

激光与光电子学进展

基于分布式光纤的钢管桩腐蚀监测试验研究

王红珂, 谢江, 陈纪国, 关雅静, 吴剑剑*

苏州热工研究院有限公司材料工程技术中心, 江苏 苏州 215004

摘要 海上风机通常处于高湿度、高盐雾的苛刻海洋环境中,随着服役时间的增加,可能会出现基础钢管桩腐蚀疲劳、风机倒塌等安全事故。因此,开展钢管桩腐蚀监测具有重要意义。探究了模拟海洋环境下分布式光纤传感技术在钢管桩腐蚀监测中的应用,通过在钢管桩表面环绕分布式光纤,监测钢管桩在大气区、水位波动区和全浸区因腐蚀产物导致的应变变化。建立了钢管桩环向应变与质量损失的关系,并通过彩色云图对钢管桩腐蚀区域进行可视化处理。实验结果表明,分布式光纤传感技术可用于钢管桩表面腐蚀的在线监测,能够进行腐蚀区域定位和腐蚀程度量化,为海上风机钢结构腐蚀预警和运维提供一定的技术支撑与保障。

关键词 分布式光纤; 应变测量; 钢管桩; 腐蚀监测

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP240721

Experimental Study on Corrosion Monitoring of Steel Piles Based on Distributed Optical Fiber

Wang Hongke, Xie Jiang, Chen Jiguo, Guan Yajing, Wu Jianjian*

Materials Engineering Technology Center, Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd.,
Suzhou 215004, Jiangsu, China

Abstract Offshore wind turbines are exposed to long-lasting harsh marine environments with high humidity and salt spray. With an increase in service time, accidents such as corrosion fatigue of basic steel pipes and fan collapse, can occur. Therefore, it is important to monitor the corrosion of steel piles. In this study, the application of distributed optical fiber sensing technology to the corrosion monitoring of steel piles is explored in a simulated marine environment. By wrapping distributed optical fibers around the surface of the steel piles, the strain changes in the steel piles due to corrosion products in the atmospheric zone, water level fluctuation zone, and immersion zone are monitored. Based on this, a relationship between the circumferential strain and mass loss of the steel pile is established. The corrosion areas of the steel piles are visualized using color cloud images. The research results show that distributed optical fiber sensing technology can be used for the online monitoring of steel pile surface corrosion and can locate the corrosion area and quantify the degree of corrosion, which provides technical support and assurance for the early warning and maintenance of offshore wind turbine steel structures.

Key words distributed optical fiber; strain measurement; steel pile; corrosion monitoring

1 引言

海上风机通常采用钢管桩作为基础的支撑结构,但在恶劣的海洋环境中,高湿度、高盐度、海水冲刷等环境因素加剧了钢管桩的腐蚀。通常采用涂层、包覆结构、阴极保护等措施来缓解腐蚀带来的影响^[1]。然而涂层剥落、包覆破损、电极故障等情况也会使钢管桩局部区域再次发生腐蚀,造成钢管桩壁厚变薄,局部应

力过大,甚至酿成风机倒塌事故,从而严重影响海上风机的安全稳定运行。

通常采用挂片法检测钢结构的腐蚀程度,但实验周期较长,不能实时监测。超声法通过测量钢结构厚度计算腐蚀速率,但精度有限,易受噪声干扰^[2]。电阻法利用钢结构腐蚀前后电阻的差值计算腐蚀速率,但对探头加工要求严苛^[3]。电化学噪声法通过测量两个相同电极间的电流计算腐蚀速率,但数据解析困难,噪

收稿日期: 2024-02-21; 修回日期: 2024-04-07; 录用日期: 2024-05-14; 网络首发日期: 2024-05-17

通信作者: *wujianjian@cgnpc.com.cn

声机理尚不明确^[4]。传统人工巡检不仅耗时费力,还难以发现隐蔽及不可达区域的腐蚀问题。因此,开发高效、简便、高精度的腐蚀监测技术,对钢管桩腐蚀评价及预警具有重要意义。

光纤布拉格光栅(FBG)传感器和分布式光纤传感器是两种典型的光纤传感器,具有精度高、稳定性好、抗电磁干扰等优点,广泛应用于结构腐蚀监测等领域^[5-7]。严琨等^[8]将设计的缠绕式FBG传感器缠绕在钢丝表面,通过监测传感器波长变化来获得钢丝的腐蚀状态。Vahdati等^[9]将研制的卡箍型FBG传感器用于油气管道的腐蚀监测。王浩等^[10]将FBG锈蚀传感器埋置于混凝土内部,实现对混凝土钢筋的锈胀监测。张庆所等^[11]将分布式光纤温度测量系统用于海底管道腐蚀泄漏监测及腐蚀定位。葛峰等^[12]搭建了一套FBG超声检测系统,通过测量钢结构腐蚀前后的冲击振动信号来实现钢结构腐蚀检测。Feng等^[13]采用分布式光纤测量由腐蚀引起的管道温度及应变信息,实现埋地管道性能评估。Tan等^[14]将分布式光纤环绕在管道表面,并建立均匀腐蚀引起的质量损失与应变之间的关系。作为点式传感器,FBG只能监测结构的局部点腐蚀,容易出现漏检现象,而分布式光纤传感器可以通过测量光纤上数千个测量点实现结构的整体分布式腐蚀测量和定位。

由于海洋环境下的钢管桩受涂层或包覆结构防护,腐蚀现象通常为局部非均匀腐蚀,腐蚀区域不确定,并且受水流影响,腐蚀产物容易流失,使得钢管桩外径变小而不是增大。上述研究可以实现对钢管桩结构的腐蚀监测及定位,但很少关注由不同区域腐蚀引起的应变规律,无法量化钢管桩结构的腐蚀程度。分布式

光纤传感技术具有精度高、空间分辨率高、耐腐蚀、可实现结构分布式测量等优点,可以更好地实现在海洋环境下对钢管桩结构的腐蚀监测及定位研究^[15-16]。

本研究将分布式光纤传感技术用于模拟海洋环境下钢管桩在大气区、水位波动区和全浸区腐蚀引起的应变监测,并建立钢管桩质量损失与测量应变之间的关系。再绘制应变云图,实现钢管桩腐蚀过程的监测及可视化。通过分布式光纤传感技术监测钢管桩环向应变,可实现对不同区域腐蚀的监测及定位,并能基于质量损失与应变的关系量化腐蚀的严重程度。

2 分布式光纤腐蚀测量原理

分布式光纤传感技术是将光纤作为传输介质和传感单元,通过监测光信号强度、相位、偏振态等参数实现外部参量分布式测量的传感技术^[17]。常用的分布式应变测量技术主要分为基于瑞利散射和基于布里渊散射的光纤传感技术两类,相较于布里渊散射,基于瑞利散射的光频域反射(OFDR)技术同时具备高精度和高空间分辨率等优势,因此选择OFDR进行钢管桩腐蚀监测研究。

OFDR监测钢管桩腐蚀的原理如图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,另一路作为探测光。探测光在光纤中传输时产生瑞利散射信号,并与反射的参考光经耦合器发生拍频干涉,干涉信号被光电探测器检测到。将预应力光纤环绕在钢管桩上,积累的腐蚀产物产生的环向应变会使光纤产生瑞利散射频移。通过测量频移量并结合频移系数,可获得对应的应变变量,从而实现钢管桩腐蚀量化。

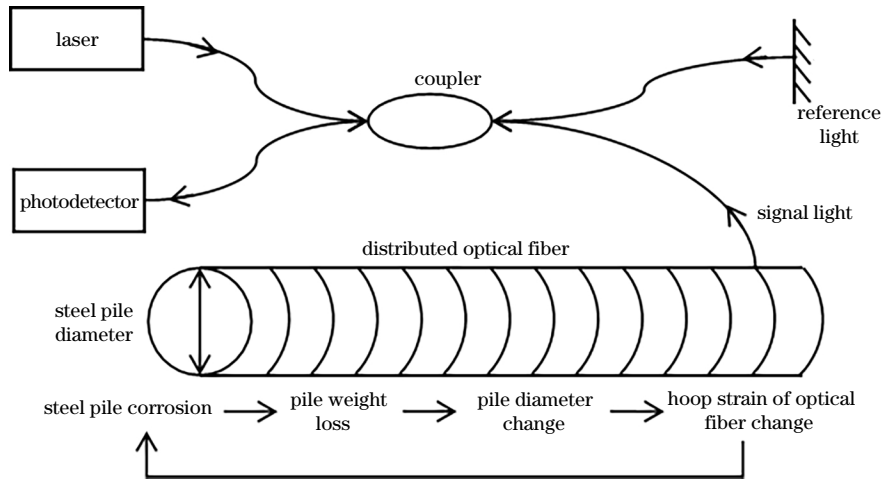


图1 分布式光纤腐蚀测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of distributed fiber corrosion measurement

基于OFDR进行钢管桩应变测量时,光纤受腐蚀产物影响发生膨胀,进而导致纤芯折射率发生改变,弹光效应使得光纤背向瑞利散射光频率发生偏移。因温度变化引起的热光效应、弹光效应和纤芯热膨胀等效应同样会使光纤背向散射光的频率发生偏移,背向散

射光频率的偏移量 Δf 可表示为

$$-\Delta f/f_0 = K_\epsilon \Delta \epsilon + K_T \Delta T \quad (1)$$

式中: f_0 为中心频率; $\Delta \epsilon$ 为应变变量; K_ϵ 为应变敏感系数; K_T 为温度敏感系数,可通过标定获得; ΔT 为温度变化量。因此,钢管桩应变测量需要对温度进行补偿,

消除温度对测量结果的影响。

假设钢管桩为均匀腐蚀,针对大气区,腐蚀产物不断在钢管桩表面积累,导致其体积膨胀并引起钢管桩外径增大,缠绕在钢管桩表面的光纤因膨胀而应变增加;对于波动区和全浸区,除了腐蚀产物增加引起的应变增加,水流作用还会造成钢管桩表面腐蚀产物不断流失,使得光纤感知应变减小,二者相互影响。因此,采用分布式光纤在海洋环境下监测钢管桩腐蚀时,需要综合考虑这两种因素的影响及相互作用。

3 实验方法及步骤

3.1 实验材料

实验材料包括:1)钢管桩,Q235 碳钢,高度为 30 cm,外径为 168 mm,壁厚为 5 mm,管道一端焊接在方型底座上;2)无纺布;3)光纤。如图 2 所示,对钢管桩两端和底座进行喷漆处理,中间未进行喷漆,留作腐蚀区域。腐蚀区域沿竖向分为 3 个区域,每个区域高度均为 7 cm,分别模拟大气区、波动区和全浸区的腐蚀。

实验共制作两类钢管桩试样,编号分别为 A 和 B,试样 A 用于研究钢管桩在不同区域由腐蚀引起的应变规律,试样 B 用于测量钢管桩在不同区域由腐蚀引起的质量损失。光纤环绕装置及试样制作如图 3 所示,具体流程如下:

1) 表面处理:将试样表面打磨清洗后,按照图 2 对试样 A 进行喷漆处理。试样 B 有 3 种,分别对应图 2 中

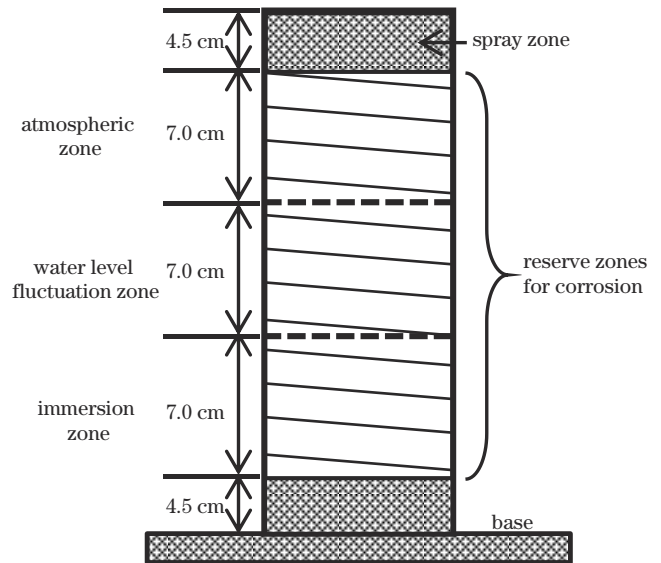


图 2 钢管桩及腐蚀区域划分图

Fig. 2 Diagram of steel pile and corrosion zone division

大气区、波动区和全浸区且不做喷漆处理,其他区域均进行喷漆处理。

2) 光纤布设:采用自制光纤环绕装置将光纤在施加预应力后缠绕在钢管桩预留腐蚀区域,相邻光纤间距为 7 mm,光纤两端通过环氧胶水固定。光纤起始固定点前预留 10 cm 不进行预拉伸,保持松弛状态,用于补偿温度引起的应变。

3) 无纺布缠绕:将无纺布紧密包裹在钢管桩表面,并用适量胶水固定。



图 3 光纤环绕装置及试样制作图。(a)光纤环绕装置;(b)试样 A 制作;(c)试样 B 制作

Fig. 3 Fiber wrapping device and sample fabrication pictures. (a) Fiber wrapping device; (b) sample A preparation; (c) sample B preparation

3.2 系统搭建

如图 4 所示,将试样按顺序放置在腐蚀水箱中,水箱中配有质量分数为 3.5% 的氯化钠溶液。通过电缆将所有试样串联并与腐蚀控制柜正极相连,石墨碳棒与腐蚀控制柜负极相连,采用恒流源控制,输出电流为 1 A,其中 A1~A3 和 B1~B9 为多个样本 A 和 B 的编号。3 个辐射加热器固定在水箱一侧,模拟光照引起的温度变化。腐蚀水箱上方及四周安装有支撑架和保温膜,用于保持水箱温度在设定范围内。采集设备为 OSI-D 型分布式光纤传感仪,设备传感长度为 0~20 m,测量模式设置为高精度测量,应变测量精度为

$\pm 1 \mu\epsilon$,刷新频率为 60 Hz,空间分辨率和采样分辨率均设置为 10.24 mm,数据采集前根据光谱图设置传感光纤的采样起点和采样终点。

3.3 实验步骤

采用质量分数为 3.5% 的氯化钠溶液模拟海水,通过分布式光纤传感技术监测模拟海洋环境下钢管桩的腐蚀。实验以 1 d 为周期,每个周期加速腐蚀 8 h。每个周期对试样 A 进行应变测量,每两个周期对试样 B 进行烘干、清除腐蚀产物、称重,然后重新放回水箱加速腐蚀。

图 5(a)为一个实验周期内的温度控制曲线,温度

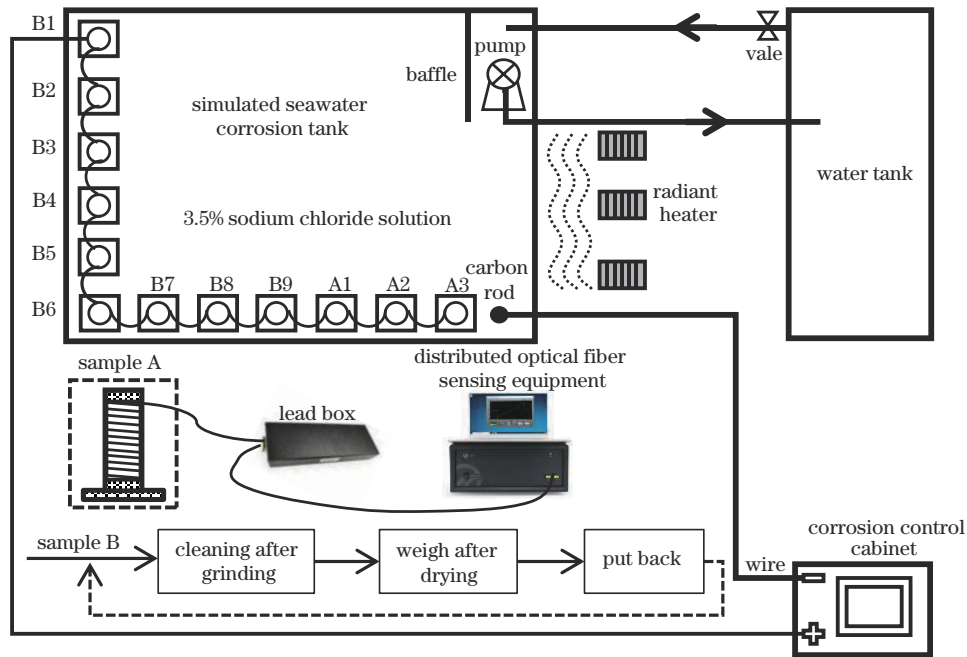


图 4 系统结构图

Fig. 4 System structure diagram

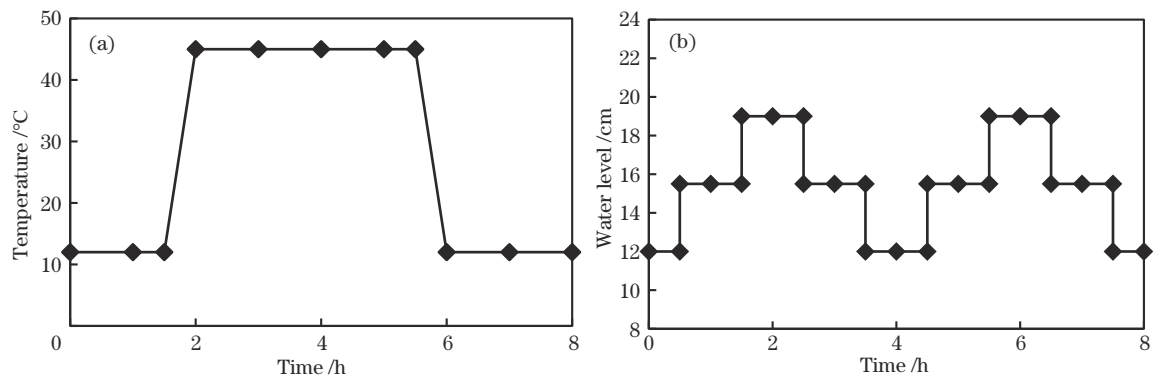


图 5 每个实验周期控制曲线。(a)温度控制曲线;(b)水位控制曲线

Fig. 5 Control curves for each experimental period. (a) Temperature control curve; (b) water level control curve

控制分常温、升温、高温和降温 4 个阶段。常温即室温,模拟夜间温度,高温模拟正午太阳出来的温度,升温和降温分别模拟日出和日落。图 5(b)为一个实验周期内的水位控制曲线,水位波动模拟钢管桩周期性受海水润湿,实验的最低、中间和最高水位分别为 12.0、15.5、19.0 cm。实验通过水泵和阀门控制盐溶液在腐蚀水箱和蓄水箱之间流通,从而实现水位的周期性变化。

4 实验结果及分析

4.1 不同腐蚀区域应变结果

图 6 为钢管桩在大气区的应变测量结果,横坐标为大气区光纤测量长度,对应范围为 2.96~7.68 m,纵坐标为实测应变与实验前应变之差的绝对值。由图 6 可知,钢管桩腐蚀 8~56 h 的过程中,随着腐蚀时间的增加,光纤的应变测量值呈逐渐增大的趋势。由

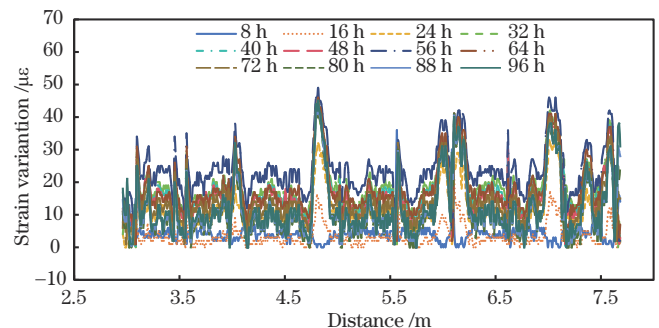


图 6 大气区分布式光纤应变随腐蚀时间的变化曲线

Fig. 6 Distributed optical fiber strain variation curves in the atmospheric zone with corrosion time

于钢管桩大气区没有与盐溶液接触,属于大气腐蚀,钢管桩腐蚀较轻,光纤应变增加比较缓慢。当腐蚀超过 56 h 后,应变测量值呈下降趋势,并且钢管桩腐蚀 64~96 h 的 5 次应变测量曲线差别很小。这是由于随着腐

蚀时间的增加,钢管桩腐蚀初期产生的锈层变得致密连续,抑制了氧气向钢管桩表面的传输,腐蚀受到抑制,从而使腐蚀速率逐渐下降,光纤应变增加变得缓慢。同时,光纤周围新生成的锈层比较疏松,附着力小,容易出现剥落现象,使得锈层剥落区域光纤的膨胀效应减弱,光纤应变测量值减小。

波动区是钢管桩经历干湿交替循环的区域,分为两部分,上半部分靠近大气区,下半部分靠近全浸区。钢管桩波动区的应变结果如图 7 所示,对应光纤范围为 7.68~13.09 m,图 7 中虚线为上下两部分的分界线。由图 7 可知,随着腐蚀时间的增加,上半部分应变呈增大趋势,变化幅度较大,下半部分应变幅值明显小于上半部分。这是由于实验过程中水流使得钢管桩表面的腐蚀产物不断损耗,钢管桩外径变小,应变也逐渐减小,但是光纤中保留了预张力,始终处于受拉状态。波动区下半部分靠近全浸区,与盐溶液接触时间较长,水流带走的腐蚀产物较多,因此应变幅值小于上半部分。从图 7 还可看出,应变沿光纤的变化是不均匀的,这是由于钢管桩不同测点位置与石墨电极之间的电阻不同,从而导致钢管桩表面的电流密度分布不均匀,电流密度越大钢管桩的腐蚀越严重。因此,钢管桩表面电流密度的不均匀分布导致了钢管桩的非均匀腐蚀。

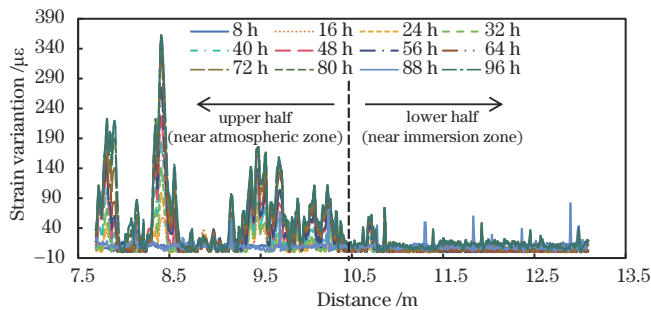


图 7 波动区分布式光纤应变随腐蚀时间的变化曲线

Fig. 7 Distributed optical fiber strain variation curves in the water level fluctuation zone with corrosion time

图 8 为全浸区应变测量结果,光纤范围为 13.09~18.48 m。由图 8 可知,随着腐蚀时间的增加,全浸区光纤应变先减小后逐渐增大。实验初期,钢管桩表面

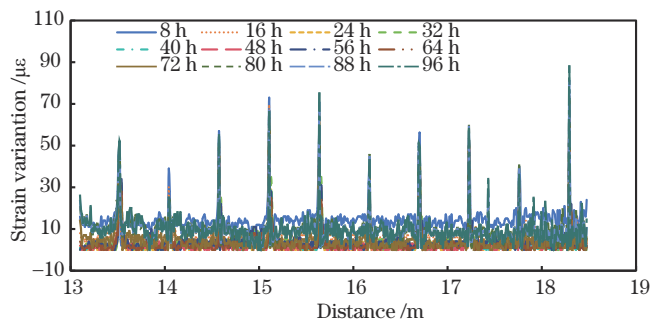


图 8 全浸区分布式光纤应变变化曲线

Fig. 8 Distributed optical fiber strain variation curves in the immersion zone

产生大量腐蚀产物,但水流导致腐蚀产物不断流失,钢管桩外径减小,应变也不断减小。继续加速腐蚀后,水流带走的腐蚀产物和新生成的腐蚀产物达到平衡状态,与水形成锈泥,由于无纺布的阻挡,应变再次增大。从图 8 还可以看出,全浸区应变包含多个峰值,相邻峰值间距约为钢管桩的截面周长,通过对比图 6 和图 7 发现钢管桩在大气区和波动区的应变曲线也出现类似现象,但全浸区更为明显。根据钢管桩布设位置发现,周期应变峰位置与辐射加热器出风口位置吻合,导致辐射加热器正对位置处钢管桩表面的局部温度高于其他区域,高温不仅导致钢管桩与腐蚀介质的反应速率加快,还使金属离子从钢管桩表面溶解到盐溶液的速率加快,从而加剧了钢管桩的腐蚀。由于波动区腐蚀产物引起的应变变化幅值较大,周期应变峰与腐蚀产物引起的应变峰融合在一起,导致周期应变峰变化不明显。

图 9 为钢管桩经过不同腐蚀时间后各腐蚀区光纤所有应变平均值的变化曲线,以图 9(a)为例,图中 12 个黑色数据圆点为 12 个应变值,分别对应钢管桩腐蚀 8、16、24、32、40、48、56、64、72、80、88、96 h 后大气区光纤所有监测点的应变平均值,每个数据圆点由图 6 中相同腐蚀时间应变曲线上所有应变值求平均获得。由图 9 可知,大气区平均应变呈先缓慢增加后逐渐减小的趋势,由于大气区没有与盐溶液接触,腐蚀速率最为缓慢。随着腐蚀时间的增加,腐蚀产物变得疏松,使光纤膨胀效应减弱,光纤应变呈逐渐减小趋势。波动区上半部分的平均应变呈线性增加,幅值变化最大,这与该区含氧量丰富、受盐溶液周期浸润等因素有关,这些因素会导致腐蚀速率加快。波动区下半部分和全浸区的变化趋势一致,都是先减小再保持稳定,然后呈线性增加趋势。这是由于这两个区域与盐溶液接触时间较长,水流带走的腐蚀产物和积累的腐蚀产物需先达到一个平衡状态。

4.2 钢管桩环向应变与质量损失的关系

为探究钢管桩各区域的腐蚀情况,将试样 B 每隔两个试验周期从水箱取出进行烘干,然后去除腐蚀产物称重并计算质量损失。图 10(a)为钢管桩经过 16、32、48、64、80、96 h 加速腐蚀后钢管桩大气区、波动区和全浸区质量损失变化曲线,其中全浸区质量损失最多,波动区次之,大气区最少,说明钢管桩全浸区腐蚀最为严重。图 10(b)为波动区平均应变与质量损失关系曲线,横坐标为钢管桩加速腐蚀 16、32、48、64、80、96 h 后波动区质量损失,纵坐标为经过对应腐蚀时间后钢管桩波动区的应变均值,应变均值计算方法与图 9 一致。通过回归分析得到波动区平均应变与质量损失的拟合方程为 $y=2.1938x+3.6307$,相关系数 $R^2=0.9891$,说明拟合结果是合理的,波动区平均应变与质量损失呈线性关系。因此,通过监测钢管桩波动区的平均应变可以量化钢管桩腐蚀的严重程度。

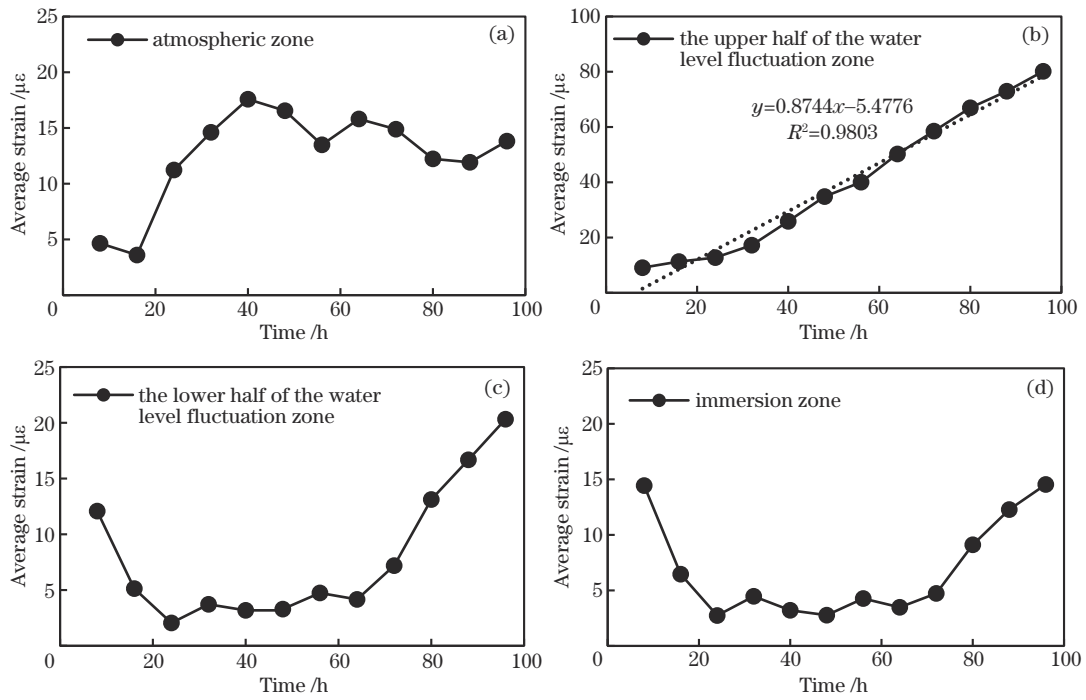


图9 各腐蚀区域平均应变曲线。(a)大气区;(b)波动区上半部分;(c)波动区下半部分;(d)全浸区

Fig. 9 Average strain curve in each corrosion zone. (a) Atmospheric zone; (b) upper half of fluctuation zone; (c) lower half of fluctuation zone; (d) immersion zone

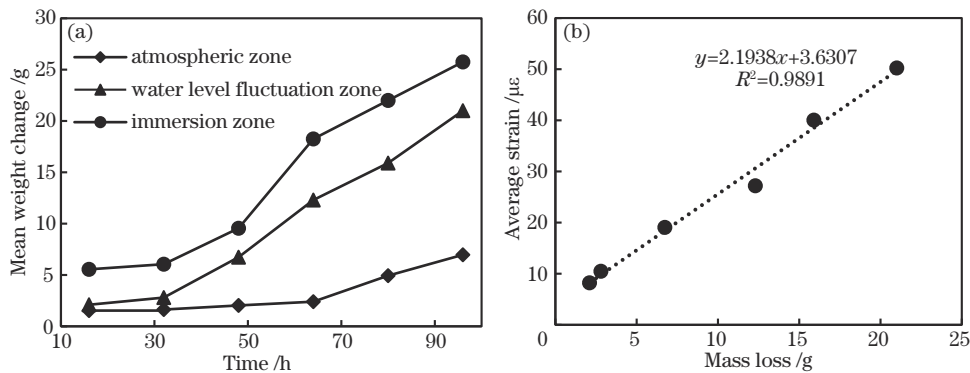


图10 质量损失与应变关系图。(a)各腐蚀区质量损失曲线;(b)波动区平均应变与质量损失曲线

Fig. 10 Mass loss and strain relationship diagrams. (a) Quality loss curves of each corrosion zone; (b) curve between average strain and mass loss in the fluctuation zone

根据图10(a)所示的全浸区质量损失曲线和图9(d)所示的全浸区平均应变曲线,可以获得全浸区质量损失与环向应变的拟合方程。由于全浸区的钢管桩与盐溶液接触时间最长,水流和渗透作用导致腐蚀产物不断流失,使得全浸区质量损失与光纤应变测量结果并不能呈现良好的线性增加关系。根据质量损失测量结果可知,钢管桩全浸区腐蚀最为严重,后续可通过选用适当孔径的过滤布来减少腐蚀产物流失,从而提高分布式光纤的腐蚀应变感知能力。

4.3 钢管桩腐蚀监测及腐蚀区域定位

为有效获得钢管桩的腐蚀情况,采用分布式光纤传感技术监测钢管桩环向应变,通过3次样条插值法

拟合相邻光纤之间的应变,然后对应变场进行重构。图11为重构后的应变云图,图11(a)~图(1)分别为钢管桩在加速腐蚀8、16、24、32、40、48、56、64、72、80、88、96 h后的应变云图。由于受到水流带走部分腐蚀产物的影响,腐蚀最严重的全浸区并没有出现明显的彩色区域。波动区与盐溶液接触时间相对较短,腐蚀产物流失较少,从应变云图上可以明显看到大量局部彩色区域,表明钢管桩是非均匀腐蚀。随着腐蚀时间的增加,彩色区域的面积逐渐增大,红色区域也更加明显,说明该区域的腐蚀也越来越严重。应变云图可以直观显示钢管桩表面的腐蚀程度,能够为运维人员提供腐蚀预警和维修指导。

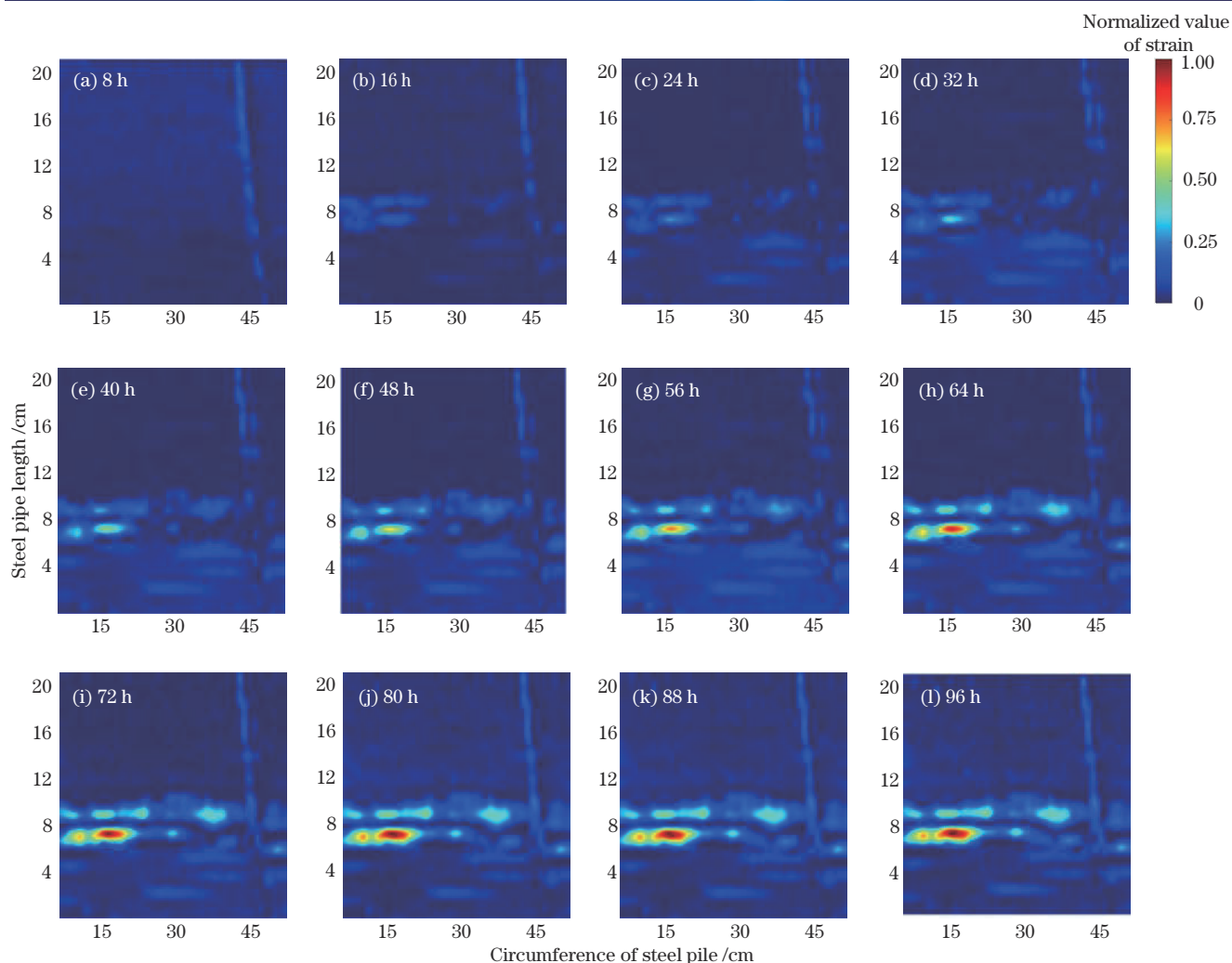


图 11 钢管桩经过不同腐蚀时间的应变彩色云图

Fig. 11 Strain color cloud maps of steel pile after different corrosion time

5 结 论

将分布式光纤传感技术用于钢管桩表面腐蚀监测,通过加速腐蚀实验探究了大气区、水位波动区和全浸区的光纤应变规律,然后建立了钢管桩质量损失与平均应变之间的关系,并绘制了钢管桩腐蚀应变云图。研究表明,通过分布式光纤应变测量可以获得钢管桩的腐蚀状态,应变彩色云图能够实现对腐蚀过程的监控及局部腐蚀区域的定位,根据应变均值与质量损失的关系可以量化钢管桩腐蚀的严重程度。然而,水流引起的腐蚀产物流失和腐蚀产物积累在达到动态平衡过程中,应变与腐蚀程度的对应关系还需进一步研究。在工程实践中,还应考虑光纤缠绕的初始拉伸力及钢管桩包覆结构的渗透性能。

参 考 文 献

- [1] 路东柱, 赵霞, 高昌, 等. 钢结构及其连接部位包覆防腐技术的应用实践[J]. 材料保护, 2023, 56(1): 163-174, 183.
Lu D Z, Zhao X, Gao C, et al. Application of wrapping

technology for protecting steel structures and joint parts from corrosion[J]. Materials Protection, 2023, 56(1): 163-174, 183.

- [2] 许波, 张子健, 柴军辉, 等. 超声导波 B 扫成像技术在压力管道腐蚀检测中的应用[J]. 化工机械, 2022, 49(1): 156-159.
Xu B, Zhang Z J, Chai J H, et al. Application of ultrasonic guided wave B-scan imaging technology in corrosion detection of pressure pipeline[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2022, 49(1): 156-159.
- [3] 张真, 殷爱鸣, 金绪良, 等. 海上风电腐蚀监测技术研究现状[J]. 分布式能源, 2022, 7(5): 39-45.
Zhang Z, Yin A M, Jin X L, et al. Research status of offshore wind power corrosion monitoring technology[J]. Distributed Energy, 2022, 7(5): 39-45.
- [4] 刘微. 测量不锈钢电化学噪声的非对称表面方法[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(5): 1151-1158.
Liu W. Asymmetric surface configuration for electrochemical noise measurement on stainless steel[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(5): 1151-1158.
- [5] 张鼎博, 李俊, 张维, 等. 光纤光栅传感技术在异形结

- 构健康监测中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(5): 0505001.
- Zhang D B, Li J, Zhang W, et al. Application of fiber Bragg grating sensing technology in the health monitoring of special-shaped structures[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(5): 0505001.
- [6] 刘显明, 任怡霖, 周峰, 等. 面向高速动态测量的光纤光栅传感信号解调技术研究进展[J]. 中国激光, 2023, 50(10): 1000001.
- Liu X M, Ren Y L, Zhou F, et al. Research progress of FBG sensing signal demodulation technology for high-speed dynamic measurement[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(10): 1000001.
- [7] 吴海颖, 朱鸿鹄, 朱宝, 等. 基于分布式光纤传感的地下管线监测研究综述[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(6): 1057-1070.
- Wu H Y, Zhu H H, Zhu B, et al. Review of underground pipeline monitoring research based on distributed fiber optic sensing[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(6): 1057-1070.
- [8] 严琨, 刘国栋, 张恒, 等. 基于缠绕式FBG传感器的斜拉索镀锌高强钢丝腐蚀定量监测方法研究[J]. 公路交通技术, 2022, 38(6): 75-82.
- Yan K, Liu G D, Zhang H, et al. Research on corrosion quantitative monitoring method of high strength galvanized steel wire for stay cable based on wound FBG sensor[J]. Technology of Highway and Transport, 2022, 38(6): 75-82.
- [9] Vahdati N, Wang X T, Shirayev O, et al. External corrosion detection of oil pipelines using fiber optics[J]. Sensors, 2020, 20(3): 684.
- [10] 王浩, 蔡思佳, 张作才. 一种新型光纤光栅锈蚀传感器及其对混凝土结构钢筋锈蚀监测实验研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(8): 877-880.
- Wang H, Cai S J, Zhang Z C. A novel fiber grating based corrosion sensor and experimental study on corrosion monitoring of reinforced concrete structure[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(8): 877-880.
- [11] 张庆所, 胡江. 光纤传感技术在海底管道泄漏监测方面的应用[J]. 天津科技, 2016, 43(3): 45-47, 50.
- Zhang Q S, Hu J. The application of optical fiber sensing technology in the monitoring of submarine pipeline leakage[J]. Tianjin Science & Technology, 2016, 43(3): 45-47, 50.
- [12] 葛峰, 别雄波, 武惠华, 等. 基于光纤Bragg光栅超声复合检测金属腐蚀与振动状态方法研究[J]. 激光杂志, 2024, 45(2): 78-84.
- Ge F, Bie X B, Wu H H, et al. Research on the method of ultrasonic composite detection of metal corrosion and vibration state based on fiber Bragg grating[J]. Laser Journal, 2024, 45(2): 78-84.
- [13] Feng X, Han Y, Wang Z H, et al. Structural performance monitoring of buried pipelines using distributed fiber optic sensors[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2018, 8(3): 509-516.
- [14] Tan X, Fan L, Huang Y, et al. Detection, visualization, quantification, and warning of pipe corrosion using distributed fiber optic sensors[J]. Automation in Construction, 2021, 132: 103953.
- [15] 王宇, 肖迪, 牛洋洋, 等. 基于光频域反射仪的光纤水听器探头结构形变研究[J]. 光学学报, 2023, 43(5): 0528001.
- Wang Y, Xiao D, Niu Y Y, et al. Structural deformation of fiber optic hydrophone probe based on optical frequency domain reflectometry[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(5): 0528001.
- [16] 付彩玲, 彭振威, 李朋飞, 等. OFDR分布式光纤温度/应变/形状传感研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(11): 1106007.
- Fu C L, Peng Z W, Li P F, et al. Research on distributed fiber temperature/strain/shape sensing based on OFDR[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(11): 1106007.
- [17] 程刚, 王振雪, 朱鸿鹄, 等. 基于分布式光纤感测的岩土体变形监测研究综述[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(19): 1900004.
- Cheng G, Wang Z X, Zhu H H, et al. Research review of rock and soil deformation monitoring based on distributed fiber optic sensing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(19): 1900004.