

顾北煤矿13521采区注浆效果治理多因素综合模拟评价

吴家峰, 朱敬忠, 赵保新

安徽理工大学, 地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2021年9月6日; 录用日期: 2021年10月11日; 发布日期: 2021年10月18日

摘要

近年来, 伴随着东部矿区浅部资源开采殆尽, 为满足资源需要, 因此煤矿开采也由浅部开采发展到深部开采。深部煤层开采所带来的“三高一扰”即高地应力、高地温、高水压及剧烈开采扰动条件下导致的深部煤层开采难题, 其中对于高水压所带来的突水问题尤其严重。顾北13521工作面由于开采深度增加, 底部太原组灰岩岩溶裂隙承压含水层对工作面开采影响较大, 所以为降低开采风险急需进行地面区域治理。现阶段对于区域治理比较高效的方法是注浆加固。本文以东部顾北煤矿13521工作面注浆区域治理工程为例, 结合注浆实际评价效果与AHP模拟评价进行比较, 与实际比较有一定的可靠性。

关键词

灰岩水害, 注浆加固, AHP, 注浆效果评价

Comprehensive Simulation Evaluation of the Effect of Slurry Injection in 13521 Mining Area of Gubei Coal Mine

Jiafeng Wu, Jingzhong Zhu, Baoxin Zhao

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Sep. 6th, 2021; accepted: Oct. 11th, 2021; published: Oct. 18th, 2021

Abstract

In recent years, along with the exploitation of shallow resources in the eastern mining areas, in order to meet the needs of resources, coal mining has also developed from shallow mining to deep

mining, and the “three highs and one disturbance” brought about by deep coal seam mining is the problem of deep coal seam mining caused by high stress, high temperature, high water pressure and severe mining disturbance. Among them, the problem of sudden water caused by high water pressure is particularly serious. Gubei 13521 work surface due to the increase in mining depth, the bottom Taiyuan group ash karst crack pressure aquifer has a greater impact on the working surface mining, so in order to reduce mining risk, there is urgent need to carry out ground area management. At this stage, it is more efficient method for regional governance: injection reinforcement. In this paper, taking the regional management project of 13521 working surface slurry in the eastern Gubei coal mine as an example, this paper compares the actual evaluation effect of slurry with the simulation evaluation of AHP, and has some reliability compared with the actual comparison.

Keywords

Limestone Water Damage, Grouting Reinforcement, AHP, Grouting Effect Evaluation

Copyright © 2021 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. 引言

顾北煤矿地处淮南煤田中部, 该井田为全隐伏煤田, 含煤系为石炭二叠系, 其主要为二叠系山西组煤层段[1] [2] [3], 煤层厚度平均 69 m, 含煤 1 层区内 1 煤厚 2.6~10.2 m, 平均 7.6 m; 上距 4-1 煤层 66.5~75.3 m, 平均 70.6 m; 下距 1 灰 14.6~25.4 m, 平均约 19.1 m; 采区中部较薄, 两侧逐渐增厚; 一般含 1~3 层泥岩夹矸; 煤层发育稳定, 属稳定型煤层[4] [5]。为保证资源及时供应, 现需要继续开采 1 煤层。但 1 煤层开采受底板灰岩水害威胁, 水文地质条件复杂。为此, 建立了地面 - 井下注浆系统。利用导管进行注浆加固和含水层改造从而达到可安全开采的目的。

13521 采区工作面主要受底部太原组灰岩岩溶裂隙水影响, 其中 C₃I 组灰岩含水层为 1 煤层底板直接充水含水层, 厚度为 29.6~35 m, 平均厚度为 32.3 m。通过底板的构造裂隙与采动裂隙影响工作面, 因此采用注浆加固来进行水害防治。本文以顾北煤矿为例, 结合 AHP 对煤层底板区注浆区域综合治理进行模拟评价[6]。

2. 注浆孔区域概况

13521 工作面主体为向东倾斜的单斜构造[7]。根据工作面的综合历次三维地震数据、, 工作面发育断层 14 条, 其中对采掘影响较大的断层 2 条, 分别为 F_s854 和 F_s960 (如下表 1)。13521 工作面煤层发育稳定, 属稳定型煤层。

Table 1. Three-dimensional seismic exploration and interpretation of faults in 13521 working face

表 1. 13521 工作面三维地震勘查解释断层

序号	断层名称	走向	倾向	倾角/°	落差/m	错段层位	性质
1	F _s 854	NE	SE	56~70	0~9	1煤-奥灰	正
2	F _s 960	NWW	NNW	70~75	0~10	1煤-奥灰	正

13521 工作面地面区域探查治理范围内施工 3 个钻探主孔、26 个钻探分支孔, 钻孔钻进及注浆工作

于 2021 年 2 月 27 日全部完成。本次探查治理共施工 3 个钻探主孔，26 个钻探分支孔，共完成钻探工程量 17,576 m，其结构图如图 1 所示。

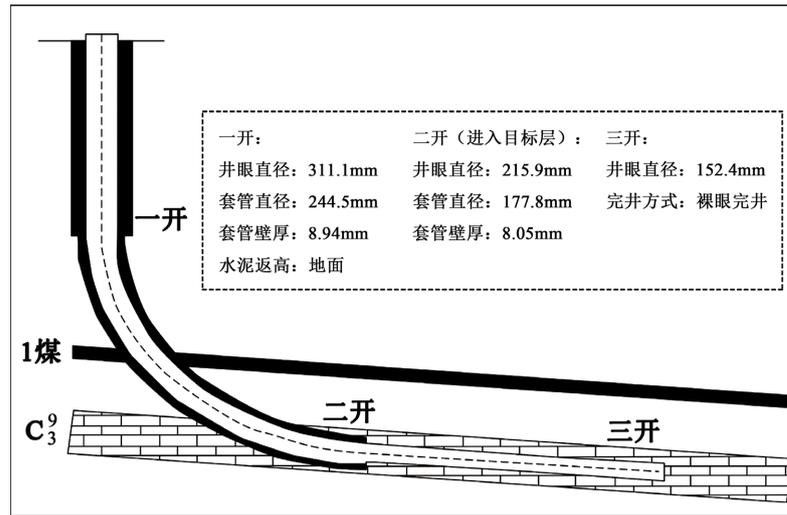


Figure 1. Schematic diagram of drilling well structure for exploration and treatment of surface area in Nanyi 1 coal mining area
图 1. 南一 1 煤采区地面区域探查治理钻孔井身结构示意图

3. 评价指标的设计

层次分析法，简称 AHP。层次分析法通常分为四个步骤：1) 建立层次结构模型；2) 构造比较判断矩阵；3) 计算矩阵的最大特征根及其对应的特征向量；4) 层次排序和其一一致性检验[8] [9]。此次采用分析法综合分析 16 个因素影响下的注浆效果评价。

根据前述，将 13521 工作面范围区域探查治理效果评价指标分为钻孔质量、注浆质量和效果检验三大方面。分别对应总目标层、分目标层和准则层[10]具体如图 2 所示。

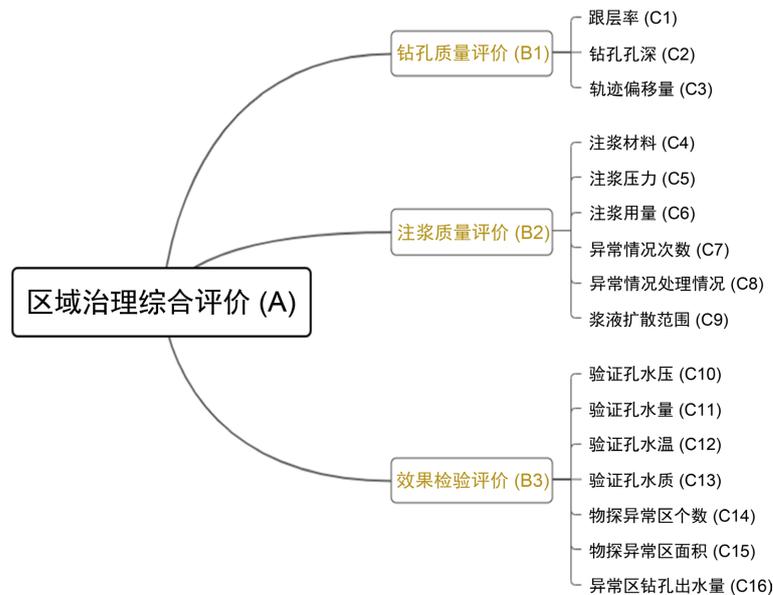


Figure 2. Hierarchical analysis structure diagram
图 2. 层次分析结构图

3.1. 判断矩阵构造与计算

权重计算以指标层开始逐步进行探究[11]。为掌握指标层中有 16 个因素在区域治理综合评价中的所占权重, 和各因素之间的关系, 引入 1~9 的区分标度(见表 2)。对各个因素进行比较, 采用层次分析法, 确定各因素的权重, 构造出判断矩阵(见表 3~7)。后采用 AHP 软件进行矩阵的判断与求解[12]。

Table 2. Discrimination scale of each element in the judgment matrix

表 2. 判断矩阵中各元素的区分标度

a_{ij}	两指标相比	解释
1	同等重要	指标 i 和 j 和同样重要
3	稍微重要	指标 i 比 j 略微重要
5	明显重要	指标 i 比 j 重要
7	重要得多	指标 i 比 j 明显重要
9	极端重要	指标 i 和 j 绝对重要
2、4、6、8	介于两相邻重要程度间	

Table 3. Judgment matrix and weights for comprehensive evaluation of regional governance

表 3. 区域治理综合评价的判断矩阵与权重

A	B_1	B_2	B_3	W_i
B_1	1	1	1/5	0.1429
B_2	1	1	1/5	0.1429
B_3	5	5	1	0.7143

Table 4. Judgment matrix and weights for borehole quality evaluation

表 4. 钻孔质量评价的判断矩阵与权重

B_1	C_1	C_2	C_3	W_i
C_1	1	1/3	1/3	0.1429
C_2	3	1	1	0.4286
C_3	3	1	1	0.4286

Table 5. Judgment matrix and weights for grouting quality evaluation

表 5. 注浆质量评价的判断矩阵与权重

B_2	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	W_i
C_4	1	1/2	1	1	1/2	1/2	0.1071
C_5	2	1	1/2	3	1/2	3	0.1946
C_6	1	2	1	1	1/3	2	0.1589
C_7	1	1/3	1	1	1/4	1/2	0.0892
C_8	2	2	3	4	1	2	0.3241
C_9	2	1/3	1/2	2	1/2	1	0.1261

Table 6. Judgment matrix and weights of effect test evaluation
表 6. 效果检验评价的判断矩阵和权重

B_3	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}	W_i
C_{10}	1	7	3	7	3	1/2	1/2	0.2226
C_{11}	1/7	1	1/5	2	1/3	1/4	1/3	0.0453
C_{12}	1/3	5	1	6	2	1/3	1/2	0.1350
C_{13}	1/7	1/2	1/6	1	1/5	1/3	1/5	0.0326
C_{14}	1/3	3	1/2	5	1	1	1/4	0.1063
C_{15}	2	4	3	3	1	1	1	0.2094
C_{16}	2	3	2	5	4	1	1	0.2488

Table 7. The value table of random consistency index R.I. with different matrix betweennesses
表 7. 矩阵阶数不同的随机一致性指标 R.I.取值表

矩阵阶数(n)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
R.I.	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.54	1.56	1.58

假定分目标层(B)指标中 B_i 与准则层中 $P_i (i=1,2,\dots,n)$ 有联系, 建立判断矩阵, 如下:

C_1	P_1	P_2	...	P_n
P_1	b_{11}	b_{12}	...	b_{1n}
P_2	b_{21}	b_{22}	...	b_{2n}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
P_n	b_{n1}	b_{n2}	...	b_{nn}

通过各指标的比较确定各指标的优先权重等级, 表示指标关系的相对重要性。其评价结果采用如下矩阵表示。

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix}$$

指标权重的确定:

1) 计算矩阵每行所有元素的几何平均数

$$W_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}, i=1,2,\dots,n, \text{ 可得, } W_i = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T \quad (3.1)$$

2) 进行归一化

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^n w_j}, i=1,2,\dots,n, \text{ 可得, } W_i = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T \quad (3.2)$$

3) 计算判断矩阵最大特征值 λ_{\max}

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{nw_i}, \text{ 其中 } (Aw)_i \text{ 为向量 } Aw \text{ 的第 } i \text{ 个元素。} \quad (3.3)$$

4) 一致性检验

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I} \tag{3.4}$$

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{3.5}$$

其中, $C.I.$ 与 $R.I.$ 是平均随机一致性指标, $R.I.$ 取值见上表 7 所示。

如表 8, 判断矩阵的 $C.R.$ 分别为 0、0、0.097 和 0.091 均小于 0.1, 符合上述层次分析法所要求的一致性检验结果标准。

Table 8. Consistency check

表 8. 一致性检验

	λ_{max}	3.0000	3.0000	6.6017	7.7173
一致性检验	$C.I.$	0.000	0.000	0.12034	0.11955
	$R.I.$	0.58	0.58	1.24	1.32
	$C.R.$	0	0	0.097	0.091

根据以上计算所得各目标层次指标的所占权重如表 2~8 所示。为了实现更加总体客观的评价, 还需要进行总目标层次排序。其计算方式如下所示:

$$C_i = \sum_{j=1}^m c_{ij} b_j, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

由此计算所得组合权重判断矩阵见表 9。

Table 9. Priority weight of grouting effect evaluation index

表 9. 注浆效果评价指标优先级权重

C_i	B_1	B_2	B_3	组合权重(V)
	0.1429	0.1429	0.7143	
C_1	0.1429	0	0	0.0204
C_2	0.4286	0	0	0.0612
C_3	0.4286	0	0	0.0612
C_4	0	0.0955	0	0.0136
C_5	0	0.1948	0	0.0278
C_6	0	0.1590	0	0.0227
C_7	0	0.1002	0	0.0143
C_8	0	0.3243	0	0.0463
C_9	0	0.1262	0	0.0180
C_{10}	0	0	0.2226	0.1590
C_{11}	0	0	0.0453	0.0324
C_{12}	0	0	0.1350	0.0964
C_{13}	0	0	0.0326	0.0233
C_{14}	0	0	0.1060	0.0757
C_{15}	0	0	0.2094	0.1496
C_{16}	0	0	0.2488	0.1777

基于上述各指标的权重性分析, 对各指标的分析如下:

3.2. 计算结果及其评价

1) 钻孔质量评价(B_1)

跟层率(C_1)其中各分支水平孔实钻跟层率>89%，符合设计中要求。

钻孔孔深(C_2)其中各分支水平孔钻孔孔深均>设计孔深。

轨迹偏差量(C_3)各水平分支孔实际轨迹与设计轨迹的偏差均<2 m 的要求。

2) 注浆质量评价(B_2)

注浆材料(C_4)其中各指标质量均符合国家 GB175-2007 标准。

注浆压力(C_5)均大于钻孔水平段所在位置奥灰含水层静水压力的 1.5 倍[13] [14]。

注浆用量(C_6)均小于设计注浆结束吸水率(0.010 L/min·m·m)。

注浆异常情况次数(C_7)，注浆期间发生严重漏失异常 2 次。

异常情况处理(C_8)各异常情况均得到及时有效处理。

浆液扩散有效范围(C_9)，各分支孔浆液设计间距为 60 m，结合注浆模拟可知，实际浆液扩散有效半径>30 m。

3) 效果检验评价(B_3)

验证孔水压(C_{10})各验证孔终孔出水水压为 0~1.0 MPa，水压值<深部灰岩水压。

验证孔水量(C_{11})10 个验证钻孔，共有 6 个出水，水量 0.2~0.85 m³/h，钻孔出水量较小。

验证孔水温(C_{12})验证钻孔实测水温值在 32℃~37℃之间，比奥灰水温低。

验证孔水质(C_{13})各验证孔的常规离子含量、TDS 及舒卡列夫水化学分类均与奥灰水存在差距。

物探异常区数(C_{14})物探异常区面积(C_{15} 通过槽波地震和无线电波坑透探查，综合确定 13521 底板有 5 处低阻区。

低阻区内钻孔出水量(C_{16})低阻异常区验证钻孔水量 0.4~0.85 m³/h。

根据实际情况将区域探查治理效果等级水平划分为四个等级[15]，并作了定性和定量的描述，具体见表 10。

Table 10. Classification of grouting effect grade level

表 10. 注浆效果等级水平划分

等级	效果良好 I	效果较好 II	效果差 III	效果极差 IV
数值 v	$0 < v \leq 0.25$	$0.25 < v \leq 0.5$	$0.5 < v \leq 0.75$	$0.75 < v \leq 1$

利用以上 16 个分目标量化，对注浆评价数值 V 进行计算，其计算方式如下：

$$V = \sum_{i=1}^{16} V_i = \sum_{i=1}^{16} Z_i \times C_i \tag{3.6}$$

式中： Z_i 为各指标无量纲化评价值； C_i 为各指标的权重值。

结合各指标与实际情况，对区域综合探查治理效果影响指标评价数值计算， $V < 0.25$ ，对照表 9 可知，确定其属于等级 I，注浆效果良好，区域探查治理取得了很好效果。

4. 结论

1) 根据实际现场采用物探方法检测注浆效果与模拟效果评价大致一致可以确定 AHP 分析法在注浆效果评价中是可以实现一定的预测效果。

2) 对于注浆加固改善采区工作面灰岩水害防治取得了很好的效果。注浆效果明显, 探查治理效果良好。

3) 利用各因素关系、专家打分、MATLAB 计算, 通过建立层次分析结构、构造与计算判断矩阵、确定各因素的权重以及建立评价等级等步骤, 分步完成对于多因素影响评价模型。根据工作面实际评价效果从而推动模型的优化与分析。

参考文献

- [1] 吴基文, 沈书豪, 翟晓荣. 煤层底板注浆加固效果波速探查与评价[J]. 物探与化探, 2014, 38(6): 1302-1306.
- [2] 韩云春. 基于采动效应研究的注浆工作面底板突水危险性评价[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2011.
- [3] 许延春, 黄磊, 俞洪庆, 罗亚麒, 李鹏飞, 耿浩博, 等. 基于注浆钻孔数据收集的注浆工作面底板突水危险性评价体系[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 1150-1159.
- [4] 慕松利, 李鹏飞, 耿浩博, 韩久方. 底板注浆效果及突水危险性评价法在赵固二矿的应用[J]. 煤炭工程, 2020, 52(4): 67-72.
- [5] 王凯. 甚井微裂隙软岩高压注浆渗流特性及应用研究[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [6] 李亚昊, 朱昌淮, 缪长军, 张海涛, 魏健, 丁永俊, 等. 东部矿区煤层底板区域注浆治理效果评价[J]. 地下水, 2020, 42(5): 58-61+67.
- [7] 王润红, 郭联宏, 朱文胜, 郭华. 突水系数法在华晟荣煤矿水上带压开采安全评价中的应用[J]. 煤矿安全, 2012, 43(10): 135-138.
- [8] 黄小广. 煤矿安全注浆效果检测方法的评价[J]. 煤矿安全, 2001(10): 38-39.
- [9] 王邵辉, 刘占宁, 张朋伟, 贾立锋, 王远声, 张大为. 煤矿生产部门技术工作评价方法研究[J]. 煤炭技术, 2021, 40(6): 217-220.
- [10] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 高明忠, 张茹, 高亚楠, 等. 深部开采的定量界定与分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 1-10.
- [11] 柏建彪, 王襄禹, 贾明魁, 侯朝炯. 深部软岩巷道支护原理及应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 632-635.
- [12] 刘瑜. 复杂开采条件下顶板砂岩突水危险性评价[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
- [13] 武强, 王金华, 刘东海, 崔芳鹏, 刘守强. 煤层底板突水评价新型实用方法 IV: 基于 GIS 的 AHP 型脆弱性指数法应用[J]. 煤炭学报, 2009, 34(2): 233-238.
- [14] 代礼永. 刘店矿过断层注浆加固技术研究[J]. 中国西部科技, 2015(8): 17-19, 37.
- [15] 徐光亮, 刘旭锋. 煤矿破碎围岩注浆加固技术研究现状分析[J]. 煤矿安全, 2016, 47(1): 174-177.