

采场覆岩变形分布式光纤测量研究

王正帅^{1,2},柴 敬^{1,3},黄旭超²,袁 强¹

(1. 西安科技大学 能源学院,陕西 西安 710054;2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司,重庆 400037;

3. 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室,陕西 西安 710054)

摘要:为了研究分布式光纤传感技术在采场相似材料模拟试验检测中的适用性,将BOTDA和PPP-BOTDA两种分布式光纤传感技术应用于采场相似材料模拟试验覆岩移动变形的测量。在模型内水平埋设2根传感光纤用于检测岩层变形,试验分2个阶段进行,分别采用不同的分布式光纤传感技术测量岩层移动变形,并将二者的测量结果与岩层移动状态、百分表、全站仪、岩层垮落宽度进行了对比分析。试验表明,分布式光纤传感技术能够实现采场相似材料模拟试验的分布式测量,其结果能和岩层移动状态、百分表、全站仪良好对应,岩层垮落宽度测量准确;仪器空间分辨率直接影响模型试验测量结果准确性,具备高空间分辨率的PPP-BOTDA分布式光纤传感技术更适用于相似材料模拟试验的分布式测量。

关键词:相似材料模拟试验;分布式光纤传感技术;覆岩移动变形;空间分辨率

中图分类号:TD325;TP212 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2017)10-0196-07

Research on overlying strata deformation based on distributed optical fiber sensing measure

WANG Zhengshuai^{1,2}, CHAI Jing^{1,3}, HUANG Xuchao², YUAN Qiang¹

(1. School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Chongqing Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Chongqing 400037, China;

3. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention of Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to study the applicability of distributed optical fiber sensing technology in similar material model experiment detection, BOTDA and PPP-BOTDA distributed optical fiber sensing technology are applied to measure overlying strata deformation of similar material model. Two sensing fibers are embedded horizontally in model to detect overburden deformation. The test is carried out in two stages, and two kinds of distributed optical fiber sensing technology are used to measure deformation of rock strata, and measured results are contrasted with overlying strata movement status, dial indicator, total station and rock collapse width. The results showed that distributed optical fiber sensing technology achieved distributed measurement of similar material simulation experiment, optical fiber measurement results and overlying strata movement status, dial indicator, total station measurement results had good corresponding relationship, measuring rock collapse width was accurate. The spatial resolution directly influences accuracy of the model test results; PPP-BOTDA distributed optical fiber sensing technology with high spatial resolution is more suitable for the distributed measurement of similar material model experiment.

Key words: similar material model experiment; distributed optical fiber sensing technology; overlying strata deformation; spatial resolution

0 引言

相似材料模拟试验是一种从物理试验、力学分

析、模型测试直到指导工程实践的试验性研究方法^[1-2],其广泛应用于采矿、岩土、冶金、水利、石油、建筑、机械、地质、爆破和地下工程等行业,是自然科

收稿日期:2017-05-05;责任编辑:杨正凯 DOI:10.13199/j.cnki.est.2017.10.033

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41027002;51174280);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20126121110003)

作者简介:王正帅(1988—),男,甘肃酒泉人,工程师,硕士。Tel:18290885927,E-mail:jt0112@126.com

引用格式:王正帅,柴 敬,黄旭超,等.采场覆岩变形分布式光纤测量研究[J].煤炭科学技术,2017,45(10):196-202.

WANG Zhengshuai, CHAI Jing, HUANG Xuchao, et al. Research on overlying strata deformation based on distributed optical fiber sensing [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(10): 196-202.

学、工程技术的一种主流研究手段^[3-7]。对12种学术期刊发表的621篇相似材料模拟试验论文统计分析发现,相似材料模拟试验发展至今,其测试方法仍然主要依靠传统的以测点为基本单元的点式测量方法,相似材料模拟试验测量手段相对滞后^[8]。柴敬等^[9]2004年采用光时域反射仪技术(OTDR)测量岩梁变形,由于其空间分辨率低,需借助套管才能实现宏观变形测量;2007年研究开发了光纤光栅分布式测量方法,使得测量方法逐渐向准分布式测量转变^[10];2014年采用布里渊散射时域分析技术(BOTDA)探索了采场模型试验的分布式测量,得出光纤能够测量沿线岩层的移动变形情况^[11]。分布式光纤传感技术不仅具有一般光纤传感器的优点,而且能在沿光纤路径上同时得到被测量场在时间和空间上的连续分布信息,光纤上的每一段既是传感单元又是传输介质,克服了准分布式光纤传感器中光纤只“传”不“感”的不足^[12],但受到其原理限制,空间分辨率和精度未能再大幅提高,目前空间分辨率能达到分米级。渥太华大学Bao Xiaoyi^[13]基于BOTDA技术开发了脉冲预泵浦布里渊散射时域分析技术(PPP-BOTDA),具有更高空间分辨率(厘米级)和精度^[14],国内已有学者将其应用到试桩和边坡等工程的检测中^[15-16]。光纤传感技术作为一种新兴的测试手段,在模型试验应用中需要更多探究^[17]。笔者将BOTDA和PPP-BOTDA两种分布式光纤传感技术应用于采场相似材料模拟试验覆岩移动变形的检测,将两种传感技术的测量结果与岩层移动状态、百分表、全站仪、岩层垮落宽度进行了对比分析,研究了两种光纤传感技术在采场相似材料模拟试验检测中的适用性。

1 布里渊分布式光纤传感技术

1.1 BOTDA分布式光纤传感技术

基于布里渊光时域分析技术(Brillouin Optical Time Domain Analysis, BOTDA)的传感器典型结构如图1所示。

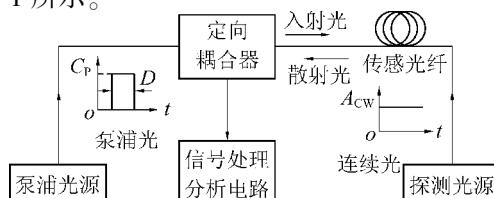


图1 BOTDA分布式光纤传感系统

Fig.1 BOTDA distributed optical fiber sensing system

由于布里渊频移与温度、应变存在线性关系,因此,对两光源的频率进行连续调谐的同时,通过检测从光纤一端耦合出来的连续光的功率,就可以确定光纤各小段区域上的布里渊频移,从而得到温度、应变信息^[18-19],布里渊散射光信号强,易于检测,目前其空间分辨率能达到20 cm。

1.2 PPP-BOTDA分布式光纤传感技术

为了大幅提高空间分辨率而又能保持良好的布里渊频谱形态,克服BOTDA的一些不足,Bao Xiaoyi开发了脉冲预泵浦布里渊光时域分析技术(Pulse-PrePump Brillouin Optical Time Domain Analysis, PPP-BOTDA)^[13-14],典型结构如图2所示。二者的主要区别在于入射光形态不同,后者在脉冲光射入之前,加入一束预泵浦光激发声子,而呈现为阶跃脉冲形态,这样就满足了激发声子的时间要求,保证了良好的布里渊增益和频谱形态,同时具有了高空间分辨率和高精度,目前其空间分辨率提高了一个数量级,能够达到2 cm,精度±7.5 με。

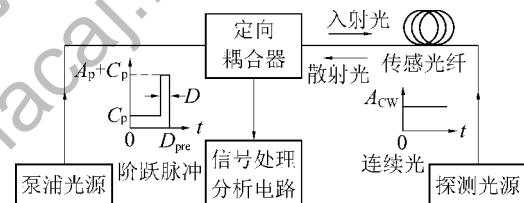


图2 PPP-BOTDA分布式光纤传感系统

Fig.2 PPP-BOTDA distributed optical fiber sensing system

阶跃脉冲的描述公式为

$$A_p(t) = \begin{cases} A_p + C_p & (D_{pre} - D < t \leq D_{pre}) \\ C_p & (0 \leq t \leq D_{pre} - D) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (1)$$

式中:D为泵浦脉冲光持续时间;D_{pre}为阶跃脉冲光持续的时间;C_p为预泵浦光功率;A_p+C_p为阶跃脉冲光功率。

1.3 布里渊分布式光纤传感

由于布里渊频移与温度、应变存在线性关系,因此,光纤在应变和温度共同作用下,布里渊频移与应变、温度的关系可表示为

$$\Delta v_{B1} = C_e \Delta \varepsilon + C_{T1} \Delta T \quad (2)$$

$$\Delta v_{B2} = C_{T2} \Delta T \quad (3)$$

式中:Δv_{B1}、Δv_{B2}分别为光纤布里渊频移的变化量;C_{T1}、C_{T2}为分别两根光纤的布里渊温度系数;C_e为温度不变时光纤的应变系数;Δε、ΔT分别为应变和温度的变化量。

联立式(2)和式(3),得到应变的变化量为

$$\Delta\varepsilon = [\Delta v_{B_1} - (C_{T_1}/C_{T_2})\Delta v_{B_2}]/C_e \quad (4)$$

将光纤布设于被测物体上(内)时,留设一段不受力光纤作为温度补偿使用。从式(4)可看出,在已知光纤布里渊传感特性和基体材料热膨胀系数的情况下,只要测得测量光纤和温度补偿光纤布里渊频移的变化值,就可以得到剔除温度影响的准确应变值,同时由式(3)也可以得到准确的温度值。如果两根光纤的布里渊传感特性一致,基体材料也一样,即光纤的布里渊温度系数一样,式(4)中的 $C_{T_1}/C_{T_2}=1$,则应变的变化量为

$$\Delta\varepsilon = [\Delta v_{B_1} - \Delta v_{B_2}]/C_e \quad (5)$$

这种不受力光纤温度补偿方法为实际操作带来很大的便利,只要测得两根光纤的布里渊频移变化值,就可以直接消除温度对应变测量的影响^[20]。

一般情况下,布里渊散射对应变的敏感程度要远高于温度,研究发现温度变化在 5 ℃以内时,温度引起的布里渊频移即可忽略。本次试验在室内进行,经测量温度变化在 2 ℃以内,因此忽略温度对测量结果的影响,即认为 $C_{T_1}/C_{T_2}=1$ 。

2 相似材料模拟试验分布式光纤测试

2.1 模型参数

选择在 3 m 平面应力模型架上进行试验,模型尺寸为 3 000 mm×200 mm×1 090 mm(长×宽×高),煤层厚度 50 mm,几何相似比 100,容重相似比 1.6,应力相似比 160。用河沙、粉煤灰、石膏和碳酸钙作相似材料,按配比混合加水搅拌均匀后分层装入模型架夯实,分层材料用 8~20 目(830~2 360 μm)的云母粉。

2.2 测试系统

试验中采用基于 BOTDA 和 PPP-BOTDA 的两种分布式光纤测量仪、百分表、全站仪、底板压力传感器等测试手段对模型岩层的应变及位移进行测试。测点、测线布置如图 3 所示。

试验所用的 BOTDA 分布式光纤测量仪为 OZ Optics 公司的 DSTS,空间分辨率可达 50 cm,根据光纤应变标定得出其应变系数为 0.052 8 MHz/με。PPP-BOTDA 分布式光纤测量仪为 Neubrex 公司的 NBX-6055,空间分辨率可达 5 cm,应变测试精度可达 ±7.5 με,应变系数为 0.0497 MHz/με。选用普通紧套单模光纤作为传感光纤,从下到上分别编号为 1 号传感光纤(直径 1.2 mm)和 2 号传感光纤(直径 0.9 mm),分别位于 1 号层位和 2 号层位,也同时对

应两条全站仪测线 A 和 B。两根传感光纤右侧端头用法兰连接,使其成为一条光回路,左侧两端头接入分布式光纤测量仪。

在模型开挖前记录分布式光纤测量仪、百分表、全站仪和底板压力传感器等测量仪器初始值。模型开挖后,每开挖一次分别记录一次数据。

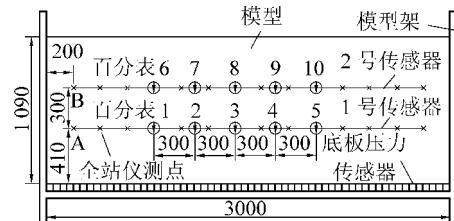


图 3 测点和测线布置

Fig. 3 Layout of measuring points and lines

2.3 试验过程

在距模型左侧边界 25 cm 处掘出开切眼,高度 5 cm,宽度 4 cm。工作面按 4 cm 的循环进尺向前推进,开采高度 5 cm。试验共分为 2 个阶段,第 1 阶段用 DSTS 光纤测量仪进行测量,空间分辨率选择 50 cm,工作面共推进 144 cm,经历了初次来压和七次周期来压。第 2 阶段从工作面推进到 144 cm 开始用 NBX-6055 光纤测量仪进行测量,空间分辨率选择 5 cm,工作面共推进 104 cm,经历了 7 次周期来压。实验过程及岩层垮落形态如图 4 所示,并在图中标出了光纤所在层位岩层的垮落宽度。

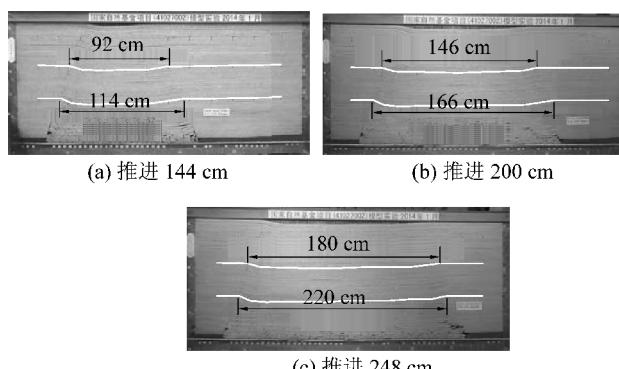


图 4 模型试验岩层垮落过程

Fig. 4 Model test rock collapse process

3 试验结果分析

3.1 覆岩移动状态分析

工作面推进 144 cm,基本顶第 7 次周期来压,1 号层位岩层随基本顶破断随即破断,垮落宽度 114 cm,2 号层位岩层垮落宽度为 92 cm,工作面前方支

承压力影响范围 45 cm, 破断后的岩块与未破断的岩层发生铰接, 形成了砌体梁结构, 在破断位置形成明显的张拉裂隙, 试验现象与光纤测试结果如图 5 所示。

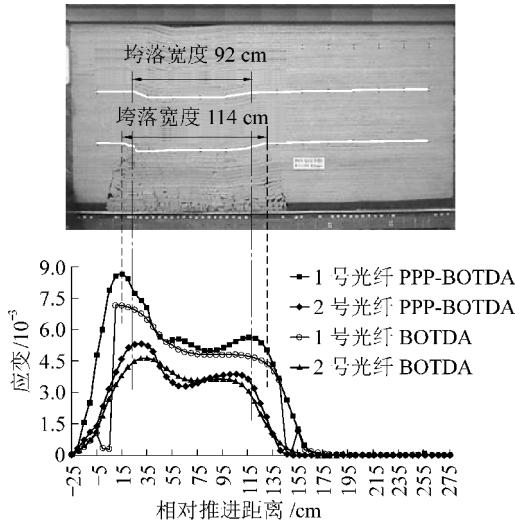


图 5 第 7 次周期来压时试验现象与光纤测试结果

Fig. 5 Experimental phenomena and optical fiber test results of 7th cycle pressure

图 5 中 PPP-BOTDA 测量曲线左侧、右侧峰值与岩层破断位置相对应, 用峰值间距离表示测量到的岩层垮落宽度。1 号光纤沿线 170 cm 范围内应变明显增大且都处于受拉状态, 左右峰值应变分别为 8.606×10^{-3} 和 5.682×10^{-3} , 两峰值间距离 105 cm, 岩层破断位置前方 35 cm 范围为应力增高区; 2 号光纤沿线 150 cm 范围内应变明显增大且都处于受拉状态, 左右峰值应变分别为 5.314×10^{-3} 和 3.892×10^{-3} , 两峰值间距离 80 cm, 岩层破断位置前方 25 cm 范围为应力增高区。BOTDA 测量曲线中 1 号光纤测量曲线连续性较差, 岩层破断位置处变化突然, 出现左右两个断点, 断点间距离 130 cm; 2 号光纤测量曲线未出现断点, 峰值也不明显, 不容易判断出岩层垮落宽度; 很难确定岩层破断位置前方应力增高区的范围。从整个 4 条曲线来看, 1 号光纤应变值明显比 2 号光纤大, 表明 1 号层位岩层移动变形量要明显大于 2 号层位, 且峰值和断点处岩层移动变形最为剧烈; 从 PPP-BOTDA 的两条测试曲线看, 1 号光纤测量到的应变发生范围也较 2 号大, 表明 1 号层位岩层移动变形范围要比 2 号层位大。

3.2 分布式光纤与百分表测量结果对比

工作面从开切眼推进到 144 cm 过程中 2 号百

分表所在位置处岩层下沉量与该位置处光纤测得的应变如图 6 所示。从工作面推进 52 cm 开始, 岩层出现微小下沉, 推进至 104 cm 时下沉量陡然增加, 此后随着周期来压逐渐增加, 在周期来压时均出现明显下沉。从应变曲线看, 工作面推进到 64 cm 第一次周期来压时, 应变发生变化, 推进到 86 cm 时, 应变急剧增加, 后又减小, 推进到 106 cm、118 cm、130 cm 时应变均出现明显增加。从图 6 来看, 百分表下沉量的 7 次增加变化中, 应变曲线中有 3 次能够与其完全对应, 其余四次能够基本对应。

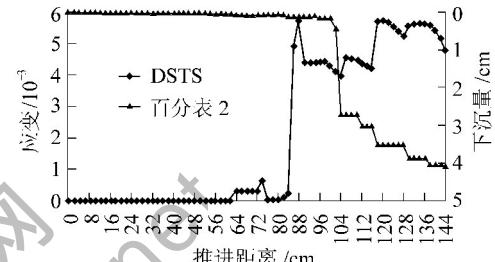


图 6 2号百分表处的应变与岩层下沉量

Fig. 6 Strain and rock subsidence of the location of 2th dial indicator

工作面从 144 cm 推进到 248 cm 过程中 10 号百分表所在位置处岩层下沉量与该位置处测得的应变曲线如图 7 所示。从工作面推进 168 cm 开始岩层下沉量缓慢增加, 推进至 184 cm 时略有增加, 推进至 200、216、228 cm 时都有明显增加, 此后变化缓慢。从应变曲线可以看出, 从工作面推进到 168 cm 开始, 应变也渐渐增加, 推进到 184、200、216、228 cm 时, 应变均突然增加, 此后变化幅度不大。从图 7 来看, 百分表的 5 次下沉量明显增加变化中, 应变曲线都能够与其完全对应。

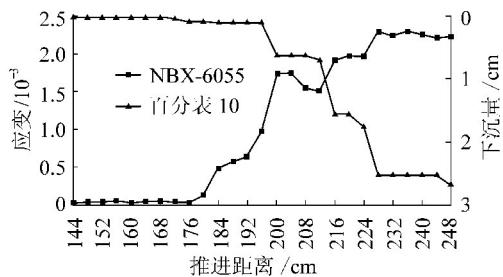


图 7 10号百分表处的应变与岩层下沉量

Fig. 7 Strain and rock subsidence of the location of 10th dial indicator

3.3 分布式光纤与全站仪测量结果对比

从试验过程中的观察和测量记录来看, 1 号层

位下沉垮落后,垮落范围随着工作面推进方向向前延伸,而 1 号层位的左侧破断位置再未变化。工作面从开切眼推进到 144 cm 过程中 1 号光纤 DSTS 和全站仪 A 测线的测量结果如图 8 所示。从全站仪测量曲线来看,1 号层位在工作面后方 88 cm 处下沉量最大,其值为 4.0 cm。从光纤测量的应变曲线看,八次来压过程中,1 号层位的左侧破断位置有两次与其他测量结果不一致,偏差 5 cm。整体来看,应变曲线基本能反映岩层的移动变形情况,能基本反映出岩层的移动变形范围,但其连续性较差,岩层破断位置处变化突然,对破断位置前方岩层的小变形识别不灵敏,有效信息含量不足,无法反映破断位置前方的应力增高区域情况。

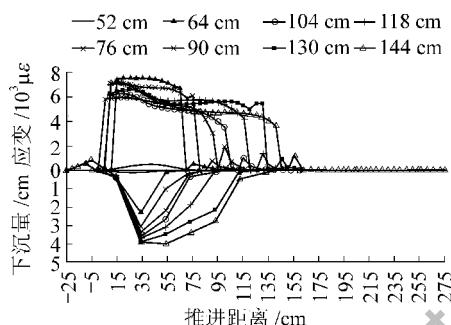


图 8 DSTS 和全站仪 A 测线的测量结果

Fig. 8 Measurement results of DSTS and total station A measuring line

工作面从 144 cm 推进到 248 cm 过程 1 号光纤 PPP-BOTDA 和全站仪 A 测线的测量结果如图 9 所示。光纤测量的应变曲线都呈两头凸起中间下凹的“马鞍”型,存在左右两个峰值,都位于工作面后方,“马鞍”的凹部位于采空区中部。

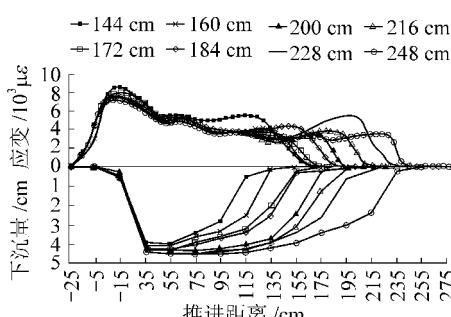


图 9 PPP-BOTDA 和全站仪 A 测线的测量结果

Fig. 9 Measurement results of PPP-BOTDA and total station A measuring line

从全站仪测量曲线来看,1 号层位下沉量最大为 4.5 cm。从光纤测量的应变曲线看,每次开挖后,

1 号层位的左侧破断位置基本没变化,相对固定。光纤测量曲线连续性好,曲线的起伏变化细节反映了光纤沿线不同位置处岩层的移动变形情况,曲线的细节表现明显优于全站仪。随着工作面的推进,右侧破断位置逐渐前移,岩层移动变形范围均比全站仪大,说明埋于岩层内部的光纤较全站仪更易检测到岩层内部的微小变形,能够反映破断位置前方的应力增高范围。

3.4 分布式光纤测量岩层垮落宽度的修正

通过对光纤测量结果与覆岩移动状态的分析发现,DSTS 所测得的岩层垮落宽度要比实际值大,NBX-6055 所测得的岩层垮落宽度要比实际值略小。为了让光纤测量的数据能够准确的反映岩层垮落宽度,需要对其进行必要的修正。通过对比例修正法和差值修正法的比较发现,差值修正法具有较好的效果。通过求实际值与测量值之差的平均数得到修正常数,测量值与修正常数之和即为修正结果(修正值),修正后的结果见表 1。

由表 1 可知,2 种分布式光纤传感技术都能够检测到光纤所在层位岩层的垮落宽度,DSTS 测量的 1 号光纤、2 号光纤修正值与实际值的最大误差出现在工作面推进到 64 cm 和 144 cm 时,分别为 10.2% 和 3.9%;NBX-6055 测量的 1 号光纤、2 号光纤最大误差出现在工作面推进到 144 cm 和 200 cm 时,分别为 3.5% 和 2.0%。由此可见,NBX-6055 测量的岩层垮落宽度误差要明显小于 DSTS,测量结果的准确性优于后者,而且光纤测量的岩层垮落宽度修正后误差能够满足试验和工程需要,差值修正法可行有效。

通过以上比较分析发现,基于 PPP-BOTDA 原理的 NBX-6055 在岩层移动状态的测量、与百分表和全站仪对比灵敏度和准确性、测量岩层垮落宽度等方面均要优于基于 BOTDA 原理的 DSTS,具备高空间分辨率的 PPP-BOTDA 分布式光纤传感技术更适用于相似材料模拟试验的分布式测量。同时说明,分布式光纤传感技术能够实现相似材料模拟试验的分布式测量,较实际工程应用,在小几何相似比的模型试验中分布式光纤测量仪的空间分辨率直接影响测试结果的准确性和测量结果中有效信息的含量;空间分辨率越高测量结果越准确,曲线细节特征表现越好,包含的有效信息越多。

表1 分布式光纤垮落宽度测量值和修正后结果
Table 1 Rock collapse width with optical fiber measured and corrected results

设备	推进距离/cm	1号传感光纤				2号传感光纤			
		实际值/cm	测量值/cm	修正值/cm	误差值/cm	实际值/cm	测量值/cm	修正值/cm	误差值/cm
DSTS	52	—	—	—	—	—	—	—	—
	64	35	50	31.43	3.57	—	—	—	—
	76	46	65	46.43	-0.43	—	—	—	—
	90	58	85	61.43	-3.43	43	80	43.40	-0.40
	104	72	90	71.43	0.57	60	95	58.40	1.60
	118	84	105	86.43	-2.43	71	110	73.40	-2.40
	130	101	120	101.4	-0.43	81	120	83.40	-2.40
	144	114	130	111.4	2.57	92	125	88.40	3.60
NBX-6055	144	92	75	88.75	3.25	114	100	114.25	-0.25
	160	112	95	108.75	3.25	130	115	129.25	0.75
	172	112	100	113.75	-1.75	130	115	129.25	0.75
	184	132	120	133.75	-1.75	151	135	149.25	1.75
	200	146	135	148.75	-2.75	166	155	169.25	-3.25
	216	162	145	158.75	3.25	182	165	179.25	2.75
	228	174	160	173.75	0.25	196	185	199.25	-3.25
	248	180	170	183.75	-3.75	220	205	219.25	0.75

4 结 论

1) 分布式光纤传感技术能够实现采场相似材料模拟试验的分布式测量。PPP-BOTDA 的测量结果与百分表、全站仪测量结果有较好的一致性,当岩层发生移动变形时其测量结果能和百分表、全站仪同步变化,测量曲线细节表现较好,而且灵敏程度高。

2) 基于 PPP-BOTDA 原理的分布式光纤传感技术由于具备更高的空间分辨率更适合于相似材料模拟试验的分布式测量。

3) 采用差值法修正测量出的岩层垮落宽度可行有效;在模型试验中分布式光纤测量仪的空间分辨率直接影响测试结果的准确性和测量结果中有效信息的含量。若有条件应选择更高空间分辨率和更小采样间隔的仪器来进一步提高测量结果的准确性并改善测量曲线的细节表现,尽可能测得更多有效信息。

参考文献(References):

[1] A.M.依尔熙丁,M.B.勃洛克米来尔,钱鸣高,等.用相似材料模型的方法研究矿山压力[J].北京矿业学院学报,1958(1):28-

48.

- [2] 李鸿昌.矿山压力的相似材料模拟试验[M].徐州:中国矿业大学出版社,1988:1-2.
- [3] 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):1505-1511.
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): 1505-1511.
- [4] 许江,马天宇,彭守建,等.煤岩体水力压裂动态演化物理模拟试验研究[J].煤炭科学技术,2017,45(6):9-16.
XU Jiang, MA Tianyu, PENG Shoujian, et al. Experimental study on physical simulation experiment of hydraulic fracturing dynamic evolution in coal and rock mass [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(6): 9-16.
- [5] 刘福明,才庆祥,周伟,等.露天矿排土场边坡降水入渗规律试验研究[J].煤炭学报,2015,40(7):1534-1540.
LIU Fuming, CAI Qingxiang, ZHOU Wei, et al. Experimental study on the rainfall infiltration rule in the dump slope of surface mines [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1534-1540.
- [6] 束龙仓,范建辉,鲁程鹏,等.裂隙-管道介质泉流域水文地质模拟试验[J].吉林大学学报:地球科学版,2015,45(3):908-917.
SHU Longchang, FAN Jianhui, LU Chengpeng, et al. Hydrogeo-logical simulation test of fissure-conduit media in springs watershed. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2015, 45 (3): 908-917.
- [7] 贺凯,彭建兵,黄强兵,等.近距离平行通过地裂缝的地铁隧

- 道模拟试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 4086–4095.
- HE Kai, PENG Jianbing, HUANG Qiangbing, et al. Simulation test of metro tunnel parallel ground fissure with short distance [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 4086–4095.
- [8] 柴 敬, 袁 强, 汪志力, 等. 物理模型试验方法的应用分析 [J]. 西安科技大学学报, 2013, 33(5): 505–511.
- CHAI Jing, YUAN Qiang, WANG Zhili, et al. Application analysis of physical model simulation method [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2013, 33(5): 505–511.
- [9] 柴 敬, 魏世明, 常心坦, 等. 岩梁变形监测的分布式光纤传感技术 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 4068–4071.
- CHAI Jing, WEI Shiming, CHANG Xintan, et al. Distributed optical fiber sensor for monitoring rock deformation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(23): 4068–4071.
- [10] 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): 455–462.
- CHAI Jing, WEI Shiming. Transmission character analysis of fiber optical sensing in similar material of simulation experiments [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(4): 455–462.
- [11] 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.
- [12] 沈逸铭. 高性能布里渊光时域分析分布式传感的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 1–2.
- [13] KINZO Kishida, LI Chehsien. Pulse Pre-Pump-BOTDA technology for new generation of distributed strain measuring system [R]. Japan: IEICE, 2004: 15–20.
- [14] LI Chehsien, KENICHI Nishiguti, Miyuki Miyatake. PPP-BOTDA method to achieve 2cm spatial resolution in Brillouin distributed measuring technique [R]. Japan: IEICE, 2008: 39–44.
- [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): 3190–3195.
- JIANG Hong. PPP-BOTDA distributed fiber optic sensing techniques and its application to pile tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 3190–3195.
- [16] 俞 政, 徐景田. 光纤传感技术在边坡监测中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(5): 628–633.
- YU Zheng, XU Jingtian. Application of optical fiber sensing technology to slope monitoring [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2012, 9(5): 628–633.
- [17] 柴 敬, 袁 强, 李 穆, 等. 物理模型试验光纤传感测试方法应用进展 [J]. 工程地质学报, 2015, 23(6): 1100–1108.
- CHAI Jing, YUAN Qiang, LI Mu, et al. Application analysis on method of physical model test with optical fiber sensing technique [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(6): 1100–1108.
- [18] 王其富, 乔学光, 贾振安, 等. 布里渊散射分布式光纤传感技术的研究进展 [J]. 传感器与微系统, 2007, 27(7): 7–8.
- WANG Qifu, QIAO Xueguang, JIA Zheng'an, et al. Development of research on Brillouin scatter ing distributed optic fiber sensing technology [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2007, 27(7): 7–8.
- [19] TSUNEO Horiguchi, KAORU Shimizu, Toshio Kurashima, et al. Development of a distributed sensing technique using Brillouin Scattering [J]. Lightwave Technology, 1995, 13(7): 1296–1302.
- [20] 何建平. 全尺度光纤布里渊分布式监测技术及其在土木工程的应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 23–24.

(上接第 154 页)

- 究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2010.
- [13] 王 鹏. 韩家湾煤矿大采高开采地表移动变形规律研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2012.
- [14] 陈俊杰, 南 华, 闫伟涛, 等. 浅埋深高强度开采地表动态移动变形特征 [J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3): 158–162.
- CHEN Junjie, NAN Hua, YAN Weitao, et al. Features of surface dynamic movement and deformation caused by high intensity mining with shallow depth [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 158–162.
- [15] 李圣军. 哈拉沟煤矿高强度开采覆岩与地表破坏特征研究 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2015.
- [16] 高 超, 徐乃忠, 刘 贵, 等. 东坡矿特厚煤层综放开采地表移动

- 规律特殊性及机理分析 [J]. 煤矿开采, 2014, 19(2): 91–94.
- GAO Chao, XU Naizhong, LIU Gui, et al. Surface movement rule's particularity and mechanism of fully-mechanized caving mining extremely-thick coal-seam in Dongpo Colliery [J]. Coal Mining Technology, 2014, 19(2): 91–94.
- [17] 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.
- [18] 中华人民共和国能源部. 煤矿测量规程 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1989.
- [19] 煤炭科学科学研究院北京开采所. 煤矿地表移动与覆岩破坏规律及其应用 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1982.
- [20] 何国清, 杨 伦, 凌赓娣, 等. 矿山开采沉陷学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1991.