

中文引用格式:段继超,宗琦,汪海波,等. 起爆顺序对台阶岩石破碎块度及爆破振动影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(2): 192-199.

英文引用格式:DUAN Jichao, ZONG Qi, WANG Haibo, et al. Study on influence of initiation sequence on fragmentation of step rock and blasting vibration [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(2): 192-199.

起爆顺序对台阶岩石破碎块度及爆破 振动影响研究*

段继超, 宗琦 教授, 汪海波 教授, 王浩
(安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

中图分类号: X936 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.02.0319

资助项目: 安徽高校自然科学基金项目(2023AH051167)。

【摘要】 为探究起爆顺序对露天台阶岩石破碎效果以及周围环境的影响, 利用 LS-DYNA 仿真软件分别计算不同起爆顺序下的台阶爆破模型。分析不同起爆顺序下模型的物理力学特征; 开展现场试验验证模拟结果, 并分析起爆顺序对爆破振动强度及岩石破碎块度的影响特征。研究表明: 起爆顺序对爆破过程中自由面空间分布产生影响, 从而改变应力波的叠加效应, 不同起爆顺序下台阶破碎效果及爆破振动强度表现出明显差异。逐孔起爆技术能够有效降低爆破振动, 从而减轻对周围环境的不良影响, 但其岩石破碎效果并不理想, 岩石通过率为 81.52%。与逐孔起爆相比, 波浪式顺序起爆碎石通过率提高 11.68%, 增大孔网参数至 3 m×7 m 时单孔崩落矿量提高 16.8%, 这可以有效减少炸药消耗量, 降低综合成本。然而, 其产生的爆破振动强度较大, 需要注意对周围环境的影响。

【关键词】 起爆顺序; 台阶爆破; 破碎块度; 爆破振动; 数值模拟

Study on influence of initiation sequence on fragmentation of step rock and blasting vibration

DUAN Jichao, ZONG Qi, WANG Haibo, WANG Hao

(College of Civil Architecture, Anhui University of Science and Technology,
Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In order to explore the influence of initiation sequence on the crushing effect of open steps and the surrounding environment, the LS-DYNA simulation software was used to calculate the step blasting model under different initiation sequences. First, the physical and mechanical characteristics of the model under different initiation orders were analyzed. Then, the field test was conducted to verify the simulation results and study the influence of the initiation sequence on the blasting vibration strength and rock crushing degree. The results show that the stacking effect, which changes the stress wave, shows the breaking effect and blasting vibration strength. The hole-by-hole blasting technology can effectively reduce the blasting vibration so as to reduce the adverse effects on the surrounding environment, but the rock-crushing effect is not ideal; the rock passing rate is 81.52%. Compared with the hole-by-hole blasting, the passing rate of wave sequential blasting gravel is increased by 11.68%, and the amount of single-hole

collapse is increased by 16.8% when the hole net parameter is increased to 3 m×7 m, which effectively reduces the explosive consumption and reduces the comprehensive cost. However, it produces a large blasting vibration strength, which needs to pay attention to the impact on the surrounding environment.

Keywords: detonation sequence; bench blasting; fragmentation size; blasting vibration; numerical simulation

0 引言

台阶爆破作为一种安全高效的开采技术,被广泛应用于露天矿山^[1]。为了追求经济发展和保护环境友好协同,有必要在改善台阶爆破质量的基础上,降低爆破对周围环境的影响^[2-4]。因此,深入研究不同起爆顺序的爆破特点,优选适合现场生产的起爆网路,才能满足矿山生产对安全性和经济性的要求。

近些年,诸多专家学者对改善台阶爆破质量开展了研究与探索。于江浩等^[5]以神华北电胜利露天矿为研究对象,得出逐孔起爆可以减弱岩石的夹制作用,有效降低岩石破碎程度,保持边坡稳定性。陈亚军等^[6]为了降低露天煤矿在复杂条件下岩体大块率和爆堆不规整及爆破飞石等不良影响,采用多排深孔微差爆破来增加爆破侧向自由面,增强反射拉伸波对后爆孔岩体的径向拉应力作用。陈运成等^[7]采用倾斜浅孔和倾斜深孔相结合,优化设计孔网参数和装药结构,以逐孔起爆的方式,有效解决了台阶坡面坡比上下相差大的技术难题。从以上研究

看出,优化起爆网络能够改善露天矿山爆破效果。然而,现有研究大多集中在单一的、简单的起爆网络,对复杂起爆网络研究较少,并缺乏多种起爆网络的对比分析。此外,对台阶爆破效果的评价往往依赖于定性分析,缺乏定量分析。

鉴于此,笔者拟围绕起爆顺序对破碎效果以及周围环境的影响这一关键问题,利用 LS-DYNA 软件对不同起爆顺序下的爆破模型进行数值模拟,探究爆炸过程中模型应力、位移及振动速度的变化特征;开展现场试验验证模拟结果,并通过定量分析现场爆破振动和岩石破碎块度,优选适合现场的起爆网路,以期为露天台阶爆破起爆网络的选取和优化提供理论参考。

1 数值模拟材料参数选取

1.1 岩石材料参数

采用 Holmquist-Johnson-Cook (HJC) 模型描述岩石, HJC 形式简洁, 参数明确, 广泛应用于岩石材料的动力学响应研究^[8-9]。主要材料参数见表 1。

表 1 砂岩 HJC 参数

Tab. 1 Sandstone HJC parameters

参数	取值	参数	取值	参数	取值	参数	取值
密度 $\rho_0 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 688	抗拉强度 T / MPa	12.2	压力常数 K_1 / GPa	81	抗压强度 f_c / MPa	157
特征化黏聚强度参数 A	0.32	弹性极限压力 P_c / MPa	51.33	压力常数 K_2 / GPa	-91	损伤常数 D_1	0.041
压力强化参数 B	1.76	弹性极限体积应变 μ_c	2.76	压力常数 K_3 / GPa	89	损伤常数 D_2	1.0
应变率敏感系数 C	0.001 86	静水压力 P_l / GPa	0.012	最小断裂应变 $\varepsilon_{\text{min}} / \text{s}^{-1}$	0.01	剪切模量 G / GPa	26.54
特征化最大强度 S_{max}	7.0	塑性变形 μ_1	0.012	压力硬化系数 N	0.79	参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0 / \text{s}^{-1}$	1.0

1.2 炸药单耗确定及参数选择

在采石场平台的同一区域采用乳化、铵油和粉状 3 种类型炸药开展爆破漏斗试验,其中,炮孔深度为 1 m,炮孔孔径约 170 mm,装药质量为 1 kg,图 1 为 3 种类型炸药爆破漏斗隆起形态。乳化炸药爆破

漏斗效果最为理想,使用反铲将爆破漏斗里的碎石抓取出来,对开挖后的碎石称重并计算开挖方量,爆破药量 Q 等于开挖方量 V 与炸药单耗 q 的乘积,即 $Q = q \cdot V$,求得 q 为 0.72 kg/m³。乳化炸药状态相关参数见表 2。

表 2 炸药状态相关参数

Tab. 2 Parameters related to the explosive status

炸药密度 $\rho_c / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	爆速 $c_d / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	压缩性系数 Y_j / GPa	相关性系数 X_j / GPa	常数 ω	高压段系数 R_1	中压段系数 R_2	炸药内能 E_0 / GPa
1 250	3 200	2.76	23.3	0.28	5.25	1.60	8.56



图1 不同炸药爆破漏斗效果

Fig.1 Effect of different explosives on blasting funnel

2 数值模拟计算与数据分析

2.1 数值模型建立及运算结果

数值模拟过程中,采用光滑粒子流体动力学 (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) 法与有限元 (Finite Element Method, FEM) 法相结合的方式,选择在近区大变形场采用 SPH 法,远区小变形场采用 FEM 法,不仅可以避免靠近炮孔周围区域的网格变形严重,而且减少 SPH 的计算面积,提高计算效率^[10]。数值计算模型如图 2 所示。模型孔间距、排间距与现场布孔参数的比例为 1:10,依据已确定的炸药单耗,计算装药直径为 0.12 m,装药长度和堵塞长度分别为 0.4 和 0.15 m。SPH 范围内网格数量 306 384,台阶网格总数量 747 600。

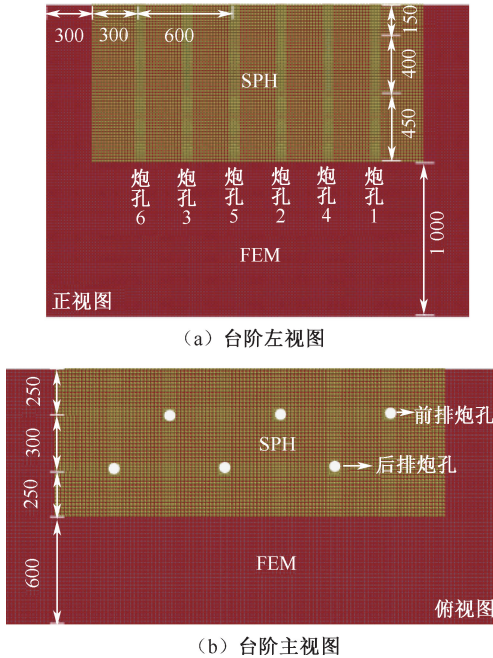


图2 台阶 SPH-FEM 建模

Fig.2 Step SPH-FEM modeling schematic diagram

依托工程现场采用逐孔起爆,保持现场布孔参数不变,选择奇偶式顺序起爆和波浪式顺序起爆作

为现场逐孔起爆的对比分析对象。台阶爆破模型的孔网参数布置如图 3 所示。图 3 中,数字排序表示起爆先后顺序。

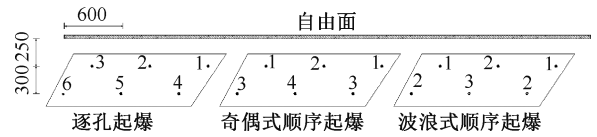


图3 起爆顺序

Fig.3 Initiation sequence

图 4 展示了模型相邻 SPH 与 FEM 的压力对比曲线。可以看出,相邻的 SPH 与 FEM 压力时程曲线几乎重叠,由于炮孔爆生气体压力由内而外连续传播,SPH 的压力较 FEM 峰值略大。可见,耦合设置可以确保近区 SPH 的应力和变形等信息成功传递给 FEM 单元。

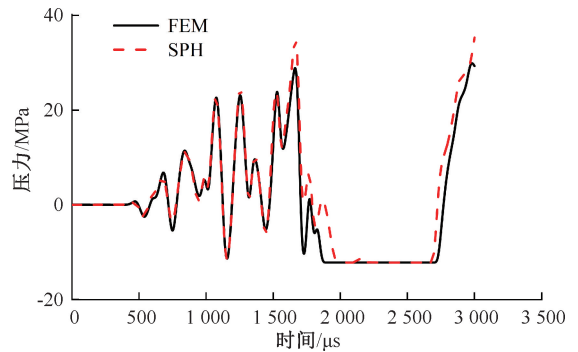


图4 相邻 SPH 与 FEM 压力对比曲线

Fig.4 Pressure contrast curves of adjacent SPH and FEM

台阶爆破压力分布及 SPH 抛掷图如图 5 所示。在不同的起爆顺序下,模型 SPH 区域粒子的抛掷形态及压力分布均存在明显差异。在 Ansys/Ls-PrePost 中去除 SPH 粒子区域,只显示岩石单元,保留岩体损伤,如图 6 所示。可以看到,岩体损伤呈现柱状分布形态,符合实际工程应力波的传播特性以及岩体的损伤分布特性。

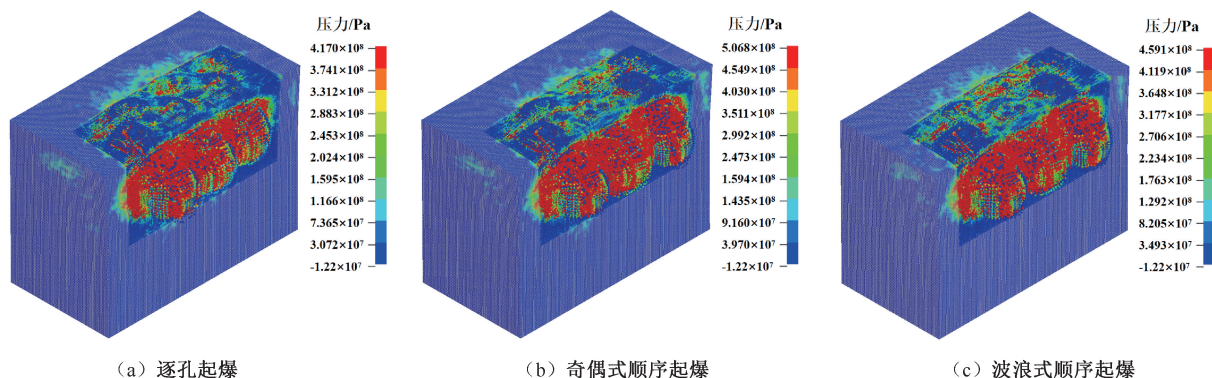


图 5 台阶爆破压力分布及 SPH 抛掷图

Fig. 5 Pressure distribution of bench blasting and SPH throwing diagram

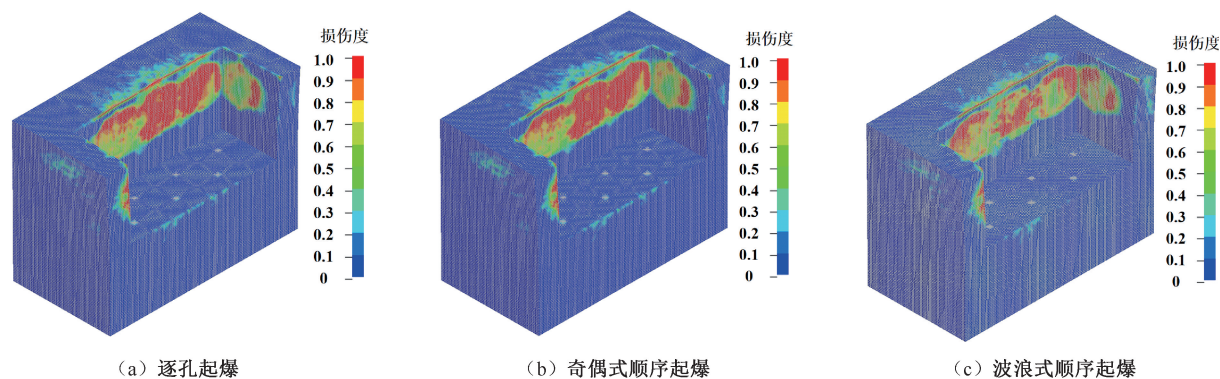


图 6 保留岩体损伤云图

Fig. 6 The damaged cloud map of rock mass is preserved

2.2 数值模拟结果分析

在计算模型的典型位置布置监测点,探究爆炸

荷载作用下模型的应力、位移以及爆破振动等动力学变化特征,监测点布置如图 7 所示。

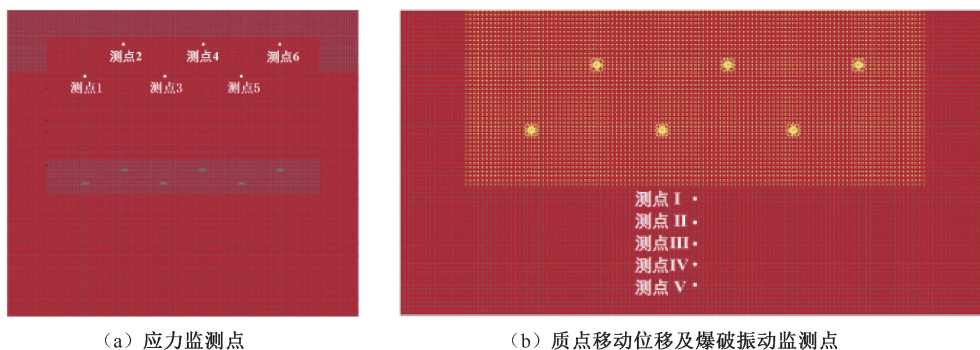


图 7 计算模型监测点布置

Fig. 7 Lay layout of calculation model monitoring points

2.2.1 保留岩体应力

不同起爆顺序下模型监测应力随时间变化规律如图 8 所示。可以看出,不同起爆顺序下监测点峰值应力数值存在差异,奇偶式起爆和波浪式起爆最大应力出现在监测点 1 处,分别为 254.01 和 265.05 MPa;逐孔起爆峰值应力出现在测点 3 处,应力峰值

为 249.55 MPa。这是由于不同起爆顺序下,先爆炮孔对后爆炮孔形成的自由面的位置和数量存在差异,导致应力波的叠加效果各异。

2.2.2 保留岩体运动特征分析

图 9 为监测点爆破峰值振动速度(Peak Particle Velocity, PPV)及位移随时间的变化曲线。从图 9

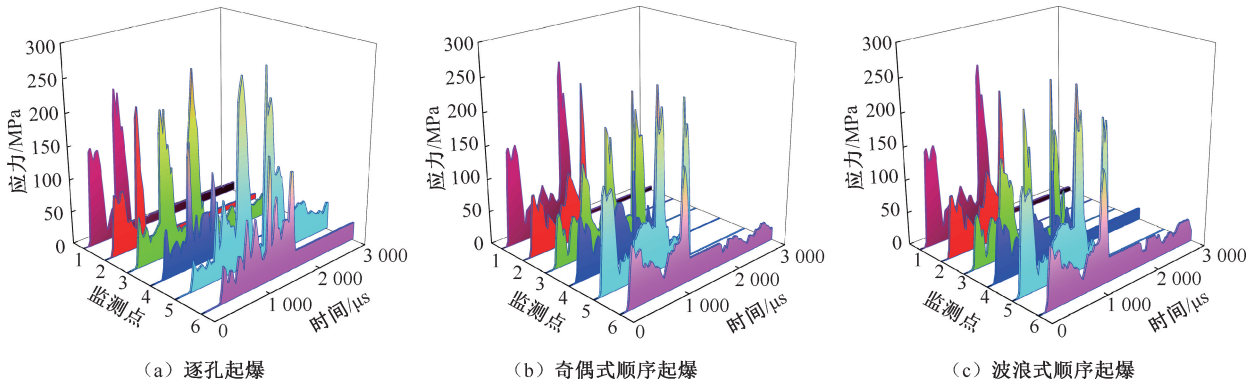


图8 保留岩体典型位置损伤应力

Fig. 8 Retaining damage stress in typical position of rock mass

可以看出,逐孔起爆、奇偶式顺序起爆和波浪式顺序起爆的PPV分别为1.87、2.31、2.53 cm/s,峰值位移分别为2.57、2.77、2.83 cm。这是由于逐

孔起爆后鞭炮孔与先鞭炮孔之间微差时间过长,无法形成有效的应力场,相比于奇偶式顺序和波浪式顺序起爆,逐孔起爆振动速度以及移动位移均较小。

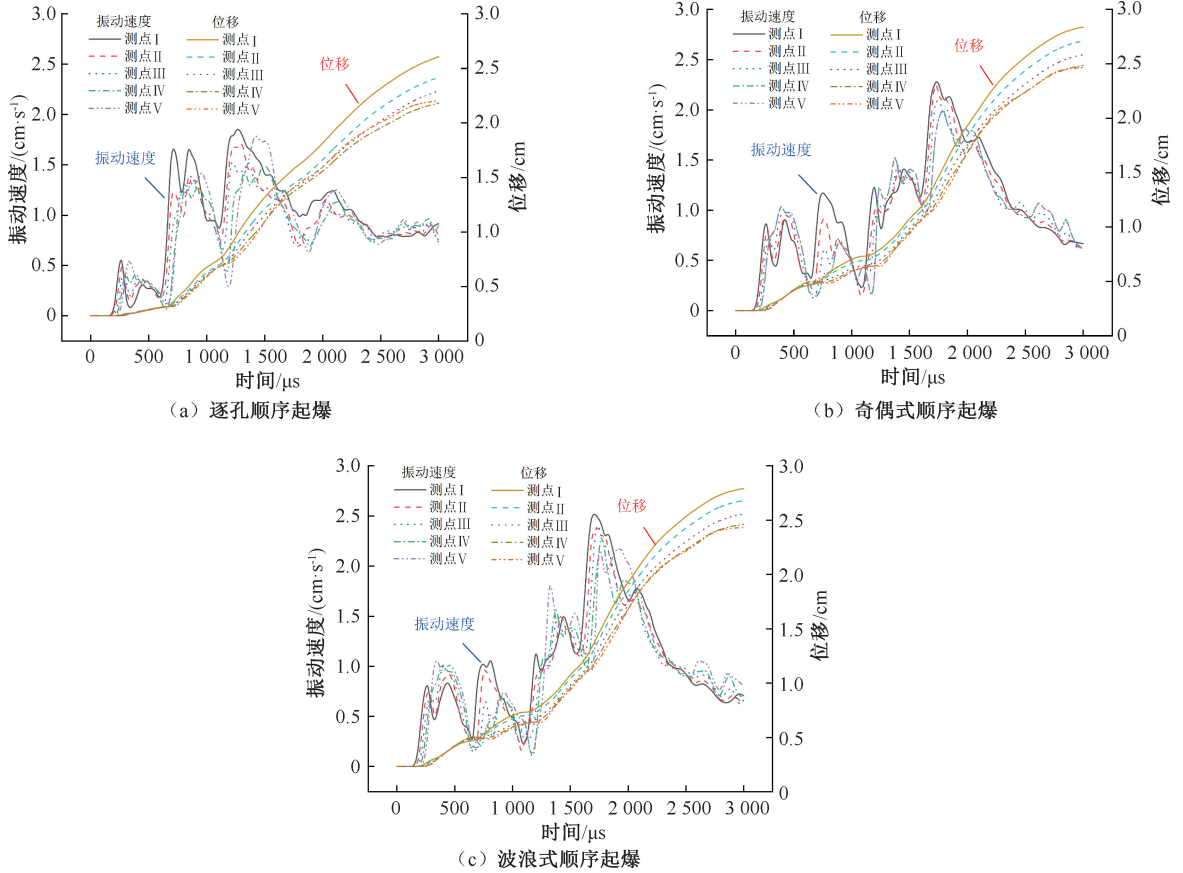


图9 监测点振动速度和位移时程曲线

Fig. 9 Vibration speed and displacement time-course curve of the monitoring point

3 起爆顺序对破碎块度及爆破动的影响

3.1 起爆顺序对岩体地震波能量的影响

试验过程使用振动仪器监测三向PPV,根据规

范要求^[11],依次放置在距离主爆破区域中间位置30、60、90 m处,监测数据见表3。

从表3可以看出,不同起爆顺序下最大同段起爆药量是影响PPV的重要因素^[12]。在各种起爆顺序中,波浪式顺序起爆的同时,起鞭炮孔数量最多,

表 3 现场试验爆破振动监测数据

Tab. 3 Field test blasting vibration monitoring data

起爆方式	测点	测点位移/m	径向		切向		垂向	
			最大振速/ (cm · s ⁻¹)	主频/ Hz	最大振速/ (cm · s ⁻¹)	主频/ Hz	最大振速/ (cm · s ⁻¹)	主频/ Hz
逐孔起爆	1	30	-25.796	17.700	-13.888	35.706	20.134	18.005
	2	60	-6.688	18.616	9.926	31.316	-10.72	37.537
	3	90	4.174	36.926	-3.232	37.537	4.334	37.231
奇偶式顺序起爆	1	30	-33.581	18.005	-15.233	19.836	-27.692	17.700
	2	60	-11.895	18.616	-13.460	18.92	-10.269	20.142
	3	90	-7.311	40.283	11.410	36.926	-6.354	19.531
波浪式顺序起爆	1	30	-35.708	49.4	30.475	18.005	-25.179	19.226
	2	60	-33.918	59.814	7.722	19.531	-15.416	19.836
	3	90	13.551	18.616	-10.365	21.362	12.408	18.616

其引起的 3 个振动分量的数值均大于其他起爆顺序的 PPV 值。

为准确评估不同起爆顺序对爆破振动的影响特征,采用地震波能量作为直观的表征手段,爆破振动能量 E_s 计算公式为:

$$E_s = \rho [c_L v_x^2 + c_T (v_y^2 + v_z^2)] \quad (2)$$

式中: c_L 和 c_T 分别为传播介质的纵波波速和横波波速, m/s; v_x 、 v_y 、 v_z 分别为质点径向、切向和垂向的振

动速度, m/s。

图 10 展示了不同起爆顺序下岩体的能量时程曲线,可以看出,同一起爆顺序下爆破振动能量随着监测点距离的增大而减弱,且不同起爆顺序下爆炸波振动能量时程曲线激荡程度不同。此外,不同起爆顺序下爆破振动能量峰值不同,波浪式顺序起爆在 1 041.00 ms 时振动能量达到峰值 13.607 GJ,分别是逐孔起爆和奇偶式顺序起爆振动能量的 1.89 和 1.23 倍。

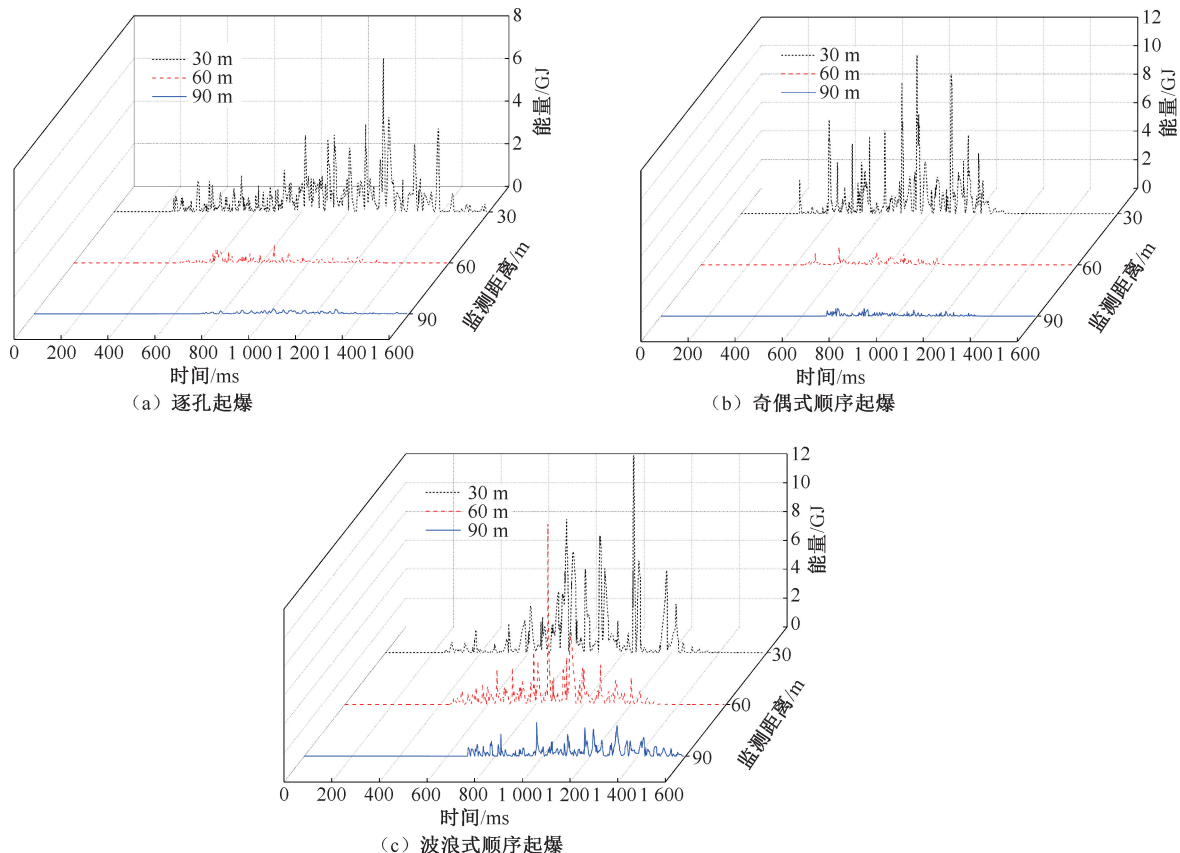


图 10 不同起爆顺序爆炸地震波能量时程曲线

Fig. 10 Time course curve of explosion seismic wave with different initiation sequence

3.2 台阶爆破岩石破碎块度分析

在岩体爆破工程中,岩石破碎块度的分布情况是评估破碎效果的重要指标。针对传统人工抽样筛分爆破矿堆块度方法的不足,采用 WipFrag 图像分析软件即时处理,实现对爆堆块度的精准分析。在拍摄爆堆过程中,采用 300 mm 钢尺作为参照物,拍摄角度应尽量与爆堆剖面保持垂直,将图像导入到 WipFrag 中分析并得出爆堆块度占比分布,如图 11 所示。

从图 11 可以看出,岩矿粒径均小于 350 mm,中位数岩矿粒径小于 75 mm,爆破块度分布均匀。此外,图 11 中,PS₅₀ 代表所采集的爆堆中有 50% 的岩矿粒径小于 69.43 mm,则 PS₉₉ 代表着有 99% 的岩矿粒径小于 336.88 mm。

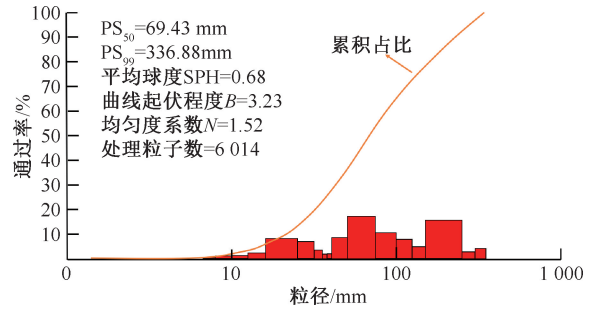


图 11 岩石破碎块度分析

Fig. 11 Analysis of rock fragmentation degree

采石场下料口筛网尺寸为 250 mm,爆破碎石直径大于筛网尺寸需二次破碎。因此,在统计图像分析软件中,划分多个尺寸区间,统计爆堆岩石中各个区间内碎石所占整体爆堆比例,将直径不大于 250 mm 的部分所占的比重定义为通过率,统计结果见表 4。

表 4 爆区岩石破碎块度尺寸统计

Tab. 4 Statistics of rock fragmentation block size in the burst zone

起爆方式	孔网参数/m×m	占整体爆堆比例/%					单孔爆落矿量/t
		≤ 250 mm	(250,300] mm	(300,350] mm	(350,400] mm	≥ 400 mm	
逐孔起爆	3×6	81.52	3.94	7.51	2.26	4.76	572.4
波浪式顺序起爆		93.21	6.79	—	—	—	
奇偶式顺序起爆		87.20	—	1.74	11.06	—	

从表 4 可以看出,相较于逐孔起爆方式,波浪式起爆和奇偶式起爆通过率显著提高,分别提高 11.68% 和 5.67%,有效减少了二次破碎矿量,提高了生产效率。可以发现,科学的起爆网络能够改善台阶爆破质量。然而,对于企业的实际生产而言,生产效益也至关重要。采石场在开采过程中,炸药单耗量过高已引发关注,寻求合理降低成本的解决方案显得尤为重要。考虑到波浪式起爆和奇偶式起爆

的通过率相较于原有起爆方案显著提高,故增大其孔网参数,从而达到增加单孔爆落矿量,降低炸药单耗的目的。保持排间距不变,孔间距增至 3 m×7 m,进行现场试验,分析并统计爆破区域内岩石的破碎块度尺寸,结果见表 5。通过对比表 4 和表 5 的数据发现,提高孔网参数后,单孔爆落矿量有明显增加,岩石破碎块度有小幅下降。

相较于逐孔起爆(3 m×6 m)爆堆岩石通过率,

表 5 增大孔网参数爆区岩石破碎块度尺寸统计

Tab. 5 Increase the size statistics of rock crushing block in the burst area

起爆方式	孔网参数/m×m	占整体爆堆比例/%					单孔爆落矿量/t
		≤ 250 mm	(250,300] mm	(300,350] mm	(350,400] mm	≥ 400 mm	
波浪式顺序起爆	3×7	80.33	5.33	1.74	10.9	1.70	667.8
奇偶式顺序起爆		73.6	8.56	2.22	5.66	9.96	

孔网参数为 3 m×6 m 时,波浪式起爆和奇偶式起爆分别增加 11.68% 和 5.67%,当孔网参数增至 3 m×7 m 时,波浪式起爆和奇偶式起爆分别降低 1.19% 和 7.93%,但单孔崩落矿量提高 16.8%。可以发现,增大孔网参数后,波浪式顺序起爆爆堆碎石通过率小幅降低,崩落矿量显著提高,可有效降低炸药单耗。

4 结论

1) 数值模拟计算中,SPH-FEM 法的耦合设置能够准确地将 SPH 在近区的应力、变形以及损伤等信息传递给 FEM 单元。在不同起爆顺序下,模型 SPH 区域粒子的抛掷形态各异,同时,保留岩体 FEM 的应力侵蚀深度也有显著差异。

2) 不同起爆顺序下,先爆炮孔对后爆炮孔所创造自由面的位置和数量不同,影响应力波的叠加效果以及爆破振动强度,从而对整个台阶的爆破效果以及周围环境产生不同程度影响。

3) 通过现场试验发现,逐孔起爆爆堆岩石通过率为81.52%。相较于逐孔起爆,波浪式顺序(3 m×6 m)爆堆岩石通过率提高11.68%;波浪式起爆

(3 m×7 m)岩石通过率降低1.19%,但单孔崩落矿量提高16.8%,能够有效降低炸药单耗。

4) 波浪式起爆技术能够显著降低炸药消耗量以及二次破碎矿量,从而降低综合成本。逐孔起爆技术有效减少碎石的抛掷及爆破引发的振动,从而减轻对周围环境的不良影响,确保在复杂环境下的安全生产。

参 考 文 献

- [1] 沈立晋,刘颖,汪旭光. 国内外露天矿山台阶爆破技术[J]. 工程爆破, 2004(2):54-58.
SHEN Lijin, LIU Ying, WANG Xuguang. Bench blasting technology in open pit mines at home and abroad [J]. Engineering Blasting, 2004(2):54-58.
- [2] 柯丽华,陈魁香,胡南燕,等. 基于SNA的露天矿爆破安全风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(10):48-56.
KE Lihua, CHEN Kuixiang, HU Nanyan, et al. Safety risk assessment of blasting in open-pit mine based on SNA [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(10):48-56.
- [3] 韩亮,梁书锋,刘殿书,等. 深孔台阶爆破近区利用Anderson模型预测振动效应的修正方法研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(7):110-115.
HAN Liang, LIANG Shufeng, LIU Dianshu, et al. Study on correction method of forecasting the effects of vibration using Anderson model in near field of deep hole bench blasting [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(7):110-115.
- [4] 杨超. 露天矿山台阶深孔爆破大块成因及解决措施[J]. 工程爆破, 2019, 25(6):32-37,55.
YANG Chao. Solved measures and causes of boulder in bench deep-hole blasting of open pit mines [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(6):32-37,55.
- [5] 于江浩,宋子岭. 逐孔起爆技术在露天煤矿深孔爆破中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2015, 34(4):438-441.
YU Jianghao, SONG Ziling. Application of deep hole blasting in open-pit coal mine with hole-by-hole blasting technique [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2015, 34(4):438-441.
- [6] 陈亚军,简海洋,董法,等. 干旱区露天煤矿复杂岩体爆破技术方案设计研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(1):200-205.
CHEN Yajun, JIAN Haiyang, DONG Fa, et al. Design of blasting technology for complex rock masses in the arid open-pit coal mine [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2022, 39(1):200-205.
- [7] 陈运成,谢守冬,颜世留,等. 露天超深孔大抵抗线爆破技术研究[J]. 爆破, 2023, 40(1):62-68.
CHEN Yuncheng, XIE Shoudong, YAN Shiliu, et al. Open-pit blasting technology research on super deep hole and large resistance line [J]. Blasting, 2023, 40(1):62-68.
- [8] 凌天龙,吴帅峰,刘殿书,等. 砂岩Holmquist-Johnson-Cook模型参数确定[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8):2211-2216.
LING Tianlong, WU Shuifeng, LIU Dianshu, et al. Determination of Holmquist-Johnson-Cook model parameters for sandstone [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8):2211-2216.
- [9] 赵文博,邓丽梅,赵大凯,等. 高应变率下花岗岩动态力学性能试验及数值模拟研究[J]. 爆破, 2022, 39(3):10-15.
ZHAO Wenbo, DENG Limei, ZHAO Dakai, et al. Experimental research and numerical simulation on dynamic mechanical properties of granite under high strain rate [J]. Blasting, 2022, 39(3):10-15.
- [10] 王志亮,毕程程,李鸿儒. 混凝土爆破损伤的SPH-FEM耦合法数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(6):1419-1428.
WANG Zhiliang, BI Chengcheng, LI Hongru. Numerical simulation of blasting damage in concrete using a coupled SPH-FEM algorithm [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(6):1419-1428.
- [11] 魏晓刚,麻凤海,刘书贤. 爆破开采对采空区地面建筑抗震性能的影响分析[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(9):102-108.
WEI Xiaogang, MA Fenghai, LIU Shuxian. Analysis of impact of blasting mining on seismic performance of ground buildings in coal mining area [J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(9):102-108.
- [12] 代树红,王召,王振伟,等. 露天矿爆破地震波作用下框架建筑的安全性研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(5):44-49.
DAI Shuhong, WANG Zhao, WANG Zhenwei, et al. Study on safety of frame construction impacted by open-pit blasting seismic wave [J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(5):44-49.