

千米深井自然崩落法矿山块度预测及分布规律研究

童建华^{1,2}

(1. 紫金矿业集团股份有限公司; 2. 塞尔维亚紫金矿业有限公司)

摘要:针对国外某斑岩型铜矿自然崩落法块度预测,基于矿区工程地质调查、地应力测试、自然崩落设计等参数,采用 Monte Carlo 模拟技术和 BCF 软件分析和预测崩落块度、放出块度和卡斗情况。预测分析结果表明:该矿山初始块度大块率较高,初始块度体积大于 2 m^3 占比为44.19%~48.01%。放出块度在崩落初期大块率较高,随着放矿高度增大,放出块度逐渐降低,尤其是在60 m放矿高度时由原有的20%~25%降低为10%左右。对比分析了4种不同尺寸聚矿槽卡斗情况,在崩落初期漏斗堵塞率均大于20%,放矿过程中易产生堵塞;当聚矿槽尺寸增大至 $12\text{ m}\times 5.0\text{ m}$ 时,聚矿槽堵塞程度明显缓和。该研究成果为自然崩落法矿山采矿设计和放矿控制提供了重要依据。

关键词:深部开采;自然崩落法;块度预测;放矿高度;大块率;初始块度;BCF系统;聚矿槽

中图分类号:TD853.36

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)02-0013-05

doi:10.11792/hj20250202

引言

自然崩落法^[1-5],作为一种依赖矿体自身重力作用使其受压失稳而产生自然坍塌并实行控制出矿的采矿方法,特别是在低品位厚大矿床的开采中,该方法以其成本低、效率高、安全性好的特点受到广泛关注。然而,自然崩落法的有效应用离不开对矿岩崩落块度的准确预测和控制^[6-12]。

矿岩崩落块度预测^[13-17]的重要性首先体现在其对采矿效率和安全性直接影响。在自然崩落过程中,矿岩块度的分布和大小直接关系到矿石的回收率和出矿效率。通过对矿岩崩落块度的预测,可以更加精确地制定采矿计划,合理安排放矿工作,从而提高矿石回收率和出矿效率。同时,准确的块度预测也有助于避免或减少大块矿石堵塞放矿口等安全问题,提高采矿作业的安全性。因此,崩落块度预测成为自然崩落法研究过程中尤为重要的一环。

本文针对国外某斑岩型自然崩落法矿山,结合矿区工程地质条件和自然崩落开采设计等,采用 Monte Carlo 模拟技术和 BCF(Block Cave Fragmentation, BCF)软件分别进行了不同区域初始块度、放矿块度和聚矿槽卡斗预测与分析,为提升自然崩落法采矿设计可靠性提供技术支撑。

1 工程概况

某斑岩型铜矿位于塞尔维亚波尔市以南6 km处,其开发的铜矿床为地中海斑岩成矿带上的超大型

铜金矿床。该矿山上矿带为高品位的铜金矿,下矿带为斑岩型铜矿,埋藏深度700~2 200 m;以Cu边际品位0.30%圈定,下部矿带矿石量2 049.55 Mt,Cu金属量15.70 Mt,Cu平均品位0.77%。

由于下部矿带矿床规模巨大,采用分期建设方案。一期工程开采-800 m标高以上矿体,采用自然崩落法,箕斗主井、副井开拓;生产规模45 kt/d,基建期5 a,预计2026年底投产。该铜矿自然崩落区域空间位置关系见图1。一期工程开采中段距地表埋深1 176 m,为千米深井开采;根据上矿带地应力实测规律,-800 m中段最大主应力为37 MPa,属高应力环境。

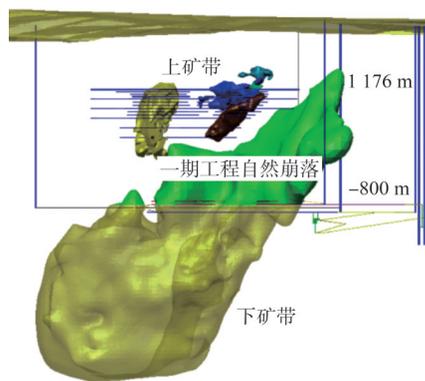


图1 某铜矿自然崩落区域空间位置关系示意图
Fig. 1 Schematic diagram of spatial relationships in the natural caving area of a copper mine

2 分析方法与参数

2.1 分析方法与工具

块度预测方法^[18-21]主要有间接法、图像法和节理

收稿日期:2024-07-26; 修回日期:2024-09-15

基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2022YFC2903904)

作者简介:童建华(1970—),男,工程师,从事有色金属矿山建设、技术工艺与管理工;E-mail:913619493@qq.com

网络模拟法。间接法主要是通过RQD、节理发育情况等来评价矿石块度;图像法是通过图像识别来分析矿石块度。本次研究采用节理网络模拟法,即一种根据节理空间展布状态及节理面条件的统计分析结果,采用 Monte Carlo 模拟技术模拟节理面对岩体的切割情况,并利用有关崩落和放矿过程的力学知识,预测崩落矿石块度的分布。

BCF^[18]软件是一个用于评价自然崩落法放矿点块度分布的软件,其块度分析系统采用节理网络模拟法来确定原始块度,并用经验法则来预测崩落块度和放出块度。该软件是目前自然崩落法块度预测中应用最多的分析系统之一。BCF 块度分析系统块度预测基本流程见图2。

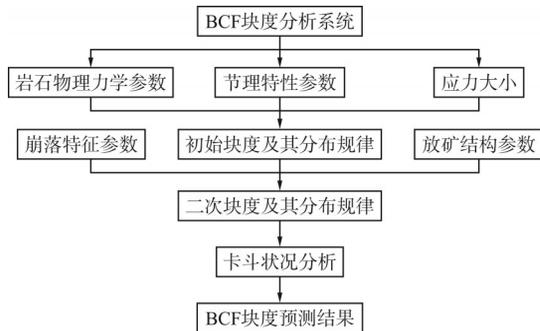


图2 BCF 块度分析系统块度预测基本流程
Fig. 2 Basic flowchart of block size prediction in BCF block size analysis system

表1 放出块度预测主要参数

Table 1 Key parameters for released block size prediction

放矿高度/m	最大崩落高度/m	放矿宽度/m	松散系数	岩石密度/ (kg·m ⁻³)	聚矿槽上口 宽度/m	聚矿槽下口 宽度/m	放矿速度/ (cm·d ⁻¹)
20~185	500	758	1.4	2 732	10	4.5	20

3 块度预测与分析

3.1 初始块度分析

国际上通常将体积大于2 m³的大块所占百分比作为矿体产生大块的衡量标准^[23]。从初始块度运行结果来看,该矿山初始块度大块块度较高,初始块度体积大于2 m³占比为44.19%~48.01%;平均块度体积为1.09~1.19 m³;最大块度体积为13.80~21.71 m³。该矿山各勘探线区域大于2 m³的初始块度占比和平均块度体积分布见图4。

该矿山初始块度累积体积分布曲线见图5。以0勘探线为界,对初始块度预测结果进行统计分析,0勘探线以北区域初始块度相对较小,块度体积多小于1.14 m³,大于2 m³块度占比多为45%左右;0勘探线以南区域初始块度也相对均匀,块度体积多小于1.17 m³,大于2 m³块度占比多在47%左右。

2.2 主要参数

1)初始块度参数。初始块度^[16]是指从周围岩体分离出来的岩石块度,主要输入参数有:①节理;②岩体强度;③崩落面方向;④应力。根据前期工程地质调查和地应力测试结果,该矿山的初始块度预测主要参数见图3。

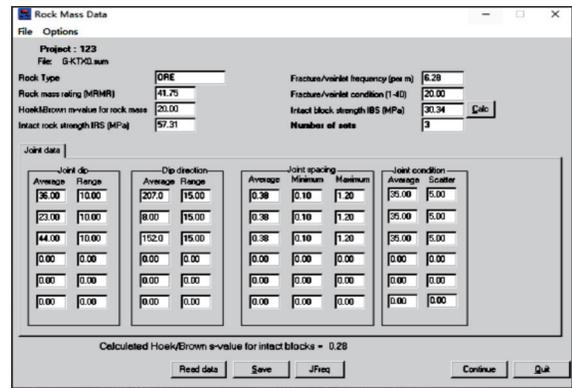


图3 初始块度预测主要参数

Fig. 3 Key parameters for initial block size prediction

2)放出块度参数。放出块度^[22]是指矿岩从某一高度脱离顶板起,在放矿过程中不断碰撞、磨损、破裂后,最终到达放矿点的矿石块度。假设放矿高度为150 m,则放出的块度结果是岩石从150 m高运动至放矿口的岩石块度。该矿山放出块度预测主要参数见表1。

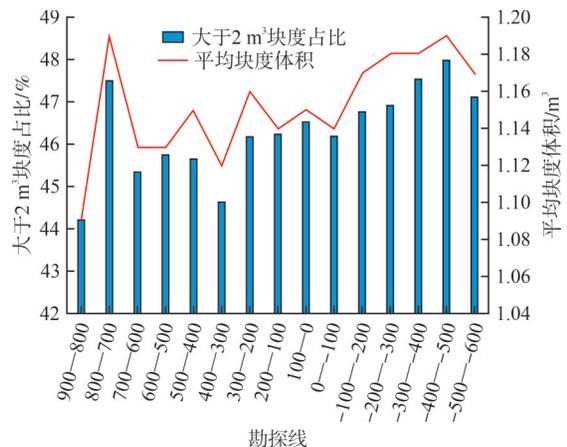


图4 该矿山各勘探线区域大于2 m³的初始块度占比和平均块度体积分布

Fig. 4 Proportions of initial block size over 2 m³ and average block size distribution along exploration lines of the mine

3.2 放出块度分析

根据矿山开采规划,平均放矿高度为185 m,此次

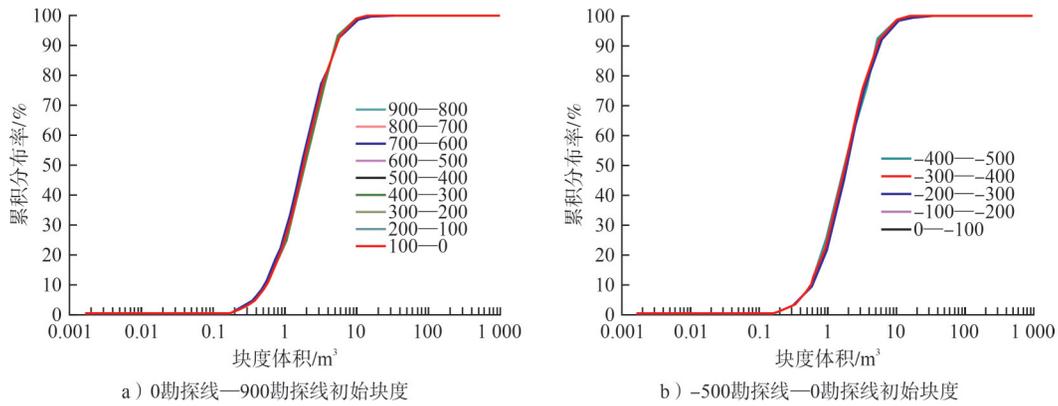


图5 初始块度体积累积分布曲线

Fig. 5 Cumulative volume distribution curve of initial block size

研究取放矿高度 20~185 m, 递增梯度为 40 m, 即从放矿高度 20 m 开始, 每增加 40 m 计算一次放出块度体积, 直至达到最大放矿高度。

900 勘探线—800 勘探线放出块度体积累积分布曲线见图 6。从放出块度运行结果来看: 放出块度在放矿过程中块度减小, 放矿高度越高, 放出块度越小。当放矿高度为 20 m 时, 900 勘探线—800 勘探线块度体积大于 2 m³ 占比为 20.79%, 平均块度体积为 0.66 m³; 随着放矿高度的增加, 块度体积不断减小, 至放矿高度为 180 m 时, 放出块度体积大于 2 m³ 占比降低至 0.90%, 平均块度体积降至 0.13 m³。

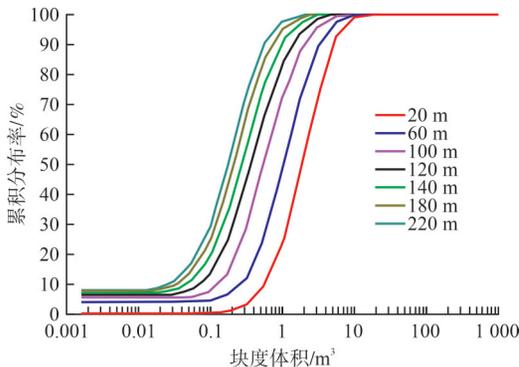


图6 900 勘探线—800 勘探线放出块度体积累积分布曲线

Fig. 6 Cumulative volume distribution curve of released block size along exploration lines 900-800

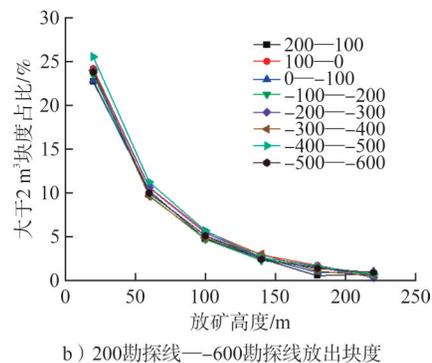
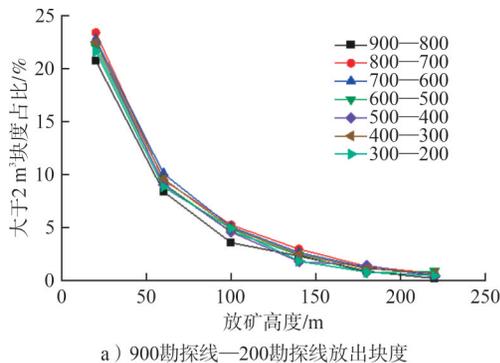


图7 各勘探线大于 2 m³ 放出块度变化趋势

Fig. 7 Trends of released block size over 2 m³ along different exploration lines

各勘探线间的放出块度变化趋势见图 7。放矿高度从 20 m 增大至 220 m, 放出块度体积占比明显大幅减小。从各勘探线不同放矿高度下大于 2 m³ 的块度体积占比趋势来看, 总体上在放矿高度 20 m 时, 大于 2 m³ 的块度体积占比为 20%~25%; 放矿高度 60 m 和 100 m 时, 大于 2 m³ 的块度体积占比明显下降, 尤其是在 60 m 放矿高度时由原有的 20%~25% 降低至 10% 左右。分析原因为该矿山岩石单轴抗压强度 57.31 MPa, 强度较低; *MRMR* 值 40~42, 岩体质量评分值也不高; 随着放矿高度增大, 放矿过程中的碰撞、磨损作用使得放出块度体积整体偏小, 可以预见, 这一区域内的卡斗状况相对也会低些。

4 聚矿槽卡斗分析

4.1 聚矿槽方案

卡斗分析是根据放出块度结果来决定放矿漏斗中卡斗情况, 该模块的目的是预测潜在卡斗情况; 该分析方法认为, 当岩块个数少于 25 个 (5×5) 且占据了放矿漏斗 40% 的面积时, 就可能发生卡斗现象。根据底部结构布置和放矿管理等因素考虑, 该矿山聚矿槽尺寸方案见表 2。

4.2 卡斗预测与分析

聚矿槽下口宽对于崩落矿石是否能够放出影响

表2 该矿山聚矿槽尺寸方案

Table 2 Dimension schemes for ore gathering chutes at the mine

方案	上口长/m	上口宽/m	下口长/m	下口宽/m
方案1	15	10	15	4.5
方案2	15	15	12	4.5
方案3	15	12	15	5.0
方案4	15	15	15	5.0

很大,以方案1下口宽4.5 m和方案3下口宽5.0 m为例,其不同放矿高度下聚矿槽卡斗预测与分析结果见图8。

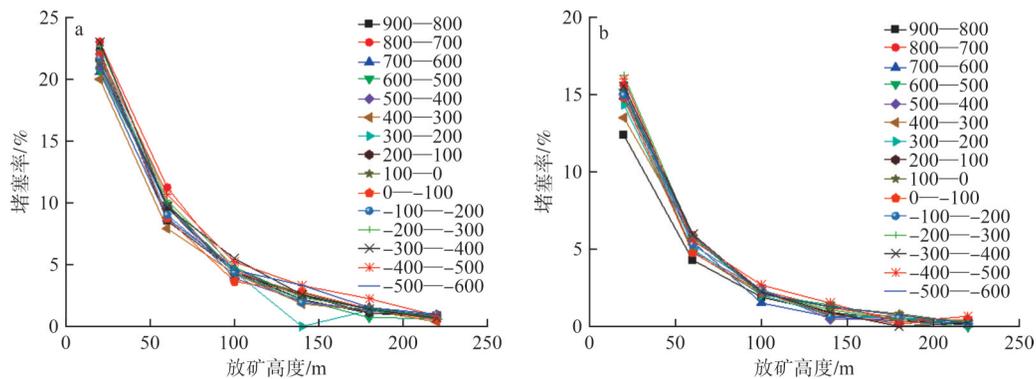


图8 方案1和方案3聚矿槽卡斗预测与分析

Fig. 8 Prediction and analysis of chute jamming for Scheme 1 and Scheme 3

在聚矿槽下口宽都为4.5 m,上口宽为10 m时最大堵塞率为22.99%,上口宽为15 m时最大堵塞率为22.22%;聚矿槽下口宽为5.0 m,上口宽为12 m时最大堵塞率为16.24%,上口宽为15 m时最大堵塞率为16.21%。从2组对照分析来看,聚矿槽下口宽对堵塞率影响更大。

5 结论

1)初始块度从总体看,大块率比较高,以体积 2 m^3 为单位对块体大小进行划分,初始块度体积大于 2 m^3 占比为44.19%~48.01%,平均块度体积为 $1.09\sim 1.19\text{ m}^3$,最大块度体积为 $13.80\sim 21.71\text{ m}^3$ 。

2)放矿高度从20 m增大至220 m,二次块度体积占比明显大幅减小。从各勘探线不同放矿高度下大于 2 m^3 的块度体积占比趋势来看,总体上在放矿高度20 m时,大于 2 m^3 的块度体积占比为20%~25%;放矿高度60 m和100 m时,大于 2 m^3 的块度体积占比明显下降,尤其是在60 m放矿高度时由原有的20%~25%降低为10%左右;随着放矿高度增大,放矿过程中的碰撞、磨损作用使得二次块度体积整体偏小,可以预见,这一区域内的卡斗状况相对也会低些。

3)针对不同聚矿槽尺寸进行了卡斗状况分析与预测,在崩落的初始阶段,几乎所有勘探线间的漏斗堵塞率均大于20%,放矿过程中易产生堵塞;当聚矿槽尺寸增大至 $12\text{ m}\times 5.0\text{ m}$ 时,在崩落的初始阶段,各

图8。

从不同尺寸聚矿槽卡斗运行结果来看,该矿山卡斗预测分布规律如下:

1)卡斗与放矿高度关系。分析不同尺寸聚矿槽卡斗情况,最大堵塞率发生在放矿初始阶段,即放矿高度20 m;在放矿高度增加至60 m时,堵塞率由16.4%~23.0%下降至9.0%~10%,堵塞率明显下降;随着放矿高度的增加,堵塞率下降至5%以下。

2)卡斗与聚矿槽宽度的关系。从对比方案来看,

勘探线间的区域仍可产生少量堵塞;随着放矿高度的增加,部分区域的堵塞率已趋于零,堵塞程度明显缓和。

[参考文献]

- [1] 于少峰,吴爱祥,韩斌.自然崩落法在厚大破碎矿体中的应用[J].金属矿山,2012(9):1-4.
- [2] 艾敏,杨玉婷,许志发,等.国内外自然崩落法研究与应用现状[J].中国水运(下半月),2018,18(11):241-243.
- [3] 郭鸿德,朱先艳,郭楠,等.夜长坪铜矿自然崩落采矿法小型工业试验研究[J].黄金,2016,37(5):36-40.
- [4] 刘育明.自然崩落法的发展趋势及在铜矿峪二期工程中的技术创新[J].采矿技术,2012,12(3):1-4,28.
- [5] 兰启城.自然崩落采矿法创新技术设计及应用[J].黄金,2018,39(7):49-53.
- [6] 刘欢,任凤玉,何荣兴,等.自然崩落法岩体可崩性研究现状与展望[J].中国矿业,2023,32(7):95-104.
- [7] 高鹏举,周礼.黄山南铜镍矿采矿方法优化选择及应用[J].黄金,2019,40(6):35-39.
- [8] SOMEHNESHIN J, ORAEE-MIRZAMANI B, ORAEE K. Analytical model determining the optimal block size in the block caving mining method[J]. Springer India, 2015, 45(2): 156-168.
- [9] RAFIEER,ATAEI M,KHALOOKAKAIE R,et al. Numerical modeling of influence parameters in cavability of rock mass in block caving mines [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 105:22-27.
- [10] 周益龙,王宁.自然崩落采矿法计算机放矿控制技术[J].黄金,2002,23(6):11-15.
- [11] 陈晓云,范文录,夏长念,等.自然崩落法矿岩崩落块度研究现

- 状与趋势[J].中国矿山工程,2020,49(3):17-19,25.
- [12] 张东红.自然崩落法的岩石力学工作与矿石崩落块度[C]//《矿业研究与开发》编辑部.中国有色金属学会第五届学术年会论文集.长沙:《矿业研究与开发》编辑部,2003:86-87,113.
- [13] 李强,程文文.长山壕金矿自然崩落采矿法矿岩崩落块度预测研究[J].黄金,2019,40(11):36-38.
- [14] 马从安,张峰,裴青彦,等.自然崩落法放矿品位预测研究[J].矿业研究与开发,2010,30(2):16-18.
- [15] 江飞飞,李向东,张华军,等.急倾斜厚大矿体自然崩落块度预测及分布规律研究[J].矿业研究与开发,2014,34(2):6-9,36.
- [16] 陈江川,李兴平,李伟明.夜长坪钨矿自然崩落法块度预测及控制技术[J].采矿技术,2017,17(3):19-20,32.
- [17] 孙伟,冯兴隆,刘华武,等.普朗铜矿自然崩落法开采风险因素分析[J].中国金属通报,2018(9):42-43,45.
- [18] 荆永滨,赵新涛,冯兴隆.节理岩体矿岩块度三维模拟研究[J].黄金科学技术,2018,26(3):357-364.
- [19] 李光,刘育明,范文录,等.眼前山铁矿矿岩崩落块度预测研究[J].中国矿山工程,2019,48(5):14-16,20.
- [20] 杨啸,杨志强,高谦,等.基于节理网络模拟和分形理论预测矿岩体块度[J].太原理工大学学报,2015,46(3):318-322.
- [21] 陈小伟,刘育明,葛启发,等.基于BCF软件的自然崩落法矿岩崩落块度预测研究[J].中国矿山工程,2019,48(6):6-9.
- [22] 李响,贾明涛,王李管,等.基于蒙特卡罗随机模拟的矿岩崩落块度预测研究[J].岩土力学,2009,30(4):1186-1190.
- [23] 于润沧.采矿工程师手册:下册[M].北京:冶金工业出版社,2009:198.

Study on block size prediction and distribution patterns in a kilometer-deep mine using the natural caving method

Tong Jianhua^{1,2}

(1. Zijin Mining Group Co., Ltd.; 2. Serbia Zijin Mining Co., Ltd.)

Abstract: Focusing on block size prediction for a porphyry-type mine abroad using the natural caving method, this study, based on the parameters such as engineering geological survey, ground stress testing, and natural caving design, employed the Monte Carlo simulation technique to analyze and predict caving block size, extracted block size, and funnel blockages. The prediction results indicate that the initial block size exhibits a high proportion of large blocks, with blocks larger than 2 m³ accounting for 44.19 %–48.01 %. During the early stage of extraction, the extracted block size also showed a high proportion of large blocks, but this gradually decreased with increased draw height, particularly at 60 m, where the proportion dropped from the initial 20 %–25 % to approximately 10 %. A comparative analysis of funnel blockages in 4 drawpoints of different sizes revealed that all funnels experienced a blockage rate of over 20 % in the early caving stage, with frequent blockages during ore extraction. However, enlarging the drawpoint size to 12 m×5.0 m significantly mitigated blockage severity. This research provides critical insights for mining design and extraction control in mines using the natural caving method.

Keywords: deep mining; natural caving method; block size prediction; draw height; large block proportion; initial block size; BCF system; drawpoint