

天然气输送管线维修中的复合材料修复技术研究

李俊(中国石油化工股份有限公司华北油气分公司采油气工程服务中心,山西晋中030600)

摘要:天然气输送管道作为能源调配的核心基础设施,其安全运维直接影响国家能源战略安全。天然气输送管线在运行过程中会因为多方面原因而出现磨损、老化、破损等情况,以往焊接修复技术作业难度大,工艺复杂,并且还会影响天然气的正常输送,而复合材料修复技术等不断发展为天然气输送管线维修提供了新的方向。文章对当下常用的复合材料修复技术进行了总结分析,结合具体的工程实例进一步探讨了复合材料修复技术在应用中的要点和关键,以供类似工程参考。

关键词:天然气输送管道;复合材料修复技术;实例分析

中图分类号:TE973.6 文献标识码:A 文章编号:1674-5167(2025)017-0087-03

Research on Composite Material Repair Technology in Natural Gas Pipeline Maintenance

Li Jun (Oil and Gas Engineering Service Center, North China Oil and Gas Branch, Sinopec, Jinzhong Shanxi 030600, China)

Abstract: As the core infrastructure for energy allocation, the safe operation and maintenance of natural gas transmission pipelines directly affect the national energy strategy security. Natural gas transmission pipelines may experience wear, aging, and damage due to various reasons during operation. In the past, welding repair techniques were difficult and complex, and could also affect the normal transportation of natural gas. The continuous development of composite material repair technology has provided new directions for the maintenance of natural gas transmission pipelines. The article summarizes and analyzes the commonly used composite material repair techniques, and further explores the key points and key applications of composite material repair techniques through specific engineering examples, providing reference for similar projects.

Keywords: natural gas transmission pipeline; Composite material repair technology; case study

复合材料修复技术作为新兴的管道结构补强手段,因其带压施工、快速响应的技术特性,逐渐成为管道维修领域的研究热点。做好相关复合材料修复技术的研究和应用,对于确保天然气输送安全和满足社会发展需求具有重要的促进作用。

1 复合材料修复技术在天然气输送管线维修中的应用优势

在能源运输体系现代化进程中,天然气输送管道作为连接资源产地与消费市场的核心纽带,其安全稳定运行直接关系到国民经济命脉。传统管道维修技术受制于停输成本高、施工风险大等固有缺陷,已难以适应现代管网高效运维需求。复合材料修复技术作为新兴的非开挖维修手段,在多方面发挥了极其良好的应用价值,该技术主要通过高性能纤维与树脂基体的协同作用,在受损管段表面构筑具有结构承载能力的复合补强层,实现管道完整性的原位恢复。相较于传统焊接修复,其优势体现在以下三个方面:第一,加固后具有更好的力学性能,修复层与母材形成协同受力体系,能够有效传递环向应力并抑制缺陷扩展,尤其适用于高压管道的强度恢复^[1];第二,经济性能好,无需停输降压的工艺特点可避免巨额供气中断损失,

同时显著降低施工设备投入与人力成本;第三,绿色环保,冷作业方式消除了焊接烟尘与天然气放空造成的环境污染,符合绿色低碳发展趋势。特别在复杂地质条件与高后果区域,复合材料修复技术展现出独特的技术适应性,为管道全生命周期管理提供了创新解决方案。

2 常用复合材料修复技术分析

2.1 碳纤维增强复合材料修复技术

随着长输管道向高钢级、大管径方向发展,对修复材料的力学性能提出了更高要求。碳纤维增强复合材料修复技术,发挥了良好的应用价值,其主要是通过高强度纤维定向排布与树脂基体固化成型,形成与管道曲率紧密贴合的复合壳体。该技术特别适用于存在显著壁厚损失的体积型缺陷修复,能够在管道运行压力下实现结构补强。在具体应用过程中,碳纤维布可灵活裁剪以适应不同管径,配合专用树脂体系形成稳定的三维网状结构^[2],如图1所示。但是该技术对基体表面处理要求严苛,需达到特定粗糙度等级以确保界面粘结强度,同时在低温环境下存在树脂固化速度减缓的技术瓶颈。尽管如此,其优异的抗疲劳性能与长期耐久性仍使其成为高压主干线修复的首选方案。

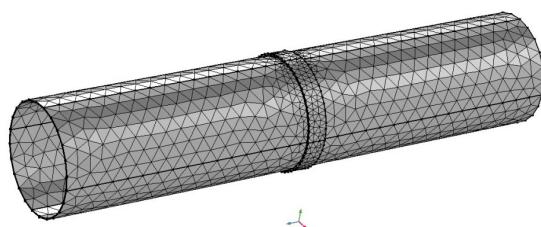


图 1 碳纤维增强复合材料修复管道的示意图

2.2 玻璃纤维增强修复技术

在低压支线管道与早期建设管网的维护场景中，玻璃纤维修复技术凭借其经济性优势得到了广泛应用。玻璃纤维修复技术是通过高韧性树脂与编织纤维布复合逐层叠加形成具有一定柔性的补强结构。其技术特点在于施工工艺简单、材料成本低廉，特别适合处理局部点蚀或小范围机械损伤。但在实际应用中发现，玻璃纤维模量相对较低，在长期承压工况下易出现应力松弛现象，导致补强效率随时间推移逐步衰减，并且材料耐温性能的局限性也制约了其在高温输送管段的应用。因此，该技术通常作为过渡性修复措施，或与其他工艺配合使用以提升综合效益。

2.3 芳纶纤维复合修复技术

针对应力集中区域与动态载荷工况下的管道缺陷，芳纶纤维修复技术可获得更好的应用效果。芳纶纤维复合修复技术在应用过程中可以利用高韧性纤维的三维编织结构，有效分散裂纹尖端应力场，抑制缺陷的进一步扩展，其独特的分子结构能够赋予材料优异的抗冲击与抗剪切性能，特别适用于存在振动风险的穿越段管道修复。在施工实践中，芳纶纤维的柔韧特性使其能够紧密贴合复杂管体表面，甚至在弯头、三通等异形部位也能实现高质量修复。需注意的是，由于该材料具有较强的吸湿性，所以在施工中必须严格控制环境的湿度，并采取必要的防潮处理措施，以确保修复效果。

3 复合材料修复技术在天然气输送管线维修中的实例分析

3.1 项目概况

西北某能源通道主干线在近年检测中发现多处严重缺陷，其中一处位于黄土高原过渡地带的管段尤为典型。该管道建成投运已超过 15 年，管径为 $\Phi 762\text{mm}$ ，设计压力 8.4MPa，承担着区域能源枢纽的重要输配任务。现场勘查显示，受损区域由第三方施工机械撞击造成，形成长约 280mm、深达 7.5mm 的凹陷损伤，邻近管体存在明显应力变形。环境检测表明该区域昼夜温差达 25℃以上，且土壤氯离子含量超标，加速了管壁腐蚀进程，经评估缺陷部位剩余强度已低于安全运行阈值，但传统停输换管方案将导致下游三

个城市供气中断。综合考虑技术可行性和经济影响，最终确定采用复合材料修复技术实施带压维修。

3.2 修复方案设计

基于缺陷形态与管道运行参数，设计团队制定了分阶段递进的修复策略。首先对损伤区域进行几何整形，采用高分子填充材料修复管体轮廓，确保后续补强层均匀受力，补强体系选用高模量碳纤维与柔性芳纶纤维的混合铺层结构，内层芳纶织物用于吸收动态载荷能量，外层碳纤维提供主要结构强度。

施工分为三个阶段：第一阶段实施表面喷砂处理，创造适宜黏结的微观形貌；第二阶段采用真空辅助工艺精确铺设纤维层，确保树脂浸润充分且无气泡残留；第三阶段通过梯度固化工艺优化材料性能，避免温度骤变引发界面应力。特别在层间过渡区域，创新采用锯齿状搭接设计，有效提升多材料界面的载荷传递效率。经理论计算，修复后管段承压能力可恢复至原设计值的 126%，完全满足后续安全运行要求。

3.3 复合材料修复技术要点

3.3.1 表面预处理

表面预处理作为修复工程的基础环节，其质量直接决定了复合材料与管道基体的结合效能。在复杂工况下，管道表面往往附着油污、腐蚀产物及环境污染，若未彻底清除将严重影响修复层的黏结强度。为此，工程团队采用干冰喷射技术作为清洁工艺的核心手段——通过高速喷射 -78.5℃ 的固态二氧化碳颗粒，利用其低温脆化与相变升华特性，在不损伤基体的前提下实现污染物剥离，这种非接触式清洁方式尤其适用于含氯离子或硫化物的腐蚀表面，可避免传统喷砂导致的磨料嵌入问题，经清洁后的表面需进行氯离子残留检测，采用离子色谱法抽检确保浓度低于 $3 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的临界值，从源头上杜绝界面电化学腐蚀风险。

在完成表面清洁后，就需要进行表面的粗化处理，从而构建稳定黏结的界面，工程选用莫氏硬度 8.5 的 16 棕刚玉磨料，在 0.6–0.8MPa 气压下实施精准喷砂作业。该工艺形成的 $50\text{--}100 \mu\text{m}$ 深度锚纹结构，既保证了树脂的机械嵌合效果，又避免过度粗化导致的应力集中。针对弯头、焊缝等异形区域，创新采用多自由度旋转喷枪系统，通过动态调整冲击角度使粗糙度分布均匀性偏差控制在 15% 以内，达到 ISO 8501-1 标准 Sa2.5 级的目视验收要求。

对于深度超 2mm 的局部凹陷，需进行几何形态修复以重建应力传递路径。双组分触变性环氧腻子的应用成为解决方案：其 60MPa 以上的抗压强度与基体热膨胀系数的高度匹配（差值 $\leq 1.5 \times 10^{-6}/\text{°C}$ ），确保了修复区与母材的协同变形能力。施工过程中，激光轮廓

廓仪实时扫描表面形貌，动态指导刮涂作业将平整度偏差控制在 0.5mm/m 以内。

3.3.2 纤维层铺设阶段

纤维层铺设质量直接影响着修复的质量，由于工程所处地区昼夜温差显著，所以在施工中施工团队首先对碳纤维布进行热压预成型处理，根据管径曲率 ($R=5D \sim 10D$) 预弯材料，消除其成型过程中的残余应力。首层纤维沿环向 0° 方向精准定位，借助激光投影辅助系统将铺设角度偏差控制在 2° 以内，确保纤维轴向与管道主应力方向精准匹配，后续采用 $[+45^\circ / -45^\circ / 0^\circ]$ 交叉叠层策略，每层 50mm 的阶梯式搭接设计有效分散层间剪切应力，尤其在环焊缝区域增设的 $\pm 30^\circ$ 斜向补强层，显著提升了应力集中区域的承载裕度。

为了确保纤维浸润质量，必须加强对树脂的管理，施工中采用双行星搅拌机以 300rpm 转速混合环氧树脂与固化剂（配比 100 : 35），通过精密控温系统维持混合料温度在 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ，调配完成的树脂黏度稳定在 3500–4500cps 范围，触变指数 > 4.0 的特性使其既能顺畅流动填充纤维间隙，又能在垂直表面保持稳定形态。在施工中为了避免树脂固化过程影响施工质量，必须在 40 分钟内完成涂覆作业。

在完成树脂的涂覆后，就可以真空辅助成型，通过柔性硅胶模具施加 -0.08MPa 均匀负压，配合 $60\text{--}80^\circ\text{C}$ 梯度热风辅助，使树脂浸润率达到 98% 以上。在弯头过渡区等复杂部位，采用预浸料补片加强技术，其锯齿形边缘设计（搭接长度 $\geq 15\text{mm}$ ）有效抑制了层间剥离风险。

3.3.3 固化养护阶段

在完成固化后，还需要进行进一步的养护以确保修复施工质量。针对西北地区特殊的气候条件，工程团队开发了三阶段梯度固化工艺：①初始预固化阶段在 25°C 环境中进行 2 小时，使树脂交联度达到 40% ~ 50%，形成初步网络结构；②主固化阶段以 $1^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 50°C 并维持 4 小时，促进分子链有序排列；③最终后固化阶段升温至 80°C 恒温处理 6 小时，完成三维交联网络构建。

为了确保固化的质量，还需要加强对环境管理，修复区域需要通过复合保温毯进行保温，在 72 小时常温养护期间需要将湿度波动控制在 40% ~ 60% 范围。同时在养护期间每天都需要进行巴柯尔硬度测试^[3]，材料刚度随时间呈现指数增长规律，最终稳定在 40 以上。针对昼夜温差 $> 20^\circ\text{C}$ 的极端工况，可以采用 0.2MPa 预应力补偿技术，通过液压张拉系统以 $0.05\text{MPa}/10\text{min}$ 的梯度施加环向预应力，有效抵消了材料收缩引起的

界面应力，使修复结构的长期稳定性提升 28%。

3.4 应用效果

在完成修复后，为了确保修复质量还需要进行多维度的检测，以此来评估修复结构的力学性能和服役可靠性。

3.4.1 水压试验

采用分级加载策略，先以设计压力的 1.1 倍 (12.5MPa) 稳压 4 小时，监测系统压降率需严格控制在 1% 以内，此过程可验证修复层的整体密封性与结构完整性。

3.4.2 应变测试

沿管道环向均匀布置 24 个电阻应变片，在升压过程中实时采集数据，结果显示最大环向应变值 0.15%，仅为允许限值 (0.5%) 的 30%，表明修复层有效分担了母材载荷。

3.4.3 无损检测

采用相控阵超声技术进行无损检测，探头阵列以 10mm 间距进行扇形扫描，检测报告显示层间结合面无分层缺陷，界面结合合格率超过 98%。对于高风险管段，额外实施脉冲涡流检测评估修复区与母材的电化学相容性，确保无局部腐蚀电流产生。具体检测数据如表 1 所示。

表 1 检测数据

检测项目	测试参数	验收标准	实测结果
水压试验	12.5MPa 保压 4 小时	压降 <1%	0.8%
应变测试	最大环向应变	$\leq 0.5\%$	0.15%
超声检测	层间缺陷检出率	无分层缺陷	合格率 98.7%
涡流检测	电化学电位差	$\leq 50\text{mV}$	32mV

4 结语

通过工程实例表明。复合材料修复技术在天然气管道维抢修中能够发挥良好的应用效果，有效减少因修复作业造成的损失和影响。但是在具体应用过程中，必须结合实际情况选择相应的修复方法，并加强对各环节的技术控制，以确保修复的质量，为天然气行业发展作出贡献。

参考文献：

- [1] 曾斌. 长输管道复合材料修复技术应用关键问题探讨 [J]. 全面腐蚀控制, 2023, 37(11):20-22+26.
- [2] 王莉莉, 高兆基, 马松浩, 等. 输油管道泄漏的三类不停输修复技术建模与对比分析 [J]. 河南科学, 2024, 42(11):1570-1577.
- [3] 颜达峰. 碳纤维复合材料对膨胀节补强修复效果的研究及应用 [J]. 上海煤气, 2024, (04):5-7.

作者简介：

李俊 (1970-) 男, 河北蔚县人, 大专, 工程师, 研究方向: 机械设备。