

文章编号: 1001-1986(2020)04-0019-10

煤层底板突水综合监测技术及其应用

段建华

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 底板岩溶水害是华北型煤田较为普遍存在的问题, 因其具有隐蔽性、突发性的特点, 防治水工作面临巨大的问题和挑战, 因此, 底板突水监测预警已成为煤矿安全生产过程中的必要措施。底板水害的形成和发生都有一个从孕育、发展到发生的演变过程, 在此过程的不同阶段, 底板裂隙、岩层视电阻率等均会释放出对应的突水征兆, 及时、准确、有效地采集这些信息, 根据这些信息判别突水过程中的具体水文地质特征, 为建立突水监测系统奠定了基础。根据突水三要素, 在葛泉煤矿东井 11916 工作面, 利用井-地-孔微震监测技术和视电阻率监测技术构建了底板突水综合监测系统, 对引起突水的导水通道和水源 2 个要素进行实时监测。监测结果表明: 正常情况下, 11916 工作面回采过程中底板破坏深度为 20~25 m, 但是在 2019 年 9 月 14 日工作面推进到中间巷道时, 运料巷和中间巷来自顶板的压力对底板破坏的叠加作用, 以及附近的陷落柱原有破裂, 致使该位置底板破坏深度加大, 达到 30~35 m, 底板本溪灰岩水通过导水通道进入运料巷, 底板出水 2 m³/h, 从视电阻率监测结果中不难发现 1 个低阻异常体从底板下逐步向上发育的过程。利用井-地-孔微震监测技术和视电阻率监测技术构建的底板突水综合监测系统能够捕捉到底板突水征兆, 对于预测重特大水害事故的发生具有重要意义和实用价值。

关键词: 底板突水; 微震监测技术; 视电阻率监测技术; 葛泉煤矿

中图分类号: TD166 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2020.04.003



移动阅读

Integrated monitoring technology of water inrush from coal seam floor and its application

DUAN Jianhua

(Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

Abstract: Karst water damage in floor is a common problem in North China type coalfield. Because of its characteristics of concealment and emergency, the prevention and control of water is faced with huge problems and challenges, monitoring and early warning technology of floor water inrush has become a necessary measure in the process of the safe production in coal mines. The formation and occurrence of floor water disaster have a process of evolution from conception, development to occurrence. In this process, the corresponding water inrush symptoms will be released in different stages of the floor crack and apparent resistivity of the rock layer. Timely, accurate and effective collection of these information and the specific hydrogeological characteristics in the process of water inrush can be distinguished according to these information. It laid a foundation for the establishment of water inrush monitoring system. According to the three factors of water inrush, an integrated monitoring system of water inrush from the floor is built in the working face 11916 of the east shaft of Gequan mine by using the technology of well ground hole microseismic monitoring and apparent resistivity monitoring. In order to provide a scientific basis for the prediction of water inrush from the floor, the real-time monitoring of the water channel and the water source are carried out. The monitoring results show that under normal conditions, the depth of floor damage in working face 11916 is 20~25 m. However, when the working face was pushed to the middle roadway on September 14, 2019,

收稿日期: 2020-05-20; 修回日期: 2020-07-03

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC0804103); 中煤科工集团科技创新基金项目(2017MS007)

Foundation item: National Key R&D Program of China(2017YFC0804103); Science and Technology Innovation Fund of CCTEG(2017MS007)

作者简介: 段建华, 1979 年生, 男, 山西五台人, 博士, 副研究员, 从事煤矿微震监测技术研究工作. E-mail: duanjianhua@cctegxian.com

引用格式: 段建华. 煤层底板突水综合监测技术及其应用[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(4): 19-28.

DUAN Jianhua. Integrated monitoring technology of water inrush from coal seam floor and its application[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(4): 19-28.

the superposition effect of the pressure of the haulage roadway and the middle roadway on the floor damage resulted in the increase of the floor damage depth at this location, reaching 30–35 m. The limestone water from Benxi bottom slab entered into the material conveying roadway through the water diversion channel, and the water output from the bottom slab of the working face is $2 \text{ m}^3/\text{h}$. In addition, from the apparent resistivity monitoring results, we can see the development process of a low resistivity abnormal body from the bottom to the top. The research shows that the integrated monitoring system of water inrush from the bottom slab, constructed by using well ground hole microseismic monitoring technology and apparent resistivity monitoring technology, can capture the signs of water inrush from the bottom slab. It is of great significance and practical value to predict the occurrence of serious and serious water disasters.

Keywords: water inrush from floor; microseismic monitoring; apparent resistivity monitoring; Gequan coal mine

华北型煤田普遍存在岩溶水侵袭的问题,近年来,随着煤矿开采深度的不断增加,岩溶水对矿井的威胁日益突出^[1]。常规的底板水害防治方法主要集中在采区或者工作面致灾因素探查和底板注浆改造,这些工作一般在工作面回采前已经完成,但是,根据大量统计结果,底板水害往往是在工作面回采过程中发生的^[2]。工作面回采过程中发生的底板水害,实际上是地下采矿活动使得围岩在采动应力诱发作用下处于峰后应力状态或者破碎状态极大地改变了围岩的孔隙结构和渗透性,导致隔水层的隔水能力降低,在承压水水压的作用下发生突水^[3-6],其作用机理复杂^[7],加之地质条件复杂,突水影响因素较多,常规的物探和钻探手段很难客观地反映底板突水通道的形成和演化过程以及工作面回采过程中底板承压水的导升变化特征。

武强^[8]提出在采动条件下,矿井水害的形成和发生都有一个从孕育、发展到发生的演变过程,在这一过程的不同阶段,应力应变、水压(水位)、水温、涌水量等方面均会释放出对应的突(透)水征兆,及时、准确、有效地监测这些征兆信息,建立一个集矿井水害监测、辨识和预警技术于一体的完整体系,对于预防重特大水害事故的发生具有重要的理论意义和实用价值。杨天鸿等^[9]提出“突水三要素为:① 水源(含水层)、② 导水通道(断层、陷落柱、破碎带)、③ 采矿扰动因素,3 个要素缺一不可”的观点。煤矿底板突水本质上就是以含水层为突水水源,以破碎裂隙带为导水通道,采矿扰动为影响因素,3 个要素共同作用的结果^[9]。水源即为含水层的赋水性以及不同含水层水温、水质的不同,是煤矿水害形成最关键的要素之一^[10],对水源的监测手段主要有并行电法^[11]、电阻率法^[12]、水温或水压^[13-14]监测等,在孔中或者孔巷测试,一般采用视电阻率断面图或电阻率反演成像,对矿井电法监测数据进行处理解释,解释结果多数局限于二维^[15],鲁晶津^[12]研究了三维电阻率反演成像技术,并且取得了不错的效果。虎维岳等^[10]提出导水通道的过水能力与

断面尺寸是影响水害严重程度的主要因素。断层、陷落柱等一般采用常规物探手段基本可以探查清楚^[16],但是破碎带往往是在采动应力作用引起的二次或多次破碎下不断调整形成的^[9],因此,需要对其进行长期监测。对底板破碎带监测的主要手段有微震监测技术^[17]、网络并行电法^[18]、应力应变监测^[19],网络并行电法、应力应变监测都是通过视电阻率、应变等物理量的变化间接推断破碎带的位置,而微震监测技术则是直接测量破裂带的空间位置。

鉴于此,本文根据“下三带”理论^[20-22]和导升进理论^[23-25],以葛泉矿东井 11916 工作面为背景,采用“井-地-孔”微震监测技术和视电阻率监测技术,构建底板水害综合监测系统,于 2019 年在工作面回采过程中开展水害监测。

1 “井-地-孔”微震监测技术

微震监测技术是利用布置在测区周围的传感器接收微地震信号,根据传感器坐标求取震源位置、震源机制等参数,近实时地获得裂缝空间展布特征的地球物理监测方法^[26]。在矿山开采领域,微震监测最早被用于研究冲击地压和矿震等问题,随着仪器制造技术的进步和定位精度的提高,逐步被用于监测煤矿导水通道形成和活化,为煤矿水害防治服务^[27]。姜福兴等^[28]、程文关等^[29]等利用微震监测技术开展了底板和顶板导水裂隙监测的研究,效果良好。该技术具有实时、连续监测的优点,是描述导水通道孕育、发展到最终失稳过程的有效技术手段^[28]。震源参数三要素之中,震源平面位置、发震时刻和震级的计算精度较高,而震源深度的定位误差相对较大^[30-32]，“井下-地面-孔中”联合微震监测技术(简称:“井-地-孔”微震监测技术)是对传统微震监测技术的创新,该技术通过在井下巷道、地面、地面孔中或井下孔中同时布置传感器,对破裂点进行全方位立体监测,能够大幅提高震源深度定位精度。

“井-地-孔”联合微震监测技术定位原理如

图1所示, S 和 T_i 分别表示微震源和第 i 个传感器, 其中, (x_0, y_0, z_0) 和 (x_i, y_i, z_i) 分别表示震源和第 i 个传感器的坐标, t_0 和 t_i 分别表示震源发震时间和第 i 个传感器震动波初至时, 假设震动波的传播速度为 v , 可以建立由 n 个式(1)组成的方程组, 解方程组即可获得震源的位置 (x_0, y_0, z_0) 和发震时间 t_0 。

$$\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} = v(t_i - t_0) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

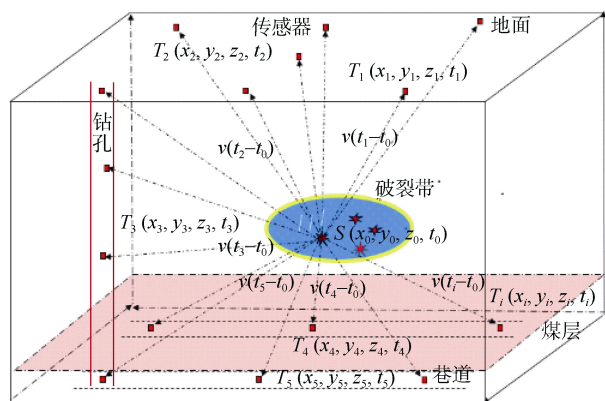


图1 “井-地-孔”微震监测定位原理

Fig.1 Positioning principle of “well-ground-hole” microseismic monitoring

从其定位原理可以看出, 只需要有4个传感器接收到震动波就可以对其进行定位, “井-地-孔”微震监测技术由于数据采集点可以对震源形成包围, 监测数据更为丰富, 定位精度可以达到5 m, 能够满足防治水的要求, 可以更好地对导水裂隙带进行实时监测和准确定位。

“井-地-孔”微震监测系统由地面监测分站、地面传感器、地面服务器、井下监测分站、巷道传感器、孔中传感器、通信分站、数据传输、配套的数据采集与处理软件等组成, 地面的无线传输设备与井下的光纤环网组成数据传输网络。其工作原理为: 传感器负责采集震动信号, 并将其传输到监测分站; 监测分站将震动信号数字化, 并将其传输到通信分站; 通信分站将数字信号通过数据传输网络传输到服务器, 由服务器的数据采集与处理软件进行定位和分析。

一般监测底板破坏^[33]时需要在井下巷道和孔中布置传感器, 监测顶板裂隙时需要在地面、井下巷道、地面孔中布置传感器。

2 视电阻率监测技术

电法监测在矿山领域的应用始于岩体破裂失稳过程的电阻率监测矿井电法^[34], 随着应用领域的扩展, 逐步被应用于井下探测煤层底板隔水层厚度和

底板水导升高度^[35], 取得了良好的效果。网络并行电法仪等工作面采动破坏监测设备研制成功^[36]和井下监测试验的陆续开展^[37-38], 为井下电法监测仪器的长远发展积累了丰富的经验。

回采工作面视电阻率监测系统是专门用于监测煤矿顶底板裂隙带是否与含水层导通的仪器。工作原理如图2所示, 在工作面2侧巷道顶板或者底板布置电极, 一侧发射人工激发的电场, 另一侧接收, 2侧巷道全部接收和发射完成后, 利用拟高斯-牛顿法对接收的数据进行全空间三维视电阻率反演, 反演数据体为顶底板岩层中每个5 m×5 m×5 m网格的视电阻率值, 利用多次监测结果, 分析顶底板视电阻率的异常变化, 并且对破坏裂隙的导水性进行判别, 实现工作面水害风险的动态评估和预警。

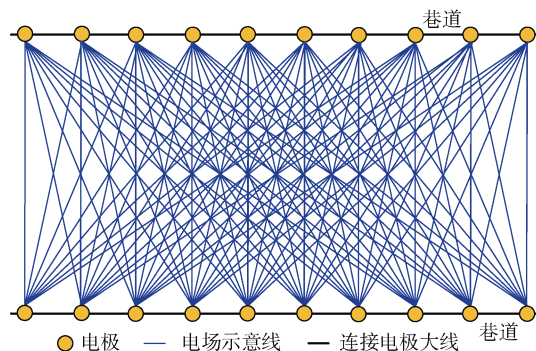


图2 采煤工作面视电阻率监测原理

Fig.2 Monitoring principle of apparent resistivity in mining face

回采工作面视电阻率监测系统由地面服务器、通信分站、监测分站、数据传输电缆、电极、配套的数据采集与处理软件等组成^[39]。

3 葛泉矿东井概况

冀中能源股份有限公司葛泉矿东井设计生产能力为90万t/a, 可采煤层为9号煤(底板标高为-128 m), 工作面布置采用走向长壁以及倾向长壁方式, 综合机械化开采, 11916工作面设计走向长度约1080 m, 倾向宽度约70 m, 煤层呈单斜构造, 倾角7°~21°, 平均厚度5.5 m, 两巷高差约20 m, 11916运料巷西北侧是11915工作面采空区, 如图3所示, 工作面底板至本溪灰岩间距平均约20.3 m(图4)。隔水层岩层结构以铝土质粉砂岩、中细粒砂岩、粉砂岩为主, 阻水性能中等。工作面底板至奥陶系灰岩含水层的隔水岩层厚度为36.0~43.6 m, 平均41.1 m。隔水层岩性组合以粉砂岩、细砂岩、中细砂岩、灰岩和铝土质粉砂岩为主, 其中, 粉砂岩、细砂岩占总厚度的47.5%左右; 可塑性比较强的铝土质软岩类厚度

占总厚度的 32.7%左右,本溪灰岩厚度约占总厚度的 19.8%。这种软硬相间且具有一定厚度的隔水层结构在未受构造破坏的情况下,具有较好的阻水性能。赋水性中等、厚度较薄的本溪组岩溶裂隙含水层(简称“本灰”)以及赋水性好、巨厚层状奥陶系岩溶

裂隙含水层(简称“奥灰”)是工作面的主要含水层,其中奥灰岩溶水是矿井主要水害防治对象。9 号煤底板隔水层将承受 1.71~2.21 MPa 的奥灰水压,计算出该工作面突水系数为 0.047~0.061 MPa/m,工作面存在底板岩溶突水威胁。

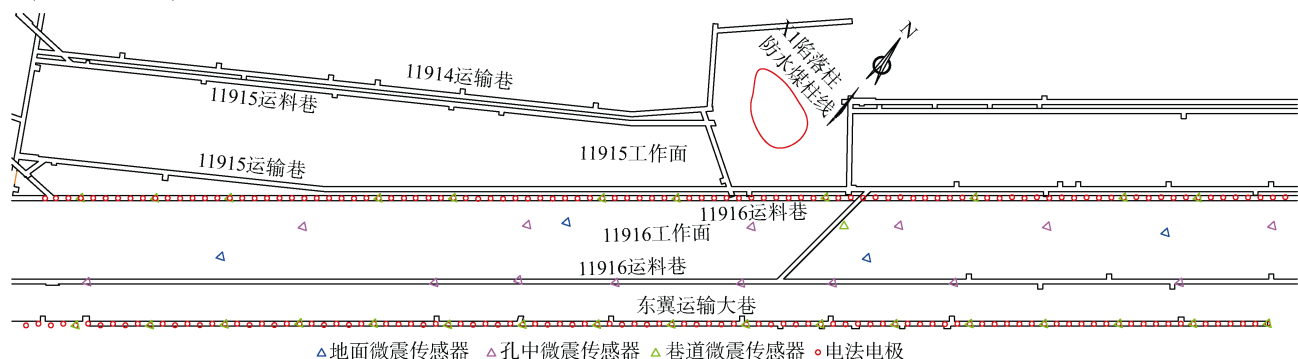


图 3 微震与电阻率传感器布置

Fig.3 Layout of microseismic and resistivity sensors

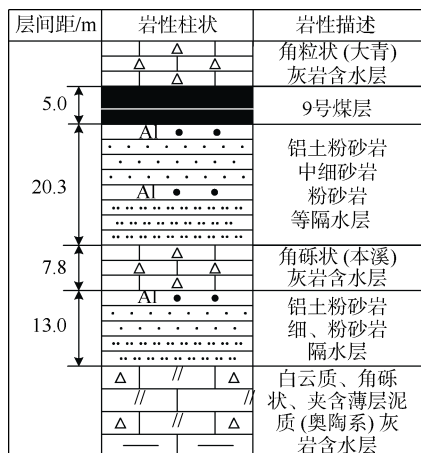


图 4 9 号煤层底板水文地质综合柱状示意图

Fig.4 Hydrogeological comprehensive columnar diagram of No.9 coal seam floor

工作面前期已经实施了底板本灰含水层注浆加固工程,由于 11913 工作面在回采过程中发生了突水,后期又对本工作面的奥灰含水层进行了加固,2 次加固共施工钻孔 52 000 m,注浆用水泥 92 000 t,整个注浆工程的直接投入为: 52 000 m×300 元/m+92 000 t×320 元/t=4 320 万元,但是底板倾角大,隔水层厚度变化大,而且在工作面运料巷西北侧存在直径超过 50 m 的陷落柱,经打钻验证陷落柱含水,虽然陷落柱已经过注浆改造,但是仍然存在突水风险,因此,本文利用井-地-孔微震、视电阻率监测技术建立综合突水监测系统,分别对导(突)水通道、水源进行监测,本次综合突水监测系统投入为 260 万元,设备费为 180 万元,耗材为 80 万元,其中设备可以重复使用,考虑到设备折旧,本工作整个监测系统实际投入按照(180 万元×1/5+80 万元)116 万元计算,该费用为注浆工程费用的 2.6%,大大降低

人员和财产损失。

4 底板水害综合监测技术方案

4.1 微震测点布置

11916 工作面附近共有 3 个巷道可以布置传感器,本次选择将传感器布置在东翼运输巷和工作面运料巷,东翼运输巷在工作面回采期间不会垮塌,在回采后便于保护传感器及其电缆的完整性,可以更好监测工作面采空区底板的破裂情况。井下共布置拾震传感器 41 个,其中巷道内布置 28 个,道距 50 m;孔中布置 13 个,道距 50~100 m,布置传感器的孔垂深 25 m,倾角 45°;地面一共布置 4 个传感器,道距 250 m,具体测点布置如图 3 所示。

4.2 视电阻率测点布置

为了更好地监测 11916 工作面采空区底板视电阻率及其变化,将电极布置在运料巷和东翼运输巷,2 个巷道各布置 101 个电极,电极间距为 10 m,2 个巷道的无穷远电极分别布置在距离停采线 1 500 m 的位置。电极埋置方式如图 5 所示,在巷道底板靠近外帮处打孔,孔深 1.5 m,倾角 45°,把锚杆放入孔中,用黄泥封孔,锚杆尾部连接监测电缆。

工作面监测长度为 1 000 m,而采煤扰动对底板破坏的范围有限,无需对整个工作面 1 000 m 范围同时进行监测,因此,采用滚动监测方式。考虑到底板视电阻率的强弱对比,单次监测须覆盖 200 m 范围,随着工作面的推进,监测电极逐步向推进方向移动,电极的移动通过地面数据采集软件设置即可,无需在井下进行人工干预。

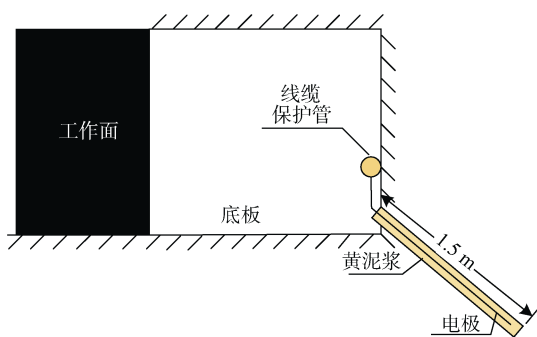


图5 电极安装示意

Fig.5 Schematic diagram of electrode installation

数据采集过程,采用单极发射-偶极接收方式,首先,运料巷的1号电极发射,东翼运输巷的1~21号电极依次接收,每次都利用最小二乘法和小波分析技术对接收的信号进行数据预处理;接着,运料巷的2号电极发射,东翼运输巷的1~21号电极依次接收,直到运料巷21个电极全部发射完成;然后,东翼运输巷的1号电极发射,运料巷的1~21号电极依次接收,直到东翼运输巷的21个电极全部发射完成;最后,自动反演软件采用拟高斯-牛顿法对预处理后的数据进行全空间三维电阻率反演,并根据预先设置的参数对三维数据体进行二维切片、三维异常体提取和立体成像等操作,从而实现了对底板岩层富水性变化过程的实时动态成像。其中电极的切换与数据的采集由数据采集软件自动完成,不需要人工干预。

5 监测结果及分析

5.1 微震监测系统定位精度标定

为了提高震源定位精度,在实施监测前需要测量地震波在岩层中的传播速度,本次试验利用标定炮的方法进行测量,即把起爆位置当成一个已知的点震源,进行反演分析,从而获得地震波的传播速度,并且可以利用标定炮对定位精度进行检验。根据标定炮测得葛泉矿东井11916工作面底板围岩破裂产生纵波的介质传播速度为3100 m/s。

采用平均波速3100 m/s计算,微震定位结果为:(9 507.467,1 625.886,303.878),实际放炮震源坐标为(9 514.527,1 627.926,305.198),误差分别为 $\Delta x=7.06$ m, $\Delta y=2.04$ m, $\Delta z=1.32$ m,平均误差为3.473 m,11916工作面隔水层平均厚度为41.1 m,定位误差小于隔水层厚度的1/10,能够满足监测需要。

5.2 底板水害综合微震监测结果

开展为期6个月的微震监测,共监测到微震事件8381个,其中发生在底板的事件3086个。11916工作面煤层倾角较大,为了便于统计分析,本文利用底板等高线,通过数据计算将煤层转换为近水平

煤层,正常情况下底板破坏深度为20~25 m,从图6中可以看出,9月6日前底板的破坏深度为20~25 m,但是在9月6日—14日底板微震事件标高范围分布特点发生了变化,分布比较均匀,底板破坏深度已经达到了35 m,9月14日该工作面底板出水,水量2 m³/h。

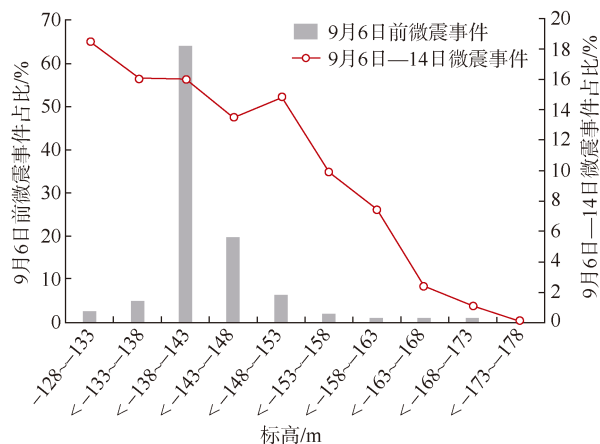


图6 9号煤层底板不同标高范围微震事件分布统计

Fig.6 Histogram of elevation range distribution of floor microseismic events of No.9 coal seam

图7为工作面煤层、底板岩层以及底板微震事件分布图,从图7可以看出在红线位置底板破坏深度明显加深,很多微震事件已经进入本溪灰岩含水层。图8a为底板微震事件在YZ平面的密度(单位体积内微震事件数量)图、图8b为底板微震事件在XY平面的密度图,从图8看出在9月14日前,运料巷附近底板破裂深度明显大于其他位置,在运料巷附近微震事件密度明显增加,该区域底板破坏剧烈,结合图7—图8,可以推断中间巷底板靠近运料巷侧的导水通道可能已经形成。

5.3 视电阻率监测结果

开展了为期6个月的视电阻率监测,共采集到完整的视电阻率数据体2723个,每次监测工作面长度为200 m,如图9所示,从监测数据来看,底板20 m范围内视电阻率一直都保持较高的状态,说明底板水的高度没有发生明显变化。

从图10可知,在运料巷35号电极附近底板下存在一个低阻异常区域逐渐变大,该区正是9月14日的出水点。

结合图7、8、10发现,图8中破裂较深位置处的导水通道已经形成,并且从图10中的低阻异常,及其随时间不断从下到上的发育过程验证了有水从该通道涌出,从图8中看出,当工作面推进至中间巷时,此处发生出水,结合图11可以看出,底板破坏较深的位置正是视电阻率异常体发育之

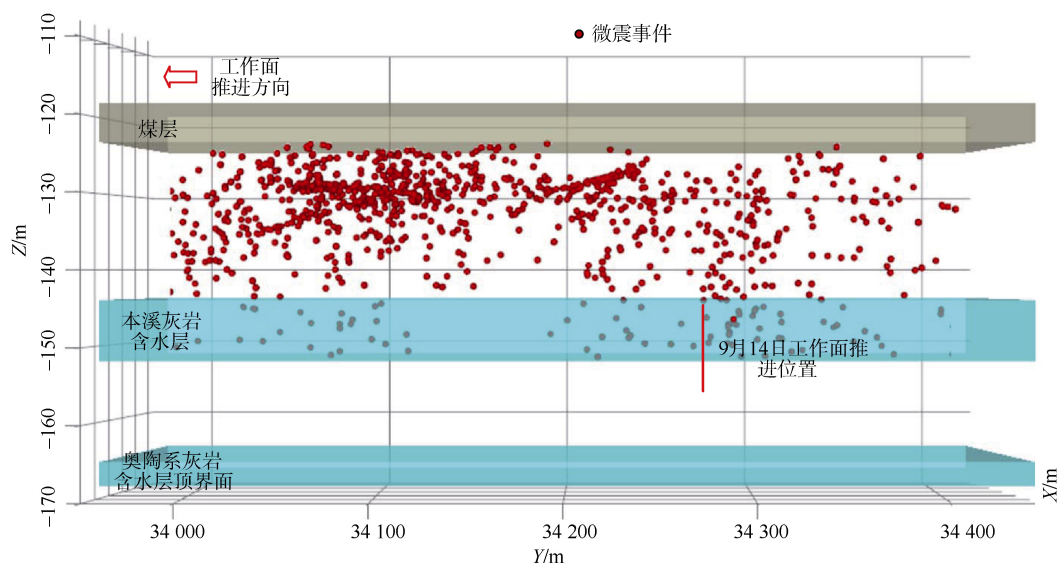


图 7 工作面底板岩层与微震事件分布

Fig.7 Distribution of floor rock layer and microseismic events in working face

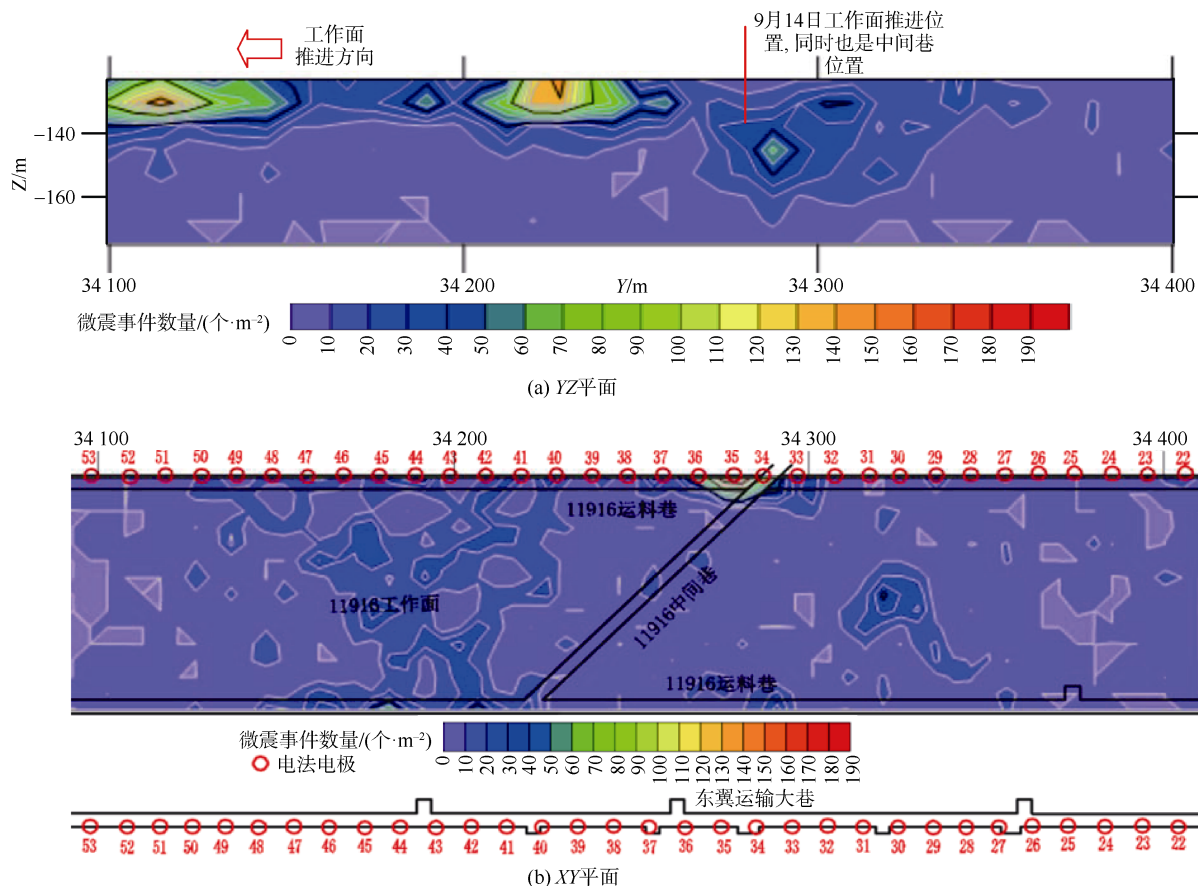


图 8 9 号煤层底板微震事件平面密度图

Fig.8 Plane density diagram of microseismic events of No.9 coal seam floor

处,推测底板水是通过该通道进入运料巷,引起该处底板出水。

6 结果与讨论

从微震与视电阻率监测结果来看,在 9 月 6~14 日确实存在一次底板突水过程,其突水位置正好为

工作面推进位置附近,顶板覆岩垂直压力集中于工作面前 10~15 m 范围的煤壁内^[40],该范围正好与工作面中间巷道对底板的剪切破坏作用重合,加之此处靠近陷落柱,使得该处的底板破坏深度明显增加,而且从图 7 中可以看出,在底板下 35 m 深的范围内微震事件的分布比较均匀,使得底板裂隙具有很好

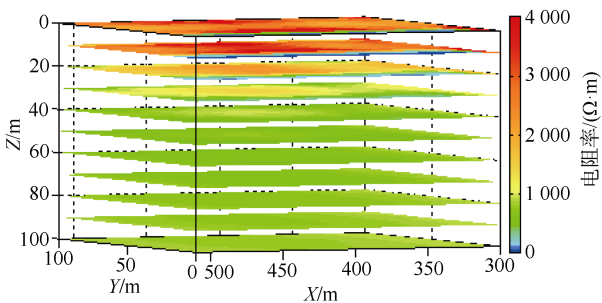


图 9 9 月 4 日 9 号煤层底板视电阻率水平剖面
Fig.9 Horizontal section of apparent resistivity of floor on September 4

的连通性,形成了导水通道,从图 10 中 4 d 的电阻率异常区域的变化情况也说明了底板水正通过该通

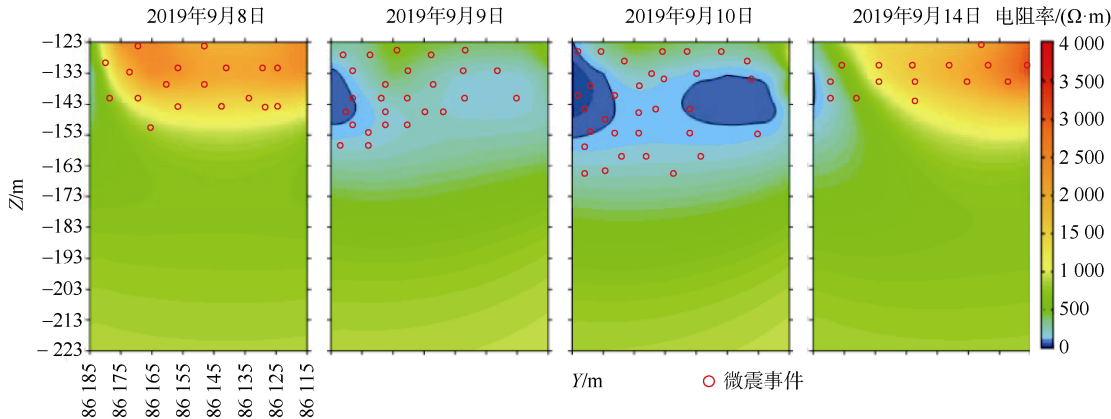


图 10 35 号电极 9 月 8—14 日底板视电阻率垂直剖面
Fig.10 Vertical plane of apparent resistivity of No.35 electrode from September 8 to 14

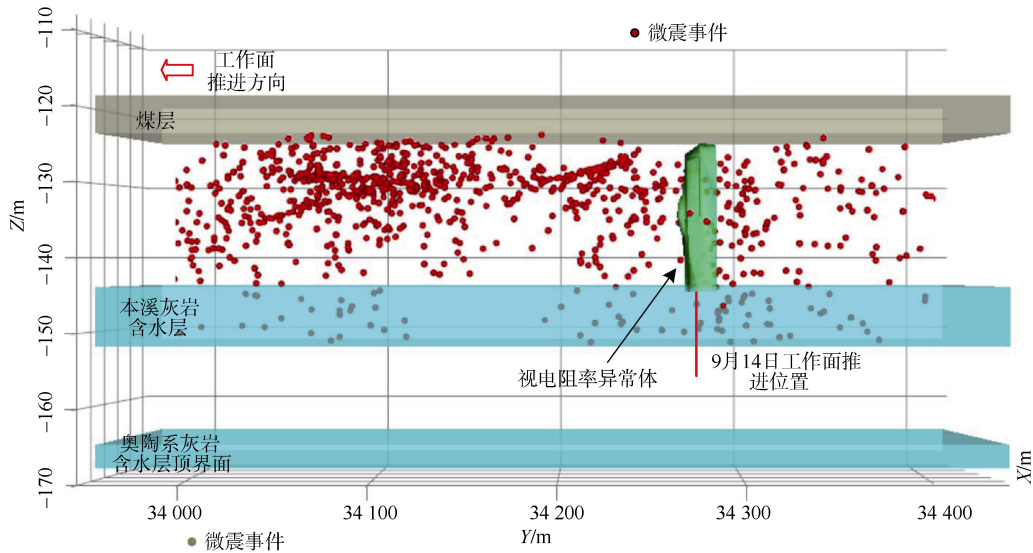


图 11 工作面底板岩层与微震事件和电阻率异常体分布
Fig.11 Distribution of floor rock layer, microseismic events and resistivity anomalies in working face

7 结 论

a. 葛泉煤矿 11916 工作面 9 号煤层倾角较大,底板地形较复杂,从井-地-孔微震监测结果可知:

道逐步进入巷道,导致出水。
微震与视电阻率监测技术分别从导水通道与水源 2 个突水要素进行监测是解决底板突水监测的有效途径。微震监测技术仅仅能够监测底板裂隙,由于地质情况复杂,底板岩层的厚度、位置不清晰,底板裂隙的深度也不尽相同,导致在不同的工作面位置,仅仅依靠底板裂隙深度很难判断裂隙是否与含水层建立起水力联系,即导水通道是否形成;而视电阻率监测技术则正好可以弥补这一缺陷,如果裂隙中的富水性增强,视电阻率会明显降低,这就为导水通道的形成提供了科学依据,也就为突水预警提供了科学依据。

回采过程中底板破坏深度变化较大,在中间巷附近底板破坏深度达到 30~35 m,其他区域底板破坏深度为 20~25 m。
b. 井-地-孔微震监测技术能够实时监测 11916

工作面回采过程中底板的破坏情况, 而且能够监测不同位置不同时间底板的破坏情况; 根据微震事件的空间位置和平面密度图, 结合视电阻率监测结果可以推测导水通道的形成。

c. 视电阻率监测技术能够对 11916 工作面回采过程中底板岩层的视电阻率及其变化情况进行实时监测, 根据视电阻率的变化, 结合井-地-孔微震监测结果能够对底板突水风险进行评价。

d. 井-地-孔微震监测技术和视电阻率监测技术构建的底板水害综合监测系统能够对底板突水过程中的导水通道和水源实施有效监测, 为突水预警提供科学依据。

请听作者语音介绍创新技术成果

等信息, 欢迎与作者进行交流



OSID 码

参考文献(References)

- [1] 张文泉, 张广鹏, 李伟, 等. 煤层底板突水危险性的 Fisher 判别分析模型[J]. 煤炭学报, 2013, 38(10): 1831-1836.
ZHANG Wenquan, ZHANG Guangpeng, LI Wei, et al. A model of Fisher's discriminant analysis for evaluating water inrush risk from coal seam floor[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(10): 1831-1836.
- [2] 靳德武. 我国煤矿水害防治技术新进展及其方法论思考[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(5): 141-147.
JIN Dewu. New development of water disaster prevention and control technology in China coal mine and consideration on methodology[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 141-147.
- [3] 彭苏萍, 王金安. 承压水体上安全采煤[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001: 34-35.
PENG Suping, WANG Jin'an. Safe mining on confined water[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2001: 34-35.
- [4] 张金才, 张玉卓, 刘天泉. 岩体渗流与煤层底板突水[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 48-51.
ZHANG Jincai, ZHANG Yuzhuo, LIU Tianquan. Seepage of rock mass and water inrush from coal seam floor[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 48-51.
- [5] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 76-80.
QIAN Minggao, LIAO Xiexing, XU Jialin, et al. Key stratum theory of strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003: 76-80.
- [6] 施龙青, 韩进. 底板突水机理及预测预报[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2004: 45-50.
SHI Longqing, HAN Jin. Mechanism and prediction of floor water inrush[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2004: 45-50.
- [7] 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.
- [8] 武强. 我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 795-805.
WU Qiang. Progress, problems and prospects of prevention and control technology of mine water and reutilization in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 795-805.
- [9] 杨天鸿, 师文豪, 李顺才, 等. 破碎岩体非线性渗流突水机理研究现状及发展趋势[J]. 煤炭学报, 2016, 41(7): 1598-1609.
YANG Tianhong, SHI Wenhao, LI Shuncui, et al. State of the art and trends of water-inrush mechanism of nonlinear flow in fractured rock mass[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(7): 1598-1609.
- [10] 虎维岳, 赵春虎. 基于充水要素的矿井水害类型三线图划分方法[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(5): 1-8.
HU Weiyue, ZHAO Chunhu. Trilinear chart classification method of mine water hazard type based on factors of water recharge[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(5): 1-8.
- [11] 刘盛东, 刘静, 戚俊, 等. 矿井并行电法技术体系与新进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2336-2345.
LIU Shengdong, LIU Jing, QI Jun, et al. Applied technologies and new advances of parallel electrical method in mining geophysics[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2336-2345.
- [12] 鲁晶津. 煤矿井下含/导水构造三维电阻率反演成像技术[J]. 煤炭学报, 2016, 41(3): 687-695.
LU Jingjin. 3D electrical resistivity inversion and imaging technology for coal mine water-containing/water-conductive structures[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 687-695.
- [13] 刘德民, 尹尚先, 连会青, 等. 煤矿底板突水定量预警准则及预警系统研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(4): 16-20.
LIU Demin, YIN Shangxian, LIAN Huiqing, et al. Study on quantitative warning criteria and early warning system for water inrush from coal floor[J]. Coal Engineering, 2019, 51(4): 16-20.
- [14] 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.
- [15] 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.

- [16] 程建远, 金丹, 覃思. 煤矿地质保障中地球物理探测技术面临的挑战[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 112–116.
CHENG Jianyuan, JIN Dan, QIN Si. Challenges faced by geophysical detection technology in mine geological guarantee system[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 112–116.
- [17] 刘超, 吴顺川, 程爱平, 等. 采动条件下底板潜在导水通道形成的微震监测与数值模拟[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(9): 1129–1135.
LIU Chao, WU Shunchuan, CHENG Aiping, et al. Microseismic monitoring and numerical simulation of the formation of water inrush pathway caused by coal mining[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(9): 1129–1135.
- [18] 徐智敏, 孙亚军, 巩思园, 等. 高承压水上采煤底板突水通道形成的监测与数值模拟[J]. 岩土力学与工程学报, 2012, 31(8): 1698–1704.
XU Zhimin, SUN Yajun, GONG Siyuan, et al. Monitoring and numerical simulation of formation of water inrush pathway-caused by coal mining above confined water with high pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1698–1704.
- [19] 张平松, 翟恩发, 程爱民, 等. 深厚煤层开采底板变形特征的光纤监测研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(4): 1197–1211.
ZHANG Pingsong, ZHAI Enfa, CHENG Aimin, et al. Optical fiber monitoring study on characteristics of deformation in floor of deep and thick coal seam during mining[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(4): 1197–1211.
- [20] 李白英, 沈光寒, 荆自刚, 等. 预防采掘工作面底板突水的理论与实践[J]. 煤矿安全, 1988(5): 47–48.
LI Baiyin, SHEN Guanghan, JING Zigang, et al. Theory and practice of preventing water inrush from the floor of mining face[J]. Safety in Coal Mines, 1988(5): 47–48.
- [21] 沈光寒, 李白英, 吴戈. 矿井特殊开采的理论与实践[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992: 56–72.
SHEN Guanghan, LI Baiying, WU Ge. Theory and practice of special mining[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1992: 56–72.
- [22] 李白英. 预防矿井底板突水的“下三带”理论及其发展与应用[J]. 山东矿业学院学报(自然科学版), 1999, 18(4): 11–18.
LI Baiying. “Down Three Zones” in the prediction of the water inrush from coalbed floor aquifer-theory, development and application[J]. Journal of Shandong Institute of Mining and Technology(Natural Science), 1999, 18(4): 11–18.
- [23] 王经明. 承压水沿煤层底板递进导升机理的模拟与观测[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 546–549.
WANG Jingming. In-situ measurement and physical analogue on water inrush from coal floor induced by progressive intrusion of artesian water into protective aquiclude[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(5): 546–549.
- [24] 王经明. 承压水沿煤层底板递进导升机理的物理方法研究[J]. 煤田地质与勘探, 1999, 27(6): 40–43.
WANG Jingming. Physical investigation on water inrush from coal floor induced by pressure water progressive intrusion up into protective aquiclude[J]. Coal Geology & Exploration, 1999, 27(6): 40–43.
- [25] 王经明. 承压水沿煤层底板递进导升的突水机理及其应用[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2004: 78–82.
WANG Jingming. Water inrush mechanism and application of confined water advancing along coal seam floor[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2004: 78–82.
- [26] 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(增刊1): 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(Sup.1): 83–96.
- [27] 陈歌, 孙亚军, 徐智敏, 等. 微震监测技术在矿井水害防治中的研究进展[J]. 金属矿山, 2019(1): 7–15.
CHEN Ge, SUN Yajun, XU Zhimin, et al. Study progress for microseism monitoring technique on the predication and control in mine water disaster[J]. Metal Mine, 2019(1): 7–15.
- [28] 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.
- [29] 程关文, 王悦, 马天辉, 等. 煤矿顶板岩体微震分布规律研究及其在顶板分带中的应用: 以董家河煤矿微震监测为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊2): 4036–4046.
CHENG Guanwen, WANG Yue, MA Tianhui, et al. Research on the partitioning method of the overburden in coal mine based on microseismic monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(Sup.2): 4036–4046.
- [30] 高原, 周蕙兰, 郑斯华, 等. 测定震源深度的意义的初步讨论[J]. 中国地震, 1997, 13(4): 321–329.
GAO Yuan, ZHOU Huilan, ZHENG Sihua, et al. Preliminary discussion on implication of determination on source depth of earthquake[J]. Earthquake Research in China, 1997, 13(4): 321–329.
- [31] MENDECKI A J. Seismic monitoring in mines[M]. London: Chapman and Hall Press, 1997: 67–80.
- [32] 田玥, 陈晓非. 地震定位研究综述[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(1): 147–155.
TIAN Yue, CHEN Xiaofei. Review of seismic location study[J]. Progress in Geophysics, 2002, 17(1): 147–155.
- [33] 段建华, 闫文超, 南汉晨, 等. 井-孔联合微震技术在工作面

- 底板破坏深度监测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(1): 208–213.
- DUAN Jianhua, YAN Wenchao, NAN Hanchen, et al. Application of mine-hole joint microseismic technology in monitoring the damage depth of working face floor[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(1): 208–213.
- [34] BRACEW F, ORANGE A S. Electrical resistivity changes in saturated rocks during fracture and frictional sliding[J]. Journal of Geophysical Research, 1968, 73(4): 1433–1445.
- [35] 候克昌. 形变-电阻率法探测煤层底板水导高[J]. 煤田地质与勘探, 1991, 19(6): 46–49.
- HOU Kechang. The application of deformation-resistivity method to uplift height of the bottom water about the coal seam[J]. Coal Geology & Exploration, 1991, 19(6): 46–49.
- [36] 刘盛东, 吴荣新, 胡水根, 等. 网络分布式并行电法勘探系统[C]. 中国地球物理年会论文集. 2006: 251.
- LIU Shengdong, WU Rongxin, HU Shuigen, et al. Network distributed parallel electrical exploration system[C]. Proceedings of the annual geophysical conference of China, 2006: 251.
- [37] 李建楼, 刘盛东, 张平松, 等. 并行网络电法在煤层覆岩破坏监测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(2): 61–64.
- LI Jianlou, LIU Shengdong, ZHANG Pingsong, et al. Failure dynamic observation of upper covered stratum under mine using parallel network electricity method[J]. Coal Geology & Exploration, 2008, 36(2): 61–64.
- [38] LI S, LIU B, NIE L, et al. Detecting and monitoring of water inrush in tunnels and coal mines using direct current resistivity method: A review[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015, 7(4): 469–478.
- [39] 鲁晶津, 李德山, 王冰纯. 超大采高工作面顶板电阻率监测可行性试验[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(增刊3): 186–194.
- LU Jingjin, LI Deshan, WANG Bingchun. Feasibility test of roof resistivity monitoring for super-high mining face[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(Sup.3): 186–194.
- [40] 虎维岳, 尹尚先. 采煤工作面底板突水灾害发生的采掘扰动力学机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 1): 3344–3349.
- HU Weiyue, YIN Shangxian. Dynamic mechanism of water inrush from floor of mining face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup.1): 3344–3349.

(责任编辑 聂爱兰)