

基于五品联动理论的品位效益优化决策研究

邵安林

(鞍山钢铁集团公司, 辽宁鞍山 114001)

[摘要] 本文以五品联动理论为研究背景,考虑到矿山工程中地质工程、采矿工程、配矿工程、选矿工程和冶炼工程5个工程是相互联系的串联耦合工程,是矿山企业活动的主体,而与其相对应的地质品位、采出品位、入选品位、精矿品位和入炉品位对于矿山整体经济效益起到关键的控制作用。本文运用并拓展了“质量守恒”原理,利用“矿量守恒”和“金属量守恒”建立了品位经济效益模型,提出了五品联动品位一效益活跃指数,通过实例计算与分析,获得了某铁矿的品位优化数值,为进一步研究矿山企业工程管理模式奠定了基础。

[关键词] 五品联动;品位一效益活跃指数;优化决策;矿冶工程

[中图分类号] C93 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)02-0068-05

1 前言

五品联动工程管理模式源自对贫铁矿规模高效开发的需求,是一种集工程理论与决策、规划与设计、组织与协调、建造与实施、运行与评价、更新与优化于一体的工程综合管理技术与方法^[1,2]。具体而言,就是以系统效益最大化为目标导向,以工程哲学理念为指导,以系统论为理论基础,打破矿山、冶炼分割优化定式,从整体上把握和优化工程实践活动,将地质工程、采矿工程、配矿工程、选矿工程、冶炼工程统筹集成构建成大工程系统,综合考虑地质品位、采出品位、入选品位、精矿品位、入炉品位(五大工程分别对应一个品位,简称“五品”),在单系统优化基础上,进行全系统联动优化,形成五品联动集成管理模式。矿山企业管理与一般意义上的企业管理具有明显区别,它的基础是矿山企业保有的资源地质储量,地质资源不随管理者政策的制定而改变,并且管理者也无法选择地质资源^[3-7]。同时,矿产资源的开发过程,既是一个资源采出过程,也是一个资源发现过程,资源总量随着

开发过程的进行不断地变化,不同的资源开发决策将导致最终采出资源量的明显变化^[8-13]。因此,研究矿产资源的工程管理模式,对于提高矿产资源的回收率和利用率都具有非常重要的意义。

五品联动中的五品分别指:地质品位(P_1)、采出品位(P_2)、入选品位(P_3)、精矿品位(P_4)和入炉品位(P_5),它们分别和地质工程、采矿工程、配矿工程、选矿工程、冶炼工程相对应,具体关系如图1所示。

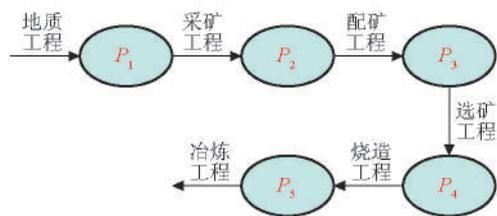


图1 五品联动关系图

Fig.1 Five Grades Ganged diagram

通过图1可以看出,第一步,圈矿过程,根据地质勘探获得的相关资料,进行矿体圈定,获得矿体的地质品位 P_1 ;第二步,采矿过程,由于不可避免的

[收稿日期] 2013-08-29

[作者简介] 邵安林,1963年出生,男,黑龙江肇东县人,教授级高级工程师,主要研究方向为贫铁矿资源高效开发利用;E-mail:alshao@163.com

损失和贫化,造成矿石品位的变化,采出矿石的品位为 P_2 ;第三步,配矿过程,由于各个采区采出的矿石性质不同,将各采区矿石进行分类配置,同类矿石集中于某一选场进行处理,在送入选场之前先进行矿石的预选,剔除某些品位极低的矿石,使得处理之后的矿石的平均品位得到提高,到达入选品位 P_3 的要求;第四步,选矿过程,将配矿预选所获得的矿石送入选场,进入选矿流程,进行矿物的富集,达到精矿品位 P_4 ;第五步,在精矿粉中加入添加剂,进行造球和烧结的过程,获得满足入炉要求(入炉品位 P_5)的烧结球团,最终出售球团获得利润。从图1中可以看出,提高某一过程的产品品位要求,将不可避免的增加本环节的成本,但是却为后续环节节约了成本,这样,总效益到底如何变化,直观上很难判断。因此,“五品”之间在经济效益上相互影响。

2 模型建立

2.1 矿量模型

假设“五品”所对应的矿量(10^4 t)分别为 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 、 Q_5 ,则五品联动矿量关系如图2所示。

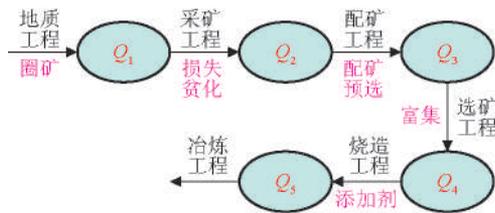


图2 五品联动矿量关系图

Fig.2 Five Grades Ganged ore diagram

根据图2可以得到各个矿量之间的关系,即:

$$Q_2 = Q_1(1 - S_c) \quad (1)$$

$$Q_3 = Q_2(1 - S_v) \quad (2)$$

$$Q_4 = Q_3(1 - S_x) \quad (3)$$

$$Q_5 = Q_2 + Q_s + Q_j \quad (4)$$

式(1)中, S_c 表示采矿过程中矿量损失率, S_c 计算式为

$$S_c = \frac{q-r}{1-r} \quad (5)$$

式(2)~式(5)中, S_v 为配矿和预选过程中的矿量损失率; S_x 为选矿过程中的矿量损失率; q 为矿石损失率; r 为废石混入率; Q_z 为造球矿量; Q_s 为烧结矿量; Q_j 为剩余精矿量,其中

$$Q_z = Q_4 X_z(1 + S_z) \quad (6)$$

$$Q_s = Q_4 X_s(1 + S_s) \quad (7)$$

$$Q_j = Q_4 X_j \quad (8)$$

式(6)~式(8)中, X_z 为造球矿量占精矿量的百分比; S_z 为造球过程中的矿量增加率; X_s 为烧结矿量占精矿量的百分比; S_s 为烧结过程中的矿量增加率; X_j 为直接以精矿粉形式出售的精矿量占整个选矿产出精矿量的百分比。(以上各个变化量,均以增加为“+”,减小为“-”)

$$X_z + X_s + X_j = 1 \quad (9)$$

2.2 矿量经济模型

如图3所示,由于采矿环节、配矿预选环节、选矿环节、造球烧结环节均为消费环节,只有最终出售球团矿、烧结矿和精矿粉是收入环节,因此当考虑整体经济效益时,需要知道各个工艺环节的支出和收入,总收入和总支出两者之差即为最终收益,即总盈利可以表示为

$$T = T_5 - (T_1 + T_2 + T_3 + T_4) \quad (10)$$

假定 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 分别为各环节单位成本, C_5 为球团售价、 C'_5 为烧结矿售价、 C''_5 为精矿售价,单位都为万元/万吨,则有

$$T = (Q_z C_5 + Q_s C'_5 + Q_j C''_5) - [Q_2(C_1 + C_2) + Q_3 C_3 + Q_4(X_z C_4 + X_s C'_4)] \quad (11)$$

将式(1)、(2)、(3)、(6)、(7)、(8)代入式(11)中,可以得到总盈利的第3种表示形式——“变化率表示形式”,即

$$T = Q_1(1 - S_c)\{[1(1 - S_v)(1 - S_x)\{X_z(1 + S_z)C_5 - C_4\} + X_s[(1 + S_s)C'_5 - C'_4] + X_j C''_5]\} - [(C_1 + C_2) + (1 - S_v)C_3] \quad (12)$$

2.3 品位经济模型

考虑到边界品位与矿石量之间的关系,如图4所示,为某金矿边界品位与矿量之间的关系曲线,它们之间满足指数递减关系。因此,圈定矿量与边界品位之间满足的函数关系式,可以写为

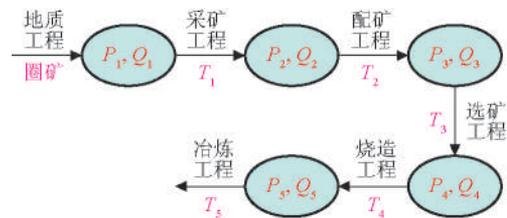


图3 五品联动经济关系图

Fig.3 Five Grades Ganged economic diagram

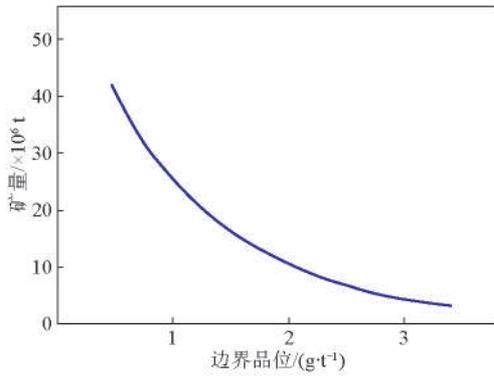


图4 边界品位与矿量之间的关系曲线

Fig.4 Relation curve of cutoff grade and ore quantity

$$Q_1 = Q_B + B_1 e^{-\frac{P_1'}{B_2}} \quad (13)$$

圈矿时选取的边界品位 P_1' 与圈定矿量的地质品位 P_1 之间满足一定的关系,这取决于矿区矿石品位的分布情况,可以通过微积分运算获得,此处假设地质品位与边界品位之间满足如下关系

$$P_1' = \varphi(P_1) \quad (14)$$

将式(14)代入式(13)中,得到以地质品位表示的圈定矿量表达式,即

$$Q_1 = Q_B + B_1 e^{-\frac{\varphi(P_1)}{B_2}} \quad (15)$$

根据“矿石量平衡”和“金属量平衡”规律,可以得到采选冶品位和各矿量变化率之间的关系

$$S_c = \frac{q(P_1 - \alpha_c) + P_2 - P_1}{P_2 - \alpha_c} \quad (16)$$

$$S_y = \frac{P_3 - P_2}{P_3 - \alpha_y} \quad (17)$$

$$S_x = \frac{P_4 - P_3}{P_4 - \alpha_x} \quad (18)$$

$$\frac{P_5}{P_{sz}} = \frac{(X_z + X_s)(1 + S_z)}{X_z(1 + S_z) + X_s(1 + S_s)} \quad (19)$$

$$\frac{P_5}{P_{ss}} = \frac{(X_z + X_s)(1 + S_s)}{X_z(1 + S_z) + X_s(1 + S_s)} \quad (20)$$

式(16)~式(20)中, α_c 为混入废石的品位; α_y 为预选过程中剔除的矿石的品位; α_x 为尾矿品位, P_{sz} 为球团品位; P_{ss} 为烧结矿品位。其中

$$S_z = \frac{P_4}{P_{sz}} - 1 \quad (21)$$

$$S_s = \frac{P_4}{P_{ss}} - 1 \quad (22)$$

综上,将式(16)、(17)、(18)、(21)、(22)代入式(12)中,得到总盈利的第4种表示形式——五品联动表示形式,即

$$T = \frac{Q_1(P_1 - \alpha_c)(1 - q)}{P_2 - \alpha_c} \left\{ \frac{P_2 - \alpha_y}{P_3 - \alpha_y} \times \frac{P_3 - \alpha_x}{P_4 - \alpha_x} \times [X_z \left(\frac{P_4}{P_{sz}} C_5 - C_4 \right) + X_s \left(\frac{P_4}{P_{ss}} C_5 - C_4 \right) + X_1 C_5] - [(C_1 + C_2) + \frac{(P_2 - \alpha_y)C_3}{P_3 - \alpha_y}] \right\} \quad (23)$$

若将式(13)代入式(23)中,可以得到包含边界品位的五品联动表示形式

$$T = \frac{(Q_B + B_1 e^{-\frac{P_1'}{B_2}})(P_1 - \alpha_c)(1 - q)}{P_2 - \alpha_c} \left\{ \frac{P_2 - \alpha_y}{P_3 - \alpha_y} \times \frac{P_3 - \alpha_x}{P_4 - \alpha_x} \times [X_z \left(\frac{P_4}{P_{sz}} C_5 - C_4 \right) + X_s \left(\frac{P_4}{P_{ss}} C_5 - C_4 \right) + X_1 C_5] - [(C_1 + C_2) + \frac{(P_2 - \alpha_y)C_3}{P_3 - \alpha_y}] \right\} \quad (24)$$

或者将式(15)代入式(23),得到考虑边界品位影响的五品联动表示形式

$$T = \frac{(Q_B + B_1 e^{-\frac{\varphi(P_1)}{B_2}})(P_1 - \alpha_c)(1 - q)}{P_2 - \alpha_c} \left\{ \frac{P_2 - \alpha_y}{P_3 - \alpha_y} \times \frac{P_3 - \alpha_x}{P_4 - \alpha_x} \times [X_z \left(\frac{P_4}{P_{sz}} C_5 - C_4 \right) + X_s \left(\frac{P_4}{P_{ss}} C_5 - C_4 \right) + X_1 C_5] - [(C_1 + C_2) + \frac{(P_2 - \alpha_y)C_3}{P_3 - \alpha_y}] \right\} \quad (25)$$

式(23)、(24)、(25)即为最终建立的五品联动经济模型,根据矿山实际情况对式中的各个参数给出限定范围,就可以按照相关数学理论进行极值求解,获得最大经济效益。

从模型的建立过程可以看出,五品联动牵一发而动全身,对于矿山的整体经济效益都起到了控制作用。“五品”的确定和决策过程,就是整个矿山系统工程的管理和运行过程。

3 品位—效益活跃指数

根据上述分析可知地质品位、采矿品位、入选品位、选矿品位和入炉品位相互联动,因此总盈利可以表示为

$$T = f(P_1, P_2, P_3, P_4, P_5) \quad (26)$$

这样,总盈利随单一品位的变化情况可以表示为

$$\frac{dT}{dP_i} = \frac{df}{dP_i} = k_{(P_i)} \quad (27)$$

式(27)定义为品位—效益活跃指数 (grade-profit activity index, GPAI)。式(27)中, $i=1, 2, 3, 4, 5$, 分别代表5个过程对应的矿石品位。品位—效益活跃

指数是指系统单位效益对单位品位的比值,用于衡量工序品位和系统效益活跃程度的一个指数,反映工程各环节对整体效益影响强弱,品位一效益活跃指数越大,说明该环节技术指标对系统效益影响越大;反之,影响越小。

4 模型应用

表1给出了某矿山的边界品位与矿量之间的对

表1 某矿山边界品位与矿量对照表

Table 1 Comparison table of cutoff grade and ore quantity in a mine

边界品位/(g·t ⁻¹)	20	21	22	23	24	25	26	27
矿量/(10 ⁴ t)	13.332 83	12.510 312	12.441 264	12.239 716	12.107 451	11.461 705	11.018 860	10.531 29

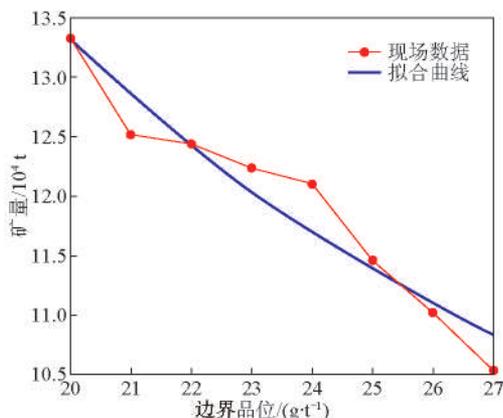


图5 某矿山边界品位与矿量之间的拟合关系曲线
Fig.5 Matched relation curve of cutoff grade and ore quantity in a mine

运用本文所建立的数学模型,对该矿山的“五品”进行优化,使得总经济效益最优,图6给出了总经济效益随“五品”的变化曲线。

从图6中可以看出,总经济效益随着 P_1 、 P_2 、 P_3 的增加而增加,随着 P_4 和 P_5 的增加而减少,并且总经济效益对“五品”增减的敏感性也明显不同,敏感性越大,曲线的斜率越大,敏感性越小,曲线的斜率越小。如果用品位效益指数进行度量,可以表示为 $k_{(P_2)} > k_{(P_1)} > k_{(P_3)} > 0 > k_{(P_4)} > k_{(P_5)}$,也就是说“五品”之间对总经济效益的作用是不一致的,存在明显的矛盾,即“五品”不能进行简单的增加或减少。要使最终的经济效益最优,就要求品位经济模型(式(25))的极值,观察式(25)可以看到,总经济效益与“五品”之间呈现出非线性的关系,因此要获得最大

应情况,通过指数拟合方法,获得该矿山矿量与边界品位之间的关系式为

$$Q_1 = 8.408 65 + 36.572 01e^{-\frac{P_1}{9.958 49}} \quad (28)$$

某矿山边界品位与矿量之间的拟合关系曲线如图5所示。

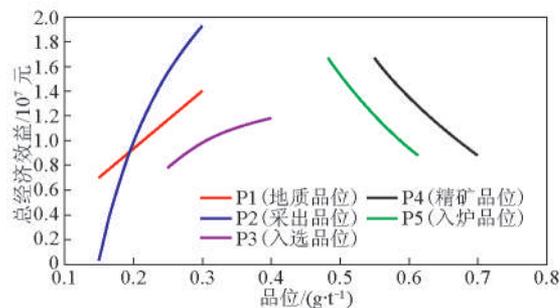


图6 品位效益曲线图
Fig.6 Curve of Grade efficiency

的总经济效益,及其所对应的“五品”取值,就需要使用带有约束条件的非线性规划方法进行求解。Matlab 优化工具箱针对非线性规划问题,给出了求解函数 fmincon,该函数使用3种算法来处理 Hessian 矩阵,即有效集算法、基于映射牛顿法的置信域算法和内点算法,能够有效地解决带有线性(或非线性)约束的非线性规划问题。本文使用 Matlab 优化工具箱,运用 fmincon 函数,对品位效益模型进行求解,获得最优经济效益所对应的“五品”,即: $P_1 = 21\%$, $P_2 = 20\%$, $P_3 = 30\%$, $P_4 = 67.5\%$, $P_5 = 60\%$ 。

5 结语

五品联动模型推导过程中,以经典的“质量守恒定律”为理论基础,以各个环节之间的“矿量守恒”和“金属量守恒”为链条,将“五品”有机的联系在一起,通过简单的初等数学变换,得到了“五品”之间的联动关系。

通过收支关系,建立了描述经济效益的函数表达式,将“五品”与经济效益联系起来,通过对数学模型的分析,可以得到经济效益对“五品”的敏感因素,找到经济效益的主控因素,进行重点技术攻关,实现敏感因素的点突破。

当然,数学模型的计算结果受一系列表征参数的影响较大,不同的参数输入,将导致不同的优化结果和优化方案。同时,数学模型中亦有许多影响经济效益的因素未纳入其中,待相关的数量关系搞清之后,便可逐步加入,使模型更加完善,计算结果更加可靠。

参考文献

- [1] 周群. 由“贫”到“富”的历史转变[N]. 中国冶金报, 2013-7-4(1).
- [2] 邵安林. 鞍钢矿业铁矿资源发展战略的实践与思考[J]. 中国矿业, 2012, 21: 26-31.
- [3] 王青. 采矿学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- [4] Levin Y, McGill J, Nediak M. Dynamic pricing in the presence of strategic consumers and oligopolistic competition[J]. *Management Science*, 2009, 55(1): 32-46.

- [5] Cachon G P, Lariviere M A. Supply chain coordination with revenue sharing contracts: Strengths and limitations[J]. *Management Science*, 2005, 51(1): 30-44.
- [6] Barnes S D, Basok Y, Anupindi R. Coordnation and flexibility in supply contracts with options[J]. *Manufacturing & Services Operations Management*, 2002, 3: 171-207.
- [7] Daniel O C, Benjamin M T. Evidence of long range dependence in Asian equity markets: The role of liquidity and market restrictions[J]. *Physica A*, 2007, 342: 656-664.
- [8] Arslan H, Graves S C, Roemer T A. A single-product inventory model for multiple demand classes[J]. *Management Science*, 2007, 53(9): 1486-1500.
- [9] Deshpande V, Cohen M A, Donohue K. A threshold inventory rationing policy for service-differentiated demand classes[J]. *Management Science*, 2003, 49(6): 638-703.
- [10] Debo L G, Toktay L B, Wassenhove L N V. Market segmentation and product technology selection for remanufacturable products[J]. *Management Science*, 2005, 51(8): 1193-1205.
- [11] Ferrer G, Swaminathan J M. Managing new and remanufactured products[J]. *Management Science*, 2006, 52(1): 15-26.
- [12] Banker R D, Khosla I, Sinha K K. Quality and competition[J]. *Management Science*, 1998, 44(9): 1179-1192.
- [13] Grinaud A, Rouge L. Non-renewable resources and growth with vertical innovations optimum, equilibrium and economic policies[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2003, 45(2): 433-453.

Study on the optimization and decision of grade benefits based on Five Grades Ganged theory

Shao Anlin

(Anshan Iron and Steel Group Corporation, Anshan, Liaoning 114001, China)

[Abstract] The correlation of exploration, mining, ore blending, processing and smelting sectors, which are considered to be series-coupled in mine engineering, is considered to be principal for mines. The corresponding geological grade, mining grade, milling grade, concentrate grade, charged grade all plays an important role in the general economical benefits of mines. Based on Five Grades Ganged (FGG) theory, an economic effectiveness model for mining grade benefits was established. The proposed model obeys the principle of ore conservation and metal conservation. Grade-profit activity index was proposed and analyzed via an example. The grade of optimization of a certain metal mine was obtained and the proposed model would establish a foundation for further study of the management mode in mining enterprises.

[Key words] Five Grades Ganged; grade-profit activity index; optimization and decision; mining and metallurgical engineering