

光纤温度传感器在气体管道泄漏监测上的应用

王江伟¹, 王红义¹, 崔 恺¹, 容昭海², 张国强²

(1. 新天绿色能源股份有限公司, 石家庄 050000; 2. 河北省天然气有限责任公司, 石家庄 050000)

摘要: 光纤泄漏监测技术是国际上公认的、有应用前景的长输管道泄漏监测解决方案,但在地理气体管道上尚无明确的有效监测范围。为了测定有效监测范围,采用不同压力的氮气,在直径为 355 mm 的管道上进行了不同位置和不同孔径的泄漏模拟试验。试验结果表明:光纤温度传感器的有效范围受泄漏孔径大小的影响很小,受压力和位置的影响较大,也会间接受到土壤密实度的影响。在实际工程应用时,可根据以上因素的影响,调整光纤温度传感器的布设方案,以提升其监测效果。

关键词: 气体管道; 泄漏监测; 光纤温度传感器; 监测范围; 模拟试验

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2021)07-0019-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.07.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application of optical fiber temperature sensor in gas pipeline leakage monitoring

WANG Jiangwei¹, WANG Hongyi¹, CUI Kai¹, RONG Zhaohai², ZHANG Guoqiang²

(1. Suntain Green Energy Corporation Limited, Shijiazhuang 050000, China;

2. Hebei Natural Gas Company Limited, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Optical fiber leakage monitoring technology is internationally recognized as a promising solution for long-distance pipeline leakage monitoring. However, there is no clear effective monitoring scope for buried gas pipeline. In order to determine the effective monitoring range, the leakage simulation tests with different positions and different apertures are carried out on a 355 mm diameter pipeline with different nitrogen pressures. The test results show that the effective range of the fiber-optic temperature sensor is little affected by the size of the leakage aperture, but is greatly affected by the pressure and position, and is also affected by the soil compactness. In practical engineering application, the layout scheme of optical fiber temperature sensor can be adjusted according to the above factors to improve its monitoring effect.

Key words: gas pipeline; leakage monitoring; optical fiber temperature sensor; monitoring range; simulation test

0 引言

管道运行时,泄漏在线监测系统具有重要的安全预警功能。油气管道泄漏引发的事故不仅会造成巨大的经济损失,甚至会对居民的生命安全带来巨大威胁。美国管道和危险材料安全管理局的数据显示:2010年1月~2018年11月,美国因油气管道泄漏事

收稿日期:2020-09-25。

基金项目:新天绿色能源股份有限公司科技项目(XT-KJ-2020009)资助。

作者简介:王江伟(1986—),男,硕士,工程师,2014年毕业于华北电力大学(北京)机械设计及理论专业,现就职于新天绿色能源股份有限公司生产运营管理中心智能运营部,主要从事新能源及天然气行业的状态监测技术研究工作。



故造成的损失超过 10 亿美元。国内也发生了不少影响恶劣的泄漏事故,例如:2017 年,贵州省黔西南州晴隆县“7·2”中石油输气管道燃烧爆炸事故;2018 年,中石油中缅天然气管道黔西南州晴隆段“6·10”泄漏燃爆事故等^[1-4]。

近年来,国内外许多学者致力于管道泄漏监测技术的研究工作,基于次声波法、流量平衡法、内检法和光纤法等技术的泄漏监测方案应运而生^[3-6]。其中,分布式光纤温度传感器因具有抗电磁干扰、耐腐蚀性强和适用于长距离监测等优点,在地理长输管道泄漏监测方面具有很好的应用前景^[7-9]。目前,基于分布式光纤温度传感技术的泄露监测方案在液体管道和少量气体管道上已有工程试用案例,但由于气体扩散具有

不确定性,在气体管道泄漏监测上的应用尚无明确的有效监测范围。为此,本文对分布式光纤温度传感技术在气体管道监测上的应用进行不同压力、孔径和位置的泄漏模拟试验,以测定其不同工况下的适用性和有效监测范围。

1 分布式光纤温度传感器监测管道泄漏的原理

气体管道发生小孔泄漏属于节流膨胀,根据焦耳-汤姆逊效应,常温常压下多数气体泄漏后的温度会下降,极少数会升高^[6,10-12],且温度变化值取决于气体的初始状态,可以利用温度传感器进行泄露监测。

分布式光纤温度传感器利用后向自发喇曼散射效应和光时域反射原理^[14-15]能够实时连续地监测和定位。激光脉冲在光纤中会产生瑞利、布里渊和喇曼等3种散射^[16-19],其中布里渊和喇曼散射均对温度比较敏感,而基于光时域喇曼散射的分布式光纤温度传感技术相对更加成熟^[20-21]。喇曼散射光中的反斯托克斯(Anti-Stokes)光对温度非常敏感,背向的斯托克斯(Stokes)光随温度变化不明显,通过两者光强的比值即可解调出温度信号,再根据入射光和喇曼散射光的时差定位产生温度变化的位置^[22-23]。

2 分布式光纤温度传感器在不同工况下的适用性测试

2.1 试验测试方案

为真实反映管道的泄漏情况,本次试验采用埋地形式。泄漏试验装置如图1所示,该装置包括直径为355 mm的管道、2.5 mm的连接钢管、氮气瓶组、压力表和阀门等。根据焦耳-汤姆逊效应,在管道埋地环境一定的情况下(即埋地压力和土壤密实度相同),气体泄漏后的温度变化取决于泄漏前的压力和温度。因此,只要保证气体泄漏前的压力和温度达到相同的试验条件,泄漏孔无论是设置在连接钢管上还是直接设置在试验管道上,泄漏后的温度变化效果是一样的。

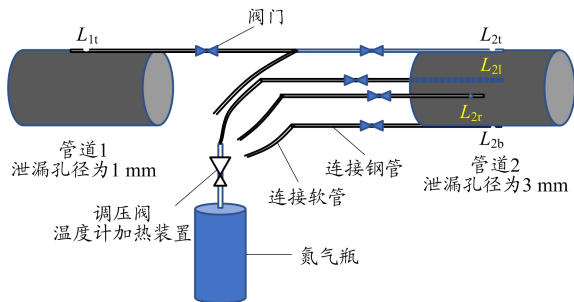


图1 试验装置连接示意图

为减少用气量,本试验的泄漏孔均设置在连接钢管上,并通过连接软管与氮气瓶组相连。管道1的顶部为1 mm泄漏孔,记为 L_{1t} ;管道2的顶部、底部和两侧均为3 mm泄漏孔,分别记为 L_{2t} 、 L_{2l} 、 L_{2r} 和 L_{2b} 。为便于回填后对各泄漏点进行单独控制,试验采用连接管的形式进行泄漏模拟。

本次试验中,分布式光纤温度传感器采用LS-FOS-RMS型分布式光纤测温系统,其温度精度为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度分辨率为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,空间分辨率为0.5 m,光纤型号为DTS-1000,其布置示意图如图2所示。在试验管道的上、下、左、右且距离管道表面0.05 m的4个位置分别设置光缆 F_{1t} 、 F_{1b} 、 F_{1l} 和 F_{1r} ;距离管道表面0.15 m、0.25 m、0.35 m和0.5 m处分别设置光缆 F_{2t} 、 F_{3t} 、 F_{4t} 和 F_{5t} 。现场采用单根光缆S形敷设,并分段进行标记。为了与实际温度变化进行对比,本文在管道2的周围布置有24个K型热电偶测点,如图3所示。

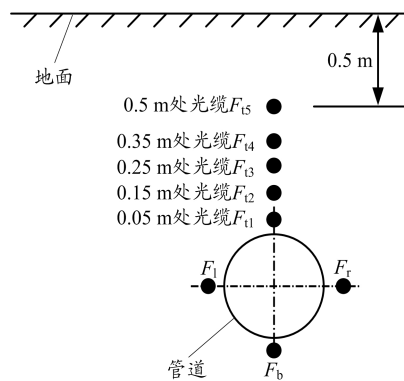


图2 分布式光纤温度传感器布置示意图

试验气体采用与环境温度相近的氮气,通过加热和冷却装置控制其温度。每次泄漏持续时间为10 min左右,试验压力和泄漏位置如表1所示。

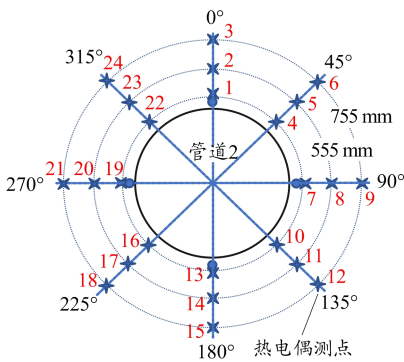


图3 热电偶测点位置及编号

2.2 试验数据分析

2.2.1 不同泄漏孔径对监测效果的影响

本文对第一次泄漏数据进行分析,在0.5 MPa的压力下 L_{1t} 和 L_{2t} 同时泄漏时,分布式光纤温度传感器的温度变化曲线如图4所示。可以看出,由于36 m前的光缆始终在空气中,泄漏前后的温度基本一致;而在70 m前后,泄漏后的温度较泄漏前明显降低,试验光缆70 m前后的位置对应管道泄漏的位置。

试验光缆的70 m前后,正好位于管道1和管道2泄漏孔上方的0.05 m处,其温度随时间的变化曲线如

表 1 试验压力和位置对照表

试验序号	试验压力/MPa	泄漏位置
1	0.5	L_{1t}, L_{2t}
2	0.2	L_{2b}
3	0.2	L_{2t}
4	0.2	L_{2r}
5	0.2	L_{1t}, L_{2t}
6	0.3	L_{1t}, L_{2t}
7	0.3	L_{2b}

图 5 所示,0 s 为开始泄漏的时间。可以看出,2 处光纤的温度变化基本一致,泄漏开始后,光纤所测温度开始降低,大约 840 s 达到最低值,泄漏前、后温度降低 4.5 °C 左右。这说明初始条件相同的情况下,不同的泄漏孔径引起的温度变化值基本相同(即不同的泄漏孔径对光纤监测效果的影响较小);而其它位置的光纤几乎监测不到温度变化。因此,此条件下仅有靠近泄漏孔处的光纤才是有效的,即单根光纤仅能对附近的泄漏进行有效监测。

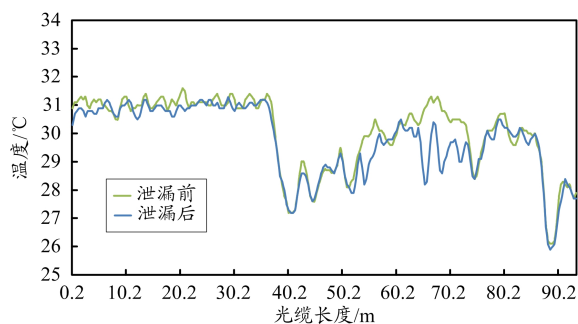


图 4 第一次泄漏前后光缆的温度变化

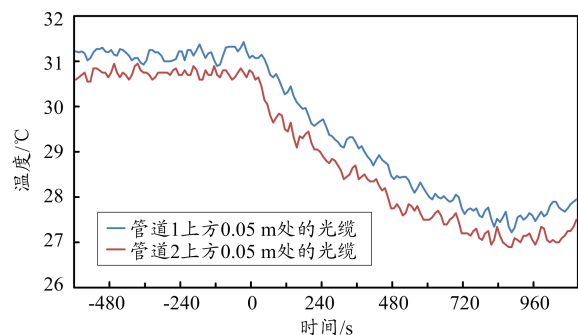


图 5 管道上方 0.05 m 处光缆的温度变化

2.2.2 分布式光纤温度传感器与热电偶的对比

在 0.5 MPa 的压力下,热电偶 1 随泄漏时间的温度变化如图 6 所示。与图 5 对比,可以看出热电偶与光纤温度传感器的温度变化趋势一致,热电偶的温度变化更快,温度降低了约 19 °C,比分布式光纤温度传感器降低了 15 °C 左右。分析表明,造成温度变化差异大的主要原因是分布式光纤温度传感器的准确性受到了其空间分辨率的限制。空间分辨率是分布式光纤温度传感器沿其长度方向上所能准确测量的最小单

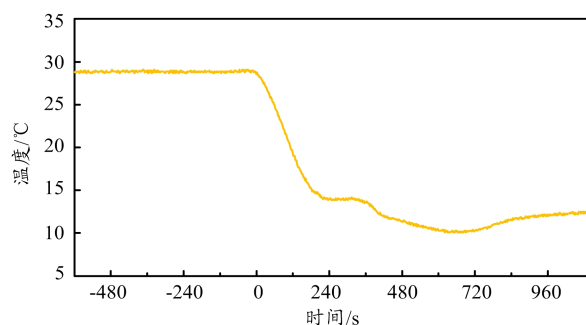


图 6 热电偶 1 的温度变化曲线

元^[23],当光缆上的温度变化范围小于其空间分辨率时,测得的温差值会比实际温差小。由于试验条件所限,短时间泄漏所引起的温度变化范围小于分布式光纤温度传感器的空间分辨率,造成其测得的温差比实际小 15 °C。如果泄漏持续进行,所引起的温度变化范围也会逐步扩大,当超过传感器的空间分辨率时,这种差异就会变得很小。

2.2.3 不同压力和位置对监测效果的影响

在 0.2 MPa 和 0.3 MPa 的压力下,由于试验压力较小,泄漏引起的温度变化值也更小,而温度变化范围同样小于分布式光纤温度传感器的空间分辨率,此时光纤所测得的温度变化已经很不明显,这说明该试验条件下,光纤温度传感器已不能对管道泄漏进行有效监测,即试验条件下,光纤对压力低于 0.3 MPa 的氮气泄漏监测是无效的。

在实际工程中,管道泄漏在未发现之前是会持续进行的,所引起的温度变化范围也会逐渐扩大。由 2.2.2 节内容分析可知,当泄漏引起的温度变化范围在长度方向上超过分布式光纤温度传感器的空间分辨率时,光纤与热电偶所测的温度值将会趋于一致。此情况下,分布式光纤温度传感器的泄漏监测效果可用热电偶的数据进行等效分析。

在 0.2 MPa 的压力下,管道 2 顶部、底部和两侧泄漏时,对应热电偶所测的温度变化曲线如图 7 所示。可以看出,顶部泄露时温度最大降低了 17 °C,底部泄漏时温度只降低了 7 °C,两侧泄漏时温度分别降低了 13 °C 和 14 °C,这说明相同压力和孔径、不同的泄漏位置也会对泄漏引起的温度变化产生较大影响,且埋深越深,温度变化越小。不同的埋深,土壤的压力和密度也不相同,会影响气体泄漏前、后的压力差,从而影响泄漏前、后的温度差。此外,土壤密度也会通过影响泄漏气体的扩散,间接影响分布式光纤温度传感器监测的有效范围。

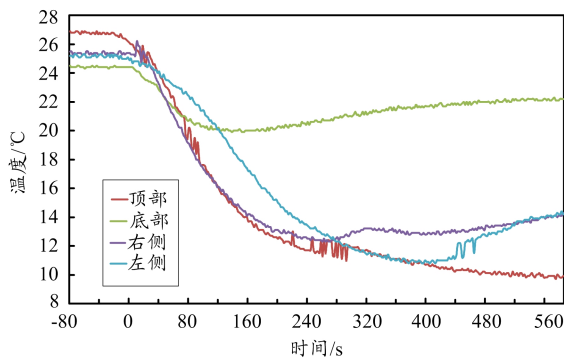


图 7 管道 2 不同位置泄露时的温度变化曲线

3 结束语

本文对分布式光纤温度传感器在气体管道泄漏监测上的应用进行了模拟测试。试验结果表明:现有的分布式光纤温度传感系统可有效用于气体管道的泄漏监测,但针对微小泄漏情况,其适用范围存在局限性,特定位置的光缆只能对附近很小范围的泄漏进行有效监测;而且,当泄漏气体沿光纤长度方向的分布范围小于传感器的空间分辨率时,光纤测温结果的准确性极大降低,严重影响泄漏监测的效果。

通过试验数据分析,本文研究了不同压力、泄漏孔径和泄漏位置对其有效性的影响。研究结果表明:压力越大,气体泄漏后的温度越低,越有利于泄漏的监测;泄漏孔径的大小不影响气体泄漏后的温度,但会影响气体泄漏量和扩散范围,间接影响监测效果,孔径越大越利于监测;不同的泄漏位置,由于环境压力不同,会影响气体泄漏后的温度和扩散,泄漏位置越低,气体泄漏前后的温度变化越小,越不利于泄漏的监测。

在实际工程应用时,可根据具体的监测对象,结合气体管道泄漏的风险评估和文章结论,进一步完善传感器的布设方案。例如:对于小管径的天然气管道,可以在管道顶部敷设一条测温光纤;对于大管径的天然气管道,尤其是在高风险区,就要根据单根光纤的有效监测范围,在顶部两侧适当增加光纤数量,或者考虑沿管道长度方向、在分布式光纤温度传感器的上方,增加一种用于收集泄漏气体的“集气装置”,在空间分辨率一定的条件下,通过改变测量环境来提高系统的监测效果。分布式光纤温度传感器在气体管道泄漏监测方面的应用前景广阔,但其空间分辨率还有待提高,科研单位和厂家可致力于该方面的技术与突破。

参考文献:

- [1] 季军,钟成,郝永梅,等.基于谐波小波分析的城市燃气管道泄漏检测[J].中国科技信息,2019(Z1):105-107.
- [2] 赵健,朱莎露,潘建宇,等.分布式光纤温度传感器在油库中的应用[J].光通信技术,2015,39(4):42-43.
- [3] 王洋.天然气管道泄漏及其检测方法研究[J].科技与企业,2015(16):92-92.
- [4] 别沁,郑云萍,付敏,等.国内外油气输送管道泄漏检测技术及发展趋势[J].石油工程建设,2007(3):19-23,6.
- [5] 周兆明,帐佳,杨克龙,等.输气管道泄漏检测技术发展及适应性[J].油气田地面工程,2019,38(1):7-12.
- [6] 王江伟,王红义.天然气管道泄漏对周围土壤温度的影响[J].石油工程建设,2020,46(2):5-8.
- [7] 佟敬阔,靳宝全,王东,等.面向管道安全监测的 R-OTDR 分布式光纤测温系统[J].传感技术学报,2018,31(1):158-162.
- [8] 葛惠,赵健,朱莎露,等.分布式光纤喇曼温度传感器的研究和应用进展[J].光通信技术,2014,38(11):5-7.
- [9] 周广丽,鄂书林,邓文渊.光纤温度传感器的研究和应用[J].光通信技术,2007,31(6):54-57.
- [10] 天津大学物理化学教研室.物理化学.上册[M].第四版.北京:高等教育出版社,1979:88-91.
- [11] 胡新根,林娟娟.气体节流膨胀过程的热力学分析[J].大学化学,2015,30(4):74-77.
- [12] 陈良坦.绝热膨胀与节流膨胀的比较[J].大学化学,2011,26(3):30-32.
- [13] 白亮,张红娟,高妍,等.基于时分复用的长距离 R-OTDR 分布式光纤测温系统[J].仪表技术与传感器,2019(10):61-65.
- [14] CULSHAW B, KERSEY A. Fiber-optic sensing: a historical perspective[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(9): 1064-1078.
- [15] DAKIN J P, PRATT D J, BIBBY G W, et al. Distributed optical fibre Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector[J]. Electronics Letters, 1985, 21(13): 569-570.
- [16] 黄军芬,黄民双,冯音琦,等.基于 BOTDA 技术的分布式光纤温度传感试验系统[J].仪表技术与传感器,2011(2):6-8.
- [17] 徐中翔,刘南生,张华.光纤温度传感器原理及应用[J].南昌大学学报(工科版),2004(4):9-14.
- [18] 王春丽,张春蕾.分布式光纤温度传感系统测温精度的提高[J].光通信技术,2014,38(11):8-10.
- [19] 李赢,杨松伟,章建欢,等.基于分布式光纤测温的干式空心电抗器温升监测方法的研究[J].仪表技术与传感器,2017(2):43-46,50.
- [20] 汪建科,何俊发,王红霞,等.分布式光纤温度传感器的研究现状与发展趋势[J].光机电信息,2005(7):19-24.
- [21] 翟延忠,赵玉明,许舒荣,等.分布式光纤测温系统[J].仪表技术与传感器,2007(9):36-38.
- [22] 韩博,周越文,郭学玲,等.基于光纤温度传感器的分布式温度测量系统设计[J].测控技术,2016,35(9):20-24.
- [23] 徐瀚立.分布式光纤温度传感器空间分辨率对测温精度的影响研究[D].杭州:中国计量学院,2014.