

# 基于混沌粒子群改进支持向量机对露天矿边坡稳定性的分类预测<sup>①</sup>

赵国彦, 邹景煜, 王 猛

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 为了简便有效地评估边坡稳定性状态, 针对目前传统机器学习的算法选择与超参数优化等难题, 提出了基于混沌粒子群优化算法的4种机器学习模型, 并对其预测性能进行了对比。建立了包含221组露天矿边坡稳定性案例的数据库, 其中80%的数据用于训练, 20%的数据用于模型测试。4种模型预测结果及工程实例验证结果表明, 基于混沌粒子群改进支持向量机模型的预测效果上总体优于其他3种机器学习模型, 预测准确率88%, 能够有效预测边坡稳定性, 可为露天矿边坡安全提供可靠的预测结果。

**关键词:** 边坡稳定性; 混沌粒子群优化; 支持向量机; 预测

中图分类号: TD854

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.02.003

文章编号: 0253-6099(2024)02-0008-05

## Classification and Prediction of Slope Stability of Open-Pit Mine with Support Vector Machine Based on Chaotic Particle Swarm Optimization

ZHAO Guoyan, ZOU Jingyu, WANG Meng

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

**Abstract:** In order to simply and effectively evaluate slope stability, four machine learning models based on chaotic particle swarm optimization (CPSO) were proposed to solve the existing problems of algorithm selection and hyper-parameter optimization in traditional machine learning model, and their prediction performance were comprehensively compared among each other. A database consisting of 221 open-pit slope stability cases was established, in which 80% of the data were used for training and 20% for model testing. Based on the comparison between the prediction results of four models and the verification results of engineering practices, it is found that the support vector machine (SVM) based on CPSO is superior than other three machine learning models in terms of prediction of slope stability, presenting an accuracy up to 88%. Thus, it can provide a reliable prediction for the safety of slope in open-pit mine.

**Key words:** slope stability; chaotic particle swarm optimization (CPSO); support vector machine (SVM); prediction

露天边坡稳定性深受国内外露天矿山关注。露天采场边坡一旦失稳, 不但会引发生产安全事故, 还会对开采进度以及生产效率造成严重影响。目前针对具体边坡的稳定性分析<sup>[1-6]</sup>较多, 且多以 Taylor 在 1973 年提出的边坡稳定性图进行分析判断<sup>[6]</sup>; 通过算法整合边坡参数并对其做出稳定性预测的研究较少。本文以粒子群算法并结合交叉验证改进支持向量机(SVM)、决策树(DT)、K 最邻近(KNN)、神经网络(BPNN)等

机器学习模型, 再通过收集各个露天矿山的各类边坡参数及稳定状况, 对边坡稳定性进行二分类预测并比较彼此间的性能差异。

## 1 算法理论基础

### 1.1 混沌粒子群优化算法

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是美国人工智能专家 Ebberha 等人提出的一种仿生生物

① 收稿日期: 2023-10-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0604606)

作者简介: 赵国彦(1963—), 男, 湖南沅江人, 二级教授, 主要从事采矿、岩石力学、矿山通风与环保、安全技术等方面的教学与研究工作。  
E-mail: gyzhao@csu.edu.cn

通信作者: 邹景煜(1999—), 男, 江西宜春人, 硕士研究生, 主要从事机器学习、边坡稳定性分析等方面的研究。E-mail: 1848308573@qq.com

算法<sup>[7]</sup>。粒子群算法本质上是一种种群智能算法,是从一个随机的初始值不断地通过算法搜索找到问题的最优解。其特点是通过跟踪当前局部的最优值,一步一步向全局的最优解靠近<sup>[8]</sup>。

混沌映射所具有的遍历性以及随机性都能实现 PSO 在局部上更为深入的寻优搜索,进而加强了 PSO 的局部寻优能力<sup>[9]</sup>。为克服既往初始化中的盲目性,选用 Sinusoidal 混沌映射执行种群的初始化,用  $x_i^j$  表示种群  $U$  中第  $j$  个个体的第  $i$  个纬度值,定义为:

$$x_i^j = lb + m_i^j(ub - lb) \quad (1)$$

式中  $m_i^j$  利用 Sinusoidal 混沌映射策略生成,可以表达为:

$$m_i^j = a(m_{i-1}^j)^2 \sin(\pi m_{i-1}^j) \quad (2)$$

## 1.2 支持向量机

支持向量机(SVM)的基本模型是在特征向量空间上的一种线性分类器,学习方式为间隔最大化,若引入核技巧可使其进行非线性分类。

本文使用的 SVM 采用高斯核函数:

$$k(x_i, x_j) = e^{-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}}, \sigma > 0 \quad (3)$$

由于本文描述的预测模型为二分类,采用非线性分类的高斯核函数对数据进行二分类处理。实际露天矿给出的各项参数并不为线性可分,可通过高斯核函数建立映射。

## 1.3 决策树

决策树(DT)是一种通过案例学习为模型基础的归纳推理算法。其优势在于可以从随机性较强、次序与规则不明显的的数据中建立决策树。决策树从上至下的推演归纳将搜索空间分隔为若干互不相交的子集,形成分类器<sup>[10]</sup>。得到的决策树模型主要面向数据的分类、预测等需求。本文露天边坡失稳与边坡属性之间的关系不明确,数据的随机性较强,能充分发挥决策树分类模型的特点。

## 1.4 K 最邻近

K 最邻近(KNN)分类算法主要用于分类与回归预测。其原理是通过一定的距离度量在给定的训练集上寻找一个合适的  $k$  值,再根据大多数分为一致的类来进行分类<sup>[11]</sup>。简单的分类学习方式使其成为非常简单有效的惰性机器学习方法。应对本文复杂的边坡二分类预测,KNN 具有计算速度快、效率高的优点。本文采用的 KNN 距离度量为欧里几得距离:

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (4)$$

式(4)表达的距离度量为  $n$  维空间中的两点距离。

## 1.5 BP 神经网络

BP 神经网络(BPNN)是一种模拟生物神经网络

结构的机器学习模型。BPNN 通过不断学习调整多层数、多节点之间的映射关系来不断逼近目标<sup>[12]</sup>。本文使用的 BPNN 采用单隐含层、Relu 激活函数:

$$f(x) = \max(0, x) \quad (5)$$

Relu 激活函数较为简单,减少了过拟合问题的发生并节省了大量的计算时间,适用于本文露天边坡稳定性分类问题。

## 2 边坡稳定性预测的模型构建

### 2.1 数据集建立

露天边坡的坡高( $H$ )、坡脚( $\beta$ )以及土壤容重( $\gamma$ )是边坡的基本几何参数,这些参数往往是边坡是否失稳的重要参考。目前应用广泛的 Mohr-Coulomb 准则也揭示了内摩擦角( $\varphi$ )与黏聚力( $c$ )与边坡稳定性之间的关系。实际工程应用实践中,边坡的孔隙水压比( $ru$ )也是边坡失稳的主要触发条件之一<sup>[13]</sup>。本文通过对以上 6 个参数并结合实际边坡案例对边坡失稳进行预测分析,将边坡状态分为“稳定”与“破坏”,是一个典型的二分类研究。

本文所使用的边坡数据来源于国内外各个露天矿山的边坡案例,共计 221 组,边坡稳定与失稳案例分别为 115 组与 106 组。部分数据见表 1。

表 1 边坡稳定性预测数据集(部分数据)

$H/m$	$\beta/(\circ)$	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\circ)$	$ru$	边坡状态
10.67	22	20.41	24.90	13	0.35	稳定
12.90	22	19.63	11.97	20	0.41	破坏
12.80	28	21.82	8.62	32	0.49	破坏
45.72	16	20.41	33.52	11	0.20	破坏
10.67	25	18.84	15.32	30	0.38	稳定
7.62	20	18.84	0	20	0.45	破坏
61.00	20	21.43	0	20	0.50	破坏
21.00	35	19.06	11.71	28	0.11	破坏
30.50	20	18.84	14.36	25	0.45	破坏
76.81	31	21.51	6.94	30	0.38	破坏
88.00	30	14.00	11.97	26	0.45	破坏

## 2.2 模型构建

### 2.2.1 交叉验证

交叉验证用于评估模型的预测性能,尤其是训练好的模型在新引入数据集上的预测表现,可以减少一定程度上的过拟合。实际模型训练中会出现“初始条件敏感”的问题,因此需要从原始数据集中分离出部分数据对训练后的模型进行测试,从而相对客观地判断模型对训练集之外数据的贴合程度<sup>[14]</sup>。本文采用 4:1 的划分方法划分原始数据集,即 80% 的数据用于

模型训练、20%的数据用于模型测试。

### 2.2.2 误差指标

宏平均的计算方式为每个模型  $P$ 、 $R$  的算术平均值,微平均则是对现有数据集的每个示例不分类地进行统计建立全局混淆矩阵,然后计算与之相对应的指标。用于评判模型的其他参数还有:查准率、灵敏性、特异性、准确率以及 F1 分数。总共通过 7 个维度对模型的误差与准确进行分析评价。

混沌粒子群算法使用其局部寻优算法的优良搜索能力改进 SVM 支持向量机、DT 决策树、K 最邻近、BP 神经网络的结果准确性,加强模型的快速收敛;同时通过交叉验证的取值与赋值减少过拟合的发生,加强模型的准确性。混沌粒子群算法优化后的四类模型通过学习坡高 ( $H$ )、坡脚 ( $\beta$ )、土壤容重 ( $\gamma$ )、内摩擦角 ( $\varphi$ )、黏聚力 ( $c$ ) 与孔隙水压比 ( $ru$ ) 这六大边坡稳定性影响因素与边坡是否失稳的二分类问题之间的关系,通过训练集的训练建立影响因素与稳定状态的映射关系,来建立多因素耦合下的边坡失稳二分类预测模型。模型框架如图 1 所示。

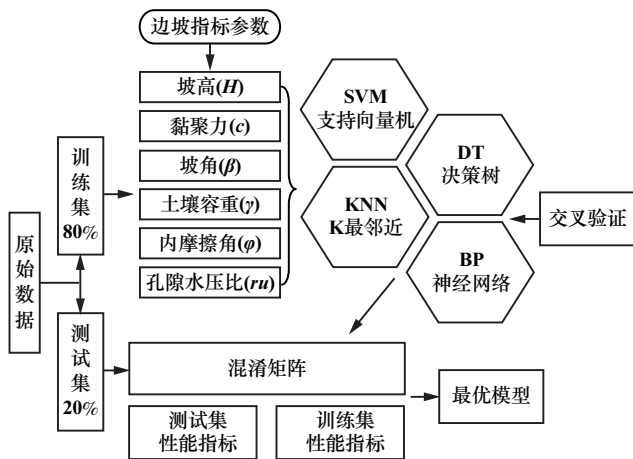


图1 混沌粒子群优化机器学习混合模型框架

### 2.3 模型结果

最终的预测结果与真实情况之间的关联通过混淆矩阵的形式展现,由于判断边坡是否失稳采用的是二分类,学习模型最终判断样本的结果分为 0 和 1。并通过采集的样本与模型预测结果构建  $2 \times 2$  的混淆矩阵,其中 4 个一级指标分别为真阳性 (TP)、假阴性 (FN)、假阳性 (FP)、真阴性 (TN)。其中 TP 与 TN 的数值越大,表示预测模型越准确,即真稳定与真破坏的预测结果数出现越多,预测模型越精准,反映在混淆矩阵中即为二、四象限数值越大,预测模型准确度越高。各类模型交叉验证混淆矩阵和测试集混淆矩阵分别见图 2 和图 3。

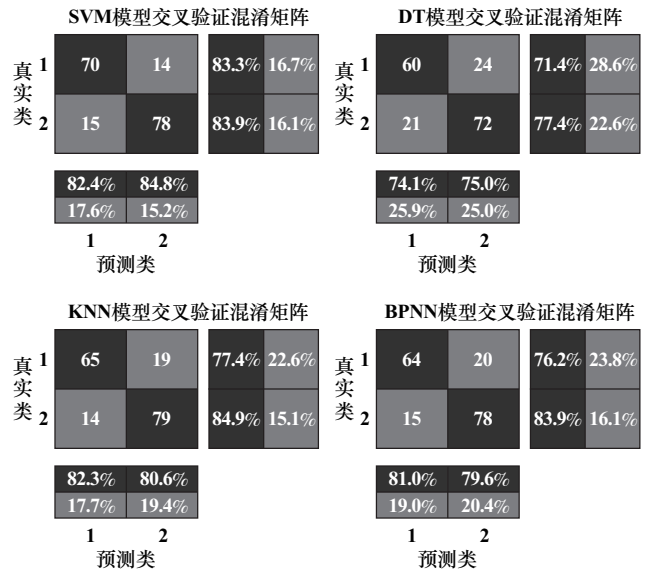


图2 各类模型交叉验证混淆矩阵

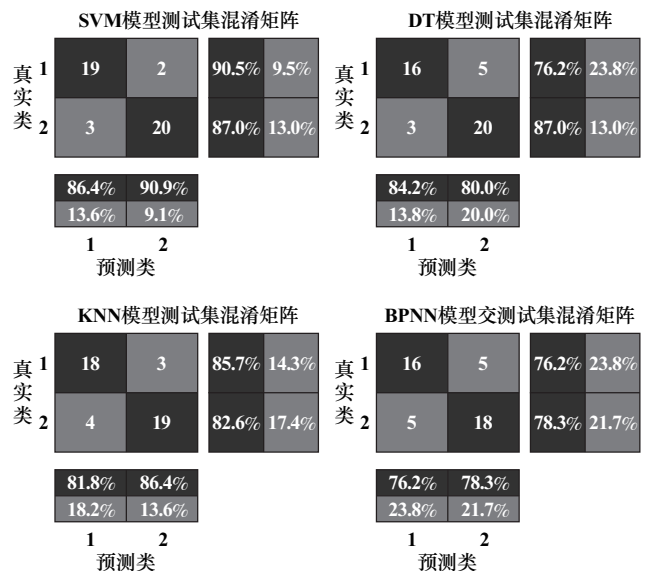


图3 各类模型测试集混淆矩阵

在模型训练中,随着迭代次数不断增加,目标函数值不断收敛。4类预测模型 50 次迭代进化曲线如图 4 所示。从图 4 可以发现,模型的收敛速度从大到小排序为:DT>KNN>BPNN>SVM,对应的目标函数值区间跨度从大到小排序为:SVM>BPNN>KNN>DT。

在本研究中,通过绘制受试者工作特征曲线 (ROC) 来评估混沌粒子群优化后的各机器模型对边坡稳定性数据的预测能力。ROC 曲线能较准确地反映 4 个模型之间的收敛速度与预测准确度。

通过预测结果对样本进行排序,之后将样本视为稳定状态进行逐一预测,其中以假阳率为横坐标、真阳率为纵坐标绘图,分别得到模型交叉验证与模型测试集的 ROC 曲线,如图 5 和图 6 所示。结合图 5、图 6 和

图 4,可见 SVM 支持向量机收敛速度优异、学习性能好,模型预测准确率高。

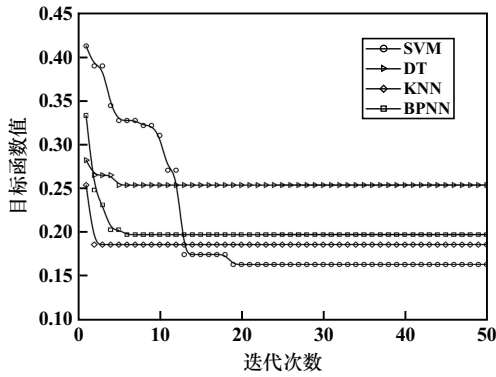


图 4 不同预测模型的进化曲线对比

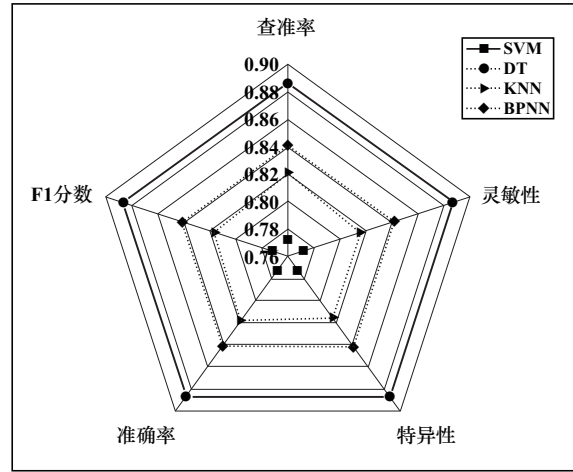


图 7 预测模型性能评估图

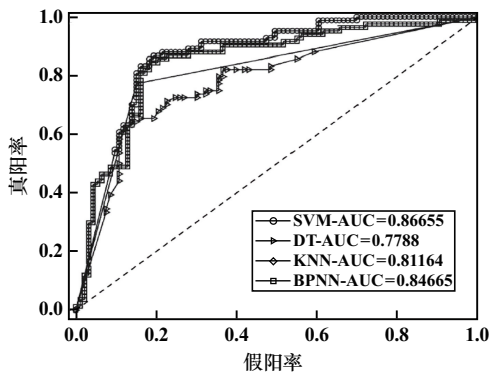


图 5 模型交叉验证 ROC 曲线对比

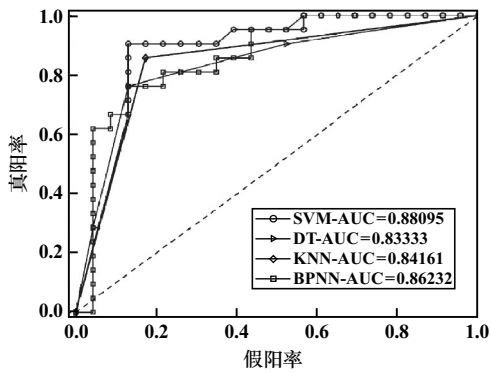


图 6 模型测试集 ROC 曲线对比

与准确率如图 8 所示。由图 8 可知,传统 SVM 分类模型预测准确率只有 83%,低于拥有 88%准确率的混沌粒子群算法优化的 SVM 分类模型。

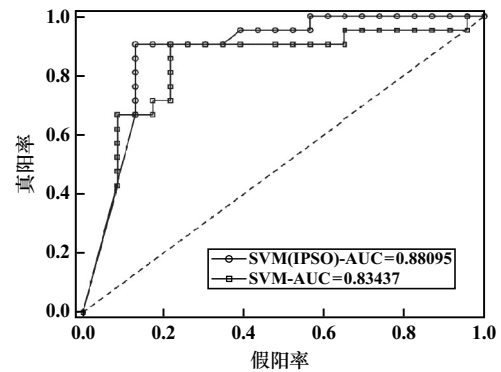


图 8 优化后 SVM 模型与传统 SVM 模型 ROC 曲线对比

将混沌粒子群优化的 4 种预测模型的测试集结果进行宏观均值采样。用查准率、灵敏度、特异性、准确率以及 F1 分数 5 个指标进行模型评估,结果见图 7。从数据对比上来看,SVM 模型评估值均能达到 0.88 以上,显著优于其他 3 种预测模型。

### 2.4 讨论与分析

将同一数据集导入传统 SVM 模型中,训练集与测试集的数据量比例控制为 4:1,种群数量与迭代次数不变,传统 SVM 模型与优化后 SVM 模型分类预测结果

## 3 工程应用案例

为了验证混沌粒子群优化后分类预测模型的准确性,对外部引入的 10 组实例数据进行预测,模型预测分类结果与原数据的对比如表 2 所示。

表 2 实例验证结果

$\gamma / (kN \cdot m^{-3})$	$c / kPa$	$\varphi / (^\circ)$	$\beta / (^\circ)$	$H / m$	$ru$	边坡状态	预测结果
22.4	10	35	45	10	0.40	破坏	破坏
20	20	36	45	50	0.50	破坏	破坏
20	0	36	45	50	0.25	破坏	破坏
20	0	36	45	50	0.50	破坏	破坏
22	0	40	33	8	0.35	破坏	稳定
24	0	40	33	8	0.30	破坏	稳定
20	0	24.5	20	8	0.35	稳定	稳定
18	5	30	20	8	0.30	稳定	稳定
27	40	35	43	420	0.25	破坏	破坏
27	50	40	42	407	0.25	稳定	稳定

从表2可见,预测模型准确度为80%,该模型对边坡稳定性的分类预测有较高的实际应用价值,能较为准确地通过边坡地质条件等因素综合判断边坡稳定状态。

## 4 结 论

通过混沌粒子群优化了SVM支持向量机、DT决策树、KNN邻近、BP神经网络4种分类算法模型,并通过4种算法模型预测了露天矿边坡的稳定状态,探究了6项边坡参数与边坡稳定性之间的非线性关联,并结合实例进行了验证,证实混沌粒子群优化机器学习模型预测准确度高,有实际工程应用价值。

### 参考文献:

- [1] ZAN W B, ZHANG W J, WANG N, et al. Stability analysis of complex terrain slope based on multi-source point cloud fusion[J]. *Journal of Mountain Science*, 2022,19:2703-2714.
- [2] ZHOU J, LI E, YANG S, et al. Slope stability prediction for circular mode failure using gradient boosting machine approach based on an updated database of case histories[J]. *Safety Science*, 2019, 118: 505-518.
- [3] 李佳伦,张志贵,李 斌,等. 露天矿采场边坡稳定性概率分析[J]. *化工矿物与加工*, 2022,51(9):15-18.
- [4] 赵 亮. 多岩性分布的露天采场边坡稳定性分析[J]. *西部探矿工程*, 2022,34(9):10-12.
- [5] Chakraborty A, Goswami D. Three-dimensional (3D) slope stability

analysis using stability charts[J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2018,15(5):642-649.

- [6] Hour M, Hataf N, Azar E. A mathematical model based on artificial neural networks to predict the stability of rock slopes using the generalized hoek-brown failure criterion[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2019,38(1):587-604.
- [7] 肖支才,龙玉峰,郭家豪,等. 基于非线性变因子的粒子群算法[J]. *电子测量技术*, 2020,43(5):67-70.
- [8] 刘 卓,韩凯越,聂 彬,等. 基于混沌粒子群优化算法的NOMA功率分配研究[J]. *电子测量技术*, 2022,45(16):159-163.
- [9] 周立栋. 基于改进混沌粒子群算法的多源微网优化运行模型[D]. 北京:华北电力大学, 2018.
- [10] 黄 华. 基于DT和SVM算法的科技文献分类研究[C]//中国武汉决策信息研究开发中心,决策与信息杂志社,北京大学经济管理学院.“决策论坛——区域发展与公共政策研究学术研讨会”论文集(上), 2016:125.
- [11] 毋雪雁,王水花,张煜东. K最近邻算法理论与应用综述[J]. *计算机工程与应用*, 2017,53(21):1-7.
- [12] 陈奂良,李常锁,高 帅,等. 基于遗传算法优化BP神经网络的岩溶泉水位预测研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2022,33(4): 50-57.
- [13] Kim J R, Salgado, YU H S. Limit analysis of soil slopes subjected to pore-water pressures[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999,125(1):49-58.
- [14] 范永东. 模型选择中的交叉验证方法综述[D]. 太原:山西大学, 2013.

引用本文: 赵国彦,邹景煜,王 猛. 基于混沌粒子群改进支持向量机对露天矿边坡稳定性的分类预测[J]. *矿冶工程*, 2024,44(2):8-12.

(上接第7页)

序优化及改变断面形状等措施。根据鄂西磷矿岩爆发生特点,开展适合其自身岩爆特点的支护措施,降低岩爆对从业人员的安全风险。并通过现场试验验证了支护措施的科学性和可行性。

### 参考文献:

- [1] 李彤彤,王 玺,刘焕新,等. 基于组合赋权的T-FME岩爆倾向性预测模型研究及应用[J]. *黄金科学技术*, 2020,28(4):565-574.
- [2] 彭振斌,方建勤,颜荣贵,等. 硬岩矿山深井岩爆预测方法的研究[J]. *矿冶工程*, 2003,23(5):8-11.
- [3] 窦林名,何学秋. 冲击矿压防治理论与技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2001.
- [4] 熊祖强,贺怀建. 深井矿山硬岩巷道岩爆治理方案研究[J]. *化工矿物与加工*, 2006,35(9):25-27.
- [5] 刘美山,吴新霞,丁秀丽,等. 弱能量爆破技术在地下隧洞工程岩爆治理中的应用试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013,32(增刊2): 3675-3680.
- [6] 吝曼卿,柯晓苏,张电吉,等. 基于“协同开采”理念的深部磷矿岩爆防控研究[J]. *金属矿山*, 2020,55(5):158-163.
- [7] 王维庆. 苏家坡磷矿岩爆倾向性评价及岩爆灾害处置方法研究[D].

武汉:武汉工程大学, 2022.

- [8] 贾月卿. 改建铁路成昆线老鼻山隧道岩爆倾向性预测分析与防治技术研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2018.
- [9] 樊玉峰,肖晓春,丁 鑫,等. 岩煤结构静动组合加载试验系统研制及应用[J]. *中国矿业大学学报*, 2023,52(3):502-512.
- [10] 张清怡. 地下磷矿岩爆灾害风险管控体系研究[D]. 武汉:武汉工程大学, 2022.
- [11] Keneti A, Sainsbury B A. Review of published rock burst events and their contributing factors[J]. *Engineering Geology*, 2018(1):361-373.
- [12] 刘 栋,李夕兵,刘志祥,等. 群采空区下浅部岩爆诱发机制研究[J]. *矿冶工程*, 2016,36(2):23-27.
- [13] 中华人民共和国国家标准编写组. 工程岩体分级标准:GB/T 50218—2014[S]. 北京:中国计划出版社, 2015.
- [14] 周亚博,柏 杨,赵学平,等. 阿尔哈达铅锌矿深部地应力分布特征及其应用[J]. *矿业研究与开发*, 2022,42(6):85-89.
- [15] 裴 峰. 纱岭金矿深部地层岩体力学性能与深竖井围岩稳定性分析及控制[D]. 北京:北京科技大学, 2020.
- [16] 吝曼卿,孙郡阳,张继豹,等. 地下磷矿山岩爆研究进展及防控措施[J]. *化工矿物与加工*, 2023,52(4):16-21.

引用本文: 柴修伟,盛益明,张 龙. 鄂西磷矿岩爆现状及治理措施研究[J]. *矿冶工程*, 2024,44(2):5-7.