

基于 BOTDA 技术感测的大倾角煤层顶板活动规律研究

柴敬^{1,2}, 杜文刚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:以大倾角煤层开采为研究背景,运用工程规律总结、理论分析、力学建模及物理相似模拟试验等研究方法,将 BOTDA(基于布里渊散射的分布式光纤传感)与 DIC(三维光学数字散斑)技术相结合,分析大倾角煤层开采顶板破坏规律及应力演化特征。研究表明:大倾角煤层原岩应力分布中部最大、下部次之、上部最小,中上部顶板弯矩及剪力大于下部,矸石堆积密度由下往上逐渐降低,中上部顶板活动剧烈,下部较稳定;光纤可感知岩体内部微弱变形,检测应变从单调递增发展为递减的临界时刻即为顶板垮落,垮落前瞬间应变达到极值,应力释放至最小值时达到稳定;BOTDA 与 DIC 技术均可检测顶板离层发育、闭合过程,BOTDA 表现为应变值阶跃突变,DIC 表现为离层位置形成应变局部化突变带;中上部基本顶内部应变远大于下部,应变峰值出现在中部偏上位置,全站仪与 DIC 监测同层位岩体位移亦表现此规律。表明大倾角煤层开采顶板变形具有非对称性,中上部变形程度大于下部。研究成果对于将光纤传感、数字摄影测量等先进技术用于岩土体结构变形破坏监测具有借鉴意义。

关键词:采矿工程;大倾角煤层;模型试验;光纤传感;三维数字散斑

中图分类号: TD 325

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2019)09 - 1809 - 10

Study on roof activity law in steeply inclined seams based on BOTDA sensing technology

CHAI Jing^{1,2}, DU Wengang¹, ZHANG Dingding^{1,2}, LEI Wulin¹

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

Abstract: Taking the steeply inclined seam mining as the research background and using the methods of engineering practice summary, theoretical analysis, mechanical modeling and physical similar model test, the failure law of the roof in steeply inclined seam mining was analyzed adopting BOTDA(distributed optical fiber sensing based on Brillouin scattering principle) and DIC(three-dimensional optical digital speckle) technologies. The research results show that the initial stress in the steeply inclined seam obeys a distribution of the largest in the middle part, the second in the lower part and the smallest in the upper part, that the bending moment and shear force in the middle-upper part are larger than those in the lower part, that the density of gangue accumulation gradually decreases from the bottom to the top, and that the activity of the upper and middle roof is intense while

收稿日期: 2018 - 12 - 11; **修回日期:** 2019 - 05 - 11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41027002, 51174280, 51804244)

Supported by the National Natural Sciences Foundation of China(Grant Nos. 41027002, 51174280 and 51804244)

作者简介: 柴敬(1964 -),男,1985年毕业于重庆大学采矿工程专业,现任教授、博士生导师,主要从事采矿工程实验岩石力学及光纤传感方面的教学与研究工作。E-mail: chajj@xust.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1464

the lower part is relatively stable. Once the strain detected by optical fiber which can sense the internal weak deformation of rock mass, develops from monotonous increasing to decreasing, the roof will collapse, and at this moment, the instantaneous strain reaches the maximum. Both BOTDA and DIC techniques can detect the development and closure process of the roof abscission layer. The former shows a step change of the strain value and the later presents a strain mutation zone formed at the abscission layer. The monitoring results of the displacement at the same position by both total station and DIC reveal that the internal strain of the upper and middle basic roof is much larger than that of the lower part, which shows that the overburden deformation in steeply inclined seam mining is asymmetric. The research results in this paper can be used for reference in monitoring deformation and failure of geotechnical structures by using optical fiber sensing and DIC techniques.

Key words: mining engineering; steeply dipping seam; model test; optical fiber sensing; three-dimensional optical digital speckle

1 引言

大倾角煤层是指赋存角度为 $35^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 的煤层,是国际采矿领域公认的复杂难采煤层之一^[1]。由于煤层赋存条件复杂,大倾角煤层开采覆岩运移规律、采场空间应力演化特征与普通煤层具有明显差异。国内学者针对大倾角煤层顶板断裂及致灾机制、支架-围岩耦合作用关系、覆岩空间结构等问题开展了大量研究。伍永平^[2]基于W&Kane原理,利用Lagrange动力学理论,得到“R-S-F”系统的动力学方程,基于该方程可对系统在任意时刻的运动特征进行描述和分析;王金安等^[3]基于弹性力学理论,建立了横、纵载荷作用下大倾角煤层基本顶的薄板力学模型,提出了大倾角煤层基本顶的初次断裂模式为“V-Y”型;伍永平等^[4-5]认为大倾角围岩采场具有非对称特征,岩层破坏易形成倾向堆砌与反倾向堆砌结构,且倾斜砌体结构与支架相互作用可分为正压、倾向挤压、反倾向挤压、后推和走向挤压型。实践与研究普遍表明,区别于近水平煤层,大倾角煤层开采后顶板垮落矸石因其自然安息角小于煤层赋存倾角导致沿底板滑移,造成对采空区的非均匀充填,采场围岩应力分布受采空区矸石非均匀充填约束及覆岩自重应力沿煤层倾向分解影响,具有明显的非对称特性,进而导致顶板非对称垮落。

在研究手段上,常采用理论分析^[6]、力学建模^[7]、工程监测^[8]、物理相似模拟和数值模拟等方法^[9-10]。其中,物理相似模型试验是真实物理实体,在满足基本相似原理的条件下,更能真实反映工程结构关系,因其独特优越性,在国内外岩土工程领域得到广泛应用。目前,物理模型试验变形监测多采用全站仪、百分表、应变片等,应力监测多采用压力传

感器、压力盒、测压管等电类传感器,测试精度和灵敏度均较低,多为点式监测,布点布线复杂,且变形监测一般只能监测模型表面,不能实现内部分布式监测,电子类压力传感器长期处于潮湿环境,易锈蚀失效。

随着光纤传感技术的飞速发展,为模型试验监测提供了新的方法。其中分布式光纤传感技术(DOFS)更是近年研究的热点领域,该技术可实现结构健康长距离分布式监测,具有抗腐蚀、抗电磁干扰、体积小质量轻、高灵敏高精度等优势,广泛应用于铁路、桥梁、隧道、油气管路、岩土结构等领域。J. Chai等^[11-13]将FBG, BOTDA等光纤传感技术应用于采动覆岩变形与来压规律、物理相似模型温/湿度场的检测等,取得一系列重要成果;钱振东等^[14]采用BOTDA技术对铺装层裂缝监测进行了室内模拟;江宏^[15]首次将分布式光纤传感技术应用于混凝土管桩桩身变形监测;朴春德等^[16]采用BOTDA光纤传感技术,研究覆岩变形分布式监测方法,分析采动引起覆岩变形特征,并探讨了离层变化机制。近年来光纤传感技术无论是理论研究还是工程应用,都取得重大突破。

本文将分布式光纤传感技术应用于大倾角煤层倾向物理相似模拟试验,通过在模型内部沿煤层倾向及与煤层呈一定角度布置传感光纤,借助DIC技术(三维数字散斑)对模型表面位移场及应变场进行实时跟踪监测,综合分析围岩应变分布及演化规律和空间运移特征。

2 大倾角煤层开采覆岩结构特征

2.1 顶板空间结构特征

区别于一般煤层,大倾角煤层在形成过程中受

构造应力影响，使得煤岩层以一定角度赋存。煤层开采后，围岩应力场重新分布，自重应力分解为沿煤层倾向和垂直于倾向 2 个分力。垂直于倾向分力与一般煤层垂直应力作用基本相同；沿煤层倾向分力使顶板有向下滑移趋势，造成大倾角煤层复杂的围岩应力环境。走向力学特征与一般煤层相近，存在增压区、减压区和稳压区，顶板随工作面推进周期性垮落，并伴有周期来压现象；倾向顶板垮落先从中上部开始，随工作面推进逐渐向高位顶板延伸，并向下部扩展。另一方面，因矸石堆积自然安息角一般为 $27^\circ \sim 30^\circ$ ，小于煤层赋存倾角 $35^\circ \sim 55^\circ$ ，矸石沿煤层底板向下滑移，堆积于采空区下方，堆积密度由下往上逐渐降低，形成采空区下部充实、中部分部分充填、上部空顶的非均衡充填特征(见图 1)。矸石对顶板运动有约束作用，采空区非均衡充填造成大倾角工作面矿压显现具有时序性和非对称性。大量工程实践表明^[5]，大倾角工作面来压顺序为先中部、次上部、后下部，中上部来压强度高于下部，是岩层控制的重点区域。

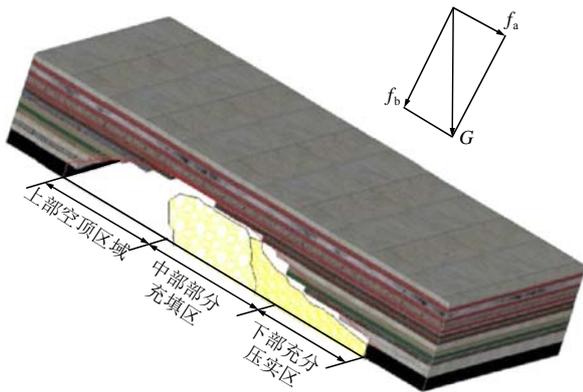


图 1 大倾角煤层顶板结构特征

Fig.1 Structure characteristic of roof in steeply dipping seam

2.2 顶板倾向力学模型

将基本顶岩层沿倾向简化为受非对称载荷作用的固支梁结构。根据力的叠加原理，非对称载荷可分解为均布载荷和渐变载荷。以上部顶板支承点建立坐标系，根据平衡方程可得均布载荷支反力：

$$F_{oy} = F_{ay} = \frac{q_0 l}{2} \quad (1)$$

式中： F_{oy} ， F_{ay} 分别为上、下端支反力； l 为顶板水平投影长度； q_0 为均布载荷大小。 S 为距左端任意长度为 x 的截面，则该截面处弯矩为

$$M_u = \frac{q_0 l}{2} x - \frac{1}{2} q_0 x^2 \quad (2)$$

截面处剪力为

$$F_s = \left(\frac{q_0 l}{2} - q_0 x \right) \cos \alpha \quad (3)$$

渐变载荷距梁左端 x 处截面上剪力方程为

$$Q_x = \frac{q l}{6} \left(1 - \frac{3x^2}{l^2} \right) \cos \alpha \quad (4)$$

根据式(6)求得两端点及中点剪力分别为

$$\left. \begin{aligned} Q_o &= \frac{q_0 l}{6} \cos \alpha & (x=0) \\ Q_a &= -\frac{q_0 l}{3} \cos \alpha & (x=l) \\ Q_b &= \frac{q_0 l}{24} \cos \alpha & (x=\frac{l}{2}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

渐变载荷距梁左端 x 处截面上弯矩方程为

$$M_s = \frac{q_0 l}{6} x - \frac{1}{6l} q_0 x^3 \quad (6)$$

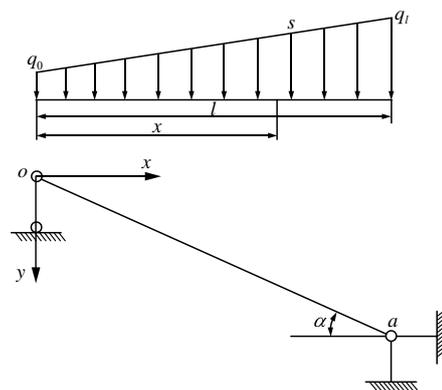
同理，求得两端点及中点处截面弯矩分别为

$$\left. \begin{aligned} M_{s_o} &= 0 & (x=0) \\ M_{s_a} &= 0 & (x=l) \\ M_{s_c} &= q_0 l^2 / 16 & (x=\frac{l}{2}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

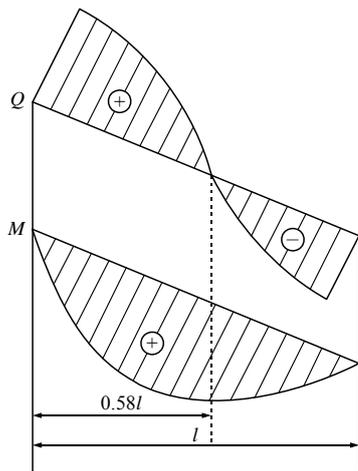
令 $\frac{dM(x)}{dx} = 0$ ，可得在 $x = \frac{l}{\sqrt{3}}$ ，弯矩出现极大值：

$$M_{\max} = \frac{q_0 l^2}{9\sqrt{3}} \quad (8)$$

绘制叠加后的剪力与弯矩图如图 2(b)所示。由图可知，中上部顶板岩梁弯矩及剪力大于下部，煤层开采后，该位置应力集中程度高，加之采空区中部为矸石充填区与空顶区分界所在，对顶板形成剪切作用，容易造成顶板溃屈。正因如此，大倾角工作面来压具有先中部、次上部、后下部的时序性特征。上部顶板因采空区非均衡充填出现空顶现象，次于中部发生来压，采空区下部充填最为密实，顶



(a) 顶板倾向受力分析



(b) 顶板剪力与弯矩分布

图2 大倾角煤层顶板倾向力学模型

Fig.2 Stress model in dip direction of basic roof in steeply dipping seam

板活动空间最小,受约束程度最高,因此,最后发生来压。直接顶、基本顶及高位岩层的运动规律具有明显的“非均衡性”和“非对称性”。沿倾向由上往下岩层运动依次形成“活跃区”、“过渡区”和“稳定区”,非对称载荷条件导致中上部顶板变形程度大于下部。

3 相似模型试验方案

3.1 工程背景

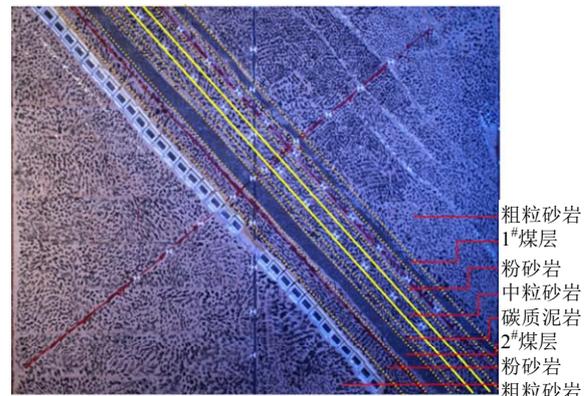
试验以枣泉煤矿 120210 工作面地质条件为研究背景。工作面标高+1 114~972 m,主采煤层为 2[#]煤层,工作面走向长度为 2 114 m,倾向长度 183.7 m,煤层厚度 6.8~9.8 m,平均厚度 8.15 m,煤层为单斜构造,平均倾角 43°,普氏硬度系数 $f=1.6\sim 2.0$,平均抗压强度 17.91 MPa。直接顶为泥岩、炭质泥岩和砂质泥岩,平均厚度 6.35 m,平均抗压强度 24.4 MPa。基本顶为中粒砂岩、细砂岩,平均厚度 35.4 m,平均抗压强度 55.0 MPa。底板为炭质泥岩、粉砂岩,平均厚度 22 m,平均抗压强度 42.55 MPa。

3.2 模型概况

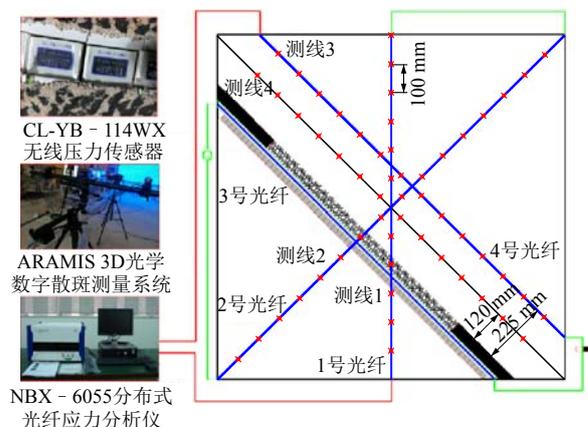
物理相似模型试验是按照一定相似比将工程问题缩小至实验室模型尺度,科学、合理地选择相似比是试验结果真实、可靠的重要保障。要求试验模型与原型各部分的尺寸应按同样的比例尺缩小或放大,即满足: $l_p/l_m=C_l$,其中, l_p 为原型尺寸, l_m 为模型尺寸, C_l 为几何相似常数。根据选取地质资料及试验模型架尺寸,确定几何相似比为: $C_l=1:200$,模型几何尺寸为 1 200 mm×1 200 mm×200

mm,边界条件为平面应力模型。容重相似常数为原型材料与模型材料的密度之比,即 $C_\gamma=\gamma_p/\gamma_m=1.56$;应力相似常数为原型与模型的应力比。在弹性范围内,原型与模型都应满足平衡微分方程,满足该方程的相似指标为 $C_\sigma=C_l C_\gamma$ 。根据几何相似常数与容重相似常数得应力相似常数 $C_\sigma=312$ 。模型试验得到的应力值需通过应力相似常数转化为工程应力值。时间相似常数为 14.14,模型开挖过程中,按时间相似常数将工作面实际每循环开采时间转化为模型开挖时间,每次开挖结束后,停留 20 min 待上覆岩层及垮落矸石充分稳定后,再进行下一开采循环。

相似材料通常由几种材料配制而成,根据以上要求和以往研究经验,确定本次试验各岩(煤)层采用河砂、粉煤灰、云母(兼做分层材料)为骨料,石膏、大白粉为胶结材料,水为溶剂材料。选定相似材料后,根据确定相似常数和各岩层的物理力学性质,通过材料配比试验调整确定配比,以达到力学相似的要求。按照相似配比逐层铺设相似材料。模型岩层岩性分布如图 3(a)所示。开挖步距为 3 cm,共计开挖 30 次,模拟工作面倾向长度 180 m。



(a) 主要监测系统



(b) 模型岩层岩性分布

图3 试验主要监测系统及主要岩层分布

Fig.3 Main monitoring system and main stratum distribution of the test

3.3 主要监测系统

试验监测系统分为 4 种，分别为 BOTDA 分布式光纤监测系统、全站仪位移监测系统，底板压力传感器监测系统、三维光学数字散斑监测系统。形成对模型表面和内部位移、应变、应力多方位多场监测。各测量系统均在每次开挖结束，上覆岩层充分稳定后，采集一次数据。

(1) BOTDA 监测系统

分布式光纤采取预埋方式植入。相似材料铺设前，将图 3(b)所示 4 根光纤固定于设计位置，光纤两端施加一定预应力使光纤处于紧绷状态。1 号光纤位于模型架中部，与煤层呈 47°斜交；2 号光纤与煤层垂直，沿模型对角线布置；3 号光纤与煤层平行，沿煤层底板布置；4 号光纤与煤层平行，位于工作面上方高位基本顶岩层，与煤层垂直距离 45 m。基于布里渊散射的分布式光纤传感(BOTDA)系统测量时，光纤需形成闭合回路。测试前将 4 根光纤熔接为一个完整回路，1 号光纤下端为回路起点，即泵浦光输出端，4 号光纤上端为回路终点，即探测光输出端。

由于布里渊频移与光纤所处环境温度和应变成正比相关，在测量时，通过连续调节两激光器频率，检测接收端功率，确定能量转移最大时的频率差：

$$\Delta V_B = V_{B(\varepsilon)} - V_{B(0)} = C_1 \Delta T + C_2 \Delta \varepsilon \quad (9)$$

$$\varepsilon = (\Delta V_B - C_1 \Delta T) / C_2 \quad (10)$$

式中： ΔV_B 为布里渊频移变化量， C_1 为光纤对温度的敏感系数， $V_{B(\varepsilon)}$ 为应变引起的布里渊频移， C_2 为光纤对应变的敏感系数， $V_{B(0)}$ 为初始布里渊频移。通过检测布里渊信号频移变化和归一化信号功率变化值来获得光纤应变温度信息，实现分布式检测。因模型试验在室内进行，试验过程温度变化小于 5 °C，依据已有经验，可忽略温度效应影响。分布式光纤检测设备为 NBX - 6055 型分析仪，可实现 1 cm 采样间隔和 5 cm 空间分辨率，为国际先进水平。光纤选用直径为 2 mm 普通单模光纤。

(2) DIC 监测系统

DIC(三维光学数字散斑测量)技术是一种基于非接触式图像光学测量方法，使用数字成像设备获取不同状态下对象图像，基于相关性匹配算法进行图像分析，以定量提取结构体全场位移和应变响应，可对模型外表面位移与应变分布进行整场实时监测。散斑预制是为了保证被测物体表面具有足够的图像纹理，在被测物体变形过程中图像纹理会作为变形信息的载体随模型表面一起变形。为减小人工

制作散斑对模型材料物性的影响，并确保散斑图案与被测物表面变形一致，采用普通墨水在模型表面制作散斑，散斑大小相对均匀，位置随机分布，直径在 5 mm 左右，密度在 40%左右。

4 传感光纤标定

4.1 测试精度标定

用于物理模型试验的分布式光纤在选型上需考虑光纤的存活率、光纤对模型物性的影响程度、光纤的测量敏感度、光纤封装材料及自身力学属性等因素。根据已有研究经验，本次试验选用直径为 2 mm 聚氨酯封装的高灵敏应变测量光纤。

为验证 BOTDA 测试结果可靠性，试验前对设备性能进行检测。对一段不受外力变化和温度变化影响的自由段光纤进行重复测量 5 次，验证设备的系统测量误差。图 4 中横坐标为光纤空间分布，选取 2~25 m 范围光纤，该范围包含 4 根测试光纤；纵坐标为光纤中心频率，单位为 GHz。

由图 4(a)可知，5 次测试结果基本一致，表明设备工作性能稳定，系统误差较小。图 4(b)以第一

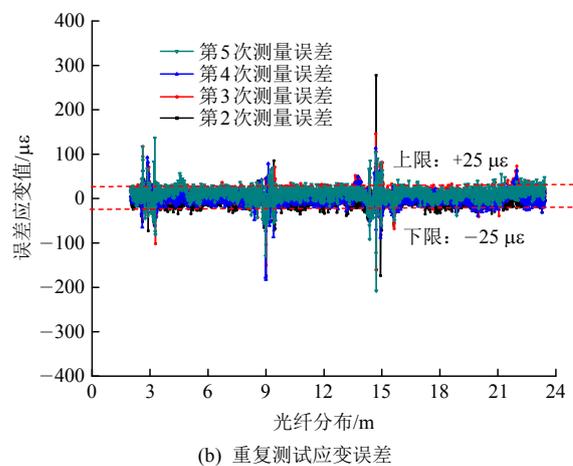
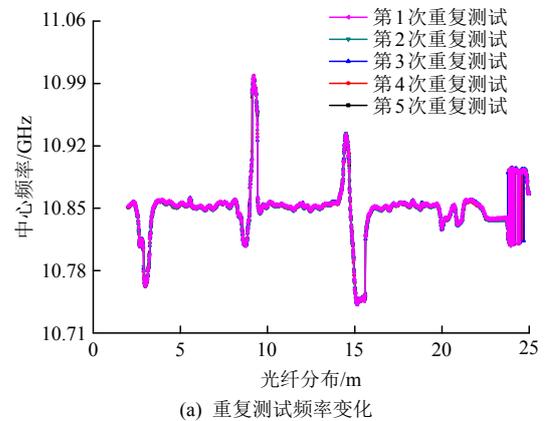


图 4 分布式光纤精度测试

Fig.4 Accuracy test of distributed optic fiber

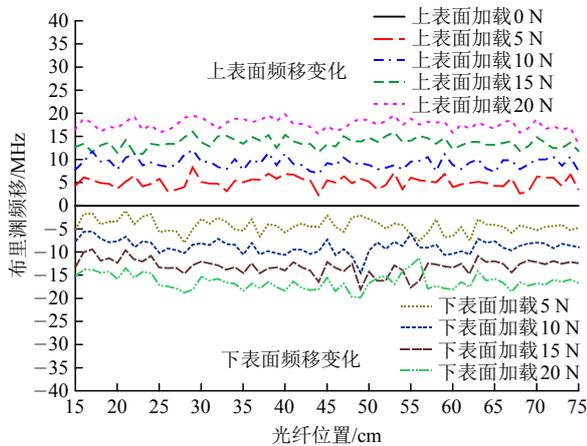
次测量中心频率为基准值，将后 4 次测量结果与第 1 次作差得到因系统误差引起的频率漂移，再求得应变系数将其转化为应变。由图 4 可知，除个别数据异常点外，因系统稳定性引起的测量应变误差在 $\pm 25 \mu\epsilon$ 以内。即由分布式光纤检测得到的模型内部应变置信区间为 $> +25 \mu\epsilon$ 或 $< -25 \mu\epsilon$ ，此范围内应变为岩层变形造成。

4.2 应变系数标定

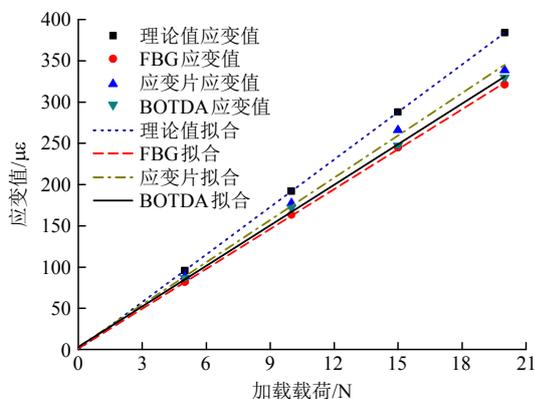
由 BOTDA 传感原理知，若要求得模型内部光纤沿线应变分布，需先对传感光纤进行标定，求得应变灵敏度系数。

设计等强度梁标定试验，在等强度梁上下表面分别布置分布式光纤、光纤光栅和电阻应变片，基于等强度梁在不同载荷下，梁表面任意截面应变相等的原理，测试不同载荷下各传感器测量应变值差异，最后通过理论计算等强度梁表面应变，求得分布式光纤检测布里渊频移与应变的关联系数，即为传感光纤应变灵敏度系数。

由材料力学理论知：梁向下弯曲时，中性面以上部分受拉，以下受压。对比测试结果(见图 5(a))，



(a) 不同载荷梯度光纤频移变化



(b) 综合对比结果

图 5 传感光纤应变系数标定

Fig.5 Calibration of strain coefficient of sensing optical fiber

上表面频移值为正，下表面频移值为负。基于此，可通过测试光纤频移值或应变值正、负，判断被测物应力状态。由图 5(b)可知，3 种传感器测量值与理论值接近，表明光纤传感测试结果真实、可靠。等强度梁在载荷作用下的理论应变为

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{6Fx}{Eb_x h^2} = \frac{6FL}{Ebh^2} \quad (11)$$

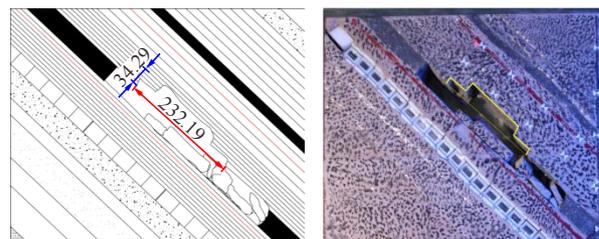
式中： F 为载荷值， E 为梁弹性模量， h 为梁厚度， b 为梁固定端截面宽度， L 为梁长度。通过计算理论应变值，反算分布式光纤应变灵敏度系数为 $0.0497 \text{ MHz}/\mu\epsilon$ 。通过此系数，可将传感光纤检测布里渊频移变化转化为岩体内部应变分布。

5 大倾角煤层顶板活动规律

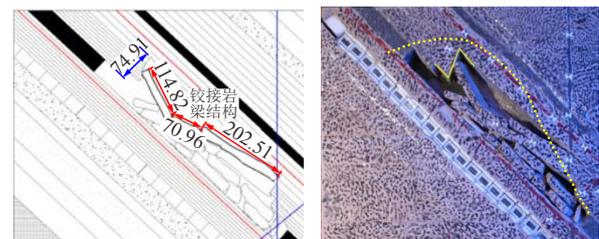
5.1 顶板宏观垮落特征

模拟煤层倾向开采，仅体现倾向顶板垮落特征。模拟工作面实际长度 180 m，模拟煤层倾角 43° 。上、下端头各留设 40 m 边界煤柱，模拟采高 8 m。沿倾向推进步距 6 m，共计推进 30 次。沿倾向推进至 36 m 时，顶板初次垮落，垮落长度 28.39 m，垮落岩块沿煤壁整体切落，结构完整。随工作面继续推进，垮落矸石不断沿底板下滑，由完整结构逐渐破碎，堆积于采空区下部。

如图 6 所示，工作面倾向长度为 78 m 时，下位基本顶破断，垮落高度 6.86 m，垮落区长度 46.43 m，垮落区呈现“凸”型，形成二级岩梁台阶，煤壁上方形成台阶状悬臂梁，工作面上方悬臂梁跨度达到



(a) 工作面倾向长度 78 m(单位: m)



(b) 工作面倾向长度 108 m(单位: m)

图 6 大倾角工作面倾向顶板垮落特征

Fig.6 Fracture characteristics of the roof in steeply dipping seam

23.4 m, 采空区下部堆积矸石接触直接顶, 对直接顶有一定支承作用。工作面长度为 108 m 时, 基本顶岩梁断裂, 形成三段相互铰接的倾斜砌体结构^[5], 三段岩梁长度分别为 22.96, 14.19, 40.50 m, 岩梁间相互咬合, 具有水平作用力。垮落岩梁上部至高位基本顶形成三角形空顶区, 后方煤壁上部未断裂岩体形成倒“Z”型结构, 因覆岩重力沿倾向分力引起, 此结构一般不会发生于近水平煤层, 是大倾角或急倾斜煤层开采覆岩垮落特有结构特征。中部断裂岩梁与下部垮落岩体完全接触, 上部岩梁上端与后方未垮岩层接触, 之间不存在结构应力; 下部岩梁并未与稳定岩层完全分离, 但已形成明显纵向贯通裂隙。

工作面倾向长度为 150 m 时, 基本顶发育较大离层, 离层发育长度为 93.8 m, 最大张开度 6.74 m, 离层发育在关键层下, 垮落岩层与之前断裂岩梁相互铰接, 形成砌体结构。倾向长度为 162 m 时, 之前形成的离层裂隙闭合, 在上煤层顶板发育新离层裂隙, 裂隙发育长度 58.16 m, 最大张开度 0.89 m。采空区垮落矸石与工作面上方未断裂岩层相互挤压, 在一定程度上阻止了顶板正常垮落。

因试验模拟煤层倾向开采, 不能模拟完整上覆岩层, 区别于走向模型试验, 不能模拟出工作面初次来压、周期来压、地表沉陷、“三带”分布等规律。最终垮落带范围高度为 21.53 m, 裂隙带和弯曲下沉带没有明显分界, 包含垮落区、裂隙区、离层区、连续变形区不同尺度采动覆岩影响范围为 67.94 m。覆岩运移具有明显非对称特征, 区别于水平煤层开采, 裂隙拱顶位于采空区中部偏上位置, 两侧呈现非对称形。垮落岩块堆积于采空区下部, 阻止其上顶板正常垮落, 采空区上部出现空顶区, 从上往下分别为顶板活动活跃区、过渡区和稳定区。

5.2 顶板微观变形光纤传感响应

传感光纤内植于模型中, 相似材料固结后与光纤相互耦合, 采场围岩受采动影响变形带动光纤同步变形。1 号光纤与煤层夹角 47°, 位于模型中部沿垂直方向布置。图 7 为顶板初次垮落前后 1 号光纤检测应变分布, 图中竖直的矩形框为节 4.1 中求得系统测量误差 $\pm 25 \mu\epsilon$, 应变曲线落于该区域认为是无效数据。

由图 7 可知, 首次开采即引起光纤感应, 与开挖区对应位置应变峰值为 $70 \mu\epsilon$, 已超出系统误差范畴, 表明传感光纤感知到岩体内部微弱变形。此后, 随工作面沿倾向推进, 采空区对应位置应变曲线呈

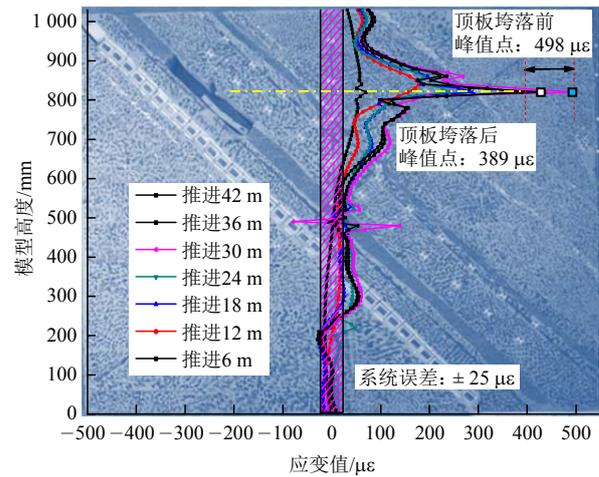


图 7 顶板垮落光纤响应特征

Fig.7 Response characteristic of the fiber when the roof collapses

尖峰状, 峰值随开采不断增大, 应变均为正值, 至工作面长度为 36 m 时, 达到该阶段应变最大值 $498 \mu\epsilon$ 。这一过程表明, 煤层开采打破上覆岩层应力平衡, 引起围岩应力重新分布, 应变值为正表明顶板出现拉应力集中, 弹性变形逐渐集聚, 此过程其余传感器均未采集到有效数据。推进至 36 m 时, 顶板发生初次垮落, 至 42 m 时光纤检测应变已从 $498 \mu\epsilon$ 降至 $389 \mu\epsilon$ 。光纤层位岩体出现一定程度应力释放, 集聚的弹性变形能亦得到释放。

当顶板垮落后, 随着工作面继续推进, 应变峰值位置基本固定, 但峰值大小随推进降低, 推进 54 m 时峰值应变为 $225 \mu\epsilon$, 至推进 60 m 时达到弹性能释放过程极小值 $212 \mu\epsilon$ 。推进 60~72 m 过程, 应变峰值重新随工作面长度增加单调递增, 当顶板垮落后应变再次回落。应变曲线峰值从单调递增发展为单调递减的临界时刻为顶板垮落, 垮落前的瞬间应变达到最大值, 垮落后顶板岩层迅速卸压, 应力开始向采空区四周深部稳定岩体转移, 此时垮落位置顶板岩层应力达到最小值, 覆岩运动逐渐趋于稳定。此后, 随工作面推进又重新单调递增, 循环该过程形成工作面沿倾向的周期性矿压显现。

5.3 顶板宏观离层检测

工作面倾向长度为 150 m 时, 下位基本顶发育较大离层, 离层发育长度为 93.8 m, 最大张开度 6.74 m, 将该离层命名为下位离层。1 号分布式光纤检测到离层发育过程。推进 144 m 时应变峰值为 $3076 \mu\epsilon$, 推进 150 m 时应变峰值达到 $5095 \mu\epsilon$, 应变出现超过 $2000 \mu\epsilon$ 阶跃式跳增, 峰值位置位于离层与光纤相交处。岩层张开形成离层裂隙引起光纤

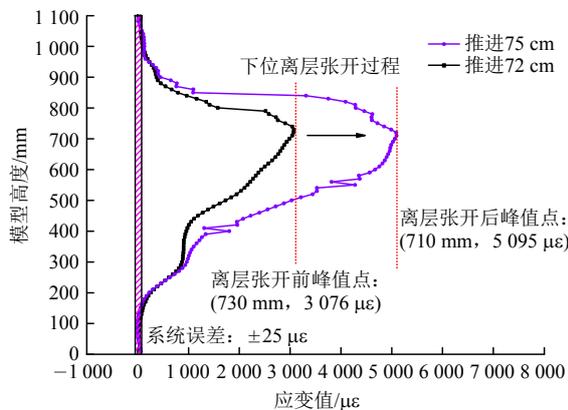
拉应力集中，如图 8(a)所示。

图 8(b)为数字散斑计算该过程模型表面总应变分布。可以看出，在离层发育位置形成局部应变突变带，突变带与光纤相交位置与图 8(a)中应变峰值位置对应，表明此位置上方存在坚硬岩层，不同强度岩层变形不协调引起离层导致应变突变。对比模型实物图，离层上方为中粒砂岩，平均厚度为 35.4 m，平均抗压强度 55.0 MPa，形成 2#煤与 1#煤层间关键层结构。DIC 测量应变绝对值与光纤监测不在同一数量级，远大于光纤监测应变。分析主要原因为：(1) DIC 监测表面应变，光纤监测内部应变，监测对象不一致。表面材料移动自由度远大于模型内部，因此造成差异。(2) 光纤受自身属性限制，其监测应变范围为-3%~4%，超出范围光纤传感失效。而摄影测量不受任何限制。(3) 测量原理不同。光纤通过检测其自身频率漂移反映被测物体变形，数字散斑追踪模型图像划分的若干子集内像素点的移动检测表面变形。

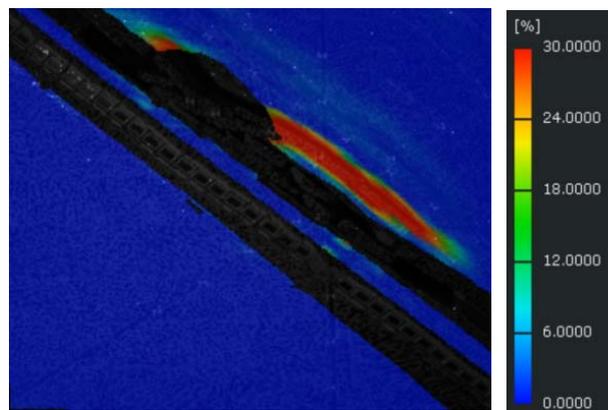
工作面倾向长度为 162 m 时，下位离层裂隙逐渐压实闭合，在 1#煤层上方顶板发育新离层裂隙，裂隙发育长度 58.16 m，最大张开度 0.89 m，将新发

育裂隙命名为上位离层裂隙。此过程光纤检测应变分布如图 8(c)所示。推进 156 m 时，应变峰值点高度 610 mm，峰值应变 5 315 $\mu\epsilon$ ，对比模型实物照片，峰值点位置与下位离层与垂直光纤交点位置吻合，表明此应变峰值由下位离层张开引起。推进 162 m 时，应变峰值高度 790 mm，峰值大小 6 145 $\mu\epsilon$ ，应变值增加了 830 $\mu\epsilon$ ，峰值点位置大致位于上位离层与垂直光纤交点处，此时，下位离层对应峰值应变已明显回落。分布式光纤监测到离层发育、扩展、闭合、重生等过程，上位离层以上顶板在随后的推采过程未发生较大变动，上位离层发育长度随工作面继续推进逐渐扩展，表明上位离层上方粗粒砂岩构成模型主关键层。

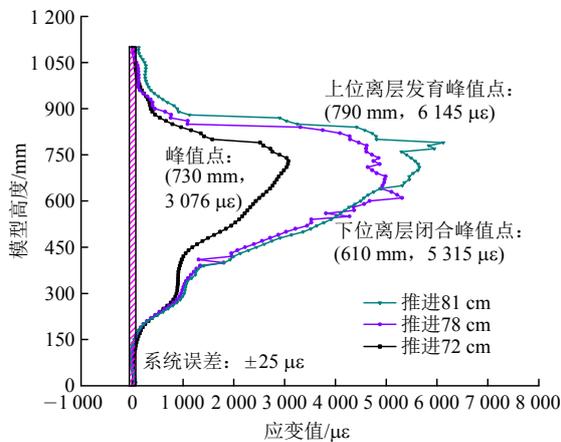
图 8(d)为此过程 DIC 检测模型表面应变分布，相比之前(见图 8(b))，下位离层应变突变带明显降低，在其上方形成 2 个新的突变带，上部突变带应变值远大于中部突变带。其中，上部突变带即为上述推进 162 m 时产生的上位离层，位置与光纤检测应变峰值对应。中部突变带位置肉眼无法分辨存在离层裂隙。三维数字散斑技术可用于识别采动引起覆岩离层裂隙发育过程。



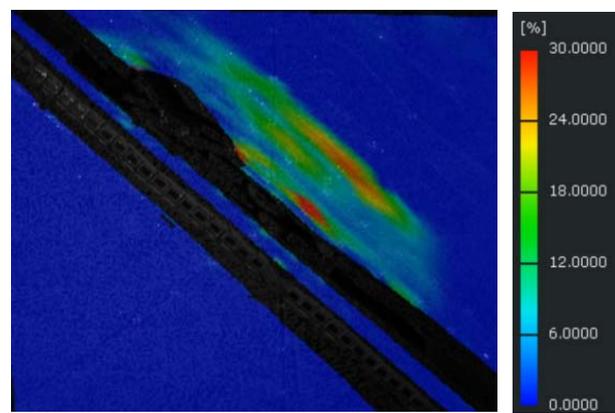
(a) BOTDA 测下位离层张开过程



(b) DIC 测下位离层张开过程



(c) BOTDA 测下位离层闭合上位离层张开过程



(d) DIC 测下位离层闭合上位离层张开过程

图 8 BOTDA 与 DIC 监测顶板离层过程

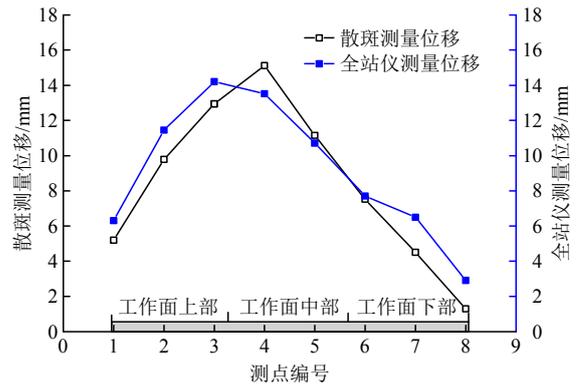
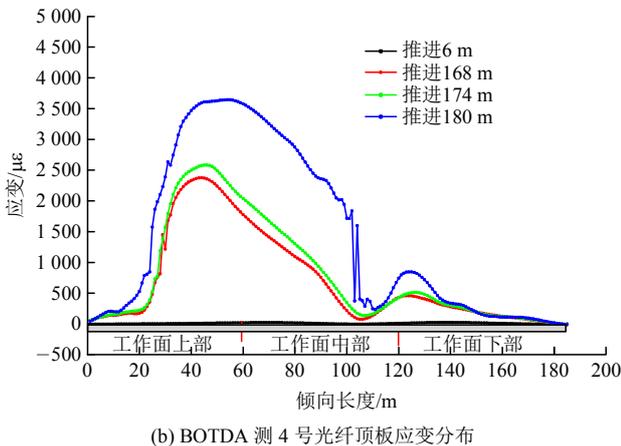
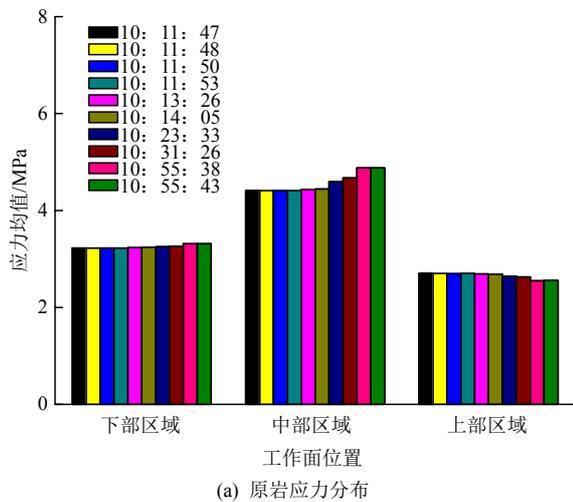
Fig.8 Abscission layer process of roof monitored by BOTDA and DIC

分布式光纤的优势是可以实现岩体内部应变分布式测量，数字散斑优势是可以实现非接触式岩体表面应变整场测量，2 种方法可配合用于分析采动覆岩离层裂隙发育过程。当岩体从连续变形发展为裂隙、离层张开等非连续大变形过程中，光纤检测应变会出现超过 $2\ 000\ \mu\epsilon$ 的阶跃变化，而 DIC 会在岩体离层裂隙张开前形成应变局部化突变带。

5.4 顶板非对称变形规律

为了分析高位基本顶受大倾角煤层开采扰动规律，在 1#煤层上方粗砂岩中布置与煤层倾向平行的 4 号传感光纤及 3 号全站仪测线，其监测结果如图 9 所示。其中，图 9(a)为底板压力传感器测工作面不同区域底板应力状态，大倾角工作面中部区域上覆岩层原岩应力最高、下部区域次之、上部区域最小，区别于近水平煤层原岩应力分布，大倾角工作面原岩应力存在非均衡分布特征。

图 9(b)为 4 号光纤测得该层位岩体内部应变分布随工作面长度变化，横坐标为工作面倾向长度，其中，0~60 m 为工作面上部区域，60~120 m 为工作面中部区域，120~180 m 为工作面下部区域。从图中应变曲线分布可以看出，工作面中上部对应高



(c) 全站仪与 DIC 测 3 号测线顶板垂直位移

图 9 BOTDA、全站仪及 DIC 监测顶板非对称变形过程
Fig.9 Asymmetric roof deformation monitored by BOTDA, total station and DIC

位基本顶内部应变远大于工作面下部，应变峰值出现在中部偏上位置，峰值应变为 $3\ 613\ \mu\epsilon$ ，下部区域应变峰值仅为 $816\ \mu\epsilon$ ，峰值位置靠近下部区域与中部分界处。由节 2.2 顶板受力分析可知，大倾角煤层开采顶板受非对称载荷作用，中上部顶板弯矩和剪力大于下部顶板。且矸石非均匀充填造成采空区下部压实，上部空顶。综合因素导致顶板出现中上部强于下部的非对称变形特征。图 9(c)为全站仪与数字散斑测量相同位置岩层位移量。位移分布规律与应变分布基本一致，中上部位移量大于下部，峰值位移位于中部偏上位置，整个位移分布曲线呈现明显非对称状，验证了理论分析与光纤传感检测的正确性。此外，DIC 技术测量模型表面位移与全站仪结果非常接近，且具有高测量精度、大面积整场监测、操作简单等优势，该技术可成为同类型试验传统测量手段的替代方法。

6 结 论

本文通过理论分析、力学建模、物理相似模拟试验等方法，综合分析了大倾角煤层开采顶板活动规律，得到以下结论：

(1) 传感光纤可感知岩体内部微弱变形。检测应变从单调递增发展为递减的临界点即为顶板垮落，垮落前瞬间应变达到极大值，应力释放至最小值时达到稳定。此后，随工作面推进又重新单调递增，循环该过程形成沿倾向的周期性矿压显现。

(2) 分布式光纤优势为可实现岩体内部应变分布式测量，数字散斑优势为可实现非接触式岩体表面应变整场测量，2 种方法可配合用于分析采动覆岩离层裂隙发育过程。光纤传感表现为应变值突变，

出现超过 2 000 $\mu\epsilon$ 阶跃式跳增, 数字散斑表现为离层位置形成应变局部化突变带。

(3) 工作面中上部对应基本顶内部应变远大于工作面下部, 应变峰值出现在中部偏上位置, 峰值应变为 3 613 $\mu\epsilon$, 下部区域应变峰值仅为 816 $\mu\epsilon$ 。全站仪与 DIC 监测同层位岩体位移亦表现此规律。表明大倾角煤层开采顶板变形具有非对称性, 中上部变形程度大于下部, 验证了理论分析结论。本文研究成果对于将光纤传感、数字摄影测量等先进技术用于岩土体结构变形破坏监测具有借鉴意义。

参考文献(References):

- [1] 伍永平. 大倾角煤层开采“R-S-F”系统动力学控制基础研究[博士学位论文][D]. 西安: 西安科技大学, 2003.(WU Yongping. Study on dynamics controlling basis of system “R-S-F” in steeply dipping seam mining[Ph. D. Thesis][D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2003.(in Chinese))
- [2] 伍永平. 大倾角煤层开采“顶板-支护-底板”系统的动力学方程[J]. 煤炭学报, 2005, 30(6): 685 - 689.(WU Yongping. Dynamic equation of system “roof(R)-support(S)-floor(F)” in steeply dipping seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(6): 685 - 689.(in Chinese))
- [3] 王金安, 张基伟, 高小明. 大倾角厚煤层长壁综放开采基本顶破断模式及演化过程(I)——初次破断[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1 353 - 1 360.(WANG Jinan, ZHANG Jiwei, GAO Xiaoming. Fracture mode and evolution of main roof stratum above longwall fully mechanized top coal caving in steeply inclined thick coal seam(I)——initial fracture[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1 353 - 1 360.(in Chinese))
- [4] 伍永平, 解盘石, 任世广. 大倾角煤层开采围岩空间非对称结构特征分析[J]. 煤炭学报, 2010, 35(2): 182 - 184.(WU Yongping, XIE Panshi, REN Shiguang. Analysis of asymmetric structure around coal face of steeply dipping seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 182 - 184.(in Chinese))
- [5] 解盘石, 伍永平, 王红伟, 等. 大倾角煤层长壁采场倾斜砌体结构与支架稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1 275 - 1 280.(XIE Panshi, WU Yongping, WANG Hongwei. Stability analysis of incline masonry structure and support around longwall mining face area in steeply dipping seam[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1 275 - 1 280.(in Chinese))
- [6] 范志忠, 毛德兵, 徐刚, 等. 大倾角大采高综采面倾向长度尺度效应分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(3): 581 - 585.(FAN Zhizhong, MAO Debing, XU Gang, et al. Analysis on the scale effect in the fully mechanized mining panel width with large mining height and dip angle[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 581 - 585.(in Chinese))
- [7] 罗生虎, 伍永平, 刘孔智, 等. 大倾角大采高综采工作面煤壁非对称受载失稳特征[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1 829 - 1 836.(LUO Shenghu, WU Yongping, LIU Kongzhi, et al. Asymmetric load and instability characteristics of coal wall at large mining height fully-mechanized face in steeply dipping seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1 829 - 1 836.(in Chinese))
- [8] 杨科, 池小楼, 刘帅. 大倾角煤层综采工作面液压支架失稳机理与控制[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1 821 - 1 828.(YANG Ke, CHI Xiaolou, LIU Shuai. Instability mechanism and control of hydraulic support in fully mechanized longwall mining with large dip[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1 821 - 1 828.(in Chinese))
- [9] 王红伟, 伍永平, 曹沛沛, 等. 大倾角煤层开采大型三维可加载相似模拟试验[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1 505 - 1 511.(WANG Hongwei, WU Yongping, CAO Peipei, et al. Large scale loadable 3D-simulation tests on mining steeply dipping seam[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1 505 - 1 511.(in Chinese))
- [10] 王红伟, 伍永平, 解盘石, 等. 大倾角煤层长壁大采高工作面煤壁稳定性的采厚效应[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, (1): 64 - 70.(WANG Hongwei, WU Yongping, XIE Panshi, et al. Coal rib stability effect of mining-thickness with large mining height of working face in steeply inclined seams[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2018, (1): 64 - 70.(in Chinese))
- [11] CHAI J, LIU Q, LIU J, et al. Optical fiber sensors based on novel polyimide for humidity monitoring of building materials[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 41: 40 - 47.
- [12] 柴敬, 孙亚运, 钱云云, 等. 基于FBG-BOTDA联合感测的岩层运动试验研究[J]. 西安科技大学学报, 2016, 36(1): 1 - 7.(CHAI Jing, SUN Yayun, QIAN Yunyun, et al. Strata movement testing based on FBG-BOTDA combined sensing technology in similar model[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2016, 36(1): 1 - 7.(in Chinese))
- [13] 柴敬, 王正帅, 袁强, 等. BOTDA在岩层移动相似材料模拟试验中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 1 - 4.(CHAI Jing, WANG Zhengshuai, YUAN Qiang, et al. Application of Brillouin optical time domain analysis in strata movement similar material simulation experiment[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1): 1 - 4.(in Chinese))
- [14] 钱振东, 黄卫, 关永胜, 等. BOTDA在沥青混凝土铺装层裂缝监测中的应用[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, 38(5): 799 - 803.(QIAN Zhendong, HUANG Wei, GUAN Yongsheng, et al. Application of BOTDA on cracking monitoring for asphalt concrete pavement[J]. Journal of Southeast University: Natural Science, 2008, 38(5): 799 - 803.(in Chinese))
- [15] 江宏. PPP-BOTDA分布式光纤传感技术及其在试桩中应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3 190 - 3 195.(JIANG Hong. PPP-BOTDA distributed fiber optic sensing techniques and its application to pile tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 3 190 - 3 195.(in Chinese))
- [16] 朴春德, 施斌, 魏广庆, 等. 采动覆岩变形BOTDA分布式测量及离层分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(3): 376 - 381.(PIAO Chunde, SHI Bin, WEI Guangqing, et al. BOTDA distributed measurement and analysis of mining overburden separation[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32(3): 376 - 381.(in Chinese))