

高地应力下双孔爆破成缝最优孔间距研究

李 潜^{1,2}, 李海波^{1,2}, 傅帅阳^{1,2}, 鞠明和³, 李晓锋^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国矿业大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 预裂爆破作为一种典型控制爆破技术, 广泛应用于基坑、公路边坡和露天及地下矿山等岩体工程开挖。受地应力夹制作用影响, 深部预裂爆破需采用小孔径全耦合和小间距装药, 影响了施工周期, 显著增加了施工成本。该研究旨在通过理论推导和数值分析研究高地应力下双孔爆破最优孔间距与径向不耦合系数的相关关系。首先通过线弹性理论建立考虑应力波叠加效应的双孔预裂爆破模型, 确定不同地应力下孔间距和径向不耦合装药系数的最优关系曲线。基于自主开发的 OpenFDEM 软件, 开展不同应力水平和径向不耦合装药下考虑爆破粉碎区和裂隙区扩展的双孔预裂爆破模拟。研究结果表明: 应力波叠加效应对裂纹贯通具有促进作用, 地应力较低时, 低不耦合系数虽会显著促进裂纹延伸, 同时也增大裂隙区分岔密度和扩展范围, 增加了围岩损伤范围, 不利于预裂缝成型; 随着地应力增加, 应力波叠加效应降低, 进一步影响双孔成缝效果, 因此所提出的充分考虑高地应力和应力波叠加效应相互作用的最优孔间距推荐取值, 对双孔爆破成缝效果有重要参考价值。

关键词: 爆炸力学; 预裂爆破; 有限-离散元方法; 炮孔间距; 双孔成缝; 地应力

中图分类号: O 38

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2025)03-0678-13

Study on the most optimistic hole spacing for double-hole blasting under high in-situ stresses

LI Qian^{1,2}, LI Haibo^{1,2}, FU Shuaiyang^{1,2}, JU Minghe³, LI Xiaofeng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering,

China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: As a typical contour blasting technique, presplitting blasting is widely used in rock engineering excavation for foundation pits, highway slopes, open-pit and underground mines. Due to the influence of in-situ stress, deep presplitting blasting requires small-diameter fully coupled charges and closely spaced holes, which affects construction timelines and significantly increases costs. This study aims to investigate the correlation between optimal hole spacing and radial decoupling coefficients under high in-situ stress through theoretical derivation and numerical analysis. A double-hole presplitting blasting model is established using linear elastic theory, incorporating the stress wave superposition effect. This model determines the optimal relationship curves for hole spacing and radial decoupling coefficients under different high in-situ stresses. Using the self-developed OpenFDEM software, simulations are conducted to assess the expansion of the blasting fragmentation zone and fracture zone under various

收稿日期: 2024-07-12; **修回日期:** 2024-10-08

基金项目: 国家自然科学基金区域联合基金项目(U22A20239)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. U22A20239)

作者简介: 李 潜(1999-), 男, 2021年毕业于中南大学地质工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事深部岩体爆破开挖机制方面的研究工作。

E-mail: liqian21@mails.ucas.ac.cn. 通讯作者: 李晓锋(1990-), 男, 博士, 现任研究员、博士生导师。E-mail: xfli@whrsm.ac.cn

DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2024.0545

stress conditions and radial decoupling charges. The results indicate that the stress wave superposition effect promotes crack penetration. At low stress conditions, a lower decoupling coefficient significantly enhances crack extension. However, it also increases the density and extent of fracture branching. This enlarges the damage zone and hinders the formation of pre-splitting cracks. As in-situ stress increases, the influence of the stress wave superposition effect diminishes. This further affects the pre-splitting cracks formation in double-hole blasting. This paper proposes optimal hole spacing values that fully consider the interaction between high in-situ stress and stress wave superposition effects, providing important references for enhancing pre-splitting cracks formation in double-hole blasting.

Key words: mechanics of explosion; pre-splitting blasting; finite-discrete element method(FDEM); hole spacing; double-hole cracking; in-situ stress

1 引言

在采矿、水电和深部交通工程中, 钻爆法仍是应用最广泛的围岩开挖技术, 而预裂爆破控制技术是控制爆破损伤、保留岩体完整性的重要方式之一。不同于光面爆破, 预裂爆破在围岩开挖前产生初始贯通的预裂缝, 对爆炸波起到反射和缓冲作用, 降低对保留岩体的爆破损伤, 形成平整轮廓面^[1-3]。

大量研究表明, 预裂爆破主要通过调整装药系数、装药结构和孔间距实现预裂缝成形。例如, 戴俊^[4]通过弹性理论讨论了预裂爆破与光面爆破的成缝机制。肖正学等^[5-6]研究了孔间距、装药系数和材料对裂纹扩展速度、长度及主裂纹形态的影响, 为预裂爆破研究提供了试验依据; 杨仁树和王雁冰^[7]通过改变装药结构, 揭示了爆炸应力波作用方向对孔壁裂纹形成及双孔间裂纹贯通机制。上述研究大多集中在爆轰波与岩壁的相互作用, 较少考虑双孔应力波叠加效应对裂纹贯通的影响。刘鑫等^[8]基于全场应变、高速摄影图像和应力波分布特征对同时起爆的双孔台阶模型试验进行研究, 发现高药量易导致裂纹分岔, 而适当的装药系数可充分利用应力波叠加效应形成贯通裂纹。C. He 和 J. Yang^[9]通过模型试验研究了不同起爆延迟下双孔应力波叠加效应, 发现同时起爆时应力波叠加有助于形成贯通的径向裂纹。因此为形成良好的轮廓面, 浅部预裂爆破多采用大孔径小装药的形式, 而对于深部预裂爆破, 地应力的影响不可忽略, 采用小孔径炮孔全耦合装药和小孔间距难以显著提高成缝效果, 同时也增加了施工成本。

考虑到试验条件的限制和边界条件影响, 传统模型试验和现场试验难以全面研究预裂爆破成缝的影响因素, 通过数值模拟的方法来确立其成缝过程的内在机制成为现阶段的研究热点。比如宗琦和孟德君^[10]通过对比数值模拟结果与现场试验数据, 揭

示了轴向装药系数和装药结构会导致应力分布的不均匀性, 进而影响了预裂爆破的成缝效果; 杨仁树等^[11]利用有限元软件 DYNA-3D 对聚能装药条件下的预裂爆破模型进行了数值模拟, 分析了聚能管在实现定向断裂爆破中的作用机制; 李洪伟等^[12]利用 LS-DYNA 软件的流固耦合算法, 探讨了不同炮孔间距对于岩石裂纹扩展行为的影响; 杨建华等^[13]通过 SPH-FEM 耦合数值模型研究了双孔爆破下岩体在不同地应力条件下的开裂规律, 发现高地应力显著减少裂纹扩展时间并抑制裂纹长度, 影响了预裂爆破的成缝效果。

然而, 上述数值模型将围岩作为连续体考虑, 通过损伤本构模型或者删除屈服单元间接表征岩体的裂隙扩展, 忽略了裂纹扩展过程的能量耗散和网格依赖性影响。近年来, 通过有限-离散元耦合模型研究岩体的不连续行为成为了主要的研究方向。有限元-离散元混合法(FDEM)继承了传统有限元和离散元的优点, 通过断裂能控制裂纹在岩体内部的萌生与扩展^[14], 考虑了裂纹扩展过程中的能量耗散, 且严格满足质量守恒。其作为一种耦合算法, FDEM 既可开展 FEM 研究, 也可构建 DEM 模型, 能有效实现连续体向非连续体演变的破坏全过程模拟, 尤其在深部洞室开挖^[15]、边坡稳定性分析^[16]、波速场反演^[17-18]、室内试验^[19]、GBM^[20]等领域受到了广泛应用。如 H. Han 等^[21-22]为探究爆破开挖过程中动态断裂效应对洞室稳定性的影响, 通过 FDEM 模型模拟了爆轰过程岩石破碎和裂缝扩展过程, 为爆破损伤评估提供了新思路。

本文旨在通过理论推导和数值分析研究高地应力作用下预裂爆破孔间距最优设计方案。文中通过自主开发的 OpenFDEM 软件构建双孔预裂爆破模型, 系统地研究在高地应力下双孔预裂爆破的成缝机制和裂纹分布, 验证了高地应力作用下炮孔间距与径向不耦合系数的最优关系曲线, 以优化预裂爆破设计方案, 提高爆破效率。

2 双孔预裂爆破应力分布解析解

假设在弹性各向同性岩石介质中存在单个炮孔, 炮孔壁在受爆破冲击荷载和初始地应力共同作用。该问题可简化为弹性轴对称平面应变问题, 通过应力叠加法解耦为静态应力场和动态应力场, 进一步求得高地应力作用下炮孔爆破后应力场分布解析解。为研究预裂爆破中多炮孔同时起爆时相邻炮孔间的成缝机制, 本文通过应力叠加法建立双孔预裂爆破模型, 将双孔模型分解成 2 个叠加的单孔模型, 如图 1 所示。炮孔半径为 r_b , 炮孔间距为 a 。

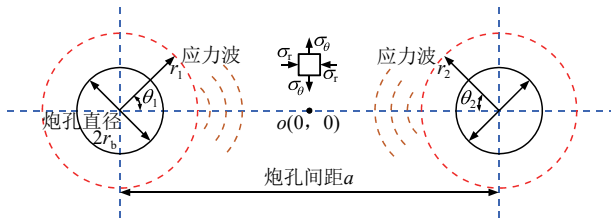


图 1 双孔预裂爆破模型

Fig.1 Double-hole pre-splitting blast model

2.1 动态应力弹性解

爆破荷载引起的应力变化可简化柱状坐标系下作用于圆柱形空腔的径向应力波问题。J. Miklowitz^[23]通过拉普拉斯变换求解微分方程获得了无限弹性体应力波的解析解。爆轰波作用下炮孔近场满足的运动控制方程和边界条件为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 u(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u(r, t)}{\partial r} - \frac{1}{r^2} u(r, t) &= \frac{1}{c_p^2} \frac{\partial^2 u(r, t)}{\partial t^2} \\ u(r, 0) = \frac{\partial u(r, 0)}{\partial t} &= 0 \quad (r \geq r_b) \\ \lim_{r \rightarrow \infty} u(r, t) &= 0 \quad (t > 0) \\ \sigma_r^d(r_b, t) &= P(t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $u(r, t)$ 为位移函数, $c_p = \sqrt{(\lambda + 2G)/\rho}$ 为弹性体纵波波速。结合广义胡克定律和边界条件, 对式(1)进行拉普拉斯变换可求得位移函数的拉普拉斯变换式为

$$\bar{u}(r, p) = -\frac{\bar{P}(p)K_1(sr)}{2G/r_b K_1(sr_b) + (\lambda + 2G)sK_0(sr_b)} \quad (2)$$

式中: p 为拉普拉斯变换参数, 而 $s = p/c_p$; K_0 , K_1 分别为零阶和一阶的第二类虚宗量贝塞尔函数; $\bar{P}(p)$ 为爆破荷载函数的拉普拉斯变换式^[24]表示为

$$\bar{P}(p) = \frac{P_0 \xi(\beta - \alpha)}{(p + \alpha)(p + \beta)} \quad (3)$$

其中, α 和 β 为波形常数, 常数 $\xi = 1/(e^{-\alpha t_0} - e^{-\beta t_0})$; 本文取 $\beta/\alpha = 4$, 爆破上升时间为 $t_0 = 10 \mu s$, 并满足 $t_0 = [1/(\beta - \alpha)] \lg(\beta/\alpha)$ 。爆破峰值荷载 P_0 ^[25](见图 2)为

$$P_0 = \frac{\rho_e VOD^2}{2(\gamma + 1)} \left(\frac{d_e}{d_b} \right)^{2\nu} \quad (4)$$

式中: ρ_e 为炸药密度; VOD 为爆轰速度; d_e , d_b 分别为装药直径和炮孔直径; γ 为比热容比, 通常取 3.0; ν 为绝热膨胀常数, 通常取 1.5。

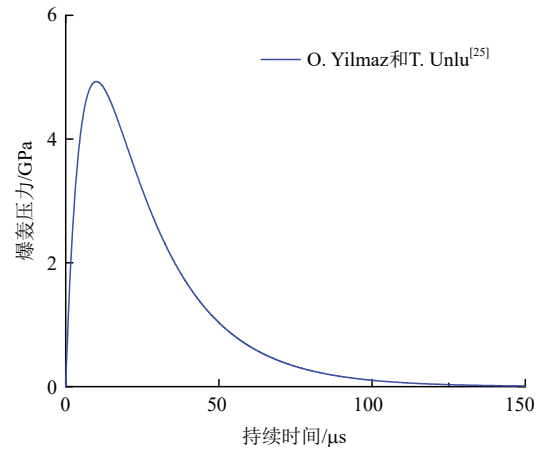


图 2 爆轰荷载曲线

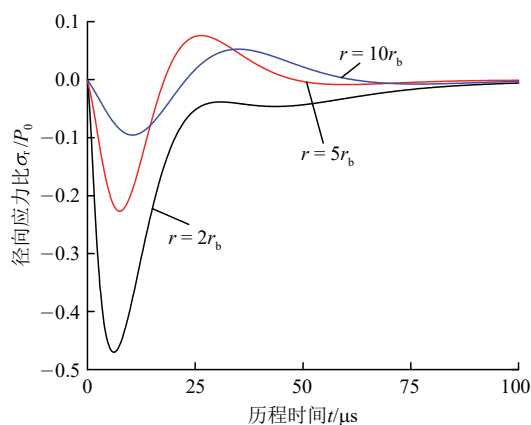
Fig.2 Blasting load curve

通过胡克定律和 Durbin 法^[26]对式(2)进行数值反演, 可得到炮孔周边径向应力和环向应力分布。

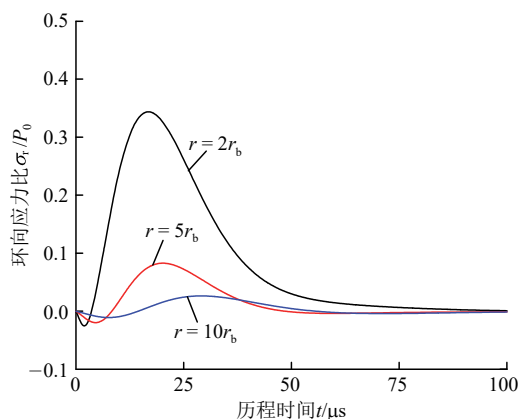
2.2 双孔爆破的孔间应力分布

本文炮孔半径 r_b 取 21 mm, 装药半径 r_e 为 12.5 mm, 径向不耦合系数为 $K = r_b/r_e = 1.68$ 。不考虑爆轰波在炮孔轴向传播的影响, 轴向装药长度为单位长度, 轴向不耦合系数设为 1。岩体的密度为 2 650 kg/m³, 弹性模量 51 GPa, 泊松比 0.17。其考虑的抗拉强度为 7.5 MPa, 抗压强度为 151 MPa。炸药的密度为 1 320 kg/m³, 爆轰速度 6 690 m/s。图 3 给出了 $r = 2r_b$, $5r_b$ 和 $10r_b$ 时的单孔爆破模型动态径向应力和环向应力的时程曲线。可知, 爆炸应力波作用下, 孔间单元水平方向上受应力波的径向压力作用和垂直方向上受环向拉力作用, 呈现水平受压竖直受拉的应力状态, 如图 1 所示。此时孔间单元最大拉应力方向沿竖直方向。

根据单孔模型下动态应力分布及双孔同时起爆时的应力叠加规律, 图 4 给出了炮孔间距 $a = 10r_b$ 时, 双孔爆破应力叠加后沿炮孔连线不同位置的环向最大拉应力分布曲线。由图可知, 当孔内径向不耦合系数为 1.68, 孔间距为 $10r_b$ 时, 在 $-1.6r_b \leq x \leq 1.6r_b$ 范



(a) 径向应力解析解



(b) 环向应力解析解

图3 爆轰波作用下炮孔周边径向应力和环向应力解析解
Fig.3 Analytical solution of radial stresses and hoop stresses around blasthole under the blast loading

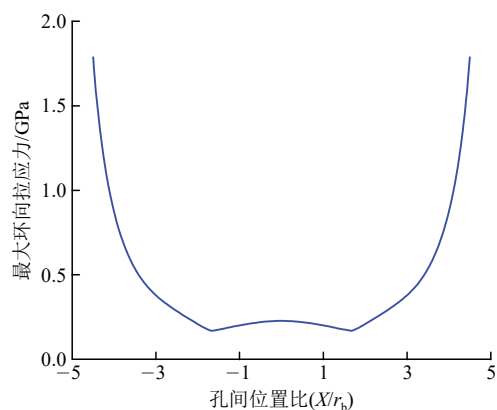
(c) C. Ding 等^[27]的模型试验孔间最大拉应力分布

图4 孔间拉应力分布对比

Fig.4 Comparison of tensile stress distribution between holes

围双孔同时起爆产生的环向应力叠加显著,并在炮孔连线中心点处达到最大。叠加后的环向拉应力在 $x = -1.6r_b$ 和 $1.6r_b$ 时达到最小,说明双孔同时起爆的应力叠加效果只在一定范围内显著,与 C. Ding 等^[27]的模型试验结果一致(见图 4(c))。因此,当相邻 2 个预裂孔同时起爆,炮孔连线上存在两点最小的环向最大拉应力;当炮孔连线处最小的拉应力大于岩石的动态抗拉强度时,相邻炮孔间裂纹贯通。戴俊^[28]指出,岩石的抗拉强度受应变率的影响较小,在爆破过程中,可假定为准静态试验下的抗拉强度。同时经验证,当炮孔间距大于 $10r_b$ 时,炮孔孔周应力集中对预裂孔成缝的影响可忽略不计。因此,假定均布地应力条件下,双孔爆破的成缝条件为

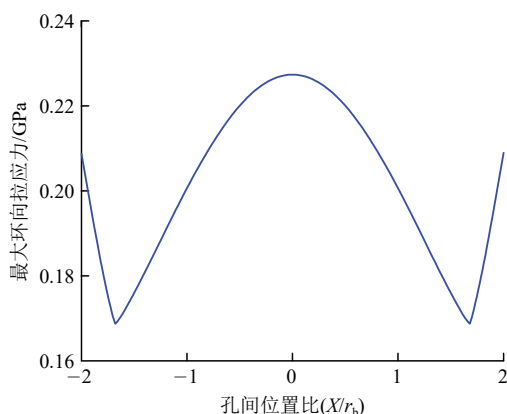
$$\min(\sigma_{\theta\max}) \geq \sigma + f_t \quad (5)$$

式中: f_t 为岩石抗拉强度。

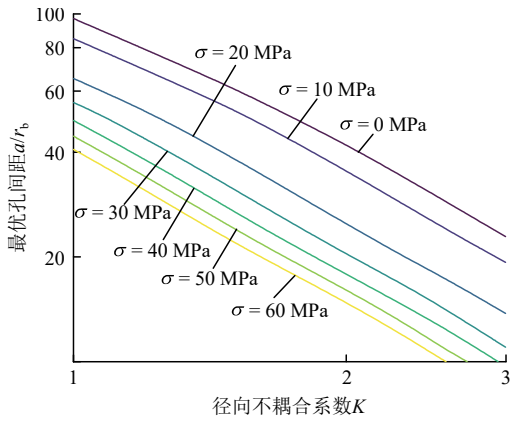
根据上述公式,可以求得地应力、径向不耦合系数和最优孔间距的关系曲线如图 5 所示,图 5(a)和(b)分别为不同地应力下最优孔间距与径向不耦合系数的关系以及不同径向不耦合系数下最优孔间距与地应力的关系。由图 5 可知,最优孔间距与径向不耦合系数和地应力均呈现明显的非线性关系。戴俊^[28]提出,爆炸应力波在弹性介质中传播的衰减公式可简单表示为

$$P(r) = P_0 \left(\frac{r}{r_b} \right)^\alpha \quad (6)$$

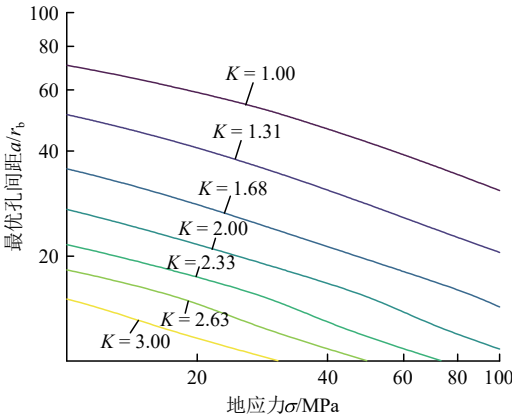
结合式(4)~(6)可知,图 5(a)中数据进行拟合得到的最优孔间距与径向不耦合系数的拟合曲线可表示为



(b) (放大)孔间最大拉应力分布



(a) 最优孔间距与径向不耦合系数关系



(b) 最优孔间距与地应力关系

图 5 最优孔间距、地应力和径向不耦合系数之间的相关性
Fig.5 The correlations among hole spacing, in-situ stress and charge diameter

$$a / r_b = \alpha_1 K^{\beta_1} \quad (7)$$

式中: α_1 , β_1 为拟合参数值; a / r_b 为最优孔间距和炮孔半径的比值; K 为径向不耦合系数。

相应地, 最优孔间距与地应力的拟合曲线可表示为

$$a / r_b = \alpha_2 \sigma^{\beta_2} \quad (8)$$

式中: α_2 , β_2 为拟合参数值。

如表 1 和 2 所示, 上述公式能较好反映最优孔间距与径向不耦合系数的变化关系及最优孔间距与地应力的变化关系。图 6(a)为不同地应力条件下最优孔间距与径向不耦合系数的拟合曲线的相关系数与曲线。图 6(b)为最优孔间距与地应力的拟合曲线相关系数在不同径向不耦合系数下的变化规律。结合图 5(a)和 6(a)可以发现, 随着地应力幅值的增加, 尤其当 $\sigma > 30$ MPa 时, 系数 α_1 的变化趋势变缓, 表明高地应力下地应力增量对最优炮孔间距影响降低, 可忽略不计。由图 6(b)可知, 高不耦合下拟合系数 α_2 呈现逐渐递减。比较图 6 可得系数 β_1 和

表 1 不同地应力(σ)下最优孔间距与径向不耦合系数(K)的拟合曲线系数和拟合度

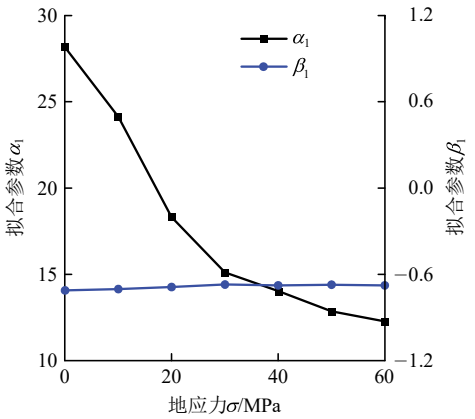
Table 1 Coefficients and R-squared values for fitting curves of the optimal hole spacing to radius ratio and decoupling coefficient(K) under various in-situ stresses (σ)

σ /MPa	α_1	β_1	R^2
0	28.16	-0.71	0.98
10	24.13	-0.70	0.98
20	18.32	-0.69	0.97
30	15.11	-0.67	0.97
40	14.03	-0.68	0.97
50	12.85	-0.67	0.96
60	12.27	-0.68	0.96

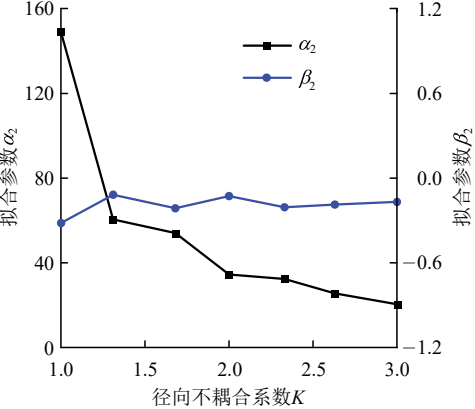
表 2 不同不耦合系数(K)下最优孔间距与地应力(σ)的拟合曲线系数和拟合度

Table 2 Coefficients and R-squared values for fitting curves of the optimal hole spacing to radius ratio and in-situ stress (σ) under various decoupling coefficients (K)

K	α_2	β_2	R^2
1.00	148.70	-0.32	0.99
1.31	60.53	-0.12	0.89
1.68	54.00	-0.21	0.92
2.00	34.47	-0.13	0.90
2.33	32.40	-0.21	0.95
2.63	25.60	-0.19	0.94
3.00	20.48	-0.17	0.93



(a) α_1 , β_1 与地应力的关系曲线



(b) α_2 , β_2 与径向不耦合系数的关系曲线

图 6 拟合曲线系数变化趋势

Fig.6 Trend analysis of coefficients in fitting curves

β_2 随地应力和不耦合系数增加而缓慢增加, 但影响相对较小。

3 数值模型与参数确定

3.1 数值模型

本文通过自主开发的开源连续非连续软件 OpenFDEM^[29]建立了综合考虑爆破粉碎区和裂隙区耗能的双孔预裂爆破数值模型, 如图 7 所示。数值模型包括岩体、炸药和空气三部分, 模型未考虑气楔作用。模型尺寸 3 m×3 m, 炮孔孔径 d_b 为 42 mm, 炮孔间距分别为 0.5, 0.6, 0.7 和 0.8 m。模型的最小、最大网格尺寸分别为 6 mm 和 24 mm。模型四周添加无反射边界来模拟无限岩体; 为简化计算, 数值模型为平面应变模型, 不考虑炮孔轴向装药的影响, 认为孔内装药长度为单位长度, 轴向不耦合系数为 1。不同炸药当量对应的径向不耦合系数如表 3 所示。

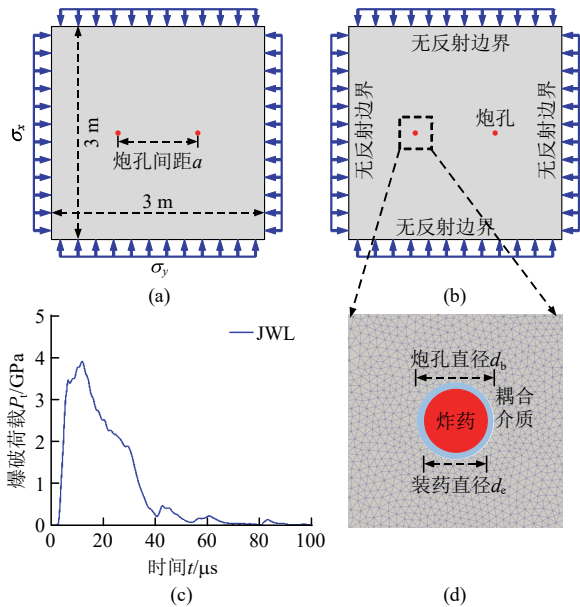


图 7 双孔预裂爆破数值模型

Fig.7 Numerical model of double-hole pre-splitting blasting

计算模型的地应力平衡一般耗费大量计算时间, FDEM 采用在连续模型上添加地应力边界条件, 通过结合质量缩放方式实现地应力快速平衡, 在地应力平衡后再插入黏结单元来模拟爆破过程中围岩破裂扩展研究, 因此在黏结单元插入后需再次

表 3 不同工况下的径向不耦合系数和炸药当量取值

Table 3 The radial uncoupling coefficient and explosive charge under different cases

工况编号	径向不耦合系数 K	装药半径 r_c /mm	炸药当量 m_e /kg
I	1.00	21.0	1.83
II	1.40	15.0	0.93
III	1.68	12.5	0.65
IV	2.10	10.0	0.41
V	2.47	8.5	0.30

进行一定时间步的应力平衡, 实现最终的地应力加载。为分析不同地应力水平和炮孔间距对双孔预裂爆破成缝的影响, 本文就以下 4 种情况进行详细讨论, 分别研究不同径向不耦合系数对无地应力条件和高地应力条件的双孔成缝影响, 不同地应力水平对双孔成缝影响及不同地应力水平及不同径向不耦合系数的最优双缝炮孔间距:

- (1) 地应力为 0 MPa、孔间距为 0.7 m 时不同径向不耦合系数的双孔爆破模型;
- (2) 地应力为 30 MPa、孔间距为 0.7 m 时不同径向不耦合系数的双孔爆破模型;
- (3) 孔间距为 0.7 m、径向不耦合系数为 1.68 ($m_e = 0.65$ kg) 时不同地应力的双孔爆破模型;
- (4) 地应力为 0, 10, 20 MPa 时最优炮孔间距和最优径向不耦合系数的双孔预裂爆破模型。

3.2 岩石力学参数确定和炸药参数选取

本文采用的岩石材料采用超弹性本构, 由三角形单元和初始无厚度的四边形节理单元组成, 岩石单元的宏观和微观的材料力学参数如表 4^[30]所示。炸药单元由三角形单元组成, 采用 Jones-Wilkins-Lee(JWL)状态方程:

$$P_e = A_e \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V_e} \right) e^{-R_1 V_e} + B_e \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V_e} \right) e^{-R_2 V_e} + \frac{\omega E_e}{V_e}$$
(9)

式中: V_e 为爆生物相对体积; E_e 为单位体积炸药的内能; A_e , B_e , R_1 , R_2 和 ω 均为炸药常数。具体炸药参数见表 5^[30], 由此产生的爆轰波如图 7(c) 所示。采用的空气单元与炸药单元类似, 通过线性多项式状态方程予以描述:

表 4 岩石材料的宏观和微观力学参数^[30]

Table 4 The macro- and micromechanical parameters of rock materials^[30]

密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E /GPa	泊松比 ν	黏聚力 c /MPa	抗压强度 σ_c /MPa	抗拉强度 f_t /MPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)	I 型断裂能 G_I /($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)	II 型断裂能 G_{II} /($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)
2 650	51	0.17	30	151	7.5	30	6	60

表 5 炸药材料参数^[30]

Table 5 Parameters for explosive^[30]

炸药密度 $\rho_c /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	爆轰速度 $VOD /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$E_c /$ GPa	$P_{C3} /$ GPa	$A_c /$ GPa	$B_c /$ GPa	R_1	R_2	ω
1 320	6 690	7.38	16	586	21.6	5.81	1.77	0.282

$$P_a = C_0 + C_1 \mu_a + C_2 \mu_a^2 + C_3 \mu_a^3 + (C_4 + C_5 \mu_a + C_6 \mu_a^2) E_a \quad (10)$$

式中： E_a 为单位体积空气的内能； μ 为空气的压缩系数，可表征为 $\mu_a = \rho_a / \rho_{a0} - 1$ ， ρ_a 和 ρ_{a0} 分别为空气的当前密度和初始密度； C_0 ， C_1 ， C_2 ， C_3 ， C_4 ， C_5 ， C_6 均为材料常数，其中 $C_4 = C_5 = \gamma_a - 1$ ， γ_a 为空气的比热容比。

3.3 径向不耦合系数对无地应力条件下双孔成缝影响

图 8 为地应力为 0 MPa、孔间距为 0.7 m、径向不耦合系数为 1.0 时双孔爆破模型在爆轰波作用下的应力叠加演化和裂纹扩展过程。图 9 则展示了双孔爆破模型试验的应变叠加云图^[27]。在爆轰波作用下(125 μs 前)，爆孔周边产生密集的剪切裂纹(II 型)聚集区，表现为压剪破坏，形成爆破粉碎区；受衰减后的爆炸应力波影响(125 μs 后)，在粉碎区范围外形成初始径向拉伸裂纹(I 型)，并在应力集中的影响下逐渐扩展形成裂隙区。图 8(b)，(c)为应力波叠加前后双孔爆破中裂纹的扩展和分布。由图 8(c)可知，因为相邻炮孔应力波的叠加，部分裂纹在炮孔连线区域上先起裂，逐渐向炮孔方向扩展，并与炮孔上的拉张裂纹贯通。

如图 8(d)所示，炮孔外侧的拉张裂纹朝远离炮孔连线中心的方向扩展，形成一个扇形裂纹分布区

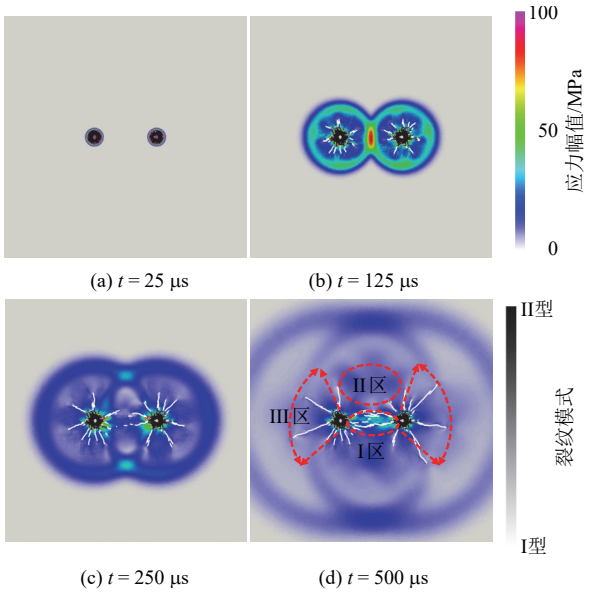


图 8 双孔爆破数值模型应力叠加演化过程

Fig.8 Stress superposition evolution in double-hole blasting numerical models

(III 区)，在该区域内的裂纹普遍长于炮孔内侧(II 区)的裂纹。主要原因在于相邻炮孔间不同区域的应力波叠加作用的差异性，导致炮孔附近区域环向拉张应力的分布和方向出现显著不同：I 区内，由两孔应力波产生的拉伸应力垂直于炮孔连线，应力波叠加后在孔间竖直方向的应力显著增加，促进了孔间裂纹的贯通；II 区内，近孔的拉伸波受到远孔压缩波和拉伸波的共同作用，这种作用抑制了裂纹的扩展，并导致裂纹扩展方向向 III 区偏移；III 区内，双孔应力波产生叠加效应，尽管应力叠加效应小于 I 区，但拉伸应力的增加促进了裂纹的扩展，导致 III 区的损伤区范围大于单孔爆破的损伤区范围。该模拟现象与现实模型试验^[6, 31-32]的试验现象一致。由图可知，该扇形区域内的裂纹长度和裂纹扩展方向将会显著影响双孔预裂爆破成缝效果。

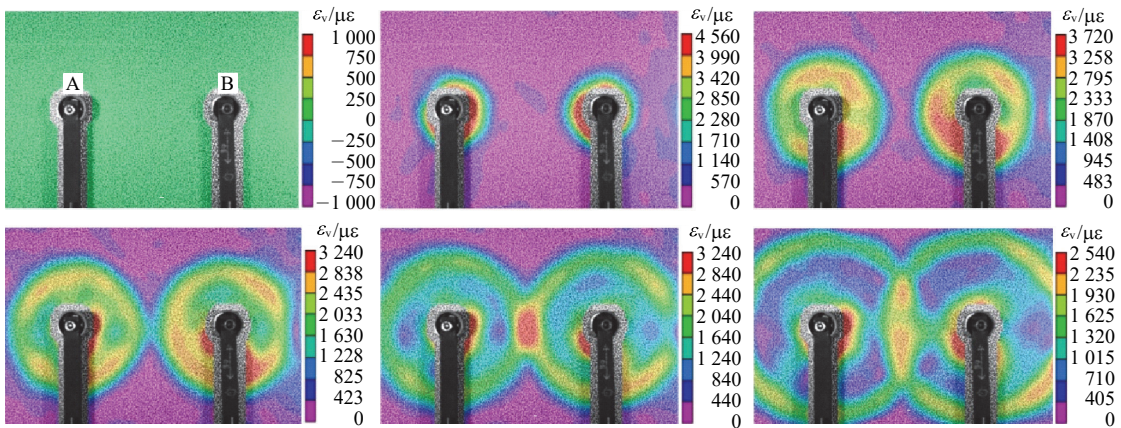


图 9 双孔爆破模型应变叠加演化过程^[27]

Fig. 9 Strain superposition evolution in double-hole blasting models^[27]

图 10 为无地应力条件下不同径向不耦合系数对双孔爆破模型岩石损伤分布的影响。由图可知, 随着径向不耦合系数的增加, 裂隙区范围显著减小, 双孔间的贯通裂纹减少, 双孔外侧的裂隙区范围减小, 裂纹趋于均匀分布, 从双孔预裂爆破演变为 2 个不叠加的单孔爆破。图 11 通过裂纹分布将 2 个炮孔周围的损伤区范围分别进行统计, 并通过比较选取最大值作为结果, 定量分析了无地应力条件下, 不同径向不耦合系数的双孔爆破产生的粉碎区和裂隙区范围。结果表明, 随着径向不耦合系数的增加, 粉碎区和裂隙区范围均显著减小; 裂隙区 90° 方向的裂纹显著增加, 与水平向夹角随之增大; 此外, 在较小径向不耦合系数下, 裂隙区随径向不耦合系数的增大而缓慢减小, 而当其超过一定值时, 裂隙区范围显著下降, 表明存在一个最优的径向不耦合系数, 该点可实现相邻炮孔裂纹贯通, 同时将炮孔

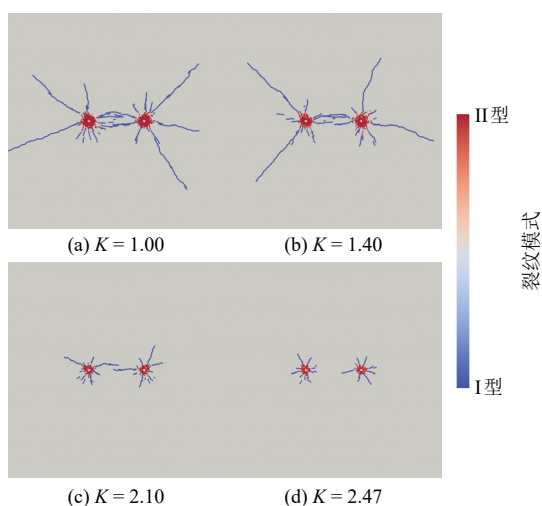


图 10 地应力 0 MPa, 孔间距为 0.7 m 不同径向不耦合系数双孔爆破模型的岩石损伤分布

Fig.10 Rock damage distribution of double-hole blasting with different radial decoupling coefficients at an in-situ stress of 0 MPa and a hole spacing of 0.7 m

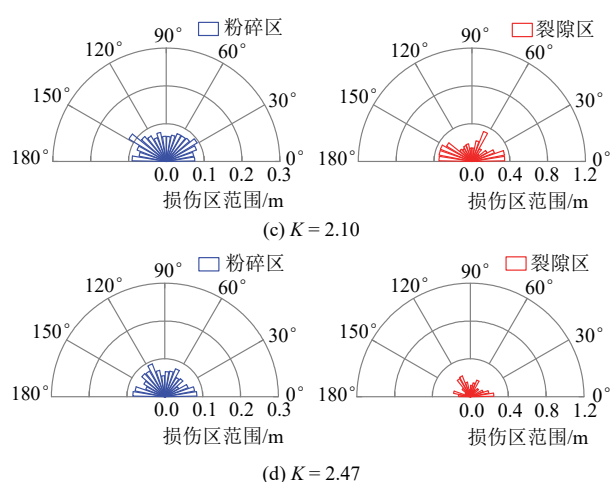
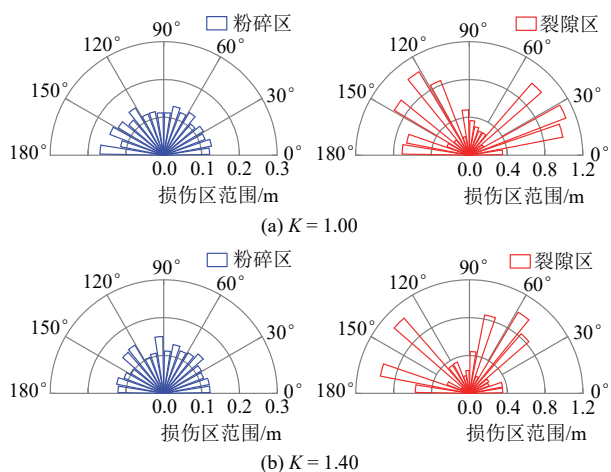


图 11 无地应力不同径向不耦合系数下双孔爆破的裂纹范围玫瑰图

Fig.11 Rose map of cracks for double-hole blasting with various radial decoupling coefficients under high in-situ stresses

周围损伤范围限制在预定阈值内, 并保证以较低的装药量达到理想的成缝效果。

3.4 径向不耦合系数对高地应力条件下双孔成缝影响

图 12 展示了高地应力条件下, 不同径向不耦合系数双孔爆破模型对岩石损伤分布的影响。结果表明, 与无地应力环境相比, 高地应力对粉碎区的影响有限, 但明显抑制了裂隙区的扩展, 双孔间的裂纹分布更均匀, 应力叠加效应不显著。图 13 表明, 在较小径向不耦合系数情况下, 不同地应力对粉碎区范围的影响不大, 但对裂隙区的影响较为显著;

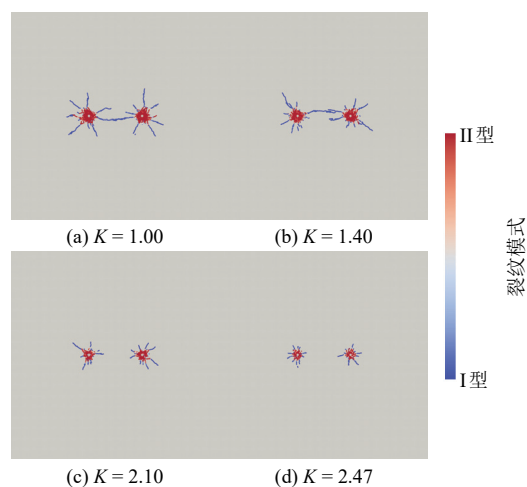


图 12 地应力 30 MPa, 孔间距为 0.7 m 不同径向不耦合系数双孔爆破模型的岩石损伤分布

Fig.12 Rock damage distribution of double-hole blasting with various explosive charges at an in-situ stress of 30 MPa and a hole spacing of 0.7 m

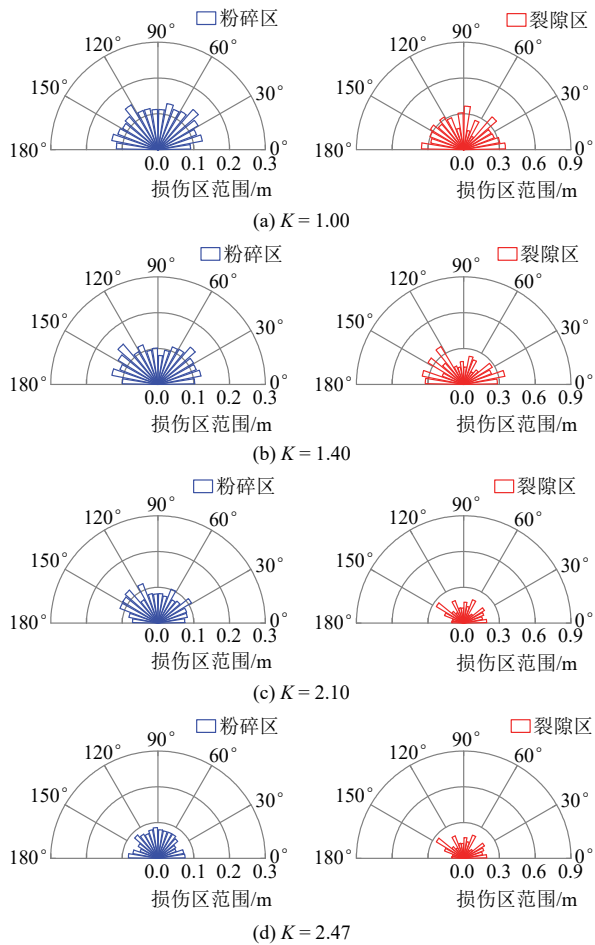
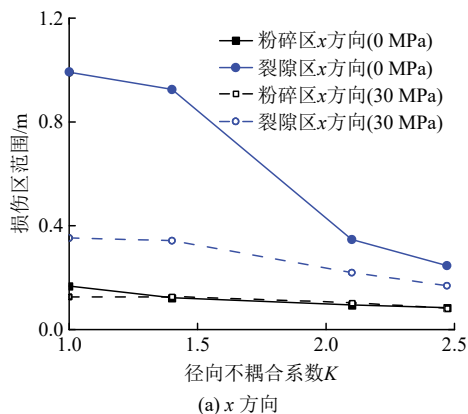


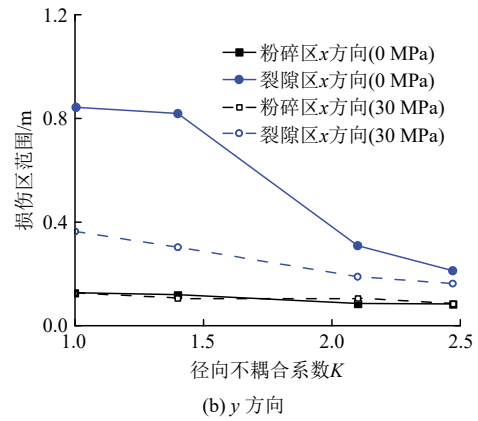
图 13 高地应力不同径向不耦合系数双孔爆破的裂纹长度玫瑰图

Fig.13 Rose map of cracks for double-hole blasting with various radial decoupling coefficients under high in-situ stresses

当高不耦合时, 这种差异则不明显。由图 14 可知, 在应力波叠加效应的作用下, 双孔爆破模型在垂直方向的损伤程度相对小于水平方向, 特别是在低不耦合系数时, 这一差异更为显著。因此, 优化炮孔间距以充分利用应力波叠加效应, 可促进炮孔贯通、控制非炮孔连线方向的损伤区分布, 实现良好预裂成缝效果。



(a) x 方向



(b) y 方向

图 14 损伤区范围、地应力和不耦合系数的相关性

Fig.14 Correlation between damage zone extent, ground stress, and decoupling coefficient

3.5 地应力水平对双孔成缝影响

图 15 呈现了孔间距 0.7 m, 径向不耦合系数 $K = 1.68$ 时, 不同地应力的双孔爆破模型岩石损伤分布。从图可知, 随地应力增加, 双孔爆破的应力叠加效应减弱, 裂纹分布更加均匀; 当地应力 σ 超过 15 MPa 时, 当前径向不耦合系数的装药当量已无法使双孔间的裂纹贯通, 双孔外侧的拉张裂纹扩展受到抑制, 长度减少。进一步增加地应力, 裂隙区范围的扩展趋于稳定, 接近粉碎区范围(见图 16)。图 17 展示了不同地应力条件下的损伤区范围变化趋势。可见随地应力的增大, 粉碎区范围变化不大, 维持在 0.1 m 附近, 而裂隙区的扩展受到显著抑制, 从 0.7 m 降低到 0.3 m。

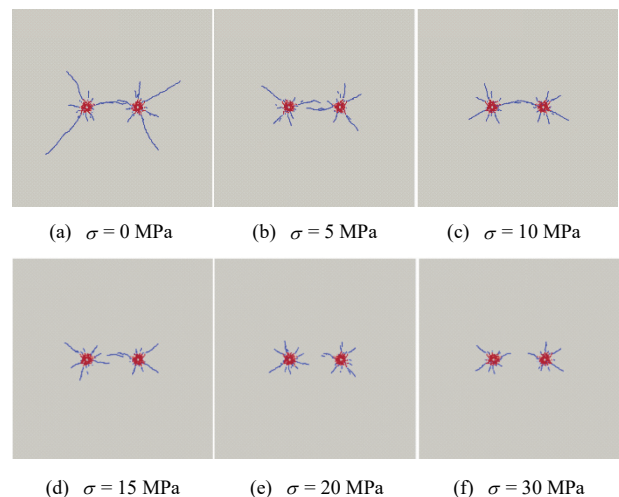


图 15 孔间距为 0.7 m, 径向不耦合系数为 1.68 时不同地应力的双孔爆破模型岩石损伤分布

Fig.15 Rock damage distribution of double-hole blasting with various explosive charges at a hole spacing of 0.7 m and a decoupling coefficient of 1.68

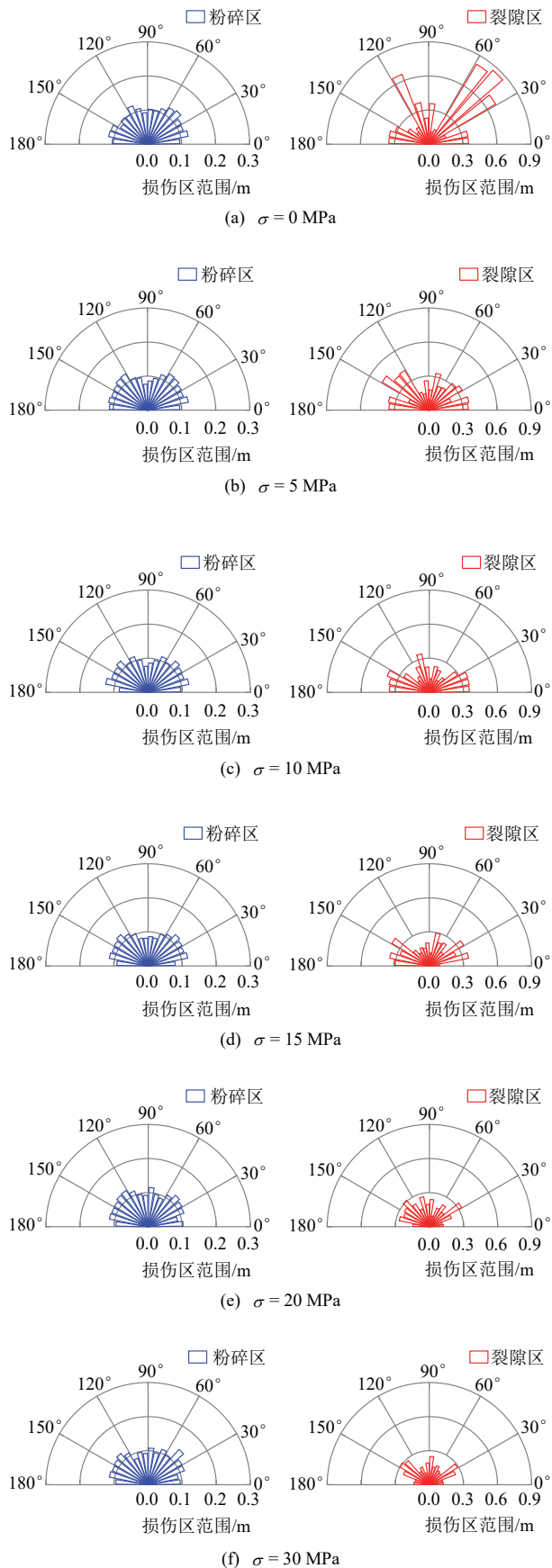


图16 不同地应力下双孔爆破的裂纹玫瑰图

Fig.16 Rose map of cracks for double-hole blasting under different in-situ stresses

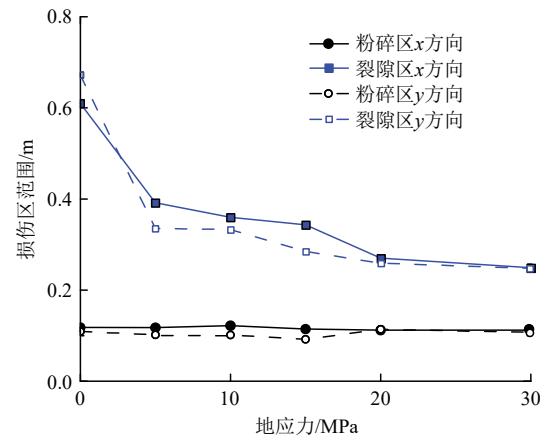


图17 不同地应力作用下爆破损伤范围

Fig.17 Blasting damage extent under different in-situ stresses

3.6 不同地应力和径向不耦合系数下的最优双孔间距

为研究不同地应力、径向不耦合系数和炮孔间距对预裂爆破中成缝效果的影响,本节基于图5和式(7)对孔内径向不耦合系数进行调整,以快速获取不同地应力条件下,不同径向不耦合系数的最优炮孔间距。如表6所示,随着炮孔间距的增加,孔间贯通裂纹的形态从“直线型”向“牵手型”转变,这一观察与实际模型试验现象相吻合^[6]。并且随着地应力的提高,这种形态转变的趋势变得更加显著。

数值模拟与理论分析的对比结果如图18所示,其中数值模拟结果要小于式(7)对应的理论解,这是由于理论模型建立在线弹性假设上,未充分考虑实际爆破过程中破碎区和裂隙区的影响,因此得到的最优孔间距大于实际情况。相比X. D. Li等^[33]采用的基于线弹性损伤模型的连续方法,本文得到的最优间距要略小。这是因为FDEM方法采用黏结单元对岩石裂纹起裂和扩展等不连续行为进行模拟,严格满足能量守恒和质量守恒,同时考虑了黏结单元在失效过程产生非线性断裂过程区的能量耗散。

图19为不同地应力下最优孔间距双孔爆破在垂直炮孔连线方向的爆破损伤区分布。可以看出,随着地应力和炮孔间距的增加,最优成缝对应的径向不耦合系数随之降低。无地应力的抑制作用时,随着径向不耦合系数的降低,爆破损伤区扩大,垂直炮孔连线方向的裂隙区最高达到了0.4 m;高地应力下,受到地应力和应力波叠加效应的相互作用,裂隙区范围控制在0.2~0.3 m范围。由此可见,最优孔间距设计对地应力条件下的双孔成缝方面具有显著的控制效果,既有效限制了垂直炮孔连线的爆破损伤范围又确保了裂纹的顺利贯通。由图可知,

表 6 不同地应力不同孔间距下双孔爆破模型的裂纹形态

Table 6 Fracture patterns of double-hole blasting models with various hole spacing under different in-situ stresses

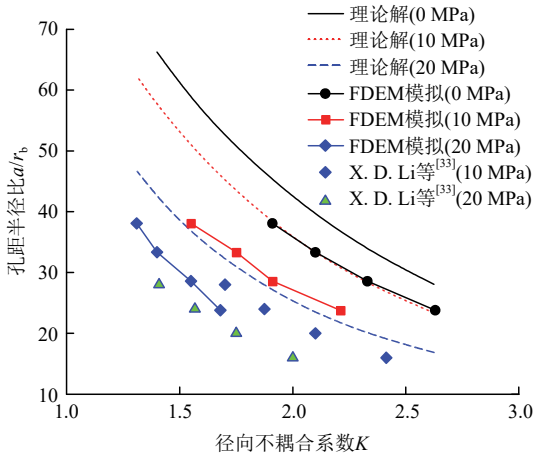
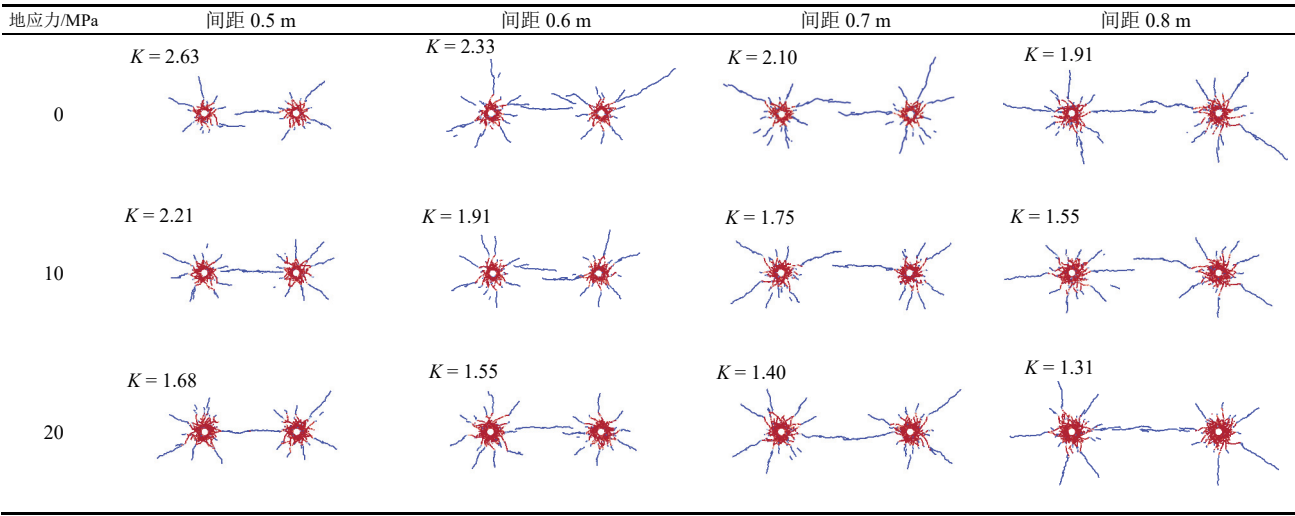


图 18 不同地应力条件下最优孔间距与径向不耦合系数的相关关系

Fig.18 The relationship of the optimal hole spacing and radial decoupling coefficient under different in-situ stresses

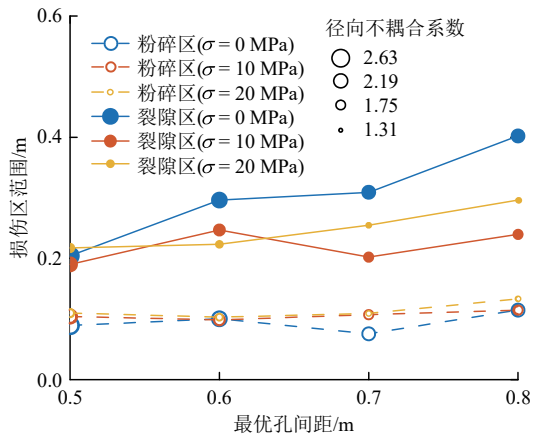


图 19 不同地应力条件下最优炮孔间距和径向不耦合系数的 y 方向爆破损伤范围

Fig.19 Damage extent in the y -direction for blasting with optimal hole spacings and radial decoupling coefficients under different in-situ stresses

高地应力对裂纹扩展的抑制作用与双孔应力波的叠加作用相互耦合，对双孔裂缝贯通具有协同增强效应，一方面降低了非成缝方向上的围岩爆破损伤范围的分布，另一方面增强了成缝方向的上裂纹贯通，优化了断裂面的成缝效率。

预裂爆破孔间距优化设计原则是在满足成缝的前提下尽量加大孔间距，减少钻孔成本，但是较大孔间距与径向不耦合系数成反比，甚至某些孔间距设计需要全耦合装药才能实现成缝效果，而较小径向不耦合装药系数会在爆孔周向产生较大的裂隙区，增加保留岩体的损伤范围。因此本文将最优孔间距与最大损伤范围的比值作为成缝范围因子，对预裂爆破的成缝效果进行定量比较。可知，成缝范围因子越接近 2，孔间距范围约为 2 倍的损伤范围，对炸药的能量利用率越高，成缝效果较好，围压损伤范围也较小。图 20 展示了不同地应力条件下成缝范围因子随径向不耦合系数变化的分布曲线。由图可知，不同地应力条件下，成缝范围因子随着径向不耦合系数的增加而先升高再降低。且随着地应力的减小，最优孔间距与最大损伤区范围的比值受径向不耦合系数的影响越大。当地应力为 0，10 和 20 MPa 时，成缝范围因子最大对应的孔间距均为 0.7 m，对应的不耦合系数分别为 2.10，1.75 和 1.40。为降低钻孔成本和控制爆破损伤，存在一个最大的最优孔间距，既满足围岩损伤控制要求，也极大地增加了钻孔间距。实际工程当中，可由此选取最优的孔间距，降低钻孔成本，减少损伤范围，改善超欠挖现象。

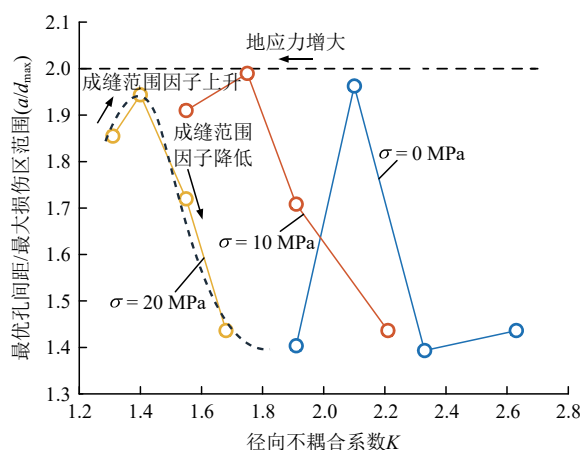


图 20 不同地应力条件下成缝范围因子和径向不耦合系数的关系

Fig.20 Relationship between normalized damage extent and radial decoupling coefficients under different in-situ stress conditions

4 结 论

本文通过理论分析和数值模拟研究了炮孔间距、径向不耦合系数和地应力之间对预裂爆破双孔成缝效果的影响,通过建立不同地应力场下双孔爆破的数值模型,获得了不同地应力水平和径向不耦合装药下的最优孔间距,量化表征了双孔成缝的效果。主要结论如下:

(1) 炮孔周边裂隙受爆炸应力波叠加效应影响,形成了炮孔连线区域(I区)、炮孔外侧非扇形区(II区)和炮孔外侧扇形区(III区)3个区域。爆生主裂纹在I区内贯通,在III区内裂隙区取最大值。

(2) 径向不耦合系数和炮孔间距的减小均会增强应力波叠加效应,促进裂纹沿炮孔中心线扩展,利于裂纹贯通。同时,随地应力增加,应力波的叠加效应减弱,最优成缝孔间距受应力波叠加的影响降低。

(3) 地应力较低时,低不耦合系数虽会显著促进裂纹延伸,同时也增大裂隙区分岔密度和扩展范围,增加了围岩损伤范围,不利于预裂缝成型;随着地应力增加,应力波叠加效应降低,进一步影响双孔成缝效果。

(4) 成缝范围因子可定量比较不同孔间距和径向不耦合系数下的成缝效果。不同地应力条件下,成缝范围因子随着径向不耦合系数的增加而先升高再降低。且随着地应力的减小,成缝范围因子受径向不耦合系数的影响越大。不同地应力下存在一个最优径向不耦合系数使得成缝范围因子最大化。

参考文献(References):

- [1] KUTTER H K, FAIRHURST C. On the fracture process in blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1971, 8(3): 181 - 202.
- [2] 杨永琦, 戴俊, 单仁亮, 等. 岩石定向断裂控制爆破原理与参数研究[J]. 爆破器材, 2000, 29(6): 24 - 28.(YANG Yongqi, DAI Jun, SHAN Renliang, et al. A study of the mechanism of directional split of rock by controlled blasting and its parameters[J]. Explosive Materials, 2000, 29(6): 24 - 28.(in Chinese))
- [3] LU W, CHEN M, GENG X, et al. A study of excavation sequence and contour blasting method for underground powerhouses of hydropower stations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 29: 31 - 39.
- [4] 戴俊. 深埋岩石隧洞的周边控制爆破方法与参数确定[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(6): 493 - 498.(DAI Jun. The controlled contour blasting technique and its parameter determination for rock tunnel at depth[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(6): 493 - 498.(in Chinese))
- [5] 肖正学, 张志呈, 郭学彬. 断裂控制爆破裂纹发展规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 546 - 549.(XIAO Zhengxue, ZHANG Zhicheng, GUO Xuebin. Research on crack developing law of rock fracture controlled blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 546 - 549.(in Chinese))
- [6] 岳中文, 田世颖, 陈志远. 炮孔间距对切缝药包爆生裂纹扩展规律的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(11): 2460 - 2467.(YUE Zhongwen, TIAN Shiying, CHEN Zhiyuan. Influence of the interval between holes on crack propagation in slit charge blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(11): 2460 - 2467.(in Chinese))
- [7] 杨仁树, 王雁冰. 切缝药包不耦合装药爆破爆生裂纹动态断裂效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1337 - 1343.(YANG Renshu, WANG Yanbing. Experimental study of dynamic fracture effect of blasting crack in slotted cartridge decoupling charge blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1337 - 1343.(in Chinese))
- [8] 刘鑫, 杨军, 唐红亮. 同时起爆的双孔台阶模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(12): 2460 - 2470.(LIU Xin, YANG Jun, TANG Hongliang. Experimental study on simultaneous initiation in double-hole bench model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(12): 2460 - 2470.(in Chinese))
- [9] HE C, YANG J. Experimental and numerical investigations of dynamic failure process in rock under blast loading[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 83: 552 - 564.
- [10] 宗琦, 孟德君. 炮孔不同装药结构对爆破能量影响的理论探

- 讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 641 - 645.(ZONG Qi, MENG Dejun. Influence of different kinds of hole charging structure on explosion energy transmission[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 641 - 645.(in Chinese))
- [11] 杨仁树, 佟 强, 杨国梁. 聚能管装药预裂爆破模拟试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(5): 631 - 635.(YANG Renshu, TONG Qiang, YANG Guoliang. Pre-splitting blasting with binding energy tube charges: simulations and experimental research[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2010, 39(5): 631 - 635.(in Chinese))
- [12] 李洪伟, 雷 战, 江向阳, 等. 不同炮孔间距对岩石爆炸裂纹扩展影响的数值分析[J]. 高压物理学报, 2019, 33(4): 82 - 91.(LI Hongwei, LEI Zhan, JIANG Xiangyang, et al. Numerical analysis of impact of shot hole spacing on crack growth in rock[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(4): 82 - 91.(in Chinese))
- [13] 杨建华, 孙文彬, 姚 池, 等. 高地应力岩体多孔爆破破岩机制[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(7): 118 - 127.(YANG Jianhua, SUN Wenbin, YAO Chi, et al. Influences of in-situ stress on blast-induced rock fracture and seismic waves[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 40(7): 118 - 127.(in Chinese))
- [14] MUNJIZA A. The combined finite-discrete element method[M]. [S. l.]: John Wiley and Sons, 2004: 231 - 254.
- [15] LISJAK A, FIGI D, GRASSELLI G. Fracture development around deep underground excavations: Insights from FDEM modelling[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(6): 493 - 505.
- [16] XU C, LIU Q, TANG X, et al. Dynamic stability analysis of jointed rock slopes using the combined finite-discrete element method (FDEM)[J]. Computers and Geotechnics, 2023, 160: 105556.
- [17] 傅帅旸, 李海波, 吴 迪, 等. 基于波速场反演的爆破损伤区范围界定研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(增 1): 3 257 - 3 266.(FU Shuaiyang, LI Haibo, WU Di, et al. Study on the quantitative definition of blasting damage zone scope based on wave velocity field inversion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(Supp.1): 3 257 - 3 266.(in Chinese))
- [18] FU S, LI H, LIU L, et al. Effect of intermittent joint distribution on the mechanical and acoustic behavior of rock masses[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024, 16(4): 1 231 - 1 244.
- [19] LISJAK A, TATONE B S A, GRASSELLI G, et al. Numerical modelling of the anisotropic mechanical behaviour of Opalinus clay at the laboratory-scale using FEM/DEM[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(1): 187 - 206.
- [20] LI X F, LI H B, LIU L W, et al. Investigating the crack initiation and propagation mechanism in brittle rocks using grain-based finite-discrete element method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 127: 104219.
- [21] HAN H, FUKUDA D, LIU H, et al. Combined finite-discrete element modelling of rock fracture and fragmentation induced by contour blasting during tunnelling with high horizontal in-situ stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 127: 104214.
- [22] AN H, SONG Y, LIU H, et al. Combined finite-discrete element modelling of dynamic rock fracture and fragmentation during mining production process by blast[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021: 1 - 18.
- [23] MIKLOWITZ J. The theory of elastic waves and waveguides[M]. [S. l.]: Elsevier, 1978: 277 - 288.
- [24] CHO S H, KANEKO K. Influence of the applied pressure waveform on the dynamic fracture processes in rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(5): 771 - 784.
- [25] YILMAZ O, UNLU T. Three dimensional numerical rock damage analysis under blasting load[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38: 266 - 278.
- [26] DURBIN F. Numerical inversion of Laplace transforms: an efficient improvement to Dubner and Abate's method[J]. The Computer Journal, 1974, 17(4): 371 - 376.
- [27] DING C, YANG R, FENG C. Stress wave superposition effect and crack initiation mechanism between two adjacent boreholes[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 138: 104622.
- [28] 戴 俊. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 235 - 236.(DAI Jun. Dynamic behaviors and blasting theory of rock[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002: 235 - 236.(in Chinese))
- [29] LI X F, LI H B, ZHAO J. Transgranular fracturing of crystalline rocks and its influence on rock strengths: Insights from a grain-scale continuum-discontinuum approach[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2021, 373: 113462.
- [30] BANADAKI M M D. Stress-wave induced fracture in rock due to explosive action[M]. [S. l.]: University of Toronto Toronto, 2010: 31 - 32.
- [31] YANG R, FANG S, YANG A, et al. In situ stress effects on smooth blasting: model test and analysis[J]. Shock and Vibration, 2020, 2020: 1 - 14.
- [32] 尤元元, 崔正荣, 张西良, 等. 爆破中双线性型聚能药包最佳成缝角度[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(2): 144 - 158.(YOU Yuanyuan, CUI Zhengrong, ZHANG Xiliang, et al. Optimum seam forming angle of bilinear shaped charge in engineering blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(2): 144 - 158.(in Chinese))
- [33] LI X D, LIU K W, QIU T, et al. Study of presplit blasting under high in-situ stress[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 288: 109360.