

基于改进麻雀搜索算法的爆破参数优化^①

闫祎然¹, 徐振洋¹, 刘鑫¹, 王雪松², 张宇庭¹

(1. 辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114051; 2. 沈阳工业大学 建筑与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 为了提高露天矿山爆破参数选取精度, 基于采场生产成本建立了露天台阶爆破参数数学模型, 并利用改进的麻雀搜索算法对爆破参数进行优化。结果表明, 改进的麻雀搜索算法用于爆破参数优化, 有效改善了露天矿台阶爆破的效果, 提高了采矿施工效率。以西藏玉龙矿业为例, 通过优化最终得出该矿的爆破参数为: 孔间距 $a=6.2$ m、排距 $b=4.9$ m、炸药单耗 $q=0.32$ kg/t, 在该参数条件下, 采场生产成本为 11.06 元/t, 采场生产成本降低了 7.5%, 大块率控制在 10% 以内。

关键词: 生产成本; 成本控制; 台阶爆破; 露天采场; 爆破参数; 数学模型; 麻雀搜索算法

中图分类号: TD235

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.06.003

文章编号: 0253-6099(2023)06-0011-04

Optimization of Blasting Parameters Based on Improved Sparrow Search Algorithm

YAN Yiran¹, XU Zhenyang¹, LIU Xin¹, WANG Xuesong², ZHANG Yuting¹

(1. College of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, Liaoning, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China)

Abstract: In order to improve accuracy in selection of blasting parameters for open-pit mines, a mathematical model was established for determining bench blasting parameters in open-pit mines based on production cost of stope, and the blasting parameters were then optimized by using an improved sparrow search algorithm. The results show that the improved sparrow search algorithm can effectively improve the effect of bench blasting in open-pit mine, but also improves the construction efficiency. With Yulong Mining Industry Company in Xizang as an example, the blasting parameters after optimization are as follows: hole spacing of 6.2 m, row spacing of 4.9 m, and unit explosive consumption of 0.32 kg/t. With these blasting parameters, the stope production cost goes down by 7.5% to 11.06 yuan/t, and the bulk rate can be controlled within 10%.

Key words: production cost; cost control; bench blasting; open pit; blasting parameters; mathematical model; sparrow search algorithm

爆破参数不仅直接影响爆破成本和爆破质量, 还会间接影响钻孔、铲装、运输等环节的生产成本。采场生产过程中, 必须寻求最优的爆破参数, 以便获得较好的爆破质量以及较低的采场生产成本。随着计算机技术飞速发展, 近年来参数的优化选取逐渐与人工智能相结合^[1-5], 本文利用萤火虫算法优化麻雀搜索算法, 提高其搜索能力和求解精度, 并能迅速地查找出最优值。本文以西藏玉龙矿业为例, 分析矿山采场成本影响因素, 构建采场生产成本模型, 利用改进的麻雀搜索

算法求解模型, 得到最优成本下的爆破参数。实践证明, 萤火虫算法可以有效提高麻雀搜索算法的寻优效率, 可为台阶爆破参数选取提供新途径。

1 露天矿台阶爆破参数优化模型

通过优化爆破参数, 可以有效改善矿山露天开采工程爆破效果、减少炸药单耗量, 进而降低爆破成本。爆破效果的优劣程度一般用矿岩的平均块度和大块率来衡量。为提高矿山经济效益, 控制生产成本是目前

① 收稿日期: 2023-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(51974187); 辽宁科技大学青年骨干人才项目(601011507-25); 辽宁省教育厅项目(LJKZ0282); 辽宁省教育厅项目(LJKZ0313)

作者简介: 闫祎然(1997—), 女, 内蒙古海拉尔人, 硕士研究生, 主要从事工程爆破方面的研究。

通信作者: 徐振洋(1982—), 男, 河南洛阳人, 博士, 教授, 主要从事爆破工程与岩石破碎的研究。

研究的重要课题之一^[6]。近年来,许多研究者将岩石块度与生产成本联系起来,建立了成本优化模型^[7-8]。

根据矿山生产管理模式,钻孔作业成本以每米钻进成本为单位计算,与钻孔工作量以及孔网参数有着直接关系,因此,钻孔成本计算函数关系式为:

$$C_z = \frac{e_1 L}{HS\gamma} \quad (1)$$

式中 C_z 为钻孔成本; e_1 为钻进每米消耗成本; L 为钻孔深度; H 为台阶高度; S 为炮孔担负面积; γ 为矿石容重。

露天矿爆破成本主要是台阶爆破成本,它主要体现在爆破器材与炸药消耗两个方面,而这与爆破参数的选择密切相关:

$$C_b = e_2 q + \frac{e_3 L}{HS\gamma} \quad (2)$$

式中 C_b 为爆破成本; q 为炸药单耗; e_2 为炸药单价; e_3 为爆破器材消耗单价。

露天矿主要以挖掘机、电铲等设备进行铲装作业,主要成本在于设备的能源消耗,可通过统计设备的电耗与油耗获得:

$$C_c = f_1 X + f_2 \quad (3)$$

式中 C_c 为铲装成本; X 为矿石的平均块度; f_1 f_2 均为函数模型的相关系数。

露天矿矿石多采用汽车运输,主要成本在于汽车的能源消耗,可通过统计汽车的电耗与油耗获得:

$$C_y = e_4 (f_3 X^2 + f_4 X + f_5) \quad (4)$$

式中 C_y 为运输成本; f_3 f_4 f_5 均为函数模型的相关系数; e_4 为每吨矿石的运输成本。

本次模型的构建以西藏玉龙矿业为背景,该矿山位于高原地区,矿山作业受该地区特殊环境的限制,生产成本相对较高。针对矿山的实际生产状况,提出了采用低成本、高效的台阶爆破方法。但由于露天爆破成本受到多种因素的影响,如在爆破后,矿岩块度的具体分布情况将直接影响并决定其爆破成本。最终,建立的露天爆破成本控制数学模型为:

$$C = C_z + C_b + C_c + C_y + C_p \quad (5)$$

式中 C 为露天采场生产成本; C_p 为排岩成本。以上参数单位均为元/t。由于忽略了管理成本, $C_y = C_p$ 。

2 采场生产成本模型求解算法

2.1 麻雀搜索算法

麻雀搜索算法(SSA)是根据麻雀的群体觅食行为提出的一种群智能算法^[9],该算法将样本看作一个麻雀群体,将群体按职能分为发现、加入和警戒3种身份

类型的成员,通过调整3种成员所占比例来决定麻雀群体的搜索能力和收敛速度,最终经过多次迭代完成整个函数的寻优。该算法能较好地解决单峰、多峰函数的寻优问题,且具有较好的收敛性和精确性,但其寻优能力较为薄弱。

通常情况下,一个群体中所有麻雀都可以用一个数据集来描述,设该群体中有 n 只麻雀,那么该群体可被表示为:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1d} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nd} \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中 d 为待优化变量的维度; n 为麻雀数量。

则所有麻雀的适应度值可表示为:

$$F_X = \begin{bmatrix} f([X_{1,1} & X_{1,2} & \cdots & X_{1,d}]) \\ f([X_{2,1} & X_{2,2} & \cdots & X_{2,d}]) \\ \vdots \\ f([X_{n,1} & X_{n,2} & \cdots & X_{n,d}]) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中 f 为适应度值。

发现者在算法中被赋予了较高的适应度值,因此,在整个种群搜索过程中以发现者的目标作为整个算法的寻优目标,并且发现者会被赋予更多新的食物以提高其搜索能力及范围,发现者位置变换如下:

$$x_{id}^{p+1} = \begin{cases} x_{id}^p \cdot \exp\left(\frac{-i}{\alpha \cdot T}\right) & R_2 < ST \\ x_{id}^p + Q \cdot L & R_2 \geq ST \end{cases} \quad (8)$$

式中 p 为目前迭代次数; T 为最大迭代次数; α 一般为 $(0, 1]$ 中的数值; Q 为服从正态分布的随机数; L 表示一个 $1 \times d$ 的矩阵,该矩阵内所有元素均为 1。

按照麻雀的行为准则,加入者的位置更新描述如下:

$$x_{id}^{p+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left|\frac{xw_d^p - x_{id}^p}{i^2}\right| & i > \frac{n}{2} \\ xb_d^{p+1} + \left|x_{id}^p - xb_d^{p+1}\right| A^+ \cdot L & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中 xb_d^{p+1} 为目前发现者所占据的最优位置; xw_d^p 为最劣位置。

警戒者的位置更新描述如下:

$$x_{id}^{p+1} = \begin{cases} xb_d^p + \beta(x_{id}^p - xb_d^p) & f_i \neq f_g \\ x_{id}^p + K \left(\frac{x_{id}^p - xw_d^p}{|f_i - f_w| + e} \right) & f_i = f_g \end{cases} \quad (10)$$

式中 K 为 $[-1, 1]$ 之间的某一数值; β 为步长控制参数; e 为较小实数; f_i 为第 i 个麻雀的适应度值; f_g 为最优适应度值; f_w 为最差适应度值。

2.2 萤火虫算法优化麻雀搜索算法

萤火虫算法 (FA) 是一种将函数值的改变与萤火虫的群体行为相结合的启发式算法^[10], 利用个体的光亮程度来反映函数值的优劣。该算法在局部搜索方面表现出了良好的性能, 并通过干扰麻雀的位置, 使其移动效率得到提高, 局部寻优能力得到明显改善。

萤火虫的亮度函数为:

$$I = I_0 * e^{-\gamma r_{ij}} \quad (11)$$

式中 I_0 为初始的萤光强度, 根据目标函数变化而变化; γ 为光强度吸收系数, 随着距离增大而减小; r_{ij} 为萤火虫从 i 到 j 的空间距离。

萤火虫的吸引度为:

$$\beta = \beta_0 * e^{-\gamma r_{ij}^2} \quad (12)$$

式中 β_0 为 $r=0$ 时的最大吸引度。

萤火虫 i 被吸引向萤火虫 j 移动的位置更新为:

$$x_i = x_i + \beta * (x_j - x_i) + \alpha * (\text{rand} - 1/2) \quad (13)$$

式中 x_i 与 y_i 为萤火虫在当前种群中的位置; α 为步长因子, 一般为 $[0, 1]$ 中的数值; rand 为 $[0, 1]$ 中服从均匀分布的随机数。

该优化主要是在麻雀搜索过程中, 通过萤火虫对麻雀种群内发现者的定位进行干扰, 以增强其搜寻力, 使其寻优目标更趋近于最优值目标, 对麻雀与最优的麻雀通过萤火虫干扰方法进行定位更新, 将干扰后的麻雀与干扰前的麻雀进行比较, 如果干扰后的麻雀为最优, 则可改变麻雀定位。此算法提高了原麻雀算法对于单峰与多峰函数的优化能力。改进算法流程如图 1 所示。

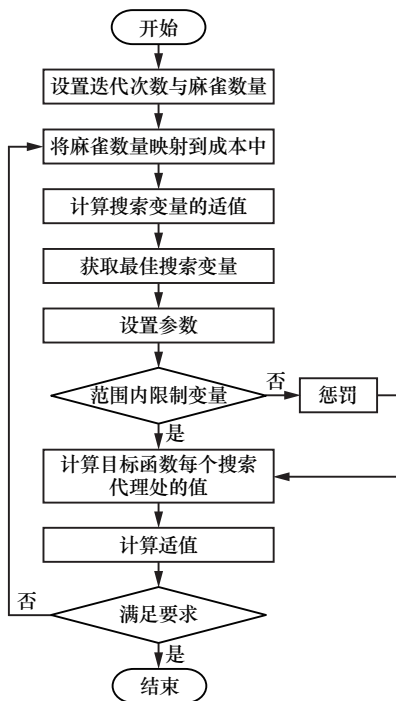


图 1 改进麻雀搜索算法求解流程

一般采用测试函数验证优化后算法的寻优能力。遵循公平原则, 测试的两个算法选用相同的参数, 麻雀种群大小为 20, 迭代次数为 1 000 次, 为减小偶然误差对实验结果的影响, 测试函数共测试 20 次, 以获得目标函数的最优值, 结果见图 2。通过图 2 对比可知, 原麻雀搜索算法最优值远逊色于改进后的麻雀搜索算法, 说明改进麻雀搜索算法精度得到了大幅提升。

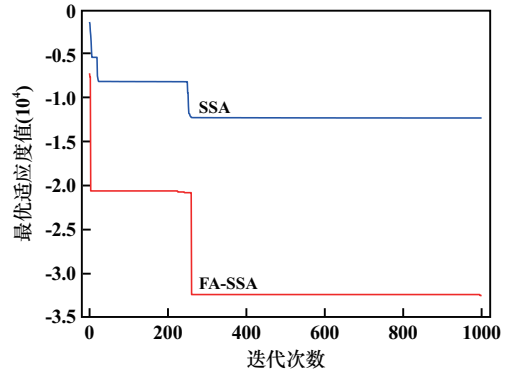


图 2 适应度值曲线

本次仿真实验利用多峰值测试函数进行测试, 该函数搜索维度为 30 维, 搜索范围为 $[-500, 500]$ 。改进麻雀搜索算法运动轨迹见图 3。从图 3 可以看出, 改进麻雀搜索算法大多数能聚集到最优解附近, 说明该算法具有较好的寻优收敛能力, 能够快速找到最优值, 实现对函数快速、精确的求解。

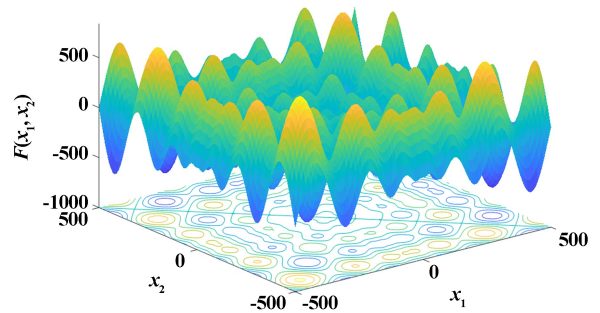


图 3 改进麻雀搜索算法运动轨迹

3 台阶爆破参数优化

3.1 工程参数采集

西藏玉龙矿业地处高海拔的青藏高原, 矿石赋存空间海拔标高一般在 4 200~4 600 m 之间。其含矿物岩石主要有长英质角岩、角岩化石英砂岩等, 该矿山受高原地质环境、气候特性的影响, 生产设备能耗相对较高, 炸药与爆破器材等运输距离较远, 导致该矿区生产成本相比于平原地区明显增多, 亟须进行采场生产成本的控制。

通过采集该矿山实际生产数据得出,该矿山钻进成本 $e_1=44$ 元/m,爆破平台高度 $H=15$ m,炮孔直径 $d=140$ mm,最大孔深 $L_{\max}=18.4$ m,平均孔深 $L=16.9$ m,矿石容重 $\gamma=2.96$ t/m³,炸药以混装乳化炸药为主,单价 $e_2=5.9$ 元/kg,爆破器材消耗单价 $e_3=4.2$ 元/m,矿石运输成本 $e_4=4$ 元/t。通过统计平均块度与铲装成本数据,计算得到 $f_1=0.013, f_2=0.18$,通过统计平均块度与运输成本数据,计算得到 $f_3=-0.0023, f_4=0.06, f_5=0.96$ 。

将实际参数代入式(5)中,得到采场成本计算目标公式,采用改进的麻雀搜索算法,对目标函数进行了优化,得到参数模型公式为:

$$C = \frac{44 \times 16.9}{15 \times a \times b \times 2.66} + 5.9q + \frac{4.2 \times 16.9}{15 \times a \times b \times 2.66} + 0.013X + 0.18 + 8(-0.0023X^2 + 0.06X + 0.96) \quad (14)$$

约束条件为:

$$X = 0.8 \times 10 \times q^{-0.8} \times (0.25 \times 3.14 \times 80^2 \times 17 \times 1.05)^{\frac{1}{6}} \times \left(\frac{115}{100}\right)^{\frac{19}{30}} \quad (15)$$

$$a = mW_1 \quad (16)$$

$$b = a \cdot g \sin 60^\circ \quad (17)$$

$$q = Q / (a \cdot W_1 \cdot H) \quad (18)$$

式中 a 为孔间距, m; b 为排距, m; X 为平均块度, cm; m 为密集系数; W_1 为底盘抵抗线, m; Q 为炸药量, kg; H 为台阶高度, m。

根据以上经验公式可得炸药单耗推荐取值范围为 $[0.3, 0.6]$, 孔间距推荐取值范围为 $[3.0, 7.0]$, 排距推荐取值范围为 $[3.0, 6.0]$ 。利用改进麻雀搜索算法对式(14)进行求解,最终得出最优生产成本为 11.06 元/t, 炸药单耗 $q=0.32$ kg/t, 孔间距 $a=6.2432$ m, 排距 $b=4.9464$ m。参数均在合理的取值范围中,能够满足实际需求。

3.2 数学模型求解

为了验证改进麻雀搜索算法的寻优能力,在此模型的求解中,选取了目前应用比较成熟的差分进化算法(DE)、粒子群算法(PSO)和遗传算法(GA)进行比较^[11-13]。由于构建的求解爆破参数数学模型复杂度相对较低,设置每一种算法迭代次数为 100 次,初始种群为 20,空间维度为 3。4 种算法求解结果见图 4。从图 4 可以看出,模型迭代求解过程中,所有算法均起到了优化效果,其中改进麻雀搜索算法适应度值更好,迭代次数约 40 次时基本达到最优,其他 3 种算法在迭代约 20 次时达到最大值。

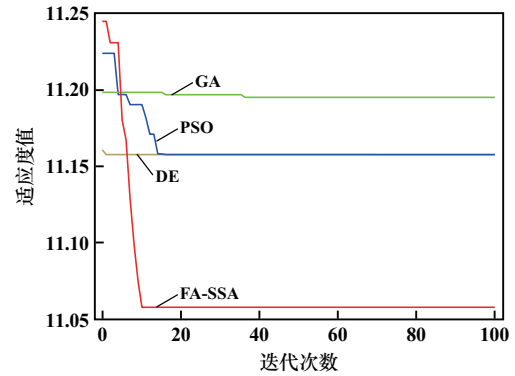


图4 4种算法求解结果

3.3 现场试验

通过分析,确定西藏玉龙矿山在实际爆破应用中的最优孔网参数为:孔间距 $a=6.2$ m,排距 $b=4.9$ m。经现场应用试验验证,采用优化后的爆破参数能够有效降低爆破中大块率高、缩口严重的问题,大块率控制在 10% 以内,提高爆破效果的同时采场成本降低了 7.5%。

4 结 论

1) 在现有采场生产成本模型基础上,通过将排岩成本量化为影响采场生产成本模型的因素,优化了露天矿山成本控制模型,提高了矿山成本控制精度。

2) 优化了采场成本模型的求解算法,利用测试函数证明了算法的优越性,结果表明,改进麻雀搜索算法在收敛速率上差异不大,在求解精确度上显著优于原始麻雀搜索算法。

3) 将该方法成功应用于矿山实际中,通过算法求解得出西藏玉龙矿业最优成本下的爆破参数为:孔间距 $a=6.2$ m、排距 $b=4.9$ m、炸药单耗 $q=0.32$ kg/t,该条件下生产成本 11.06 元/t。研究成果可为具有相似工艺的矿山提供借鉴。

参考文献:

- [1] 郭进平,刘益超,李角群,等.基于三维巷道模型的深孔爆破扇形布孔优化设计[J].工程爆破,2021,27(2):66-72.
- [2] 刘益超,郭进平,李角群,等.基于Floyd算法的扇形中深孔爆破布孔优化设计[J].爆破,2021,38(1):64-69.
- [3] 黄尘,李江腾,赵远,等.基于PFC^{2D}的冬瓜山铜矿爆破参数优化[J].矿冶工程,2022,42(1):1-4.
- [4] 岳中文,吴羽霄,魏正,等.基于PCA-GA-SVM的露天矿爆破振动速度预测模型研究[J].工程爆破,2021,27(4):22-28.
- [5] 田睿,李燕卿,刘占宁,等.基于改进樽海鞘算法优化支持向量机的岩爆预测模型[J].矿冶工程,2023,43(2):5-9.
- [6] 霍晓锋,苟永刚,成涌,等.铜绿山矿中深孔掏槽爆破参数优化研究[J].矿冶工程,2019,39(5):17-21.

(下转第19页)

是间接影响自由水的比例,屈服应力和黏度随灰砂比增加呈现近似线性增长,而料浆浓度直接影响自由水比例,屈服应力和塑性黏度随料浆浓度增加表现为指数增长。

使用 XGBoost 这种高效的梯度提升决策树算法,对料浆流变参数进行预测,得到的预测值与实际值十分接近。控制料浆质量浓度、灰砂比、级配和温度等变量进行试验,将试验得到的流变参数结果作为样本集,屈服应力预测模型各项误差结果为: $RMSE = 4.33$, $MAE = 3.36$;黏度预测模型各项误差结果为: $RMSE = 0.40$, $MAE = 0.31$ 。根据经验法则, $RMSE$ 值在 0.2~0.5 之间,说明该模型能够较准确地预测数据。

XGBoost 的基本思想和 GBDT 相同,但做了一些优化:比如二阶导数使损失函数更精准、正则项避免树过拟合、Block 存储可以并行计算等。使用 XGBoost 模型预测膏体在多因素条件下的流变参数可以得到较高的精度。可以看出,使用该模型误差较小,拟合程度高,能满足实际生产对预测分析的要求。

4 结 语

采用 Brookfield R/S+型流变仪对某尾砂制备的充填料浆进行了流变特性测试,并采用 XGBoost 算法对料浆流变参数进行了预测。结果表明,室温条件下,膏体料浆质量浓度对膏体流变特性的影响强于料浆灰砂比,料浆浓度低于 64%时,灰砂比对流变特性影响较小;料浆浓度增大,料浆屈服应力和黏度呈指数增长,料浆浓度 68%时增长最快;料浆灰砂比增大,料浆屈服应力和黏度呈近似线性增长。XGBoost 预测结果与

实际值的相对误差以及均方差均在合理范围内,证实该模型对预测料浆流变参数具有一定的准确性。

参考文献:

- [1] 刘金枝,高子明. 温度对膏体流变特性影响研究[J]. 矿冶工程, 2020,41(2):9-14.
- [2] 冯胜洋,崔宇,许田贵,等. 铀尾砂膏体充填材料的流动性能研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(2):1-5.
- [3] 吴爱祥,王勇,王洪江. 膏体充填技术现状及趋势[J]. 金属矿山, 2016(7):1-9.
- [4] 翟永刚,吴爱祥,王洪江,等. 全尾砂膏体料浆的流变特性研究[J]. 金属矿山, 2010(12):30-32.
- [5] 王志凯,吕文生,杨鹏,等. 超声波对充填料浆流变特性的影响及流变参数预测[J]. 中国有色金属学报, 2018,28(7):1442-1452.
- [6] DAI Chaoqun, WANG Yong, WU Aixiang, et al. Effect of temperature on the structure of paste slurry at low constant shear rate[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2023,45(1):2417-2427.
- [7] 李翠平,颜丙恒,王少勇,等. 时间-速率双因素下全尾砂膏体的屈服应力易变行为[J]. 工程科学学报, 2020,42(10):1308-1317.
- [8] 马浩吉,王贻明,王元青,等. 西藏甲玛铜矿全尾砂膏体充填料浆流变特性研究[J]. 金属矿山, 2017(11):42-47.
- [9] 吴爱祥,焦华喆,王洪江,等. 膏体尾矿屈服应力检测及其优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013,44(8):3370-3376.
- [10] 王富林,杨仕教,苏帅,等. 高浓度全尾砂充填料浆流变特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2019,36(2):87-90.
- [11] Chen T, Guestrin C. Xgboost: A scalable tree boosting system[C]// Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining, 2016:785-794.

引用本文:刘金枝,殷菲,高子明. 多因素下尾砂充填料浆流变参数试验研究及预测分析[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):15-19.

(上接第 14 页)

- [7] 胡振襄. 露天矿爆破至破碎综合优化[D]. 武汉:武汉理工大学, 2012.
- [8] 周亚博,李克民,肖双双,等. 露天矿排土场堆置参数优化[J]. 金属矿山, 2014(3):48-51.
- [9] 薛建凯. 一种新型的群智能优化技术的研究与应用[D]. 上海:东华大学, 2020.
- [10] 李奕. 基于萤火虫算法的 SDN 多控制器放置方法研究[D]. 烟台:山东工商学院, 2021.
- [11] 周敏. 差分进化算法的改进及其应用研究[D]. 银川:北方民族大学, 2021.

- [12] 冯茜. 基于改进粒子群算法的多目标优化及其应用[D]. 北京:北京科技大学, 2022.
- [13] 杨劼. 求解约束优化问题的遗传算法研究[D]. 大连:大连海事大学, 2013.

引用本文:闫伟然,徐振洋,刘鑫,等. 基于改进麻雀搜索算法的爆破参数优化[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):11-14.