doi:10.3963/j. issn. 1001 -487X. 2024. 01. 005

爆堆自适应分层的块度空间分布测量方法研究*

徐振洋[1,2],郇宝乾[1],李萍丰[3],王雪松[4],周成平[3]
(1. 辽宁科技大学 矿业工程学院,鞍山 114051;2. 辽宁省金属矿产资源绿色开采工程研究中心, 鞍山 114051;
3. 宏大爆破工程集团有限责任公司, 广州 510623;4. 沈阳工业大学 建筑与土木学院,沈阳 110870)

摘 要: 爆堆块度分布特征是评价爆破效果的重要指标,针对目前爆堆块度直接与间接法测量方法的不足,提出了一种爆堆自适应分层的块度空间分布测量方法,该方法使用GA-LSSVM模型来预测Weilbull函数的形状参数α、β,并设置多个预测点,生成三维爆堆形态预测曲线。同时对Kuz-Ram块度预测模型参数进行转换和融合,建立了爆堆分层距离预测模型,并将其导入Weilbull-GA-LSSVM爆堆形态预测模型,实现爆堆自动分层。通过现场应用,不断优化分层设计,探究爆堆最佳分层位置,达到爆堆自适应分层的效果。以广东省大排矿山为工程依托开展现场试验,结果表明:(1)Weibull-GA-LSSVM模型能够准确预测爆堆形态,其中爆堆最大前移距离预测结果的平均相对误差仅为5.6%,松散系数预测结果的相对误差多数在9%左右,表现出良好的稳定性。(2)爆堆自动分层模型能够在爆前合理地输出分层距离以及分层层数,保证了爆后现场爆堆的铲装效率。(3)推导出爆堆最佳分层位置距离公式,实现了爆堆自适应分层,爆堆块度分布测量精度明显提高,更接近于爆堆整体块度分布。

关键词: 爆堆; 自适应分层; 块度分布; 分层距离; 爆破效果
中图分类号: TD235.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001 -487X(2024)01 -0027 -10

Study on Measurement Method of Fragment Spatial Distribution by Adaptive Stratification of Blasting Pile

XU Zhen-yang[1,2], *HUAN Bao-qian*[1], *LI Ping-feng*[3], *WANG Xue-song*[4], *ZHOU Cheng-ping*[3]
(1. School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China;
2. Liaoning Engineering Technology Research Center for Efficient Mining and Utilization of Metal Mineral Resources, Anshan 114051, China; 3. Hongda Demolition Engineering Group Co., Guangzhou 510623, China; 4. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: The distribution characteristics of blasting pile is an important index indicator to evaluate blasting effect. In view of the inadequacy of the current direct and indirect methods of measuring fragment size of the blast pile, a spatial distribution measurement method for adaptive stratification of the blast pile is proposed. It uses the GA-LSSVM model to predict the shape parameters α and β of the Weibull function and sets multiple prediction points to predict the three-dimensional blasting pile morphology. By converting and fusing the parameters of the Kuz-Ram fragment prediction model, a distance prediction model of blast pile stratification is established and applied to the

收稿日期(Date of reception): 2023 -08 -24 **网络首发日期(Published online):** 2023 -12 -10
作者简介: 徐振洋(1982 -),男,博士、教授,从事爆炸力学与工程爆破方面的研究,(E-mail)xuzhenyang10@foxmail.com。
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51974187);辽宁省教育厅重点项目(LJKZ0282)
About the author: XU Zhen-yang(1982 -), male, professor, mainly engaged in research on mining engineering and blasting theory and technology, (E-mail) xuzhenyang10@foxmail.com.
Fund Programs: National Natural Science Foundation of China(51974187); Key Projects of Liaoning Provincial Department of Education(LJKZ0282)

Weibull-GA-LSSVM model to achieve an automatic stratification of the blast pile. Through field application, the stratification design is continuously optimized for the best stratification position to realize the adaptive stratification. The results show that: (1) the Weibull-GA-LSSVM model can accurately predict the morphology of the blast pile with a good stability that the average relative error of the prediction results of the maximum forward distance of the blast pile is only 5.6% and the relative error of the prediction results of the looseness coefficient is mostly around 9%. (2) The Kuz-Ram-based blast pile stratification model can reasonably output the layer distance and number before blast, which ensures the shoveling efficiency after blast. (3) The optimal layer distance formula is derived to achieve the adaptive stratification of the blast pile, and the measurement accuracy of the fragment size distribution of the blast pile is significantly improved, which is closer to the overall fragment size distribution.

Key words: blast pile; adaptive stratification; fragment size distribution; layer distance; blasting effect

爆堆块度分布是评价爆破效果的重要指标[1]。目前,爆堆块度分布测量方法主要分为直接法和间接法[2]。直接法由于其工作量较大且耗时耗力,在工程实际应用中被逐渐淘汰。间接法分为相关数据测量法[3]、经验分布函数法[4]、数值模拟法[5]、摄影图像处理法[6]。相关数据测量法是通过后期工序指标推测块度分布情况,推算结果并不可靠。经验分布函数法是通过现有理论与试验建立爆堆块度分布信息与相关影响因素的函数关系[7]。研究发现,*R-R* 分布比重越大,越近似于爆堆实际分布规律[8]。数值模拟法是利用计算机建立爆破物理过程的瞬态数学模型[9]。黄梦龙等通过拟合地质影响系数 K、α,成功模拟了爆破后爆堆块度分布情况[10]。冯春等模拟了露天矿爆堆形成的全过程[11],证明了数值模拟的可行性。摄影图像处理法分为二维图像和三维图像[12]。姬付全等利用 ACE + CLAHE 算法对隧道爆破块度图像进行处理[13],能够在光照不均的情况下识别隧道爆堆块度。江松等在深度学习算法中融入点渲染多分支的方法[14],解决了模型上采样时丢失语义信息的问题,提升了爆堆块体的分割精度。刘强等利用 3DPCFM 统计方法预测了三维点云爆堆的表面块度分布[15]。谢博等利用区域生长的方法实现了点云岩块轮廓自动识别[16]。不难看出,以上对爆堆块度的研究分析多为爆堆表观层,难以准确表征爆堆整体的块度分布情况。

因此,提出了爆堆自适应分层的块度空间测量方法,该方法使用 GA-LSSVM 模型来预测 Weibull 函数的形状参数 α、β,并设置多个预测点,进而预测三维爆堆形态。通过将 Kuz-Ram 块度预测模型参数进行转换和融合,建立了爆堆分层距离预测模型,并将其应用于 Weibull-GA-LSSVM 爆堆形态预测模型,实现爆堆自动分层。通过现场应用,不断优化分层设计,探究爆堆最佳分层位置,达到爆堆自适应分层的效果。并以广东省肇庆市大排矿为工程依托,开展现场试验,验证了爆堆自适应分层的块度空间测量方法准确性。

1 工程概况

大排矿山矿区位于广东省肇庆市封开县长岗镇、罗董镇,矿山岩性主要为石灰石与花岗岩,范围海拔标高最低为 100 m,标高最高为大排山山顶 366.2 m,设计最低开采标高为 +30 m,台阶高度为 15 m,计划每年生产骨料 2000 万 t,机制砂 1300 万 t,合计每年生产成品总量为 3300 万 t。图 1 为大排矿山施工总平面图,矿山开采分为东西两个采区,设计东西采区采用独立的运输矿道,采用公路开拓—汽车运输的开拓方式,运矿设备为载重不小于 70 t 的电动矿车,达产期计划需配备 73 台载重 70 t 的矿车。根据矿物料运输距离及岩性,矿山配套的挖装设备为小松 PC500、PC850。

图 1 大排矿山施工总平面图

Fig. 1 General plan of the construction of the Grand Row Mine

2 爆堆自动分层

首先采用 Weibull-GA-LSSVM 模型预测爆堆形态,获取爆堆最大前移距离,再基于 Kuz-Ram 分层距离预测模型,计算爆堆分层距离,两者相结合,输出爆堆分层层数,实现爆堆自动分层,如图 2 所示。

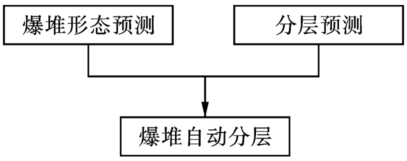


图 2　爆堆自动分层过程

Fig. 2　Automatic stratification process of bursting pile

2.1　基于 Weibull 函数的 GA-LSSVM 爆堆形态预测

2.1.1　Weibull 函数

Weibull 函数是一种连续性分布模型,由于 Weibull 分布曲线近似于爆堆剖面曲线[17],因此被广泛运用于爆堆形态预测。

爆破试验表明,爆破后岩体质量等于爆破前岩体质量

$$\int_0^{L_m} \rho_{ra} h(x)\,\mathrm{d}x = A_0 \rho_r \tag{1}$$

式中:ρ_r、ρ_{ra} 分别为爆破前、后的岩石密度;$h(x)$ 是爆堆高度,m;A_0 是台阶剖面面积,m^2;L_m 是最远抛掷距离,m。

将式(1)无量纲化

$$\int_0^{L_m} H(X) mX = 1 \tag{2}$$

式中:$X = \dfrac{x}{\xi_1}$,$H = \dfrac{h}{\xi_1}$,$L_m = \dfrac{l_m}{\xi_1}$,$\xi = \dfrac{\rho}{\rho_{ra}}$,$\xi$ 为岩石松散系数。

取 $H(X)$ 为 Weibull 分布的概率密度函数

$$H(X) = \begin{cases} 0, & X < 0 \\ (\beta/\alpha) X/\alpha^{\beta-1} \cdot \exp[-(X/\alpha^{\beta})], & 0 \leqslant X \leqslant L_m \\ 0, & X > L_m \end{cases} \tag{3}$$

式中:α、β 为控制曲线形状的参数,$\beta > 1$。若 α 与 β 选择合理,$H(X)$ 在 L_m 处变化很小。

因此,为了更加准确地预测爆堆形态[17], 必须有效预测 Weibull 函数中的两个参数 α、β,进而修正 Weibull 函数形态,使其更加接近于爆堆真实形态。

2.1.2　LSSVM 模型优化

LSSVM 算法是一种全新的回归计算方法[18,19],通过引入 GA 优化算法,我们可以有效地改善 LSSVM 模型的收敛速度,并且通过调整惩罚参数 c 和核函数 g,可以显著提升模型的学习和泛化能力,能够更准确地预测 Weibull 函数中的两个参数 α、β。图 3 为优化过程。

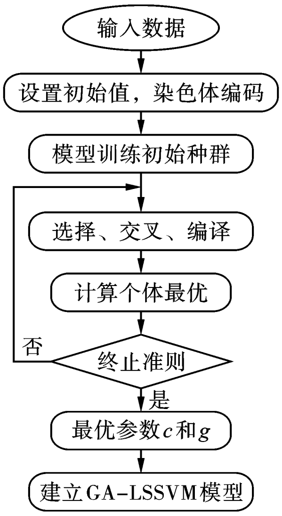


图 3　GA 优化 LSSVM

Fig. 3　Optimized GA-LSSVM

2.1.3　GA-LSSVM 模型建立

采用 Matlab 的 2021(a)仿真平台建立 GA-LSSVM 模型,共选取 30 组肇庆大排矿现场爆破监测数据为数据集,按 2∶1 的比例分为训练集和测试集。其中,爆堆松散系数以及 Weibull 函数中的形状参数 α、β 作为模型的输出层参数,而炸药单耗、台阶高度、抵抗线、孔距、排距、自由面坡脚作为输入层参数[20]。限于篇幅,数据见表 1 和表 2。

表 1　输入层参数

Table 1　Input layer parameters

编号	炸药单耗/(kg·m^{-3})	台阶高度/m	抵抗线/m	孔距/m	排距/m	自由面坡脚/°
1	0.50	16.5	4.2	7.5	4.5	79
2	0.44	15.1	4.2	7.5	4.5	76
3	0.44	15.1	4.2	7.5	4.5	80
4	0.44	15.2	4.2	7.5	4.5	77
5	0.41	15.3	4.2	7.5	4.5	82
6	0.41	15.3	4.2	7.5	4.5	81
7	0.41	15.3	4.2	7.5	4.5	76
8	0.48	16.0	4.2	7.5	4.5	77
9	0.45	15.3	4.2	7.5	4.5	78
10	0.44	15.6	4.2	7.5	4.5	80

表 2 输出层参数

Table 2 Output layer parameters

编号	松散系数	α	β
1	1.117	1.1074	1.1059
2	1.214	1.0265	1.2613
3	1.162	1.0729	1.3125
4	1.112	1.0490	1.2084
5	1.073	1.0593	1.3040
6	1.150	1.0630	1.2553
7	1.103	1.0733	1.0479
8	1.133	1.0973	1.3239
9	1.053	1.1903	1.2337
10	1.152	1.0428	1.1260

2.1.4 爆堆形态预测

表 3 所示为 GA-LSSVM 模型的预测结果，α 值的相对误差低于 8%，β 值的相对误差变化不大，在 4% ~ 6% 之间，而松散系数的相对误差则稳定在 10%以下，多数在 9%左右，预测结果达到了预期的要求。

现将预测输出的 α、β 值导入 Weibull 分布函数，设置多个预测点，生成三维爆堆形态预测曲线，输出爆堆最大前移距离，如图 4 所示，从而实现爆堆形态可视化。

图 5 所示为无人机测量现场爆堆最大前移距离的过程[21]。表 4 所示为爆堆最大前移距离预测结果，平均相对误差仅为 5.6%，这是因为在爆破过程中，破碎岩石之间的碰撞会产生阻力，从而使得爆堆预测距离要超出爆堆实际测量距离[6]。

表 3 GA-LSSVM 预测结果

Table 3 GA-LSSVM prediction results

编号	松散系数			α			β		
	真实	预测	相对误差/%	真实	预测	相对误差/%	真实	预测	相对误差/%
1	1.112	1.238	9.13	1.0490	1.1209	6.85	1.2084	1.2595	4.23
2	1.103	1.235	8.14	1.0733	1.2269	7.15	1.0479	1.0967	4.64
3	1.214	1.320	8.75	1.0265	1.1017	7.33	1.2613	1.3139	4.17
4	1.150	1.255	9.10	1.0630	1.1411	6.14	1.2553	1.3186	5.04
5	1.073	1.177	9.97	1.0593	1.1331	6.97	1.3040	1.3710	5.14

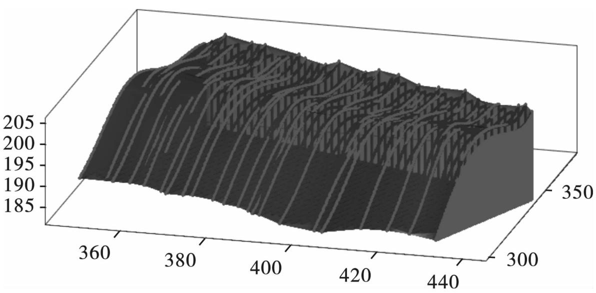


图 4 爆堆三维形态预测

Fig. 4 Prediction of the 3D morphology of the blast pile

表 4 最大前移距离预测结果

Table 4 Maximum forward distance prediction results

编号	爆堆实际最大前移距离/m	爆堆预测最大前移距离/m	相对误差/%
1	40.4	42.3	4.7
2	39.6	41.4	4.5
3	38.5	40.7	5.7
4	41.3	44.7	8.2
5	39.7	41.6	4.9

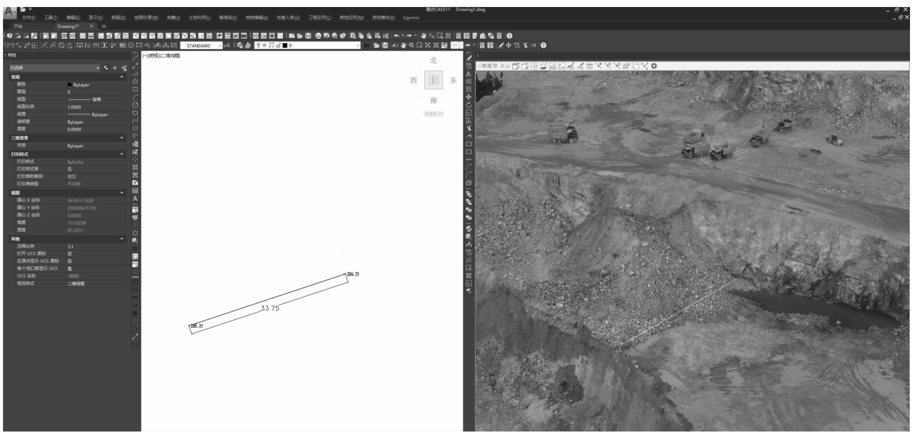


图 5 无人机爆堆最大前移测量

Fig. 5 Maximum forward movement measurement of the UAV blast pile

2.2 基于 Kuz-Ram 的分层距离模型

为了保证分层距离预测的合理性,需要综合考虑现场爆堆块体的大小以及场铲装设备型号参数。

2.2.1 Kuz-Ram 块度分布预测模型

多年来,Kuz-Ram 爆破块度预测模型一直被广泛地运用于矿业中[22],模型表达式如下

$$n = \left(2.2 - 14\frac{W}{D}\right)\left(1 - \frac{e}{W}\right)\left(1 + \frac{m-1}{2}\right)\frac{L_0}{H} \tag{4}$$

$$x_{50} = A \times q^{-0.8} \times Q^{1/3} \times (115/E)^{19/30} \tag{5}$$

$$R = 1 - \exp^{-(x/x_0)^n} \tag{6}$$

式中:x_{50}为平均粒径,cm;x_0 特定筛下累积率为 63.2%的块体粒径值,cm;x 为特征粒径,cm;m 为孔距与抵抗线之比;q 为炸药单位耗药量,kg/m^3;Q 为单孔药量,kg;W 为最小抵抗线,m;D 为炮孔直径,mm;e 为钻孔精度标准差,m;H 为台阶高度,m;E 为炸药的相对重量强度,梯恩梯为 115,一般工业炸药取 100;L_0 开挖线以上的装药长度,m;A 为岩石系数,与岩体裂隙、结构面发育程度有关;R 为筛下累计率;n 为不均匀系数。

2.2.2 爆堆分层距离预测模型建立

由文献[23]可知 $x_{50} = 0.693^{1/n}$,利用 Kuz-Ram 模型的筛下累计率公式推导 x_{80},推导过程如下

$$x_{80} = 2.309^{1/n} x_{50} \tag{7}$$

结合现场实际生产情况,选取挖机斗容 T 作为模型参数,最终得出分层距离预测公式如下

$$M = k(x_{80} + T^{\frac{1}{3}}) \tag{8}$$

$$M = k\left[2.309^{1/n\left(2.2-14\frac{W}{D}\right)\left(1-\frac{e}{W}\right)\left(1+\frac{m-1}{2}\right)\frac{L_0}{H}} \cdot x_{50}/100 + T^{\frac{1}{3}}\right] \leqslant \frac{1}{2}N \tag{9}$$

式中:M 表示分层距离,m;k 为分层距离控制系数,$k>1$ 且为正整数,k 越大爆堆分层的层数越少;x_{80}为特征粒径,即为特定筛下累积率为 80%的块体粒径,m;T 为不同型号挖机漏斗的斗容,m^3;N 为爆堆最大前移距离,m。

2.3 爆堆自动分层模型建立

结合 Weibull-GA-LSSVM 爆堆形态预测模型和分层距离预测模型,建立爆堆自动分层模型。爆前输入模型所需爆破设计参数,预测生成三维爆堆形态,如图 6 所示,输出爆堆最大前移距离、爆堆分层距离以及爆堆分层层数等参数。同时,在爆堆自动分层模型中增加了手动自定义调节功能,在等分的基础上调整层与层之间的距离,也可以调整分层剖面的倾斜角度,以便于工作人员根据实际情况进行调整。

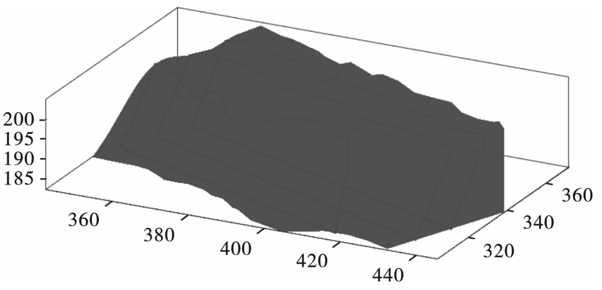


图 6　爆堆自动分层

Fig. 6　Automatic stratification of blast pile

3 爆堆自动分层现场应用

3.1 爆堆自动分层验证

为了验证爆堆自动分层方法的可行性,首先对大排矿东采区炮区 A 进行爆堆自动分层处理,表 5、6 所示分别为模型输入层及输出层参数,不难看出,爆堆自动分层模型能够合理地输出分层距离与分层层数。然后,又连续对东采取的 B、C、D 三个炮区进行爆堆的自动分层处理,最终四次爆破产生的爆堆经自动分层后采集的图像如表 7 所示,结果表明爆堆自动分层模型具有良好的稳定性。

表 5　输入层参数

Table 5　Input layer parameters

台阶高度 H/m	孔径 D/mm	平均单耗 q/(kg·m^{-3})	孔距 S/m	排距 J/m	超深长度 L_B/m	堵塞长度 L_C/m	系数 A
15	140	0.40	7.4	4.5	1.5	3	7
最小抵抗线 W/m	坡脚 θ/°	分层控制系数 K	单孔装药量 Q/kg	漏斗容积 T/m^3	相对强度 E	钻孔精度标准差 e/m	
4	76	6	145.4	4	100	0.20	

表 6　输出层参数

Table 6　Output layer parameters

爆堆最大前移距离/m	x_{50}/cm	x_{80}/cm	n	爆堆分层距离/m	爆堆分层层数
37.76	32	53	1.69	13.3	3

表 7　分层图像采集

Table 7　Layered image acquisition

编号	分层图像采集	层数	距离/m
爆堆 A		3	13.30
爆堆 B		4	9.57
爆堆 C		5	8.65
爆堆 D		6	6.67

3.2　爆堆块度识别系统

通过 MATLAB 开发了基于深度学习 U-Net 分割模型的爆堆粒度分布检测系统[24,25]，如图 7 所示。此外，调用相关命令，可以生成或读取“.xls”文件，能够对爆堆级配效果进行全面、准确的评估。

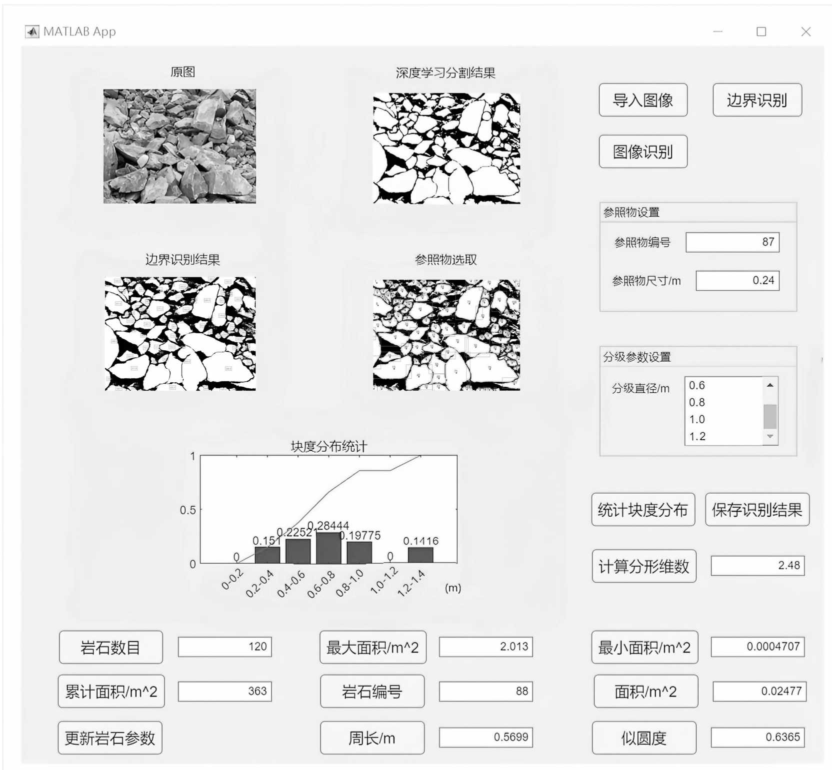


图 7　爆堆块度识别系统

Fig. 7　Blast pile frgment size identification system

3.3　爆破效果评价

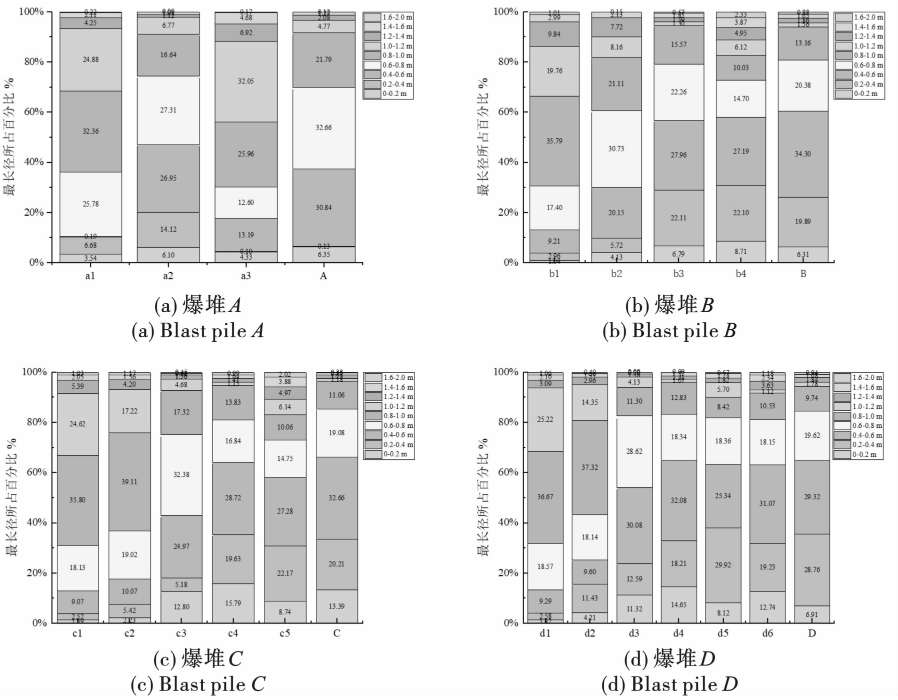
图 8 展示了四次爆破后爆堆块度空间分布的统计结果，其中每一层的块度分布以小写字母标识，而整体的块度分布则以大写字母标识，不同颜色的区域代表着不同的爆堆块体最长径范围。经过分析，我们发现，在四次爆破后，爆堆的大块率显著下降。这是因为前期的爆破活动对岩体造成了严重的损伤[26]。对于单一爆堆而言，表面的大块数量最多，根部次之，中部的大块数量最少。

4　爆堆自适应分层

4.1　爆堆最佳分层位置拟合

从图 8 中可以看出，a_2 的块度分布更接近 A，b_3 更接近 B，c_4 更接近 C，d_5 更接近 D，这表明爆堆的

中部靠左区域,块体分布情况接近于爆堆整体的块度分布情况。为了更好地探究爆堆分层的最佳位置,我们随机对 10 个爆堆进行分层块度分析,结果表明,中部靠左区域的块体分布情况确实接近于爆堆整体的块度分布,如图 9 所示。



(a) 爆堆 A
(a) Blast pile A

(b) 爆堆 B
(b) Blast pile B

(c) 爆堆 C
(c) Blast pile C

(d) 爆堆 D
(d) Blast pile D

图 8　爆堆分层及整体块度分布

Fig. 8　Stratification and overall fragment size distribution of the blast pile

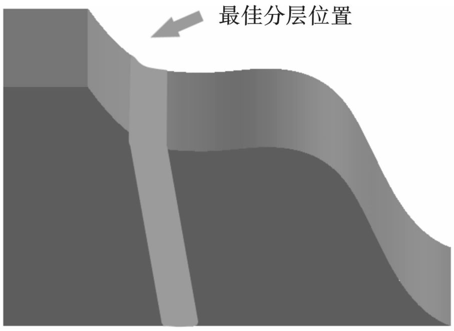


图 9　最佳分层位置图

Fig. 9　Map of optimal layer locations

表 8 提供了十个爆堆中最接近爆堆整体块度分布的分层中点位置及对应的爆堆最大前移距离。

使用 MATLAB 进行拟合,图 10 展示了最终的拟合结果,从而得出最佳的分层位置公式,如下

$$y = -90.54e^{-x/19.17} + 27.61, R^2 = 0.9697 \tag{10}$$

式中:y 代表最佳分层距离,m;x 表示爆堆最大前移距离,m;从拟合结果来看,各离散点的曲线误差不超过 0.5 m,表明效果良好,可以忽略不计,能够满足现场爆堆挖机铲装的实际应用要求。

4.2　爆堆自适应分层现场验证

现将爆堆最佳分层距离公式导入爆堆自动分层模型,建立爆堆自适应分层模型。利用大排矿东采区 300 平台 E 炮区对爆堆自适应分层的块度空间测量方法进行现场验证,爆前输入表 9 所示模型参数,图 11 所示为生成的爆堆自适应分层三维模型,预测结果如表 10 所示。

表 8　最佳分层距离与最大前移距离

Table 8　Optimal layer distance and maximum forward distance

编号	最佳分层距离/m	爆堆最大前移距离/m
1	16.14	40.27
2	15.92	39.83
3	19.92	47.44
4	19.56	45.12
5	15.17	37.47
6	14.35	36.71
7	20.13	48.26
8	19.11	44.31
9	20.61	47.20
10	15.40	38.79

表 9　输入层参数

Table 9　Input layer parameters

台阶高度 H/m	平均单耗 q/(kg·m^{-3})	排距 J/m	孔距 S/m	最小抵抗线 W/m	坡脚 θ/°
15.6	0.48	4.5	7.4	4.2	79

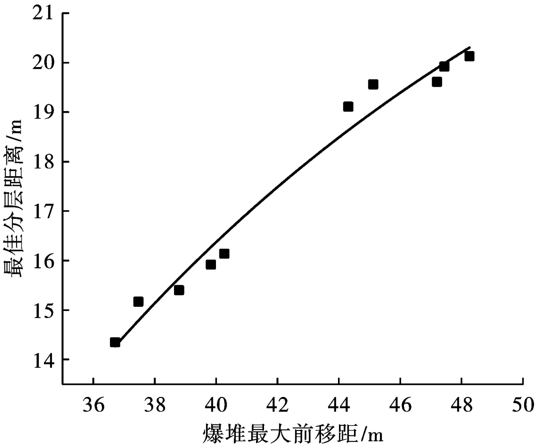


图 10 最佳分层位置线性拟合

Fig. 10 Linear fit of optimal layer position

按照表 9 模型的预测结果，对东采区 300 平台 E 爆堆的最佳分层位置进行划定，然后使用挖机进行挖掘，如图 12 所示，最后采集爆堆最佳分层位置的剖面图对爆堆块度分布情况进行测量。

表 10 输出层参数

Table 10 Output layer parameters

爆堆最大前移距离/m	爆堆最佳分层位置/m
44.2	18.59

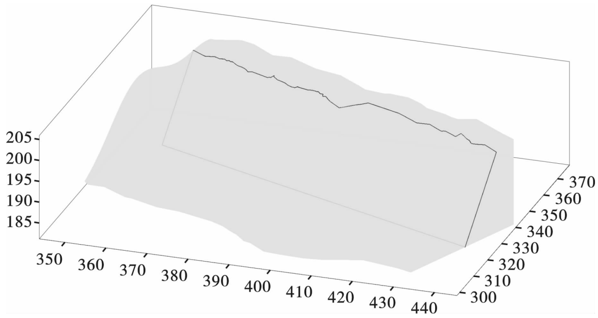


图 11 爆堆自适应分层模型

Fig. 11 Adaptive stratification of the bursting pile

图 12 东采区 300 平台爆堆自适应分层图像采集

Fig. 12 Adaptive stratified image acquisition of the 300 platform burst pile in the east mining area

图 13 所示为东采区 300 平台爆堆块度分布情况，与爆堆表面块度分布情况相比，最佳分层位置的块度分布级配曲线更接近于爆堆整体块度分布级配曲线，表面块度分布曲线处于低位，主要是因为爆堆表面的大块居多，中小粒径的块体个数占比较少[11]。

为了进一步检验爆堆自适应分层测量方法的精确度，我们连续对东采区的 F、G、H、I 四个爆堆进行了块度分布统计，具体结果见图 14。从这个结果中，我们可以明显看出，爆堆自适应分层的块度空间分布测量方法，能够更精确地统计爆堆的块度分布状况。

5 结论

(1) 建立爆堆自动分层模型，爆堆最大前移距离预测结果的平均相对误差仅为 5.6%，能够在爆前合理地输出爆堆分层距离及爆堆分层层数，表现出良好的稳定性，实现了对爆堆块度的分层量化分析，为爆堆自适应分层奠定基础。

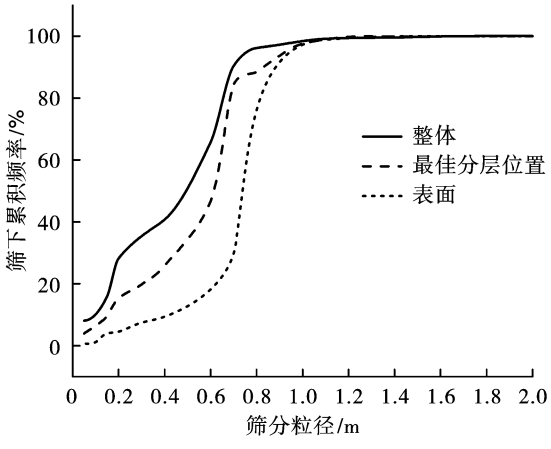
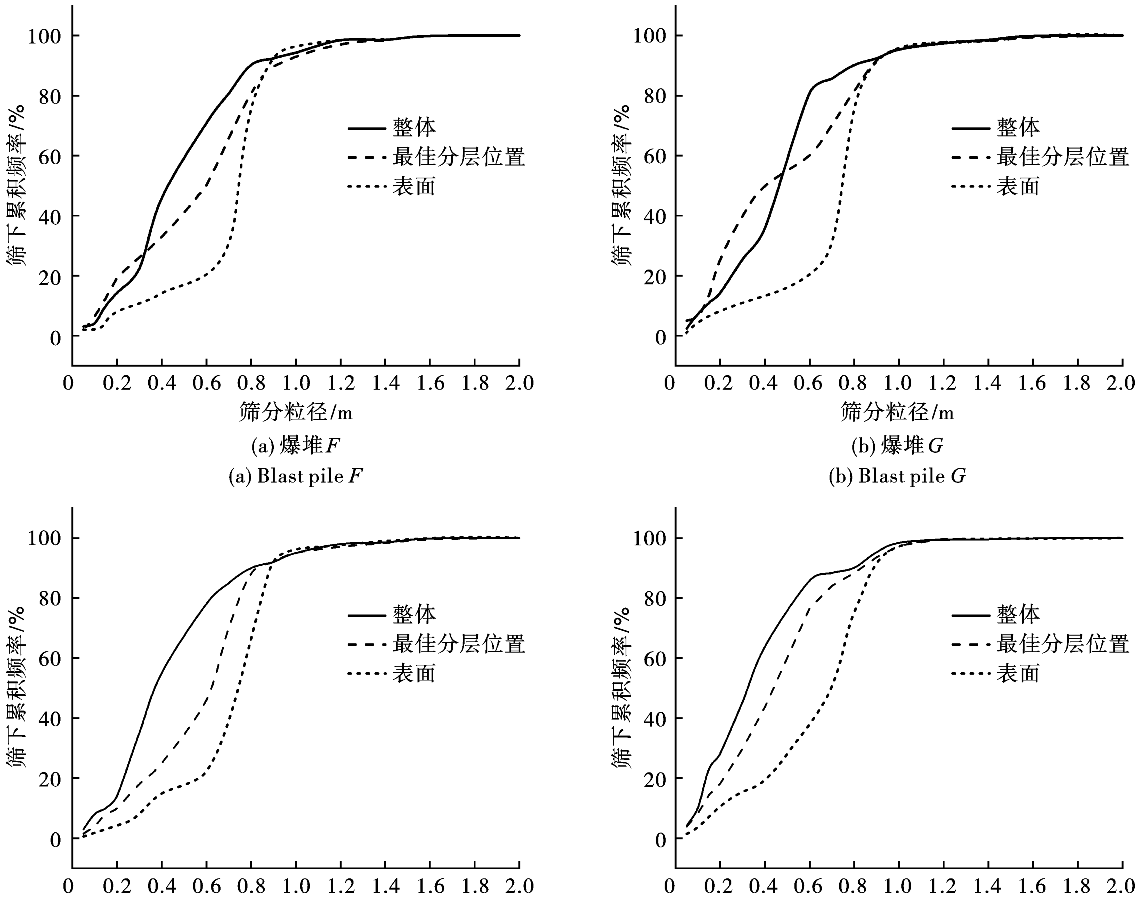


图 13 东采区 300 平台 E 爆堆块度分布统计

Fig. 13 Fragment size distribution statistics of blast pile E at the +300 platform in east mining area



(a) 爆堆 F
(a) Blast pile F

(b) 爆堆 G
(b) Blast pile G

(c) 爆堆 H
(c) Blast pile H

(d) 爆堆 I
(d) Blast pile I

图 14　东采区不同爆堆块度分布对比

Fig. 14　Comparison of the fragment size distribution of different blast piles in the east mining area

(2)推导出爆堆最佳分层位置距离公式,建立了爆堆自适应分层模型,并通过现场试验进行了验证,爆堆自适应分层的块度空间分布测量方法的测量精度更高,更接近于爆堆整体的块度空间分布情况,对爆破效果的评价具有一定的现场应用价值。

参考文献(References)

[1]　题正义,衣东丰. 爆堆矿岩块度分布测试方法概述[J]. 辽宁工程技术大学学报,2003(S1):1-3.

[1]　ZHANG Zheng-yi, YI Dong-feng. An overview of block size distribution test methniversity of Engineering andods for blasted ore rocks[J]. Journal of Liaoning University of Engineering and Technology, 2003(S1): 1-3. (in Chinese)

[2]　ARMAGHANI D J, HAJIHASSANI M, MOHAMAD E T, et al. Blasting? induced flyrock and ground vibration prediction through an expert artificial neural network based on particle swarm optimization[J]. Arabian Journal of Geoences, 2014, 7(12): 5383-5396.

[3]　赵兴东,刘　杰,张洪训,等. 基于摄影测量的岩体结构面数字识别及采场稳定性分级[J]. 采矿与安全工程学报,2014,31(1):127-133.

[3]　ZHAO Xing-dong, LIU Jie, ZHANG Hong-xun, et al. Photogrammetry-based digital identification of rock structure surface and quarry stability classification[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31(1): 127-133. (in Chinese)

[4]　林大泽. 爆堆块度评价方法研究的进展[J]. 中国安全科学学报,2003,13(9):5.

[4]　LIN Da-ze Progress in the evaluation of blast reactor lumpiness[J]. Chinese Journal of Safety Science, 2003, 13(9): 5. (in Chinese)

[5]　MENG Ning-kang, CHEN Yong, BAI Jian-biao, et al. Numerical simulation of directional fracturing by shaped charge blasting[J]. Energy Science & Engineering, 2020, 8(5): 1824-1839.

[6]　GUO Qin-peng, WANG Yu-chen, YANG Shi-jiao, et al. A method of blasted rock image segmentation based on improved watershed algorithm[J]. Scientific Reports, 2022,

12(1):1-21.
[7] SHEHU S A,YUSUF K O,HASHIM M H M. Comparative study of WipFrag image analysis and Kuz-Ram empirical model in granite aggregate quarry and their application for blast fragmentation rating[J]. Geomechanics and Geoengineering,2022,17(1):197-205.
[8] ЗАМЫШЛЯЕВ Б В,ЕВТЕРЕВ Л С,ЛОБОРЕВ В М,ЧЕРНЕЙКИН В А. Локальный двухмодальный законраспределения обломков по размерам при взрывномразрушении горных пород [J]. ДАН СССР,1987,293(2):326-329.
[9] 柴朝政. 节理岩体爆破块度分区反演模拟和预测[D]. 武汉:长江科学院,2019.
[9] CHAI Chao-zheng. Inverse simulation and prediction of blasting blockiness zoning of nodular rock body[D]. Wuhan:Yangtze River Academy of Sciences,2019. (in Chinese)
[10] 黄梦龙,吴钦正,李金平,等. 基于 JKSimBlast 的露天矿爆破效果数值模拟研究与应用[J]. 爆破,2022(3):95-99.
[10] HUANG Meng-long,WU Qin-zheng,LI Jin-ping,et al. Research and application of numerical simulation of blasting effect in open pit mines based on JKSimBlast[J]. Blasting,2022(3):95-99. (in Chinese)
[11] 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[J]. 爆炸与冲击,2019,39(2):110-120.
[11] FENG Chun,LI Shi-hai,ZHENG Bing-xu,et al. Numerical simulation of the whole process of three-dimensional step blasting in open pit mines based on the continuous-discontinuous cell method[J]. Explosion and Shock,2019,39(2):110-120. (in Chinese)
[12] 题正义. 单图片摄影测试系统的煤岩块度分布计算方法[J]. 阜新矿业学院学报(自然科学版),1994(1):14-16.
[12] TI Zheng-yi. Calculation method of lumpiness distribution of coal rock by single picture photographic test system[J]. Journal of Fuxin Mining College(Natural Science Edition),1994(1):14-16. (in Chinese)
[13] 姬付全,梁晓腾,杨 林,等. 基于 ACE+CLAHE 算法的隧道爆破块度图像分析[J]. 人民长江,2022,53(11):125-129.
[13] JI Fu-quan,LIANG Xiao-teng,YANG Lin,et al. Image analysis of tunnel blasting blockiness based on ACE+CLAHE algorithm[J]. People's Yangtze River,2022,53(11):125-129. (in Chinese)
[14] 江松,饶彬舰,卢才武,等. 基于点渲染的多分支融合露天矿爆堆块体精细分割方法[J/OL]. 煤炭学报.[2022-12-06]. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2022.1364.
[14] JIANG Song,RAO Bin-ship,LU Cai-wu,et al. A fine segmentation method based on point rendering for multi-branch fusion of blast pile blocks in open pit mines[J/OL]. Coal Journal.[2022-12-06]. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2022.1364. (in Chinese)
[15] 刘 强,施富强,汪旭光,等. 基于三维激光点云的爆破块度统计预测方法[J]. 煤炭学报,2020,45(S2):781-790.
[15] LIU Qiang,SHI Fu-qiang,WANG Xuguang,et al. A statistical prediction method of blasting lumpiness based on 3D laser point cloud[J]. Journal of Coal,2020,45(S2):781-790. (in Chinese)
[16] 谢 博,施富强,赵建才,等. 爆破岩块自动识别与块度特征提取方法[J]. 爆破,2019,36(3):43-49.
[16] XIE Bo,SHI Fu-qiang,ZHAO Jian-cai,et al. Automatic identification of blasting rock mass and blockiness feature extraction method[J]. Blasting,2019,36(3):43-49. (in Chinese)
[17] 李祥龙,何丽华. 高台阶抛掷爆破爆堆形态预测的分排 Weibull 模型[J]. 爆炸与冲击,2013(S1):122-129.
[17] LI Xiang-long,HE Li-hua. Split-row Weibull model for the prediction of blast pile morphology in high step-throw blasting[J]. Explosion and Shock,2013(S1):122-129. (in Chinese)
[18] 葛继科,邱玉辉,吴春明,等. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用研究,2008,25(10):2911-2916.
[18] GE Ji-ke,QIU Yu-hui,WU Chun-ming,et al. A review of genetic algorithm research[J]. Computer Applications Research,2008,25(10):2911-2916. (in Chinese)
[19] 马 力,李天翔,来兴平,等. 基于 Fourier 级数的露天矿抛掷爆破效果 GA-LSSVM 预测[J]. 煤炭学报,2022,47(12):4455-4465.
[19] MA Li,LI Tian-xiang,LAI Xing-ping,et al. GA-LSSVM prediction of blast effects in open pit mines based on Fourier series[J]. Journal of Coal,2022,47(12):4455-4465. (in Chinese)
[20] 苗作华,谢 媛,任 磊,等. 基于三维可视化的爆堆形态灰色敏感度分析[J]. 金属矿山,2022(2):83-89.
[20] MIAO Zuo-hua,XIE Yuan,REN Lei,et al. Grey sensitivity analysis of blast pile morphology based on three-dimensional visualisation[J]. Metal Mining,2022(2):83-89. (in Chinese)

(下转第 50 页)

35(2):30-34. (in Chinese)
[8] 李 伟. 露天深孔台阶爆破合理炮孔超深的数值模拟与确定[D]. 包头:内蒙古科技大学,2019.
[8] LI Wei. Numerical simulation and determination of reasonable blasting hole deep in deep-hole step blasting in open pit[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology,2019. (in Chinese)
[9] 卢跃刚,陈 彬. 北京首云铁矿露天爆破矿岩质量的控制研究[J]. 金属矿山,2009(S1):438-440,443.
[9] LU Yue-gang, CHEN Bin. On control of ore rock quality of open-pit blasting in Beijing Shouyun Iron Mine[J]. Metal Mine,2009(S1):438-440,443. (in Chinese)
[10] 李建军. 露天矿爆破根底形成原因及其预防措施[J]. 中国矿业,2004(6):56-58.
[10] LI Jian-jun. Reasons for the formationr of blasting base in open-pits & its preventon measures[J]. China Mining Magazine,2004(6):56-58. (in Chinese)
[11] 王丹丹,池恩安,詹振锵,等. 自由面状态对爆破效果的影响及解决措施[J]. 金属矿山,2012(3):52-55.
[11] WANG Dan-dan, CHI En-an, ZHAN Zhen-qiang, et al. The influence of free surface morphology on blasting effect and its solving measurement[J]. Metal Mine, 2012(3):52-55. (in Chinese)
[12] 许垅清. 某露天矿台阶爆破根底控制方法试验[J]. 现代矿业,2019,35(6):118-120.
[12] XU Long-qing. Experimental study on toe rocks control of bench blasting in open-pit mine[J]. Modern Mining, 2019,35(6):118-120. (in Chinese)
[13] 高云龙. 煤矿井巷爆破参数的设计及效果分析[J]. 山西冶金,2021,44(3):121-122,180.
[13] GAO Yun-long. Design and effect analysis of blasting parameters of a coal mine well lane[J]. Shanxi Metallurgy,2021,44(3):121-122,180. (in Chinese)
[14] 冷振东,卢文波,范 勇,等. 侧向起爆条件下的爆炸能量分布及其对破岩效果的影响[J]. 爆炸与冲击,2017,37(4):661-669.
[14] LENG Zhen-dong, LU Wen-bo, FAN Yong, et al. Explosion energy distribution by side initiation and its effects on rock fragmentation[J]. Explosion and Shock Waves, 2017,37(4):661-669. (in Chinese)
[15] 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.
[15] 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. (in Chinese)
[16] 冷振东,卢文波,陈 明,等. 岩石钻孔爆破粉碎区计算模型的改进[J]. 爆炸与冲击,2015,35(1):101-107.
[16] LENG Zhen-dong, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. Improved calculation model for the size of crushed zone around blasthole[J]. Explosion and Shock Waves,2015, 35(1):101-107. (in Chinese)
[17] 刘 亮,郑炳旭,陈 明,等. 起爆方式对台阶爆破根底影响的数值模拟分析[J]. 爆破,2015,32(3):49-54,78.
[17] LIU Liang, ZHENG Bing-xu, CHEN Ming, et al. Numerical simulation analysis of influence of different detonation methods on bedrock in bench blasting[J]. Blasting, 2015,32(3):49-54,78. (in Chinese)

英文编辑:陈东方

(上接第 36 页)

[21] 孙健东,陈 需,周 宇,等. 基于无人机倾斜摄影的抛掷爆破爆堆形态测量方法[J]. 煤炭工程,2021,53(2):99-105.
[21] SUN Jian-dong, CHEN Yun, ZHOU Yu, et al. Morphological measurement of thrown blast pile based on UAV tilt photography[J]. Coal Engineering, 2021, 53(2): 99-105. (in Chinese)
[22] GHEIBIE S, AGHABABAEI H, HOSEINIE S H, et al. Modified Kuz Ram fragmentation model and its use at the Sungun Copper Mine[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2009,46(6):967-973.
[23] 龚汉松. 岩体爆破块度控制机理与工程应用研究[D]. 北京:中国地质大学:2009.
[23] GONG Han-song. Research on the control mechanism of rock blasting lumpiness and engineering application [D]. Beijing: China University of Geosciences: 2009. (in Chinese)
[24] RAJAMANI K T, RANI P, SIEBERT H, et al. Attention-augmented U-Net(AA-U-Net) for semantic segmentation [J]. Signal, image and video processing, 2023, 17(4): 981-989.
[25] 王韶辉. 露天煤矿煤岩爆破块度分布规律及爆破参数优化研究[D]. 北京:中国矿业大学,2020.
[25] WANG Shao-hui. Research on the distribution law of blasting lumpiness and optimisation of blasting parameters of coal rock in surface coal mine[D]. Beijing: China University of Mining and Technology,2020. (in Chinese)
[26] 徐振洋. 爆炸聚能作用下岩石劈裂机理及试验研究[D]. 北京:北京理工大学,2014.
[26] XU Zhen-yang. Mechanism and experimental study of rock splitting under the action of explosive energy gathering[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology,2014. (in Chinese)

英文编辑:陈东方