

## 丰山铜矿北缘试验采场稳定性研究

张宏荣<sup>1</sup>,张纯锋<sup>1</sup>,付琛<sup>1</sup>,王贻明<sup>2</sup>,杜双成<sup>2</sup>,石大庆<sup>2</sup>,刘鹏鹏<sup>2</sup>

(1. 大冶有色金属有限责任公司; 2. 北京科技大学土木与资源工程学院)

**摘要:**通过矿岩力学强度测试和工程地质调查对丰山铜矿北缘试验采场稳定性开展研究,重点分析矿岩质量评价结果和采场顶板水力半径计算结果。研究表明:RMR法和Q分类法对矿岩质量评价均为好;通过Mathews稳定性图表法计算得出,北缘矽卡岩的无支护安全跨度为9.19~11.49 m;大理岩的无支护安全跨度为9.45~11.81 m;花岗闪长斑岩的无支护安全跨度为11.40~18.00 m。

**关键词:**丰山铜矿;地质调查;矿岩质量评价;Mathews稳定性图表法;水力半径;稳定性

中图分类号:TD853

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2024)08-0064-04

doi:10.11792/hj20240809

## 引言

矿石和围岩的稳定性决定采场的地压管理、采矿方法的选择和采场构成要素及落矿方法。影响稳定性的因素十分复杂,包括矿岩的成分、结构、构造节理状况、风化程度,以及水文地质条件,还与矿岩在开采过程中形成的相对空间关系相关。

目前大冶有色金属有限责任公司丰山铜矿(下称“丰山铜矿”)不论是分层充填采矿法的分层高度、点柱尺寸,还是分段块石胶结充填采矿法的分段高度与采场结构参数的确定,均凭借设计人员的经验,没有根据矿岩的稳固性确定合理的暴露面积和暴露时间、支护方式,导致采矿损失贫化较大,采场的安全性有待进一步提高<sup>[1-2]</sup>。

为了实现丰山铜矿顺利达产达标,亟须对现有采场结构参数进行优化研究<sup>[3]</sup>。全面开展岩石力学研究,提出合理有效的支护方式与支护参数<sup>[4]</sup>,并对采场结构参数与回采顺序进行优化<sup>[5]</sup>,为井下采场与盘区设计及生产组织提供技术支撑,以确保安全高效生产,对于实现达产达标具有重要意义<sup>[6]</sup>。

## 1 矿岩稳定性参数调查

## 1.1 岩石力学试验

主要对丰山铜矿矽卡岩、大理岩和矿石进行取样测试,取样地点应该选择具有代表性的区域。试样分组及岩性描述如表1所示。

在试验采场进行取样并加工,测试按照GB/T 50266—2013《工程岩体试验方法标准》进行,同一含水状态下每组试验试样的数量不应少于3个。主要

表1 试验试样分组及岩性描述

Table 1 Groups of test samples and their lithology

岩性	取样地点
矽卡岩	南缘-425 m 1405 采场
大理岩	岩芯库
矿石	岩芯库

开展的岩石力学试验有单轴抗压强度试验、抗拉强度试验(巴西劈裂法)和抗剪强度试验。测试结果如表2所示。

表2 岩石力学试验结果

Table 2 Test results of rock mechanics

岩石类型	抗拉强度/ MPa	单轴抗压 强度/MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	内聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)
矽卡岩	2.794	88.72	44.633	0.229	10.85	45
花岗闪长斑岩	10.89	86.47	68.01	0.166	14.34	45.43
大理岩	3.723	65.93	40.807	0.257	8.69	44.36

## 1.2 工程地质测试

为全面掌握丰山铜矿各采区3种岩性的工程地质条件,确保节理裂隙调查结果具有代表性,选择穿透矿体或揭露上下盘围岩的巷道开展节理裂隙调查。地下工程结构面调查测线地点分布如表3所示。部分测线布置如图1所示。

工程地质测试的主要内容有:节理裂隙倾向、倾角、统计节理组数,测量其产状、延展长度及宽度,在不同岩性岩石中的变化、发育程度,节理面形态,开裂宽度,充填物及其性质;编制相关的图件,确定优势结构面的发育方向等。测试结果如表4所示。

表3 地下工程结构面调查测线地点分布

Table 3 Locations of exploration lines for underground engineering structural plane investigation

中段	地点	测线长/m	岩性	节理条数
北缘-380 m	-372 m 水平 8 勘探线采场沿脉	25	矽卡岩	27
北缘-380 m	-372 m 水平-9 勘探线材料井联络道	30	大理岩	29
北缘-320 m	-314 m 水平 10 勘探线采场 1007 矿房	11	花岗闪长斑岩	25
北缘-320 m	-314 m 水平 10 勘探线采场 1000B 矿房	10	矽卡岩	15
北缘-320 m	-314 m 水平 10 勘探线采场 1006B 矿房	23	大理岩	25

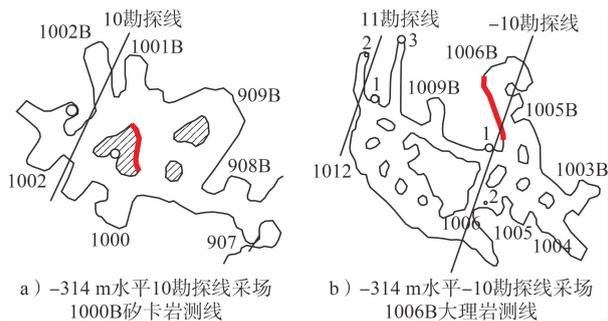


图1 部分测线布置示意图

Fig. 1 Layout of some exploration lines

表4 矿岩工程地质调查结果

Table 4 Engineering geological survey results for ore rocks

参数	大理岩	花岗闪长斑岩	矽卡岩
单轴抗压强度/MPa	54.29 ~ 62.68	88.18 ~ 102.38	91.64 ~ 102.38
<i>RQD</i>	87.36	85.53	82.88
裂隙间距/mm	0.98	0.44	0.83
节理长度/m	3 ~ 10	1 ~ 3	3 ~ 10
张开度/mm	0.1 ~ 1.0	0.1 ~ 1.0	0.1 ~ 1.0
粗糙度	微平滑	粗糙	微平滑
充填物/mm	硬充填, 2	硬充填, 3	硬充填, 3
风化程度	微风化	微风化	微风化
地下水状态	完全干燥	完全干燥	完全干燥

## 2 矿岩质量评价及分级结果

### 2.1 RMR 法

南非宾尼亚斯基 1973 年首次提出用岩体质量指标 (Rock Mass Rating, RMR) 来进行岩体分级。该方法采用完整的岩石强度、岩体质量指标、节理间距、节理状态和地下水条件等 5 个分级参数, 其评价公式为:

$$RMR = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \quad (1)$$

式中:  $R_1$  为单轴抗压强度评分值;  $R_2$  为岩体质量指标 ( $RQD$ ) 评分值;  $R_3$  为节理间距评分值;  $R_4$  为节理状态评分值;  $R_5$  为地下水状况评分值。

### 2.2 Q 分类法

Q 分类法是由挪威的 Barton 于 1974 年提出的一

种地下硐室围岩质量分类方法, 英文全称是 Rock Mass Quality, 简称 Q 分类法。Q 分类法由 6 个参数来确定, 其计算公式为:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (2)$$

式中:  $RQD$  为岩体质量指标;  $J_n$  为节理组数;  $J_r$  为节理粗糙系数;  $J_a$  为节理蚀变系数;  $J_w$  为节理水折减系数;  $SRF$  为应力折减系数。

根据上述试验和调查结果, 采用 RMR 法和 Q 分类法评分后得到计算结果, 如表 5 所示。

表5 综合评价结果

Table 5 Comprehensive evaluation results

矿岩	RMR 法	Q 分类法
大理岩	67	15
花岗闪长斑岩	66	43
矽卡岩	60	14

根据 RMR 法: 北缘大理岩、花岗闪长斑岩、矽卡岩岩体的质量等级均为好; 根据 Q 分类法: 北缘大理岩、矽卡岩岩体质量均为好, 北缘花岗闪长斑岩岩体质量为很好。

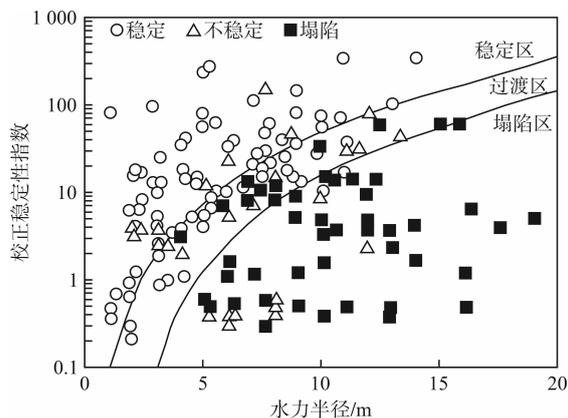
## 3 试验采场矿岩稳定性分析

### 3.1 Mathew 稳定性图表法

英国 Golder 公司的 Mathew 于 1981 年建立了岩体稳定性指数  $N$  与采矿暴露面水力半径  $S$  之间关系的稳定性图表, 如图 2 所示。Mathew 稳定性图表法实质上是利用  $NGI$  岩体分级指标  $Q$  计算岩体稳定性指数  $N$ , 初步确定采场结构参数并计算采场暴露面水力半径  $S$ , 将  $N$  和  $S$  值投影到 Potvin 修改后的稳定性图表上即可初步判断采场的总体稳定性。稳定性指数  $N$  反映了在附加应力条件下岩体保持稳定的能力, 其计算公式为:

$$N = Q'ABC \quad (3)$$

式中:  $Q'$  为修正后的  $NGI$  岩体质量评价指数;  $A$  为岩石强度因子;  $B$  为节理方向调整参数;  $C$  为重力调整

图2 稳定性指数  $N$  与水力半径  $S$  关系示意图Fig.2 Relationship between stability coefficient  $N$  and hydraulic radius  $S$ 

因子。

$A$  值根据岩石单轴抗压强度与最大诱导应力的比值关系确定,  $B$  值根据采矿工作面与节理间夹角的对应关系确定,  $C$  值主要考虑采场顶板与开采角度不同所导致顶板不同位置稳定性的差别确定。根据上述参数值, 计算丰山铜矿 3 种矿岩的稳定性指数  $N$ , 并计算水力半径  $S$ , 结果如表 6 所示。

表 7 采场结构参数(垂直走向布置, 中段高度 60 m)

Table 7 Stope structural parameters (layout perpendicular to the trending, level height 60 m)

区域	岩性	侧壁水力半径/m		跨度/m	稳定采场		跨度/m	崩落采场	
		稳定状态 $S_1$	崩落状态 $S_2$		长度/m	暴露面积/m <sup>2</sup>		长度/m	暴露面积/m <sup>2</sup>
顶板	矽卡岩	3.96	5.91	25	11.59	289.81	25	22.42	560.51
上盘	花岗闪长斑岩	8.55	11.69	25	54.11	1 352.85	25	130.47	3 261.82

由表 7 可知: 丰山铜矿现有采矿工艺, 采场垂直走向布置, 采场跨度即为矿体厚度, 矿体厚度均值为 25 m, 北缘矿体的平均倾角为 65°, 北缘花岗闪长斑岩上盘、矽卡岩矿体的稳定采场跨度分别为 54.11 m、11.59 m, 暴露面积分别为 1 352.85 m<sup>2</sup>、289.81 m<sup>2</sup>。

表 8 采场结构参数(沿走向布置, 阶段高度 60 m)

Table 8 Stope structural parameters (layout along the trending, level height 60 m)

区域	岩性	侧壁水力半径/m		跨度/m	稳定采场		跨度/m	崩落采场	
		稳定状态 $S_1$	崩落状态 $S_2$		长度/m	暴露面积/m <sup>2</sup>		长度/m	暴露面积/m <sup>2</sup>
北缘顶板	矽卡岩	3.96	5.91	8.79	80	703.22	13.87	80	1 109.53
北缘上盘	花岗闪长斑岩	8.55	11.69	21.75	80	1 739.90	33.03	80	2 642.74
北缘顶板	矽卡岩	3.96	5.91	8.60	100	860.12	13.40	100	1 340.44
北缘上盘	花岗闪长斑岩	8.55	11.69	20.63	100	2 062.73	30.51	100	3 051.42
北缘顶板	矽卡岩	3.96	5.91	8.48	120	1 017.56	13.11	120	1 573.38
北缘上盘	花岗闪长斑岩	8.55	11.69	19.94	120	2 393.00	29.04	120	3 484.50

由表 8 可知: 当阶段高为 60 m、采场沿走向布

表 6 采场暴露面稳定性指数  $N$  与水力半径  $S$  计算结果Table 6 Calculation results for stability coefficient  $N$  and hydraulic radius  $S$  of exposed stope face

区域	岩性	$Q'$ 值	$A$	$B$	$C$	$N$	$S_1$	$S_2$
顶板	矽卡岩	14	1	0.2	2.00	5.6	3.96	5.91
上盘	花岗闪长斑岩	43	1	0.2	5.46	46.956	8.55	10.49

### 3.2 试验采场稳定性分析

采场的稳定性主要与水力半径相关, 需根据目前的采场结构参数计算水力半径, 并与理论水力半径值对比。如果要保持采场稳定, 需要控制采场水力半径不超过稳定区水力半径。

#### 3.2.1 采区顶板稳定性分析

丰山铜矿北缘矿带采用上向水平分层尾砂充填采矿法回采时, 矿体厚度小于 6 m 的采场沿走向布置, 矿体厚度大于 6 m 的采场垂直走向布置。目前开采已进入深部, 深部矿体厚度普遍大于 6 m, 北缘深部采场基本沿垂直走向布置。丰山铜矿现有采矿技术条件下, 采场的暴露面积形状系数、稳定采场长度和极限暴露面积分布情况如表 7 所示。

为提高开采效率, 若改为大盘区采场, 考虑采场长度分别为 80 m、100 m、120 m 时, 采场的允许暴露面积和极限暴露面积。当采场沿走向布置, 长度分别为 80 m、100 m、120 m 时采场的暴露面积形状系数、稳定采场跨度和极限暴露面积分布情况如表 8 所示。

置, 采场长度为 80 m, 北缘矿体的平均倾角为 65°, 北

缘花岗闪长斑岩上盘、矽卡岩矿体的稳定采场跨度分别为 21.75 m、8.79 m, 暴露面积分别为 1 739.90 m<sup>2</sup>、703.22 m<sup>2</sup>; 当阶段高为 60 m、采场沿走向布置, 采场长度为 100 m, 北缘矿体的平均倾角为 65°, 北缘花岗闪长斑岩上盘、矽卡岩矿体的稳定采场跨度分别为 20.63 m、8.60 m, 暴露面积分别为 2 062.73 m<sup>2</sup>、860.12 m<sup>2</sup>; 当阶段高为 60 m、采场沿走向布置, 采场长度为 120 m, 北缘矿体的平均倾角为 65°, 北缘花岗闪长斑岩上盘、矽卡岩矿体的稳定采场跨度分别为 19.94 m、8.48 m, 暴露面积分别为 2 393.00 m<sup>2</sup>、1 017.56 m<sup>2</sup>。

### 3.2.2 采场安全跨度

为了较全面的了解丰山铜矿岩体, 分别采用岩体分类系统和岩体质量指标对矿区岩体进行分类, 并根据分类结果对井下采空区的稳定性进行评价和预测。

Q 分类法综合了 RQD 值、节理组数、节理面粗糙度、节理面蚀变程度、裂隙水及地应力的影响 6 个方面的因数 Q。本次围岩分类采用 2002 年修正的 Q 计算公式。

通过现场调查研究, Barton 等建议采用经验计算公式(4)来确定工程跨度:

$$W = 2E_z Q^{0.4} \quad (4)$$

式中: W 为无支护巷道最大安全跨度(m); E<sub>z</sub> 为支护比; Q 为岩体质量指标。

对于永久性矿山工程, E<sub>z</sub> = 1.6 ~ 2.0; 对于临时性矿山巷道或工程, 取 E<sub>z</sub> = 3 ~ 5。不同支护跨距与 Q 值关系如图 3 所示。

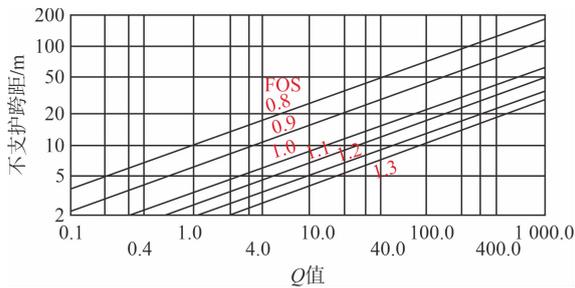


图 3 不同支护跨距与 Q 值关系图(FOS 为安全系数)

Fig. 3 Relationship between support spans and Q value (FOS as safety coefficient)

根据 De - Q 值曲线(如图 4 所示), 可以估算出所需要的支护。

由于丰山铜矿北缘试验采场的井下部分矿块采用上向充填, 采空区在矿石回采完毕后会立即进行充填处理, 但需在采空区下进行铲运机自动化作业, 因此, 取 E<sub>z</sub> = 1.6 ~ 2.0, 按式(4)计算丰山铜矿井下开采时无支护采场的安全跨度, 其结果如表 9 所示。

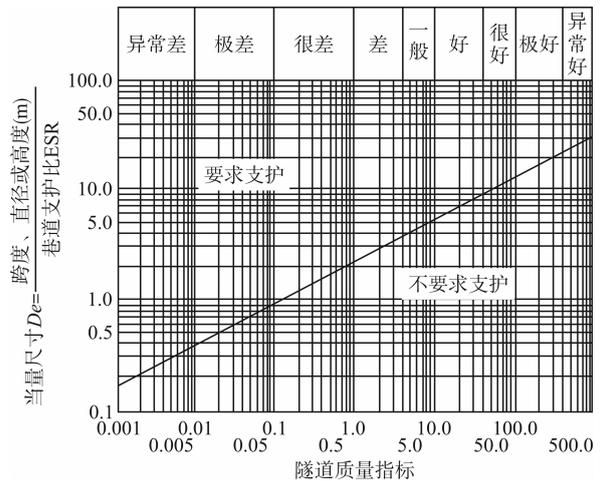


图 4 不支护的地下开挖体当量尺寸 De 与 Q 值之间的关系  
Fig. 4 Relationship between equivalent size De of underground excavation body not supported and Q value

表 9 丰山铜矿北缘矿(岩)体 Q 分类法结果及无支护安全跨度  
Table 9 Q classification results and safety span without support for the rock mass on the north margin of Fengshan Copper Mine

岩体类型	Q 值	无支护安全跨度/m
矽卡岩	14	9.19 ~ 11.49
大理岩	15	9.45 ~ 11.81
花岗闪长斑岩	43	11.40 ~ 18.00

## 4 结论

1) 通过室内岩石力学试验和现场工程地质测试, 掌握了丰山铜矿各采区矽卡岩、花岗闪长斑岩、大理岩 3 种岩性的工程地质条件。基于 RMR 法和 Q 分类法的矿岩质量评价结果均为好, 可见丰山铜矿北缘试验采场具有良好的矿岩稳定性。

2) 结合岩体 Q 分类法结果, 对各岩体无支护安全跨度进行了评价, 结果显示: 北缘矽卡岩的无支护安全跨度为 9.19 ~ 11.49 m; 大理岩的无支护安全跨度为 9.45 ~ 11.81 m; 花岗闪长斑岩的无支护安全跨度为 11.40 ~ 18.00 m。

### [参考文献]

- [1] 罗卫兵, 石大庆, 武鹏杰, 等. 丰山铜矿深部岩爆特征及防治措施研究[J]. 世界有色金属, 2023(17): 160 - 162.
- [2] 马明辉. 残矿回采围岩 - 充填体协同承载机制与稳定性分析[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- [3] 王冠男, 童大志, 汪杰. 考虑结构特征的采场胶结充填体稳定性分析[J]. 黄金, 2023, 44(9): 21 - 30.
- [4] 陈霖, 黄明清, 唐绍辉, 等. 大直径深孔空场嗣后充填法采场结构参数优化及稳定性分析[J]. 金属矿山, 2022(11): 44 - 51.
- [5] 李胜辉, 王立杰, 刘志义, 等. 复杂破碎矿体试验采场稳定性分析及结构参数优化[J]. 金属矿山, 2021(8): 41 - 45.
- [6] 屈利群. 某矿区地下采场群稳定性分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.