DOI：10.16285/j.rsm.2017.08.034

使用 BOTDR 技术进行隧道监测的光纤护套效应

侯公羽[1,2]，谢冰冰[1]，胡 涛[1]，殷姝雅[1]，韩育琛[1]

（1. 中国矿业大学（北京） 力学与建筑工程学院，北京 100083；2. 新疆工程学院 采矿工程系，新疆 乌鲁木齐 830091）

摘 要：基于 BOTDR 的布里渊应变监测技术已在岩土工程领域得到了初步的应用，但一系列的试验及工程应用表明，不同类型的光缆得到的测试结果呈现较大的差别性，原因就是光纤护套效应。以 BOTDR 的光纤应变监测技术为基础，并通过精准定位（温度刺激）、应变测量范围（漂移量）及温度测量等一系列试验，对新型应变光缆、套装光缆以及铠装光缆的工程性能进行了对比试验研究，得到了光纤护套效应对巷道监测结果的影响，甄别了适用于不同工程应用的光缆类型，并保证监测结果与实际变形及温差变化的一致性。这些研究工作初步解决了使用 BOTDR 技术进行巷道应变监测的光缆选型的问题，为基于 BOTDR 的应变监测技术的工程应用提供了理论基础。

关 键 词：隧道监测；光缆选型；护套效应；BOTDR 技术

中图分类号：TU 473.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2017)08－2441－07

Fiber sheath effect in tunneling monitoring based on BOTDR technology

HOU Gong-yu[1,2], XIE Bing-bing[1], HU Tao[1], YIN Shu-ya[1], HAN Yu-chen[1]

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China;
2. School of Mining Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Wulumuqi, Xinjiang 830091, China)

Abstract: Based on BOTDR technology, Brillouin strain monitoring technology has been applied preliminarily in the field of geotechnical engineering. However, a series of experiments and engineering applications reveal that there are large differences induced by using different types of fiber optic cables, due to the sheath effect. In this study, three kinds of cables were selected to comparably investigate the engineering performance, namely new strain sensing fiber optical cable, suit fiber optical cable and armored fiber optical cable. Based on BOTDR fiber optic strain monitoring technology, a number of experiments, including precise positioning (temperature stimulation), strain measurement range (drift) and temperature measurement, were carried out. As a result, the effect of fiber optic sheath on tunnel monitoring was obtained. Finally, a suitable fiber optic cable type was identified for different engineering applications, and monitoring results show good agreements with the actual deformation and temperature change. Therefore, this study initially solves the problem of fiber selection in tunnel monitoring technology based on BOTDR technology and further provides the theoretical basis for engineering applications.

Keywords: tunnel monitoring; fiber selection; sheath effect; BOTDR technology

1 引 言

巷道/隧道健康监测技术一直是业内专家研究的重点，为找到一种适合于巷道/隧道变形的监测技术，人们进行了大量研究工作[1−4]。但从现有监测技术来看，目前这些常用的检测和监测技术存在以下不足：①均为点式的。点式布点常常带有随意性，最危险的地方有可能被漏检，存在监测盲区。②使用寿命较低。一些检测和监测技术所用的传感器，在一些恶劣的监测环境中，耐久性差。③实时、并行和自动化监测程度不高。目前常用的检测和监测技术实际上多为检测技术而不是监测技术，且多为静态单点检测。④缺少长距离和大面积的监测技术。特大型煤矿的巷道通常数千米到数十千米长或采面

收稿日期：2016-09-21
基金项目：中央在京高校重大成果转化项目（No. ZDZH20141141301）；国家自然科学基金委员会与神华集团有限责任公司联合资助重点项目（No. U1261212，No. U1361210）。
This work was supported by the Central University Major Achievement Transformation Project in Beijing(ZDZH20141141301) and the National Natural Science Fund Committee and Shenhua Group Co., LTD. Jointly Funded Key Projects (U1261212，U1361210).
第一作者简介：侯公羽，男，1965 年生，博士，教授，主要从事岩土工程、岩石力学方面的教学与研究工作。E-mail: hgyht@126.com
通讯作者：谢冰冰，男，1991 年生，博士研究生，主要从事岩土工程、隧道健康监测方面的研究工作。E-mail: XIE817824@163.com

在几平方千米以上，对这些长距离和大面积的监测对象，传统点式的检测、监测技术和方法一般无能为力。⑤监测系统的集成化程度不高。

由于上述监测的不足，影响了人们在岩土工程灾害防治和安全生产实践中的正确判断和措施的实施，因此，亟需新的技术和方法来弥补这些不足，以满足现代煤矿安全监测的要求。近年来，光纤传感（网）监测技术，如 BOTDR（布里渊光时域反射应变/温度测量技术）、BOTDA（布里渊光时域分析应变/温度测量技术）、ROTDR（拉曼光时域反射应变/温度测量技术）、FBG（布拉格光纤光栅测量技术）等[5−7]，已相继应用于岩土与地质工程[8−9]、矿山安全监测[10]、管道监测[11]中。

分布式监测[12−16]是指利用相关的监测技术获得被测参量在空间和时间上的连续分布信息。煤矿开采的分布式监测就是在煤矿巷道工程中布设一维线形传感元件，形成一个传感监测网络，利用相关的调制解调技术，连续监测传感网络沿线的各类采矿工程的变形和温度信息，这些传感网络就像在“死”的采矿工程中植入了能感知的神经网络，采矿活动中发生的任何变形和温度变化，监测系统都能感知它们的分布和大小。这种监测方法的突出优点就是改变传统的点式监测方式，弥补点式监测的不足，可实现分布式、长距离和实时监测的目标。

岩土工程特别是巷道工程中如何实现 BOTDR 技术的应用，其研究的重点是监测机制，其关键技术是传感光纤及其在待测物上的布设方法。但选用不同的光缆类型对监测结果的影响较大，因此，光缆选型的问题同样不容忽视。不同的光缆类型的差别主要体现在光缆护套材料上，由于护套造成应变传递的差异简称为护套效应。

以 BOTDR 监测技术为基础，并通过精准定位（温度刺激）、应变测量范围（漂移量）及温度测量等一系列试验，对新型应变光缆、套装光缆以及铠装光缆的工程性能进行了对比试验研究，得到了光缆护套效应对巷道监测结果的影响，甄别了适用于不同工程的光缆类型，并保证监测结果与实际变形及温差变化的一致性。这些研究工作初步解决了使用 BOTDR 技术进行巷道应变监测的光缆选型问题与选型方案，为 BOTDR 技术在巷道应变监测中的应用和推广提供了有效的光缆性能测试方法。

2 基于 BOTDR 的试验系统建立

2.1 仪器选择

目前基于布里渊散射的光纤应变监测传感技术主要有 2 种：布里渊光时域反射仪（BOTDR）和布里渊光时域分析技术（BOTDA）。考虑到巷道/隧道等地下工程结构的复杂地质条件，监测困难，选择仪器一定要注重它的实用性及可行性。必须满足：操作简单、监测方便、数据准确等特点，仪器需要在复杂环境下也能正常运行，不受外界干扰。同时，光缆的铺设方案也要切实可行，避免复杂线路，避免除了监测构件外其他外部因素的影响。

由于 BOTDA 监测技术需要形成光纤回路，增加了布设和维护的成本和难度，故选用布里渊光时域反射仪（BOTDR）作为巷道/隧道健康监测的首选仪器。此次试验选用的是国产 AV6419 型号 BOTDR 光纤应变分布式测试仪，如图 1 所示。它主要用于测量光纤、光缆应力，温度的分布情况。

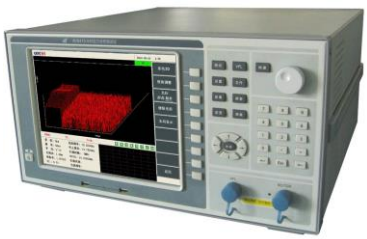


图 1 AV6419 光纤应变分布测试仪

Fig.1 AV6419 optical fiber strain distribution tester

本次试验中仪器测试参数设定为：脉宽为 10 ns、折射率为 1.468、仪器的起始频率和终止频率为 10.5～11.5 GHz（理论上此范围可以测出 1 000 με 的大应变量而不使布里渊频移溢出）、光纤中心频率 $fB(0)=10.839$ GHz、频率间隔为 5 MHz，为了使数据更精确，采用了仪器的最小采样间隔为 0.05 m。

2.2 试验光缆类型

（1）新型紧套应变光缆（见图 2），是一种新研发的光缆，是在普通光缆基础上发展而来的专门针对应变试验研究出来的。它具有良好的延展性，解决了光纤和护套之间相对滑移的问题。能更准确地反映工程中的真实变形。

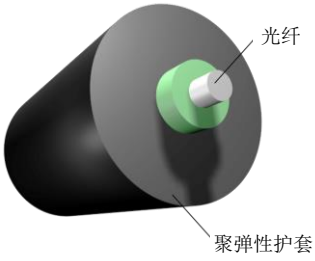


图 2 新型紧套应变感测光缆

Fig.2 The new set of fiber optical cable strain sensor

（2）铠装光缆（见图 3），是在套装光缆外部加上金属护套，这样可大大增加光纤的抗压、抗拉、抗腐蚀、抗辐射等性能。常用于尾纤和跳线、光通信设备机房、光配线架的光连接、光仪器的光连接，光缆测温等。由于铠装光缆大大改善了光纤的物理、化学、机械性能，因此，在大范围的、环境复杂的工程监测（应变量测）中得到广泛应用[17]。

（3）套装光缆与铠装光缆的差别在于少了光纤外部的不锈钢管，优点是对于应变的反应更加灵敏，更能反应真实变形，缺点是强度低，在复杂恶劣条件中容易被损坏。套装与铠装光缆都存在内部光纤与外部保护层易滑移的缺点。详见表 1。

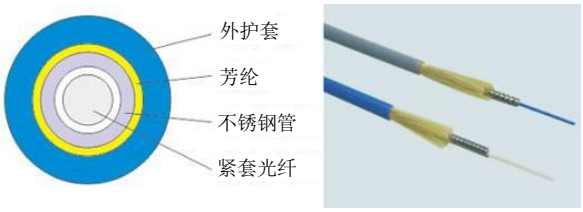


图 3　单芯柔性铠装光缆示意图
Fig.3　Flexible single-core steel pipe armored fiber

表 1　光缆参数对比
Table 1　Fiber optic cable parameter comparison

光缆	光纤类型	纤芯数量 /个	光缆直径 / mm	光缆重量 / (kg/km)
套装光缆	单模	1	3.0	16
铠装光缆	单模	1	4.0	28
应变光缆	单模	1	0.9	2

2.3　试验室布置

由于地下工程健康监测的特殊性，对光缆的铺设有着严格的要求，光缆必须满足长距离、长时间的数据采集。光缆如何布置在要监测的结构物上，关系着之后监测数值的准确性和有效性。工程铺设的方法根据工程现场的条件的不同而略有差异，但根据其原理、工艺可将其分为目前常用的 2 种，即植入式和粘贴式。

本次试验的应变监测光缆采用了粘贴式和夹具进行固定，详见图 4。为了简化试验过程，忽略了结构物的变形影响，直接对光缆进行变形模拟，这使其固定方式与工程实际略有不同，但原理是一致的。粘贴时并不是把光缆粘在结构上，而是固定在某点上，夹具式固定也是直接夹住光缆。

试验仪器和材料：AV6419 光纤应变分布测试仪、新型紧套应变光缆、套装光缆、铠装光缆、模拟试验台、夹具、刻度尺、胶结剂等。试验布置如图 4 所示。

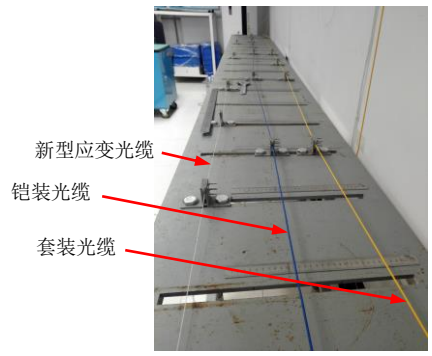


图 4　试验台布置图
Fig.4　Layout of testing platform

3　试验过程

3.1　精准定位方法及对比区别

为了全方位监测巷道/隧道应变情况，光缆在巷道/隧道中的铺设很复杂[18]，可水平布置在隧道顶板、两腰或底板，也可环绕在隧道内，光缆会出现弯曲、蛇形等布置，这样将难以确定光纤产生应变点在隧道内的实际位置，因此，在布里渊 BOTDR 隧道监控监测技术中，必须有简单的方法把光纤上某点的位置与隧道的位置联系起来。

布里渊频移与光纤应变和温度的变化有关，通过这个特点，可以从两方面入手，对光缆进行位置的标定。①改变某段温度对位置点标定，温度标定方法有两种：一种是在光缆上喷冷凝剂，局部降温；另一种是用热毛巾或热水使局部升温。②通过应变对光缆进行位置标定。对于应变方式标定距离，只要对露出的自由端进行拉伸，让其产生应变，就可测得其应变变化曲线并得到它的位置坐标。这就要求在光缆铺设过程中，每隔一定距离留一段自由端外露出来（不固定在混凝土衬砌上），可进行人工控制变形来标定位置，其铺设方式见图 5。

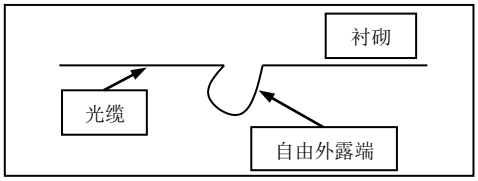


图 5　光缆自由端铺设示意图
Fig.5　Fiber optic free end laid sketch

本次定位试验采用的方法为冷凝剂降温法，选用的冷凝剂为 CRC 急速冷冻剂。试验过程：在光缆

局部（范围长度约为 50 cm）用冷凝剂进行降温，局部降温将使应变发生变化。初始温度用温度计测量为 30 ℃，降温后温度为 15 ℃。分别对 3 种光缆进行降温刺激试验，试验结果如图 6 所示。

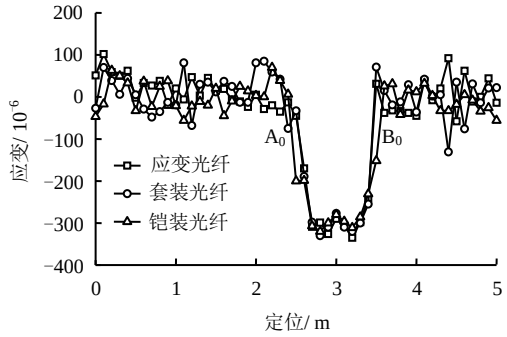


图 6 冷凝剂精确定位结果对比图

Fig.6 Comparison chart of accurate positioning results of lowering condensing agent

3.2 应变变化范围（漂移量）对比

在光纤应变测试中，仪器测量出来的应变范围通常比实际变形范围大，它们的差值一般称为应变漂移量[18]。理论上光缆应变漂移量应该等于光纤应变仪的应变距离分辨率。本次试验采用的 AV6419 型号光纤应变仪的应变距离分辨率为 1 m，因此，试验得到的漂移量为 1 m 时此种光缆的性能才最佳，才能真实地反映实际变形。

不同的光缆因为护套的不同，光缆纤芯的变形不能与实际变形同步进行，由此产生的漂移量也会存在较大差异。新型应变光缆的同步特性在理论上应该优于普通光缆和铠装光缆。此次试验就是针对不同光缆在 BOTDR 光纤应变测试仪上的漂移量的测试及对比。

试验方法：将光缆用夹具夹在试验台上，光缆与夹具之间用环氧树脂胶黏结，保证光缆护套与夹具不会发生错动。当光纤发生应变的长度范围比较小时，使用三角形模型是比较合适的。三角形模型计算简单，尤其适合于短距离内的沉降监测。在地铁隧道中，由于管片衬砌的错台和折角变形，其变化规律类似于直线拉伸，因此，抛物线模型就不适合沉降预测，必须使用三角模型。试验原理如图 7 所示。

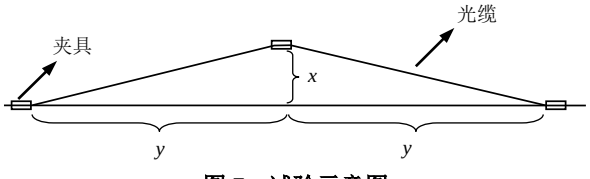


图 7 试验示意图

Fig.7 Schematic of the experiment

3.3 光缆应变分析

光缆形变量为

$$\Delta y = 2(\sqrt{x^2 + y^2} - y) \tag{1}$$

则光缆应变为

$$\varepsilon = \frac{\Delta y}{2y} = \sqrt{\left(\frac{x}{y}\right)^2 + 1} - 1 \tag{2}$$

令 $\frac{x}{y} = k$

则

$$\varepsilon = \sqrt{k^2 + 1} - 1 \tag{3}$$

本次试验 2 个夹具之间距离为 $y = 1$ m，选取 3 个夹具为试验对象，固定两边夹具不动，光缆实际变形范围为 2 m。为了更好辨析 3 种光缆的应变传递效能，令应变值略大使试验现象明显，因此，推动中间夹具分别向上产生 30、35 和 40 mm 的位移量如图 7 中 x（沉降、错缝量等值），因此，$x_1 =$ 30 mm，$x_2 = 35$ mm，$x_3 = 40$ mm；$k_1 = 0.03$，$k_2 =$ 0.035，$k_3 = 0.04$。

相对应的应变值及形变量为 $\varepsilon_1 = 450 \times 10^{-6}$，$\varepsilon_2 = 612 \times 10^{-6}$，$\varepsilon_3 = 800 \times 10^{-6}$；$\delta_1 = 0.9$ mm，$\delta_2 =$ 1.225 mm，$\delta_3 = 1.599$ mm。

3 种光缆的试验位置不同，故数据起始点也不一样，试验结果如图 8 所示。

3.4 温度测量

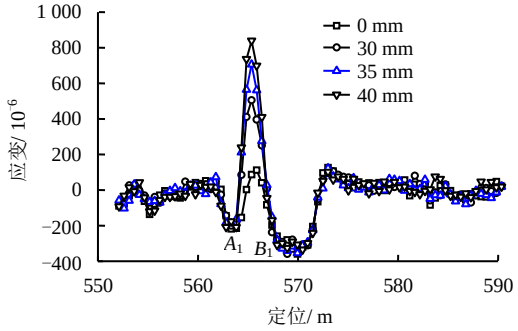
光纤对温度具有敏感性，在温度发生变化时，光纤的频率和布里渊曲线都会发生变化。本次试验对不同光缆在相同温度下的漂移量进行了测试。

试验方法：把光缆局部放入水浴锅加热，分别设定温度为 50°、60°、70° 和 80°，分别将 3 种光缆进行如上试验。为了减小测试仪器的误差影响，选择了不同光缆，进行加热的位置及长度范围均不同，但均提前精确标定。试验结果如图 9 所示。

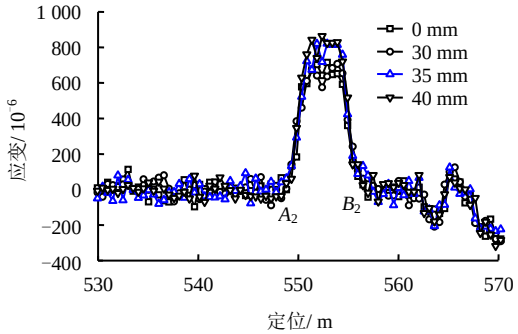
4 试验结果分析

（1）精确定位试验得到的结果，如图 6 所示。从图中可以看出，冷凝剂的降温刺激对 3 种光缆的应变影响是一样的，即 A_0B_0 区间应变变化一致，试验表明，各种光缆的护套对温度的精确定位是没有影响的，计算可得试验中冷凝剂降温幅度为 15°，应变减小了约 300×10^{-6}，由此可知，温度每降低 1° 时光纤应变减小约 20×10^{-6}。在降温区间，应变曲线出现下凹，其下凹的中间点就是试验中降温刺激定位的中间点。试验表明，图 7 显示的仪器的光学定位与试验中的实际位置是高度一致的。在实际工

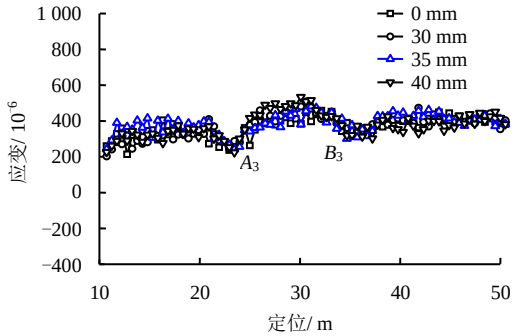
程测试中，可以通过此方法对一些重要的位置进行精确标定。此方法不会对光纤造成任何损伤，而且操作简便、精度高。



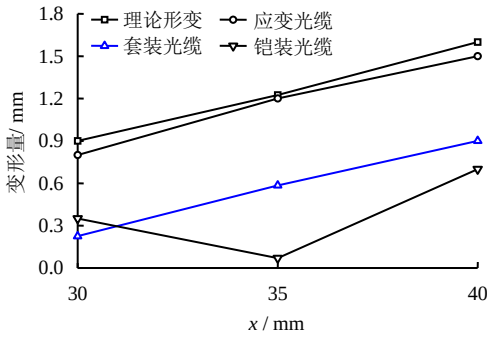
(a) 新型应变光缆结果对比图



(b) 套装光缆结果对比图



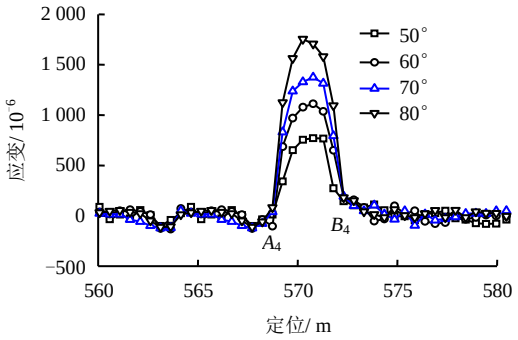
(c) 铠装光缆结果对比图



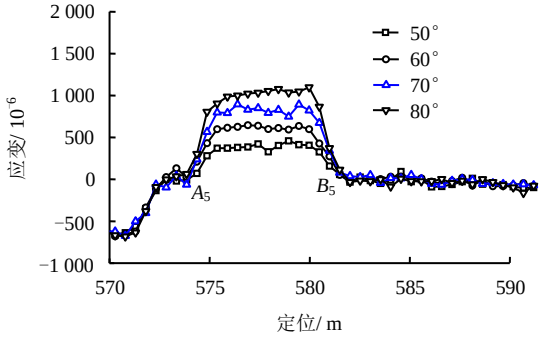
(d) 理论形变量与 3 种光缆实测形变量对比图

图 8　光纤漂移量试验结果对比图

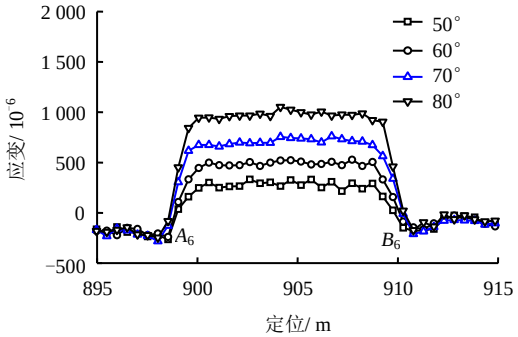
Fig.8　Comparison charts of fiber Brag gratings



(a) 新型应变光缆温度变化图



(b) 套装光缆温度变化图



(c) 铠装光缆温度变化图

图 9　温度变化下漂移量对比图

Fig.9　Comparison charts of fiber Bragg gratings under changing temperature

（2）光纤应变变化范围（漂移量）的测定，如图 8 所示。从图可以看出，①新型应变光缆（见图 8(a)）的应变曲线，可以明显地分辨出中间夹具发生的位移量分别为 30、35 和 40 mm。②套装光缆（见图 8(b)）的应变曲线，也可以分辨出中间夹具发生的位移量分别为 30、35 和 40 mm，但为了区分位移量，其应变变化区间较大。③铠装光缆（见图 8(c)）的应变曲线，显然无法分辨出中间夹具发生的位移量，而且其要求的应变变化区间也很大。

拉力所致漂移量的确定：①图 8(a)中 A_1B_1 为新型应变光缆因拉力所致的应变变化区间，约为 4 m，

实际变形区间为 2 m，因此，新型应变光缆变形的漂移量为 2 m。②图 8(b)中 A_2B_2 为套装光缆因拉力所致的应变变化区间，约为 9 m，实际变形区间为 2 m，因此，套装光缆变形的漂移量为 7 m。③图 8(c)中 A_3B_3 为铠装光缆因拉力所致的应变变化区间，约为 14 m，实际变形区间为 2 m，因此，铠装光缆变形的漂移量为 12 m。显然，光纤的漂移量越小越好。④图 8(d)中通过理论形变量与 3 种光缆实测形变量对比可看出，只有新型应变光缆能更真实地反映实际变形，而运用套装光缆与铠装光缆得出的试验数据与理论值相差较大，因此，新型应变光缆的护套对于变形传递的影响较小，变形传递效能最高，适合用作应变监测，而套装光缆与铠装光缆均不适合用于应变监测。

（3）温度测量试验结果（见图 9），3 种光缆的应变曲线均随着温度的升高而变大，并且具有很明显的区分度。经过计算可知，温度每升高 1° 时光纤应变增加约 20×10^{-6}，此结论与图 7 得到的结果类似，可总结为温度每改变 1° 时光纤应变变化 20×10^{-6}。温度所致漂移量的确定：①图 9(a)中 A_4B_4 为新型应变光缆因温度所致的应变变化区间，约为 4 m，实际升温区间为 3 m，因此，新型应变光因纤温度所致的漂移量为 1 m。②图 9(b)中 A_5B_5 为套装光缆因温度所致的应变变化区间，约为 8 m，实际升温区间为 6.5 m，因此，套装光缆因温度所致的漂移量为 1.5 m。③图 9(c)中 A_6B_6 为铠装光缆因温度所致的应变变化区间，约为 13 m，实际升温区间为 12 m，因此，铠装光缆因温度所致的漂移量为 1 m。

5 结 论

（1）测温试验研究表明，3 种光纤的漂移量都在 1 m 左右，说明光缆的护套对温度变化引起的应变改变没有影响。因此，在需要测温或者进行温度补偿的工程应用中，应优先选择铠装型护套光缆。

（2）光纤应变测试试验表明，光缆护套效应对应变测试具有很大的影响。其中，新型应变光缆的漂移量最小，说明新型应变光缆的护套对于变形传递的影响较小，变形传递效能最高。

（3）关于应变光缆选型的建议：新型应变光缆适用于测试精度要求高、比较温和的环境；套装护套型光缆，具有一定的抵抗外界物理变化的能力，适用于环境比较恶劣、对应变精度要求不高的工程中；铠装护套型光缆，由于拉力所致的漂移量过大，护套效应很明显，不适合用作监测变形的工程中。

参 考 文 献

[1] 梁秀荣, 朱小龙. 煤矿安全监测监控系统有关问题的探讨[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(8): 69－71.
LIANG Xiu-rong, ZHU Xiao-long. Discussion on several issues of mine safety monitoring and control system[J]. **Mine and Science Technology**, 2006, 34(8): 69－71.

[2] 姚明远, 闫相宏, 范方起, 等. 煤矿顶板安全综合监测预警系统及应用[J]. 煤矿安全, 2009, 39(增刊 1): 122－124.
YAO Ming-yuan, YAN Xiang-hong, FAN Fang-qi, et al. Comprehensive detection algorithm Early-warning system and application of mine roof[J]. **Mine Safety**, 2009, 39(Supp.1): 122－124.

[3] 余伟健, 冯涛, 王卫军, 等. 软弱半煤岩巷围岩的变形机制及控制原理与技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4): 658－671.
YU Wei-jian, FENG Tao, WANG Wei-jun, et al. Deformation mechanis，control principle and technology of soft half coal rock roadway[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(4): 658－671.

[4] OU J P. Some recent advances of intelligent health monitoring systems for eivil infrastructures in mainland China[M]. [S. l.]: A A. BALKEM, 2003: 131－144.

[5] 侯公羽, 谢冰冰, 江玉生, 等. 基于 BOTDR 的光纤应变与顶板沉降变形关系的模型构建与试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1298－1304.
HOU Gong-Yu, XIE Bing-bing, JIANG Yu-sheng, et al. Research for the optical fiber strain and the settlement of roof based on BOTDR technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(5): 1298－1304.

[6] 施斌, 徐学军, 王镝. 隧道健康诊断 BOTDR 分布式光纤应变监测技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2622－2628.
SHI Bin, XU Xue-jun, WANG Gao, et al. Study On Botdr-Based distributed optical fiber strain measurement for tunnel health diagnosis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(2): 2622－2628.

[7] 侯公羽, 谢冰冰, 江玉生, 等. 用于巷道沉降变形监测的光纤锯齿状布设技术与原理[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊 1): 1－8.
HOU Gong-yu, XIE Bing-bing, JIANG Yu-sheng, et al. Fiber sawtooth layout technology and principle used in roadway subsidence deformation monitoring[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(Supp.1): 1－8

[8] 马水山, 王志旺, 李端有. 光纤传感器及其在岩土工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增刊): 1692－1694.

MA Shui-shan, WANG Zhi-wang, LI Duan-you. Optical fiber sensors and their application to geotechnical engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(Supp): 1692－1694.

[9] 柴敬, 张丁丁, 李毅. 光纤传感技术在岩土与地质工程中的应用研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(3): 28－36.
CHAI Jing, ZHANG Ding-ding, LI Yi. Research progress of optical fiber sensing technology in geotechnical and geological Engineering[J]. **Journal of Architecture and Civil Engineering**, 2015, 32(3): 28－36.

[10] 刘媛, 雷涛, 王哲, 等. 光纤传感技术在矿山安全监测中的应用[J]. 金属矿山, 2009, 43(增刊 1): 536－538.
LIU Yuan, LEI Tao, WANG Zhe, et al. Application of optical fiber sensing technology in mine safety monitoring[J]. **Metal Mine**, 2009, 43(Supp.1): 536－538.

[11] 李明, 王晓霖, 吕高峰, 等. 光纤传感及其在管道监测中应用的研究进展[J]. 当代化工, 2014, 43(1): 54－57.
LI Ming, WANG Xiao-lin, LÜ Gao-feng, et al. Development and application of optical fiber sensing technology in pipeline monitoring[J]. **Contemporary Chemical Industry**, 2014, 43(1): 54－57.

[12] 施斌, 张丹, 王宝军. 地质与岩土工程分布式光纤监测技术及其发展[J]. 工程地质学报, 2007, 15(增刊 2): 109－116.
SHI Bin, ZHANG Dan, WANG Bao-jun, et al. Distributed optical fiber monitoring technologies of geological and geotechnical engineering and its development[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2007, 15(Supp.2): 109－116.

[13] 隋海波, 施斌, 张丹, 等. 边坡工程分布式光纤监测技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 3726－3730.
SUI Hai-bo, SHI Bin, ZHANG Dan, et al. Study on distributed optical fiber Sensor-Based monitoring for slope engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(2): 3726－3730.

[14] 丁勇, 王平, 何宁. 基于 BOTDA 光纤传感技术的 SMW 工法桩分布式测量研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 719－724.
DING Yong, WANG Ping, HE Ning. SMW method based on optical fiber sensing technology pile BOTDA distributed measurement study[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(5): 719－724.

[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] 丁勇, 王平, 李鹏飞, 等. 基于 BOTDA 的地下连续墙分布式变形监测技术研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊 2): 500－503.
DING Yong, WANG Ping, LI Peng-fei, et al. Monitoring technology of deformation of continuous concrete wall based on BOTDA[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(Supp.2): 500－503.

[17] NAN Shi-qing, GAO Qian. Application of distributed optical fiber sensor technology based on BOTDR in similar model test of backfill mining[J]. **Procedia Earth and Planetary Science**, 2011, 31(2): 34－39.

[18] 寇欣, 尹成群, 吕安强. 基于 BOTDR 监测数据的光纤复合海底电缆状态预测[J]. 电测与仪表, 2015, 52(3): 48－53.
KOU Xin, YIN Cheng-qun, LÜ An-qiang, et al. Prediction of the state of optical cable based on BOTDR fiber composite submarine monitoring data[J]. **Electrical Measurement and Instrumentation**, 2015, 52(3): 48－53.

上接第 2440 页

[10] 缪云, 戴国亮, 龚维明. 斜桩承台桩基沉降影响有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 208－211.
MIAO Yun, DAI Guo-liang, GONG Wei-ming. Finite element analysis of settlement interaction of inclined pile caps[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(2): 208－211.

[11] 龚维明, 戴国亮, 蒋永生, 等. 桩承载力自平衡测试理论与实践[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(1): 82－88.
GONG Wei-ming, DAI Guo-liang, JIANG Yong-sheng, et al. Theory and practice of self-balanced loading test for pile bearing capacity[J]. **Journal of Building Structures**, 2002, 23(1): 82－88.

[12] 龚维明, 于清泉, 戴国亮. 越南大翁桥桩基承载性能试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 558－562.
GONG Wei-ming, YU Qing-quan, DAI Guo-liang. Experimental research on bearing behavior of piles with self-balanced method in Daweng bridge in Vietnam[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(2): 558－562.

[13] 东南大学土木工程学院, 南京市建筑工程质量监督总站. DB32/T291－99 桩承载力自平衡测试技术规程[S]. 南京: 江苏省工程建设标准设计站, 1999.
School of Civil Engineering, Southeast University; Nanjing Construction Engineering Quality Supervision Station. DB32/T291 － 99 Technical specification for self-balance test of pile bearing capacity[S]. Nanjing: Jiangsu Province Engineering Construction Standard Design Station, 1999.