

# 光纤光栅自感知预应力锚索在边坡加固中的应用

徐辉华<sup>1</sup>, 李俊宏<sup>2</sup>, 覃荷瑛<sup>2\*</sup>

(1. 广西建设职业技术学院, 广西南宁 530007; 2. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院)

**摘要:** 锚索是边坡加固工程的核心元件, 对锚索施加预应力是提高其加固效果的重要途径。为对锚索预应力施工张拉过程进行监测, 该文设计了一种光纤光栅自感知锚索: 在锚索的钢绞线中心丝上设置凹槽, 并在凹槽中用胶黏剂封装光纤光栅(FBG); 同时为提高光纤光栅传感器监测量程, 使中心丝在持荷状态下粘贴光纤光栅。以中心丝持荷值为变化参数, 研究不同持荷值下光纤光栅传感器的监测性能。在某边坡加固工程中, 采用该技术对预应力锚索的施工张拉进行了监测, 传感器存活率为100%, 并与现场张拉数据进行对比, 二者误差很小, 体现了自感知钢绞线在边坡加固工程中的实用性和可靠性。

**关键词:** 光纤光栅自感知钢绞线; 现场试验; 预应力锚索; 边坡加固; 预应力监测

预应力锚索加固作为一种可靠的边坡加固方法, 能有效改善岩体不利的受力状态, 提高岩体的自身强度和自稳能力, 被广泛应用于边坡加固工程中。锚索的有效预应力是影响加固工程成败的重要因素, 因此对锚索的受力状态进行实时监测, 对边坡加固工程的安全具有重要作用。目前, 许多边坡加固工程通过各种不同的方法对锚索的受力状态进行监测。三峡永久船闸高边坡使用了预应力锚索进行加固, 并安装了113台锚索测力计对锚索的受力状态进行长期监测; 广邻高速公路4<sup>#</sup>边坡在进行预应力锚索加固后, 安装了5个压力传感器对锚索预应力进行监测, 以确定锚索的受力和边坡的变形情况; 胡时友等设计了一种数字式智能化锚索预应力传感器, 其具有精度高、抗干扰性强等优点, 在室内试验和实际工程长期监测中都已成功运用; 姜德生等在从应用现场取回的锚索钢绞线表面粘贴光纤光栅传感器, 并进行轴向受拉下的应力应变监测, 结果与工程实际应用情况相近; 王蓉川在大

岗山拱坝抗力体边坡加固的部分岩体预应力锚索上使用光纤光栅传感技术, 将光纤光栅传感器置于锚索测力计的高强度合金筒中, 实现对锚索预应力的监测。

常规的锚索监测主要采用测力环, 电阻应变片, 差动电阻应变计, 钢弦频率式传感器等。测力环安装在锚索垫板和锚环之间, 安装简便、使用简单、测量效果直观。但其易受施工安装时偏载的影响, 精度不高。电阻应变片是将应变片直接粘贴在弹性体上, 其结构简单, 测量精度高, 但容易受损, 耐久性较差。差动电阻式传感器容易受环境温度影响, 测量精度偏低。电阻应变式和差动电阻式传感器输出的都是模拟信号, 无法进行远距离传输, 无法满足远距离监测的要求。钢弦式传感器具有结构简单, 信号传输距离较远等优点, 但其灵敏度受制于压力盒尺寸, 且不能用于动态测试。光纤光栅以光为传感媒介, 具有传感特性稳定、精度高、抗电磁干扰等优点, 非常适合用于锚索预应力的监测。但光纤光栅体积纤细, 直径仅为125  $\mu\text{m}$ , 加上

\*\*\*\*\*

- [10] 张茹, 何昌荣, 费文平. 高土石坝筑坝料本构模型参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(S1).
- [11] 王智猛, 蒋关鲁, 魏永幸. 红层泥岩土邓肯-张模型参数试验研究[J]. 路基工程, 2009(6).
- [12] 赵明华, 刘晓明, 苏永华. 含崩解软岩红层填料路用工程

- 特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005(6).
- [13] 刘晓明, 刘凯, 梁新权, 等. 基于分形理论的红层软岩填料缩尺料制备方法研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018(11).
- [14] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.

收稿日期: 2020-10-31(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51768014)

作者简介: 徐辉华, 女, 大学本科, 高级工程师. E-mail: 277857999@qq.com

\* 通信作者: 覃荷瑛, 女, 博士, 教授. E-mail: qinheyinlqx@163.com

材质的玻璃脆性,抗剪能力差,易折断,为保证其在复杂工程环境中的存活率,须进行封装。该文通过在锚索的钢绞线中心丝上设置凹槽封装光纤光栅制成光纤光栅自感知锚索,并用于某广场边坡加固工程中,以实现锚索预应力施工张拉的监测。

## 1 自感知锚索封装设计及应变传递

取预应力锚索的钢绞线中心丝,在其上设置凹槽,将光纤光栅传感器用胶黏剂封装在凹槽内,待胶黏剂达到足够的黏结强度后,将中心丝与边丝扭绞成型并对端部进行封装保护如图 1、2 所示。



图 1 自感知钢绞线封装设计



图 2 自感知钢绞线端部封装保护

采用此凹槽嵌入式封装法,一方面可以避免施工过程中因拉拽挤压造成光纤光栅断裂,提高光纤光栅在恶劣施工环境下的布设存活率和使用寿命;另一方面,胶黏剂作为光纤光栅粘贴层的同时,也成为光纤光栅的保护层,起到吸收外界冲击振动的作用。

光纤光栅应变传感原理:基体产生形变,通过中间层传递给裸光栅。由于中间层吸收微小变形,因此,光纤光栅与基体的应变存在差异,二者的应变之比即为传感器的应变传递能力,称之为应变传递率。根据剪滞理论,光纤光栅的平均应变传递率见式(1)、(2):

$$\beta = \frac{\epsilon_g}{\epsilon_m} = 1 - \frac{\cosh(kL) - 1}{kL \sinh(kL)} \quad (1)$$

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

式中: $\epsilon_g$  和  $\epsilon_m$  分别为光纤光栅传感器的应变和基体

的应变; $2L$  为光纤传感器粘贴长度; $G_p$  和  $E_g$  分别为粘贴层的剪切弹性模量和光纤光栅的杨氏模量; $r_m$  和  $r_g$  分别为粘贴层的外径和光纤的外径。

该文凹槽深度取 0.6 mm,宽度取 1 mm,光纤光栅传感器的粘贴层厚度取 0.5 mm,粘贴长度为 50 mm,胶黏剂的弹性模量为 2.5 GPa。根据式(1)计算可得,自感知钢绞线的平均应变传递率为  $\beta = 96\%$ ,满足应变传递要求。

## 2 光纤光栅自感知锚索试验研究

### 2.1 试验概况

取长度为 3 m 的普通钢绞线,钢绞线为 1×7 标准型,公称直径为 15.2 mm,公称截面面积为 140 mm<sup>2</sup>,抗拉强度为 1 860 MPa,屈服荷载为 225 kN,极限承载力为 260 kN;光纤布拉格光栅 3 dB 带宽,反射率为 99.64%,中心波长为 1 540 nm;光纤光栅解调仪为 Agilent86142B 光谱仪,采样频率为 3 Hz,波长范围为 1 525~1 560 nm,波长精度为 2 pm,分辨率为 1 pm。将钢绞线打散取出中心丝,在中心丝上设置 0.6 mm 深、1.0 mm 宽的凹槽;张拉中心丝,在持荷状态下将光纤光栅传感器用胶黏剂封装在凹槽内,封装长度需保证在光栅左右各 20 mm 均匀地覆盖胶黏剂,待胶黏剂达到足够黏结强度时,卸载中心丝,制成自感知中心丝,再将自感知中心丝与边丝扭绞成型。

根据钢绞线中心丝持荷值的不同,分别设计 4 组(每组 3 根)试样进行研究,把中心丝持荷值为 0 作为 A 组,中心丝持荷值分别为 0.2 $P_b$ 、0.3 $P_b$ 、0.4 $P_b$  ( $P_b$  为中心丝的极限承载力,  $P_b = 39.5$  kN) 作为 B 组、C 组、D 组。加载方案:① 首先记录光纤光栅传感器的原始波长;② 施加 0.2 $P_n$  荷载 ( $P_n$  为钢绞线极限承载力,  $P_n = 260$  kN) 进行预张拉,检测仪器和构件状态,确保钢绞线与锚具无滑移;③ 以 0.05 $P_n$  (取 10 kN) 逐级施加荷载,张拉速度不大于 100 MPa/min,持荷 5 min 后同时记录光栅解调仪、张拉力和千分表读数;④ 当光纤光栅传感器失效时,记录对应的荷载、钢绞线和波长的变化值;⑤ 张拉至钢绞线断裂,记录极限荷载。

### 2.2 试验结果及分析

通过对试验结果分析整理,对同组的 3 根试件数据进行拟合,得到不同中心丝持荷值光纤光栅传感器的受拉波长变化、最大波长变化、极限应变,最大张拉力及钢绞线的屈服应变和极限张拉力等如表 1 所示。其中  $\lambda_0$  为光纤光栅传感器初始波长; $\lambda_0'$  为光纤光栅

表 1 光纤光栅自感知钢绞线拉伸试验数据

试件 编号	$\lambda_0 /$ nm	$\lambda_0' /$ nm	$\lambda /$ nm	$\Delta\lambda' /$ nm	$\Delta\lambda /$ nm	$\Delta\lambda^* /$ nm	$\epsilon^* /$ ( $\times 10^{-6}$ )	$\epsilon_y /$ ( $\times 10^{-6}$ )	$P^* /$ kN	$P_s /$ kN
A	1 548.597	1 548.597	1 556.824	0	8.227	8.227	6 864	9 308	170	260
B	1 542.195	1 540.117	1 549.574	2.078	7.379	9.457	7 855	9 223	220	275
C	1 542.376	1 539.569	1 554.942	2.807	12.566	15.373	12 811	9 493	265	270
D	1 542.126	1 538.026	1 554.625	4.100	12.499	16.599	13 867	9 216	240	255

传感器预压后的波长; $\lambda$ 为光纤光栅传感器极限受拉波长; $\Delta\lambda'$ 为光纤光栅传感器预压后的波长变化值, $\Delta\lambda'=\lambda_0'-\lambda_0$ ; $\Delta\lambda$ 为光纤光栅传感器受拉总波长变化值, $\Delta\lambda=\lambda-\lambda_0$ ; $\Delta\lambda^*$ 为光纤光栅传感器极限总波长变化值, $\Delta\lambda^*=\lambda-\lambda_0'$ ; $\epsilon^*$ 为光纤光栅传感器达到极限受拉波长时,钢绞线对应的应变; $\epsilon_y$ 为钢绞线屈服时的应变; $P^*$ 为光纤光栅传感器达到极限受拉波长时,钢绞线对应的张力; $P_s$ 为钢绞线的极限张力。

由表 1 可知:A 组试件光纤光栅的应变监测量程为钢绞线屈服应变的 70%,应力监测量程为极限张拉力的 65%。通常,对钢绞线施加预应力时,其张力为钢绞线极限张拉力的 70%,采用超张拉时,张力为极限张拉力的 75%,这意味着光纤光栅传感器在施加预应力过程中,将因超过量程而断裂;B 组试件光纤光栅的应变监测量程为钢绞线屈服应变的 85%,应力监测量程为极限张拉力的 80%。相对于 A 组试件,量程提高不明显;C 组试件光纤光栅的应变监测量程超过钢绞线屈服应变,应力监测量程为钢绞线极限张拉力的 98%。相对于 A 组试件,量程提高十分明显,基本可以实现对钢绞线全生命周期应力应变的监测;D 组试件光纤光栅应变监测量程超过钢绞线屈服应变,应力监测量程为钢绞线极限张拉力的 98%,相对于 A 组试件,量程提高同样十分明显,基本可以实现对钢绞线全生命周期应力应变的监测。但相对于 C 组试件,量程提高优势不明显,线性和重复性不如 C 组试件。

分析试验数据可知:光纤光栅传感器在中心丝持荷状态下进行封装,卸载后会对光纤光栅传感器形成预压效果,经预压后的光纤光栅传感器的量程会得到显著提高。比较不同的预压值发现,在光纤光栅传感器封装时进行 0.3 $P_b$  的预压,能达到最佳效果。

3 自感知预应力锚索工程应用

为验证自感知预应力锚索在边坡加固工程中的应用效果,取 3 根应用于某广场深基坑排桩与锚索支护

体系中。加固过程采用注浆锚索工艺,3 根自感知预应力锚索试件分别布置在 3 个不同的深孔中,自感知试件制作时中心丝持荷值均为 0.3 $P_b$ ,设计的张拉预应力分别为:1 号钢绞线为 120 kN;2 号钢绞线 150 kN;3 号钢绞线 170 kN,现场施工如图 3、4 所示。



图 3 自感知钢绞线埋设

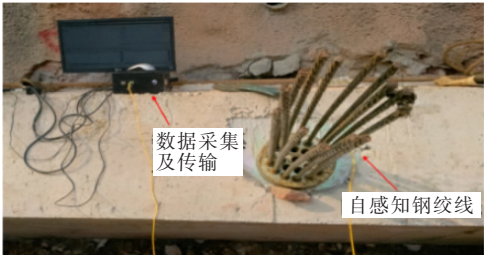


图 4 自感知钢绞线现场监测

锚索张拉在注浆体强度达到 5 MPa 后进行,使用穿心型千斤顶和电动油泵加载系统进行张拉,达到设计张力时,记录中心波长变化值,再通过式(3)、(4)计算出监测应力。

当光纤光栅传感器处于均匀应变场时,其波长变化与应变关系为:

$$\Delta\lambda = \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right\} \lambda \epsilon_g = h \epsilon_g \quad (3)$$

式中: $\Delta\lambda$ 为波长变化值; $n$ 为光栅折射率; $p_{11}$ 、 $p_{12}$ 为光弹效应系数; $\nu$ 为泊松比; $\epsilon_g$ 为光栅应变; $h$ 为光栅应变灵敏度。

监测应力与应变的关系为:

$$F = E \frac{\epsilon_g}{\beta} A = E \epsilon_m A \quad (4)$$



式中: $F$  为监测应力; $E$  为弹性模量; $\beta$  为光纤光栅平均应变传递率; $\epsilon_m$  为基体应变; $A$  为基体截面面积。

将计算出的监测应力与现场油表显示的实际张拉应力进行对比,结果如表 2 所示。其中  $\lambda_0$  为光纤光栅

传感器初始波长; $\lambda_{FBG}$  为钢绞线达到张拉应力值时的监测波长; $\Delta\lambda_{FBG}$  为钢绞线达到张拉应力值时的波长变化; $\epsilon_{FBG}$  为钢绞线达到张拉应力值时的应变; $F_{FBG}$  为监测应力; $F_{CON}$  为实际张拉应力。

表 2 钢绞线监测数据与实际张拉力值对比

试件	$\lambda_0 /$ nm	$\lambda_{FBG} /$ nm	$\Delta\lambda_{FBG} /$ nm	$\epsilon_{FBG} /$ $\mu\epsilon$	$F_{FBG} /$ kN	$F_{CON} /$ kN	$[(F_{CON} - F_{FBG}) / F_{CON}] /$ %
1 号	1 536.605	1 541.849	5.244	4 396	123.722	120	-3.0
2 号	1 536.963	1 543.064	6.101	5 495	154.653	150	-3.1
3 号	1 536.995	1 543.989	6.994	6 227	175.254	170	-3.1

从表 2 可知:1 号试件的中心波长变化为 5.244 nm,光栅应变为 4 396  $\mu\epsilon$ ,监测应力为 123.722 kN,与实际张拉值 120 kN 的绝对误差值为 3%;2 号试件的中心波长变化为 6.101 nm,光栅应变为 5 495  $\mu\epsilon$ ,监测应力为 154.653 kN,与实际张拉值 150 kN 的绝对误差值为 3.1%;3 号试件的中心波长变化为 6.944 nm,光栅应变为 6 227  $\mu\epsilon$ ,监测应力为 175.254 kN,与实际张拉值 170 kN 的绝对误差值为 3.1%。3 根自感知锚索预应力施加结束后均存活,存活率为 100%,其监测应力与实际张拉应力相比,误差均比较小,能够满足对整个预应力施加过程的监测。

4 结 论

通过在钢绞线中心丝上设置凹槽,设计了可将光纤光栅传感器封装在凹槽内部的自感知锚索,理论分析了光纤光栅传感器与基体的应变传递率;以中心丝持荷值为变化参数,对自感知试件进行了张拉试验;依据理论推导及试验结果对自感知锚索进行了边坡加固工程试点应用,结果表明:

- (1) 内嵌式凹槽封装工艺能够提高光纤光栅传感器在复杂环境和恶劣施工状况下的存活率,在拉伸试验与边坡加固工程试点应用中,光纤光栅传感器存活率为 100%。
- (2) 采用预压方法封装光纤光栅传感器,解决了光纤光栅传感器监测量程过小的问题。试验中,在光纤光栅封装时进行 0.3 $P_b$  的预压,量程提高效果十分明显且线性度和重复性良好。
- (3) 在边坡加固工程试点应用中,光纤光栅自感知预应力锚索监测应力与实际张拉力值误差约为 3%,误差较小,验证了自感知预应力锚索监测量程的

有效性和监测数据的可靠性。

参考文献:

[1] 郭增,张丽敏,韩磊,等. 高速列车荷载作用下锚固边坡动力响应特征[J]. 中外公路,2018(2).

[2] 丁秀丽,盛谦,韩军,等. 预应力锚索锚固机理的数值模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002(7).

[3] 徐志华,俞俊平,荣耀,等. 基于锚杆轴力监测的楔形体结构面抗剪强度参数反演分析[J]. 中外公路,2017(6).

[4] 黄代茂,汪小静,赵文. BFRP 锚杆公路岩质边坡加固工程应用研究[J]. 中外公路,2020(4).

[5] 高大水,曾勇. 三峡永久船闸高边坡锚索预应力状态监测分析[J]. 岩石力学与工程学报,2001(5).

[6] 胡时友,王全成,姜昭群. 数字式智能化锚索预应力传感器的研究与设计[J]. 探矿工程—岩土钻掘工程,2001(2).

[7] 姜德生,南秋明,梁磊. 光纤光栅传感技术在锚索监测中的应用研究[J]. 承德石油高等专科学校学报,2004(3).

[8] 王蓉川. 光纤光栅传感技术在边坡预应力锚索监测中的应用[J]. 水电站设计,2013(2).

[9] 何治辉. 边坡预应力锚索索力检测方法的比较分析[J]. 河南建材,2016(3).

[10] 桂贵,齐舒. 穿心式测力环弹性体的结构优化设计[J]. 土木工程与管理学报,2015(1).

[11] 高晓丁,胥光申,王锦. 电阻应变片贴装方位偏差对测量结果的影响[J]. 西安石油学院学报(自然科学版),2001(6).

[12] 高友. 振弦式传感器测量过程中干扰问题的解决[J]. 仪表技术与传感器,2007(2).

[13] 覃荷瑛,张贺丽,沈全喜,等. 内嵌预压式大量程光纤光栅智能钢绞线的标定试验[J]. 铁道标准设计,2018(5).

[14] 覃荷瑛,朱万旭,张贺丽,等. 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[J]. 中国激光,2017(4).