

引入最小搜索模式(MSP)控制边坡角容差,提升了境界优化算法的准确性及效率。马宁等^[8]采用NPV开展境界优化确定了露天和地下开采界限,并通过工程实例验证,对露天地下联合开采具有指导意义。

对于复杂多金属矿床而言,由于多种有价元素的共生或伴生特性,以往在露天境界圈定及矿床经济评价时,大多采用当量品位的方法,其原理是通过将伴生金属的经济价值折算为主金属的等价品位^[9],简化了多金属评价问题,但当量品位的方法的缺陷也日益显现,如无法动态反映价格变化、忽略不同选冶流程中不同品位矿石回收率的差异等。

近几年国外多金属矿山在地质勘探和经济评价时,矿山企业及咨询机构广泛应用NSR(Net Smelter Return)这一概念。NSR在采矿业中至关重要,是评估矿产项目经济可行性的关键指标,NSR通过综合矿石品位、金属价格、冶炼成本、精矿运输成本等参数,直接计算矿块中所有金属元素的净收益,能够更精确地评估矿块的经济价值,在生产阶段为品位控制和精炼工艺流程提供了可靠的基础。

本研究旨在全面介绍NSR的定义、计算方法以及需要的相关经济参数,进而深入探讨NSR在露天境界圈定中的应用并通过相关实例来说明使用方法,验证其应用效果。通过本研究,希望更多的采矿工程师了解NSR的计算,并将其广泛应用于经济评估、露天境界优化、矿石品位控制以及风险管理与决策支持等方面。

2 NSR的定义和计算方法

2.1 NSR的定义

NSR这一名词来源于冶金地质学,国内学者刘益康曾定义为“矿产品返还”^[10],其含义为单位采出矿石中所生产的精矿销售额,扣除冶炼本、杂质扣减、运输费用及销售费用后所获得的最终产品的净收益。这一概念从经济角度出发,综合考虑了矿石中所含有价金属的价值以及将其转化为可销售产品所需的生产成本,为评价矿石的经济价值提供了量化指标,是连接地质资源特征与经济效益的关键桥梁。

影响NSR的主要因素包括矿石品位、金属价格、冶炼回收率、冶炼成本、精矿运输成本、杂质扣减和销售费用等。NSR的本质是一个经济价值指标,其单位为元/吨、美元/吨,它将地质品位、冶金性能、

市场价格和运营成本这四大关键要素融为一体,将地质模型与经济模型有机结合在一起。

与传统的当量品位法相比,NSR方法不仅能够更全面、精确地反映多金属矿床的内在价值和潜在盈利能力,而且能更好的体现矿石中有害元素处理成本的增加对于矿山经济评价的影响,该方法尤其适用于具有复杂共生关系的矿床,例如铜矿、金矿中高砷矿石的经济评价。

2.2 NSR的计算方法

基于上述NSR的定义,多金属矿床NSR计算如式(1)所示:

$$NSR = \sum(\alpha_i \cdot \beta_i \cdot P_i \cdot N_i) \cdot (1 - R) - C_s - C_t - C \quad (1)$$

式中: α_i 为矿石出矿品位,%; β_i 为选矿回收率,%; N_i 为计价系数,%; P_i 为金属价格; R 为特许权使用费,%; C_s 为冶炼成本; C_t 为运输成本; C 为其他扣减项(如有害元素的扣减)。

以某铜矿为例,说明NSR的计算,最常见的铜矿石为原生矿,铜矿开采后进入选矿厂后选出铜精矿,铜精矿运往冶炼厂通常会生成成本和扣除:

(1)铜价按照3.85美元/磅,计价系数为95.8%。

(2)冶炼费用为70美元/吨精矿。

(3)精炼费用,0.09美分/磅。

(4)运费为35美元/湿矿,含水率为7%。

(5)销售费用及精矿的损失为2美元/金属。

(6)计算 $NSR = 2\ 204.62 \times 23.9\% \times 95.8\% \times 3.85 - 2 - 70 - 45 - 38 = 1\ 788.4$ 美元/吨·精矿。

2.3 NSR值在露天境界优化软件中的应用流程

目前对于露天开采境界优化的方法主要是通过商业软件计算,应用的软件包括Datamine(NPV)、Whittle(Geovia)、3DMine、MineSight等。Datamine是常用的露天开采境界优化的一种软件,其中的Scheduler NPV优化程序主要采用L-G法对露天开采境界进行优化,是露天开采境界优化常用的程序之一。在Scheduler NPV软件中通过NSR进行露天境界优化流程如下:

(1)根据评价和设计矿山,构建矿体模型、估算或收集采、选、冶等相关成本等数据。

(2)块体价值化:根据矿物类型、计价元素、相关成本及扣减确定NSR计算的基础数据,根据基础数据建立相应的字段计算出每个矿块对应的NSR值,明确每个块体的经济价值。

(3) 运行优化算法: 将经济价值模型、最终边坡角、采剥及选矿成本等参数输入境界优化软件中寻找理论最优境界(理论上 NPV 最大)。

(4) 盈亏平衡分析: 根据采选成本计算 NSR 的边际值及相应的边际品位。

3 NSR在某矿山露天矿境界优化中的基础资料

3.1 矿山概况

以国外某矿为例, 该矿为斑岩型金-铜-银-钼矿床, 中生代侵入岩和侏罗纪千枚岩和片岩组成了斑岩体的围岩, 金矿化主要赋存于中新世斑岩和相邻角砾岩中, 矿体总体走向为北西-南东走向, 近似垂直分布; 其中 A 矿段矿化带的走向方向长约 1 500 m, 宽度从 70 ~ 900 m 不等; B 矿段矿化带的走向方向长约 1 050 m, 宽度从 90 ~ 1 000 m 不等, 距地表最大垂直深度 700 m, 本研究中以 A 矿段为例进行分析。

矿化主要为黄铜矿、黄铁矿以及少量斑铜矿、灰钼矿组成, 根据目前已经完成的选矿试验, 选矿产品主要为铜精矿, 主要计价金属为金、银、铜。

3.2 资源模型

该矿山自从 20 世纪 90 年代开始进行了初步勘探, 后续勘探工程持续开展对资源量进行了升级。本次设计的基础为 2025 年完成的资源量报告及相应的地质模型, 模型中对金、银、铜三种主要元素进行了品位赋值。

导入的模型在 X 轴上共 218 块, 在 Y 轴上 230 块, 在 Z 轴上 100 块, 块体尺寸按 15 m × 15 m × 15 m 的标准块划分。资源量共计 143 410 万 t, Cu 平均品位 0.09%, Au 平均品位 0.46 g/t, Ag 平均品位 0.70 g/t。

3.3 圈定境界的技术经济参数

当前贵金属市场流动性极高, 特别是金价一直在高位震荡。2022 年 1 月 1 日至 2025 年 3 月 30 日期间黄金交易价格最低为每盎司 1 629 美元, 最高为每盎司 3 204 美元, 月平均价格为每盎司 2 106 美元。

从 2022 年 1 月到 2025 年 3 月, 白银的交易价格在每盎司 18.05 ~ 33.79 美元。

铜是世界上最重要且应用最广泛的金属之一, 其应用范围涵盖了从电线电缆、数据中心到管道和建筑等多个领域。根据伦敦金属交易所(LME)和

纽约商品交易所(NYMEX)等主要交易所的交易价格, 2025 年 4 月 15 日, 铜的收盘价为每磅 4.12 美元。2022 年至 2025 年期间, 铜价在每磅 3.23 ~ 5.09 美元。

对于设计中采用的金属价格既参照了近五年的市场均价, 但是也考虑了未来市场预期。采、选等运营成本主要参考周边矿山的相关成本, 主要参数见表 1。

表 1 技术经济相关参数

序号	项目	单位	数值	备注
金属价格				
1	铜	\$/t	9 226	
	金	\$/g	70.49	
	银	\$/g	0.86	
精矿品位				
2	铜	%	16.00	
	金	g/t	96.71	
	银	g/t	149.67	
选矿回收率				
3	铜	%	75	
	金	%	80	
	银	%	82	
计价系数				
4	铜	%	92.5	
	金	%	98.0	
	银	%	83.30	
成本				
5	采剥成本	\$/t·矿	2.2	
	选矿成本	\$/t·矿	10.0	
	管理成本	\$/t·矿	1.00	
	国内运输费用	\$/t·矿	0.03	
	海运费	\$/t·矿	0.09	
	Rc 费用	\$/t	0.046	
6	特许权费用	\$/t	0.41	

3.4 块体模型中 NSR 字段的构建

在块体模型中构建 NSR 字段是一个将地质信息(元素、品位)、冶金信息(回收率、冶炼费用)和经济信息(价格、成本)相结合的多步骤过程。该矿山作为大型斑岩斑岩型金-铜-银-钼矿床, 根据选矿试验及确定的选矿流程, 精矿中综合考虑了铜、金和银 3 种元素的原矿品位、金属价格、采选冶回收

率以及冶炼加工费用。此外根据试验精矿的分析表明精矿中不含其它有害杂质,因此不产生冶炼厂的扣罚。

根据表 1 中确定的相关经济参数,构建 NSR 字段值如下:

$$NSR = Au * AuR * (70.49 - 0.241130) * 0.98 + Ag * AgR * (0.86 - 0.02) * 0.833 + Cu * CuR * (9226 - 143.3) * 0.925/100 - 0.03 - 0.09 - 0.046 - 0.41$$

式中: Au 为金品位, g/t; Ag 为银品位, g/t; Cu 为铜品位, %; AuR 为金选矿回收率, %; AgR 为银选矿回收率, %; CuR 为铜选矿回收率, %。

3.5 边坡参数

矿山前期开展了必要的现场调查以及工程地质研究,工程地质工作主要施工了 36 个专门的岩土工程钻孔,并从 292 个资源和加密钻孔中收集了更多岩土工程数据进行工程地质分析。根据岩石力学开展工作,对 A 矿段和 B 矿段分别进行边坡稳定性研究,本次设计最终确定露天采场最终边坡角按照图 1 设计。

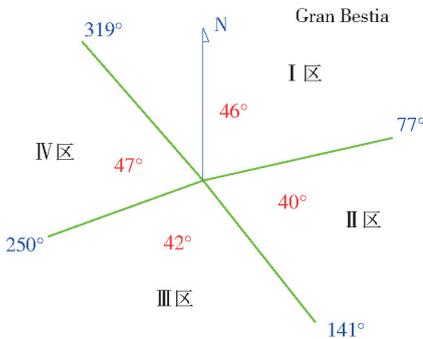


图 1 边坡分区及角度参数

另外针对浅地表的腐殖土、黏土层及碎石层,暂时考虑腐殖土层及黏土层(SAP)边坡角度为 25°,

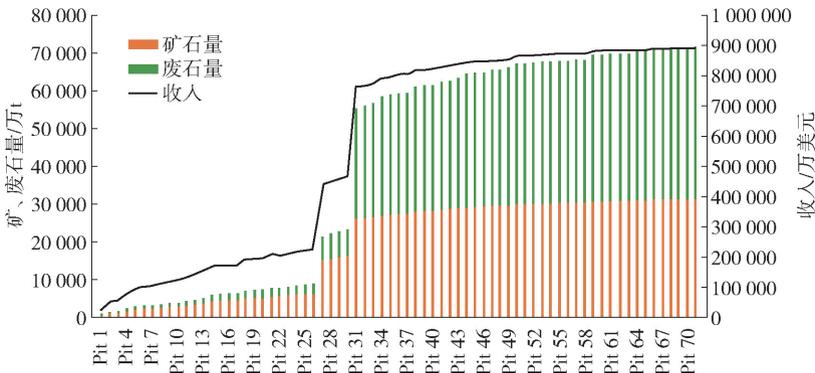


图 2 矿、岩量及收入随金属价格变化情况

碎石层(SRK)边坡角度为 42°,边坡参数在 NPV 软件中根据岩性赋值。

3.6 边际 NSR 值的确定

为了将露天境界内的资源区分为矿石和废石,使用了边际品位(cut-off)的概念,盈亏平衡边际品位根据表 1 中列出的经济和技术参数计算得出。根据国内外广泛开展的生产和生产实践,只要可以覆盖选矿成本和管理费用(G&A)即为盈亏平衡点。露天境界内 NSR 边际值(cut-off)以上的资源为矿石,而低于边际值(cut-off)的资源则划分为废石。实际对于生产矿山利用的时候可能还要考虑到采剥环节,矿、废石穿爆参数、采场运输距离的差异造成的成本的差别。根据以上计算原则,确定该矿山的 NSR 边际值为:11.00 美元/吨。

4 某矿山基于 NSR 值的露天开采境界的应用

4.1 基于 NSR 值的露天开采境界

依据建立的矿体的经济模型和确定的技术经济参数,利用 NPV 优化圈定了程序露天境界,软件通过调节金属价格变化系数生成嵌套境界。

本次境界优化过程中的采用的调控价格系数(NSR 实际价值)的方式逐步优化露天境界,随着金属价格上涨,每个境界潜在收入(扣除加工和管理及行政成本),变化曲线如图 2 所示,从图中可以看出随着价格系数的变化,收入、矿废石呈上升趋势,根据 NSR 的计算,选择收入最大的第 70 个露天境界为露天开采最优境界。

A 矿段露天开采最终境界内矿岩总量为 $71\ 532.3 \times 10^4$ t,废石量为 $31\ 293.8 \times 10^4$ t,矿石量为 $40\ 238.5 \times 10^4$ t,平均地质品位: Au 0.47 g/t, Ag 0.78 g/t, Cu 0.08%, 平均剥采比为 0.78 t/t。因境

界优化过程中对资源量要求较高,推断级别资源量不纳入境界优化的范畴,也不在本次和比较的范围,资源综合利用时需要根据标准规范酌情考虑。

需要注意的是,境界优化过程为动态非线性的,随着价格系数的提升,矿、废石量及收入都存在陡然升高过程,表明露天境界扩展过程中存在影响矿体形态的地质体,在价格上涨前期,主要开采矿石埋藏浅、上覆废石少且品位较高的区域。

在经济评估与境界圈定优化中,NSR 方法通过计算不同开采方案的净收益,帮助确定最优的露天矿境界,不仅考虑了矿石的地质特征,还综合了经济

因素,使得境界圈定更加科学合理。通过前期计算将多金属矿石品位直接变现为矿块价值,可以减少境界优化过程中多金属优化的繁琐步骤,可降低设计复杂度,提升设计效率。

4.2 基于 NSR 值的露天首采区及分期境界

为了开采设计指导,需要进一步确定矿山分期境界及确定首采区,通过按价格系数来降低 NSR 实际值。考虑到境界优化过程为非线性的,且矿废石量及收入存在突变,选取突变前的 Pit 26 和 Pit 30 境界和价格系数 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9 分布的各大境界开展矿岩量统计,具体见表 2 和图 3。

表 2 不同价格系数的境界内矿岩量及收入变化表

Phase	价格系数	矿石量/万 t	Au/g·t ⁻¹	Ag/g·t ⁻¹	Cu/%	废石量/万 t	收入/万美元	剥采比/t·t ⁻¹
Pit 1	0.30	693.0	0.74	1.18	0.11	468.6	31 846.1	0.68
Pit 11	0.40	3 448.5	0.63	0.87	0.09	988.9	134 158.2	0.29
Pit 21	0.50	5 723.6	0.58	0.86	0.09	2 216.1	205 574.6	0.39
Pit 26	0.55	6 513.1	0.57	0.84	0.09	2 583.8	225 890.4	0.40
Pit 30	0.59	16 433.3	0.47	0.78	0.08	7 071.3	468 065.3	0.43
Pit 31	0.60	26 217.2	0.48	0.82	0.08	28 919.4	761 329.5	1.10
Pit 41	0.70	28 333.7	0.48	0.80	0.08	33 082.7	818 539.1	1.17
Pit 51	0.80	30 099.1	0.47	0.79	0.08	36 838.2	861 136.9	1.22
Pit 61	0.90	30 811.2	0.47	0.78	0.08	38 587.7	876 757.7	1.25
Final	1.00	31 293.8	0.47	0.78	0.08	40 238.5	887 374.6	1.29

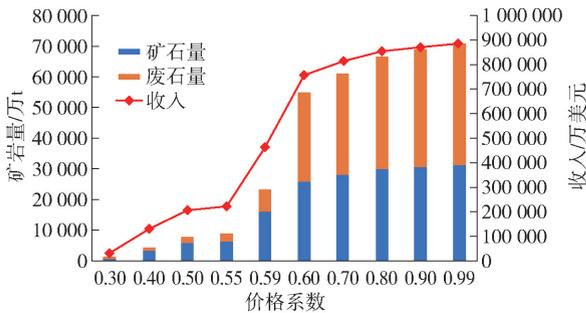


图 3 不同价格系数的境界内矿岩量及收入变化表

如图 3 所示,价格系数变化的初期及末期,相同变化率情况下,矿岩量及收入变化差别较小,仅有在价格系数为 0.55 和 0.59 时候产生突变,前后的矿石量、废石量、剥采比均产生巨大变化,因此本次分期境界的选取具有代表性的突变境界作为分期境界用以指导矿山生产。

如图 4 所示,Pit 26 为矿体地表浅层出露位置,上覆岩层小,境界内矿石量和剥采比都偏小,适合前期开采作为首采区,结合表 2 中的数据可知,Pit 26

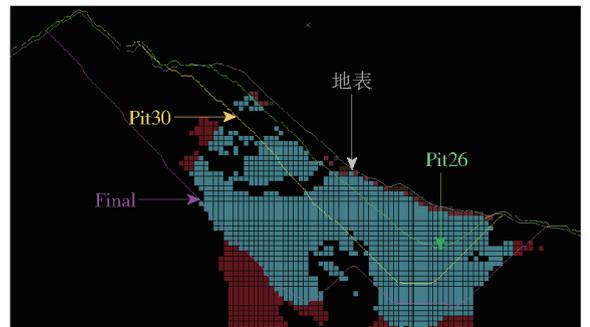


图 4 优化过程中的突变境界

境界中的矿石量只有 6 513.1 万 t,一般不满足矿山分期境界矿石量需求。Pit 30 相对于 Pit 26 进行了更多的上部废石剥离和深部矿体开采,该变化与地表上方大量岩石覆盖存在较强关联。随着矿块中 NSR 实际值增加,同等情况下可以将更多资源量纳入开采范围,并剥离上覆岩石,且与最终境界相比,Pit 30 刚好与矿体底部形态分割具有较好适配性,且境界内矿石量 16 433.3 万 t 可满足矿山近十年生产,因此可作为较好分期境界,后期逐步扩帮,进一

步增强矿山抗风险能力。

在风险管理与决策支持方面,NSR方法为矿山企业提供了有效的工具。通过分析不同金属价格和成本条件下的NSR值,企业可以评估市场波动对开采经济性的影响,制定相应的风险应对策略。此外,NSR值还可用于确定不同矿体的开采优先级,为投资决策提供依据。这种方法有助于矿山企业在复杂多变的市场环境中做出科学决策,提高整体经济效益。

4.3 不同露天境界优化方法的比较

现行研究多金属矿露天境界优化中通常采用当量品位的方法。本次研究中为了进一步对比用当量品位进行境界优化和用NSR进行境界优化的区别,综合考虑铜、金和银3种元素的原矿品位、金属价

格、采选冶回收率以及冶炼加工费用。根据确定的金属价格、选冶回收率等指标,确定铜当量系数为1.16,银当量系数为0.011。

通过当量系数将上述伴生元素折算为当量金品位,开展境界优化。两种境界优化的结果见表3,其中采用NSR境界优化比当量金境界优化开采出的矿石少了1427.4万t,降低了4.36%,废石量反而增加2776.1万t,增加了7.41%,总体收入增加42410.8万美元,增加了5.02%。对比分析表明,采用NSR开展境界优化的矿石平均品位比当量金开展境界优化更高,表明将矿石品位直接转化为价值后,境界优化过程中优先开采高价值(即高品位)矿石,细节情况如图5所示。

表3 NSR与当量金品位境界优化结果对比表

优化方法	矿岩总量/万t	矿石量/万t	废石量/万t	收入/万美元	Au/g·t ⁻¹	Ag/g·t ⁻¹	Cu/%	剥采比/t·t ⁻¹
NSR	71 532.3	31 293.8	40 238.5	887 374.6	0.469	0.780	0.076	1.286
当量金品位	70 183.6	32 721.3	37 462.3	844 963.8	0.456	0.780	0.075	1.145
差值	1 348.7	-1 427.4	2 776.1	42 410.8	0.012 9	0.000 6	0.001 5	0.141

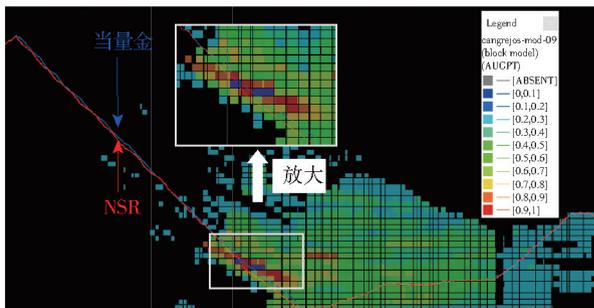


图5 NSR与当量金境界优化的细节差异

综合对比表3的矿岩量、品位及收入参数,采用NSR与当量金优化的最终境界整体上差别不大,一定程度上验证了NSR开展境界优化的可靠性。另外,NSR开展境界优化过程中,直接将矿石品位转化为经济价值,切实反映了矿块开采的实际收益,优先开采矿石品位高、经济价值大的矿体,相较于当量金境界优化经济效益提升了5%,对采矿设计具有指导意义。通过分析不同品位矿石的NSR值,可以确定经济可行的开采品位范围,从而优化资源利用,减少低品位矿石的开采。该特别适用于处理复杂矿体或低品位矿床,能够显著提高资源利用率。

NSR方法通过综合考虑经济因素和地质条件,能够有效优化露天矿境界圈定,提高矿山经济效益

和资源利用率。实例分析验证了NSR方法在实际应用中的有效性,展示了其在经济评估、境界圈定优化、矿石品位控制等方面的优势。

NSR值还可用于确定不同矿体的开采优先级,为投资决策提供依据。这种方法有助于矿山企业在复杂多变的市场环境中做出科学决策,提高整体经济效益。

然而,NSR方法也存在一些局限性,如对数据质量要求较高,计算过程相对复杂等。未来研究可以探索将NSR方法与先进的数据分析技术相结合,进一步提高其应用效果和适用范围。

5 结论

本研究深入探讨了净冶炼收益(NSR)在露天矿境界圈定中的应用,为露天矿境界圈定提供了一种科学、有效的工具,对提高矿山经济效益和促进矿业可持续发展具有重要意义。主要结论如下。

(1) NSR方法通过计算矿块净收益,确定最优的露天矿境界,综合考虑了矿石的地质特征与经济因素,使得境界圈定更加科学合理。通过前期计算减少境界优化过程中多金属优化的繁琐步骤,可降低设计复杂度,提升设计效率。

(下转第94页)