

doi: 10.3788/gzxb20124101.0006

应用光纤布喇格光栅传感器监测地下管道 腐蚀的新方法研究

孙丽¹, 孙茜茜¹, 任亮², 张新收¹

(1 沈阳建筑大学 土木工程学院, 沈阳 110168)

(2 大连理工大学 土木水利学院, 辽宁大连 116085)

摘 要:地下管线工作环境恶劣, 腐蚀是引起它破坏和失效的主要原因之一. 本文提出了一种应用光纤光栅传感器监测管道腐蚀的新方法. 输送石油和天然气等一些物质的管道内部存在的压力会使管道发生膨胀, 进而导致管道外壁产生环向变形. 假定管道为无限长, 管道内部压力导致的管道外壁轴向应变可忽略不计, 当管线发生腐蚀时, 会导致管壁变薄, 管道内部的压力又可以看作基本不变, 这样就会增大管道外壁的环向应变. 当管道内部压力保持恒定时, 管道壁厚与应变之间存在一定的反比例关系, 本文方法就是将封装好的光纤光栅传感器粘贴在管道外壁, 通过监测外壁环向变形来判断管道腐蚀的情况和程度. 通过理论值、模拟值和试验值三者的对比分析来说明了这种新方法是可行的, 并且值得被广泛应用, 为埋地管道的防灾减灾提供了一种对策.

关键词:腐蚀监测; 地下管道; 光纤布喇格光栅; 有限元

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)01-0006-5

0 引言

地下管线是城市基础设施的重要组成部分, 是城市赖以生存和发展的物质基础, 被称为城市“生命线”^[1]. 城市地下管线工作环境恶劣, 事故发生后果严重, 有效地对城市地下管线进行实时健康监测、及时识别管线的累积损伤, 是一个亟待解决的问题. 腐蚀是引起埋地管道破坏和失效的主要原因之一. 埋地管道的腐蚀情况不能直接观察到, 发生泄漏等情况时不容易及时发现, 所以, 防止管道的腐蚀破坏一直是管道工程中重要的环节^[2]. 为了判别地下管线的实际结构健康状态, 必须通过有效的技术手段检测到管线在各种荷载和病害作用下的反应信号. 而恶劣的工作环境导致各种输入信号的可观测性较差、信噪比较低, 常规的检测和维护难以奏效, 因此, 地下管线健康监测的研究工作必然是艰巨的、充满挑战的. 常用的埋地管道腐蚀情况的检测方法有交流电流梯度法或多频管中电流法 (Pipeline Current Mapper, PCM)、变频选频法、瞬变电磁法 (Transient Electromagnetic Method, TEM)、皮尔逊法和电化学检测法等, 但它们都存在一定的不足. 如交流电流梯度法或多频 PCM, 数据处理软件只能分别对各个异常点进行分别解析, 对穿孔过多的管

道或设施过多的管道 (如集油环管道或双管流程集、掺水管道), 检测误差较大, 对管道是否腐蚀或腐蚀程度不能准确判断; 变频选频法不能判断破损的位置, 在管路结构复杂情况下难以适用; 对于蚀失量小于检测灵敏度的管体腐蚀现象只能标明正在发生腐蚀作用的管段 (点) 位置, 不能给出准确量化结果, 不能在平行或重叠分布的管群中区分出待测管道的金属蚀失量; 皮尔逊法能确定防腐层破损的确切位置, 但不能准确判断破损的大小, 适于埋深小于 3 m 各种直径的输油、气、水的地下管, 不适于局域性管网; 电化学检测法目前仍处于在实验室阶段^[3].

近年来, 光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 作为一种新型的光无源器件在传感方面的应用一直是人们研究的热点. 用 FBG 作为敏感元件的传感器尺寸小、重量轻、抗电磁干扰、传输距离远和耐腐蚀, 而且由于被测信息采用波长编码, 可以排除光信号传输中光强波动的影响. 当把多个传感器相串联时, 还可以构成多种形式的传感网络. 光纤光栅传感器不仅能达到普通传感器的功能, 同时还能测量普通传感器无法测量的一些特殊物理量, 用途广泛, 可测量结构体的温度、压力、应变等参量, 为地下管线结构的监测和研究开辟了一条新途径^[4-7].

本文提出的这种监测管道腐蚀的新方法是采用 FBG 传感器监测管道的环向应变变化,来达到监测管道腐蚀的目的.该方法将准分布式光纤光栅引入地下管道的健康监测中来,实现自动化远程实时监测,为地下管道在使用过程中的安全性评价奠定基础,为地下管道结构的实时、长期监测开辟了一条新途径.

1 管道腐蚀监测理论

管道在运营期间,需要通过高压输送石油和天然气等一些物质,因此管道内部存在较大的压力,这个压力会使管道发生膨胀,导致管道外壁产生环向变形,如式(1)

$$\epsilon_y = \frac{\sigma_y - \nu\sigma_z}{E} \quad (1)$$

式中, ϵ_y 为管道外壁径向应变, ν 为管道泊松比, σ_y 为管道外壁径向应力, σ_z 为管道外壁轴向应力, E 为管道弹性模量.

假定管道为无限长,则管道内部压力导致的管道外壁轴向应变 σ_z 可忽略不计,即 $\sigma_z = 0$ [8];同时,由材料力学基本原理 [9] 可知, $\sigma_y = PR/h$, 其中 P 为管道内部压力, R 为管道内径, h 为管道壁厚,如图 1.

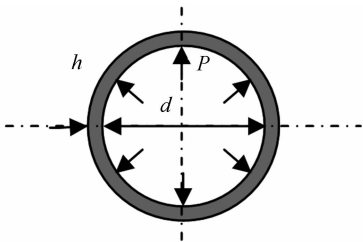


图 1 管道剖面图

Fig. 1 Sectional drawing of pipeline

将 σ_z 和 σ_y 的值带入式(1),得到管道壁厚与管道外壁径向应变的关系式为

$$h = \frac{pR}{\epsilon_y E} \quad (2)$$

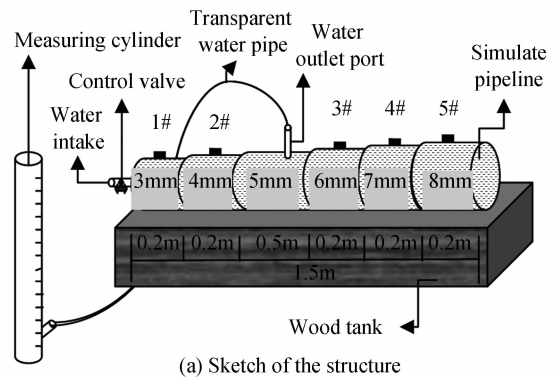
由式(2)可知,当地下管道发生腐蚀时,会导致管壁 h 变薄,管道内部的压力 P 可以看作基本不变,这样就会增大管道外壁的环向应变 ϵ_y . 因此,当管道内部压力 P 保持恒定时,管道壁厚与应变之间存在一定的反比例关系,通过长期监测管道的环向应变变化情况能够得到管道壁厚 h 的变化状况,进而可以判断被测管道的腐蚀情况和程度,从而达到监测管道腐蚀的目的.

温度是结构健康监测中必须考虑的重要参量,在进行实际管线腐蚀监测时需额外布设光纤光栅温度传感器对光纤光栅应变传感器进行温度补偿,以消除温度对应变测量的影响.

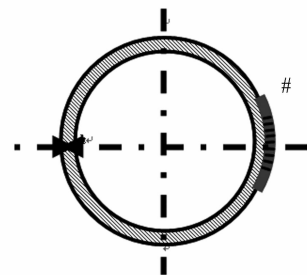
2 试验研究

试验中,采用有机玻璃(聚丙烯树脂)模拟地下管道,有机玻璃的弹性模量取 3.4 GPa.

将管道制成长 $L = 1.5$ m, 内径 $R = 85$ mm, 壁厚分别为 $h = 3$ mm、 $h = 4$ mm、 $h = 5$ mm、 $h = 6$ mm、 $h = 7$ mm、 $h = 8$ mm 的连续均匀模型. 试验在室内环境进行,温度变化不大,可以忽略温度对传感器的影响,为了方便进行试验,在制作模拟管道时保持管道内径不变,通过打磨管道外壁减小壁厚,来模拟不同腐蚀程度造成的壁厚不同的情况. 在不同壁厚处各粘贴一个封装好的光纤光栅应变传感器(5 mm 为出水口处,除外),编号为 1#、2#、3#、4#、5#, 同时在管道附近自由布设一个光纤光栅温度传感器,用于补偿温度对应变传感器的影响,结构示意图如图 2.



(a) Sketch of the structure



(b) Sectional drawing of pipeline

图 2 结构示意图

Fig. 2 Structure profile

试验结构图如图 3, 先将管道放在铺满细沙的木头槽内, 一是为了固定管道防止管道滚动, 另一个是为了使整个管道受力均匀, 避免只有两端固定时中部悬空, 加满水后重力使管道发生弯曲. 然后通过进水口向管道内注水, 管内水满后会由出水口经过水管流入量筒(用透明水管将出水口和量筒相连), 当管道内部以及透明水管内没有气泡存在时, 关闭进水口处的控制阀门, 保持量筒中的水面一定. 为了保证封装好的光纤光栅传感器能够有效地传递应变, 实验中采用夹持式的方法, 夹持件做成与管道外壁弧度相同的形状, 使得夹持件与管道外壁能够紧

密结合,如图4.夹持件同样采用有机玻璃材料制作,目的是保证材料属性的一致性,以减少应变传递的损耗.

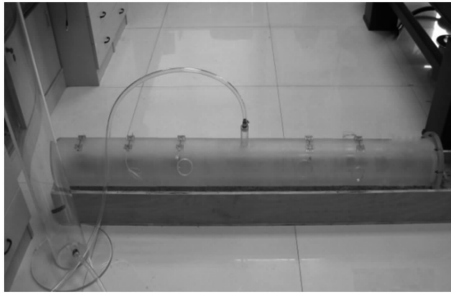


图3 试验结构图
Fig.3 Sketch of experimental structure

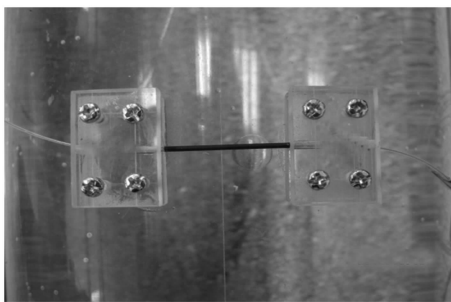


图4 夹持式光纤光栅应变传感器
Fig.4 Pictures of clamp-packaged FBG strain sensor

最后向量筒中加入一定高度的水柱,会使管道产生一定大小的压强,同时,粘贴在不同壁厚处的传感器反射回的波长会产生不同的变化.实验室中温度基本无变化,此处数据处理不考虑温度影响.根据文献[10]得知,波长与应变之间的关系式为 $\Delta\lambda = \alpha\epsilon\lambda$,因此,通过波长的变化可以得到相应的应变变化.实验结果如图5和图6.

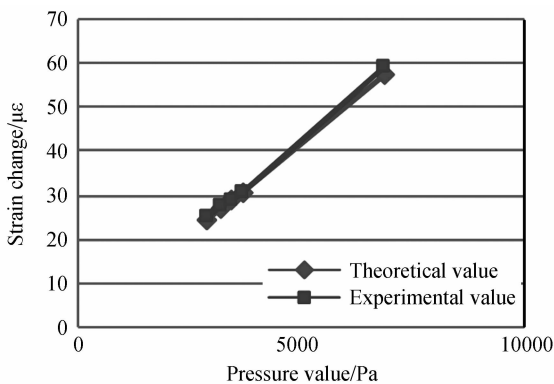


图5 壁厚 $h=3$ mm时的 $p-\epsilon$ 图
Fig.5 $p-\epsilon$ drawing when the wall $h=3$ mm

图5是壁厚 $h=3$ mm处的压力-应变图,从图中可以看出,对管道施加不同压力时,同一壁厚处可以产生相应的应变变化,压力值与应变变化成良好的线性关系,说明这种传感器适合于管道结构的监测,并且这种方法可以用来监测管道应变的变化情况.图6是内部压力 $P=3430$ Pa时的壁厚-应变图,管道内部压力一定时,不同壁厚处产生的应变变

化也不同,并且也呈线性关系,随着壁厚的增加应变变化逐渐减小,这一结果与理论计算结果非常吻合,说明这是一种可行的监测管道腐蚀的方法,值得应用和推广.此外,实验虽然在室内进行,忽略了周围环境和温度变化产生的影响,以及存在着不可避免的人为误差和系统误差,但实验结果与理论计算还是比较接近,说明这种方法的抗干扰能力强、测量准确度高,测量结果比较理想.

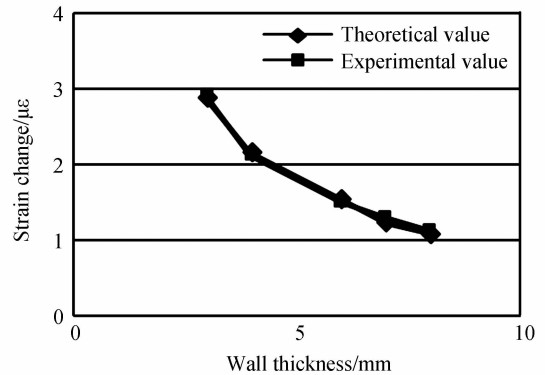


图6 压力 $P=3430$ Pa时的 $h-\epsilon$ 图
Fig.6 $h-\epsilon$ drawing when the pressure $P=3430$ Pa

3 有限元模拟

3.1 有限元模型

有限元模型采用实体单元,管道单元为C3D20,在一条均匀管道上切割管壁来模拟6种不同程度的腐蚀,从左到右依次为3 mm、4 mm、5 mm、6 mm、7 mm和8 mm,材料属性见表1.本算例定义一个分析步,只进行管线在内压荷载作用下的静力计算.考虑到试验的具体情况,设置模型两端边界为固定支撑.

表1 材料属性表
Table 1 The table of material attribute

Elastic modulus	Poisson ratio	Inside diameter	Outside diameter
3.4 Gpa	0.2	85 mm	88 mm
			89 mm
			90 mm
			91 mm
			92 mm
			93 mm

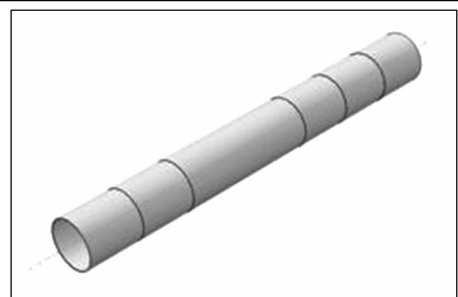


图7 管道模型
Fig.7 Pipeline model

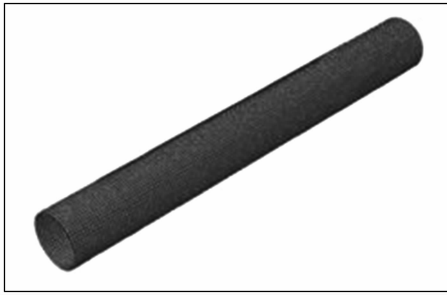
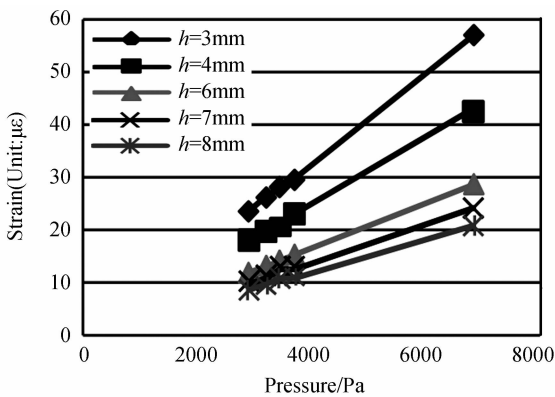
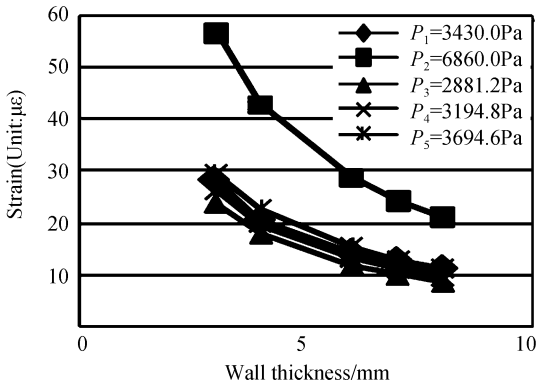


图8 有限元模型

Fig. 8 The finite element model

3.2 有限元分析

图9是模拟结果中不同腐蚀程度时的压力-应变图,图10给出了不同压强作用下的壁厚-应变图.由图可知施加的压力不同时,应变变化值就不同,基本均呈线性变化,并且相同压力作用下不同壁厚处的应变变化值也不同.随着壁厚的增加应变变化值逐渐减小,模拟结果与理论计算比较吻合,在理论上进一步论证了方法的可行.

图9 不同腐蚀程度时的 $p-\epsilon$ 图Fig. 9 $p-\epsilon$ drawing for different extent of corrosion图10 不同压强作用下的 $h-\epsilon$ 图Fig. 10 $h-\epsilon$ drawing at different pressure

综合前面图5和图6中理论值与试验值的结果对比情况可以看出,三者的数据变化情况基本相同,并且结果比较接近;再通过图9和图10的分析论证,充分说明了这种监测管道腐蚀的新方法适用于地下管道以及其他一系列管道的腐蚀监测,可以有效预测地下管道的剩余寿命.

4 结论

1) 本文通过模拟结果与理论、试验数据的对比,充分说明了这种监测管道腐蚀的新方法是可行的.它可以提高管道安全性,降低安全隐患和运行风险,提高总体经济效益.

2) 方法中用到了光纤光栅传感器,它的优点使得这种方法较其他监测管道腐蚀常用的方法抗电磁干扰能力强、测量准确度高、长期稳定性好、耐久性强、传输距离远、传输损耗小,并且可以实现在线实时监测,不会影响管道的正常运行.

3) 本文的结果说明了这种监测方法不仅可以用于地下管线的腐蚀监测,同样可以用于只考虑内压作用下的海底管道以及其他一些管线的腐蚀情况监测.

参考文献

- [1] LI Yong-lu, LI Xiao-dong. Evaluation for reliability of existing underground pipelines[J]. *Building Structure*, 2007, **37**(8): 26-28.
李永录, 李晓东. 既有地下管线综合评估应用[J]. *建筑结构*, 2007, **37**(8): 26-28.
- [2] LIU Kai, MA Li-min, CHEN Zhi-dong, et al. Corrosion of buried pipeline and its anticorrosion[J]. *Pipeline Technique and Equipment*, 2007(4): 36-42.
刘凯, 马丽敏, 陈志东, 等. 埋地管道的腐蚀与防护综述[J]. *管道技术与设备*, 2007(4): 36-42.
- [3] ZHANG Hui-min, PAN Jia-zhen, SUN Zhan-mei. The comparison of the methods in measuring the corrosion of the buried pipelines [J]. *Journal of Shanghai Institute of Technology*, 2004, **4**(2): 104-110.
张慧敏, 潘家祯, 孙占梅. 现有埋地管道腐蚀检测方法比较[J]. *上海应用技术学院学报*, 2004, **4**(2): 104-110.
- [4] LI Yan, XU Xiao-feng, KANG Zhi-hui, et al. Interrogation technique for diametric load on fiber bragg grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 717-720.
李岩, 徐晓峰, 康智慧, 等. 光纤光栅径向受力检测技术[J]. *光子学报*, 2008, **37**(4): 717-720.
- [5] RAN Zeng-ling, RAO Yun-jiang, LUO Xiao-dong. Theoretical and Experimental investigation on erbium-doped fiber amplifiers with long-period fiber grating filters[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 695-700.
- [6] LIU Bo, TONG Zheng-rong, ZENG Jian, et al. A demodulation method based on chirp grating reflective filter in fiber bragg grating sensing system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 57-60.
刘波, 童峥嵘, 曾剑, 等. 一种利用啁啾光栅反射滤波的光纤光栅传感解调方法[J]. *光子学报*, 2004, **33**(1): 57-60.
- [7] CAI Han-li, HU Wen-bin, ZHANG Yan-xiao, et al. A fiber bragg grating sensor of steel corrosion at different humidities [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(5): 690-693.
蔡汉莉, 胡文彬, 张艳晓, 等. 光纤光栅锈蚀传感器在不同湿度下的特性研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(5): 690-693.
- [8] TENNYSON R C, MORISON W D, MIOSNER T. Fiber optic monitoring focuses on bending corrosion[J]. *Oil&Gas Journal*, 2006, **104**(7): 55-60.
- [9] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学(I)[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2005.

[10] SUN Li. Research of fiber bragg sensing technology and engineering application[D]. (Doctoral Dissertation). Dalian University of Technology, 2006.

孙丽. 光纤光栅传感技术与工程应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.

A New Method for Underground Pipeline Corrosion Monitoring Applied FBG

SUN Li¹, SUN Qian-qian¹, REN Liang², ZHANG Xin-shou¹

(1 *School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China*)

(2 *Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116085, China*)

Abstract: In atrocious working conditions, corrosion is one of the major failure modes for underground pipelines. A method for monitoring pipeline corrosion applied fiber Bragg grating (FBG) sensor is proposed. Internal high pressure of pipes caused by carrying oil, gas and other matters will expand the pipe and then result in hoop strain on pipe outer wall. Assuming the pipeline has an indefinitely length, the axial strain pipe outer wall caused by internal pipe pressure is negligible. The pipe wall will be thinning at corrosion, while the pressure inside the pipe remains about the same, and this will increase hoop strain of the outer wall. Pipe wall and the strain are to some extent in inverse proportion when internal pressure keeps constant. This method attached packaged fiber grating strain sensors to the surface of pipe, the corrosion extent of pipe can be judged by monitor hoop strain. Through detailed contrastive analysis of theoretical value, analogue value and test value to explain the method is practical and worth being extensively applied and spread, and then provide strategy of disaster prevention and reduction for underground pipeline.

Key words: Monitoring corrosion; Underground pipeline; Fiber Bragg Grating(FBG); Finite element