

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.08.009

自然崩落法放矿方案初步优化

朱忠华¹,代碧波²,陶干强¹,彭贯军¹

(1.南华大学核资源工程学院,湖南衡阳 421001;2.中钢集团马鞍山矿山研究院有限公司,
安徽马鞍山 243000)

摘要:放矿方案优化是放矿优化控制和放矿管理的基础。以数字矿山软件平台和 VC++ 为工具,进行自然崩落法放矿方案优化研究。首先确定放矿方案构成要素与放矿方案优化准则;在数字矿山软件平台上构建放矿优化三维模型,确定放矿水平及放矿边界;自动确定放矿结构参数及布置放矿点,建立放矿点和放矿分层的品位计算数据搜索模型,通过品位估值确定放矿点及放矿分层的品位分布;建立基于矿山利润的放矿资源价值模型,以金属市场价格、生产成本及贫损指标为基础输入参数,计算各放矿分层的价值和利润,得到放矿点的最佳放矿高度、担负矿量和出矿截止品位,从而确定放矿优化方案,并为放矿计划编制和管理提供数据。

关键词:放矿方案优化;资源价值模型;放矿分层;单水平;自然崩落法

中图分类号:TD672;TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-582X(2018)08-075-11

Preliminary optimization of ore drawing scheme of block caving

ZHU Zhonghua¹, DAI Bibo², TAO Ganqiang¹, PENG Guanjun¹

(1. Nuclear Resources Engineering College, University of South China, Hengyang 421001, Hunan, P.R.China;
2. Sino Steel Maanshan Institute of Mining Research CO., LTD, Maanshan 243000, Anhui, P.R.China)

Abstract: The optimization of ore drawing scheme is the basis of optimization control and intelligent management of ore drawing. In this paper, VC++ is used as a programming tool to optimize the single level ore drawing scheme. The main contents include: determine the elements of the ore drawing scheme and criteria for its optimization; construct a 3D model of drawing optimization to determine the ore drawing level and the ore drawing boundary; determine the structure parameters of the ore drawing and layout of drawpoint automatically, and establish a computational data search model of ore drawing and its slice grade, by the estimation of which to determine drawpoints and the grade distribution of slices; establish ore resource value model based on the profit of mine enterprise, with the market price, production cost and dilution index as basic input parameters to calculate the value and profit of each slice, so that to determine the best height of drawing, tonnage and cutoff grade of drawpoints under different technical and economic conditions. Based on the result of the above experiment, the optimization scheme of ore drawing is made,

收稿日期:2018-03-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51574151);南华大学科研启动基金资助项目(2016XQD28);湖南省教育厅科研资助项目(17C1372)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China(51574151), Scientific Research Start-up Fund of University of South China(2016XQD28) and Scientific Research Project of the Education Department of Hunan Province(17C1372).

作者简介:朱忠华(1981—),男,博士,主要从事数字矿山及数值模拟技术研究,(E-mail)zzhnhao545@126.com。

providing data related to ore drawing plan and management.

Keywords: ore drawing scheme; resource value model; slice; single level; block caving

自然崩落法放矿优化控制和智能化管理按业务逻辑可分为矿岩流动特性分析、放矿方案优化、计划编制、放矿控制和放矿管理几大部分^[1]。自然崩落法放矿研究中,矿岩流动特性分析是基础工作,放矿方案优化是重要环节,也是放矿计划编制和放矿管理的基础^[2-3]。

按放矿水平的确定方式,放矿方案优化可分为单水平放矿优化和多水平(整体)放矿方案优化。前者指放矿水平已经确定,无需进行放矿水平的选择论证,放矿方案只针对出矿水平以上矿体。整体放矿方案则是在放矿水平未确定条件下,选择出矿水平并进行单水平、多水平放矿方案的对比论证,从而确定放矿水平和放矿方案。前者是后者的基础。

鉴于放矿工作在自然崩落法中的重要性,不少学者对其进行了研究,但以往对放矿方案的研究偏少,并往往与放矿控制和放矿计划混淆在一起,未能界定放矿方案优化的目标和内容^[4-7]。国外基于 Laubscher 放矿理论也开发了放矿软件 PC-BC,但其在放矿方案优化的功能不足^[8]。

近年来,三维建模和数字矿山技术快速发展^[9-11],形成了成熟的矿山软件平台^[11-12],使得在三维可视化条件下研究自然崩落法放矿变得可能和方便;目前国内外成熟的矿山软件平台有 Dimine、3DMine、datamine、Surpac,以及在矿业应用的测绘软件 Arcgis 等,这些软件既为三维可视化建模提供平台,又为二次开发提供条件。

笔者以数字矿山软件平台和 VC++ 为工具进行放矿方案优化研究,首先确定放矿方案构成要素与放矿方案优化准则;在数字矿山软件平台上构建放矿优化三维模型;布置放矿点,建立基于放矿分层的资源价值模型,用 VC++ 予以实现,从而确定放矿优化方案,并集成到放矿控制与管理系统的 iOreDraw 中。前期笔者对自然崩落法矿岩流动、放矿数据模型以及放矿的价值模型进行了研究^[13-15],本文的研究是前期研究的继续。

1 自然崩落法放矿方案优化概述

1.1 放矿方案构成要素

自然崩落法矿山设计涉及到的因素主要有:矿山产量和服务年限的确定、回采顺序、回采形式、出矿系统、矿块尺寸、放矿口大小、放矿点间距、生产巷道和矿石溜井与运输水平的确定。放矿方案考虑的主要有以下要素。

1.1.1 阶段高度

阶段高度的确定对放矿方案设计有重要影响。阶段布置方式有分段布置及全采高布置。相对而言,分段布置会增加开拓工程量,但对于倾斜矿体和急倾斜矿体,分段布置有利于设置放矿副层,降低损失贫化率;全采高阶段布置适宜厚大缓倾斜及水平矿体,利于大规模高效开采,可以减少开拓工程量。

自然崩落法是利用岩石重力以保持矿岩持续崩落,所以矿体应有足够的垂直高度和宽大的水平面积。然而阶段高度除受矿体几何形状限制外,还是个经济问题。阶段高度从理论上讲越大越好。因为阶段越高,每吨矿石的开拓、采准和切割分摊费用越低,且相应减少了矿床的开采阶段及有关基建投资。然而矿石柱体太高,如覆盖岩层的破碎块度小于矿石块度时,往往易于增大贫化,另外,加大段高势必延长出矿巷道的服务期,增加巷道的支护和维修费用。此外,若阶段高度太低,则将缩短崩落矿石从崩落点到放矿点的行程,减少矿石进一步破碎的机会,降低出矿效率,且同样会促使矿石早期贫化,尤其放矿点间距较宽时更是如此。因此在设计中必须通过技术经济比较,设计合理的阶段高度。

1.1.2 矿块尺寸

矿体在高度方向划分为阶段或分段,而在水平方向划分为盘区,各个盘区有相对独立的采矿系统,如不划分盘区,则为全矿区连续推进。矿块尺寸指阶段和盘区内的的矿块尺寸。

1.1.3 出矿水平

出矿水平主要包括沿脉、穿脉巷道、进路等工程,这些工程的布置,总体服从采矿方法及开拓系统,与放矿点布置方式、放矿点尺寸、放矿点间距及出矿方式相关。

1.1.4 拉底水平

对电耙出矿系统,拉底水平一般直接位于生产耙矿或格筛水平以上7~15 m处。从拉底水平底板至格筛或耙矿平巷底板之间的垂直高度,主要由岩层条件和崩落矿石的块度来决定。在岩层松软中,该垂直高度需大一些,而矿石块度较大则有助于减小垂直高度。此外,不同的出矿系统,该高度差也有所不同,一般重力出矿取小值,铲运机系统取大值,电耙出矿居中。

1.1.5 集矿和运输水平

运输平巷尺寸取决于运输设备和可能承担的其他功用(如通风、矿山排水)。对于有轨运输系统,通常是在矿体的边缘开挖运输平巷,然后垂直矿体布置穿脉平巷,而对无轨运输系统,则要求到达放矿溜井的运距应尽可能短。

1.1.6 放矿点尺寸和间距

放矿口是从巷道通向崩落采场的门户,采场中的崩落矿石最终都将通过放矿口进入巷道。因此,放矿口尺寸应根据预测的最大崩落块度和保证矿石连续流动所需最小孔口来确定。理想情况是崩落矿石易于从放矿口流出,又易于放矿控制和截流。试验表明:大于矿石平均块度4倍尺寸的放矿口可提供自由流动条件,而块度与孔口尺寸之比为1/2或者更大,则将出现非自由流动条件,若块度与孔口尺寸之比介于1/4~1/2之间,则可能出现放矿口堵塞情况^[16]。

1.2 放矿方案优化准则

自然崩落法放矿方案优化设计准则主要有:安全高效开采准则、资源回收率最大化准则以及经济效益最大化准则。

1.2.1 安全高效开采准则

崩落矿岩放矿的流动,是放矿研究的基本问题。打开漏斗之前,崩落矿岩堆放在采场中,处于相对静止状态;漏斗打开后,位于放矿口上部的岩块静力平衡首先受到破坏,从放矿口流出;一个岩块流动就顺势破坏其上岩块的静力平衡,这种平衡的破坏向上传递,持续进行,进而对整个矿岩堆产生影响,直到达到新的平衡为止。矿岩的流动速度与安全高效放矿直接相关,过小的放矿速度导致矿堆被压死,使得出矿不能持续;过大的放矿速度导致空气间隔过大,放矿过程出现较大冲击波引起放矿底部结构损坏。因此放矿过程必须确保高效安全。

1.2.2 资源回收率最大准则

自然崩落法采矿的特点之一就是矿石在岩石覆盖下出矿,放矿过程中,随着矿岩的随机流动,岩石极易混入矿石层中,造成矿石贫化;放矿方案设计不佳或者放矿控制不好,容易造成脊部残留过大,甚至出现“烟囱”状放出体,导致上部覆岩从漏口放出而矿石放不出来,降低资源回收率。

1.2.3 经济效益最大化准则

自然崩落法采矿特点之一是在覆岩下出矿,放矿过程中矿岩相互掺杂流动,容易引起矿石贫化及损失,造成矿产资源浪费和矿山企业经济效益下降;此外出矿量及出矿品位直接影响选矿工艺及成本,故放矿直接与矿山经济效益相关联。合理进行放矿控制和管理,促使矿山企业经济效益最大化,是自然崩落放矿方案优化准则的之一^[13,17]。

确保安全的矿山生产的前提;提高资源回收率有利于保护资源、延长矿山企业生命周期;而经济效益则直接决定矿山企业的盈利能力,决定着矿山企业的生存。

1.3 放矿方案优化的主要内容

自然崩落法放矿方案优化的内容主要有:以放矿优化准则为目标,考虑单水平和多水平放矿方案,设计和计算不同方案的放矿参数并进行技术经济比较,从而确定放矿优化方案。

在三维可视化环境下进行放矿方案优化研究,内容包括:创建放矿三维实体模型;在三维模型上确定放矿水平和放矿边界,布置放矿点;建立品位计算数据搜索模型并进行品位估值,确定放矿点及放矿分层的品位分布;建立基于矿山利润的资源价值模型,以金属价格、生产成本及贫损指标为基础输入参数,计算各放矿分层的价值和利润,进而得到不同技术经济条件下各放矿点的最佳放矿高度、担负矿量和出矿截止品位,比较计算结果确定放矿优化方案,为放矿计划编制和管理提供数据。

2 自然崩落法放矿方案优化三维可视化建模

2.1 放矿方案优化三维建模

放矿优化前期的三维模型,主要包括钻孔数据库、三维实体模型和块段模型。前期建模基础数据包括测量数据、钻孔数据、地质地形资料,基础数据经过矢量化和电子化,使用数字矿山软件平台生成三维模型,包括矿岩体模型、地表模型、块段模型和阶段运输巷、穿脉、沿脉、进路、溜井及放矿底部结构等工程模型。在前期三维模型基础上,进行放矿方案优化,包括布置放矿点、矿岩体品位估值、建立资源价值模型、计算最佳放矿高度及品位分布,生成优化结果三维模型,放矿方案优化三维建模流程如图 1 所示。

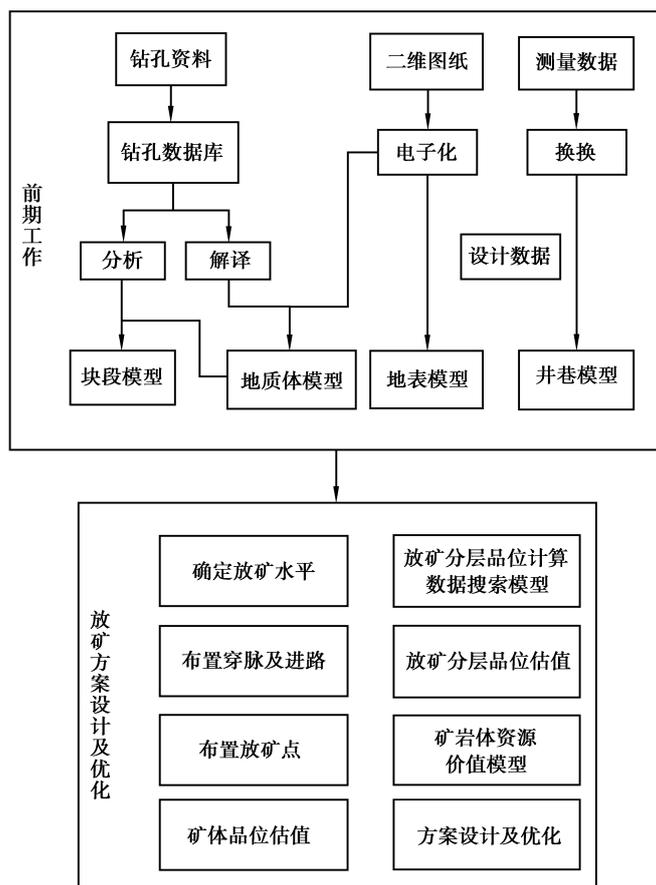


图 1 放矿方案优化三维建模流程

Fig.1 3D modeling process for scheme optimization of ore drawing

2.2 自然崩落法放矿的资源价值模型

放矿点的最佳放矿高度,随金属价格、矿石回收率及采选成本变动而变化。放矿点及放矿分层的品位分布确定后,确定单个放矿点最佳放矿高度的资源价值模型见式(1):

$$M = \sum_{j=1}^m [\rho V_j (\sum_{i=1}^m g_i R_i P_i - c)] \quad (1)$$

式(1)的建立及式中参数的意义详见文献[15]。技术经济条件的变化即 P_i 、 R_i 及 c 的变化,在当前技术

经济条件下,最佳放矿高度由放矿点 M (Margin, 利润) 值最大化决定。

式(1)表示的资源价值模型,矿石品位 g_i 为一个固定值,可视为常量; P_i 、 R_i 及 c 为资源价值模型的自变量,Margin 为应变量,该价值模型中自变量参数对 Margin 的敏感性可由式(2)~(4)表示。

$$\frac{\partial M}{\partial P_i} = \sum_{j=1}^m [\rho V_j G_i R_i], \tag{2}$$

$$\frac{\partial M}{\partial R_i} = \sum_{j=1}^m [\rho V_j g_i P_i], \tag{3}$$

$$\frac{\partial M}{\partial c} = - \sum_{j=1}^m [\rho V_j]. \tag{4}$$

由式(2)-(4)可知式(1)为 P_i 、 R_i 及 c 的线性函数。

上述资源价值模型是放矿方案优化的关键,通过 VC++ 语言编程予以实现,并集成到放矿控制与管理系*统 iOreDraw* 中^[17]。

3 自然崩落法单水平放矿方案优化

在自然崩落法放矿三维模型构建的基础上,利用三维建模平台可方便地确定出矿水平和放矿边界以及可布置放矿点,从而建立放矿分层品位计算数据搜索模型,使用资源价值模型进行放矿方案优化。本节的放矿方案优化,主要考虑单水平(主水平)放矿条件下的方案优化。

自然崩落法单水平放矿方案优化,就是以放矿三维实体模型和品位模型为基础,以采矿结构参数和资源价值模型为约束,以矿山利润和资源回收率最大为目标,确定最优放矿方案,其流程如图 2 所示。

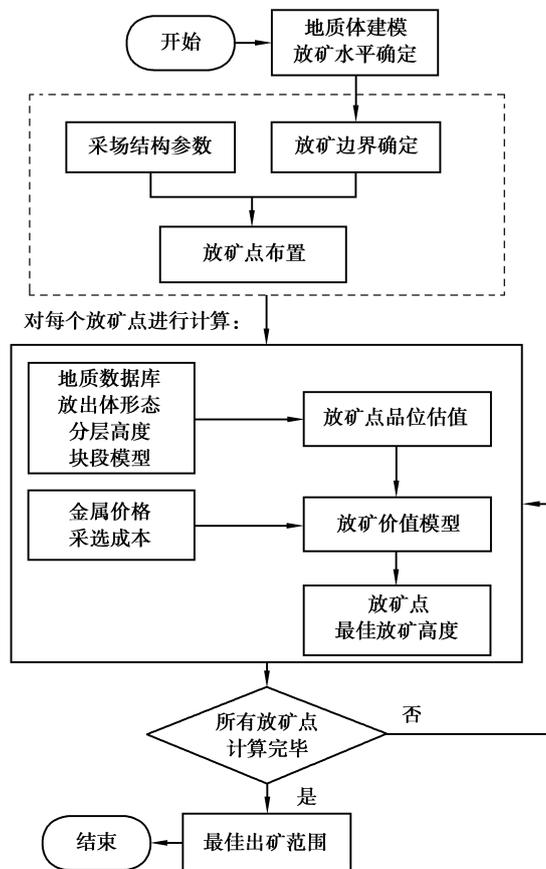


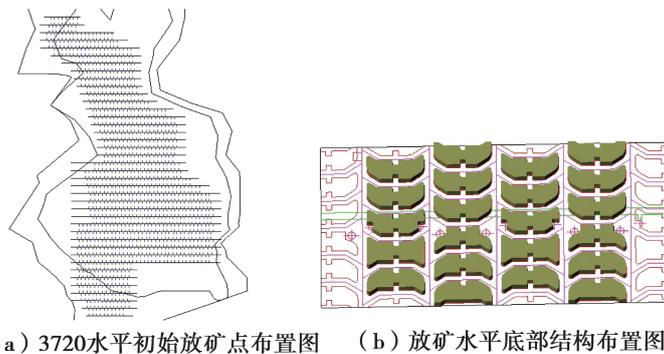
图 2 单水平放矿方案优化流程

Fig.2 Optimization process of single level ore drawing scheme

4 工程实例

普朗铜矿位于云南省迪庆藏族自治州香格里拉县北东部,于 2017 年 3 月顺利投产试车,达产后是国内最大的自然崩落法矿山^[3]。其矿体厚大,为高阶多漏斗放矿,放矿生产工艺较复杂。为使矿山适应市场及技术条件变化,取得最佳经济效益,使用本文方法进行单水平放矿方案优化,放矿水平为 3720 水平。

使用某三维数字矿山软件构建普朗铜矿地质数据库、地质体模型、块段模型及地表模型,在地质体模型基础上得到 3720 水平放矿边界,自动进行偏移式鲐鱼形布局布置放矿点如图 3 所示,放矿口尺寸为 $3.5\text{ m} \times 4\text{ m}$,放矿点间距为 $14\text{ m} \times 15\text{ m}$,矿岩体重 2.68 t/m^3 ,使用的放矿分层品位计算数据搜索模型为放矿圆锥体,如图 4 所示。使用本文方法得到基准技术经济条件下的放矿方案(基准方案),其输入输出参数见表 1。基准方案下担负矿量如图 5 所示。



(a) 3720水平初始放矿点布置图 (b) 放矿水平底部结构布置图

图 3 放矿点布置图

Fig.3 Layout of drawpoints

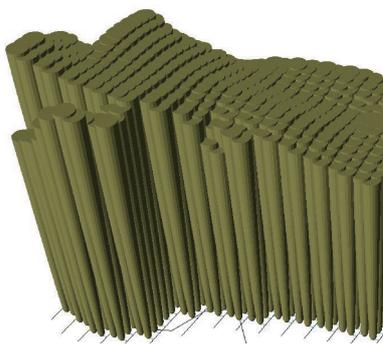


图 4 放矿圆锥示意图(局部)

Fig.4 Schematic diagram of ore drawing cone (partly)

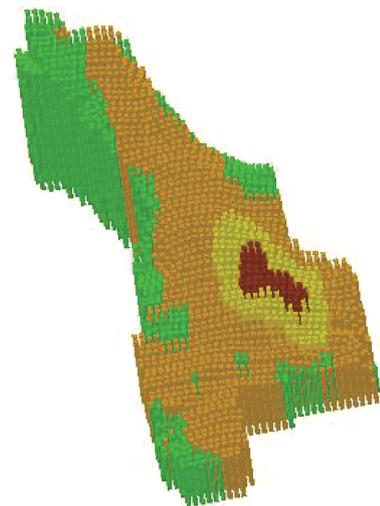


图 5 担负矿量

Fig.5 Schematic diagram of tonnage

表 1 基准技术经济条件下放矿模拟输入输出参数

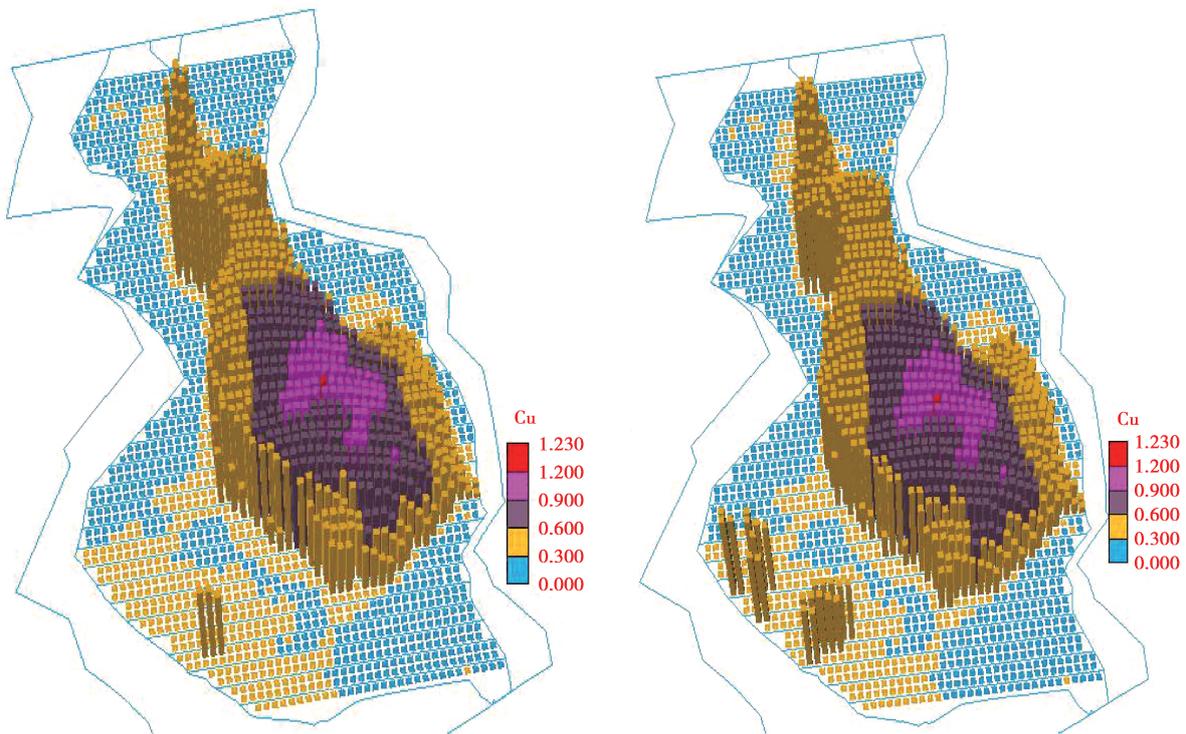
Table 1 The analogue input and output parameters of ore drawing under the base technical and economic conditions

名称	值	名称	值
方案名称	基准方案	放矿水平标高/m	3 720
价格-铜精矿含铜/(万元·t ⁻¹)	3.72	采选成本/(元·t ⁻¹)	121
价格-钼精矿含钼/(万元·t ⁻¹)	16.1	Cu 选矿回收率/%	89

续表 1

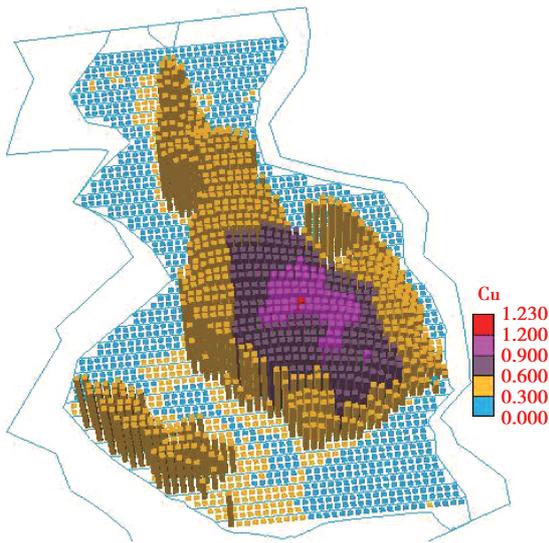
名称	值	名称	值
价格-铜精矿含金/(万元·kg ⁻¹)	16.4	Mo 选矿回收率/%	86
Cu 截止品位/%	0.30	Au 选矿回收率/%	56
Mo 截止品位/%	—	放矿点行距/m	15
Au 截止品位/(g·t ⁻¹)	—	放矿点列距/m	14
Cu 金属量/t	889 777.5	Cu 品位/%	0.445
Mo 金属量/t	19 995	Mo 品位/%	0.01
Au 金属量/kg	20 994.75	Au 品位/(g·t ⁻¹)	0.105
放矿点数量/个	1 768	总价值/万元	3 415 541.901
担负矿量/t	1.999 5×10 ⁸	总利润/万元	980 350.851

对文中 2.2 节资源价值模型中自变量的变动,势必引起函数值(利润)的变化,从而影响最优放矿方案。图 6(a)~(j)体现了在基准方案的基础上,Cu 金属价格变动对放矿点数量、担负矿量、和利润的影响,进而绘制 Cu 金属价格与方案输出参数的关系,如图 6(j)所示。

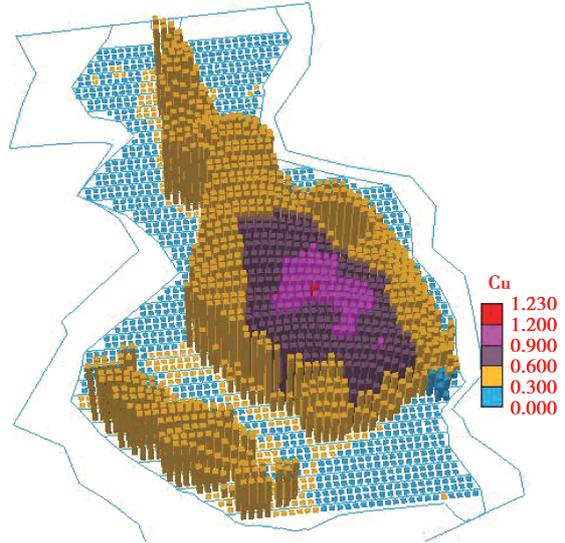


(a) Cu金属价格2.976万元/t (-20%)

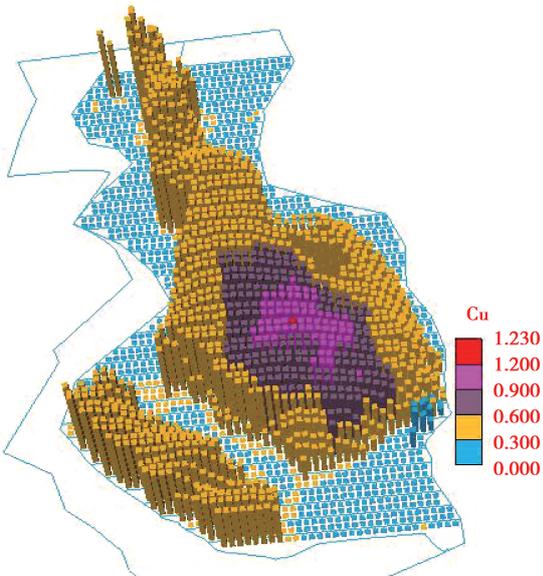
(b) Cu金属价格3.162万元/t (-15%)



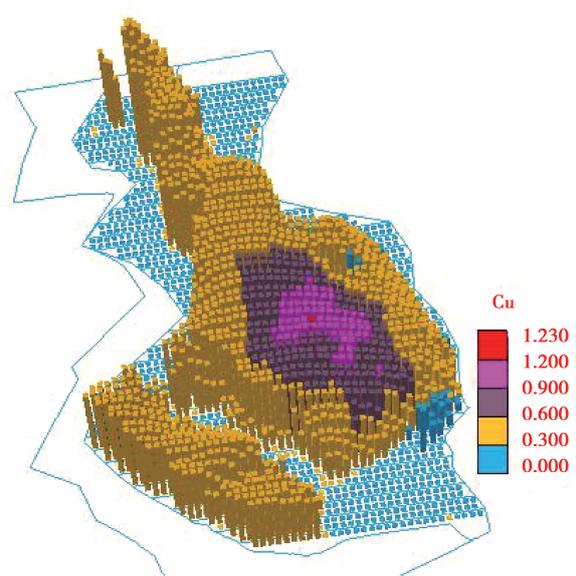
(c) Cu金属价格3.348万元/t (-10%)



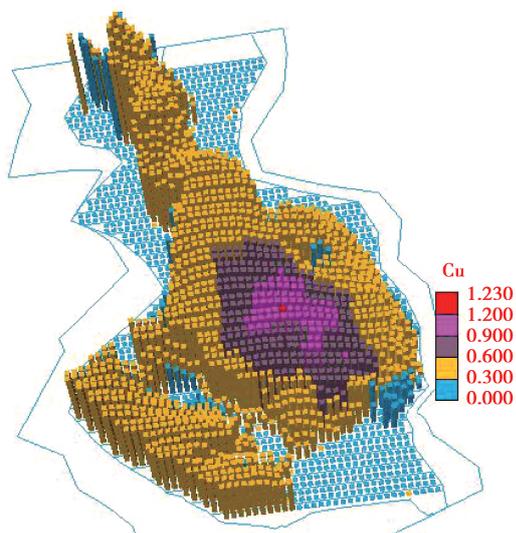
(d) Cu金属价格3.534万元/t (-5%)



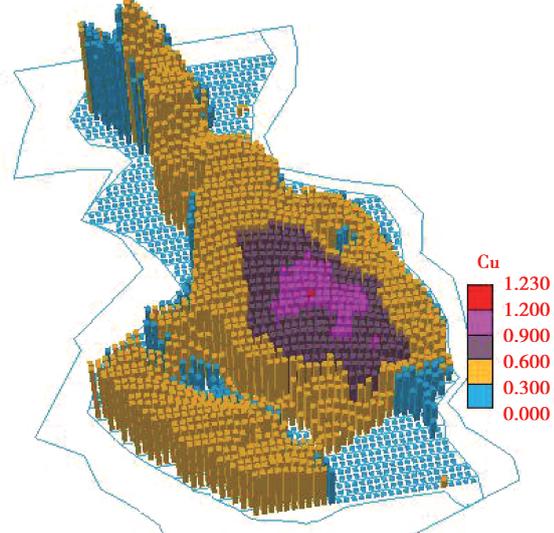
(e) Cu金属价格3.72万元/t (基准输入)



(f) Cu金属价格3.906万元/t (5%)



(g) Cu金属价格4.092万元/t (10%)



(h) Cu金属价格4.278万元/t (15%)

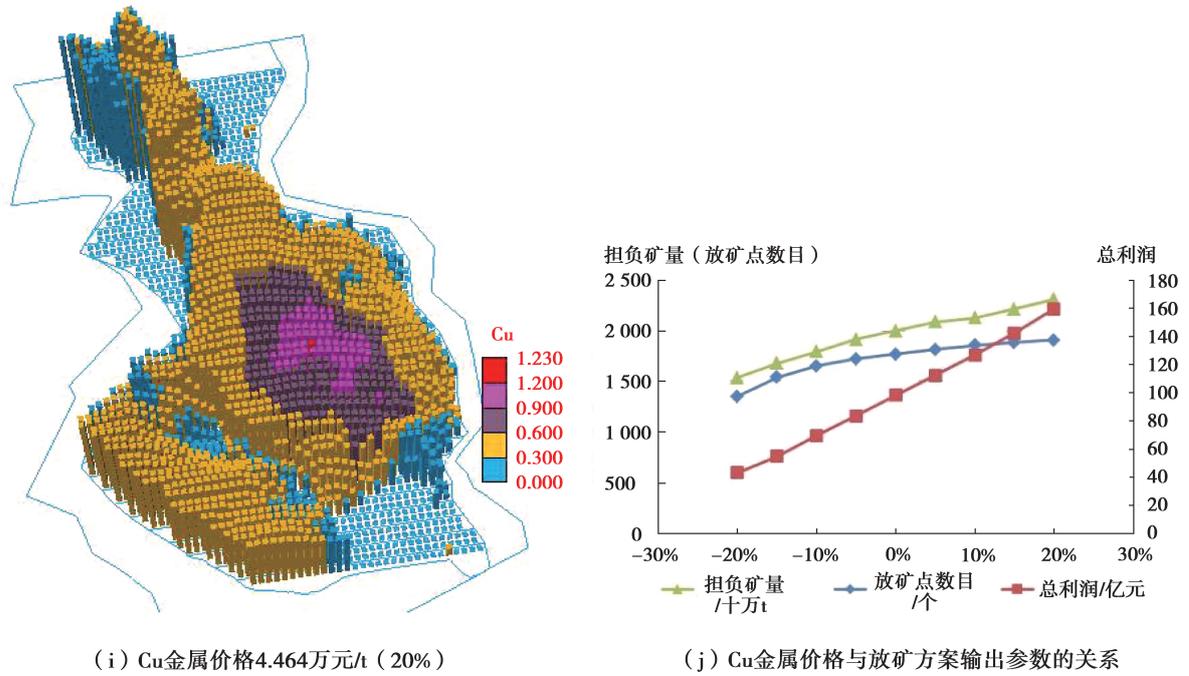


图 6 Cu 金属价格对放矿点数量、担负矿量和利润的影响

Fig.6 The influence of Cu metal price on the quantity of drawpoints, the tonnage and the profit

同理,可得 Cu 回收率和采选成本与方案输出参数的关系,如图 7 和图 8 所示。

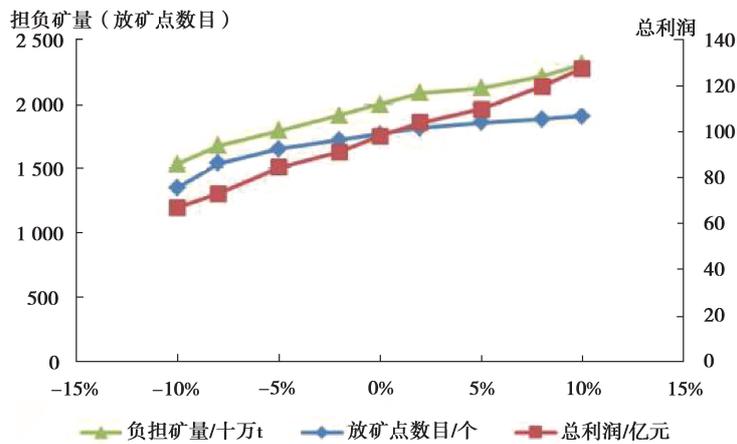


图 7 Cu 回收率与放矿方案输出参数的关系

Fig.7 The relationship between the recovery rate of Cu and the output parameters of the ore drawing scheme

由图 7~8 可以看出,Cu 金属价格、Cu 回收率和采选成本 3 个输入参数均对放矿方案输出有显著影响,其中 Cu 金属价格、Cu 回收率与放矿点数量、担负矿量及利润 3 个输出参数成正比关系,3 个输入参数与利润近似呈线性关系,这与本文 2.2 节资源价值模型参数敏感性分析结果一致。利润与采选成本成反比,但放矿点数量、担负矿量与采选成本成正比,这是因为随着采选成本增加,利润较少但仍然为正值,所以放矿点数量、担负矿量增加。

在基准方案的基础上,金属 Cu 金属价格和采选成本增加 10%、Cu 回收率不变情况下可放矿的放矿点数量 1 856 个,担负矿量 2.1263×10^8 t,Cu 平均品位 0.434%,Cu 金属量 922 814.2,总利润 3 855 332.569 万元,总价值 1 265 711.799 万元,实现了该技术经济条件下矿山经济效益最大化和资源回收率最大化。

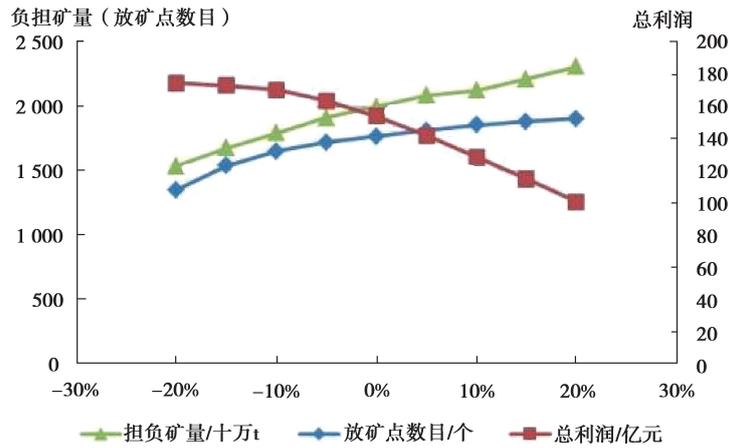


图 8 采选成本与放矿方案输出参数的关系

Fig.8 The relationship between the cost of mining and the output parameters of the ore drawing scheme

5 结 语

基于资源价值模型进行单水平放矿方案优化设计,得到了不同技术经济条件下的放矿优化方案,明确了金属价格、采选成本及选矿回收率的变动对放矿方案的影响。

自然崩落法矿山一般为大型特大型矿山,对应矿体为厚大矿体。在确定放矿水平之前,应该进行整体放矿方案优化设计,包括出矿水平选择、单水平与多水平放矿方案优化及对比,以及技术经济比较,从而确定最优方案。单水平放矿方案优化是整体放矿方案优化的基础,后者较前者复杂,可作为后续研究的内容。

参考文献:

- [1] 朱忠华.自然崩落法放矿优化控制与智能化管理关键技术研究[D].长沙:中南大学,2015.
ZHU Zhonghua. Study on key technologies of drawing control optimization and intelligent management of block caving[D]. Changsha: Central South University, 2015. (in Chinese)
- [2] Pourrahimian Y, Askari-Nasab H, Tannant D D. A multi-step approach for block-cave production scheduling optimization[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013,23(3):739-750.
- [3] 朱忠华,胡杰,陶干强,等.自然崩落法高阶多漏斗放矿矿岩流动模拟及结构参数优化[J].重庆大学学报,2017,40(5):49-59.
ZHU Zhonghua, HU Jie, TAO Ganqiang, et al. Flow simulation of ore and rock and optimization of structure parameter of oredrawing of high stage block caving under multi funnel[J]. Journal of Chongqing University, 2017,40(5):49-59. (in Chinese)
- [4] Brown E T. Block caving geomechanics[M]. Queensland, Australia: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 2002.
- [5] 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.
ZHOU Yilong, WANG Ning. The ore drawing computer control in caving method[J]. Gold, 2002, 23(6):11-15. (in Chinese)
- [6] 王长军.基于动态最佳经济出矿品位的控制放矿技术研究[D].长沙:中南大学,2009.
WANG Changjun. Research of the controlling techniques of ore drawing based on the best economic dynamic removal ore grade[D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese)
- [7] 徐海.地下金属矿山产能优化及开采规划[D].长沙:中南大学,2012.
XU Hai. Optimization of productivity and mining planning in underground metal mines[D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)

- [8] Diering T. PC-BC: A block cavedesign and draw control system [C] // Proceedings of MassMin. Brisbane: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2000: 305-335.
- [9] 徐志强,杨邦荣,王李管,等.巷道实体的三维建模研究与实现[J]. 计算机工程与应用,2008,44(6):202-205.
XU Zhiqiang, YANG Bangrong, WANG Liguan, et al. Three-dimensional modeling and implementation of tunnel entities[J]. Computer Engineering and Applications, 2008,44(6): 202-205. (in Chinese)
- [10] 荆永斌,刘晓明,毕林.复杂矿床三维可视化建模关键技术[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(9):3104-3110.
JING Yongbin, LIU Xiaoming, BI Lin. Key techniques for 3D visual modeling of complex mineral deposits[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2014,45(9):3104-3110. (in Chinese)
- [11] 毕林.数字采矿软件平台关键技术研究[D]. 长沙:中南大学,2010.
BI Lin. Study of key technology of platform of digital mining software system[D]. Changsha: Central South University, 2010. (in Chinese)
- [12] 韩立钦,王志红,张晓东.基于 ArcGIS的矿山地质体模型构建方法[J]. 矿山测量, 2014, 4(2): 3-5.
HAN Liqing, WANG Zhihong, ZHANG Xiaodong. Method for constructing geological model based on ArcGis[J]. Mine Surveying, 2014, 4(2): 3-5. (in Chinese)
- [13] 朱忠华,王李管,毕林,等.基于随机介质理论自然崩落法矿岩流动特性[J]. 东北大学学报(自然科学版),2016, 37(6): 869-874.
ZHU Zhonghua, WANG Liguan, BI Lin, et al. Flow characteristics of discrete ore rock of block caving based on stochastic medium theory[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2016,37(6):869-874. (in Chinese)
- [14] 朱忠华,杨月平,陶干强,等.自然崩落法放矿计算机模拟数据模型研究[J]. 南华大学学报,2017, 31(1):6-10.
ZHU Zhonghua, YANG Yueping, TAO Ganqiang, et al. Study on data model for oredrawingsimulation of block caving[J]. Journal of University of South China(Science and Technology), 2017, 31(1):6-10. (in Chinese)
- [15] 朱忠华,王李管,谭正华,等.三维平台下基于资源价值模型的自然崩落法放矿方案优化[J]. 黄金科学技术学报,2016, 24(1):80-85.
ZHU Zhonghua, WANG Liguan, TAN Zhenghua, et al. Oredraw scheme optimization of block caving based on ore resource value model under 3D platform[J]. Gold Science and Technology, 2016, 24(1):80-85. (in Chinese)
- [16] 王李管,贾明涛,毕林,等.普朗铜矿井下大规模开采关键技术研究之矿体可崩性与崩落矿石块度预测研究报告[R]. 长沙:中南大学,2012:1-120.
WANG Liguan, JIA Mingtao, BI Lin, et al. Research on ore body collapse and caved ore block size prediction in the study of key technologies of large-scale mining in Pulang copper mine[R]. Changsha: Central South University,2012:1-120. (in Chinese)
- [17] 刘华武,王李管,冯兴隆,等. iOreDraw 放矿管理系统在普朗铜矿放矿计划编制中的应用[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(3):108-111.
LIU Huawu, WANG Liguan, FENG Xinglong, et al. Application of iOreDraw ore management system in the drawing plan preparation for Pulang copper mine[J]. Mining Research and Development, 2017,37(3): 108-111. (in Chinese)

(编辑 郑洁)