

霍丙杰, 康尚博, 李其平, 等. 极近距离煤层开采再生顶板稳定性评价模型构建与应用[J]. 安全与环境学报, 2026, 26(6): 2073–2083.

HUO B J, KANG S B, LI Q P, et al. Construction and application of a stability evaluation model for regenerated roof in ultra-close distance coal seam mining[J]. Journal of Safety and Environment, 2026, 26(6): 2073–2083.

极近距离煤层开采再生顶板稳定性评价模型构建与应用*

霍丙杰¹, 康尚博¹, 李其平², 夏平川³, 刘 灿², 郭东旭¹, 张丞博¹

(1 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁阜新 123000;

2 新疆昌吉市菏泽腾达矿业有限责任公司, 新疆昌吉 831115;

3 武汉工程科技学院机械与工程学院, 武汉 430200)

摘 要: 针对极近距离煤层下行开采时再生顶板稳定性影响下煤层安全高效开采的核心问题, 研究再生顶板稳定性评价理论与方法, 以保障矿井的安全生产。构建了涵盖再生顶板自身因素、地质环境因素和开采扰动因素 3 个准则层及岩性组合、压实胶结时间等 8 个指标的综合评价指标体系。提出了一种层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP)-熵权组合赋权与逼近理想解排序法 (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS) 相耦合的评价模型, 通过组合赋权法均衡主客观权重以科学确定指标影响程度, 利用 TOPSIS 法计算各评价对象的相对接近度, 以此量化稳定性。基于 ArcGIS 平台采用反距离权重 (Inverse Distance Weighting, IDW) 法实现了再生顶板稳定性的空间可视化表达并提出分区管理对策。以胜利煤矿层间距极小 (平均 1.45 m) 的 14、15 煤层为工程背景进行应用研究, 分析方法的可操作性与科学性。结果表明: (1) 岩性组合是影响再生顶板稳定性的主导因素, 其权重高达 0.543; (2) 再生顶板稳定性可划分为 4 个等级, 研究区 15 煤层再生顶板稳定区 (I 级) 和较稳定区 (II 级) 占比达 80%, 整体稳定性较好; 不稳定区 (III 级) 与极不稳定区 (IV 级) 主要分布于水文地质条件复杂、有少量断层、岩性组合差且胶结时间短的区域; (3) 经相似回采工作面验证, 模型评价结果与现场实际吻合度达 80%。构建的评价模型与方法能有效实现对极近距离煤层再生顶板稳定性的评价与空间预测, 研究结果可为类似条件下煤层安全开采提供理论依据和技术支持。

关键词: 安全工程; 极近距离煤层; 再生顶板; 稳定性评价; 熵权法; 逼近理想解排序法

中图分类号: X936; TD327.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-6094(2026)06-2073-11

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2025.1687

0 引 言

随着我国煤炭资源开采向深部及复杂地质区域不断发展^[1-2], 近距离和极近距离煤层的安全高效开采已成为许多矿区面临的共同技术难题。在此类煤层群中, 下位煤层的开采活动直接受控于形成的“再生顶板”的稳定程度。所谓再生顶板即由上部采空区内破碎煤岩体经再次压实、胶结形成的再生岩体作为下煤层开采的顶板^[3]。该类岩体并非原生岩层结构, 胶结程度差, 是由煤、岩块混合压实而成, 整体强度极低, 巷道开挖后随即表现出较大变形, 随着工作面的回采, 在强扰动条件下再生顶板极易松散、破碎, 难以稳定^[4]。这使得传统基于原生结构岩层的顶板稳定性评价方法难以直接应用, 给下位煤层的工作面布置、支护设计及灾害防控带来了极大挑战。

近年来, 国内外学者围绕再生顶板结构特性、稳定性机理及控制技术等方面开展了系统性研究, 并取得了重要进展。1993 年, 赵和松^[5]首次对再生顶板的结构形式进行了系统划分, 并提出了控制原则, 为该领域的研究体系奠定了基础。2014 年, Kang^[6]系统论述了深部及复杂巷道支护技术, 首次全面分析了多次采动影响下围岩的破坏机理与控制原则, 为地下工程围岩稳定性评价提供了重要理论框架。陶明印等^[7]针对复杂再生顶板开展了应力分析, 提出了有针对性的控制对策, 深化了对再生顶板力学行为的认识。冯国瑞等^[8-9]通过相似模拟试验系统研究了垮落法残采区上行开采的可行性, 提出了技术条件判定理论与方法, 揭示了再生顶板在重复采动影响下的变形与破坏特征。王同旭等^[10-11]通过数值模拟再生顶板破坏过程, 发现再生顶板失稳模式为小块岩体到大块关键块体的失稳。马文强

* 收稿日期: 2025-09-23

作者简介: 霍丙杰, 教授, 博士, 从事矿山压力与矿井动力灾害防治研究, huobingjie@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52174185); 第二师铁门关市科技计划项目(2024HZ0108)

等^[12-13]研究了复采采场再生顶板结构特征与支架载荷确定方法,进一步发展了注-锚联合支护技术,为再生顶板巷道支护设计提供了重要理论依据与技术途径。杨庆威^[14]以白皎煤矿为背景,系统研究了余煤复采过程中的顶板控制关键技术,并综合集成了防灭火技术体系,为复杂条件下复采提供了重要工程借鉴。李怀宾等^[15]针对深部大跨度采场顶板垮塌问题,通过对原始数据进行对数回归分析,改进 Mathews 稳定图并结合厚板理论对红透山铜矿深部大跨度采场顶板进行了稳定性分析,为类似研究提供了参考。朱涛等^[16]深入研究了下层煤采场的顶板结构特征与控制方法,明确了关键层的运移规律对支架-围岩关系的影响。李凤仪等^[17]针对薄煤层下分层复采工作面的顶板控制技术提出了实践方案,保障了特殊条件下的安全开采。李文军^[18]从工程应用角度分析了煤矿再生顶板发生事故的主要原因,介绍了再生顶板事故的特点及类型并探讨了煤矿再生顶板安全管理的技术要点。

这些研究成果极大地丰富了再生顶板的理论体系,并为工程实践提供了多样化的控制技术选择。然而,目前关于极近距离煤层开采再生顶板方面的文献报道尚少,尤其对于层间距极小甚至出现合层现象的“极近距离煤层”再生顶板稳定性评价的研究几乎没有,亟须建立一套能够综合多源信息、融合主客观权重并实现稳定性空间可视化表达的定量评价体系与方法。基于此,本文以内蒙古胜利煤矿极近距离赋存的 14、15 煤层为工程背景,提出并构建一个融合再生顶板自身属性、地质环境和开采扰动因素的综合评价指标体系。将层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP)^[19]与熵权法^[20]相结合以确定指标组合权重^[21],并引入逼近理想解排序法 (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)^[22]对再生顶板稳定性进行量化评价。最后,借助 ArcGIS^[23]平台的空间插值功能,实现研究区内再生顶板稳定性的分区与可视化表达,以期类似条件下的煤层安全开采提供理论依据与决策支持。

1 极近距离煤层再生顶板稳定性评价模型构建

1.1 评价指标体系建立

(1) 指标体系构建原则。

为确保科学性和可靠性,遵循以下原则构建极近距离煤层再生顶板稳定性评价指标体系。

a. 科学性原则,指标需具有明确的物理力学或地质含义,源于经典理论;

b. 系统性原则,从内在属性、外部环境、工程因素等多维度全面考量;

c. 可操作性原则,指标数据需便于通过现场勘探、试验或生产记录获取;

d. 定性与定量相结合原则,对定性指标采用等级赋值法进行量化处理;

e. 主导因素原则,聚焦控制稳定性的关键变量,避免体系冗杂。

(2) 指标含义与相互联系。

再生顶板稳定性受多因素耦合影响,基于科学性、系统性及数据可得性原则,主要从再生顶板自身因素、地质环境因素、开采扰动因素 3 个主要因素出发,考虑定量与定性属性,总结出具有代表性的 8 个评价指标:岩性组合、压实胶结时间、再生顶板厚度、含水率、埋深、地质构造影响程度、平均来压步距和平均来压强度。

岩性组合指再生顶板中垮落岩块的岩石类型分布比例,特别是坚硬岩层(砂岩)与软弱岩层(泥岩)的相对含量,该岩性组合特征不仅是构成再生顶板的物质骨架,更从成因上决定了再生顶板的胶结物类型与本质强度。再生顶板的胶结物必然以母岩为主导,这从根本上制约了再生顶板的稳定性上限。因此,岩性组合指标综合反映了“骨架支撑”与“胶结强度”的双重效应,是控制稳定性的核心,岩性组合指标值通过钻孔岩屑筛分,以坚硬岩石质量占总岩屑质量的百分比(%)表征。压实胶结时间指上煤层采空区顶板垮落基本稳定后至下煤层开采前所经历的时间段,该过程直接影响垮落矸石的压密程度和化学胶结效应,其值通过矿井生产台账与采掘接续计划查询获得。再生顶板厚度指垮落岩块经采动压实后重新形成的、具有一定承载能力的岩层总厚度,可综合反映再生顶板的结构稳定性与抗变形能力,通过仰孔钻探并记录钻透该层位进尺数据直接量取获得。含水率指再生顶板在天然状态下的水分含量,地下水浸泡会显著降低岩块间摩擦系数和胶结物强度,其值通过钻孔取样采用烘干法测定质量含水率获得。埋深指煤层赋存位置距地表的垂直距离,作为地应力场的主要影响因素,其值通过标高数据计算获得。地质构造影响程度指综合考量原生地质构造与采动扰动后,再生顶板所表现出的岩体结构复杂性,该指标以上煤层剧烈采动导致的再生顶板内部裂隙发育与破碎情况为主、原生地质构造

为辅来表现岩体结构复杂性,其值可依据钻孔岩芯裂隙发育与破碎程度进行分级赋值评估获得。平均来压步距指上煤层开采时老顶周期来压步距的统计平均值,反映上覆关键层对再生顶板的周期性压实作用强度,其值通过分析液压支架压力监测历史数据统计计算获得。平均来压强度指上煤层老顶周期来压期间支架工作阻力增量的平均值,该指标反映了上覆关键层破断对再生顶板造成的周期性冲击扰动强度,是量化开采扰动核心参数,通过处理支架阻力监测数据求取各次来压时支架工作阻力的平均值与来压前工作阻力平均值的差值以得到单次来压强度,最后将所有次来压强度进行算术平均计算获得。

这些评价指标体现了再生顶板形成的内在属性、赋存环境的外在影响及开采扰动的动态作用。岩性组合、压实胶结时间与再生顶板厚度作为表征顶板自身特性的核心指标,分别从材料组成基础、成岩过程持续性和结构尺度特征三个方面决定了再生顶板的固有稳定属性;含水率、埋深和地质构造影响程度作为地质环境要素,分别通过水分弱化效应、地应力场作用和结构面发育程度从流体作用、力学环境和岩体结构三个维度制约着再生顶板的稳定状态;平均来压步距和平均来压强度作为开采扰动要素,通过表征顶板周期来压的时空规律与动力强度,反映了采动影响对再生顶板稳定性的动态调控作用。这些指标共同构成了一个涵盖材料特性、环境因素与工程扰动的综合评价系统。根据上述原则与分析建立如图 1 所示的再生顶板稳定性评价指标体系。

1.2 评价方法理论与流程

在选定影响煤层顶板稳定性的评价指标后,需要合理确定各项指标的权重。首先采用 AHP 法,利用已有工程实际经验确定指标的主观权重,然后利用熵权法对指标客观赋权,修正由 AHP 法判断权重

产生的主观性,再结合 TOPSIS 法确定每个评价对象与理想解的相对接近度,分析这些相对接近度,就可以准确地评价煤层再生顶板的稳定性。

(1) AHP 法。

层次分析法(AHP 法)是一种定性和定量分析的决策方法,常用于解决多目标的复杂决策问题,也被用于评价指标权重的确定。AHP 法计算步骤如下。

a. 分析影响结果的因素,建立问题的层次结构模型;

b. 将同一层次各指标之间两两比较,建立判断矩阵,判断矩阵量化关系见表 1;

c. 对判断矩阵进行运算得到特征向量,得到该层次各项指标的权重;

d. 对判断矩阵进行一致性检验。

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \quad (1)$$

式中 C_R 为一致性比率; C_1 为一致性指标, $C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$; n 为矩阵阶数; $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征根; R_1 为随机一致性指标,对应不同矩阵阶数下的取值见表 2。若 $C_R \leq 0.1$,则该权重向量有效。

表 1 判断矩阵标度

Table 1 Scale of judgment matrix

标度	含义
1	因素 r_i 与 r_j 同等重要
3	因素 r_i 比 r_j 稍微重要
5	因素 r_i 比 r_j 明显重要
7	因素 r_i 比 r_j 强烈重要
9	因素 r_i 比 r_j 极端重要
2, 4, 6, 8	上述标度之间的中间值

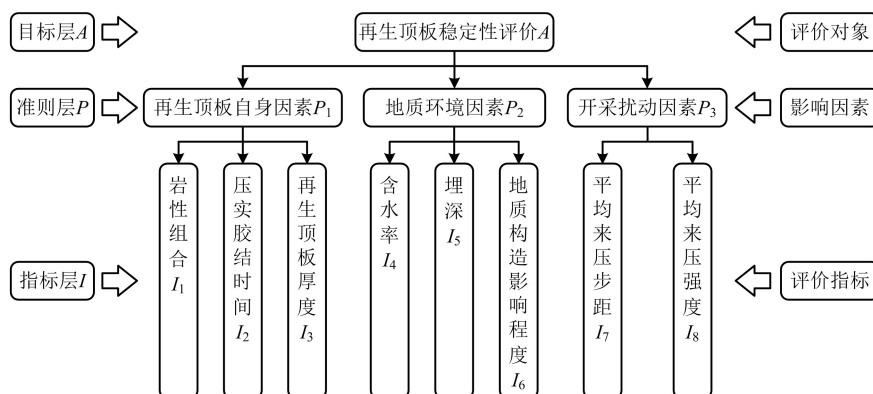


图 1 再生顶板稳定性评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system for the stability of regenerated roof

表 2 随机一致性指标值

Table 2 Random consistency index value

阶数 n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_1	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

(2) 熵权法。

熵权法是在客观条件下,依据评价指标的原始数据来确定评价指标权重的一种方法,在评价中某项评价指标的信息熵越小,该评价指标提供的信息就越大,权重也越大。熵权法计算步骤如下。

a. 将 m 个评价对象 n 个评价指标的原始数据 x_{ij} ($i=1,2,\dots,m;j=1,2,\dots,n$) 组成的矩阵定义为 $X=(x_{ij})_{m \times n}$ 。

b. 对于指标值越大评价就越好的正向指标和指标值越小评价就越好的逆向指标,分别进行量纲归一化(规范化)处理,其中正向指标为

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j x_{ij}}{\max_j x_{ij} - \min_j x_{ij}} \quad (2)$$

逆向指标为

$$y_{ij} = \frac{\max_j x_{ij} - x_{ij}}{\max_j x_{ij} - \min_j x_{ij}} \quad (3)$$

c. 计算第 i 个评价对象第 j 个评价指标的比重,即

$$f_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}} \quad (4)$$

d. 计算第 j 个评价指标的熵值,即

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (5)$$

e. 计算各评价指标的熵权,即

$$w_{j,e} = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad j=1,2,\dots,n \quad (6)$$

(3) 主客观组合赋权。

设由 AHP 法确定的第 j 个评价指标总排序权重为 $w_{j,a}$,每个指标的总排序权重 = 该指标在准则层下的权重 $\times$ 该指标所属准则层的权重;由熵权法确定的第 j 个评价指标权重为 $w_{j,e}$,则两种方法确定的第 j 个评价指标的组合权重为

$$w_j = \frac{w_{j,a} w_{j,e}}{\sum_{j=1}^n w_{j,a} w_{j,e}} \quad j=1,2,\dots,n \quad (7)$$

(4) TOPSIS 法。

逼近理想解排序法(TOPSIS 法)是基于加权规范化后的数据寻找正、负理想解,并通过计算相对接

近度来分析各组评价对象的优劣,相对接近度越大,表明该组评价对象越接近正理想解,即评价对象越优。TOPSIS 法计算步骤如下。

a. 设有 m 个评价对象、 n 个评价指标,以 y_{ij} 表示第 i 个评价对象第 j 个指标的评价值,则 $Y=(y_{ij})_{m \times n}$ 为规范化评价矩阵。

b. 构造加权规范化矩阵 $V=(v_{ij})_{m \times n}$,其元素 $v_{ij}=w_j y_{ij}$,其中 w_j 为 AHP 法和熵权法确定的第 j 个评价指标的组合权重, $i=1,2,\dots,m;j=1,2,\dots,n$ 。

c. 确定“正理想解” v^+ 和“负理想解” v^- :“正理想解”由每个评价指标中最大值构成,“负理想解”由每个评价指标中最小值构成。

d. 计算评价值与“正负理想解”的距离,即

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (8)$$

评价值与“负理想解”的距离为

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (9)$$

e. 计算相对接近度,即

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (10)$$

1.3 基于 ArcGIS 的空间可视化与分区

基于 ArcGIS 将评价模型输出的再生顶板稳定性评价结果进行空间表达,其核心步骤是空间插值,即根据有限采样点(钻孔)的相对接近度(C),预测整个研究区域内所有未知点的值,从而生成连续的稳定性分布曲面,并据此进行分区,具体流程如下。

(1) 创建空间数据库。

将计算得到的各钻孔点的相对接近度与对应的地理坐标(X, Y)相结合,在 ArcGIS 平台中创建点状矢量图层。每个钻孔点都包含其属性信息,构成后续空间分析的基础数据库。

(2) 反距离权重(Inverse Distance Weighting, IDW)插值。

选用反距离权重法进行插值。IDW 是一种确定性空间插值方法,其基本原理是假设未知点的值受邻近已知点值的影响,且影响程度与距离成反比,即距离越近的已知点对预测点值的贡献越大。通过设置适当的幂参数控制权重随距离衰减的速率,从而生成连续的预测表面。利用该方法对整个研究区域进行插值计算,生成一个连续的、覆盖全区的相对接近度栅格图,其中每个像元的值代表该位置的预测稳定性值。

(3) 重分类与稳定性分区。

将插值得到的连续相对接近度栅格图,根据所确定的稳定性等级划分阈值,利用 ArcGIS 的重分类工具,将连续的相对接近度划分为不同的离散稳定性等级,从而最终生成再生顶板稳定性分区图。

(4) 成果图件输出。

对生成的分区图进行地图修饰完善,该图可直观显示研究区域内再生顶板稳定性的空间分布规律,为下煤层安全高效开采提供直接依据。

2 应用与结果

2.1 工程概况

胜利煤矿位于内蒙古牙克石市五九煤田的东端,采用斜井开拓方式、综合机械化采煤方法,全部垮落法管理顶板,分水平开采组织生产。其中,第一水平一采区 14 煤层、15 煤层可采,煤层倾向普遍为 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$,局部最大为 9° 。该区域 14 煤层与 15 煤层呈极近距离赋存,层间距极小($0 \sim 3.50\text{ m}$,平均仅为 1.45 m),局部甚至出现两层煤合层现象,断层及褶曲较少,地下水主要以裂隙水形式存在。目前 14 煤层工作面均已开采完毕,根据一采区煤层赋存特征和地质条件,布置了 15 煤层 15102、15106、15107 和 15108 工作面,工作面采掘接续如图 2 所示。14 煤层平均埋深为 68.33 m ,平均厚度为 2.05 m ,煤层结构简单,顶底板岩性以泥岩、碳质泥岩和粉砂岩为主,此类岩层强度较低、遇水易软化,且泥质含量高,具有良好的可塑性和胶结特性,在采空区垮落后易在覆岩压力、地下水及时间作用下重新胶结形成具有一定承载能力的结构,为 15 煤层形成稳定性较好的再生顶板创造了优越条件。15 煤层平均埋深为 74.96 m 、平均厚度为 2.16 m ,顶板和底板岩性与 14 煤层相同。从结构上看,15 煤层再生顶板自下而上可分为四个分层:首层是压实的浮煤层,该层在上煤

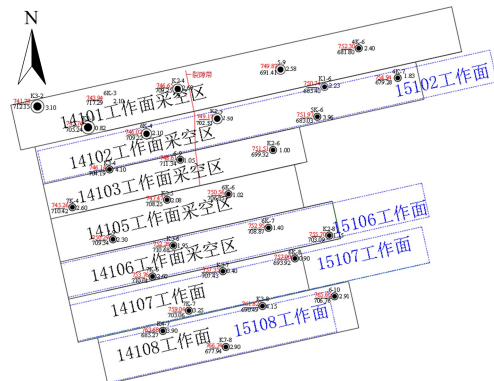
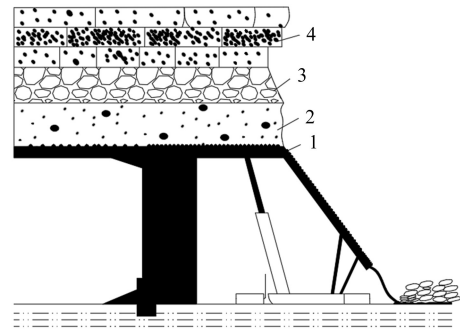


图2 工作面采掘接续计划

Fig.2 Succession plan of working face mining and excavation

层工作面推进过程中随采随落,可视为下煤层工作面的伪顶和假顶标识层;接着是由松散破碎岩石在胶结作用下形成的胶结层,该层虽然整体上较为密实,但由于强度偏低,在受外界扰动时很容易发生垮落,是下煤层的直接顶;第 3 层是上煤层开采时垮落带内的冒落岩层,这一层由于经历了垮落和压实的过程,其稳定性和承载能力受到了较大影响;最上层是上煤层开采期间裂隙带内的岩层,该层相对完整,岩石块度较大,具有较好的承载能力和稳定性,见图 3。



1—浮煤层;2—胶结层;3—垮落带冒落岩层;4—裂隙带岩层。

图3 15 煤层再生顶板结构模型

Fig.3 Structural model for the regenerated roof of coal seam 15

2.2 数据处理

评价指标可分为定量指标和定性指标,其中地质构造影响程度为定性指标,其余为定量指标,定量指标的获取上述指标描述中提及,不再赘述;针对地质构造影响程度这一定性指标,结合一采区地质环境及钻孔岩芯完整程度,通过构建隶属度函数并参考相关专家评分研究成果^[24-25],对该指标进行分级赋值与量化处理,得到如表 3 所示的分级区间与得分标准。所用样本的各指标原始数据见表 4。

表3 定性指标分级与量化标准

Table 3 Classification and quantification criteria for qualitative indicators

指标	分级区间	分值
地质构造影响程度	简单	0.3
	中等	0.5
	复杂	0.7
	特复杂	0.9

2.3 评价指标权重的确定

(1) AHP 法确定评价指标主权重。

表4 原始数据
Table 4 Raw data

钻孔号	再生顶板自身因素			地质环境因素			开采扰动因素	
	岩性 组合/%	压实胶结 时间/a	再生顶板 厚度/m	含水 率/%	埋 深/m	地质构造 影响程度	平均来压 步距/m	平均来压 强度/MPa
K3-3	4.28	3.50	5.2	53	38.52	0.7	14	38
6K-3	5.43	3.67	4.8	47	26.65	0.9	13	35
K2-4	4.50	3.83	5.0	51	37.70	0.7	12	35
K5-9	10.38	4.00	6.8	60	58.46	0.9	11	34
4K-6	4.31	4.42	3.5	70	70.50	0.7	9	32
6K-4	11.05	6.75	7.2	51	36.80	0.9	15	37
K2-5	4.48	7.00	5.5	55	46.64	0.7	13	35
5K-6	4.67	7.75	4.0	64	68.94	0.9	11	33
K1-6	4.17	8.33	3.8	73	65.34	0.7	10	33
4K-7	4.36	9.00	3.2	76	75.66	0.5	8	32
7K-4	4.18	5.67	5.8	50	34.84	0.9	15	38
K3-4	4.30	5.92	4.5	69	41.95	0.7	14	36
K6-9	4.60	6.17	5.6	50	37.27	0.7	11	35
K2-6	11.55	6.33	6.5	56	52.19	0.5	8	31
K7-9	4.51	4.92	4.2	72	40.95	0.7	13	35
K3-5	4.70	5.17	5.3	51	39.22	0.7	12	34
6K-6	4.27	5.33	5.1	52	44.21	0.7	11	33
K2-7	12.00	5.67	4.8	75	47.08	0.7	10	32
7K-6	13.55	2.58	7.5	50	43.75	0.9	14	35
K3-6	4.22	2.75	5.0	50	41.60	0.7	13	34
6K-7	13.40	2.92	6.0	64	44.08	0.5	11	31
K2-8	8.33	3.33	5.2	67	52.61	0.7	9	31
K4-6	4.55	1.67	5.5	45	36.77	0.7	13	35
7K-7	4.75	1.83	5.8	54	55.98	0.7	12	34
K3-7	4.45	2.00	4.0	64	49.92	0.9	11	32
6K-8	9.01	2.42	3.6	71	63.08	0.7	9	30
K4-7	4.73	0.67	4.5	63	78.41	0.9	14	39
7K-8	14.35	0.92	6.2	67	88.80	0.7	13	35
K3-8	11.38	1.08	5.0	73	71.33	0.9	12	32
K6-10	4.80	1.25	4.8	53	58.89	0.7	10	32

为确定各项评价指标的权重,建立目标层(A)对应准则层(P)的判断矩阵、准则层(P)对应指标层(I)的判断矩阵,然后由判断矩阵得到各项指标的

归一化特征向量(权重)。

根据式(1)计算,A-P判断矩阵的 $C_R = 0.005\ 6 < 0.1$, P_1-I 判断矩阵的 $C_R = 0.037\ 1 < 0.1$, P_2-I 判断

矩阵的 $C_R = 0.024$ $4 < 0.1$, $P_3 - I$ 判断矩阵的 $C_R = 0 < 0.1$, 均通过一致性检验, 对应的权重向量分别为: $w(A) = (0.691, 0.091, 0.218)$, $w(P_1) = (0.683, 0.200, 0.117)$, $w(P_2) = (0.681, 0.201, 0.118)$, $w(P_3) = (0.667, 0.333)$ 。各项评价指标的权重见表 5。

(2) 熵权法确定评价指标客观权重。

根据表 4, 得到由 30 组钻孔数据构建的初始判断矩阵 X , 在再生顶板稳定性评价指标中, 岩性组合、压实胶结时间、再生顶板厚度属于正向指标, 含水率、埋深、地质构造影响程度、平均来压步距、平均来压强度为逆向指标, 由式 (2) 和 (3) 对两类指标进行量纲归一化处理, 得到规范化后的评价矩阵 Y 。接着采用式 (4) ~ (6) 计算得到各项评价指标的熵权 ($w_{j,e} = (0.164, 0.125, 0.118, 0.135, 0.104, 0.120, 0.128, 0.111)$)。

(3) 计算组合权重。

根据式 (7), 将 AHP 法确定的主观指标权重 $w_{j,a}$ 与熵权法确定的客观指标权重 $w_{j,e}$ 结合, 得到各项评价指标的组合权重 $w = (w_j) = (0.543, 0.121, 0.067, 0.059, 0.013, 0.009, 0.130, 0.057)$ 。

可以看出, 岩性组合的权重高达 0.543, 对再生顶板稳定性的影响是最为关键的, 在再生顶板稳定性评价中起着主导作用。

(4) TOPSIS 法综合评价。

由规范化矩阵 Y 和各项指标的组合权重 w , 计算得到加权规范化矩阵 V 。接着采用式 (8) ~ (10) 计算得到 30 组钻孔数据的相对接近度 $C = (0.112, 0.259, 0.225, 0.443, 0.275, 0.385, 0.251, 0.260, 0.223, 0.377, 0.145, 0.189, 0.300, 0.522, 0.208, 0.287, 0.267, 0.438, 0.457, 0.301, 0.499, 0.385, 0.242, 0.282, 0.267,$

$0.422, 0.126, 0.583, 0.402, 0.299)$ 。相对接近度越大, 表明与正理想解的距离越近, 即该处再生顶板的稳定性越好。

再生顶板的稳定性评价等级根据我国 MT 554—1996《缓倾斜煤层采煤工作面顶板分类方法》和现场 14 煤层开采情况, 参考近距离煤层顶板稳定性分类研究^[26-27], 对由 AHP—熵权—TOPSIS 法得到的钻孔数据相对接近度进行排序并通过自然断点法将连续数值区间分为 4 个等级 (I 级: 稳定; II 级: 较稳定; III 级: 不稳定; IV 级: 极不稳定), 由此得到再生顶板稳定性评价分级 (见表 6)。

表 6 再生顶板稳定性评价分级

Table 6 Stability evaluation and classification of regenerated roof

接近度 C_i	$C_i \geq 0.39$	$0.26 \leq C_i < 0.39$	$0.21 \leq C_i < 0.26$	$C_i < 0.21$
等级	I	II	III	IV

2.4 再生顶板稳定性评价结果

为了清晰地得到胜利煤矿一采区 15 煤层再生顶板稳定性的空间分布格局, 为后续工作面安全高效回采提供依据。采用地理信息软件 ArcGIS, 结合钻孔坐标与对应的相对接近度, 使用空间插值算法绘制一采区 14 煤层开采后 15 煤层再生顶板稳定性等级分布图, 如图 4 所示。

图 4 直观表现了 15 煤层再生顶板的稳定分区, 其中稳定与较稳定区域占一采区的 80% 左右, 集中在采区中部与东部, 分析其原因是这些区域顶板岩性以粉砂岩、砂质砾岩为主, 胶结时间较长且水文影响程度低, 形成的再生顶板稳定性高; 不稳定区域与极不稳定区域集中分布于采区西部, 少量分布于采区中部偏北区域, 结合地质与钻孔资料可知, 此区域

表 5 基于 AHP 的指标权重分配

Table 5 Allocation of indicator weights based on AHP

评价指标	权重	所属准则层权重	总排序权重 $w_{j,a}$
I_1	0.683	0.691	0.472
I_2	0.200		0.138
I_3	0.117		0.081
I_4	0.681	0.091	0.062
I_5	0.201		0.018
I_6	0.118		0.011
I_7	0.667	0.218	0.145
I_8	0.333		0.073

内再生顶板的岩性为泥岩,岩性组合系数最低,顶板胶结时间短,且此处有少量断层与裂隙分布,形成的再生顶板稳定性差。

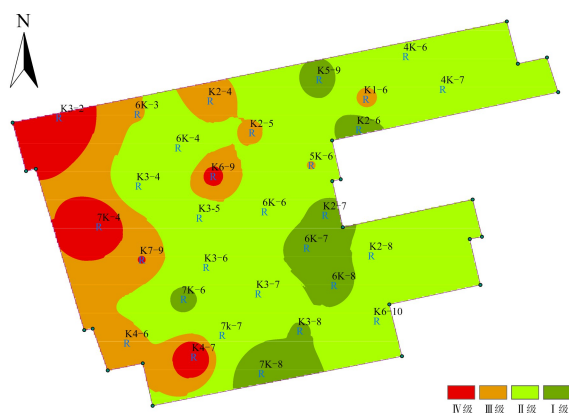


图4 再生顶板稳定性等级分布图

Fig. 4 Distribution map of stability grades for regenerated roof

为了保障下层15煤层工作面进行安全回采,依靠地质资料结合14煤层开采后形成的15煤层再生顶板稳定性等级分区提出以下建议。

(1) I级稳定区域:虽然区域稳定性好,但回采活动可能引发局部破坏,建议回采时采用锚杆支护,确保基本支护强度;加强回采过程中的顶板监测,做到及时发现问题。

(2) II级较稳定区域:虽然区域整体较稳定,但回采扰动可能会降低顶板强度,建议采用常规锚杆+金属网支护,可预防开采扰动引发的失稳。

(3) III级不稳定区域:该区域岩性破碎、裂隙发育且受岩层浸水软化程度大,顶板易失稳坍塌,建议采用锚索+锚杆+金属网支护,局部裂隙段注浆补强,还应加密顶板离层仪对顶板进行监测。每5 m布置一组,实时掌握顶板离层情况,离层超过50 mm时立即采取补强措施。

(4) IV级极不稳定区域:该区域岩性破碎、裂隙发育与受岩层浸水软化程度进一步加深,顶板极易失稳坍塌,建议采用高预应力锚索+钢筋网+U形钢支架联合支护,实施超前注浆加固并安装顶板动态监测系统监控。

3 讨论与分析

3.1 模型验证

为验证本文所建评价模型的准确性与工程实用性,特选取与本研究区域地质及开采条件极为相似且已回采完毕的淮北矿业集团许疃煤矿7228工作面进行回判验证。

许疃煤矿7煤组为典型的极近距离分岔煤层^[28],下分层开采时面临再生顶板稳定性控制难题,该工作面进行了系统的地面钻孔探查与注浆改造工程,积累了矿压观测数据、生产记录及钻孔探查资料,为验证提供了一定的数据基础。

用于验证的指标数据来源于7228工作面地面注浆改造前实施的探查钻孔及井下探测记录。这些钻孔及探测记录提供了岩性组合、再生顶板厚度、含水率等关键指标的原始数据。地质构造影响程度依据钻孔岩芯破碎状况进行分级赋值,开采扰动参数来源于上煤层开采时的支架阻力监测数据。将10组数据整理代入本文构建的AHP-熵权-TOPSIS评价模型,计算各钻孔位置的相对接近度。依据表6的稳定性分级标准,利用ArcGIS平台使用钻孔坐标和计算得到的相对接近度,采用反距离权重法进行空间插值,生成7228工作面的再生顶板稳定性分区图,然后将5个在开采过程中发生过问题的区域点叠加在分区图上进行对比分析,结果如图5所示。

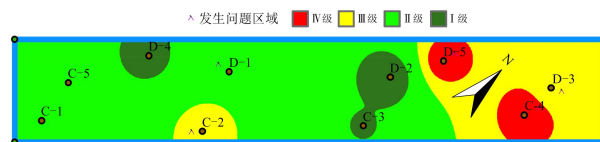


图5 工作面再生顶板稳定性等级分布与历史问题区域叠加图

Fig. 5 Overlay map of stability grade distribution for regenerated roof and historical problem areas in working face

分析图5可知,历史记录中标注的5处顶板问题区域,有4处准确地落在了模型评价出的不稳定区和极不稳定区内,吻合比例达80%。仅1处问题区域位于较稳定区内,经核查原始记录,该次事件主要由采煤机振动剧烈引发煤壁应力突然增大所致,而非再生顶板自身稳定性问题,因此不影响对模型有效性的判断。综合分析认为,该模型能够有效地对极近距离煤层再生顶板的失稳特征进行空间预测,评价结果可靠,可用于指导未来工作面的安全生产和灾害防控。

3.2 研究局限性与未来方向

(1) 数据与尺度局限性。

本文建立的评价模型在很大程度上依赖于钻孔取样数据的准确性和代表性。研究区钻孔空间分布相对稀疏,反距离权重插值过程在钻孔控制程度较低的区域存在一定不确定性。未来研究可考虑增加钻孔数量,或融合地震勘探、微震监测等地球物理数

据,以约束插值结果,提高分区精度。

(2) 模型本身局限性。

本文采用的 AHP-熵权-TOPSIS 模型本质上是一种静态评价模型。它反映了某一时间节点下再生顶板的稳定性状态,但未能考虑下煤层开采过程中动态采动应力对再生顶板的二次破坏效应。未来的研究方向可侧重于采动应力场与再生顶板稳定性耦合机制的动态评价。

4 结 论

(1) 构建了适用于极近距离煤层再生顶板稳定性评价的综合指标体系,涵盖再生顶板自身因素、地质环境因素和开采扰动因素三大类共 8 项指标,同时分析得出了再生顶板稳定性影响因素中岩性组合是主要因素。

(2) 提出了基于 AHP-熵权组合赋权与 TOPSIS 法耦合的评价模型,兼顾主观经验与客观数据,有效克服了单一赋权方法的主观偏差,显著提升了权重确定的科学性与稳定性评价的准确性。

(3) 引入 ArcGIS 平台进行再生顶板稳定性的空间可视化表达,通过反距离权重插值将点状钻孔数据转化为连续稳定性分区图,直观揭示再生顶板稳定性的空间分布规律,可为后续井下工作面布置与灾害防控提供直观、可靠的决策依据。

参考文献 (References):

- [1] 谢和平,周宏伟,薛东杰,等. 煤炭深部开采与极限开采深度的研究与思考[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 535-542.
XIE H P, ZHOU H W, XUE D J, et al. Research and consideration on deep coal mining and critical mining depth[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 535-542.
- [2] 袁亮. 煤及共伴生资源精准开采科学问题与对策[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 1-9.
YUAN L. Scientific problems and countermeasures of precision mining of coal and associated resources[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 1-9.
- [3] 王平,冯涛,蒋运良,等. 软弱再生顶板巷道围岩失稳机理及其控制原理与技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(10): 2953-2965.
WANG P, FENG T, JIANG Y L, et al. Instability mechanism and control principle and technology of roadway surrounding rock in weak regenerated roof[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(10): 2953-2965.
- [4] FANG S L, ZHANG J. In-situ measure to internal stress of shotcrete layer in soft-rock roadway[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(3): 321-328.
- [5] 赵和松. 再生顶板的结构形式及其顶板控制[J]. 煤炭科学技术, 1993(5): 2-5, 63.
ZHAO H S. Structural form of regenerated roof and its control[J]. Coal Science and Technology, 1993(5): 2-5, 63.
- [6] KANG H P. Support technologies for deep and complex roadways in underground coal mines: a review[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(3): 261-277.
- [7] 陶明印,刘峰. 再生复杂顶板应力分析和控制研究[J]. 中国煤炭, 2007(12): 33-36.
TAO M Y, LIU F. Stress analysis and control research of complex regenerated roof[J]. China Coal, 2007(12): 33-36.
- [8] 冯国瑞,任亚峰,王鲜霞,等. 白家庄煤矿垮落法残采区上行开采相似模拟实验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(4): 544-550.
FENG G R, REN Y F, WANG X X, et al. Similar simulation experiment study on upward mining in residual mining area with caving method in Baijiazhuang Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4): 544-550.
- [9] 冯国瑞,郑婧,任亚峰,等. 垮落法残采区上行综采技术条件判定理论及方法[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1863-1867.
FENG G R, ZHENG J, REN Y F, et al. Theory and method for determining technical conditions of upward fully mechanized mining in residual mining area with caving method[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1863-1867.
- [10] 王同旭,马文强,张恒. 再生顶板结构及巷道注-锚支护研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(4): 693-700.
WANG T X, MA W Q, ZHANG H. Structure of regenerated roof and grouting-bolt support of roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(4): 693-700.
- [11] 王同旭,马文强,曲孔典. 随机节理岩体巷道再生顶板失稳机理与控制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(2): 265-270.
WANG T X, MA W Q, QU K D. Instability mechanism and control of roadway regenerated roof in random jointed rock mass[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(2): 265-270.
- [12] 马文强,王同旭,江东海,等. 基于双承载拱的巷道

- 再生顶板控制机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(1): 47-53.
- MA W Q, WANG T X, JIANG D H, et al. Control mechanism of roadway regenerated roof based on double load-bearing arches [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(1): 47-53.
- [13] 马文强, 王同旭, 马紫阳. 复采采场再生顶板结构及支架载荷确定[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(10): 1892-1900.
- MA W Q, WANG T X, MA Z Y. Structure of regenerated roof and determination of support load in re-mining stope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(10): 1892-1900.
- [14] 杨庆威. 白皎煤矿余煤复采顶板控制及防灭火技术应用[D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
- YANG Q W. Roof control and application of comprehensive technology of fire prevention and extinguishing of residual coal compound mining of Baijiao Coal Mine[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013.
- [15] 李怀宾, 代碧波, 赵一凡, 等. 红透山铜矿深部大跨度采场顶板稳定性分析[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(5): 2468-2473.
- LI H B, DAI B B, ZHAO Y F, et al. Roof stability analysis of deep large-span stope in Hongtoushan copper mine[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(5): 2468-2473.
- [16] 朱涛, 张百胜, 冯国瑞, 等. 极近距离煤层下层煤采场顶板结构与控制[J]. 煤炭学报, 2010, 35(2): 190-193.
- ZHU T, ZHANG B S, FENG G R, et al. Roof structure and control in the lower seam mining field in the ultra-close multiple seams[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 190-193.
- [17] 李凤仪, 王维维. 薄煤层下分层复采工作面顶板控制技术[J]. 矿业安全与环保, 2009, 36(1): 50-51.
- LI F Y, WANG W W. Roof control technology of repeated working face of lower slice thin seam [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2009, 36(1): 50-51.
- [18] 李文军. 煤矿再生顶板安全管理要点分析[J]. 煤矿安全, 2016, 47(6): 237-239.
- LI W J. Key points analysis for safety management of coal mine regenerated roof[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(6): 237-239.
- [19] 侯恩科, 纪卓辰, 车晓阳, 等. 基于改进 AHP 和熵权法耦合的风化基岩富水性预测方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(10): 3164-3173.
- HOU E K, JI Z C, CHE X Y, et al. Water abundance prediction method of weathered bedrock based on improved AHP and entropy weight method coupling[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(10): 3164-3173.
- [20] 左林霄, 高鹏, 冯栋, 等. 基于 AHP-熵权法耦合方法的地质构造复杂程度定量评价[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(11): 140-149.
- ZUO L X, GAO P, FENG D, et al. Quantitative evaluation of geological structure complexity based on AHP-entropy weight coupling method[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(11): 140-149.
- [21] FAN R L, ZHANG H L, GAO Y. The global cooperation in asteroid mining based on AHP, entropy and TOPSIS [J]. Applied Mathematics and Computation, 2023, 437: 127535.
- [22] 陈军涛, 李文昕, 薛峰, 等. 主客观组合赋权的 TOPSIS-RSR 注浆效果综合评价方法[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(增刊2): 191-199.
- CHEN J T, LI W X, XUE F, et al. Comprehensive evaluation method of grouting effect based on TOPSIS-RSR with combined subjective and objective weighting [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(Suppl. 2): 191-199.
- [23] 李鸿卫, 闫文超. 基于 ArcGIS 的三维地质模型自动构建方法[J]. 世界有色金属, 2024(7): 25-27.
- LI H W, YAN W C. Automatic construction method of 3D geological model based on ArcGIS [J]. World Nonferrous Metals, 2024(7): 25-27.
- [24] 陶金颖. 基于模糊数学的煤层顶板稳定性评价研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(11): 87-89.
- TAO J Y. Study on roof stability evaluation of coal seam based on fuzzy mathematics [J]. Coal Technology, 2017, 36(11): 87-89.
- [25] 乔宇钢. 煤矿顶板稳定性影响因素分析与评价[J]. 陕西煤炭, 2018, 37(5): 86-88, 97.
- QIAO Y G. Analysis and assessment of factors affecting the stability of coal mine roof[J]. Shaanxi Coal, 2018, 37(5): 86-88, 97.
- [26] 郝彬彬, 王春红. 近距离煤层顶板稳定性分类研究[J]. 煤炭与化工, 2017, 40(1): 21-25, 29.
- HAO B B, WANG C H. Study on stability classification of coal seam roof in close distance [J]. Coal and Chemical Industry, 2017, 40(1): 21-25, 29.
- [27] TRAVIS W, ISIAM M. Using acoustic impacts and machine learning for safety classification of mine roofs [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 147: 104912.
- [28] 胡儒. 分岔煤层下分层再生顶板结构特征及其地面

注浆改造参数研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
HU R. Structural characteristics of the regenerated roof

in the lower slice of a bifurcated coal seam and study on surface grouting modification parameters [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2022.

Construction and application of a stability evaluation model for regenerated roof in ultra-close distance coal seam mining

HUO Bingjie¹, KANG Shangbo¹, LI Qiping², XIA Pingchuan³, LIU Can², GUO Dongxu¹, ZHANG Chengbo¹

(1 School of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China;

2 Heze Tengda Mining Co., Ltd., Changji 831115, Xinjiang, China;

3 School of Mechanical and Civil Engineering, Wuhan University of Engineering and Science, Wuhan 430200, China)

Abstract: This study addresses the critical issue of safe and efficient mining of lower coal seams while considering the stability of regenerated roofs during the downward extraction of ultra-close coal seams. The research investigates theories and methodologies for evaluating regenerated roof stability to enhance mine safety. Methodologically, we construct an innovative comprehensive evaluation index system that includes three criterion layers: factors inherent to the regenerated roof itself, geological environment factors, and mining disturbance factors. This framework comprises eight specific indicators, including lithological composition and compaction-cementation duration. We propose an evaluation model that integrates the Analytic Hierarchy Process (AHP) with the Entropy Weight method and the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). This combined weighting approach balances subjective and objective influences to scientifically assess the significance of each indicator, while the TOPSIS method quantifies relative closeness to determine stability. Furthermore, utilizing the ArcGIS platform, we employed the Inverse Distance Weighting (IDW) method to visualize the spatial distribution of regenerated roof stability, leading to the formulation of targeted management strategies. We applied this methodology at Shengli Mine, focusing on the No. 14 and No. 15 coal seams, which are characterized by an exceptionally small interlayer spacing averaging 1.45 m, thereby serving as an engineering case study to evaluate the method's applicability and scientific validity. The results indicate that: (1) Lithological composition is the predominant factor affecting regenerated roof stability, with a weight of 0.543; (2) Regenerated roof stability can be categorized into four grades. In the study area, stable (Grade I) and relatively stable (Grade II) zones of the No. 15 coal seam account for 80% of the total area, reflecting generally favorable stability conditions. Conversely, unstable (Grade III) and extremely unstable (Grade IV) zones are primarily located in areas with complex hydrogeological conditions, minor faults, unfavorable lithological combinations, and short cementation durations; (3) A validation against a similar mining face demonstrated an 80% consistency between the model evaluation outcomes and actual field conditions. The evaluation model and methods developed in this study effectively assess and spatially predict the stability of regenerated roofs in extremely close coal seams. The findings provide a theoretical foundation and technical support for the safe mining of coal seams under comparable conditions.

Key words: safety engineering; ultra-close distance coal seams; regenerated roof; stability evaluation; entropy weight method; technique for order preference by similarity to ideal solution