



## 煤层采动底板变形破坏过程多参数精细感知方法研究

姚多喜 刘畅

### 引用本文:

姚多喜, 刘畅. 煤层采动底板变形破坏过程多参数精细感知方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 44–52.

YAO Duoqi, LIU Chang. Multi-parameter fine sensing method of deformation and failure process of coal seam mining floor[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 44–52.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0368>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 采动煤层底板层次性破坏特征全空间多参量协同监测

Full-space multi-parameter cooperative monitoring of failure hierarchy characteristics of mining coal seam floor

煤炭科学技术. 2022, 50(2): 86–94 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/dce5385a-5e79-4e2c-8547-ea862c35d8b0>

#### 矿山围岩变形与破坏光纤感测理论技术及应用

Theory-technology and its application of optical fiber sensing on deformation and failure of mine surrounding rock

煤炭科学技术. 2021, 49(1): 208–217 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.01.016>

#### 煤层底板采动破坏机制的岩性效应研究

Study on lithologic effect of mining-induced failure mechanism of coal seam floor

煤炭科学技术. 2023, 51(11): 166–178 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0309>

#### 采动覆岩变形多场光纤神经感知与安全保障体系构建研究

Research on multi-field fiber optic neural sensing and safety guarantee system constructing for mining overburden deformation

煤炭科学技术. 2023, 51(11): 104–118 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-2091>

#### 矿井电法在煤层采动破坏和水害监测中的应用进展

Advances of mine electrical resistivity method applied in coal seam mining destruction and water inrush monitoring

煤炭科学技术. 2019(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7201ab24-9435-4a69-ab5d-4cbda8ed63f7>

#### 回采巷道底鼓演化过程的分布式光纤实测研究

Distributed optical fiber measurement of floor heave evolution in mining roadway

煤炭科学技术. 2023, 51(1): 146–156 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1515>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

姚多喜, 刘 畅. 煤层采动底板变形破坏过程多参数精细感知方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 44–52.  
YAO Duoxi, LIU Chang. Multi-parameter fine sensing method of deformation and failure process of coal seam mining floor[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 44–52.

## 煤层采动底板变形破坏过程多参数精细感知方法研究

姚多喜, 刘 畅

(安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

**摘 要:**煤层采动过程中, 通过测试参数感知底板变形破坏过程是采场地质保障的有效方式。利用有限差分法构建煤层采动底板破坏数值模型, 获取塑性区的分布和演化特征, 结果显示底板破坏深度为 21 m。在煤层底板钻孔中植入电缆和分布式光纤, 通过对电极电流值和光纤应变的连续采集, 获得采动效应下的特征参数图谱, 进一步分析底板的变形破坏程度。结果表明: 电极电流的初始值在 40 mA 以上。随着工作面的推进电流值轻微升高, 当工作面推进到孔口附近时, 电流降到 1 mA 以下, 岩层破坏; 光纤测试方面, 随着工作面的推进光纤应变不断增大, 当工作面靠近孔口时, 光纤应变峰值为  $8.589 \times 10^{-3}$ , 之后岩层破裂, 能量释放, 光纤应变回弹。电极电流和光纤应变参数图谱显示底板的变形破坏过程分为 4 个阶段, 分别为无影响阶段、微影响阶段、显著影响阶段和破坏阶段。监测数据对底板变形破坏过程起到了良好表征作用, 但存在一定差异, 具体表现在超前应力和破裂伊始的感知上, 电极电流的响应要略早于光纤应变。电极电流的结果显示底板破坏深度为 20.8 m, 光纤应变的结果显示底板破坏深度为 21.0 m。构建电极电流值和应变值的核密度图, 对于底板浅部的监测点, 数据点离散程度较大; 而埋深较大的监测点受动效应影响较小, 回采过程中数据点分布较为集中, 离散程度较小。通过多测试参数联合感知, 实现煤层采动底板变形破坏过程的精细表征和评价。

**关键词:**煤层采动; 底板破坏; 多参数表征; 精细化探测; 光纤监测

中图分类号: TD163

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)07-0044-09

### Multi-parameter fine sensing method of deformation and failure process of coal seam mining floor

YAO Duoxi, LIU Chang

(School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** Sensing the floor deformation and damage process by testing parameters during coal seam mining is an effective way to secure the geology of the quarry. A numerical model of coal seam mining floor failure was constructed by using the finite difference method to obtain the distribution and evolution characteristics of the plastic zone, which showed a floor failure depth of 21 m. Electric Cables and distributed optical fibers were implanted in the coal floor borehole, and the characteristic parameter profiles under the mining effect were obtained through the continuous acquisition of electrode current values and optical fiber strain values to further analyze the deformation and failure. The result showed that the initial value of electrode current was above 40 mA, and the current value increases slightly as the working face advances, and when the working face advances near the borehole, the current value dropped to less than 1 mA and the rock formation was failure; as for the fiber optic test, the fiber optic strain value increased continuously as the working face advances, and the peak fiber optic strain was  $8.589 \times 10^{-3}$  when the working face was near the monitoring borehole, after which the rock formation ruptured and the energy was released, and the fiber optic The strain value bounced back after the rock rupture and energy release. The mapping of

收稿日期: 2023-05-02

责任编辑: 常 琛

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0368

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41877268)

作者简介: 姚多喜(1960—), 男, 安徽淮南人, 教授, 博士生导师。E-mail: dxyao@aust.edu.cn

通讯作者: 刘 畅(1993—), 男, 安徽淮北人, 博士研究生。E-mail: lcwarm1995@163.com

electrode current and fiber optic strain parameters showed that the deformation and failure process of the floor was divided into four stages, namely, no impact stage, micro impact stage, significant impact stage, and failure stage. The monitoring data provided a good characterization of the deformation and failure process of the floor, but there were some differences, specifically in the perception of the overstress and the beginning of rupture, with the response of the electrode current slightly earlier than the fiber optic strain. The results of the electrode current showed that the floor failure depth was 20.8 m, and the results of the fiber optic strain showed that the floor failure depth was 21 m. The kernel density maps of electrode current values and strain values were constructed. For the monitoring points in the shallow part of the floor, the data points were more discrete; while the monitoring points in the deeper burial were less affected by the dynamic effect, and the data points were more concentrated and less discrete during the recovery process. Through the joint sensing of multiple test parameters, we can realize the fine characterization and evaluation of the deformation and failure process of the coal seam mining floor.

**Key words:** coal seam mining; coal floor failure; multi-parameter characterization; refined detection; fiber optic monitoring

## 0 引 言

目前,世界经济飞速发展,浅部地层矿产资源所剩无几,开采深度正逐年加大<sup>[1-2]</sup>。淮南 A 组煤储量大、赋存稳定、煤质好,是重要的化石能源储备<sup>[3]</sup>。煤层底板采动破坏的特征主要包括以下 4 个方面:破坏类型多样、破坏形态复杂、破坏规模较大、破坏时效性较强。A 组煤层底板灰岩富水性较强,动压下海相岩层遇水膨胀形成裂隙,对 A 组煤安全开采构成了巨大威胁<sup>[4-5]</sup>。捕捉煤层采动底板地球物理参数变化,分析复杂条件下岩层变形破坏规律,精准感知、评价采动条件下岩层稳定性,是矿井水害防治中亟待解决的难题之一。

国内外众多学者主要从理论分析、模拟试验和现场实测等方面,对煤层采动底板变形和破坏特征开展研究。在理论研究方面,朱术云等<sup>[6]</sup>对煤层底板下相对固定位置剖面应变分布规律进行了初步探讨,并探讨了软岩和硬岩两种底板的应变响应特征;孟祥瑞等<sup>[7]</sup>建立了底板任意一点应力计算的弹性力学模型得到底板岩层破坏深度,并结合震波及电阻率实测验证了理论推导的准确性;鲁海峰等<sup>[8]</sup>将支承压力与底板水压简化为水平荷载,得到水压作用下采场底板的应力表达式;王连国等<sup>[9]</sup>综合考虑工作面走向和倾向受力特点,得到采场底板垂直应力的迭代计算式。在模拟试验方面,李保良等<sup>[10]</sup>开展了煤层开采底板承压水导升模拟试验,分析了煤层底板承压水导升规律和导水通道形成过程;王进尚等<sup>[11]</sup>利用相似材料模拟试验研究底板隐伏断层递进导升过程;李杨杨等<sup>[12]</sup>通过相似物理模型试验研究了煤层采动底板突水演变过程,该试验具有可视化、定量化的特点;张玉军等<sup>[13]</sup>采用相似物理模拟和数值模拟方法开展了承压水体上煤层底板下位隐伏断层采动突水机制研究;马文著等<sup>[14]</sup>通过数值模拟得到承压水上煤层底板破坏特征。煤层采动过程中,

煤层底板的原位监测是最直接有效的观测手段。根据技术原理的不同可分为直接观测法和间接观测法。直接观测方法包括钻孔冲洗液法和钻孔电视法<sup>[15]</sup>。间接观测方法包括直流电法<sup>[16]</sup>、微震监测法<sup>[17]</sup>、震波 CT 法<sup>[18]</sup>、声发射监测法<sup>[19]</sup>和锚杆位移监测法<sup>[20]</sup>等。吴荣新等<sup>[21]</sup>通过对厚松散层薄基岩坚硬顶板工作面覆岩破坏进行电法监测,获得了覆岩裂隙带在采动过程中的空间展布;张平松等<sup>[22]</sup>对准格尔煤田特厚煤层开采底板破坏特征综合测试研究,获得采区工作面底板破坏深度在 7.2 ~ 16.5 m;LIU 等<sup>[23]</sup>通过在底板钻孔植入分布式光纤,获得大采高下不同深度岩层随工作面推进的应变变化曲线及特征,以此得到工作面底板破坏深度。煤层底板的变形、裂缝发育等现象,会造成其电性、力学、位移等参数的变化。为提高探查结果的可靠性,多种探测方法或多参数法被应用到地质问题的探测中。目前钻孔电法采用电阻率值作为参数评价覆岩破坏效果,但该参数不稳定、容易受到干扰,常导致电阻率值有较大的跳跃和波动,对于评价结果产生较大影响<sup>[24]</sup>。选取一个稳定的电性参数来评价覆岩变形与破坏具有重要的意义。在现场实测中,选择钻孔电极电流值作为参数,可以实时、高效监测煤层采后覆岩破坏高度。同时,光纤传感作为一种新型监测方法也逐渐被应用在矿山岩土体变形监测上,并取得了良好的应用效果<sup>[25]</sup>。因此,通过电极电流和光纤应变精细感知了煤层采动过程中底板的变形破坏过程,结合数值模拟结果进一步分析了煤层采动条件下底板破坏深度,为矿井水害防治中的多手段、多参数细致探查提供借鉴。

## 1 研究区概况

研究区位于中国东部某煤矿,井田为全隐蔽含煤区,依据钻探结果,地层由老到新依次为奥陶系、石炭系、二叠系和新生界。区内地层多为整合接触,



整体地质构造复杂程度为中等,主采 A 组煤。A 组煤薄基岩工作面上部赋存有巨厚松散层。煤层工作面巷道标高-610 m~-487 m,倾向长度 205 m,走向长度 1 170 m,平均煤厚 7.4 m,分上下两层开采,上层煤平均开采厚度为 4.3 m,下层煤平均厚度为 3.1 m。底板发育有薄层的砂质泥岩,显缓波状层理;基本底以粉细砂岩为主,泥质含量不均,局部泥质含量较高,夹大量泥质条纹。煤层底板充水水源主要为灰岩水,富水性中等。本次监测在上层煤开采期间开展。表 1 为主采煤层顶、底板岩性分布。

表 1 主采煤层顶、底岩性分布

Table 1 Lithology distribution of top and bottom of main coal seam

地质年代	岩性	层厚/m	累深/m
二叠系	泥岩	5.0	477.7
	砂质泥岩	5.6	482.7
	粉砂岩	8.9	488.3
	砂质泥岩	7.3	497.2
	A组煤	7.4	504.5
	砂质泥岩	2.0	511.9
	细砂岩	5.5	513.9
	砂质泥岩	4.4	519.4
	泥岩	5.2	523.8
	灰岩	2.8	529.0
石炭系	细砂岩	5.2	531.8
	灰岩	0.9	537.0

2 煤层采动底板数值模拟

2.1 模型的建立

基于研究区煤层工作面地质条件分析,选取工作面推进方向为  $x$  轴,水平垂直推进方向为  $y$  轴,岩层垂向为  $z$  轴,简化构建为长 $\times$ 宽 $\times$ 高=300 m $\times$ 300 m $\times$ 114 m 的数值模型(图 1)。其中,模型覆岩设置 58 m, A 组煤厚度设置为 7 m,共划分 194 400 个单元及 204 655 个节点。结合矿压资料,周期来压步距约为 15 m,模拟过程采用逐步开挖的方式,开挖步距为周期来压步距。岩层参数见表 2。

2.2 结果分析

煤层开采后,底板岩层应力重分布,随着回采工作面的不断推进形成了底板破坏带后趋于稳定。数值模型中,塑性区可表明岩层破坏区的分布范围。根据图 2 可知,开挖 15 m 时,底板破坏深度为 15 m,此时底板破坏区以剪切破坏为主,回采工作面前方

15 m 为剪切破坏带。开挖 45 m 时,底板破坏深度为 17 m,以剪切破坏为主,回采工作面前方 20 m 为横向剪切破坏带。开挖 75 m 时,底板破坏深度为 21 m,以剪切破坏为主,回采工作面前方 35 m 为横向剪切破坏带。开挖 105 m 时,底板塑性区持续横向扩展,横向破坏带延伸至回采工作面前方 45 m。数值模拟塑性区结果显示,煤层采动底板破坏深度为 21 m。

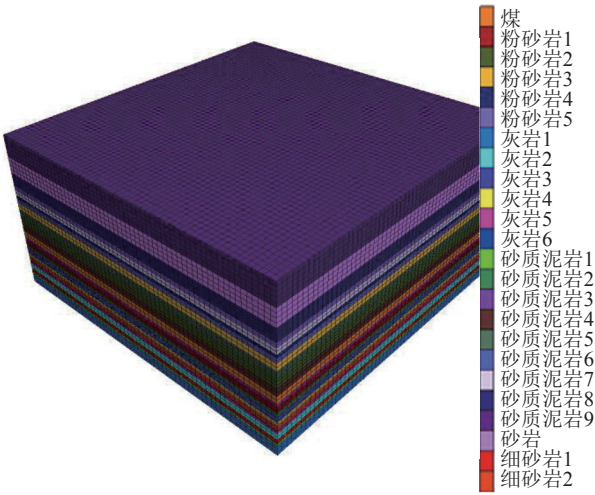


图 1 底板采动数值模型

Fig.1 Numerical modeling of floor affect by mining

表 2 数值模型力学参数

Table 2 Numerical model mechanics parameters

岩层	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	抗拉强度/ MPa
细砂岩	1.84	1.78	3.22	35	2.52
粉砂岩	2.69	1.65	2.98	34	2.38
砂质泥岩	1.21	1.36	2.45	33	2.05
煤	0.08	0.09	1.48	26	0.40
泥岩	1.08	1.24	2.05	31	1.75
灰岩	1.92	1.92	3.95	36	3.12
顶板	2.85	2.32	2.42	33	2.40

3 煤层采动底板原位测试

3.1 技术原理

3.1.1 并行电法技术

并行电法技术通过在被测体表面或内部布置多个电极,并施加一定的电压和电流,利用观测点测量电位差和电流值,从而计算地下电性参数分布。与传统的电阻率成像技术相比,该技术能够在同一时间内采集更多的电信号,因此可以更快速地获取更准确的地电场信息。

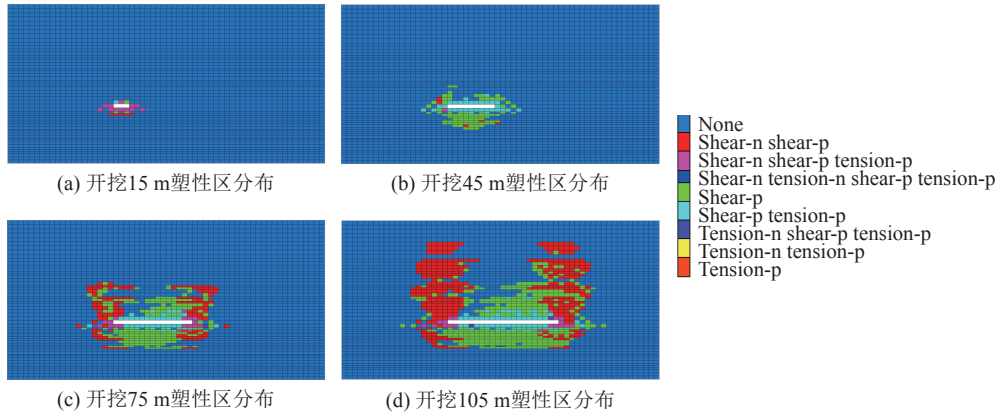


图2 煤层采动底板塑性区分布

Fig.2 Distribution of plastic zone in the floor of coal seam mining

采用激励电流法等来进行监测,此方法是以不同地层之间岩体的导电性以及介电性的差异为基础。根据现有理论<sup>[26]</sup>,铜片电极的接地电阻  $R$  和接地介质电阻率  $\rho$  成正比例关系。

$$R = c\rho \quad (1)$$

根据人为供电,电压  $U$ 、电流  $I$  和电极的接地电阻  $R$  存在下列关系:

$$R = \frac{U}{I} \quad (2)$$

通过公式 (1) 和 (2) 可得:

$$I = \frac{U}{c\rho} \quad (3)$$

由公式(3)可知,当供电电压  $U$  保持不变时,激励电流  $I$  与岩层电阻率  $\rho$  呈反比,激励电流值反映了电极附近一定尺度范围内的岩层电性特征。

### 3.1.2 BOTDR

BOTDR (Brillouin Optic Time Domain Reflectometer), 通过将一束激光脉冲通过光源射入到光纤中,并对其背向散射光信号的光强分布进行探测的信息测量(图3)。基于矿山岩层的变形场变化,不同位置光纤所受的拉、压程度不同,该光路处的布里渊光频率发生改变,通过解调仪的解析,获得该光路通道上的分布式光频率。BOTDR 的优势是单端测试,不依靠光回路的完整性,即使光纤中部断裂,仍可捕捉与解调仪连接部分的光纤应变/温度变化。

$$f_B(\varepsilon, T) = f_B(0) + C_\varepsilon \varepsilon + C_T T \quad (4)$$

其中:  $\varepsilon$ ,  $T$  为应变和温度的变化量;  $f_B(0)$  为初始布里渊漂移量;  $f_B(\varepsilon, T)$  为应变为  $\varepsilon$ , 温度为  $T$  时的布里渊频移量;  $C_\varepsilon$  为应变常数;  $C_T$  为温度常数。当温变化  $\Delta T < 5^\circ\text{C}$  时,可以忽略温度对光纤的布里渊频率漂移量的影响。所以,光纤应变变量可表示为

$$\varepsilon = \frac{f_B(\varepsilon) - f_B(0)}{C_\varepsilon} \quad (5)$$

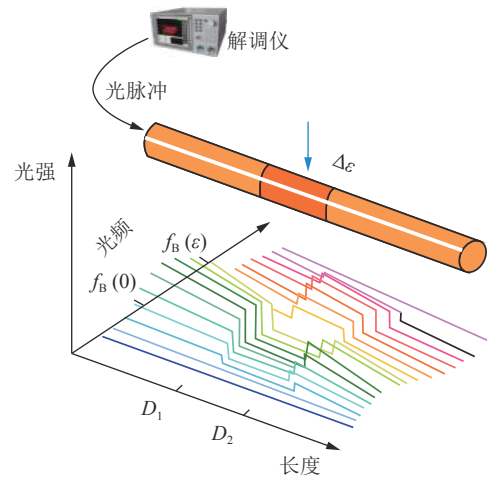


图3 布里渊光时域反射传感原理

Fig.3 Brillouin light time domain reflection sensing principle

### 3.2 监测系统布置

底板监测孔长 55.3 m, 与回风巷的夹角为  $15^\circ$ , 与水平向夹角为  $30^\circ$ , 钻孔位置如图 4a 所示。分布式光纤在监测孔底弯折固定, 采用全孔安装的方式。如图 4b 所示, 钻孔测应变光缆外径 5.0 mm, 通过多股金属加强件保护光纤, 强度大, 可抵抗一定的变形破坏。光缆全部采用非金属加强件设计, 具有极高的绝缘性。电法线缆电极距为 2 m, 32 号电极在孔底, 4 号电极在孔外。电法线缆外部使用高强度、耐腐蚀材料, 有效适应钻孔的水岩环境和具备一定的抗破坏能力。传感线缆植入后全孔采用水泥分段注浆封堵, 确保传感线缆与岩层高度耦合。采集日期及对应的工作面回采位置见表 3。

### 3.3 监测结果及分析

#### 3.3.1 电极电流值结果

对现场采集的电极激励电流进行解编与处理,

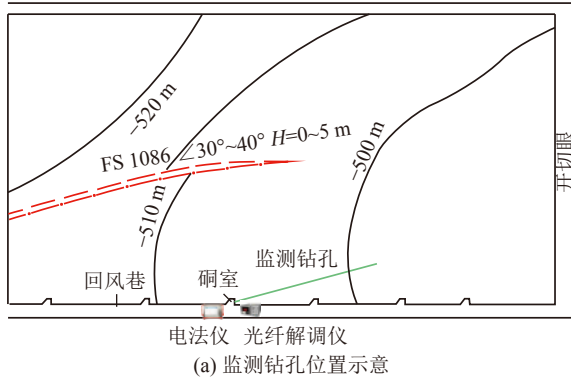


图 4 底板岩层监测系统组成

Fig.4 Composition of subgrade rock monitoring system

表 3 回采工作面与监测断面位置关系

Table 3 Relationship between working face and monitoring borehole location

日期(月-日)	距离/m	日期(月-日)	距离/m	日期(月-日)	距离/m
08-05	130.1	08-21	78.2	08-31	29.8
08-07	123.3	08-22	70.8	09-01	25.0
08-08	121.6	08-23	67.0	09-04	13.6
08-09	118.5	08-24	62.2	09-05	9.8
08-10	115.2	08-27	49.4	09-06	6.1
08-12	109.1	08-28	44.6	09-07	1.8
08-17	92.1	08-29	40.9	09-08	-3.2
08-18	89.1	08-30	33.9		

1~4 号电极在钻孔外部,不统计在内。8 月 5 日开始采集数据,监测孔内各电极电流值均在 40 mA 以上,电极接地情况良好。随工作面回采推进,监测孔内的各电极电流值变化情况如图 5 所示。图 5a 中,8 月 28 日之前,回采工作面靠近孔口,钻孔围岩被逐渐压实,电极 5~11 号的电流值总体趋势为缓慢上升。8 月 28 日—8 月 30 日,周期来压使得顶板垮落,钻孔围压压力减小,电流值略有下降。8 月 30 日—9 月 6 日,回采工作面继续靠近孔口,在支承压力作用下岩层压实,使得电流值先升高,之后岩层出现局部裂隙或破坏,电流值降低。其中,电极 9、10 号的

电流值骤降至 1 mA 以下,为岩层破裂时电性响应特征。图 5b 中,电极电流值的响应和变化趋势与图 5a 相似,监测后期,电极 13 的电流值骤降至 1 mA 以下,为岩石的破坏电性响应特征。图 5c 中,电极的电流值的变化趋势与图 5a 和图 5b 类似,9 月 6 日时,电极 21~25 号的电流值骤降至 1 mA 以下,为岩石的破坏电性响应特征,其位于泥岩层,质软易裂。图 5d 中,电极 26~32 号至监测结束未出现电流值明显下降的现象,表明受采动影响较小,岩层较稳定。

图 6 为监测期间的电极电流云图,根据电流云图可将监测期内的回采过程分为 4 个阶段  $R_1 \sim R_4$ 。 $R_1$  阶段,电极电流值几乎没有变化,表明底板岩层未受到煤层采动影响; $R_2$  阶段,电极电流值出现轻微升高,表明底板岩层开始受到煤层采动影响; $R_3$  阶段,电极电流值变化明显,表明底板岩层在支承压力作用下进一步压实; $R_4$  阶段,部分电极电流值出现骤降,表明底板岩层出现局部破裂。煤层采动对底板岩层的最大影响到 25 号电极,表现出岩石破裂特征,位于孔深 41.6 m(即图 6 中  $D_1$  深度范围),换算为底板垂深为 20.8 m。 $D_2$  深度范围包括 26~32 号电极,电流值在煤层回采过程中出现一定的波动,为采动扰动区。

### 3.3.2 分布式光纤应变值结果

回采工作面从孔口前方 123.3 m,推进至孔口后 3.2 m 的过程中,完整地现场分布式光纤数据进行采集。图 7 为监测期间内分布式光纤应变时空分布二维云图。根据光纤应变云图显示,底板岩层的损伤演化可分为无影响阶段  $Q_1$ 、微影响阶段  $Q_2$ 、显著影响阶段  $Q_3$  和岩层破裂阶段  $Q_4$ 。 $Q_1$  阶段几乎不受采动影响,光纤应变值变化极小; $Q_2$  阶段为微影响阶段,回采工作面未及钻孔之上,但钻孔围岩在支承压力作用下逐渐压密,分布式光纤应变增大; $Q_3$  为显著影响阶段,此时回采工作面位于钻孔控制范围内,分布式光纤应变值变化可分为两部分。一部分是采空区下方钻孔,在卸荷作用下拉应变增大。钻孔内光纤长度 28.0~42.0 m,受卸荷作用影响剧烈,在 9 月 6 日时拉应变增量达到测量峰值  $8.589 \times 10^{-3}$ 。另一部分是回采工作面前方底板,受支承压力作用,以压应变为主,对近煤层的底板岩层影响较大。8 月 27 日开始,浅部岩层中的光纤压应变变化显著。8 月 30 日,钻孔内光纤长度 8.9 m 处压应变增量达到测量峰值  $-2.325 \times 10^{-3}$ 。 $Q_4$  为岩层破裂阶段,积聚能量释放,应变值减小。综上,孔深 42.0 m 为分布式光纤探测的底板最大采动破坏深度,对应底板垂深



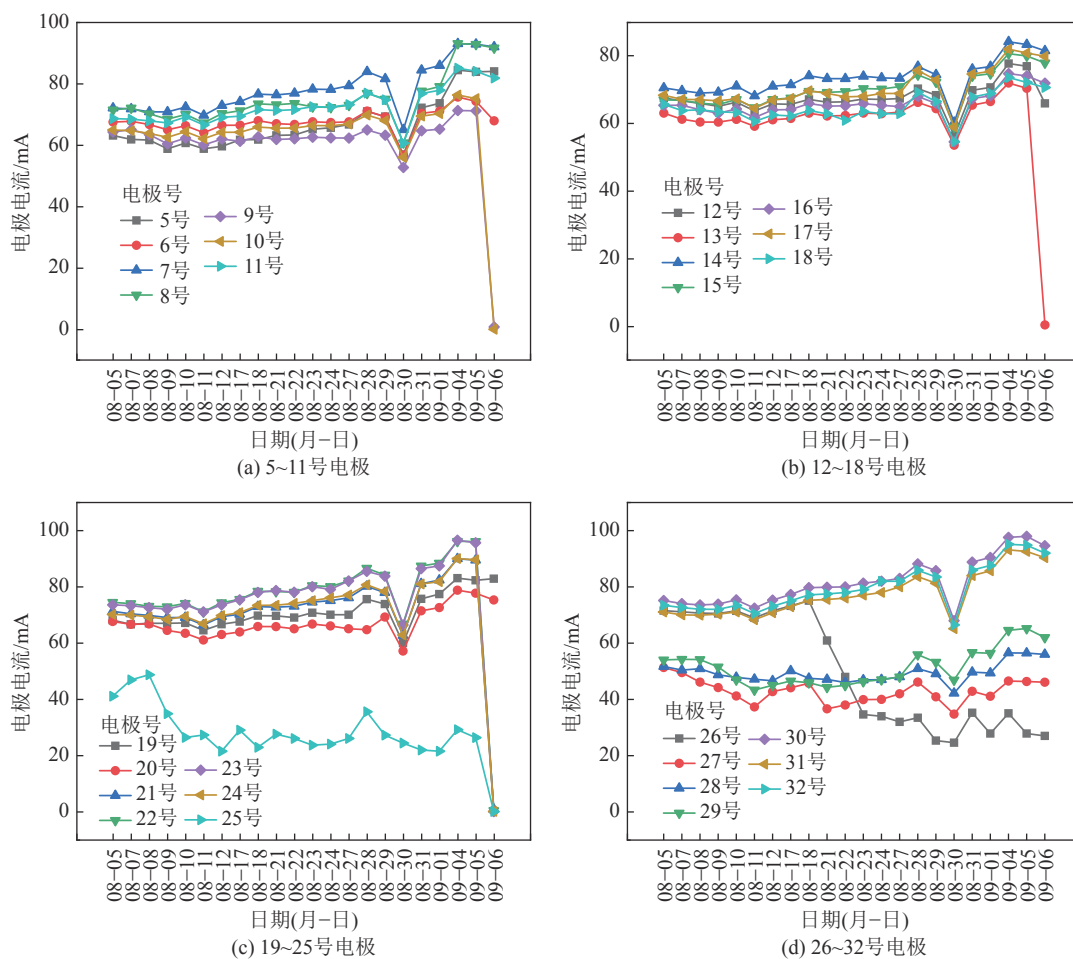


图5 底板监测孔中电极电流值响应特征

Fig.5 Response characteristics of electrode current values in the coal floor monitoring borehole

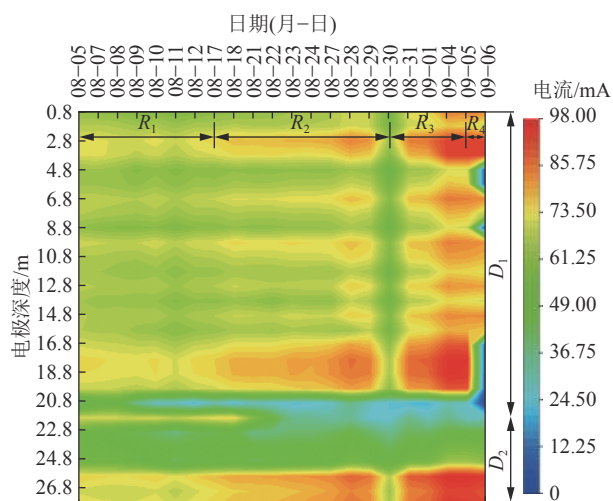


图6 电极电流云图

Fig.6 Electrode current cloud mapping

21.0 m, 即图中  $L_1$  深度范围。该回采工作面底板的注水测试结果显示的底板破坏极限是 20.0 m, 与监测结果相近。 $L_2$  区域为采动影响, 该区域的岩层出现一定的应变值变化, 但未破坏。

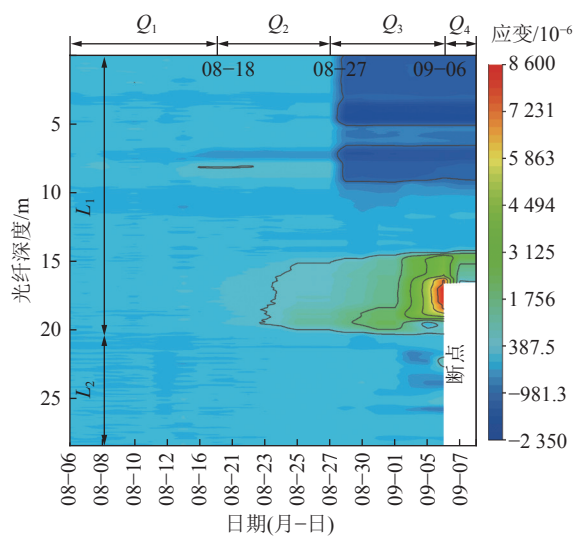


图7 底板监测孔中分布式光纤应变值响应特征

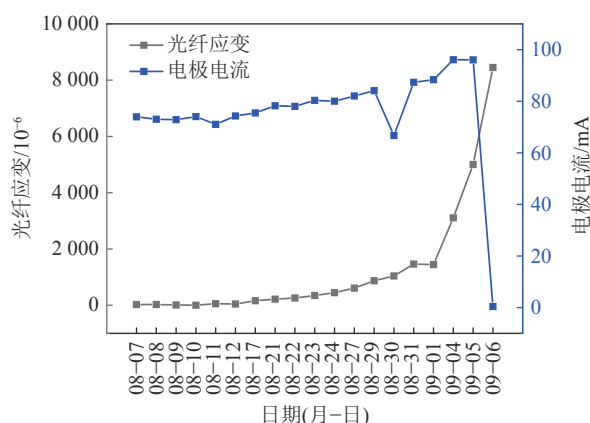
Fig.7 Response characteristics of distributed fiber optic strain values in the base plate monitoring borehole

### 3.3.3 多参数监测结果对比分析

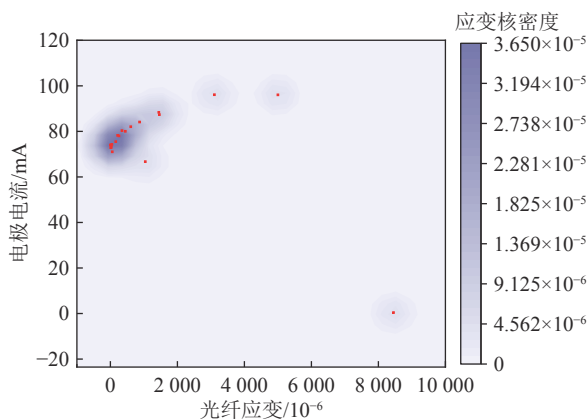
为厘清回采过程中底板岩层变形破坏情况, 采

用多参数联合表征与分析。图8a的监测点位于钻孔中22号电极处,在泥岩层中,对应底板深度17.8m。监测初期,随着拉应变增量的变大,电极电流值轻微升高,两者变化趋势正相关。监测后期该处岩层拉应变值超出最大承载范围,岩层破裂,电极电流值骤降至1mA以下,呈岩层破坏特征,光纤拉应变随之骤降。为更好地理解数据的分布情况,识别异常值、分布特征等,采用以监测过程中的钻孔光

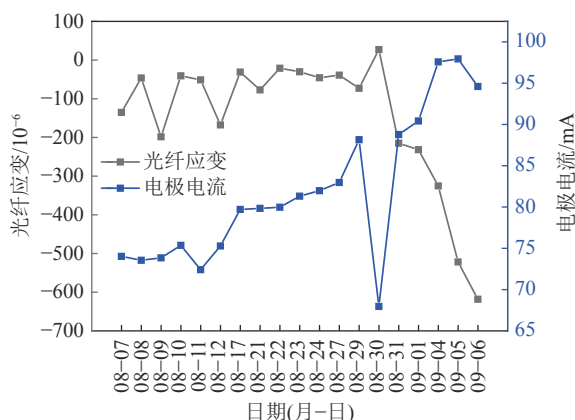
纤应变和电极电流值构建多参数核密度图,如图8b所示。综合图8a和图8b可以看出,监测初期,数据点较为集中,密度较大,表明数值变化较小,底板监测点所处岩层受采动影响较小;监测中期,数据点开始出现离散,密度降低,表明数据出现波动,底板监测点所处岩层受到一定的采动影响;监测后期,数据点脱离采动波动范围,出现“逃逸”现象,表明监测点附近岩层稳定性发生较大改变,岩层破裂。



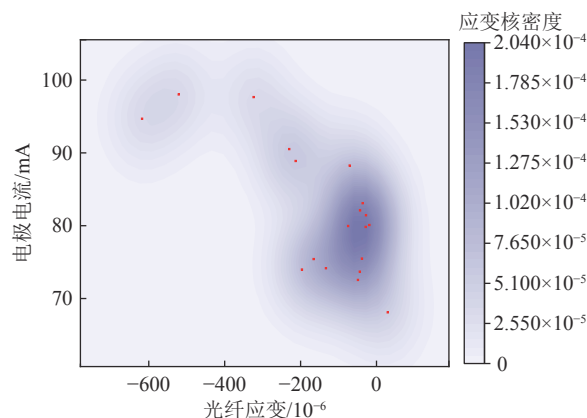
(a) 22号电极处电极电流和应变响应特征



(b) 22号电极处电极电流和应变核密度



(c) 30号电极处电极电流和应变响应特征



(d) 30号电极处电极电流和应变核密度

图8 钻孔多参数响应特征

Fig.8 Borehole multi-parameter response characteristics

图8c的监测点位于钻孔中30号电极处,对应底板垂深25.8m。由于埋深较大,参数数值波动较小,表明该处岩层较为完整,受采动影响较小。图8d为该监测点处的多参数核密度图。综合图8c和图8d可以看出,监测初期,数据点较为集中,密度较大,表明数值变化较小,底板监测点所处岩层受采动影响较小;监测中后期,数据点开始出现一些变化,密度降低,该监测点所处岩层受到一定的采动影响,至监测最后,未出现数据点剧烈变化现象,表明监测过程中该处岩层虽受采动扰动影响,但整体较为稳定,未破裂。

统计了22号电极和30号电极处参数的极差和标准差,见表4。结果显示22号电极处参数的极差和标准差均大于30号电极处参数的极差和标准差,表明22电极处参数在监测过程中离散程度较大,30电极处参数在监测过程中离散程度较小。

煤层回采监测过程中,电极电流值和光纤应变值均起到了良好的表征效果,但存在一定差异。在超前应力和破裂伊始的感知上,电极电流的响应要略早于光纤应变。电极电流和光纤应变的全程监测都可概括为4个阶段:无影响阶段、微影响阶段、显著影响阶段和破裂阶段,通过地质地球物理参数实



现了煤层回采过程的多参数有效表征。在底板破坏深度的确定上, 电法结果为 20.8 m, 分布式光纤为 21.0 m, 两者结果相近, 达到互相验证的目的。在破坏深度的确定上, 分布式光纤展现出了全分布和高精度的优势, 可准确感知岩层破裂的位置。

表 4 监测点处数据极差和标准差统计

Table 4 Statistics of data range and standard deviation at monitoring points

数据来源	计算值	
	极差	标准差
22号电极处电流值	95.7	19.8
22号电极处应变值	8 449.8	2 156.5
30号电极处电流值	30.0	8.8
30号电极处应变值	645.3	174.1

## 4 结 论

1) 建立煤层采动底板数值模型, 得到了煤层采动过程中的塑性区演化特征, 塑性区结果显示底板破坏深度为 21 m。

2) 在底板钻孔中植入电法电极和分布式光纤, 获得了煤层采动过程中电极电流和光纤应变的响应特征, 电流值和应变值有效表征了底板的变形破坏过程。由二维参数图谱将底板岩层的变形破坏过程分为 4 个阶段, 分别为无影响阶段、微影响阶段、显著影响阶段和破坏阶段。

3) 在超前应力和破裂伊始的感知上, 电极电流的响应要略早于光纤应变。电极电流的结果显示底板破坏深度为 20.8 m, 光纤应变的结果显示底板破坏深度为 21.0 m。2 种监测方法测试结果与数值模拟结果相近, 相互验证。

4) 核密度图和数据统计结果显示, 埋深较小的监测点受采动效应影响明显, 监测过程中参数离散程度较大, 岩层破裂时出现数据点“逃逸”现象; 埋深较大的监测点受动效应影响较小, 监测过程中参数离散程度较小。

## 参考文献(References):

- [1] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.  
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [2] 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.
- [3] GUO Jinshuai, MA Liqiang, ZHANG Dongsheng. Management and utilization of high-pressure floor-confined water in deep coal mines[J]. *Mine Water and the Environment*, 2019, 38(4): 780-797.
- [4] ZHANG Yujun. Mechanism of water inrush of a deep mining floor based on coupled mining pressure and confined pressure[J]. *Mine Water and the Environment*, 2021, 40(2): 366-377.
- [5] ZHAO Jinhai, CHEN Juntao, ZHANG Xinguo, et al. Distribution characteristics of floor pore water pressure based on similarity simulation experiments[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(9): 4805-4816.
- [6] 朱术云, 姜振泉, 侯宏亮. 相对固定位置采动煤层底板应变的解析法及其应用[J]. 矿业安全与环保, 2008, 35(1): 18-20.  
ZHU Shuyun, JIANG Zhenquan, HOU Hongliang. Analytical method and its application of floor strain of mining coal seam in relative fixed position[J]. *Mining safety and Environmental Protection*, 2008, 35(1): 18-20.
- [7] 孟祥瑞, 徐铨辉, 高召宁, 等. 采场底板应力分布及破坏机理[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1832-1836.  
MENG Xiangrui, XU Chenghui, GAO Zhaoning, et al. Stress distribution and failure mechanism of stope floor[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(11): 1832-1836.
- [8] 鲁海峰, 姚多喜, 胡友彪, 等. 水压影响下煤层底板采动破坏深度弹性力学解[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(3): 452-458.  
LU Haifeng, YAO Duoxi, HU Youbiao, et al. Elastic mechanical solution of coal seam floor failure depth under water pressure[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2017, 34(3): 452-458.
- [9] 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.  
WANG Lianguo, HAN Meng, WANG Zhansheng, et al. Study on stress distribution and failure law of stope floor[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2013, 30(3): 317-322.
- [10] 张保良, 郭惟嘉, 张新国, 等. 煤层开采底板承压水导升模拟试验系统研制与应用[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 2057-2062.  
ZHANG Baoliang, GUO Weijia, ZHANG Xinguo, et al. Development and application of analogue testing system for floor confined water rise in coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(8): 2057-2062.
- [11] 王进尚, 姚多喜, 黄 浩. 煤矿隐伏断层递进导升突水的临界判据及物理模拟研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 2014-2020.  
WANG Jinshang, YAO Duoxi, HUANG Hao. Critical criterion and physical simulation research on progressive ascending water inrush in hidden faults of coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(7): 2014-2020.
- [12] 李杨杨, 张士川, 孙熙震, 等. 煤层采动底板突水演变过程可视化试验平台研制与试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3515-3524.  
LI Yangyang, ZHANG Shichuan, SUN Xizhen, et al. Development and experimental study on visualization test platform for

- water inrush evolution process of coal seam mining floor[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(11): 3515–3524.
- [13] 张玉军, 张志巍, 肖杰, 等. 承压水体上煤层底板下位隐伏断层采动突水机制研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(2): 283–291.
- ZHANG Yujun, ZHANG Zhiwei, XIAO Jie, *et al.* Study on mining water inrush mechanism of buried fault under coal seam floor above confined water body[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(2): 283–291.
- [14] 马文著, 周晓敏, 谭帅. 承压水上煤层底板破坏特征研究: 以山西义棠煤矿为例[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2020, 2(3): 23–31.
- MA Wenzhu, ZHOU Xiaomin, TAN Shuai. Study on failure characteristics of coal seam floor above confined water: a case study of Shanxi Yitang Coal Mine[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2020, 2(3): 23–31.
- [15] 孙庆先, 牟义, 杨新亮. 红柳煤矿大采高综采覆岩“两带”高度的综合探测[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(S2): 283–286.
- SUN Qingxian, MOU Yi, YANG Xinliang. Comprehensive detection of “Two Zones” height of overlying rock with large mining height in Hongliu Coal Mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(S2): 283–286.
- [16] WU Rongxin, HU Zean, HU Xiongwu. Principle of using borehole electrode current method to monitor the overburden stratum failure after coal seam mining and its application[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2020, 179: 104111.
- [17] LIU Chao, LI Shugang, CHENG Cheng. Activation characteristics analysis on concealed fault in the excavating coal roadway based on microseismic monitoring technique[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 27(5): 883–887.
- [18] 张平松, 刘盛东, 吴荣新. 地震波CT技术探测煤层上覆岩层破坏规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 13(15): 2510–2513.
- ZHANG Pingsong, LIU Shengdong, WU Rongxin. Observation of overburden failure of coal seam by CT of seismic wave[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 13(15): 2510–2513.
- [19] LIU Shuai, YANG Ke, TANG Chunan. Rupture and migration law of disturbed overburden during slicing mining of steeply dipping thick coal seam[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 4: 1–11.
- [20] LI X Y, ZHANG L M, JIANG S H, *et al.* Assessment of slope stability in the monitoring parameter space[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 2016, 142(7): 04016029.
- [21] 吴荣新, 吴茂林, 曹建富, 等. 厚松散层薄基岩坚硬顶板工作面覆岩破坏电法监测[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(1): 239–245.
- WU Rongxin, WU Maolin, CAO Jianfu, *et al.* Electrical monitoring of overburden failure in hard roof working face with thick loose layer and thin bedrock[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(1): 239–245.
- [22] 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.
- ZHANG Pingsong, LIU Chang, OU Yuanchao, *et al.* Comprehensive testing research on floor damage characteristics of mining extra-thick seam in Jungar Coalfield[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(1): 263–269.
- [23] LIU Chang, ZHANG Pingsong, SHANG Jianxuan, *et al.* Comprehensive research on the failure evolution of the floor in upper mining of deep and thick coal seam[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2022, 206: 1–11.
- [24] 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.
- [25] SHI Bin, ZHANG Dan, ZHU Honghu, *et al.* DFOS applications to geo-engineering monitoring[J]. *Photonic Sensors*, 2021, 11(2): 158–186.
- [26] 刘志民, 刘希高, 杜毅博, 等. 电法测量接地电阻计算方法及影响因素仿真分析[J]. *煤田地质与勘探*, 2015, 43(2): 96–100.
- LIU Zhimin, LIU Xigao, DU Yibo, *et al.* Calculation method and analysis of influence factors of the grounding resistance in electrical measurement[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2015, 43(2): 96–100.