

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.01.011

基于爆破漏斗试验的地下扇形中深孔 爆破参数优化研究*

熊国雄¹, 刘天豪², 尹东升¹, 杨玉民², 石德华¹

(1. 大冶有色金属有限责任公司 铜绿山铜铁矿, 黄石 435000; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074)

摘要: 深部地应力环境下矿岩体的力学性质及破碎特征与浅部矿岩体相比存在显著差异。为了优化铜绿山铜铁矿深部采场扇形中深孔爆破参数, 在分析了铜绿山铜铁矿-485中段矿岩力学特性的基础上, 在-485中段9428采场开展了系列爆破漏斗试验, 并对爆破漏斗关键参数进行计算和分析。基于爆破漏斗形态和炸药单耗对中深孔爆破参数提出优化建议, 并开展工业实验验证合理性。研究结果表明: 铜绿山矿-485中段9428采场矽卡岩的完整性等级为较破碎; 爆破漏斗试验药包中心最佳埋深 L_j 为0.400 m, 临界埋深 L_c 为0.898 m, 应变能系数 E 为 $1.69 \text{ m/kg}^{1/3}$, 最佳埋深比 Δ_0 为0.445, 最佳爆破漏斗半径 R_j 为0.461 m, 最佳爆破漏斗体积 V_j 为 0.014 m^3 ; 试验最佳炮孔间距为0.809 m, 爆破漏斗最小抵抗线为0.740 m; 基于爆破相似理论可知, 生产爆破孔径为64 mm时, 扇形中深孔孔底距为1.3~1.6 m, 孔口距为0.8~1.3 m, 排距为1.1~1.4 m。

关键词: 深部开采; 扇形中深孔; 岩石力学特性; 爆破漏斗试验; 爆破参数

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)01-0099-10

Blasting Parameter Optimization of Underground Fan-shaped Medium-deep Holes based on Crater Test

XIONG Guo-xiong¹, LIU Tian-hao², YIN Dong-sheng¹, YANG Yu-min², SHI De-hua¹

(1. Tonglushan Cu-Fe Mine, Daye Nonferrous Metals Co., Ltd, Huangshi 435000, China;

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: Under the deep geostress environment, ore-rock masses exhibit distinct mechanical properties and fragmentation characteristics that markedly differ from those observed in shallow deposits. To optimize the blasting parameters for fan-shaped medium-deep holes in the deep stope of Tonglushan Copper-Iron Mine, crater blasting tests were conducted at the 9428 stope of the -485 level, following a comprehensive analysis of the ore-rock mechanical properties at this depth. Optimized medium-length hole blasting parameters were systematically derived from a thorough analysis of crater morphology and specific explosive consumption characteristics, with subsequent industrial-scale trials confirming their technical validity and operational feasibility. The research findings demonstrate that the rock mass integrity coefficient of the skarn in the 9428 stope of the -485 level at Tonglushan Mine measures 0.39, classifying it as relatively fragmented according to the Standard for Engineering Classification of Rock Mass. Single-

收稿日期(Date of reception): 2025-07-25

网络首发日期(Published online): 2025-10-20

作者简介: 熊国雄(1979-), 男, 本科, 采矿高级工程师, 主要从事采矿技术方面研究, (E-mail) 670118709@qq.com。

通信作者: 刘天豪(2001-), 男, 硕士研究生, 主要从事土木工程和爆破工程方面研究, (E-mail) liutianhao_cug@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41972286)

About the author: XIONG Guo-xiong(1979-), male, bachelor degree, senior mining engineer, mainly engaged in research on mining technology, (E-mail) 670118709@qq.com.

Corresponding author: LIU Tian-hao(2001-), male, master degree candidate, mainly engaged in research on civil engineering and blasting engineering, (E-mail) liutianhao_cug@163.com.

Fund Programs: Project supported by National Natural Science Foundation of China(41972286)

hole carter blasting tests revealed optimal parameters including: charge center burial depth(0.400 m), critical burial depth(0.898 m), strain energy coefficient($1.69 \text{ m/kg}^{1/3}$), optimal burial depth ratio(0.445), optimal crater radius(0.461 m), and optimal crater volume(0.014 m³). Subsequent double-hole and inclined bench crater tests determined an optimal hole spacing of 0.809 m and a minimum crater burden of 0.740 m. Applying blasting similarity theory to production-scale fan-shaped medium-deep holes(64 mm diameter), recommended parameters include: hole bottom spacing(1.3 ~ 1.6 m), hole mouth spacing(0.8 ~ 1.3 m), and row spacing(1.1 ~ 1.4 m).

Key words: deep mining; fan-shaped medium-deep holes; rock mechanical properties; blasting crater test; blasting parameters

随着我国工业及农业等领域快速发展,有色金属资源需求量已进入爆发式增长阶段。浅部矿产资源供给缺口持续扩大,现有开采深度不足 500 m 的矿山已难以满足社会发展需求。随着我国对矿产资源需求量的日益增加,深部矿产资源开发成为破解资源约束的必由之路^[1]。铜绿山铜铁矿作为长江中下游成矿带典型矿山,历经 50 余年开采,浅部资源已濒临枯竭,目前主采区最低生产中段为 -725 m 中段^[2]。然而,深部开采面临高地应力、复杂节理网络及铜铁共生体各向异性等特殊地质条件^[3],浅部使用的爆破参数在深部采场出现爆破效率低、块度不均、超欠挖严重等突出问题,因此,亟须开展针对铜绿山铜铁矿深部岩体的爆破参数优化研究。

爆破漏斗试验是获取岩体爆破参数的主要方法,也是爆破设计和施工的重要基础,国内外学者对此开展了大量的研究。张俊兵等针对青藏高原多年冻土区铁路建设中高含冰量冻土爆破开挖的实际需求^[4],以及该领域相关研究较为匮乏的现状,通过对沱沱河地区高含冰量冻土特性、装药量与爆破深度关系的研究,明确了单位药包的最佳埋深和最大体积,并在此基础上推导得出了最佳爆破参数。周传波等基于利文斯顿爆破漏斗理论^[5],在安庆铜矿开展现场试验,通过单孔及变孔距多孔同段爆破漏斗试验,系统分析炸药能量分布特性曲线、体积与埋深/半径关系、临界埋深比及炸药单耗等关键参数,建立了矿岩特性与炸药匹配模型,优化得到大直径深孔爆破参数体系。YE T 在云浮硫铁矿实施单孔及变孔距多孔同段爆破漏斗试验^[6],同步分析数据采集及处理方法,结合最小二乘法拟合与 MATLAB 解析不同炸药埋深与爆破漏斗体积的关联,获得爆破漏斗特性曲线,并基于三次多项式推导得到最佳埋深、临界埋深及最佳炸药单耗。Peng J 采用电爆法对类岩石试件在无围压及单轴围压条件下实施爆破漏斗试验^[7],探究围压对爆破漏斗形态、尺寸及裂纹扩展的作用机制,揭示试件表面径向-环向裂纹与内部径向-层裂裂纹主导破坏、围压调控裂纹扩展

的规律,明确该成果对深部地质工程开挖中炮孔布置的支撑价值。邱胜光等在与紫金山地下采场岩性匹配的水平巷道^[8],实施单孔、变孔距及斜面台阶爆破漏斗试验,通过试验数据解析并耦合爆破相似定理,确定了单孔爆破的最佳埋深、漏斗半径、炸药单耗、最小抵抗线,及采场不同间隔装药的深孔爆破参数。然而,不同采场的工程地质条件存在差异、复杂性及不同的不可预测性,针对特定采场的理论分析、试验与数值模拟结果难以迁移至其他采场^[9];且单一研究方法得出的爆破参数,在矿山实际应用中适用性亦欠佳^[10-12]。因此在实际爆破参数优化中,通常需综合运用多种研究方法开展分析,以获取更优的优化效果。

以铜绿山铜铁矿深部采场为工程背景,通过物理力学试验、爆破漏斗试验和理论经验公式相结合的研究方法,对铜绿山铜铁矿深部采场扇形中深孔爆破参数进行优化,为生产爆破提供建议。

1 工程概况

铜绿山铜铁矿位于大冶市城区西南约 3 km 处,矿区地处大冶湖南部、青山东部,洪水期呈三面环水的半岛状伸入湖中。开采前,矿区地势平缓,以低山及丘陵残丘为主,整体南高北低,海拔 14.5 ~ 58.15 m;矿山浅部矿体露天开采后,地形地貌发生显著改变,形成南北两个露采坑,边坡顶部标高 30 ~ 50 m,坑底最低达 -175 m。铜绿山铜铁矿地理位置及矿体分布如图 1 所示。

目前铜绿山铜铁矿已全面进入深部开采,深部矿体和上部中段矿体相比有较大的变化,深部开采面临高地应力、复杂节理网络、厚大矿体占比例小、矿体倾角变化大及矿岩稳固性变差等。目前铜绿山铜铁矿的生产采场主要位于 -485 ~ -605 m,采矿方法主要为分段凿岩嗣后充填采矿法,采用中深孔爆破技术,其中包括扇形孔与平行孔两种布孔形式,其中掏槽区采用平行孔,见图 2(a)红色区域,侧崩区采用扇形孔,见图 2(a)蓝色区域,平行孔及扇形

孔的装药结构如图 2(b) 所示,孔间距在 1.2 ~ 2.0 m 之间,排距在 1.2 ~ 1.5 m 之间。为提高采场爆破效果,根据深部矿体赋存条件及开采技术条件,先开展系列爆破漏斗试验对爆破参数进行优化,并通过试验采场进行现场爆破试验。

2 爆破试验区矿岩物理力学特性

在铜绿山矿 -485 中段分别对矽卡岩岩芯和矽卡岩矿岩取样,并制作成直径 3.5 cm,高度 2 cm/7 cm 的圆柱体试样,测量并计算岩样密度,并开展声波波速进行测试、单轴抗压强度试验、抗拉强度试

验,如图 3 所示,测得矿岩物理力学参数见表 1。

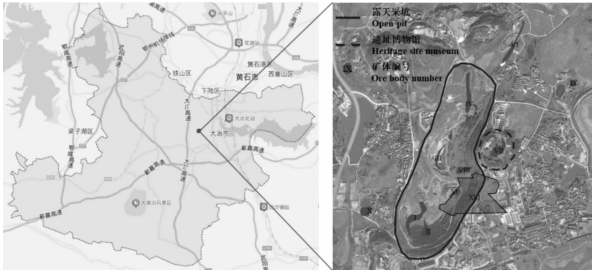


图 1 铜绿山铜铁矿地理位置及矿体分布图
Fig. 1 Geographical location and ore-body distribution map of Tonglvshan Copper-Iron Mine

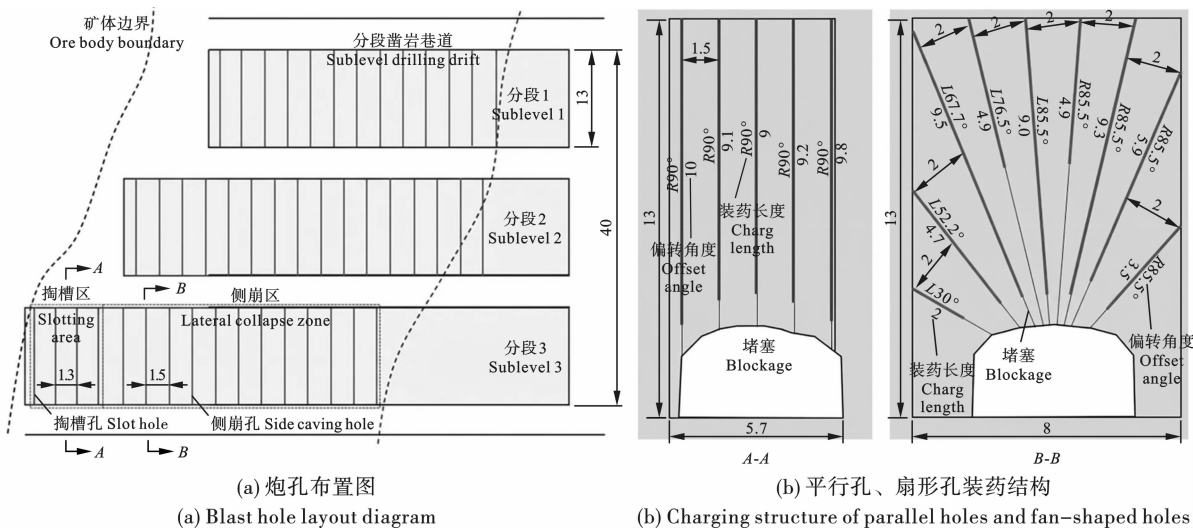


图 2 中深孔布置与装药结构(单位:m)
Fig. 2 Layout and charging structure of medium-deep holes(unit:m)

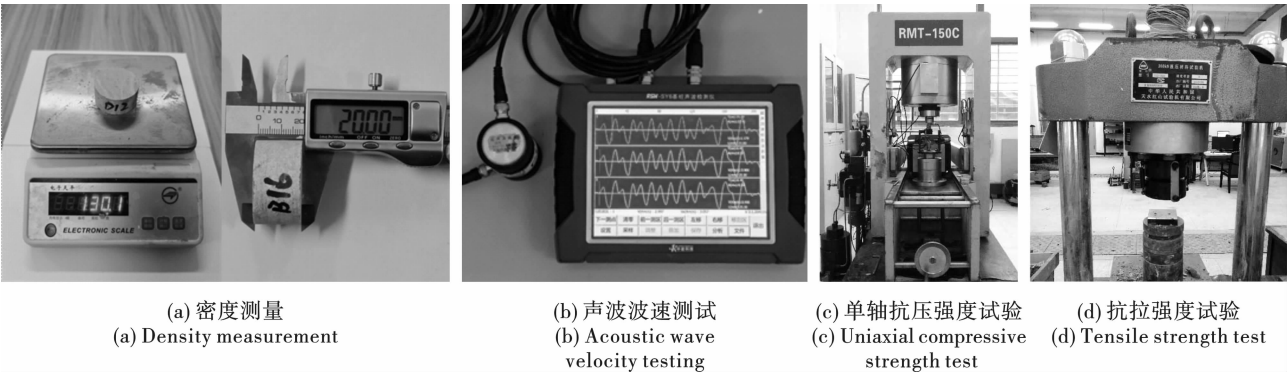


图 3 室内岩石试验
Fig. 3 Laboratory rock test

在 -485 中段 9428 采场钻取 2 个深度 1.5 m, 直径 0.04 m 的孔,孔间距 1.0 m,利用 RSM-SY6 基桩声波检测仪开展现场岩体声波测试,孔内每 0.2 m 取一次数据,测试原理如图 4,岩体声波测试结果见表 2。

岩体完整性系数 K_v 计算公式

$$K_v = \left(\frac{V_{pm}}{V_{pr}} \right)^2 \quad (1)$$

式中: V_{pm} 为岩体纵波波速; V_{pr} 为岩石纵波波速。计算得到,岩体纵波波速的平均值为 3.69,岩体纵波波速的平均值为 2.31,代入上式得试验场地矽卡岩的岩体完整性系数为 0.39,根据《工程岩体

分级标准》(GB/T50218—2014)^[13],可知完整性等级为较破碎($0.35 < K_v \leq 0.55$)。

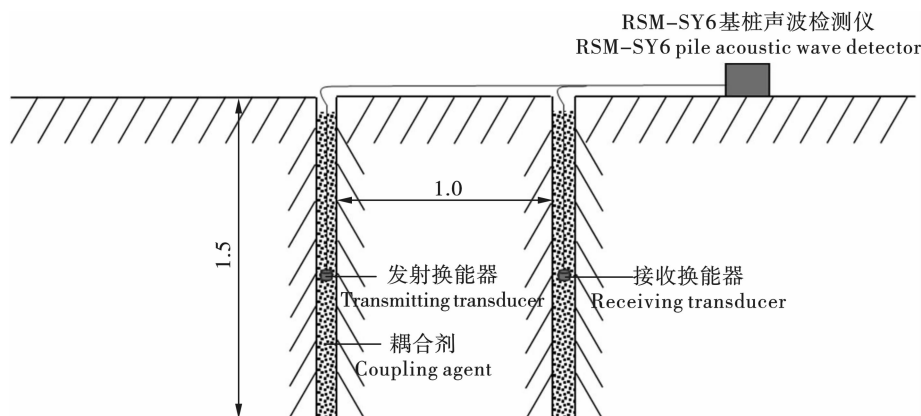


图 4 岩体声波测试原理(单位:m)

Fig. 4 Principle of rock mass acoustic wave testing(unit:m)

表 1 矿岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of mineral rock

岩样编号 Rock sample numbering	密度 Density/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	抗压强度 Compressive strength/MPa	抗拉强度 Tensile strength/MPa	弹性模量 Elastic modulus/GPa	泊松比 Poisson's ratio	岩石纵波波速 Longitudinal wave velocity of rock/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	2.52	34.86	2.31	27.85	0.28	3.62
2	2.87	38.52	1.89	30.12	0.26	3.78
3	2.63	33.79	2.08	28.33	0.31	3.55
4	2.74	36.45	2.12	29.67	0.25	3.83
5	2.91	37.93	1.92	30.55	0.23	3.67

表 2 岩体波速测试结果

Table 2 Results of rock mass wave velocity test

测试深度 Test depth/m	岩体纵波波速 Longitudinal wave velocity of rock mass/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)
0.2	2.20
0.4	2.35
0.6	2.10
0.8	2.40
1.0	2.50
1.2	2.05
1.4	2.57

质量,与维持装药质量不变而改变药包埋深,二者在能量传递效果上具有等效性。

临界埋深、最佳埋深及应变能系数计算公式如下

$$L_e = EQ^{1/3} \quad (2)$$

$$L_j = \Delta_j EQ^{1/3} \quad (3)$$

$$E = \frac{L_e}{\sqrt[3]{Q}} \quad (4)$$

式中: L_e 为临界埋深; L_j 为最佳埋深; E 为应变能系数; Q 为球状药包质量; Δ_j 为最佳埋深比($\Delta_j = L_j/L_e$)。

3.2 单孔爆破漏斗试验

爆破漏斗试验场地的岩性应与实际深孔爆破采场的岩性相似,此次试验场地选在铜绿山矿-485 m中段的9428采场,岩性为矽卡岩,采用YT-28型气动凿岩机进行钻孔,钻孔直径为0.04 m,垂直巷道壁钻凿。相邻炮孔间距2 m,孔深0.3~0.8 m,按0.1 m递增,即0.3 m、0.4 m、0.5 m、0.6 m、0.7 m、0.8 m,共计6个炮孔,炮孔设计如图5所示,重复开展两次试验,提高试验结果合理性。

钻孔完成后,采用卷尺测量实际炮孔深度,对炮孔的深度进行验证,确保试验的准确性。试验所用炸药为卷状改性铵油炸药,单卷长度22 cm,直径

3 系列爆破漏斗试验

3.1 利文斯顿爆破漏斗理论

20世纪50年代,美国学者C W Livingston通过系统性的爆破漏斗试验研究^[14],构建了以能量平衡理论为核心的爆破漏斗理论框架。该理论揭示,炸药能量向岩体的传递效率是炸药属性、装药质量以及岩石物理力学特性共同作用的结果。从能量传递视角分析,在保持药包埋深恒定的条件下调整装药

3 cm,重量 150 g,采用电子雷管起爆,起爆方式为孔底起爆,孔间逐孔起爆,试验流程如图 6 所示。

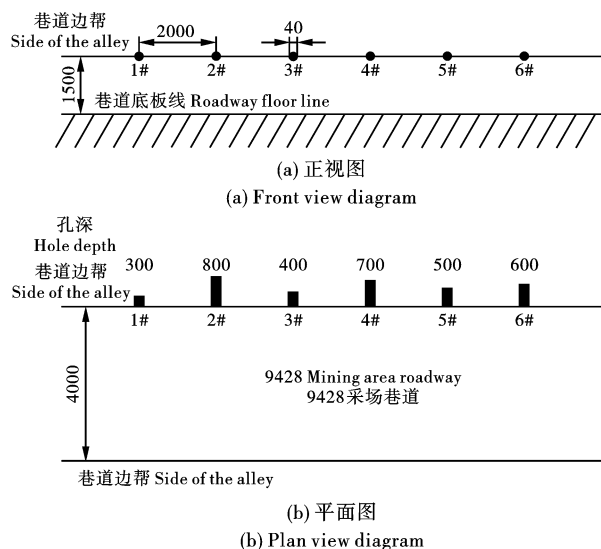


图 5 单孔爆破漏斗试验炮孔布置(单位:mm)

Fig. 5 Blasthole layout for single-hole blasting crater test (unit:mm)

试验完成后,扣除漏斗周围松散岩体并圈定漏斗边界,以炮孔为中心,间隔 45° 量取 8 个不同方位的漏斗半径,取其平均值为漏斗半径。利用 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的网格覆盖整个爆破面,依次量取所有网格节点的漏斗深度,依据辛卜生法计算爆破漏斗体积^[15],计算公式为

$$S_i = \frac{B}{3} [(Y_0 + Y_n) + 2(Y_2 + Y_4 + \cdots + Y_{2i} + \cdots) + 4(Y_1 + Y_3 + \cdots + Y_{2i+1} + \cdots)] \quad (5)$$

式中: S_i 为漏斗某断面面积, ($i=1,2,3,\cdots$); B 为测点间距, $B=0.1\text{ m}$; Y_i 为第 i 点爆破漏斗深度。求出各断面面积后,按棱台体求得漏斗体积 V

$$V = \frac{B}{3} [(S_1 + S_n) + 2(S_1 + S_2 + \cdots + Y_i + \cdots) + \sum_{i=1}^n \sqrt{S_i \cdot S_{i+1}}] \quad (6)$$

对单孔爆破漏斗试验结果进行现场测量,结果见表 3。计算试验结果的平均数,并根据所得数据结合最小二乘法拟合爆破漏斗特征曲线,结果如图 7 所示。

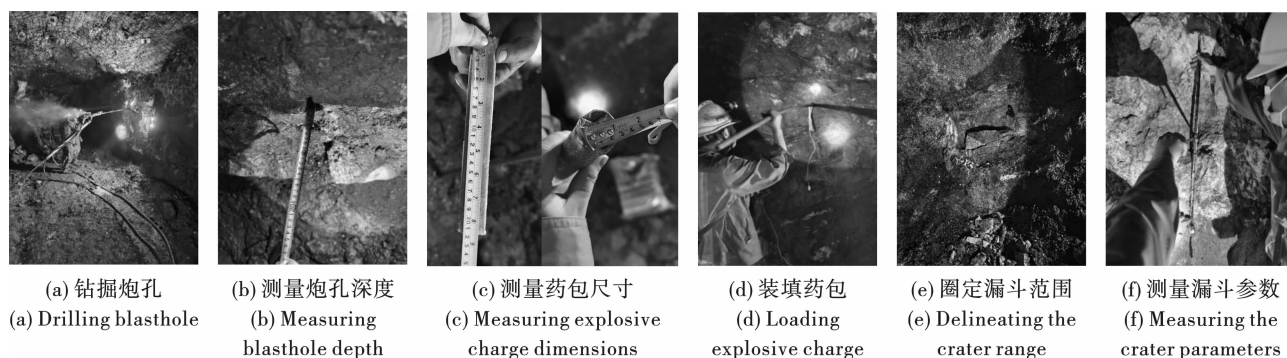


图 6 单孔爆破漏斗试验流程

Fig. 6 Single-hole blasting crater test procedure

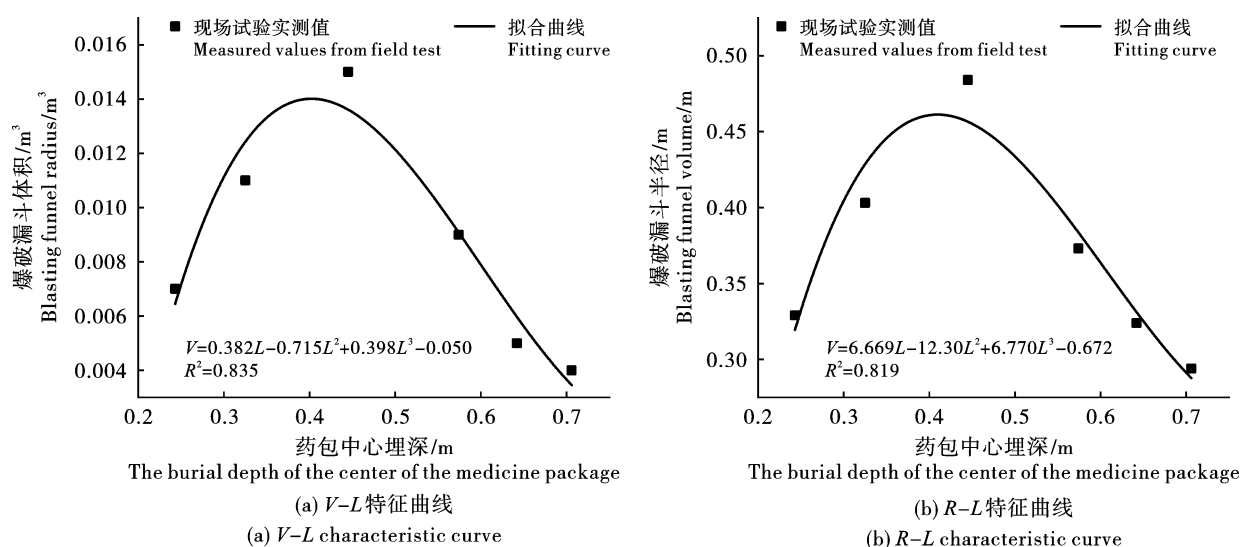


图 7 单孔爆破漏斗试验数据及拟合

Fig. 7 Single-hole blasting crater test data and fitting

表 3 单孔爆破漏斗试验结果
Table 3 Results of single-hole blasting crater test

炮孔编号 Blast hole numbering	设计孔深 Design hole depth/m	实测孔深 Measured hole depth/m	药包中心埋深 Charge center burial depth/m	爆破漏斗可见深度 Blasting crater visible depth/m	爆破漏斗半径 Blasting crater radius/m	爆破漏斗体积 Blasting crater volume/m ³	单位炸药爆破体积 Unit explosive blasting volume/(m ³ · kg ⁻¹)
1 [#] -A	0.300	0.340	0.235	0.070	0.320	0.006	0.048
2 [#] -A	0.400	0.450	0.310	0.065	0.410	0.012	0.085
3 [#] -A	0.500	0.540	0.460	0.060	0.490	0.014	0.120
4 [#] -A	0.600	0.690	0.560	0.070	0.360	0.011	0.050
5 [#] -A	0.700	0.740	0.650	0.040	0.330	0.003	0.020
6 [#] -A	0.800	0.820	0.715	0.050	0.300	0.002	0.030
1 [#] -B	0.300	0.366	0.251	0.060	0.338	0.008	0.058
2 [#] -B	0.400	0.420	0.340	0.075	0.396	0.010	0.061
3 [#] -B	0.500	0.570	0.430	0.050	0.478	0.016	0.094
4 [#] -B	0.600	0.678	0.588	0.060	0.386	0.007	0.070
5 [#] -B	0.700	0.764	0.634	0.050	0.318	0.007	0.046
6 [#] -B	0.800	0.812	0.697	0.040	0.288	0.006	0.024

单孔爆破漏斗试验中,爆破漏斗体积 V 与药包埋深 L ,以及爆破漏斗半径 R 与药包埋深 L 之间的回归多项表达式分别为

$$V = 0.382L - 0.715L^2 + 0.398L^3 - 0.05 \quad (7)$$

$$R = 6.669L - 12.301L^2 + 6.77L^3 - 0.672 \quad (8)$$

当爆破漏斗体积最大时,所对应的药包埋置深度为最佳埋深,此时炸药单耗最小,爆破能量利用率最高。通过计算上式的最大值,得最佳埋深 L_j 为 0.400 m,临界埋深 L_c 为 0.898 m,应变能系数 E 为 $1.69 \text{ m/kg}^{1/3}$,最佳埋深比 Δ_0 为 0.445,最佳爆破漏

斗半径 R_j 为 0.461 m,最佳爆破漏斗体积 V_j 为 0.014 m^3 。

3.3 双孔同段爆破漏斗试验

基于单孔爆破漏斗试验所得结果,在 9428 采场开展变孔距双孔同段爆破漏斗试验,试验分为 6 组,每组 2 个炮孔,共 12 个炮孔,孔间距分别为 $0.5L_j$ 、 $1.0L_j$ 、 $1.5L_j$ 、 $2.0L_j$ 、 $2.5L_j$ 、 $3.0L_j$,即 0.2 m、0.4 m、0.6 m、0.8 m、1.0 m、1.2 m,炮孔孔径 0.04 m,孔深 0.51 m,炮孔布置如图 8 所示,重复开展两次试验,提高试验结果合理性。

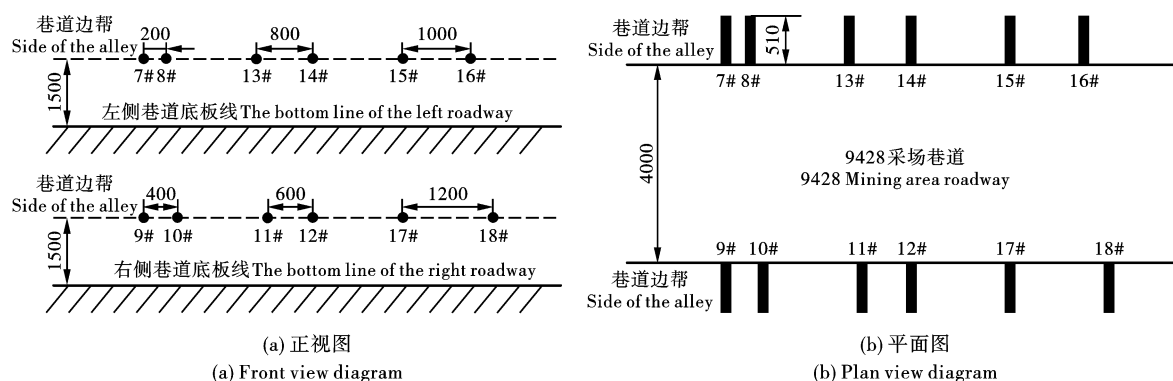


图 8 双孔同段爆破漏斗试验炮孔布置(单位:mm)

Fig. 8 Blasthole layout for double-hole simultaneous-delay blasting crater test(unit:mm)

双孔爆破漏斗试验结束后,对漏斗参数进行测量,试验结果如表 4 所示,计算试验结果的平均值,并结合最小二乘法回归拟合爆破漏斗特征曲线,如图 9 所示。

综合分析不同炮孔间距下爆破漏斗体积及漏斗间的脊柱变化情况,可得铜绿山铜铁矿深部矸卡岩双孔爆破漏斗试验的最佳炮孔间距为 0.809 m,此

时炸药单耗为 1.667 kg/m^3 。

3.4 斜面台阶爆破漏斗试验

在 9428 采场开展斜面台阶爆破漏斗试验,在距巷道底板 1.5 m 处倾斜巷道帮面钻水平炮孔,共设置两组试验,炮孔倾斜角为 35° ,炮孔深度为 2 m,炮孔直径为 0.04 m,为避免炮孔之间相互影响,设置炮孔间距为 4 m,孔间延时设置为 1000 ms。采用卷

状改性铵油炸药,单卷炸药长 0.22 m,直径 0.03 m,重量 0.15 kg,连续装药,每个炮孔装 7 卷炸药,装药量为 1.05 kg,孔口堵塞,孔底起爆,炮孔布置如图 10 所示。

表 4 双孔同段爆破漏斗试验结果
Table 4 Results of double-hole simultaneous blasting crater test

炮孔编号 Blast hole numbering	炮孔间距 Blast hole spacing/m	药包中心埋深 Charge center burial depth/m	爆破漏斗体积 Blasting crater volume/m ³	单位炸药爆破体积 Unit explosive blasting volume/ (m ³ · kg ⁻¹)	结果描述 Result description
7#~8#-A	0.200	0.500	0.080	0.290	漏斗成型较小,块度均匀 The crater formation is small, and the fragmentation size is uniform
9#~10#-A	0.410	0.490	0.140	0.450	漏斗成型较好,块度均匀
11#~12#-A	0.610	0.495	0.170	0.520	The crater formation is good, and the fragmentation size is uniform
13#~14#-A	0.780	0.525	0.195	0.650	
15#~16#-A	1.010	0.500	0.150	0.545	漏斗间有脊柱,存在大块 There are spines between the craters, and large blocks exist
17#~18#-A	1.200	0.515	0.115	0.415	
7#~8#-B	0.220	0.514	0.104	0.324	漏斗成型较小,块度均匀 The crater formation is small, and the fragmentation size is uniform
9#~10#-B	0.400	0.516	0.122	0.424	漏斗成型较好,块度均匀
11#~12#-B	0.604	0.505	0.158	0.506	The crater formation is good, and the fragmentation size is uniform
13#~14#-B	0.810	0.511	0.183	0.636	
15#~16#-B	0.996	0.524	0.164	0.529	漏斗间有脊柱,存在大块 There are spines between the craters, and large blocks exist
17#~18#-B	1.220	0.495	0.129	0.399	

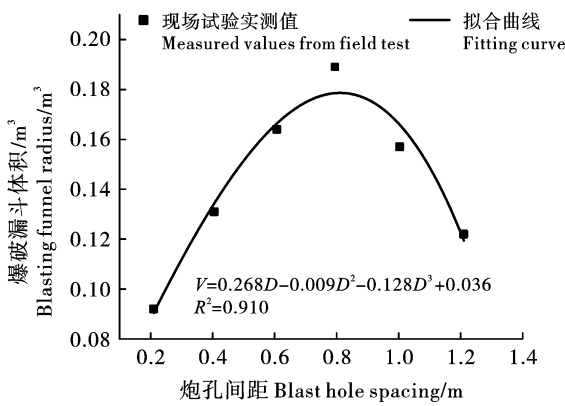


图 9 双孔同段爆破漏斗试验数据及拟合
Fig. 9 Double-hole simultaneous-delay
blasting crater test data and fitting

最小抵抗线为自药包重心到最近自由面的最短距离,即表示爆破时岩石抵抗破坏能力最小的方向。斜面台阶爆破漏斗试验现场爆破效果较好,岩石块度均匀,无明显大块产生,试验结果见表 5。

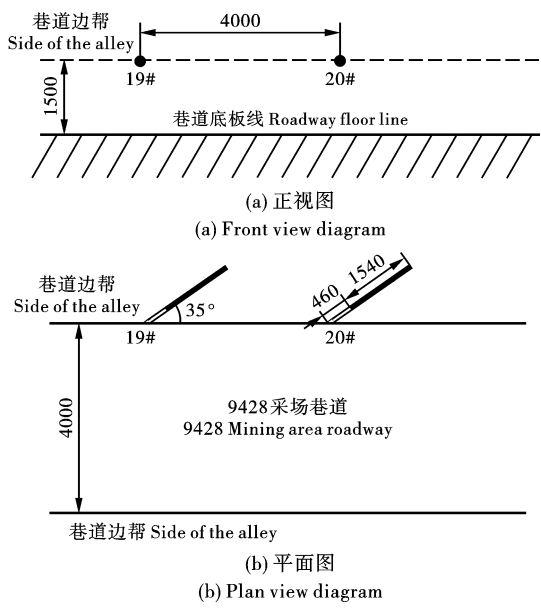


图 10 斜面台阶爆破漏斗试验炮孔布置(单位:mm)
Fig. 10 Blasthole layout for sloped
bench blasting crater test(unit:mm)

表 5 斜面台阶爆破漏斗试验结果

Table 5 Results of inclined bench blasting crater test

炮孔编号 Blast hole numbering	实测孔深 Measured hole depth/m	实测倾斜角度 Measured tilt angle/°	装药长度 Charging length/m	装药量 Charge quantity/kg	堵塞长度 Stemming length/m	最小抵抗线 Minimum burden/m
19 [#]	1.950	33	1.540	1.050	0.410	0.753
20 [#]	1.980	35	1.540	1.050	0.440	0.726

由斜面台阶爆破漏斗试验结果可知,该试验条件下爆破漏斗最小抵抗线为 0.740 m。

4 爆破参数优化

4.1 大孔径爆破漏斗参数计算

根据铜绿山矿深部实际生产情况,采场炮孔孔径为 64 mm,生产爆破使用炸药为改性铵油炸药,密度为 0.970 g/cm³,根据目前铜绿山铜铁矿使用炸药的密度及炮孔孔径等,计算得到生产爆破炮孔每米装药量为 3.12 kg/m。

根据爆破相似理论可知,在同一岩体中采用同一种炸药爆破时,小型爆破漏斗试验与大直径爆破的爆破漏斗参数满足如下关系

$$\frac{L_{j1}}{L_{j0}} = \frac{R_{j1}}{R_{j0}} = \left(\frac{Q_1}{Q_0}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{V_1}{V_0}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

式中: Q_0 、 Q_1 分别为小型爆破漏斗试验和大直径深孔爆破所用的装药量; L_{j0} 、 L_{j1} 分别为小型爆破漏斗试验装药量为 Q_0 时,大直径深孔爆破装药量为 Q_1 时的最佳埋深; R_{j0} 、 R_{j1} 分别为小型爆破漏斗试验在 Q_0 、 L_{j0} 状态时,大直径深孔爆破在 Q_1 、 L_{j1} 状态时的最佳漏斗半径; V_{j0} 、 V_{j1} 分别为小型爆破漏斗试验在 Q_0 、 L_{j0} 状态时,大直径深孔爆破在 Q_1 、 L_{j1} 状态时的爆破漏斗体积。

将爆破漏斗试验所得数据带入公式(9),得到实际孔径 64 mm 下的爆破漏斗参数,最佳埋深 0.640 m,临界埋深 1.437 m,最佳爆破漏斗半径 0.738 m,最佳爆破漏斗体积 0.057 m³,最佳炮孔间距 1.294 m,最小抵抗线 1.4 m。

4.2 孔距和排距计算

根据已知的爆破漏斗关键参数,确定生产爆破扇形中深孔的孔间距和排间距。结合前期试验换算:40 mm 孔径最佳孔距 0.809 m,按比例系数 $k = 1.6$,初步得 64 mm 孔径孔底距为 1.29 m;再结合装药量增大,孔底距应增大至 1.3 ~ 1.6 m。孔口距通常为孔底距的 0.6 ~ 0.8 倍,所以孔口距应为 0.8 ~ 1.3 m。

为确保前排爆破形成的新自由面为后排提供卸载空间,排距应略小于孔距。排距通常取孔底距的

0.8 ~ 1.0 倍,所以排距应为 1.1 ~ 1.4 m。

4.3 现场试验验证

将系列爆破漏斗试验确定的较优爆破参数应用于铜绿山铜铁矿 -485 中段 9428 采场进行现场验证。炮孔孔径 0.064 m,孔底距为 1.3 ~ 1.6 m,排距为 1.2 m,炮孔设计如图 11 所示。

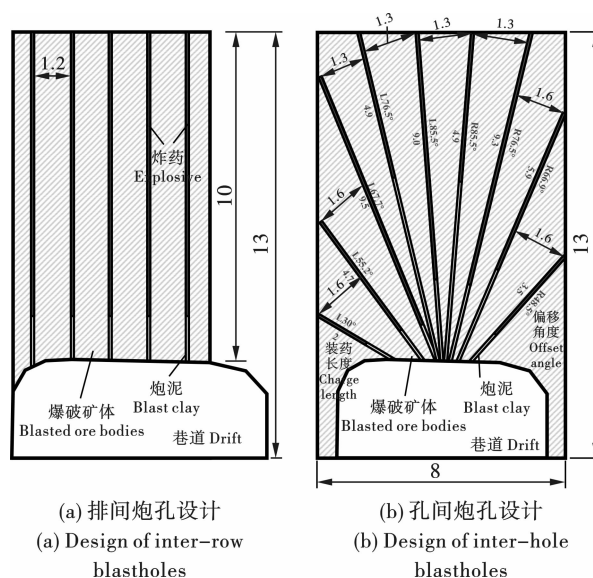


图 11 扇形中深孔设计图(单位:m)

Fig. 11 Design diagram of fan-shaped medium-length holes(unit:m)



图 12 爆破回采效果图

Fig. 12 Blasting recovery effect diagram

由图12可知,爆破回采矿岩块度分布较为均匀,没有出现直径大于1 m的块体。通过现场观察,采场顶板稳定性较好,未出现爆破超挖,整体爆破效果良好。

5 结论

以铜绿山铜铁矿为研究背景,通过物理力学试验和系列爆破漏斗试验,系统地分析了铜绿山铜铁矿深部矿岩爆破效应,提出了符合铜绿山铜铁矿深部采场的爆破参数优化方案。具体研究结论如下:

(1)铜绿山铜铁矿-485中段9428采场矸卡岩的岩体完整性系数为0.39,完整性等级为较破碎。

(2)根据单孔爆破漏斗试验结果可知,爆破漏斗试验药包中心最佳埋深 L_j 为0.400 m,临界埋深 L_c 为0.898 m,应变能系数 E 为1.69 m/kg^{1/3},最佳埋深比 Δ_0 为0.445,最佳爆破漏斗半径 R_j 为0.461 m,最佳爆破漏斗体积 V_j 为0.014 m³。

(3)根据双孔爆破漏斗试验和斜面台阶爆破漏斗试验结果可知,试验最佳炮孔间距为0.809 m,爆破漏斗最小抵抗线为0.740 m。

(4)基于爆破相似理论可知,生产爆破扇形中深孔炮孔孔径为64 mm时,孔底距应为1.3~1.6 m,孔口距应为0.8~1.3 m,排距应为1.1~1.4 m。

参考文献 (References)

- [1] 孙金山,周传波,郑晓硕,等. 大冶铁矿爆破开采巷道围岩累积损伤规律研究[J]. 爆破,2013,30(3):10-14.
- [1] SUN Jin-shan,ZHOU Chuan-bo,ZHEN Xiao-shuo, et al. Study on cumulative damage law of rock mass under blasting loading in Daye Iron Mine [J]. Blasting, 2013, 30(3):10-14. (in Chinese)
- [2] 石凯. 铜绿山矿深部岩爆机理及开采地压危害预警研究[D]. 武汉:中国地质大学,2018.
- [2] SHI Kai. Study on mechanism of rock burst and early warning of ground pressure by mining in the deep of Tonglushan mine [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese)
- [3] 刘立顺,杨小聪,万串串,等. 金属矿山深井开采中的力学问题研究进展[J]. 有色金属(矿山部分),2022,74(4):14-18,25.
- [3] LIU Li-shun, YANG Xiao-cong, WAN Chuan-chuan, et al. Research progress on mechanical problems in deep mining of metal mines [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2022, 74(4):14-18, 25. (in Chinese)
- [4] 张俊兵,潘卫东,傅洪贤. 青藏铁路多年高含冰量冻土爆破漏斗的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(6):1077-1081.
- [4] ZHANG Jun-bing, PAN Wei-dong, FU Hong-xian. Experimental study on the explosion crater of ice-rich frozen soil along Qinghai-Tibet Railway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(6):1077-1081. (in Chinese)
- [5] 周传波,范效锋,李政,等. 基于爆破漏斗试验的大直径深孔爆破参数研究[J]. 矿冶工程,2006(2):9-13.
- [5] ZHOU Chuan-bo, FAN Xiao-feng, LI Zheng, et al. Study of parameters of large diameter deep hole blasting based on blasting crater test [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2006(2):9-13. (in Chinese)
- [6] YE Tu-qiang. Field experiment for blasting crater [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 18(2):224-228.
- [7] PENG Jian-yu, ZHANG Feng-peng, DU Chuan, et al. Effects of confining pressure on crater blasting in rock-like materials under electric explosion load [J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 139:103534.
- [8] 邱胜光,孙明武. 基于爆破漏斗试验的大直径深孔爆破参数研究[J]. 矿业研究与开发,2020,40(1):64-69.
- [8] QIU Sheng-guang, SUN Ming-wu. Study on the parameters of large-diameter deep-hole blasting based on the blasting crater test [J]. Mining Research and Development, 2020, 40(1):64-69. (in Chinese)
- [9] 吴春平. 地下爆破漏斗实验方法研究[J]. 中国矿业,2017,26(7):155-158,172.
- [9] WU Chun-ping. Study on blasting crater experimental methods for underground blasting [J]. China Mining Magazine, 2017, 26(7):155-158, 172. (in Chinese)
- [10] 张钦礼,郑晶晶,张德明,等. 新桥硫铁矿凿岩爆破参数优化试验研究[J]. 爆破,2009,26(3):1-5.
- [10] ZHANG Qin-li, ZHENG Jing-jing, ZHANG De-ming, et al. Test research on drilling and blasting parameters optimization in Xinqiao Pyrite Mine [J]. Blasting, 2009, 26(3):1-5. (in Chinese)
- [11] 谷亚州,史秀志,霍晓峰,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.
- [11] GU Ya-zhou, SHI Xiu-zhi, HUO Xiao-feng, et al. Study on brow protection technology for upward medium-length hole blasting in underground mines [J]. Blasting, 2022, 39(4):62-70. (in Chinese)
- [12] 潘博,郭连军,汪旭光,等. 爆炸荷载作用下不同形式采空区损伤模式研究[J]. 工程爆破,2023,29(5):22-31.
- [12] PAN Bo, GUO Lian-jun, WANG Xu-guang, et al. Study

- on different damage modes of goaf under blast load[J]. Engineering Blasting, 2023, 29(5): 22-31. (in Chinese)
- [13] 长江水利委员会长江科学院. GB/T 50218—2014 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [13] Changjiang Water Resources Commission, Changjiang River Scientific Research Institute. GB/T 50218—2014 Standard for engineering classification of rock mass[S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese)
- [14] LIVINGSTON C W. Fundamentals of rock failure[C]// ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. ARMA, 1956: ARMA-56-0001.
- [15] 邓 琛, 彭泽锋, 蒋志明, 等. 基准平面垂直断面法在爆破漏斗试验中的应用[J]. 工程爆破, 2021, 27(1): 85-88, 94.
- [15] DENG Cheng, PENG Ze-feng, JIANG Zhi-ming, et al. Application of reference plane with vertical section measurement method in blasting crater test[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(1): 85-88, 94. (in Chinese)

(上接第 61 页)

5 结论与建议

5.1 结论

通过理论分析、现场试验和工程应用, 本研究得出以下结论:

1) 低威力混装乳化炸药通过其独特的低爆压、长延时爆轰特性, 成功将爆炸能量由“强冲击”转化为“强裂解”, 是解决坚硬完整岩体预裂爆破难题的核心技术。

2) 该技术将低威力混装乳化炸药、宽孔距、空气间隔装药结构及电子雷管起爆技术有机集成, 形成了一套高效、经济、高质量的综合性解决方案, 在岩体完整的硬岩和中硬岩环境中可获得良好的预裂效果, 半孔率达到 80% 以上, 预裂面平整度满足规范要求, 极具推广应用价值。

3) 孔距增大至 $(18 \sim 25)D$ 范围内时, 通过优化装药参数和起爆时序, 可以保证预裂缝的充分贯通。底部耦合装药与上部空气间隔相结合的装药结构能够优化能量分布, 提高爆破效果。

4) 本技术具有显著的经济效益, 可降低预裂爆破直接成本 46% 以上, 提高施工效率 5 倍以上, 同时减少了环境影响, 提高了作业安全性。

5) 电子雷管起爆系统的应用提高了起爆时序控制的精确性和可靠性, 解决了导爆索起爆存在的安全问题, 是预裂爆破技术发展的重要方向。

6) 将现场混装炸药技术和电子雷管起爆系统集成应用于预裂爆破, 提高了作业效率和安全性。

研究开发的宽孔距低威力混装乳化炸药耦合装药预裂爆破技术, 在技术经济性、安全环保性等方面表现出显著优势, 具有广阔的推广应用前景。

5.2 建议

基于本研究的结果和经验, 对今后工作提出以下建议:

1) 进一步研究不同岩性、不同地质条件下宽孔

距预裂爆破的适用性, 特别是节理发育岩体中的参数优化方法。

2) 开展爆破过程数值模拟研究, 深入分析应力波传播规律和裂纹扩展机制, 为参数设计提供理论依据。

3) 研发智能化装药和起爆控制系统, 实现爆破参数的精准控制和自适应调整。

4) 加强爆破效果监测和评价技术研究, 建立完善的质量评价体系和反馈机制。

5) 推广本技术在其他工程领域的应用, 如水利水电工程、交通隧道等, 扩大技术的适用范围。

参考文献 (References)

- [1] 葛克水. 预裂爆破参数的研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
- [1] GE Ke-shui. Study on parameters of pre-splitting blasting[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2009. (in Chinese)
- [2] 马国强, 钱明渊, 程 路, 等. 边坡宽孔距大孔径预裂爆破技术研究及应用[J]. 现代矿业, 2024, 40(3): 67-70, 75.
- [2] MA Guo-qiang, QIAN Ming-yuan, CHENG Lu, et al. Research and application of wide-spacing large-diameter pre-splitting blasting technology for slopes[J]. Modern Mining, 2024, 40(3): 67-70, 75. (in Chinese)
- [3] 杨仁树, 曹文俊, 陈 程, 等. 单-双孔爆炸荷载作用下应变测试试验[J]. 中国煤炭, 2015, 41(10): 49-52.
- [3] YANG Ren-shu, CAO Wen-jun, CHEN Cheng, et al. Strain test under single and double hole blasting loading[J]. China Coal, 2015, 41(10): 49-52. (in Chinese)
- [4] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
- [4] WANG Xu-guang. Blasting design and construction[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011. (in Chinese)