

# 有色金属矿山系列生产技术指标的优化

李克庆 贾水库 刘保顺 袁怀雨

北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083

**摘 要** 基于系统分析的思想,提出了有色金属矿山主要生产技术指标多目标、整体、动态优化的原则,介绍了基于该原则的具体的优化方法.以某金铜矿山为背景,对该矿的系列生产技术指标进行了系统优化,结果表明,在当前的生产工艺和市场条件下,对其主要的生产技术指标进行适当调整,可以使该矿获得更好的经济 and 资源效益.

**关键词** 技术指标; 系统建模; 模糊综合评判; 优化

**分类号** TD 9

开展矿山技术指标的优化研究,利用研究结果指导矿山的具体生产实践,是提高矿产资源开发的经济效益,以及使资源得到充分利用、资金充分发挥其作用、使矿山获得较高的经济效益和社会效益的有力措施<sup>[1-2]</sup>.

世界上技术先进的矿山,对其生产经济技术的优化都非常重视,每当矿产品价格有较大变化,或生产技术有较大提高时,都要进行及时优化,以便取得更佳的效益<sup>[3-4]</sup>.我国的许多矿山所采用的主要技术指标大多数是由当年上级主管部门基于行业的整体情况而下达的,目前矿山所处的市场环境,特别是资源状况、生产技术条件与当时相比都已发生了很大的变化.显然,应针对变化了的情况,重新制订和确立其合理的经济技术指标,至少应对现行的指标进行相关的技术经济论证.本文通过系统分析的基本思想,应用技术经济分析的方法,针对有色金属矿山的特点,对其主要的经济技术指标进行系统优化.

## 1 矿山主要技术指标优化的原则

国内外有关矿山生产技术指标的制定,由于受体制、价值观念差异的影响,无论是理论研究还是具体的确定方法都没有一个通用的标准<sup>[5-6]</sup>.因此,针对我国有色金属矿山的具体情况,在制订矿山生产技术指标时,必须确立一定的原则,形成系统的分析方法,其研究结果才能符合实际,才能实现矿山的经营目标和国家的资源效益目标.

(1) 多目标优化的原则<sup>[5]</sup>. 合理的技术指标,应兼顾资源效益和经济效益,经济效益中应兼顾宏观和微观经济效益、计时评价效益和不计时评价效益,即兼顾多个目标.

(2) 整体优化的原则. 以矿床工业指标的制定为例,传统的做法是按某一原则先确定边界品位或工业品位中的某一个,然后再确定另一个品位指标,显然,这种方法并不能保证两者都是最合理的指标,因为两者是互相关联地影响经济效益的.因此,矿山生产技术指标的优化应是基于特定生产经营目标,针对主要生产技术指标的整体优化.

(3) 动态优化原则<sup>[7]</sup>. 首先,各主要技术指标之间存在着互相制约、互为变量的关系,一个指标的变化将导致与之相关的其它指标发生变化;其次,最佳的生产技术指标不能一次制定之后便一成不变,应随着时间的推移,当采矿、选矿技术水平取得进步,矿产品价格、生产成本等发生变动时,应适时进行调整.

## 2 矿山主要技术指标优化的方法

(1) 建立以边界品位及工业品位为自变量求储量和平均品位的数学模型.

矿床工业指标是决定矿体规模进而影响矿山开发效益的首要指标,因此,必须首先建立可用于计算不同工业指标方案下矿体储量和地质平均品位的数学模型,而工业指标方案可能有几十个乃至上百个,如用传统的断面法进行计算,则每改变一次工业指标,就要在所有储量计算图纸上,重新圈定一次矿体,其难度将大到难以完成的程度.对此问题,国外是采用克立格法等方法在电子计算机上进行计算.但它们实行的是单指标制,不适用于我国现行的双品位指标制<sup>[8-10]</sup>.经过反复探索,我们采用了一种新的方法,即数理统计法,建立相关的数学模型,计算各工业指标方案下的储量和平均品位.

(2) 建立损失率和贫化率的关系模型.

对一般的露天矿山或采用诸如崩落采矿法的矿

山而言,矿石开采的损失率和贫化率之间存在着一定的相关关系,贫化率大,损失率相应地就会变小.因此,应当尽可能建立贫化率与损失率之间的关系模型,这样就可以将不同边界品位和工业品位方案下的矿石储量和平均品位动态地转化为采出矿量和采出品位.

(3) 建立选矿回收率模型.

一般情况下,供矿品位与选矿回收率之间关系比较密切,供矿品位提高,选矿回收率也将提高<sup>[11-13]</sup>,因此应该尽可能建立起反映此种相关关系的数学模型.

(4) 建立综合技术经济模型.

基于系统优化的复杂性,应建立将技术指标与相关经济参数密切地结合起来的“综合技术经济模型”以进行分析.这种模型不仅可反映系统复杂的技术参数间的动态联系,而且可反映经济参数与技术因素间的密切联系.通过这种联系,可根据多个决策变量来求解多个决策目标函数.同时,还可利用此模型进行成百上千个方案的对比分析.

(5) 进行多目标优化决策.

矿山生产技术指标优化的目的,就是确定能使企业获得经济效益和资源回收效益最佳的系列技术指标,其本质上就是一个多目标决策问题.对此类问题,可采用近年来广泛应用于多目标优化决策领域的模糊综合评判法<sup>[14]</sup>,通过综合隶属度的计算,进行系统寻优.

3 矿山生产技术指标的系统优化

基于上述矿山生产技术指标优化的原理和方法,对我国某有色金属矿山的主要生产技术指标进行系统的优化.该矿山由一、二两个主体采区组成,以生产金、铜精矿为主,两采区年生产规模分别为30万t和33万t.采矿方法以分段中深孔落矿嗣后阶段充填法及上向水平分层充填采矿法为主,两采区目前采用的矿床工业指标如表1所示.

表1 现行矿床工业指标

| 边界品位                     |                               | 工业品位                     |                               |
|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| $\alpha_{\text{bCu}}/\%$ | $\alpha_{\text{bAu}}/10^{-6}$ | $\alpha_{\text{gCu}}/\%$ | $\alpha_{\text{gAu}}/10^{-6}$ |
| $\geq 0.3$               | $\geq 1.0$                    | $\geq 0.5$               | $\geq 2.5$                    |

3.1 矿体储量模型的建立

采用前述数理统计法,经矿石品位频率统计、滤波处理、参数估值、回归分析等步骤,最终建立一、二矿区以铜的工业指标为自变量的储量和地质平均品位模型如下:

$K_1(C_1, C_2) = 1.6531 - 0.0781 C_1 - 1.5069 C_2 +$

$0.1533 C_1^2 - 0.1969 C_1 C_2 + 0.5553 C_2^2 + 0.0645 C_1^3 -$   
 $0.1799 C_1^2 C_2 + 0.1525 C_1 C_2^2 - 0.0349 C_2^3$  (1)

$\alpha_{1\text{Cu}}(C_1, C_2) = 1.1521 - 0.1016 C_1 + 1.0809 C_2 -$   
 $0.1447 C_1^2 + 0.6588 C_1 C_2 + 0.1507 C_2^2 - 0.1781 C_1^3 +$   
 $0.2565 C_1^2 C_2 - 0.2802 C_1 C_2^2 - 0.0902 C_2^3$  (2)

$K_2(C_1, C_2) = 1.3831 + 0.0220 C_1 - 0.7721 C_2 +$   
 $0.0457 C_1^2 - 0.2536 C_1 C_2 + 0.0342 C_2^2 + 0.0676 C_1^3 -$   
 $0.0983 C_1^2 C_2 + 0.1527 C_1 C_2^2 + 0.1028 C_2^3$  (3)

$\alpha_{2\text{Cu}}(C_1, C_2) = 1.5859 - 0.1828 C_1 + 0.7271 C_2 -$   
 $0.0414 C_1^2 + 0.7342 C_1 C_2 + 0.5344 C_2^2 - 0.1738 C_1^3 +$   
 $0.1731 C_1^2 C_2 - 0.3314 C_1 C_2^2 - 0.2631 C_2^3$  (4)

式中,  $C_1$  为 Cu 的边界品位, %;  $C_2$  为 Cu 的工业品位, %;  $K_1(C_1, C_2)$ 、 $\alpha_{1\text{Cu}}(C_1, C_2)$  分别为一矿区矿体的储量系数和地质平均品位;  $K_2(C_1, C_2)$ 、 $\alpha_{2\text{Cu}}(C_1, C_2)$  分别为二矿区矿体的储量系数和地质平均品位.

3.2 矿体中金-铜关系模型的建立

上述储量模型,只是确立了铜资源的数量和质量随其工业指标变化而变化的情况.金作为该矿最终产品的重要组成部分,对其数量和质量的准确跟踪、分析和计算是评价该矿经营效益,确定合理的生产技术指标的重要因素.因此,必须对铜的边界品位和工业品位的变动所引起矿体中金品位的变化情况进行动态的分析和计算.为此,我们通过对勘探取样化验数据的详细分析,发现一、二两个矿区金和铜的品位之间存在一定的相关关系,以此为基础,建立了它们之间的动态关系模型.

(1) 一矿区金-铜关系模型.

$\alpha_{1\text{Cu}} = 0.92694 + 1.16791 \alpha_{1\text{Cu}}(C_1, C_2)$  (5)  
 $R = 0.6179, r_5\%(5143) = 0.0273, s = 2.1239.$

式中,  $\alpha_{1\text{Cu}}$  为一矿区 Au 的平均品位,  $\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$ ;  $R$  为相关系数;  $r$  为相关检验临界值;  $s$  为标准差;其它符号同前.

(2) 二矿区金-铜关系模型

$\alpha_{2\text{Cu}} = 0.53565 + 0.81422 \alpha_{2\text{Cu}}(C_1, C_2)$  (6)  
 $R = 0.8138, r_5\%(4126) = 0.0305, s = 1.5419.$

式中,  $\alpha_{2\text{Cu}}$  为二矿区 Au 的平均品位,  $\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$ ;其它符号同前.

3.3 相关采矿技术指标的确定

通过对生产实际情况的分析,发现该矿的损失率和贫化率数据不具相关性,因此,本次研究采用矿山的生产计划数据,即损失率11%,贫化率9%.

3.4 选矿回收率模型的建立

随矿床的工业指标的变化,在一定采矿技术条

件下,采出矿石亦即运往选厂的综合供矿品位也会不同.从理论上而言,在选厂的各项工艺技术参数一定的情况下,综合供矿品位越高,选矿的金属回收率就会越高.为此,通过系统收集该矿选矿厂 2006 年 1 月—2006 年 12 月共计 12 个月的生产报表数据,经过对该数据的整理分析,在剔除部分异常数据的基础上,建立了铜金精矿生产过程中 Cu 及 Au 的回收率与各自的入选品位之间的关系模型.

#### (1) Cu 回收率模型.

$$\varepsilon_{\text{Cu}} = 99.141e^{-0.103/\alpha_{\text{rCu}}} \quad (7)$$

$$R = 0.6841, r_5\%(435) = 0.0938, s = 1.5143.$$

式中,  $\varepsilon_{\text{Cu}}$  为铜金精矿中 Cu 的回收率, %;  $\alpha_{\text{rCu}}$  为 Cu 的入选品位, %; 其它符号同前.

#### (2) Au 回收率模型.

$$\varepsilon_{\text{Au}} = 94.612e^{-0.239/\alpha_{\text{rAu}}} \quad (8)$$

$$R = 0.5246, r_5\%(435) = 0.0938, s = 3.178.$$

式中,  $\varepsilon_{\text{Au}}$  为铜金精矿 Au 的回收率, %;  $\alpha_{\text{rAu}}$  为 Au 的入选品位, g t<sup>-1</sup>; 其它符号同前.

### 3.5 综合技术经济分析模型的建立

所谓综合技术经济分析模型,即能够计算不同方案(不同的边界品位、工业品位、开采损失率、贫化率、成本、铜金价格等指标的组)下总利润、净现值、总产铜量、总产金量等目标值的数据分析模型,其核心为总利润模型、铜金产量模型和模糊综合评判模型.

上述决策目标的重要性程度显然是不同的,本次研究结合该矿的实际情况,采用专家打分法确定各个目标的权重系数分别为总利润 0.6, 净现值 0.1, 铜产量 0.2, 金产量 0.1.

#### (1) 铜(金)产量模型.

产品产量模型即根据储量模型、平均品位模型、年度计划生产规模、开采的损失率、贫化率,以及选矿回收率计算特定评价年份铜(金)产量的数学模型,如下所示:

$$Q = \sum (M_i \cdot K_i(C_1, C_2) \cdot \alpha_i(C_1, C_2) \cdot (1 - \rho)) \cdot \varepsilon \quad (9)$$

式中,  $i = 1, 2$ , 分别代表一、二矿区;  $Q$  为铜或金产量;  $M_i$  为第  $i$  采区年生产规模, 万 t a<sup>-1</sup>;  $\rho$  为开采贫化率, %;  $\varepsilon$  为铜或金的选矿回收率, %;  $K_i(C_1, C_2)$  为第  $i$  采区储量系数;  $\alpha_i(C_1, C_2)$  为第  $i$  采区地质平均品位.

#### (2) 总利润模型.

总利润模型即是根据产品产量模型及采矿、选

矿费用指标计算特定评价年份企业获利的数学模型,该模型如下所示:

$$TP = \sum (M_i \cdot K_i(C_1, C_2) \cdot \alpha_i(C_1, C_2) \cdot (1 - \rho)) \cdot \varepsilon \cdot P - C_{\text{ck}} - C_{\text{xk}} - C_{\text{gl}} - C_{\text{cw}} - C_{\text{qt}} \quad (10)$$

式中,  $TP$  为总利润, 万元;  $P$  为产品价格, 万元 t<sup>-1</sup>;  $C_{\text{ck}}$  为年采矿总费用, 万元;  $C_{\text{xk}}$  为年选矿费用, 万元;  $C_{\text{gl}}$  为年管理费用, 万元;  $C_{\text{cw}}$  为年财务费用, 万元;  $C_{\text{qt}}$  为矿山其它费用, 万元; 其它符号同前.

#### (3) 净现值模型.

$$NPV = \sum_{j=1}^n NCF_j \cdot (1 + r)^{-j} \quad (11)$$

式中,  $j$  为评价年份(本次研究评价期为  $j = 1, 2, \dots, 6$  年);  $NPV$  为净现值, 万元;  $NCF_j$  为第  $j$  年净现金流量, 万元;  $r$  为折现率, %.

#### (4) 模糊综合评判模型.

$$Lsd(k) = \sum_{l=1}^4 W_l \mu(X_{kl}) \quad (12)$$

式中,  $Lsd(k)$  为方案  $k$  的综合隶属度;  $l$  代表总利润、净现值、铜产量、金产量等决策目标;  $W_l$  为第  $l$  个决策目标的权重;  $\mu(X_{kl})$  为第  $k$  方案对第  $l$  目标的隶属程度, 即模糊隶属度.

### 3.6 优化方案设置及优化结果分析

基于矿山未来生产的技术可能性,设定各采区边界品位和工业品位在 0.2% ~ 0.9% 的范围内按一定步长(本研究采用 0.1%)分别作不同变动的一系列组合方案,对这些方案利用上述建立的模型分别计算与之相对应的总利润、净现值及铜金产量.

在上述建模和方案设置的基础上,利用我们开发的矿山技术指标优化系统即可进行优化工作,表 2 列出了优化方案及其与现行方案的对照结果.

从表 2 可以看出,该矿在现有的技术和经济条件下,主要的生产技术指标可作如下调整:

(1) 两个采区的品位指标均应做适当调整,即 Cu 的边界品位由原来的 0.3% 降低为 0.2%, 而工业品位由原来的 0.5% 降低到 0.3%.

(2) 矿床工业指标调整后,一、二两个矿区各自可多利用表外矿 163 万 t 和 149 万 t, 而其 Cu 的地质平均品位分别降低 0.26% 和 0.23%, Au 的地质平均品位分别降低 0.3 g t<sup>-1</sup> 和 0.19 g t<sup>-1</sup>.

(3) 由于工业指标降低,将导致矿石的综合入选品位有所降低,即 Cu 降低 0.23%, Au 降低 0.23 g t<sup>-1</sup>; 综合入选品位的降低将进一步导致铜金精矿 Cu 和 Au 的选矿回收率分别降低 0.83% 和 1.16%.

(4) 尽管选矿的回收率指标降低了,但由于多利

表2 优化方案与现行方案技术指标及决策目标对比表

| 生产单位 | 指标                                 | 现行方案   | 优化方案   |
|------|------------------------------------|--------|--------|
| 一矿区  | 边界品位 $\alpha_{\text{bCu}}/\%$      | 0.3    | 0.2    |
|      | 工业品位 $\alpha_{\text{gCu}}/\%$      | 0.5    | 0.3    |
|      | 地质品位 $\alpha_{\text{dCu}}/\%$      | 1.76   | 1.5    |
|      | 采出品位 $\alpha_{\text{cCu}}/\%$      | 1.62   | 1.38   |
|      | 地质品位 $\alpha_{\text{dAu}}/10^{-6}$ | 2.98   | 2.68   |
|      | 采出品位 $\alpha_{\text{cAu}}/10^{-6}$ | 2.14   | 1.86   |
|      | 边界品位 $\alpha_{\text{bCu}}/\%$      | 0.3    | 0.2    |
| 二矿区  | 工业品位 $\alpha_{\text{gCu}}/\%$      | 0.5    | 0.3    |
|      | 地质品位 $\alpha_{\text{dCu}}/\%$      | 2.08   | 1.85   |
|      | 采出品位 $\alpha_{\text{cCu}}/\%$      | 1.91   | 1.7    |
|      | 地质品位 $\alpha_{\text{dAu}}/10^{-6}$ | 2.23   | 2.04   |
|      | 采出品位 $\alpha_{\text{cAu}}/10^{-6}$ | 2.05   | 1.88   |
|      | 入选品位 $\alpha_{\text{rCu}}/\%$      | 1.77   | 1.54   |
|      | 入选品位 $\alpha_{\text{rCu}}/10^{-6}$ | 2.1    | 1.87   |
| 选矿厂  | 回收率 $\varepsilon_{\text{Cu}}/\%$   | 93.53  | 92.7   |
|      | 回收率 $\varepsilon_{\text{Au}}/\%$   | 84.4   | 83.24  |
|      | 利润/万元                              | 54466  | 55330  |
| 经营目标 | 净现值/万元                             | 37945  | 37732  |
|      | 铜产量/t                              | 63056  | 64503  |
|      | 金产量/kg                             | 6730.3 | 7036.3 |

用了表外矿,且这部分矿石无须再花管理费、折旧费、采选固定制造费,其所增加的只是采选可变费用,因此,矿山的总体经营效果反而提高了。调整指标后,6年的评价期内,矿山可获得864万元的增量经济效益和1446.32t铜、306.04kg金的增量资源回收效益。

4 结束语

矿山生产技术指标的高低是影响企业经营效益的重要因素,矿山企业应根据自身的生产技术状况、市场环境等的变化对其主要的生产技术指标进行实

时动态的优化,以便企业能够取得最佳的经营效益。

生产技术指标整体动态优化原则的提出,以及优化方法的实现,将为有色金属矿山开展类似的工作提供有益的指导。

参 考 文 献

[1] 肖洪生. 黄金矿业企业经营决策方法研究. 黄金, 2003, 24(11): 1

[2] 庞保成,唐旭艳,刘军. 广西隆或金矿技术经济评价. 中国矿业, 2005, 14(12): 49

[3] Everett J E. Iron ore production scheduling to improve product quality. Eur J Oper Res, 2001, 129(2): 355 - 361.

[4] Huang XL, Chu Y G, Yi H, et al. The production process management system for production indices optimization of mineral processing 16th IFAC World Congress, Prague, 2005

[5] 张顺堂. 金属矿山经营参数动态优化综合模型研究. 矿业研究与开发, 2005, 25(3): 5

[6] 云庆夏. 优化采选冶产品品位的遗传算法. 金属矿山, 1999(10): 11

[7] 王义达,周伟,袁怀雨. 矿山经营参数整体动态优化系统的研究. 金属矿山, 2003(10): 10

[8] 李克庆,秦元萍,刘保顺. 铁精矿品位优化通用系统. 北京科技大学学报, 2005, 27(1): 114

[9] 池顺都,刘治国,朱建东. 矿床工业指标优化时的品位统计分析及方案法结果的预测. 地质与勘探, 2003, 39(2): 81

[10] 董藏海. 矿石品位指标优化方法在二峰山铁矿的应用. 金属矿山, 2002(4): 14

[11] 孙传尧,周俊武,王福利. 基于RBF网络的浮选过程技术指标智能预测系统的研究. 矿冶, 2002, 11(4): 24

[12] 黄肖玲,丁进良,柴天佑. 面向生产指标优化的选矿过程调度研究. 系统工程学报, 2006, 21(2): 136

[13] 段展,李守业,褚广勤,孙成武. 关于原矿品位、回收率、尾矿品位之间相关性的分析. 黄金, 2005, 26(9): 41

[14] 赖祥璞,刘世光,慕娟. 模糊数学综合评判法在确定合理精矿品位中的应用. 矿冶, 1999, 8(3): 25

Optimization of series technology indexes in nonferrous metal mines

LI Keqing, JIA Shuiku, LIU Baoshun, YUAN Huaiyu

School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

**ABSTRACT** Based on the thoughts of system analysis, multi-objective, integrated, and dynamic optimization principle about main technology indexes in nonferrous metal mines was put forward, and the concrete optimization method was introduced. Bases on the background of a gold-copper mine, the series technology indexes of the mine were systematically optimized. The results showed that a better economic benefit and ore resources development effect could be obtained under current production technology and market environment if the optimum indexes were applied.

**KEY WORDS** technology indexes; system modeling; fuzzy comprehensive evaluation; optimization