

煤层采动巨厚松散层全断面监测及内部变形特征

张平松¹, 许时昂¹, 傅先杰², 吴荣新¹

(1. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 2. 中煤新集能源股份有限公司, 安徽 淮南 232170)

摘要: 开采沉陷是煤炭资源井工开发利用所面临的主要环境地质问题, 尤其对于我国东部高潜水位矿区而言, 巨厚松散层的移动变形控制与采动减损评价备受关注。为了研究巨厚松散层内部移动机制, 明确其对地表移动变形影响, 以淮南新集矿区某井田为研究区, 通过采用分布式光纤与平行电法联合测试技术, 构建超过 600 m 深度全断面钻孔监测系统, 探究巨厚松散层变形特征和内部移动规律。全断面监测系统能够获取煤层采动区域巨厚松散层内部应变、位移信息及监测钻孔周围电阻率变化情况, 量化地层监测断面松散层内部移动变形时空关系和渗流场变化数据, 分析松散层内地层变形特征与发育形态。研究结果表明: 多参量联合测试技术的应用, 显著提高了对巨厚松散层移动变形的监测效率和变形定位的准确性, 获得了工作面回采位置与松散层内部变形时空演变关系。并根据松散层变形特征, 将采动影响过程划分为超前影响期、弱采动影响期、强采动影响期、采后沉稳期 4 个阶段, 揭示了超前影响变形表现“台阶状”形态与采动影响期的“反向 3 字型”移动特征, 同时分析了“反向 3 字型”移动模式的构成条件、影响因素。基于全断面监测数据, 提出巨厚松散层变形多场可测信息量化评价方法, 阐明了巨厚松散层在煤层开采过程中存在分层应力积累与释放的规律。研究内容为巨厚松散层内部移动变形的精细化监测分析提供重要的技术支持。全断面监测技术的应用, 也可为采动损害过程监测与评价、矿山生态源头减损与减沉、沉陷区土地规划与复垦以及松散层内注浆改造等提供参考。

关键词: 变形特征; 全断面监测; 巨厚松散层; 开采沉陷; 分布式光纤感知

中图分类号: TD325 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)01-0628-17

Internal deformation characteristics and full section monitoring for extremely thick loose layers under mining conditions

ZHANG Pingsong¹, XU Shiang¹, FU Xianjie², WU Rongxin¹

(1. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. China Coal Xinji Energy Co., Ltd., Huainan 232170, China)

Abstract: Mining subsidence represents the primary environmental geological challenge in coal mining, particularly at high water level mining areas in the eastern regions of China. The control of movement deformation and the assessment of ecological losses in the context of extremely thick loose layers have garnered significant attention. To investigate the internal movement mechanisms of extremely thick loose layers and ascertain their impact on surface movement and deformation, this study focuses on the Xinji mining area in Huainan. A comprehensive 600 m depth full-section drilling monitoring system is established using the combined testing technology of distributed optical fiber and parallel electrical methods. This system aims to explore the deformation characteristics and internal movement patterns of the extremely thick loose

收稿日期: 2023-11-29 修回日期: 2023-12-20 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YH23.1647

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41877268)

作者简介: 张平松(1971—), 男, 安徽六安人, 教授, 博士。E-mail: pszhang@sohu.com

引用格式: 张平松, 许时昂, 傅先杰, 等. 煤层采动巨厚松散层全断面监测及内部变形特征[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1):

628-644.

ZHANG Pingsong, XU Shiang, FU Xianjie, et al. Internal deformation characteristics and full section monitoring for extremely thick loose layers under mining conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 628-644.



移动阅读

layer. The full-section monitoring system captures internal strain and displacement information within the coal seam mining area, monitors changes in resistivity around the borehole, quantifies the spatio-temporal relationship between deformation in the stratum monitoring section, and analyzes the deformation characteristics and development forms of the inner stratum of the loose layer. Results indicate that the application of multi-parameter joint testing technology significantly enhances the monitoring efficiency and the accuracy of deformation location in the extremely thick loose layer. A relationship between the mining position of the working face and the internal deformation of the loose layer is established, dividing the mining influence process into four periods: the pre-influence period, weak mining influence period, strong mining influence period, and post-mining settlement period. The observed “reverse 3-shaped” shape movement model during advance influence deformation is verified, and the constitutive conditions and influencing factors of this model are analyzed. This model reveals the law of the accumulation and release of stratified stress during the process of coal mining in the extremely thick loose layer. The research outcome provides an essential technical support for the fine monitoring and analysis of the internal movement and deformation of the extremely thick loose layer. The acquired technical data serves as a crucial reference for monitoring and evaluating the progression of mining-induced damage, mitigating losses, reducing subsidence in ecological mining areas, devising land planning strategies for subsidence regions, and assessing the effectiveness of grouting transformations in loose geological layers.

Key words: deformation mechanism; full-section monitoring; extremely thick loose layer; mining subsidence; distributed fiber optic sensing

煤炭在我国能源结构中占据重要的基础性地位,在推动经济社会的高质量发展和确保能源安全与稳定性供给方面做出了巨大的历史性贡献^[1-5]。我国东部矿区,进行巨厚松散层覆盖下煤炭资源开采时,地表下沉现象显著,表现出下沉量大于采高、沉陷范围大、沉稳时间长、活跃期集中且剧烈等现象^[6-11]。并且,由开采所引起的土地占用和地表沉陷治理成为限制矿区发展最严重的问题之一,这些问题在煤炭资源分布区与经济社会发展圈的重叠区以及高潜水位矿区显得更为突出^[12-13]。以两淮矿区为例,淮北采煤塌陷土地2.77万ha,造成失地农民人数达到27.6万之多;淮南矿区塌陷累计面积也近3.33万ha,涉及搬迁人口也达到了17.4万余人。两地因搬迁及沉陷区生态修复累计投入资金已达数百亿。其中淮南采煤沉陷影响区域已占据了城市总面积的10%以上。随着煤炭开采的持续进行,矿区沉陷面积及影响范围还将进一步扩大^[14]。

巨厚松散层矿区沉陷行为的特殊性,加上松散层土体在物理力学性质和赋存环境的复杂性,使得对其移动、变形等特征进行研究成为众多学者关注的焦点和难点,同时这也是煤矿企业在安全生产中高度重视的工程问题。地表稳沉的范围和时间的不确定性,除了直接影响工业广场和井筒的安全运行,还对矿区生态修复、安全生产和可持续发展提出了极大的挑战^[15]。我国对于松散层变形研究起源于20世纪50年代,此时研究多关注“三下”开采,通过建立地表移动观测站获得地表沉陷数据;至20世纪80年代,华东地区出

现大面积的井筒破裂的问题,同时巨厚松散层下开采所导致的地表移动、工业广场建筑物损坏以及塌陷区异地搬迁等问题,对其细致研究逐渐兴起。一些学者研究了松散层与井筒之间的作用机制,并深入分析松散层内部变形机理;何国清等^[16]探讨了水平移动变形分布规律、预计和误差控制方法的优化,在一定程度上促进了地表沉陷预测、评价水平的提高;陈俊杰等^[17]探讨了应力演化分区对地表沉陷影响,分析了应力分布与地表移动的机理,研究提出将松散层与基岩分开评价,以松散层厚度与基岩厚度比来评定采动程度;李文平等^[18]通过室内试验研究了大理深土与井壁相互作用,分析了砂、黏土互层组成的含水层组失水变形及黏土层固结压缩变形相关机理,指出深部土层失水变形从深部开始,且深部的位移大于浅部;隋旺华等^[19]研究了采动作用下沉陷土体与孔隙水压之间作用关系,揭示厚松散含水层开采沉陷机制,发现应力分区从采空区向上依次发育为双向拉应力、拉压应力区及双向压应力去,并表现出较为明显的分带性;吴侃等^[20]以物理相似模拟试验为基础,分析了采动作用下竖向裂缝优先由地表发生的松散层变形破坏特征,认为土体内部非黏性土在变形过程中还充当滑动层的作用;许延春等^[21-22]研究了采矿引起厚松散层变形特征,发现厚松散层内部移动边界有明显的曲线特征,得出松散层内部移动角参数存在分层差异,提出了依据埋深和沉积年代划分松散层中第四系、第三系地层进行分段确定角量参数用来设计保护煤柱的留设参数更为准确;戴华阳等^[23]提出了急倾斜煤层开采

条件下地表变形特征,通过数值计算研究松散层软弱面非连续变形的形态和机理,讨论了地表移动及其变形预计方法和极值的问题;张丁丁等^[24]采用相似松散层沉降变形物理模型试验装置,探究了光纤光栅测试技术在注水和失水条件下厚松散层沉降观测中的应用;左建平等^[25]在厚松散层水平煤层开采条件下,建立岩层移动与地表沉降内外“类双曲线”模型理论;汪锋等^[26]研究了关键层与松散层结构组合的形态特征,提出了“关键层-松散层拱”模型分析其变形及内力分布,利用数值模拟,获得松散层内部变形发育松散层拱的认识;刘义新等^[27]通过钻孔电视探测和多点位移传感器对厚黄土层采动条件下沉陷进行实时监测,得到厚黄土层近似整体下沉;刘世齐等^[28]研究了厚松散层薄基岩条件下黏-岩协同变形及其结构失稳突变模型,利用沉降仪和倾斜仪对姚桥煤矿7267工作面开采后松散层内部移动变形进行了探测,同时还利用全站仪对钻孔位置变形进行观测。基于前人的研究成果,发现过去的研究主要集中在300 m以浅的松散层变形现象,沉陷动态发育过程表征不够明确,变形传递机理有待深入。而且现有观测手段多为点式测量,无法提供精细的地层内部变形定位。同时,研究内容多为变形后的结果,过程中的动态数据与长周期量化分析方面存在不足^[29-30]。

淮南新集矿区的松散层覆盖厚度平均厚度超过500 m,其内部变形研究难度大。笔者以淮南新集矿区某矿110801首采工作面为研究对象,构建了600 m深度全断面监测系统,完成煤层开采过程及停采后沉稳期间数据采集,探究煤层回采过程中巨厚松散层内部变形特征和移动规律,提出巨厚松散层变形多场可测信息量化评价方法,揭示巨厚松散层立体空间变形机理与内部分区特征。研究结果能够为开采沉陷源头治理与过程控制提供基础数据^[31-35]。

1 监测技术原理及系统构建

1.1 全断面联合监测技术

全断面监测技术采用分布式光纤-并行电法(简称“光纤-电法”)联合开展测试。其中,分布式光纤感知技术作为一种新型传感技术,兼具信号测试与传输的优势^[36]。其基本原理利用光波在光纤中传播时特征参量(频率、相位、波长等)会随着被测对象影响因素的变化(如压力、温度等)而发生相应的变化^[37]。通过建立起环境变量与光纤传感器自身参量之间的函数关系,实现多种变量如应变、温度、振动、位移等的测量与监测(式(1))^[38]:

$$\begin{cases} f_B(\varepsilon) = f_B(0) + \frac{df_B(\varepsilon)}{d\varepsilon} \varepsilon \\ f_B(T) = f_B(0) + \frac{df_B(T)}{dT} T \end{cases} \quad (1)$$

其中, $f_B(0)$ 为光纤初始布里渊频率; ε 为应变; T 为温度; $f_B(\varepsilon)$ 为受测试环境改变影响后的布里渊频率; $\frac{df_B(\varepsilon)}{d\varepsilon}$ 为光缆应变系数; $f_B(T)$ 为受测试环境改变影响后的布里渊频率; $\frac{df_B(T)}{dT}$ 为光缆温度系数。当测试区段的温度变化小于±2 °C时,可不进行温度校正。原理如图1(a)所示。

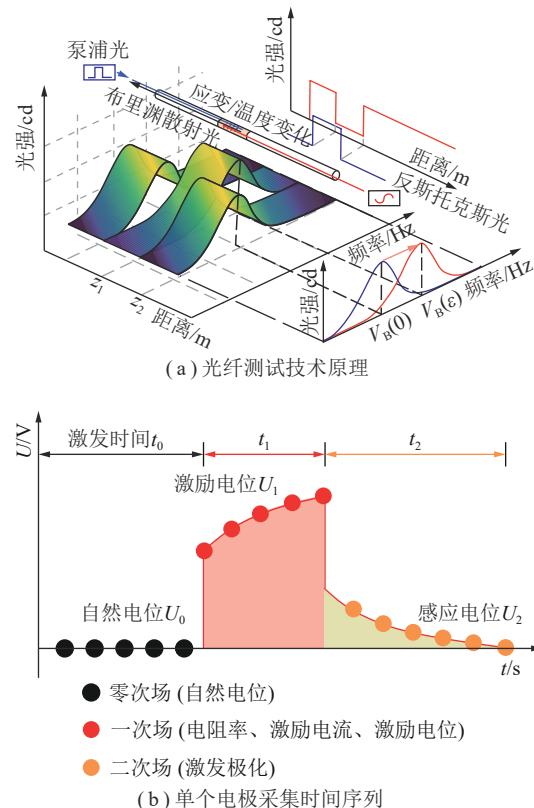


图1 测试技术原理示意

Fig.1 Schematic diagram of the test technique

此外,采用并行电法测试技术可完成传统电法的各种测量装置数据采集,获得丰富数据,并能够高效处理数据是该系统的核心^[39]。其基本原理通过单点电源供电,剩余电极同时在并行采集电位数据,只需一次测量,即可实现二极、三极等装置的数据处理及反演(式(2))^[40-41]:

$$\left\{ \begin{array}{l} I = \frac{U}{R} \\ R = \int_a^\infty dR = \frac{\rho}{2\pi a} \\ \Delta d = G \Delta m \\ (G^T G + \lambda C^T C) \Delta m = G^T \Delta d \end{array} \right. \quad (2)$$

其中, I 为供电电流; U 为供电电压; R 为接地电阻; a 为供电电极半径; ρ 为电阻率; \mathbf{G} 为 Jacobi 矩阵; $\Delta\mathbf{d}$ 为观测数据与正演数据计算值的残差向量; $\Delta\mathbf{m}$ 为初始模型的修改向量; \mathbf{C} 为模型光滑矩阵; λ 为阻尼因子。原理如图 1(b) 所示。

1.2 全断面监测系统构建

巨厚松散层监测系统构建的难点主要在于松散层力学性质与胶结强度同岩石差异大, 施工中虽然钻进速度快, 但极易出现缩孔、塌孔, 这也是导致传统钻孔观测手段, 如钻孔电视、测斜仪、分层沉降仪以及多点位移计等难以实施与进行监测的主要原因^[42]。尤其是针对研究区超过 500 m 的巨厚松散层, 内部变形观测的难度进一步增加。光纤-电法联合测试技术优势为实施松散层内部变形监测提供了可能性。

全断面监测系统实施需要综合考虑场地条件、施工工艺、测试技术等方面内容。因此, 监测系统构建主要解决以下内容: ① 巨厚松散层钻孔成孔工艺; ② 监测钻孔裸孔安装; ③ 传感单元与钻孔耦合; ④ 监测系统构建。以此形成全断面监测系统构建(图 2),

全断面监测系统可以实现地面至基岩界面, 包括巨厚松散层内部全地层空间, 在采动过程中的连续、动态的变形测试。监测系统的构建要素的详细内容, 见表 1。

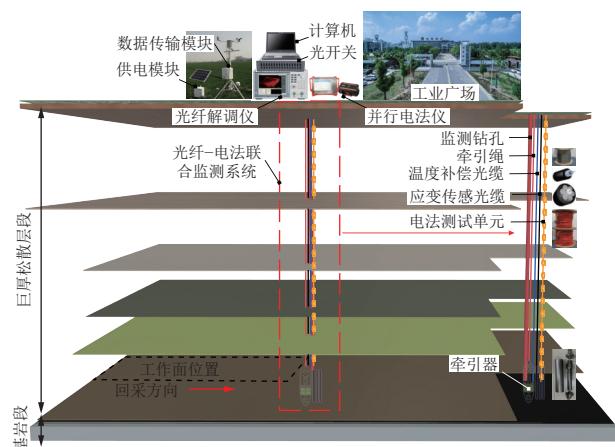


图 2 巨厚松散层全断面监测系统构建

Fig.2 Construction of full-section monitoring system for extremely thick loose layer

表 1 全断面监测系统构建要素

Table 1 Components of the full-section monitoring system

实施项目	施工工艺	解决难题
监测钻孔施工	① 二次成孔: 小孔径开孔, 钻进至设计深度后, 通过扩孔, 以满足钻孔安装条件; ② 泥浆配比改善: 增加黏土容重, 添加纳羧甲基纤维素, 以降低水分流失, 提高泥浆黏性。具体: 失水量小于 12 mm/min, 密度 1.0~1.2 g/cm ³ , 黏度 30 s; ③ 钻进压力与转速: 根据钻进地层性质进行实时调整	确保钻孔孔壁质量, 减少含隔水地层段钻孔内壁扰动; 确保钻孔终孔偏斜度, 确保监测钻孔顺直度; 提高井壁稳定性, 为传感线缆下放提供条件
600 m 裸孔安装	① 优化导向牵引器: 设计拼接牵引器, 可以根据钻孔条件, 调整配重, 同时增加深度感知传感器; ② 多传感单元同步下放: 优化多线缆同步安装工艺, 设计高强度牵引绳	实时获得传感单元下放深度, 确保传感单元下放至指定深度; 形成传感单元与松散层土体的直接接触
钻孔分层回填	① 优化钻孔回填料及回填方式, 钻孔回填料选取石英砂、中砂及黏土球; ② 结合地层岩性组成, 进行分层回填, 回填前根据已有地质资料计算分层回填量	确保钻孔回填后与原地层结构的一致性, 以期传感单元获得准确地层形变信息
监测系统组建	① 钻孔保护单元: 孔口线缆及数据采集单元实施保护; ② 数据采集单元: 光纤解调仪、光模块、供电模块; ③ 数据传输系统: 无线传输模块、数据处理平台	获得工程场地动态数据采集; 实现数据快速传输与分析

2 研究区概况

2.1 研究区工程概况

以淮南新集矿区某井田 110801 首采工作面为主要研究对象。该工作面上覆地层松散层厚度范围在 542(37-1 钻孔)~713 m(28-1 钻孔), 平均厚度为 580 m 左右, 为典型的巨厚松散层结构。工作面内 8 煤地层倾角较为平缓, 平均倾角为 8°; 煤厚 0.8~3.7 m, 埋深 689.2~801.4 m。110801 工作面设计走向长 1 280 m, 倾向宽 260 m, 采用走向长壁综采法回采, 顶板管理为一次采全高垮落法, 平均采高为 2.2 m。已有研究表

明, 区内巨厚松散层下煤层开采除了形成大面积塌陷、积水区外, 对井筒及工业广场影响尤为严重。

2.2 “四含三隔” 地质模型

结合井田地质勘探信息和水文地质资料分析, 绘制了 110801 工作面附近 31-9 钻孔柱状图(图 3)。在研究中为了方便相关研究工作开展, 根据地层沉积特征, 将多个岩性相似、工程物理性质相近的地层, 进行归类, 结合早期黄淮海平原地层分组情况, 构建研究场地 4 个含水层组、三隔隔水层组(后简称“四含三隔”)的工程地质模型, 地层概况见表 2。

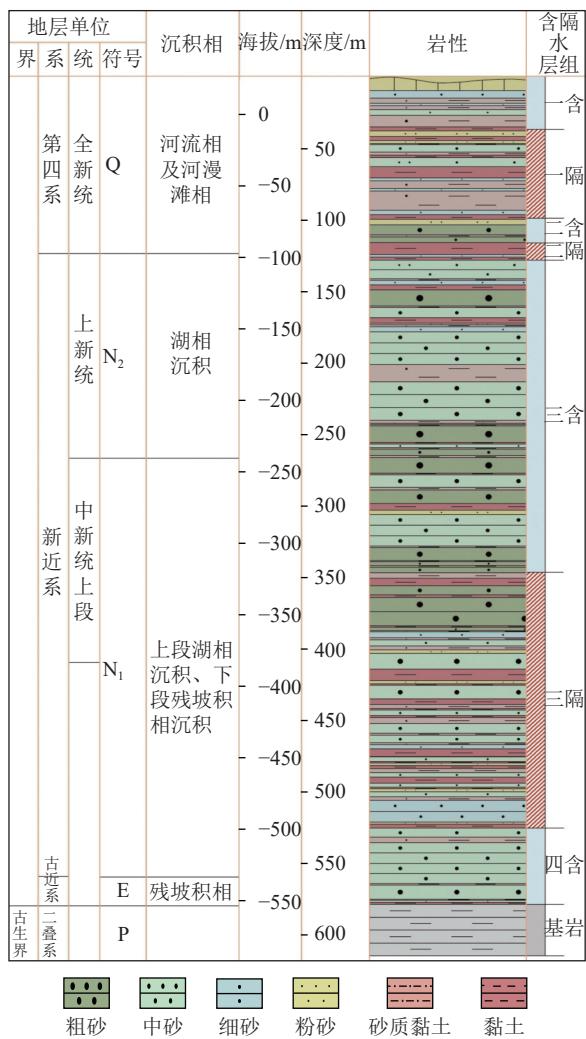


图 3 31-9 钻孔“四含三隔”巨厚松散层综合柱状

Fig.3 No.31-9 borehole synthesis histogram of extremely thick loose layer of four aquifers and three aquifers

3 巨厚松散层内部变形机理

随着煤层采出,直接顶岩体向下垮落,上覆岩体形成垮落带、导水裂隙带及弯曲下沉带。这些地层内部的变形最终会传导至地表,导致地表沉陷^[43-44]。通

常煤层顶板垮落带形成后,直接顶掉落充填采空区,因其兼具碎胀性,故基岩内实际下沉值通常小于采高^[45-46]。厚松散层矿区地表实测数据结果,沉陷下沉系数大于1,说明松散层内附加变形是使得下沉值超过采高的主要原因。

研究区巨厚松散层中含隔水层组中三含、四含中均发育有封闭性较好的承压水,采空区上方弯曲变形带的下沉,增加了承压层的水头差。与此同时,弯曲沉自下而上的传递过程,使得四含优先变形,当三隔层位未发生变形时,四含空间增大,而在地下水补给较弱的情况下,难以迅速补充。而稳定承压水形成的条件也是水头高度下降后,能够得到稳定、等势能的补给。在其无法补给的情况下,采动作用造成水头高度下降迅速,就会造成含水层的压缩,如图4所示。

同时,分布于隔水层之间的含水层,在水头高度未发生变化前,对上覆隔水层存在有顶托力,并且,相关研究表明顶托力大小与承压水的水头高度成正比。而采空区的临空面及下沉盆地会导致,含水层水头高度下降,而此时含水层中依然是充满水,但存在地下水降深的降落漏斗。此时平衡状态会被打破,承压水减压。故在上覆土层和承压层的界面处则会产生一个向下的附加作用力(图5)^[47],作用力f为

$$f = r_w \frac{Q}{2\pi k M} \ln\left(\frac{R'}{r}\right) \quad (3)$$

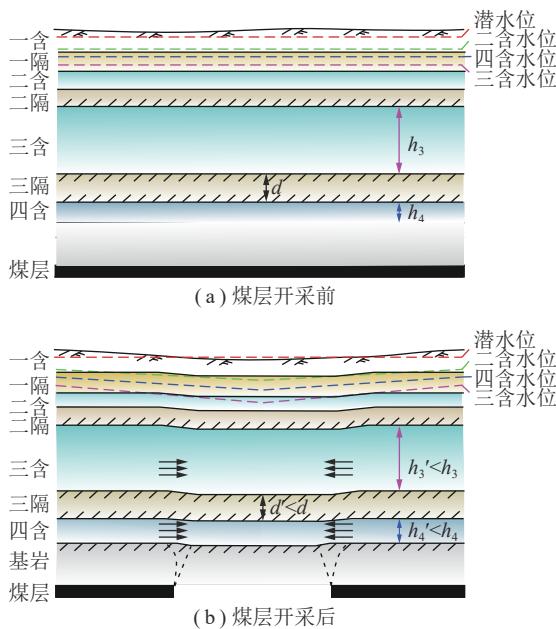
式中, r_w 为采空区弯曲步距; Q 为变化流量; k 为渗透系数; M 为含水层厚度; R' 为影响半径; r 为计算点至采空区下沉中点的径向距离。

研究区地面标高为24~26 m,地下潜水位标高为21~23 m,不同含水层承压水位为15~18 m,而松散层平均厚度为580 m,因此在计算中可以进行简化,认为地下水水位与地表齐平。此时,松散层内部任意一点仅作用自重应力 σ_{cz} 和水平侧向应力与剪应力^[48]分别为

表 2 研究区工作面附近地层概况

Table 2 General situation of strata near the working face in the study area

含、隔水层	平均厚度/m	主要地质特征	富水性
一含	37.2	以黏质砂土为主,含粉、细砂,质不纯	中等富水,弱承压水
一隔	61.9	以砂质黏土、黏土为主,间夹薄层细、粉砂,黏土塑性好	无
二含	19.4	由中、细砂和薄层黏土、砂质黏土组成	中等富水,弱承压水
二隔	12.0	以砂质黏土、黏土为主,间夹薄层细、粉砂,黏土结构致密厚度变化大	无
三含	246.4	由细、中砂和薄层黏土、砂质黏土组成	强富水性,水压2.5~2.8 MPa
三隔	148.7	由厚层黏土、砂质黏土和多层细砂组成,黏土质纯,可塑性较强,具膨胀性	无
四含	48.5	由上部厚层中、细砂层和下部砂砾层组成,夹薄层黏土、砂质黏土	中等富水,水压7.5~5.7 MPa



注: d 、 h_3 、 h_4 分别为煤层开采前三隔、三含、四含地层厚度; d' 、 h'_3 、 h'_4 分别为煤层开采后三隔、三含、四含地层厚度。

图 4 煤层开采松散层变形示意

Fig.4 Deformation diagram of loose layer during coal seam mining

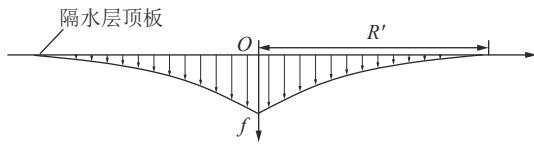


图 5 隔水层界面附加应力分布示意

Fig.5 Diagram of additional stress distribution at the interface of the barrier

$$\begin{cases} \sigma_{cx} = \sigma_{cy} = 0 \\ \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

土体自重根据经典土力学中有存在地下水土体自重应力 σ_{cz} 和侧向应力 σ_{ch} ^[49-50] 为

$$\begin{cases} \sigma_{cz} = \gamma' z \\ \sigma_{ch} = \sigma_{xy} = \sigma_{yz} = K_0 \sigma_{cz} \end{cases} \quad (5)$$

其中, γ' 为有效容重; z 为计算点距离地表的深度, K_0 为静止侧压系数。根据沉积地层情况研究中对应砂层和土层为密砂和超固结黏土, 因此计算式分别取 K_0 的典型值 0.5 和 1.0。

在 n 层土体组成松散层的内部, 则有

$$\sigma_{cz} = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \cdots + \gamma_n h_n = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (6)$$

地下水位以下土层中, 式(5)中 γ_i 用 γ'_i 进行替换。同时, 土体中还存在孔隙水压力 u_0 , 其计算公式为

$$u_0 = \gamma_w h_w \quad (7)$$

式中, γ_w 为水的容重; h_w 为计算点水头高度。

故松散层内部, 煤层未开采前某一点所受竖向总应力 σ_v 和侧向总应力 σ_h 分别为

$$\begin{cases} \sigma_v = \sigma_{cz} + u_0 \\ \sigma_h = \sigma_{ch} + u_0 \end{cases} \quad (8)$$

当煤层开采后, 地下水位下降会导致孔隙水压力 u_0 减小, 同时在隔水层上方产生附加应力 f 。此时, 松散层内部的该点受力平衡变为

$$\begin{cases} \sigma_v = \sigma_{cz} + u'_0 + f \\ \sigma_h = K_0(\sigma_{cz} + f) + u'_0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, u'_0 为煤层采后松散层内孔隙水压力。

由式(8)、(9)可知, u'_0 受到地下水位降深影响, 较初始孔隙水压力 u_0 减小。土体中的有效应力增加, 土体颗粒重新排列, 在隔水黏性土层上界面竖向应力也增加, 表现出地层的压缩。而隔水黏性土层下方界面受压减小, 特别有不稳定矿物成分的黏性土界面容易受到水分影响, 会发生渗透压的改变, 发生界面释水。而含水层则由于水位下降, 含水层上部土体中孔隙中水压力减小, 导致含水层土体颗粒的排列更加紧密, 进而出现含水砂层体积缩小。故在地层沉降作用影响下, 以及含水砂层快速压密情况下, 含水砂层上界面会出现短暂的离层。叠加变形作用导致结果为加剧地表沉陷幅值。

4 监测系统原位测试

4.1 系统设计与安装

根据该矿的生产计划, 本次监测钻孔设计围绕 110801 工作面进行布置。由于研究重点为巨厚松散层部分, 因此钻孔的设计深度为从地表穿过松散层进入基岩界面后向下延伸 30 m 深, 主要监测区段位于松散层段。图 6 为监测钻孔布置平面示意及安装记录。

监测钻孔内有效感测长度为钻孔安装深度。其中 1 号监测钻孔位于工作面终采线附近, 4 号监测钻孔位于工业广场附近, 与 1 号监测钻孔相距 1 270 m, 2 者区别在于 4 号监测钻孔不受开采扰动影响。监测钻孔施工参数见表 3。监测钻孔平面位置如图 7 所示。

4.2 数据采集

监测数据采集自钻孔安装并回填完成后进行, 待钻孔回填料沉稳结束后, 以稳定数据作为背景数据, 1 号监测孔获得采前 715 m 至采后 -44.5 m 过程松散层内部变形数据; 4 号孔在采动影响区外, 用以对比 1 号监测孔数据结果。故监测周期内, 获得了全地层内部密集的变形数据体, 动态反映松散层不同深度的发育情况。

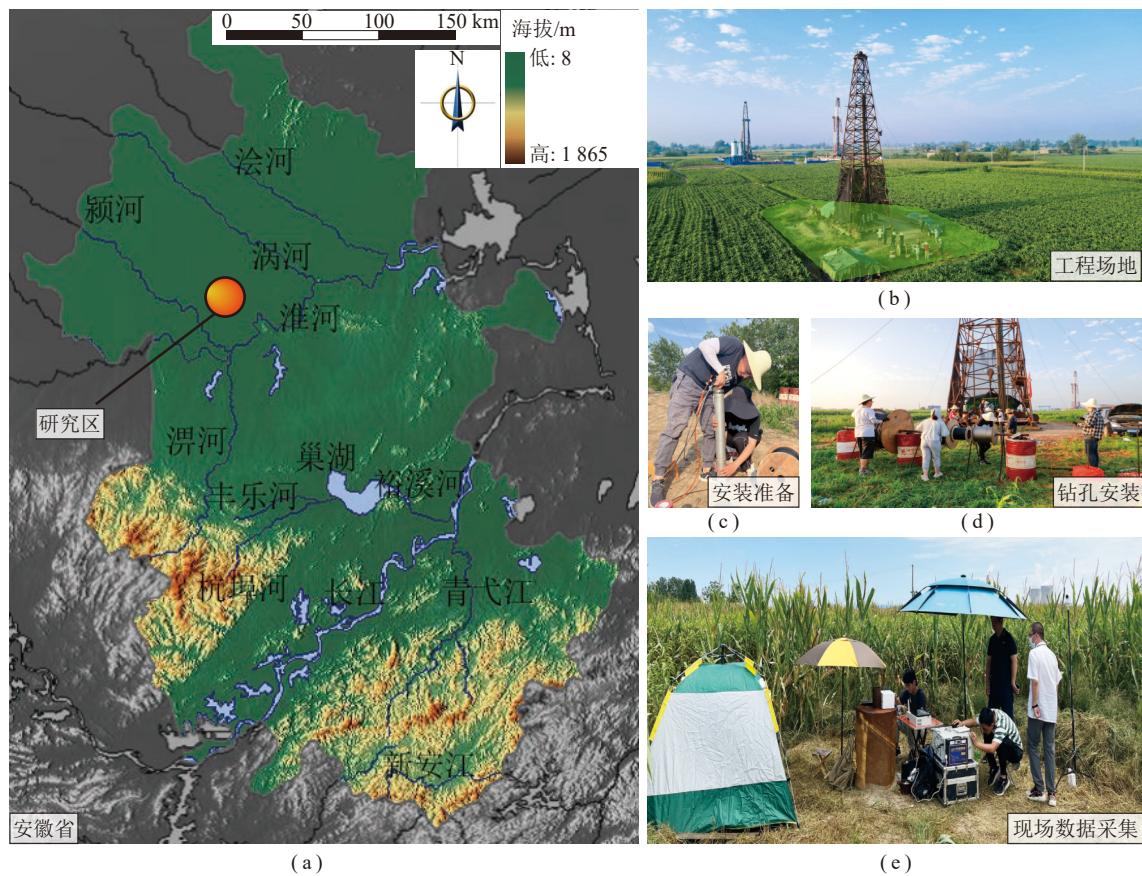


图 6 全断面监测系统布置与安装

Fig.6 Layout and installation of full-section monitoring system

表 3 监测钻孔设计及安装参数

Table 3 Design and Installation parameters of monitoring boreholes

钻孔	设计深度/m	施工深度/m	安装深度/m	安装层位	孔底斜度/(°)
1号	630	629	620	基岩	1.85
4号	630	630	607	基岩	2.09

现场数据采集,选用了AV6419光纤解调仪。该设备性能稳定,基于布里渊时域散射技术,进行单端发射与接收,可开展连续数据采集。同时,单端测试也使得在测线出现损伤后,依然可以获得损伤点之后的测试数据。根据监测要求,解调仪空间分辨率设置为1 m,采样间隔设置为0.1 m。此外感测光缆为铠装钢绞线光缆,即使用金属加强件对纤芯进行保护,封

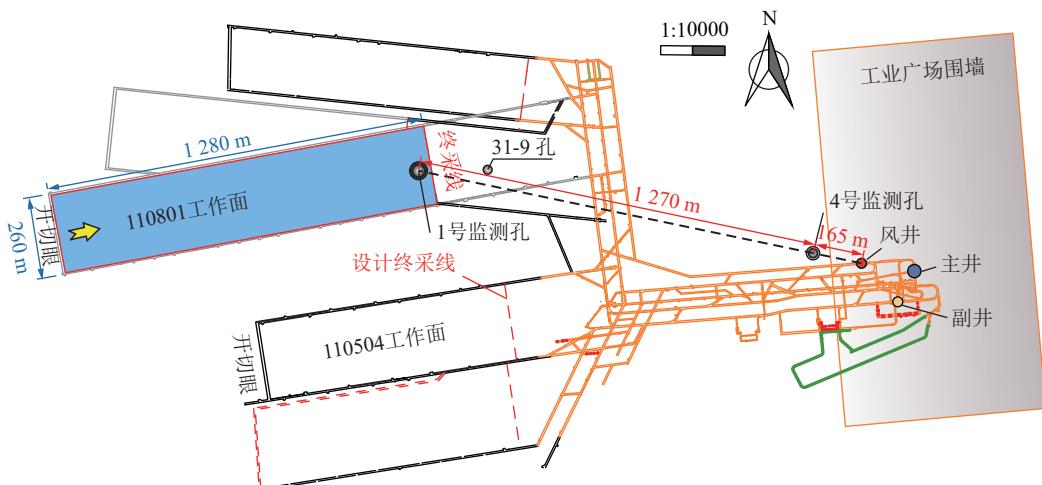


图 7 工程场地监测钻孔平面位置

Fig.7 Layout plan of monitoring boreholes at the project site

装后的光缆直径 5 mm, 抗拉强度 20 kN, 其纤芯应变传递系数为 0.047 8。巨厚松散层变形过程中兼具地层拉伸与压缩等形变, 考虑光缆在使用过程中对拉应变较压应变反映更为敏感, 故在定制光缆时须对光缆进行预拉, 以保证现场数据采集的准确性及长周期观

测需求^[51-53]。

4.3 监测数据分析

图 8 分别为 1 号和 4 号监测孔应变分布数据，其中横坐标表示钻孔深度，纵坐标表示累计应变分布曲线。

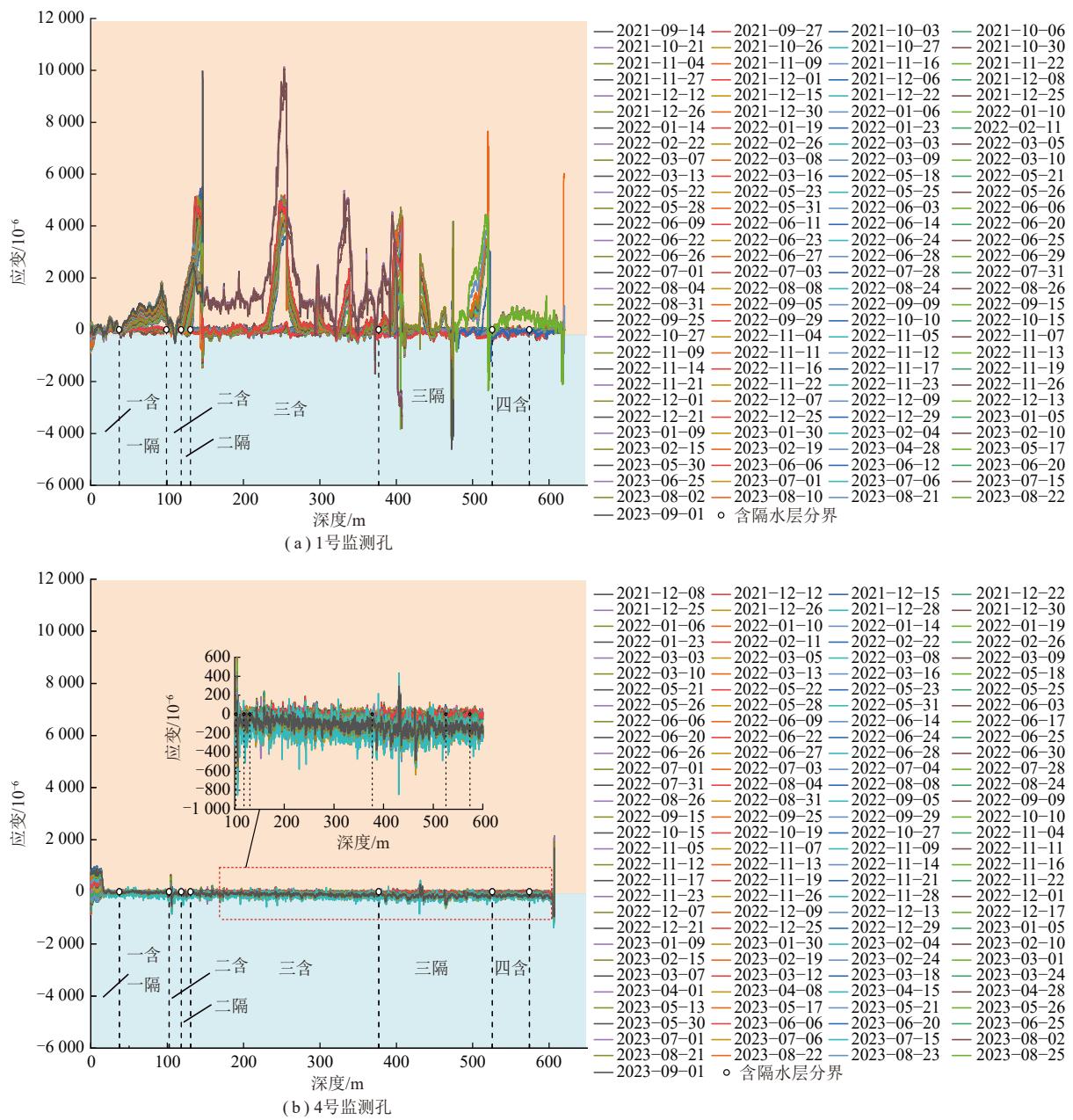


图 8 监测钻孔光纤数据应变分布时程曲线

Fig.8 Strain distribution time-history curves of the monitored borehole fiber optic data

数据分析中,应变正值为拉应变,表示对应地层位置发生拉伸;应变负值表示压应变,说明对应地层发生压缩。钻孔测试结果可以观察到在不同深度,钻孔的变形分布并不均匀,并且应变大小也呈现不连续的特点。测试结果表明,全断面监测系统获得极为丰富的动态变化数据,能够反映形变发生位置。由图8(a)测试结果可知,位于工作面回采范围内的1号监测孔

应变分布随工作面推进,在不同深度地层分别发育拉应变与压应变,并且数据变化在煤层采动作用下变形特征明显,其中最大拉应变为 $10\ 356 \times 10^{-6}$,最大压应变为 $4\ 723 \times 10^{-6}$,且存在多个拉应变峰值区和压应变峰值区;而处于沉陷影响外围4号监测孔应变分布相对稳定,其应变变化相对较小,仅在局部地层发育少量拉应变,整体分布以压应变为主,其中最大拉应变

仅为 485×10^{-6} , 最大压应变达到 825×10^{-6} (图 8(b))。说明煤层采动对沉陷影响的显著性突出, 而影响范围之外, 松散层几乎不受采动影响。

1号监测孔应变数据分析可知, 工作面开挖前, 井田范围内应力状态处于相对平衡状态。工作面开挖形成采空区后, 上覆地层会发生移动变形, 破坏了井田范围内地层应力平衡状态。在采空区上方形成一个卸压区, 以采空区为中心的周边地层就会出现向卸压区转移应力的情况。而松散层介质抗拉强度非常有限, 导致局部地层出现较大的拉应变。

结合研究区下水位观测结果, 井田区域内三含、四含水位收疏放水影响, 出现持续性下降(图 9(a)), 在监测周期内, 四含水位平均降深达到了 5.1 m 左右,

三含水位平均降深达到 4.3 m。由此, 进一步分析了 1号监测孔与 4号监测孔累计变形量(图 9(b))。根据 1号监测钻孔与 4号监测钻孔对比的累计变形实测数据, 说明含水层水位的持续下降会引起松散层内部产生压缩变形, 2者全地层变形趋势基本一致。由于 1号监测孔靠近开采工作面, 其变形幅值较 4号监测孔更大, 并且在进入开采强扰动期后, 4号监测孔的空间位置远, 其在变形时间上滞后于 1号监测孔变形。这也表明, 在煤层采动过程中, 地下水位变化所引起的地表沉降变形也是其中影响因素。采动影响范围外的地下水位降深也会引发地表沉降, 其影响范围更大, 相比较采动影响的沉降幅值相对较小。

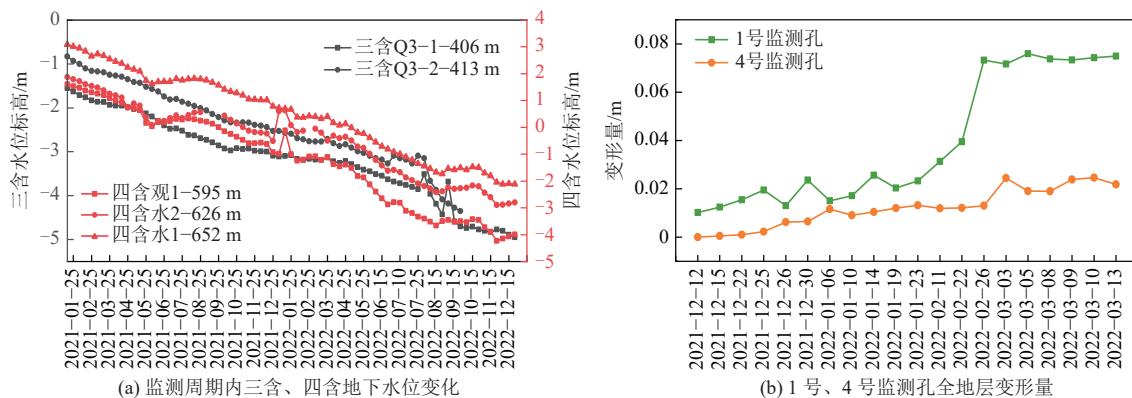


图 9 地下水位变化与监测孔全地层变形量结果

Fig.9 Results of groundwater level changes and cumulative deformation amount in monitoring boreholes

4.4 工作面回采松散层内变形与地层对应关系

为了更全面地呈现不同回采位置与相应地层形变之间的关系。在工作面回采过程中, 分析了 1号监测钻孔巨厚松散层内部变形分布位置及演化过程。结果展示中约定了相对距离变化的规则: 当相对距离为正值时, 表示工作面回采位置位于监测钻孔之前; 而当相对距离为负值时, 表示工作面位置经过监测钻孔位于其后方。其应变空间分布与地层对应关系, 如图 10 所示。全断面监测钻孔变形位置与地层岩性关系密切, 能够较好对应不同含隔水层组岩性组合。

图 10 中记录数据范围为回采位置距离监测钻孔之前 715.5 m 至经过工作面后 44.5 m 过程的数据。根据工作面不同回采位置松散层内变形应变分布与地层对应关系发现, 在工作面距离 1号监测孔 598.8 m 时, 四含及三隔层内发育压应变, 最大应变 -485×10^{-6} ; 其间相对距离 179.7 m 时地层内部变形发育至地面, 此时在 522.3 m 与 249.2 m 发育拉应变峰值; 对应 31-9 地层柱状图, 在对应深度黏性土层内发育压应变, 如 149.6、389.1、402.5、476.4 m 深度, 地层出现强压

缩层位, 最大压应变达到 3789×10^{-6} 。

根据图 10 全断面监测系统获得应变分布结果可知, 松散层变形发育位置与地层岩性组成关系密切, 优先发育在含隔水层界面。由于前文所述“含隔水层组”并非完全单一砂层或黏性土层形成的含水层与隔水层, 因此在不同含隔水层中, 在采动影响作用下, 会发生层组内形变。其变形特征受隔水层附加应力影响, 在黏性土层上界面形成层内压缩, 如 148.5、417.6、482.3、524.7 m 等位置出现明显压应变峰值区分布。结合 31-9 柱状图对应岩性特征分析, 其中厚黏性土层对于松散层变形表现控制作用, 及其在附加应力影响下, 形成界面弱化。

综合分析“四含三隔”的含隔水层组中, 含水层上界面通常会发育拉应变峰值区, 即在采动影响下, 含水层水位发生快速降深, 含水层与隔水层间发生离层。其原因是由于含水层通常由砂层组成, 其孔隙率相对较大, 尤其中粗砂介质, 水动力条件的改变, 含水层的水头压力快速减小, 砂土中孔隙水压力也减小, 导致有效应力的增加, 引发了砂土层的快速压缩。而黏性

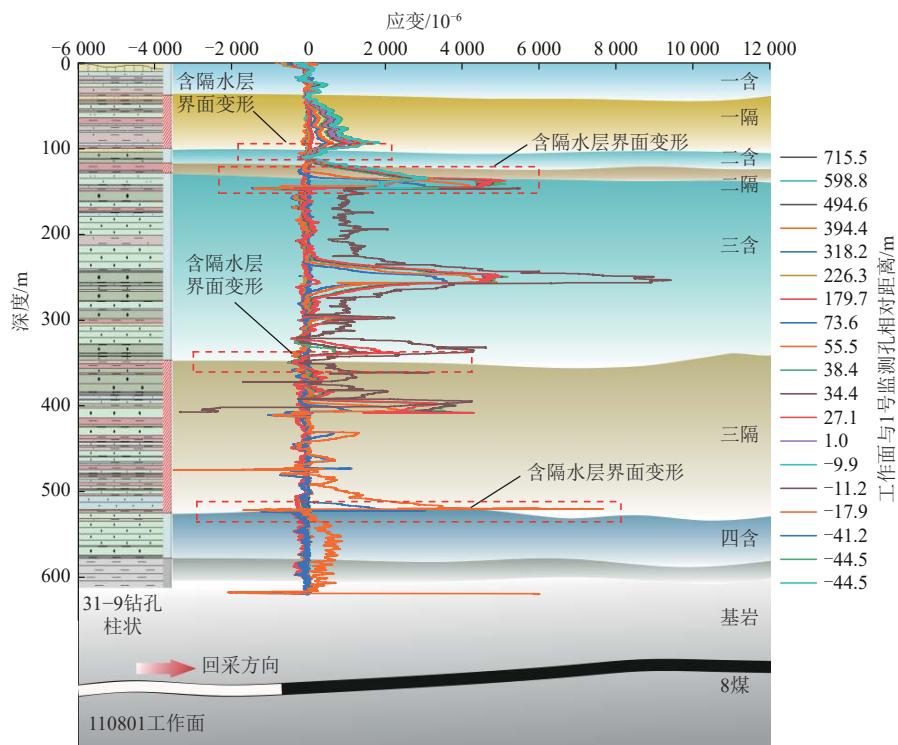


图 10 监测钻孔应变分布与地层对应关系

Fig.10 Relationship of the distribution of monitored borehole strain and strata

土界面应力平衡打破,局部地层会界面弱化,出现所述强压缩,其压缩幅值较含水层值更大,最大压缩量为含水砂层最大压缩量的 12.8 倍。实测结果表明,黏性土层变形滞后,使得巨厚松散层内部变形表现非整体性移动特征。

5 巨厚松散层内部变形演化特征

5.1 松散层内部变形过程

进一步分析煤层开采对松散层内移动变形的影响关系。以 1 号监测钻孔变形数据为例,分别选取了一隔层内 61.5、95.4 m;二含层内 110.2 m;二隔层内 126.6 m;三含层内 138.1、261.5、332.4 m;三隔层内 398.3、442.5、507.9 m;四含层内 545.9、574.3 m 多个特征点进行变化过程分析。其形变结果如图 11 所示,图中展示了 1 号监测钻孔开挖至挂网收作后 60 d 的特征点变形特征。特征点形变数据更加清晰的展示了松散层内部各个含隔水层形变情况。

根据图 11(a)所示结果,不同深度地层特征点在不同数据采集日期获得的变化表征存在差异,即在不同数据采集日期所对应工作面与 1 号监测钻孔相对距离不同的影响下,松散层内不同层位变形启动与变化不同。

工作面回采与监测孔相对距离由远及近,采动影响对前方松散层的影响也表现出由弱及强的特点(图 11(b)),可将工作面开采对松散层扰动划分为 4 个

时期:①超前影响期,该时期以含水地层变形轻微压 缩为主,隔水层保持相对稳定,这种变形主要影响因素为含水层向采空区运移,形成地下水降深变化所导致;②弱采动影响期,该时期地层变形进一步加剧,地层内含隔水层同时发育,含水层变形幅值和速率较隔水层变形程度更大;③强采动影响期,此时工作面回采位置距离 1 号监测钻孔 272.6 m,该过程中含水层压缩转变为地层拉应变,同时隔水层位也表现拉应变趋势,而含水层拉应变变化为陡升,隔水层变形则变化相对缓慢。强采动影响期内,存在地层大变形,会导致下部光缆逐层损伤断裂;④采后沉稳期,工作面回采经过监测钻孔后地层的沉降变形并未完全停止,此时应变分布减小,也会使得早期地层裂隙发育闭合。在采后 37 d 后,地层内部变形逐渐平稳。

煤层采动引起上覆地层变形,其中松散层内部形变表现明显非整体变形特征,含隔水层分层变形。既在不同岩性特征下,应变分布及演化趋势不同,会在层内形成应力集中,当其形变超过其承载极限后,松散层出现应力释放,这种变形通常表现地层压缩、拉伸与滑移,进而导致测线的损伤。因此,选择多项式回归分析方法来建立不同特征点变形过程的趋势分析,根据图 12 的拟合结果显示,不同深度特征点的 R^2 分别达到了 0.986、0.991、0.914、0.981、0.939、0.965、0.859、0.990、0.982、0.975、0.860 和 0.866,说明地层内变形为非线性变形,其中四含地层特征点拟

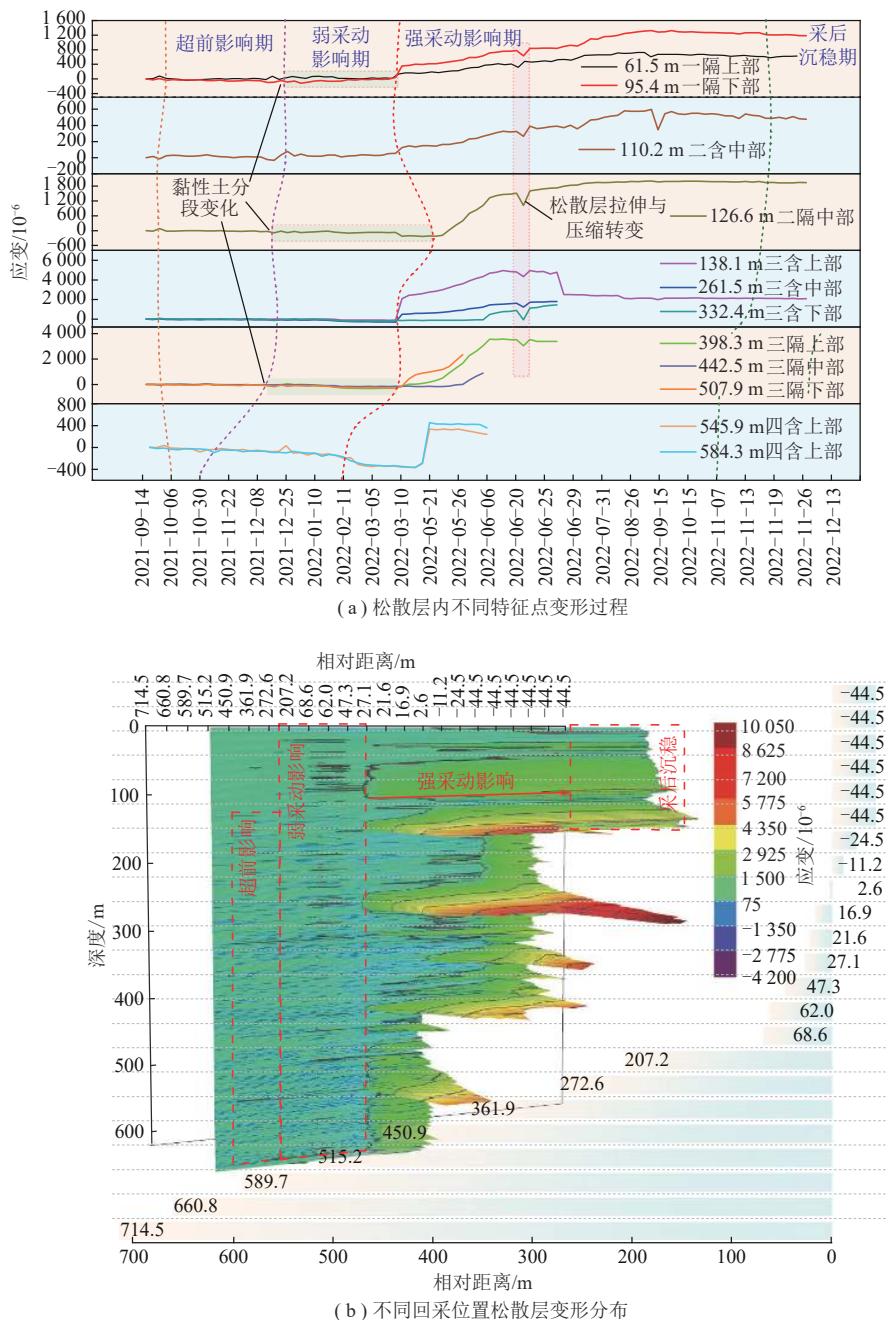


图 11 巨厚松散层内部变形演化过程

Fig.11 Deformation process in the extremely thick loose layer

合精度略低,表明采动影响的下部地层非线性变化特征较上部地层更显著。

5.2 松散层变形传递规律

松散层处于弯曲变形带以上,因此其内部变形会随基岩变形,在四含下部形成向下的直接的弯曲变形,这种直接变形对于砂层而言会引起其内部结构破坏。松散层内部的传递会形成“下沉—拉伸—下沉”动态的变化向前推进,并随着过程改变形不同地层内部形态随之改变。[图 13](#)为松散层内部变形动态演化示意图,这种动态演化经历无影响([图 13\(a\)](#))、超前影响层内压缩([图 13\(b\)](#))、影响加剧地层沉陷变形的过程

([图 13\(c\)](#))。

结合实测数据结果,煤层采动对松散层影响会因为开挖形成内部卸荷空间。当传递至松散层内,由于松散层土体抗拉强度、抗压强度以及抗剪强度都较弱,故在采空区影响范围内发育沉陷形态。其中采空区正上方松散层受沉降盆地影响会向下移,而变形移动则兼具向下和向盆地中心的水平移动。因此,工作面回采位置的动态变化以及采空区范围的扩大,在地表移动范围线边界外围会表现下部地层的压缩变形。而靠近采空区边界的形变,会出现层内的拉伸和下沉的共同作用。

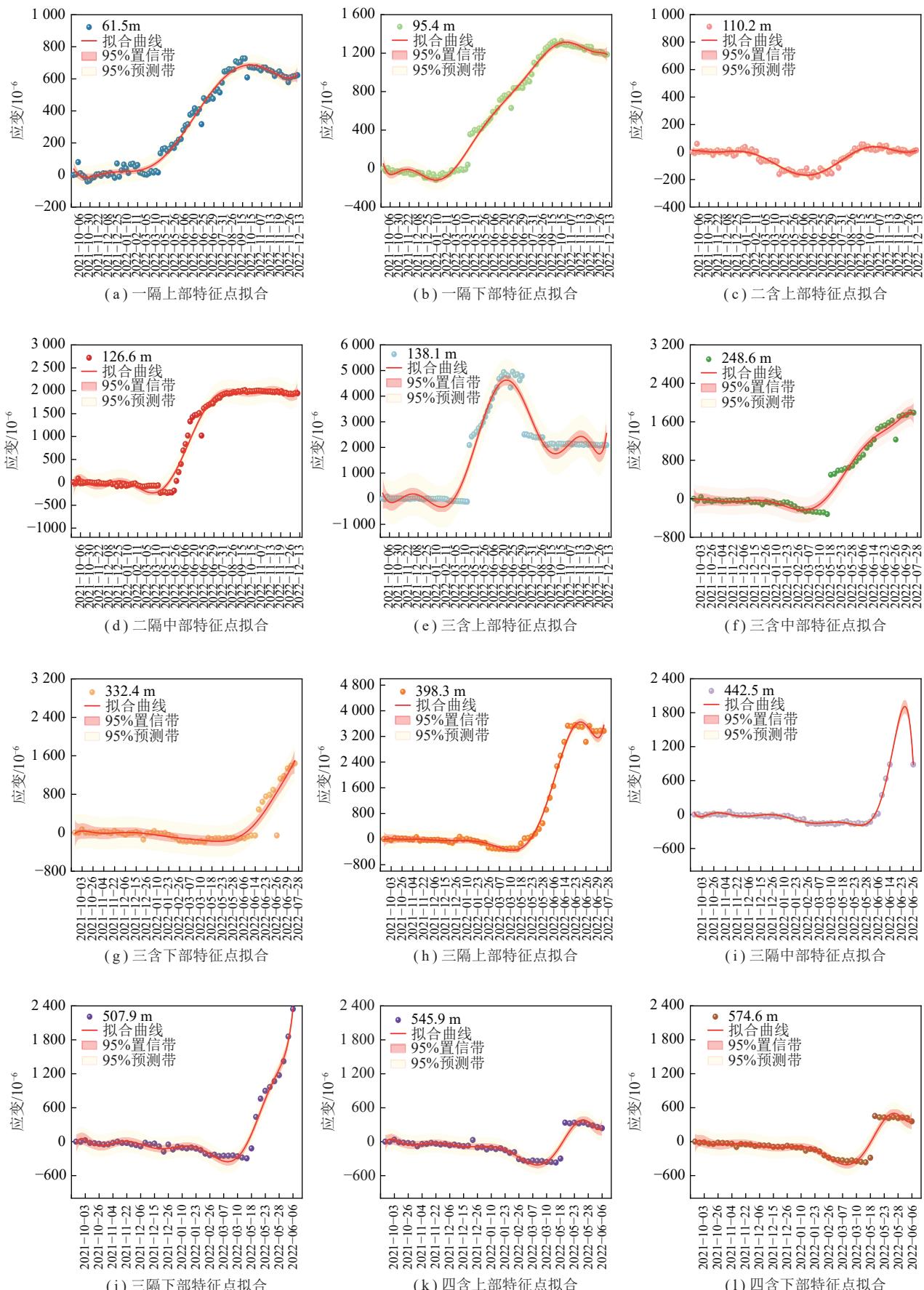


图 12 松散层不同地层变形特征点拟合分析

Fig.12 Fitting analysis of deformation characteristic points in different depths of loose layer

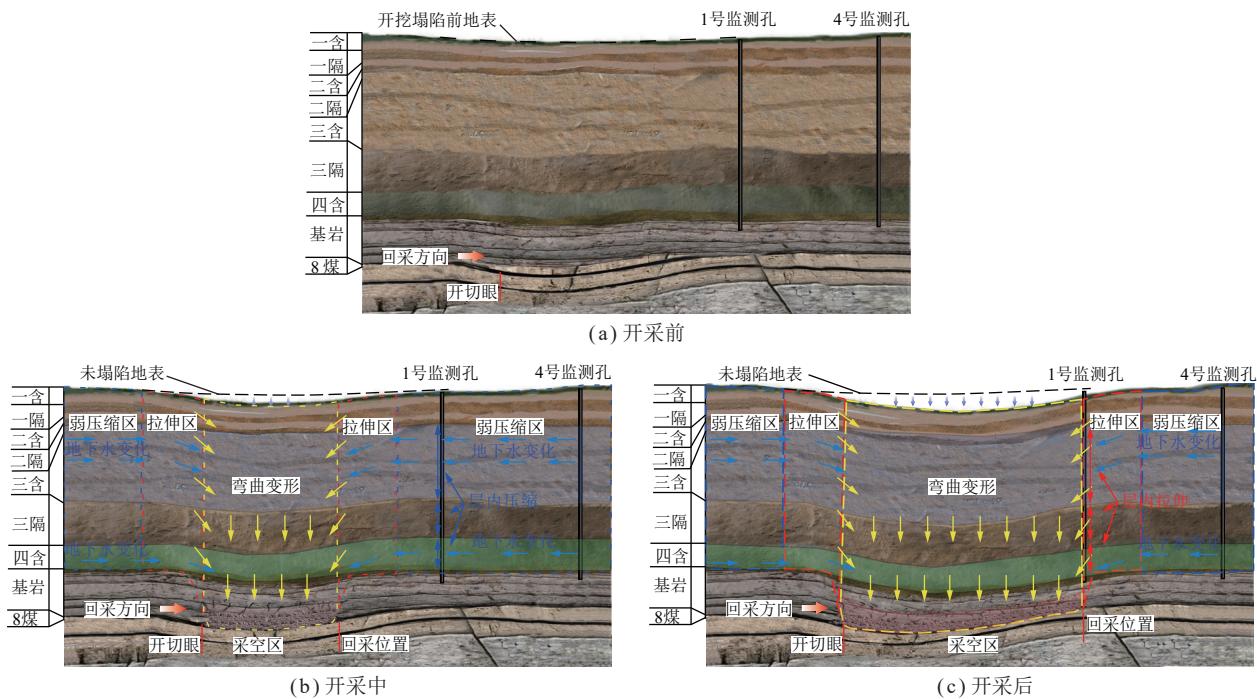


图 13 松散层内部变形动态演化示意

Fig. 13 Illustration of the dynamic evolution of internal deformation in loose layers

图 14 为工作面在不同回采位置对厚层松散地层的超前影响其的发育形态描述, 横坐标包括数据采集测试日期、工作面回采位置以及监测钻孔之间的相对位置, 而纵坐标表示监测钻孔的深度。图 14 中暖色调代表地层内发生层间移动, 而冷色调表示地层经历了压缩。

从图 14(a) 可以观察到深部地层首先经历了非连续地层压缩与拉伸, 其中压缩层位主要分布在松散层下部, 并在 128、255、407 m 层为存在应力集中, 随着工作面的逐步推进, 在层内形成相对的连续变化逐层向上传播, 形成了“台阶状”发育形态; 图 14(b) 在工作面回采过程中, 观察到工作面距监测钻孔越近, 钻孔内测线会发生自下而上的损伤现象, 反映应力释放(损伤后, 进行数据拟合补全)。通过扰动期内地层变形数据, 在扰动过程中会形成超前的“反向 3 字型”变形形态。“反向 3 字型”扰动形态的发育, 其形成主要原因为: 受含隔水层不同变形速率影响, 不同含水层水位除自身变化外, 叠加采动影响, 沿着最大水力梯度的方向向采空区方向势能低的地方流动, 改变了土中的有效应力, 进而影响了土体原有的强度和变形, 导致地层发生附加沉降。综上, 通过应变分布云图清晰地展示, 在回采过程中, 不同深度的地层对采动扰动的响应特征存在显著差异, 含隔水层界面形成了相互交错的压缩—拉伸—稳定的演化过程, 这种演化过程与变形机理分析结果具备较好的一致性。

5.3 松散层渗流场演化特征

图 15 获得了 1 号钻孔全地层地电场数据, 展示了工作面与监测钻孔之间相对距离由 660.8~180.0 m 间视电阻率分布的结果。通过地电场数据, 说明了监测孔附近地电场视电阻率主要分布在 0~120 $\Omega \cdot m$, 其中三含以上地层与四含电阻率分布差异主要受地下水矿化度影响。工作面在不同回采期, 松散层内部渗流场会随地下水动力条件改变及采动影响视电阻变化范围 5~20 $\Omega \cdot m$, 其整体变化相对稳定。一含、二含与地表存在补给关系, 视电阻率随二含水位变化出现轻微波动; 而三含电阻率后期出现升高, 其对应层位发生渗流改变。同时, 四含在工作面回采过程中出现电阻率的降低, 说明原有含水层水动力条件发生改变, 使得地电场结果随之变化。测试结果说明渗流场变化超前与变形场发育, 结合分布式光纤测试结果, 能够量化地层监测断面松散层内部移动变形时空关系和渗流场变化数据。

6 结 论

(1) 构建了“光纤-电法”联合测试的 600 m 深度巨厚松散层裸孔全断面监测系统, 实现了松散层内部连续变形动态监测。全断面监测系统能够获取煤层采动区域巨厚松散层内部应变、位移信息及监测钻孔周围电阻率变化信息, 并对松散层内部变形位置进行准确定位, 获得了回采位置与松散层内部变形时空演

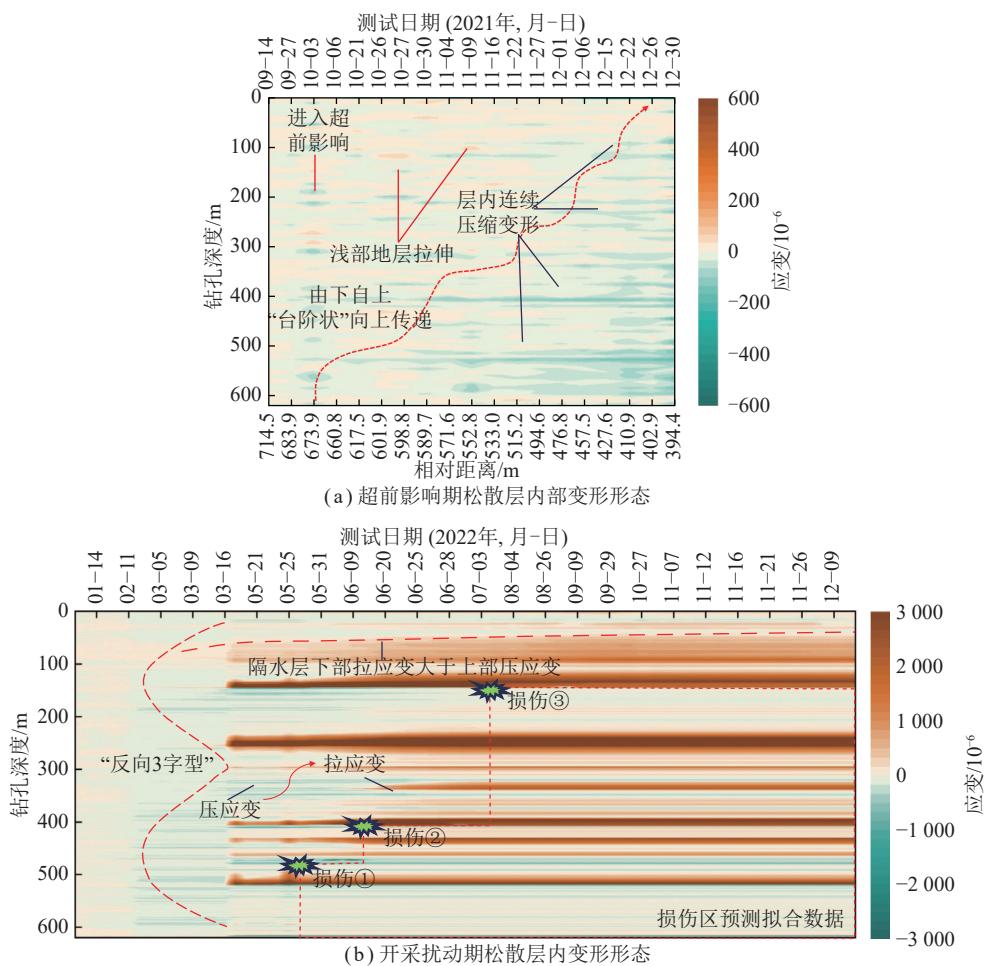


图 14 工作面回采过程中松散层内部变形发育过程及形态

Fig.14 Deformation pattern within the loose layer during mining conditions

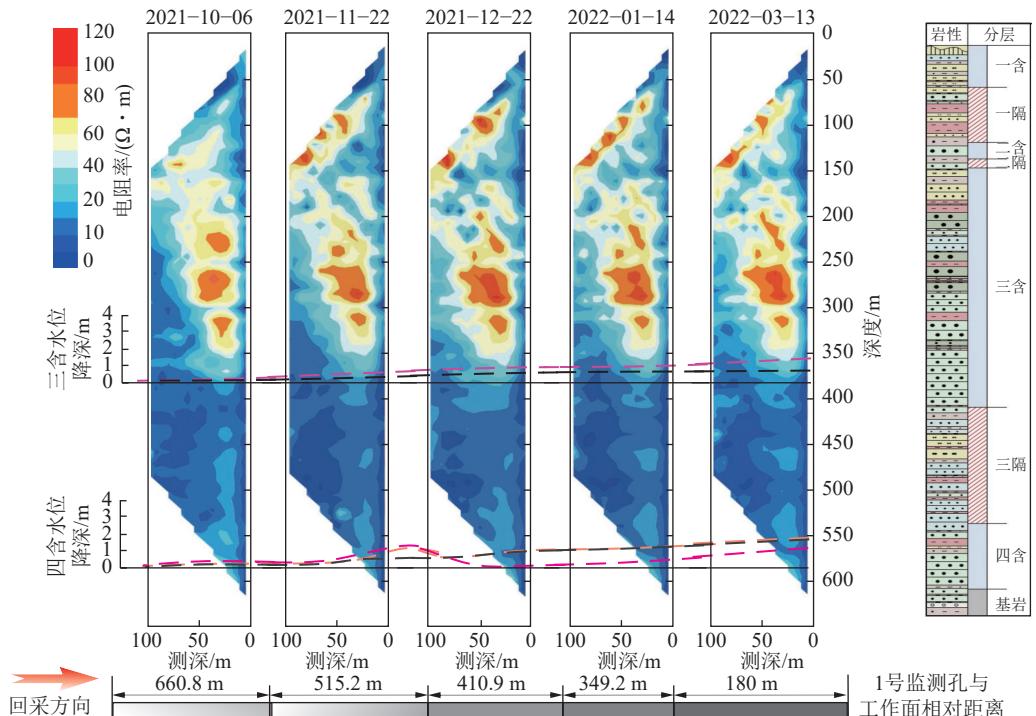


图 15 并行电法渗流场测试结果

Fig.15 Parallel electrical method seepage field test results

变关系。

(2) 研究表明采动过程中松散层内部变形并非整体移动, 在含隔水层界面会优先发生形变。并且其中含水砂层上界面变形速率快, 形变通常为突跃形式, 且影响范围大; 而隔水层黏性土界面形变相对连续, 变形持续时间较含水砂层更长, 厚黏性土隔水层表现

“类关键层”滞后变形特征。同时, 表明了黏性土形变是导致沉陷周期边长的主要控制因素。

(3) 巨厚松散层内部变形过程表现显著的非线性变化特征。基于工作面回采位置与松散层内部变形时空演变关系, 将采动影响对前方松散层扰动过程划分为超前影响期、弱采动影响期、强采动影响期、采后沉稳期四个阶段, 并揭示了超前影响变形表现“台阶状”形态与采动影响期的“反向3字型”移动变形特征。

参考文献(References):

- [1] 邹才能, 赵群, 张国生, 等. 能源革命: 从化石能源到新能源[J]. 天然气工业, 2016, 36(1): 1–10.
ZOU Caineng, ZHAO Qun, ZHANG Guosheng, et al. Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(1): 1–10.
- [2] 王双明, 申艳军, 宋世杰, 等. “双碳”目标下煤炭能源地位变化与绿色低碳开发[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2599–2612.
WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SONG Shjie, et al. Change of coal energy status and green and low-carbon development under the “dual carbon” goal[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2599–2612.
- [3] 王佟, 刘峰, 赵欣, 等. 生态地质层理论及其在矿山环境治理修复中的应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(10): 3759–3773.
WANG Tong, LIU Feng, ZHAO Xin, et al. Theory of ecological geological layer and its application in mine environment remediation[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(10): 3759–3773.
- [4] 刘峰, 郭林峰, 赵路正. 双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 1–15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHAO Luzheng. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 1–15.
- [5] 王双明, 刘浪, 赵玉娇, 等. “双碳”目标下赋煤区新能源开发——未来煤矿转型升级新路径[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 59–79.
WANG Shuangming, LIU Lang, ZHAO Yujiao, et al. New energy exploitation in coal-endowed areas under the target of “double carbon”: A new path for transformation and upgrading of coal mines in the future[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 59–79.
- [6] 林庞锟. 矿山污染及环境破坏问题的思考[J]. 中国资源综合利用, 2011, 29(1): 58–59.
LIN Pangkun. Thinking on the problem of mine pollution and environmental destruction[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2011, 29(1): 58–59.
- [7] 周大伟, 安士凯, 吴侃, 等. 矿山开采损害 InSAR/UAV 融合监测关键技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(10): 121–134.
ZHOU Dawei, AN Shikai, WU Kan, et al. Key technology and application of InSAR/UAV fusion monitoring for coal mining damages[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(10): 121–134.
- [8] 刘辉, 朱晓峻, 程桦, 等. 高潜水位采煤沉陷区人居环境与生态重构关键技术: 以安徽淮北绿金湖为例[J]. 煤炭学报, 2021, 47(12): 4021–4032.
LIU Hui, ZHU Xiaojun, CHENG Hua, et al. Key technology of human environment and ecological reconstruction in high submersible level coal mining subsidence area: A case study from Lujin Lake, Huainai[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 47(12): 4021–4032.
- [9] 李树志, 李学良, 尹大伟. 碳中和背景下煤炭矿山生态修复的几个基本问题[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 286–292.
LI Shuzhi, LI Xueliang, YIN Dawei, et al. Several basic issues of ecological restoration of coal mines under background of carbon neutrality[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 286–292.
- [10] 程桦, 张亮亮, 姚直书, 等. 厚松散层薄基岩非对称开采井筒偏斜机理[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 102–114.
CHENG Hua, ZHANG Liangliang, YAO Zhishu, et al. Mechanism of shaft deflection caused by asymmetric mining in thin bedrock and deep loose strata[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 102–114.
- [11] 李树志. 我国采煤沉陷区治理实践与对策分析[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 36–43.
LI Shuzhi. Control practices and countermeasure analysis on coal mining subsidence area in China[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 36–43.
- [12] 张亮亮, 程桦, 姚直书, 等. 基于改进 Knothe 时间模型的地表最大沉降速度预测[J]. 岩土力学, 2023, 44(4): 1111–1119.
ZHANG Liangliang, CHENG Hua, YAO Zhishu, et al. Prediction of maximum surface subsidence velocity based on improved Knothe time model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(4): 1111–1119.
- [13] 彭苏萍. 我国煤矿安全高效开采地质保障系统研究现状及展望[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2331–2345.
PENG Suping. Current status and prospects of research on geological assurance system for coal mine safe and high efficient mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2331–2345.
- [14] 安徽省人民政府. 安徽省采煤沉陷区综合治理规划(2021—2025年)[R]. 合肥: 2021.
- [15] 李德海, 许国胜, 余华中. 厚松散层煤层开采地表动态移动变形特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(7): 103–106.
LI Dehai, XU Guosheng, YU Huazhong, et al. Study on features of surface dynamic movement and deformation caused by coal mining under thick alluvium[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(7): 103–106.
- [16] 何国清, 杨伦, 凌赓娣, 等. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1991.
- [17] 陈俊杰, 陈勇, 郭文兵, 等. 厚松散层开采条件下地表移动规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(11): 95–97.
CHEN Junjie, CHEN Yong, GUO Wenbing, et al. Study on surface movement law under the condition of thick unconsolidated strata[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(11): 95–97.
- [18] 李文平, 孙如华, 王维理, 等. 深部土高压卸载变形结构性量化参

- 数确定及本构模型[J].工程地质学报,2007(3):384-390.
- LI Wenping, SUN Ruhua, WANG Weili, et al. Constitutive model and structural parameter for unloading deformation of clay soils at high pressure from triaxial testing[J]. Journal of Engineering Geology, 2007(3): 384-390.
- [19] 隋旺华.近松散层采掘抗渗透破坏评价方法 I:临界水力坡度[J].煤田地质与勘探,2023, 51(2): 175-186.
- SUI Wanghua. Evaluation method of resistance to seepage failure due to mining near unconsolidated aquifers I: Critical hydraulic gradient[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(2): 175-186.
- [20] 吴侃,靳建明,戴仔强,等.开采沉陷在土体中传递的实验研究[J].煤炭学报,2002, 27(6): 601-603.
- WU Kan, JIN Jianming, DAI Zaiqiang, et al. The experimental study on the transmit of the mining subsidence in soil[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(6): 601-603.
- [21] 许延春,马子民,李小二,等.基岩风化带性质对顶板突水溃砂的影响研究——以赵固一矿为例[J].煤炭科学技术,2023, 51(7): 64-71.
- XU Yanchun, MA Zimin, LI Xiaor, et al. Research on the influence of the nature of the weathered bedrock zone on the roof water bursting and sand bursting: taking Zhaogu No.1 Mine as an example[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 64-71.
- [22] 许延春.深厚含水松散层的工程特性及其在矿区的应用[M].北京:煤炭工业出版社,2003.
- [23] 戴华阳.岩层与地表移动变形量的时空关系及描述方法[J].煤炭学报,2018, 43(S2): 450-459.
- DAI Huayang. Mining subsidence variables and their time-space relationship description[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S2): 450-459.
- [24] 张丁丁,柴敬,李毅,等.松散层沉降光纤光栅监测的应变传递及其工程应用[J].岩石力学与工程学报,2015, 34(S1): 3289-3297.
- ZHANG Dingding, CHAI Jing, LI Yi, et al. Strain transfer function of embedded Fiber Bragg grating sensors for unconsolidated layer settlement deformation detector and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3289-3297.
- [25] 左建平,孙运江,钱鸣高.厚松散层覆岩移动机理及“类双曲线”模型[J].煤炭学报,2017, 42(6): 1372-1379.
- ZUO Jianping, SUN Yunjiang, QIAN Minggao, et al. Movement mechanism and analogous hyperbola model of overlying strata with thick alluvium[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(6): 1372-1379.
- [26] 汪峰,许家林,陈绍杰,等.松散层拱结构模型及其对覆岩运动的影响[J].采矿与安全工程学报,2019, 36(3): 497-504, 512.
- WANG Feng, XU Jialin, CHEN Shaojie, et al. Arch structure in unconsolidated layers and its effect on the overlying strata movement[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(3): 497-504, 512.
- [27] 刘义新,戴华阳,姜耀东,等.厚松散层大采深下采煤地表移动规律研究[J].煤炭科学技术,2013, 41(5): 117-120.
- LIU Yixin, DAI Huayang, JIANG Yaodong, et al. Study on surface movement law above underground deep mining under thick unconsolidated overburden strata[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(5): 117-120.
- [28] LIU Shiqi, JIE Yuxin, XU Yanchun. Prevention of mine-shaft failure by aquifer replenishment[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2016, 45(3): 890-903.
- [29] 郭惟嘉,王海龙,陈绍杰,等.采动覆岩涌水溃砂灾害模拟试验系统研制与应用[J].岩石力学与工程学报,2016, 35(7): 1415-1422.
- GUO Weijia, WANG Hailong, CHEN Shaojie, et al. Development and application of simulation test system for water and sand inrush across overburden fissures due to coal mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1415-1422.
- [30] 余学义,穆驰,张冬冬.厚松散层大采高开采地表移动变形规律研究[J].煤矿安全,2020, 51(4): 235-239.
- YU Xueyi, MU Chi, ZHANG Dongdong, et al. Study on law of surface movement and deformation in thick loose layer with large mining height[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(4): 235-239.
- [31] 胡振琪,理源源,李根生,等.碳中和目标下矿区土地复垦与生态修复的机遇与挑战[J].煤炭科学技术,2023, 51(7): 474-483.
- HU Zhenqi, LI Yuanyuan, LI Gensheng, et al. Opportunities and challenges of land reclamation and ecological restoration in mining areas under carbon neutral target[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 474-483.
- [32] 胡炳南,郭文砚.我国采煤沉陷区现状、综合治理模式及治理建议[J].煤矿开采,2018, 23(2): 1-4.
- HU Bingnan, GUO Wenyan. Mining subsidence area status, syntheses governance model and governance recommendation[J]. Journal of Mining And Strata Control Engineering, 2018, 23(2): 1-4.
- [33] 胡振琪.矿山复垦土壤重构的理论与方法[J].煤炭学报,2022, 47(7): 2499-2515.
- HU Zhenqi. Theory and method of soil reconstruction of reclaimed mined land[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7): 2499-2515.
- [34] 崔希民,邓喀中.煤矿开采沉陷预计理论与方法研究评述[J].煤炭科学技术,2017, 45(1): 160-169.
- CUI Ximin, DENG Kazhong. Research review of predicting theory and method for coal mining subsidence[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 160-169.
- [35] 徐良骥,朱楠,马荣振,等.厚松散承压含水层失水沉降模拟实验研究[J].采矿与安全工程学报,2015, 32(5): 821-826.
- XU Liangji, ZHU Nan, MA Rongzhen, et al. Water loss settlement simulation of thick unconsolidated confined aquifer layer[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(5): 821-826.
- [36] 施斌,王宝善,张诚成,等.川西甲基卡锂矿3211 m科学深钻多物理量分布式光纤观测[J].科学通报,2022, 67(23): 2719-2726.
- SHI Bin, WANG Baoshan, ZHANG Chengcheng, et al. Multi- physical distributed fiber optic observation in a 3211-m-deep scientific borehole at Jiajika lithium mine, western Sichuan[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(23): 2719-2726.
- [37] 程刚,王振雪,施斌,等.DFOS在矿山工程安全开采监测中的研究进展[J].煤炭学报,2022, 47(8): 2923-2949.
- CHENG Gang, WANG Zhenxue, SHI Bin, et al. Research progress of DFOS in safety mining monitoring of mines[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 2923-2949.

- [38] 张丹, 张平松, 施斌, 等. 采场覆岩变形与破坏的分布式光纤监测与分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 952–957.
ZHANG Dan, ZHANG Pingsong, SHI Bin, et al. Monitoring and analysis of overburden deformation and failure using distributed fiber optic sensing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(5): 952–957.
- [39] 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.
- [40] 刘静, 刘盛东, 刘志新, 等. 采掘扰动岩体破坏自然电场近源效应[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3451–3462.
LIU Jing, LIU Shengdong, LIU Zhixin, et al. Near-source effect of natural electric field responding to mining-induced rock mass destruction[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3451–3462.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 谢和平, 苗鸿雁, 周宏伟. 我国矿业学科“十四五”发展战略研究[J]. 中国科学基金, 2021, 35(6): 856–863.
XIE Heping, MIAO Hongyan, ZHOU Hongwei. Development strategy of mining discipline in china during the 14thfive-year plan period[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(6): 856–863.
- [44] 郭文兵, 邓喀中, 邹友峰. 概率积分法预计参数选取的神经网络模型[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(3): 322–326.
GUO Wenbing, DENG Kazhong, ZOU Youfeng. Artificial neural network model for predicting parameters of probability-integral method[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(3): 322–326.
- [45] 刘宝琛, 戴华阳. 概率积分法的由来与研究进展[J]. 煤矿开采, 2016, 21(2): 1–3.
LIU Baochen, DAI Huayang. Research development and origin of probability integral method[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2016, 21(2): 1–3.
- [46] 武强, 王洋, 赵德康, 等. 基于沉积特征的松散含水层富水性评价方法与应用[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(3): 460–466.
WU Qiang, WANG Yang, ZHAO Dekang, et al. Water abundance assessment method and application of loose aquifer based on sedimentary characteristics[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(3): 460–466.
- [47] 龚晓南, 张杰. 承压水降压引起的上覆土层沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 145–149.
GONG Xiaonan, ZHANG Jie. Settlement of overlaying soil caused by decompression of confined water[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 145–149.
- [48] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 201–272.
CHEN Zhenghan. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 201–272.
- [49] 隋旺华. 土质学与土力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2020.
- [50] 李广信. 土力学[M]. 第8版. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [51] 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.
- [52] 张平松, 孙斌杨, 许时昂, 等. 煤系上覆地层移动变形钻孔多参数监测技术[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 2907–2922.
ZHANG Pingsong, SUN Binyang, XU Shiang, et al. Multi parameter monitoring technology of borehole for movement and deformation of overlying strata of coal measures[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 2907–2922.
- [53] 柴敬, 韩志成, 雷武林, 等. 回采巷道底鼓演化过程的分布式光纤实测研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 146–156.
CHAI Jing, HAN Zhicheng, LEI Wulin, et al. Distributed optical fiber measurement of floor heave evolution in mining roadway[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 146–156.