

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.01.011

## 基于无人机航测的露天矿爆堆形态 与延期间隔的研究\*

李胜林<sup>1</sup>,王宗睿<sup>1,2</sup>,孙建成<sup>3</sup>,王永超<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083;  
2. 淮安市清江浦区固定资产投资审计中心,淮安 223001;3. 北京金隅北水环保科技有限公司,北京 102202)

**摘要:** 在露天矿爆破工程中,爆破延时对爆堆形态有着重要的影响。研究爆堆形态特征随爆破延时的变化规律,可以优化爆破设计方案,便于铲装、运输及破碎等后序工序的进行,提高矿山生产效益。矿山生产中爆堆形态主要通过爆堆的高度、外形特征等方面进行评价。通过分析爆堆形态是否符合铲装设备生产要求可评价爆破效果的理想性。选取某露天矿山台阶爆破工程为背景,运用无人机倾斜摄影测量技术获取矿山爆堆倾斜影像数据,使用 Smart 3D 进行三维爆堆模型构建,提取爆堆模型轮廓曲线,研究逐孔起爆时不同延时下爆堆形态特征,孔间延时 23 ms、排间延时 50 ms 下爆堆评价指标总体优于其他组别,更适用于该矿山爆破生产。通过 Matlab 软件选用 Weibull 函数进行爆堆形态拟合,得到 Weibull 函数参数  $\alpha$  取值范围为 1.0297 ~ 1.2194,  $\beta$  取值范围为 1.1754 ~ 1.8040。

**关键词:** 爆破延时;无人机航拍;爆堆形态;露天台阶爆破

**中图分类号:** TD235.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)01-0070-05

## Blasting Shape and Delay Interval of Open Pit Mine based on UAV Aerial Survey

LI Sheng-lin<sup>1</sup>, WANG Zong-ru<sup>1,2</sup>, SUN Jian-cheng<sup>3</sup>, WANG Yong-chao<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. Huai'an Qingjiangpu District Fixed Assets Investment Audit Center, Huai'an 223001, China; 3. Beijing Jinyu Beishui Environmental Protection Technology Co., Ltd., Beijing 102202, China)

**Abstract:** In open-pit mine blasting, blasting delay time has an important influence on the shape of the blasting pile. The study on the variation law of blasting pile shape characteristics with changing delay time can optimize the blasting design scheme, facilitate the subsequent procedures such as shovel loading, transportation and crushing, and improve the mine production efficiency. The shape of the blasting pile in mine production is mainly evaluated by the height and shape characteristics of the blasting pile. The ideality of the blasting effect can be evaluated by analyzing whether the shape of the blasting pile meets the production requirements of shovel loading equipment. Taking a bench blasting project of an open-pit mine, the UAV tilt photogrammetry technology was used to obtain mine blasting pile tilt image data, and built a blasting pile model with smart 3D. The contour curve of blasting pile model was extracted, and the shape characteristics of blasting pile under different delay time were studied. The evaluation index of blasting pile under the delay time with 23 ms between holes and 50 ms delay between rows was better than those of other groups, which was more suitable for blasting production in the mine. Through MATLAB software, the Weibull function was selected to fit the shape of the explosive heap, and the value range of parameter  $\alpha$  of Weibull function was 1.0297 ~ 1.2194, and the value range of  $\beta$  was 1.1754 ~ 1.8040.

**Key words:** blasting delay time; UAV aerial photography; blasting pile shape; open pit mine

爆破技术广泛应用于矿区开采、房屋拆除、基础设施建设等多个领域,取得了良好的社会效益<sup>[1]</sup>。在露天矿山台阶爆破中,良好的爆堆形态有利于后续铲装工作的顺利进行<sup>[2,3]</sup>。近年来随着电子雷管产品的推广与应用,越来越多的露天矿山采用电子雷管,但爆破网路中延期时间参数大多使用导爆管雷管的名义延期时间,而导爆管雷管延期时间允许误差区间一般高过电子雷管一到两个数量级,这样造成了电子雷管精确延期时间的优势浪费,甚至爆破效果劣化。因此,应充分运用电子雷管高精度优势,研究不同爆破延时下爆堆形态特征,确定矿山电子雷管爆破网路延时具有重要意义。

陈庆凯、赵文龙等以大量试验数据基础为基础<sup>[4]</sup>,对不同爆堆分布形态进行了总结分类,并且应用威布尔模型完成了台阶爆破的爆堆形态模拟。齐留洋、郭建新等运用威布尔分布函数模型与灰色关联理论<sup>[5]</sup>,对影响爆堆分布形态的各因素进行了相关理论分析与计算,所得结论对后续的爆堆形态研究有一定的指导意义。本文结合无人机倾斜摄影测量技术,对北京金隅北水环保科技有限公司凤山石灰岩矿爆堆进行倾斜影像数据获取与三维爆堆模型重建,通过电子雷管实现高精度爆破延时控制,研究不同爆破延时下爆堆的形态特征,确定适用于凤山矿爆破生产的爆破延时,提高凤山石灰岩矿开采的经济效益。

## 1 工程概况

凤山石灰岩矿位于北京市昌平区十三陵水库东侧,矿区采场面积约 $1 \times 10^5 \text{ m}^2$ ,主要生产水泥用石灰石。根据矿山生产勘探时进行组样品进行试验,测得各种岩石平均抗压强度为:矿石 69.1 ~ 149.2 MPa;围岩(安山岩)200.1 MPa;夹石(泥质条带灰岩)48.5 ~ 124.7 MPa;矿石硬度:10 ~ 12 f;夹石硬度:5 ~ 13 f。

凤山石灰岩矿采用典型的台阶爆破方案,爆破网路采用逐孔起爆方案。台阶高度 14 m,坡面角 $80^\circ$ ,钻孔孔径 152 mm,垂直钻孔,孔深 15.5 ~ 16.5 m,超深 1.5 ~ 2.5 m,第一排平均最小抵抗线 3.5 m,孔距 5 m,其余排孔距 6 m,排距 3 m,单耗为

0.556 kg/m<sup>3</sup>。

## 2 无人机倾斜摄影测量航测方案设计

### 2.1 航测数据获取

试验选取大疆精灵 4pro V2.0 无人机<sup>[6,7]</sup>,执行飞行任务的无人机如图 1 所示。根据爆堆形态及无人机性能,用 Altizure App 制定飞行计划,导入凤山矿位置文件,确定具体飞行区域。初步设计飞行高度为 30 m,无人机最大飞行速度 6 m/s,航向与旁向重叠率均设置为 85%,最短拍照时间间隔为 2 s。为消除摄影存在的偏差,航拍前还需在爆堆附近布置若干个醒目的控制点,起伏大的区域应多布置。地面标记的控制点要保证在设计飞行高度下航拍,照片上的控制点保证肉眼可以分辨。然后用 MG8 系列手持高精度移动 GIS 平台确定每个控制点的经纬度和高程数据,以提高后续建模精度。



图 1 执行飞行任务的无人机

Fig. 1 Drones on missions

### 2.2 航测数据处理

本文共进行 12 次航测试验,使用 Smart 3D 软件处理航测影像数据通过导入具有一定重叠度的航测影像,进行空中三角测量与模型重建,得到高分辨率的三维实景模型。下面以某一次试验所得航测数据为例,航测数据建模结果如图 2、图 3 所示。

## 3 不同爆破延时下爆堆形态特征

### 3.1 不同延时的爆破网路方案

凤山矿台阶爆破充分利用电子雷管精度高、安全性有保障的技术优势,可以更加精准地确定适用于凤山矿爆破生产的最佳延时,优化爆堆形态,便于后续铲装工作的进行,提高矿山生产效益<sup>[8-10]</sup>。本

收稿日期:2020-10-05

作者简介:李胜林(1977-),男,博士、副教授,主要从事岩石爆破理论与技术研究,(E-mail) lsl@cumtb.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金(51574247、10272109);教育部高等学校博士学科点专项科研基金(006029009);中央高校基本科研业务专项资金(2010QJ05)

试验采用逐孔起爆的起爆顺序,在逐孔爆破的爆区网络中,孔间延时主要影响爆区的块度破碎程度,排间延时主要影响爆区的岩石位移。查阅文献资料及凤山矿以往的爆破设计方案,初定矿山爆破的孔间延期时间范围为 15 ~ 30 ms,排间延时范围是 45 ~ 105 ms。在此范围内对电子雷管孔间和排间爆破延时进行微调,通过控制变量法对比确定合理延时。试验中孔间、排间延时拟定为 18 ms/50 ms、23 ms/50 ms、27 ms/50 ms、18 ms/70 ms、23 ms/70 ms、27 ms/70 ms 共 6 种情况,每种情况重复 2 次,共进行 12 次试验。下面以其中一组爆破设计方案为例,炮孔位置平面图和网路连接图如图 4、图 5 所示。

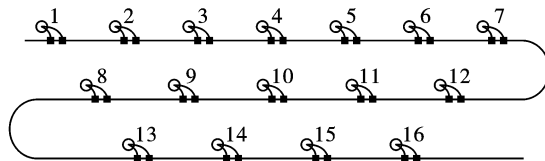


图 5 网路连接图

Fig. 5 Blasting network connection

### 3.2 爆堆特征轮廓曲线提取与分析

将爆破后由航测影像所建的爆堆三维模型放大至合适比例,调整局部爆堆模型使其与电脑屏幕平行,确保图像上下左右的岩石尺寸比例一致。在每一个爆堆三维模型中,提取若干组同一  $x$  坐标下的爆堆轮廓坐标数据,进行相对坐标换算与线性拟合回归,可得到爆堆特征轮廓曲线图。把 12 组数据分为两份,爆堆轮廓曲线如图 6 和图 7 所示。

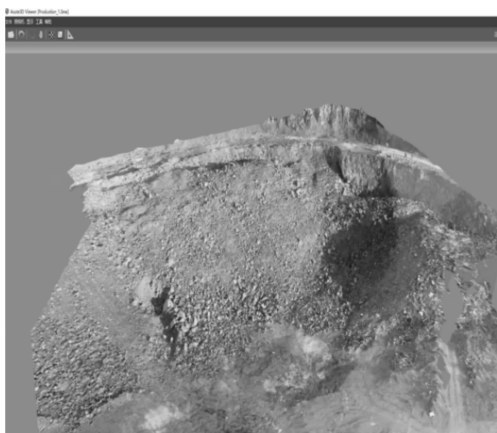


图 2 爆堆模型整体效果图

Fig. 2 Overall effect of the blasting muckpile model

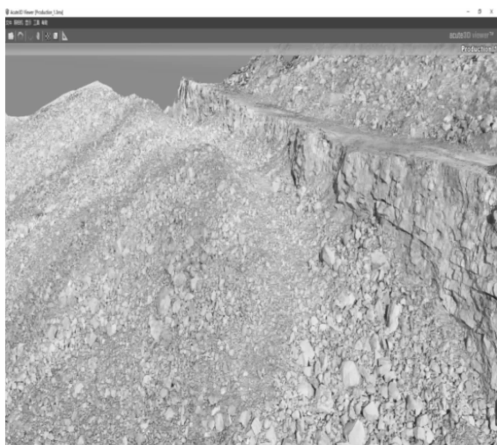


图 3 爆堆模型局部效果图

Fig. 3 Partial effect situ of the blasting muckpile model

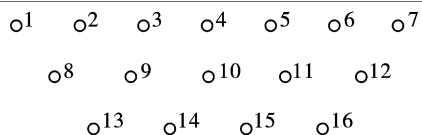


图 4 炮孔位置平面图

Fig. 4 Borehole position layout

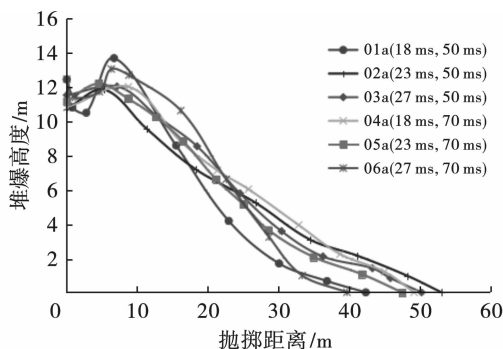


图 6 第一组轮廓曲线对比图

Fig. 6 Comparison of the first group of contour curves

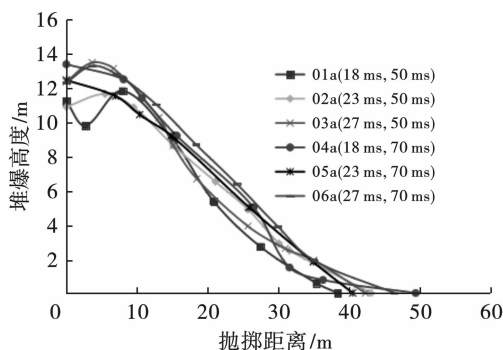


图 7 第二组轮廓曲线对比图

Fig. 7 Comparison of the second group of contour curves

图 7 中,01a、06a 爆堆为漏斗形爆堆,爆堆整体坡度较大;02a ~ 05a 爆堆近似于马鞍形,爆堆形态较为相似,02a 爆堆的爆堆高度略低于其他组别,爆堆坡面角略低于其他组别,02a 爆堆形态相对更有利于后续铲装工序的进行。图 8 中 01b 爆堆为漏斗形爆堆,01b 爆堆整体坡面角为图中最大的一组;02b ~ 06b 爆堆近似于马鞍形,但 06b 爆堆整体坡度明显高于其它组别;02b ~ 05b 爆堆坡面角较为相

似,02b 爆堆高度较低有利于后续铲装工序的进行。因此,从爆堆形态方面,建议采用孔间延时 23 ms,排间延时 50 ms 作为凤山矿爆破生产所用延时。

### 3.3 基于 Weibull 分布函数的爆堆形态模拟

Weibull 模型广泛地用于处理各种随机现象的数量性表征,其力学基础是质量守恒定律<sup>[5]</sup>。

由质量守恒定律可知,爆破前后岩体质量不变

$$\int_0^{l_m} \rho_h h(x) dx = S_0 \rho_q \quad (1)$$

式中: $\rho_q$ 、 $\rho_h$  分别为爆破前、后的岩石密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $h(x)$  为在  $x$  轴上爆堆高度,  $\text{m}$ ;  $S_0$  为待爆岩体的台阶剖面面积,  $\text{m}^2$ ;  $l_m$  为岩块最远抛掷距离,  $\text{m}$ 。

将式(1)无量纲化,可得

$$\int_0^{L_m} H(X) dX = 1 \quad (2)$$

$$\text{式中: } X = \frac{x}{L_m}, H = \frac{h}{L_m}, L_m = \frac{x}{\sqrt{\zeta S_0}}, \zeta = \frac{\rho_h}{\rho_q},$$

$\zeta$  为岩石松散系数。

取  $H(X)$  为 Weibull 分布的概率密度函数

$$H(X) = \begin{cases} 0, & X > L_m \text{ 或 } X < 0 \\ \left(\frac{\beta}{\alpha}\right) \left(\frac{X}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{X}{\alpha}\right)^\beta\right], & 0 \leq X \leq L_m \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\alpha$ 、 $\beta$  是控制曲线形状的参数, $\beta > 1$ 。若  $\alpha$  与  $\beta$  选择合理的话, $H(X)$  在  $L_m$  处变化很小,那么上式可写成

$$\int_{-\infty}^{+\infty} H(X) dX = 1 \quad (4)$$

本次模拟对象为凤山石灰岩矿爆破生产中的 12 个特征剖面。

所选取的每组数据主要包含原始设计参数、实测参数及模拟结果 3 个部分。原始设计参数:台阶高度  $H$ ,孔距  $a$ ,排距  $b$ ,最小抵抗线  $W$ ,单耗  $q$ ,台阶坡面角  $\alpha$ ,原始设计参数在工程概况中已作介绍。爆后实测结果:松散系数  $\xi$ ,最远抛距  $L_m$ ,爆堆各点坐标  $P(x, y)$ 。模拟结果:Weibull 分布函数模型形状参数  $\alpha$ 、 $\beta$ 。

采用 Weibull 分布函数数学模型手段来模拟爆堆分布形态,其中主要困难的部分就是  $\alpha$ 、 $\beta$  值的选取。本次模拟主要采用最小二乘法对实测爆堆形态曲线进行拟合,目标函数为 Weibull 分布函数,通过使用 Matlab 软件拟合曲线,即可得到相应的  $\alpha$ 、 $\beta$  值,将统计结果和计算结果列入表 1。

表 1 Weibull 分布模型爆堆模拟结果统计表

Table 1 Statistical table of simulation results of explosion with Weibull distribution model

编号	$H/\text{m}$	$L_m/\text{m}$	$\zeta$	$\alpha$	$\beta$
01a	12.47	42.19	1.115	1.1078	1.1754
01b	11.42	38.82	1.078	1.0297	1.2531
02a	10.74	52.86	1.309	1.4023	1.4625
02b	11.08	42.49	1.186	1.0538	1.4084
03a	11.55	50.06	1.340	1.0831	1.3703
03b	12.58	41.70	1.231	1.1692	1.8040
04a	10.82	49.00	1.379	1.2194	1.6291
04b	13.63	48.70	1.284	1.1150	1.3553
05a	11.19	47.28	1.262	1.0677	1.5476
05b	12.69	39.92	1.232	1.1771	1.6944
06a	12.48	39.54	1.278	1.0913	1.2146
06b	12.53	45.70	1.439	1.1253	1.4239

将所得结果带入到 Weibull 分布数学函数中,进而可以得到 Weibull 函数模拟曲线图,并与实测爆堆形态曲线进行对比分析,以孔间延时 18ms,排间延时 50ms 下的 01a 爆堆为例,对比结果图如图 8 所示,由图可以看出 Weibull 分布函数模型能够比较好的拟合爆堆形态,是一种较好的模拟爆堆形态的方式。

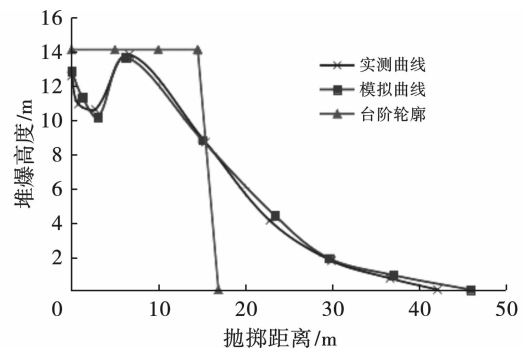


图 8 Weibull 拟合形态曲线与爆堆实测形态曲线对比  
Fig. 8 Comparison of Weibull fitting shape curve with measured one

## 4 结论

通过无人机倾斜摄影测量技术,对凤山石灰岩矿爆堆进行倾斜影像数据获取与三维爆堆模型重建,通过电子雷管实现高精度起爆时序控制,研究不同爆破延时下爆堆形态特征,确定适用于凤山矿爆破生产的爆破延时。研究结论如下:

(1)通过现场试验实测及矿区三维模型构建表明可以通过无人机倾斜摄影技术进行露天矿航测数

据的采集工作,航测数据能够在露天矿生产中得到有效的应用。

(2)使用爆堆的高度、爆堆形坡面角评价指标对爆破效果进行评价,孔间延时 23ms、排间延时 50 ms 下爆堆评价指标总体优于其他组别,更适用于凤山矿爆破生产。

(3)通过 12 组爆堆实测形态曲线,可获知每个爆堆的形态特征,最远抛掷距离范围在 38.82 ~ 52.86 m,采用 Weibull 分布函数拟合爆堆轮廓曲线,并与爆堆实测形态曲线对比可知,Weibull 分布曲线模型能够比较好的拟合爆堆形态。Weibull 函数参数  $\alpha$  取值范围为 1.0297 ~ 1.2194,  $\beta$  取值范围为 1.1754 ~ 1.8040。

### 参考文献 (References)

- [1] 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.
- [1] 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)
- [2] 张智宇,丁 飞,李洪超,等.最小抵抗线对台阶模型爆破效果影响研究[J].北京理工大学学报,2020,40(2):129-134.
- [2] ZHANG Zhi-yu, DING Fei, LI Hong-chao, et al. Study on the effect of minimum resistance line on blasting effect of bench model [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2020, 40(2): 129-134. (in Chinese)
- [3] 叶春雷,郑德明,戴春阳,等.复杂环境下数码电子雷管在土石方爆破工程中的应用[J].爆破,2019,36(4):76-79,95.
- [3] YE Cun-lei, ZHENG De-ming, DAI Cun-yang, et al. Application of digital electronic detonator in soil-rock blasting engineering in complex situation [J]. Blasting, 2019, 36(4): 76-79, 95. (in Chinese)
- [4] 陈庆凯,赵文龙,郭赵杰,等.基于模糊神经网络爆破效果评价模型[J].工程爆破,2019,25(4):74-79.
- [4] CHEN Qing-kai, ZHAO Wen-long, GUO Zhao-jie, et al. Blasting effect evaluation model based on fuzzy neural network [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(4): 74-79. (in Chinese)
- [5] 齐留洋,郭建新,顾春雷.基于 Weibull 模型的爆堆形态神经网络预测[J].有色金属(矿山部分),2019,71(3):92-95.
- [5] QI Liu-yang, GUO Jian-xin, GU Cun-lei. Prediction of blast-heap morphology based on Weibull model [J]. Non-ferrous Metals (Mining Section), 2019, 25(4): 74-79. (in Chinese)
- [6] 陈建龙,卢文波,孙鹏昌,等.毫秒延时爆破作用下岩体的受迫振动分析[J].岩土工程学报,2019,41(2):397-404.
- [6] CHEN Jian-long, LU Wen-bo, SUN Peng-chang, et al. Forced vibration analysis of rock mass under millisecond delay blasting [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(2): 397-404. (in Chinese)
- [7] 吴昊骏,龚 敏.基于雷管实际延时范围的逐孔爆破振动合成计算与应用[J].爆炸与冲击,2019,39(2):151-161.
- [7] WU Hao-jun, GONG Min. Calculation and application of hole by hole blasting vibration superposition based on measured delay times of detonators [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(2): 151-161. (in Chinese)
- [8] 金爱兵,陈帅军,赵安宇,等.基于无人机摄影测量的露天矿边坡数值模拟[J].岩土力学,2021(1):1-10. [2020-09-22]. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2020.0697>.
- [8] JIN Ai-bing, CHEN Shuai-jun, ZHAO An-yu, et al. Numerical simulation of open-pit mine slope based on UAV photogrammetry [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021(1): 1-10. [2020-09-22]. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2020.0697>. (in Chinese)
- [9] 王 虎,吕伟才,高 翔.无人机倾斜摄影实景三维建模及精度评价[J].测绘与空间地理信息,2020,43(8):74-78.
- [9] WANG Hu, LV Wei-cai, GAO Xiang. 3D modeling and accuracy evaluation of UAV tilt photography [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2020, 43(8): 74-78. (in Chinese)
- [10] 李顺波,李泽华,杨军,等.矿岩分离露天爆破毫秒延时间隔研究[J].爆破器材,2019,48(3):55-58.
- [10] LI Shun-bo, LI Ze-hua, YANG Jun, et al. Research on millisecond delay interval of open blasting for separation of ore and rock [J]. Explosive Materials, 2019, 48(3): 55-58. (in Chinese)