

矿井微震与电法耦合监测技术

刘盛东¹, 杨 彩^{2,3,4}, 章 俊¹, 李纯阳^{4,5}, 任 川^{4,5}

(1. 中国矿业大学深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏徐州 221116; 2. 中国矿业大学矿山互联网应用技术国家地方联合工程实验室, 江苏徐州 221116; 3. 中国矿业大学物联网(感知矿山)研究中心, 江苏徐州 221116; 4. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州 221116; 5. 安徽惠州地质安全研究院股份有限公司, 安徽合肥 230088)

摘要:随着煤炭资源开采区域、深度及强度的增加, 矿井工作面采掘扰动极易诱发矿井突水事故, 严重威胁我国煤炭资源安全开采。矿井水害事故的发生主要是岩体采动破裂与矿井水渗流共同作用的结果。研究表明, 微震信号的纵横波到时、幅值、频率等参量可有效表征岩体破裂位置、强度及其震源机制, 地电场信号中的电阻率、激励电流及自然电位等参量可有效表征岩体渗流演化过程。透水通道形成对应微震场特征, 地下水渗流对应地电场特征, 因此微震电法耦合方法对矿井水害孕育发展过程具有监测预警的功能, 可有效对采动破坏过程中形成的突水通道、水源位置及渗流过程等水害三要素进行精准捕捉; 减少单一地球物理方法多解性, 提高水害监测预警精度, 对煤矿防治水意义重大。当前, 微震与电法耦合监测技术在煤矿水害实时动态监测中开始得到应用, 突破传统微震与电法独立采集的局限, 课题组自主研发了国内外首款煤安认证的微震与电法耦合并行监测系统, 该系统以微震场与地电场并行采集基站为核心, 集被动源微震波场与主被动地电场为一体, 通过连接矿井物联网, 实现远程数据采集控制、传输及云端存储; 其一体化网络服务器主机可连接多个采集基站, 并将微震检波器、电法激励电极与电位测量电极进行相互隔离、并行采集, 形成微震事件密度与能级分布、电阻率分布、自然电位分布等时空云图来监测预判水害三要素。微震与电法耦合监测技术仍需在微震事件智能识别与定位、地电场的电阻率三维反演以及自然电位渗流反演方面进行专项攻关; 结合并行监测的微震电法大数据集, 重点在微震电法数据联合反演、智能化监测预警方向开展进一步研究。微震与电法耦合监测技术, 作为矿井水害的主动预警监测新方法, 可为我国智能化矿井建设发挥重要作用。

关键词:微震与电法耦合; 主被动一体化; 监测预警; 煤矿水害; 智能矿山

中图分类号:P631.3 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2024)01-0586-15

Mine microseismic and electrical coupling monitoring technology

LIU Shengdong¹, YANG Cai^{2,3,4}, ZHANG Jun¹, LI Chunyang^{4,5}, REN Chuan^{4,5}

(1. National Key Laboratory of Intelligent Construction and Health Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. The National Joint Engineering Laboratory of Internet Applied Technology of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Internet of Things Perception Mine Research Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. School of Resource and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 5. Auhui Huizhou Geology Security Institute Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: With the increase of the depth, mining intensity and area of coal resource, the mining disturbances in the min-

收稿日期: 2023-10-19 修回日期: 2024-01-06 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YH23.0919

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41974149, 42104133)

作者简介: 刘盛东(1962—), 男, 安徽潜山人, 教授, 博士生导师。E-mail: liushengdong@126.com

通讯作者: 杨 彩(1986—), 女, 江苏徐州人, 副研究员, 硕士生导师, 博士。E-mail: yangcaicumt@163.com

引用格式: 刘盛东, 杨彩, 章俊, 等. 矿井微震与电法耦合监测技术[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 586–600.

LIU Shengdong, YANG Cai, ZHANG Jun, et al. Mine microseismic and electrical coupling monitoring technology[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 586–600.



移动阅读

ing face can easily induce mine water inrush accidents, seriously threatening the safe mining of coal resources in China. Mine water disasters are mainly caused by the joint action of rock mass rupture and mine water seepage. The research results show that the parameters such as the longitudinal and transverse wave time, amplitude, frequency, and other microseismic signal parameters can effectively characterize the fracture location and intensity, as well as the source mechanism of rock mass. The parameters such as resistivity, excitation current and self-potential in geoelectric field signals can effectively characterize rock mass seepage evolution process. The characteristics of microseismic field indicate the formation of permeable channels, while the characteristics of geoelectric field indicate groundwater seepage. Therefore, the coupling of microseismic and electrical method has the function of monitoring and early warning for the development process of mine water hazards, which can accurately capture three elements of water hazards including water inrush channel, water source location and seepage process formed in the process of mining failure. It reduces the multiple solutions of a single geophysical method, and improves the monitoring accuracy of water disaster, which is of great significance to the prevention and control of water in coal mines. At present, the microseismic and electrical coupling monitoring technology has begun to be applied in the real-time dynamic monitoring of water hazards in coal mines. Breaking through the limitations of traditional microseismic and electrical data collected independently, the research group has developed the first coal-certified microseismic and electrical coupling parallel monitoring system. With the microseismic field and geoelectric field parallel acquisition base station as the core, this system integrates the passive source microseismic wave field and active and passive geoelectric field. By connecting the mine Internet of Things, the acquisition control, transmission and cloud storage of the remote data are realized. Its integrated network server host can connect multiple acquisition base stations, so as to realize the optimal arrangement of the multi-field observation system in the limited space of the underground and borehole with the separation of microseismic sensor, current electrode and potential electrode while parallel acquisition. It can obtain the spatial and temporal cloud map of microseismic event density and energy level distribution, resistivity distribution and self-potential distribution to monitor and predict the three elements of water hazards. The microseismic and electrical coupling monitoring technology still needs more research particularly in intelligent identification and location of microseismic events, three-dimensional resistivity inversion of geoelectric field and self-potential seepage inversion. Combined with the microseismic and electrical data sets of parallel monitoring, the joint inversion of microseismic and electrical data and intelligent monitoring and early warning method need to be further studied. As a new method of active early warning and monitoring of mine water disaster, the microseismic and electrical coupling monitoring technology will play an important role in the construction of intelligent mine in China.

Key words: coupling of microseismic and electrical method; active and passive integration; monitoring and early warning; water disaster in coal mines; intelligent mines

我国煤炭消费占比到 2050 年仍将维持在 40% 左右^[1], 持续占据主体能源地位。随着煤炭资源开采区域、深度及强度的增加, 水文地质类型愈加复杂, 矿井工作面采掘扰动极易诱发矿井突水事故, 严重威胁我国煤炭资源安全开采。当前, 传统矿井物探技术难以实现智能化矿井建设下的透明地质要求, 采用多场(微震场、地电场等)耦合方法在采矿全生命周期阶段实时动态监测矿井地质灾害孕育发展过程^[2-3], 可有效对采动破坏过程中岩体破裂及渗流情况进行精准捕捉, 减少单一地球物理方法多解性, 是实现智能精准开采的重要手段^[4], 对煤矿防治水意义重大。

矿井水害事故的发生主要是岩体破裂与矿井水渗流共同作用的结果。研究表明, 微震信号可有效表征岩体破裂位置、强度及其震源机制^[5-6], 微震监测技

术因此被广泛应用在采掘扰动下导水通道断层、陷落柱等活化与失稳过程^[7-8]、采空区突水^[9]及顶底板采动裂隙孕育发展过程等^[10-16], 但是微震监测主要反馈岩体破裂发育时空位置信息, 该破裂是否充水、导水, 对回采工作面是否存在水害威胁难以确定; 地电场信号中的激励电流、自然电位及电阻率等参数可有效表征岩体破裂、水渗流或二者共同作用情况^[17-18], 电法监测技术因此被广泛应用到底板采动破坏深度^[19-21]、顶板导水裂隙带发育高度^[22-23]、隐伏地质构造(断层、陷落柱等)活化及注浆效果探查等^[24-26]。因此, 由于地电参数对水反应敏感, 与微震信息结合, 可有效对采掘扰动产生的导水通道富水性进行准确描述。

2018 年, 国家矿山安全监察局下发《煤矿防治水细则》提出复杂水文地质类型矿井应采用微震与电法

耦合等监测技术^[27]。微震与电法耦合监测技术是一种通过并行同步监测目标区域被动源微震波场与主被动地电场的多场多参量地球物理实时动态监测技术。当前该项技术已逐渐应用于复杂水文地质条件下的矿井水害监测预警,同时被作为一项全过程实时动态监测预警技术服务于智能矿山建设。作为一种适用于当前煤矿复杂地质环境下的矿井水害探测的重要手段,目前已开始被应用于井下煤层顶、底板突水监测、断层活化监测等^[10,28]。随着矿井物联网技术的发展,微震与电法耦合监测已实现了采集数据的在线实时传输与处理,对受采掘扰动影响的地质异常区域进行实时动态监测,并在此基础上提出了煤矿井下突水模型预警技术^[29]。

微震与电法耦合监测技术从被动监听与主动监测、微震场与地电场结合的角度,可实时动态表征采掘过程中地质灾害演化过程,作为矿井水害主动预警技术,可有效服务我国智能化矿井建设。当前,微震与电法耦合监测技术在煤矿水害实时动态监测中开始得到应用,突破传统微震与电法独立采集的局限,课题组自主研发了国内外首款煤安认证的微震与电法耦合并行监测系统,该系统基于网络并行电法、并行多物理场采集等核心技术^[30],在同一个采集仪内实现微震与地电场数据实时并行同步采集,集被动源微震波场(微震信号)与主被动地电场(激励电流、自然电位及视电阻率)为一体——矿用本安型微震电法并

行监测仪采集站。采集站内置精密时钟连接矿井环网,由地面网络服务器实现井下1~n个采集站的远程网络对时、守时,采集站与服务器同时具备数据采集控制、传输、存储、解编功能;并将微震监测、电位监测与电法激励进行硬件内部隔离与并行采集,远程实现单个采集站内部、多个采集站之间的微震通道、电位通道、电流发射通道的不同组合,从而实现井下巷道、钻孔有限空间范围内微震监测点、电位监测点、电流发射点的最优观测系统布置,真正实现微震电法耦合监测。笔者将从微震与电法耦合监测原理、硬软件系统、现场实测案例等方面进行阐述,并探讨微震与电法耦合未来研究方向。

1 微震与电法耦合监测原理

1.1 微震监测原理

微震是岩体损伤变形破坏过程中的伴生现象^[31]。岩体的应变能在此过程突然释放,以地震波(主要为P波和S波)的形式向外传播。受煤矿采掘应力扰动的影响,矿井水害导水通道(煤层顶底板破坏、构造活化等)孕育、发展至失稳的过程往往伴随岩体变形、微破裂及宏观破坏的过程,通过全空间、实时、动态监测微震信号,可获取岩体破裂发生的位置、强度、震源机制等信息(图1(a)),从而确定导水通道的孕育演化过程。

岩样压裂实验表明,微震(声发射)信号与应力变

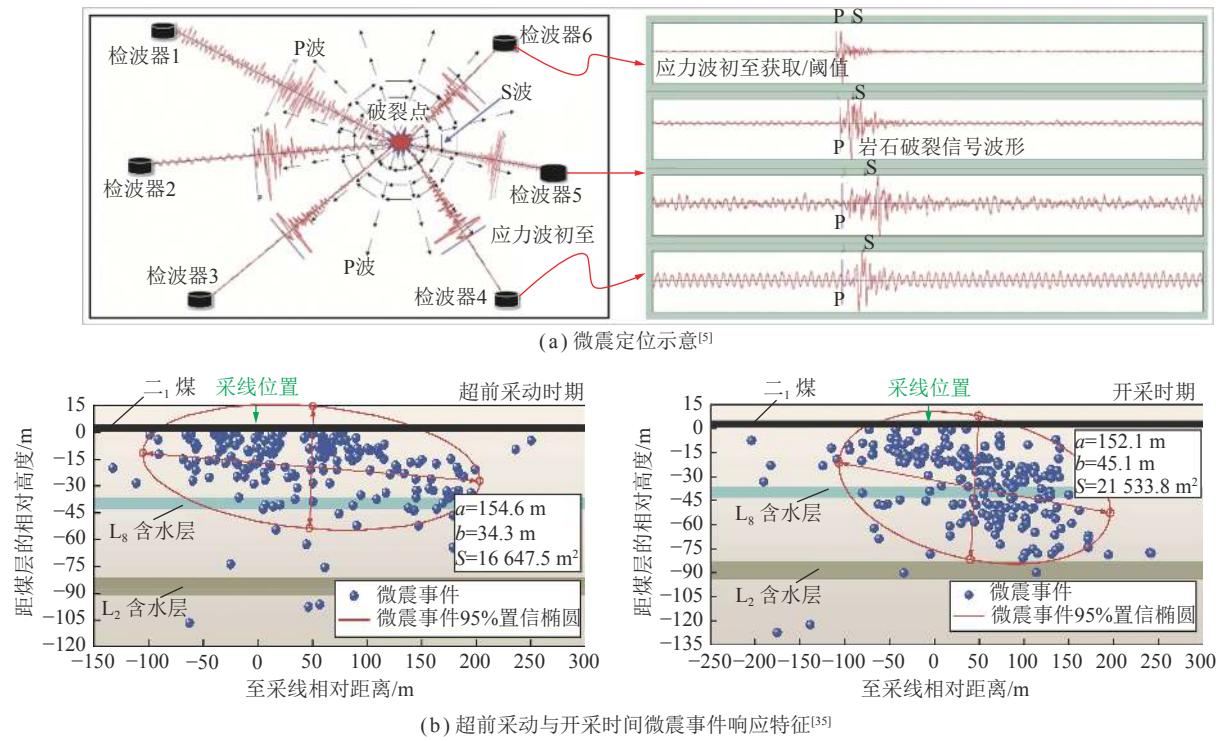


图1 微震信号响应特征

Fig.1 Response characteristics of microseismic signal

化保持一致^[32]。工程实践研究表明,采动突水通道形成是岩层破裂裂隙萌生、扩展和贯通的动态过程。因此,由采动压力和水压力扰动应力场而诱发的岩体破裂微震活动是矿山突水的重要前兆^[33]。进一步研究表明,微震信号发生的时间、空间、强度可用来确定微破裂发生的空间位置、频率以及微破裂尺寸^[15],岩层采动裂隙的导通性可以采用微震能量密度及连通度进行描述^[5]。因此,通过微震定位结果刻画与预测裂隙等突水通道,利用微震事件能量、频次及微震波形特征等前兆信息时空定量描述突水过程,可为突水监测预警提供依据^[34-35],如图1(b)所示,图中, a 为椭圆长轴; b 为椭圆短轴; S 为椭圆面积。

1.2 电法监测原理

电法监测的基本原理是监测目标区域岩性的电性特征变化。地电特征参量主要包括电位(自然电位、激励电位、极化电位)或电位差、激励电流,以及由激励电流对应的激励电位响应计算得到的电阻率参数、极化率参数等。其中自然电位是天然状态下(未供电时)岩体受渗流或破裂影响下形成的自然电场产生的电位,与微震场一样属于被动源场,可进行全天候不间断监测。与自然电位不同,电阻率与激励电流属于

主动源场数据:通过主动供电电极A、B向地下供入稳定激励电流 I ,然后测量测量电极M、N之间的电位差 U ,从而求得该电法测点的视电阻率值 $\rho=KU/I(K$ 为装置系数),与供电电极A、B和测量电极M、N的空间位置有关^[36];采用并行电法技术把DC法中的AB供电转换成AM法供电,实现了视电阻率的快速巡检。

影响岩层电阻率的因素主要包括岩层的岩性、含水性、温度、应力、孔隙裂隙结构等,其中岩层含水性、应力及孔隙裂隙结构3者共同作用的含水岩层受力变形破裂,是矿井水害电法监测地电响应异常的最主要诱因,研究学者发现覆岩破坏形成的垮落带与导水裂隙带视电阻率变化分别是正常情况的4~6倍与2~3倍^[37];激励电流对电极附近接地条件反应灵敏,也可用接地电导率 $\delta=I/E$ 来表达(E 为发射电压),激励电流大小对矿井水头位置与裂隙发育情况可进行直接反馈,水头抵达时激励电流会显著变大,裂隙发育为导致该处电极的激励电流下降。底板突水实验证明视电阻率、激励电流及自然电位等地电参量可有效动态表征矿井水渗流孕育发展过程^[38](图2)。然而由于电法监测线缆易受应力破坏而拉断,其在实际井下应用时的监测范围受限。

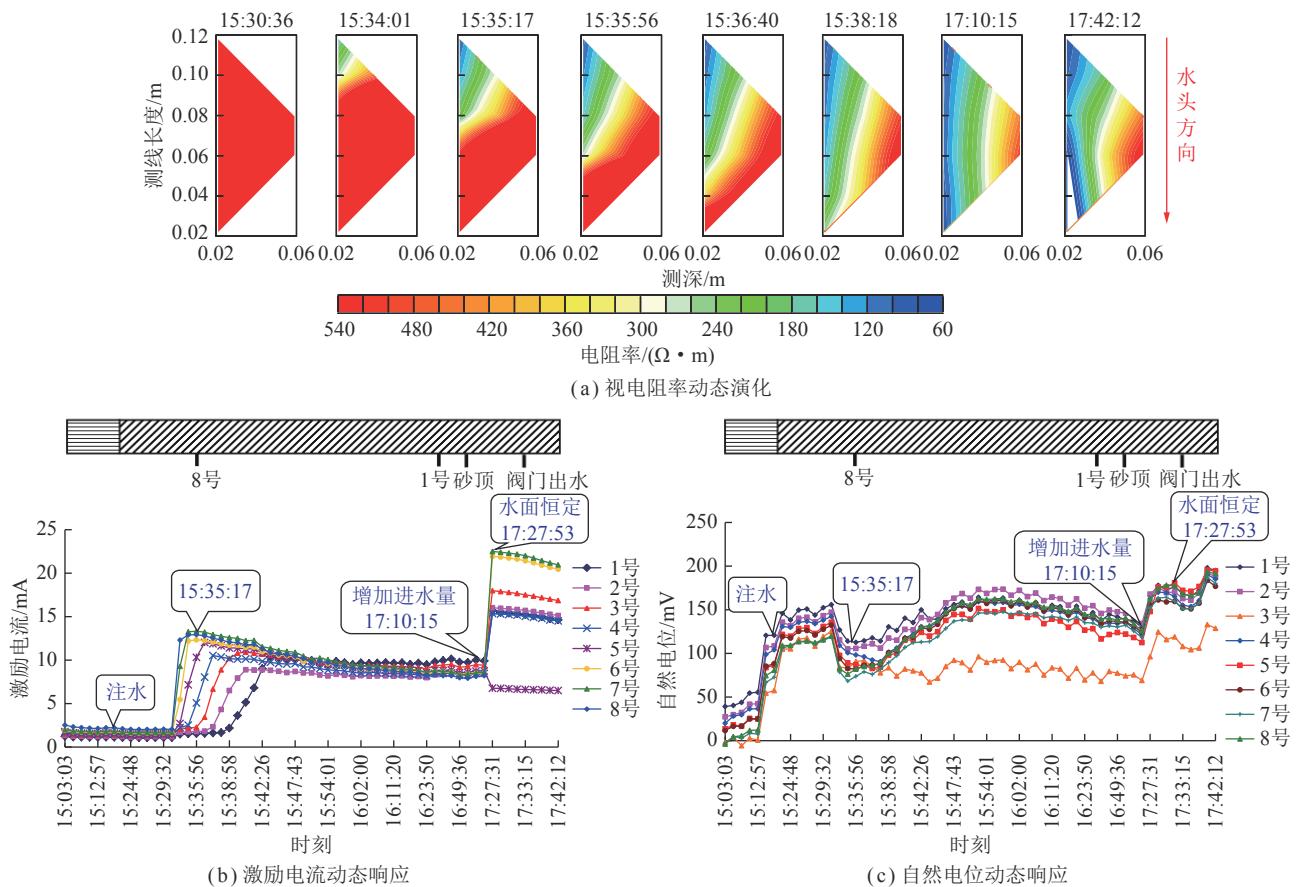


图2 底板突水模拟地电场动态响应规律^[38]

Fig.2 Response law of geoelectrical field in floor water inrush simulation^[38]

1.3 微震与电法耦合监测原理

随着我国煤矿开采深度的不断增加,矿井水文地质环境愈来愈复杂,单一地球物理方法难以准确捕捉矿井水害动态发育过程。煤岩变形破裂是矿井水害发生的重要诱因,煤岩微震电法特征变化显著(图3)^[39],采用微震与电法耦合监测技术对矿井水害孕育发展过程进行动态监测,对煤矿防治水意义重大。

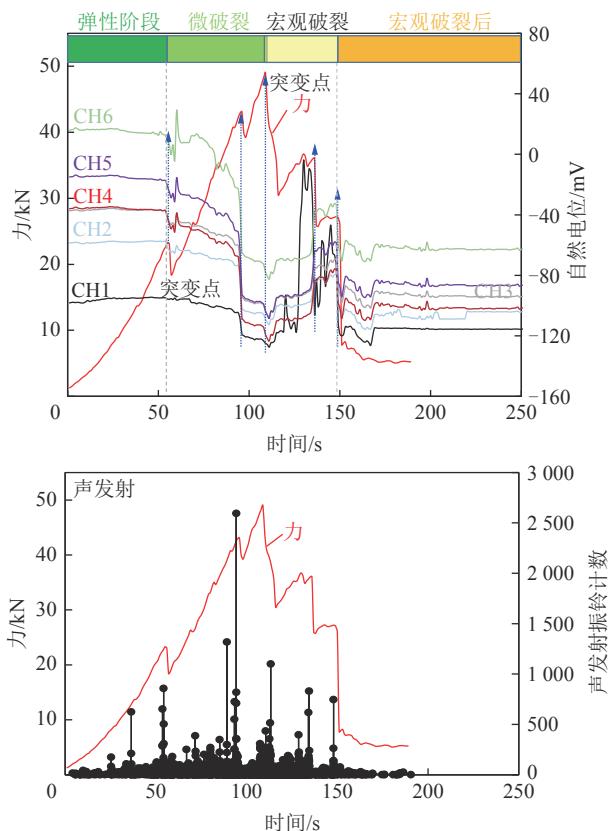


图3 岩样受载变形破裂声发射、自然电位与力同步响应特征^[39]

Fig.3 Response characteristics of rock acoustic emission, self-potential and force during loaded rock samples deformation and rupture^[39]

微震方法通过微震事件发生频率实时判断裂隙发育程度,利用定位分析可准确判断裂隙发育位置;电法通过监测岩体破裂或水的渗流引起的地电场异常,可以动态表征裂隙发育或地下水的渗流过程。微震与电法耦合监测技术综合利用微震信号、自然电位、电阻率等震电参量实时动态监测岩体破裂情况,利用主动源电阻率与激励电流动态监测岩体内裂隙充水或渗流情况。2者相辅相成,电法监测数据可有效弥补微震信号很难识别导水通道是否充水的不足^[40],而微震监测可突破电法监测范围受限的难题,并提高其识别导水通道及其含水性的能力,进而有效提升矿井水害精测精度。一般情况下,对于微震与电法耦合固

定监测区域,若岩体破裂时不伴随水的渗流作用,微震场与地电场响应特征为,微震事件在该区域发生频繁,自然电位变化显著,电阻率在该区域呈现逐渐升高趋势,破裂区域电极的激励电流则会出现显著下降^[41];若岩体破裂时伴随水的渗流作用,微震场与地电场响应特征为,微震事件在该区域发生频繁,自然电位呈现逐渐升高趋势,电阻率在该区域呈现逐渐降低趋势,渗流水头抵达区域电极的激励电流则会出现显著升高;若监测区域岩体整体保持完整,受现场采动扰动较少,微震场与地电场响应特征为,微震事件发生频率较少,自然电位、电阻率、激励电流等地电参量保持相对稳定。现有多个矿井水害监测工程经验表明,自然电位连续2d升高600mV,电阻率连续下降30%,监测系统将提前48h预报水害危险,结合微震事件的频次与能级大小提高预警精准度。

2 微震与电法耦合监测系统

实现微震与电法耦合监测的关键基础在于2类地球物理硬件装备的耦合设计与研制。为此,本课题组自主研发了首台国家煤安认证的微震与电法耦合监测系统,其将微震与地电场数据实时并行同步采集、存储与传输,从底层装备上实现了微震与电法的耦合,突破了传统综合物探硬件相互独立采集的现状,可用于采掘扰动诱发的岩体破裂及其水渗流场的有效监测。该系统通过得到微震事件与地电事件的时空分布,可进一步融合三维地质建模,获取震波场、自然电场及电阻率时空三维可视化。微震与电法耦合监测系统的主要特色包括以下几个方面:①此监测系统同步采集微震与电法数据,其电法通道和微震通道可任意组合,根据现场需求多个基站可以级联,适用于井下有限空间下观测系统的最优化布置;②监测系统依托发明专利“分布式并行智能电极电位差信号采集方法”进行电法数据的并行采集^[28],采集效率显著提升,可实现自然电位、电阻率、激励电流等地电场主被动参量同步监测;③电法供电电极与接收电极分离,减少电极极化影响,保障电法原始数据采集质量;④实现微震电法数据实时在线传输,云端处理,一键成图,可自动生成微震与电法耦合监测日报。微震与电法耦合预警机制是利用背景电阻率信号和自然电位信号对比开展综合预警,当出现微震事件频次与能级阈值、激励电流显著变化、电阻率降低与自然电位持续升高5个特征时,触发预警机制。具体矿井初次预警指标的阈值,可通过监测过程的安全极值为初值进行期望迭代考虑,重点突水指标为电阻率持续降低和自然电位持续升高阈值,超越电极范围的信息,可采用

电阻率、极化率反演和微震定位计算频次与能级参数综合确定。

2.1 微震与电法耦合监测硬件系统

微震与电法耦合监测系统由井下监测仪采集站系统和井上服务器控制系统2部分组成,如图4所示。井下采集系统由微震电法并行监测仪采集站、检波器、测量电极、发射电极、本安电源、网络接口等组成;井下可根据现场具体微震电法观测系统设计布置多个采集站。地面控制系统由服务器及控制软件、计算机

等组成。整个系统的总体架构为B/S(Browser/Server)架构即浏览器和服务器架构模式,所有授权的用户都可以通过计算机或手机的网页,远程控制服务器和井下采集站,通过网络(通用网络+矿用网络)来发送指令、传送数据、处理数据、查阅图表、推送结果。采集站仪器有内置时钟守时,服务器通过1588协议进行秒级网络对时,实现多采集站-服务器直接的时间同步。图5为微震与电法耦合监测井下现场安装实物图。

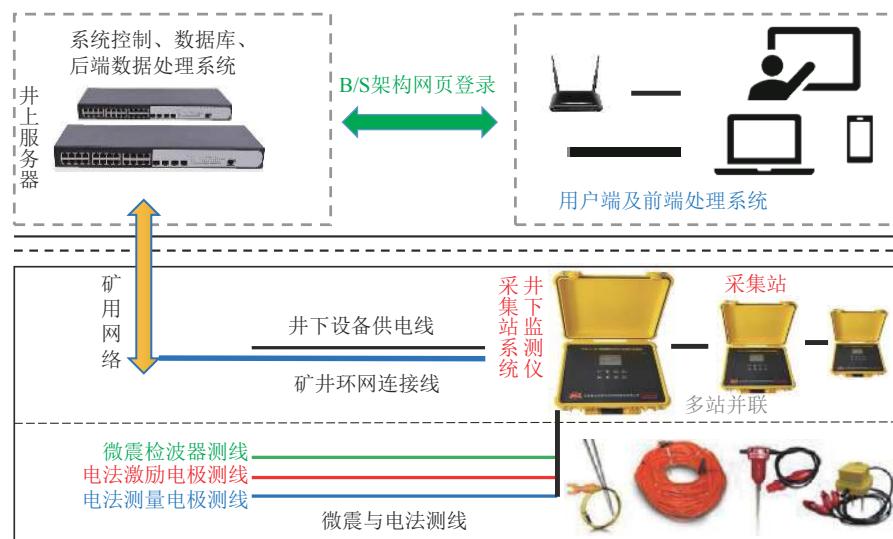


图4 微震与电法耦合监测系统示意

Fig.4 Diagram of microseismic and electrical coupling monitoring system

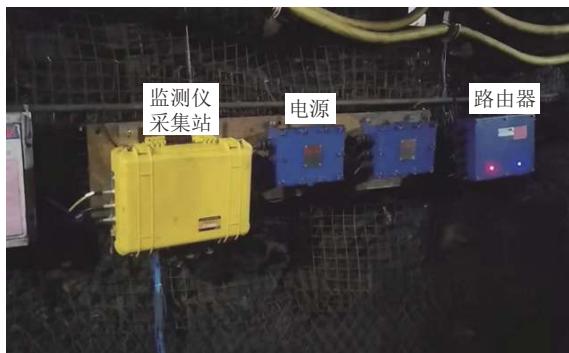


图5 YZD12-C 矿用本安型微震电法并行监测仪井下安装

Fig.5 Underground installation of YZD12-C mining intrinsically safe microseismic and electrical parallel monitoring instruments

微震与电法耦合监测仪采集站数据采集工作流程:①设计微震与电法耦合监测观测系统,确定现场电法和微震的通道数;②设定待监测工作面坐标系;③施工传感器布置钻孔,安装微震传感器和电极;④构建微震检波器、测量电极、激励电极坐标;⑤建立三维观测系统;⑥虚拟3D表达;⑦监测点属性点亮显

示等,获取如图6所示某工作面顶底板破坏微震与电法耦合事件示意,进而通过数据分析与处理解释形成可视化图解与定量表达。

2.2 微震与电法耦合监测软件平台

微震与电法耦合监测系统软件平台负责微震电法数据的采集控制及分析处理。可通过网页端登录在线监测系统,软件需对应项目工程的用户名及密码,访问模式有管理模式及访客登录模式。登入系统后(图7),可进行工程建立和项目管理,获取井下设备的运行状态并进行远程置参,并在主界面配置监测项目工程的采集参数,包括起始及结束通道号、发射电压、供电时间、数据类型、采样频率、供电装置等,同时可通过设置微震信号触发阈值,在微震事件发生时同步进行电法发射,实现微震电法耦合同步监测。监测启动后,全时存储微震波形、自然电位波形、激励电流及其响应电位波形数据,并对其进行微震事件、电法事件提取和摘要显示,单场显示或多场同步显示(图8);自动实现微震事件P、S波初至预拾取、预定位及其震级预计计算与三维表达功能;测量电极自然电位实时

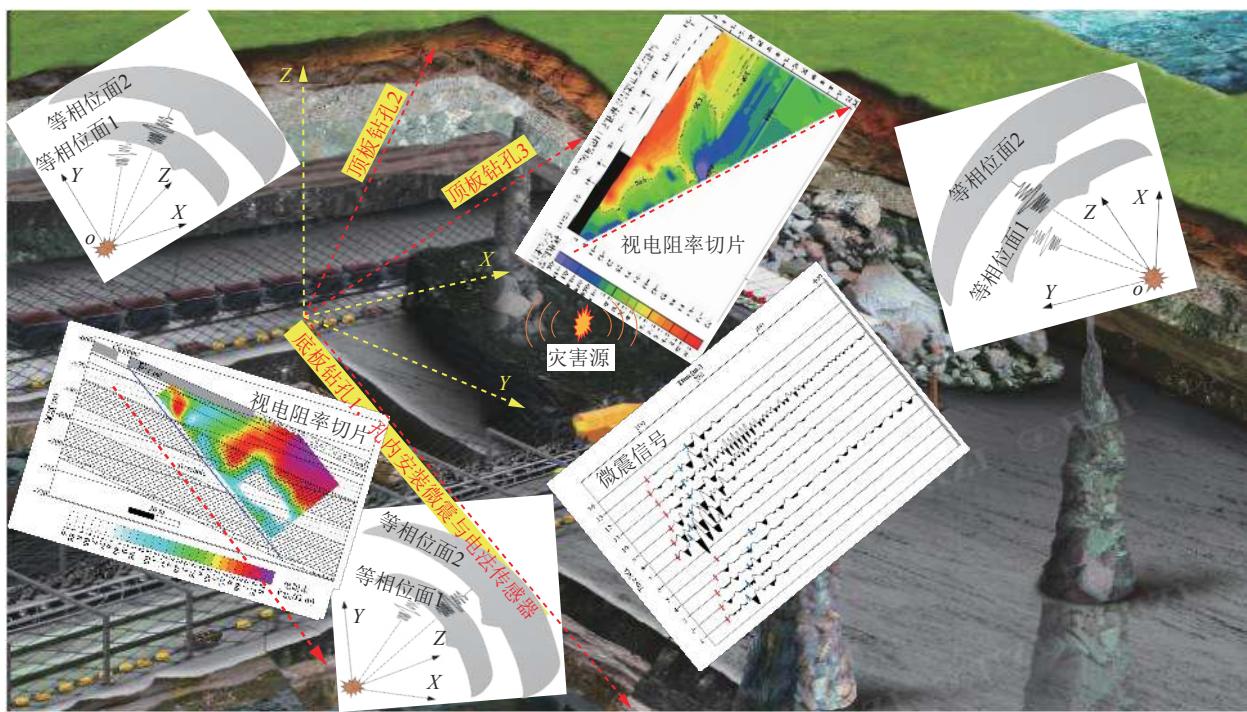


图 6 工作面微震与电法耦合数据采集示意

Fig.6 Diagram of data acquisition with microseismic and electrical coupling system



(a) 煤矿智能水害监测预警平台



(b) 监测系统主界面

图 7 微震与电法耦合监测系统预警平台与主界面

Fig.7 Early warning platform and main interface of microseismic and electrical coupling monitoring system

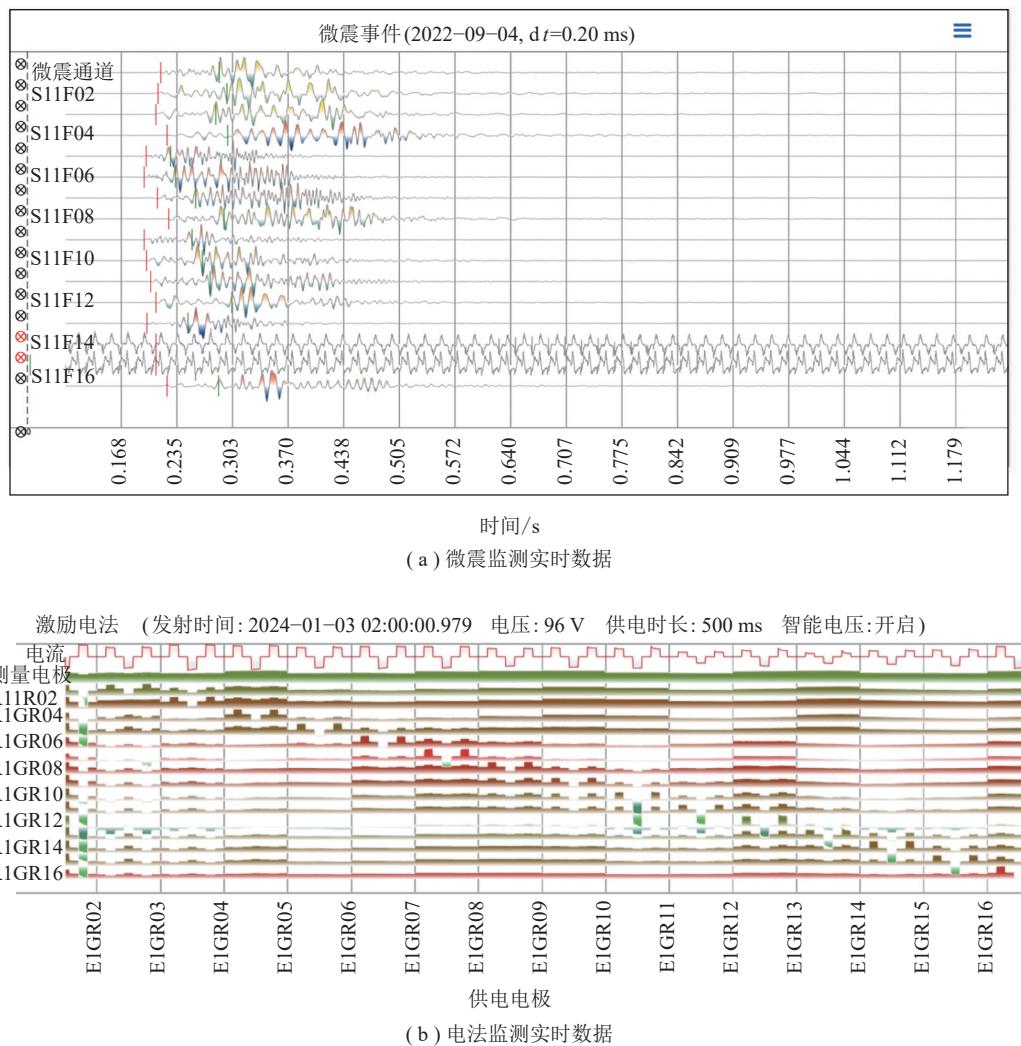


图8 微震与电法实时采集数据显示

Fig.8 Data collection in real time for microseismic and electrical coupling monitoring system

演化成图,供电电极电导率实时演化成图,每次供电后视电阻率自动成图等处理功能。

3 现场应用案例

3.1 顶底板采动破坏在线监测

3.1.1 地质概况

中煤某煤矿属深井厚松散层薄基岩下单翼开采,松散层厚度达600 m,110504工作面为二叠系下石盒子组5煤,煤层平均厚度6 m,控制采高4 m左右;5煤距顶板9煤顶砂岩含水层60 m,距顶板“四含”113~190 m,距底板灰岩含水层约110 m,开采煤层同时受顶板“四含”水和底板水威胁。工作面回采期间存在遇隐伏构造导通5煤顶、底板含水层向工作面充水的风险。因此,在110504工作面回采期间开展微震与电法耦合监测,对工作面回采期间顶、底板破坏深度及充水情况进行实时监测、综合分析、预警,防止

裂隙导通“四含”水和隐伏构造导通底板含水层出水,确保工作面安全回采。

3.1.2 观测系统

根据110504工作面实际情况,本次微震与电法监测系统共设计4个监测采集站,监测区域为110504工作面并外扩100 m范围内顶板120 m,底板110 m。监测平面范围、监测站位置及测线布置如图9所示,第1阶段同时进行1号站和2号站监测,完成后再进行第2阶段3号站和4号站监测,每个阶段均共布置32道微震传感器、96道电法测量电极、96道电法发射电极。

3.1.3 成果解释

2022-07-29—2023-07-27对110504工作面进行了微震与电法耦合监测。微震事件数总体为顶板事件多于底板事件,表明回采活动对顶板影响较大,表现出先上升后平缓的趋势,表明随回采顶底板破坏趋于平稳,2023-01-03回采停止后事件数逐渐减少,

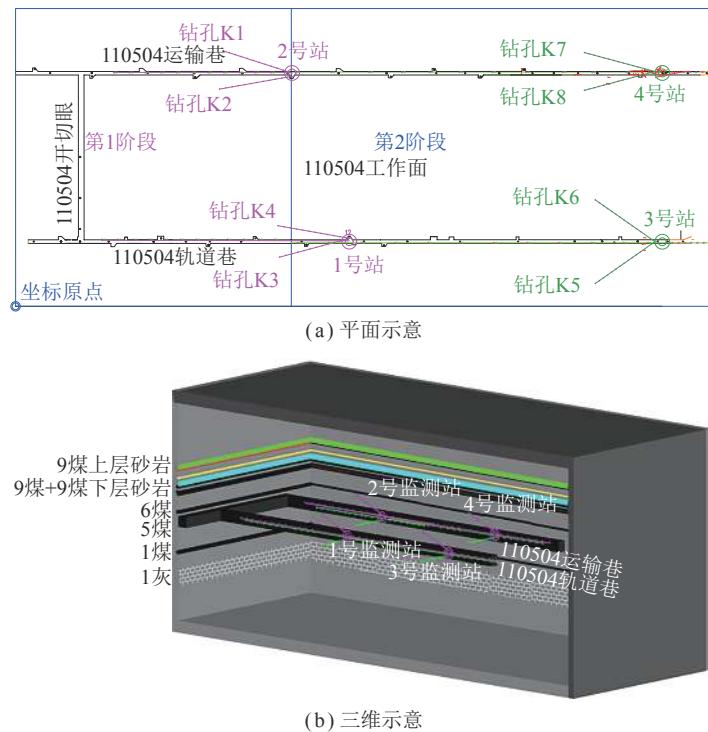


图 9 110504 工作面顶底板微震与电法耦合远程监测观测系统

Fig.9 Observing systems of remote monitoring with microseismic and electrical coupling in the roof and floor of 110504 working face

大部分微震事件发生在顶板 0~30 m, 注浆改造后顶板事件逐渐增多, 如图 10(a) 所示。根据微震事件发育高度变化趋势可看出, 工作面初采期间微震事件分布区域变化较大, 随着工作面正常推进, 至工作面见方顶板及底板微震事件分布范围趋于稳定, 主要集中在导水裂隙带发育范围及底板破坏带发育范围内, 2023 年 1 月回采趋于停采状态, 微震事件发生数量及分布的高度及深度均逐渐变小, 基本上与工作面覆岩受采动破坏影响变化规律相一致, 如图 10(b) 所示。电法监测结果表明, 在 9 煤顶板上层砂岩层位存在低阻异常区, 电阻率值均在 $15 \Omega \cdot m$ 以下, 与 0~70 m 层位连通性不强; 11 月 27 日到 12 月 6 日在井下 GD1 钻场注浆, 注浆结束后低阻区域的视电阻率逐渐上升为高阻区, 如图 10(c) 所示。综合回采期间微震事件及电阻率监测结果分析, 导水裂隙带高度为 70 m, 垮落带高度为 30 m 左右。

3.2 工作面底板陷落柱在线监测

3.2.1 地质概况

山能某煤矿 4316 工作面掘进范围内 3 煤层厚度 7.90~9.05 m, 平均煤层厚度 8.39 m, 该工作面与下部三灰含水层层间距平均为 48.96 m, 根据四采区三维地震勘探资料, 4316 工作面运输巷西邻发育一岩溶陷落柱, 2021 年通过定向钻孔探查, 推断该陷落柱实际长轴长约 68 m, 短轴长约 47 m, 在工作面回采过程中

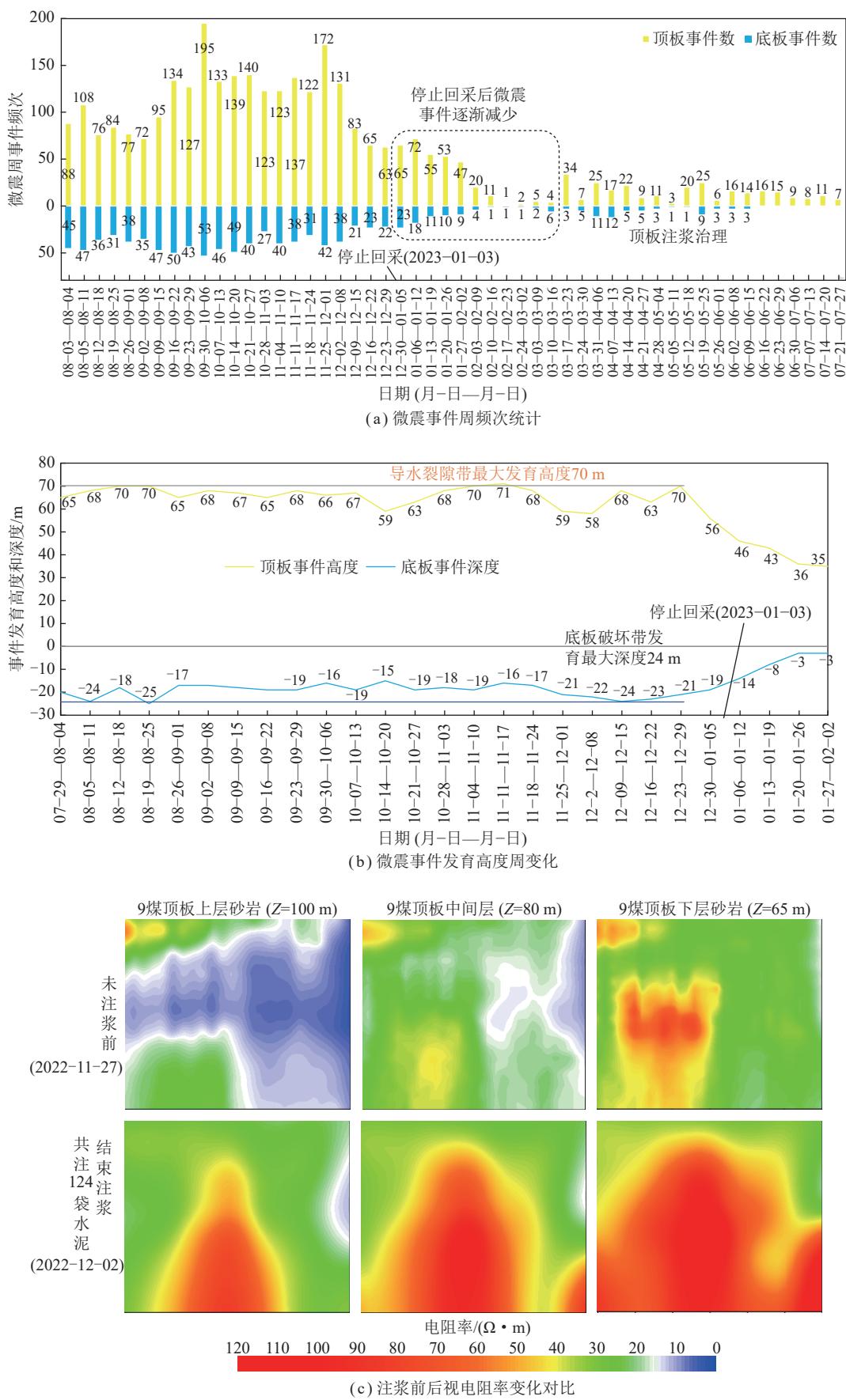
受采动影响, 陷落柱将可能导通下部灰岩水, 对矿井安全生产构成严重威胁, 为了保障工作面安全回采, 在回采过程对该工作面底板及陷落柱附近岩层进行微震与电法耦合动态实时监测。

3.2.2 观测系统

根据现场条件, 利用运输巷和联络巷开展微震与电法耦合远程监测。在运输巷底板布置电法监测大线和电极, 自开切眼口至联络巷交口, 测线长度共 660 m, 共布置 48 道电极 (每道电极含发射和接收电极), 电极间距 14 m。在运输巷和联络巷底板布置微震监测大线和传感器, 其中运输巷布置 13 个微震传感器, 自开切眼口往后 5 m 左右位置开始布置, 间距 54 m; 联络巷布置 3 个微震传感器, 间距 54 m, 共计 16 道微震传感器。微震与电法监测系统布置如图 11 所示。

3.2.3 成果解释

2022-12-20 开始对 4316 工作面底板进行了微震与电法耦合监测。图 12 为 4316 工作面底板陷落柱微震与电法耦合监测成果图 (红色虚线代表陷落柱边界), 选取 4 月 25 日与 5 月 22 日两次的电法监测数据及微震事件综合分析发现, 从开切眼靠近陷落柱边界 (2023-04-25) 到开切眼远离陷落柱边界 (2023-05-22) 的过程中, 视电阻率变化不大, 未出现低阻异常区, 微震事件主要存在于 4 煤及以上岩层, 距离 3 灰还有一定距离。综上分析认为, 随着回采进行, 工作面底板



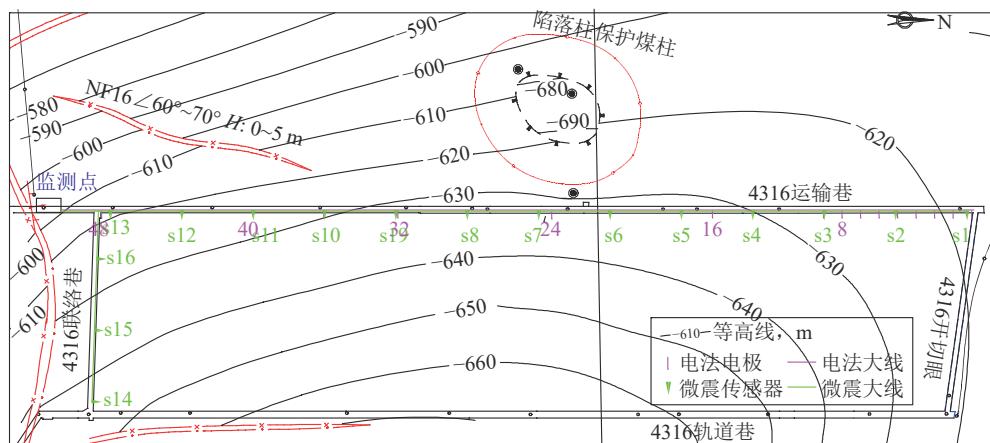


图 11 4316 工作面底板微震与电法耦合远程监测观测系统

Fig.11 Observing systems of remote monitoring with microseismic and electrical coupling system in the floor of 4316 working face

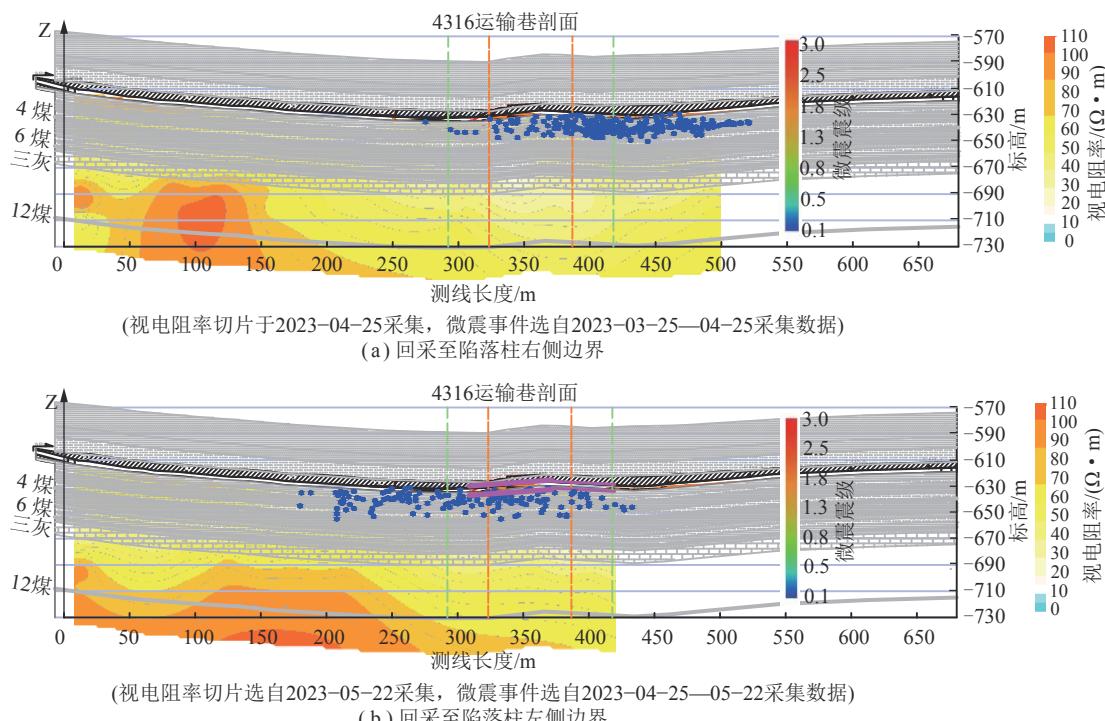


图 12 微震与电法耦合监测底板陷落柱成果

Fig.12 Results of monitoring the collapse column in the floor with microseismic and electrical coupling system

扰动破坏未诱发陷落柱活化导通底板灰岩水。截至2023-09-01 该工作面安全回采已接近尾声, 未出现灰岩水水害。

4 讨 论

4.1 微震与电法耦合监测数据采集

高质量获取井下微震与电法原始数据,是后续进行数据处理、分析及地质解释的基础(图13)。其关键在于以下3个方面:①高精度抗干扰信号采集单元研发。采用多场保真并行采集、大动态测量范围、自适应浮点增益、数字可编程前置放大和FPGA现场可编

程软核处理等硬件开发技术,实现复杂工况下高信噪比多地球物理场数据的获取,保障现场有效数据采集。
②传感器的选型与安装。对于微震检波器安装,需采用宽频高灵敏度的传感器以保证弱微震信号的接收,并采用孔中安装的方式以避免松动圈以及巷道噪声环境对信号的影响;对于电法电极安装,需将电极安装入相应顶底板的岩层中以避免煤层高阻屏蔽作用,另外利用黄泥等导电材料进行孔中电极的耦合,减少接地电阻影响,增强供电电流。
③电磁干扰剔除。井下环境噪声复杂且不可避免,目前多次叠加、正负正供电、小波分析等方法被广泛用于数据噪声剔除,但

效果不理想, 如何采用更为有效的方法剔除干扰噪声、获取高质量微震电法监测数据是未来亟待解决的难题。

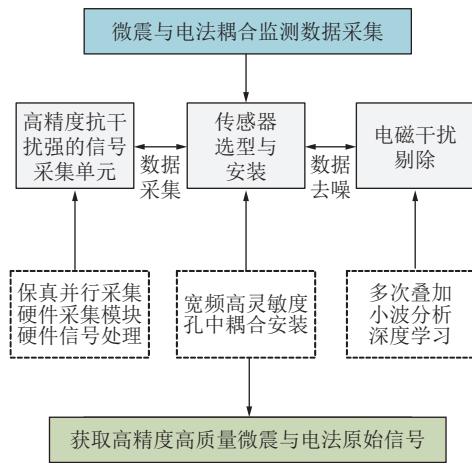


图 13 微震与电法耦合监测数据采集

Fig.13 Data acquisition of microseismic and electrical coupling monitoring

4.2 井下有限空间特殊观测系统数据处理

在井下巷道、钻孔有限空间范围内实现最优观测系统布置并对微震与电法采集数据进行准确解析, 是实现精准识别地质异常体的关键步骤(图 14)。① 不规则观测系统电法数据处理。不规则观测系统主要包括顶板/底板巷-孔、顶板/底板孔-孔、顶底板联合孔-孔以及围面等电极布设方式。不规则观测系统电法监测数据解析是一大难点, 包括如何定义视电阻率的空间几何坐标、实现不规则观测系统下视电阻率成图, 如何对不规则复杂观测系统下电法监测数据实现真实可靠的数据反演, 例如利用时移电阻率^[39,42]、全波形反演等方法进行数据反演等。② 微震事件定位优化。为有效接收煤层顶底板微震信号, 水害微震监

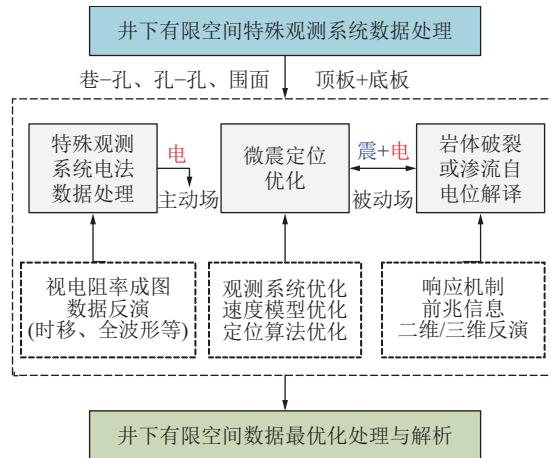


图 14 井下有限空间特殊观测系统数据处理

Fig.14 Data processing for the special observation system in underground limited space

测应避免在工作面回采巷道有限空间布置扁平化的观测系统, 优选回采巷道-顶底板深孔联合观测系统进行布置^[43]。与此同时, 利用已知工作面地层剖面构建精准层状速度模型、优化定位算法, 提高定位精度。③ 岩体破裂或渗流自然电位的超前解译。自然电位作为地电场中的被动场, 可与微震同步实时动态感知井下地质灾害孕育发生过程。目前现场自然电位采样频率已达 1 ms, 亟需从海量高频自然电位监测数据中提取有效的地质异常信息, 实现不规则观测系统下自然电位二维/三维反演, 精准辨识引起自然电位变化的主导因素(破裂或渗流), 获取岩体破裂及突水前兆信息并预警。

4.3 微震与电法监测系统智能预警平台

微震与电法监测系统智能预警平台是集地球物理勘探-监测多场数据的融合、解析及地质灾害智能预警平台(图 15)。其关键在于以下 3 个方面: ① 智能数据处理与分析。采用深度学习卷积神经网络、自监督学习等人工智能算法处理微震、电法监测数据。② 多场数据融合解译。微震与电法耦合监测目前已实现硬件的真正耦合, 但在微震与电法数据解释方面仍相对独立, 亟需厘清矿井水害孕育发生过程震波场、地电场与应力场、渗流场等多场耦合机理, 构建微震信号与地电参量的数学耦合模型, 以达到对地质灾害动态演化过程的同步耦合监测与解释。③ 智能监测预警。构建微震与电法监测数据库。依据大量现场实测案例, 捕捉矿井水害发生微震与电法响应规律及预警阈值, 融合目标矿区地质构造条件, 运用人工智能大数据、深度学习等算法, 实现对矿井水害的实时动态智能监测预警, 为我国智能化矿井建设提供技术支撑。

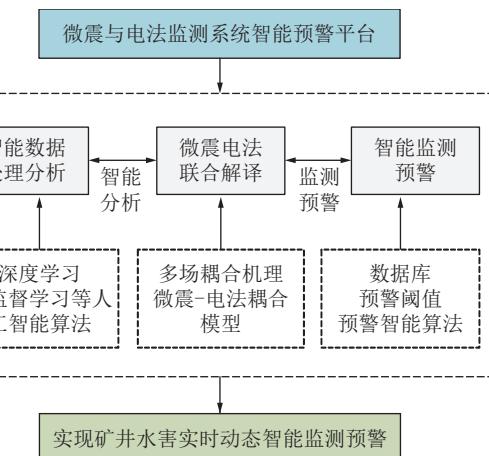


图 15 微震与电法监测系统智能预警平台

Fig.15 Intelligent early warning platform of microseismic and electrical monitoring system

5 结 论

(1) 微震与电法耦合监测技术是集被动源微震波场与主被动地电场的多场多参量地球物理实时动态监测技术。采用微震与电法耦合监测技术对矿井水害孕育发展过程进行全采掘过程监测预警, 可有效对采动破坏过程中岩体破裂位置分布、水渗流过程进行精准捕捉, 服务我国矿山水害智能监测预警。

(2) 研制的国内外首款煤安认证的微震与电法耦合并行监测系统, 突破传统微震与电法独立采集的局限, 实现了微震与地电场数据实时并行同步采集, 通过连接矿井物联网, 实现远程数据采集控制、传输、云端存储及数据处理, 已在煤矿顶底板破坏、陷落柱导水等实时动态监测预警方面得到应用。

(3) 微震与电法耦合监测技术未来仍需优化硬软件系统, 提高原始数据采集质量, 在微震事件智能识别与定位、地电场的电阻率三维反演以及自然电位渗流反演方面进行攻关; 同时结合并行监测的微震电法大数据集, 在震电数据联合反演、智能化监测预警方向开展深入研究, 建立矿井水害主动预警监测平台, 为我国智能化矿山建设提供技术支撑。

参考文献(References):

- [1] 王双明, 孙强, 乔军伟, 等. 论煤炭绿色开采的地质保障[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 8–15.
WANG Shuangming, SUN Qiang, QIAO Junwei, et al. Geological guarantee of coal green mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 8–15.
- [2] 袁亮, 张平松. 煤矿透明地质模型动态重构的关键技术与路径思考[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 1–14.
YUAN Liang, ZHANG Pingsong. Key technology and path thinking of dynamic reconstruction of mine transparent geological model[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 1–14.
- [3] 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 Guofa, ZHANG Liang, LI Shoubin, et al. Progresses in theory and technological development of unmanned smart mining system[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 34–53.
- [4] 袁亮. 煤炭精准开采科学构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 1–7.
YUAN Liang. Scientific conception of precision coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 1–7.
- [5] 靳德武, 段建华, 李连崇, 等. 基于微震的底板采动裂隙扩展及导水通道识别技术研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(4): 962–971.
JIN Dewu, DUAN Jianhua, LI Lianchong, et al. Microseismicity based research for mining induced fracture propagation and water path way identification technology of floor[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(4): 962–971.
- [6] 李楠, 王恩元, GE Maochen. 微震监测技术及其在煤矿的应用现状与展望[J]. 煤炭学报, 2017, 42(S1): 83–96.
LI Nan, WANG Enyuan, GE Maochen. Microseismic monitoring technique and its applications at coal mines: present status and future prospects[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1): 83–96.
- [7] 姜福兴, 叶根喜, 王存文, 等. 高精度微震监测技术在煤矿突水监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1932–1938.
JIANG Fuxing, YE Genxi, WANG Cunwen, et al. Application of high-precision microseismic monitoring technique to water inrush monitoring in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1932–1938.
- [8] 姜福兴, 刘伟建, 叶根喜, 等. 构造活化的微震监测与数值模拟耦合研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 3590–3597.
JIANG Fuxing, LIU Weijian, YE Genxi, et al. Coupling study of micro-seismic monitoring and numerical simulation for tectonic activation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 3590–3597.
- [9] 窦林名, 何江, 巩思园, 等. 采空区突水动力灾害的微震监测案例研究[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(1): 20–25.
DOU Linming, HE Jiang, GONG Siyuan, et al. A case study of microseismic monitoring: Goaf water-inrush dynamic hazards[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2012, 41(1): 20–25.
- [10] 王红梅, 董书宁, 王鹏翔, 等. 复杂地质条件下煤矿地下水监测预警技术[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42(3): 501–511.
WANG Hongmei, DONG Shuning, WANG Pengxiang, et al. Monitoring and early-warning of water disaster in coal mine with complex geological conditions[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(3): 501–511.
- [11] 余国锋. 基于微震和神经网络的煤层底板突水预警技术研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022: 1–10.
YU Guofeng. Research on early warning methods of water inrush from coal seam floor strata based on microseismic and neural network technologies[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2022: 1–10.
- [12] 侯恩科, 范继超, 谢晓深, 等. 基于微震监测的深埋煤层顶板导水裂隙带发育特征[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(5): 89–96.
HOU Enke, FAN Jichao, XIE Xiaoshen, et al. Development characteristics of water-conducting fractured zone in deep coal seam based on microseismic monitoring[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(5): 89–96.
- [13] 连会青, 杨艺, 杨松霖, 等. 基于微震监测技术的煤矿顶板水害预测[J]. 煤矿安全, 2023, 54(5): 49–55.
LIAN Huiqing, YANG Yi, YANG Songlin, et al. Prediction of coal mine roof water damage based on microseismic monitoring technology[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(5): 49–55.
- [14] 程关文. 煤矿突水的微破裂前兆信息微震监测技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017: 7–10.
CHENG Guanwen. Study on microseismic monitoring technique for micro-fracture precursor information of water inrush[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017: 7–10.
- [15] 查华胜, 张海江, 连会青, 等. 潘二煤矿 A 组煤层底板灰岩水害微震监测[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 3001–3014.

- ZHA Huasheng, ZHANG Haijiang, LIAN Huiqing, et al. Microseismic monitoring on limestone water inrush at coal seam floor for group A coal layer of Pan'er Coal Mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(8): 3001–3014.
- [16] 方恩才, 余国锋, 赵一鸣. 张集煤矿厚煤层工作面底板灰岩突水监测预报研究[J]. *煤炭科技*, 2022, 43(4): 116–121.
- FANG Encai, YU Guofeng, ZHAO Yiming. Floor limestone water inrush disaster monitoring and forecasting in high mining face of Zhangji Coal Mine[J]. *Coal Science & Technology Magazine*, 2022, 43(4): 116–121.
- [17] 刘盛东, 王勃, 周冠群, 等. 基于地下水渗流中地电场响应的矿井水害预警试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(2): 267–272.
- LIU Shengdong, WANG Bo, ZHOU Guanqun, et al. Experimental research on mine floor water hazard early warning based on response of geoelectric field groundwater seepage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(2): 267–272.
- [18] 刘静, 刘盛东, 曹煜, 等. 地下水渗流与地电场参数响应的定量研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(5): 986–993.
- LIU Jing, LIU Shengdong, CAO Yu, et al. Quantitative study of geoelectrical parameter response to groundwater seepage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(5): 986–993.
- [19] 张平松, 许时昂, 郭立全, 等. 采场围岩变形与破坏监测技术研究进展及展望[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(3): 14–35.
- ZHANG Pingsong, XU Shiang, GUO Liquan, et al. Prospect and progress of deformation and failure monitoring technology of surrounding rock in stope[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(3): 14–35.
- [20] 王勃, 刘盛东, 张朋. 采用网络并行电法仪进行煤矿底板动态监测[J]. *中国煤炭地质*, 2009, 21(3): 53–57.
- WANG Bo, LIU Shengdong, ZHANG Peng. Application of network parallel electrical instrument on dynamic coal floor monitoring[J]. *Coal Geology of China*, 2009, 21(3): 53–57.
- [21] 刘树才, 刘鑫明, 姜志海, 等. 煤层底板导水裂隙演化规律的电法探测研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(2): 348–356.
- LIU Shucai, LIU Xinxing, JIANG Zhihai, et al. Research on electrical prediction for evaluating water conducting fracture zones in coal seam floor[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(2): 348–356.
- [22] 刘盛东, 吴荣新, 张平松, 等. 高密度电阻率法观测煤层上覆岩层破坏[J]. *煤炭科学技术*, 2001, 29(4): 18–19, 22.
- LIU Shendong, WU Rongxin, ZHANG Pingsong, et al. High density electric resistance method applied to monitor and measure overburden failure above seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2001, 29(4): 18–19, 22.
- [23] 杨海平, 刘盛东, 杨彩, 等. 煤层顶底板采动破坏同步动态监测电性特征分析[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(4): 1002–1009.
- YANG Haiping, LIU Shengdong, YANG Cai, et al. Analysis of electrical characteristics of mining destruction on coal seam roof and floor with simultaneous dynamic monitoring method[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(4): 1002–1009.
- [24] 刘军. 煤层开采过程中断层活化机理与监测技术研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018: 1–4.
- LIU Jun. Research on fault activation mechanism and monitoring technology in coal seam mining process[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018: 1–4.
- [25] 王冰纯, 李德山. 电法监测系统对导水陷落柱随采动态变化情况的应用[C] // 2020年中国地球科学联合学术年会论文集. 2020: 2998–2999.
- [26] 姜春露, 姜振泉, 刘盛东, 等. 多孔岩石化学注浆过程中视电阻率变化试验[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(10): 4202–4207.
- JIANG Chunlu, JIANG Zhenquan, LIU Shengdong, et al. Experiment on apparent resistivity changes in porous rock chemical grouting process[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(10): 4202–4207.
- [27] 国家煤矿安全监察局. 煤矿防治水细则[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2018: 1–5.
- [28] 靳德武, 赵春虎, 段建华, 等. 煤层底板水害三维监测与智能预警系统研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6): 2256–2264.
- JIN Dewu, ZHAO Chunhu, DUAN Jianhua, et al. Research on 3D monitoring and intelligent early warning system for water hazard of coal seam floor[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 2256–2264.
- [29] 乔伟, 靳德武, 王皓, 等. 基于云服务的煤矿水害监测大数据智能预警平台构建[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(7): 2619–2627.
- QIAO Wei, JIN Dewu, WANG Hao, et al. Development of big data intelligent early warning platform for coal mine water hazard monitoring based on cloud service[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(7): 2619–2627.
- [30] 刘盛东, 张平松. 分布式并行智能电极电位差信号采集方法[P]. 中国专利: ZL200410014020.0, 2006-07-26.
- [31] 刘建功, 噬晓宇, 李玉宝, 等. 矿井水害微震监测预警理论与技术研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2016: 1–7.
- [32] 杨彩. 煤岩体电性时频特征研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017: 49–58.
- YANG Cai. Electrical time-frequency characteristics research of coal-rock mass[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017: 49–58.
- [33] 杨天鸿, 唐春安, 谭志宏, 等. 岩体破坏突水模型研究现状及突水预测预报研究发展趋势[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(2): 268–277.
- YANG Tianhong, TANG Chun'an, TAN Zhihong, et al. State of the art of inrush models in rock mass failure and developing trend for prediction and forecast of groundwater inrush[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(2): 268–277.
- [34] MA K, SUN X Y, TANG C A, et al. Floor water inrush analysis based on mechanical failure characters and microseismic monitoring[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 108(1): 103698.
- [35] 许延春, 黄磊. 基于微震监测的工作面底板突水全时空预警方法

- [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 369–382.
XU Yanchun, HUANG Lei. Full-time and space early-warning method for floor water inrush in working face based on microseismic monitoring[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 369–382.
- [36] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京: 北京地质出版社, 2005: 136–148.
- [37] 于师建, 程久龙, 王玉和. 覆岩破坏视电阻率变化特征研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(5): 457–460.
YU Shijian, CHENG Jiulong, WANG Yuhe. The study on apparent resistivity change feature of overlying strata[J]. *Journal of China Coal Society*, 1999, 24(5): 457–460.
- [38] 刘盛东, 杨彩, 赵立瑰. 含水层渗流突变过程地电场响应的物理模拟[J]. 煤炭学报, 2011, 36(5): 772–777.
LIU Shengdong, YANG Cai, ZHAO Ligui. Physical simulation research on response to geoelectricity of the aquifer in seepage mutation process[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(5): 772–777.
- [39] YANG Cai, LIU Shengdong, LIU Jing, et al. Characteristics of self-potential of coal samples under uniaxial compression[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2019, 168: 1–11.
- [40] 鲁晶津, 王冰纯, 颜羽. 矿井电法在煤层采动破坏和水害监测中的应用进展[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 18–26.
LU Jingjin, WANG Bingchun, YAN Yu. Advances of mine electrical resistivity method applied in coal seam mining destruction and water inrush monitoring[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(3): 18–26.
- [41] 吴荣新, 曹建富. 工作面覆岩破坏双孔并行电法数据多方法处理[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2020, 40(4): 1–7, 12.
WU Rongxin, CAO Jianfu. Multi-method processing and interpretation of monitoring data of double hole parallel electrical method for overburden damage in coal face[J]. *Journal of Anhui University of Science and Technology(Natural Science)*, 2020, 40(4): 1–7, 12.
- [42] YANG Haiping, LIU Shengdong, YANG Cai. Dynamic monitoring of mining destruction on coal seam floor with constrained time-lapse resistivity imaging inversion[J]. *IEEE ACCESS*, 2022, 10: 84799–84808.
- [43] 程久龙, 宋广东, 刘统玉, 等. 煤矿井下微震震源高精度定位研究[J]. 地球物理学报, 2016, 59(12): 4513–4520.
CHENG Jiulong, SONG Guangdong, LIU Tongyu, et al. High precision location of micro-seismic sources in underground coal mine[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(12): 4513–4520.