

考虑矿渣处理的铁矿石关键品位优化决策模型

李 斌, 刘文胜[†]

(东北财经大学 工商管理学院, 辽宁 大连 116025)

摘 要: 在铁矿石的采选和冶炼过程中, 原矿品位、初选品位和精矿品位是与矿石处理成本和固体废物排放量密切相关的三个关键品位。通过优化关键品位指标, 可以减小包括矿渣等废物处理费用在内的整个采冶过程的总成本。通过考察采矿、预选、选矿和冶炼球团阶段铁矿品位和产量、废物排放之间的关系, 建立相应的数学模型, 并在此基础上进行边际分析, 得出各阶段品位-链接成本关系模型, 并据此提出考虑废物处理成本的品位-成本边际成本指数, 用以评价品位指标。还提出了关键品位指标的集成优化方法。所提出的建模方法在鞍钢实际生产中进行了应用验证, 和实际生产情况吻合并能对实际生产决策起到指导作用。

关键词: 矿渣处理; 品位指标; 边际成本; 优化模型

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1352

Modeling and Optimizing the Ore Grades Decision Problem Considering Environment Impact

LI Bin¹, LIU Wen-sheng^{1†}

(1. College of Industrial and Commercial Management, Dongbei University of Finance and Economics, Liaoning Dalin 110004, China)

Abstract: In mining and metallurgical engineering, the crude, feed and concentrate ore grades are three key interactive factors for both ore processing cost and solid waste emission. It can reduce the total cost involved in the mining and metallurgical engineering, including the waste processing cost, to optimize the three ore grade decisions. The paper analyzes the relationship between grade and ore output/waste emission in the mining, ore blending, beneficiation and smelting stages, respectively, and thus derives the corresponding Grade-Cost relationship model. The chained grade cost models are then built and a Grade-Cost Marginal Index (GCMI) is defined. A grade optimization method is also developed to determine the grade decisions. At last, the proposed models and method are applied to a practical numeric sample from Ansteel Mining and the analysis results are reasonable and helpful to the practical production decision.

Keywords: tailings Processing; grade index; marginal cost; optimization model

0 引 言

随着工业化进程, 铁矿石资源中的富矿越来越少, 有效地开发利用贫铁矿成为重点^[1]。贫矿资源的开发利用通常包括勘探、开采、配矿(预选)、选矿和冶炼五个阶段, 常称采冶工程。在整个采冶工程中, 涉及五种矿石品位, 分别为工业品位、原矿品位、初选品位、精矿品位和入炉品位。其中, 地质品位反映了矿床赋存条件^[2], 入炉品位需要满足冶金技术的要求^[3], 原矿品位、初选品位和精炼品位为直接关系到生产成本和废物处置成本的关键生产决策指标(如图1所示)。这三种品位指标的决策是大型钢铁企业采冶工程管理的重要组成部分。

众多学者对采冶工程中涵盖的技术及经济指标优化决策问题进行了大量研究, 尤其在矿石开采边际品位优化问题上。18世纪70年代, Adam Smith讨论过涉及不同品位矿石开采的经济问题^[3]。20 世纪60年代, 西方经济学家Vikers、Carlisle、Mortimer、Musgrove 和Krige等研究在矿产开发与应用边际成本理论来确定边际品位的经济问题^[4-8]。Hall^[9]在Krige^[5]研究的基础上, 阐释了技术和经济指标的动态优化。Lane^[10]证明, 如果以最大化净现值为目标, 边际品位应该随着生产进度而降低。最近, Hooley等^[11]和Sun 等^[12]研究从矿石开采到热轧带钢的全过程中的系统总能耗情况, 其中也涉及到

铁矿石品位的问题。邵安林^[13]研究了五品联动优化问题，其模型没有考虑矿石品位对矿渣等废物排放的影响。

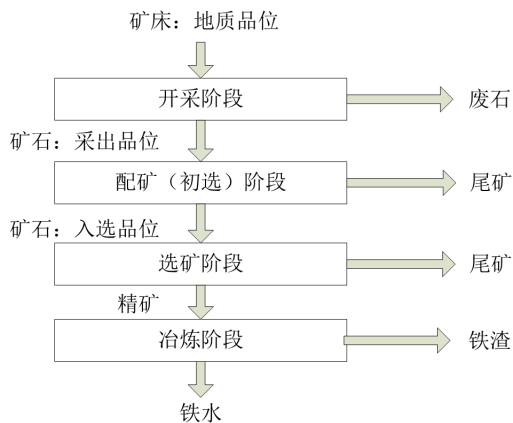


图1 矿石品位变化示意图

近年来，最新的信息技术和优化方法的应用成为研究的热点^[14-17]。He、Xu 等^[15-16]应用人工神经网络和粒子群优化等多种智能优化方法来确定边际品位和原矿品位(采出品位)。Li 和Yang^[17]结合蒙特卡洛仿真和实物期权理论来优化边际品位。Tahmasebi 和Hezarkhani^[18]通过混合智能优化算法处理品位评估问题。Chao等^[19]运用边际分析方法解决露天矿生产和管理中的品位决策问题。初道忠^[20]在边际品位的动态优化决策模型中同时考虑时间和空间因素。在选矿和冶金领域也有一些品位指标优化的研究。范光杰^[21]开发了一套自动调节软件对选矿过程中的技术指标进行在线优化。贺勇、廖诺^[22-23]考虑了资源利用和节能降耗对铁矿石采选品位的影响，提出智能优化方法。李超等^[24]进一步将神经网络技术应用其中。顾清华等人^[25]以钨钼矿为例，建立多金属多目标配矿优化数学模型，并通过自适应遗传算法求解问题。处于国情考虑，许多中国学者研究了品位铁矿开发利用的技术经济问

题^[26-27]。上述研究，除文献^[13]外，都集中研究边际品位决策或者单一矿石处理过程中的优化决策不同，与文献^[13]类似，本文综合考虑采矿、配矿、选矿和冶炼过程，同时对原矿品位、初选品位和精矿品位进行优化决策。与文献^[13]不同的是，结合当前的环保要求，本文考虑的总生产成本包括废物处理成本。

1 品位-成本关系模型和采冶工程中的边际分析

原矿品位(如图1所示)是指在开采阶段所采出矿石的平均品位，因此也称为采出品位。在一定的地质条件下，原矿品位取决于开采的截止品位(边界品位)。对于一定的采装设备条件，不同的原矿品位要求对应不同的原矿生产能力。在配矿阶段，通过干选(预选工程)可以在选矿之前稍微提高矿石品位。在配矿(预选)之后的矿石品位称为初选品位。选矿工程将矿石品位最终提高到精矿品位。精矿集中到烧结厂烧结后用于高炉炼炉，这就是冶炼工程。

原矿品位作为一个关键指标，不仅影响原矿生产能力，又影响随后的选矿成本(包括废物处理成本)。初选品位和精矿品位可以直接影响矿石的选矿成本。在一定程度上，提高精矿品位又可以减少冶炼中的原料和能源消耗。因此，品位决策问题需要着眼于整个采冶工程，以整个采用采冶过程的总成本为优化目标。

如图1所示，前一生产工序输出是下一工序的输入，前一个阶段更高的输出品位意味装该阶段更高的生产成本，但却能降低后面生产阶段的成本。品位优化决策实际上是一个权衡相邻生产阶段生产成本的问题。为准确分析各品位对采矿过程相关工序单位成本的影响，本文建立与之相应的品位-成本模型，将模型中的变量和参数定义见表1。

表1 模型变量及参数定义

模型变量	参数定义
p_1, p_2, p_3	分别表示原矿品位、初选品位、精矿品位；
t_2, t_3, t_4	分别表示一定时期开采出的原矿重量，配矿阶段后入选矿石的重量和选矿后精炼矿石的重量；
t_1	在开采阶段中需要清除的废石的重量；
f_1, f_2, f_3, f_4	分别表示采矿工程、配矿工程、选矿工程、冶炼工程中的单位成本（每单位产出量需要的成本），包括了尾矿处理成本；
k_1, k_2, k_3, k_4	分别表示采矿阶段、配矿阶段、选矿阶段和冶炼阶段的尾矿的单位废物处理成本；
δ_2, δ_3	分别表示配矿和选矿工程中的尾矿品位；
C_0^0, C_0^1, C_0^2	分别表示在一定时期内，采矿工程、配矿工程和选矿工程的固定运营成本；
c_1^0	采矿工程中穿孔、爆破、装载和运输的单位成本；
c_2^0	采矿工程中废物运输的单位成本；
c_3^0	采矿工程中铁矿石的单位运输成本；
c_1^1	配矿工程中原矿石单位处理成本，不包括尾矿处理成本；
c_1^2	选矿工程中原始矿石单位处理成本，其中不包括尾矿处理成本。

1.1 开采阶段的品位-成本关系模型

对于一个给定的设备和人员的矿区, 生产能力和成本在一定时期内可以看作是常数。在爆破、采装和运输能力一定的情况下, 不同的原矿品位就意味着不同的原矿产量。

在开采阶段, 基本的单位成本计算公式如下^[13]:

$$f_1 = [C_0^0 + c_1^0 (t_1 + t_2) + c_2^0 t_1 + k_1 t_1 + c_3^0 t_2] / t_2. \quad (1)$$

根据经验公式在地质统计学^[13], 公式(2)和(3)分别可以计算出废石和粗矿石的数量。

$$t_1 = Y_1 - A e^{-\frac{p_1}{B}}, \quad (2)$$

$$t_2 = Y_2 - A e^{-\frac{p_1}{B}}. \quad (3)$$

式中, Y_1 , Y_2 为前期勘探中得到的与采动对象体量大小相关的参数, A 为储量系数, B 为品位影响系数。

对于给定的设备和人员的条件下, 提取的矿石和清理废石总体积在一定时期内可以被视为常数, 从而有公式如下

$$T_0^0 = t_1 + t_2 = Y_1 + Y_2. \quad (4)$$

那么, 则有:

$$\begin{aligned} f_1 &= [C_0^0 + c_1^0 T_0^0 + c_2^0 t_1 + k_1 t_1 + c_3^0 t_2] / t_2 \\ &= \frac{C_0^0 + c_1^0 T_0^0}{t_2} + \frac{(c_2^0 + k_1) t_1}{t_2} + c_3^0 \\ &= \frac{C_0^0 + c_1^0 T_0^0}{Y_2 + A e^{-\frac{p_1}{B}}} + \frac{(c_2^0 + k_1) (Y_1 - A e^{-\frac{p_1}{B}})}{Y_2 + A e^{-\frac{p_1}{B}}} + c_3^0. \end{aligned} \quad (5)$$

公式(5)两边分别对开采品位 p_1 进行求导, 得到公式(6):

$$\frac{df_1}{dp_1} = \frac{A e^{-\frac{p_1}{B}} [(C_0^0 + c_1^0 T_0^0) + T_0^0 (c_2^0 + k_1)]}{B (Y_2 + A e^{-\frac{p_1}{B}})^2}. \quad (6)$$

公式(6)表示单位开采成本随开采品位变化的情况。

1.2 配矿阶段品位-成本关系模型

配矿阶段包括一个干选的工序, 因此也被称为预选工程。干选可以排除一些尾矿, 提高饲料级(如选矿工程中矿石的品位流入下面的选矿厂选矿工程)。

在配矿阶段, 基本成本计算公式为

$$f_2 = [C_0^1 + c_1^1 t_2 + k_2 (t_2 - t_3)] / t_3, \quad (7)$$

其中, $(t_2 - t_3)$ 是尾矿在配矿工序的重量, 而 $k_2(t_2 - t_3)$ 是处理这些尾矿的成本。

在配矿工程, 单位原矿石的处理成本可视为常数, 可设

$$c_2 = (C_0^1 + c_1^1 t_2) / t_2, \quad (8)$$

为配矿工程的单位原矿石处理的成本。

配矿工程输入与输出矿石的重量比, 通常采用:

$$\frac{t_3}{t_2} = \frac{p_1 - \delta_2}{p_2 - \delta_2}. \quad (9)$$

利用公式(7)、(8)、(9), 可以推导出公式(10):

$$f_2 = (p_2 - \delta_2) (c_2 + k_2) / (p_1 - \delta_2) - k_2. \quad (10)$$

对公式(10)中的 p_1 和 p_2 分别求导, 可以推导出公式(11)和(12)。

$$\frac{df_2}{dp_1} = -\frac{(p_2 - \delta_2) (c_2 + k_2)}{(p_1 - \delta_2)^2}, \quad (11)$$

$$\frac{df_2}{dp_2} = \frac{(c_2 + k_2)}{p_1 - \delta_2}. \quad (12)$$

1.3 选矿阶段中的品位-成本关系模型

选矿工程可以通过一系列的方法, 包括磨矿、磁选、浮选等把初选品位的矿石分离成精矿品位矿石(冶炼工程中的高品位矿石)和尾矿。选矿工程的单位成本计算和基本公式和预选工程阶段相似, 见公式(13)。

$$f_3 = [C_0^2 + c_1^2 t_3 + k_3 (t_3 - t_4)] / t_4. \quad (13)$$

其中, 在选矿工程中, $(t_3 - t_4)$ 表示尾矿的重量而 $k_3(t_3 - t_4)$ 是尾矿处理成本。

和混合阶段情况类似, 单位矿石处理成本通常被视为常数, 因此

$$c_3 = (C_0^2 + c_1^2 t_3) / t_3. \quad (14)$$

其中, c_3 在选矿工序的单位原矿石的成本。

选矿的收益率, 即投入产出比, 其可以通过公式(15)计算:

$$\frac{t_4}{t_3} = \frac{p_2 - \delta_3}{p_3 - \delta_3}. \quad (15)$$

根据公式(13)、(14)和(15), 可以推导出公式(16)。

$$f_3 = (p_3 - \delta_3) (c_3 + k_3) / (p_2 - \delta_3) - k_3. \quad (16)$$

通过对公式(10)中的 p_3 和 p_2 分别求导, 可以得到公式(17)和(18)。

$$\frac{df_3}{dp_3} = \frac{(c_3 + k_3)}{p_2 - \delta_3}, \quad (17)$$

$$\frac{df_3}{dp_2} = -\frac{(p_3 - \delta_3) (c_3 + k_3)}{(p_2 - \delta_3)^2}. \quad (18)$$

公式(17)和(18)分别代表了单位选矿成本随精矿品位和初选品位的变化情况。

1.4 冶炼阶段中的品位-成本关系模型

在冶炼工程中, 精矿品位是烧结成混合其他一些材料球状的铁矿石, 倒入高炉中形成铁水。此阶段的品位与成本的关系比前一阶段要复杂得多, 文章采用公式(19)来计算, 这源于假设高炉产能相对恒定和基于一系列的实际生产数据的回归分析。

$$\frac{df_4}{dp_3} = -\frac{c_4 + bk_4}{(p_3 - \delta_4)^2}. \quad (19)$$

其中, c_4 表示精炼加工在冶炼工程中单位成本, $b \in (1, 1.5)$ 是在冶炼阶段的浪费系数, 而 δ_4 是铁元素的耗散系数而不是铁尾矿品位。

2 基于边际成本的品位优化及品位-成本边际指数

2.1 优化原矿品位

矿业的开采品位是输出阶段以及材料的混合阶段的材料品位, 因此这两个阶段应该同时考虑。本文同时考虑了等式(20), 包括前述公式(6)和(11), 如下所示:

$$\begin{cases} \frac{df_1}{dp_1} = \frac{Ae^{-\frac{p_1}{B}} [[C_0^0 + c_1^0 T_0^0] + T_0^0 [c_2^0 + k_1]]}{B (Y_2 + Ae^{-\frac{p_1}{B}})^2}, \\ \frac{df_2}{dp_1} = -\frac{(p_2 - \delta_2)(c_2 + k_2)}{(p_1 - \delta_2)^2}. \end{cases} \quad (20)$$

同时在等式(20)中, $\frac{df_1}{dp_1}$ 和 $\frac{df_2}{dp_1}$ 分别可以看作是原矿品位 p_1 对采矿和混合阶段的边际效应。与经济学的边际分析相似, 优化原矿品位的目的是减少采矿和混合成本的总和, 其需要满足的条件如下所示:

$$\frac{df_1}{dp_2} + \frac{\lambda_2 df_2}{dp_2} = 0, \lambda_2 = \frac{p_1 - \delta_2}{p_2 - \delta_2}. \quad (21)$$

其中, λ_2 表示铁矿石开采阶段与配矿阶段的输出比率。

方程(22)可以由公式(20)和(21) 推导得出, 而方程的实数根是最优解 p_1 。

$$\frac{Ae^{-\frac{p_1}{B}} [[C_0^0 + c_1^0 T_0^0] + T_0^0 [c_2^0 + k_1]]}{B (Y_2 + Ae^{-\frac{p_1}{B}})^2} - \frac{c_2 + k_2}{p_1 - \delta_2} = 0. \quad (22)$$

值得注意的是, 实际的开采品位由于地质条件限制和矿产资源的利用率的需求比计算出的最优值低很多。

2.2 初选品位优化

与上节原矿品位边际分析类似, 联立公

式(13)和(18)可得等式组(23),

$$\begin{cases} \frac{df_2}{dp_2} = \frac{(c_2 + k_2)}{p_1 - \delta_2}; \\ \frac{df_3}{dp_2} = -\frac{(p_3 - \delta_3)(c_3 + k_3)}{(p_2 - \delta_3)^2}. \end{cases} \quad (23)$$

类似于原矿品位, 最佳的初选品位应该满足以下条件:

$$\frac{df_2}{dp_2} + \frac{\lambda_3 df_3}{dp_2} = 0, \lambda_3 = \frac{p_2 - \delta_3}{p_3 - \delta_3}. \quad (24)$$

其中, λ_3 表示铁矿石的配矿阶段与选矿阶段输出比例, 即有

$$\frac{df_2}{dp_3} + \frac{(p_2 - \delta_3) df_3}{(p_3 - \delta_3) dp_3} = \frac{c_2 + k_2}{p_1 - \delta_2} - \frac{c_3 + k_3}{p_2 - \delta_3} = 0. \quad (25)$$

可以通过公式(26)来得到最佳的初选品位。

$$p_2 = \frac{(c_3 + k_3)(p_1 - \delta_2)}{c_2 + k_2} + \delta_3. \quad (26)$$

2.3 优化开采品位

与之前边际效应分析相似, 联立等式(27)于公式(16)和(18)制定得到的。

$$\begin{cases} \frac{df_3}{dp_3} = \frac{(c_3 + k_3)}{p_2 - \delta_3}; \\ \frac{df_4}{dp_3} = -\frac{c_4 + bk_4}{(p_3 - \delta_4)^2}. \end{cases} \quad (27)$$

由公式(28)得出精矿品位的最佳条件如下所示:

$$\frac{df_3 + \lambda_4 df_4}{dp_3} = \frac{c_3 + k_3}{p_2 - \delta_3} - \frac{c_4 + bk_4}{p_3 - \delta_4} = 0. \quad (28)$$

其中, λ_4 表示铁水与输入铁精输入矿石重量比, 可以粗略地表示为 $\lambda_4 = p_3 - \delta_4$ 。

通过公式(29)得到最优的精矿品位, 如下所示:

$$p_3 = \frac{(c_4 + bk_4)(p_2 - \delta_3)}{c_3 + k_3} + \delta_4. \quad (29)$$

2.4 品位-成本边际指数

为了明确评估三种矿石品位的最优决策, 引入三种品位-成本边际指数(GCMI)来评价相关的成本增加导致成绩偏差。列出了计算公式如下:

$$P_i^{GCMI} = \frac{df_i + \lambda_{i+1} df_{i+1}}{(f_i + \lambda_{i+1} f_{i+1}) dp_i}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (30)$$

对于三种矿石品级, $P_i^{GCMI} = 0$ 表示相应的矿石品位 p_i 得到最优, 而 $P_i^{GCMI} > 0$ 或者 $P_i^{GCMI} < 0$ 分别表明此品位高于或低于最优解, 其绝对值表明对应的矿石品位和最优解之间的差异。

其中, $i = 1, 2, 3$, P_1^{GCMI} , P_2^{GCMI} 和 P_3^{GCMI} 分别表示着原矿品位, 初选品位和精矿品位的品位-成本边际指数, 分别可以从上面的公式推导出计算公式(31), (32)和(33)。

$$P_1^{GCM I} = \frac{\frac{Ae^{-\frac{p_1}{B}} \left[[C_0^0 + c_1^0 T_0^0] + T_0^0 [c_2^0 + k_1] \right]}{B \left(Y_2 + Ae^{-\frac{p_1}{B}} \right)^2} - \frac{c_2 + k_2}{p_1 - \delta_2}}{\frac{(c_2^0 + k_1) \left(Y_1 - Ae^{-\frac{p_1}{B}} \right) + C_0^0 + c_1^0 T_0^0}{Y_2 + Ae^{-\frac{p_1}{B}}} + \frac{k_2(p_2 - p_1)}{p_2 - \delta_2} + c_3^0 + c_2}, \quad (31)$$

$$P_2^{GCM I} = \frac{\frac{c_2 + k_2}{p_1 - \delta_2} - \frac{c_3 + k_3}{p_2 - \delta_3}}{\frac{k_2(p_2 - p_1) + c_2(p_2 - \delta_2)}{p_1 - \delta_2} + \frac{k_3(p_3 - p_2)}{p_3 - \delta_3} + c_3}, \quad (32)$$

$$P_3^{GCM I} = \frac{\frac{c_3 + k_3}{p_2 - \delta_3} - \frac{c_4 + bk_4}{p_3 - \delta_4}}{\frac{(p_3 - \delta_3)(c_3 + k_3)}{p_2 - \delta_3} + bk_4(1 - p_3) + c_3}. \quad (33)$$

3 品位的优化方法及其应用实例

3.1 品位的优化方法

根据上面的公式, 本文提出了一个在实际的采矿和冶金工程方法来优化三个矿石品位。详细的步骤如下所示:

第一步, 根据现场操作记录和实验数据确定出实际操作参数。

第二步, 在实际的技术的限制条件下, 通过等式(22)、(26)和(29)逐一计算和优化采矿、进料和精矿品位。

第三步, 在通过公式(31)、(32)和(33)确定矿石品位的基础上, 计算三种品位-成本的边际指数。

值得注意的是, 理论上计算出的最佳矿石品位可能高于实践中的技术极限。此外, 如果改变工艺流程或大幅调整工艺参数以达到理论上的最佳品位, 相关公式中的参数可能会发生显著变化, 成本最优级需要反复计算。

由于实际上可接受的矿石品位可能偏离计算出的最佳品位, 因此计算当前品位的品位-成本边际指标是很有意义的, 该指标可以量化当前品位与最优品位之间的偏差, 从而为工艺流程改进和工艺参数调整提供量化参考。

3.2 品位优化应用实例

前文提出的公式和方法已经作为一个品位优化决策应用到鞍钢矿业实际生产中。其中部分参数如下:

在预选工程阶段, 尾矿品位是 $\delta_2 = 11\%$, 尾矿处理成本 $k_2 = 7.9$ (元/t), 加工成本约为24.00(元/t) ($c_2 = 24$); 在选矿阶段, $\delta_3 = 10\%$, $c_3 = 73.4$ (元/t), 尾矿处理成本 $k_3 = 14.9$ (元/t)。部分其他参数处于保密原因没有列出, 所有参数都是在实际操作数据通过回归分析得到的。值得注意的是上面得到的加工成本和尾矿品位只有当工艺参数(包括给定的矿石品位)在小范围内波动可以当作现有的生产情况数据和参数设定。

在实际生产情况中, 原矿品位 ($p_1 = 21\%$) 因为

决定了矿山的开采服务年限, 需要根据矿产资源法律法规要求保持固定。理论上直接从公式 (3.6) 得到的初选品位为39.6%, 但文章考虑可能的技术限制采用了34%, 因为初选品位的提高总是伴随着初选阶段较高的尾矿品位。计算理论精矿品位是67.6%, 而实际中采用了66.5%。

为了验证考虑尾矿处理成本的必要性, 在不考虑尾矿处理成本 (令 $k_2 = k_3 = 0$) 的情况下, 重新计算初选品位为41.7%, 大于考虑尾矿处理成本情况下的结果。事实上, 后者更接近于实际采用的初选品位34%。这一对比, 说明考虑尾矿处理成本是必要的, 能够计算出更符合实际的结果。

4 结论

对于采矿和冶金工程的矿石品位决策问题, 本文通过分析每个链接品位成本的影响 (包括废物处理成本以及直接工序成本) 建立了一系列的品位-成本关系模型。建立了品位链接成本模型, 提出了三个品位-成本边际成本指数 (GCMIs)。基于上述模型, 提出了品位优化方法来确定采矿和冶金工程中涉及的矿石品位。最后, 将该模型和方法应用于鞍钢矿业的一个数值样本, 求得的结果合理, 符合企业的实际生产情况。

参考文献(References)

- [1] Kotta A B, Karak S K, Kumar M. Effect of mineralogy on reduction behaviour of iron ore pellets[C]//Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2020, 978: 525-531.
- [2] 姜航, 姜圣才, 曲俊利, 陈敏, 苗琦, 王天元. 铁矿资源有偿使用税费现状及对行业的影响[J]. 金属矿山, 2019 (6): 14-19.
(Jiang H, Jiang S C, Qu J L, Chen M, Wang T Y. Current situation of paid use taxation system of iron ore resources and its impact on metallurgical industry[J]. Metal Mine, 2019 (6): 14-19)
- [3] Smith A. The Wealth of Nations: An inquiry into the nature and causes of the Wealth of Nations[M]. Harriman House Limited, 2010.
- [4] Vickers E L. Marginal analysis-its application in determining cutoff grade[J]. Mining Eng, 1961, 13(6):

- p578-582.
- [5] Krige D G. Effective pay limits for selective mining[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1962, 62(6): 345-363.
 - [6] Carlisle D. Economic aspects of the definition of ore[J]. Trans Inst Min Metall, 1954, 64: p89-99.
 - [7] Musgrove P A . Lead: Grade-tonnage relation[J]. Mining Magazine, 1965, 112(4):249-251.
 - [8] Taylor H K . General Background Theory of Cutoff Grade[J].Transaction, Institution of Mining And Metallurgy,1972,81: 160-179.
 - [9] Halls J L, Bellum D P, Lewis C K. Determination of optimum ore reserves and plant size by incremental financial analysis[J]. Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy, 1969, 78: A20-A26.
 - [10] Veerkamp C H . Commercial aspects of mechanical processing and downgrading of carcasses[J]. Zootechnica international, 1982.
 - [11] Hooy L, Riesbeck J, Wikström J O, et al. Role of ferrous raw materials in the energy efficiency of integrated steelmaking[J]. ISIJ international, 2014, 54(3): 596-604.
 - [12] Sun W, Wang Q, Zhou Y, et al. Material and energy flows of the iron and steel industry: Status quo, challenges and perspectives[J]. Applied Energy, 2020, 268: 114946.
 - [13] 邵安林. 五品联动模式下品位决策问题建模与优化[J]. 中国管理科学, 2013, 21(6): 139-144.
(Sao A L. Modelling and optimization of grades decision problem under “Five Grades Ganged” mode[J]. Chinese Journal of Mangement Science, 2013, 21(6): 139-144.)
 - [14] Fettweis H . About science and technology in the field of mining in the Western world at the beginning of the new century[J]. Resources Policy, 2001, 27:157-168.
 - [15] He Y, Xu S, Zhu K, et al. A genetic-neural method of optimizing cut-off grade and grade of crude ore[C]International Symposium on Neural Networks. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008: 588-597.
 - [16] Xu S, He Y, Zhu K, et al. A PSO-ANN integrated model of optimizing cut-off grade and grade of crude ore[C]2008 Fourth International Conference on Natural Computation. IEEE, 2008, 7: 275-279.
 - [17] Shou-guo L, Chang Y. Computer-assisted Monte Carlo simulation of optimum cut-off grade in surface mining metal ore deposits[C]2012 IEEE International Conference on Information and Automation. IEEE, 2012: 966-970.
 - [18] Tahmasebi P, Hezarkhani A. A hybrid neural networks-fuzzy logic-genetic algorithm for grade estimation[J]. Computers & geosciences, 2012, 42: 18-27.
 - [19] Chao C, Zhang Y, Gan D, et al. Study on iron mining grade optimization method of open-pit mine based on marginal cost analysis[C]2012 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet). IEEE, 2012: 3534-3537.
 - [20] 初道忠. 地下开采边界品位动态优化研究及其应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
(Chu D Z. Study and its application on dynamic optimum of cutoff grade in underground mine[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.)
 - [21] 范光杰. 选矿生产过程运行指标优化组态软件的研发[D].沈阳: 东北大学, 2012.
(Fan G J. Reasearch and development of configuration software for the optimization of mineral processing operation indices[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.)
 - [22] 贺勇, 廖诺. 资源利用与能耗约束下铁矿采选品位的智能优化[J]. 运筹与管理, 2016, 25(5): 88-94.
(He Y, Liao N. Intelligent optimization of mining & milling grades in iron mine under the constraints of resource utilization and energy consumption[J]. Openrations Research and Management Science, 2016, 25(5): 88-94.)
 - [23] 廖诺, 贺勇. 基于 PSO-GA-ANN 的铁矿采选品位与投资策略优化[J]. 系统管理学报, 2018, 27(3): 493-399.
(Liao N, He Y. Optimization of iron ore grade selection and investment strategies in iron mines based on PSO-GA-ANN[J]. Journal of System & Mangement, 2018, 27(3): 493-399.)
 - [24] 李超, 尚衍波, 朱阳戈, 罗科华, 阳光. 神经网络技术在选矿行业的应用研究[J]. 现代矿业, 2019, 8: 123-125.
(Li C, Shang Y B, Zhu Y G, Luo K H, Yang G. Application of neural network technology in mineral processing industry[J]. Modern Mining, 2019, 8: 123-125.)
 - [25] 顾清华, 刘海龙, 卢才武, 李学现, 杨亚鹏. 基于采选流程下的露天矿多金属多目标配矿优化模型[J]. 金属矿山, 2020, 3: 56-63.
(Gu Q H, Liu H L, Lu C W, Li X X, Yang Y P. Multi-metal multi-objective ore optimization model for open-pit mine Based on mining and beneficiation process[J]. Metal Mine, 2020, 3: 56-63.)
 - [26] 刘长正, 曹志成, 彭程, 崔慧君. 低品位难选铁矿转底炉直接还原中试研究[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(4): 58-63.
(Liu C Z, Cao Z C, Peng C, Cui H J. Pilot study on direct reduction of low grade refractory iron ore by rotary hearth furnace[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(4): 58-63.)
 - [27] 汪加军. 某低品位镜铁矿选矿生产指标考察与分析研究[J]. 中国金属通报, 2020, (08):233-234.
(Wang J J. Study and analysis on production index of a low grade specularite ore[J]. China Metal Bulletin, 2020, (08):233-234.)

作者简介

李斌(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 从事管理科学研究, E-mail: 48226792@qq.com;

刘文胜(1976—), 男, 高级工程师, 硕士研究生, 从事金矿山开采、矿山工程管理的研, E-mail: 261170825@qq.com.