

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)01-0096-06

# 基于分布式光纤的压力管道壁厚监测及强度评价

王红珂, 吴剑剑, 关雅静, 仇云林, 谢江

(苏州热工研究院有限公司非金属材料研究所, 江苏 苏州 215004)

**摘要:**针对核电厂冷源管道缺乏腐蚀监测及失效预警问题,采用分布式光纤传感技术开展管道壁厚监测实验研究。首先通过有限元仿真,验证了管道环向应变与壁厚的倒数成正比关系,并对管道表面的应变分布规律进行分析。随后开展基于分布式光纤的管道腐蚀监测实验,分析了管道不同腐蚀区域的应变测量结果。最后基于 ASME B31G 准则,对腐蚀后管道的剩余强度进行评价。结果表明,分布式光纤传感器对管道腐蚀减薄引起的环向应变非常敏感,并能对管道减薄区域进行定位,分布式光纤传感技术在压力管道腐蚀监测和失效预警方面有着广阔的应用前景。

**关键词:**分布式光纤;腐蚀;压力管道;壁厚监测;强度评价

**中图分类号:** TP182; TN29

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1003-7241(2026)01-0096-06

## Wall thickness monitoring and strength evaluation of pressure pipeline based on distributed optical fiber

WANG Hongke, WU Jianjian, GUAN Yajing, QIU Yunlin, XIE Jiang

(Material Mechanics Institute, Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou 215004, Jiangsu, China)

**Abstract:** In view of the lack of corrosion monitoring and failure warning of cold source pipelines in nuclear power plants, distributed optical fiber sensing technology is used to conduct experimental research on pipe wall thickness monitoring. Firstly, the correlation between the circumferential strain and reciprocal wall thickness is verified by finite element simulation. Then the strain distribution on the pipe surface is analyzed. Furthermore, the pipeline corrosion monitoring experiment based on distributed optical fiber is carried out to analyze the strain measurement results of different corrosion areas of the pipeline. Finally, the residual strength of corroded pipes is evaluated based on ASME B31G code. Results show that the distributed optical fiber sensor is hypersensitive to the circumferential strain caused by pipeline corrosion thinning, which can locate the thinning area of pipeline. Distributed optical fiber sensing technology has a promising application in corrosion monitoring and failure warning of pressure pipelines.

**Keywords:** distributed fiber; corrosion; pressure pipe; wall thickness monitoring; strength evaluation

核电厂冷源系统属于核安全相关系统,其主要功能是将设备冷却水收集到的热负荷输送到海水。为避免冷源管道腐蚀,通常采用内衬橡胶将其与腐蚀介质隔离,防止管道内壁发生腐蚀。但衬胶在制造、安装、服役过程中或受异物入侵时容易造成衬胶鼓包、渗漏或老化脱落,从而使管道与海水直接接触而发生腐蚀。腐蚀将造成管壁减薄、穿孔、承载能力下降,在载荷作用下容易发生局部应力集中,从而导致管道破坏和失效<sup>[1]</sup>。管道失效不仅会引发冷却水泄漏,造成机组降功率或停运,还可能引发设备故障或安全事故,严重影响冷源系统及发电机组的安全、稳定运行。

目前,针对管道壁厚检测的方法有超声法、漏磁法、涡流法和射线法等。超声法利用超声传感器测量超声波在

管道内外表面反射的时间差实现管道壁厚测量,具有测量范围大、检测速度快、操作简便等优点,然而受超声波波长限制,超声法对薄壁管道的测量精度较低,且测量结果受温度及耦合剂影响较大<sup>[2-3]</sup>。漏磁法通过测量磁通的变化实现管道壁厚测量,不需要耦合剂并且对管道表面状况要求较低,但测量前需要对探头进行标定,并且管道存在的剩磁及其与探头的距离偏差会造成测量数据不准确<sup>[4]</sup>。涡流法可以实现管道壁厚非接触测量,检测速度快、不易受温度影响,但激励信号的频率较低,不适用于管道局部厚度测量<sup>[5]</sup>。射线法通过提取 X 射线拍摄的管道轮廓图像像素实现管道壁厚测量,具有测量精确、结果直观等优点,但系统操作复杂,难以在现场大规模应用<sup>[6-7]</sup>。因此,开发快速、准确、简便的管道壁厚监测技术,在管道失效前

收稿日期:2024-05-09;录用日期:2024-05-21

基金项目:江苏省基础研究计划自然科学基金项目(BK20170383)

作者简介:王红珂(1989—),男,硕士,工程师,研究方向:结构健康监测及传感系统集成。

引用本文:王红珂,吴剑剑,关雅静,等.基于分布式光纤的压力管道壁厚监测及强度评价[J].自动化技术与应用,2026,45(1):96-101.(WANG Hongke, WU Jianjian, GUAN Yajing, et al. Wall thickness monitoring and strength evaluation of pressure pipeline based on distributed optical fiber[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(1):96-101.)

进行预警和维护,是保障管道安全运输的重要环节之一。

光纤传感技术以光纤为媒介,光波为载体,能够感知和传输外界被测信号,具有灵敏度高、稳定性好、抗电磁干扰等优点,广泛应用于能源、土木等结构健康监测领域<sup>[8-10]</sup>。在管道监测方面,任亮等开发了一种光纤光栅应变传感器并用于管道局部腐蚀监测,通过管道环向应变与局部腐蚀区域壁厚的关系,实现管壁腐蚀监测<sup>[11]</sup>。薛田甜等将分布式光纤以螺旋式缠绕在管道表面,通过测量管道泄露位置的温度变化实现管道泄露检测<sup>[12]</sup>。李波等将分布式光纤传感技术用于天然气管道的泄露检测及安全预警,通过采集管道泄露时光纤的振动信号实现管道泄露检测及泄露点定位<sup>[13]</sup>。然而,冷源管道腐蚀造成的管壁减薄是一个缓慢变化的过程,发生腐蚀的区域是不确定的。上述研究可以实现管壁减薄及失效检测,但无法实时跟踪管壁的变化状态,不能对管道失效进行预警。

本文将分布式光纤传感技术用于压力管道腐蚀壁厚监测,通过监测环向应变判断管壁的腐蚀程度。首先基于仿真分析,探究了管道内壁局部腐蚀减薄与环向应变的关系。然后开展管道内壁局部加速腐蚀实验,验证了分布式光纤在管壁测量的效果。最后对腐蚀后管道的剩余强度进行了评价。同传统方法相比,分布式光纤传感技术具有测量精度高、定位准确、分布式测量等优点,可实现压力管道壁厚监测、腐蚀定位和失效预警,为管壁测量及维护提供方法和策略。

### 1 分布式光纤管道壁厚测量原理

光频域反射(optical frequency domain reflectometry, OFDR)是一种基于瑞利散射的背向反射技术,具有较大的动态范围和优异的空间分辨率,其工作原理如图1所示。光源发出的连续光被耦合器分为两路,一路作为参考光,另一路作为信号光。信号光在前向传播时不断产生瑞利散射信号,散射信号与参考光发生拍频干涉,干涉信号被探测器检测。通过测量光纤的频移量,并结合频移系数即可实现管道环向应变测量。

假设管道内压及外界条件不变,将光纤预拉伸后紧密缠绕在管道表面,当管道内壁发生腐蚀减薄后,管道环向应变会随之增加,因此通过测量环向应变可以实现管道壁厚监测。同时,结合光纤的空间定位功能可以对管道减薄区域进行定位。

对于长输管道,管道的轴向变形可以忽略不计。根据材料力学原理可得管道环向应变的计算公式为

$$\varepsilon = \frac{RP}{Et} \quad (1)$$

式中, $R$ 为管道环向应变, $P$ 为管道内压, $t$ 为管道壁厚, $E$ 为管道材料的弹性模量, $R$ 为管道外径。由式(1)可知,当内压 $P$ 恒定时,环向应变与管道壁厚成反比。因此,本文通过分布式光纤监测管道环向应变,从而实现管道壁厚监测。

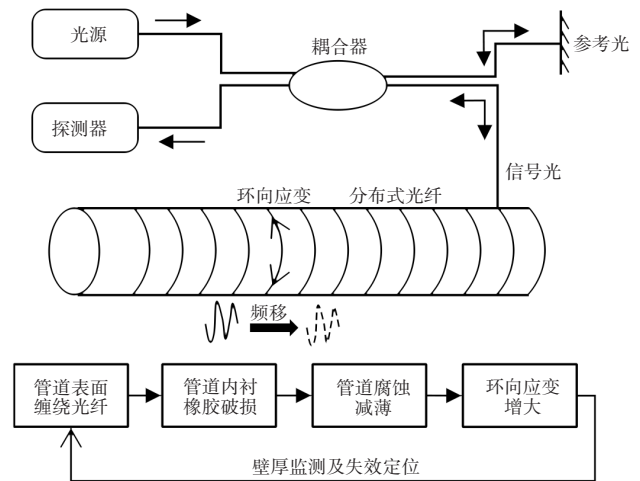


图1 分布式光纤壁厚测量原理图  
Fig. 1 Schematic diagram of distributed fiber pipe wall thickness measurement

### 2 管道腐蚀减薄仿真分析

为探究管道发生内壁腐蚀后环向应变的分布规律,采用Ansys有限元分析软件建立管道均匀腐蚀模型,模拟0.6 MPa压力下管道环向应变与壁厚的关系。如图2(a)所示,管道模型由七段组成,每段管道外径均为219 mm,壁厚分别为10 mm、8 mm、6 mm、4 mm、2 mm、1 mm、10 mm。模型中间五段长度均为120 mm,两端管段长度为200 mm,模型两端采用固端连接,通过不同壁厚模拟管道不同程度的腐蚀,壁厚越薄则腐蚀越严重。管道模型仿真结果如图2(b)所示,模型参数设置如表1所示。

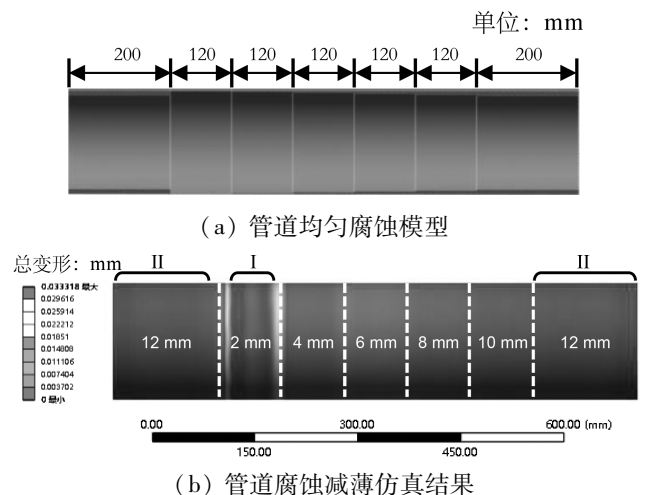


图2 管道模型及环向应变云图  
Fig. 2 Pipeline model and circumferential strain cloud diagram

表1 有限元管道模型参数

Tab. 1 Finite element pipe model parameters

材质	外径/ mm	厚度/ mm	弹性模量/ GPa	长度/ mm	泊松比	压力/ MPa
Q235 碳钢	219	10	210	1 000	0.3	0.6

如图2(b)所示,“I”区域为应变最大区域,“II”区域为应变最小区域,相同壁厚管段的环向应变分布基本一

致,随着管道壁厚逐渐减小环向应变呈增大趋势,并且明显大于没有腐蚀管段的应变。由图 2 还可看出,各管段连接处均出现变形突变,并且相邻管段壁厚差值越大变形突变越明显,但各管段中间区域的环向应变分布均匀。因此,将光纤布置在管段中间部位可有效避免边界效应。

沿管道模型表面任一轴线提取环向应变,绘制的环向应变分布曲线如图 3(a)所示。由图 3(a)可知,管道环向

应变呈阶梯状分布,这是由于不同管段的壁厚不同所致。相邻管段连接处出现应变突变现象,这与图 2 中的应变云图对应。图 3(b)为环向应变与管道壁厚倒数的拟合直线,线性度接近于 1,表明管道环向应变与壁厚的倒数成正比,拟合结果是合理的。通过图 3(b)还可看出,有限元仿真结果与理论计算结果基本一致,通过测量环向应变可实现管道腐蚀后壁厚监测。

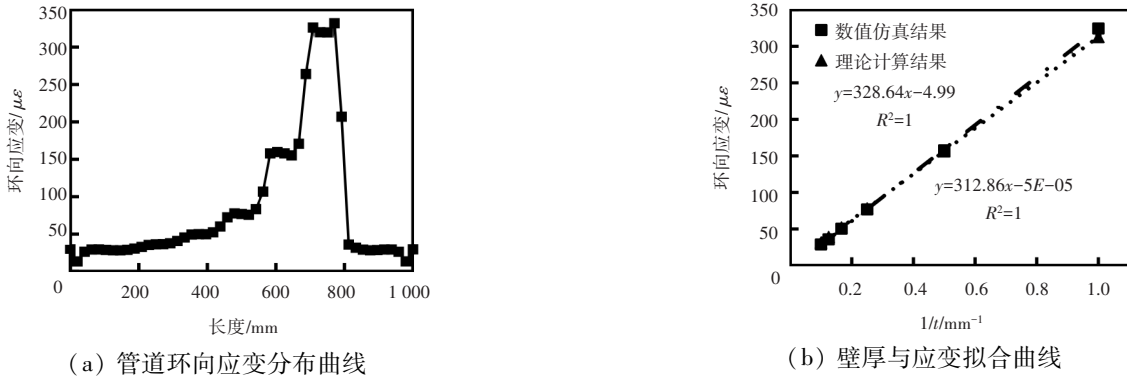


图 3 管道模型环向应变仿真结果

Fig. 3 Simulation results of the circumferential strain in the pipeline model

### 3 管道腐蚀实验及结果分析

#### 3.1 实验材料

实验材料包括。1) 碳钢管道, 外径 219 mm, 壁厚 10 mm, 长度 1 m, 管道两端焊接密封, 上部焊接注水管道和进气管道; 2) 逆止阀, 安装在注水管顶部; 3) 压力表, 安

装在进气管顶部; 4) 光纤; 5) 空气压缩机。如图 4 所示, 对管道内部喷漆处理, 其中管道侧面设置 5 个大小不同的编号为 A1~A5 的预留腐蚀区, 不做喷漆处理。然后将分布式光纤预拉伸后缠绕在管道表面, 相邻光纤间距为 5 mm, 光纤起始固定端预留 10 cm 不进行粘接, 用于补偿温度带来的应变变化。管道试样及预留腐蚀区如图 4 所示。

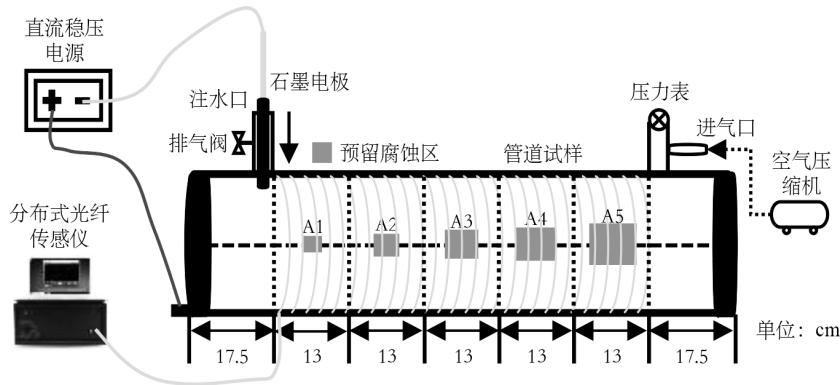


图 4 管道试样及预留腐蚀区域

Fig. 4 Pipe sample and reserved corrosion areas

#### 3.2 实验装置及步骤

如图 4 所示, 管道内配有 3.5 wt% 的氯化钠溶液, 通过电缆将石墨电极和管道外壁分别连接至直流电源的负极和正极, 直流电源采用恒流源控制, 输出电流为 2A。管道环向应变采集设备为 OSI-D 型分布式光纤传感仪, 设备的测量长度为 20 m, 测量模式设为高精度测量, 采样频率为 60 Hz, 空间分辨率为 10.24 mm, 应变采集前需根据光谱图设置传感光纤的起点和终点。实验装置实物如图 5 所示。



图 5 实验装置实物

Fig. 5 Physical experimental device

实验以2天为周期进行加速腐蚀,每个周期结束后关闭注水口排气阀,同时采用空气压缩机对管道加压,当压力表示数稳定后进行应变测量。压缩机最大泵压为0.89 MPa,实验中应变测试时应保证压力表读数稳定在0.7 MPa。应变数据采集后打开排气阀,然后将石墨电极放入注水口,使其底部石墨棒与管道内的氯化钠溶液接触,电极的金属端通过电缆连接至直流电源负极,继续进行管道加速腐蚀。

### 3.3 应变测量结果

图6为管道试样经过0 h、48 h、96 h、144 h、192 h、240 h、288 h加速腐蚀后的环向应变曲线,其中横坐标为提取的经过腐蚀区域的光纤长度,提取光纤位置如图6(a)所示。图6(b)~图6(f)分别为预留腐蚀区域A1~A5经过不同腐蚀时间后的环向应变曲线,可以看出经过48 h加速腐蚀后管道环向应变开始在预留腐蚀区出现应变集中。随着腐蚀时间的增加,管道环向应变也逐渐增大,表

明预留腐蚀区的管壁发生腐蚀减薄。

根据图6(a),预留腐蚀区域A1~A5均为正方形,边长分别为5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、25 cm。当腐蚀区域宽度小于20 cm时,腐蚀区域应力集中效应明显,环向应变呈尖峰突变。随着腐蚀区域宽度增大,腐蚀区域出现多个尖峰突变,环向应变在一定范围内波动变化,表明腐蚀区域管壁为非均匀腐蚀,腐蚀后管壁的剩余厚度并不相同。

环向应变越大表明管道的腐蚀越严重,提取管道预留腐蚀区域在0 h、48 h、96 h、144 h、192 h、240 h、288 h的最大环向应变值,并进行线性拟合,结果如图7所示。根据图7,预留腐蚀区域的最大环向应变与腐蚀时间呈线性关系,腐蚀时间越长环向应变越大。管道A1~A5区域环向应变与腐蚀时间拟合直线的斜率分别为0.247 2、0.189 8、0.203 3、0.212 3、0.256 2,斜率越大表明腐蚀速率越大。其中A5区域的面积最大,并且靠近进气口位置,氧供应充分,应变拟合斜率最大,腐蚀速率最快。

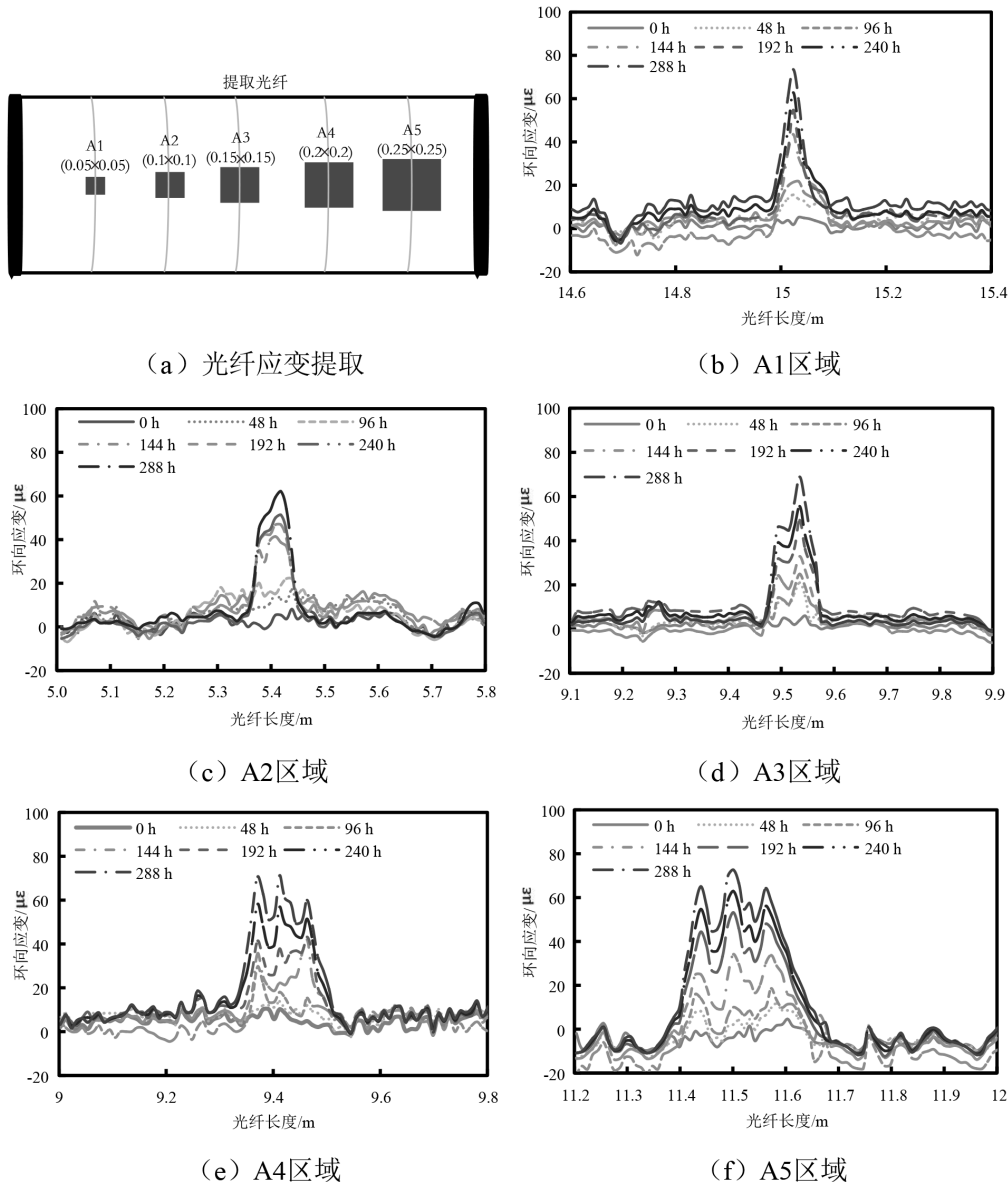


图6 管道环向应变测量曲线

Fig. 6 Circumferential strain measurement curve of the pipeline

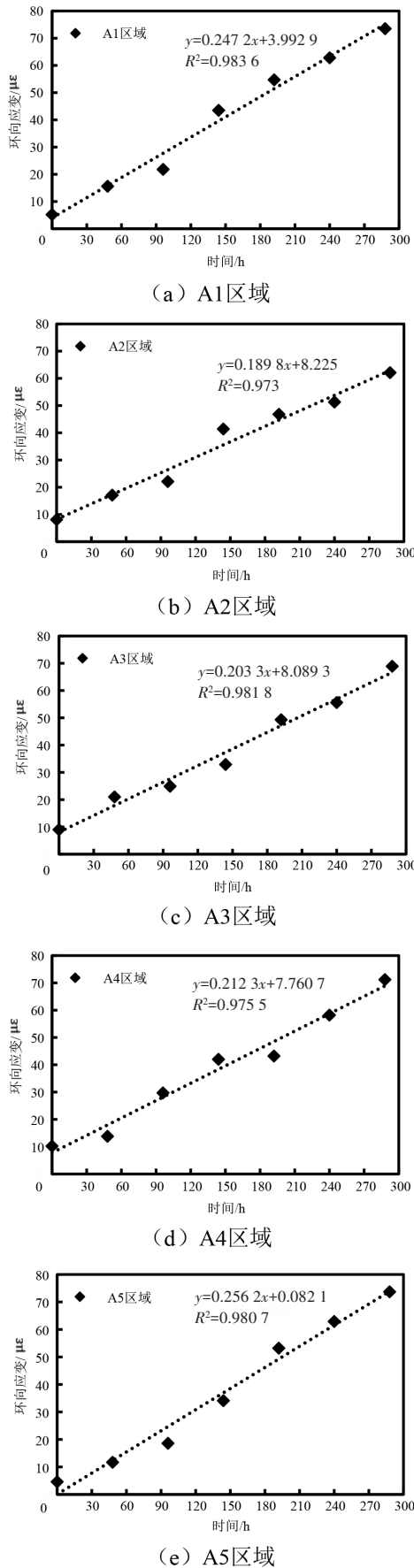


图7 腐蚀区域环向应变最大值拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve of the maximum circumferential strain in the corrosion area

### 3.4 管道剩余强度评价

冷源管道属于核安全相关系统管道,开展管道壁厚监测的目的是评价管道腐蚀减薄后是否满足继续安全运行的条件。本文基于管道试样环向应变测量结果,采用ASME B31G 准则对管道腐蚀后的剩余强度进行评价,评价流程如图8所示。

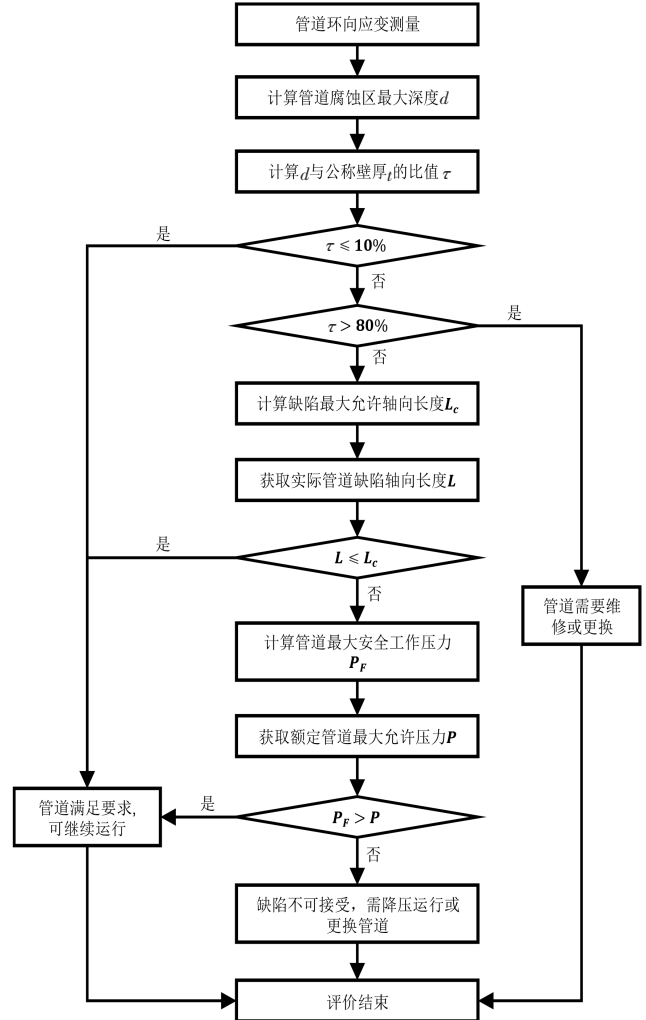


图8 管道腐蚀安全评价流程

Fig. 8 Safety evaluation process for pipeline corrosion

根据图7,管道A5区域的环向应变最大,为73.7  $\mu\epsilon$ 。由公式(1)可得,管道的剩余壁厚为4.95 mm,则腐蚀区最大深度为5.05 mm,计算得 $\tau$ 为50.5%,满足 $10\% < \tau \leq 80\%$ 的条件。缺陷最大允许轴向长度 $L_c$ 可由下式获得

$$L_c = 1.12B \sqrt{Dt} \tag{2}$$

$$B = \sqrt{\left(\frac{d/t}{1.1d/t - 0.15}\right)^2 - 1} \tag{3}$$

式中, $B$ 为系数, $t$ 为公称壁厚, $D$ 为管道外径。当 $10\% < (d/t)\% < 17.5\%$ 时, $B = 4.0$ ;当 $17.5\% < (d/t)\% < 80\%$ 时, $B$ 由式(3)确定。根据式(2)和式(3),计算得 $L_c$ 为38.9 mm。本实验中管道A5区域的环向应变最大,因此实际缺陷的轴向长度取图6(f)中管道腐蚀288 h后光纤11.40 m~11.65 m应变峰值的半高宽,即 $L$ 的取值为0.18 m。由于 $L_c < L$ ,因此需计算管道最大安全工作压力

$P_F, P_F$  的计算公式为

$$P_F = \sigma_{\text{flow}} \frac{2tF}{D} \left[ \frac{1 - 0.85 \frac{d}{t}}{1 - 0.85 \frac{d}{t} \frac{1}{M}} \right] \quad (4)$$

式中,  $\sigma_{\text{flow}}$  为管材的流变压力,  $M$  为鼓胀系数,  $F$  为管线设计系数, 一般取 0.72。由于  $\frac{L^2}{Dt} = 14.8 < 50$ , 因此  $M$  可由下式获得

$$M = \sqrt{1 + 0.6275 \frac{L^2}{Dt} - 0.003375 \left(\frac{L^2}{Dt}\right)^2} \quad (5)$$

式中,  $L$  为腐蚀缺陷轴向投影长度。根据式(4)和式(5), 计算得管道最大安全工作压力  $P_F$  为 13.25 MPa。管道正常运行的压力为 0.7 MPa, 小于管道最大安全工作压力。因此管道满足要求, 可以继续运行。

## 4 结论

本文将分布式光纤传感技术用于压力管道腐蚀壁厚监测, 通过数值模拟验证了管道表面环向应变与壁厚的倒数成正比关系, 管道减薄区域边界存在应变突变效应。然后开展管道加速腐蚀实验, 并对管道腐蚀后的剩余强度进行评价。结果表明, 分布式光纤对管壁减薄非常敏感, 随着管道内壁腐蚀减薄环向应变逐渐增大。因此, 通过分布式光纤测量管道环向应变可实现压力管道腐蚀监测, 并能够对减薄区域进行定位, 测量结果可为运维人员提供预警信息,

(上接第 85 页)

的状态量差异度量明显比其他几种方法小, 这说明本文方法所感知的配电线路状态量与其实际的状态更为接近, 感知精度更高。由此可见, 本文所提技术有着更为优良的实践应用性能。

## 3 结论

文章结合先进的数据融合与处理技术, 通过电子式传感器的数据分析, 实现了对配电线路状态的融合感知。经过测试分析, 验证了该项技术的实践应用性能良好, 能够得到较为精准的状态感知结果。技术在实际生活中的应用, 能够通过对配电线路状态的持续监测和分析, 及时发现并处理潜在问题, 避免大规模停电事故的发生, 从而减少对人力、物力等资源的浪费, 实现资源的高效配置。随着技术的不断进步和应用场景的拓展, 基于电子式传感器的配电线路状态融合感知技术将不断推动电力行业的技术创新和产业升级, 为电力行业的可持续发展注入新的动力。

## 参考文献

- [1] 程江洲, 王永威, 朱险峰. 计及节点-线路重要度的配网实时健康状态评估[J]. 电子测量技术, 2023, 46(9): 61-68.
- [2] 吴阳, 张品佳. 基于漏电流测量的配电网电缆高精度状态感知技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2929-2940.

并提前介入管道的维修防护。目前, 该技术尚处于实验研究阶段, 实际工程应用中应考虑光纤的缠绕布置及温度效应的剔除。

## 参考文献

- [1] 周俊, 乔泽, 肖调兵, 等. 某滨海电厂辅助冷却水系统衬胶管道的腐蚀穿孔原因及其防护措施[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(9): 95-97.
- [2] 贺建峰, 贾晓丽, 姚宁. 基于超声检测的管道壁厚在线监测系统[J]. 无损检测, 2024, 46(2): 65-71.
- [3] 李继承, 戚政武, 苏宇航, 等. 基于电磁超声技术的管道壁厚检测研究[J]. 中国特种设备安全, 2023, 39(S2): 52-55, 66.
- [4] 左万君, 戴西斌, 吴昌玉. 漏磁检测在管道损伤探测中的应用[J]. 无损检测, 2024, 46(3): 56-63.
- [5] 高彬, 肖培光. 在线无损检测技术在压力管道检测中的应用研究[J]. 中国机械, 2024(6): 77-80.
- [6] 惠进财, 高敏, 尚其铎, 等. 射线数字成像检测技术(DR)在低温真空绝热管道测厚评估上的应用[J]. 石油和化工设备, 2024, 27(3): 5-8.
- [7] 陈剑. 在用管道检验射线数字成像外透照检测技术研究[J]. 全面腐蚀控制, 2022, 36(7): 43-45.
- [8] 马文长, 田源, 柴少磊, 等. 基于光纤传感的输电线路杆塔倾斜预警系统[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(3): 137-141.
- [9] 周晏, 李兵祖. 基于光纤传感技术的隧道结构安全监测系统研究[J]. 铁道勘察, 2023, 49(2): 118-123.
- [10] 李翠, 夏炳森, 林斌, 等. 基于多维分量分布式光纤传感的架空输电线路覆冰监测技术[J]. 光电子技术, 2024, 44(1): 38-46.
- [11] 任亮, 程祥, 姜涛. 基于光纤光栅应变传感器的管道局部腐蚀监测[J]. 油气储运, 2017, 36(3): 303-309.
- [12] 薛田甜, 刘永莉, 陈智, 等. 基于分布式光纤测温技术的管廊管道泄漏检测设计[J]. 中国科技论文, 2023, 18(8): 867-874, 889.
- [13] 李波. 分布式光纤泄漏检测与安全预警系统在天然气管道中的应用[J]. 石油化工自动化, 2023, 59(5): 60-63, 95.
- [3] 陈晓娟, 黄文卓, 孙鸿辉, 等. 基于隶属度函数的电力光纤线路健康度评估[J]. 激光杂志, 2022, 43(3): 128-133.
- [4] XUE F, LI X, WANG X, et al. State evaluation method of distribution terminal based on deep reinforcement learning[J]. Mathematical Problems in Engineering: Theory, Methods and Applications, 2022(35): 2022.
- [5] 黄蔓云, 马一达, 孙国强, 等. 高量测丢包率下基于共享模糊等价关系的配电网状态感知[J]. 太阳能学报, 2024, 45(3): 436-445.
- [6] 高飞, 刘颖异, 贾鹏飞, 等. 基于健康指数的架空线路运行状态评价方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 167-176.
- [7] 张军六, 刘珊, 李瑞. 数字孪生技术下输变电设备运行状态智能感知[J]. 计算机仿真, 2023, 40(12): 123-127, 144.
- [8] 马文长, 田源, 柴少磊, 等. 基于光纤传感的输电线路杆塔倾斜预警系统[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(3): 137-141.
- [9] 崔炳荣, 李德建, 刘亮, 等. 面向分布式光伏状态实时感知的边缘缓存与计算策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(8): 67-74.
- [10] 程显, 余亚东, 葛国伟, 等. 混合式直流断路器状态感知技术与智慧框架体系探讨[J]. 电网技术, 2024, 48(7): 3033-3042.
- [11] 刘显苗, 王皓怀, 郭自豪, 等. 基于多源数据融合的新能源运行数据监测系统设计[J]. 能源与环保, 2023, 45(9): 221-227, 231.
- [12] 唐冰婕, 陈宁, 张磊, 等. 适用于风-光-火耦合系统运行控制的状态感知及预测技术[J]. 高电压技术, 2024, 50(4): 1596-1607.
- [13] 潘德泰, 李贵亮, 何启远, 等. 基于计算机视觉的电网输变配环节配电线路巡检系统[J]. 电子设计工程, 2023, 31(17): 85-89.
- [14] 李海英, 沈益涛, 罗雨航. 基于改进深度置信网络的智能电网暂态安全状态感知[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(5): 171-177.
- [15] 舒胜文, 陈阳阳, 张梓奇, 等. 基于多维能力和知识图谱-多层感知机的变压器运行状态画像构建方法[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 750-759.