

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0433

充-岩界面耦合体爆破动力响应机理*

胡建华¹, 张涛¹, 丁啸天¹, 温观平¹, 文增生², 郭萌萌¹

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410000;

2. 山东华联矿业股份有限公司, 山东淄博 255000)

摘要: 充填采矿法的充填体与矿岩体构成的界面耦合结构体, 受采矿爆破影响会持续受到动力扰动, 在充-岩界面耦合处易产生脱粘、裂隙扩展等行为, 为井下生产带来安全隐患。采用 ANSYS/LS-DYNA 建立了充-岩界面耦合体模型, 分析了爆破作用对界面耦合体结构的力学影响, 获取了不同界面粗糙度、充填体养护龄期和起爆方式等因素对爆破裂隙扩展及应力波峰值应力的影响, 探讨了爆破动力作用机理。结果表明: (1) 爆破冲击在界面耦合体中存在拉、压和剪 3 种力学作用, 且随着界面粗糙度的提高, 界面受力呈先上升后下降趋势; (2) 随着充填体养护时间增长, 界面破坏逐步从受拉转化成剪切损伤; (3) 同时起爆对耦合界面的损伤比逐孔起爆的小。

关键词: 耦合结构体; 爆炸冲击; 动力扰动; 裂纹扩展

中图分类号: O382.2; TD853

国标学科代码: 1303520

文献标志码: A

Dynamic response mechanism of a rock-filling interfacial coupling body to blasting in it

HU Jianhua¹, ZHANG Tao¹, DING Xiaotian¹, WEN Guanping¹, WEN Zengsheng², GUO Mengmeng¹

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410000, Hunan, China;

2. Shandong Hualian Mining Co., Ltd., Zibo 255000, Shandong, China)

Abstract: The interfacial coupling structure between the backfill and ore rock body in the filling mining method will be continuously disturbed by the influence of mining and blasting. In the filling-rock interfacial coupling, it is easy to produce the behaviors of debonding and fissure expansion, which will bring potential safety hazards to underground production. Because the field experiment is time-consuming and laborious, and it is difficult to observe the impact effect and the rock crack propagation process when the explosive is detonated, the simulation method was adopted for research. In the simulation, reasonable simplification is particularly important. According to the actual situation of blasting hole layout, the three rows of blasting holes that were detonated at one time were simplified into a single-row blasting hole model and an edge blasting hole model. According to the research results in related literatures, the coupling surfaces of the filling bodies and the ore rocks were simplified into three kinds (a flat interface, wavy interface and serrated interface). The three different shapes of the interfaces correspond to the different roughnesses of the interfaces, respectively. By considering that the hole arrangement method used in stope blasting is vertical hole arrangement, the holes are parallel, and at the same time, in order to improve the calculation of the software efficiency, simplified the three-dimensional model of the stope into a two-dimensional plane model. After a series of simplifications, a physical model for the filling-rock interface coupling body was proposed, and the corresponding geometric analysis model was established by using the ANSYS/LS-DYNA software. And different material parameters were assigned to the different parts of the model, and the blasting effect was analyzed by software calculation. The mechanical influence of the interface coupling body structure was obtained, and the response law of different interface roughness, the curing age of the

* 收稿日期: 2020-11-24; 修回日期: 2020-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(41672298); 中南大学研究生自主探索创新项目(2021zzts0883)

第一作者: 胡建华(1975—), 男, 博士, 教授, hujh21@csu.edu.cn

通信作者: 张涛(1997—), 男, 硕士研究生, tao_zhang66@csu.edu.cn

filling body and the blasting method on the blasting shock was obtained, and the mechanism of the blasting dynamics was discussed. The research results can reveal mechanical behaviors such as debonding and crack propagation at the coupling of filling-rock interface, and clarify the influence of different factors on the law of blasting shock response and the mechanism of blasting dynamics, which has certain guiding significance for downhole safety production. The results show as follows. (1) The blasting impact has three mechanical effects in the interface coupling body: tension, pressure and shear. When the stress wave passes through the interface, the peak acceleration of the monitoring point at the interface will increase due to different degrees of refraction. After passing through the coupling interface, the stress wave energy decays rapidly. (2) The impact of different interface roughness on blasting action is different. The joint roughness coefficient (JRC) represents the roughness of the interface coupling body. With the increase of the JRC value, the interface stress tends to rise first and then decline, but the overall damage decreases. (3) As the curing time of the backfill increases, the fracture range at the coupling interface shrinks, and the interface damage gradually changes from tensile damage to shear damage. (4) The damage of different detonation modes to the interface coupling body is different, and the damage of simultaneous detonation to the coupling interface is weaker than that of hole-by-hole detonation.

Keywords: coupling structure; explosive impact; dynamic disturbance; crack propagation

充填采矿法能最大限度地回收矿产资源, 保护地下、地表环境, 被广泛运用于地下矿产资源开采^[1-4]。充填体强度一般为 0~10 MPa^[5-6], 与相邻间柱或顶底板矿岩耦合形成特殊的结构体, 主要起到控制地压、防止地表沉降等作用。爆炸应力波经过这些结构体时, 将在界面处发生多重透、反射现象, 加剧界面处的破坏, 为二步骤开采的采场带来安全隐患^[7-8]。

对不同介质间应力波传播规律及损伤情况的研究较多, 李夕兵等^[9]给出了一种求解应力波在层状矿岩结构中传播效应的算法—等效波阻法, 该方法可以用来计算不同波形瞬态应力波通过各种夹层后的透射波形式和能量传递效果^[10]。应力波在节理、断层和层面等不连续面岩体中传播, 主要有两种不同的理论研究方法: 位移不连续法^[11-12]和等效介质法^[13-14]。Li 等^[15]提出了平行节理岩体的等效黏弹性介质模型, 该模型能用来有效地分析具有平行节理的不连续介质中纵波的传播规律。Ma 等^[16]进一步发展了等效黏弹性介质方法, 并对等效黏弹性介质法的参数进行了解析求解。杨立云等^[17]采用超高速图像试验系统分析了爆炸应力波在含节理结构试件中的传播, 结果发现应力波遇到层理后会发生反射和折射现象, 导致入射波和反射波叠加形成较强的应力集中区, 并沿着层理向两端扩展。杨仁树等^[18]利用霍普金森压杆对层状复合岩样进行冲击试验, 揭示了复合岩体的动力学特性、破坏特征和能量耗散规律。包会云^[19]采用 C61 非金属超声波检测仪测试了多种层状岩石试样的波速, 探究了岩石波速与节理角度、岩石密度之间的关系。武仁杰等^[20]同样利用霍普金森压杆对不同层理倾角的试样进行冲击实验, 得到不同层理倾角下层状岩石的动态抗压强度特性与宏观破坏模式。刘婷婷等^[21]采用二维离散元程序 UDEC (universal distinct element code) 研究了应力波在含一组平行充填节理岩体中的传播规律, 探究了充填材料、厚度等因素对应力波折、反射的影响。李秀虎等^[22]利用 LS-DYNA 软件对不同数量、宽度与充填强度的节理岩体爆破进行了数值模拟分析, 研究了节理对岩体中应力波与爆炸能量传播特性的影响。孙宁新等^[7]采用 LS-DYNA 软件研究了含软弱夹层的岩体爆炸应力波的传播过程, 探究了软弱夹层厚度、位置及角度对爆炸应力波传播的影响规律。

对于充填体和围岩构成的耦合体, 朱鹏瑞等^[23]理论分析了爆破动载下胶结充填体的力学特性, 推导了相邻矿柱爆破对充填体产生的拉应力计算公式, 并利用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立了边孔爆破数值模型, 探究了爆破对充填体及矿岩结构面的影响。刘志祥等^[24]分析了爆炸应力波在充填体界面的传播规律, 对动载作用下充填体的稳定性进行了系统研究。王振昌^[25]研究了二步回采作用下充填体及围岩的爆破损伤特性。针对充-岩耦合体的动力响应规律, 特别是在不同的界面条件、充填体力学特性和起爆方式的差异性研究上, 仍存在机制不清、规律不明的现象。

基于上述, 本文中拟采用显式动力分析软件 ANSYS/LS-DYNA, 建立充-岩耦合体动力仿真模型, 探

究结构面特征、充填体力学特性和起爆方式等因素变化对界面耦合体动载破坏的影响, 分析不同工况下爆破扰动对界面耦合体的影响规律, 探讨爆破冲击对界面耦合体的作用机理。

1 模型构建

1.1 物理模型

1.1.1 几何模型构建

模型背景依托山东华联矿业股份有限公司卧虎山矿的预控顶分段凿岩分段出矿嗣后充填采矿法采场, 采场阶段高度为 50 m, 分段高度为 12.5 m, 预控顶凿岩硐室高度为 4.5 m。在阶段内沿走向分条带交替布置矿房和矿柱, 矿房采用间隔回采、嗣后充填的方式进行开采。矿房长度为矿体的厚度, 即矿房长度为 50~80 m, 宽度为 12.5 m。矿山实际生产过程中炮孔布置参数及所采用的炮孔布置如表 1、图 1 所示。

表 1 炮孔布置参数

Table 1 Parameters of blasting hole arrangement

布置方式	炸药密度/(kg·m ⁻³)	孔径/mm	孔深/m	炮孔排距/m	炮孔间距/m
垂直中深孔	1060	90	8	2	2

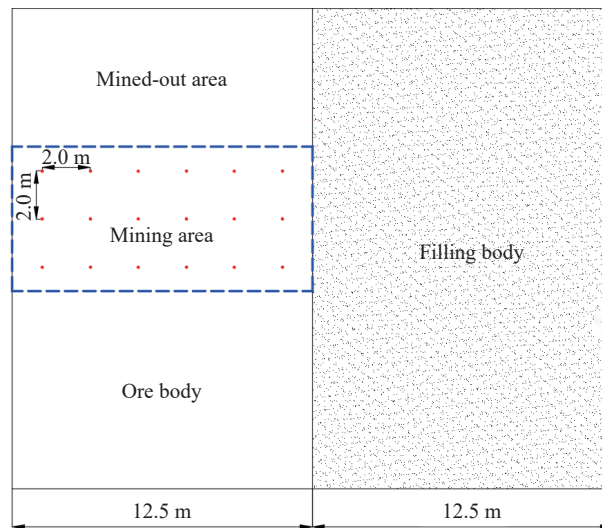


图 1 炮孔布置

Fig. 1 Arrangement of blasting holes

1.1.2 耦合界面简化

参考文献 [26], 利用伸长率法中的伸长率 $R^{[27]}$, 及直边法和修正直边法中的轮廓曲线相对起伏度 $R_r^{[28]}$ 来定义节理粗糙度 (joint roughness coefficient, JRC) c_{jr} 。

伸长率 R 表达式为:

$$R = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (1)$$

式中: L_0 为剖面的水平距离, L 为剖面线的曲线长度。

相对起伏度 R_r 表达式为:

$$R_r = \frac{R_a}{L_0} \quad (2)$$

式中: R_a 为剖面绝对起伏度。

根据文献 [26], 结构面剖面常区分为平直形、波浪形和锯齿形。这 3 类剖面其结构面 JRC 值与剖面

需要说明的是, 两种模型忽略了多排炮孔同时起爆时爆炸冲击波之间的叠加作用, 模拟结果理论上比实际结果弱, 但整体上呈现出来的裂隙扩展方式、扩展规律等方面可为现场提供参考, 便于分析不同因素和工况下爆破扰动对界面耦合体的影响。

1.2 材料参数

炸药和空气采用多物质 ALE(arbitrary Lagrangian-Eulerian) 算法, 其整体与岩石和充填体材料间采用流固耦合算法, 其中空气作为耦合介质, 将炸药爆炸所产生的力传递给岩石。

1.2.1 炸药材料

炸药采用 8 号材料 MAT_HIGH_EXPOLOSIVE, 材料参数如表 3 所示, 逐孔起爆孔间延期为 5 ms, 炸药状态方程(Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程)如下:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (6)$$

式中: p 为由 JWL 状态方程定义的爆轰压力, V 为相对体积, E 为初始比内能, A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为描述 JWL 状态方程的 5 个独立参数^[29-30]。

表 3 炸药材料及 JWL 状态方程参数

Table 3 Parameters for explosive materials and JWL equation of state

密度/(kg·m ⁻³)	爆速/(km·s ⁻¹)	A/GPa	B/GPa	R ₁	R ₂	ω	E/GPa
1 060	4	220	0.2	4.5	1.1	0.35	4.2

1.2.2 岩石和充填体材料

采用具有运动硬化特性的弹塑性动态破坏本构模型来模拟爆炸高应力下的岩石响应情况, 同时引入 MAT_ADD_EROSION 关键字观察微裂隙生成情况, 并按照拉应力破坏准则对破坏条件进行限定, 岩石与充填体材料参数如表 4 所示^[31-33]。

表 4 岩石和充填体材料参数

Table 4 Parameters for rocks and filling materials

材料	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	弹性模量/GPa	单轴抗压强度/GPa
岩石	2 551	0.25	25.00	100.00
7 d龄期充填体	2 180	0.31	0.92	2.10
28 d龄期充填体	2 200	0.24	2.20	4.17

2 结果分析

2.1 爆破作用对界面耦合体的损伤机理

2.1.1 爆破致裂时空演化规律

以养护时间为 7 天的平直形界面耦合体为例, 起爆过程的应力以及裂隙的时空演化过程如图 4 所示。

由图 4 可知, 第 1 个炮孔起爆后, 爆炸应力波经过 1.5 ms 到达耦合界面, 在穿过耦合界面时, 由于界面两侧的物质材料不同, 应力波会产生不同程度的透射与反射现象, 造成一定程度的衰减。第 1 个炮孔距界面较远, 故起爆后对界面的扰动较小, 未在界面处产生明显裂隙。第 2 个炮孔在 5.0 ms 时起爆, 在爆炸应力波的作用下同样产生粉碎区以及径向裂隙, 但此时炮孔距界面较近, 爆破带来的扰动对界面产生了显著影响, 导致界面处产生了由应力波剪切作用导致的沿界面的裂隙以及由拉伸作用导致的伸向充填体内部的裂隙。第 3 个炮孔起爆过程中产生的应力波会进一步扩展界面处已有裂隙, 最终生成的爆破裂隙图如图 4(h) 所示。

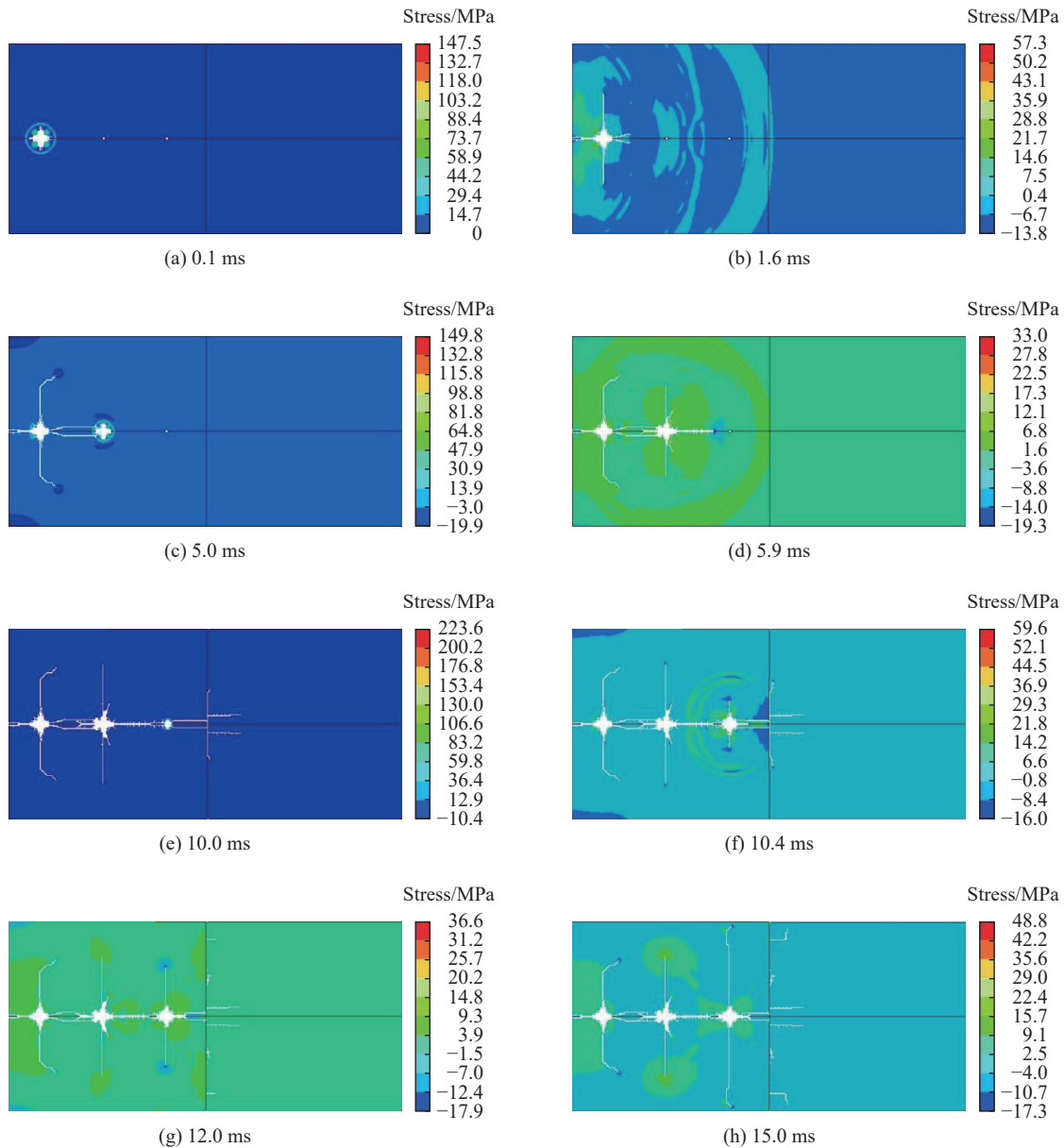


图 4 爆破应力云图(以 7 d 龄期的平直形界面耦合体为例)

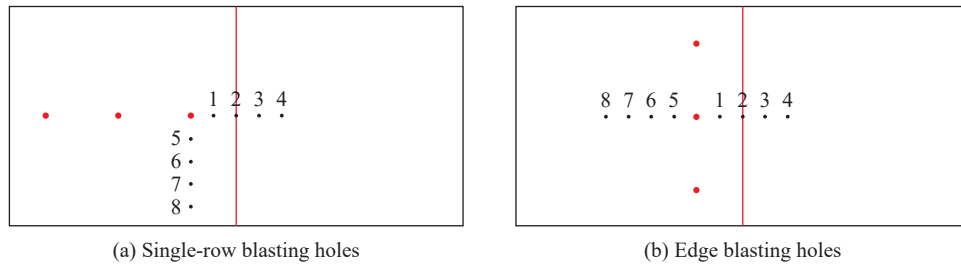
Fig. 4 Blasting stress nephograms (taking the 7-day-age coupling body with a flat interface as an example)

2.1.2 XY 方向应力时程曲线

在模型中设置 2 条监测线, 每条监测线上等距布置 4 个监测点, 标号按顺序记为 1~8。针对 2 种模型, 监测点 1~4 布置方式不变, 监测点 5~8 布置方式的差异是便于在分析时与监测点 1~4 进行对比。后续时程曲线分析均采用此监测点布置方式, 如图 5 所示。

采用两帮炮孔模型, 以 7 d 龄期平直形界面耦合体为例, 其监测点 XY 方向的应力时程曲线对比如图 6 所示。在模拟的均质岩体内, 爆炸应力波是以炮孔为中心向四周呈放射状传播, 体现为监测点 1 与监测点 5 应力时程曲线形状类似。但监测点 1 的峰值拉、压应力较监测点 5 的大, 表明耦合界面对应力波的传播存在影响。这是因为监测点 1 更接近耦合界面右侧的充填体, 相较于岩体, 充填体力学性能弱, 因此爆炸应力波倾向于朝力学性能弱的一侧发展, 导致监测点 1 与监测点 5 应力波峰值的差异。监测点 2 与监测点 6 的应力时程曲线差异较大, 在 LS-DYNA 中监测应力是以体单元的形式进行, 监测点 2 实际位于充填体内, 受到的拉压扰动较小, 应力峰值不超过 1 MPa。监测点 3 在 XY 方向应力值几乎为

零, 而处于对称位置的监测点 7 受到的拉、压应力较大, 峰值压应力达到 3 MPa。由监测点 2、6 与监测点 3、7 的时程曲线对比图易知耦合界面会吸收大部分应力波能量, 削弱应力波对充填体的拉、压作用。监测点 3、4 的应力时程曲线存在明显的先后关系, 监测点 4 的峰值应力出现时间滞后于监测点 3, 体现了应力波的传播过程, 且总体上监测点 4 的应力峰值低于监测点 3, 表明爆炸应力波随距离增大而逐渐衰减。

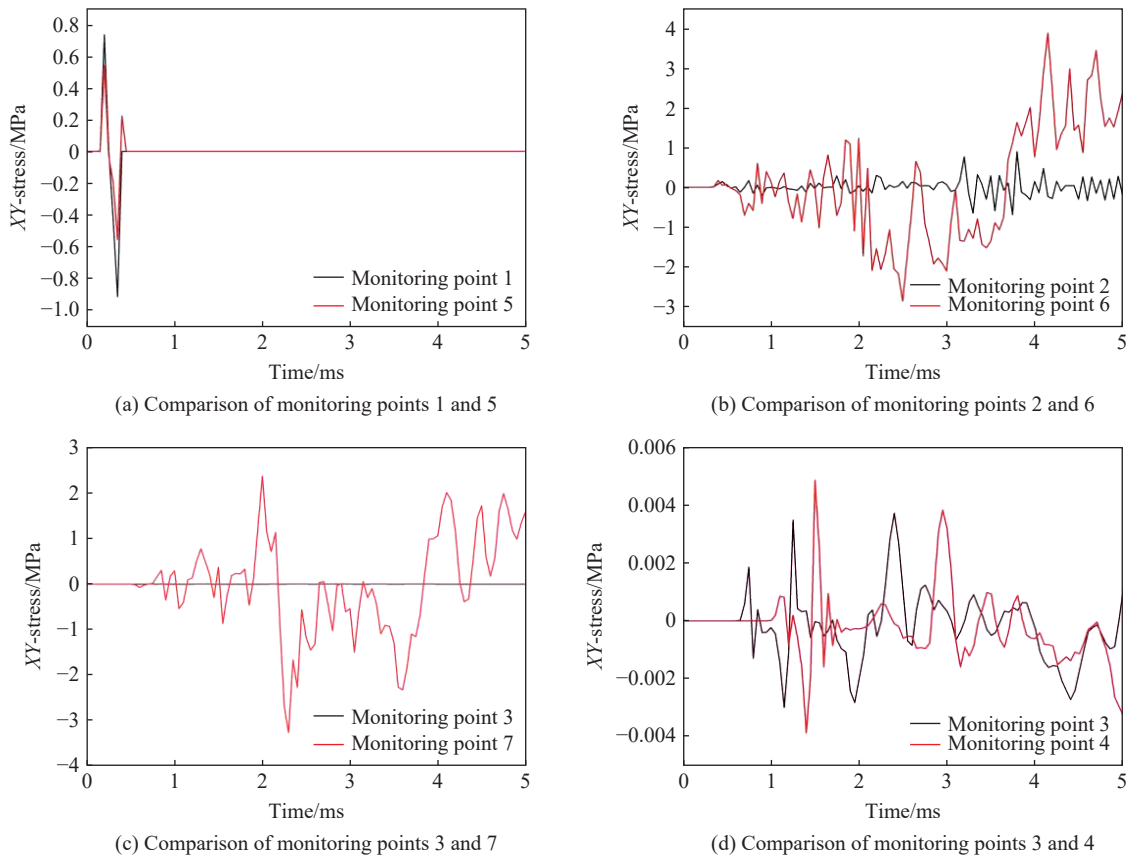


(a) Single-row blasting holes

(b) Edge blasting holes

图 5 监测点布置方式示意

Fig. 5 Layout of monitoring points



(a) Comparison of monitoring points 1 and 5

(b) Comparison of monitoring points 2 and 6

(c) Comparison of monitoring points 3 and 7

(d) Comparison of monitoring points 3 and 4

图 6 监测点应力时程曲线对比(以 7 d 龄期的平直形界面耦合体为例)

Fig. 6 Comparison of stress-time curves at the monitoring points (taking the 7-day-age coupling body with a flat interface as an example)

2.1.3 加速度时程曲线

采用两帮炮孔模型, 同样以 7 d 龄期充填体平直形界面耦合体为例, 其监测点加速度时程曲线对比如图 7 所示。监测点 1 和 5 的加速度时程曲线图重合, 表明爆炸应力波在同一介质内传播时, 处于同一波阵面上的各监测点受到的动力扰动情况一致。LS-DYNA 中监测加速度能够以监测点单元的形式进行, 即此时的监

测点 2 正好位于耦合界面上, 应力波在经过界面时会发生不同程度的折、反射现象, 折射和反射的应力波叠加导致界面上的监测点加速度峰值更大。监测点 3、7 的加速度曲线差异说明爆炸应力波经过耦合界面后迅速衰减, 考虑为应力波经过界面时损失了大部分能量, 导致监测点 3 的加速度峰值低于监测点 7 的。在充填体中爆炸应力波的衰减情况显著, 对应图 7(d) 中监测点 4 的加速度峰值较监测点 3 的小。

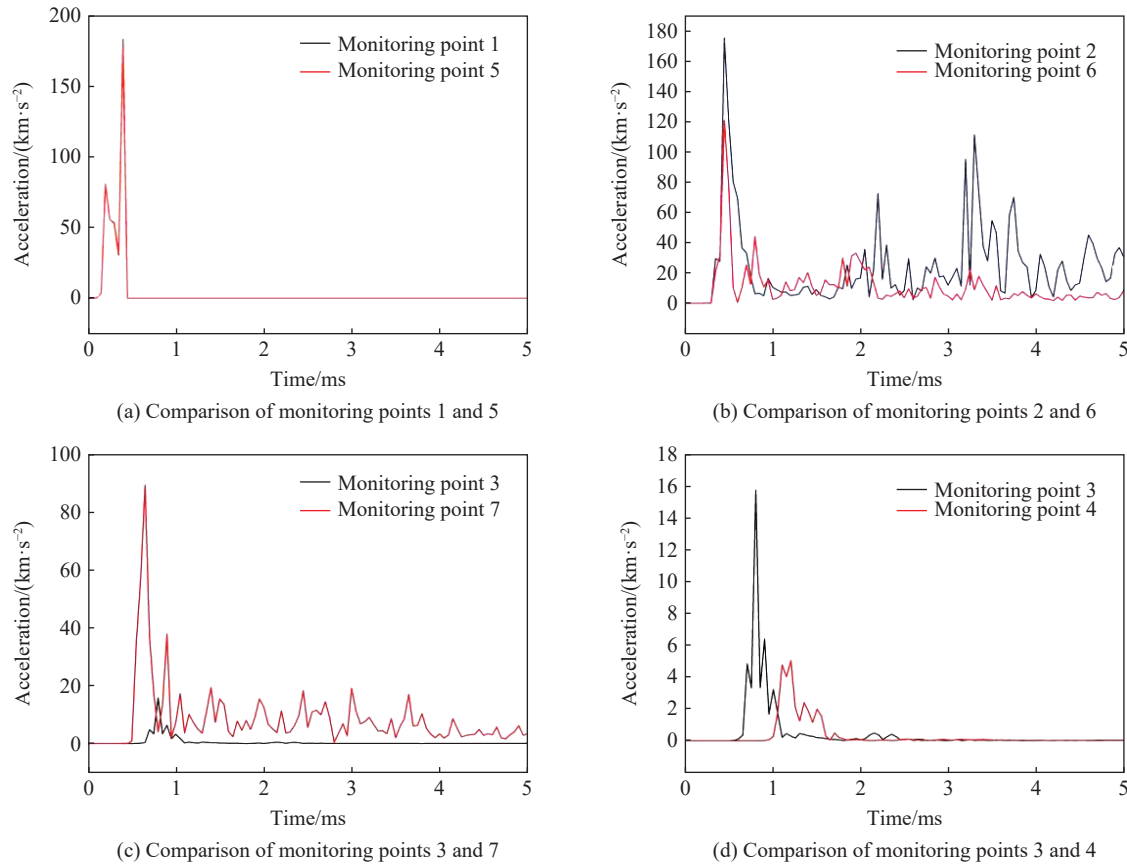


图 7 监测点加速度时程曲线对比(以 7 d 龄期的平直形界面耦合体为例)

Fig. 7 Comparison of acceleration-time curves at the monitoring points (taking the 7-day-age coupling body with a flat interface as an example)

2.2 不同粗糙度对耦合界面爆破损伤影响

2.2.1 裂隙扩展

图 8 为爆破后 3 种不同粗糙度界面耦合体的裂隙扩展情况。对于单排炮孔, 平直形耦合界面主要产生沿耦合界面的裂隙和垂直于耦合界面的裂隙, 此时的力学作用以拉、压、剪为主。而波浪形和锯齿形耦合界面主要产生沿耦合界面的裂隙和切齿裂隙两种, 垂直于耦合界面向充填体内部延伸的裂隙仅在锯齿形耦合界面的 2 个齿中存在, 且延伸长度较小, 此时的力学作用以压、剪为主。

对于两帮炮孔, 3 种不同粗糙度的耦合界面在第 1 个炮孔起爆后就可产生沿界面的裂隙, 并贯通整个模型。第 2 个炮孔和第 3 个炮孔爆破产生的碎石使得爆破裂隙进一步闭合, 并产生剪切作用。而耦合面处的剪切性能与界面参数如齿高、齿宽有关, 所以不同粗糙度耦合界面的剪切性能不同, 从而导致耦合界面受损程度的差异。相较于单排炮孔, 两帮炮孔距耦合界面更近, 因此充填体受扰动情况更加显著, 导致 3 种不同粗糙度的界面上都会产生更明显的深入充填体内部的裂隙。

分析裂隙扩展图可知, 对于同种炮孔模型, 粗糙度更大的锯齿形耦合界面受损程度相对较低, 故认为在一定程度上提高界面粗糙度会降低其损伤程度。

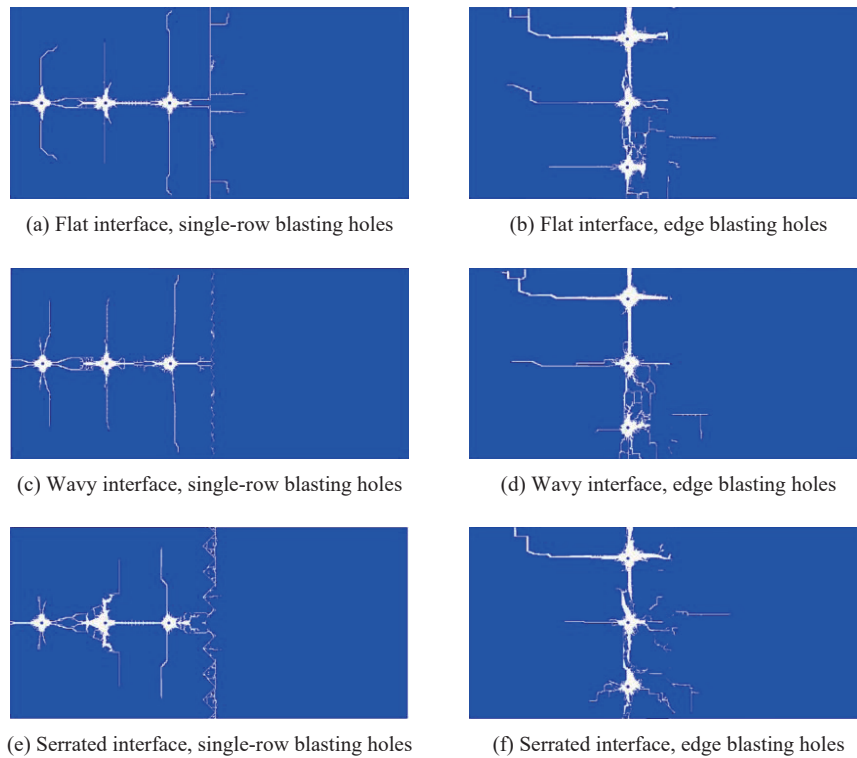


图 8 不同粗糙度耦合界面爆破裂隙对比(以采用不同炮孔模型逐孔起爆的 7 d 龄期界面耦合体为例)

Fig. 8 Comparison of blasting cracks at different roughness coupling interfaces (taking the 7-day-age interface coupling body detonated hole by hole based on different blasing hole models as an example)

2.2.2 峰值应力

表 5 为不同粗糙度界面耦合体的 1~4 监测点的峰值拉应力数值对比, 其中界面耦合体养护龄期为 7 d, 起爆方式为同时起爆。

表 5 不同粗糙度界面耦合体监测点 1~4 峰值拉应力

Table 5 Peak tensile stress at monitoring points 1-4 in the interface coupling bodies with different roughnesses

监测点编号	单排炮孔峰值拉应力/MPa			两帮炮孔峰值拉应力/MPa		
	$c_{jr}=0$	$c_{jr}=8$	$c_{jr}=20$	$c_{jr}=0$	$c_{jr}=8$	$c_{jr}=20$
1	9.96	3.06	2.56	0.73	4.76	0.73
2	0	2.85	0.04	0.90	4.46	0.04
3	0	9.17×10^{-3}	0.02	3.73×10^{-3}	0.01	0.02
4	0	9.61×10^{-3}	0.01	4.86×10^{-3}	0.02	0.02

由表 5 可知, 对于单排炮孔, $c_{jr}=0$ 的耦合界面在监测点 1 处受到的拉应力峰值较大, 而监测点 2~4 处拉应力峰值为零。 $c_{jr}=8$ 的耦合界面在监测点 1 处拉应力峰值较 $c_{jr}=0$ 界面的小, 但其在监测点 2 处仍受到较大的拉应力作用, 监测点 3、4 处受到的影响较小。 $c_{jr}=20$ 的耦合界面在监测点 1 处的应力峰值最小, 在监测点 2~4 处受到的拉应力峰值较小。分析可知: 在界面 JRC 值由 0 提高至 8 的过程中, 界面处受到的冲击波力学作用增强; JRC 值由 8 提高至 20 的过程中, 界面处受到的冲击波力学作用减弱。在模拟的 3 种 JRC 值耦合界面中, $c_{jr}=20$ 的耦合界面受到的拉应力最小, 可以推测出提高界面 JRC 值, 界面处受力情况呈先上升后下降的趋势。这种变化趋势在两帮炮孔模型的各监测点峰值拉应力对比中呈现得更明显。

2.3 不同龄期充填体耦合界面爆破损伤分析

2.3.1 裂隙扩展

不同龄期充填体耦合界面在受到爆破扰动后产生的裂隙如图 9~10 所示。对于单排炮孔, 28 d 龄期

充填体耦合界面受爆破扰动产生的裂隙范围更小, 且主要为沿耦合界面的裂隙, 仅在锯齿形界面中观察到存在向充填体内部延伸的裂隙, 考虑为随充填体养护时间增长, 粗糙度更大的界面力学性能更强, 导致爆破不足以产生沿界面的贯通裂隙, 从而使剩余爆生气体膨胀产生伸向充填体内部的拉伸裂隙, 这属于模拟中遇到的偶然现象, 当爆生气体足以产生沿界面的贯通裂隙时, 不会产生伸向充填体内部的裂隙。对于两帮炮孔, 两种不同龄期充填体耦合界面的损伤呈现出与单排炮孔相同的规律, 同时 28 d 龄期充填体耦合界面并未产生明显的向充填体内部延伸的裂隙, 表明在两帮炮孔起爆时, 耦合界面主要受到剪切作用。分析裂隙扩展图可知, 增加养护时间会使耦合体受到的损伤减弱, 同时界面破坏逐步从受拉转化成剪切损伤为主。

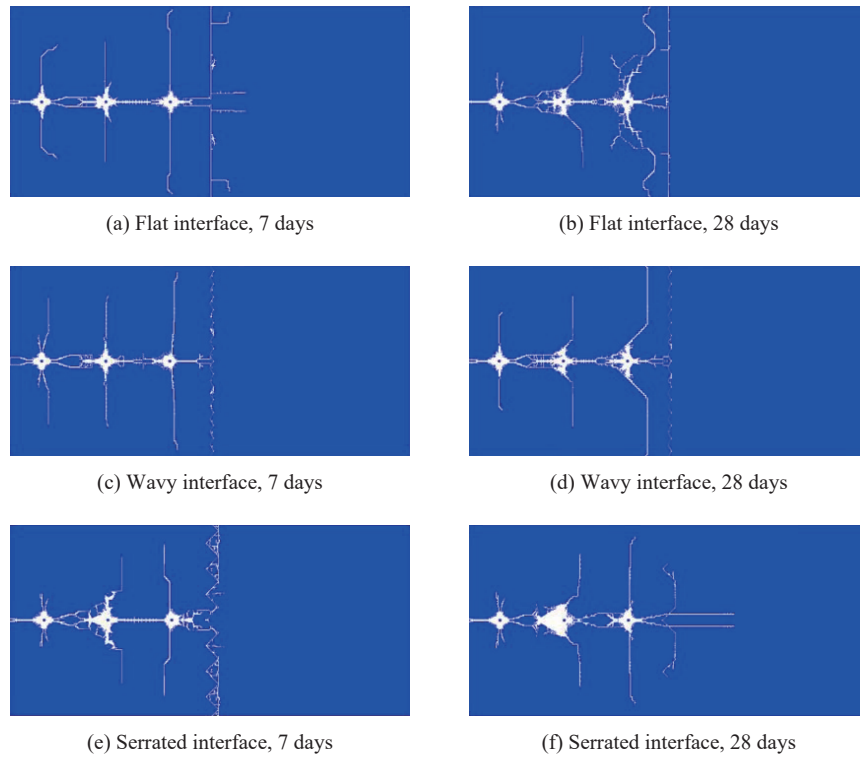


图 9 不同龄期、不同界面粗糙度界面耦合体爆破裂隙对比(以基于单排炮孔模型逐孔起爆的界面耦合体为例)

Fig. 9 Comparison of blasting cracks in different-age interfacial coupling bodies with different interface roughnesses (taking the interface coupling bodies detonated hole by hole based on the the single-row blasting hole model as an example)

2.3.2 峰值应力

表 6 为不同龄期界面耦合体的监测点 1~4 的峰值拉应力数值对比, 其中界面形态为平直形界面, 起爆方式为同时起爆。

表 6 不同龄期界面耦合体监测点 1~4 峰值拉应力

Table 6 Peak tensile stress at monitoring points 1-4 in different-age interface coupling bodies

监测点编号	单排炮孔峰值拉应力/MPa		两帮炮孔峰值拉应力/MPa	
	7 d龄期	28 d龄期	7 d龄期	28 d龄期
1	9.96	3.12	0.73	0.70
2	1.15×10^{-3}	2.10×10^{-3}	0.90	0.97
3	1.43×10^{-3}	0.03	3.73×10^{-3}	0.56
4	9.56×10^{-4}	0.02	4.86×10^{-3}	0.26

由表 6 可知, 随着充填体养护时间增长, 不同炮孔模型起爆在监测点 1 处产生的峰值拉应力减小, 而在监测点 2 处峰值拉应力数值略有增加, 监测点 3、4 处的峰值拉应力值增大。考虑随着充填体养护

龄期增长, 充填体力学性能增强, 充岩耦合界面处应力波折反射程度加剧, 导致界面及充填体内受到的拉应力值增加。

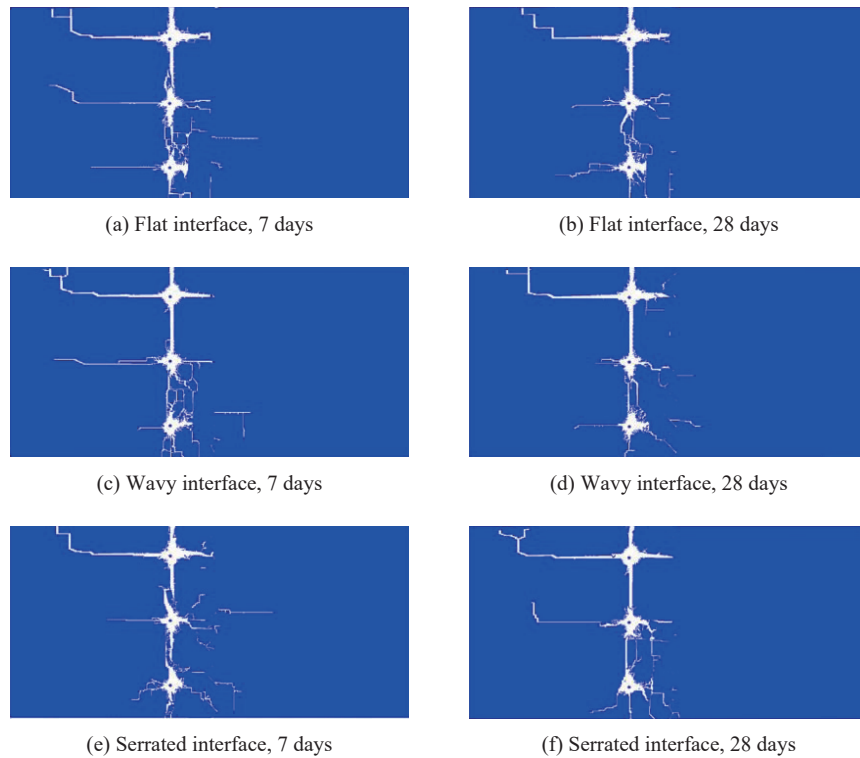


图 10 不同龄期、不同界面粗糙度界面耦合体爆破裂隙对比(以基于两帮炮孔模型逐孔起爆的界面耦合体为例)

Fig. 10 Comparison of blasting cracks in different-age interfacial coupling bodies with different interface roughnesses (taking the interface coupling bodies detonated hole by hole based on the the edge blasting hole model as an example)

2.4 不同起爆方式对耦合界面爆破损伤分析

2.4.1 裂隙扩展

图 11~12 为不同起爆方式下 7 d 龄期充填体的单排和两帮炮孔爆破裂隙扩展图。对于单排炮孔, 7 d 龄期充填体受到同时起爆的扰动后在界面处产生的裂隙较逐孔起爆少, 其中平直形界面更能明显观察到这种差异。对于两帮炮孔, 同时起爆产生的扰动会造成贯通整个界面的裂隙, 而逐孔起爆会造成伸向充填体内部的裂隙, 造成充填体受损。综合分析得出同时起爆对界面的扰动弱于逐孔起爆的规律。

2.4.2 峰值应力

表 7 为不同起爆方式下界面耦合体的监测点 1~4 的峰值拉应力数值对比, 其中界面形态为平直形界面, 界面耦合体养护龄期为 7 d。

表 7 不同起爆方式下界面耦合体监测点 1~4 峰值拉应力

Table 7 Peak tensile stress at monitoring points 1-4 in interfacial coupling bodies with different detonation modes

监测点编号	单排炮孔峰值拉应力/MPa		两帮炮孔峰值拉应力/MPa	
	同时起爆	逐孔起爆	同时起爆	逐孔起爆
1	9.96	2.66	0.73	14.64
2	0	0.09	0.90	2.34
3	0	0.05	3.73×10^{-3}	0.19
4	0	0.04	4.86×10^{-3}	0.16

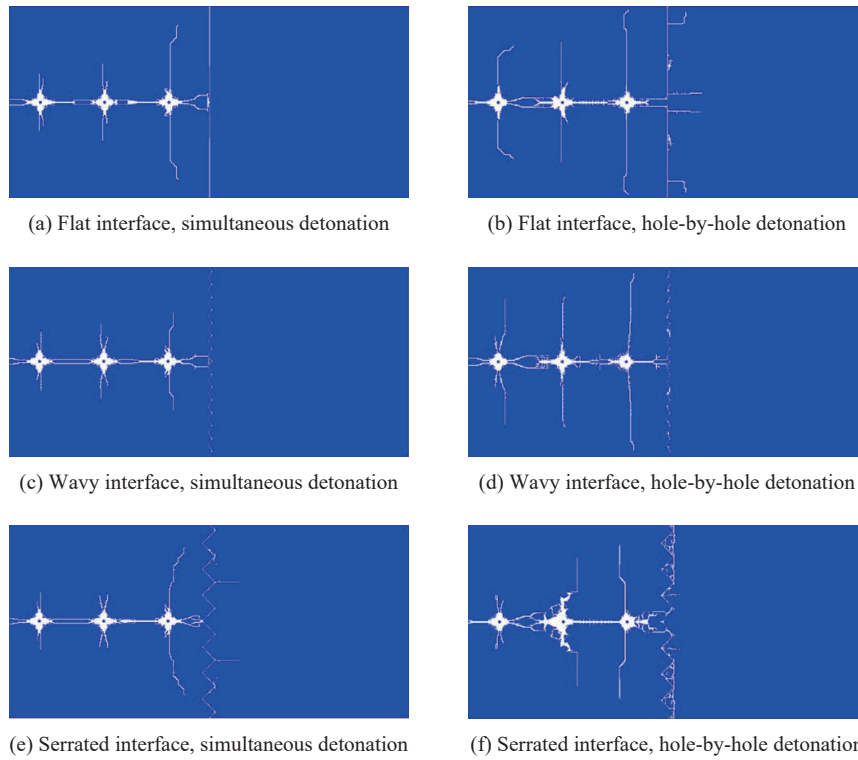


图 11 基于单排炮孔模型, 不同起爆方式下, 界面粗糙度不同的 7 d 龄界面耦合体爆破裂隙对比
Fig. 11 Comparison of blasting cracks in 7-day-age interface coupling bodies with different interfacial roughnesses detonated by different modes based on the single-row blasting holde model

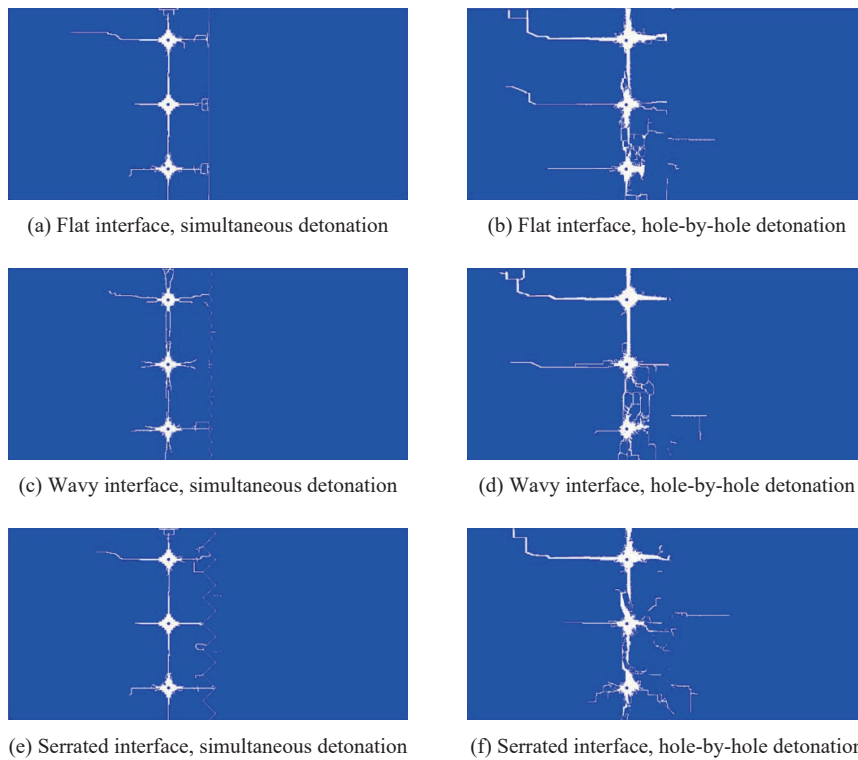


图 12 基于两帮炮孔模型, 不同起爆方式下, 界面粗糙度不同的 7 d 龄界面耦合体爆破裂隙对比
Fig. 12 Comparison of blasting cracks in 7-day-age interface coupling bodies with different interfacial roughnesses detonated by different modes based on the edge blasting holde model

由表7可知,对于单排炮孔模型,同时起爆在监测点1处产生的拉应力峰值较逐孔起爆高,在监测点2~4处均小于逐孔起爆;对于两帮炮孔模型,同时起爆在各监测点处拉应力峰值都较逐孔起爆低,分析得出界面耦合体在不同起爆方式下受力情况不同,逐孔起爆产生的扰动比同时起爆大,在同等条件下耦合体的充填体部分受到的损伤更大。

3 结 论

采用显式动力分析软件 ANSYS/LS-DYNA,建立了充-岩耦合体动力仿真模型,探讨了爆破冲击对界面耦合体的力学作用机理,探究了结构面特征、充填体力学性能和起爆方式等因素变化对界面耦合体受爆破扰动下裂隙扩展及应力波峰值应力的影响规律,得到的结论如下。

(1)模拟结果验证了爆炸冲击会对界面耦合体产生拉、压和剪3种力学作用,在应力波经过耦合界面时,会发生不同程度的折射和反射现象,导致应力波能量快速衰减等已知规律。

(2)不同的界面参数会影响爆破冲击对耦合界面的剪切作用,表现为不同节理粗糙度的耦合界面产生的主要裂隙类型不同,随着节理粗糙度的提高,界面处受力情况呈先上升后下降,整个耦合体的受损情况降低的规律。

(3)随着充填体养护时间的增长,充填体力学性能上的提高使得爆破对其拉伸作用效果明显减小,耦合面破坏逐步从受拉转化成剪切损伤为主。同时起爆比逐孔起爆对耦合界面的扰动弱,耦合界面处裂隙扩展范围比逐孔起爆小,且未出现沿齿根断裂的裂隙,剪切作用被削弱。

参考文献:

- [1] 张海波,宋卫东. 评述国内外充填采矿技术发展现状 [J]. *中国矿业*, 2009, 18(12): 59-62. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4051.2009.12.018.
ZHANG H B, SONG W D. Discussion on the current state of backfill mining from the domestic and foreign development [J]. *China Mining Magazine*, 2009, 18(12): 59-62. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4051.2009.12.018.
- [2] 王湘桂,唐开元. 矿山充填采矿法综述 [J]. *矿业快报*, 2008, 24(12): 1-5.
WANG X G, TANG K Y. Overview of cut and fill method for mines [J]. *Express Information of Mining Industry*, 2008, 24(12): 1-5.
- [3] 尹升华,吴爱祥. 缓倾斜中厚矿体采矿方法现状及发展趋势 [J]. *金属矿山*, 2007(12): 10-13. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1250.2007.12.002.
YIN S H, WU A X. Status quo of mining methods for gently inclined medium-thick orebodies and their development trend [J]. *Metal Mine*, 2007(12): 10-13. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1250.2007.12.002.
- [4] 刘光生. 充填体与围岩接触成拱作用机理及强度模型研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2017: 17-22.
LIU G S. Required strength model of cemented backfill with research on arching mechanism considering backfill-rock interaction [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017: 17-22.
- [5] 韩斌,王贤来,肖卫国. 基于多元非线性回归的井下采场充填体强度预测及评价 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2012, 29(5): 714-718.
HAN B, WANG X L, XIAO W G. Estimation and evaluation of backfill strength in underground stope based on multivariate nonlinear regression analysis [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2012, 29(5): 714-718.
- [6] 贺桂成,刘永,丁德馨,等. 废石胶结充填体强度特性及其应用研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2013, 30(1): 74-79.
HE G C, LIU Y, DING D X, et al. Strength characteristic of cemented waste rock backfills and its application [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2013, 30(1): 74-79.
- [7] 孙宁新,雷明锋,张运良,等. 软弱夹层对爆炸应力波传播过程的影响研究 [J]. *振动与冲击*, 2020, 39(16): 112-119, 147. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.16.016.
SUN N X, LEI M F, ZHANG Y L, et al. A study on the influence of weak interlayer on the propagation process of explosion stress wave [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(16): 112-119, 147. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.16.016.
- [8] 李夕兵. 论岩体软弱结构面对应力波传播的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 1993, 13(4): 334-342.

- LI X B. Influence of the structural weakness planes in rock mass on the propagation of stress waves [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1993, 13(4): 334–342.
- [9] 李夕兵, 陈寿如. 应力波在层状矿岩结构中传播的新算法 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 1993, 24(6): 738–742.
LI X B, CHEN S R. A new method for investigating the propagation of stress waves through layered rockmass [J]. *Journal of Central South University*, 1993, 24(6): 738–742.
- [10] 李夕兵, 古德生, 赖海辉. 爆炸应力波遇夹层后的能量传递效果 [J]. *有色金属*, 1993, 45(4): 1–6.
LI X B, GU D S, LAI H H. Energy transmission effects of transient stress waves through sandwiches in rock mass [J]. *Nonferrous Metals*, 1993, 45(4): 1–6.
- [11] SCHOENBERG M. Elastic wave behavior across linear slip interfaces [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, 68(5): 1516–1521. DOI: 10.1121/1.385077.
- [12] PYRAK L J, MYER L R, COOK N G W. Anisotropy in seismic velocities and amplitudes from multiple parallel fractures [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1990, 95(B7): 11345–11358. DOI: 10.1029/JB095iB07p11345.
- [13] SCHOENBERG M E, MUIR F. A calculus for finely layered anisotropic media [J]. *Geophysics*, 1989, 54(5): 581–589. DOI: 10.1190/1.1442685.
- [14] FAN L F, MA G W, LI J C. Nonlinear viscoelastic medium equivalence for stress wave propagation in a jointed rock mass [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 50: 11–18. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2011.12.008.
- [15] LI J C, MA G W, ZHAO J. An equivalent viscoelastic model for rock mass with parallel joints [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, 115(B3): B03305. DOI: 10.1029/2008jb006241.
- [16] MA G W, FAN L F, LI J C. Evaluation of equivalent medium methods for stress wave propagation in jointed rock mass [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, 37(7): 701–715. DOI: 10.1002/nag.1118.
- [17] 杨立云, 刘振坤, 周莹莹, 等. 爆炸应力波在含层理介质中传播规律的实验研究 [J]. *爆破*, 2008, 35(2): 1–5, 11. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2018.02.001.
YANG L Y, LIU Z K, ZHOU Y Y, et al. Study on propagation law of explosive stress wave in layered media [J]. *Blasting*, 2008, 35(2): 1–5, 11. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2018.02.001.
- [18] 杨仁树, 李炜煜, 方士正, 等. 层状复合岩体冲击动力学特性试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(9): 1747–1757. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0021.
YANG R S, LI W Y, FANG S Z, et al. Experimental study on impact dynamic characteristics of layered composite rocks [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(9): 1747–1757. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0021.
- [19] 包会云. 层状岩体应力波传播特性及震源定位研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2015: 45–61.
BAO H Y. Research on propagation characteristics of stress wave propagation in layered rock and vibration source localization [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015: 45–61.
- [20] 武仁杰, 李海波. SHPB 冲击作用下层状千枚岩多尺度破坏机理研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(8): 083106. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0187.
WU R J, LI H B. Multi-scale failure mechanism analysis of layered phyllite subject to impact loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(8): 083106. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0187.
- [21] 刘婷婷, 李新平, 李海波, 等. 应力波在充填节理岩体中传播规律的数值研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(S2): 3552–3560. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0829.
LIU T T, LI X P, LI H B, et al. Numerical study on stress wave propagation across filled joints [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(S2): 3552–3560. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0829.
- [22] 李秀虎, 郭连军, 潘博, 等. 节理岩体爆破数值模拟研究 [J]. *辽宁科技大学学报*, 2017, 40(5): 390–395. DOI: 10.13988/j.ustl.2017.05.013.
LI X H, GUO L J, PAN B, et al. Numerical simulation of blasting in jointed rock mass [J]. *Journal of University of Science and Technology Liaoning*, 2017, 40(5): 390–395. DOI: 10.13988/j.ustl.2017.05.013.
- [23] 朱鹏瑞, 宋卫东, 曹帅, 等. 爆破动载下胶结充填体的张拉力学响应机制 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(3): 605–611. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2018.03.022.
ZHU P R, SONG W D, CAO S, et al. Tensile mechanical response mechanism of cemented backfills under blasting load [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2018, 35(3): 605–611. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2018.03.022.
- [24] 刘志祥, 李夕兵. 爆破动载下高阶阶段充填体稳定性研究 [J]. *矿冶工程*, 2004, 24(3): 21–24. DOI: 10.3969/j.issn.0253-6099.

- 2004.03.007.
- LIU Z X, LI X B. Research on stability of high-level backfill in blasting [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2004, 24(3): 21–24. DOI: 10.3969/j.issn.0253-6099.2004.03.007.
- [25] 王振昌. 二步回采围岩和充填体爆破损伤特征及安全阈值研究 [D]. 福州: 福州大学, 2018: 10–26.
- WANG Z C. Study on blasting damage characteristics and safety threshold of surrounding rock and backfill in two-step mining [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2018: 10–26.
- [26] 李化, 黄润秋. 岩石结构面粗糙度系数 JRC 定量确定方法研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(S2): 3489–3497. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.s2.012.
- LI H, HUANG R Q. Method of quantitative determination of joint roughness coefficient [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(S2): 3489–3497. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.s2.012.
- [27] 王岐. 用伸长率 R 确定岩石节理粗糙度系数的研究 [C]//地下工程经验交流会论文选集. 甘肃: 中国岩石力学与工程学会, 1982: 355–360.
- WANG Q. Study on determining the roughness coefficient of rock joints with elongation R [C] // Gansu: Meeting on Underground Engineering Experience Sharing, 1982: 355–360.
- [28] 杜时贵, 陈禹, 樊良本. JRC 修正直边法的数学表达 [J]. *工程地质学报*, 1996, 4(2): 36–43.
- DU S G, CHEN Y, FAN L B. Mathematical expression of JRC modified straight edge [J]. *Journal of Engineering Geology*, 1996, 4(2): 36–43.
- [29] 段军, 常诗源, 张鹏飞, 等. 双利铁矿台阶爆破空气间隔长度研究与应用 [J]. *中国矿业*, 2020, 29(6): 155–158. DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.2020.06.006.
- DUAN J, CHANG S Y, ZHANG P F, et al. Study and application of bench blasting interval length in Shuangli mine [J]. *China Mining Magazine*, 2020, 29(6): 155–158. DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.2020.06.006.
- [30] 曹杨. 中深孔台阶爆破模拟与研究 [D]. 太原: 中北大学, 2012: 27–47.
- CAO Y. Simulation and research on the medium-length hole bench blasting [D]. Taiyuan: North University of China, 2012: 27–47.
- [31] 季京晨. 花岗岩物理力学性质与宏微观力学特性研究 [D]. 安徽淮南: 安徽理工大学, 2019: 27–28.
- JI J C. Study on the physical and mechanical properties of the granite and the micro-mechanical properties of the macro [D]. Huainan, Anhui: Anhui University of Science and Technology, 2019: 27–28.
- [32] 刘永涛. 不同龄期尾砂胶结充填体单轴压缩破坏的声发射及断口分形特征 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2018: 21–26.
- LIU Y T. Acoustic emission and fractal characteristics of cemented tailings backfill in different age under uniaxial compression [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2018: 21–26.
- [33] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2013: 24–25.
- CAI M F, HE M C, LIU D Y. Rock mechanics and engineering [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2013: 24–25.

(责任编辑 张凌云)