

DOI: 10.11779/CJGE2020S2040

# 新型预应力锚索内部监测结构试验研究

孙彦鹏<sup>1,2</sup>, 凌永玉<sup>2</sup>, 林兴超<sup>2</sup>, 赵宇飞<sup>2</sup>, 安新赞<sup>2</sup>, 尹韬<sup>2</sup>

(1. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056002; 2. 中国水利水电科学研究院岩土工程研究所, 北京 100048)

**摘要:** 针对预应力锚索内部应力监测难题, 研发了一种新型预应力锚索内部应力监测结构, 并通过破坏性张拉试验和多级荷载反复张拉试验对该监测结构进行测试。测试结果表明锚索达到屈服荷载前, 新型监测结构与锚索同步变形, 具有较高的一致性; 高荷载反复张拉 13 次可消除加工监测结构引起的残余应变, 提高监测精度; 通过多级别反复张拉试验建立了监测结构应变与锚索应力之间的转换公式, 残余应变消除后, 采用转换公式测定锚索应力误差小于 2%; 为预应力锚索内部应力监测提供了一种新的有效可行的监测技术。

**关键词:** 预应力锚索; 监测结构; 锚固工程; 应力监测

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S2-0226-05

**作者简介:** 孙彦鹏(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事预应力锚索传力机制方面的研究工作。E-mail: 15733225622@163.com。

## Experimental study on internal monitoring structure of a new prestressed anchor cable

SUN Yan-peng<sup>1,2</sup>, LING Yong-yu<sup>2</sup>, LIN Xing-chao<sup>2</sup>, ZHAO Yu-fei<sup>2</sup>, AN Xin-zan<sup>2</sup>, YIN Tao<sup>2</sup>

(1. School of Water Conservancy and Hydroelectric power, Hebei University of Engineering, Handan Hebei 056002, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

**Abstract:** On account of their difficult internal stress monitoring, a new type of internal stress monitoring structure for pre-stressed anchor cables is developed and then tested by the destructive tension tests and the repeated tension tests under multi-level load. The test results show that before reaching the yield load, the new monitoring structure deforms synchronously with the anchor cable, representing a relatively high consistency. The residual strain caused by processing of monitoring structure is eliminated by 13 times of repeated tensioning under high loads, thus improving the accuracy. After elimination of the residual strain, a conversion formula is established between strain of monitoring structure and stress of anchor cables. The error of stress of anchor cables measured by this conversion formula is smaller than 2%. This study may provide a new effective and feasible monitoring technology for the internal stress monitoring of pre-stressed anchor cables.

**Key words:** prestressed anchor cable; monitoring structure; anchoring engineering; stress monitoring

## 0 引言

预应力锚固技术具有对岩(土)体扰动小, 施工快捷, 安全可靠, 经济高效等优点, 已成为高边坡、大跨度地下洞室以及深基坑等重要岩体结构的首选支护处理手段, 预应力锚固技术应用越来越普遍<sup>[1-3]</sup>。如在长江三峡水利枢纽船闸高边坡加固工程中, 共使用了 1000~3000 kN 的预应力锚索 4000 多根, 极大保证了边坡的稳定性<sup>[4]</sup>, 与边坡形成了一个整体。加强锚索的应力监测不仅可以直接测得锚索本身的受力情况, 还能了解加固体整体运行状态, 为边坡、地下工程等加固对象的长期安全运行提供重要支撑, 锚索应力监测一直是岩土工程研究的重点问题<sup>[5]</sup>。与锚索大量应用和应力监测重要性不匹配的是, 锚索中间部位

(内部) 应力监测缺乏有效技术手段<sup>[6]</sup>。

目前, 岩土工程中常用的锚索索力测量方法主要有压力表测定法、电阻应变片监测法、振弦测力传感器法、振动频率法、测力环测法、磁通量法等<sup>[7]</sup>。压力表测定法在高压环境下, 指针震动激烈, 误差较大; 电阻应变片监测法的监测结果易受外界环境的影响; 振弦测力传感器零漂及长期测值漂移较大; 震动频率法的测量结果不够精确; 测力环测法安装繁琐、操作

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0407000); 国家自然科学基金青年基金项目(51809289); 中国水科院人才基金项目(GE0145B462017, GE0145B692017)

收稿日期: 2020-08-07

\*通信作者(E-mail: linxc@jwhr.com)

不便;磁通量法响应较慢,不易获得动态参数<sup>[8-9]</sup>;这些方法难以实现锚索内部应力监测。付文光等<sup>[10]</sup>、孙东亚等<sup>[11]</sup>和安新赞<sup>[12]</sup>都提出将光纤与锚索耦合的分布式监测形式,但锚索在实际工程中受力会有较大变形,光纤为脆性材料可能无法适应,而且锚索全长与光纤完全耦合也较难实现。已有研究成果表明,由于锚索线性索状的特征结构,很难直接通过其表面应变直接监测锚索应力;并且,锚固工程绝大多数属于隐蔽工程,锚索赋存于岩体内部,运行工程地质环境复杂,这种复杂地质环境和特殊结构使得锚索中间部位的应力监测变得十分困难。

针对锚索中间部位(内部)应力监测的不足,本文研发并测试了一种新型预应力锚索中间部位(内部)应力监测结构,通过挤压握裹方式实现应变体与锚索咬合形成一体协调变形,解决了索体非光滑平整面监测设备无法在上面固定的难题,并能够适应索状结构大变形的特点,为锚索中间部位(内部)应力监测提供有效技术手段。

### 1 监测结构原理及结构设计

新型预应力锚索内部监测结构的监测原理是:在索状结构锚索特定部位通过挤压握裹形成柱状的等效应变体,应变体与锚索握裹效果足够好时通过测定应变体表面应变就可得到锚索所受轴力。数值解结果如图 1 所示:①不同锚索轴力条件下应变体变形分布规律一致,量值与锚索轴力呈线性相关,可通过应变体应变计算锚索轴力;②不同位置应变体表面呈现两端小中间大的应变分布特征,在实际运用中应统应变测量位置,进行标定后使用。

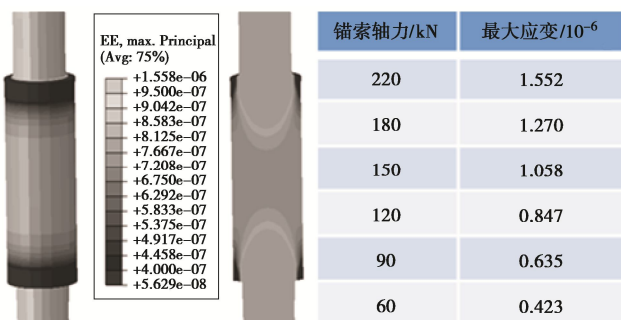


图 1 数值解结果

Fig. 1 Numerical results

基于上述原理从材料选择、监测结构与锚索耦合方法和几何尺寸等指标进行设计:①通过调研和力学特性试验测试,监测结构材料选用了 20CrMnTiH 钢材,该材料与锚索的主要材料特性参数相近(如表 1 所示),这种几乎相同的弹性模量可以更好保证监测结构与锚索协调变形。②监测结构与锚索的耦合方式采

用穿心千斤顶挤压握裹,在挤压过程中 20CrMnTiH 钢材与锚索之间增加四角剪力弹簧加强监测结构与锚索之间的耦合效果,如图 2 (a) 所示。③为满足监测需要,并减少监测结构对锚索本身结构特征的影响,通过优化设计确定监测结构应变体的几何特征,如图 2 (b) 所示,按常用锚索长度 30~60 m 计算监测结构的长度与锚索总长度的比值不超过 0.2%,不影响锚索大变形条件下的几何结构特征,并为分布式内部应力监测提供了条件。

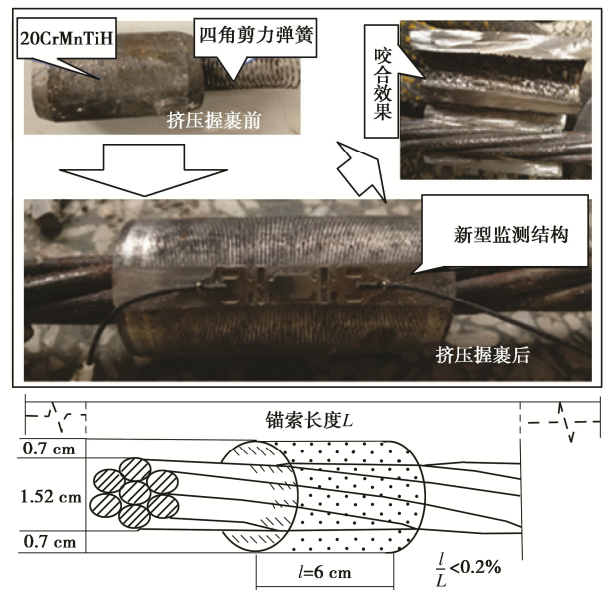


图 2 监测结构设计

Fig. 2 Design of monitoring structure

表 1 材料基本参数

Table 1 Basic parameters of materials

材料	抗拉强度 /MPa	屈服荷载 /kN	破坏荷载/kN	伸长率 /%
锚索	1860	234.6	260.7	3.5
监测结构	1080	234.6	207.0	10.0

### 2 试验及成果分析

#### 2.1 试验方案

为测试新型预应力锚索内部监测结构的可行性,设计了破坏性张拉试验和反复张拉试验,试验设备如图 3 所示。破坏性张拉试验,手动控制以约 1 kN/s 的速度加载直至锚索破坏;反复张拉试验,手动控制以约 1 kN/s 的速度加载至指定荷载,以约 2 kN/s 的速度卸载,如此反复循环直至满足设计方案要求,反复张拉试验方案如表 2 所示。

#### 2.2 破坏性张拉试验结果分析

破坏性张拉试验过程曲线、破坏后锚索和监测结构情况如图 4 所示。试验结果表明锚索轴力达到屈服荷载(230 kN)前,锚索轴力与监测结构应变同步变

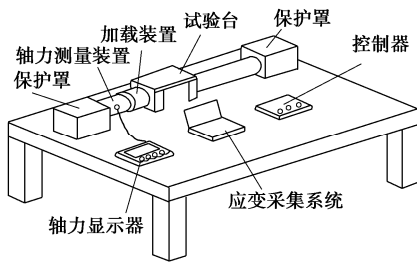


图3 试验设备示意图

Fig. 3 Diagram of experimental equipment

表2 多级荷载循环加卸载试验表

Table 2 Loading and unloading tests under multi-level loading cycles

加载顺序	加载值/kN	加载次数	加载顺序	加载值/kN	加载次数
1	120	20	6	150	10
2	150	10	7	120	10
3	180	10	8	150	10
4	220	10	9	180	10
5	180	10	10	220	10

化, 线性相关系数为 0.979, 锚索轴力与监测结构应变之间有良好的相关性; 锚索轴力超过屈服荷载后, 锚索出现塑性变形, 锚索编索结构开始发生破坏, 监测结构与锚索之间的咬和程度降低, 监测设备应变逐渐减小, 锚索轴力与监测设备应变不同步; 当锚索轴力达到极限荷载时, 锚索轴力和监测结构应变均回到零点; 锚索张拉破坏后监测结构与锚索结合良好, 未发现脱离现象, 钢绞线本身 7 根钢丝松散, 结构完全破坏。

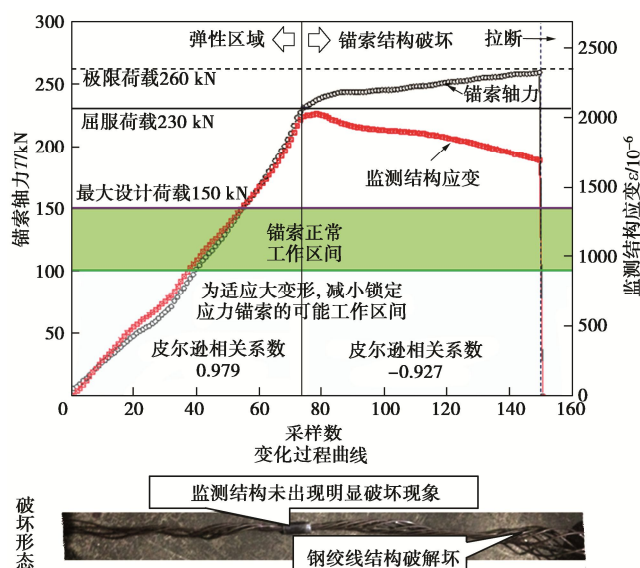


图4 破坏性张拉试验结果

Fig. 4 Results of destructive tensile test  
结合锚索受力特征和实际工程中锚索轴力主要工

作范围可知, 加工监测结构不会影响锚索基本力学特性参数 (屈服荷载 230 kN, 极限荷载 260 kN), 监测结构强度不小于锚索本身强度, 在屈服荷载前监测结构可以与锚索很好的结合。上述特征表明在工程锚索受力范围内, 新型监测结构具备作为锚索内部应力的基本条件, 在实际工程设计和应用中是不允许锚索进入屈服状态的。

2.3 多级荷载循环加卸载试验结果分析

为进一步验证新型监测结构的可行性, 进行了反复张拉试验, 锚索轴力张拉过程曲线如图 5 (a) 所示, 监测结构应变响应曲线如图 5 (b) 所示, 对比加载曲线和响应曲线可知: ①与破坏性张拉试验结果相同, 监测结构能够与锚索协同变形, 具备作为锚索轴力监测的基本条件。②在前 20 次 120 kN 加卸载过程中, 卸载后监测结构初始应变逐渐减小, 超过 13 次后趋于平衡, 分析原因主要是由于监测结构通过挤压握裹形成, 加工过程中存在加工应力和残余应变, 随着加卸载过程加工应力会逐渐释放, 残余应变会逐渐消除。③随着荷载的增大, 第 21~30 次 150 kN 加卸载过程的进行, 同样出现加工应力释放过程, 但是趋于平衡的次数减少, 只需 8 次加卸载过程监测结构初始应变不再减小。④随着荷载继续增大, 上述现象重复出现直至荷载级别达到 220 kN; ⑤当荷载不大于历史最大荷载 (220 kN) 时, 对锚索进行加卸载不会再出现初始应变减小的现象。

上述试验现象表明, 监测结构加工过程中存在加工应力和残余应变, 残余应变可以通过预先反复张拉进行消除, 针对现行锚索和监测结构设计可通过 13 次 220 kN 的反复张拉消除加工应力和残余应变, 提高监测结构的监测精度。需要指出的是加工应力是结构设计中经常出现的问题, 通常可以通过放置一定时间自动消除或施加人为扰动加速释放, 本文提出的通过反复张拉试验加速释放加工应力的方法在实际工程应用中是切实可行的。

为进一步验证监测结构与锚索轴力之间的关系, 通过消除残余应变后的反复张拉试验 (第 51~110 次加卸载) 结果建立监测结构与锚索之间的换算公式。通过 60 次反复张拉试验 8037 组锚索轴力与监测结构应变数据, 拟合得到的关系式:

$$T = 0.137\varepsilon + 53.29 \quad (1)$$

皮尔逊相关系数达到 0.996, 锚索轴力与监测设备应力呈良好的线性关系, (拟合曲线见图 6)。通过式 (1) 对加卸载过程中的特征值进行验证 (见表 3), 验证结果表明 30 个特征值的验证误差均小于 2%, 满足一般监测设备的监测精度, 可用于实际工程中的锚索中间部位 (内部) 应力监测。

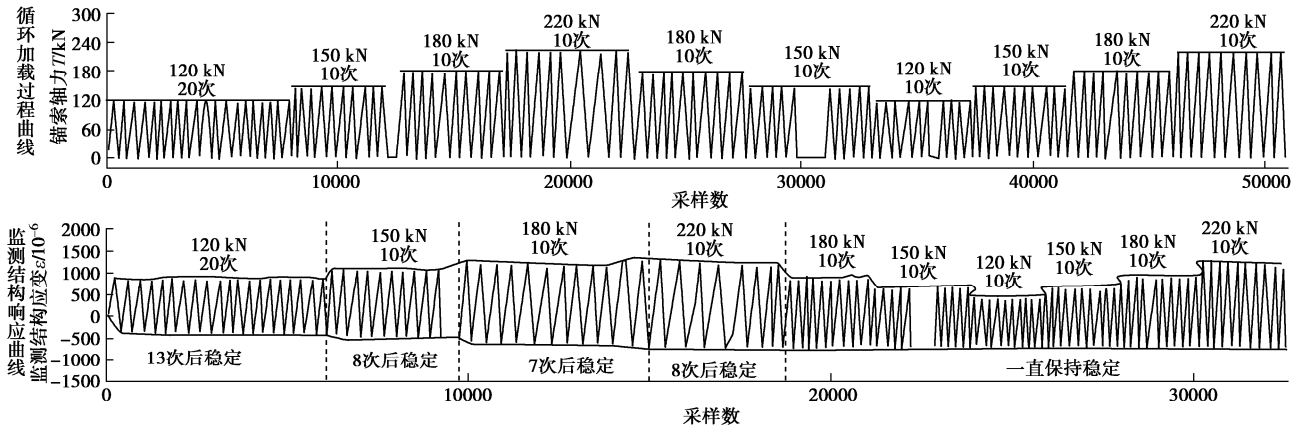


图 5 锚索多级荷载循环加卸载轴力及监测结构响应曲线图

Fig. 5 Axial forces of loading and unloading of multi-level loading cycle of anchor cables and response curves of monitoring structure

表 3 加卸载试验最大荷载误差验证

Table 3 Verification of maximum load errors in loading and unloading tests

加卸载 次数	180 kN (51~60)			150 kN (61~70)			120 kN (71~80)		
	T/kN	T'/kN	误差/%	T/kN	T'/kN	误差/%	T/kN	T'/kN	误差/%
1	180.3	179.8	-0.29	149.9	149.1	-0.52	120.4	118.6	-1.53
2	181.5	182.3	0.46	150.6	149.5	-0.72	119.9	118.7	-1.01
3	181.2	182.5	0.70	149.8	150.0	0.15	120.3	119.3	-0.85
4	180.5	181.6	0.61	151.1	150.9	-0.11	120.3	119.6	-0.54
5	178.3	179.0	0.39	151.1	151.3	0.14	120.5	120.1	-0.32
6	180.5	182.6	1.17	150.4	153.2	1.85	120.6	120.4	-0.18
7	180.3	181.2	0.53	150.5	152.1	1.04	120.6	120.1	-0.42
8	180.8	183.0	1.21	150.6	151.9	0.88	121.1	121.1	0.01
9	180.1	182.0	1.04	150.1	151.1	0.68	120.5	120.6	0.08
10	180.1	181.9	1.02	151.0	153.0	1.33	120.5	120.3	-0.17

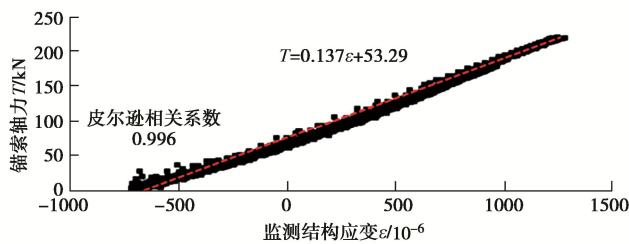


图 6 关系曲线拟合

Fig. 6 Fitting of relationship curves

### 3 结 论

本文研发并测试了一种适用于锚索中间部位(内部)应力监测的新型监测结构,得到主要结论如下:

(1) 通过材料选择、监测结构与锚索耦合方法确定和几何尺寸设计,研制了一种适用于锚索中间部位(内部)应力监测的新型监测结构,该结构能够与锚索之间耦合并协调变形,监测结构的长度与锚索总长度的比值不超过 0.2%,不影响锚索适应大变形几何结构特征。

(2) 破坏性张拉试验结果表明,监测结构及与锚索耦合部位强度大于锚索本身强度,锚索轴力超过

屈服荷载前能够保持很好的协调一致变形,其测量范围为 0~屈服荷载,结合实际工程锚索运行状态该测量范围满足实际工程需求,具备作为锚索轴力监测的基本条件。

(3) 反复张拉试验结果表明,通过 13 次 220 kN 的反复张拉消除加工应力和残余应变提高了监测结构的监测精度。

(4) 根据 60 次反复张拉试验 8037 组锚索轴力与监测结构应变数据建立了监测结构应变与锚索轴力计算公式,通过 30 个特征值的验证误差分析验证了计算公式的准确性和可靠性。为锚索中间部位(内部)应力监测提供一种可行途径。

### 参考文献:

[1] 肖世国,周德培. 岩石高边坡一种预应力锚索框架型地梁的内力计算[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 479 - 482. (XIAO Shi-guo, ZHOU De-pei. Internal force calculation of a prestressed anchor rope frame ground beam on high rock slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4): 479 - 482. (in Chinese))



- [2] 陈祖煜, 杨 健. 岩土预应力锚固技术的进展[J]. 贵州水力发电, 2004(5): 5 - 10. (CHEN Zu-yu, YANG Jian. Development of geotechnical prestressed anchoring technology[J]. Guizhou Hydropower, 2004(5): 5 - 10. (in Chinese))
- [3] 陈安敏, 顾金才, 沈 俊, 等. 软岩加固中锚索张拉吨位随时间变化规律的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 251 - 256. (CHEN An-min, GU Jin-cai, SHEN Jun, et al. Model test study on the law of the change in the tonnage of anchor cable with time in soft rock reinforcement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2): 251 - 256. (in Chinese))
- [4] 赵明华, 刘小平, 冯汉斌, 等. 小湾电站高边坡的稳定性监测及分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 1): 2746 - 2750. (ZHAO Ming-hua, LIU Xiao-ping, FENG Han-bin, et al. Monitoring and analysis of a high-slope stability in Xiaowan hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 2746 - 2750. (in Chinese))
- [5] 高大水. 三峡船闸高边坡锚固及新型无粘结锚索开发[J]. 水力发电, 2003(1): 36 - 40. (GAO Da-shui. Anchorage of the high slope of the Three Gorges Ship Lock and the development of a new type of unbonded anchor cable[J]. Hydroelectric Power, 2003(1): 36 - 40. (in Chinese))
- [6] 朱晗迺, 孙红月, 汪会帮, 等. 边坡加固锚索预应力变化规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2756 - 2760. (ZHU Han-nai, SUN Hong-yue, WANG Hui-bang, et al. Analysis of the change law of prestress of anchor cable for slope reinforcement[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2756 - 2760. (in Chinese))
- [7] 高俊启, 施 斌, 张 巍, 等. 分布式光纤传感器监测预应力锚索应力状态的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 2): 5604 - 5610. (GAO Jun-qi, SHI Bin, ZHANG Wei, et al. Experimental study on monitoring the stress state of prestressed anchor cables by distributed optical fiber sensors[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S2): 5604 - 5610. (in Chinese))
- [8] 汪小刚, 王玉杰, 贾志欣, 等. 分布式光纤预应力智能监测锚索, 11100.CN106906824A[P]. 2017-06-30. (WANG Xiao-gang, WANG Yu-jie, JIA Zhi-xin, et al. Distributed Optical Fiber Prestressed Intelligent Monitoring Anchor Cable, 11100.CN106906824A[P]. 2017-06-30. (in Chinese))
- [9] 王清标, 蒋金泉, 孙彦庆, 等. 基于振弦传感技术的高性能锚索测力系统开发研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 2): 3981 - 3987. (WANG Qing-biao, JIANG Jin-quan, SUN Yan-qing, et al. Development and research of high-performance anchor cable force measurement system based on vibrating wire sensing technology[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S2): 3981 - 3987. (in Chinese))
- [10] 付文光, 于会来, 耿 培. 预应力锚索应力测量误差的试验研究与对策[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 2): 487 - 491. (FU Wen-guang, YU Hui-lai, GENG Pei. Experimental research and countermeasures of stress measurement error of prestressed anchor cable[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 487 - 491. (in Chinese))
- [11] 孙东亚. 光纤智能材料、器件与智能锚索结构系统的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2002. (SUN Dong-ya. Research on Optical Fiber Intelligent Materials, Devices and Intelligent Anchor Cable Structure System[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2002. (in Chinese))
- [12] 安新赞. 基于光纤 Bragg 光栅传感技术的锚索预应力监测可行性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017. (AN Xin-zan. Feasibility Study of Anchor Prestress Monitoring Based on Fiber Bragg Grating Sensing Technology[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017. (in Chinese))

(编校: 孙振远)