

光纤光栅冷铸锚头锚拉索及其在桥梁中应用

邓年春¹ 周智² 龙跃¹ 李惠² 欧进萍²

(1 柳州欧维姆机械股份有限公司 柳州 545005 2 哈尔滨工业大学土木工程学院 哈尔滨 150090)

摘要:冷铸锚头锚拉索是国内桥梁拉索的主要结构形式,其索体由若干根直径相同的钢丝同心扭绞,外包覆聚乙烯护套制成,锚杯内填充由环氧树脂、锌粉和铸钢丸等组成的环氧砂浆。将与钢丝同直径的FRP-OFBG筋在拉索制作时植入索体,筋的两端通过锚杯内环氧砂浆固定,与索体保持协调变形,形成光纤光栅冷铸锚头锚智能拉索。文中对FRP-OFBG筋的应变温度传感性能、智能拉索的感知性能及工程应用等进行了研究。研究结果表明,光纤光栅冷铸锚头锚拉索具有优异的传感性能,能用于拉索的施工监控和运营监测。

关键词:光纤光栅 冷铸锚头锚拉索 监测

1 引言

拉索是缆索支承桥梁的主要承载构件之一,由于施工质量、环境荷载作用、疲劳效应以及腐蚀和材料老化等不利因素的影响,它将不可避免地产生损伤积累和抗力衰减,因此很有必要对拉索施工阶段进行监控和运营阶段进行健康安全监测。光纤光栅传感技术通过栅格反射波长的移动来感应外界物理量的微小变化,具有测量线性度高、重复性好,可对结构的应力、应变进行高精度的、绝对的、准分布式的数字测量;同时光纤光栅传感器还具有抗电磁干扰能力强、耐高温、体积小、接线简单、可实现数据远距离传输等优点,比较适合用于拉索的远程长期监测。冷铸锚头锚拉索是国内桥梁拉索的主要形式,其索体由若干根直径相同的钢丝平行集束,大捻距同心扭绞绕包,然后包覆聚乙烯护套制成。锚具内,钢丝通过锥形锚杯,穿过定位板上的对应蜂窝眼孔后,末端被锚粗形成锚头。锚杯中的空隙用特制的环氧树脂、锌粉和铸钢丸等混合料填充。环氧树脂混合料在180℃固化后即和锚杯中的钢丝结合成一个整体。研究将光纤光栅与冷铸锚头锚拉索结合,形成具有自感知性能的智能索,具有重大的意义和广阔的应用前景。裸光纤光栅传感器质地比较脆弱,难以与粗放式拉索制作与施工相适应。本文研究将FRP封装的光纤光栅植入到冷铸锚头锚拉索中的制作方法、传感性能与工程应用。

2 FRP封装光栅传感器与性能试验

本文原载中国公路学会桥梁和结构工程分会2006年《公路桥梁检测、评定与加固关键技术研讨会论文集》

2.1 FRP封装光栅传感器

纤维增强聚合(FRP)筋是以纤维为增强材料,以树脂为基体材料,并掺加辅助剂,经拉拔成型和必要的表面处理所形成的一种新型复合材料。根据纤维种类的不同,纤维增强聚合筋可分为碳纤维增强聚合(CFRP)筋、玻璃纤维增强聚合(GFRP)筋和芳纶纤维增强聚合(AFRP)筋等。它们具有轻质、高强、抗疲劳、耐腐蚀、易加工、材料力学性能线性等优异特性。

由于FRP筋容易加工成型,在其制备过程中,在筋的中间位置且沿长度方向埋入光纤光栅(OFBG),制成FRP-OFBG筋。光纤传感器直径只有125 μm,其涂覆层为聚合物,与FRP具有相容性,不会改变FRP筋本身的力学性能,因此FRP-OFBG筋兼有FRP筋良好的力学性能和耐腐蚀性能以及光栅传感器的传感特性。FRP筋是光纤传感器的一种封装方式,彻底克服了光纤传感器脆弱、布设困难的缺点,大大提高了光纤传感器的耐久性,同时提高了光纤光栅的测量量程。

柳州欧维姆机械股份有限公司与哈尔滨工业大学合作研制开发了FRP-OFBG筋,该类筋中可以用同一根光纤复用多个FBG传感器,监测沿FRP筋长度方向的应力分布。另外还可以根据需要,将FRP-OFBG筋切割成任意长度,使用非常方便。

2.2 传感器温敏试验

为了研究温度对FRP-OFBG传感器性能的影响,将2根直径为3.5mm的GFRP-OFBG筋,自由放置在HS025恒定湿热试验箱内进行升降温试验,试验装置见图1所示,温度变化范围为

5℃~45℃。光栅解调采用SI425光栅解调仪，测量精度为 $\pm 2\text{pm}$ 。试验结果曲线见图2。试验结果表明，GFRP-OFBG筋的温度传感灵敏度系数约为 $16.0\text{pm}/\text{℃}$ ，布拉格波长与温度拟合的相关系数达0.999。



图1 光栅传感器温敏试验装置

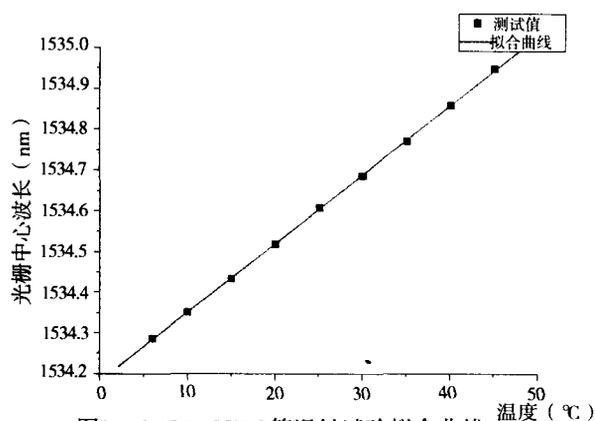


图2 GFRP-OFBG筋温敏试验拟合曲线

2.3 应变传感特性试验

GFRP-OFBG筋的应变传感特性试验在材料试验机上完成，见图3，应变测试采用高精度电子引伸计。光纤光栅波长解调采用美国MICRON OPTICS Inc.生产的光纤光栅解调仪。将FRP-OFBG筋在试验机上进行拉伸，记录引伸计的应变值和光纤光栅的波长值得到的结果如图4所示。为了验证传感器的重复性，图中同时绘制了反复加载试验结果。从图4可以看出，GFRP-OFBG筋具有优异的线性传感性能，并且传感重复性很好。

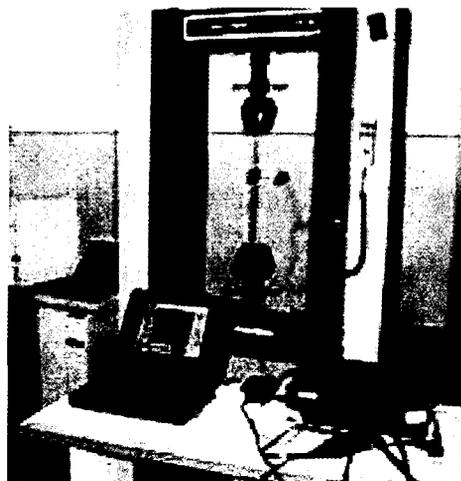


图3 GFRP-OFBG筋应变传感试验装置

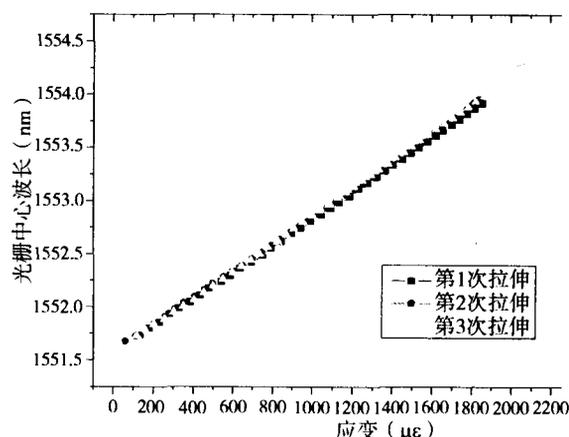


图4 GFRP-OFBG筋应变传感试验结果

3 冷铸镦头锚智能拉索制作与试验

冷铸镦头锚智能拉索可以采用下述方法制作。制作过程，将与钢丝等直径等长的FRP-OFBG筋，放入排丝架，与钢丝一起缠包成型，然后外挤PE。安装冷铸镦头锚时，FRP-OFBG筋进行引线，并在锚杯内保持一定的锚固长度。这样拉索固化后，锚具内的环氧砂浆固定FRP筋的两端，使索内FRP-OFBG智能筋与平行钢丝保持同步协调变形，利用筋内的光纤光栅传感器，感知拉索的应变，进而得出拉索应力及索力。由于OFBG不仅对变形敏感，同时对温度也相当敏感，需要另外的OFBG进行温度补偿。温度补偿方法，可以采用参考光栅法。

柳州欧维姆机械股份有限公司与哈尔滨工业大学合作，制作了3根长度约为4.5米的85丝平行钢丝冷铸锚智能索，索中采用前述直接增加智能

筋的办法。3根索体中，1号索和2号索在周边分别布设1根智能筋，3号索在索内周边均匀布设3根智能筋。每根智能筋中埋入了2个光栅，部分光栅为温度传感器，制作的平行钢丝智能索见图5所示。

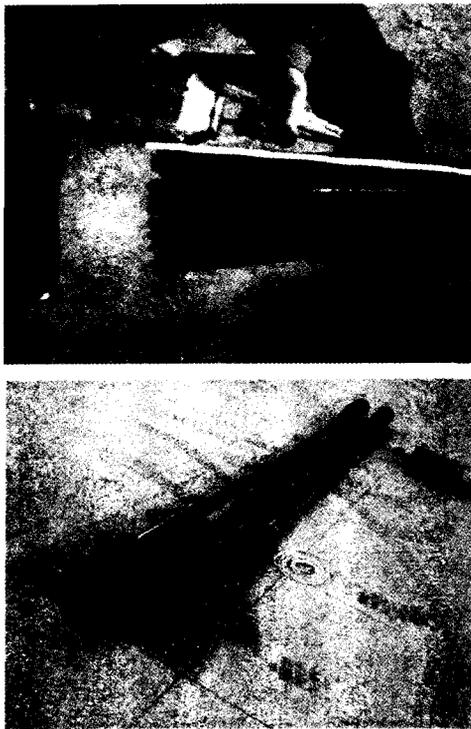


图5 平行钢丝冷铸锚智能索

试验在柳州欧维姆机械股份有限公司试验中心的12000kN拉索静载试验台架上进行。试验装置包括电动油泵、千斤顶、锚固力传感器、光栅调解仪等。加载方法为，先加载至0.2倍公称破断索力 P_b 进行预张拉，然后卸载至 $0.05P_b$ ；由 $0.05P_b$ 开始，每级 $0.05P_b$ 加载，加载速度不大于 $100\text{MPa}/\text{min}$ ，持荷5分钟后同时记录光栅读数和锚固力传感器读数，逐级加载至 $0.35P_b$ ，持荷10分钟后，卸载至 $0.05P_b$ ；由 $0.05P_b$ 开始，到 $0.35P_b$ ，每级 $0.05P_b$ ，持荷5分钟后记录数据，重复加载卸载一次；由 $0.05P_b$ 开始，每级 $0.05P_b$ ，持荷5分钟后记录数据，逐级加载直到所有的光栅读数消失。

将光栅的波长变化与索计算应力绘制成曲线图，3根索的试验结果分别见图6、图7和图8。从图中可以看出，光栅波长变化与应力之间的线性

关系非常好，重复性也非常好，但不同光栅的灵敏系数有所不同，1号索光栅的灵敏系数为 $84.5\text{MPa}/\text{nm}$ ；2号索光栅的灵敏系数分别为 $175.1\text{MPa}/\text{nm}$ 和 $173.5\text{MPa}/\text{nm}$ ；3号索光栅的灵敏系数分别为 $88.4\text{MPa}/\text{nm}$ 、 $89.9\text{MPa}/\text{nm}$ 、 $92.0\text{MPa}/\text{nm}$ 和 $94.0\text{MPa}/\text{nm}$ 。光栅的灵敏系数有所不同有时甚至差异较大，可能是由于索体不同位置的扭绞角度存在差异引起受力不均和不同筋的初始长度有差异等原因引起的。

图9是将3根索第3次张拉的光栅波长变化与应力的关系曲线绘制在一起。从图中10可以看出，FRP-OFBG筋在索中的极限波长变化为 8nm 左右，可监测索内应力达45%到80%公称破断索力。从上述分析可知，光纤光栅传感器可直接用于监测平行钢丝索的应力，最大量程可监测拉索的整个弹性工作阶段。

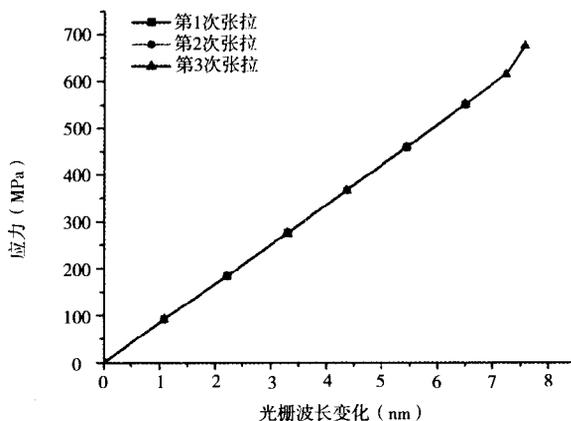


图6 1号拉索光栅波长变化与索内应力关系

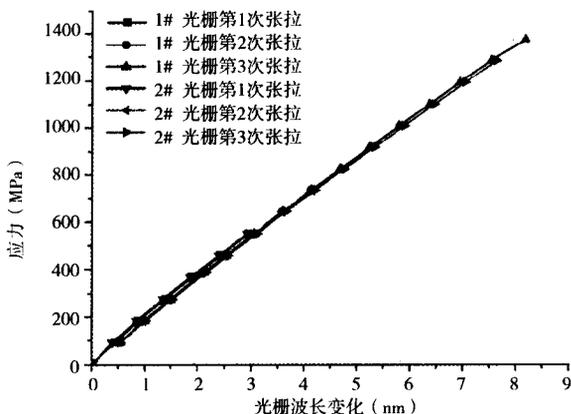


图7 2号拉索光栅波长变化与索内应力关系

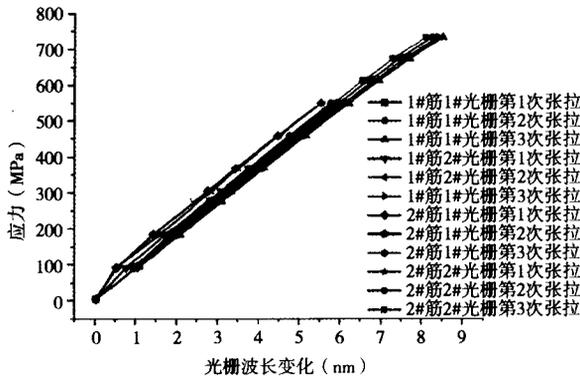


图8 3号拉索光栅波长变化与索内应力关系

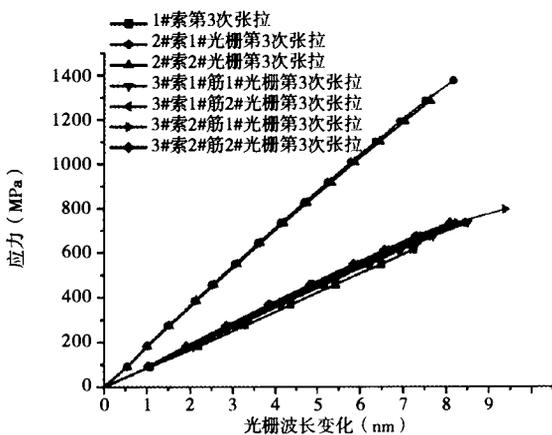


图9 1号、2号、3号拉索第3次张拉对比

4 光纤光栅智能拉索在天津永和大桥中应用

永和大桥是津汉公路跨永定新河的一座全长510.0m,主跨为260m的双塔双索面预应力混凝土斜拉桥。拉索为扇型布置,采用 $\phi 5$ 平行高强钢丝束,拉索端部采用冷铸镦头锚。原桥1987年12月建成通车,2006年7月开始对该桥进行维修加固和更换斜拉索。为了尽早获知桥梁结构的健康状态,以便保障桥梁在运营过程的安全,并及时进行恰当养护与维修提供直接依据,该桥设计了桥梁健康监测系统。斜拉索是该桥的生命线,为了监测拉索的工作状态,在部分拉索中布设了光纤光栅应变传感器和温度传感器。布设方法采用直接增加与钢丝同直径的FRP-OFBG筋传感器。智能索制作过程中,出厂前超张拉时,同时对传感器进行标定。标定在柳州欧维姆机械股份有限公司阳和索厂的张拉沟内进行。标定设备

采用曲浪CL-YB-M7MN压力传感器、OVM YCW650A型千斤顶、电动油泵等。69丝 $\phi 5$ 的索号为C2B-1和C2B-4的拉索的标定曲线分别见图10和图11。从图中可以看出,忽略拉索松弛到预紧阶段的影响,智能索中光栅传感的线性度非常好。但不同传感器的灵敏系数稍有不同,C2B-1索中的灵敏度分别为159.7MPa/nm和185.9MPa/nm;C2B-4索的灵敏度分别为172.6MPa/nm和154.5MPa/nm。

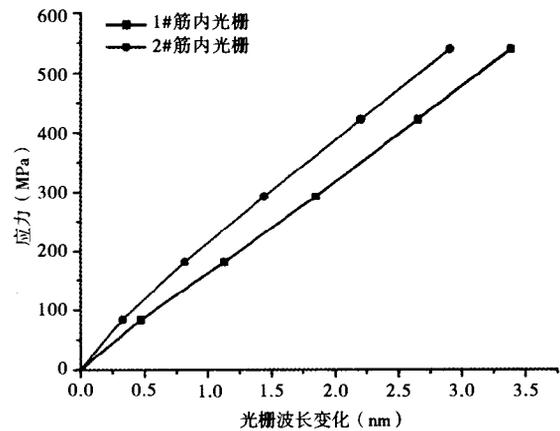


图10 C2B-1索标定曲线

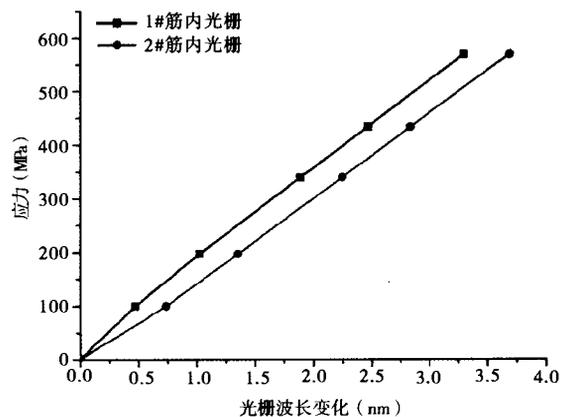


图11 C2B-4索标定曲线

5 结论

文中对FRP-OFBG筋的传感特性、光纤光栅智能索的制作方式和传感试验及工程应用等进行了研究。通过文中的研究,可以得出如下结论:

(1) FRP-OFBG筋克服了光栅质地脆弱的弱点,能方便地布设到冷铸镦头锚拉索中,用来监测桥梁拉索的安全。

(2) FRP封装光纤光栅提高了其测量量
(下转第24页)

- [86] Lang, G.: Festigkeitseigenschaften von verbundanker-systemen. Bauingenieur 54, 1979
- [87] Wu Shenxing. Dynamic experimental study of bond-slip between bars and the concrete in XiaoWan arch dam, New Developments in Dam Engineering-Wieland, Ren & Tan(eds), (c) 2004 Taylor & Francis Group, London, ISBN 04 1536 240 7: 951-959
- [88] Bo Liu, Libing Tao, Longguang Tao. Field Tests of Nails/Strains and Their Spatial Behavior in Vertical Soil Nailing Wall of Deep Excavation, Proceedings of the International Symposium of Civil Engineering in the 21st Century, Beijing, China, 11-13 October, 2000:417-423
- [89] 徐景茂, 顾雷雨. 锚索内锚固段注浆体与孔壁之间峰值抗剪强度试验研究, 岩石力学与工程学报, 2004.11, 23 (22): 3765-3769.
- [90] 何思明, 王成华. 预应力锚索破坏特性及极限抗拔力研究, 岩石力学与工程学报, 2004.9, 23 (17): 2966-2971.
- [91] 杨松林, 徐卫亚, 黄启平. 节理剪切过程中锚杆的变形分析, 岩石力学与工程学报, 2004.10,23 (19): 3268-3273
- [92] 曹国金, 姜弘道,熊红梅. 一种确定拉力型锚杆支护长度的方法, 岩石力学与工程学报, 2003.6, 22 (7): 1141-1145
- [93] 王霞, 郑志辉, 孙福英, 曾宪明. 锚索内锚固段摩阻力分布及扩散规律研究, 煤炭工程, 2004 No.7: 45-48.
- [94] 赵华, 董泽荣, 李融融, 段会文等. 小湾水电站岸锚支护试验研究, 见: 徐桢祥等主编, 岩土锚固技术与西部开发, 北京: 中国建筑工业出版社, 2002
- [95] 谷建国, 王再芳, 董翌为, 刘鸿俊. 特大吨位预应力锚索试验研究, 见: 徐桢祥等主编, 岩土锚固技术与西部开发, 北京: 中国建筑工业出版社, 2002
- [96] 甘文鸿, 大朝山水电站地下洞室主要支护施工技术, 见: 徐桢祥等主编, 岩土锚固技术与西部开发, 北京: 中国建筑工业出版社, 2002
- [97] Cook, R. A., Bishop, M. C., Hagedoorn, H. S., Sikes, D. E., Richardson, D. S., Adams, T. L., De Zee, C. T.: Adhesive bonded anchors. Structural and Effects of In-service and Installation Conditions. Structural and Materials Research Report No. 94-2A. University of Florida, 1994
- [98] Eligehausen, R.; Mall é e, R. Rehm, G.: Befestigungstechnik. In: Betonkalender 1997, Ernst & Sohn, Verlag f ù r Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, 1997
- [99] Rehm, G.: Langzeitverhalten von HILTI-Verbundankern HVA. Gutachtliche Stellungnahme vom 23.06.1978, not published
- [100] Cook, R. A.; Kunz, J., Fuchs, W., Konz, R. C.: Behavior and Design of Single Adhesive Anchors under Tensile Load in Uncracked Concrete. ACI Structural Journal, January-February 1998
- [101] Eligehausen, R.; Mall é e, R.; Rehm, G.: Fixings formed with Resin Anchors. Betonwerk+Fertigteile-Technik, Volume 10 to 12, 1994
- [102] Cook, R.A: Behavior of Chemically Bonded Anchors, Journal of Structural Engineering, vol. 119, No.9, September, 1993
- [103] Fuchs, W.; IExpansion, R., Breen, J.E.: Concrete Capacity Design (CCD) APPROACH FOR Fastening to Concrete. ACI-Structural Journal, pp. 73-94, Vol.92, 1995
- [104] [法国] Marc Panet文, 张新乐译, 被动锚杆加固岩体的实用设计方法, 见: 曾宪明, 王振宇, 徐孝华, 杨章甫等编译, 国际岩土工程新技术新材料新方法, 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.5
- [105] (澳大利亚) Marc A. Wood Word文, 朱大明译, 锚索设计、试验、监测和施工方法, 见: 曾宪明, 王振宇, 徐孝华, 杨章甫等编译, 国际岩土工程新技术新材料新方法, 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.5
- [106] (日本) S. Sakurai文, 张新乐译, 锚杆加固节理岩体的机理与分析方法, 见: 曾宪明, 王振宇, 徐孝华, 杨章甫等编译, 国际岩土工程新技术新材料新方法, 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.5

(上接第6页)

程, 极限波长变化为8nm左右, 能监测拉索的整个弹性工作阶段。

(3) 通过标定, FRP-OFBG筋可直接测量拉索的应力和索力。但由于索体扭绞不均和FRP-OFBG筋在索中位置的影响, 不同光栅有不同的灵敏系数。

(4) FRP-OFBG筋在拉索全长范围内进行监测, 与钢丝同步协调变形, 可监测拉索服役期间的动应力。

(5) 测量方法具备光纤光栅传感器的优点, 如耐腐蚀、传感精度高、抗电磁干扰、准分布式传感、绝对测量、稳定性与耐久性好等;

(6) 由于光纤光栅不仅对应变敏感, 同时对温度也相当敏感, 使用时可以用另外的参考传感器进行温度补偿;

(7) 光纤光栅冷铸锚头锚拉索具有自感知性能, 可用于施工监控和长期安全监测。

参考文献

- [1] M D Todd, G A Johnson & ST Vohra. Deployment of a fiber Bragg grating-based measurement system in a structural health monitoring application. Smart Materials and Structures. 2001, 10 (3)
- [2] 欧进萍, 周智. 纤维增强塑料-光纤光栅复合筋[P]. 中国专利: CN1484456A, 2004-3-24
- [3] Post-Tensioning Institute's (PTI). Recommendations for stay cable design, testing and installation, 2001
- [4] 周智. 土木工程结构光纤光栅智能传感元件及其监测系统. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学博士学位论文, 2003
- [5] Deng Nianchun, Zhou Zhi, Ou Jinping, Long yue, Zhu Wanxu Health Monitoring of Stay Cables using Fiber Bragg Grating Technology. SHMII-2'2005, Shenzhen, 2005
- [6] 邓年春, 付振安. 光纤光栅纤维增强塑料筋锚杆. 煤炭技术, 2005, 24(11): 53-55
- [7] Zhi Zhou, Zhichun Zhang, Nianchun Deng, et al. Applications of FRP-OFBG sensors on bridge cables. Proceedings of the SPIE, 2005, 5765: 668-677
- [8] 李国利, 李志全. 光纤光栅应变测量中的温度补偿问题. 激光与光电子学进展, 2005, 42(4)