

深部急倾斜薄矿体中深孔爆破夹制力量化分析

张小瑞^{1,2}, 贾志伟³, 安龙⁴

(1. 长春黄金研究院有限公司; 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;
3. 中国黄金集团有限公司; 4. 东北大学深部金属矿山安全开采教育部重点实验室)

摘要:在深部急倾斜薄矿体中深孔爆破过程中,由于围岩的夹制力作用,在生产实践过程中往往存在“爆不开”或“爆太开”的情况,从而导致采矿损失贫化大等问题。针对某矿山的开采技术条件,基于 PFC 2D 数值模拟软件对深部急倾斜中深孔爆破过程进行数值模拟,量化分析深部急倾斜薄矿体中深孔爆破过程中有无围岩夹制力对爆破效果的影响,确定炮孔直径为 65 mm,排距(抵抗线)为 1.6 m。现场应用表明:爆破后效果良好,大块率较低,矿石贫化率为 15%,采矿损失率为 5%,炸药单耗为 0.6 kg/t,数值模拟结果与现场爆破效果相近,相应的爆破参数可指导现场生产。

关键词:深部开采;中深孔落矿;中深孔爆破;急倾斜薄矿体;数值模拟;高夹制力

中图分类号:TD235

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2024)08-0052-06

doi:10.11792/hj20240807

引言

急倾斜薄矿体是金、银等贵金属矿床常见的赋存形态^[1-4]。在开采这类矿体过程中,常采用浅孔留矿采矿法^[5]、脉内上向水平分层充填采矿法^[6]、干式充填采矿法^[7]等“劳动密集型”的传统浅孔采矿工艺,采场作业环境差、工人直接在采场顶板下施工,采矿损失贫化大、生产能力低等问题突出。而在国外类似矿床的开采过程中,以中深孔连续干式充填采矿法、分段空场嗣后充填采矿法等中深孔机械化开采工艺为主^[8],工人在有支护的巷道中作业,生产能力大、安全程度高,能够切实达到深部急倾斜薄矿体规模化安全高效开采目标。目前,一些矿山在自动化、机械化、信息化、智能化改造过程中,也逐渐开始摒弃传统浅孔开采工艺,积极探索以中深孔开采工艺为主的机械化开采方案^[8]。但是,与厚大矿体中深孔爆破过程不同,深部急倾斜薄矿体在爆破过程中,由于围岩的夹制力作用^[9],凿岩爆破参数缺乏相关理论依据指导,在生产实践过程中往往存在采矿损失贫化大等问题^[10-12]。本文基于数值模拟技术,量化分析深部急倾斜薄矿体中深孔爆破过程中有无围岩夹制力对爆破效果影响,以为深部矿体安全高效开采提供技术支撑。

1 工程背景

1.1 地质概况

某矿山矿床成因为蚀变型岩金矿床,岩性为绢云

石英片岩,矿石类型主要为黄铁矿化石英脉和黄铁矿化蚀变类型,矿体平均厚度 2.12 m,倾角近直立,品位 3.12 g/t,属急倾斜薄矿体。岩体质量中等,矿岩结构面发育。

1.2 采矿工艺

该矿山原采用无底柱浅孔留矿采矿法和脉内上向水平分层充填采矿法进行开采,由于原工艺存在生产能力小、贫损指标大、安全程度差等问题,经技术改造后,部分采场改为上行式中深孔分段充填连续采矿法,如图 1 所示,采场沿走向布置,分矿房、矿柱两步骤回采,不留顶、间柱连续回采,由下至上分段回采,每个分段内后退式回采,采用平行中深孔落矿工艺,炮孔直径 65 mm,通过装药器吹入散装乳化炸药,数码雷管起爆,遥控铲运机出矿,每分段采空区出矿结束后立即充填并转入上一分段回采。

2 中深孔爆破数值模拟

2.1 炸药破岩过程

根据其他矿山实际开采经验,中深孔爆破生产能力大,作业安全程度高,便于机械化施工,有利于降低工人劳动强度。然而,在深部急倾斜薄矿体中深孔爆破应用过程中,由于矿脉厚度小,往往受到较大的围岩夹制力影响,加之周围岩体节理裂隙发育,一旦爆破参数应用不当,经常会出现“爆不下来”或“爆得太开”等问题^[13],从而造成采矿损失贫化加大的后果,如图 2 所示^[14]。为探究和表征深部急倾斜薄矿体中深孔爆破时的夹制力,采用 PFC 2D 数值模拟软件对

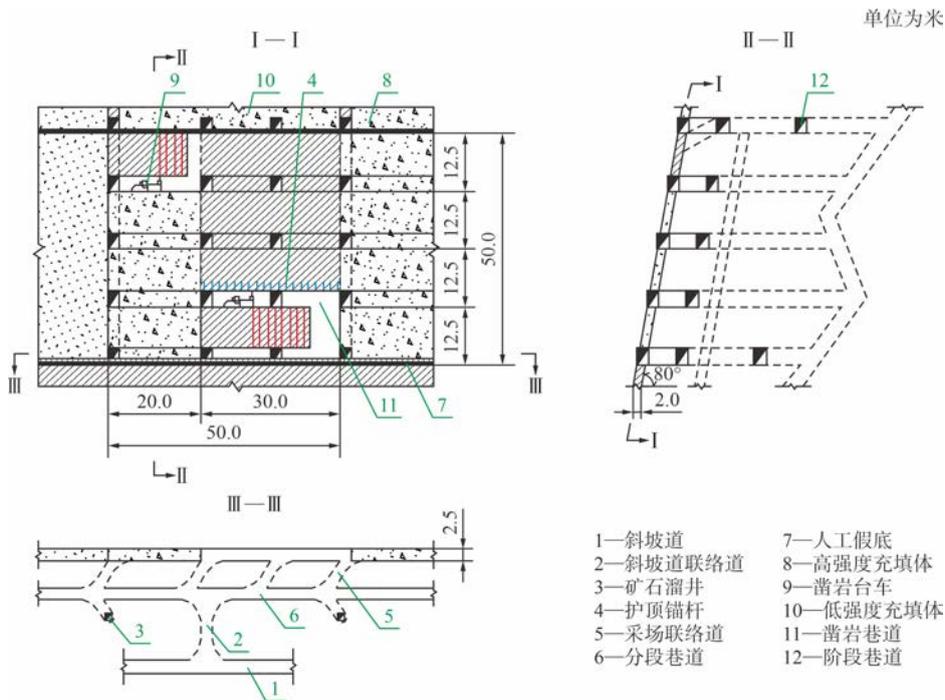


图 1 上行式中深孔分段充填连续采矿法标准方案

Fig. 1 Standard schemes for upward medium long-hole sublevel filling mining method

深部急倾斜中深孔爆破过程进行分析。

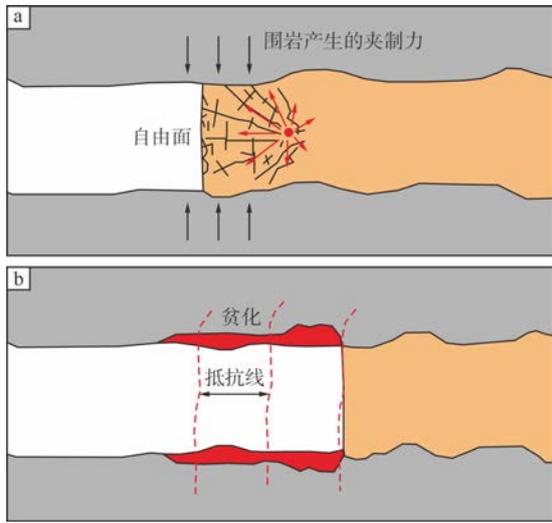


图 2 高夹制力环境下的矿石贫化示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ore dilution under high compression force environment

结合大量工程实际和理论研究结果,岩体在爆破过程中可简化为 2 个阶段^[15]:第 1 个阶段为炸药爆炸后产生应力加载速率极高的应力波动压作用阶段;第 2 个阶段为炸药爆炸过程中化学反应附带产生的爆生气体准静压作用阶段。岩体爆破裂纹的数量和特征与其应力加载率紧密相关。第 1 个阶段发生过程中,炸药爆炸后产生冲击波的作用时间仅为零点几毫秒,应力加载率大,促使岩体产生较多的径向裂纹,但裂纹延展长度短。第 2 个阶段发生过程中,爆生气体的作用时间则达到了几十甚至上百毫秒,应力加载

率降低,产生的裂纹少,但在爆生气体作用下不断推动第 1 个阶段中产生的裂纹向远端延展,从而扩大了裂隙长度。根据这一显著特征将岩体爆破过程简化为 2 个发生段,如图 3 所示。

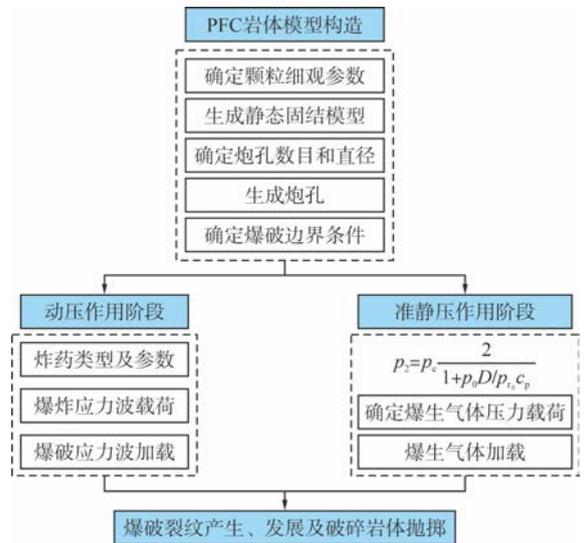


图 3 岩体爆破数值模拟方法

Fig. 3 Numerical simulation method for rock mass blasting

2.2 数值模拟模型建立

本次模拟过程中,建立模型如下:矿体厚度设置为 2 m,无限区域围岩宽度取矿体的 2 倍,设置为 4 m,矿体长度取 6 m,自由面暴露长度取 1 m,整个模型长度约 10 m,宽度 7 m,如图 4 所示。

2.3 基于宏观参数的细观岩体力学参数标定

PFC 2D 是一种基于粒子运算的离散元数值模型,

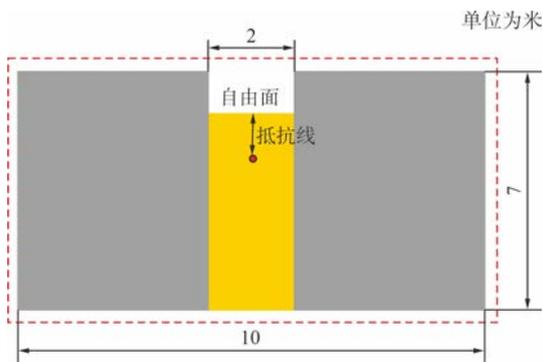


图4 数值模拟模型

Fig.4 Numerical simulation model

模型中用于定义颗粒之间的细观力学行为与宏观力学行为具有一定差别,因此在由室内试验得到岩体的宏观参数后,还应不断调整和标定颗粒间的细观参数,从而得到与岩体宏观力学参数对象匹配的细观参数。

通过标定,采用平行黏结模型,并得到岩体宏观力学参数与细观力学参数,结果如表1和表2所示。

表1 岩体宏观力学参数

Table 1 Macro mechanical parameters of rock mass

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗压强度/ MPa	杨氏模量/ GPa	泊松比	抗拉强度/ MPa
2 806	142.41	50.1	0.19	5.99

表2 平行黏结(PBM)模型细观力学参数

Table 2 Micro mechanical parameters of PBM model

类别	指标	参数
颗粒参数	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 806
	接触模量/GPa	53.76
	摩擦因数	0.5
	接触黏结模量/GPa	9.57
接触属性	刚度比	0.98
	法向接触强度均值/Pa	1.42×10^9
	切向接触强度均值/Pa	1.13×10^7
	接触半径/m	0.5×10^{-4}

在 PFC 2D 程序中采用半径扩大法生成的计算模型如图5所示。模型粒径为 0.005 ~ 0.007 5 m, 粒径比为 1.5, 平均粒径为 0.006 25 m, 共生成颗粒约 50 359 个。

3 围岩夹制力及其量化分析

构建数值模拟模型探求夹制力对回采爆破的影响(如图6所示)。通过设置自由面出露长度来进行夹制力的设置,无夹制力时,自由面出露长度为 0 m, 即自由面完全暴露;有夹制力时,自由面内陷 1 m, 以

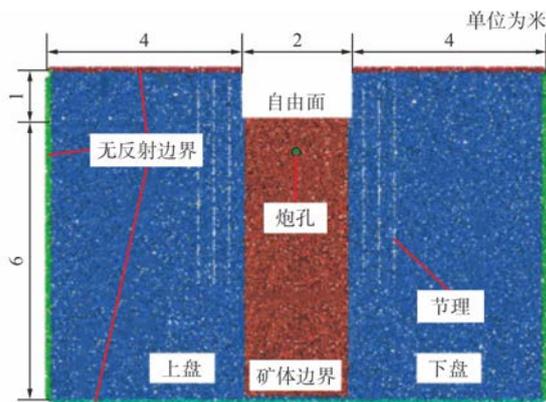


图5 生成的 PFC 计算模型

Fig.5 Generated PFC calculation model

还原深部急倾斜薄矿体爆破过程中的围岩夹制力。炮孔采用双孔爆破形式,根据经验公式,一般最小抵抗线为炮孔直径的 25 ~ 30 倍,因此,取最小抵抗线为 1.6 m,炮孔距离矿体边界 0.2 m。

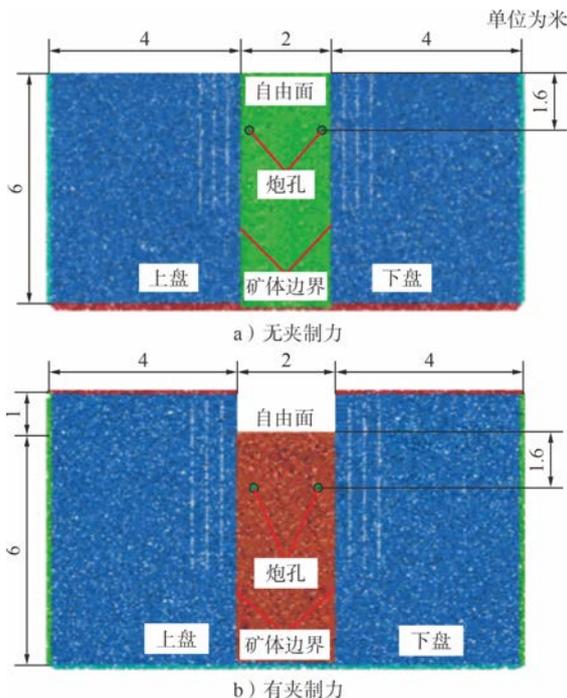


图6 无夹制力与有夹制力模型示意图

Fig.6 Schematic diagram of models with and without compression force

3.1 无夹制力时中深孔爆破结果

无夹制力情况下,双孔起爆时,底部沿炮孔连线率先撕裂形成漏斗底,且各炮孔形成的爆破漏斗接近标准爆破漏斗形成的 45°角边界线,边界线顺利通过围岩节理裂隙,并在叠加作用下形成碗状漏斗形态(如图7所示)。

3.2 有夹制力时中深孔爆破结果

有夹制力情况下,双孔起爆时,底部沿炮孔连线率先撕裂形成漏斗底,但各炮孔形成的爆破漏斗由于

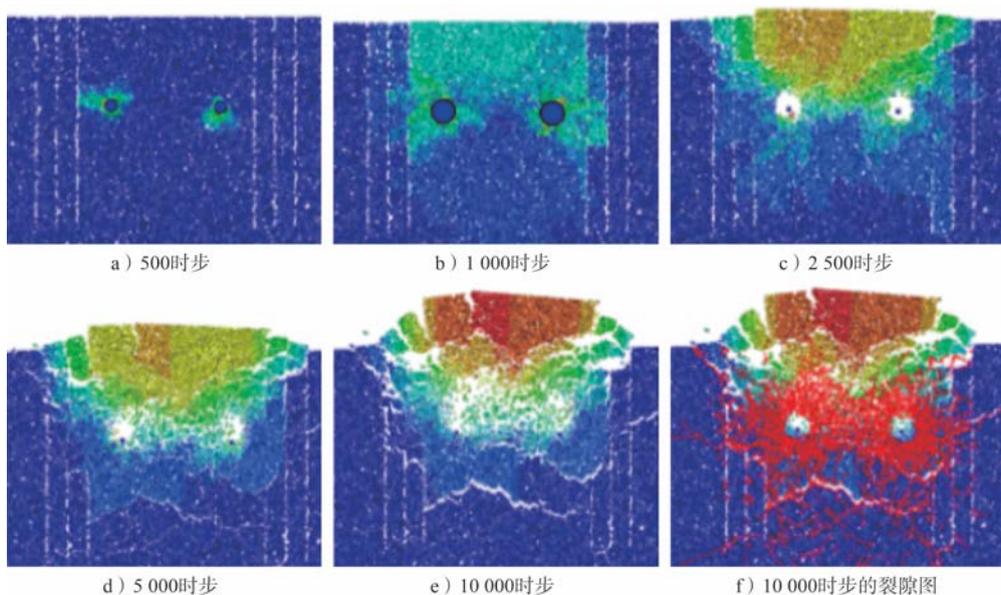


图 7 无夹制力爆破过程与结果

Fig. 7 Process and effect of blasting without compression force

夹制力作用,形成漏斗边界线小于标准爆破漏斗的 45°,边界线在围岩节理裂隙时受到阻滞,不能顺利贯通(如图 8 所示)。两炮孔虽在叠加作用下形成碗状

漏斗形态,但在围岩夹制力影响下,漏斗体积明显小于无夹制力情况,并在局部形成悬壁矿,造成一定矿石损失,且存在一定安全风险。

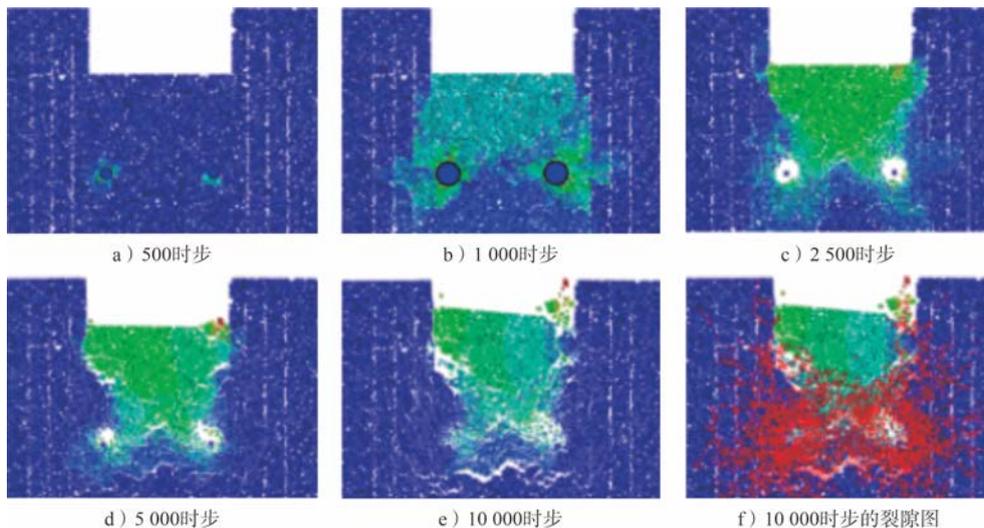


图 8 有夹制力爆破过程与结果

Fig. 8 Process and effect of blasting with compression force

3.3 围岩夹制力量化分析

为进一步量化深部急倾斜薄矿体夹制力的影响,评估夹制力对爆破效果的影响,通过爆破超挖、欠挖程度及裂纹密度等可量化的指标对中深孔爆破效果进行定量分析^[14]。

爆破超挖与欠挖定义为:空腔(未爆破的区域)超过矿体边界区域即为超挖,空腔小于矿体边界区域即为欠挖,计算公式为:

$$A = \begin{cases} S_{\text{over}}/S_0 & (\text{超挖}) \\ S_{\text{under}}/S_0 & (\text{欠挖}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: S_{over} 为超挖面积(m^2); S_{under} 为欠挖面积(m^2); S_0

为设计爆破面积(m^2)。

有无夹制力超欠挖对比如图 9 所示,由此可计算得到无夹制力时: $S_{\text{over}} = 3.95 \text{ m}^2$, $S_0 = 9.29 \text{ m}^2$, $S_{\text{under}} = 0 \text{ m}^2$,矿石贫化率为 42.5%,采矿损失率为 0;有夹制力时, $S_{\text{over}} = 0.63 \text{ m}^2$, $S_0 = 4.31 \text{ m}^2$, $S_{\text{under}} = 0.11 \text{ m}^2$,矿石贫化率为 14.6%,采矿损失率为 2.6%。

其中有无夹制力对爆破效果的影响可根据爆破面积来进行衡量,无夹制力时,爆破面积为 9.29 m^2 ;有夹制力时,爆破面积仅为 4.31 m^2 ,面积减少幅度较大,由此可见薄矿体爆破时的夹制力之大。

定义裂纹密度为回采区域单位面积内的裂纹数

量,该指标可直观反映爆破后矿岩块度的粒径特征与爆破能量的集中程度。无夹制力时,裂纹密度为703条/ m^2 ;有夹制力时,裂纹密度为1422条/ m^2 。

由此可见,有夹制力时,由于围岩(近似为无限

平面)的弹性波吸能作用,爆破能量倾向于向自由面(阻力最小的方向)进行反射,从而撕裂岩石,因此导致爆破空腔减小,裂纹相对集中,爆破能量更为集中。

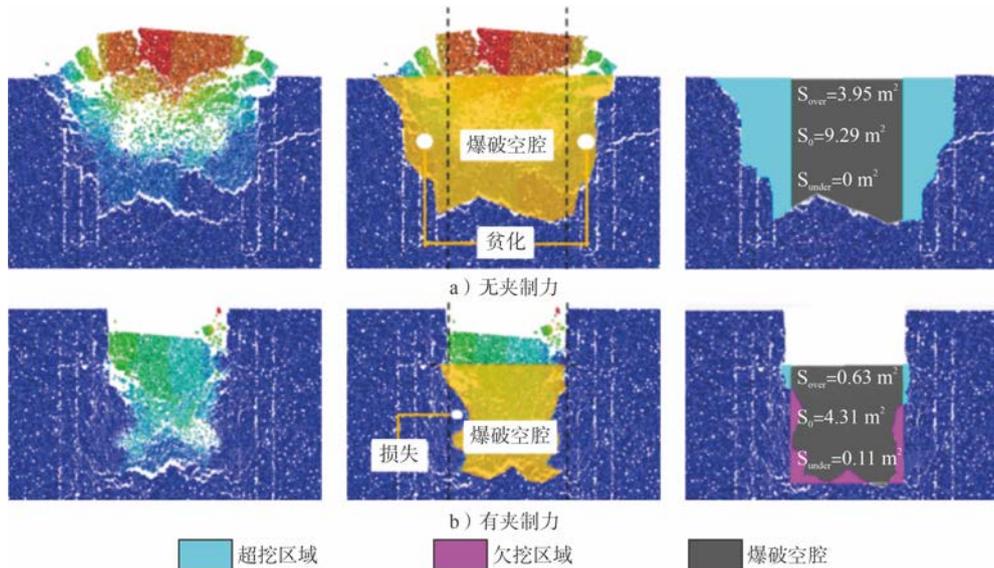


图9 有无夹制力超欠挖对比

Fig.9 Comparison of over and under excavation with and without compression force

4 现场应用效果

结合数值模拟爆破结果,由于围岩的夹制力导致爆破能量更为集中,因此为确保爆破效果,应将炮孔布置在近矿体边界处,最终根据现场情况将炮孔布置在矿体边界100 mm处,并采用相应的爆破参数进行现场试验,试验效果如图10所示。由图10可知:爆破后效果良好,炸药能量分布合理,大块率较低,无需进行二次破碎,便于铲运机倒运矿石。经统计,矿石贫化率为15%,采矿损失率为5%,炸药单耗为0.6 kg/t,现场应用效果与数值模拟效果相符合,证明数值模拟结果可信。

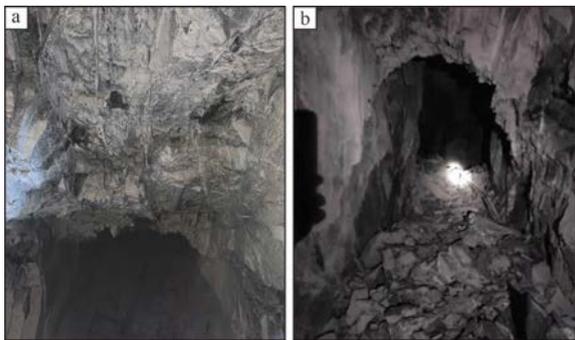


图10 现场爆破效果

Fig.10 Effect of on-site blasting

5 结论

本文通过对深部急倾斜薄矿体中深孔爆破过程

进行数值模拟,真实还原了中深孔爆破过程中围岩夹制力对爆破效果的影响,并取得了如下结论:

1) 针对该矿山的开采技术条件,通过经验方法初步确定的中深孔爆破孔网参数是可行的,因此炮孔直径可确定为65 mm,排距(抵抗线)为1.6 m。

2) 为量化深部急倾斜薄矿体中深孔爆破过程中围岩的夹制力作用,根据超挖、欠挖面积和裂纹密度,提出了相应的量化指标。

3) 有夹制力时,由于爆破空腔减小,裂纹相对集中,爆破能量更为集中,导致炮孔周围碎屑化严重,因此在深部急倾斜薄矿体中深孔爆破现场应用时,应将炮孔布置在近矿体边界处方能取得较好爆破效果。

4) 根据现场爆破效果,采用上述爆破孔网参数能够取得较好效果,相关研究成果可为其他矿山提供借鉴和设计经验。

[参考文献]

- [1] 杜树浩,王苹.柴胡栏子金矿急倾斜破碎薄矿体采矿方法选择与应用[J].黄金,2021,42(9):52-56.
- [2] 齐致富,李学锋,宋子贺,等.大洞金矿采矿工艺与采场稳定性分析研究[J].矿业研究与开发,2021,41(7):19-24.
- [3] 李波然,周佳琦.无底柱浅孔留矿采矿法在二道沟金矿的优化与应用[J].黄金,2021,42(7):47-49.
- [4] 齐致富,李学锋,宋子贺,等.急倾斜复杂薄矿体高效采矿法技术研究[J].矿业研究与开发,2021,41(4):1-5.
- [5] 杨臣堂,赵小葵,高伟.平底结构浅孔留矿采矿法在上官金矿的应用[J].黄金,2007,28(9):28-30.
- [6] 王元民,由松江,刘吉兴,等.脉内无固废精准开采采矿方法在嵩县山金的应用[J].黄金,2022,43(4):45-48.

- [7] 任玉东. 上向水平分层分步充填采矿法在红花沟金矿的应用[J]. 黄金, 2021, 42(10): 49-53, 58.
- [8] 周佳琦, 任玉东. 黄金矿山急倾斜薄矿脉开采工艺及发展趋势[J]. 黄金, 2022, 43(9): 35-38.
- [9] 黄文钿. 薄矿脉崩矿的夹制作用[J]. 江西冶金, 1982(3): 22-24.
- [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] 谢俊, 耿荣, 王宜勇, 等. 鑫达黄金矿业急倾斜薄矿体中深孔采矿方法的研究与优化[J]. 现代矿业, 2020, 36(11): 60-62.
- [12] 戚伟, 曹帅, 宋卫东. 中深孔嗣后废石充填采矿法在急倾斜薄矿脉开采中的试验应用[J]. 黄金, 2017, 38(2): 30-33.
- [13] 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.
- [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.
- [15] 安华明. 基于有限元与离散元混合模型的岩石动态破裂过程研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.

Quantitative analysis of compression force in medium long-hole blasting in deep steeply inclined thin ore bodies

Zhang Xiaorui^{1,2}, Jia Zhiwei³, An Long⁴

(1. Changchun Gold Research Institute Co., Ltd.;

2. Key Laboratory of Ground Control Management Plan in Deep Metal Mines, National Mine Safety Administration;

3. China National Gold Group Co., Ltd.;

4. Key Laboratory of Ministry of Education for Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University)

Abstract: During the medium long-hole blasting process in deep steeply inclined thin ore bodies, the surrounding rock's compression force often causes issues such as "inadequate blasting" or "excessive blasting" during production practice. This leads to significant mining losses and ore dilution. Based on the mining technical conditions of a specific mine and using PFC 2D numerical simulation software to numerically simulate the medium long-hole blasting process in deep steeply inclined thin ore bodies, a quantitative analysis was performed on the impact of surrounding rock compression force on blasting effects in deep steeply inclined thin ore bodies. It was determined that the borehole diameter should be 65 mm and the blast spacing (resistance line) should be 1.6 m. Field applications showed that the blasting results were satisfactory with a low block rate, an ore dilution rate of 15%, a mining loss rate of 5%, and an explosive consumption of 0.6 kg/t. The numerical simulation results were consistent with field blasting effects, and the corresponding blasting parameters can guide on-site production.

Keywords: deep mining; medium long-hole caving; medium long-hole blasting; steeply inclined thin ore body; numerical simulation; high compression force