

磷矿山地下开采方法研究

徐孟超^{1,4} 李小双^{1,2} 王佳文³ 王孟来⁴ 李树建⁴

1 绍兴文理学院土木工程学院 2 常州大学城市建设学院

3 江西理工大学资源与环境工程学院 4 国家磷资源开发利用工程技术研究中心

DOI:10.12238/jsse.v1i1.6238

[摘要] 采矿方法一直是地下开采过程中研究的重点内容,本文以昆阳磷矿二矿地下开采部分为研究对象,采用经验方法设计了3种方法并利用熵权TOPSIS法对开采方案进行评价和优选。研究表明:选取对地下开采影响最大经济合理性(采矿成本、前期投资)、技术可行性(生产能力、贫化率、回采率、充填效率、技术适用性、采掘比)、环境稳定性(通风条件、采场稳定性)三个方面共10个指标来计算上向水平分层充填采矿法、上向水平分层进路充填采矿法、伪倾斜分段条带充填采矿法的正负理想距离 D_i^+ 、 D_i^- 和相对接近度 C_i 。方案一上向水平分层充填采矿法的相对接近度 C_i 为0.475,方案二上向水平分层进路充填采矿法的相对接近度 C_i 为0.482,方案三伪倾斜分段条带充填采矿法的相对接近度 C_i 为0.708。通过比较三个开采方案的相对接近度 C_i 可知,伪倾斜分段条带充填采矿法更加适合昆阳磷矿二矿的地下开采。

[关键词] 地下开采; 充填采矿法; 熵权法; 正负理想距离; 相对接近度

中图分类号: TD803 **文献标识码:** A

Research on underground mining methods for phosphorus mines

Mengchao Xu^{1,4} Xiaoshuang Li^{1,2} Jiawen Wang³ Menglai Wang⁴ Shujian Li⁴

1 School of Civil Engineering, Shaoxing University

2 School of Urban Construction, Changzhou University

3 School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology

4 National Engineering Research Center for Exploitation and Utilization of Phosphorus Resources

[Abstract] Mining methods have always been a focus of research in the underground mining process. This article takes the underground mining part of Kunyang Phosphate Mine No. 2 as the research object, adopts empirical methods to design three methods, and uses entropy weight TOPSIS method to evaluate and optimize the mining plan. The research results indicate that a total of 10 indicators, including economic rationality (mining cost, initial investment), technical feasibility (production capacity, dilution rate, recovery rate, filling efficiency, technical applicability, mining ratio), and environmental stability (ventilation conditions, stope stability), are selected to calculate the upward horizontal layered filling mining method and upward horizontal layered drift filling mining method, which have the greatest impact on underground mining. The positive and negative ideal distances D_i^+ , D_i^- , and relative progress C_i of the pseudo inclined segmented strip filling mining method. The relative proximity C_i of the upward horizontal slicing and filling mining method in Scheme 1 is 0.475, the relative proximity C_i of the upward horizontal slicing and filling mining method in Scheme 2 is 0.482, and the relative proximity C_i of the pseudo inclined segmented strip filling mining method in Scheme 3 is 0.708. By comparing the relative proximity C_i of the three mining schemes, it can be seen that the pseudo inclined segmented strip filling mining method is more suitable for underground mining in Kunyang Phosphate Mine No. 2.

[Key words] underground mining; Filling mining method; Entropy weight method; Positive and negative ideal distance; Relative proximity

前言

采矿方法的选择问题一直以来是露天转地下开采过程中的重点问题。国内外学者对地下开采也进行了大量的研究,曲立平(2021)等^[1]为了解决矿石贫化率高问题,通过现场调研、采矿方案对比技术手段对柴矿4"井V号脉薄矿体的采矿方法进行了系统的研究,最后确定了脉外天井单采联上向水平分层充填采矿法为最佳的开采方案。柏杨(2023)等^[2]针对急倾斜薄矿体开采过程中出现的技术难题,对传统上向水平分层充填采矿工艺进行优化研究,提出了一种适用于急缓倾斜薄矿体上向水平分层次尾砂充填采矿法。郝英杰(2022)等^[3]针对上向水平进路充填采矿法进路回采效率低、顶板安全隐患等缺点进行了优化研究,提出了二步骤回采新的回采顺序,并顺利在胶东某矿山应用。杨海辉(2023)等^[4]利用Flac^{3D}数值分析软件模拟深部中段首采分段4个分层的回采,优选适合于该矿的深部矿体机械化上向水平分层进路充填采矿法的进路断面尺寸。曾佳龙(2022)等^[5]利用FLAC3D和Midas-GTS软件对伪倾斜分段条带充填采矿法下的应力扰动、位移变化情况进行了对比分析,为同类型矿山采场结构参数选取提供理论依据,具有一定的指导意义。

充填采矿方法相比于以前传统的开采方法具有回采效率高,贫化率低等优点,以及可在“三下”开采矿体,资源利用率高;而且能有效地控制地压,防止地面塌陷、开裂、山体崩塌等引发地质灾害。空区可以利用废石和尾砂来充填地面不需要构筑大面积的废石坝、尾矿库,可以有效的保护周边的生态环境、避免当地居民与企业发生不必要的矛盾。自从国家领导人提出“金山银山就是绿水青山”的发展理念之后,国家对矿产资源和环境的保护力度越来越大,充填采矿法已经成为了露天转地下开采后的首选开采方法。而且随着科学技术的发展,充填采矿法已经从低产、低效率采矿法发展成为了一种高产、高效采矿方法。

针对昆阳磷矿二矿缓倾斜薄中厚含软夹层的开采方法问题,本文主要设计了3中开采方法,主要有上向水平分层充填采矿法、上向水平分层进路充填采矿法、伪倾斜分段条带充填采矿法,通过熵权TOPSIS对比三种方法选出了最优开采方式。

1 工程概况

昆阳磷矿二矿建矿与于2020年,原为昆阳磷矿二矿段。昆阳磷矿二矿位于滇池聚磷区南西,东邻昆阳磷矿(一至四采区),西接肖家营磷矿,北部为海口磷矿,位于晋宁区二街镇境内^[6]。昆阳磷矿二矿矿体露头区域及矿权北部进行露天台阶式开采,中部最低台阶已经回采到接近2100m。西采区开采116.29万吨,局部最低标高2015m。矿区水文地质条件属于中等的岩溶裂隙含矿层及底板直接充水矿床,矿层倾斜角平均为15°,是典型的缓倾斜薄至中厚含软夹层的矿体,极具代表性。根据地质勘查结果显示,上矿层平均厚度为6.70m, P₂O₅平均含量为22.48%;下矿层平均厚度为5.67m, P₂O₅平均含量为26.90%。直接顶板和间接顶板均为白云岩,中间夹层为粘土质页岩。

2 地下开采方式探讨

依据矿山开采方案评价指标体系的构建的方式和原则,综合考虑经济合理性、技术可行性、环境稳定性等三个方面构建理论评价指标体系,选择10个影响因子构建昆阳磷矿二矿地下开采方式的指标体系如图1所示,该体系较为完整的反映了矿山地下开采的相关情况。

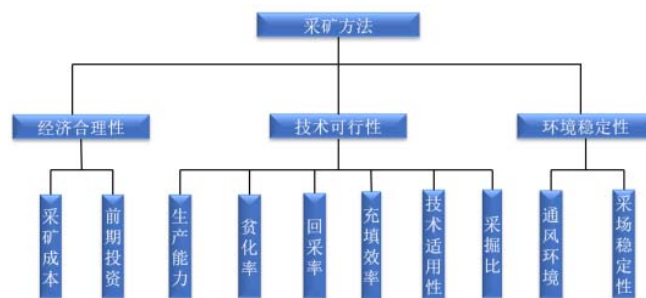


图1 采矿方法指标体系图

在影响地下开采10个影响因子中,充填效率、技术适用性、通风环境、采场稳定性等4个影响因子无法对数值进行量化,属于定性指标。所以针对这些定性指标,昆阳磷矿二矿通过专家邀请,根据地下开采试验段的具体情况和采用三种开采方法之后对具体的方案进行相应等级划分标如表1所示,并将优选等价确定为:较好、好、一般、较差、差五种等级。

表1 开采方案等级划分标准

等级	换算数值	等级描述
好	0.85-1	方案好,技术可行性较高,
较好	0.70-0.85	方案较好,技术可行性较高,
一般	0.55-0.70	方案一般,技术可行性较低
较差	0.30-0.55	方案较差,技术可行性低,环境影响大
差	0-0.30	方案极差,对生态环境影响大

3 基于熵权TOPSIS法综合评价分析法

TOPSIS法根据有限个评价对象与理想化目标接近的排序方法,是对现有的方法进行优劣性评价, TOPSIS是一种逼近与理想的排序法,也是目标决策分析中的一种常用方法,又称为优劣解距离法^[7]。

3.1 矿山地下开采评价指标的建立

根据矿山地下开采的实际情况,主要建立经济评价指标(开采成本、前期投资);技术评价指标(生产能力、贫化率、回采率、充填效率、技术适用性、采掘比);安全性指标(通风环境、采场稳定性)共3个方面,10个指标进行评估。

步骤1建立初始评价指标矩阵:假设有项评价指标和个评价方案,构成的初始数据指标矩阵为 $X = (a_{ij})_{u \times v}$, 其中 a_{ij} 为第 i ($i=1, 2, \dots, u$) 个评价方案对应的第 j ($j=1, 2, \dots, v$) 项指标值。

$$X = \begin{bmatrix} a_{ij} & \cdots & a_{iv} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{uj} & \cdots & a_{uv} \end{bmatrix}$$

步骤2规范化初始矩阵。将指标值 a_{ij} 与指标矩阵最小指标值的差除以指标矩阵的极差, 得到正指标规范化矩阵 G^+ ; 将指标矩阵最大指标值与指标值 a_{ij} 的差除以指标矩阵的极差, 得到负指标规范化矩阵 G^-

正指标值: 当对应的指标参数越大时, 方案的可行性越高

$$z_{ij} = \frac{a_{ij} - \min(a_{ij})}{\max(a_{ij}) - \min(a_{ij})} \quad (1)$$

负指标值: 当对应的指标参数越大时, 方案的可行性越高

$$z_{ij} = \frac{\max(a_{ij}) - a_{ij}}{\max(a_{ij}) - \min(a_{ij})} \quad (2)$$

步骤3计算初始指标值占比。将指标值 a_{ij} 除以对应列各行元素之和 $\sum_{i=1}^u a_{ij}$, 得到处理之后的指标为 r_{ij}

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^u a_{ij}} \quad (3)$$

步骤4计算各指标的信息熵 E_j 和信息效用值 d_j

$$E_j = -\frac{1}{\ln u} \sum_{i=1}^u (r_{ij} \ln r_{ij}) \quad (4)$$

$$d_j = 1 - E_j \quad (5)$$

步骤5计算各指标的权重 w_j 。

$$\frac{d_j}{\sum_{j=1}^v d_j} = w_j \quad (6)$$

步骤6构造加权矩阵。将 G^+ 和 G^- 分别于对应的指标权重相乘在组合, 得到加权矩阵 G^*

步骤7寻找各指标最优、最劣解, 建立正理想解向量 G^{*+} 和负理想解向量 G^{*-} :

$$\begin{cases} G_j^{*+} = \max_{1 \leq i \leq u} \max \{G_{ij}^*\} \quad (j = 1, 2 \dots v) \\ G_j^{*-} = \min_{1 \leq i \leq u} \min \{G_{ij}^*\} \quad (j = 1, 2 \dots v) \end{cases} \quad (7)$$

步骤8 计算第 i 个评价方案与正、负理想的距离 D_i^+ 、 D_i^-

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^v (G_{ij}^* - G_j^{*+})^2} \quad (8)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^v (G_{ij}^* - G_j^{*-})^2} \quad (9)$$

式中 G_j^{*+} 、 G_j^{*-} 分别为第 i 个评价方案对应的指标最优解和最劣解。

步骤9计算个方案的相对接近度 c_i :

$$c_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \quad (0 \leq c_i \leq 1) \quad (10)$$

步骤10方案优选。相对接近度 c_i 越大, 综合得分越高, 该方案越接近理想方案。

4 磷矿开采方案优选分析

昆阳磷矿二矿地下开采的方式总共设计选用了三种, 分别是上向水平分层充填采矿法、上向水平进路充填采矿法、伪倾斜分段条带充填采矿法, 主要从经济合理性、技术可行性、环境稳定性方面对这三种方案优选。上向水平分层进路充填法(沿走向布置矿房)安全性好; 每个盘区可布置的矿房数多, 有利于提高盘区生产能力的优点, 但工艺复杂, 采场通风环境较差。上向水平分层充填法(垂直走向布置矿房), 可以根据矿体和围岩情况采取锚杆护顶、留矿柱以及变化为分层进路充填开采, 盘区斜坡道脉外布置时对矿体的开采技术条件适应性好, 但预留矿柱后回收率低, 盘区生产能力制约因素较多。设计推荐矿体倾角大于 15° 可采用此方法回采。伪倾斜分段条带充填法, 具有盘区生产能力大, 服务年限长, 安全性好的优点, 且经济性较好。

方案一: 采用上向水平分层充填采矿法, 根据相关试验段得出的结论可知, 上向水平分层充填采矿法开采成本较高, 为140元/吨, 盘曲前期投资为120万元。盘区的生产能力为40万t/a, 地下开采过程中贫化率为8%, 回采率为70%, 采掘比为3.2。经过观察和仪器检测, 充填效率较高。环境稳定性方面, 通风环境较好, 开采过程中暴露的顶板为矿体, 稳固性好。

方案二: 采用上向水平分层进路充填采矿法^[8,9]。根据试验段得出的结论可知, 上向水平分层进路充填采矿法开采成本为130元/吨, 盘曲的前期投资为115万元。盘曲的生产能力为45万t/a, 地下开采过程中贫化率为6.5%, 回采率为72%, 采掘比为2.5。分层进路属于独头掘进, 采场通风较差, 采场的稳定性一般。

方案三: 采用伪倾斜分段条带充填采矿法。根据试验段得出的结论可知, 伪倾斜分段条带充填采矿法开采成为120元/吨, 盘曲前期投资为100万元。盘曲生产能力为50万t/a, 地下开

表2 指标评价数值

	经济合理性		技术可行性						环境稳定性	
指标	采矿成本(元)	前期投资(万)	生产能力(万/吨)	贫化率(%)	回采率(%)	充填效率	技术适用性	采掘比	通风环境	采场稳定性
方案一	140	120	40	8	70	0.85	0.70	3.2	0.9	0.9
方案二	130	115	45	6.5	72	0.75	0.75	2.5	0.6	0.85
方案三	120	100	50	6	74	0.9	0.85	2.21	0.8	0.85

表3 评价指标信息熵值和权重

一级指标	二级指标	信息熵值 E_j	权重 w_j	一级指标权重
经济合理性	采矿成本	0.9982	0.0402	0.1
	前期投资	0.9973	0.0598	
技术可行性	生产能力	0.9962	0.0839	0.6159
	贫化率	0.9931	0.1544	
	回采率	0.9998	0.0052	
	充填效率	0.9974	0.0576	
	技术适用性	0.9970	0.0667	
	采掘比	0.9889	0.2481	
环境稳定性	通风环境	0.9876	0.2767	0.2842
	采场稳定性	0.9997	0.0075	

采过程中贫化率为6%,回采率为74%,采掘比为2.21。由于伪倾斜分段条带充填采矿法初始步骤采用进路充填采矿为独头掘进,采场通风环境差,采场稳定性较好。

5 熵权TOPSIS评价

5.1 指标的获取与处理

为了能够最大程度的反映三种开采方法对地下开采的真是情况,从经济合理性、技术可行性、环境稳定性方面选取的10个评价指标,具体数据选取见表2。

对初始化指标进行归一化处理,其中贫化率、采掘比、采矿成本、前期投资等四个指标为负向指标,其余的指标均为正向指标,经过归一化处理得到的规范化矩阵为:

$$z_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.67 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0.5 & 0.25 & 0.5 & 0.75 & 0.5 & 0 & 0.33 & 0.99 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0.67 & 0 \end{bmatrix}$$

利用Matlab软件对信息熵 E_j 、信用效用值 d_j 、权重进行计算 w_j ,计算结果如表3所示

构造加权矩阵 G^* 如下:

$$G^* = z_{ij} \times w_j$$

$$G^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.04 & 0.07 & 0 & 0.28 & 0.01 \\ 0.02 & 0.01 & 0.04 & 0.12 & 0 & 0 & 0.02 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0.04 & 0.06 & 0.08 & 0.15 & 0.01 & 0.06 & 0 & 0.25 & 0.19 & 0 \end{bmatrix}$$

正理想解向量 G^{*+} :

$$G^{*+} = [0.04 \quad 0.06 \quad 0.08 \quad 0.15 \quad 0.01 \quad 0.06 \quad 0.07 \quad 0.25 \quad 0.28 \quad 0.01]$$

负理想解向量 G^{*-} :

$$G^{*-} = [0.00 \quad 0.00 \quad 0.00 \quad 0.00 \quad 0.00 \quad 0.00 \quad 0.00 \quad 0.00 \quad 0.00 \quad 0.00]$$

计算第j个评价方案的正理想距离 D_i^+ 、负理想距离 D_i^- 和相对接近度 C_i 。

根据式(8)、(9)、(10)得出的正负理想距离和相对接近度如表4所示:

根据表4可知,方案一、方案二和方案三的相对接近度 C_i 分别为0.475、0.482、0.708。相对接近度越大说明越逼近理想方案的可行性越大,因此方案的可行性依次排名为方案三>方案二>方案一。结合地下开采经济、技术、环境等因素采用方案三伪倾斜分段条带充填法更加适用于地下开采。

表4 正负理想距离与相对接近度

矿山开 采方案	正理想距 离 D_i^+	负理想距离 D_i^-	相对接近度 C_i	排名
方案一	0.32	0.29	0.475	3
方案二	0.30	0.28	0.482	2
方案三	0.11	0.37	0.708	1

6 结论

本文以昆阳磷矿二矿地下开采为研究对象,为了研究适用于昆阳磷矿二矿缓倾斜薄中厚矿体的最佳的开采方式,选取了上向水平分层充填采矿法、上向水平分层进路充填采矿法、伪倾斜分段条带充填采矿法三种方案,通过熵权TOPSIS根据各项指标确定了最佳的开采方案。

(1)将逼近理想解法应用于地下开采方法中,综合考虑经济合理性、技术可行性、环境稳定性等三个方面构建地下开采评价指标体系,选择10个影响因子构建昆阳磷矿二矿地下开采方式的指标体系。

(2)通过使用熵权TOPSIS将各项指标进行量化为可以进行计算的数据,通过计算权重的方式计算出了三种方案的正负理想距离和相对接近度。

(3)计算了三种方案的正负理想距离、和相对接近度。上向水平分层充填采矿法、上向水平分层进路充填采矿法和伪倾斜分段条带充填采矿法的相对接近度分别为0.475、0.482、0.708,确定了方案三更加适合昆阳磷矿二矿的地下开采。

[基金项目]

国家自然科学基金资助项目(42277154,41867033);山东省高等学校“青创人才引进计划”边坡安全管控与灾害预防技术创新团队项目(鲁教科函〔2021〕51号);贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2022]一般229);山东省自然科学基金资助项目

(ZR2022ME188);国家磷资源开发利用工程技术研究中心开放基金(NECP 2022-04);煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金(SKLCRSM22KF009);三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学)开放基金(2022KDZ07)。

[参考文献]

- [1]曲立平,王泳棋.上向水平分层充填采矿法在急倾斜破碎薄矿体中的应用[J].矿业研究与开发,2021,41(12):1-4.
- [2]柏杨,周亚博,崔越,等.急倾斜薄矿体脉外采准上向水平分层充填采矿法研究[J].矿业研究与开发,2023,43(05):1-6.
- [3]郝英杰.上向水平进路充填高效采矿方法研究[J].世界有色金属,2022,No.589(01):164-166.
- [4]杨海辉,杨灵敏,张晶,等.深部矿体机械化上向水平分层...路充填开采进路断面尺寸优选[J].化工矿物与加工,2023,52(04):9-15.
- [5]曾佳龙,周勇,高新,等.伪倾斜分段条带充填采矿法采场稳定性分析[J].采矿技术,2022,22(04):107-111.
- [6]张斌,王孟来,李树建,等.缓倾斜中厚磷矿体采矿方法设计及采动效应研究[J].采矿技术,2022,22(04):8-13+38.
- [7]黄耀裔,魏星,苏建云,等.在Matlab中实现熵权TOPSIS法对地下水综合评价[J].地球环境学报,2014,5(04):261-265.
- [8]许爱辉.上向水平进路充填法的分析与研究[J].世界有色金属,2022,No.612(24):190-192.
- [9]王鑫.上向水平分层进路充填法在夏家店金矿的应用[J].现代矿业,2020,36(06):83-86.

作者简介:

徐孟超(1997--),男,硕士研究生,研究方向:岩石力学。

通信作者:

王佳文(1999--),男,硕士研究生,研究方向:从事矿山安全控制与灾害防治方面的研究。