



煤炭科学技术 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

煤炭科学技术

基于模糊综合评价的导水通道超前探查判识技术

李建林 薛杨 王心义 徐博博 郭水涛

引用本文:

李建林, 薛杨, 王心义, 等. 基于模糊综合评价的导水通道超前探查判识技术[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(7): 178–186.
LI Jianlin, XUE Yang, WANG Xinyi. Judgment technique for over-exploration of water-conducting channel based on process analysis and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7): 178–186.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1269>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤层底板导水通道钻孔超前探查与多元信息识别技术

Advanced drilling detection and multi-information identification of water-conducting channel of coal floor
煤炭科学技术. 2023, 51(7): 15–23 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0493>

基于模糊集对分析法的底板突水危险性评价研究

Study on evaluation of mine floor water inrush danger based on Fuzzy Set Pair Analysis Method
煤炭科学技术. 2019(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/3a07a140-f7ed-4d03-becd-83ed978795eb>

矿井煤层冲击危险性多层次综合评价研究

Research on multi-level comprehensive evaluation of coal seam rockburst risk in underground mine
煤炭科学技术. 2020, 48(8): 82–89 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e07e7cae-990c-4e34-88ad-71bdb68f9bb8>

基于微震数据及模型的煤矿水害“双驱动”预警体系构建与应用

Construction and application of “Dual-drive” pre-warning system for coal mine water disaster based on microseismic data and model
煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 242–255 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2228>

基于PSO-XGBoost的矿井突水水源快速判识模型

A rapid identification model of mine water inrush based on PSO-XGBoost
煤炭科学技术. 2023, 51(7): 72–82 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0446>

基于SBAS技术的煤矿采空区探查与稳定性评价

Exploration and stability evaluation of coal mine goaf based on SBAS technology
煤炭科学技术. 2022, 49(3): 208–214 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e81b068d-d3d8-4c12-aad0-ed7cd24608ae>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



李建林, 薛 杨, 王心义, 等. 基于模糊综合评价的导水通道超前探查判识技术[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(7): 178-186.
LI Jianlin, XUE Yang, WANG Xinyi, *et al.* Judgment technique for over-exploration of water-conducting channel based on process analysis and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7): 178-186.

移动扫码阅读

基于模糊综合评价的导水通道超前探查判识技术

李建林^{1,2}, 薛 杨¹, 王心义^{1,2}, 徐博博³, 郭水涛⁴

(1. 河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454000; 2. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454000;
3. 焦作市神龙水文地质工程有限公司, 河南 焦作 454000; 4. 河南焦煤能源有限公司 古汉山矿, 河南 焦作 454100)

摘要: 华北型煤田地质条件复杂, 煤层底板受构造切割形成大量导水通道, 其探查判识一直是水害防治中的重点和难点。以多分支定向长钻孔超前探查为基础, 构建了基于流程分析与模糊综合评价相结合的导水通道判识技术。首先在超前探查过程中, 选取钻时录井、钻井液消耗量、 γ 录井、岩屑录井、压水试验、可注性 6 个评判指标, 将施工过程分为 16 种工况, 依此建立综合分析流程图, 对样点是否导水进行定性判识; 其次采用钻速、钻井液消耗量、 γ 值、非灰岩占比、单位压注量和注浆量对 6 个指标进行量化分级, 利用超标加权法确定指标权重, 基于模糊理论和最大隶属度原则对样点是否导水进行三级定量判识; 最后利用该技术对赵固一矿 15031 工作面 13 个点位进行综合流程分析和模糊综合评价, 其中 10 个点位导水可能性高, 3 个点位导水可能性低; 在此基础上, 结合工程实际成功标定了 3 条导水通道的具体位置。该技术构建了导水通道的判识指标体系, 并对其进行了量化分级与综合评估, 提高了煤层底板导水通道的判识度。

关键词: 超前探查; 导水通道; 模糊综合评价; 矿井水害

中图分类号: TD745 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2024)07-0178-09

Judgment technique for over-exploration of water-conducting channel based on process analysis and fuzzy comprehensive evaluation

LI Jianlin^{1,2}, XUE Yang¹, WANG Xinyi^{1,2}, XU Bobo³, GUO Shuitao⁴

(1. College of Resources and Environment, Henan University of Technology, Jiaozuo 454000, China; 2. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean High Efficiency Utilization, Jiaozuo 454000, China; 3. Jiaozuo Shenlong Hydrogeology Company, Jiaozuo 454000, China;
4. Guhanshan Coal Mine, Henan Coking Coal Energy Co., Ltd., Jiaozuo 454100, China)

Abstract: The geological conditions of the North China-type coalfields are complicated, and a large number of water-conducting channels are formed by the tectonic cutting of the coal seam base plate, whose detection and identification have always been the key point and difficulty in water damage prevention and control. Based on the multi-branch directional long drilling overrun investigation, the water-conducting channel identification technology combining process analysis and fuzzy comprehensive evaluation was constructed. Firstly, in the process of overpassing exploration, six evaluation indexes were selected, named drilling time recording, drilling fluid consumption, γ recording, rock chip recording, water pressure test and injectability and the construction process was divided into 16 working conditions, according to which a comprehensive analysis flowchart was set up to make a qualitatively judgement on whether the sample points were water-conducting. Secondly, the six indicators are quantified and graded by drilling speed, drilling fluid consumption, γ value, non-tuff proportion, unit grouting volume, and grouting volume, the weights of the indicators were determined by using the over-weighting method, and a three-level quantitative identification was made based on the fuzzy theory and the maximum membership principle to determine whether the sample point was water-conducting. Lastly, the technique was used to carry out a comprehensive process analysis and fuzzy comprehensive evaluation of 13 points in the 15031 working face of Zhaogu No.1 mine, of which 10 points had a high probability of water conduction and 3 points had a low probability of water conduction. This technique constructed a system of indicators for identifying water-

收稿日期: 2023-09-05 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.12438/cst.2023-1269

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41972254); 河南省高等学校重点科研资助项目(22A170009)

作者简介: 李建林(1973—), 男, 甘肃天水人, 教授, 博士。E-mail: lj.l.wy@163.com

通讯作者: 薛 杨(1993—), 男, 河南焦作人, 助理工程师, 硕士。E-mail: 436027254@qq.com

conducting channels, and carried out quantitative grading and comprehensive evaluation, which improved the identification of water-conducting channels in the coalbed base plate.

Key words: over-exploration; water-conducting channel; fuzzy comprehensive evaluation; mine water disaster

0 引言

华北型煤田水文地质条件复杂,具有大埋深、高水压、煤层底板隔水层薄等显著特征,构造对煤层底板隔水层产生强烈破坏,形成裂隙、断层等导水通道,显著降低隔水层阻水性能,突水水源极易沿底板隔水层导水通道进入采区,对矿井生产造成重大威胁。在长期的工程实践中,各矿区经过摸索逐渐形成以井下超前探技术为基础,地震法、直流电法、电磁法等多种方法并行的探查手段^[1-2];微震监测技术在解决煤层底板变形、破裂、渗流、构造活化导致的裂隙、断层等导水通道突水问题方面得到了广泛应用^[3-4];无线电波透视技术仪器轻便灵活,透视距离及抗干扰能力好,已成为探测顶底板导水通道的有效手段^[5-7];地下全空间瞬变电磁技术^[8]、扇形探测技术^[9]、巷-孔瞬变电磁三分量探测技术^[10-11]在探测导水通道方面也取得了良好的效果。综上所述,导水通道探查技术不断更新发展,矿井水害治理水平取得很大进步,但受井下空间、设备、限员规定等条件制约,井下钻探及物探技术存在设备作用范围小、探测距离近等问题,单一技术手段对部分导水通道探测效果不佳,导致后期治理时常常形成覆盖盲区,突水事故仍时有发生,给矿井生产带来不利影响,亟需探寻新的探查技术以满足矿井生产的迫切需求。

近年来,地面区域水害治理工程在华北型煤田各矿区广泛开展,施工中以长距离多分支定向钻探技术为依托,利用多种录井及参数测量手段及时掌握钻孔轨迹和地层异常信息,对断层、裂隙等地质构造有较好的识别效果,并可通过施工多分支钻孔对其进行验证。地面区域水害治理技术突破了设备能力、施工环境的限制,可大范围对目标区域进行超前探查。不少专家学者基于地面区域水害治理工程对导水通道探查判识技术进行了研究,也取得了一定的成果^[12-13]。由于地面区域水害治理工程在各矿区开展时间不长,针对导水通道探查判识技术研究尚处起步阶段,判识多依靠定性分析,量化分析尚显不足,技术体系亟待系统化、流程化和定量化。

基于此,以赵固一矿 15031 工作面为例,依托地面多分支定向钻探技术,构建基于流程分析和模糊综合评价相结合的导水通道判识技术体系,以期为

区域超前探查下的导水通道判识提供有益的借鉴。

1 导水通道探查判识技术流程

1.1 导水通道的分类与判识难点

矿井水害的导水通道主要可分为天然通道和人为通道^[14]。其中,人为通道来源较为明确,位置确定及治理难度相对较小;而天然通道多发育于煤层底板,由裂隙或隐伏断层组成的导水通道往往尺度较小,具有位置不明、导水性较好、隐蔽性好、可探测性差等特点^[15],使用井下钻探、物探等单一技术手段进行探测时,受限于井下施工条件和设备技术能力,判识效果往往不够理想,极易产生探查盲区,对矿井下一步治理工作造成不利影响。

1.2 探查判识评价指标的选取

为解决导水通道探查判识技术难题,基于区域超前治理工程,利用多分支钻孔地毯式高密度覆盖的技术优势,通过分析华北型煤田地面区域水害治理工程实例^[16-18],选取以下 6 个指标作为导水通道超前探查判识的评价指标。

1) 钻时录井,又称钻速录井。通过分析钻穿单位厚度岩层所需时间来判断井下岩层性质;钻速快慢反映当前地层的可钻性,与地层孔隙度和岩层的致密程度密切相关。通过观察钻时情况,可以初步判定岩性,划分对比地层,判识裂缝、溶洞等地质情况^[19-20]。

2) 钻井液消耗量。钻井液是钻探过程中重要的循环介质,具有携带岩屑、冷却钻头和为井下动力钻具提供能量的作用,钻进时可根据钻井液消耗量判识当前位置是否存在裂隙、断层等导水通道;钻井液漏失速度和大小,可估算导水通道发育程度和导水性高低^[21]。

3) γ 录井。各矿区可根据当地情况划定伽马值岩性区分标准,为当前地层情况识别提供参考。当钻进时岩性发生改变,或当前井段中存在裂隙,但已被前序封堵作业中的注浆材料等物质所充填时,伽马值均会发生变化,从而为判识导水通道提供帮助^[19]。

4) 岩屑录井。岩屑录井是根据钻进过程中钻井液循环返出的岩屑,对当前地层的岩性进行分析和对比,为钻探工作提供地质指导;结合岩屑中的次生矿物和前序分支钻孔中扩散而来的注浆材料,可对

判识及标定裂隙、断层等导水通道位置提供参考^[22-23]。

5) 压水试验。压水试验的基本原理是在封隔钻孔试段中, 按照规定压力值将水压入隔离后的试验段孔壁中, 确定压入流量稳定后的流量值, 以求解试验段在规定压力下的渗透率, 该数值可作为导水通道裂隙发育情况的测试依据^[24]。

6) 可注性。可注性是渗入注浆孔段的可能性; 根据注浆过程中的注浆压力和注浆流量变化情况,

结合注入总量可分析出注浆孔段的可注性, 对于分析注浆孔段导水通道的存在与否及裂隙发育情况有较好的参考^[25]。

1.3 导水通道探查判识流程

上述 6 种评价指标在施工过程中可细分为 16 种工况(图 1a)。将这 16 种工况进行梳理整合, 形成导水通道探查判识流程(图 1b)。利用该流程图, 可对施工中所遇重要点位进行导水通道判识。

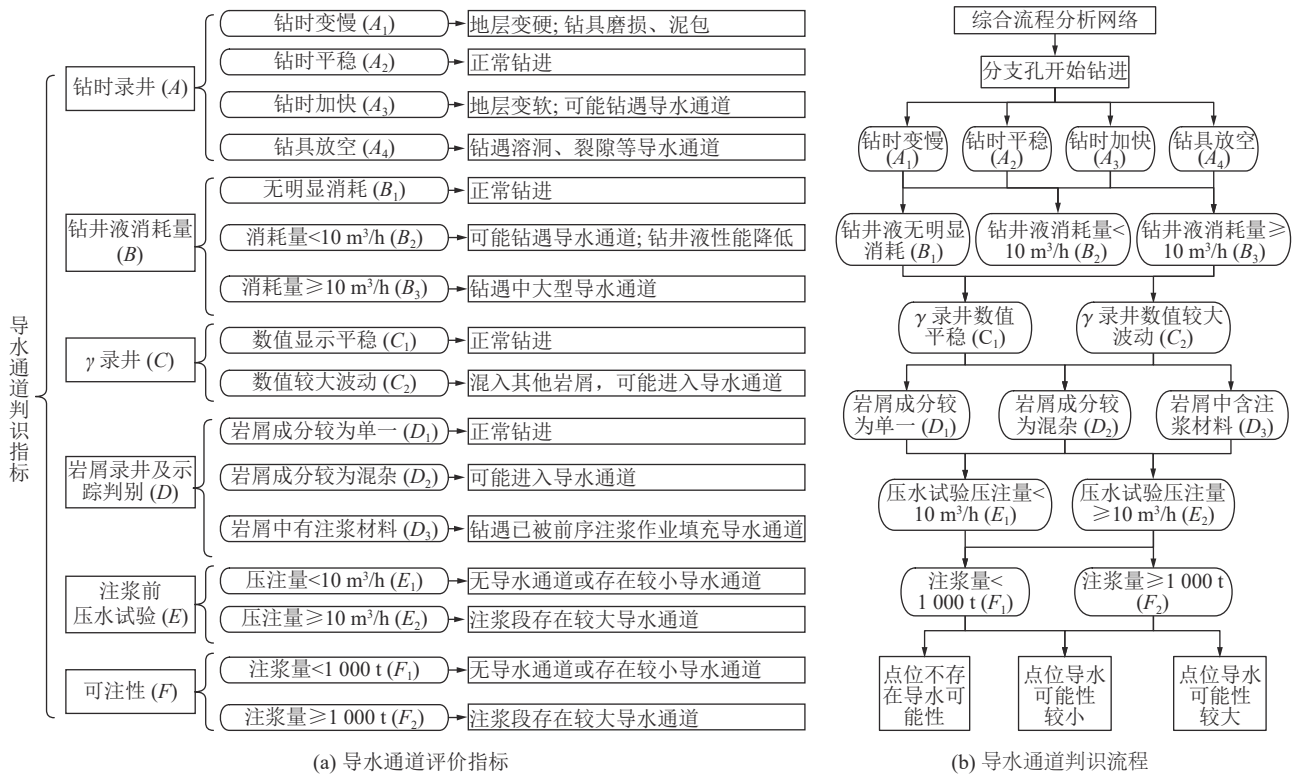


图 1 导水通道评价指标及判识流程
Fig.1 Indicators for evaluating hydraulic conduits and process of identifying them

由图 1a 可看到, 当探查点位钻时变慢或钻时平稳时, 钻遇导水通道可能性较小, 当钻时加快乃至钻具放空, 其钻遇导水通道可能性随之增大; 当探查点位钻井液消耗量、压水试验压注量、注浆量为 0 时, 该点位存在导水通道可能性较小, 随着数值的加大, 点位存在导水通道的可能性也相应加大。在图 1b 中, 当探查点位符合流程 A₁/A₂→B₁→C₁→D₁→E₁→F₁ 时, 该通道导水可能性最小; 探查点位符合流程 A₃/A₄→B₃→C₂→D₃→E₂→F₂ 时, 该通道导水的可能性最大。因此, 结合实际施工情况, 可利用该流程图对探查点位是否导水进行初步的定性判识。

2 基于模糊综合评价的判识流程的量化

利用图 1 进行导水通道判识时, 6 个指标的评判过程具有典型的主观性和模糊性; 尤其是钻时录井

和岩屑录井, 目前大都采用定性描述, 评判过程容易出现误判。而模糊综合评价模型可以弥补人为分析和量化的不足, 提高评判结果的可信度。

2.1 评价体系的构建

根据预评判点位注浆与否, 将评价指标体系分为 2 类, 构建评价体系。注浆状态下, 评价指标为 6 个, 未注浆状态下, 评价指标为 4 个(表 1)。

2.2 评价等级的确定

根据华北型煤田地面区域水害治理工程实例, 将导水通道的判识分为导水可能性“低、中、高”3 个等级, 分别对应 V₁、V₂、V₃; 评价指标也划分为相应的 3 个等级(表 2)。其中, 指标“钻时录井”以探查点位井段平均钻速来量化; 指标“岩屑录井”采用非灰岩质量与捞取岩屑总质量之比(以下简称“非灰岩占比”)来量化。

表 1 评价指标体系
Table 1 Evaluation indicator system

状态	目标层	准则层	指标层
注浆	通道导水评价(A)	钻进参数(B ₁)	钻时录井(C ₁)
			钻井液消耗量(C ₂)
		伽马录井与岩屑录井(B ₂)	γ录井(C ₃)
			岩屑录井(C ₄)
		注浆参数(B ₃)	压水试验(C ₅)
			可注性(C ₆)
未注浆	通道导水评价(A)	钻进参数(B ₁)	钻时录井(C ₁)
			钻井液消耗量(C ₂)
		γ录井与岩屑录井(B ₂)	γ录井(C ₃)
			岩屑录井(C ₄)

表 2 评价指标评定等级标准
Table 2 Criteria for rating evaluation indicators

评价指标	量化取值	导水通道评价等级		
		V ₁	V ₂	V ₃
钻井液消耗量	单位消耗量/(m ³ ·h ⁻¹)	(0, 10)	[10, 30)	[30, +∞)
钻时录井	钻速/(m·h ⁻¹)	(0, 6)	[6, 9)	[9, +∞)
γ录井	γ值	(0, 35)	[35, 50)	[50, +∞)
岩屑录井	非灰岩占比/%	(0, 5)	[5, 10)	[10, 100)
压水试验	单位压注量/(m ³ ·h ⁻¹)	(0, 10)	[10, 30)	[30, +∞)
可注性	注浆量/t	(0, 1 000)	[1 000, 2 000)	[2 000, +∞)

2.3 基于隶属度的单因素评价

利用式(1)一式(3)计算每个因素的隶属度。点位状态为注浆时,评价指标为 6 个,模糊矩阵为 6 行 3 列矩阵 $R = (r_{ij})_{6 \times 3}$; 点位状态为未注浆时,评价指标为 4 个,模糊矩阵为 4 行 3 列矩阵 $R = (r_{ij})_{4 \times 3}$ 。

$$r_1(x) = \begin{cases} 1, & y \leq x_1 \\ \frac{x_2 - y}{x_2 - x_1}, & x_1 < y < x_2 \\ 0, & y \geq x_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$r_2(x) = \begin{cases} 0, & y \leq x_1 \text{ 或 } y \geq x_3 \\ \frac{y - x_1}{x_2 - x_1}, & x_1 < y < x_2 \\ \frac{x_3 - y}{x_3 - x_2}, & x_2 < y < x_3 \end{cases} \quad (2)$$

$$r_3(x) = \begin{cases} 0, & y \leq x_2 \\ \frac{y - x_2}{x_3 - x_2}, & x_2 < y < x_3 \\ 1, & y \geq x_3 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $r_1(x)$ 、 $r_2(x)$ 、 $r_3(x)$ 为隶属度函数; y 为定量评价指标的实测数据; x_1 、 x_2 、 x_3 为将定义域划分为若干模糊子集而确定的临界值。

2.4 评价指标权重的确定

确定评价因素权重的方法很多,常用的方法有 AHP、网络层次分析法(ANP)和超标加权法等。由于 AHP 与 ANP 在确定权重过程中,更多的是依赖专家的经验,且对不同点位权重固定;而在实际施工过程中,点位发生改变时,评价指标的权重往往也会发生变化,所以, AHP 和 ANP 不适用于多位点导水通道判识指标权重的确定。若探查点位各指标取值都已确定,更适合采用超标加权法确定权重^[26],其具体公式如下:

$$W_i = \frac{x_i}{s_i} \bigg/ \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{s_i} \quad (4)$$

式中: W_i 为第 i 个指标权重; s_i 为指标分级中最优临界值; x_i 为第 i 个指标的实测数据。

根据探查点位状态不同,由 W_i 组成的矩阵分别为指标权重集 $W = (w_{ij})_{1 \times 6}$ 与 $W = (w_{ij})_{1 \times 4}$ 。

2.5 综合评价

将因子权重集 W 与模糊矩阵 R 进行复合运算,便得到综合评价结果 U , 即:

$$U_{1 \times 3} = W \circ R = (u_{ij})_{1 \times 3} \quad (5)$$

式中: $u_{ij} = \bigvee_{j=1}^m (w_j \wedge r_{jk}) = \max_{1 \leq j \leq m} \{\min(w_j, r_{jk})\}, k = 1, 2, 3$ 。

得到综合评价结果 U 之后,根据最大隶属度原则即可确定该点位导水可能性的级别。

3 应用

3.1 工程概况

赵固一矿位于焦作矿区东部,主采煤层为二₁煤层。15031 工作面二₁煤层平均厚度 5.8 m 左右,煤层倾角 1°~4°。; L₈ 灰岩厚度 10.60~11.49 m,上距二₁煤层底板 27.09~27.16 m,水压 5.3~5.4 MPa,存在较大的突水危险。

为提高 15031 工作面二₁煤层底板一定厚度范围内岩层的完整性,增加煤层底板与 L₈ 灰岩含水层底面之间的岩层抗压强度,降低采掘期间水害威胁几率及程度,于该工作面实施地面区域水害治理工程,共完成 6 个主要分支钻孔;施工过程中对实时工况进行监测,选定 13 个点位进行导水通道可能性判识(图 2);各点位指标具体数据见表 3。

3.2 探查点位综合流程分析

依据各点位指标的实际取值(表 3),利用流程图(图 1b)分析,得到上述 13 个点位导水可能性的定性判识结果(表 4)。

3.3 模糊综合评价

1)以点位 1(注浆点位)、点位 11(未注浆点位)

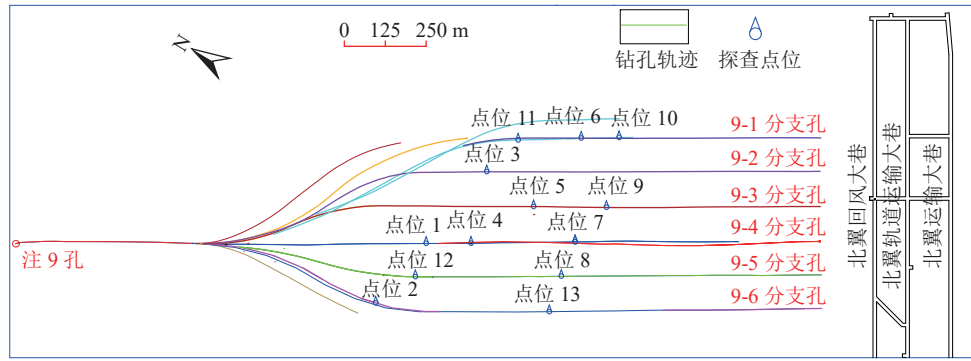


图2 探查点位平面示意
Fig.2 Schematic plan of probe site

表3 各点位评判指标取值
Table 3 Statistical table of data for each point

点位序号	点位状态	点位深度/m	钻井液单位消耗量/ (m ³ ·h ⁻¹)	钻速录井/ (m·h ⁻¹)	γ录井	岩屑录井/%	单位压注量/ (m ³ ·h ⁻¹)	注浆干料 质量/t
1	注浆	1 080	37.6	7	70	2	37.6	1 341.2
4		1 164	42.0	7	60	2	42.0	1 969.8
5		1 255	18.8	8	55	3	18.8	1 269.7
6		1 351	60.0	8	30	1	60.0	2 256
7		1 310	10.8	7	40	2	10.8	3 328
10		1 412 ~ 1 431	18.0	8	55	3	18.0	2 786
2		未注浆	1 022 ~ 1 024	0	12	48	15	
3	1 177 ~ 1 197		0	10	30	13		
8	1 293		0	10	57	12		
9	1 360 ~ 1 380		0	11	43	15		
11	1 245 ~ 1 255		0	5	45	3		
12	1 022 ~ 1 024		0	4	30	2		
13	1 285 ~ 1 295		0	5	28	2		

为例,利用式(1)一式(3)分别计算指标隶属度,得到模糊矩阵:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.67 & 0.33 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.66 & 0.34 \end{bmatrix}$$

$$R_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0.17 & 0.83 & 0 \\ 0 & 0.33 & 0.67 \\ 0.4 & 0.6 & 0 \end{bmatrix}$$

2)利用式(4)分别计算点位1和点位11各因素的权重集:

$$W_1 = (0.302\ 55, 0.093\ 88, 0.160\ 93, 0.032\ 19, 0.302\ 55, 0.107\ 92)$$

$$W_{11} = (0, 0.306\ 48, 0.472\ 85, 0.220\ 67)$$

3)将因子权重集与模糊矩阵代入式(5)进行复合运算,得到综合评价结果U;利用最大隶属度原则

得到最终的判识结果(表5)。

4)导水通道探查判识结果分析。点位1—10在施工过程中根据经验初步判定为疑似导水点位,进而利用综合流程分析和模糊综合评价进行判识,其结果均显示点位1—10导水可能性为高。点位11—13在施工过程中,根据施工经验初步判定不具有导水可能性,但这3个点位与疑似导水点位距离较近(图2),将其作为对比点位一同纳入导水通道探查判识技术体系中进行分析,既可验证该技术体系判识结果的准确性,也可为后续推测导水通道位置走向提供参考。点位11—13通过综合流程分析与模糊综合评价进行判识,其结果显示这3个点位导水可能性均不为高。

3.4 研究区导水通道分析标定

根据以上评判结果,结合各点位距离及位置关系,以及部分点位中出现的前序分支注浆工程扩散而来的注浆材料(图3),对导水通道位置及走向进行

表 4 基于流程图的点位导水定性判识
Table 4 Statistical of identification results of points

序号	点位状态	流程路径	定性判识	序号	点位状态	流程路径	定性判识
1	注浆	$A_3 \rightarrow B_3 \rightarrow C_2 \rightarrow D_1 \rightarrow E_2 \rightarrow F_1$	可能性大	2	未注浆	$A_3 \rightarrow B_1 \rightarrow C_2 \rightarrow D_3$	可能性大
4	注浆	$A_3 \rightarrow B_3 \rightarrow C_2 \rightarrow D_1 \rightarrow E_2 \rightarrow F_1$	可能性大	3	未注浆	$A_3 \rightarrow B_1 \rightarrow C_1 \rightarrow D_3$	可能性大
5	注浆	$A_3 \rightarrow B_3 \rightarrow C_2 \rightarrow D_1 \rightarrow E_2 \rightarrow F_1$	可能性大	8	未注浆	$A_3 \rightarrow B_1 \rightarrow C_2 \rightarrow D_3$	可能性大
6	注浆	$A_3 \rightarrow B_3 \rightarrow C_1 \rightarrow D_1 \rightarrow E_2 \rightarrow F_2$	可能性大	9	未注浆	$A_3 \rightarrow B_1 \rightarrow C_2 \rightarrow D_3$	可能性大
7	注浆	$A_3 \rightarrow B_3 \rightarrow C_2 \rightarrow D_1 \rightarrow E_2 \rightarrow F_2$	可能性大	11	未注浆	$A_2 \rightarrow B_1 \rightarrow C_2 \rightarrow D_1$	可能性小
10	注浆	$A_3 \rightarrow B_3 \rightarrow C_2 \rightarrow D_1 \rightarrow E_2 \rightarrow F_2$	可能性大	12	未注浆	$A_2 \rightarrow B_1 \rightarrow C_1 \rightarrow D_1$	可能性小
—	—	—	—	13	未注浆	$A_2 \rightarrow B_1 \rightarrow C_1 \rightarrow D_1$	可能性小

表 5 各点位模糊综合评价结果
Table 5 Statistical table of fuzzy comprehensive evaluation results for each point

点位序号(注浆)	评价结果			导水性	点位序号(未注浆)	评价结果			导水性
	低	中	高			低	中	高	
1	0.019	0.147	0.834	高	2	0	0.032	0.968	高
4	0.018	0.073	0.909	高	3	0.023	0.144	0.833	高
5	0.028	0.449	0.523	高	8	0	0	1	高
6	0.017	0.073	0.910	高	9	0	0.095	0.905	高
7	0.029	0.461	0.509	高	11	0.140	0.543	0.317	中
10	0.024	0.299	0.676	高	12	0.301	0.699	0	中
—	—	—	—	—	13	0.266	0.734	0	中

标定：1 号导水通道：通过点位 1、2、3 标定，其分别位于 9-4、9-6、9-2 分支孔；2 号导水通道：通过点位 4、5、6 标定，其分别位于 9-4、9-3、9-1 分支孔；3 号导水通道：通过点位 7、8、9、10 标定，其分别位于 9-4、9-5、9-3、9-1 分支孔(图 4)。



图 3 岩屑出现注浆材料
Fig.3 Presence of grouting material in rock chips

点位 11、12、13 均位于上述 3 条导水通道的延伸方向上，但通过对导水通道探查判识技术体系评价结果及现场工况综合分析，上述 3 个点位不存在导水可能性，但可为技术体系评价结果及导水通道位置推测的准确性提供佐证及参考。因此，本文提

出的导水通道探查判识技术具有较强的科学性与准确性，可在传统施工经验判识基础上提升导水通道的探查判识效果。

4 讨 论

模糊综合评价法是一种应用模糊数学原理对多种因素所影响的事物或现象进行综合评价的方法，其优点在于对模糊信息的量化且充分考虑了多个评价指标间的相互影响。目前，基于地面定向钻进技术的导水通道判识存在较多的判识指标，且有些指标是通过人为定性来描述的，具有模糊性和主观性，所以可采用模糊综合评价法对导水通道进行判识。要使判识结果更加客观且符合实际，关键在于评价指标的选择、量化、分级和权重的确定是否合理。

1)评价指标选择。研究表明，在地面定向钻进探查导水通道过程中揭露地层起伏或构造时，岩屑、钻时、钻井液漏失量等直观指标和压水试验透水率、注浆参数等验证性指标均与正常地层条件下有显著差异^[13]。所以选择钻时录井、钻井液消耗量、γ录井、岩屑录井、压水试验和可注性作为导水通道判识的 6 个指标是合理的。

2)评价指标的量化。以上 6 个指标中，钻井液

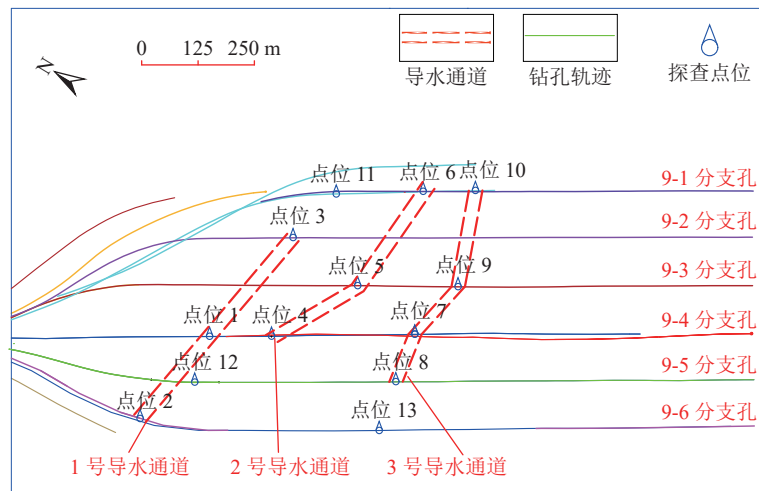


图4 导水通道位置示意

Fig.4 Schematic diagram of water channel location

消耗量和 γ 录井2个指标可以直接采用数值来描述;压水试验和可注性2个指标可采用单位压注量和注浆量来量化。而钻时录井和岩屑录井目前多以定性描述来刻画,无法进行模糊运算。钻时与钻速存在对映关系,所以钻时录井可采用探查点位井段平均钻速来量化;岩屑录井反映的是钻进过程中钻井液循环返出的岩屑,采用非灰岩质量与捞取岩屑总质量之比(非灰岩占比)来量化是可行的。这样,6个指标都用数值来量化,为模糊综合评价奠定了基础。

3)评价指标的分级。参考华北型煤田地面区域水害治理工程实例和相关文献^[13],对钻井液消耗量、 γ 录井、单位压注量和注浆量的分级相对容易。

就钻速而言,通过测算各分支孔钻进数据,综合定向钻进/复合钻进工况,统计出钻孔在灰岩中正常钻进平均钻速均少于6 m/h,在此工况背景下钻遇导水通道概率低;当井段平均钻速在9 m/h以上时,井段往往在岩屑录井中出现大量注浆材料等异常成分,在此工况背景下钻遇导水通道概率极大。因此,将钻速按6 m/h和9 m/h划分为3个区间来刻画钻时录井是合理的。

就岩屑录井而言,当钻孔在灰岩中正常钻进时,岩屑中几乎不含注浆材料,其余岩屑成分也较少,岩屑构成较为单一,通过对该情况下井段岩屑质量进行测算,非灰岩岩屑质量占比一般小于5%。而出现导水通道时,后续分支孔钻进过程中,岩屑中往往存在由前序分支孔注浆作业扩散而来的注浆材料(图3),此注浆材料成为岩屑录井中非灰岩岩屑的主要成分。通过对不同井段录井岩屑的统计分析,当岩屑中开始出现注浆材料(其质量占比一般为5%~

10%)时,该点位往往存在裂隙较小的导水通道;当岩屑中开始大量出现注浆材料(其质量占比一般大于10%)时,该点位往往存在较大导水通道。因此,将非灰岩占比按5%和10%划分为3个区间来刻画岩屑录井是合理的。

4)评价指标的权重。在实际施工过程中,点位发生改变时,评价指标的权重往往也会发生变化。而超标加权法(式(4))就是在不同点位,利用指标的不同取值进行比较来确定权重的,点位不同,指标权重也不同。所以,超标加权法更加适用于导水通道判识指标权重的确定。

通过在赵固一矿15031工作面的实例分析与验证,说明上述6个导水通道判识指标的选择、量化、分级和权重的确定是合理的。

5 结 论

1)以多分支定向长钻孔超前探查为基础,利用综合分析流程图对样点是否导水进行定性判识;利用模糊理论构建了导水通道三级定量判识的技术体系。

2)导水通道模糊综合评价过程中,对选取的6个判识指标分别采用钻速、钻井液消耗量、 γ 值、非灰岩占比、单位压注量和注浆量来量化,并对指标进行了低、中、高3个等级的划分;利用超标加权法确定指标权重;利用模糊算子和最大隶属度原则对导水通道进行综合判识。

3)利用该技术对赵固一矿15031工作面13个点位进行了综合流程分析和模糊综合评价,最终成功标定了3条导水通道的具体位置。该技术构建了

导水通道的判识指标体系,并对其进行量化分级与综合评估,提高了煤层底板导水通道的判识度。

参考文献(References):

- [1] 韩德品,赵锴,李丹. 矿井物探技术应用现状与发展展望[J]. *地球物理学进展*, 2009, 24(5): 1839-1849.
HAN Depin, ZHAO Pu, LI Dan. Application status and development prospects of mine geophysical exploration technology[J]. *Progress in Geophysics*, 2009, 24(5): 1839-1849.
- [2] 刘盛东,刘静,岳建华. 中国矿井物探技术发展现状和关键问题[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(1): 19-25.
LIU Shengdong, LIU Jing, YUE Jianhua. Development status and key problems of Chinese mining geophysical technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(1): 19-25.
- [3] 孙建,王连国. 基于微震信号突变分析的底板断层突水预测[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(8): 1404-1410.
SUN Jian, WANG Lianguo. Floor fault water-inrush prediction based on catastrophe analysis of micro-seismic signals[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(8): 1404-1410.
- [4] 原富珍,马克,庄端阳,等. 基于微震监测的董家河煤矿底板突水通道孕育机制[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(6): 1846-1856.
YUAN Fuzhen, MA Ke, ZHUANG Duanyang, et al. Preparation mechanism of water inrush channels in bottom floor of Dongjiahe Coal Mine based on microseismic monitoring[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(6): 1846-1856.
- [5] 韩德品,张天敏,石亚丁,等. 井下单极-偶极直流电透视原理及解释方法[J]. *煤田地质与勘探*, 1997, 25(5): 32-35.
HAN Depin, ZHANG Tianmin, SHI Yading, et al. The principle and interpretation method of the monopolar-dipole dc penetration at working face[J]. *Coal Geology & Exploration*, 1997, 25(5): 32-35.
- [6] 曾方禄,王永胜,张小鹤,等. 矿井音频电透视及其应用[J]. *煤田地质与勘探*, 1997, 25(6): 54-57.
ZENG Fanglu, WANG Yongsheng, ZHANG Xiaohe, et al. Mine voice frequency electric perspective technique and its application[J]. *Coal Geology & Exploration*, 1997, 25(6): 54-57.
- [7] 贾茜,张仲礼,田小超,等. 矿井无线电波透视法在唐家会矿井61101工作面隐伏断层探测中的应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2017, 45(1): 137-142.
JIA Qian, ZHANG Zhongli, TIAN Xiaochao, et al. Application of radio wave perspective method in exploration of concealed fault in 61101 working face of Tangjiahui Mine[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2017, 45(1): 137-142.
- [8] 郭纯,刘白宙,白登海. 地下全空间瞬变电磁技术在煤矿巷道掘进头的连续跟踪超前探测[J]. *地震地质*, 2006, 28(3): 456-462.
GUO Chun, LIU Baizhou, BAI Denghai. Prediction of water disasters ahead of tunneling in coal mine using continuous detection by uwtem[J]. *Seismology and Geology*, 2006, 28(3): 456-462.
- [9] 刘志新,岳建华,刘仰光. 扇形探测技术在超前探测中的应用研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2007, 36(6): 822-825, 868.
LIU Zhixin, YUE Jianhua, LIU Yangguang. Application of sector detection technology in advanced detection[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2007, 36(6): 822-825, 868.
- [10] 李学潜,韩德品,王程,等. 巷-孔瞬变电磁法在探测含水构造中的应用[J]. *中国煤炭地质*, 2019, 31(3): 77-82.
LI Xueqian, HAN Depin, WANG Cheng, et al. Application of roadway-borehole TEM in water-bearing and water conducting structure prospecting[J]. *Coal Geology of China*, 2019, 31(3): 77-82.
- [11] 赵睿,范涛,李宇腾,等. 钻孔瞬变电磁探测在水力压裂效果检测中的应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(4): 41-45.
ZHAO Rui, FAN Tao, LI Yuteng, et al. Application of borehole transient electromagnetic detection in the test of hydraulic fracturing effect[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(4): 41-45.
- [12] 赵庆彪. 奥灰岩溶水害区域超前治理技术研究及应用[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(6): 1112-1117.
ZHAO Qingbiao. Ordovician limestone Karst water disaster regional advanced governance technology study and application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(6): 1112-1117.
- [13] 董书宁,李智,郑士田,等. 煤层底板导水通道钻孔超前探查与多元信息识别技术[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(7): 15-23.
DONG Shuning, LI Zhi, ZHENG Shitian, et al. Advanced drilling detection and multi-information identification of water-conducting channel of coal floor[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(7): 15-23.
- [14] 武强,崔芳鹏,赵苏启,等. 矿井水害类型划分及主要特征分析[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(4): 561-565.
WU Qiang, CUI Fangpeng, ZHAO Suqi, et al. Type classification and main characteristics of mine water disasters[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(4): 561-565.
- [15] 张玉军,张志巍,肖杰,等. 承压水体上煤层底板下位隐伏断层采动突水机制研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(2): 283-291.
ZHANG Yujun, ZHANG Zhiwei, XIAO Jie, et al. Study on mining water inrush mechanism of buried fault under coal seam floor above confined water body[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(2): 283-291.
- [16] 董书宁,刘其声,王皓,等. 煤层底板水害超前区域治理理论框架与关键技术[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(1): 185-195.
DONG Shuning, LIU Qisheng, WANG Hao, et al. Theoretical framework and key technology of advance regional control of water inrush in coal seam floor[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 185-195.
- [17] 高耀全,方刚,闫兴达. 邢东煤矿深部区域奥灰水害探查治理技术[J]. *煤矿安全*, 2021, 52(5): 87-95.
GAO Yaoquan, FANG Gang, YAN Xingda. Exploration and control technology of Ordovician limestone water hazard in deep area of Xingdong coal mine[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(5): 87-95.
- [18] 董书宁,郭小铭,刘其声,等. 华北型煤田底板灰岩含水层超前区域治理模式与选择准则[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(4): 1-10.
DONG Shuning, GUO Xiaoming, LIU Qisheng, et al. Model and selection criterion of zonal preact grouting to prevent mine water disasters of coal floor limestone aquifer in North China type coalfield[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(4): 1-10.

- [19] 阚留杰, 陈钉钉, 祝国伟, 等. 应用测井、录井资料识别泥岩裂缝方法[J]. *录井工程*, 2015, 26(2): 29-33, 90-91.
KAN Liujie, CHEN Dingding, ZHU Guowei, *et al.* Use well logging and mud logging data to recognize mudstone fractures[J]. *Mud Logging Engineering*, 2015, 26(2): 29-33, 90-91.
- [20] 汪磊. 微钻时录井技术在冀东油田的研究与应用[J]. *录井工程*, 2023, 34(1): 9-17.
WANG Lei. Research and application of micro-drilling time logging technology in Jidong Oilfield[J]. *Mud Logging Engineering*, 2023, 34(1): 9-17.
- [21] 李超峰, 虎维岳, 王云宏, 等. 煤层顶板导水裂缝带高度综合探查技术[J]. *煤田地质与勘探*, 2018, 46(1): 101-107.
LI Chaofeng, HU Weiyue, WANG Yunhong, *et al.* Comprehensive detection technique for coal seam roof water flowing fractured zone height[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2018, 46(1): 101-107.
- [22] 雷军, 王慎实, 杨钰. 岩屑录井数字化技术在塔里木油田的应用[J]. *录井工程*, 2017, 28(4): 1-6, 129.
LEI Jun, WANG Shenshi, YANG Yu. Application of digital technology of cutting logging in Tarim Oilfield[J]. *Mud Logging Engineering*, 2017, 28(4): 1-6, 129.
- [23] 刘合年, 吴蕾, 曹来勇, 等. 阿姆河右岸膏盐岩下碳酸盐岩缝洞储层研究[J]. *石油天然气学报*, 2014, 36(3): 46-53, 4-5.
LIU Henian, WU Lei, CAO Laiyong, *et al.* Study of characteristics of sub-salt gypsum carbonate reservoir on the right bank of amudar'ya basin[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2014, 36(3): 46-53, 4-5.
- [24] 杨月堂. 煤矿顶部隔水性能多尺度评价[J]. *能源与环境*, 2023, 45(2): 268-274.
YANG Yuetang. Multiscale evaluation of water impermeability of coal mine roof[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2023, 45(2): 268-274.
- [25] 荣传新, 武汉, 彭世龙, 等. 千米深井 L 型钻孔地面预注浆岩体可注性研究[J]. *安徽理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 38(1): 1-7.
RONG Chuanxin, WU Han, PENG Shilong, *et al.* Study on the grouting of rock mass in kilometer deep well by surface ground pre-grouting of L type drilling[J]. *Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science)*, 2018, 38(1): 1-7.
- [26] 于维洋, 张颂嘉, 沈会涛, 等. 基于模糊物元法地表水质量评价[J]. *统计与决策*, 2019, 35(1): 72-74.
YU Weiyang, ZHANG Songjia, SHEN Huitao, *et al.* Evaluation of surface water quality based on fuzzy matter-element method[J]. *Statistics & Decision*, 2019, 35(1): 72-74.