

近距离煤层开采围岩地质系统分类方法研究

韩 振

义煤集团宜阳义络煤业有限公司, 河南 宜阳

收稿日期: 2022年3月12日; 录用日期: 2022年4月14日; 发布日期: 2022年4月21日

摘 要

为解决11号与10号煤层近距离开采安全问题, 必须对近距离煤层开采围岩地质条件进行分类。首先分析了国内外各种工程对围岩分级的理论。结合山西某煤矿近距离煤层独特的地质开采条件, 以围岩系统总体分类、围岩区域界定、围岩参数测定、系统内构造参数、水文地质参数、上下层煤开采参数、上下层煤开采施工关系参数、地表形态参数等近距离煤层安全开采相关因素作为山西某煤矿近距离煤层围岩分级的因素。

关键词

近距离煤层, 围岩, 地质分类

Study on Classification Method of Surrounding Rock Geological System in Short Distance Coal Seam Mining

Zhen Han

Yiyang Yiluo Coal Industry Co., Ltd. of Yimei Group, Yiyang Henan

Received: Mar. 12th, 2022; accepted: Apr. 14th, 2022; published: Apr. 21st, 2022

Abstract

In order to solve the safety problem of short distance mining in No. 11 and No. 10 coal seams, the geological conditions of surrounding rock in short distance mining must be classified. Firstly, the theories of surrounding rock classification in various projects at home and abroad are analyzed. According to the unique geological mining conditions of the close seam in a coal mine in Shanxi, we have obtained the factors related to the classification of the close seam surrounding rock in a coal mine in Shanxi, including the general classification of the surrounding rock system, definition

of surrounding rock area, determination of surrounding rock parameters, structural parameters in the system, hydrogeological parameters, mining parameters of upper and lower seams, construction relationship parameters of upper and lower seams, surface morphological parameters and other factors related to the safe mining of the close seams. The corresponding surrounding rock grades are divided, and the basic classification method of surrounding rock geological system of close coal seam mining in a coal mine in Shanxi Province under the influence of complex factors is constructed.

Keywords

Close Coal Seam, Surrounding Rock, Geological Classification

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 工程背景

11-101 工作面是山西某煤矿 10#、11#近距离煤层下煤层的首采工作面，工作面走向长度 840 m，倾向长度 135 m。如图 1 所示，11-101 工作面位于上覆 10#煤层 10-111 工作面下方，采用外错式布置方式。

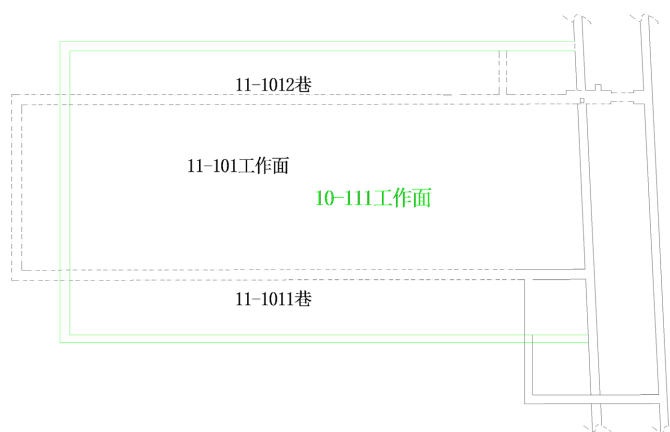


Figure 1. Layout plan of working face

图 1. 工作面布置平面图

如图 2 所示，11-101 工作面开采范围内 10#煤层厚度平均 2.13 m，11#煤层厚度 1.20~6.13 m，平均厚度 3.49 m，煤层倾角 1° ~ 9° ，平均倾角 4° ；老顶为 K_2 灰岩，厚度 9.7 m；直接顶为粉砂岩，厚度 5.4 m，直接底为铝质泥岩，厚度 1.5 m。

2. 近距离煤层开采围岩地质系统影响因素

近距离煤层开采围岩地质系统划分方法选取 8 个围岩参数量化值，即围岩参数指标 A、岩石质量指标 B、围岩区域界定 C、围岩系统内部构造参数 D、水文地质参数 E、各分层回采参数 F、上下分层煤回采时空关系 G、地表形态参数 H 等，计算出围岩分级评分参数 W，根据 W 值得大小划分围岩特性[1] [2] [3]。

名称		岩性	厚度(m)	岩性特征
顶板	老顶	K ₂ 灰岩	9.7	深灰色，块状，坚硬，裂隙中充填方解石脉，中部有 0.4 m 泥岩
	直接顶	粉砂岩	5.4	深灰色，粉砂质结构，中一薄层状结构，矿物以石英为主，杂基次之，层面可见泥质层份，具裂隙，裂隙呈半充填
底板	直接底	铝质泥岩	1.5	泥质结构，中一厚层状构造，层面可见泥质挤压揉浅灰色，皱现象，被挤压面光滑，有滑感，层间有少量岩屑，偶见泥质团粒

Figure 2. Characteristics of top and bottom slate

图 2. 顶底板岩性特征

2.1. 围岩参数 A

围岩参数 A 包括以下部分：单轴抗压强度 A1、弹性波 A2、节理条件 A3 等 3 个参量。

1) 单轴抗压强度 A1

岩石单轴抗压强度是岩石坚硬程度的一个定量判定指标，根据 GB/T 50218-2014《工程岩体分级标准》中关于岩石饱和单轴抗压强度的分级可以得到以下评分，详见表 1。

Table 1. Scoring table of saturated uniaxial compressive strength of rock

表 1. 岩石饱和单轴抗压强度评分表

A1/MPa	岩石坚硬程度	分值
>60	坚硬岩	5
60~30	较坚硬岩	4
30~15	较软岩	3
15~5	软岩	2
<5	极软岩	1

2) 弹性波 A2

通过测定同类岩石的弹性波波速，可以判定岩石内部裂隙的发育程度，也就是岩石的完整程度，参考 GB/T 50218-2014《工程岩体分级标准》中关于弹性波与岩石完整程度的关系，本项目所取弹性波探测值为岩体弹性波波速与岩块弹性波波速之比的平方，可得到以下评分，详见表 2。

Table 2. Scoring table of rock elastic wave

表 2. 岩石弹性波评分表

A2	岩石完整程度	分值
>0.75	完整	5
0.75~0.55	较完整	4
0.55~0.35	较破碎	3
0.35~0.15	破碎	2
<0.15	极破碎	1

3) 节理条件 A3

岩体内部节理的发育程度对岩体的坚硬程度和完整性有着直接影响，但是节理条件无法简单的用定量指标来表示，因此同一种岩体对其内部节理条件采用定性描述来确定等级，其等级划分如表 3 所示。

Table 3. Scoring table of joint conditions in rock body

表 3. 岩体内节理条件评分表

节理条件 A3	分值
节理面粗糙、宽度为 0、不连续、无软弱夹层、节理面岩石坚硬	5
节理面粗糙、宽度 1 mm、不连续、无软弱夹层、节理面岩石坚硬	4
节理面较粗糙、宽度 1~3 mm、较不连续、无软弱夹层、节理面岩石较软弱	3
节理面光滑、宽度 1~5 mm、较连续、具有<5 mm 软弱夹层、节理面岩石较软弱	2
节理面光滑、宽度 > 5 mm、连续、具有>5 mm 软弱夹层、节理面岩石较软弱	1

2.2. 岩石质量指标 B

按 RQD 值的高低，划分岩石等级评分如表 4 所示。

Table 4. Scoring table of RQD score of rock quality index

表 4. 岩石质量指标 RQD 评分表

B(RQD)	岩石质量	分值
90~100	好	5
75~90	较好	4
50~75	一般	3
25~50	较差	2
<25	差	1

2.3. 围岩区域界定 C

围岩区域界定 C 包括：煤层倾角 C1、煤层埋深 C2 等两个参量。

1) 煤层倾角 C1

根据煤层倾角可以将煤层划分为近水平煤层(<8°)、缓斜煤层(8°~25°)、中斜煤层(25°~45°)及急斜煤层(>45°)。随着煤层倾角的增加，巷道围岩稳定性下降，围岩破坏受采掘影响较大，根据煤层倾角不同对围岩稳定性影响不同划分影响等级，等级评分结果如表 5 所示。

Table 5. Scoring table of coal seam inclination

表 5. 煤层倾角评分表

煤层倾角 C1/°	分值
近水平煤层(<8)	5
缓斜煤层(8°~25°)	4
中斜煤层(25°~45°)	3
急斜煤层(>45°)	2

2) 煤层埋深 C2

根据煤矿中按埋深对煤层的划分情况及其对围岩的影响程度，划分评分等级如表 6 所示。

Table 6. Scoring table of coal seam buried depth
表 6. 煤层埋深评分表

煤层埋深 C2/m	分值
露天开采	5
浅埋煤层(<150 m)	4
普通煤层(150 m ~800 m)	3
深埋煤层(800 m~1500 m)	2
临界深度(>1500 m)	1

2.4. 围岩系统内部构造参数 D

围岩系统内部构造参数 D 包括：节理间距 D1、不连续结构面特征 D2、不连续结构面影响程度 D3 等三个参量。

1) 节理间距 D1

节理间距直接反映构造对围岩系统的破坏程度，直接影响地下工程的稳定程度，根据节理间距的大小划分评分等级如表 7 所示。

Table 7. Scoring table of joint spacing in surrounding rock system
表 7. 围岩系统内节理间距评分表

节理间距/cm	分值
<6	5
6~20	4
20~60	3
60~200	2
>200	1

2) 不连续结构面特征 D2

按照不连续结构面的特征划分不同的评分等级如表 8 所示。

Table 8. Scoring table of characteristic score of discontinuity structural plane
表 8. 不连续结构面特征评分表

不连续面结构特征	分值
表面很粗糙；不连续；无间距；围岩没有风化	5
表面粗糙；间距 < 1 mm；围岩轻度风化	4
表面粗糙；间距 < 1 mm；风化严重	3
擦痕面或填充物厚度 < 5 mm 或结构面间距 1~5 mm；分解	2
低硬度填料 > 5 mm 厚；结构面间距 > 5 mm；分解	1

3) 不连续结构面影响程度 D3

根据不连续结构面的巷道走向、倾向的关系, 评定不连续结构面的影响程度如表 9 所示。

Table 9. Scoring table of influence degree of discontinuity structural plane

表 9. 不连续结构面影响程度评分表

不连续断面走向垂直于巷道轴线 巷道与结构面夹角	分值	不连续断面走向平行于 巷道轴线	分值
45°~90°	5	45°~90°	5
20°~45°	4	20°~45°	2
135°~180°	3	0°~20°	2
110°~135°	2		
90°~110°	1		

2.5. 水文地质参数 E

根据工作面采掘过程中地下水水量变化参数以及巷道显现特征直观判断, 划分评分等级如表 10 所示。

Table 10. Scoring table of hydrogeological parameters

表 10. 水文地质参数评分表

地下水		巷道特征	分值
工作面进水量/L·min ⁻¹	水压/MPa		
0	0	整体干燥	5
<10	<0.1	潮湿	4
10~25	0.1~0.2	湿	3
25~125	0.2~0.5	滴水	2
>125	>0.5	流水	1

2.6. 各分层回采参数 F

各分层回采参数 F 包括: 采煤工艺 F1、下煤层工作面布置 F2、回采速度 F3 等三个参量。

1) 采煤工艺 F1

根据不同采煤工艺对围岩的影响, 划分不同评分等级如表 11 所示。

Table 11. Scoring table of coal mining technology

表 11. 采煤工艺评分表

采煤工艺	分值
综采	5
普采	3
炮采	1

2) 下煤层工作面布置 F2

根据下煤层工作面相对上煤层工作面所处的位置，划分评分等级如表 12 所示。

Table 12. Scoring table of working face layout of lower coal seam
表 12. 下煤层工作面布置评分表

下煤层工作面布置位置	分值
上煤层增压区	1
上煤层减压区	5
上煤层稳压区	3

3) 回采速度

根据工作面推进度划分评分等级如表 13 所示。

Table 13. Scoring table of mining speed
表 13. 回采速度评分表

工作面推进速度	分值
快	1
较快	3
合理	5
较慢	3
慢	1

2.7. 上下分层煤回采时空关系 G

上下分层煤回采时空关系 G 包括：采空区条件 G1、煤柱条件 G2、层间岩层状态 G3 等三个条件。

1) 采空区条件 G1

回采过后，采空区上覆岩层会随着时间的推移发生下沉，根据其下沉速度可以将其下沉的过程划分为几个阶段，覆岩移动速度不同对下煤层围岩的稳定性及完整性具有较大影响，根据覆岩移动的状态划分评分等级如表 14 所示。

Table 14. Scoring table of goaf condition
表 14. 采空区条件评分表

下煤层上采空区状态	分值
采空区稳定	5
采空区缓慢变化	3
采空区急速变化	1

2) 煤柱条件 G2

根据上下空区留煤柱对下煤层巷道的影响划分评分等级如表 15 所示。

Table 15. Scoring table of coal pillar condition**表 15.** 煤柱条件评分表

巷道与煤柱相对位置	分值
位于煤柱影响区外	5
位于煤柱下方	3
位于煤柱影响区内	1

3) 层间岩层状态 G3

煤层间岩层状态直接影响着下煤层回采工作面顶板的稳定性，根据层间岩层的状态划分评分等级如表 16 所示。

Table 16. Scoring table of state score of interlayer strata**表 16.** 层间岩层状态评分表

煤层间岩层状态	分值
完整	5
较完整	4
一般	3
较破碎	2
破碎	1

2.8. 地表形态参数 H

煤层上方地表形态不同直接影响着煤层埋深，根据地表形态相对于平地情况，不同的地表形态评分如表 17 所示。

Table 17. Scoring table of surface morphological parameters**表 17.** 地表形态参数评分表

地表环境	评分
沟谷(埋深减小)	5
平地沟谷过度	4
平地	3
山区平地过度	2
山区(埋深加大)	1

3. 山西某煤矿近距离煤层开采围岩地质系统智能分类评价方法

项目对于山西某煤矿近距离煤层开采围岩地质系统的分类评价方法首先采用层次分析法计算各因素权重，然后根据各因素评分结果与各因素权重对围岩级别进行划分。

3.1. 层次分析模型建立

对影响底板突水的主要控制因素进行分析，将研究对象划分为 3 个层次。近距离煤层围岩地质系统

评价作为模型的目标层(X 评价层); 围岩参数指标、岩石质量指标、围岩区域界定、围岩系统内部构造参数、水文地质参数、各分层回采参数、上下分层煤回采时空关系、地表形态参数决定了围岩等级划分的依据, 但其影响方式还需通过与其相关的具体因素来体现, 将其作为模型的准则层(Y 指标层); 各个具体的主控因素指标构成了本模型的决策层(Z 因素层) [4] [5] [6]。霍西煤田近距离煤层围岩地质系统评价层次分析模型见图 3。

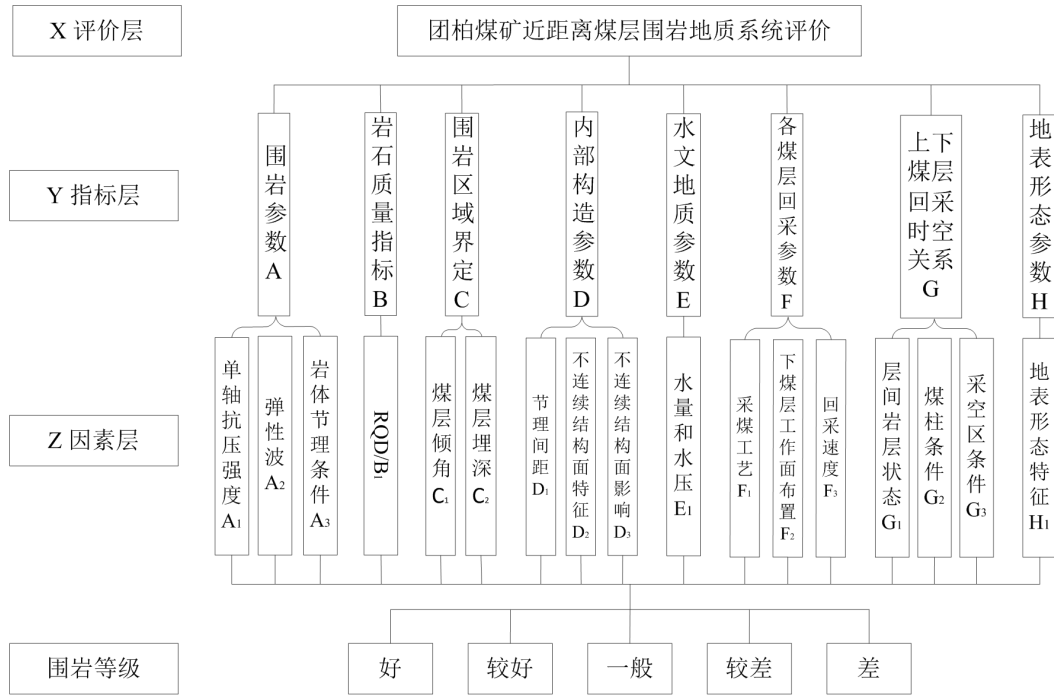


Figure 3. Evaluation hierarchy model of surrounding rock geological system of close coal seam
图 3. 近距离煤层围岩地质系统评价层次结构模

3.2. 权重计算

1) 建立评判矩阵

根据影响近距离煤层围岩地质系统的因素进行分析, 运用“专家打分法”, 将同一支配层下的所有指标进行两两比较, 分析每一层次的指标相对于上一层次其支配指标的重要程度, 得到它们之间的互反关系, 构建评判矩阵, 通过矩阵计算和确定指标权重及评判矩阵如公式 3-1 所示[7]:

$$A = (a_{ij})$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

其中: $a_{ij} \cdot a_{ji} = 1$, $a_{ii} = a_{jj} = 1$

本文采用 AHP 方法 1~5 标度法, 通过专家评分系统进行两两比较如表 18 所示。

Table 18. Index importance classification and its standards
表 18. 指标重要程度分级及其标准

标准值	定义	说明
1	同等重要	因素 r_i 与 r_j 重要性相同
3	比较重要	因素 r_i 比 r_j 重要性
5	绝对重要	因素 r_i 比 r_j 重要性
2、4	上述相邻判断的中间值	

2) 各层次单排序和一次性检验

① 层次单排序

判断矩阵的最大特征值 λ_{\max} 多对应的特征向量 W ，经过归一化处理后就是同一层次相对应的因素对上一层次某个因素的相对重要性排序值。

② 一致性检验

一致性指标 CI

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{3-2}$$

平均一致性指标 RI 可以查表 19 得到。

Table 19. Average consistency index RI
表 19. 平均一致性指标 RI

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

3) 一致性比例 CR

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{3-3}$$

当 $CR < 0.1$ 认为判断矩阵符合一致性要求；若 $CR > 0.1$ 时，认为判断矩阵需要修改。评价层的判断矩阵如表 20、表 21。

Table 20. Judgment matrix of evaluation layer
表 20. 评价层的判断矩阵

X	A	B	C	D	E	F	G	H	W (X_i/X)
A	1	1	5	1	2	4	2	5	0.2094
B	1	1	5	1	2	4	2	5	0.2094
C	1/5	1/5	1	1/5	1/3	1/2	1/3	1	0.0376
D	1	1	5	1	2	4	2	5	0.2094
E	1/2	1/2	3	1/2	1	2	1	3	0.1147
F	1/4	1/4	2	1/4	1/2	1	1/2	2	0.0673
G	1/2	1/2	3	1/2	1	2	1	3	0.1147
H	1/5	1/5	1	1/5	1/3	1/2	1/3	1	0.0376

Table 21. Judgment matrix of each index layer
表 21. 各指标层的判断矩阵

围岩参数指标 A				
Y/A	A1	A2	A3	W (A _i /A)
A1	1	2	1	0.4
A2	1/2	1	1/2	0.2
A3	1	2	1	0.4
围岩区域界定指标 C				
Y/C	C1	C2	W (C _i /C)	
C1	1	3	0.75	
C2	1/3	1	0.25	
围岩系统内部构造参数 D				
Y/D	D1	D2	D3	W (D _i /D)
D1	1	1/2	1/3	0.1618
D2	2	1	1/2	0.3088
D3	3	2	1	0.5294
各分层回采参数 F				
Y/F	F1	F2	F3	W (F _i /F)
F1	1	1/2	1	0.25
F2	2	1	2	0.50
F3	1	1/2	1	0.25
上下分层煤回采时空关系 G				
Y/G	G1	G2	G3	W (G _i /G)
G1	1	2	1/3	0.2941
G2	1/2	1	1/2	0.1765
G3	3	2	1	0.5294

经计算，评价层的判断矩阵最大特征值 $\lambda_{\max} = 8.0323$ ， $n = 8$ ， $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0.0046$ ， $RI = 1.41$ ， $CR = \frac{CI}{RI} = 0.00326 < 0.10$ ，满足一致性检验。

围岩参数指标 A 判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max} = 3$ ， $n = 3$ ， $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0$ ， $RI = 0.58$ ， $CR = \frac{CI}{RI} = 0 < 0.10$ ，满足一致性检验。

围岩区域界定指标 C 判断矩阵最大特征值 $\lambda_{\max} = 2$, $n = 2$, $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0$, $RI = 0$, $CR = \frac{CI}{RI} = 0 < 0.10$, 满足一致性检验。

围岩系统内部构造参数 D 判断矩阵最大特征值 $\lambda_{\max} = 3.0092$, $n = 3$, $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0.0046$, $RI = 0.58$, $CR = \frac{CI}{RI} = 0.0079 < 0.10$, 满足一致性检验。

各分层回采参数 F 判断矩阵最大特征值 $\lambda_{\max} = 3$, $n = 3$, $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0$, $RI = 0.58$, $CR = \frac{CI}{RI} = 0 < 0.10$, 满足一致性检验。

上下分层煤回采时空关系 G 判断矩阵最大特征值 $\lambda_{\max} = 3.0356$, $n = 3$, $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0.0678$, $RI = 0.58$, $CR = \frac{CI}{RI} = 0.03 < 0.10$, 满足一致性检验。

各指标 C_i 对总目标的权重 $W(A/C_i)$, 见表 22 , 即为近距离煤层围岩地质系统主要影响因素对围岩地质系统评价的权重 , 见表 23。

Table 22. Weight of each index to the overall objective
表 22. 各指标对总目标的权重

X/Z	A/0.2094	B/0.2094	C/0.0376	D/0.2094	E/0.1147	F/0.0673	G/0.1147	H/0.0376	W (Z _i /X)
A1	0.4								0.0838
A2	0.2								0.0419
A3	0.4								0.0838
B		1							0.2094
C1			0.75						0.0282
C2			0.25						0.0094
D1				0.1618					0.0339
D2				0.3088					0.0647
D3				0.5294					0.1109
E					1				0.1147
F1						0.25			0.0168
F2						0.50			0.0337
F3						0.25			0.0168
G1							0.2941		0.0337
G2							0.1765		0.0202
G3							0.5294		0.0607
H								1	0.0376

Table 23. Weights of main factors affecting the evaluation of surrounding rock geological system of close coal seam**表 23.** 影响近距离煤层围岩地质系统评价各主要因素的权重

影响因素	权重/W _i
单轴抗压强度	0.0838
弹性波	0.0419
节理条件	0.0838
岩石质量指标(RQD)	0.2094
煤层倾角	0.0282
煤层埋深	0.0094
节理间距	0.0339
不连续结构面特征	0.0647
不连续结构面影响程度	0.1109
地下水水量和水压	0.1147
采煤工艺	0.0168
下煤层工作面布置	0.0337
回采速度	0.0168
采空区条件	0.0337
煤柱条件	0.0202
层间岩层状态	0.0607
地表形态参数	0.0376

4) 围岩等级划分

山西某煤矿近距离煤层开采围岩地质系统等级划分, 依据 RMR 分级法对围岩等级划分的模式, 围岩综合评分结果采用下式计算[8]:

$$V = \sum_{k=1}^n (W_k \cdot Z_k) / 5 \quad (3-4)$$

式中: V 为近距离煤层围岩综合评分; W_k 为各影响因素权重; Z_k 为单因素评分; 对结果进行归一化以便于进行比较。

将围岩各影响因素评分分值和各因素权重带入上式, 计算可得围岩综合评分分值, 并按照下表 24 对近距离煤层围岩地质系统等级进行评价。

Table 24. Classification of surrounding rock geological system of close coal seam**表 24.** 近距离煤层围岩地质系统级别划分表

围岩综合评分 V 值	围岩级别	评价结果
0.9~1	I	好: 岩体完整
0.7~0.9	II	较好: 岩体较完整
0.5~0.7	III	一般: 岩体较破碎
0.3~0.5	IV	较差: 岩体破碎
0.2~0.3	V	差: 岩体极破碎

4. 结论

1) 提出近距离煤层开采围岩地质系统智能分类方法的概念, 并对影响近距离煤层开采围岩地质系统的主要影响因素进行分析, 并进行评分, 获得各因素评分表;

2) 根据各因素对近距离煤层围岩地质系统的影响程度, 采用层次分析法对各因素的影响权重进行评估, 并结合 RMR 岩石分级法的思路得到近距离煤层围岩地质系统级别划分表。

参考文献

- [1] 章浩天. 基于大数据的地质灾害多发区风险性评价[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2021. <https://doi.org/10.27204/d.cnki.glzhu.2021.001891>
- [2] 彭苏萍. 我国煤矿安全高效开采地质保障系统研究现状及展望[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2331-2345. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.DZ20.1089>
- [3] 董书宁, 刘再斌, 程建远, 陈宝辉, 代振华, 李丹. 煤炭智能开采地质保障技术及展望[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(1): 21-31.
- [4] 吴拥政, 付玉凯, 何杰, 陈金字, 褚晓威, 孟宪志. 深部冲击地压巷道“卸压-支护-防护”协同防控原理与技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 132-144. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.yg20.1821>
- [5] 丁永红. 高应力坚硬顶板沿空掘巷矿压显现规律及围岩控制技术研究[EB/OL]. 甘肃省, 甘肃靖远煤电股份有限公司红会第一煤矿. <https://kns.cnki.net/kns8/defaultresult/index>, 2020-12-08.
- [6] 谢正正. 深部巷道煤岩复合顶板厚层跨界锚固承载机制研究[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2020. <https://doi.org/10.27623/d.cnki.gzkyu.2020.002442>
- [7] 郑超杰. 基于成分数据及机器学习在阿舍勒地区的综合找矿研究[D]: [博士学位论文]. 桂林: 桂林理工大学, 2021. <https://doi.org/10.27050/d.cnki.gglgc.2021.000004>
- [8] 王新华. 大水金矿集区成矿规律与成矿预测数值模型研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020. <https://doi.org/10.27493/d.cnki.gzdzy.2020.001554>