高海拔寒区冻融循环下露天矿台阶高度优选①

聂港，徐海，蒋雨村，马驰
（长沙有色冶金设计研究院有限公司，湖南 长沙 410019）

摘　要：针对高海拔寒区露天矿台阶高度优选问题，提出了一种考虑冻融循环影响的多目标决策方法。基于铲装设备选型与底盘抵抗线等参数，确定台阶高度初选范围为 12~18 m，并设定 7 个备选方案。采用 GeoStudio 软件对冻融循环 25 次后的边坡稳定性进行数值模拟，得到各方案安全系数为 1.196~1.214；构建矿石贫损模型、穿爆成本模型及矿岩运输功模型，计算各方案在贫化率、损失率、穿孔成本、爆破成本及运输功等指标下的效果值。在此基础上，运用熵权法确定各指标权重，计算备选方案综合评分。结果表明：15 m 台阶方案综合评分最高（0.516 6），为最优方案。该方法将冻融循环力学效应纳入多目标评价体系，为高海拔寒区露天矿台阶高度设计提供了量化决策依据。

关键词：高海拔；露天矿；台阶高度；熵权法；冻融循环；多目标决策
中图分类号：TD854　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.001
文章编号：0253-6099（2026）04-0001-07

Optimization of Bench Height for Open-Pit Mines Under Freeze-Thaw Cycles in High-Altitude Cold Regions

NIE Gang, XU Hai, JIANG Yucun, MA Chi
(*CINF Engineering Co., Ltd., Changsha* 410019, *Hunan*, *China*)

Abstract: Aiming at optimization of bench height for open-pit mines in high-altitude cold regions, a multi-objective decision-making method considering the influence of freeze-thaw cycles was proposed. Based on parameters including shoveling equipment selection and toe burden, the bench height was preliminarily determined to be within the range of 12−18 m, and seven alternative schemes were proposed. Numerical simulation of slope stability after 25 freeze-thaw cycles was conducted by adopting GeoStudio software, and the safety factors of each scheme ranged from 1.196 to 1.214. Models for ore dilution and loss, drilling and blasting cost, and ore-rock transportation work were then established to calculate the performance values of each scheme in terms of dilution rate, loss rate, drilling cost, blast cost, and transportation work. On this basis, the entropy-weight method was used to determine the weight of each index, and the comprehensive scores of alternative schemes were calculated. The results show that the 15 m bench scheme achieves the highest comprehensive score (0.516 6), and is identified as the optimal solution. Incorporating the mechanical effects of freeze-thaw cycles into the multi-objective evaluation framework, this method provides a quantitative decision-making basis for bench height design of open-pit mines in high-altitude cold regions.

Key words: high altitude; open-pit mine; bench height; entropy-weight method; freeze-thaw cycle; multi-objective decision

露天矿台阶高度是影响开采效率、经济效益与安全生产的关键参数[1]。对于高海拔露天矿，台阶高度选择需在考虑常规参数基础之上，分析冻融循环对边坡稳定性的影响。因此，在复杂地质条件与高海拔环境约束下，如何构建兼顾安全、经济与高效的多目标台阶高度优选方法，成为亟待解决的关键问题。

目前，国内外学者围绕台阶高度优化已开展多维度研究。一方面，基于工艺适配性，研究台阶高度与设

① **收稿日期**：2026-03-04
基金项目：国家重点研发计划（2022YFC2903905）
作者简介：聂港（1997—），男，湖南怀化人，硕士，助理工程师，主要从事有色金属矿床开采工程设计与技术研究。E-mail：15874560900@163.com
通信作者：徐海（1986—），男，湖南浏阳人，博士，高级工程师，主要从事有色金属矿床开采工程设计与技术研究。E-mail：xuhai104@163.com

备性能、开采工艺的关联性[2-4];另一方面,基于多目标决策方法,开展台阶高度优化研究[1,5]。同时,数值模拟[6]、爆破振动影响研究[7-8]、边坡稳定性分析[9]、运输功经济评价[10-12]以及矿石贫损控制[13]等研究工作进一步拓展了台阶高度优化的理论体系。然而,由于高海拔矿区地质、环境等因素的特殊性与复杂性,现有成果直接应用于高海拔寒区露天矿面临一定局限性,需构建综合考虑开采工艺适应性、经济性、安全性因素的台阶高度优选方法。

本文针对某高海拔寒区露天矿工况条件,根据铲装设备选型、底盘抵抗线等设计参数,确定台阶高度取值范围。运用 GeoStudio 软件计算冻融条件下边坡稳定性安全系数,以采矿贫损率、穿爆成本、矿岩运输功及边坡稳定性为评价指标,基于熵权法对不同台阶高度进行比选,最终确定该高海拔寒区露天矿的最优台阶高度。

1 工程背景

某露天矿山为大型斑岩型铜矿床,位于藏北高原中西部,属高原中低山地貌区,区内海拔多在 4 700~5 100 m,最高海拔 5 540 m,相对高差 440~840 m。矿体主要赋存于花岗闪长斑岩、变长石石英砂岩、绢云母化石英砂岩中。矿区出露地层较为简单,矿体受蚀变花岗闪长斑岩岩枝控制,矿岩硬度系数 f 为 3~11。

矿山属高原亚寒干旱季风气候,年均气温-0.2 ℃,最冷月(1 月)平均气温-12.8 ℃,最热月(7 月)平均气温 13.8 ℃,极端最低温-44.6 ℃,极端最高温 26 ℃。矿山地处季节性冻土分布区,冰冻期达 6 个月,每年 10 月中旬开始冻结,次年 5 月开始融化,冻结深度一般为 1~2 m。

根据矿山边坡稳定性分析结果,已确定采场推荐边坡角为 35.5°~43°,考虑到矿山的特殊环境和复杂矿岩条件,基于常规地质和低海拔经验进行台阶高度设计具有一定不确定性:高海拔寒区冻融循环作用对边坡稳定性存在影响,不合理的台阶高度会增加边坡安全管控难度;矿山规划开采深度大(最大边坡高度约 790 m),优化台阶高度是开采后期调整工作帮空间需求的有效手段。鉴于上述情况,重点研究矿山台阶高度的优选设计,在确保安全作业的前提下,匹配设备潜能,保障矿区生产效能。

2 台阶高度方案初选

1) 按铲装设备确定台阶高度范围。露天矿台阶高度 h 与采场矿岩爆堆高度 h_b 之间的关系可表示为:

$$h_b \leqslant h_{max} \tag{1}$$

$$h = h_b \times K_b \tag{2}$$

式中:K_b 为岩石爆破系数;h_{max} 为铲装设备的最大挖掘高度,m。

2) 按底盘抵抗线确定台阶高度范围。台阶高度 h 与底盘抵抗线 W 之间的关系可表示为:

$$h = (1.11 \sim 1.67) \times W \tag{3}$$

矿山选取的主要铲装设备最大挖掘高度为 18.2 m,设计底盘抵抗线 9.5 m。根据式(1)~(3),综合考虑矿山年采剥量及矿岩特性,确定台阶高度范围为 12.1~18.2 m,据此,设计的露天矿台阶高度备选方案及边坡结构参数详见表 1。

表 1 露天矿台阶高度备选方案及边坡结构参数

Table 1 Alternative bench height schemes and slope structure parameters for open-pit mine

台阶高度/m	推荐终了边坡角/(°)	台阶坡面角/(°)	安全平台宽度/m	清扫平台宽度/m
12	35.5~43	65	4.0	8.0~13.5
13	35.5~43	65	4.4	8.0~14.5
14	35.5~43	65	4.7	8.1~15.9
15	35.5~43	65	5.0	8.6~16.9
16	35.5~43	65	5.4	9.1~18.0
17	35.5~43	65	5.7	9.7~19.4
18	35.5~43	65	6.0	11.6~20.5

注:备选方案均采用两个台阶一组合布置方式,即每隔一个安全平台设置一个清扫平台。

3 台阶高度优化

3.1 评价指标选取及效果值计算

本文采用熵权法对台阶高度进行优选,熵权法评价指标的合理程度影响评价结果[14]。综合考虑矿山资源条件、开采工艺等实际工况条件,选取采矿贫化率、损失率、穿孔成本、爆破成本、矿岩运输功、边坡稳定性(安全系数)为评价指标,详见表 2。

表 2 露天矿台阶高度综合评价指标

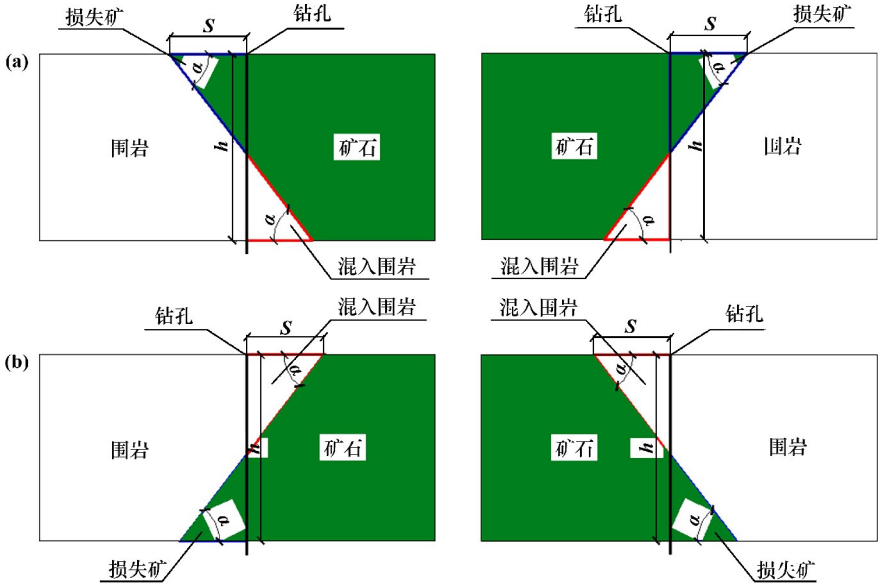
Table 2 Comprehensive evaluation indices for bench height of open-pit mine

指标类别	子项	类型
技术指标	贫化率	负向
	损失率	负向
	矿岩运输功	负向
安全指标	边坡稳定性	正向
成本指标	穿孔成本	负向
	爆破成本	负向

3.1.1 矿石贫化损失模型

针对厚大且连续产出矿体,假定其在每一个台阶

分层内产状倾角一定,则矿体倾向方向上矿岩接触带处的贫化损失如图 1 所示。由图 1 可知,矿体沿走向方向下盘发生图 1(a)所示的贫化损失,上盘发生图 1(b)所示的贫化损失。



(a) 沿矿体走向下盘贫损;(b) 沿矿体走向上盘贫损

图 1　矿岩接触带贫化损失示意图

Fig. 1　Schematic of dilution and loss in ore-rock contact zone

单台阶水平内矿石损失体积为:

$$V_{损i}=\frac{1}{4}P_i\cdot\left[d^2\cdot\tan\alpha+\frac{(h-d\cdot\tan\alpha)^2}{\tan\alpha}\right] \tag{4}$$

式中:$V_{损i}$为第 i 台阶水平矿石损失体积,m^3;P_i为第 i 台阶水平矿体围岩分界线周长,m;d 为钻孔中心距矿岩分界线的垂直距离,m;α 为该台阶水平内矿体倾角,(°)。

单台阶水平内废石混入体积为:

$$L=\frac{\sum_{i=1}^{n}V_{损i}}{V_k}\times 100\% \tag{5}$$

$$D=\frac{\sum_{i=1}^{n}V_{贫i}}{V_k}\times 100\% \tag{6}$$

式中:L 为境界内损失率,%;D 为境界内贫化率,%;V_k 为境界内矿石体积,m^3;$V_{贫i}$为第 i 台阶混入废石体积,m^3。

3.1.2　*矿岩运输功*

矿区模拟图如图 2 所示,露天矿卡车运输做功过程如图 3 所示,运输功消耗主要包括两部分:克服阻力所做的功 W_f,以及改变矿岩势能所做的功 W_e[15]。W_e 计算式为:

$$W_e=G\cdot H \tag{7}$$

式中:G 为卡车的有效载重,t;H 为斜坡段的高度,m。

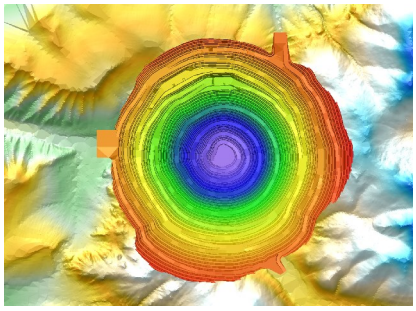


图 2　矿区模拟图

Fig. 2　Schematic of simulated mining area

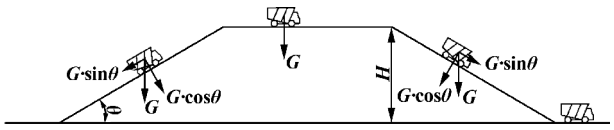


图 3　卡车运输做功过程示意图

Fig. 3　Schematic of truck transportation work process

卡车所受滚动阻力 F_f、坡度阻力 F_p、空气阻力 F_w 计算如下:

$$F_f=G\cdot\omega\cdot\cos\theta \tag{8}$$

$$F_p=G\cdot\mu \tag{9}$$

$$F_w=\frac{1}{2}\cdot C\cdot S\cdot\rho\cdot\bar{v}^2 \tag{10}$$

式中:ω 为道路的滚动阻力系数;θ 为斜坡路段的坡度角,(°);μ 为坡度阻力系数,$\mu=\sin\theta$;C 为空气阻力系

数;ρ 为空气密度,kg/m^3;S 为卡车迎风面积,m^2;$\bar{v}$ 为卡车平均速度,km/h。

综上,卡车行驶过程中总阻力做功 W_f 为:

$$W_f = (F_f + F_w + F_p) \cdot L \tag{11}$$

将 F_f,F_p,F_w 计算式代入式(11)可得:

$$W = G \cdot L \cdot (\omega \cdot \cos\theta + \mu) + \frac{1}{2} \cdot C \cdot L \cdot S \cdot \rho \cdot \bar{v}^2 \tag{12}$$

式中 L 为矿岩运输总运距。

1) 场内矿岩运距(如图 4 所示)。按照台阶之间设置连续纵坡和台阶内设置水平缓坡段的布置方式,可得台阶水平至总出入沟口的矿岩运距为:

$$L_{ix} = \frac{H_0 - H_i}{\sin(\arctan j)} + \left(\frac{H_0 - H_i}{h} - 1\right) \cdot L_{hp} \tag{13}$$

$$L_i = \frac{H_0 - H_i}{\sin(\arctan j)} + \left(\frac{H_0 - H_i}{h} - 1\right) \cdot L_{hp} + L_{iz} \tag{14}$$

式中:L_i 为第 i 台阶水平至总出入沟口的总运距,m;L_{ix} 为第 i 台阶外终了边坡上固定坑线段运距,m;L_{iz} 为第 i 台阶内水平距离,m;H_0 为总出入沟口所在台阶水平标高,m;H_i 为第 i 台阶水平标高,m;j 为道路纵坡,%;L_{hp} 为缓坡段长度,m。

2) 台阶水平运距。采用矿业软件,按台阶标高进行切割,生成各台阶矿岩分层平面图,根据矿岩分层平面图、开采境界及运输系统规划线路,利用 CAD 获取矿岩等效质心点并计算台阶内水平运距。

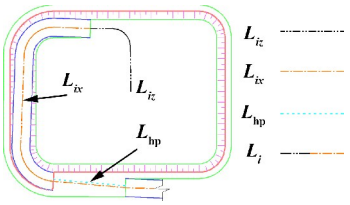


图 4 场内矿岩运距示意图

Fig. 4 Schematic of ore-rock transport distance within pit

3) 台阶矿岩量。台阶矿岩量可根据台阶标高、开采境界和矿床块体模型,运用三维矿业软件得出。

运输功模型中,根据《汽车轮胎滚动阻力限值和等级》(GB/T 29042—2020)[16],结合案例矿山拟采用矿山二级道路,滚动阻力系数 ω 取值为 0.03;参照文献[17]提出的研究成果,空气阻力系数 C 取值为 0.85;根据国际标准大气模型(ISA)进行修正计算,空气密度 ρ 取值为 0.75 kg/m^3;按矿山选取的车型参数计算,卡车迎风面积 S 取值为 66.5 m^2。

3.1.3 边坡稳定性

高海拔寒区露天矿边坡稳定性分析需考虑冻融作用的影响[18-19]。基于矿山环境数据,取冻融循环 25 次后边坡岩体条件(岩体力学参数详见表 3),采用 GeoStudio 软件计算冻融层 2 m 时边坡在自重+地下水+地震力条件下的稳定性安全系数,将其作为台阶高度备选方案的效果值,计算结果详见表 4。

表 3 岩体力学参数

Table 3 Rock-mass mechanical parameters

岩组代号	岩组	容重 ρ/(kN·m^{-3})	冻融前		冻融后(25 次)	
			黏聚力 c_m/kPa	内摩擦角 φ_m/(°)	黏聚力 c_j/kPa	内摩擦角 φ_j/(°)
Ⅱ	全风化岩组-强风化岩组	25.5	176	22	65	8
Ⅲ-1	中风化变长石石英砂岩亚组	26.3	342	30	263	23
Ⅳ	微风化粉砂质、泥质板岩岩组	26.5	263	34	194	25
Ⅴ-1	微风化较软弱碎裂状变长石石英砂岩亚组	26.7	406	35	342	30
Ⅴ-2	微风化较坚硬层状变长石石英砂岩亚组	26.6	734	41	524	29
Ⅶ	构造破碎带岩组	27.0	149	15	55	5

注:表 3 数据来源于案例矿山边坡工程地质勘察报告。

表 4 冻融边坡稳定性分析结果

Table 4 Stability analysis of slope after freeze-thaw cycles

台阶高度/m	安全系数
12	1.214
13	1.209
14	1.205
15	1.202
16	1.199
17	1.197
18	1.196

3.1.4 穿爆成本模型

1) 穿孔成本。露天矿穿孔成本主要由钻机耗材备件、燃料动力及人工费用组成,其中人工费用、燃料动力费可通过加强管理进行调控优化,钻机耗材费用则会受穿孔作业量的影响,由此穿孔成本计算模型可表示为:

$$C_{穿孔} = (n_{矿} + n_{岩}) \times h_d \times \left(\frac{p_{钻头}}{L_{钻头}} + \frac{p_{钻杆}}{L_{钻杆}}\right) \Big/ Q_{矿岩} \tag{15}$$

$$n_{矿} = \frac{Q_{矿}}{\rho_{矿} \cdot (a \times b) \cdot H} \tag{16}$$

$$n_{岩}=\frac{Q_{岩}}{\rho_{岩}\cdot(a\times b)\cdot H} \tag{17}$$

式中:$n_{矿}$、$n_{岩}$分别为矿石、废石钻孔数量;h_d为钻孔深度,m;$p_{钻头}$、$p_{钻杆}$分别为钻头、钻杆单价;$L_{钻头}$、$L_{钻杆}$分别为钻头、钻杆使用寿命,套/m;$Q_{矿}$、$Q_{岩}$分别为天矿境界内矿石、岩石总量,t;$Q_{矿岩}$为矿石和岩石的总量;a 为孔间距,m;b 为孔排距,m。

2) 爆破成本。露天矿爆破成本主要由炸药消耗及起爆器材组成,考虑到矿岩性质差异,矿石、岩石爆破成本计算模型可分别表示为:

$$C_{爆矿}=q_{矿}\times p_{炸药}+\frac{n_{矿}\times p_{起爆}}{Q_{矿}} \tag{18}$$

$$C_{爆岩}=q_{岩}\times p_{炸药}+\frac{n_{岩}\times p_{起爆}}{Q_{岩}} \tag{19}$$

式中:$C_{爆矿}$、$C_{爆岩}$分别为矿石、岩石爆破成本,元;$q_{矿}$、$q_{岩}$分别为矿石、废石炸药单耗,kg/t;$p_{炸药}$为炸药单价,元/kg;$p_{起爆}$为起爆器材单价(含起爆药),元/个。

根据上述公式,可得露天矿平均每吨矿岩爆破成本 $C_{爆破}$为:

$$C_{爆破}=[(q_{矿}\times p_{炸药}\times Q_{矿}+n_{矿}\times p_{起爆})+(q_{岩}\times p_{炸药}\times Q_{岩}+n_{岩}\times p_{起爆})]/Q_{矿岩} \tag{20}$$

3.1.5　台阶高度方案评价指标效果值

根据上述矿石贫损模型、成本模型、边坡稳定性分析结果确定备选方案的指标效果值,其中:贫化率、损失率基于案例矿山矿体模型数据,由矿石贫损模型公式(4)~(6)计算得出。穿孔成本、爆破成本基于同类型矿山耗材价格与案例矿山爆破设计单耗,由穿爆成本模型公式(20)计算得出。矿岩运输功基于案例矿山道路参数,由运输功模型公式(7)~(14)计算得出。评价指标推算条件详见表 5。不同台阶高度方案指标效果值见表 6。

表 5　评价指标推算条件

Table 5　Computation conditions for evaluation indices

道路等级	道路最大纵坡坡度 θ/(°)	矿体平均倾角 α/(°)	钻头单价 $p_{钻头}$/(元·个$^{-1}$)	钻杆单价 $p_{钻杆}$/(元·根$^{-1}$)	滚动阻力系数 ω	空气阻力系数 C	空气密度 ρ/(kg·m^{-3})	卡车迎风面积 S/m^2	卡车平均速度 $\bar{v}$/(km·h^{-1})
二级	3.43	43	15 000	36 000	0.03	0.85	0.75	66.5	20

表 6　不同台阶高度方案指标效果值

Table 6　Performance values of different bench-height schemes

台阶高度/m	贫化率/%	损失率/%	穿孔成本/(元·t^{-1})	爆破成本/(元·t^{-1})	矿岩运输功/(10^{16} t·km)	安全系数
12	2.3	2.4	0.61	2.04	528.5	1.214
13	2.5	2.6	0.54	1.88	519.5	1.209
14	2.7	2.8	0.49	1.75	510.8	1.205
15	2.9	3.0	0.44	1.63	503.7	1.202
16	3.1	3.2	0.40	1.53	497.1	1.199
17	3.3	3.4	0.36	1.44	490.5	1.197
18	3.5	3.6	0.33	1.36	484.9	1.196

3.2　指标效果值标准化

为消除各评价指标单位、数量级、数据性质等量纲存在的差异,对表 6 中各评价指标效果值进行标准化处理。

正向指标:

$$X_{AB}=\begin{cases}1 & x_{AB}=\max(X_B)\\ \dfrac{x_{AB}-\min(X_B)}{\max(X_B)-\min(X_B)} & \min(X_B)<x_{AB}<\max(X_B)\\ 0 & x_{AB}=\min(X_B)\end{cases} \tag{21}$$

负向指标:

$$X_{AB}=\begin{cases}1 & x_{AB}=\min(X_B)\\ \dfrac{\max(X_B)-x_{AB}}{\max(X_B)-\min(X_B)} & \min(X_B)<x_{AB}<\max(X_B)\\ 0 & x_{AB}=\max(X_B)\end{cases} \tag{22}$$

式中:X_{AB}为标准化值,其中 A 为台阶高度方案,B 为比选指标;x_{AB}为方案 A 第 B 项指标的原始数值;$\max(X_B)$和 $\min(X_B)$分别为第 B 项指标的最大值和最小值。

考虑到后续熵权法计算信息熵的需要,为避免标准化后的数据出现 0,导致对数计算无定义或失效,基于拉普拉斯平滑法与熵权法相关研究[20]中的处理方

式,在原有公式基础之上增加0.000 1,避免后续计算无意义,确保对数运算的数学可行性。

正向指标:

$$X_{AB}=\frac{x_{AB}-\min(X_B)}{\max(X_B)-\min(X_B)}+0.000\,1 \tag{23}$$

负向指标:

$$X_{AB}=\frac{\max(X_B)-x_{AB}}{\max(X_B)-\min(X_B)}+0.000\,1 \tag{24}$$

对7个方案的贫化率、损失率、穿孔成本、爆破成本、运输功、边坡稳定性(安全系数)等6项评价指标建立标准化矩阵,结果如下:

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}1.000 & 1.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000\\ 0.833 & 0.833 & 0.250 & 0.231 & 0.206 & 0.722\\ 0.667 & 0.667 & 0.429 & 0.429 & 0.405 & 0.500\\ 0.500 & 0.500 & 0.607 & 0.600 & 0.570 & 0.333\\ 0.334 & 0.333 & 0.750 & 0.750 & 0.720 & 0.167\\ 0.167 & 0.167 & 0.893 & 0.882 & 0.873 & 0.056\\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0.000\end{bmatrix}$$

3.3 指标综合评分与方案比选

指标信息熵计算公式为:

$$e_B=-\frac{1}{\ln(n)}\times\sum_{A=1}^{7}[Y_{AB}\times\ln(Y_{AB})] \tag{25}$$

$$Y_{AB}=\frac{X_{AB}}{\sum_{A=1}^{7}X_{AB}} \tag{26}$$

式中:e_B为第B项指标的熵值;Y_{AB}为第B项指标在同一标准化处理之后总体数值中所占的比重。

得到各项指标信息熵如下:

$\boldsymbol{E}$ = [10.869 10.869 10.752 10.771 10.801 11.388]

根据信息熵的计算结果,计算各项指标的权重。评价指标B在评价方案A上的权重值w_B为:

$$w_B=\frac{d_B}{\sum_{B=1}^{6}d_B}=\frac{1-e_B}{\sum_{B=1}^{6}(1-e_B)} \tag{27}$$

式中:w_B为第B项指标权重;d_B为第B项指标的差异系数。

得到各项指标权重如下:

$\boldsymbol{W}$ = [0.166 0.166 0.164 0.164 0.165 0.175]

方案综合得分计算公式为:

$$s_A=\sum_{B=1}^{6}w_B\times X_{AB} \tag{28}$$

式中s_A为评价方案A按照权重计算的综合得分。

由此得到7个台阶高度方案综合评分量$\boldsymbol{S}$为:

$\boldsymbol{S}$ = [0.506 9 0.515 9 0.516 4 0.516 6 0.504 9 0.500 6 0.493 3]

由此可知,方案4(h=15 m)的综合评分在7个备选方案中得分最高,确定为最优方案。

4 讨论

根据案例矿山推算数据,分析不同台阶高度方案对开采周期及长期边坡维护成本的影响。

从开采周期角度,增加台阶高度有助于在矿山开采前期压缩采剥周期,但整体推进速度相对放缓,对矿山中后期产量接续带来挑战。减小台阶高度可实现工作帮灵活调整,但单体采剥工程量小,增加工作面切换频率。

从长期边坡维护角度,采用大台阶方案,便于集中布设边坡监测和排水等系统,但会增加不稳定区域出现的概率及维护频次。采用小台阶方案,有利于坡面应力的阶段性释放,但前期维护点相对分散。

受限于研究周期与数据可得性,尚未深入研究上述影响,待案例矿山正式投产后,可从矿山全生命周期视角,进一步开展短期效益与长期可持续性的台阶高度优选研究。

5 结论

1)针对高海拔寒区露天矿台阶高度优化问题,选取贫化率、损失率、穿孔成本、爆破成本、矿岩运输功及边坡稳定性6个评价指标。通过构建采矿贫损指标模型、穿爆成本模型、矿岩运输功模型,结合GeoStudio软件分析边坡稳定性,确定了不同台阶高度下的评价指标效果值,基于熵权法实现了案例矿山台阶高度的优选。

2)在常规指标基础之上,引入冻融循环下的边坡稳定性作为评价指标,采用熵权法进行露天矿台阶高度多目标决策,克服了单纯根据铲装设备选型确定台阶高度的局限性,可为高海拔寒区露天矿山台阶高度优化提供新的思路。

参考文献(References):

[1] 李强,张丁. 采用多因素模糊评判原理优化黑岱沟露天煤矿台阶高度[J]. 露天采矿技术, 2011,26(3):9-13.
Li Qiang, Zhang Ding. Using multiobject fuzzy policy decision method optimization the bench height of Heidaigou open-pit coal mine[J]. Opencast Mining Technology, 2011,26(3):9-13.

[2] 胡鹏飞,袁金祥. 伊敏露天矿半连续工艺开采参数优化研究[J]. 露天采矿技术, 2022,37(6):11-13.
Hu Pengfei, Yuan Jinxiang. Study on mining parameters optimization

of semi-continuous process in Yimin open-pit mine[J]. Opencast Mining Technology, 2022,37(6):11-13.

[3] 胡鹏飞,李月强. 伊敏露天矿采掘台阶高度优化研究[J]. 露天采矿技术, 2023,38(6):5-7.
Hu Pengfei, Li Yueqiang. Study on the height optimization of mining steps in Yimin open-pit mine[J]. Opencast Mining Technology, 2023,38(6):5-7.

[4] 梁嘉伟. 露天矿台阶并段带来的经济效益分析[J]. 露天采矿技术, 2023,38(4):111-113.
Liang Jiawei. Economic benefit analysis of step merging section in open-pit mine[J]. Opencast Mining Technology, 2023,38(4):111-113.

[5] Igorevich F S, Olegovich R A, Konstantinovich R S. Determining height of benches in open mining of steeply-dipping deposits with consideration of ore losses and dilution[J]. International Journal of Advanced Research in Engineering & Technology, 2019,10(3):225-233.

[6] 李俊平,李鹏伟,张浩. 毕机沟露天矿台阶坡面角取值范围及最终边坡角研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017,49(4):598-603.
Li Junping, Li Pengwei, Zhang Hao. Research on bench angle range value & final slope angle in Bijigou open-pit[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2017,49(4):598-603.

[7] 李祥龙,刘殿书,何丽华,等. 露天煤矿的台阶高度对抛掷率的影响[J]. 爆炸与冲击, 2012,32(2):211-215.
Li Xianglong, Liu Dianshu, He Lihua, et al. Influences of bench height of an open-pit coal mine on cast percentage[J]. Explosion and Shock Waves, 2012,32(2):211-215.

[8] 张小军,汪旭光,崔新男,等. 台阶高度对爆破振动高程效应的影响研究[J]. 中国矿业, 2020,29(3):124-129.
Zhang Xiaojun, Wang Xuguang, Cui Xinnan, et al. Study on the influence of step height on the elevation effect of blasting vibration[J]. China Mining Magazine, 2020,29(3):124-129.

[9] 管晓明,王旭春,聂庆科,等. 露天矿边坡稳定性及设计参数优化研究[J]. 煤矿安全, 2018,49(5):71-74.
Guan Xiaoming, Wang Xuchun, Nie Qingke, et al. Stability analysis and parameters optimization of an open-pit slope[J]. Safety in Coal Mines, 2018,49(5):71-74.

[10] 刘艳章,冯毓松. 运输功的计算及其在优选排土场方案中的应用[J]. 化工矿物与加工, 2003,32(12):24-27.
Liu Yanzhang, Feng Yusong. Calculation of transportation work and its application to optimizing dumping scheme[J]. Industrial Minerals and Processing, 2003,32(12):24-27.

[11] 陈广平,刘琦. 台阶高度与矿岩运输功含量的关系[J]. 中国矿业, 1993,2(1):41-44.
Chen Guangping, Liu Qi. The relation of bench height to transport work content of ore and rock[J]. China Mining Magazine, 1993,2(1):41-44.

[12] 汪为平,蔡鸿起. 论深凹露天矿的台阶高度与运输功的关系[J]. 中国矿业, 1993,2(2):23-26.
Wang Weiping, Cai Hongqi. On relationship between bench height and transport work in deep open-pits[J]. China Mining Magazine, 1993,2(2):23-26.

[13] 田楷,韩金潮,松建军. 曼家寨露天矿减少损失贫化的措施[J]. 世界有色金属, 2016(11):63-64.
Tian Kai, Han Jinchao, Song Jianjun. The measures to reduce the loss and dilution of Manjiazhai open-pit mine[J]. World Nonferrous Metals, 2016(11):63-64.

[14] 喻鲲鹏,张海行,黄攀衡,等. 基于未确知测度理论和欧氏距离判别法的基坑边坡稳定性评价[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):57-62.
Yu Kunpeng, Zhang Haixing, Huang Panheng, et al. Evaluation of foundation pit slope stability based on unascertained measure theory and euclidean distance discriminant method[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):57-62.

[15] 李学现. 露天矿卡车运输最优路径规划模型及应用研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2020:23-27.
Li Xuexian. Research on path planning model and application of transport truck in open-pit mine[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020:23-27.

[16] GB/T 29042—2020 汽车轮胎滚动阻力限值和等级[S].
GB/T 29042—2020 Limits and grades of rolling resistance of automobile tires[S].

[17] 李明达,门玉琢,冀秉魁,等. 基于 LBM 方法的运煤卡车气动阻力研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2018,19(2):26-28.
Li Mingda, Men Yuzhuo, Ji Bingkui, et al. The study on aerodynamic drag analysis to coal trucks based on LBM[J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Science Edition), 2018,19(2):26-28.

[18] 赵彬,谢东伟. 某石墨露天矿边坡稳定性分析研究[J]. 现代矿业, 2022,38(6):107-110.
Zhao Bin, Xie Dongwei. Study on slope stability of a graphite open-pit mine[J]. Modern Mining, 2022,38(6):107-110.

[19] 周文汶,杨天鸿,董鑫,等. 寒区露天矿板岩冻融力学特性及边坡稳定性研究[J]. 中国矿业, 2024,33(增刊 1):143-150.
Zhou Wenwen, Yang Tianhong, Dong Xin, et al. Research on freezing-thawing mechanical properties of slate and slope stability in open-pit mines of cold regions[J]. China Mining Magazine, 2024,33(S1):143-150.

[20] 李翠萍. 基于熵权法的美丽福建综合评价体系构建和应用研究[J]. 环境生态学, 2024,6(8):138-143.
Li Cuiping. Research on construction and application of comprehensive evaluation system of beautiful Fujian province based on the entropy weight method[J]. Environmental Ecology, 2024,6(8):138-143.

引用本文:聂港,徐海,蒋雨村,等. 高海拔寒区冻融循环下露天矿台阶高度优选[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):1-7.
Nie Gang, Xu Hai, Jiang Yucun, et al. Optimization of bench height for open-pit mines under freeze-thaw cycles in high-altitude cold regions[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):1-7.