基于数值模拟的银山矿上向中深孔爆破网格参数优化*

林海祥,洪巧,熊泽华,张鑫,林金山

(江西铜业集团银山矿业有限责任公司, 江西 德兴市 334201)

摘 要:银山矿采场在爆破过程中采用的上向中深孔落矿工艺经常会出现超采及矿岩大块率高的 现象,这主要与不合理的爆破网格参数以及炮孔布置方式所导致的爆破能量分布不均匀有关。针 对银山矿地下矿岩条件,提出多种爆破网格参数及布置方式,对爆破设计方案进行模型设计规划 和力学爆破仿真试验,分析试验模型关键监测单元的有效应力峰值,得出方案四(梅花形布孔、炮 孔直径 76 mm、排距 1.5 m)为最优爆破效果网格参数。

关键词:薄矿脉;数值模拟;中深孔爆破;爆破网格参数

0 引言

目前我国对于急倾斜薄矿脉开采一般采用浅孔 留矿法^[1-2],但是这种生产方式存在安全性较差、工 人劳动强度高、生产效率低等问题^[3-4]。因此,在综 合考虑矿岩稳固条件等因素的前提下,提出采用分 段空场法在开采银山井下急倾斜薄矿脉,配套使用 上向中深孔落矿工艺进行矿石回采^[5-6]。

上向中深孔落矿工艺爆破参数的设计是一个非 常重要的工作^[7],很多学者都进行了研究。例如,张 金钟等^[8]在谦比希铜矿进行现场试验,利用三维扫 描仪对采空区进行切片,分析不同方案优劣,确定合 适的爆破参数;谷亚州等^[9]基于爆破漏斗理论和 LS-DYNA有限元分析软件,确定了最优的炮孔角 度、空气垫层长度以及炮孔间距;李红鹏^[5]通过分析 不同爆破参数下的爆破效果以及关键单元的有效应 力峰值,实现了最佳方案的优选。

因此,为了解决银山矿上向中深孔落矿工艺爆破超采、大块率高^[10-12]等问题,本文利用 ANSYS 软件建立矿体块段模型,并根据现场爆破经验参数开展了 5 组爆破参数模拟试验。对爆破模拟过程中自由面内以及采场边帮上的关键单元爆炸应力峰值进行监测分析,得出不同方案下采场爆破效果及边帮的破坏情况,优选出了最佳方案。

1 爆破方案设计

* 收稿日期: 2023-04-24

1.1 工程概况

银山铜铅锌多金属矿床属陆相火山岩-斑岩型

多金属矿床,受银山背斜轴部断裂带、火山机构的严 格控制。目前矿山采用的采矿方法为分段空场法, 矿体属急倾斜薄矿脉,采场爆破工艺采用上向中深 孔落矿工艺^[13-14]。生产实践发现,采用上向中深孔 落矿工艺在进行矿石回采过程中经常出现超采及大 块率高的现象,分析其原因,主要是不合理的爆破网 格参数与炮孔布置方式导致爆破能量分布不均匀。

1.2 爆破方案

针对上述生产现象,提出符合该地下矿山矿岩 条件的多种爆破网格参数及布置方式。结合矿山实 际应用,本次研究设计采用0.5~2.0 m 排距的5 组 模型,炮孔直径选用76 mm,筛选出爆破效果最优的 方案。具体方案见表1,爆破炮孔布置如图1所示。

表1 各方案爆破参数设置

| 方案 | 炮孔布置 | 炮孔直径/mm | 炮孔排距/m |
|-----|-------|---------|--------|
| 方案一 | 平行布孔 | 76 | 1.0 |
| 方案二 | 梅花形布孔 | 76 | 0.5 |
| 方案三 | 梅花形布孔 | 76 | 1.0 |
| 方案四 | 梅花形布孔 | 76 | 1.5 |
| 方案五 | 梅花形布孔 | 76 | 2.0 |

2 数值模型构建与评价方法确定

2.1 计算模型的建立

采用数值分析软件 ANSYS/LS-DYNA 对爆炸 过程进行模拟。为提高模型计算效率,对炸药实体 和岩体分别采用 ALE 和 Lagrange 网格进行划分,

作者简介:林海祥(1998—),男,江西上饶人,主要从事矿山开采相关技术工作,E-mail:963124520@qq.com。

计算过程基于流固耦合算法进行,且不考虑炮孔上 下的端部效应。根据爆破网格方案设定,分别建立 方案一和方案二的数值计算模型,如图 2 和图 3 所 示。模型为三孔侧向崩矿爆破,侧边宽度较大,因 此,侧向为主要的爆破自由面。



图 2 方案一的数值计算模型

如图 2 和图 3 所示,参照各方案爆破网格参数 设置,方案一的模型尺寸(长×宽×高)设置为 3 m ×6 m×0.02 m,方案二分别为 3.5 m×6 m×0.02 m。在实际工程中,爆破的自由面一般选择为自由 边界条件,其余边界采用全透射边界条件,模型右侧



为侧向自由面。由于方案三、方案四、方案五与方案 二的爆破网格参数差异只体现在炮孔排距的变化, 因此构建出来的模型基本一致,主要的差别在于模 型长度参数上的不同。方案三、方案四、方案五的模 型尺寸(长×宽×高)为4.0 m×6 m×0.02 m、4.5 m×6 m×0.02 m和5.0 m×6 m×0.02 m。模型 中 X 向表示为长度方向,Y 向表示为宽度方向,Z向表示为高度方向。

2.2 计算参数选取

(1) 岩石材料模型及参数。爆破瞬间会产生较 大能量,导致岩石破碎,因此通常情况下岩石的应变 率会较大。ANSYS中的塑性动力学模型 * MAT_ PLASTIC_KINEMATIC 包含了应变率效应,非常 适用于分析爆破中岩石材料。同时选取的矿体模型 材料参数见表 2。

(2) 炸药材料模型及参数。银山矿爆破采用的 是二号岩石乳化炸药,具有较高的能量密度,因此选 用软件内部的高能材料本构模型 MAT_HIGH_EX-PLOSIVE_BURN 来进行计算。爆破采用的乳化炸 药相关参数及其 JWL 状态方程参数见表 3。

2.3 爆破效果评价方法的确定

为了能够对模型中的部分关键点的应力曲线及 峰值进行分析,本次研究对被爆实体设定两组关键 监测单元,监测单元点的布置如图 4 所示。从图 4 可以看出,A、B、C、D四个监测单元在模型自由面

表 2 矿体模型材料参数

| 密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 弹性模量 E/GPa | <u></u> 洎松比ν | 屈服强度/MPa | 切线模量 E/MPa | β | 参数 C/s^{-1} | 参数 P |
|---|------------|--------------|-----------|------------|---|---------------|------|
| 2880 | 30.7 | 0.25 | 78.92 | 2800 | 1 | 2.5 | 4 |
| 注:参数 C、P 是与硕 | 广体应变率相关的参 | :数:β=1 表 | 示岩体服从各项同性 | 硬化的特征。 | | | |

| 密度 $ ho/(kg \cdot m^{-3})$ | 爆速 $D/(m \cdot s^{-1})$ | 爆压 P _{CJ} /GPa | $A_{_0}/\mathrm{GPa}$ | $B_0/{ m GPa}$ | R_1 | R_{2} | ω | $E_0/{ m GPa}$ |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------|-------|---------|------|----------------|
| 1180 | 3200 | 7 | 214.4 | 0.182 | 4.2 | 0.9 | 0.15 | 4.192 |

注:参数 A_0 、 B_0 、 R_1 、 R_2 和 ω 为输入参数, A_0 表示单位体积内物质的内能, B_0 表示单位体积内物质的内能的变化率, R_1 和 R_2 分别表示等熵膨胀和等熵压缩过程中气体的压力与体积的乘积变化率, ω 表示气体的压缩系数, E_0 为初始比内能。 内部, A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 、 E_1 、 F_1 集中在采场边帮上。 通过获取A、B、C、D四个监测单元应力峰值的大 小分析不同爆破方案的爆破效果。获取 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 、 E_1 、 F_1 六个监测单元应力峰值的大小来判 断采场边帮的破坏情况。



3 模拟结果分析

3.1 爆炸应力波分析

3.1.1 方案一

为便于观察侧崩爆破过程岩体的应力破岩过程,绘制了 0.14 ms、0.32 ms、0.54 ms、1.0 ms 四个关键时刻的爆炸应力波云图,如图 5 所示。

从图 5 可以看出,在 t = 0.14 ms 时刻,模型中 3 个炮孔的爆炸应力波在孔间相互叠加,有效增强 了炮孔之间岩体的破碎效果;在 t = 0.32 ms 时刻, 爆炸应力波几乎同时到达侧向自由面附近,经自由 面反射拉伸应力波,自由面岩体收到反射拉伸应力 波的作用后开始发生拉伸破坏,并向着炮孔方向发 展;在 t = 0.54 ms 时刻,反射拉伸应力波传播到 3 个炮孔附近,传播过程中使炮孔至自由面区域的岩 体发生破坏;在 t = 1.0 ms 时刻,爆炸应力波基本消 失,爆破产生的岩体破坏基本完成。

3.1.2 方案二

方案二中 0.30 ms、0.50 ms、1.26 ms、2.0 ms 4 个关键时刻的爆炸应力波云图如图 6 所示。

从图 6 可以看出,在 t = 0.30 ms 时刻,中间炮 孔的爆炸应力波先于两边帮的炮孔抵达侧向自由 面附近,经自由面反射拉伸应力波,自由面岩体收 到反射拉伸应力波的作用后开始发生拉伸破坏,并 向着炮孔方向发展;在 t = 0.50 ms 时刻,反射拉伸 应力波传播到中间炮孔附近,传播过程中使炮孔至 自由面区域的岩体发生破坏;在 t = 1.26 ms 时刻, 在 1.0 ms 起爆的两个边帮炮孔的爆炸应力波传递 至中心线附近,并产生叠加,增强了中间岩体的破 碎效果;在 t = 2.0 ms 时刻,爆炸应力波基本消失, 爆破产生的岩体破坏基本完成。

模型建立的过程中,方案二、方案三、方案四、 方案五的数值计算模型基本相同,主要差异体现在 炮孔的排距不同。经过数值模拟结果显示,其爆破 过程产生的爆破应力波传播趋势基本相似。由于 文章篇幅限制,不再将方案三、方案四、方案五的爆 破应力波云图进行一一列举。





图 6 方案二爆炸应力波云图

3.2 各测点应力分析

3.2.1 自由面内关键监测单元应力曲线及峰值 A、B、C、D四个监测单元的应力曲线和峰值的 变化主要是为了对岩体爆破效果进行分析,根据数 值结果,获取了方案一、方案二、方案三、方案四、方 案五的监测单元结果,见图 7 和表 4。



表 4 自由面各监测单元爆炸应力峰值

| 士安 | 爆炸应力峰值/MPa | | | | | | |
|-----|------------|------|------|------|--|--|--|
| 刀杀 | A | В | С | D | | | |
| 方案一 | 39.7 | 40 | 41.3 | 45.3 | | | |
| 方案二 | 32.0 | 31.7 | 25.3 | 25.4 | | | |
| 方案三 | 45.7 | 30.7 | 19.3 | 19.4 | | | |
| 方案四 | 17.2 | 18.2 | 17.0 | 17.2 | | | |
| 方案五 | 15.2 | 18.1 | 12.4 | 12.2 | | | |

从图 7 和表 4 可以看出:

(1) 在开挖爆破区域,方案一、方案二、方案三、 方案四中各监测单元的爆炸应力峰值均远远大于 岩体的抗拉强度值,而方案五中仅 B 监测单元的爆 炸应力峰值大于岩体的抗拉强度值;

(2)方案一中自由面上单元爆炸应力值小于自由面与炮孔中心面上单元爆炸应力值,而方案二、 方案三和方案四则反之; (3) *A*、*B* 两点的应力曲线分布状态相似,*C*、*D* 两点的应力曲线分布状态相似;

(4)方案一、方案二、方案三、方案四均可以保 证爆炸开挖区域的爆破破碎效果,但方案一、方案 二和方案三的孔网参数过于密集,爆炸应力过大, 易造成凿岩量和炸药能量的浪费,以及粉矿率的 提高;

(5)方案四中各监测单元的爆炸应力分布均 匀,无特别大的爆炸应力峰值出现,说明方案四网 格参数合理,可以充分利用各炮孔的炸药爆炸能量; (6)方案五的孔网参数选取较大,爆炸应力较

低,难以保证爆炸开挖区域的爆破破碎效果,易形成大块。

3.2.2 采场边帮关键监测单元应力曲线及峰值

为探究采场边帮岩体的破坏情况,提取出了方 案一、方案二、方案三、方案四和方案五的 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 、 E_1 、 F_1 六个监测单元的应力曲线及峰值, 分别见图 8 和表 5。



表 5 采场边帮各监测单元爆炸应力峰值

| 士安 | | 5 | 爆炸应力! | 峰值/MPa | 1 | |
|------|-------|---------|-------|--------|---------|---------|
| 刀杀 " | A_1 | B_{1} | C_1 | D_1 | E_{1} | F_{1} |
| 方案一 | 25.7 | 23.1 | 44.7 | 41.2 | 28.2 | 25.7 |
| 方案二 | 18.1 | 15.8 | 14.8 | 21.2 | 14.4 | 11.3 |
| 方案三 | 11.7 | 13.4 | 15.4 | 14.6 | 12.4 | 15.8 |
| 方案四 | 14.3 | 12.9 | 12.8 | 12.4 | 15.4 | 13.7 |
| 方案五 | 13.0 | 12.8 | 7.7 | 12.7 | 13.7 | 11.7 |

从图 8 和表 5 可以看出:

(1) 在采场边帮区域,方案一中各监测单元的 爆炸应力峰值均远大于岩体的动态抗拉强度值,因此,方案一极易造成采场两帮超采,导致边帮矿岩的垮落;

(2) 在采场边帮区域,方案三、方案四、方案五 所有监测单元的爆炸应力峰值均小于岩体的抗拉 强度值,因此,方案三、方案四和方案五对于控制采 场两帮超采以及保护边帮稳定性均具有非常好的 效果;

(3)方案二中 A₁、D₁ 监测单元的爆炸应力峰 值均大于岩体的抗拉强度值,但其他监测单元应力 峰值明显减小,未超过岩体的动态抗拉强度值。方 案二的梅花形布孔方式对于控制采场两帮超采以 及保护边帮稳定性具有明显效果。

3.2.3 爆破方案优选

根据各方案开挖爆破区域监测单元的数值模 拟数据,进行采场爆破方案的优选。根据表4可知, 方案一、方案二、方案三、方案四均能达到破岩应力 要求。方案二、方案三、方案四和方案五的A、B监 测单元的峰值应力要高于C、D两点,表明梅花形炮 孔布置更有利于自由面的利用以及能量的传递。 同时,方案一、方案二和方案三的监测单元应力峰 值较大,容易造成矿石破碎度较大,增加矿石损失。 而方案五由于炮孔排距过大,监测单元受到的应力 峰值较低,难以实现较好的破岩效果。因此,综合 考虑爆破效果确定方案四为最佳爆破方案。

由表 5 可知,方案一和方案二均会对采场边帮 岩体造成一定破坏,但是方案二的炮孔布置方式更 有利于爆破自由面的发挥。方案三、方案四、方案 五均能保证边帮矿岩保持良好的整体性以及稳 定性。

根据上述分析结果可知,不论是从爆破效果还 是采场边帮破坏情况来看,方案四均具有较好的爆 破效果。因此可以认为,银山矿薄矿脉上向中深孔 落矿工艺应选择方案四作为采场最优爆破参数,见 表 6。

表 6 方案四最优爆破参数

| 孔径/mm | 孔深/m | 孔间距/m | 排距/m | 堵塞长度/m | 微差间隔/ms | 线装药密度/(kg/m) | 布孔形式 |
|-------|------|-------|------|--------|---------|--------------|------|
| 76 | 11.5 | 1.8 | 1.5 | 1.8 | 25 | 5.35 | 梅花形 |

4 结论

结合银山矿矿体、炸药等相关材料参数,利用 ANSYS软件建立矿体块段模型,并根据现场爆破 经验参数开展了5组爆破参数模拟试验。对爆破模 拟过程中自由面内以及采场边帮上的关键单元的 爆炸应力峰值进行监测分析,得出不同方案下采场 爆破效果及边帮的破坏情况。通过模拟银山薄矿 脉中深孔爆破,得出方案四为该模型的最优孔网参 数,在该条件下模型爆破区域的破岩效果以及采场 边帮的控制效果均为最佳,为后期现场工业试验的 爆破参数提供了参考。

参考文献:

- [1] 邓国明,戴嘉诚.急倾斜极薄矿脉采矿方法的选择及应用[J]. 湖南有色金属,2022,38(4):4-6+10.
- [2] 阮阳.铅锌矿薄矿脉浅孔留矿法采矿工艺优化[J].中国金属 通报,2019(4):36+38.
- [3] 张传柱,曲展鹏,刘剑,等.急倾斜极薄矿脉采矿方法试验研究 与应用[J].黄金,2016,37(6):36-38.
- [4] 魏学松,程海勇,张修香.浅孔留矿法开采倾斜薄矿脉时围岩

稳固性研究[J].有色金属(矿山部分),2013,65(1):30-36.

- [5] 李红鹏.银山矿上向中深孔爆破落矿参数优化研究[J].现代 矿业,2021,37(6):68-72.
- [6] 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.
- [7] 徐帅,彭建宇,李元辉,等.急倾斜薄矿脉中深孔落矿爆破参数 优化[J].爆炸与冲击,2015,35(5):682-688.
- [8] 张金钟,李小松,赵承佑,等.谦比希铜矿上向中深孔爆破参数 优化及应用[J].黄金,2022,43(10):44-46+53.
- [9] 谷亚州,史秀志,霍晓锋,等.地下矿山上向中深孔爆破回采眉 线保护技术研究[J].爆破,2022,39(4);62-70.
- [10] 周斌.中深孔爆破技术在极不稳固薄矿脉中的应用[J].采矿 技术,2021,21(5):140-142+148.
- [11] 王利军,董旭,李耀宗,等.杏山铁矿中深孔爆破参数优化与高 效改进措施[J].有色金属(矿山部分),2022,74(3):55-58.
- [12] 骆浩浩,杨仁树,马鑫民,等.石禄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.
- [13] 霍晓锋,苟永刚,成涌,等.铜绿山矿中深孔掏槽爆破参数优化 研究[J].矿冶工程,2019,39(5):17-21.
- [14] 丁家铎,陈思源,龙跃,等.银山矿业中深孔爆破一次成井参数 优化与工业试验[J].采矿技术,2021,21(6):125-129+137.