

应用光纤光栅应变箍传感器的管道腐蚀监测试验*

王 涛¹, 姜 涛¹, 夏梦颖², 任 亮¹, 程 祥¹

(1. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024; 2. 大连大学, 辽宁 大连 116622)

摘要: 为了验证通过光纤光栅应变箍传感器对管道进行腐蚀监测的方法的可行性, 在均匀腐蚀管道模型和局部腐蚀管道模型上分别进行了试验, 试验所使用的应变箍传感器能够测量管道截面的环向应变, 通过环向应变能够反应管道壁厚的变化情况。试验表明, 这种光纤光栅应变箍传感器性能优良, 可以应用于测量腐蚀引起的环向应变, 在管道的腐蚀监测中具有很好的应用前景。

关键词: 光纤光栅; 管道腐蚀; 应变箍传感器; 环向应变

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)01-0171-05

0 引言

随着国民经济的快速发展, 输送能源的管道运输业的安全问题也显得越发重要(王占山等, 2003)。但是随着管线服役时间的增长(冯耀荣等, 1999), 管道里程的不断增加, 长输管道的泄漏、火灾、爆炸等恶性事故也不断增多, 而油气管道一旦发生泄漏、爆炸等事故, 不仅会造成巨大的资源浪费, 还会对人民的生命财产安全造成巨大威胁(张恩勇等, 2004)。因此, 对管道安全运营问题的研究具有十分重要的意义。

由于受输送介质和外界腐蚀环境影响, 管道常常会发生腐蚀, 腐蚀缺陷造成的失效是既有埋地管道最主要的损坏方式之一(林新宇等, 2011)。现有的管道腐蚀检测法主要是把智能检测器置于管道内, 在输送介质的推动下, 完成管道内、外腐蚀缺陷的检测。检测技术主要有漏磁检测法、涡流检测法和超声波检测法等。检测原理均为测量管道壁厚变化, 从而得到管道的腐蚀发展状况(刘慧芳等, 2008)。但是由于石油、天然气均为易燃易爆物质, 应用电类传感器对管道的安全状况进行测量的同时, 也给管道的安全运营埋下隐患。

近年来, 光纤光栅(Fiber Bragg Gating, 简称FBG)作为一种新型的智能材料被广泛地应用于工

程领域(任亮等, 2013; Li *et al*, 2004; 贾子光等, 2010)。光纤光栅具有精巧轻柔、抗电磁干扰能力强、多参数测量(应变、温度、转速等)、无火花、耐酸碱腐蚀、稳定性好等优点, 因此光纤光栅材料能够在复杂环境下进行长期工作, 适用于输油输气管道的长期实时监测。这种新型智能材料已经广泛应用于管道无损监测技术之中(Ren *et al*, 2006; 孙丽等, 2012)。本文基于自行研制的光纤光栅应变箍传感器, 提出一种通过测量管道环向应变来实现管道腐蚀监测的方法。

1 基于FBG应变箍传感器的管道腐蚀监测原理

假设在化学腐蚀和冲刷腐蚀的共同作用下, 管道的内壁表面上发生了均匀腐蚀, 在工作压力下管道均匀变形。反映环向应变和管道壁厚关系的基本公式为

$$\Delta\varepsilon_h = \frac{R\Delta P}{dE} \quad (1)$$

其中, $\Delta\varepsilon_h$ 表示管道的环向应变, R 表示管道外径, ΔP 表示管道内压变化量, d 表示管道壁厚, E 表示管道材料的弹性模量。

由式(1)可知, 当 R 、 ΔP 、 E 为定值时, 管道的环向应变与壁厚成反比。管道在正常运营过

* 收稿日期: 2015-11-16.

基金项目: 973项目(2015CB060000)、自然科学基金(51421064和51327003)和中央高校基本科研业务费专项资金(DUT15YQ107)联合资助.

程中, 内压基本保持恒定, 管道外径保持不变, 因此通过长期监测管道环向应变 $\Delta\varepsilon_h$ 的变化情况, 就能够得到管道壁厚 d 的变化情况, 从而随时掌握被监测管道的腐蚀程度。通过这种方法进行管道的腐蚀监测, 首先要能够有效地测量管道环向应变, 因此笔者研制了一种 FBG 应变箍传感器。

2 FBG 应变箍传感器测量原理

FBG 应变箍传感器由一根带有栅区的光纤, 两个夹持套管, 两个夹持块, 一个保护管套, 一个滑动端, 一个固定端组成, 其结构如图 1 所示。

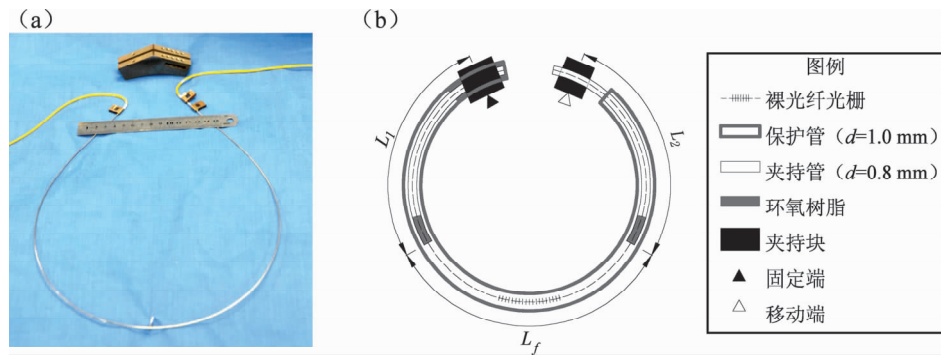


图 1 应变箍传感器实物 (a) 及内部结构 (b) 示意图

Fig. 1 The picture of FBG strain hoop sensor (a) and the schematic map of its inside construction (b)

表 1 封装材料以及光纤的物理性质

Tab. 1 The physical properties of packaging materials and optical fiber

材料参数	符号	数值	单位
光纤弹性模量	E_f	7.2×10^{10}	Pa
夹持部件 (钢管) 的弹性模量	E_s	2.1×10^{11}	Pa
毛细钢管的直径	d_s	0.8	mm
光纤直径	d_f	0.125	mm

将 FBG 应变箍传感器安装在管道外壁, 当管道发生变形时, 产生的形变传递给内层钢管以及光纤, 内层钢管与光纤受到的力相等, 所以光纤的变形为

$$\Delta L_f = \frac{pL_f}{E_f A_f} \quad (2)$$

内层钢管变形为

$$\Delta L_s = \frac{pL_s}{E_s A_s} \quad (3)$$

式中, L_s 表示两段内层钢管的长度之和, $L_s = L_1 + L_2$; p 表示内层钢管与光纤受到的拉力, L_f 表示光纤的长度。由式 (2) 和 (3) 以及表 1 各材料特性可得:

$$\frac{\Delta L_s}{\Delta L_f} = 0.0191 \times \frac{L_s}{L_f} \quad (4)$$

对于 FBG 应变箍传感器, L_s 与 L_f 的比值大于 1, 所以应该考虑内层钢管的变形。由于 FBG 应变箍传感器紧箍在管道外壁, 理想状态下, 管道的环向变形将全部传递到内层钢管和光纤上, 因此管道环向平均应变可以通过内层钢管和光纤的应变表示为

$$\varepsilon_h = \frac{\Delta L_s + \Delta L_f}{L_s + L_f} \quad (5)$$

式中, ε_h 表示管道的环向平均应变, 所以光纤应变与管道环向平均应变之比为

$$\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_h} = \frac{\frac{\Delta L_f}{L_f}}{\frac{\Delta L_s + \Delta L_f}{L_s + L_f}} = \frac{\frac{L_s}{L_f} + 1}{0.0191 \times \frac{L_s}{L_f} + 1} \quad (6)$$

其中, ε_f 表示光纤的应变。定义 ζ 为 FBG 应变箍传感器灵敏度系数:

$$\zeta = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_h} = \frac{(\varphi + 1)}{(0.0191\varphi + 1)} \quad (7)$$

其中, $\varphi = L_s/L_f$ 为增敏系数影响因子, 所以对于管

道环向平均应变有

$$\varepsilon_h = \frac{\varepsilon_f}{\zeta}. \quad (8)$$

对于波长为 1 550 nm 附近的 FBG 应变传感器, 其应变与中心波长的关系为

$$\varepsilon_f = \frac{\Delta\lambda}{K_f}. \quad (9)$$

其中, $K_f = 1.2 \text{ pm}/\mu\varepsilon$, 因此对于 FBG 应变箍传感器, 由式 (8) 与 (9) 可得管道环向平均应变与 FBG 应变箍传感器中心波长关系为

$$\varepsilon_h = \frac{\Delta\lambda}{\zeta K_f}. \quad (10)$$

从式 (7) 可以看出, FBG 应变箍传感器的灵敏度可以通过调整增敏系数影响因子 φ 来实现, 因此可以针对不同的测量要求, 调整 FBG 应变箍传感器的测量灵敏度。

3 管道腐蚀模拟实验介绍

在本次试验中, 设计了两个管道模型: 一个是均匀腐蚀管道模型, 由长为 150 mm, 直径为 273 mm, 不同管道壁厚度 (6.0 mm、5.0 mm、4.6 mm、4.2 mm、3.8 mm、3.4 mm、3.0 mm)

的 7 部分组成, 如图 2 所示; 另一个是局部腐蚀管道模型, 由长为 150 mm、直径 273 mm, 局部腐蚀区管道壁厚度均为 3 mm, 不同腐蚀区角度 (30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 180° 、 270°) 的 6 部分组成, 如图 3 所示。将 FBG 应变箍传感器安装在每一部分的中间位置, 防止边缘效应对试验结果造成影响。传感器连接到解调仪上, 解调仪通过以太网将收集到的信号传输到 PC 机上, 以此来实现对全腐蚀的监测, 解调仪采集信号的频率为 10 Hz。通过最大泵压为 0.4 MPa 的气泵向管道内打气提供压力环境, 模拟实际工程中的输油输气管道运营环境。压力传感器 (采用 cRIO9140 进行解调) 安装在管道模型入气口一端, 测量管道内部压力值。试验在 26° 的室温下进行, 因为 FBG 对于温度也很敏感, FBG 应变箍传感器的测量结果均用温度传感器测得的值进行补偿和修正。

4 实验结果及分析

4.1 均匀腐蚀试验结果分析

由式 (1) 可以得到, 管道的环向应变与管道壁厚的倒数成正比。通过均匀腐蚀模型试验, 将管道壁厚倒数与环向应变拟合成曲线, 如图 4 所示。从图中可以看出, 管道壁厚的倒数与环向应变的相关系数达到 0.99, 证明管道壁厚的倒数与

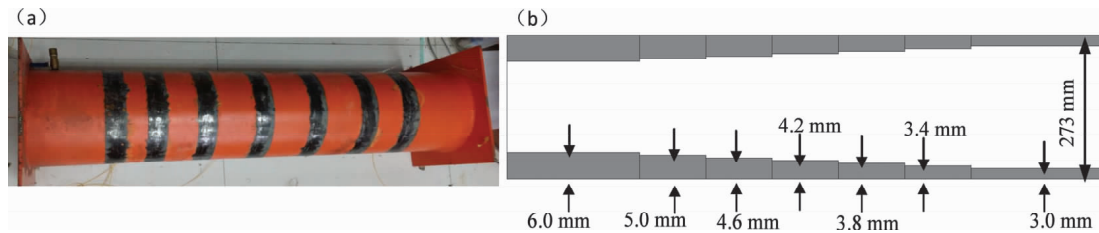


图 2 均匀腐蚀管道模型 (a) 及其纵截面图 (b)

Fig. 2 The model of steel pipeline with uniform corrosion (a) and its longitudinal section (b)

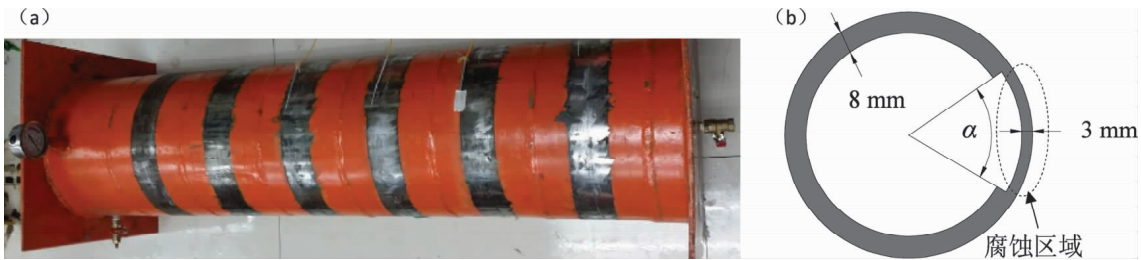


图 3 局部腐蚀管道模型 (a) 及其截面图 (b)

Fig. 3 The model of steel pipeline with local corrosion (a) and its cross section (b)

环向应变存在正比例关系,并且通过环向应变能够准确反映均匀腐蚀管道壁厚的变化情况。通过试验也说明这种传感器具有较好的灵敏度以及较高的精确性,适合用于管道均匀腐蚀状况的监测。

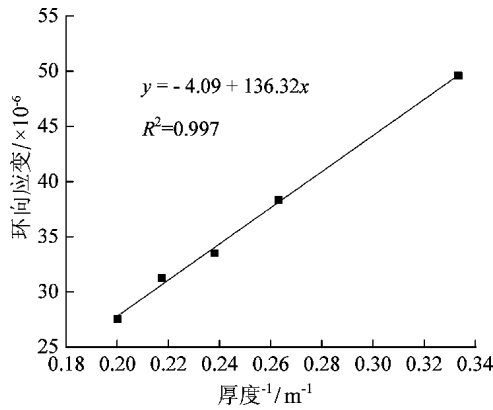


图4 均匀腐蚀模型壁厚与环向应变关系

Fig. 4 Relationship between wall thickness and circumferential strain of the model with uniform corrosion

4.2 局部腐蚀试验结果分析

为了研究这种 FBG 应变箍传感器是否适用于管道局部腐蚀的测量,进行了局部腐蚀管道模型试验。图5所示为不同腐蚀角度与管道环向应变的拟合曲线,从图中可以看出,随着腐蚀角度的增

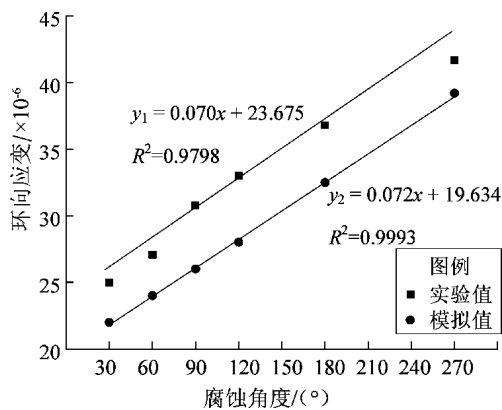


图5 不同腐蚀角度管道的环向应变

Fig. 5 Circumferential strain of the model in different corrosion angle

长,管道的环向应变呈线性变化,并且试验结果与数值模拟结果一致。因此可以证明,在管道的腐蚀厚度相同的情况下,随着腐蚀面积的增加,环向应变将线性增长;也表明这种 FBG 应变箍传感器能够有效地测量由局部腐蚀面积变化引起的环向应变的改变。

5 结论

本文提出了一种应用 FBG 应变箍传感器进行管道腐蚀监测的方法,并通过实验测试这种方法的可行性,结果表明:(1) FBG 应变箍传感器对管道环向应变非常敏感;(2)通过 FBG 应变箍传感器可以准确地测量管道腐蚀的发生和发展。综上所述,FBG 应变箍传感器适用于油气管道腐蚀监测,并且具有可以测量整个管道截面环向应变、对管道的腐蚀进行实时监测、无需破坏管道就可以探测到腐蚀的发生和发展情况等优点。

参考文献:

- 冯耀荣,王新虎,赵冬岩. 1999. 油气输送管失效事故的调查与分析[J]. 中国海上油气工程, 11(5): 11-14.
- 贾子光,任亮,李宏男等. 2010. 应用光纤光栅传感器监测复合材料固化过程[J]. 中国激光, 37(5): 1298-1303.
- 林新宇,吴明,程浩力等. 2011. 埋地油气管道腐蚀机理研究及防护[J]. 当代化工, 40(1): 53-59.
- 刘慧芳,张鹏,周俊杰等. 2008. 油气管道内腐蚀检测技术的现状与发展趋势[J]. 管道技术与设备, (5): 46-56.
- 任亮,姜涛,李东升等. 2013. 微型 FBG 应变传感器在大坝模型实验中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 33(2): 278-283.
- 孙丽,孙茜茜,任亮等. 2012. 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[J]. 光子学报, 41(1): 6-1.
- 王占山,陈钢,冯健等. 2003. 长输管道泄漏检测和定位技术[J]. 沈阳工业学院学报, 22(2): 32-36.
- 张恩勇,金伟良,宋牟平等. 2004. 海底管道串联分布式光纤监测系统[J]. 中国海洋平台, 19(5): 40-43.
- Li H N, Li D S, Song G B, et al. 2004. Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering [J]. Engineering structures, 26(11): 1647-1657.
- Ren L, Zhou J, Sun L, et al. 2006. Application of tube-packaged FBG, strain sensor in vibration experiment of submarine pipeline model [J]. China Ocean Engineering, (20): 155-164.

Application of Fiber Bragg Grating Strain Hoop Sensor in Pipeline Corrosion Tests

WANG Tao, JIANG Tao¹, XIA Mengying², REN Liang¹, CHENG Xiang¹

(1. *Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China*)

(2. *Dalian University, Liaoning 116622, Dalian, China*)

Abstract

We present a new method to detect pipeline corrosion based on the fiber bragg grating (FBG) hoop – strain sensor. To verify the feasibility of the proposed method, we take the test on the uniform corrosion and local corrosion pipeline models by the installation of FBG strain hoop sensors. The hoop – strain sensor used in the test could measure the circumferential strain of pipe cross section, and the obtained circumferential strain which could reflect the change of the thickness of the pipe tunnel. The experiment results show that the FBG strain hoop sensor with good performance can be applied to measure circumferential strain induced by the pipeline corrosion, which has the application prospect of pipeline corrosion monitoring.

Key words: fiber bragg; pipeline corrosion; FBG; hoop-strain