

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.01.010

地下金属矿山扇形孔爆破装药结构优化研究^{*}

贾 贝^{1,2}, 熊赞民^{1,2}, 郭 雷^{1,2}, 王 潇³, 齐路路^{1,2}

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038;

2. 深部金属矿采动地压灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室, 北京 100038;

3. 中国矿业大学(北京), 北京 100083)

摘 要: 为了解决传统地下扇形孔爆破技术中存在的孔口矿石过度破碎与孔底装药不足导致的大块遗留问题, 基于利文斯顿爆破漏斗理论, 提出了一种适用于扇形孔的装药结构优化方案。基于 LS-DYNA 有限元软件开展数值模拟, 确立了最优的扇形孔孔底距, 通过分析连续装药与间隔装药岩石损伤区的分布特征, 揭示了间隔装药在控制损伤范围方面的优势, 并以现场试验进行了验证。试验结果表明: 间隔装药结构与连续装药结构的爆破破碎效果基本相同, 但间隔装药结构在孔口附近能够有效降低岩石粉碎率, 从而减少粉矿化现象; 采用优化装药结构后提高了采场的爆破效果, 其中爆破块度 D_{20} 和 D_{80} 分别达到 7.12 cm 和 18.52 cm, 最大块度控制在 28.49 cm 以内, 且小于 5 cm 的粉矿占比极少。

关键词: 中深孔爆破; 装药结构优化; 数值模拟; 爆破块度; 岩石损伤

中图分类号: TD235

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2026)01-0091-08

Optimization of Charge Structure for Fan-hole Blasting in Underground Metal Mines

JIA Bei^{1,2}, XIONG Zan-min^{1,2}, GUO Lei^{1,2}, WANG Xiao³, QI Lu-lu^{1,2}

(1. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China; 2. Key Laboratory of Ground Control Management Plan in Deep Metal Mine National Mine Safety Administration, Beijing 100038, China; 3. China University of Mining Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: This study develops an optimized fan-hole charging configuration grounded in Livingston's crater theory to resolve the persistent challenges of collar zone over-fragmentation and toe region under-charging in conventional underground fan-hole blasting operations, which frequently generate undesirable oversized fragments. Numerical simulations employing LS-DYNA finite element software were performed to optimize fan-hole toe spacing. Through comprehensive analysis of rock damage zone distribution characteristics under both continuous and decked charging conditions, this study demonstrates the superior efficacy of decked charging in damage control, with field experimental results providing conclusive validation. Experimental results demonstrate that while the spaced charging configuration achieves comparable fragmentation effectiveness to continuous charging, it significantly reduces rock pulverization near boreholes, thereby minimizing powder mineralization. Implementation of the optimized charging structure yields stope blasting fragments with D_{20} and D_{80} sizes of 7.12 cm and 18.52 cm, respectively, with maximum block size rigorously

收稿日期 (Date of reception): 2025-07-23

网络首发日期 (Published online): 2025-10-20

作者简介: 贾 贝 (1993-), 男, 河北石家庄人, 博士、高级工程师, 主要从事矿山爆破研究与咨询工作, (E-mail) Jiab@enfi.com.cn。

基金项目: 国家“十四五重点研发计划项目” (2023YFC2907201); 中国五矿集团有限公司科技专项计划“揭榜挂帅”项目 (2025ZX01)

About the author: JIA Bei (1993-), male, born in Shijiazhuang city, Hebei province, Ph. D, Senior Engineer, mainly engaged in mine blasting research and consulting, (E-mail) Jiab@enfi.com.cn.

Fund Programs: National Key R&D Program of the 14th Five-Year Plan (2023YFC2907201), China Minmetals Corporation “Unveiling the List and Appointing the Best” Science and Technology Special Project (2025ZX01)

constrained below 28.49 cm and minimal occurrence of sub-5 cm fines.

Key words: medium-deep hole blasting; optimization of charge structure; numerical simulation; blast rock size; rock damage

爆破作业作为矿山开采的重要环节,其效果直接影响矿山的生产效益和安全^[1,2]。扇形孔爆破因其凿岩工作量小、布孔灵活性高、炸药消耗低等特点,在金属非金属矿等多种矿产资源开采中得到广泛应用^[3]。然而,传统的扇形孔爆破孔口与孔底间距差异大,孔口矿石装药密度过高易出现块度过小甚至粉矿化的现象,而其孔底因装药不足易产生大块,严重影响出矿效率和后续破碎成本^[4]。

针对以上难题,国内外学者对其进行了广泛的研究。一些研究者通过理论分析,探索炸药爆炸机制和爆轰波传播规律,结合现场矿岩特性,推导出合理的采场爆破参数^[5];此外,部分学者利用大量现场数据对采场矿石大块产生机制进行了分析,通过开展爆破漏斗试验的方法,提出了适用于采场的孔底距、排间距等孔网参数^[6,7]。随着科技的快速发展,数值模拟技术凭借其高效性、高安全性和全面性特点,逐步成为爆破参数优化研究的热点。学者们通过相关数值模拟软件对爆破孔网参数的优化、岩石破碎效果的预测以及炮孔起爆延期的设置等领域进行了深入研究^[8-11],并取得了丰富的成果。

尽管现有的研究在孔网参数优化方面取得了一定成果,但大多数研究集中于孔底距和排间距的优化,但较少对扇形孔装药结构优化进行系统研究。因此,以优化装药结构为核心,利用数值模拟的方法确定扇形孔最佳孔底距,通过对比分析不同装药结

构下的爆破效果,提出了一种基于利文斯顿爆破漏斗理论的扇形孔装药结构优化方法,为提高爆破效率和矿石质量提供了理论依据和实践指导。

1 模拟试验方案制定与模型建立

1.1 方案制定

弓长岭井下矿位于辽阳市弓长岭区,矿体呈层状、似层状产出,总体走向 NE,倾向 NW,倾角 $60^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 。矿体主体为磁铁石英岩,含铁品位 $35\% \sim 45\%$,且随开采深度增加品位呈正向富集趋势,但较深部采场在开采过程中出现了炸药单耗高、大块率高等问题。

为了优化采场爆破参数,弓长岭井下矿在与采场岩性相似的巷道内开展了一系列爆破漏斗试验,其试验结果为:最佳炮孔埋深为 0.56 m、最佳爆破漏斗半径为 0.44 m、同段爆破漏斗试验最佳孔底距为 0.73 m。

目前,矿山采用 76 mm 孔径的扇形炮孔,以粉状乳化炸药实施耦合装药爆破。由利文斯顿爆破漏斗理论推出采场的孔底距为 1.4 ~ 1.6 m,排间距确定为 1.6 m。然而,由于现场条件限制,无法进行中深孔爆破工业试验,进一步优化孔网参数和爆破装药结构。因此,以优化爆破装药结构为目的,在排间距保持不变的情况下,对扇形孔孔底距和爆破装药结构进行数值模拟,试验模型方案如表 1 所示。

表 1 数值模拟试验方案
Table 1 Numerical simulation test scheme

方案编号 Plan number	孔底距 Bottom distance	装药结构 Charge structure
1	1.40 m	
2	1.50 m	连续装药 Continuous charging
3	1.60 m	
5	模拟得到适合孔底距	连续装药 Continuous charging
6	The simulated obtained suitable bottom hole distance	间隔装药 Deck charging

1.2 间隔装药优化方法

扇形孔间隔装药结构设计多以现场经验为准,通常间隔段长度设置为装药段长度的 0.5 ~ 1.5 倍。为进一步降低采场的大块率与粉尘浓度,本研究基于利文斯顿爆破漏斗理论,以变化的相邻炮孔中心距离为变量,反推各段炮孔对应的装药长度,以空气

作为间隔材料,优化扇形孔装药结构。具体研究步骤如下:

(1) 根据扇形孔的空间分布特征,将其分为两类:第一类为孔底接近采场顶板的炮孔,第二类为孔底接近采场侧壁的炮孔。

(2) 按照炮孔长度进行分段计算:对于第一类

炮孔,从采场顶板开始,每2 m的垂直距离划分为一段;对于第二类炮孔,从采场侧壁开始,每1 m的水平距离划分为一段,如图1所示。

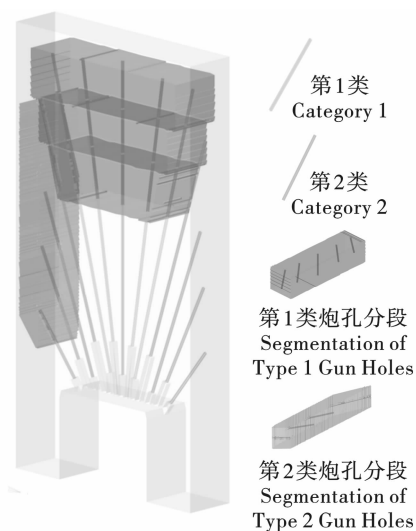


图1 炮孔分类示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gun hole classification

(3)确定炮孔各段中心的水平距离平均值。针对 N 个第一类和 M 个第二类炮孔的第 i 段的中心水平距离 $l_{i,N-1}$ 、 $l_{i,M-1}$ 进行统计,并分别计算其平均值 L_i 。

(4)对中心距离进行适当修正。当某段中心距离 L_i 小于0.5倍孔底距时,将其修正为 $2L_i$,以代表该段位间隔一个炮孔的中心水平距离平均值。

(5)依据利文斯顿爆破漏斗理论,计算各段对应的装药长度,计算公式为

$$l_i = \frac{4Q_0 L_i^3}{\rho \pi d^2 L_0^3} \quad (1)$$

式中: L_i 为采场扇形炮孔各段中心的水平距离平均值,m; L_0 为爆破漏斗试验的最佳孔间距,m; Q_0 为爆破漏斗试验的单孔装药量,kg; ρ 为扇形炮孔的炸药密度,kg/m³; d 为扇形炮孔的直径,m。

1.3 数值模型的建立

利用 ANSYS/LS-DYNA 软件在 g-cm- μ s 的单位制下对采场扇形孔及其相邻矿体进行建模,选取采场第一排中部的3个扇形孔作为模拟对象,并以实际比例进行等比例建模,所建模型如图2所示。模型的长度为300 cm、宽度为400 cm、高度为1200 cm,其中心炮孔的垂直距离为1100 cm。炮孔的孔径为7.6 cm,孔底距根据表1方案调整,且三个炮孔的孔底需保持在同一水平。为了降低模型计算时长,选取以中心炮孔为中心1/2大小的对称模型作为实际计算的有限元模型。

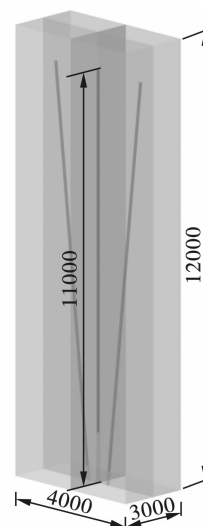


图2 扇形孔等比例模型(单位:mm)

Fig. 2 Model of fan-shaped holes(unit:mm)

有限元模型计算采用流固耦合算法,包含岩石、炸药、堵塞和空气等4部分,其中岩石单元采用拉格朗日单元、其他三个部分采用 ALE 单元。所有方案计算模型的对称面设置为对称约束边界,模型前方和底部设置为自由边界,其余面均设置为透射边界,以减少波反射对模拟结果的影响。图3为孔底距为1.6 m的有限元计算模型,模型矿体以炮孔所在平面为中心被分为两部分,其中第1部分拥有2个自由面,第2部分拥有1个自由面。

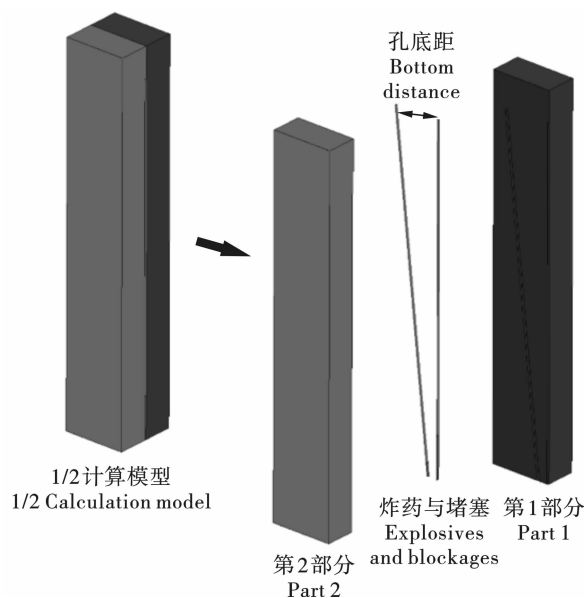


图3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

文献[12]研究表明当模拟激发波长至少能够包含6~12个单元时,可有效避免波形失真。最短波长的估计值由波传播的最低速度(瑞利波速度)

除以最大频率给出,其中岩石的瑞利波速度约为 2000 m/s,爆炸应力波的频率通常不超过 2000 Hz,则最短波长可确定为 1 m,因此最大单元尺寸可计算为 16.67 cm。

图 4 为炮孔附近模型网格划分方式示意图,其中矿体主要单元网格尺寸为 5 cm,其最大网格出现在矿岩与炮孔网格过渡段,尺寸约为 7 cm;炮孔网格单元尺寸相对较小,其中最小单元网格尺寸为 1.2 cm。

1.4 数值模型参数选取

(1)本研究使用 * MAT_RHT 来模拟岩体行为和动态响应,这是一种用于混凝土和岩石等脆性材料的高级损伤塑性模型,其在爆破模拟中得到了广泛应用。铜铁矿的矿体物理力学性质如表 2 所示,

表 2 矿体的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of ore body

名称 Name	密度 Density	泊松比 Poisson's ratio	动态抗压强度 Dynamic compressive strength	动态抗拉强度 Dynamic tensile strength
铁矿 Iron mine	2730 kg/m ³	0.3	121.1 MPa	12.6 MPa

(2)乳化炸药使用 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 进行建模,采用 Jones-Wilkens-Lee (JWL) 状态方程来模拟乳化炸药的爆炸产物压力。JWL 状态方程在工程计算中被广泛应用,其方程如式(2)所示

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (2)$$

式中, P 为炸药爆炸产生的压力; A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为常数; V 为相对体积; E 为单位体积炸药爆炸产生的热能。

其物理力学性质接近于文献矿体,故岩体相关模型参数引用于此^[13]。

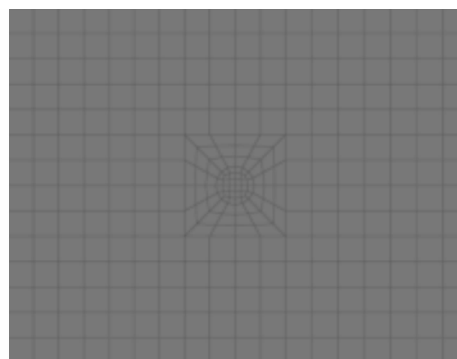


图 4 模型网格示意图

Fig. 4 Grid diagram of the model

(3)空气材料采用了 * MAT_NULL,其状态方程如式(3)所示

$$P' = C_0 + C_1 u + C_2 u^2 + C_3 u^3 + (C_4 + C_5 u + C_6 u^2) e \quad (3)$$

式中: P' 为压力;单位 e 体积空气的热能; u 空气材料的压缩系数; C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 和 C_6 为常数。

(4)堵塞材料采用了 * MAT_SOIL_AND_FOAM,其主要模型参数引用文献[14]。见表 3、见表 4。

表 3 炸药及其状态参数方程参数表

Table 3 Parameter table of explosive and its state parameter equation

密度 Density	爆速 Detonation velocity	JWL 状态方程参数 Parameters of JWL state equation					
		A	B	R_1	R_2	ω	E
750 kg/m ³	4000 m/s	276.2 GPa	8.44 GPa	5.2	2.1	0.5	3.87 GPa

表 4 材料及其状态参数方程参数表

Table 4 Parameter table of material and its state parameter equation

密度 Density	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E
1.29 e ⁻³ g/cm ³	0	0	0	0	0.4	0.4	0	0.025 GPa

2 数值模拟结果分析

2.1 孔底距模拟结果分析

炸药爆炸瞬间产生巨大的能量,当其产生的应

力波峰值大于矿岩的动态抗拉强度,对矿岩造成损伤破坏。为了确定扇形孔合适的孔底距,在爆破漏斗试验结果的基础上,选取了第 1 部分钻孔附近的 4 个单元 A 、 B 、 C 、 D 作为监测点,通过对比监测单元

的有效应力峰值和岩石动态抗压强度的大小,判断该单元的岩石破碎情况。图 5 展示了 4 个监测单元的具体位置,其中 *B* 测点位于两个炮孔孔底连线的中线上;*A* 测点距离孔底 10 cm,且与 *B* 测点处于同一水平;*C*、*D* 测点分别位于 *A*、*B* 测点的上方,具体高度为 0.25 倍的孔底距。

表 5 统计了不同方案各测点对应的有效应力峰值,其中方案 2 中各个监测点的应力-时间曲线如图 6 所示。由表 5 可知,方案 1 中的所有测点有效应力峰值均高于岩石的动态抗压强度,表明在此孔底距下,炸药爆炸不仅对孔间矿体造成破坏,同时对采场顶板也产生了显著破坏,这与实际工程要求不符;方案 2 中测点 *A*、*B* 有效应力峰值高于岩石的动态抗压强度,测点 *C*、*D* 有效应力峰值低于此强度,表明该方案下孔间矿体达到了较好的破坏效果,且采场顶板并未受到破坏;方案 3 中测点 *B*、*C*、*D* 有效应力峰值均低于岩石的动态抗压强度,此时虽然顶板

未被破坏,但 *B* 测点位置附近矿体易产生大块。综上所述,当孔底距设置为 1.5 m 时,既能保证孔底岩石均匀破碎,又能保持采场顶板稳定性。

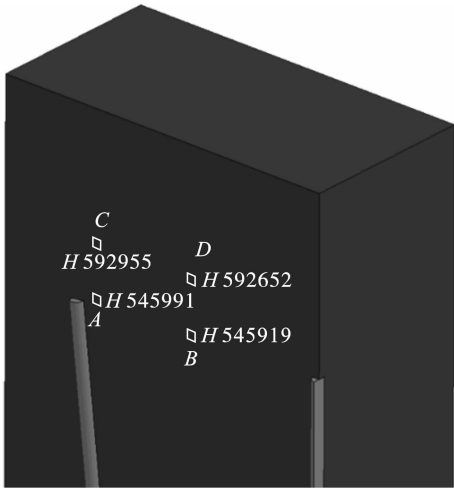


图 5 监测单元示意图
Fig. 5 Schematic diagram of monitoring unit

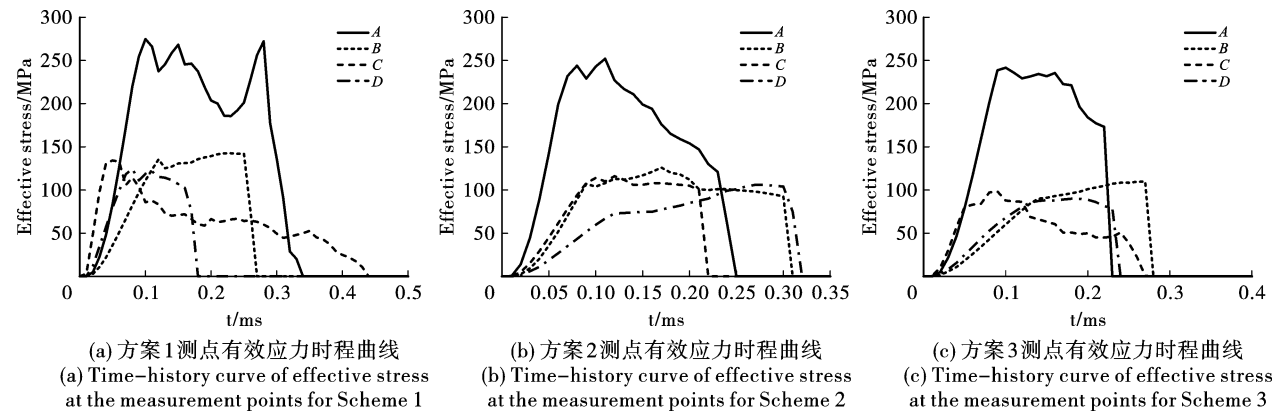


图 6 各方案测点有效应力时程曲线
Fig. 6 Equivalent stress time history curve of schemes

表 5 材料及其状态参数方程参数表
Table 5 Parameter table of material and its state parameter equation

方案编号 Plan Number	孔底距 Bottom distance	监测点 Monitoring point	有效应力峰值 Effective stress
1	1.40 m	<i>A</i>	274.8 MPa
		<i>B</i>	142.6 MPa
		<i>C</i>	134.2 MPa
		<i>D</i>	124.5 MPa
2	1.50 m	<i>A</i>	252.1 MPa
		<i>B</i>	126.7 MPa
		<i>C</i>	116.4 MPa
		<i>D</i>	106.2 MPa
3	1.60 m	<i>A</i>	241.6 MPa
		<i>B</i>	109.8 MPa
		<i>C</i>	98.3 MPa
		<i>D</i>	89.9 MPa

2.2 装药方式数值模型损伤分析

矿体的破碎是评估落矿效果的重要因素。有限元数值计算方法不能直观地描述矿体破碎程度,文献研究表明损伤水平高于 0.6 的单元可被认为是完全破碎的,当损伤水平高于 0.6 的单元被空白处理,剩余单元组成的岩体被认为是破碎的^[15,16]。

为研究不同装药结构下炮孔间岩石的破坏情况,可通过岩体破碎体积与相应部分体积的比值来评估岩体破坏水平。通过评估每个部分的岩体破碎比例,可获得岩体破坏的整体情况。为了更加直观评估剩余岩体的准确范围和完整性以及未破碎岩体的大小,选择了 3 个模型截面作为评价依据,其均布置在两炮孔之间,具体位置如图 7 所示。

截面 1 和截面 3 与相邻炮孔的距离均为 10 cm,且始终与对应炮孔的轴线保持平行,设置其为观察

截面的目的是评估炮孔相邻矿岩的破碎特征;截面 2 则由孔底中心线和孔口中心线构成,设置其目的是评估爆破后炮孔中间位置大块矿石出现情况。

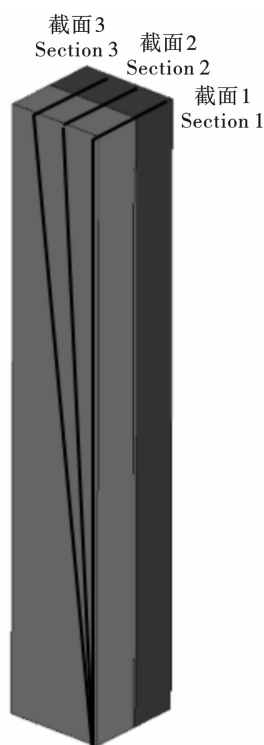


图 7 截面示意图

Fig. 7 Schematic diagram of cross-section

模型炮孔垂直高度为 11 m,孔底接近采场顶板,属于第一类炮孔;按照优化方法的步骤(2)、(3)所述,炮孔可分为 6 段且每段中心水平距离分别为 1.42 m、1.22 m、1.01 m、0.74 m、0.56 m 以及 0.40 m;模型孔底距为 1.6 m,按照步骤(4)所述,第 4~6 段炮孔中心距分别修正为 1.48 m、1.12 m、0.80 m,以代表该段位间隔一个炮孔的中心水平距离平均值;由系列爆破漏斗试验可知,爆破漏斗试验的最佳孔间距为 0.72 m、单孔装药量为 0.3 kg,根据公式(1)可得到各段对应装药长度分别为 1.75 m、1.10 m、1.00 m、2.00 m、1.00 m 以及 0.40 m。

图 8 中分别给出了孔底距为 1.6 m 时,连续装药方式和间隔装药方式的装药结构,可看出随着孔间距的减小,两个炮孔的装药量逐渐降低。

基于文献提出的岩体破碎比例统计方法^[15],通过 LS-PrePost 软件 Fringe Range 功能中的 Show 模块定量分析不同装药结构下的岩体破碎比例,结果如表 6 所示。由此可知,连续装药结构和间隔装药结构的总体岩体破碎比例分别为 43.61% 和 34.64%,其中第 1 部分岩体破碎比例分别为 70.58%、

63.34%,第 2 部分岩体破碎比例分别为 16.64%、5.94%。两种装药结构下岩石破碎主要发生于第 1 部分矿岩内,这是因为相比于第 2 部分,第 1 部分前侧为临空自由面,应力波在此面发生反射,矿岩在反射的应力波作用下更容易受到破坏;由于连续装药结构的装药量较大,其爆破后第 1 部分和第 2 部分矿岩的破碎程度更大。

图 8 分别给出了不同装药结构下各个部分和截面的破碎情况。由此可看出,爆破后两种装药方式孔底处均产生了裂纹,其基本延伸至自由面,形成一定的贯穿裂缝,表明此孔底距下两种装药结构均能达到良好的爆破效果。但与连续装药结构相比,采用间隔装药结构时,矿岩在截面 1 和截面 3 孔底位置的破碎程度较低,而在截面 2 孔底位置的破碎程度基本一致。这表明间隔装药结构在孔底位置产生的粉矿量更少。

两种装药结构在炮孔中部的破碎效果明显弱于孔口与孔底位置。采用间隔装药结构时,在截面 2 的炮孔中部位置的破碎程度略低于连续装药结构;而在截面 1 和截面 3 炮孔中部位置,两种装药结构的矿岩破碎程度基本相同。这表明间隔装药结构在炮孔中部位置产生的矿石块度相对较大,但考虑到炮孔中部位置的孔间距仅为 1 m 左右,此位置产生的大块矿石与整个采场的大块相比,尺寸并不突出,可忽略不计。

由图 8(a)可知,采用连续装药结构爆破后,第 1 部分孔口位置以上 3 m 范围内有大量的矿岩被粉碎,且第 2 部分孔口位置同样存在一定的粉碎区域。与之相比,由图 8(b)可发现,采用间隔装药结构爆破后,第 1 部分孔口位置的岩石破碎均匀,不存在大量的粉碎区域,其孔口位置以上 1~3 m 范围内矿岩破碎程度较低;第 2 部分孔口位置矿岩基本保存完整。

综上所述,两种装药结构爆破后整体破碎效果基本相同,均未在孔底位置产生大块,但相比连续装药结构,间隔装药结构炸药消耗量较少,且在孔口处矿岩的粉碎程度明显降低。见表 6。

3 现场试验

井下矿-425 m 水平采场采用连续装药实施爆破,其孔底距为 1.6 m、炸药单耗约为 1.41 kg/m^3 ,以原参数爆破后,采场大块率与粉尘浓度居高不下,典型爆破效果如图 9 所示。为了解决上述问题,采场以 1.5 m 为孔底距,按照上述方法优化装药结构,其炸药单耗降为 1.18 kg/m^3 ,典型效果如图 10 所示。图 11 展示了采场试验爆破块度累积分布曲线。

由此可见,试验采场的爆破块度 D_{20} 和 D_{80} 分别为 7.12 cm 和 18.52 cm,最大块度为 28.49 cm,且小于 5 cm 的粉矿较少。试验结果表明,优化后的孔网

参数和装药结构有效地降低了矿石的粉尘浓度与大块率,满足矿山生产的需求。

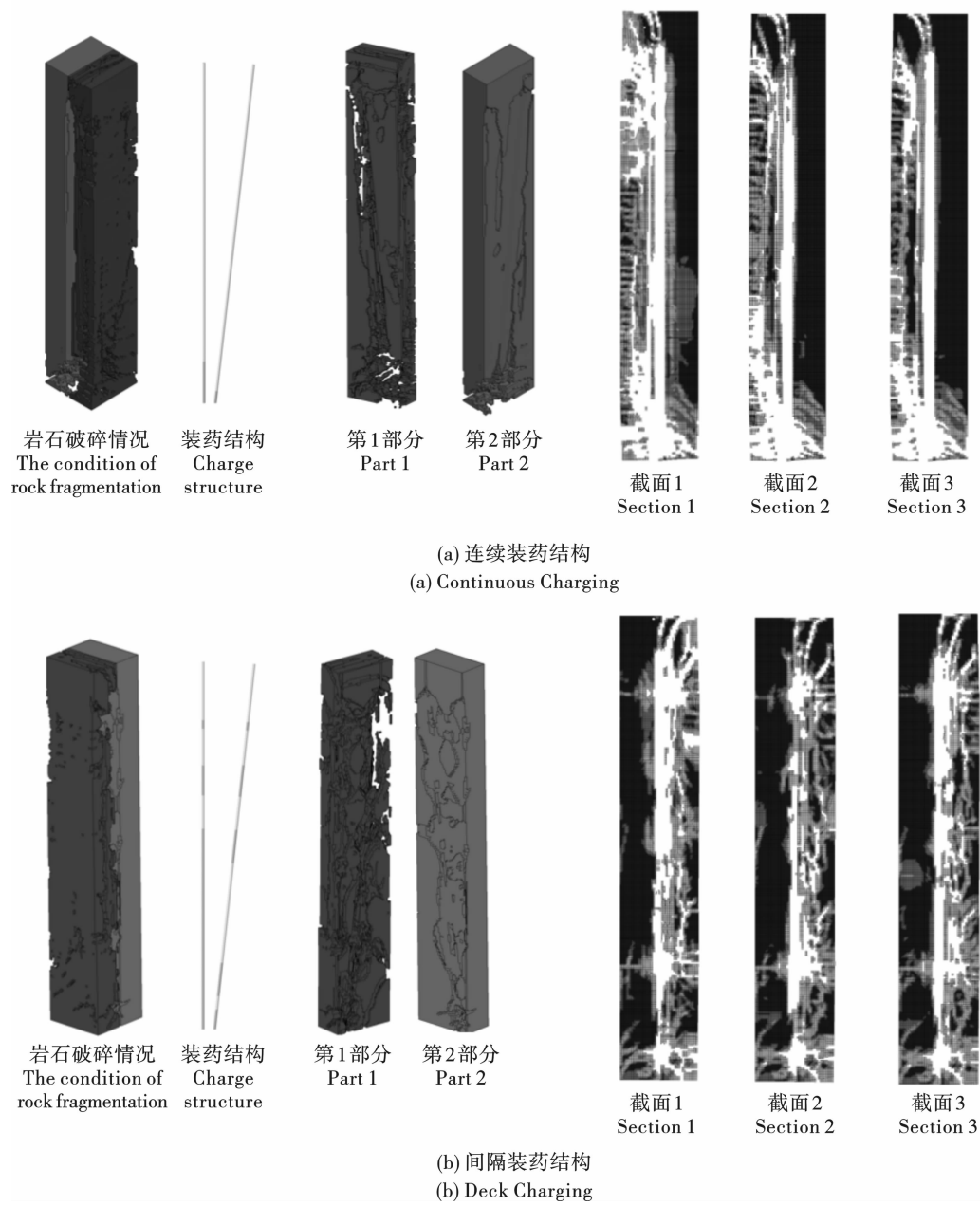


图 8 不同装药结构的岩石破碎情况
Fig. 8 Rock breakage of different charge structures

表 6 不同装药结构的岩体破碎比例
Table 6 Rock mass breakage ratio of different charging structures

装药结构 Charge structure	装药量 Explosive load	岩体破碎比例 Proportion of rock fragmentation		
		第 1 部分 Part 1	第 2 部分 Part 2	总体 Totality
连续装药 Continuous Charging	68 kg	70.58%	16.64%	43.61%
间隔装药 Deck Charging	41.2 kg	63.34%	5.94%	34.64%

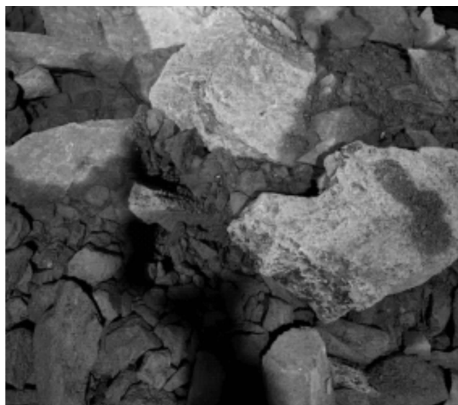


图 9 采场试验前爆破效果

Fig. 9 Blasting effect before the stope test



图 10 采场试验爆破效果

Fig. 10 Blasting effect of the stope test

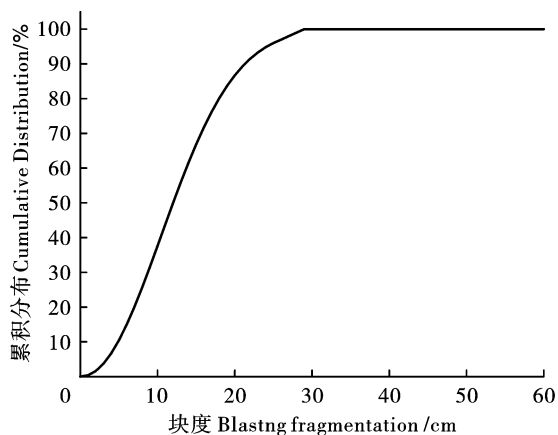


图 11 采场试验爆破块度累积分布曲线

Fig. 11 Cumulative distribution curve of blasting block in stope test

4 结论

研究以优化装药结构为核心,利用数值模拟的方法确定扇形孔最佳孔底距,通过对比分析不同装药结构下的爆破效果,提出了一种扇形孔装药结构优化方法,并通过现场试验对其可行性进行了验证。

(1)在保证采场顶板稳定性前提下,井下矿扇形孔孔底距可取 1.5 m,该参数能够平衡孔底岩石破碎效果与顶板稳定性,满足爆破作业要求。

(2)数值模拟结果表明,间隔装药结构与连续装药结构的爆破破碎效果基本相同,均未在孔底位置产生大块,但间隔装药结构在孔口附近能够有效降低岩石粉碎率,从而减少粉矿化现象。

(3)现场试验结果验证了优化装药结构的可行性,试验采场爆破块度 D_{20} 和 D_{80} 分别达到 7.12 cm 和 18.52 cm,最大块度控制在 28.49 cm 以内,且小于 5 cm 的粉矿占比极少。

参考文献 (References)

- [1] 骆浩浩,杨仁树,马鑫民,等. 石碌铁矿扇形中深孔爆破块度分布特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023,40(2):371-378.
- [1] LUO Hao-hao, YANG Ren-shu, MA Xin-min, et al. Study on the distribution characteristics of deep hole blasting in the fan-shaped hole of Shilu Iron Mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(2): 371-378. (in Chinese)
- [2] 何建元,马国虎,梁 博,等. 破碎矿体条件下扇形孔爆破块度优化措施研究与实践[J]. 矿业研究与开发, 2023,43(12):24-28.
- [2] HE Jian-yuan, MA Guo-hu, LIANG Bo, et al. Research and practice optimization measures of ore block sizes in fan-shaped blasting under the condition of broken ore body[J]. Mining R&D, 2023, 43(12): 24-28. (in Chinese)
- [3] 殷锦训,王 维,游喻豪,等. 湖北三鑫金铜矿扇形中深孔爆破参数优化数值模拟研究[J]. 爆破, 2022, 39(2):85-93.
- [3] YIN Jin-xun, WANG Wei, YOU Yu-hao, et al. Numerical simulation of sanxin gold and copper mine in hubei province blasting parameters[J]. Blasting, 2022, 39(2): 85-93. (in Chinese)
- [4] 尹东升,熊国雄,贾 贝,等. 铜绿山矿中深孔爆破参数优化研究[J]. 中国矿山工程, 2025,54(1):8-12,19.
- [4] YIN Dong-sheng, XIONG Guo-wei, JIA Bei, et al. Research on optimization of blasting parameters for medium and long holes in Tonglvshan Mine[J]. China Mine Engineering, 2025, 54(1): 8-12, 19. (in Chinese)
- [5] 王 平,李 斌,许梦国. 扇形孔爆破落矿大块产生机理及控制研究[J]. 爆破, 2015,32(2):1-10,58.
- [5] WANG Ping, LI Bin, XU Guo-meng. Production mechanism and control measure of boulder by fan shaped round blasting[J]. Blasting, 2015, 32(2): 1-10, 58. (in Chinese)