

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.02.027

基于三维激光点云的采场爆破边界 控制方法及现场试验研究^{*}

任少峰¹, 吴立波¹, 王大龙¹, 罗 泓¹, 陶 明², 李启月², 刘 恺², 陈中琪²

(1. 贵州福麟矿业有限公司, 福泉 550509; 2. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 针对深部磷矿采场在复杂充填体约束条件下爆破轮廓难以精确控制、超欠挖评价手段定量性不足的问题,以贵州新桥磷矿二号井875水平采场为工程背景,构建了一套基于三维激光点云的地下采场爆破边界精细表征与控制方法。通过移动式三维激光扫描获取爆后采场高密度点云数据,建立了涵盖点云滤波预处理、配准校正、曲面重建与几何差值计算的系统化分析流程,实现了采场实际开挖轮廓与设计模型之间超欠挖空间分布、体积偏差及轮廓吻合度的定量评价。在此基础上,结合典型采场点云分析结果,对爆破能量分布与边界成形偏差进行针对性诊断,提出以分区微差起爆与孔网参数优化为核心的爆破控制方案,并在875-13#采场开展现场工业试验进行验证。结果表明:三维点云方法能够真实反映爆后采场边界形态及其偏差特征, A_1 、 A_2 排面实际轮廓与设计轮廓吻合度均超过90%;基于点云的体积差集分析可准确量化超挖与欠挖体积,为爆破参数优化提供可靠依据;在存在钻孔偏差与不利施工条件的 A_3 、 A_4 排面中,所提出的边界控制技术仍表现出良好的稳定性与抗干扰能力。研究成果为深部矿山采场爆破精细化设计与边界智能调控提供了可量化、可追溯的技术路径,对降低采矿贫化损失和提升回采效率具有重要工程意义。

关键词: 三维激光点云; 采场爆破; 边界控制; 超欠挖评价; 孔网参数优化

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)02-0253-14

Method and Field Experiment of Stope Blast Boundary Control Based on 3D Laser Point Cloud

REN Shao-feng¹, WU Li-bo¹, WANG Da-long¹, LUO Xiong¹,
TAO Ming², LI Qi-yue², LIU Kai², CHEN Zhong-qi²

(1. Guizhou Fulin Mining Co., LTD., Fuquan 550509, China;

2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Precise control of blasting-induced excavation boundaries in deep phosphate stopes presents significant challenges under complex backfill constraints, with current overbreak/underbreak evaluation methods frequently lacking quantitative rigor. Using the 875-level stope of Shaft No. 2 at Guizhou's Xinqiao Phosphate Mine as a case study, this research develops an advanced methodology for blasting boundary characterization and control that leverages three-dimensional (3D) laser point cloud data analysis. High-precision post-blast point cloud data were collected using a mobile laser scanning system, followed by the development of a comprehensive analytical framework incorpo-

收稿日期 (Date of reception): 2026-01-08

网络首发日期 (Published online): 2026-03-05

作者简介: 任少峰 (1983-), 男, 博士后, 从事采矿和爆破的研究, (E-mail) rsf1226@163.com。

通信作者: 陈中琪 (2002-), 男, 硕士研究生, 主要从事矿山爆破、智慧矿山等方面的研究, (E-mail) 245512072@csu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (12472409)

About the author: REN Shao-feng (1983-), male, postdoctoral researcher, mainly engaged in research on mining engineering and blasting, (E-mail) rsf1226@163.com.

Corresponding author: CHEN Zhong-qi (2002-), male, postgraduate student, mainly engaged in research on mine blasting and smart mining, (E-mail) yuanquan@csu.edu.cn.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (12472409)

rating point cloud denoising, preprocessing, registration correction, surface reconstruction, and geometric discrepancy analysis. This system allows quantitative evaluation of the spatial distribution of overbreak and underbreak, volumetric deviation, and the degree of contour matching between the excavation boundary and the design profile. Utilizing point cloud diagnostic results from representative stopes, the effects of blasting energy distribution and initiation sequence on boundary formation were analyzed, subsequently developing a control strategy integrating zoned millisecond-delay initiation with optimized blasthole layouts. Field trials at the 875-13# stope confirmed the method's capability to precisely characterize post-blast boundary morphology and deviation characteristics, achieving over 90% contour matching accuracy for both A_1 and A_2 rows. Volumetric difference analysis of point cloud data provided a reliable quantitative basis for assessing overbreak and underbreak and for guiding blasting parameter optimization. The developed boundary control technique demonstrates consistent stability and robustness even under challenging conditions, including drilling deviations in the A_3 and A_4 rows. This methodology offers a quantitative, traceable technical solution for precision blasting design and boundary control in deep mining stopes, delivering practical value by minimizing ore dilution and enhancing stope extraction efficiency.

Key words: 3D laser point cloud; stope blasting; excavation boundary control; overbreak and underbreak evaluation; blasthole pattern optimization

随着地下矿山开采深度与采场规模的不断增大,爆破作业在采场空间形成中的主导作用愈发凸显,其成形质量直接关系到围岩稳定性、矿石回采率以及后续采掘作业的安全与效率^[1-3]。在复杂地质与高应力环境下,采场爆破边界往往难以精确控制,超挖与欠挖问题普遍存在:超挖会削弱围岩承载能力,诱发顶板松动、裂隙扩展甚至局部冒落,同时造成矿石贫化和无效剥离^[4];欠挖则导致矿体残留与边界不规整,增加二次爆破与修整工作量,降低资源回收率^[5,6]。尤其在充填体约束显著的深部采场中,爆破能量释放路径受限,边界成形的随机性和不均匀性进一步加剧,使得传统经验型爆破设计难以满足精细化开采要求^[7,8]。

针对采场爆破边界控制问题,已有研究主要从爆破参数优化、起爆顺序调整及数值模拟等方面展开^[9,10],但受限于现场条件和测量手段,多数研究仍依赖人工断面量测、局部抽样统计或二维影像分析,难以全面、真实地反映爆后采场三维空间几何形态及其偏差分布特征。这种信息获取手段的局限性,使得爆破成形问题的诊断往往停留在定性或局部层面,难以支撑针对性的参数反演与工艺优化,亦难以对围岩稳定性和贫化、损失问题进行精细评估。

近年来,三维激光点云技术在地下空间监测领域逐步得到应用,其高精度、高密度和全空间覆盖的特点,为爆后采场边界形态的定量表征提供了新的技术途径^[11,12]。通过构建采场实际开挖轮廓的三维点云模型,可实现与设计模型的精准对比,进而在空间尺度上定量识别超欠挖分布、边界偏差分带特征及潜在失稳区域。然而,现有研究多集中于点云技术在断面测量或形态重建中的应用,针对深部复

杂采场条件下,如何将点云诊断结果与爆破工艺设计有机结合,并通过现场试验加以验证的系统研究仍较为缺乏。

基于贵州福泉新桥磷矿山二号井 875 水平采场的工程背景,本研究采用无人机搭载式三维激光扫描系统,对典型采场(875-18#、875-12#)爆后边界进行高精度点云采集与处理,揭示了不同采场和剖面位置超欠挖的空间分布规律及其控制因素。通过对采场实际爆破结果与设计轮廓的对比分析,发现爆破能量分布、起爆顺序、钻孔偏差及围岩结构等因素在边界控制中起着重要作用。根据点云分析结果,提出了以分区能量控制、微差起爆时序优化及孔网参数精细化配置为核心的爆破设计方案,旨在优化能量释放路径与起爆顺序,减少局部过破坏并提高边界控制精度。进一步在 875-13#采场开展现场工业试验验证,结果表明,三维激光点云技术能够真实反映爆后采场边界形态,为超挖与欠挖的定量诊断提供了可靠依据。优化后的爆破方案在复杂充填体约束条件下有效提高了采场边界的连续性与可控性。研究成果为深部矿山采场的爆破精细化设计、围岩稳定性控制及贫化损失降低提供了新的技术路径与工程参考。

1 实际开挖轮廓面点云数据获取

1.1 设备及技术原理

三维激光点云设备基于激光测距原理,通过向开挖面发射激光脉冲并接收从岩体表面反射的信号,结合其内部高精度角度编码器记录的水平和垂直方向角信息,可解算出每个测点在仪器坐标系下的三维坐标。相较于传统的断面测量或二维影像方

法,三维激光扫描技术能高效、完整地获取采场开挖后的复杂空间几何形态。本研究在此基础上研制并采用了无人机搭载式三维点云采集系统:以自研地下飞行无人机平台为载体,集成三维激光扫描仪、姿态/环境等传感器以及电源与机载存储模块,通过规划无人机飞行路径实现对采场多位置覆盖扫描,并将采集的点云数据实时记录至机载存储,供后续快速处理与三维建模分析。该系统可替代人员进入采空区、破碎围岩或坍塌隐患等高风险环境开展近距

离测量,在无需人员到场、无需架设测站的条件下完成对人难以到达区域的快速扫描与数据获取,显著降低现场作业安全风险与组织成本,同时提升复杂空间的覆盖完整性与测量效率。该系统测距精度高且能获取探测范围内所有可见表面的高密度空间信息,为后续构建精细化的三维实景模型提供了可靠的数据基础,系统配套设备如图1所示,关键参数如表1所示。

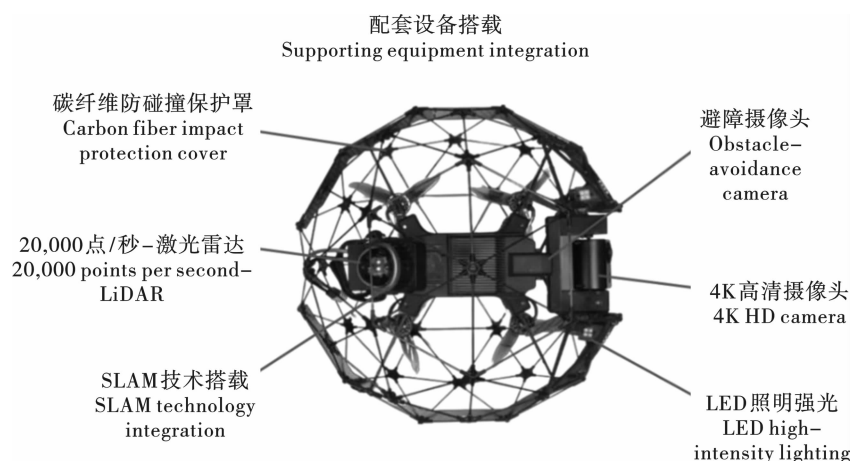


图1 采场无人机激光点云扫描系统

Fig. 1 Stope UAV laser point cloud scanning system

表1 采场无人机激光点云扫描系统关键参数配置

Table 1 Key parameter configuration of the stope UAV laser point cloud scanning system

指标 Indicator	设备参数 Equipment parameters
尺寸 Dimensions/mm	≤ 380 × 380
续航时间 Battery life/min	30
分辨率 Resolution	4K
相机帧率 Camera frame rate	60 fps
设备控制 Device control	SLAM
重量 Weight/g	1550

1.2 点云数据预处理与边界提取流程

1.2.1 点云滤波与预处理

爆后采场点云往往包含空气散射点、远距离弱回波离群点、设备/管线等非目标点,若直接在原始点集上进行差值,离群点、局部空洞与站间错位将被放大并传递至超欠挖结果。预处理环节以提高点云统计一致性为目标,在不改变真实几何的前提下抑制随机噪声与离群点,本研究采用了基于邻域距离的分布假设法。

$$\begin{cases} \bar{d}_j = \frac{1}{k} \sum_{p_j \in N_k(p_i)} \|p_i - p_j\| \\ \bar{d}_i \leq \mu + \alpha\sigma \end{cases} \quad (1)$$

式中: $N_k(p_i)$ 为 k 近邻集合, α 为阈值系数; μ 为点云中所有点之间距离的均值; σ 为点云中距离的标准差,定义每个点 p_i 到其 k 个最近邻点($k - NN$)的平均距离为 $\bar{d}_i$, $\|p_i - p_j\|$ 为点 p_i 和点 p_j 之间的欧几里得距离。对于井下粉尘与弱回波导致的稀疏噪声点, SOR 具有良好抑制效果。

1.2.2 点云配准

配准的目标是把多站点云以及点云与设计模型统一到同一坐标基准。为减少累积漂移,可通过最小二乘求解相似变换,以实现工程坐标对齐^[13-15]

$$\min_{s,R,t} \sum_i \|sRp_i + t - P_i\|^2, s > 0, R^T R = I \quad (2)$$

式中: s 为尺度因子; R 为旋转矩阵; t 为平移向量; p_i 为源点云中的点, P_i 为目标点云中的点。在完成粗对齐后,采用迭代最近点(ICP)进行精配准,基本思想是不断更新点对应关系,并最小化配准残差。

1.2.3 点云重建

完成精配准后,点云数据仍然是离散的点集合。考虑到采场存在遮挡与局部缺失,重建能够将不规则边界转化为可用于体积差集与分区统计的连续表达。在获得实测边界曲面与设计边界曲面后,超欠挖评价的关键是建立“有符号偏差”与“体积差异”的可计算定义。对实测表面上的点,在设计表面上寻找最近点,并取设计曲面的单位法向,定义有符号距离,如下式所示

$$s(p) = n(p^*)(p - p^*) \quad (3)$$

式中: $s(p)$ 为点 p 到设计表面的 p^* 的有符号距离; $n(p^*)$ 表示点 p^* 处的单位法向量; p 表示实测点云中的点; p^* 表示设计模型中的点; $s_{(p)} > 0$ 表示超挖, $s_{(p)} < 0$ 表示欠挖。

因此我们可以统计到扫描点云区域中的每个点与设计边界的有符号距离,使用了均值、均方根以及95%分位数来进一步说明整个扫描区域的超欠挖情况,如下式所示^[1]

$$\begin{cases} \mu_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i \\ \text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i^2} \\ P_{95} = \text{percentile}(\{s_i\}, 95\%) \end{cases} \quad (4)$$

式中: μ_s 是超欠挖的均值,表示所有点的平均偏差;RMS表示均方根误差,反映了所有点的偏差分布; P_{95} 表示第95百分位,表示最极端的超挖区域。

当需要评估超挖或欠挖在空间中的体积时,体素差集方法则显得尤为重要。通过将空间离散为体素单元,分析实测与设计模型之间的差异,计算超欠挖体积。基于多轮爆后扫描的数据,可进一步开展相关分析、回归或建模,点云处理与超欠挖评价为精细化爆破与围岩稳定性评估提供可持续的数据支撑。

2 现场扫描实例

2.1 工程概况

本研究所涉及的工程位于贵州福泉福磷矿业有限公司新桥磷矿山二号井(如图2所示)875 m水平,矿体倾角为 $30^{\circ}27'42''$,矿房分段高度平均15 m,回采长度26.1 m,平均真厚度为29.27 m,采用垂直走向布置的扇形孔分段空场嗣后充填采矿法,采场工况受矿岩、充填体及采动扰动的耦合作用影响显著。现场常因剩余炸药回填导致装药量偏大,使爆破能量分布不均,进一步加剧超欠挖及边界控制困难。在此复杂地质—施工条件下,为准确刻画爆后采场实际开挖形态并揭示边界偏差形成机理,选取875-18#与875-12#采场开展三维激光点云扫描,从而对采场爆破后的真实边界、超欠挖情况及围岩稳定性进行分析。



图2 新桥磷矿山二号井

Fig. 2 Xinqiao phosphate mine No. 2 shaft

2.2 点云特征分析与超欠挖测算

2.2.1 875-18#采场点云分析

如图3所示,为定量揭示爆后采场边界的成形规律,对875-18#采场的纵向与横向剖面点云数据进行了系统的超欠挖测算。基于表2与表3数据,选取不同剖面距(5 m、10 m、15 m、20 m)处的顶板及前后帮部作为研究对象,对其几何偏差进行统计分析,以识别超欠挖的空间分布特征及其可能的控制因素。

表2 875-18#采场纵向剖面图超欠挖测算

Table 2 875-18# stope longitudinal section overbreak and underbreak calculation

剖面类型	剖面距	平均超挖值	最大超挖值	超挖面积	平均欠挖值	最大欠挖值	欠挖面积	设计面积	实际面积
Cross-section type	Section spacing/m	Average overbreak/m	Maximum overbreak/m	Overbreak area/m ²	Average underbreak/m	Maximum underbreak/m ²	Underbreak area/m ²	Design area/m ²	Actual area/m ²
顶板 Top	5	0.93	3.26	24.28	1.13	3.35	29.43	391.5	386.35
	10	2.63	7.16	68.60	0.55	4.35	14.41	391.5	445.69
	15	2.33	8.20	60.89	0.88	1.96	22.96	391.5	429.43
前后 Front and rear	5	/	/	/	1.24	2.00	18.61	391.5	372.89
	10	4.11	13.87	61.70	0.30	1.34	4.51	391.5	448.69
	15	/	/	/	1.26	2.59	18.85	391.5	372.65

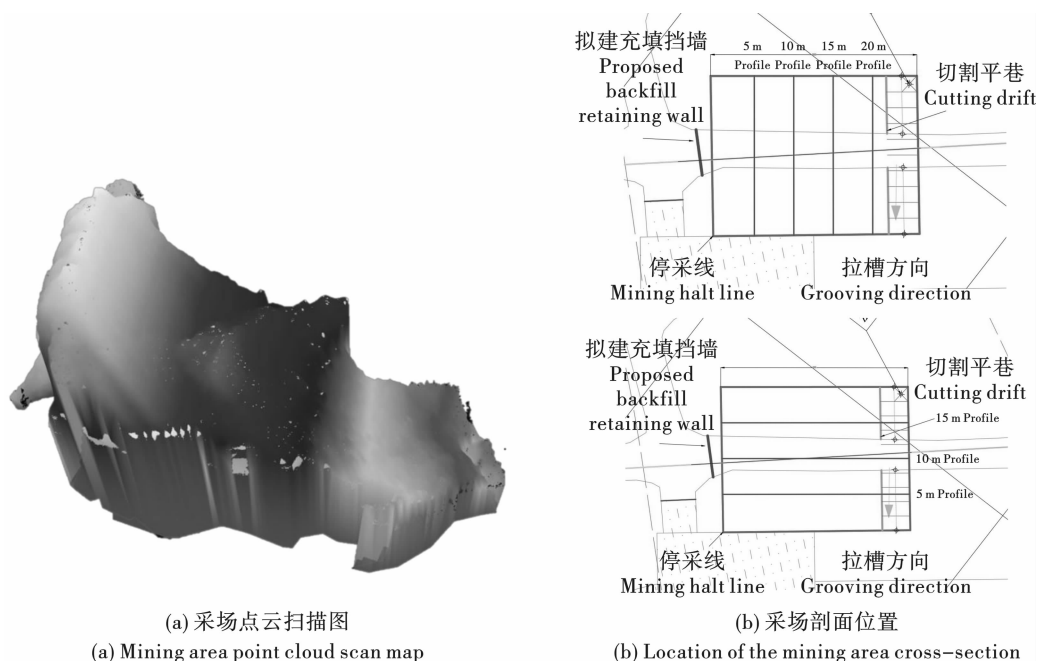


图3 875-18#采场点云扫描图及剖面位置

Fig. 3 875-18# Mining area point cloud scan map and cross-section locations

875-18#采场纵向剖面对比如图4所示,分析结果表明,纵向方向的超挖表现出显著的空间分异性。随着剖面距增大,顶板超挖呈现明显的阶段性增强趋势:5 m剖面的平均超挖值仅为0.93 m,最大超挖达3.26 m,而10 m与15 m剖面的平均超挖值分别增大至2.63 m与2.33 m,最大超挖进一步扩大至7.16 m与8.20 m,说明采场纵向中段受爆破作用与采动应力叠加影响更为显著,顶板局部出现抬起、松动或破碎的特征,是爆后边界不稳定的潜在集中区。

此外,纵向方向的欠挖亦呈不均匀分布,其主要集中于5 m与15 m剖面,欠挖面积分别达到29.43 m²和22.96 m²,表明这些区域可能因钻孔偏斜、装药不足或围岩完整性较高而导致爆破能量未能充分传递。由实际开挖面积的变化可进一步印证上述规律:5 m剖面的开挖面积略小于设计值,而10 m剖面开挖面积显著增大,达到445.69 m²,比设计面积超出54 m²,反映出纵向中部存在明显的超挖集中区,易诱发顶板卸荷、拉裂及局部冒落。

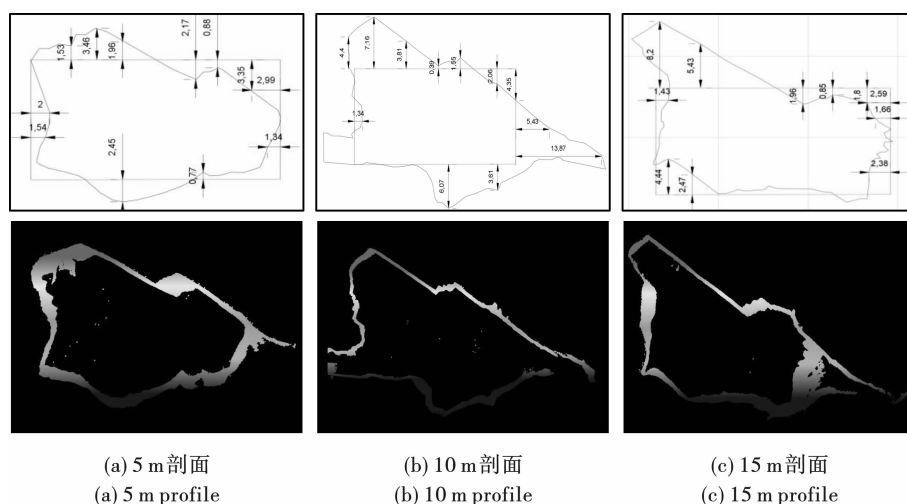


图4 875-18#采场纵向剖面对比图

Fig. 4 875-18# stope longitudinal section comparison

875-18#采场横向剖面对比如图5所示,横向剖面的超欠挖特征相较纵向更为复杂,顶板与帮部的

几何偏差呈现高度不规则性。横剖面顶板超挖总体呈现“入口强、中段弱、末段趋缓”的空间演化趋势,

其中 5 m 剖面平均超挖达 4.53 m, 最大超挖为 6.30 m, 超挖面积高达 90.67 m², 显示入口段受自由面效应、炮孔布置与爆破冲击波叠加的共同影响, 顶板破坏尤为显著; 10 m 与 15 m 剖面虽较前者有所减弱, 但仍存在明显超切现象; 至 20 m 剖面, 顶板超挖趋于消失, 但欠挖面积增至 10.61 m², 表明爆破能量在尾部区域不足。帮部的超欠挖呈现交替出现的特征, 5 m 与 10 m 剖面同时存在超挖与欠挖,

而 15 m 与 20 m 剖面则以欠挖为主, 且欠挖面积分别达到 30.60 m² 和 42.13 m²。此类现象通常由能量分布不均、围岩结构面发育差异或钻爆施工偏差所致。横向方向的实际开挖面积波动较大, 且总体呈减小趋势, 从 5 m 剖面的 390.67 m² 逐步下降至 20 m 剖面的 289.39 m², 进一步说明横向边界成形受围岩结构特征与爆破随机性的影响更为显著。

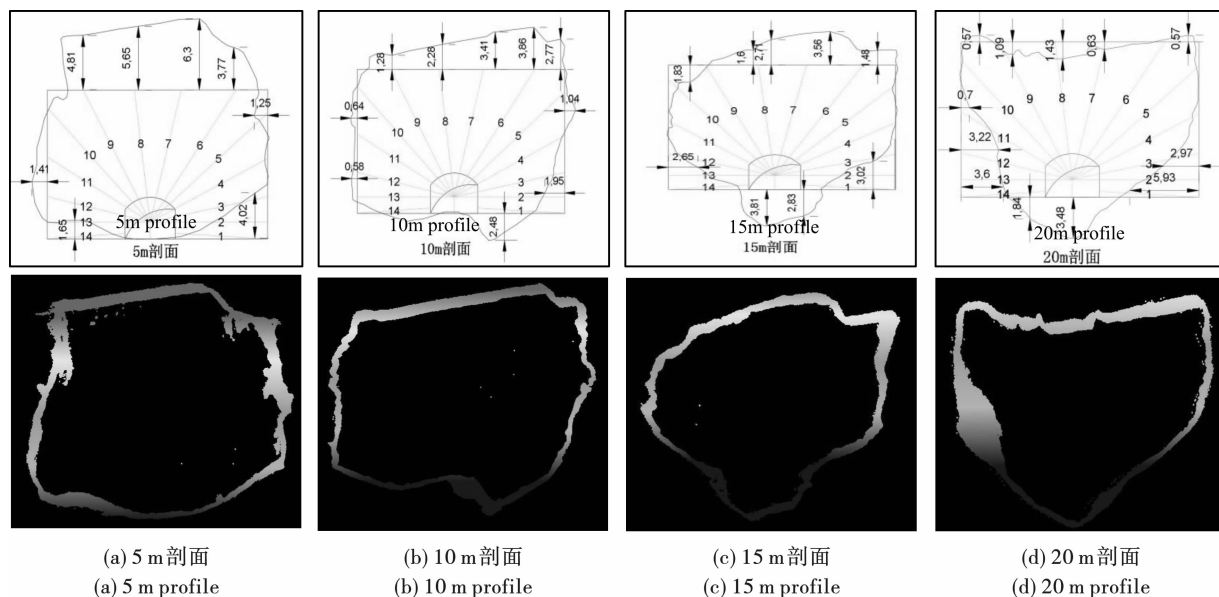


图 5 875-18# 采场横向剖面对比图

Fig. 5 875-18# stope transverse section comparison

表 3 875-18# 采场横向剖面开挖测算

Table 3 875-18# stope transverse section excavation calculation

剖面类型 Cross-section type	剖面距 Section spacing/m	平均超挖值 Average overbreak/m	最大超挖值 Maximum overbreak/m	超挖面积 Overbreak area/m ²	平均欠挖值 Average underbreak/m	最大欠挖值 Maximum underbreak/m ²	欠挖面积 Underbreak area/m ²	设计面积 Design area/m ²	实际面积 Actual area/m ²
顶板 Top	5	4.53	6.30	90.67	/	/	/	300	390.67
	10	2.43	3.86	48.59	/	/	/	300	348.59
	15	1.87	3.56	37.43	0.26	1.83	5.17	300	332.26
	20	/	/	/	0.53	1.43	10.61	300	289.39
前后 Front and rear	5	0.56	1.41	8.34	1.46	1.25	21.92	300	286.42
	10	0.46	1.04	6.85	0.66	1.95	9.96	300	296.89
	15	/	/	/	2.04	2.65	30.60	300	330.69
	20	/	/	/	2.81	5.93	42.13	300	342.13

综合纵横剖面分析可知 875-18# 采场爆后边界整体存在较大的几何偏差, 其中顶板超挖最为突出, 最大超挖超过 8 m, 是影响采场安全的关键控制部位; 帮部欠挖普遍存在, 局部保留矿柱现象明显, 不仅降低矿石回采率, 还可能引发不利的应力重新分布; 超挖与欠挖均呈现分带性, 与采场内部结构面组

合、炮孔偏差、装药结构及爆破能量耦合效应密切相关; 实际开挖断面变化幅度较大, 表明爆破对围岩的扰动强烈, 边界成形质量与设计轮廓存在显著差异。

2.2.2 875-12# 采场点云分析

如图 6 所示, 同样为揭示 875-12# 采场爆后边界的真实成形特征, 基于表 4 与表 5 数据, 对不同剖面

距(5 m、10 m、15 m、20 m、30 m、40 m)处的纵向与横向点云数据进行超欠挖测算。基于表中统计结

果,对顶板及两帮的几何偏差进行系统分析,以明确超欠挖的空间分布规律及其潜在控制因素。

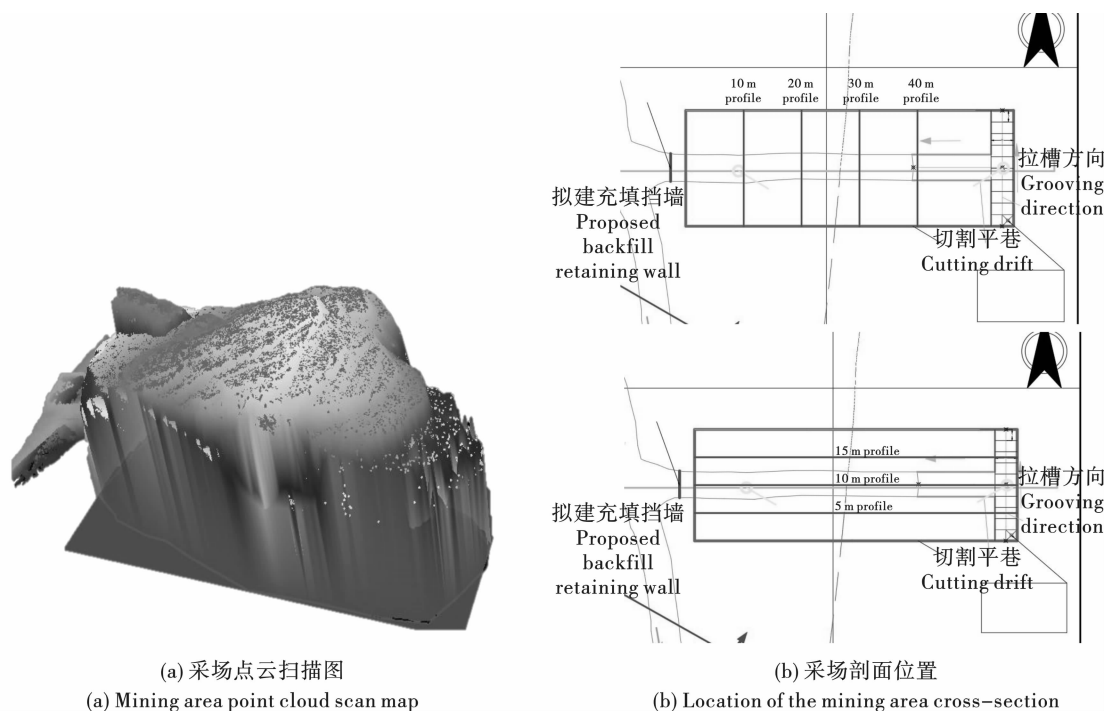


图6 875-12#采场点云扫描图及剖面位置

Fig. 6 875-12# Mining area point cloud scan map and cross-section locations

875-12#采场纵向剖面对比如图7所示,从纵向剖面结果来看,875-12#采场的顶板超挖程度显著高于875-18#,且空间分布极不均匀,呈现明显的“入口与中段强、后段趋弱”的特征。在5 m剖面处,平均超挖达5.56 m,最大超挖达到10.40 m,对应超挖面积高达319.8 m²;10 m剖面的超挖规模进一步扩大,平均超挖为6.95 m,最大超挖达11.61 m,超挖面积达到393.2 m²,是纵向超挖最为显著的位置。

上述数值表明,采场前部及中段顶板受爆破冲击波及能量叠加效应影响强烈,附近围岩结构面较为发育,导致顶板大范围剥落与抬升,形成严重的超挖区。15 m剖面处的顶板超挖有所减弱,平均超挖降至2.26 m,但最大超挖仍达到7.80 m,且出现欠挖面积47.6 m²的混合特征,表明爆破能量沿纵向方向呈快速衰减,且受局部岩性变化及钻孔偏差共同影响,使顶板成形出现“超挖—欠挖”并存的复杂状态。

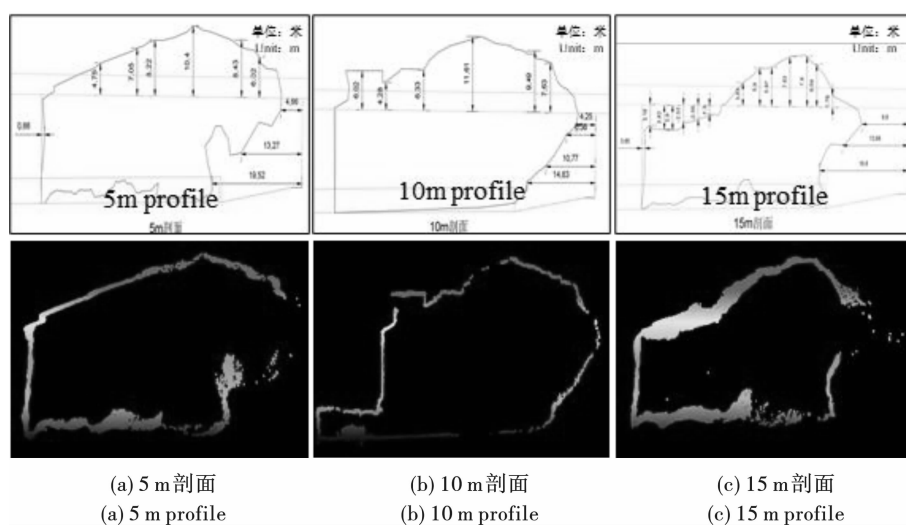


图7 875-12#采场纵向剖面对比图

Fig. 7 875-12# stope longitudinal section comparison

表 4 875-12#采场纵向剖面图超欠挖测算

Table 4 875-12# stope longitudinal section overbreak and underbreak calculation

剖面类型 Cross-section type	剖面距 Section spacing/m	平均超挖值 Average overbreak/m	最大超挖值 Maximum overbreak/m	超挖面积 Overbreak area/m ²	平均欠挖值 Average underbreak/m	最大欠挖值 Maximum underbreak/m ²	欠挖面积 Underbreak area/m ²	设计面积 Design area/m ²	实际面积 Actual area/m ²
顶板 Top	5	5.56	10.4	319.8	/	/	/	905.6	1225.4
	10	6.95	11.61	393.2	/	/	/	905.6	1298.8
	15	2.26	7.80	127.9	0.84	3.90	47.6	905.6	985.9
前后 Front and rear	5	/	/	/	3.69	19.52	209.0	905.6	696.6
	10	/	/	/	2.48	14.83	140.3	905.6	765.3
	15	/	/	/	3.95	18.80	223.4	905.6	682.2

纵向两帮的欠挖特征同样十分突出,5~15 m 剖面均未出现明显超挖,而是以欠挖为主,欠挖面积分别为 209.0 m²、140.3 m² 及 223.4 m²,且欠挖深度最大可达 19.52 m。如此大尺度的欠挖表明爆破能量在两帮方向分布严重不足,可能与钻孔密集度不足、围岩完整性较高或爆破对称性差有关,同时也暗示存在较大范围的残留矿体或未破碎岩块,对后续回采组织和资源回收率造成不利影响。纵向实际开挖面积进一步反映了上述规律:5 m、10 m 剖面实际开挖面积均超过设计值 300 m²,但 15 m 剖面开挖面积减少至 682.2 m²,说明爆破在纵向方向既存在

过度破碎区域,也存在明显能量不足区。

875-12#采场横向剖面对比如图 8 所示,横向剖面反映了 875-12#采场爆后边界的另一典型特征,即顶板超挖的显著累积效应与空间扩散性。10~40 m 剖面顶板平均超挖分别为 5.07 m、6.18 m、12.59 m 和 9.80 m,最大超挖均超过 7 m,其中 30 m 剖面甚至达到 11.51 m 的峰值,显示该区域顶板遭受剧烈的爆破破坏,形成宽厚且延伸性强的超挖带。尤其在 30 m 剖面,超挖面积达到 251.7 m²,明显高于其他剖面,表明该处可能为结构面聚集区、岩性突变区或多次爆破能量叠加区,是顶板失稳风险最高的段落。

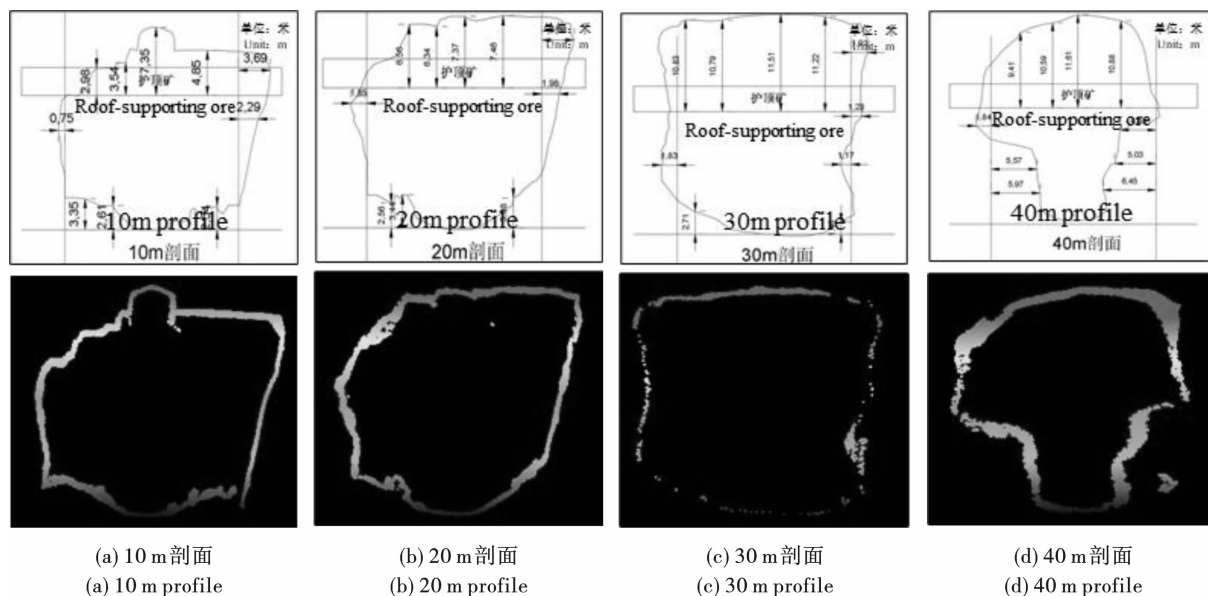


图 8 875-12#采场横向剖面对比图

Fig. 8 875-12# stope transverse section comparison

两帮在横向方向的超欠挖特征同样复杂:10 m 与 20 m 剖面两帮主要表现为超挖,平均超挖分别为 2.53 m 和 3.37 m;30 m 剖面则同时出现超挖(16.3 m²)与欠挖(3.9 m²),显示能量分布不均特征;在 40 m 剖面,欠挖现象最为明显,其欠挖面积达

131.4 m²,反映出爆破末段能量衰减显著,难以完全破坏帮部围岩。结合点云剖面图可见,横向帮部几何形态受围岩节理面控制更强,爆破作用表现出较为明显的随机性与空间不均匀性。

综合纵向与横向剖面的分析可以看出,875-12#

采场爆后边界呈现大尺度、强扰动的超挖特征,尤其是顶板方向,最大超挖超过 11 m,且超挖区域连续性强、空间跨度大,是采场潜在失稳的主要危险源。同时,两帮存在较大范围的欠挖与残留矿体,不仅降低资源回收率,也可能导致围岩应力重新分布,诱发

深部采场局部破坏。总体来看,875-12#采场爆破成形偏差显著,边界控制质量较差,需在后续生产中对爆破参数、钻孔布置及装药结构进行系统优化,并结合预裂爆破与高精度点云监测手段实现动态调整,以提高爆破成形质量与采场稳定性。

表 5 875-12#采场横向剖面图超欠挖测算
Table 5 875-12# stope transverse section overbreak and underbreak calculation

剖面类型	剖面距	平均超挖值	最大超挖值	超挖面积	平均欠挖值	最大欠挖值	欠挖面积	设计面积	实际面积
Cross-section	Section	Average	Maximum	Overbreak	Average	Maximum	Underbreak	Design	Actual
type	spacing/m	overbreak/m	overbreak/m	area/m ²	underbreak/m	underbreak/m ²	area/m ²	area/m ²	area/m ²
顶板 Top	10	5.07	7.35	101.4	/	/	/	300	401.4
	20	6.18	7.46	123.6	/	/	/	300	423.6
	30	12.59	11.51	251.7	/	/	/	300	551.7
	40	9.80	11.61	196.0	/	/	/	300	496.0
两帮 Two sides	10	2.53	3.69	38.0	/	/	/	300	338.0
	20	3.37	3.69	50.5	/	/	/	300	350.5
	30	1.09	1.91	16.3	0.26	1.83	3.9	300	312.4
	40	0.37	0.84	5.6	8.76	6.45	131.4	300	431.4

3 现场工业试验

基于 875-18#与 875-12#采场三维激光点云分析结果可知,爆后边界偏差在空间上呈现显著的非均匀分布特征:顶板超挖主要集中于纵向中段及结构面较为发育的局部区域,而在充填体约束条件下,两帮方向普遍存在欠挖与残留矿体现象。点云定量结果表明,爆破边界成形质量受爆破能量分区配置、起爆时序以及孔网参数匹配程度的共同制约。针对上述边界失控机理,在点云诊断结果基础上,对爆破负面效应进行针对性分析,并从能量释放路径与围岩响应角度出发,对起爆顺序与孔网参数进行系统优化,形成以分区能量控制、微差起爆协同及孔网参数优化为核心的设计思路,并在复杂充填体约束条件下开展现场工业试验验证。

3.1 现场概况

本次试验选取福麟矿新桥二号井 A 层 875 黔龙-13#采场作为研究对象。该采场属于典型的二步骤回采采场。采场周边地质构造复杂,围岩岩性类型多样,主要包括硅质团块白云岩、黑色磷块岩、含磷微粒白云岩、砂质泥质磷块岩及微细粒白云岩等。岩体整体呈块状结构,密度为 2.81 ~ 2.96 g/cm³,平均单轴抗压强度达 111.01 MPa,而平均抗拉强度仅为 3.06 MPa,表现出典型的“高压抗—低抗拉”力学特征,在爆破荷载作用下易发生裂隙扩展与局部剥落。从空间关系上看,875 黔龙-13#采场三面被人

工充填体包围,上方紧邻已回采并充填的 890 分段,顶板直接受充填体约束;北侧毗邻 875-14#充填采空区,南侧紧邻 875-12#充填采空区,仅西侧为矿界实体边界。该高度受限的围岩—充填体组合结构,使爆破能量释放路径受限,对边界稳定性与成形质量提出更高控制要求。

3.2 爆破工艺优化

3.2.1 爆破负面效应控制

为降低爆破对围岩及相邻充填体的不利影响,并抑制能量叠加引起的局部破坏,将单个排面按空间位置划分为底部区、左右两帮区及顶部 4 个功能分区,并对起爆顺序进行优化设计。起爆顺序采用“底部区优先起爆、两帮区随后起爆、顶部区最后起爆”的分区微差方式,使爆破能量沿既定释放路径逐步展开。同时采用单排爆破方式,降低单次起爆药量;排内实施多段微差起爆,严格控制能量释放节奏,避免振动叠加对围岩与充填体造成附加扰动。

3.2.2 爆破参数设计

(1) 顶部参数确定

顶部孔网参数是通过现场实测孔壁压力值计算出裂隙区破坏半径 $r_1 = 1.81$ m,反射拉伸区破坏半径 $r_2 = 1.27$ m,可以获得爆破最小抵抗线 $w = r_1 + r_2$,即排距 $w = 3.08$ m。根据爆破应力波圈相交原理,得到孔底距。

$$a = 1.414(r_1 + r_2) = 4.36 \text{ m} \quad (5)$$

通过保持孔网面积和单位炸药消耗量不变的方

法,增大孔底距和减少抵抗线,使爆破能量能得到充分的利用,即

$$S = aw = 13.4 \text{ m}^2 \quad (6)$$

当炮孔底部与顶部边界预留 0.3 m,顶部围岩损伤程度和范围大幅度减少,顶部炮孔底边距设计为 0.3 m,从而确定顶部边界距离。

(2) 含充填体的采场两帮参数确定

两帮孔网参数是根据两帮正常布孔原则确定,孔底距设计为 4.3 m。分析发现,当边帮为充填体时,炮孔底部与两帮边界预留 0.6 m 以上,帮充填体

损伤程度和范围大幅度减少,初步确定炮孔底边距为 0.6 m。

(3) 底部参数确定

底部孔网参数可根据边帮区域炮孔布置方案确定,底部区域高度初步定为 3.0 m,按 1.5 m 孔底距布孔。并根据底部孔网参数,边界预留距离定为 0.2 m。

3.3 爆破方案设计

875W-13#采场排面设计如图 9 所示,综合顶板、两帮及底板区域的孔网参数与起爆方式,形成针对不同排面的差异化爆破方案。

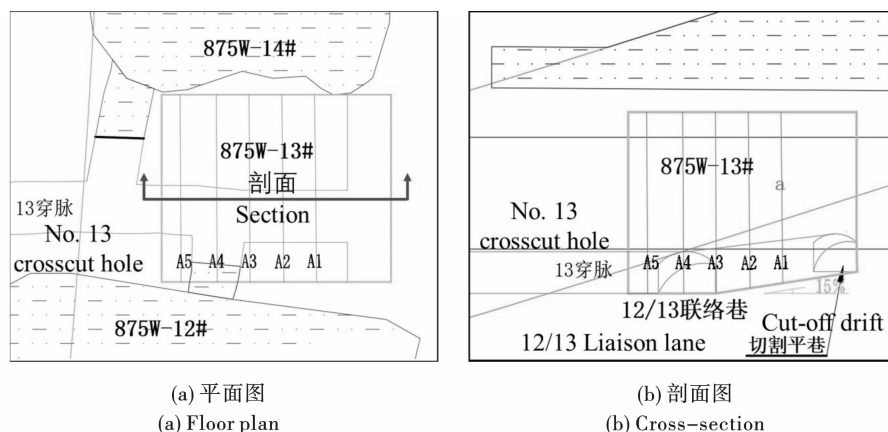


图 9 875W-13#采场排面设计图

Fig. 9 875W-13# stope face design

单个排面炮孔数量为 9 ~ 12 个,排距统一为 3.0 m。本次试验共布置五个爆破排面,每个排面设置 10 ~ 12 个主爆孔,并在底孔两侧位置各布置 3 个加强孔,两帮位置各设置 3 个加强孔(单侧加强孔总数共 6 个),单排加强孔总数为 12 个。各排面炮孔总数为 22 ~ 24 个,累计炮孔 116 个,装药线密度控制在 3000 ~ 5000 g/m 范围内。

3.3.1 炮孔布置

孔底距:孔底距控制在 1.0 ~ 4.6 m 之间,自底部向顶部逐渐增大,且顶部炮孔孔底距保持均匀,有利于形成稳定的爆破自由面并改善块度分布。

炮孔角度:将顶角炮孔布置至顶角部位,有效改善顶角破碎效果;底部炮孔角度则在满足溜矿坡成形条件的前提下进行调整,以保证底板轮廓稳定。

3.3.2 起爆网路

本次试验采用分区微差起爆技术,微差时间统一为 200 ms,爆破方案设计如图 10 所示。起爆总体遵循“前排辅助孔先起爆、后排主爆孔随后起爆;单排内自下而上逐级起爆”的原则。主爆排内起爆顺序依次为底孔、两帮及顶角孔、其余顶板孔。同一排内,单侧位置较高的炮孔先行起爆,随后起爆同侧较

低位置炮孔;单侧完成后,再按相同顺序起爆另一侧对应炮孔,最顶端炮孔单独置于最后起爆,以保证爆破能量沿设计路径有序释放并降低对顶板与充填体的扰动。

3.4 爆破试验结果与分析

图 11 ~ 图 14 为 875-13#采场 $A_1 \sim A_4$ 排的现场爆破效果图,基于此并结合前述爆破参数优化与起爆网络设计结果可以看出,各排面爆后轮廓整体成形质量较高,采场边界控制效果较为理想,未出现以往类似复杂工况下常见的大范围围岩失稳或深部不受控超挖现象。 A_1 排爆破后,溜矿坡与右侧边帮轮廓清晰、连续,岩面完整性较好,炮孔痕迹沿设计方向展开,仅在局部区域出现轻微超欠挖,表明在施工条件较为规范的情况下,分区微差起爆与优化孔网参数能够有效引导爆破能量有序释放,实现对采场边界形态的有效约束。 A_2 排爆后,溜矿坡整体成型更加规整,底部及右侧边帮与设计轮廓高度吻合,顶板局部区域可见一定程度的欠挖与不规则剥落,其主要因为个别炮孔塌孔或装药条件波动,但整体破坏范围仍受控于炮孔轨迹,未发生显著的顶板整体失稳。 A_3 排受一次性钻孔偏差影响,局部区域出现欠挖及顶板塌落现象,但从整体几何形态看,溜矿

坡及主要边帮仍保持较好的连续性与平顺性,表明在施工偏差与初始损伤叠加的不利条件下,分区起爆方式对限制裂隙扩展范围、抑制破坏向深部发展的能力依然较为显著。 A_4 排爆破后,溜矿坡成形较

为规整,右侧边帮与顶板轮廓控制效果良好,左侧局部出现超挖并揭露充填体,反映出前序爆破累积损伤与钻孔轨迹偏差耦合作用对局部围岩稳定性的影响,但超挖范围总体有限,未形成连续性的失稳带。

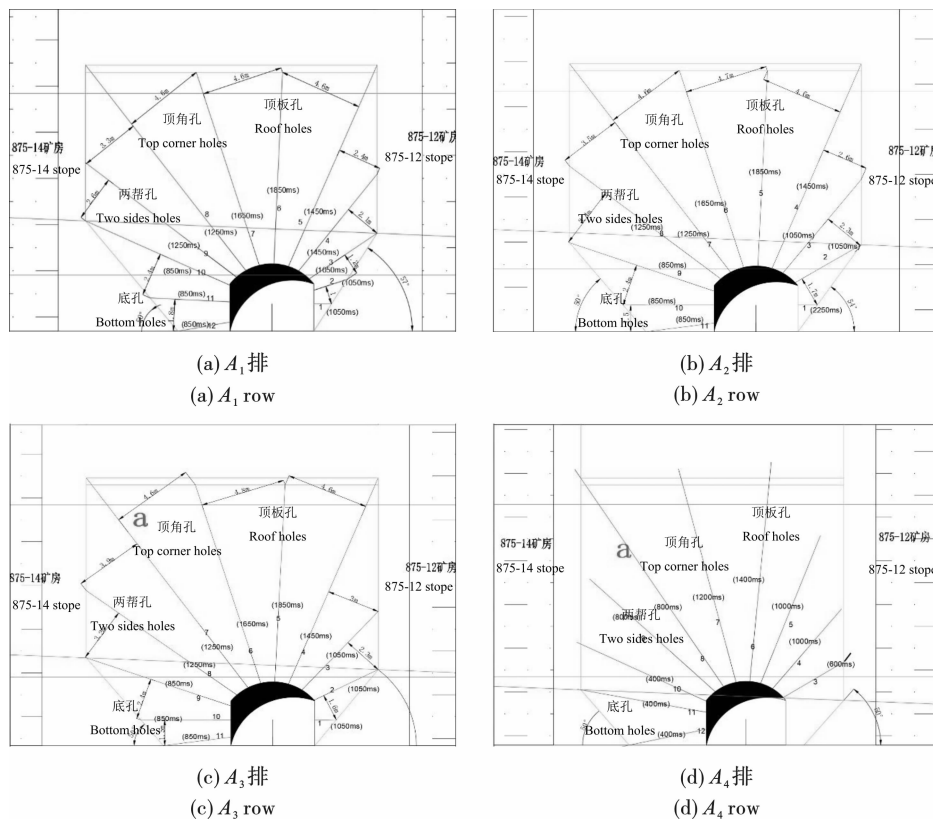


图 10 爆破方案设计图

Fig. 10 Blasting plan design



(a) 爆破前炮眼布置情况

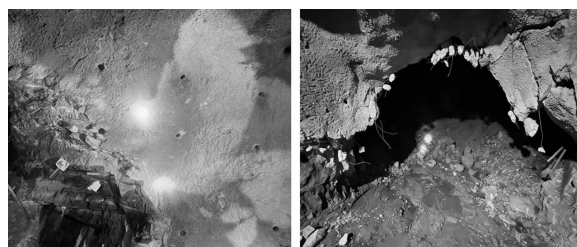
(a) Blasthole layout
before blasting

(b) 爆破后作业面现场情况

(b) Post-blasting conditions
at the working face

图 11 875-13# 采场 A_1 排爆破效果

Fig. 11 875-13# stope A_1 blasting effect



(a) 爆破前炮眼布置情况

(a) Blasthole layout
before blasting

(b) 爆破后作业面现场情况

(b) Post-blasting conditions
at the working face

图 12 875-13# 采场 A_2 排爆破效果

Fig. 12 875-13# stope A_2 blasting effect

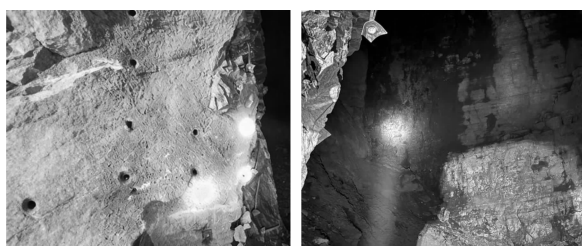
综合 $A_1 \sim A_4$ 排爆破效果分析可认为,基于前期三维激光点云分析所提出的分区微差起爆与孔网参数优化技术体系,在复杂受限采场条件下能够有效抑制爆破能量的无序叠加,提升采场边界成形的连续性与可控性,对保障深部采场围岩稳定性及后续安全回采具有显著工程应用价值。

现场实际爆破结果与设计轮廓对比剖面如图 15

所示,对 A_1 、 A_2 排爆后点云三维重建结果与剖面轮廓对比分析,可以进一步从空间整体性与局部几何特征两个层面对爆破效果进行验证。图 16 和图 17 展示了 A_1 和 A_2 排的爆破后三维激光扫描结果,点云正视、侧视及俯视结果表明,爆后采场整体形态完整,轮廓连续性良好,未出现明显的深部拉槽、局部失稳或非设计方向的能量外泄特征,三维实体形态与设计采

场空间边界保持较高一致性。 A_1 排点云模型显示,溜矿坡区域表面起伏相对均匀,坡面连续,边帮与底部交汇部位未见明显台阶式破坏,表明底孔—两帮—顶部的分区微差起爆有效引导了岩体破碎与位移方向;局部顶板与左侧边帮虽存在一定程度的表面粗糙化与体积微量偏差,但主要表现为小尺度剥落,未形成贯通性超挖空腔。 A_2 排点云结果进一步印证了上述特征,其三维形态呈现出较为规整的块体剥离特征,底部与右侧边帮点云密度分布均匀,轮廓面基本沿设

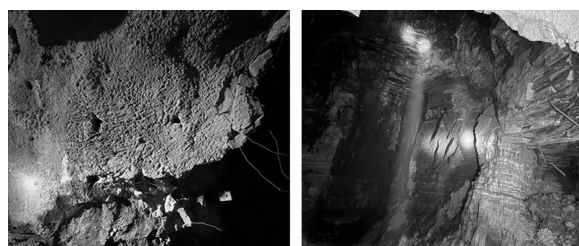
计孔网展开;左侧顶板局部超挖及右侧顶板轻微欠挖在点云中表现为局部体量变化,而非整体轮廓失控,说明偏差更多来源于局部钻孔质量与围岩非均质性影响。综合剖面分析与三维点云重建结果可以认为,在 A_1 与 A_2 排所代表的施工条件下,“分区微差起爆+孔网参数优化”不仅在二维轮廓层面实现了较高的设计吻合度,而且在三维空间尺度上有效控制了爆破能量释放路径与岩体破碎形态,为采场边界稳定性与块度可控性提供了可靠保障。



(a) 爆破前炮眼布置情况
(a) Blasthole layout
before blasting
(b) 爆破后作业面现场情况
(b) Post-blasting conditions
at the working face

图 13 875-13#采场 A_3 排爆破效果

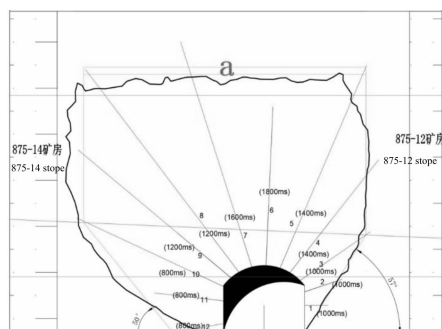
Fig. 13 875-13# stope A_3 blasting effect



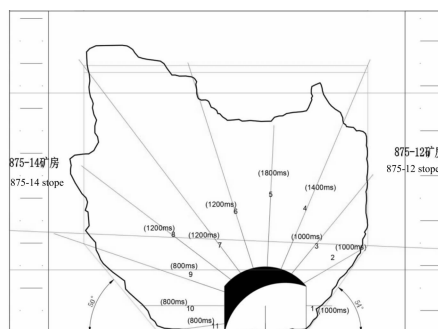
(a) 爆破前炮眼布置情况
(a) Blasthole layout
before blasting
(b) 爆破后作业面现场情况
(b) Post-blasting conditions
at the working face

图 14 875-13#采场 A_4 排爆破效果

Fig. 14 875-13# stope A_4 blasting effect



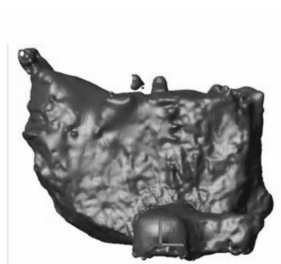
(a) A_1 排
(a) A_1 row



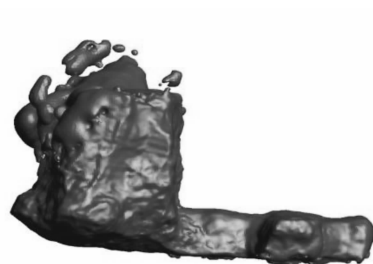
(b) A_2 排
(b) A_2 row

图 15 实际爆破结果与设计轮廓对比剖面图

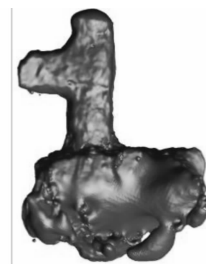
Fig. 15 Comparison of actual blasting results with design profile



(a) A_1 排点云正视图
(a) A_1 row point cloud frontal view



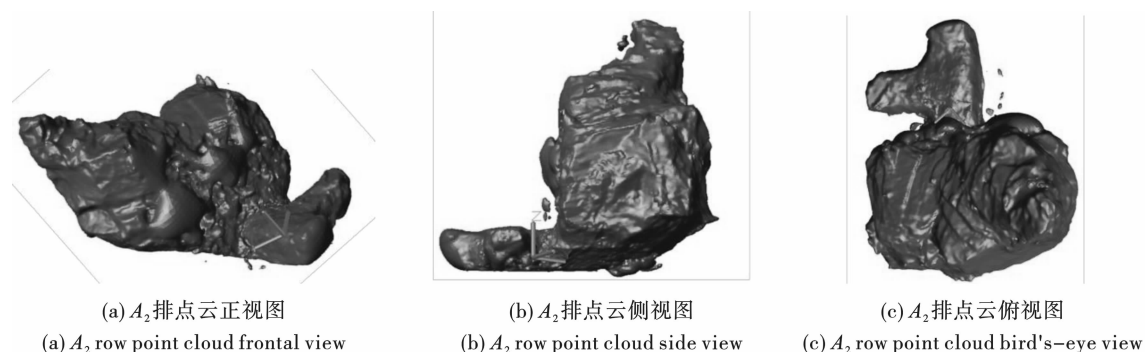
(b) A_1 排点云侧视图
(b) A_1 row point cloud side view



(c) A_1 排点云俯视图
(c) A_1 row point cloud bird's-eye view

图 16 A_1 排爆破后三维激光扫描结果

Fig. 16 3D laser scanning results after A_1 blasting

图 17 A_2 排爆破后三维激光扫描结果Fig. 17 3D laser scanning results after A_2 blasting

4 结论

(1) 基于三维激光点云技术,提出了一种系统的采场爆破边界控制方法。该方法通过点云数据的预处理、配准、重建及几何差值计算,实现了对爆后采场轮廓超挖与欠挖的定量评估,为边界控制提供了可靠的技术支持。

(2) 研究揭示了深部充填约束条件下采场爆破边界的偏差规律,发现顶板超挖主要集中在纵向中段和结构面发育区域,两帮方向普遍存在欠挖现象。偏差的空间分布特征与能量分配、起爆顺序和钻孔精度密切相关。

(3) 通过现场工业试验验证,采用基于点云分析的分区微差起爆与孔网参数优化方案,显著改善了爆破边界的连续性与稳定性。即使在施工偏差和不利工况下,仍能有效控制爆破效果,提升采场边界形态的控制能力,具有较好的工程适应性。

参考文献 (References)

- [1] 高金石,张继春. 爆破破岩机理动力分析[J]. 金属矿山,1989(9):7-12,6.
- [1] GAO Jin-shi,ZHANG Ji-chun. Dynamic analysis of rock-breaking mechanism in blasting [J]. Metal Mines, 1989(9):7-12,6. (in Chinese)
- [2] 张理维,王卫华,戴怡文. 基于岩石爆破损伤的炮孔布置优化研究[J]. 爆破,2020,37(1):32-39.
- [2] ZHANG Li-wei,WANG Wei-hua,DAI Yi-wen. Research on optimizing drill hole arrangement based on rock blasting damage[J]. Blasting,2020,37(1):32-39. (in Chinese)
- [3] 赵瑞,陶明,向恭梁,等. 爆破引起的深埋岩石隧道动态应力集中和破坏特征[J]. 中南大学学报(英文版),2024,31(7):2321-2340.
- [3] ZHAO Rui,TAO Ming,XIANG Gong-liang,et al. Dynamic stress concentration and failure characteristics of deeply buried rock tunnels induced by blasting[J]. Journal of Central South University(English Edition),2024,31(7):2321-2340. (in Chinese)
- [4] 傅师贵,刘泽功,张健玉,等. 高地应力下岩体控制爆破机理与损伤演化特征研究[J]. 采矿与安全工程学报,2024,41(4):867-878.
- [4] FU Shi-gui,LIU Ze-gong,ZHANG Jian-yu,et al. Study on mechanism and damage evolution characteristics of controlled blasting in rock masses under high ground stress [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2024, 41(4):867-878. (in Chinese)
- [5] 邹洋,李夕兵,周子龙,等. 开挖扰动下高应力岩体的能量演化与应力重分布规律研究[J]. 岩土工程学报,2012,34(9):1677-1684.
- [5] ZOU Yang,LI Xi-bing,ZHOU Zi-long,et al. Study on energy evolution and stress redistribution patterns in high-stress rock masses under excavation disturbance[J]. [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9):1677-1684. (in Chinese)
- [6] 左胜. 超深孔爆破扩裂提高硬岩巷道机掘效能技术[J]. 煤矿安全,2019,50(7):88-91,95.
- [6] ZUO Sheng. Technology for enhancing hard rock tunnel machine excavation efficiency via ultra-deep hole blasting expansion[J]. Coal Mine Safety,2019,50(7):88-91,95. (in Chinese)
- [7] 宗琦,马亚东,汪海波,等. 煤矿硬岩巷道掘进大直径炮孔爆破试验研究[J]. 爆破,2017,34(1):47-51.
- [7] ZONG Qi,MA Ya-dong,WANG Hai-bo,et al. Experimental study on large-diameter blast holes for hard rock tunnel excavation in coal mines [J]. Blasting,2017,34(1):47-51. (in Chinese)
- [8] 邵文琦,陈大勇,佟治,等. 煤矿岩巷掘进技术现状及展望[J]. 中国矿业,2024,33(11):192-205.
- [8] SHAO Wen-qi,CHEN Da-yong,TONG Zhi,et al. Current status and prospects of coal mine rock tunnel excavation technology [J]. China Mining, 2024, 33(11):192-205. (in Chinese)

- [9] 姜立春,苏 勇,代庆松. 远场爆破水平应力波扰动下分层胶结充填体矿柱的动力响应机制[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(1):34-44.
- [9] JIANG Li-chun, SU Yong, DAI Qing-song. Dynamic response mechanism of stratified grout-filled mine pillars under disturbance of far-field blasting horizontal stress waves[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020,39(1):34-44. (in Chinese)
- [10] 张召冉,杨仁树. 岩石巷道“多阶段”掏槽技术及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(3):551-559.
- [10] ZHANG Zhao-ran, YANG Ren-shu. Research on “multi-stage” trenching technology and its application in rock tunnels[J]. Acta Mechanica et Technicae Terrae Sinicae, 2019,38(3):551-559. (in Chinese)
- [11] 王国法,庞义辉,任怀伟. 智慧矿山技术体系研究与发展路径[J]. 金属矿山,2022(5):1-9.
- [11] WANG Guo-fa, PANG Yi-hui, REN Hua-wei. Research and development pathways for smart mine technology systems[J]. Metal Mines, 2022(5):1-9. (in Chinese)
- [12] 廉旭刚,蔡音飞,胡海峰. 我国矿山测量领域三维激光扫描技术的应用现状及存在问题[J]. 金属矿山, 2019(3):35-40.
- [12] LIAN Xu-gang, CAI Yin-fei, HU Hai-feng. Application status and existing issues of 3d laser scanning technology in china's mine surveying field [J]. Metal Mines, 2019(3):35-40. (in Chinese)
- [13] 闫 冬,卢晓东. 一种改进的高斯滤波方法[J]. 地理空间信息,2018,16(5):113-114,122.
- [13] YAN Dong, LU Xiao-dong. An improved gaussian filtering method[J]. Geospatial Information, 2018, 16(5): 113-114,122. (in Chinese)
- [14] 霍佳欣,杨家志. 统计学滤波和引导滤波相结合的点云数据降噪[J]. 计算机应用与软件,2023,40(5):248-252,287.
- [14] HUO Jia-xin, YANG Jia-zhi. Noise reduction in point cloud data using combined statistical and guided filtering [J]. Computer Applications and Software, 2023,40(5): 248-252,287. (in Chinese)
- [15] 廖中平,白慧鹏,陈 立. 基于双边滤波改进的点云平滑算法[J]. 计算机技术与发展,2019,29(11):42-46.
- [15] LIAO Zhong-ping, BAI Hui-peng, CHEN Li. An improved point cloud smoothing algorithm based on bilateral filtering [J]. Computer Technology and Development, 2019, 29(11):42-46. (in Chinese)

(上接第 244 页)

- [15] 杨仁树,左进京,李永亮,等. 不同切缝管材质下切缝药包爆炸冲击波传播特性研究[J]. 中国矿业大学学报,2019,48(2):229-235.
- [15] YANG Ren-shu, ZUO Jin-jing, LI Yong-liang, et al. Experimental study of slotted cartridge explosion shock wave propagation characteristic with different cutting seam pipe material[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2019,48(2):229-235. (in Chinese)
- [16] 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.
- [16] LIU Zhen, YANG Ren-shu, ZUO Jin-jing, 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 and Technology, 2024,53(6):1171-1184,1197. (in Chinese)
- [17] 傅师贵,刘泽功,邱进伟,等. 深部隧道切缝装药爆破岩体损伤演化及致裂特征[J]. 工程科学学报,2025, 47(6):1191-1206.
- [17] FU Shi-gui, LIU Ze-gong, QIU Jin-wei, et al. Study on the evolution of rock damage and blasting characteristics of deep tunnel splitting and drilling with explosives[J]. Journal of Engineering Science, 2025, 47(6): 1191-1206. (in Chinese)
- [18] 田家璇,张昌锁,李 泽,等. 新型聚能管设计及工程应用[J]. 爆破,2025,42(1):159-165,198.
- [18] TIAN Jia-xuan, ZHANG Chang-suo, LI Ze, et al. Design and engineering application of new energy concentrating tube[J]. Blasting, 2025,42(1):159-165,198. (in Chinese)
- [19] 王清标,王 涛,田成林,等. 周边孔聚能装置间隔装药在光面爆破中的应用研究[J]. 爆破,2024,41(1):77-84.
- [19] WANG Qing-biao, WANG Tao, TIAN Cheng-lin, et al. Application of shaped charge device and decked charge in perimeter holes of smooth blasting [J]. Blasting, 2024,41(1):77-84. (in Chinese)
- [20] 吴 波,韦 汉,徐世祥,等. 不同装药结构的双向聚能药包爆破数值研究[J]. 工程爆破,2021,27(1):14-21.
- [20] WU Bo, WEI Han, XU Shi-xiang, et al. Numerical study of two way shaped charge blasting with different charge structures[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(1): 14-21. (in Chinese)
- [21] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R. A computational constitutive model for glass subjected to large strains, high strain rates and high pressures[J]. Journal of Applied Mechanics, 2011,78(5):051003.