



移动扫码阅读

高银贵,孔皖军,陈永春,等. 特厚煤层综放开采下工作面底板岩层破坏特征[J]. 能源环境保护, 2021, 35(6):68-75.

GAO Yingui, KONG Wanjun, CHEN Yongchun, et al. Study on the failure characteristics of the bottom slate layer in the working face of fully mechanized caving in ultra-thick coal seam[J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(6):68-75.

## 特厚煤层综放开采下工作面底板岩层破坏特征

高银贵<sup>1</sup>, 孔皖军<sup>1</sup>, 陈永春<sup>2</sup>, 薛贤明<sup>3</sup>, 郑刘根<sup>3</sup>, 常成林<sup>1</sup>, 姜春露<sup>3</sup>,

国伟<sup>1</sup>, 雷锋<sup>1</sup>, 王刚<sup>1</sup>

(1.鄂尔多斯市华兴能源有限责任公司, 内蒙古鄂尔多斯 017000; 2.平安煤炭开采工程技术研究院有限责任公司, 安徽淮南 232001; 3.安徽大学资源与环境工程学院, 安徽合肥 230601)

**摘要:**为提高特厚煤层工作面综放开采条件下煤层底板突水预警有效性,以唐家会矿61303工作面为研究区,通过光纤传感技术和高密度并行电法勘探技术,进行井下钻孔布置与实测,观测6煤采后底板变形和破坏情况。根据观测孔光纤应变云图变化,在工作面未到达监测断面孔口位置时,底板受采动超前应力影响前期以压应变为主;当工作面推过监测钻孔,由于底板卸压发生底鼓膨胀受剪切力的作用,呈现一定拉伸应变。结合视电阻率的变化分析了底板破碎发育情况及其控制层位,61303工作面底板岩层破坏深度为14.5 m,位于砂泥岩岩层中部,破坏扰动最大深度为32.0 m,位于砂泥岩岩层下部。

**关键词:**准格尔煤田;特厚煤层;底板破坏;分布式光纤;并行电法

中图分类号:X936

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2021)06-0068-08

## Study on the failure characteristics of the bottom slate layer in the working face of fully mechanized caving in ultra-thick coal seam

GAO Yingui<sup>1</sup>, KONG Wanjun<sup>1</sup>, CHEN Yongchun<sup>2</sup>, XUE Xianming<sup>3</sup>, ZHENG Liugen<sup>3</sup>,  
CHANG Chenglin<sup>1</sup>, JIANG Chunlu<sup>3</sup>, GUO Wei<sup>1</sup>, LEI Feng<sup>1</sup>, WANG Gang<sup>1</sup>

(1. Ordos Huaxing Energy Co., Ltd., Ordos 017000, China; 2. Ping'an Mining Engineering Technology Research Institute Co., Ltd., Huainan 232001, China; 3. School of Resource and Environment Remediation, Anhui University, Hefei 230601, China)

**Abstract:** In order to improve the effectiveness of early warning technology of water inrush from the coal seam floor in the working face of fully mechanized caving in ultra-thick coal seams, selecting No. 61303 working face of Tangjiahui Mine as the research area, the underground drilling layout and actual measurement were carried out, using the optical fiber sensing technology and high-density parallel electrical exploration technology, to observe the floor deformation and destruction of the 6th coal after mining. According to the change of the optical fiber strain nephogram of the observation hole, when the working face does not reach the orifice position of the monitoring section, the bottom plate is mainly affected by the mining advance stress in the early stage. When the working face pushes through the monitoring borehole, due to the bottom bulge expansion caused by the bottom plate pressure relief and the shear force, it presents a certain tensile strain. Combined with the change of apparent resistivity, the development of bottom plate crushing and its control horizon were analyzed. The depth of the failure

zone of the floor rock stratum of No. 61303 working face is 14.5 m, which is located in the middle of the sandstone mudstone layer. The maximum depth of failure disturbance is 32.0 m, which is located in the lower part of sandstone mudstone layer.

**Key Words:** Zhungeer Coalfield; Ultra-thick coal seam; Floor failure; Distributed optical fiber; Parallel electrical method

## 0 引言

随着中国工业发展需求,煤炭需求也日益增长。华北型煤田作为我国重要产煤区,煤炭储量丰富,随着煤矿向深部延伸开采,煤层底板灰岩水害问题已成为煤田开采的最大技术难题之一<sup>[1]</sup>。底板涌水是指下伏承压水冲破底板岩石屏障并沿底板含水层的内部导水通道向上流入采空区的过程<sup>[2]</sup>。在综放开采条件下,煤层开采使工作面底板阻水层厚度减小,底板阻水能力降低,涌水风险增大。由于底板形成的条件不同,导致底板岩体存在理化性质差异,结合当下不一样的水文地质条件,在多种类地应力混合作用影响下,底板损伤的程度、方式和机理存在差异<sup>[3-4]</sup>,使得底板岩体抵抗承压水侵入的能力存在差异。为减少底板变形破坏带来的灾害事故,掌握致灾机理,对开采条件下覆岩变形进行预测和防治成为重要的研究内容<sup>[5-6]</sup>。刘军<sup>[7]</sup>将并行电法应用于探测新疆某高瓦斯倾斜厚煤层综采工作面“竖三带”分布情况,结合电极电流反演技术,探测结果与理论值基本吻合,证明了并行电法在煤矿工作面“三带”探测具有较高的准确性。张平松等<sup>[8]</sup>将震波 CT 探测技术应用于工作面孔-巷间的断面观测,得到回采过程中底板破坏的动态发育规律及特征。王静雪等<sup>[9]</sup>将导致底板突水的主控因素基于 FDAHP 与 TOPSIS 建立了煤层底板突水风险评价模型,与华北型煤田开采工程实践相结合取得了较好的预测效果。孙晓光<sup>[10]</sup>采用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件对底板进行流固耦合分析,对煤层底板突水预测及防治进行了深入研究。可见,研究煤层底板受采动影响下应力状态和分布变化,及其对于底板岩层破坏深度与特征影响,总结相关技术参数,可为煤矿工作面防治水工作开展提供基础<sup>[11]</sup>,对保障工作面安全开采,具有重要的指导意义<sup>[12-14]</sup>。

准格尔煤田煤炭资源开发于近年伊始,该区域深埋特厚煤层综放开采下工作面底板变形破坏规律研究较少<sup>[15]</sup>。唐家会煤矿是目前准格尔煤田中采深最大、水压最高的矿井,主采 6 煤底板缺

少峰峰组灰岩沉积,受奥灰岩溶水害威胁严重,因此底板破坏特征研究更是重中之重。光纤传感技术和高密度并行电法在对唐家会矿 61201 工作面底板破坏监测取得了良好的效果,故本次工程以准格尔煤田唐家会矿 61303 特厚煤层综放开采工作面为研究区,运用光纤传感技术和高密度并行电法进行现场动态监测,综合分析底板变形特征和破坏机理,总结底板破坏参数,为该区域煤矿进行防治水工作、消除突水威胁、保障工作面安全合理开采提供依据。

## 1 工作面概况

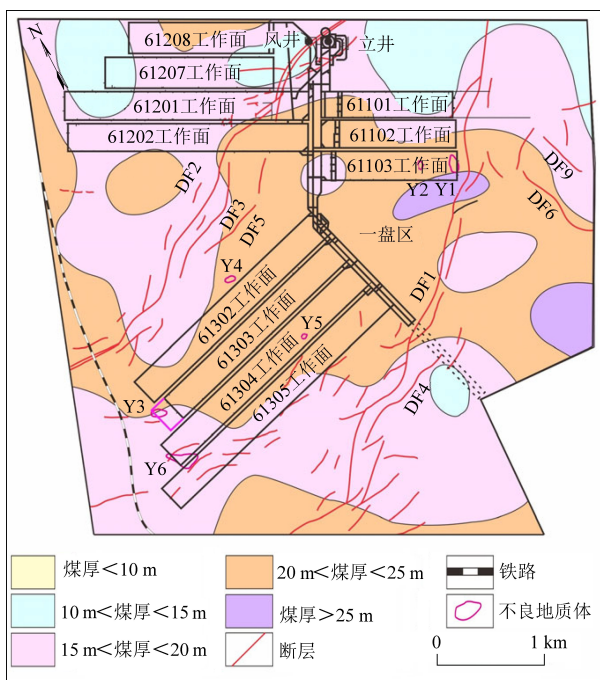
61303 工作面东起一盘区 6 煤辅运大巷(图 1),西至呼准一期铁路煤柱保护线,北邻 61302 工作面,南邻 61304 工作面。根据资料,61303 工作面主采 6 煤,走向长 1 800 m,倾向宽 240 m,工作面煤层厚度 17.2~27.3 m。

6 煤底板砂岩层的富水性较弱,在隔水层薄、阻水性能差或存在奥灰水原始导升的地段,主要水害威胁来源为底板灰岩水,在垂向导水构造发育块段,6 煤顶底板含水层水与底板奥灰含水层相互连通,奥灰水作为充水水源。61303 工作面 6 煤底板到奥灰顶界面的隔水层厚 33.69~88.79 m,上部岩性以 6 煤底板粘土岩、砂质泥岩为主,夹灰色透镜状砂岩;中部岩性以泥岩、砂质泥岩、粘土岩夹多层砂岩为主;下部岩性为砂质泥岩、泥岩、细~粗粒石英砂岩,夹透镜状灰岩、泥灰岩;底部岩性为粘土岩或铝土质粘土岩,相当于华北 G 层铝土矿。岩石裂隙发育较差,由于缺失峰峰组灰岩沉积,导致局部地区出现砂岩层直接覆盖在奥灰含水层之上。

## 2 探测原理

### (1) 光纤传感技术探测原理

光纤传感技术探测应用光纤几何上的一维特性<sup>[4]</sup>,把被测参量作为光纤位置长度的函数,它可以在光纤的整个长度上沿着光纤的几何路径连续地测量外部物理参数,并获得所测



(a) 等值线图

柱状	厚度/m	顶底板	岩性
	3.2~17.7 (7.8)	老顶	细砂岩, 灰色, 以石英为主, 夹煤线条痕, 半坚硬
	2~4.3 (2.9)	直接顶	细砂岩, 灰白色, 以石英为主, 含岩屑及炭屑, 较坚硬
	17.2~27.3 (23)	6煤	/
	6.1~6.7 (6.5)	直接底	砂泥岩, 灰色, 砂泥质或泥质结构, 断口参差状, 含植物化石
	2.5~17.1 (8.8)	老底	砂质泥岩或细砂岩, 灰色, 砂泥质结构, 断口参差状, 含植物化石

(b) 底板岩性图

图1 唐家会矿6煤煤厚等值线图及61303工作面顶底板岩性图

Fig.1 Thickness contour map of No.6 Coal Seam and lithology map of roof and floor of No.61303 working face in Tangjiahui mine

物理参数的空间分布和时变信息<sup>[16]</sup>。受采掘工作推进影响,煤层底板岩体发生形变,其应力状态和温度场的改变使得光纤发生拉伸和压缩形变,导致光纤的布里渊中心频率向左和向右偏移,进而光纤应变测量仪根据光纤应变值的变化进行监测和测量计算,从而分析岩层的破坏规律<sup>[17-20]</sup>。

## (2) 高密度并行电法原理

高密度电阻率法根据土壤电导率的差异,采用电法通过人工施加稳定的电流场,研究土地中传导电流的分布规律<sup>[21]</sup>。它的理论基础与常规电阻率法相同,但区别在于方法和技术。在高密度电阻率法的现场测量中,将所有电极(数十到数百个)放置在观察部分的每个测量点上,然后使用程序控制的电极转换装置和微机工程电气测量仪器。将测量结果发送到微机后,对数据进行处理,并给出有关地电断面分布的各种图示结果<sup>[22]</sup>。

## 3 工程设计

以监测煤层底板在回采条件下的变形与破坏特征,获得相应的技术参数,掌握底板破坏发育规律为目标,为工作面开采灰岩水防治提供依据,选择61303工作面的61303-1断面开展试验工程。通过在工作面巷道特定位置施工井下钻孔,采用并行电法和光纤传感探测技术,观测6煤采后底板破坏情况,分析6煤工作面回采过程与底板破坏之间的动态变化规律。

### (1) 钻孔布置安装

61303工作面底板变形与破坏特征观测实施底板钻孔观测方式,进一步获得采前100 m,采后50 m范围内的岩层变形规律及其特征。

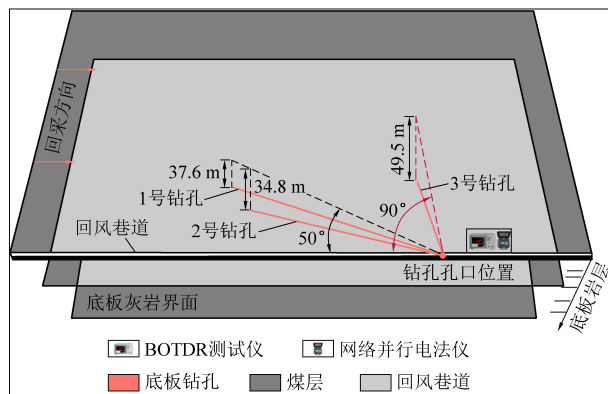


图2 底板监测孔布置位置图

Fig.2 Layout of bottom plate monitoring holes

图2为底板破坏测试断面监测孔设计位置示意图,监测孔利用工作面原有回风顺槽布置。为了使得61303工作面监测数据完善,将监测孔设计为朝着工作面退尺方向和朝向工作面内与巷道走向垂直两个方向,1#、2#监测孔为了在监测过程中形成协同作用,布设方向为朝着工作面退尺方向布置,3#监测孔对于初次超前应力影响的时间

及工作面距监测孔口距离可有效捕捉,布设方向为朝向工作面内与巷道走向垂直。1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>监测孔与工作面底板的水平夹角分别为 30°、30°和 90°,详见表 1。通过在设计钻孔中布置电极与光纤传感器,采用并行电法仪器与 BOTDR 光纤仪进行数据采集,根据不同时间测取的钻孔电法反演电阻率成像与岩层应力应变变化曲线,分析总结底板破坏变化规律。

表 1 监测孔主要设计参数

Table 1 Main design parameters of monitoring holes

监测孔	与工作面夹角/°	孔深/m	控制垂深/m	倾角/°	投影/m
1 <sup>#</sup>	30	80	27.4	20	75.2
2 <sup>#</sup>	30	85	48.8	35	69.6
3 <sup>#</sup>	90	70	49.5	45	49.5

## (2) 断面数据采集

1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>监测孔布设完成后以距离监测断面孔口距离约 100 m 处作为工作面回采退尺点,共

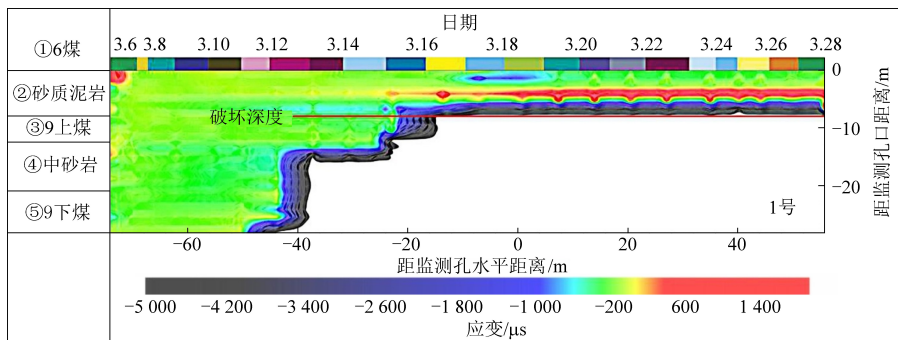
采集数据 78 组。将工作面回采至距离监测断面 80 m 后设为监测灵敏阶段,在监测灵敏阶段连续采集数据,同时加强对于工作面底板应变、电阻率值变化的监测。

监测孔控制范围是指在该工作面回采退尺底板对于影响深度的范围内以及受到工作面超前应力的影响,引起岩体在运动中产生不同的时空之间关联内部变化规律与特点的区域,将在工作面回采退尺位置距离监测断面-100.4 m 处的数据作为监测数据初值,并自此加强对断面监测灵敏期阶段的监测,共采集数据 168 组。

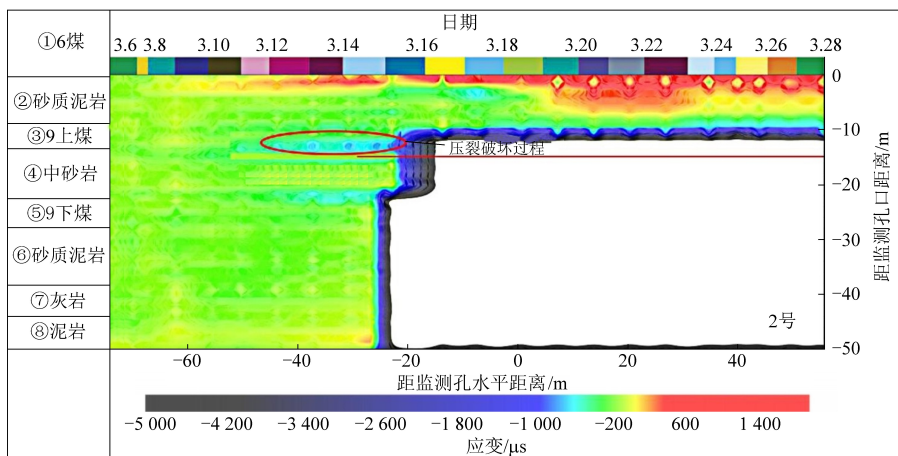
## 4 结果分析

### 4.1 光纤应变分布特征

随着回采工作不断推进,对监测断面位置处观测孔中不同深度的感应光纤应实时监测,获得 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>监测孔应变云图,如图 3 所示。



(a) 1<sup>#</sup> 监测孔



(b) 2<sup>#</sup> 监测孔



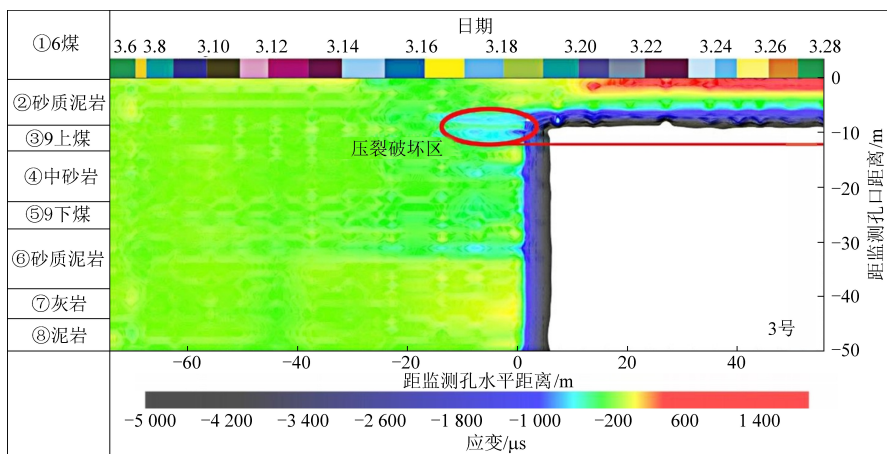
(c) 3<sup>#</sup> 监测孔

图3 光纤应变云图

Fig.3 Optical fiber strain nephogram

由图3(a)可知,光缆应变以压应变为主,说明底板受采动超前应力影响前期整体压缩,当工作面推过监测钻孔相应的监测区段,底板卸压发生底鼓膨胀,受剪切力的作用呈现一定的拉伸应变。受采动影响钻孔最大拉应变为 $1\ 772\ \mu\epsilon$ ,位于孔深 $6.0\ \text{m}$ 处,此时工作面跨过监测孔口 $33.5\ \text{m}$ ,最大压应变为 $-5\ 383\ \mu\epsilon$ 位于孔深 $6.6\ \text{m}$ 处,此时工作面过监测孔口 $9.6\ \text{m}$ 。由图3(b)可知,光缆应变以压应变为主,说明底板受采动超前应力影响前期整体拉伸,当工作面推过监测钻孔相应的监测区段,底板卸压使得超前应力施加在监测区域底板,呈现一定的压缩应变。受采动影响,钻孔最大压应变发生于工作面距离监测孔口 $21.0\ \text{m}$ 处,孔深 $11.0\ \text{m}$ 处,为 $-2\ 093\ \mu\epsilon$ ;最大拉应变发生于工作面距离监测孔口 $26.2\ \text{m}$ 处,为 $2\ 341\ \mu\epsilon$ 。由图3(a)和(b)可以看出,回采初期,距工作面退尺位置较远,采动影响较小,感应光缆受影响较小,光缆应变趋势相对稳定。

由图3(c)可知,在工作面回采未到达3<sup>#</sup>监测断面孔口时,光缆以压应变为主,底板受采动超前应力作用发生压缩,过监测孔口后,底板卸压发生底鼓膨胀,光缆受剪切力作用发生拉伸应变。受采动影响钻孔最大拉应变为 $1\ 223\ \mu\epsilon$ 位于孔口处,此时工作面跨过监测断面 $39.5\ \text{m}$ ,最大压应变为 $-4\ 153\ \mu\epsilon$ ,位于孔深 $6.5\ \text{m}$ 处,此时工作面距离监测断面 $9.6\ \text{m}$ 。

回采进程中,通过对监测孔及孔内感应光缆在对应地层发生的应变分布监测,底板应变随回采发生弹性、剪切和膨胀三个阶段的采动变形。由1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>监测孔综合分析,破坏深度划分在应

变云图上圈定。结果如表2,综合分析底板破坏深度为 $14.5\ \text{m}$ ,破坏扰动最大深度为 $32.0\ \text{m}$ 。

表2 光纤测试结果

Table 2 Fiber test results

孔号	底板破坏深度/m	破坏扰动最大深度/m
1 <sup>#</sup>	8.0	24.0
2 <sup>#</sup>	14.5	32.0
3 <sup>#</sup>	12.0	32.0

#### 4.2 视电阻率分布特征

随着工作面推进,监测钻孔受到超前应力压缩以及采后底板卸压底板岩体底鼓膨胀的影响,监测随回采推进钻孔不同深度的电阻率,获得电阻率分布图(图4)。

工作面切眼距观测系统 $101.5\ \text{m}$ 时,距离监测孔口较远,工作面采动应力对该范围无影响,可作为正常砂质泥岩、中砂岩电阻率背景值,其电阻率背景值总体都在 $330\ \Omega \cdot \text{m}$ 以下。在过监测孔口 $56\ \text{m}$ (3月28日),监测电缆线受损,受此影响电法数据无法呈现监测效果,但是从处理结果看,控制范围的岩层受采动影响变化已稳定。

将视电阻率值变化与底板分带现象的呈现阶段相结合,可将视电阻率变化划分为四个阶段,由图5可知,第I阶段监测范围内的视电阻率稍有上升,总体平稳。垂直打入底板的3<sup>#</sup>监测孔受综放开采下底板变形导致的剪切应力影响较小,视电阻率变化较1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>监测孔趋于平缓。第II阶段,随着回采推进,底板受超前应力作用致监测孔的受影响范围增加,主要表现为1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>监测孔在孔深 $10.0\sim 40.0\ \text{m}$ 、 $10.0\sim 48.0\ \text{m}$ 和 $10.0\sim 35.0\ \text{m}$ 范围的电阻率值持续升高。第III阶段,回采工作

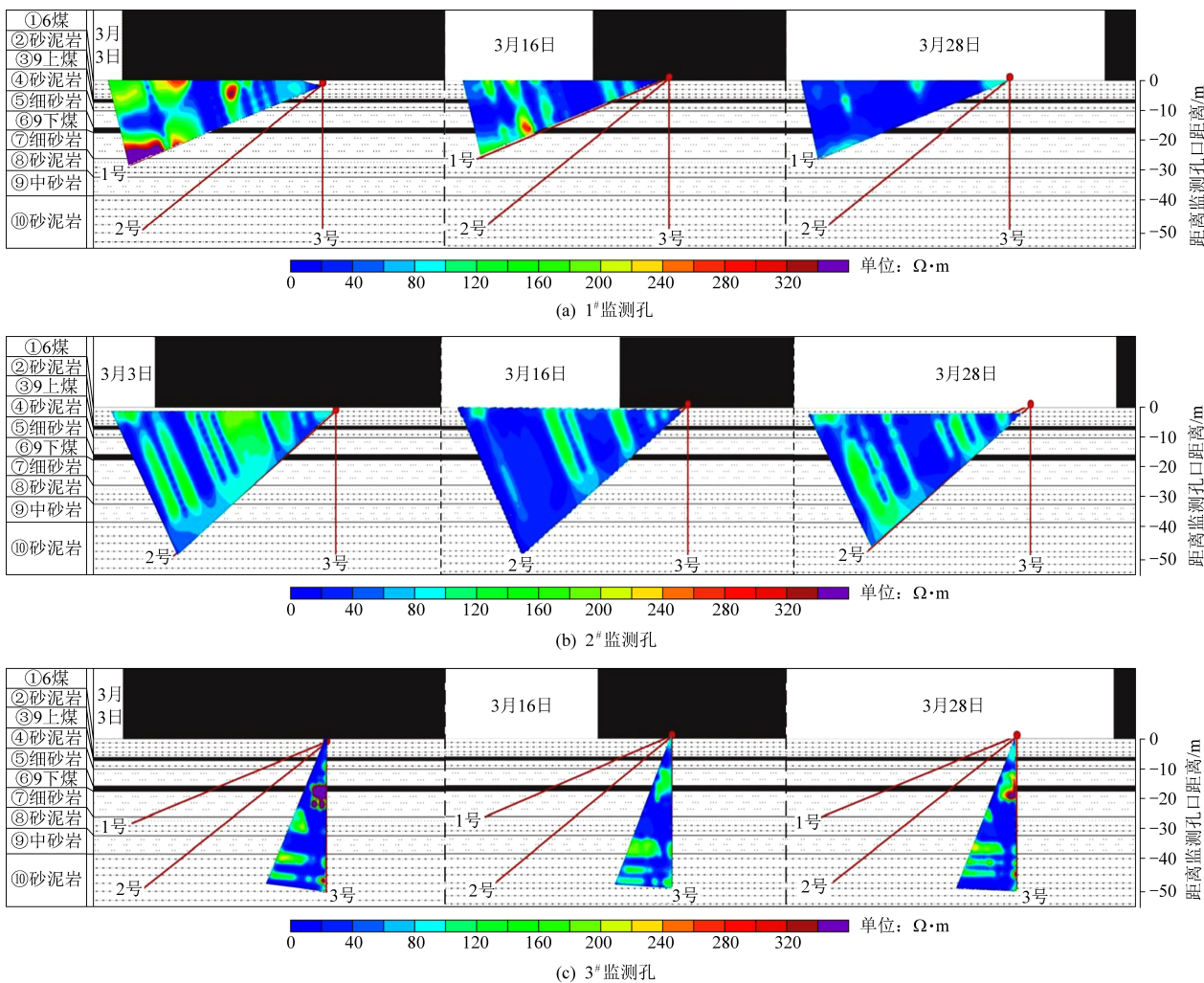
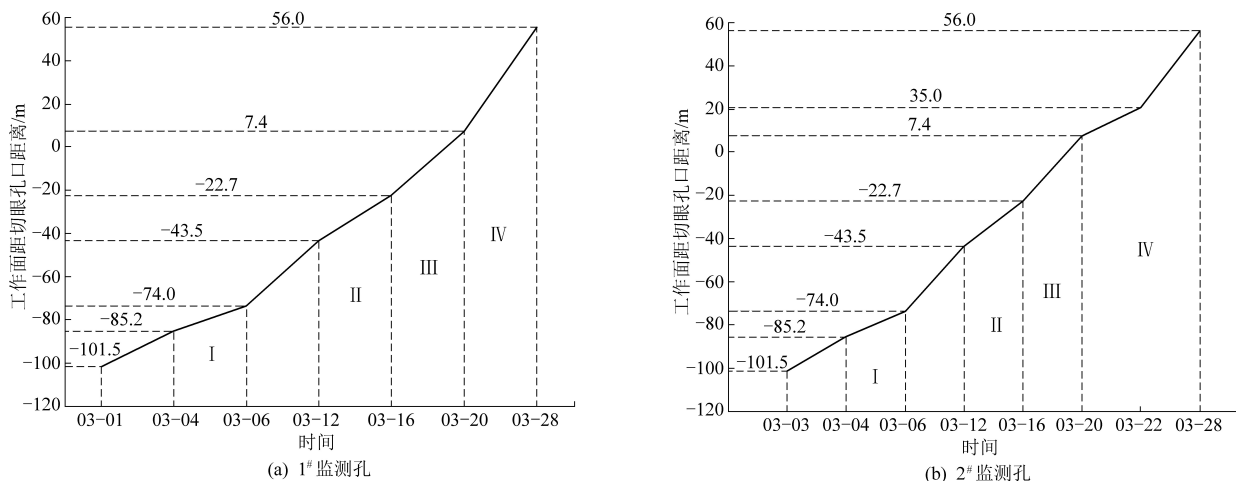


图 4 视电阻率分布图

Fig.4 Apparent resistivity distribution map



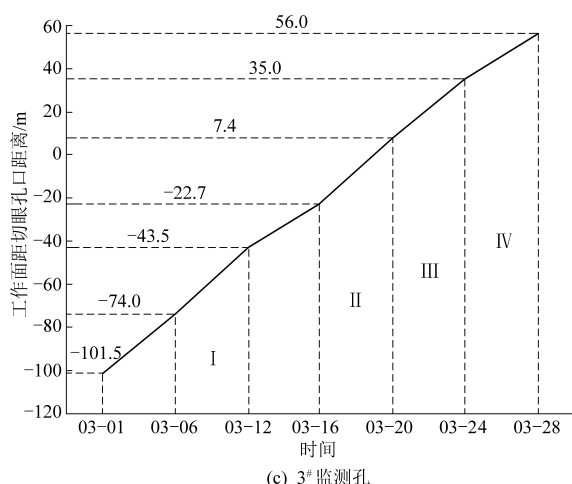


图5 1#、2#和3#监测孔视电阻率变化阶段示意图

Fig.5 Schematic diagram of apparent resistivity change stages of 1#, 2# and 3# monitoring holes

不断推进,底板受超前应力影响,1#、2#和3#监测孔在监测孔口至孔深40.0、35.0、40.0 m范围内,部分钻孔控制的砂质泥岩层在监测孔口附近出现大面积电阻率上升现象。第IV阶段,1#、2#和3#监测孔在工作面推进过孔口7.4、20.7、35 m后,监测孔控制层位范围的电阻率值不再出现明显变化。分带现象初步呈现发生在第II阶段,在第III阶段较明显且可能伴随破碎带发育,主要在控制层位的砂质泥岩层中。与2#监测孔呈现效果相比,1#监测孔超前应力影响不明显,出现明显的电阻率值变化现象有所推迟,2#监测孔在孔深5.0~35.0 m范围时就出现大面积电阻率值明显升高现象,钻孔控制范围的层位破碎带发育也明显提前。综合3个监测孔并行电法视电阻率分布情况,底板破坏深度12.0 m,破坏扰动最大深度为30.0 m。

## 5 结 论

对于61301工作面底板岩层破坏深度和破坏扰动最大深度的测试研究,钻孔光纤技术与并行电法技术两种方法探测结果基本一致。考虑到光纤光缆布设位置更为精确,数值变化灵敏,反映的破坏带变化更为清晰,且电缆线后期发生断裂,因此对于破坏带的划分与判断,将钻孔光纤传感技术的成像结果作为主体,钻孔并行电法成像结果为辅助进行解释。通过光纤传感技术和并行电法结果综合分析,61303工作面底板岩层破坏带深度为14.5 m,位于砂泥岩岩层中部,破坏扰动最大深度为32.0 m,位于砂泥岩岩层下部。

## 参考文献

- [1] 史先志. 大埋深高承压水上采煤底板破坏演化及水害防治研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2020: 22-23.
- [2] 王连国, 韩猛, 王占盛, 等. 采场底板应力分布与破坏规律研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30 (3): 317-322.
- [3] 苗飞. 大采深工作面煤层底板采动破坏及特征研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2017: 18-23.
- [4] 崔晚, 杨柳, 李学成. 双向渐厚综放工作面不同开采时期来压特征研究 [J]. 中国矿业, 2021, 30 (2): 127-132+138.
- [5] 蓝航, 陈东科. 我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析 [J]. 煤炭科学技术, 2016, 44 (1): 39-46.
- [6] 李波, 巨广刚, 王珂, 等. 2005—2014年我国煤矿灾害事故特征及规律研究 [J]. 矿业安全与环保, 2016, 43 (3): 111-114.
- [7] 刘军. 并行电法在倾斜厚煤层工作面“三带”探测中的应用 [J]. 矿业安全与环保, 2018, 45 (3): 102-107.
- [8] 张平松, 吴基文, 刘盛东, 等. 煤层采动底板破坏规律动态观测研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (s1): 3009-3013.
- [9] 王静雪, 刘海松, 邱梅. 煤层底板突水危险性评价的FDAHP-TOPSIS模型 [J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3 (2): 104-115.
- [10] 孙晓光. 煤层底板突水预测及防治研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2008: 25-40.
- [11] 谭海亮, 李七明. 光纤传感技术在覆岩“两带”高度探测中的应用 [J]. 中国煤炭地质, 2019, 31 (5): 60-65.
- [12] 曹帅. 彬长矿区导水裂缝带观测方法综合对比分析 [J]. 能源与环保, 2021, 43 (5): 145-151+164.
- [13] 冯洁, 侯恩科, 王苏健. 宁东煤炭基地煤炭开采对地下水的影响预测 [J]. 地质通报, 2018, 37 (12): 64-71.
- [14] 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.
- [15] 张平松, 刘畅, 欧元超, 等. 准格尔煤田特厚煤层开采底板破坏特征综合测试研究 [J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49 (1): 263-269.
- [16] 孔皖军, 郑根源, 国伟, 等. 采动条件下底板岩层破坏深度动态测试研究及应用 [J]. 煤炭工程, 2018, 50 (10): 96-100.
- [17] 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.
- [18] 邓广哲, 付英凯, 杨东. 下保护层开采上覆煤层卸压效果研究 [J]. 煤矿安全, 2020, 51 (9): 174-178 +186.
- [19] 李思友, 刘宝贺, 杨万. 煤矿开采中厚硬顶板覆岩稳定性机理研究 [J]. 煤炭技术, 2016, 35 (3): 53-55.
- [20] Xu S, Wang S, Zhang P, et al. Study on strain characterization and failure location of rock fracture process using distributed optical fiber under uniaxial compression [J]. Sensors, 2020, 20 (14): 3853.
- [21] 冀显坤. 高密度电法勘探地形校正技术研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2010: 5-9.
- [22] 刘国勇, 杨明瑞, 王永刚. 高密度电法在煤矿积水采空区探测中的应用 [J]. 矿业安全与环保, 2019, 46 (5): 90-94.