

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.08.036

页岩单轴压缩破坏试验的光纤布拉格光栅测试技术研究

范成凯^{1,2}, 孙艳坤^{1,2}, 李琦¹, 鲁海峰³, 牛智勇^{1,2}, 李霞颖^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 由于化石能源工业的不断发展及其大量燃烧造成的严重环境污染问题等原因, 促使页岩气逐渐成为绿色革命的关键能源组成之一。四川盆地龙马溪组是我国页岩气主力开采层位, 在页岩气开采过程中, 针对储层变形监测将有利于指导现场页岩气开采方案和安全风险管理等工作。光纤布拉格光栅测量应变的方法是近年来被广泛使用的一种新颖先进的实时应变监测技术, 研究将其运用于页岩单轴压缩试验并对页岩表面应变进行监测。结果表明: (1) 光纤布拉格光栅能够较好地监测页岩表面应变变化且环向应变传递效率高于轴向; (2) 光纤布拉格光栅测试结果优于十字应变花, 但轴向应变变化极易受表面裂缝发育影响而导致较低传递效率; (3) 光栅传递效率受光栅本身力学性质、粘贴层性质及厚度等因素影响。从试验选择的两种环氧树脂黏胶对比试验结果中可知, 新型 555 黏胶效果更佳。

关键词: 页岩; 光纤布拉格光栅; 单轴压缩试验; 应变测量; 变形监测

中图分类号: TU 454

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017)08-2456-09

Testing Technology of fiber Bragg grating in the shale damage experiments under uniaxial compression conditions

FAN Cheng-kai^{1,2}, SUN Yan-kun^{1,2}, LI Qi¹, LU Hai-feng³, NIU Zhi-yong^{1,2}, LI Xia-ying^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: Since serious environmental pollution problems are caused by the continuous development of fossil energy industry and releasing huge combustion products, shale gas is gradually becoming the key element of the green revolution. The Longmaxi shale formations in the Sichuan basin are the main mining layers of shale gas in China. In the process of exploiting shale gas, monitoring the stress and strain of the shale gas reservoir is helpful to guide programs in exploitation of shale gas and provide management of security risk and other works. Fiber Bragg grating (FBG) strain sensor system is a widely-used advanced technique to monitor real-time strain in recent years. In this paper, the FBG system was employed to measure the strain of shale surface in uniaxial compression tests using the MTS 815 machine. The results show that the strain variation of shale surface was well recorded by FBG, and axial strain transferring was more effective than that of the radial strain. It is found that the strains measured by FBG sensors were superior to those from strain gage rosettes, but the axial strain variation was susceptible to the development of surface cracks, resulting in lower strain transmission efficiency. The strain transfer ratio was mainly influenced by the grating itself, the properties and thickness of the bonding layer. According to experimental results from two kinds of epoxy resins, it can be seen that the new 555 viscose was better than DP100.

Keywords: shale; fiber Bragg grating; uniaxial compression testing; strain measurement; deformation monitoring

收稿日期: 2016-09-23

基金项目: 中国自然科学基金面上资助项目“酸气-咸水作用下岩石特异性破坏机理研究”(No.41274111)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China “Failure mechanism of rock under acid gas and saline water interaction” (41274111).

第一作者简介: 范成凯, 男, 1994 年生, 硕士研究生, 主要从事岩石物理与渗流监测方面的研究工作。E-mail: chengkaivan@163.com

通讯作者: 李琦, 男, 1972 年生, 博士, 研究员, 主要从事酸气回注、二氧化碳地质利用与封存方面的研究工作。E-mail: qli@whrsm.ac.cn

1 引言

页岩是一种在自然界分布广泛的沉积岩,是由细粒碎屑、黏土矿物以及丰富的有机质所构成。当页岩气聚集于储层中并赋存于一定地质条件下时,达到开采价值的页岩气就可成为人们所能利用的新能源^[1]。美国能源信息署对全球页岩气的分布进行了定量估算:当前全世界拥有页岩气资源量达 $1.87 \times 10^{14} \text{ m}^3$,其中我国页岩气技术可采储量位于世界第一,主要分布于四川盆地、鄂尔多斯盆地以及塔里木盆地^[2-3]。目前,美国是世界上惟一个页岩气商业化开采的国家^[4]。尽管我国页岩气储量十分丰富,但由于复杂的地质条件以及不成熟的开采技术使其商业化开采受限。随着国内科研人员的不懈努力,页岩气的勘探程度必将不断增高且开采技术也会日趋进步。

现阶段,页岩气的开采主要运用水平井钻井技术和水力压裂技术,研究页岩气储层岩石的物理及力学性质有利于提高页岩气的采收率^[5]。由于页岩在成岩过程中会生成较多的弱结构面,使得页岩具有明显的各向异性特征^[6]。衡帅等^[7]针对四川盆地下志留统龙马溪组的页岩进行单轴及三轴的压缩试验,并从力学特征、强度特征以及破裂模式 3 个方面分析了页岩的各向异性;侯振坤等^[8]在单轴压缩试验条件下着重对龙马溪组的层状页岩展开研究,验证其为横观各向同性体并阐述造成各向异性的主要原因;张永泽等^[9]同样在单轴压缩试验中对龙马溪组页岩的物理力学性质进行了深入研究。页岩微观、宏观方面的非均质性对页岩气开采过程中的水力压裂有较大影响,前人在研究页岩过程中主要从单轴或三轴试验对其力学性质进行研究,而极少在压裂过程中针对页岩储层的应力、应变变化进行实时高精度原位监测。

光纤布拉格光栅(fiber bragg grating, FBG)传感器是近年来才被广泛应用于室内研究及工程应用的一种新颖、先进的光纤传感器,具有耐高温高压、抗电磁干扰、可弯曲并易于复用等多种独特优势。基于 FBG 的原理及诸多优点,可将其运用于岩石变形破坏的应力、应变监测中^[10-13]。

四川盆地是我国页岩气主力开采区,特别是区内沉积的上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩是当前页岩气勘探开发的重点层系^[14],精细化研究压裂过程中储层页岩岩芯的应力、应变变化极有利于了解开采区储层物性差异,为提高页岩开发过程中岩层稳定性和安全性提供指导。研究基于 FBG 传

感原理及高精度高分辨率动态实时监测等优点,将其用于实时监测单轴压缩试验条件下龙马溪组黑色页岩表面应变变化,这将大大提升页岩气开采中岩石应力、应变的监测能力和精度,深化理解室内试验的基础机制研究。

2 光纤布拉格光栅传感原理

20 世纪 80 年代,世界上第 1 根光纤光栅被发明出来并发展迅速,其制作过程是将一小段对光敏感的光纤暴露在一个光强周期性分布的光波下,致使光纤的光折射率发生变化,从而形成周期性的相位光栅^[15-16]。

如图 1 所示,当一束宽带光传播到光栅时会反射回一种特定波长的光波,而同时其他波长的光波都会透射出去,光纤光栅充当了光波选择反射镜的角色,满足反射条件式(1)的光波波长被称为布拉格波长,表达式为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中: λ_B 为布拉格波长; n_{eff} 为有效折射率; Λ 为每一小段光栅间隔长度,也称光栅周期。

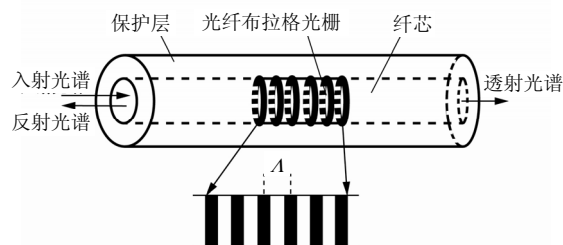


图 1 光纤布拉格光栅传感原理
Fig.1 Principle of FBG sensing

当光栅有效折射率 n_{eff} 和光栅周期 Λ 发生变化时,其反射光波波长相应发生改变,而造成这两者发生变化的主要原因是外界温度与应力(或应变)的变化^[12]。光纤布拉格光栅反射波长随应变和温度的变化可以近似定量地用关系式表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_0} = (1 - p_\epsilon)\epsilon + (\alpha_A + \alpha_n)\Delta T \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为布拉格波长变化量; λ_0 为初始布拉格波长; p_ϵ 为应变光学灵敏系数; ϵ 为应变变量; α_A 为热膨胀系数; α_n 为温度光学灵敏系数; ΔT 为外界温度变化量。等式右边前半部分表征应变变化对反射波长的影响,后半部分则为温度变化的影响。

当不考虑温度影响或外界温度变化不明显时,

在轴向应力作用下得到反射波长变化量与应变耦合关系式为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_0} = (1 - p_\varepsilon)\varepsilon \quad (3)$$

$$p_\varepsilon = \frac{1}{2}n_{\text{eff}}^2[-(p_{11} + p_{12})\mu + p_{12}] \quad (4)$$

式中： μ 为泊松比； p_{11} 、 p_{12} 为光弹系数。

何伟等^[17]研究发现，在通常情况下 p_ε 随轴向应力变化很小，可视为常数，故光纤光栅中心波长变化量仅与应变有关，可进行相应应变测量。

3 页岩单轴压缩试验过程

3.1 试样来源与制备

试验选用的两块页岩是分别采集于四川长宁和重庆石柱县龙马溪组地层的黑色露头页岩。龙马溪组页岩岩性致密、性脆、层理面发育。从尺寸较大的岩块中按沿层理方向取芯得到两块页岩岩芯，并按制样标准加工为直径 50 mm、长度 125 mm 的圆柱体试样，误差 ± 0.5 mm，端面平行度 ± 0.02 mm。页岩岩芯参数如表 1 所示。

表 1 页岩岩芯参数

Table 1 Parameters of shale samples

编号	地层及编号	采集点	直径 / mm	长度 / mm
S1	龙马溪组 2.3	四川长宁	49.49	125.42
S2	龙马溪组 2.4	重庆石柱	49.53	125.28

3.2 试验设备与装置

该试验利用国际通用标准的岩石力学压力机 MTS 815.04 对岩样进行单轴压缩，并通过安装环向应变规，粘贴光纤布拉格光栅传感阵列以及十字应变花进行应变实时采集。MTS 系统中配置的环向链式引伸计是用链条将试件围住，当试件发生环向变形时可以通过其内置应变规电路中电压变化来测试件直径的变化量，从而换算出环向应变及轴向位移等参量。试验选用裸露的单模光纤布拉格光栅，裸纤外有一层薄薄的涂覆层作为保护层。光纤直径为 62.5 μm ，带保护层直径为 102.5 μm 。试验使用的 FBG 信号解调仪 FS445 II 含有 4 个通道，分别表示为 CH1、CH2、CH3、CH4；波长测试范围为 1 510~1 590 nm，分辨率为 1 pm，应变分辨率小于或等于 1 $\mu\varepsilon$ 。试验中将环向光纤尾纤端接入通道 CH1，轴向光纤尾纤端接入通道 CH4，温度补偿光纤尾纤端接入通道 CH2。当外界应力（或应变）及温度发生改变时，反射至解调仪的布拉格波长发生变化，

通过信号解调仪将光信号转化为电信号发送至计算机光谱分析系统中，并以数据图形的方式记录并成图。整个应变测试试验系统示意图如图 2 所示。

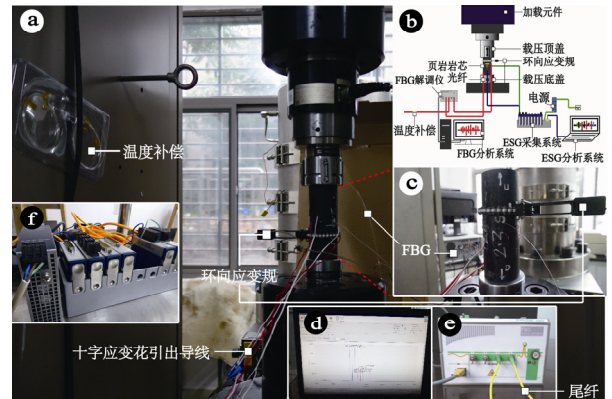


图 2 测试系统原理图

Fig.2 The principle diagrams of testing system

3.3 光纤布拉格光栅及高精度十字应变花的表面粘贴

试验过程需 5 根光纤，其中 4 根光纤上分别被刻入 3 个连续光栅并粘贴于两块页岩试样表面环向、轴向方向上。如图 3 所示，左、右侧试样为 S1、S2 光纤及高精度十字应变花（electrical resistance strain gauge, ESG）粘贴示意图（R1~R3 表示环向光栅，A1~A3 表示轴向光栅，ESG 表示应变片）；单独含有一个光栅的光纤用作温度补偿。页岩表面粘贴光纤及应变片有一套严格的工艺，在粘贴过程前既要考虑为获得更多有利信息的待粘贴位置且要设定粘贴步骤及所需工具。

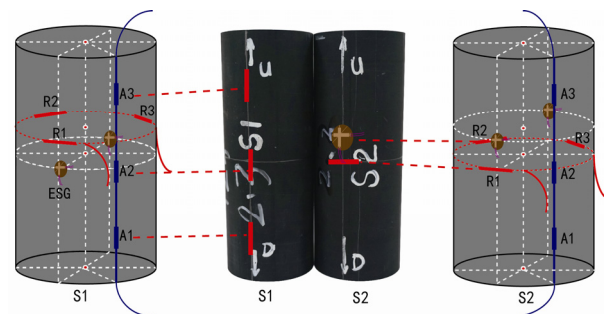


图 3 光纤及应变花粘贴示意图

Fig.3 Schematic of FBGs and strain gauges bonded to shale specimens S1 and S2

对于试样 S1，首先在页岩轴向中心位置粘贴高精度十字应变花。再者，在距离应变花上方 1 cm 处粘贴环向光纤，第 1 个光栅紧临高精度十字应变花，

并依次粘贴剩余光栅。因环向光纤尾纤端接入 FBG 信号解调仪第 1 通道,故 3 个光栅分别表示为 CH1-R1、CH1-R2、CH1-R3。最后,在标注位置粘贴轴向光栅,并将光纤尾纤端接入解调仪第 4 通道,故 3 个光栅分别表示为 CH4-A1、CH4-A2、CH4-A3。而试样 S2 相对于试样 S1 粘贴位置的不同之处在于将环向光纤与十字应变花位置互换,两试样使用 FBG 参数见表 2。试验选用进口于日本共和电业的高精度十字应变花,具体参数见表 3。粘贴试样 S1、S2 分别选用新型 555 环氧树脂 AB 胶和型号为 DP100 的环氧树脂 AB 胶粘贴光纤光栅;高精度十字应变花选用 DP100 环氧树脂黏胶剂粘贴。

表 2 粘贴于岩样 S1、S2 上的 FBG 传感器参数对比
Table 2 Different FBG sensors' parameters of samples S1 and S2

试样	FBG 解调仪通道	名称	初始中心波长 / nm	光栅周期 / mm	粘贴方式	黏胶类型
S1	CH1	CH1-R1	1 540.2			
		CH1-R2	1 543.2	42	环向表面粘贴	
		CH1-R3	1 546.2			新型 555 快干
	CH2	CH2-Temp	1 564.2		不粘贴	透明环氧树脂
	CH3	CH4-A1	1 549.6			AB 胶
		CH4-A2	1 552.6	30	轴向表面粘贴	
CH4-A3		1 555.6				
S2	CH1	CH1-R1	1 549.5			
		CH1-R2	1 552.5	42	环向表面粘贴	
		CH1-R3	1 555.5			
	CH2	CH2-Temp	1 564.1		不粘贴	DP100 环氧 树脂 AB 胶
	CH3	CH4-A1	1 549.5			
		CH4-A2	1 552.5	30	轴向表面粘贴	
CH4-A3		1 555.5				

表 3 高精度十字应变花类型及参数
Table 3 The type and parameters of high-precision electrical resistance strain gage

应变片类型	应变片长度 / mm	应变片敏感栅电阻 / Ω	材料电阻元素	应变片敏感因子 / %	横向灵敏度 / %
KFG-5-120-D16-11L30C2S	5	119.6±0.4	Cu-Ni 合金箔	2.12±0.1	0.40

3.4 试验过程

首先对 S1 试样进行单轴压缩试验,待将 FBG 信号解调仪、应变片数据采集卡以及 MTS 环向应变花安装设置好后对岩样进行预加载,即施加 1 kN 的轴向力。试验采用轴向位移控制连续加载的方式,前半程加载速率较快为 0.001 mm/s,加载 15 min 时降低加载速率至 0.000 5 mm/s,以便观察页岩整个

破坏过程。

试件 S1 从预加载到发生剧烈破坏的时间超过 25 min,变形破坏过程完整;试件 S2 由于在放置过程中不慎摔落,以致高精度十字应变花导线折断而无法测量,故只能利用 FBG 传感器测量表面应变,其变形破坏时间超过 26 min。页岩破坏时发生剧烈形变,并伴有巨大碎裂声。由于 FBG 传感器受页岩表面应变影响明显,故随表面裂隙发育 FBG 所测数据波动性逐渐变大。待页岩破坏后,光纤光栅折断而采集数据中止。

4 试验结果与分析

由于 MTS 815.04 岩石力学伺服机是目前国际公认具有良好测试性能的试验设备,故本试验首选 MTS 所测值作为参考值。根据 MTS 所测轴向力、环向位移、轴向位移及换算而来的环向应变、轴向应变等数据,将其分析结果与 FBG 传感器、高精度十字应变花所测结果进行对比,有一些新的发现。

4.1 试样变形过程分析

由于试样表面已粘贴好光纤光栅及十字应变花,故在页岩环向光纤上方的空余位置安装环向应变规。针对页岩变形过程中的力学性质,主要对试样 S1 进行分析。试样 S1 在加载过程中,按照轴向位移控制的连续加载方式,MTS 主要测得其轴向力、轴向位移及环向位移。通过计算可得轴向应变、环向应变随加载时间持续增加的变化情况。

如图 4 所示,S1 轴向位移随时间逐渐增大且线性变化。由于在加载过程中改变加载速率,故加载 15 min 后轴向位移随时间增加速率减缓以便更好地观察页岩破坏过程。整个加载过程持续时间超过 25 min,S1 的峰值应力为 202.5 MPa,轴向位移量接近 1.2 mm。在轴向力的作用下页岩逐渐变形直至破坏,此时 MTS 停止加载。轴向位移及环向位移随载荷逐渐增加的变化情况如图 5 所示。

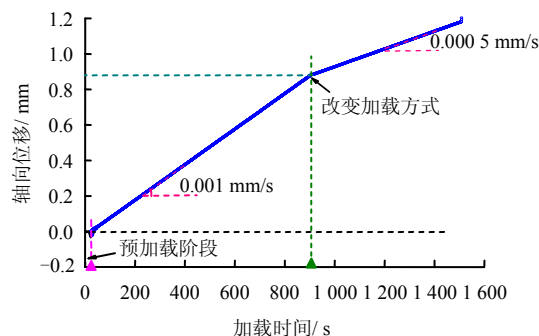


图 4 试样 S1 加载历史

Fig.4 The loading history of sample S1

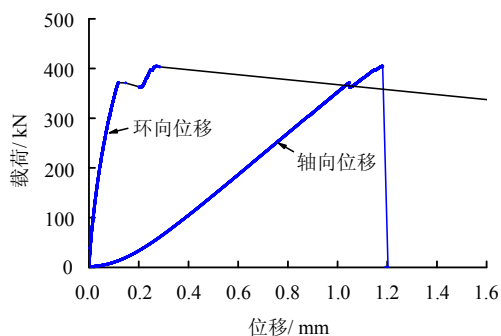


图 5 试样 S1 轴向、环向位移

Fig.5 The axial and circumferential displacement of sample S1

页岩试样 S1 抗压强度大, 破坏峰值强度超过 200 MPa, 主要有两个原因: 一是 S1 为沿层理方向取芯, 即取芯角度为 0° 。通常情况下, 在单轴压缩时, 页岩的抗压强度随层理角度变化而差异明显, 0° 和 90° 时的抗压强度最高^[7]; 二是 S1 的矿物组成中脆性矿物含量高。蒲泊伶等^[18]对川南地区龙马溪组页岩的储层物性进行了深入研究并对该区页岩矿物组成进行分析, 发现以石英、长石以及碳酸盐岩矿物为主体的脆性矿物含量介于 27.4%~89.0%。王玉满等^[19]也对川南下志留统龙马溪组页岩进行 X 射线衍射 (X-ray Diffraction, XDR) 分析得出, 该区页岩脆性矿物高且含硅质。针对试验研究采集于不同地点的页岩进行岩石物性检测, 得到两块页岩的 XDR 矿物成分分析数据如表 4 所示。其中采集于四川长宁编号为 2.3 的页岩脆性矿物含量为 83.13%, 采集于重庆石柱编号为 2.4 的页岩脆性矿物含量为 83.66%。由此可见, 本试验所取下志留统龙马溪组页岩岩性硬且脆, 峰值强度高, 这种特性有利于页岩内部天然裂缝的形成以及在人工压裂过程中易于致裂。

表 4 试样 S1 和 S2 物性参数

Table 4 Physical properties of samples S1 and S2

地层	编号	矿物名称及其化学式	含量		脆性矿物含量
			/ %	/ %	
龙马溪组	2.3	石英 SiO_2	65.71		83.13
		方解石 CaCO_3	17.42		
		伊利石 $\text{K}(\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_9(\text{OH})_3)$	16.87		
龙马溪组	2.4	石英 SiO_2	20.10		83.66
		白云石 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	58.72		
		方解石 CaCO_3	24.84		
		伊利石 $\text{K}(\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_9(\text{OH})_3)$	16.34		

在一般情况下, 在单轴压缩试验条件下试样的轴向位移较环向位移大。如图 5 所示, 在轴向荷载逐渐增加的过程中, 轴向位移在开始阶段增长幅度

较大, 而后近于线性增长直至破坏, 最大变形量接近 1.2 mm; 环向位移较轴向位移变化量小, 在荷载逐渐增加的情况下呈现近抛物线变化趋势, 环向最大变形量近 0.3 mm, 故可推出 S1 近似泊松比 $\mu = 0.25$ 。从图中可观察到, 当轴向力达到 360 kN 时, 轴向、环向位移变化曲线都出现跳跃点, 以及试样发生破坏时, 载荷发生突降。这是由于页岩表面在轴向荷载作用下裂缝开始发育直至岩样剧烈破坏, 在破裂瞬间局部应力释放使得轴压略有减小, 但形变持续增大, 当达到破坏瞬间, 采样时间间隔大于破坏瞬间以致超出试验机的响应, 故最终荷载从最高点降至 0 轴附近。

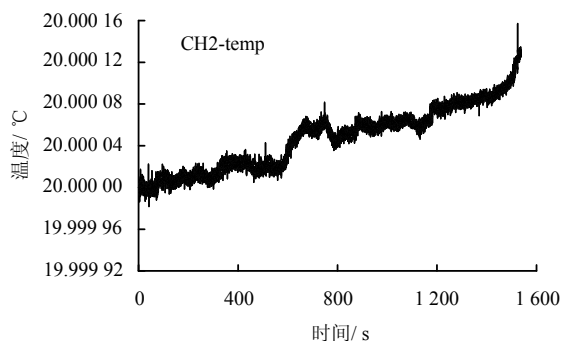
4.2 试样表面应变测量结果分析

轴向光纤上含有中心波长相差 3 nm 的连续 3 个光栅, 光栅间隔为 30 mm; 环向光纤上含有连续 3 个光栅, 光栅间隔为 42 mm。所有光栅均匀分布在页岩表面, 每个光栅长约 1.5 cm。

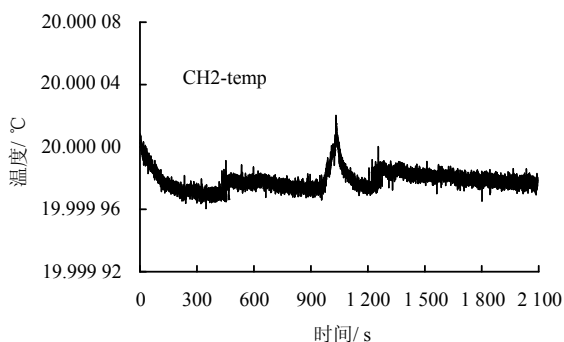
4.2.1 FBG 所测环向应变

将环向光纤尾纤端接入 FBG 信号解调仪的 CH1 通道, 则距离尾纤端最近光栅中心波长最小记为 CH1-R1, 剩余两个光栅分别为 CH1-R2、CH1-R3。考虑温度影响, 在试验室单独设置一根含有单个光栅的光纤作为 FBG 温度传感器并将其表示为 CH2-temp。由于对 2 块页岩进行单轴压缩的时间不同, 故利用 FBG 温度传感器测得结果不同, 如图 6 所示。从图中可看出, 两次试验过程中温度虽有变化, 但变化幅度很小, 不会影响到 FBG 应变传感器测量精度, 因此, 可基本上忽略温度对应变的影响。

图 7 分别为试样 S1、S2 利用 FBG 应变传感器所测环向应变变化情况。由图可知, 环向应变随加载时间的增加而逐渐增大, 且 3 个光栅所测应变变化趋势相同。测得试样 S1 环向应变最大值接近 $1\ 500\ \mu\epsilon$, 且在环向第 2 个光栅 R2 处最先发生应变突变, 即此处率先出现表面裂缝; 环向第 3 个光栅 R3 在近 1 425 s 时所测应变发生陡降至负值, 表示此光栅受力状态由拉伸变为压缩; 加载时间超过 25 min 时, 3 个光栅受岩石破坏影响而折断, 故中止测试。在同样试验条件下, 试样 S2 所测环向应变最大值为 $1\ 490\ \mu\epsilon$, 环向第 3 个光栅 R3 由于表面裂缝影响率先出现数据陡降, 最后加载至极限强度时光栅折断。综合来看, 在单轴压缩试验条件下 FBG 应变传感器能够较好地测量页岩环向应变变化, 且环向方向上应变传递效率高。但由于页岩本身物性差异、两块试样环向光纤粘贴位置及所用黏胶不同, 故应变测量结果不同, 可以看出, 试样 S1 测量结果较好。



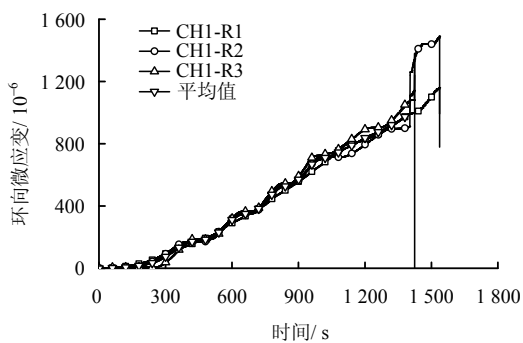
(a) 试样 S1 试验过程温度变化



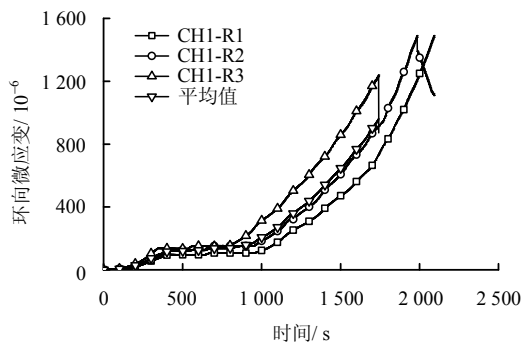
(b) 试样 S2 试验过程温度变化

图 6 试验过程中 FBG 所测温度变化情况

Fig.6 The variation of ambient temperature measured by FBG sensors during experiments of samples S1 and S2



(a) 试样 S1 环向应变



(b) 试样 S2 环向应变

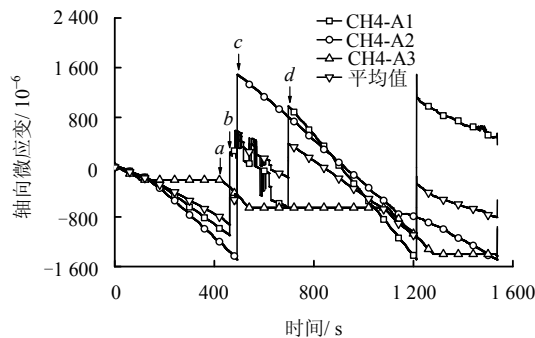
图 7 FBG 所测试样 S1、S2 环向应变变化

Fig.7 The measurement of circumferential strains on samples S1 and S2 by FBG sensors

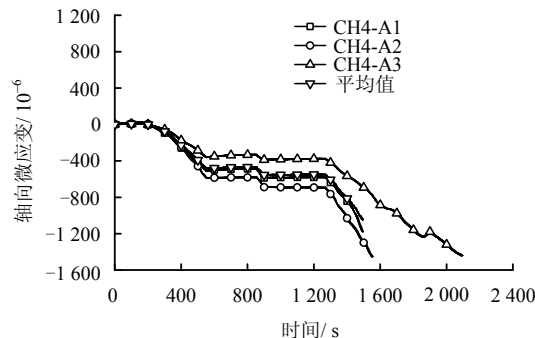
4.2.2 FBG 所测轴向应变

将轴向光纤尾纤端接入 FBG 信号解调仪的 CH4 通道，则距离尾纤端最近光栅中心波长最小记为 CH4-A1，剩余两个光栅分别为 CH4-A2、CH4-A3。在单轴压缩试验条件下，页岩轴向方向变形量、变形程度大于环向方向以致轴向光纤更易受表面变形影响，甚至折断。

图 8 分别为试样 S1、S2 利用 FBG 应变传感器所测轴向应变变化。由图可以看出，加载过程中试样 S1 轴向应变变化幅度大，甚至轴向 A1、A2 光栅所测数据发生多次突变；利用 FBG 所测试样 S1 轴向应变波动性大，但整体仍然呈负增长趋势，表明在轴向荷载作用下压缩变形持续进行；图 8(a)中 a、b、c 点处最先出现数据波动和突变，且 3 个光栅所测数据整体呈现阶梯型负增长。相对而言，A3 光栅对应页岩下部 1/3 处受扰动较 A1、A2 处小；A1、A2 在加载时间近 500 s 时发生数据突变，此时光栅受力状态从压缩变为拉伸，且受力状态多次改变。其中 A1 光栅所测数据在 b、d 两点之间波动大且其受力状态多次改变，主要是由于页岩表面变形的持续发育，可反映出试样 S1 轴向 A1、A2 处最先出现破坏。轴向光纤测得 S1 破坏时的最大应变近 1500×10^{-6} 。



(a) 试样 S1 轴向应变



(b) 试样 S2 轴向应变

图 8 FBG 所测试样 S1、S2 轴向应变变化

Fig.8 The measurement of axial strains on samples S1 and S2 by FBG sensors

对于试样 S2 (见图 8(b)), 相对 S1 来说轴向方向上变形较为均匀, 3 个光栅处所测应变值呈阶梯型负增长, 且达到破坏时的最大应变值超过 $1\ 500 \times 10^{-6}$ 。从变化情况来看, S2 所测数据较 S1 稳定, 主要是因为页岩物性差异以及在变形破坏过程中页岩各向异性所决定的。3 个光栅处几乎同时出现数据波动, 且 A3 处较 A1、A2 处波动性更小且所测数据更稳定。这表明位于页岩下部 1/3 处受扰动较小, 光栅布拉格光纤更易稳定测量应变变化。

4.2.3 共和应变片测量结果

图 9 为利用高精度十字应变花测得试样 S1 表面轴向及环向应变变化。因在试验过程中使用了两对十字应变花, 故测得数据分别用 c1、c2 和 a1、a2 表示环向、轴向应变变化。由图可知, 随轴向荷载持续增加, 环向应变及轴向应变值持续增大, 达到峰值强度时环向应变最大值超过 $2\ 000 \times 10^{-6}$, 而轴向应变最大值接近 $8\ 000 \times 10^{-6}$ 。由此可知, 相对于高精度十字应变花测量数据, 利用 FBG 所测应变值偏小。

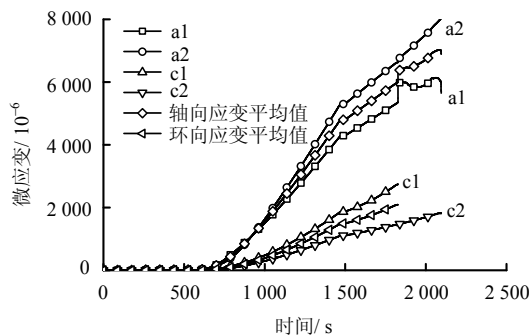


图 9 共和十字应变花所测试样 S1 应变变化
Fig.9 The measurement of strains on samples S1 by Kyowa strain gages

4.3 应变测量对比分析

在单轴压缩试验条件下, 利用 FBG 测量轴向应变过程中需考虑应变传递效率的影响问题。魏世明等^[20]研究了岩石变形与光纤光栅应变传递的关键问题, 并提出了轴向光栅应变传递模型, 求解出应变传递系数 α 、应变传递效率 η , 计算公式分别为

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{\sinh(kL)}{kL \cosh(kL)}} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{1}{\alpha} \quad (6)$$

式中: k 为轴向应变传递特征值, 其与光纤半径、保护层半径、光纤弹性模量以及保护层剪切模量有

关, 且与粘贴层厚度及力学性质有关系, 据表 4^[21-22] 计算其值为 111.69; L 为单根光栅长度的 1/2, 取 0.75 cm; $\sinh(x)$ 、 $\cosh(x)$ 为三角函数计算公式。

由于魏世明等^[20]建立的岩石力学表面应变传递模型和本试验实际情况略有不同, 笔者针对本文试验进行应变传递系数的重新估算, 对于轴向光栅测量条件下估算结果 α 为 5.45, 则应变传递效率 η 为 18.3%。由此可知, 在轴向变形过程中轴向光栅应变传递效率低, 而环向应变受扰动较小, 所测数据波动性小, 故不做换算处理。

表 5 光纤及黏胶力学参数

Table 5 Parameters of FBG and epoxy resin adhesive

光纤半径 / μm	保护层半径 / μm	光纤弹性模量 / GPa	保护层弹性模量 / MPa	保护层泊松比	保护层剪切模量 / MPa	环氧树脂黏胶剪切模量 / kPa
62.5	102.5	72	2.55	0.48	0.85	29.5

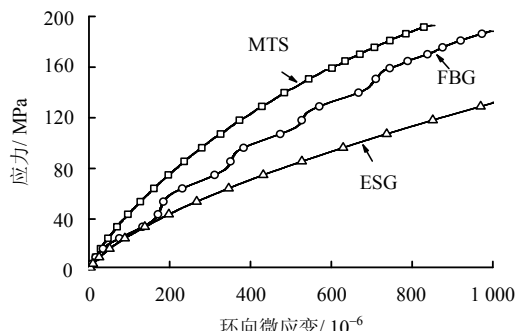
4.3.1 环向应变综合对比分析

利用 FBG 应变传感阵列、高精度十字应变花以及 MTS 环向应变规所测页岩表面环向应变与应力的关系如图 10 所示。对于试样 S1, 将 MTS 应变规所测数据作为参考值, 并分析对比在同应力条件下 3 种测量手段所测数据, 可以发现: 光纤光栅所测结果与其他两种测试手段测得值趋势相同, 但 FBG 应变传感器测量精度较十字应变花 ESG 更为靠近 MTS 所测数据, 且应力越大时越接近 MTS 所测值。相比而言, 高精度十字应变花 ESG 测量结果与 MTS 所测值有较大差异, 且随应力逐渐增大而误差更大。试样 S2 在试验之前十字应变花导线损坏故无法测得数据, 但从 FBG 传感器测的结果看出, 环向应变较为稳定, FBG 虽不能测得完整破坏后期数据, 但变化趋势及测量精度方面非常接近 MTS 测量结果。

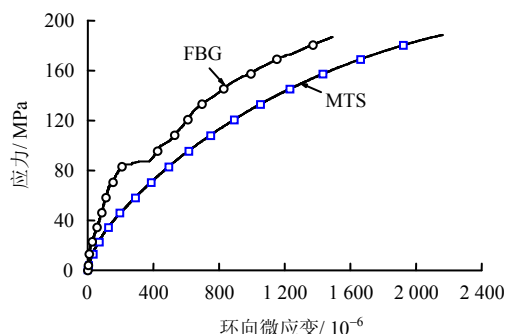
4.3.2 轴向应变综合对比分析

单轴压缩过程中页岩轴向方向上变形量大, 裂缝随轴向应力增大而逐渐发育直至破坏。试样 S1 利用 3 种测量手段测得轴向应变变化趋势相同, 其中 FBG 换算前数据值较实际应变小且波动变化大。将 FBG 所测轴向应变进行换算并将数据平滑处理, 平滑度为 3 884。如图 11(a)所示, FBG 换算轴向应变呈 S 型增长, 且应力越大越接近 MTS 测量结果。相对于高精度十字应变花 ESG, FBG 测得结果更为接近 MTS 测量结果。

试样 S2 轴向光栅同样受表面变形影响而出现测量结果波动性大, FBG 所测值呈阶梯型增长且测



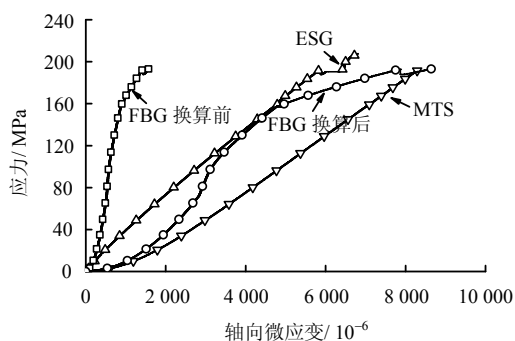
(a) 试样 S1 环向应变



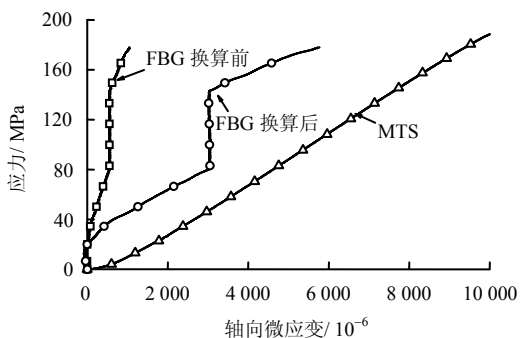
(b) 试样 S2 环向应变

图 10 应力-应变环向曲线

Fig.10 Stress-circumferential strain relationships of samples S1 and S2



(a) 试样 S1 轴向应变



(b) 试样 S2 轴向应变

图 11 应力-应变轴向曲线

Fig. 11 Stress-axial strain relationships of samples S1 and S2

量范围小于 MTS 的结果。由于在页岩达到峰值强度之前，表面变形迅速且发生应变突变、裂缝生成或贯通，以及页岩物性差异致使两试样测试结果不相同。

5 结 论

(1) 试验应变监测技术包含 FBG 传感器阵列（轴向和环向）、高精度应变花和 MTS 815.04 配置的环向应变规，综合性地研究了页岩室内单轴压缩破坏过程，发现光纤布拉格光栅与 MTS 测试结果接近，且在试样 S1 应变精度对比中表现出优秀的测试性能，即优于高精度十字应变花测试结果，表明 FBG 能够更精细化捕捉岩石表面应变变化情况。

(2) 本文仅在单轴压缩试验条件下验证了 FBG 测试精度及其适用性。环向应变传递效率高于轴向。本试验中轴向应变传递效率仅为 18.3%，轴向应变传递效率与光纤本身力学性质、光栅长度以及粘贴层力学性质和厚度决定。

(3) 本次试验采用的是将两根含有 3 个光栅的光纤粘贴于试样环向及轴向相应位置。光栅之间因变形而相互影响、粘贴过程中所用环氧黏胶的种类、凝固强度、厚度以及 FBG 解调仪对于信号解调的能力等因素都会影响最后测量精度。通过试验可知，从粘贴效果来看，新型 555 黏胶优于 DP100 黏胶。

参 考 文 献

- [1] 刘洪林, 王红岩, 刘人和, 等. 中国页岩气资源及其勘探潜力分析[J]. 地质学报, 2010, 84(9): 1374—1378.
LIU Hong-lin, WANG Hong-yan, LIU Ren-he, et al. China shale gas resources and prospect potential[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(9): 1374—1378.
- [2] 张小龙, 张同伟, 李艳芳, 等. 页岩气勘探和开发进展综述[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(2): 116—122.
ZHANG Xiao-long, ZHANG Tong-wei, LI Yan-fang, et al. Research advance in exploration and development of shale gas[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2013, 25(2): 116—122.
- [3] ADMINISTRATION U S E I. Annual energy outlook 2011 with projections to 2035[EB/OL][J]. [http://www.eia.gov/forecast/aeo/df/0383\(2011a\).pdf](http://www.eia.gov/forecast/aeo/df/0383(2011a).pdf), 2011-08-06.
- [4] 董大忠, 邹才能, 杨桦, 等. 中国页岩气勘探开发进展与发展前景[J]. 石油学报, 2012, 33(增刊 1): 107—114.
DONG Da-zhong, ZOU Cai-neng, YANG Hua, et al. Progress and prospects of shale gas exploration and development in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(Supp.1): 107—114.
- [5] 仲冠宇, 王瑞和, 周卫东, 等. 人工裂缝逼近条件下天然裂缝破坏特征分析 [J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 247

- 255.
ZHONG Guan-yu, WANG Rui-he, ZHOU Wei-dong, et al. Failure characteristics of natural fracture in the vicinity of hydrofractures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(1): 247—255.
- [6] 侯振坤, 杨春和, 王磊, 等. 大尺寸真三轴页岩水平井水力压裂物理模拟试验与裂缝延伸规律分析[J]. 岩土力学, 2016, 32(2): 407—414.
HOU Zhen-kun, YANG Chun-he, WANG Lei, et al. Hydraulic fracture propagation of shale horizontal well by large-scale true triaxial physical simulation test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 32(2): 407—414.
- [7] 衡帅, 杨春和, 张保平, 等. 页岩各向异性特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 609—616.
HENG Shuai, YANG Chun-he, ZHANG Bao-ping, et al. Experimental research on anisotropic properties of shale[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(3): 609—616.
- [8] 侯振坤, 杨春和, 郭印同, 等. 单轴压缩下龙马溪组页岩各向异性特征研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2541—2550.
HOU Zhen-kun, YANG Chun-he, GUO Yin-tong, et al. Experimental study on anisotropic properties of Longmaxi formation shale under uniaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(9): 2541—2550
- [9] 张永泽, 刘俊新, 冒海军, 等. 单轴压缩下页岩力学特性的各向异性试验研究[J]. 金属矿山, 2015, 36(12): 33—37.
ZHANG Yong-ze, LIU Jun-xin, MAO Hai-jun, et al. Anisotropic experimental study on mechanical properties of shale under uniaxial compression[J]. **Vadose Zone Journal**, 2015, 36(12): 33—37.
- [10] SUN Y, LI Q, YANG D, et al. Investigation of the dynamic strain responses of sandstone using multichannel fiber-optic sensor arrays[J]. **Engineering Geology**, 2016, 213: 1—10.
- [11] SHIVANANJU B N, KIRAN M, NITHIN S P, et al. Real time monitoring of petroleum leakage detection using etched fiber Bragg grating[M]. International Conference on Optics in Precision Engineering and Nanotechnology. Singapore: Singapore SPIE, 2013.
- [12] 魏世明, 柴敬. 岩石变形破坏过程的光纤光栅传感检测方法研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2010, 29(2): 233—238.
WEI Shi-ming, CHAI Jing. A method of fiber Bragg grating sensing in rock deformation and damage test[J]. **Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)**, 2010, 29(2): 233—238.
- [13] 孙艳坤, 李琦, 李霞颖, 等. 基于光纤 Bragg 光栅的油气工业实时监测技术研究进展[J]. 科技导报, 2015, 33(12): 84—91.
SUN Yan-kun, LI Qi, LI Xia-ying, et al. Progress of real-time monitoring technology in oil and gas industry based on Fiber Bragg Grating sensing[J]. **Science & Technology Review**, 2015, 33(12): 84—91.
- [14] 邹才能, 董大忠, 王玉满, 等. 中国页岩气特征、挑战及前景(一)[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 689—701.
ZOU Cai-neng, DONG Da-zhong, WANG Yu-man, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (I)[J]. **Petroleum Exploration and Development**, 2015, 42(6): 689—701.
- [15] HILL K O, FUJII Y, JOHNSON D C, et al. Photosensitivity in Optical Fiber waveguides—Application to reflection filter fabrication[J]. **Applied Physics Letters**, 1978, 32(10): 647—649.
- [16] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
LIAO Yan-biao. Fiber Optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [17] 何伟, 陈宏波, 梅家纯, 等. 光纤光栅中光弹效应的研究[J]. 光电子·激光, 2002, 13(9): 885—888.
HE Wei, CHEN Hong-bo, MEI Jia-chun, et al. Study on the strain-optic effect in fiber bragg gratings[J]. **Journal of Optoelectronics Laser**, 2002, 13(9): 885—888.
- [18] 蒲泊伶, 董大忠, 阎耳, 等. 川南地区龙马溪组页岩有利储层发育特征及其影响因素[J]. 天然气工业, 2013, 33(12): 41—47.
PU Bo-ling, DONG Da-zhong, CHUANG Er, et al. Favorable reservoir characteristic of the Longmaxi shale in the southern Sichuan Basin and their influence factors[J]. **Natural Gas Industry**, 2013, 33(12): 41—47.
- [19] 王玉满, 董大忠, 李建忠, 等. 川南下志留统龙马溪组页岩气储层特征 [J]. 石油学报, 2012, 33(4): 551—561.
WANG Yu-man, DONG Da-zhong, LI Jian-zhong, et al. Reservoir characteristic of shale gas in Longmaxi Formation of the Lower Silurian, southern Sichuan[J]. **Acta Petrolei Sinica**, 2012, 33(4): 551—561.
- [20] 魏世明, 柴敬. 岩石变形光纤光栅传感检测的应变传递分析[J]. 试验力学, 2010, 25(4): 445—450.
WEI Shi-ming, CHAI Jing. Strain transfer analysis of rock deformation based on FBG Sensing[J]. **Journal of Experimental Mechanics**, 2010, 25(4): 445—450
- [21] 尤明庆. 岩石试件的强度及变形破坏过程[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
YOU Ming-qing. The strength and deformation during the process of rock failure[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000.
- [22] 魏世明. 岩体变形光纤光栅传感检测的理论与方法研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2008.
WEI Shi-ming. Study on theory and method of Fiber Bragg Grating sensing in rock deformation test[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2008.