

基于SPH-FEM耦合法的连续与分段装药爆破效果数值模拟

梁瑞¹, 陈小伟^{1*}, 周文海¹, 陈鹏辉², 胡才智³

1. 兰州理工大学石油化工学院, 甘肃 兰州 730050;
2. 新疆金宝矿业有限责任公司, 新疆 阿勒泰 836500;
3. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730099



摘要:为了探究连续与分段装药的爆破效果,基于ANSYS/LS-DYNA有限元软件,分别采用有限元法(FEM)与光滑粒子流体动力学—有限元耦合法(SPH-FEM)建立单孔爆破的二维数值模型,模拟岩体单孔爆破过程;运用SPH-FEM法分别构建连续装药和分段装药的三维数值模型,对距离炮孔1 m处岩石的振动速度、压力场、有效应力分布及损伤特征进行对比分析。研究表明,在二维模型下,2种算法的模拟结果变化趋势一致,损伤范围基本吻合,且SPH-FEM法能够更清晰地展示裂纹扩展情况和岩体损伤范围,更准确地复现岩体爆破动力响应过程。分段装药岩石的最终抛掷速度达到69.6 m/s,较连续装药提高了12.3%;距爆心1 m处自由面质点的应力峰值增加了646 MPa;在相同爆破参数下,分段装药结构的爆破效果更好。

关键词:岩体损伤;粉碎区;有效应力分布;粒子抛掷速度;爆心距;分段装药

中图分类号: X932 文献标志码: A 文章编号: 1005-2518(2025)06-1128-11 DOI: 10.11872/j.issn.1005-2518.2025.06.124
引用格式: 梁瑞, 陈小伟, 周文海, 等. 基于SPH-FEM耦合法的连续与分段装药爆破效果数值模拟[J]. 黄金科学技术, 2025, 33(6): 1128-1138. LIANG Rui, CHEN Xiaowei, ZHOU Wenhai, et al. Numerical Simulation of Blasting Effect of Continuous and Segmented Charge Based on SPH-FEM Coupling Method[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(6): 1128-1138.

在矿山开采等诸多工程领域,钻爆法凭借效率高和成本低等优势得到广泛应用(傅帅畅等,2024)。在采矿工程中,深孔爆破往往采用连续装药,底部起爆优化了爆轰波的传播路径,实现了更为均匀的能量释放与传递,使得爆破效果显著提升(曲艳东等,2014)。然而,当炮孔较深时,由于单孔装药量增大,单位炸药所产生的有效破碎能量占比逐渐降低(叶建军等,2023;陈鑫,2024),传统的连续装药结构难以满足复杂地质条件下的爆破需求。如:硬岩巷道掏槽中心孔爆破对提高爆破进尺起主要作用(龚敏等,2015;张召冉等,2020;王雁冰等,2023),但炮孔越深岩石的夹制作用越大。因此,通

过优化装药结构来提高破岩效率是爆破工程研究的重要方向之一。以往研究发现,通过不等高分层和多层上下依序起爆等方法,能够解决一次爆破成井的夹制性难题(李启月等,2013),合理的炸药能量释放顺序,有助于减少掏槽孔摩擦阻力和抗拉阻力(张召冉等,2019)。

SPH-FEM耦合法能够有效模拟爆破近区的成坑行为和岩体损伤,这一优势使其成为装药结构优化设计的有效分析工具(王维国等,2013;杨仁树等,2024)。光滑粒子流体动力学(SPH)是一种通过粒子间的局部相互作用来表征材料宏观力学行为的数值模拟方法。早期SPH被用于天体物理学

收稿日期:2025-04-03;修订日期:2025-07-24

基金项目:甘肃省青年科技基金项目“油水乳状液液滴聚并微观特征机理研究”(编号:23JRRA774)资助

作者简介:梁瑞(1968—),男,甘肃兰州人,教授,从事安全工程与工程爆破研究工作。E-mail:liangr@lut.edu.cn

*通信作者:陈小伟(2001—),男,甘肃兰州人,硕士研究生,从事安全工程与工程爆破研究工作。E-mail:1553769373@qq.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

的研究(Lucy, 1977; Gingold et al, 1977),目前已扩展到大变形问题。国外学者主要关注算法的稳健性,其中支持热-力耦合与可逆相变的SPH框架成功模拟金属粉末爆炸焊接中的熔融-凝固过程,界面塑性变形预测误差相较传统的SPH法有了显著提升(Fuchs et al, 2021)。与此同时,人工智能技术深度融入爆破数值模拟领域,通过深度学习实现爆破过程中力学参数的预测,从而提高了模型的计算效率(Wang et al, 2023)。在国内,配合LS-DYNA二次开发技术,SPH-FEM耦合算法在研究侵彻和爆破等极端荷载场景中展现出显著优势(胡英国等, 2015),尤其在模拟冲击载荷下的变形和损伤问题中,SPH-FEM耦合法较单一数值方法能够更有效地刻画爆炸产物膨胀和近场岩体的大变形行为(强洪夫等, 2016;王志亮等, 2018;程兵等, 2020)。基于SPH-FEM方法对爆破过程的精细化模拟能力,研究人员进一步探索了装药结构对爆破效果的调控机制。例如,在单孔爆破模型中,当首段装药比例设定为0.4时,炸药能量释放效率达到最优(李成孝等, 2023)。对比连续装药与分段装药的爆破效果,后者不仅使岩石破碎块度更均匀,而且通过微差破岩机制改善了岩体破坏形态(胡涛等, 2014;邹新宽等, 2018)。但是,SPH-FEM耦合法在装药结构优化及爆破效果分析中的应用仍需进一步探索。

本文运用ANSYS/LS-DYNA有限元软件,基于Holmquist-Johnson-Cook(HJC)本构模型,分别采用FEM法和SPH-FEM耦合法,对岩石单孔爆破过程进行数值模拟,对比分析2种算法计算的爆破效果,以及FEM法与SPH-FEM耦合法在爆破模拟中的差异,验证了耦合法的优势,并采用SPH-FEM耦合法建立了连续装药与分段装药结构数值模型,对模型损伤演化进行了分析,研究结果对于爆破方式的选择具有理论指导意义。

1 FEM法与SPH-FEM耦合法单孔爆破计算结果对比

1.1 数值模型建立

模型总体采用2D SOLID 162单元,岩石材料选用花岗岩,炸药选用PETN-太安。岩石FEM模型尺寸为500 cm×500 cm,SPH粒子区域尺寸为100 cm×

100 cm,包括岩石和炸药部分,炸药采用耦合装药,炮孔直径为12 cm。基准模型为纯FEM架构,全模型采用有限元法(FEM)构建,未引入其他数值方法。当采用SPH-FEM耦合法建模时,岩石及炸药粒子区域采用SPH专用关键字*BOUNDARY_SPH_SYMMETRY_PLANE进行约束,以避免SPH粒子向两端扩散,造成模拟结果失真。采用点面接触将SPH与FEM进行耦合,在接触中将FEM单元视为主面,SPH粒子视为从面,通过关键字*CONTACT_CONSTRAINT_NODES_TO_SURFACE控制。模型尺寸如图1所示。

1.2 材料模型

HJC模型是一种用于描述混凝土等脆性材料在高应变率下的动力学行为模型,可模拟岩体结构在爆破冲击下的响应和破坏机理。因此,本文采用HJC模型,具体参数见表1。

结合JWL状态方程(毕程程, 2018)来表示炸药爆炸过程中压力与体积的关系,即:

$$P=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V}+\frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中: P 为爆轰压力(Pa); V 为相对体积; E_0 为初始比内能(J/kg); A, B, R_1, R_2 和 ω 均为描述JWL方程的独立常数。相关炸药参数(王占江, 2003)详见表2。

1.3 单孔爆破模型数值计算分析

为检验SPH-FEM耦合法在SPH和FEM接触边界处应力传递的连续性,在二者边界处分别设置2个相邻的测点 P_S (SPH侧)和 P_F (FEM侧),如图1所示。取两测点处的有效应力-时间曲线,如图2所示。

研究表明:接触面两侧的压力峰值几乎相等,标准差为0.63%,证明了应力在2个区域界面处传递的连续性。

为探究2种算法计算的岩石爆破损伤特性,提取点A、B、C、D、E、F(距爆心分别为6, 26, 50, 67, 88, 109 cm)处的单元作为监测点(图1)。以爆心距作为横坐标,分别绘制峰值压力和有效峰值应力的变化曲线,如图3所示。

由图3(a)可知,随着爆心距的增大,峰值压力快速降低并趋于稳定。炸药爆炸产生的冲击波直接作用于炮孔壁,使测点A压力极高。FEM法孔壁压力峰值为573 MPa,而SPH-FEM耦合法仅为

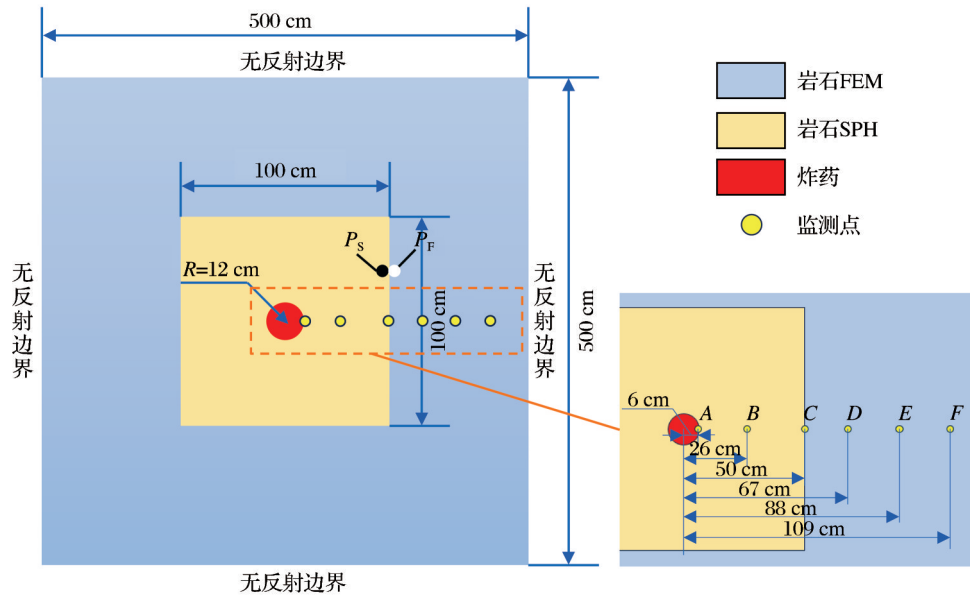


图1 二维模型尺寸示意图

Fig. 1 2D schematic diagram of model size

表1 HJC模型参数

Table 1 HJC model parameters

参数	数值	参数	数值	参数	数值
$\rho_0 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2600	T / MPa	12.2	U_L	0.012
G / GPa	28.7	$EPSO$	1.0E-11	D_1	0.04
A	0.28	$EFMIN$	0.01	D_2	1.0
B	2.5	$SFMAX$	5.0	K_1 / GPa	12
C	0.00186	P_C / MPa	51	K_2 / GPa	25
N	0.79	U_C	0.00162	K_3 / GPa	42
F_C / MPa	154	P_L / GPa	1.2	FS	0.035

注： ρ_0 为密度； G 为剪切模量； A 为无量纲黏度常数； B 为无量纲压力强化系数； C 为应变速率系数； N 为无量纲压力硬化指数； F_C 为准静态单轴抗压强度； T 为最大拉伸静水压力； $EPSO$ 为准静态应变速率临界值； $EFMIN$ 为破裂前的累积塑性应变； $SFMAX$ 为无量纲最大强度； F_C 为压碎(溃)压力； U_C 为压碎体积应变； P_L 为压实点压力； U_L 为压实点体积应变； D_1, D_2 为损伤参数； K_1, K_2, K_3 为压力参数； FS 代表失效类型，当 $FS < 0$ 时，若损伤强度小于0则失效，当 $FS = 0$ 时，若 $P^* + T^* \leq 0$ 则失效，当 $FS > 0$ 时，若等效塑性应变大于 FS 则失效

111 MPa，二者相差462 MPa。一方面，由于SPH法允许岩石与炸药粒子发生滑移和错动大变形的机制优于FEM法，压缩波通过这些区域时，部分转化为剪切波，反射波出现明显的幅值突变特征，导致SPH法下孔壁压力低于FEM法。另一方面，孔壁压力的剧增使模型FEM网格发生畸变，畸变网格阻碍体积变化，致使孔壁处产生虚假高压。反观SPH的拉格朗日粒子框架则天然规避了网格畸变问题。

表2 炸药物力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of explosives

参数	数值	参数	数值
$\rho_0 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1500	R_1	5.25
$v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	7 450	R_2	1.60
P / GPa	22.00	ω	0.28
A / GPa	625.30	E_0 / GPa	8.56
B / GPa	23.29		

注： ρ_0 为密度； v 为爆轰波速度； $P, A, B, R_1, R_2, \omega$ 和 E_0 均为描述JWL方程的相关参数

当爆心距超过26 cm之后，2种算法计算的应力迅速接近；当爆心距达到109 cm后，峰值应力均低于10 MPa，未对岩体造成损伤。在图3(b)中，A、B两测点有效应力变化趋势与有效应力峰值基本接近且数值最高，表明两测点均处于粉碎区。C测点之后，FEM法的有效应力高于SPH-FEM耦合法。在近场范围(26~50 cm)内，2种算法模拟的有效峰值应力衰减速率存在显著差异；进入远场范围(>67 cm)后，这种差异逐渐消失，应力衰减行为表现出良好的一致性。

通过对比2种算法计算的爆破作用时间为3 000 μs 时的损伤云图(图4)可以看出，二者的损伤范围基本吻合，且耦合法能够更清晰地展示裂纹

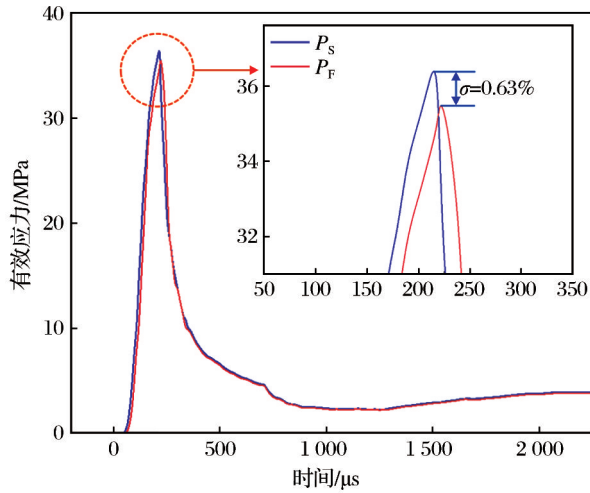


图2 测点有效应力—时间曲线

Fig. 2 Effective stress–time curves of measurement point

的扩展情况。

根据文献(尹晓玉等,2022)中损伤区域判断依

据,损伤度 $D > 0.80$ 为粉碎区, $0.19 < D < 0.80$ 为裂隙区, $D < 0.19$ 为弹性振动区。由图5可以看出,冲击波使孔壁附近岩体完全破碎,形成粉碎区。当爆心距大于30 cm后,SPH-FEM耦合法计算的岩石损伤度较FEM法低。基于爆炸载荷下岩石破裂机理,戴俊(2001)提出了柱状装药损伤半径的理论计算公式,其计算结果与哈努卡耶夫(1980)对岩体损伤半径的研究基本相符,认为计算方法是可靠的。根据上述公式计算的耦合装药条件下的粉碎区和裂隙区半径以及模拟得出的粉碎区及裂隙区半径分别如表3和表4所示。

由表3和表4可知,2种算法的计算结果与理论公式预测值的相对误差均小于10%,且耦合法的计算结果相对更小。由于戴俊(2001)假设岩石破坏为理想弹塑性行为,理论公式未充分考虑岩体能量耗散机制与岩体结构效应,导致理论公式对高波阻

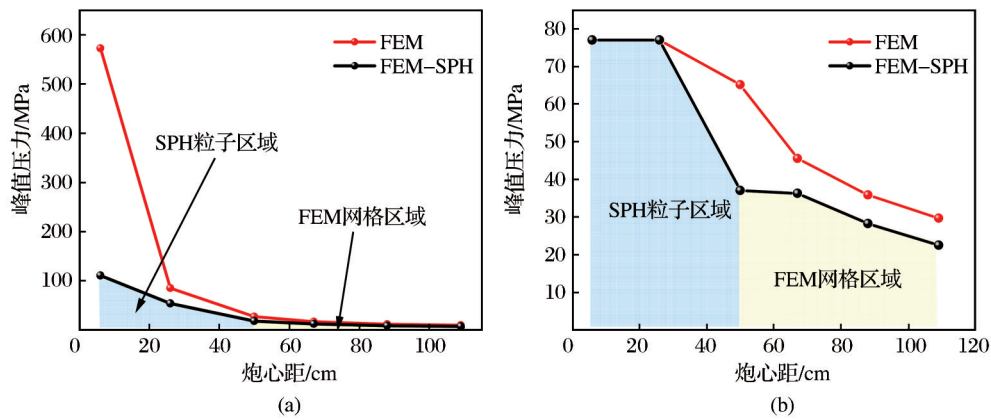


图3 峰值压力(a)和有效峰值应力(b)随爆心距的变化规律

Fig. 3 Variation law of peak pressure(a) and effective peak stress(b) with explosion center distance

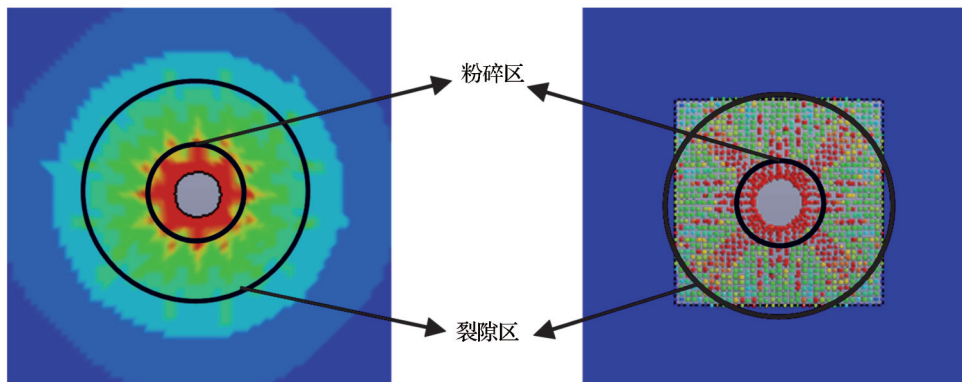


图4 FEM法与FEM-SPH耦合法爆破损伤对比

Fig. 4 Comparison of blast damage between FEM method and FEM-SPH coupling method

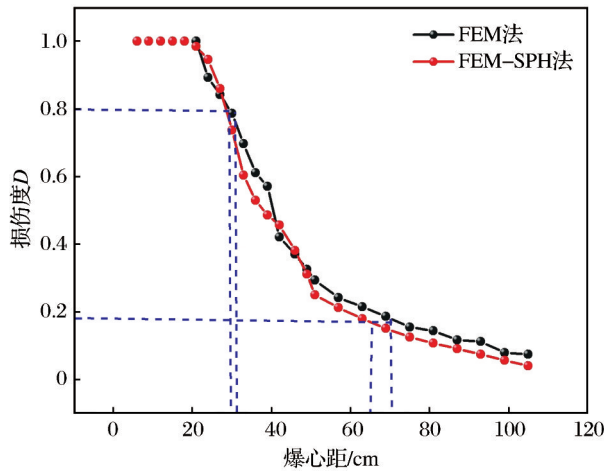


图5 损伤度D随爆心距的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of damage degree D with explosion center distance

表3 岩石粉碎区半径

Table 3 Radius of rock crushing area

计算方法	数值/cm
理论公式法	$R_1 = \left(\frac{\rho_0 D^2 AB}{4\sqrt{2} \sigma_{cd}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} r_b$ 32.43
模拟法	FEM法 33.54
	FEM-SPH法 30.14

表4 岩石裂隙区半径

Table 4 Radius of rock fracture zone

计算方法	数值/cm
理论公式法	$R_2 = \left(\frac{\sigma_R AB}{\sqrt{2} \sigma_{td}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} R_1$ 72.53
模拟法	FEM法 70.13
	FEM-SPH法 65.54

抗岩体等特殊工况的岩体粉碎区和裂隙区的半径计算结果偏大。在理想弹性FEM模型中,炸药—岩石界面能量损耗机制(如摩擦滑移和塑性耗散)常被简化处理,而实际工程中该损耗显著影响爆破效果。近年来,诸多学者通过对比FEM-SPH耦合法的模拟结果与现场试验数据(如裂纹形态和损伤范围等),发现采用耦合法得到的结果与试验结果吻合更好(强洪夫等,2016;李成孝等,2023)。因此,在所述工况下,耦合法较传统单一数值方法(如纯FEM)能够更准确地复现岩体爆破动力响应过程。

2 SPH-FEM耦合法模拟装药结构分析

建立连续装药和分段装药爆破数值模型,模型总体采用3D SOLID 164单元,岩石有限元尺寸为400 cm×400 cm×400 cm,岩石SPH粒子尺寸为200 cm×200 cm×300 cm,包括岩石、堵塞和炸药部分,炮孔直径为10.5 cm,模型总体除上部自由面之外均为无反射边界,岩石和炸药物理参数与上文一致,堵塞土体材料参考已有文献(Wang, 2001)中的力学参数,如表5所示。在距离炮孔1 m处沿炮孔方向取6个监测点,如图6所示。

表5 土壤材料参数

Table 5 Soil material parameters

参数	取值
材料类型	土壤
DYNA材料模型	MAT_SOIL_AND_FOAM_FAILURE
密度/(g·cm ⁻³)	1.8
剪切模量/Mbar	6.385×10 ⁻⁴
体积模量/Mbar	0.3

2.1 孔内连续装药数值分析

连续装药结构如图6(b)所示,其装药段长度为150 cm,堵塞段长度为50 cm,装药方式采用耦合装药。

测点1、2、3和4位于装药段,测点5和6位于堵塞段。为研究连续装药条件下岩石损伤特性,分别提取不同时间连续装药岩体损伤云图,如图7所示。

由图7(a)可以看出,炸药在炮孔底部起爆,底部最先出现空腔。随着爆破作用时间的延长,炸药向上传爆,空腔逐渐扩大,岩体呈现正三角形损伤区。爆破持续时间为300 μs时,上部岩体的损伤形态呈椭圆形,随后,裂纹逐渐显现并向周围扩展,且随着空腔体积逐渐增大,岩体顶部开始出现向外位移。

为了深入探究连续装药爆破工况下岩石抛掷动力学特性,提取6个监测点处岩石抛掷速度和有效应力时间数据,绘制成相应的演化曲线,如图8所示。

由图8(a)可以看出,爆炸冲击波作用于孔壁岩体,导致岩体碎裂并产生初始裂纹,随后爆生气体的气楔作用促使裂纹进一步扩展,岩石抛掷速度急剧上升。各测点抛掷速度随爆破持续时间呈显著分

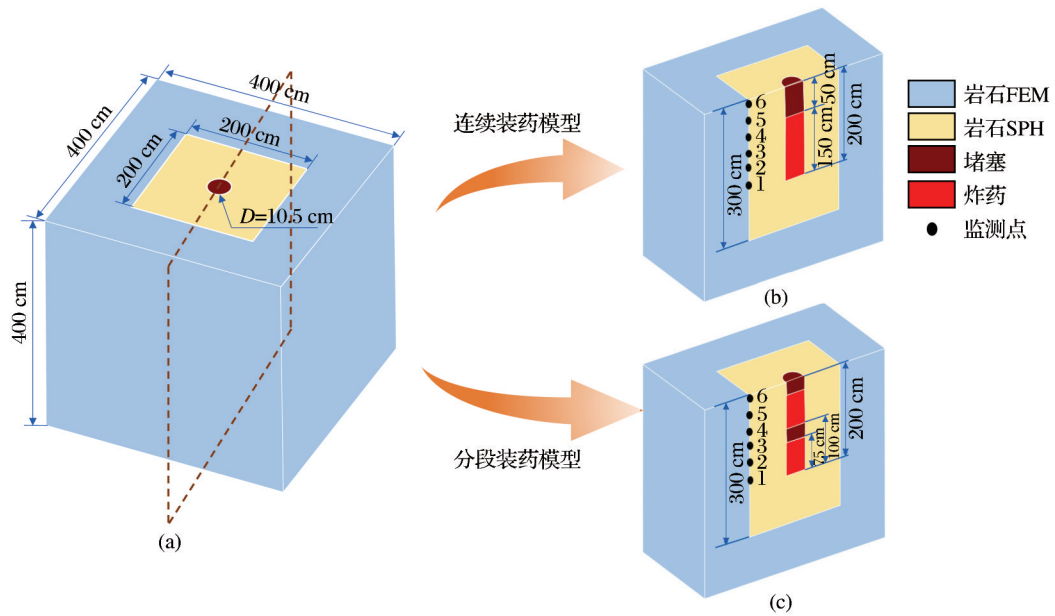


图6 三维模型尺寸示意图

Fig. 6 3D schematic diagram of the model size

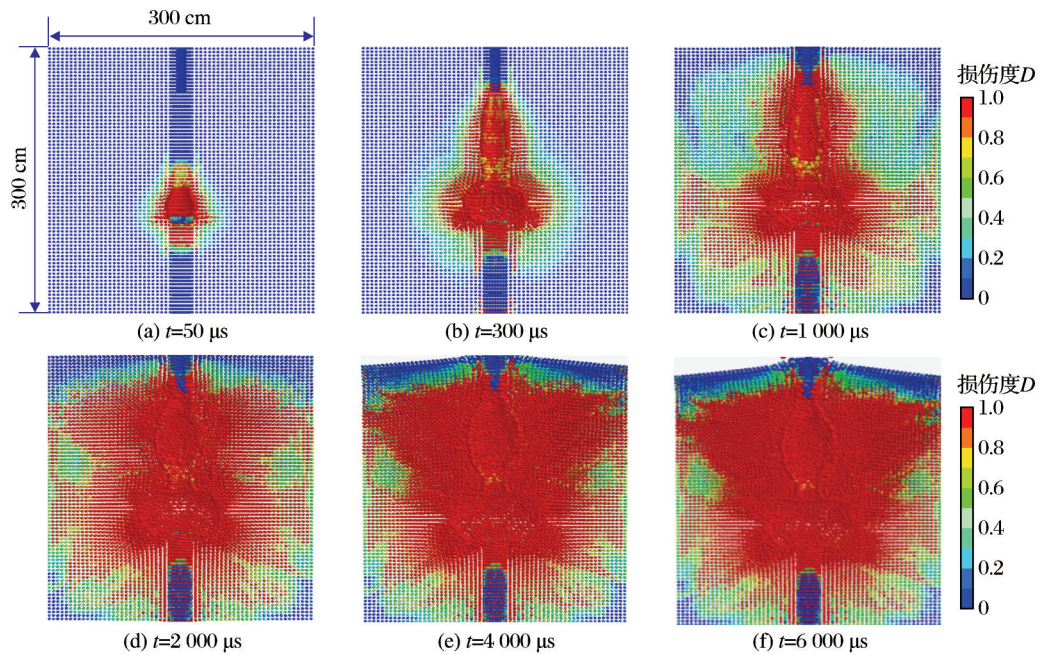


图7 连续装药岩石损伤云图

Fig. 7 Cloud diagram of rock damage of continuous charge

化趋势。其中,自由面邻近点(测点5和测点6)的速度值最终稳定在62 m/s,而其余测点速度值则维持在较低水平。如图8(b)所示,位于自由面处的测点6应力峰值为124 MPa,而装药段底部的测点1和测点2,其峰值应力则分别达到771 MPa和769 MPa。随着爆破持续时间延长,各测点有效应力逐渐减小。

2.2 孔内分段装药数值分析

分段装药结构如图6(c)所示,其上下堵塞段长度均为25 cm,装药段长度为75 cm,装药方式采用耦合装药。监测点1、2、4和5位于装药段,监测点3和6位于堵塞段。提取分段装药不同时间的岩体损伤云图(图9)。

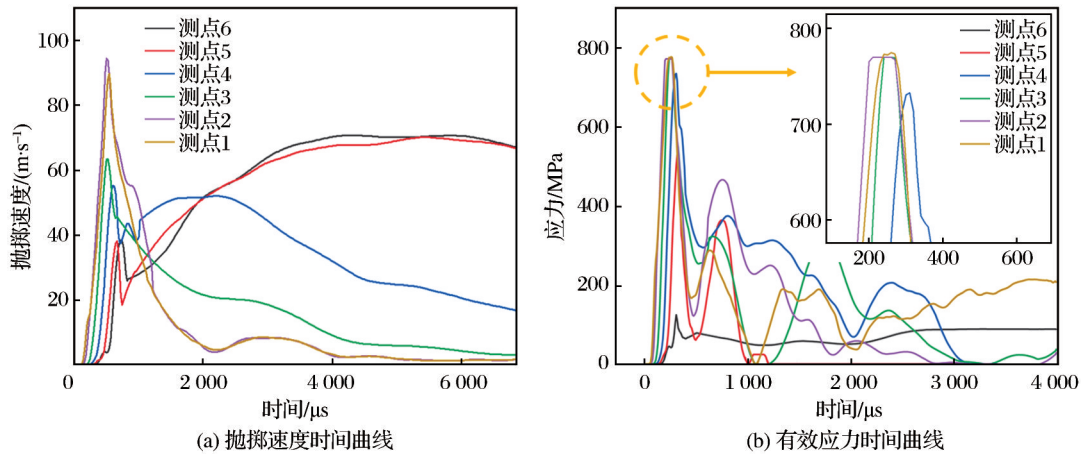


图8 连续装药条件下岩石抛掷速度(a)和岩石有效应力(b)时程曲线

Fig. 8 Time history curves of rock throwing velocity (a) and rock effective stress (b) under the condition of continuous charge

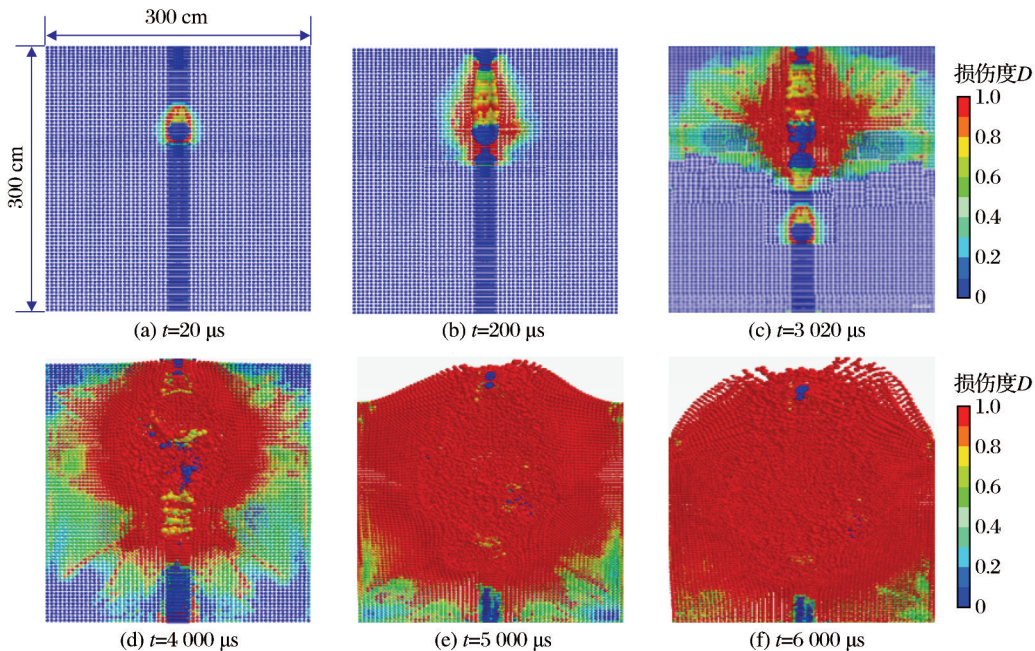


图9 分段装药岩石损伤云图

Fig. 9 Cloud diagram of rock damage of segmented charge

如图9所示,初始阶段上段药柱由底部起爆并上传爆,形成近似三角形的初始损伤区。当 $t=200\ \mu\text{s}$ 时,上段药柱已完全起爆,且损伤持续向深部岩体扩展。随着上部岩体损伤范围不断扩大,该区域碎裂岩块虽未抛掷,但已与母岩完全脱离,为下部岩体的爆破提供了新的自由面。伴随着下段炸药的起爆,上部岩体损伤范围明显大于下部岩体。当 $t=4\ 000\ \mu\text{s}$ 时,顶部自由面向外扩张,且损伤

范围还在持续增大。相较于连续装药,分段装药条件下岩石整体损伤范围更广。提取各监测点处岩石抛掷速度时间数据和有效应力时间数据,绘制成相应的演化曲线,如图10所示。

由图10(a)可以看出,上部炸药起爆后仅诱发局部岩体运动,当下部炸药起爆后,复合应力波场使各测点抛掷速度显著提升。与连续装药的抛掷速度曲线[图8(a)]相比,分段装药的速度峰值存在

显著时滞,这种差异源于连续装药与分段装药的起爆顺序以及应力波的多次叠加效应。其中,位于自由面处的测点6的岩石抛掷速度为69.6 m/s,高于连续装药(62 m/s)。

由图10(b)可以看出,与连续装药相比,第一次

有效应力峰值的出现时间滞后,各测点(测点6至测点1)的第一次峰值应力值依次为216,446,685,709,662,473 MPa。第二次有效应力峰值均接近于770 MPa,显著高于第一次峰值,该应力状态对岩石的抛掷更为有利。

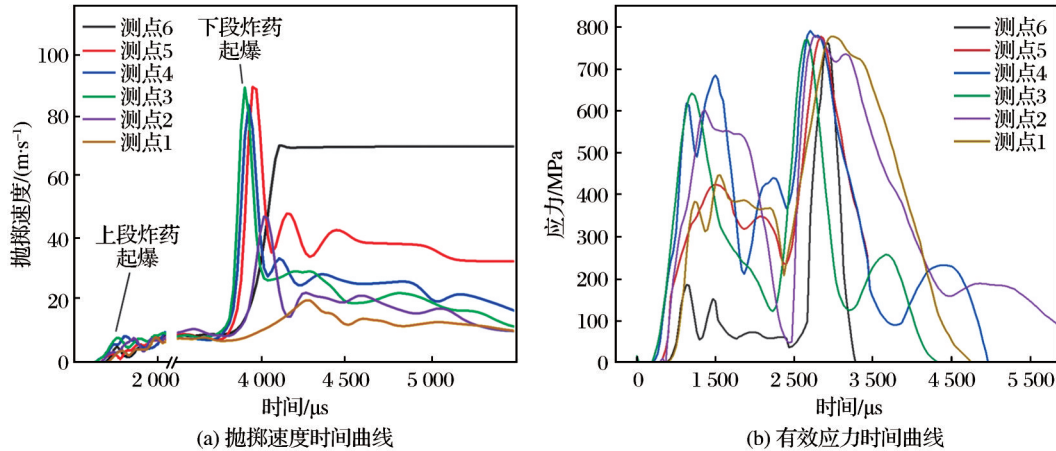


图10 分段装药条件下岩石抛掷速度(a)和岩石有效应力(b)时程曲线

Fig. 10 Time history curves of rock velocity (a) and rock effective stress (b) under the condition of segmented charge

3 结论

(1) FEM法和SPH-FEM耦合法计算的岩体损伤范围基本一致,且后者对裂纹扩展细节的描述更精确。

(2) 由于SPH法允许岩石与炸药粒子发生滑移和错动的大变形机制优于FEM法,且SPH法对于大变形的适应度更高,使得FEM模型在爆破近区的峰值压力明显高于耦合模型。对照理论公式计算结果可知,耦合法能够更准确地复现岩体爆破动力响应过程。

(3) 利用SPH-FEM耦合法对连续和分段2种装药结构的爆破效果进行数值模拟分析。在相同装药量、岩石性质和边界条件下,分段装药结构自由面处的岩石最终抛掷速度达到69.6 m/s,较连续装药(62.0 m/s)提升了12.3%;相较于连续装药,分段装药的有效应力分布呈现双峰值特征,分别对应上部和下部装药的轰炸作用,其中各监测点的第2次有效应力峰值均接近770 MPa,且应力分布更均匀。此外,分段装药的槽腔损伤范围显著大于连续装药。由此可见,在相同爆破条件下,分段装药在岩

石抛掷效率和爆破效果优化方面显著优于连续装药。

参考文献 (References):

- Fuchs S L, Meier C, Wall W A, et al, 2021. An SPH framework for fluid-solid and contact interaction problems including thermo-mechanical coupling and reversible phase transitions [J]. *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*, 8(1): 15.
- Gingold R A, Monaghan J J, 1977. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181(3): 375-389.
- Lucy L B, 1977. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis [J]. *The Astronomical Journal*, 82: 1013.
- Wang J, 2001. Simulation of landmine explosion using LS-DYNA3D software: benchmark work of simulation of explosion in soil and air [R]. Australia: Aeronautical and Maritime Research Laboratory.
- Wang L Y, Xu J, Wang Z L, et al, 2023. A novel cost-efficient deep learning framework for static fluid-structure interaction analysis of hydrofoil in tidal turbine morphing blade [J]. *Renewable Energy*, 208: 367-384.

- 毕程程, 2018. 华山花岗岩 HJC 本构参数标定及爆破损伤数值模拟[D]. 合肥: 合肥工业大学. Bi Chengcheng, 2018. Calibration of HJC constitutive parameters of Huashan granite and its blasting damage numerical simulation [D]. Hefei: Hefei University of Technology.
- 陈鑫, 2024. 地下矿扇形中深孔装药设计模型研究与应用[J]. 黄金科学技术, 32(6): 1107-1115. Chen Xin, 2024. Research and application of model for fan-shaped medium-deep hole charging design in underground mines [J]. Gold Science and Technology, 32(6): 1107-1115.
- 程兵, 汪海波, 宗琦, 2020. 基于 SPH-FEM 耦合合法切缝药包爆破机理数值模拟[J]. 含能材料, 28(4): 300-307. Cheng Bing, Wang Haibo, Zong Qi, 2020. Numerical simulation on blasting mechanism of slotted cartridge based on coupled SPH-FEM algorithm [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 28(4): 300-307.
- 戴俊, 2001. 柱状装药爆破的岩石压碎圈与裂隙圈计算[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 20(2): 144-147. Dai Jun, 2001. Calculation of radii of the broken and cracked areas in rock by a long charge explosion [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 20(2): 144-147.
- 傅帅旸, 李海波, 吴迪, 等, 2024. 基于波速场反演的爆破损伤区范围界定研究[J]. 岩石力学与工程学报, 43(增刊 1): 3257-3266. Fu Shuaiyang, Li Haibo, Wu Di, et al, 2024. Study on the definition of blasting damage zone based on inversion of wave velocity field [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 43 (Suppl. 1) : 3257-3266.
- 龚敏, 文斌, 王华, 2015. 掏槽参数对煤矿岩巷爆破效果的影响[J]. 爆炸与冲击, 35(4): 576-584. Gong Min, Wen Bin, Wang Hua, 2015. Influences of cut parameters on blasting effect in rock roadway of coal mine [J]. Explosion and Shock Waves, 35(4): 576-584.
- 哈努卡耶夫 A H, 1980. 矿岩爆破的物理过程[M]. 刘殿中, 译. 北京: 冶金工业出版社. Hanukaev A H, 1980. Physical process of ore rock blasting [M]. Liu Dianzhong, trans. Beijing: Metallurgical Industry Press.
- 胡涛, 李祥龙, 关思, 等, 2014. 分段装药结构爆破效果的数值模拟研究[J]. 中国工程科学, 16(11): 36-41. Hu Tao, Li Xianglong, Guan Si, et al, 2014. Numerical simulation of structure performance under blasting with piecewise charge [J]. Engineering Sciences, 16(11): 36-41.
- 胡英国, 卢文波, 陈明, 等, 2015. SPH-FEM 耦合爆破损伤分析方法的实现与验证[J]. 岩石力学与工程学报, 34(增刊 1): 2740-2748. Hu Yingguo, Lu Wenbo, Chen Ming, et al, 2015. Realization and verification of SPH-FEM coupling blasting damage analysis method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 34 (Suppl. 1) : 2740-2748.
- 李成孝, 杨仁树, 王雁冰, 等, 2023. 基于数值模拟的岩石巷道深孔分段装药掏槽爆破研究[J]. 煤炭科学技术, 51(9): 100-111. Li Chengxiao, Yang Renshu, Wang Yanbing, et al, 2023. Research on deep hole segmented charge cut blasting of rock roadway based on numerical simulation [J]. Coal Science and Technology, 51(9): 100-111.
- 李启月, 李夕兵, 范作鹏, 等, 2013. 深孔爆破一次成井技术与应用实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 32(4): 664-670. Li Qiyue, Li Xibing, Fan Zuopeng, et al, 2013. One time deep hole raise blasting technology and case study [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 32(4): 664-670.
- 强洪夫, 范树佳, 陈福振, 等, 2016. 基于 SPH 方法的聚能射流侵彻混凝土靶板数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 36(4): 516-524. Qiang Hongfu, Fan Shujia, Chen Fuzhen, et al, 2016. Numerical simulation on penetration of concrete target by shaped charge jet with SPH method [J]. Explosion and Shock Waves, 36(4): 516-524.
- 曲艳东, 吴敏, 孔祥清, 等, 2014. 深孔连续与间隔装药爆破数值模拟研究[J]. 爆破, 31(4): 16-21, 81. Qu Yandong, Wu Min, Kong Xiangqing, et al, 2014. Numerical simulation of continuation and interval loading in deep-hole blasting [J]. Blasting, 31(4): 16-21, 81.
- 王维国, 陈育民, 刘汉龙, 等, 2013. 基于 SPH-FEM 耦合合法的土体爆炸效应数值研究[J]. 岩土力学, 34(7): 2104-2110. Wang Weiguo, Chen Yumin, Liu Hanlong, et al, 2013. Numerical simulation of explosion in soil based on a coupled SPH-FEM algorithm [J]. Rock and Soil Mechanics, 34(7): 2104-2110.
- 王雁冰, 孔维文, 王国豪, 等, 2023. 深孔掏槽超深爆破破岩机制及最佳超深值研究[J]. 采矿与安全工程学报, 40(6): 1210-1218. Wang Yanbing, Kong Weiwen, Wang Guohao, et al, 2023. Mechanism of rock breaking by deep hole ultra-deep cut blasting and the optimum ultra-deep value determination [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 40(6): 1210-1218.
- 王占江, 2003. 岩土中填实与空腔解耦爆炸的化爆模拟实验研究[D]. 长沙: 中国人民解放军国防科学技术大学. Wang Zhanjiang, 2003. Experimental investigation on tamped and cavity decoupled explosion in rock-soil by mili-

- explosive charge [D]. Changsha: National University of Defense Technology.
- 王志亮, 毕程程, 李鸿儒, 2018. 混凝土爆破损伤的SPH-FEM耦合法数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 38(6): 1419-1428.
- Wang Zhiliang, Bi Chengcheng, Li Hongru, 2018. Numerical simulation of blasting damage in concrete using a coupled SPH-FEM algorithm[J]. Explosion and Shock Waves, 38(6): 1419-1428.
- 杨仁树, 丁晨曦, 杨立云, 等, 2024. 岩石爆破基础理论研究进展[J]. 工程爆破, 30(5): 11-19. Yang Renshu, Ding Chenxi, Yang Liyun, et al, 2024. Research progress on the fundamental theory of rock blasting[J]. Engineering Blasting, 30(5): 11-19.
- 叶建军, 彭庆波, 王雁冰, 等, 2023. 深孔孔内分段爆破技术[J]. 爆破, 40(2): 61-68. Ye Jianjun, Peng Qingbo, Wang Yanbing, et al, 2023. In-hole sectional initiation technology of deep hole blasting[J]. Blasting, 40(2): 61-68.
- 尹晓玉, 李建功, 2022. 爆破施工对隧道围岩的稳定性影响分析[J]. 科技创新与应用, 12(28): 64-67, 71. Yin Xiaoyu, Li Jianguo, 2022. Analysis on the influence of blasting construction on the stability of tunnel surrounding rock[J]. Technology Innovation and Application, 12(28): 64-67, 71.
- 张召冉, 丁晨曦, 左进京, 等, 2020. 岩巷二阶二段掏槽破岩机制与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 39(1): 93-104. Zhang Zhaoran, Ding Chenxi, Zuo Jinjing, et al, 2020. Experiment study on rock breaking mechanisms of two-step cutting technology in rock roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 39(1): 93-104.
- 张召冉, 杨仁树, 2019. 岩石巷道“多阶段”掏槽技术及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 38(3): 551-559. Zhang Zhaoran, Yang Renshu, 2019. Multi-step cutting technology and its application in rock roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 38(3): 551-559.
- 邹新宽, 张继春, 潘强, 等, 2018. 楔形分段掏槽爆破减振效应研究[J]. 西南交通大学学报, 53(3): 450-458. Zou Xinkuan, Zhang Jichun, Pan Qiang, et al, 2018. Vibration reduction effect of stepped V-cut blasting [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 53(3): 450-458.

Numerical Simulation of Blasting Effect of Continuous and Segmented Charge Based on SPH-FEM Coupling Method

LIANG Rui¹, CHEN Xiaowei¹, ZHOU Wenhai¹, CHEN Penghui², HU Caizhi³

1. School of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;

2. Xinjiang Jinbao Mining Co., Ltd., Altay 836500, Xinjiang, China;

3. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730099, Gansu, China

Abstract: To investigate the blasting effects of continuous and segmented charges, a two-dimensional numerical model of single-hole blasting was developed by utilizing ANSYS/LS-DYNA finite element software. This model employed both the finite element method (FEM) and the smooth particle hydrodynamics-finite element method (SPH-FEM) coupling technique to simulate the rock mass's single-hole blasting process. Initially, a two-dimensional numerical model was constructed to assess the feasibility and advantages of the SPH-FEM coupling method. Subsequently, using the SPH-FEM coupling approach, three-dimensional numerical models for continuous and segmented charges were developed. The models facilitated a comparative analysis of vibration velocity, pressure fields, effective stress distribution, and damage characteristics of the rock located 1 meter from the blast hole. The study reveals that within the two-dimensional model, the simulation outcomes of the two algorithms exhibit a similar trend, with the damage range being largely consistent. Notably, the SPH-FEM coupling method demonstrates crack propagation with greater clarity, and the simulation results for the crushing area and it more accurately reproduces the dynamic response process of rock mass blasting. The final ejection velocity of the sectional charge rock reached 69.6 m/s, representing a 12.3% increase compared to

the continuous charge. Additionally, the stress peak of the free plane mass point, located 1 meter from the blast center, increased by 646 MPa. Under identical blasting parameters, the segmented charge structure yields superior blasting performance and effectiveness.

Key words: rock mass damage; crushing area; effective stress distribution; particle throwing velocity; burst distance; segmented charge

我国探明国内首个千吨级金矿

2025年11月14日,自然资源部公布一项重大找矿成果,辽宁地矿集团在辽东地区成功探明国内首个千吨级、低品位超大型金矿床——大东沟金矿,共探明金金属量1 444.49 t,为新中国成立以来发现的规模最大单体金矿床。

据了解,该金矿床找矿线索于1983年首次发现,在2009年和2015年的普查找矿工作中取得阶段性进展。2023年12月,辽宁省地质勘探矿业集团有限责任公司(以下简称“辽宁地矿集团”)取得“辽宁省盖州市大东沟金矿普查探矿权”(以下简称“大东沟金矿”),创新实施“普详勘一体化”勘查模式,统筹组织18家生产与科研单位开展“大会战”。施工高峰期间,现场45台钻机同时运行,近千名工作人员协同作业,构建了多层次协同与全流程闭环管理体系,形成“战略决策—专业执行—技术支撑”的高效运行机制。其间,勘探团队首次在千枚岩地区成功安装变频装置,实现基于岩性硬度钻速与压力的动态调控,有效控制钻探偏斜;全面应用三维建模技术展示矿体赋存状态,采用地质统计学方法估算资源量,经传统几何法验证,确保估算结果真实可靠。

历经15个月,辽宁地矿集团累计投入资金近2亿元,完成219个钻孔,机械岩心钻探进尺达

13.67万米,于2025年6月30日全面完成野外工作、8月19日提交《辽宁省盖州市大东沟矿区34-39勘查线金矿勘探报告》,开创国内“短周期、高质量”的金矿勘查先河。

9月15日,勘探报告经辽宁省自然资源厅评审备案:全区-720 m标高以上共探明金矿石量25.86亿t、金金属量1 444.49 t,平均品位 0.56×10^{-6} ;矿体赋存于-913.06~115.08 m标高之间,最大走向长度3 128 m,最大斜深1 250 m,平均厚度263.35 m,最厚处达513.49 m。

据介绍,该金矿边界品位为 0.25×10^{-6} ,是继华北陆块北缘西段成矿带大型露天开采矿山(边界品位 0.28×10^{-6})和已采完的浙西—闽西成矿带大型露天矿山(边界品位 0.2×10^{-6} 以下)之后的又一超大型低品位露天金矿。目前,该矿已通过了开发利用经济性论证,预期效益良好。

大东沟金矿勘探项目为辽宁省委、省政府确定的重点项目。项目实施不仅进一步夯实了国家黄金资源战略储备,也为原有资源基地深部及外围找矿提供了成功范例,丰富了金矿成矿理论,对打造辽东世界级黄金产业基地、服务东北全面振兴具有重大意义。

(来源:自然资源部)