

文章编号: 1001-4888(2010)04-0445-06

## 岩石变形光纤光栅传感检测的应变传递分析<sup>\*</sup>

魏世明<sup>1</sup>, 柴敬<sup>2</sup>

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南焦作 454003; 2. 西安科技大学 能源学院, 陕西西安 710054)

**摘要:** 岩石变形过程可以通过光纤光栅的表面粘贴法进行检测。建立了考虑表面凹槽时的应变传递模型, 经过力学分析得出了应变传递方程及传递系数的表达式; 在 MTS 伺服机上进行了单轴压缩实验, 借助光纤光栅对加载过程进行了测试。结果表明, 传递方程与粘贴层厚度均匀分布时的方程形式相同, 只是特征值  $k$  不同; 换算后光栅的轴向应变与 MTS 位移计吻合很好, 相对误差仅为 3.2%; 环向测试优于 MTS 的环向应变计, 而两种方法都明显地优于应变片。实验验证了所建模型的正确性。经应变传递换算后, 通过光纤光栅可以实现岩石变形过程中与 MTS 精度相当的高精确测试。

**关键词:** 岩石; 光纤光栅; MTS; 应变传递

**中图分类号:** TD32; TP212.4

**文献标识码:** A

### 0 引言

岩石变形与破坏是岩石力学研究的基本内容之一。光学、CT、声发射、电磁辐射及红外等是目前常用的检测方法, 可以对损伤过程进行监测研究, 解决含有少量裂纹的力学问题, 但无法实现岩石变形破坏过程中应力应变的精确测试。因此, 需不断寻求适合岩石应力应变检测的新的测试方法。

光纤光栅是近几年国际上新兴的电子器件。世界上第一根光纤光栅诞生于 1978 年, 由加拿大的 Hill 等人在实验室中制作出。1989 年美国的 Meltz 等人发明了光纤光栅的紫外侧写入技术。随后, 1993 年 Hill 与 Lemaire 分别提出相位掩模成栅技术和低温高压载氢技术。这两项技术相结合极大地降低了光纤光栅的制作成本与难易程度, 从而在世界各地掀起了基于光纤光栅应用研究的热潮。现如今, 该项技术已被广泛地应用于混凝土、复合材料、航空航天等领域<sup>[1-5]</sup>。

无论光纤光栅是被埋入材料内部或被粘贴于表面, 都存在一个同被测材料的应变传递过程, 而应变传递系数的大小也直接决定了测试精度。国内外众多学者也认识到这个问题, 进行了较为深入的研究。Antonio Nanni<sup>[6]</sup> 十分粗略地得到光纤传感器测试应变与混凝土应变关系; Ansari 等人<sup>[7]</sup> 假定埋入式光纤粘贴长度中心的应变与基体应变相同而得出了光纤的轴向应变和剪应力分布, 并给出了相应的光纤传感力学模型。在国内周智<sup>[8]</sup> 通过对多层粘接情况的分析得出了比 Ansari 等更一般的结果。黄国君等人<sup>[9]</sup> 通过实验证明了不同的材料和封装方式对光纤光栅传感器应变传递率的影响。李东升等人<sup>[10]</sup> 根据光纤光栅封装的实际情况, 修正了 Ansari 等人不合理的假定而推导了埋入光纤光栅传感器所测应变与实际结构应变的关系, 得出了平均应变传递率并讨论了影响应变传递率的影响因素, 与实验结果进行了比较, 并对多层粘接情况进行了分析。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2009-12-25; 修订日期: 2010-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50774060)

通讯作者: 魏世明(1979—), 男, 博士, 讲师, 主要从事采矿工程、岩石力学及光纤传感监测方面的教学及研究工作。E-mail: sming2002cn@163.com

采用光纤光栅传感技术对岩石变形破坏过程进行检测的研究还比较初步<sup>[11,12]</sup>。鉴于岩石变形过程的复杂性,目前对岩石材料的内部应力、应变、压力测试仍处于理论探索阶段,该研究的应用存在较多的理论和技术难题。光纤光栅与岩石的应变传递规律成为此项研究中亟待解决的关键理论之一。

本文以岩石变形机理及光纤光栅传感原理为基础,针对岩石变形检测中光纤光栅表面粘贴法的应用,分析研究了表面粘贴状态下的应变传递规律。

## 1 光纤光栅传感原理

当光纤中的光波通过 Bragg 光栅时,满足波长条件( $\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$ )的光被反射回来而成为反射光。外界参量(主要为应变和温度)的变化将引起反射光波长的漂移,通过对漂移量的检测可获得所测参量的大小。

由光纤光栅基本方程进行推导,得出轴向应力作用下的基本传感方程<sup>[13]</sup>:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\epsilon \quad (1)$$

式中,  $\Lambda$  为光栅周期;  $\lambda_B$  为光栅波长;  $p_e = \frac{1}{2}n_{eff}^2[-(P_{11} + P_{12})\mu + P_{12}]$ ,  $P_{11}$  和  $P_{12}$  为弹光系数。

由式(1)可知,灵敏度系数  $p_e$  为一常数,其大小由光纤材料所决定,表明了波长漂移量与轴向应变的线性变化关系。

## 2 表面粘贴状态下光纤光栅应变传递过程分析

光栅通过粘贴的方式被布置于岩石表面,通过岩石→粘贴层→光纤保护层→光纤光栅实现应变传递过程。对该过程进行力学分析,获取应变传递规律,对于实现光纤光栅的高精度测试显得尤为必要。

### 2.1 模型的建立

为有利于光纤固定及增大光纤与粘贴层的接触,实际粘贴时一般都在材料表面开一与光纤直径相当的凹槽,而这也彻底改变了光纤的受力状态,但前人所建立的力学模型中并未考虑此影响<sup>[8]</sup>。鉴于此,本文建立如下的力学模型:假定凹槽形状为半圆形,半径  $r_h$  等于光纤保护层的直径,即  $r_h = 2r_p$ , 光纤光栅的长度  $2L$ , 模型如图 1 所示。

### 2.2 力学分析过程

建立柱坐标系,  $x$  沿光纤轴向,  $r$  沿径向方向,坐标原点为光栅正中央。取光纤微元体长度为  $dx$ , 假设剪应力均匀分布,沿光纤体表面的剪应力均为  $\tau_g(x, r_g)$ , 沿保护层外表面的剪应力为  $\tau_p(x, r_p)$ , 轴向正应力分别为  $\sigma_g(x)$ 、 $\sigma_p(x)$ , 如图 2 所示。

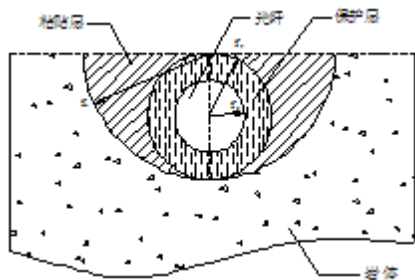


图 1 凹槽表面粘贴力学模型

Fig. 1 Mechanics model of surface pasting with groove

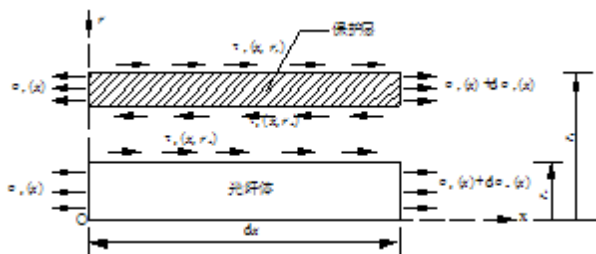


图 2 光纤体及保护层受力

Fig. 2 The stress state of optical fiber body and its protective layer

对光纤微元体来说,水平方向力平衡方程:

$$-\sigma_g(x)\pi r_g^2 + [\sigma_g(x) + d\sigma_g(x)]\pi r_g^2 + 2\pi r_g dx \cdot \tau_g(x, r_g) = 0 \quad (1)$$

化简可得:

$$\tau_g(x, r_g) = -\frac{r_g}{2} \frac{d\sigma_g(x)}{dx} \quad (2)$$

对保护层微元体, 水平方向力的平衡方程为:

$$-\sigma_p(x) \pi(r_p^2 - r_g^2) + [\sigma_p(x) + d\sigma_p(x)] \pi(r_p^2 - r_g^2) - \tau_g(x, r_g) \cdot 2\pi r_g + \tau_p(x, r_p) \cdot 2\pi r_p = 0 \quad (3)$$

化简得:

$$\frac{d\sigma_p(x)}{dx} = \frac{2[\tau_g(x, r_g) r_g - \tau_p(x, r_p) r_p]}{r_p^2 - r_g^2} \quad (4)$$

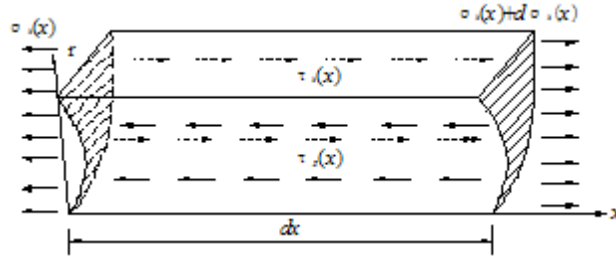


图3 粘贴层受力

Fig. 3 The stress state of pasting layer

对于整个粘贴层来说(图3), 沿  $x$  方向力的平衡方程为:

$$-\sigma_h(x) \left( \frac{\pi r_h^2}{2} - \pi r_p^2 \right) + [\sigma_h(x) + d\sigma_h(x)] \left( \frac{\pi r_h^2}{2} - \pi r_p^2 \right) - 2\pi r_p \tau_p(x, r_p) dx + \pi r_h \tau_h(x, r_h) dx = 0 \quad (5)$$

化简得:

$$\frac{d\sigma_h(x)}{dx} = \frac{2 \left[ r_p \tau_p(x, r_p) - \left( \frac{\sqrt{2}}{2} r_h \right) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \tau_h(x, r_h) \right]}{\left( \frac{\sqrt{2}}{2} r_h \right)^2 - r_p^2} \quad (6)$$

假设粘贴层厚度均匀分布, 其他条件不变, 设其外半径  $r'_h$ , 内分布应力  $\tau(x, r_h)'$ , 建立其平衡方程为:

$$\frac{d\sigma_h(x)}{dx} = \frac{2[r_p \tau_p(x, r_p) - r'_h \tau_h(x, r_h)']}{(r'_h)^2 - r_p^2} \quad (7)$$

比较式(6)和(7)可知, 当  $r'_h = \frac{\sqrt{2}}{2} r_h$ ,  $\tau(x, r_h)' = \frac{\sqrt{2}}{2} \tau(x, r_h)$  关系成立时, 二方程完全等价, 由此表明, 原模型可转换为粘贴层外半径为  $\frac{\sqrt{2}}{2} r_h$ , 内表面受均布剪应力的力学模型。以此为基础, 根据文献[14]中3.4节的推导结果, 可得最终的应变传递方程:

$$\epsilon_g(x) = \epsilon_r(x) \left[ 1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)} \right] \quad (8)$$

式中,  $\epsilon_g(x)$  为光纤体的轴向应变;  $\epsilon_r(x)$  为沿光纤轴向方向的岩石应变。特征值  $k$  的表达式为:

$$k^2 = \frac{2}{E_g r_g^2 \left[ \frac{1}{G_p} \ln \frac{r_p}{r_g} + \frac{1}{G_h} \ln \sqrt{2} \right]} \quad (9)$$

式中,  $E_g$  为光纤体的弹性模量;  $G_p$  为光纤保护层的剪切模量;  $G_h$  为粘贴层的剪切模量。

由式(8)可得光纤光栅平均应变与岩石之间的应变传递系数  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\bar{\epsilon}_r}{\bar{\epsilon}_g} = \frac{1}{1 - \frac{\sinh(kL)}{kL \cosh(kL)}} \quad (10)$$

### 3 岩石单轴压缩实验光纤光栅表面检测法研究

由某矿取变质细砂岩并制成圆柱形标准试件。光栅粘贴位置分别沿试件轴向和环向,轴向光栅粘贴于 1/3 纵轴处,环向光栅粘贴于试件正中央。在贴近光栅位置分别粘贴应变片(ESG),以比较测试结果。胶结剂选用 A、B 组分的环氧树脂胶。实验在 815MTS 伺服机上进行,采用单循环加载,试件破坏后停止实验。

#### (1) 轴向应变分析

光栅栅区的长度取  $2L=3\text{cm}$ ,所用胶结剂在  $25^\circ\text{C}$  时的剪切模量为  $29.5\text{MPa}$ ,其他参数见文献[14]的表 3.1,将各值代入式(10)后得应变传递系数为 2.3。将经过该系数换算后光栅应变与应变片及 MTS 相对比,结果如图 4 所示。

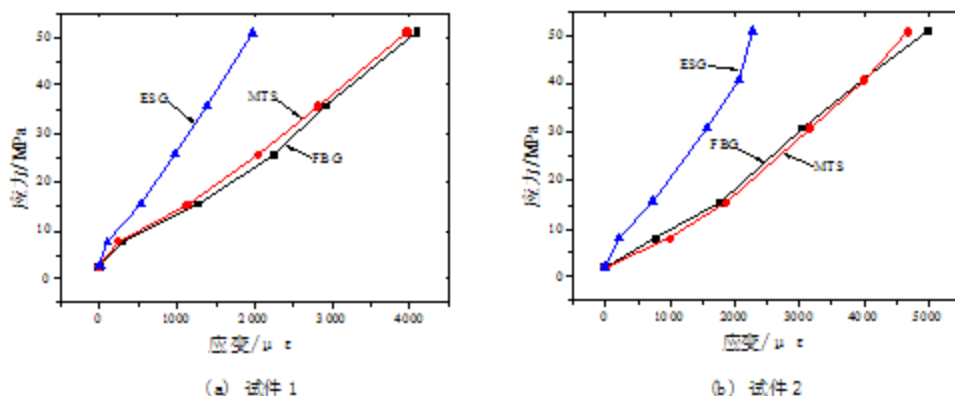


图 4 轴向应变比较

Fig. 4 Compare of axial stress

由图 4 可知,光栅与 MTS 的结果相一致,若以 MTS 为基准,试件 1 应变值相对误差为 2.8%,绝对误差  $63\mu\epsilon$ ,且载荷越大,数据的吻合程度越高;而对于应变片来说,相对误差为 50.8%,绝对误差  $1440.3\mu\epsilon$ ,且随着载荷的增加误差值越大。

由以上的分析知,经过应变传递系数换算后光纤光栅应变与 MTS 相比平均相对误差仅为 3.2%,表明应变传递系数与实际相吻合,经该应变传递系数换算后的应变可以视作试件的真实应变。

#### (2) 环向应变分析

在试件的压缩过程中通过 MTS、光纤光栅及应变片三种测试方法得到的环向应变变化如图 5 所示。

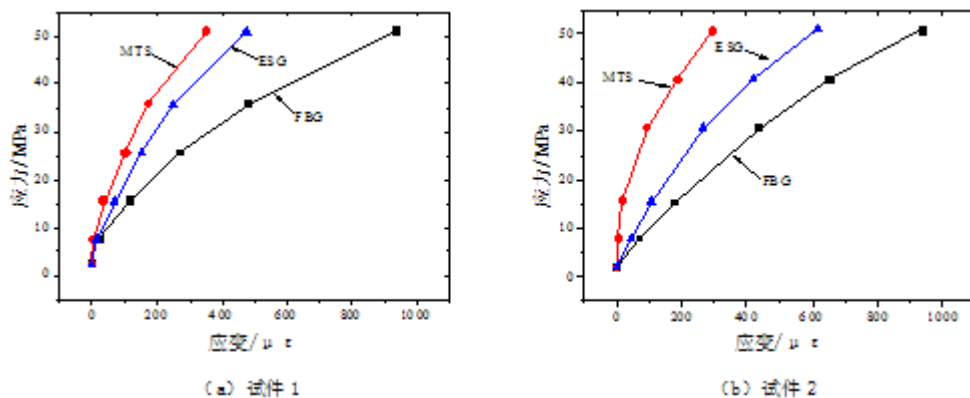


图 5 环向应变比较

Fig. 5 Compare of ring strain

由图 5 可知,三种测试手段所得的环向应变变化规律一致,但数值上有较大差别。总的来说,光纤

光栅所测得的应变值最大,其次为应变片,MTS 所测得的值最小。

比较图 4 和图 5 可知,与轴向测试相比,光栅与 MTS 的环向应变测试差异较大,主要原因是:① 传感器布置方式不同。环向应变测试中,光纤光栅与应变片都是通过粘贴的方式固定于试件表面,与试件接触紧密,而 MTS 采用的是捆绑式环向应变计(图 6),与试件之间难免有空隙,故造成 MTS 的测试结果偏小。② MTS 轴、环向应变测试分别采用了不同传感器。MTS 轴向应变测试采用的是 MTS 本身自带的轴向位移计,具有极高的测试精度,与环向测试中环向应变计不同。由此可知,MTS 轴向与环向的测试条件改变,而在轴向测试中光纤光栅实现了与 MTS 精度相当的测试过程,因此,相同粘贴条件下的环向应变测试可以达到相同精度,即通过光纤光栅可以实现环向应变的高精度测试。该结果也与文献[12]中的结论相一致。



图 6 环向应变计

Fig. 6 Ring strain sensor

## 4 结论

(1) 对光纤光栅表面粘贴模型推导时,应考虑表面凹槽的影响。考虑凹槽时的应变传递方程为  $\epsilon_g(x) = \epsilon_r \left[ 1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)} \right]$ 。在各种力学参数已知时,可以求得应变传递系数。

(2) 通过在 MTS 伺服机上的单轴压缩实验,验证了理论分析的结果。经应变传递系数换算后光栅轴向应变与 MTS 位移计相对误差率平均仅为 3.2%,表明了应变传递模型的正确性。

(3) 通过光纤光栅可以实现岩石变形过程的高精度测试,测试结果在某种程度上与 MTS 的精度相当,明显优于应变片。

(4) 表面粘贴时应变传递系数受粘接剂剪切模量及其他粘贴工艺的影响,因此,在接下的研究中应考虑各影响以减小测试过程中的误差。

## 参考文献:

- [1] 任鹏, 汤立群, 张红 等. 光纤光栅传感器对钢筋混凝土内部应变的测量及温度效应的研究[J]. 实验力学, 2003, 18(2): 234—238 (Ren Peng, Tang Liqun, Zhang Hong, et al. Studies on the internal strain measurement of FBGs in side of steel-reinforced concrete and it's temperature effect[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2003, 18(2): 234—238(in Chinese))
- [2] 赵鸣, 何涛, 李杰. 光纤光栅传感器在大体积混凝土基础温度监测中的应用[J]. 实验力学, 2005, 20(1): 23—29 (Zhao Ming, He Tao, Li Jie. The application of the fiber Bragg grating sensors in the temperature monitoring of the large volume concrete foundation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(1): 23—29 (in Chinese))
- [3] 芦吉云, 梁大开, 李东升 等. 基于光纤智能夹层传感结构的应力测量研究[J]. 实验力学, 2006, 21(5): 567—571 (Lu Jiyun, Liang Dakai, Li Dongsheng, et al. A study on stress measurement based with optical fiber smart layer sensor structure[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(5): 567—571(in Chinese))
- [4] 朱启荣, 方如华, 曾伟明 等. FRP 混凝土结构力学性能的实验研究[J]. 实验力学, 2003, 18(2): 161—165 (Zhu Qirong, Fang Ruhua, Zeng Weiming, et al. An experimental study on the mechanical properties of FRP-concrete structure[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2003, 18(2): 161—165 (in Chinese))
- [5] 柴敬, 常心坦. 光纤传感器在相似材料模型测试中的相容性研究[J]. 实验力学, 2004, 19(4): 453—458 (Chai Jing, Chang Xintan. Study on compatibility of fiber optical sensor in simulation experiment with analogy material [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2004, 19(4): 453—458 (in Chinese))
- [6] Nann A, Yang C C, Pan K, et al. Fiber-optic sensors for concrete strain/stress measurement[J]. ACI materials Journal, 1991, 88(3): 257—264.

- [7] Ansari Farhad, Yuan Libo. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(4): 385—394.
- [8] 周智. 土木工程结构光纤光栅智能传感元件及其监测系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003 (Zhou Zhi. Optical fiber smart Bragg grating sensors and intelligent monitoring systems of civil infrastructures[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2003 (in Chinese))
- [9] 黄国君, 殷昀骥, 戴锋 等. 光纤布拉格光栅应变传感器的灵敏性及疲劳可靠性研究[J]. 激光杂志, 2003, 24(6): 45—47 (Huang Guojun, Yin Yunguo, Dai Feng, et al. Investigation on the sensibility and fatiguere liability of fiber Bragg grating strain sensors[J]. Lazer Journal, 2003, 24(6): 45—47(in Chinese))
- [10] 李东升, 李宏男. 埋入式封装的光纤光栅传感器应变传递分析[J]. 力学学报, 2005, 37(4): 435—441 (Li Dongsheng, Li Hongnan. Strain transferring analysis of embedded fiber Bragg grating sensors[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2005, 37(4): 435—441 (in Chinese))
- [11] 魏世明, 柴敬. 岩石单轴压缩光纤光栅传感检测方法研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3174—3177 (Wei Shiming, Chai Jing. Study of application of optical fiber Bragg grating sensing to uniaxial compression experiments of rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 3174—3177 (in Chinese))
- [12] Hattenberger C S, Marcel Naumann, Gunter Borm. Fiber Bragg grating strain measurements in comparison with additional techniques for rock mechanical testing[J]. IEEE sensors journal, 2003, 3(1): 50—55.
- [13] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 198~202 (Liao Yanbiao. Fiber optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 198—202 (in Chinese))
- [14] 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 Shiming. 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 (in Chinese))

## Strain Transfer Analysis of Rock Deformation based on FBG Sensing

WEI Shi-ming<sup>1</sup>, CHAI Jing<sup>2</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Rock deformation process can be tested by using the fiber Bragg grating (FBG) surface pasting method. Strain transfer model considering the surface groove was established, and the expression of strain transfer equation and transfer coefficient was obtained by mechanics analysis. Rock uniaxial compression experiment on MTS was conducted, and the loading course was tested by using FBG. Results indicate that the transfer equation is the same as the equation used when the thickness of the adherence layer is uniformly distributed with the only different eigenvalue  $k$ . The converted axial strain of FBG accords with MTS displacement gauge with the relative error 3.2%. The effect of ring strain test is better than MTS radial strain gauge, and both methods are all obviously better than electrical strain gauges. This experiment validates above mentioned strain transfer model of surface pasting. After strain transfer conversion, high precision rock deformation test will be achieved by FBG with equivalent accuracy with MTS.

**Keywords:** rock; fiber Bragg grating (FBG); Rock Mechanics Test System (MTS); strain transfer