

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.02.014

## 基于 K-Means 聚类与熵权 TOPSIS 法的 岩石可爆性评价研究\*

叶海旺<sup>1a,1b</sup>, 雷丙响<sup>1a</sup>, 周汉红<sup>2</sup>, 余梦豪<sup>1a</sup>, 雷涛<sup>1a,1b</sup>, 王其洲<sup>1a,1b</sup>, 李宁<sup>1a,1b</sup>, Doumbouya Sekou<sup>1a</sup>

(1. 武汉理工大学 a. 资源与环境工程学院; b. 矿物资源加工与环境湖北省重点实验室, 武汉 430070;  
2. 武汉市公安局 治安管理局, 武汉 430077)

**摘要:** 露天矿山的爆破块度分布, 直接影响到后续的采装、运输和破碎工作。为了控制石墨矿山不同区域爆破块度分布, 基于 K-means 无监督聚类学习与熵权 TOPSIS 评价法建立了一种新的岩石可爆性评价模型, 选取岩石密度、动力能量耗散率、动态抗压强度、平均应变率、脆性指数作为评价指标, 通过熵权计算, 发现岩石破碎程度受脆性指数影响最大, 受平均应变率影响最小。将此模型应用于实际石墨矿山, 可爆性分为 10 个等级, 统计不同分级下的岩石平均破碎粒径, 发现可爆性分级等级越高平均粒径越大, 有明显的分级特征, 验证了模型的有效性。从爆破石墨矿石岩体类型看, 岩石可爆性从易到难排序为: 片岩、片麻岩、变粒岩、混合岩。结合石墨矿石微观观测结果分析可知: 岩性从片岩向混合岩转变, 岩石内部石墨晶质呈下降趋势, 石墨矿石可爆性等级也随之越来越高。岩石密度、能量耗散率、动态抗压强度之间呈线性正相关, 岩石可爆性与平均应变率、脆性指数存在负相关性。研究成果为矿山岩石可爆性评价提供了一条新思路, 对露天矿山爆破块度优化具有一定的理论和实践指导意义。

**关键词:** 岩体爆破; 可爆性评价; 岩石力学; K-means 算法; 熵权 TOPSIS 评价

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2024)02-0112-08

## Rock Blastability Evaluation based on K-Means Clustering and Entropy Weight TOPSIS Method

YE Hai-wang<sup>1a,1b</sup>, LEI Bing-xiang<sup>1a</sup>, ZHOU Han-hong<sup>2</sup>, YU Meng-hao<sup>1a</sup>,  
LEI Tao<sup>1a,1b</sup>, WANG Qi-zhou<sup>1a,1b</sup>, LI Ning<sup>1a,1b</sup>, Doumbouya Sekou<sup>1a</sup>

(1. a. School of Resources and Environment Engineering; b. Hubei Key Laboratory of Mineral Resources Processing and Environment, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;  
2. Security Administration of Wuhan Public Security Bureau, Wuhan 430077, China)

**Abstract:** The distribution of blasting fragmentation in open pit mines has a direct impact on subsequent excavation, transportation, and crushing operations. To effectively control the fragmentation distribution of blasted rocks in different regions of graphite mines, a new model for evaluating rock blastability was developed using the K-means unsupervised cluster learning method and entropy weight TOPSIS evaluation method. Evaluation indexes including rock

收稿日期 (Date of reception): 2023-11-27

网络首发日期 (Published online): 2024-01-17

作者简介: 叶海旺 (1971-), 男, 博士、教授, 主要从事采矿、爆破、安全等方面的教学和科研工作, (E-mail) yehaiwang@sina.com.

通讯作者: 雷涛 (1983-), 男, 博士、讲师, 主要从事采矿、安全、数字化矿山等方面的教学和科研工作, (E-mail) leitao539@163.com.

基金项目: 湖北省重点研发计划项目 (2021BCA152); 国家重点研发计划项目 (2020YFC1909602)

**About the author:** YE Hai-wang (1971-), male, Ph. D, professor, mainly engaged in mining, blasting, safety and other aspects of teaching and research work, (E-mail) yehaiwang@sina.com.

**Corresponding author:** LEI Tao (1983-), male, PH. D, lecturer, mainly engaged in mining, safety, numerical mining and other aspects of teaching and research, (E-mail) leitao539@163.com.

**Fund Programs:** Hubei Province key research and development project (No. 2021BCA152), National key research and development plan project (No. 2020YFC1909602).

density, dynamic energy dissipation rate, dynamic compressive strength, average strain rate, and brittleness index were selected. Through entropy weight calculation, it was determined that the degree of rock breakage is most influenced by the brittleness index and least influenced by the average strain rate. The model was then applied to an actual graphite mine to assess its effectiveness. The rock blastability was divided into 10 grades based on this evaluation model. The average particle size of rocks under different grades was calculated and it was observed that as blastability grade increased, so did the average particle size. This finding demonstrates clear classification characteristics and validates the efficacy of our model. From the perspective of rock mass type of graphite ore, the rock explosibility is ranked from easy to difficult: schist, gneiss, granodiorite, mixed rock. Combined with the analysis of microscopic observation results of graphite ore, it can be seen that the lithology changes from schist to mixed rock, and the graphite crystalline content in the rock decreases, and the graphite ore explosibility grade is also higher and higher. Additionally, there exists a linear positive relationship between density/energy dissipation rate/dynamic compressive strength with rock blastability while negative correlation is observed with respect to average strain rate/brittleness index.

**Key words:** rock blasting; blastability evaluation; rock mechanics; K-means algorithm; entropy weight TOPSIS evaluation

岩石可爆性是表征岩石在炸药爆破作用下发生破碎的难易程度,岩石物理力学参数一定程度上决定了岩石的可爆性。对矿山岩体进行可爆性分级是爆破参数优化设计与施工的基础,根据岩石分级调整爆破参数,防止破碎块度过大或过小,使矿山不同分级的爆破块度控制在一定区间,达到精细化爆破的效果,方便后续的生产作业,减少生产成本。

目前,岩石可爆性分级评价方法尚无统一标准,随着各类方法的发展,国内外专家对岩石可爆性分级方法做了许多研究,如多因素综合赋权评价法<sup>[1-4]</sup>、客观赋权评价法<sup>[5-8]</sup>、灰色关联分析法<sup>[9]</sup>、Fisher 判别法<sup>[10,11]</sup>、机器学习预测法等<sup>[12-14]</sup>。上述方法都具有一定的可靠性,但分级指标大都基于岩石的物理与静态力学性质,而爆破对岩石施加的是冲击荷载,因此仅仅考虑岩石物理与静力学性质是不充分的。为了解决上述问题,在总结对比不同研究方法的基础上,结合岩石物理、静力学和动力学性质,提出一种基于 K-means 聚类法与熵权 TOPSIS 法的岩石可爆性评价方法。K-means 聚类是机器学习算法中的一种无监督学习法,此方法不需要先验数据的训练,并能将不同数据样本根据彼此之间的欧氏距离大小分为多个簇,同簇内对象相似度较大,不同簇内的对象相似度较低,是目前应用广泛的一种无监督聚类方法<sup>[15,16]</sup>;熵权法是一种客观赋权法,可以减少主观偏差;TOPSIS 法是一种应用较广泛的决策模型<sup>[17]</sup>,能对多目标进行对比研究,并进行排序<sup>[18]</sup>。

基于上述三种方法构建岩石可爆性评价模型,首先通过室内岩石力学试验获取矿山不同区域的岩石静力学与动力学参数,通过 K-means 聚类法对其进行簇类分级,然后通过熵权 TOPSIS 法对不同簇类

进行评价,得到不同簇的评价标定值,根据评价结果对矿山岩石进行可爆性分级。

## 1 岩石可爆性评价指标的选择

岩石爆破是一个瞬态的能量转化过程,各种因素互相耦合造成岩体破碎,针对不同因素对爆破效果的影响,研究人员做了许多分析。Akinbinu V A 基于实际爆破数据利用多元相关性分析<sup>[19]</sup>,证明了岩石爆破的能量利用率与岩石脆性和断裂韧性密切相关。Dimitraki L 等利用岩石爆破指数联合炸药单耗成功预测了矿山不同区域爆破块度<sup>[20]</sup>。Salmi E F 等总结了 30 多种可爆性评估方法<sup>[21]</sup>,并分析了其中 20 多类爆破参数,指出影响岩体动态破碎机制的三个关键因素分别是岩体的动态强度、密度和结构(不连续性),且岩体的结构难以量化,并不适合作为定量评估指标。李晓锋等针对 3 种不同类型岩石进行 SHPB 试验<sup>[22]</sup>,发现随着应变率增加岩石破坏程度逐渐加剧。李占金等基于 SHPB 试验得出在一定范围内<sup>[23]</sup>,随着入射能增加,磁铁矿能量耗散率与岩石破碎粒径成正相关。基于已有研究,并充分考虑岩石的动力学指标,选取岩石的密度、动力能量耗散率、动态抗压强度、平均应变率、脆性指数作为评价指标。

## 2 基于 K-means 聚类与熵权 TOPSIS

### 2.1 K-means 聚类

K-means 算法是一种基于簇聚类的无监督算法,可根据不同因素指标给出较为客观合理的聚类结果,且算法的复杂度低,适合处理高维数据集。针对给定的多维数据集,通过按照样本数据值之间的欧氏距离大小,将其划分为  $K$  个簇,使存在同一个

簇类之间的样本点尽量靠近,不同簇之间的距离尽量大。假定划分簇类集为 $(C_1, C_2, \dots, C_K)$ ,则簇内欧氏距离  $D$  如下

$$D = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} \|x - u_i\|^2 \quad (1)$$

式中, $u_i$  为簇  $C_i$  内的质心,表达式如下

$$u_i = \frac{1}{|C_i|} \sum_{x \in C_i} x \quad (2)$$

通过在数据集中随机选取质心,计算数据集样本点到质心的距离,根据样本点距质心的距离将其分簇,重复  $K$  轮,使  $D$  值达到最小后停止,得到最优的聚类结果。

## 2.2 熵权 TOPSIS 法

熵权 TOPSIS 法是一种客观赋权多因素评价方法,评价流程如下:

首先对多因素数据矩阵  $X_{(m \times n)}$

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $i=1,2,\dots,n;j=1,2,\dots,m$ 。

进行数据标准化,消除不同因素之间的量纲影响,公式如下

$$Y_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - (x_{ij})_{\min}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}}, & \text{正向化指标} \\ \frac{(x_{ij})_{\max} - x_{ij}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}}, & \text{逆向化指标} \end{cases} \quad (4)$$

计算第  $j$  项因素在第  $i$  行所占百分比  $P_{ij}$  为

$$P_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^m Y_{ij}} \quad (5)$$

计算第  $j$  项因素的熵值  $E_j$

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \left( \sum_{i=1}^m P_{ij} \cdot \ln P_{ij} \right) \quad (6)$$

计算第  $j$  项指标的客观权重  $W_j$

$$W_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n G_j} \quad (7)$$

得到加权矩阵  $Z_{ij}$

$$Z_{ij} = W_j \cdot Y_{ij} = \begin{bmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{i1} & \cdots & z_{ij} \end{bmatrix} \quad (8)$$

计算正负理想距离  $D_i^+, D_i^-$

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (i_j^+ - z_{ij})^2} \quad (9)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (i_j^- - z_{ij})^2} \quad (10)$$

式中, $i_j^+, i_j^-$  为加权矩阵中同组数据的最大值、最小值。

计算综合评价值

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (11)$$

## 2.3 可爆性分级评价模型

可爆性评价实际上可以作为一个多属性决策问题,将等级分类作为优劣评价来进行考虑,将综合评价值作为分类等级的序列标签,最终通过等级标签值排序得到评价分类结果。

首先利用 K-means 算法对岩石数据进行客观聚类得到无标记的簇类,然后利用熵权计算对各个评价指标进行权重计算,得到加权矩阵,将其代入 TOPSIS 法中进行簇类的评价标定值计算,按照标定值进行可爆性的评价分类,即构建 K-means-熵权 TOPSIS 评价模型对矿岩进行可爆性分级,流程见图 1。

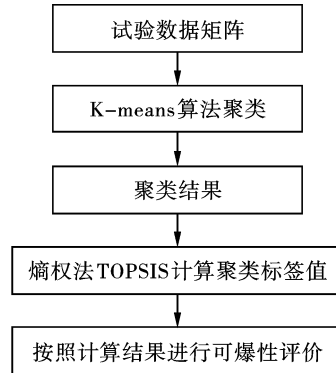


图 1 可爆性分级

Fig. 1 Blastability classification

## 3 工程应用

### 3.1 矿山岩体力学性质

矿山位于黑龙江省萝北县,属于晶质石墨露天矿,年产量较大。石墨矿石品位分布较广,致使不同区域的岩石类型区别较为明显,性质差异较大,因此进行矿石可爆性分级对爆破开采意义重大<sup>[24-26]</sup>。矿山矿石类型主要有石墨片岩、石墨变粒岩、片麻岩、混合岩等。

在矿山不同区域取不同类型岩样,按照国际岩石力学试验要求加工成  $\phi 50 \text{ mm} \times H 100 \text{ mm}$ 、 $\phi 50 \text{ mm} \times H 25 \text{ mm}$ 、 $\phi 50 \text{ mm} \times H 50 \text{ mm}$  的标准试样,利用 TAJW-2000 微机控制电液伺服岩石试验机、分离式霍普金森压杆试验系统 (SHPB) 进行静力学与动力学试验。

其中单轴静态压缩加载速率为  $0.2 \text{ kN/s}$ ,加载至  $15 \text{ kN}$  后采用变形控制方式进行加载,设置加载

速率为 0.02 mm/s,得到不同区域岩样单轴抗压强度;采用巴西圆盘劈裂法测量单轴抗拉强度,将试件放置在加载圆弧半径为 37.5 mm 的 ISRM 标准夹具中,负荷控制加载,加载速率为 0.05 kN/s,得到不同区域岩样单轴抗拉强度;采用 0.3 MPa 冲击气压开展 SHPB 试验,得到不同区域岩样动力学参数,其

中能量耗散率为耗散能与入射能比值,试样密度通过质量体积法得出,脆性指数(BI)计算如式(12)

$$BI = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad (12)$$

式中, $\sigma_c$ 、 $\sigma_t$  分别为单轴抗压强度、单轴抗拉强度。相关评价指标数据详情如表 1。

表 1 岩体力学性质

Table 1 Mechanical properties of rock mass

岩样编号	岩石类型	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	能量 耗散率	动态抗压 强度/MPa	平均 应变率/ $\text{s}^{-1}$	脆性 指数
1	品位 12.65% 石墨片岩	2.635	0.206	119.847	112.231	8.19
2	品位 12.65% 石墨片岩	2.640	0.197	120.986	113.787	8.42
3	品位 12.65% 石墨片岩	2.643	0.158	178.204	130.039	8.20
4	品位 15.50% 石墨片岩	2.674	0.178	94.788	178.204	9.56
5	品位 15.50% 石墨片岩	2.655	0.173	87.493	184.694	9.61
6	品位 15.50% 石墨片岩	2.675	0.171	90.042	191.548	9.04
7	品位 10.79% 石墨片岩	2.702	0.221	136.903	167.850	9.26
8	品位 10.79% 石墨片岩	2.706	0.217	135.419	161.163	8.57
9	品位 10.79% 石墨片岩	2.686	0.242	135.213	143.804	8.44
10	品位 10.79% 石墨片岩	2.799	0.205	121.050	193.666	8.23
11	品位 10.79% 石墨片岩	2.647	0.195	103.188	181.657	8.18
12	品位 10.79% 石墨片岩	2.702	0.220	119.984	169.099	8.06
13	品位 19.50% 石墨片岩	2.556	0.188	85.622	168.350	11.02
14	品位 15.50% 石墨片岩	2.524	0.164	74.465	197.816	9.25
15	品位 19.50% 石墨片岩	2.689	0.229	118.099	170.012	11.41
16	品位 6.03% 混合岩	2.834	0.306	186.928	133.434	5.50
17	品位 1.57% 片麻岩	2.887	0.368	216.904	135.580	5.96
18	品位 1.57% 片麻岩	2.916	0.348	210.804	131.510	6.14
19	品位 2.02% 片麻岩	3.113	0.376	231.479	115.682	6.36
20	品位 2.02% 片麻岩	3.146	0.472	198.579	119.074	6.21
21	品位 2.02% 片麻岩	3.006	0.409	219.810	119.669	6.25
22	品位 5.19% 变粒岩	2.864	0.286	156.060	95.162	5.69
23	品位 5.19% 变粒岩	2.874	0.212	159.646	101.973	5.55
24	品位 6.03% 混合岩	2.917	0.309	167.911	131.880	5.66
25	品位 6.11% 混合岩	2.998	0.373	169.974	138.816	6.16
26	品位 6.11% 混合岩	3.001	0.361	167.870	145.365	5.78
27	品位 6.11% 混合岩	2.992	0.366	141.866	158.042	6.73
28	品位 2.02% 片麻岩	3.063	0.400	203.711	99.331	6.17
29	品位 0.85% 片麻岩	3.021	0.350	201.364	79.322	6.18
30	品位 2.02% 片麻岩	3.133	0.389	205.621	101.331	6.24

### 3.2 可爆性分级评价过程

根据实地调查,石墨矿山生产中存在不同爆区块度差异较大的问题,因此非常有必要对矿山不同区域进行岩石可爆性划分。

通过 K-means 算法中的间隔统计量法则与实际的生产需要,将可爆性评价分为 10 个等级,即  $K = 10$ ,按照表 1 内所测数据,通过 K-means 算法中的式(1)和式(2)进行迭代,得到基于评价数据的 10 种

簇聚类结果,见表 2。

将得到的 10 种聚类数据通过熵权 TOPSIS 法的式(4)进行无量纲化处理。然后通过式(5)~(7)得到岩石的密度、动力能量耗散率、动态抗压强度、平均应变率、脆性指数的客观评价权重值,如表 3 所示,可见脆性指数对岩石可爆性影响最大,平均应变率影响最小。

表 2 簇聚类结果

Table 2 Cluster clustering results

簇聚类结果	岩样编号
$C_1$	1、2、3
$C_2$	4、5、6、14
$C_3$	7、8、9、10、11、12
$C_4$	13、15
$C_5$	29
$C_6$	17、18
$C_7$	19、20、21、28、30
$C_8$	22、23
$C_9$	16、24
$C_{10}$	25、26、27

表 3 评价指标权重值

Table 3 Evaluation index weight value

评价因素	密度	能量耗散率	动态抗压强度	平均应变率	脆性指数
权重系数 $W_j$	0.1602	0.2632	0.1550	0.1252	0.2964

根据得到的权重矩阵  $Z_{ij}$ , 通过公式 (8) ~ (11) 计算不同编号岩样的综合评价价值, 进一步计算不同簇聚类的平均综合评价价值作为可爆性指标, 分级结果如表 4 所示, 其中评价价值越大, 岩石可爆性越好。

表 4 可爆性评价结果

Table 4 Blastability evaluation results

簇类	$C_4$	$C_2$	$C_3$	$C_1$	$C_{10}$	$C_7$	$C_6$	$C_5$	$C_9$	$C_8$
平均评价价值	0.606	0.521	0.470	0.432	0.399	0.388	0.361	0.323	0.314	0.255
分级结果	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X

### 3.3 可爆性评价模型验证与分析

岩石可爆性是岩石在动荷载下的破碎难易程度, 因此可以通过矿石破碎块度的分布来进行研究, J A Åström 的研究证明破碎块度与能量有关系<sup>[27]</sup>, 冲击荷载下的碎片与爆破损伤下的碎片分布都服从幂律分布, 具有高度相似性, 仅在幂律指数上存在较小差距。Gábor Domokos 等通过对锤击实验和爆炸下的岩石碎片进行统计<sup>[28]</sup>, 证明无论加载条件和材料如何变化, 岩石碎片形状与粒径分布高度相似。因此基于上述研究的结论, 利用冲击荷载下的岩样平均块度来验证岩石可爆性评价模型的可行性, 平均块度是衡量岩石破碎程度的重要指标, 平均块度  $D_s$  计算公式如下

$$D_s = \frac{\sum R_i D_i}{\sum R_i} \quad (13)$$

式中:  $D_i$  为不同筛网孔径下的破碎岩石尺寸;  $R_i$  为筛网直径为  $D_i$  时, 破碎岩石质量百分比。

通过对 SHPB 试验后的岩石碎块进行不同孔径

筛网 (2.5 mm、5 mm、10 mm、16 mm、20 mm、31.5 mm、40 mm) 的筛分, 统计不同粒径破碎岩石质量百分比, 部分筛分情况如图 2。

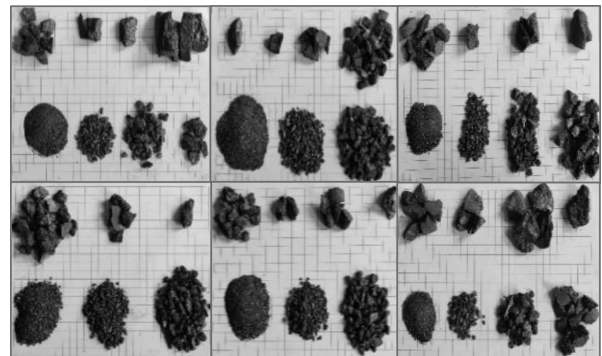


图 2 部分块度统计结果

Fig. 2 Partial block degree statistics

根据统计结果, 结合公式 (13), 得到不同分级结果下岩石破碎平均粒径, 对分级结果进行验证, 不同分级下的冲击破碎平均粒径见表 5 和图 3。

表 5 不同分级下的破碎粒径

Table 5 Crushed particle size under different classifications

分级结果	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
冲击破碎平均粒径/mm	9.19	11.82	13.06	13.17	13.34	13.71	16.76	17.79	19.42	23.23

通过上述结果, 可知基于 K-means-熵权 TOPSIS 评价模型对于石墨矿山岩体可爆性分级效果良好, 等级为 I 时, 破碎岩样冲击平均粒径为 9.19 mm, 等级为 X 时, 破碎平均粒径为 23.23 mm, 随着可爆性

等级增加, 破碎平均粒径逐渐增大, 破碎程度减弱, 有明显的分级特征, 可见此模型针对岩石可爆性评价可靠性高。

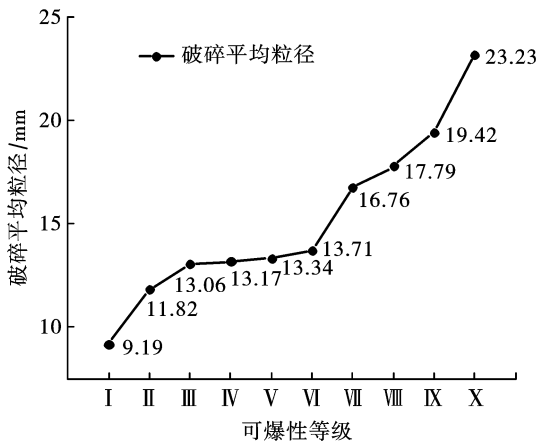


图 3 不同分级下的破碎粒径变化折线图

Fig. 3 Line plot of crushed particle size changes under different classifications

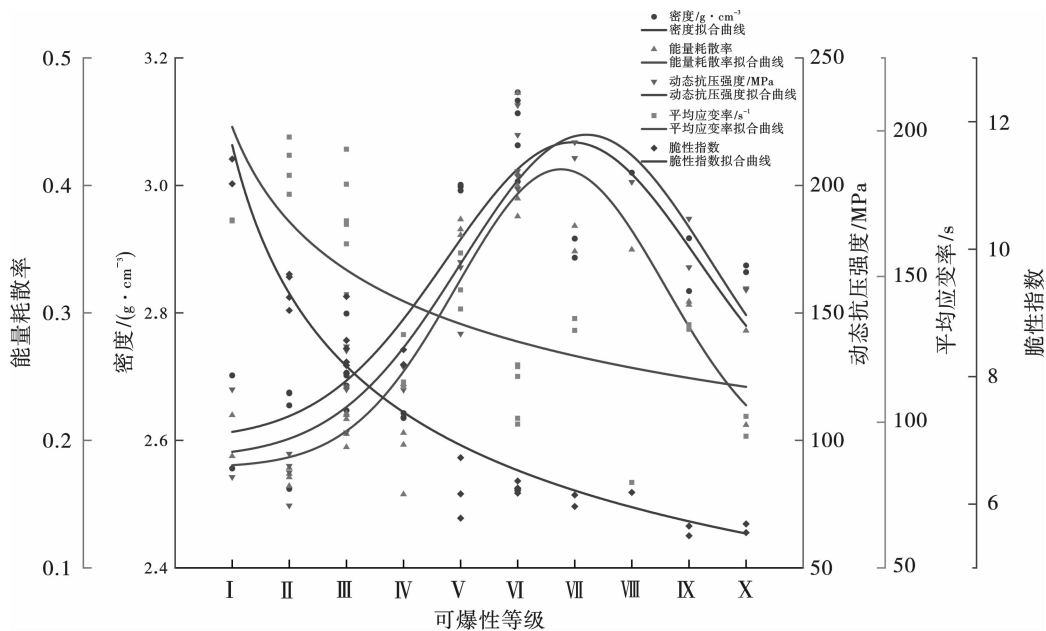


图 4 评价指标与可爆性等级的关系

Fig. 4 The relationship between evaluation index and blastability level

(1) I ~ VI 等级岩石类型主要为片岩、片麻岩。片岩中石墨晶质含量相对较高,呈片理结构,晶质分布在矿石当中,相当于胶结物质,减弱了岩石的宏观强度,在 0.3 MPa 冲击气压下的动态抗压强度主要在 80 ~ 120 MPa 之间,脆性指数主要为 8.1 ~ 11.0,在冲击荷载作用下,胶结体部位会先于其他岩石部位出现损伤,产生裂缝,应力波能量在传播过程中,在裂缝部位会发生反射,造成反射能增加,因此片岩能量耗散率主要在 20% 左右。片麻岩中石墨含量较片岩少,内部为石墨变晶结构,质地坚硬,但片理面发育,导致动态抗压强度在 200 ~ 230 MPa,而脆性指数在 6.0 ~ 6.4 之间,能量耗散率在 35% 左右。

(2) VII ~ X 等级岩石类型为变粒岩、混合岩,节

进一步得到各岩样指标与可爆性等级演变关系如图 4。岩石密度、能量耗散率、动态抗压强度之间有着明显的线性正相关性,且这种相关性跟岩石类型无关,具有普适性。此外三者随着可爆性评价等级的增加,呈现出先增加后下降的趋势,可见不同岩石类型孔隙率与矿物的含量差异会影响岩体的可爆性,所以难爆岩石的密度不一定比较为易爆岩石的密度大,还应考虑内部矿物脉石组成。但是,而岩石脆性指数随着可爆性等级的增加而减少,总体上与平均应变率呈正相关的关系,但这种关系不是线性的,也具有普适性。

结合室内微观观测结果,对岩石可爆性评价结果进行岩性与破碎能耗分析,可以得出:

理不发育,较为坚硬,动态抗压强度位于 170 ~ 220 MPa,矿物交代变质作用明显,细粒变晶结构开始显现,脆性指数在 5.5 ~ 6.7 之间,能量耗散率在 30% 左右,破碎平均粒径相比于 I ~ VI 等级有一个相对的陡增,因此不同岩石的能量耗散率与破碎粒径之间并不总是正相关。

#### 4 结论

(1) 建立了基于 K-means 无监督聚类学习与熵权 TOPSIS 评价法的岩石可爆性评价模型,选取的评价指标为岩石密度、动力能量耗散率、动态抗压强度、平均应变率、脆性指数,评价等级分成 10 等。

(2) 对比分析岩石可爆性等级和破碎平均粒

径,得出破碎平均粒径随可爆性等级增加而增加,验证了基于 K-means-熵权 TOPSIS 可爆性评价模型的可行性。

(3)将基于 K-means-熵权 TOPSIS 可爆性评价法应用实际石墨矿山,结果表明,脆性指数对可爆性影响最大,平均应变率影响最小。岩石可爆性从易到难排序为:片岩、片麻岩、变粒岩、混合岩。岩石密度、能量耗散率、动态抗压强度之间呈线性正相关,岩石可爆性与平均应变率、脆性指数存在负相关性。

### 参考文献 (References)

- [1] 周楠,王德胜,常建平,等. 基于综合赋权聚类分析的岩石爆破性分区评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2013,32(S1):2817-2824.
- [1] ZHOU Nan, WANG De-sheng, CHANG Jian-ping, et al. Evaluation of rock blasting zoning based on comprehensive weighted clustering analysis[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S1):2817-2824. (in Chinese)
- [2] 丁小华,原文杰,解 祯,等. 基于综合赋权云模型的露天矿岩体可爆性分级识别[J]. 煤炭科学技术, 2019,47(10):96-101.
- [2] DING Xiao-hua, YUAN Wen-jie, XIE Zhen, et al. Classification and identification of rock mass explosiveness in open-pit mines based on a comprehensive weighted cloud model[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10):96-101. (in Chinese)
- [3] 彭亚雄,程 瑶,吴 立,等. 基于 AHP-TOPSIS 法的矿岩可爆性评价[J]. 爆破, 2017,34(4):80-84, 105.
- [3] PENG Ya-xiong, CHENG Yao, WU Li, et al. Explosiveness evaluation of ore and rock based on AHP-TOPSIS method[J]. Blasting, 2017, 34(4):80-84, 105. (in Chinese)
- [4] 尚俊龙,胡建华,莫荣世,等. 可爆性分级的博弈论物元可拓预测模型及其应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2013,30(1):86-92.
- [4] SHANG Jun-long, HU Jian-hua, MO Rong-shi, et al. Game theory element extension prediction model for explosive grading and its application [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(1):86-92. (in Chinese)
- [5] 薛剑光,周 健,史秀志,等. 基于熵权属性识别模型的岩体可爆性分级评价[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010,41(1):251-256.
- [5] XUE Jian-guang, ZHOU Jian, SHI Xiu-zhi, et al. Classification evaluation of rock mass explosiveness based on entropy weight attribute recognition model [J]. Journal of Central South University(Natural Science Edition), 2010, 41(1):251-256. (in Chinese)
- [6] 张紫晗,胡光球,郑建礼,等. 基于脆性指数和熵权理论的岩体可爆性分级方法[J]. 工程爆破, 2021, 27(5):65-71.
- [6] ZHANG Zi-han, HU Guang-qiu, ZHENG Jian-li, et al. A classification method for rock mass explosiveness based on brittleness index and entropy weight theory[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(5):65-71. (in Chinese)
- [7] 白玉奇,李振阳,李传增,等. 基于 CRITIC-Vague 模型的岩体可爆性评价[J]. 金属矿山, 2020(12):27-32.
- [7] BAI Yu-qi, LI Zhen-yang, LI Chuan-zeng, et al. Rock mass explosiveness evaluation based on CRITIC Vague model[J]. Metal Mines, 2020(12):27-32. (in Chinese)
- [8] 赵国彦,余佩佩,礼 周. 基于未确知测度理论的岩体可爆性分级[J]. 爆破, 2013,30(4):20-24, 31.
- [8] ZHAO Guo-yan, YU Pei-pei, LI Zhou. Classification of rock mass explosiveness based on the theory of uncertain measures[J]. Blasting, 2013, 30(4):20-24, 31. (in Chinese)
- [9] 马 康,张 群,盛建龙,等. 基于 GCRN 的矿岩可爆性分级模型及其应用[J]. 武汉科技大学学报, 2016, 39(3):200-203.
- [9] MA Kang, ZHANG Qun, SHENG Jian-long, et al. GCRN based classification model for ore rock explosiveness and its application [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2016, 39(3):200-203. (in Chinese)
- [10] 杨 凯,时 磊,黄 滚,等. 费歇尔判别法在岩体可爆性分级中的应用[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(8):84-87.
- [10] YANG Kai, SHI Lei, HUANG Gun, et al. Application of Fischer discriminant method in rock mass explosiveness classification [J]. Mining Research and Development, 2018, 38(8):84-87. (in Chinese)
- [11] 武仁杰,李海波,于 崇,等. 基于统计分级判别的爆破块度预测模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1):141-147.
- [11] WU Ren-jie, LI Hai-bo, YU Chong, et al. Prediction model of blasting size based on statistical classification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1):141-147. (in Chinese)
- [12] 张钦礼,刘伟军,杨 伟,等. 基于 PCA 和改进 BP 组合预测模型的矿岩可爆性研究[J]. 爆破, 2016, 33(1):19-25, 83.
- [12] ZHANG Qin-li, LIU Wei-jun, YANG Wei, et al. Research on blastability of ore and rock based on PCA and improved BP combination prediction model [J]. Blasting, 2016, 33(1):19-25, 83. (in Chinese)
- [13] 冯夏庭. 岩石可爆性神经网络研究[J]. 爆炸与冲击, 1994(4):298-306.

- [13] FENG Xia-ting. Research on neural networks for rock explosiveness[J]. *Explosion and Impact*, 1994(4):298-306. (in Chinese)
- [14] 李夕兵,朱玮,刘伟军,等. 基于主成分分析法与RBF神经网络的岩体可爆性研究[J]. *黄金科学技术*, 2015,23(6):58-63.
- [14] LI Xi-bing, ZHU Wei, LIU Wei-jun, et al. Research on rock mass explosiveness based on principal component analysis and RBF neural network[J]. *Gold Science and Technology*, 2015,23(6):58-63. (in Chinese)
- [15] 李建斌,郑赢豪,荆留杰,等. 基于岩体聚类分级的TBM掘进参数预测方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020,39(S2):3326-3337.
- [15] LI Jian-bin, ZHENG Ying-hao, JING Liu-jie, et al. Prediction method of TBM excavation parameters based on rock mass clustering and grading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020,39(S2):3326-3337. (in Chinese)
- [16] 史涵虚,周传波,蒋楠,等. 魏家崮煤矿区深孔台阶剥离爆破施工岩体可爆性分析[J]. *爆破*, 2023,40(1):37-44.
- [16] SHI Han-xu, ZHOU Chuan-bo, JIANG Nan, et al. Analysis of rock mass explosiveness during deep hole step stripping blasting construction in Weijiamao coal mine area[J]. *Explosives*, 2023,40(1):37-44. (in Chinese)
- [17] 李绍红,王少阳,吴礼舟. 基于MCS-TOPSIS耦合模型的岩体质量分类研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017,36(5):1053-1062.
- [17] LI Shao-hong, WANG Shao-yang, WU Li-zhou. Research on rock mass quality classification based on MCS-TOPSIS coupling model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017,36(5):1053-1062. (in Chinese)
- [18] 龚剑,胡乃联,崔翔,等. 基于AHP-TOPSIS评判模型的岩爆倾向性预测[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014,33(7):1442-1448.
- [18] GONG Jian, HU Nai-lian, CUI Xiang, et al. Rockburst propensity prediction based on AHP-TOPSIS evaluation model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014,33(7):1442-1448. (in Chinese)
- [19] AKINBINU V A. Multivariate analysis of fracture toughness, brittleness and blasting geometric ratios for the prediction of fragmentation output[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 2017,93:324-329.
- [20] DIMITRAKI L, CHRISTARAS M, PANTAZIS G et al. Predicting the average size of blasted rocks in aggregate quarries using artificial neural networks[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019,78:2717-2729.
- [21] SALMI E F, SELLERS E J. A review of the methods to incorporate the geological and geotechnical characteristics of rock masses in blastability assessments for selective blast design[J]. *Engineering Geology*, 2021,281:105970.
- [22] 李晓锋,李海波,刘凯,等. 冲击荷载作用下岩石动态力学特性及破裂特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017,36(10):2393-2405.
- [22] LI Xiao-feng, LI Hai-bo, LIU Kai, et al. Study on the dynamic mechanical properties and fracture characteristics of rocks under impact loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017,36(10):2393-2405. (in Chinese)
- [23] 李占金,郝家旺,甘德清,等. 冲击荷载下磁铁矿石破碎的能量耗散特性[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020,52(4):150-159.
- [23] LI Zhan-jin, HAO Jia-wang, GAN De-qing, et al. Energy dissipation characteristics of magnetite crushing under impact load[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020,52(4):150-159. (in Chinese)
- [24] 叶海旺,严立德,雷涛,等. 冲击荷载下石墨矿石破碎能耗特征[J]. *爆破*, 2023,40(1):30-36.
- [24] YE Hai-wang, YAN Li-de, LEI Tao, et al. Energy consumption characteristics of graphite ore crushing under impact load[J]. *Blasting*, 2023,40(1):30-36. (in Chinese)
- [25] 叶海旺,李兴旺,雷涛,等. 石墨矿石品位对其动力学特性的影响研究[J]. *爆破*, 2022,39(4):25-31,52.
- [25] YE Hai-wang, LI Xing-wang, LEI Tao, et al. Research on the influence of graphite ore grade on its dynamic characteristics[J]. *Blasting*, 2022,39(4):25-31,52. (in Chinese)
- [26] 李兴旺,叶海旺,雷涛,等. 不同固定碳含量石墨矿石单轴压缩力学行为及损伤本构关系研究[J]. *金属矿山*, 2023(2):22-29.
- [26] LI Xing-wang, YE Hai-wang, LEI Tao, et al. Study on uniaxial compressive mechanical behavior and damage constitutive relationship of graphite ore with different fixed carbon contents[J]. *Metal Mines*, 2023(2):22-29. (in Chinese)
- [27] J A Åström. Statistical models of brittle fragmentation[J]. *Advances in physics*, 2006,55(3-4):247-278.
- [28] GáBOR Domokos, FERENC Kun, ANDRÁS úrpád Sipos, et al. Universality of fragment shapes[J]. *Scientific Reports*, 2015,5(1):9147.