

地下金属矿扇形孔网参数优选研究

高锦文 陈辉*

新疆大学 地质与矿业工程学院, 中国·新疆 乌鲁木齐 830046

摘要: 研究以地下铜矿采用上向扇形中深孔爆破回采为工程背景, 针对矿山爆破大块率较高的问题, 结合采场实际和类似矿山经验, 采用“大孔底距、小抵抗线”的方法, 结合经验理论计算和 ANSYS/LS-DYNA 有限元数值模拟, 对比分析不同孔底距 1.8m、2.0m、2.2m 和不同排距 1.5m、1.7m、1.9m 下的应力分布。结果表明, 孔底距 1.8m 可确保有效应力峰值 (> 33MPa) 充分破碎矿岩, 排距 1.5m 自由面反射波效应可使岩石拉伸破碎。结合现场试验确定优化后孔底距 1.8m, 排距 1.5m, 对比优化前后爆破大块率由 11% 降低到 9%, 爆破大块率降低了 18%, 改善了爆破效果, 一定程度上降低了二次爆破需求与钻孔成本。

关键词: 地下矿山; 扇形中深孔; 参数优化; 大块率

Research on the Optimization of the Parameters of the Fan-shaped Porous Network of Underground Metal Ores

Jinwen Gao Hui Chen*

School of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang, 830046, China

Abstract: Based on the engineering background of the upward sector medium and deep hole blasting and mining in underground copper mines, in view of the problem of high blasting rate in mines, combined with the actual stope and similar mine experience, the method of “large hole bottom distance and small resistance line” was adopted, combined with empirical theoretical calculation and ansys/ls-dyna finite element numerical simulation, the stress distribution at different hole bottom distances of 1.8m, 2.0m, 2.2m and different row spacings of 1.5m, 1.7m and 1.9m was compared and analyzed. The results show that the bottom spacing of the hole is 1.8 m to ensure that the effective stress peak (> 33MPa) can fully break the ore and rock, and the free surface reflection wave effect of the discharge distance of 1.5 m can make the rock tensile and crush. Combined with the field test, it was determined that the bottom spacing of the optimized hole was 1.8m and the row spacing was 1.5m, and the blasting block rate was reduced from 11% to 9% and the blasting block rate was reduced by 18% before and after optimization, which improved the blasting effect and reduced the secondary blasting demand and drilling cost to a certain extent.

Keywords: underground mines; medium and deep holes in the sector shaped; parameter optimization; bulk rate

0 前言

中国金属矿山下开采用广泛采用扇形中深孔爆破方法进行回采, 该方法具有机械化程度高、破岩效率高和回采成本低廉等优点^[1]。铜矿山采用空场嗣后充填法, 上向扇形中深孔凿岩爆破落矿, 孔口部位和孔底部位的炮孔密集系数差异大, 这种不均匀的孔位布局导致爆破时炸药能量在排面内的分布极不均匀, 导致爆破大块率高等问题^[2], 不仅影响铲装效率, 还会增加二次爆破的需求。论文以降低铜矿扇形孔大块率为核心, 根据经验公式和类似矿山参数, 结合 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟软件建立扇形孔爆破模型, 在模型关键位置布设应力监测点, 分析应力变化情况来确定最优爆破参数, 在实际采场进行现场试验验证, 将验证后的参数应用于矿山后续生产。

1 参数优选

铜矿二号矿床矿体走向 310°, 倾向北东, 矿体倾角

70°~80°, 矿体平均厚度 10~50m, 矿体整体工程地质岩组类型为整体块状岩组, 总体岩石质量较好。二号东段矿体埋深在地表以下 520~760m, 埋藏较深, 沿垂向和走向具有明显分异规律, 采用分段空场嗣后充填法采矿。矿石普氏系数 f 值为 8~10, 阶段高度为 60m, 分段高度 10~15m, 进路间距 30~50m。采用 YGZ-90 型钻机在回采进路中钻凿上向扇形中深孔, 炮孔直径 65mm, 孔深范围 5~15m, 炮孔排距 1.3m, 孔底距 1.5m。

依据经验可采用“增大孔底距, 减小抵抗线”的方法^[3], 减少大块的产生。矿山现有凿岩设备钻凿 65mm 炮孔。抵抗线根据钻孔孔径及围岩稳定性的经验公式, 如表 1 所示。

表 1 最小抵抗线与炮孔直径的比值系数

岩石硬度	坚硬岩石	中等坚硬岩石	较软岩石
比值公式	$W = (23 \sim 30) d$	$W = (30 \sim 35) d$	$W = (35 \sim 40) d$
W 取值范围 /m	1.50~1.95	1.95~2.27	2.27~2.60

表中: W 为排距, m ; d 为孔径, mm ; 该矿区的岩石属于坚硬岩石, 排距取 $1.5\sim 1.9m$ 。扇形中深孔孔底距用 a 表示, 依据经验公式确定:

$$a=mW=(0.8\sim 1.2)W \quad (1)$$

式中, m ——深孔密集系数, 扇形孔 m 取较大值 1.2 ; 故计算得出孔底距 $a=1.8\sim 2.2m$ 。

2 数值模拟及分析

依据矿山回采爆破参数, 基于 ANSYS/LS-DYNA 有限元数值模拟的方法, 选取 $1.8m$ 、 $2.0m$ 、 $2.2m$ 三种不同孔底距和 $1.5m$ 、 $1.7m$ 、 $1.9m$ 三种不同排距进行爆破模拟分析。通过观察应力分布云图, 设置监测单元, 提取 Von Mises 应力峰值, 通过与岩石动态抗拉强度对比, 判断岩石是否发生破坏。先模拟确定最优孔底距后确定最优排距。

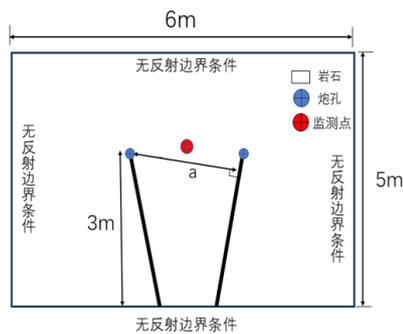


图 1 扇形孔爆破孔底距计算模型

岩石和炸药选用 solid164 单元, 岩石材料模型采用 *mat_plastic_kinematic, 岩石参数如表 2 所示。

表 2 矿岩参数

密度 ρ / ($kg \cdot m^{-3}$)	弹性模量 GPa	泊松比 μ	抗拉强度 / MPa	动态抗拉强度 / MPa
2660	11	0.25	5.5	33

乳化炸药模型采用 *mat_high_explosive_burn, 状态方程 EOS_JWL 模拟爆破过程中爆轰压力 P 与爆轰体积 V 间的关系, 如式:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (3)$$

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为炸药性质常数; P 表示爆轰压力; V 表示爆炸产物的相对体积; E 表示爆炸产物的内能。炸药参数如表 3 所示。

2.2 孔底距模拟分析

以孔底距 $1.8m$ 为代表, 选取有效应力在不同时刻的分布情况如图 3 所示。扇形孔从孔底起爆, 爆炸应力场从孔底向孔口传递, 并伴随有相邻炮孔应力波的叠加, 共同作用使

岩石动态抗拉强度一般用公式表示^[1]:

$$\sigma_{td} = (4\sim 8) \sigma_t \quad (2)$$

式中岩石动态抗拉强度表示为 σ_{td} , 单轴静态抗拉强度表示为 σ_t , 根据矿山 530 分段矿岩现场情况, 其单轴静态抗拉强度为 $5.5MPa$, 岩石动态抗拉强度取 $33MPa$ 。

2.1 模型建立

为简化计算时间和成本, 在保证计算精度的条件下, 将扇形孔简化为准二维模型, 厚度 $0.01m$, 网格划分 1 层单元, 取单排炮孔中的 2 个扇形孔来研究, 由于扇形孔底区域破碎难, 因此取孔底部分进行研究, 排间距只考虑自由面的影响, 其他表面都设置了无反射边界条件, 模型在这些表面都可以无限延伸。孔底距和排距计算模型尺寸和边界条件如图 1 和图 2 所示。

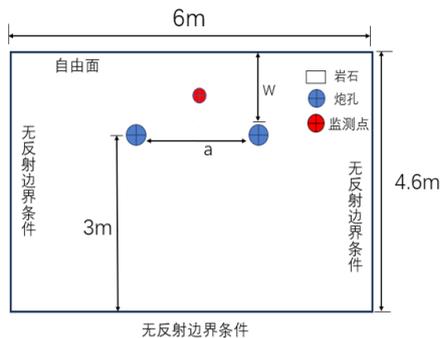


图 2 扇形孔爆破排距计算模型

岩石破碎。

图中在 $t=299\mu s$ 时, 孔周围形成局部高应力区, 应力最大值达到约 $1.5 \times 10^3 MPa$, 呈蓝绿色区域向外扩展。 $t=499\mu s$, 应力分布进一步扩展, 高应力区域扩大, 最大应力增至约 $1.45 \times 10^3 Pa$ 。到 $t=699\mu s$ 时, 应力场已发生显著变化, 在孔底部出现了红色高应力集中区。在 $t=899\mu s$, 整体应力进一步降低至约 $3.3 \times 10^3 MPa$, 但应力分布更加均匀, 同时可观察到应力波已向周围岩体深入传播。各孔之间的应力场也开始相互作用。

孔底区域相邻炮孔中间位置应力值较小, 岩石难破碎, 选取监测单元点位于孔底两炮孔孔底连线的中点, 监测单元有效应力峰值随时间变化曲线如图 4 所示。图中可以看出, 当孔底距取 $1.8m$ 时, 监测点等效应力峰值最大有效应力 $34MPa$, 大于岩石的动态抗拉强度 $33MPa$, 岩石发生破坏。孔底距取 $2.0m$ 和 $2.2m$ 时, 应力峰值分别为 $43MPa$ 和 $56MPa$ 均大于岩石动态抗拉强度值, 综合比较, 孔底距取 $1.8m$ 为最优孔底距。

表 3 炸药参数及状态方程参数

密度 ρ / ($kg \cdot m^{-3}$)	爆速 D / ($m \cdot s^{-1}$)	C-J 压力 /GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E/GPa
1200	5660	3.79	214.4	0.182	4.2	0.9	0.15	4.192

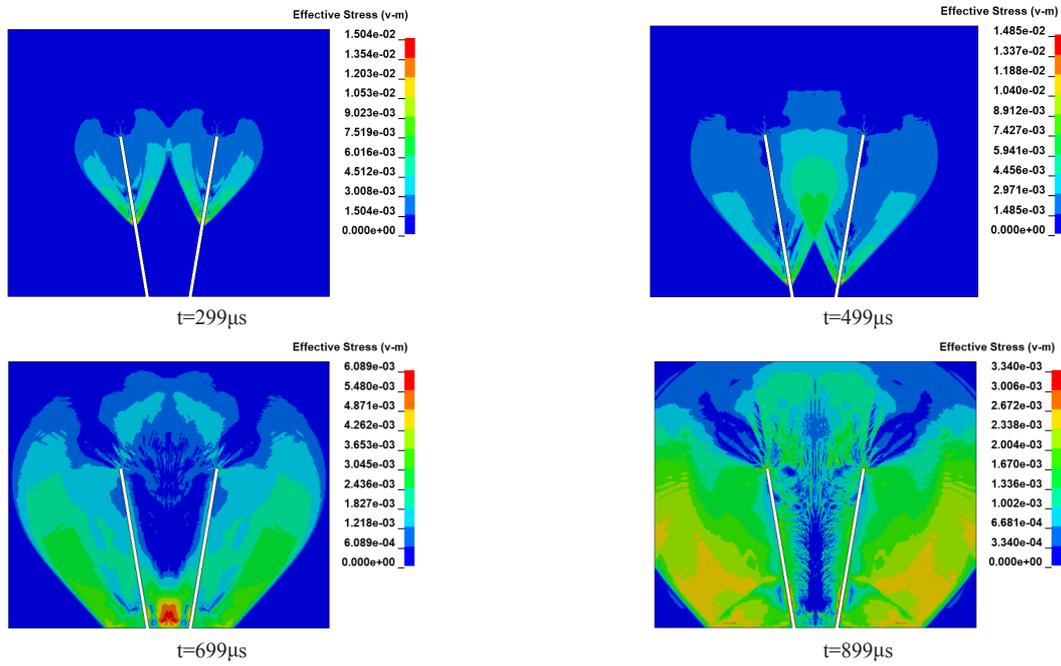


图 3 孔距 a=1.8m 时不同时刻数值模型应力云图

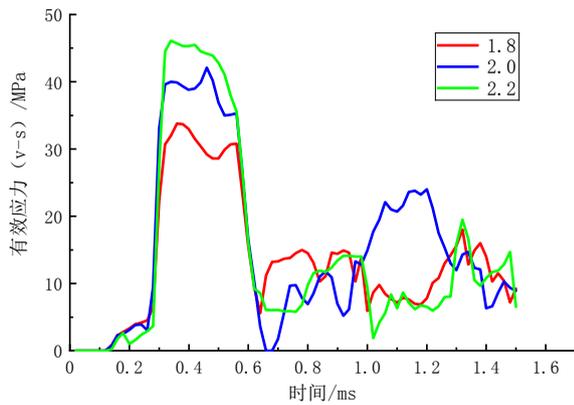


图 4 不同孔底距的有效应力时程变化曲线

2.3 排间距模拟分析

确定孔底距 1.8m 情况下，选取代表性排距 1.5m 的应力在不同时刻的分布情况如图 5 所示。图中在 $t=99\mu s$ 阶段，可见两个孔周围形成明显的应力集中区，呈同心圆分布，核心区域达到峰值应力约 $1.5 \times 10^3 \text{MPa}$ 。 $t=199\mu s$ ，应力波开始从爆心向外传播，形成放射状的应力分布特征，裂纹已开始沿软弱面方向延伸。 $t=299\mu s$ 时，应力场进一步扩展，两个爆破孔的应力场已经相互影响，在中间区域形成应力叠加，裂纹延伸更为明显。在 $t=399\mu s$ ，整个区域的应力波相互干涉，形成了完整的应力场叠加效应，裂纹网络基本形成，爆源之间的岩体已接近完全破碎，为后续岩体剥落创造了条件。

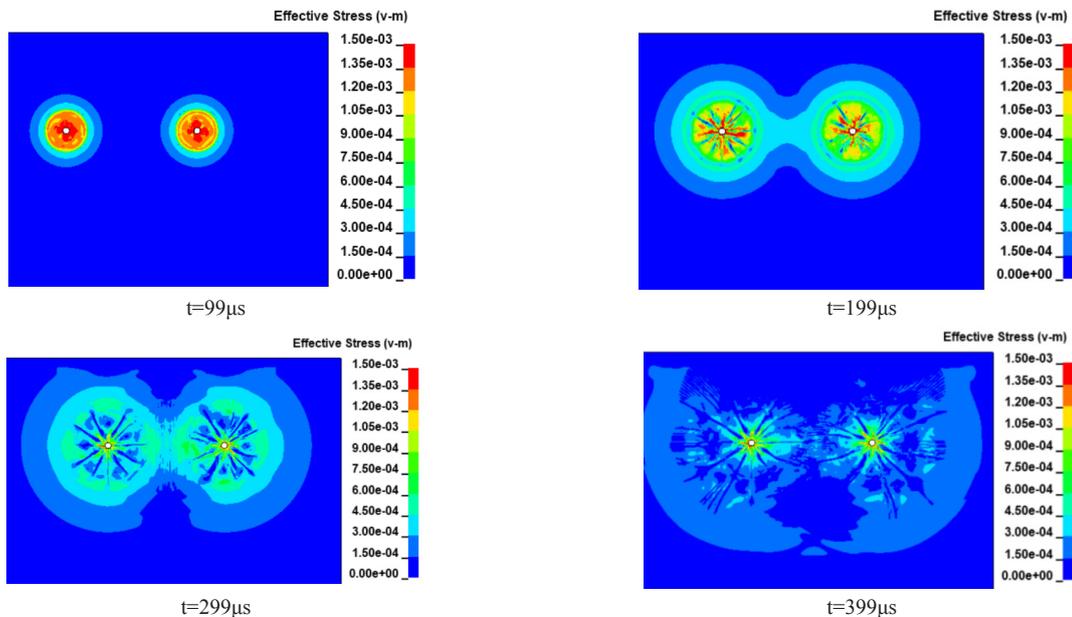


图 5 排距 w=1.5m 时不同时刻数值模型应力云图

炮孔连线中心区域有效应力值较小, 选取监测单元点位于靠近两炮孔连线中点与自由面的垂线上, 且垂线上靠近炮孔一侧的 1/3 处, 监测单元有效应力峰值随时间变化曲线如图 6 所示。图中可以看出, 当排距取 1.5m 时, 监测点等效应力峰值 33MPa, 岩石会发生破坏。排距为 1.7m 时, 应力峰值达到 40MPa, 排距为 1.9m 时, 应力峰值为 45MPa, 均大于岩石动态抗拉强度值, 综合比较, 最优排距可取 1.5m。

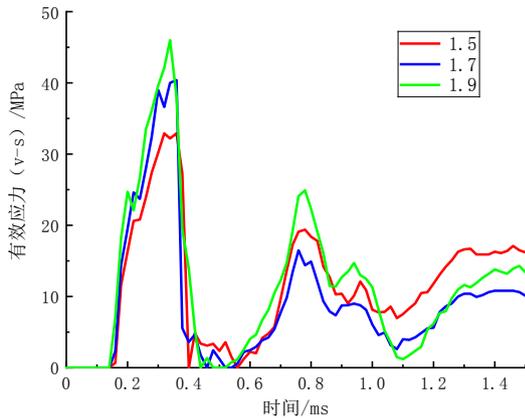


图 6 不同排距的有效应力时程变化曲线

3 现场试验

根据数值模拟得出的最优参数, 确定孔底距 1.8m, 排

表 4 爆破效果统计表

方案	孔数(排数)/个	孔底距/m	排距/m	矿石量/t	大块量/t	大块率/%
优化前	11(2)	1.5	1.3	259.3	28.5	11
优化后	10(2)	1.8	1.5	268.6	24.2	9

4 结论

针对铜矿生产过程中扇形中深孔爆破存在大块率高的问题, 采用 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟软件对爆破参数进行了优化模拟, 并经过了现场验证, 得出如下结论:

①通过分析扇形中深孔爆破大块产生的原因, 可采用“增大孔底距, 减小抵抗线”的方法进行参数优化, 提高爆破能量利用率, 减少大块的产生。

②通过对不同孔底距和排距数值模拟, 观测有效应力云图并设置监测点, 通过与岩石抗拉强度比较, 判断岩石是否破坏, 确定铜矿扇形中深孔爆破的适宜参数: 孔底距 1.8m, 排距 1.5m。

③优化后的孔网参数经现场试验, 将优化前后的爆破结果进行对比分析, 爆破大块率降低了 18%, 降低了成本,

距 1.5m, 将优化后的孔网参数应用于现场试验, 在铜矿采场 357 水平 49-51 线采场试验, 参数优化前后的爆破效果如图 7 所示。

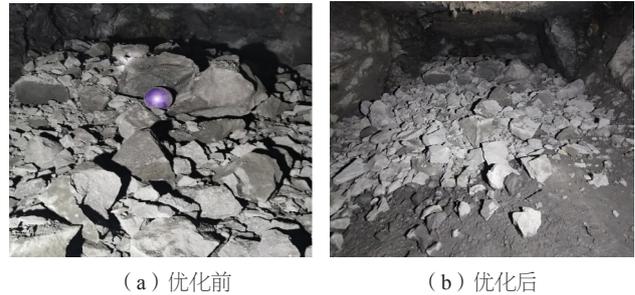


图 7 优化前后现场爆破效果图

爆破大块率是评价爆破效果的重要指标, 图中优化后虽然仍有大块存在, 但大块占比明显少了。该矿山大块格筛尺寸是 300mm × 300mm, 最大尺寸不能超过 350mm, 为增加大块统计的准确性, 考虑到爆破体量较小, 在尽量不影响矿山开采效率的情况下, 采用矿量法统计大块爆破效果如表, 矿山实际生产大块率约为 11%, 经参数优化后试验测得大块率降低到约 9%, 大块率降低了 18%, 爆破块度适中, 并且优化后单排的炮孔个数也有减少, 减少了钻孔工作量, 也验证了优化参数的可行性。爆破效果统计表见表 4。

也取得了预期效果, 对类似矿山有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 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.
- [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.
- [3] 权富成. 梅岭铜锌矿扇形中深孔爆破参数的优化研究[J]. 世界有色金属, 2020(8): 295-296.

作者简介: 高锦文(1998-), 男, 中国山西人, 硕士, 从事矿山爆破研究。

通讯作者: 陈辉(1985-), 男, 中国伊犁人, 博士, 副教授, 从事矿山开采与教学研究。