

基于构造影响特征的断层预测技术研究

张士岭^{1,2}

(1. 瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室, 重庆 400037; 2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037)

摘要: 为了防止采掘过程中无计划揭露地质构造和地质构造引发的灾害, 丰富地质构造探测预报技术, 开展了基于构造影响特征的断层构造预测技术研究。提出了利用构造影响特征推断前方断层及影响范围的思想和技术途径。通过对赵庄矿地质构造影响下突出危险指标、煤层厚度、夹矸厚度、瓦斯涌出等变化特征的分析, 从中挖掘、提取这些信息特征—构造影响特征, 建立了多维构造影响特征指标体系和断层构造综合预测模型, 并在赵庄矿进行了成功应用。应用结果表明, 通过分析采掘期间各种生产安全信息蕴含的构造影响特征变化情况, 采用地质构造综合预测模型, 能够实现工作面前方断层构造的超前预测, 提高勘探钻孔施工的针对性, 降低地质构造勘探的成本。

关键词: 地质构造; 断层预测; 煤层厚度; 煤层夹矸; 地质勘探; 瓦斯涌出

中图分类号: TD713 文献标志码: A 文章编号: 1003-0506(2023)11-0140-07

Research on fault prediction technology based on structural influence characteristics

Zhang Shiling^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Gas Disaster Monitoring and Emergency Technology, Chongqing 400037, China;

2. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China)

Abstract: In order to prevent unplanned exposure of geological structures and disasters caused by geological structures during the process of excavation, enrich tectonics detection and prediction technology, research on structural prediction techniques based on structural impact characteristics was carried out. The idea and technical approach of using structural influence features to infer the front fault and its influence range were proposed. By analyzing the characteristics of changes in outburst risk indicators, coal seam thickness, gangue thickness and gas emission under the influence of geological structure in Zhaozhuang Mine, these information characteristics—structural influence characteristics were mined and extracted. A multi-dimensional structural impact characteristic index system and a comprehensive prediction model for fault structures were established and applied in practice in Zhaozhuang Mine. The research results showed that using various production safety information during the mining period, by analyzing the changes of structural impact characteristics contained in these information and using the comprehensive prediction model of tectonics, the advance prediction of fault structure in front of the working face can be achieved, improving the pertinence of exploration drilling construction and reducing the cost of geological structure exploration.

Keywords: geological structure; fault prediction; coal seam thickness; coal seam gangue; geological prospecting; gas gushing

预知工作面前方构造情况以及避免无计划揭露地质构造是应对矿井各种灾害的基础。但是地质构造掌握往往比较困难, 需要逐级勘探矿井地质构造, 并采用多源数据融合的地质构造探测方法^[1-3], 如图 1 所示。地质构造探测技术主要包括物探、钻探、巷探等方法。近年来, 人们在生产实践活动中又总结形成许多有效的探测手段和方法。例如, 贾坡等^[4]

利用断层影响范围裂隙和褶皱情况与煤层破碎带宽度具有相关性的原理, 通过观察和测定断层影响带相关参数变量, 从而预测断层的位置和产状; 王超群^[5]利用槽波与纵波相结合的地震勘探技术, 推测工作面前方地质构造位置、范围等情况; 李丹^[6]研究了断层不同落差条件下瞬变电磁的变化规律, 并构建了不同落差断层构造的理论模型, 为应用瞬变

收稿日期: 2023-05-20; 责任编辑: 陈鑫源 DOI: 10.19389/j.cnki.1003-0506.2023.11.021

基金项目: 中煤科工集团重庆研究院有限公司重大专项资助项目(2021ZDZX05)

作者简介: 张士岭(1987—), 河北邢台人, 副研究员, 硕士, 2012年毕业于中国矿业大学, 主要从事瓦斯地质及瓦斯灾害防治方面的研究工作。

引用格式: 张士岭. 基于构造影响特征的断层预测技术研究[J]. 能源与环保, 2023, 45(11): 140-146, 153.

Zhang Shiling. Research on fault prediction technology based on structural influence characteristics[J]. China Energy and Environmental Protection, 2023, 45(11): 140-146, 153.

电磁法探测断层提供了理论基础; 弓仲标等^[7]针对大柳塔煤矿前期对断层三维地震勘探不明的问题, 采用钻探方法对物探断层进行了验证; 徐长久^[8]采用坑透和槽波相结合的探测技术, 成功探测出采煤工作面前方煤厚变薄、夹矸、断层发育等异常区域; 温亨聪等^[9]研发了适用于高瓦斯矿井的地震波超前探测系统, 该系统基于震波反射和震波速度理论, 采用负视速度原理, 实现了掘进工作面前方地质构造异常体的超前预测; 苏晓云^[10]采用数值模拟, 研究厚煤层条件下断层反射槽波和直达槽波的特征, 认为反射槽波对厚煤层中小断层的探测相对透射槽波有更好的适应性。上述诸多构造探测理论、方法、工艺为地质构造的有效预测提供了重要手段。在这些技术方法中, 最直接的技术手段是钻探, 优点是直观性强、准确性高、适应条件广, 但具有工程量大、周期长、费用高及“一孔之见”的缺点^[11-13]; 地球物理探测法优点为非接触无损探测、信息量多、费用低、方便快捷等, 由于煤矿井下探测空间有限, 而且探测结论具有一定的多解性和不确定性^[14-15]。因此, 在以物探、钻探为主的前提下, 研究基于构造揭露前的影响特征对构造进行推断预测, 对于现有探测手段的补充必要且有重要意义。

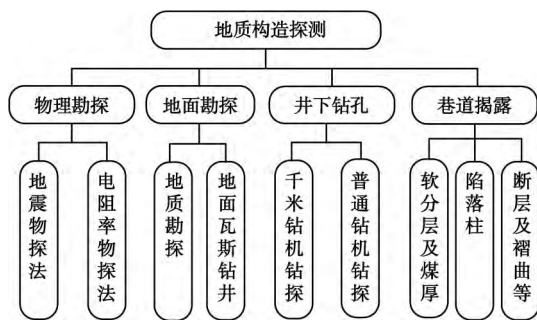


图1 地质构造探测方法

Fig. 1 Geological structure detection methods

1 多特征预测构造技术基本原理

从正常煤层进入到地质构造影响范围, 构造揭露前总会有些变化的信息^[16]。多特征构造预测技术就是捕捉构造揭露前的变化信息, 通过对这些信息内在特征与变化规律的分析挖掘, 实现地质构造的预测预报。

应用多特征预测构造技术可对工作面前方是否具有断层构造及断层性质进行预测预报。矿区区域构造演化决定了煤层井田的构造分布, 在一定的构造特征条件下, 断层构造揭露前煤层厚度、夹矸厚度、瓦斯涌出、突出危险指标及构造软煤特征都会发

生一定规律的变化^[17]。这种变化揭示了构造影响特征与断层构造的关系, 并蕴含与断层分布相关的信息。基于构造影响特征的断层预测技术, 就是对采掘中的各种生产、安全信息进行深入分析, 从中挖掘、提取与断层相关的特征, 进行断层构造的预测预报, 如图2所示。

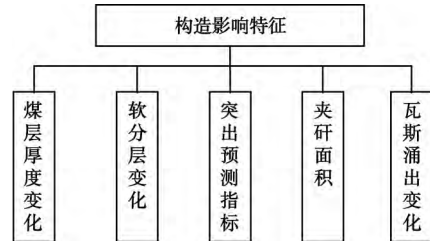


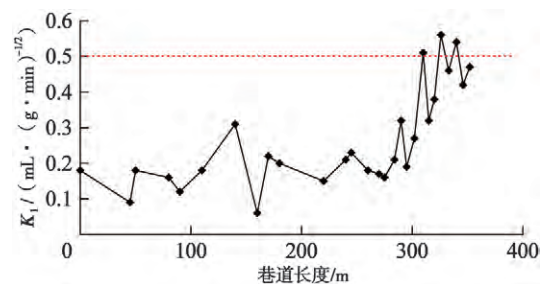
图2 断层构造影响特征

Fig. 2 Characteristics of fault structure influence

2 构造影响特征的确定

2.1 突出危险指标

突出危险预测指标直接反映了煤层突出危险性大小, 地质构造是影响煤与瓦斯突出危险性的重要因素, 地质构造揭露前, 突出危险预测指标往往出现一定规律的变化^[18-19]。根据对晋煤集团赵庄矿掘进工作面过断层前后测得钻屑解析指标 K_1 与钻屑量 S 值的分析(图3—图6), 发现断层揭露前后一段距离内预测指标均发生了相似的变化。

图3 2101 巷过 F259 断层 K_1 变化曲线Fig. 3 K_1 variation curves of No. 2101 lane passing through F259 fault

2101 巷过 F259 断层期间 K_1 值逐轮增大, 所有的3个超标点全部位于构造带, 构造破坏带超标数占总超标数的100%。北翼进风巷过断层期间呈现类似于2101巷的特征, K_1 普遍明显增大, 2次预测超标; 南翼进风大巷与胶带运输巷的钻屑量变化有着较高的一致性, 均在过断层期间出现钻屑量增大或超标的现象。钻屑量 S 在一定程度上反映了煤层地应力大小或构造应力情况, 而解吸指标 K_1 值则反

映煤体物理力学性质的变化^[20]。因此 K_1 、 S 值有规律的增大,表明该处煤体物理力学性质或构造集中应力在地质构造影响下有序地变化。日常预测指标逐轮增大且频繁超标,表明该区域有可能处于地质构造影响范围。

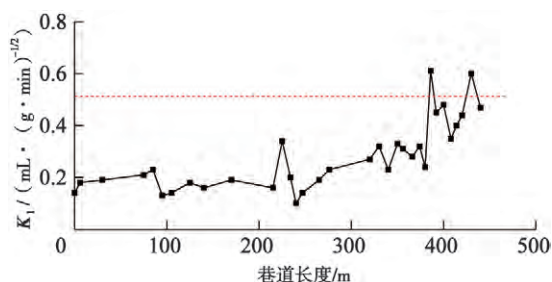


图 4 北翼进风巷过 F421 断层 K_1 变化曲线

Fig. 4 K_1 variation curves of northern wing air inlet roadway passing through F421 fault

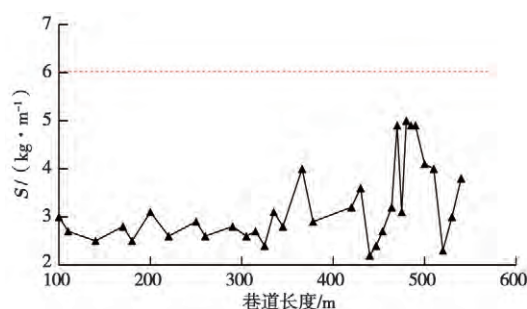


图 5 南翼进风大巷过 F462 断层 S 值变化曲线

Fig. 5 S -value variation curves of the southern wing air inlet roadway passing through F462 fault

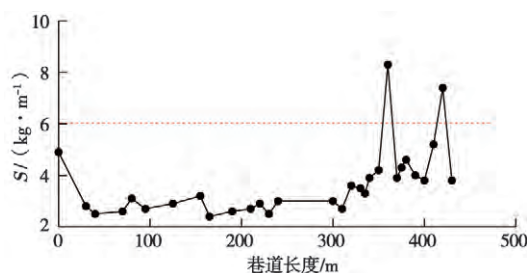


图 6 胶带运输大巷过 F223 断层 S 值变化曲线

Fig. 6 S -value variation curves of belt conveyor roadway passing through F223 fault

对赵庄矿 3 号煤层多条巷道掘进期间的瓦斯含量和预测指标 K_1 值超标数量进行统计,得到预测指标超标数量与距断层破裂带距离关系曲线,如图 7 所示。由图 7 可知,距断层越近瓦斯含量和 K_1 值超标数量越多,突出危险性越大,且二者超标数量与至断层距离之间呈现一定的变化规律:在距断层 0 ~ 30 m 内超标个数最多,此范围内随着至断层距离增

大超标个数明显下降,直到距断层大于 30 m 曲线才趋于缓和,表明 30 m 为该曲线的拐点。因此,赵庄矿日常预测指标构造特征影响范围应为 30 m 左右。

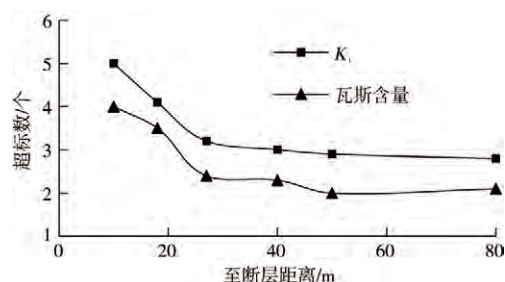


图 7 日常预测指标超标数与距断层距离关系

Fig. 7 The relationship between the number of daily prediction indicators exceeding the standard and the distance from the fault

2.2 夹矸厚度

天然形成的煤层夹矸分布和厚度一般比较稳定,具有较好的连续性^[21-22]。断层形成时,由于受到挤压、搓揉作用,致使断层上下盘断面破碎而形成构造夹矸,而顶底板锐角与构造夹矸短轴指向顶板受到的剪切力方向。断层破碎带的组成包括构造夹矸包体附近的无根褶皱、揉皱泥质岩、断层屑、软分层等^[23]。同时煤层的连续性被断层构造破坏,煤层一定部位和一定方向产生断裂,断裂面之间附近的煤层被矸石填充,因此工作面推进到断层破碎带附近,会出现大量的矸石。与天然形成的矸石相比,构造夹矸分布及厚度不稳定,随着采掘的进行矸石厚度或者分布形态呈现明显变化,且较为破碎。

对赵庄矿北翼进风巷工作面到断层的距离和掌面矸石厚度的关系分析如图 8 所示。由图 8 可以看出,随着工作面向断层方向掘进,掘进面矸石逐渐增加,最后仅剩厚 300 ~ 600 mm 的煤层,其余为矸石而且煤体结构较为破碎。即在非构造区和构造区之间存在过渡带,从非构造区向构造区采掘,煤层逐渐变薄,矸石逐渐变厚。煤层夹矸厚度或分布的变化特点反映出工作面前方的断层构造信息,采掘时可根据掘进面矸石厚度及分布形态的变化规律,推测前方地质构造情况。

2.3 煤层厚度

煤层厚度发生变化,主要原因就是煤层形成时的沉积环境以及后期发生的各种地质构造作用^[24-25]。煤层沉积环境导致煤层厚度变化主要包括地壳不均匀沉降、古地形不平整、河流冲蚀等原因^[26]。沉积环境对煤层厚度变化的影响范围一般较大,煤层厚度呈连续缓变特征且煤层相对完整。而

断层构造引起的煤层厚度变化影响范围相对较小,在局部范围内尤其断层两侧呈现较大的变化,且煤层不连续存在一定的破碎带^[27]。逆断层会挤压聚焦使煤层逆掩重叠,导致断层附近煤层厚度增大;正断层由于受到拖拽扩张作用,形成一定的薄煤带^[28]。非构造区与构造区之间存在着过渡带,煤层厚度变化则是过渡带的特征之一。对赵庄煤矿掘进工作面揭露断层前煤层厚度变化情况进行统计分析,见表 1。从表 1 可以看出,断层影响区域内煤层厚度呈现规律性变化,除了一些断层影响范围的煤层厚度基本不变外,基本符合逆断层影响范围煤层变厚、正断层影响范围煤层变薄的特征。因此,局部范围内的煤层厚度变化可作为预测断层及其性质的构造影响特征之一。

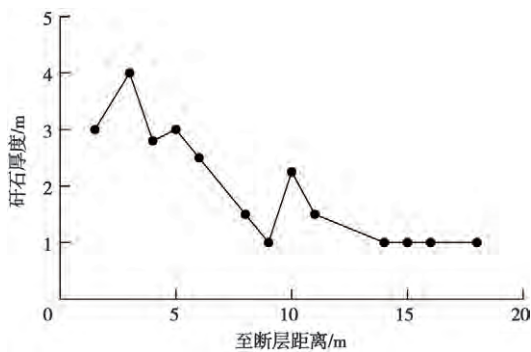


图 8 北翼进风巷夹矸厚度与距断层距离关系

Fig. 8 Relationship between the thickness of the gangue in the northern wing intake roadway and the distance from the fault

表 1 断层性质与煤厚变化关系

Tab. 1 Relationship between fault properties and coal thickness changes

工作面	煤层厚度变化特征	对应断层	断层性质
13071 巷	变薄	F367($H=3\text{ m}$ $\theta=56^\circ$)	正断层
13084 巷反掘	基本不变	F420($H=2\text{ m}$ $\theta=70^\circ$)	正断层
1101 巷	基本不变	F409($H=6\text{ m}$ $\theta=16^\circ$)	逆断层
5303 巷	变薄	F371($H=1.5\text{ m}$ $\theta=63^\circ$)	正断层
4102 巷	变薄	F429($H=1.8\text{ m}$ $\theta=80^\circ$)	正断层
4103 巷	变薄	F421($H=3.5\text{ m}$ $\theta=73^\circ$)	正断层
西翼南回风巷	变厚	F405($H=1\text{ m}$ $\theta=58^\circ$)	逆断层
13092 巷	变薄	F375($H=3.2\text{ m}$ $\theta=71^\circ$)	正断层
13081 巷 2 号联巷	变厚	F375($H=3.2\text{ m}$ $\theta=68^\circ$)	逆断层

注: H 为断层落差; θ 为倾角。

2.4 瓦斯涌出

断层构造一般对瓦斯赋存有着 2 种作用: 对瓦斯封闭作用或成为瓦斯运移的通道^[29]。从赵庄矿井田内揭露的断层来看,有封闭性断层也有开放

性断层,这些断层大多被泥岩等碎屑物质充填,钻孔穿过断层带时,若未发现漏水或者冲洗液明显消耗,说明断层破碎带含水性弱。这些地质构造有的利于瓦斯赋存、有的利于瓦斯逸散。采掘期间受断层构造影响,瓦斯涌出表现出一定的变化特征,这些特征蕴藏着与断层构造性质相关的信息。

以 13074 巷过断层 F384($H=1\text{ m}$, $\theta=85^\circ$) 为例,分析开采期间断层对瓦斯涌出的影响特征。F384 断层顶底板为泥岩,泥岩透气性差、封闭性好,使得 13074 巷在过断层期间瓦斯涌出量明显增大(图 9),瓦斯浓度峰值增高,尤其在巷道接近地质带时,瓦斯涌出迅速增加,工作面瓦斯浓度最大值接近 0.5%。对赵庄矿揭露断层期间瓦斯涌出变化及断层性质进行统计分析,见表 2。由表 2 可知,瓦斯涌出增大多数是由于揭露封闭性断层,而瓦斯涌出减小或者不变往往是由开放性断层引起的。因此,瓦斯涌出变化特征可作为判断断层性质的因素之一。

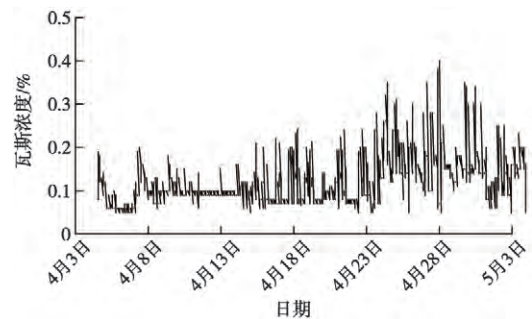


图 9 13074 巷工作面瓦斯浓度变化曲线

Fig. 9 Gas concentration change curves of No. 13074 lane working face

表 2 断层性质与瓦斯涌出关系

Tab. 2 Relationship between fault properties and gas emission

工作面	瓦斯涌出	对应断层	断层性质
13092 巷	增大	F351($H=2\text{ m}$ $\theta=45^\circ$)	封闭性
5104 巷	增大	F460($H=3\text{ m}$ $\theta=53^\circ$)	封闭性
13071 巷	增大	F319($H=4.5\text{ m}$ $\theta=36^\circ$)	封闭性
5303 巷	减小	F411($H=3\text{ m}$ $\theta=61^\circ$)	开放性
4102 巷反掘	增大	F331($H=3.5\text{ m}$ $\theta=50^\circ$)	封闭性
4103 巷	不变	F324($H=3\text{ m}$ $\theta=62^\circ$)	开放性
东翼南辅运巷	增大	F365($H=2\text{ m}$ $\theta=44^\circ$)	封闭性
1103 巷	不变	F482($H=4.4\text{ m}$ $\theta=35^\circ$)	封闭性

注: H 为断层落差; θ 为倾角。

3 综合预测模型建立

由于断层构造影响因素较为复杂,通过单一构

造影响特征进行断层预测,准确性较低,需要根据突出危险指标、煤层厚度、瓦斯涌出等构造影响特征指标进行综合判断,以提高断层预测结果的可靠性。为此,建立了断层构造综合预测模型,根据专家知识,确定各指标因素的权重 w_i 见表3,所有预测指

标的权重之和为1。将采掘过程中实际测定的各影响指标参数与表3中的判识标准进行对比,若符合判识标准,该因素权重系数 k_i 取1;否则,该因素权重系数 k_i 为0。

表 3 预测指标权重
Tab. 3 Weight of prediction indicators

类别	判识标准	权重 w_i	系数 k_i
突出危险指标	突出危险指标 $K_1 \geq 0.5 \text{ mL}/(\text{g} \cdot \text{min})^{1/2}$ 或 $S \geq 6 \text{ kg/m}$	0.10	各因素发生取1,否则取0
煤层赋存	煤层厚度变化率 $\alpha \geq 25\%$	0.25	
	存在构造软煤	0.15	
	煤层倾角变化 $\gamma \geq 7^\circ$	0.15	
瓦斯涌出	瓦斯涌出量增长率 $q \geq 25\%$	0.10	各因素发生取1,否则取0
夹矸特征	夹矸厚度或面积变化率 $\delta \geq 25\%$	0.25	

利用表3确定的各因素权重和其权重系数,得到断层综合预测值 R ,综合预测值 R 计算公式如下:

$$R = \sum_{i=1}^6 w_i k_i \tag{1}$$

断层预测结果的判识规则应根据在赵庄矿考察的断层影响特征结合专家知识综合确定,其判定规则见表4。

表 4 断层预测结果判识规则
Tab. 4 Recognition rules for fault prediction results

综合预测值 R	预测结果
$R < 0.35$	工作面地质正常
$R \geq 0.35$	工作面前方可能存在断层构造

4 现场应用

4.1 矿井地质构造概况

赵庄煤矿主采煤层为3号煤层,3号煤层在形成后经历了几次大地构造运动,多次改变构造应力场。因此,赵庄矿3号煤层地质条件极为复杂,煤层内分布着数量众多的断层构造,如图10所示。受区域构造控制,总体构造形态为走向北北东、倾向北西,倾角 $5^\circ \sim 10^\circ$,伴有大量断层和少量陷落柱的单斜构造。在此基础上发育了一系列北北东向的宽缓褶曲,形成了井田内岩层的波状起伏。矿区内主要断层和褶曲的走向多为北北东向,伴生的次一级断层为北东和北东东向。

截止到目前,占整个井田30%的开采区域中已揭露出385条断层,密集的地质构造对3号煤层的开采造成严重影响,同时极大地增加了赵庄矿地质构造探测工程量。揭露的断层多为北东和北东东向,落差大部分在5 m以下,断层性质多数为正断

层。为了提升赵庄矿地质构造预测预报的准确性和及时性,同时降低钻孔探测工程量,首先在赵庄矿应用了基于构造影响特征的断层预测预报技术。

4.2 应用情况

赵庄矿2307工作面回风巷为瓦斯灾害严重区域,地质构造比较发育。巷道掘进期间未揭露地质构造,但根据边掘边抽钻孔施工记录,巷道前方存在夹矸,随着工作面推进夹矸厚度逐渐增大。工作面实施的防突钻孔施工记录中对此也有反映,经防突预测 K_1 值为 $0.89 \text{ mL}/(\text{g} \cdot \text{min})^{1/2}$, S 值为 6.5 kg/m ,突出危险性增大,说明工作面接近地质变化区。通过断层构造预测模型计算得到综合预测值 $R = 0.35$,根据断层预测判识规则预测前方有断层构造。2307回风巷工作面前方掘进25 m后揭露了两条断层,证明预测的准确性。

1102巷掘进期间的瓦斯解吸速度指标 K_1 值变化曲线如图11所示。图11中,指标值连续多个循环超标,掘进面煤厚由3 m变为1.9 m,煤层顶板未发生变化,但煤层底板上抬,呈现明显的构造影响特征。经计算,该工作面构造综合预测值 $R = 0.35$,由此可以推测,突出危险区域的煤层存在地质变化带,该构造距离工作面30 m左右。后经钻孔探测发现,前方34 m处存在正断层F114。

基于构造影响特征的断层预测技术在赵庄矿推广应用以来,提高了探测钻孔施工的针对性,在不增加探测钻孔的基础上,成为矿井地质构造预测预报的有效方法。自2020年应用该技术以来,共预测地质构造58次,预测情况与实际揭露构造对比分析结果表明,预测准确率为56.1%,在保障矿井安全生产的前提下,有效降低了探测钻孔的工程量。

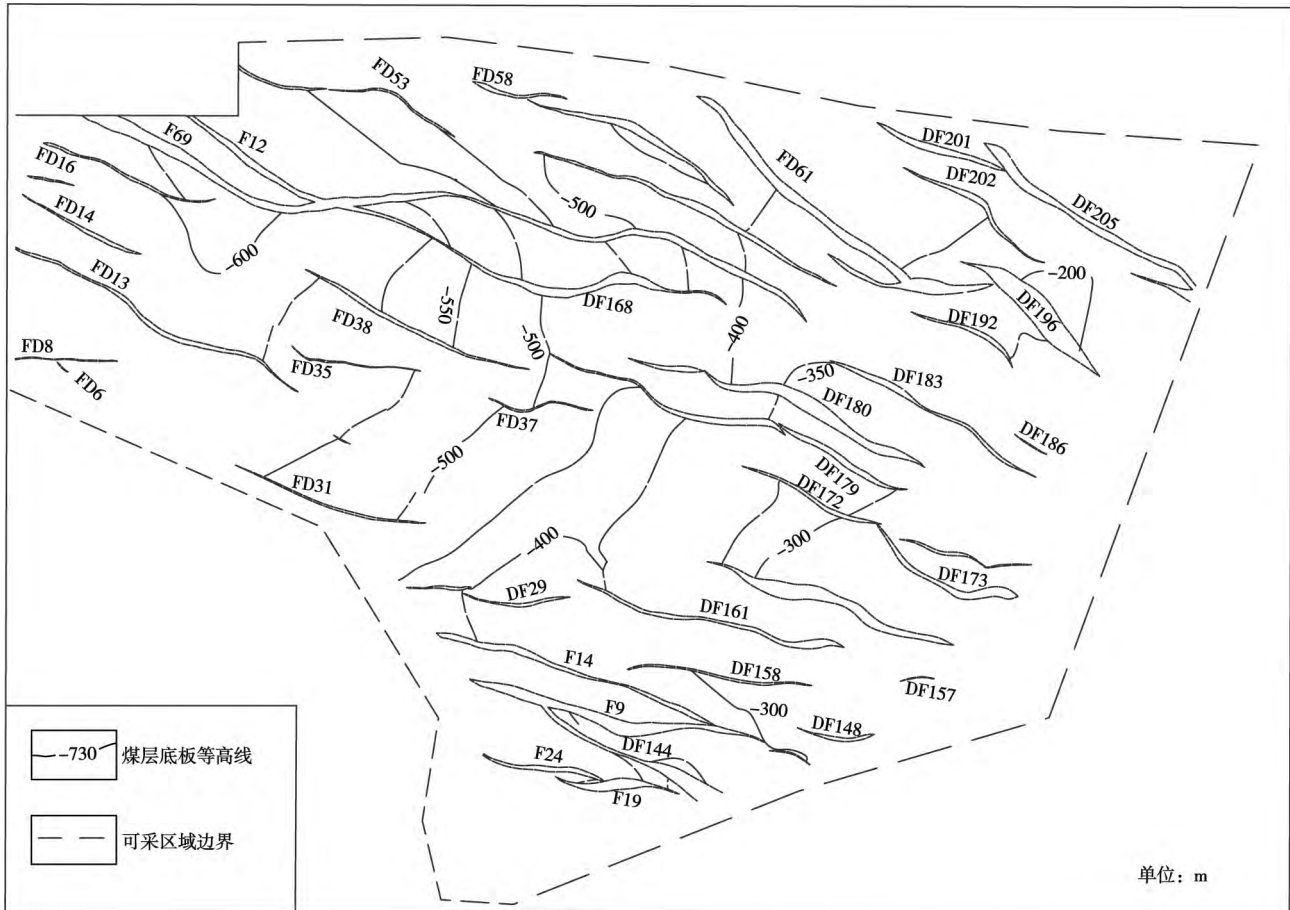
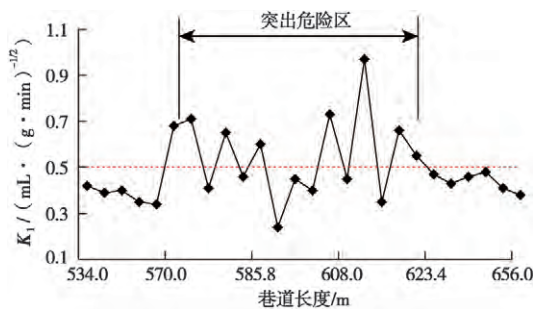


图 10 赵庄矿井田构造纲要

Fig. 10 Structural outline map of Zhaozhuang mine field

图 11 1102 巷 K_1 值变化规律Fig. 11 Variation law of K_1 value in No. 1102 lane

5 结语

(1) 在分析断层构造对煤层厚度、突出危险预测指标、煤层夹矸厚度等因素影响的基础上,利用构造影响特征进行地质构造预测预报,对充分利用矿井生产安全资料及揭示相关地质规律具有重要的实践意义。

(2) 在煤矿生产安全信息集中管理的基础上,从构造揭露前呈现的各种规律入手,通过多特征的跟踪和分析进行地质构造预测,是今后构造预测技

术的发展趋势之一。

(3) 实践应用结果表明,利用构造影响特征技术可以有效预测前方断层构造,预测准确率为 56.1%,丰富了地质构造预测技术,应用效果良好,对其他矿井有借鉴意义。

参考文献 (References):

- [1] 赵惊涛,彭苏萍,陈宗南,等.煤矿隐蔽致灾地质体地震绕射波探测方法[J].矿业科学学报 2022, 7(1): 1-8.
Zhao Jingtao, Peng Suping, Chen Zongnan, et al. Seismic diffraction detection method for geological hidden disasters in coal mining [J]. Journal of Mining Science and Technology 2022, 7(1): 1-8.
- [2] 谭希鹏,施龙青,邱梅.基于支持向量机的赵官矿小断层预测[J].煤田地质与勘探 2015, 43(5): 11-14.
Tan Xipeng, Shi Longqing, Qiu Mei. Forecast of small fault based on SVM in Zhaoquan mine [J]. Coal Geology & Exploration 2015, 43(5): 11-14.
- [3] 王保利,金丹,张唤兰,等.煤层中断层的透射槽波定量响应特征[J].煤炭学报 2022, 47(8): 2985-2991.
Wang Baoli, Jin Dan, Zhang Huanlan, et al. Quantitative response characteristics of transmitted in-seam channel wave in coal seam with faults [J]. Journal of China Coal Society 2022, 47(8): 2985-

- 2991.
- [4] 贾坡,仲崇武,王英德,等.南屯煤矿采掘工作面地质构造预测[J].中国煤炭,2010,36(6):87-88,97.
Jia Po,Zhong Chongwu,Wang Yingde,et al. A study on the forecast of Nantun Coal Mine's mining and heading face geological structure[J].China Coal,2010,36(6):87-88,97.
- [5] 王超群.深部矿井地质构造探测及支护技术研究[J].矿业装备,2022(6):61-63.
Wang Chaoqun. Research on tectonics detection and support technology in deep mine[J].Mining Equipment,2022(6):61-63.
- [6] 李丹.瞬变电磁法探测断层构造的有效性分析[J].能源与环保,2022,44(3):93-100.
Li Dan. Analysis of effectiveness of transient electromagnetic method in detecting fault structures[J].China Energy and Environmental Protection,2022,44(3):93-100.
- [7] 弓仲标,贺斌,雷鹏翔.大柳塔煤矿五盘区 DDF2 断层构造的探测研究[J].煤炭科学技术,2021,49(S2):241-246.
Gong Zhongbiao,He Bin,Lei Pengxiang. Study on detection of DDF2 fault structure in fifth panel of Daliuta Coal Mine. Coal Science and Technology,2021,49(S2):241-246.
- [8] 徐长久.高瓦斯矿井地质构造超前探测技术研究[J].煤矿现代化,2021,30(6):117-119.
Xu Changjiu. Research on advanced detection technology of geological structure in high gas mine[J].Coal Mine Modernization,2021,30(6):117-119.
- [9] 温亨聪,杨海涛,张辉辉.多频无线电坑透技术在煤矿地质构造探测中的应用[J].煤炭技术,2021,40(7):71-74.
Wen Hengcong,Yang Haitao,Zhang Huihui. Application of multi-frequency radio wave perspective technology in geological structure exploration of coal mine[J].Coal Technology,2021,40(7):71-74.
- [10] 苏晓云.厚煤层内小断层的反射槽波探测技术及应用[J].煤田地质与勘探,2022,50(1):25-30.
Su Xiaoyun. Application of reflected in-seam wave detection for small faults in thick coal seams[J].Coal Geology & Exploration,2022,50(1):25-30.
- [11] 孙林,曹路通.基于三维数值模拟及矿井瞬变电磁法的导水构造探测研究[J].能源与环保,2021,43(10):79-85.
Sun Lin,Cao Lutong. Research on water-conducting structure detection based on three-dimensional numerical simulation and mine transient electromagnetic method[J].China Energy and Environmental Protection,2021,43(10):79-85.
- [12] 刘尧,孟贵祥,吕庆田,等.新疆准噶尔北缘覆盖区深部地质结构及其地质意义——来自综合地球物理探测的证据[J].地球物理学报,2021,64(11):4075-4089.
Liu Yao,Meng Guixiang,Lü Qingtian,et al. Deep structure beneath the overburdened area of northern margin of Junggar Basin and its geologic implications: evidence from 3D inversion of integrated geophysical data[J].Chinese Journal of Geophysics,2021,64(11):4075-4089.
- [13] 张士岭.基于采掘应力增量的瓦斯压力演化规律研究[J].矿业安全与环保,2021,48(6):1-5.
Zhang Shiling. Research on gas pressure evolution law based on mining stress increment[J].Mining Safety & Environmental Protection,2021,48(6):1-5.
- [14] 刘世奇,桑树勋,杨恒林,等.沁南东区块 3#煤层构造煤发育对渗透率的影响[J].煤矿安全,2020,51(4):167-171.
Liu Shiqi,Sang Shuxun,Yang Henglin,et al. Characteristics of tectonic coal in No. 3 coal seam of eastern Qinnan block and its influence on permeability[J].Safety in Coal Mines,2020,51(4):167-171.
- [15] 王季.反射槽波探测采空巷道的实验与方法[J].煤炭学报,2015,40(8):1879-1885.
Wang Ji. Experiment and method of void roadway detection using reflected in-seam wave[J].Journal of China Coal Society,2015,40(8):1879-1885.
- [16] 徐浩然,鞠玮,周阳,等.滇东恩洪地区地应力场特征及对煤储层渗透性影响[J].煤炭科学技术,2019,47(12):184-192.
Xu Haoran,Jü Wei,Zhou Yang,et al. Characteristics of in-situ stress field and its influence on coal reservoir permeability in En-hong Basin of Eastern Yunnan Region[J].Coal Science and Technology,2019,47(12):184-192.
- [17] 韩军,张宏伟,张普田.推覆构造的动力学特征及其对瓦斯突出的作用机制[J].煤炭学报,2012,37(2):247-252.
Han Jun,Zhang Hongwei,Zhang Putian. Nappe structure's kinetic features and mechanisms of action to coal and gas outburst[J].Journal of China Coal society,2012,37(2):247-252.
- [18] 高原,谈国文.赵庄矿断层构造对煤与瓦斯突出的影响分析[J].矿业安全与环保,2015,42(3):104-107.
Gao Yuan,Tan Guowen. Analysis on influence of fault structure upon coal and gas outburst in Zhaozhuang mine[J].Mining Safety & Environmental Protection,2015,42(3):104-107.
- [19] 张士岭,和树栋.瓦斯压力对煤体应力及失稳破坏特性影响分析[J].采矿与安全工程学报,2022,39(4):847-856.
Zhang Shiling,He Shudong. Analysis of the influence of gas pressure on coal stress and instability failure characteristics[J].Journal of Mining & Safety Engineering,2022,39(4):847-856.
- [20] 高魁,刘泽功,刘健.复合构造带力学特征及其对瓦斯突出的作用机制[J].中国安全科学学报,2017,27(5):111-116.
Gao Kui,Liu Zegong,Liu Jian. Mechanical characteristics of complex geological structure zone and its effect on gas outburst[J].China Safety Science Journal,2017,27(5):111-116.
- [21] 王水利,李仁山,梁绍暹.山西阳泉三矿煤层粘土岩夹矸地球化学特征[J].煤田地质与勘探,2012,40(5):11-15.
Wang Shuili,Li Renshan,Liang Shaoxian. Geochemistry of clay parting in No. 3 coal mine of Yangquan Coal Co. Ltd of Shanxi Province[J].Coal Geology & Exploration,2012,40(5):11-15.
- [22] 高魁,乔国栋,刘健,等.构造复杂矿区煤与瓦斯突出瓦斯地质分析[J].中国安全科学学报,2019,29(1):119-124.
Gao Kui,Qiao Guodong,Liu Jian,et al. Gas-geology action analysis of coal-gas outburst in complicated geological structure coal mine[J].China Safety Science Journal,2019,29(1):119-124.

(下转第 153 页)

- gress on fracturing fluid technology and its high-pressure rheology [J]. Oilfield Chemistry 2018 35(4): 715-720.
- [23] 熊湘华. 低压低渗透油气田的低渗透压裂液的研究[D]. 成都: 西南石油大学 2003.
- [24] 梁文利, 赵林, 辛素云. 压裂液技术研究新进展[J]. 断块油气田 2009 16(1): 95-98.
Liang Wenli, Zhao Lin, Xin Suyun. New progress in fracturing fluid technology research [J]. Fault Block Oil & Gas Field 2009 16(1): 95-98.
- [25] 程兴生, 卢拥军, 管保山 等. 中石油压裂液技术现状与未来发展[J]. 石油钻采工艺 2004 36(4): 52-57.
Cheng Xingsheng, Lu Yongjun, Guan Baoshan et al. Current status and future development of CNPC fracturing fluid technology [J]. Petroleum Drilling and Production Technology 2004 36(4): 52-57.
- [26] Wu K, Olson J E. Mechanics analysis of interaction between hydraulic and natural fractures in shale reservoirs [C]//Unconventional Resources Technology Conference. 2016.
- [27] 张搏, 李晓, 王宇. 排量对水力压裂网络扩展影响的试验研究[J]. 工程地质学报 2017 26(6): 1516-1522.
Zhang Bo, Li Xiao, Wang Yu. Experimental study on the influence of displacement on hydraulic fracturing network expansion [J]. Journal of Engineering Geology 2017 26(6): 1516-1522.
- [28] 田伟. 页岩储层水力压裂复杂裂缝网络数值模拟[D]. 合肥: 中国科学技术大学 2018.
- [29] 龚迪光, 曲占庆, 李建雄 等. 基于 ABAQUS 平台的水力裂缝扩展有限元模拟研究[J]. 岩土力学 2016 3(5): 1512-1519.
Gong Diguang, Qu Zhanqing, Li Jianxiong et al. Finite element simulation of hydraulic crack propagation based on ABAQUS platform [J]. Rock and Soil Mechanics 2016 3(5): 1512-1519.
- [30] 王永辉, 刘玉章, 丁云宏 等. 页岩层理对压裂裂缝垂向扩展机制研究[J]. 钻采工艺 2017 40(5): 39-42.
Wang Yonghui, Liu Yuzhang, Ding Yunhong et al. Study on the effect of shale bedding on the vertical propagation mechanism of fracturing fractures [J]. Drilling & Production Technology 2017 40(5): 39-42.
- [31] 何建华, 丁文龙, 王哲 等. 页岩储层体积压裂缝网形成的主控因素及评价方法[J]. 地质科技情报 2015 34(4): 108-117.
He Jianhua, Ding Wenlong, Wang Zhe et al. The main controlling factors and evaluation methods of shale reservoir volume fracturing network formation [J]. Geological Science and Technology Information 2015 34(4): 108-117.
- [32] 韩慧芬, 陈明忠, 杨淑珍. 变排量压裂技术在白马—松华地区的应用[J]. 钻采工艺 2005 28(2): 46-48.
Han Huifen, Chen Mingzhong, Yang Shuzhen. Application of variable displacement fracturing technology in Baima-Songhua area [J]. Drilling and Production Technology 2005 28(2): 46-48.
- [33] 魏斌, 陈平, 张冕 等. 变排量压裂技术及其现场应用[J]. 石油钻采工艺 2000 22(6): 70-71.
Wei Bin, Chen Ping, Zhang Mian et al. Variable displacement fracturing technology and its field application [J]. Petroleum Drilling and Production Technology 2000 22(6): 70-71.
- [34] 杨科峰, 孙挺, 熊冬 等. 水平井水力压裂裂缝扩展影响因素研究[J]. 石化技术 2019 26(7): 82-84 57.
Yang Kefeng, Sun Ting, Xiong Dong et al. Research on Influencing factors of hydraulic fracturing in horizontal Wells [J]. Petrochemical Technology 2019 26(7): 82-84 57.
- [35] 叶鑫锐. 压裂液的流动特性及对油藏裂缝影响研究[D]. 大庆: 大庆石油学院 2009.
- [36] 许建红. 致密砂岩储层水平井水力压裂裂缝参数影响因素数值模拟[J]. 大庆石油地质与开发 2023(4): 1-6.
Xu Jianhong. Numerical simulation of hydraulic fracturing parameters of horizontal well in tight sandstone reservoir [J]. Petroleum Geology and Development in Daqing 2023(4): 1-6.

(上接第 146 页)

- [23] 关金锋, 丁志伟, 崔洪庆 等. 利用瓦斯抽采穿层钻孔预测煤层小断层工程实践[J]. 安全与环境学报 2019 19(1): 186-190.
Guan Jinfeng, Ding Zhiwei, Cui Hongqing et al. Practical engineering approach to detecting minor faults in the coal seam with the penetrating boringholes [J]. Journal of Safety and Environment 2019 19(1): 186-190.
- [24] 李鹏飞, 刘启蒙, 陈秀艳. 断层活化的主控因素关联度分析[J]. 矿业安全与环保 2018 45(5): 109-114.
Li Pengfei, Liu Qimeng, Chen Xiuyan. Correlation analysis of controlling factors on fault activation [J]. Mining Safety & Environment Protection 2018 45(5): 109-114.
- [25] Zhang Qinghua. Systematic division of coalbed methane-enriched units [J]. International Journal of Oil, Gas and Coal Engineering 2017 5(1): 5-12.
- [26] 张士岭. 巷道断面风速分布特征井下试验研究[J]. 煤炭技术, 2022 41(8): 119-122.
Zhang Shiling. Research on characteristics of wind speed distribution in roadway section by underground measurement test method [J]. Coal Technology 2022 41(8): 119-122.
- [27] 孟凡刚, 马亚杰, 王国华 等. 基于钻孔勘探数据的煤层厚度分布与构造预判[J]. 煤炭科学技术 2017 55(8): 233-237.
Meng Fangang, Ma Yajie, Wang Guohua et al. Seam thickness distribution and tectonic prediction based on exploration data from drilling [J]. Coal Science and Technology 2017 55(8): 233-237.
- [28] 张浩, 施刚, 巫虹 等. 上海罗店一周浦隐伏断裂第四纪活动性综合探测与研究[J]. 地质力学学报 2021 27(2): 267-279.
Zhang Hao, Shi Gang, Wu Hong et al. Quaternary activity of the Luodian-Zhoupu buried fault in the Shanghai region: integrated exploration and research [J]. Journal of Geomechanics 2021 27(2): 267-279.
- [29] 张士岭, 宋志强. 基于速度势的多抽采钻孔干扰理论[J]. 矿业研究与开发 2022 42(9): 22-28.
Zhang Shiling, Song Zhiqiang. Multiple extraction borehole interference theory based on velocity potential [J]. Mining Research and Development 2022 42(9): 22-28.