



移动阅读

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. doi:10.13225/j.cnki.jccs.KJ19.0575

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. doi:10.13225/j.cnki.jccs.KJ19.0575

矿井并行电法技术体系与新进展

刘盛东^{1,2}, 刘 静², 戚 俊³, 曹 煜³, 吕荣其²

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 3. 安徽惠洲地质安全研究院股份有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘 要:并行电法(Parallel Electrical Method, PEM)是集阵列式、全电极、全波形3种电场(自然电场、激励电场和感应电场)的同步采集和处理于一体的地电场勘探方法,它以时空域地电场的并行测试与并行处理为核心思想;通过每个电极1个ADC及开关装置的集成,实现全部电极的并行激励与采集,获得包括AM法和ABM法两种形式的地电场数据体;按照电极的空间组合与时序关系,解编出激励电流序列和对应的自然电场(零次场)、激励电场(一次场)和感应电场(二次场)的电位响应序列,再根据电位响应与电流激励的传递原理解析出探测介质的电阻抗属性(包括自然电位、电阻率和极化率等参数),由此实现3种电场信息的并行解析。矿井并行电法(Mine-PEM)充分利用了巷道空间、钻孔空间及其组合形式,进而实现了对煤层顶底板充水水源、导(含)水断层、岩溶陷落柱及注浆改造效果的有效探查,对采动围岩破坏特征及富水异常区的动态检测,以及对地下水渗流演化的实时远程监测及水害超前预警等,这些技术于过去15 a间在全国煤矿防治水领域得到推广应用,发展、形成了矿井并行电法技术体系。矿井物联网技术的普及,使网络并行电法的智能特色得以发挥,实现了矿井地电场定时激励采集与实时动态监测的在线远程控制;双模式电极测试技术(Double-mode Electrode Testing Technique)的引入与应用,解决了常规地电场测试技术(如高密度电法)中激发、接收共用同一电极而导致自然电场、感应电场数据误差大甚或失效的问题,保证了3种电场并行测试数据的有效性;由此,并行电法技术实现了对主动源电法勘探与被动源地电场监测的有效融合,这对矿井灾害源动态、精细探测尤其是水害预警来说意义重大,形成的并行电法国家能源行业标准已得到实施。并行电法不仅可为智能矿山、透明矿山的建设提供技术保障,而且在工程与环境物探领域以及城市地下空间精细探查中也已得到推广。当前,地电场多参数的并行解析与联合反演是其重点研究内容,通过对介质电阻抗成像理论的深入研究,有望为岩土体多相介质多场耦合作用及其演化特征的探查提供有效手段。

关键词:并行电法;矿井物探;岩体破坏;地下水渗流;煤矿防治水

中图分类号:P631 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2019)08-2336-10

Applied technologies and new advances of parallel electrical method in mining geophysics

LIU Shengdong^{1,2}, LIU Jing², QI Jun³, CAO Yu³, LÜ Rongqi²

(1. State Key Laboratory of Deep Geomechanics & Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Resource and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Anhui Huizhou Geology Security Institute Co., Ltd.,

收稿日期:2019-05-05 修回日期:2019-06-17 责任编辑:常明然

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41804106);江苏省自然科学基金资助项目(BK20170274);国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600902)

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:刘 静(1985—),女,山东曹县人,讲师,硕士生导师。E-mail:liujing8503@126.com

Hefei 230088, China)

Abstract: Parallel Electrical Method (PEM) is a kind of geoelectric field exploration method, which integrates the synchronous acquisition and processing of whole array, all electrodes, all waveforms and three kinds of electric fields. It takes the parallel measurement and parallel processing of geoelectric field in both space and time domain as its core idea based on the integration of an ADC and a switch device for each electrode, the parallel excitation and acquisition of all electrodes are realized, and the geoelectric data volume is obtained containing AM mode and ABM mode. According to the space combination and time series of electrodes, the excitation current sequence and potential response sequence of natural electric field (zero field), excitation electric field (primary field) and induction electric field (secondary field) are decomposed, and thus the resistance properties (including self-potential, resistivity and polarizability etc.) of the detecting medium are analyzed according to the transmission principle of potential response and current excitation, therefore, the parallel analysis of three kinds of electric field information is realized using this method. The Mine-PEM makes full use of roadway space, borehole space and its combination form in coal mine, thus it can effectively explore water-filled source, water-bearing fault, karst collapse column and grouting effect in both roof and floor, dynamically detect mining rock damage characteristics and water-rich anomaly area, real-timely monitor groundwater seepage evolution and predict mine water disasters. In the past 15 years, these techniques have been widely applied and promoted in coal mine water disaster prevention all over China, as a result of which the technology system of Mine-PEM has been established. The intelligent characteristics of Network Parallel Electrical Method show its advantages thanks to the popularization of Internet of Things technology in coal mines in China, which realizes the online remote control of timing excitation and acquisition as well as real-time dynamic monitoring of mine geoelectric field. Furthermore, the Double-mode Electrode Testing Technique overcomes the shortcomings of using the same electrode for both excitation and acquisition in normal geoelectric measuring techniques, such as multi-electrode resistivity method (high-density electrical method), which always results in errors or even failures with natural electric field and induced electric field data, and this technique ensures the data validity of PEM. Therefore, the PEM effectively integrates active source exploration and passive source monitoring, which makes a significant contribution to the dynamic and fine detection of mine disaster sources, especially to mine water hazards early-warning, and presently two Chinese energy industry standards closely related to PEM has been implemented. Additionally, PEM not only provides a technical support for intelligent mines and transparent mines construction in China, but also has been widely used in engineering geophysics, environmental geophysics and urban underground space exploration areas. At present, the parallel analysis and joint inversion of multi-parameters of geoelectric field is the key research area of PEM, and by studying the electric impedance tomography theory based on PEM, effective means should be formed to explore multi-field coupling and evolution characteristics in multi-phase media.

Key words: parallel electric method (PEM); mining geophysics; rock damage; groundwater seepage; mine water prevention and control

地电场勘探的本质在于对地质结构的电性拟断面或拟立体重建。在过去近 200 a 的时间里,直流电法勘探技术经历了电测深、电剖面、高密度电法、并行电法、网络并行电法的发展历程,对应的地电场测试技术也从一维测试向四维监测发展,尤其在 21 世纪发展迅速^[1]。并行电法技术的正式形成虽然只有短短 15 a,但因其阵列式、多场并行采集的优越性,故而在矿井物探、工程物探和环境物探领域都得到广泛应用。在矿井物探领域,该技术主要应用于巷道围岩破坏动态检测^[2-3]、地质异常体与富水异常区识别^[4]、地下水渗流监测与突水预警^[5-6]、巷道掘进超前探

测^[7-8]、注浆监测及效果评价^[9]、矿井综合物探等方面^[10-11]。

笔者介绍了并行电法的基本原理与主要技术特点,论述了针对矿山灾害源精细探查而形成的巷道围岩破坏并行电法动态检测技术、地下水渗流并行电法动态观测与水害预警技术,探讨了并行电法的最新进展和现存问题。

1 并行电法原理和技术特点

1.1 并行电法原理

并行电法技术是一种分布式并行智能电极电位

差信号采集方法^[12],含 2 类工作方法:针对单点电源场测试的 AM 法和针对 2 个异性点电源场测试的 ABM 法。

(1)AM 法:公共地电极 N 与公共供电负极 B 单独布设,测线(二维勘探为测线,三维勘探为测区,测线等同于测区,为表述简便统一为测线)上 n 个电极自动轮流取得作为供电正极 A、建立单点电源场的工作资格,每当 1 个电极取得该资格后,测线上其余 $n-1$ 个电极自动扮演采集电极 M 的角色。所以,在由 n 个电极构成的测线的电阻率勘探中,采集到 n 个电极电流和 $(n-1) \times n$ 个电极电位数据;测线上全部电极扮演的角色有 A 和 M 两种,故这种测试方法又称为 AM 法;AM 法能够解析出二极法、三极法在 n 个电极中的所有电极距排列组合的视电阻率值。

(2)ABM 法:公共地电极 N 单独布设,测线上全部 n 个电极中,循环性地由任意 2 个电极取得作为供电正极 A、负极 B 的资格,以完成建立起 2 个异性点电源场(偶极子场)的任务;每当有 2 个电极取得这种资格后,测线上其余 $n-2$ 个电极则扮演采集电极 M 的角色,A 有 n 种状态循环、B 有 $(n-1)$ 种状态循环,测线上 n 个电极供电循环勘探中,先后呈现 $n \times (n-1)$ 种偶极子供电状态及供电电流数据,采集到的电极电位数据点总量为 $n \times (n-1) \times (n-2)$ 个。测线上全部电极扮演的角色有 A、B 和 M 三种,故这种测试方法又称为 ABM 法。ABM 法能够解析出所有四极法在 n 个电极中所有电极距排列组合中的视电阻率。

可见,在场源的建立、场的测量 2 方面,并行电法利用分布式并行智能电极电位差信号采集方法,自动实现了对测线上所有电极的完整排列组合,达到了采集数据海量提升,而采集时间呈 n^2 倍缩短;其原因在于并行采集需要每个电极 1 个 ADC 和 3 个继电器开关,这与只有 1 个 ADC 的高密度电法完全不同^[13]。

在数据提取过程中,认为每个测量电极采集的电位为 U 序列,采集的电流值为 I 序列,图 1 为单个电极采集的电位时间序列特征,有关电位的提取与计算是基于此特征展开的^[12]。利用这种时域序列特征,可先后计算、提取到零次场(自然电场)、一次场(激励电场)和二次场(感应电场)的数据。

1.2 并行电法的技术实现

地电场的并行测试功能主要基于 FPGA 技术实现^[14],使主机不但功能强大且体积小,结合先进的通讯系统、控制系统,共同构成网络并行电法勘探监测系统,实现电法数据的远程获取和智能控制。现有网

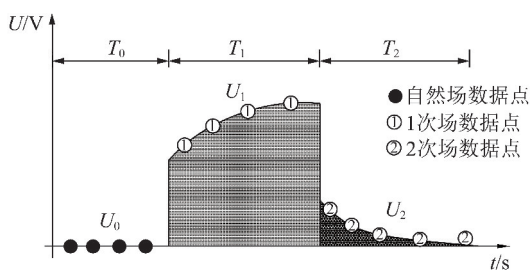


图 1 单个测点采集电位的时间序列

Fig. 1 Potential time series of a single measuring point

络并行电法硬件系统包括煤安型与非煤安型两大类,其中动态监测系统的构成情况如图 2 所示。目前,配套的数据处理软件为 WBD3.0 版本。

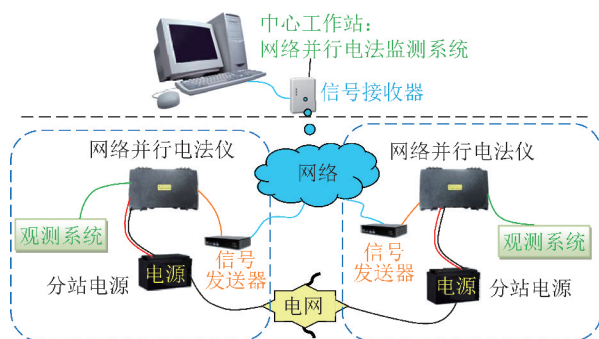


图 2 网络并行电法动态监测系统

Fig. 2 Network parallel electric method dynamic monitoring system schematic diagram

为了避免高密度电法中激发、接收共用同一电极(单模式,Single-mode)而导致自然电场、激发极化电场数据误差大乃至失效的问题,并行电法采用双模式(Double-mode)电极测试技术^[15-16],配套于并行电法中的地电场勘探、监测系统中,不极化测量电极与供电电极在同一电极点并存,增强了多场并行测试数据的有效性。如图 3 所示,为单模式实测电位与双模式实测电位数据情况的对比,可以看出双模式实测电位更接近理想情况。

1.3 并行电法的技术特点

在数据采集方面,高密度电法是在单次激发条件下进行单通道采集,且每次激发循环只能采集 1 种装置的数据;与之相比,超高密度电法实现了单次激发条件下、单一装置的多通道同步采集,但每次激发循环仍然只能采集单一装置的数据,且激发与采集通道的组合受该装置形式所限^[13]。并行电法则采用排列组合逻辑,实现了同一测线上激发通道与采集通道的全组合、循环切换,单次激发条件下的阵列式全部电极通道同步采集(没有装置概念,数据涵盖了全部装置形式),实现了地电场测试技术的阵列式、全波形与智能化发展^[14,17]。抗干扰方面采用时域交替方波、工频周期叠加、动态时变增益及抗混滤波等技术

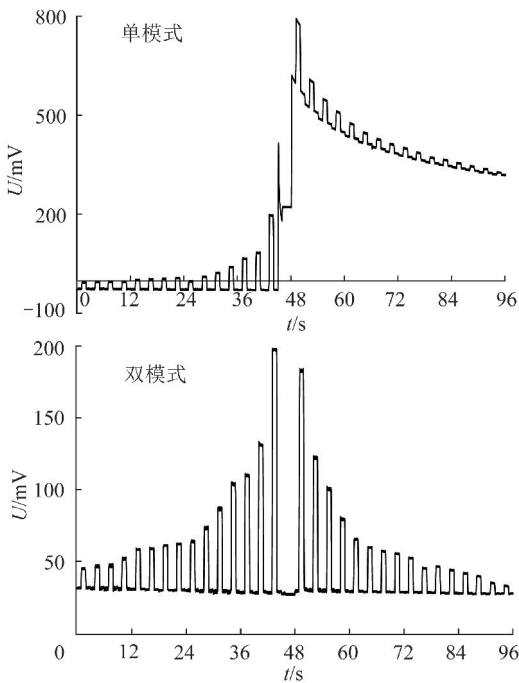


图3 单模式实测电位与双模式实测电位

Fig. 3 Potential data of single-mode acquisition and double-mode acquisition

组合,有效消除大地电磁的低频漂移和工频多阶谐波干扰。在数据解编方面,并行电法利用采集信号的时域序列特征,基于一次测试完成对自然电场、一次场和二次场全部参数的组合提取,实现自然电场法、充电法、电阻率法、激发极化法、频谱激电法、复电阻率法等多种方法的并行解编。空间域中的全场阵列扫描和时间域中的多场并行测试这两大特点赋予并行电法显著的优越性;网络通讯技术的引入则使其智能特点更加突出,由此形成的网络并行电法技术直接推动了地电场勘探的4D化飞跃,进而促生了矿山灾害源精细探查与监测预警并行电法技术体系^[18]。

1.4 基于网络并行电法的矿井地电场观测方式

在井下施工方面,由于巷道、钻孔是矿井物探仅可利用的两种施工空间,而巷道空间仅包括工作面的上下顺层巷道和开切眼,钻孔的施工则受采高、岩性、现场条件的共同限制^[19]。所以,电法观测系统的布设包括单巷、单孔、巷-巷组合、孔-孔组合、巷-孔联合5种方式。虽然施工空间有限,但网络并行电法的阵列式、多参数并行采集与远程监控功能却使矿井直流电法从二维勘探发展到三维立体探测、四维动态监测,且可同步辅以自然电场法、激励电流/电位法、激发极化法等测试与分析。就施工环节而言,井下的并行电法动态监测工作以孔中测试居多,孔中观测系统的安装,一般利用PVC管将电缆、电极送入钻孔中,然后注入水泥浆液完成电极耦合与封孔保护。需

指出的是,为摆脱工业电流的干扰,参比电极N往往就近安装,供电负极B的位置则受测线方向的影响且一般安装在远处的巷道空间。

2 巷道围岩破坏并行电法动态检测技术

为保障煤炭资源的安全开采,对巷道围岩破坏规律的有效揭示、准确探测是重要的科学、技术问题,矿井直流电法是该方面的重要手段,而并行电法的出现则推动了巷道围岩破坏电阻率探测方法的进步、完善及其技术体系的形成,并在过去十数年中发挥了重要作用,产生了重大经济效益。

2.1 巷道围岩破坏地电场动态检测的理论依据

由于煤系地层中的不同岩层(泥岩、页岩、砂岩、煤层)之间存在明显电阻率差异,同时在煤层开采过程中,顶板覆岩“上三带”区域中岩体变形破坏程度不同往往导致电阻率的变化规律明显不同(弯曲变形带内电阻率变化不大,导水裂缝带内电阻率往往发生1.5~2.5倍的升高,垮落带中电阻率往往发生4~5倍的升高^[20-21]),底板围岩中的高阻异常与破坏位置存在对应关系且在回采工作面前方出现的相对低阻异常位置与矿压引起的高应力区往往相当^[21],故在研究以顶、底板为代表的巷道、采场围岩破坏特征方面,基于网络并行电法的电阻率动态检测技术具有可行性。

2.2 煤层顶板覆岩破坏并行电法动态检测

有效探测顶板覆岩“上三带”发育特征,特别是准确判定裂隙带高度,对矿山顶板管理、瓦斯抽采、水害防治等意义重大。利用网络并行电法技术,通过对巷、孔空间的充分利用,可在工作面回采过程中,对顶板覆岩进行二维、三维的动态测试,由此判识垮落带、导水裂缝带的高度,并圈定富水异常区。该技术具有如下特点:①采用单孔观测方式,在顶板钻孔中安装电极,获取不同开采进程中的二维电阻率剖面,能直观反映顶板覆岩“二带”发育形态和矿山压力显现规律,同时结合其它物探、钻探资料,可提高对冒落带、导水裂缝带探测的准确度^[19,21];②采用孔-孔组合的观测方式,在顶、底板同时布设测试钻孔,获取不同开采进程中的孔间电阻率剖面,可实现对巷道围岩超前应力显现特征、采动过程和采后破坏特征、冒采与裂采特征的分析^[22];③采用巷-孔联合的观测方式,在顶板布设测试钻孔,联合巷道空间,开展并行电法动态测试,获取自然电场、电阻率时空变化特征,可跟踪预测顶板破裂高度,清晰表征覆岩变形破坏的全过程^[23-24],且比单孔测试结果更准确^[3]。

2.3 煤层底板围岩破坏并行电法动态检测

查清煤层底板破坏带的深度和发育特征,是底板水害防治的关键技术,尤其是对受底板灰岩承压水威胁的矿井。受采掘扰动影响,煤层底板围岩中发生应力场的动态演化时间上常表现出周期性,而空间上则在回采工作面前方与后方存在不同应力分布,因此在煤层采动过程中,底板围岩的变形破坏行为具有一定时空规律,且可引发明显的地电场响应,这为利用并行电法探测底板围岩破坏特征提供了理论依据。研究证实:①采用单孔观测方式,在底板中布设电法观测钻孔,可实现底板破坏特征的动态监测^[25-26];②采用单巷观测方式,利用巷道中的电法测线开展并行电法动态测试,能准确判断底板岩体的破坏深度^[27];③采用巷-孔联合的观测方式,在底板与底板钻孔中同时布设测线,开展并行电法动态测试工作,利用电阻率的时空变化特征可直观地分辨出底板岩层结构与动态破坏特征并圈定破坏带范围^[28];④采用巷-巷组合的观测方式,在进风巷、开切眼、回风巷布置三维观测系统,开展并行电法动态测试,计算得到不同开采进程中的电阻率三维数据体,结合探采对比分析,实现对底板围岩中富水区的准确圈定和隐伏岩溶、陷落柱等灾害源的有效判别^[29]。

3 地下水渗流并行电法动态观测与水害预警技术

查清导水裂隙带分布范围和围岩裂隙动态变化规律,并有效圈定各类富水异常区,是矿山水害防治的基础工作;而准确探测并实时预报采掘扰动条件下地下水渗流场的时空演化,则是实现矿山水害准确预警的关键技术问题。

3.1 地下水渗流地电场动态观测的理论依据

赋存或运动于岩土体空隙(孔隙、裂隙、溶隙)中的地下水是一种富含带电粒子的复杂溶液,在其运移过程中会发生扩散、吸附、过滤、氧化还原等电化学反应,进而引发地电场异常,以此为理论基础的电法动态观测技术在地下水渗流研究中得到应用。然而,岩体渗流具有各向异性,且采掘扰动下其时空演化特征更加复杂。常规直流电法与高密度电法的串行采集方式从根本上制约了地电场勘探技术效能的发挥。网络并行电法的出现使这一瓶颈得以突破,且经过十余年探索,在与岩体渗流相关的基础研究和工程应用方面积累了大量成果,并初步建立了矿山水害地电场多参数协同预警方法。

3.2 地下水渗流演化并行电法实时监测

大量理论研究、模拟实验、原位试验证实:利用并

行电法的实时采集功能,视电阻率数据可用于动态表征围岩中水的渗流演化过程、分析其主要时空特征^[30-32]、并判定断层等复杂岩体的导水性能与控水作用^[2];自然电位往往随水流逼近而上升、随其回落而下降,而激励电流、激励电位的升降规律则受水流空间方位影响,自然电位和激励电流可用于判定渗流方向与速度、识别出水点位置等,基于相关分析可利用激励电流、激励电位数据来预测顶板出水量的变化趋势,图4、5分别展示了皖北煤电某矿顶板突水过程中激励电流 I 和激励电位 U^1 对突水量 Q_0 的超前指示能力;上述3种参数对岩土体中各向异性渗流演化特征的研究有重要作用,且已在矿山水害预警工作中发挥了实际价值^[2,5,33-39]。

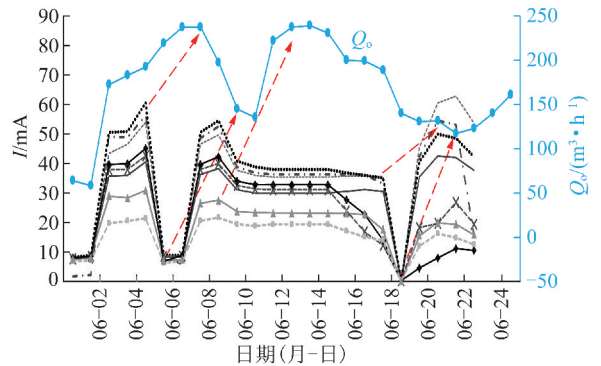


图4 顶板突水激励电流 I 与出水量 Q_0 对应关系^[38]

Fig. 4 Relation between excitation current I and water yield Q_0 in a roof water burst event^[38]

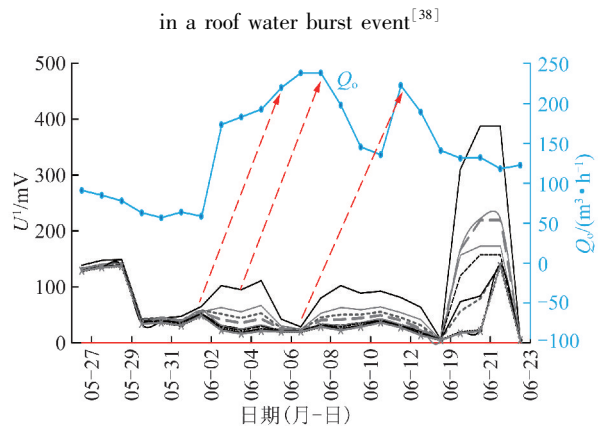


图5 顶板突水激励电位 U^1 与出水量 Q_0 对应关系^[39]

Fig. 5 Relation between excitation voltage U^1 and water yield Q_0 in a roof water burst event^[39]

3.3 地下水渗流突变特征并行电法动态检测

物理模拟实验和原位测试工作都表明:自然电位等时线的极值点指示了地下水渗流的空间方位,并具有超前感应能力^[5];在渗流突变过程中,自然电位、激励电位、激励电流和视电阻率都有明显响应,这4种参数能有效反映地下水渗流系统的时空演化和灾

变行为,且基于工程实践已确认自然电位和视电阻率可作为突水前兆的敏感因子^[5-6];突水前和突水后相比,在突水过程中,自然电位发生突变,一次场电位大幅降低,激励电流大幅升高,视电阻率可表征渗流、突水、突水后 3 个阶段的变化^[34]。

3.4 采动岩体渗流定量研究与多参数预测

物理模拟与原位测试研究发现:实时视电阻率图像具备跟踪识别渗流区域和相对水量变化的能力,随着视电阻率变低,地下水渗流趋向饱和^[5];视电阻率和视极化率对介质含水量、顶板透水量都具有幂函数关系^[35-36];自然电位与砂层非饱和厚度呈线性相关^[37];激励电流与介质含水量、顶板透水量呈线性相关^[38]。图 6 显示了非均匀介质中激励电流与含水量呈线性相关关系^[38],图 7 显示了实际煤矿顶板突水过程中观测钻孔中大部分测点的激励电流与含水量呈正相关,且越是响应敏感的测点其相关度越高^[32];激励电位则在稳态渗流过程中与介质含水量有 2 次相关关系,图 8 显示了在采动渗流过程中激励电位与

介质含水量则有阶段性的 2 次相关关系^[39],图 9 则显示出实际煤矿顶板突水过程中观测钻孔中大部分测点的激励电位与透水量有负的相关关系^[32]。采掘扰动条件下,自然电位呈 200 mV 以上的大幅波动,水源充足时自然电位总体升降幅度可达 600 mV,并最终高于初始值 200 mV 以上^[32]。

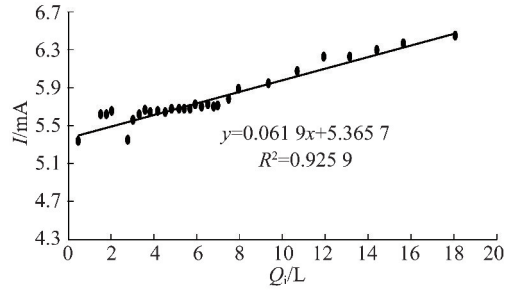


图 6 非均匀介质渗流模拟激励电流 I 与含水量 Q_i 相关关系^[38]

Fig. 6 Excitation current I and water injection Q_i relations of steady groundwater seepage in heterogeneous media^[38]

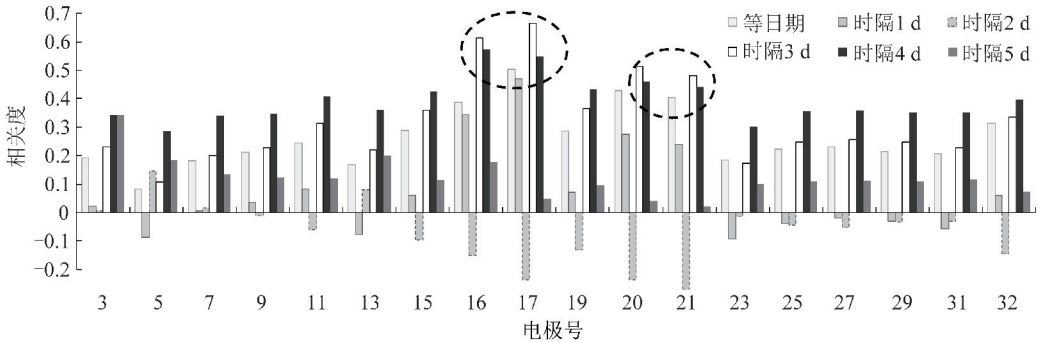


图 7 顶板突水激励电流 I 与出水量 Q_o 的相关度^[32]

Fig. 7 Relevancy of primary current I and water yield Q_o in a roof water burst event^[32]

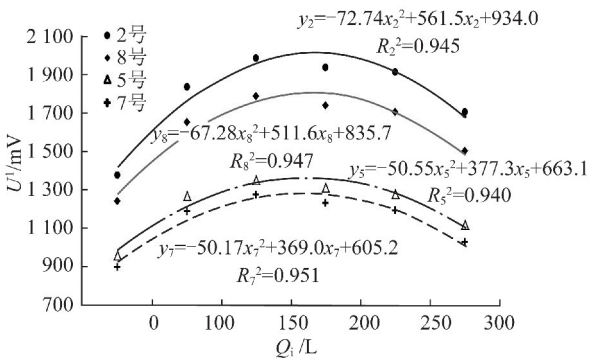


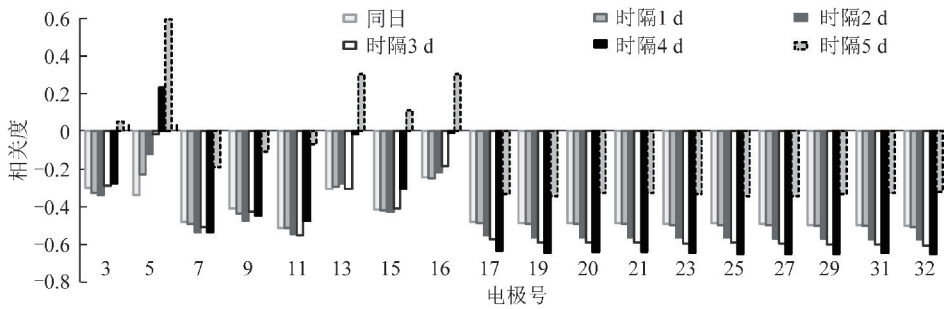
图 8 非均匀介质采动渗流模拟激励电位 U^I 与含水量 Q_i 阶段性相关关系^[39]

Fig. 8 Excitation voltage U^I and water injection Q_i relations of mining groundwater seepage in heterogeneous media test^[39]

4 网络并行电法技术的新进展

4.1 基于 AM 法数据体推导 ABM 法数据体

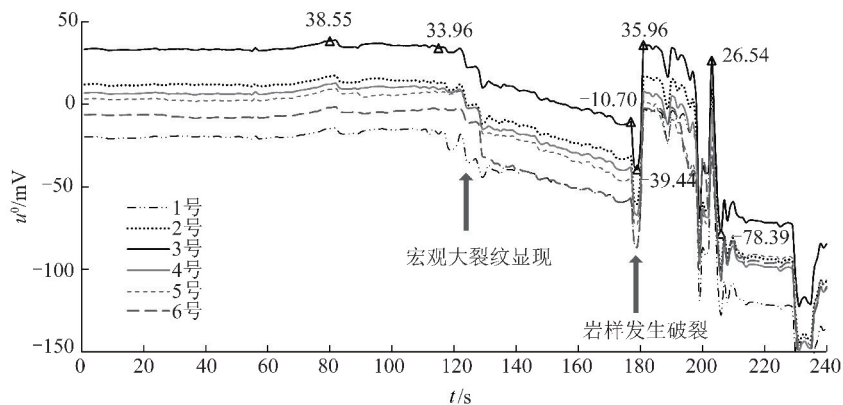
全场阵列式扫描的特点是并行电法的优势所在,但由于数据量巨大,尤其是 ABM 法含有海量数据,在实际工程应用中存在单次数据采集耗时(分钟级别)较长的问题,不利于动态监测效率的提升。针对此问题开展了理论研究与实测验证,获取了由 AM 数据体推导 ABM 数据体的有效方法,在双模电极下实现了将 AM 法和 ABM 法两种方法合二为一,提高了电法探测资料质量和现场工作效率,进一步强化了并行电法的技术优势^[40]。所以,在开展地电场动态监测工作时,若对数据的采集速率要求较高,则仅开展 AM 法的测试可同时满足多场多参数和电阻率多装置数据同步、实时采集功能。

图9 顶板突水激励电位 U^I 与出水量 Q_0 的相关度^[32]Fig. 9 Relevancy between primary voltage U^I and water yield Q_0 in a roof water burst event^[32]

4.2 采动岩体破坏地电场多参数综合分析新方法

在矿井电法勘探工作中,视电阻率是最常用的参数,但在动态勘探工作中,激励电流与电位、自然电位等参数不仅可提供有效借鉴,而且时域响应效果更佳。由于岩层结构遭受破坏时,导电性变差会引起激励电流降低,反之,岩层破坏程度较弱时激励电流基本保持稳定,激励电流对岩层裂隙变形有较好的灵敏度,可指示底板破坏带的岩层裂隙发育特征^[28];岩土体中的自然电场,除了受大地电场、工业电场等干扰外,往往由流固系统中的各种电化机制引发,同时值得注意的是:岩土体损伤(变形、破裂)过程中的电极化效应(位错机制等)和裂隙尖端放电等物理机制也是自然电场的重要成因^[41-42],这一认识对地震预报和岩体动力灾害的预警具有重要意义。利用网络并行电法测试技术,实现了多通道自然电位、电阻率等参数的响应特征,可更有效地判识采动岩体的动态破坏特征^[27],提升顶底板灾害的预测预报准确度。

岩样的高精度测试需求。单轴加载实验发现:不同岩性(烟煤、无烟煤、砂岩和灰岩)的岩样在变形破坏过程中,自然电位参数响应规律与压力特征都有对应关系^[43];同时,综合理论推导、模拟实验和原位试验多种研究手段发现,人工采掘扰动下的深部岩体连续破坏过程中,自然电场的响应呈非线性特征、较直流电阻率响应更加超前,岩体破坏程度与自然电位波动幅度、频率、整体升降幅度呈正相关,且随着研究尺度由毫米级别扩展到米的级别,自然电位波动的幅值也从数十毫伏扩展到数百甚至上千毫伏^[18,44]。图10显示了单轴加载条件下砂岩岩芯破裂过程中自然电位的特征,图11显示了实际工作面推进过程中顶板覆岩破坏引发的自然电位波动特征(D 为工作面与监测钻场的距离)。综合分析自然电场、激励电流、电阻率等参数的响应特征,可更有效地判识采动岩体的动态破坏特征^[27],提升顶底板灾害的预测预报准确度。

图10 砂岩样品破裂自然电位特征^[18]Fig. 10 SP characteristics in sandstone sample fracture^[18]

4.3 基于并行电法的岩体损伤时频特性研究

基于并行电法的多场参数同步、实时采集功能,研究了不同岩性(烟煤、无烟煤、砂岩及灰岩)岩样的时间域和频率域的电性特征,得到了在高、低电导率溶液高压饱和后不同岩性岩样的频谱激电特征,发现高电导率溶液饱和后的频谱激电特征普遍强于低电

导率溶液,并结合现代分析测试手段研究了频谱激电参数和渗透率的相关性;同时,发现岩样的时间域直流电阻率参量与其频谱激电参量(虚部电导率参量、总充电率参量和中值弛豫时间参量)呈负相关关系;此外,结合原位测试工作发现电性时频响应对采动岩体的破坏状态具有表征能力^[43]。

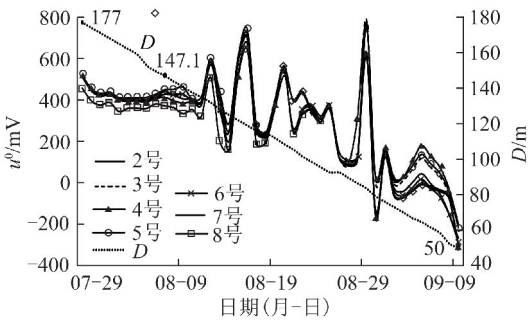


图 11 煤层开采顶板破坏过程中自然电位特征^[18]

Fig. 11 SP characteristics in roof strata damage induced by mining^[18]

5 结论与探讨

(1) 并行电法可同步、高效地获取地电场的多场、多参数数据体,实现了电阻率法、自然电场法、充电法和激发极化法等多方法并行、实时、远程测试与综合分析,实现了对矿井巷、孔空间的最充分利用,在煤矿顶底板破坏带、导水通道和隐蔽水源的二维与三维探测、采动岩体裂隙场与地下水渗流场演化的四维监测、流固系统灾变的实时在线预警等方面成效显著。

(2) 在空间域,并行电法的数据量远远超越高密度和超高密度电法,但在数据的解析与反演方面,目前仍多转换成传统的装置形式处理,数据反演的理论与方法尚滞后于先进的测试技术。因全空间、全电极距组合本质上只与激励电流及其响应电位相关,地层电阻抗(或电阻率)在线性时不变系统下可视为激励与响应的传递函数,故基于并行电法的电阻抗(或电阻率)的反演是值得探索的重要问题。

(3) 在时间域,并行电法采集的全程时间序列,包含零次场(自然电场)、一次场(激励电场)和二次场(感应电场),参数丰富、信息量大。如何把自然电场的面(体)电荷密度、一次场的电阻率、二次场的极化率进行联合反演,进而实现并行电法数据时间域信息的并行、精细解析,是亟需突破的关键问题。

(4) 时、空域同步是并行电法的核心思想之一,而从直流电法到大地电磁法,只需增加磁场分量的观测,且按照电磁正交性,目前已实现了直流电场与AMT的联合观测;在将来,可把低频的直流电法与宽频的大地电磁法相融合,实现DC、CR、AMT和CSAMT等多种方法的联合观测与反演,进而推动并行电法走向并行地电场勘探、监测的跃迁,真正实现该技术的应用价值。

参考文献 (References):

[1] 刘盛东,刘静,岳建华. 中国矿井物探技术发展现状和关键问题

[J]. 煤炭学报,2014,39(1):19-25.

LIU Shengdong, LIU Jing, YUE Jianhua. Development status and key problems of Chinese mining geophysical technology [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 19-25.

[2] 张朋,刘盛东,许进鹏,等. 复杂岩体水渗流地电场响应试验分析[J]. 地球物理学进展,2013,28(3):1557-1562.

ZHANG Peng, LIU Shengdong, XU Jinpeng, et al. Experimental on geoelectric field of water seepage of complex rock mass [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(3): 1557-1562.

[3] 张平松,刘盛东,舒玉峰. 煤层开采覆岩破坏发育规律动态测试分析[J]. 煤炭学报,2011,36(2):217-222.

ZHANG Pingsong, LIU Shengdong, SHU Yufeng. Analysis on dynamic testing results of distortion and collapsing of the top rock by geophysical method during mining of coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 217-222.

[4] 吴荣新,刘盛东,张平松. 双巷并行三维电法探测煤层工作面底板富水区[J]. 煤炭学报,2010,35(3):454-457.

WU Rongxin, LIU Shengdong, ZHANG Pingsong. The exploration of two-gateways parallel 3-Delectrical technology for water-rich area within coal face floor [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 454-457.

[5] 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 in groundwater seepage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 267-272.

[6] 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 Ligu. Physical simulation research on response geoelectricity of the aquifer in seepage mutation process [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(5): 772-777.

[7] 张平松,刘盛东,曹煜. 坑道掘进立体电法超前预报技术研究[J]. 中国煤炭地质,2009,21(2):50-53.

ZHANG Pingsong, LIU Shengdong, CAO Yu. A study on stereo electric method advance prediction technology in tunnel excavation [J]. Chinese Coal Geology, 2009, 21(2): 50-53.

[8] 刘路. 矿井直流电阻率法三维超前探测技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2014.

LIU Lu. Study on DC resistivity method 3D advanced prediction technology in mine [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.

[9] 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, 2013, 44(10): 4202-4207.

[10] 路拓,刘盛东,王勃. 综合矿井物探技术在含水断层探测中的应用[J]. 地球物理学进展,2015,30(3):1371-1375.

LU Tuo, LIU Shengdong, WANG Bo. Application of integrated min-

- ing geophysical method in detection of water-bearing faults [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(3):1371-1375.
- [11] 赵立瑰,刘盛东,杨彩,等.基于小波分析的矿井工作面涌水量评价[J].煤田地质与勘探,2011,39(6):67-71.
ZHAO Ligui, LIU Shengdong, YANG Cai, et al. The evaluation of water inflow in mine face based on wavelet analysis[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(6):67-71.
- [12] 刘盛东,张平松.分布式并行智能电极电位差信号采集方法和系统[P].中国:CN1616987,2005-05-18.
LIU Shengdong, ZHANG Pingsong. Distributed parallel intelligent electrode potential difference signal acquisition method and system [P]. China:CN1616987,2005-05-18.
- [13] 胡水根,刘盛东.电法勘探中并行数据采集与传统数据采集效率的比较研究[J].地球物理学进展,2010,25(2):612-617.
HU Shuigen, LIU Shengdong. A comparative study of efficiency about traditional electrical and collateral electrical data collection in electrical prospecting[J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(2):612-617.
- [14] 郑晓亮.工程电测 CT 仪系统研制[D].淮南:安徽理工大学,2005.
ZHENG Xiaoliang. Development of engineering electrical measurement CT system [D]. Huainan: Anhui University of Technology, 2005.
- [15] 杨海平.基于双模式并行电法采集系统的激发极化法实验研究[D].徐州:中国矿业大学,2017.
YANG Haiping. Experimental study on induced polarization method based on dual mode parallel electrical acquisition system [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [16] YANG Cai, LIU Shengdong, Feng Yang, et al. Influence of electrode polarization on the potential of DC electrical exploration[J]. Journal of Applied eophysics, 2018, 49(1):63-76.
- [17] 曹煜.并行直流电法成像技术研究[D].淮南:安徽理工大学,2008.
CAO Yu. The imager technology of concurrent electrical meter [D]. Huainan: Anhui University of Technology, 2008.
- [18] 刘静.采动岩体渗流特征的地电场显现与水害预警基础[D].徐州:中国矿业大学,2013.
LIU Jing. Geoelectric behavior responding to mining-induced rock-mass seepage characteristics and water inrush early warning basis [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.
- [19] 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):18-19,22-0.
LIU Shengdong, WU Rongxin, ZHANG Pingsong, et al. Observation of overburden destruction in coal seam by high density resistivity method[J]. Coal Science and Technology, 2001, 29(4):18-19, 22-0.
- [20] 程久龙,于师建.覆岩变形破坏电阻率响应特征的模拟实验研究[J].地球物理学报,2000,5:699-706.
CHENG Jiulong, YU Shijian. Simulation experiment study on resistivity response characteristics of overburden deformation and failure [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 5:699-706.
- [21] 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.
- [22] 张平松,刘盛东,吴荣新,等.采煤面覆岩变形与破坏立体电法动态测试[J].岩石力学与工程学报,2009,28(9):1870-1875.
ZHANG Pingsong, LIU Shengdong, WU Rongxin, et al. Dynamic detection of overburden deformation and failure in mining workface by 3D resistivity method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9):1870-1875.
- [23] NB/T51033-2015,煤层开采覆岩破坏动态视电阻率测试方法[S].北京:国家能源局,2015-04.
NB/T51033-2015, Dynamic apparent resistivity test method for overburden failure in coal seam mining[S]. Beijing: National Energy Administration, 2015-04.
- [24] NB/T 51038-2015,煤矿并行电法数据采集方法[S].北京:国家能源局,2015-04.
NB/T 51038-2015, Data acquisition method for coal mine parallel electric method [S]. Beijing: National Energy Administration, 2015-04.
- [25] 董春勇.高密度电法应用于监测底板破坏[A].中国煤炭学会矿井地质专业委员会.中国煤炭学会矿井地质专业委员会2008年学术论坛文集[C].2008:3.
DONG Chunyong. Application of high-density electrical method to monitor floor damage[A]. China Coal Society Mine Geology Professional Committee. China Coal Society Mine Geology Professional Committee 2008 Academic Forum Collection [C]. 2008:3.
- [26] 张朋,王一,刘盛东,等.工作面底板变形与破坏电阻率特征[J].煤田地质与勘探,2011,39(1):64-67.
ZHANG Peng, WANG Yi, LIU Shengdong, et al. Resistivity characteristic of deformation and failure of floor in workface[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(1):64-67.
- [27] 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]. China Coal Geology, 2009, 21(3):53-57.
- [28] 张朋,彭岩,刘盛东.采煤面底板变形与破坏地电性动态测试[J].西安科技大学学报,2013,33(2):198-202,220.
ZHANG Peng, PENG Yan, LIU Shengdong. Measurement of geoelectric dynamics of deformation and failure of coal mining face[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2013, 33(2):198-202, 220.
- [29] 刘盛东,吴荣新,张平松,等.三维并行电法勘探技术与矿井水害探查[J].煤炭学报,2009,34(7):927-932.
LIU Shengdong, WU Rongxin, ZHANG Pingsong, et al. Three-dimensional parallel electric surveying and its applications in water disaster exploration in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(7):927-932.
- [30] YANG Cai, LIU Shengdong, LIU Lu. Water abundance of mine floor limestone by simulation experiment [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, 26(3):495-500.

- [31] YANG Cai, LIU Shengdong, WU Rongxin. Quantitative Prediction of water volumes within a coal mine underlying limestone strata using geophysical methods [J]. *Mine Water & the Environment*, 2017;1-8.
- [32] 刘静. 地下水渗流地电场响应检测实验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.
LIU Jing. Experimental study on electric field response detection of groundwater seepage [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2010.
- [33] 刘静, 刘盛东, 杨胜伦, 等. 采动过程中顶板围岩水渗流自然电位响应特征[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(6): 1031-1037.
LIU Jing, LIU Shengdong, YANG Shenglun, et al. Self-potential response characteristics to water seepage in wall rocks affected by mining [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(6): 1031-1037.
- [34] 杨彩, 刘盛东, 胡泽安. 基于地电场响应的矿井顶板突水模拟实验[J]. *物探与化探*, 2012, 36(2): 220-223.
YANG Cai, LIU Shengdong, HU Zean. Experimental research on mine roof water-inrush based on response of geoelectric field to groundwater seepage [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2012, 36(2): 220-223.
- [35] 刘盛东, 杨胜伦, 曹煜, 等. 煤层顶板透水水量与地电场参数响应分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2010, 27(3): 341-345.
LIU Shengdong, YANG Shenglun, CAO Yu, et al. Analysis about response of geoelectric field parameters to water inrush volume from coal seam roof [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2010, 27(3): 341-345.
- [36] 李洪明. 泊江海子矿侏罗系3-1煤层顶板孔隙水物探应用研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014.
LI Hongming. Study on pore water above the Jurassic No. 3-1 coal seam in Bojianghaizi Mine using geophysical exploration methods [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2014.
- [37] 孙强, 刘盛东, 姜春露, 等. 砂岩地层渗流过程非饱和厚度变化的地电测试[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(7): 1350-1354.
SUN Qiang, LIU Shengdong, JIANG Chunlu, et al. Electric response tests on unsaturated layer thickness in course of seepage of sandstone [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(7): 1350-1354.
- [38] 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.
- [39] 刘静, 刘盛东, 曹煜, 等. 采动条件下一次场电位对地下水渗流响应的定量研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2013, 30(5): 748-755.
LIU Jing, LIU Shengdong, CAO Yu, et al. Response of primary electric voltage to groundwater seepage during mining operation [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2013, 30(5): 748-755.
- [40] 曹煜, 刘盛东, 唐润秋, 等. 电法并行采集AM排列推导ABM排列技术研究[J]. *物探与化探*, 2016, 40(6): 1157-1165.
CAO Yu, LIU Shengdong, TANG Runqiu, et al. Research on the derivation of ABM array for parallel acquisition of AM array technique [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016, 40(6): 1157-1165.
- [41] 郭自强, 尤峻汉, 李高, 等. 破裂岩石的电子发射与压缩原子模型[J]. *地球物理学报*, 1989, 32(2): 173-177.
GUO Ziqiang, YOU Junhan, LI Gao, et al. Electron emission and compression atomic model of fractured rocks [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1989, 32(2): 173-177.
- [42] 郝锦琦, 刘力强, 龙海丽, 等. 双轴压力下岩样自电位变化实验的新结果[J]. *地球物理学报*, 2004, 47(3): 475-482.
HAO Jinqi, LIU Liqiang, LONG Haili, et al. New result of the experiment on self-potential change of rocks under biaxial compression [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(3): 475-482.
- [43] 杨彩. 煤岩体电性时频特征研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
YANG Cai. Electrical time-frequency characteristics research of coal-rock mass [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [44] 刘静, 刘盛东, 曹煜. 基于裂隙尖端放电机制的深部岩体损伤自电特征分析[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(1): 323-330.
LIU Jing, LIU Shengdong, CAO Yu. Self-potential characteristics in deep rock mass damage based on point discharge mechanism [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(1): 323-330.