

# 集束孔掏槽爆破破岩机理研究<sup>1)</sup>

李贲鹏\* 冯盼学† 冯春\*\* 张一鸣\*,2)

\* (河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401)

† (矿冶科技集团有限公司, 北京 102628)

\*\* (中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘要** 掏槽爆破是竖井掘进爆破的常用手段, 集束孔爆破用于掏槽爆破可有效提高掏槽效率。集束孔掏槽爆破过程涉及到结构在动力载荷下的从连续介质到非连续介质过程, 数值计算过程复杂, 如何快速估计某特定集束孔设计的爆破效果一直是科研界与工程界研究重点之一。本文基于应力波叠加方法提出了爆破区半径快速计算公式, 同时基于连续-非连续单元法对 5 孔集束孔爆破设计展开了理论与数值分析。通过与实验结果对比, 验证了计算公式的有效性, 并讨论了集束孔掏槽爆破的破岩机理与规律。结果表明, 当集束孔孔间距为 4~5 倍炮孔直径时, 爆破效果最佳。本文相关成果可为爆破设计人员提供一定指导。

**关键词** 集束孔, 掏槽技术, 爆破漏斗, 破岩机理, 破裂度

中图分类号: O382, O389 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-22-137

## STUDY ON ROCK BREAKING MECHANISM OF BUNDLE-HOLE CUT BLASTING<sup>1)</sup>

LI Yunpeng\* FENG Panxue† FENG Chun\*\* ZHANG Yiming\*,2)

\*(School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

† (BGRIMM Technology Group, Beijing 102628, China)

\*\* (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** Cut blasting is a commonly used method of shaft excavation blasting project. The application of bundle-hole cut blasting can improve the cut efficiency. However, the process of bundle-hole cut blasting involves the continuous and discontinuous process of the structure under dynamic load, the numerical calculation process is complex. How to quickly estimate the blasting effect of a specific cutting design has always been a key point in scientific research and engineering field. In this paper, based on the explosion stress wave superposition method, a fast calculation formula of crater radius is proposed. Meanwhile, based on continuous discontinuous element method (CDEM), the rock breaking mechanism of bundle-hole cut blasting is discussed and verified with experiments. By comparing with the experimental results, the availability of the calculation formula is verified and the rock breaking mechanism of bundle-hole cut blasting is revealed. The obtained results show that when the cut hole spacing is 4~5 times of the diameter of the hole, the blasting effect is the best. The results of this paper can provide some guidance for the design of bundle-hole cut blasting.

**Keywords** bundle-hole, cut hole technology, blast funnel, rock breaking mechanism, fracture degree

2022-03-07 收到第 1 稿, 2022-05-15 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金 (52178324) 和科技部国家重点研发计划 (2018YFC1505504) 资助项目。

2) 张一鸣, 教授, 研究方向为岩土工程和土木工程防灾减灾等。E-mail: yiming.zhang@hebut.edu.cn

**引用格式:** 李贲鹏, 冯盼学, 冯春等. 集束孔掏槽爆破破岩机理研究. 力学与实践, 2023, 45(1): 90-99

Li Yunpeng, Feng Panxue, Feng Chun, et al. Study on rock breaking mechanism of bundle-hole cut blasting. *Mechanics in Engineering*, 2023, 45(1): 90-99

伴随我国经济发展，矿产资源开采量逐年增加，尤其是煤炭、有色金属等战略资源的开采。目前地表浅层资源已开采完毕，开采工作逐渐向深层延伸。深层开采所面临的爆破问题极为复杂<sup>[1]</sup>，传统矿山爆破技术也迎来了新的挑战。掏槽爆破是深部爆破开采常用技术，对于矿区资源的高效生产具有重要意义<sup>[2]</sup>。

在炸药总当量一定的条件下掏槽爆破的爆破效率主要取决于掏槽设计。近十年来国内专家学者分别从理论分析、试验和数值模拟方面作了诸多研究。李启月等<sup>[3]</sup>应用弹性力学理论对不同地应力条件下直眼掏槽破岩进行分析，并采用 LS-DYNA 软件进行数值模拟。王辉<sup>[4]</sup>利用断裂力学和损伤力学理论对岩石在爆炸作用下的断裂机理进行深入分析。余永强等<sup>[5]</sup>通过试验的方法，设置了三种复楔形掏槽爆破方案，得出了中心孔加装药的复楔形掏槽是一种有效的硬岩掏槽方案的结论。Chandrakar 等<sup>[6]</sup>认为爆破拉力是影响爆破效果的一个因素。研究了不同约束因素孔隙比对爆破拉力的影响，结果表明：为了获取更长的爆破拉力，至少需要 20% 的孔隙比。张召冉等<sup>[7]</sup>提出了多阶段掏槽技术，并通过工程实践得出多阶段掏槽爆破可以显著提高爆破效率。韩博等<sup>[8]</sup>针对立井井筒基岩段深孔爆破问题进行了爆破参数优化研究。刁先鹏<sup>[9]</sup>通过对含大直径中空孔的直眼掏槽爆破方案进行现场应用而取得了更好的爆破效果。梁群<sup>[10]</sup>通过对直眼掏槽中深孔进行爆破实践，结果表明直眼掏槽效果优于楔形掏槽。Cardu 等<sup>[11]</sup>认为平行向的爆破切割模式具有更高的爆破牵引率。郑祥滨等<sup>[12]</sup>采用任意拉格朗日-欧拉方法 (arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE)，研究了单螺旋空孔爆破的成腔过程，认为爆破应力波以柱面波的形式传递。Himanshu 等<sup>[13]</sup>认为单次槽顶爆破效果不佳主要是由爆破设计不当导致的，基于 Ansys 软件建立了数值模型研究了槽顶爆破的评估方法。梁瑞等<sup>[14]</sup>基于 LS-DYNA 软件对准直眼掏槽爆破技术进行研究。王鹏等<sup>[15]</sup>研究了多孔同段爆破漏斗形成过程，认为爆炸后应力波的传播规律、叠加后应力波的大小及持续时间是影响多孔同段爆破效果的关键因素。杨国梁等<sup>[16]</sup>应用 LS-DYNA 软件对复式楔形深孔掏槽爆破进行研究，结果表明复

式楔形深孔掏槽爆破可以形成两个应力峰值，有利于炮孔底部岩石的破碎。

上述研究发现：对于竖井爆破，其爆破效果和掏槽的形式密不可分。本文基于连续-非连续方法，以理论推导、数值模拟和试验相结合的形式，研究集束孔掏槽爆破在竖井掘进这一领域的可行性。基于应力波叠加原理推导集束孔掏槽爆破漏斗，并以破裂度、大块率为指标来评价集束孔掏槽爆破的爆破效果。

## 1 集束孔爆破漏斗计算

本章节分为三个部分，分别是爆破理论、集束孔爆破漏斗理论公式和连续-非连续单元方法 (continuous-discontinuous element method, CDEM) 计算模型。其中第一类方法基于应力波叠加原理和应力波衰减公式，推导出集束孔掏槽爆破漏斗理论公式。效率较高，可以用来快速估算集束孔爆破漏斗半径；第二类方法基于连续-非连续方法，构建出集束孔数值计算模型。用来分析集束孔掏槽爆破破坏形态，在后一章节将两类方法与实验结果展开对比。

### 1.1 爆破理论

理论认为爆破时岩石的破坏是应力波和爆生气体共同作用的结果，两者的作用在不同的阶段体现。在爆炸时，靠近炮孔的岩石被粉碎，认为主要是炸药爆炸产生的强烈冲击波作用的结果；而裂隙区岩石破碎为尺寸不同的块体则认为是爆炸后产生的爆生气体的作用<sup>[17]</sup>。爆炸产生具有高压的爆生气体，爆生气体渗入到前一阶段所产生的径向裂缝中，并在裂缝尖端产生强应力集中，从而促使裂缝发育贯通。

当采用平行集束孔的形式进行掏槽爆破时，由于不同炮孔爆破产生的应力波具有一定的相位差，其爆破后所共同形成的应力波具有一定的厚度。从而使应力波峰值作用于岩石的时间更长、冲量也更大，有利于增强中远区的破碎作用<sup>[18]</sup>。

### 1.2 集束孔爆破漏斗理论公式推导

采用球状药包相关理论对集束孔爆破漏斗直径进行推导<sup>[19]</sup>。当炮孔中的炸药起爆后，靠近炮孔壁区域的岩石直接受到爆轰波的作用而被粉碎。

同时由于岩石被粉碎，爆轰波因消耗大部分能量而衰减为应力波继续向爆炸中远区传播。引入应力波衰减公式对此规律进行描述

$$\sigma_r = P_0 \left( \frac{r}{r_e} \right)^{-\delta} \quad (1)$$

式中， $\sigma_r$  为径向应力峰值； $P_0$  为初始的炸药爆压； $r$  为某时刻应力波波峰叠加处顶点到相邻两炮孔中心的距离； $r_e$  为炮孔的半径； $\delta$  为压力衰减系数，一般取  $\delta = 3$ 。

由于集束孔是多个炮孔同时起爆，其各炮孔之间的距离又较为接近，因此需要考虑各炮孔爆炸产生的爆炸应力波相互叠加的问题。首先取相邻两炮孔进行应力波叠加：假设相邻两个炮孔中心距为  $a$ ，破岩角为  $\beta$ ，任一时刻两应力波叠加波峰的交点为  $m$ ， $m'$  为最大破岩角  $\beta = 70^\circ$  [20] 时的交点。取两相邻炮孔叠加的一般情况，即应力波斜交叠加的情况进行推导，其径向应力  $\sigma_r$  与切向应力  $\sigma_\theta$  的关系为

$$\sigma_\theta = \frac{\mu_d}{1 - \mu_d} \sigma_r \quad (2)$$

式中  $\mu_d$  为岩石动态泊松比，其和岩石泊松比  $\mu$  的关系为

$$\mu_d = 0.8\mu \quad (3)$$

根据几何关系可得，当破岩角为  $\beta$  时，相邻两炮孔  $A$  和  $B$  在其径向某点处的合力为 [20]

$$\sigma_r = \sigma_{rA} - \sigma_{\theta B} \cos \left( \frac{\pi}{2} - 2\beta \right) - \sigma_{rB} \cos (2\beta) \quad (4)$$

式中  $\sigma_{rA}$  和  $\sigma_{rB}$  分别为炮孔  $A$  和  $B$  在  $m$  点处产生的径向应力， $\sigma_{\theta A}$  和  $\sigma_{\theta B}$  分别为切向应力。由于采用集束孔掏槽爆破各炮孔装药量一致， $\sigma_{rA} = \sigma_{rB}$ ，对式 (4) 进行化简可得

$$\sigma_{rABm} = \sigma_{rA} - \sigma_{rA} \sqrt{1 + \lambda^2} \sin (2\beta + \varphi) \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{\mu_d}{1 - \mu_d} \quad (6)$$

$$\tan \varphi = \frac{1}{\lambda} \quad (7)$$

式中  $\lambda$  为动态侧应力系数，当  $\arctan \lambda < \beta < 90^\circ$  时，径向方向合力为压应力 [20]。其次在炮孔  $A$  和  $B$  应力波叠加后，对剩余炮孔  $C$ ， $D$  和  $E$  按照式 (1) 应力波衰减后再行叠加，如图 1 所示，图中  $\theta$  为正  $N$  边形的圆心角。

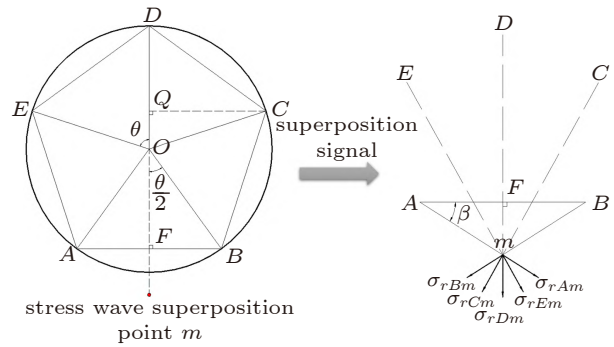


图 1 五孔集束孔应力波叠加模型

Fig. 1 Stress wave superposition model of bundle-hole with five holes

$$\sigma_{rCm} = P_0 \left( \frac{r_{Cm}}{r_e} \right)^{-\delta} \quad (8)$$

$$\sigma_{rDm} = P_0 \left( \frac{r_{Dm}}{r_e} \right)^{-\delta} \quad (9)$$

$$\sigma_{rEm} = P_0 \left( \frac{r_{Em}}{r_e} \right)^{-\delta} \quad (10)$$

综上所述， $m$  点处五孔应力波叠加值为

$$\sigma_{rm} = \sigma_{rABm} + \sigma_{rCm} + \sigma_{rDm} + \sigma_{rEm} \quad (11)$$

由几何关系可知， $r_{Cm}$ ， $r_{Dm}$  和  $r_{Em}$  的取值和破岩角  $\beta$  的大小有关，求解公式为

$$r_{Cm} = r_{Em} \quad (12)$$

$$r_{Cm} = \sqrt{(l_{CQ})^2 + (l_{Qm})^2}$$

其中

$$l_{CQ} = \frac{a \sin \frac{\theta}{2} \sin \theta}{2}$$

$$l_{Qm} = \frac{a \sin \frac{\theta}{2} \tan \frac{\theta}{2} \cos \theta + a + a \tan \frac{\theta}{2} \tan \beta}{2 \tan \frac{\theta}{2}} \quad (13)$$

$$r_{Dm} = l_{DF} + l_{Fm} = \frac{a \left( \sin \frac{\theta}{2} \tan \frac{\theta}{2} + 1 + \tan \frac{\theta}{2} \tan \beta \right)}{2} \quad (14)$$

因此当确定了相邻两个药包的中心距  $a$  时即可确定上述取值，且其取值中含有  $\tan \beta$  项。

当径向的压应力大于岩石的抗压强度时，认为岩石被压碎发生破坏。然而掏槽爆破一般处于地层深部，需要考虑围压的作用。所以岩石的抗压强度采用多向应力条件下的强度

$$\sigma_0 = \sigma_c \sqrt{\rho_s \frac{C_p}{\sigma_c}} \quad (15)$$

式中， $\sigma_0$  为多应力条件下岩石的强度； $\sigma_c$  为岩石的单轴抗压强度； $\rho_s$  为岩石的密度； $C_p$  为岩石纵波的波速。

五孔爆炸叠加后的应力波在点  $m$  处继续向外传播并按式 (1) 继续进行衰减，但此时炮孔半径  $r_e$  应采用等效炮孔半径  $R_e$  来进行计算<sup>[19]</sup>。当其值达到  $\sigma_0$  时认为是临界状态，所得半径即为集束孔掏槽爆破的强烈破碎区半径  $R_{C1}$

$$R_e = \sqrt{N} r_e \quad (16)$$

$$R_{C1} = R_e \sqrt{\frac{\sigma_{rm}}{\sigma_0}} \quad (17)$$

式中  $N$  为组成集束孔的炮孔个数；式 (17) 所计算出来  $R_{C1}$  为集束孔爆破所形成强烈破碎区半径，由于集束孔炮孔布置较近，集束孔自身所形成束孔区域内的岩石也会破碎。所假设的某一时刻应力波峰值叠加点  $m$  处的应力值远高于岩石的强度，因此沿径向  $m$  点以内的岩石也会破碎，所以集束孔爆破漏斗半径为  $l_{Om} + R_{C1}$ ，将  $l_{Om}$  记作  $R_{C2}$ ，如图 2 所示，则有

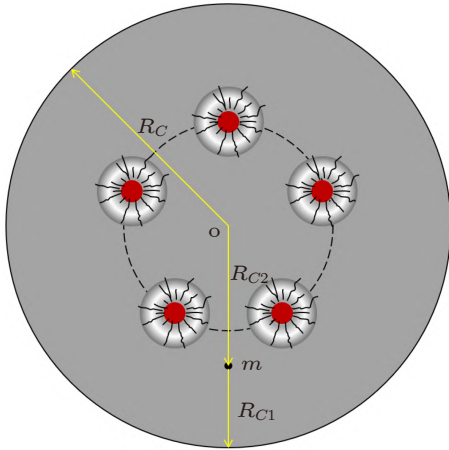


图 2 集束孔压碎区示意图

Fig. 2 Schematic diagram of bundle-hole crushed zone

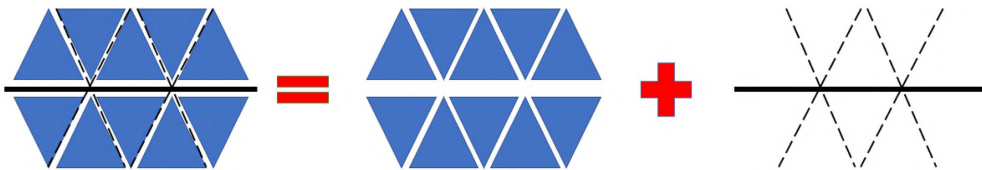


图 3 CDEM 中的两套本构模型

Fig. 3 Two constitutive models in the CDEM

$$R_C = R_{C1} + R_{C2} \quad (18)$$

式中  $R_C$  为集束孔爆破漏斗半径。

### 1.3 基于 CDEM 计算模型

早期爆破领域的数值方法多为基于显式积分的 LS-dyna<sup>[21]</sup>，而 CDEM<sup>[22-23]</sup> 是一种将有限元和离散元相互耦合的显示动力学数值方法，结合了连续和离散计算的优势。它基于拉格朗日方程，通过两套本构来分别描述块体单元及单元之间的界面，从而更加准确地刻画了材料从连续变形到断裂直至运动的全过程，目前已广泛应用于爆破冲击领域<sup>[24-28]</sup>。

CDEM 的控制方程为

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial v_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial u_i} = Q_i \quad (19)$$

式中， $v_i$  和  $u_i$  为广义坐标； $Q_i$  为系统的非保守力； $L$  为拉格朗日函数，可写为

$$L = \Pi_m + \Pi_e + \Pi_f \quad (20)$$

式中， $\Pi_m$ ， $\Pi_e$  和  $\Pi_f$  分别为系统的动能、弹性能和势能。

为了表征材料由连续到非连续的转变，CDEM 方法采用了两套本构，一套用来描述块体单元自身的材料特性，一套用来描述块体单元之间的虚拟界面。所采用的两套本构如图 3 所示。

图 3 中蓝色部分为块体单元，块体单元之间通过界面来进行连接。其中粗实线为块体之间的真实界面，例如裂隙、节理等；细虚线为块体之间的虚拟界面，当虚拟界面未断开时，块体之间是连续的，当虚拟界面逐渐断开则表明块体之间出现了裂缝。

块体单元之间的界面用弹簧来进行表征，通过弹簧来起到粘聚力模型。当弹簧没有断裂时，认为处于连续体状态，提供弹簧作用力

$$\left. \begin{aligned} F_n^j &= -K_n^j \cdot \Delta d_n^j \\ F_t^j &= -K_t^j \cdot \Delta d_t^j \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式中,  $F$  表示弹簧的作用力,  $K$  表示弹簧的刚度,  $\Delta d$  为弹簧所连接两节点的相对位移, 也即弹簧的变形量, 上标  $j$  表示第  $j$  根弹簧, 下标  $n$  和  $\tau$  分别表示法向和切向。

弹簧采用拉伸破坏的 Mohr-Coulomb 准则, 其破坏条件为

$$\left. \begin{aligned} F_n^j > T \text{ 时,} & F_n^j = 0 \quad F_\tau^j = 0 \\ F_\tau^j > F_n^j \cdot \tan \varphi + C \text{ 时,} & F_\tau^j = F_n^j \cdot \tan \varphi \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

式中,  $T$  为抗拉强度,  $\varphi$  为内摩擦角,  $C$  为黏聚力。

炸药模型采用朗道点火爆炸模型, 该模型主要基于朗道-斯坦纽科维奇公式 ( $\gamma$  率方程)

$$\left. \begin{aligned} PV^\gamma &= P_0 V_0^\gamma, & P &\geq P_k \\ PV^{\gamma_1} &= P_k V_k^{\gamma_1}, & P &< P_k \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

式中,  $\gamma$  为第一段绝热指数;  $\gamma_1$  为第二段绝热指数;  $P$  和  $V$  分别是高压气球的瞬态压力和体积;  $P_0$  和  $V_0$  分别为高压气球初始时刻的压力和体积;  $P_k$  和  $V_k$  分别为高压气球在两段绝热过程边界上的压力和体积, 其中  $P_k$  为

$$P_k = P_0 \left\{ \frac{\gamma_1 - 1}{\gamma - \gamma_1} \left[ \frac{(\gamma - 1) Q_w \rho_w}{P_0} - 1 \right] \right\}^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (24)$$

式中,  $Q_w$  为爆热,  $\rho_w$  为炸药的装药密度。

## 2 集束孔掏槽爆破工况分析

本章节分为三个部分, 分别是试验设置、计

算结果验证和结果讨论。通过设计不同中心距的集束孔掏槽爆破工况, 采用实验和数值模拟的手段对理论公式进行验证。随后以爆破漏斗半径、破裂块体粒径和破裂度为评价指标对四种集束孔掏槽爆破工况的爆破效果进行分析。

### 2.1 试验设置

根据北矿院相关文献, 采用标号为 42.5R 的普通硅酸盐水泥和粗细骨料制作底面半径 1.3 m, 高 1.2 m 的混凝土圆柱体试验模型, 如图 4(a) 所示, 所制作混凝土配合比为水泥:石子:河砂:水=52:88:63:21 (重量比)。炮孔采用集束孔掏槽设计如图 4(b) 所示, 炮孔半径为 2.5 cm。分别设置四种不同中心距的掏槽爆破工况, 其中中心距分别为 7.5 cm, 10 cm, 12.5 cm 和 15 cm, 分别命名为工况一、工况二、工况三和工况四。所选取炸药为黑索金, 炮孔的装药结构从上到下依次是: 9 cm 炮泥, 5 cm 装药长度和 106 cm 炮泥。同时建立与之匹配的数值模型如图 4(c) 所示。图中紫色和红色区域为混凝土数值模型, 黄色圆环及底部的绿色圆柱体为所设置的高阻尼区域, 以此来吸收应力波模拟无反射边界条件。为了降低计算量, 将混凝土模型分为两个区域, 红色区域网格较稀疏, 网格尺寸为 0.1~0.15 m。紫色区域网格较密, 网格尺寸为 0.05~0.06 m。采用 Gmesh 软件对数值模型划分网格, 共划分 69133 个四面体单元。

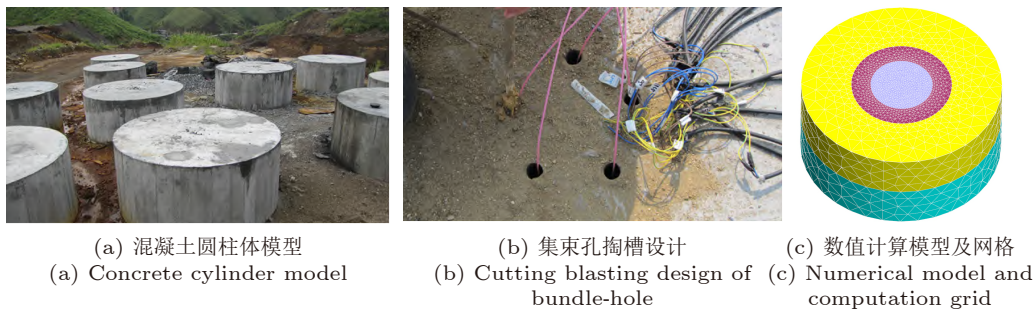


图4 集束孔掏槽爆破试验

Fig. 4 Cutting blasting test of bundle-hole

采用断裂能模型 FracEnergy 来表征爆炸载荷下混凝土模型的渐进破坏过程, 其中块体单元引入线弹性模型本构, 虚拟界面引入断裂能模型本构来模拟混凝土模型损伤断裂过程。混凝土模型主要力学参数为: 密度  $\rho = 2.5 \text{ t/m}^3$ , 弹性模

量  $E = 30.9 \text{ GPa}$ , 泊松比  $\mu = 0.3$ , 黏聚力  $C = 3 \text{ MPa}$ , 抗拉强度  $T = 2.42 \text{ MPa}$ , 内摩擦角  $\phi = 45^\circ$ , 剪胀角  $\psi = 16.7^\circ$ 。其中参数取值为试验所得; 虚拟界面的参数是软件自动从所设置的单元力学参数中获取的, 其中刚度为单元的 10 倍,



强度为 1 倍。

炸药采用黑索金炸药，其主要参数为：装药密度  $\rho_w = 1.82 \text{ t/m}^3$ ，爆速  $D = 8.35 \text{ km/s}$ ，爆热  $Q_w = 5.1 \text{ MJ/kg}$ ，初始段绝热指数  $\gamma = 3.0$ ，第二段绝热指数  $\gamma_1 = 1.333$ ，爆压  $P_0 = 32 \text{ GPa}$ ，持续时间  $t = 1 \text{ ms}$ 。

### 2.2 计算结果验证

根据 2.1 所设计试验，代入相关爆炸参数进行试算（此处仅以工况一的中心距为例进行试算）：取  $P_0 = 32 \text{ GPa}$ ， $\delta = 3$ ；相邻两个药包之间的中心距  $a = 3r_e$ ，即  $R_{C2} = 4.59r_e$ ， $r_e = 2.5 \text{ cm}$ ； $\sigma_0 = 5\sigma_c$ ， $\sigma_c = 27 \text{ MPa}$ 。根据北矿院勘察报告取泊松比  $\mu = 0.3$ ，根据式 (3)，式 (6) 和式 (7) 可计算得  $\lambda = 0.316$ ， $\varphi = 72.4^\circ$ ，随着  $\beta$  值的增大， $2\beta + \varphi$  也逐渐增大，其值域为  $[72.4^\circ, 212.4^\circ]$ ， $\sin(2\beta + \varphi)$  的值随之先增大后减小。当  $2\beta + \varphi$  为  $90^\circ$  时，有最小  $\sigma_{rABm}$ ；当  $2\beta + \varphi$  为  $212.4^\circ$  时，有最大  $\sigma_{rABm}$ 。

将其代入式 (11)，式 (15)，式 (17) 和式 (18) 即可求得集束孔爆破漏斗半径  $R_C \in [28.97, 32.24]$ ，与试验结果漏斗半径  $22.7 \text{ cm}$  存在一定误差，与数值模拟结果  $X$  方向  $27.19 \text{ cm}$  和  $Y$  方向  $29.93 \text{ cm}$  较为接近。

四种工况起爆后试验结果如图 5 所示。由图可知两种方法下集束孔的爆破漏斗均为圆台形，漏斗上表面半径大，下表面半径小。这主要是因为上表面存在自由面，爆破效果好，下表面则由于缺乏自由面且存在周围混凝土的约束导致爆破效果不如上表面，但其爆破漏斗直径仍大于传统的爆破漏斗，其直径接近五孔集束孔外切圆半径。为了更加详细地对比集束孔掏槽爆破漏斗的特征，对数值结果进行了  $X$  和  $Y$  两个方向的切片，如图 6 所示。由图可知由于集束孔沿正五边形布置，其两个主轴方向爆破漏斗剖切图基本一致。随着中心距的增大，爆破漏斗的半径也随之增大，但当中心距增大到  $12.5 \text{ cm}$  时，爆破漏斗的半径基

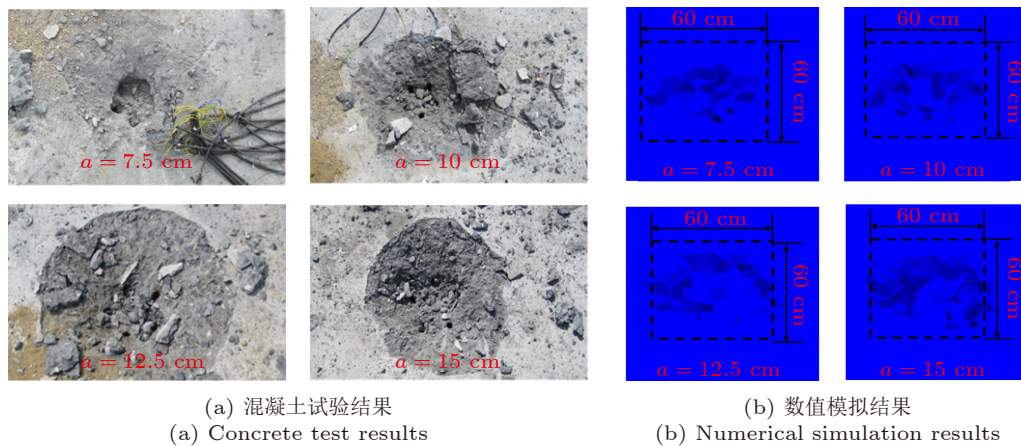


图 5 集束孔掏槽爆破试验爆破漏斗验证  
Fig. 5 Verification of blasting funnel for bundle-hole cut blasting test

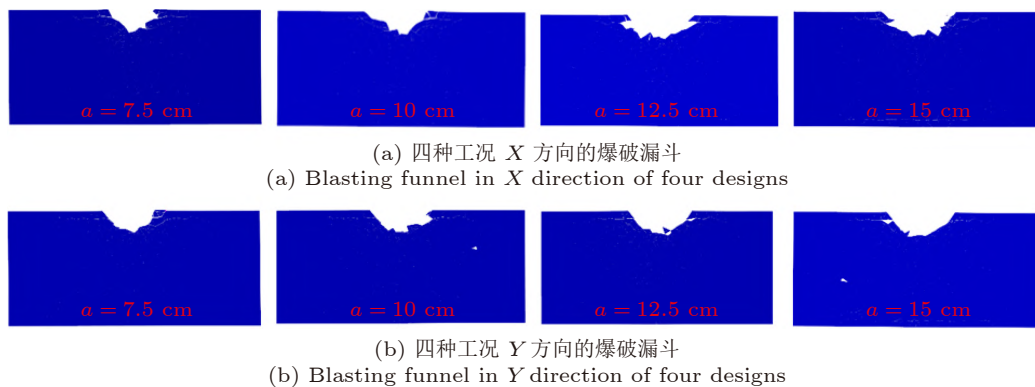


图 6 四种工况爆破漏斗形状  
Fig. 6 Blasting funnel shape of four designs

本不变。这主要是因为当装药量一定时，炸药的破岩能力有限。四种工况的爆破漏斗深度基本一致，约为炮孔掏槽的深度。四种工况的主要差别呈现在爆破漏斗半径上，为了更加直观地去对比四种工况的爆破漏斗尺寸，对比了理论公式、爆破试验及数值模拟的结果，如图7所示。由于工程原因，现场试验尚未开展。

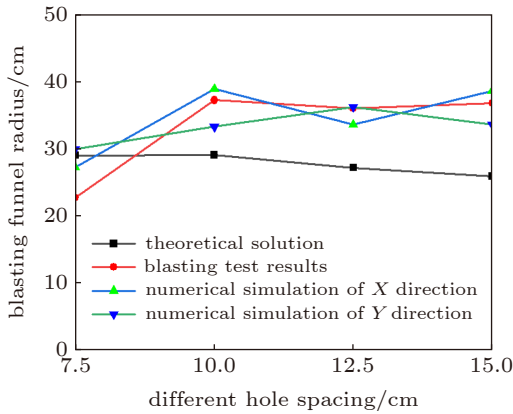


图7 四种工况爆破漏斗半径

Fig. 7 Radius of blasting funnel in four designs

由图7可知，理论公式所推导爆破漏斗半径较为保守，在集束孔孔间距较小时与试验值较为接近，当孔间距较大时与试验值存在一定的误差。这主要是因为应力波反射造成的破坏在孔间距较大时比较明显，但多孔应力波反射叠加机理较为复杂，仍需作进一步研究。其爆破漏斗半径峰值出现在4倍孔间距时，为29.05 cm；数值模拟X方向结果与试验结果较为近似，具有相同的发展趋势，爆破漏斗半径峰值均出现在4倍孔间距时，分别为38.9 cm和37.2 cm。Y方向与X方向数值模拟结果存在一定差异，最大差值出现在4倍孔间距时，约为5.65 cm。该差值与网格尺寸较为接近，可能是由于网格尺寸偏大导致。Y方向

爆破漏斗峰值出现在5倍孔间距时，为36.16 cm。因此对于集束孔掏槽爆破来说，当孔间距取4~5倍炮孔直径时其爆破效果最好。

### 2.3 四种工况破裂特征分析

集束孔掏槽爆破试验可以直观地观察爆破漏斗特征，但对于岩石内部的损伤和集束孔爆破破岩机理研究存在不足，为了弥补这一缺陷，采用数值模拟的方法对四种工况的破裂特征进行分析。

截取集束孔爆破后的竖向位移云图如图8所示，四种工况的破裂特征基本一致，仅以中心距为12.5 cm的工况三进行说明，其中左图为模型整体位移云图，右图为爆破漏斗局部放大图。相关研究表明<sup>[29]</sup>，炸药爆炸时产生的冲击波作用时间约为几十微秒，爆生气体作用时间约为10 ms。因此截取爆炸后0~9 ms模型竖向位移云图进行分析。炮孔内炸药爆炸后，爆炸冲击波作用在炮孔壁上，随后衰减为应力波，应力波在0.5 ms时已传递至模型的自由面，使数值模型出现一定的破裂，呈漏斗状；在2 ms时，在爆生气体的作用下，炮孔底部的裂隙进一步发育，同时上部自由面区域开始出现鼓包运动；在4 ms时，数值模型已出现明显破裂，此时爆破漏斗呈现明显的圆台形。模型上部也出现明显的鼓包，呈凸字形；在6 ms时，模型上部自由面区域出现明显破裂，爆生气体逸散。

与地表矿山爆破不同，竖井掏槽爆破在爆破结束后需要进行人工清底工作，因此爆破后的块体尺寸也是衡量爆破效果的一个重要指标。因此绘制了四种工况的破裂块体分布曲线如图9所示，破裂块体的数据由软件直接导出。可以看到，当块体的特征尺寸小于2.5 cm时，四种工况均没有通过率，即在爆破后被粉碎的混凝土较少；破碎

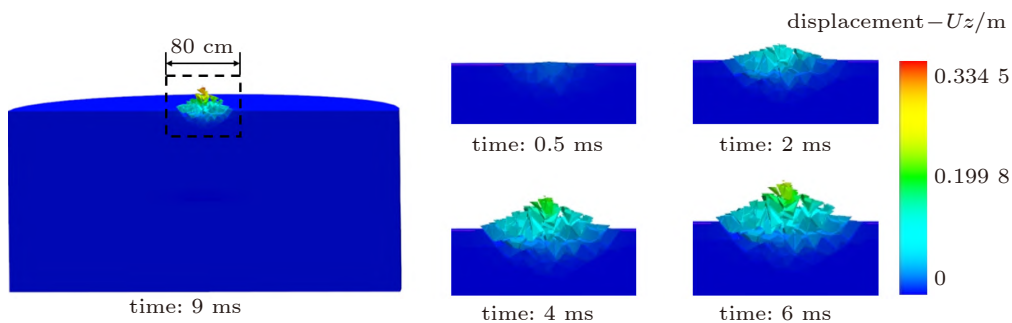


图8 竖向位移云图

Fig. 8 Vertical displacement cloud chart

后的主要块体特征尺寸为 3~6 cm，更大尺寸块体虽然单一通过率较高，但块体数量较少。为了定量地说明存在的差异，统计了块体尺寸如表 1 所示，表中爆破后块体的粒径用  $S$  表示，四种工况在破碎后的小尺寸块体占比基本相同，约为 90%，但在大尺寸块体（6 cm 及以上）上存在差异。当孔间距为 3~4 倍炮孔直径时，其大块率较低，约为 9%；当孔间距为 5~6 倍炮孔直径时大块率占比较高，约为 11%。因此，从爆破后的大块率上来看，3~4 倍炮孔直径时其爆破效果最好。

为了进一步说明混凝土数值模型的破裂程度进而更加直观地反映爆破效果，引入了无量纲量，即破裂度<sup>[30]</sup>来进行评估。破裂度是指模型的破裂数与模型最大破裂数的比值，其值越大，说明爆

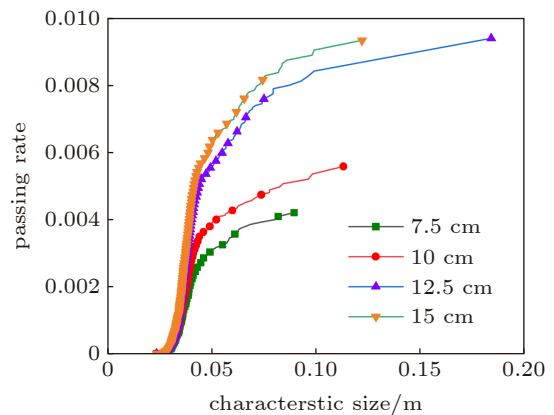


图 9 四种工况破裂块体分布曲线

Fig. 9 Fracture block curve of four blasting designs

破效果越好。绘制了四种工况的破裂度时程曲线如图 10 所示，其数据由软件直接导出。由于爆炸过程在一瞬间完成，后续破裂度基本不变，仅绘制前 30 ms 的破裂度时程曲线。

表 1 四种工况破碎岩石不同粒径占比(单位:%)

Table 1 The proportions of different particle sizes of broken rocks under four blasting designs (unit: %)

粒径 $S$	$S < 4$ cm	$4$ cm $\leq S < 6$ cm	$6$ cm $\leq S < 8$ cm	$8$ cm $\leq S < 10$ cm	$S \geq 10$ cm
$a = 7.5$ cm	49.82	40.96	7.07	2.14	0.01
$a = 10$ cm	51.09	39.93	6.07	2.29	0.62
$a = 12.5$ cm	46.67	40.33	10.89	1.64	0.47
$a = 15$ cm	49.78	38.40	8.95	2.48	0.39

由图 10 可知，在前 5 ms 内四种工况的破裂度均随时间在增长，10 ms 后爆破基本完成，四种工况破裂度均保持不变，但峰值存在明显差异。随着孔间距的不断增大，破裂度也随之增大。3 倍炮孔直径时其破裂度最小，这主要是由于炮孔过于密集，对于炸药的利用不充分导致炮孔附近

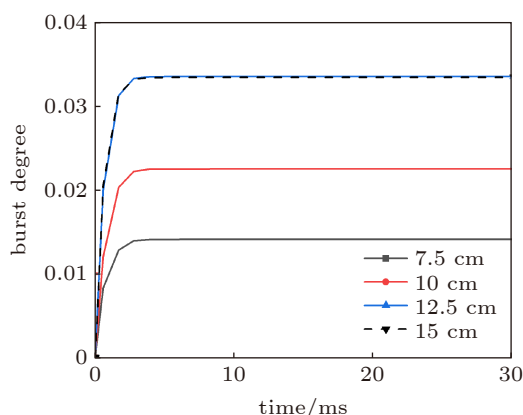


图 10 四种工况破裂度时程曲线

Fig. 10 Fracture time history curves for four blasting designs

岩石过度粉碎，这点在表 1 中也有所体现；5 倍炮孔和 6 倍炮孔直径的工况破裂度基本一致，这主要是由于孔间距变大，应力波峰值在传递的过程中随着距离在不断地衰减，其破岩能力有限，故当孔间距超过 5 倍炮孔直径时其破裂度基本不变。因此，从破裂度的角度来看，孔间距取 5 倍炮孔直径时其爆破效果最好。

综合爆破漏斗半径、破裂块体和破裂度，对于集束孔掏槽爆破来说，孔间距取 4~5 倍炮孔直径时其爆破效果最好。

### 3 结论

本文基于应力波叠加原理对集束孔掏槽爆破爆破漏斗半径进行了推导，与试验结果进行对比验证，并进一步应用 CDEM 对集束孔掏槽爆破损伤机理进行研究，探讨了不同孔间距集束孔掏槽爆破的爆破效果并得到了如下结论。



(1) 从球形药包理论出发,应用应力波叠加原理和应力波衰减原理对集束孔爆破漏斗半径进行推导,给出了集束孔爆破漏斗公式,并进行了相似混凝土试验加以验证,结果较吻合。

(2) 集束孔掏槽爆破产生的爆破漏斗为圆台形,爆破后的块体尺寸可有效衡量爆破效果。当其孔间距较小时,将会导致炮孔附近岩石过度粉碎;孔间距过大时则会增大爆破后的大块率,不利于后续的清底工作。

(3) 对于集束孔掏槽爆破来说,不同的孔间距将会导致不同的爆破效果,最佳的孔间距为4~5倍炮孔直径。

结果表明集束孔掏槽爆破是一种行之有效的掏槽方案,本文的研究为集束孔掏槽爆破更加深入的研究奠定了基础,提供了理论和试验参考,辅助工作人员优化方案,较好地实现深部资源的有效开采。

### 参 考 文 献

- 钱七虎. 岩石爆炸动力学的若干进展. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 1945-1968  
Qian Qihu. Some advances in rock blasting dynamics. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(10): 1945-1968 (in Chinese)
- 黄宝龙. 岩巷掘进准直眼掏槽爆破试验研究. [博士论文]. 北京: 中国矿业大学, 2011  
Huang Baolong. Research on quasi-parallel cutting blast in rock drivage. [PhD Thesis]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2011 (in Chinese)
- 李启月, 黄武林, 吴正宇等. 不同地应力条件下直眼掏槽破岩的理论研究与数值模拟. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(11): 57-62  
Li Qiyue, Huang Wulin, Wu Zhengyu, et al. Theoretical study and numerical simulation on rock failure process in cutting by parallel hole under different ground stress conditions. *Journal of Safety Science and Technology*, 2016, 12(11): 57-62 (in Chinese)
- 王辉. 爆炸载荷下岩石爆破损伤断裂机理研究. [博士论文]. 西安: 西安科技大学, 2003  
Wang Hui. Study on mechanism of rock damage and crack by explosion loading. [PhD Thesis]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2003 (in Chinese)
- 余永强, 王超, 褚怀保等. 硬岩巷道中深孔爆破掘进复楔形掏槽试验研究. 爆破, 2013, 30(2): 95-99  
Yu Yongqiang, Wang Chao, Chu Huaibao, et al. Duplex wedge cutting on mid-depth borehole tunneling blasting in hard rock. *Blasting*, 2013, 30(2): 95-99 (in Chinese)
- Chandrakar S, Paul PS, Sawmliana C. Influence of void ratio on "Blast Pull" for different confinement factors of development headings in underground metalliferous mines. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 108: 103716
- 张召冉, 杨仁树. 岩石巷道“多阶段”掏槽技术及应用研究. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(3): 551-559  
Zhang Zhaoran, Yang Renshu. Multi-step cutting technology and its application in rock roadways. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(3): 551-559 (in Chinese)
- 韩博, 张乃宏. 立井筒基岩段深孔爆破技术参数优化分析. 煤炭工程, 2012(3): 29-31  
Han Bo, Zhang Naihong. Analysis on parameter optimization of blasting technology for deep borehole in base rock section of mine shaft. *Coal Engineering*, 2012(3): 29-31 (in Chinese)
- 刁先鹏. 含大直径中空孔的直眼掏槽在岩巷掘进的应用. 中国煤炭, 2015, 41(8): 77-80  
Diao Xianpeng. The application of parallel cut with large diameter hollow bore in rock drive. *China Coal*, 2015, 41(8): 77-80 (in Chinese)
- 梁群. 直眼掏槽中深孔爆破实践. 煤炭技术, 2009, 28(5): 78-79  
Liang Qun. Practice of deep-hole blasting with straight cut hole. *Coal Technology*, 2009, 28(5): 78-79 (in Chinese)
- Cardu M, Seccatore J. Quantifying the difficulty of tunneling by drilling and blasting. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, 2016, 60: 178-182
- 郑祥滨, 蹇世杰, 范利华等. 单螺旋空孔直眼掏槽成腔过程数值模拟研究. 岩土力学, 2008, 29(9): 2589-2594  
Zheng Xiangbin, Qu Shijie, Fan Lihua, et al. Numerical simulation of cavity formation process by single helix parallel hole cut blasting. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(9): 2589-2594 (in Chinese)
- Himanshu VK, Mishra AK, Roy MP, et al. Numerical simulation based approach for assessment of blast induced deformation pattern in slot raise excavation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 144(A1): 104816
- 梁瑞, 俞瑞利, 周文海等. 基于LS-DYNA模拟的准直眼掏槽爆破技术研究. 有色金属工程, 2019, 9(8): 101-107  
Liang Rui, Yu Ruili, Zhou Wenhai, et al. Research on quasi-parallel cutting blasting technology based on LS-DYNA simulation. *Non-ferrous Metal Engineering*, 2019, 9(8): 101-107 (in Chinese)
- 王鹏, 周传波, 耿雪峰等. 多孔同段爆破漏斗形成机理的数值模拟研究. 岩土力学, 2010, 31(3): 993-997  
Wang Peng, Zhou Chuanbo, Geng Xuefeng, et al. Numerical simulation of formation mechanism of multi-hole and same delay time of blasting crater. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(3): 993-997 (in Chinese)
- 杨国梁, 姜琳琳, 杨仁树. 复式楔形深孔掏槽爆破研究. 中国矿业大学学报, 2013, 42(5): 755-760  
Yang Guoliang, Jiang Linlin, Yang Renshu. Investigation of cut blasting with duplex wedge deep holes. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2013, 42(5): 755-

- 760 (in Chinese)
- 17 杨仁树, 丁晨曦, 王雁冰等. 爆炸应力波与爆生气体对被爆介质作用效应研究. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(S2): 3501-3506  
Yang Renshu, Ding Chenxi, Wang Yanbing, et al. Action-effect study of medium under loading of explosion stress wave and explosion gas. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(S2): 3501-3506 (in Chinese)
- 18 袁向全, 林大泽. 地下采矿平行集束装药落矿技术研究与应用. *中国工程科学*, 2005(S1): 369-372  
Yuan Xiangquan, Lin Daze. Study and determination on the blasting technique of parallel bunch-long-hole in underground mining. *Engineering Sciences in China*, 2005(S1): 369-372 (in Chinese)
- 19 孙忠铭, 陈何, 王湖鑫. 束状孔等效直径当量球形药包大量落矿采矿技术. *采矿科学技术前沿论坛*, 长沙, 2006  
Sun Zhongming, Chen He, Wang Huxin. Huge ore caving technology with spherical explosive cartridges and cluster drilling holes. *The Frontiers of Mining Science and Technology Forum*, Changsha, 2006 (in Chinese)
- 20 梁瑞, 朱冕, 周文海等. 球状药包应力波叠加过程的破岩特性. *长江科学院院报*, 2020, 37(4): 67-72, 78  
Liang Rui, Zhu Mian, Zhou Wenhai, et al. Rock-breaking characteristics of stress wave superposition between spherical charges. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(4): 67-72, 78 (in Chinese)
- 21 马文伟, 李江涛, 梁文勛等. 爆炸应力波作用下岩石破坏数值分析. *煤矿安全*, 2015, 46(9): 188-191, 195  
Ma Wenwei, Li Jiangtao, Liang Wenxu, et al. Numerical analysis of rock damage under the action of explosive stress wave. *Coal Mine Safety*, 2015, 46(9): 188-191, 195 (in Chinese)
- 22 Li SH, Wang JG, Liu BS, et al. Analysis of critical excavation depth for a jointed rock slope using a face-to-face discrete element method. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2007, 40(4): 331-348
- 23 Wang Yuannian, Zhao Manhong, Li Shihai, et al. Stochastic structural model of rock and soil aggregates by continuum-based discrete element method. *Science in China Series E Engineering & Materials Science*, 2005, 48: 95-106
- 24 冯春, 李世海, 马照松等. CDEM数值方法及其在爆炸冲击领域的应用. 第五届全国强动载效应及防护学术会议暨复杂介质/结构的动态力学行为创新研究群体学术研讨会, 呼和浩特, 2013  
Feng Chun, Li Shihai, Ma Zhaosong, et al. CDEM numerical method and its application in the field of explosion shock. 2013 International Workshop on Intensive Loading and Its Effects & Innovation Research Group Symposium on Dynamic Mechanical Behavior of Complex Media/ Structure, Hohhot, China, 2013
- 25 冯春, 李世海, 周东等. 爆炸载荷作用下岩石损伤破裂过程的数值分析. *岩土工程学报*, 2014, 36(7): 1262-1270  
Feng Chun, Li Shihai, Zhou Dong, et al. Numerical analysis of damage and crack process of rock under explosive loading. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(7): 1262-1270 (in Chinese)
- 26 冯春, 李世海, 郝卫红等. 基于CDEM的钻地弹侵彻爆炸全过程数值模拟研究. *振动与冲击*, 2017, 36(13): 11-18, 26  
Feng Chun, Li Shihai, Hao Weihong, et al. Numerical simulation for penetrating and blasting process of EPW based on CDEM. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(13): 11-18, 26 (in Chinese)
- 27 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. *爆炸与冲击*, 2019, 39(2): 110-120  
Feng Chun, Li Shihai, Zheng Bingxu, et al. Numerical simulation on complete process of three-dimensional bench blasting an in open-pit mine based on CDEM. *Explosion and Impact*, 2019, 39(2): 110-120 (in Chinese)
- 28 Ding H, Yang RS, Zheng CD, et al. Numerical analysis of deep hole multi-stage cut blasting of vertical shaft using a continuum-based discrete element method. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(12): 1086
- 29 唐杰伟, 刘涛, 郑祥等. 不耦合装药爆破载荷作用时间研究. *水电与新能源*, 2019, 33(10): 11-16  
Tang Jiewei, Liu Tao, Zheng Xiang, et al. On the action time of blasting load with decoupled charge. *Hydropower and New Energy*, 2019, 33(10): 11-16 (in Chinese)
- 30 李世海, 周东, 刘天莘. 基于破裂度的堆积层滑坡危险性分析方法. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(S2): 3909-3917  
Li Shihai, Zhou Dong, Liu Tianping. Risk analysis method of accumulation landslide based on fracture degree. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(S2): 3909-3917 (in Chinese)

(责任编辑: 王永会)