是大直径深孔爆破落矿技术亟待解决的关键难题。许多学者以理论分析、爆破试验和数值模拟等手段,研究不同装药结构对炸药破岩作用的影响^[5]。刘优平用 LS-DYNA 数值分析软件对 6 种不同装药结构的大直径深孔爆破过程进行建模计算^[6],结合爆破破岩机理及 Mises 屈服理论,确定了大直径深孔爆破的最佳炮孔装药结构,将确定的最优方案应用于爆破工程实践,取得较好的爆破效果。刘鹏程通过理论分析和模拟试验发现空气间隔装药可以降低爆破压力峰值、延长爆破作用时间^[7],而调整装药间隔长度,可以加强对爆破作用控制,改善爆破效果。曹寄梅通过现场试验研究^[8],发现采用孔底充填缓冲吸能材料,其减震率达到 3.23% ~ 35.19%。朱红兵确定了炮孔内一维应力变化历程及时空分布^[9],理论定量确定了梯段爆破中合理的空气间隔比例。李章超利用 JKSimBlast 分析了空气

间隔长度、中间间隔位置对爆破大块率的影响^[10],确定最佳间隔长度 2 m 与最佳间隔位置距离孔口 11.5 m,现场试验表明,与连续装药相比,优化后的装药结构爆破后大块率平均降低 9.24%。李宗楠利用 ANSYS/LS-DYNA 从计算模型的应力、应变及部分质点的力学参数变化等方面系统地介绍了间隔装药爆破技术的优越性^[11]。

爆破数值模拟方法具有快速、低成本、可视化的优点,被广泛用于分析岩体爆破机理和优化回采爆破参数。基于此,本文以西藏中凯矿业帮中矿区为工程依托,运用 LS-DYNA 模拟大直径深孔爆破落矿过程中的损伤演化规律,分析不同装药结构对爆破后冲作用、大块率、自由面质点振动峰值速度以及峰值有效应力的影响,确定采场最优爆破落矿装药结构,并进行现场爆破试验验证。

1 工程概况

帮中矿区位于西藏林周县 355° 方向,直线距离 44 km,属旁多乡管辖。矿区为高山深切区,海拔在 4400 m 以上,相对高差大,地形坡度较大,地势陡峭,矿体工程控制标高 4407 ~ 4773 m。矿山主要开采对象为 Zn-1 主矿体。矿体走向为 NNW-SSE,走向长 2.4 km,倾角 77°,平均厚度 30.95 m。矿床围岩岩石类型简单,矿体上盘围岩为斑岩体,矿体下盘围岩为角岩和板岩,矿体主要岩性是角岩,部分为斑岩。矿体下盘围岩稳固性相对较差,上盘围岩稳固性好。采用分段凿岩阶段空场嗣后充填法,大直径深孔爆破落矿技术进行采场落矿,采矿方法见图 1;矿块垂直走向布置,矿块高度 56 m,矿块长度为矿体厚度,矿块宽度 12.5 m。阶段空场嗣后充填法将大幅提高矿山的生产能力和效率,但同时也对其回采爆破提出了更高要求,当前矿山采用 3 m × 3 m (排距 × 孔距)的孔网参数,采用 T-150 潜孔钻机钻凿下向垂直深孔,钻孔直径 165 mm,采用空气间隔装药结构,空气间隔长度比例为 24.2%,临爆区炮

孔塌孔、堵孔问题严重,严重影响生产效率;确定最优大直径深孔爆破装药结构,减少爆破后冲作用和大块率对实际生产有重要经济意义。

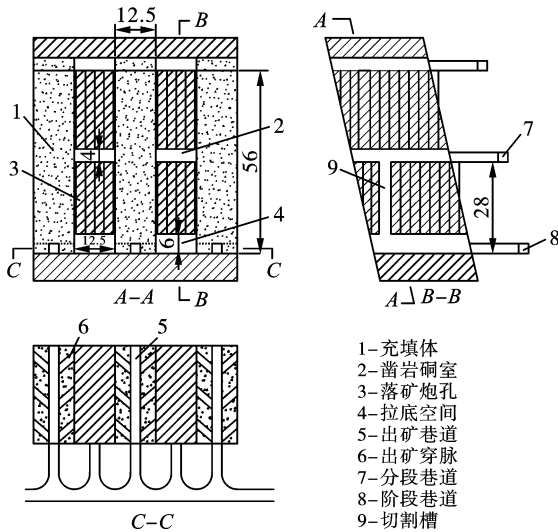


图1 阶段空场嗣后充填采矿法示意图(单位:m)

Fig. 1 Schematic diagram of open stope with subsequent filling mining method(unit:m)

2 大直径深孔爆破落矿过程数值计算

2.1 大直径深孔爆破落矿装药结构设计

保证堵塞长度不变,结合矿山使用的药卷尺寸(药卷直径140 mm,长度40 cm),本文设计了以空

表1 不同装药结构方案的空气间隔长度比例

Table 1 Proportion of air deck length for different charging structure schemes

方案编号	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5	方案6	方案7	方案8	方案9	方案10	方案11	方案12
空气间隔长度比例/%	18.9	30.5	38.9	44.2	45.3	47.4	24.2	36.8	46.3	51.6	53.7	55.8

2.2 大直径深孔间隔装药数值模型

用ANSYS/LS-DYNA分别对设计的12种装药结构进行爆破模拟,根据矿山实际情况,按照1:1的比例建立长×宽×高分别为6 m×6 m×22 m的单孔三维模型,炮孔模型直径165 mm,炸药模型直径140 mm,其装药结构根据2.1节确定的方案进行建模,自由面采用自由边界建模,其余边界均设置为无反射边界,数值模型如图3所示,共产生193 6000个单元。炸药、堵塞和空气采用欧拉网格建模,而岩石材料采用ALE算法中的拉格朗日网格建模,采用流固耦合方法进行计算。流体域位于模型中央,尺寸为2 m×2 m×22 m,炸药及堵塞采用初始体积分数法建模。通过试算发现,当计算时长达到6 ms之后,爆破引起的围岩损伤基本不变,故设置计算时长6 ms。

气间隔长度比例为变量的12种装药结构方案,装药结构具体参数如图2所示;12种装药结构的空气间隔长度比例见表1,由表1可知,12种装药结构方案的空气间隔长度比例介于18.9%~55.8%之间。

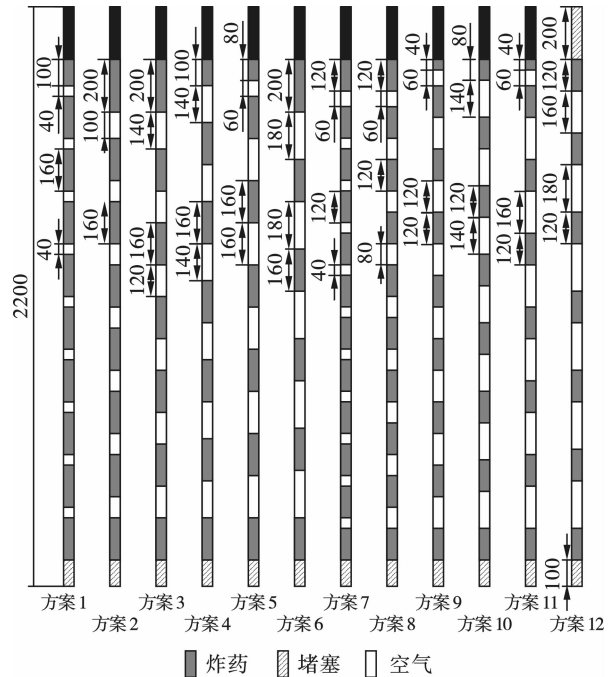


图2 空气间隔装药结构示意图(单位:cm)

Fig. 2 Schematic diagram of air decking charging structure(unit:cm)

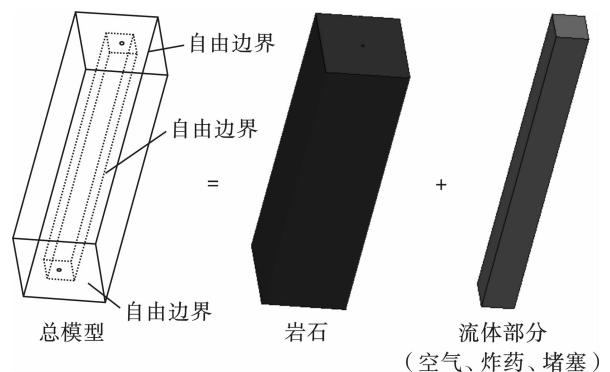


图3 装药结构数值模型

Fig. 3 Numerical model of charge structure

2.3 数值模型材料参数

2.3.1 岩石RHT模型参数

LS-DYNA中有三种损伤本构模型来模拟岩体

的爆破损伤: Holomquis-Johnson-Cook (HJC) 模型、Riedel-Hiermaier-Thoma (RHT) 模型和 JH 系列模型^[12]。与其他模型相比,RHT 模型能够表征岩石在动态载荷下的拉伸和压缩损伤演化,故本文选用

RHT 模型用于深孔爆破装药结构优化数值计算。根据矿山岩石力学实验结果,得出岩石 RHT 模型参数如表 2 所示。

表 2 岩石 RHT 模型参数
Table 2 Rock RHT model parameters

$\rho_0 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	f_c / MPa	EPSF	B_0	B_1	α_0	G / GPa	T_1 / GPa	T_2 / GPa
4080	121.37	2	1.68	1.68	1.0	18.81	53.64	0
P_{crush} / MPa	N	P_{lock} / GPa	F_s^*	A_1 / GPa	A_2 / GPa	A_3 / GPa	F_t^*	Q_0
40.51	0.74	6	0.26	53.64	90.12	55.08	0.06	0.68
EOC/s ⁻¹	EOT/s ⁻¹	EC/s ⁻¹	ET/s ⁻¹	β_c	β_t	PTF	G_c^*	G_t^*
3.0E-5	3.0E-6	3.0E25	3.0E25	0.0104	0.0142	0.001	0.4	0.7
D_1	D_2	EPM	A_f	N_f	XI	N_p	A	B
0.04	1	0.01	1.6	0.61	0.5	3	2.47	0.05

2.3.2 炸药参数

炸药采用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型模拟,爆炸过程中其压力和比容关系采用如 JWL 方程来描述

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

式中: P 为压力; V 为相对体积; E_0 为初始比内能;参数 A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为试验确定的常数。根据矿山采用的 2# 岩石乳化炸药具体参数,得出本文所用炸药的各项参数见表 3。

3 大直径深孔装药结构优化

3.1 数值计算结果

以装药结构方案 4 作为典型案例,对爆破过程不同时刻 A-A 截面的岩石损伤云图进行详细解析。由图 4 可知,当 $t = 0.5 \text{ ms}$ 时,岩石由于受到冲击波作用,在炮孔周围形成压碎区; $t = 1.0 \text{ ms}$ 时,压缩应力波在自由面产生反射形成拉伸波,造成自由面附近岩石的拉伸片落;此后,应力波在炮孔与自由面之间往复循环拉压震荡,造成岩石的进一步损伤。

表 3 2# 岩石乳化炸药参数

Table 3 Parameters of 2# rock emulsion explosive

密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	爆速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	P_{CJ} / GPa	A / GPa	B / GPa	R_1	R_2	ω	E_0 / GPa
1.18×10^3	4.2×10^3	9.55	293.9	21.73	6.366	2.152	0.207	3.14

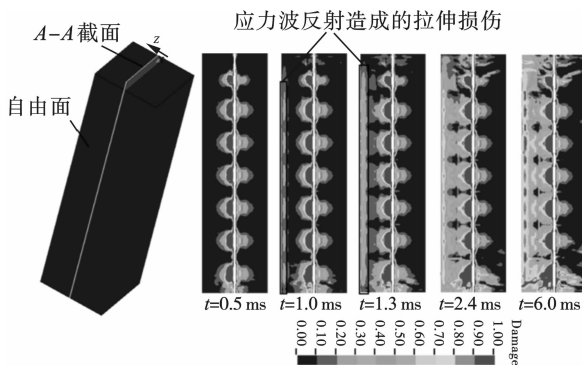


图 4 方案 4 爆破数值模拟损伤云图

Fig. 4 Numerical simulation damage cloud map of blasting in Scheme 4

不同装药结构方案的 A-A 截面岩石最终损伤云图见图 5。图 5 表明,不同装药结构所形成的岩石

爆破损伤范围分布不同,且炮孔至自由面间的岩石损伤明显大于另一侧,这说明自由面对降低爆破大块率具有重要作用。王卫华研究得出^[13],采用 RHT 模型进行岩石爆破数值模拟研究时,当岩石损伤水平高于 0.5 时,即可认为该处岩石被完全破碎。故本文确定损伤阈值 Damage 为 0.5,当单元损伤值 Damage 低于 0.5 时,即认为该处岩石不能得到有效破碎,图 5 中实线框用以表征可能产生大块的区域 (Damage < 0.5, 且面积大于 0.8 m^2),虚线框用以表征爆破后冲作用对临爆区炮孔的损伤。由图 5 可以发现,随着空气间隔长度比例增加,其可能产生大块区域的面积增加,同时爆破后冲作用对后排炮孔的损伤逐渐降低,当空气间隔长度比例小于 30.5% (方案 1、2、7) 时,后排炮孔由于受到爆破后冲作用的影响,出现较大面积的损伤区,存在塌孔风险,可

能造成后排炮孔报废,其中方案7为矿山现行装药结构,数值模拟结果与实际结果一致,进一步验证了数值模拟结果的可靠性;当空气间隔长度比例大于45.3%(方案5、6、10、11、12),可能产生大块区域的面积增加较为明显。故合理的空气间隔长度比例介于36.8%到46.3%之间(方案3、4、8、9),此时既能降低爆破后大块率,又可减少爆破后冲作用。

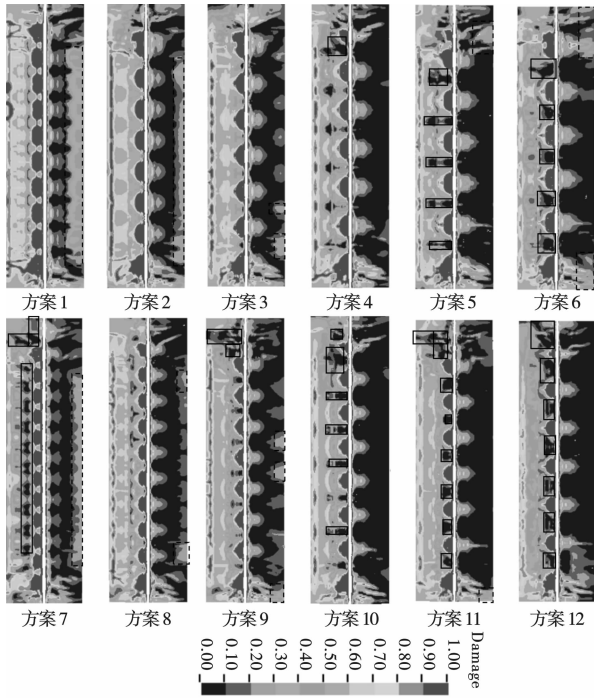


图5 各方案爆破数值模拟最终损伤云图($t = 6$ ms)
Fig. 5 Final damage cloud map of blasting numerical simulation for each scheme($t = 6$ ms)

3.2 大直径深孔爆破落矿参数优化

自由面质点振动速度是不同爆破参数条件下自由面处的爆破能量传播特征^[14]。在自由面上自上而下选取距炮孔中心线1.5 m处的7个监测点,监测点间距均为2.75 m;图6为不同方案下监测点振动峰值速度曲线,由图6可知,随着空气间隔长度比例的增加,其监测点振动峰值速度逐渐下降。由前文分析可知,方案3、4、8、9均能使爆破区域得到有效破碎,爆破后产生较少的大块,而方案3、8监测点振动峰值速度明显大于方案4、9,说明方案3、8爆破能量过大。且由图6可知,方案4监测点峰值速度波动幅度比方案9小,介于5.74 m/s到6.56 m/s之间,说明方案4爆破能量分布较均匀。

图7为不同方案下监测点有效应力峰值曲线,由图7可知,随着空气间隔长度比例的增加,其监测点峰值有效应力总体呈现逐渐下降趋势。且方案4监测点峰值有效应力波动幅度比方案9小,说明方

案4爆破能量分布更均匀。

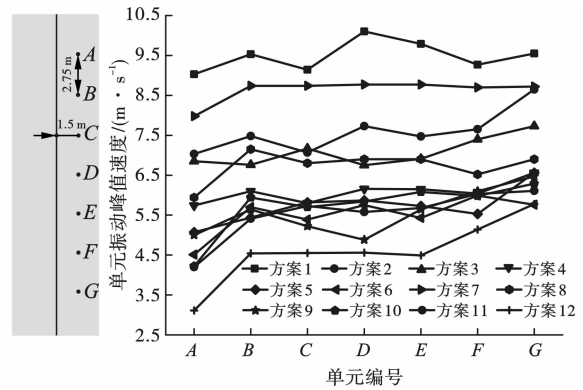


图6 不同方案下监测点振动峰值速度
Fig. 6 Peak vibration velocity of monitoring points under different schemes

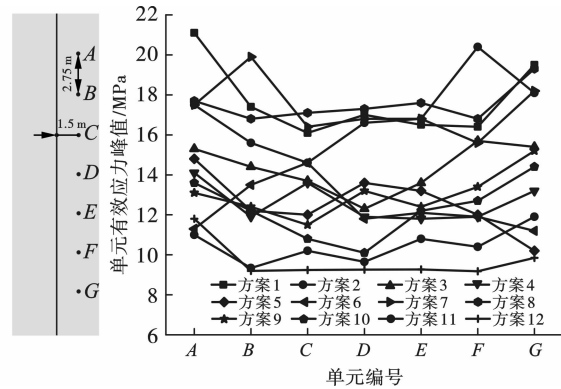


图7 不同方案下监测点有效应力峰值
Fig. 7 Effective stress peak value of monitoring points under different schemes

综上所述,考虑爆破后冲作用、大块率、自由面质点振动峰值速度以及峰值有效应力对爆破效果的影响,最终选取方案4为帮中矿区采场爆破落矿的装药结构。

4 大直径深孔爆破落矿现场试验

为验证优化后的装药结构爆破结果,在帮中矿区开展现场爆破试验。试验地点选择在该矿山4600 m中段5号采场进行,5号采场矿房凿岩洞室长为40 m,矿体平均厚度为30 m,倾角71°。空气间隔使用木棍(直径140 mm,长度1.4 m),采用混凝土塞进行孔底堵孔,河沙填塞,相邻炮孔药包交错布置,以降低爆破后矿石大块率,由图2所示装药结构,经计算可知,方案4的单孔装药量为192.4 kg。侧向崩矿孔口采用非电半秒导爆管雷管延时起爆方式,段间延时0.25 s(1~10段,0~2.25 s)。采用非电半秒导爆管雷管延时起爆方式,因本次爆破炸药量大,现有导爆管段别难以实现多孔分段起爆,故起

爆网路采用“排间延时起爆”,即将整个爆破区域构成起爆网路,起爆顺序为分区中间孔先爆,呈“VV”形起爆,边排孔滞后,3个孔为一段别,每组网路采用1~10段非电半秒导爆管雷管串联式联接,起爆时先引爆靠近采空区的网路,依次排序。

通过现场统计,优化的装药结构爆破后大块率为7.1%,且临爆区炮孔未出现由后冲作用造成的坍塌堵塞现象。利用三维激光扫描仪对爆后采空区进行扫描,扫描结果如图8所示,在该爆破参数条件下爆破对二步回采矿体损伤较小,边界面基本完整,采场下部出现少量超挖,但满足施工要求,空区形态与设计采场形态基本吻合,进一步验证优化的深孔爆破装药结构更加合理。

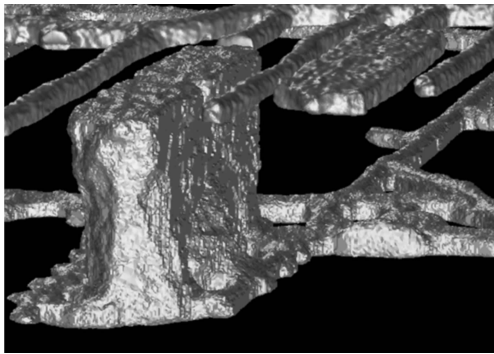


图8 现场爆破试验空区形态扫描结果

Fig. 8 Scanning results of stope morphology in field blasting test

5 结论

通过采用数值模拟方法研究了不同装药结构下的岩石爆破过程,并对优化后装药结构爆破现场实践结果进行了介绍,得到了以下结论:

(1)空气间隔长度比对爆破能量的分布与爆破效果有明显的影响,结合矿山具体情况,确定合理的空气间隔长度比对提升爆破效果具有重要积极作用。

(2)标定了矿山RHT模型参数,提出了利用爆破引起的围岩损伤分布云图、自由面质点Von Mises有效应力及振动速度优化深孔爆破装药结构的方法。

(3)采用ANSYS/LS-DYNA有限元分析软件,对设计的12种炮孔装药结构进行了数值模拟,得出空气间隔长度比例为44.2%的装药结构能量分布最均匀,大块率低,爆破后冲作用小;现场工业试验证明优化后装药结构可改善爆破效果,大块率为7.1%且后冲作用得到有效控制。

参考文献 (References)

- [1] 孙忠铭. 地下金属矿山大直径深孔采矿技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2014.
- [2] 王善元. 我国大直径深孔采矿技术的研究与发展趋势[J]. 矿业研究与开发,1998(3):10-13.
- [2] WANG Shan-yuan. Study on large-diameter longhole mining technology and its trends of development[J]. Mining Research and Development, 1998(3):10-13. (in Chinese)
- [3] 薛若衡. 装药结构的分类及其应用[J]. 露天采矿, 1991(2):16-20.
- [3] XUE Ruo-heng. Classification and application of charge structure[J]. Opencast Mining Technology, 1991(2):16-20. (in Chinese)
- [4] 赵 春. 空气间隔装药技术在露天煤矿爆破开采中的应用[J]. 能源技术与管理,2022,47(1):61-62.
- [4] ZHAO Chun. The application of air interval charging technology in open-pit coal mine blasting mining[J]. Energy Technology and Management, 2022, 47(1):61-62. (in Chinese)
- [5] 陈 震. 铜绿山矿井下采场深孔爆破参数优化与安全控制技术数值模拟研究[D]. 长沙:中南大学,2013.
- [5] CHEN Zhen. Numerical simulation research of deep-hole blasting parameters optimization and safety control in Tonglushan Mine underground stopes [D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese)
- [6] 刘优平,龚 敏,黄刚海. 深孔爆破装药结构优选数值分析方法及其应用[J]. 岩土力学,2012,33(6):1883-1888.
- [6] LIU You-ping, GONG Min, HUANG Gang-hai. Numerical analysis method for optimizing charging structure of deep-hole blasting and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6):1883-1888. (in Chinese)
- [7] 刘鹏程. 地下大直径深孔空气间隔装药结构探讨[J]. 矿业研究与开发,1994(4):24-28.
- [7] LIU Peng-cheng. Discussion on the charge structure of underground large diameter and deep hole air spacer[J]. Mining Research and Development, 1994(4):24-28. (in Chinese)
- [8] 曹奇梅,赵卫东,刘朝红,等. 深孔爆破孔底充填缓冲吸能材料减震试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2010,20(4):120-123.
- [8] CAO Ji-mei, ZHAO Wei-dong, LIU Chao-hong, et al. Experimental study on shock vibration attenuation of endergonic cushioning materials filled at the bottom of the deep-hole blasting hole [J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(4):120-123. (in Chinese)
- [9] 朱红兵. 空气间隔装药爆破机理及应用研究[D]. 武

- 汉:武汉大学,2006.
- [9] ZHU Hong-bing. Study on the mechanism and application of air-decking blasting [D]. Wuhan: Wuhan University, 2006. (in Chinese)
- [10] 李章超,徐 帅,李金平,等. 基于 JKSimBlast 的露天台阶爆破空气间隔装药结构优化研究 [J]. 爆破, 2023,40(1):50-56,68.
- [10] LI Zhang-chao, XU Shuai, LI Jin-ping, et al. Optimization research of air decking charge structure for bench blasting based on JKSimBlast [J]. *Blasting*, 2023, 40(1): 50-56,68. (in Chinese)
- [11] 李宗楠,余 斌,吴春平. 某露天矿间隔装药 ANSYS/LS-DYNA 数值分析及应用 [J]. 有色金属(矿山部分),2014,66(6):79-83.
- [11] LI Zong-nan, YU Bin, WU Chun-ping. ANSYS /LS-DYNA analysis and application of interval charge blasting in an open-pit mine [J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2014,66(6):79-83. (in Chinese)
- [12] WANG Hao-chen, WANG Zhi-liang, WANG Jian-guo, et al. Effect of confining pressure on damage accumulation of rock under repeated blast loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021(3):103961.
- [13] 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.
- [13] WANG Wei-hua, LIU Yang, ZHANG Li-wei, 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. (in Chinese)
- [14] 安 龙,张家华,李元辉,等. 急倾斜薄矿脉夹制作用下中深孔爆破模拟与参数优化 [J]. 东北大学学报(自然科学版),2022,43(4):567-574.
- [14] AN Long, ZHANG Jia-hua, LI Yuan-hui, et al. Simulation and parameters optimization of medium deep hole blasting in steeply narrow vein mine under confinement [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2022,43(4):567-574. (in Chinese)

英文编辑:陈东方

(上接第 26 页)

- [12] HUANG J, ZHANG G, LUO Y, et al. Study on timing sequence control fracture blasting excavation of deep rock masses with filled joints [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1):21056.
- [13] TIAN X, Tao T, Liu X, et al. Calculation of hole spacing and surrounding rock damage analysis under the action of in situ stress and joints [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1):22331.
- [14] 杨仁树,苏 洪. 爆炸荷载下含预裂缝的裂纹扩展实验研究 [J]. 煤炭学报, 2019,44(2):482-489.
- [14] YANG Ren-shu, SU Hong. Experimental study on crack propagation with pre-crack under explosive loading [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(2):482-489. (in Chinese)
- [15] LI C X, YANG R S, Li Q, et al. Experiment on blasting damage and dynamic caustics of jointed medium [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022,259:108143.
- [16] LI C X, YANG R S, ZUO J J, et al. Influence of open joints on blasting damage and crack propagation of PMMA [J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2023,2023:1-12.
- [17] LI C X, KANG Y Q, ZHANG Y T, et al. Analyze the influence of explosion stress wave on the dynamic fracture of PMMA plates with different curvature radius defects [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2022,234:111278.
- [18] 肖同社,杨仁树,庄金钊,等. 节理岩体爆生裂纹扩展动态焦散线模型实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(2):159-164.
- [18] XIAO Tong-she, YANG Ren-shu, ZHUANG Jin-zhao, et al. Experimental study on dynamic caustics model of explosive crack propagation in jointed rock mass [J]. *Explosion and Shock*, 2007,27(2):159-164. (in Chinese)
- [19] ZHANG Y, YANG R, CHEN C, et al. Analysis of the blasting effect of strip cartridge position on jointed rock mass [J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022,2022:1-11.
- [20] 岳中文,郭 洋,王 煦,等. 空孔形状对岩石定向断裂爆破影响规律的研究 [J]. 岩土力学, 2016,37(2):376-382.
- [20] YUE Zhong-wen, GUO Yang, WANG Xu, et al. Study on the influence of void shape on directional fracture blasting of rock [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(2):376-382. (in Chinese)
- [21] XU P, YANG R S, GUO Y, et al. Investigation of the blast-induced crack propagation behavior in a material containing an unfilled joint [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(13):4419.

英文编辑:陈东方