

基于 HGWO-SVR 模型的竖向受荷斜坡桩基沉降预测^①

蒋冲^{1,2}, 施泽雄²

(1.水能资源利用关键技术湖南省重点实验室,湖南长沙410014; 2.中南大学资源与安全工程学院,湖南长沙410083)

摘要:采用灰色关联分析深入研究了竖向荷载作用下斜坡桩基沉降的关键因素,各因素影响程度由大到小排序为:弹性模量>临坡距>斜坡坡度>内摩擦角>黏聚力>土体密度>土体泊松比>桩长>桩径。为优化支持向量回归(SVR)模型参数,引入差分进化,建立混合灰狼算法(HGWO),提出了一种新的HGWO-SVR模型。该模型与GWO-SVR和GS-SVR模型相比,表现出更显著的预测优势,整体预测精度高,误差较小。基于HGWO-SVR模型构建了斜坡桩基沉降的预测模型,并将其预测结果与已有沉降计算公式计算结果进行对比,结果表明,HGWO-SVR模型预测结果与公式计算结果最大误差为6.55%,验证了该模型在斜坡桩基沉降预测方面的可行性。

关键词:斜坡桩基; 沉降预测; 灰色关联分析; 改进灰狼算法

中图分类号: TU433

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.02.006

文章编号: 0253-6099(2024)02-0022-05

Settlement Prediction for Pile Foundation of Vertically Loaded Slope Based on HGWO-SVR Model

JIANG Chong^{1,2}, SHI Zexiong²

(1.Hunan Provincial Key Laboratory of Hydropower Development Key Technology, Changsha 410014, Hunan, China; 2.School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: The key factors of pile foundation settlement were explored for the slope under vertical load by using grey relational analysis, and it is found that each factor is in the following descending order by its influence: elastic modulus > slope distance > slope gradient > internal friction angle > cohesion > soil density > poisson's ratio of soil > pile length > pile diameter. In order to optimize the parameters of support vector regression (SVR) model, a novel HGWO-SVR model was proposed by integrating the differential evolution-enhanced gray wolf algorithm (HGWO). Compared with GWO-SVR and GS-SVR models, this model presents obvious advantage in prediction, with high accuracy and minor error. A settlement prediction model for pile foundation of slope was constructed based on HGWO-SVR model, and the prediction results were compared with those values calculated with existing settlement formulas. The results show that the maximum percentage error between the prediction value of HGWO-SVR model and the calculated value is 6.55%, thus verifying that this model is feasible in settlement prediction for pile foundation of slope.

Key words: pile foundation of slope; settlement prediction; grey relational analysis (GRA); improved gray wolf algorithm

目前,对于桩基沉降计算大多集中于平地桩基沉降的理论计算,然而,由于斜坡的存在,斜坡桩基沉降与平地桩基沉降有很大不同。目前对于斜坡桩基沉降计算的研究较少,尚未形成系统的理论,已有的研究成果大都集中于水平荷载作用下斜坡桩基的横向响应^[1]、横向变形^[2]和横向承载力,或竖向受荷斜坡桩

基的荷载传递规律^[3]。因此,有必要研究竖向受荷斜坡桩基沉降计算方法。

随着机器学习的飞速发展,已有大量学者将其引入土体参数^[4]、地表沉降^[5-6]、边坡可靠性、单桩荷载-位移曲线、嵌岩桩沉降、极限承载力等岩土工程预测。关于桩基沉降预测模型的研究主要有高阶神经网络、

① 收稿日期: 2023-10-28

基金项目: 水能资源利用关键技术湖南省重点实验室开放研究基金项目(PKLHD202103)

作者简介: 蒋冲(1977—),湖南城步人,博士,教授,主要从事岩土与地下工程教学与研究。E-mail: jiangchong@csu.edu.cn

基因表达式编程、支持向量机、LM 算法等。由于斜坡桩基的特殊性,应用上述模型进行沉降预测时存在如下问题:① 支持向量回归模型超参数选取较为困难,模型泛化能力较差;② 使用传统智能优化算法寻找模型超参数时易陷入局部最优值,降低预测精度。

本文首先使用有限元软件建立 100 个斜坡桩基受荷沉降模型,获取不同模型参数下斜坡桩基沉降数据,引入改进的灰狼算法优化支持向量回归模型,并基于此模型预测竖向荷载作用下斜坡桩基沉降,探讨该模型在竖向受荷斜坡桩基沉降预测中的适用性,对比结果证实了该模型的可靠性和适用性。

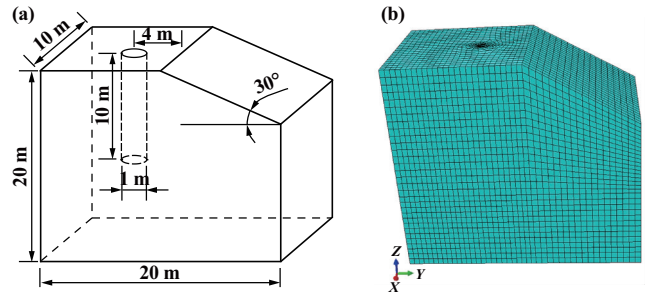
1 沉降预测模型建立

1.1 数据获取及分析

1.1.1 有限元模型的建立

为获取竖向荷载作用下斜坡桩基沉降数据,建立了三维有限元模型。建模过程中,假设斜坡土体为单层土体,斜坡土体和桩体材料参数保持不变。模型如图 1 所示。模型中 X、Y、Z 方向土体尺寸分别为 10 m、20 m、20 m,其中斜坡部分根据斜坡坡度切削土体,桩体所处位置关于 YZ 平面对称,为土体中间位置。桩体采用线弹性模型;土体变形分为弹性阶段和塑性阶段:

弹性变形阶段本构模型为弹性模型,塑性变形阶段本构模型为摩尔-库伦模型。参考工程经验以及《工程地质手册》^[7] 选取模拟桩土材料参数。



(a) 三维示意图; (b) 有限元模型
图 1 斜坡桩基沉降预测模型

建立基本模型之后,通过调整斜坡坡度、泊松比、黏聚力、内摩擦角等参数,建立 100 个有限元模型,计算得出桩基沉降随荷载变化的数据。采用逐级加载模式,为增加数据量,每级加载 20 kN,逐级加载至 2 000 kN。大部分研究建议“沉降变形控制的沉降量一般取桩径的 3%~6%”^[8],因此最大沉降量统一取 0.06 倍桩径,即删除超过 0.06 倍桩径的沉降数据。处理异常数据之后,100 个数值模拟试验共获得 5 083 组数据。部分数据见表 1。

表 1 不同参数下斜坡桩基沉降数据(部分数据)

斜坡坡度 $\alpha/(\circ)$	临坡距 L/m	桩长 H/m	桩径 D/m	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	荷载 F/kN	斜坡桩基沉降 s/mm
30	3.5	12	0.6	1 800	10	0.45	40	30	600	8.814
45	3.6	12	0.6	1 800	13	0.42	35	35	900	11.285
15	2.5	12	1.0	1 800	12	0.40	30	35	1 400	17.436
30	3.6	10	0.8	1 800	10	0.45	40	30	1 100	36.376
15	3.5	12	1.0	1 800	10	0.45	40	30	1 800	24.104
30	3.5	12	1.0	1 700	12	0.40	30	35	500	6.244
30	2.5	12	0.6	1 750	12	0.38	30	31	900	32.345
30	3.6	10	0.6	1 700	13	0.42	35	30	700	9.820
45	1.8	12	0.6	1 600	14	0.30	35	35	700	14.870
15	3.5	12	1.0	1 800	14	0.40	30	30	1 500	16.694

1.1.2 输入输出数据分析

为研究各项输入参数与输出参数之间的关系,选用灰色关联分析(GRA)对获取的数据进行分析。GRA 主要通过搜索灰色关联度来描述每个变量属性之间的关系^[9],再据此确定每个变量对目标影响的关联度,计算公式为:

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_i \min_k |s(k) - x_i(k)| + \rho \cdot \max_i \max_k |s(k) - x_i(k)|}{|s(k) - x_i(k)| + \rho \cdot \max_i \max_k |s(k) - x_i(k)|} \quad (1)$$

$$r_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \zeta_i(k) \quad (2)$$

式中 s 为母序列,即斜坡桩基沉降; x_i 为子数列,即各项输入参数; $s(k)$ 为母序列的第 k 个值; $x_i(k)$ 为第 i 个子序列的第 k 个值; $\zeta_i(k)$ 为第 i 个子序列第 k 个值的关联度; ρ 为分辨系数,分辨系数越小,分辨率越好, ρ 通常取 0.5^[10]; r_i 为第 i 个子序列与母序列的关联度。

模拟获取的数据为不同竖向荷载作用下斜坡桩基沉降值,因此进行灰色关联分析时去除荷载这一因素,

同时为消除荷载对沉降的影响,统一取荷载为 1 000 kN 时的数据,将各个变量分别进行归一化处理,部分数据如表 2 所示。将其代入式(1)~(2),计算结果如表 3 所示。

表 2 归一化处理后的数据(部分数据)

s	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
0.556	1.125	1.132	1.19	1.020	1.102	1.003	0.909	0.920	0.556
1.111	0.482	1.132	1.19	0.907	1.102	0.752	1.061	1.074	1.111
0.556	1.286	0.755	0.952	1.020	1.024	1.053	1.061	1.074	0.556
0.556	1.125	1.132	1.190	1.020	0.787	1.128	1.212	0.920	0.556
1.111	0.804	1.132	0.714	0.992	0.945	0.952	0.909	0.951	1.111
0.556	1.447	1.132	0.714	0.963	1.024	1.053	1.061	0.920	0.556
1.111	0.482	1.132	1.190	1.020	0.945	1.003	0.909	1.074	1.111
1.111	1.158	0.943	0.714	1.020	1.024	1.053	1.061	1.074	1.111
1.667	0.804	0.755	0.952	1.020	1.102	1.003	0.909	0.920	1.667
1.667	1.286	0.755	1.190	1.020	0.945	1.003	0.909	1.074	1.667

注: s 为斜坡桩基沉降值; x_1 为斜坡坡度; x_2 为临坡距; x_3 为桩长; x_4 为桩径; x_5 为密度; x_6 为弹性模量; x_7 为泊松比; x_8 为黏聚力; x_9 为内摩擦角。

表 3 灰色关联度

评价项	单位	子数列	关联度	排名
弹性模量 E	Pa	x_6	0.767	1
临坡距 L	m	x_2	0.734	2
斜坡坡度 α	(°)	x_1	0.731	3
内摩擦角 φ	(°)	x_9	0.728	4
黏聚力 c	Pa	x_8	0.727	5
密度 ρ	kg/m ³	x_5	0.722	6
泊松比 μ		x_7	0.714	7
桩长 H	m	x_3	0.696	8
桩径 D	m	x_4	0.687	9

由表 3 可得,土体弹性模量是斜坡桩基沉降的首要影响因素,同时,各项影响因素之间差距不大,可知选取的输入变量与输出变量之间关系密切。

1.2 HGWO-SVR 斜坡桩基沉降预测模型

为建立斜坡桩基沉降预测模型,使用支持向量回归模型训练数据。支持向量机(SVM)能够在最小化采样点误差的同时,在不受数据维数限制的情况下提高模型的泛化能力^[11]。为了解决 SVM 的回归拟合问题,Vapnik 等人在支持向量机分类的基础上引入了不敏感损失函数 ε ,通过适当的非线性函数变换,将输入变量映射到高维特征空间,并在此空间寻求线性回归最优超平面(见式(3))^[12]。

灰狼算法(GWO)^[13]在进行狩猎行为时易陷入局部最优解。因此本文引入差分进化算法(DE)^[14]优化灰狼算法狩猎过程,将 DE 算法与 GWO 算法结合,建立混合灰狼算法(HGWO),灰狼种群通过变异加强种

群多样性,提高其全局搜索能力。在解决土木工程中的复杂问题时,需要优化罚参数和核函数参数,以提高预测精度。本文采用 HGWO 优化算法寻找 SVR 模型中罚参数 C 、核参数 g 的最优值,以此来提高模型的精度和鲁棒性。

$$\left\{ \begin{array}{l} \max \left\{ \sum_{i=1}^n s_i (\alpha_i - \alpha_i^*) - \varepsilon \sum_{i=1}^n (\alpha_i + \alpha_i^*) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [(\alpha_i - \alpha_i^*)(\alpha_j - \alpha_j^*)K(x_i, x_j)] \right\} \\ s.t. \quad \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \\ 0 \leq \alpha_i \leq C, 0 \leq \alpha_i^* \leq C \end{array} \right. \quad (3)$$

式中 s_i 为输出向量; $\alpha_i, \alpha_i^*, \alpha_j, \alpha_j^*$ 均为拉格朗日乘子; C 为罚参数; $K(x_i, x_j)$ 为高斯径向基函数(RBF)。在高维非线性空间中,与其他核函数相比, RBF 具有良好的泛化性、非线性预测性能,且需要调整的参数较少,因此本文选择 RBF 作为核函数:

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(\frac{-\|x_i - x_j\|}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

为验证 HGWO 优化 SVR 模型的有效性及其实用性,额外训练一个 GWO-SVR 模型以及一个网格搜索(GS)优化的 SVR 模型进行对比。HGWO 优化算法中参数设定为: $NP=20, N=100, SF_{\max}=0.8, SF_{\min}=0.2, CR=0.3$, 罚参数 C 的范围设为 $[10^{-3}, 10^3]$, 核宽度 g 的范围设为 $[10^{-3}, 10^3]$, 以便 HGWO 等优化算法可以在类似于正方形的二维平面上搜索最优值,采用五折交叉验证。

初始化 HGWO-SVM 模型的各个参数,对输入数据进行模型训练,采用 HGWO 算法、GWO 算法、GS 算法对支持向量机模型参数寻优后得到最终模型参数如表 4 所示。

表 4 模型参数

模型名称	罚参数 C	核参数 g
HGWO-SVR	6.860 6	0.508 41
GWO-SVR	53.286 4	0.507 3
GS-SVR	17.512 3	0.464 16

2 预测结果评估与分析

2.1 模型预测结果评估

模型的精度通过确定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)进行评估。 R^2 的值介于 0 和 1 之间, R^2 越接近 1, 说明模型预测能力越好。

RMSE、MAE 表示真实数据与预测数据之间的偏差, 值越小, 表明模型的预测能力越好。计算公式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{s}_i - s_i)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{s}_i - s_i)^2} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{s}_i - s_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{s}_i - s_i}{s_i} \right| \quad (7)$$

式中 s_i 为真实沉降; \bar{s}_i 为真实沉降的平均值; \hat{s}_i 为模型输出的斜坡桩基沉降预测值。

根据获取的斜坡桩基在不同竖向荷载作用下的桩顶沉降数据建立模型训练数据库。数据集分为两部分, 其中 80% 为训练集, 20% 为测试集。各模型经过对数据集的训练和学习, 预测结果对比见表 5。

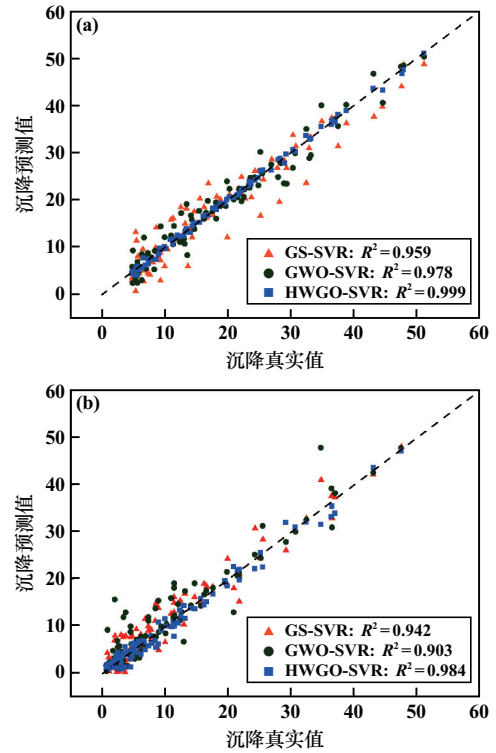
表 5 不同模型预测结果对比

模型名称	样本空间	R^2	RMSE	MAE
HGWO-SVR	训练集	0.999	0.557	0.031
	测试集	0.984	1.359	0.232
GWO-SVR	训练集	0.978	2.387	0.133
	测试集	0.903	3.516	0.574
GS-SVR	训练集	0.959	3.266	0.186
	测试集	0.942	2.705	0.489

综合分析表 5 可知, 3 种模型对竖向荷载作用下斜坡桩基沉降变形预测结果均很好, HGWO-SVR 模型预测精度高于其他两种模型, HGWO-SVR 在训练集及测试集中 R^2 最高、MSE 最低, 可见 HGWO-SVR 具有更高的预测精度以及良好的预测稳定性。测试集中, SVR 模型 R^2 最低, 可能因为罚参数 C 设置略高, 模型处于过拟合状态, 但 HGWO-SVR 模型在测试集仍表现良好, 体现了差分进化算法改进灰狼算法的全局寻优能力, 不易陷入局部最优解。

2.2 模型预测结果对比

图 2 为 3 种模型沉降真实值与预测值的对比。由图 2 可知, 各模型沉降真实值与预测值之间误差较小, 其中 HGWO-SVR 模型预测精度远优于其他两种算法。各模型在训练集均有较好的表现, 但在测试集中, GWO-SVR、GS-SVR 模型预测偏差明显大于 HGWO-SVR 模型。由图 2 也可以看出, 经过 HGWO 算法优化的 SVR 模型在预测精度及鲁棒性上均有提高, 进一步证明了优化算法的有效性。



(a) 训练集; (b) 测试集

图 2 不同模型沉降真实值与预测值的关系

3 预测效果验证

以文献[15]提出的计算斜坡桩基沉降计算方法为例, 选取两种工况(详见表 6), 与本文建立的机器学习模型进行对比, 结果如图 3 所示。

表 6 验证工况

材料	弹性模量/ Pa	泊松比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^\circ$)
桩	3.0×10^{10}	0.10	2 500	—	—
土	1.2×10^7	0.40	1 800	3.0×10^4	35

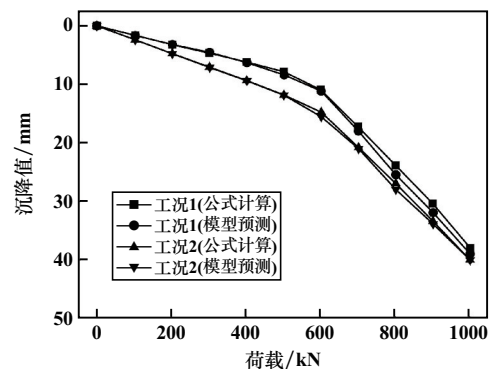


图 3 公式计算值与模型预测结果对比

由图 3 可知, HGWO-SVR 模型预测沉降值与公式

计算沉降值在趋势以及数值上都十分接近,说明HGWO-SVR模型对于竖向荷载作用下斜坡桩基沉降预测具有较高的精度。其中工况1理论计算与模型预测结果最大误差为6.55%,工况2理论计算与模型预测结果最大误差为5.33%,两者趋势基本一致,进一步证明了HGWO-SVR模型预测斜坡桩基沉降是可行的。

4 结 论

1) 通过灰色关联分析法分析各项输入参数对竖向荷载作用下斜坡桩基沉降的影响,各因素影响程度由大到小排列顺序为:弹性模量>临坡距>斜坡坡度>内摩擦角>黏聚力>土体密度>土体泊松比>桩长>桩径。

2) 通过差分进化改进灰狼算法,将其用于SVR模型惩罚因子及核函数参数寻优中优化支持向量回归模型,提出HGWO-SVR模型,并与已有模型进行对比,结果表明,HGWO-SVR模型整体预测精度高、误差小,预测效果明显优于GWO-SVR、GS-SVR模型。

3) 通过HGWO-SVR模型建立斜坡桩基沉降预测模型,并将其与现有沉降计算公式进行比较,模型与理论计算结果最大误差为6.55%,证明了HGWO-SVR模型应用于斜坡桩基沉降的可行性。

参考文献:

- [1] FU Z, JIANG G, YUAN S, et al. Lateral behavior of piled bridge foundation and stabilizing piles on steep slope[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019,23(10):4223-4236.
- [2] JIANG C, ZHANG Z, HE J. Nonlinear analysis of combined loaded rigid piles in cohesionless soil slope[J]. Computers and Geotechnics, 2020,117:103225.
- [3] Jesmani M, Kasranian A, Kamalzare M. Finite element modelling of undrained vertical bearing capacity of piles adjacent to different types

of clayey slopes[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2016,12(2):147-154.

- [4] ZHANG P, YIN Z Y, JIN Y F. Machine learning-based modelling of soil properties for geotechnical design: review, tool development and comparison[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2022,29:1229-1245.
- [5] 阳俊,曾维伟. 基于GA-BP神经网络的采空区地表沉降预测模型[J]. 矿冶工程, 2022,42(2):42-45.
- [6] 陈仁朋,戴田,张品,等. 基于机器学习算法的盾构掘进地表沉降预测方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021,48(7):111-118.
- [7] 工程地质手册编委会. 工程地质手册(第5版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1992.
- [8] 阳吉宝,钟正雄. 超长桩的荷载传递机理[J]. 岩土工程学报, 1998(6):111-115.
- [9] 邓聚龙. 灰色系统理论的关联空间[J]. 模糊数学, 1985(2):1-10.
- [10] Sarikaya M, Gullu A. Multi-response optimization of minimum quantity lubrication parameters using Taguchi-based grey relational analysis in turning of difficult-to-cut alloy Haynes 25[J]. J Clean Prod, 2015,91:347-357.
- [11] Vapnik V N. An overview of statistical learning theory[J]. IEEE Trans Neural Netw, 1999,10(5):988-999.
- [12] Chih-Chung C, Chih-Jen L. Libsvm: a library for support vector machines[J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2011,2(3):1-27.
- [13] Sm A, Smm B, Al A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014,69:46-61.
- [14] Storm R, Price K. Minimizing the real functions of the ICEC'96 contest by differential evolution[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation. IEEE, 1996:842-844.
- [15] JIANG C, WU W Y, HE J L, et al. Computation method for the settlement of a vertically loaded pile in sloping ground[J]. Advances in Civil Engineering, 2020(sm11):1-10.

引用本文: 蒋冲,施泽雄. 基于HGWO-SVR模型的竖向受荷斜坡桩基沉降预测[J]. 矿冶工程, 2024,44(2):22-26.

(上接第21页)

- [4] 章海象. 控制爆破技术在锦丰露天矿的应用[J]. 矿业研究与开发, 2018,38(5):33-36.
- [5] 潘世华,刘艳章,柯丽华,等. 基于贫化率控制的乌龙泉矿生产台阶矿石起采厚度研究[J]. 矿冶工程, 2016,36(4):21-25.
- [6] 宋德林,张浩,王德胜,等. 巴润矿矿岩混合爆区爆破分离技术研究[J]. 金属矿山, 2021(12):149-153.
- [7] 郭建新,张波,付明宇. 矿岩分离爆破技术在某大型复杂露天铁矿的应用研究[J]. 现代矿业, 2020,36(12):93-95.
- [8] 刘占全,王德胜,崔凤,等. 巴润矿矿岩混合复杂爆区爆破分离技术试验研究[J]. 金属矿山, 2022(1):136-141.
- [9] 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] 余铁钢,彭业宣. 矿岩分离爆破技术在瓮福磷矿英坪矿段开采中的应用[J]. 采矿技术, 2013,13(4):119-120.

- [11] 张乐,颜景龙,张宪玉,等. 露天采矿矿岩分离爆破技术探索[J]. 工程爆破, 2011,17(3):77-80.
- [12] 梁冰. 利用延时爆破降低矿石贫化的应用研究[J]. 爆破, 2021,38(3):58-61.
- [13] 黄刚,周文涛,张建华,等. 东沟钨矿露天台阶爆破参数优化研究[J]. 金属矿山, 2018(8):1-6.
- [14] 刘文胜,陈能革,朱末琳,等. 数码雷管高精度延时对爆破震动影响试验研究[J]. 金属矿山, 2021(9):37-43.
- [15] 蔡文琪,董文明,谭期仁,等. 基于品位控制模型的露天钨矿爆破流程优化[J]. 金属矿山, 2022(7):105-112.

引用本文: 宋德林,王春旺,郭建新,等. 巴润矿露天开采贫化控制技术的研究及应用[J]. 矿冶工程, 2024,44(2):18-21.