

基于帝国竞争算法的多金属矿山边界品位优化研究

许倩倩¹, 郭进平¹, 王小林¹, 刘亚雄², 薛涛¹

1. 西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安 710055;
2. 河南发恩德矿业有限公司, 河南 洛阳 471700

中图分类号: TD80 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2025)01-0008-07
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.08.020

摘要 边界品位是矿山开采的一个重要决策参数, 在多金属矿山开采项目中, 确定合理的边界品位是为后续开采获取更大经济效益的基础。针对某矿山采选二阶段生产流程, 以最大净现值法为基础, 利用综合品位构建了基于帝国竞争算法(ICA)算法的多金属矿山边界品位动态优化模型, 实现了该银铅矿最佳边界品位的动态确定。实例应用表明: 该模型适用于多金属矿山边界品位的确定。在矿山寿命期间, 通过 ICA 算法所确定的铅金银多金属矿最佳铅边界品位为 2.619%, 后期下降至 1.331%, 矿山总净现值为 127 457.53 万元; 对比 Lane 法, 该模型具有全局搜索能力, 对矿山后期边界品位指标的动态优化更具优势, 为矿山确定合理的边界品位指标提供了新思路。

关键词 多金属矿; ICA 算法; 综合品位; 最大净现值法; 边界品位

0 引言

边界品位是决定矿石与废石界限的生产指标, 同时也是考虑企业是否盈利的经济指标, 其对于确定矿床的开采边界、规划采矿方案、评估矿产资源储量以及进行经济评估具有重要作用^[1-3]。矿山开发属于长期项目, 其寿命周期少则几年多则几十年, 界定矿山边界品位的统计法、盈亏平衡法^[4-6]等传统方法忽略了资金的时间价值, 在矿山全生命周期内难以针对市场的变化做出动态调整, 不利于合理确定中长期生产计划。Lone KF^[7]针对单一金属矿床, 最早提出了净现值最大化的边界品位优化方法。Lane 法综合考虑了矿山开采的机会成本和资金的时间动态价值, 以矿山采选冶三阶段的生产能力为约束条件, 可灵活调整模型参数以适应矿山开发条件及市场变化, 克服了传统方法的不足。国内外学者考虑金属价格、成本、品位的不确定性、库存、品位分布和生产能力^[8-11]对边界品位选择和产能规划的影响, 在 Lane 法的基础上对矿山边界品位指标的优化进行了大量的拓展性研究, 该类研究大多针对单一金属矿山。

目前我国普遍采用单矿种的品位指标圈矿^[12], 事实上, 大多数矿山都是多矿种共伴生的矿床, 单矿种的品位指标圈矿难以反映矿床有用组分的客观赋存实际, 影响了对共伴生矿床的客观评价^[13]。基于此, 有学者引入综合品位概念^[14-15]对多金属矿床的边界品位进行研究, 提出了“综合勘查系统”理论方法^[15]。M. Osanloo 等^[16-17]引入等效品位因子, 分别采用 Lane 模型和盈亏平衡法确定矿山综合品位, Lane 模型计算的采矿作业净现值提升了两倍。随着计算机技术的发展, 一些研究者们开始利用遗传算法(GA)^[18]、网格搜索(GS)^[19]、模因算法(MA)^[20]等元启发式智能算法开发 Lane 模型确定最佳边界品位, 目标函数求解速度快, 结果具有较好的收敛性, 避免陷入局部极值。其中帝国竞争算法(ICA)是 Atashpaz-Gargarie 等^[21]提出的一种模拟人类社会政治结构和国家竞争的元启发式算法。该算法是一种全局性的优化算法, 具有较高的收敛速度, 能够有效地处理各种复杂的非线性问题并寻找最优解, 已被应用于调度^[22]、多目标优化^[23]等多种优化问题。

基于此, 针对多金属矿山边界品位指标确定现状,

收稿日期: 2024-06-07

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2024JC-YBQN-0507); 国家资助博士后研究人员计划项目(GZC20232063); 陕西省博士后科研项目管理项目(2023BSHYDZZ142)

作者简介: 许倩倩(1999—), 女, 硕士, 从事矿山开采、矿业经济研究, E-mail: 2771572390@qq.com。

通信作者: 郭进平(1970—), 男, 副教授, 硕士生导师, 从事复杂矿床开采理论与技术研究, E-mail: 414075711@qq.com; 王小林(1991—), 男, 讲师, 博士, 从事膏体充填理论与技术研究, E-mail: 18706841567@163.com。

本文将以某银铅多金属矿为例, 基于 Lane 法利用综合品位构建考虑采选两阶段的多金属矿综合边界品位优化模型, 并通过 ICA 算法改进原 Lane 求解方法, 优化求解多金属矿边界品位。利用该模型可求得多金属矿寿命周期内的动态边界品位, 获得矿山最大净现值, 提高资源利用率, 对确定多金属矿边界品位指标具有借鉴意义。

1 模型建立

1.1 Lane 的最大净现值法

Lane 提出的最大净现值法目前多应用于单一金属矿山, 该方法将矿山的整个生产过程分为采矿、选矿、冶炼三个主要阶段。每个阶段都有其最大生产力和单位成本, 当不同阶段成为整个生产过程的最大约束, 即相应生产能力制约着整个企业的生产能力时, 最佳边界品位也不同。而在多金属矿床中, 可以将共生伴生金属品位折算为主金属品位^[24], 通过综合品位求解多金属矿边界品位, 降低多金属矿确定边界品位的难度并提高共生伴生金属的利用率。

1.2 多金属矿综合边界品位模型

企业开采单位矿石所获得的利润由两部分组成, 一是已经发生的利润 P , 二是未发生的利润 W , 其中未发生的利润 W 考虑在资源开发决策中的时机性, 被看作机会成本。将这两部分利润折现至时间 0 点, 则开采整个矿山所获总利润为 V ^[25]:

$$V = \frac{W}{(1+d)^T} + \frac{P}{(1+d)^T} \quad (1)$$

式中: d 表示折现率, 由泰勒级数展开式可得 $(1+d)^T \approx 1+Td$, 带入公式(1)中, 则企业在 T 时间内获得的利润 v 为:

$$v = V - W = P - VTd \quad (2)$$

根据我国目前矿业现状, 精矿仍为主要销售产品。因此, 本文将矿山生产主要分为采、选两个阶段, 并基于 Lane 法构建边界品位优化模型。开采阶段, 根据采矿厂产能确定开采的矿岩量; 选矿阶段, 根据选矿厂产能确定所处理的矿石量上限, 对矿石进行磨碎和选别, 得到精矿。根据上述生产过程, 充分考虑不同阶段的成本和销售收入, 企业获得的整体利润表示如下:

$$P = sQ_r - hQ_h - mQ_m - fT \quad (3)$$

其中

$$Q_r G = Q_h \bar{g}_y \quad (4)$$

式中: P 表示总利润, 元/t; s 表示金属的销售价格, 元/t; h 为选矿成本, 元/t; m 为矿石开采成本, 元/t; Q_m 为矿

石开采量, t; Q_h 为矿石入选矿量, t; Q_r 为精矿产量, t; f 为固定成本, 元/a; T 为总生产时间, $\bar{g}$ 为入选矿石平均品位, G 为精矿品位, y 为选矿回收率。

为保证矿产资源的综合利用, 在多金属矿山中, 以矿山综合品位为基准计算边界品位, 考虑矿产资源的综合利用, 为更加全面反映资源潜在价值, 利用产值法计算矿石综合品位, 其折算表达式为^[14]:

$$k_i = \frac{s_i y_i}{s_{\pm} y_{\pm}} \quad (5)$$

$$\bar{g} = \bar{g}_{\pm} + \sum_{i=1}^n k_i \times \bar{g}_i \quad (6)$$

式中: k_i 是有价组分的品位折算系数; $s_{\pm}$ 、 s_i 分别为主、共生伴生金属精矿的市场价格, 元/t; $y_{\pm}$ 、 y_i 分别是主、共生伴生金属的选矿回收率; $\bar{g}_{\pm}$ 、 $\bar{g}_i$ 分别为为主、共生伴生金属入选平均品位。

将公式(3)带入公式(2)中, 可得在 T 时间内企业采矿生产应获得的利润 v 为:

$$v = sQ_r - hQ_h - mQ_m - (f + Vd)T \quad (7)$$

其中 T 将受到矿山产能的约束, 如果矿山产能 M 是决定性约束, 则 $T = Q_m/M$, 此时开采矿山获得的利润为:

$$v_m = sQ_r - hQ_h - \left(m + \frac{f + Vd}{M} \right) Q_m \quad (8)$$

如果选矿厂产能 H 是决定性约束, 则 $T = Q_h/H$, 此时开采矿山获得的利润为:

$$v_h = sQ_r - \left(h + \frac{f + Vd}{H} \right) Q_h - mQ_m \quad (9)$$

矿山开采的决定性约束将由 v_m 和 v_h 中的较小值决定^[26], 因此模型求解的目标函数为:

$$\max v = \max(\min(v_m, v_h)) \quad (10)$$

1.3 基于 ICA 算法的模型求解

ICA 算法模拟了帝国的建立、扩张和衰落过程, 通过竞争和合作来寻找最优解。其基本思想是通过模拟帝国间的领地扩张和争夺过程来进行决策优化。算法将解空间划分为多个帝国, 每个帝国由多个领地组成, 每个领地对应一个解。帝国之间进行领地的争夺、领地的扩张和收缩, 通过竞争和合作来逐步优化解空间, 最终得到最优解。在本模型中, 初始化的种群即为边界品位, 其具体步骤如下:

(1) 确定输入变量: 品位-吨位数据; 折现率 d ; 金属价格 s ; 采选成本 h 、 m ; 固定成本 f ; 选矿回收率 y ; 采选厂生产能力 H 、 M 。

(2) 根据品位-吨位数据设置生成种群范围为品位区间上下限的个体数量 n 个, 根据公式(10)计算个体的适应度并进行排序, 选择前 N 个为帝国, 即得到

以这 N 个边界品位为中心的集合, 该集合其他个体个数根据中心边界品位的适应度比例进行分配。集合优化过程包括同化、革命、竞争, 从而实现集合的迭代更新。竞争过程中, 当一个集合失去所有个体时, 该集合消失。

(3) 判断此时是否满足以下终止条件: 达到设定迭代次数或最优个体已达到设定的停止迭代次数且结果无改进。若是, 结束算法获得最优边界品位; 若否, 则进入新一轮迭代优化, 直至满足终止条件。

(4) 循环求和, 根据第一年的最佳边界品位进行矿山开采, 更新品位-吨位数据, 开始第二年的边界品位寻优, 最终求和得到该矿山在 n 年内所能创造的最大净现值。

该算法具体流程如图 1 所示。

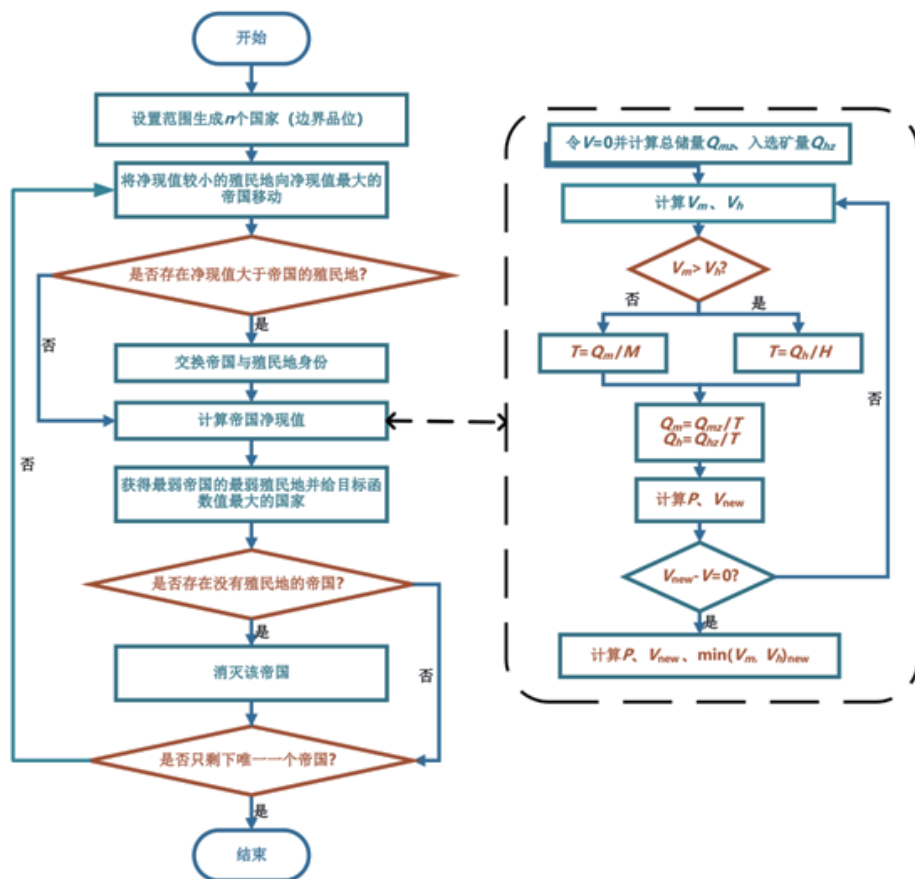


图 1 边界品位优化步骤

Fig. 1 Steps of cut-off grade optimization

表 1 矿床经济参数表

Table 1 Economic parameters of ore deposit

指标	采矿成本/(元·t ⁻¹)	选矿成本/(元·t ⁻¹)	年固定成本/万元	开采能力/(万 t·a ⁻¹)	选矿能力/(万 t·a ⁻¹)	折现率/%
数值	171	72	3 816	23	15	15

指标	选矿回收率			精矿品位			价格		
	Pb/%	Ag/%	Au/%	Pb/%	Ag/(g·t ⁻¹)	Au/(g·t ⁻¹)	Pb/(元·t ⁻¹)	Ag/(元·t ⁻¹)	Au/(元·t ⁻¹)
数值	91.32	92.67	92.01	40	2 602	29.84	13 720	3.33	302.55

2 应用实例

2.1 矿山概况

以某银铅多金属矿为例, 该矿山区内矿石以原生矿为主, 矿石类型、矿物组成均较简单, 矿物有用元素为 Pb、Ag 和 Au。该矿区矿石储量大, 品位较富, 目前主要采用地下开采方式, 矿石可选性能良好, 选矿回收率较高, 工业利用性能好。

该矿床原生矿主要包含 Pb、Ag 和 Au 等元素, 其中含铅银的原生矿占比 90% 左右, 其他为含铅银金的原生矿, 综合回收 Pb、Ag 和 Au 等有价元素。其生产技术指标、相关成本、价格、生产能力等经济参数见表 1, 其中金属价格参照近 5 年来金属市场价格, 取

Ag 4.01 元/g, 精矿计价系数为 83%; Pb 17 150 元/t, 精矿计价系数为 80%; Au 351.80 元/g, 精矿计价系数为 86%。

2.2 综合品位计算

该矿山探矿工程勘探了 466 个钻孔, 获取样品数 16 745 件, 其中含 Pb 16 734 件、Ag 16 734 件、Au 16 381 件, 勘查工程取样分析各金属品位变化范围分别为 Pb 0.01%~30.56%、Ag 1.0~4 229.0 g/t、Au 0.01~3.81 g/t。

矿山产品为银铅精矿、银铅金精矿, 两种产品中铅均为主金属。以铅为主元素, 将银和金品位分别折算成铅品位。根据公式(5)、(6)以及表 1 数据计算得到在多金属矿中银、金金属折算系数分别为:

$$k_{Ag} = \frac{S_{Ag}Y_{Ag}}{S_{Pb}Y_{Pb}} = \frac{3\,328\,300 \times 92.67\%}{13\,720 \times 91.32\%} = 246.17 \quad (11)$$

$$k_{Au} = \frac{S_{Au}Y_{Au}}{S_{Pb}Y_{Pb}} = \frac{302\,550\,000 \times 92.01\%}{13\,720 \times 91.32\%} = 22\,218.37 \quad (12)$$

因此, 利用折算系数和金属平均品位可计算出综合铅品位:

$$g_{\text{综}} = g_{Pb} + 246.17 \times g_{Ag} + 22\,218.37 \times g_{Au} \quad (13)$$

以 1% 的步长划分矿石品位段, 处理后的矿床综合品位-吨位分布情况如图 2 所示。

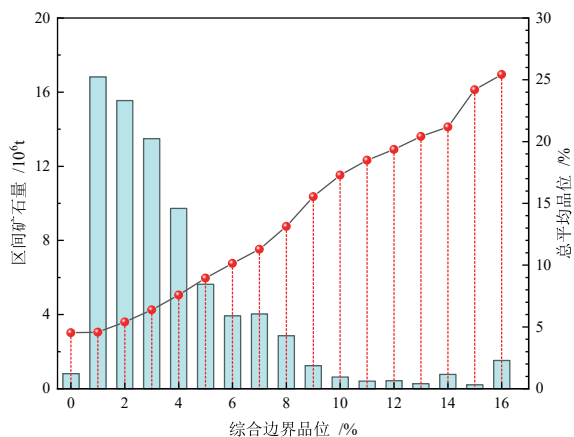


图 2 品位-吨位分布

Fig. 2 Reserve grade distribution

2.3 边界品位优化结果与分析

根据数据处理结果选定在 0~0.16 的综合品位范围内随机生成边界品位, 以此迭代搜寻求解每一年的最佳边界品位。通过应用帝国竞争算法, 殖民地在不断迭代中向帝国移动, 最终剩下一个利润最高的帝国, 如图 3 所示。此时对应的边界品位为在这一年能使矿山总净现值达到最大的最佳边界品位。根据算法计算, 设置迭代次数为 200, 取迭代次数平均值可知, 迭代 10 次左右将求得每年最佳边界品位及其对应的最大利润, 模型计算效率较高。

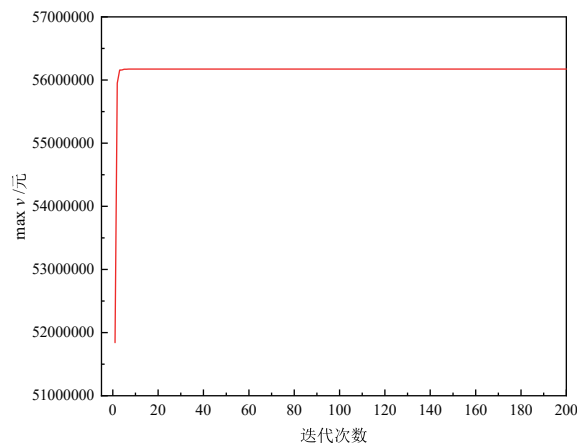


图 3 边界品位目标函数优化迭代情况

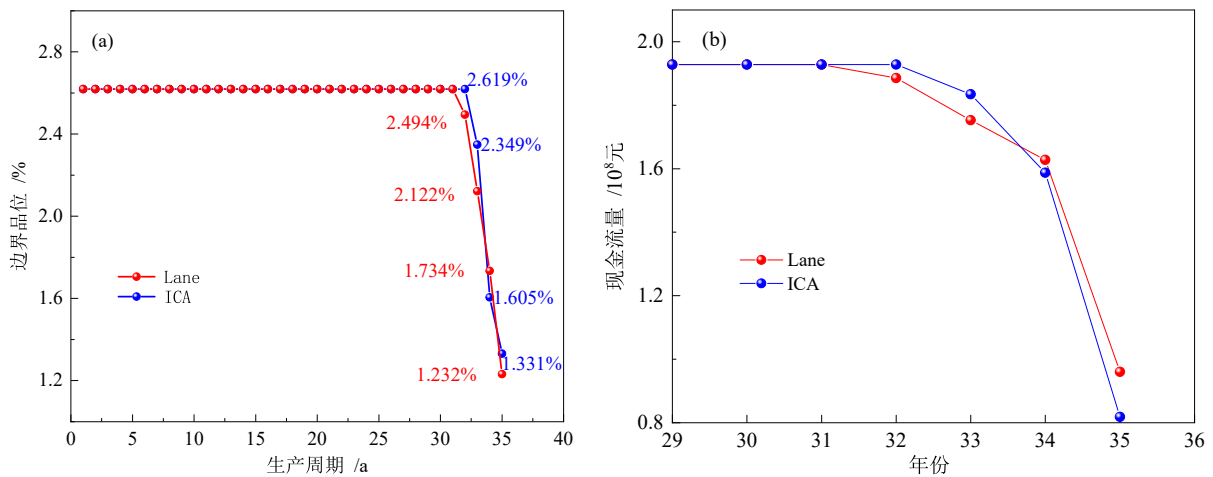
Fig. 3 Optimization iteration of cut-off grade objective function

通过应用 ICA 算法, 计算了该银铅多金属矿床在生命周期内的最佳边界品位。最佳边界品位、开采量、选矿量、精矿量和每年现金流量结果如表 2 所示。根据表 2 可知, 除后 3 年以外每年的最佳铅边界品位都为 2.619%, 开采期间, 矿山的采厂和选厂几乎每年都处于一个平衡状态, 能够满负荷工作, 达到最高工作效率, 到最后 3 年时, 采场虽没能满负荷工作, 但选厂仍能满负荷工作, 使矿石处理效果最好, 最终可以根据每年现金流量计算出矿山项目全寿命周期内所能获得的总净现值为 1 274 575 317 元。

将上述结果与 Lane 法所求结果进行对比, 如图 4 所示。两种方法所得最佳边界品位高度一致, 只在最后 4 年出现不同, 通过图 4a 可知矿山寿命周期后 4 年最佳边界品位逐年下降, 表明随着矿山寿命周期接近尾声, 矿山中较高品位的矿石储量逐渐减少, 剩余的矿石品位较低。Lane 法所得最佳铅边界品位将下降至 1.232%, 而 ICA 算法所得最佳边界品位将下降至 1.331%, 对比 Lane 法所得最佳边界品位更高, 较高的最佳边界品位表明 ICA 算法能够更有效地优化目标函数, 找到更优解。可见, ICA 算法在寻找最佳边界品位方面具有更好的性能及更高的准确性, 能够找到更接近于全局最优解的结果。对比两种方法在最后 4 年所得的最佳边界品位对应的现金流量, 如图 4b 所示, 当开采至矿山后期, 矿石品位逐渐降低, 资源储量减少, 两种算法所确定的最佳边界品位都开始呈下降趋势。对于 Lane 法为获取后两年更高的利润而先降低边界品位, ICA 算法所确定的最佳边界品位则更倾向于先确定高的边界品位, 以优先获得更高的年度现金流量, 更加符合矿山开采经济策略。计算 Lane 法最所能获得的总净现值, 为 1 274 266 111 元, 对比 ICA 算法减少 309 206 元, 该差额主要来源于后 4 年的边界品位指标影响。同时, ICA 算法所确定的最佳边界品位基本上是高于 Lane 法所确定的, 更高的边界品位更能提高开采效率, 减少资源浪费, 提升经济效

表 2 ICA 算法结果
Table 2 Results of ICA

年份	边界品位	开采量/t	选矿量/t	精矿量/t	现金流量/元	累计净现值/元
1	0.026 187	230 000	150 000	20 488.42	192 811 070.1	1 274 415 276
2	0.026 187	230 000	150 000	20 488.42	192 811 070.1	1 272 766 498
3	0.026 187	230 000	150 000	20 488.42	192 811 070.2	1 270 870 403
4	0.026 187	230 000	150 000	20 488.42	192 811 070.2	1 268 689 893
5	0.026 187	230 000	150 000	20 488.42	192 811 070.2	1 266 182 307
.....						
31	0.026 187	230 000	150 000	20 488.42	192 811 078.3	557 616 793.2
32	0.026 187	230 000	150 000	20 488.42	192 811 081.4	448 448 241
33	0.023 492	212 567.1	150 000	19 591.26	183 483 088.2	328 757 845.9
34	0.016 052	174 485	150 000	17 315.01	158 765 044.3	201 402 698.9
35	0.013 31	89 025.88	81 774.53	9 017.471	81 805 064.02	40 009 635.65



(a) 边界品位结果对比; (b) 现值结果对比

图 4 Lane 算法与 ICA 算法结果对比

Fig. 4 Comparison of Results between Lane and ICA

益,降低生产成本,这进一步验证了 ICA 算法在计算矿山边界品位方面具有更良好的性能。

3 结论

(1)通过对共伴生金属的折算,得到了矿山综合品位,构建了基于 ICA 算法的采选两阶段的多金属矿综合边界品位优化模型,降低了多金属矿山边界品位求解复杂度。

(2)基于综合边界品位优化模型,应用 ICA 算法计算某铅多金属矿最佳铅边界品位由早期的 2.619% 至矿山寿命周期结束时的 1.331%,所获总净现值为 1 274 575 317 元;矿山开采至后期,矿石品位逐渐降低、资源储量减少时,ICA 算法计算结果更优。与原 Lane 法结果相比,ICA 算法在寻找最佳边界品位方面具有更好的性能和更高的准确性。

(3)ICA 算法相较于 Lane 法在确定矿山后期边界品位更具优势,将该模型应用于贫矿边界品位上应具

有良好的应用前景,可为矿山生产规划提供科学指导。

参考文献:

- [1] 冯巧云,马涛,邓宇.普通克里格法在草桃背铀矿床资源量估算中的应用[J].金属矿山,2023(12):171-176.
FENG Q Y, MA T, DENG Y. Application of ordinary Kriging method in resource estimation of Caotaobei uranium deposit[J]. Metal Mines, 2023(12): 171-176.
- [2] 杨占峰,王晗,侯晓志.白云鄂博东露天境界外铁矿体开采探讨[J].稀土,2022,43(3):1-8.
YANG Z F, WANG H, HOU X Z. Exploration of iron ore body mining outside the open-pit cut-off of Bayan Ebo East Mine[J]. Rare Earth, 2022, 43(3): 1-8.
- [3] 王青,顾晓薇,胥孝川.边界品位对露天矿最佳境界及总利润的影响[J].东北大学学报(自然科学版),2018,39(8):1187-1191.
WANG Q, GU X W, XU X C. The influence of cut-off grade on the optimal state and total profit of open-pit mines[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2018, 39(8): 1187-1191.
- [4] 熊涛.国内某铅锌银矿矿床工业指标制定[J].有色冶金设计与研

- 究, 2023, 44(4): 1–5.
- XIONG T. Industrial indicator formulation for a domestic lead zinc silver deposit[J]. *Nonferrous Metallurgical Design and Research*, 2023, 44(4): 1–5.
- [5] 魏进平. 沙溪铜矿矿床工业指标探讨[J]. *世界有色金属*, 2022(9): 100–102.
- WEI J P. Discussion on industrial indicators of Shaxi copper deposit[J]. *World Nonferrous Metals*, 2022(9): 100–102.
- [6] 徐静, 吕宏芝, 陈丙强, 等. 四川某铜矿矿床工业指标的探讨[J]. *矿业研究与开发*, 2016, 36(10): 140–146.
- XU J, LV H Z, CHEN B Q, et al. Discussion on industrial indicators of a copper deposit in Sichuan[J]. *Mining Research and Development*, 2016, 36(10): 140–146.
- [7] LANE K F. The economic definition of ore: Cut-off grades in theory and practice[M]. Mining Journal Books, 1988.
- [8] ASAD M W A. Optimum cut-off grade policy for open pit mining operations through net present value algorithm considering metal price and cost escalation[J]. *Engineering Computations*, 2007, 24(7): 723–736.
- [9] GITHIRIA J, MUSINGWINI C. A stochastic cut-off grade optimization model to incorporate uncertainty for improved project value[J]. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2019, 119(3): 217–228.
- [10] PAITHANKAR A, CHATTERJEE S, GOODFELLOW R, et al. Simultaneous stochastic optimization of production sequence and dynamic cut-off grades in an open pit mining operation[J]. *Resources Policy*, 2020, 66: 101634.
- [11] BALCI M, KUMRAL M. Impacts of grade distribution and economies of scale on cut-off grade and capacity planning[J]. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2024: 1–23.
- [12] 万贵龙. 综合品位指标在多金属矿勘查中的应用——以广西南丹黑水沟-大树脚矿段锌多金属矿为例[J]. *矿产勘查*, 2022, 13(1): 95–99.
- WAN G L. Application of comprehensive grade indicators in the exploration of polymetallic mines – taking the zinc polymetallic mine in the Heishuigou Dashujiao section of Nandan, Guangxi as an example[J]. *Mineral Exploration*, 2022, 13(1): 95–99.
- [13] 黄炳香, 赵兴龙, 韩晓克, 等. 煤系共伴生矿产协同开发[J]. *采矿与安全工程学报*, 2024, 41(1): 1–14.
- HUANG B X, ZHAO X L, HAN X K, et al. Collaborative development of coal bearing co associated minerals[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2024, 41(1): 1–14.
- [14] 李静. 蔡家隈子镍钴多金属矿最低综合工业品位制定方法[J]. *有色矿冶*, 2023, 39(5): 62–63+66.
- LI J. Determination method of the minimum comprehensive industrial grade of the Caijiakuizi Nickel-cobalt polymetallic ore[J]. *Nonferrous Metals and Metallurgy*, 2023, 39(5): 62–63+66.
- [15] 高任, 李旭辉, 叶少贞, 等. 综合勘查系统: 一种适合铜-银共生矿床的勘查理论方法[J]. *中国矿业*, 2021, 30(2): 25–30.
- GAO R, LI X H, YE S Z, et al. Comprehensive exploration system: A theoretical method for exploration of copper silver symbiotic deposits[J]. *China Mining*, 2021, 30(2): 25–30.
- [16] OSANLOO M, ATAEI M. Using equivalent grade factors to find the optimum cut-off grades of multiple metal deposits[J]. *Minerals Engineering*, 2003, 16(8): 771–776.
- [17] ATAEI M, OSANLOO M. Using a combination of genetic algorithm and the grid search method to determine optimum cutoff grades of multiple metal deposits[J]. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 2004, 18(1): 60–78.
- [18] AHMADI M R, SHAHABI R S. Cutoff grade optimization in open pit mines using genetic algorithm[J]. *Resources Policy*, 2018, 55: 184–191.
- [19] CETIN E. Assessment of costs in cut-off grades optimization by using grid search method[J]. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 2018, 34(2): 67–80.
- [20] CETIN E, DALGIC A. The optimization of cut-off grades by means of memetic algorithms[J]. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi—Mineral Resources Management*, 2022, 38(1): 107–122.
- [21] ATASHPAZ-GARGARI E, LUCAS C. Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition[C]//2007 IEEE congress on evolutionary computation, 2007: 4661–4667.
- [22] 李斌, 黄起彬. 面向资源约束项目调度的二阶段帝国竞争算法[J]. *计算机科学与探索*, 2023, 17(11): 2620–2639.
- LI B, HUANG Q B. Two-stage imperial competition algorithm for resource-constrained project scheduling[J]. *Computer Science and Exploration*, 2023, 17(11): 2620–2639.
- [23] 王庆丰, 马少飞, 刘强, 等. 基于帝国竞争算法的主动配电网多目标优化研究[J]. *智慧电力*, 2018, 46(8): 74–78.
- WANG Q F, MA S F, LIU Q, et al. Research on multi-objective optimization of active distribution networks based on imperial competition algorithm[J]. *Smart Power*, 2018, 46(8): 74–78.
- [24] 全国自然资源与国土空间规划标准化技术委员会. 矿产资源综合利用技术指标及其计算方法: GB/T 42249—2022[S].
- [25] ASAD M W A, QURESHI M A, JANG H. A review of cut-off grade policy models for open pit mining operations[J]. *Resources Policy*, 2016, 49: 142–152.
- [26] 李裕伟. 边界品位确定方法及其在矿产勘查中的应用[J]. *中国国土资源经济*, 2022, 35(3): 4–15.
- LI Y W. Method for determining cut-off grade and its application in mineral exploration[J]. *China Land and Resources Economy*, 2022, 35(3): 4–15.

Research on Optimization of Cut-off Grade in Polymetallic Mines Using Imperialist Competitive Algorithm

XU Qianqian¹, GUO Jinping¹, WANG Xiaolin¹, LIU Yaxiong², XUE Tao¹

1. School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;

2. Henan Fender Mining Co., LTD, Luoyang 471000, Henan, China

Abstract: Cut-off grade is an important decision parameter in mining operations. In multi metal mining projects, determining a reasonable cut-off grade is the foundation for obtaining greater economic benefits for subsequent mining. Based on the maximum net present value method, a dynamic optimization model for the comprehensive cut-off grade of a polymetallic mine based on ICA algorithm was constructed for the two-stage production process of mining and selection. The optimal cut-off grade of a certain silver lead mine was dynamically determined. The example application shows that the model is suitable for determining the cut-off grade of polymetallic mines. During the lifespan of the mine, the optimal cut-off grade for a Pb-Au-Ag polymetallic material determined by the ICA algorithm was 2.619%, which later decreased to 1.331%. The total net present value of the mine was 1 274.575 3 million yuan; Compared with the Lane method, this model has global search ability and is more advantageous in dynamic optimization of cut-off grade indicators in the later stage of mining, providing new ideas for determining reasonable cut-off grade indicators in mines.

Keywords: polymetallic ore; imperialist competitive algorithm; comprehensive grade; maximum net present value method; cut-off grade

引用格式: 许倩倩, 郭进平, 王小林, 刘亚雄, 薛涛. 基于帝国竞争算法的多金属矿山边界品位优化研究[J]. 矿产保护与利用, 2025, 45(1): 8-14.

XU Qianqian, GUO Jinping, WANG Xiaolin, LIU Yaxiong, XUE Tao. Research on optimization of cut-off grade in polymetallic mines using imperialist competitive algorithm[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2025, 45(1): 8-14.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn