

DOI: 10.11779/CJGE201505023

# 采场覆岩变形与破坏的分布式光纤监测与分析

张丹<sup>1</sup>, 张平松<sup>2</sup>, 施斌<sup>1</sup>, 王宏宪<sup>1</sup>, 李长圣<sup>1</sup>

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 安理理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 提出了采用 BOTDR 分布式光纤传感技术, 对煤层采动过程中覆岩变形与破坏的发育规律进行了监测和分析。以淮南矿区某工作面为例, 介绍了监测孔的布置方式和传感光缆的安装方法, 提出了采用钻孔安装技术将传感光缆植入到煤层顶板覆岩中, 根据工作面回采进度, 定期采集传感光缆的应变分布, 分析了光缆的应变分布特征及其变化规律, 得到了应变分布与地层的对应关系, 发现应变分布是不均匀的, 传感光缆的应变变化与覆岩模量呈反比, 揭示了覆岩变形与破坏的发育规律。根据光缆的应变分布特征、传感光缆光损耗较大的点或者断点所处的层位, 结合 13-1 煤覆岩的岩性组合, 得到了垮落带和导水裂缝带的发育高度分别为 12.5 m 和 40.0 m。

**关键词:** 覆岩变形与破坏; BOTDR; 分布式光纤传感; 应变; 垮落带; 导水裂缝带

中图分类号: TU459, TD325 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)05-0952-06

**作者简介:** 张丹(1976-), 男, 副教授, 主要从事地质灾害监测与防治方面的教学和科研工作。E-mail: zhangdan@nju.edu.cn。

## Monitoring and analysis of overburden deformation and failure using distributed fiber optic sensing

ZHANG Dan<sup>1</sup>, ZHANG Ping-song<sup>2</sup>, SHI Bin<sup>1</sup>, WANG Hong-xian<sup>1</sup>, LI Chang-sheng<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** BOTDR, a kind of distributed fiber optic sensing technology, is employed to monitor the overburden deformation and failure during the coal mining. As an example in Huainan mining area, the layout and the installation technique of the sensing cables for overburden monitoring are designed. The sensing cables are implanted into the overburden by drilling installation technique. The strain distribution of the sensing cables is collected regularly according to the mining schedule. The characteristics and variation of the strain distribution are studied to reveal the relationship between the strain distribution and strata. The strain distribution is not uniform, which is relatively larger in the soft strata, such as mudstone, than that in the hard strata, such as sandstone. The deformation and failure of the overburden are also obtained. Based on the strain distribution and the breakpoint position of the cables, the heights of the caving zone and fractured zone are 12.5 m and 40.0 m respectively with the consideration of the overburden lithology and stratum combination above 13-1 coal seam.

**Key words:** overburden deformation and failure; BOTDR; distributed fiber optic sensing; strain; caving zone; fractured zone

## 0 引言

煤层回采后, 采用垮落法顶板管理方式, 煤层覆岩会形成垮落带、导水裂缝带和弯曲带<sup>[1]</sup>。当煤层顶板有含水层和水体时, 应当观测垮落带、导水裂缝带的发育高度, 确定安全合理的防隔水煤(岩)柱厚度, 以保障煤矿的安全生产<sup>[2]</sup>。

自 20 世纪 50 年代, 对采动覆岩破坏规律的研究逐步深入, 建立了多种研究覆岩变形、破坏的方法。目前, 常用的方法主要有经验公式<sup>[3-4]</sup>、相似模拟试验<sup>[5]</sup>、数值计算<sup>[6-9]</sup>和现场观测与探测<sup>[10-15]</sup>等。这些方法的运用, 提高了垮落带、导水裂缝带高度的计算精度, 为

煤矿的安全、高效生产提供依据。但在实际应用过程中, 上述方法均不同程度地存在一些缺陷, 定量化程度不高, 难以动态精确地反映采动影响下覆岩的受力、变形以及破坏的发育全过程。

煤层在开采过程中, 覆岩原始应力场的平衡状态被破坏, 引起应力的重新分布, 并造成采场上覆岩体的变形、移动、离层、断裂、垮落等。垮落带和导水

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41230636); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)课题(2011CB710605); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目(SKLGP2011K011)

收稿日期: 2014-10-12

裂缝带的发育与煤层上覆岩体应力、应变状态具有紧密的联系。同时, 上覆岩层的运动又决定了矿山压力及其显现规律<sup>[16]</sup>。因此, 准确、全面、定量化地掌握覆岩的变形分布及其演化特征对于矿压理论的研究也具有重要的理论意义。

本次研究采用的是基于自发布里渊散射原理的分布式光纤传感技术——布里渊光时域反射计(BOTDR)<sup>[17-19]</sup>。通过分布式传感光缆感测煤层开采过程中覆岩的应变状态, 分析覆岩变形和受力的动态变化过程及特征, 结合覆岩的岩性及其组合, 得到垮落带、导水裂缝带的发育高度。研究结果对于建立基于分布式光纤传感的煤层开采覆岩变形与破坏的监测技术方法具有重要的意义。

## 1 工作面概况

该工作面位于淮南矿区, 开采煤层为13-1煤, 地质条件相对简单, 为倾向近南的单斜构造, 产状:  $180\sim215\angle8\sim13^\circ$ , 煤层厚度3.6~8.9 m, 平均6.1 m。工作面走向长1433 m, 倾斜长117.6~240 m。13-1煤直接顶为砂质泥岩, 平均厚4.2 m。老顶为粉细砂岩, 平均厚4.0 m, 裂隙发育, 连通性差, 含水性不均。

上覆新生界厚度平均约为380 m, 从上至下可分为上含上段、上段隔、上含下段、中含上段、中含下段、中隔和红层组成的复合隔水层直接覆盖在煤系地层之上。工作面基岩面南高北低, 标高为-338~-365 m, 风氧化带厚度为17.3~20.3 m, 二叠系砂岩裂隙含水组以石英砂岩、中细砂为主。

工作面采用综合机械化走向长壁采煤方法, 采厚4.0 m, 一次采全高, 顶板管理为全部垮落法。

## 2 分布式光纤监测方案

### 2.1 监测钻孔的布置

自风巷向工作面回采方向施工2个仰倾超前监测钻孔, 钻孔倾向与风巷的水平夹角均为5°, 即与工作面回采方向的夹角为5°, 如图1所示。<sup>#1</sup>监测孔的仰角为55°, 孔深为63 m, 控制垂高为51.6 m, 控制平距为36.1 m; <sup>#2</sup>监测孔的仰角为15°, 孔深68 m, 控制垂高为17.6 m, 控制平距为65.7 m。监测孔为超前测孔, 根据回采进度可超前探查顶板岩层的变形及破坏, 当工作面到达监测孔, 顶板的变形及破坏特征已基本稳定。

### 2.2 传感光缆及其安装

为满足传感器安装和煤层覆岩大变形监测的要求, 本次研究采用的传感器为经过机械增强的紧套应变传感光缆。传感光缆的直径为 $5\pm0.2$  mm, 应变系

数为499.8 MHz/%, 最大拉断力为2350 N。

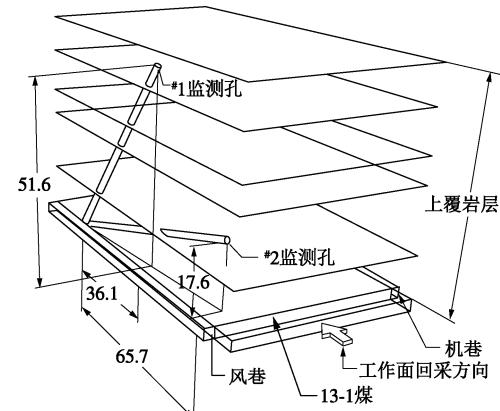


图1 监测孔布置示意图

Fig. 1 Location of monitoring boreholes

倾斜钻孔施工结束后, 在孔口安装封孔装置。之后, 利用PVC管件将传感光缆植入到倾斜钻孔中, 孔口封闭后进行全孔注浆, 使得传感光缆与围岩耦合为一个整体。传感光缆与通讯光缆冷接后, 沿巷道边帮架空并引至大巷与BOTDR数据采集仪连接。图2为传感光缆与通讯光缆布设的平面示意图。

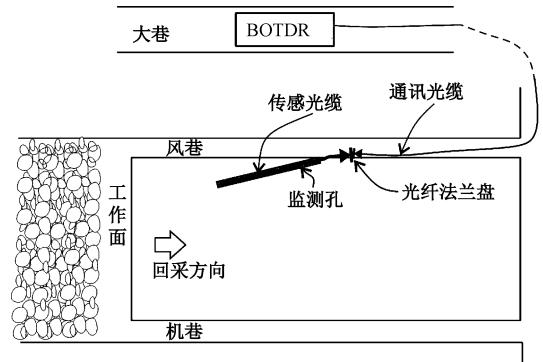


图2 光缆布设平面示意图

Fig. 2 Layout of optical cables

### 2.3 数据采集与分析

待监测孔内水泥浆液凝固后, 即可获取各条传感光缆的初始应变分布。之后, 根据工作面回采进度, 定期监测钻孔内光缆的应变分布情况。通过对传感光缆应变分布、变化特征以及光缆断点位置的分析, 得到顶板覆岩的变形和破坏规律, 进而推算垮落带和导水裂缝带的高度。

BOTDR分布式光纤传感技术具有单端测试的优点, 即只需将传感光缆的一端接入BOTDR数据采集仪就可以得到整个光缆长度上的应变分布, 无需构成回路。因此, 当传感光缆中出现断点, 仍然可以采集自BOTDR数据采集仪至断点的传感光缆的应变分布。按照图2所示, 当工作面逐渐靠近监测孔, 监测孔孔底的传感光缆首先发生变形, 甚至出现断点; 随

着工作面的进一步推进,传感光缆的变形或者新的断点逐渐由监测孔孔底向孔口方向发展。

由于深部覆岩温度变化不大,而且光缆实测的应变通常远大于岩体温度的变化。因此,可以忽略温度变化对应变测量结果的影响。

### 3 监测数据分析

#### 3.1 #1孔光缆应变分布及变化特征

#1监测孔的仰角为55°,传感光缆的应变主要反映了顶板覆岩沿竖直方向的变形特征。

图3为#1监测孔传感光缆的应变分布曲线。由图3可见,光缆应变总体呈压应变(这里,定义拉应变为正值,压应变为负值。光缆应变点的空间采样间隔为0.1 m,下同),说明了覆岩受采动影响沿竖向发生整体压缩。但在不同孔深,光缆的应变值是不同的,最大值约为-3100 με。当工作面逐步靠近监测孔,传感光缆的压应变值逐渐增大,反映了覆岩受到的超前支撑压力不断增大。随着超前支撑压力的进一步增大,覆岩发生破坏,出现裂隙和断裂,传感光缆也随之破坏,在相应位置出现断点。

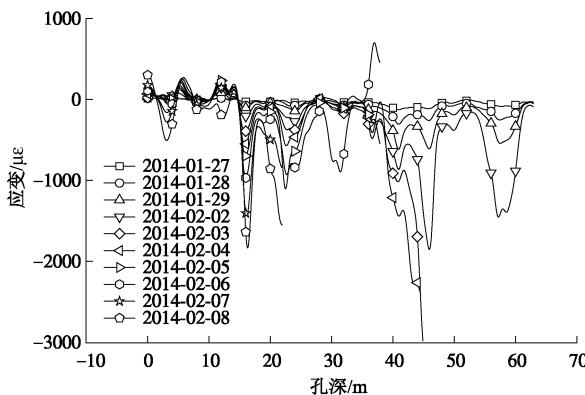


图3 #1监测孔传感光缆应变分布图

Fig. 3 Strain distribution of sensing cable in borehole No. 1

图4是#1孔光缆应变分布与地层的对应关系。由图4可见,光缆的应变分布与地层岩性具有很好的对应关系:处于弹性模量较高的岩层中的传感光缆的应变值相对较小,如③、⑤粉细砂岩、⑧粉砂岩和⑩细砂岩;处于弹性模量相对较低的岩层中的传感光缆的应变值则相对较大,如⑦和⑨泥岩;而④和⑥砂质泥岩中的光缆应变值则介于之间。说明在采动应力作用下,岩层的竖向压缩量与弹性模量呈反比。

图4中,圆点表示传感光缆的断点位置及日期。可见, #1孔光缆断点最初出现在2月3日,即工作面推进至距离#1孔孔口45 m处,断点位置位于⑦泥岩的顶部,说明该处岩层已出现裂隙。

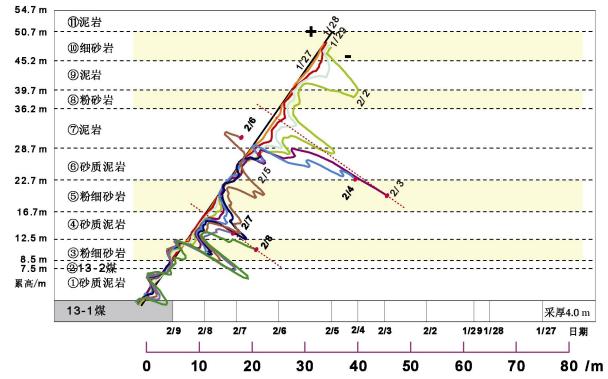


图4 #1孔传感光缆应变分布与地层的对应关系

Fig. 4 Correlation between strata and strain distribution in borehole No. 1

图5为孔深分别为16.6, 21.5, 45.1 m处传感光缆应变随工作面推进的变化曲线。孔深45.1 m测点位于⑦泥岩顶面,距离13-1煤顶面的垂高为35.9 m。随着工作面的靠近,光缆压应变显著增大,最大压应变约为-3100 με,随后,光缆受岩层断裂影响而受损。此时,工作面至测点的平距约为+21 m(测点位于工作面前面为正,后方为负)。孔深16.6 m和21.5 m测点分别位于④砂质泥岩的底面和顶面,垂高分别为12.6 m和16.6 m。随着工作面的靠近,光缆压应变逐渐增大,但与⑦泥岩相比,压应变增大速率相对较小,位于④砂质泥岩底面、垂高为12.6 m测点的最大压应变约为-1800 με。当工作面推进至距测点+24~14 m时,位于④砂质泥岩顶部、垂高为16.6 m测点的压应变有所减小,可能是由于④砂质泥岩与⑤粉细砂岩之间发生离层造成的。当工作面推过该测点时,光缆的压应变再次增大,最大压应变约为-1500 με。最终,传感光缆受岩层破坏的影响出现断点。

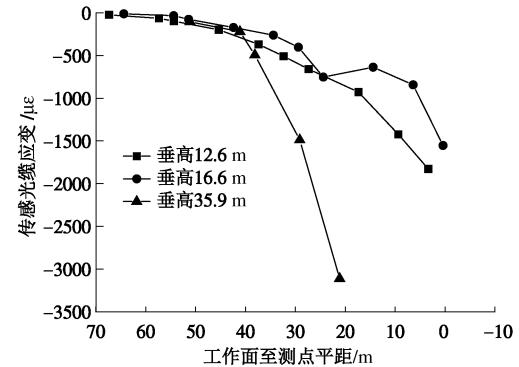


图5 #1监测孔不同垂高测点应变随工作面推进的变化曲线

Fig. 5 Strain variation at different vertical heights of borehole No. 1 with face advancing

#### 3.2 #2孔光缆应变分布及变化特征

#2监测孔的倾角为15°,传感光缆的应变分布反映的主要是覆岩沿水平方向的变形特征。

图6为#2监测孔传感光缆的应变分布图。由图6

可见, 光缆应变总体呈拉伸状态, 最大拉应变约为 $+10000 \mu\epsilon$ 。在不同孔深处应变存在较大差异, 说明岩体在水平方向受到拉伸, 但受拉程度是不同的。随着工作面的推进, 在采动应力作用下, 煤壁前方覆岩中的传感光缆的拉应变逐渐增大, 并随着顶板的破坏、垮落, 光缆最终被拉断。

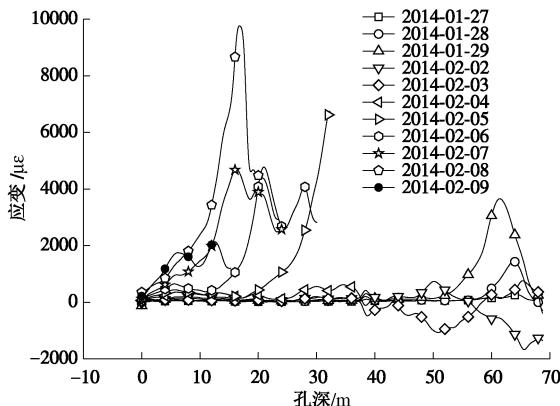


图 6 #2 监测孔传感光缆应变分布图

Fig. 6 Strain distribution of sensing cable in borehole No. 2

从图 7 可知, 处于④砂质泥岩中的传感光缆, 应变呈现先拉伸后压缩的变化规律, 虽然在孔底处拉应变达到峰值, 但光缆未被拉断。而作为老顶的③粉细砂岩, 由于岩性较硬, 呈现出脆性变形的特征, 在采动影响下, 初始变形相对较小, 但当岩体的应力超过其抗拉强度时, 即发生脆断破坏, 光缆也被拉断, 断点出现在③粉细砂岩的中部, 这可能与③粉细砂岩块体发生回转, 呈现出规则垮落的现象有关。随着工作面的推进, 由于直接顶岩性较软, 在采动影响下, 初期的塑性变形较为显著, 传感光缆实测的拉伸应变量也较大, 直接顶随采随落, 传感光缆随即也被拉断。

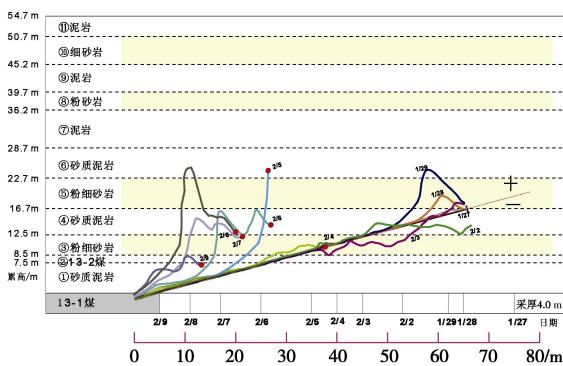


图 7 #2 孔传感光缆应变分布与覆岩的对应关系

Fig. 7 Correlation between strata and strain distribution in borehole No. 2

图 8 是不同孔深处传感光缆应变随工作面推进的变化曲线。总体上, 随着工作面的逐步靠近, 测点的拉应变逐渐增大, 反映了顶板覆岩在采动应力的作用下, 有向工作面发生近水平向位移的趋势。当覆岩受到的拉应力超过其抗拉强度时, 煤层顶板发生破坏并

垮落, 形成垮落带, 传感光缆也被拉断。

垂高为 3.2 m 和 7.4 m 的测点分布位于①砂质泥岩和上覆②13-2 煤层中, 当工作面到达测点下方时, 光缆拉应变达到峰值, 约为 $+9000 \mu\epsilon$ 。

垂高 11.5 m 的测点位于③粉细砂岩的中上部, 光缆应变变化较小, 当工作面到达测点下方时, 光缆应变状态由拉伸转变为压缩, 随后受损, 说明③粉细砂岩岩性较为坚硬, 呈脆性破坏, 并且岩体在破坏前出现下沉、回转现象。

垂高 14.9 m 的测点位于④砂质泥岩中部, 该测点的拉应变峰值相对较大, 随着工作面的靠近, 拉应变迅速达到峰值, 约为 $+3600 \mu\epsilon$ , 但此时光缆并未被拉断, 说明④砂质泥岩虽然沿水平方向受到拉张, 但在③粉细砂岩的撑托作用下, 未出现垮落, 只是产生拉张裂隙; 之后, 光缆的应变状态由拉伸转变为压缩, 说明④砂质泥岩中的张裂隙趋于闭合, 并在近水平方向呈现轻微的受压状态; 当工作面推进至测点后方 15 m 时 (-15 m), 垂高 14.9 m 处的光缆的应变量未出现显著的变化, 约为 $+120 \mu\epsilon$ 。因此, 可以认为垮落带的发育高度应低于④砂质泥岩。

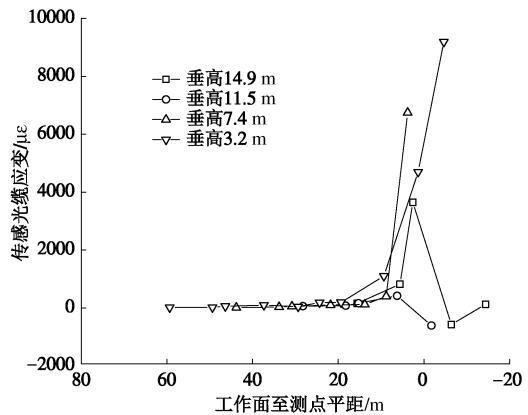


图 8 #2 监测孔不同垂高测点应变随工作面推进的变化曲线

Fig. 8 Strain variation at different vertical heights of borehole No. 2 with face advancing

#### 4 “两带”高度的确定

从#1 和#2 监测孔传感光缆的应变分布及变化可以看出, 随着工作面的推进, 顶板覆岩逐步发生变形、破坏等现象, 造成光缆在相应位置发生拉压变化、弯折, 甚至断裂。根据光缆的应变分布特征、传感光缆光损耗较大的点或者断点所处的层位, 结合 13-1 煤覆岩的岩性和组成, 可以推断导水裂隙带和垮落带的发育高度。

由图 4 可知, #1 监测孔光缆断点最先出现在⑦泥岩的顶部。根据前期的勘探资料可知, ⑧粉砂岩裂隙发育, 且含水。因此, 可以推断导水裂隙带的发育高

度应位于⑧粉砂岩和⑨泥岩的界面处, 约为 40.0 m。

由图 7 可知, #2 监测孔光缆断点最先出现在③粉细砂岩的中部, 上覆④砂质泥岩虽然出现较大拉应变, 但当工作面推过测点 15 m 后, 应变减小为  $+120 \mu\epsilon$ , 说明垮落带的高度应不超过③粉细砂岩的顶板。因此, 可以认为垮落带的发育高度约为 12.5 m。

该工作面顶板 70 m 范围内主要分布有砂质泥岩、泥岩、粉细砂岩等。根据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》缓倾斜煤层中硬覆岩垮落带与导水裂隙带最大高度计算公式<sup>[3]</sup>, 按累计采厚 4.0 m 计算, 垮落带的最大高度为  $10.6 \pm 2.2$  m, 导水裂隙带的最大高度为  $40.0 \pm 5.6$  m。可见, 由分布式光纤传感技术得到的“两带”高度与经验公式得到的高度基本一致。根据滕永海对淮南部分矿区综采放顶煤条件下的导水裂隙带高度的研究可知<sup>[20]</sup>, 当采高为 4.0 m 时, 对于软弱顶板, 导水裂隙带高度约为 45.0 m; 对于中硬顶板, 导水裂隙带高度约为 49.0 m。由分布式光纤传感技术得到的导水裂隙带高度相对较小, 也验证了在综采放顶煤条件下, 导水裂隙带的发育高度要比综采条件下大得多。

图 9 为依据 2 月 4 日 #1 孔和 #2 孔光缆的应变分布及断点位置, 推断的垮落带和导水裂隙带的发育范围。图 10 是 2 月 6 日垮落带和导水裂隙带的发育范围。

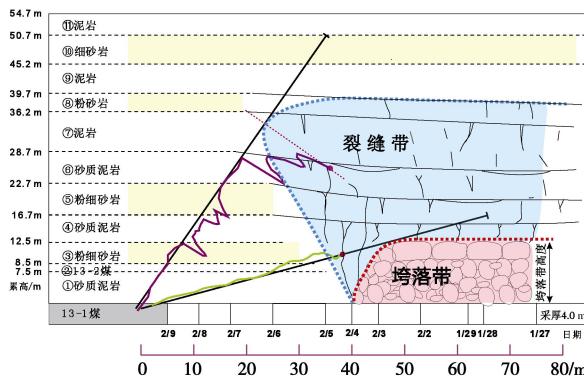


图 9 2 月 4 日“两带”发育范围及高度示意图

Fig. 9 Caving zone and fractured zone on 4th Feb.

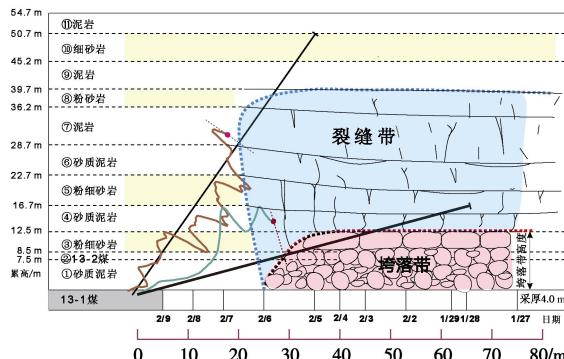


图 10 2 月 6 日“两带”发育范围及高度示意图

Fig. 10 Caving zone and fractured zone on 6th Feb.

## 5 结 论

提出了采用分布式光纤传感技术确定煤层开采垮落带和导水裂隙带的新方法, 得到的以下 4 点结论。

(1) 根据传感光缆的应变分布特征、变化过程以及光缆断点的最高位置, 结合顶板地层的岩性及组合情况, 可以判断垮落带的高度为 12.5 m, 导水裂隙带的发育高度为 40.0 m。

(2) 沿传感光缆, 应变分布是不均匀的, 处于模量较高的砂岩中的光缆应变变化较小, 而处于模量较低的泥岩中的应变较大。

(3) 倾角 55° 的 #1 孔传感光缆总体为压应变, 最大应变应变为  $-3100 \mu\epsilon$ ; 倾角 15° 的 #2 孔传感光缆总体为拉应变, 最大拉应变约为  $+10000 \mu\epsilon$ 。反映了工作面前方岩体, 在采动影响下, 覆岩竖向受到压缩, 水平方向受到拉伸。

(4) 经机械增强的紧包应变传感光缆具有很好的感测性能, 满足覆岩变形、破坏监测的要求。

总之, 采用分布式光纤传感技术, 可以实现在煤层回采过程中对覆岩的变形、破坏过程进行全过程监测, 为覆岩垮落带和导水裂隙带的确定提供了一种新的技术手段。

## 参考文献:

- [1] SINGH M M, KENDORSKI F S. Strata disturbance prediction for mining beneath surface water and waste impoundments[C]// 1st Annual Conf on Ground Control in Mining. Morgantown, West Virginia: West Virginia University, 1981: 76 - 89.
- [2] 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局. 煤矿安全规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2011. (State Administration of Work, State Administration of Coal Mine Safety. Coal mine safety regulations[M]. Beijing: Coal Industry Publishing House, 2011. (in Chinese))
- [3] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000. (State Bureau of Coal Industry. Regulations of buildings, water, rail way and main well lane leaving coal pillar and press coal mining[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2000. (in Chinese))
- [4] BISE C J. Modern American coal mining: methods and applications[M]. Englewood: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), 2013.
- [5] 许家林, 钱鸣高, 金宏伟. 岩层移动离层演化规律及其应用研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 632 - 636. (XU

- Jia-lin, QIAN Ming-gao, JIN Hong-wei. Study and application of bed separation distribution and development in the process of strata movement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(5): 632 - 636. (in Chinese))
- [6] 李连崇, 唐春安, 梁正召. 考虑岩体碎胀效应的采场覆岩冒落规律分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(11): 3537 - 3541. (LI Lian-chong, TANG Chun-an, LIANG Zheng-zhao. Investigation on overburden strata collapse around coal face considering effect of broken expansion of rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(11): 3537 - 3541. (in Chinese))
- [7] GAO F, STEAD D, COGGAN J. Evaluation of coal longwall caving characteristics using an innovative UDEC Trigon approach[J]. Computers and Geotechnics, 2014, **55**: 448 - 460.
- [8] 缪协兴, 陈荣华, 浦海, 等. 采场覆岩厚关键层破断与冒落规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(8): 1290 - 1296. (MIAO Xie-xing, CHEN Rong-hua, PU Hai, et al. Analysis of breakage and collapse of thick key strata around coal face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(8): 1290 - 1296. (in Chinese))
- [9] 鞠杨, 左建平, 宋振铎, 等. 煤矿开采中的岩层应力分布与变形移动的DDA模拟[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(2): 268 - 273. (JU Yang, ZUO Jian-ping, SONG Zhen-duo, et al. Numerical simulation of stress distribution and displacement of rock strata of coal mines by means of DDA method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(2): 268 - 273. (in Chinese))
- [10] 吴荣新, 张卫, 张平松. 并行电法监测工作面“垮落带”岩层动态变化[J]. 煤炭学报, 2012, **37**(4): 571 - 577. (WU Rong-xin, ZHANG Wei, ZHANG Ping-song. Exploration of parallel electrical technology for the dynamic variation of caving zone strata in coal face[J]. Journal of China Coal Society, 2012, **37**(4): 571 - 577. (in Chinese))
- [11] 张平松, 胡雄武, 吴荣新. 岩层变形与破坏电法测试系统研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(3): 952 - 956. (ZHANG Ping-song, HU Xiong-wu, WU Rong-xin. Study of detection system of distortion and collapsing of top rock by resistivity method in working face[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(3): 952 - 956. (in Chinese))
- [12] 康永华, 王济忠, 孔凡铭, 等. 覆岩破坏的钻孔观测方法[J]. 煤炭科学技术, 2002, **30**(12): 26 - 28. (KANG Yong-hua, WANG Ji-zhong, KONG Fan-ming, et al. Bore hole survey method for overburden failure[J]. Coal Science and Tehcnology, 2002, **30**(12): 26 - 28. (in Chinese))
- [13] 王忠昶, 张文泉, 赵德深. 离层注浆条件下覆岩变形破坏特征的连续探测[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(7): 1094 - 1098. (WANG Zhong-chang, ZHANG Wen-quan, ZHAO De-shen. Continuous exploration for deformation and failure of overburdens under injecting grouts in separate layers[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(7): 1094 - 1098. (in Chinese))
- [14] PALCHIK V. Formation of fractured zones in overburden due to longwall mining[J]. Environmental Geology, 2003, **44**(1): 28 - 38.
- [15] PALCHIK V. Localization of mining-induced horizontal fractures along rock layer interfaces in overburden: field measurements and prediction[J]. Environ Geol, 2005, **48**(1): 68 - 80.
- [16] 宋振骐, 蒋金泉. 煤矿岩层控制的研究重点与方向[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, **15**(2): 128 - 134. (SONG Zhen-qi, JIANG Jin-quan. The current research situation and developing orientation of strata control in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, **15**(2): 128 - 134. (in Chinese))
- [17] 张丹, 施斌, 吴智深, 等. BOTDR 分布式光纤传感器及其在结构健康监测中的应用 [J]. 土木工程学报, 2003, **36**(11): 83 - 87. (ZHANG Dan, SHI Bin, WU Zhi-shen, et al. Distributed optical fiber sensor based on BOTDR and its application to structural health monitoring[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, **36**(11): 83 - 87. (in Chinese))
- [18] BAO X Y, CHEN L A. Recent progress in brillouin scattering based fiber sensors[J]. Sensors, 2011, **11**(4): 4152 - 4187.
- [19] 施斌, 徐洪钟, 张丹, 等. BOTDR 应变监测技术应用在大型基础工程健康诊断中的可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(3): 493 - 499. (SHI Bin, XU Hong-zhong, ZHANG Dan, et al. Feasibility study on application of BOTDR to health monitoring for large infrastructure engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(3): 493 - 499. (in Chinese))
- [20] 滕永海. 综放开采导水裂隙带的发育特征与最大高度计算[J]. 煤炭科学技术, 2011, **39**(4): 118 - 120. (TENG Yong-hai. Development features and max height calculation of water conducted fractured zone caused by fully mechanized top coal caving mining[J]. Coal Science and Technology, 2011, **39**(4): 118 - 120. (in Chinese))