

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.02.017

刚果(金) SICOMINES 铜钴矿岩体可爆性分级研究^{*}

祁晓鑫¹, 贺云², 周玉祥³, 曾俊莹³, 任莹娜³

(1. 中铁九局大连分公司, 大连 116600; 2. 中铁九局大连分公司, 北京市海淀区 100037;
3. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 阜新 123000)

摘要: 对岩体可爆性展开科学评价,一方面能够为工程爆破方案的设计与优化工作提供关键指导,另一方面也可作为凿岩机械设备、炸药及各类爆破器材的合理选型提供重要依据。为了科学合理地评价刚果(金) SICOMINES 铜钴矿岩体可爆性等级,提出了传统方法层次分析法(AHP)与可拓物元模型相结合的矿岩可爆性评价体系,选取了与评价模型和矿山实际相适应的岩石种类(X_1)、抗压强度(X_2)、矿岩密度(X_3)、抗拉强度(X_4)4个岩体可爆性分级评价指标,建立可拓物元模型,将研究区爆破岩体可爆性评价分级划分为Ⅰ(极易爆)、Ⅱ(易爆)、Ⅲ(中等)、Ⅳ(难爆)和Ⅴ(极难爆)5个等级,建立了各评价指标的等级描述和物元模型的经典域 R_o 、节域 R_p 。计算关联度矩阵对矿岩CMN层、RAT层、RSC层进行了矿岩可爆性评价。得出CMN层矿岩可爆性等级为Ⅳ(难爆)级,RAT层矿岩可爆性等级为Ⅲ(中等)级,RSC层矿岩可爆性等级为Ⅱ(易爆)级与矿山实际情况一致。结果表明:该方法不需要大量的训练样本,计算简便,实用性强,为工程爆破设计及优化提供重要依据,为岩体可爆性评价提供一种新的方法。

关键词: 露天矿; 可爆性; 层次分析法; 可拓物元模型; 爆破; 评价指标

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)02-0170-09

Study on Blastability Classification of Rock Mass in SICOMINES Copper-cobalt Mine, DRC

QI Xiao-xin¹, HE Yun², ZHOU Yu-xiang³, ZENG Jun-ying³, REN Ying-na³

(1. China Railway 9th Bureau Dalian Branch, Dalian 116600, China;
2. China Railway 9th Bureau Dalian Branch, Haidian District, Beijing 100037, China;
3. School of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: The scientific assessment of rock mass blastability performs two key roles by providing vital guidance for engineering blasting plan design and optimization, as well as creating essential standards for choosing suitable drilling equipment, explosives, and related blasting materials. A systematic evaluation approach integrating conventional Analytic Hierarchy Process(AHP) methodology with extension matter-element modeling was developed to assess rock mass blastability characteristics at the SICOMINES Copper-cobalt Mine in the Democratic Republic of the Congo with scientific rigor and practical feasibility. The study identifies four key assessment parameters for rock mass

收稿日期(Date of reception): 2025-09-23

网络首发日期(Published online): 2025-11-19

作者简介: 祁晓鑫(1989-), 男, 汉族, 辽宁铁岭人, 硕士、高级工程师, 主要从事露天矿山深孔爆破合理超深研究, (E-mail) 451398529@qq.com。

通信作者: 周玉祥(1979-), 男, 汉族, 辽宁北票人, 博士、讲师, 主要从事露天开采理论与技术研究, (E-mail) zyx0418@126.com。

基金项目: 中国中铁股份有限公司科技研究开发计划(2025-专项-03)

About the author: QI Xiao-xin(1989-), male, Han ethnicity, born in Tieling city, Liaoning province, master degree and senior engineer status, primarily engaged in the reasonable ultra-deep research of deep hole blasting in open-pit mines, (E-mail) 451398529@qq.com.

Corresponding author: ZHOU Yu-xiang(1979-), male, Han nationality, born in Beipiao city, Liaoning province, Ph. D, lecturer, mainly engaged in research on open-pit mining theory and technology, (E-mail) zyx0418@126.com.

Fund Programs: China Railway Group Limited Science and Technology Research and Development Plan(2025-Special Project-03)

blastability classification that align with both the evaluation framework and site-specific mining conditions, including rock type(X_1), compressive strength(X_2), ore-rock density(X_3), and tensile strength(X_4). An extension of the matter element model was constructed to classify the blastability of the rock mass in the study area into 5 distinct categories, ranging from grade I, representing extremely easy blasting conditions, to grade V, indicating extremely difficult blasting conditions. Intermediate grades II, III, and IV correspond to easy, medium, and difficult blasting conditions, respectively. The correlation degree matrix analysis was performed to assess blastability characteristics of three geological layers(CMN, RAT, and RSC) in the mining area, with results indicating grade IV (difficult) for the CMN layer, grade III (medium) for the RAT layer, and grade II (easy) for the RSC layer, demonstrating strong alignment with observed field conditions. The findings demonstrate that this approach requires minimal training, uses sample features and straightforward calculations, and has high practical applicability, while serving as both a valuable foundation for engineering blasting design optimization and an innovative technique for assessing rock mass blastability.

Key words: open-pit mine; blastability; analytic hierarchy process; generative element model; blasting; evaluation criteria

凿岩爆破是露天开采中首要环节,爆破效果的好坏直接影响到后续采装、运输等环节的工作效率,进而影响整个矿山的生产效率和经济效益。针对不同的爆区选择合理的爆破设计参数是取得良好爆破效果的关键。矿岩可爆性分级在矿山生产领域具有双重关键价值,既是中深孔爆破参数确定的核心参考依据,也是推动中深孔爆破开采技术向精细化方向发展的重要研究内容。岩体可爆性具体指借助爆破等技术手段,促使岩体产生破裂与损伤过程的难易程度。在矿山开采、隧道施工等实际工程场景中,对岩体可爆性展开科学评价,一方面能够为工程爆破方案的设计与优化工作提供关键指导,另一方面也可为凿岩机械设备、炸药及各类爆破器材的合理选型提供重要依据,对保障工程效率与安全具有重要意义。

近年来在岩体工程研究领域,学界诸多研究者立足于不同研究视角,运用多样化研究方法针对岩体可爆性分级开展了系统且深入的探索,进而构建并提出了适用于该分级工作的各类评价指标与技术方法。于庆磊等用蚁群算法优化 BP 神经网络对评价指标进行赋权^[1],提出了基于加权聚类分析的露天矿岩体可爆性分区方法并进一步预测了炸药单耗。白朝阳等基于博弈论组合赋权法对这 5 个指标赋予合理权重^[2],采用集对分析的方法计算待分级区域指标实测值与常用矿岩可爆性级别判据的最大联系度,确定了太白金矿六大勘探区域的矿岩可爆性等级,大块率和炸药单耗显著降低。周楠等基于加权聚类分析方法的岩石爆破性分区评价框架^[3]。薛剑光等构建出用于岩体可爆性分级判别的熵权属性识别模型^[4]。白玉奇等建立了岩体可爆性评价的 CRITIC-vague 模型^[5],进行了岩石可爆性分级,但缺少评价指标与标准的讨论。王文军等提出了一种基于现有爆破作用

指数法评价可爆性的修正方法^[6],完成了黑沟矿区典型矿岩可爆性分级。由于爆破问题的模糊性、复杂性、不确定性,目前还没有一套通用的岩体可爆性分级方法适用于所有的矿山实际。刚果(金)SICOMINES 铜钴矿矿区岩体可爆性不明晰,未能根据不同区域岩体特征而选用匹配的炸药类型,导致爆破设计针对性不强、爆破效果有时不尽人意等问题。本文通过建立层次分析法与可拓物元模型结合,得到矿区不同区域岩体的可爆性分级,该方法将复杂问题予以定量化解,计算过程简单,实用性强,为台阶爆破工艺评估和爆破参数优化提供依据和支撑。

1 工程概况

SICOMINES 铜钴矿区位于刚果民主共和国(简称“刚果(金)”)加丹加省科卢韦齐市西南方向,公路里程 20 km,直线距离 7 km,由 6 个矿段组成,矿权区面积 11.05 km²,控制加推断级矿石量 2.5 亿 t,铜品位 3.47%,钴品位 0.215%,铜金属量 868 万 t,钴金属量 54 万 t,是世界级特大铜钴矿山。矿山采用露天开采方式,采剥总量达 19.99 亿 t,采剥成本高,迫切需要提升爆破效率。在爆破生产过程中,SICOMINES 矿区面临多方面挑战。首先,作为爆破对象的岩石类型多样,物理力学性质差异明显,地层赋存条件复杂,且断层、裂隙及软弱层发育,导致爆破过程中岩体响应不均,常出现大块率、根底残留与冲孔现象、炸药单耗偏高等问题。解决问题的关键之一就是选择合适的方法对爆破岩体的可爆性分级评价,为爆破设计参数优化提供依据。

1.1 指标选取

目前,关于爆破岩体可爆性分级评价的文献资料较多,本文重点关注 SICOMINES 铜钴矿区爆破岩体可爆性分级评价指标选取及评价模型研究。在以

往的研究中岩体可爆性分级评价指标选取各有不同,主要集中在普氏硬度系数、矿岩密度、矿岩容重、抗拉强度、抗压强度、波阻抗、完整性系数、平均节理间距、冲击强度以及岩体完整性系数等指标进行组合,取得了较好的效果^[7-10]。评价指标的选取并非越多越好,指标过多会造成数据测量困难,运算繁杂等情况。本文结合相关文献资料和《刚果(金)SICOMINES 铜钴矿采矿工程(二期)地质概况说明书》选取了适合研究区域的岩石种类(X_1)、抗压强度(X_2)、矿岩密度(X_3)、抗拉强度(X_4)作为岩体可爆性分级评价指标。

岩石种类(X_1):岩石种类决定了其力学性质和结构特征,而这两大因素直接决定了岩体的可爆性,岩石的成因类型(岩浆岩、沉积岩、变质岩),其可爆性呈现明显规律,通常结晶程度高、颗粒粗、致密,层理不发育的玄武岩、石英岩坚固性系数大,可爆性差,需要更多炸药,反之层理明显、胶结程度差的石灰岩、砂岩可爆性会好一些。

抗压强度(X_2):反映岩石抵抗压缩破坏的能

力,是衡量岩体坚固性的关键指标。抗压强度高的岩石(如硅化白云岩)需更大爆破能量才能破碎,反之则可采用较小单耗。

岩石密度(X_3):直接影响炸药能量的作用效果,密度大的岩石(如硅化白云岩)需更高爆破能量才能破碎,因单位体积岩体质量大,克服重力与内部摩擦力所需能量更多。

岩石抗拉强度(X_4)远低于抗压强度,爆破过程中岩体的破裂主要由拉伸应力引起,抗拉强度低的岩石易在爆破荷载下产生裂隙扩展,但若过低则可能导致过爆现象(如岩石粉化)。

1.2 爆破岩体可爆性分级

岩体可爆性影响因素复杂,根据研究成果考虑矿山的实际生产状况,将刚果(金)SICOMINES 铜钴矿爆破岩体可爆性评价体系分为 I(极易爆)、II(易爆)、III(中等)、IV(难爆)和 V(极难爆)5 个等级。由于指标的量化方法不经相同,部分指标的量化需要根据露天矿的实际生产情况而定。见表 1。

表 1 岩体可爆性分级评价指标等级描述^[5,10-12]

Table 1 Description of the grades of evaluation indicators for rock mass blastability classification^[5,10-12]

指标层 X_i Indicator layer X_i	I (极易爆) I (Extremely high)	II (易爆) II (high)	III (中等) III (Medium)	IV (难爆) IV (low)	V (极难爆) V (Extremely low)
岩石种类(X_1) (代表性岩石) Types of rocks (X_1) (Representative rocks)	千枚岩、破碎砂岩 Phyllite, Fractured sandstone	石灰岩、白云岩 Limestone, Dolomite	砂岩、大理岩 Sandstone, Marble	花岗岩、片麻岩 Granite, Gneiss	石英岩、矽卡岩 Quartzite, Skarn
抗压强度(X_2) R_c Compressive strength(X_2) R_c /MPa	≤ 25	25 ~ 60	60 ~ 100	100 ~ 180	180 ~ 300
岩石密度(X_3) ρ Rock density (X_3) ρ /(g · cm ⁻³)	≤ 2.0	2.0 ~ 2.4	2.4 ~ 2.75	2.75 ~ 3.0	3.0 ~ 3.5
抗拉强度(X_4) R_t Tensile strength (X_4) R_t /MPa	≤ 1.5	1.5 ~ 3	3 ~ 6	6 ~ 12	12 ~ 30

2 评价模型应用

本文利用传统方法层次分析法(AHP)的多准则决策分析与可拓物元模型相结合进行矿岩可爆性评价,不需要大量的训练样本,计算过程简单,实用性强,是一种理想的矿岩可爆性评价方法。

2.1 层次分析法

层次分析法(Analytic Hierarchy Process)以多准

则决策方式把定性分析和定量分析结合了起来。因而在信息系统的分析中被广泛采用。其主要步骤为构造判断矩阵、求解特征根和一致性检验。

本文针对 SICOMINES 铜钴矿区爆破岩体可爆性情况,构建了岩石种类(X_1)、抗压强度(X_2)、矿岩密度(X_3)、抗拉强度(X_4)4 个评价指标,利用层次分析法确定他们的权重。之后通过可拓物元模型得出岩体可爆性评价等级。见表 2。

表2 判断矩阵A

Table 2 Judgment matrix A

矩阵A Matrix A	X_1	X_2	X_3	X_4	权重($C \supset_i$) Weight($C \supset_i$)	一致性检验 Consistency check
X_1	1	1/2	1/2	1/3	0.121	CI=0.024
X_2	2	1	1/2	1/2	0.190	RI=0.890
X_3	2	2	1	1/2	0.269	CR=0.027<0.1
X_4	3	2	2	1	0.420	满足要求 Meet the requirements

2.2 可拓物元模型

(1) 爆破岩体可爆性物元确定

在可拓物元模型体系内,“物元”特指研究者所聚焦的某类研究对象^[13,14],其构成要素包含事物名称 N (亦称作事元)、特征属性 X 以及量值参数 V 。

在对爆破岩体可爆性指标开展描述与评价工作时,首先设定爆破岩体可爆性的评价等级共涵盖 m 个(统一记为 N),影响爆破岩体可爆性特征的指标共涵盖 n 个(统一记为 X);若第 i 个(其中 $i=1,2,\dots,m$)爆破岩体可爆性评价等级 N_i ,在第 j 个(其中 $j=1,2,\dots,n$)影响指标 X_j 下对应的量值为 v_{ij} ,那么爆破岩体可爆性的可拓物元模型,则可借助 n 维物元 $R=(N,X,V)$ 进行完整描述。

$$R = \begin{bmatrix} N & x_1 & v_1 \\ & x_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & x_m & v_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

(2) 经典域、节域和待评物元确定

在可拓物元模型框架下,经典域代表各评价等级 N_i 的定义域,节域则界定为各影响指标 X_j 的定义域。鉴于不同指标的量纲存在差异,为排除量纲因素对评价结果的干扰并为后续计算提供便利,因此需对指标实施归一化处理。通过式(2)对各指标开展归一化处理,即可明确评价指标的经典域与节域。在本文研究中,爆破岩体可爆性的隶属度值域已明确界定为 $[0,1]$,在计算过程中可直接引用隶属度数值,无需再开展归一化处理。

$$v_{ij} = \begin{cases} \frac{v_{ij} - v_{ij}^{\min}}{v_{ij}^{\max} - v_{ij}^{\min}} & (v_{ij} \text{ 为正向指标}) \\ \frac{v_{ij}^{\max} - v_{ij}}{v_{ij}^{\max} - v_{ij}^{\min}} & (v_{ij} \text{ 为反向指标}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_{ij} 为每个指标归一化后的值; v_{ij} 为每个指标的取值。

爆破岩体可爆性的评价经典物元是将爆破岩体的可爆性划分为不同等级,使其成为定性、定量综合

评价的物元。假设对爆破岩体可爆性的评价指标进行等级数量划分为 S ,则爆破岩体可爆性评价经典物元矩阵

$$R_{oj} = \begin{bmatrix} N_{oj} & x_1 & v_{oj1} \\ & x_2 & v_{oj2} \\ & \vdots & \vdots \\ & x_m & v_{ojm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_p & x_1 & [a_{oj1}, b_{oj1}] \\ & x_2 & [a_{oj2}, b_{oj2}] \\ & \vdots & \vdots \\ & x_m & [a_{ojm}, b_{ojm}] \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: R_{oj} 代表爆破岩体可爆性处于第 j 时的物元矩阵; N_{oj} 代表第 j 级时的评价等级; $[a_{ojk}, b_{ojk}]$ 代表爆破岩体的可爆性为第 j 级时第 k 个指标的取值范围。

爆破岩体可爆性评价节域物元是由可爆性评价指标的取值范围构成的,即

$$R_p = \begin{bmatrix} N_p & x_1 & v_{p1} \\ & x_2 & v_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & x_m & v_{pm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_p & x_1 & [a_{p1}, b_{p1}] \\ & x_2 & [a_{p2}, b_{p2}] \\ & \vdots & \vdots \\ & x_m & [a_{pm}, b_{pm}] \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: R_p 为爆破岩体可爆性综合评价物元模型的节域; N_p 为事物等级的全体; $v_{pk}=[a_{pk}, b_{pk}]$ 表示可爆性评价指标的取值范围,且有 $[a_{ojk}, b_{ojk}] \subset [a_{pk}, b_{pk}]$ 待评物元用 P 表示,在爆破岩体可爆性的可拓物元模型也用 n 维物元 $R=(P,X,V)$ 来描述。

为消除各指标量纲的差异,方便计算,爆破岩体可爆性评价指标经典域和节域确定方法如下:

岩石种类 X_1 属于定性指标,经典域 R_o 按等分法在 0 到 1 间按可爆性等级 5 等分取值,抗压强度 X_2 、岩石密度 X_3 、抗拉强度 X_4 三个指标经典域 R_o 依据表 1 中数值根据式(1)对各指标进行归一化处理,节域 R_p 统一取值 $[0,1]$,所得结果见表 3。

(3) 待评物元确定

选取 SICOMINES 铜钴矿区二条带 CMN 砂岩、四帮 RAT 砾岩和坑底 RSC 白云岩这三种典型岩组进行现场取样和实验室测试,选取地点如图 1 所示。

表 3 爆破岩体可爆性评价指标经典域与节域

Table 3 Classic domain and node domain of evaluating indicators for blasting fragility of blasted rock masses

T 准则层 K_1 TCriterion layer K_1	指标层 X_i Indicator layer X_i	经典域 R_o Classic domain R_o					节域 R_p Section domain R_p
		N_{o1}	N_{o2}	N_{o3}	N_{o4}	N_{o5}	
爆破岩体 可爆性 K_{11} Blastability of rock mass K_{11}	岩石种类 X_1 Types of rocks X_1	(0.80, 1.00]	(0.60, 0.80]	(0.40, 0.60]	(0.20, 0.40]	[0, 0.20]	[0, 1]
	抗压强度 X_2 Compressive strength X_2	(0.92, 1.00]	(0.80, 0.92]	(0.67, 0.80]	[0.40, 0.67]	[0, 0.40]	[0, 1]
	岩石密度 X_3 Rock density X_3	(0.43, 1.00]	(0.31, 0.43]	(0.21, 0.31]	(0.14, 0.21]	[0, 0.14]	[0, 1]
	抗拉强度 X_4 Tensile strength X_4	(0.95, 1.00]	(0.90, 0.95]	(0.80, 0.90]	(0.60, 0.80]	[0, 0.60]	[0, 1]



图 1 三种岩组选取地点图

Fig. 1 Map of sampling locations for three rock formations

岩石种类(X_1)采用现场调研,结果见表 4。

密度测试采用量积法:将试件放在下部贮水的干燥器内存放 1~2 d,注意试样不应与水接触,使之保持自然含水状态,称重得 M_z 。

测定结果计算

$$\rho_z = \frac{M_z}{Fh} \quad (5)$$

式中: ρ_z 为岩石的自然块体密度, g/cm^3 ; M_z 为试件自然含水状态下的质量, g ; F 为试件截面积, cm^2 ; h 为试件的高度, cm 。

平行测定三次,取算术平均值,计算结果取三位有效数字,三次测定结果的最大差值不应超过 $0.05 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

抗压强度(X_2)和抗拉强度(X_4)分别采用单轴压缩试验和巴西劈裂试验进行,平行测定三次,取算术平均值,如图 2、图 3 所示。

得到结果如表 5 所示。

在上述矿岩可爆性评价指标体系中,对每个指标进行科学的指标量化是做好评价的前提和基础。

根据影响因素的特性和对矿岩可爆性的影响,采用半梯形分布隶属函数进行量化。 X_2 、 X_3 、 X_4 三

个指标为连续变量,其值越大对可爆性贡献率越小,即矿岩越不容易爆破。此指标取值区间为 $[x_{\min}, x_{\max}]$,其模糊隶属度值计算模型为

$$\mu(X_i) = \begin{cases} 1, & X_i \leq x_{\min} \\ - (X_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}), & x_{\min} < X_i < x_{\max} \\ 0, & X_i \geq x_{\max} \end{cases}, i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式(6)中 $\mu(X_i)$ 为第 i 种评价因子 X_i 的隶属度值, X_i 为矿岩第 i 种可爆性评价指标的实测值。

图 2 单轴压缩测试抗压强度(X_2)Fig. 2 Uniaxial compression test compressive strength(X_2)图 3 巴西劈裂试验测试抗拉强度(X_4)Fig. 3 Brazilian splitting test for tensile strength measurement(X_4)

表 4 三种典型岩组岩性情况分析表

Table 4 Analysis table of lithological conditions of three typical rock groups

地层单位 Stratigraphic unit	岩性 Lithology
CMN 层 CMN layer	分为上下两部分:上部(CMN2)层厚 100 ~ 110 m 主要为浅灰色,燧石条带白云岩、白云质粉砂岩;下部(CMN1)为白云质长石石英砂岩、粉砂岩,厚度 10 ~ 20 m,受层间断裂及地下水侵蚀作用固结程度较低,多呈散砂状。 It is divided into two parts:the upper part(CMN2),with a thickness of 100 ~ 110 meters,mainly consists of light-gray,chert-banded dolomite and dolomitic siltstone; the lower part(CMN1) consists of dolomitic feldspathic quartz sandstone and siltstone,with a thickness of 10 ~ 20 meters. Due to the influence of interlayer faults and groundwater erosion,its degree of consolidation is low,and it is mostly in a loose sand state.
RSC 层 RSC layer	厚 15 ~ 30 m,主要为块状、蜂窝状硅化白云岩,灰色、灰黑色,微晶、细砂质结构,块状、局部角砾、蜂窝状构造,本层为 C_{u1}、C_{u2} 号主矿体的夹石层,但靠近上、下接触带常常矿化富集,成为工业矿体的一部分,也可单独构成薄层状小矿体(带)。 It is 15 ~ 30 meters thick,mainly consisting of massive and honeycomb-shaped silicified dolomite,which is gray or grayish-black,with a microcrystalline,fine-sand structure,and massive,locally brecciated,and honeycomb-like structures. This layer serves as the country rock of the main ore bodies C_{u1} and C_{u2}. However,mineralization is often enriched near the upper and lower contact zones,becoming part of the industrial ore body,and it can also form thin-bedded,small ore bodies(zones) independently.
RAT 组 RAT layer	主要分布在矿区南部、西部;层厚 > 100 m,岩石为紫红、浅灰绿色,砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩,常含有少量的赤铁矿,接触面附近多为暗紫红色泥质胶结的砾岩。在构造活动强烈部位及上接触面附近常有弱裂隙充填型孔雀石、硅孔雀石等矿化,矿化一般厚度不大,是本区矿化体底板标志层。 It is mainly distributed in the southern and western parts of the mining area; the layer thickness exceeds 100 meters,and the rocks are purplish red and light grayish green,including conglomerate,sandstone,siltstone,and mudstone,often containing a small amount of hematite. Near the contact surface,there is mostly dark purplish-red,argillaceous,cemented conglomerate. In areas with strong tectonic activity and near the upper contact surface,there are often weak fracture-filled mineralizations such as malachite and chrysocolla. The mineralization generally has a small thickness and is the marker bed of the floor of the mineralized bodies in this area.

岩石种类 X_1 的实测值为:影响矿岩可爆性的主要因素考虑岩石构造参数 D_{tx} (取值为:粒砂状 = 1,块状 = 2,条带状 = 3) 和构造复杂程度 X_{12} (取值为:复杂 = 1,较复杂 = 2,简单 = 3)。其隶属度函数为

$$\mu(X_1) = \frac{X_1}{3} \left(1 - \frac{D_x}{3} \right) \tag{7}$$

得到待评物元归一化值,见表 6。

表 5 SICOMINES 铜钴矿区待评物元

Table 5 Matter elements to be evaluated in the SICOMINES copper-cobalt mining area

评价指标 Evaluation metrics	CMN	RAT	RSC
X_1	层厚 100 ~ 110 m 主要为浅灰色,燧石条带白云岩、白云质粉砂岩 With a thickness of 100 ~ 110 meters,it is mainly light gray,consisting of chert,banded dolomite,and dolomitic siltstone	厚 15 ~ 30 m,主要为块状、蜂窝状硅化白云岩 It is 15 ~ 30 meters thick,mainly consisting of massive and honeycomb-shaped silicified dolomite	层厚 > 100 m,岩石为砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩 Layer thickness > 100 m,rocks are gravel,sandstone,siltstone,and mudstone
X_2	37.70	21.70	17.73
X_3	2.78	2.59	2.26
X_4	2.78	2.25	5.01

表 6 待评物元归一化值
Table 6 Normalized values of the
matter-element to be evaluated

评价指标 Evaluation metrics	CMN	RAT	RSC
X_1	0.22	0.44	0.33
X_2	0.87	0.93	0.94
X_3	0.21	0.26	0.35
X_4	0.91	0.93	0.83

(4) 矿岩可爆性评价指标关联度函数确定

评价指标的关联度矩阵为 $K_1 = [k_i(v_j)]_{m \times n}$, 根据可拓学“距”的概念, 关联度矩阵计算式为

$$k_i(v_j) = \begin{cases} \frac{-\rho(\overline{v_{ij}}, v_{oij})}{|v_{oij}|} (v_{ij} \in v_{oij}) \\ \frac{\rho(\overline{v_{ij}}, v_{oij})}{\rho(\overline{v_{ij}}, v_{pj}) - \rho(\overline{v_{ij}}, v_{oij})} (v_{ij} \notin v_{oij}) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \rho(\overline{v_{ij}}, v_{oij}) = \left| \overline{v_{ij}} - \frac{1}{2}(a_{oij} + b_{oij}) \right| - \frac{1}{2}(b_{oij} - a_{oij}) \\ \rho(\overline{v_{ij}}, v_{pj}) = \left| \overline{v_{ij}} - \frac{1}{2}(a_{pj} + b_{pj}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pj} - a_{pj}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\rho(\overline{v_{ij}}, v_{oij})$ 为点 $\overline{v_{ij}}$ 与区间 v_{oij} 的距; $\rho(\overline{v_{ij}}, v_{pj})$ 为点 $\overline{v_{ij}}$ 与区间 v_{pj} 的距, 即见式(9); v_{oij} 为可爆性等级 N_i 在第 j 个指标下的值域; a_{oij} 和 b_{oij} 分别为 v_{ij} 所在等级定义域的两个端点; a_{pj} 和 b_{pj} 分别为可拓物元模型中第 j 个指标的节域的两个端点。

根据式(7)、式(8)计算出 CMN 层、RAT 层、RSC 层待评物元各评价指标 X_i 关于个评价等级的关联度, 计算结果见表 7 ~ 表 9。

表 7 CMN 层矿岩各评价指标关于评价等级的关联度
Table 7 Correlation degrees of various evaluation
indicators of ore and rock in the CMN layer with
respect to evaluation grades

评价指标 Evaluation metrics	I	II	III	IV	V
X_1	-0.725	-0.633	-0.45	0.100	-0.083
X_2	-0.278	0.417	-0.35	-0.606	-0.783
X_3	-0.512	-0.323	0	0	-0.250
X_4	-0.308	0.200	-0.10	0.550	-0.775

(5) 若待评因素 X_i 的权重系数为 ω , 且 $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$, 则待评事物 P_o 关于等级 N_j 的关联度为

$$K_j(P_o) = \sum_{i=1}^n \omega_i K_i(X_i) \quad (10)$$

则 $K_j = \max K_j(P_o)$, 从而确定矿岩可爆性评价等级为第 j 级。经计算

$K_{CMN} = (-0.40763, -0.00025, -0.16295, 0.12796, -0.55156)$ 根据最大关联度原则, 可判定 CMN 层矿岩可爆性等级为 IV (难爆) 级。

$K_{RAT} = (-0.2302, -0.0908, -0.01934, -0.47607, -0.64199)$ 根据最大关联度原则, 可判定 RAT 层矿岩可爆性等级为 III (中等) 级。

$K_{RSC} = (-0.247562, -0.135013, -0.265532, -0.253004, -0.547618)$ 根据最大关联度原则, 可判定 RSC 层矿岩可爆性等级为 II (易爆) 级。

表 8 RAT 层矿岩各评价指标关于评价等级的关联度
Table 8 Correlation degrees of various evaluation
indicators of ore and rock in the RAT layer with
respect to evaluation grades

评价指标 Evaluation metrics	I	II	III	IV	V
X_1	-0.450	-0.267	0.20	-0.083	-0.353
X_2	0.125	-0.588	-0.65	-0.788	-0.883
X_3	-0.395	-0.161	0.50	-0.161	-0.316
X_4	-0.222	0.400	-0.30	-0.650	-0.825

表 9 RSC 层矿岩各评价指标关于评价等级的关联度
Table 9 Correlation degrees of various evaluation
indicators of ore and rock in the RSC layer with
respect to evaluation grades

评价指标 Evaluation metrics	I	II	III	IV	V
X_1	-0.588	-0.450	0.175	0.350	-0.283
X_2	0.250	-0.250	-0.700	-0.818	-0.900
X_3	-0.186	0.333	-0.103	-0.286	-0.375
X_4	-0.414	-0.292	-0.300	-0.150	-0.575

3 结论

(1) 选取了适合刚果(金) SICOMINES 铜钴矿区的岩石种类(X_1)、抗压强度(X_2)、矿岩密度(X_3)、抗拉强度(X_4)作为岩体可爆性分级评价指标, 将研究区爆破岩体可爆性评价分级划分为 I (极易爆)、II (易爆)、III (中等)、IV (难爆) 和 V (极难爆) 5 个等级, 建立了各评价指标的等级描述和物元模型的经典域 R_o 、节域 R_p 。

(2) 利用传统方法层次分析法(AHP)与可拓物

元模型相结合对刚果(金)SICOMINES 铜钴矿 CMN 层、RAT 层、RSC 层进行了矿岩可爆性评价,得出 CMN 层矿岩可爆性等级为 IV(难爆)级,RAT 层矿岩可爆性等级为 III(中等)级,RSC 层矿岩可爆性等级为 II(易爆)级与矿山实际情况一致。该方法将复杂问题予以定量化解决,计算过程简单,为不同岩体可爆性评价提供一种新的方法。

参考文献(References)

- [1] 于庆磊,李友,李万涛,等.基于可爆性分区方法的露天矿炸药单耗预测模型[J].金属矿山,2024(5):102-109.
- [1] YU Qing-lei, LI You, LI Wan-tao, et al. Prediction model for explosive consumption in open-pit mines based on the detonability partitioning method [J]. Metal Mines, 2024(5):102-10. (in Chinese)
- [2] 白朝阳,刘拴平,邓朋.基于矿岩可爆性分级的中深孔爆破参数优化研究[J].矿业研究与开发,2025,45(4):88-95.
- [2] BAI Chao-yang, LIU Shuan-ping, DENG Peng. Research on optimizing medium-to-deep hole blasting parameters based on rock blastability classification [J]. Mining Research and Development, 2025, 45(4):88-95. (in Chinese)
- [3] 周楠,王德胜,常建平,等.基于综合赋权聚类分析的岩石爆破性分区评价[J].岩石力学与工程学报,2013,32(S1):2817-2824.
- [3] ZHOU Nan, WANG De-sheng, CHANG Jian-ping, et al. Evaluation of rock blasting zones based on integrated weight cluster analysis [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S1):2817-2824. (in Chinese)
- [4] 薛剑光,周健,史秀志,等.基于熵权属性识别模型的岩体可爆性分级评价[J].中南大学学报(自然科学版),2010,41(1):251-256.
- [4] XUE Jian-guang, ZHOU Jian, SHI Xiu-zhi, et al. Graded evaluation of rock mass blastability based on entropy-weighted attribute recognition model [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2010, 41(1):251-256. (in Chinese)
- [5] 白玉奇,李振阳,李传增,等.基于CRITIC-Vague模型的岩体可爆性评价[J].金属矿山,2020(12):27-32.
- [5] Bai Yu-qi, Li Zhen-yang, Li Chuan-zeng, et al. Evaluation of rock blastability based on the CRITIC-Vague model [J]. Metal Mines, 2020(12):27-32. (in Chinese)
- [6] 王文军,李润然,纪旭波,等.黑沟矿区露天开采矿岩可爆性分级研究[J].金属矿山,2021(4):64-69.
- [6] WANG Wen-jun, LI Run-ran, JI Xu-bo, et al. Research on the blastability classification of ore and rock in open-pit mining at the Heigou mining area [J]. Metal Mines, 2021(4):64-69. (in Chinese)
- [7] 刘玉龙,扶海鹰,黄磊,等.基于深度学习的露天铀矿可爆性智能分级模型研究[J].爆破,2024,41(3):240-247.
- [7] LIU Yu-long, FU Hai-ying, HUANG Lei, et al. Research on deep learning-based intelligent classification model for blastability of open-pit uranium mines [J]. Blasting, 2024, 41(3):240-247. (in Chinese)
- [8] 曾庆田,李洪超,冯兴隆,等.普朗铜矿岩体可爆性分级及炸药单耗预测研究[J].矿业研究与开发,2024,44(3):28-32.
- [8] ZENG Qing-tian, LI Hong-chao, FENG Xing-long, et al. Research on blastability classification and prediction of unit explosive consumption for rock masses at pulan copper mine [J]. Mining Research and Development, 2024, 44(3):28-32. (in Chinese)
- [9] 盛益明.深部磷矿工作面矿岩体可爆性分级模型研究[D].武汉:武汉工程大学,2024.
- [9] SHENG Yi-ming. Research on a blastability classification model for rock masses in deep phosphate mine workings [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2024. (in Chinese)
- [10] 柴修伟,李成镇,盛益明,等.基于神经网络的深部磷矿岩体可爆性分级模型研究[J].爆破,2025,42(1):71-80.
- [10] CHAI Xiu-wei, LI Cheng-zhen, SHENG Yi-ming, et al. Research on a deep phosphate rock blastability classification model based on neural networks [J]. Blasting, 2025, 42(1):71-80. (in Chinese)
- [11] 蒋云莱,张义平,赵坤,等.基于博弈论赋权的矿岩可爆性GT-TOPSIS评价[J].矿业工程研究,2023,38(3):17-23.
- [11] JIANG Yun-lai, ZHANG Yi-ping, ZHAO Kun, et al. GT-TOPSIS evaluation of rock blastability based on game theory weighting [J]. Research on Mining Engineering, 2023, 38(3):17-23. (in Chinese)
- [12] 史涵虚,周传波,张升,等.基于CWM和CM的长滩露天矿深孔台阶爆破岩体可爆性评价[J].爆破,2024,41(1):51-59,119.
- [12] SHI Han-xu, ZHOU Chuan-bo, ZHANG Sheng, et al. Evaluation of rock blastability for deep-hole bench blasting in the changtan open-pit mine based on CWM and CM [J]. Blasting Technology, 2024, 41(1):51-59, 119. (in Chinese)
- [13] 周玉祥,宋子岭,杨星辰,等.基于可拓物元模型的露天煤矿气体环境绿色度评价[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2018,37(2):264-271.

-
- [13] ZHOU Yu-xiang, SONG Zi-ling, YANG Xing-chen, et al. Green rating of gas environment in open-pit coal mines based on extensible metamodel[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2018, 37(2):264-271. (in Chinese)
- [14] 周玉祥. 露天煤矿绿色开采技术与评价研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2018.
- [14] ZHOU Yu-xiang. Research on green mining technology and evaluation for open-pit coal mines[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2018. (in Chinese)
-
- (上接第 169 页)
- [19] 唐红梅, 周云涛, 廖云平. 地下工程施工爆破围岩损伤分区研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(23):202-206.
- [19] TANG Hong-mei, ZHOU Yun-tao, LIAO Yun-ping. Damage zone of surrounding rock of underground engineering under construction blasting[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(23):202-206. (in Chinese)
- [20] 褚怀保, 杨小林, 梁为民, 等. 煤体爆破损伤断裂过程与机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(2):410-414.
- [20] CHU Huai-bao, YANG Xiao-lin, LIANG Wei-min, et al. Study on the damage-fracture process and mechanism of coal blasting[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2018, 35(2):410-414. (in Chinese)
- [21] 许梦飞, 姜谔男, 蒋腾飞, 等. 考虑循环爆破效应的 Hoek-Brown 弹塑性损伤模型及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S1):2683-2692.
- [21] XU Meng-fei, JIANG An-nan, JIANG Teng-fei, et al. A cumulative blasting damage model of rock based on Hoek-Brown criterion and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S1):2683-2692. (in Chinese)
- [22] TIAN Xing-chao, TAO Tie-jun, LIU Xia, et al. Calculation of hole spacing and surrounding rock damage analysis under the action of in situ stress and joints[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1):22331-22331.
- [23] 陈大勇, 黄炳香, 吴占伟, 等. 煤矿顶板超深孔爆破对巷道围岩稳定性影响研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(6):1135-1142.
- [23] CHEN Da-yong, HUANG Bing-xiang, WU Zhan-wei, et al. Study on influence of ultra-deep hole roof blasting on stability of surrounding rock of roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(6):1135-1142. (in Chinese)
- [24] 马泗洲, 刘科伟, 杨家彩, 等. 初始应力下岩体爆破损伤特性及破裂机理[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(10):152-173
- [24] MA Si-zhou, LIU Ke-wei, YANG Jia-cai, et al. Blast-induced damage characteristics and fracture mechanism of rock mass under initial stress[J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(10):152-173. (in Chinese)
- [25] 黄永辉, 孙 博, 张智宇, 等. 岩石 RHT 本构的爆破碎裂判定方法优化及验证[J]. 北京理工大学学报, 2023, 43(6):565-574.
- [25] HUANG Yong-hui, SUN Bo, ZHANG Zhi-yu, et al. Optimization and verification of blasting fragmentation judgment method for RHT constitutive model of rock[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(6):565-574. (in Chinese)
- [26] 辛春亮, 涂 建, 王俊林, 等. 由浅入深精通 LS-DYNA[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
- [26] XIN Chun-liang, TU Jian, WANG Jun-lin, et al. Mastering LS-DYNA: from fundamentals to advanced applications[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2019. (in Chinese)
- [27] 秦庆词, 李克钢, 李明亮, 等. 非均质性岩石材料损伤失效准则及其失效行为研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(9):1812-1825.
- [27] QIN Qing-ci, LI Ke-gang, LI Ming-liang, et al. Study on damage failure criterion and failure behavior of non-homogeneous rock materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(9):1812-1825. (in Chinese)
- [28] 何元斌, 杜永林, 罗倩蓉. 工程经济学[M]. 2 版. 成都: 西南交通大学出版社, 2021.
- [28] HE Yuan-bin, DU Yong-lin, LUO Qian-rong. Engineering economics[M]. 2nd edition. Chengdu: Southwest Jiaotong University press, 2021. (in Chinese)
- [29] 梁东彪. 周边孔爆破参数对隧道围岩损伤及超欠挖的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [29] LIANG Dong-biao. Study on the influence of peripheral hole blasting parameters on tunnel surrounding rock damage and overbreak[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [30] 王雁冰, 李书萱, 耿延杰, 等. 切缝药包爆破定向断裂机理及围岩损伤特性分析[J]. 工程科学学报, 2023, 45(4):521-532.
- [30] WANG Yan-bing, LI Shu-xuan, GENG Yan-jie, et al. Directional fracture mechanism and surrounding rock damage characteristics of slotted cartridge blasting[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(4):521-532. (in Chinese)