

环境影响下基于CRITIC法的露天矿山道路综合成本分析

温晨^{1,2,3}, 黄敏^{1,2,3}, 饶帝军^{1,2,3}, 谢成龙^{1,2,3}, 蔡思杰^{1,2,3}

(1. 紫金矿业集团股份有限公司; 2. 紫金(长沙)工程技术有限公司;
3. 低品位难处理黄金资源综合利用国家重点实验室)

摘要:随着“双碳”目标的实施及投资者对矿山企业ESG指标的要求,在分析露天矿山道路综合成本时需要考虑环境成本。研究基于CRITIC法构建涉及材料、人力、机械、维护、碳排放、降尘、环境毒性、运输效率、构件寿命和轮胎损耗等10种因素的露天矿山道路综合成本分析模型。以紫金山金铜矿为例,通过信息承载量分析法,得到各指标的客观权重,降低指标间的相互影响。经计算,道路量化综合成本为:碎石路98.6元/m²,水泥路108.5元/m²,面层改性路62.9元/m²,整体改性路67.7元/m²。相对于碎石路和传统水泥路,改性道路在综合成本上具备显著优势,其中,面层改性路的综合成本优势超36%。

关键词:露天矿山;CRITIC法;改性道路;ESG;综合成本;环境影响;成本管理

中图分类号:TD57

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)04-0039-05

doi:10.11792/hj20250408

引言

金属矿山露天开采中,一条高效、低成本的运输道路至关重要,矿用运输车辆运输效率、轮胎损耗等因素极大影响了矿山矿石及废料的运输成本,进而影响矿山的开采成本^[1-3]。成本管理作为现代企业运营的核心战略工具,其优化实施对于提升组织运营效益和增强市场竞争力具有显著促进作用^[4]。此外,在经济衰退和能源危机的双重影响下,可持续发展的浪潮席卷各国,也带动着与其深度契合的ESG理念在全球范围内的持续升温,特别是矿山行业投资者对企业ESG信息披露情况给予更多关注^[5-6]。因此,环境成本成为矿山生产建设特别是大型运输道路建设中需要重点考虑的一环。

21世纪以来,绿色生产施工评价体系在公路、铁路、建筑、市政等多领域的应用日趋成熟。姚刚等^[7-8]对绿色低碳公路施工评价体系进行了研究;吴伟东等^[9-11]分别在铁路、建设及市政工程上基于环境及材料成本等诸多因素构建相关的评价模型,对施工方案进行优选。

然而,露天矿山道路建设仍多以人力、材料、设备等直接成本进行评价,忽视了建设周期内对环境的影响。本文考虑环境影响下,基于CRITIC法选择10种道路成本因素,并进行量化分析,通过信息承载法计

算客观权重,进一步计算道路的综合成本,对多种道路综合成本进行比较以选择最优道路施工方案。

1 CRITIC法分析模型基础

CRITIC (CRITERIA THROUGH INTERCRITERIA CORRELATION, CRITIC)法是1995年由DIAKOULAKI等提出的一种客观权重赋权法。该方法不需要属性的独立性,并且将定性属性转化为定量属性,其核心思想为利用指标间的对比性和冲突性来确定各指标权重,对比性以标准差为依据,标准差越大,意味着数据波动越显著,权重也会更高;冲突性则以相关系数为依据,相关系数越大,表明指标间冲突性越小,权重自然也会更低^[12-14]。

1.1 结构层次

本文所涉及的综合成本包括直接成本、环境成本和效率成本。其中,直接成本包括材料、人力、机械和维护成本,环境成本包括碳排放成本、降尘成本和环境毒性成本,效率成本包括运输效率、构件寿命和轮胎损耗成本。据此,建立的基于CRITIC法的露天矿山道路综合成本分析层次图见图1。所分析的10个子项中,材料、人力、机械、碳排放、环境毒性、降尘、轮胎损耗归为逆向指标(指标值越小越好),其余为正向指标。

收稿日期:2024-11-09;修回日期:2025-01-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51804079);福建省自然科学基金项目(2019J05039);国家重点研发计划专项(2022YFC2903900);紫金矿业集团股份有限公司2022年科技计划项目(5401KY2022100003);福厦泉自贸区协同专项资助项目(35022CQX72021009)

作者简介:温晨(1998—),男,助理工程师,硕士,研究方向为控制爆破及岩层控制;E-mail:1398448249@qq.com

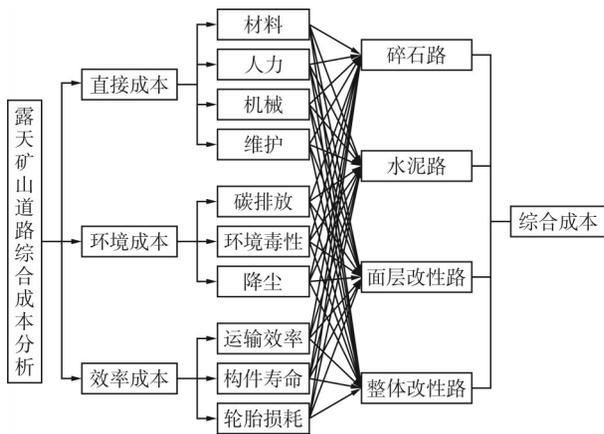


图1 基于CRITIC法的露天矿山道路综合成本分析层次图

Fig. 1 Hierarchical diagram of comprehensive cost analysis for open-pit mine roads based on the CRITIC method

1.2 客观权重

CRITIC法分析需要先将获得的原始数据标准化处理,由此计算各指标的信息承载量,进一步计算客观权重,最后将获得的客观权重归一化处理。

1)原始数据标准化。CRITIC法假设现有1组待评价的原始数据,其包含 m 个对象, n 个评价指标,共同构成原始数据矩阵 X :

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为矩阵中第 i 行第 j 列的元素。

其中,各指标的量纲不同,无法直接确定指标的权重关系,因此需进行数据标准化,去除量纲影响。分别对正向指标和逆向指标单独处理,正向处理,数值越大越优;逆向处理,数值越小越优^[15]。

正向指标:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (2)$$

逆向指标:

$$x'_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (3)$$

式中: $\max(x_j)$ 为第 j 列元素中的最大值; $\min(x_j)$ 为第 j 列元素中的最小值。

2)计算信息承载量。信息承载量即对比性和冲突性,分别由标准差 S_j 和相关系数 A_j 表示。

(1)对比性。对比性由每一指标(列)的标准差 S_j 表示。

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n-1}} \quad (4)$$

式中: \bar{x}_j 为每个指标(列)的平均值。

(2)冲突性。冲突性由每一指标(列)的相关系数

A_j 表示,需先构建相关性矩阵 R 。

$$R = \frac{\sum_{j,k=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)(x_{ik} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}} \quad (5)$$

根据相关性矩阵 R ,按式(6)计算相关系数 A_j :

$$A_j = \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (6)$$

式中: r_{ij} 为相关性矩阵 R 中的元素。

(3)信息承载量。计算信息承载量 C_j :

$$C_j = S_j A_j \quad (7)$$

3)计算客观权重。客观权重 W_j 按式(8)计算:

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (8)$$

进一步对所得的客观权重 W_j 进行归一化处理,以消除各因素间的相互影响:

$$F_j = \frac{W_j}{W_1} \quad (9)$$

式中: F_j 为指标的归一化权重; W_1 为第一个指标的权重。

2 道路综合成本各因素客观权重计算

2.1 工程概况

紫金山金铜矿自2017年开展采矿技术攻关以来,采用多元多层露天矿运输道路结构,其底基层为大直径爆破废石(直径80~150 mm),基层为中等直径爆破废石(直径20~80 mm),面层为直径0~20 mm的爆破废石粉末,取得了良好效果。现场实践结果表明,采用新型多元多层结构后,露天开采运输道路轮胎磨损率下降,行车效率相对提升,但转弯处、上坡等部分路段存在水稳定性差、耐久性差等问题。在此基础上开展了多种道路改造方案(见表1),根据前期试验,几种方案均满足要求,因此进一步对比综合成本择优选择。其中,改性道路使用的固化剂主要成分为水淬钢渣、水泥、生石灰。

表1 道路综合成本分析方案

Table 1 Comprehensive cost analysis plan for the roads

方案	材料	厚度/cm
碎石路	爆破废石	55
水泥路	爆破废石、细砂、水泥	30
面层改性路	爆破废石、废土、固化剂	改性面层10、碎石层40
整体改性路	爆破废石、废土、固化剂	改性面层和改性基层共30

2.2 原始分析数据

使用CRITIC法分析露天矿山道路综合成本各因素原始数据见表2。其中,材料、人力、机械、维护、环境毒性(采用Cu离子浸出浓度表示)、降尘和运输效

率(采用运矿卡车车速表示)等7个参数由现场统计而来,其余参数通过计算获得。

表2 道路综合成本各因素原始数据

Table 2 Original data of factors affecting comprehensive cost for the roads

类型	材料/ (元·m ⁻²)	人力/ (元·m ⁻²)	机械/ (元·m ⁻²)	维护 间隔/月	碳排放量/ (kg·m ⁻²)	环境毒性/ (μg·L ⁻¹)	日降尘 次数	运输效率/ (km·h ⁻¹)	构件寿命/ %	轮胎损耗/ %
碎石路	28	4.8	13.54	2	2.48	5.63	6	9	69.4	63.8
水泥路	70	15	15	10	137.375	5.52	8	9.6	100	100
面层改性路	36.3	6	13.55	5	2.03	4.14	3	9.5	95.9	95.2
整体改性路	47.5	6	13.55	8	2.03	4.14	3	9.5	95.9	95.2

1)碳排放。根据文献[16],道路建设及养护阶段的各种路面筑路材料及碳排放因子见表3。其中,面层改性路所采用的固化剂主要原料为矿山工业废物,因此碳排放因子近似取0。

表3 筑路材料及碳排放因子

Table 3 Road construction materials and carbon emission factors

类型	碳排放因子/(kg _{CO₂} ·kg ⁻¹)	道路材料量/(kg·m ⁻²)	道路碳排放量/(kg·m ⁻²)
碎石路	碎石0.002	1 240	2.48
水泥路	碎石0.002、细砂0.051、水泥0.73	碎石350、细砂175、水泥175	137.375
面层改性路	碎石0.002	1 013	2.03
整体改性路	碎石0.002	1 013	2.03

2)构件寿命及轮胎损耗。构件寿命(车辆空气悬挂寿命)及轮胎损耗计算公式为国外矿山统计值,并采用最小二乘法拟合而来^[17],与路面的不平整度及车速相关,见式(10)。各因素采用百分数表示,标准水泥路为100%,各道路构件寿命及轮胎损耗见表4。

$$\begin{cases} L_g = (101.2 + 0.038v + 0.01H - 0.084vH) \times \frac{g_0}{100} \\ L_t = (102.3 - 0.105v - 0.149H - 0.08vH) \times \frac{t_0}{100} \end{cases} \quad (10)$$

式中: L_g 为构件寿命(a); L_t 为轮胎损耗(月); v 为特定

表4 各道路构件寿命及轮胎损耗

Table 4 Component lifespan for each road and tire wear

类型	行驶速度/(km·h ⁻¹)	不平整度/mm	L_g/a	构件寿命/%	$L_t/月$	轮胎损耗/%
碎石路	9.0	49	3.25	69.4	1.76	63.8
水泥路	9.6	10	4.68	100	2.76	100
面层改性路	9.5	15	4.49	95.9	2.63	95.2
整体改性路	9.5	15	4.49	95.9	2.63	95.2

路面上运矿卡车的正常行驶速度(km/h); H 为路面不平整度(mm); g_0 为空气悬挂寿命的标准值,市面产品标准值为5a; t_0 为常规水泥路面运矿卡车年损耗轮胎个数标准值,市面产品建议矿山单个轮胎寿命小

于4个月,本文取3个月。

2.3 客观权重计算

1)原始数据标准化。通过表2建立原始数据矩阵 X :

$$X = \begin{bmatrix} 28 & 4.8 & 13.54 & 2 & 2.48 & 5.63 & 6 & 9 & 69.4 & 63.8 \\ 70 & 15 & 15 & 10 & 137.375 & 5.52 & 8 & 9.6 & 100 & 100 \\ 36.3 & 6 & 13.55 & 5 & 2.03 & 4.14 & 3 & 9.5 & 95.9 & 95.2 \\ 47.5 & 6 & 13.55 & 8 & 2.03 & 4.14 & 3 & 9.5 & 95.9 & 95.2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

将原始数据矩阵 X 结合式(2)、式(3)进行标准化,其中,材料、人力、机械、碳排放、环境毒性、降尘、

轮胎损耗为逆向指标(指标值越小越好),其余为正向指标,标准化矩阵 X' 如下:

$$X' = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0.9967 & 0 & 0.4 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0.0738 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0.8024 & 0.8824 & 0.9932 & 0.375 & 1 & 1 & 1 & 0.8333 & 0.866 & 0.1336 \\ 0.5357 & 0.8824 & 0.9932 & 0.75 & 1 & 1 & 1 & 0.8333 & 0.866 & 0.1336 \end{bmatrix} \quad (12)$$

2)计算权重。使用标准化矩阵 X' ,结合式(4)~(9)得到标准差、相关性系数、信息承载量、客观权重、

归一化权重如下:

$$\begin{cases} S_j = (0.376 & 0.402 & 0.431 & 0.379 & 0.433 & 0.482 & 0.424 & 0.391 & 0.398 & 0.398) \\ A_j = (7.270 & 6.285 & 5.983 & 11.381 & 5.959 & 5.807 & 5.311 & 9.882 & 9.707 & 10.295) \\ C_j = (2.730 & 2.526 & 2.579 & 4.312 & 2.578 & 2.800 & 2.253 & 3.862 & 3.865 & 4.100) \\ W_j = (0.0864 & 0.0799 & 0.0816 & 0.1364 & 0.0816 & 0.0886 & 0.0713 & 0.1222 & 0.1223 & 0.1297) \\ F_j = (1.0000 & 0.9252 & 0.9445 & 1.5794 & 0.9441 & 1.0256 & 0.8253 & 1.4146 & 1.4154 & 1.5015) \end{cases} \quad (13)$$

3 紫金山金铜矿道路综合成本对比

为评价紫金山金铜矿道路的综合成本,基于原始数据计算得到各指标的归一化权重 F_j ,按式(14)计算综合成本(C_s):

$$C_s = YF_j \quad (14)$$

式中: Y 为初始成本矩阵。

原始数据(见表2)中,除材料、人力及机械成本外,其余指标并不是采用成本进行量化,因此在计算综合成本前需要将剩下7个指标转化为年化成本。

3.1 道路各因素初始成本

1)维护。矿山所有道路单次维护费用预计为67.5万元,试验区域面积为15万 m^2 ,单次维护费用为4.5元/ m^2 ,计算得到4种道路年化维护成本分别为27元/ m^2 、5.4元/ m^2 、10.8元/ m^2 、6.75元/ m^2 。

2)碳排放。碳排放成本按照全国碳市场每日综合价格78元/t进行计算,4种道路碳排放成本分别为0.19元/ m^2 、10.72元/ m^2 、0.16元/ m^2 、0.16元/ m^2 。

3)环境毒性。环境毒性采用Cu离子浸出浓度表示,根据GB 25467—2010《铜、镍、钴工业污染物排放标准》^[18]要求,铜直接排放限值为1 mg/L。4种道路均满足要求,因此环境毒性处理成本均为0。

4)降尘。降尘采用工业用水,运输费、水费、维护费累加为5元/t,按照洒水量、路面面积摊薄为0.0027元/($m^2 \cdot$ 次)。按照一年365 d计算可得4种路面年化降尘成本分别为5.91元/ m^2 、7.88元/ m^2 、2.96元/ m^2 、

2.96元/ m^2 。

5)运输效率。运输效率以碎石路方案为基准值0元/ m^2 的负指标计算,计算公式如下:

$$\eta = \left(\frac{v}{v_0} - 1\right) \frac{365ab}{S} \quad (15)$$

式中: v_0 为碎石路上运矿卡车的正常行驶速度(km/h); a 为该矿山日均运矿量(t); b 为利润(元/t); S 为试验矿山道路面积(m^2)。

根据调查结果,矿山日均运矿量为20 000 t,每吨矿利润为80元,计算出4种道路运输效率成本分别为0,-13,-10.83,-10.83元/ m^2 。

6)构件寿命。市面上空气悬挂的单价为6 000~13 000元,取10 000元,即0.067元/ m^2 。根据表4,4种道路车辆的构件寿命分别为3.25 a、4.68 a、4.49 a、4.49 a,按运矿卡车10辆计算,4种道路行驶车辆的构件寿命年化成本分别为0.19元/ m^2 、0.13元/ m^2 、0.14元/ m^2 、0.14元/ m^2 。

7)轮胎损耗。市面上运矿卡车轮胎单价为2 000~5 000元,取3 000元,即0.02元/ m^2 。根据表4,4种道路行驶车辆的轮胎寿命分别为1.76月、2.76月、2.63月、2.63月,每辆运矿卡车有6个轮胎,单车每年轮胎消耗量分别为18个、11.64个、12.24个、12.24个,计算可得轮胎损耗年化成本分别为3.6元/ m^2 、2.33元/ m^2 、2.45元/ m^2 、2.45元/ m^2 。

3.2 道路综合成本

综上,可得紫金山金铜矿道路各因素初始成本,见表5。

表5 紫金山金铜矿道路各因素初始成本

Table 5 Initial cost for each factor of the roads in the Zijinshan Gold-Copper Mine

类型	材料	人力	机械	维护	碳排放	环境毒性	降尘	运输效率	构件寿命	轮胎损耗
碎石路	28	4.8	13.54	27	0.19	0	5.91	0	0.19	3.6
水泥路	70	15	15	5.4	10.72	0	7.88	-13	0.13	2.33
面层改性路	36.3	6	13.55	10.8	0.16	0	2.96	-10.83	0.14	2.45
整体改性路	47.5	6	13.55	6.75	0.16	0	2.96	-10.83	0.14	2.45

由此可以得到初始成本矩阵 Y 为:

$$Y = \begin{bmatrix} 28 & 4.8 & 13.54 & 27 & 0.19 & 0 & 5.91 & 0 & 0.19 & 3.6 \\ 70 & 15 & 15 & 5.4 & 10.72 & 0 & 7.88 & -13 & 0.13 & 2.33 \\ 36.3 & 6 & 13.55 & 10.8 & 0.16 & 0 & 2.96 & -10.83 & 0.14 & 2.45 \\ 47.5 & 6 & 13.55 & 6.75 & 0.16 & 0 & 2.96 & -10.83 & 0.14 & 2.45 \end{bmatrix} \quad (16)$$

将初始成本矩阵 Y 和 F_j 代入式(14),计算得到紫

金山金铜矿4种道路基于CRITIC法分析的道路综合

成本,见表6,并以矿山原碎石路成本为基准,计算得到各种道路的成本比例。从表6可以看出,改性后的道路综合成本明显降低,其中,面层改性路成本最低。

表6 基于CRITIC法分析的道路综合成本计算结果

Table 6 Calculated results of comprehensive cost for the roads based on the CRITIC method

指标	碎石路	水泥路	面层改性路	整体改性路
综合成本/(元·m ⁻²)	98.6	108.5	62.9	67.7
成本比例/%	100	110	63.7	68.6

4 结论

1)综合考虑材料、人力、机械、维护、碳排放、降尘、环境毒性、运输效率、构件寿命和轮胎损耗等10种因素,基于CRITIC法计算露天矿山道路综合成本。

2)以紫金山金铜矿露天矿山道路为例,通过信息承载量分析法,得到各指标的客观权重,降低了指标间的相互影响,最终计算出路面量化综合成本为:碎石路98.6元/m²,水泥路108.5元/m²,面层改性路62.9元/m²,整体改性路67.7元/m²。相对于碎石路和传统水泥路,改性道路在综合成本上具备显著优势,其中,面层改性路的综合成本优势超36%。

3)在构建矿山道路成本计算模型时,考虑了ESG理念、“双碳”背景,并将无法量化的因素进行量化,对矿山相对复杂的成本组成具备良好的适应性,其结果客观反映了不同矿山道路的成本组成,具有良好的应用前景。

[参考文献]

- [1] 韩智慧.露天煤矿采场运输道路平整度分级研究及应用[D].徐州:中国矿业大学,2023.
[2] BAEK J, CHOI Y. A new method for haul road design in open-pit

- mines to support efficient truck haulage operations [J]. Applied Sciences, 2017, 7(7):747.
[3] 阎岩,赵红.浅析提高矿用汽车轮胎使用寿命的途径[J].黄金, 2006, 27(3):31-34.
[4] 陈雪.战略成本管理在国有企业中的应用探析[J].黄金, 2018, 39(5):1-3.
[5] 刘英杰.企业ESG表现对企业绩效的影响研究[D].徐州:中国矿业大学,2024.
[6] 汪谢萌.采矿业企业ESG信息披露对融资约束的影响[D].上海:上海师范大学,2023.
[7] 姚刚,刘自强,何云勇,等.川西高原绿色韧性公路建设探索与工程实践[J].公路工程, 2024, 49(1):169-176
[8] 高硕晗,孔亚平,余璇,等.面向碳达峰目标的公路基础设施低碳发展对策研究[J].公路, 2023, 68(12):315-319.
[9] 吴伟东,黄鹏,钟明茜,等.基于云模型的高速铁路绿色施工等级评价——以西南地区为例[J].铁道科学与工程学报, 2021, 18(6):1418-1425.
[10] 李远远,黄兆炜.绿色施工方案的选择与优化研究——基于综合赋权-TOPSIS-数据挖掘的系统模型[J].系统科学学报, 2020, 28(1):78-82.
[11] 肖秋明,郑婵娟.考虑碳排放的市政道路绿色施工评价研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(2):113-121.
[12] ALINEZHAD A, KHALILI J. New methods and applications in multiple attribute decision making (MADM) [M]. Cham: Springer, 2019:199-203.
[13] 陈俊文,王丽,路嘉,等.基于CRITIC法的平陆运河内河段生境健康评价[J].中国农村水利水电, 2024(9):21-28.
[14] 姜群,曾鹏,陈秋松,等.基于改进CRITIC-TOPSIS的急倾斜薄矿脉采矿方法优选与应用[J].黄金, 2020, 41(8):49-52.
[15] 孙梦瑶,赵俊英,乔雅男.基于AHP-CRITIC法城市暴雨洪水灾害风险评估的研究[J/OL].天津理工大学学报, 1-9[2024-10-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1374.N.20240514.1447.044.html>.
[16] 井召阔.城市道路工程全寿命周期碳排放测算及多情景模拟预测研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2023.
[17] 环境保护部,国家质量监督检验检疫总局.铜、镍、钴工业污染物排放标准:GB 25467—2010[S].北京:中国标准出版社,2010.
[18] A A 库列绍夫, H B 济里亚诺夫, 曹玉宏.露天矿路面的平整度对自卸汽车尤其是大型载重汽车运营效率的影响[J].国外金属矿山, 1996(4):23-25.

Comprehensive cost analysis of open-pit mine roads under environmental impact based on the CRITIC method

Wen Chen^{1,2,3}, Huang Min^{1,2,3}, Rao Dijun^{1,2,3}, Xie Chenglong^{1,2,3}, Cai Sijie^{1,2,3}

(1. Zijin Mining Group Co., Ltd.; 2. Zijin (Changsha) Engineering Technology Co., Ltd.;

3. State Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Low-grade Refractory Gold Ores)

Abstract: With the implementation of China's "dual-carbon" target and increasing investor focus on ESG metrics, environmental costs must be integrated into the comprehensive cost analysis of open-pit mine roads. This study constructs a cost analysis model for the comprehensive cost of open-pit mine roads using the CRITIC method, incorporating 10 factors: material, labor, machinery, maintenance, carbon emissions, dust suppression, environmental toxicity, transport efficiency, component lifespan, and tire wear. Taking the Zijinshan Gold-Copper Mine as a case study, objective weights for each indicator were derived through information load analysis to mitigate inter-indicator correlations. Calculated quantitative comprehensive road costs are: gravel roads 98.6 yuan/m², cement roads 108.5 yuan/m², surface-modified roads 62.9 yuan/m², and overall modified roads 67.7 yuan/m². Compared to gravel and conventional cement roads, modified roads exhibit significant cost advantages, with surface-modified roads achieving a reduction in comprehensive costs of over 36%.

Keywords: open-pit mine; CRITIC method; modified road; ESG; comprehensive cost; environmental impact; cost management