

内嵌预压式大量程光纤光栅传感器的 智能钢绞线的研制与性能分析

覃荷瑛^{1,2}, 朱万旭^{1,2,4*}, 张贺丽^{1,2}, 周智³, 欧进萍⁴

¹ 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004;

² 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004;

³ 大连理工大学土木工程学院, 辽宁 大连 116024;

⁴ 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 设计了一种在钢绞线中心丝上设置凹槽、在中心丝张拉持荷状态下于凹槽中嵌入光纤光栅(FBG)传感器的智能钢绞线,使 FBG 传感器在服役前产生一定的压应变,以解决 FBG 传感器封装存活率低以及监测量程不够的问题。理论分析了嵌入式 FBG 传感器与基体之间的应变传递率,对凹槽的截面尺寸、传感器的黏结长度以及封装材料的弹性模量提出了设计要求。以中心丝持荷值为变化参数,对 FBG 智能钢绞线进行不同监测量程的张拉实验。结果表明,实验数据具有良好的线性度和重复性;当中心丝持荷值达到中心丝极限承载力的 30% 以上时,FBG 传感器的监测量程接近钢绞线的极限张拉力,从而实现对钢绞线全生命周期的监测。

关键词 光纤光学; 光纤光栅; 凹槽; 监测量程; 智能钢绞线

中图分类号 U443; U445

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0410001

Manufacturing and Performance Analysis of Intelligent Steel Strand Embedded with Prepressure Large Scale Fiber Bragg Grating Sensor

Qin Heying^{1,2}, Zhu Wanxu^{1,2,4}, Zhang Heli^{1,2}, Zhou Zhi³, Ou Jinping⁴

¹ College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

² Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin, Guangxi 541004, China;

³ School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

⁴ School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract An intelligent steel stand is designed, which is set a groove on the steel stand center wire and embedded with fiber Bragg grating (FBG) sensor under the state of the center wire holding a certain load. FBG sensor can generate a certain strain before serving. Thus, the problems of low survival rate and limited monitoring range of FBG sensor can be solved. Based on the theoretical analysis of the strain transfer rate between embedded FBG sensor and substrate, the cross-sectional size of the groove, the bond length of the sensor and the elastic modulus of the packaging material are proposed to meet the designed requirements. Tensile experiments for the FBG intelligent steel strand are carried out in different monitoring ranges according to different holding values. The results show that the experimental data has good linearity and repeatability. When the holding value reaches 30% of the ultimate bearing capacity of the center wire, the monitoring range of FBG sensor is close to the limit tension of the steel strand. The monitoring for whole life cycle of steel strand can be achieved.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; groove; monitoring range; intelligent steel strand

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 050.2770; 130.6010

收稿日期: 2016-11-15; **收到修改稿日期:** 2016-12-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41272358)、广西科技计划(桂科 AD16380017)

作者简介: 覃荷瑛(1972—),女,博士,副教授,主要从事结构智能健康监测和混凝土结构及其新材料方面的研究。

E-mail: qinheyinlqx@163.com

* **通信联系人.** E-mail: zhuwanxu@vip.163.com

1 引 言

斜拉桥的拉索、系杆拱桥的吊杆、悬索桥和索道的缆索、岩土和边坡护坡的锚杆、大跨度构件的体内外预应力筋以及体育场馆、天文台等索网支撑体系(500 m 口径球面射电望远镜工程^[1])中的索网是这些结构的核心构件,起着关键作用,这些核心构件的承力部件为钢绞线,其线型、应力分布、可靠与失效都集中表现在钢绞线的受力上。目前,体外钢绞线的寿命通常在 20 年以下,且因制作方法、受力情况、使用环境的不同,寿命相差较大;体内钢绞线由于受其他材料(如混凝土)的保护,使用寿命大于体外钢绞线,但通常也会先于整个构件或结构失效,并且体内是一个隐蔽工程,实现无损监测较难。为掌握核心构件自身以及整个结构的安全与营运状态,及时发现失效先兆,以防止突发性事故发生,必须监测钢绞线的应力应变状态^[2-3]。工程上,研究人员提出了各种光纤光栅(FBG)应力应变传感器^[4-6]。然而,FBG 本身比较纤细,它的玻璃脆性决定了其抗剪能力差、易折断,这使得 FBG 传感器的封装技术变得尤为复杂,尤其在相对恶劣的施工环境中,以及在各种荷载与环境腐蚀等多因素耦合作用的条件下,FBG 的封装存活率更加无法保障。为解决 FBG 封装存活率较低的问题,相关研究人员进行了大量的探索,周祖德等^[7]将 FBG 粘贴或焊接于钢绞线两边丝之间的自然小槽内或将嵌有 FBG 的光纤预制件作为钢绞线的绳芯,以达到在钢绞线中封装 FBG 的目的;FBG 智能筋成功解决了 FBG 存活率较低的问题^[8-10]。通常 FBG 传感器测量得到的应变最大值(约 4.5×10^{-3})远达不到钢绞线的屈服应变值(9×10^{-3} 以上),无法实现对钢绞线服役期全寿命过程的监测。因此,需要找到一种既能有效保护 FBG、又能解决 FBG 监测量程不足的封装方法。

2 凹槽嵌入式智能钢绞线封装结构的设计及其对应变传递效率的影响

为解决 FBG 在钢绞线中封装存活率较低的问题,设计了一种凹槽嵌入式封装方法:将钢绞线机械打散,取出中心丝或还没有扭绞成钢绞线的中心丝,在中心丝上设置纵向凹槽,用胶黏剂将 FBG 粘贴于凹槽内,将制作好的封装有 FBG 的中心丝与边丝扭绞成型,再引出 FBG 端部进行封装保护。图 1 为凹槽嵌入式智能钢绞线的结构示意图,图 2 为对应的实物图。

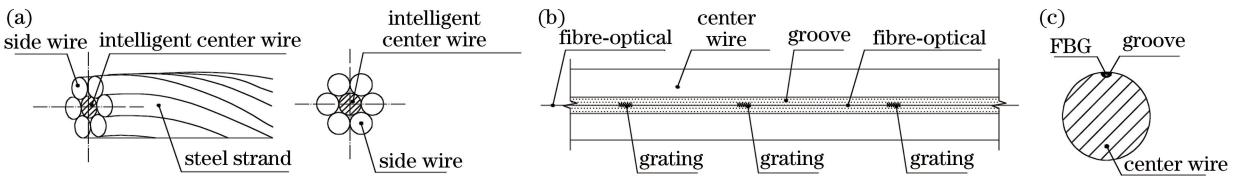


图 1 凹槽嵌入式智能钢绞线结构示意图。(a)智能钢绞线的组成;(b)智能中心丝纵截面;(c)智能中心丝横截面
Fig. 1 Structural diagram of groove embedded intelligent steel strand. (a) Constitution of intelligent steel strand; (b) longitudinal section of intelligent center wire; (c) cross section of intelligent center wire

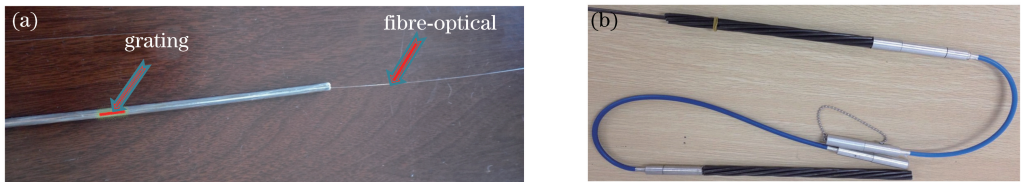


图 2 凹槽嵌入式智能钢绞线实物图。(a)智能中心丝;(b)智能钢绞线的端部封装结构

Fig. 2 Pictures of groove embedded intelligent steel strand. (a) Intelligent center wire; (b) end package structure of intelligent steel strand

采用以上封装方式,将 FBG 粘贴于凹槽处,避免 FBG 与其他硬性表面直接接触和挤压而造成断裂,从而提高粗放式施工条件及恶劣使用环境下 FBG 在钢绞线中的布设存活率及使用寿命;同时,用作粘贴的胶黏剂可作为 FBG 的保护层,该保护层在制作过程中可抵抗外界的冲击振动,进一步提高传感器的存活率,但在钢绞线的受力过程中,该保护层会产生应变,从而降低了钢绞线应变测量的灵敏度。分析发现,粘贴式传感器的测量应变与被测基体的实际应变之间存在着一个传递率 β 。为使传感器的测量结果准确反映基体的真实应变,需明确二者之间的应变传递机制,并找到计算应变传递率 β 的公式。

为此,选取粘贴有传感器的中心丝微元作为研究对象,进行受力分析。根据实际情况对该微元作如下假设:1) 光纤与粘贴层以及粘贴层与中心丝基体的交界面结合紧密,没有出现相对滑移;2) 将光纤看作是一种单一材料组成的玻璃纤维,即忽略光纤纤芯和纤芯保护层材料特性之间的差异;3) 钢绞线(基体结构)承受平行于光纤轴向的应力,粘贴层不直接受力;4) 假定 FBG 传感器栅区中点的 FBG、粘贴层和基体结构三者具有相同的应变。根据短纤维复合材料剪滞理论的基本原理^[11-14],推导出光纤的监测应变和基体结构真实应变之间的关系为

$$\epsilon_g = \epsilon_m \left[1 - \frac{\sinh(kx)}{\sinh(kL)} \right], \quad (1)$$

式中 ϵ_g 和 ϵ_m 分别为光纤传感器的应变和基体的应变, x 为光纤传感器上的定点到传感器端点的距离, L 为光纤传感器粘贴长度的一半,关于 k 的表达式为

$$k^2 = \frac{2G_p}{r_g^2 E_g \ln(r_m/r_g)}, \quad (2)$$

式中 G_p 和 E_g 分别为粘贴层的剪切弹性模量和光纤的弹性模量, r_m 和 r_g 分别为粘贴层的外径和光纤的外径。光纤传感器的平均应变为

$$\bar{\epsilon}_g = \int_0^L \epsilon_g(x) dx / L. \quad (3)$$

根据(1)、(3)式,可得光纤的平均应变传递率为

$$\beta = \frac{\bar{\epsilon}_g}{\epsilon_m} = 1 - \frac{\cosh(kL) - 1}{kL \sinh(kL)}. \quad (4)$$

为避免在制作和服役时该智能钢绞线的光纤被边丝挤压出到凹槽外而断裂,要求粘贴层的厚度应小于凹槽的深度,同时凹槽的深度和宽度应以不影响钢绞线的力学性能为前提。经多次实验得到,凹槽的深度在 0.2~0.5 mm、宽度在 0.5~1.2 mm 内取值时,对由直径为 5.2 mm 的中心丝和直径为 5.0 mm 的边丝组成的 1×7 标准型、公称直径为 15.2 mm 的钢绞线力学性能的影响较小,且光纤不易被挤出凹槽外,保证了 FBG 封装的存活率。此外,为确保两结合面不发生相对位移,粘贴层越厚越好。

针对本封装结构,粘贴层的材料为环氧树脂,其弹性模量取 2.5 GPa。根据(1)~(4)式,得出粘贴层厚度和光纤传感器粘贴长度对平均应变传递率影响的三维图,如图 3 所示。图中,传感器粘贴长度越大且粘贴层厚度越小时,平均应变传递率越大;当传感器粘贴长度小于 35 mm 时,平均应变传递率增加较快;当传感器粘贴长度大于 35 mm 时,平均应变传递率基本保持不变。从 2 个方向曲线的斜率可以得出,平均应变传递率受粘贴层厚度的影响更为明显。因此在实际应用中,为达到一定的平均应变传递率,应首先考虑粘贴层的厚度,再考虑传感器的粘贴长度。

综合考虑以上各种因素,该封装结构的凹槽深度和宽度分别取 0.4 mm 和 1 mm,FBG 光纤传感器粘贴长度为 40 mm,粘贴层厚度为 0.3 mm,环氧树脂的弹性模量不小于 2.5 GPa。根据(1)~(4)式,计算得到平均应变传递率 $\beta = 0.973$,应变传递率修正系数 $1/\beta = 1.028$,基体结构钢绞线的真实应变与 FBG 监测应变的关系满足 $\epsilon_m = \bar{\epsilon}_g / \beta = 1.028 \bar{\epsilon}_g$ 。

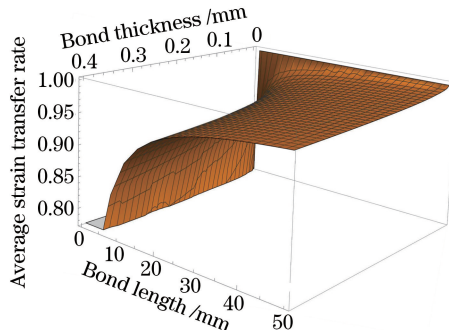


图 3 粘贴层厚度和粘贴长度对平均应变传递率的影响

Fig. 3 Effects of bond thickness and bond length on average strain transfer rate

3 大量程智能钢绞线实验研究

3.1 实验概况及数据

机械打散钢绞线并取出中心丝,在中心丝上设置深度为 0.4 mm、宽度为 1 mm 的凹槽,张拉中心丝,在持荷状态下用环氧树脂将 FBG 应变传感器粘贴于凹槽内,粘贴长度以光栅栅区长度的中点为对称点,两端分别超出栅区不小于 10 mm,且总长度不小于 40 mm,待环氧树脂达到足够强度时,卸载中心丝,制成智能中心丝,再将智能中心丝与边丝扭绞成钢绞线。

实验采用的钢绞线为 1×7 标准型,由 1 根直径为 5.2 mm 的中心丝和 6 根直径为 5 mm 的边丝绕中心丝扭绞而成,如图 4 所示。钢绞线公称直径为 15.2 mm,截面面积为 140 mm²,抗拉强度为 1860 MPa,最小屈服荷载为 225 kN,最小极限承载力为 260 kN;FBG 传感器的 3 dB 带宽为 0.12 nm,反射率为 99.64%;解调仪为 Agilent86142B 光谱仪,波长范围为 1525~1570 nm,采样频率为 1 Hz,波长精度为 2.5 pm,分辨率为 1 pm;环氧树脂的弹性模量大于 2.5 GPa。

以中心丝持荷值为变化参数,设计了 A、B、C、D 4 组张拉实验,每组实验中使用 3 根钢绞线试件。其中 A 组实验粘贴 FBG 传感器时不张拉中心丝,B 组实验在中心丝张拉持荷值为 0.2P_b 的状态下粘贴 FBG 传感器,C 组实验在中心丝张拉持荷值为 0.3P_b 的状态下粘贴 FBG 传感器,D 组实验在中心丝张拉持荷值为 0.4P_b 的状态下粘贴 FBG 传感器。设 P_b 为中心丝的极限承载力,P_b=39.5 kN。

加载方案:1) 对钢绞线进行 0.2P_n (P_n 为钢绞线极限承载力,P_n=260 kN) 的预张拉,然后卸载至 0.05P_n;2) 由 0.05P_n 取 10 kN 开始,逐级张拉,每级增加 10 kN 的张拉力,张拉速度不大于 100 MPa/min,持荷 5 min 后同时记录光栅解调仪读数、张拉力和千分表的读数;3) 逐级张拉至 0.35P_n,持荷 10 min;4) 卸载至 0.05P_n;5) 重复 2)~4) 的步骤,即张拉卸载一次。

由 0.05P_n 取 10 kN 开始,逐级张拉,每级增加 10 kN 的张拉力,持荷 5 min 后同时记录光栅解调仪读数、张拉力和千分表读数,逐级张拉直到解调仪读数消失以及钢绞线破坏。实验装置图如图 5 所示。

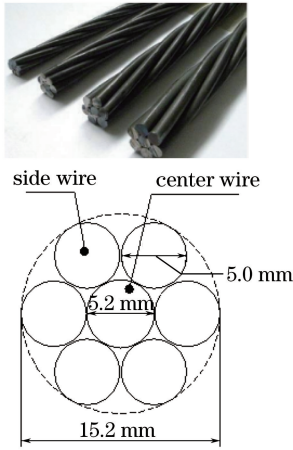


图 4 钢绞线实物图

Fig. 4 Picture of steel strand

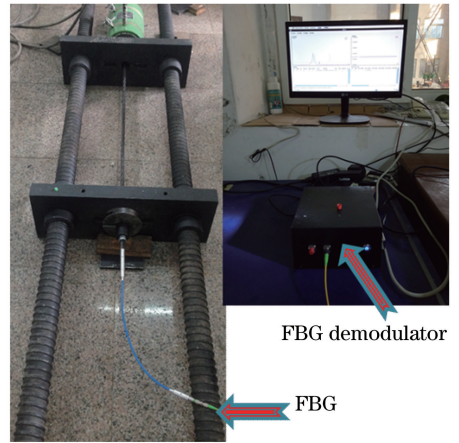


图 5 智能钢绞线张拉实验装置图

Fig. 5 Picture of experimental setup of intelligent steel strand

3.2 实验结果分析

3.2.1 FBG 波长变化与应变的关系

理论上,对于光纤布拉格光栅,入射光通过光纤布拉格光栅后反射,反射光的中心波长 λ_B 为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (5)$$

式中 Λ 为相位掩模光栅的周期,n_{eff}为光纤纤芯针对自由空间中心波长的折射率。

当 FBG 处于均匀应变场时,波长变化与应变的关系为

$$\Delta\lambda = \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right\} \lambda \varepsilon = h\varepsilon, \quad (6)$$

式中 Δλ 为波长的变化值,p₁₁、p₁₂为光弹效应系数,ν 为泊松比,ε 为光栅应变,h 为光栅应变灵敏度,n 为光

栅折射率。

千分表读取的位移量经应变公式转换为钢绞线的基体应变 ϵ_m ，根据封装结构的平均应变传递率 $\beta = 0.973$ ，计算出 FBG 传感器的应变 $\epsilon_g = \beta\epsilon_m = 0.973\epsilon_m$ 。以传感器应变为横坐标、波长变化为纵坐标，对不同组别的实验数据进行线性拟合，拟合结果如图 6 所示。

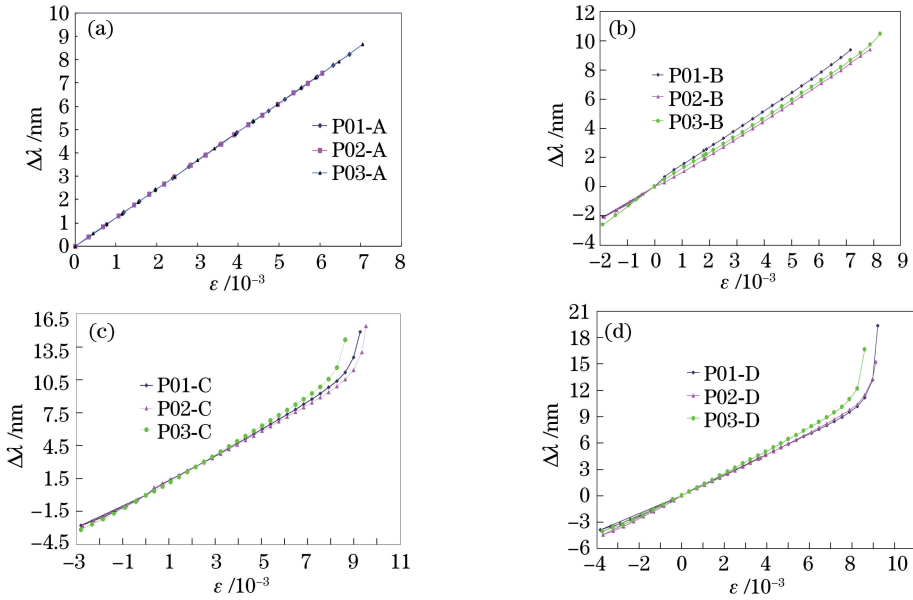


图 6 不同中心丝持荷值条件下 FBG 传感器波长变化与应变的关系。(a)中心丝未持荷;(b)中心丝持荷 $0.2P_b$;
(c)中心丝持荷 $0.3P_b$;(d)中心丝持荷 $0.4P_b$

Fig. 6 Relationship between wavelength change and strain of FBG sensor under different loadings.

(a) Center wire without loading; (b) center wire with loading of $0.2P_b$; (c) center wire with loading of $0.3P_b$;
(d) center wire with loading of $0.4P_b$

对于 A 组试件,在不对中心丝进行张拉条件下粘贴传感器,波长变化值 $\Delta\lambda$ 与应变 ϵ 的线性相关系数为 99.99%,满足

$$\Delta\lambda = 0.001220\epsilon. \quad (7)$$

对于 B 组试件,在中心丝持荷 $0.2P_b$ 状态下粘贴 FBG 传感器,波长变化值 $\Delta\lambda$ 与应变 ϵ 的线性相关系数为 99.83%,满足

$$\Delta\lambda = 0.001215\epsilon. \quad (8)$$

对于 C 组试件,在中心丝持荷 $0.3P_b$ 状态下粘贴 FBG 传感器,波长变化值 $\Delta\lambda$ 与应变 ϵ 的线性相关系数为 97.96%,满足

$$\Delta\lambda = 0.001285\epsilon. \quad (9)$$

对于 D 组试件,在中心丝持荷 $0.4P_b$ 状态下粘贴 FBG 传感器,波长变化值 $\Delta\lambda$ 与应变 ϵ 的线性相关系数为 96.75%,满足

$$\Delta\lambda = 0.001326\epsilon. \quad (10)$$

由图 6 及线性相关系数可知,实验数据具有良好的线性度和重复性。

3.2.2 中心丝持荷值对 FBG 监测量程的影响

根据中心丝在不同持荷值状态下嵌入 FBG 传感器的封装技术的实验数据,得到 FBG 传感器的极限应变、受拉波长变化、最大波长变化、最大张拉力及钢绞线的屈服应变、屈服力及极限张拉力等如表 1 所示。表 1 中 λ_0 为 FBG 传感器的初始波长值, λ'_0 为 FBG 传感器经预压后的波长值, $\Delta\lambda'$ 为 FBG 传感器的预压波长变化值, $\Delta\lambda' = \lambda'_0 - \lambda_0$; λ 为 FBG 传感器的极限受拉波长值, $\Delta\lambda$ 为 FBG 传感器的极限受拉波长变化值, $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$; $\Delta\lambda^*$ 为 FBG 传感器的极限总波长变化值, $\Delta\lambda^* = \lambda - \lambda'_0$; ϵ^* 为 FBG 传感器达到极限受拉波长值 λ 时,钢绞线所对应的应变; P^* 为 FBG 传感器达到极限受拉波长值 λ 时,钢绞线所对应的张拉力; ϵ_y 为钢

表 1 实验数据
Table 1 Experimental data

Specimen number	λ_0 / nm	λ'_0 / nm	$\Delta\lambda' / \text{nm}$	λ / nm	$\Delta\lambda / \text{nm}$	$\Delta\lambda^* / \text{nm}$	$\epsilon^* / 10^{-6}$	P^* / kN	$\epsilon_y / 10^{-6}$	P_y / kN	P_s / kN	ϵ^* / ϵ_y	P^* / P_y	P^* / P_s
P01-A	1548.597	1548.597	0	1556.824	8.237	8.237	6864	170	9308	231	260	0.74	0.74	0.65
P02-A	1543.932	1543.932	0	1552.573	8.641	8.641	7201	181	9265	233	262	0.78	0.78	0.69
P03-A	1548.117	1548.117	0	1555.533	7.416	7.416	6180	161	9287	242	265	0.67	0.67	0.61
P01-B	1542.142	1540.016	2.066	1549.376	7.293	9.360	7800	200	9231	227	252	0.84	0.88	0.79
P02-B	1542.195	1540.117	2.078	1549.574	7.379	9.427	7855	220	9223	258	275	0.85	0.85	0.80
P03-B	1542.342	1539.792	2.601	1550.257	7.915	10.465	8720	230	9295	248	268	0.94	0.93	0.86
P01-C	1542.224	1539.458	2.766	1554.229	12.005	14.848	12373	258	9305	240	263	1.33	1.08	0.98
P02-C	1542.376	1539.569	2.807	1554.942	12.566	15.373	12811	265	9493	252	270	1.35	1.05	0.98
P03-C	1542.238	1539.098	3.140	1553.401	11.163	14.133	11778	240	9225	228	253	1.28	1.05	0.95
P01-D	1542.142	1538.227	3.915	1557.918	15.776	19.349	17590	257	9235	230	258	1.90	1.12	1.00
P02-D	1542.416	1537.938	4.478	1553.118	10.702	15.226	12688	255	9278	235	262	1.37	1.09	0.97
P03-D	1542.126	1538.026	4.100	1554.625	12.499	16.640	13867	240	9216	225	255	1.50	1.07	0.94

绞线屈服时的应变; P_y 为钢绞线的屈服力; P_s 为钢绞线的极限张拉力。P01-A、P02-A、P03-A 为 A 组的 3 个试件, P01-B、P02-B、P03-B 为 B 组的 3 个试件, P01-C、P02-C、P03-C 为 C 组的 3 个试件, P01-D、P02-D、P03-D 为 D 组的 3 个试件。

由表 1 可知:

1) 对于所有试件, FBG 传感器受拉总波长变化值比一般裸光栅的极限总波长变化值大, 可能是粘贴材料的保护作用增强了 FBG 传感器的抗拉性能。

2) 对于 A 组试件, FBG 传感器在监测之前不预压, 其极限总波长变化值 $\Delta\lambda^*$ 为受拉总波长变化值, 约为 8 nm, 所能跟踪监测钢绞线的应变为 7×10^{-3} , 与钢绞线的屈服应变之比约为 0.7, 不满足预应力钢绞线的监测量程。通常, 对钢绞线施加预应力时, 张拉应力为极限应力的 0.7 倍。采用超张拉时张拉力为极限应力的 0.75 倍, 这意味着智能钢绞线在预应力施加过程中 FBG 传感器将超过量程而断裂, 从而失去作用。

3) 对于 B 组试件, 采取在中心丝持荷 $0.2P_b$ 的状态下粘贴 FBG 传感器, 监测之前受预压的波长变化约为 2 nm, 受拉总波长变化值约为 7.5 nm, 极限总波长变化值约为 9.5 nm, 所能跟踪监测钢绞线的应变为 8×10^{-3} , 与钢绞线的屈服应变之比约为 0.85, 相比于 A 组试件, 量程的提高并不显著。

4) 对于 C 组试件, 采取在中心丝持荷 $0.3P_b$ 的状态下粘贴 FBG 传感器, 监测之前受预压的波长变化约为 2.8 nm, 受拉总波长变化值约为 12 nm, 极限总波长变化值约为 14.5 nm, 所能跟踪监测钢绞线的应变为 0.012, 与钢绞线的屈服应变之比约为 1.3, 所能跟踪监测的张拉力与钢绞线的极限张拉力之比约为 0.98。相比于 A 组试件, 监测量程提高非常显著, 基本上能实现对钢绞线全生命周期的应力应变监测。

5) 对于 D 组试件, 采取在中心丝持荷 $0.4P_b$ 的状态下粘贴 FBG 传感器, 监测之前受预压的波长变化约为 4 nm, 受拉总波长变化值约为 13 nm, 极限总波长变化值约为 16 nm, 所能跟踪监测钢绞线的应变为 0.013, 与钢绞线的屈服应变之比约为 1.4, 所能跟踪监测的张拉力与钢绞线的极限张拉力之比约为 0.98。相比于 A 组试件, 监测量程提高同样非常显著, 也基本上能实现对钢绞线全生命周期的应力应变监测。但相比于 C 组试件, 量程提高的优势并不明显, 并且重复性没有 C 组试件好。

此外对于中心丝持荷粘贴 FBG 传感器的 C、D 组试件, 其受拉总波长变化值比 A、B 组大得多, 即经预压的 FBG 传感器的极限抗拉应变会得到提高, 可能是由于粘贴 FBG 传感器时环氧树脂人工压实度不足, 经预压后可挤出环氧树脂中的气泡, 并提高环氧树脂的弹性模量, 提高对 FBG 的封装保护, 从而也相应提高了传感器的极限抗拉能力。

4 结 论

设计了一种在钢绞线中心丝上设置凹槽并在中心丝张拉持荷状态下于凹槽中嵌入 FBG 的智能钢绞线。

理论分析了嵌入式 FBG 传感器与基体的应变传递率,在此基础上以中心丝持荷值为变化参数,对 FBG 智能钢绞线进行不同监测量程的张拉实验,结论如下。

1) 在中心丝上设置的凹槽封装 FBG 传感器的工艺,可提高粗放式施工条件及恶劣使用环境下光纤在钢绞线中的布设存活率及使用寿命。

2) 预先给 FBG 施加压应变,可克服光纤本身极限拉应变较低的缺陷,提高监测量程;当中心丝持荷值为 $0.3P_b$ 时,能实现对钢绞线全生命周期的应力应变监测,并且实验数据的重复性和线性度都很好。

3) 基于智能中心丝上多个凹槽结构,多组 FBG 可同时工作,并且可进行多项数据对比。

4) 利用光纤上刻有的多个光栅,可监测钢绞线不同部位的应力应变状况。

5) 当钢绞线使用环境温度变化较大时,可利用共线技术,串联 FBG 温度传感器,进行温度补偿,以解决应力和温度的交叉敏感问题。

6) 根据钢绞线在服役期常受到的荷载值,改变对 FBG 的预压应变,使 FBG 及环氧树脂在工作时不受力或受微小应力,避免产生疲劳破坏,提高疲劳寿命,以便实现对钢绞线施工和服役全生命周期的监测。

参 考 文 献

- [1] Jiang Peng, Zhu Wanxu, Liu Fei, *et al.* Fatigue proformance evaluation of FAST cable-net structures and development of a new type of steel cable system with high fatigue resistance[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(9): 243-249.
姜 鹏, 朱万旭, 刘 飞, 等. FAST 索网疲劳评估及高疲劳性能钢索研制[J]. 工程力学, 2015, 32(9): 243-249.
- [2] Chen Weimin, Zhu Yong, Feng Jun, *et al.* Experimental study on fiberoptic F-P strain sensor system[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(4): 36-39, 64.
陈伟民, 朱 永, 封 君, 等. 光纤法珀应变传感器系统的实验研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(4): 36-39, 64.
- [3] Li Hui, Ou Jinping. Design and implementation of health monitoring systems for cable-stayed bridges (II): Implementations[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(4): 45-53.
李 惠, 欧进萍. 斜拉桥结构健康监测系统的设计与实现(II): 系统实现[J]. 土木工程学报, 2006, 39(4): 45-53.
- [4] Nan Qiuming, Jiang Desheng, Liang Lei. Study and application of FBG force testing ring[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2006, 34(9): 63-65.
南秋明, 姜德生, 梁 磊. 光纤光栅测力环的应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(9): 63-65.
- [5] Wang Huaping, Zhou Zhi, Liu Wanqiu, *et al.* Strain transfer error analysis of flexible raw-material packaged FBG sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015, 28(4): 492-497.
王花平, 周 智, 刘婉秋, 等. 柔性基体材料封装 FBG 传感器的应变传递误差分析[J]. 传感技术学报, 2015, 28(4): 492-497.
- [6] Wu Jun, Chen Weimin, Shu Yuejie, *et al.* Embedded strain homogenized FBG sensor for smart cables[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(7): 0706002.
吴 俊, 陈伟民, 舒岳阶, 等. 锚头植入式应变均化光纤布喇格光栅测力传感器[J]. 光子学报, 2015, 44(7): 0706002.
- [7] Zhou Zude, Liang Lei, Wang Lixin, *et al.* Monitoring method and device for long-term working state of fiber grating anchor: 02138980.2[P]. 2003-03-05.
周祖德, 梁 磊, 王立新, 等. 光纤光栅锚索长期工作状态的监测方法及装置: 02138980.2[P]. 2003-03-05.
- [8] Deng Nianchun, Ou Jinping, Zhou Zhi, *et al.* Application of fiber Bragg grating sensor to monitor tensile stress in a seven-wire prestressed steel strand[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(10): 1550-1553.
邓年春, 欧进萍, 周 智, 等. 光纤光栅在预应力钢绞线应力监测中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(10): 1550-1553.
- [9] Lan Chunguang, Zhou Zhi, Ou Jinping, *et al.* Novel embedded steel wire GFRP-FBG smart rebar and its properties [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science Edition), 2012, 28(1): 72-78.
兰春光, 周 智, 欧进萍, 等. 内嵌钢丝 GFRP-FBG 智能复合筋的研制及其性能分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(1): 72-78.
- [10] Li Dongsheng, Zhou Zhi, Ou Jinping, *et al.* Sensing properties study and engineering applications for GFRP-OFBG intelligent sensors[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2009, 20(10): 1294-1297.
李冬生, 周 智, 欧进萍. 光纤光栅智能复合筋传感特性及其工程应用[J]. 光电子 • 激光, 2009, 20(10): 1294-1297.

- [11] Ansari F, Yuan L B. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(4): 385-394.
- [12] Yuan L B, Zhou L M. Sensitivity coefficient evaluation of an embedded fiber-optic strain sensor[J]. Sensor and Actuators A, 1998, 69(1): 5-11.
- [13] Zhou Zhi, Li Jilong, Ou Jinping. Interface strain transfer mechanism and error modification of embedded FBG strain sensors[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(1): 49-55.
周 智, 李冀龙, 欧进萍. 埋入式光纤光栅界面应变传递机理与误差修正[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(1): 49-55.
- [14] Tian Shizhu, Zhang Guoqing, Wang Dapeng. Study on strain transfer mechanism of surface fiber Bragg grating sensor [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0805005.
田石柱, 张国庆, 王大鹏. 表面式光纤布拉格光栅传感器应变传递机理的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0805005.