Research of Distributed Optical Fiber Brillouin Scattering Oil Leakage Sensor on EPDM Substrate*

WEI Ting*, WU Bingbing, LIU Yinggang, LUO Jun, LUO Xiaodong
(MOE Key Laboratory of Optoelectronic Oil and Gas Logging and Detection, Xi'an Shaanxi 710065, China)

Abstract: An EPDM-based distributed optical fiber Brillouin scattering oil leakage sensor based on Brillouin optical time-domain analysis (BOTDA) is developed, which can accurately detect and locate small-scale oil leakage with high sensitivity and reusability. The optical fiber is embedded in EPDM and laid along the oil tank under the pipeline, and optical fiber Brillouin scattering frequency is monitored in real time by BOTDA. The results of the oil leakage experiment show that the frequency response sensitivity with time is 2.5 MHz/min, and the oil leakage can be accurately located in 1 m and detected within 2 minutes, and the oil leakage sensor can be used repeatedly indicating show that the technology is feasible and can be used in long-distance oil pipelines, oil depots and other places that need long-term dynamic real-time nondestructive oil leakage monitoring.

Key words: optical fiber Brillouin scattering; distributed oil sensitive fiber sensor; oil leakage sensing; EPDM; BOTDA
EEACC: 7230 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2025.02.023

三元乙丙橡胶基底分布式光纤布里渊散射漏油传感器的研究*

尉 婷*, 吴冰冰, 刘颖刚, 罗 俊, 罗小东
(西安石油大学光电油气测井与检测教育部重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘 要: 研制了一种基于 BOTDA 技术的三元乙丙橡胶基底的分布式光纤布里渊散射油敏传感器, 可在分钟量级精准检测并定位小规模漏油事件, 灵敏度高, 可重复使用。将三元乙丙橡胶(EPDM)基底的油敏传感器沿模拟输油管线下方油槽内铺设, 用布里渊光时域分析仪(BOTDA)实时监测浸油后传感光纤中布里渊散射频移, 测试数据表明布里渊散射频率随时间响应灵敏度为 2.5 MHz/min, 可在 2 min 内发现并定位漏油事件, 空间分辨率为 1 m, 漏油传感器可重复使用。实验证明该油敏传感器在长距离输油管线、油库等需长期分布式实时漏油监测的应用具有可行性。

关键词: 光纤布里渊散射; 分布式光纤油敏传感器; 漏油传感; 三元乙丙橡胶; BOTDA
中图分类号: TN29; TP212.9 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2025)02-0368-05

管道运输是解决石油资源地理分布不均衡的最佳手段, 石油及石油类产品的存储和长距离油气管道运输中漏油是需要实时长期检测的事件, 迅速检测到漏油事件并准确确定泄漏的位置, 具有十分重要的现实意义。输油管线漏油检测的方法主要有热红外成像法和漏噪声探测法等[1], 但是上述方法都有反应不太灵敏、检测漏油位置不准确、响应时间长、抗干扰性差、只适用于较大油气管道漏油等缺点。布里渊光时域分析仪(BOTDA)是基于光时域反射(OTDR)和受激布里渊散射(SBS)效应的分布式光纤检测法[2-8], 具有可监测距离长、精度高等优势, 受到研究人员的极大关注。基于 BOTDA 技术的分布式光纤捡漏法可实现全光分布式测量, 光纤既是传输媒介又是传感器, 可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, 准确定位参数发生变化位置, 检测小规模漏油, 实现全分布式远程监控, 有利于降低成本提高经济效益, 非常适用于环境恶劣的场所中长期监测。

本研究将传感光纤通过偶联工艺埋敷于研制的三元乙丙橡胶(EPDM)油敏传感模型中, 浸入原油后, 由于三元乙丙橡胶对石油类碳氢化合物有融胀反应, 产生膨胀, 通过特殊的偶联技术将形变应变高效地传递到传感光纤, 引起光纤中布里渊散射频率蓝移, 采用 BOTDA 仪检测光纤布里渊频移可快速精准定位是否发生泄漏及泄漏地点等分布情况, 实现实时无损漏油检测, 具有安装简单、灵敏度高、抗

项目来源: 国家"863"计划资助项目(2009AA06Z203); 教育部科技创新工程重大项目培育资金项目(708087); 陕西省"13115"科技创新工程重大科技专项项目(2009ZDKG-42); 陕西省自然科学基础研究计划项目(2012JQ8015); 陕西省省级大学生创新创业训练计划项目(S202110705130)
收稿日期: 2022-06-06 **修改日期**: 2022-10-08

干扰能力强等特点,适用于监测长距离输油管线、油气储存罐、油库等需要分布式智能化的永久在线健康监测的场所。

1　分布式光纤布里渊散射漏油传感原理

1.1　分布式光纤布里渊散射

布里渊散射是光波与声波在光纤中传播时相互作用而产生的光非弹性散射过程。在 BOTDA 技术采用双端输入,一端输入泵浦光,一端输入探测光。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就会在该区域发生布里渊放大效应,两光束之间发生能量转移[9]。同时根据散射信号返回时间对布里渊频移发生区域进行定位,从而得到沿着光纤的布里渊频移图。

布里渊频移为[10]:

$$\upsilon_B = 2nV_a/\lambda_0 \tag{1}$$

式中:υ_B 为布里渊频移,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。

布里渊频移 υ_B 与光纤中声速 V_a 有关,而声速受光纤材料的热光特性和弹光特性影响,所以光纤中的温度和应变的变化都会引起布里渊频移的变化。光纤中的声速:

$$V_a = \sqrt{\frac{(1-k)E}{(1+k)(1-2k)\rho}} \tag{2}$$

式中:E 为杨氏弹性模量,k 为泊松比,ρ 为光纤纤芯密度。

将式(2)代入式(1)得:

$$\upsilon_B = \frac{2n(T,\varepsilon)}{\lambda_0}\sqrt{\frac{[1-k(T,\varepsilon)]E(T,\varepsilon)}{[1+k(T,\varepsilon)][1-2k(T,\varepsilon)]\rho(T,\varepsilon)}} \tag{3}$$

由于折射率 n、弹性模量 E、泊松比 k、密度 ρ 均为温度和应变的函数,当光纤的温度、应变改变时,布里渊散射频率 υ_B 也发生相应的变化,从而可实现对温度、应变的测量。

布里渊散射频移的改变量为:

$$\Delta\upsilon_B = C_{\upsilon,T}\Delta T + C_{\upsilon,\varepsilon}\Delta\varepsilon \tag{4}$$

式中:$\Delta\upsilon_B$ 为布里渊散射频移改变量,$C_{\upsilon T}$ 和 $C_{\upsilon\varepsilon}$ 分别为布里渊频移量随温度和应力变化系数。当光波长为 1 550 nm,单模裸石英光纤在常温及无应变情况下的布里渊频移为 11.2 GHz。

1.2　油敏传感器漏油传感原理

保持温度恒定的情况下,布里渊频移随应变变化如下式所示:

$$\Delta\upsilon_B = C_{\upsilon,\varepsilon}\Delta\varepsilon \tag{5}$$

式中:$\Delta\varepsilon$ 为裸光纤应变,$C_{\upsilon,\varepsilon} = (0.048\ 3 \pm 0.000\ 4)$ MHz/με,为布里渊频移的应变系数,从式(5)可以看出,温度保持不变时,布里渊频移的变化量与应变呈线性关系。

将光纤封装于油敏基底材料,当油敏材料接触油品发生膨胀产生形变应变并通过偶联工艺把应变传递给传感光纤时,式(5)变为:

$$\Delta\upsilon_B = C_{\upsilon,\varepsilon}\eta\Delta\varepsilon_z \tag{6}$$

式中:$\Delta\varepsilon_z$ 为基底材料的浸油膨胀形变应变,η 是传感光纤与油敏材料偶联质量有关的常数。若应力传递系数 $\eta = 100\%$,油敏材料浸油膨胀应变 1 με 将无损耗地传递给传感光纤,所引起的布里渊频移变化约为 0.048 3 MHz。

2　分布式光纤布里渊散射漏油传感实验研究

2.1　三元乙丙橡胶浸油实验研究

油敏材料封装的光纤布里渊散射漏油传感器是通过油敏材料与油品接触后发生膨胀从而产生应变,通过无损耗粘贴将基底材料膨胀产生的应变传递给传感光纤。基于漏油检测的需求,油敏基底材料需具备油浸后反应快、油浸膨胀系数高的特性。且油气管线的传感光缆均于地埋式管线周边铺设,维护和更换需要消耗大量人力物力,因此要求高稳定性、抗干扰、耐久性好、成本低易加工和重复性好等特性。同时考虑到油品为饱和烃,根据相似相容原理对高分子聚合物材料进行筛选比较后,采用三元乙丙橡胶作为光纤漏油传感器的基底油敏材料[11-12]。研究资料表明,该聚合物材料主链是由化学稳定的饱和烃组成,对油类分子具有良好的吸附作用、疏水性能、延展性、耐老化性、耐腐蚀性和电绝缘性能优越,120 ℃以下可长期使用。

实验测量了 80 min 内长度 785 mm、半径 8 mm 的长条状油敏基底材料随浸油时间的伸长量变化,每 2 min 测量一次基底材料浸油后长度变化。实验显示油敏材料吸油后其膨胀量随时间呈非线性变化,但在前 20 min 内线性度高,油敏材料膨胀率测试曲线如图 1 所示。

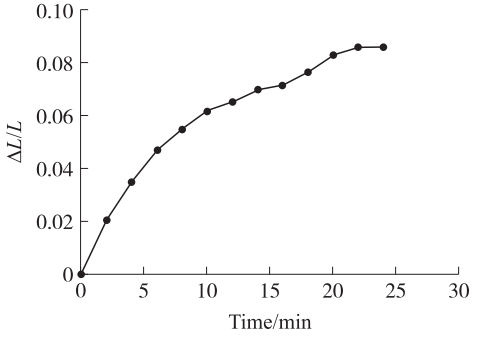

图 1　785 mm 三元乙丙橡胶基底材料浸油膨胀率测试

从图 1 中可看出,油敏材料 2 min 时有较大的膨胀率,可快速检测漏油事件,2 min 到 20 min 之间油敏材料膨胀量随时间线性增加,20 min 后油敏材料吸油量达到饱和。对于一维膨胀试验,实验测定沿长度方向三元乙丙橡胶材料浸油膨胀应变 $\varepsilon_z=\Delta L/L$,式中,L 为试样长度,ΔL 为试样的膨胀量,由图可知,2 min~20 min 内随时间的膨胀率为 3.1%/min,线性度为 0.93,2 min 内有较大膨胀应变,符合输油管线漏油检测快速实时在线的需求。

实验测试表明,三元乙丙橡胶材料对石油具有良好的融胀性,且油敏材料通过油品蒸发基本可自修复,因此用该材料封装的油敏传感器可重复使用。

2.2 油敏传感器的偶联封装工艺及漏油传感原理

输油管线漏油检测要求油敏光纤传感器吸油膨胀后能迅速使光纤产生应变并实时定位。分布式光纤布里渊散射油敏传感器模型为长度 3 600 mm 直径 8 mm 的圆柱体,为了增加油敏材料与油品的接触面积,外表面均设计为凹槽刻痕,可增大与油品接触面积,从而提高传感响应速度。用特种胶将芯径 6.57 μm 的标准单模光纤嵌入油敏材料中,如图 2 所示,粘贴固化过程中持续稳定给光纤两端施加一定预应力,以减少初始测量误差。

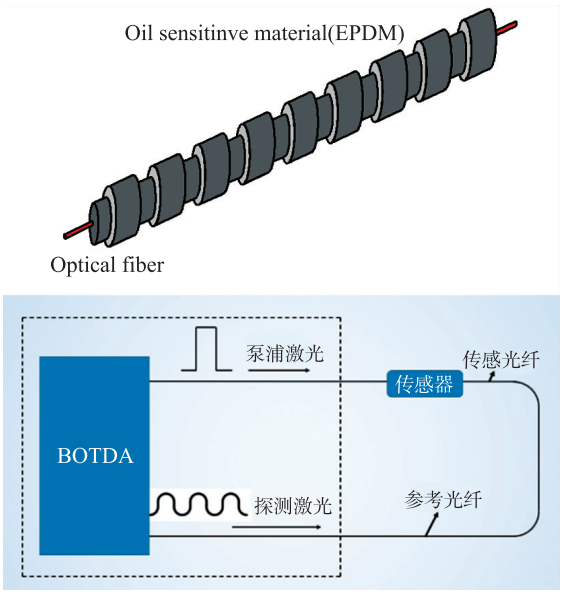

图 2 三元乙丙橡胶基底分布式光纤布里渊散射漏油传感系统

偶联工艺:实验研究中发现,由于常规粘贴工艺固化过程中收缩率不均匀导致传感光纤应力分布随机起伏,油敏材料浸油膨胀应变传递也相应会产生非线性,对 BOTDA 监测油敏传感器的布里渊频率带来随机误差。本文采用在传感光纤涂覆偶联剂进行工艺改善,机理为通过偶联剂分子一端的化学键进入三元乙丙橡胶材料大分子中,另一端与二氧化硅形成较强的硅氧键,在光纤材料和三元乙丙橡胶材料基体之间形成一个牢固的化学键界面层,可起到缓冲应力并牢固粘贴的作用。实验证实全粘贴方式漏油传感器的应力传递效率高、性能稳定。

浸油实验中,三元乙丙橡胶油敏材料吸收油品膨胀形变,通过牢固的偶联将膨胀产生的拉伸应力传递给嵌入其中的传感光纤,使光纤产生相应拉伸应变,光纤布里渊散射频率会发生相应变化,通过监测光纤布里渊散射频移规律实现实时在线漏油检测。

2.3 油敏传感器漏油实验分析

实验使用瑞士 Omnisens 公司的 DiTeSt STA-R 系列 BOTDA,最大检测距离为 50 km,应变测量分辨率为 20 με,激光器发出脉冲宽度为 10 ns 的激光,扫描频率为 2 MHz,定位精度为 0.2 m。室温 20 ℃下,在 3 km 的传感光纤上排布漏油传感器和对照裸光纤,在距离传感端 20 m 处接入一段施加同等预应力未封装的 3.6 m 对照裸光纤,30 m 处接入 3.6 m 的三元乙丙橡胶基底分布式光纤布里渊散射漏油传感器。将研制的三元乙丙橡胶基底的分布式光纤布里渊散射漏油传感器浸泡在原油中,采集数据时间间隔为 2 min 左右,由 BOTDA 完成一次完整扫描结束的时间间隔为采样间隔。由图 1 可知,三元乙丙橡胶油敏材料吸油膨胀 20 min 内有较好的线性度。由于实验过程仅持续 20 min,可认为环境温度稳定不变。BOTDA 20 min 内测量漏油传感器中光纤布里渊散射频率随时间响应如图 3 所示。

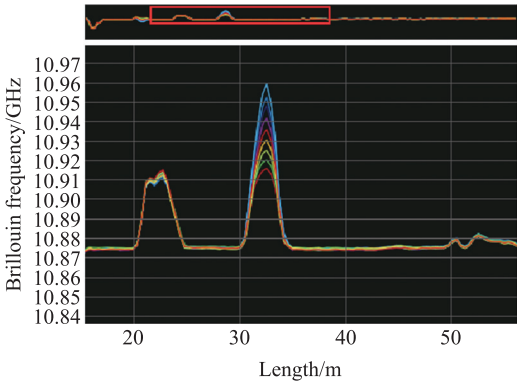

图 3 三元乙丙橡胶基底油敏传感光纤浸油测试

提取浸油的光纤布里渊散射漏油传感器(32.51 m处)和裸光纤中段(23.74 m 处)最稳定的实验数据点进行线性拟合分析,可得光纤漏油传感器频率时间响应灵敏度为 2.5 MHz/min;裸光纤频率时间响应灵敏度为 0.05 MHz/min,远远小于 BOTDA 2 MHz 的扫描分辨率,可以忽略不计,数据拟合曲线

如图 4 所示。

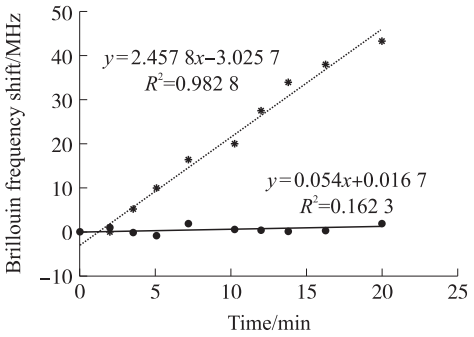

图 4　三元乙丙橡胶基底油敏光纤对比裸光纤布里渊频移时间响应曲线

实验可知油敏材料接触油品前 2 min 膨胀率较高,加上制作传感器预置预应力、粘贴工艺等因素导致 0~2 min 数据具有不稳定因素,可用于快速判定是否漏油,但由于偶然性较大,绘制线性拟合曲线时将其剔除。另外,在 22 min 测得的数据为 10 959.93 MHz,明显偏离数据趋势线,将其剔除,且 25 min 测试时布里渊散射频率已回落,通过检查实验线路发现因油敏材料与光纤弹性模量等力学参量差距过大,导致少许光纤从油敏材料中脱离,因此剔除 22 min 后的实验数据。综上分析可得 2 min~20 min 内漏油传感器布里渊频移随时间持续线性增加,光纤布里渊频移随时间响应灵敏度为 2.5 MHz/min,拟合曲线线性度为 0.98。

参考三元乙丙橡胶材料浸油膨胀实验 20 min 内吸油膨胀量随时间呈线性变化,漏油检测实验选取了传感器和裸光纤浸油后 20 min 数据进行线性拟合分析,如图 4 所示,从图中可得,三元乙丙橡胶基底光纤布里渊散射漏油传感器布里渊散射频率随时间响应灵敏度为 2.5 MHz/min,2 min~20 min 内布里渊频移总量为 43.26 MHz,对比频移应力系数 $C_{\nu,\varepsilon}$,浸油 20 min 油敏传感器传感光纤中产生应变量为 895.7 με。由图 1 可算出三元乙丙橡胶基底材料浸油后膨胀率为 3.1%/min,对应轴向膨胀传递到传感光纤上的应变随时间响应灵敏度为 3.1×10^3 με/min,故浸油后 18 min 内基底材料轴向应变为 55 800 με。该油敏材料浸油膨胀通过偶联工艺和全粘贴将应变 ε 传递至传感光纤,对比理论数据可得油敏基底材料应力传递系数约为 1.6%,相比文献报道的应力传递系数(约为 5%)低[12]。分析认为由于三元乙丙橡胶浸油后弹性模量远大于裸光纤的,因此材料吸油膨胀应变不能完全传递给传感光纤。

由图 3 可看出实验中采用了新型偶联工艺封装后,油敏传感器光纤布里渊频率测试曲线光滑平坦,证实了采用偶联工艺桥接三元乙丙橡胶油敏材料与裸光纤改善了应力不均匀现象。同时,由图 3 和图 4 可得,裸光纤(3.6 m)浸油实验过程中,光纤中布里渊散射频移量小于 BOTDA 扫描频率分辨率 2 MHz,因此裸光纤对油品完全不敏感。

实验中,将三元乙丙橡胶基底的分布式光纤布里渊散射漏油传感器放置在空气中晾干后,同一实验条件下进行两次重复实验,三次实验中漏油传感器接触油品的前 20 min 内布里渊散射频率均呈线性变化,光纤布里渊频移随时间响应灵敏度为同一数量级,分别为 2.5 MHz/min,2.1 MHz/min,3.2 MHz/min。测试结果表明,三元乙丙橡胶基底的漏油传感器接触油品后,油品晾干即可恢复漏油检测功能,可重复使用,大大降低了维修和更换成本。实验证明以该材料制作漏油传感器可检测并定位小规模漏油事件。

实验中环境温度保持在 20 ℃,由于长距离输油管线外部环境温度变化较缓慢,且环境温度升降会造成全线传感区域内布里渊散射频率整体红移或蓝移,实验显示油敏光纤布里渊散射传感器在接触油品 2 min 内,即可通过 BOTDA 检测到,传感线路集中在该部位的布里渊散射频率产生了 12.47 MHz 频移,由此规律可排除环境温度影响,准确快速判定 BOTDA 检测到的布里渊散射频率移动是否漏油事件。

3　结论

综上,本文研究了三元乙丙橡胶油敏材料基底的分布式光纤布里渊散射漏油传感器,理论分析和漏油实验均证明该传感器具有高的漏油检测灵敏度和定位精度、可重复使用等优势,可检测到分钟量级的小范围漏油,空间分辨率为 1 m,传感检测距离为 50 km,该技术为输油管线的断裂、腐蚀等造成的泄露事故的检测开辟新的道路,提供新的测试手段,对保障输油管道安全生产运营具有重大经济价值和社会意义,有望成为监测定位漏油事件的新型实用技术。

参考文献:

[1]　王忠东,闫铁,王宝辉. 分布光纤式输油管道安全监测预警系统[J]. 微计算机信息,2008,24(11):58-60.

[2]　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.

[3]　蒋朋,闫连山,周银,等. 格雷编码布里渊光时域分析传感器中偏振随机噪声影响及其抑制方法[J]. 光学学报,2020,40(7):14-20.

[4] 蔡戚斌,张家洪,赵振刚. 基于双对称受激布里渊散射效应的瞬时微波频率测量分析[J]. 激光与光电子学进展,2021,58(9):148-154.

[5] Sfar Zaoui, Lauber W, Pohl T, et al. Machine-Learning Distributed-Temperature-Sensing-Based Pipeline Leak Detection[C]//2020 Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, 2020: SPE-202905-MS.

[6] Sanchez L A, Diez A, Cruz J L, et al. Strain and Temperature Measurement Discrimination with Forward Brillouin Scattering in Optical Fibers[J]. Optics Express, 2022, 30(9): 14384-14392.

[7] 刘昕,应启瑞,张建国,等. 基于光纤传感检测的矿井人员定位方法[J]. 2018,31(9):1325-1330.

[8] Wu Q, Nair S, van Oort E, et al. Concurrent Real-Time Distributed Fiber Optic Sensing of Casing Deformation and Cement Integrity Loss[C]//The 2019 SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition, Hague, Netherlands, 2019: SPE-194159-MS.

[9] Agrawal G P. 非线性光纤光学应用[M]. 贾东方,余震虹,谈斌,等译. 第 3 版. 北京:电子工业出版社,2002:222-240.

[10] 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.

[11] 王贝贝,周坤,肖建斌. 吸油膨胀橡胶的制备及其性能研究[J]. 青岛科技大学学报,2011,32(2):154-158.

[12] 陈培,邹华,张立群,等. 吸油膨胀橡胶复合材料研究进展[J]. 特种橡胶制品,2010,31(5):61-65.

尉 婷(1974—),女,副教授,毕业于西安光学精密机械研究所,获博士学位。主要从事光纤传感与检测等研究工作,主持陕西省自然科学基础研究、陕西省教育厅自然科学研究等计划项目,参加陕西省科技攻关、陕西省科技厅、陕西省教育厅重点实验室项目、陕西省自然科学基础研究计划等十余项科研项目。发表科研论文 20 余篇,yolandeweiting@sohu.com。