



基于OFDR的采动覆岩铰接结构回转角度及“三带”变形表征研究

刘奇 刘相林 曹广勇 赵金海 蒋长宝

引用本文:

刘奇, 刘相林, 曹广勇, 等. 基于OFDR的采动覆岩铰接结构回转角度及“三带”变形表征研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(3): 63–73.

LIU Qi, LIU Xianglin, CAO Guangyong. Study on rotation angle and three-zone deformation characterization of hinged structure of mining overburden rock based on OFDR[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(3): 63–73.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0893>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

基于岩层挠曲变形的“竖三带”理论判别方法及工程应用

Theoretical judgement method of overburden “three-zone” based on rock strata deflection deformation and its engineering application

煤炭科学技术. 2022, 50(10): 42–50 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6b084916-50ac-4e3a-bcb6-417e9ab1b38c>

8.8 m大采高工作面覆岩三带分布特征及分层沉降研究

Study on distribution characteristics of collapse zone, fissure zone and curved subsidence zone and layered settlement of overburden on 8.8 m super-large mining height coal mining face

煤炭科学技术. 2020, 48(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7b4cde1a-483f-4d87-958a-021f8b003dc9>

大倾角高瓦斯煤层采动覆岩“三带”微震监测及瓦斯抽采效果

“Three zones” microseismic monitoring and analysis of gas drainage effect of overlying strata in gob of high dip high gas seam
煤炭科学技术. 2022, 50(1): 177–185 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0c16bebc-bacd-41d6-873f-420e04616cb5>

多重采动下大倾角上覆煤岩移动及地面井变形规律

Movement of overlying rock and deformation law of surface well under multiple mining with large dip angle

煤炭科学技术. 2023, 51(4): 47–55 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0827>

采动覆岩微震分区演化特征的数值模拟研究

Numerical simulation study on sub-regional evolution of microseismic characteristics of mining overburden rock

煤炭科学技术. 2023, 51(8): 36–46 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0693>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

刘 奇, 刘相林, 曹广勇, 等. 基于 OFDR 的采动覆岩铰接结构回转角度及“三带”变形表征研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(3): 63–73.

LIU Qi, LIU Xianglin, CAO Guangyong, *et al.* Study on rotation angle and three-zone deformation characterization of hinged structure of mining overburden rock based on OFDR[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(3): 63–73.

基于 OFDR 的采动覆岩铰接结构回转角度及“三带”变形表征研究

刘 奇^{1,2}, 刘相林¹, 曹广勇³, 赵金海^{1,2}, 蒋长宝⁴

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东省矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590; 3. 安徽建筑大学 建筑结构与地下工程安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230601; 4. 重庆大学 资源与安全学院, 重庆 400044)

摘 要: 为了研究陕北某矿采动覆岩结构的光纤应变表征方法, 基于 12217 工作面工程地质条件, 分析了 OFDR(光频域反射技术)的应变监测原理, 在采动覆岩运动状态分区和分布式光纤应变监测原理基础上, 建立了水平光纤应变表征采动覆岩铰接结构回转角度的力学分析模型, 推导出应变峰值宽度与岩层破碎后所形成采动覆岩铰接结构回转角度的函数关系, 定义了铰接结构回转临界角度的概念, 提出了基于光纤应变特性和采动覆岩铰接结构回转角度的覆岩“三带”划分判据, 并采用光纤应变表征方法对采动覆岩应变特征进行分析。结果表明: 采动覆岩“三带”的不同变形程度与铰接结构回转角度的大小呈正比例关系, 因此通过铰接结构回转角度划分“三带”范围是可行的; 通过水平光纤应变峰值特性计算铰接结构回转角度, 与二维物理相似模型试验的近景摄影测量角度相比, 两者平均误差小于 1°, 验证了提出的光纤应变表征采动覆岩铰接结构回转角度的力学模型有效性。二维物理相似模型得到的垮落带高度和裂隙带高度与该工作面现场结果一致, 与理论计算数值吻合, 符合该矿实际情况。研究结果为分布式光纤监测技术表征采动覆岩变形特征的应用提供了新的研究思路。

关键词: 采动覆岩; 光频域反射; 回转角度; 光纤应变; 采动“三带”

中图分类号: TD325

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)03-0063-11

Study on rotation angle and three-zone deformation characterization of hinged structure of mining overburden rock based on OFDR

LIU Qi^{1,2}, LIU Xianglin¹, CAO Guangyong³, ZHAO Jinhai^{1,2}, JIANG Changbao⁴

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. Anhui Jianzhu University, Anhui Provincial Key Laboratory of Building Structure and Underground Engineering, Hefei 230601, China; 4. College of Resources and Security, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to study the fiber optical strain characterization method of the overlying rock structure during mining in a certain mine in northern Shannxi, based on the engineering geological conditions of 12217 working face in Buertai Mine, the strain monitoring principle of OFDR (Optical Frequency Domain Reflection Technology) was analyzed. Based on the partition of mining-induced overburden movement state and the principle of distributed optical fiber strain monitoring, a mechanical analysis model of horizontal optical fiber strain to characterize the rotation angle of mining-induced overburden hinged structure was established. The functional relationship between the peak width of strain and the rotation angle of mining-induced overburden hinged structure formed after rock strata were broken was deduced, and the concept of critical rotation angle of hinged structure was defined. Based on the strain characteristics of optical fiber and the rotation angle of hinged structure of mining overburden rock, the criterion of three-zone division of overburden rock is proposed, and the strain characteristics of mining overburden rock are analyzed by means of optical fiber strain characterization method. The

收稿日期: 2023-08-03

责任编辑: 朱恩光

DOI: 10.12438/cst.2023-0893

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51904168), 山东省自然科学基金资助项目(ZR202212010234)

作者简介: 刘 奇(1987—), 男, 山东日照人, 副教授, 博士。E-mail: xihuancicuo@163.com

results show that the different deformation degree of the three zones of mining overburden is proportional to the rotation angle of the hinged structure, so it is feasible to divide the three zones by the rotation angle of the hinged structure. The rotation angle of the hinged structure is calculated by the peak strain characteristics of the horizontal optical fiber. Compared with the close-range photogrammetry angle of the two-dimensional physical similarity model test, the average error between the two is less than 1° , which verifies the effectiveness of the mechanical model of the proposed optical fiber strain to characterize the rotation angle of the hinged structure of the mining overburden. The height of the caving zone and the height of the fracture zone obtained by the two-dimensional physical similarity model are consistent with the field results of the working face and the theoretical calculation values, which are in line with the actual situation of the mine. The research results provide a new research idea for the application of distributed optical fiber monitoring technology to characterize the deformation characteristics of mining overburden.

Key words: mining overburden rock; OFDR; rotation angle; fiber strain; mining three zones

0 引 言

受煤层开采影响,采空区上覆岩层断裂、垮落,形成垮落带、裂隙带和弯曲下沉带。导水裂隙带,也即“两带”高度是防治水和瓦斯治理等的设计依据^[1];也是确定开采上限、瓦斯高位钻孔终孔层位、采煤工艺及参数的基础性工作^[2]。因此,垮落带和裂隙带高度的确定是煤矿安全生产的必要条件。两带高度确定方法中,相似模拟试验是研究煤矿采动覆岩破断和垮落运动的主要手段之一。目前,用于相似材料模型试验监测的主要方式为全站仪^[2]、压力盒^[3]、位移传感器、近景摄影^[4]、和光纤监测^[5-6]等。其中,光纤监测中的分布式光纤传感技术(Distributed Fiber Optic Sensing, DFOS)作为一种新兴的监测技术,具有全分布、连续监测的优点,并且兼备传输和感测作用。DFOS 技术主要包括基于干涉原理的分布式传感技术和基于瑞利、布里渊以及拉曼等散射机制的分布式传感技术。由于材料性质和监测原理使得光纤纤体轻柔、耐腐蚀、抗电磁、并具有一定的耐久性,但不会对埋入位置的物理性质产生影响,避免了与监测物体匹配的问题^[7]。

DFOS 技术主要通过感知应变、温度或振动的变化来实现对结构体和岩土体的实时监测。目前此技术已广泛应用于地质工程、岩土工程^[8-10]等领域。在煤矿领域,DFOS 被广泛应用在覆岩采动变形的现场监测^[11-13]。其中,基于瑞利散射的光频域反射技术(OFDR)因其高空间分辨率和高灵敏度等优点,多用于高精度监测。将分布式光纤监测用于相似模型试验时,多用水分分布式光纤确定垮落范围,竖向分布式光纤监测采动竖“三带”,再以光纤应变峰值位置结合近景摄影测量结果得到覆岩分区范围的演化规律^[14-16]。以水平光纤应变特性来表征铰接结构回转角度^[17]和“三带”演化规律还有待进一步研究。

采用 OFDR 监测技术,以陕北某矿 12217 工作

面为背景,结合二维物理相似模型试验。建立水平光纤应变表征铰接结构回转角度的数学模型,通过不同推进距离的光纤应变来得到采动影响下竖“三带”变化规律,为采动覆岩变形的物理相似模型试验提供一种新的监测技术和表征方法。

1 OFDR 技术的光纤应变测量原理

OFDR 是一种高空间分辨率的全分布式光纤感测技术。如图 1 所示,通过耦合器将光源发出且频率已线性扫描后的连续光分为 2 路。其中一路作为参考光,另一路探测光向前传播时会产生瑞利散射信号,经过反射的参考光与信号光在通过耦合器时发生拍频干涉。

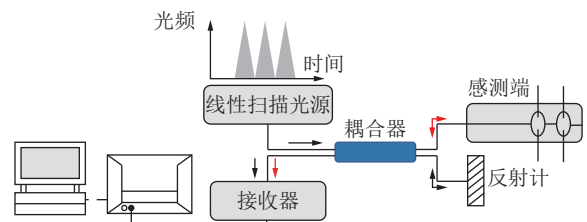


图 1 OFDR 工作原理

Fig.1 OFDR working principle

通过光电探测器检测到这些干涉信息后,利用光学差分测量技术解调出探测光的瑞利散射信号,信号频率用于光纤各点定位。将参考光和探测光的瑞利散射信号按空间分辨率大小划分为多个信号窗口,通过互相关运算计算每个信号窗口的频谱移动。

如图 2 所示,当光纤受到外力或周围温度变化导致光纤的反射光谱发生漂移时,光纤内波长漂移量与扰动之间存在对应关系^[18],分布式光纤的应变总量为

$$\begin{cases} \varepsilon_0 = \frac{\Delta L}{L} = \frac{(t_{\text{str}} - t_{\text{ref}}) c}{L N k_1} \\ \varepsilon_s = (\varepsilon_0 - \varepsilon_t) k_2 \\ \delta = \frac{\varepsilon_s}{\lambda} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ε_0 为光纤应变或温度变化时的应变总量; ε_s 为

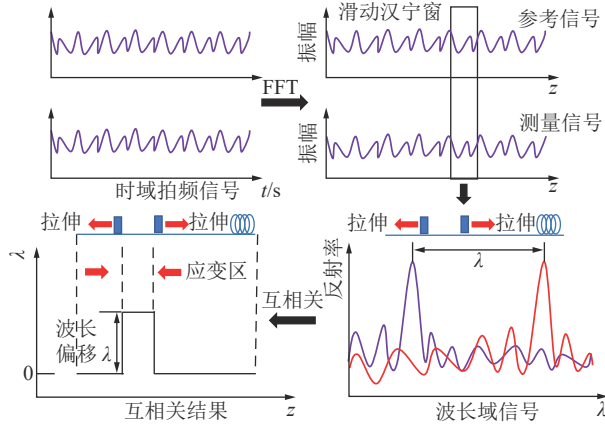


图 2 OFDR 测量原理

Fig.2 OFDR measurement principle

拉伸或压缩引起的应变; ε_t 为温度引起的应变; L 为光纤原长; λ 为波长偏移量; ΔL 为光纤的变形量; δ 为应变-波长偏移系数, 可由试验测出; t_{str} 为光纤变形后的延迟时间; t_{ref} 为光纤变形前的延迟时间; c 为光速; N 为光线的折射率; k_1 为应力光学校正因子; k_2 为温度-应变光学校正因子; k_1 和 k_2 需要在每次测试前通过预加应变进行标定。

2 光纤应变表征“三带”覆岩变形原理

文中统一定义光纤的拉应变为正值; 光纤的压应变为负值。假设如下: ①光纤与其所在岩层耦合性一致且不发生破断; ②岩层水平分布, 无倾斜角度; ③铰接结构长度为一个定值, 且岩层仅沿法向方向断裂。

2.1 竖“三带”简化模型

研究证明, 采动覆岩岩层运动是上覆坚硬岩层随着工作面推进形成破断“岩块”运动的综合反映, 是以“块体”运动主导的力学现象^[19]。因此分析岩层的运动状态可以得到覆岩运动变形的应变表征方法。如图 3 所示, 覆岩运动使得采场上覆岩层出现明显的分区: 横三区的①区是超前支承压力影响区, ②区是离层区, ③区为重新压实区; 竖“三带”为 I 垮落带, II 裂隙带, III 弯曲下沉带。

垮落带破断垮落的岩块最终充满采空区, 支撑

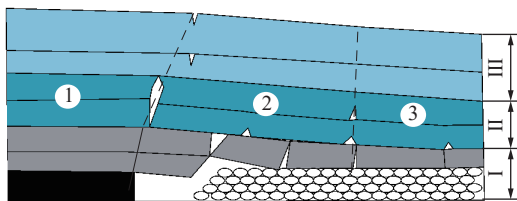


图 3 覆岩运动分区

Fig.3 Overburden rock movement partition

上覆岩块的旋转下沉, 使得工作面上方形成铰接的砌体梁结构, 据此可将竖“三带”简化为 3 个力学模型, 如图 4 所示。

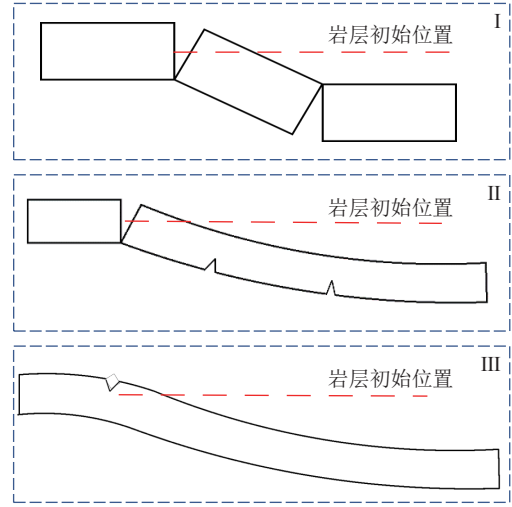


图 4 覆岩运动分区简化模型

Fig.4 Simplified model of overlying strata movement partition

2.2 基于竖“三带”简化模型的水平光纤应变表征模型

水平光纤均铺设在岩层中部, 结合 2.1 节的竖“三带”简化模型, 可以得到铺设在垮落带、裂隙带内水平光纤的应变与铰接结构回转角度的关系, 分别如图 5、图 6 所示。

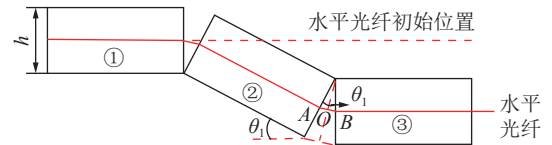


图 5 垮落带光纤应变表征模型

Fig.5 Optical fiber strain characterization model of caving zone

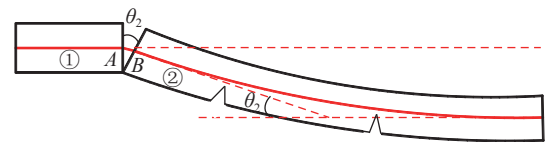


图 6 裂隙带光纤应变表征模型

Fig.6 Optical fiber strain characterization model of fracture zone

水平光纤在岩层破断形成铰接结构并发生回转之前, 应变曲线为基准值或初始值, 近似一条水平线; 岩层破断后, 铰接结构回转角范围内的光纤被明显拉长, 对应位置光纤应变增大, 此时在光纤应变曲线上会出现一个峰值, 从该应变峰值顶点处向左右两侧取第一个拐点, 两个拐点之间的距离即为光纤应变曲线峰值宽度, 而这个光纤应变曲线峰值宽度就

对应的是 AB 的长度, 因此假设图 5 内 AB 长度为 x_1 , AB 的长度可由 OFDR 测得。设已垮落岩块③和形成铰接结构的岩块②之间夹角为 θ_1 , 岩层厚度为 h , 则 θ_1 可由已知量表示如下:

$$\frac{\frac{AB}{2}}{\frac{h}{2}} = \sin \frac{\theta_1}{2} \quad (2)$$

$$\frac{x_1}{h} = \sin \frac{\theta_1}{2} \quad (3)$$

由于回转角度较小, 可依据数学知识以 $\sin x \sim x$ 将式(3)做一个简化, 则有:

$$\theta_1 = 2 \frac{x_1}{h} \quad (4)$$

式中: θ_1 为铰接结构回转角度; x_1 为铰接结构回转角内的光纤拉长范围, 对应水平光纤应变曲线的峰值宽度; h 为所在岩层的厚度; 可知铰接块体②的回转角度与②与③岩块的夹角相等, 由此即可求得铰接块体②的回转角度 θ_1 。

假设图 6 内 AB 长度为 x_2 , 将图中①和②岩块的夹角设为 θ_2 , 由数学知识可知图 6 中的 2 个 θ_2 角相等, 则 θ_2 角即代表裂隙带范围内铰接结构的回转角度, 大小可由下式计算得到:

$$\theta_2 = 2 \frac{x_2}{h} \quad (5)$$

受到碎胀系数影响, 随着距顶板高度增加, 岩块回转的自由空间减小, 垮落岩块与已垮落岩块的夹角 θ 减小, 由此可知回转角的大小和光纤的拉应变成正比例关系。

2.3 横三区光纤应变表征模型

根据 2.1 节覆岩运动分区, 图 3 所示随着工作面推进, 工作面上方存在①、②、③三个横分区。

1) 当光纤位于超前支承压力影响区域①时, 竖向光纤受到压应力作用。当①区岩块处在弹性阶段, 则竖向光纤为初始应变状态; 当①区岩块发生塑性变形破坏, 则竖向光纤会出现压应变。

2) 当光纤位于压实区域③时, 处于 I 垮落带内的竖向光纤受到岩块垮落的作用, 出现较大的拉应变并迅速减小; 处于 II 裂隙带内的竖向光纤随着离层和裂隙的“产生→发育→闭合”过程而出现拉应变并减小; 处于 III 弯曲下沉带内的竖向光纤, 表现出缓慢减小的拉应变。

3) 当光纤位于离层区域②时, 在 I 垮落带和 II 裂隙带的铰接结构上方出现较大的拉应变峰值, 随着上覆岩层的破断、垮落, 竖向光纤拉应变逐渐减小至初始应变状态; 在 III 弯曲下沉带内的竖向光纤从

拉应变状态向初始应变状态转换。

综上可知, 随着推进距离的增加, 如图 7 所示, 垮落带形成前期, 竖向光纤形成较大的拉应变, 垮落带发育至后期, 逐渐压实, 岩石发生塑性变形破坏, 形成较大的压应变; 裂隙带的竖向光纤随着离层裂隙的“产生→发育→闭合”过程出现较大的拉应变峰值并逐渐减小, 且应变峰值高度逐渐向模型上部移动; 弯曲下沉带失去关键层的承载作用, 岩层整体协调变形, 竖向光纤仅在弯曲下沉带与裂隙带交界处出现拉应变, 且峰值逐渐减小。

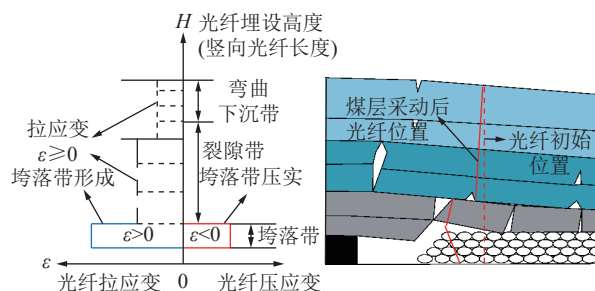


图 7 竖向光纤应变表征裂隙带结构^[20]

Fig.7 Vertical optical fiber strain characterization of fracture zone structure^[20]

通过以上对水平光纤和竖向光纤岩层破断应变表征模型的分析, 表明光纤应变变化的数值大小、应变峰值宽度及应变变化范围可以表征“三带”覆岩的垮落强度、岩层回转运动情况及“三带”发育的宽度和高度。

2.4 基于水平光纤应变表征模型的“三带”判据

由 2.1 和 2.2 节可知, 煤层开采导致的覆岩运动在竖“三带”范围内的主要区别在于: ①垮落带: 推进至终采线位置之前, 铰接结构发生周期破断, 岩块垮落高度等于煤层采厚, 工作面侧上方铰接结构与岩层断面所形成的夹角 θ_1 较大; 对于光纤应变特征而言, 预埋在垮落带内的水平光纤受到铰接结构的周期破断影响, 导致光纤应变曲线出现多个大小相同的应变峰值。②裂隙带: 受到垮落带碎胀系数的影响, 裂隙带下沉空间明显减小, 工作面上方铰接结构与岩层断面的形成的夹角 θ_2 相对于 θ_1 明显减小; 仅在开切眼侧上方和工作面侧上方的岩层断面出现明显的拉应变, 在中部仅出现未贯通岩层的拉张裂缝, 因此水平光纤在开切眼侧上方和工作面上方出现较大的拉应变峰值, 在这两个拉应变峰值中部均为较小的拉应变峰值。③弯曲下沉带: 弯曲下沉带的岩层在有限的垮落高度内已经不能发生破断, 因此仅在岩层上方产生挠曲变形的范围两侧出现拉张裂隙,

连接岩层下沉点和岩层最大挠度点所形成的 θ_3 要小于 θ_2 ; 对于水平光纤应变特征而言, 仅在拉张裂隙部分出现应变峰值。

由于竖“三带”岩层垮落程度差异较大, 竖“三带”内铰接结构回转角度也存在明显的大小关系: $\theta_1 > \theta_2 > \theta_3$, 假设在 θ_1 与 θ_2 之间存在着一个临界角度, 称为垮落带-裂隙带临界角, 同样将在 θ_2 与 θ_3 之间的临界角度称为裂隙带-弯曲下沉带临界角。

由岩层的不同垮落程度对水平光纤的影响可以得出基于光纤应变特性和铰接结构回转角度的“三带”判据:

垮落带: 光纤应变曲线的多个峰值大小相同, 且铰接结构回转角度大于垮落带-裂隙带临界角。

裂隙带: 两侧应变峰值中部出现多个峰值, 明显小于开切眼侧和工作面上方应变峰值, 且铰接结构回转角度小于垮落带-裂隙带临界角, 大于裂隙带-弯曲下沉带临界角。

弯曲下沉带: 两侧应变峰值中部不出现峰值, 且

铰接结构回转角度小于裂隙带-弯曲下沉带临界角。

3 物理相似模型试验

3.1 相似模型试验概况

以 12217 工作面走向中剖面为模拟对象, 使用山东科技大学国家重点实验室平面应变相似模拟试验台, 搭建长×宽×高为 1.9 m×0.22 m×1.8 m 的物理相似模型, 试验采用 1 : 200 的几何相似比, 1 : 1.5 的容重相似比, 1 : 14.14 的时间相似比, 1 : 300 的强度相似比, 1 : 300 的弹性模量相似比, 1 : 300 的应力相似比, 1 : 1 的泊松比相似比。

1) 模型铺设。按照表 1 中相似材料配比号将河砂、石膏和石灰搅拌均匀, 再按照水、复合骨料质量比 1 : 10 加水搅拌, 其中, 煤层加入少量墨汁, 搅拌均匀后, 倒入相似模型框架内, 压实抹平, 层间撒厚云母层来分层。岩层铺设到光纤位置时, 在光纤表面涂抹胶水以增加光纤的耦合性。

2) 光纤铺设。竖向光纤采用预埋方式植入, 在

表 1 模型岩层结构及相似材料配比
Table 1 Model rock structure and similar material ratio

序号	岩性	厚度/m	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	密度/(t·m ⁻³)	模型抗压强度/kPa	模型抗拉强度/kPa	模型密度/(g·m ⁻³)	配比号
22	风积砂	5.60	—	—	—	—	—	—	—
21	中粒砂岩	18.50	6.45	1.47	2.22	64.5	14.7	2 220	837
20	粗粒砂岩	18.85	5.77	0.95	2.19	57.7	9.5	2 190	855
19	细粒砂岩	27.07	13.06	1.84	2.24	130.6	18.4	2 240	837
18	砂质泥岩	20.48	7.32	2.32	2.18	73.2	23.2	2 180	946
17	细粒砂岩	24.69	14.87	2.87	2.24	148.7	28.7	2 240	837
16	砂质泥岩	5.33	9.67	2.67	2.32	96.7	26.7	2 320	946
15	中粒砂岩	16.01	16.43	3.43	2.43	164.3	34.3	2 430	955
14	粉砂岩	9.05	29.34	5.34	2.29	293.4	53.4	2 290	946
13	中粒砂岩	13.76	19.78	2.78	2.14	197.8	27.8	2 140	846
12	砂质泥岩	40.69	14.32	2.32	2.25	143.2	23.2	2 250	837
11	细粒砂岩	27.27	24.42	3.84	2.37	244.2	38.4	2 370	855
10	砂质泥岩	13.80	26.75	2.55	2.38	267.5	25.5	2 380	746
9	中粒砂岩	9.10	18.76	3.43	2.21	187.6	34.3	2 210	828
8	砂质泥岩	4.70	42.13	4.83	2.39	421.3	48.3	2 390	846
7	细粒砂岩	4.38	38.67	5.67	2.35	386.7	56.7	2 350	837
6	砂质泥岩	9.11	47.32	1.82	2.35	473.2	18.2	2 350	846
5	中粒砂岩	18.54	32.72	3.72	2.16	327.2	37.2	2 160	837
4	泥岩	4.36	23.89	0.89	2.33	238.9	8.9	2 330	746
3	细粒砂岩	23.48	45.24	3.12	2.36	452.4	31.2	2 360	837
2	煤	4.34	55.18	5.00	2.38	551.8	50	2 380	864
1	细粒砂岩	4.00	42.83	5.76	1.23	428.3	57.6	1 230	837

模型相似材料铺设之前,按照试验方案设计,预先布设5条竖向光纤,记为VF1、VF2、VF3、VF4、VF5,每一段监测光纤的两端固定在试验台上,并拉直光纤。考虑到上覆岩层多为厚硬岩层,选取标号为3、5、9、12、15的岩层,在各标号岩层铺设的期间埋入水平光纤,记为HF1、HF2、HF3、HF4、HF5,得到单模光纤布置如图8所示。

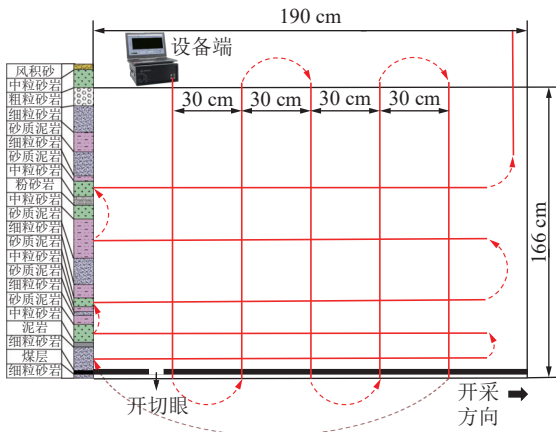


图8 相似模型光纤布设
Fig.8 Similarity model optical fiber layout

3) 空间位置标定。试验采用一根长度为50 m的单模光纤,为消除空间分辨率带来的位置误差,将光纤适量弯曲,对光纤长度进行标定。得到竖向光纤FV1、FV2、FV3、FV4、FV5的定位结果分别为:3 820~5 250、5 750~7 180、9 320~10 750、11 250~12 680、14 820~16 250 mm;水平光纤FH1、FH2、FH3、FH4、FH5的定位结果分别为:31 530~33 480、35 440~37 340、38 410~40 350、42 120~44 050、

44 720~46 640 mm。试验使用的测量仪器为苏州南智传感科技有限公司生产的OSI-C型OFDR仪器,该仪器的应变测试精度为 $\pm 1.0 \times 10^{-6}$,性能参数如下:

光纤类型	单模光纤
空间分辨率/m	0.001~0.01
最高采样分辨率/m	0.001
应变测试精度/ 10^{-6}	± 1.0
应变测量范围/ 10^{-3}	-12~+12
采样频率/Hz	4

4) 模型开挖。在煤层布设测点位置开挖5 cm作为工作面的开切眼,然后按每0.5 h向前推5 cm作为一个开挖步骤,记录开挖过程中的位移和岩层裂隙发育情况。在模型两侧留设25 cm的边界煤柱,以减小边界效应。煤层表面测点距离均为5 cm,煤层顶板所在高度为14 cm。

3.2 煤层开挖后覆岩运移情况

煤层开挖整个过程中覆岩运动情况和裂隙演化过程如图9所示,共计开挖28次,每次开挖后监测水平光纤和竖向光纤应变的原始数据(225组)。工作面推进至27.5 cm时,直接顶垮落,但上部基本顶无明显裂隙产生;工作面由27.5 cm推进至35 cm的过程中,基本顶出现离层,中间部分出现明显弯曲,基本顶底部裂隙开始发育;工作面推进至37.5 cm时,基本顶达到强度极限,出现大范围垮落,工作面初次来压显现。工作面推进至45 cm时,直接顶悬空部分突然垮落,第一次周期来压显现,离层发育至距煤层顶板10.5 cm处,且工作面上方形形成铰接结构;随

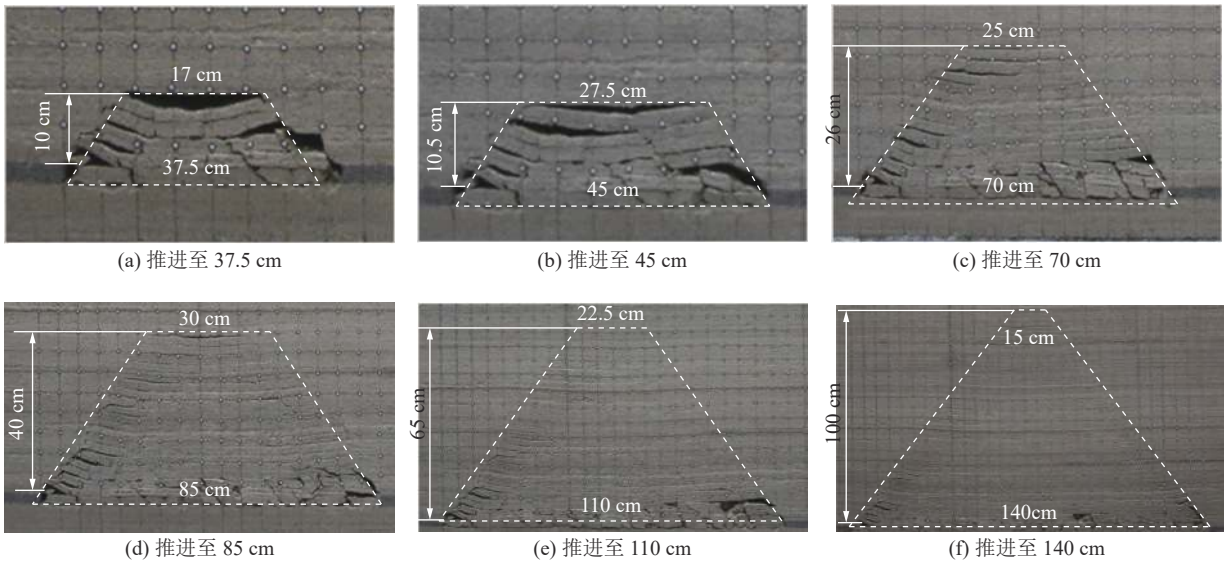


图9 采动覆岩垮落过程
Fig.9 Caving process of mining overburden rock

着工作面继续推进至 70 cm 过程中,工作面上方岩层出现大范围的岩层破断变形,直接顶岩层随采随垮,离层最大高度发育至煤层顶板上方 26 cm 处;工作面推进至 85 cm,顶部离层高度发育至煤层顶部 40 cm;工作面推进至 110 cm,由于垮落带对上覆破断岩层提供了支撑作用,垮落带和裂隙带高度未受影响,上方未出现离层区域;推进至 140 cm 过程中,

采空区逐渐压实,顶部裂缝逐渐闭合,未再有上覆岩层的变形移动发生。

3.3 水平光纤应变监测结果分析

当岩层垮落或者断裂时,水平岩层断裂成为多个不同运动状态的岩块,岩块之间产生裂隙,埋设其间的水平光纤受到相邻 2 个岩块的拉力作用,产生拉应变峰值,水平光纤应变曲线如图 10 所示。

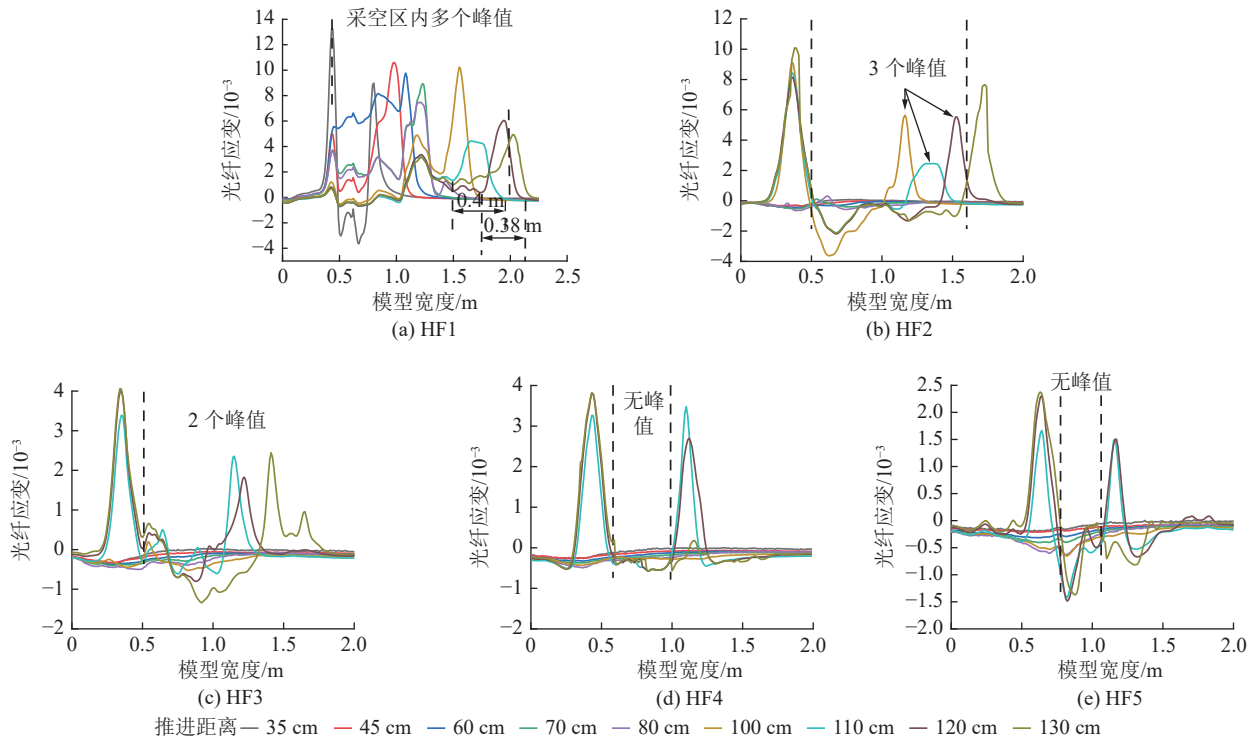


图 10 水平光纤随工作面开挖的应变

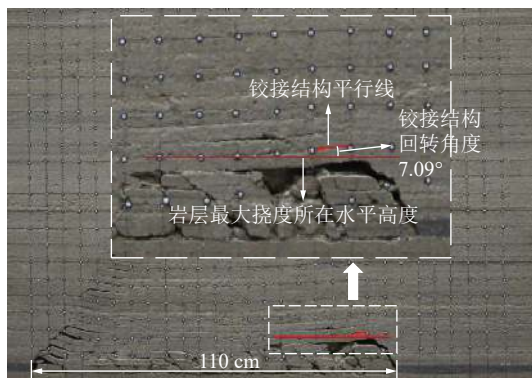
Fig.10 Strain diagram of horizontal optical fiber along with working face excavation

1) 水平光纤应变表征。应变图可见 HF1 ~ HF4 光纤具有相同的特性,由于 HF1 光纤位于顶板上方距离工作面最近的厚硬中砂岩层内,能够很好的反映覆岩垮落的全过程,因此以 HF1 光纤随工作面开挖的应变曲线为例进行讨论。HF1 水平光纤在工作面推进至 35 cm 时,左右两侧的两个峰值应变 13×10^{-3} 和 9×10^{-3} 分别对应开切眼侧和工作面侧,而中间的峰值范围对应工作面初次垮落的范围,两个峰值应变的大小差异对应了岩层垮落的不均匀性,右侧峰值较低的原因是右侧靠近工作面,工作面上方悬臂梁断裂,与采空区的垮落岩石形成铰接结构,覆岩垮落范围及强度均小于开切眼侧;工作面开挖从 45 cm 开挖至 110 cm 过程中,此阶段垮落岩层多为软弱的随动层,每次开挖完都形成一个完整的双峰曲线,双峰之间的范围也随着工作面推进而逐渐变大,对应采空区范围的增大,HF1 水平光纤采空区范围内的应变,从第一次周期来压显现到开挖至终

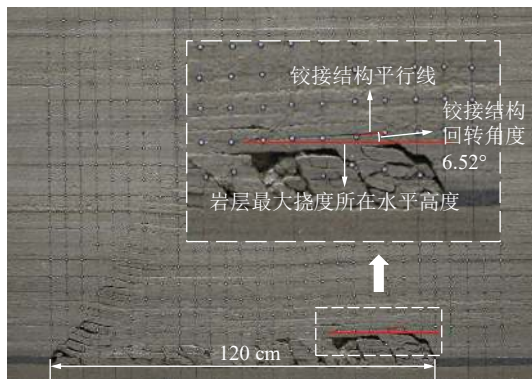
采线位置,在不断减小且向右偏移,值得注意的是,光纤应变整体趋势呈现出“W”型的形状,呈现 3 个峰值,中部出现峰值是由于岩层发生挠曲变形,当岩层达到最大挠度时,顶板发生断裂垮落,在推进至 60 cm 之前,“W”型中部峰值集中在 0.50 ~ 0.75 m 范围内,推进至 60 cm 时,由于顶板上方厚硬岩层发生破断,中部峰值范围明显变大;在推进距离为 60 ~ 100 cm 时,“W”型中部峰值范围明显减小,说明上一次厚顶板上方厚硬岩层垮落时,采空区侧发生明显的压实现象;当推进至 100 cm 时,中部峰值明显减小,直至推进至终采线方向,中部峰值的位置未变化。与 HF1 一样,随工作面开挖, HF2, HF3 和 HF4 光纤同样也呈现一级到多尖峰形状应变曲线,左侧峰值位置基本固定,右峰值随着推进距离增大不断向工作面侧方向移动,值得注意的是,从 HF1 至 HF5,采空区范围内的水平光纤应变峰值逐渐减小,这是由于岩层的碎胀特性影响,随着距顶板高度

增加,垮落空间逐渐减小,因此光纤的拉应变也逐渐减小。因此造成了 HF1 光纤应变曲线出现多个大小相同的峰值;HF2、HF3、HF4 光纤中部峰值要明显小于开切眼侧和工作面侧对应的峰值;HF5 中部则无峰值,这与 2.4 节中竖“三带”范围光纤应变曲线特征保持一致。

2) 近景摄影测量铰接结构回转角度。对煤层推进过程中的 H2、H5、H7、H16、H20 测线角度进行统计,以 H2 测线在推进距离为 110 cm 和 120 cm 时为例,对近景摄影测量的铰接结构回转角度进行取值,取值方法如图 11 所示。



(a) 开挖至 110 cm 时



(b) 开挖至 120 cm 时

图 11 铰接结构回转角度取值示意

Fig.11 Schematic of rotation angle of hinged structure

如图 10a 所示,取开挖至 110 cm 时的 HF1 光纤峰值宽度 $x=0.4$ m,开挖至 120 cm 时的 HF1 光纤峰值宽度 $x=0.38$ m; HF1 所在层位为 3 号细粒砂岩, $h=23.48/200=0.1174$ m,参考 2.1 节垮落带铰接结构回转角度计算公式 (4) 得到 $\theta_{110\text{cm}}$ 和 $\theta_{120\text{cm}}$:

$$\theta_{110\text{cm}} = 2 \times \frac{0.4}{0.1174} = 6.81^\circ$$

$$\theta_{120\text{cm}} = 2 \times \frac{0.38}{0.1174} = 6.47^\circ$$

将算例计算结果与摄影测量结果统计见表 2。

表 2 近景摄影与模型计算所得铰接结构回转角度对比

Table 2 Comparison of rotation angle of hinged structure obtained by close-range photography and model calculation

开挖距离/cm	近景摄影角度/(°)	模型计算角度/(°)	误差/%
110	7.09	6.81	3.90
120	6.52	6.47	0.77

通过以上算例的计算过程得到不同推进距离时,各光纤所在层位的工作面上方铰接结构回转角度,与近景摄影测量所得角度对比得到图 12。

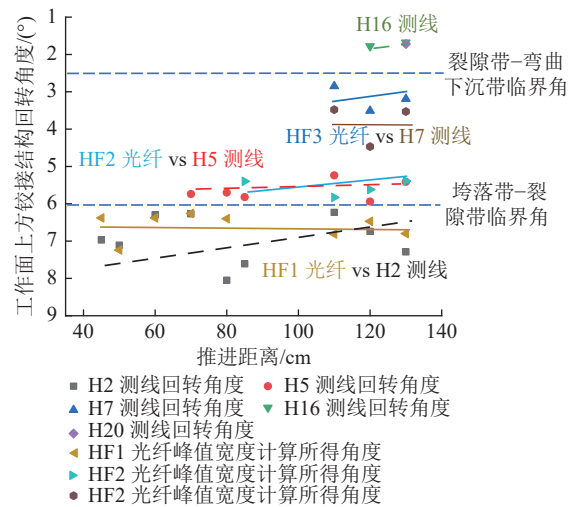


图 12 光纤应变特性表征铰接结构回转角度和近景摄影测量对比

Fig.12 Comparison of optical fiber strain characterization and close-range photogrammetry of hinged structure rotation angle

由图 12 可以看出,垮落带、裂隙带和弯曲下沉带的工作面侧铰接结构回转角度随着推进距离增加,出现明显的分带趋势。且近景摄影测量角度和光纤应变表征模型计算所得角度误差平均值小于 1°,由此可以近似认为通过光纤应变曲线峰值宽度计算所得角度和近景摄影测量所得角度是一致的,近景摄影结果和光纤应变监测数据可以相互验证,说明通过水平光纤应变峰值宽度计算得到铰接结构回转角度,再由回转角度划分“三带”是可行的。据此可以验证 2.4 节中基于光纤应变特性和铰接结构回转角度的“三带”范围划分判据,并且得到垮落带-裂隙带临界角为 6°,裂隙带-弯曲下沉带临界角为 2.5°。

3.4 竖向光纤应变监测结果分析

为反映随工作面开挖上覆岩层的变形规律,在开切眼侧和终采线之间均匀布设 5 条竖向光纤,5 条竖向光纤覆盖了从开切眼到终采线的开挖全过程,使竖向光纤应变能全面反映工作面上覆岩层的破坏变形的运动规律。

1) 竖向光纤应变表征“三带”发展变化。随工作面开挖, 由光纤解调仪测量得到的 5 条对应模型高度的应变曲线, 如图 13 所示。VF1 和 VF5 分别距开切眼和终采线位置各 25 cm。随着工作面开挖, 首先到达 VF1 所在位置, 光纤由初始应变状态转变为拉应变状态, 开挖至 35 cm 时, VF1 的 200 ~ 400 mm 高度出现突变, 应变峰值为 17×10^{-3} ; 继续向前推进, 当推进至 45 cm 时, VF1 的 200 ~ 400 mm 高度范围内峰值减小, 应变峰值向上移动, 在 500 ~ 800 mm 高度范围内出现明显的应变峰值, 大小为 12.5×10^{-3} ; 开挖至 70 cm 时, 到达 VF2 光纤所在位置, VF2 在 300 ~ 800 mm 范围内出现了大小为 10.8×10^{-3} 的应变峰值, 随着工作面开挖至 100 cm, VF2 的应变峰值向上偏移并逐渐减小; 此时 VF3

的 400 ~ 1 200 mm 高度范围内出现了明显的应变变化台阶, 这是由于上方厚硬岩层的承载作用, 导致岩层不能协同变形, 出现离层, 这说明了模型不同高度上岩层断裂的不均衡性; 开挖至 110 cm 时, VF3 的拉应变台阶值突然增加, 对应位于 1.1 m 高度的厚硬关键层破断, 上方的岩层失去了承载作用, 随关键层一同发生失稳回转, 此时 VF4 的 100 ~ 800 mm 范围内出现一个突变的峰值, 大小为 9.3×10^{-3} ; 随着继续向前推进, VF4 的应变峰值逐渐远离工作面顶板, 向上移动, 当工作面推进至 130 cm, VF4 在 300 ~ 500 mm 高度范围内出现了压应变峰值, 峰值大小为 1.5×10^{-3} ; 推进至终采线位置, VF5 仅在 800 ~ 1 400 mm 范围内出现一个较大的拉应变峰值, 大小为 3.25×10^{-3} 。

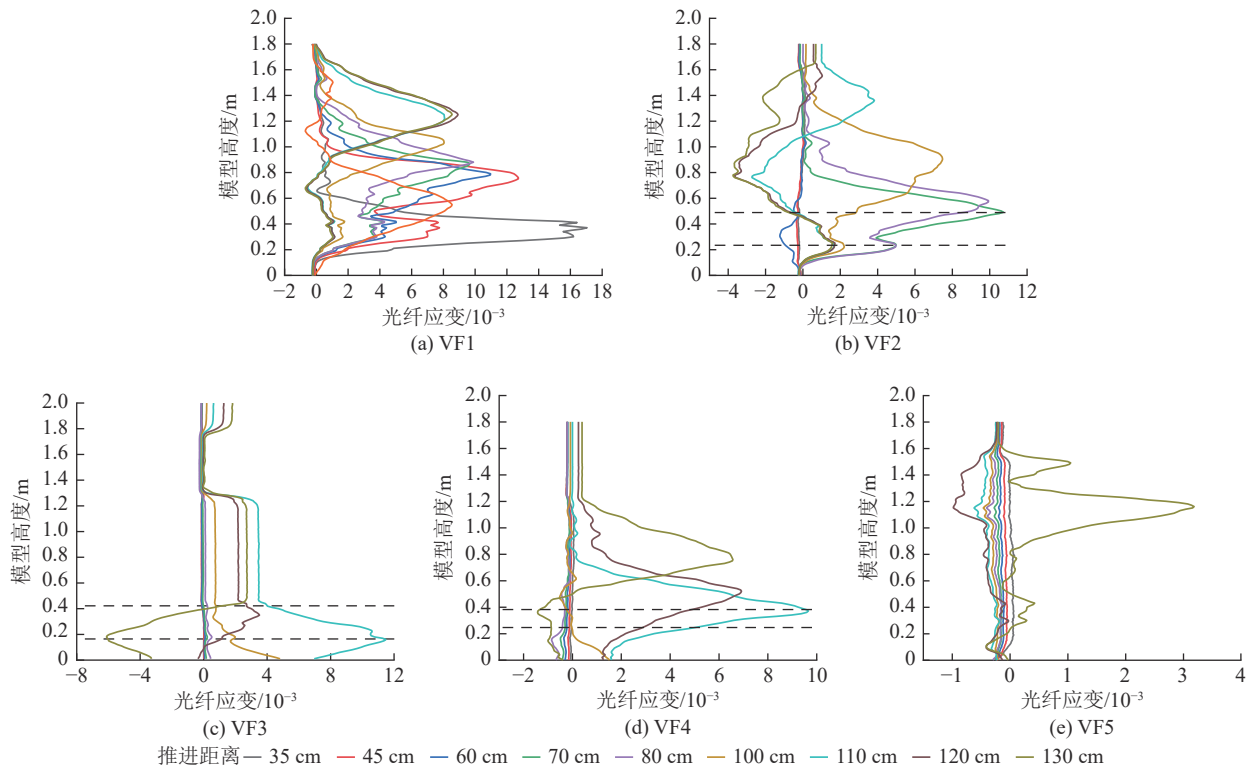


图 13 竖向光纤随工作面开挖的应变

Fig.13 Strain of vertical optical fiber with excavation of working face

2) 竖向测线的近景摄影测量。通过光纤铺设布置图可知竖向测线 V8、V14 和 V20 与竖向光纤 VF2、VF3 和 VF4 相对应。结合 2.3 节横三区光纤应变表征模型, 通过近景摄影将这三条测线表征的离层裂隙高度演化过程进行统计, 并与光纤应变峰值高度变化情况对比^[20], 如图 14 所示。

由图 14 可知, 随着工作面推进距离开挖至 130 cm, V14 测线表征顶部离层高度达到最大值 100 cm, 这与 VF3 光纤监测顶部离层高度保持一致。

而 VF2、VF4 光纤所表征的离层高度分别为 88 cm 和 78 cm, 这是由于 VF2 和 VF4 光纤与岩层的断裂迹线相交, 开切眼侧和工作面侧上方的顶部裂隙最大高度发育不均衡, 中部采空区顶部的离层高度最大。

由以上分析可知竖向光纤出现应变峰值的位置即为离层最大高度, 可见光纤应变峰值和覆岩离层裂隙的出现具有一定的相关性, 采用 OFDR 技术监测覆岩运动分区, 通过光纤应变曲线峰值

对应的高度来描述顶部离层高度符合实际覆岩垮落规律。

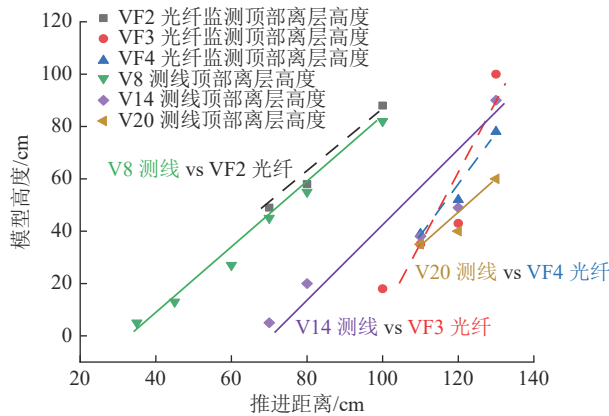


图 14 顶部离层光纤应变表征和近景摄影测量对比

Fig.14 Comparison of strain characterization and close-range photogrammetry of top separation fiber

4 竖“三带”高度确定

4.1 竖“三带”理论公式计算

由于覆岩破坏与岩层岩性密切相关,参考岩层结构图,覆岩多为砂岩,抗压强度较高,因此选用垮落带与裂隙带高度理论计算公式时,选用覆岩岩性为中硬进行计算:

1)垮落带高度 H_k :

$$H_k = (3 \sim 4)M \tag{6}$$

式中: M 为工作面采高, m; 根据岩石软硬程度取采高倍数 3 ~ 4 倍; 工作面采高为 6 m, 将其代入式(6)计算得工作面垮落带高度为 18 ~ 24 m。

2)裂隙带高度 H_L :

$$H_L = \frac{100M}{3.3n + 3.8} \pm 5.1 - H_k \tag{7}$$

式中: M 为工作面采高, m; n 为煤层开采层数, 一次采全高, $n=1$; 工作面采高为 6 m, 将其代入式(7)计算得 22207 工作面裂隙带高度为 55.4 ~ 71.6 m。

4.2 竖“三带”高度分析

根据竖向光纤的应变曲线峰值所在高度可得 VF2、VF3 和 VF4 表征的垮落带和裂隙带高度, 其数据见表 3。

为了保证安全, 垮落带和裂隙带高度均取最大值。按照 1 : 200 的几何相似比例换算, 竖向光纤应变所表征的实际工作面垮落带高度为 20 m, 位于式(6)计算的 18 ~ 24 m 范围内, 裂隙带高度为 70 m, 位于式(7)计算的 55.4 ~ 71.6 m 范围内。同时亦符合该矿其他已采工作面的垮落带、裂隙带高度情况。

由此说明物理相似模型模拟中使用 OFDR 技术在物理模型试验中监测“三带”高度符合现场实际和理论计算结果, 光纤应变表征的岩块垮落位置、横向和竖向垮落范围与近景测量结果一致, 可见, 所建立的基于 OFDR 监测技术的物理相似模型试验方法和监测技术是合理的。

表 3 由光纤应变曲线峰值高度计算垮落带、裂隙带高度
Table 3 Height of caving zone and fracture zone is calculated by peak height of optical fiber strain curve

光纤	光纤表征高度/m		煤层顶板高度/m	计算高度/m	
	垮落带	裂隙带		垮落带	裂隙带
VF2	0.23	0.49		0.09	0.35
VF3	0.17	0.42	0.14	0.03	0.28
VF4	0.24	0.38		0.1	0.24

5 结 论

1) 建立了水平光纤应变表征采动覆岩铰接结构回转角度的力学分析模型, 推导得出光纤应变的峰值宽度可表征采动覆岩铰接结构的回转角度, 两者的大小关系呈正比。

2) OFDR 光纤应变完整的表征了随工作面开挖的“三带”变形情况。将近景摄影测量结果与铰接结构回转角度计算结果对比, 两者误差平均值小于 1°, 验证了光纤应变表征采动覆岩铰接结构回转角度力学模型的有效性和准确性。

3) 建立了基于 OFDR 监测技术的试验方法和监测技术。定义了“铰接结构回转临界角度”的概念, 并结合水平光纤应变曲线特性, 提出了采动覆岩“三带”范围划分判据, 通过对光纤应变曲线分析确定垮落带-裂隙带临界角为 6°, 裂隙带-弯曲下沉带临界角为 2.5°。为分布式光纤监测技术表征采动覆岩变形特征的应用提供一种新的监测技术和表征方法。

4) 通过理论计算和现场实测结果等的对比分析, 验证了光纤应变表征结果的可靠性, 说明 OFDR 监测技术不仅可以应用在室内相似模型试验测试, 也可以应用在现场监测。

参考文献(References):

[1] 陈荣华, 白海波, 冯梅梅. 综放面覆岩导水裂隙带高度的确定[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(2): 220-223.
CHEN Ronghua, BAI Haibo, FENG Meimei. Determination of height of water flowing fractured zone in overlying strata of fully mechanized caving face[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2006, 23(2): 220-223.

- [2] 杨伟强, 郭文兵, 赵高博, 等. 理论判别方法及工程应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(10): 42–50.
YANG Weiqiang, GUO Wenbing, ZHAO Caobo, *et al.* Theoretical judgement method of overburden “three-zone based on rock strata deflection deformation and its engineering application[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(10): 42–50.
- [3] 刘三钧, 林柏泉, 高 杰, 等. 远距离下保护层开采上覆煤岩裂隙变形相似模拟[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 51–55.
LIU Sanjun, LIN Baiquan, GAO Jie, *et al.* Similar simulation of overlying coal rock fracture deformation in long-distance lower protective layer mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(1): 51–55.
- [4] 林海飞, 李树刚, 成连华, 等. 覆岩采动裂隙带动态演化模型的实验分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 298–303.
LIN Haifei, LI Shugang, CHENG Lianhua, *et al.* Experimental analysis of dynamic evolution model of mining-induced fracture zone in overlying strata[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(2): 298–303.
- [5] 柴 敬, 魏世明. 相似材料中光纤传感检测特性分析[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(4): 458–462.
CHAI Jing, WEI Shiming. Analysis of optical fiber sensing detection characteristics in similar materials[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 36(4): 458–462.
- [6] ZHANG D, WANG J C, ZHANG P S, *et al.* Internal strain monitoring for coal mining similarity model based on distributed fiber optical sensing[J]. Measurement, 2017, 97: 234–241.
- [7] 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(11): 83–87.
ZHANG Dan, SHI Bin, WU Zhishen, *et al.* BOTDR distributed optical fiber sensor and its application in structural health monitoring[J]. China Civil Engineering Journal, 2003(11): 83–87.
- [8] 李豪杰, 朱鸿鹄, 朱 宝, 等. 基于光纤监测的埋地管线沉降模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S2): 3645–3654.
LI Haojie, ZHU Honghu, ZHU Bao, *et al.* Model test study on settlement of buried pipeline based on optical fiber monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S2): 3645–3654.
- [9] 王德洋, 朱鸿鹄, 吴海颖, 等. 地层塌陷作用下埋地管道光纤监测试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1125–1131.
WANG Deyang, ZHU Honghu, WU Haiying, *et al.* Experimental study on optical fiber monitoring of buried pipeline under the action of stratum collapse[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1125–1131.
- [10] 张诚成, 施 斌, 朱鸿鹄, 等. 地面沉降分布式光纤监测土-缆耦合性分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(9): 1670–1678.
ZHANG Chengcheng, SHI Bin, ZHU Honghu, *et al.* Analysis of soil-cable coupling for distributed optical fiber monitoring of land subsidence[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(9): 1670–1678.
- [11] 柴 敬, 刘永亮, 王梓旭, 等. 保护层开采下伏煤岩卸压效应及其光纤监测[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 2896–2906.
CHAI Jing, LIU Yongliang, WANG Zixu, *et al.* Pressure relief effect and optical fiber monitoring of underlying coal rock under protective layer mining[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 2896–2906.
- [12] PIAO C D, LI J J, WANG D L, *et al.* A dofs-based approach to calculate the height of water-flowing fractured zone in overlying strata under mining[J]. Geofluids, 2021: 1–10.
- [13] HU T, HOU G Y, LI Z X. The field monitoring experiment of the roof strata movement in coal mining based on DFOS[J]. SENSORS, 2020, 20(5): 1318–1349.
- [14] 柴 敬, 袁 强, 王 帅, 等. 长壁工作面覆岩采动“横三区”光纤光栅检测与表征[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(6): 971–976.
CHAI Jing, YUAN Qiang, WANG Shuai, *et al.* detection and characterization of fiber grating in horizontal three area of overburden rock mining in longwall working Face[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2015, 44(6): 971–976.
- [15] 杜文刚, 柴 敬, 张丁丁, 等. 采动覆岩导水裂隙发育光纤感测与表征模型试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1565–1575.
DU Wengang, CHAI Jing, ZHANG Dingding, *et al.* Experimental study on optical fiber sensing and characterization model of water-conducting fracture development in mining overburden rock[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1565–1575.
- [16] 柴 敬, 霍晓斌, 钱云云, 等. 采场覆岩变形和来压判别的分布式光纤监测模型试验[J]. 煤炭学报, 2018, 43(S1): 36–43.
CHAI Jing, HUO Xiaobin, QIAN Yunyun, *et al.* Distributed optical fiber monitoring model test for deformation and weighting discrimination of overlying strata in stope[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S1): 36–43.
- [17] 李 竹. 关键层结构回转速度力学模型及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
LI Zhu. Rotary velocity mechanical model of key layer structure and its application research[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2018.
- [18] 李 磊, 侯 晨, 朱万成, 等. 基于 OFDR 技术的胶结充填体内部应变演化试验[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2023, 44(2): 258–264.
LI Lei, HOU Chen, ZHU Wancheng, *et al.* Internal strain evolution test of cemented backfill based on OFDR technology[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition). 2023, 44(2): 258–264.
- [19] 钱鸣高, 许家林. 煤炭开采与岩层运动[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 973–984.
QIAN Minggao, XU Jialin. Coal mining and strata movement[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 973–984.
- [20] 侯公羽, 胡 涛, 李子祥, 等. 基于 BOFDA 的覆岩采动“两带”变形表征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(2): 224–237.
HOU Gongyu, HU Tao, LI Zixiang, *et al.* Study on deformation characterization of two zones in overlying strata mining based on BOFDA[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2020, 37(2): 224–237.