

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.02.009

## 台阶爆破过程中内部岩体 运移轨迹及爆堆分布规律研究\*

李志恒<sup>1</sup>, 白俊<sup>2</sup>, 金长宇<sup>1</sup>, 陈立军<sup>3</sup>

(1. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 沈阳 110819; 2. 太钢集团岚县矿业公司, 吕梁 033504;  
3. 中铁十九局集团 矿业投资有限公司 新巴尔虎右旗分公司, 满洲里 021400)

**摘要:** 作为露天矿开采的主要手段, 台阶爆破在目前乃至未来一段时间内仍然是其他技术不可代替的生产方式。通过深入分析台阶爆破实测数据, 并采用3DEC软件模拟台阶爆破过程, 揭示了台阶爆破过程中内部岩体运移轨迹及爆堆分布规律。研究结果表明: 在爆破过程中, 监测点整体呈现出先沿垂直方向上隆起后下落的运动规律。其中, 监测孔上部监测点在垂直方向运动较为明显, 隆起到一定高度后迅速垂直向下进行运动, 而监测孔下部监测点主要以水平方向运动向前推进, 垂直方向运动相对平缓。同时为了研究台阶岩体在爆破作用下破碎后在爆堆之中空间分布情况, 本文将研究区域的台阶在爆破之前划分为I~VI共6个部分, 以及将台阶爆破之后爆堆主体0~40 m部分均匀划分为A、B、C、D 4个区域。根据模拟结果可以发现, 在区域A(爆堆0 m~10 m)中V岩体占比最多达到41.7%, 在区域B(爆堆11~20 m)中存在I~V岩体且分布较为平均, 而在区域C(爆堆21~30 m)中主要包含台阶I~III岩体, 占比分别达到了43.1%、37.5%、19.3%, IV占极少部分可忽略不计; 在爆堆最前沿区域D(爆堆31 m~40 m)中基本由I岩体组成, 占比高达95%。研究成果能够为矿山的高效开采和精准配矿提供理论支撑与基础性数据。

**关键词:** 台阶爆破; 现场监测; 数值模拟; 岩体运移规律; 爆堆分布规律

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2025)02-0073-08

## Study on Internal Rock Mass Movement Trajectory and Muckpile Distribution during Bench Blasting

LI Zhi-heng<sup>1</sup>, BAI Jun<sup>2</sup>, JIN Chang-yu<sup>1</sup>, CHEN Li-jun<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Lanxian Mining Co., Ltd., TISCO Group, Lvliang 033504, China; 3. China Railway 19 Bureau Group Mining Investment Co., Ltd., Manzhouli 021400, China)

**Abstract:** As a main mean of open-pit mining, bench blasting is still an irreplaceable production method at present and even in the future. By deeply analyzing the measured data of bench blasting and using 3DEC software to simulate the bench blasting process, the internal rock mass movement trajectory and muckpile distribution during the bench blasting process were revealed. The research results show that the monitoring points generally rose along the vertical direction first and then fell during the blasting process. Among them, the movement of the monitoring points

收稿日期 (Date of reception): 2023-03-20

网络首发日期 (Published online): 2023-06-01

作者简介: 李志恒 (1997-), 男, 硕士, 主要从事采矿工程方向研究, (E-mail) 2070987@stu.neu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金 (41972284, 41974028); 中央高校基本科研业务费专项资金 (No. N2101041)

About the author: LI Zhi-heng (1997-), male, master degree, mainly engaged in mining engineering research, (E-mail) 2070987@stu.neu.edu.cn.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (41972284, 41974028), Special Fund for Basic Scientific Research for Central Universities (No. N2101041)

on the upper part of the monitoring hole were more obvious in the vertical direction, rising to a certain height and then quickly moving vertically downward. While the monitoring points on the lower part of the monitoring hole mainly moved forward in the horizontal direction, and the vertical direction movement is relatively weak. At the same time, in order to study the spatial distribution of the muckpile, the bench in the research area were divided into six parts, as I ~ VI. Besides, the main part (0 ~ 40 m) of the muckpile was divided into four regions, as A, B, C and D. According to the simulation results, it can be found that the V rock mass accounts for the most in region A (muckpile 0 ~ 10 m), which is as high as 41.7%. The I ~ V rock mass distribution is relatively even in region B (muckpile 11 m ~ 20 m). The I ~ III rock mass accounts for 43.1%, 37.5% and 19.3%, respectively, and the IV rock mass accounts for a very small part in region C (muckpile 21 ~ 30 m). It is basically composed of the I rock mass in region D (muckpile 31 ~ 40 m) at the forefront of the blast muckpile, which accounts for 95%.

**Key words:** bench blasting; field monitoring; numerical simulation; rock mass movement trajectory; muckpile distribution

钻孔爆破是一种利用炸药能量来破碎岩体的方法,无论在过去还是未来一直都是岩土工程最为基础的破岩方式,如露天采矿、地下采矿、隧道开挖等<sup>[1-4]</sup>,其中在露天矿台阶爆破的应用最为广泛。由于台阶爆破过程中矿岩的移动轨迹以及矿岩最终位置无法准确测试,因此如何描述开采爆破过程中台阶内部位移场的空间演化规律一直是采矿工程中的难题,也是实现精准采矿的瓶颈。

为了评价爆破效果,确定岩体爆破移动距离,诸多学者采用现场试验、理论分析与数值计算等方法开展了系统研究。有学者利用现场测试来测量爆破所引起的矿岩移动,如 Taylor 利用沙袋在爆破前后产生的位移可以等效测得矿岩在爆破作用下产生的位移<sup>[5]</sup>。Harris 等在爆破区域的监测炮孔中放入磁铁块<sup>[6]</sup>,并根据磁场的变化来确定磁铁块爆破后的位置。Engmann 等<sup>[7]</sup>、Eshun 等使用爆破监测系统 BMM<sup>[8]</sup>,实现了对岩石在爆破作用下运动过程的监测,吴豪等利用高精度 MEMS 惯性导航传感器获取了露天矿爆破过程中矿岩运动轨迹<sup>[9]</sup>。Yu 等将神经网络和爆破监测系统数据相结合应用于爆破作用下矿岩移动的预测<sup>[10-12]</sup>。除了现场试验方法之外,在 20 世纪 70 年代以来,数值计算快速发展,朱传云等采用非连续变形分析 (DDA) 方法对台阶爆破的全过程进行模拟分析<sup>[13]</sup>,较好地反映了节理岩体在爆生气体作用下破坏、移动的力学过程及爆堆最后形成情况。Ning 等在 DDA 中采用改进的离散元方法<sup>[14,15]</sup>,分别模拟了台阶爆破和爆破漏斗模型在爆破冲击压力和爆生气体作用下破坏、运动及堆积的过程。周旺潇等将爆破块度与岩体离散化结合<sup>[16]</sup>,提出了考虑爆破块度的 3DEC 人工离散方法,提高了模拟爆破结果的精度。Yan 等采用三维离散元程序 3DEC<sup>[17]</sup>,利用预设的节理将台阶数值模型离散化,在炮孔的破碎区外边界引入了等效三角荷载,并

考虑了爆破块度大小,模拟了整个台阶的爆破过程及最终的爆堆分布。冷振东等利用 3DEC 离散元软件<sup>[18]</sup>,研究起爆位置对台阶爆破爆堆形态影响,可以很好地得到爆破后爆堆形态的分布。

综上所述,研究爆破作用下岩体移动的方法有多种,并且相关研究也得出了有价值的结论。然而,受到台阶内部地质构造模糊、岩体参数不确定以及爆破气体破岩机制复杂等因素的影响,台阶内部位移场的空间演化规律研究一直是工程难题,需要不断通过实验与理论分析进行完善。本文在太钢袁家村铁矿尝试采用具有惯性导航技术的智能信标跟踪系统及利用 3DEC 离散元数值分析软件,对台阶内部岩体移动轨迹及最终爆堆分布情况进行综合分析。

## 1 工程概况

太钢袁家村铁矿位于山西省吕梁市岚县梁家庄乡袁家村,矿山南北长 2640 m,东西宽 1610 m 矿山的最终边坡角为 42° ~ 46°,最终阶段高度和阶段坡面角分别为 30 m 和 75°,露天开采境界最大和最小标高分别为 1725 m 和 1110 m。矿区内 5 个地质分区的最大边坡高度分别为 285 m、420 m、570 m、500 m 和 410 m。矿山采用自上而下的逐水平缓帮分层开采方法,日开采量大、爆破作业量多,矿山每年采剥总量为 8580 万 t,其中矿石量 2200 万 t/年,岩石量 6380 万 t。

## 2 台阶爆破现场监测

### 2.1 现场监测地点及信标布置

本文中现场台阶爆破测试采用的设备是由东北大学自主研发的具有惯性导航技术的智能信标跟踪系统<sup>[9]</sup>,该系统由信号标记物、信号标记物激活器、信号标记物探测器、处理数据的电脑软件组成。

台阶爆破研究区域位于袁家村铁矿某开采台阶,其中台阶主体部分主要为中风化磁铁石英岩。

为了达到形成小抵抗线宽孔距爆破,使中深孔实际的密集系数增大,保证岩石的破碎质量,采用三角布孔 V 型起爆。炮孔内采用连续装药结构,炮孔孔径为 140 mm,炮孔堵塞长度 4 m,孔深 18 m,超深 3 m,孔间距、排间距为 2 m。结合台阶爆破设计及布孔形式,本文设计了如下的监测方式,即在台阶自由面处第一排炮孔至第五排炮孔呈 45°走向依次设置了 5 个监测孔,监测孔位置布置在每排两个炮孔中间位置处,如图 1 所示。

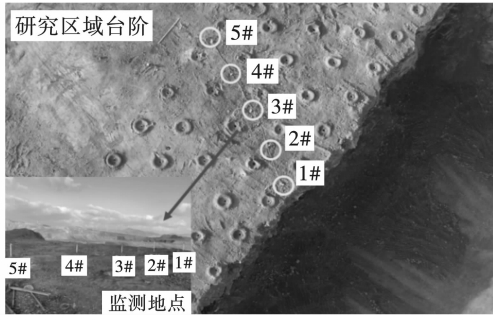


图 1 测试地点及监测孔布置

Fig. 1 Test locations and monitoring hole layout

在台阶爆破研究区域内钻取的 5 个监测孔中,1#、2#监测孔的深度为 11 m;3#、4#、5#监测孔的深度为 7 m,其中 1#、2#监测孔内各布置 3 个信标,3#、4#、5#监测孔内各布置 2 个信标,共在监测孔内布置 12 个信标,且每个信标的间距为 4 m,具体分布如图 2。安装过程中记录编号,以了解信标在爆破过程中不同位置和不同深度的运动状态。

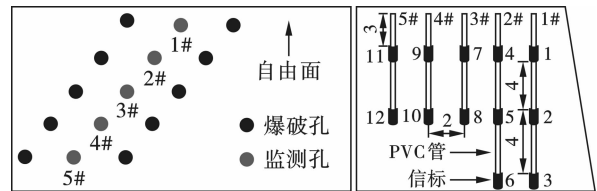


图 2 信标在监测孔中安装示意图(单位:m)

Fig. 2 Schematic diagram of installation of signal markers in monitoring holes (unit: m)

### 2.2 信标运动监测结果分析

对安装在监测孔中的 12 个信标进行数据处理,获得信标完整的运动轨迹,具体如图 3 所示。

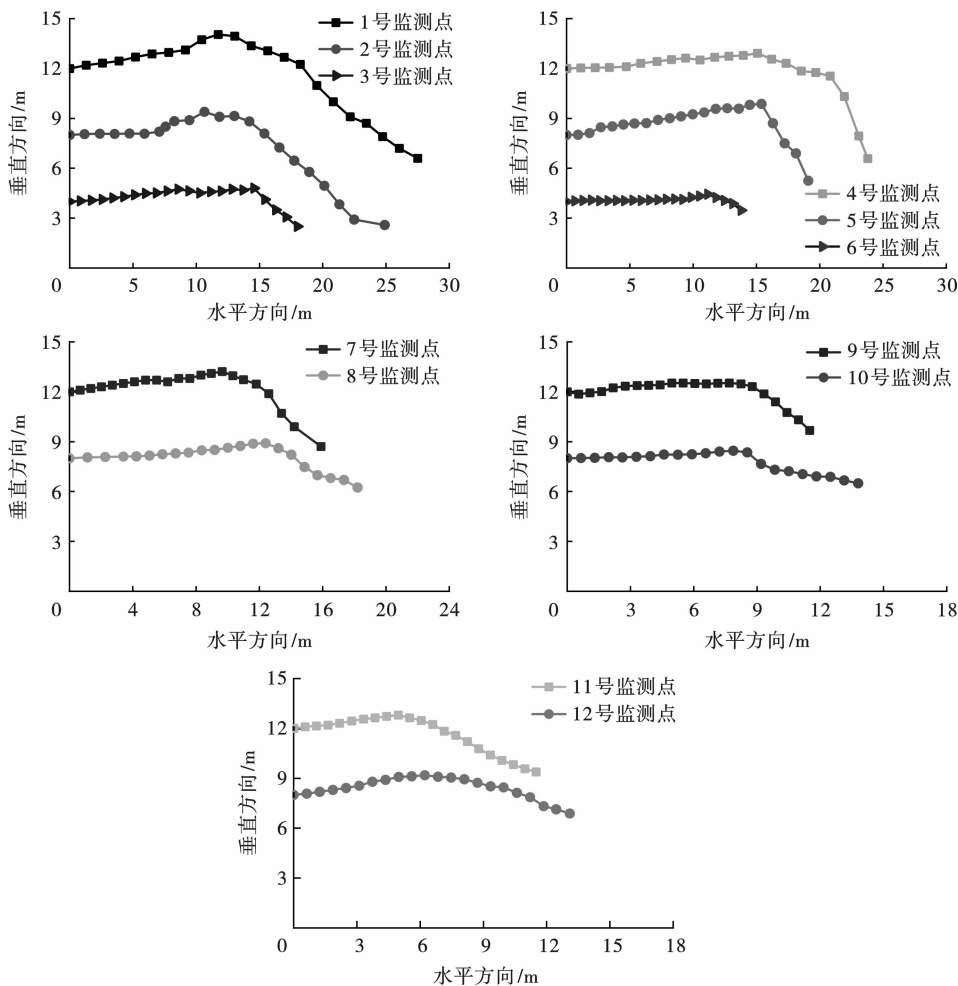


图 3 不同监测孔中信标的轨迹

Fig. 3 Tracks of signal markers in different holes

对信标水平位移、垂直位移、运动时间、平均速度求解,如表1所示。根据监测结果可以发现:

表1 信标运动数据统计

Table 1 Signal marker movement data statistics

	水平 位移/m	垂直 位移/m	运动 时间/s	平均速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
监测点1	27.5	5.4	3.4	8.0
监测点2	24.9	5.5	3.4	7.3
监测点3	18.0	1.5	3.2	5.6
监测点4	23.8	5.5	3.2	7.4
监测点5	19.1	2.8	3.2	5.9
监测点6	13.8	0.6	3.1	4.5
监测点7	15.9	3.5	3.1	5.1
监测点8	18.2	1.8	2.8	6.5
监测点9	11.5	2.3	2.9	4.0
监测点10	13.8	1.5	2.6	5.3
监测点11	11.5	2.6	2.8	4.1
监测点12	13.1	1.0	2.6	5.0

(1)从水平方向运动上看,1#~5#监测孔中的信标在水平方向上位移呈现出依次递减的规律。其中由于1#、2#监测孔距离台阶自由面近,3#、4#、5#监测孔位于爆区中后段部位,这使得1~6号信标有足够的空间且受到阻碍较小,导致其运动时间长且运动速度快,能够向水平方向进行抛掷运动,7~12号信标在爆破运动过程中受到前方岩体的阻碍较大,从而1~6号信标水平位移明显大于7~12号信标水平位移。而在3#、4#、5#监测孔中,由于炮孔堵塞长度的原因7、9、11号信标受到炸药能量作用影响要小于8、10、12号信标受到炸药能量作用影响,故8、10、12号信标的水平位移要大于7、9、11号信标水平位移。

(2)从垂直方向运动上看,由于在炮孔中炸药能量更多地作用于水平方向上,因此在浅部布置的信标在水平方向运动的同时都有向上移动趋势,其中以1#、2#监测孔中信标在垂直方向运动轨迹较为明显,而在深部布置信标在垂直方向运动起伏不大。

(3)从整体运移轨迹上看,信标整体位移运动规律呈现出先向垂直方向上隆起后下落的过程,其

中监测孔中上部信标在垂直方向运动较为明显,隆起到一定高度后迅速垂直向下进行运动,而监测孔中下部信标主要是以水平方向运动向前推进,垂直方向运动相对平缓。

### 3 台阶爆破数值模拟

#### 3.1 台阶数值模型建立

本文采用离散元计算程序3DEC进行数值模拟,该程序是以描述离散介质力学性的计算分析程序。离散单元法通过不连续面切割实体,实现连续介质的离散化进而开展数值计算,该方法在模拟节理岩体的变形破坏方面具有很强的优势。

考虑到本文所研究的重点区域为现场布置信标监测区域以及模拟软件计算能力和计算时间等因素,现将台阶的数值模型进行简化,简化后模型的顶部长度16 m,底部长度为17.4 m,宽度为10 m,高度为15 m,且模型研究区域采用两组正交预设节理对台阶进行离散化。爆破自由面方向为水平方向,台阶垂直方向为垂直方向,建立了袁家村铁矿台阶爆破研究区域的台阶模型如图4所示。

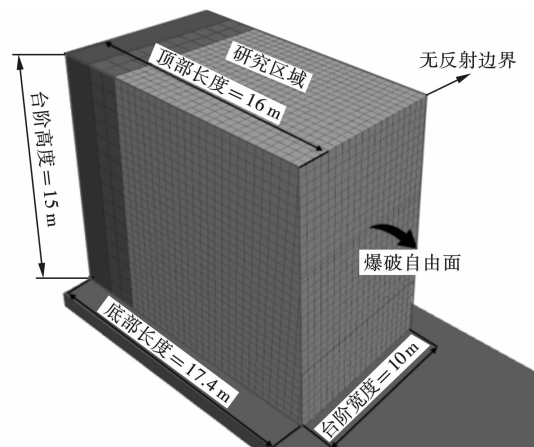


图4 简化台阶数值模型

Fig. 4 Simplified bench model

根据袁家村铁矿地质资料和岩石物理力学实验结果,得到研究区域台阶岩体力学参数,如表2所示。

表2 台阶岩体力学参数

Table 2 Mechanical parameters of bench rock mass

密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松比	体积模/ GPa	剪切模/ GPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )	粘聚力/ MPa	抗拉强/ MPa
2500	0.25	12.5	7	5	42	0.055

#### 3.2 数值模拟结果分析

利用离散元程序对台阶爆破进行计算分析时,如

何确定合理的爆破荷载及施加方式是十分重要的,因此本文在模拟台阶爆破时,考虑了爆轰传播方向以及

荷载施加<sup>[15]</sup>,此外在模拟中计算爆破荷载峰值时采用密度为  $1100 \text{ kg/m}^3$ ,爆轰速度  $D$  为  $4000 \text{ m/s}$  的乳化炸药。模型除顶部边界以及爆破自由面外均设置无反射边界,计算时考虑岩体重力。

图 5 给出了台阶岩体在爆破作用下不同时刻变

化过程及爆堆最终形态。爆破前后台阶内部不同监测点位置分布如图 6 所示,其中模拟监测点的点位分布与现场监测孔中监测点布置一致。爆破模拟过程中记录下监测点移动轨迹及位移数据。

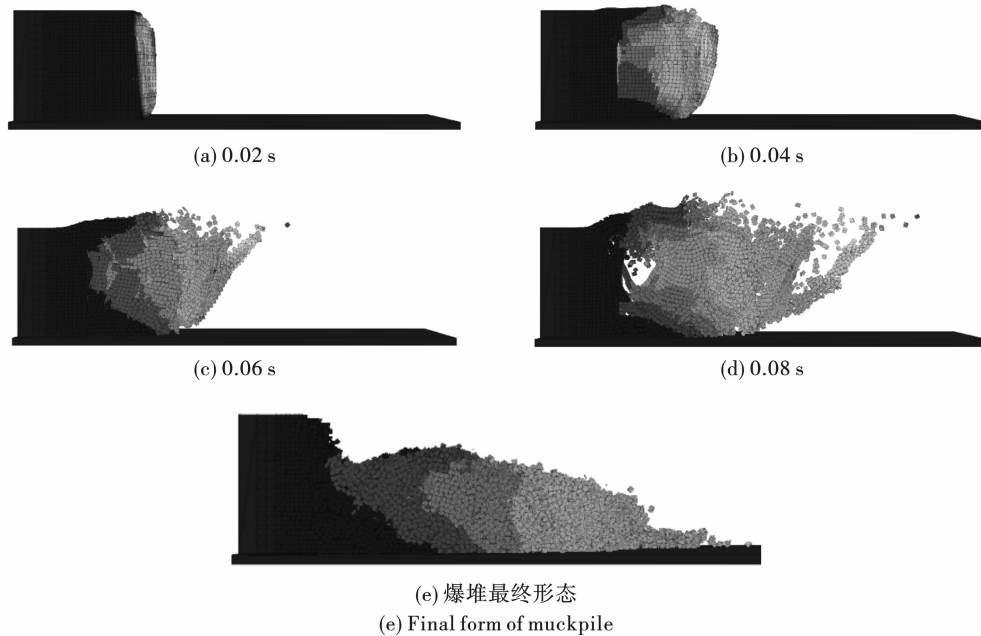


图 5 不同时刻台阶岩体位置变化

Fig. 5 The position of bench rock mass changes at different time

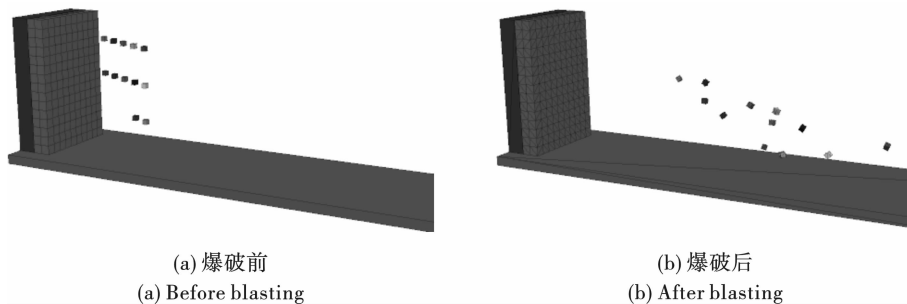


图 6 数值模拟中监测点位置分布

Fig. 6 Location distribution of monitoring points in numerical simulation

为了对台阶爆破过程中其内部监测点运动过程进行分析,将与现场布置相同的 12 个模拟监测点起止位置、隆起最大高度位置及下移运动位置四个点位,利用曲线对其连接绘制台阶在爆破作用内部监测点移动分布情况,如图 7 所示。其中,上部的 1、4、7、9、11 号监测点在爆破作用下首先向垂直方向移动,达到最高隆起位置然后下落前移直至最终位置;台阶下部的其余监测点在爆破起初作用下运动情况与上部监测点相似,但在爆破过程后期到达最低点后垂直方向不再运动,而是向水平方向继续前移直至最终位置。通过图 7 可以看出台阶内部监测

点运移轨迹整体上与图 3 现场测试结果较及信标的运动位移数据较为吻合,根据计算值与实测值的一致性,证明了本文研究方法的合理性与准确性。

#### 4 爆堆空间分布

此外,台阶岩体爆破后在爆堆中分布占比同样能够有效地描述台阶内部岩体的空间演化规律。本文在模拟台阶爆破之前将台阶岩体划分为 I ~ VI 共 6 个区域,且每个区域的内岩体位于监测点中间及两侧,将爆堆平均划分为 A、B、C、D 4 个爆堆区域,按照爆堆中 I - VI 被预设节理切割的岩块体积所占

区域 A ~ D 各部分百分比进行统计,划分的区域及 爆破后岩体在爆堆中分布情况如图 8、图 9 所示。

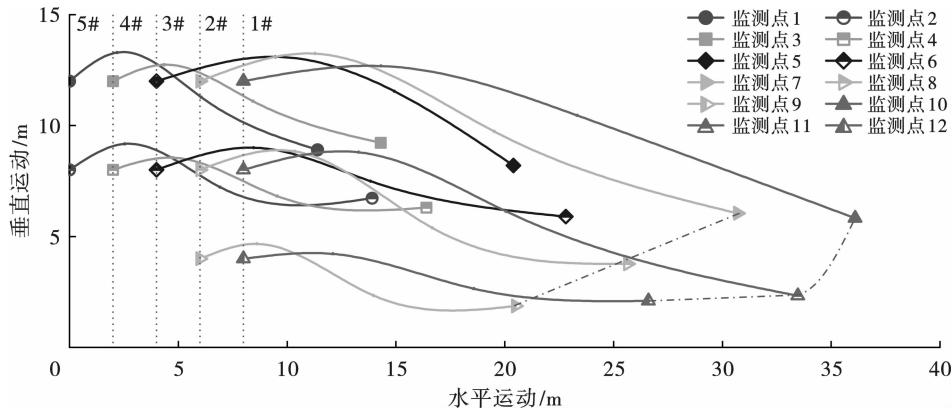


图 7 数值模拟监测点运动轨迹

Fig. 7 Numerical simulation of the monitoring point movement

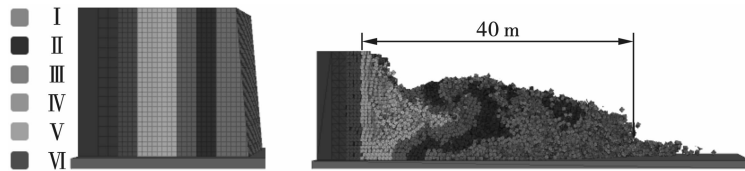


图 8 台阶岩体在爆破前后的分布

Fig. 8 Distribution of bench rock mass before and after blasting

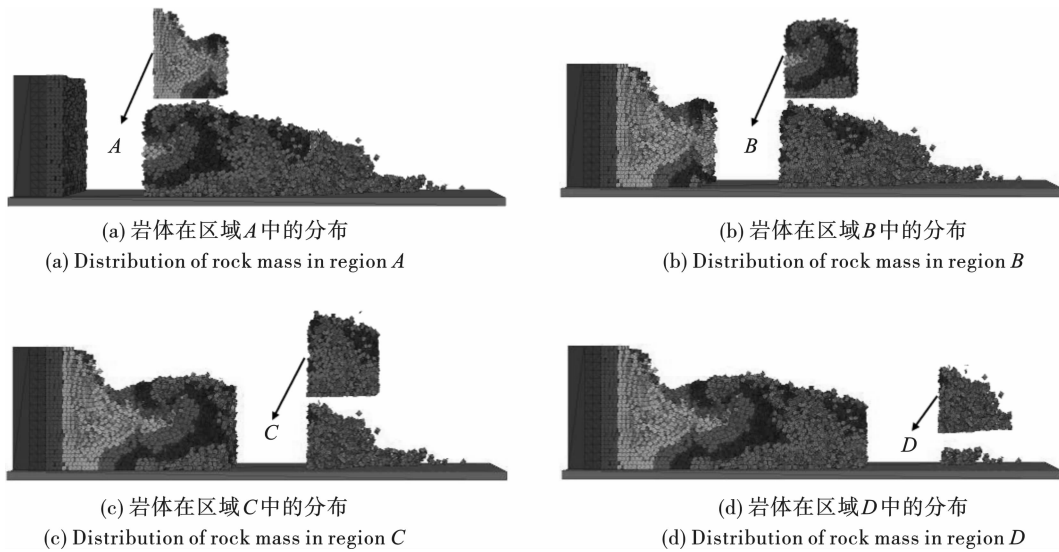


图 9 台阶岩体在爆堆中的占比

Fig. 9 Proportion of bench rock mass in muckpile

结合图 9 岩体各区域在爆堆中分布情况以及图 10 岩体体积所占百分比可以看出在区域 A 和区域 B 中岩体分布较为均匀,尤其突出在区域 B 中,这与图 7 中监测点 5 ~ 12 最终所在位置区域相吻合;而区域 C 内部中包含了 I ~ III 岩体,IV 占极少部分可忽略不计;在爆堆最前沿区域 D 中 I 岩体占比高达 95%,与图 7 中监测点 1 ~ 4 的最终位置情况一致。综上,通过上述分析可以准确得知岩体在爆堆中分布情况。见表 3。

表 3 不同区域岩体体积在爆堆中占比

Table 3 Proportion of rock mass volume in different areas in muckpile

	I	II	III	IV	V	VI	Total
A	17	282	624	1118	1814	494	4349
B	929	854	1155	1277	586	0	4801
C	1391	1208	621	5	0	0	3225
D	1074	56	0	0	0	0	1130

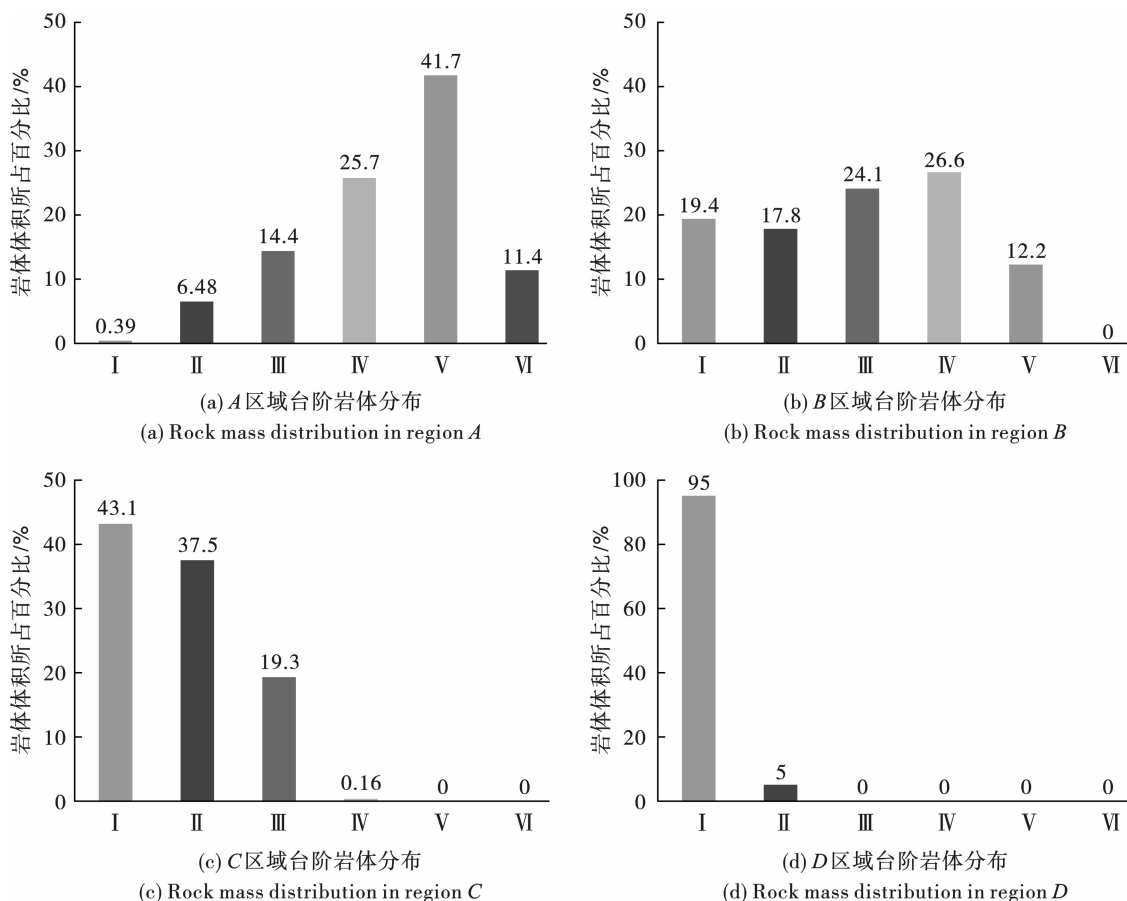


图 10 I ~ VI 岩体在区域 A、B、C、D 中的百分比

Fig. 10 Percentage of I ~ VI rock mass in region A B C and D

矿山在生产过程中必不可少的一个环节就是配矿,配矿可以将不同品位的矿石按照一定比例进行搭配,混合之后达到矿山生产的指标要求,精准的配矿不仅可以提高矿产资源的有效利用率、提高矿山经济效益以及降低现场工作人员工作强度等。因此本文基于上述的信标跟踪系统与数值模拟相结合的研究方法对台阶内部岩体在爆破过程中的运移轨迹进行了分析,并且准确地获取到信标在爆破后向水平方向(自由面方向)产生的位移,同时还对台阶岩体在爆堆中不同区域间的分布进行了数据统计。通过对岩体运移距离及其最终在爆堆中所处位置进行分析,能够为矿山的配矿系统提供理论支撑与基础性数据。

## 5 结论

在现场测试的基础上,利用 3DEC 离散元数值分析软件对台阶爆破进行了数值模拟,得到监测点运动轨迹及台阶岩体在爆堆中的分布情况,主要得出以下结论:

(1) 采用东北大学研发的具有惯性导航技术的智能信标跟踪系统对台阶爆破这一过程中内部岩体

移动轨迹进行了监测。

(2) 获取了开采爆破过程中爆堆内部各质点的运行轨迹与不同区域岩体在爆堆中的分布规律。首先,从爆破过程上看,台阶内部岩体在炸药能量作用下产生的位移向水平方向和垂直方向进行运动,上部 1、4、7、9、11 号监测点与下部其余监测点呈现出不同运动规律。其次,从爆破结果上看,爆破研究区域岩体向水平方向抛掷之后进行堆积形成爆堆主体部分,研究区域后部岩体只受到炸药能量作用进行破碎,并没有进行水平方向移动,而是类似自由落体垂直向下堆积,这两部分岩体堆积形成一个完整爆堆。

(3) 用过利用 3DEC 对台阶爆破进行数值模拟从而得到台阶内部监测点运动过程,其模拟结果与现场测试结果相基本吻合,证明了离散元分析方法能够有效地对台阶爆破进行分析。获得了开采爆破过程中爆堆内部各质点的运行轨迹与不同区域岩体在爆堆中的分布规律,为矿山生产精准配矿提供理论支撑与基础性数据。

## 参考文献 (References)

[1] 刘占全,王德胜,崔凤,等. 巴润矿岩混合复杂爆

- 区爆破分离技术试验研究[J]. 金属矿山, 2022(1): 136-141.
- [1] LIU Zhan-quan, WANG De-sheng, CUI Feng, et al. Experimental study on blasting separation technology in complex ore-rock mixed blasting zone in barun mine [J]. Metal Mine, 2022(1): 136-141. (in Chinese)
- [2] 王建超, 梁卫龙. 老龙山石灰岩矿深孔爆破参数优化试验[J]. 爆破, 2022, 39(4): 80-84, 99.
- [2] WANG Jian-chao, LIANG Wei-long. Optimization experiment of deep hole blasting parameters in laolongshan limestone mine [J]. Blasting, 2022, 39(4): 80-84, 99. (in Chinese)
- [3] 余 昕, 周家祥, 宋卫东, 等. 分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿工艺及爆破设计[J]. 金属矿山, 2018(8): 7-12.
- [3] YU Xin, ZHOU Jia-xiang, SONG Wei-dong, et al. Mining technology and blasting design of the staged open stope mining with subsequent filling in sublevel drilling process [J]. Metal Mine, 2018(8): 7-12. (in Chinese)
- [4] 张万志, 徐帮树, 葛颜慧, 等. 隧道拱部穿越页岩爆破开挖方法及参数试验研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(15): 90-98.
- [4] ZHANG Wan-zhi, XU Bang-shu, GE Yan-hui, et al. Blasting excavation method and parametric tests for tunnel arch crossing shale [J]. Vibration and Shock, 2022, 41(15): 90-98. (in Chinese)
- [5] TAYLOR S L. Blast induced movement and its effect on grade dilution at the Coeur Rochester Mine [D]. University of Nevada, 1995.
- [6] HARRIS G W, MOUSSET-JONES P, DAEMEN J. Blast movement measurement to control dilution in surface mines [J]. Cim Bulletin, 2001, 94: 52-55.
- [7] ENGMANN E, AKO S, BISIAUX B, et al. Measurement and modelling of blast movement to reduce ore losses and dilution at Ahafo Gold Mine in Ghana [J]. Ghana Mining, 2013(14): 27-36.
- [8] ESHUN P A, DZIGBORDI K A. Control of ore loss and dilution at Anglo Gold Ashanti, Iduapriem Mine using blast movement monitoring system [J]. Ghana Mining, 2016(16): 49-59.
- [9] 吴 豪, 荆洪迪, 于健洋, 等. 基于惯性导航技术的露天矿爆破过程矿岩运动规律研究[J]. 金属矿山, 2022(4): 180-187.
- [9] WU Hao, JING Hong-di, YU Jian-yang, et al. Study on ore and rock movement law in open pit blasting process based on inertial navigation technology [J]. Metal Mine, 2022(4): 180-187. (in Chinese)
- [10] YU Z, SHI X, ZHOU J, et al. Prediction of blast-induced rock movement during bench blasting: use of gray wolf optimizer and support vector regression [J]. Natural Resources Research, 2020(29): 843-865.
- [11] YU Z, SHI X, ZHOU J, et al. Machine-learning-aided determination of post-blast ore boundary for controlling ore loss and dilution [J]. Natural Resources Research, 2021(30): 4063-4078.
- [12] YU Z, SHI X, ZHOU J, et al. Feasibility of the indirect determination of blast-induced rock movement based on three new hybrid intelligent models [J]. Engineering with Computers, 2021(37): 991-1006.
- [13] 朱传云, 戴晨, 姜清辉. DDA 方法在台阶爆破仿真模拟中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(S1): 2461-2464.
- [13] ZHU Chuan-yun, DAI Chen, JIANG Qing-hui. Numerical simulation of bench blasting by discontinuous deformation analysis method [J]. Rock Mechanics and Engineering [J]. 2002, 21(S1): 2461-2464. (in Chinese)
- [14] NING Y, YANG J, AN X, et al. Modelling rock fracturing and blast-induced rock mass failure via advanced discretisation within the discontinuous deformation analysis framework [J]. Computers and Geotechnics, 2011(38): 40-49.
- [15] NING Y, YANG J, MA G, et al. Modelling rock blasting considering explosion gas penetration using discontinuous deformation analysis [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2011(44): 483-490.
- [16] 周旺潇, 严 鹏, 郑炳旭, 等. 爆破漏斗形成过程数值模拟的几个关键问题 [J]. 爆破, 2014, 31(3): 15-22.
- [16] ZHOU Wang-xiao, YAN Peng, ZHENG Bing-xu, et al. Key problems in simulation of formation process of blasting crater [J]. Blasting, 2014, 31(3): 15-22. (in Chinese)
- [17] YAN P, ZHOU W, LU W, et al. Simulation of bench blasting considering fragmentation size distribution [J]. International Journal of Impact Engineering, 2016(90): 132-145.
- [18] 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.
- [18] LENG Zhen-dong, LIU Liang, ZHOU Wang-xiao, et al. Numerical investigation of initiation points on muckpile profile in bench blasting [J]. Blasting, 2018, 35(2): 50-55, 100. (in Chinese)