

基于光纤拉曼测温的腐蚀性酸溶液渗漏检测技术研究

冯维一^{1,2}, 刘礼华^{1*}, 张旭莘², 赵霞¹, 黄晓炜¹, 于春涵³

1. 法尔胜泓昇集团有限公司, 江苏 无锡 214433
2. 南京大学材料与工程博士后流动站, 江苏 南京 210008
3. 江阴爱科森博顿聚合体有限公司, 江苏 无锡 214446

摘要 分布式光纤温度传感系统(distributed temperature sensing, DTS)是基于拉曼光谱对温度敏感的效应,可以实现长距离分布式温度监测,特别适用于火灾报警、高温液体泄漏和低温气体泄漏等应用场景。但对于常温介质,如化工管道中输送的强腐蚀性溶液,因管道腐蚀发生渗漏时,渗漏介质温度与周围环境温度没有太大差别,此时采用DTS测温技术很难识别渗漏事件的发生。为解决常温下强酸溶液管道或储罐渗漏检测的问题,提出了一种基于光纤传感的酸溶液介质渗漏监测技术。设计了一种新颖的酸溶液自感知特种光缆结构,与泄漏电缆相比,不需要消耗电能,不容易发生误报,精准定位、敷设简单,可实现管道全线多点泄漏检测。光缆外护套材质采用耐碱不耐酸的特殊材料,由尼龙、氢氧化镁、氢氧化铝和少量色母粒组成,能够被一定质量分数的酸溶液迅速溶解,与泄漏点处的酸溶液发生化学中和反应并放热,从而引发感测光纤中后向散射的拉曼光谱发生变化,使感测光缆的温度能够升高5℃以上。传感光缆连接DTS系统,系统采用基于反斯托克斯光和斯托克斯光双路解调方法,能够精确计算出传感光纤中各个位置处的温度值。因此,当特种光缆与管道同沟敷设后,某一位置若发生酸溶液渗漏,引起该位置上的光缆温度升高,根据色散补偿和温度校准后的反斯托克斯光和斯托克斯光的比值变化就可以判断出是否发生酸液渗漏事件。该技术不仅能解决酸溶液运输和存储过程中渗漏监测报警的工程化应用问题,而且不受弱酸或碱溶液的误报干扰,节能环保,能够精准检测出强腐蚀性酸溶液渗漏事件,提升危化品的数字智能化安全监测水平。

关键词 渗漏检测; 光纤传感; 危化品; 应急管理

中图分类号: U178 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)11-3425-05

引言

随着市场竞争的日益激烈以及安全管理体制调整等因素的影响,化工行业的安全隐患和压力日益增大。化工企业和生物制药企业的管道输送介质多数都是强腐蚀性物质,主要含有硫酸根、硝酸根、盐酸根和氢氧根离子的流体介质^[1]。这些输送强腐蚀介质的化工管道多选择不锈钢材料,但即使在这种耐腐蚀性极好的管道上也常会发生腐蚀现象。有关酸溶液管道或储罐泄漏而引起的化工安全环保的事故频频见诸媒体。2005年10月15日,青岛东方化工股份有限公司发生硫酸储罐破裂事故,罐内2800多吨硫酸泄漏,造成6名职工死亡,13人受伤。2015年7月14日,韶关曲江乌石镇一

家工厂的盐酸储罐区内发生盐酸罐泄漏事故,两个大型盐酸桶内总量约200t浓盐酸流出并挥发,对工厂附近居民以及周边环境造成巨大威胁,事故初步确定与盐酸储罐老化有关。腐蚀性输送介质泄漏会给人民的生命财产造成很大损失,因此,预防和控制管道泄漏事故的发生,是实现危化品安全生产的一项重要工作。

传统的管道检测技术包含电流法、超声波法、漏磁法、负压波法、射线法等^[2],如王永胜等^[3]针对长距离输送浓硫酸管道泄漏监测系统所提出的“负压波+输差分析”测漏技术原理,实现了较大泄漏的在线监测报警和定位,报警点定位误差500m。但这些方式容易受背景噪声影响,误报率高、探测距离短,不适合长距离大范围监测。

光纤传感器具有无源、抗电磁干扰、灵敏度高、探测距

收稿日期: 2019-11-19, 修订日期: 2020-03-02

基金项目: 国家重点研发计划光纤传感系统应用示范项目(2017YFB0405505), 江苏省科技成果转化项目(BA2019011)和国家博士后基金面上项目(2019M661704)资助

作者简介: 冯维一, 1988年生, 法尔胜泓昇集团有限公司和南京大学联合培养博士后 e-mail: fwynj@163.com

* 通讯联系人 e-mail: fengwy@fastengk.com

离等优点,近年来得到了极大的发展,已成功应用于输油气、输水管道的泄漏检测应用中^[4-6]。Jia 等^[7]开发了一种光纤光栅应变传感器,利用支持向量机 SVM 算法来分析管道环向应力,对于管道的泄漏监测表现出灵敏度高、响应时间短、误报率低等特性。王辰等^[8]提出了一种基于高保真分布式光纤声波传感器的油气管线泄漏在线监测技术,采用小波降噪算法提升了泄漏事件的检测灵敏度,实现对加压 0.05 MPa 气体泄漏的准确检测。但这些泄漏检测系统只适合于泄漏量比较大或压力管道输送介质的情况,无法检测因酸溶液腐蚀产生的缓慢渗漏或储罐开裂渗漏,且容易受到外界因素干扰,产生误报。

本文基于拉曼光时域反射技术(Raman optical time domain reflection, ROTDR)^[9],开发了一种用于酸溶液管道或储罐渗漏检测的新型光缆,有效且有针对性地检测腐蚀性酸液,不受外界干扰,误报率低,适合工程化应用推广。

1 分布式光纤拉曼传感技术简介

目前基于散射的分布式光纤传感技术主要是基于拉曼散射和基于布里渊散射两种。其中基于布里渊散射的分布式光纤测温系统结构较为复杂,成本较高,且易受环境应力的影响。因此,基于拉曼散射的分布式光纤拉曼测温技术更受用户的青睐,其测温原理如图 1 所示。

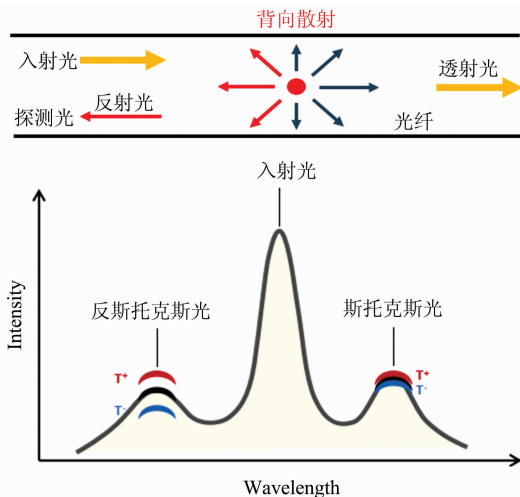


图 1 分布式光纤拉曼测温原理图

Fig. 1 Distributed fiber Raman temperature measurement schematic diagram

分布式光纤拉曼传感技术是利用光时域反射原理结合拉曼散射光的温度效应实现对光纤沿线的分布式温度测量。当具有一定能量的激光脉冲入射到光纤后,由于非弹性效应而产生拉曼散射。其中,背向拉曼散射中波长大于入射光的为斯托克斯光,小于入射光的为反斯托克斯光。反斯托克斯光相比于斯托克斯光对温度更敏感,当光纤局部温度升高时,反斯托克斯光强也随之增加,反之则减小。为抑制光源的不稳定性对光纤测温精度造成影响,在实际测量过程中,通常采用光纤中反射回的反斯托克斯光信号强度值 I_{as} 与斯托克

斯光信号强度值 I_s 的比值来计算得到光纤中各个位置上的实际温度

$$\frac{1}{T} = \frac{k}{hc\nu_0} \left[\ln a - \ln \left(\frac{I_{as}}{I_s} \right) \right] \quad (1)$$

式(1)中: a 为与温度系数; h 为普朗克常数; c 为真空中的光速; ν_0 为入射光频率; k 为波尔兹曼常数。

值得注意的是,由于斯托克斯光在光纤中的传播速度比反斯托克斯光快,因此光纤中相同距离上反射回的反斯托克斯光将滞后于斯托克斯光,为消除这种光纤色散引起的信号错位,解调过程中需要对斯托克斯光信号进行平移处理,使其对应的散射位置与反斯托克斯光信号的散射位置一致,从而消除错位误差,如图 1 所示。对向后散射光中的斯托克斯光强信号进行色散补偿处理可用式(2)表示

$$I_s(l) = I_s \left(l + \frac{\Delta L}{L_{as}} l \right) \quad (2)$$

式(2)中: $I_s(l)$ 为斯托克斯在光缆长度 l 处的光强值, ΔL 为斯托克斯光和反斯托克斯光的菲涅尔反射峰之间的距离差, L_{as} 为反斯托克斯光的菲涅尔反射峰位置。

2 渗漏监测系统

2.1 自感知特种光缆

分布式光纤温度传感技术可实现长距离管道的温度测量,特别适用于火灾定温报警监测、高温液体泄漏和低温气体泄漏等应用场景。但对于某些常温介质,如化工管道中输送的强腐蚀性溶液,当泄漏介质温度与周围环境温度相接近时,泄漏点处没有产生明显的温度差,ROTDR 测温技术也很难识别泄漏的发生。测漏光缆虽然也能用于常温化工介质的管道泄漏检测,但容易引起误报,即外界雨水、地下水或者管道传送的常温酸溶液都会引起报警,且对于距离比较长的管道,电类的检测方式显然不合适,存在用电能耗、检测点有限和密封失效等问题,不适合实际工程化应用。

为解决常温下腐蚀性酸溶液管道泄漏检测的难题,本文设计了一种酸溶液自感知的特种光缆结构。如图 2 所示,该种光缆为芯包结构,由外向内依次为外护套、芳纶纱、松套管、阻水纱和纤芯。外护套的材质采用耐碱不耐酸的材料,由尼龙 PA6、氢氧化镁、氢氧化铝和少量色母粒组成,可以与一定质量分数的盐酸溶液发生化学反应,迅速放热,让内

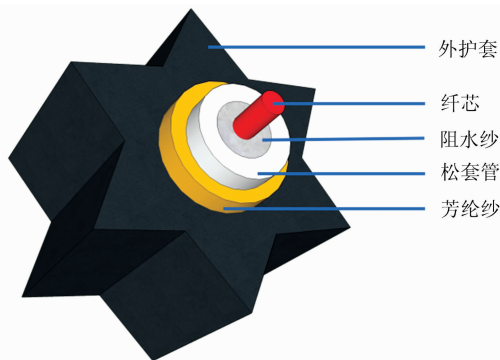


图 2 酸溶液自感知特种光缆

Fig. 2 Acid self-sensing special cable structure

部纤芯温度升高。其横截面设计为多角形，可增加化学反应的接触面。芳纶纱作为加强件均匀地缠包在松套管外层，纤芯采用 62.5/125 的多模光纤。

该光缆的外护套具有防紫外老化和阻燃的效果，同时与酸溶液产生的化学中和反应能有效减少环境污染。护套料用电子万能试验机(上海倾技仪器仪表 QJ210A)测得的拉伸强度如图 3 所示，其机械性能如表 1 所示。在测试温度为 235 °C，测试负重 2.16 kg 的情况下，材料的熔融指数为 2.1 g · (10 min)⁻¹，测试性能可以满足光缆的在线挤塑要求。

表 1 护套料测试性能
Table 1 Test performance of sheath material

测试项	数值
拉伸强度/MPa	68.23
断裂伸长率/%	4.0
弯曲强度/MPa	102.1
弯曲弹性模量/PMa	4 054.47
硬度	83.8

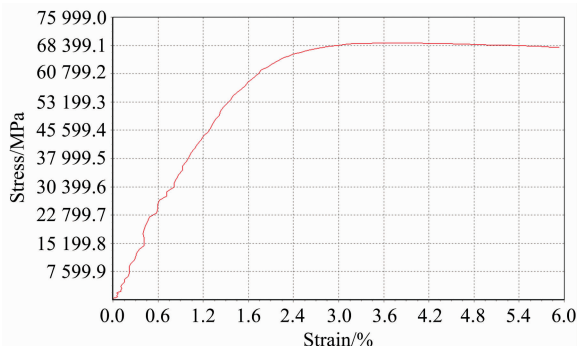


图 3 护套料拉伸强度
Fig. 3 Sheath material tensile strength

2.2 传感系统

如图 4 所示，本文搭建了一套用于酸溶液输送管道渗漏检测的分布式光纤测温系统装置，主要由一体化光模块、参考光纤环、特种光缆、采集卡和信号处理系统组成。其中一体化光模块(彼格光电 BG-DTS-10)内部集成了重复频率 10 kHz 的高速窄带拉曼激光光源、波分复用器(WDM)和 In-GaAs-APD 探测器。集成度高、尺寸小，具有长期可靠性和稳定性；光纤环是由 160 m 长的多圈光纤在圆环金属支架上按四极对称绕法绕制的参考光纤环圈，减小了因骨架或光纤本身热胀冷缩引起的应力不均匀变化对光纤环的测温影响，提高系统的温度自校准精度。

在发送端上，由一体化光模块内部产生 1 550 nm 波长、10 ns 脉宽的激光脉冲信号，经过参考光纤后连接特种光缆，特种光缆沿待测管道轴线方向敷设；在接收端上，特种光缆中传播的激光脉冲信号会产生后向散射拉曼信号，传播回一体化光模块内部的波分复用器中分成 1 450 nm 波长的反斯托克斯光信号和 1 663 nm 波长的斯托克斯光信号，由高速雪崩二极管(InGaAs-APD)接收后转化成电信号，然后通过

放大电路将电信号放大，并由采样率为 100 MHz 的采集卡(星烁华创 USB9812)采集数据，传输给信号处理系统进行温度解调和分析，最后基于光时域反射技术求解出各个温度点的位置，即利用入射激光脉冲回到入射端的时间和入射光在光纤中的传播速度求解出传输距离。系统可实现 5 km 的光缆温度监测，定位精度 1 m，测温精度 ±1 °C。

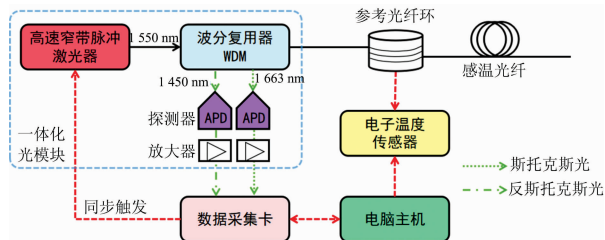


图 4 用于酸溶液输送管道渗漏检测的分布式光纤测温系统装置

Fig. 4 A distributed optical fiber temperature measuring system for detecting the leakage of acid solution pipeline

3 渗漏监测模拟验证

如图 5 所示，为验证自感知特种光缆的检测效果，本文将长度为 200 m 的自感知特种光缆放置于待测管道正下方，管道中放入质量比为 18% 的盐酸溶液，在管道接头部位利用小孔模拟管道渗漏，并用海绵将渗漏点包裹一圈，以便保持住渗漏溶液。当管道发生渗漏时，特种光缆与渗漏点处流出的酸溶液接触，外护套填充剂尼龙被酸溶液溶解，使护套内部反应物(氢氧化镁、氢氧化铝)与酸溶液发生化学反应并释放热量，该区域的光缆被加热升温，由传感系统接收后向拉曼散射光谱信号，并利用损耗补偿后的反斯托克斯与斯托克斯光强比值来线性解调出渗漏点处的温度值。实验在室温 29 °C 下进行，采用 sym4 小波基作为滤波函数处理，在小波分解第 4 层中设置模极大阈值来滤除噪声。

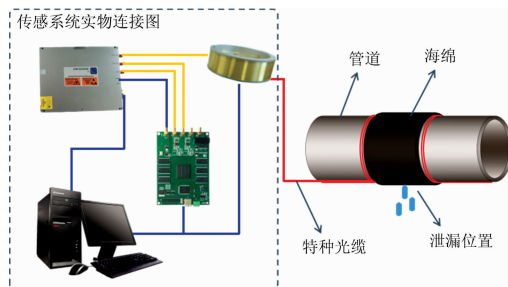


图 5 酸溶液渗漏检测模拟试验装置

Fig. 5 Simulation test equipment for acid solution leakage detection

盐酸溶液导致光缆局部温度变化见图 6，从图 6 中可以看出，采用分布式光纤测温系统可以测出光缆在酸溶液渗漏点处的温升变化，自感知特种光缆在 30 s 内就能和盐酸溶液迅速反应放热，使局部光缆温度升高，在 1 min 之后温度达到最高点，上升 7 °C，在 3 min 后温度开始回落。在 5 min 之内，特种光缆与酸溶液的持续反应能使光缆温度维持升高

5℃, 传感系统可通过设置温度差阈值($T_{th}=5\text{ }^{\circ}\text{C}$)和温度变化速率(每分钟 4℃)的方式来判断是否存在酸溶液渗漏事件, 并给管道管理部门发送报警信息。当管道渗漏事件发生后, 可在维护管道时重新熔接一段新的特种光缆, 即可继续检测。值得注意的是, 为了减小误报, 实验中用质量分数 10% 以下的盐酸溶液和弱碱溶液进行测试, 特种光缆均没有

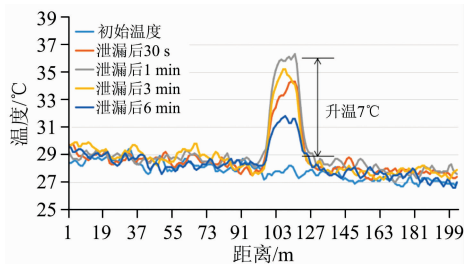


图 6 渗漏点温度变化随时间的曲线图

Fig. 6 Time curve of temperature change at the leakage point

升温效果, 不发生反应, 说明该特种光缆能够保持耐弱酸的特性, 能够精确检测出一定浓度的酸溶液管道渗漏事件, 避免接触外界弱酸性雨水或地下水后产生误报。

4 结 论

提出了一种用于腐蚀性酸溶液输送管道渗漏检测的分布式光纤传感装置及酸溶液自感知特种光缆。当酸溶液输送管道发生渗漏时, 渗漏点流出的腐蚀性酸溶液能与特种光缆发生化学反应, 引起光缆局部位置温度升高, 根据沿线光缆的升温速率和温差阈值即可判断出是否有渗漏事件发生。实验结果表明, 本文提出的自感知特种光缆能够实现质量分数 18% 的腐蚀性酸溶液管道渗漏监测, 检测精度高, 误报率低。同时, 基于分布式光纤传感技术的传感光缆不需要通电, 特别适合在长距离酸溶液输送管道安全监测中推广应用。

References

- [1] ZHAO Quan(赵 全). Beijing University of Chemical Technology(北京化工大学), 2017.
- [2] LIAN Long-jie(连龙杰). Beijing University of Chemical Technology(北京化工大学), 2014.
- [3] WANG Yong-sheng, WEN Hua-long, WU Hai-tao(王永胜, 文华陇, 吴海涛). Sulphuric Acid Industry(硫酸工业), 2013, (3): 34.
- [4] Huang Y, Wang Q, Shi L, et al. Applied Optics, 2016, 55(2): 242.
- [5] Wong L, Deo R, Rathnayaka S, et al. Electron. J. Struct. Eng., 2018, 18: 47.
- [6] Ren L, Jiang T, Jia Z, et al. Measurement, 2018, 122: 57.
- [7] Jia Z, Ho S C, Li Y, et al. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019, 62: 103926.
- [8] WANG Chen, LIU Qing-wen, CHEN Dian, et al(王 辰, 刘庆文, 陈 典, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2019, 39(10): 1006005.
- [9] LI Min, LIAO Yan-biao(黎 敏, 廖延彪). Fiber Optic Sensors Technology(光纤传感器及应用技术). Wuhan: Wuhan University Press (武汉: 武汉大学出版社), 2012.

Study on Leakage Detection Technology of Corrosive Acid Solution Based on Fiber Raman Temperature Measurement

FENG Wei-yi^{1, 2}, LIU Li-hua^{1*}, ZHANG Xu-ping², ZHAO Xia¹, HUANG Xiao-wei¹, YU Chun-han³

1. Fasten Group, Wuxi 214433, China

2. Post-Doctoral Research Station of Materials and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210008, China

3. Jiangyin Excen Broaden Polymer Co., Ltd., Wuxi 214446, China

Abstract Distributed Temperature Sensing System (DTS) is based on the effect of Raman spectrum on temperature sensitivity. It can realize long-distance distributed temperature monitoring, especially suitable for fire alarm, high-temperature liquid leakage, low-temperature gas leakage and other application scenarios. However, for normal temperature media, such as highly corrosive solutions transported in chemical pipelines, when corrosion occurs in the pipeline infiltration, there is basically no temperature change between the leakage location and the surrounding environment. At this time, DTS temperature measurement technology is difficult to identify the occurrence of leakage events. In order to solve the problem of leakage detection of strong acid solution pipelines or tanks under normal temperature, in this paper, a technology based on optical fiber sensing to detect the leakage of acid solution medium was proposed. A novel self-sensing structure of acid solution was designed. Compared with leaking cable, it does not need to consume electricity and is not easy to cause a false alarm. Precise positioning and simple laying. Multi-point leakage detection can be realized across the pipeline. Fiber optic cable outer sheath material is alkali resistant and

acid-resistant material, composed of nylon, magnesium hydroxide, aluminum hydroxide and a small number of colors masterbatch. It can be dissolved quickly by hydrochloric acid with the certain mass fraction. Exothermic chemical neutralization reaction occurs. Then the Raman spectrum of backscattering in the sensor fiber is changed, and the temperature of the sensor fiber can be increased by more than 5°C. The sensing fiber optic cable is connected to the DTS system, and the system adopts the dual demodulation method based on anti-stokes light and stokes light to calculate the temperature value of each position in the sensing fiber. Therefore, when the special optical cable and pipeline are laid in the same ditch, if acid solution leakage occurs in a certain position, resulting in the temperature rise of the point. After the dispersion compensation and the temperature calibration, the acid leakage event can be determined, according to the ratio change between the anti-stokes light and the stokes light. This technology not only solves the problem of engineering application of leakage detection and alarm in the transportation and storage of acid solution but also avoids the interference of false alarm of weak acid or alkali solution, saving energy and protecting the environment. It can accurately detect the leakage of the highly corrosive acid solution and improve the digital intelligent safety monitoring level of hazardous chemicals.

Keywords Leakage detection; Optical fiber sensing; Hazardous chemicals production; Emergency management

(Received Nov. 19, 2019; accepted Mar. 2, 2020)

* Corresponding author

关于《光谱学与光谱分析》调整审稿费收费标准的通知

尊敬的《光谱学与光谱分析》广大作者、读者：我刊自 2018 年 7 月 1 日以后登记的稿件向投稿作者收取审稿费 200 元/篇，在您投稿之前，为免受经济损失，请您必须考虑：

1. 没有创新的一般性稿件，请您不要投稿。
2. 没有国家级基金资助的稿件，请您不要投稿。
3. 不是光谱专业的稿件，请您不要投稿。
4. 与其他文章重合率超过 10% 的稿件，请您不要投稿。

所投稿件经初审通过后，作者会收到缴纳审稿费的通知。请作者及时从我刊网站(<http://www.gpxygpx.com>)查询稿件是否处于交审稿费状态，在收到通知后，请及时缴纳审稿费；如在 10 天之内没有收到您的审稿费，被视为自动放弃，我刊不再受理。交费后我刊开据增值税电子普通发票，并传至作者提供的电子邮箱，作者可自行打印。

联系电话：010-62181070, 62182998

电子邮箱：chngpxygpx@vip.sina.com

感谢您多年来对《光谱学与光谱分析》的支持和厚爱！

《光谱学与光谱分析》期刊社

2018 年 6 月 30 日