

支吊架结构输油管道应变仿真及光纤布里渊散射实验研究

尉婷, 吴冰冰, 龙万江, 刘颖刚, 罗俊

(西安石油大学 光电油气测井与检测教育部重点实验室, 西安 710065)

摘要: 为了有效检测输油管道应变, 首先, 提出采用有限元软件对支吊架结构输油管道施加载荷, 仿真管道表面应变分布, 从而优化分布式光纤输油管线应变检测排布方式; 然后, 在实验中将传感光纤沿轴向黏贴于管道外表面, 通过布里渊光时域分析仪(BOTDA)测量光纤布里渊频移, 以对管道表面应变分布进行实时监测。对比仿真和实验数据可知, 管道顶部和底部对应变敏感, 且管道表面应变分布的仿真结果与实验数据基本吻合。

关键词: 输油管道; 管道应变分布; 有限元分析; 模拟仿真; 光纤布里渊散射

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)06-0073-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.06.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optical fiber Brillouin scattering experimental study and strain simulation of oil pipeline with support and hanger structure

WEI Ting, WU Bingbing, LONG Wanjiang, LIU Yinggang, LUO Jun

(Key Laboratory of Photoelectricity Gas-oil Logging and Detecting,

Ministry of Education of China, Xi'an University of Petroleum, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to effectively detect the strain of oil pipeline, Firstly, the finite element software is proposed to apply load to the oil pipeline with support and hanger structure, and the strain distribution on the surface of the pipeline is simulated to optimize the strain detection arrangement mode of the distributed optical fiber oil pipeline. Then, the sensing fiber is pasted to the outer surface of the pipeline along the axial direction. The strain distribution on the pipeline surface is monitored in real time by measuring Brillouin frequency shift by brillouin optical time domain analyzer (BOTDA). Comparing the simulation and experimental data, it can be known that the top and bottom of the pipeline are sensitive to strain, and the simulation result of the strain distribution on the pipeline surface are basically consistent with the experimental measurement.

Key words: oil pipeline, distribution of pipeline strain, finite element analysis, analog simulation, fiber Brillouin scattering

0 引言

管道运输成本低且能连续运输, 根据有关资料统计, 成品油管道运输成本为 5.8 分每吨每千米, 在同等条件下, 仅为铁路运输成本的 63%^[1]。我国现有油气管

收稿日期: 2022-06-04。

基金项目: 国家“863”计划项目(2009AA06Z203)资助; 教育部科技创新工程重大项目培育项目(708087)资助; 陕西省“13115”科技创新工程重大科技专项项目(2009ZDKG-42)资助; 陕西省自然科学基金研究计划项目(2012JQ8015)资助; 陕西省省级大学生创新创业训练计划项目(S202110705130)资助。

作者简介: 尉婷(1974—), 女, 博士, 副教授, 毕业于西安光学精密机械研究所。主要研究方向为光纤传感与检测, 主持了陕西省自然科学基金、陕西省教育厅自然科学基金等计划项目, 参加了陕西省科技攻关、陕西省科技厅、陕西省教育厅重点实验室项目等 10 余项科研项目, 发表科研论文 20 余篇。



道十几万千米, 由于油气管道的长跨度、多气候等特殊特性, 油气管道健康监测一直是个重点问题。倘若能对管道上的应变采取有效监测, 使管道能全天候、全时段进行安全油气运输, 这对能源持续供应有重大意义^[2-4]。在管道检测传感中, 广泛使用的检测方法有压力分布法、负压波检测法和声波法等, 但这些方法主要是在管道破坏后进行检测, 不能起预防作用, 且普遍存在灵敏度低、响应时间长、抗干扰性差和分辨率低等缺点。基于布里渊光时域分析仪(BOTDA)的分布式光纤检测法可以在沿光纤路径上同时得到被测量场在时间和空间上的连续分布信息, 实现远程监控, 具有分布式、长距离、高精度和检测小规模漏油等特点, 非常适用于长距离油气管道的健康监测。基于此, 本文提出通过 BOTDA 测量光纤布里渊散射信息变化, 判断输油管道是否发生形变、断裂泄漏事故或存在其它安全隐患^[5]。

1 输油管道轴向应变模型建立

有限元法计算机设计程序通过前处理、求解和后处理 3 个步骤对模拟管道进行仿真;模拟管道采用硬质聚氯乙烯(PVC-U)管材,管道长度 $L=4.0$ m,公称外径 $\Phi=110$ mm,公称壁厚 $d=3.2$ mm,力学性能材料弹性模 $E=3.50$ GPa,泊松比 $\nu=0.38$,密度 $\rho=1.4$ g/cm³;网格密度为 80×40 ,管道两端采用固定支承,中央环向竖直向下施加静态持续荷载。

管道模型(左视图)及其横切面方位示意图如图 1 所示,规定管道沿轴向左视图上方为顶部,下方为底部,左视图右方为正面(下文称为侧部),左方为后面。

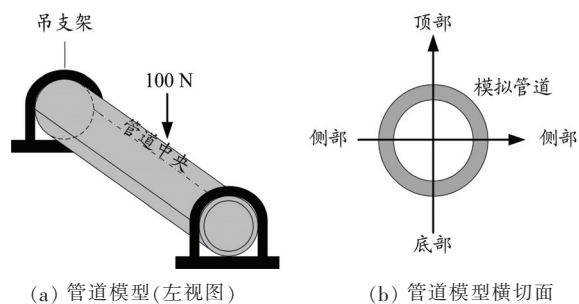


图1 管道模型(左视图)及其横切面方位示意图

本文选择硬质 PVC-U 对管材进行材料定义,对建造模型设置点状支吊架结构支撑,采用自适应进行网格划分。考虑到管材自身的重量因素,对模拟管道进行加载标准地球重力设定,重力方向沿 Y 轴为负方向,两端点为固定支撑单元面,建立并生成三维管道模型。设定后,管道加载标准地球重力整体和正面视图如图 2 所示。

本文采用系统坐标系在管道中心节点处设置集

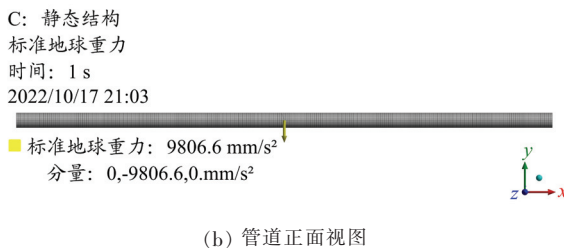
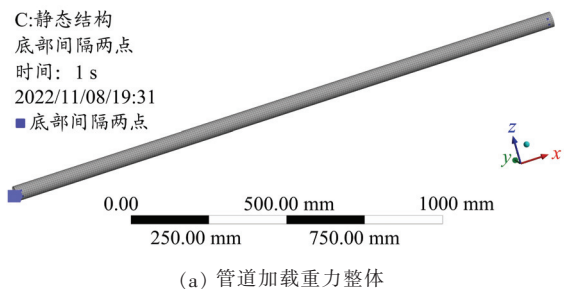


图2 管道加载重力整体与正面视图

中静态持续向下载荷来模拟加载情况。设置静态载荷在 X 分量方向(沿着管道方向)为 0 N;在 Y 分量方向(垂直于管道方向)为 -100 N,作用力沿垂直表面向下;在 Z 分量方向(沿着管道径向切线方向)为 0 N。

2 有限元仿真分析

有限元仿真得到管道外表面轴向应变模拟如图 3 所示。其中,蓝色箭头表示负应变,红色箭头表示正应变,箭头的集中程度代表应变的大小。可以看出,管道顶部中央与加载静态持续荷载处负应变值最大,沿管道轴向向两支撑端延伸负应变逐渐趋近于零,这是因为荷载作用下管道顶部中间段产生了压缩应变;管道底部中间段为正应变,说明在荷载作用下管道底部中间段产生了拉伸应变;管道两支撑端的中心正应变最大,应变向管道两支撑端方向延伸,并逐渐变小,接近端点时为零,至支撑端时减小变为负值,这是因为管道底部两侧有支撑单元面,受力后支撑端附近区域产生了压缩应变;管道顶部和底部的应变分布均呈现对称分布;管道侧部中线沿管道轴向方向,两支撑端之间轴向应变基本不变,支撑端附近有正应变。

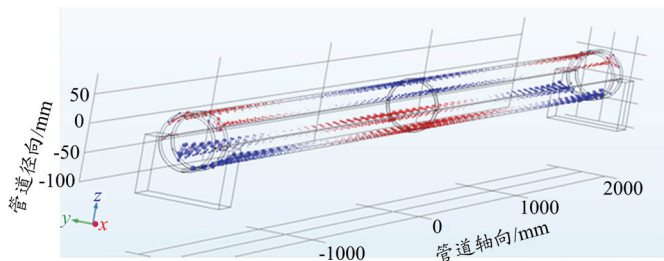


图3 管道外表面轴向应变分布图

在施加 100 N 静态持续荷载过程中,对管道外表面顶部、侧部和底部分别进行网格节点等距离采样,将节点及轴向应变数据导出,绘制支吊架结构输油管道外表面不同方位轴向应变分布曲线,如图 4 所示。可以看出,管道顶部中央(约横坐标轴上 2 m 处)与加载荷载处为压缩负应变极值,应变沿管道轴向向两支撑端(约横坐标轴上 0.5 m 和 3.5 m 处)延伸,中央段变化幅度较快,至支撑端逐渐趋近于零应变;支吊架结构输油管道侧部中线沿管道轴向方向,两支撑端之间轴向应变基本不变,支撑点附近有正应变;管道底部中间段产生正拉伸应变,管道两支撑端之间中心点为拉伸正应变极值,应变朝管道两支撑端方向延伸,逐渐变小,接近端点 0.5 m 附近时为零,至支撑端变为负值,这是因为管道底部两侧有支撑单元面,因受支撑力产生压缩负应变;模拟管道应变分布均呈现中点对称分布。

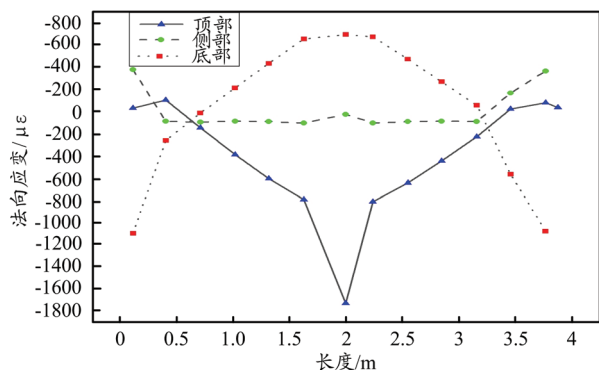


图4 输油管道顶部、侧部和底部沿轴向方向的法向应变分布(100 N载荷)曲线图

综上所述,在顶部中央施加静态持续荷载的支吊架结构输油管道模型中,管道顶部外表面整体为压缩负应变;管道底部外表面中段为拉伸正应变,两支撑端附近为压缩负应变;管道侧部外表面基本无拉伸压缩,应变为零。

3 光纤布里渊散射应变测量

光纤布里渊散射应变传感是通过将传感光纤黏贴在管道外表面来获得外表面应变信息,再采用BOTDA监测外力作用下的光纤布里渊频移,实时在线监测输油管道外表面应变分布。

3.1 光纤布里渊散射应变测量原理

在基于BOTDA的光纤应变测量系统中,光纤两端激光器在计算机的控制下分别输入泵浦光和探测光。当泵浦光与探测光的频差与光纤中某区域的布里渊频移相等时,在该区域内就会产生布里渊放大效应,2束光之间发生能量转移^[6],此时的布里渊频移 ν_b 为

$$\nu_b = 2nV_a/\lambda_0 \quad (1)$$

其中, n 为光纤纤芯折射率, V_a 为光纤中的声波波速, λ_0 为入射光在真空中的波长。

式(1)表明,分布式光纤布里渊散射光的频移与光纤的有效折射率和声波波速有关。而温度和应变都能改变光纤的折射率和声波波速,只要检测布里渊频移的变化,就可以得到温度或应变在光纤上的分布,布里渊频移、温度和应变的关系^[6]为

$$\nu_b = \nu_{b0} + C_T \Delta T + C_\varepsilon \Delta \varepsilon \quad (2)$$

其中, ν_b 为布里渊频移, T 为温度, ε 为应变, ν_{b0} 为光纤初始状态下光纤布里渊散射频率, C_T 和 C_ε 分别为布里渊频移量随温度和应变变化(变化量分别为 ΔT 和 $\Delta \varepsilon$)的系数。若温度恒定,应变改变,弹光效应会引起光纤折射率的变化。假设温度为室温(20℃),推导出布里渊频移随应变变化关系为

$$\Delta \nu_b = C_\varepsilon \Delta \varepsilon \quad (3)$$

其中, $C_\varepsilon = 0.0483 \pm 0.0004$ MHz/ $\mu\varepsilon$ 。从式(3)可以看出,当温度保持不变时,布里渊频移的变化量 $\Delta \nu_b$ 与应变变化量 $\Delta \varepsilon$ 呈线性关系。当光波长为1550 nm,普通单模石英光纤在常温及无应变的情况下的布里渊频移为11.2 GHz,则应变每变化1 $\mu\varepsilon$ 引起的布里渊频移变化约为0.0483 MHz^[8]。

3.2 光纤布里渊散射油气管道应变分布实验研究

实验中使用瑞士Omnisens公司的DiTeSt STA-R系列BOTDA分析仪,最大检测距离为50 km,应变分辨率为20 $\mu\varepsilon$ 。实验采用的激光脉冲宽度为10 ns,扫描频率分辨率为2 MHz,定位精度为0.2 m。距离光纤输入端11.7 m的位置沿管道底部接入传感光纤,传感光纤在4 m模拟输油管道上沿轴向直线型排布,底部、侧部和顶部中间空置6 m长裸光纤以避免这3个方位数据产生串扰,具体排布图如图5所示。

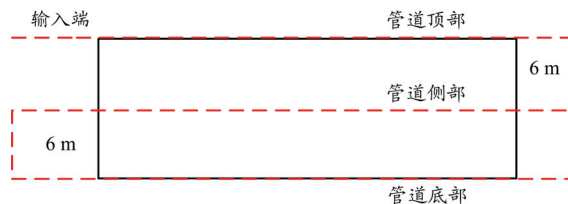


图5 输油管道传感光纤排布图

实验中采用悬吊方式给管道中央(2 m处)模拟施加静态持续荷载100 N,在室温为22℃的情况下,用BOTDA扫描记录数据,并与前文有限元仿真数据(同等条件下)进行对照分析。从图4可知,管道中央有应变集中现象,由于BOTDA的空间分辨率为1 m,施加载荷处的应变集中会导致BOTDA对数据进行采样平均,如果用2 m处仿真数据(法向应变)进行对比,会与实验数据(BOTDA测量的光纤布里渊频移)有较大偏差,因此本文避开应变集中区域,选取了距离管道左端2.5 m处为第一个数据点进行对照分析。

图6为管道顶部法向应变分布曲线和光纤布里渊频移曲线对比图。可以看出,管道顶部两支撑端之间整体为压缩法向应变,管道中央应变集中且从中心朝支撑端方向逐渐减小,趋向于0应变,应变变化趋势仿真与实验一致。距离左支撑端2.5 m处的管道顶部(对应BOTDA监测的光纤接入端13.3 m处)产生了-25.73 MHz布里渊频移,由式(3)可知对应管道负应变为-532.7 $\mu\varepsilon$,此处的法向应变为-1741 $\mu\varepsilon$ 。频移曲线与法向应变分布曲线不同步,原因是距离左支撑端2.5 m处处于施加载荷的管道中心应变集中区域的

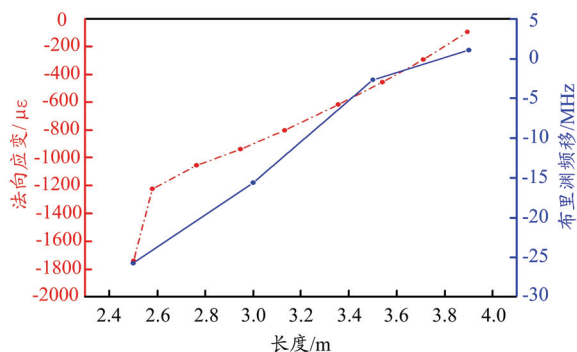


图6 管道顶部法向应变分布曲线和光纤布里渊频移曲线对比图

边缘,且仿真数据是精准采样点,而实验中 BOTDA 测量的数据是 1 m 范围内采样数据的均值,因此仿真与实验存在一定的偏差,但总体变化趋势一致。

图 7 为管道侧部法向应变分布曲线和光纤布里渊频移曲线对比图。可以看出,管道侧部法向应变分布在负应变附近变化,光纤中布里渊散射频率也趋向于稳定,即布里渊频移较小,管道侧部沿轴向方向最大布里渊频移约为 -1.6 MHz,由式(3)可知对应应变为 $-33.1 \mu\epsilon$ 。管道侧部为负应变是由于实验操作定位管道侧部位置不够精准,粘贴的传感光纤位置整体偏上造成的。

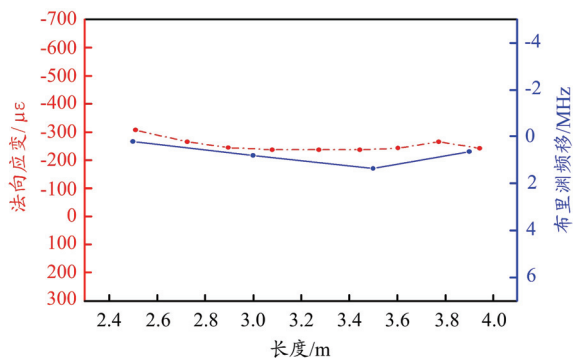


图7 管道侧部法向应变分布曲线和光纤布里渊频移曲线对比图

图 8 为管道底部法向应变分布曲线和光纤布里渊频移曲线对比图。可以看出,管道底部为拉伸法向应变且从中心朝支撑端方向呈现下降趋势,管道应变分布总体呈现先缓慢、后急剧下降趋势。距接入端 2.5 m (对应 BOTDA 仪监测的光纤接入端 32.5 m 处) 处,管道底部产生了 25.19 MHz 布里渊频移,由式(3)可知对应管道应变为 $521.5 \mu\epsilon$,此时的法向应变为 $692 \mu\epsilon$,与实验数据相近。这是由于管道底部不在载荷施力位置附近,不存在应力集中现象,因此管道底部的仿真与实验数据吻合度好。但实验数据偏小,这是因为光纤与管道的粘贴并非刚性连接,存在一定传递损耗造成的。

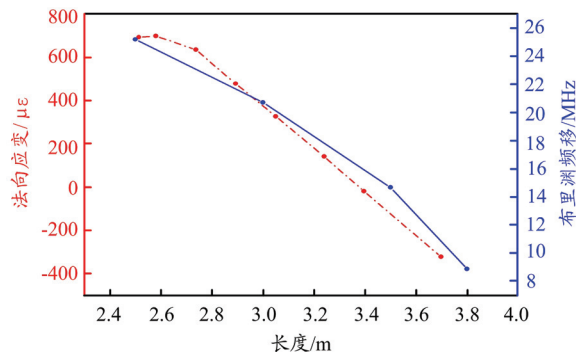


图8 相同载荷条件下管道底部法向应变仿真和光纤布里渊频移图

4 结束语

本文对支吊架结构输油管道应变及光纤布里渊散射进行了仿真与实验研究,对比光纤布里渊频移与应变分布规律可知,施加载荷作用下管道表面顶部产生压缩负应变,侧部不产生应变,底部产生拉伸正应变,实验数据与仿真数据基本吻合。基于仿真和实验结论,排布分布式传感光纤时应避开对应变不敏感的侧部,采用沿输油管道顶部或底部轴向直线铺设方案以获取较高的应变传感灵敏度。

本文的研究可用于根据输油管道形变强度极限阈值设定安全预警,能有效应用于输油管道、油库和油罐车罐体等场所的长期完整性动态检测,这对输油管道建设、实时在线监测输油管道安全运营有应用意义。

参考文献:

- [1] 李福健. 我国油气管道运输发展探析 [J]. 湘潮 (下半月), 2010(1): 60-61.
- [2] MUANENDA Y, TAKI M, PASQUALE F D. Long-range accelerated BOTDA sensor using adaptive linear prediction and cyclic coding[J]. Optics Letters, 2014, 39(18): 5411-5414.
- [3] 尉婷. 基于布里渊光时域分析分布式光纤漏油传感器[J]. 光电子·激光, 2017, 28(5): 492-496.
- [4] DONG Y K, CHEN L, BAO X Y. Time-division multiplexing-based BOTDA over 100 km sensing length[J]. Optics Letters, 2011, 36(2): 277-279.
- [5] 蔡永军, 杨士梅, 李妍, 等. 基于光纤传感的管道线路复杂状态监测技术[J]. 油气储运, 2020, 39(4): 434-440.
- [6] RAAB T, REINSCH T, ALDAZ C, et al. Real-time well-integrity monitoring using fiber-optic distributed acoustic sensing [J]. Spe Journal, 2019, 24: 1997-2009.
- [7] 尉婷. 基于 BOTDA 的分布式光纤漏油传感器[J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 2017, 32(4): 81-85.
- [8] LEUNG C, WAN K, INAUDI D, et al. Review: optical fiber sensors for civil engineering applications [J]. Materials and Structures, 2015, 48(4): 871-906.