

软硬互层岩体台阶爆破间隔装药效应的数值模拟 与试验研究*

贾盈鑫^{1,2}, 和铁柱², 杨国梁¹, 刘强², 韩子默^{1,2}, 马明雪¹

(1. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083;

2. 保利民爆哈密有限公司, 新疆 哈密 839000)

摘要: 软硬互层岩体因岩层力学性质差异显著, 在露天台阶爆破中易出现软岩过碎、硬岩破碎不足和爆堆块度离散等问题。为优化爆炸能量分配并改善破碎效果, 以吉郎德露天煤矿为工程背景, 采用 ANSYS/LS-DYNA 建立三炮孔流固耦合模型, 对比连续装药、空气间隔装药和水间隔装药在不同间隔比例下的爆破响应, 并结合现场试验, 验证模拟结果。以软岩区峰值有效应力、硬岩区均值有效应力和损伤截面计盒维数为评价指标, 分析了不同装药结构对软硬岩层应力分布、能量分配和损伤演化的影响。在此基础上, 将软硬互层结构响应、空气/水间隔介质对比、损伤分形评价和现场块度验证相结合, 分析了间隔装药对软硬岩层爆炸能量分配及协调破碎效果的影响机制。结果表明: 间隔装药可有效调节爆炸能量沿炮孔方向的释放过程, 随着间隔比例增大, 软岩区峰值有效应力总体降低, 应力集中现象得到削弱; 硬岩区均值有效应力在 17.0% 间隔比例时最大, 说明适宜的间隔比例能够维持硬岩破碎所需应力水平, 而过大的间隔比例会降低硬岩破碎效果。综合应力响应与损伤分形特征, 17.0% 和 18.5% 的间隔比例均能较好兼顾软岩控碎与硬岩破碎, 其中 17.0% 工况时损伤截面计盒维数更优, 损伤分布更充分。现场试验结果表明, 与连续装药相比, 17.0% 间隔装药可明显缓解软岩粉碎现象, 提高爆堆块度均匀性; 其中水间隔装药爆破不均匀系数最低, 综合爆破效果最佳。研究成果可为软硬互层露天矿山台阶爆破装药结构优化及精细化爆破设计提供参考。

关键词: 软硬互层岩体; 台阶爆破; 间隔装药; 块度分析

中图分类号: TD235; O521.9

文献标识码: A

露天矿台阶爆破效果直接关系到矿岩松动质量、采装效率及边坡作业安全^[1]。对于软硬互层岩体, 由于不同岩层在强度、波阻抗及结构完整性等方面存在明显差异, 爆炸应力波在层间传播过程中易发生反射、透射与耗散^[2], 进而引起软岩区过度破碎、硬岩区破碎不足及爆堆块度不均等问题。因此, 如何通过装药结构优化改善爆炸能量在不同岩层中的分配, 是软硬互层岩体台阶爆破设计中的关键问题。

间隔装药可通过在炮孔内设置空气柱或水柱改变爆炸能量释放方式, 在削弱孔壁峰值压力、延长爆炸气体作用时间和改善破碎均匀性方面具有较大潜力。吴亮等^[3]总结了空气间隔装药爆破研究进展, 指出空气柱具有缓冲、储能和延长爆炸作用时间的效果; 张袁娟等^[4]认为间隔段位置和长度是影响台阶爆破能量分配及破碎效果的重要因素; 刘江超等^[5]研究表明合理间隔装药有利于控制围岩损伤。针对露天台阶爆破, 李章超等^[6]分析了空气间隔器长度和位置对大块率的影响。水间隔或含水炮孔爆破方面, 王浩等^[7]指出含水条件会改变炮孔内爆炸压力传递过程和应力波叠加特征。总体来看, 空气介质更有利于削弱峰值冲击, 水介质则因压缩性小、波阻抗较高, 更有利于后期压力维持和裂纹扩展。

软硬互层岩体中不同岩层强度、波阻抗及结构完整性差异明显, 爆炸应力波在层间传播时易发生反射、透射和能量重新分配。Ding 等^[8]研究表明软硬岩界面会影响应力波传播路径和裂纹扩展形态; 康玉梅等^[9]指出岩层组合关系和层间界面对软硬互层类岩石动力响应及破坏模式具有显著影响; 杨国梁等^[12]进一步说明层理结构会控制爆生裂纹扩展方向和破裂形态。已有研究为间隔装药和层状岩体爆破提供了重要参考, 但针对软硬互层台阶爆破中空气间隔与水间隔装药的对比研究仍相对不足, 软岩控碎、硬岩破碎及损伤空间分布也需结合应力响应、损伤分形和现场块度结果进行综合评价。

基于此, 本文以新疆吉郎德露天煤矿软硬互层岩体为工程背景, 采用 LS-DYNA 建立三炮孔流固耦合模型, 系统比较连续装药、空气间隔装药和水间隔装药在不同间隔比例下的有效应力分布及损伤分形特征, 并结合现场试验分析爆堆块度分布规律。通过将软硬互层岩体的差异化动力响应、空气/水间隔介质对比、损伤截面计盒维数评价和现场爆堆块度分析相结合, 揭示间隔装药对软硬岩层爆炸能量分配及协调破碎效果的影响机制。研究结果可为软硬互层岩体台阶爆破装药结构优化提供参考。

*收稿日期: 2026-05-14; 修回日期: 2026-06-11

基金项目: 新疆维吾尔自治区“天池英才”领军人才计划项目(XJTCYC2023(2)-BLMB2)

第一作者: 贾盈鑫(2001-), 男, 硕士研究生, 主要从事工程爆破研究. E-mail: jiayx5990@163.com

通讯作者: 杨国梁(1979-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石动力学研究. E-mail: yanggl531@163.com

1 数值模型建立

根据新疆吉郎德露天煤矿生产实际,建立三孔爆破数值计算模型。模型总高 14 m,台阶高度 12 m,长 10 m,宽 11 m,孔距 5 m,排距 4 m,炮孔直径 150 mm,孔深 13 m,超深 1 m,填塞段高 3 m,单元数量共计 269.5 万个。其中,超深 1 m 依据现场台阶爆破设计参数确定。超深是露天台阶爆破孔深设计中的重要参数,与底盘抵抗线、台阶底部夹制作用及底部岩体破碎效果密切相关^[13]。若超深过小,台阶底部夹制作用较强,易导致底部阻力增大并形成根底;若超深过大,则可能造成台阶底部岩体过度破碎,并增加炸药消耗。结合吉郎德露天煤矿现场生产经验,1 m 超深可较好兼顾底部岩体破碎效果和爆破能量利用效率。岩石部分采用拉格朗日算法,炸药、间隔介质和堵塞段采用 ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 算法,可在一定程度上降低爆轰产物大变形和孔内介质流动引起的网格畸变影响。孔周岩石与孔内介质之间采用流固耦合求解。模型坡面及顶面设为自由边界,其余各面设为无反射边界,以消除人工边界反射对计算结果的干扰。台阶模型尺寸如图 1 所示。

在网格划分方面,模型在炮孔周边、装药段、间隔段及软硬岩层界面附近进行局部加密,以提高爆炸荷载作用区和层间应力波传播区域的计算精度;远离炮孔的边界区域采用相对较大的网格尺寸,以兼顾计算精度和计算效率。计算过程中对单元变形、能量变化及计算稳定性进行检查,未出现影响结果判断的异常单元畸变或能量突变。由于本文主要关注不同装药结构下爆破响应的相对差异,各工况采用相同网格划分策略、边界条件和材料参数,以保证不同工况结果的可比性。

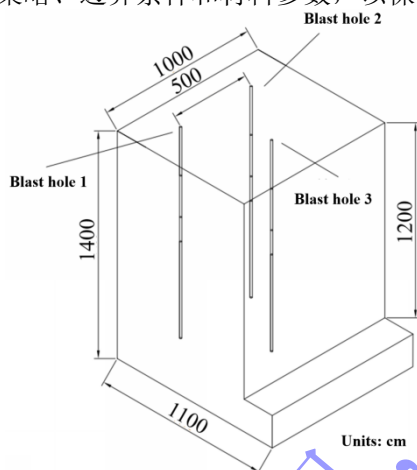


图 1 台阶模型尺寸

Fig. 1 Dimensions of the bench model

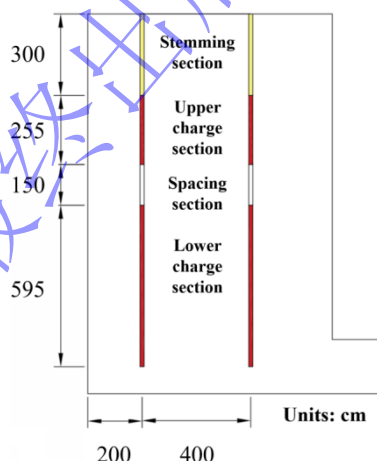


图 2 11.5%空气间隔装药炮孔模型

Fig. 2 11.5% air-decoupled charge blasthole model

为考察不同间隔介质和间隔比例对爆破响应的影响,本文建立空气间隔装药和水间隔装药两类模型(以空气间隔比例 11.5% 为例,见图 2),并以连续装药作为对照。结合现场装药条件,设置 11.5%、13.0%、17.0%、18.5% 和 20.5% 五种间隔比例,通过对比不同工况下的有效应力变化和损伤演化特征,分析装药结构调整对能量分配与破岩效果的影响,见表 1。

表 1 不同装药比例下各段长度

Table 1 Segment lengths under different charge ratios

Deck charge ratio	11.5 %	13.0 %	17.0 %	18.5 %	20.5 %
Stemming section	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Upper charge	2.55	2.49	2.34	2.28	2.20
Spacing section	1.50	1.69	2.21	2.41	2.67
Lower charge	5.95	5.82	5.45	5.32	5.13

根据现场岩性条件,软岩部分采用 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC 材料模型进行描述,并以泥岩参数作为代表,相关参数见表 2。

表 2 软岩模型参数

Table 2 Parameters of the soft rock model

$\rho_r / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E / GPa	ν	σ_c / GPa	E_1	β'	ϵ_f
2 200	8.0	0.30	0.014	0.10	0.50	0.05

硬岩部分同样采用 *MAT_RHT 材料^[14]模型。建模时参考红砂岩的典型密度、强度和变形参数,以反映硬岩区域在爆破荷载作用下的动态响应特征,RHT 模型关键参数参考已有红砂岩 RHT 模型参数敏感性分析与正交标定研究^[15]选取,相关主要参数见表 3。

表 3 硬岩 RHT 模型主要参数

Table 3 Main parameters of the hard rock RHT model

f_c/GPa	α_0	$\rho_v/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	A_1/GPa	A_2/GPa	A_3/GPa	β_c
0.086	1.12	2 060	15.86	26.61	16.26	0.014
β_t	B_0	B_1	T_1/GPa	T_2/GPa	G/GPa	p_{el}/GPa
0.019	1.68	1.68	15.84	0	10.5	0.0287
$\dot{\epsilon}c 0/(10^{-8}\text{ms}^{-1})$	$\dot{\epsilon}t 0/(10^{-9}\text{ms}^{-1})$	$\dot{\epsilon}c/(10^{-22}\text{ms}^{-1})$	$\dot{\epsilon}t/(10^{-22}\text{ms}^{-1})$	D_2	B	g_t^*
3.0	3.0	3.0	3.0	1	0.0105	0.7
N	Q_0	f_s^*	A_s	n_f	f_t^*	g_c^*
5.8	0.54	0.45	1.63	0.59	0.1	0.3
ξ	P_{comp}	A	ϵ_p^m	D_1	n	
0.3	0.55	1.6	0.01	0.053	0.56	

空气间隔及孔周空气域采用*MAT_NULL 材料模型, 定义*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程^[16], 本构模型参数^[17]如表 4 所示。

表 4 空气材料模型参数
Table 4 Parameters of the air material model

$\rho_k/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E_0/GPa	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
1.2	0.002 5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.0

水采用*MAT_NULL 材料模型定义*EOS_GRUNEISEN 状态方程^[18], 计算所采用的水材料模型参数^[19]如表 5 所示。

表 5 水材料模型参数
Table 5 Parameters of the water material model

$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	C	S_1	S_2	S_3	γ_0	E_0
1 000	1.647	0.344	-0.096	0	0.35	0

选取与矿区实际爆破条件相符的乳化炸药, 采用*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型, 并结合*EOS_JWL 状态方程^[11]对其爆轰过程进行描述, 相关参数^[17]见表 6。

表 6 炸药模型参数
Table 6 Parameters of the emulsion explosive model

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$D_e/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	P_{CJ}/GPa	A_0/MPa	B/MPa
1 210	5 662	9.7×10^3	2.144×10^5	9.4×10^3
R_1	R_2	ω	$E/(\text{J}\cdot\text{m}^{-3})$	V
4.2	0.9	0.15	4.192×10^{10}	1

2 数值模拟结果与分析

2.1 有效应力分析

为深入探究模型内部不同位置在爆破作用下的应力变化规律, 在两炮孔连线中点, 自模型顶部开始每隔 1m 选取一个测点, 共设置 14 个观测点进行应力分析, 如图 3 所示。

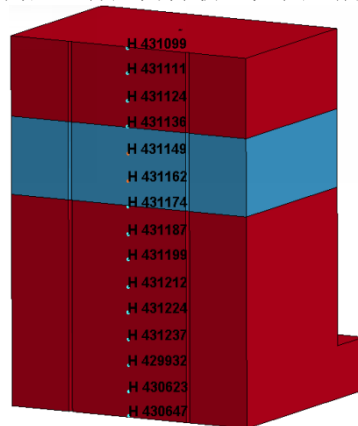


图 3 有效应力测点分布

Fig. 3 Distribution of effective stress measurement points

以 11.5 %水间隔装药工况为例, 通过后处理软件导出各测点的应力时程曲线, 并进一步将时程数据导入 Origin 绘制三维云图, 如图 4~5 所示。图中 X 轴表示爆炸作用时间, Y 轴表示测点单元距台阶底部相对距离, Z 轴表示有效应力值。为便于识别应力波在软硬互层岩体中的传播路径、集中位置与衰减过程, 提取各模型的三维应力云图底部的应力时程等高线图如图 6~11 所示。

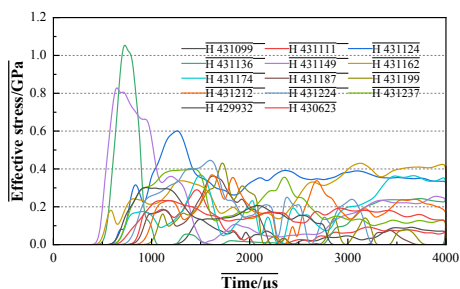


图 4 各测点应力-时程曲线 (水间隔装药、间隔比例 11.5 %)

Fig. 4 Stress time-history curves at measurement points (water-decoupled charge, decoupling ratio 11.5 %)

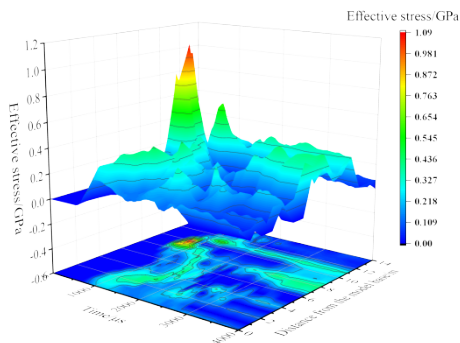
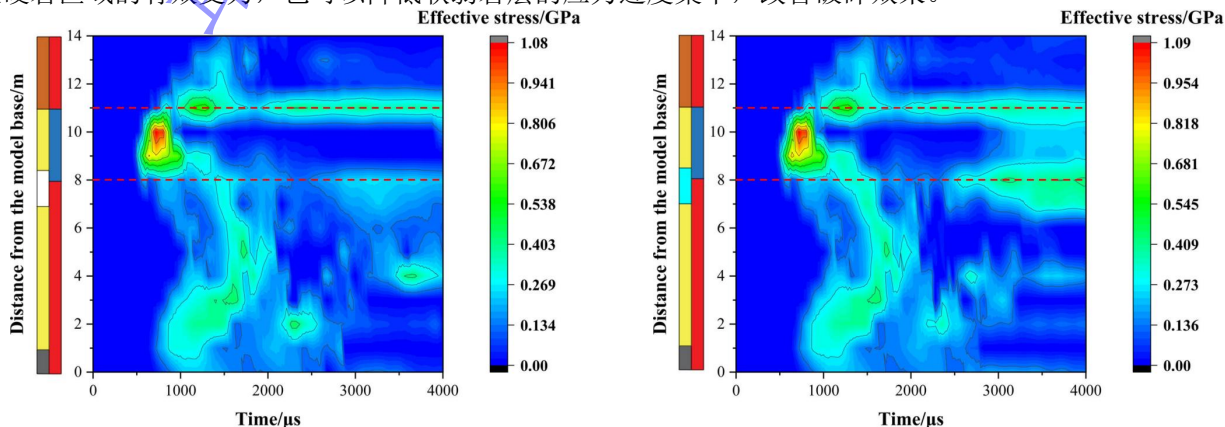


图 5 各测点应力时程云图 (水间隔装药、间隔比例 11.5 %)

Fig. 5 Stress time-history nephograms at various measurement points (water-decoupled charging, decoupling ratio 11.5 %)

图 6~图 11 的左轴标注了装药结构及岩层分布示意。左侧自上而下为堵塞段、上部装药段、间隔段、下部装药段、底部岩石段。右侧为岩体结构示意, 自上而下为上部硬岩、软岩、下部硬岩。可知, 间隔装药与连续装药在应力传播规律上存在明显差异。间隔装药工况下, 由于炮孔内轴向炸药分布发生改变, 上部装药段由于底部起爆, 沿药柱传爆, 使软弱层界面较早受到应力波的影响, 在约 550 μs 时即可到达软岩区域; 而连续装药工况中, 应力波在约 760 μs 时才作用于下部硬岩, 经历一段明显振荡后, 直至 1800 μs 才在软岩区域形成强应力集中, 且峰值应力达到 1.139 GPa。根据柱状药包端点起爆应力波传播理论^[10], 起爆后爆源处首先产生波速较高、幅值较大的压缩波 (P 波), 随后形成能够引起介质剪切变形的剪切波 (S 波)。二者沿传爆方向共同传播并相互叠加, 使孔周围岩呈现出显著能量累积效应^[17]^{[20][21]}。这就导致图 11 中应力等高线图呈现阶梯式上升, 表明柱状药包沿传爆方向传播爆破能量, 最终在偏向软岩区域产生了明显的应力集中。然而台阶上部岩石由于应力波的延迟到达, 产生破碎的时间滞后, 爆生气体难以通过已破碎的岩体继续传播, 可能会导致上部硬岩区破碎不均匀, 致使爆后块度增大。可见, 连续装药结构能够在局部产生更高峰值应力, 但能量作用更偏于集中, 上部岩体受载滞后; 相比之下, 间隔装药结构能够使爆炸应力波和爆生气体更早作用于上部岩体, 从而改善整体受载过程, 台阶上部硬岩受到上部装药段的爆炸应力产生初始压裂纹, 随后爆生气体在这些初始裂纹传播, 由于“气楔”作用, 进一步促进裂纹扩展, 使岩石破碎更为充分。适当长度的空气间隔段能够削弱局部区域的应力过度集中, 同时增强台阶岩体中、下部的局部应力响应, 使爆炸载荷由局部集中释放转变为多空间位置的相对均衡分配。

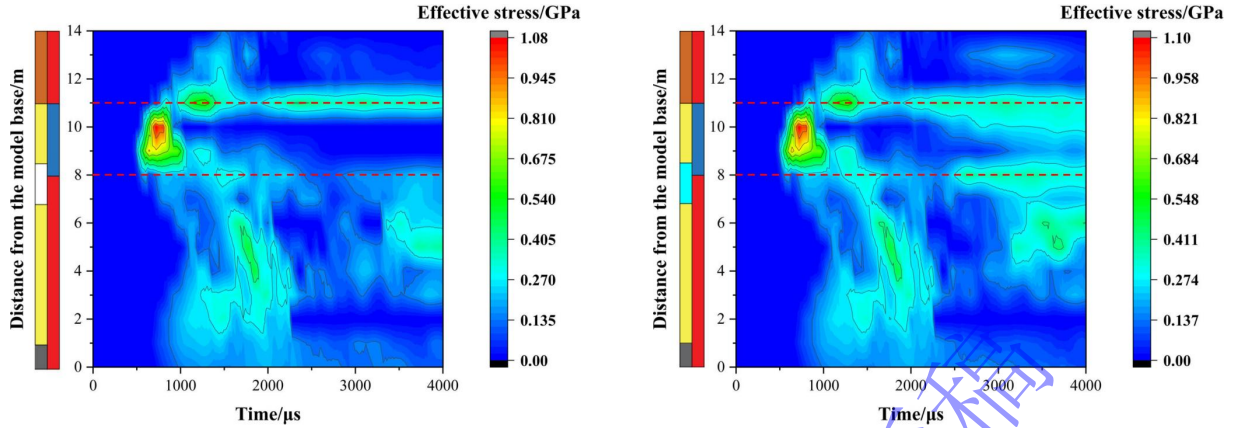
观察图 6~10, 可知在不同间隔装药工况下, 软岩区域测点大多在 800 μs 时出现应力集中。随后在 1100~1200 μs 范围内, 上部软硬岩体层理界面处出现较明显的局部应力集中现象, 之后爆炸应力波及能量沿互层界面逸散, 并在等高线图上表现为较为连续的残余应力带。当间隔比例为 11.5 % 和 13.0 % 时, 水间隔装药在下部层理界面形成的残余应力较空气间隔更明显, 表现为爆破作用后期, 水间隔装药的残余应力明显大于空气间隔装药结构; 随着间隔比例增大, 这一差异逐渐减弱, 当间隔比例为 18.5 % 时, 两类间隔介质的应力时程在下部硬岩区均表现出较强的振荡特征; 当间隔比例继续增至 20.5 % 后, 爆破作用后期的残余应力减低, 表现为应力等高线图中稀疏的应力分布。可知当间隔比例过大时, 药柱被分割后的轴向能量传递连续性降低, 应力波叠加效应减弱, 说明存在一个最优的间隔比例区间, 即能够保证硬岩区域的有效受力, 也可以降低软弱岩层的应力过度集中, 改善破碎效果。



(a) Air-spaced charge (b) Water-spaced charge

图6 间隔比例 11.5%测点位置与应力时程等高线图

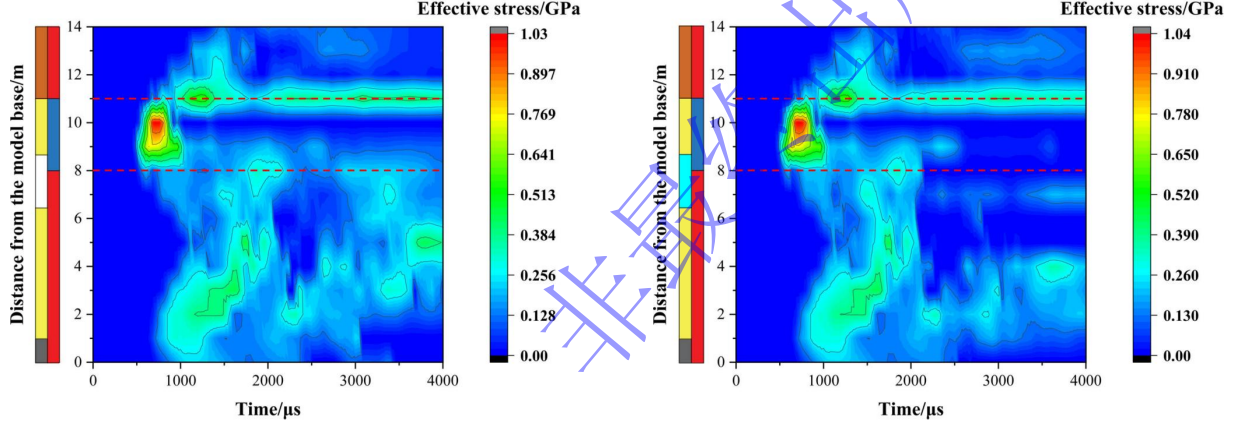
Fig. 6 Measurement point locations and stress time-history contour plot (decoupling ratio 11.5%)



(a) Air-spaced charge (b) Water-spaced charge

图7 间隔比例 13%测点位置与应力时程等高线图

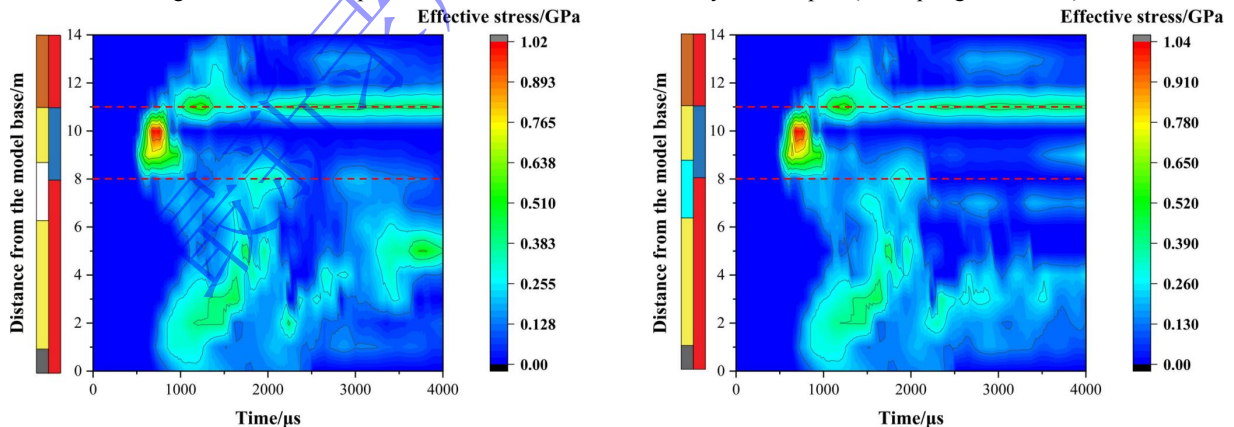
Fig. 7 Measurement point locations and stress time-history contour plot (decoupling ratio 13%)



(a) Air-spaced charge (b) Water-spaced charge

图8 间隔比例 17%测点位置与应力时程等高线图

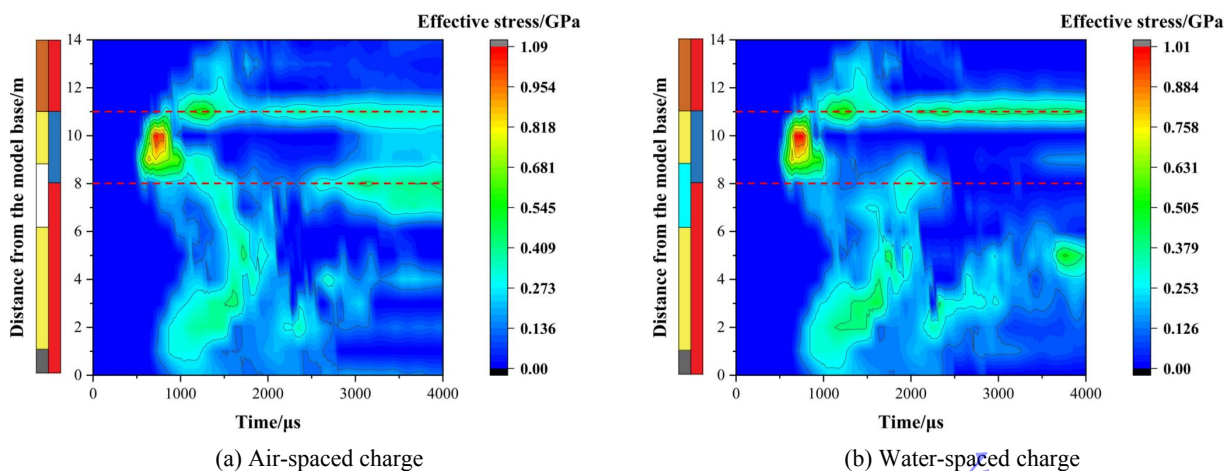
Fig. 8 Measurement point locations and stress time-history contour plot (decoupling ratio 17%)



(a) Air-spaced charge (b) Water-spaced charge

图9 间隔比例 18.5%测点位置与应力时程等高线图

Fig. 9 Measurement point locations and stress time-history contour plot (decoupling ratio 18.5%)



(a) Air-spaced charge (b) Water-spaced charge

图 10 间隔比例 20.5 %测点位置与应力时程等高线图

Fig. 10 Measurement point locations and stress time-history contour plot (decoupling ratio 20.5 %)

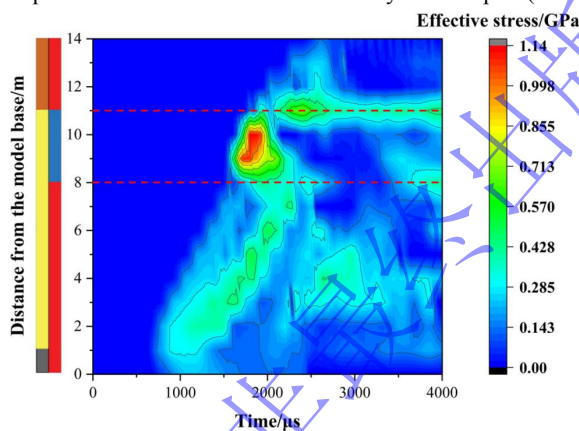


图 11 连续装药下测点位置与应力时程等高线图

Fig. 11 Measurement point locations and stress time-history contour plot (continuous charge)

由应力等高线图可知，软岩区域在达到峰值应力后衰减较快，900 μs 之后软岩岩层区基本不再出现明显的残余应力，说明软岩在爆破作用前期的应力集中阶段已发生充分破坏，后期持续承载能力较弱。因此，本文以软岩测点峰值有效应力作为评价指标。对于硬岩区域，由于其后期仍保留较明显的残余应力振荡，故选取距离台阶底部 4 m 处的测点单元有效应力均值作为评价指标。该测点位置的选取主要基于模型几何与岩性分布特征：一方面，距离台阶底部 4 m 处位于下部硬岩主要分布区域内，可代表硬岩区在爆炸荷载作用下的受力响应；另一方面，该位置避开了炮孔底部超深段及自由面附近的强边界效应，同时也不同于近孔区局部高应力集中区域，能够相对稳定地反映硬岩区的平均受力水平，选取该位置有效应力均值作为硬岩区评价指标具有一定的几何代表性。

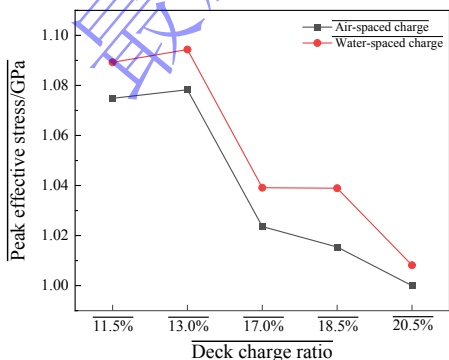


图 12 不同间隔比例下软岩峰值有效应力变化趋势
Fig. 12 Variation trend of the peak effective stress in soft rock under different decoupling ratios

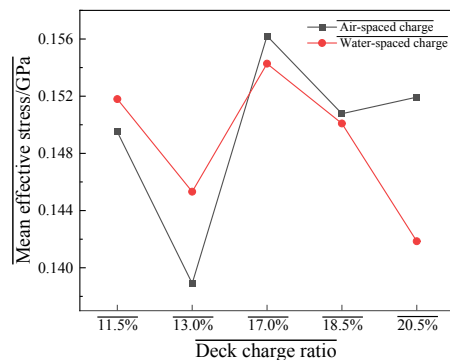


图 13 不同间隔比例下硬岩有效应力均值变化趋势
Fig. 13 Variation trend of the mean effective stress in hard rock under different decoupling ratios

图 12 为不同间隔比例下软岩峰值有效应力变化趋势，在软岩区空气间隔装药与水间隔装药的峰值应

力随间隔比例的变化表现出相似规律。峰值有效应力整体呈下降趋势，在 11.5 %和 13.0 %时保持较高水平，此后随间隔比例增加逐步降低；水间隔装药在 13.0 %附近达到较高水平，随后在 17.0 %~18.5 %区间保持相对稳定，至 20.5 %时明显下降。图 13 为不同间隔比例下硬岩有效应力均值变化曲线，可知随着间隔比例的增大，距离台阶底部 4 m 处的硬岩区域均值有效应力呈现先减小后增大再次减小的复杂趋势，在间隔比例为 17.0 %时，底部硬岩均值有效应力相对较大。结合软岩与硬岩两类有效应力指标可知，当间隔比例为 11.5 %和 13.0 %时，软岩峰值应力偏高，易引起过度破碎；当间隔比例增至 20.5 %时，软岩峰值应力和硬岩均值应力均有所降低。相比之下，17.0 %和 18.5 %两个工况在抑制软岩区过碎的同时，仍能维持较高的硬岩区受力水平，因此可视为本文条件下较优的间隔比例区间。

从应力演化过程看，连续装药条件下爆炸能量沿连续药柱集中释放，近孔区更易形成较高峰值应力，当应力波传播至软硬岩界面时，应力波发生反射与透射，且由于两种岩石的波阻抗差异^[22]，应力波波速受到影响，导致局部卸载明显不均。对于软硬互层岩体，这种作用方式容易使软岩区出现瞬时应力偏高、硬岩区后期受载不足，不利于不同岩层之间的协调破碎。间隔装药通过在上下装药段之间引入空气柱或水柱，使药柱由连续释放转变为分段耦合作用，既可削弱软岩区的瞬时过强加载，又可在硬岩区维持一定的后期受力水平，从而改善爆炸能量在不同岩层中的分配。本文中 17.0 %和 18.5 %间隔比例均表现出“软岩峰值应力下降、硬岩均值应力保持较高”的特征，说明该区间内装药结构与互层岩体动力响应之间具有较好的匹配关系；而 20.5 %工况后期硬岩残余应力明显减弱，表明过大间隔比例会削弱能量向硬岩区的有效传递。

空气间隔与水间隔的差异主要来源于介质属性。空气可压缩性较强，更有利于削弱局部峰值冲击；水介质波阻抗较高、压缩性较弱，更有利于在爆破后期维持较强的准静态作用。因此，空气间隔更偏向于“削峰”，水间隔则更有利于裂隙持续扩展，在爆堆岩石破碎均匀性控制方面可能具有优势。

从应力波传播机理看，爆炸荷载作用于软硬互层岩体时，应力波在不同岩层界面处会发生反射、透射和能量重新分配。由于红砂岩与泥岩在密度、弹性模量和波阻抗方面存在差异，应力波由硬岩传播至软岩时，部分能量进入低强度岩层并易形成局部应力集中，使软岩产生较强损伤；而由软岩传播至硬岩时，界面反射和透射作用会改变应力波传播路径和能量分布，影响硬岩区裂纹起裂和扩展。连续装药条件下，爆炸能量沿药柱连续集中释放，容易在软弱夹层附近形成局部强应力集中；间隔装药通过改变炮孔轴向装药分布，使爆炸荷载由连续集中释放转变为分段耦合作用，可削弱软岩区瞬时峰值应力，同时改善硬岩区后期受载条件，从而有利于软硬岩层协调破碎。

2.2 爆破损伤与分形特征

前文有效应力分析表明，不同装药结构改变了爆炸荷载沿炮孔轴向的释放位置和软硬岩层中的应力分布特征。应力集中区域通常对应损伤萌生和裂纹扩展的主要区域，爆破后期残余应力则会影响裂纹进一步扩展，从而增大累积损伤范围。因此，本文在应力响应分析基础上，进一步结合损伤云图和损伤截面计盒维数评价不同装药结构下岩体的损伤空间分布，以建立应力响应与损伤效果之间的对应关系。

RHT 模型中的损伤变量 D 取值范围为 0~1， D 值越大表示材料损伤程度越高。为表征爆破结束后岩体的有效损伤范围，结合 Ls -PrePost 后处理识别需求，本文取 $D \geq 0.3$ ^[12] 作为损伤区识别阈值，并在后处理过程中隐去满足该条件的单元，以获取不同工况下软岩与硬岩区域的损伤形态。岩石最终破损形态如图 14。



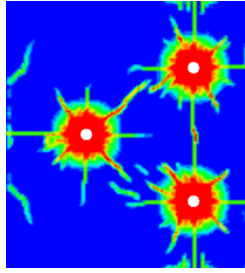
(a) Partial fragmentation morphology of hard rock

(b) Partial fragmentation morphology of soft rock

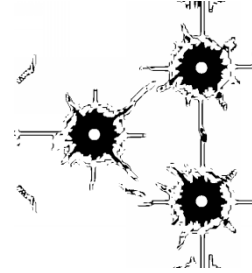
图 14 软岩及硬岩破碎形态

Fig. 14 Fragmentation patterns of soft rock and hard rock

为进一步分析不同空气间隔比例及介质对爆破效果的影响，结合前文应力分析。选取三维模型中两种典型的，间隔介质比例为 17 %、18.5 %以及连续装药共计 5 个模型进行对比分析。从计算模型底部的 2 m 处向上每隔 1 m 截取水平剖面，各计算模型截取 12 个特征面，将选取的 60 个平面进行二值化处理，像素为 546×607，得到各损伤平面经过处理后的二值化图像，如图 15 所示。



(a) Cross-sectional damage contour plot



(b) Binarized image

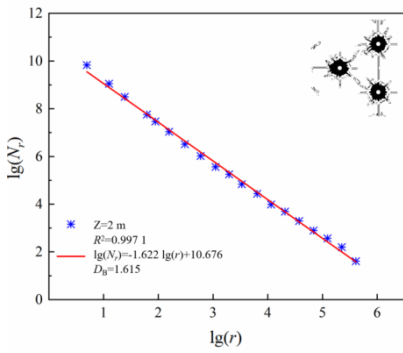
图 15 模型爆破损伤剖面二值化处理

Fig. 15 Binarized processing of blasting damage profiles in the model

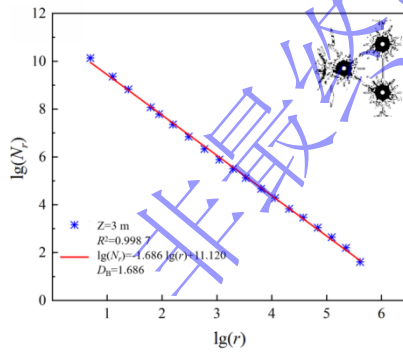
基于岩石损伤分形理论^[17], 利用 MATLAB 对不同工况的损伤截面进行计盒维数分析。具体做法为将二值化后的损伤图像导入程序, 采用不同尺度网格覆盖图像矩阵, 统计包含损伤像素的网格数, 再在双对数坐标中进行线性拟合, 以拟合直线斜率绝对值作为计盒维数 D_B 。计盒维数越大, 表明损伤区分布越复杂、裂隙网络越发育^[12]。以 18.5 % 水间隔装药工况为例, 其各高程截面的计盒维数结果见图 16。各爆破模型损伤截面标准差采用式 (1) 计算^[17]:

$$D_B = -\lim_{\lg r} \frac{\lg N_r(X)}{\lg r} \quad (1)$$

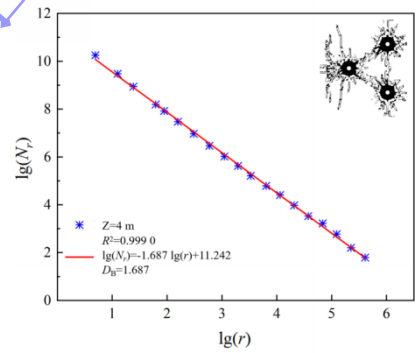
式中: D_B 为损伤截面的计盒维数值; r 为一个递减序列, 由各种矩形盒子作为子集合; $N_r(X)$ 为用大小为 r 的矩形盒子覆盖目标集合 X 时所需的最小网格数。



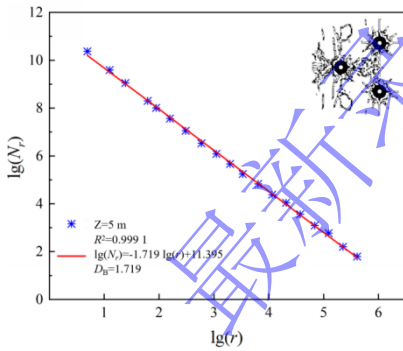
(a) $Z=2 \text{ m}$ $D_B=1.615$



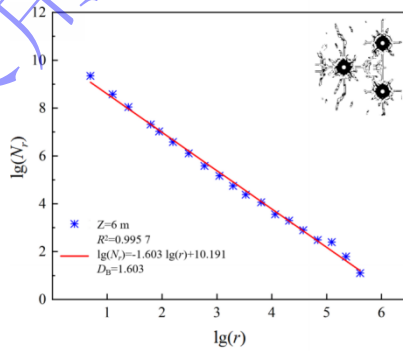
(b) $Z=3 \text{ m}$ $D_B=1.681$



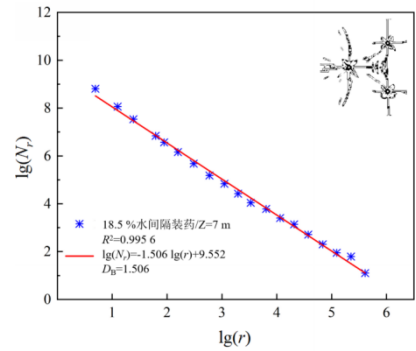
(c) $Z=4 \text{ m}$ $D_B=1.681$



(d) $Z=5 \text{ m}$ $D_B=1.715$



(e) $Z=6 \text{ m}$ $D_B=1.610$



(f) $Z=7 \text{ m}$ $D_B=1.502$

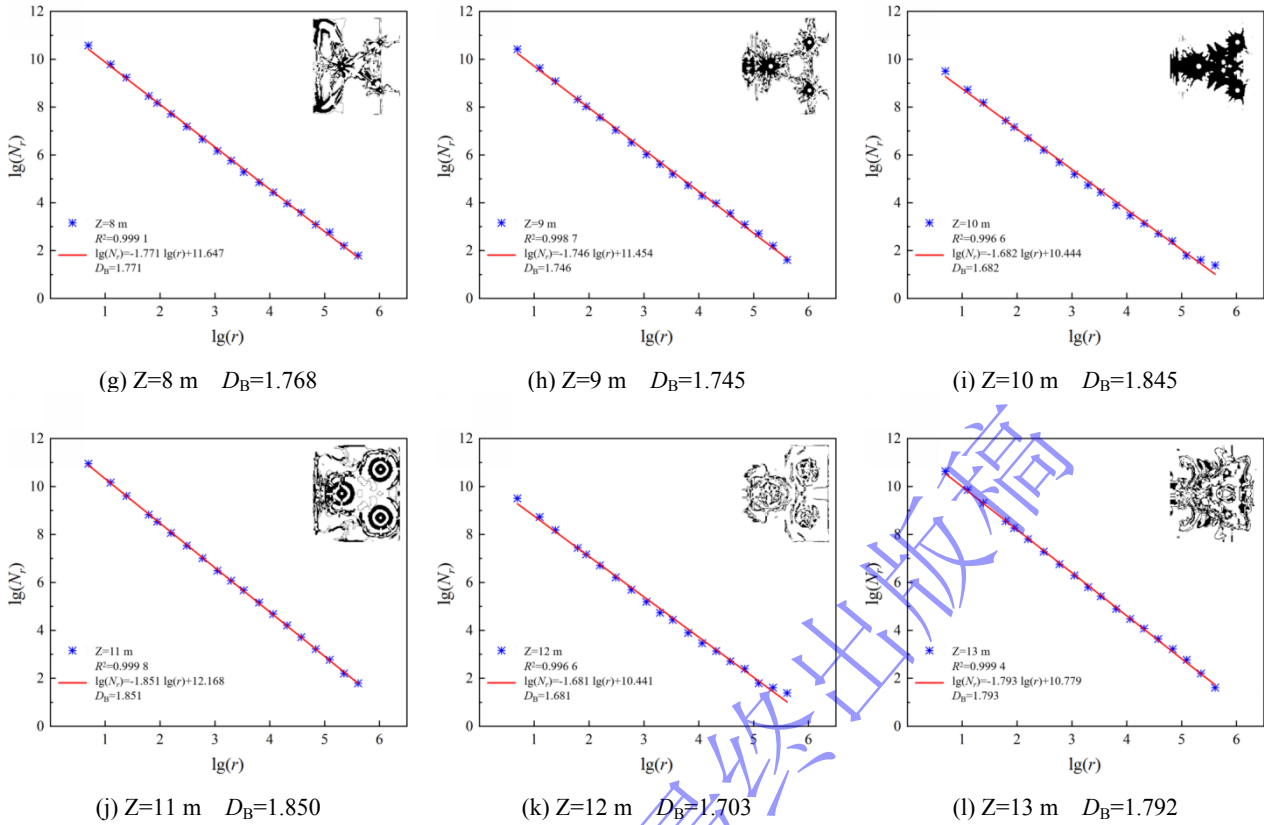


图 16 水间隔装药比例 18.5% 模型损伤分形分析

Fig. 16 Fractal analysis of model damage (water-decoupled charge, decoupling ratio 18.5%)

上述 5 个模型软岩部分和硬岩部分的计盒维数均值如表 7 所示。由表可见，在 $Z=9\text{ m}$ 和 $Z=10\text{ m}$ 的软岩主控区域，损伤范围明显大于硬岩区域，这与软硬岩体在强度和波阻抗上的差异有关。对于软岩而言，应力波在透过层理面后，使软岩受到应力波的作用变强，初始裂纹发育较充分，在爆生气体的持续作用下，原生裂隙发展为贯通软岩岩体的次生裂纹，复杂的裂纹扩展规律使软岩界面区域形成了更高的损伤分形维数。在图 16 中软硬互层界面附近，即 $Z=8\text{ m}$ 和 $Z=11\text{ m}$ 位置，还可见较明显的反射拉伸损伤，说明界面逸散效应对裂隙扩展方式具有重要影响^[23]。

表 7 五种装药结构软、硬岩计盒维数均值

Table 7 Mean box-counting dimensions for soft and hard rocks under five charge structures

Spacing ratio and spacing medium	Mean box-counting dimension of the soft-rock section	Mean box-counting dimension of the hard-rock section
Continuous charge	1.784 9	1.693 6
17.0 % (air spacing)	1.789 9	1.664 7
17.0 % (water spacing)	1.793 2	1.662 5
18.5 % (air spacing)	1.784 8	1.643 6
18.5 % (water spacing)	1.780 8	1.654 0

从计盒维数均值来看，17.0% 间隔比例在软岩和硬岩区域均表现出较高的裂隙网络复杂度，尤其在硬岩区域更为突出，说明该工况下爆炸能量在不同岩性中的分配更为协调。相比之下，18.5% 间隔比例虽然仍能取得较好的损伤效果，但对硬岩破碎的促进作用略弱。就间隔介质而言，空气间隔与水间隔总体差异不大，在 17% 间隔比例时，空气介质软岩区域分形维数略小于水介质，且硬岩区域空气介质分形维数略大于水介质。综合分析结果可认为，在本文工况范围内，17.0% 间隔比例的数值模拟效果优于 18.5%，且空气间隔介质略优于水间隔介质。

计盒维数不仅反映损伤范围大小，也反映裂隙网络在空间上的复杂程度和分布均衡性。对软硬互层岩体而言，若爆炸能量主要集中于近孔区或某一低强度岩层，则虽会形成局部高损伤，但裂隙网络在整体空间上的扩展未必充分；相反，当应力波能够在不同岩层中较均衡地传播时，裂隙网络的空间占据能力增强，计盒维数通常更高。因此，本文中 17.0% 间隔比例在硬岩区表现出更高计盒维数，说明其更有利于硬岩区裂隙扩展和损伤均匀分布。软岩区计盒维数整体高于硬岩区，反映了低强度岩层对爆炸荷载更高的敏感性。这一方面与软岩自身强度较低有关，另一方面也与其波阻抗较小、应力波与爆生气体更易进入其内部有关。互层界面附近出现明显反射拉伸损伤，则说明界面不仅是岩性分界面，也是控制应

力波传播和裂纹偏转的重要边界。综上可知 17.0 % 间隔比例的工况能够在抑制软岩区过损伤的同时促进硬岩区损伤发育，其分布更符合软硬互层岩体协调破碎的要求。

3 现场爆破试验与块度分析

3.1 试验准备

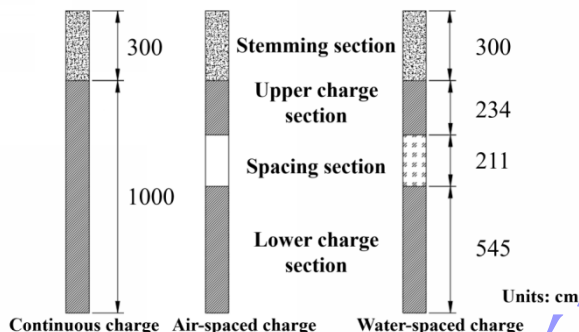


图 17 装药结构示意图

Fig. 17 Schematic diagram of charge structure

现场爆破试验依托新疆吉郎德露天煤矿西帮 1320、1328、1332、1340 平台软硬互层结构区域开展。试验区岩体呈典型软硬互层结构，中部为泥岩层，顶层和底层主要以红砂岩为主。试验台阶高度为 12 m，炮孔直径为 150 mm，孔深为 13 m，超深为 1 m，填塞长度为 3 m，孔距和排距分别为 5 m 和 4 m，底盘抵抗线为 3.0~5.4 m。采用数码电子雷管逐孔毫秒微差起爆，炮孔内炸药为乳化炸药。

结合前文有效应力和损伤分形分析结果，为进一步验证数值模拟所得 17.0 %~18.5 % 较优间隔比例区间的现场适用性，设置连续装药、17.0 % 空气间隔装药、17.0 % 水间隔装药、18.5 % 空气间隔装药和 18.5 % 水间隔装药 5 种工况。每种工况各开展 2 组试验，各工况布置在相近岩性区域，孔径、孔距、排距、填塞长度和炸药单耗等主要爆破参数保持一致，以降低岩性差异和施工参数变化对试验结果的影响，相关参数见表 8。

表 8 现场爆破参数

Table 8 Field blasting parameters

Bench height/m	Blast-hole diameter/mm	Hole depth/m	Toe burden/m	Hole spacing/m
12	150	13	3.0~5.4	5
Row spacing/m	Subdrilling depth/m	Specific explosive consumption/(kg·m ⁻³)	Single-hole charge range/kg	Stemming length/m
4	1	0.5	104~131	3

3.2 现场爆破试验验证

现场观察岩石爆破后爆堆形态表明，连续装药区域细小块体较多，块度分布较离散；相比之下，间隔装药工况下爆堆表面块度更为均衡，软岩过度粉碎现象有所缓解。爆后采用数码相机获取不同装药工况下的爆堆图像，并以标准篮球作为比例尺参照物，在 Split-Desktop 软件中完成图像比例标定、块体边界自动识别及人工修正，进而获得粒径分布曲线及特征块度参数^[24]。考虑到爆堆表面块度具有一定离散性，本文选取能够较完整反映爆堆整体块度特征的代表性图像进行分析，见图 18。

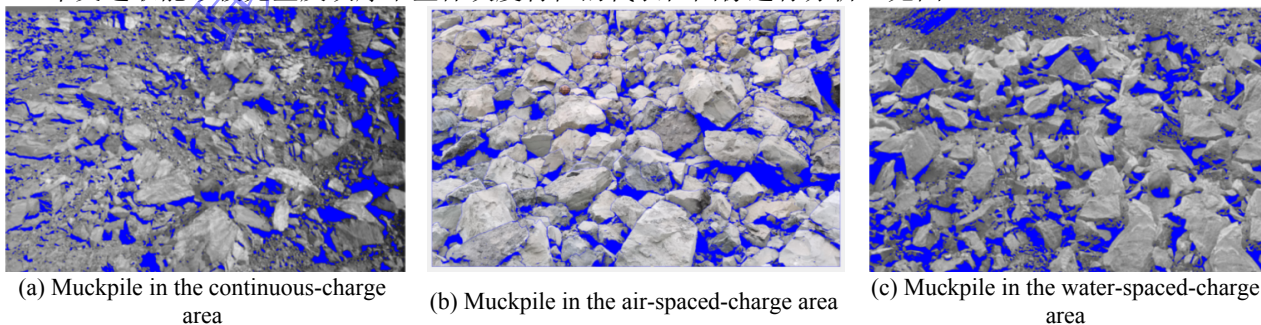


图 18 不同爆堆的图片处理结果
Fig. 18 Image processing results of different muck piles

表 9 不同装药结构下的爆破块度分布参数
Table 9 Fragment size distribution parameters under different charge structures

Test area	charging method	d_{10}/cm	d_{50}/cm	d_{90}/cm	d_{90}/d_{50}	d_{max}/cm
West slope 1320 and 1332 platforms	continuous charge	13.41	32.11	70.01	2.18	112.63
West slope 1320 and 1332 platforms	17.0 % air-spaced charge	16.44	35.08	71.21	2.03	120.34
West slope 1320 and 1332 platforms	17.0 % water-spaced charge	17.72	37.82	72.62	1.92	119.02
West slope 1328 and 1340 platforms	18.5 % air-spaced charge	16.68	35.20	73.46	2.09	122.84
West slope 1328 and 1340 platforms	18.5 % water-spaced charge	17.42	35.31	73.09	2.07	121.67

引入常用块度评价指标^[25]。统计得到不同装药结构下的岩石爆破块度平均指标如表 9 所示。与连续装药相比,空气间隔装药和水间隔装药的 d_{90}/d_{50} 均有所降低,说明间隔装药能够改善爆破块度分布均匀性。其中,17.0 %水间隔装药的 d_{90}/d_{50} 为 1.92,低于连续装药的 2.18、17.0 %空气间隔装药的 2.03、18.5 %空气间隔装药的 2.09 和 18.5 %水间隔装药的 2.07,表明其块度分布相对最为均匀。对比不同间隔比例可知,当间隔比例由 17.0%增加至 18.5 %时,空气间隔装药的 d_{50} 、 d_{90} 、 d_{max} 及 d_{90}/d_{50} 均有所增加;水间隔装药的 d_{90} 、 d_{max} 及 d_{90}/d_{50} 也略有增加。说明间隔比例过大时,装药段长度相对减小,局部破岩能量有所不足,大块粒径有所增加,块度均匀性下降。综合重复试验平均结果可知,17.0 %水间隔装药的块度分布均匀性较好,18.5 %间隔比例下大块粒径略有增加。现场试验结果与数值模拟中 17.0 %间隔比例破岩效果较优的结论基本一致,进一步验证了数值模拟结果的可靠性。

间隔装药对爆破块度的改善,本质上是通过调整炮孔轴向能量释放位置和爆炸荷载作用历程实现的。连续装药条件下,炸药能量沿药柱连续释放,近孔区易形成较高峰值压力和强应力集中,泥岩等低强度软岩层容易发生过度粉碎;而红砂岩等高强度岩层若后期受载不足,则可能出现局部欠破碎。间隔装药将连续药柱分割为上下两个装药段,使爆炸能量由连续集中释放转变为分段释放,可在削弱软岩区瞬时峰值应力的同时,改善硬岩区后期受载条件,从而提高软硬岩层协调破碎程度。

不同间隔介质的作用机制存在差异。空气介质密度和波阻抗较低、可压缩性较强,当爆炸应力波传播至空气间隔段时,部分能量被空气压缩过程吸收,孔内压力峰值得到削弱,爆炸荷载作用时间相对延长,因此空气间隔装药主要表现为“削峰缓冲”和延时释能作用,有利于降低近孔区冲击破碎强度,抑制软岩过度粉碎。水介质密度和波阻抗高于空气、可压缩性较小,能够更有效地传递爆轰压力,并在裂隙中形成持续水压力作用;当水进入初始裂隙或爆生裂纹后,可产生类似“水楔”^[26]的扩展效应,促进裂纹在爆破后期稳定扩展。因此,在吉郎德露天煤矿互层岩体中,水间隔装药能够在抑制泥岩过度粉碎的同时促进红砂岩裂纹扩展,使爆堆块度分布更为均匀。

需要指出的是,数值模拟中空气间隔装药的部分损伤分形指标略优于水间隔装药,而现场块度统计中水间隔装药效果略优。这主要与天然岩体非均质性和初始裂隙发育有关。现场岩体受长期开采扰动和爆破振动影响,裂隙发育较为突出,水介质更易进入初始裂隙并通过准静态压力和“水楔”作用促进裂纹扩展,从而降低极细块体比例并改善块度均匀性。总体来看,现场块度结果与数值模拟在趋势上具有一致性,均表明间隔装药较连续装药更有利于改善软硬互层岩体爆破块度分布。

从工程应用角度看,间隔装药并非适用于所有露天台阶爆破工况。与连续装药相比,间隔装药需要控制间隔段位置、长度及介质充填状态,施工组织复杂度相对增加。因此,本文所提出的间隔装药方案主要面向软硬互层、节理裂隙发育或块度控制要求较高的复杂地质条件。吉郎德露天煤矿现场采用测孔机器人和智能钻机进行钻孔定位、孔深复核及施工参数控制,可有效提高炮孔施工精度和间隔段控制精度,降低间隔装药带来的施工误差。综合来看,间隔装药虽然增加了一定工序控制要求,但可改善软硬岩层爆炸能量分配、缓解软岩过碎并提高爆堆块度均匀性,在复杂软硬互层岩体中具有较好的工程适用性。

4 结论

1) 与连续装药相比,轴向间隔装药可削弱软岩区局部应力集中,降低软岩过度损伤风险,同时提高硬岩区有效受载程度,有利于协调软岩控损与硬岩破碎之间的矛盾。随着间隔比例增大,软岩区峰值有效应力整体呈下降趋势。综合分析表明,17.0 %~18.5 %为较优间隔比例区间,其中 17.0 %综合效果较好。

2) 空气间隔装药与水间隔装药的作用机制不同。空气间隔装药主要通过削峰和延长应力波作用时间改善损伤分布;水间隔装药则利用水介质较小的可压缩性增强爆炸压力传递,并促进裂纹扩展。损伤分

形维数分析表明,合理间隔装药有利于提高裂隙网络发育程度和空间复杂性。

3) 现场试验表明,17.0%和18.5%空气间隔装药、水间隔装药均可改善爆堆块度分布。与连续装药相比,间隔装药条件下 d_{10} 、 d_{50} 和 d_{90} 整体增大, d_{90}/d_{50} 减小,说明细碎块比例降低、块度均匀性提高。其中,17.0%水间隔装药的 d_{90}/d_{50} 最小,块度分布均匀性较好;18.5%间隔比例下 d_{90} 、 d_{max} 及 d_{90}/d_{50} 略有增加,说明间隔比例过大时大块粒径增加、块度均匀性下降。现场试验平均结果与数值模拟结果基本一致,进一步验证了17.0%间隔比例下爆破效果较优的结论。

参考文献

- [1] 邹宗山,杨军,佐建君,等.大型露天矿半连续工艺台阶爆破参数优化试验[J].工程爆破,2015,21(03):32-35.
ZOU Z S, YANG J, ZUO J J, et al. Optimization test of bench blasting parameters for semi-continuous mining technology in a large open-pit mine[J]. Engineering Blasting, 2015, 21(03): 32-35.
- [2] 黄永辉,李永杰,杨阳,等.露天爆破中炸药单耗对岩石破碎块度的数值模拟研究[J].工程科学学报,2024,46(06):973-981.
HUANG Y H, LI Y J, YANG Y, et al. Numerical simulation of the effect of powder factor on rock fragmentation in open-pit blasting[J]. Chinese Journal of Engineering, 2024, 46(06): 973-981.
- [3] 费鸿禄,陈良雨,杨鹏亮,等.不同节理几何参数的类岩体材料冲击试验与裂纹扩展规律[J/OL].高压物理学报,1-20[2026-05-11]
FEI H L, CHEN L Y, YANG P L, et al. Impact tests and crack propagation laws of rock-like materials with different joint geometric parameters[J/OL]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1-20[2026-05-11].
- [4] 周朝兰,刘志祥,杨小聪,等.残矿回采挤压爆破参数优化的数值模拟[J].高压物理学报,2023,37(03):146-157.
ZHOU C L, LIU Z X, YANG X C, et al. Numerical simulation of parameter optimization for squeeze blasting in residual ore recovery[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(03): 146-157.
- [5] 吴亮,朱红兵,卢文波.空气间隔装药爆破研究现状与探讨[J].工程爆破,2009,15(01):16-19.
WU L, ZHU H B, LU W B. Research status and discussion on air-deck charge blasting[J]. Engineering Blasting, 2009, 15(01): 16-19.
- [6] 张袁娟,赵强,李星.台阶爆破间隔装药最佳间隔位置确定方法[J].煤矿安全,2016,47(08):230-232+236.
ZHANG Y J, ZHAO Q, LI X. Determination method of optimal deck position for deck charge in bench blasting[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(08): 230-232+236.
- [7] 刘江超,高文学,张声辉.隧道掘进周边孔间隔装药结构选取及优化[J].爆破,2021,38(03):38-44+112.
LIU J C, GAO W X, ZHANG S H. Selection and optimization of deck charge structure for perimeter holes in tunnel excavation[J]. Blasting, 2021, 38(03): 38-44+112.
- [8] 李章超,徐帅,李金平,等.基于JKSimBlast的露天台阶爆破空气间隔装药结构优化研究[J].爆破,2023,40(01):50-56+68.
LI Z C, XU S, LI J P, et al. Optimization study on air-deck charge structure of open-pit bench blasting based on JKSimBlast[J]. Blasting, 2023, 40(01): 50-56+68.
- [9] 王浩,张智宇,雷振,等.露天含水炮孔台阶爆破数值模拟与分析[J].有色金属(矿山部分),2021,73(02):11-15+26.
WANG H, ZHANG Z Y, LEI Z, et al. Numerical simulation and analysis of bench blasting with water-filled blastholes in open-pit mines[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2021, 73(02): 11-15+26.
- [10] Ding X, Yang Y, Zhou W, et al. The law of blast stress wave propagation and fracture development in soft and hard composite rock[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 17120.
- [11] 康玉梅,谷今,魏梦琦.冲击荷载作用下软硬互层类岩石力学特性[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(03):1062-1073.
KANG Y M, GU J, WEI M Q. Mechanical properties of soft-hard interbedded rock-like materials under impact loading[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(03): 1062-1073.
- [12] 杨国梁,毕京九,董智文,等.定向断裂控制爆破下层理页岩的致裂机理[J].爆炸与冲击,2024,44(6):3-17.
YANG G L, BI J J, DONG Z W, et al. Fracturing mechanism of bedded shale under directional fracture controlled blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(6): 3-17.
- [13] 陈运成,谢守冬,颜世留,等.露天超深孔大抵抗线爆破技术研究[J].爆破,2023,40(1):62-68.
CHEN Y C, XIE S D, YAN S L, et al. Study on large burden blasting technology of ultra-deep holes in open-pit mines[J]. Blasting, 2023, 40(1): 62-68.
- [14] 李洪超.岩石RHT模型理论及主要参数确定方法研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2016:24-36.
LI H C. Study on the theory of rock RHT model and determination method of main parameters[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2016:24-36.

- [15] 李洪超,王富旗,张继,等.岩石 RHT 模型部分参数的敏感性分析及确定[J].高压物理学报,2025,39(6):66-76.
LI H C, WANG F Q, ZHANG J, et al. Sensitivity analysis and determination of some parameters of the rock RHT model[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(6): 66-76.
- [16] YI C P, SJÖBERG J, JOHANSSON D, et al. A Numerical study of the impact of short delays on rock fragmentation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 100:250-254.
- [17] 和铁柱,令星,杨国梁,等.露天矿台阶爆破间隔装药结构优化及工程应用[J/OL].金属矿山,1-17.[2026-05-31]
HE T Z, LING X, YANG G L, et al. Optimization and engineering application of deck charge structure in open-pit mine bench blasting[J/OL]. Metal Mine, 1-17.[2026-05-31].
- [18] 赵晓明,杨玉民,蒋楠,等.深埋引水隧洞光面爆破周边孔装药结构优化试验研究[J].高压物理学报,2022,36(04):208-218.
ZHAO X M, YANG Y M, JIANG N, et al. Experimental study on optimization of charge structure for peripheral holes in smooth blasting of deep-buried water diversion tunnels[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(04): 208-218.
- [19] 沈泽伟,刘浩杉,张智宇,等.含水炮孔预裂爆破的孔距及不耦合系数优化[J/OL].高压物理学报,1-18[2026-05-27].
SHEN Z W, LIU H S, ZHANG Z Y, et al. Optimization of hole spacing and decoupling coefficient for presplitting blasting in water-filled boreholes[J/OL]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1-18[2026-05-27].
- [20] 赵康,敖文强,伍俊,等.不同初始缺陷条件下尾矿胶结充填体损伤突变预警分析[J].岩石力学与工程学报, 2023,42(10):2400-2411.
ZHAO K, AO W Q, WU J, et al. Early warning analysis of damage mutation of cemented tailings backfill under different initial defect conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(10): 2400-2411.
- [21] Ren M, Yue Z, Zhou J, et al. Experimental study on blasthole fracturing caused by stress waves from a cylindrical charge[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2025, 139(PA): 105020-105020.
- [22] 杨仁树,李炜煜,杨国梁,等.炸药类型对富铁矿爆破效果影响的试验研究[J].爆炸与冲击,2020,40(06):96-107.
YANG R S, LI W Y, YANG G L, et al. Experimental study on the influence of explosive type on blasting effect of iron-rich ore[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(06): 96-107.
- [23] 段继超.煤矿综采面过断层硬岩深孔爆破损伤机理研究[D].安徽理工大学,2025:58-69.
DUAN J C. Study on damage mechanism of deep-hole blasting for hard rock passing through faults in fully mechanized coal mining face[D]. Anhui University of Science and Technology, 2025:58-69.
- [24] Babaeian M, Ataei M, Sereshki F, et al. A new framework for evaluation of rock fragmentation in open pit mines[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 11(02):325-336.
- [25] 赵安平,冯春,郭汝坤,等.节理特性对应力波传播及爆破效果的影响规律研究[J].岩石力学与工程学报, 2018,37 (09) :2027-2036.
ZHAO A P, FENG C, GUO R K, et al. Influence of joint characteristics on stress wave propagation and blasting effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(09): 2027-2036.
- [26] 马文涛.基于 ALE 算法的连续高压水射流破岩数值模拟[J].煤炭工程,2022,54(12):164-169.
MA W T. Numerical simulation of rock breaking by continuous high-pressure water jet based on ALE algorithm[J]. Coal Engineering, 2022, 54(12): 164-169.

Numerical Simulation and Experimental Study of Deck-Charging Effects in Bench Blasting of Soft-Hard Interbedded Rock Masses

JIA Yingxin^{1,2}, HE Tiezhu², YANG Guoliang¹, LIU Qiang², HAN Zimo^{1,2}, MA Mingxue¹

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

2. Poly Explosive Hami Co., Ltd., Hami 839000, Xinjiang, China)

Abstract: Due to the significant differences in mechanical properties among strata, soft-hard interbedded rock masses are prone to excessive fragmentation of soft rock, insufficient breakage of hard rock, and large discreteness in muckpile fragment size during open-pit bench blasting. To optimize explosive energy distribution and improve fragmentation performance, a three-borehole fluid-solid coupling model was established using ANSYS/LS-DYNA, taking Jilangde open-pit coal mine as the engineering background. The blasting responses of continuous charge, air-spaced charge, and water-spaced charge under different spacing ratios are compared, and the simulation results are verified by field tests. The peak effective stress in the soft rock zone, the mean effective stress in the hard rock zone, and the box-counting dimension of damage sections are selected as evaluation indices to analyze the effects of different charging structures on stress distribution, energy allocation, and damage evolution in soft and hard rock strata. Four aspects are integrated to clarify the mechanism by which spaced charging affects explosive energy distribution and coordinated fragmentation of soft and hard rock strata: the structural response of soft-hard interbedded rock masses, the comparison between air and water spacing media, damage fractal evaluation, and field fragmentation verification. The results show that spaced charging can effectively regulate the release process of explosive energy along the borehole. With increasing spacing ratio, the peak effective stress in the soft rock zone generally decreases, indicating that stress concentration is weakened. The mean effective stress in the hard rock zone reaches its maximum at a spacing ratio of 17.0%, indicating that an appropriate spacing ratio can maintain the stress level required for hard rock fragmentation, whereas an excessive spacing ratio reduces the fragmentation effect of hard rock. Considering both stress response and damage fractal characteristics, spacing ratios of 17.0% and 18.5% can effectively balance soft-rock fragmentation control and hard-rock breakage. Among them, the 17.0% case exhibits a more favorable box-counting dimension of damage sections and a more fully developed damage distribution. Field test results show that, compared with continuous charge, the 17.0% spaced charge can significantly alleviate pulverization of soft rock and improve muckpile size uniformity. In particular, water-spaced charge produces the lowest nonuniformity coefficient and the best overall blasting effect. The findings provide a reference for charge structure optimization and refined blasting design in open-pit mines with soft-hard interbedded rock masses.

Keywords: soft-hard interbedded rock mass; bench blasting; deck charging; fragmentation analysis