

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.01.008

岩体裂隙分布特征对预裂爆破成缝效果的影响及控制*

李育朋¹, 郭丽安¹, 胡盼¹, 郝兵元², 王晨龙², 赵婷婷², 张涛³

(1. 山西平舒煤业有限公司, 寿阳 045400; 2. 太原理工大学, 太原 030024;
3. 山西吉昌泰矿山工程技术有限公司, 太原 030024)

摘要: 平舒煤业8213工作面辅助进风切顶留巷顶板预裂爆破受原生裂隙影响, 爆生裂隙无序扩散、偏离预裂孔连线, 预裂缝呈断续、粗糙锯齿状, 造成预裂孔两侧岩体咬合难分离、卸压滞后, 致使沿空留巷围岩长期处于高应力状态并引发大变形。为改善裂隙岩体预裂爆破切顶效果, 采用离散元颗粒膨胀法开展岩体裂隙分布特征参数对预裂爆破成缝效果影响的数值模拟研究, 构建了多参耦合的岩体预裂爆破模拟体系与效果量化评价方法, 提出了注浆加固与分段封堵炮泥间隔装药协同作用的预裂爆破效果优化控制方法, 并通过现场试爆验证该协同控制方案的可行性。研究表明: 裂隙与预裂爆破孔连线夹角 β , 裂隙长度 L_f 和间距 d 是预裂爆破成缝效果的主要影响因素; β 从 0° 变化到 90° 过程中, 原生裂隙辅助成缝作用逐渐转变为阻碍作用, 预裂缝由“一”字型或平缓“之”字型的光滑连续状向“X”型不规则粗糙断续状转变; L_f 的影响作用随着 β 的增大而增强, 预裂缝的光滑性与连续性大幅劣化; 随着 d 增大, 原生裂隙负面影响减弱; 采用注浆加固与分段封堵炮泥间隔装药措施后, 岩体均质性及预裂孔内爆炸能量均衡性均得到显著提升, 最终沿炮孔全长形成明显预裂缝, 裂隙率达70%。

关键词: 裂隙分布特征; 预裂爆破; 注浆加固; 分段封堵炮泥间隔装药

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)01-0062-12

Influence of Rock Mass Fracture Distribution on Crack Formation Effectiveness and Control in Presplit Blasting

LI Yu-peng¹, GUO Li-an¹, HU Pan¹, HAO Bing-yuan², WANG Chen-long², ZHAO Ting-ting², ZHANG Tao³

(1. Shanxi Pingshu Coal Industry Co., Ltd., Shouyang 045400, China;

2. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

3. Shanxi Jichangtai Mine Engineering Technology Co., Ltd., Taiyuan 030024, China)

Abstract: During roof presplitting blasting for auxiliary air inlet and roof cutting gob-side entry retaining at Pingshu Coal Industry's 8213 working face, blast-induced fractures exhibit random propagation patterns and deviate from presplitting holes alignment due to the influence of pre-existing fractures. The presplit fractures exhibit discontinuous, rough, and serrated morphologies, resulting in rock masses interlocking that hinder effective separation along the presplitting hole plane and delay pressure relief. Consequently, the surrounding rock of the gob-side entry retaining

收稿日期 (Date of reception): 2025-09-15

网络首发日期 (Published online): 2025-10-31

作者简介: 李育朋 (1981-), 男, 陕西西安, 采矿工程师、本科, 主要从事煤矿安全生产管理和技术研究工作, (E-mail) 330632356@qq.com。

通信作者: 王晨龙 (1988-), 男, 山西太原, 讲师, 主要从事采矿工程、工程爆破理论及技术研究工作, (E-mail) wachenlong@tyut.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (12102294)

About the author: LI Yu-peng (1981-), male, born in Xi'an city, Shaanxi province, undergraduate, mainly engaged in the safe production management of coal mines and technological research, (E-mail) 330632356@qq.com.

Corresponding author: WANG Chen-long (1988-), male, born in Taiyuan city, Shanxi province, lecturer, mainly engaged in research on the theory and technology of mining engineering and engineering blasting, (E-mail) wachenlong@tyut.edu.cn.

Fund Programs: The Youth Project of the National Natural Science Foundation of China (12102294)

maintains prolonged high-stress conditions, leading to significant deformations. To enhance roof-cutting effectiveness in fractured rock masses through presplitting blasting, this study employs the discrete element particle expansion method to numerically investigate how characteristic parameters of fracture distribution influence presplit fracturing outcomes. Furthermore, a multi-parameter coupling simulation system for rock mass presplitting blasting and a quantitative evaluation methodology for blast effect were established. Meanwhile, an optimized control strategy was proposed that leverages the synergistic effects of grouting reinforcement, segmented stemming, and decked charge configurations. Field validation tests confirmed the feasibility of this synergistic approach. Key findings reveal three dominant factors governing presplit blasting effectiveness: (1) the intersection angle (β) between natural fractures and the blast hole alignment, (2) fracture length (L_f), and (3) fracture spacing (d). As β increases from 0° to 90° , the primary fractures' role transitions progressively from assisting to inhibiting the fracturing process. In contrast, the presplit fractures evolve morphologically from smooth, continuous linear/gentle-zigzag patterns to irregular, rough, and discontinuous X-shaped configurations. The influence of L_f intensifies with the increasing intersection angle (β), while the smoothness and continuity of presplit fractures degrade substantially. The detrimental effect of primary fractures diminishes with greater fracture spacing (d). By implementing grouting reinforcement combined with segmented plugging stemming and spaced charging, both rock mass homogeneity and uniformity of explosive energy distribution in presplitting holes are markedly enhanced, ultimately generating distinct presplit fractures along the full blast hole length at a 70% fracture rate.

Key words: fracture distribution characteristics; presplitting blasting; grouting reinforcement; stemming deck charging

爆破切顶卸压是切顶沿空留巷技术的关键环节,其切顶效果将直接决定沿空留巷围岩控制的最终成效^[1-4]。作为切顶卸压的关键手段,预裂爆破通过在预裂孔连线形成连续贯通、规整的预裂缝,致使采空区覆岩沿着预裂缝及时垮落,进而切断留巷顶板与采空区覆岩之间的应力传递路径,实现采动应力转移与能量释放,最终优化留巷围岩所处的应力环境^[5]。

然而,在实际工程中,岩体并非理想的完整介质,普遍存在的原生裂隙给预裂爆破效果带来了严峻挑战。受原生裂隙干扰,平舒煤业 8213 工作面辅助进风巷顶板预裂爆破后,爆生裂隙仅局限于预裂孔周边发育并塌孔,距预裂孔 0.5 m 的观察孔未观测到明显爆生裂隙,预裂效果差。此种情况下,爆生裂隙偏离预设的预裂孔连线,呈现出无序扩散的态势,最终形成的预裂缝往往表现为断续、粗糙的锯齿状^[6]。这种不良的预裂成缝效果会导致预裂孔两侧岩体咬合紧密、难以有效分离,使得卸压过程滞后,进而造成沿空留巷围岩长期处于高应力状态,引发巷道大变形问题,严重威胁井下作业安全。

针对岩体裂隙对预裂爆破效果的影响,学者已围绕裂隙参数影响机制^[7-10]、爆破参数优化与调控技术开展了大量研究^[11,12],但裂隙分布特征多参数耦合作用对预裂成缝的影响机制研究仍不充分。为此,针对平舒煤业 8213 工作面辅助进风裂隙岩体留巷顶板预裂爆破效果差的问题,建立了裂隙分布特征多参数耦合裂隙岩体离散元预裂爆破模型,系统

研究了岩体裂隙分布特征参数对预裂爆破成缝效果的影响,并构建了注浆加固与分段封堵炮泥间隔装药协同作用的预裂爆破效果优化控制方法。

1 裂隙岩体离散元预裂爆破模型与方案

1.1 离散元爆破模拟方法

离散元采用颗粒膨胀法将爆炸应力波等效为炸药颗粒与孔壁颗粒的重叠量^[13],随后通过颗粒间的接触算法计算孔壁颗粒因该重叠量产生的相互作用载荷,构建爆炸能量向孔壁颗粒的传递机制,从而实现孔壁颗粒的爆炸载荷精准施加,见图 1 所示。首先,在颗粒集体中生成半径为 r_0 为爆破孔,同时在爆破孔中安置半径为 r_0 的炸药颗粒。随爆炸作用时间变化,炸药颗粒半径将按照爆炸应力波和炸药颗粒、孔壁颗粒之间重叠量的等效关系发生膨胀。

爆炸作用时间为 t 时,与孔壁颗粒所承受的爆炸载荷相等效的颗粒重叠量为 $\Delta r(t)$,则炸药颗粒对孔壁颗粒的径向作用力 F 可表达为

$$F = K_n \cdot \Delta r(t) \quad (1)$$

式中, K_n 为炸药颗粒与孔壁颗粒之间接触的法向刚度。

同时,在爆炸作用时间为 t 时,孔壁颗粒所承受的爆轰压力为 $p(t)$,则孔壁颗粒所受的爆炸载荷 F' 可表达为

$$F' = 2\pi r_0 \cdot p(t) \quad (2)$$

由于 $F = F'$,则 $\Delta r(t)$ 可进一步表达为

$$\Delta r(t) = \frac{2\pi r_0 p(t)}{K_n} \quad (3)$$

式(3)建立了爆炸载荷和炸药颗粒、孔壁颗粒

之间重叠量的等效关系,不同形式的爆破载荷 $p(t)$ 均可通过式(3)等效为炸药颗粒半径的改变量 $\Delta r(t)$ 进行模拟。

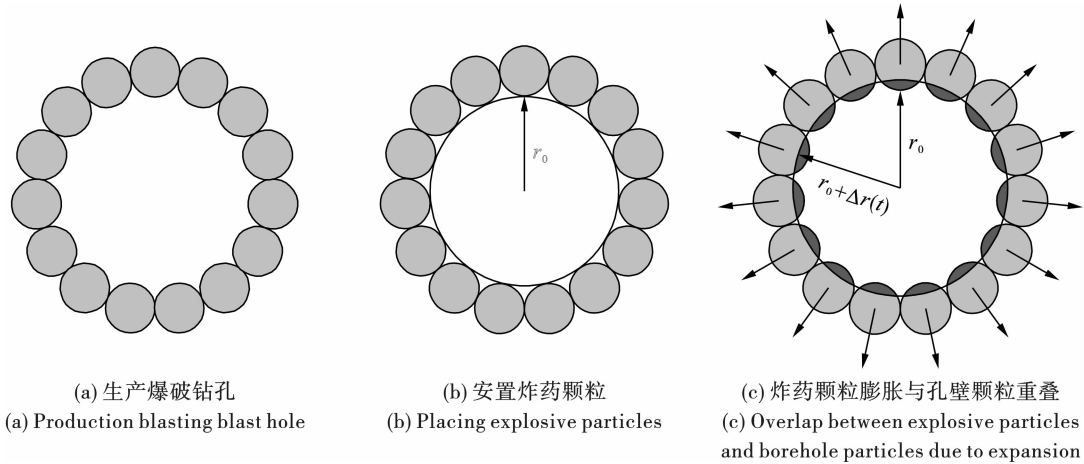


图1 离散元颗粒膨胀爆破模拟方法

Fig. 1 Particle expansion blasting simulation method in DEM

爆炸载荷 $p(t)$ 通常可采用上升、下降时间相等的半正弦波表示为^[13]

$$p(t) = \frac{p_m}{2} [1 - \cos(2\pi ft)] \quad (4)$$

式中: p_m 为爆破孔壁冲击波压力峰值; f 为半正弦波频率; t 为爆炸作用时间。

根据式(3)和式(4),最终,炸药颗粒半径 $R(t)$ 随爆炸作用时间的变化规律可表示为

$$R(t) = r_0 + \frac{2\pi r_0 p(t)}{K_n} [1 - \cos(2\pi ft)] \quad (5)$$

式(5)即为离散元采用颗粒膨胀法模拟岩体爆破的载荷施加函数。爆破过程作用时间一般不大于 50 ms, f 取 100 Hz。对于直径 ϕ 50 mm 钻孔,装填直径 ϕ 35 mm 三级乳化炸药药卷时^[14],孔壁冲击波压力峰值 p_m 可取 1.1 GPa。

1.2 数值模型建立

离散元模型建立流程如图2所示,具体如下:首先,在长 2 m、宽 1 m 的矩形计算区域内,生成 19755 个颗粒,其中颗粒半径遵循均匀分布,分布范围为 4 mm 至 6.64 mm;随后删除三个孔间距为 0.5 m 的预裂爆破钻孔内的颗粒,并采用平行粘结模型对剩余颗粒进行粘结,构建形成完整岩石颗粒粘结模型。其次,依据岩体裂隙几何分布特征构建离散裂隙网络,并采用光滑节理接触将其嵌入上述完整岩石颗粒粘结模型中,最终生成合成岩体模型。最后,在预裂爆破钻孔内布设炸药颗粒,按照式(5)施加爆破载荷,完成岩体预裂爆破模拟。预裂爆破模拟过程中,在模型四周边界颗粒设置局部阻尼系数为 1.0,实现无反射边界条件。模型细观参数见表 1 所示^[15]。

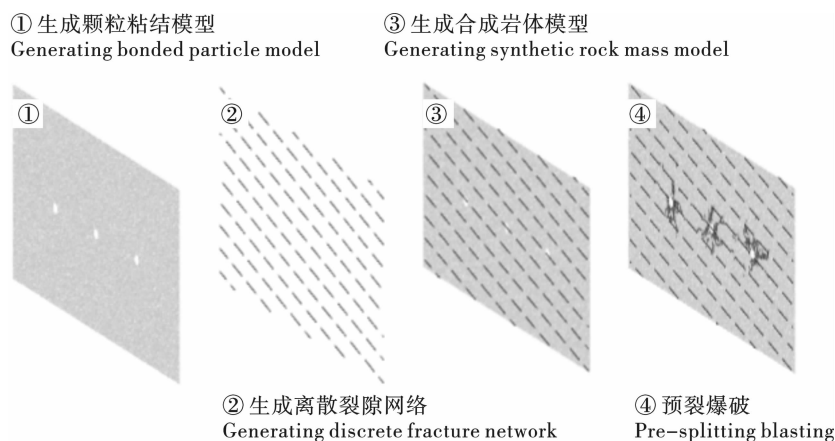


图2 数值模型生成过程

Fig. 2 Numerical model generation procedure

表 1 数值模型参数^[15]
Table 1 Numerical model parameters^[15]

| 参数 Parameters | 完整岩石 Intact rock | 参数 Parameters | 裂隙 Fracture |
|--|---------------------|--|----------------|
| 密度 Density/(g · cm ⁻³) | 2.67 | 光滑节理法向刚度 Smooth joint normal stiffness/(MPa · m ⁻¹) | 1 |
| 颗粒半径 Particle radius/mm | 4 ~ 6.64 | 光滑节理切向刚度 Smooth joint shear stiffness/(MPa · m ⁻¹) | 0.5 |
| 泊松比 Poisson's ratio | 0.27 | 光滑节理摩擦系数 Smooth joint friction coefficient | 1.4 |
| 颗粒弹性模量 Particle elastic modulus/GPa | 35 | 光滑节理粘聚力 Smooth joint cohesion/MPa | 0 |
| 颗粒摩擦系数 Particle friction coefficient | 0.5 | 光滑节理抗拉强度 Smooth joint tensile strength/MPa | 0 |
| 平行粘结粘聚力 Parallel bond cohesion/MPa | 40 | | |
| 平行粘结弹性模量 Parallel bond elastic modulus/GPa | 35 | | |
| 平行粘结抗拉强度 Parallel bond tensile strength/MPa | 41 | | |
| 平行粘结内摩擦角 Parallel bond friction angle/° | 30 | | |

1.3 数值模拟方案

影响岩体预裂爆破成缝效果的裂隙几何分布特征参数包括裂隙长度 L_f , 岩桥长度 L_r , 裂隙与预裂爆破孔连线夹角 β , 阶梯角 γ 和间距 d , 见图 3 所示。由于裂隙长度 L_f 和岩桥长度 L_r 的改变均只是影响裂隙贯通性, 两者对预裂成缝效果影响一致。为此, 研究 β 、 γ 、 L_f 和 d 对预裂成缝效果的影响作用。

研究 β 影响作用时, 按照单一变量原则, 设定 $L_f = 12$ cm, $L_r = 6$ cm, $\gamma = 90^\circ$, $d = 12$ cm 保持不变, β 分别取 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° , 共建立 7 个

离散裂隙网络合成岩体预裂爆破模型, 见图 4 所示。

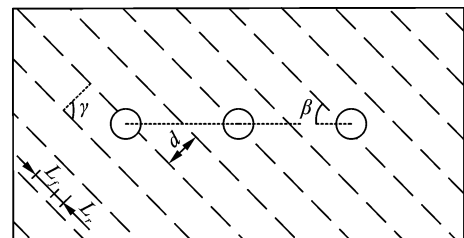


图 3 岩体裂隙几何分布特征参数
Fig. 3 Geometric distribution parameters of rock mass fractures

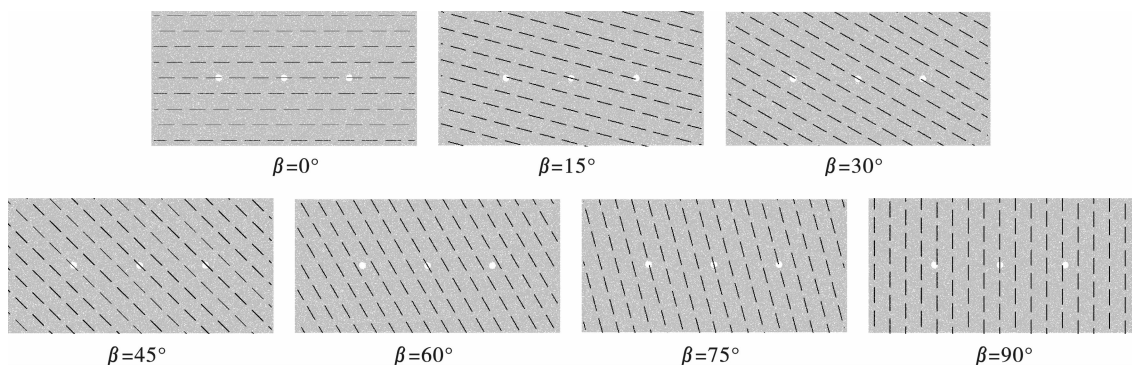


图 4 β 对预裂成缝效果影响作用研究模型
Fig. 4 Research model on the influence of β on pre-splitting fracturing results

由于裂隙与预裂爆破钻孔连线的夹角对预裂成缝效果具有较大影响作用, 为此研究 γ 影响作用时, 分别在 β 为 15° 、 45° 和 75° 三个角度下, 探究 γ 的影

响情况。设定 $L_f = 12$ cm, $L_r = 6$ cm, $d = 12$ cm 保持不变, γ 分别取 75° 、 90° 、 105° 、 120° 和 130° , 共建立 15 个离散裂隙网络合成岩体预裂爆破模型, 见图 5

所示。

研究 L_f 影响作用时,分别在 β 为 15° 、 45° 和 75° 三个角度下,探究 L_f 的影响情况。设定 $L_r = 6$ cm,

$d = 12$ cm, $\gamma = 105^\circ$ 保持不变, L_f 分别取 6 cm、9 cm、12 cm、15 cm 和 18 cm,共建立 15 个离散裂隙网络合成岩体预裂爆破模型,见图 6 所示。

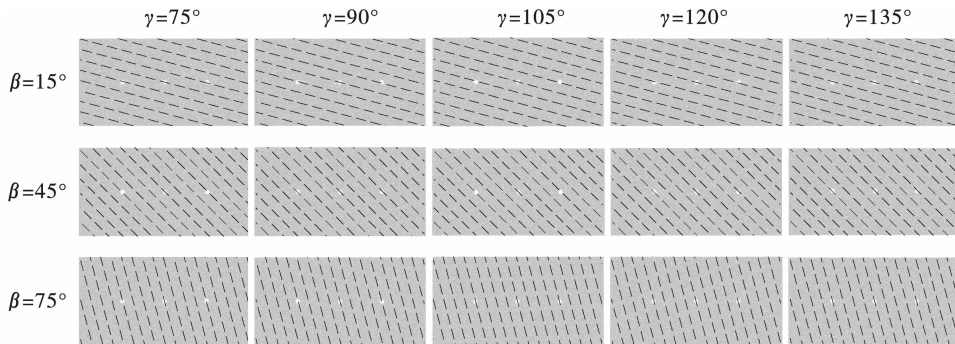


图 5 γ 对预裂成缝效果影响作用研究模型

Fig. 5 Research model on the influence of γ on pre-splitting fracturing results

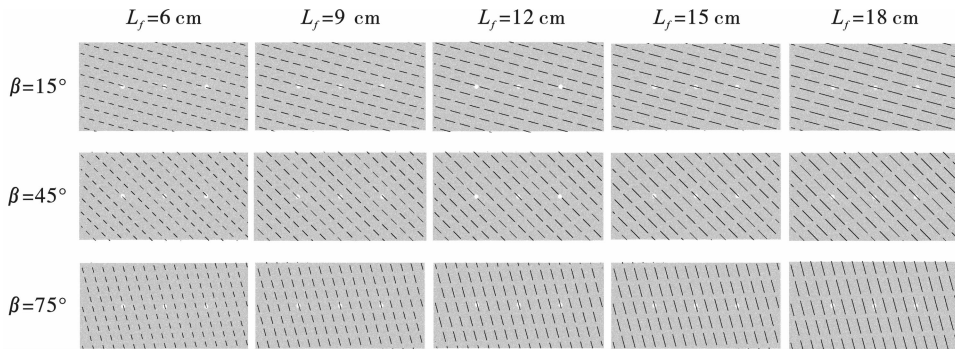


图 6 L_f 对预裂成缝效果影响作用研究模型

Fig. 6 Research model on the influence of L_f on pre-splitting fracturing results

研究 d 影响作用时,分别在 β 为 15° 、 45° 和 75° 三个角度下,探究 d 的影响情况。设定 $L_f = 12$ cm, $L_r = 6$ cm, $\gamma = 105^\circ$ 保持不变, d 分别取 4 cm、12 cm、

20 cm、28 cm 和 36 cm,共建立 15 个离散裂隙网络合成岩体预裂爆破模型,见图 7 所示。

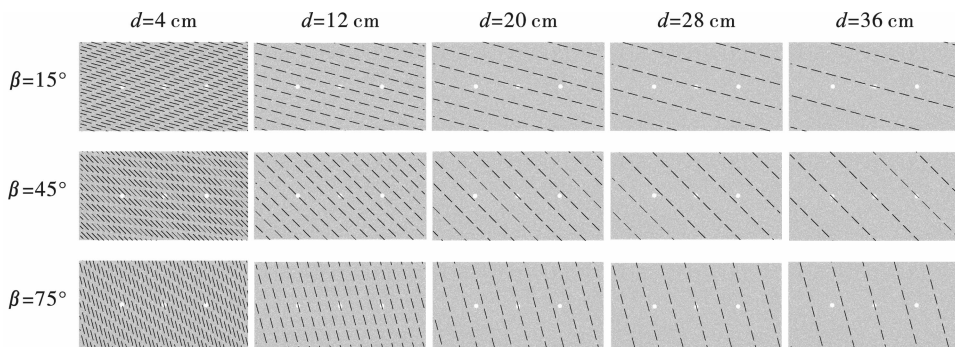


图 7 d 对预裂成缝效果影响作用研究模型

Fig. 7 Research model on the influence of d on pre-splitting fracturing results

2 原生裂隙分布特征参数对预裂成缝效果的影响分析

2.1 预裂成缝效果的量化表征指标

采用预裂有效裂隙数目 N_e ,潜在贯通预裂缝迹

线的粗糙度轮廓指数 R_p 和预裂缝贯通率 η 量化表征裂隙几何特征参数对预裂成缝效果的影响作用。

潜在贯通预裂缝迹线的粗糙度轮廓指数 R_p 表征预裂成缝的光整度,首先按照预裂孔间爆生裂隙相贯通的最短路径原则,提取潜在贯通预裂缝迹线,

随后对潜在贯通预裂缝迹线离散化处理,并按照式(6)计算 R_p 。

$$R_p = \frac{L_l}{L} = \frac{\sum_{i=1}^m [(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2]^{1/2}}{L} \quad (6)$$

式中: L_l 为潜在贯通预裂缝迹线长度; L 为参考长度,为模型最左侧预裂孔的右侧孔壁至最右侧预裂孔的左侧孔壁之间的距离,取 0.95 m; x_i, y_i 分别为潜在贯通预裂缝迹线离散线段的两端点坐标。

预裂有效裂隙数目 N_c 为潜在贯通预裂缝迹线

附近的新生裂隙,不含炮孔周围爆后新生裂隙。预裂缝贯通率 η 表示裂隙的连续程度,其值等于潜在贯通预裂缝迹线上所有新生和原有裂隙的累计长度 L_2 与潜在贯通预裂缝迹线长度 L_1 的比值,计算公式见式(7)所示。

$$\eta = \frac{L_2}{L_1} \times 100\% \quad (7)$$

完整岩石预裂成缝效果见图 8 所示,经计算,潜在贯通预裂缝迹线的粗糙度轮廓指数 R_p 为 1.37,预裂缝贯通率 η 为 100%,预裂有效裂隙数目 N_c 为 190。

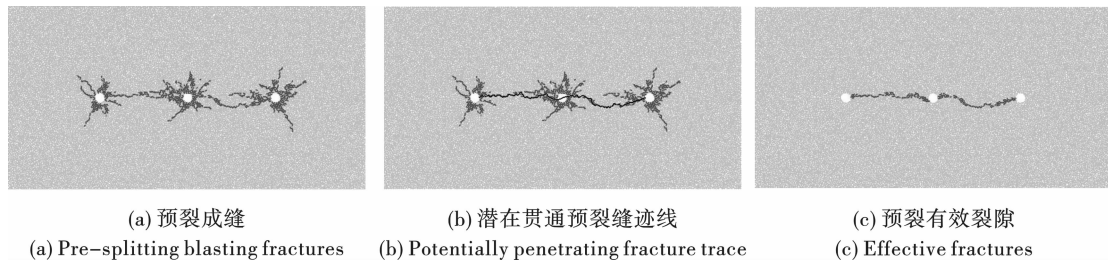


图 8 完整岩石预裂成缝效果

Fig. 8 Intact rock pre-splitting blasting results

2.2 原生裂隙与预裂爆破孔连线夹角对预裂成缝效果的影响

原生裂隙与预裂爆破孔连线夹角 β 对预裂成缝效果影响作用见表 2 所示。 β 从 0° 到 90° 过程中,原生裂隙对预裂爆破的负面影响呈持续增强的趋势;预裂缝由“一”字型或平缓“之”字型的光滑连续状向“X”型不规则粗糙断续状转变;潜在贯通预裂缝迹线粗糙度指数 R_p 由 1.15 增大至 3.02,预裂缝由光滑逐渐变为粗糙;预裂缝贯通率 η 从 99% 降低至 70%,连续性逐渐变差;整体而言,有效裂隙数目 N_c 呈增大趋势,表明原生裂隙辅助成缝作用逐渐变弱。原生裂隙会引导爆破应力波传播,使其优先沿原生

裂隙方向传播。若原生裂隙方向与预裂方向不一致,会导致预裂孔间应力难以均匀贯通,破坏预裂面连续性和光滑性。

2.3 原生裂隙阶梯角对预裂成缝效果的影响

原生裂隙阶梯角 γ 对预裂成缝效果的影响作用见表 3 和图 9 所示。不同 β 夹角条件下, γ 从 75° 变化至 135° 过程中,预裂裂隙的形状、粗糙度指数 R_p 和贯通率 η 均未发生变化,这表明 γ 对预裂成缝效果无明显影响作用。由于不同 γ 对应的原生裂隙和爆破孔的几何关系存在差异,使得 R_p 和 η 呈现出一定的离散性,见图 9 所示。

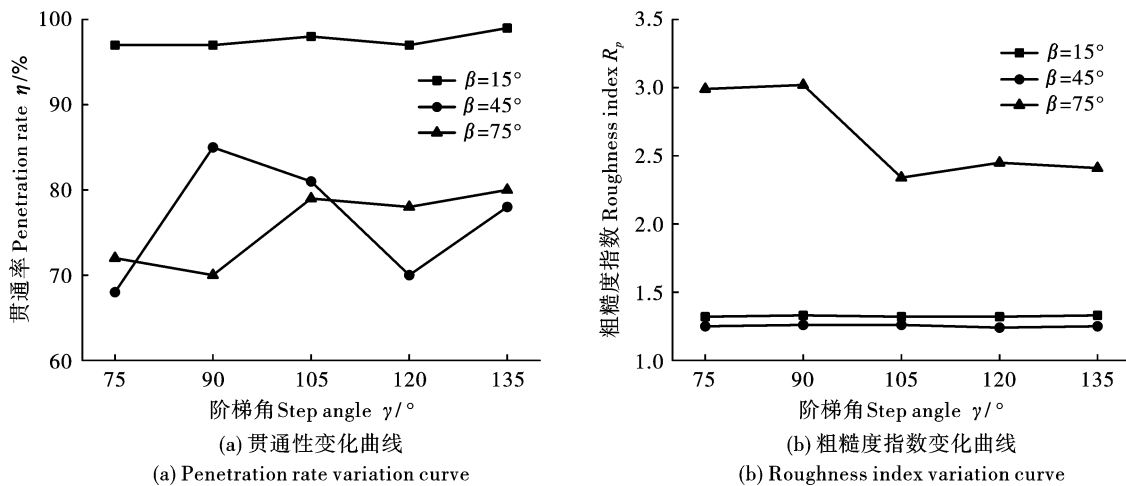


图 9 γ 对预裂缝的贯通性和光滑性的影响

Fig. 9 The influence of γ on the penetrability and smoothness of pre-splitting fracturing

表2 β 对预裂成缝效果的影响Table 2 The influence of β on pre-splitting fracturing results

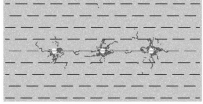
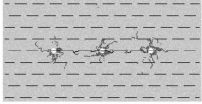
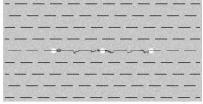
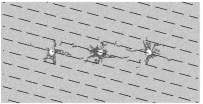
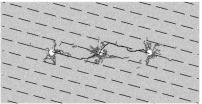
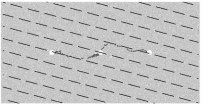
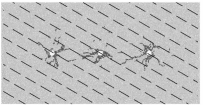
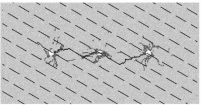
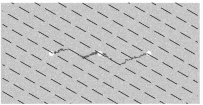
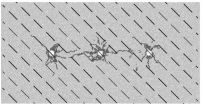
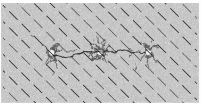
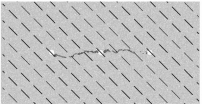
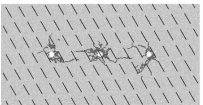
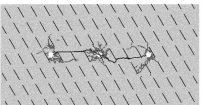
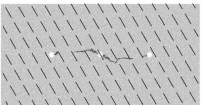

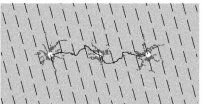
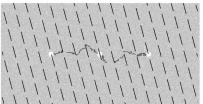
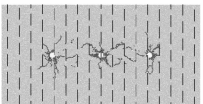
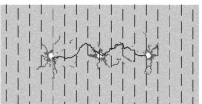
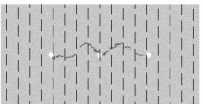
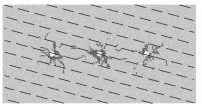
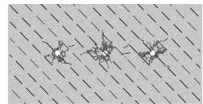
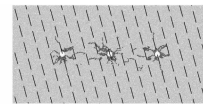
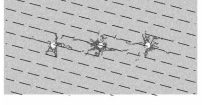
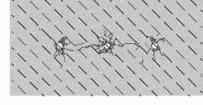

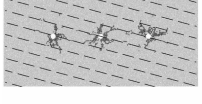
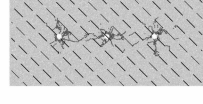
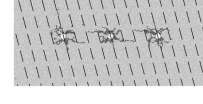
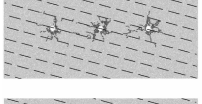
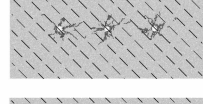
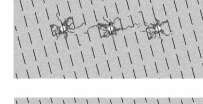
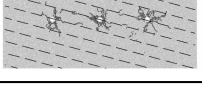
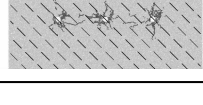

| β | 预裂效果 Pre-splitting blasting effect | 潜在贯通预裂缝迹线 Potentially penetrating fracture trace | 有效裂隙 Effective fractures | R_p | $\eta/\%$ | N_c |
|---------------------|---|---|--|-------|-----------|-------|
| $\beta = 0^\circ$ |  |  |  | 1.15 | 99 | 82 |
| $\beta = 15^\circ$ |  |  |  | 1.33 | 97 | 94 |
| $\beta = 30^\circ$ |  |  |  | 1.45 | 97 | 151 |
| $\beta = 45^\circ$ |  |  |  | 1.26 | 85 | 132 |
| $\beta = 60^\circ$ |  |  |  | 1.25 | 68 | 128 |
| $\beta = 75^\circ$ |  |  |  | 2.95 | 76 | 146 |
| $\beta = 100^\circ$ |  |  |  | 3.02 | 70 | 138 |

表3 γ 对预裂成缝效果的影响Table 3 The influence of γ on pre-splitting fracturing results

| γ | $\beta = 15^\circ$ | $\beta = 45^\circ$ | $\beta = 75^\circ$ |
|----------------------|---|---|--|
| $\gamma = 75^\circ$ |  |  |  |
| $\gamma = 90^\circ$ |  |  |  |
| $\gamma = 105^\circ$ |  |  |  |
| $\gamma = 120^\circ$ |  |  |  |
| $\gamma = 135^\circ$ |  |  |  |

2.4 原生裂隙长度对预裂成缝效果的影响

由表 4、图 10 可知,原生裂隙长度 L_f 对预裂成缝效果的影响随夹角 β 增大而增强:当 $\beta = 15^\circ$ (小夹角) 时, L_f 从 6 cm 增至 18 cm, 预裂裂隙始终呈“之”字型, 粗糙度指数与贯通率均无明显变化, L_f 无显著影响; 当 $\beta = 45^\circ$ (中夹角) 时, L_f 从 6 cm 增至

18 cm, 预裂裂隙仍呈“之”字型, 但粗糙度指数轻微减小、贯通率明显降低, L_f 影响逐渐显著; 当 $\beta = 75^\circ$ (大夹角) 时, L_f 从 6 cm 增至 18 cm, 预裂裂隙呈“之”字型或“X”型, 粗糙度指数快速增长、贯通率明显降低且裂隙光滑性与连续性变差, L_f 影响最为显著。

表 4 L_f 对预裂成缝效果的影响

Table 4 The influence of L_f on pre-splitting fracturing results

| L_f | $\beta = 15^\circ$ | $\beta = 45^\circ$ | $\beta = 75^\circ$ |
|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $L_f = 6$ cm | | | |
| $L_f = 9$ cm | | | |
| $L_f = 12$ cm | | | |
| $L_f = 15$ cm | | | |
| $L_f = 18$ cm | | | |

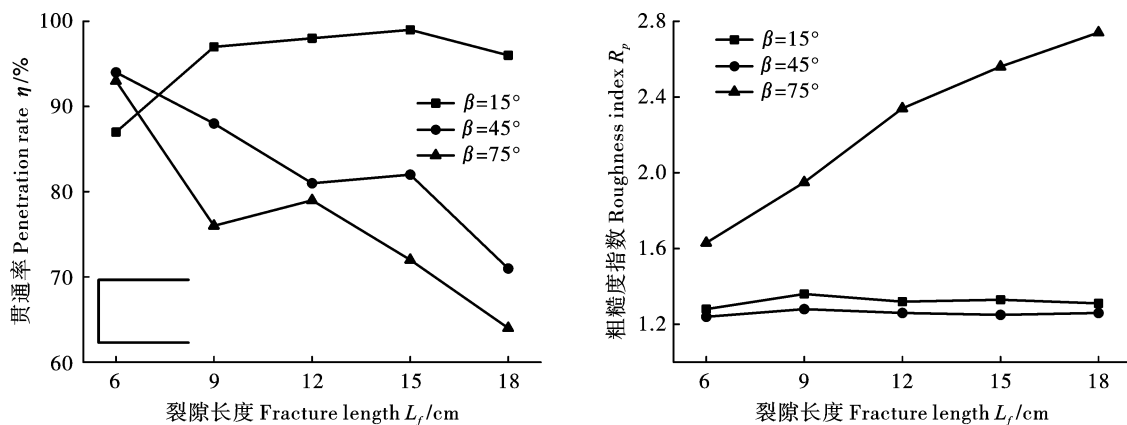


图 10 L_f 对预裂缝的贯通性和光滑性的影响

Fig. 10 The influence of L_f on the penetrability and smoothness of pre-splitting fracturing

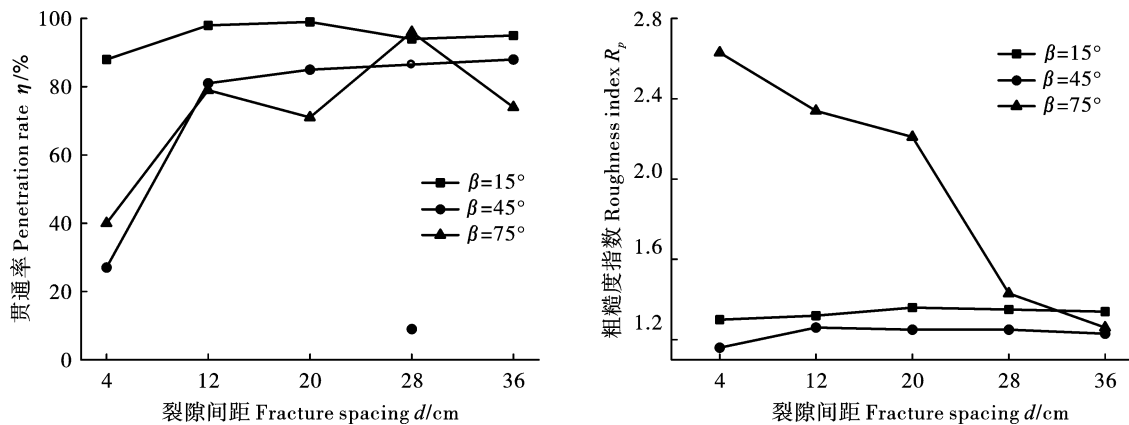
2.5 原生裂隙间距对预裂成缝效果的影响

原生裂隙间距 d 对预裂成缝效果的影响作用见表 5 和图 11 所示。 d 主要影响预裂孔之间的裂隙密度, 其随 d 值减小而越大。 d 值较小时, 原生裂隙的约束作用使爆生裂隙集中在爆破孔周围, 有效裂隙数目减少, 导致预裂缝贯通率 η 降低、粗糙度指数 R_p 增大; 随着 d 增大, 预裂孔间原生裂隙密度减小, η 总体呈递增趋势, R_p 呈减小趋势, 原生裂隙对

预裂成缝效果的负面影响逐渐减弱, 预裂缝由粗糙、断续向光滑、连续转变, 预裂效果逐步改善。图 11 中, $\beta = 45^\circ$ 、 $d = 28$ cm 和 $\beta = 75^\circ$ 、 $d = 36$ cm 时, 预裂缝贯通率为 9% 和 74%, 这是由于裂隙网络需依据 L_f 、 L_r 、 β 、 γ 和 d 五个参数按照统一规则生成, 易造成爆破孔和原生裂隙的几何位置发生变化, 进而改变爆炸应力波的传播规律所引起。

表 5 d 对预裂成缝效果的影响Table 5 The influence of d on pre-splitting fracturing results

| L_f | $\beta = 15^\circ$ | $\beta = 45^\circ$ | $\beta = 75^\circ$ |
|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $d = 4$ cm | | | |
| $d = 12$ cm | | | |
| $d = 20$ cm | | | |
| $d = 28$ cm | | | |
| $d = 36$ cm | | | |

图 11 d 对预裂缝的贯通性和光滑性的影响Fig. 11 The influence of d on the penetrability and smoothness of pre-splitting fracturing

3 裂隙岩体预裂成缝效果的注浆加固与分段炮泥间隔装药协同优化控制

3.1 注浆加固与分段封堵炮泥间隔装药协同优化措施

原生裂隙 β 越大、 L_f 越大、 d 越小, 预裂成缝效果越差, 其根本原因在于原生裂隙破坏了爆炸能量的定向传递和利用。因此, 提高岩体均质性、阻止爆生气体逸散, 是弱化原生裂隙影响的关键所在: ①通过注浆物理填充、化学粘结岩体裂隙, 能够提升岩体均质性, 减少应力集中, 确保爆炸能量的定向传递; ②采用分段封堵炮泥, 间隔装药的方式, 平衡炮孔内爆炸能量, 避免爆炸能量被炮孔全长范围内的薄弱部位无效耗散。

(1) 注浆加固

注浆加固材料主要有硅酸盐改性聚氨酯有机加

固材料和无机粉状速凝固化材料, 其中硅酸盐改性聚氨酯有机加固材料的弹性模量一般约为 500 MPa, 抗压强度不小于 40 MPa, 抗拉强度不小于 5 MPa, 固化密度为 1.38 g/cm^3 ; 无机矿粉速凝固化材料的弹性模量一般约为 25 GPa, 抗压强度不小于 50 MPa, 抗拉强度不小于 3 MPa, 固化密度为 2.12 g/cm^3 。相较于有机注浆材料, 无机注浆材料具备更高的密度、更快的波速及更低的孔隙率。无机材料注浆后, 可有效增大岩体的波阻抗, 而波阻抗的提升能够显著提高爆炸能量的利用效率, 避免爆炸能量因岩体裂隙无序扩散而损耗, 使能量更集中地作用于预裂路径, 最终使预裂缝呈现出更优异的连接性与光滑性。

8213 工作面辅助进风顶板预裂爆破钻孔直径 $\phi 50 \text{ mm}$, 孔深 8 m, 仰角 75° , 在顶板距回采帮 200 mm 开孔。现场打设预裂爆破钻孔前, 先采用无

机矿粉速凝固化材料对顶板进行注浆加固。沿巷道走向,分别在预裂爆破钻孔设计位置两侧各打一系列孔径 $\phi 38\text{ mm}$ 注浆孔,见图 12(a) 所示。①类注浆孔孔深 8 m,仰角 75° ,在顶板距回采帮 1.2 m 位置开口,距预裂孔 1 m,孔距 1.5 m;②类注浆孔孔深 8.5 m,仰角 70° ,在顶板回采帮肩窝处开口,孔底距

预裂孔 1.06 m,孔距 1.5 m。

注浆作业采用立体气动高压双液注浆泵,配套配置 2 个浆液搅拌桶、4"钢管注浆管、高压胶管、双液注射混合枪及封孔器,见图 12(b) 所示。注浆控制以注浆终压作为作业结束判定指标,且注浆压力需不低于 4 MPa。

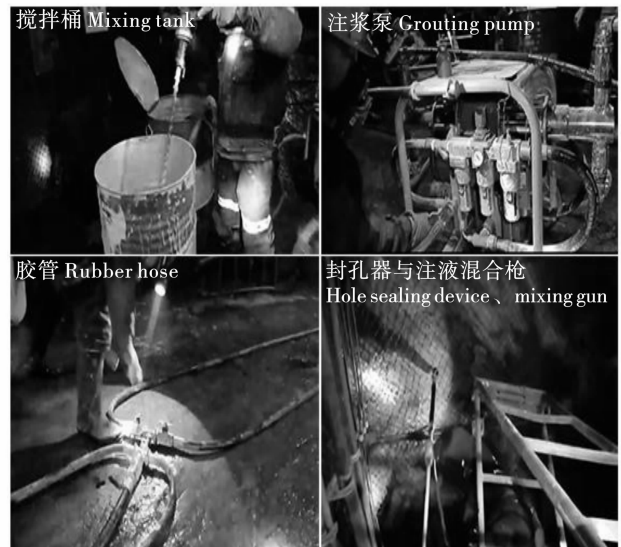
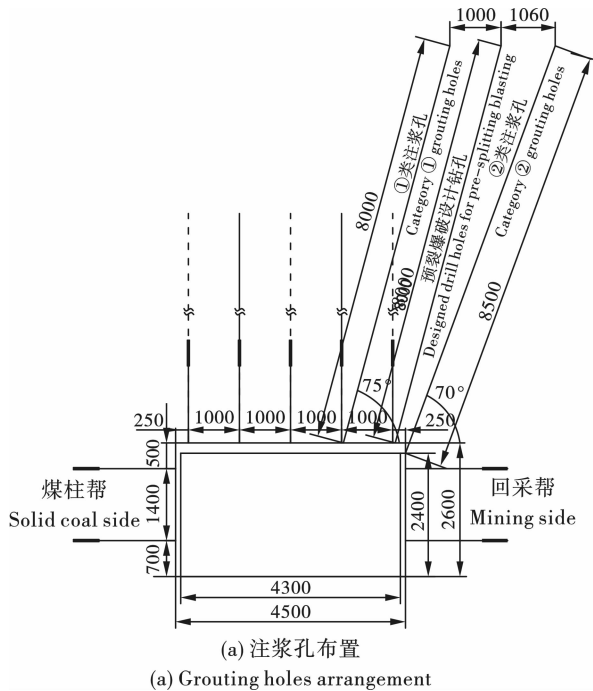


图 12 留巷顶板注浆加固(单位:mm)

Fig. 12 Grouting reinforcement for the retained roadway's roof(unit:mm)

(2)分段封堵炮泥间隔装药

8213 工作面辅助进风顶板预裂孔原采用空气间隔装药,孔间距 500 mm,孔径 $\phi 50\text{ mm}$,斜长 8 m,仰角 75° 偏向采空侧。现场使用的三级煤矿许用乳化炸药药卷规格为 $\phi 35\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 300\text{ g}$ 。单孔使用 4 节外径 42 mm、内径 36.5 mm、长 1.5 m 的聚能管,孔底第一节聚能管放置 4 卷炸药,第二节放置 4 卷炸药,第三节放置 3 卷炸药,第四节放置 2 卷炸药,共计 13 卷炸药,药量 3.9 kg;每节聚能管内安放 1 枚 1 段煤矿许用数码电子雷管,共计 4 枚。

为实现炮孔内爆炸能量的均衡分配,避免能量在炮孔全长范围内的薄弱部位发生无效耗散,从而提升爆炸能量利用效率,对装药结构进行如下优化:采用炮泥密实充填原装药结构中各聚能管内炸药之间的空气柱,将原空气间隔装药结构改进为 40 目潮湿黄土炮泥间隔装药结构,其余装药参数保持不变,具体如图 13 所示。同时,为了提升炮孔封堵质量,采用 BQF-50 型装药器压风送黄土封孔工艺代替人工封堵,如图 14 所示。

3.2 预裂成缝优化效果评价

完成顶板注浆加固与预裂孔装药结构优化后,随即开展预裂爆破试爆。试爆共布设 11 个孔,孔间距 500 mm;其中 6#孔作为观察孔,专门用于后续预裂效果评价,其余 10 个孔依据图 13(b) 所示的炮泥间隔装药结构完成装药作业。10 个预裂孔采用一次起爆方式,炮孔布置见图 15。爆破作业结束后,先通过风管对 6#观察孔进行清孔处理,再使用钻孔窥视仪探测爆生裂隙的发育特征,探测结果见图 16。优化前预裂成缝效果窥视结果见图 17。

较优化前预裂成缝效果相比,优化后观察孔由浅至深(1 m→3 m→5 m→7 m),炮孔全长均形成了明显的预裂缝,裂隙率由 44% 提升至 70%。这表明:注浆加固和分段封堵炮泥间隔装药的协同优化作用,可有效弱化原生裂隙对预裂成缝的负面影响;预裂后不仅有主裂隙,同时伴随大量的分支裂隙,克服了爆生裂隙仅在预裂孔周围发育的约束。

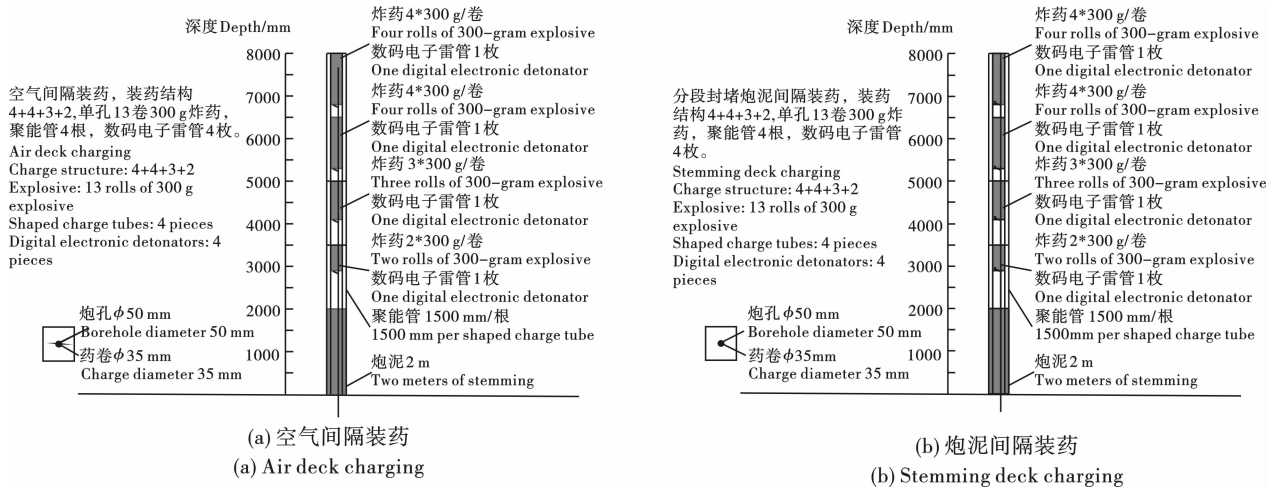


图 13 预裂孔装药结构优化
 Fig. 13 Optimization of charging structure for pre-split holes

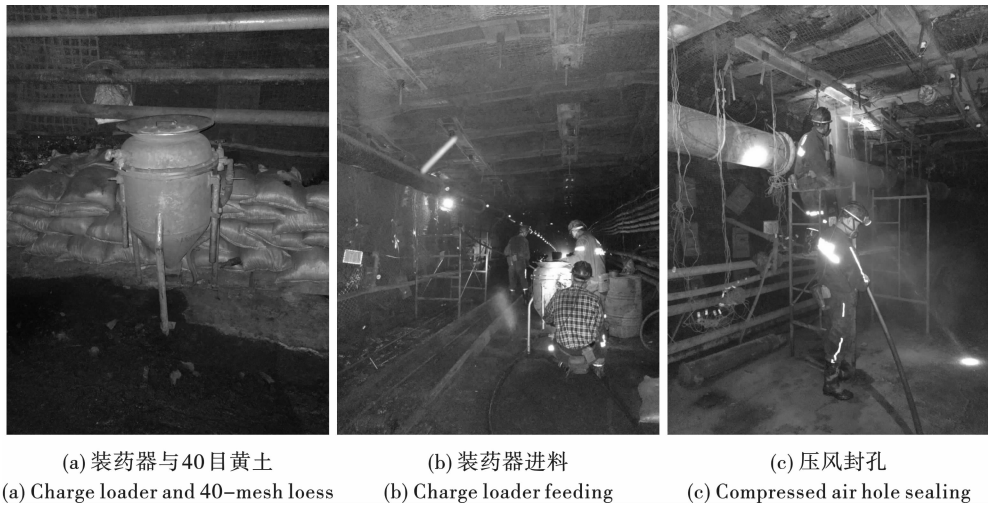


图 14 装药器压风封孔工艺
 Fig. 14 Charge loader compressed air hole sealing process

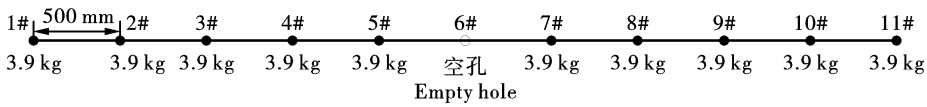


图 15 预裂孔布置
 Fig. 15 Pre-splitting blast hole arrangement

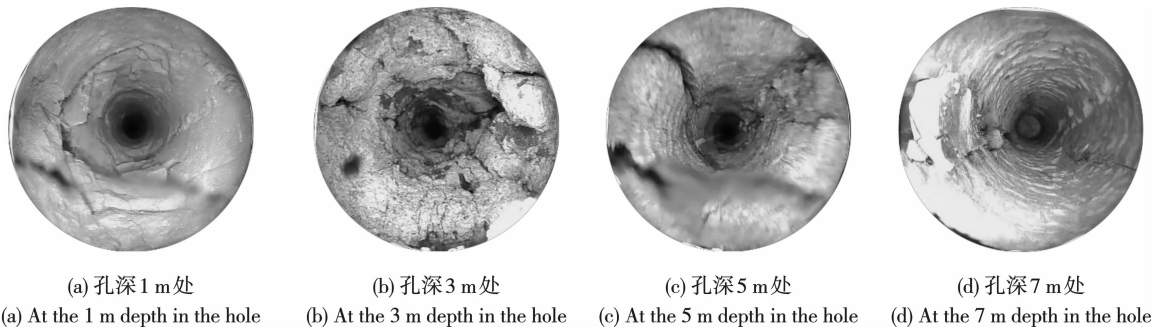


图 16 优化后预裂成缝效果窥视
 Fig. 16 Inspection of pre-splitting blasting fracture formation after optimization

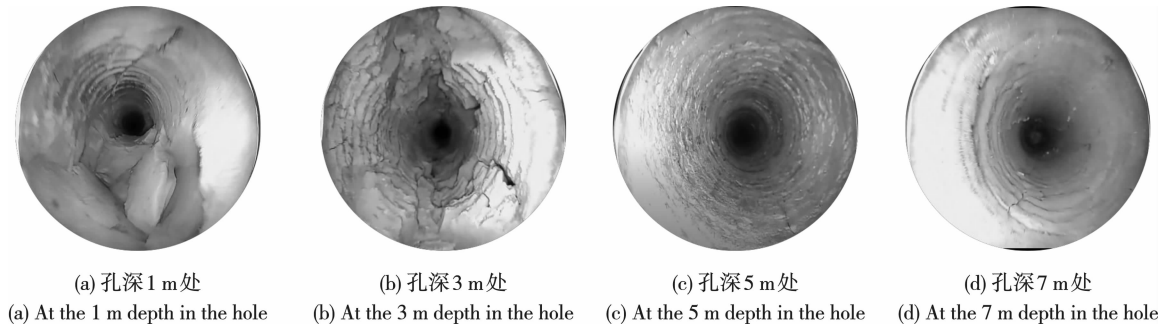


图 17 优化前预裂成缝效果窥视

Fig. 17 Inspection of pre-splitting blasting fracture formation before optimization

4 结论

(1) 原生裂隙的关键几何参数对预裂爆破成缝效果具有不同程度的影响,其中裂隙与预裂爆破孔连线夹角 β 、裂隙长度 L_f 、裂隙间距 d 为主要影响因素,而裂隙阶梯角 γ 无明显影响;具体表现为: β 从 0° 增至 90° 时,原生裂隙对预裂爆破的负面影响持续增强; L_f 的影响随 β 的增大而逐渐显著; d 越小,对预裂成缝效果的负面影响越强。

(2) 随原生裂隙 β 增大、 L_f 增大、 d 减小,预裂成缝效果量化指标呈规律性劣化:潜在贯通预裂缝迹线粗糙度指数 R_p 增大、预裂缝贯通率 η 降低,预裂缝由“一”字型光滑连续形态逐渐转变为“之”字型或“X”型粗糙断续形态,原生裂隙辅助成缝作用减弱。

(3) 注浆加固和分段封堵炮泥间隔装药,是改善原生裂隙对预裂成缝效果负面影响的有效控制对策。其中,注浆加固能够提升岩体均质性,降低应力集中程度,从而保障爆炸能量定向传递;分段封堵炮泥间隔装药则能平衡炮孔内爆炸能量,有效避免爆炸能量在炮孔全长范围内的薄弱部位被无效耗散。现场试爆结果进一步表明,当上述两项措施协同实施后,沿炮孔全长均形成明显预裂缝,裂隙率高达70%,充分证明了该协同控制方案的有效性。

参考文献 (References)

- [1] 何满潮,陈上元,郭志彪,等.切顶卸压沿空留巷围岩结构控制及其工程应用[J].中国矿业大学学报,2017,46(5):959-969.
- [1] HE Man-chao, CHEN Shang-yuan, GUO Zhi-biao, et al. Control of surrounding rock structure for gob-side entry retaining by cutting roof to release pressure and its engineering application [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2017, 46(5): 959-969. (in Chinese)
- [2] 王炯,朱道勇,宫伟力,等.切顶卸压自动成巷岩层运动规律物理模拟实验[J].岩石力学与工程学报,2018,37(11):2536-2547.
- [2] WANG Jiong, ZHU Dao-yong, GONG Wei-li, et al. Physical simulation experiment on the movement of rock strata upon automatic roadway forming by roof cutting and pressure releasing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(11): 2536-2547. (in Chinese)
- [3] 何满潮.无煤柱自成巷开采理论与110工法[J].采矿与安全工程学报,2023,40(5):869-881.
- [3] HE Man-chao. Theory and engineering practice for non-pillars mining with automagical entry formation and 110 mining method [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2023, 40(5): 869-881. (in Chinese)
- [4] 何满潮,高玉兵,盖秋凯,等.无煤柱自成巷力学原理及其工法[J].煤炭科学技术,2023,51(1):19-30.
- [4] HE Man-chao, GAO Yu-bing, GAI Qiu-kai, et al. Mechanical principle and mining methods of automagical entry formation without coal pillars [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 19-30. (in Chinese)
- [5] 高玉兵,杨军,王琦,等.无煤柱自成巷预裂切顶机理及其对矿压显现的影响[J].煤炭学报,2019,44(11):3349-3359.
- [5] GAO Yu-bing, YANG Jun, WANG Qi, et al. Mechanism of roof presplitting in a nonpillar mining method with entry automatically retained and its influence on the strata behaviors [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3349-3359. (in Chinese)
- [6] 王玉杰.爆破工程[M].2版.武汉:武汉理工大学出版社,2018.
- [6] WANG Yu-jie. Engineering blasting [M]. Second edition. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2018. (in Chinese)