

基于 NPV Scheduler 软件的露天转地下 矿山开采境界研究

Research on Boundary Optimization of Open-pit to Underground Mining
Based on NPV Scheduler Software

马宁, 汪昌亮, 丁鹏(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要:基础的 L-G 图论法未考虑地下开采可能的成本优势,在露天转地下矿山开采境界圈定时存在一定的局限性。本文通过对价格法与储量盈利比较法计算的经济合理剥采比进行分析,结合 NPV Scheduler 软件研究了露天转地下开采境界圈定方法,并通过工程实例验证了该方法的合理性。研究成果对露天转地下矿山开采境界的确定具有一定的指导意义。

关键词:露天转地下; NPV Scheduler; 经济合理剥采比; L-G 图论法

中图分类号: TD164

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2023)02-0021-05

Abstract: The basic L-G graph theory does not take into account the possible cost advantages of underground mining, and there are certain limitations in the boundary optimization of open-pit to underground mining. Based on the analysis of the economic and reasonable stripping ratio calculated by the price method and the reserve profit comparison method, and combined with the NPV Scheduler software, this paper studies the method of boundary optimization of open-pit to underground mining, and verifies the rationality of this method through engineering examples. The research results have certain guiding significance for the determination of mining boundary of open-pit to underground mines.

Key words: open-pit to underground mining; NPV Scheduler; economic and reasonable stripping ratio; L-G graph theory

1 前言

科学合理圈定露天开采境界对于露天转地下矿山经济高效开采具有重要意义。露天开采境界优化方法经历了手工设计阶段到计算机设计阶段的发展,基于 L-G 图论法设计的境界优化软件成为设计主要手段。L-G 图论法最早由 Lerchs 与 Grossmann 提出,通过将境界圈定问题转换为加权有向图最大权重闭集的图论问题,获得最大价值的露天开采境界;Hochbaum 将 L-G 图论法结合 Pseudoflow 网络模型,提高了算法的可执行性。相关学者^[1-3]采用 L-G 图论法,借助不同的境界优化软件,建立地质模型,并对露天矿山开采境界进行优化,确定经济合理的露天开采境界,实现经济效益最大化;顾晓薇等^[4]考虑了生态成本对境界圈定的影响,将生态成

本分摊到开采成本中,得到最优开采境界,并分析了生态成本对最终境界的影响;杨彪等^[5]研究了多金属矿山境界优化方法,以主导元素为基础,将其余计价元素根据产品价格与回收率转化为综合当量品位,运用 L-G 图论法获得不同矿石售价下的开采境界,并分析了不同开采境界净现值变化,实现了考虑生产进度计划的动态境界圈定。相较于手工法,L-G 图论法显著提升了露天开采境界圈定的工作效率、可操作性与准确度。

目前,基于 L-G 图论法的露天境界优化软件已逐步成熟,NPV Scheduler 软件为其中一款认可度较高的软件。基础的 L-G 图论法对于仅采用露天开采的矿山具有较强的适用性,但未考虑地下开采可能的成本优势。对于适合露天转地下开采的矿床,基础的 L-G 图论法难以确定经济合理的开采境界。鉴于此,本文通过对经济合理剥采比计算方法的分析,研究了基于 NPV Scheduler 软件的露天转地下矿山境界优化方法,研究成果对露天转地下矿山开采境界的确定具有一定的指导意义。

[作者简介] 马宁(1995—),男,工程师,主要从事矿山工程咨询与设计工作。

[引用格式] 马宁,汪昌亮,丁鹏. 基于 NPV Scheduler 软件的露天转地下矿山开采境界研究[J]. 中国矿山工程,2023,52(2):21-25.

2 经济合理剥采比计算方法

经济合理剥采比是指单位矿石量在经济上允许剥离的最大岩石量,是露天矿山境界圈定最重要的经济指标之一^[6]。经济合理剥采比计算方法主要有价格法与比较法两种,比较法又分为原矿成本比较法、精矿成本比较法和储量盈利比较法。

原矿成本比较法,以露采和地采原矿单位成本相等为计算基础;精矿成本比较法,以露采和地采单位精矿成本相等为计算基础;储量盈利比较法,以露采和地采单位矿石获得的总盈利相等为计算基础。

储量盈利比较法全面考虑了露天开采与地下开采损失率、贫化率的差距,对于贵金属和稀有金属矿床,储量盈利比较法较原矿成本比较法与精矿成本比较法更合理^[7]。通过储量盈利比较法确定的经济合理剥采比更适合露天转地下开采界限的确定。储量盈利比较法需要基础数据多,包括采矿成本、选矿成本、选矿回收率等,对数据准确度要求高,计算方法为

$$N_j = \frac{u_l - u_d}{b} \quad (1)$$

$$u_l = A \times \alpha_l \times \beta_l - c_l - x_l - z_l \quad (2)$$

$$u_d = A \times \alpha_d \times \beta_d - c_d - x_d - z_d \quad (3)$$

式中, u_l 、 u_d 分别为露采、地采单位工业储量盈利,元/t; A 为单位工业储量价值, $A = \text{金属价格} \times \text{平均地质品位}$,元/t; α_l 、 α_d 分别为露采、地采采矿回收率,%; β_l 、 β_d 分别为露采、地采选矿回收率,%; c_l 、 c_d 分别为露采、地采采矿成本,元/t; x_l 、 x_d 分别为露采、地采选矿成本,元/t; z_l 、 z_d 分别为露采、地采综合成本,包括销售成本与管理成本,元/t; b 为露采剥离岩石成本。

价格法是露天开采单位矿石利润所能承担的最大剥离量,又称盈亏平衡法。价格法适用于技术或经济限制,只宜采用露天开采的矿床,如水泥矿山、砂石矿山等低价值非金属矿床。计算方法为

$$N_j = \frac{u_l}{b} \quad (4)$$

3 经济合理剥采比敏感性分析

经济合理剥采比主要影响因素为矿石价值与采选成本。矿床金属种类、品位不同,单位工业储量价值差异很大。相较于单位工业储量价值,采矿成本与选矿成本维持在稳定区间,区间跨度较小。因此,单位工业储量价值为经济合理剥采比的主要影响因

素。为进一步讨论单位工业储量价值对于经济合理剥采比的影响,结合国内外矿山实际生产数据,确定计算的基础技术经济参数,具体参数见表1。

表1 经济合理剥采比计算参数

项目	单位	露天开采	地下开采
采矿贫化率	%	5	10
采矿损失率	%	5	10
选矿回收率	%	80	80
成本费用			
采矿	元/t	15	250
剥离	元/t	15	
选矿	元/t	100	100
销售	元/t	50	50
管理	元/t	50	50
税金	元/t	20	20

经济合理剥采比随单位工业储量价值的变化结果如图1所示,从图中可以看出,随着单位工业储量价值的增加,价格法与储量盈利比较法计算的经济合理剥采比均逐渐增大,价格法计算的经济合理剥采比增长速度明显大于储量盈利比较法计算的经济合理剥采比,两种方法计算结果差距逐渐增大。例如, Li_2O 平均地质品位为1.2%的锂金属矿床,单位工业储量价值 A 约为1200元/t,价格法计算的经济合理剥采比为储量盈利比较法计算的经济合理剥采比的三倍。

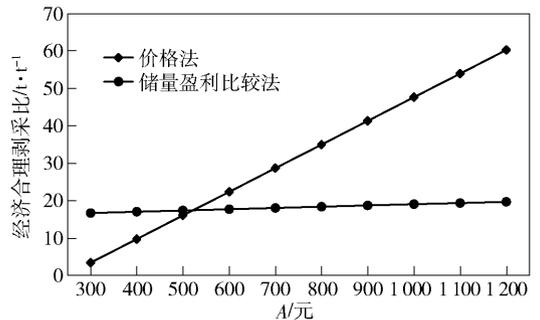


图1 经济合理剥采比随单位工业储量价值变化曲线

当单位工业储量价值低于一定限值时,价格法计算的经济合理剥采比小于储量盈利比较法计算的经济合理剥采比,地下开采采出的矿石加工成最终产品的成本高于售价,储量盈利比较法确定经济合理剥采比的方法不再适用,矿山只宜采用露天开采。

通过以上分析,对于贵金属和稀有金属矿床,单位工业储量价值大,采用价格法计算经济合

理剥采比确定露天开采境界时,圈定境界内部分矿石采用地下开采方式更经济,生产中错过露天转地下的最佳时机,矿山全生命周期的经济效益会有所降低。

4 基于 NPV Scheduler 软件的露天转地下开采境界确定方法

NPV Scheduler 软件采用 L-G 图论法,通过块体价值模型与块段约束弧集,求解得到经济价值最高的露天境界。块体价值即为块体盈利,计算公式为

$$V = W \times u_l \quad (5)$$

式中, W 为块体重量。

经济价值最高的露天境界即表示开采境界外开采矿石的盈利低于相应需剥离岩石的费用,向外扩帮的境界剥采比大于价格法计算的经济合理剥采比。结合上节分析,NPV Scheduler 软件采用基础的 L-G 图论算法确定的最大境界作为露天转地下矿山开采境界,可能导致部分适合地下开采的矿体圈入露天开采境界。

NPV Scheduler 软件境界圈定过程中,通过不同的价格系数,获得一系列嵌套境界,其中境界剥采比等于储量盈利比较法计算的经济合理剥采比的嵌套境界更适合作为露天转地下矿山开采境界。

储量盈利比较法计算时选用的地质品位为平均地质品位,但矿床不同区域地质品位差异很大。境界剥采比等于储量盈利比较法计算的经济合理剥采比的嵌套境界,并未考虑品位差异的影响,可能导致部分适合露天开采的高品位矿石作为保安矿柱损失,或部分适合地下开采的低品位矿石圈入露天开采境界。随着价格系数的增加,NPV Scheduler 软件嵌套境界的境界剥采比呈增长趋势,但在经济合理剥采比附近上下波动较大,难以选定准确的开采境界。由此可见,选择境界剥采比等于储量盈利比较法计算的经济合理剥采比的嵌套境界的方法存在一定的局限性。

地质块体模型中有金属品位信息,为保证露天转地下矿山境界圈定过程中充分考虑品位差异的影响,应在 NPV Scheduler 软件块体价值计算阶段将地下开采的因素考虑在内。结合储量盈利比较法计算公式与 NPV Scheduler 软件块体价值计算公式,当矿石块体价值设置为露天开采盈利与地下开采盈利差值时,即可保证向外扩帮的境界剥采比大于储量盈利比较法计算的经济合理剥采比,所确定的最大境

界为露天转地下矿山适合露天开采的价值最高境界。新的块体价值计算公式为

$$V_{\text{new}} = W \times (u_l - u_d) \quad (6)$$

5 工程应用

以某锂金属矿山为工程实例,采用 NPV Scheduler 软件,通过上述方法进行露天转地下开采境界优化。

该矿赋存地层主要为三叠系巴颜喀拉山群中组上段,赋矿岩石为花岗伟晶岩。矿体主要分布在矿区的南西部二云母二长花岗岩体外接触带 400 ~ 1 500 m。矿体的上、下盘围岩主要为变细粒长石砂岩及透辉石角岩,矿体和上、下盘围岩之间接触界线比较清楚,多呈切层侵入接触关系。矿区内构造断层不发育,矿体与围岩接触带部分岩体节理裂隙较发育,岩石破碎。

勘探区圈定了四条主要矿体,其资源量占总资源量的 85% 以上。矿床主要矿体为似层状、脉状或透镜状结构,倾向北东,走向 107° ~ 138°,倾角 21° ~ 55°,厚度 4 ~ 15 m,长度 1 080 ~ 3 040 m,地表出露长度 80 ~ 1 040 m。该矿床主要矿体埋藏较浅,部分区域出露地表,矿床上部矿体适宜用露天方式进行开采,露天境界以外挂帮矿体及深部矿体适宜采用地下开采方式。

将勘探线剖面图中圈定的矿体、夹石与断层导入 Datamine 软件进行三维化,并生成线框模型;依据地形数据在 Datamine 软件中生成矿区地形表面模型。综合考虑探矿工程间距、取样长度与采矿台阶高度确定块体模型的参数,具体参数见表 2。以矿区地形表面模型为约束,按表中参数依次生成矿体、夹石与围岩的块体模型。

表 2 块体模型参数表

模型起点			基块数量			基块尺寸		
X-RIG	Y-RIG	Z-RIG	NX	NY	NZ	X	Y	Z
612 935	3 966 193	4 590	195	130	75	16	16	12

将钻孔、探槽数据整理为地质工程数据库,在 Datamine 软件中生成可视化的三维钻孔文件。按组合样长 1 m,对基本分析样品进行组合,并使用距离平方反比法进行品位估值,生成带有 Li₂O 品位信息的地质块体模型。通过 Datamine 软件生成的地质块体模型与勘探报告对比,资源量相对误差为 4%,Li₂O 品位相对误差为 -0.7%,模型精确度满足境

界圈定要求。钻孔、矿体与地形三维形态如图 2 所示。

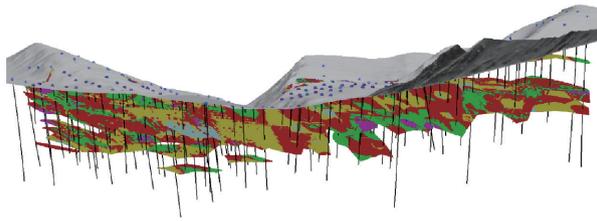


图 2 钻孔、矿体与地形三维形态图

将建立的地质块体模型导入 NPV Scheduler 软件,结合矿山地质赋存条件与类似矿山实际生产成本,并考虑矿山建设条件及矿山运输条件,确定计算经济合理剥采比与境界圈定的基础数据,具体参数见表 3。

表 3 境界圈定参数表

项目	单位	露天开采	地下开采
Li ₂ O 平均地质品位	%	1.42	1.42
采矿回收率	%	95	90
选矿回收率	%	81	81
成本费用			
采矿	元/t	23	240
剥离	元/t	23	
选矿	元/t	150	150
运输	元/t	48	46
管理	元/t	90	90
税金	元/t	32	31
Li ₂ O 金属价格	元/t	104 582	104 582
工业储量价值	元/t	1 143	1 095
工业储量利润	元/t	822	528
经济合理剥采比			
价格法	t/t	35.74	
储量盈利法	t/t	11.83	
设计边坡角	°	41	

将确定的经济参数输入 NPV Scheduler 软件中生成经济模型,将设计边坡角输入软件生成块段约束弧集。以选定的 Li₂O 金属价格为基础价格系数 1.0,以 0.01 为步距,价格系数为 0.01 的嵌套境界为 Pit1,逐步提高价格系数到 1.0,最终获得 100 个嵌套坑,价格系数为 1.0 的嵌套坑为 Pit100。

不同嵌套坑境界剥采比随价格系数变化曲线如图 3 所示,从图中可以看出随着价格系数的增加境

界剥采比呈上升趋势,当价格系数为 0.33 时,境界剥采比首次大于储量盈利比较法计算的经济合理剥采比,选择价格系数为 0.32 的嵌套坑 Pit32 为露天开采最终境界。从图中可以看出,当价格系数为 0.39 时,境界剥采比再次小于储量盈利比较法计算的经济合理剥采比。如前文分析,通过上述方法难以保证选定的开采境界为最优境界。

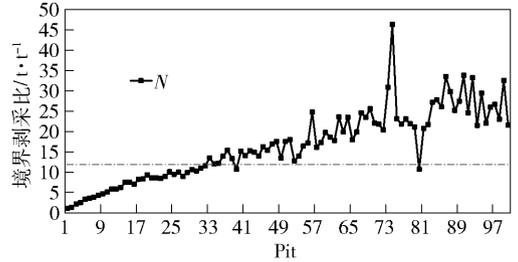


图 3 境界剥采比随价格系数变化曲线

块体价值计算过程中考虑地下开采因素,使块体价值等于 V_{new} , 获得新的经济模型。当价格系数等于 1.0 时的嵌套坑为 Pit100_{new}。垂直勘探线做剖面图如图 4 所示,从图中可以看出,嵌套坑 Pit100_{new} 与 Pit32 境界范围相差不大,嵌套坑 Pit100_{new} 较 Pit32 在矿坑西北部多圈出部分矿体,这部分矿体品位普遍高于地质平均品位。嵌套坑 Pit100 较嵌套坑 Pit100_{new}、Pit32 露天境界明显扩大,外扩距离约 180 m,矿石量与废石量都大量增加。

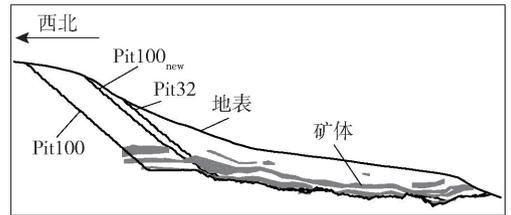


图 4 垂直勘探线剖面图

将 Pit32、Pit100、Pit100_{new} 嵌套坑矿岩量进行对比,具体数据见表 4。从表中可以看出,随着矿石量的增加 Li₂O 品位逐渐降低,嵌套坑 Pit100_{new} 与 Pit32 矿石量与剥采比较为接近。Pit100 较 Pit100_{new} 矿石

表 4 不同嵌套坑矿岩数据对比表

嵌套坑	矿岩总量/ 万 t	矿石量/ 万 t	废石量/ 万 t	Li ₂ O 品位/%	剥采比/ t·t ⁻¹
Pit32	18 277.2	2 139.4	16 137.8	1.45	7.54
Pit100	31 797.8	2 913.3	28 884.5	1.42	9.91
Pit100 _{new}	21 346.1	2 380.6	18 965.5	1.44	7.97

量增加 532.7 万 t, 废石量增加 9 919.0 万 t, 境界剥采比 18.62 t/t, 明显大于储量盈利比较法计算的经济合理剥采比。

计算嵌套坑 Pit100_{new} 与 Pit100、Pit32 间矿体开采的经济效益, 对比分析三个嵌套坑的优劣性。嵌套坑间矿体开采利润测算见表 5。

表 5 不同嵌套坑间矿体开采利润测算表

项目	露采收入/ 亿元	地采收入/ 亿元	地采成本/ 亿元	选矿成本/ 亿元	露采成本/ 亿元	露采利润/ 亿元	地采利润/ 亿元
Pit100-Pit100 _{new}	499.7	473.4	133.6	132.7	209.0	157.9	207.1
Pit100 _{new} -Pit32	204.7	194.0	60.5	60.1	61.4	83.3	73.4

从表中可以看出, 嵌套坑 Pit100_{new} 与 Pit100 间矿体采用露天开采的利润为 157.9 亿元, 采用地下开采的利润为 207.1 亿元, 地下开采利润高出 49.2 亿元, 更适合采用地下开采。嵌套坑 Pit100_{new} 与 Pit32 间矿体采用露天开采的利润为 83.3 亿元, 采用地下开采的利润为 73.4 亿元, 露天开采利润高出 9.9 亿元, 更适合采用露天开采。

从上述结果可以看出, 通过基础的 L-G 图论法确定的最大境界内部分矿体更适合采用地下开采方式, 更大的露天开采境界反而使矿山全生命周期利润明显下降。相较于手工选择境界剥采比等于储量盈利比较法计算的经济合理剥采比的嵌套境界的方法, 通过 NPV Scheduler 软件, 采用改变矿体价值为 V_{new} 的方法确定的露天转地下开采境界经济性最优, 使矿山全生命周期开采利润达到最大值。

6 结论

(1) 随着单位工业储量价值的增加, 价格法与储量盈利比较法计算的经济合理剥采比均逐渐增大, 价格法计算的经济合理剥采比增长速度更快。

(2) 对于单位储量价值较大的矿床, 当剩余矿石仍需要采用地下开采方式回收时, 不适合采用价格法计算经济合理剥采比确定露天开采境界。

(3) 采用改变矿体价值为 V_{new} 的方法, 可获得全生命周期开采利润最大的开采境界, 更适合露天

转地下矿山境界圈定。

(4) 矿体赋存条件差异导致露天开采境界外剩余矿石量不同, 在开采境界确定过程中, 还需要结合地采投资、剩余矿体开采年限与安全环保政策等情况综合考虑确定露天开采境界。

[参考文献]

- [1] 永学艳, 周紫辉, 匡勇. 某大型铜矿境界优化及投达产方案研究[J]. 有色冶金设计与研究, 2016, 37(6): 1-4.
- [2] 刘韦. 基于 Whittle 软件的露天矿境界优化在西藏某矿的应用[J]. 有色金属, 2020, 72(1): 45-49.
- [3] 赵明, 王忠鑫, 曾祥玉, 等. 基于 3DMine 软件的露天矿境界优化研究[J]. 露天采矿技术, 2021, 36(3): 30-33.
- [4] 顾晓薇, 朱清玉, 胥孝川, 等. 考虑生态成本的南芬露天矿最终境界优化[J]. 金属矿山, 2017, 2017(7): 38-41.
- [5] 杨彪, 罗周全, 陆广, 等. 复杂多金属露天矿山最终境界动态综合优化[J]. 矿冶工程, 2011, 31(1): 1-4.
- [6] 王满仓, 谢志勤, 姜振兴. 经济合理剥采比在确定露天矿开采境界中的计算与应用[J]. 中国矿山工程, 2014, 43(2): 31-34.
- [7] 孟令刚. 露天矿经济合理剥采比改进及在低品位金属矿床的应用研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2020, 72(4): 129-133.