

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.22.018

基于分布式光纤传感技术的排水管道监测研究

彭 军¹, 张树俊¹, 高 磊²

(1. 南京市市政设计研究院有限责任公司, 江苏 南京 210010; 2. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 城市管网大多深埋地下,长时间运行会发生各种病害,传统检测手段无法实时获知管道状态,进而无法对管道可能发生的危害进行预判和及时采取预防措施。分布式光纤传感技术具有结构分布式、长距离和实时监测的特点,适用于地下管道监测。南京市污水第二通道工程采用分布式光纤传感技术对试验段管道的应变和温度进行了监测,通过监测数据分析了管道变化的趋势和可能存在隐患的部位,为运维单位预判和提前制定应对方案提供直接的依据,也可为类似排水管道实时监测项目提供参考。

关键词: 管道病害; 分布式光纤传感技术; 实时监测; 应变; 温度

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)22-0110-06

Study on Sewage Pipeline Monitoring by Distributed Optical Fiber Sensing Technology

PENG Jun¹, ZHANG Shu-jun¹, GAO Lei²

(1. Nanjing Municipal Design and Research Institute Co. Ltd., Nanjing 210010, China; 2. School of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Most urban pipes are deeply buried underground, and various diseases may occur during long-term operation. Traditional detection methods can not obtain the status of the pipeline in real-time, so it is impossible to predict the possible hazards of the pipeline and take preventive measures. Distributed optical fiber sensing technology with the characteristics of distributed structure, long-distance and real-time monitoring, is suitable for underground pipeline monitoring. Combined with the second sewage pipeline project in Nanjing, the distributed optical fiber sensing technology was used to monitor the strain and temperature of the pipeline in the test section. Through the monitoring data, the trend of pipeline change and the potential hidden dangers were analyzed, which provided a direct basis for the operation and maintenance unit to predict and formulate the response plan in advance, and also could provide a reference for similar real-time monitoring projects of drainage pipeline.

Key words: pipeline diseases; distributed optical fiber sensing technology; real-time monitoring; strain; temperature

随着城市化进程的加快,城市雨污水管网呈现规模巨大、结构复杂等趋势和特点。城区多处管网的雨污水管道存在破、漏、堵等问题。管线可能由于各种自然或人为因素而发生病害,管道病害和

失效不仅会造成严重的资源损失和环境污染,还可能引发重大的人身伤亡事故。

管线一般埋于地下一定深度处,属于隐蔽性工程,管线在地下纵横交错、交叉重叠,远距离输送大

量流体,管线所处的地质环境、所受的工作荷载复杂多变。为了有效预防地下管线老化、损毁,保障其长期稳定运行甚至延长使用期限,需要对地下管线进行在线监测,探明其存在的缺陷并及时进行维修。然而地下管线作为一项隐蔽性工程,其工作状态很难被察觉。如何兼顾经济性和可靠性,有效地进行管道监测及预警一直是工程界的关注点之一。目前应用于油气管道的检测技术可分为生物法、硬件法和软件法^[1]。这些方法各有优势和不足,大多存在相同的问题,检测技术具有周期性和信息滞后性,无法对管道的实时状态进行监测和对将要发生的事故灾害进行超前预警。应用于管身应力应变监测的传统传感器有电阻式应变片、振弦式应变计等,这些传感器或监测数据误差大,或布设、存放条件苛刻,且都是对管道结构的点式测量,很难做到对管道结构整体健康状态的实时监测。

1 分布式光纤传感技术

分布式光纤传感技术(DFOS)是一种以光为载体、光纤为媒介,感知和传输外界信号的新型传感技术。由于DFOS具有结构分布式、长距离和大规模的特点,非常适合土木工程的监测要求,因此近年来在土木工程监测的应用已十分广泛。在管道监测应用方面,国内外不少学者进行了试验研究。Lim等^[2]针对PVC管道开展了不同加载条件下的圆管内压力和刚度变化的监测试验,发现在不同荷载下,分布式光纤应变传感器的监测结果较为准确,与传统应变计测得的结果接近。Simpson等^[3]通过足尺室内试验,用分布式光纤传感器对钢管、混凝土管和HDPE管在不同竖向荷载下的环向应变进行了监测。结果显示,分布式光纤传感器能对管道结构的完整性进行评估,监测精度取决于光纤传感器种类的选择、黏结表面与黏结剂的选择、安装步骤。胡盛等^[4]针对聚乙烯管道在安装运营中易发生变形这一问题,开展了聚乙烯管道纯弯曲变形的试验研究,通过分布式光纤监测管道表面的应变分布情况,得到了管道的变形方位和管道转角,为埋地管道在线监测提供了参考。在管道泄漏光纤监测方面,冯维一等^[5]提出了一种基于光纤传感的酸溶液介质渗漏监测技术,设计了一种新颖的酸溶液自感知特种光缆结构,与泄漏电缆相比,不需要消耗电能,不容易发生误报,精准定位、敷设简单,可实现

管道全线多点泄漏检测。Wang等^[6]提出了一种基于选择性平均阈值的自来水管道的泄漏源法,用于捕捉自来水的温降并定位泄漏点。据此进行了自来水管道的泄漏检测和泄漏位置识别试验,试验表明分布式温度传感(DTS)对不同材质的水管具有适用性。

结合南京市污水第二通道工程研制了一套针对大直径深埋管道光纤监测的系统和方案,对管道在实际工程中的变形状态进行了监测和研究,分析了管道应变和温度的变化规律和特点,可为排水管道监测和风险预判提供参考。

2 工程概况

北护城河DN1 500截流管已运行多年,存在管道破损情况,维护管理困难,进而影响了城北污水处理厂的进水水量和水质。为解决城北护城河污水截流管的输送能力不足问题和进一步完善污水收集系统,2018年开始实施南京市建宁路污水第二通道工程,如图1所示。

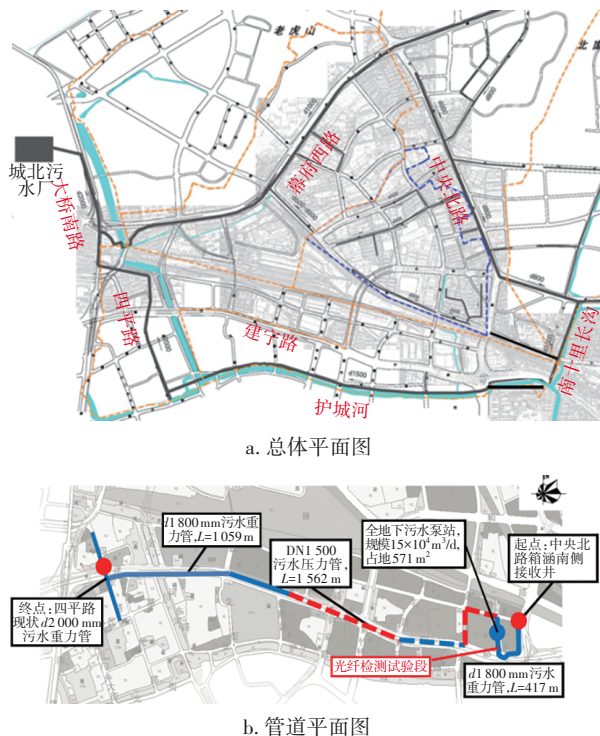


图1 工程总体平面图和管道平面图

Fig.1 General plane and pipeline plane of the project

本工程起点至泵站前采用DN1 800污水重力管,泵站后至中段采用DN1 500压力管,余段采用DN1 800污水重力管。为研究如何提高管道维护管理能力、加强管道风险预判能力,本次工程选取进

泵站前一段管道作为光纤监测试验段,该段管道采用DN1 800 III级钢筋混凝土管,管长50 m,采用顶管施工,每节管道2.5 m,管道覆土约6 m,管道两端分别为内净空6 m的接收井和内净空8 m的工作井。

针对管道变形特点和现场情况,确定光纤测定的参数为管道的轴向应变和温度变化,光纤布设如图2所示。

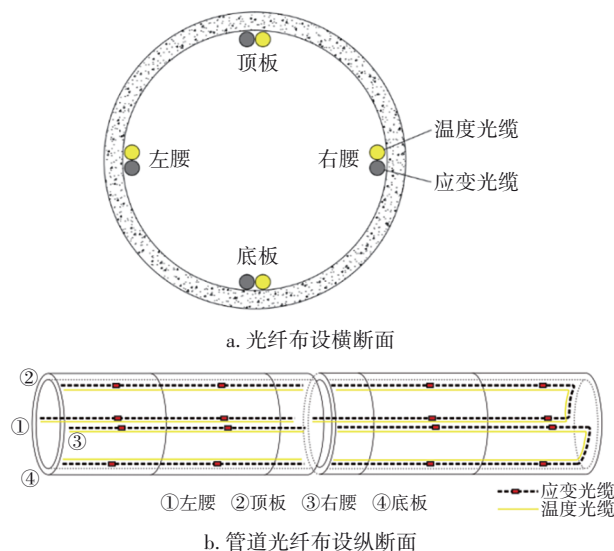


图2 管道光纤布设断面

Fig.2 Cross-section of optical fiber layout

沿管道正交的4个角各布设2根光纤光缆,分别是温度光纤光缆和应变光纤光缆,光缆的选择和布设方式是影响监测效果的主要因素。常见管道光纤类型见表1。

表1 常见管道光缆对比

Tab.1 Comparison of common optical fiber cable

mm

种类	直径	优点	缺点
裸纤	0.064	测量灵敏,精度高	强度低,适应性差
尼龙护套光缆	0.9	除裸纤外,反应最为灵敏,精度较高	温度敏感性复杂,受温度影响较大
PE护套光缆	2	对环境适应性强,抗疲劳性能较强	测量采样范围较小
聚酯弹性体加强光缆	2	反应较为灵敏,精度较高	强度一般,抗疲劳性能较弱
铠装松套光缆	5	强度较高,对环境适应性强,抗疲劳性能较强	测量采样范围较小

通过以上综合对比,结合光缆现场布设方式,应变光缆采用2.5 m间距分布式定点PE护套光缆,

温度光缆采用5 mm双层铠装高精度光缆。通过应变光纤和管道的协同变形感测管道在外界荷载作用下的变形状态,同时通过温度光纤监测管道内部温度变化判定管道是否发生泄漏。在管道的末端、左腰、顶板、右腰和底板的光纤形成闭合回路。应变光缆采用分布式定点光缆跨缝安装,在安装过程中定点之间施加预拉应力,布设过程中保持整条光纤测线处于绷直状态,并处于同一直线。温度光缆与应变光缆同步松弛布设,不施加任何外力,处于自然状态,让其只受到温度变化的影响。光缆安装步骤如下:

① 画线定位。在被测管道上画线标明安装路径及安装节点位置。

② 安装夹具母片。通过钻孔膨胀螺丝、铆钉及环氧树脂等方式将母片安装在被测管道内表面。

③ 光缆预拉固定。先将光缆用夹具一端固定,每隔2.5 m将光缆预拉到设定应变,再用夹具固定。

④ 上片安装。将两固定点间的光缆移入母片槽内,安装上片,用螺丝将上下片固定,夹住光缆。

⑤ 光路检查。利用布里渊时域反射计(BOTDR)对已安装的光缆进行松紧度、光损等检查,有不符合要求的部位可以松开夹具重新安装。

⑥ 安装防护盖。管道内环境较为复杂,为增加光缆耐久性,在光缆表面安装不锈钢防护盖。

⑦ 引出线固定。管道内光缆安装好后,采用铠装跳线将光缆引出到井外固定位置。

光纤布设完成后情况见图3。

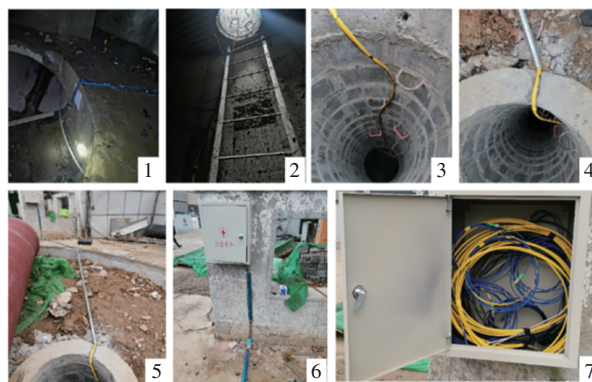


图3 光纤布设完成后情况

Fig.3 Situation after optical fiber laying

3 管道监测结果分析

本次管道监测光纤于2020年11月布设完成,随后采用BOTDR进行了数据监测。截止到2021年6月,共进行7次现场监测。温度和应变光缆各自存在2条完整的U型回路,分别为管道右腰-底板测线和左腰-顶板测线。试验管道总长度为50 m,每节管道2.5 m,共20节管道。每条测线定点光缆的起始位置为第一节管道的中点,结束位置为最后一节管道的中点,数据有效段长度47.5 m。第一次测量数据为初始数据,后续测量数据与初始数据之差为历次测量应变和温度变化值。

经过数据处理后,应变和温度变化分别如图4、5所示。

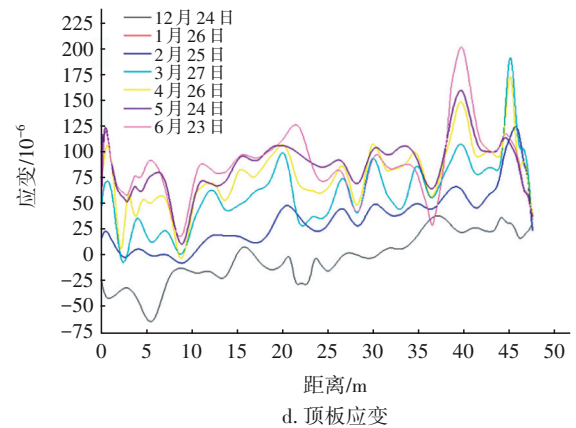
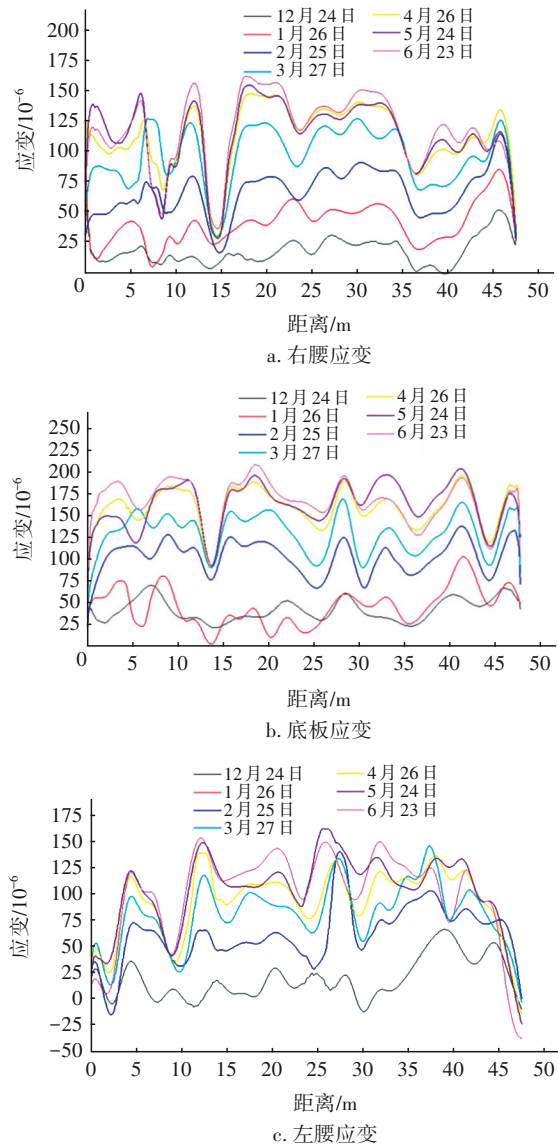
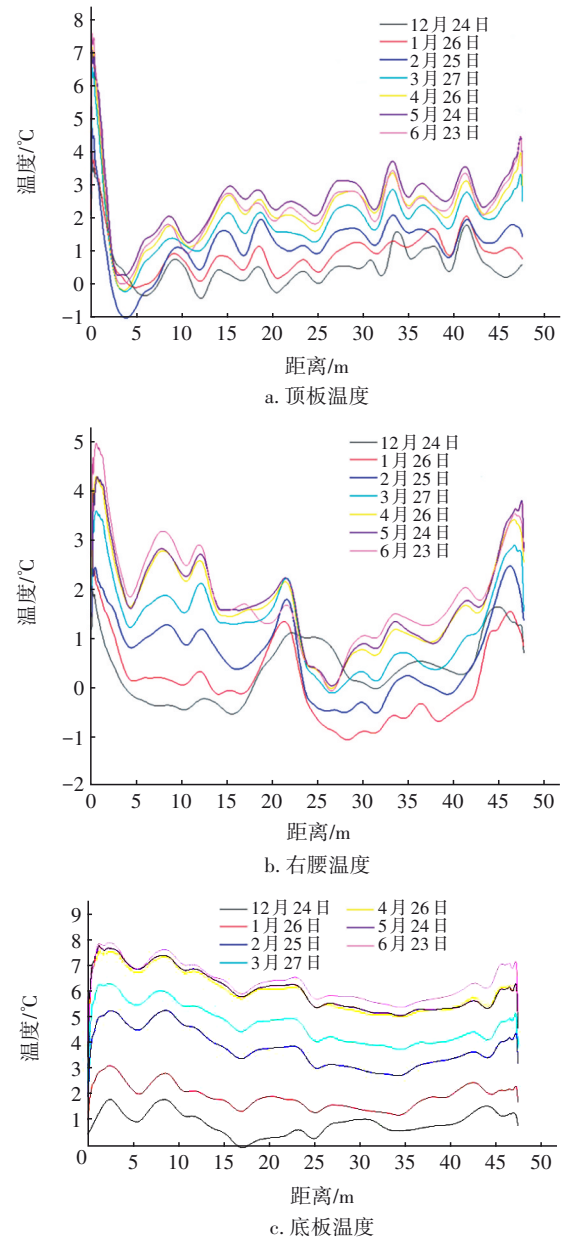


图4 右腰、底板、左腰、顶板应变的变化

Fig.4 Strain change of right, bottom, left and top



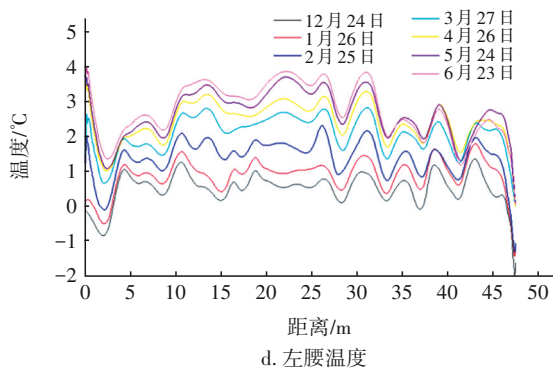


图5 顶板、右腰、底板、左腰温度变化曲线

Fig.5 Temperature change of top, right, bottom and left

根据管道结构和受力情况,管道发生破坏或者渗漏的部位基本都在接口位置。假定管道定点原始长度为 L ,沉降变形后长度变为 L' ,管道长度变化为 $L'-L$,其中:

$$L' = L / \cos \theta \quad (1)$$

式中: θ 为管道转角,取值 $0^\circ \sim 1.5^\circ$ 。

每段管道应变为:

$$\begin{aligned} (L' - L) / L &= (L / \cos \theta - L) / L \\ &= 1 / \cos \theta - 1 \end{aligned} \quad (2)$$

根据管道允许转角最大值,按式(2)计算对应的应变值为 342.8×10^{-6} ,此值可作为管道应变变化的临界值。根据管道变化特点和风险控制要求,实际工程中可通过光纤应变变化数值和临界值对比判别管道现状情况,预测发展趋势和采取相应对策。

管道温度变化是判定管道是否发生泄漏的直接指标。正常运行情况下,管道沿线温度变化是平稳的,而在特殊情况下,比如接口发生破坏泄漏或有支管接入位置温度变化发生异常,再结合应变变化情况,可以综合判定管道是否发生泄漏及发生的位置。据此结合管道光纤监测数据可以得到以下结论:

① 管道应变和温度变化曲线横坐标是相对位置,纵坐标是相应的应变和温度变化值,通过曲线的峰值可以找到变化较大的点所对应的应变和温度值以及该点所在的位置。这就建立了管道位置与管道应变和温度值一一对应关系。监测到的管道应变数据基本为拉应变,且应变逐渐增大,管道处于拉伸变形期;光纤应变变化表现为逐渐减小,到6月份数据变化趋近于个位数,表明管道在一段时间沉降变形后趋于稳定。

② 管道上下左右4个位置总体变化趋势基本一致,但各处管节变化过程不尽相同。右腰变化最小处为第6管节,变化值为 40×10^{-6} ,变化最大处为第8管节,变化值为 150×10^{-6} ;底板变化最小处为第6管节,变化值为 100×10^{-6} ,变化最大处为第8管节,变化值为 210×10^{-6} ;左腰变化最小处为第4管节,变化值为 40×10^{-6} ,变化最大处为第5管节,变化值为 160×10^{-6} ;顶板变化最小处为第4管节,变化值为 20×10^{-6} ,变化最大处为第16管节,变化值为 210×10^{-6} 。管道最大应变变化为 210×10^{-6} ,小于临界值,变化最大位置为顶板第16个接口和底板第8个接口,达到总临界值的61.4%,这两个位置应作为今后重点监测区域。

③ 光纤应变测定数据显示,管道顶板和底板部分应变较大,最大值约为 210×10^{-6} ,管道左腰和右腰部分应变稍小,最大值约为 160×10^{-6} ,变化规律与管道受力特征相符;各个部位应变变化规律有所区别,表明管道四个方向受力是不均匀的,这与理想假定情况不同,实际环境下,荷载、土质以及管道连接情况可能都不相同,四边布设光纤可以更好地反映管道不同位置实际状况。

④ 管道位于地下8 m,地下温度变化较小,管道内温度主要受池内液体介质影响,在污水充满情况下温度变化较为稳定,如管道出现泄漏,由于内外温差较大,温度将会出现剧烈变化。如温度光纤应变曲线所示,其中底板温度光纤变化较其他3处平缓,温度变化数值从 1°C 逐渐上升到 7°C ,其余3处变化较为剧烈。主要是因为管道开始运行时污水收集率不高,充满度在0.5以下,底部光纤一直处于水中,光纤温度变化受水的导热性能影响变化趋于一致。而其他3处光纤暴露在空气中,导热性能较差,不同区域对温度敏感性差别较大。周边环境对温度光纤影响较大,这一点也可以作为判断管道内液体充满度的一个判断指标。

⑤ 温度光纤数据变化需要特别注意的是,两腰和顶部光纤除个别位置外,温度差值变化都在 4°C 以内,而管道顶板和右腰位置第一节和第二节管道连接处温度变化出现了极值,温度变化明显高于其他管道节点,此处应是风险较大区域,应作为重点排查部位。根据现场实际探查结果,此处管道有渗漏情况,分析是施工阶段管道接口安装偏差所致。通过DFOS检测能够反映出节点的这种变化并

准确定位,证明了管道光纤检测的可行性和有效性。

4 结论

① 对南京市污水第二通道工程试验段管道设计了一套分布式光纤监测方案,并根据实际情况选择和布设了光缆,利用 DFOS 监测得到了管道应变和温度在半年内的变化曲线,以此准确反映管道目前的状态、变化的趋势和可能出现的问题,并且能够准确定位。这充分说明 DFOS 能够较好适应地下复杂环境,且精度能满足工程和使用要求,是一种较为理想的管道实时健康监测的有效工具。

② DFOS 能够对管道的应变和温度进行实时测量,及时发现管道变化的趋势和可能存在的隐患,能够给管理单位预判和提前制定应对方案提供直接的依据,这是其他检测手段所不具备的。

③ 根据埋深和管径大小以及周边环境情况确定管道重要性等级和风险等级,综合采用不同管道检测手段加强管网运维管理,而 DFOS 的应用对加强排水管道信息管理和动态分析,建立管道风险区域分级和风险判别具有十分重要的作用。

④ DFOS 受安装方式和造价影响,目前主要应用于深埋的大管径主干管。未来,光纤安装方式更加便捷、造价更加经济,将有利于光纤监测在管道工程中普遍应用。

参考文献:

- [1] 韩飞. 油气管道安全监测技术探讨[J]. 数字通信世界, 2010(1):56-58.
HAN Fei. Discussion on the safety monitoring technology of oil and gas pipeline [J]. Digital Communication World, 2010(1): 56-58(in Chinese).
- [2] LIM K, WONG L, CHIU W K, *et al.* Distributed

fiberoptic sensors for monitoring pressure and stiffness changes in out-of-round pipes[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2016,23(2):303-314.

- [3] SIMPSON B, HOULT N A, MOORE I D. Distributed sensing of circumferential strain using fiber optics during full-scale buried pipe experiments[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering & Practice, 2015, 6(4):04015002.
- [4] 胡盛,施斌,魏广庆,等. 聚乙烯管道变形分布式光纤监测试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(4):436-440,453.
HU Sheng, SHI Bin, WEI Guangqing, *et al.* Experimental study on deformation monitoring of PE pipelines with distributed optical-fiber [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(4): 436-440,453(in Chinese).
- [5] 冯维一,刘礼华,张旭苹,等. 基于光纤拉曼测温的腐蚀性酸溶液渗漏检测技术研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2020(11): 3425-3429.
FENG Weiyi, LIU Lihua, ZHANG Xuping, *et al.* Study on leakage detection technology of corrosive acid solution based on fiber Raman temperature measurement [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020(11): 3425-3429(in Chinese).
- [6] WANG Q, GU X, ZHANG Z, *et al.* On-line leakage detection in buried tap water distribution pipes using distributed temperature sensing [J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2022, 13(7): 216-225.

作者简介:彭军(1984-),男,江苏南京人,硕士,高级工程师,一级注册结构工程师,主要从事给排水结构设计、咨询和研究工作。

E-mail:pengjunmail2@163.com

收稿日期:2022-06-09

修回日期:2022-09-06

(编辑:衣春敏)

加强水土保持, 打造绿水青山