

铜坑矿 92 号矿体巷道顶板岩体质量评价^①

杨子超¹, 张绍国², 钟 炮², 覃庆韩², 王 辉¹, 陈庆发¹

(1. 广西大学 资源环境与材料学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西华锡集团股份有限公司铜坑矿业分公司, 广西 河池 547205)

摘要:以铜坑矿 92 号矿体+392 m 中段某运输巷道为例, 首先划分试验区并调查所需现场数据, 然后采用 MRMR 岩石质量分类系统对巷道顶板岩体评分并确定其质量等级, 最后基于分级结果给出合适的巷道顶板支护措施建议。结果表明, RMR 法评分为 50, 属于 III 级岩体, 修正后的 MRMR 方法评分为 29, 属于 IV 级岩体, 由现场结构面调查情况可知, MRMR 方法分级结果与实际情况更相符。

关键词:岩体稳定性; 岩体质量分级; 地下矿山; 岩体质量; MRMR 分级法; 巷道顶板; 支护方案

中图分类号: TD353

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.02.006

文章编号: 0253-6099(2023)02-0026-04

Roof Rock Quality Evaluation for Roadway of No.92 Ore Body in Tongkeng Mine

YANG Zichao¹, ZHANG Shaoguo², ZHONG Pao², QIN Qinghan², WANG Hui¹, CHEN Qingfa¹

(1. College of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China; 2. Tongkeng Mining Branch of Guangxi Huaxi Group Company Ltd, Hechi 547205, Guangxi, China)

Abstract: With a transport roadway at +392 m section of No.92 ore body in Tongkeng Mine as an example, the testing area was firstly divided for investigating the required on-site data. Then, the roadway roof rock was scored by using mining rock mass rating (MRMR) system for rock quality classification and rating. Finally, an appropriate support measure was proposed for the roadway roof based on the grading result. It is shown that the roof rock mass has its score of 50 by RMR system and is rated to be Grade III. However, with the modified MRMR system, the rock mass has its score of 29 and is rated to be Grade IV. Compared with the on-site actual investigation of structural plane, the rating result by using MRMR system is much more consistent with actual situation.

Key words: rock mass stability; rock mass quality grading; underground mines; rock mass quality; mining rock mass rating (MRMR) system; roadway roof; support scheme

深部开采软岩巷道的变形失稳, 特别是高地应力下巷道支护失效, 已成为采矿工程技术发展的瓶颈之一^[1]。掌握回采巷道的失稳特征, 根据实际情况提出切实合理的支护方案, 对保证矿井安全生产具有重要的现实意义。

有效的巷道支护是金属矿山安全高效开采的重要前提^[2-5]。矿山巷道支护方案的选取依据是岩体稳定性评价。岩体稳定性的评价方法已从普氏系数分级、岩石单轴抗压强度分级、岩石自稳时间定性分级, 以及根据岩石风化程度、节理结合状态作出的岩体定性分级等早期单因素分级^[6-8], 发展到巴顿岩体质量分级(Q

系统分级)^[9]等多参数岩体分级。但上述评价方法均存在参数考虑不全面、岩体质量评估准确性不足等缺点。文献[10]提出 RMR(Rock Mass Rating)分级, 综合考虑了对岩体施工时产生影响的指标, 但该指标在矿山中适用性偏低, 常常得出比现场情况更高的分级结果。文献[11]基于 RMR 法, 结合矿山实际情况提出了更适用于矿山的 MRMR(Mining Rock Mass Rating)评价方法, 该方法更加充分地考虑了岩石力学性质、结构面特性、原岩应力及工程诱发的二次应力等对可崩性分析及崩落块度的影响作用, 能更加真实反映地下矿山现场工程实际情况。

① 收稿日期: 2022-10-28

基金项目: 广西自然科学基金面上项目(2019GXNSFAA185026); 广西研究生教育创新基金(YCSW2021033)

作者简介: 杨子超(1996—), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要从事裂隙岩体几何效应研究。

通信作者: 陈庆发(1979—), 男, 河南郸城人, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事非传统采矿工艺理论与矿山岩石力学研究。

本文选取广西铜坑矿 92 号矿体代表性试验区巷道,利用 MRMR 方法评估该巷道岩体质量等级,并与 RMR 方法分级结果进行比较,验证其可靠性,可为后续支护、掘进与回采工作设计提供准确的岩体质量评估结果。

1 矿山岩体分类系统介绍

MRMR 评价方法是在 RMR 系统基础上针对矿山工程情况提出的。MRMR 和 RMR 评价系统的主要差别在于:MRMR 方法根据采矿环境对 RMR 分级方法加以改进,使分类指标能够更好地服务采矿设计,主要考虑节理产状、岩体风化、矿山爆破以及采矿应力调整评分^[12]。近年来,MRMR 方法在矿山岩体评价中的综合性、通用性均强于 RMR 分类方法。

MRMR 方法应用于矿山岩体质量评价时计算公式为:

$$MRMR = (RMR_0 + J) \times AB \times A_s \times S \quad (1)$$

式中 RMR_0 为 RMR 分级法评价指标; J 为节理方向修正系数; AB 为爆破影响系数; A_s 为原地应力和应力变化影响系数; S 为主要断层和结构影响系数。

岩体质量评价流程如图 1 所示。

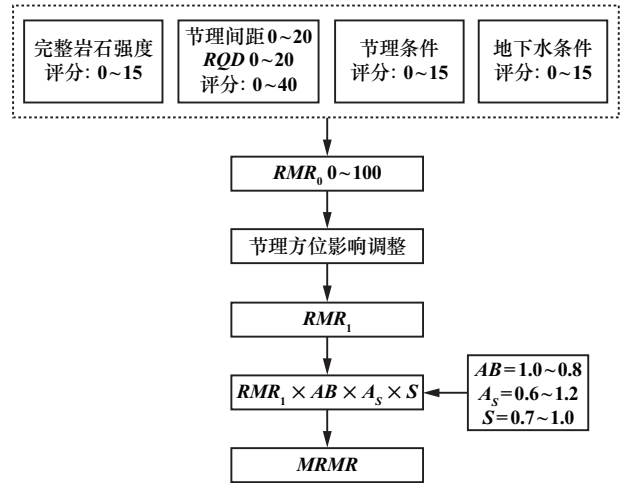


图 1 MRMR 分类法示意图

RMR_0 评价方式见表 1,评价步骤为:

- 1) 按地质构造特征把巷道分成各个区段。
- 2) 按地质构造分段收集完整岩石强度、岩芯质量指标 RQD 、节理间距、地下水状况等原始数据。
- 3) 对收集的原始数据进行评分。

表 1 RMR 岩石分类法取值标准表

完整岩石强度			岩芯质量指标 RQD		节理间距		节理条件		地下水	
点荷载强度/MPa	单轴抗压强度/MPa	评分	数值/%	评分	数值/%	评分	描述	评分	描述	评分
>10	>250	15	90~100	20	>2	20	节理面很粗糙,节理不连续,宽度为零,节理面没有风化	30	完全干燥	15
4~10	100~250	12	75~90	17	0.6~2	15	节理面稍粗糙,宽度小于 1 mm,节理面轻微风化	25	潮湿	10
2~4	50~100	7	50~75	13	0.2~0.6	10	节理面稍粗糙,宽度小于 1 mm,节理面风化严重	20	滴水	7
1~2	25~50	4	25~50	8	0.06~0.2	8	节理面光滑含厚度小于 5 mm 的软弱夹层,节理口宽度 1~5 mm,节理连续	10	中等水压	4
对强度较低的岩石采用单轴抗压强度	5~25	2					含厚度大于 5 mm 的软弱夹层或开口宽度大于 5 mm,节理连续	0	水问题严重	0
	1~5	1	<25	3	0.06	5				
	<1	0								

表 1 中,岩石质量指标 RQD 值可由计算得出,该指标作为反映工程岩体完整程度的定量参数,被广泛应用于各种工程岩体的稳定性评价^[10]。目前,国内外许多岩体工程规范、规程都采用了 RQD 值作为重要分类参数。由于指标意义明确,又属于定量指标, RQD 值对于矿山的总体设计以及巷道的设计有较好的用途。本次节理统计换算 RQD 指标时,采用文献^[11]给出的体积节理数 J_v 与体积 RQD 之间的相关关系:

$$RQD = 115 - 3.3J_v \quad (2)$$

一般地,体积节理数 J_v 很容易计算出来,当结构

面呈均匀分布时,实测的单位面积内节理数目乘以一个系数 $K(K=1.15 \sim 1.35)$,就可以得出 J_v ;当只能采用测线法进行调查或不适合采用式(2)计算,按以下公式计算 RQD 值:

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(1 + 0.1\lambda) \quad (3)$$

式中 λ 为节理面的密度,为节理间距的倒数。

2 工程概况与试验区选定

铜坑矿位于广西河池南丹县境内,主产锡、铅、锌、铋和钢等矿产资源。矿区内广泛露出中、上泥盆纪地

层及少量中、下石炭纪地层;断裂构造较发育,主要有NW向的大厂断裂和NE向的黑水沟断裂;围岩蚀变主要类型为碳酸盐化、矽卡岩化、大理岩化等;矿化类型主要为矽卡岩型锌铜矿化、锡多金属硫化物型矿化和含银闪锌矿~方铅矿型矿化;矿体围岩主要为泥灰岩、钙质泥灰岩、泥页岩等;矿体为岩层分布或小角度穿层分布,与围岩呈类层状接触产出。铜坑矿有上、中、下3个大型矿体,依次分别为细脉带矿体、91号矿体和92号矿体。

采用崩落法回采92号矿体与银锌矿过程中,凿岩巷道受到了断面尺寸过大(适用于铲运机凿岩与出矿的巷道尺寸约为4 m×3.3 m,部分巷道尺寸更大一些)、重复采动、爆破振动、结构面分布状态、地下水等不良因素的影响,已出现冒顶、片帮及整体垮塌等不良灾害现象,甚至部分不稳定区域在已经采取挂网及锚杆等加固措施情况下仍发生挂网破裂、锚杆失效、较大规模冒顶的现象。裂隙岩体凿岩巷道冒顶、片帮及整体垮塌等灾害现象的频繁发生,影响了矿山安全生产工作,威胁着井下作业人员的生命健康。

本文在92号矿体内选择+392 m中段处作为试验区,试验区岩体以层状为主,巷道顶板裂隙发育比较明显,并有斜歪褶曲,拟对该试验区岩体完整程度进行分区评价,再采取相应的支护措施进行加固。

3 试验区顶板岩体分级与治理措施

3.1 现场实测数据分析

在评价试验区岩体质量前,需先进行结构面的统计分析,以便于为评价岩体质量提供可靠的数据,并与最后分级结果进行对比。试验区结构面分析结果如下:

1) 结构面分组与优势方位。试验区共测得209条结构面,对这些结构面统计后进行分组,图2为试验区结构面等密图。

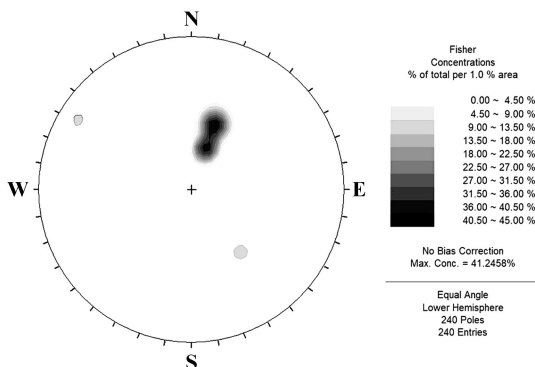


图2 试验区结构面分组等密图

2) 结构面类型与力学性质。试验区结构面类型

与力学性质统计结果如表2所示。由表2可知,试验区87.5%的结构面为压扭性节理、12.5%为压性层理,可认定试验区结构面主要由压扭性节理和压性层理组成。

表2 试验区结构面类型与力学性质统计表

结构面类型		结构面力学性质	
节理	87.08%	压扭性	87.5%
层理	12.92%	压性	12.5%

3) 间距、迹长与隙宽。试验区面积36 m²,测网长度8 m,通过计算可知,结构面的二维密度为5.81条/m²,平均间距为38.28 mm,其连续性统计结果如表3所示。对试验区结构面进行连续性统计分析,统计饼图如图3所示。由表3和图3可知,试验区93.33%为中等连续性结构面、6.67%为低连续性结构面。结构面隙宽主要为闭合级别,没有裂开和张开结构面。

表3 试验区结构面隙宽分组统计表

隙宽分组	闭合	裂开	张开
1组	209	0	0

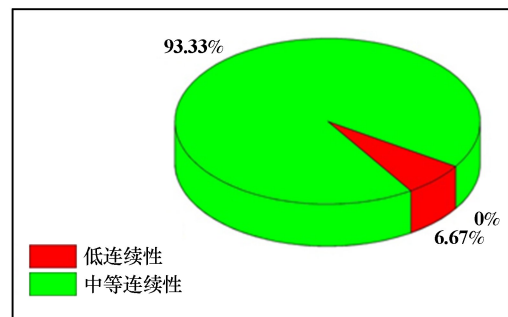


图3 试验区结构面连续性统计饼图

综上所述,试验区结构面主要由87.5%的压扭性节理和12.5%的压性层理组成,按倾向可分为一组,为优势结构面,倾向190°~210°。试验区结构面较密,迹长以中等连续性为主,隙宽以闭合为主,粗糙度以平直光滑为主,地下水状态为干燥,充填物较硬。

3.2 MRMR方法评价岩体质量

采用MRMR分级系统对试验区进行评分。

根据表1确定RMR₀所需参数进行现场数据调查,调查结果如下:试验区巷道顶板属于硅质岩,单轴抗压强度约80 MPa;并利用式(3)计算出RQD值为19.9%,其他指标具体情况可由结构面调查分析结果确定。现场顶板结构面合成图如图4所示,相关数据

以及 RMR_0 评分如表4所示, RMR 法按节理方向修正后的评分值如表5所示。

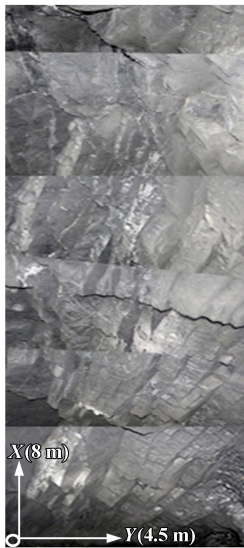


图4 试验区顶板合成图

表4 试验区 RMR_0 评分情况

指标	指标描述	评分
完整岩石单轴抗压强度	80 MPa	7
岩芯质量指标 RQD	19.9%	3
节理间距	0.033	5
节理条件	节理面光滑,宽度小于1 mm,节理面轻微风化,中等连续	20
地下水一般条件	干燥	15

表5 RMR 法按节理方向修正评分值参照表

评定项目	节理倾向/(°)	评价描述	修正评分值
节理走向垂直于隧道轴线方向	隧道沿倾向方向掘进	非常有利	0
	隧道逆倾向方向掘进	有利	-2
节理走向平行于隧道轴线方向	隧道沿倾向方向掘进	一般	-5
	隧道逆倾向方向掘进	不利	-10
不考虑节理走向	45~90	非常不利	-12
	20~45	一般	-5
0~20	一般	-5	

由表4可知,试验区的 RMR_0 为50。主要结构面倾向为 200° , 倾角 40.87° , 巷道掘进方向 270° 。由表5可知,该试验区结构面走向对巷道的稳定性影响程度为一般,修正评分值取-5。根据图1,按 $MRMR$ 分类法再次进行调整。由于本段巷道节理、裂隙较发育,节理、裂隙相互交叉,爆破影响系数 AB 取0.8,原地应力和应力变化的影响系数 A_s 取0.9;岩石非常破碎,节理张开度大小不等,最大的有5 mm,充填物主要为方解石、黄铁矿,主要断层和构造影响系数 S 取0.9;最终 $MRMR$ 总分为29,属于IV级岩体。现场调查结果表明,试验区顶板的岩体质量很差,出现较多的掉块现

象,试验区岩体顶板属于不稳定性, $MRMR$ 分级结果与实际相符。

3.3 试验区巷道顶板治理措施建议

根据现场实测资料,试验区结构面总体倾向为 $175^\circ \sim 185^\circ$, 结构面的二维密度为 5.38 条/ m^2 , 平均间距为 51.69 mm。结构面连续性级别主要为中等连续性,结构面全部为闭合,没有张开和裂开的结构面;结构面地下水状态为干燥,粗糙级别主要为平直光滑;结构面发育程度为很发育,稳定性很差。试验区在无支护的情况下,受重复采动或爆破振动的影响,发生掉块、离层、冒落等灾害事故的可能性较大,甚至在巷道掘进过程中已出现失稳破坏的现象,对井下人员和设备的安全构成严重威胁,极大影响矿山的安全生产。为了保证巷道安全稳定,需对试验区顶板进行有效加固。

结合现场情况与表4,对其加固措施如下:

1) 试验区不稳定块体分布广泛,有严重掉块现象,对有明显掉落趋势的岩块采取撬毛处理。

2) 顶板采用长4~5 m的锚杆进行系统支护,间排距1.5 m,并架设金属网。

3) 顶板喷射100~150 mm厚度混凝土。

4 结 论

1) 试验区巷道顶板裂隙只有一组明显组,其平均倾向 200° , 平均倾角 40.87° , 以中等连续性、压扭性节理面为主,隙宽以闭合级别为主,粗糙度以平直光滑为主,地下水状态潮湿,试验区结构面很发育,稳定性很差。

2) 现场结构面调查情况显示, $MRMR$ 岩体质量评分值为29,属于IV级岩体;评价结果比 RMR 分级系统得出的结果更符合地下矿山巷道岩体的实际情况。

3) 结合现场情况与分级结果,试验区巷道顶板需进行支护,首先对有明显掉落趋势的岩块进行撬毛处理,其次采用长4~5 m、间排距1.5 m的锚杆进行支护并架设金属网,最后喷射100~150 mm厚度混凝土。

参考文献:

- [1] 张爱卿,王贻明,王少勇,等.拜什塔木铜矿爆破开采软岩巷道围岩损伤规律研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(6):13-16.
- [2] 陈晓祥,吴俊鹏.断层破碎带中巷道围岩大变形机理及控制技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2018,35(5):885-892.
- [3] 傅航,马宏发,宋彦琦.深部硐室群巷道围岩变形机理及控制技术研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(12):49-54.
- [4] ZOU Jinfeng, ZHANG Penghao. Analytical of full grouted bolts in pull-out tests and in situ rock masses [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019,113:278-294.

(下转第34页)

分层的 30 404 个。该时期产生大量裂隙,分层之间矿体宽度较大,上下盘岩体失去了支撑,产生大范围垮塌崩落。

结束发展时期,围岩体内裂隙数产生速率较慢,曲线较为平缓,裂隙数由第 23 分层的 30 905 个增加到第 31 分层的 34 580 个。23~31 分层之间矿体宽度较小,为深部矿体,之前垮塌崩落的岩石在矿体上部形成了覆盖层,对塌陷坑四周的陡壁有一定支撑作用,且陡立边坡在快速发展时期发生了较大范围的垮塌,已经处于基本稳定状态。因此,开采第 23~31 分层矿体产生裂隙数的速率较小,裂隙数增加较为缓慢。

4 结 论

采用离散元 PFC^{2D}建立了地质剖面,研究了矿体开采过程中上覆岩层裂缝形成与发展过程,揭示上覆岩层逐渐垮塌崩落的机理,得到以下结论:

1) 随着矿体的开采,裂隙不断向上发展,且裂隙数增加。开采矿体后形成的采空区造成了上覆岩层拉裂-剪裂破坏,岩层中不断有新生裂缝产生。

2) 上覆岩层主要以拉裂缝发展为主,在拉裂缝发展区域的两端产生部分剪破坏裂缝,在空区的两端已经出现向上发展的裂缝集聚,是空区顶板逐渐垮塌崩落的征兆。

3) 开采第 3 和第 4 分层矿体后,出现了局部顶板垮塌现象,且垮塌崩落逐渐发展为整个采空区顶板垮塌,垮塌逐渐向上部覆盖层发展,最终由于风化岩层的抗拉强度与抗剪强度较低,在重力作用下垮塌崩落至地表,在地表初步形成一个小塌陷坑。

4) 依据裂隙数产生的快慢与个数,将发展阶段主要细分为平稳发展时期、缓慢发展时期、快速发展时期和结束发展时期。

5) 揭示了井下矿体开采致使上覆岩层中间拉裂-空区两端剪裂-整体垮塌崩落的形成机理。

参考文献:

- [1] 姜安民,董彦辰,江学良,等. 露天转地下开采引起露天采场边坡垮塌数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(3):14-17.
- [2] 刘洋,刘晓光,侯奎奎,等. 深部矿体开采对隔离矿柱及回填体的稳定性影响研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(3):29-35.
- [3] 王田龙,陈从新,夏开宗,等. 基于监测数据的陡倾结构金属矿山下盘岩层移动机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022,41(7):1409-1426.
- [4] 亓文斌,田春艳,王飞飞,等. 采矿引起地表塌陷过程中的地应力转移演化规律研究[J]. 有色金属工程, 2021,11(12):86-92.
- [5] 亓文斌,刘会林,王飞飞,等. 地下采矿引起山体滑坡发展过程数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(4):29-32.
- [6] 王飞飞,田春艳,任青阳,等. 地下复杂采空区引起地表塌陷渐进发展过程数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(6):22-25.
- [7] 王飞飞,任青阳,邹平,等. 查干敖包铁锌矿地表塌陷形成机制与发展机制研究[J]. 岩土力学, 2020,41(11):3757-3768.
- [8] 甯瑜琳. 多中段层叠采空区处理与地表塌陷坑治理方案研究[J]. 矿业研究与开发, 2017,37(11):26-29.
- [9] 宋许根,刘秀敏,陈从新,等. 程潮铁矿西区采空区地表塌陷机制与变形规律初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2018,37(S2):4262-4273.
- [10] 邓洋洋,陈从新,夏开宗,等. 程潮铁矿西区地表塌陷成因分析[J]. 岩土力学, 2019,40(2):743-758.
- [11] 王栋毅,李夕兵,黎崇金,等. 地下采矿引起地表塌陷机理研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(1):16-21.
- [12] 丁飞,付俊,周罕,等. 河流下开采岩层移动及地表变形预测研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(5):14-16.
- [13] XIA Kaizong, CHEN Congxin, LU Zude, et al. Investigation of the ground movement due to underground mining at the Jinshandian Iron Mine in China[J]. Environmental Earth Sciences, 2019,78:715.

引用本文:魏媛,王飞飞,任青阳,等. 地下采矿引起地表塌陷离散元 PFC^{2D}数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(2):30-34.

(上接第 29 页)

- [5] MENG Qingbin, HAN Lijun, ZHANG Jian, et al. Research and application of supporting technology in deep hing stress fractured softrock roadway[J]. Journal of Central South University (Nature Science Edition), 2016,47(11):3861-3872.
- [6] 王伟东,苏承东,孟亚周. 基于煤层顶底板岩石力学参数的综采技术可行性研究[J]. 煤炭科学技术, 2018,46(12):113-118.
- [7] 丁振杰,郑俊,吕庆,等. 《工程岩体分级标准》中边坡工程岩体质量指标计算方法的讨论[J]. 岩土力学, 2019,40(S1):275-280.
- [8] 姜明伟,刘焕新,王玺,等. 基于 Sirovision 节理岩体调查及岩体质量分级与支护研究[J]. 有色金属工程, 2022,12(1):115-121.
- [9] 沙鹏,赵逸文,高书宇,等. 隧道层状岩体质量评价的 BQ 分级改进[J]. 工程地质学报, 2020,28(5):942-950.
- [10] 张钦礼,李晓孟. 基于 Mamdani FIS 模型及 RMR 法的岩体质量分级研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(5):1-4.
- [11] 范文录,刘育明,陈晓云,等. 眼前山铁矿矿岩分区可崩性评价研究[J]. 中国矿山工程, 2020,49(1):27-29.
- [12] 关崇峻. 基于 MRMR 的岩体数据采集及边坡角初定[J]. 现代矿业, 2017,33(12):67-71.

引用本文:杨子超,张绍国,钟炮,等. 铜坑矿 92 号矿体巷道顶板岩体质量评价[J]. 矿冶工程, 2023,43(2):26-29.