水平侧向中深孔爆破采矿技术研究*

张洋[1],郑旭[1],郑志杰[2,3],黄丹[2,3]

(1.新疆喀拉通克矿业有限责任公司, 新疆 富蕴县 836107;
2.矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;
3.国家金属矿绿色开采国际联合研究中心, 北京 102628)

摘要:为了在新疆某铜镍矿实现安全高效开采,提出了一种水平侧向中深孔爆破采矿技术。首先采用经验类比法初步确定爆破参数为:炮孔直径65 mm,最小抵抗线1.625~2.275 m,炮孔间距1.300~2.275,孔内连续装药,炸药单耗0.35~0.5 kg/t,微差起爆时间间隔25 ms;炮孔间隔填塞,填塞长度分别为1 m和2 m。然后,采用LS-DYNA有限元分析软件对水平侧向中深孔爆破进行了数值模拟分析。数值模拟结果表明,在最小抵抗线为1.5 m、炮孔间距为1.0~1.5 m时,爆破能有效破岩,同时能保证充填体顶板的稳定性。最后,进行了现场验证试验。结果表明,爆破后的进路采场形状较为规整,预估超欠挖量低于10%,没有大块和粉矿,顶板充填体完整,取得了良好的爆破效果。

关键词:水平侧向中深孔爆破;下向进路胶结充填采矿法;爆破参数;数值模拟

中图分类号:TD235.33 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)08-0123-09

Research on Horizontal Lateral Medium-Deep Hole Blasting Mining Technology

Zhang Yang[1], *Zheng Xu*[1], *Zheng Zhijie*[2,3], *Huang Dan*[2,3]

(1.Xinjiang Kalatongke Mining Co., Ltd., Fuyun, Xinjiang 836107, China;
2.BGRIMM Technology Group Co., Ltd., Beijing 100160, China;
3.National Center for International Joint Research on Green Metal Mining, Beijing 102628, China)

Abstract: To realize safe and efficient mining in a copper-nickel mine in Xinjiang, a horizontal lateral medium-deep hole blasting mining technology was proposed. Firstly, blasting parameters are preliminarily determined by the empirical analogy method: the blast hole diameter is 65 mm, the minimum resistance line is 1.625-2.275 m, the hole spacing is 1.300-2.275 m, continuous in-hole charging is adopted, the unit explosive consumption is 0.35-0.5 kg/t, and the millisecond delay initiation interval is 25 ms. Interval stemming is adopted for blast holes, with stemming lengths of 1 m and 2 m respectively. Subsequently, the LS-DYNA finite element software was used to carry out numerical simulation analysis on horizontal lateral medium-deep hole blasting. The numerical simulation results show that rock can be effectively broken by blasting and the stability of backfill roof can be guaranteed when the minimum resistance line is 1.5 m and the hole spacing is 1.0-1.5 m. Finally, field verification tests were carried out. The results show that the shape of the drift stope after blasting is relatively regular. The predicted overbreak and underbreak volume is less than 10%, No oversize blocks or fine ore are generated, and the backfill roof remains intact, achieving favorable blasting performance.

Key words: Horizontal lateral medium-deep hole blasting, Downward cut-and-fill cemented mining method, Blasting parameter, Numerical simulation

0 引言

随着我国金属矿产资源需求增多,矿山开采量逐渐增大,传统的采用小结构参数采矿方法逐渐暴漏出多采场生产组织复杂、生产成本高、劳动强度大、人员设备在不稳定采场顶板下作业安全隐患大等问题,严重制约了矿山的发展[1-3]。因此,如何实现矿产资源的安全、高效开采是矿山企业所面临的

* **收稿日期**:2025-05-30
基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2904102)
作者简介:张洋(1974—),男,安徽庐江人,高级工程师,主要从事金属地下矿山安全、高效开采技术研究。E-mail:975346403@qq.com

技术难题。为了解决这一问题,近年来,逐步引入了以大直径中深孔、深孔落矿的大结构参数采矿方法,以期提高矿山生产能力和开采效率,降低安全隐患[4-7]。

中深孔开采的安全性、高效性及经济性使之成为矿山实现安全、高效开采的有效途径[8-9]。但是使用中深孔开采技术提高了回采爆破的质量要求,如果爆破参数选取不当,极易造成采场的超欠挖,导致矿石损失或贫化,因而合理的中深孔爆破参数是成功应用中深孔开采技术的关键。目前,中深孔爆破参数的确定方法主要有经验类比[10-11]、爆破试验[12-14]和数值模拟[15-16]等方法。经验类比法是一种常用的方法,其核心是通过类似工程案例的经验数据来推导当前工程的爆破参数。但是,经验类比法在很大程度上依靠工程师的主观经验和数据的积累,不确定性较大,难以保证爆破参数的合理性。现场爆破试验是确定爆破参数的有效方法之一,能够确定较为合理的爆破参数,但是存在试验成本高、可重复操作性小等问题。近年来,随着计算机技术的发展,数值模拟法凭借成本低、速度快、能够可视化的特点,被广泛应用到中深孔爆破参数研究。采用数值模拟法研究爆破参数时,涉及的方法主要包括有限元法[17-18]、有限差分法[19-20]、离散单元法[21-23]、光滑粒子流法[24-26]等。使用显式非线有限元分析软件 LS-DYNA 模拟爆破过程时,通过引入岩体损伤本构模型和定义炸药参数,实现爆破荷载的添加与模拟。但是,这种方法需要确定的参数较多,实际操作过程中受到多种条件的限制。离散单元法、光滑粒子流法虽然能够实现爆破作用下的岩体破裂过程模拟,但是无法模拟炸药的起爆过程,只能通过添加等效爆破荷载才能实现爆破模拟,与实际存在一定差异。

本研究以新疆某铜镍矿为工程背景,为了实现矿山安全、高效开采,引入一种以水平中深孔侧向爆破为核心的中深孔采矿技术。在此基础上,采用经验类比法,初步确定中深孔爆破参数,然后采用数值模拟方法进一步优化中深孔爆破参数,并应用于工程实践。研究结果可为同类型矿山的安全、高效开采提供理论支撑和经验参考。

1 工程背景

1.1 矿山概况

新疆某铜镍矿的设计生产规模为 5 400 t/d,现主要开采 1 号、2 号和 3 号矿体,其中 2 号矿体为主要供矿矿体。根据现有工程揭露的岩性特征可知,铜镍混合矿体是主矿体,矿体规整,层位稳定,分布在岩体底部辉长苏长岩相内,产状为月牙状,走向 310°,倾向 SW,倾角 30°～60°,上部薄、下部厚,厚度为 30～40 m,属于典型的急倾斜中厚矿体。

1.2 采矿方法

当前新疆某铜镍矿开采 2 号矿体的主要采矿方法为下向进路胶结充填采矿法。在矿体走向方向每 80～120 m 划分为一个盘区,进路断面规格为(3.5～4.5) m×(3.5～4.5) m。回采进路垂直矿体走向布置,进路的长度为矿体厚度。相邻回采进路隔二采一(岩石性质较好)或隔三采一。进路回采结束,立即进行充填作业。进路下部 1.5～2 m 采用灰砂比为 1∶4 的胶结充填料浆充填,上部(2.0～2.5 m 高)采用灰砂比为 1∶8～1∶10 的胶结充填料浆充填。

1.3 开采技术难题

随着生产规模扩大以及开采深度的增加,下向进路胶结充填采矿法采矿过程中逐步暴露出了采切工程量大、采矿效率偏低、采矿成本偏高、作业面多且复杂、工人劳动强度大、安全管理难度大、通风条件差等一系列问题,严重制约了矿山的发展。因此,如何提高矿石开采效率、实现安全高效开采成为了新疆某铜镍矿面临的技术难题。

2 水平侧向中深孔爆破技术

2.1 水平侧向中深孔采矿方法

该矿山为了解决下向进路胶结充填采矿过程中出现的难题,引入水平侧向中深孔采矿方法,如图 1 所示。在盘区内,以壁式工作面沿区段全长推进,下向进路的断面尺寸为 5.0 m(宽)×4.0 m(高),长度为 30 m,预留补偿空间宽度 2.0 m,采用中深孔落矿技术,中深孔平行于采场长度方向。为了能够形成补偿空间,在上一循环中深孔采场开采完成后,在距离下一循环工作面 2.0 m 处架设充填挡墙,以此来形成补偿空间。

为了能够有效破岩,降低爆破时矿岩的夹制作用,中深孔爆破分两次进行,首先爆破 A 区域,出矿完成后再爆破 B 区域,采用无轨运输设备通过采场两端的巷道运出崩落的矿石。经计算,水平侧向中深孔采矿方法的生产能力为 540 t/d,远大于下向进路胶结充填采矿法的生产能力(60 t/d),提高了生产效率,避免了人员直接暴露在不稳定的充填顶板下作业,施工组织较为简单。

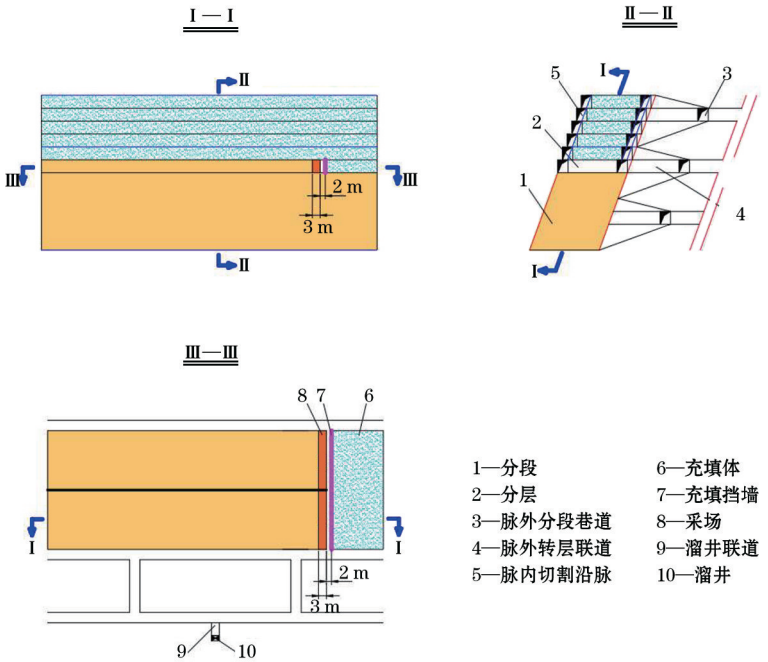


图 1 水平侧向中深孔采矿方法

Fig.1 Horizontal lateral medium-length hole mining method

2.2 中深孔爆破参数设计

采用经验类比法设计水平侧向中深孔爆破参数。

(1) 炮孔直径。影响炮孔直径的因素主要有使用的凿岩设备、炸药威力以及岩石特性。采用接杆式凿岩机凿岩的时候,主要取决于连接套杆的直径和必须的装药体积,孔径范围一般为 50～75 mm,以 55～65 mm 居多。根据炮孔直径与炮孔深度的关系(见表 1)可知[27],当炮孔深度为 15 m 时,炮孔直径为 51～64 mm。依据矿山现有凿岩设备情况,最终确定炮孔直径为 65 mm。

表 1 炮孔深度与炮孔直径之间的对应关系[27]

Table 1 Corresponding relationship between hole depth and hole diameter[27]

炮孔直径/mm	炮孔深度/m	凿岩方式
51	10～15	接杆式
64	10～15	接杆式
73	12～20	接杆式
76	20～25	接杆式
89	25～35	潜孔式
102	25～40	潜孔式
115	40～50	潜孔式
140	40～60	潜孔式

(2) 炸药单耗。炸药单耗的大小主要与矿岩的可爆性、孔径、炸药性能和采幅宽度等因素有关,即当矿石致密坚固、孔径小、炸药威力低时,炸药单耗高,反之炸药单耗低。表 2 中列出了岩石坚固性系数与炸药单耗之间的关系。由于该矿山的岩石比较破碎(岩石坚固性系数小于 8),因此,确定炸药单耗为0.35～0.50 kg/t。

表 2 地下中深孔爆破单位炸药消耗量

Table 2 Unit explosive consumption for underground deep hole blasting

岩石坚固性系数 f	一次爆破炸药单耗/(kg/t)	二次爆破炸药消耗占比/%
3～5	0.2～0.35	10～15
5～8	0.35～0.5	15～25
8～12	0.5～0.8	25～35
12～16	0.8～1.1	35～45
≥16	1.1～1.5	≥45

(3) 最小抵抗线。最小抵抗线 W 是最重要的爆破参数之一,应根据钻孔直径、岩石特性、炸药威力以及对岩石破碎程度的要求等因素来确定。柯瓦然柯夫通过总结大量实测数据,认为在保证一定的爆破矿量及允许的块度条件下,最小抵抗线 W 与炮孔直径 d 存在如下关系:

$$W=(25\sim35)d \tag{1}$$

由式(1)得到最小抵抗线为 1.625～2.275 m。

(4) 孔间距。孔间距 a 可采用下式计算:

$$a=mW \tag{2}$$

式中:m 为炮孔密集系数,一般控制在 0.8～1.0 之

间;W 为最小抵抗线。

依据 $m=0.8\sim1.0$ 和 $W=1.625\sim2.275$ m,可由式(2)计算得出 $a=1.300\sim2.275$ m。

(5) 填塞长度。为了保护未爆破炮孔以及避免孔口炸药能量集中,通常在炮孔孔口设置一定的长度不装药,爆破采用间隔填塞方式。根据该矿现场经验,确定炮孔最小填塞长度为 1.0 m,最大填塞长度为 2.0 m。

(6) 微差起爆时间。考虑应力波叠加作用,微差起爆时间间隔过大、间隔较小或没有微差时间均不利于矿岩的破碎,依据该矿爆破经验,确定中深孔爆破的微差起爆时间为 25 ms。

(7) 起爆方式和起爆顺序。考虑到补偿空间受限的条件,采用孔底起爆方式。为了降低爆破振动,采用微差起爆方式来控制每次爆破的最大段药量,自中间至底板、顶板和自由面至待爆区的顺序依次起爆炮孔。采用数码电子雷管及乳化炸药起爆,粉状岩石膨化硝铵炸药爆破。

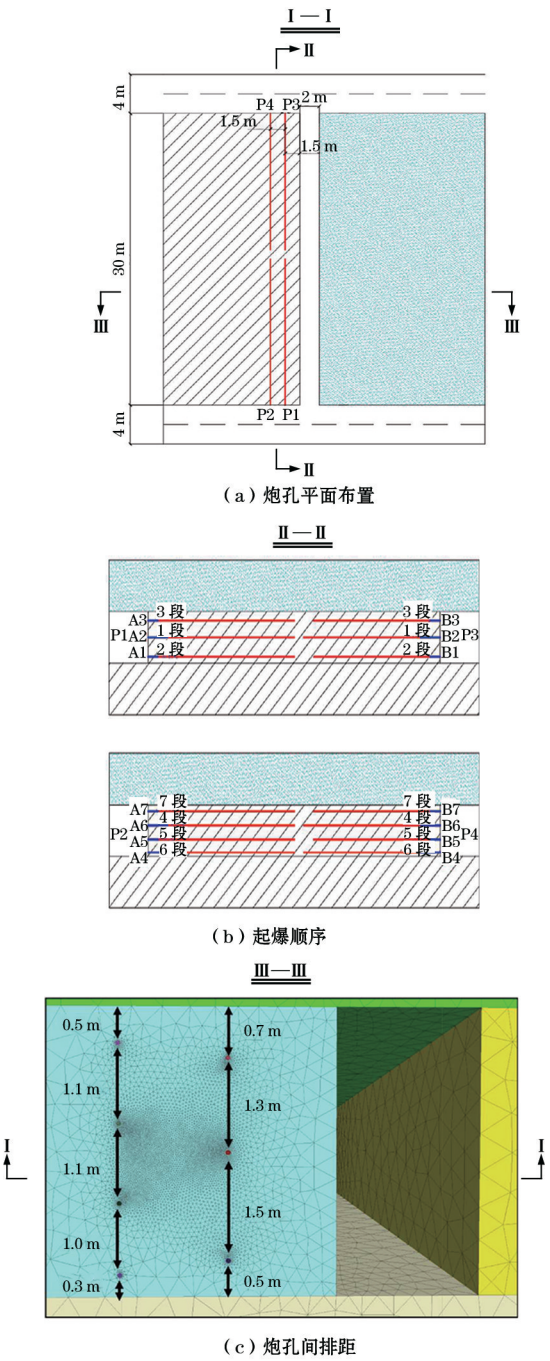
综上所述,初步设计的中深孔爆破参数如下:炮孔直径为 65 mm,最小抵抗线为 1.625~2.275 m,炮孔间距为 1.300~2.275 m,炮孔密集系数为 0.8~1.0,采取连续装药的方式,炮孔填塞长度为 1 m 或 2 m,中深孔爆破微差起爆时间为 25 ms,采用孔底起爆方式,自中间至底板、顶板和自由面至待爆区的顺序依次起爆炮孔。

3 水平侧向中深孔爆破模拟研究

在上述爆破参数的基础上,采用数值模拟方法开展水平侧向中深孔爆破研究。为了能够精确施加爆炸载荷,达到爆破载荷下岩体破裂破碎、破碎块体间碰撞及堆积过程的高效计算,采用连续-非连续单元方法(Continuum Discontinuum Element Method, CDEM)开展爆破模拟研究。CDEM 软件已被证明能够用于岩石爆破破碎效果、爆破振动等的精确模拟及分析[28-30]。

3.1 模型的建立

设计如图 2 所示的爆破方案。炮孔的间排距如图 2(c)所示,其中,A1~A3 炮孔为 P1 排,A4~A7 炮孔为 P2 排,B1~B3 炮孔为 P3 排,B4~B7 炮孔为 P4 排。爆破分两次进行,起爆顺序如图 2(b)所示,第一次进行 A 组炸药的爆破,第二次进行 B 组炸药的爆破,微差起爆间隔时间为 25 ms。根据以上爆破方案建立数值计算模型,如图 3 所示。



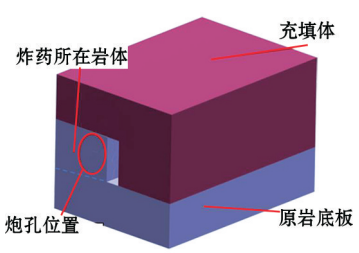
(a) 炮孔平面布置

(b) 起爆顺序

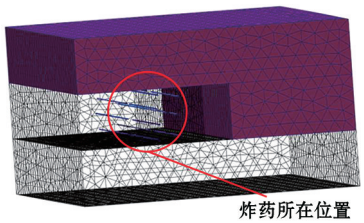
(c) 炮孔间排距

图 2 中深孔爆破方案

Fig.2 Medium-length hole blasting plan



(a) 采场模型



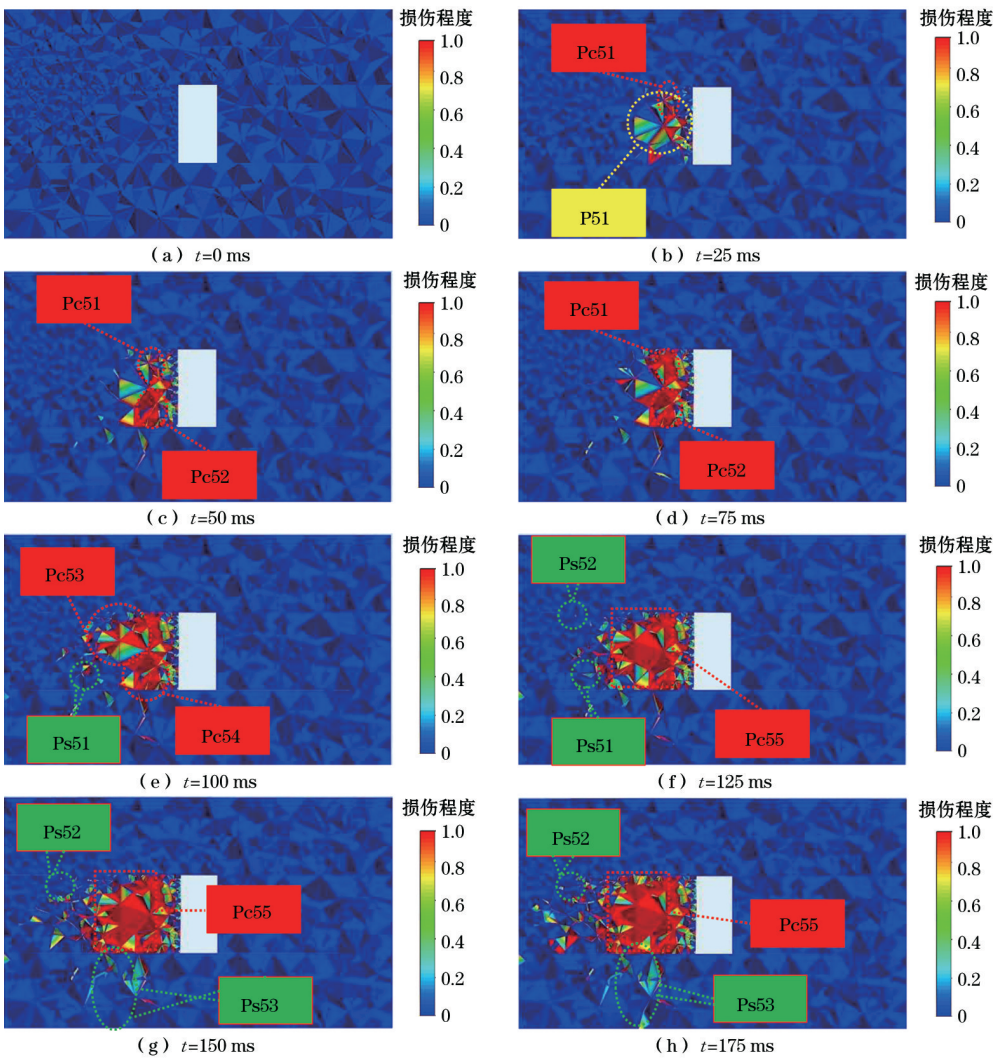
(b) 炮孔布置

图 3 水平侧向中深孔爆破数值模拟模型

Fig.3 Numerical simulation model of horizontal lateral medium-length hole blasting

3.2 结果分析

A 组炸药爆破的模拟结果如图 4 所示。从整体爆破效果来看,炸药的作用范围和对岩石块体的损伤程度随爆破进行逐渐扩大和增强,最终较为显著的爆破作用已经波及到岩壁内侧 3 m 左右的位置。t=25 ms 时刻,爆破作用发展至内侧 1.5 m 左右,损伤程度较低(在 0～0.4 之间),同时靠近顶板处有极少部分的完全损伤。t=50 ms 时,A1 炮孔已经完成爆破,从图 4(c)可以观察到,炸药的作用范围已经扩展到底板附近。t=75 ms 时刻,外侧 3 个炮孔的炸药冲击作用结束,3 个炮孔爆破的作用范围在 1.5 m 左右,损伤程度在 0.6 左右,夹杂着部分完整的块体,更深处块体虽然曾出现一些损伤,但程度较低。t=125 ms 时刻,岩壁内侧中部的 A6、A5 炮孔爆破结束,从图 4(e)和图 4(f)可以看出,内外两侧炮孔中间的岩体在之前爆破作用的基础上进一步加剧损伤,已经完全损伤破坏,外侧岩块由于之前的爆炸作用已产生了裂隙,此时爆炸产生的能量逸散,岩块虽然保持完整,但易从岩体中滑落至巷道。t=150 ms 时刻,A4 炮孔爆破结束后,内侧靠近底板处的爆破作用得到补充,从图 4(g)观察到,此时顶、底板岩体的损伤程度接近一致,3 m 范围内大部分岩块损伤程度在 0.8～1.0 范围内。



(a) t=0 ms (b) t=25 ms (c) t=50 ms (d) t=75 ms (e) t=100 ms (f) t=125 ms (g) t=150 ms (h) t=175 ms

图 4 A 组炸药爆破过程中各时间节点的损伤云图

Fig.4 Damage cloud maps at various time nodes during the blasting process of group A explosive

从图 4(h)可以观察到,此时岩体的损伤程度相较之前没有显著增大,只是轻度损伤,损伤程度在 0.4～0.6 之间,且四处分散,约在岩壁内侧 4 m 左右,这是因为岩石的不均匀性使得某些岩块承受冲击的能力弱,导致一些远离爆破点的岩块发生损伤破坏。

B 组炸药爆破的模拟结果如图 5 所示。由图 5(a)可知,受到 A 组炸药爆破的影响,B 组炸药开始爆破之前,岩体内侧已有轻微损伤(Ps61),且自由面处存在少许裂纹。B 组炸药爆破各时刻的爆破效果扩展过程与 A 组炸药爆破效果类似,不同之处在于相同时刻下的损伤效果更为彻底,云图中代表完全损伤的红色部分(颜色标识见电子版)比 A 组炸药爆破时的面积更大,完全损伤的范围接近 4 m,并且连成一片。越远离自由面,岩石损伤程度越低,岩体深处产生了一些损伤线条,延伸至 5 m 左右,爆破范围较 A 组更大。A 组炸药爆破时的冲击作用沿着炮孔方向传播到 B 组炸药爆破范围内的岩体,导致其内部产生了一些细小裂缝,这些细小的裂缝在 B 组炸药爆破冲击下进一步扩展,岩体间的接触面断开所需要的能量更低,使得岩体损伤范围变大,爆破作用也延伸到了深部岩体。

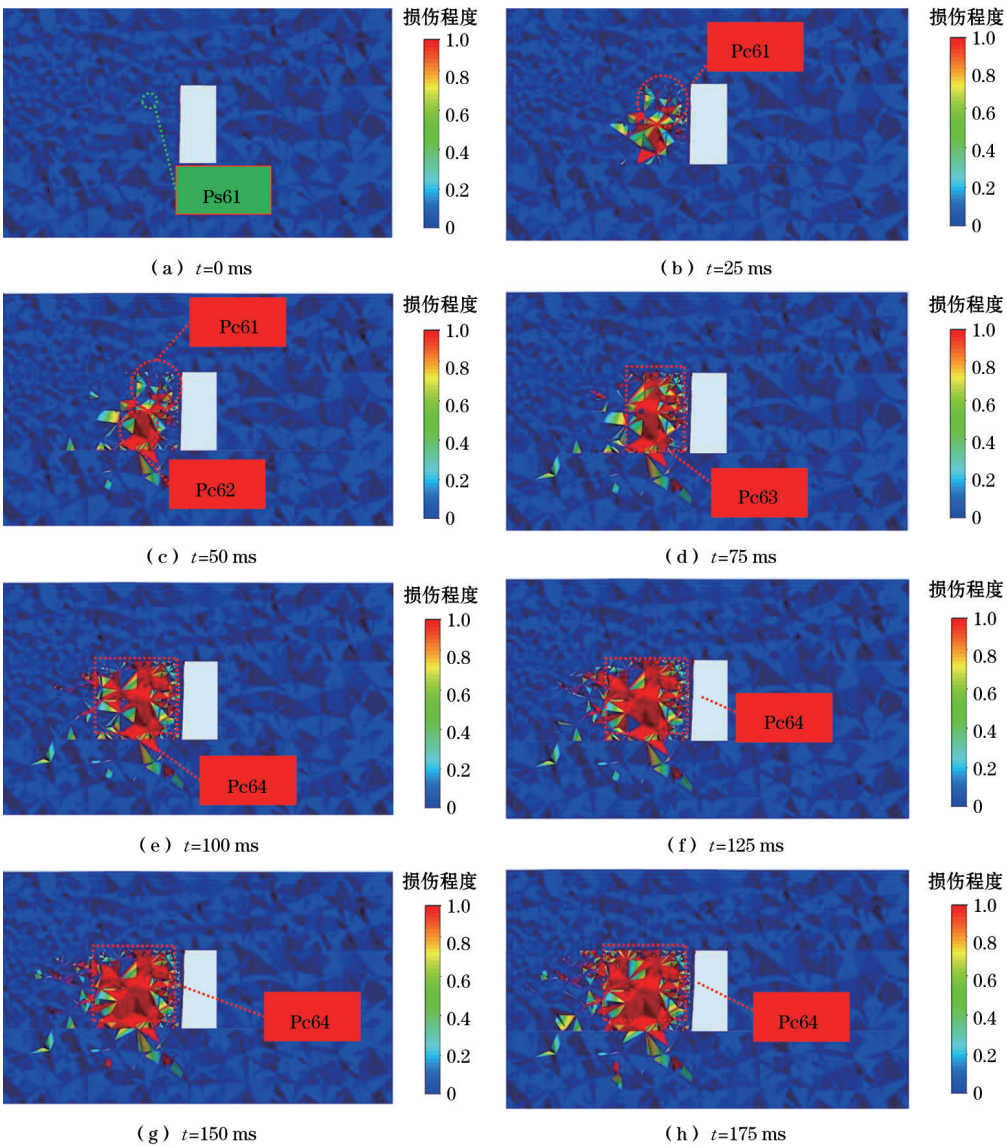


图 5 B 组炸药爆破过程中各时间节点的损伤云图

Fig.5 Damage cloud maps at various time nodes during the blasting process of group B explosive

通过上述分析可知,采用水平侧向中深孔爆破后,待爆区岩体完全破坏,同时充填体顶板受到了一定程度的损伤,但损伤破坏的范围较小,爆破振动影响可控。需要特别说明的是,本次爆破模拟没有考虑

矿山岩体不同尺度的结构面,采场岩/矿体完整,爆破应力波的传播过程不受岩/矿体介质中不连续面或断裂面的影响而衰减,得出的爆破影响范围偏大。

4 现场工业试验

在新疆某铜镍矿进路 440 m 中段进行了回采试验,以验证水平侧向中深孔回采爆破参数的合理性。爆破效果如图 6 所示。由图 6 可知,爆破效果良好,进路轮廓较为规整,预估超欠挖量低于 10%,顶板充填体完整,没有明显的超挖。爆破块度较为均匀,平均块度约为 100 mm,大块产出率及粉矿率较小,达到了爆破的预期效果。

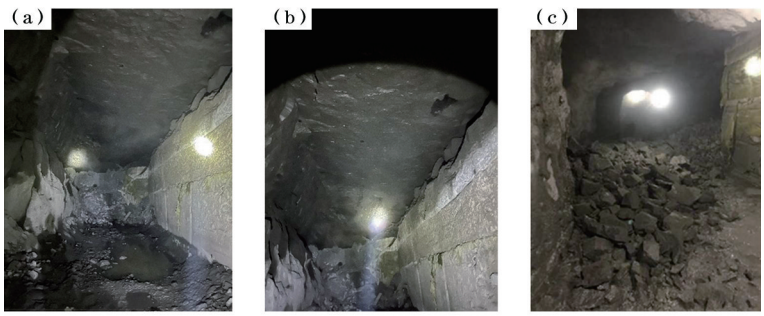


图 6 水平侧向中深孔回采爆破试验效果

Fig.6 The test results of horizontal lateral medium-length hole mining blasting

5 结论

(1) 为了在新疆某铜镍矿实现安全高效开采,提出了水平侧向中深孔采矿技术。采用经验类比法,初步计算了水平侧向中深孔爆破参数如下:炮孔直径为 65 mm,炸药单耗为 0.35～0.50 kg/t,最小抵抗线 1.625～2.275 m,炮孔间距 1.300～2.275 m,微差起爆时间间隔 25 ms,采取连续装药,炮孔间隔填塞,填塞长度分别为 1 m 和 2 m。

(2) 对水平侧向中深孔爆破回采进行数值模拟分析。模拟结果表明,最小抵抗线为 1.5 m、炮孔间距为 1.0～1.5 m 时,能够有效破岩,同时充填体顶板会受到部分损伤,但损伤破坏范围较小,爆破振动的影响可控。

(3) 通过现场工业试验验证水平侧向中深孔爆破参数的合理性。在新疆某铜镍矿 440 m 中段进行了现场试验,爆破后的进路采场形状较为规整,预估超欠挖量低于 10%,顶板充填体完整,没有明显的超挖,没有产生明显的大块和粉矿,爆破效果良好。

参考文献(References):

[1] 张宝,李永辉,盛佳.深部高应力破碎矿床下向进路充填采矿法盘区卸荷回采应用研究[J].矿业研究与开发,2023,43(11):6-11.
Zhang Bao, Li Yonghui, Sheng Jia. Application research on panel unloading mining of downward drift filling mining method in deep broken deposit under high stress[J]. Mining Research and Development,2023,43(11):6-11.

[2] 何鹏,钟周颖.上向水平分层充填采矿法采场结构参数优化研究[J].采矿技术,2024,24(5):21-26.
He Peng, Zhong Zhouying. Research on optimization of stop structure parameters for upward horizontal layered filling mining method[J]. Mining Technology,2024,24(5):21-26.

[3] 邓玉彬,周益龙,林永生.我国下向分层充填采矿法现状及发展趋势[J].采矿技术,2021,21(2):9-12.
Deng Yubin, Zhou Yilong, Lin Yongsheng. The current situation and development trend of downward layered filling mining method in China[J]. Mining Technology, 2021, 21(2):9-12.

[4] 陈鑫.地下矿扇形中深孔装药设计模型研究与应用[J].黄金科学技术,2024,32(6):1107-1115.
Chen Xin. Research and application of model for fan-shaped medium-deep hole charging design in underground mines[J]. Gold Science and Technology,2024,32(6):1107-1115.

[5] 安龙,韩琳,王智,等.阶段采场"品"字形无井切槽爆破机理研究[J].东北大学学报(自然科学版),2024,45(11):1612-1620+1628.
An Long, Han Lin, Wang Zhi, et al. Research on blasting mechanism of "pin"-shaped slotting without raise in sublevel stope[J]. Journal of Northeastern University Natural Science),2024,45(11):1612-1620+1628.

[6] 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.
Luo Haohao, Yang Renshu, Ma Xinmin, et al. Study on the distribution characteristics of deep hole blasting in the fan-shaped hole of Shilu Iron Mine[J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2023,40(2):371-378.

[7] 郭利杰,刘光生,马青海,等.金属矿山充填采矿技术应用研究进展[J].煤炭学报,2022,47(12):4182-4200.

Guo Lijie, Liu Guangsheng, Ma Qinghai, et al. Research progress on mining with backfill technology of underground metalliferous mine[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(12):4182-4200.

[8] 吴大伟.三山岛金矿倾斜中厚矿体菱形采场围岩稳定性分析与控制[D].沈阳:东北大学,2023.
Wu Dawei. Stability analysis and control of surrounding rock of rhombic stope of inclined medium thick orebody in Sanshandao Gold Mine[D]. Shenyang:Northeastern University,2023.

[9] 许文远.破碎矿体交错布置大跨度下向分段充填采矿技术研究[D].北京:北京科技大学,2024.
Xu Wenyuan. Research on large-span interleaved downward sublevel open stoping with backfill mining technology for fragmented ore bodies[D]. Beijing:University of Science and Technology Beijing,2024.

[10] 冯庆杰,谷亚州,周颜军.三贵口铅锌矿中深孔爆破参数优化研究与应用[J].矿业研究与开发,2025,45(3):66-73.
Feng Qingjie, Gu Yazhou, Zhou Yanjun. Optimization and application of medium and deep hole blasting parameters in Sanguikou lead-zinc mine [J]. Mining Research and Development,2025,45(3):66-73.

[11] 谷亚州,史秀志,刘文华,等.上向中深孔掏槽爆破炮孔布置方式优化研究[J].矿冶工程,2023,43(6):24-28.
Gu Yazhou, Shi Xiuzhi, Liu Wenhua, et al. Optimization of blasthole layout in upward cutting blasting with medium hole length[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2023,43(6):24-28.

[12] 刘朕,杨仁树,左进京,等.新型双聚能药包裂纹扩展规律及周边控制爆破试验研究[J].中国矿业大学学报,2024,53(6):1171-1184+1197.
Liu Zhen, Yang Renshu, Zuo Jinjing, et al. Experimental study on the crack propagation rule of a new type of dual-charge and its surrounding controlled blasting[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(6):1171-1184+1197.

[13] 陈星艮,关富傈,付兆凯,等.裂隙发育岩体水电工程地下洞室预裂爆破试验研究[J].爆破,2024,41(2):67-74.
Chen Xinggen, Guan Fusu, Fu Zhaokai, et al. Experimental study on pre-splitting blast of underground caverns in fractured rock mass[J]. Blasting,2024,41(2):67-74.

[14] 潘祖瑛,张西良,仪海豹,等.离心不耦合条件下寒区碎软岩体预裂爆破参数优化方法[J].金属矿山,2024(9):161-166.
Pan Zuying, Zhang Xiliang, Yi Haibao, et al. Optimization method for pre-splitting blasting parameters of fractured soft rock mass in cold regions under centrifugal decoupling conditions[J]. Metal Mine,2024(9):161-166.

[15] 刘淑鹏,李祥龙,简锡明,等.基于损伤的光面爆破参数优化数值模拟研究[J].中国矿业,2023,32(11):116-125.
Liu Shupeng, Li Xianglong, Jian Ximing, et al. Numerical simulation study on parameter optimization of smooth blasting based on damage[J]. China Mining Magazine,2023,32(11):116-125.

[16] 张钦礼,蒋超余,高翔,等.大断面六角形进路采矿法结构参数优化研究[J].黄金科学技术,2020,28(1):42-50.
Zhang Qinli, Jiang Chaoyu, Gao Xiang, et al. Study on optimization of structural parameters of hexagonal mining method with large cross-section [J]. Gold Science and Technology,2020,28(1):42-50.

[17] 费鸿禄,郭玉新.基于 LS-DYNA 的交错扇形深孔崩落法排间间隔时间优化研究[J].中国安全生产科学技术,2022,18(4):127-134.
Fei Honglu, Guo Yuxin. Study on optimized selection for row interval time of staggered sector deep-hole caving method based on LS-DYNA[J]. Journal of Safety Science and Technology,2022,18(4):127-134.

[18] 翟利军,徐新海,王正英,等.大直径深孔采矿法采场边孔爆破参数的优化[J].矿业研究与开发,2022,42(8):24-28.
Zhai Lijun, Xu Xinhai, Wang Zhengying, et al. Optimization of side hole blasting parameters in stope mined by large-diameter deep hole mining method [J]. Mining Research and Development,2022,42(8):24-28.

[19] 王翼,李珍,尹圣凯,等.基于 FLAC3D 软件的凝灰岩矿溜井爆破降段动应力数值模拟及稳定性分析[J].中国矿业,2022,31(3):117-123.
Wang Yi, Li Zhen, Yin Shengkai, et al. Numerical simulation and stability analysis of dynamic stress in the descending section of tuff mine chute blasting based on FLAC3D software[J]. China Mining Magazine,2022,31(3):117-123.

[20] 郭志东,祝贺超,潘博,等.充填法开采过程中爆破震动波传递规律与围岩破坏模式研究[J].金属矿山,2025(1):65-71.
Guo Zhidong, Zhu Hechao, Pan Bo, et al. Study on transmission law of blasting vibration wave and failure mode of surrounding rock in filling mining process [J]. Metal Mine,2025(1):65-71.

[21] 赵鑫,刘殿书,梁书峰,等.基于神经网络的爆堆数值模拟力学参数确定研究[J].北京理工大学学报,2024,44(11):1116-1127.
Zhao Xin, Liu Dianshu, Liang Shufeng, et al. Research on the evolution law of explosive pile morphology based on discrete element method and neural network algorithm[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2024, 44(11):1116-1127.

[22] 郭隆基,何满潮,瞿定军,等.NPR 锚杆/索围岩动力响应数值模拟分析[J].东北大学学报(自然科学版),2022,43(8):1159-1167.
Guo Longji, He Manchao, Qu Dingjun, et al. Numerical simulation of dynamic response of surrounding rock anchored by NPR bolt/cable[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2022,43(8):1159-1167.

[23] 朱万成,代风,任敏,等.动态扰动下顶板块体失稳冒落研究综述[J].工程科学学报,2023,45(9):1425-1440.

Zhu Wancheng, Dai Feng, Ren Min, et al. Review of unstable falling of roof rock blocks under dynamic disturbance[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(9):1425-1440.

[24] 朱淳,胡南翔,张晓虎,等.基于光滑粒子流方法的双向聚能张拉爆破数值模拟[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(6):2122-2133.
Zhu Chun, Hu Nanxiang, Zhang Xiaohu, et al. Numerical simulation of bidirectional cumulative tension blasting based on smoothed particle flow method[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(6): 2122-2133.

[25] 卢文波,孟婷,胡英国.岩石爆破破碎模拟和块度预报的研究现状与展望[J].工程爆破,2024,30(5):20-28.
Lu Wenbo, Meng Ting, Hu Yingguo. A review of numerical simulation of rock fragmentation by blasting and prediction of fragments[J]. Engineering blasting, 2024, 30(5):20-28.

[26] 刘媛媛,侯哲生,卜志凌.预切槽对钻孔内撑式破岩效果影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(增刊2):4045-4053.
Liu Yuanyuan, Hou Zhesheng, Bu Zhiling. Experimental study on influence of pre-cutting slot for breaking effect in rock splitting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(Suppl.2):4045-4053.

[27] 安龙,符洲云,张家华,等.低品位厚大矿体下向扇形深孔爆破精细控制与参数寻优方法[J].金属矿山,2025(5):89-98.
An Long, Fu Zhouyun, Zhang Jiahua, et al. Fine control and parameter optimization method of deep hole blasting in low-grade thick orebody sublevel fan shape[J]. Metal Mine, 2025(5):89-98.

[28] 杨仁树,丁晨曦,杨立云,等.岩石爆破基础理论研究进展与展望Ⅱ—动静关系[J].工程科学学报,2024,46(12):2133-2146.
Yang Renshu, Ding Chenxi, Yang Liyun, et al. Advancements and future prospects in the fundamental theories of rock blasting research Ⅱ-Dynamic-static relationship[J]. Chinese Journal of Engineering, 2024, 46(12):2133-2146.

[29] 丁晨曦,梁欣桐,杨仁树,等.高地应力巷道掏槽爆破的应力演化与损伤破裂研究[J].煤炭科学技术,2024,52(7):79-88.
Ding Chenxi, Liang Xintong, Yang Renshu, et al. Study on stress evolution and damage fracture of cut blasting in high in-situ stress roadway[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7):79-88.

[30] 任慧敏,冯春,唐昊天,等.基于CDEM的岩石基坑爆破效果的数值模拟[J].工程爆破,2022,28(6):15-24+41.
Ren Huimin, Feng Chun, Tang Haotian, et al. Numerical simulation of blasting effect of rock foundation pit based on CDEM[J]. Engineering blasting, 2022, 28(6):15-24+41.