

稿号: 2024-0414 (初稿/修改稿, 稿号请作者在退修时补充)

本文亮点介绍 (请在此简单介绍本文的工作亮点, 如创新点、主要突破或应用价值, 以便编辑和审稿人可以更准确、快速地处理和评价本文, 该内容在文章发表的时候会被删除): 通过设计试验与 LS-DYNA 数值模拟相结合的方式, 从应力波与能量传播的层面研究充填节理对爆破块度的影响, 得到了不同倾角充填节理对爆破块度的影响规律

不同倾角充填节理对岩石爆破块度影响研究

陶明^{1*}, 曹峥¹, 赵瑞¹, 刘玉龙², 李夕兵¹

(1.资源与安全工程学院, 中南大学, 湖南 长沙 410083

2.中广核铀业发展有限公司, 北京 100029)

摘要: 节理的存在对岩石爆破效果有显著影响。通过试验与数值模拟相结合的方式研究不同节理倾角对爆破块度的影响。采用一组含有不同角度节理的混凝土模型试样开展爆破试验, 在试样竖直孔中装填雷管并爆破, 使用高速摄像机记录试样爆破破碎过程, 观测了起爆后不同时刻节理面的动态响应, 利用图像处理方法进行爆破块度提取, 分析了节理倾角对爆破块度的影响, 采用 LS-DYNA 有限元数值模拟获得应力波的传播过程以及应变场的演变过程。试验与数值计算结果表明, 节理对爆破块度分布及应力波传播有显著影响, 主要源于爆炸应力波在节理处的反射, 这与节理的变形特性有关, 随着节理倾角增大, 爆破块度先减小后增大, 节理中的有效应力和峰值质点振动速度 (peak particle velocity /PPV) 透射总体呈下降趋势, 但在 45° 至 60° 之间回升, 其中 45° 左右为爆破最有利条件。数值裂纹网络重建和图像处理结果表明, 随着节理倾角的增加, 试样中产生的垂直裂纹增加, 水平裂纹有所减少。研究结果有助于理解节理与爆炸应力波之间的相互作用, 并优化节理岩体的爆破参数。

关键词: 爆破模型试验; 节理岩体; 应力波; 爆破块度分布

Influence of filled joints with different inclination angles on rock blasting fragmentation

Ming Tao^{1*}, Zheng Cao¹, Rui Zhao¹, Yulong Liu², Xibing Li¹

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, 410083, Hunan, China

2. CGNPC Uranium Resources Co., Ltd., Beijing 100029, China)

Abstract: The presence of joints significantly influences the performance of rock blasting. The impact of different joint inclination on blasting fragmentation was studied through a combination of experiments and numerical simulations. In this study, a group of concrete model specimens containing joints with different angles was used to carry out blasting experiments to investigate the effect of joint inclination on blast fragmentation. During experiments, detonators were placed in vertical boreholes in the specimens and detonated, while high-speed camera was used to capture the fragmentation process. The dynamic responses of joint surfaces at different time intervals after detonation was observed, and blasting fragmentation distribution was extracted using image processing techniques. The effect of joint inclination on blasting fragmentation was analyzed. Then LS-DYNA finite element numerical simulations were developed to obtain the propagation of stress waves and the evolution of strain fields within the specimens. Experimental and numerical results indicated that the joints have a significant influence on the distribution of blasting fragmentation and the propagation of stress waves, and the impact of the joints on the blasting performance was mainly attributed to the reflection of blasting waves from the joints, which was related to the deformation characteristics of the joints. With the increase of joint inclination, the blasting fragmentation initially decreased followed by an increase. The effective stress and peak particle velocity (PPV) transmission in the joints decreased overall with the increase of joint inclination but showed a rebound between 45° and 60°, which identified approximately 45° as the most favorable condition for rock fragmentation under blasting. Moreover, the results obtained from numerical crack network reconstruction and image processing revealed that there

39 was an upsurge in the occurrence of vertical cracks in the specimen as the joint inclination increased, while a decline was observed
40 in the presence of horizontal cracks. These study results help in understanding the interaction between joints and blasting stresses
41 and optimizing blasting parameters in jointed rock.

42 **Keywords:** blasting model experiments; jointed rock mass; stress wave; fragmentation distribution

43 1 引言

44 岩体中天然节理和裂隙的存在显著影响爆破作业的有效性, 一个显著的特征是岩石节理内存在的
45 充填材料会影响能量传递和岩石破碎模式^[1-3]。天然岩石中含有大量的微观和宏观不连续面, 在爆破作
46 用下, 这些缺陷与爆炸产生的应力波相互作用, 应力波在缺陷处发生散射, 导致局部应力集中和衰减。
47 节理作为一种常见的不连续面, 当其距离爆源较远时, 主要考虑应力波在节理面上的反射和透射^[4]。
48 爆破 P 波遇到节理时, 产生反射 P 波和 SV 波, 节理产生压缩变形和剪切滑移^[5]。节理的刚度、厚度
49 和倾角对应力波反射和透射特性均存在影响^[1, 6-8], P 波和 S 波的反射一般随节理刚度的增加而减少,
50 随节理厚度的增加而增加^[8]。许多学者的理论研究有助于理解应力波在节理中的传播机理, Li 等^[9-11]对
51 节理岩体中应力波的传播进行了全面的理论分析; Huang 等^[2]分析了节理充填介质对应力波传播的影
52 响, 提出了一种改进的节理变形模型来描述应力波作用下充填节理的变形特性。目前, 人们已广泛从
53 解析角度研究了节理间应力波的传播, 主要考虑了应力和位移的连续性和不连续性条件。

54 节理对岩体破碎的影响无法用理论方法直接评估, 为了更好地评价爆破荷载作用下节理岩体的破
55 坏情况, 我们通过建立数值模型来描述岩石在爆破冲击下的动态响应和损伤机制。Wang 等^[12]结合 LS-
56 DYNA 与 UDEC 软件建立有限元与离散元法 (DEM) 耦合模型, 对节理岩体在爆破作用下的破坏模式
57 进行评估, 研究表明: 节理附近由于应力波的反射而产生大量拉伸裂纹, 且随着节理倾角的增大,
58 岩体的爆破损伤度呈现先增大后减小的趋势。Jiang 等^[12]考虑初始应力的影响, 建立了初始应力作用下的
59 节理岩体有限元模型, 分析了不同倾角节理对爆破裂纹扩展的影响, 结果表明, 与主应力方向相交
60 的节理在爆炸作用下更容易产生拉裂。Yang 等^[13]通过光弹性实验研究评估了初始应力作用下节理模型
61 中爆破诱发裂纹的产生和扩展, 结果表明: 高应力条件增强了节理裂隙处产生的剪切损伤程度, 导致
62 裂纹产生的角度增大; 当节理处于爆破裂纹扩展区内时, 节理会阻碍裂纹在其两侧的透射。近十几年
63 来, 随着计算机技术的发展, 越来越多的数值模拟方法被开发并用于模拟材料的爆破, 例如 DEM^[14]、
64 近场动力学 (PD)^[15]以及混合方法等^[16, 17]。尽管有许多可用的数值方法, 试验和现场测试仍然是评估
65 爆破块度和振动的重要方法。Hao 等^[18]通过现场试验研究了节理对爆破振动传播特性的影响, 结果表
66 明, 峰值质点振动速度 (PPV) 在垂直节理方向上衰减最快。Jhanwar^[19]研究了空气不耦合装药对节理
67 岩体爆破破碎的影响, 结果表明, 相比作用于中等强度、多节理岩体, 空气不耦合装药对极低到低强
68 度的、含少量节理的岩体效果更佳。由于场地限制, 开展爆破试验研究存在困难, 一些学者利用霍普
69 金森杆代替炸药, 研究节理岩体的动态裂纹扩展、破坏模式、破碎以及应力波传播等^[7, 20]。大量研究
70 表明, 节理对岩石爆破具有明显的影响, 包括裂纹扩展、应力波的传播、质点振动的衰减等^[18, 21-24],
71 但目前关于节理对岩石爆破块度影响的研究较少。随着近地表易开采资源日益枯竭, 矿藏地质条件和
72 岩土工程情况日益复杂, 资源开采的挑战也越来越大, 但爆破仍是岩石破碎最有效的方法^[25], 因此研
73 究节理对岩石爆破破碎的影响重要而紧迫。

74 基于以上原因, 本研究对节理混凝土模型进行了物理试验和数值模拟, 以评估单个充填节理对爆
75 破块度的影响, 共对 6 个含不同倾角的充填节理混凝土模型进行了爆破试验。此外, 通过有限元数值
76 模拟研究了爆破过程中应力波的传播和塑性损伤演化情况, 利用数值重构裂纹网络及图像处理方法定
77 量分析了节理倾角对爆破裂纹的影响, 揭示了节理对爆破块度的影响机理, 为节理岩体爆破参数设计
78 及优化提供了指导。

2 模型试验

2.1 试样制备

露天矿和地下矿开采中，节理及层理结构对应力波传播及岩体破碎有显著影响。为了研究充填节理对爆破破碎、应力波传播等的影响，将混凝土浇筑成包含不同节理倾角的条形长方体试样。首先将木板以不同角度插入模具中，将混凝土注入模具，待混凝土初凝后，拉出木板，将石膏砂浆倒入模具中，形成充填节理，如图 1a 所示。试样尺寸及结构示意图如图 1b 所示，尺寸为 10 cm×10 cm×70 cm（宽×高×长），充填节理倾角 $\beta = 15^\circ、30^\circ、45^\circ、60^\circ、90^\circ$ ，厚度为 10 mm，钻孔直径为 10 mm。试样按照 425 水泥、河砂和水 4:6:1 的比例混合制成，条形混凝土试样如图 1c 所示。

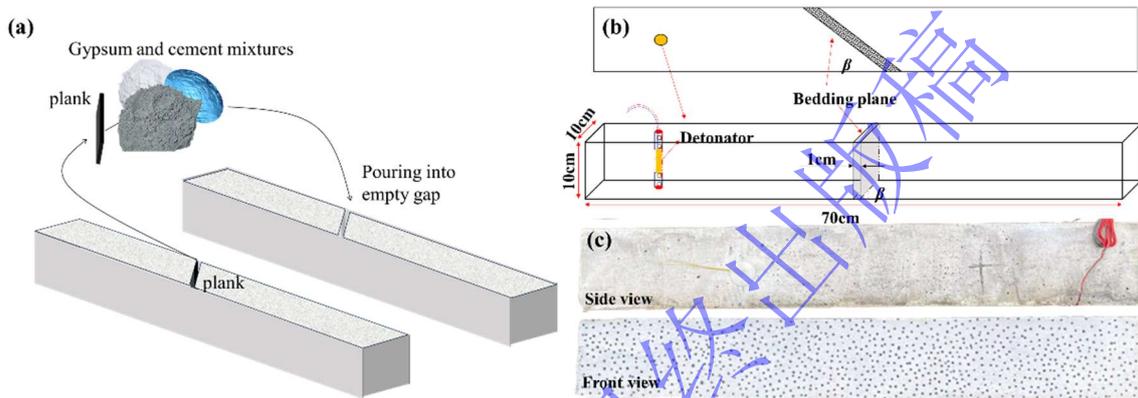


图 1 (a)试样浇筑, (b)试验模型, (c)试样图

Fig.1 (a) Specimen concreting (b) Experimental model and (c) Photograph of the bar sample

试样浇筑完成后放入恒温养护箱内养护 28 天，养护结束后通过室内试验对混凝土试样和节理充填材料的物理力学性能进行测定，结果见表 1。

表 1 材料基本力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters of materials

材料类型	密度 ρ (kg/m ³)	抗压强度 f_c (MPa)	抗拉强度 f_t (MPa)	弹性模量 E (GPa)	泊松比 ν
混凝土	2162	43.85	2.19	20.7	0.23
石膏砂浆	1905	7.4	1.45	1.56	0.32

为了直观地观察爆破过程中试样表面的变形，在其表面喷涂散斑，如图 1c 所示。喷涂散斑之前，在试样上喷涂白色哑光漆，以确保散斑与背景之间形成高对比度，然后使用黑色涂料在试样表面喷涂大小均匀、分布随机的散斑，以便进行后续的数字图像处理。

2.2 试验场地及设备

试验在开放式爆破场地中进行，采用 Photron FASTCAM SA1.1 675K-C1 型高速摄像机记录爆破过程试样的破坏和变形情况，高速摄像机分辨率为 512×1024 像素，FPS = 8000，此外，为保证充足的照明，采用直流同轴光源提供光照。试验装置如图 2 所示。

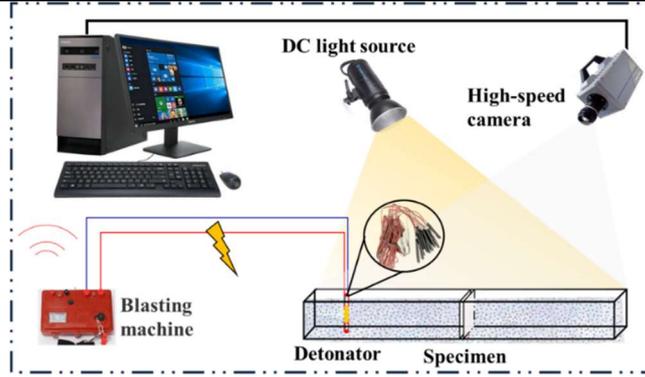


图2 爆破试验示意图

Fig.2 Schematic of blasting experiment

101
102
103
104
105
106
107

为了完整记录试验破坏过程，高速摄像机采用中间手动触发方式，使用瞬发电雷管，起爆前检查雷管电路连通情况。试验过程中，计算机控制面板在高速摄像机触发瞬间，向雷管发出爆炸指令，通过使用中间触发模式，高速摄像机在爆炸发生前就已经开始拍摄并记录试样的图像，在后续处理步骤中，利用数字图像相关（DIC）技术确定爆炸后拍摄的第一幅图像。

108 3 试验结果与处理

109 3.1 试样动态破坏

110 试样的最终断裂形态如图3所示，从图中可以看出，由于直接受到爆破影响，试样的左侧被粉碎，
111 形成了以爆破孔为中心的大致呈圆锥形的辐射状断裂面。随着节理倾角的增大，当 $\beta > 30^\circ$ 时，试样
112 断口处的垂直裂纹增加，这是因为随着节理倾角的增大，更多的应力波在节理面发生反射，在爆炸形
113 成的新自由面附近产生拉伸波和垂直拉伸纹。除完整试样外，有节理的试样均沿节理面断裂。

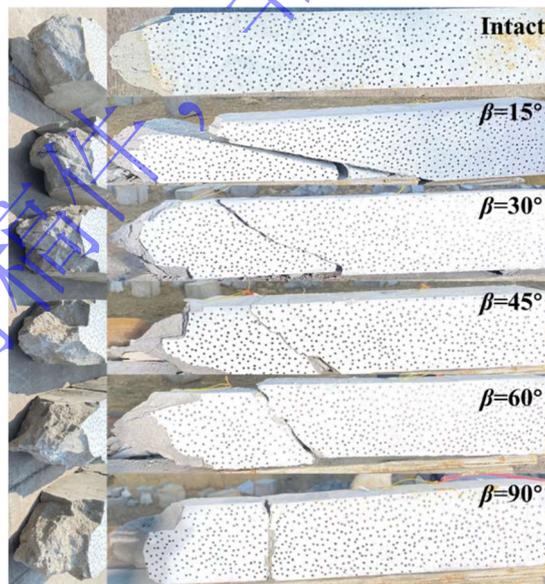


图3 试样最终破坏情况

Fig.3 The final destruction of the samples

114
115
116
117
118
119
120

图4为爆破引起的裂纹分布形态，可见在炮孔周围近场形成破碎区，裂纹区域包含径向裂纹和环向裂纹^[26-28]。由于炮孔周围存在3个自由面，反射的爆炸应力波产生拉伸波，导致靠近自由面处发生拉伸破坏。此外，节理面产生的反射拉伸波也会在炮孔周围诱发垂直裂纹，反射拉伸波产生的垂直裂纹与爆炸引起的径向裂纹和环向裂纹共同构成了图4中的最终破坏边界。

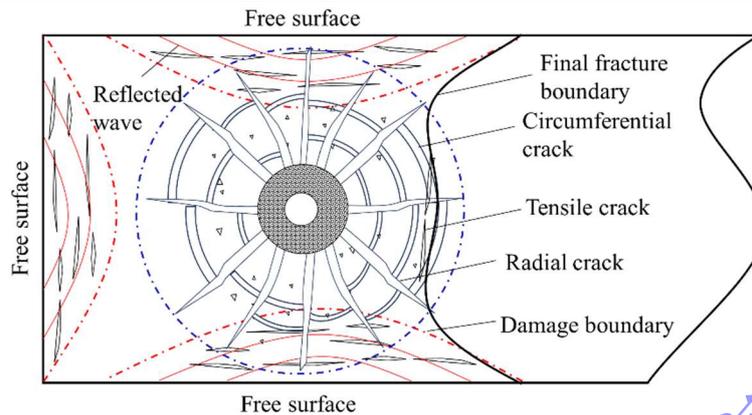


图4 内、外层爆破效果及岩体爆破块度分区示意图

Fig.4 Illustration of inner and outer blasting effects and partition of rock blasting fragmentation

121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131

雷管起爆后，利用高速摄像机记录炮孔周围裂纹的发展和破坏过程，如图5所示。可以观察到，在起爆初始阶段，由于雷管在产生径向应力的同时，还产生了显著的环向拉应力，炮孔周围首先产生径向发散裂纹^[29,30]，但混凝土的抗拉强度远低于抗压强度，导致沿炮孔边缘出现径向发散的裂纹，进而在自由面反射拉伸应力波和动荷载引起的卸荷效应^[31]共同作用下，形成环状拉裂纹。由于炮孔附近的三个自由面均垂直于爆炸产生的波前，形成了大量反射拉伸波，如图5中 $T = 625 \mu\text{s}$ 时刻炮孔周围一圈环向裂纹所示。此外，爆炸过程中必然会产生尘烟，尘烟在爆破过程中会促进裂纹的扩展，但由于其包含有毒气体，在操作过程中应采取适当措施尽量减少有毒气体的扩散。图5为爆破产生的烟尘扩散情况，可以看出，随着爆破过程的进行，从炮孔中突出的烟尘面积逐渐增大。

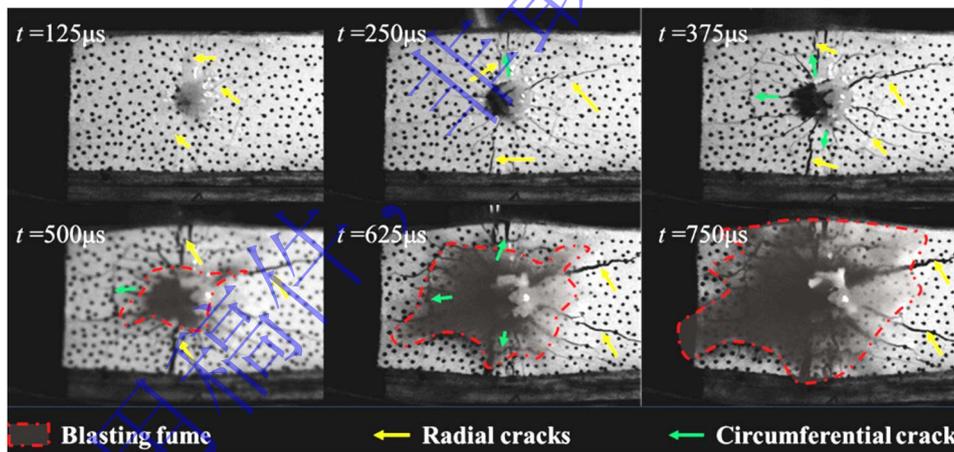
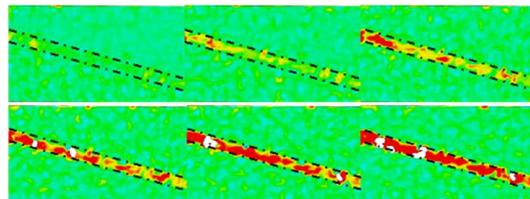


图5 钻孔周围破坏过程高速照片

Fig.5 High-speed photographs of the destruction process around the borehole

132
133
134
135
136

爆炸产生的应力波从炮孔向外传播，对节理面产生动态扰动，利用 DIC 技术获得了起爆后不同时刻节理面的动态响应，如图6所示。



(a) $\beta = 15^\circ$

137
138

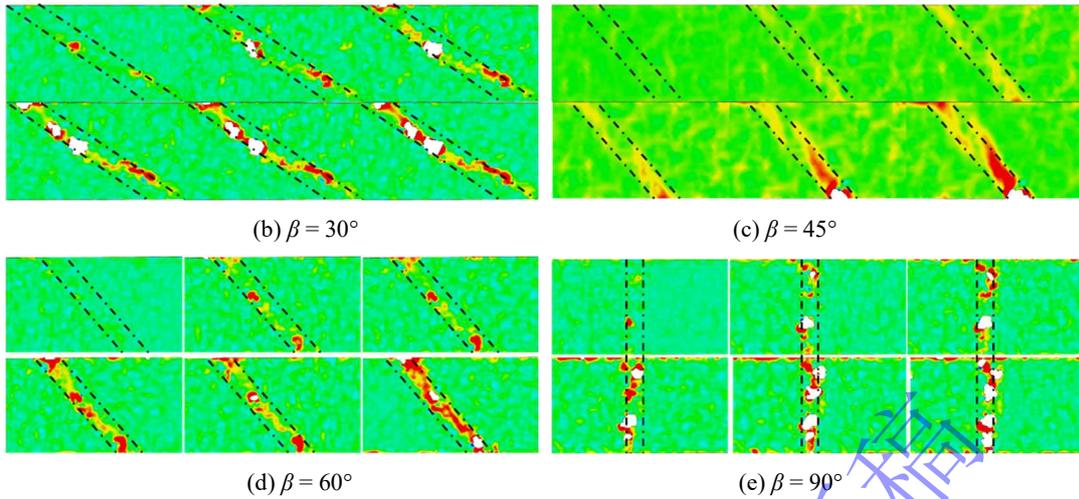


图 6 节理应变场演变($t = 250 \mu\text{s}, 375 \mu\text{s}, 500 \mu\text{s}, 625 \mu\text{s}, 750 \mu\text{s}, 875 \mu\text{s}$)

Fig.6 Strain field evolution of joints($t = 250 \mu\text{s}, 375 \mu\text{s}, 500 \mu\text{s}, 625 \mu\text{s}, 750 \mu\text{s}, 875 \mu\text{s}$)

由于充填材料与混凝土的材料性质不同,应力波在传播过程中,在接触界面处会发生反射和透射,从而产生次生 SV 波,并引起颗粒极化方向的改变^[32]。充填材料和界面的刚度相对于混凝土试样要小得多,因此在应力波的作用下会发生明显的形变。节理面上的应力可以分解为垂直于节理面的法向压缩和沿节理面的剪切,而次生 SV 波会促使压缩变形和剪切滑移的发生^[6]。当节理倾角小于 90° 时,炮孔附近的节理会发生较大的变形,随着应力波向节理右侧传播,应变由上而下逐渐增大,直至节理破坏、分离。节理的破坏也会消耗一部分爆炸能量,导致其附近反射和透射能量降低,耗散能量的大小与其力学参数有关。

3.2 试样爆破块度

为评估节理对爆破后块度分布的影响,试验中收集了爆破产生的破碎岩块。收集到的块度样品如图 7 所示,通过图像处理得到爆破后的块度分布曲线如图 8 所示。此外,图 7 还绘制了块度特征与节理倾角的关系图。其中,“ x_{10} ”表示有 10% 的岩块块度小于该值,其他值同理。

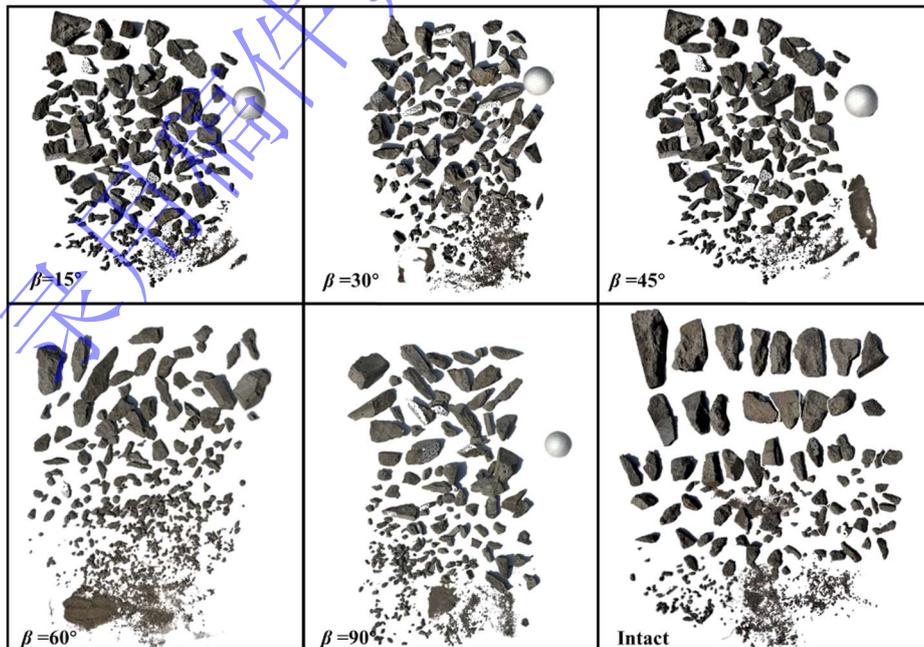


图 7 试样爆破破碎

Fig.7 Fragments of specimens

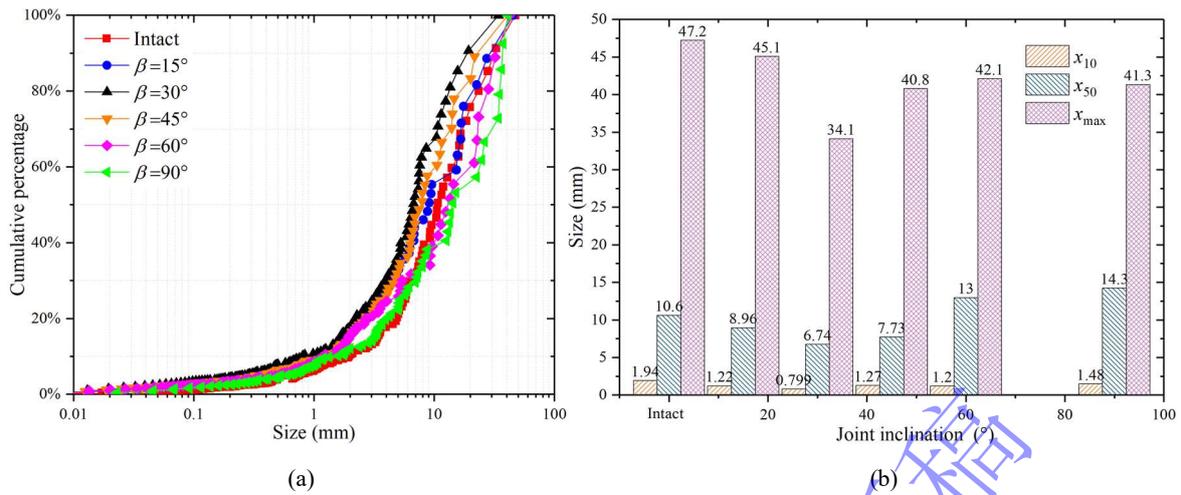


图 8 (a)试样爆破块度分布, (b)特征块度变化

Fig.8 (a) Specimen fragmentation size distributions and (b) Characteristic size variation

图 8a 为试样的爆破块度分布图, 从图中可以看出, 在 1 mm 的区域中, 试样的块度差异不大, 这归因于炮孔近场处于爆破破碎区, 该区域对小尺寸块度的贡献较大, 受试样结构影响较小。但当块度大于 1 mm 后, 节理倾角对爆破块度的影响变得明显。图 8b 表明, 试样的 3 种特征块度均随倾角的变化先减小后增大, 这与现有研究的结果^[33]一致, 表明约 45° 节理倾角是爆破破碎的最有利情况。

尽管在实际试验中可能会出现细微的变化, 我们假设爆炸产生的总能量在所有试样上都是一致的, 并假设该能量在整个爆炸过程中都是守恒的。如上一节所述, 除了爆炸造成的直接破碎外, 节理反射后的反射拉伸波也会影响试样的破碎, 大部分爆炸能量用于直接破碎岩石, 剩余能量则以应力波的形式传播, 该能量部分被节理变形消耗, 部分被节理反射利用, 产生垂直次生裂纹。试样由于抗拉强度低, 在反射的拉伸应力波下, 更容易受损。

由于节理的剪切模量小于压缩模量, 压缩变形比剪切滑移消耗更多的能量。在不考虑节理变形的情况下, 入射能量 (P 波和 S 波) 在节理上的反射随节理倾角的增加而增大^[22, 34-36]。因此, 在本试验中, 反射能量随节理倾角的增大先增大后减小, 说明产生次生裂纹所需的能量随倾角的变化先增大后减小, 最终导致试样的破碎程度随节理倾角的增大先减小后增大^[34]。

4 数值模拟

4.1 模型及材料

在物理试验中, 获取某些数据可能比较困难, 但数值模拟技术有助于理解节理的存在对爆破破碎的影响。因此, 利用有限元软件 LS-DYNA 进行了一组有限元数值模拟, 能够有效地处理爆破等动态问题^[37-39]。为确保结果准确, 时间步长 Δt 设置为小于爆炸应力波传播过任何单元的最小边长所需的时间, 记为 l_{min} ^[37]。图 9 给出了数值模型及网格划分细节。数值模型采用六面体单元离散化, 网格尺寸确定为 1 mm, 采用非共节点、节理与试样面对面接触的方式建模, 为降低计算成本, 采用等效爆破荷载进行加载^[29], 即将等效爆破荷载曲线直接施加在钻孔内壁上。采用 Tao 等^[40]提出的针状等效荷载曲线, 荷载大小为 150 MPa。

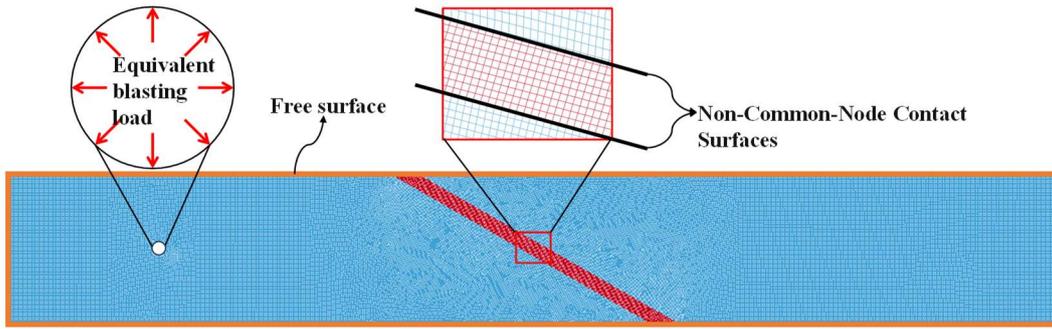


图9 数值模型及网格划分

Fig.9 Numerical model and meshing

185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195

本研究中混凝土试样采用 K&C 模型，并使用 *MAT_Concrete_Damage_Rel3^[41] 材料模型和表格压缩状态方程 (Tabulated Compaction Equation of State)。该材料模型被广泛使用，其中三个剪切破坏面，包括损伤和应变率效应，除泊松比 ν 外只需要无限抗压强度一个材料参数^[42]。用户还可以检查和修改自动生成的模型参数，有关此材料模型的更多信息，请参阅文献^[43]。模型通过控制混凝土试样的体积和变形，使用静水应力张量和偏应力张量的组合来确定应力张量^[44]，适用于脆性材料^[45]。
*MAT_Concrete_Damage_Rel3 材料模型能够很好地表示材料的拉伸和压缩响应、剪胀以及约束和应变率效应之间的差异。爆破通常是一种高应变率荷载，因此必须考虑材料的应变率效应。
*MAT_Concrete_Damage_Rel3 材料模型的动态压缩应变率效应可以用公式 1 描述：

$$r_{fc} = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{1.026\alpha} & \dot{\epsilon} \leq 10^6 \text{ s}^{-1} \quad \alpha = \frac{1}{5+0.9f'_c} \\ \gamma \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{1/3} & \dot{\epsilon} > 10^6 \text{ s}^{-1} \quad \gamma = 10^{6.156\alpha-2} \end{cases} \quad (1)$$

197 动态拉伸应变率效应由公式 2 描述：

$$r_{ft} = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^\delta & \dot{\epsilon} \leq 1.0 / \text{sec} \quad \delta = \frac{1}{1+0.8f'_c} \\ b \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{1/3} & \dot{\epsilon} > 1.0 / \text{sec} \quad b = 10^{6\delta-2} \end{cases} \quad (2)$$

199 式中， r_{fc} 、 r_{ft} 分别为压缩和拉伸的动态强度因子，压缩时 $\dot{\epsilon}_s = 3\text{e-}5 / \text{s}$ ，拉伸时 $\dot{\epsilon}_s = 1\text{e-}6$ 。 f'_c 为材料的单轴抗压强度。部分输入参数可通过室内试验确定，其余所需参数参考 Zhao 等^[46] 的文献，充填节理用 Mohr-Coulomb 材料模型，该模型简单，参数容易确定，可根据室内试验结果通过简单的计算确定相关参数。

203 4.2 数值结果与分析

204 4.2.1 数值结果与试验结果比较

205 基于上述数值模型和材料参数，图 10 给出了数值模拟和试验得到的炮孔周围应变场的演变情况。
206 数值模拟结果清晰地展现了井眼周围裂纹的演变过程，最初，径向压力产生的环向拉应力诱发沿炮孔
207 边缘均匀分布的径向裂纹，随后，自由面的反射导致环向拉裂纹形成。对比图 5 和 10 可发现数值模拟
208 结果与实验结果十分吻合，从而验证了模型的准确性。

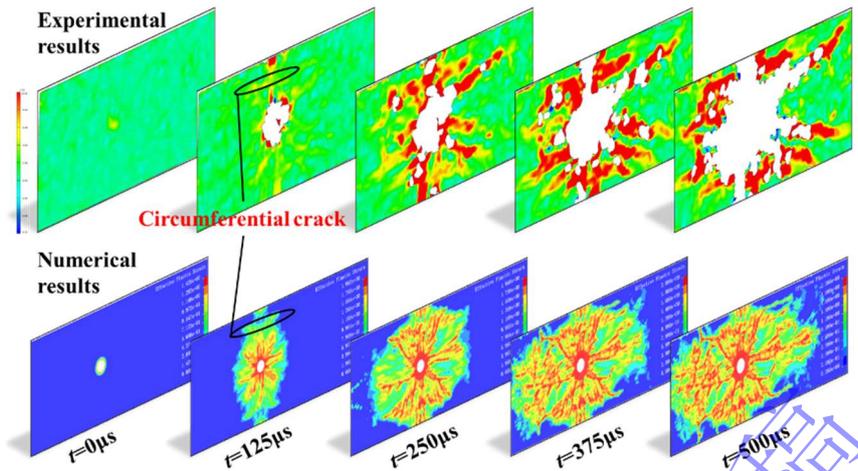


图 10 钻孔周围应变场的演变

Fig.10 Evolution of the strain field around the borehole

209
210
211
212 为了进一步验证数值模型的可靠性,图 11 给出了数值模拟和试验得到的完整试样的块度分布。同
213 样,数值模拟结果与试验结果也具有很好的一致性。因此,我们可以得出结论,建立的有限元加载模
214 型和选择的材料参数适用于模拟爆破引起的岩石破碎。

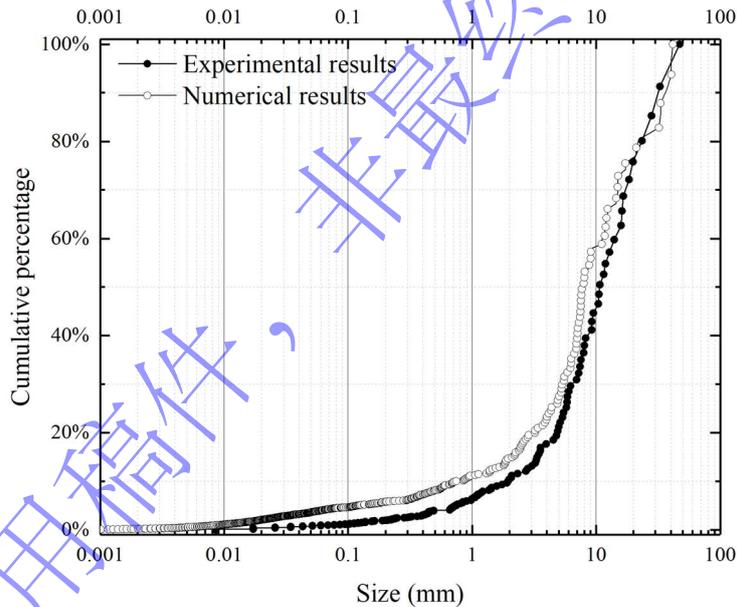


图 11 完整试样爆破块度分布实验结果与数值计算结果对比

Fig.11 Comparison of experimental and numerical results of fragmentations distribution on intact specimen

4.2.2 有效应力与塑性应变演变

218
219 爆破开始后,炮孔壁受到等效荷载,产生径向和环向应力^[30]。这些应力以柱状表面波的形式向外
220 传播,与节理相遇并相互作用^[47]。当遇到节理时,应力波在节理表面发生反射和透射,导致应力水平
221 局部变化^[9]。图 14 显示了爆炸后不同时间点试样中冯·米塞斯(V-M)应力的分布。显然,应力波以相同
222 的速度传播,直到遇到节理。然而,应力波与节理之间的相互作用因节理倾角的不同而不同。可以观
223 察到,应力波在穿过节理后显著衰减,如图 12 在 $t=680\mu\text{s}$ 处所示。由于节理和炮孔的空间位置不同,
224 节理上并非所有点都会同时受到应力,如图 12 在 $t=480\mu\text{s}$ 处所示。

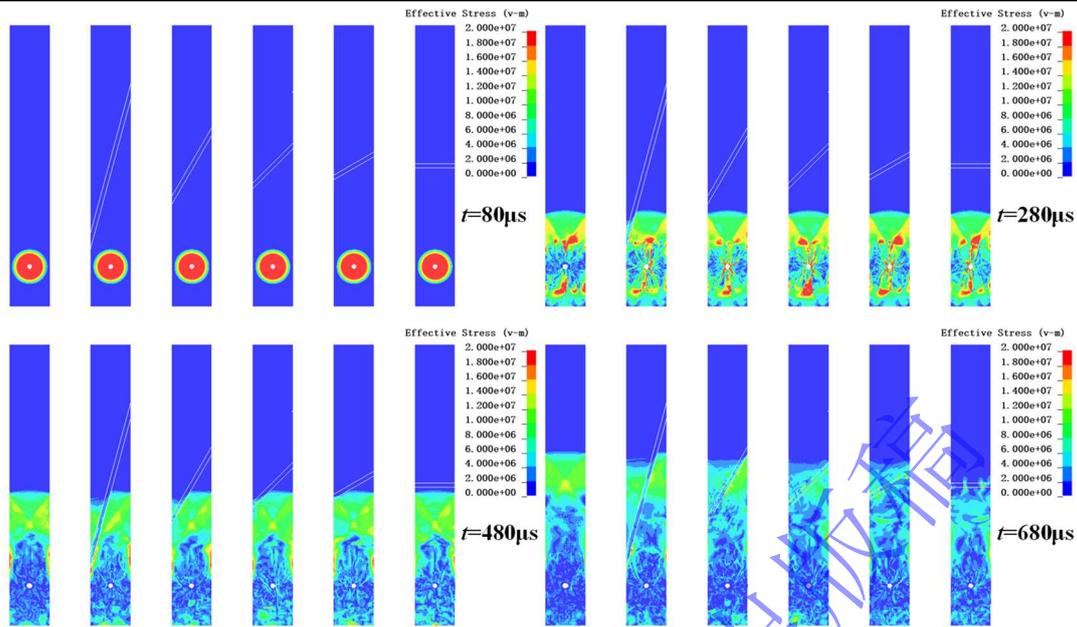


图 12 有效应力分布云图

Fig.12 Cloud chart of effective stress distribution

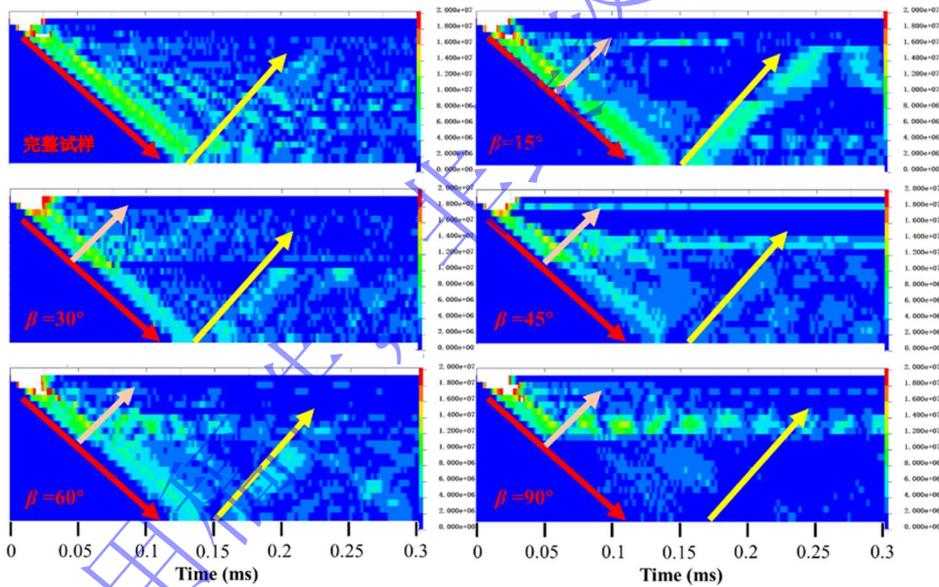


图 13 试样中有效应力的传播

Fig.13 Propagation of effective stress in the specimen

图 13 为数值模拟过程中试样中应力场的传播情况，显示了应力在节理处的反射和透射，以及在自由端的反射。很明显，反射应力的振幅随着节理倾角的增大而增大。为了更清楚地了解节理处应力的传播和衰减，图 14a 描绘了整个数值模拟过程中峰值有效应力沿试样中心轴分布的情况。该图表明，炮孔周围应力迅速降低，同时由于节理附近反射应力的叠加，峰值应力上升，该图清晰地说明了节理对应力波的阻碍作用。值得注意的是，在穿过节理后，与相同位置有节理的试样相比，无节理完整试样的应力振幅更大。进一步，应力透射因子定义为遇到节理前后有效应力振幅的比值。类似地，振动速度透射因子定义为质点通过节理前后振动峰值的比值。图 14b 给出了数值模拟得到的应力与速度透射因子随节理倾角变化的关系。整体上，透射因子随着节理倾角的增大呈减小趋势，又在 60° 时突然增大，这可能与波形改变以及节理的变形特性有关。

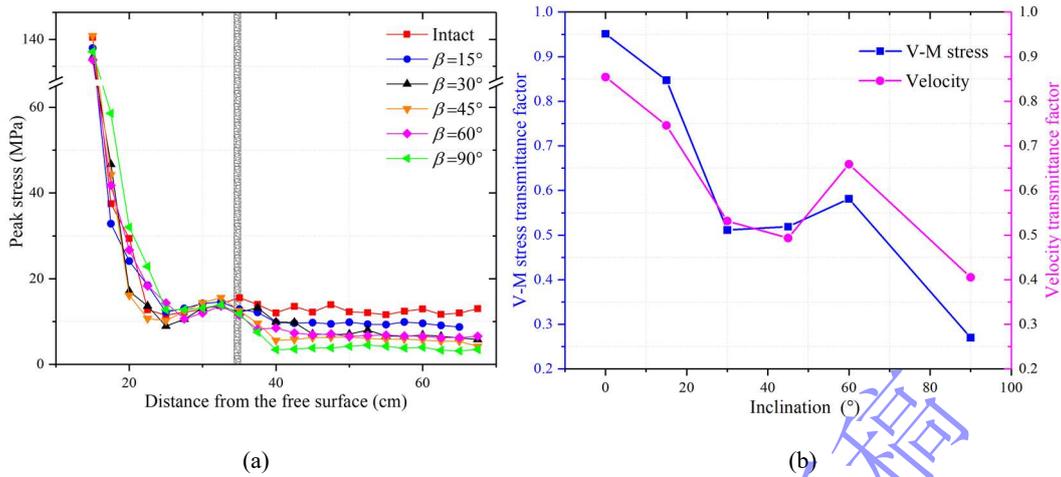


图 14 (a)应力衰减, (b)穿节理透射

Fig.14 (a) Stress attenuation and (b) Transmission across the joint

在试验装置中, 爆炸尘烟的存在阻碍了试样损伤过程的完整可视化。图 15 显示了数值模拟过程中不同时间间隔内有效塑性应变的分布。将图 15 与图 5 进行比较, 可以明显看出炮孔周围的损伤与试验观察结果相符, 特别是在爆炸的早期阶段。在 $t = 680 \mu\text{s}$ 时, 可以观察到不同试样之间应变分布的明显差异, 特别是在节理周围, 这是由于节理附近反射的拉伸波和入射压缩波的叠加导致应变分布发生变化。在 $t = 880 \mu\text{s}$ 时刻, 可以观察到明显的垂直于波传播方向的拉伸裂纹, 这与试验结果一致。此外, 这些裂纹的分布受节理倾斜角的影响, 如第 3.2 节所述。此外, 除了透射之外, 一部分入射能量还用于产生节点变形, 而剩余的能量被反射并导致试样的二次破碎。

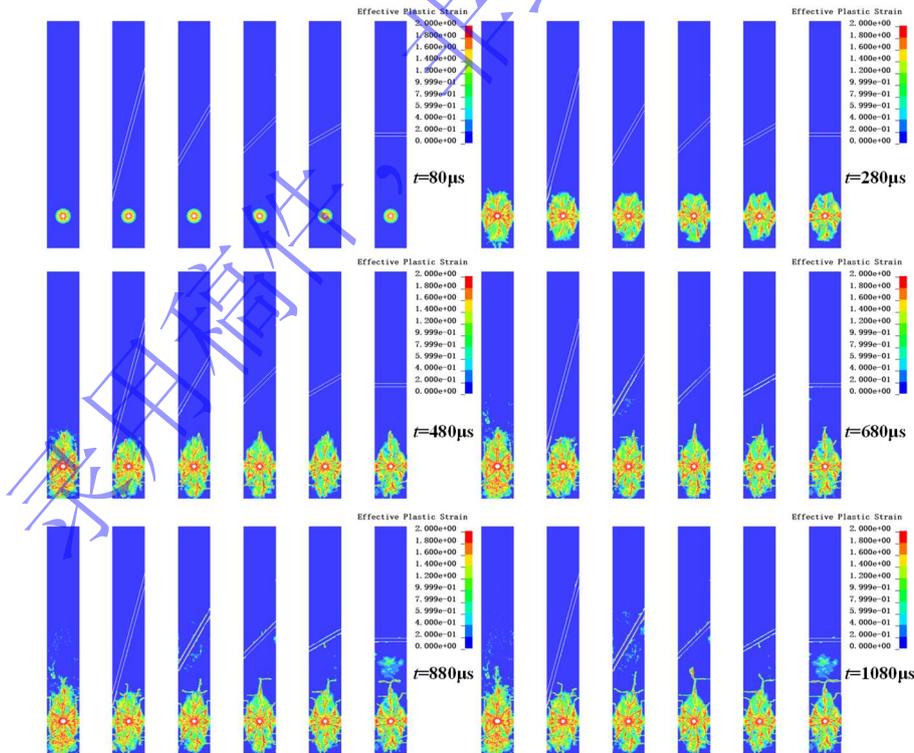


图 15 有效塑性应变云图

Fig.15 Cloud chart of effective plastic strain

由于采用了有限元数值模拟软件, 模拟中没有岩块从试样上脱落, 这有助于重建裂纹网络。利用 Healy^[48]等人开发的处理工具包 FracPaQ, 从数值模拟中获得的 6 个试样最终损伤裂纹分布和相应的裂

256 纹倾角分布玫瑰图绘制在图 16 中。

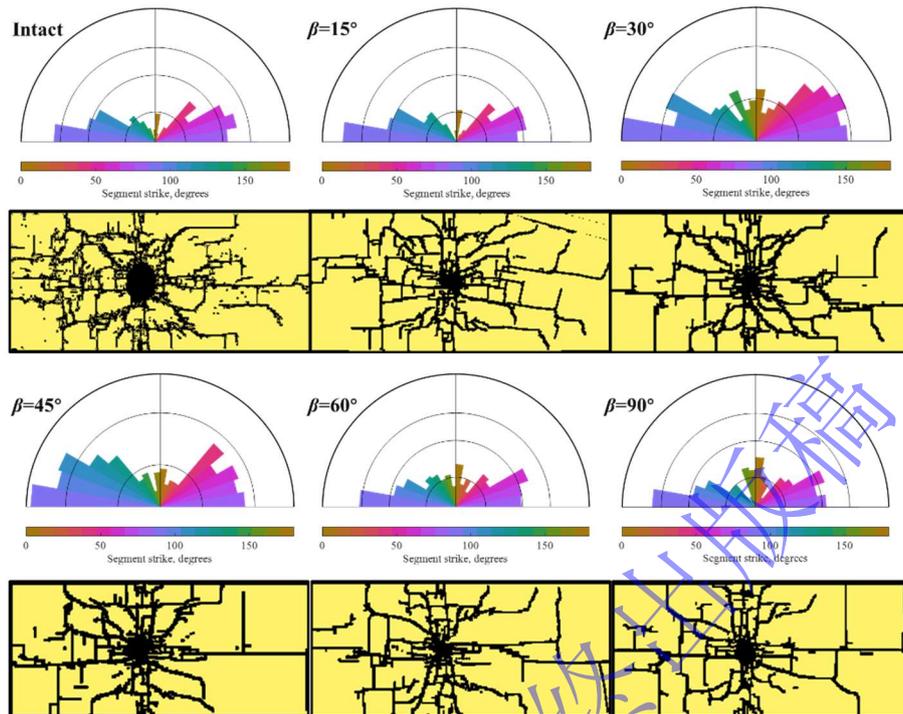


图 16 试样裂纹玫瑰图及裂纹分布

Fig.16 Crack rose diagram and crack distribution of samples

257
258
259
260 从图中可以看出节理的存在对裂纹分布有明显影响。对于无节理的情况，试样的损伤主要受到爆
261 炸引起的应力波和 3 个自由面反射的影响，在 3 个自由面附近形成了平行于自由面的拉伸裂纹^[49]。对
262 于有节理的情况，同样会产生来自三个自由面的反射应力波和与自由面平行的拉伸裂纹，不同之处在
263 于，在炮孔和节理之间的区域还出现了垂直裂纹。从图 16 的玫瑰图可以看出，节理的倾斜角越大，垂
264 直裂纹的数量越多，此外，节理的存在导致水平裂纹的数量最初先增加后减少。这些结果显示了节理
265 对试样爆破破碎的显著影响。

266 5 讨论

267 本文通过控制节理倾角的物理模型试验和基于有限元的 LS-DYNA 数值模拟，分析了节理倾斜角
268 对爆破块度的影响。前文主要研究了节理平面内有效应力和质点速度的透射特性，揭示了节理对应力
269 波的影响，具体而言，节理两侧都会产生 P 波和 S 波^[2,6]。如图 17 所示，其中 I、R、T 分别表示入射
270 波、反射波和透射波，下标 s 和 p 分别表示 SV 波和 P 波。

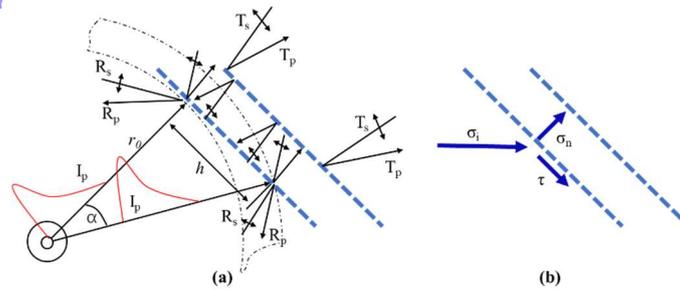


图 17 (a)圆柱形 P 波通过节理面传播示意图，(b)节理面上的应力分量

Fig.17 (a) Schematic diagram of cylindric P-wave propagation through a joint plane and

(b) Stress component on the joint plane

271
272
273
274

275 之前, 我们主要关注的是反射拉伸 P 波的影响。然而, 认识到 SV 波的偏振方向垂直于传播方向
276 至关重要, 因此, SV 波不仅有助于沿传播方向的拉伸作用, 而且还会引起平面内剪切。反射拉伸和剪
277 切作用的结合最终导致试样进一步破碎。为了更加深入地了解应力波在节理上的相互作用, 根据 li 等
278 人的研究^[9], 当一个柱面波入射到节理时, 节理前后的质点振动速度可以由式 3 求得:

$$279 \quad \left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} v_{R_p} \\ v_{R_s} \end{bmatrix}_{(i)} &= -\mathbf{B}^{-1} \mathbf{A} v_{I_p(i)} + \mathbf{B}^{-1} \mathbf{C} \begin{bmatrix} v_{T_p} \\ v_{T_s} \end{bmatrix}_{(i)} \\ \begin{bmatrix} v_{T_p} \\ v_{T_s} \end{bmatrix}_{(i+1)} &= \mathbf{G} \mathbf{D}^{-1} v_{I_p(i)} + \mathbf{G}^{-1} \mathbf{E} \begin{bmatrix} v_{R_p} \\ v_{R_s} \end{bmatrix}_{(i)} + \mathbf{G}^{-1} \mathbf{F} \begin{bmatrix} v_{T_p} \\ v_{T_s} \end{bmatrix}_{(i)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

280 式中, v 表示质点振动速度; A-G 为系数矩阵, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} z_p \cos(2\beta) \\ z_p \sin(2\beta) \tan \beta / \tan \alpha \end{bmatrix}$,

$$281 \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} z_p \cos(2\beta) & -z_s \sin(2\beta) \\ -z_p \sin(2\beta) \tan \beta / \tan \alpha & -z_s \cos(2\beta) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} z_p \cos(2\beta) & -z_s \sin(2\beta) \\ -z_p \sin(2\beta) \tan \beta / \tan \alpha & -z_s \cos(2\beta) \end{bmatrix},$$

$$282 \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} k_n \Delta t \cos \alpha \\ k_s \Delta t \sin \alpha \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} -k_n \Delta t \cos \alpha & k_n \Delta t \sin \beta \\ k_s \Delta t \sin \alpha & k_s \Delta t \cos \beta \end{bmatrix},$$

$$283 \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} z_p \cos(2\beta) - k_n \Delta t \cos \alpha & z_s \sin(2\beta) - k_s \Delta t \sin \alpha \\ z_p \sin(2\beta) \tan \beta / \tan \alpha - k_s \Delta t \sin \alpha & z_s \cos(2\beta) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} z_p \cos(2\beta) & z_s \sin(2\beta) \\ z_p \sin(2\beta) \tan \beta / \tan \alpha & -z_s \cos(2\beta) \end{bmatrix},$$

284 系数矩阵中 Z_p 、 Z_s 分别为材料中的阻抗, $Z_p = \rho c_p$, $Z_s = \rho c_s$, c_p , c_s 分别为材料中的 p-wave 和 s-

285 wave 波速。α 和 β 分别为入射角和透射角度, 满足 snell 定理: $\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{c_s}{c_p}$; 下标 T 和 R 分别表示透

286 射和反射, S 和 P 分别是 S 波和 P 波。

287 对于柱面波的入射, 角度的变化实际上体现在波阵面到节理的距离上, 也即受到图 17a 中的 r_0
288 和 h 的变化控制, 因此我们定义 h/r_0 作为一个无量纲的量来表征入射角度, 本文中的节理倾角可以被
289 表示为 $\arctan(r_0/h)$, 当 $h/r_0=1$ 时候, 对应的角度为 45° , 随着 h/r_0 的增大, 入射角度趋近于 0° 。此外
290 定义反射系数 $R_{p, s}$ 为反射波最大质点速度和入射波最大质点速度的比值:

$$291 \quad R_{P,S} = \frac{\max |v_{R_{P,S}}|}{\max |v_{I_{P,S}}|} \quad (4)$$

292 由于爆破过程中, P 波和 S 波都对试样的破碎有贡献, 进一步, 定义:

$$293 \quad R_{total} = \sqrt{R_p^2 + R_s^2} \quad (5)$$

294 根据式(3)我们获得了不同的 r_0/h 时候的 P 波与 S 波反射系数如图 18 所示:

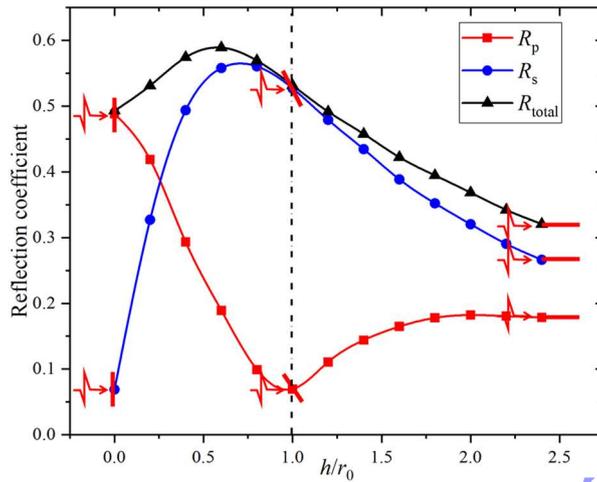


图 18 反射系数与 h/r_0 的关系

Fig.18 Reflection coefficient vs. h/r_0

295
296
297

298 爆炸产生的应力波遇到充填节理时，节理厚度^[50]、填料性质^[8, 51]等因素会影响应力波的反射和透
299 射特性，直接影响节理的变形特性和能量耗散，进而影响爆炸能量的分布和岩石破碎程度，其中，节
300 理倾角是影响爆破块度的重要因素。如图 18 所示，在认识节理对爆破块度的影响时，需要考虑反射 P
301 波和 SV 波的联合作用，理论计算结果表明，在入射 P 波的影响下，随着充填节理倾角的增大，P 波
302 的反射系数先减小后增大，而 S 波的反射系数先增大后减小^[52]，总体的反射系数与 S 波反射系数保持
303 相似的趋势，质点的振动速度满足 $\sigma = \rho cv$ ，因此，反射应力遵从与反射系数一致的趋势。节理在爆炸
304 荷载作用下发生压缩和剪切滑移，目前已提出多种理论模型来描述节理的变形。Bandis 等^[53]提出
305 Barton-Bandis (B-B) 模型描述法向变形，倾斜节理间的剪切变形则用 Mohr-Coulomb (M-C) 滑移模
306 型^[5]来描述。节理在变形过程中，应力波输入的能量被消耗。由于节理的抗压刚度往往大于剪切刚度，
307 因此压缩变形比剪切变形消耗的能量更多。爆破过程中，节理面应力分解如图 17b 所示，表示为：

308
$$\begin{cases} \sigma_n = \sigma_i \sin \beta \\ \tau = \sigma_i \cos \beta \end{cases} \quad (6)$$

309 式中， σ_i 为入射应力，可以得出当节理倾角小于 45° 时，节理面上的剪应力 τ 大于法应力 σ_n ，此时
310 节理变形以剪切变形为主；当节理倾角大于 45° 时，法应力 σ_n 大于剪应力 τ ，此时节理变形以压缩变形
311 为主。节理倾角不同，节理变形过程中消耗的能量也不同，如图 19 所示。

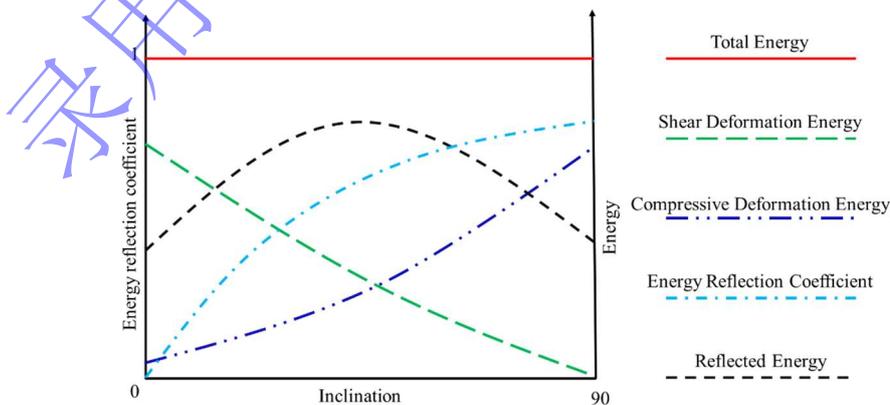


图 19 不同倾斜节理爆破能量消耗示意图

Fig.19 Schematic diagram of energy consumption during blasting for different inclined joints

312
313
314
315

可以认为节理变形所消耗的能量与应力波的反射共同决定了试样的最终破碎程度，但试验中爆破

316 块度的分布与应力波反射系数的分布趋势并不一致，随着节理倾角的增大，爆破块度先逐渐减小后又
317 增大。这一发现有助于在考虑节理填料和节理倾角的情况下理解和优化节理岩体的爆破设计，当节理
318 填料具有较高的法向刚度时，建议避免钻孔与节理面平行，同样，当节理填料具有较高的剪切刚度时，
319 使钻孔与节理之间的角度略大于 45° 可能会获得更好的爆破效果。

320 初始应力对爆炸应力波的传播和裂纹沿节理的扩展也起着至关重要的作用^[12]。在没有初始应力的
321 情况下，节理失效是由于应力波反射引起的拉应力和爆炸引起的直接动态压缩的共同作用而发生的。
322 不同的是，当存在初始应力时，节理的变形及其与应力波的相互作用与没有初始应力的情况不同^[1]，
323 这导致节理与爆破自由面之间发生多次反射和能量吸收。

324 此外，工程中节理发育情况复杂，受倾向、倾角和走向影响，呈现三维空间排列特征。爆破产生
325 的应力波以不同角度遇到节理时，会产生三维散射，大大增强了应力波与节理相互作用的复杂性。

326 6 结论

327 本文结合物理模型试验和有限元数值模拟，综合研究了不同倾角充填节理对类岩石材料爆破破碎
328 的影响，分析了爆炸荷载作用下单节理模型的块度分布、应力波传播及裂纹扩展情况，得到以下结论：

329 (1) 物理模型试验表明，节理的存在对爆破效果有显著影响。节理的变形影响爆破时的能量消耗，
330 导致不同节理倾角下能量反射程度不同。爆破块度随节理倾角的增大呈现先减小后增大的趋势，可以
331 确定倾角约 45° 的节理是爆破破碎的最有利情况。

332 (2) 节理处产生的应力波反射对岩石爆破破碎产生明显影响，反射产生的拉伸应力波能量促使岩
333 体发生二次破碎，导致节理面附近拉伸裂纹增多。

334 (3) 爆炸应力波穿过节理时发生明显衰减，导致质点振动振幅减小，有效应力减小，PPV 透射因子
335 和有效应力总体呈现减小趋势，且在 45° 和 60° 附近出现上升拐点。

336 致谢 本文的研究得到了国家自然科学基金（批准号：12072376）和中南大学中央高校基本科研业务费专项资金（批准
337 号：10533220215858）的资助。

338

339 参考文献

- 340 [1] LIU T, DING L, ZHENG Y, et al. Calculating the attenuation of stress waves passing through an in situ
341 stressed joint using a double nonlinear model [J]. *Waves in Random and Complex Media*, 2021: 1-21.
- 342 [2] HUANG X, QI S, XIA K, et al. Particle Crushing of a Filled Fracture During Compression and Its Effect
343 on Stress Wave Propagation [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123.
- 344 [3] WANG Z, KONIETZKY H, SHEN R. Coupled finite element and discrete element method for
345 underground blast in faulted rock masses [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29: 939-
346 45.
- 347 [4] DENG X F, ZHU J B, CHEN S G, et al. Numerical study on tunnel damage subject to blast-induced shock
348 wave in jointed rock masses [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 43: 88-100.
- 349 [5] DU J, HUANG X, YANG G, et al. UDEC Modelling on Dynamic Response of Rock Masses with Joint
350 Stiffness Weakening Attributed to Particle Crushing of Granular Fillings [J]. *Rock Mechanics and Rock
351 Engineering*, 2022, 56.
- 352 [6] LI X, LI H, LI J, et al. Research on Transient Wave Propagation Across Nonlinear Joints Filled with
353 Granular Materials [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51.
- 354 [7] HAN Z, LI D, ZHOU T, et al. Experimental study of stress wave propagation and energy characteristics
355 across rock specimens containing cemented mortar joint with various thicknesses [J]. *International
356 Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 131: 104352.
- 357 [8] CHAI L, CHAI S, LI P, et al. Analysis of P-wave propagation in filled jointed rock mass with viscoelastic
358 properties [J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2023, 9.
- 359 [9] LI J, MA G W. Analysis of Blast Wave Interaction with a Rock Joint [J]. *Rock Mechanics and Rock
360 Engineering*, 2009, 43: 777-87.
- 361 [10] LI J, RONG L, LI H, et al. An SHPB Test Study on Stress Wave Energy Attenuation in Jointed Rock
362 Masses [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52.
- 363 [11] LI J, LI N N, LI H B, et al. AN SHPB test study on wave propagation across rock masses with different
364 contact area ratios of joint [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 105.
- 365 [12] JIANG X, XUE Y, KONG F, et al. Dynamic responses and damage mechanism of rock with discontinuity
366 subjected to confining stresses and blasting loads [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023,
367 172: 104404.
- 368 [13] YANG R, DING C, YANG L, et al. Model experiment on dynamic behavior of jointed rock mass under
369 blasting at high-stress conditions [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 74: 145-52.
- 370 [14] YU R, ZHANG Z, GAO W, et al. Numerical simulation of rock mass blasting vibration using particle
371 flow code and particle expansion loading algorithm [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2023,
372 122: 102686.
- 373 [15] ZHU F, ZHAO J. Peridynamic modelling of blasting induced rock fractures [J]. *Journal of the Mechanics
374 and Physics of Solids*, 2021, 153: 104469.
- 375 [16] KARMAKAR S, SHAW A. Response of R.C. plates under blast loading using FEM-SPH coupled method
376 [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 125: 105409.
- 377 [17] GHAREHDASH S, BARZEGAR M, PALYMSKIY I, et al. Blast induced fracture modelling using
378 smoothed particle hydrodynamics [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 135.
- 379 [18] HAO H, WU Y, MA G, et al. Characteristics of surface ground motions induced by blasts in jointed rock
380 mass [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2001, 21(2): 85-98.

- 381 [19] JHANWAR J C, JETHWA J L, REDDY A H. Influence of air-deck blasting on fragmentation in jointed
382 rocks in an open-pit manganese mine [J]. *Engineering Geology*, 2000, 57(1): 13-29.
- 383 [20] XIE X, LI J, ZHENG Y. Experimental study on dynamic mechanical and failure behavior of a jointed rock
384 mass [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 168: 105415.
- 385 [21] WANG Z L, KONIETZKY H. Modelling of blast-induced fractures in jointed rock masses [J].
386 *Engineering Fracture Mechanics*, 2009, 76(12): 1945-55.
- 387 [22] ZHU J. Theoretical and numerical analyses of wave propagation in jointed rock masses [D], 2011.
- 388 [23] 郭文章 王, 陈寿峰. 岩体中的节理对爆破作用的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 1999, (02): 93-7.
- 389 [24] 宋彦琦, 李向上, 刘济琛, et al. 节理充填物厚度对运动裂纹扩展的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2020,
390 40(08): 67-75.
- 391 [25] 金李, 卢文波, 陈明, et al. 节理岩体的爆破松动机理 [J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(05): 474-80.
- 392 [26] HAIXIAO Z, GAO Q, FAN Y, et al. Analysis of Causes of Vibration Differences Induced by Different
393 Kinds of Blastholes Based on the Interpretation of Blasting Parameters: A Case Study in Dam Foundation
394 Excavation [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023: 1-18.
- 395 [27] ZUO J, YANG R, GONG M, et al. Effect of Different Filling Media Between Explosive and Blast-Hole
396 Wall on Rock Blasting [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56: 1-13.
- 397 [28] HAJIBAGHERPOUR A, MANSOURI H, BAHAAADDINI M. Numerical modeling of the fractured zones
398 around a blasthole [J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 123: 103535.
- 399 [29] YI C, JOHANSSON D, GREBERG J. Effects of in-situ stresses on the fracturing of rock by blasting [J].
400 *Computers and Geotechnics*, 2018, 104: 321-30.
- 401 [30] YI C, JOHANSSON D, NYBERG U, et al. Stress Wave Interaction Between Two Adjacent Blast Holes
402 [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(5): 1803-12.
- 403 [31] LI X, LI C, CAO W, et al. Dynamic stress concentration and energy evolution of deep-buried tunnels
404 under blasting loads [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 104: 131-
405 46.
- 406 [32] 陶明, 向恭梁, 赵瑞. 深埋引水隧洞对应力波的散射与动应力集中 [J]. *应用力学学报*, 2022, 39(05):
407 859-68.
- 408 [33] YAHYAOU S, HAFSAOUI A, AISSI A, et al. Relationship of the discontinuities and the rock blasting
409 results, F, 2018 [C].
- 410 [34] WANG W, HAO H, LI X, et al. Effects of a Single Open Joint on Energy Transmission Coefficients of
411 Stress Waves with Different Waveforms [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 48: 1-10.
- 412 [35] 陶明, 姚靖, 李夕兵. 平面 P 波入射具有不完美界面圆形夹塞的动态响应特性 [J]. *爆破*, 2022,
413 39(03): 25-32+63.
- 414 [36] 丁三毛. 考虑地应力影响的深埋圆形管道在爆破 P 波作用下的动力响应 [J]. *爆破*, 2023, 40(03):
415 177-83+98.
- 416 [37] LI X, LIU K, SHAY, et al. Numerical investigation on rock fragmentation under decoupled charge
417 blasting [J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 157: 105312.
- 418 [38] HONG Z, TAO M, LI X, et al. Experimental study on the influences of charging structure with various
419 filling mediums on rock blasting performances [J]. *Powder Technology*, 2023, 429: 118925.
- 420 [39] YANG J, LIU Z, LIU K, et al. Study on the blasting damage of prestressed rock-like specimens with
421 different coupling mediums [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 181: 104758.
- 422 [40] TAO M, LI Z, CAO W, et al. Stress redistribution of dynamic loading incident with arbitrary waveform
423 through a circular cavity [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in*

- 424 Geomechanics, 2019, 43(6): 1279-99.
- 425 [41] SCHWER L E, MALVAR L J. Simplified concrete modeling with *mat-concrete-damage-rel3 [J]. JRI
426 LS-Dyna User Week, Nagoya, Japan, 2005: 49-60.
- 427 [42] KRISTOFFERSEN M, PETTERSEN J E, AUNE V, et al. Experimental and numerical studies on the
428 structural response of normal strength concrete slabs subjected to blast loading [J]. Engineering
429 Structures, 2018, 174: 242-55.
- 430 [43] REN L, YU X, ZHENG M, et al. Evaluation of typical dynamic damage models used for UHPC based on
431 SHPB technology [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 269: 108562.
- 432 [44] MENG Q, WU C, SU Y, et al. Experimental and numerical investigation of blast resistant capacity of high
433 performance geopolymer concrete panels [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 171: 9-19.
- 434 [45] LIU K, LI X, HAO H, et al. Study on the raising technique using one blast based on the combination of
435 long-hole presplitting and vertical crater retreat multiple-deck shots [J]. International Journal of Rock
436 Mechanics and Mining Sciences, 2019, 113: 41-58.
- 437 [46] ZHAO R, TAO M, WU C, et al. Study on size and load rate effect of dynamic fragmentation and
438 mechanical properties of marble sphere [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 142: 106814.
- 439 [47] MOHAMMADI AZIZABADI H R, MANSOURI H, FOUCHÉ Q. Coupling of two methods, waveform
440 superposition and numerical, to model blast vibration effect on slope stability in jointed rock masses [J].
441 Computers and Geotechnics, 2014, 61: 42-9.
- 442 [48] HEALY D, RIZZO R, CORNWELL D, et al. FracPaQ: A MATLAB™ toolbox for the quantification of
443 fracture patterns [J]. Journal of Structural Geology, 2016, 95.
- 444 [49] ZHAO H, TAO M, LI X, et al. Estimation of spalling strength of sandstone under different pre-confining
445 pressure by experiment and numerical simulation [J]. International Journal of Impact Engineering, 2019,
446 133: 103359.
- 447 [50] FAN L, JIA L, WANG M. Evaluation of the displacement discontinuity method on wave propagation
448 through a thickly jointed rock mass [J]. Waves in Random and Complex Media, 2023: 1-14.
- 449 [51] YANG H, DUAN H-F, ZHU J. Experimental study on the role of clay mineral and water saturation in
450 ultrasonic P-wave behaviours across individual filled rock joints [J]. International Journal of Rock
451 Mechanics and Mining Sciences, 2023, 168: 105395.
- 452 [52] WANG R, HU Z, ZHANG D, et al. Propagation of the Stress Wave Through the Filled Joint with Linear
453 Viscoelastic Deformation Behavior Using Time-Domain Recursive Method [J]. Rock Mechanics and
454 Rock Engineering, 2017, 50.
- 455 [53] BANDIS S C, LUMSDEN A C, BARTON N R. Fundamentals of rock joint deformation [J]. International
456 Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1983, 20(6): 249-68.
- 457