

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508455

深部巷道掘进工作面地质构造超前探测方法及应用研究*

张建国^{1,2,3} 王文唱¹ 魏风清¹

(1. 河南理工大学安全科学与工程学院 焦作 454000; 2. 炼焦煤资源绿色开发全国重点实验室 平顶山 467000;

3. 平顶山天安煤业股份有限公司 平顶山 467000)

摘要:地质构造超前探测是保证煤矿高效生产与安全发展的关键技术。针对传统地球物理勘探技术无法实现深部巷道地质构造超前精准探测的问题,研究设计了基于频谱声学的地质构造超前探测新方法。首先,理论分析了巷道掘进中顶板岩层的谐振特性,阐述了利用弹性波属性反演煤岩体应力变化进行地质构造超前探测的基本原理;其次,搭建了连续监测与实时预警系统平台,研发了地震检波器和监测分站等系统硬件,开发了可人机交互操作的系统控制软件;最后,选取深部开采的典型代表平煤八矿己₁₅-15080机巷进行了有效性验证。结果表明,地质构造监测指标高值区与地质构造揭露区相重合,在地质构造揭露前的一段距离,地质构造预测系数均会出现迅速增大并超出临界值的现象。相对应力系数在断层处的单侧、双侧或者整体出现高应力,这与地质构造演化情况相一致。按照掘进方向直线距离计算,超前预警距离为7.2~37.7 m,实现超前探测的可靠性高达92.85%。研究结果为深部巷道地质构造超前探测提供了高效可靠的新技术。

关键词:人工弹性波信号;频谱声学;深部巷道;地质构造;监测预警

中图分类号: TD713

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 440.75

Study on advanced detection method and application of geological structure in deep roadway driving face

Zhang Jianguo^{1,2,3} Wang Wenchang¹ Wei Fengqing¹

(1. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. State Key Laboratory of Coking Coal Resources Green Exploitation, Pingdingshan 467000, China;

3. Pingdingshan Tian'an Coal Mining Co., Ltd., Pingdingshan 467000, China)

Abstract: Advance detection of geological structures is crucial for ensuring efficient and safe coal mine production. To address the limitations of traditional geophysical techniques in meeting the precision requirements for advance detection in deep roadways, a new method based on spectral acoustic was designed. First, the resonant characteristics of roof strata during roadway excavation were theoretically analyzed, and the basic principle of advanced detection of geological structures by inversion of stress changes of coal and rock mass with elastic wave attributes was expounded. Subsequently, a continuous monitoring and real-time early-warning system platform was established, with system hardware including geophones and monitoring substations developed, and interactive control software created. Finally, field validation was conducted at the Ji₁₅-15080 machine roadway in pingmei eighth coal mine, a representative deep mining site. Results indicate that: High-value zones of the geological structure monitoring index coincide with exposed geological structures; The prediction coefficient shows a rapid increase exceeding the critical value within a certain distance ahead of structure exposure; Relative stress coefficients exhibit elevated stresses unilaterally, bilaterally, or entirely at faults, consistent with geological structure evolution. According to the linear distance in the driving direction, the advance warning distance is 7.2 ~ 37.7 m, achieving a reliability of 92.85% for advance detection. The research results provide an efficient and reliable new technology for advanced detection of geological structure in deep roadway.

Keywords: artificially generated elastic wave; spectral acoustics; deep roadway; geological structure; monitoring and early warning

收稿日期: 2025-06-11 Received Date: 2025-06-11

* 基金项目: 中国工程科技发展战略河南研究院战略咨询研究项目(2025HENYB05)、国家自然科学基金联合基金重点项目(U23A20600)、河南省科技攻关项目(252102320335)资助

0 引言

巷道掘进作为井下煤炭开采中的重要环节之一,能否实现安全、高效的巷道掘进直接影响着煤矿的生产效率和经济效益^[1-2]。随着我国采掘装备完成跨越性发展,地质因素对巷道掘进的制约作用日益凸显^[3]。地质构造探测不明极易造成巷道掘进延滞、生产成本增加和隐蔽灾害发生,尤其是在煤岩赋存环境复杂的深部矿井,煤与瓦斯突出分布区域、危险程度与地质构造表现出极强的关联性^[4]。煤与瓦斯突出数据表明^[5-6],突出事故主要出现在煤巷掘进过程中,且多集中分布在地质构造带附近。当前我国采煤技术已进入智能化开采阶段^[7],因此有必要深入开展深部巷道掘进工作面地质构造监测预警研究,以实现地质构造的超前探测并提前制定防控措施,保障我国深部资源的安全高效开采。

目前我国主要采用地球物理勘探技术进行井下地质异常体的超前探测,该技术是基于煤岩体介质的物理属性,通过获取磁性、电性和弹性等物理参数判断异常体的类型,反演地质异常体的空间位置和发育状态^[8]。按照监测原理可将地球物理勘探技术大致分为两类,一类是以矿井直流电法、瞬变电磁法为代表的电法探测,该方法是根据探测区域介质电阻率的变化来推断地质异常体的存在^[9-10];另一类方法是以地质雷达法、地震反射波法为代表的反射波法探测,该方法是根据反射传回的电磁波或者弹性波信号计算分析地质异常体的空间分布形态^[11-12]。物理勘探技术用于地质构造的超前探测受到众多学者和技术人员的重视。其中,李毛飞等^[13]通过数值模拟和实测数据分析的方法研究地质异常体在矿井直流电透视法中的表现形态,结果表明矿井直流电透视反演能够准确解译底板空间地质体电性及水平分布信息。高小伟^[14]提出了基于瞬变电磁法的地质异常体定位技术,借助地面发射大功率信号、垂直钻孔中接收信号来判断周围地质异常体。崔凡等^[15]将地质雷达法与地震反射波法相结合用于巷道前方隐伏构造的超前探测,现场应用表明该方法能够排除环境噪音的干扰,修正解译结果的误差,预测结果与实际揭露情况基本一致。李江华等^[16]提出基于地震反射法的精细化探测技术,该技术通过优化槽波数据处理流程进行数据的分析与解译,并融合其他方法推断地质异常体的性质和范围,实现了工作面前方地质构造的精确预测。

研究表明^[17],矿井直流电法、瞬变电磁法、地质雷达法和地震反射波法等常规的地球物理勘探技术主要监测煤岩体的物理属性,并未考虑围岩的应力应变变化特征,而且在监测过程中存在抗干扰能力差、浅部分辨率不足、工作效率相对较低和对小型高阻构造不敏感等劣势,极

易造成电磁信号解译的多解性,导致无法准确探测小断层的空间位置和发育情况,难以为深部巷道掘进工作面地质构造超前探测提供有效参考依据。

考虑到地质构造的形成及发育必然会引起周围煤岩体应力应变的显著变化^[18],本文研究设计了一种深部巷道掘进工作面地质构造监测预警系统,用于地质构造的超前探测。研制的系统由井上和井下两部分组成,以矿山设备激发的人工弹性波信号为信息载体,采用地震检波器为传感器。克服传统地球物理勘探技术的全空间效应复杂导致解译难度大的弊端,本系统利用弹性波属性反演煤岩体应力变化,从而实现地质构造的超前精准预警。

1 基础理论

1.1 巷道顶板岩层谐振特性

受巷道掘进强扰动影响,顶板岩层在一系列弱化接触面处弯曲变形产生离层,形成岩层分层并相互平行的贴结结构。在矿山设备作用下,巷道顶板产生动态正弦谐波,考虑到谐波过程并不由干涉产生,说明了巷道顶板岩层为典型谐振体。基于谐振体的共振吸收效应,当矿山设备连续作用于煤岩体时,激发的人工弹性波信号总体上是由各岩体分层中自身产生的弹性振动叠加组成^[19]。

在巷道掘进过程中,巷道顶板各岩石分层中产生不同频率的横向谐振振动,巷道顶板岩层中人工弹性波信号波形与弱化接触面关系如图1所示。

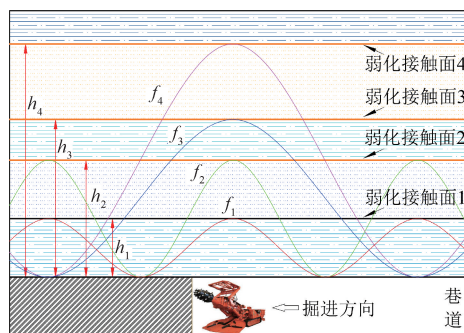


图1 巷道顶板岩层中弹性谐振

Fig.1 Elastic resonance in roof strata of roadway

基于巷道顶板岩层谐振特性,谐振频率与各岩层厚度的函数关系如式(1)所示。基于此,依据人工弹性波信号谐振频率大小可得到各弱化接触面至巷道顶部的距离,谐振频率越大,弱化接触面离煤层越近,谐振频率越小,弱化接触面离煤层越远。在确定巷道顶板弱化接触面位置关系后,可通过人工弹性波信号频谱特性评估掘

进过程中离层变形状态,并分析顶板岩层分层结构、层间变形强度和相对应力。

$$f = \frac{v}{h} \quad (1)$$

式中: f 为谐振频率; v 为横波的相速度,其大小由经验总结确定,对于大多数陆源岩层等于2 500 m/s; h 为顶板岩层中弱化接触面至巷道顶部的距离。

通过分析人工弹性波信号的谐振频率、振幅及相位,能够获得巷道顶板岩层中弱化接触面的位置关系和弱化程度,为此实施快速傅里叶变换将人工弹性波信号从稳定的正弦波形式转化为振荡频率上的频谱密度分布,从而得到弹性波信号频谱最大值频率和共振频率的总能量,凭借最大值频率确定弱化接触面发育位置,借助总能量获得弱化接触面发育程度。

由于人工弹性波信号接近正弦形式,并且频谱步距存在采样差异,容易导致弱化接触面位置测定的精度不同。为了保证频谱位于图像中间而便于分析,同时为了减少采样差异、简化数值处理。因而将人工弹性波信号频率按照1/3倍比例尺进行频谱折叠,其中振幅等于两个相邻频率振幅的平均值,结果如图2所示。

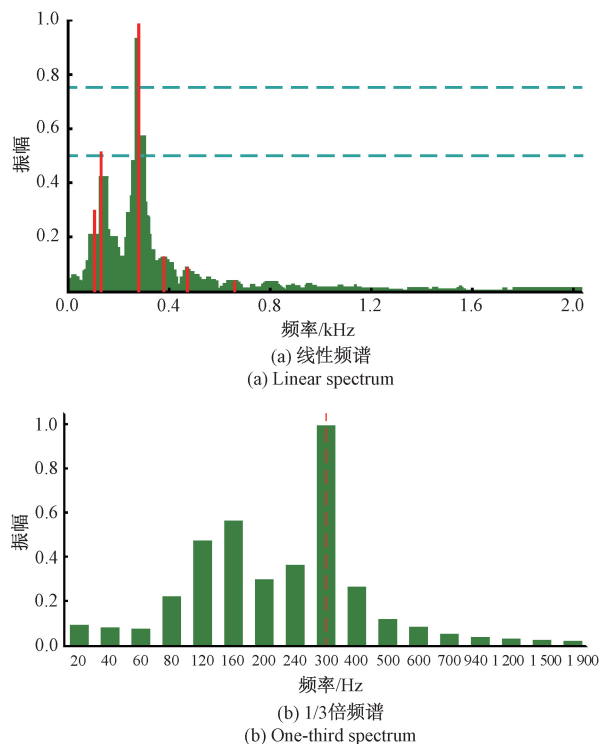


图2 人工弹性波信号频谱图

Fig. 2 Spectrum of artificially generated elastic wave

根据频谱声学原理,频谱最大值频率 f_p 与频谱最大值频率振幅 $A_{\max}$ 相对应,由频谱最大值频率振幅平均值 A_{cp} 确定工作频率 f_n 和 f_v ,由频谱最大值频率振幅二次平

均值 A'_{cp} 确定工作频率 f'_n 和 f'_v ,并划分低频分量工作频率 f_d 和低频分量工作频率 f_g 。结合图3频谱参数计算方法可知,通过人工弹性波信号的线性频谱图和1/3倍频谱图,确定高频分量振幅之和 A_v 和低频分量振幅之和 A_n 。在无地质构造区域设定 A_n 与 A_v 的比值接近1.0,定义其比值为相对应力系数 K_{rel} ,如式(2)所示,以表示监测过程中巷道顶板岩层的应力状态^[20]。

$$K_{rel} = \frac{A_v}{A_n} \quad (2)$$

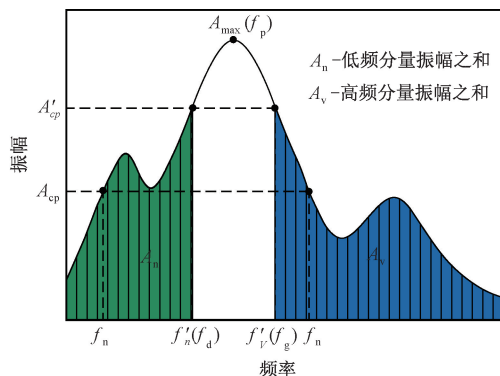


图3 频谱参数计算方法

Fig. 3 Calculation method of spectrum parameters

1.2 地质构造超前探测原理

受开采煤层中地质构造发育影响,地质构造双侧煤岩体一般存在应力应变异常变化^[21],因此及时利用弹性波属性反演煤岩体应力变化并准确划分异常区成为实现地质构造监测预警的关键,而如何建立人工弹性波信号幅频特性与煤岩体应力值的关联是最终实现地质构造超前探测的重中之重。为此,考虑将传感器安装在巷道掘进面侧帮,当矿山设备激发的人工弹性波信号沿岩体由声源向传感器传播时,巷道前方未采动煤岩体状态会影响人工弹性波信号的指标属性。矿山设备激发的声源与传感器之间区域的当前应力平均值计算如式(3)所示^[22]。

$$\sigma_n = \frac{1}{|r_v|} \int_r \sigma_m(r) dr \quad (3)$$

式中: r_v 为声波沿岩体从人工声源到传感器的传输长度; $\sigma_m(r)$ 为人工声源与传感器之间区域的当前应力极限值,是与监测区域声源到接收器的距离 r 有关的函数。

矿山设备在岩体中激发的人工弹性波信号处于较宽的频率范围,而信号频率对应的振幅 A 随着声源与传感器之间距离的变化规律为^[22]:

$$A = A_0 f(r) e^{-\alpha r} \quad (4)$$

式中: A_0 为声源处的信号振幅; $f(r)$ 是由于谐振波前发散引起的振幅随距离的变化规律,工作状态的矿山设备产生球形弹性波振动,其振幅与至传感器的距离成反比关

系; α 为衰减系数。

衰减系数 α 直接影响信号振幅 A 的大小,其取值依据煤岩体的信号频率和应力状态,衰减系数 α 与信号频率 f 成正比,与煤岩体应力 σ_n 成反比^[23]。当人工弹性波信号沿煤岩体传播时,衰减系数 α 的表达式为^[24]:

$$\alpha = \alpha_0 \frac{f}{f_0} \beta \frac{\sigma_m}{\sigma_n} \quad (5)$$

式中: α_0 是在卸压状态下某一频率 f_0 上的衰减系数; f 为信号频率; σ_m 和 σ_n 分别为岩体中平均应力的极限值和当前值; β 是由岩体性质决定的比例系数,其大小通过经验总结获得。

将式(3)~(5)代入式(2),可得相对应力系数 K_{rel} 如式(6)所示。由此可知,当声源与传感器之间距离 r 一定时,相对应力系数 K_{rel} 与岩体应力大小成正比,即岩体应力越大,相对应力系数 K_{rel} 越大,岩体应力越小,相对应力系数 K_{rel} 越小。

$$K_{rel} = A_0 e^{-C \frac{\sigma_m}{\sigma_n}} \quad (6)$$

式中: C 为常数项,即 $C = \alpha_0 \beta (f_v - f_n) f_0^{-1}$; f_v 和 f_n 分别为人工弹性波信号频谱划分为高频区域和低频区域对应的频率。

结合上述分析可知,通过解析人工弹性波信号可以间接反映巷道顶板岩体状态,从而评价工作面附近岩体的矿山压力,获得工作面附近岩体应力状态的变化情况,从而超前判断掘进面前方地质构造的存在。其中人工弹性波信号地质构造监测指标由频谱最大值频率 F_{max} 、相对应力系数 K_{rel} 和地质构造预测系数 P_g 组成;考虑到断层附近应力集中和顶板易破碎,通过工作面相对应力和应变参数确定 P_g ,即:

$$P_g = \frac{K_r}{K_b} + \frac{f_r}{f_b} \quad (7)$$

式中: K_r 与 K_b 分别为相对应力系数 K_{rel} 的日常值和背景值; f_r 和 f_b 分别为人工弹性波信号频谱最大值频率的日常值和背景值; K_b 和 f_b 由工作面推进25个循环中参数值计算确定。

1.3 人工弹性波信号与煤岩体应力状态关联机制研究

为了探究利用弹性波属性反演煤岩体应力变化以用于地质构造的超前探测,俄罗斯学者们通过煤矿现场试验对人工弹性波信号与煤岩体应力状态的关联机制开展了大量研究。其中,Гуляев以顿巴斯社会主义煤矿为例,系统研究了准备巷道接近地质构造带时的人工弹性波信号的幅频特性^[25],相关结果如图4所示。当巷道远离地质构造区域时,低频分量振幅大于高频分量振幅;当巷道逐渐接近地质构造时,高频分量振幅的增幅更为显著,在特定位置处其振幅超过低频分量振幅,且可划分为550~850 Hz与850~1 100 Hz两组频带。随着巷道不断接近

地质构造,人工弹性波信号不同频带范围的振幅变化特征如图5所示。研究结果表明,在巷道趋近地质破坏带的过程中,人工弹性波信号高频分量振幅的增幅显著高于低频分量振幅。

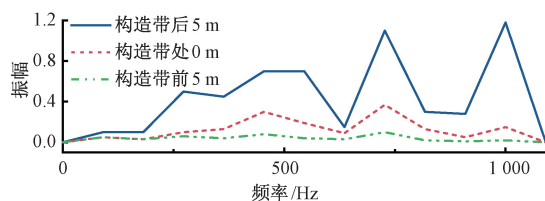


图4 地质构造附近人工弹性波信号幅频特性

Fig. 4 Amplitude-frequency characteristics of artificially generated elastic wave near geological structure

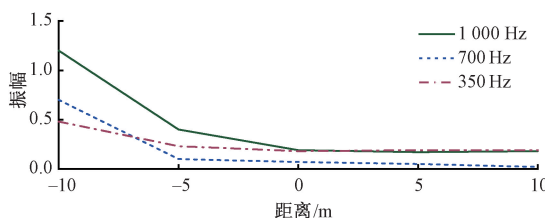


图5 地质构造附近人工弹性波信号
振幅最大值的变化

Fig. 5 Variation of maximum amplitude of artificially generated elastic wave near geological structure

Смирнов等^[26]以库兹巴斯C. М. Киров煤矿12处地质构造为例,对人工弹性波信号地质构造监测指标与煤岩体应力状态的关联特性进行了系统研究。结果显示,地质构造带内存在应力重分布现象。其中, P_g 最大值处于7~15之间,且均高于临界值7;所有地质构造下盘的 K_{rel} 显著更高,为上盘的1.3倍,同时层间变形的发育范围更远,达到上盘的1.5倍;上述地质构造带的宽度(即 K_{rel} 显著升高的区间范围)为10~60 m,其宽度与断层落差无显著相关性。图6为2594运输巷在接近落差2 m的地质构造时 P_g 与 K_{rel} 的分布特征,最终实现了该地质构造12 m的提前预警。

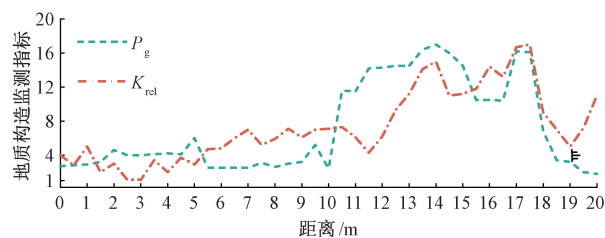


图6 地质构造附近 P_g 与 K_{rel} 分布特征

Fig. 6 Distribution characteristics of P_g and K_{rel} near geological structures

Горбачев 与 Шилов 在库兹巴斯 С. М. Киров、В. Д. Ялевского 及 Комсомолец 3 大煤矿通过实测数据重点探究了掘进工作面接近并穿越断层、褶皱及煤层侵蚀区时,人工弹性波信号地质构造监测指标 P_g 、 K_{rel} 以及 P_g 的分布特征。通过评估不同地质构造类型下地质构造监测指标的信息辨识度,证实 K_{rel} 和 P_g 最具信息价值,可实现工作面前方地质破坏的提前预测^[20]。在穿越断裂构造过程中,掘进工作面的 K_{rel} 较采煤工作面平均高出 2 倍, P_g 平均高出 1.5 倍。图 7 为 2597 运输切眼在穿越落差 20 m 逆断层时人工弹性波信号 P_g 、 K_{rel} 以及 P_g 的分布规律;其中 K_{rel} 呈马鞍形分布特征,断层两盘应力水平较高,而断层面附近应力水平偏低。

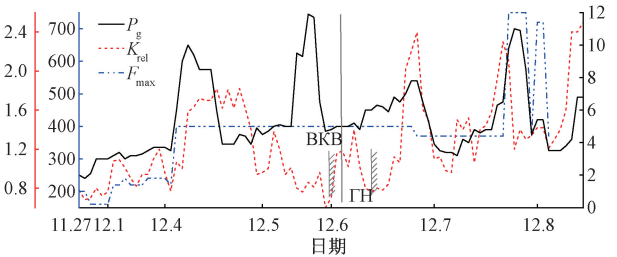


图 7 逆断层附近 P_g 、 K_{rel} 和 F_{max} 分布特征
Fig. 7 Distribution characteristics of P_g , K_{rel} and F_{max} near reverse fault

2 系统硬件构造

2.1 系统硬件组成

研发的地质构造监测预警系统布置情况如图 8 所示。硬件部分主要负责人工弹性波信号的采集、处理、传输和存储,传感器与配套设备实物如图 9 所示。其中,系统采用地震检波器作为信号传感器,地震检波器采集的信号经过从动监测分站和主动监测分站预处理后,由通讯线缆联入矿井工业环网,最终传输至井上监控主机,硬件设备由 12 V 直流电源直接供能。

2.2 地震检波器结构设计

实现地质构造超前探测的前提在于掘进工作面煤层体应力应变状态的精准监测,当前基于弹性波频谱分析的应力状态进行间接评估,因此终端设备中地震检波器就成为地质构造监测预警系统的关键组成。在原理上,当矿山设备在煤层体中激发弹性振动,并扰动巷道侧帮地震检波器中的敏感元件产生电压信号,电压信号经过电流环后转换为电流信号,并传输至从动监测分站,从而完成巷道掘进工作面人工弹性波信号的采集。

根据上述原理制作用于人工弹性波信号采集的地震检波器,如图 10 所示。地震检波器总体为圆柱体形状,长度为 220 mm,直径为 43 mm,重量为 1.5 kg。频带宽度

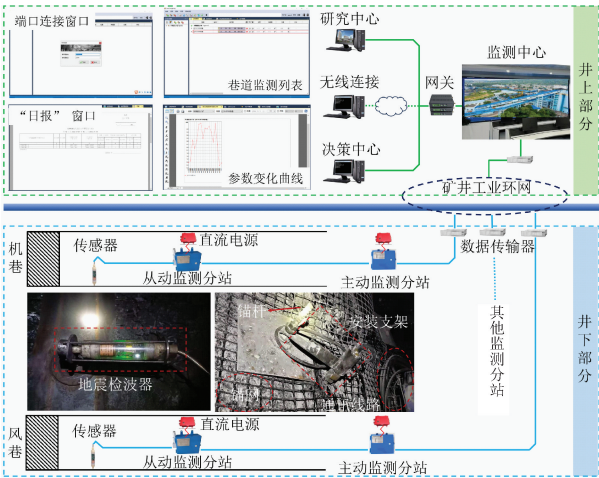


图 8 地质构造监测预警系统布置情况
Fig. 8 Layout of geological structure monitoring and early warning system

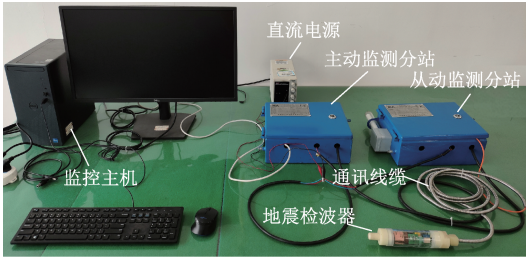


图 9 传感器与配套设备实物
Fig. 9 Physical map of sensor and supporting equipment

20~5 000 Hz,接收信号动态范围不小于 90 dB,在传输频带中振幅-频率特性的不均匀度不大于 50%。主要结构包括敏感元件、透明外壳、电路板、塑料前腔、塑料尾端和金属波纹管,透明外壳通过螺纹与塑料前腔、塑料尾端连接成一体,敏感元件为压电陶瓷嵌入于塑料前腔,能够将信号传递给电路板,通讯线缆可穿过金属波纹管在塑料尾端处接入电路板插槽,为显示连接状态,在电路板处的 LED 灯显示 3 种灯光效果。

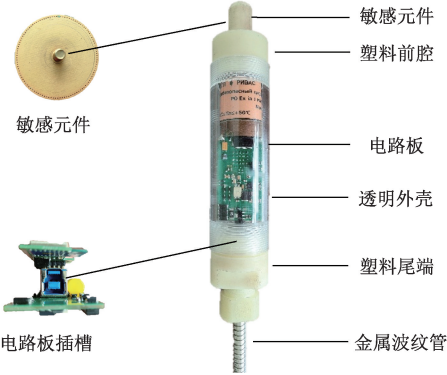


图 10 地震检波器实物
Fig. 10 Geophone physical map

在使用上,地震检波器通过支架固定在巷道掘进面侧帮锚杆的末端,并保证感应元件与平整无松动的煤壁良好接触,同时避免接触旁边锚网,如图 11 所示。使用过程中需要不断移动与重复安装地震检波器,从而与工作面的距离始终维持在 20~40 m。

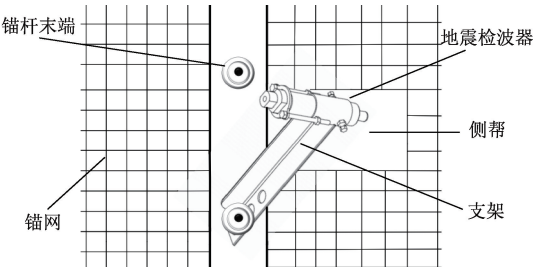


图 11 地震检波器安装方式
Fig. 11 Installation mode of geophone

2.3 监测分站设置

监测分站作为地质构造监测预警系统中的重要组成,主要功能包括信号的处理、辨别与传输。在原理上,首先对地震检波器采集的人工弹性波信号进行滤波、放大等预处理,其次通过高分辨率 16 位 ADS8513 模数转换器将处理后的模拟信号转换为数字信号;然后借助 STM32F407 主控模块对信号的有效性进一步判断,提取有效信号后通过通讯线缆联入矿井工业环网并传送至井上监测中心;最后实现掘进工作面人工弹性波信号的实时保存与显示,同时方便程序进行分析和决策。

监测分站包括主动监测分站和从动监测分站两种设备,如图 12 所示。监测分站总体为长方体形状,长度为 360 mm,宽度为 120 mm,高度为 308 mm,重量为 9.0 kg。无线数据接收范围不超过 200 m,数据传输速度为 5 Mb/s,信号传输方式采用正交频分复用技术。其中,地震检波器与从动监测分站通过通讯线缆连接,组成人工弹性波信号采集的终端设备,当进入工作模式,地震检波器显示绿灯常亮。在使用上,从动监测分站安装在巷道掘进面,与地震检波器之间维持距离小于 60 m;主动监测分站安装于采区中央变电所,为方便数据传输而紧邻矿井工业环网基站,从动、主动监测分站的线路长度不超过 5 km。

3 系统软件开发

3.1 系统软件框架

系统软件作为监测预警系统的核心组成部分,研发的地质构造监测预警系统软件框架如图 13 所示,该系统软件框架主要由 Client 程序和 Server 程序组成。

其中 Server 程序执行的程序包括信号的接收和处

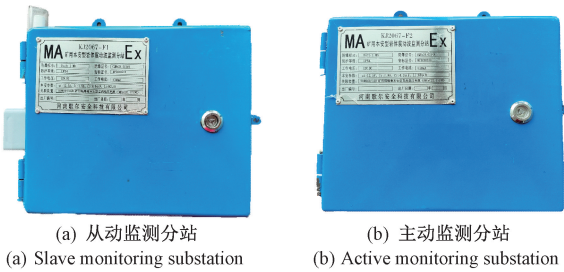


图 12 监测分站实物图
Fig. 12 Physical map of monitoring substation

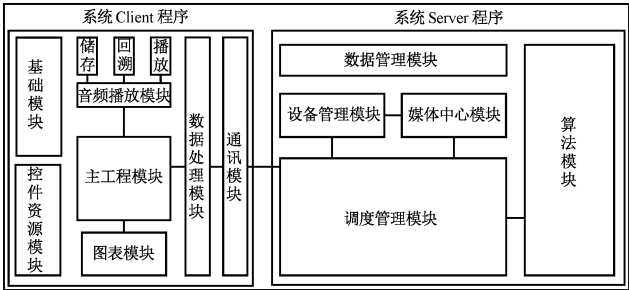


图 13 系统软件框架
Fig. 13 System software framework

理、信号的存储和回放以及信号处理参数的设置和保存,并将得到的结果保存到数据库中。Client 程序提供对 Server 程序的远程访问,并通过通信执行控制功能,以实现 Server 程序和 Client 程序间的实时数据通信。Client 程序支持对 Server 程序的配置和管理,支持收集到的音频监控数据的播放和复用,还提供分析数据的图表呈现和异常报警等功能。

3.2 客户端程序开发

客户端主要功能可分为系统管理、项目管理、设备管理、监测中心、预警设置和预警中心 6 大模块,主窗口如图 14 所示。其中,系统管理作为客户端程序正常运行的基础模块,主要包括菜单管理、用户管理、日志管理以及信号的存储回放。

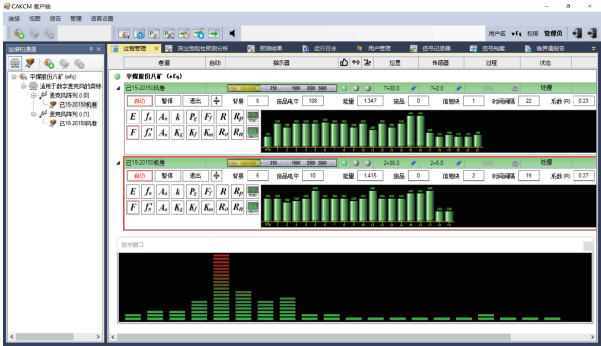


图 14 客户端程序主窗口
Fig. 14 Client program main window

菜单管理是配置系统菜单的操作权限、按钮权限标识等,客户端程序主窗口左上角的主菜单中包含的功能有“连接”、“视图”、“报告”和“管理”等。

用户管理将角色分为访客、操作员和管理员 3 种类型,每种类型对应不同的权限。管理员没有任何限制,可以管理所有流程和操作;操作员只能在“管理”选项卡中访问“信号档案”选项;访客只能访问选项“预测结果”和“信号记录器”,如图 15 所示。

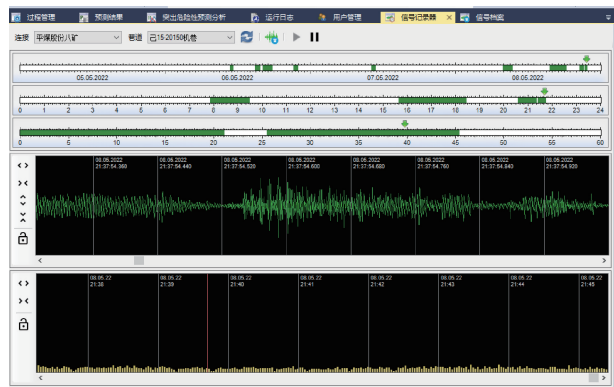


图 15 “信号记录器”窗口
Fig. 15 “Signal Recorder” window

日志管理用于记录和查询系统操作日志、异常日志和登录日志等。系统中存储每日的预测结果与详细信息,可检查工作面每个推进循环的安全程度,以及地震检波器至巷道工作面安装距离的符合性。

信号的存储回放是基于监测预警数据库,系统运行过程中将基础数据、监测数据和预警数据整合后以 CSV 格式存储至本地,同步上传至云端存储进行双备份。其中,对日常的监测数据存储 72 h,对重要的数据片段存档长期保存,以保证回放查看。

预警中心作为客户端程序中的重要模块,当 P_g 超出临界值后,系统结合 K_{rel} 等其他指标的变化情况进行综合评判。经确认即将揭露地质构造,客户端程序主窗口对应巷道的着色转变为红色,并将预警信息自动推送至监测中心,并伴有 20 s 警报信号。

4 工程实例验证

为测试基于频谱声学方法的地质构造监测预警系统在深部巷道掘进工作面的适用性,选取平顶山天安煤业股份有限公司八矿已₁₅-15080 机巷和风巷掘进工作面进行地质构造超前探测现场研究。

4.1 试验区概况

已₁₅-15080 工作面处于八矿已五采区西翼,该工作面标高-584~-656 m,埋深 658~732 m,地面高程+74~

+76 m,平均采长 300 m,可采走向长 1 753 m,储量为 243 万吨,平面布置如图 16 所示。已₁₅煤层为该工作面的主采煤层,煤厚 2.9~3.8 m,平均厚度 3.3 m,煤层厚度较稳定,煤层倾角 8~12°,平均倾角 10°,煤层地质情况如图 17 所示。

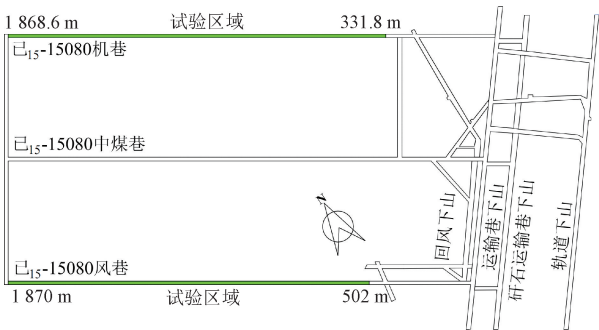


图 16 工作面平面布置情况
Fig. 16 Plane layout of working face

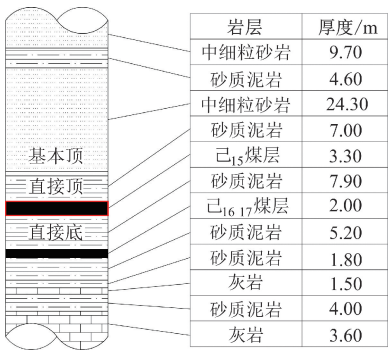


图 17 煤层地质柱状图
Fig. 17 Coal seam geological histogram

考虑到两巷的地质环境、系统布置和现场试验大致相同,选择机巷工作面进行分析,并对地质构造监测预警结果进行阐述。机巷人工弹性波信号系统采集时间自 2023-4-18 至 2024-8-14,在此时间段,机巷掘进位置由 331.8 m 推进至 1 868.6 m,地震检波器移动与安装 65 次,系统完成数据处理 1 491 个循环。选择煤层赋存稳定、无地质构造影响的安全区域作为初设区段,系统能够根据煤层属性和工作面类型自动设定 P_g 的初始临界值;随着后期工作面的推进,系统同步计算监测数据的波动幅度,从而定期自动调整临界值。

4.2 地质构造揭露情况

八矿已五采区存在断层发育,机巷掘进过程中共揭露 9 条断层和 5 处煤厚变化带,断层发育参数和煤厚变化参数如表 1 和 2 所示,地质构造分布情况如图 18 所示,地质构造多为正断层发育,落差 ≥1.0 m 的断层分布有 5 条,断层位置主要位于机巷试验区前半程。

表 1 断层发育参数

Table 1 Fault development parameters				
断层序列	位置	性质	落差/m	倾角/(°)
F1	距开口 446.5 m 处	正断层	1.5	20
F2	距开口 485.9 m 处	正断层	1.0	75
F3	距开口 527 m 处	逆断层	1.2	20
F4	距开口 570 m 处	逆断层	1.4	40
F5	距开口 649.6 m 处	逆断层	0.5	37
F6	距开口 1 244.8 m 处	正断层	0.4	20
F7	开口 1 345 m 处	正断层	0.4	85
F8	距开口 1 416.5 m 处	正断层	0.6	32
F9	距开口 1 457.3 m 处	正断层	1.1	43

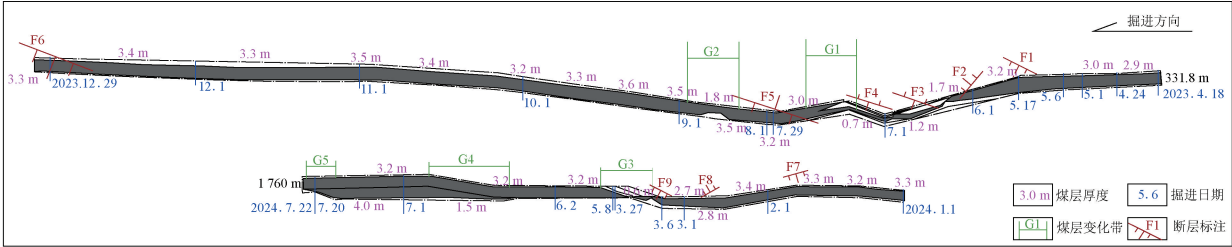
表 2 煤厚变化参数

Table 2 Coal thickness variation parameter (m)		
煤厚变化序列	变化带位置	变化带煤厚
G1	579.9~622	0.7~3.0
G2	677.3~719.4	1.8~3.5
G3	1 464.3~1 506.5	0~3.2
G4	1 581.8~1 648.3	3.2~7.2
G5	1 724.8~1 748.9	4.5~7.2

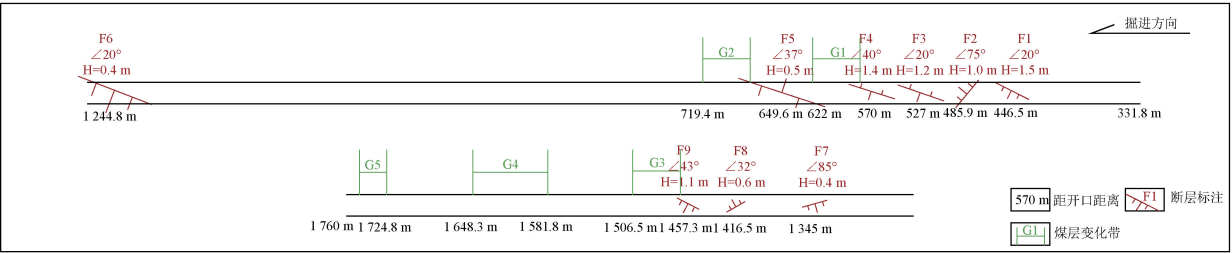
4.3 监测指标变化情况

P_g 、 K_{rel} 和 F_{max} 随巷道掘进位置的变化曲线如图 19

所示。从整体上分析, P_g 与 K_{rel} 协同变化, 曲线趋势基本一致; 在断层发育区域, P_g 与 K_{rel} 曲线较为平稳, 波动幅度有限; 而在揭露断层之前, P_g 与 K_{rel} 曲线相对波动, 部分区域波动幅度较大, 并且 P_g 曲线出现快速上升且超出数值 7 的情况, P_g 在煤厚变化区同样出现迅速增加且超过数值 7 的现象。除此之外, F_{max} 代表顶板弱化接触面的位置, 在临近断层和煤厚变化带时, F_{max} 曲线快速上升且变化幅度较大。



(a) 剖面图
(a) Sectional view



(b) 平面图
(b) Plane graph

图 18 Ji₁₅-15080 机巷地质构造图

Fig. 18 Ji₁₅-15080 machine roadway tectonic map

当系统设定 P_g 临界值为 7 时,掘进区段可划分为 6 个高值区,结合实际地质构造揭露情况可知,Ⅰ区间分布有断层 F1、F2 发育,Ⅱ区间分布有断层 F3、F4 发育并存在煤厚变化带 G1,Ⅲ区间分布有断层 F5 发育并存在煤厚变化带 G2,Ⅳ区间分布有断层 F6~F9 发育并存在煤厚变化带 G3,Ⅴ区间存在煤厚变化带 G4,Ⅵ区间存在煤厚变化带 G5。以上证明了监测预警系统的敏感性和临界值设置的合理性。

从区段上分析, P_g 、 K_{rel} 和 F_{max} 在地质构造附近的变

化曲线如图 20 所示。 P_g 曲线在断层处的单侧或者双侧超过临界值,其中断层 F1、F4、F5、F8 和 F9 的单侧 P_g 值超过临界值,断层 F2、F3 两侧的 P_g 值均超过临界值; K_{rel} 曲线在断层处的单侧、双侧或者整体出现高应力,断层 F1、F2、F3、F4 单侧存在高应力,断层 F5、F7、F8、F9 双侧存在高应力,而断层 F6 两侧及断层面均存在高应力; F_{max} 表征顶板弱化接触面的位置,当临近断层和煤厚变化带时, F_{max} 值增大且幅度扩张,表明煤层顶板弱化接触面越危险。

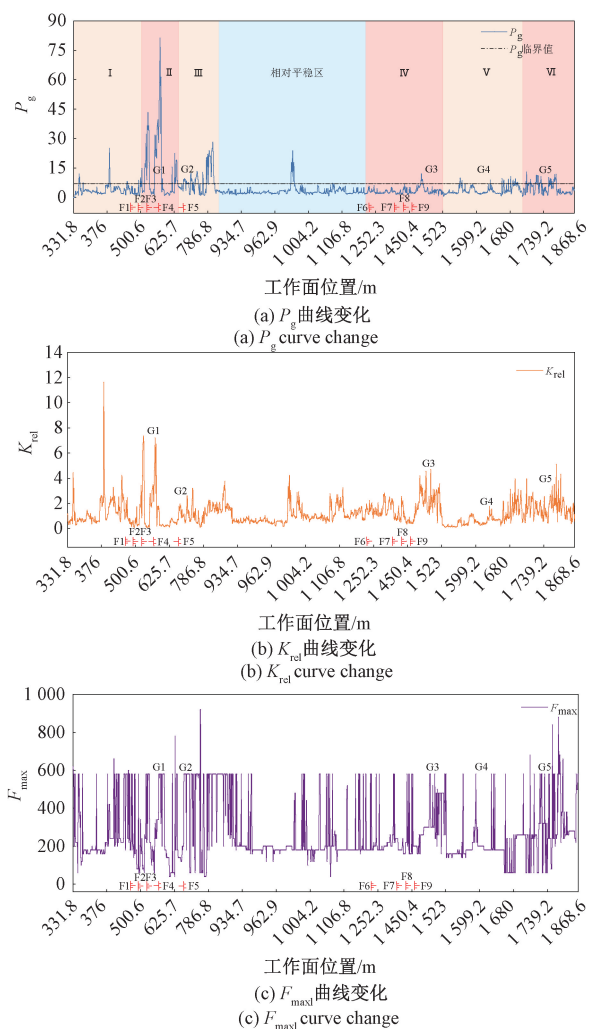


图 19 P_g 、 K_{rel} 和 F_{max} 随工作面掘进位置的曲线变化

Fig. 19 The curve changes of P_g , K_{rel} and F_{max} with the excavation position of the working face

表 3 断层上下盘地质构造预测系数 P_g 的变化特征

Table 3 Variation characteristics of geological structure prediction coefficient P_g in upper and lower walls of fault

断层 序列	上盘 P_g 指标			下盘 P_g 指标			超前预警 距离
	最小值	最大值	比值	最小值	最大值	比值	
F1	1.27	8.19	6.45	0.8	4.58	5.73	22.7
F2	1.1	8.75	7.95	1.03	14.83	14.39	8.5
F3	2.79	32.25	11.56	4.09	43.29	10.58	7.2
F4	1.63	2.33	1.43	1.54	81.21	52.73	13.1
F5	2.5	22.44	8.98	3.32	7.08	2.13	21.5
F6	1.76	5.73	3.25	1.86	6.16	3.31	27.4
F7	1.54	3.37	2.18	1.7	3.87	2.27	23.3
F8~F9	1.75	7.00	4.00	1.98	6.4	3.23	37.7

本次机巷掘进面揭露的断层落差均不足 5 m,地质构造影响距离可取值 30 m。根据系统设定,在地质构造前段 30 m 距离内监测信号应异常变化、系统应自动预警,结果表明通过地质构造监测指标实现超前探测的可

从不同断层类型上分析,正断层以单侧超过 P_g 临界值为主,如断层 F1、F8 和 F9,仅 F2 表现为双侧超临界值;正断层的应力分布形态多样,F1、F2 为单侧高应力,F6 为两侧和断层面高应力,F7、F8、F9 为双侧高应力。逆断层双侧与单侧均存在超过 P_g 临界值情况,F3 为双侧超临界值,F4、F5 为单侧超临界值;逆断层以单侧高应力为主,如断层 F3、F4,仅 F5 表现为双侧高应力。以落差 1.0 m 为界划定断层,大落差断层双侧与单侧均存在超过 P_g 临界值情况,F2、F3 为双侧超临界值,F1、F4、F9 为单侧超临界值;大落差断层以单侧高应力为主,如断层 F1、F2、F3 和 F4,仅 F9 表现为双侧高应力。小落差断层以单侧超过 P_g 临界值为主,如断层 F5、F8;小落差断层以双侧高应力为主,如断层 F5、F7 和 F8,F6 为特殊的两侧和断层面均高应力分布。区段上指标变化情况分析有助于后续形成针对性的地质构造识别准则。

4.4 监测结果分析

结合图 20 分析监测指标变化情况可知,在揭露地质构造之前,均存在 P_g 提前超出临界值的情况。根据断层发育位置相邻、 K_{rel} 曲线的连贯性以及巷道揭露时断层面的连续性,判断 F8 和 F9 断层可能为同一断层。各断层上下盘处 P_g 的变化特征如表 3 所示,沿工作面掘进方向直线距离计算,超前探测距离为 7.2~37.7 m。

突出资料显示^[21],超过 90%的煤与瓦斯突出事故是发生在地质构造 5 m 的范围之内,少于 10%的煤与瓦斯突出事故是发生在距离地质构造 5 m 的范围之外。通过现场实测可知^[27],当断层落差不足 5 m 时,其影响距离为断层附近 30 m;当断层落差为 5~15 m 时,其影响距离为断层附近 45 m;当断层落差超过 15 m 时,其影响距离为断层附近 60 m。

靠性高达 92.85%。通过工程实例验证了本文所提系统不仅能够实现深部巷道掘进工作面地质构造的实时监测,而且对于地质构造超前预警的准确性具有较优的性能,说明了所提技术在深部巷道现场的实用性和可行性。

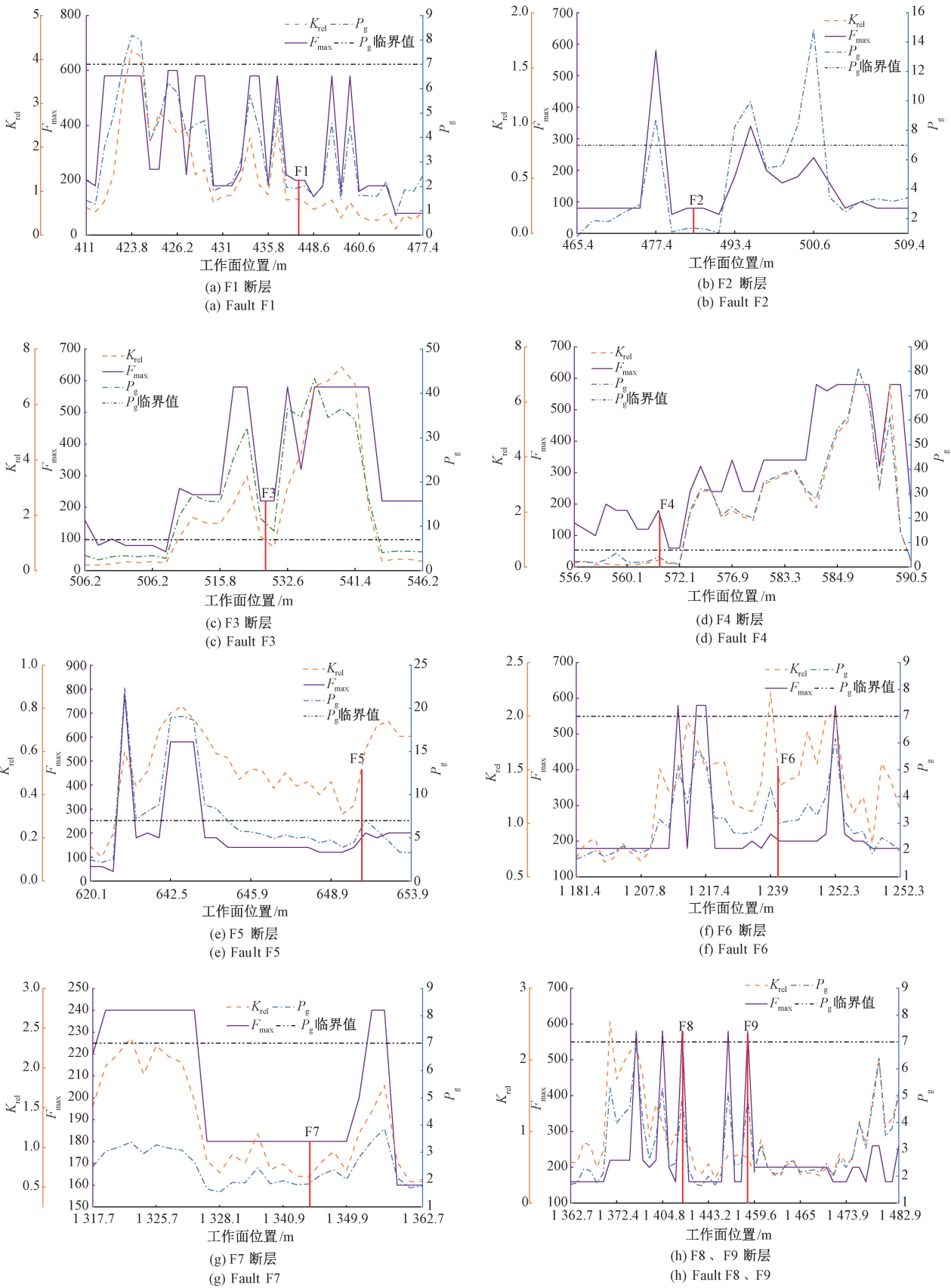


图 20 断层 F1~F9 揭露前后地质构造监测系数的变化

Fig. 20 The change of geological structure monitoring coefficient before and after the exposure of fault F1~F9

5 结 论

为建立高效精准的深部巷道掘进面地质构造超前探测技术体系,构建了基于频谱声学方法的地质构造超前探测系统。说明了巷道顶板岩层的谐振体特性,分析了矿山设备在煤体中激发的人工弹性波信号与弱化接触面的关系;通过分析人工弹性波信号的谐振频率、振幅及相位,获得了巷道顶板岩层中弱化接触面的位置关系和弱化程度;提出了利用弹性波属性反演工作面附近煤岩体应力变化为基础进行地质构造判别的理论方法,制定了掘进工作面地质构造监测指标;研制了地质构造超前探测系统硬件,开发了监测预警系统软件。通过平顶山天安煤业股份有限公司八矿已₁₅-15080机巷掘进面进行实例验证。结果表明, P_g 与 K_{rel} 协同变化,两者存在正向关联性;在揭露断层之前, P_g 曲线出现快速上升且超出数值7的现象;当以数值7为 P_g 临界值,地质构造均处于高值区内,从而说明了监测预警系统的敏感性和临界值设置的合理性。 P_g 曲线在断层处的单侧或者双侧超过临界值, K_{rel} 曲线在断层处的单侧、双侧或者整体出现高应力,这为地质构造的发育形态后续分析和防突措施的制订提供技术依据。分析 P_g 在各断层上下盘处变化特征,沿工作面掘进方向直线距离计算,超前探测距离为7.2~37.7 m,通过地质构造监测指标实现超前探测的可靠性高达92.85%,该系统具有较好的适用性和有效性,能够用于深部巷道掘进面地质构造的超前探测。

基于频谱声学方法的地质构造超前探测系统适用于煤矿掘进工作面地质构造的随掘实时监测预警,也可用于深部矿井“三高一扰动”(高地应力、高瓦斯、高地温和强开采扰动)致灾环境中地质构造的超前探测。目前,该系统存在监测信号噪声干扰大、微型地质构造探测精度低等不足,后续将开发基于深度学习策略的降噪算法,并融合微震、声发射等监测方法,提升系统探测精度。

参考文献

- [1] 康红普,姜鹏飞,张农,等. 煤矿复杂条件巷道快速智能掘进研究策略及关键技术与装备分析[J]. 中国矿业大学学报,2025,54(2):237-257.
- KANG H P, JIANG P F, ZHANG N, et al. Key technology and equipment analysis and research strategies of rapid and intelligent driving in complex roadways of coal mines[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(2): 237-257.
- [2] 程建远,陆自清,蒋必辞,等. 煤矿巷道快速掘进的“长掘长探”技术[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 404-412.
- CHENG J Y, LU Z Q, JIANG B C, et al. A novel

- technology of “long excavation/long detection” for rapid excavation in coal mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 404-412.
- [3] 马志超, 奚文武, 李文, 等. 煤矿回采工作面内部不良地质体的多波联合探测[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(3): 83-92.
- MA ZH CH, DOU W W, LI W, et al. Multi-wave joint detection of unfavorable geological bodies in coal mining face[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3): 83-92.
- [4] 张建国, 王满, 张国川, 等. 平顶山矿区深部动力灾害防治与资源绿色开采[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 295-303.
- ZHANG J G, WANG M, ZHANG G CH, et al. Prevention and control of deep dynamic disasters and resources green exploitation in Pingdingshan Mining Area [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 295-303.
- [5] 徐德宇, 李国旗, 李德全. 新安煤田煤与瓦斯突出特征及防治措施[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(11): 52-56.
- XU D Y, LI G Q, LI D Q. Study on coal and gas outburst characteristics and prevention and control measures in Xin'an coal field [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(11): 52-56.
- [6] 孔慧, 吴桂义, 钟锋, 等. 贵州矿区煤与瓦斯突出特征及其防治对策[J]. 工矿自动化, 2016, 42(2): 22-26.
- KONG Q, WU G Y, ZHONG F, et al. Coal and gas outburst features in Guizhou mining areas and its prevention counter-measures [J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(2): 22-26.
- [7] 王国法, 张良, 李首滨, 等. 煤矿无人化智能开采系统理论与技术研发进展[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 34-53.
- WANG G F, ZHANG L, LI SH B, et al. Progresses in theory and technological development of unmanned smart mining system[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 34-53.
- [8] 李鹏, 罗玉钦, 田有, 等. 深部地质资源地球物理探测技术研究发展[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(5): 2011-2033.
- LI P, LUO Y Q, TIAN Y, et al. Research progress of geophysical exploration technology for deep geological resources [J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(5): 2011-2033.
- [9] 许少毅, 卢文庭, 王承涛, 等. 随掘连续超前探测异常体辨识成像研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(11):

- 159-175.
- XU SH Y, LU W T, WANG CH T, et al. Research on anomaly identification imaging with continuous advanced detection of excavation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(11): 159-175.
- [10] 吴文刚, 卞雷祥, 何勇, 等. 瞬变/谐变一体化的大地电磁收发线圈设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(5): 98-107.
- WU W G, BIAN L X, HE Y, et al. Design of magnetotelluric transmitter and receiver coils with the integration of transient and harmonic electromagnetic method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(5): 98-107.
- [11] 李涛涛, 许献磊, 何宇, 等. 超深定向钻孔雷达采控系统设计与测试研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(6): 42-49.
- LI T T, XU X L, HE Y, et al. Data acquisition and control system design and tests of borehole ground penetrating radar for ultra deep orientated detection[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(6): 42-49.
- [12] 方涛涛, 王池社, 王洁, 等. 基于 YOLO v8n 的探地雷达图像管线定位方法[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(11): 170-177.
- FANG T T, WANG CH SH, WANG J, et al. Ground penetrating radar image pipeline location based on YOLO v8n[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(11): 170-177.
- [13] 李毛飞, 刘树才, 姜志海, 等. 矿井直流电透视底板探测及三维反演解释[J]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2708-2721.
- LI M F, LIU SH C, JIANG ZH H, et al. Detecting floor geological information by mine DC perspective and 3D inversion[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7): 2708-2721.
- [14] 高小伟. 煤矿隐伏地质异常体地孔瞬变电磁法三分量探测技术[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 237-245.
- GAO X W. Three-component detection technology of down-hole TEM for hidden geological anomalies in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 237-245.
- [15] 崔凡, 王然, 陈存强, 等. 滇东复杂地质条件探地雷达与井下地震综合超前预测小构造[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S1): 222-230.
- CUI F, WANG R, CHEN C Q, et al. Integrated advanced prediction of small structures by ground penetrating radar and downhole seismic with complex geological conditions in East Yunnan[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S1): 222-230.
- [16] 李江华, 廉玉广, 窦文武, 等. 槽波地震反射法探测地质构造应用研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(12): 201-206.
- LI J H, LIAN Y G, DOU W W, et al. Study on detection of channel wave reflection method applied to geologic structure[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(12): 201-206.
- [17] 张建国, 魏风清, Г. И. КОЛЧИН, 等. 煤岩动力现象监测预警频谱声学方法研究进展及发展方向[J]. 煤炭学报, 2025, 50(S2): 921-940.
- ZHANG J G, WEI F Q, Г. И. КОЛЧИН, et al. Research progress and development direction of frequency spectrum acoustic method for monitoring and early warning of coal-rock dynamic phenomena[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(S2): 921-940.
- [18] 曹运兴, 张海洋, 张震, 等. 正断层上盘煤与瓦斯突出特征与地应力场控制机理[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(4): 61-69.
- CAO Y X, ZHANG H Y, ZHANG ZH, et al. Characteristics of coal and gas outburst and controlling mechanism of stress field in the hanging wall of normal faults[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(4): 61-69.
- [19] 张建国, 魏风清, ШИЛОВ ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ. 基于人工声学信号的岩体状态和动力现象监测系统 САКСМ 应用[J]. 煤矿安全, 2022, 53(2): 149-155.
- ZHANG J G, WEI F Q, ШИЛОВ В И. Monitoring system for rock mass state and dynamic phenomenon based on artificial acoustic signal САКСМ application[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(2): 149-155.
- [20] ГОРБАЧЕВ А С, ШИЛОВ В И. Мониторинг массива горных пород по параметрам искусственного акустического сигнала. прогноз геологических нарушений при добыче угля[J]. Вестник Научного Центра По Безопасности Работ В Угольной Промышленности, 2022, 2: 6-16.
- [21] 张建国, 冯志成, 魏风清, 等. 掘进工作面地质构造探测频谱声学方法试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(12): 170-178.
- ZHANG J G, FENG ZH CH, WEI F Q, et al. An experimental study of the application of the spectral acoustic method to the advance detection of geologic structures in tunnelling working site[J]. Coal Geology &

- Exploration, 2024, 52(12): 170-178.
- [22] МИРЕР С В, ХМАРА О И, ШАДРИН А В. СпекТральноакусТический прогноз выбросоопасности угольных пластов [M]. Кемерово: Кузбассвуиздат, 1999.
- [23] 金解放, 熊慧颖, 肖蓓丰, 等. 岩石超声波对三维地应力的敏感性及其传播衰减特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2025, 46(S1): 183-194.
- JIN J F, XIONG H Y, XIAO Y F, et al. Experimental study on sensitivity and propagation attenuation characteristics of rock ultrasonic wave under three-dimensional in-situ stress [J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(S1): 183-194.
- [24] КАЗАНИН О И, НОРВАТОВ Ю А, ЧЕРКАШИН А А, et al. Анализ опыта интенсивной отработки выемочных участков на шахте Котинская ОАО (СУЭК Кузбасс) в условиях повышенных водопритоков [J]. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2014, (5): 21-25.
- [25] ГУЛЯЕВ П Н. Разработка спектрально-акустического метода контроля изменения напряженного состояния угленосного массива при горных работах [D]. Москва: Московский государственный горный университет, 2007.
- [26] СМЕРНОВ О В, КУЛИК А. И., ЛАПИН Е. А. Прогноз геологических нарушений по параметрам акустического сигнала [J]. УГОЛЬ, 2015, 11: 76-79.
- [27] 陈敏, 张庆华, 王麒麟. 断层对煤与瓦斯突出范围的影

响 [J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(3): 39-41.

CHEN M, ZHANG Q H, WANG Q X. Effect on scope of coal and gas outburst by fault [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(3): 39-41.

作者简介



张建国, 2013 年于中国矿业大学获得博士学位, 现为炼焦煤资源绿色开发全国重点实验室教授级高级工程师, 主要研究方向为煤矿灾害治理、瓦斯资源利用和煤矿智能化建设。

E-mail: Zhangjg9681@163.com

Zhang Jianguo received his Ph. D. degree from China University of Mining and Technology in 2013, respectively. Now he is a professor of engineering in State Key Laboratory of Coking Coal Resources Green Exploitation. His main research interests include coal mine disaster control, gas resource utilization and intelligent construction of coal mine.



王文唱(通信作者), 2019 年于安阳师范学院获得学士学位, 2022 年于河南理工大学获得硕士学位, 现为河南理工大学博士研究生, 主要研究方向为矿井灾害预防和治理。

E-mail: 1269811881@qq.com

Wang Wenchang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Anyang Normal University in 2019, M. Sc. degree from Henan Polytechnic University in 2022. Now he is a Ph. D. candidate in Henan Polytechnic University. His main research interests include prevention and treatment of mine disasters.