

含水炮孔预裂爆破的孔距及不耦合系数优化

沈泽伟^{1,2}, 刘浩杉^{1,2}, 张智宇^{1,2*}, 黄永辉³, 何德福⁴, 张帅^{1,2}

- (1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;
2. 云南省教育厅爆破新技术工程研究中心, 云南 昆明 650093;
3. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500;
4. 昆明理工大学公共安全与应急管理学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 含水炮孔预裂爆破中, 水介质的不可压缩性与高波阻抗显著改变了爆炸能量的传递路径与破岩机制, 传统基于空气介质的参数设计方法在含水地层中常出现超挖率高、保留岩体损伤过大等问题。以某磷矿富水边坡为背景, 构建光滑粒子流体动力学与有限元方法 (SPH-FEM) 耦合的数值模型, 对不同炮孔间距与不耦合系数条件下的应力波传播规律、岩体损伤响应及裂纹发育特征进行系统分析。研究结果表明: 孔间应力波叠加效应对预裂裂隙能否实现有效贯通具有显著影响。当炮孔间距为 1.4 m、不耦合系数为 2.34 时, 裂纹扩展平均长度达 49.48 cm, 预裂爆破能够形成规整连续的贯通裂缝, 并有效抑制孔壁周围的过度粉碎及次生裂纹发育。现场试验进一步验证了数值模拟结果的可靠性。优化参数条件下, 含水炮孔预裂爆破的半孔率提高至 85%, 声波降低率较常规爆破下降 18%, 表明该参数在含水预裂爆破中具备良好的控损能力与成缝效果。研究成果可为复杂水文地质条件下的预裂爆破参数选取提供参考依据。

关键词: 预裂爆破; 含水炮孔; 光滑粒子流体动力学; 有限元方法; 孔距; 不耦合系数

中图分类号: TD235; 0521.9

文献标识码: A

预裂爆破作为一种先进的边坡轮廓控制技术, 旨在主爆区起爆前, 沿设计边坡线形成一条连续贯通裂缝。传统预裂爆破中, 炮孔内通常以空气作为介质形成径向不耦合装药结构, 空气的可压缩性能够缓冲初始冲击波并降低作用于孔壁的准静态气压, 从而抑制破碎区过度扩展^[1]。然而, 在地下水位较高或富水地层等工程条件下, 炮孔积水现象普遍存在, 爆炸能量传递路径与破岩机理随之发生显著变化, 研究含水炮孔预裂爆破具有实际工程意义。

国内外学者在预裂爆破机理与参数确定方面已开展大量研究。针对常规 (空气介质) 预裂爆破的参数优化研究, 张伟等^[2]基于 RHT 损伤本构模型的有限元数值模拟, 揭示了孔距对裂纹扩展与岩体损伤的调控机制, 证明孔距优化可在有效成缝与最小化扰动间取得最优平衡; 李祥龙等^[3]通过正交试验确定了包含不耦合系数与延期时间在内的最优参数组合; 李育朋等^[4]基于离散元颗粒膨胀模型的数值模拟, 揭示了原生裂隙角度、长度与间距对预裂爆破成缝效果的影响。此外, 针对水介质或特殊地质条件下的预裂爆破研究也不断深化。钟冬望^[5]等基于相似模型试验, 揭示了涉水边坡中孔径与孔距对成缝质量及岩体损伤的耦合作用机制; 苗勤书等^[6]通过对比实验发现, 水介质能延长爆生气体作用时间并对孔壁裂纹产生定向导向作用, 显著提升成缝质量与能量利用率; 李书萱等^[7]通过 PMMA 模

收稿日期: 2025-12-31; 修回日期: 2026-01-29

基金项目: 国家自然科学基金 (52064025); 云南省青年基金 (CB24136C168A)

作者简介: 沈泽伟 (2001-), 男, 硕士, 主要从事工程爆破研究. E-mail: 673851571@qq.com

通信作者: 张智宇 (1973-), 男, 硕士, 教授, 主要从事采矿工程及工程爆破研究.

E-mail: 924221851@qq.com

型试验发现,在水耦合装药条件下适当增大不耦合系数可有效增多裂纹数量并优化裂隙分布;同时,学者们还从边坡条件与地应力角度展开深入分析, Li 等^[9]探讨了地应力影响下隧洞周边爆破裂纹的扩展行为,并提出了相应的优化方案;李潜^[10]等通过 Open FDEM 数值模拟,揭示了高地应力环境下应力叠加与不耦合系数之间的协同影响机制。Hu 等^[11]则揭示了高地应力对裂纹扩展具有明显抑制作用,为复杂应力环境下预裂设计提供了理论基础。

然而,现有研究多集中于空气介质装药条件,缺乏对矿山生产中普遍存在的自然含水炮孔预裂爆破行为的研究。其次,大部分数值模拟研究依赖有限元网格法,受网格畸变影响在模拟爆炸过程中的孔壁大变形与裂纹离散扩展等关键问题时存在明显不足^[12]。基于此,本研究以某磷矿富水边坡为工程背景,针对含水炮孔预裂爆破效果不佳问题^[13],引入 SPH-FEM 耦合方法,对含水炮孔爆破过程中应力波传播、岩体损伤累积与裂纹扩展行为进行数值模拟研究。通过改变炮孔间距与不耦合系数,基于有效应力与损伤变量的联合判据,定量揭示了孔间应力波叠加对预裂缝贯通的现象,并在此基础上提出适用于自然含水炮孔条件的预裂爆破参数优化方案。研究成果预期将为含水炮孔预裂爆破设计提供参考。

1 材料参数标定

1.1 岩石材料参数

为获取岩石力学参数,在富水爆破区域现场取样,取样过程中选取具有代表性的完整岩层以保证试样完整性。经制备打磨后,将加工完成的岩石试件放置于水桶中进行静置处理,通过每三天记录一次试件质量变化来监测吸水过程,当试件质量趋于稳定且不再变化时,认为其已达到饱水状态。动、静态力学试验如图 1 所示,经过多组试验得到的白云质粉砂岩平均主要力学参数如表 1 所示。

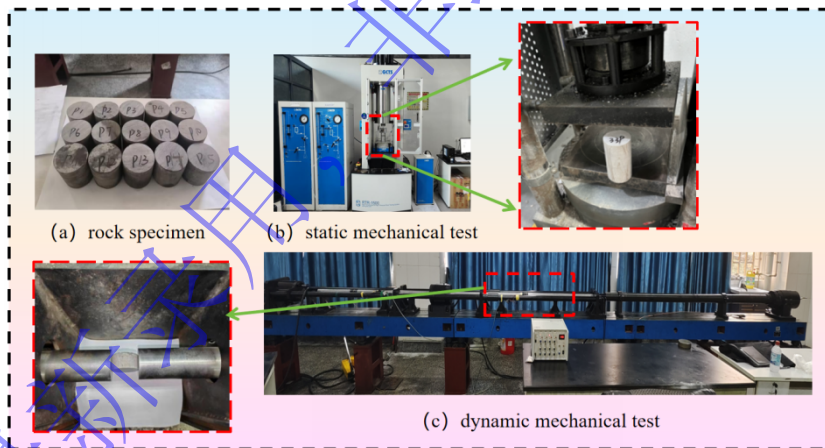


图 1 动、静态力学试验过程

Fig. 1 Procedures of dynamic and static mechanical tests

表 1 白云质粉砂岩力学参数

Table 1 Mechanical parameters of dolomitic siltstone

f_c /MPa	σ_t /MPa	τ /MPa	E /GPa	ν	σ_b /MPa	R_m /MPa	c_0 /m·s ⁻¹
118	7.78	3.81	38.03	0.27	172	21	3600

表中: f_c 为单轴抗压强度, σ_t 为单轴抗拉强度, τ 为抗剪强度, E 为弹性模量, ν 为泊松比, σ_b 为动态抗压强度, R_m 为动态抗拉强度, c_0 为纵波波速。

RHT 本构模型 (Riedel-Hiermaier-Thoma 模型) 常用于描述混凝土、岩石等脆性材料在动态载荷下力学行为的本构模型, 适合模拟高应变率和大变形条件下的力学特征^[14]。该模型通过耦合压力、损伤和应变率效应, 能够较好地反映材料在压缩、拉伸及剪切作用下

的非线性响应。该本构模型涉及状态方程参数、失效面参数、损伤演化参数、应变率增强因子等。

其中，通过上述力学试验得到初始数据为：白云质粉砂岩密度 $\rho_0 = 2415 \text{ kg/m}^3$ ，单轴抗压强度 $\sigma_c = 118 \text{ MPa}$ ，单轴抗拉强度 $\sigma_t = 7.78 \text{ MPa}$ ，泊松比 $\nu = 0.27$ 。

状态方程参数： p - a 状态方程的表达式为

$$P_R = \frac{1}{a_0} \left((B_0 + B_1 \mu - a_0 \rho_0 e + A_1 \mu + A_2 \mu^2 + A_3 \mu^3) \right) \quad (1)$$

$$\begin{cases} A_1 = \rho_0 c_0^2 \\ A_2 = \rho_0 c_0^2 (2s - 1) \\ A_3 = \rho_0 c_0^2 (3s^2 - 4s + 1) \end{cases} \quad (2)$$

$$B_0 = B_1 = 2s - 1 \quad (3)$$

式中： A_1, A_2, A_3 为两贡组多项式系数； c_0 为零压力条件下材料的声速； B_0, B_1 为状态方程参数； s 为经验参数，对于白云岩而言，查阅参考文献^[34]经验参数 s 取值为 1.11。

将相关力学参数代入上述式中，得到 $A_1=31.30 \text{ GPa}$ ， $A_2=38.18 \text{ GPa}$ ， $A_3=8.02 \text{ GPa}$ ， $B_0=B_1=1.22$ 。

损伤参数中，损伤变量 D 由塑性应变 ε_p 的累积所表征

$$D = \sum \frac{d\varepsilon_p^f}{\varepsilon_p^f} \quad (4)$$

式中： ε_p^f 为破坏时的塑性应变。

在达到破坏强度条件后，材料损伤随非弹性变形发展，其破坏塑性应变 ε_p^f 可表示为：

$$\varepsilon_p^f = \begin{cases} D_1 [P_0^* - (1-D)P_t^*]^{D_2}, & P_0^* \geq (1-D)P_t^* + \left(\frac{\varepsilon_p^m}{D_1}\right)^{1/D_2} \\ \varepsilon_p^m, & P_0^* < (1-D)P_t^* + \left(\frac{\varepsilon_p^m}{D_1}\right)^{1/D_2} \end{cases} \quad (5)$$

式中： ε_p^m 是最小残余应变； D_1 和 D_2 为损伤参数，分别取为 0.04 和 1.0。

强度相关参数中， P_{crush} 表示材料的弹性极限压力，由 $P_{\text{crush}} = 2f_c/3$ 可得。由力学试验所得白云质粉砂岩单轴抗压强度 $f_c = 118 \text{ MPa}$ ，则 $P_{\text{crush}} = 78.67 \text{ MPa}$ 。

该模型的破坏面曲线定义为当 $3P_0^* \geq F_r$ 时，破坏面表达式如下：

$$\sigma_f^* = A \left(P_0^* - \frac{1}{3} + A^{-1/N} \right)^N \quad (6)$$

$$P_0^* = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3f_c} \quad (7)$$

$$\sigma_\alpha^* = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{f_c} \quad (8)$$

式中： σ_f^* 为材料破坏强度的无量纲化值； σ_α^* 为差应力的无量纲化结果； σ_1 为最大主应力；

σ_3 为最小主应力。

为了更好地估计高应力下的岩石强度，使用 Hoek 和 Brown 的经验方程^[18]来获得各种围压应力下的岩石强度，结构如表 2 所示。根据 Banadaki 和 Mohanty^[19]中提供的数据，得到失效面拟合曲线，如图 2 所示，拟合方程如下

$$\sigma_1 = \sigma_3 + f_c \left(24 \frac{\sigma_3}{f_c} + 1 \right)^{1/2} \quad (9)$$

通过几组围压下的数据，拟合上式得到 $A=2.47042$ 、 $N=0.74047$ 。

表 2 围压参数

Table 2 Confining pressure parameters

$\sigma_2=\sigma_3$ (Mpa)	σ_1 (Mpa)	P_0^*	σ_a^*
0	118	0.33	1
20	285.64	0.92	2.25
40	396.66	1.35	3.02
60	488.77	1.72	3.63
80	570.39	2.06	4.16

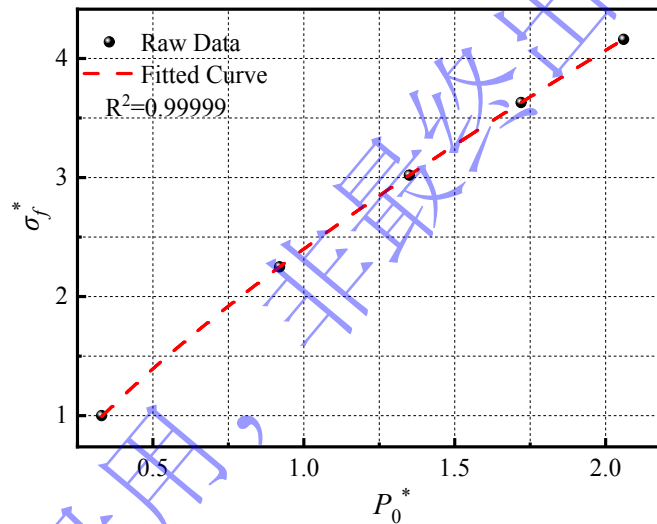


图 2 失效面拟合曲线

Fig. 2 Fitting curve of the failure surface

根据上述理论分析与数值拟合计算，得到岩石试件白云质粉砂岩 RHT 模型本构参数，具体参数如表 3 所示。

表 3 白云质粉砂岩 RHT 本构参数

Table 3 RHT constitutive parameters of dolomitic siltstone

$\rho_0/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	B_0	T_2	f_t^*	n_f	A_2/GPa	P_t^*	ζ
2 415	1.22	0	0.104 9	0.61	38.18	0.001	0.5
A	B_1	f_c/MPa	Q_0	$p_{\text{comp}}/\text{GPa}$	β_c	g_c^*	D_1
2.470 42	1.22	118	0.680 5	6.0	0.013 8	0.53	0.04
N	T_1/GPa	f_s^*	B	G/GPa	β_t	g_t^*	D_2
0.740 47	31.30	0.18	0.05	16.29	0.018 2	0.7	1
ϵ_p^m	γ	A_3/GPa	n_p	A_f	A_1/GPa	p_{el}/MPa	α
0.01	1.14	8.02	3.0	1.60	31.30	60	1.12

1.2 炸药材料参数

采用关键字*EOS_JWL^[20]来描述炸药爆轰过程中压力、体积和能量间的关系。该状态方程可精确反映爆轰产物在高压膨胀阶段的压力-体积-能量响应，表达式如下

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (10)$$

式中： P 为炸药爆轰压力， V 为炸药爆轰过程中的相对体积， E_0 为炸药初始内能， B 为材料量纲常数。

JWL 状态方程参数见表 4。

表 4 炸药材料参数

Table 4 Explosive material parameters

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	P_{CJ}/GPa	A	B	R_1	R_2	ω	E_0/GPa
1 150	3 500	9.7	214.4	0.182	4.2	0.9	0.152	4.190

1.3 水材料参数

对于水材料的建模，采用关键字 MAT_NULL^[20]。该方程的具体表达形式如下所示：

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E_0 \quad (11)$$

式中 ρ_0 、 C 、 E_0 、 γ_0 分别为材料密度、Gruneisen 方程系数、对应的流体内能以及截距； S_1 、 S_2 、 S_3 为曲线斜率的系数； α 、 μ 表示为一阶体积修正量系数。

状态方程参数如表 5 所示。

表 5 水状态方程参数

Table 5 Parameters of the water state equation

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	C	S_1	S_2	S_3	γ_0	E_0
1000	1.647	0.344	-0.096	0	0.35	0

2 预裂爆破数值模拟分析

SPH-FEM 耦合方法是一种将光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)与有限元法(Finite Element Method, FEM)相结合的混合数值模拟方法^[21]。SPH 区域与 FEM 区域在耦合界面处采用节点-面接触力算法，实现 SPH 粒子与有限元单元之间法向及切向相互作用力的双向传递，从而保证界面力与动量传递的连续性。SPH 由于没有物理网格连接，该方法在处理爆炸、冲击等涉及大变形和高应变率的工程问题中非常有效。但它的计算成本极高且施加固定的边界条件相对困难，在模拟小变形的弹性区域时精度和效率不如 FEM。将两者结合，在发生大变形的区域(炸药、水、近区岩石)使用 SPH，在小变形或远场区域使用 FEM，从而在保证精度的同时大幅提高计算效率。SPH-FEM 耦合方法示意图如图 3。

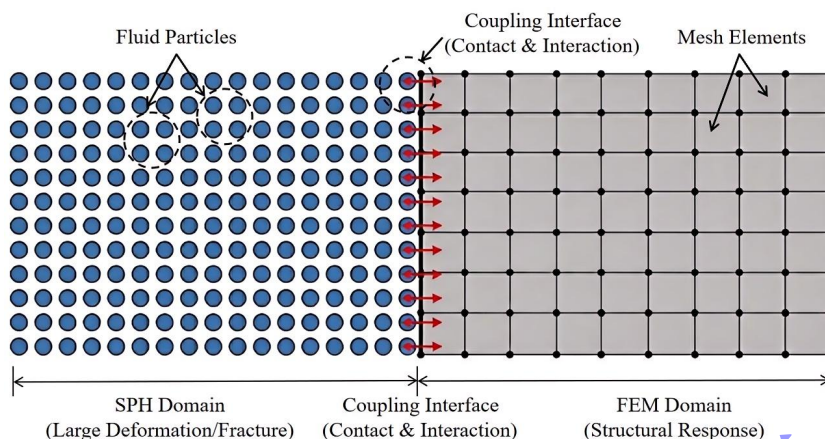


图 3 SPH-FEM 耦合示意图

Fig. 3 SPH-FEM coupling schematic

2.1 数值模型建立及可靠性验证

为验证数值模拟的可靠性与合理性，采用 ANSYS/LS - DYNA 软件建立单孔爆破漏斗数值模型，整体模型尺寸为 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ ，模型及装药结构如图 4 所示。在开展现场爆破漏斗试验时，选用矿山所提供的 $\Phi 32\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 2号岩石乳化炸药。试验时将 7 卷炸药捆绑连接，单孔装药量为 2.1 kg ，炮孔深度为 1.0 m 。为还原现场装药方式，将炮孔装药结构进行等量计算，计算后确定炮孔直径为 15 cm ，装药直径为 8.6 cm ，装药高度为 30 cm 。岩石 RHT 材料参数与第一节标定结果保持一致。

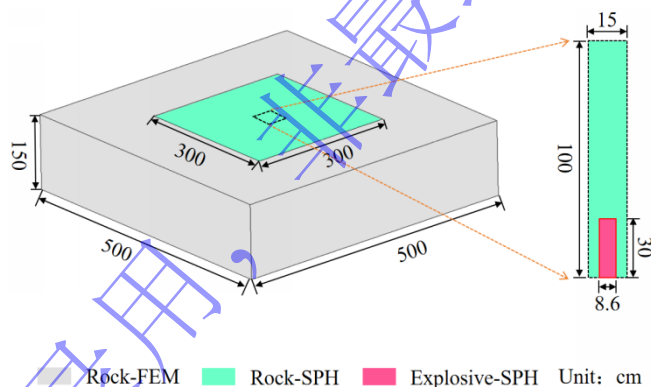


图 4 模型尺寸及装药结构

Fig. 4 Geometrical dimensions and charge structure of the model

数值模拟及现场爆破漏斗形态如图 5 所示。由图 5(a)可得，数值模拟计算结果中的岩体损伤区呈现出由炮孔向外逐渐扩展的漏斗状特征，符合爆破漏斗理论。在对现场爆破漏斗试验结果进行分析时，漏斗体积采用分步计算方法确定：各断面面积由抛物线法（辛卜生法）求得，再依据棱台体体积计算公式求得整体爆破漏斗体积^[24]，试验统计结果见表 6。对比漏斗数据可得，在漏斗深度和半径上数值模拟结果均与现场试验数据高度吻合，漏斗体积的相对误差为 4.22% 。数值模型能够较好地反映爆破作用下岩体损伤的实际特征。

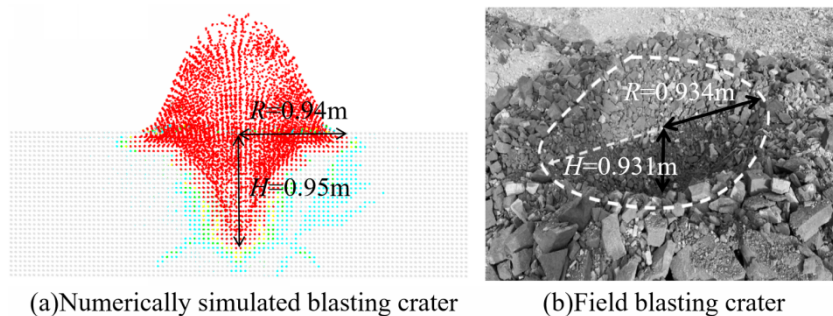


图5 现场试验与数值模拟爆破漏斗形态对比图

Fig. 5 Comparison of blasting crater morphology between field tests and numerical simulation

表6 爆破漏斗数据统计

Table 6 Statistical data of numerical simulation results of blasting crater

Data source	Burial Depth/m	Crater Depth/m	Crater Radius/m	Crater Volume/m ³
Numerical simulation	1.0	0.95	0.94	1.087
Field test	1.0	0.931	0.934	1.043

炮孔间距及不耦合系数是影响预裂效果的两个关键参数^[25], 为系统分析其影响, 通过 SPH-FEM 耦合方法建立了考虑不同炮孔间距及不耦合系数 2 个因素的三孔预裂爆破数值模型。鉴于预裂爆破装药段长度远大于其半径, 在此条件下, 岩体的主要变形特征为径向与切向变形, 轴向变形较为有限, 建模时可将相关力学分析简化为平面应变问题以提高计算效率^[26]。在实际工程应用中, 若孔深较大或装药长度显著增加时, 可进一步优化模型或通过三维模型进行验证。炮孔直径设置为 150 mm, 考虑到现场预裂爆破所用炸药为 $\Phi 32$ mm \times 300 mm 的 2 号岩石乳化炸药, 将装药直径 d 变化区间确定为 32~128 mm (分别为 32、64、96、128 mm), 对应不耦合系数为 4.69、2.34、1.56、1.17。根据矿山原有预裂爆破设计参数, 通过覆盖工程中实际可能采用的孔距范围, 确定炮孔间距变化区间为 0.8~1.6 m (分别为 0.8、1.0、1.2、1.4、1.6 m)。数值模型包括岩体、水和炸药三部分, 以 0.8 m 孔距为例, 模型尺寸为 4 m \times 2 m, 数值模型示意图如图 6。

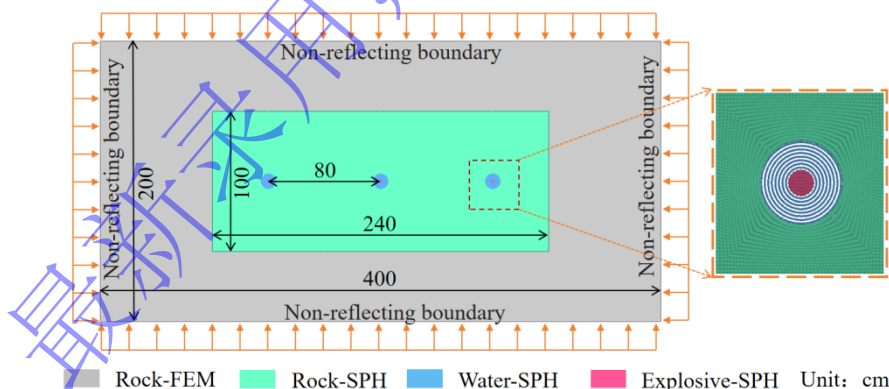


图6 SPH-FEM 数值模型示意图 (以 80 cm 为例)

Fig. 6 Schematic of the SPH-FEM numerical model (taking 80 cm as an example)

2.2 最佳预裂孔距

在不耦合系数为 2.34 条件下, 选取孔间裂纹贯通与未贯通的两组典型工况 (预裂孔距分别为 1.4 m 和 1.6 m) 进行应力演化规律分析, 应力叠加过程如图 7。

在预裂爆破初始阶段 ($t = 40 \mu\text{s}$ 左右), 炸药起爆后产生的高能爆炸载荷首先作用于孔内水介质, 爆炸能量迅速转化为高幅值压力波作用于炮孔壁, 使孔周岩体在极短时间内承受强烈冲击载荷。两种工况下孔壁附近均形成以强破坏为主要特征的破碎区; 在 $t = 160$

μs 左右, 孔周应力峰值迅速衰减, 随着爆炸应力波继续向外传播, 破碎区外侧岩体受拉伸应力作用形成裂隙区; 在 $t = 240 \mu\text{s}$ 时, 图 7 (a) 中相邻炮孔产生的爆炸应力波相遇并发生明显叠加, 致使叠加区域的应力和损伤范围显著增大, 这一模式促进了孔间裂纹的贯通。而图 7 (b) 中应力波在 $t = 280 \mu\text{s}$ 时相遇, 且应力波叠加效果明显下降, 主要原因在于该参数条件下炮孔间距过大, 导致应力波传播至孔间区域时已消耗大量炸药能量, 应力水平不足以促使裂纹贯通; 在 $t = 400 \mu\text{s}$ 时, 随着爆炸能量不断耗散, 应力波叠加效应消失, 孔间区域内应力水平明显降低并逐渐趋于稳定。

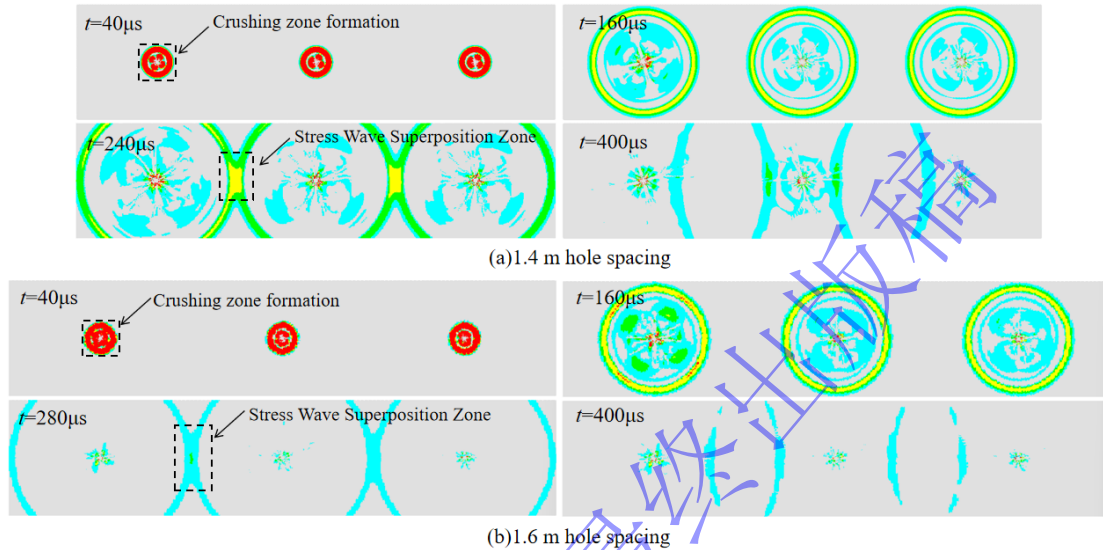


图 7 应力叠加演化过程

Fig. 7 Evolution process of stress superposition

为避免仅依赖单一判据对预裂成缝效果进行定性判断, 采用基于有效应力与损伤变量的联合判定方法。其中, 损伤变量 D 用于描述岩体在爆破荷载作用下的累积破坏程度, 反映裂纹扩展范围及贯通情况; 峰值有效应力则用于表征爆炸应力波在孔间区域的叠加强度, 并判断岩体是否达到强度破坏所需的应力阈值。通过两种判据的协同分析, 系统评价不同参数条件下预裂爆破的成缝质量与围岩损伤特征。不同孔距下的裂纹分布特征如图 8 所示, 裂纹长度及破碎区半径统计数据见图 9。基于现有研究^[27], 当损伤变量接近峰值区间 ($D = 0.6$) 时, 岩石应力-应变响应已达到极限状态, 可视为宏观裂纹产生。当损伤变量 D 增大至 1.0 时, 材料内部损伤累积已达到高度发展阶段, 岩体完整性与承载能力显著削弱, 可将对应区域判定为破碎区^[29]。由图 8、9 可知, 孔距为 0.8 m 时两炮孔连线垂直方向出现明显次生裂纹, 裂隙区呈现较大程度的重叠, 裂纹扩展平均长度仅为 34.5 cm, 表明该孔距条件下炸药能量利用率偏低; 孔距为 1.0、1.2 m 时, 裂纹扩展平均长度分别提高至 48.75、48.83 cm, 但裂隙区仍有较多次生裂纹产生, 保留岩体损伤程度较大; 而 1.4 m 孔距条件下, 裂纹扩展平均长度提升至 49.48 cm, 且在孔间裂纹实现完整贯通的同时基本未产生次生裂纹, 预裂爆破效果明显优于其他孔距条件, 炸药能量得到充分有效利用; 当孔距进一步扩大至 1.6 m 时, 由于炮孔间有效应力不足, 应力波难以实现有效叠加, 孔间裂纹无法贯通, 爆破成缝效果显著下降。在破碎区尺度方面, 除 0.8 m 孔距条件下破碎区半径相对较大 (20.36 cm) 外, 孔距为 1.0 m~1.6 m 时破碎区半径分别为 18.58、18.26、17.73、17.11 cm, 表明当炮孔间距大于 0.8 m 时, 孔距变化对预裂爆破破碎区形成的影响较小。

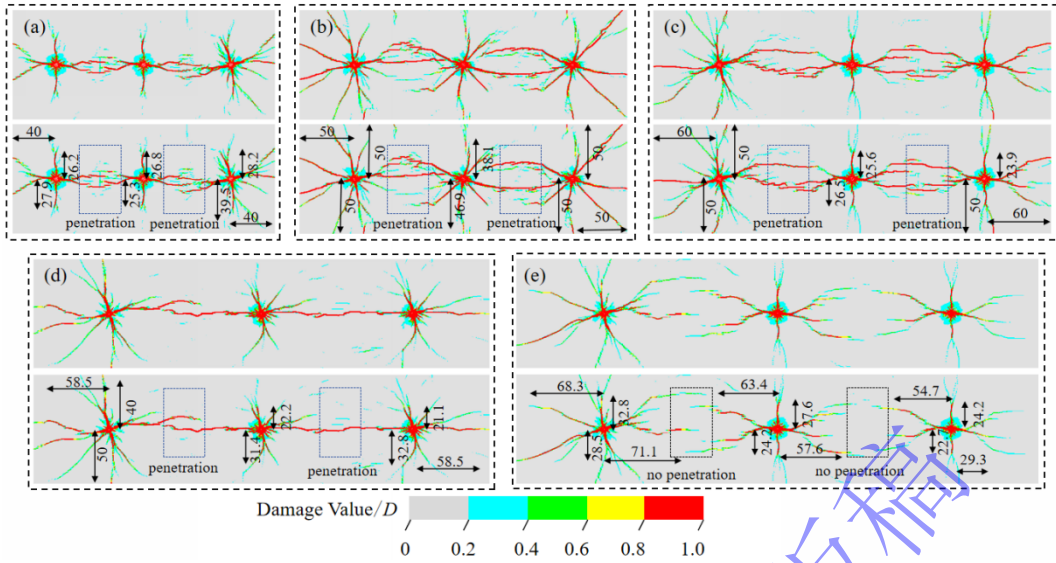


图 8 不同孔距下裂纹扩展尺度及形态图(a) 80 cm;(b) 100 cm;(c) 120 cm;(d) 140 cm;(e) 160 cm
Fig. 8 Crack propagation morphology and scale under different borehole spacings (a) 80 cm;(b) 100cm;
(c) 120 cm;(d) 140 cm(e)160 cm

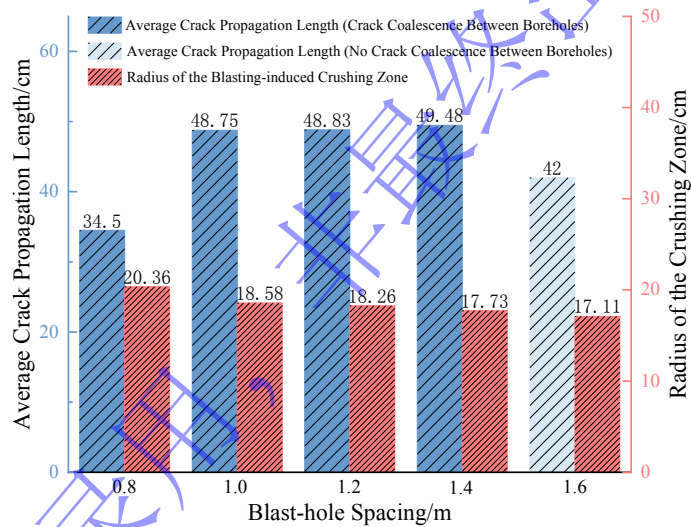


图 9 不同孔距下裂纹扩展平均长度及破碎区半径

Fig. 9 Average crack propagation length and crushing zone radius under different borehole spacings

为进一步分析炮孔间距对预裂爆破成缝效果的影响，在裂隙区范围内提取测点进行有效应力分析，测点选取示意图如图 10。依据破碎区半径分析所得结论，将 L_{10} 测点设于距离炮孔中心 15 cm 处， L_1 测点设于两炮孔连线中点处，其余测点按等距离布置。

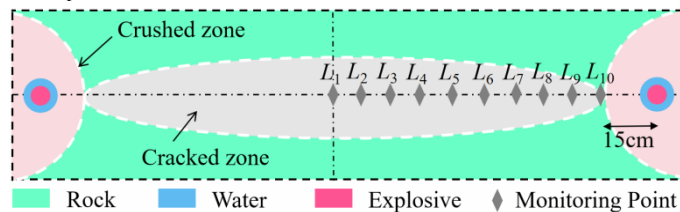


图 10 测点选取示意图

Fig. 10 Schematic diagram of monitoring point selection

由图 11 应力变化曲线可知，孔距在 0.8 ~ 1.4 m 时， L_1 测点处受应力波叠加效应影响，其峰值有效应力于最低应力点分别提高了 9.0MPa、6.4 MPa、5.6 MPa、5.2 MPa。这种应力

波叠加效应促进了爆破裂纹的扩展,显著提升了孔间区域的能量传递效率;而当孔距增大至 1.6 m 时,各测点峰值有效应力显著降低, L_{10} 至 L_1 测点峰值有效应力随着距炮孔中心距离的增加逐渐衰减,两炮孔连线中心处未发生明显的应力波叠加效应,且 L_1 、 L_2 测点处峰值有效应力未能达到岩体抗拉强度,孔间裂纹贯通能力明显不足。因此,综合考虑爆破能效及保留岩体损伤等因素,选取 1.4 m 孔距作为爆破参数,可兼顾成缝效果与损伤控制。

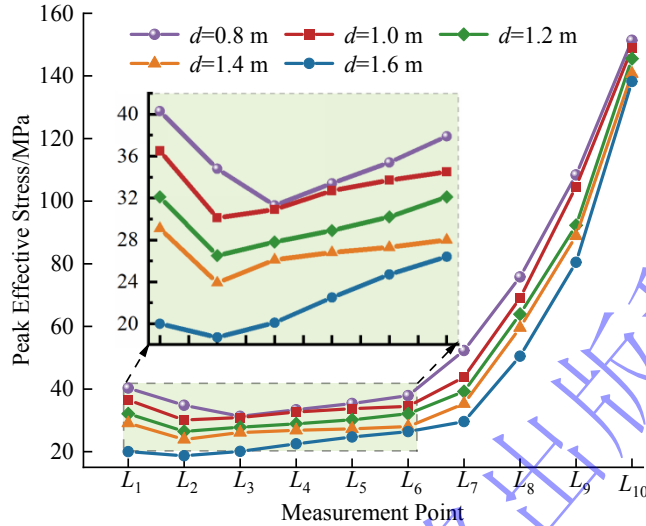


图 11 孔距变化对应的峰值有效应力曲线

Fig. 11 Peak effective stress curves corresponding to variations in borehole spacing

2.3 最佳不耦合系数

为确定含水炮孔预裂爆破的最优能量利用条件,对不同不耦合系数下的裂纹尺度进行分析,裂纹分布特征如图 12 所示,裂纹长度及破碎区半径统计数据见图 13。由图 12、13 可知,当不耦合系数为 1.17 时,裂纹扩展平均长度为 55.25 cm,破碎区半径达到 21.18 cm,破碎区半径相较于不耦合系数为 1.56-4.69 时分别增大 2.81、3.45、6.51 cm,炸药能量过多地消耗于破碎区的形成上,炸药利用率低的同时也不利于控制保留岩体的损伤范围;随着不耦合系数的增大,破碎区半径显著收缩,不耦合系数为 1.56、2.34 时的破碎区半径分别降至 18.37、17.25 cm,且裂纹平均扩展长度仍保持在较高水平,分别为 51.59、49.48 cm,炮孔间裂纹均能有效贯通。其中,不耦合系数为 2.34 时,两炮孔连线中心区域基本未出现次生裂纹,与不耦合系数为 1.56 时相比经济效益更高且能量释放更为可控;随着不耦合系数增大至 4.69 时,预裂爆破成缝效果显著下降,裂纹平均扩展长度仅为 32.61 cm,孔间裂纹未能贯通。

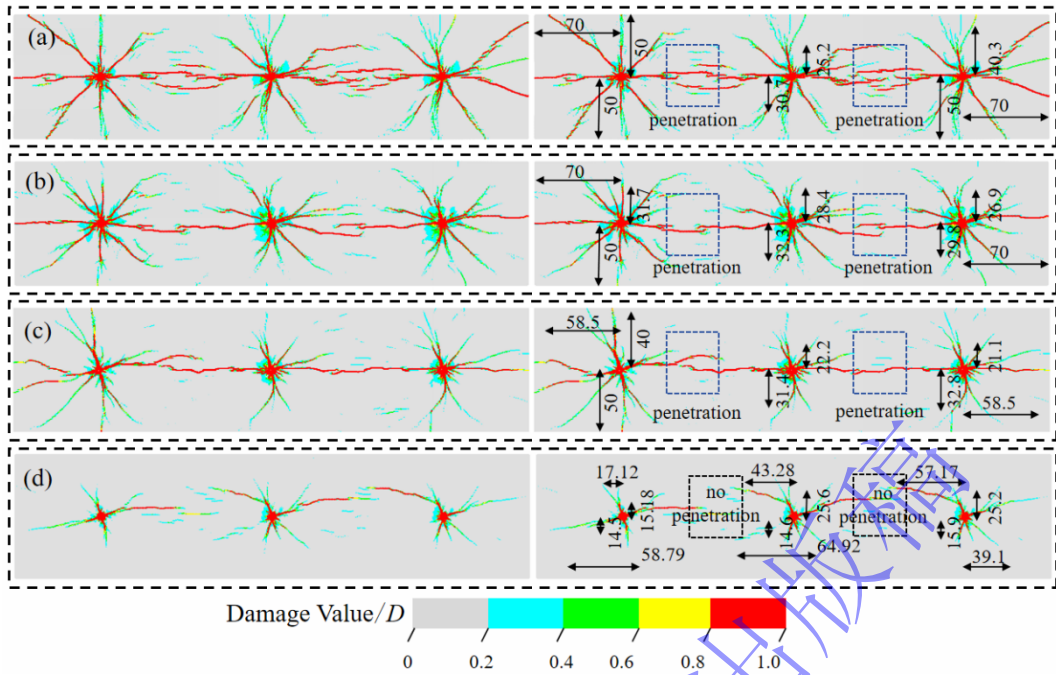


图 12 不同不耦合系数下裂纹扩展尺度及形态图(a) 1.17;(b) 1.56;(c) 2.34;(d) 4.69
Fig. 12 Crack propagation scale and morphology at different uncoupling coefficients
(a) 1.17;(b) 1.56;(c) 2.34;(d) 4.69

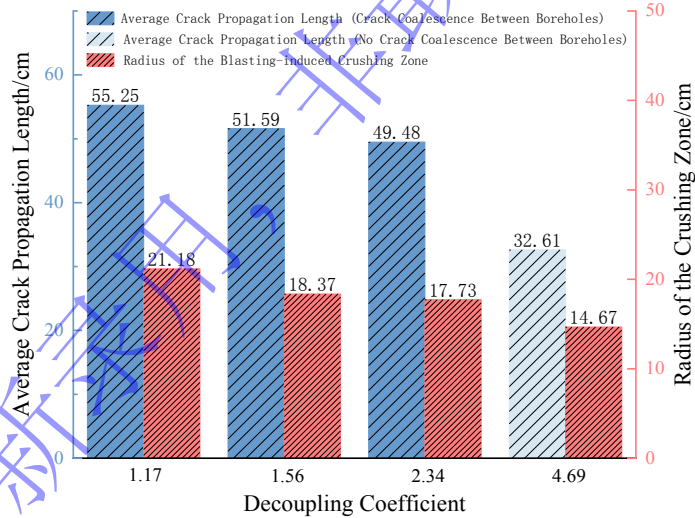


图 13 不同不耦合系数下裂纹扩展平均长度及破碎区半径

Fig. 13 Average crack propagation length and crushing zone radius under different uncoupling coefficients

依据上节测点提取方法进行有效应力分析，应力变化曲线如图 14 所示。由图 14 可知，不耦合系数为 1.17 条件下， L_{10} 测点峰值有效应力达 165.3 Mpa，由于炸药能量大量用于孔周岩体的破碎，导致其峰值有效应力沿径向迅速衰减，爆破效果较差；当不耦合系数为 1.56 和 2.34 时，峰值有效应力衰减速度有所降低，孔间能量传递能力得到改善。现有研究表明，岩石动态抗拉强度一般是其静态抗拉强度的 3 倍^[31]。在此基础上，两组参数条件下的应力最低点均超过岩体的抗拉强度，具备形成连续贯通裂缝的应力条件。其中，不耦合系数为 2.34 时的最小峰值有效应力为 23.9 MPa，相较于不耦合系数为 1.56 时下降了 3.8 MPa，更利于减少保留岩体损伤；当不耦合系数进一步增大至 4.69 时， L_1 、 L_2 测点处峰值

有效应力分别降至 19.5、20.0 MPa，未能达到岩体抗拉强度要求。综合分析，不耦合系数为 2.34 时的预裂爆破方案最优，其余参数下均难以达到良好的预裂爆破效果。

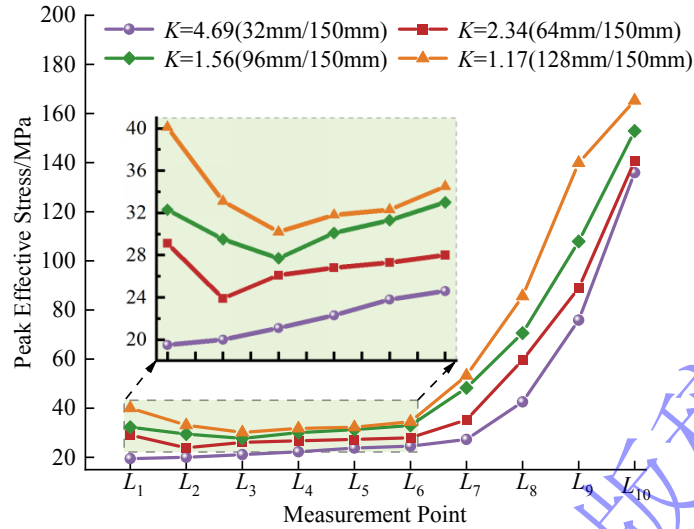


图 14 不耦合系数变化对应的峰值有效应力曲线

Fig. 14 Peak effective stress curves corresponding to variations in decoupling coefficient

3 现场试验

3.1 试验方案

基于数值模拟结果，选取 1.4 m 孔距、不耦合系数为 2.34 的参数组合进行预裂爆破现场试验。试验地点选取具有代表性的富水区域，采用 $\Phi 150$ mm 潜孔钻机进行布孔，炸药为 $\Phi 32$ mm \times 300 mm 的 2 号岩石乳化炸药。钻孔完成后，核查孔径、孔距等关键参数以确保其符合设计要求，现场水孔预裂爆破试验过程如图 15 所示。

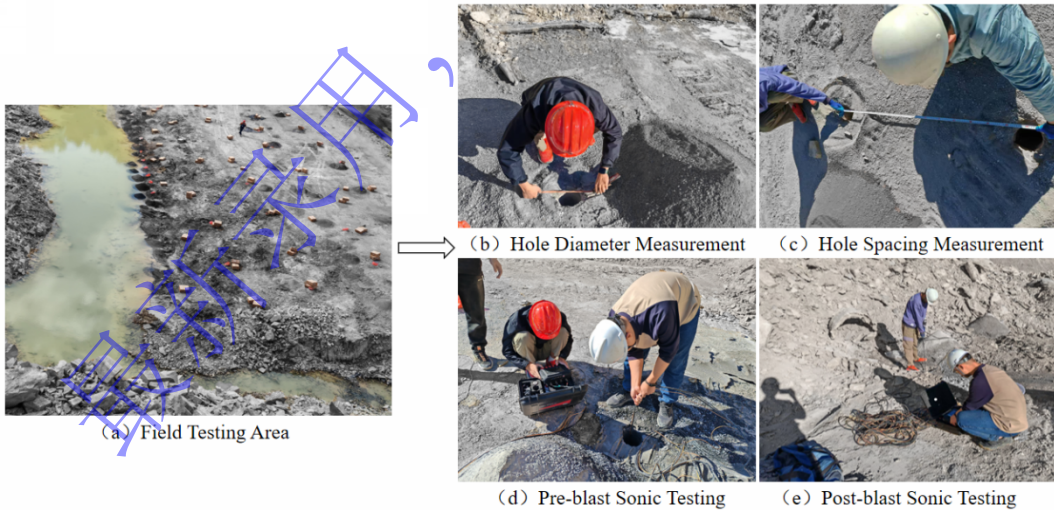


图 15 现场爆破试验流程

Fig. 15 Flowchart of field blasting test procedures

在爆破前后，采用全孔壁声学监测系统分别对常规爆破及预裂爆破的岩石进行了“一孔三测”的声波测试试验，所得测试结果取平均值以保证测试结果的可靠性^[34]，监测孔布置于预裂区段后方靠近边坡 4 m 位置，并与水平向左方向呈 75° 夹角，依据声学检测孔成孔规范，检测孔孔径设计不得小于 50 mm，实际施工采用 $\Phi 150$ mm 钻头，声波测试孔位置示意图如图 16 所示。

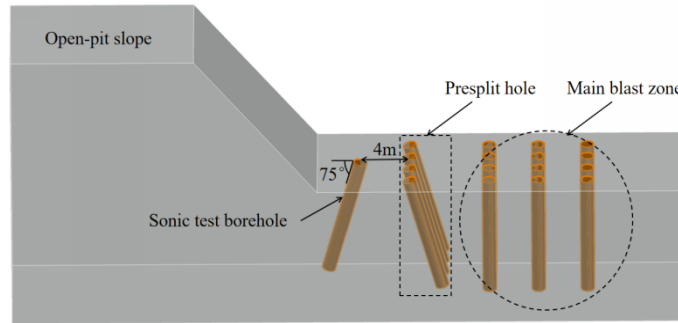


图 16 声波测试孔位置示意图

Fig. 16 Schematic diagram of the location of sonic test boreholes

3.2 现场试验结果分析

预裂试验结果表明，1.4 m 孔距下水孔预裂爆破成功形成了连续贯通的预裂缝，爆后效果如图 17 所示。预裂缝周边损伤区域较小，岩体完整性保持较佳。由于在高陡边坡进行半孔率检测时，作业人员需攀爬垂直岩壁实施测量，不仅显著降低工作效率且存在高空坠落等安全隐患。工程实践中常采用残留半孔数量占比进行半孔率估算，作为传统检测方式的补充。经测量，预裂爆破后半孔率提升至 85%，且未观察到显著的超挖现象。半孔率统计结果见表 7。

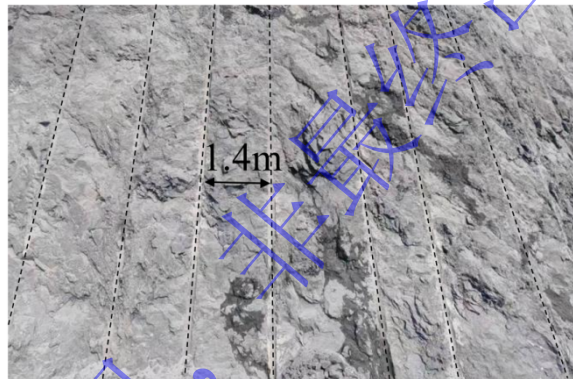


图 17 1.4 m 孔距下预裂爆破爆后效果图

Fig. 17 Post-blasting effect of presplit blasting with a borehole spacing of 1.4 m

表 7 半孔率统计表

Table 7 Half-hole ratio statistics

Spacing/m	Number of Presplit Holes/Unit	Number of Qualified Half-Holes/Unit	Half-Hole Ratio/%
1.4	20	17	85

声波测试结果如图 18 所示。比较常规爆破与水孔预裂爆破的声波测试降低率发现，常规爆破的声波降低率平均值为 33%，水孔预裂爆破声波降低率平均值为 15%。常规爆破声波降低率显著高于预裂爆破，表明预裂爆破可以有效降低保留岩体的损伤。试验结果与数值模拟所得结论一致，验证了所选爆破参数的合理性与工程可行性。

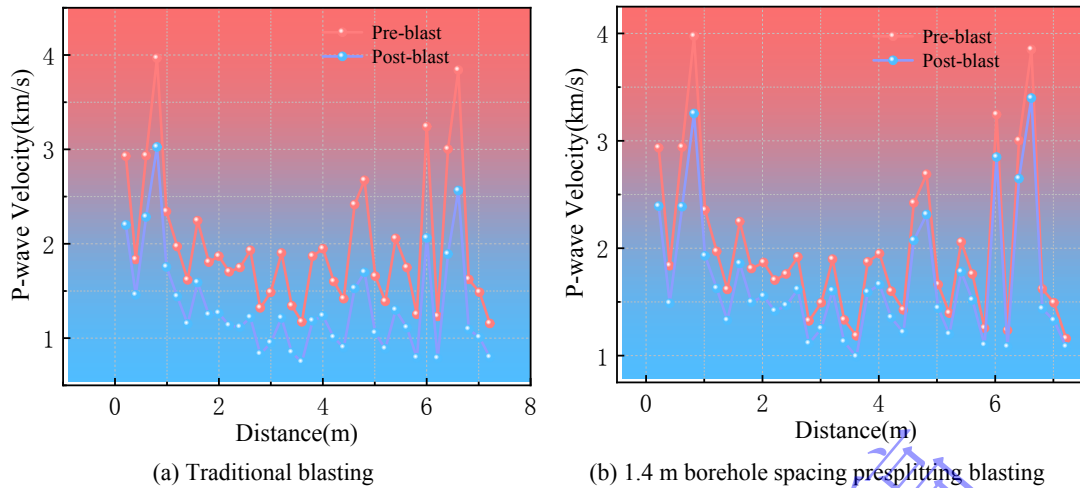


图 18 声波速度测试曲线

Fig. 18 Velocity curve of acoustic wave testing

4 结 论

本研究围绕富水条件下预裂爆破效果不佳的实际问题, 构建了 SPH-FEM 耦合动力模型, 揭示了含水炮孔爆轰能量传播与裂纹贯通规律, 为含水炮孔预裂爆破孔距与不耦合系数优化提供了借鉴。研究结论如下:

(1) 通过基于 SPH-FEM 的数值模拟所得爆破漏斗破坏形态与现场结果基本一致, 并在此基础上研究了不同孔距与不耦合系数下的含水炮孔预裂爆破问题。证明该模型是合理、有效的, 且具有良好的工程实用性, 可推广应用于实际工程中含水炮孔预裂爆破的问题。

(2) 含水炮孔预裂爆破中, 存在包含孔距与不耦合系数在内的最优参数组合。孔距或不耦合系数取值过小, 易导致炸药能量过度集中于孔周区域, 造成岩体过度破碎; 取值过大时, 应力波则难以实现有效叠加, 孔间裂缝无法贯通。

(3) 采用峰值有效应力加损伤变量的联合判据, 综合破碎区半径、裂纹贯通长度及有效应力分布等指标确定, 1.4 m 孔距、不耦合系数 2.34 的参数组合可在成缝质量与岩体损伤控制之间取得最优平衡。

参考文献:

- [1] 高瑞, 赵鸿杰, 徐冰琪, 等. “射流+爆轰”微差复合爆破定向造缝机制及其全过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(01): 81-98.
GAO R, ZHAO H J, XU B Q, et al. Research on mechanism of directional slit-making and the whole process of “jet+detonation” micro-differential composite blasting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(01): 81-98.
- [2] 于斌, 郜阳, 李勇, 等. 坚硬顶板复合爆破定向造缝技术及工程应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(01): 126-138.
YU B, TAI Y, LI Y, et al. An innovative technology of directional roof slitting by composite blasting and an engineering application [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(01): 126-138.
- [3] 张伟, 王建国, 王勉, 等. 基于 RHT 本构模型的连续装药预裂爆破孔距优化研究[J]. 高压物理学报, 2025, 39(01): 111-120.
ZHANG W, WANG J G, WANG M, et al. Optimization study of pre-splitting hole spacing for continuous charging based on RHT constitutive model [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(01): 111-120.

- [4] 李祥龙, 杨长辉, 王建国, 等. 基于模型试验的预裂孔爆破参数优选[J]. 高压物理学报, 2022, 36(02): 190-196.
LI X L, YANG C H, WANG J G, et al. Parameter optimization of presplitting blasting based on model test [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(02): 190-196.
- [5] 李育朋, 郭丽安, 胡盼, 等. 岩体裂隙分布特征对预裂爆破成缝效果的影响及控制[J/OL]. 爆破, 1-20[2026-01-29].
LI Y P, GUO L A, HU P, et al. Influence and control of distribution characteristics of rock mass fractures on fracture-forming effect of presplit blasting [J/OL]. Blasting, 1-20[2026-01-29].
- [6] 钟冬望, 陶好好, 李琳娜, 等. 涉水边坡预裂爆破参数优化试验研究[J]. 爆破, 2025, 42(02): 31-43+128.
ZHONG D W, TAO H H, LI L N, et al. Experimental study on optimization of presplitting blasting parameters for water-adjacent slopes [J]. Blasting, 2025, 42(02): 31-43+128.
- [7] 苗勤书, 李义, 王成. 炮孔水压预裂爆破的实验研究[J]. 工程爆破, 1998, (04): 20-24.
MIAO Q S, LI Y, WANG C. Experimental study on hole pre-splitting blasting with water pressure [J]. Engineering Blasting, 1998, (04): 20-24.
- [8] 李书萱, 王雁冰, 王宝珠, 等. 水耦合装药不耦合系数对爆破效果的影响研究[J]. 爆破, 2021, 38(03): 6-9+18.
LI S X, WANG Y B, WANG B Z, et al. Influence of decoupling coefficient of water-coupled charge on blasting effect [J]. Blasting, 2021, 38(03): 6-9+18.
- [9] LI X D, LIU K W, SHA Y Y, et al. Experimental and numerical investigation on rock fracturing in tunnel contour blasting under initial stress [J]. International Journal of Impact Engineering, 2024, 185: 104844.
- [10] 李潜, 李海波, 傅帅旸, 等. 高地应力下双孔爆破成缝最优孔间距研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(03): 678-690.
LI Q, LI H B, FU S Y, et al. Study on the most optimistic hole spacing for double-hole blasting under high in-situ stresses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(03): 678-690.
- [11] HU Y G, LU W B, WU X X, et al. Numerical and experimental investigation of blasting damage control of a high rock slope in a deep valley [J]. Engineering Geology, 2018, 237: 12-20.
- [12] 史腾达, 陈福振, 严红, 等. 基于 SPH-FEM 耦合方法的柔性导爆索分离装置爆炸分离过程数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(11): 39-52.
SHI T D, CHEN F Z, YAN H, et al. Numerical simulation of explosive separation of mild detonating fuse based on coupling algorithm of smoothed particle hydrodynamics with finite element method [J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(11): 39-52.
- [13] HUO X F, QIU X Y, SHI X Z, et al. Crack propagation and distribution characteristics of deep-buried rock masses under water-coupled presplit blasting [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2025, 329: 111600.
- [14] 刘浩杉, 王建国, 宋永康, 等. 高地应力下随机节理岩体单孔爆破响应特征模拟研究[J/OL]. 工程科学与技术, 1-15[2026-01-29].
LIU H S, WANG J G, SONG Y K, et al. Numerical investigation of single-hole blasting response in randomly jointed rock masses under high in-situ stress [J/OL]. Advanced Engineering Sciences, 1-15[2026-01-29].
- [15] 汪腾, 郑光, 郑宇轩, 等. 基于不同本构模型下的白砂岩动态力学性能仿真分析与实验验证[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(12): 108-126.
WANG T, ZHENG G, ZHENG Y X, et al. Simulation analysis and experimental verification of dynamic mechanical properties of white sandstone based on different constitutive models [J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(12): 108-126.
- [16] 张鑫, 刘泽功, 常帅, 等. 爆破荷载作用下煤岩本构模型参数特性研究[J]. 振动与冲击, 2025, 44(05): 263-277.

- ZHANG X, LIU Z G, CHANG S, et al. Parametric characteristics of coal rock constitutive model under blasting load [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2025, 44(05): 263-277.
- [17] 谢理想, 赵光明, 孟祥瑞. 岩石在冲击载荷下的过应力本构模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(S1): 2772-2781.
- XIE L X, ZHAO G M, MENG X R. Research on excess stress constitutive model of rock under impact load [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(S1): 2772-2781.
- [18] 莫云, 胡新丽, 崔德山, 等. 砂化白云岩 Hoek-Brown 准则参数取值方法研究及其岩体力学参数估算[J]. *岩土力学*, 2025, 46(01): 257-265.
- MO Y, HU X L, CUI D S, et al. A method for determining Hoek-Brown criterion parameters and estimating mechanical parameters of arenated dolomite masse [J]. *Rock and Soil Mechanics* 2025, 46(01): 257-265.
- [19] DEGHAN B M, MOHANTY B. Numerical simulation of stress wave induced fractures in rock, *International Journal of Impact Engineering* [J], 2012, 40-41: 16-25.
- [20] 闫秋实, 常松. 水下爆炸三维数值模拟特征参量敏感性分析[J]. *北京工业大学学报*, 2023, 49(10): 1099-1108.
- YAN Q S, CHANG S. Underwater explosion 3D numerical simulation characteristic parameter sensitivity analysis [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2023, 49(10): 1099-1108.
- [21] 王永胜, 龚蓁, 祝佳. 基于 SPH-FEM 流固耦合作用下多级拦挡坝动力响应分析[J]. *灾害学*, 2025, 1-13.
- WANG Y S, GONG Y, ZHU J. Dynamic response analysis of multi-stage blocking dam under fluid-structure interaction based on the SPH-FEM method [J]. *Journal of Catastrophology*, 2025, 1-13.
- [22] 吴国宾, 陈必港, 陈治伙, 等. 楔形掏槽爆破槽腔内岩块运动规律研究[J]. *现代隧道技术*, 2024, 61(06): 21-28+91.
- WU G B, CHEN B G, CHEN Z H, et al. Study on the movement law of rock blocks inside the cavity in wedge cut blasting [J]. *Modern Tunnel Technology*, 2024, 61(06): 21-28+91.
- [23] 杨建华, 吴泽南, 孙文彬, 等. 深部岩体爆破爆炸地震波辐射模式与能量特性数值模拟研究 (英文) [J]. *Journal of Central South University*, 2022, 29(02): 645-662.
- YANG J H, WU Z N, SUN W B, et al. Numerical simulation on radiation and energy of blast-induced seismic waves in deep rock masses [J]. *Journal of Central South University*, 2022, 29(02): 645-662.
- [24] 何德福, 王凯, 李煜程, 等. 基于 DEM-PBM 方法的不同抵抗线下爆破漏斗试验规律研究[J]. *高压物理学报*, 2025, 39(12): 102-114.
- HE D F, WANG K, LI Y C, et al. Blasting crater test law under different resistance lines based on DEM-PBM method [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2025, 39(12): 102-114.
- [25] 陈运成, 朱伟, 刘刚, 等. 宽孔距低威力混装乳化炸药耦合装药预裂爆破施工技术研究与应[J/OL]. *爆破*, 1-8[2026-01-29].
- CHEN Y C, ZHU W, LIU G, et al. Research and application of presplitting blasting technology using wide-spacing, low-velocity bulk emulsified explosives with coupled charging [J/OL]. *Blasting*, 1-8[2026-01-29].
- [26] 郝琪, 曹安业, 王常彬, 等. 硬厚致灾岩层预裂爆破防冲参数优化及工程实践[J]. *采矿与安全工程学报*, 2024, 41(03): 481-492.
- HAO Q, CAO A Y, WANG C B, et al. Optimisation of anti-impact parameters and engineering practice of pre-split blasting for hard-thick disastrous rock strata [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2024, 41(03): 481-492.
- [27] DENG Z, ZHU Z, ZHOU L, et al. Study on fracture characteristics of surrounding rock of twin tunnels under various crack inclination and location conditions [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, 194: 105084.
- [28] REN L, YU X, ZHENG M, et al. Evaluation of typical dynamic damage models used for UHPC based on

- SHPB technology [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, 269: 108562.
- [29] 孙博. 大红山铁矿盲天井一次成井掏槽爆破数值模拟研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
SUN B. Numerical simulation study on cut blasting for one-round shaft raise excavation at the Dahongshan iron mine [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.
- [30] 董源, 胡英国, 刘美山, 等. 均质岩石高边坡开挖爆破累积损伤的演化机制研究[J]. *岩土力学*, 2025, 46(09): 2929-2942.
DONG Y, HU Y G, LIU M S, et al. Cumulative damage evolution mechanism in homogeneous rock high slopes induced by excavation blasting [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2025, 46(09): 2929-2942.
- [31] 陈啸林, 张智宇, 王凯, 等. 某露天矿山预裂爆破参数优选与试验研究[J]. *高压物理学报*, 2023, 37(06): 181-194.
CHEN X L, ZHANG Z Y, WANG K, et al. Optimization and experimental study of pre-splitting blasting parameters in a certain open-pit mine [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2023, 37(06): 181-194.
- [32] 杨仁树, 李炜煜, 李永亮, 等. 3种岩石动态拉伸力学性能试验与对比分析[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(09): 3107-3118.
YANG R S, LI W Y, LI Y L, et al. Comparative analysis on dynamic tensile mechanical properties of three kinds of rocks [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(09): 3107-3118.
- [33] 夏祥. 爆炸荷载作用下岩体损伤特征及安全阈值研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2006.
XIA X. Study on damage characteristics and safety threshold of rock vibration by blast [D]. Wuhan: Institute of rock and soil mechanics, Chinese academy of sciences, 2006.
- [34] 杨朝帅, 洪开荣, 黄兴, 等. 基于跨孔声波探测技术的高地应力软岩隧道围岩扰动演化规律研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2025, 45(S1): 42-50.
YANG C S, HONG K R, HUANG X, et al. Disturbance patterns of surrounding rock of soft rock tunnels in high geo-stress using cross-hole sonic wave testing method [J]. *Tunnel Construction*, 2025, 45(S1): 42-50.

Optimization of Borehole Spacing and Decoupling Coefficient for Presplitting Blasting in Water-Bearing Borehole

SHEN Zewei^{1,2}, LIU Haoshan^{1,2}, ZHANG Zhiyu^{1,2*}, HUANG Yonghui³, HE Defu⁴, ZHANG Shuai^{1,2}

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

2. Advanced Blasting Technology Engineering Research Center of Yunnan Province Education Department, Kunming 650093, Yunnan, China;

3. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China;

4. Faculty of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China)

Abstract: In water-bearing borehole presplitting blasting, the incompressibility and high wave impedance of the water medium significantly alter the transmission pathways of explosive energy and the rock fragmentation mechanism. As a result, traditional parameter design methods based on air-filled boreholes often lead to high overbreak ratios and excessive damage to the retained rock

mass in water-bearing strata. Taking the water-rich slope in a phosphate mine as the engineering background, this study establishes a coupled smoothed particle hydrodynamics-finite element method (SPH-FEM) numerical model. The model is employed to systematically investigate the propagation characteristics of blast-induced stress waves, rock mass damage evolution, and crack propagation behavior under different borehole spacings and decoupling coefficients. The results indicate a strong correlation between the superposition of stress waves from adjacent boreholes and the coalescence of presplitting cracks. When the borehole spacing is 1.4 m and the decoupling coefficient is 2.34, the average crack propagation length reaches 49.48 cm, enabling the formation of regular and continuous through-going presplitting cracks while effectively suppressing excessive crushing around the borehole wall and the development of secondary cracks. Field tests further validate the reliability of the numerical simulations: Utilizing the optimized parameters, the half-hole rate of presplitting blasting in water-bearing borehole increases to 85%, and the reduction rate of acoustic wave velocity decreases by 18% compared to conventional blasting, demonstrating favorable damage control performance and crack-forming effectiveness under water-bearing conditions. The findings provide a useful reference for the design of presplitting blasting parameters in complex hydrogeological environments.

Keywords: presplitting blasting; water-bearing borehole; SPH-FEM; borehole spacing; decoupling coefficient

最新录用，
非最终出版稿件