

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0112

考虑药包爆破动-静时序作用的漏斗形成机理*

康普林^{1,2}, 雷涛^{1,2}, 李立峰^{1,2}

(1. 武汉理工大学关键非金属矿产资源绿色利用教育部重点实验室, 湖北 武汉 430070;
2. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 为研究爆破漏斗的形成过程和机理, 并探究该过程中爆炸应力波与爆生气体的破岩作用, 基于双指数型爆炸载荷函数和爆生气体压力状态方程, 构建了考虑药包爆破动-静时序作用的爆炸载荷加载模型, 结合爆炸应力波和爆生气体的加载特点, 建立了爆破漏斗离散元数值模型, 并开展了对被爆岩体的裂隙发育及破碎抛掷过程的模拟研究, 对比了加载和不加载爆生气体的模拟结果, 探讨了爆破漏斗形成过程中爆炸应力波和爆生气体的不同作用。结果表明: 考虑药包爆破动-静时序作用的爆炸载荷加载模型模拟的爆破漏斗尺寸与现场试验结果基本吻合, 可以较好地反映爆破岩体区域内裂隙的形成与演化规律及破碎岩体的抛掷效果。爆炸应力波加载率较大, 是引起爆源近区环状微裂隙的主要原因, 同时, 它会在自由面处发生反射拉伸, 形成“片落”破坏; 而爆生气体则是爆源远区径向长裂隙形成的主要原因, 此外, 它会推动破碎岩体以较大速度向外抛掷。爆生气体不仅具有准静态作用, 也存在一定的动态作用, 延长了爆破振动的作用时间, 加强了爆破振动的速度峰值。漏斗形成过程中的裂隙发育可大致分为爆炸应力波加载致裂、爆生气体加载致裂以及变形能释放致裂 3 个阶段。

关键词: 爆破漏斗; 爆炸应力波; 爆生气体; 裂隙发育; 动-静时序作用

中图分类号: O383+.1

国标学科代码: 1303599

文献标志码: A

The formation mechanism of blasting crater considering the dynamic-static sequential action of blasting

KANG Pulin^{1,2}, LEI Tao^{1,2}, LI Lifeng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Green Utilization of Critical Non-metallic Mineral Resources, Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China;

2. School of Resources and Environment Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: Research on blasting craters is one of the most fundamental studies in blasting engineering. To elucidate the formation process and mechanisms of blasting craters and to investigate the roles of blasting stress waves and explosion gases in rock fragmentation during this process, a blasting load model was developed. This model is based on a double-exponential explosive load function and the equation of state for explosion gas pressure, incorporating the dynamic-static sequential effects of charge detonation. By combining the distinct loading characteristics of blasting stress waves and explosion gases, a discrete element numerical model of the blasting crater was established to simulate the development of fractures, rock fragmentation and ejection of blasted rock. Simulations were performed both with and without the inclusion of explosion gas loading to explore the respective contributions of blasting stress waves and explosion gases to crater formation. The results show that the blasting crater dimensions simulated with the dynamic-static sequential loading model align closely with field test results, accurately capturing the formation and evolution of fractures in the blasting zone as well as the ejection behavior of fragmented

* 收稿日期: 2024-05-06; 修回日期: 2024-11-24

基金项目: 国家自然科学基金(52104098)

第一作者: 康普林(1998—), 男, 硕士研究生, 3461113863@qq.com

通信作者: 雷涛(1983—), 男, 博士, 讲师, leitao539@163.com

rock. The high loading rate of blasting stress waves is the primary cause of ring-shaped microfractures in the near-field region of the explosion source and also induces reflective tensile damage, forming “slice drop” failure at free surfaces. Explosion gases, on the other hand, are the main drivers of radially extensive fractures in the far-field region of the explosion source and propel fragmented rock outward at a high velocity. Explosion gases exhibit not only quasi-static effects but also dynamic effects, extending the duration of blasting vibrations and amplifying the peak vibration velocity. The development of fractures during crater formation can be broadly categorized into three stages: stress wave-induced fracturing, explosion gas-induced fracturing, and deformation energy release-induced fracturing.

Keywords: blasting crater; blasting stress wave; explosion gases; fracture development; dynamic and static sequential action

钻孔爆破作为一种高效经济的破岩手段,长期应用于水利水电、矿山、交通、军事等各个领域^[1]。爆破漏斗试验法是确定爆破参数的主要方法之一^[2],对爆破漏斗的研究是爆破工程中最为核心的基础性研究之一。深入研究爆破漏斗的形成机理,可以进一步理解群孔爆破破岩机理,为复杂爆破作业提供指导^[3]。

20世纪50年代,美国科罗拉多矿业学院的利文斯顿(Livingston)在进行了大量的爆破漏斗试验并深入研究爆破理论后,提出了第一个科学的爆破漏斗理论^[4],继而国内外的学者们开展了大量的现场或相似实验,深入研究了爆破漏斗理论。范勇等^[5]基于白马铁矿的现场爆破漏斗试验,分析了药包埋深和重量对爆破漏斗几何特征及破碎块度的影响;史涵虚等^[5]在长滩露天煤矿开展了现场单孔爆破漏斗试验,结合岩体声波测试、室内岩石力学试验等,获取了岩体可爆性分级相关指标;张智宇等^[6]、李祥龙等^[7]结合高速摄影和爆破漏斗模型试验,对爆破漏斗鼓包运动进行了记录分析,构建了爆破漏斗的鼓包运动模型;Zhang等^[8]采用数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术研究了不同静载条件下岩石爆破的应变场演化,分析了静应力对最大主应变场的影响,揭示了自由表面裂隙的形成机理;Yan等^[9]开展了不同单轴应力作用下的爆破漏斗试验,定量分析了爆破漏斗直径、面积、体积与应力强度比之间的关系,进一步研究了爆破漏斗参数与静应力之间的定量关系;Pan等^[10]在新山卡房矿山进行了多次现场爆破漏斗试验,并利用神经网络对爆破参数进行了优化计算,神经网络在工程中得到了应用。

受现场环境、技术条件、爆破器材等因素的限制,开展现场或相似试验存在一定的难度与风险,随着计算机技术的发展,数值模拟方法在爆破漏斗的分析中得到了广泛应用。冯春等^[11]利用连续-非连续单元方法(continuous-discontinuous element method, CDEM)开展了爆破漏斗数值模拟,模拟结果与试验结果基本一致;Hu^[12]采用SPH-DAM-FEM(smooth particle hydrodynamics-damage model-finite element method)方法,分析了爆炸过程中的不连续特征、大变形和损伤情况,复现了岩体中爆破响应的完整情况;Yu等^[13]、Gao等^[14]基于PFC(particle flow code)软件根据现场岩石条件建立了岩体模型,以颗粒膨胀加载算法对岩体爆破进行了数值分析,爆破漏斗模拟结果的尺寸与现场爆破试验基本一致;Zhang等^[15]通过PFC数值模拟得到的振动速度曲线虽与现场存在一定程度的差异,但爆破漏斗尺寸与试验结果吻合较好,为岩石爆破模拟提供了较为可靠的数值模拟方法。

相较于常用的有限元方法^[16-17],离散元方法可以较准确地模拟岩土介质的裂隙扩展情况^[18-19],同时可以通过多种方法模拟爆炸载荷的施加^[20-21]。尽管诸多学者们在离散元爆破模拟方面取得了有价值的成果,但仍存在一些问题亟待解决,其中,如何合理施加爆炸载荷并实现爆炸应力波与爆生气体的时序作用尤为关键,相关研究也较为缺乏。

因此,基于上述研究,拟改进离散元爆破模拟中的爆炸载荷加载方法,构建考虑药包爆破动-静时序作用的爆炸载荷联合加载模型,结合爆炸应力波与爆生气体的不同特点,运用不同的方法施加对应载荷,模拟爆破漏斗的形成过程,并研究该过程中岩体的裂隙发育与破碎抛掷情况,同时分析该过程中爆炸应力波与爆生气体的不同破岩作用,总结爆破漏斗的形成机理。

1 考虑药包爆破动-静时序作用的离散元模拟方法

1.1 考虑爆炸应力波与爆生气体动-静时序作用的爆炸载荷联合加载模型

岩石爆破理论经历了多个阶段的转变,较早的爆破理论认为岩石的破碎主要原因是爆生气体的作

用^[22]; 随着爆炸动力学的发展, 相关理论则认为岩石破碎主要是由爆炸应力波引起的^[23]; 目前国内外普遍认可的是爆生气体和爆炸应力波共同作用的理论^[24]。爆炸应力波与爆生气体的加载特点不同, 爆炸应力波的加载率较大, 衰减较快, 作用时间较短; 爆生气体的加载率较小, 衰减较慢, 作用时间较长。因此, 为较准确地模拟爆破漏斗的形成过程, 必须充分考虑爆炸应力波和爆生气体不同的加载特点。

较早的离散元爆破模拟中, 爆炸载荷的施加通常不区分应力波与爆生气体, 共同考虑两者, 以三角波^[25]或半正弦波^[26]的形式进行加载, 但其形式过于简单; Jeon 等^[27]改进了双指数型爆炸载荷函数, 如图 1(a)所示, 该模型可较好地反映出动力载荷的波动特性, 但未考虑爆生气体的运动状态, 忽略了爆生气体的准静态作用^[28]; Ye 等^[29]对三角波载荷进行了修正, 添加了爆生气体载荷, 如图 1(b)所示, 其中, p 为压力, t 为时间, t_u 为应力波峰值时间, t_d 为爆生气体开始加载时间, t_s 为爆炸载荷加载结束时间, p_m 为应力波峰值应力, p_d 为爆生气体初始加载应力, $p_d = p_m/3$ 。

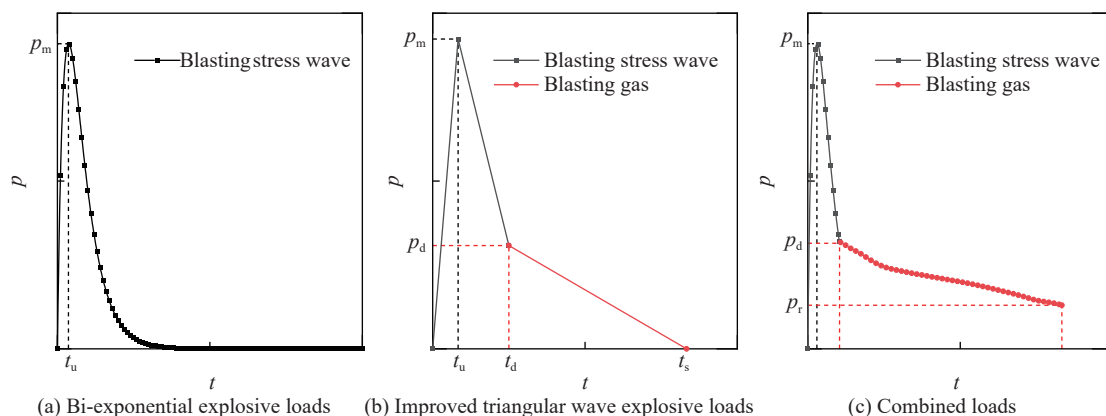


图 1 爆炸载荷曲线

Fig. 1 Explosion load curve

综合考虑上述理论, 在双指数型爆炸载荷函数的基础上添加爆生气体载荷, 建立考虑药包爆破动-静时序作用的爆炸载荷联合加载模型, 如图 1(c)所示, p_i 为爆炸空腔扩张到最大时的爆生气体压力。爆炸空腔膨胀过程中, 爆生气体的压力可根据爆生压力状态方程由爆腔体积即时演算更新并加载到离散元模型中, 由此可实现爆炸载荷的精确施加, 进而模拟爆破漏斗被爆岩体破碎、抛掷、飞散的全过程。

从图 1(c)可知, 在加载曲线的 $0-t_u-t_d$ 段, 载荷经历了一个突跃和突降的过程, 显然这一过程可以很好地表达炸药爆炸瞬间应力波的加载特性。在 t_d-t_s 段, 载荷以一个相对缓慢的速度衰减, 可以很好地表达爆生气体的准静态作用过程。

1.2 爆炸载荷在离散元模拟中加载方法

对于爆炸应力波载荷, 球状药包耦合装药爆破时孔壁初始冲击压力(p_i)^[30]为:

$$p_i = \frac{\rho_c v_c^2}{k+1} \frac{2\rho_r v_r}{\rho_r v_r + \rho_c v_c} \quad (1)$$

式中: ρ_r 为岩体的密度; v_r 为应力波在岩体内传播的纵波波速; ρ_c 为炮孔内炸药的密度; v_c 为炸药的爆速; k 为绝热指数, 近似取 3。

球状药包爆炸时产生的孔壁压力(p_t)^[31]为:

$$p_t = 4p_i \left(e^{-\beta t/\sqrt{2}} - e^{-\sqrt{2}\beta t} \right) \quad (2)$$

$$\beta = 0.269v_r/R_0 \quad (3)$$

式中: R_0 为球状药包的半径。

应力波在岩体内传播的过程中不断衰减, 可表示为^[32]:

$$p_b = \frac{p_i}{(R/R_0)^n} \quad (4)$$

式中: p_b 为应力波传播距离 R 后的压力, n 为衰减指数, 可表示为:

$$n = 2 \pm \frac{\mu}{1-\mu} \quad (5)$$

式中: μ 为岩石的泊松比, 冲击波影响范围内取正号, 应力波影响范围内取负号。

假设爆生气体的膨胀过程为绝热膨胀, 忽略进入岩体裂隙的爆生气体体积, 炮孔壁受爆生气体压力作用发生位移, 炮孔逐渐扩张, 爆腔内压力随之发生变化, 其大小可根据爆生压力状态方程由爆腔体积近似求出。爆生压力状态方程^[33]为:

$$p(t) = p_0 \left(\frac{V_0}{V} \right)^\gamma \quad (6)$$

式中: p_0 、 V_0 分别为炮孔的初始压力和初始体积, $p(t)$ 、 V 分别为 t 时刻的爆腔压力和爆腔体积, γ 为与炸药及岩石性质相关的常数。

图 2 为爆炸空腔示意图。在二维模拟中, 蓝色颗粒表示离散元模型中的炮孔壁颗粒, 各颗粒边缘到起爆中心的平均距离为爆腔半径, 实线圆表示当前的爆腔范围, 平面圆的面积为爆腔体积, 根据爆腔体积及爆生压力状态方程可求出当前爆生气体压力, 虚线圆表示载荷加载后下一循环的爆腔范围。

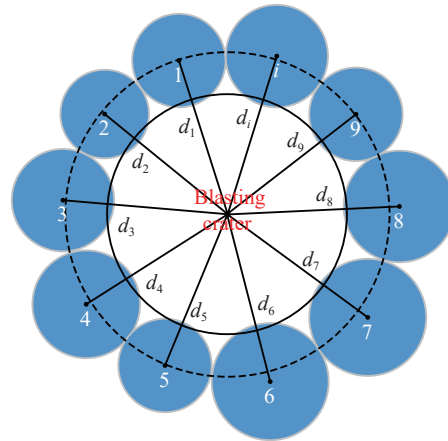


图 2 爆炸空腔示意图

Fig. 2 Diagram of the blasting crater

爆生气体的压力随爆腔体积的改变发生变化, 其中:

$$V = \pi R(t)^2 \quad (7)$$

$$R(t) = R_0 + d_t = \frac{\sum (d_i - r_i)}{n} \quad (8)$$

式中: d_i 为炮孔壁各颗粒到炸点中心的距离, r_i 为对应颗粒的半径, n 为炮孔壁颗粒的数量, d_t 为半径增量。

当爆腔半径达到最大时, 爆生气体停止加载, 爆腔的最大半径(R_m)^[34]为:

$$R_m = R_0 \left(\frac{p_i}{-\frac{c}{f} + \left(\sigma^* + \frac{c}{f} \right) \left(\frac{2l}{3\sigma^*} \right)^{\frac{4f}{3(1+f)}}} \right)^{\frac{1}{3\gamma}} \quad (9)$$

式中: c 为内聚力, f 为内摩擦因数, σ^* 为岩体的抗压强度, l 为拉梅系数 (在弹性介质中为剪切模量)。

1.3 考虑药包爆破动-静时序作用的离散元模拟流程

改进的离散元爆破漏斗模拟流程如图 3 所示。细观参数标定完成后, 确定边界条件, 建立爆破漏斗的爆区模型; 根据式 (2)~(3), 计算爆炸应力波的应力拟合曲线, 加载爆炸应力波载荷; 及时遍历炮孔壁颗粒的位置, 获得炮孔爆腔体积, 并根据式 (6) 计算并调整下一循环中加载在孔壁颗粒上的爆生气体应力, 当爆腔半径大于最大半径 R_m 时, 完成爆炸载荷施加; 破碎岩块抛掷一段时间后脱离原岩部分, 形成爆破漏斗。

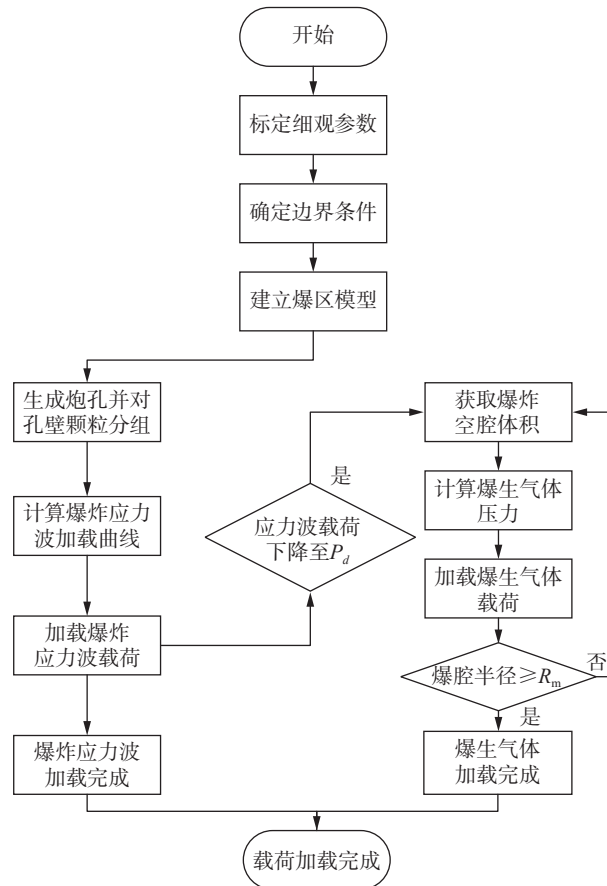


图 3 改进的爆破漏斗模拟流程图

Fig. 3 Flowchart of the improved blasting crater simulation

2 爆破漏斗模型构建

2.1 标定模型细观参数

在离散元软件 PFC^{2D}(particle flow code 2D)中, 通过改变颗粒间的接触模型以及相关参数实现对不同材料宏观力学特性的模拟, 一般采用平行黏结模型模拟岩土类材料, 模型中颗粒通过胶结连接并传递力的作用。根据山东黄金集团某金矿^[35]采集岩样的宏观力学参数, 建立单轴抗压模拟试验, 如图 4(a)所示, 一生成 12 952 个颗粒, 采用“试错法”标定平行黏结模型的细观参数, 结果如表 1 所示, 将采用该细观参数的模拟结果与室内单轴抗压试验结果进行对比, 其应力-应变曲线如图 4(b)所示。可以看出, 模拟结果的弹性模量、抗压强度与试验结果较为接近, 两者误差保持在 2% 以下, 说明该细观参数足以反映试验区域岩体的力学特性。

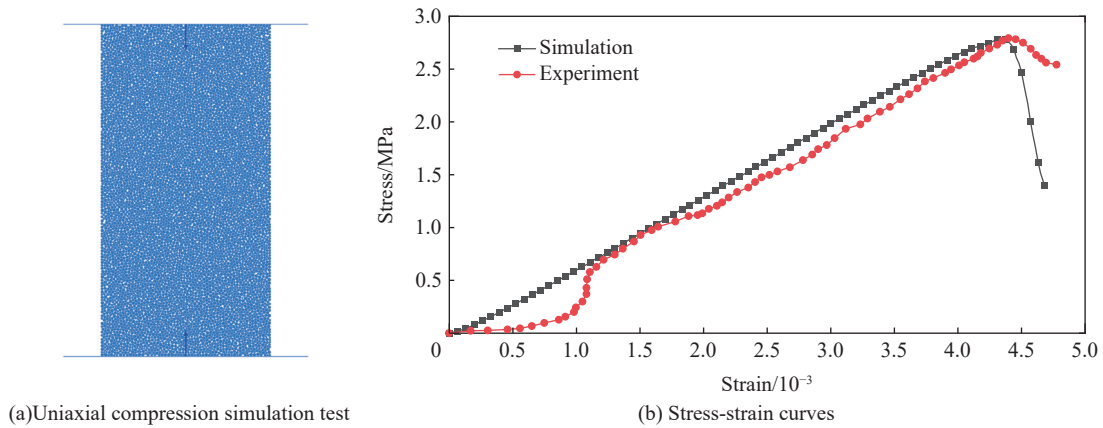


图 4 模拟结果与试验结果对比

Fig. 4 Comparison of the simulation results with the test results

表 1 平行黏结模型的细观参数

Table 1 Fine-scale parameters of the parallel bonding model

颗粒密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	颗粒最大半径 R_{\max}/mm	颗粒最小半径 R_{\min}/mm	颗粒摩擦 因数	颗粒接触弹性 模量/GPa	颗粒刚度比	平行黏结弹性 模量/GPa	黏结刚度比	平行黏结抗拉 强度/MPa	平行黏结黏 聚力/MPa
2 730	16.6	10.0	0.54	3.79	4.0	16.2	4.0	53.5	19.8

2.2 设置无反射边界

在动力学模拟中,为了减小计算量,需要控制模型的整体尺寸,但爆炸应力波会在模型边界处发生反射,影响模拟结果的准确性,因此,需要建立无反射边界以减少应力波的反射。Lysmer 等^[36]发现,可以在模型边界施加与速度方向相反的力吸收传播过来的波,实现无反射边界的模拟。

施加的边界力(F)与对应颗粒运动速度的关系为:

$$F = -2R_p\rho_rCu \quad (10)$$

式中: R_p 为边界颗粒的半径, C 为应力波在岩体内传播的波速, u 为边界颗粒的运动速度。

考虑到应力波在传播过程中存在弥散效应,设置相关系数对边界力的施加进行修正:

$$F = \begin{cases} -2\varepsilon R_p\rho_rC_pu_n \\ -2\eta R_p\rho_rC_su_s \end{cases} \quad (11)$$

式中: ε 、 η 分别为纵波、横波弥散效应修正系数, C_p 、 C_s 分别为岩体介质内纵波、横波波速, u_n 、 u_s 分别为边界颗粒法向、切向的运动速度。

为标定弥散效应修正系数,建立岩体应力波传播模型,如图 5 所示。模型尺寸为 10.0 m×5.0 m (长×高),在模型左侧施加振幅为 1.0 m、频率为 50 Hz 的正弦半波,右侧施加边界力模拟无反射边界,并在模型内部设置监测点 P1~P9 记录应力波传播的波形^[37]。当 P 波(纵波)与 S 波(横波)的弥散效应修正系数分别取 0.22、0.13 时,监测点记录的波形如图 6 所示,其中 v 为监测点振动速度,可以看出,应力波到达模型右侧边界后反射较小,波形整体较好,表明模型边界的吸收效果比较理想,基本实现无反射边界的模拟^[38]。

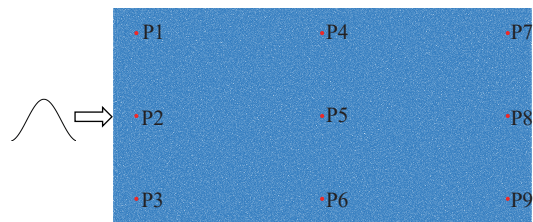


图 5 岩体应力波传播模型

Fig. 5 Stress wave propagation model for rock

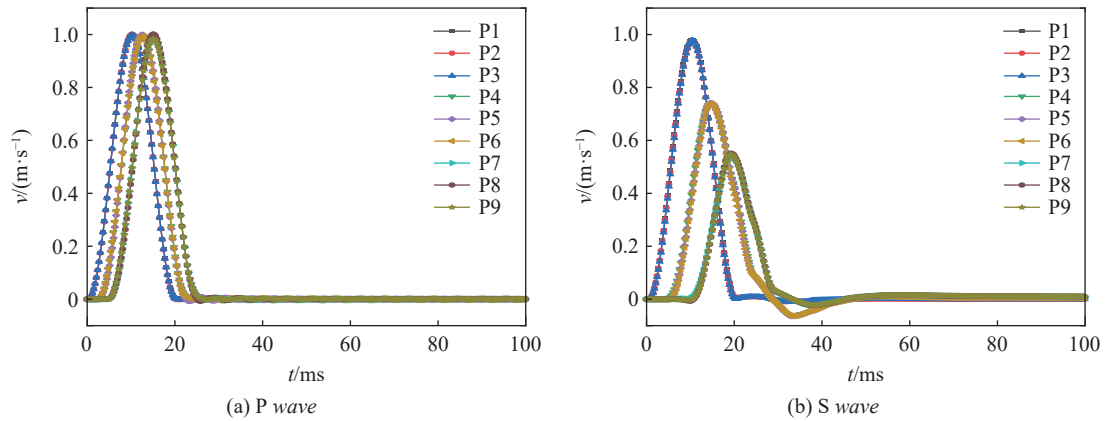


图 6 波形监测图

Fig. 6 Waveform monitoring diagram

2.3 建立爆破漏斗模型

为分析爆破漏斗的形成过程,建立二维离散元爆破漏斗模型,如图 7 所示。模型左侧及顶底部设置无反射边界,当应力波传播到边界时颗粒以 v_b 速度振动,施加反向的边界力 F ,降低应力波反射引起的误差,右侧不设置边界条件,模拟爆破自由面;模型尺寸为 $3.5\text{ m}\times 7.0\text{ m}$ (宽 \times 高),共生成 38 880 个颗粒,最小粒径尺寸为 10 mm,颗粒粒径比为 1.66;药包采用耦合装药,装药直径为 38 mm,埋深 0.6 m;同时在炮孔左侧每隔 0.8 m 位置处设置监测点 1~3,监测各点速度的变化。

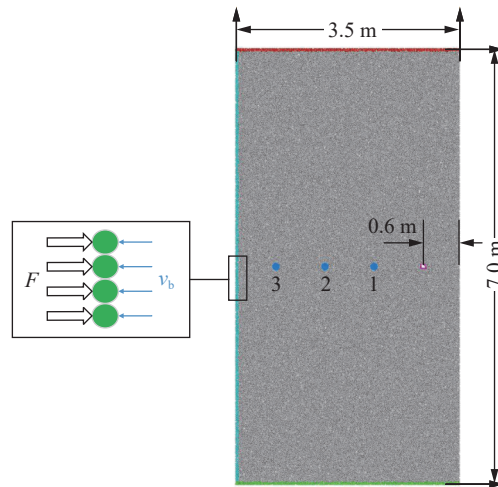


图 7 PFC 爆破漏斗计算模型

Fig. 7 Calculation model of blasting crater by PFC

2.4 施加爆炸载荷

① 爆炸应力波

药包爆炸后,产生的爆炸应力波作用在炮孔壁颗粒上,根据式(2)~(3)拟合应力波波形,颗粒受到力(F_p)的作用向四周扩散,如图 8 所示。矿山采用的炸药为 2 号岩石乳化炸药,密度为 1300 kg/m^3 ,爆速为 4000 m/s ^[39],因此, $p_i=5.11\text{ GPa}$ 。但在离散元模拟中,载荷施加在颗粒的中心,相较于炮孔尺寸,颗粒的半径不可忽略,施加在炮孔壁颗粒上的载荷需要根据式(4)进行折减,炮孔壁颗粒的中心距起爆位置的距离分布在 $1.5R_0\sim 2.8R_0$ 范围内,衰减指数公式取正号,岩石泊松比为 0.32, r 取平均值 2.15,故 $p_b=0.77\text{ GPa}$ 。

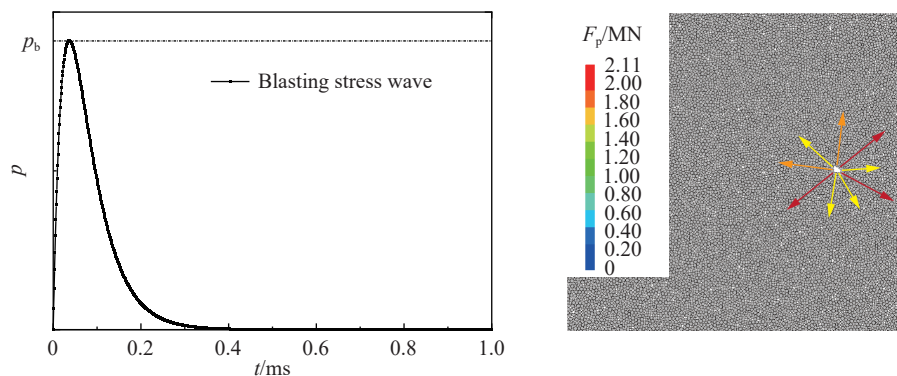


图 8 爆炸应力波加载

Fig. 8 Loading of blasting stress wave

②爆生气体

爆生气体初始应力约为应力波载荷峰值的 $1/3$, 取 257 MPa ; 加载过程中遍历炮孔壁颗粒的位置, 获取爆腔半径, 根据式 (6) 调整爆生气体压力, 模拟爆生气体的膨胀过程; 当爆炸空腔膨胀到最大时, 停止加载爆生气体压力, 爆炸载荷加载完成; 根据式 (9) 计算爆腔的最大半径, 取 $2.07R_0$ 。

3 爆破漏斗的形成过程

3.1 炮孔壁载荷监测

图 9(a) 为爆炸载荷加载过程中的爆腔膨胀比(爆腔半径与初始炮孔半径的比值)。爆生气体开始加载的时刻约为 $127 \mu\text{s}$, 由于爆炸应力波的作用, 此时的膨胀比不为 1, 当膨胀比达到 2.07 时, 爆炸载荷停止加载。炮孔壁颗粒的载荷如图 9(b) 所示, 其中, 炮孔壁应力的峰值为 0.77 GPa , 爆生气体的初始应力为 255 MPa , 约为峰值的 $1/3$ 。

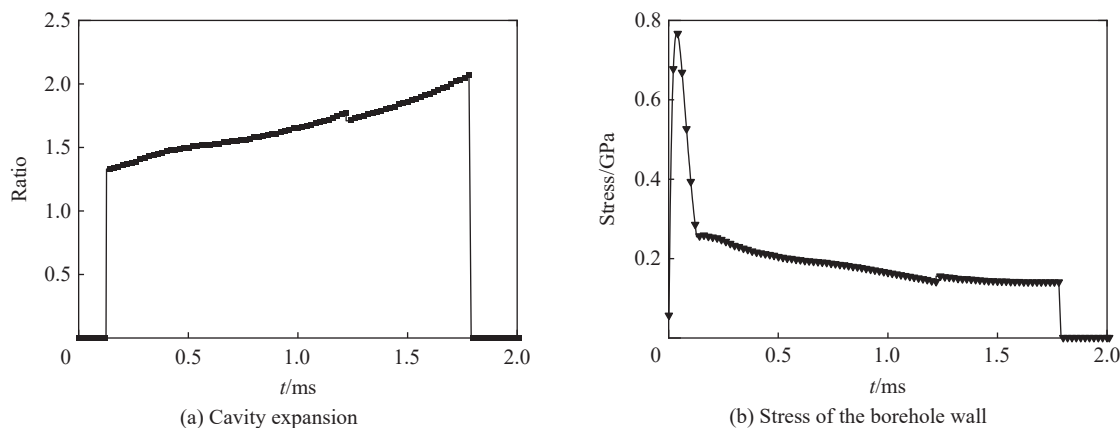


图 9 爆炸空腔膨胀及载荷监测

Fig. 9 Blasting crater expansion and load monitoring

3.2 爆破漏斗形成过程

爆破漏斗的模拟结果与现场结果^[35]如图 10 所示。药包起爆后, 产生的爆炸应力波和爆生气体作用于岩体模型, 模型内部发生破坏并出现裂隙, 裂隙相互连接形成破碎网, 进一步发育后与自由面贯通, 岩体完全破坏并向外鼓包, 以一定的速度抛掷脱离原岩, 形成爆破漏斗。爆破漏斗的直径约为 1.68 m , 与现场结果^[35]进行对比, 两者基本吻合, 直观地展示了爆破作用下岩体的裂隙发育及破碎抛掷效果。

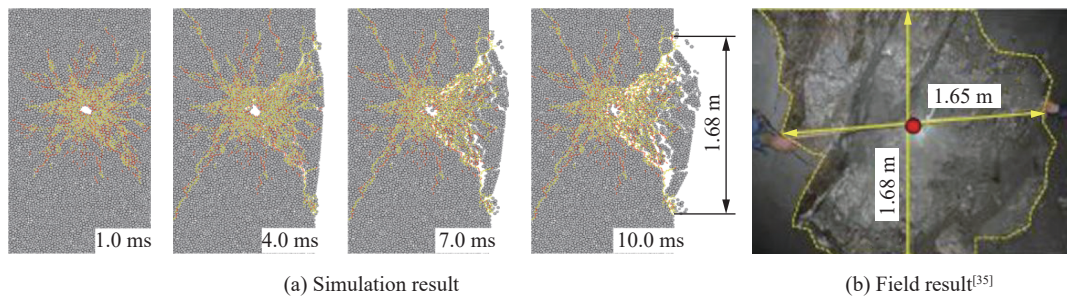


图 10 爆破漏斗结果对比

Fig. 10 Comparison of blasting crater results

4 讨论

由于爆炸应力波和爆生气体的加载特点不同,其破岩效果也不同,为分析爆破漏斗形成过程中的爆炸应力波和爆生气体的不同作用以及协同破岩效果,将第 1 节中考虑药包爆破动-静时序作用的联合加载与只加载爆炸应力波的单一加载模型模拟的爆破漏斗结果进行对比研究。

4.1 速度矢量

采用联合加载模型和单一加载模型,模拟的不同时刻的速度 (v_t) 如图 11 所示。在爆炸载荷加载初期,两模型的速度矢量相差无几,爆炸应力波引起的速度场在岩体内呈圆环形;随着爆生气体的加载,两模型的速度矢量产生差异,联合加载模型中,速度环带较宽,速度较大,单一加载模型中,速度环带较窄,速度较小。单一加载模型内,仅有应力波的作用,应力波到达自由面后发生反射拉伸,部分岩体受拉破坏发生“片落”,并向外抛掷,该破坏主要集中在自由面附近,破碎抛掷的岩体体积较小,速度较小;联合加载模型内,除爆炸应力波外,还存在爆生气体作用,爆生气体挤压破碎岩体并进一步推动其脱离原岩,破碎岩体在爆炸应力波与爆生气体的共同作用下以较大的速度向外抛掷,形成爆破漏斗。

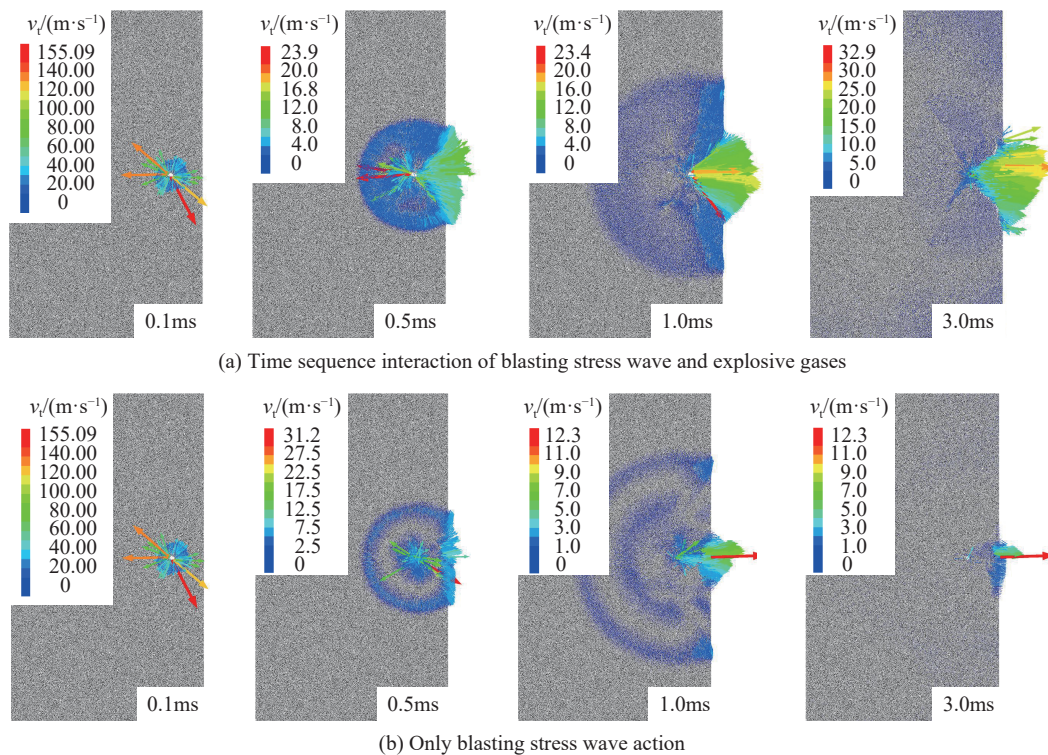


图 11 速度矢量

Fig. 11 Velocity vector

监测点 1~3 在 x 方向上的速度随时间变化曲线如图 12 所示, 各监测点的主要数据如表 2 所示。对比发现, 联合加载模型的速度峰值大于单一加载模型, 且速度第一次归零的时间远大于单一加载模型。该模拟结果表明, 爆生气体膨胀并作用于岩体的过程不仅具有准静态的作用, 同时也存在一个短时间的动态作用, 延长了爆破振动的作用时间, 加强了爆破振动的速度峰值。

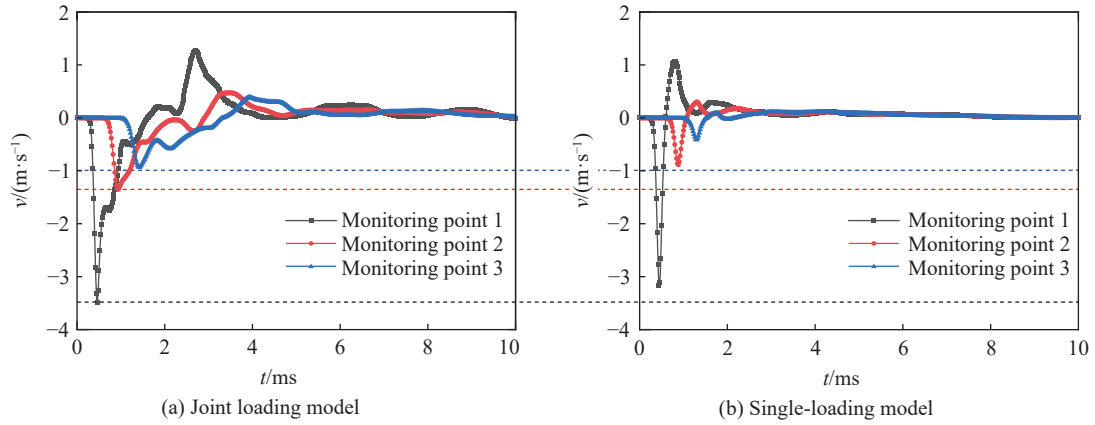


图 12 监测点速度

Fig. 12 Velocities of monitoring points

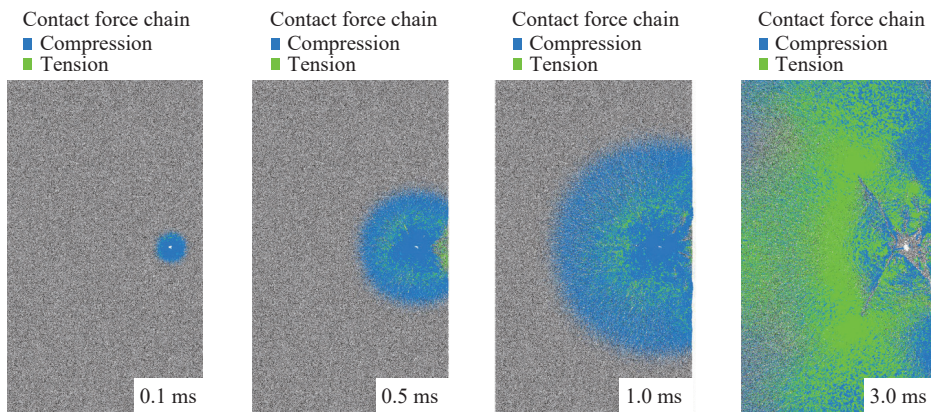
表 2 模型各监测点的主要数据

Table 2 Main data of each monitoring point of the model

模型分组	监测点	速度峰值/(m·s ⁻¹)	到达峰值时间/μs	第一次归零时间/μs
联合加载模型	1	3.48	234	1144
	2	1.35	346	1500
	3	0.93	438	1876
单一加载模型	1	3.20	224	146
	2	0.89	288	192
	3	0.41	316	222

4.2 应力分布

联合加载模型与单一加载模型在不同时刻的力链分布如图 13 所示, 蓝色力链表示压应力, 绿色力链表示拉应力, 另外, 以应力第二不变量 (σ^2) 为参照的应力十字架分布如图 14 所示。在爆炸应力波的作用下, 岩体介质的受力特征为先受压后受拉, 应力波快速传播并压缩岩体, 岩体受压变形, 当应力波继续传播,



(a) Time sequence interaction of blasting stress wave and explosive gases

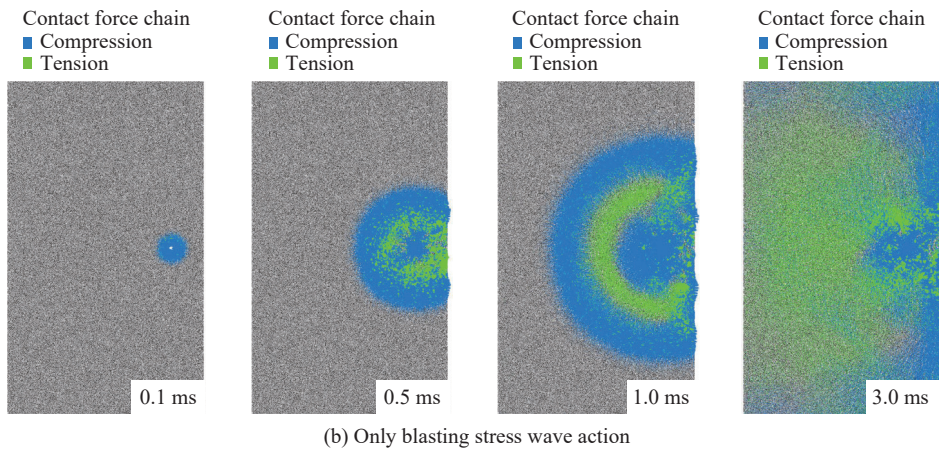
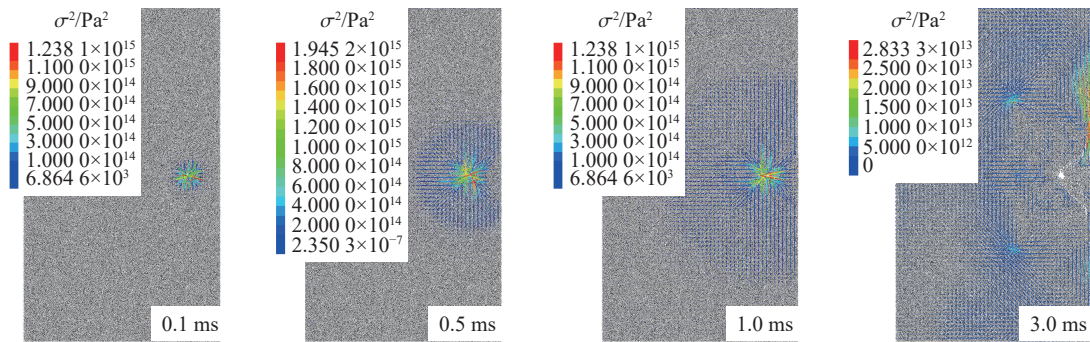


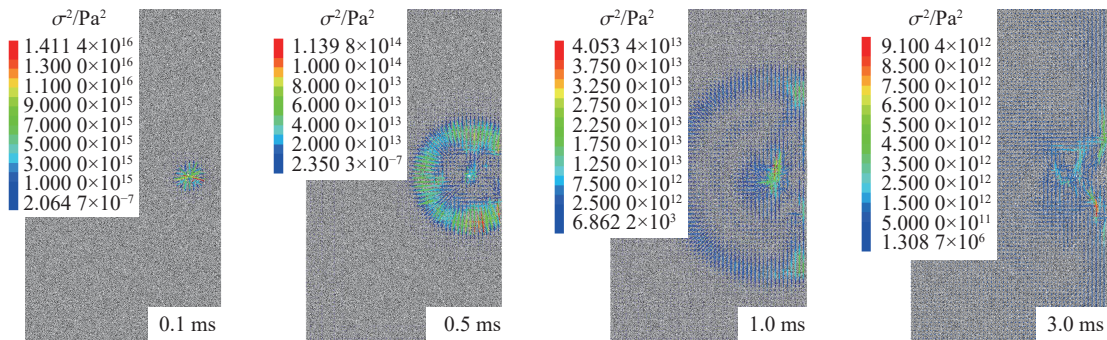
图 13 应力力链

Fig. 13 Stress force chain

原位置的压应力下降以后, 岩体内部积蓄的变形能释放, 形成与压应力方向相反的拉应力, 如图 13(b) 中 1.0 ms 时模型的应力力链所示。对比图 14 中 0.5 ms 与 1.0 ms 时两模型的应力十字架分布, 不难发现在应力波加载结束后, 爆生气体仍持续对岩体施加载荷, 推动岩体继续发生形变。图 14 中, 3.0 ms 时两模型的差异则反映了在爆炸载荷加载结束后, 变形能逐渐释放, 联合加载模型的应力强于单一加载模型, 这是由于爆生气体减慢了岩体内压应力的下降速度, 进一步推动岩体发生形变, 增强了变形能的积累。



(a) Time sequence interaction of blasting stress wave and explosive gases



(b) Only blasting stress wave action

图 14 应力十字架

Fig. 14 Stress cross

另外, 爆炸应力波除了引起炮孔附近的岩体产生大量微裂隙外, 还会在自由面处发生反射拉伸, 导致部分岩体发生“片落”破坏, 并向外抛掷。如图 13(b) 中 0.5 ms 时模型的力链所示, 应力波到达自由

面时, 岩体在爆炸荷载的作用下先压缩, 然后回弹形成拉伸波, 产生拉应力, 自由面处存在以绿色力链为主的拉应力区, 岩体抗拉性能较差, 易于发生破坏。

4.3 裂隙发育

当岩体模型内应力达到接触的抗拉强度或抗剪强度时, 颗粒间黏结发生破坏并产生裂隙, 联合加载模型和单一加载模型在不同时刻的裂隙发育情况如图 15 所示, 其中, 红色短线为剪切破坏, 黄色短线为拉伸破坏, 括号内的数值为裂隙的总量。爆炸冲击波作用在炮孔壁上, 炮孔附近的岩体受到强烈的压缩剪切作用, 结构完全破坏, 形成粉碎区; 同时, 冲击波向外传播并快速衰减为应力波, 粉碎区外侧较近区域的岩体仍受到较高的径向压应力, 发生大量拉压与剪切破坏, 形成破裂 I 区^[40], 两模型中均出现粉碎区与破裂 I 区。爆生气体载荷衰减较慢, 作用时间较长, 受泊松效应的影响, 加之岩体抗拉性能较差, 爆生气体的准静态应力场导致径向拉伸长裂隙的出现, 岩体丧失了环向承载力, 形成破裂 II 区^[40], 作为对比, 单一加载模型中并未出现相同的长裂隙。

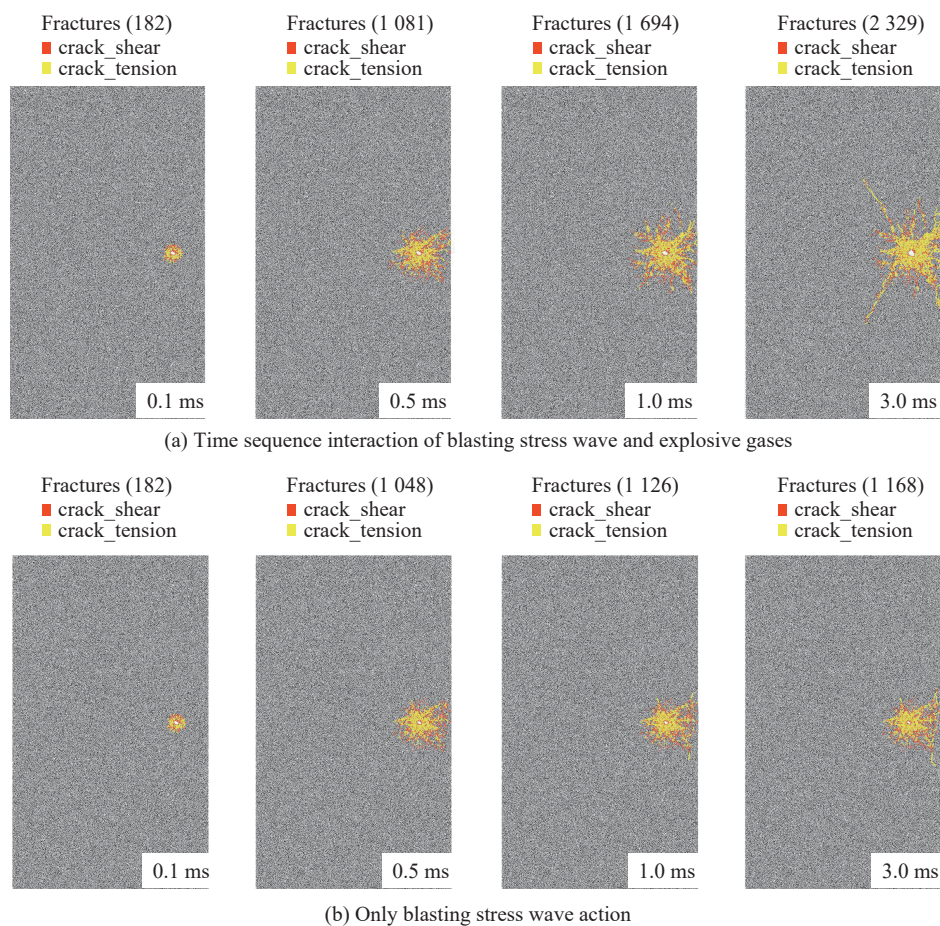


图 15 裂隙发育

Fig. 15 Fracture development

统计两模型在不同时刻裂隙的数量、长度及发育范围, 如图 16 所示。单一加载模型中, 可以看作爆炸应力波引起裂隙; 联合加载模型中, 可以看作爆炸应力波与爆生气体共同作用引起裂隙。爆炸载荷加载 0.5 ms 后, 爆炸应力波引起的裂隙数量约占裂隙总量的 98.18%, 裂隙长度占裂隙总长的 97.77%, 两模型的裂隙发育范围基本一致, 另外, 联合加载模型中拉裂隙数量占比约为 54.25%, 剪裂隙数量占比约为 45.75%, 单一加载模型中拉裂隙数量占比约为 53.71%, 剪裂隙数量占比约为 46.29%; 爆炸载荷加载 1.0 ms 后, 爆炸应力波引起的裂隙数量约占裂隙总量的 70.06%, 裂隙长度占裂隙总长的 70.10%, 两

模型的裂隙发育范围逐渐出现差异, 另外, 联合加载模型中拉裂隙数量占比约为 58.33%, 剪裂隙数量占比约为 41.67%, 单一加载模型中拉裂隙数量占比约为 55.95%, 剪裂隙数量占比约为 44.05%; 爆炸载荷加载 3.0 ms 后, 爆炸应力波引起的裂隙数量约占裂隙总量的 61.53%, 裂隙长度占裂隙总长的 61.81%, 联合加载模型的裂隙发育范围远大于单一加载模型, 另外, 联合加载模型中拉裂隙数量占比约为 65.18%, 剪裂隙数量占比约为 34.82%, 单一加载模型中拉裂隙数量占比约为 57.28%, 剪裂隙数量占比约为 42.72%。

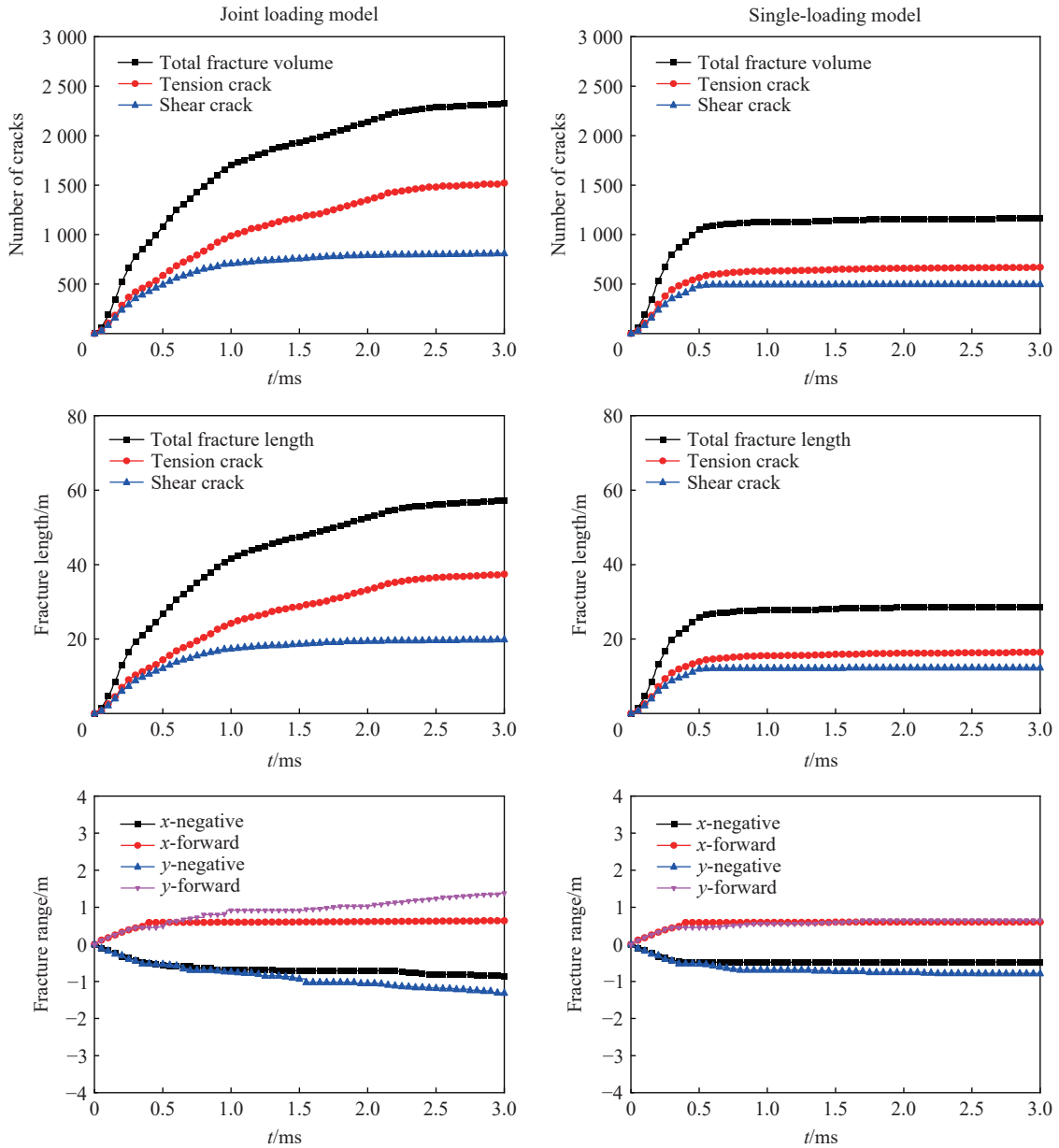


图 16 两种模型在不同时刻的裂隙数量、长度及发育范围

Fig. 16 Number, length and developmental extent of clefts at different moments in both models

根据裂隙产生的时序和主要原因, 将岩体内裂隙产生分为爆炸应力波加载致裂、爆生气体加载致裂以及变形能释放致裂 3 个阶段:

①爆炸应力波加载致裂阶段中, 裂隙主要由爆炸应力波引起, 应力波快速作用于岩体引起压缩变形, 岩体应变率较大, 产生大量破坏与裂隙, 但应力波衰减较快, 故该阶段作用时间较短;

②爆生气体加载致裂阶段中,爆生气体的准静态应力场作用于岩体,爆生气体载荷弱于应力波载荷,岩体应变率较小,但爆生气体衰减较慢,岩体径向受压,产生拉伸长裂隙;

③爆生载荷加载结束后,岩体内积蓄的变形能逐渐释放,裂隙仍在缓慢产生,但增长速度较小,并逐渐停止。

5 结 论

构建了考虑药包爆破动-静时序作用的爆炸载荷联合加载模型,结合爆炸应力波与爆生气体不同的加载特点,基于软件 PFC 建立了爆破漏斗离散元模型,模拟了爆破漏斗的形成过程,对比了加载和不加载爆生气体的模拟结果,得出了以下主要结论:

(1) 与传统的爆破漏斗模拟方法相比,考虑药包爆破动-静时序作用的模拟方法可以更好地反映炸药爆破过程中应力波与爆生气体的协同作用,也可较好地复现爆破漏斗形成过程,并直观展示这一过程中岩体的裂隙形成、演化以及碎块的抛掷效果。

(2) 爆炸应力波与爆生气体具有不同的破岩作用。爆炸应力波是距爆源较近区域内拉压与剪切微裂隙形成的主要原因,同时,它会在自由面处发生反射拉伸作用,引起部分岩体发生“片落”破坏;爆生气体是距爆源较远区域内拉压径向长裂隙形成的主要动力,此外,它可以推动破碎岩体进一步抛掷。爆生气体膨胀并作用于岩体的过程不仅具有准静态作用,同时也存在一个短时间内的动态过程,具有与爆炸应力波相似的作用,延长了爆破振动的作用时间,加强了爆破振动的速度峰值。

(3) 根据岩体内裂隙形成的不同时序与主要原因,可以将爆破漏斗形成过程中岩体内的裂隙发育过程大致分为爆炸应力波加载致裂、爆生气体加载致裂以及变形能释放致裂 3 个阶段。

考虑药包爆破动-静时序作用的爆破漏斗模拟有助于揭示爆炸载荷的作用机理,反演爆破区域岩体的裂隙发育及破碎抛掷过程,可用于优化矿山生产过程中的爆破参数,指导现场工程应用。

参考文献:

- [1] 高启栋, 靳军, 王亚琼, 等. 孔内起爆位置对爆破振动场分布的影响作用规律 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(10): 105201. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0352.
GAO Q D, JIN J, WANG Y Q, et al. Acting law of in-hole initiation position on distribution of blast vibration field [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(10): 105201. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0352.
- [2] 高峰, 李新, 罗增武, 等. 爆破漏斗体积测量方法比较与应用研究 [J]. *矿冶工程*, 2023, 43(3): 38-41. DOI: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.03.009.
GAO F, LI X, LUO Z W, et al. Comparison of different ways of volume measurement for explosion-produced crater [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2023, 43(3): 38-41. DOI: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.03.009.
- [3] 范勇, 吴进高, 冷振东, 等. 爆破漏斗岩石破碎块度实验与仿真 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(9): 2125-2139. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.0869.
FAN Y, WU J G, LENG Z D, et al. Experiment and simulation of rock fragmentation size of blasting crater [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(9): 2125-2139. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.0869.
- [4] 齐金铎. 现代爆破理论的发展阶段 [J]. *爆破*, 1996, 13(4): 7-10.
QI J D. Stages in the development of modern blasting theory [J]. *Blasting*, 1996, 13(4): 7-10.
- [5] 史涵虚, 周传波, 张升, 等. 基于 CWM 和 CM 的长滩露天矿深孔台阶爆破岩体可爆性评价 [J]. *爆破*, 2024, 41(1): 51-59, 119. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2024.01.008.
SHI H X, ZHOU C B, ZHANG S, et al. Evaluation on rock mass blastability of deep hole bench blasting in Changtan open-pit mine based on CWM and CM [J]. *Blasting*, 2024, 41(1): 51-59, 119. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2024.01.008.
- [6] 张智宇, 陈春超, 黄永辉, 等. 爆破漏斗鼓包运动模型的构建及验证 [J]. *北京理工大学学报*, 2020, 40(8): 810-817. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2019.219.

- ZHANG Z Y, CHEN C C, HUANG Y H, et al. Construction and validation for the model of bulging movement in explosion [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2020, 40(8): 810–817. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2019.219.
- [7] 李祥龙, 胡涛, 张智宇, 等. 基于高速摄影技术爆破鼓包运动规律的研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2015, 35(12): 1228–1232. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2015.12.004.
- LI X L, HU T, ZHANG Z Y, et al. Bulging movement in explosion based on high speed photography technology [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2015, 35(12): 1228–1232. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2015.12.004.
- [8] ZHANG F P, YAN G L, YANG Q B, et al. Strain field evolution characteristics of free surface during crater blasting in sandstone under high stress [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(18): 6285. DOI: 10.3390/app10186285.
- [9] YAN G L, ZHANG F P, KU T, et al. Experimental study on failure mechanism and geometric parameters of blasting crater under uniaxial static compressive stresses [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(6): 251. DOI: 10.1007/s10064-022-02714-y.
- [10] PAN D, ZHOU K P, LI N, et al. The optimization research on large-diameter longhole blasting parameters of underground mine based on artificial neural network [C]//Proceedings of 2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Changsha: IEEE, 2009, 1: 419–422. DOI: 10.1109/ICICTA.2009.109.
- [11] 冯春, 李世海, 郑炳旭, 等. 基于连续-非连续单元方法的露天矿三维台阶爆破全过程数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(2): 024201. DOI: 10.11883/bzyej-2017-0393.
- FENG C, LI S H, ZHENG B X, et al. Numerical simulation on complete process of three-dimensional bench blasting in an open-pit mine based on CDEM [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(2): 024201. DOI: 10.11883/bzyej-2017-0393.
- [12] HU Y G, LU W B, CHEN M, et al. Numerical simulation of the complete rock blasting response by SPH–DAM–FEM approach [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2015, 56: 55–68. DOI: 10.1016/j.simpat.2015.04.001.
- [13] YU R G, ZHANG Z H, GAO W L, et al. Numerical simulation of rock mass blasting vibration using particle flow code and particle expansion loading algorithm [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2023, 122: 102686. DOI: 10.1016/j.simpat.2022.102686.
- [14] GAO W L, ZHANG Z H, LI B J, et al. Study on numerical simulation of geometric elements of blasting funnel based on PFC5.0 [J]. *Shock and Vibration*, 2021, 2021(1): 8812964. DOI: 10.1155/2021/8812964.
- [15] ZHANG Z H, GAO W L, LI K P, et al. Numerical simulation of rock mass blasting using particle flow code and particle expansion loading algorithm [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2020, 104: 102119. DOI: 10.1016/j.simpat.2020.102119.
- [16] 傅鹏. 岩体结构面对台阶爆破效果影响研究 [J]. *爆破*, 2023, 40(1): 77–84. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2023.01.011.
- FU P. Influence of rock mass structure on bench blasting effect [J]. *Blasting*, 2023, 40(1): 77–84. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2023.01.011.
- [17] 赵毅波, 苏都都, 范勇, 等. 群孔起爆不同短延迟时间岩石破裂过程仿真与块度分析 [J]. *爆破*, 2023, 40(3): 92–100,122. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2023.03.013.
- ZHAO Y B, SU D D, FAN Y, et al. Simulation of rock fracture process and fragmentation analysis with different short delays for group hole blasting [J]. *Blasting*, 2023, 40(3): 92–100,122. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2023.03.013.
- [18] XIA M, ZHOU K P. Particle simulation of the failure process of brittle rock under triaxial compression [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2010, 17(5): 507–513. DOI: 10.1007/s12613-010-0350-4.
- [19] POTYONDY D O. Simulating stress corrosion with a bonded-particle model for rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(5): 677–691. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2006.10.002.
- [20] YANG J X, SHI C, YANG W K, et al. Numerical simulation of column charge explosive in rock masses with particle flow code [J]. *Granular Matter*, 2019, 21(4): 96. DOI: 10.1007/s10035-019-0950-2.
- [21] AN L, SUORINENI F T, XU S, et al. A feasibility study on confinement effect on blasting performance in narrow vein mining through numerical modelling [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 112: 84–94. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.10.010.
- [22] HAGAN T N. Rock breakage by explosives [M]//OPPENHEIM A K. *Gasdynamics of Explosions and Reactive Systems*. Oxford: Pergamon, 1980: 329–340. DOI: 10.1016/B978-0-08-025442-5.50034-2.

- [23] CLARK J A, DURELLI A J. An introduction to dynamic photoelasticity: discussion [J]. *Experimental Mechanics*, 1983, 23(1): 42–48. DOI: 10.1007/BF02328680.
- [24] 王家来, 徐颖. 应变波对岩体的损伤作用和爆生裂纹传播 [J]. *爆炸与冲击*, 1995, 15(3): 212–216. DOI: 10.11883/1001-1455(1995)03-0212-5.
WANG J L, XU Y. Damaging effects of strain waves on rock masses and explosive crack propagation [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1995, 15(3): 212–216. DOI: 10.11883/1001-1455(1995)03-0212-5.
- [25] 苏都都, 严鹏, 卢文波, 等. 露天台阶爆破爆堆形态的 PFC 模拟 [J]. *爆破*, 2012, 29(3): 35–41. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2012.03.009.
SU D D, YAN P, LU W B, et al. Prediction of muckpile profile for open bench blasting with PFC [J]. *Blasting*, 2012, 29(3): 35–41. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2012.03.009.
- [26] 黄尘, 李江腾, 赵远, 等. 基于 PFC^{2D} 的冬瓜山铜矿爆破参数优化 [J]. *矿冶工程*, 2022, 42(1): 1–4. DOI: 10.3969/j.issn.0253-6099.2022.01.001.
HUANG C, LI J T, ZHAO Y, et al. Optimization of blasting parameters for Dongguashan copper mine based on PFC^{2D} [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2022, 42(1): 1–4. DOI: 10.3969/j.issn.0253-6099.2022.01.001.
- [27] JEON S S, KIM D S, JANG Y W. Stability assessment of concrete lining and rock bolts of the adjacent tunnel by blast-induced vibration [J]. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 2007, 23(10): 33–45. DOI: 10.7843/kgs.2007.23.10.33.
- [28] 冷振东, 刘亮, 周旺潇, 等. 起爆位置对台阶爆破爆堆形态影响的离散元分析 [J]. *爆破*, 2018, 35(2): 50–55, 100. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2018.02.009.
LENG Z D, LIU L, ZHOU W X, et al. Numerical investigation of initiation points on muckpile profile in bench blasting [J]. *Blasting*, 2018, 35(2): 50–55, 100. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2018.02.009.
- [29] YE Z W, YANG J H, YAO C, et al. Attenuation characteristics of shock waves in drilling and blasting based on viscoelastic wave theory [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 171: 105573. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2023.105573.
- [30] 杜俊林, 罗强, 宗琦. 空气不耦合装药爆破孔壁冲击压力分析 [J]. *西安科技大学学报*, 2005, 25(3): 306–310. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9315.2005.03.009.
DU J L, LUO Q, ZONG Q. Analysis on preliminary shock pressure on borehole of air-de-coupling charging [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2005, 25(3): 306–310. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9315.2005.03.009.
- [31] 陈士海, 李玉民, 林从谋, 等. 条形装药硐室爆破研究 [J]. *爆炸与冲击*, 1995, 15(4): 363–373. DOI: 10.11883/1001-1455(1995)04-0363-11.
CHEN S H, LI Y M, LIN C M, et al. Explosive blast studies of strip-charged chambers [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1995, 15(4): 363–373. DOI: 10.11883/1001-1455(1995)04-0363-11.
- [32] 田浩帆, 雷振, 包太, 等. 初始地应力作用下岩石爆破裂纹扩展研究 [J]. *有色金属工程*, 2022, 12(3): 138–146, 159. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1744.2022.03.018.
TIAN H F, LEI Z, BAO T, et al. Study on rock blasting crack growth under initial in-situ stress [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2022, 12(3): 138–146, 159. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1744.2022.03.018.
- [33] NING Y J, YANG J, MA G W, et al. Modelling rock blasting considering explosion gas penetration using discontinuous deformation analysis [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2011, 44(4): 483–490. DOI: 10.1007/s00603-010-0132-3.
- [34] 于成龙, 王仲琦. 球形装药爆腔预测的准静态模型 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(2): 249–254. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0249-06.
YU C L, WANG Z Q. Quasi-static model for predicting explosion cavity with spherical charges [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(2): 249–254. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0249-06.
- [35] 吴再海, 安龙, 齐兆军, 等. 基于 LS-DYNA 与 PFC 联合的岩体爆破数值模拟方法分析 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(3): 609–614. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2020.0133.
WU Z H, AN L, QI Z J, et al. The numerical simulation method of rock mass blasting based on PFC combined with LS-DYNA [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(3): 609–614. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2020.0133.
- [36] LYSMER J, KUHFLEMEYER R L. Finite dynamic model for infinite media [J]. *Journal of the engineering mechanics division*,

- 1969, 95(4): 859–877. DOI: 10.1061/JMCEA3.0001144.
- [37] 石崇, 张强, 王盛年. 颗粒流 (PFC5.0) 数值模拟技术及应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 353–360.
SHI C, ZHANG Q, WANG S N. Numerical simulation technology and application with particle flow code (PFC 5.0) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018: 353–360.
- [38] 许彪. 基于 PFC 的岩石控制爆破技术研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018: 29–30. DOI: [10.7666/d.Y3396161](https://doi.org/10.7666/d.Y3396161).
XU B. Research on controlled blasting technology of rock based on PFC [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2018: 29–30. DOI: [10.7666/d.Y3396161](https://doi.org/10.7666/d.Y3396161).
- [39] 雷涛, 康普林, 叶海旺, 等. 柱状药包爆破过程中应力波叠加与岩体裂隙分布的方向效应研究 [J]. [岩石力学与工程学报](#), 2024, 43(2): 399–411. DOI: [10.13722/j.cnki.jrme.2023.0476](https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2023.0476).
LEI T, KANG P L, YE H W, et al. Study on the direction effect of stress wave superposition and fracture distribution in rock mass during cylindrical charge blasting [J]. [Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering](#), 2024, 43(2): 399–411. DOI: [10.13722/j.cnki.jrme.2023.0476](https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2023.0476).
- [40] 冷振东, 卢文波, 陈明, 等. 岩石钻孔爆破粉碎区计算模型的改进 [J]. [爆炸与冲击](#), 2015, 35(1): 101–107. DOI: [10.11883/1001-1455\(2015\)01-0101-07](https://doi.org/10.11883/1001-1455(2015)01-0101-07).
LENG Z D, LU W B, CHEN M, et al. Improved calculation model for the size of crushed zone around blasthole [J]. [Explosion and Shock Waves](#), 2015, 35(1): 101–107. DOI: [10.11883/1001-1455\(2015\)01-0101-07](https://doi.org/10.11883/1001-1455(2015)01-0101-07).

(责任编辑 王晓双)