

深部复杂工况巷道混合起爆网络周边成形控制应用研究

李芹涛,袁永忠,李明辉,杨 乙,呼亚洲

(莱州汇金矿业投资有限公司)

摘要: 纱岭金矿回风井 -1 200 m 水平巷道爆破掘进施工受地应力、层理和矿井水等复杂工况的影响,爆破成形差,辅助作业时间长,施工进度缓慢。为解决上述问题,采用数码电子雷管-导爆索混合起爆网络周边成形控制技术,优化原始爆破方案并开展了现场试验。试验结果表明:优化后的数码电子雷管-导爆索混合起爆网络光面爆破方案显著提高了爆破成形效果,降低了围岩损伤,半孔痕率提高了 54.5 百分点,超挖系数下降了 21.7%,作业时间缩短了 15%,经济成本每循环降低了 185.7 元,实现了深部复杂工况巷道的周边成形质量控制,为类似巷道爆破工程提供了参考。

关键词: 深部开采;金矿;巷道;地应力;矿井水;混合起爆网络;光面爆破;爆破效果

中图分类号:TD235

文章编号:1001-1277(2024)08-0046-06

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20240806

引 言

随着浅部矿产资源的开采殆尽,国内外金属矿山逐步向深部开采迈进,千米以上的深部矿产资源开采将趋于常态化^[1]。巷道作为矿山建设动脉工程,是矿井重要的运输和通风通道,其建设质量直接影响矿山的安全生产和经济效益。莱州汇金矿业投资有限公司(下称“纱岭金矿”)回风井 -1 200 m 水平巷道爆破掘进施工中,受地应力大、层理复杂、矿井水丰富等复杂不利工况影响,巷道爆破成形差,辅助作业时间长,施工进度缓慢,严重影响了安全生产和工程进度。传统爆破技术已难以满足该复杂工况下巷道施工的质量要求,亟须探索合适的爆破方法提高巷道成形质量。

目前,众多学者对矿山巷道的周边成形控制方法进行了大量研究,取得了一定的成果。刘翔宇等^[2]通过数值模拟分析研究隧道周边孔毫秒延时爆破对围岩成形质量的影响,结果表明孔间延时和药量对损伤范围有显著影响,延时适中时损伤范围最小,且花岗岩的损伤小于砂岩。ZHENG 等^[3]使用分形损伤定量评估了试验和数值结果中的爆破损伤,为周边成形质量的定量评价提供了参考。岳中文等^[4]利用新型数字激光动态焦散线试验系统,采用有机玻璃板试件研究了含预制不同形状空孔对岩石定向断裂控制爆破的影响,得出菱形空孔最有利于实现围岩成形控制,爆生主裂纹扩展速度最大,动态应力强度因子相对较小。杨仁树等^[5]通过优化爆破参数和进行对比试验,研究了切缝药包在岩巷快掘中的适应性,结果

表明切缝药包既能提高经济效益,又能显著提升成形质量。史国利等^[6]使用分形理论和 MATLAB 研究了不同不耦合系数下切缝药包的爆破损伤特征,发现不耦合系数为 1.67 时,对裂纹扩展的定向控制效果最佳。然而,在复杂工况下,诸如地应力^[7]大、层理^[8]复杂、矿井水^[9]丰富等情况下,爆生裂纹扩展受到显著影响,如何实现周边成形控制仍是一个难题。刘博等^[10]研究发现,雷管-导爆索混合起爆网络通过优化爆破能量分布,可以有效改善周边成形质量。将其中的雷管替换为当前广泛应用的数码电子雷管^[11],实现爆破的精准控制和延时,有望进一步提升该方法在周边成形控制的效果。

尽管混合起爆网络爆破方案在爆破成形控制上已经取得了一定成效,但数码电子雷管-导爆索混合起爆网络在复杂工况下的研究与实践尚需深入。本文以纱岭金矿回风井 -1 200 m 水平巷道爆破施工为依托,采用数码电子雷管-导爆索混合起爆网络周边成形控制技术,充分考虑到现场施工中地应力大、层理复杂、矿井水丰富等不利工况的影响,优化原始爆破方案并开展了现场试验。研究成果旨在为类似工程的爆破设计和施工优化提供参考。

1 工程概况

1.1 工程背景

纱岭金矿位于山东省莱州市朱桥镇,包含主井、副井、进风井和回风井 4 项竖井工程,均为超千米深井。其中,回风井井筒净直径为 8.0 m,深度为 1 343.1 m,

现场试验巷道位于回风井 -1 200 m 水平,施工长度 174.718 m,荒宽 4 800 mm,荒高 4 400 mm,直墙三心拱断面,净断面面积 18.32 m²,荒断面面积 19.51 m²。

回风井 -1 200 m 水平巷道主要由长石、石英、斜长石、绢云母、高岭土、绿帘石等矿物组成。岩石以柱状、块状、碎块状为主,RQD 值平均为 41 %,为坚硬岩,但岩体较破碎,线裂隙率 5 ~ 10 条/m,以与岩芯轴夹角 35° ~ 40°,65° ~ 75° 2 组为主,裂面平直光滑,局部充填有碳酸盐。现场勘查发现,在掘进面存在 2 条较为明显的层理,如图 1 - a) 所示。

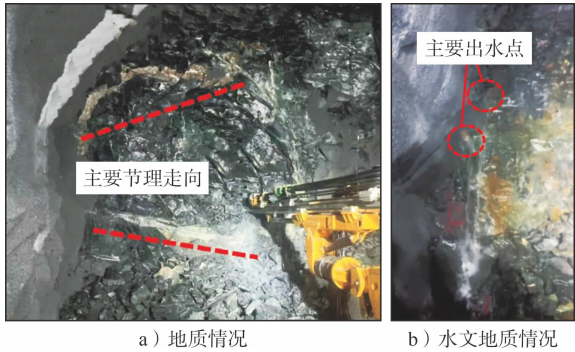


图 1 地质及水文地质情况

Fig. 1 Geological and hydrogeological conditions

回风井 -1 200 m 水平巷道的透水性、富水性随裂隙发育程度有较大的变化,富水性不均匀特点显著。岩层地质年代久远,经历多次构造变动,裂隙比较发育,但多为扭性、压扭性裂隙,裂隙闭合,连通性较差。最大单位涌水量 0.008 395 L/(s · m),渗透系数 0.000 543 775 m/d,整体上属弱富水含水层。现场调查发现,掘进面左上角有 2 处出水点,出水点附近裂隙发育,最大单位涌水量约 0.005 L/(s · m),如图 1 - b) 所示。

1.2 地质和水文地质影响分析

从地质条件上分析,纱岭金矿回风井 -1 200 m 水平巷道岩石虽然坚硬,但岩体较为破碎,爆破过程中容易形成大量的碎石和块石,影响施工进度和成形质量;另外,裂隙的存在使得爆破能量容易分散,难以集中在预定的破碎区域,从而降低爆破效率;同时,局部充填的碳酸盐矿物可能导致爆破过程中出现不均匀的破碎效果,增加施工难度;最后,层理的存在影响巷道围岩的稳定性,需要特别关注爆破后围岩的支护措施,以确保施工安全。综合来看,这些地质因素对爆破周边成形控制提出了更高的要求,需要采取针对性的优化方案来提高施工效率和成形质量。

从水文地质条件上分析,纱岭金矿回风井 -1 200 m 水平巷道富水不均匀,局部富水性高,爆破后岩石容易塌落,这大大增加了支护和清理工作的难度;裂隙发育区域的涌水量对爆破过程产生了干扰,导

致爆破周边成形不理想,施工效率低;含水层水压对爆破产生附加压力,进一步增加了施工的复杂性和风险。综合来看,这些水文及地质条件不仅影响了爆破的精度和效果,还导致施工人员需要更多的时间和资源来应对出水和清理工作,施工过程中需密切监测水压变化,及时调整爆破方案,以确保施工过程的顺利进行。

2 爆破方案设计

2.1 优化前爆破方案

钻孔采用 CYTJ45 (G) 型单臂凿岩台车凿岩,配 $\phi 38 \text{ mm} \times 3\,915 \text{ mm}$ 六角中空钢钎,联合 $\phi 45 \text{ mm}$ 球齿钻头湿式钻孔,孔深 3.9 m 左右,爆破循环进尺约 3.1 m,单循环炮孔利用率 80 %。掘进面炮孔数量为 58 个,采用七星掏槽 + 空孔的掏槽方式。各类炮孔的基本参数:

1) 掏槽孔。中心孔孔径 45 mm,中心孔与空孔圆心间距 150 ~ 200 mm,一圈掏槽孔呈菱形分布,二圈掏槽孔呈正方形分布,三圈掏槽孔呈菱形分布,四圈掏槽孔呈正方形分布。

2) 空孔。共有 6 个,空孔孔径 90 mm。

3) 崩落孔。孔径 45 mm,孔距 400 ~ 700 mm,排距 400 ~ 700 mm。

4) 周边孔。顶孔 11 个,帮孔 6 个,底孔 6 个,孔距为 400 ~ 700 mm。

详细的优化前炮孔布置如图 2 所示,具体的优化前爆破参数如表 1 所示。

炸药采用 $\phi 32 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,300 g/卷的 2 号岩石乳化炸药,数码电子雷管起爆,连续装药,反向起爆。采用 EP400 - X 型起爆器起爆。掏槽孔装药 11 卷,辅助孔装药 8 卷,顶孔装药 2 卷,帮孔装药 4 卷,底孔装药 11 卷,单循环爆破用炸药 134.7 kg,优化前各类型炮孔装药示意图如图 3 所示。

2.2 优化后爆破方案

在原方案基础上,在不改变其他爆破参数的情况下,仅针对周边孔采用数码电子雷管与导爆索的混合起爆网络,调整周边孔的药量和联线方式,以期提高爆破成形效果,减少围岩损伤。优化后炮孔布置如图 4 所示,优化后的爆破参数如表 2 所示。

周边孔主要由帮孔和顶孔 2 部分组成。它们的药量和联线方式为:帮孔(41 ~ 43,55 ~ 57 号孔)、顶孔(44 ~ 54 号孔)每孔装药 1.5 卷(0.5 卷 $\times$ 3) + 2 m 导爆索,具体如图 5 所示,炮孔底部、中部和上部分别放置长 165 mm 的 2 号岩石乳化炸药,两两间隔 1 850 mm,使用导爆索串联在一起,上部药卷距离孔口处使用纸、塑料袋和小石子封堵。每个炮孔的导爆索与主导爆索按照爆破手册^[12]规定的方式和方向联

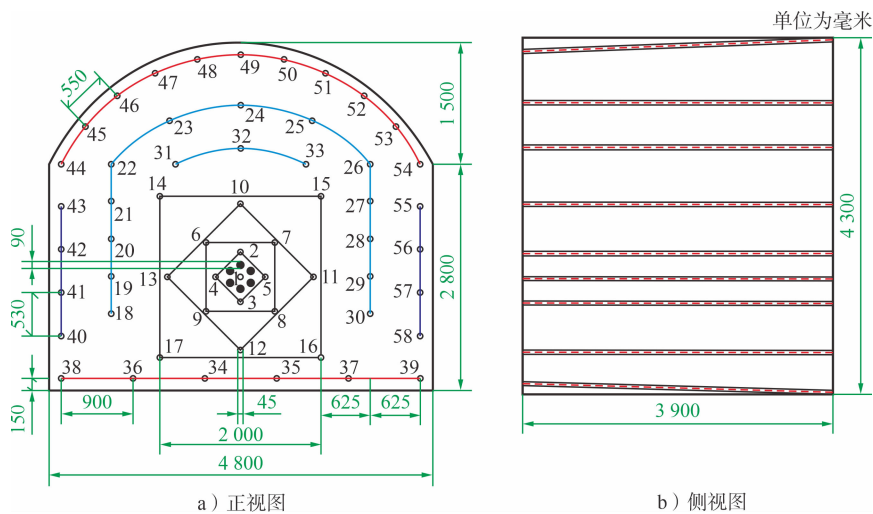


图 2 优化前炮孔布置示意图

Fig. 2 Layout of blast holes before optimization

表 1 优化前爆破参数

Table 1 Blasting parameters before optimization

序号	炮孔名称	孔号	孔深/mm	孔数	角度/(°)	装药量		起爆 顺序	联线 方式
						每孔/卷	合计/kg		
1	中心孔	1	3 900	1	90	11	3.3	1	串并联
2	空孔	无编号	3 900	6	90	0	0		
3	一圈掏槽孔	2~3	3 900	2	89	11	6.6	2	
4	一圈掏槽孔	4~5	3 900	2	89	11	6.6	3	
5	二圈掏槽孔	6~9	3 900	4	89	11	13.2	4	
6	三圈掏槽孔	10~13	3 900	4	89	11	13.2	5	
7	四圈掏槽孔	14~17	3 900	4	89	11	13.2	6	
8	崩落孔	18~33	3 900	16	90	8	38.4	7	
9	底孔	34,35	3 900	2	90	11	6.6	8	
10	底孔	36,37	3 900	2	90	11	6.6	9	
11	底孔	38,39,40,58	3 900	4	90	11	13.2	10	
12	帮孔	41~43,55~57	3 900	6	90	4	7.2	11	
13	顶孔	44~54	3 900	11	90	2	6.6	12	
合计				64			134.7		

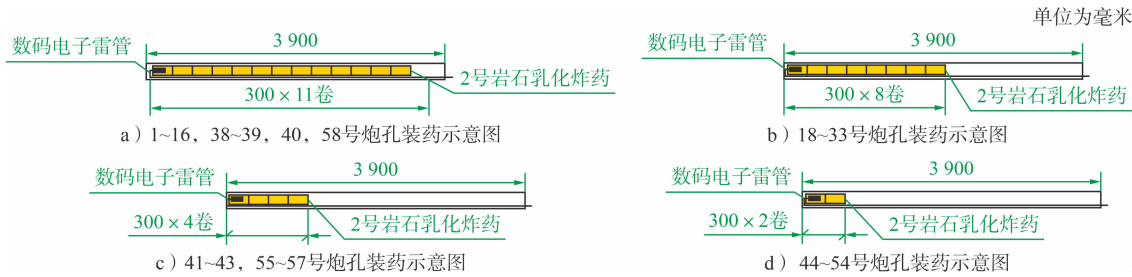


图 3 优化前各类型炮孔装药示意图

Fig. 3 Schematic diagram of charge for each type of blast hole before optimization

结在一起,使用 1 发数码电子雷管引爆主导爆索,共消耗 2 号岩石乳化炸药 123.75 kg 和 50 m 的导爆索。周边孔整体联线示意图如图 6 所示。单循环爆破

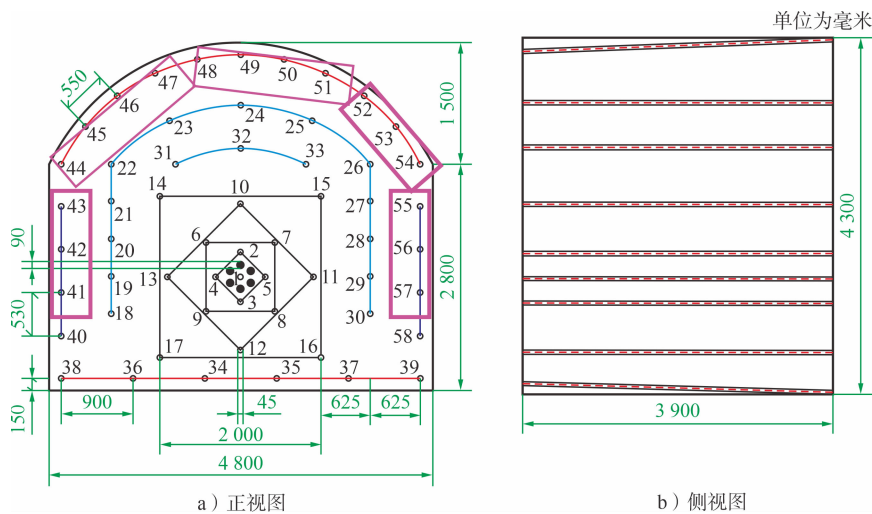


图 4 优化后炮孔布置示意图

Fig. 4 Layout of blast holes after optimization

表 2 优化后爆破参数

Table 2 Blasting parameters after optimization

序号	炮孔名称	孔号	孔深/mm	孔数	角度/(°)	装药量		起爆 顺序	联线 方式
						每孔/卷	合计/kg		
1	中心孔	1	3 900	1	90	11	3.3	1	串并联
2	空孔	无编号	3 900	6	90	0	0		
3	一圈掏槽孔	2 ~ 3	3 900	2	89	11	6.6	2	
4	一圈掏槽孔	4 ~ 5	3 900	2	89	11	6.6	3	
5	二圈掏槽孔	6 ~ 9	3 900	4	89	11	13.2	4	
6	三圈掏槽孔	10 ~ 13	3 900	4	89	11	13.2	5	
7	四圈掏槽孔	14 ~ 17	3 900	4	89	11	13.2	6	
8	崩落孔	18 ~ 33	3 900	16	90	7	33.6	7	
9	底孔	34,35	3 900	2	90	11	6.6	8	
10	底孔	36,37	3 900	2	90	11	6.6	9	
11	底孔	38,39,40,58	3 900	4	90	11	13.2	10	
12	帮孔	41 ~ 43,55 ~ 57	3 900	6	90	1.5	2.7	11	
13	顶孔	44 ~ 54	3 900	11	90	1.5	4.95	11	
合计				64			123.75		

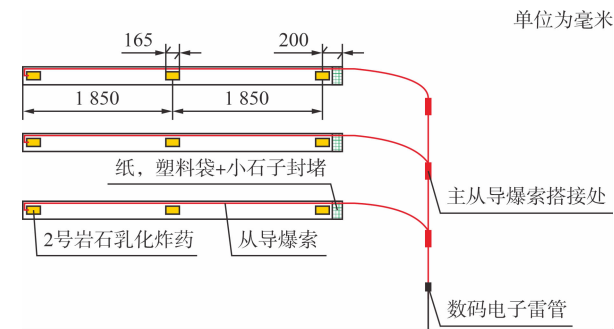


图 5 部分周边孔装药和联线示意图

Fig. 5 Diagram for partial peripheral blast holes charge and wiring

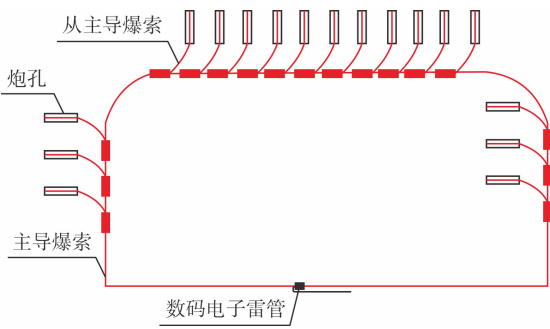


图 6 周边孔整体联线示意图

Fig. 6 Diagram of overall peripheral blast holes wiring

3 爆破效果对比与分析

严格按照优化前后爆破设计方案开展现场试验,每种爆破方案各开展5次现场试验,各项指标取平均值进行对比。主要从半孔痕率、超欠挖系数、作业时间和经济成本4个方面对优化前后的爆破效果进行深入分析。

1)半孔痕率。半孔痕率是衡量爆破成形质量的重要指标,优化前后的半孔痕情况如图7所示。优化前,爆破后的半孔痕较不清晰,数量平均为2条,半孔痕率为18.2%。优化后的爆破方案明显提升了成形质量,顶部清晰半孔痕达到8条,左右两帮无清晰半孔痕,半孔痕率显著提高至72.7%。相比优化前,半孔痕率提高了54.5百分点,表明优化后的混合起爆网络在控制周边成形方面非常有效,显著提升了爆破的成形质量。

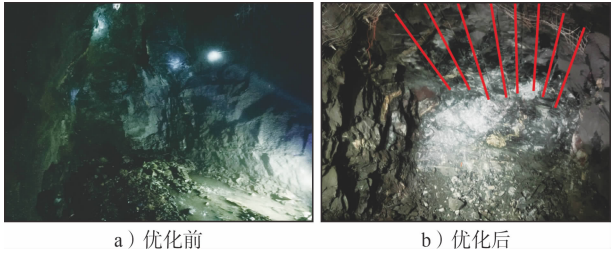


图7 优化前后半孔痕情况

Fig.7 Conditions of half-hole marks before and after optimization

2)超挖系数。优化前平均超挖系数为1.56,优化后平均超挖系数为1.22,相较于优化前下降了0.34,降低了21.7%。这说明优化后的爆破方案在控制岩石多余开挖方面更加有效,提高了周边成形的精度,有效控制了爆破过程中的超挖现象。

3)作业时间。优化前巷道施工单循环总时间为20 h,平均每孔钻孔时间为3 min,加上周边超欠挖二次处理、注浆排水等辅助作业时间,钻孔总时间约为7 h,钻孔后使用钻机进一步敲帮问顶,之后装药2 h,爆破1 h,出渣3 h,支护6 h,喷浆1 h。优化后爆破、出渣、支护和喷浆作业的时间未发生明显变化,但受成形质量提高的影响,钻孔辅助作业时间缩短,钻孔总时间从原来的7 h降低到优化后的4 h,降低了42.9%,单循环总时间从原来的20 h降低到优化后的17 h,降低了15%。这表明优化后的爆破方案减少了不必要的辅助作业时间,显著提升了施工进度。

4)经济成本。优化后的爆破方案相较于优化前,节约2号岩石乳化炸药10.95 kg,减少了数码电子雷管16个,增加了导爆索50 m。按照2号岩石乳化炸药6元/kg,数码电子雷管20元/个,导爆索4元/m来估算,每循环节约经济成本185.7元。这

说明优化后的爆破方案不仅提高了施工效率,还有效降低了物料消耗和成本,提升了整体施工效益。

总的来说,优化后的爆破方案在各项指标(如表3所示)上均表现出显著优势。半孔痕率提高了54.5百分点,表明成形质量得到显著改善;超挖系数下降了21.7%,表明爆破精度更高;作业时间缩短了15%,提高了施工效率;经济成本每循环降低185.7元,提高了施工效益。究其原因主要有以下3个方面:①数码电子雷管与导爆索的混合起爆网络,起爆时间更精准,爆破能量分布更加均匀,从而提高了周边成形质量;②更合理的火工品用量配置和起爆控制,减少了炸药和雷管的消耗,节约了经济成本;③优化后的爆破设计减少了超欠挖和岩石塌落现象,从而减少了辅助作业时间。优化后的混合起爆网络通过合理调整周边孔的药量和联线方式,实现了更优的爆破效果,充分证明了其在深部复杂工况巷道爆破掘进中提高施工质量和效率方面的显著作用。

表3 优化前后4项指标对比

Table 3 Comparison of 4 indicators before and after optimization

项目	半孔痕率/%	超挖系数/%	总作业时间/h	经济成本/元
优化后	18.2	1.56	20	x
优化前	72.7	1.22	17	$x-185.7$

4 结 论

本文通过对纱岭金矿回风井-1 200 m水平巷道优化前后爆破方案的对比分析,得出了数码电子雷管—导爆索混合起爆网络的爆破方案在周边成形控制、降低超挖系数、缩短作业时间和节约经济成本方面的显著优势。

1)起爆网络优化。数码电子雷管—导爆索混合起爆网络的应用,使起爆时间更精准,爆破能量分布更均匀,有效提高了成形质量。

2)火工品配置合理。优化后的火工品配置和联线方式减少了能量的无效扩散,显著控制了超挖现象,提高了爆破精度和施工效率。

3)作业流程优化。优化后的爆破设计显著提升了周边成形质量,间接减少了辅助作业流程,显著缩短了整体作业时间,降低了经济成本,提升了施工效益。

4)数码电子雷管—导爆索混合起爆网络在深部复杂工况巷道爆破掘进中展现了良好的适应性,研究成果为纱岭金矿后续巷道施工提供了宝贵经验,也为类似工程的爆破设计和施工优化提供了重要参考。

[参考文献]

[1] 杨仁树,郑昌达,李清,等.近50年我国竖井爆破掘进参数统计

与分析[J]. 中国矿业大学学报,2022,51(6):1 031 – 1 044, 1 085.

[2] 刘翔宇,龚敏,杨仁树,等. 隧道周边孔毫秒延时爆破围岩损伤数值分析研究[J]. 振动与冲击,2023,42(24):8 – 15.

[3] ZHENG C D, YANG R S, LI Q, et al. Fractal analysis for the blast-induced damage in rock masses with one free boundary[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures,2022;2134609.

[4] 岳中文,郭洋,王煦,等. 空孔形状对岩石定向断裂爆破影响规律的研究[J]. 岩土力学,2016,37(2):376 – 382.

[5] 杨仁树,张召冉,杨立云,等. 基于硬岩快掘技术的切缝药包聚能爆破试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(2):317 – 323.

[6] 史国利,肖成龙,郑昌达,等. 切缝药包不耦合装药爆破损伤破坏的分形研究[J]. 中国矿业,2020,29(3):105 – 109.

[7] 杨仁树,丁晨曦,杨立云. 高应力状态下穿过层理爆破致裂的动态行为研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(4):801 – 808.

[8] 杨立云,张飞,董劲扬,等. 节理频度对类岩石介质裂纹扩展行为的影响[J]. 科学技术与工程,2021,21(1):20 – 26.

[9] 罗忆,邓运辰,林城,等. 深埋岩溶隧道爆破开挖对围岩损伤及渗流特性的影响[J/OL]. 爆破;1 – 16[2024 – 05 – 18].

[10] 刘博,胡静云,史秀志. 导爆索 – 导爆管起爆网路在多点爆区联合起爆中的应用[J]. 爆破,2021,38(3):62 – 66.

[11] 王雁冰,鲍舟琦,谢平,等. 基于数码电子雷管的准楔形复式掏槽爆破试验研究[J]. 金属矿山,2023(3):73 – 79.

[12] 汪旭光. 爆破手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2010.

Application of perimeter formation control using mixed initiation network for complex working conditions

Li Quintao, Yuan Yongzhong, Li Minghui, Yang Yi, Hu Yazhou
(Laizhou Huijin Mining Investment Co., Ltd.)

Abstract: The –1 200 m roadway blasting and excavation construction in the return air shaft at Shaling Gold Mine is affected by complex working conditions such as ground stress, stratification, and mine water. These factors result in poor blast formation, long auxiliary operation time, and slow construction progress. To address these issues, the digital electronic detonator-detonating cord mixed initiation network perimeter formation control technology was adopted to optimize the original blasting scheme and conduct field experiments. The results of the field experiments showed that the optimized digital electronic detonator-detonating cord mixed initiation network and smooth blasting scheme significantly improved the blasting formation effect, reduced surrounding rock damage, increased the half-hole mark rate by 54.5 percentage points, decreased the over-excavation coefficient by 21.7 %, shortened the operation time by 15 %, and reduced the economic cost per cycle by 185.7 yuan. This achieved quality control of perimeter formation in roadways with complex working conditions and provided a reference for similar roadway blasting projects.

Keywords: deep mining; gold mine; roadway; ground stress; mine water; mixed initiation network; smooth blasting; blasting effect