

正交试验-M-P法-多元线性回归高边坡稳定性预测模型

方健¹,方庆红^{2*},李京³

(1. 广东宏通绿色矿业有限公司; 2. 长沙矿山研究院有限责任公司;
3. 武汉科技大学资源与环境工程学院)

摘要:为快速准确计算露天矿山边坡稳定性系数及预测边坡安全,利用M-P法计算正交试验设计方案的稳定性系数,采用多元线性回归,开展高边坡稳定性预测模型研究,提出高边坡稳定性简化预测模型,并验证模型预测效果;揭示边坡稳定性简化计算方法原理,探讨边坡稳定性影响因素与稳定性系数之间的定量关系;揭露因素指标对边坡稳定性影响程度,修正预测模型,并采用强度折减法对修正后的预测模型进行应用验证。研究表明:修正后预测模型预测结果相对误差平均值为2.48%,预测精度和拟合度均较高;7种因素指标对边坡稳定性影响程度为 $\varphi > C > \alpha > \rho > H > E > \mu$,其中,弹性模量和泊松比几乎无影响;应用强度折减法验证,得出修正后的预测模型科学合理。该模型可为高边坡安全预警和防控提供一定的参考。

关键词:高边坡稳定性;正交试验;M-P法;多元线性回归;强度折减法;预测模型

中图分类号:TD854.6

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)02-0049-06

doi:10.11792/hj20250209

引言

边坡稳定性研究是岩土及边坡工程领域亘古不变的研究课题。边坡稳定性不仅决定了露天采场工程设计、境界优化等,也影响企业经济效益,因此快速准确地计算露天矿山边坡稳定性系数,预测边坡安全性,为采场境界优化与安全生产提供切实可行的数据至关重要。

针对露天矿山边坡稳定性,诸多学者开展了相关研究并取得了丰硕的研究成果。王瑞鹏等^[1]构建了西露天矿边坡失稳的事故树模型;方庆红等^[2-3]构建了露天矿高边坡台阶宽度与台阶坡面角协同优化系统及SR-BP神经网络融合的坡态控制参数优化模型;王浩等^[4]建立了边坡稳定性评价指标体系,提出了基于遗传算法和投影寻踪(GA-PP)的评价方法;谢琳等^[5]通过大型露天矿山边坡岩体工程稳定性分级分析方法,找出了控制边坡稳定的关键性结构面及其组合;尤耿明等^[6]系统分析了软弱夹层赋存状态多因素影响下边坡的位移变形演化规律及破坏模式,发现软弱夹层的蠕变特性降低了边坡的长期稳定性。ZHANG等^[7]开发了一种改进的SRM模型,采用变模量弹塑性模型分析边坡的稳定性和变形;改进后的方法不仅可以模拟边坡破坏的渐进过程,而且可以获得

边坡的真实变形。

综上所述,学者运用不同方法对边坡稳定性进行了模拟分析或评价,然而,边坡稳定性受多级因素指标控制,采用数值模拟方法虽相对精确,但工作量较大,计算时间较长;评价方法分析所需样本数据多,调查较为繁琐。在前人研究的基础上,本文选取采深、最终边坡角、密度、内聚力、内摩擦角、弹性模量和泊松比7种边坡影响因素指标,利用正交试验,设计18种不同因素组合方案,采用极限平衡法中的M-P法分别计算各组合方案的边坡稳定性系数,对其进行多元线性回归分析,从而提出边坡稳定性简化预测模型,并验证模型预测效果;同时,结合边坡稳定性影响因素与稳定性系数之间的定量关系及因素指标对边坡稳定性影响程度,修正预测模型,之后再采用强度折减法对修正后的预测模型进行验证。研究成果表明,该模型可快速、准确且简单地预测边坡稳定性。

1 边坡稳定性预测模型原理

1.1 正交试验设计

正交试验以数理统计为基础,本文结合极差分析法对正交试验结果进行评价分析,选取的水平和因素具有“均匀分散、整齐可比”的特点,不需要大量样本数据,是一种快速高效的试验设计方法^[8-9]。

收稿日期:2024-08-05;修回日期:2024-10-08

基金项目:国家自然科学基金项目(42307252)

作者简介:方健(1984—),男,工程师,从事矿山开采、矿业管理等工作;E-mail:179763871@qq.com

*通信作者:方庆红(1995—),男,工程师,硕士,从事矿业工程开采咨询、设计及研究工作;E-mail:884582880@qq.com

极差分析法可清晰显现各因素指标对边坡稳定性影响程度的强弱,其准则为:

$$R_j = \max(x_{ij}) - \min(x_{ij}) \quad (1)$$

$$x_{ij} = X_{ij}/m \quad (2)$$

式中: R_j 为第 j 列的极差; x_{ij} 为第 i 水平第 j 列试验结果平均值; X_{ij} 为第 j 列因素A第 i 水平试验总和; m 为第 i 水平第 j 列因素A出现次数总和。

1.2 多元线性回归

多元线性回归分析公式为:

$$y = p_0 + p_1x_1 + p_2x_2 + \dots + p_r x_r \quad (3)$$

其中,可采用最小二乘法计算常数项和各项系数^[10],假设向量 Y 为因变量集, X 为自变量集, B 为系数集,则有:

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (4)$$

1.3 强度折减法

强度折减法通过求解不断折减的岩体参数,直至达到濒临破坏状态时的折减系数,是边坡稳定性系数的一种计算方法。其充分考虑了边坡岩体的应力,岩体参数折减公式^[2]为:

$$C_F = C/F_{\text{trial}} \quad (5)$$

$$\tan \varphi_F = \tan \varphi/F_{\text{trial}} \quad (6)$$

式中: C 、 C_F 为折减前后的内聚力(MPa); φ 、 φ_F 为折减前、后的内摩擦角($^\circ$); F_{trial} 为折减系数。

2 正交试验方案设计

2.1 选取因素指标

边坡稳定性的影响因素较多,各因素的影响程度存在较大差异,且部分影响机理尚不明确^[11-21]。从实用性和相关性角度出发,本文选取边坡几何形态的采深(H)和最终边坡角(α),以及岩体物理力学参数中的密度(ρ)、内聚力(C)、内摩擦角(φ)、弹性模量(E)和泊松比(μ)为强烈预测因素指标进行正交试验方案设计。

2.2 正交试验设计方案

以上述7种强烈预测因素作为边坡稳定性预测正交试验方案设计的因素指标,每个因素指标设置3个水平,正交试验设计水平见表1。选取3水平7因素的正交水平设计表 $L_{18}(3^7)$,正交试验设计18种方案,见表2。

表1 正交试验设计水平

Table 1 Level of orthogonal test design

序号	采深 H/m	最终边坡角 $\alpha/(^\circ)$	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	内聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
1	160	45	2.5	300	25	10	0.1
2	180	50	3	400	35	65	0.3
3	200	55	3.5	500	45	115	0.5

表2 因素指标正交试验设计方案

Table 2 Orthogonal test design for factor indices

试验编号	采深 H/m	最终边坡角 $\alpha/(^\circ)$	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	内聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
1	160	45	2.5	300	25	10	0.1
2	160	50	3	400	35	65	0.3
3	160	55	3.5	500	45	115	0.5
4	180	45	2.5	400	35	115	0.5
5	180	50	3	500	45	10	0.1
6	180	55	3.5	300	25	65	0.3
7	200	45	3	300	45	65	0.5
8	200	50	3.5	400	25	115	0.1
9	200	55	2.5	500	35	10	0.3
10	160	45	3.5	500	35	65	0.1
11	160	50	2.5	300	45	115	0.3
12	160	55	3	400	25	10	0.5
13	180	45	3	500	25	115	0.3
14	180	50	3.5	300	35	10	0.5
15	180	55	2.5	400	45	65	0.1
16	200	45	3.5	400	45	10	0.3
17	200	50	2.5	500	25	65	0.5
18	200	55	3	300	35	115	0.1

2.3 计算边坡稳定性系数

建立18种正交试验设计方案高边坡计算模型,采用M-P法进行边坡稳定性系数计算。因计算模型较多,仅以试验4为例进行展示,计算结果见图1。全部正交试验设计方案边坡稳定性系数计算结果见表3。

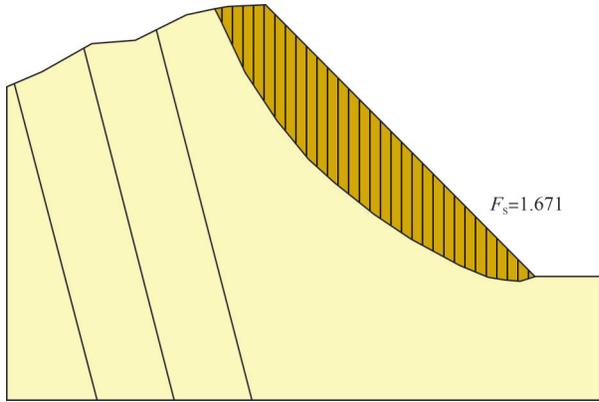


图1 试验4计算结果

Fig. 1 Calculation results of Test 4

表3 正交试验设计方案边坡稳定性系数计算结果

Table 3 Calculation results of slope stability factors for orthogonal test design

试验编号	F_s	试验编号	F_s
1	1.223	10	1.664
2	1.473	11	1.763
3	1.704	12	1.079
4	1.671	13	1.376
5	1.908	14	1.193
6	0.840	15	1.702
7	1.724	16	1.793
8	0.994	17	1.281
9	1.456	18	1.098

验设计方案对应的边坡稳定性系数代入式(1)、式(2),对计算结果进行极差分析,每个水平均值及极差见表4。为更加清晰直观地探究7种因素指标对边坡稳定性的影响程度,对各个因素指标进行单一变量控制,构建各个因素指标对边坡稳定性系数影响折线图(见图2)。

2.4 正交试验设计结果分析

1)极差分析。将M-P法计算得到的18种正交试

表4 试验计算结果极差分析

Table 4 Range analysis of test calculation results

平均值	F_s						
	采深 H	最终边帮角 α	密度 ρ	内聚力 C	内摩擦角 φ	弹性模量 E	泊松比 μ
x_{1j}	1.484	1.575	1.516	1.307	1.132	1.442	1.432
x_{2j}	1.448	1.435	1.443	1.452	1.426	1.447	1.450
x_{3j}	1.391	1.313	1.365	1.565	1.766	1.434	1.442
极差 R_j	0.093	0.262	0.151	0.258	0.634	0.013	0.018

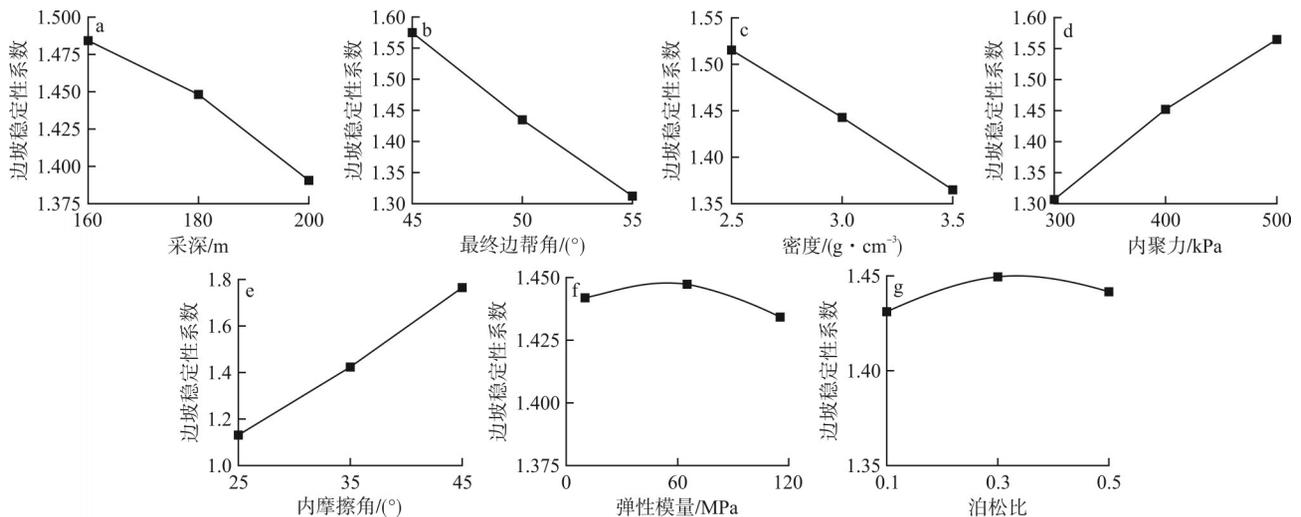


图2 因素指标对边坡稳定性系数影响折线图

Fig. 2 Line graph of effects of factor indices on slope stability coefficient

从表4和图2可以看出:边坡稳定性系数与采深、最终边帮角、密度呈负相关关系,与内聚力和

内摩擦角对边坡稳定性系数影响显著,采深次之,

而弹性模量和泊松比对边坡稳定性系数几乎没有影响。

3 边坡稳定性预测模型

3.1 构建初步模型

由正交试验设计方案计算结果及因素指标与边坡稳定性系数关系图可知,7种因素指标与边坡稳定性系数均可采用线性关系表示。因此,本文采用多元线性回归分析,探究边坡稳定性系数与7种因素指标的定量线性函数,构建边坡稳定性简化模型。

设采深(H)、最终边帮角(α)、密度(ρ)、内聚力(C)、内摩擦角(φ)、弹性模量(E)和泊松比(μ)分别为

$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$, 边坡稳定性系数 F_s 为 y , 将表2中前15组数据代入式(3), 经线性回归模拟得出的关系式为:

$$y = 1.9552 - 0.0023x_1 - 0.0245x_2 - 0.1612x_3 + 0.0013x_4 + 0.0312x_5 + 0.0001x_6 + 0.0090x_7 \quad (7)$$

各因素指标 t 值和 P 值说明, 7种因素指标对边坡稳定性的影响程度顺序为 $\varphi > C > \alpha > \rho > H > E > \mu$ (见表5), 与正交试验设计方案分析结果吻合。标准化预测值与标准化残差散点见图3。从图3可以看出: 散点均分布在0轴上下, 为 $[-0.04, 0.04]$, 无明显总体趋势, 表明了数据的合理性, 以及回归方程的真实性和可靠性。

表5 模型回归系数及检验

Table 5 Model regression coefficients and verification

因素指标	y	y_1	t	t_1	P	P_1	备注
常数项	1.955 15	1.963 982 1	11.859 61	13.400 66	$6.880 6 \times 10^{-6}$	2.99×10^{-7}	
采深 H	-0.002 25	-0.002 25	-3.874 38	-4.325 13	0.006 097 1	0.001 919	
最终边帮角 α	-0.024 52	-0.024 713	-10.927 3	-12.757 5	1.189×10^{-5}	4.56×10^{-7}	
密度 ρ	-0.161 21	-0.159 286	-7.176 3	-8.068 86	0.000 181 15	2.07×10^{-5}	t 值和 P 值均在置信度 95 % 下计算得到
内聚力 C	0.001 256	0.001 255 4	11.199 86	12.961 51	1.009×10^{-5}	3.98×10^{-7}	
内摩擦角 φ	0.031 181	0.031 277 4	27.76	31.688 08	2.0213×10^{-8}	1.52×10^{-10}	
弹性模量 E	8.99×10^{-5}		0.420 856		0.686 480 08		
泊松比 μ	0.009 008		0.160 706		0.876 864 4		

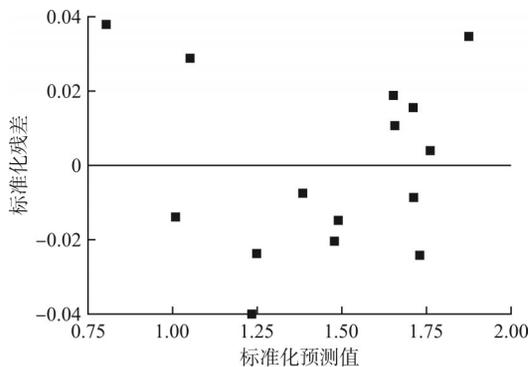


图3 标准化预测值与标准化残差散点

Fig. 3 Scatter plot of standardized predicted values versus standardized residuals

利用剩余3组数据对预测模型进行测试, 结果见表6。从表6可以看出: 预测值最大相对误差为

4.92%, 平均相对误差为2.84%, 证明该预测模型具有较高的精度。

3.2 修正预测模型

为进一步简化模型构建过程, 降低数据获取操作性和难度系数, 剔除经方差分析对边坡稳定性几乎无影响的弹性模量和泊松比2种因素指标, 对式(7)进行修正, 修正后的预测模型经验公式为:

$$y_1 = 1.9640 - 0.0023x_1 - 0.0247x_2 - 0.1593x_3 + 0.0013x_4 + 0.0313x_5 \quad (8)$$

对修正预测模型 y_1 与 y 进行对比(见表5、表6), 说明模型 y_1 同样具有高拟合度和回归性; 修正预测模型 y_1 的预测值与试验值最大相对误差为4.57%, 平均相对误差为2.48%, 有较好的预测精度, 且修正后相

表6 试验值与预测值对比

Table 6 Comparison of experimental and predicted values

试验编号	试验值	预测值 y	相对误差/%	预测值 y_1	相对误差/%
16	1.793	1.746	2.60	1.754	2.17
17	1.281	1.294	0.99	1.290	0.68
18	1.098	1.152	4.92	1.148	4.57
平均值			2.84		2.48

对误差有所下降,预测精度更高。

4 模型应用验证

为进一步验证模型的可靠性,选取相关计算参数(见表7),利用强度折减法构建高边坡数值计算模型,计算边坡稳定性系数,并与本预测模型预测结果进行对比。强度折减法计算结果见图4。该预测模型预测结果为 $F_s=1.274$,与强度折减法计算结果(1.23)相比,相对误差为3.45%,证明该模型具有较好的预测精度,可为高边坡预警防控提供参考。

表7 相关计算参数

Table 7 Related calculation parameters

采深 H/m	最终边帮角 $\alpha/(^\circ)$	密度 $\rho/(g\cdot cm^{-3})$	内聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
230	51	2.7	300	36.5

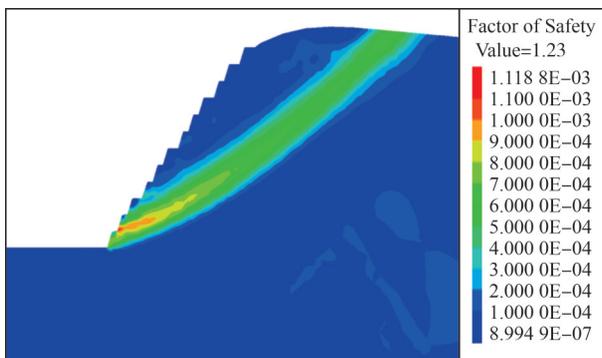


图4 强度折减法计算结果云图

Fig. 4 Cloud chart of strength reduction method results

5 结论

1)采深(H)、最终边帮角(α)、密度(ρ)、内聚力(C)、内摩擦角(φ)、弹性模量(E)和泊松比(μ)等7种因素指标对边坡稳定性的影响程度顺序为 $\varphi > C > \alpha > \rho > H > E > \mu$ 。

2)边坡稳定性与采深、最终边帮角、密度呈负相关关系,与内聚力和内摩擦角呈正相关关系,而弹性模量和泊松比对边坡稳定性系数几乎无影响。在边坡稳定性计算时,应着重密度(ρ)、内聚力(C)、内摩擦角(φ)、最终边帮角(α)等岩体力学参数的准确性。

3)该边坡稳定性预测模型有较高的拟合度和科学合理性,预测值与试验值及计算值的相对误差均在5%以下,且修正后预测模型精度更高。

4)该边坡稳定性预测模型具有建模所需数据少,获取数据相对容易,精度高等特点,研究结果可为高

边坡稳定性预警防控提供参考。

[参考文献]

- [1] 王瑞鹏,王金安.西露天矿边坡失稳影响因素分析[J].矿业研究与开发,2022,42(1):64-70.
- [2] 方庆红,胡斌,李京,等.SR-BP神经网络融合的坡态控制参数优化模型[J].中国有色金属学报,2021,31(9):2573-2582.
- [3] 方庆红,胡斌,盛建龙,等.含软弱夹层露天矿高边坡台阶宽度及台阶坡面角协同优化研究[J].矿冶工程,2021,41(5):5-9.
- [4] 王浩,张云鹏,马海越.基于GA-PP模型的露天矿边坡稳定性综合评价研究[J].矿业研究与开发,2019,39(2):30-33.
- [5] 谢琳,刘文连,王修峰,等.基于分级分析法评价结构面对岩质高边坡稳定性的影响[J].有色金属科学与工程,2019,10(1):77-86.
- [6] 尤耿明,王光进,刘文连,等.矿山边坡软弱夹层赋存状态及蠕变特性对边坡稳定性影响研究[J].金属矿山,2021(12):200-206.
- [7] ZHANG S, HU C, ZHENG S, et al. Assessing the deformation and stability of a slope using an improved strength reduction method [J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2021(2):1-6.
- [8] 贾进章,柯丁琳,陈怡诺.基于正交试验-多元回归的煤矿瓦斯涌出量预测[J].安全与环境学报,2021,21(5):2037-2044.
- [9] 张兴旺,王平,许梦国,等.基于MATLAB多元线性回归优化地压显现综合评价[J].矿业研究与开发,2019,39(4):33-37.
- [10] 张俭让,王智鹏.基于多元线性回归的煤矿驾驶员情绪预测模型[J].中国安全生产科学技术,2020,16(11):147-152.
- [11] 马驰,郭琪.露天采场边坡平台参数计算程序设计及应用[J].黄金,2022,43(7):36-39.
- [12] JIN Y C. Slope stability analysis based on the limit equilibrium method and strength reduction method [J]. Transportation Geotechnics, 2021, 631: 012048.
- [13] 李福艳.内蒙古八岔沟矿露天采场边坡滑坡灾害治理[J].黄金,2023,44(7):121-124,128.
- [14] 李其在,董志富,周癸武.大型露天矿岩体工程地质分区及边坡岩土强度参数取值[J].黄金,2023,44(8):35-43.
- [15] LI K, YU W J, XU Y L, et al. Analysis on the influence degree of deformation control factors of deep-buried roadway's fractured surrounding rock using orthogonal design [J]. Advances in Civil Engineering, 2021(6):1-11.
- [16] 万丽,孙志健,王立刚,等.基于正交设计的新疆某铁闪锌矿浮选实验研究[J].矿产综合利用,2021(3):71-75.
- [17] 何斌全,李仲泽,陈国辉,等.基于模糊数学的岩体力学参数折减方法[J].黄金,2023,44(3):26-30.
- [18] 柴利蒙,孙东东,杨天鸿,等.金宝铁矿南帮顺倾边坡滑坡机理研究及治理工程实践[J].黄金,2022,43(12):33-38.
- [19] 何旭,李克钢,秦庆词,等.某磷矿露天边坡稳定性分析[J].矿业研究与开发,2021,41(9):25-28.

- [20] 范文涛,刘雷磊.基于正交试验设计的采场结构参数优化及应
用[J].黄金,2021,42(8):36-41.
- [21] 任卫东.某露天矿山边坡稳定性分析及参数优化[J].黄金,
2020,41(6):44-47.

Prediction model for high slope stability based on orthogonal test, M-P method, and multiple regression

Fang Jian¹, Fang Qinghong², Li Jing³

(1. *Guangdong Hongtong Green Mining Co., Ltd.*;

2. *Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd.*;

3. *School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology*)

Abstract:To quickly and accurately calculate slope stability factors in open-pit mines and predict slope safety, the M-P method was utilized to calculate the stability factors of orthogonal test design. A multiple linear regression approach was employed to develop a predictive model for high slope stability, proposing a simplified prediction model and validating its accuracy. The study revealed the principle behind simplified stability calculations, explored the quantitative relationships between influencing factors and stability factors, and assessed the influence of specific factors on slope stability. The prediction model was further refined and validated using the strength reduction method. Results showed that the average relative error of the refined prediction model was 2.48 %, indicating high prediction accuracy and model fit. Among 7 influencing factors, the impact degree on slope stability was $\varphi > C > \alpha > \rho > H > E > \mu$, where elastic modulus and Poisson's ratio had negligible effects. The validation using the strength reduction method confirmed the scientific robustness of the refined prediction model. This model provides reference for slope safety early warning and control measures.

Keywords:high slope stability; orthogonal test; M-P method; multiple linear regression; strength reduction method; prediction model

(上接第42页)

- [11] CHENG S K, LI W B, HAN Y X, et al. Recent process developments in beneficiation and metallurgy of rare earths: A review[J]. *Journal of Rare Earths*, 2024, 42(4): 629-642.
- [12] 牛芳银,郭彩莲,宁新霞,等.某难选金矿石选矿试验研究[J]. *矿冶工程*, 2024, 44(5): 79-83.
- [13] 张学飞,谢青松.关于黄金选矿厂磨矿细度优化模型研究与应用[J]. *世界有色金属*, 2017(19): 96, 98.
- [14] 姚致远,胡乃联,李国清,等.黄金选矿厂磨矿细度优化模型研究与应用[J]. *现代矿业*, 2016, 32(6): 45-47, 58.
- [15] 颜炳正.自动化模型控制方案在选矿生产上的应用[J]. *自动化技术与应用*, 2012, 31(10): 92-94.

Study on the method of constructing beneficiation monitoring models using integrated technology of geological radar and high-density electrical method

Li Jiandong, Zhao Liuzhi

(*Henan Fourth Geological Brigade Co., Ltd.*)

Abstract:To address the challenges in decision-making for operational indicators in beneficiation, this study proposes the application of integrated technology of geological radar and high-density electrical methods in constructing beneficiation monitoring models. A comparative analysis of the effectiveness and predicted accuracy of the integrated technology versus traditional monitoring methods was conducted. The results indicate that the integrated technology of geological radar and high-density electrical methods has lower average sample deviations and higher measurement accuracy, outperforming traditional monitoring methods in beneficiation monitoring. This technology integration not only improves the accuracy of monitoring models but also provides critical support for optimizing production indicators.

Keywords:geological radar; high-density electrical method; beneficiation monitoring; accuracy evaluation; technology integration; model construction