

便携式在役锚索预应力检测设备研制及应用

杨栋^{1,2}, 周天游¹, 蔡强², 姜昭群², 李忠², 陈文俊²

(1. 成都华建地质工程科技有限公司, 四川 成都 611734; 2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

摘要: 现有的锚索预应力检测设备要求锚索外露段长度 >70 cm, 不适用于运维期的在役锚索检测, 且质量大都在150 kg以上, 对于高陡边坡锚索检测显得笨重。为此研制了HRAD-300型便携式在役锚索预应力智能检测仪, 可适用于钢绞线外露长度 >7 cm的在役锚索预应力检测。检测仪位移量程200 mm, 测量误差0.01 mm; 测力量程300 kN, 测量误差 $\pm 1\%$ FS, 单件质量 <15 kg, 总质量 <40 kg。基于反拉法原理及检测曲线形态, 提出锚下有效预应力算法, 并编制了相关软件。室内试验表明, 检测曲线形态多为拐点不明显型, 计算值与原始锁定值基本一致。使用该设备对邛崃市天台山景区凤凰岩不稳定斜坡锚固工程进行检测, 结果表明, 现场锚索检测曲线多为拐点明显型, 具有明显的突变点及陡降; 锚索运行状态良好, 持续发挥功效, 2号锚索预应力损失较为明显, 可以采取补偿张拉方式; 同一锚索的不同钢绞线存在受力不均的情况。便携式在役锚索预应力检测仪智能、轻便, 可为锚固工程健康评价提供数据支撑。

关键词: 预应力检测; 在役锚索; 锚下预应力; 运维期; 反拉法; 便携式智能检测仪

中图分类号: P634.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)01-0106-07

Research and application on prestress detection equipment for in-service anchors

YANG Dong^{1,2}, ZHOU Tianyou¹, CAI Qiang², JIANG Zhaoqun², LI Zhong², CHEN Wenjun²

(1. Chengdu Huajian Geological Engineering Technology Co., Ltd., Chengdu Sichuan 611734, China;

2. Institute of Exploration Technology, GAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: The existing anchor cable prestress detection equipments can only be used when the length of the exposed section of the anchor is above 70cm and the anchor cable is not in operation and maintenance period. Most of these devices weigh more than 150 kg, which is too heavy for detecting the anchor in high and steep slopes. In order to overcome the above problems, a new anchor cable prestress detection equipment HRAD-300 was developed. It can be applied to the prestress detection of in-service anchor with exposed length of 7cm. The measurement error is less than 0.01mm when the displacement range of the detector is 200mm, while the measurement error is $\pm 1\%$ FS when the force range is 300kN. The weight of a single box of the equipment is less than 15kg, and the total weight is less than 40kg. Based on the principle of reverse pull method and the shape of detection curve, the effective anchored prestress algorithm was proposed, and the software is programmed. The indoor test shows that there are no obvious mutation points in the detection curve. The calculated values were basically consistent with the original locked values. The equipment was used to detect the anchor of the unstable slope of Fenghuang rock. The field anchor detection curves has

收稿日期: 2023-06-29; 修回日期: 2023-10-30 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.01.014

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“地质灾害防治工程技术应用”(编号: DD20230451)

第一作者: 杨栋, 男, 汉族, 1985年生, 高级工程师, 注册岩土工程师, 岩土工程专业, 硕士, 主要从事岩土体稳定性及防治技术方面的研究工作, 四川省成都市郫都区成都现代工业港港华路139号, 271062514@qq.com。

通信作者: 周天游, 男, 汉族, 1988年生, 工程师, 环境工程专业, 主要从事水工环地质调查、勘查、设计、评估等研究工作, 四川省成都市郫都区成都现代工业港港华路139号, 271062514@qq.com。

引用格式: 杨栋, 周天游, 蔡强, 等. 便携式在役锚索预应力检测设备研制及应用[J]. 钻探工程, 2024, 51(1): 106-112.

YANG Dong, ZHOU Tianyou, CAI Qiang, et al. Research and application on prestress detection equipment for in-service anchors[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1): 106-112.

obvious mutation points and steep drops. The anchor cable runs well and keeps on working. The prestress loss of the No.2 anchor cable is more obvious, and the way of compensate and stretch can be taken. Uneven stress exists in the same anchor cable. In conclusion, the HRAD-300 is intelligent and light, which can provide data for the health evaluation of anchorage engineering.

Key words: prestress detection; in-service anchor; anchored prestress; operation and maintenance period; anti-pulling method; portable intelligent detector

0 引言

锚固工程可有效改善斜坡表面岩土体应力状态,限制斜坡表面岩土体变形,并具有强度高、结构简单、经济高效等独特优点,因而在斜坡支护工程中已被广泛应用,且其规模体量不断增加,尤其是在大型水利水电工程中,诸如三峡库区、溪洛渡水电站、锦屏一级水电站、白鹤滩水电站等国家重大建设工程^[1-5]。但随着服役时间延长,部分锚固工程已出现不同程度损伤^[6-7],甚至出现锚索拉断的安全事故^[7]。作为隐蔽地下工程,其预应力、长度、灌浆饱满度及腐蚀状态的检测^[8]以及根据这些指标获取锚固工程损伤状态是当前工程运营与管理部门最为关注的焦点,也是学术界的研究热点。其中,锚下预应力的变化直接影响到预应力锚固工程的安全。目前通常的做法是在选取一定数量的锚索通过预设振弦式传感器、磁通量传感器^[9]、光纤传感器^[10]等进行预应力长期监测,监测点数量和监测年限非常有限,大量锚索并未预设测力传感器,用少量锚索预应力推断整个锚固工程是否安全显然是不合适的。

锚下有效预应力的检测大致可分为弹性波法、等效质量法及反拉法。弹性波法通过激振信号使得锚索振动,根据一维振动杆原理检测有效预应力,但锚索结构对波形特征影响机制复杂,理论探讨研究较多,始终无法形成被普遍认可的产品^[11-12]。等效质量法将锚墩与注浆体视为一体,通过不同的共振频率确定预应力大小^[13-14]。该方法需要复杂的现场标定试验,并且精度不高,误差大约30%。切向刚度法^[15]通过室内试验探索锚索预应力与外锚段切向刚度的关系,仍处于理论探讨阶段。反拉法则通过对锚索进行张拉获取张拉荷载-锚索伸长量关系曲线,通过拐点法或测微法来判断锚下有效预应力。该方法简便易行,原理简单,检测精度高,在行业中受认可程度最高。美国的Bruce等使用拉脱法对加固挡土墙的预应力锚索的工作应力进行了检测^[16]。日本及中国香港的岩土锚固规程均规定使

用拉脱法检测预应力锚索的工作荷载^[17-18]。国内预应力检测的主流生产厂家主要有武汉中岩科技股份有限公司、四川升拓检测设备技术股份有限公司、湖南联智科技股份有限公司等,基本采用的是测微法^[19],将差动变压器测微原理引入锚具夹片位移的测微中。上述主流产品均要求锚索外露段长度 >70 cm,而竣工后的锚索外露段长度仅仅为10 cm左右;且设备质量大都在150 kg以上,对于高陡边坡锚索检测显得笨重。综上,现有产品只适用于锚索施工期检测,不适用于运维期检测。

为解决上述问题,本文研制了在役锚索预应力检测仪,可适用于钢绞线外露长度 >7 cm的在役锚索,并在邛崃市天台山景区凤凰岩不稳定斜坡锚固工程中得到应用。

1 反拉法原理

对于无黏结预应力结构或灌浆前的有黏结预应力结构,通过对钢筋的外露段施加拉力来测得其锚下预应力。先通过钢绞线连接器将外露端与一段长约70 cm钢绞线相连,使用撑脚、张拉设备等对其进行张拉,当施加外力小于锚下有效预应力时,实际上锚具可视为固定端,此时只是外接钢绞线受拉,位移变化很小;当施加外力达到锚下有效预应力时,锚索自由段与外接钢绞线同时受拉,因此位移变化增大,张拉曲线变缓,这个突变点或区间即对应锚下有效预应力。典型反拉曲线可见图1。

(1)OA段:为锚索外露段预紧,施加荷载很小,张拉曲线呈非线性;

(2)AB段:为锚索外露段弹性变形,此时施加荷载小于锚索自由段轴力,仅钢绞线外露段受拉,其张拉位移曲线为一斜率较陡的直线;

(3)BC段:为夹片松动,此时施加荷载达到锚索自由段轴力,由于需要克服夹片与锚具及钢绞线的摩擦,一般会产生一定程度陡降至C点。可取图中点B为拐点,作为锚索有效预应力。但当夹片与锚

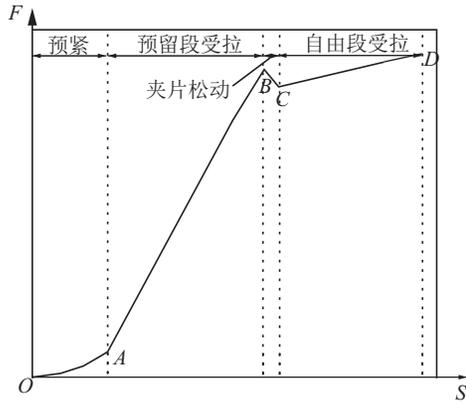


图1 反拉法原理图示

Fig.1 Illustration of anti-pulling principle

具及钢绞线表面光滑、无锈蚀时,有可能为一缓变区。

(4)CD段:为锚索整体段受拉,此时施加荷载超过锚索自由段轴力,外露段与自由段形成受拉段,产生弹性变形,其张拉位移曲线为一斜率较缓的直线。此时根据虎克定律,可以反推锚索自由段长度。

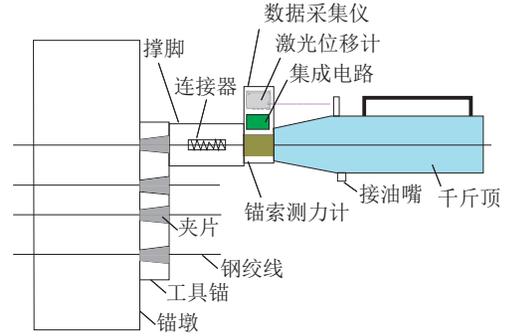
需要注意的是,由于现场锚索施工工艺、防腐措施、服役年限的差异,以上各阶段不一定都会出现,此时应根据张拉曲线的具体类型来判定锚下有效预应力大小。

2 在役锚索预应力检测仪

2.1 系统组成

基于反拉法原理,成功研制HRAD-300型在役锚索预应力检测仪(图2)。其主要由数据采集仪、钢绞线连接器、撑脚、限位装置、对中装置、拉拔装置等组成。其中数据采集仪由激光位移计、锚索测力计及集成电路组成,数据采集仪与电脑采用蓝牙连接。位移计量程200 mm,测量误差0.01 mm;测力计量程300 kN,测量误差 $\pm 1\%FS$ 。检测仪单件质量 $< 15\text{ kg}$,总质量 $< 40\text{ kg}$ 。可适用于外露长度 $> 7\text{ cm}$ 的在役锚索检测。

开发的锚索预应力智能检测系统主要可分为业务模块层、核心功能层及数据管理层(图3)。业务模块层包括仪器校正、数据检测、工程信息三大模块。仪器校正模块可设置传感器参数,标定位移计、测力计。数据检测模块可进行采集设置、预警设置及通讯设置,实时监控张拉曲线,实时计算锚下有效预应力值及自由段长度。工程信息模块可录入工程



(a) 检测仪组成



(b) 检测仪实物

图2 在役锚索预应力检测仪

Fig.2 Prestress detector for in-service anchor

信息,自动生成锚固工程检测报告。数据管理层可实现工程文件保存、读取、查询、修改及打印检测报告等功能,工程文件包含了锚固工程信息、测试原始数据、检测曲线、检测报告等关键信息。

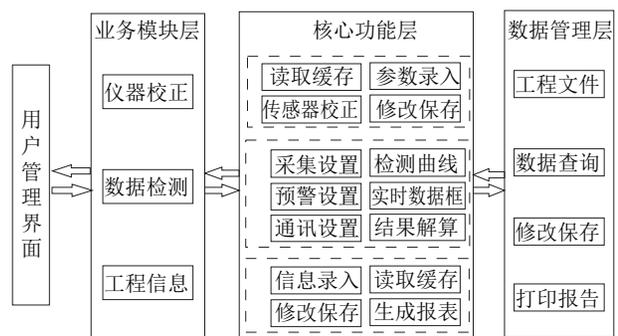


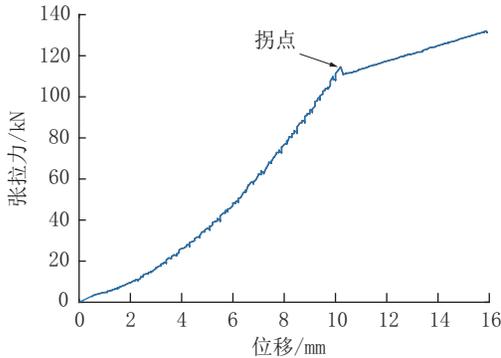
图3 锚索预应力智能检测系统框架

Fig.3 System framework diagram of HRAD-300

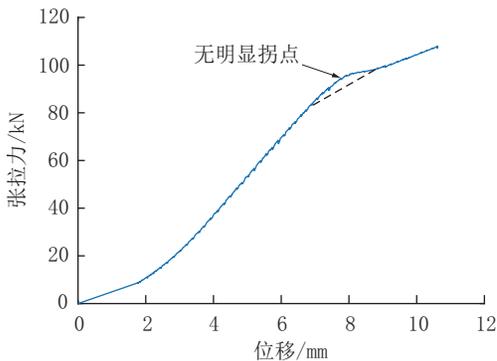
2.2 数据处理及算法

由于位移及预应力采用连续采样,加压稳压过程中,同一位移下可能对应多个不同拉力值,导致数据冗余,对原始数据进行中位值平均滤波,剔除多余数据并采用递推平均滤波处理。典型检测曲线形态

分为拐点明显(图 4a)及拐点不明显(图 4b)两大类。



(a) 拐点明显的典型检测曲线



(b) 拐点不明显的典型检测曲线

图 4 典型预应力检测曲线

Fig.4 Typical prestress detection curve

当锈蚀明显时,检测曲线多为拐点明显型,大多数现场检测曲线属于此类。若锚索服役年限较短,锈蚀不明显,则其检测曲线有可能表现为第二类。对第一类检测曲线,有明显突变区,其特征为在不同位移值下的两个点会出现拉力值相同。首先用程序搜索出这两个点的位移坐标 x_1, x_2 , 再次搜索对应拉力区间 $[y_1, y_2]$ 中最大值 y_{max} , 即为拐点位置。若不存在拐点,根据曲线的凹凸性,搜索曲线中上凸处的最大值。本方法的精度与搜索区间的大小,及曲线趋势有关。软件还设置了“修正”功能,即可人工交互修改拐点。

3 室内验证

室内试验在张拉台架上进行,锚索一端使用千斤顶将钢绞线张拉锁定至不同预应力值;另一端使用 HRAD-300 型便携式锚索预应力检测仪进行检测。室内进行了长度为 4 m(图 5)及 6 m 锚索(图 6)的预应力检测。室内检测曲线形态多为拐点不明显型,存在缓变区,但不存在骤降的情形。这是由于室内试验使用的钢绞线、夹片及锚具保存完好无锈蚀,因此夹片与钢绞线及锚具的摩擦可以忽略不计。为模拟夹片与钢绞线及锚具的摩擦,选取试样 1-7 及 1-9 在锚具与垫板之间、夹片与锚具之间涂满 AB 胶,这两个试样的检测曲线产生了突变点(图 5)。

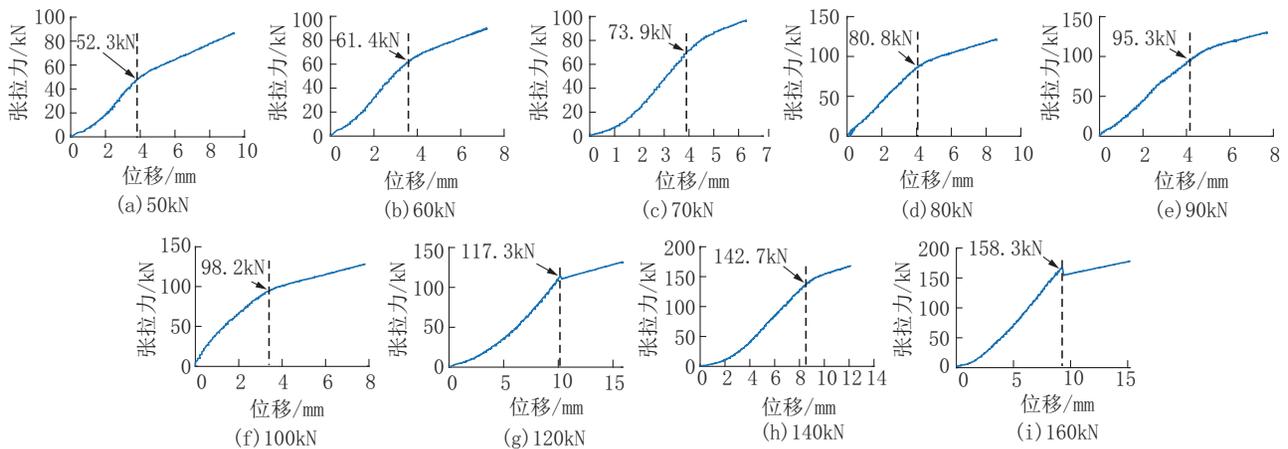


图 5 1号锚索(长度 4 m)室内检测曲线

Fig.5 Indoor detection curve of No.1 anchor cable with the length of more than 4m

由图 5 及图 6 可见,对于两种类型的检测曲线,使用软件自动搜索功能,锚下有效预应力计算值与原始锁定值基本一致,误差 < 5 kN,精度可满足工程需求。

4 工程应用

邛崃市天台山景区凤凰岩不稳定斜坡发育一处坡面型泥石流及一处滑坡,严重威胁景区公路及过往行人。采取的工程措施包括拦砂坝、排水沟、格构

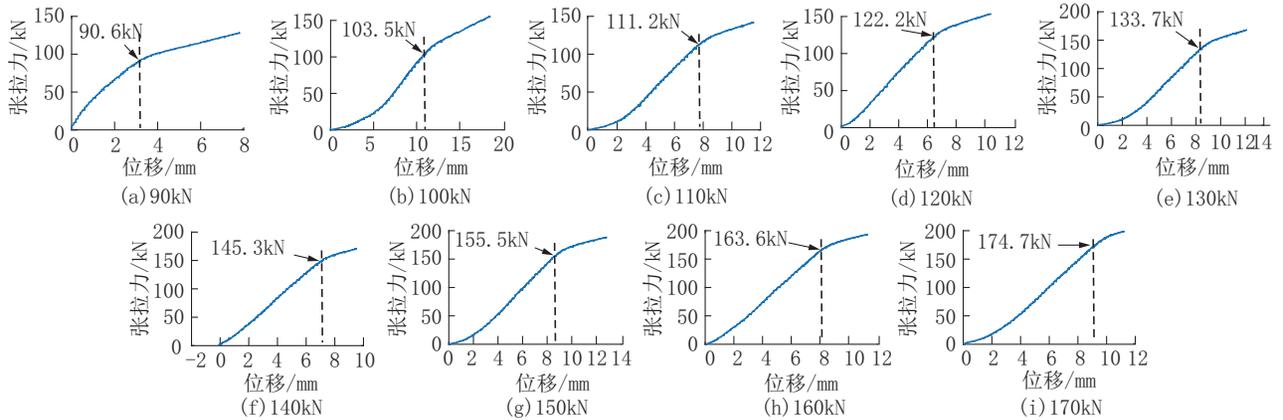


图6 2号锚索(长度6 m)室内检测曲线

Fig.6 Indoor detection curve of No.2 anchor cable with the length of more than 4m

锚杆及双排抗滑桩,施工单位为成都华建地质工程科技有限公司,锚索完工时间2014年。2022年11月,项目组选取治理工程中3根锚索进行检测(图7a),锚索设计锚固力450 kN,每根锚索4根钢绞线。首先清理锚头,然后再依次安装好连接器、撑脚、限位装置、对中装置、拉拔装置及数据采集仪(图7b)。所检测的锚索外露段长度约为10 cm,最短外露长度约为7 cm(图7c)。

检测曲线见图8,现场锚索检测曲线多为拐点明显型曲线,具有明显的突变点及陡降,这是由于施加张拉力克服夹片与锚具及钢绞线摩擦产生的。其中钢绞线1-4与室内实验结果类似,存在缓变区,不存在明显的拐点,该钢绞线表面较为光滑,锈蚀不明显。检测结果统计表见表1。检测结果表明,1号锚索锚下有效预应力约为414.4 kN,2号锚索锚下有效预应力约为293.1 kN,3号锚索锚下有效预应力约为427.0 kN。锚索运行状态良好,持续发挥功效,其中2号预应力损失较为明显,可以采取补偿张拉。

同一锚索的不同钢绞线存在受力不均的情况(表1)。定义不均匀系数为锚索各钢绞线极差与均值的比值,可见本次检测锚索不均匀系数分别为0.37、0.18及0.21。推测为编制锚索、下锚及张拉工艺造成。钢绞线不均匀受力问题虽然是在锚索施工后已经发生,但是其直接影响锚索长期承载能力和后期容许附加应力增量。因此锚索的长期承载能力分析必须建立在对该问题准确认识的基础上。

使用该设备检测锚索自由段长度时,结果较为离散(参见表1)。这是因为利用虎克定律反推自由



(a) 检测现场



(b) 采集仪



(c) 锚索外露段

图7 凤凰岩不稳定斜坡锚索检测

Fig.7 Anchor detection of Fenghuang rock slope

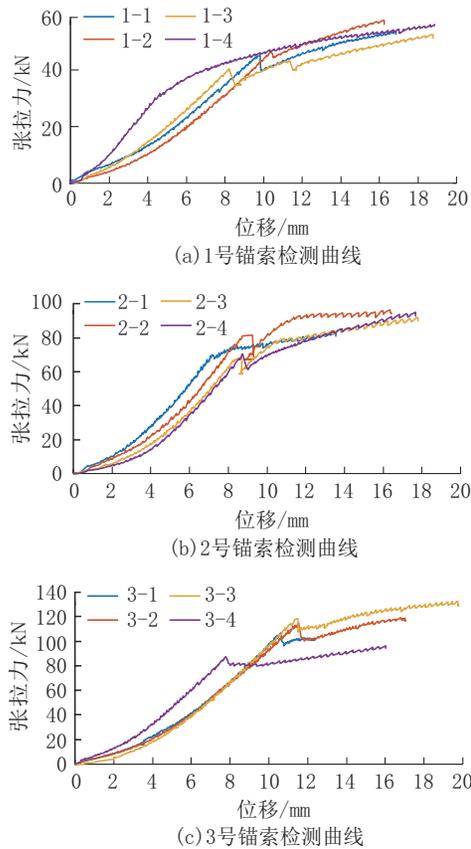


图8 凤凰岩不稳定斜坡锚索检测曲线

Fig.8 Anchor detection curves of Fenghuang rock slope

表1 锚索检测结果统计

Table 1 Statistics of anchor cable detect results

| 锚索编号 | 钢绞线编号 | 单束预应力/kN | 不均匀系数 | 设计锚固力/kN | 综合锚下预应力/kN | 自由段长度/m |
|------|-------|----------|-------|----------|------------|---------|
| 1 | 1-1 | 112.4 | 0.37 | 450 | 414.4 | 11.58 |
| | 1-2 | 118.73 | | | | |
| | 1-3 | 103.3 | | | | |
| | 1-4 | 79.94 | | | | |
| 2 | 2-1 | 72.55 | 0.18 | 450 | 293.1 | 18.05 |
| | 2-2 | 81.57 | | | | |
| | 2-3 | 68.53 | | | | |
| | 2-4 | 70.41 | | | | |
| 3 | 3-1 | 106.92 | 0.29 | 450 | 427.0 | 21.20 |
| | 3-2 | 114.6 | | | | |
| | 3-3 | 118.22 | | | | |
| | 3-4 | 87.23 | | | | |

段长度时,需假定钢绞线弹性模量为常数,由于漫长的服役年限、复杂的腐蚀环境,钢绞线弹性模量会发

生不同程度的变化^[3],从而影响长度检测的精度。建议锚索长度还应结合设计资料及应力波无损检测的方式综合确定。

5 结论

(1)自主研发的HRAD-300型便携式在役锚索预应力检测仪,可适用于钢绞线外露长度>7 cm的在役锚索预应力检测。其便于携带,不受地形影响,可实时监测张拉曲线、计算锚下有效预应力,并出具检测报告。

(2)基于检测曲线不同形态提出锚下有效预应力算法并编制相关软件,通过室内试验进行了验证,计算值与锁定值基本一致。

(3)锚索预应力检测仪成功运用于凤凰岩不稳定斜坡锚索检测。其中2号锚索预应力损失较为明显。同一锚索的不同钢绞线存在受力不均的情况。锚索不均匀系数分别为0.37、0.18及0.21。

(4)由于漫长的服役年限、复杂的腐蚀环境,钢绞线弹性模量会发生不同程度的变化,从而影响设备长度检测的精度。建议锚索长度应结合设计资料及应力波无损检测的方式综合确定。

参考文献(References):

[1] Li Shucai, Wang Hongtao, Wang Qi. Failure mechanism of bolt-ing support and high-strength bolt-grouting technology for deep and soft surrounding rock with high stress[J]. Journal of Central South University, 2016(23):440-448.

[2] 江权,陈建林,冯夏庭.大型地下洞室对穿预应力锚索失效形式与耦合模型[J].岩土力学,2013,34(8):2271-2279. JIANG Quan, CHEN Jianlin, FENG Xiating. The failure form and coupling model of prestressed anchorage cable for large underground caverns and coupling model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013,34(8):2271-2279.

[3] 王全成,姜昭群,罗宏保,等.自承载式预应力锚索现场试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(8):79-82,87. WANG Quancheng, JIANG Zhaoqun, LUO Hongbao, et al. Field test of self-bearing pre-stressed anchor cable[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(8):79-82,87.

[4] 罗宏保,王全成,张勇,等.预应力锚索孔内扩孔工艺的研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):44-48. LUO Hongbao, WANG Quancheng, ZHANG Yong, et al. Research on pre-stressed anchor cable hole reaming technology[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(10):44-48.

- [5] 郝峰,李存峰.跨断层牛顿力监测系统超大长度锚索综合施工技术[J].钻探工程,2021,48(5):88-95.
HAO Feng, LI Cunfeng. Comprehensive construction technology for super-long anchor cables for the cross-fault Newton force monitoring system [J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48 (5) : 88-95.
- [6] 董志宏,丁秀丽,黄书岭,等.高地应力区大型洞室锚索时效受力特征及长期承载风险分析[J].岩土力学,2019,40(1):352-361.
DONG Zhihong, DING Xiuli, HUANG Shuling, et al. Analysis of ageing-stress characteristics and long-term bearing risk of anchor cable for a large cavern in high geo-stress area [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(1):352-361.
- [7] 陶志刚,任树林,郝宇,等.层状反倾边坡破坏机制及NPR锚索控制效果物理模型试验[J].岩土力学,2021,42(4):977-990.
TAO Zhigang, REN Shulin, HAO Yu, et al. Physical model experiment on failure mechanism and NPR anchor cable control effect of layered counter-tilt slope [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(4) :977-990.
- [8] 程良奎,韩军,张培文.岩土锚固工程的长期性能与安全评价[J].岩石力学与工程学报,2008,27(5):865-872.
CHENG Liangkui, HAN Jun, ZHANG Peiwen. Long term performance and safety evaluation of geotechnical anchorage engineering [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(5):865-872.
- [9] Kwun H, Bartels K A. Magnetostrictive sensor technology and its applications [J]. *Ultrasonics*, 1998, 36(1-5):171-178.
- [10] Assaf Klar, Ori Nissim, Itai Elkayam. A hardening load transfer function for rock bolts and its calibration using distributed fiber optic sensing [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.12.027>.
- [11] 张维平.一种基于谱能比的数字信号分析方法:ZL201210056010.8[P].2014-05-14.
ZHANG Weiping. A digital signal analysis method based on spectral energy ratio: ZL201210056010.8[P]. 2014-05-14.
- [12] 郭琦.复杂预应力体系梁式结构有效预应力预测理论与方法研究[D].西安:长安大学,2008.
GUO Qi. Study on the theory and method of effective prestress prediction for beam-type structures with complex prestressed systems[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [13] Wu Jiaye, Wu Jiaer, Yang Chao, et al. System equivalent mass based post-tensioned anchor tension testing technique [C]// ASCE, GeoCongress 2012, Oakland, California: 2688-2696.
- [14] 吴佳晔.等效质量法在锚下有效预应力检测中的应用[J].铁道建筑,2017(5):1-4.
WU Jiaye. Application of equivalent mass method in inspection of effective prestress under anchorage [J]. *Railway Engineering*, 2017(5):1-4.
- [15] 陈强,周志鸿,朱宝龙.基于外锚头段切向刚度的在役锚索预应力测试方法研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(8):1596-1608.
CHEN Qiang, ZHOU Zhihong, ZHU Baolong. Study on prestress test on in-service anchor cables based on tangential stiffness of external anchor head segment [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(8):1596-1608.
- [16] Bruce Mary Ellen C, Gomez Jesus, Traylor Robert P. Repeated Lift-off Testing of Single Bore Multiple Anchors for Dam Retaining Wall over a 5-year Period [M]. New York: American Society of Civil Engineers, 2009.
- [17] Hiroaki Miyatake, Takeshi Oshita, Hiroaki Kubo, et al. A new manual for ground anchor inspection, integrity investigation and remedial measures [C]// International Conference on Ground Anchorages and Anchored Structures in Service. London, 2007.
- [18] Hong Kong Geotechnical Control Office. Model Specification for Prestressed Ground Anchors [M]. Hong Kong: Government Publications Centre, 1989.
- [19] 付丹,郭红仙,程晓辉.预应力锚索工作应力的检测方法-拉脱法的检测机制和试验研究[J].岩土力学,2012,33(8):2247-2252.
FU Dan, GUO Hongxian, CHENG Xiaohui. Working stress measurement of prestressed anchor cables: Detection mechanism and experimental study of lift-off test [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(8):2247-2252.

(编辑 王文)