

黄金矿山低品位资源技术经济评价与应用

陈玉民^{1,2)} 胡乃联¹⁾ 郑小礼²⁾ 潘贵豪¹⁾

1) 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083 2) 山东黄金矿业股份有限公司, 济南 250014

摘 要 基于盈亏平衡理论,建立了焦家金矿低品位资源的技术经济评价模型. 根据待投入成本的不同,对处在不同工程控制之下的低品位资源进行了评价和分级;计算了级差品位,研究其是否具有回收价值. 结合 Surpac 软件建立的三维矿床模型对焦家金矿的低品位矿化体进行了估算和评价. 在黄金价格 180 元·g⁻¹ 情况下,级差品位的应用可使矿山增加 2.73 t 金属量,并可产生 7 500 万元的新增利润.

关键词 低品位资源; 级差品位; 盈亏平衡理论; 矿床模型

分类号 TD863

Technical-economic evaluation of low-grade resources and its application for gold mines

CHEN Yu-min^{1,2)}, H U Nai-lian¹⁾, ZHENG Xiao-li²⁾, PAN Gui-hao¹⁾

1) School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
2) Shandong Gold Mining Co. Ltd., Jinan 250014, China

ABSTRACT A technical and economic evaluation model for low-grade resources in Jiaojia Gold Mine was built up based on the break-even theory. In different production stages, the corresponding follow-up cost was calculated, based on which the low grade resources were evaluated and classified. Differential grades were calculated to determine whether it is worthy to recovery them. The three-dimensional deposit model in combination with Supac software was adopted to estimate and evaluate low-grade mineralized deposits in Jiaojia Gold Mine. Given the gold price of RMB ' 180 g⁻¹, the application of differential grade can bring the mine additional 2.73 t gold metals, as well as RMB ' 7 500 million profits.

KEY WORDS low-grade resource; differential grade; break-even theory; deposit model

随着经济的不断发展,人类社会对矿产品的需求量与日俱增,而不可再生的矿产资源越来越少,矿产资源的紧缺程度将不断加剧. 在此背景之下,低品位矿产资源的开发利用问题就成了矿业领域研究的热点^[1-3]. 通常,低于矿山现行工业指标而圈定的矿化体一般被称为低品位矿体,根据我国《固体矿产资源/储量的分类》中所颁布的标准,其资源量分类一般划为 333,即推断的内蕴经济资源量. 对于生产矿山,低品位矿体是重要的潜在资源和财富. 矿床工业指标的确定取决于该矿床的客观地质条件和开采的技术经济条件. 矿床的地质特征是固有的、无法改变的,但是矿体地质特征有可能随着工业指

标的变化而发生改变,如矿体规模、产状和连续性等. 开采技术条件主要取决于生产能力、回采工艺以及矿石选冶技术水平;经济条件主要取决于产品价格和生产成本,它们之间又是相互关联、相辅相成的. 例如,产品价格的提高和生产成本的降低可以促使工业指标降低;工业指标降低可以促使矿体规模增大、连续性变好,从而使采矿方法优化或改变,提高采矿能力;生产规模的扩大、工艺水平的提高将直接大幅度降低生产成本,从而实现矿山生产经营的良性循环^[4-5]. 因此,进行低品位矿产资源的动态评估及开发利用研究,对增加矿山可利用的资源储量、延长矿山服务年限以及提高经济效益具有十

分重要的意义。

焦家金矿是山东黄金矿业股份有限公司的骨干矿山,是驰名中外的“焦家式”金矿床的典型代表。截至 2007 年底,焦家金矿保有地质储量为矿石量 862 万 t,地质品位 $4.51\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$,金属量 38.90 t,按目前的生产规模,焦家金矿的服务年限不到 7 a。随着企业的不断壮大,生产规模还在不断增加,资源问题已成为实现矿山跨越式发展的最大瓶颈。

随着开采深度的增加,焦家主矿区 I 号主矿体地质品位呈现较大幅度的负变,矿体形态分支复合现象严重,−190, −230, −270 m 三个正在全面回采的主采中段的 I 号主矿体内部和下盘赋存规模较大的、地质品位相对较低的矿化体资源,到目前为止,矿山对此区域 $1.5\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$ 以下的低品位矿化体没有进行过回收。另外, I 号主矿体内部及下盘已经部分形成开拓、采准及回采工程,一些部位已经具备与主矿体同时回采的便利条件,低品位资源的直接生产成本相对较低。因此,对焦家金矿来说,在探矿增储的同时,如何评价和利用这些低品位矿产资源,是一个迫切需要解决的问题。

1 低品位资源技术经济评价模型

1.1 矿山盈亏平衡分析

在市场经济条件下,矿山企业生产经营的主要目的就是在为人类社会提供矿产品的同时获得利润。具体到黄金矿山,根据盈亏平衡原理得:

$$AP \geq C \tag{1}$$

式中, A 是黄金产量, g; P 是黄金销售价格, 元 $\cdot\text{g}^{-1}$; C 是黄金生产成本, 元。

又有
 $A = Q_c G_c \varepsilon_t \varepsilon_q \varepsilon_y = Q_c G_k (1 - \rho) \varepsilon_t \varepsilon_q \varepsilon_y$, $C = Q_c C_k$ 。
式中, Q_c 是处理矿石量(等于采出矿石量), t; G_c 是处理矿石品位(等于采出矿石品位), $\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$; G_k 是地质品位, $\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$; ε_t 是浮选回收率, %; ε_q 是氰化回收率, %; ε_y 是冶炼回收率, %; ρ 是矿石贫化率, %;

C_k 是矿石综合成本,即每吨矿石负担的黄金成本, 元 $\cdot\text{t}^{-1}$ 。

代入式(1)并整理得:

$$G_k (1 - \rho) \varepsilon_t \varepsilon_q \varepsilon_y P \geq C_k \tag{2}$$

在矿山生产规模、技术指标和黄金价格一定的情况下,即可根据矿石综合成本,利用式(2)计算出可利用低品位矿的盈亏平衡品位 $G_k^{[6-7]}$ 。

1.2 级差成本计算模型

在影响低品位矿盈亏平衡品位 G_k 的因素中,黄金价格不受企业控制,除了采选技术经济指标外,最主要的影响因素是矿石综合成本。焦家金矿的低品位资源大部分赋存于 I 号主矿体的内部和下盘,这些部位已经部分形成开拓、采准及回采工程,低品位资源的回收成本相对较低。因此,必须根据工程的控制程度,分阶段计算低品位矿石的生产成本。

对于典型的地下开采黄金矿山,生产过程可以划分为开拓(包括生产勘探)、采准切割、矿石回采和矿石加工四个主要生产阶段,分别处在开拓探矿、采准切割或回采阶段的低品位矿石所对应的待投入成本是不同的,这就形成了所谓的级差成本。

开拓成本:在现有工程条件下,通过开拓、探矿形成开拓矿量所需投入的成本称为开拓成本,用 m_1 表示。

采切成本:通过采准切割工程,把开拓矿量升级成备采矿量所需投入的成本称为采切成本,用 m_2 表示。

回采成本:把矿石从采场采出所需投入的成本称为回采成本,用 m_3 表示。

加上运输提升成本 m_4 、充填成本 m_5 、选冶成本 m_6 和修理费、资源税、资源补偿费、维简费等其他费用 m_7 ,即可计算出由处于不同阶段的矿石生产出最终产品所需的费用。分别用 C_1 、 C_2 和 C_3 表示由开拓、采切和回采不同阶段的矿石生产出最终产品所需的费用,其构成如表 1 所示。

表 1 级差成本构成
Table 1 Intergrant of differential cost

阶段	开拓成本, m_1	采切成本, m_2	回采成本, m_3	运输成本, m_4	充填成本, m_5	选冶成本, m_6	其他费用, m_7
开拓, C_1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
采准, C_2	—	✓	✓	✓	✓	✓	✓
回采, C_3	—	—	✓	✓	✓	✓	✓

注:“✓”表示处于此工程阶段时,相应的 m_i 计入此阶段的级差成本;“—”表示处于此工程阶段时,相应的 m_i 不计入此阶段的级差成本。

$$C_k = \sum_{i=1}^7 m_i, k = 1, 2, 3 \tag{3}$$

代入式(2), 即得:

$$G_k(1-\rho)\varepsilon_f\varepsilon_q\varepsilon_yP \geq \sum_{i=1}^7 m_i, k = 1, 2, 3 \tag{4}$$

在矿石贫化率 ρ 、浮选回收率 ε_f 、氰化回收率 ε_q 、冶炼回收率 ε_y 、黄金价格 P 和各工序成本费用 m_i 已知的情况下, 令 k 分别等于 1, 2, 3, 即可计算出最低开拓品位 G_1 、最低采准品位 G_2 和最低回采品位 G_3 , 形成不同工程控制下的级差品位^[8-11].

2 焦家金矿级差品位的计算

级差品位指标的计算, 需要收集矿山近几年的生产数据和财务成本数据, 进行生产技术指标的统计分析和财务成本数据分析分解. 本次计算对焦家金矿 2003—2007 年的生产统计数据和财务成本数据进行了分析, 得出了计算所需的级差成本指标和生产技术指标.

2.1 财务成本数据的分解

通过对近 5 年的财务成本数据的挖掘分析, 焦家金矿的级差成本构成如表 2 所示.

表 2 焦家金矿各级矿量分摊的级差成本

Table 2 Shared differential cost according to production stages in Jiaojia Gold Mine

级差成本	元·t ⁻¹							合计
	m ₁	m ₂	m ₃	m ₄	m ₅	m ₆	m ₇	
C ₁	22.5	16.7	47.4	10.6	11.8	35.8	33.3	178.1
C ₂	—	16.7	47.4	10.6	11.8	35.8	33.3	155.6
C ₃	—	—	47.4	10.6	11.8	35.8	33.3	138.9

2.2 生产指标的统计分析

2.2.1 损失贫化指标分析

焦家金矿一直采用胶结充填采矿法, 损失率和贫化率一般控制在 5%~6%, 低品位矿石资源一般处于矿体的边角部位, 回采难度相对大一些, 故损失率 ε_c 和贫化率 ρ 均按 6% 计算.

2.2.2 浮选回收率 ε_f 的确定

浮选回收率与入选品位有着密切的关系. 一般而言, 在选厂各项工艺技术指标一定的情况下, 入选品位越高, 浮选回收率就越高, 二者存在一定的相关性. 因此可以通过相关性分析来建立它们之间的关系模型. 考查焦家金矿入选品位与浮选回收率的实际数据, 通过相关性分析并参考类似矿山的实际经验, 浮选回收率 ε_f 与入选品位 g 之间存在一元非线性数学关系^[3], 即:

$$\varepsilon_f = ae^{\frac{b}{G_c}}$$

式中, a 和 b 是待定回归系数.

选取焦家金矿 2003 年 1 月到 2007 年 12 月的生产统计数据进行分析, 得出:

$$a = 0.9825, b = -0.177.$$

即:

$$\varepsilon_f = 0.9825e^{\frac{-0.177}{G_c}}$$

$R^2 = 0.6249$, 表明二者相关性较好, 模型可信, 可被用于反映入选品位与选矿回收率之间的关系.

$F = 73.3 > F_{5\%}(1, 44) = 4.06$, 回归显著, 所建模型符合焦家金矿的生产实际, 具有使用价值.

因 $G_c = G_k(1-\rho)$, 故浮选回收率 ε_f 与地质品位 G_k 之间的关系为:

$$\varepsilon_f = 0.9825e^{\frac{-0.177}{G_k(1-\rho)}} \tag{5}$$

2.2.3 氰化回收率 ε_q 的确定

根据 2003 年 1 月至 2007 年 12 月氰化回收率的时间序列分析, 氰化回收率最大值为 98.60%, 最小值为 97.29%. 通过数理统计有: 中位数为 98.165%, 众数为 98.03%, 平均值为 98.141%, 平均值的 95% 的置信度为 0.08, 所以平均值的 95% 的置信区间为 [98.07 98.22], 因此可以取其均值 98.14% 作为后期计算的依据, 即 $\varepsilon_q = 98.14\%$.

2.2.4 冶炼回收率 ε_y 的确定

金精矿经过氰化进入冶炼, 从历年数据来看, 冶炼回收率 ε_y 为定值 99.90%, 因此在后续计算过程中可把冶炼回收率 ε_y 的值定为 99.90%.

2.3 级差品位指标的计算

将式(5)代入式(4)并整理, 得:

$$0.9825G_k(1-\rho)\varepsilon_q\varepsilon_yPe^{\frac{-0.177}{G_k(1-\rho)}} \geq \sum_{i=1}^7 C_i, k = 1, 2, 3 \tag{6}$$

利用式(6), 即可计算出在不同黄金价格下, 处于不同工程控制之下的低品位矿石的最低工业品位(级差品位)见表 3, 级差品位随黄金价格变动的趋势见图 1.

表 3 不同黄金价格情况的级差品位

Table 3 Differential grade for various gold prices

黄金价格/ (元·g ⁻¹)	级差品位/(g·t ⁻¹)		
	G ₁	G ₂	G ₃
100	2.17	1.92	1.73
120	1.84	1.63	1.47
140	1.60	1.42	1.29
160	1.42	1.26	1.15
180	1.28	1.14	1.04
200	1.17	1.04	0.95
220	1.08	0.96	0.88

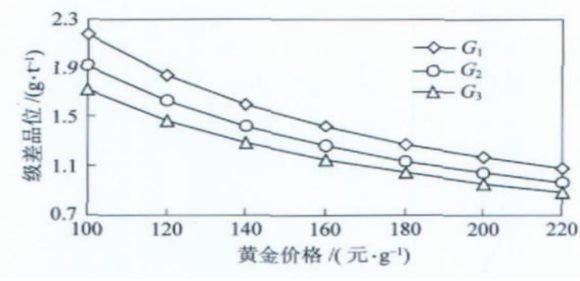


图 1 级差品位随黄金价格变动趋势图

Fig 1 Trend of differential grade with gold price

如果黄金价格按 $180\text{元}\cdot\text{g}^{-1}$ 考虑, 分别处在开拓、采准和回采阶段低品位矿石的最低工业品位分别为 1.28 , 1.14 和 $1.04\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$.

表 4 焦家金矿低品位资源估算结果

Table 4 Estimated results of low-grade resources in Jiaojia Gold Mine

中段号	采准阶段			回采阶段			合计		
	矿量/ 万 t	品位/ ($\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$)	金属量/ kg	矿量/ 万 t	品位/ ($\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$)	金属量/ kg	总矿量/ 万 t	品位/ ($\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$)	金属量/ kg
- 190m	74.46	1.30	967.98	5.00	1.02	51.00	79.46	1.28	1018.98
- 230m	48.42	1.20	580.38	21.93	1.03	225.90	70.35	1.15	806.28
- 270m	40.96	1.18	483.08	37.91	1.11	420.14	78.87	1.15	903.22
合计	163.84	1.24	2031.44	64.84	1.08	697.04	228.68	1.19	2728.48

品位矿在- 270m 水平的分布情况见图 2.

新增低品位资源按黄金售价 $180\text{元}\cdot\text{g}^{-1}$ 计算, 将产生潜在工业价值 42 000 万元, 利润 7 500 万元, 其经济效益和社会效益显著.

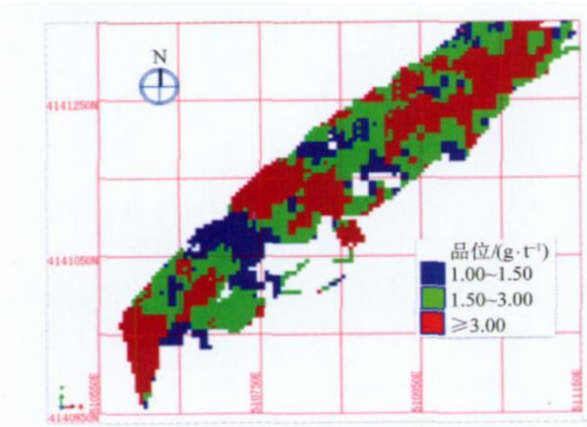


图 2 - 270m 中段低品位矿石分布情况

Fig.2 Position of low-grade resources in the - 270m level

4 结论

(1) 基于盈亏平衡理论, 根据待投入成本的不同, 对处在不同工程控制之下的低品位资源分别进行动态评价和分级、计算级差品位, 研究其是否具有

3 模型的实际应用

根据模型计算结果及焦家矿区现有工程的布置情况, 利用 Surpac 矿业软件对焦家矿区 I 号主矿体, 标高范围- 270~ - 150 m 内的低品位矿化体进行估算的结果为: 矿石量 228.68 万 t, 平均品位为 $1.19\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$. 根据工程控制程度, 其中有 64.84 万 t 矿石处在回采阶段, 平均品位为 $1.08\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$, 略高于回采控制品位; 163.84 万 t 低品位矿石需要做一些采准切割工程, 处在采准阶段, 平均品位为 $1.24\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$, 高于采准控制品位. 因焦家金矿- 270 m 以上为主要回采阶段, 所有的开拓探矿工程已基本形成, 故没有处在开拓阶段的低品位资源, 见表 4. 低

回收价值, 这样可明显提高矿产资源的利用率, 增加矿山的经济效益, 延长矿山服务年限.

(2) 焦家金矿的实际应用证明, 只要对- 190, - 230, - 270 m 三个中段的低品位资源进行回收, 即可产生工业价值 42 000 万元, 利润 7 500 万元, 其经济效益和社会效益十分显著.

(3) 基于盈亏平衡理论的级差品位计算模型简单实用、可操作性强, 具有很好的应用前景.

(4) 利用级差品位指标计算, 并合理进行矿块搭配, 指导矿山进行矿石质量管理, 保证出矿品位均衡, 是保证低品位矿资源充分利用的条件, 也是本文后期需要进一步研究的内容.

参 考 文 献

[1] Li K Q, Jia S K, Liu B S, et al. Optimization of series technology indexes in nonferrous metal mines. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2007, 29(12): 204
(李克庆, 贾水库, 刘保顺, 等. 有色金属矿山系列生产技术指标的优化. 北京科技大学学报, 2007, 29(12): 204)

[2] Xie Y L. Economic efficiency analysis of utilizing low grade ores. *Chin J Nonferrous Met*, 1997, 7(4): 189
(谢英亮. 低品位矿石利用的经济分析. 中国有色金属学报, 1997, 7(4): 189)

(下转第 556 页)

- tion of ammonia nitrogen by modified natural zeolite. *J South China Univ Technol*, 2007, 35(4): 6
(李忠, 符瞰, 夏启斌. 改性天然沸石的制备及对氨氮的吸附. 华南理工大学学报, 2007, 35(4): 6)
- [10] Kirik S D, Dubkov A A, Dubkova S A, et al. X-ray powder diffraction and t. p. d. study of SO_2 adsorption on type Y zeolite. *Zeolites*, 1992, (12): 292
- [11] Ren G, Cui F Y. Study of modified zeolite to remove ammonia nitrogen in water. *Tech Equip Environ Pollut Control*, 2006, 7(3): 75
(任刚, 崔福义. 改性天然沸石去除水中氨氮的研究. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(3): 75)
- [12] Wang L J, Lin C M. Research progress of nitrogen and phosphorus removal from water by modified zeolite. *J Anhui Agric Sci*, 2007, 35(20): 6207
(王黎瑾, 林春绵. 改性沸石净化水中氮磷的研究进展. 安徽农业科学, 2007, 35(20): 6207)
- [13] Ding W M, Huang X, Zhang L P. Removal of phosphorus from aqueous solution by lanthanum hydrate. *Environ Sci*, 2003, 24(5): 110
(丁文明, 黄霞, 张力平. 水合氧化镧吸附除磷的实验研究. 环境科学, 2003, 24(5): 110)
- (上接第 536 页)
- [3] Chang W S, Sun L M, Hao Q M. Application of the delimitation method of dynamic economic mining boundary to the mining of low grade ore body of Fankou lead-zinc mine. *Gold*, 2003, 24(5): 19
(畅文生, 孙立明, 郝全明. 动态经济开采边界圈定方法在凡口铅锌矿低品位矿体开采中的应用. 黄金, 2003, 24(5): 19)
- [4] Xu T. Optimum intensification of reserves development. *Nat Resour Econ China*, 2004, 7(12): 4
(徐焱. 矿量开发最佳集约化程度优选研究. 中国国土资源经济, 2004, 7(12): 4)
- [5] Osanloo M, Ataie M. Using equivalent grade factors to find the optimum cut-off grades. *Miner Eng*, 2003, 16(2): 771
- [6] Jiang S H, Li D B. Decision for mining and dressing of low-grade ores by breakeven grades. *Jiangxi Nonferrous Met*, 2006, 20(1): 22
(江四海, 李德斌. 运用盈亏平衡品位进行低品位矿采选决策. 江西有色金属, 2006, 20(1): 22)
- [7] Xiang P C, Xie Y L. Determining critical grade of low grade ore utilization by break even analysis. *Met Mine Des Constr*, 2001, 23(6): 24
(向鹏程, 谢英亮. 应用盈亏平衡分析法确定低品位矿利用的临界品位. 冶金矿山设计与建设, 2001, 23(6): 24)
- [8] Chen S R. Calculating the class-difference grade of Hetai gold mine by reverse deduction method. *South Iron Steel*, 2000, 114(6): 18
(陈少荣. 用倒推方法计算河台金矿级差品位. 南方钢铁, 2000, 114(6): 18)
- [9] Zhou L S. The Account and application of the gradation quality in gold ore. *Gold Sci Technol*, 1998, 6(4): 45
(周龙寿. 黄金矿山级差品位的计算与应用. 黄金科学技术, 1998, 6(4): 45)
- [10] Wu Z L, Fu Q, Wang L. Using differential grade index to carry out dynamic appraisal of mine production. *Gold*, 2000, 21(8): 28
(吴忠良, 付强, 王林. 应用级差品位指标动态评价矿山生产过程. 黄金, 2000, 21(8): 28)
- [11] Zhang B R, Sun L N. An approach to the grade difference index of gold mines. *J Shenyang Inst Gold Technol*, 1995, 14(2): 125
(张宝仁, 孙丽娜. 岩金矿山级差品位指标的探讨. 沈阳黄金学院学报, 1995, 14(2): 125)