

三山岛金矿采充动态平衡分析模型的研究与应用

付厚利, 韩继欢, 闫 丽, 秦 哲, 赵 凯, 元伟林, 朱少瑞, 郭少华

(山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590)

摘 要: 针对三山岛金矿采充工作受多方面影响, 易造成矿区采充不平衡的现象, 提出运用平衡动态分析理论, 建立采充平衡动态模型, 确定采充平衡协调发展水平及影响矿区采充平衡关系的主要因素, 保障井下持续、均衡、高效生产。实践表明, 通过采充动态平衡分析模型的应用, 三山岛金矿各采场充填回填率高达 95%, 生产规模达到 1 700 t/d, 有效促进了矿山的快速发展。

关键词: 三山岛金矿; 采充回填法; 采充平衡; 动态平衡分析

中图分类号: TD802

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2015)01-0092-07

Analytical Model of Dynamic Equilibrium Between Mining and Filling at Sanshandao Gold Mine and its Application

Fu Houli, Han Jihuan, Yan Li, Qin Zhe, Zhao Kai, Qi Weilin, Zhu Shaorui, Guo Shaohua

(College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: The mining-filling work is influenced by many factors, which tends to cause loss of equilibrium in mining and filling. The analytical theory of dynamic equilibrium was proposed to build the model of dynamic equilibrium between mining and filling and ensure the coordinating development level about mining-filling equilibrium. The principal factors affecting the equalized relationship between mining and filling were examined to ensure the underground continuous, balanced and efficient production. The experiment shows that it can achieve the average backfill filling rate of up to 95% and the production of 1 700 t/d, which effectively promote the development of the mine.

Key words: Sanshandao gold mine; mining and filling; mining-filling equilibrium; analysis of dynamic equilibrium

三山岛金矿是山东黄金集团公司的主力矿山之一, 为大型二档黄金企业, 位于山东省莱州市三山岛境内。金矿中央厚大的矿体采用点柱法回采, 两翼较窄小的矿体采用分层采充回填法回采。但由于直属矿区的充填受多方面的影响, 新立矿区的充填又受直属矿区充填的影响, 使两矿区的采充管理工作异常, 易造成两矿区的采充不平衡, 直接影响三山岛金矿的生产和发展^[1]。

从采充协调性及有利于管理的角度出发, 建立了采充动态平衡分析模型, 利用模型得到影响三山岛金矿采充平衡的主要因素及其关联性, 为采充生产及其他相关生产环节的标准制定提供依据。

1 采充动态平衡分析模型框架

采充动态平衡是指在准备矿量保证生产的条件下, 协调整个矿区采场的采矿工艺与充填工艺, 实现连续、均衡生产, 即达到采充动态协调平衡^[2]。实现采充动态平衡是矿区生产的目标与要求, 必须合理地进行规划与设计。通过研究主要采充生产指标与工艺指标间的相互关系, 为规划设计提供科学的依据。但采充

收稿日期: 2014-05-07

基金项目: 山东科技大学研究生创新基金项目(YC130312)

作者简介: 付厚利(1966—), 男, 山东博兴人, 教授, 博士生导师, 主要从事矿山建设工程、岩土工程等方面的研究。

E-mail: fuhouli@tom.com

动态平衡又是一项复杂的系统工程,涉及到生产的各个环节,影响因素多,且相互联系^[3]。因此,建立采充动态平衡分析模型可实现主要指标的预测、各个指标间的关系协调、采充平衡的条件分析、采充平衡的预警等功能。采充动态平衡分析模型框架如图1所示。

2 建立协整分析模型

通过对采矿与充填两个工艺间平衡模型建立所需要的数据指标进行统计分析,找出因素之间的关系,建立误差修改协整模型,以提高预测与预警的精度^[4]。协整模型可对两个存在单位根的时间序列数据进行直接分析,极大地推动了包含大量复杂时间序列数据的宏观经济问题的研究过程^[5]。同时,利用 Eviews 软件对时间序列进行数据处理、序列平稳性分析、自相关系数分析、带有自回归校正的最小二乘法估计、T 检验、方差分析、协整检验、Granger 因果检验以及拟合作图等功能^[6]。采用 Eviews 处理数据不仅可以迅速地导出数据中导出统计关系,预测数据的未来值,而且可采用多种操作方式进行各种计量分析和统计分析,数据管理简单方便。

根据生产实际分析,采矿量与采场个数具有密切相关性,对 2011-10-01—20 的数据进行分析协整,通过对采矿量与采场个数进行 ADF(Augmented-Dickey-Fuller)单位根检验,建立采矿量的协整分析模型。数据如表1所示。

在给定的显著性水平下,如果序列 X 有单位根,则 X 为非平稳序列,对其一级差分后,再对序列 $D(X)$ 进行 ADF 单位根检验,如有单位根, $D(X)$ 仍为非平稳序列,若无单位根,则 $D(X)$ 为平稳序列,序列 X 为一阶单整,记作 $X(1)$ 。

其中,协整关系描述了变量之间的长期均衡关系。如果序列 Y 经过 p 次差分后具有平稳性,则称该序列为 p 阶单整序列,表示为 $I(p)$;如果由两个同阶单整序列的线性组合得到一个变量为 $I(0)$,则认为这两个变量是协整的,例如, $X, Y \sim I(1)$:

$$Y_t = \beta Y_{t-1} + \epsilon_t \quad (1)$$

残差项 ϵ_t 为 $I(0)$,那么 X, Y 是协整的, α 称为协整系数 ($\alpha \neq 0$),由于 ϵ_t 是平稳的,那么 X, Y 就不会分离太远。因此,式(1)反映了一种长期均衡关系。

通过对表1中采矿量 (C_{kl}) 和采场个数 (C_{cs}) 进行 ADF 单位根检验,得到 ADF 检验统计量分别为 $-3.537\ 343, -3.344\ 068$,其绝对值小于 ADF 检验临界值 $-3.679\ 322$ 的绝对值,表明在这种检验方法下,存在单位根,采矿量、采场个数不是平稳时间序列,也说明采矿量、采场个数至少是一阶单整的。

接下来对采矿量、采场个数的差分序列进行单位根检验。已知采矿量和采场个数均为二阶单整的时间序列,即 $C_{kl} \sim I(2), C_{cs} \sim I(2)$ 。

利用向量自回归模型,选择滞后项为2项。得到采矿量的向量自回归模型的估计式为:

$$C_{kl} = 267.28 + 0.016 C_{kl}(-1) + 0.115\ 2 C_{kl}(-2) + 101.345 C_{cs} - 4.044\ 45 C_{cs} - 12.171\ 4 C_{cs} \quad (2)$$

同样计算得到充填量 (C_{cl})、尾砂量 (W_{sl}) 和掘进量 (J_{jl}) 的协整模型的自回归结果如下:

$$C_{cl} = -4\ 874.967 + 0.245 C_{cl}(-1) + 0.246 C_{cl}(-2) + 0.288 W_{sl} + 0.067 W_{sl}(-1) + 0.451 W_{sl}(-2); \quad (3)$$

$$W_{sl} = 9\ 681.728 - 0.064 W_{sl}(-1) - 0.108 W_{sl}(-2) - 0.101 C_{kl} + 0.199 C_{kl}(-1) - 0.042 C_{kl}(-2); \quad (4)$$

$$J_{jl} = 60.217 + 0.183 J_{jl}(-1) - 0.075 J_{jl}(-2) - 0.015 C_{kl} + 0.001 C_{kl}(-1) + 0.007 C_{kl}(-2) \quad (5)$$

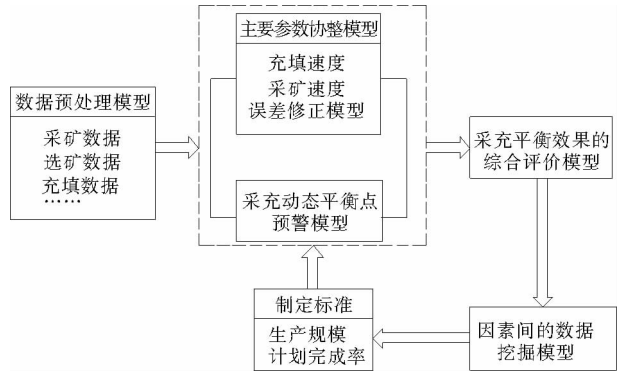


图1 采充动态平衡分析模型框架

Fig.1 The analysis model framework of dynamic mining-filling equilibrium

表 1 三山岛金矿采矿量与采场个数

Tab. 1 The mining quantity and the number of stopes at Sanshandao gold mine

日期	采一车间			采二车间			采三车间			采矿量 合计/t	采场数
	采掘 工段/t	温井 公司/t	黄金 建设/t	采掘 工段/t	温井 公司/t	黄金 建设/t	采掘 工段/t	温井 公司/t	黄金 建设/t		
2011-10-01	2 080	150	250	3 070	1 280	220	1 940	50	350	9 390	92
2011-10-02	1 790	150	200	1 930	2 520	90	1 240	100	400	8 420	83
2011-10-03	1 900	200	300	2 830	1 080	-	1 920	100	400	8 730	86
2011-10-04	1 560	150	300	2 640	1 360	130	1 610	150	450	8 350	82
2011-10-05	2 040	150	250	2 130	1 740	-	1 380	100	550	8 340	82
2011-10-06	1 780	250	250	2 470	1 390	50	1 570	150	200	8 110	80
2011-10-07	1 580	200	250	1 890	1 990	130	1 590	150	400	8 180	80
2011-10-08	1 450	100	250	3 010	1 310	150	1 460	150	400	8 280	81
2011-10-09	1 140	150	300	2 760	1 440	50	1 370	100	400	7 710	76
2011-10-10	950	100	450	1 970	2 100	90	1 580	50	450	7 740	76
2011-10-11	1 890	100	550	2 700	1 220	-	1 620	100	700	8 880	87
2011-10-12	1 850	100	350	2 190	1 760	100	1 790	50	400	8 590	84
2011-10-13	1 600	200	300	2 290	1 280	180	1 810	100	300	8 060	79
2011-10-14	1 920	0	150	2 410	1 530	-	1 820	100	350	8 280	81
2011-10-15	1 370	200	300	2 180	1 950	80	1 600	150	350	8 180	80
2011-10-16	1 400	200	100	2 340	1 460	50	1 310	100	400	7 360	72
2011-10-17	1 750	250	300	2 680	1 380	20	1 480	150	250	8 260	81
2011-10-18	1 550	200	250	2 180	1 940	-	1 290	150	400	7 960	78
2011-10-19	950	200	500	2 360	1 530	50	1 530	150	300	7 570	74
2011-10-20	1 260	150	200	2 460	1 510	50	1 660	100	300	7 690	75

3 建立采充平衡点的预警模型

采充平衡点预警模型^[7-9]是以系统动力学为基础,运用系统结构决定系统功能的原理,将系统构建为结构、功能的因果关系模型,利用反馈、调节和控制原理进一步设计反映系统行为的反馈回路,最终通过建立计算机仿真模型并借助于计算机仿真定量研究高阶次、非线性、多重反馈复杂时变系统的系统分析技术,实现结构、功能、历史相结合^[10]。根据采矿、充填、洗选车间的主要生产技术指标建立采充协调平衡模型,预警模型可预测采充环节不协调的主要原因。

3.1 采充动态平衡因果关系分析

采矿与充填是相互联系的两个主要生产环节,是由其相互联系的因素组成的一个因果链条。通过对各因素间的因果分析,得出采充平衡点的因果环如图 2 所示。

3.2 建立采充动态平衡入树模型

利用强简化流率基本入树建模法,可实现系统结构由

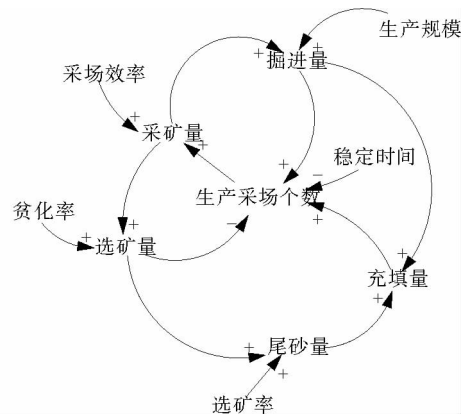


图 2 采充平衡点因果关系图

Fig. 2 The causal relationship of mining-filling equilibrium point

流图刻画改为流率基本入树模型刻画,有利于通过嵌运算对复杂系统进行反馈环分析。因此,在采充动态平衡因果环路分析的基础上,建立采充动态平衡入树模型,如图 3 所示。

3.3 采充动态平衡仿真结果分析

生产采场数的变化直接影响采矿量,而采场产量决定着企业的生产能力。以表 1 数据为基础,利用协整分析模型,将数据经过统计处理后代入采充动态平衡入树仿真模型。从 2011 年 10 月 20 日起,仿真模型运行 100 d,以模拟结果为依据进行分析。生产采矿数、采场产量、选矿量和充填量的仿真结果如图 4~7 所示。

根据仿真结果可知:①当采场个数在 75~82 变化时,生产比较稳定;②当采场产量在 6 800~7 500 t 变化时,矿区生产达到均衡;③选矿量呈现均匀的变化规律,未超出矿山入选能力;④由于充填采场数量的减少,其充填量略呈下降趋势,但总体变化不大。

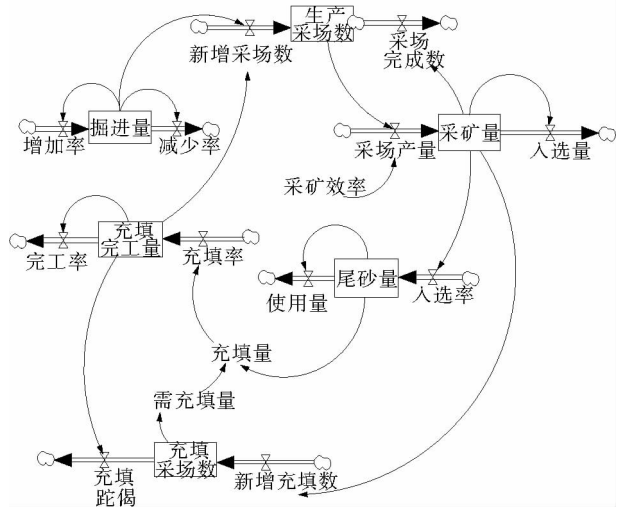


图 3 采充动态平衡入树仿真模型图

Fig. 3 Simulated in-tree model of dynamic mining-filling equilibrium

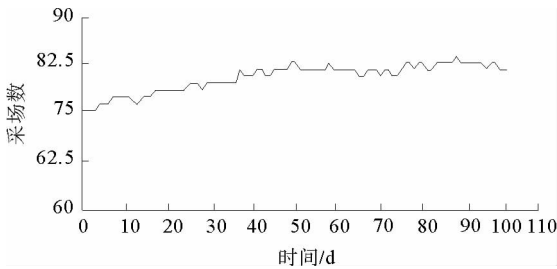


图 4 生产采场个数的变化规律

Fig. 4 Change rules on number of stopes

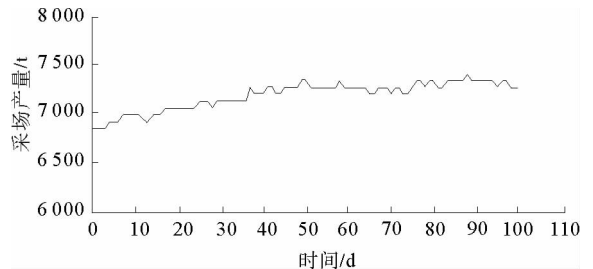


图 5 采场产量的变化规律

Fig. 5 Change rules on production of stopes

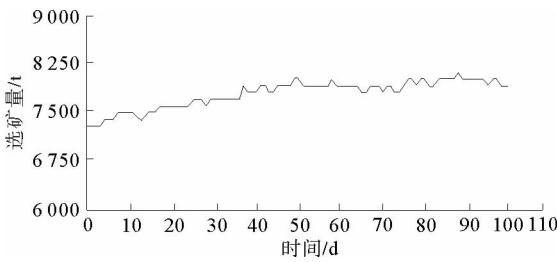


图 6 选矿量的变化规律

Fig. 6 Change rules on amount of mineral processing

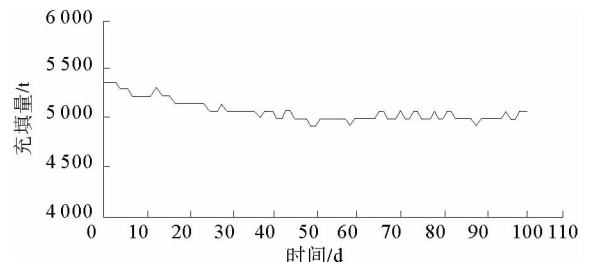


图 7 充填量的变化规律

Fig. 7 Change rules on amount of filling

4 构建采充平衡效果的综合评价模型

根据协整模型与平衡点预警模型对影响采充平衡的主要指标进行预测与仿真,再加上其他指标,建立综合评价采充平衡效果的指标评价体系,在此基础上,建立综合评价分析模型,利用此模型找出影响采充平衡的主要因素。

4.1 采充平衡效果评价指标体系

采充平衡效果的评价可为企业合理安排生产提供依据,进而对评价结果进行分析,采取必要措施实现生产的均衡。通过以上分析可知,衡量采充平衡需从采矿效率、充填质量及两者间的协调性出发。在构建指标的过程中,还应充分考虑指标的可操作性和代表性,由此将评价体系划分为三层共 10 个指标,如图 8 所示。

4.2 采充平衡效果评价标准及等级划分

根据我国黄金企业目前的实际情况,将采充平衡协调发展水平分为协调发展、初级协调发展、由传统发展向协调发展过渡、传统发展 4 个等级。不同企业的自身发展模式和特点不尽相同,所以不同发展阶段的评价标准集则不同。目前大部分黄金企业处在经济快速发展的时期,由此可将评价指标分为国家统一指标和国家未统一指标两类,未统一指标按全国的平均值为标准进行设置。以此建立采充平衡协调发展对应 4 个等级的各项指标的评价标准集 V ,如式(5)所示。

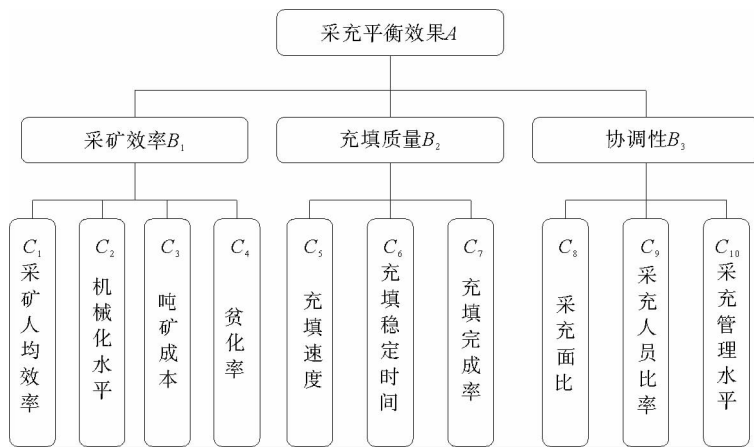


图 8 采充平衡协调发展水平指标体系图

Fig. 8 Index system of coordinating development level about mining-filling equilibrium

以此建立采充平衡协调发展对应 4 个等级的各项指标的评价标准集 V ,如式(5)所示。

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{115} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{215} \\ v_{31} & v_{32} & \cdots & v_{315} \\ v_{41} & v_{42} & \cdots & v_{415} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 50 & 0.1 & 15 & 50 & 20 & 20 & 30 & 000 & 15 & 000 & 20 & 4 & 2 & 50 & 000 & 20 & 500 & 60 \\ 40 & 0.2 & 10 & 40 & 15 & 15 & 20 & 000 & 10 & 000 & 30 & 3 & 3 & 30 & 000 & 15 & 300 & 50 \\ 30 & 0.3 & 8 & 30 & 10 & 10 & 10 & 000 & 6 & 000 & 40 & 2 & 4 & 15 & 000 & 10 & 100 & 40 \\ 20 & 0.4 & 6 & 15 & 5 & 5 & 6 & 000 & 3 & 000 & 50 & 1 & 5 & 5 & 000 & 5 & 50 & 30 \end{bmatrix} \quad (5)$$

4.3 采充平衡效果评价方法及步骤

1) 确定各评价指标的隶属度函数

由于各项评价指标不在同一评价等级,且每项指标属于评价等级的程度也不尽相同,为确定各评价指标属于各评价等级的隶属度和简化计算,采用线性关系确定评价指标的隶属度函数^[11]。将评价指标分为正指标和逆指标两类,对于任意评价指标值 $u_i (i=1, 2, \dots, m)$,可利用下式计算其属于各评价等级的隶属度 r_{ij} ,求得隶属度矩阵 R 。

$$j=1 \text{ 时, } r_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{正指标: } u_i \leq v_{i1} & \text{逆指标: } u_i \geq v_{i1} \\ \frac{u_i - v_{i2}}{v_{i1} - v_{i2}} & \text{正指标: } v_{i1} < u_i \leq v_{ij} & \text{逆指标: } v_{i2} < u_i \leq v_{i2}; \\ 0 & \text{正指标: } u_i \geq v_{i2} & \text{逆指标: } u_i \leq v_{i2} \end{cases} \quad (6)$$

$$j=2, 3, \dots, n-1 \text{ 时, } r_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{正指标: } u_i \leq v_{ij-1}, u_i \geq v_{ij+1} & \text{逆指标: } u_i \geq v_{ij-1}, u_i \leq v_{ij+1} \\ \frac{u_i - v_{ij-1}}{v_{ij} - v_{ij-1}} & \text{正指标: } v_{ij-1} < u_i \leq v_{ij} & \text{逆指标: } v_{ij} < u_i \leq v_{ij-1} \\ \frac{u_i - v_{ij+1}}{v_{ij} - v_{ij+1}} & \text{正指标: } v_{ij} < u_i \leq v_{ij+1} & \text{逆指标: } v_{ij+1} < u_i \leq v_{ij} \end{cases} ; \quad (7)$$

$$j=n \text{ 时, } r_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{正指标: } u_i \geq v_{in}, u_i \leq v_{in-1} & \text{逆指标: } u_i \leq v_{in}, u_i \geq v_{in-1} \\ \frac{u_i - v_{in-1}}{v_{in} - v_{in-1}} & \text{正指标: } v_{in-1} < u_i \leq v_{in} & \text{逆指标: } v_{in} < u_i \leq v_{in-1} \end{cases} \quad (8)$$

其中： n 为评价等级数， m 为指标个数。

2) 确定各层次的权重系数矩阵

各项指标对目标的贡献不同，其重要性的程度则不相同。为了尽量反映实际情况，运用层次分析法^[12]计算各层次指标权重如下：

第二级目标 $B_1 \sim B_3$ 对总目标 A 的权重 $\mathbf{a} = (a_1, a_2, a_3) = (0.28, 0.47, 0.25)$ ；

环境指标对于第二级目标 B_1 的权重 $\mathbf{b}_1 = (0.146, 0.218, 0.201, 0.268)$ ；

经济指标对于第二级目标 B_2 的权重 $\mathbf{b}_2 = (0.247, 0.285, 0.224)$ ；

社会指标对于第二级目标 B_3 的权重 $\mathbf{b}_3 = (0.162, 0.231, 0.149)$ 。

4.4 分层模糊评价方法

采充平衡分层模糊评价共分两层，第一层是指标层相对于目标层的综合评价，即通过各项指标的权重矩阵和隶属度矩阵计算评价矩阵 \mathbf{B} ：

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \cdot \mathbf{R}_1 \\ b_2 \cdot \mathbf{R}_2 \\ b_3 \cdot \mathbf{R}_3 \end{bmatrix}; \tag{9}$$

然后利用评价矩阵 \mathbf{B} 对总目标 \mathbf{A} 进行综合评价，得综合评价结果：

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \cdot \mathbf{B}_1 \\ a_2 \cdot \mathbf{B}_2 \\ a_3 \cdot \mathbf{B}_3 \end{bmatrix}。 \tag{10}$$

其中 $\mathbf{A}_1 \sim \mathbf{A}_3$ 分别代表矿区可持续发展属于各评价等级的评价结果。

4.5 采充平衡效果评价^[13]

三山岛金矿 2011 年 11 月采矿平衡协调性指标如表 2 所示。

表 2 三山岛金矿 2011 年 11 月采矿平衡协调性指标

Tab. 2 Coordinating index of mining equilibrium at Sanshano Gold Mine in November 2011

序号	指标名称	指标值	序号	指标名称	指标值
1	采矿人均效率/(t/人)	562.3	6	充填稳定时间/d	4
2	采矿机械化水平/%	83.2	7	充填完成率/%	95
3	吨矿成本/(元/t)	294.96	8	采充面比	3 : 1
4	矿石贫化率/%	9.45	9	采充人员比	4 : 1
5	充填速度/(m/h)	4	10	管理水平	80

将表 2 中的数据代入式(5)~(8)计算各评价指标的隶属度矩阵向量 $\mathbf{R}_1 \sim \mathbf{R}_3$ ，根据式(9)进行第一层次的综合评价。最后代入式(10)获得第二层次对总目标的综合评价结果。

5 采充动态平衡分析模型的效果分析

三山岛金矿采场回采面积从 200~2 500 m² 不等，采场的采出天数和充填天数都与采场的回采面积密切相关，但采场的充填天数远小于采出天数。

利用采充动态平衡分析模型，构建采场采矿与充填两个工艺之间的协整回归模型，确定以采矿为主、充填为辅，大中小采场相结合的动态平衡模型。最终，确定各工艺间的生产指标，并整体对这两个工艺的人员、生产规模、生产班次、机械配备进行安排，同时进行采矿作业，随着采矿工艺的结束，依次进行充填工艺。达到了一旦采矿结束，即可到下一采场进行生产，充填结束即可到下一个采场进行充填，实现连续、均衡生产，提高了生产效率和管理效率。

6 结论

1)及时充填和改善充填工艺可实现采矿人均效率 562.3 t/人,充填速度达到 4 m/h,采充过程更加协调,为保持井下持续、均衡、高效生产起到了保障作用。

2)通过提高采场分层生产能力、采用大中小采场相结合的方法进行采充动态平衡管理,实现三山岛金矿各采场充填回填率达到 95%,生产规模达到 1 700 t/d,有效提高了生产效率,降低了生产成本。

参考文献:

- [1]张强,李夕兵.中国金属采矿业发展现状[J].西部探矿工程,1999,11(4):74-76.
Zhang Qiang, Li Xibing. The present situation on the development of China's mining industry[J]. West-China Exploration Engineering, 1999, 11(4): 74-76.
- [2]耿茂兴,谭金.采充动态平衡管理浅论[J].有色矿山,2000,29(1):18-21.
Geng Maoxing, Tan Jin. Discussion on dynamic balance management of mining and filling[J]. Nonferrous Mines, 2000, 29(1): 18-21.
- [3]李四德,侯成桥,丁岳祥.山东黄金集团生产矿山充填技术现状与展望[J].黄金,2013,34(9):46-53.
Li Side, Hou Chengqiao, Ding Yuexiang. Current situations and outlook of filling technology in productive mines of Shandong Gold Corp[J]. Gold, 2013, 34(9): 46-53.
- [4]马云庆,吴昌晓,夏登奎.采充动态平衡的管理[J].矿业快报,2001(17):7-9.
- [5]杨政,曾勇,原子霞.几类非线性协整模型研究综述[J].数量经济技术经济研究,2011(10):148-160.
Yang Zheng, Zeng Yong, Yuan Zixia. A Research survey of some nonlinear cointegrating models[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2011(10): 148-160.
- [6]安广坤.基于协整理论的 R&D 投入与经济增长之间协整关系研究[D].青岛:山东科技大学,2008:9-20.
- [7]苑占永,孙豁然,李少辉,等.地下采选一体化系统采充平衡临界品位研究[J].金属矿山,2011(3):27-30.
Yuan Zhanyong, Sun Huoran, Li Shaohui, et al. Research of the critical grade to achieve a balance between mining and filling in integration system of underground mining and beneficiation[J]. Metal Mine, 2011(3): 27-30.
- [8]耿茂兴,桑茂楨.提高采场综合生产能力的有效途径[J].黄金,1998,19(9):29-34.
Geng Maoxing, Sang Maozhen. The effective method to improve synthetic productivity of stope[J]. Gold, 1998, 19(9): 29-34.
- [9]李长权,王安强,穆怀富.机械化胶结充填采矿法在富家矿的应用[J].黄金,2009,30(6):25-29.
Li Changquan, Wang Anqiang, Mu Huaifu. Application of mechanized cemented filling mining method in Fujia Mine[J]. Gold, 2009, 30(6): 25-29.
- [10]崔啸,周克成,曹冬冰,等.北京市商品住宅系统动力学模型构建及在预警中的应用[J].系统工程理论与实践,2011,31(4):672-678.
Cui Xiao, Zhou Kecheng, Cao Dongbing, et al. Empirical study of systematic dynamics model construction of Beijing commercial housing market and application in early warning[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2011, 31(4): 672-678.
- [11]李堂军,王建奎,李菁.区域经济、社会与环境协调发展模糊评价模型与应用[J].山东科技大学学报:自然科学版,2008,27(2):99-104.
Li Tangjun, Wang Jiankui, Li Jing. Fuzzy evaluation model of harmonious development for the regional economy, society and environment and its application[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2008, 27(2): 99-104.
- [12]韩继欢,闫丽,秦哲,等.层次分析法在水封洞库注浆设计中的应用研究[J].山东科技大学学报:自然科学版,2014,33(5):90-94.
Han Jihuan, Yan Li, Qin Zhe, et al. Analytic hierarchy process applied in the grouting design optimization of water sealed caverns[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2014, 33(5): 90-94.
- [13]李堂军,孙承爱,顾洪利.矿区可持续发展分层模糊综合评价方法研究[J].矿冶工程,2001,21(3):15-17.
Li Tangjun, Sun Cheng'ai, Gu Hongli. Study on layer fuzzy and synthetic evaluated method for sustainable development in a mining area[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2001, 21(3): 15-17.