基于 AHP-TOPSIS 评判模型的尾砂浓密装置优选*

吴灿[1,2],江科[1,2],刘立辉[3],邱镜煌[4],仵锋锋[5],彭亮[1,2],胡凡[3],龚永超[1,2]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012;
3.四川黄金股份有限公司, 四川 成都 610041;
4.塞尔维亚紫金矿业有限公司, 塞尔维亚 波尔市 19210;
5.紫金(长沙)工程技术有限公司, 湖南 长沙 410036)

摘要:为解决尾砂浓密装置多样性给矿山选择符合实际的尾砂浓密装置带来困难的问题,提出一种基于 AHP-TOPSIS 评判模型的浓密装置优选方法。结合某多金属矿山的充填实际情况,从经济、场地条件、技术等方面选取13个评判指标,通过专家打分的方式对3种浓密装置方案(立式砂仓、深锥浓密机、膏体仓储浓密机)进行综合评判优选。通过计算分析,得出了3种方案的综合优越度分别为49.51%、17.42%、80.11%,因此判定膏体仓储浓密机方案为最佳方案。该结果与现场实际应用情况相符,某多金属矿山采用基于膏体仓储浓密机的充填工艺,单台膏体仓储浓密机尾砂处理能力超过100 t/h,尾砂存储能力超过1 600 t,浓密机最高底流质量浓度达74%,充填效果良好。该评判模型为尾砂浓密装置的选择提供一种新方法。

关键词:尾砂浓密装置;尾砂充填;方案优选;AHP-TOPSIS 评判模型

中图分类号:TD926.4;TD853.34 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)05-0079-07

Optimal Selection of Tailings Thickening Devices Based on the AHP-TOPSIS Evaluation Model

WU Can[1,2], *JIANG Ke*[1,2], *LIU Lihui*[3], *QIU Jinghuang*[4], *WU Fengfeng*[5], *PENG Liang*[1,2], *HU Fan*[3], *GONG Yongchao*[1,2]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.State Key Laboratory of Safety Technology of Metal Mine, Changsha, Hunan 410012, China;
3.Sichuan Gold Corporation Limited, Chengdu, Sichuan 610041, China;
4.Serbia Zijin Mining Co., Ltd., Bor 19210, Serbia;
5.Zijin(Changsha) Engineering Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan 410036, China)

Abstract: To address the challenges of selecting suitable tailings thickening devices for domestic mines due to the diversity of available options, a thickening device optimization method based on the AHP-TOPSIS evaluation model was proposed. Based on the actual filling situation of a certain polymetallic mine, 13 evaluation indicators were selected from aspects such as economy, site conditions, and technology. Three thickening device schemes, including vertical sand silo, deep cone thickener, and paste storage thickener, were comprehensively evaluated and optimized through expert scoring. By calculation and analysis, the comprehensive superiority of the three schemes is found to be 49.51%, 17.42% and 80.11%, respectively. Therefore, the paste storage thickener scheme is determined to be the best scheme. The result is consistent with the actual application situation on site in a certain polymetallic mine, which adopts a filling process based on paste storage thickener. The tailings processing capacity of a single paste storage thickener exceeds 100 t/h, and the tailings storage capacity exceeds 1 600 t. The highest bottom flow mass concentration of the thickener reaches 74%, with a good filling effect. This evaluation model can provide a new method for optimal selection of tailings thickening devices.

Key words: Tailings thickening device, Tailings filling, Optimal selection of scheme, AHP-TOPSIS evaluation model

---

* **收稿日期**:2024-07-22
基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC2907203,2022YFC2904003)
作者简介:吴灿(1989—),男,湖南涟源人,工程师,主要从事充填采矿方面的研究工作。E-mail:397919217@qq.com
通信作者:江科(1992—),男,湖北天门人,硕士,高级工程师,主要从事充填采矿方面的研究工作。E-mail:Jiangk92@163.com

0 引言

近年来,随着国家和社会对矿山安全、环保方面的重视程度不断提高,充填采矿法在地下矿山开采领域的应用越来越普遍[1-3]。按照充填材料和充填方式的不同,充填采矿经历了干式充填、水砂充填、低浓度胶结充填、高浓度胶结充填、全尾砂膏体充填等阶段[4]。其中,全尾砂膏体充填技术因在安全、环保、经济、高效等方面具备明显优势而逐渐成为矿山充填技术的主要发展方向[5-7]。尾砂浓密装置作为膏体充填系统的核心装备,用于将大流量尾砂浆液中的固体颗粒快速从水中分离出来,同时将水回收利用,这是矿山生产和膏体充填中不可或缺的环节。

王章等[8]系统地梳理了马钢矿业集团几座地下矿山的尾砂浆浓密、充填料浆制备与输送、充填采场管理三个环节的主要问题,对各项问题作出了总结,各矿山实现了浆料充分搅拌、满管结构流输送,减轻了管道磨损。江科等[9]针对某矿立式砂仓尾砂利用率低等问题,提出了降低溢流浓度的措施,使溢流质量浓度从7%降低到1%以下。徐刚等[10]采用三度标AHP法计算各指标权重,构建通风管道模型,结果表明,改进的AHP法使得评价结果更加接近实际情况。李翠平等[11]为分析细尾砂粒径对浓密机内料浆沉降脱水效果的影响规律,开展了实验室规模的细尾砂浓密脱水过程模拟试验,试验结果表明,当尾砂颗粒粒径增大时,底流固相体积分数和最小固体通量均呈线性增大。罗才严等[12]选用膏体仓储浓密机装置作为核心设备,较深锥浓密机成本降低了10%,充填效果更好。赖伟[13]采用膏体仓储浓密机,解决了矿山采矿-选矿-充填突出的时空矛盾关系,通过系列组合可以适用于各种情况下的矿山。赵晶莹[14]以某矿山充填系统与设备选型分析为例,介绍了设计思路,从工艺设计,浓密机、搅拌机选型,水泥仓、输送管道及充填站设计等方面入手,研究了充填系统的设计和设备选型。魏正坤[15]根据磷矿沉降试验得到的参数,优化了浓密机结构尺寸,取得了较好的经济效益。

选择合适的浓密装备并确定最佳的工作参数是复杂的多准则决策问题,涉及到多个因素和目标的权衡。上述研究成果均未采用数字化计算方式对不同浓密装置进行定量评价。层次分析法(AHP)可用于建立多准则决策的层次结构,确定各个因素的权重,逼近理想解排序法(TOPSIS)能够根据相关评价对象和理想化解的接近程度进行排序。AHP-TOPSIS能够考虑多个目标和因素,使工程师能够更科学地做出决策,以选择最适合特定条件的装备。

1 构建AHP-TOPSIS综合评判模型

1.1 AHP原理

AHP的基本原理:将待评价系统的有关替代方案的各种要素分解成若干层次,并对同一层次的各种要素进行两两比较,计算出各要素的权重,最后根据综合权重确定最优方案。

该方法构建判断矩阵时用1~9标度法对各要素重要性判断结果进行量化,要素的相对重要性标度见表1。用指标之间的两两比值作为矩阵中元素构造判断矩阵。

表1 相对重要性标度

Table 1 Relative importance scale

重要性标度	含义(针对i,j两个元素相比)
1	前者i和后者j具有同等重要性
3	前者i比后者j稍重要
5	前者i比后者j明显重要
7	前者i比后者j强烈重要
9	前者i比后者j极端重要
2,4,6,8	表示上述判断的中间状态对应的标度值
1~9的倒数	若元素i与元素j的重要性之比为a_{ij},则元素j与元素i的重要性之比为$A_{ji}=1/a_{ij}$

判断矩阵的最大特征值和特征向量采用几何平均近似法(方根法)计算,计算步骤如下。

(1) 计算矩阵各行各元素乘积。

$$m_i=\prod_{i=1}^{n}a_{ij} \tag{1}$$

式中:$i,j=1,2,3,\cdots,n$。

(2) 计算n次方根。

$$\overline{w}_i=\sqrt[n]{m_i} \tag{2}$$

(3) 对向量$\overline{\boldsymbol{w}}=(\overline{w}_1,\overline{w}_2,\cdots,\overline{w}_n)^{\mathrm{T}}$进行规范化处理。

$$\hat{w}_i=\frac{\overline{w}_i}{\sum_{i=1}^{n}\overline{w}_i} \tag{3}$$

得到$\hat{\boldsymbol{w}}=(\hat{w}_1,\hat{w}_2,\cdots,\hat{w}_n)^{\mathrm{T}}$,为所求特征向量近似值,即各因素权重。

(4) 计算矩阵的最大特征值$\lambda_{\max}$。

$$\lambda_{\max}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(\boldsymbol{A}\hat{\boldsymbol{w}})_i}{w_i} \tag{4}$$

式中,$(\boldsymbol{A}\hat{\boldsymbol{w}})_i$为向量$(\boldsymbol{A}\hat{\boldsymbol{w}})$的第$i$个元素。

(5) 计算判断矩阵一致性指标,并检验其一致性。

为检验矩阵的一致性,定义 $CI=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1}$。当 $CI=0$ 时,判断矩阵具有完全一致,CI 愈大,矩阵的一致性愈差。对于 1 ~ 14 阶矩阵,平均随机一致性指标 RI 见表 2。

表 2 平均随机一致性指标

Table 2 Average random consistency indicators

阶数 n	RI 值	阶数 n	RI 值
1	0.520	8	1.490
2	0.890	9	1.520
3	1.120	10	1.540
4	1.260	11	1.560
5	1.360	12	1.580
6	1.410	13	1.590
7	1.460	14	1.594

根据 CI、RI 值求解 CR:

$$CR=\frac{CI}{RI} \tag{5}$$

当阶数不超过 2 时,矩阵始终完全一致;当阶数超过 2 时,若 $CR<0.1$,则表明判断矩阵表现出满意的一致性;若 $CR\geqslant 0.1$,则需要对矩阵进行调整,直至通过一致性检验。

1.2 结合 AHP 的 TOPSIS 算法原理

传统 TOPSIS 法默认指标权重相等,评估结果可能与实际出现偏差,鉴于此,提出一种基于 AHP 计算出的权重改进待评估对象的正、负理想解,从而构建带权重的 AHP-TOPSIS 模型的方法。该方法的步骤如下:

(1) 数据标准化处理。

设各待评价方案的指标数据矩阵为:

$$\boldsymbol{X}=\begin{pmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ X_{m1} & \cdots & X_{mn} \end{pmatrix} \tag{6}$$

式中:m 为待评价方案的个数;n 为指标个数。

利用式(7) 和式(8) 消除各指标的量纲影响,得到标准矩阵 $\boldsymbol{X}'$,具体公式如下:

$$\text{正向指标:}\boldsymbol{X}'_{ij}=\frac{X_{ij}-\min(X_j)}{\max(X_j)-\min(X_j)} \tag{7}$$

$$\text{负向指标:}\boldsymbol{X}'_{ij}=\frac{\max(X_j)-X_{ij}}{\max(X_j)-\min(X_j)} \tag{8}$$

式中,$\boldsymbol{X}'_{ij}$ 为第 i 个方案第 j 项指标标准化后的值;$\max(X_j)$ 表示第 j 项指标的最大值;$\min(X_j)$ 表示第 j 项指标的最小值。

(2) 建立加权决策评价矩阵。

由 AHP 计算得出的指标权重 $\boldsymbol{w}_j$ 组成权重向量 $\boldsymbol{W}$,基于标准化 $\boldsymbol{X}'_{ij}$,得到标准化加权矩阵 $\boldsymbol{V}$,计算公式为:

$$\boldsymbol{V}=\boldsymbol{X}'_{ij}\cdot\boldsymbol{W}=[V_{ij}]_{m\times n} \tag{9}$$

(3) 确定正负理想解 V^+ 和 V^-。

$$V^+=\{\max(V_{ij})\mid i=1,2,\cdots,m\}=\{V_1^+,V_2^+,\cdots,V_m^+\} \tag{10}$$

$$V^-=\{\min(V_{ij})\mid i=1,2,\cdots,m\}=\{V_1^-,V_2^-,\cdots,V_m^-\} \tag{11}$$

式(10) 和式(11) 是针对正向型指标的计算公式,如存在负向型指标,则计算相反,V^+ 取指标的最小值,V^- 取指标的最大值,因在标准化数据处理时已经对负向型指标进行处理,故在确定正负理想解的时候按正向型指标处理即可。

(4) 计算贴近度。

分别计算各待评价方案与正理想解 V^+、负理想解 V^- 的距离 D_i^+ 和 D_i^-。

$$D_i^+=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(V_{ij}-V_j^+)^2} \tag{12}$$

$$D_i^-=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(V_{ij}-V_j^-)^2} \tag{13}$$

一般只需要计算评价对象与正理想解的贴近度 E_i^+,E_i^+ 的取值介于[0,1],其值越大,表示越靠近最优水平。

$$E_i^+=\frac{D_i^-}{D_i^++D_i^-} \tag{14}$$

2 尾砂浓密装置优选实例

某多金属矿设计采选规模为 7 500 t/d,设计采用的采矿方法为大直径深孔阶段空场嗣后充填采矿法和分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿法。为满足充填采矿法及采空区治理需求,该矿充填系统设计生产能力为 8.0×10^5 m^3/a,充填主材料为该矿选厂产出的全尾砂及充填胶固粉,全尾砂粒径分布为−200 目占比约 75%。经物料平衡计算,该充填系统日均浓密处理尾砂量为 3 200 t/d,日最大浓密处理尾砂量为3 840 t/d。

根据目前国内外尾砂浓密技术发展现状,可供该多金属矿山充填系统选择的尾砂浓密装置主要有 3 种,分别为立式砂仓、深锥浓密机和膏体仓储浓密机。这 3 种浓密装置的尾砂浓缩脱水工艺与原理各

不相同,立式砂仓主要采用自然沉降与高泥层压缩的脱水工艺,深锥浓密机主要采用絮凝沉降与耙架扰动相结合的脱水工艺,膏体仓储浓密机主要采用絮凝沉降与高泥层压缩脱水工艺。根据该多金属矿山的充填系统设计规模,初步确定 3 种浓密装置方案的选型和数量见表 3。

表 3 浓密装置的选型及数量

Table 3 Selection and amount of thickening devices

方案 1	方案 2	方案 3
4 个直径为 12 m、高度为 20 m 的立式砂仓。	1 个直径为 18 m 的深锥浓密机和 2 个直径为 12 m、高度为 20 m 的立式砂仓。	2 个膏体仓储浓密机。

2.1 基于 AHP 计算的方案优选评价体系及指标权重

影响尾砂浓缩装置选择的因素众多,如造价、运营成本、浓缩工艺繁简度、有效容积利用率、检修难易程度、工作效率等,本研究选择的评价因素指标见表 4。通过向 10 名业内专家发放调查问卷的方式构建尾砂浓密装置方案优选评价指标的判断矩阵。根据 10 名专家在问卷中对 3 项一级指标下的 13 项二级指标之间两两相对重要性的打分,综合考虑每项指标的大部分专家勾选的相对重要性等级,构造各层级的判断矩阵如下。

表 4 尾砂浓密装置方案优选评价指标体系

Table 4 Evaluation index system for optimization of tailings thickener plan

目标(A)	准则层(B)	元素层(C)
尾砂浓密装置优选	经济指标(B_1)	造价(C_1)
		运行成本(C_2)
	条件指标(B_2)	场地要求(C_3)
		尾砂性质适应度(C_4)
	技术指标(B_3)	放砂质量浓度(C_5)
		溢流水澄清度(C_6)
		浓缩工艺繁简度(C_7)
		有效容积利用率(C_8)
		故障率(C_9)
		检修难易程度(C_{10})
		清洗难易程度(C_{11})
		尾砂淤积难易程度(C_{12})
		工作效率(C_{13})

$$\boldsymbol{D}_A=\begin{bmatrix}1 & 2 & 1/2\\ 1/2 & 1 & 1/3\\ 2 & 3 & 1\end{bmatrix} \tag{15}$$

$$\boldsymbol{D}_{B1}=\begin{bmatrix}1 & 3\\ 1/3 & 1\end{bmatrix} \tag{16}$$

$$\boldsymbol{D}_{B2}=\begin{bmatrix}1 & 1/2\\ 2 & 1\end{bmatrix} \tag{17}$$

$$\boldsymbol{D}_{B3}=\begin{bmatrix}1 & 5 & 3 & 4 & 3 & 5 & 6 & 6 & 2\\ 1/5 & 1 & 1/3 & 1/2 & 1/3 & 1/2 & 2 & 3 & 1/2\\ 1/3 & 3 & 1 & 2 & 1 & 3 & 4 & 4 & 1\\ 1/4 & 2 & 1/2 & 1 & 1/2 & 2 & 3 & 3 & 1/2\\ 1/3 & 3 & 1 & 2 & 1 & 2 & 4 & 4 & 1\\ 1/5 & 2 & 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1 & 2 & 2 & 1/2\\ 1/6 & 1/2 & 1/4 & 1/3 & 1/4 & 1/2 & 1 & 1 & 1/3\\ 1/6 & 1/3 & 1/4 & 1/3 & 1/4 & 1/2 & 1 & 1 & 1/4\\ 1/2 & 2 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1/3 & 4 & 1\end{bmatrix} \tag{18}$$

利用 SPSSU 软件计算出各层级判断矩阵的权重,并进行一致性检验。以一级指标 A 为例,其判断矩阵 $\boldsymbol{D}_A$ 的最大特征根 $\lambda_{max}=3.009$,通过将矩阵归一化后计算得出特征向量如下:

$$\boldsymbol{w}=(w_1,w_2,w_3)^{\mathrm{T}}=(0.297\ 0,0.163\ 4,0.539\ 6)^{\mathrm{T}} \tag{19}$$

对矩阵进行一致性检验如下:

$$CI=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1}=\frac{3.009-3}{3-1}=0.005 \tag{20}$$

$$CR=\frac{CI}{RI}=\frac{0.005}{0.54}=0.009 \tag{21}$$

根据上文所描述的判断标准,一致性指标 $CI<0.1$,且一致性比率 $CR<0.1$,因此矩阵 $\boldsymbol{D}_A$ 通过一致性检验。类似地,对上述各层级的指标进行权重计算和一致性检验,各层级的判断矩阵均通过一致性检验,可得出各指标对于总目标的组合权重,具体数据见表 5,指标的权重分布如图 1 和图 2 所示。

表 5 尾砂浓密装置方案优选评价指标权重

Table 5 Weights of evaluation indicators for optimization of tailings thickener plan

准则层(B)	权重	元素层(C)	层级内权重	全局权重
经济指标(B_1)	0.297 0	造价(C_1)	0.750 0	0.222 7
		运行成本(C_2)	0.250 0	0.074 3
条件指标(B_2)	0.163 4	场地要求(C_3)	0.333 3	0.054 5
		尾砂性质适应度(C_4)	0.666 7	0.108 9
技术指标(B_3)	0.539 6	放砂质量浓度(C_5)	0.301 0	0.162 4
		溢流水澄清度(C_6)	0.055 8	0.030 1
		浓缩工艺繁简度(C_7)	0.146 0	0.078 8
		有效容积利用率(C_8)	0.089 1	0.048 1
		故障率(C_9)	0.139 5	0.075 3
		检修难易程度(C_{10})	0.065 1	0.035 1
		清洗难易程度(C_{11})	0.035 6	0.019 2
		尾砂淤积难易程度(C_{12})	0.032 9	0.017 8
		工作效率(C_{13})	0.135 1	0.072 9

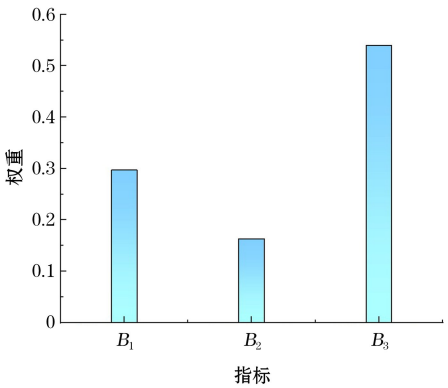


图 1 准则层指标的权重分布

Fig.1 Distribution indicator weights of the criterion level

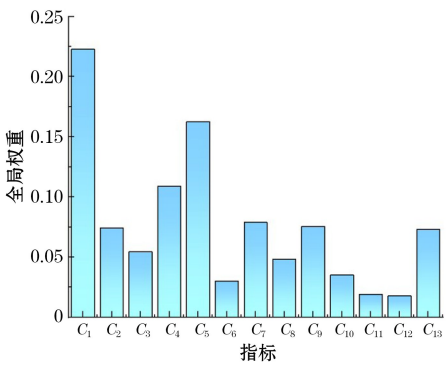


图 2 元素层指标全局权重分布

Fig.2 Distribution global weights of element layer indicators

2.2 尾砂浓密装置方案优选

邀请行业专家对 3 种尾砂浓密装置方案的 13 项指标按 7 级量表进行打分,具体打分情况见表 6。

表 6 3 种尾砂浓密装置方案的指标得分

Table 6 Index scores of three tailings thickener schemes

方案	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}
方案 1	5	2	3	5	6	2	7	6	5	5	6	4	3
方案 2	4	5	4	4	5	6	5	5	4	3	5	7	5
方案 3	7	8	5	7	6	6	5	6	7	6	4	4	7

为了使得表 6 中的得分变化更加具象化,将表 6 中的数据进行绘制折线图,如图 3 所示。

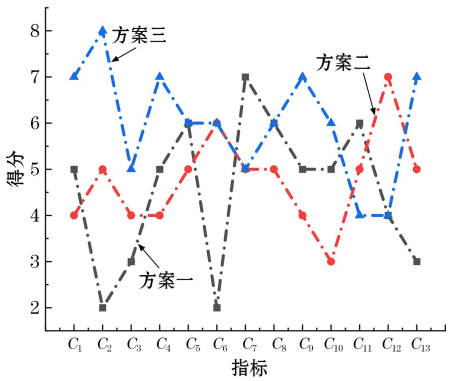


图 3 3 种尾砂浓密装置方案的不同指标得分

Fig.3 The scores of different indicators for three tailings thickener schemes

利用极差法对 3 种方案的指标值进行标准化处理,将上文 AHP 计算出的指标权重进行加权得到加权规范化矩阵以及正负理想解,见表 7。

表 7 3 种尾砂浓密装置方案的规范化矩阵及正负理想解

Table 7 Standardized matrices, positive and negative ideal solutions of three tailings thickener schemes

项目	C_1	$C2$	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}
方案 1	0.074 3	0.000 0	0.000 0	0.036 3	0.162 4	0.000 0	0.078 8	0.048 1	0.025 1	0.023 4	0.019 2	0.000 0	0.000 0
方案 2	0.000 0	0.037 1	0.027 2	0.000 0	0.000 0	0.030 1	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.009 6	0.017 8	0.036 5
方案 3	0.222 8	0.074 3	0.054 5	0.108 9	0.162 4	0.030 1	0.000 0	0.048 1	0.075 3	0.035 1	0.000 0	0.000 0	0.072 9
正理想解	0.222 8	0.074 3	0.054 5	0.108 9	0.162 4	0.030 1	0.078 8	0.048 1	0.075 3	0.035 1	0.019 2	0.017 8	0.072 9
负理想解	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0

根据各方案 3 个一级指标及整体指标与正负理想解距离,计算出各维度相对贴近度及排名,见表 8 至表 11。3 种尾砂浓密装置方案各维度及整体评价排名情况见表 12。

表 8 经济指标 B_1 的相对贴近度及排名

Table 8 Relative proximity and ranking of economic indicator B_1

方案	D^+	D^-	E^+	排名
方案 1	0.166 0	0.074 3	0.309 0	2
方案 2	0.225 8	0.037 1	0.141 2	3
方案 3	0.000 0	0.234 8	1.000 0	1

表 9 条件指标 B_2 的相对贴近度及排名

Table 9 Relative proximity and ranking of conditional indicator B_2

方案	D^+	D^-	E^+	排名
方案 1	0.090 8	0.036 3	0.285 7	2
方案 2	0.112 3	0.027 2	0.195 2	3
方案 3	0.000 0	0.121 8	1.000 0	1

表 10 技术指标 B_3 的相对贴近度及排名

Table 10 Relative proximity and ranking of technical indicator B_3

方案	D^+	D^-	E^+	排名
方案 1	0.095 9	0.190 9	0.665 6	2
方案 2	0.207 9	0.051 4	0.198 2	3
方案 3	0.083 0	0.204 5	0.711 3	1

表 11 3 种尾砂浓密装置方案的相对贴近度及排名

Table 11 Relative proximity and ranking of three tailings thickener schemes

方案	D^+	D^-	E^+	排名
方案 1	0.212 1	0.208 0	0.495 1	2
方案 2	0.326 8	0.069 0	0.174 3	3
方案 3	0.083 0	0.334 3	0.801 1	1

表 12 3 种尾砂浓密装置方案的排名

Table 12 Ranking of three tailings thickener schemes

评价项目	方案排名
经济指标 B_1	方案 3>方案 1>方案 2
条件指标 B_2	方案 3>方案 1>方案 2
技术指标 B_3	方案 3>方案 1>方案 2
整体情况	方案 3>方案 1>方案 2

通过以上分析确定上述尾砂浓密装置方案 1、方案 2 和方案 3 的综合优越度分别为 49.51%、17.42%、80.11%,可知方案 3(膏体仓储浓密机方案)为最佳方案。

3 结论

(1) 通过向多名业内专家发放调查问卷打分的方式,基于 AHP 建立了尾砂浓密装置方案评价指标的判断矩阵,使得判断矩阵更加科学和贴近实际,可以有效避免决策失衡的现象。

(2) 利用 AHP-TOPSIS 评判模型对尾砂浓密装置方案进行了综合评价和优选。通过对某多金属矿山的 3 种浓密装置备选方案进行计算和分析,得出了各方案的综合优越度排序,其中方案 3(膏体仓储浓密机方案)综合优越度最高,达到 80.11%,因此可以判定该方案为最佳方案。该结果在工程实践中得到了验证,某多金属矿山的充填系统于 2024 年 4 月建成,采用基于膏体仓储浓密机的充填工艺方案,经过调试运行,单台膏体仓储浓密机的尾砂处理能力达到 100 t/h 以上,尾砂存储能力超过 1 600 t,浓密机底流质量浓度在 68%以上,最高底流质量浓度达 74%,充填效果良好。

(3) 膏体仓储浓密机采取无耙架设计,采用絮凝沉降与高泥层压缩脱水工艺,可以将尾砂高效浓缩后存储在仓内,可实现尾砂边进边出、只进不出、只出不进、不进不出 4 种放砂充填工况。该尾砂浓缩装备具有占地面积小、底流质量浓度波动小、运行成本低、故障率低等特点。

(4) 通过实践案例验证了基于 AHP-TOPSIS 评判模型的尾砂浓密装备优选方法是可行的。该方法不仅能够全面考虑经济、条件、技术等多维度的因素,还能根据生产实际需求量化各评价指标的权重,具有灵活性和普遍适用性,可为决策者提供客观科学的评价结果。

参考文献(References):

[1] 施灿海,刘明生,程立家,等.尾矿综合利用研究进展及工程实践[J].中国矿业,2024,33(2):107-114.
SHI Canhai, LIU Mingsheng, CHENG Lijia, et al. Research progress and engineering practice on comprehensive utilization of tailings[J]. China Mining Magazine,2024,33(2):107-114.

[2] 张兴旺.充填采矿法在铜矿的运用实践探索[J].世界有色金属,2024(21):196-198.
ZHANG Xingwang. Exploration of the application practice of fill mining method in copper mines[J]. World Nonferrous Metals,2024(21):196-198.

[3] 朱起作,段庆豹,刘建国,等.高寒地区金属非金属矿山采空区充填技术研究[J].矿业研究与开发,2023,43(12):59-64.
ZHU Qizuo, DUAN Qingbao, LIU Jianguo, et al. Research on filling technology of goaf in metal and non-metal mines in alpine region[J]. Mining Research and Development,2023,43(12):59-64.

[4] 孙光华,王玥,任伟成.胶结充填技术在金属矿山中的应用现状与发展趋势[J].有色金属(矿山部分),2022,74(4):26-33.
SUN Guanghua, WANG Yue, REN Weicheng. Application status and development trend of cemented filling technology in metal mines[J]. Nonferrous Metals(Mine Section),2022,74(4):26-33.

[5] 李明骏,莫静,周成豪.武山铜矿全尾砂膏体充填顶板稳定性分析[J].铜业工程,2023(4):126-130.
LI Mingjun, MO Jing, ZHOU Chenghao. Stability analysis of full tailing paste filling roof in wushan copper mine[J]. Copper Engineering,2023(4):126-130.

[6] 魏钊,吕文生,杨鹏,等.超声聚能器作用下全尾砂浆浓密沉降试验[J].矿业研究与开发,2022,42(11):34-41.
WEI Zhao, LYU Wensheng, YANG Peng, et al. Thickening sedimentation test on unclassified tailings slurry under the action of ultrasonic focusing transducer[J]. Mining Research and Development,2022,42(11):34-41.

[7] 姚宣成.某金矿全尾砂膏体充填优化配比及性能研究[J].黄金,2024,45(11):75-79.
YAO Xuancheng. Optimization of ungraded tailings paste backfill mix ratio and performance study in a gold mine[J]. Gold,2024,45(11):75-79.

[8] 王章,祝小龙,纪芳,等.马钢矿业地下矿山充填工艺关键技术[J].现代矿业,2022,38(6):64-67.
WANG Zhang, ZHU Xiaolong, JI Fang, et al. Key technology of filling process in underground mines of Anhui Masteel Mining Resources Group Co., Ltd.[J]. Modern Mining,2022,38(6):64-67.

[9] 江科,黄腾龙,刘杨,等.降低立式砂仓溢流浓度的措施探究[J].采矿技术,2023,23(4):172-175.
JIANG Ke, HUANG Tenglong, LIU Yang, et al. Research on measures to reduce overflow concentration in vertical sand silo[J]. Mining Technology,2023,23(4):172-175.

[10] 徐刚,侯亚平,金洪伟,等.基于改进 AHP-TOPSIS 模型的矿井通风系统安全评价方法[J].矿业研究与开发,2023,43(4):166-172.
XU Gang, HOU Yaping, JIN Hongwei, et al. Safety evaluation method of mine ventilation system based on improved AHP-TOPSIS model[J]. Mining Research and Development,2023,43(4):166-172.

[11] 李翠平,侯贺子,阮竹恩,等.浓密机内细尾砂沉降脱水规律模拟研究[J/OL].中南大学学报(自然科学版):1-11[2024-12-25]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1426.N.20241209.1623.004.html.
LI Cuiping, HOU Hezi, RUAN Zhuen, et al. Simulation study on the settling dewatering of fine tailings in a lab-scale thickener[J/OL]. Journal of Central South University (Science and Technology):1-11[2024-12-25]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1426.N.20241209.1623.004.html.

[12] 罗才严,郑伯坤,张峰.四方金矿充填系统与工艺的方案选择[J].采矿技术,2022,22(2):121-125.
LUO Caiyan, ZHENG Bokun, ZHANG Feng. Scheme selection of filling system and technology in Sifang Gold Mine[J]. Mining Technology,2022,22(2):121-125.

[13] 赖伟.尾砂浆体仓式浓密技术及其充填应用[J].黄金,2023,44(9):31-35.
LAI Wei. Tailing slurry warehouse thickening technology and its application in mine filling[J]. Gold,2023,44(9):31-35.

[14] 赵晶莹.充填系统与设备选型分析[J].有色矿冶,2024,40(5):16-18.
ZHAO Jingying. Analysis of filling system and equipment selection[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy,2024,40(5):16-18.

[15] 魏正坤.磷酸装置浓密机底流提浓技改[J].硫磷设计与粉体工程,2024(1):34-36+49.
WEI Zhengkun. Retrofit of thickener underflow density in a phosphoric acid plant[J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering,2024(1):34-36+49.