

柴敬, 欧阳一博, 张丁丁, 等. 采场覆岩变形分布式光纤监测岩体-光纤耦合性分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(3): 033038.

CHAI Jing, OUYANG Yibo, ZHANG Dingding, et al. Theoretical analysis of the mechanical coupling between rock and optical fiber for distributed sensing of overlying strata deformation[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 2(3): 033038.

采场覆岩变形分布式光纤监测岩体-光纤耦合性分析

柴敬^{1,2}, 欧阳一博¹, 张丁丁^{1,2}, 雷武林¹

(1. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 教育部西部矿井开采与灾害防治重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 岩体与光纤之间的耦合性是决定分布式光纤感测岩体变形准确性的关键因素。通过岩层变形光纤响应特性的力学分析, 结合运动学方法, 提出了光纤-岩体的耦合性判据, 并建立了岩层变形光纤监测模型。通过水平埋设在物理相似模型内部的传感光纤, 监测不同开挖状态下关键层的结构性变形, 并借助数字图像相关技术(DIC)对关键层挠度分布进行实时跟踪监测, 综合分析覆岩变形特征及演化规律, 并将2者监测结果进行对比分析。结果表明: 当岩层变形较小时, 岩体-光纤耦合性系数在0.9~1.0内, 光纤应变计算的岩层挠度与DIC测量的实际岩层挠度基本一致, 最大相对误差为8.9%; 当岩层变形较大时, 岩体-光纤耦合性系数呈断层式直线下降, 直至岩层发生破断, 裂缝处岩体-光纤发生脱离, 光纤-岩体接触度与光纤-岩层耦合系数 k 值均为0; 通过光纤监测数据反演, 获得采动覆岩的变形范围及特征, 从而反映出光纤沿线岩层移动变形的的位置及程度。研究成果为分布式光纤传感技术应用于模型及现场覆岩变形监测提供了参考。

关键词: 覆岩变形; 分布式光纤; 耦合性; 模型试验

中图分类号: TD325

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(2020)03-3038-10

Theoretical analysis of the mechanical coupling between rock and optical fiber for distributed sensing of overlying strata deformation

CHAI Jing^{1,2}, OUYANG Yibo¹, ZHANG Dingding^{1,2}, LEI Wulin¹

(1. College of Energy Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Xi'an University of Science and Technology, Ministry of Education of the Western Mining and Mine Disaster Prevention and Control of Key Laboratory, Xi'an 710054, China)

Abstract: The mechanical coupling between rock and fiber is the key factor to determine the accuracy of rock deformation sensing by distributed fiber. Based on the mechanical analysis of the response characteristics of fiber deformation in rock strata and the method of kinematics, the coupling criterion between fiber and rock strata is put forward, and the monitoring model of fiber deformation in rock strata is established. Through the sensor fiber embedded in the physical similarity model horizontally, the structural deformation of key layers under different excavation conditions is monitored, and the deflection distribution of key layers is tracked and monitored in real time with the help of digital image related technology. The deformation characteristics and evolution rules of overlying rocks are analyzed comprehensively, and the monitoring results of the two are compared and evaluated. The results

收稿日期: 2019-08-19

修回日期: 2019-10-28

责任编辑: 许书阁

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51174280, 51804244); 陕西省教育厅科学研究计划资助项目(16JK1488)

作者简介: 柴敬(1964—), 男, 宁夏平罗人, 教授, 博士。E-mail: chajj@xust.edu.cn

show that when the rock deformation is relatively small, the rock-fiber coupling coefficient is within the range of 0.9 ~ 1.0, and the rock deflection calculated by fiber strain is consistent with the actual rock deflection measured by DIC, with the maximum relative error of 8.9%. When the rock deformation is large, the rock-fiber coupling coefficient drops linearly in a fault-type manner, until the rock fracture occurs and the rock-fiber is detached at the crack, and both the fiber-rock contact degree and the fiber-rock coupling coefficient k -value are 0. However, the strain curve measured by the horizontal optical fiber can be used to invert the deformation range and characteristics of mining overburden, reflecting the location and size of strata movement deformation along the fiber, as well as the size of strata affected by mining. The research results provide a solid theoretical basis for the application of distributed optical fiber sensing technology in the model and the field overburden deformation monitoring.

Key words: overlying strata deformation; distributed fiber optical; coupling; model test

煤矿采动引起的覆岩运移演化规律是研究矿山压力, 确保煤矿安全生产的关键核心^[1-3]。采矿覆岩运动注重的是岩层变形、破坏和垮落等运动过程中的应力-应变规律, 然而传统监测方法(钻孔成像法、电阻率法、微地震法、超声波法、钻孔应力计法等)均难以同时满足分布式、长距离、高精度、实时在线的监测要求^[4-6]。

分布式光纤传感技术(Distributed Optical Fiber Sensing, DOFS)是一种借助于光纳仪, 利用光纤作为传感元件, 以光为载体, 通过感测外力或温度获得光纤沿线应变信息的新型监测技术。分布式光纤传感技术由于其能长距离感测传输、抗电磁干扰、分辨率高等优点可实现对矿山压力驱动下采场上覆岩层变形、破坏时空演化动态过程的实时监测^[7-10]。在应用分布式光纤监测覆岩变形过程中, 光纤监测数据与岩体真实变化是否匹配, 传感光纤与被测煤岩体之间耦合性能的不确定性是决定光纤感测岩体变形准确性的关键因素。

ITEN^[11]通过拉拔试验对光纤与土体界面力学特性进行了定量研究, 并使用“微锚”结构增加光纤与土体的耦合性; 管振德^[12]等对光纤与土体的协调变形进行了力学分析, 认为光纤变形是光纤外套与土层的摩擦力作用的结果; 余骏宽^[13]通过建立三段式拉拔模型揭示了不同上覆压力下光纤-砂土界面应力传递规律; 张丁丁^[14]等通过分析光纤光栅应变与松散层应变的传递性能, 建立了钻孔植入光纤光栅传感器的松散层应变传递计算模型; 李博^[15]等设计了土体三点弯曲试验, 并借助摄影测量技术对光纤土体变形耦合性能进行研究, 提出了采用应变传递系数衡量光纤与土体之间的耦合性能; 张诚成^[16-17]等研究了环境变化对光纤-土体界面的影响及

其渐进性破坏过程, 随后研究了钻孔回填料与光缆之间的耦合性, 进一步针对地面沉降分布式光纤监测的土-缆耦合性定义及评价方法进行深入研究。

与土体变形不同, 开采过程中覆岩产生变形由微裂隙发育扩展形成宏观裂隙, 不同岩层的力学性能差异导致岩层变形具有梁式或板式结构性特征, 发生压缩、断裂和错动甚至铰接、回转等现象。对于覆岩运移这种复杂的物理力学过程, 光纤-岩体之间的耦合关系, 是通过光纤监测应变解读反演覆岩变形及应力分布的决定性因素, 但目前鲜有相关报道。为此, 本文通过水平埋设在物理相似模型内部的传感光纤, 监测不同开挖状态下关键层的结构性变形, 并借助数字图像相关技术(Digital Image Correlation, DIC)对关键层挠度分布进行实时跟踪监测, 综合分析覆岩变形特征及演化规律, 并将2者的监测结果进行对比分析, 提出了表征光纤与岩体耦合性的新参数, 论证了分布式光纤传感技术监测覆岩变形的可行性和有效性, 研究成果可为分布式光纤传感技术应用于模型及现场覆岩变形监测提供参考。

1 岩层变形光纤监测模型

1.1 岩层变形的的光纤响应特性

分布式光纤传感技术监测岩层变形的基本原理是: 随着开采范围的增大, 上覆岩层将发生一定变形, 岩层中的埋入式传感光纤也随之发生轴向拉伸, 进而感知岩层内部应变分布情况。通过对传感光纤沿线应变的时空演化分析, 可获取采动覆岩运移规律与破坏过程, 揭示了不同开挖状态的覆岩破坏形态。

随着工作面推进距离的增加, 上覆岩层运移形

成一定的力学结构,可将其简化为简支梁、悬臂梁或固支梁等梁式结构进行稳定性分析^[18]。为了便于力学分析,同时对岩体-光纤的力学结构作如下假设:①上覆岩层载荷均匀分布,是均匀的、各向同性的弹性体;②纤芯与包层的力学特性相同,忽略纤芯与包层间的滑移;③光纤-岩层变形各向同性。

岩体与光纤之间的相互作用,通过以下力学分析来说明。取长度为 dx 的光纤体微元,此时光纤-岩体界面的剪应力 τ 可表示为

$$\tau = \frac{D}{4} \frac{d\sigma}{dx} \quad (1)$$

式中, D 为光纤直径; σ 为光纤所受轴向应力。

光纤-岩体界面摩擦力 f 可表示为

$$f = \mu \sigma_N \quad (2)$$

式中, σ_N 为上覆岩体对光纤径向应力; μ 为光纤-岩体界面的摩擦因数。

若光纤-岩体界面的剪应力 τ 小于光纤-岩体界面摩擦力 f ,则表明光纤-岩体的耦合性较好,反之则产生滑移,此时监测数据的可靠性无法保证。

图1为不同阶段岩层变形光纤监测模型,图中蓝线代表光纤初始埋设位置,红线代表岩层变形后的光纤形态。如图1(a)所示,当岩层发生较小变形时,岩层内光纤随着岩层协调变形产生弯曲,可将岩层变形构成的力学结构视为简支梁结构,此时光纤主要受到上覆岩层施加在光纤上的连续均布荷载,根据材料力学,即可获得呈简支梁结构岩层的弯矩图,进而得到光纤的应力分布。

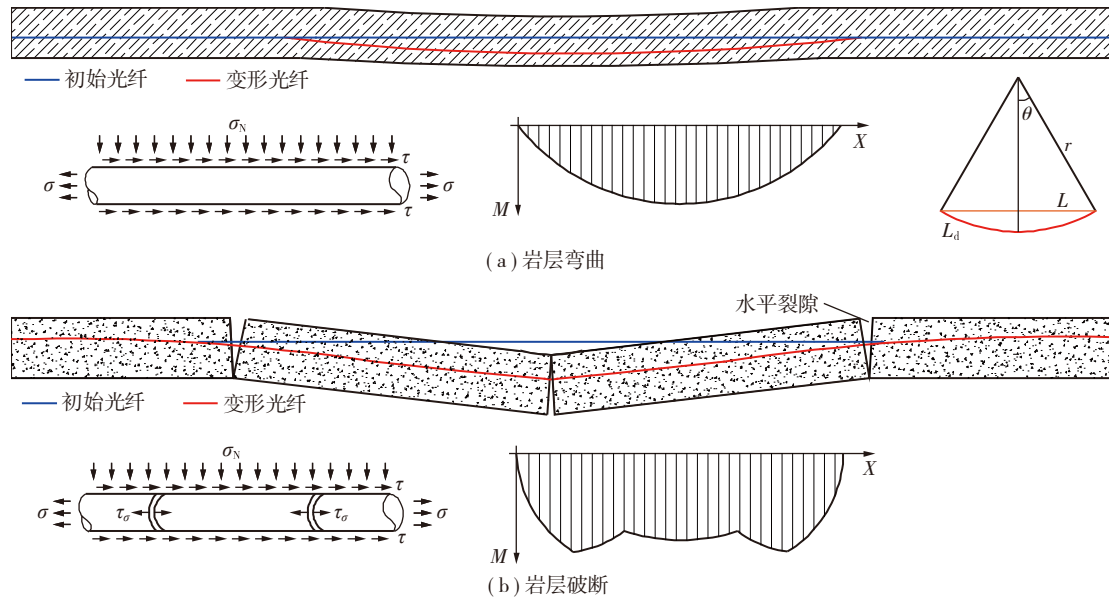


图1 岩层变形光纤监测模型

Fig. 1 Monitor structure of rock layer-optical fiber

图1(b)为岩层破断阶段光纤监测模型,当岩层发生较大变形时,岩层中出现纵向裂隙,裂隙处光纤裸露与岩层发生脱离,裂隙张开对光纤产生张拉力 τ_σ ,导致应力突变。而采空区上部破断垮落后岩层内的光纤仅受少量残余拉应力及岩体自重。岩层弯曲作用下光纤上的弯矩分布呈碗状,而存在水平张拉裂隙时,分布在光纤上的拉应力将在裂隙产生的对应位置产生应力突变。

1.2 光纤-岩体的耦合性判据

一般情况下,可通过拉拔试验得到埋入式光纤的最大拉拔力,进而求出峰值抗剪强度,通过光纤应变梯度判断光纤是否滑移^[19]。但是一方面,对于

抗拉强度较小的光纤或在光纤-岩体黏结力较强的情况下,可能在光纤达到其极限抗拉强度之前就发生断裂。另一方面,光纤受裂缝影响,发生应变突增,致使光纤应变梯度异常高,影响耦合性能判断。

因此笔者通过运动学方法对光纤-岩体结构进行几何分析,使用分布式光纤测量应变计算岩层弯曲挠度,并与岩层实际挠度进行对比,进行光纤-岩体耦合性定量评价。如图1(a)所示,首先,假设岩层以最大挠度位置处为中心,两侧对称;然后将岩层弯曲段内部光纤形态视作圆弧;最后采用圆弧模型对光纤变形形态构建几何关系进行定量描述,表达

式为

$$\begin{cases} r(x) \times \theta = \frac{L_d(x)}{2} \\ \frac{L(x)}{2} = r(x) \times \sin \theta \\ s(x) = r(x) \times (1 - \cos \theta) \end{cases} \quad (3)$$

式中, θ 和 $r(x)$ 分别为圆弧的弧度和半径; $L_d(x)$ 为光纤变形后的长度; $L(x)$ 为光纤的初始长度; $s(x)$ 为岩层弯曲挠度。

$L_d(x)$ 由光纤各采样点应变求得, 表达式为

$$\begin{cases} L_d(x) = L(x) + \sum_{i=1}^N l \varepsilon_i \\ N = \frac{L(x)}{l} \end{cases} \quad (4)$$

式中, l 为光纳仪设置的空间采样间隔; ε_i 为各采样点应变; N 为采样点数量。

受光纤-岩体受力特性及光纳仪空间分辨率的影响, 对于非均匀应变的监测, 光纤应变分布范围总大于光纤初始长度 $L(x)$, 因此一般根据应变曲线的分布特征, 将应变凸峰范围长度减去一倍空间分辨率所对应的长度即为 $L(x)$ [20]。

为了表征岩体应变与光纤实测应变之间的关系, 引入光纤-岩体耦合系数 k , 用于描述光纤与岩体之间的接触程度, 即光纤-岩体耦合性能。通过圆弧模型, 使用分布式光纤测量应变计算岩层弯曲挠度, 并与岩层实际挠度进行对比, 其表达式为

$$k = 1 - \frac{|s_g - s_y|}{s_y} \quad (5)$$

式中, s_g 为光纤实测应变, 可由式(3)求得; s_y 为岩层实际挠度。

光纤-岩体耦合系数 k , 其值为 $0 \sim 1$, 0 表示光纤-岩体解耦, 1 表示光纤-岩体耦合。

1.3 光纤-岩体的耦合性表征

光纤-岩体的耦合性具有以下特点: ① 传感光纤水平埋设于岩层中, 其与岩层变形间的耦合性未知; ② 岩层变形不均匀且变形范围大, 多呈结构性变形, 当其变形量较大时, 可能导致光纤与周围岩体发生滑移; ③ 光纤-岩体变形具有时空效应, 未发生滑移区域内光纤的监测数据依旧可信; ④ 光纤与岩层的耦合性能, 一方面受光纤本身的材料特性及封装结构的影响, 另一方面受岩体与封装结构之间相互作用的影响。

将光纤与岩体的接触程度定义为光纤-岩体接

触度, 其值为 $0 \sim 1$, 0 表示光纤与岩体脱离, 1 表示光纤与岩体紧密接触。如图2所示, 在岩体发生较小变形时, 岩层处于弯曲阶段, 光纤-岩体接触度趋于 1 , 光纤-岩体耦合性良好, 光纤-岩层耦合系数 k 值接近于 1 ; 随着岩体发生较大变形, 岩层处于破断阶段, 在岩层破断产生的水平裂缝处光纤与岩层相互脱离, 光纤-岩体接触度与光纤-岩层耦合系数 k 值均为 0 , 而裂缝附近岩层随着变形的继续增大, 光纤-岩层耦合系数 k 值呈断层式下降。

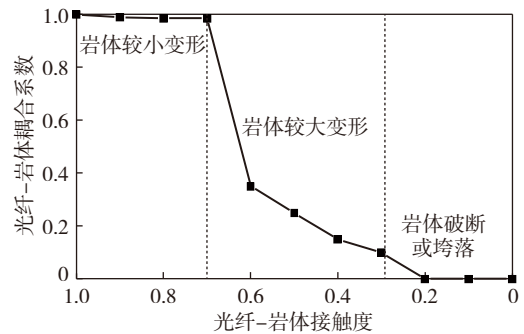


图2 光纤-岩体耦合系数

Fig.2 Optical fiber-rock mass coupling coefficient

不同于土体变形, 上覆岩层变形过程的结构性变化导致光纤处于复杂的应力状态, 光纤-岩层之间的耦合性随着岩层变形阶段的不同而不同, 且岩层变形不同阶段中岩层不同位置光纤的耦合性也不相同, 总体来讲, 光纤-岩层耦合性具有时空效应。

2 相似模型试验

2.1 模型概况

试验以某矿工作面地质条件为研究背景, 选用 3 m 平面应力模型架, 搭建了尺寸为 $3\ 000\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 1\ 200\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高) 的相似模型, 其所用相似材料主要为河砂、粉煤灰、石膏、大白粉。模型几何相似比为 $1:150$, 应力相似比为 $1:234$ 。模型两侧均留设 30 cm 的边界煤柱, 模拟工作面开挖步距为 3 cm , 累计开挖 77 次, 共推进 231 cm 。

2.2 监测系统的布置

模型共布置有 2 种试验监测系统, 分别为分布式光纤监测系统和 DIC 监测系统, 并辅以全站仪进行同步测量。各测量系统均在每次开挖结束, 岩层稳定后采集数据。

2.2.1 分布式光纤监测系统

试验采用埋入式光纤进行覆岩运移监测。如

图3所示,在相似材料铺设前,将光纤固定于关键层位置,在光纤两端施加一定的预应力使光纤处于绷直状态。为准确获取岩层内部变形信息,将NBX-6055光纳仪的参数进行设置,其中空间分辨率为5 cm,采样间隔为1 cm,平均化次数为 2×10^6 。前期基础试验研究表明^[21],埋设光纤的模型与无光纤的模型岩层变形相比,埋设不同直径和弹性模量的光纤将使模型岩层变形产生不同程度的误差。埋设光纤直径小于2 000 μm 时,岩层位移变化误差

小于5%;埋设光纤直径大于2 000 μm 时,位移变化误差大于5%。相似材料与光纤弹性模量相差2个数量级以内岩层位移变化误差小于8%,反之,误差大于8%。本试验选择2 000 μm 直径单模紧套光纤,此时光纤对岩层变形的影响较小,模型预埋光纤的岩层变形与无光纤的岩层变形基本一致。试验选用莱卡TS02型光学全站仪,在光纤铺设位置岩层表面布置横向测线,共25个测点,测点间距均为10 cm。

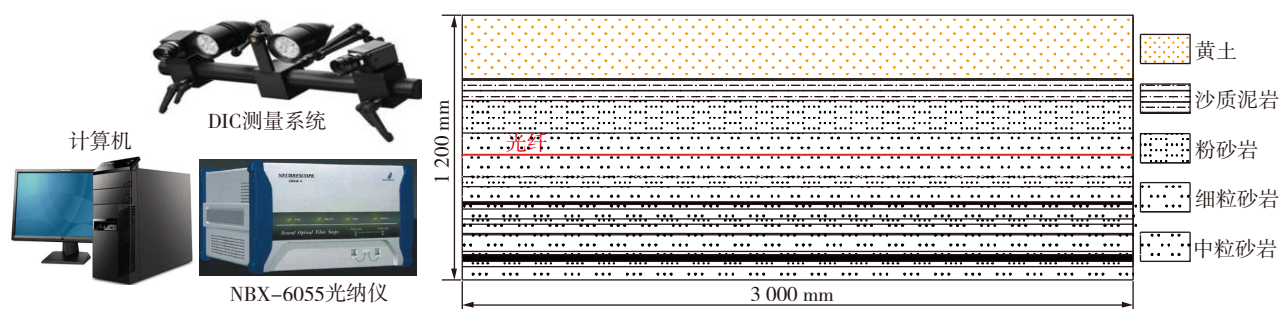


图3 监测系统布置

Fig. 3 Monitoring system layout

2.2.2 DIC 监测系统

采用GOM-ARAMIS作为DIC测量系统,由2个CCD工业相机采集,分辨率为2 648像素 $\times$ 2 448像素。由于相似材料的表面纹理不佳,需要人工预制散斑,实际预制散斑的大小根据实际成像的放大倍率来决定,由于本次试验测试系统放大倍率为1.8 pixel/mm,于是此次试验实际预制散斑的大小控制在3 mm左右。采用墨水在模型表面绘制圆形散斑,散斑大小相对均匀且各向同性,散斑覆盖率在40%左右。本次试验通过双参数阈值法确定子区大小为20像素,子区间距为5像素的计算参数对所采集图像进行分析计算^[22]。

3 测试系统精度

3.1 光纤应变系数标定

由于生产材料及工艺等因素影响,在光纤使用前,需先对光纤进行标定,求得光纤的应变灵敏度系数 C ^[23],单位为MHz/ $\mu\epsilon$,可表示为

$$C = \frac{v(\epsilon) - v(\epsilon_0)}{\epsilon - \epsilon_0} \quad (6)$$

式中, $v(\epsilon_0)$ 为拉伸前的传感光纤测得的布里渊频移值; $v(\epsilon)$ 为拉伸后的布里渊频移值; ϵ_0 为拉伸前的光纤应变; ϵ 为拉伸后的光纤应变。

设计光纤拉伸标定试验,在高精度位移拉伸平台上进行应变系数标定。光纤的初始长度为1 200 mm,依次按1 mm的步距递增,每次拉伸完成后对光纤的布里渊频移值进行测试。图4为光纤理论应变与布里渊频移值的关系曲线。由式(6)可计算出光纤应变灵敏度系数为0.048 MHz/ $\mu\epsilon$ 。根据此系数,可将传感光纤检测到的布里渊频移值转化为应变值。

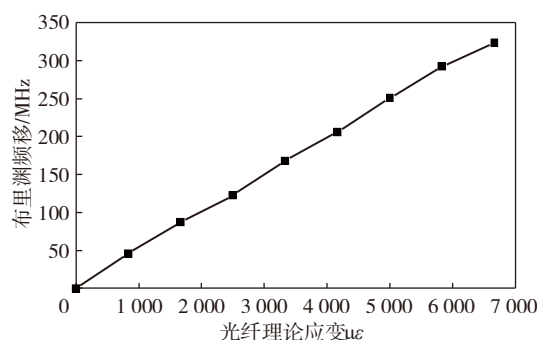


图4 传感光纤应变系数标定

Fig. 4 Calibration of strain coefficient of sensing optical fiber

3.2 光纤测试系统精度

埋入式传感光纤铺设完成后,需要对光纤的存活情况以及测试结果可靠性进行检测。在模型开挖之前,对埋入模型内部的光纤重复测量5次,验证光纤测试系统的系统误差。图5为以光纳仪第1次

测量中心应变为基准值,将后4次测量结果与第1次作差得到的因系统误差引起的应变变化。

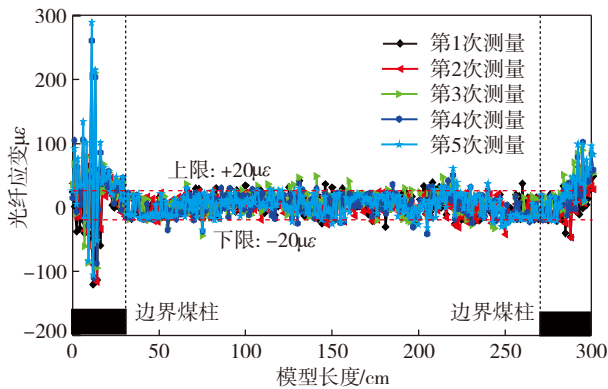


图5 分布式光纤精度测试

Fig. 5 Accuracy test of distributed optical fiber

可以发现,5次测试结果基本一致,表明光纤测试系统光纤传感器存活良好,设备工作性能稳定,系统误差较小。除个别数据异常点外,因系统稳定性引起的测量应变误差在 $\pm 20 \mu\epsilon$ 以内。

3.3 DIC 测试系统精度

为了评价DIC测试系统精度,选取第77次开挖时全站仪测线数据进行对比验证。由于DIC测量幅面限制,仅对比全站仪22个测点数据。由图6可知,DIC与全站仪测量获取的岩层下沉移动整体变化趋势一致,同一时刻下沉值的相对偏差最大为7.1%,

其位移标准偏差为0.008 mm。DIC测量结果可反应岩层表面的真实变形。

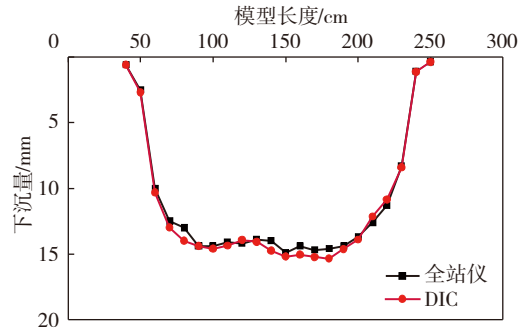


图6 全站仪与DIC测量结果对比

Fig. 6 Comparison of measurement results between total station and DIC

4 试验结果与分析

4.1 岩层弯曲阶段

图7(a)为工作面推进过程中,布置在关键层中的光纤监测结果以及沿光纤埋设位置布设的DIC测线应变结果。图7中阴影矩形框为3.2节中求得光纤系统测量误差,应变曲线落于该区域认为是无效数据。图7中左右两侧黑色部分为30 cm的边界煤柱。由于测量原理及对象不一致,导致DIC测量应变值与光纤监测应变值不在同一数量级,但是光纤应变分布特征与DIC应变分布特征几乎一致。

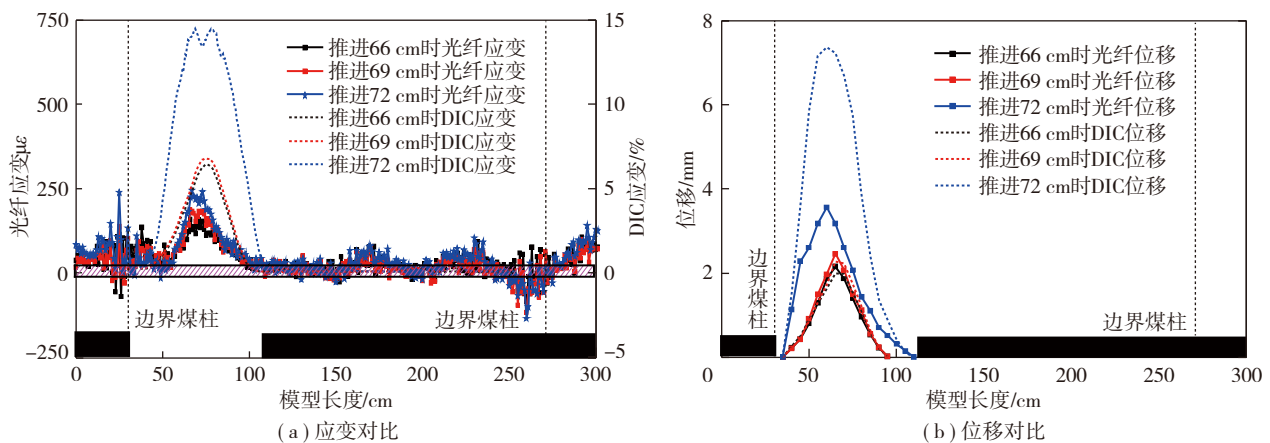


图7 光纤与DIC监测结果对比

Fig. 7 Comparison chart of monitoring results between optical fiber and DIC

当工作面推进至66 cm时,关键层附近围岩中应力重新分布,岩层内弹性变形能逐渐积聚,岩层内部光纤受到拉应力的作用,产生正应变,出现微小凸峰,光纤应变峰值达到 $138 \mu\epsilon$,DIC应变峰值达到6.3%。当工作面推进至72 cm时,关键层由于受到拉伸作用,发生较大法向位移,其上方位置产生较

大离层裂隙,光纤应变峰值突增至 $216 \mu\epsilon$,对应的DIC应变峰值突增至14.4%。随着推进距离的增加,离层裂隙不断发育,光纤应变曲线和DIC应变曲线中的峰值均呈增大趋势。由于关键层发生较大变形,此时光纤应变曲线峰值和DIC应变曲线峰值均发生突增。在工作面推进66~72 cm时,光纤应变峰

值位置与DIC应变曲线中应变峰值位置基本一致,变化趋势也大致相同。

使用1.2节中运动学方法,求取工作面推进66~72 cm时岩层弯曲挠度,并与DIC测量的实际岩层挠度进行对比,评估光纤-岩层的耦合性能。图7(b)为通过光纤应变计算的岩层挠度与DIC测量的实际岩层挠度对比,其中横坐标对应模型长度,纵坐标为岩层挠度变化。

在工作面推进66~69 cm时,光纤应变计算的岩层挠度与DIC测量的实际岩层挠度基本一致,最大相对误差为8.9%,此时对应的 k 值为0.91,表明光纤-岩体耦合良好。而当工作面推进至72 cm时,光纤应变计算的岩层挠度与DIC测量的实际岩层挠度相差甚远。对应关键层最大挠度处,光纤应变计算的岩层挠度与DIC测量的实际岩层挠度最大相对误差为63.9%,此时对应的 k 值约为0.36,表明光纤-岩层的耦合性能较差。

4.2 岩层破断阶段

主关键层发生破断是岩层受到拉伸破坏的结果,当岩层某位置处拉应力达到岩体本身抗拉强度极限时,裂缝于该部位起裂,起裂方向与最大拉应

力方向垂直,且沿着最大拉应力正交迹线扩展。因此,破断线位置处的岩体内光纤受到张拉裂隙的影响发生应变突增,光纤应变达到峰值。而已破断垮落的岩体内光纤仅受到少量残余拉应力及垮落岩块自身重力,该区域内光纤测试曲线比较平缓。对应的DIC应变测试曲线呈现相同的应变分布特征。

如图8所示,随着关键层的破断垮落,在距煤壁采空区方向20 cm位置处岩层产生水平张拉裂隙,形成了一条向上发育的破断线,与采空区一侧的岩层发育的破断线,形成八字型分布。反映到光纤监测应变曲线上即为存在2个应变峰值。两凸峰峰值间距即为垮落影响宽度。岩层垮落影响宽度随着工作面推进不断增大,而应变峰值间距也在不断增大。证明水平光纤测试的应变峰值间距是覆岩垮落影响宽度的表现,双峰位置是岩层垮落破断线的直接表征。虽然岩层破断后,光纤与岩体耦合性较差,光纤监测应变并不等于岩层实际应变,但是可以通过对光纤监测结果的反演,获得采动覆岩的破断程度及范围,从而反映出光纤沿线岩层移动变形的的位置及程度。

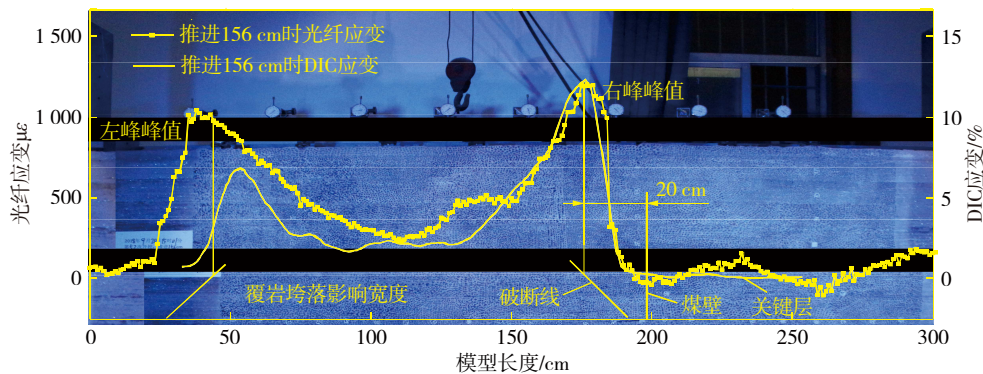


图8 光纤与DIC应变分布

Fig. 8 Optical fiber and DIC strain distribution

图9为工作面推进过程中,布置在关键层中的光纤监测结果以及沿光纤埋设位置布设的DIC测线应变监测结果。光纤和DIC应变变化曲线均呈两头凸起,中间下凹的“马鞍”型。随着工作面的推进,应变曲线左峰位置基本保持不变,右峰位置逐渐右移,且右峰峰值大小总体呈升高趋势,光纤应变曲线分布特征与文献[24]基本一致。

从岩层垮落形态上看,模型左侧(采空区一侧)的岩层率先破断,垮落形态随时间逐渐稳定;模型右侧(工作面一侧)的岩层滞后破断,随时间推移岩

层将继续破断垮落。应变左峰大小随着工作面推进而不断发生变化,在推进105~123 cm时峰值持续增大,推进123~165 cm时峰值持续减小,推进195~231 cm时峰值趋于稳定,其变化表明该峰值位置岩层的破断程度在发生变化,而左峰位置始终保持在模型长度45 cm左右。右峰峰值不断右移反映了关键层破断的位置,峰值大小总体呈增大趋势,反映了岩层破断的程度。

在距煤壁向采空区方向10~30 cm位置处岩层产生水平张拉裂隙,使埋设在岩层内部的传感光纤

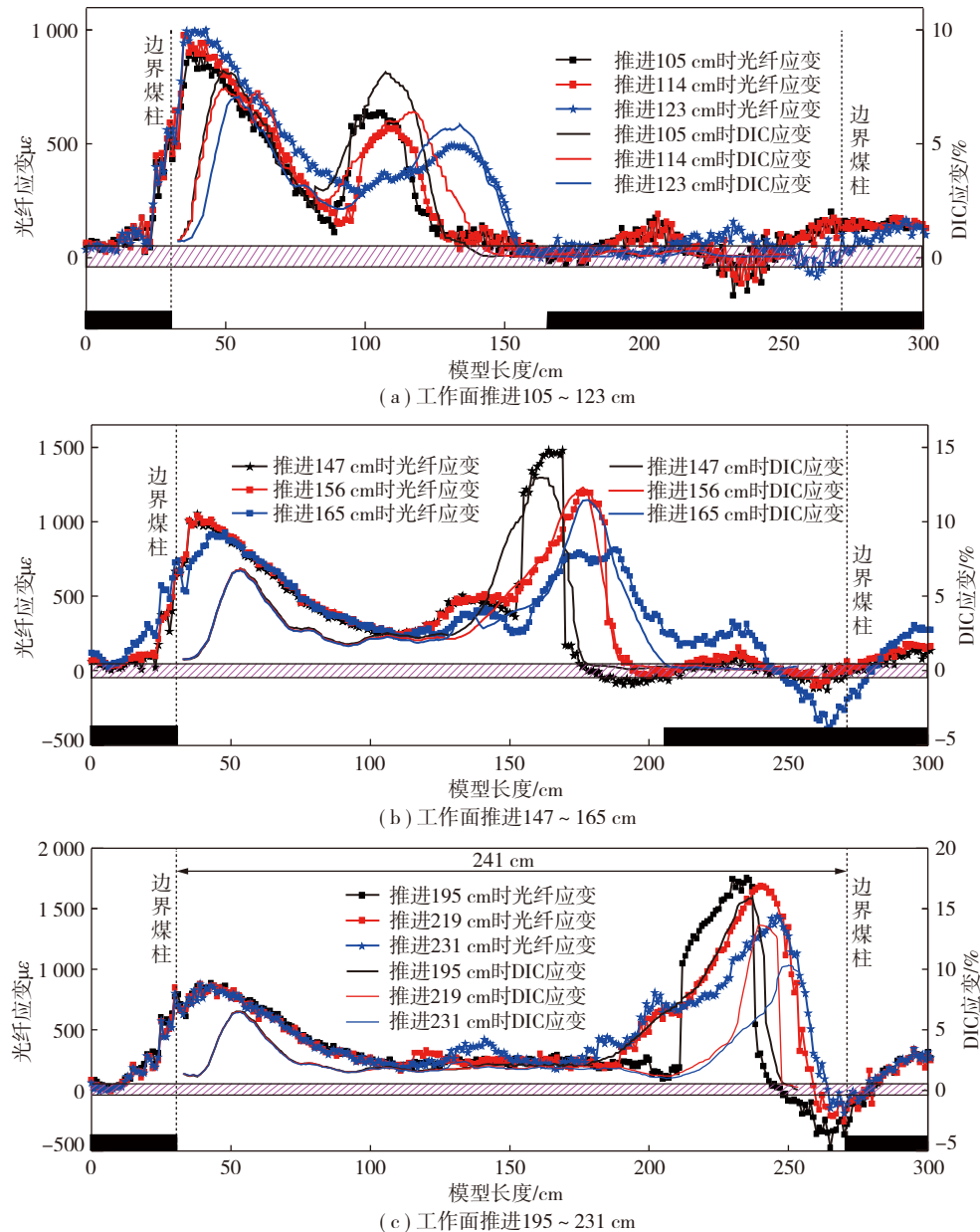


图9 光纤与DIC应变曲线

Fig. 9 Curves of optical fiber and DIC

受到水平方向的拉应力作用,裂缝位置处的光纤应变达到峰值,而采空区一侧破断岩层和工作面一侧未破断岩层均存在应变分布,这表明光纤随岩层垮落而处于拉伸变形状态,使裂缝附近岩层内光纤受到不同程度的拉伸。但是靠近采空区一侧光纤应变曲线相比于工作面一侧未破断岩层分布范围大,造成这种现象的原因一方面是由于未破断岩层区域受采动影响较小,光纤-岩体耦合性较好,岩体对光纤起到很好的“固化”作用;另一方面是靠近采空区一侧岩体内光纤受到残余应力和岩体自重的叠加影响。光纤应变曲线右侧峰值范围始终滞后于工作面的推进长度,处于采空区范围内。

5 结论

(1) 提出了光纤-岩体耦合性系数,形成岩层变形光纤监测数据有效性的评价方法。通过运动学方法对光纤-岩体结构进行几何分析,使用光纤测量应变值计算岩层弯曲挠度,并与DIC测得岩层实际挠度进行对比,进行光纤-岩体耦合性定量评价。

(2) 当岩层变形较小时,岩体-光纤耦合性系数 k 在0.9 ~ 1.0内,光纤测得应变即为岩层应变。当岩层变形较大时,岩体与光纤耦合系数骤降;当岩层发生破断垮落时,裂隙处光纤与岩体脱落,岩体与

光纤解耦,岩体与光纤耦合系数 $k=0$;靠近采空区一侧岩体内光纤耦合性相比于工作面一侧未破断岩层内光纤耦合性较差。

(3) 虽然岩层破断后,光纤与岩体耦合性较差,但是可以通过对光纤监测结果的反演,获得采动覆岩的破断程度及范围,从而反映出光纤沿线岩层移动变形的位臵及程度。

参考文献(References):

- [1] 康红普,徐刚,王彪谋,等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展40a及展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2019,1(1):013501.
KANG Hongpu, XU Gang, WANG Biaomou, et al. Forty years development and prospects of underground coal mining and strata control technologies in China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(1):013501.
- [2] 王家臣. 基于采动岩层控制的煤炭科学开采[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2019,1(1):013505.
WANG Jiachen. Sustainable coal mining based on mining ground control[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(1):013505.
- [3] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16):2803-2813.
- [4] 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):18-22.
LIU Shengdong, WU Rongxin, ZHANG Pingsong, et al. High density electric resistance method applied to monitor and measure overburden failure above seam[J]. Coal Science and Technology, 2001, 29(4):18-22.
- [5] 孙建,王连国,唐芙蓉,等. 倾斜煤层底板破坏特征的微震监测[J]. 岩土力学,2011,32(5):1589-1595.
SUN Jian, WANG Lianguo, TANG Furong, et al. Microseismic monitoring failure characteristics of inclined coal seam floor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5):1589-1595.
- [6] 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,2004,23(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, 23(15):2510-2513.
- [7] 施斌,张丹,朱鸿鹄. 地质与岩土工程分布式光纤监测技术[M]. 北京:科学出版社,2019.
SHI Bin, ZHANG Dan, ZHU Honghu. Distributed fiber optic sensing for geological engineering monitoring[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [8] 张平松,张丹,孙斌杨,等. 巷道断面空间岩层变形与破坏演化特征光纤监测研究[J]. 工程地质学报,2019,27(2):260-266.
ZHANG Pingsong, ZHANG Dan, SUN Binyang, et al. Optical fiber monitoring technology for evolution characteristic of rock stratum deformation and failure in space of mining field[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(2):260-266.
- [9] 柴敬,薛子武,郭瑞,等. 采场覆岩垮落形态与演化的分布式光纤检测试验研究[J]. 中国矿业大学学报,2018,47(6):1185-1192.
CHAI Jing, XUE Ziwu, GUO Rui, et al. Experimental study of overlying mine strata collapse and its evolution by a distributed optical fiber system[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(6):1185-1192.
- [10] CHAI Jing, DU Wengang, YUAN Qiang, et al. Analysis of test method for physical model test of mining based on optical fiber sensing technology detection[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 48:84-94.
- [11] ITEN M. Novel applications of distributed fiber-optic sensing in geotechnical engineering[D]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology in Zurich, 2011.
- [12] 管振德,蒋小珍,高明. 岩溶塌陷光纤传感试验装置的标定试验[J]. 中国岩溶,2012,31(2):173-178.
GUAN Zhende, JIANG Xiaozhen, GAO Ming. A calibration test on optical fiber sensing device for karst collapse monitoring[J]. Carsologica Sinica, 2012, 31(2):173-178.
- [13] 余骏宽,朱鸿鹄,张诚成,等. 传感光纤-砂土界面力学性质的试验研究[J]. 工程地质学报,2014,22(5):855-860.
SHE Junkuan, ZHU Honghu, ZHANG Chengcheng, et al. Experiment study on mechanical properties of interface between sensing optical fiber and sand[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(5):855-860.
- [14] 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.
- [15] 李博,张丹,陈晓雪,等. 分布式传感光纤与土体变形耦合性能测试方法研究[J]. 高校地质学报,2017,23(4):633-639.
LI Bo, ZHANG Dan, CHEN Xiaoxue, et al. Testing method on performance of deformation coupling between distributed sensing fiber and soil[J]. Geological Journal of China Universities, 2017, 23(4):633-639.
- [16] 张诚成,施斌,刘苏平,等. 钻孔回填料与直埋式应变传感光缆耦合性研究[J]. 岩土工程学报,2018,40(11):1-9.
ZHANG Chengcheng, SHI Bin, LIU Suping, et al. Mechanical coupling between borehole backfill and fiber-optic strain-sensing cable[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(11):1-9.
- [17] ZHANG C C, ZHU H H, SHI B. Role of the interface between distributed fibre optic strain sensor and soil in ground deformation measurement[J]. Scientific Reports, 2016, 6:36469.
- [18] 左建平,于美鲁,胡顺银,等. 不同厚度岩层破断模式实验研究[J].

- 采矿与岩层控制工程学报, 2019, 1(1):013007.
- ZUO Jianping, YU Meilu, HU Shunying, et al. Experimental investigation on fracture mode of different thick rock strata[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(1):013007.
- [19] ZHANG C C, ZHU H H, SHI B, et al. Interfacial characterization of soil-embedded optical fiber for ground deformation measurement[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(9):095022.
- [20] ZHANG C C, ZHU H H, LIU S P, et al. A kinematic method for calculating shear displacements of landslides using distributed fiber optic strain measurements[J]. Engineering Geology, 2018, 234: 83–96.
- [21] 袁强. 采动覆岩变形的分布式光纤检测与表征模拟试验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2017: 24–35.
- YUAN Qiang. Experimental study on detection and representation of mining-induced overburden deformation with distributed optical fiber sensing [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017: 24–35.
- [22] 柴敬, 欧阳一博, 张丁丁. DIC在相似材料模型中的裂隙检测[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(2):023015.
- CHAI Jing, OUYANG Yibo, ZHANG Dingding. Crack detection method in similar material models based on DIC[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 2(2):023015.
- [23] 索文斌, 施斌, 张巍, 等. 基于BOTDR的分布式光纤传感器标定实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(9):985–989.
- SUO Wenbin, SHI Bin, ZHANG Wei, et al. Study on calibration of distribution optical fiber sensors based on BOTDR[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(9):985–989.
- [24] 柴敬, 袁强, 李毅, 等. 采场覆岩变形的分布式光纤检测试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 36(S2): 3589–3596.
- CHAI Jing, YUAN Qiang, LI Yi, et al. Experimental study on overlying strata deformation based on distributed optical fiber sensing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 36(S2): 3589–3596.