

文章编号 1004-924X(2024)17-2635-10

引水钢岔管水压试验分布式应力测量

尹国路^{1,2*}, 马璟铭², 姜胜先³, 王鑫², 张元寅², 朱涛^{2,1}

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;

3. 长江科学院 重庆分院, 重庆 400026)

摘要: 引水钢岔管的结构尺寸大、焊接工况复杂, 且需要长期耐受 6 MPa 的水压, 迫切需要一种分布式、高精度、高空间分辨率的应力测量技术, 以便在水压试验中进行全方位的应力测量和结构健康评估。传统的点式应变片只能进行局部应力测量, 且测量精度受制于防水措施、贴片工艺、温度变化等因素。为此, 提出了一种基于光频域反射仪的引水钢岔管水压试验应力测量方法, 采用沿焊缝布设的标准单模光纤作为传感器, 测量空间分辨率达到 5.8 cm, 应力与水压力成线性关系并且沿焊缝存在 0.2~0.6 m 的周期性变化。月牙肋板焊缝的腰部应力最大, 达到 196.2 MPa; 主锥环缝的应力在 300 MPa 附近; 相贯线焊缝的应力呈 180° 对称分布, 在腰线附近存在 352.0 MPa 的最大应力, 顶部和底部基本不存在应力。

关键词: 分布式应力测量; 光频域反射仪; 引水钢岔管; 抽水蓄能

中图分类号: TN253 文献标识码: A doi: 10.37188/OPE.20243217.2635

Distributed stress measurement for water pressure test of diversion steel branch pipe

YIN Guolu^{1,2*}, MA Jingming², JIANG Shengxian³, WANG Xin², ZHANG Yuanyin², ZHU Tao^{2,1}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Chongqing University (Ministry of Education), Chongqing 400044, China;

3. Chongqing Branch, Changjiang River Scientific Research Institute, Chongqing 400026, China)

* Corresponding author, E-mail: glyin@cqu.edu.cn

Abstract: The diversion steel branch pipe is large and complex to weld, requiring endurance for long-term water pressure of 6 MPa. There is a need for a high-precision, high-resolution stress measurement technique for comprehensive assessment during water pressure tests. Traditional strain gauges are limited to localized measurements and restricted by waterproofing, application processes, and temperature changes. This study proposes using optical frequency domain reflectometry for stress measurement in the pipe. A standard single-mode fiber sensor is laid along the weld seam for a spatial resolution of 5.8 cm. Stress corre-

收稿日期: 2024-05-07; 修订日期: 2024-05-29.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2023YFF0715700)

lates linearly with water pressure and varies periodically from 0.2 to 0.6 m along the weld seam. Maximum stress reaches 196.2 MPa at the crescent rib weld seam's waist, about 300 MPa at the main conical ring seam, and distributes symmetrically along the intersecting line, with a peak of 352.0 MPa near the waist-line and minimal stress at the top and bottom.

Key words: distributed stress measurement; optical frequency domain reflectometer; diversion steel branch pipe; pumped storage

1 引言

随着全球社会对能源需求的日益增长,能源结构调整是我国近年来较为重要的任务之一^[1]。水电作为一种可再生且高效费比的清洁能源,有利于提高社会的资源利用率和综合经济效益,是建设两型社会的必然选择^[2]。而抽水蓄能电站的建设也是水电利用的关键一环。根据2024年国家发展改革委、国家能源局发布的《关于加强电网调峰储能和智能化调度能力建设的指导意见》,到2027年,我国抽水蓄能电站投运规模预计超8 000万千瓦,将有效促进能源清洁低碳转型、为能源电力安全稳定供应提供支撑。

我国大中型抽水蓄能电站的压力管道多采用联合供水或分组供水的方式,引水钢岔管主要用于一条主管和分出的几条支管与各台机组连接^[3]。引水钢岔管一般是由薄壳和刚度较大的加强梁组成的复杂空间组合结构,该结构在工作过程中随着水压力的加大受力情况复杂,因此,对引水钢岔管的关键部位应力测量在岔管结构健康分析中极为重要^[4]。引水钢岔管在建造完成后,为保证各条焊缝焊接工艺达到要求,需根据NBT 35056—2015《水电站压力钢管设计规范》^[5]规定,对引水钢岔管关键位置完成水压试验的应力测试^[6]。

随着国内高水头抽水蓄能电站的开发,混凝土衬砌引水压力管道逐渐被800 MPa级的高强度引水钢岔管取代^[7]。引水钢岔管主要结构由主管、支管及肋板组成,高度及长度从数米到十几米不等,一般在制造过程中先将岔管压制多个瓦片,采用立式或卧式焊接方式,按照先纵缝后环缝的顺序完成焊接。为保证焊接质量,需在焊接完成后进行水压试验。引水钢岔管水压试验应力测量的主要方式为电阻式应变

片,其原理是通过外界应力改变应变片特定方向的电阻来测量应力。2019年,韦庆华等用电阻式应变片完成了8.9 MPa级水压试验,最大测量应力为325.4 MPa,满足引水钢岔管运行要求,证明了引水钢岔管的可靠性^[8]。2020年,刘蕊等在丰宁抽水蓄能电站采用无损压痕法对引水钢岔管水压试验应力进行测试,最大测量应力值达667.0 MPa,验证了引水钢岔管的可靠性^[9]。2023年,张一鸣等在清原抽水蓄能电站,通过对水压试验前后的应力检测,证明了引水钢岔管的可靠性^[10]。

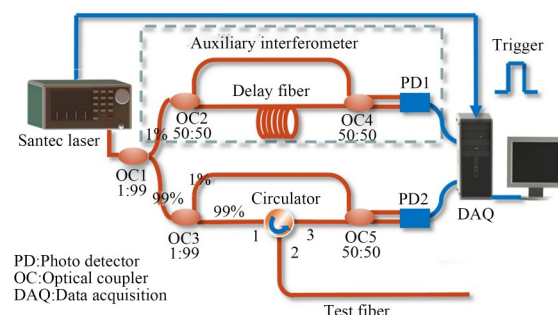
引水钢岔管的焊缝复杂,需要应力测量的位置较多^[11]。显而易见,传统点式应变片测量方式只能实现引水钢岔管局部位置的应力测量,且测量效果受制于防水措施、贴片工艺、温度变化等因素,难以满足高精度、高可靠性、高空间分辨率以及连续分布式的应力测量需求。分布式光纤传感技术已经在油气管线^[12]、电力管廊^[13]、周界安防^[14]和海缆监测^[15]等领域得到广泛的应用。在众多分布式光纤传感技术中,基于光纤瑞利散射的光频域反射仪(Optical Frequency Domain Reflectometer, OFDR)具有空间分辨率高和测量精度高的优势^[16],已经在航空航天^[17]、海洋国防^[18]、生物医疗^[19]以及结构健康监测^[18, 20-24]等领域得到了广泛的应用。2016年,Sierra-Pérez等将光纤嵌入到叶片中,用OFDR系统测量涡轮叶片中应变场的分布,证明了将OFDR用于涡轮叶片损伤检测的可能性,极大地提高了涡轮叶片结构健康监测效率^[20]。2020年,仇唐国等将OFDR应用于深层土体水平位移监测,提出了一种连续的高精度水平位移监测方法,结果表明,该方法相对传统测量方法的误差为5%^[21]。2022年,成林等基于欧拉-伯努利弹性基础模型,设计了一套适用于OFDR的地下水管道的变形监测的测试

设备,并对两种光纤应变-偏转转换方法进行了验证,结果表明两种方法的最大相对误差为 2.98%^[22]。2023 年,尹国路等将 OFDR 应用于水听器探头结构形变研究,用光纤完成了水听器探头的全分布式力学监测,当静压力达到 6 MPa 时,3 个周期性凹陷深度达到 124 μm ,测量结果与仿真相符^[18]。2023 年,Abedin 等提出了一种基于 OFDR 的桥梁结构健康监测方法,该方法将光纤包裹于新型传感纺织品内实现了 28 m 长人行桥 2 年内的应变监测^[23]。

针对引水钢管管水压试验传统应力测量存在系统复杂、传感区域有限及干扰因素多等不足,本文提出了一种基于 OFDR 的高空间分辨率、高测量精度、高效率、连续分布式的引水钢管管水压试验应力测量方法,阐述了 OFDR 的应力形变测量原理和光纤布设工艺,完成了 4 个水压循环试验的在线实时应力测量,为我国引水钢管管的出厂水压试验应力测量提供了先进的技术手段。

2 基于 OFDR 的应力测量系统及原理

光频域反射仪的系统原理如图 1(a)所示,图 1(b)表示是重庆大学与重庆塔科智感科技有限公司联合研制的 OFDR 产品。OFDR 系统主要包含扫频激光器、辅助干涉仪、主干干涉仪、光电探测器、采集卡以及数据处理设备。激光器提供频率连续扫描的激光源,辅助干涉仪用于补偿扫频光源的非线性效应。如图 1(a)所示,橙色线为光纤,蓝色线为电学信号线(彩图见期刊电子版)。扫频激光器发出的光经耦合器 1 分为两路,1% 的光进入辅助干涉仪通过延迟光纤后在耦合器 4 处产生特定频率的拍频信号,并进入光电探测器 1 用以补偿激光光源的非线性扫描效应;剩下 99% 的光进入主干干涉仪再次被 1:99 的耦合器 3 分为两路,其中 1% 的光进入参考臂,99% 的光进入测量臂,经由环形器进入待测光纤。待测光纤的后向瑞利散射信号再次经过环形器后在耦合器 5 处与参考臂中的光发生干涉形成拍频信号,并进入光电探测器 2。最终,两个光电探测器



(a) 光频域反射仪的分布式光纤传感系统
(a) Distributed optical fiber sensing system based on OFDR



(b) 光频域反射仪的样机
(b) Prototype of OFDR system

图 1 基于 OFDR 的测量系统

Fig. 1 Measurement system based on OFDR

将光信号转化为电信号被采集卡采集,在数据处理设备中采用互相关算法实现传感光纤的分布式温度和应变测量。本设备采用的扫频光源为 Santec(TSL-550),扫描范围为 1 500~1 630 nm,扫描速度为 1~100 nm/s,最大输出功率为 20 mW。

OFDR 主要采用互相关算法获得外界的应变/温度,具体步骤包括^[18]:第一步,测量应变/温度发生改变前后的信号作为参考和测量信号,并通过傅里叶变换将这些时域信号映射到光纤的距离域信号;第二步,在相同的光纤距离位置加窗进行傅里叶逆变换,获得参考和测量的光纤瑞利散射光谱;第三步,对这些瑞利散射光谱信号进行互相关运算,获得应变/温度发生改变带来的波长漂移。

主干干涉仪的拍频信号光场可以表示为:

$$I(t) = 2E_0^2 \sqrt{R_z} \cos[2\pi\gamma\tau_z t + \phi_{0z}], \quad (1)$$

式中: E_0 为光源初始振幅, R_z 为光纤后向瑞利散射的等效反射系数, γ 表示光源扫描速度, τ_z 表示光在光纤 z 位置往返产生的时延, $\phi_{0z} = v_0\tau_z - \gamma\tau_z^2/2$ 为时间无关项,与扫频光源的初始光频 v_0 有关。

令 $f_b = \gamma \tau_z$, 表示光纤 z 位置的拍频频率, 当激光器线性扫频速度为定值时, 该拍频值与光纤位置存在线性对应关系, 以此保证 OFDR 的连续分布式无盲区测量。其传感空间分辨率可表示为:

$$\Delta L = N \cdot \Delta Z = N \cdot \frac{\lambda_c^2}{2n\Delta\lambda}, \quad (2)$$

其中: ΔZ 表示 OFDR 将光纤距离域离散化后相邻位置的距离, 与激光器的波长扫描范围 $\Delta\lambda$ 成反比; λ_c 为扫频光源的中心波长; N 是整数, 表示光纤距离域的加窗点数。

待测光纤每一位置处的瑞利散射光谱信息是一个稳态信号。当外界环境产生变化时, 光纤的后向瑞利散射光谱会发生一定的漂移, 光纤受到的应变 $\Delta\epsilon$ 与波长漂移量 $\delta\lambda$ 的关系如下:

$$\Delta\epsilon = \frac{\delta\lambda}{(1 - P_e) \times \lambda_c}, \quad (3)$$

其中 $P_e = 0.22$, 为弹光系数^[25]。材料应变与应力的关系如下^[26]:

$$\Delta\sigma = \Delta\epsilon \times E, \quad (4)$$

其中: $\Delta\sigma$ 为应力, E 为材料的弹性模量。本次抽水蓄能电站引水钢岔管采用 800 MPa 级钢, 其弹性模量取 0.2×10^6 MPa。

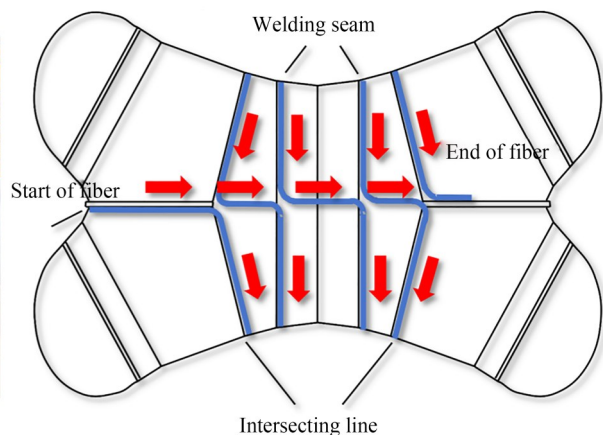
3 试验测量系统

3.1 光纤布设方案

图 2(a) 为引水钢岔管水压试验现场。本次测量的引水钢岔管由两个对称“Y”型内加强月牙肋岔管拼接而成, 左侧为二号岔管, 右侧为一号岔管, 如图 2(b) 所示。以二号岔管为例, 主管直径约为 5.0 m, 两条支管直径约为 3.5 m, 支管之间分岔角为 75° , 主管和两条支管之间的公切球直径均为 5.65 m。光纤以二号岔管月牙肋板底部为起点, 按箭头走向, 经过二号岔管月牙肋板到达顶部后依次按图 2(b) 所示路径经过二号岔管相贯线、二号岔管主锥环缝、一号岔管主锥环缝以及一号岔管相贯线。沿引水钢岔管表面布设的测量光纤总长度约为 95 m, 从测量光纤起点到 OFDR 系统的引纤长度约为 75 m。测量光纤共设置 23 个温度补偿圈, 用于抵消测量过程中环境温度变化带来的测量误差, 每个温度补偿点长度约为 0.6 m, 水压试验采用单模裸纤作为传感光纤。引水钢岔管表面锈蚀严重, 采用角磨机对钢材表面进行打磨, 增强光纤与钢材基地的力学耦合效率, 最后沿光纤均匀涂上 AB 胶后, 等待 24 h 使胶水完全凝固。凝固后光纤局部最终粘接效果如图 2(a) 放大部分所示。



(a) 现场概况
(a) Site conditions



(b) 光纤布设方案
(b) Optical fiber deployment scheme

图 2 引水钢岔管水压试验现场及测量方案

Fig. 2 Site conditions and deployment scheme of diversion steel branch pipes

3.2 水压试验流程

本次水压试验共分为 4 个循环轮次完成, 如

图 3 所示。4 个循环水压试验的最高压力分别为 2, 4, 5.6 和 6 MPa, 在达到最高压力后稳压一定

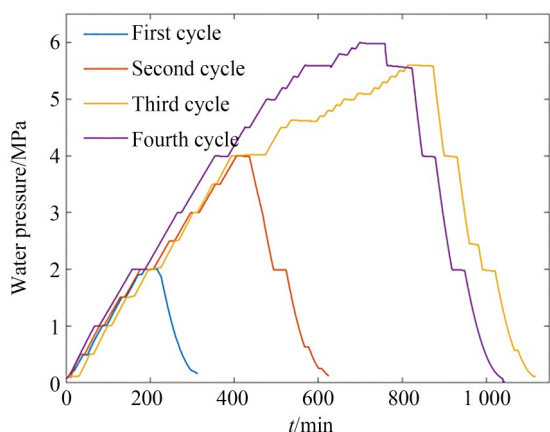


图3 引水钢管4轮次水压试验的水压力变化曲线

Fig. 3 Water pressure change curves during four rounds of water pressure test for diversion steel branch pipe

时长后再逐步泄压,4次循环水压试验的总时长分别为294,625,1100和1040 min。

在测试过程中,为了保障应变测量精度,OFDR扫频光源的扫描速度设置为100 nm/s,采集卡的采样率为250 MHz,采样时长约为0.067 s,对应激光器的扫描范围约为 $\Delta\lambda=6.7$ nm,OFDR的距离域空间分辨率为 $\Delta z=116$ μm ;窗点数 $N=500$,对应的传感空间分辨率为5.8 cm,相邻传感单元之间重叠90%,对应的采样分辨率为5.8 mm。在引水钢管上布设的95 m传感光纤,总计可获得约16380个应力测量点,保障能够获得引水钢管各个位置的应力分布规律。

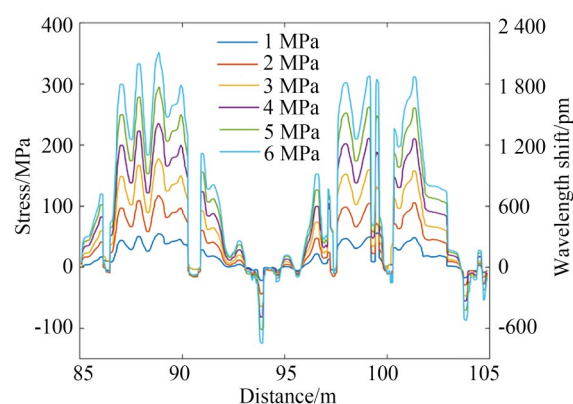
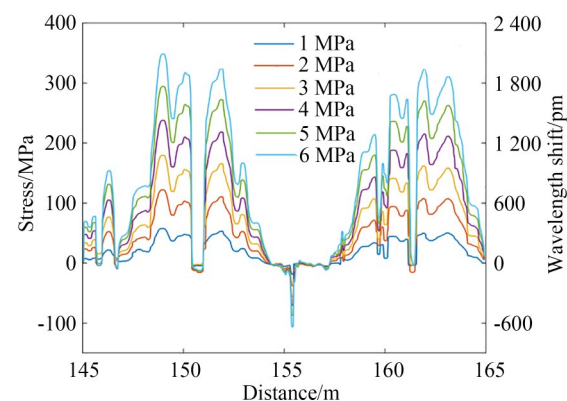
在水压循环试验过程中,OFDR工作在连续测量模式,测量时间间隔为1 min,能够获得引水钢管各个位置应力在加压和泄压过程中的变化规律。

4 试验结果及分析

引水钢管的应力监测主要包括二号岔管月牙肋板、二号岔管相贯线、二号岔管主锥环缝、一号岔管主锥环缝以及一号岔管相贯线等5个部分,各个部分与传感光纤存在映射关系。月牙肋板光纤起点为月牙肋板底部,终点为月牙肋板顶部;相贯线和主锥环缝光纤的起点均为顶部,沿岔管壁绕向底部后重新绕回顶部。二号岔管月牙肋板对应74~84 m的传感光纤,二号岔管相贯

线对应85~104 m的传感光纤,二号岔管主锥环缝对应105~125 m的传感光纤;一号岔管主锥环缝对应126~145 m的传感光纤,一号岔管相贯线对应146~165 m传感光纤。

图4表示在6 MPa水压试验过程中,引水钢管各个部分在水压强分别为1,2,3,4,5和6 MPa时光纤瑞利散射的波长漂移及应力测量结果。水压试验持续时间最高达到18 h,存在环境温差。各部分温度补偿点位置如表1所示。然而,在整个监测过程中,温度补偿光纤,均未发现明显的波长漂移,如图4(a)中75.7,79.5及80.5 m处的凹陷所示。这主要是由于引水钢管体积大,在充水加压过程中,水的比热容大,环境温度变化很难改变引水钢管外壁的温度。温度补偿点的最大波长漂移量约为80 pm,而应力测量部分的波长漂移量最大为2112 pm,前者仅是后者的3.8%。因此,采用光纤测量引水钢管水压试验应力时,可以忽略温度的影响,所测量

(a) 二号岔管相贯线
(a) No.2 pipe intersection line(b) 一号岔管相贯线
(b) No.1 pipe intersection line

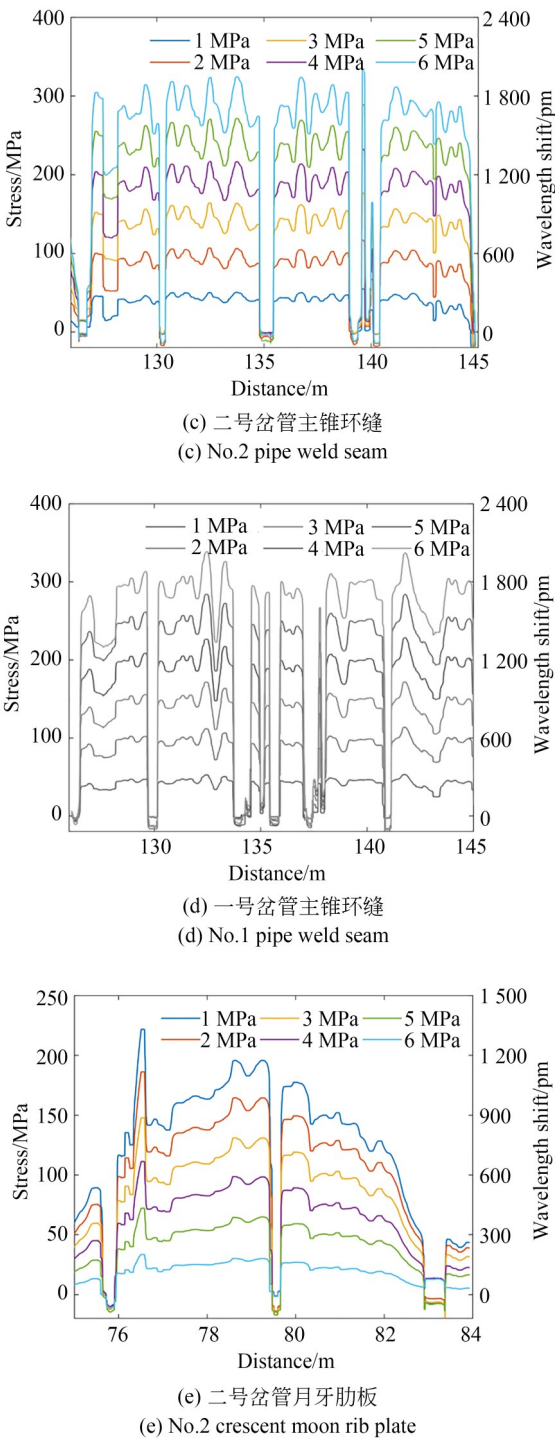


图4 引水钢岔管水压试验各部分的应力分布情况
Fig. 4 Stress distribution for water pressure test of diversion steel branch pipe

的光纤波长漂移可确定是由于引水钢岔管在水压试验时变形带来的应力值。

如图4所示,OFDR能够测量引水钢岔管水压试验的连续分布式应力变化,这是传统点式应

表1 各部分温度补偿点位置
Tab. 1 Location of temperature compensation points(m)

Range	Position of different temperature compensation points			
No. 2 crescent rib bifurcation	75.7	79.5	80.5	
No. 1 intersecting line	146.6	151.7	160.0	161.8
No. 2 intersecting line	86.9	90.2	97.4	99.1 100.0
No. 1 welding seam	130.0	133.6	135.5	137.2 141.1
No. 2 welding seam	110.5	115.5	118.8	120.4

变片不能实现的。在6 MPa水压时,引水钢岔管各部位的应力如表2所示。结合图4和表2,引水钢岔管的应力分布存在如下特点:(1)月牙肋板的腰部所受应力最大,达到196.2 MPa,并沿着月牙肋板底部和顶部呈现对称降低的趋势,应力在月牙肋板底部和顶部达到最小,仅为33.8 MPa;(2)二号、一号岔管相贯线的应力分布相似,均呈180°对称分布,两侧腰线应力最大,达到352.0 MPa,并从腰线向顶部和底部逐渐减小,顶部和底部几乎不存在应力;(3)二号、一号岔管主锥环缝的应力分布相似,整条焊缝所受应力在300 MPa附近。

表2 钢岔管焊缝的典型应力值
Tab. 2 Typical stress values of steel branch pipe (MPa)

Range	Top	Bottom	waistline
No. 2 crescent rib bifurcation	39.8	33.8	196.2
No. 1 intersecting line	44.5	-9.7	322.9
No. 2 intersecting line	28.8	-3.3	352.0
No. 1 welding seam	274.2	291.2	300.5
No. 2 welding seam	304.5	276.1	313.4

图5(a)为各部分最大应力随时间的变化趋势,整体上与图4中第4轮次试验水压力的变化趋势相同。比较各个部分的最大应力,二号岔管月牙肋板所受的最大应力相对于其余各部分较小,最大达到196.2 MPa;其余各部分所受的最大应力较为接近,最大达到352.0 MPa。各个部分的应力与水压存在高度线性关系,如图5(b)

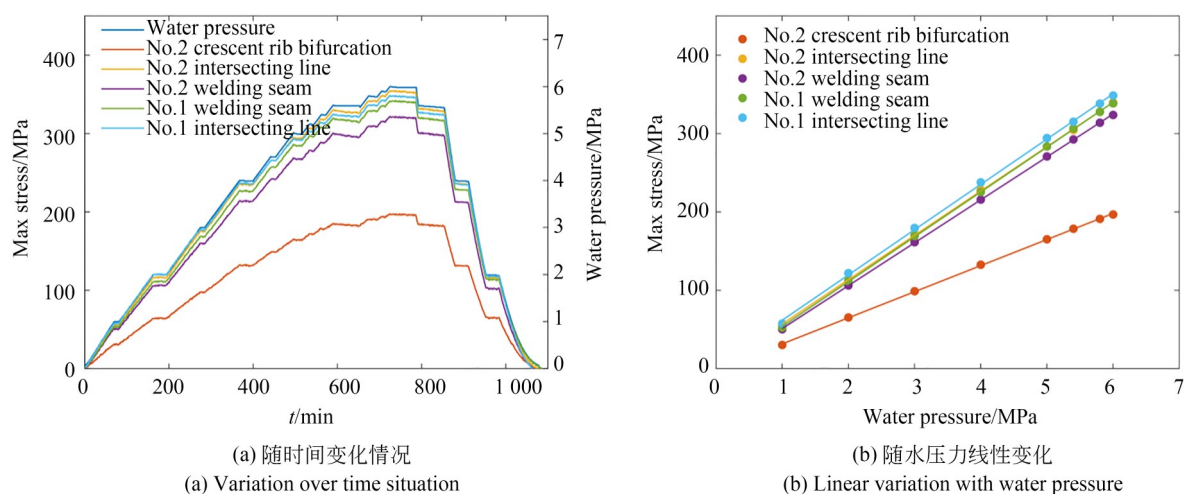


图 5 引水钢岔管各部分的最大应力

Fig. 5 The maximum stress in each part of the diversion steel branch pipe

所示。

值得注意的是,从图4可以看出,应力在距离上还呈现一定周期的上下波动,波动周期在0.2~0.6 m之间。图6(a)为各部分最大应力波动随加压和泄压的变化情况,变化趋势与水压的

变化趋势相同。比较各个部分的最大应力波动,二号岔管月牙肋板波动最小,6 MPa水压力时仅为12.03 MPa;二号岔管相贯线波动最大,最大水压力时达到165.3 MPa。除此以外,应力波动与水压力也呈高度线性关系,如图6(b)所示。

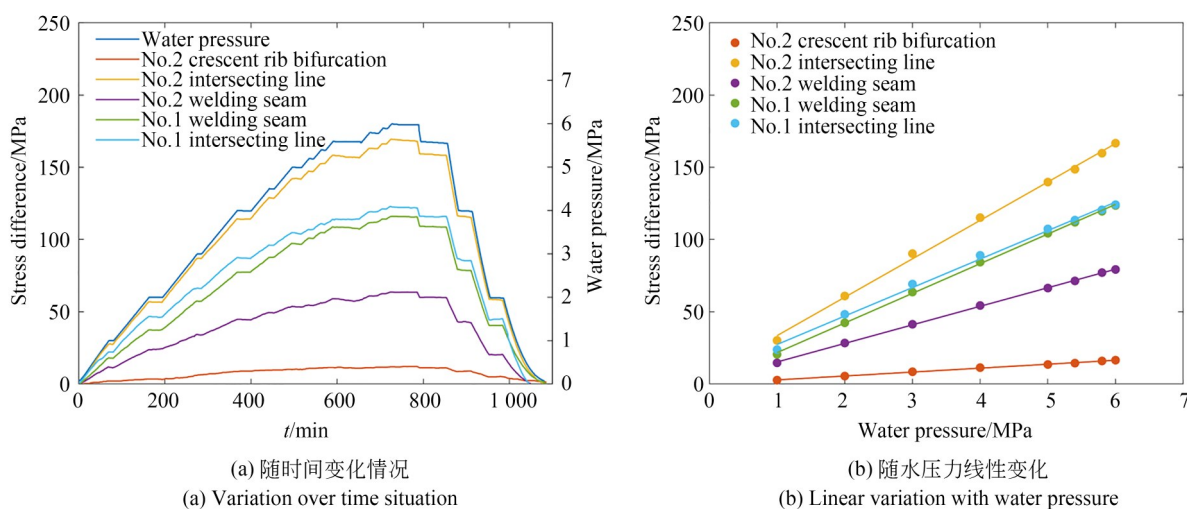


图 6 引水钢岔管各部分的应力波动

Fig. 6 Stress fluctuations in each part of diversion steel branch pipe

5 结 论

本文提出了一种基于OFDR的引水钢岔管水压试验分布式应力测量方法,采用打磨抛光法沿焊缝完成95 m传感光纤的布设,实现最高

水压力6 MPa、4次加压和泄压循环下共2 069 min的连续在线分布式应力监测。结果表明,引水钢岔管的应力与水压力呈高度线性关系,月牙肋板焊缝的腰部应力最大,达到196.2 MPa,并沿着月牙肋板底部和顶部呈对称降低趋势,

顶部和底部基本不存在应力;两条相贯线的应力测量结果相似,呈 180° 对称分布,在腰线附近存在 352.0 MPa 的最大应力,顶部和底部基本不存在应力;两条主锥环缝的应力测量结果相似,腰线、顶部和底部无较大差异,均在 300 MPa 附近。此外,应力沿焊缝均呈周期性纹波分布,纹波周期在 0.2~0.6 m 间,应力波动与水

压力也存在线性关系。上述研究结果证实了 OFDR 可以用于引水钢岔管水压试验的应力测量,其高空间分辨率、分布式在线监测能力,能够获得比传统应变片离散测量更细节、更丰富、更规律的应力分布信息,有助于改善引水钢岔管的水压试验分析和引水钢岔管本身的结构设计。

参考文献:

- [1] 靳亚东,唐修波,赵杰君,等.我国抽水蓄能电站的现状与发展前景分析[C].抽水蓄能电站工程建设文集 2019,F,2019.
YADONG Q, XIUBO T, ZHIEJUN *et al.*. Analysis of the current situation and development prospects of pumped storage power stations in China [C]. *Proceedings of the Collection of Papers on the Construction of Pumped Storage Power Stations in* 2019, F, 2019. (in Chinese)
- [2] 张德强.浅析抽水蓄能电站 GIS 选址与设备安装[J].储能科学与技术,2022,11(12):4100-4101.
ZHANG D Q. Analysis on GIS site selection and equipment installation of pumped storage power station [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(12): 4100-4101. (in Chinese)
- [3] 王晓东.梯级电站运行期水库放空经济调度研究与实践[J].四川水力发电,2022,41(2):126-130.
WANG X D. Research and practice on economic dispatching of reservoir emptying during operation period of cascade power stations [J]. *Sichuan Water Power*, 2022, 41(2): 126-130. (in Chinese)
- [4] 朱晨,袁翔.抽水蓄能电站钢岔管水压试验结构应力测试分析与评价[J].焊接技术,2022,51(11):43-48,114.
ZHU CH, YUAN X. Structural stress test analysis and evaluation of steel bifurcated pipe in pumped storage power station [J]. *Welding Technology*, 2022, 51(11): 43-48, 114. (in Chinese)
- [5] NB/T 35056-2015 水电站压力钢管设计规范[M].北京:中国电力出版社,2015.
NB/T 35056-2015 *Design Code for Steel Penstocks of Hydroelectric Stations* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015. (in Chinese)
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部.水电水利工程压力钢管制作安装及验收规范:GB 50766—2012[S].北京:中国计划出版社,2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for manufacture installation and acceptance of steel penstocks in hydroelectric and hydraulic engineering: GB 50766—2012 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese)
- [7] 廖钧,屈刚.国产 800MPa 级高强度大 HD 值高压钢岔管整体运输安装施工技术应用[J].水电站机电技术,2016,39(S1):37-41,95.
LIAO J, QU G. Application of construction technology for integral transportation and installation of domestic 800MPa high-strength steel bifurcated pipe with high HD value [J]. *Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station*, 2016, 39(S1): 37-41, 95. (in Chinese)
- [8] 韦庆华,余金凤,张宪民,等.引水式水电站压力钢管岔管水压试验[J].广西水利水电,2019(2):10-13.
WEI Q H, YU J F, ZHANG X M, *et al.* Hydraulic pressure test of steel bifurcated pipe for a diversion-type hydropower station [J]. *Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering*, 2019(2): 10-13. (in Chinese)
- [9] 刘蕊,余健,白威.丰宁抽水蓄能电站引水钢岔管残余应力测试与研究[J].水电与抽水蓄能,2020,6(4):110-116.
LIU R, YU J, BAI W. Test and research on residual stress of diversion steel bifurcation pipe of Fengning pumped storage power station [J]. *Hydropower and Pumped Storage*, 2020, 6(4): 110-116. (in Chinese)
- [10] 张一鸣,钱玉英,宋蕊香.清原抽水蓄能电站引水钢岔管水压试验研究[J].水利水电技术(中英文),2023,54(S2):67-72.
ZHANG Y M, QIAN Y Y, SONG R X. Study on hydraulic test of steel bifurcated pipe of qingyu-an pumped storage power station [J]. *Water Re-*

- sources and Hydropower Engineering*, 2023, 54 (S2): 67-72. (in Chinese)
- [11] 王光军. 高强度瓦片式凑合节制造拼装技术[J]. 技术与市场, 2022, 29(11): 82-84.
WANG G J. Manufacturing and assembling technology of high strength steel tile joint[J]. *Technology and Market*, 2022, 29(11): 82-84. (in Chinese)
- [12] 尉婷, 龙万江, 吴冰冰, 等. 油气管道分布式光纤布里渊散射应变的仿真研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(21): 112-116.
WEI T, LONG W J, WU B B, *et al.* Simulation research on distributed optical fiber Brillouin scattering strain in oil and gas pipelines[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(21): 112-116. (in Chinese)
- [13] 范佳铭, 黄闽南, 王一山, 等. 面向电力管廊外破监测的分布式光纤传感技术研究[J]. 光学精密工程, 2024, 32(10): 1433-1442.
FAN J M, HUANG M N, WANG Y SH, *et al.* Research on distributed optical fiber sensing technology for power pipe corridor breakdown monitoring [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32 (10): 1433-1442. (in Chinese)
- [14] 张旭革, 丁哲文, 洪瑞, 等. 相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术[J]. 光学学报, 2021, 41 (1): 100-114.
ZHANG X P, DING ZH W, HONG R, *et al.* Phase sensitive optical time-domain reflective distributed optical fiber sensing technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41 (1): 100-114. (in Chinese)
- [15] 邢炜光, 赵赞善, 邢猛, 等. 光纤传感用于海缆扰动探测的试验研究[J]. 光学精密工程, 2023, 31 (10): 1432-1442.
XING W G, ZHAO Z SH, XING M, *et al.* Experimental research on submarine cable disturbance detection with optical fiber sensing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31 (10): 1432-1442. (in Chinese)
- [16] DING Z Y, GUO H H, LIU K, *et al.* Advances in distributed optical fiber sensors based on optical frequency-domain reflectometry: a review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23 (22): 26925-26941.
- [17] KRAINAK M A, STEPHEN M A, TROUPAKI E, *et al.* Integrated photonics for NASA applications [C]. *Components and Packaging for Laser Systems V. February 2-7*, 2019. San Francisco, USA. SPIE, 2019.
- [18] 王宇, 肖迪, 牛洋洋, 等. 基于光频域反射仪的光纤水听器探头结构形变研究[J]. 光学学报, 2023, 43(5): 242-250.
WANG Y, XIAO D, NIU Y Y, *et al.* Structural deformation of fiber optic hydrophone probe based on optical frequency domain reflectometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(5): 242-250. (in Chinese)
- [19] BEISENOVA A, ISSATAYEVA A, ASHIK-BAYEVA Z, *et al.* Distributed sensing network enabled by high-scattering MgO-doped optical fibers for 3D temperature monitoring of thermal ablation in liver phantom [J]. *Sensors*, 2021, 21 (3): 828.
- [20] SIERRA-PÉREZ J, TORRES-ARREDONDO M A, GÜEMES A. Damage and nonlinearities detection in wind turbine blades based on strain field pattern recognition. FBGs, OBR and strain gauges comparison[J]. *Composite Structures*, 2016, 135: 156-166.
- [21] 仇唐国, 孙阳阳, 卢天鸣, 等. 基于OFDR技术的深层土体水平位移场监测研究[J]. 压电与声光, 2020, 42(1): 108-112.
QIU T G, SUN Y Y, LU T M, *et al.* Research on monitoring of horizontal displacement field of deep soil based on OFDR technology [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2020, 42(1): 108-112. (in Chinese)
- [22] CHENG L, MAO H R, PAN P S, *et al.* Experimental verification research of pipeline deflection deformation monitoring method based on distributed optical fiber measured strain[J]. *Measurement*, 2022, 199: 111483.
- [23] ABEDIN S, BIONDI A M, WU R, *et al.* Structural health monitoring using a new type of distributed fiber optic smart textiles in combination with optical frequency domain reflectometry (OFDR): taking a pedestrian bridge as case study [J]. *Sensors*, 2023, 23(3): 1591.
- [24] CAI Q L, ZHU S Y. Optical frequency domain re-

flectometry sensing for damage detection in long-span bridges using influence surface[J]. *Structural Health Monitoring*, 2023, 22(5): 3465-3480.

[25] 范钦珊, 殷雅俊. 材料力学[M]. 北京: 清华大学

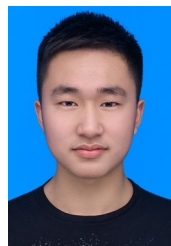
出版社, 2004.

QIN SH F, YIN Y J.. *Mechanics of Materials* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)

作者简介:



尹国路(1985—),男,重庆开州人,教授,博士生导师,2008年、2013年于北京交通大学分别获得学士和博士学位,主要从事分布式光纤传感技术的研究工作。E-mail: glyin@cqu.edu.cn



马璟铭(1999—),男,四川成都人,硕士研究生,2021年于重庆大学获得学士学位,主要从事光纤三维形状轨迹传感技术的研究。E-mail: cqumjm@163.com