

基于DOFS技术的CIPP原位固化修复工程 全线监测技术及工程实践

王晓波¹, 孙跃平², 包凌³, 徐臻炜¹, 杨后军²

[1. 上海城市环境集团有限公司, 上海市 200082; 2. 上海管丽建设工程有限公司, 上海市 201109;

3. 拓洪管道材料(昆山)有限公司, 江苏 苏州 215311]

摘要: 原位固化法(cured-in-place pipe, CIPP)作为当前地下管道非开挖修复的主流技术,在实际应用中受传统温度监测技术诸多缺陷制约,存在全线监测盲区、温度测量精度低、质量追溯能力缺乏等缺点,且易因地下水渗入等环境干扰导致树脂固化度不足,最终造成修复效果不佳及返工。分布式光纤传感(distributed optical fiber sensing, DOFS)技术基于光散射效应,具备厘米级间隔的长距离实时监测能力,且具抗电磁干扰、耐腐蚀特性,可适配地下复杂施工环境。将该技术应用于CIPP修复工程,能够实时监控固化温度变化、精准定位异常数值并及时调整施工参数,有效解决传统监测痛点。目前,这种技术已在上海、浙江等地的多个管道修复工程中成功应用并通过验证,内衬弯曲弹性模量均满足设计要求,对提升CIPP修复工程质量具有重要现实意义。

关键词: 分布式光纤传感(DOFS); 原位固化法(CIPP); 温度监测; 施工质量; 全生命周期监测; 光时域反射(OTDR)

中图分类号: TU992

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)06-0317-05

Full-line Monitoring Technology and Engineering Practice of CIPP In-situ Curing Repair Project Based on DOFS Technology

WANG Xiaobo¹, SUN Yueping², BAO Ling³, XU Zhenwei¹, YANG Houjun²

[1. Shanghai Urban Environment Group Co., Ltd., Shanghai 200082, China; 2. Shanghai Guanli Construction Engineering Co., Ltd., Shanghai 201109, China; 3. Tohon Pipeline Materials (Kunshan) Co., Ltd., Suzhou 215311, China]

Abstract: The cured-in-place pipe (CIPP) method, as the mainstream technology for trenchless repair of underground pipelines at present, is constrained in practical applications by many shortcomings of traditional temperature monitoring techniques. There are disadvantages such as blind spots in full-line monitoring, low accuracy in temperature measurement, and lack of quality traceability capabilities. And it is also prone to insufficient resin curing due to environmental interference such as groundwater infiltration, ultimately leading to poor repair effect and rework. The distributed optical fiber sensing (DOFS) technology based on the light scattering effect has the capability of long-distance real-time monitoring at centimeter-level intervals, and has the characteristics of anti-electromagnetic interference and corrosion resistance, which can be adapted to the complex underground construction environment. Applying this technology to CIPP repair projects can monitor the changes in curing temperature in real time, accurately locate the abnormal values and promptly adjust construction parameters, effectively addressing the pain points of traditional monitoring. At present, this technology has been successfully applied and validated in multiple pipeline repair projects in Shanghai, Zhejiang and other areas. The bending elastic modulus of the inner lining all meet the design requirements. The significant practical significance is for improving the quality of CIPP repair projects.

Keywords: distributed optical fiber sensing (DOFS); cured-in-place pipe (CIPP); temperature monitoring; construction quality; full-life-cycle monitoring; optical time-domain reflectometry (OTDR)

0 引言

收稿日期: 2026-02-05

作者简介: 王晓波(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事市政工程施工领域的科研及科技管理工作。

通信作者: 杨后军(1985—), 男, 本科, 高级工程师, 从事给排水管道非开挖修复技术研究及施工管理工作。电子信箱: 305682987@qq.com

城市地下管网长期服役后,易因腐蚀、沉降出现渗漏、结构破损等缺陷,直接威胁居民生活与生态环境。原位固化法(CIPP)作为非开挖修复的核心技

术,已成为雨污水管道修复的主流方案。但该技术依赖复杂的热化学固化反应,受管道弯曲、地下水渗漏、周围环境温度等环境条件,以及加热速率、树脂配比等施工参数的综合影响,固化质量难以精准把控,成为工程落地的核心瓶颈。

传统热电偶点式监测仅覆盖管道两端或少数中间点位,温度测量误差大于1℃。实际工程中,管底易积聚残余污水,导致内衬局部温度较实际值低15~20℃,进而造成固化度不足;而管道弯曲段因热量积聚可能出现过度固化,这些监测盲区仅依靠端点数据无法识别,常引发内衬鼓包、开裂等问题,返工成本高昂^[1]。

施工方通常依据材料商提供的“固化温度-时间”参数参考(如80℃保温2h)组织施工,未充分考虑管道实际环境差异。例如,地下水通过裂缝渗入未固化树脂时,会形成局部散热区域,导致树脂交联反应不完全,此类离散、动态干扰均无法通过预设参数应对。传统电子传感器易受管内余水及地下水影响,在地下潮湿环境中故障率高,且单根电子线性传感器成本比分布式光纤高1倍以上,仅能在管道两端检查井或少数中间点位布设,无法满足管道的连续监测需求。

综上所述,传统监测难以实现CIPP固化过程“全线、实时、精准”的管控目标,既缺乏施工调整的数据支撑,也无法提供可追溯的质量证明,急需适配性更强的监测技术突破现有瓶颈。

1 DOFS 技术原理与优势

分布式光纤传感技术基于光散射效应,通过激光脉冲与光纤分子的相互作用^[2],将温度信号转化为可量化的光信号,结合时域分析实现全线连续监测,其核心原理与工程适配性完全契合CIPP修复的质量管控需求。

1.1 核心技术原理

DOFS技术的监测功能依赖三种关键光散射效应,通过光时域反射(optical time domain reflectometer, OTDR)或光频域反射(optical frequency domain reflectometer, OFDR)技术解析数据,不同效应的功能定位存在显著差异^[3]。

(1)瑞利散射。激光脉冲与光纤分子发生弹性碰撞,散射光强度随光纤拉伸或压缩形变而变化。尽管本研究聚焦CIPP施工期固化温度监测,但瑞利散射可同步记录内衬固化后的初始应变基准值,为

修复完成后长期监测内衬开裂、沉降提供数据参照,形成“施工期-运营期”完整监测链条^[4]。

(2)布里渊散射。激光与光纤中的声子相互作用,散射频移量与光纤所受应力及应变呈线性关系,精度可达1με。当前CIPP修复中内衬与原管道界面黏结质量缺乏有效监测手段,布里渊散射的应力应变监测能力可作为技术拓展方向,未来与现有温度监测技术结合,可实现“温度+应力”双维度质量控制,完善全过程监测体系。

(3)拉曼散射。通过捕捉“斯托克斯光-反斯托克斯光强度比”,可直接转化为工程所需的温度数据^[5],测温范围-40~300℃,完全覆盖CIPP热水/蒸汽固化温度(60~120℃)及放热峰(140~200℃)的工况需求。

(4)本研究应用阶段仅采用拉曼散射实现固化温度监测;瑞利散射仅同步记录内衬初始应变基准值,为后续运营期监测预留数据基础,非本次工程验证内容;布里渊散射的应力监测为未来技术拓展方向,暂未纳入本次工程实践。

1.2 系统工作流程

(1)预先将传感光纤铺设于内衬外侧或垫层中;(2)向光纤注入10~100 ns窄脉冲激光;(3)通过高速光电探测器捕获散射回波,记录光信号传播时间;(4)借助算法将散射光强度和频移转化为温度、应变数据,生成“温度-时间-位置”三维图谱,实现全域实时监测。

1.3 工程适配性优势

DOFS技术在CIPP修复场景中的优势显著优于传统监测技术,具体对比如表1所示。

1.4 光纤安装与校准要求

为确保监测有效性,DOFS技术在CIPP施工中的

表1 传统监测技术与DOFS技术对比

对比维度	传统监测(热电偶/电子传感器)	DOFS技术
监测范围	仅管道两端或少数测点,全线盲区多	单根光纤可覆盖几十千米,全线无盲区
测量精度	温度误差大于1℃,无法覆盖管道全线	温度误差±1℃,厘米级间隔,覆盖管道全线
环境适用性	易受地下水干扰,潮湿环境故障率大	抗电磁干扰、耐腐蚀,测温范围-40~300℃
数据呈现	单点温度值,无空间关联性	三维图谱(温度-时间-位置),直观定位异常
成本	单根电子线性传感器成本高	设备和运维成本低
附加价值	仅施工期监测,无长期功能	施工期质量控制,可追溯质量数据,支持全生命周期监测

安装需选用直径2.0 mm铠装传感光纤,横截面积70%以上用于抗拉伸设计,以适配管道拉入过程中的机械应力;光纤优先铺设于管道底部(升温最慢、易积水的关键区域),条件允许时还可沿管道周向间隔 120° 布设3根,实现全断面温度分布监测。铺设流程如下:(1)在原管道内拉入预衬管;(2)将光纤牵拉至预衬管内;(3)内衬翻转置入后,确保光纤紧贴内衬外侧;(4)启动固化温度实时监测,同步记录温度-时间-位置数据;(5)修复完成后,及时切除管道两端多余光纤,保障施工期监测数据完整。

2 软件监测与数据应用

2.1 核心监测参数

基于DOFS技术的温度数据采集能力,专用软件需聚焦CIPP固化过程中直接影响树脂交联质量的关键参数,具体包括放热峰值温度、固化时长和冷却速率三类。软件需实时采集并分析以下关键参数,直接关联固化质量。

(1)放热峰值温度

树脂固化的放热反应会产生峰值温度,通常比设定温度高 $15\sim 40^{\circ}\text{C}$,如设定固化温度为 $80\sim 150^{\circ}\text{C}$ 时,放热峰值为 $110\sim 190^{\circ}\text{C}$,软件需精准捕捉峰值并判断是否超材料耐受极限,避免内衬热损伤。

(2)固化时长

软件自动统计各区域达到固化临界温度后的持续时间(如 50°C 以上持续2 h),确保树脂充分交联,避免表面固化、内部未固化的“假固化”现象。

(3)冷却速率

固化完成后,冷却速率需控制在 $1\sim 2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以内,冷却过快易导致内衬与原管道黏结剥离,软件通过温度曲线斜率实时显示冷却速率,为施工调整提供依据。

2.2 软件功能与数据联动

专用监测软件作为DOFS技术落地的核心载体,通过“实时监测-数据追溯-资产联动”3大核心功能,构建“数据驱动决策”的质量管控闭环,为CIPP修复工程高效落地提供关键支撑。

(1)实时监测固化温度

终端界面同步显示全线温度概览与单点温度曲线,支持实时调取任意位置的温度数据,无需复杂操作即可完成参数查看与调控指令下发,大幅提升现场作业效率(设备终端见图1)。

软件界面生成“温度-时间-位置”三维温度曲



图1 设备终端全触摸操作界面

线,其中一条曲线对应“选定时间点下管道各区域温度分布”,一条曲线对应“选定区域在全时段的温度变化趋势”;横轴标注管道距离(单位:m),纵轴标注温度值(单位: $^{\circ}\text{C}$),底部进度条可精准定位当前监测时间点,施工人员可依据曲线波动实时调节热水循环速率、热水温度等参数,避免局部固化不足或过度固化。

(2)数据追溯与报告生成

系统每5 s自动存储全线温度数据,修复完成后生成CIPP固化质量数据及图表,包含“温度-时间-位置”三维图谱,各区域固化时长统计、异常温度区域处置记录等核心内容,数据可追溯、结论可量化,直接作为工程管理单位验收的依据。

(3)资产管理联动

软件预留GIS(地理信息系统)对接接口,为管道全生命周期资产管理提供技术延伸,未来可通过数据接口实现温度监测数据与GIS空间信息的深度融合,将各路段管道基于温度数据判定固化质量情况映射至管道电子地图,并以“优、良、合格”三级等级直观标注,形成“空间位置-固化质量-验收结论”一体化的可视化报告,为工程验收、后期运维提供精准的空间化数据支撑。

3 分布式光纤在CIPP修复中的实际应用

为验证DOFS技术在复杂管道缺陷场景下的监测有效性,选取上海市嘉定区某小区缺陷污水管道开展现场试验,试验准备工作如下。

3.1 试验准备

选用直径2.0 mm的铠装分布式光纤(插入损耗0.01 dB,回波损耗37.5 dB,见图2);沿管道底部铺设1根光纤,重点监测温度最低点(光纤置入管道过程见图3);采用OTDR光时域反射仪(采样频率1 kHz),搭配CIPP专用监测软件,支持实时温度显示与温度

数据回放。参照《城镇排水工程施工质量验收标准》(DG/TJ 08-2110—2025),闭水试验渗漏量需为0,内衬弯曲弹性模量不小于2 000 MPa。



图2 2.0 mm 铠装分布式光纤实拍图



图3 光纤置入管道过程

3.2 试验过程与监测结果

管道长86.1 m,存在2处4级破裂、2处3级破裂、多处2级破裂,1处3级渗漏、2处2级渗漏、多处1级变形,采用翻转法热水固化工序,树脂为MERICAN9405T不饱和聚酯树脂,基材为聚酯纤维软管。试验全程监测6 h,其中加热阶段2.5 h、固化阶段3.5 h,核心结果及温度调控措施如下:

(1)加热阶段,0~2.5 h,管道两端温度先升至50℃,第1.7 h时,25.7 m处出现114.5℃放热峰值(见图4),未超出材料耐受极限。施工方通过调整热水循环速率,切换热水循环泵运行模式,成功将该区域温度调控至60℃合理区间。结合修复前录像分析,该区域因管道变形导致热水流速异常加快,形成局部高温(管道25.7 m处缺陷见图5)。

(2)固化阶段,2.5~6 h,全线温度经加热后稳定在50~55℃区间,但37.3 m处温度持续偏低,仅维持在30℃左右,低于50℃固化临界阈值。施工方延长锅炉加热2 h,该区域温度上升至33℃(见图6)。通

过分析该点温度曲线,发现曾出现过放热高峰,结合MERICAN 9405T树脂固化动力学曲线,判断固化已完成。后查看修复前录像及参考基于分布式光纤温度传感器的排水管网外来水监测试验研究^[6],确认该点位因管道渗漏导致热量散失,是温度偏低的核心原因(管道37.3 m处缺陷见图7)。

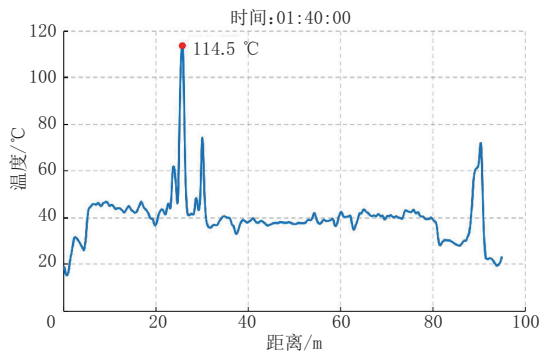


图4 高温异常点监控



图5 管道25.7 m处缺陷

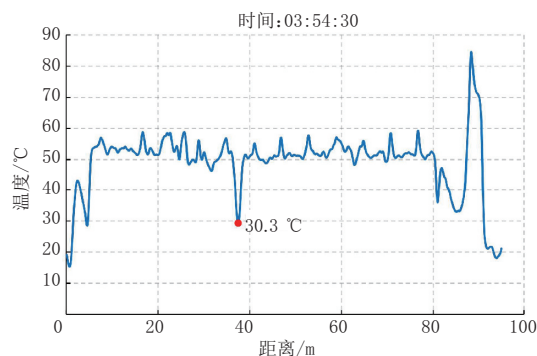


图6 低温异常点监控



图7 管道37.3 m处缺陷

试验中选取管道20、40、60、80 m四个典型测点,平均温度相对误差4.9%、标准差1.43℃,数据稳定良性。修复完成后,内衬表面光滑、平整;闭水试验结果合格,内衬管弯曲弹性模量达3 199 MPa,满足设

计要求且符合《城镇排水工程施工质量验收标准》(DG/TJ 08-2110—2025)要求^[7]。

3.3 其他工程案例数据分析

CIPP温度监测系统已在浙江DN1200-93 m雨水水泥管、上海DN1200-46 m雨水水泥管、上海DN800-125 m污水金属管修复工程中应用,结合监测数据分析得出以下规律。

(1) 材质不同的影响

金属管高低温度差小于水泥管,金属管高低温度差范围为20~30℃,46 m水泥管为30~50℃,93 m水泥管为20~60℃。

(2) 管道长度不同的影响

管道长度越短,升温速率越快,相邻点位温度差异越小,温度曲线波动幅度较大。管道长度越长,升温与降温速率越慢,两端易积聚热量,管道中间部位温度偏低,可能导致固化不充分。

基于上述规律,针对金属管需侧重稳定加热、针对水泥管侧重温差控制、针对短管强化波动预警、针对长管强化中间段补热,最终实现全工况下的温度精准调控,保障CIPP内衬层固化质量的稳定性与可靠性。

该检测系统对紫外光固化法在上海DN1000-52.5与DN100-44.3 m水泥管上也有相关应用。检测数据分析,紫外光灯架行进作业时,管内对应区域温度随设备抵达同步抬升、辐照核心处达峰值且过区后回落,连续作业整体温度基线小幅缓步上升且波动符合工艺要求,因所修两段管道参数相近、施工仅做局部微幅优化,故两段管道温度检测曲线高度一致。

综上所述,CIPP温度监测系统在热水原位固化法、紫外光固化法两种工艺中均具有良好适用性,可广泛应用于各类管道修复监测;管道材质、长度、地域气候是核心影响因素,基于此制定的差异化调控策略,能有效保障CIPP内衬层固化质量,为同类管道修复工程提供可靠技术参考。

4 结论与未来展望

分布式光纤并非全新技术,已在石油勘探长输

管道温度监测等领域应用多年,技术成熟度高。将其应用于CIPP修复场景,仅需针对管道施工环境优化探针结构与算法,技术风险可控,可靠性有保障。该技术能有效解决CIPP修复的监测痛点,实现全线、实时、精准的温度监测,定位误差不大于0.5 m,温度误差 $\pm 1^{\circ}\text{C}$,可动态调整加热参数,提高了CIPP内衬修复质量,同时减少了返工成本,兼具技术与经济价值。

未来可从四方面深化:一是研发低成本嵌入式、耐弯折光纤,降低技术推广门槛;二是建立不同材料商的“材料-固化温度-时间”曲线数据库,叠加环境温度进行现场固化控制;三是优化异常温度模式识别算法,如构建冷凝水、地下水渗入的特征温度曲线,减少人工判断依赖;四是完善“施工-运营”全过程监测体系,实现内衬质量的全生命周期管控;五是拓展技术应用场景,覆盖燃气与热力管道的CIPP修复监测。

综上所述,DOFS技术为CIPP修复工程质量控制提供了全新解决方案,既能提升施工质量与效率,又能保障管网长期安全运行,具备广阔的应用前景,值得在城市地下管网修复中大规模推广。

参考文献:

- [1] Jacob Wells, Richard Lindner, Carlos Andres Munera, 等. 应用光纤温度传感技术控制管道CIPP施工质量[J]. 非开挖技术, 2013(2): 116-118.
- [2] 林勇锋. 电力电缆隧道计算机综合监控系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [3] DL/T 1573—2016 电力电缆分布式光纤测温系统技术规范[S].
- [4] 李洁. 分布式光纤传感技术在蜗壳模型试验中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [5] 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, 22(7): 19-24.
- [6] 陈静如, 郭帅, 申屠华斌, 等. 基于分布式光纤温度传感器的排水管网外来水监测试验研究[J]. 水电能源科学, 2024, 42(6): 134-138.
- [7] 陈起新. 浅析污水管道CIPP非开挖修复技术[J]. 江西建材, 2022(9): 284-285.