

复杂地质段天然气管道安全施工与输送关键技术研究

韩 瑶 (安徽中石油昆仑合燃压缩气有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘要: 本文以长三角地区常熟段天然气管道工程为研究对象, 针对其复杂地质与环境条件, 探讨了管道安全施工与输送的关键技术。通过集成地质精细化勘测、管道本体安全优化、动态防护体系及智能监测系统, 构建了多维度技术体系。工程实践表明, 采用预应力管桩、三维补偿器及分布式光纤传感等创新技术, 成功将地基差异沉降量控制在 5cm 以内, 管道失效概率降低至 $1.1 \times 10^{-6} / (\text{km} \cdot \text{a})$, 泄漏检测时间缩短至 30min。

关键词: 天然气管道; 安全输送; 复杂地质; 动态防护; 智能监测

中图分类号: TE832 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 023-0093-03

Research on Key Technologies of Safe Construction and Transportation of Natural gas Pipeline in Complex Geological Section

Han Yu (Anhui PetroChina Kunlun He Ran Compressed Gas Co., Ltd., Hefei Anhui 230000, China)

Abstract: This study focuses on the natural gas pipeline project in the Changshu section of the Yangtze River Delta region, addressing the critical technologies for pipeline safety construction and transportation under complex geological and environmental conditions. By integrating refined geological surveys, pipeline structural safety optimization, dynamic protection systems, and intelligent monitoring technologies, a multi-dimensional technical framework was established. Engineering practices demonstrated that innovative approaches, including prestressed pipe piles, three-dimensional compensators, and distributed optical fiber sensing, successfully controlled differential foundation settlement within 5 cm, reduced pipeline failure probability to $1.1 \times 10^{-6} / (\text{km} \cdot \text{a})$, and shortened leakage detection time to 30 minutes.

Keywords: Natural gas pipeline; Safe transportation; Complex geology; Dynamic protection; Intelligent monitoring

随着长三角城市群能源需求的持续增长, 区域性天然气管道已成为保障能源安全的重要基础设施^[1]。常熟地区河道密布、软土地基广泛分布的特征, 导致管道建设面临地基沉降、水力侵蚀、空间受限等多重挑战^[2]。现场监测数据显示, 第四纪沉积层压缩系数达 0.45 MPa^{-1} , 地下水位年变幅 2.8m, 汛期地基承载力衰减可达 40%^[3]。既有工程经验表明, 传统施工方法在软土区段易引发管体偏移超标 (最大达管径的 12%)、环焊缝开裂等质量缺陷^[4-5]。本研究聚焦长三角典型地质特征, 创新构建“勘察-设计-施工-监测”四维技术体系。

1 工程概况

表 1 工程核心参数表

参数类别	技术指标
管道规格	$\Phi 1219 \times 26.2 \text{ mm} \times 70$ 钢管
设计压力	10MPa
焊接工艺	全自动焊 (热输入 1.2-1.5kJ/mm)
防腐体系	三层 PE+ 牺牲阳极 (设计寿命 30 年)
地基处理强度	灰土挤密桩承载力 $\geq 350 \text{ kPa}$
沉降控制标准	差异沉降 $\leq 0.15\%L$ ($L=12 \text{ m}$)
断裂带补偿量	π 型补偿器 $\pm 800 \text{ mm}$

本工程为长三角天然气环网重要组成部分, 全长

24.6km, 设计压力 6.3MPa, 采用 $\Phi 1016 \times 20.6 \text{ mm} \times 70$ 钢管, 年输气量 85 亿 m^3 。工程穿越典型长三角复合地质区段: ①软土地基段长度 12.4km, 土层压缩模量 $E_s=3.2-4.8 \text{ MPa}$, 地下水位埋深 0.8-1.5m; ②河网交错区涉及 7 条Ⅲ级航道穿越, 最大河宽 86m, 汛期流速达 2.1m/s; ③城市建成区包含 3 处下穿轨道交通 (最小净距 2.3m)、5 处邻近高压输电塔 (最近水平距离 15m)。工程核心参数见表 1。

2 施工难点分析

2.1 软土地基差异沉降控制

长三角地区广泛分布的第四纪冲积层具有典型的高压缩性、低渗透性及显著的结构性特征^[6]。室内三轴试验表明, 当含水率从天然状态的 30% 增至饱和状态的 40% 时, 土体压缩模量 E_s 由 4.8MPa 骤降至 2.1MPa, 固结系数 C_v 下降幅度达 82%。基于修正剑桥模型的数值模拟显示, 在未采取地基处理措施的情况下, 24.6km 管线段在 5 年运营期可能产生最大 12cm 的差异沉降, 对应管体 Von Mises 应力分布显示: 在桩号 K9+370 处最大弯曲应力达 358MPa, 超过 X70 钢管屈服强度的 74%, 存在明显的塑性变形风险。

现场监测数据揭示了水文环境影响机制: 汛期地下水位上升 1m 时, 孔隙水压力梯度使有效应力降低 28%, 导致瞬时沉降速率达 1.8mm/d, 其时间序

列特征呈现指数型衰减规律。针对此类工程难题，工程团队研发了多层次控制体系：首先采用预应力混凝土管桩形成复合地基，通过桩土应力比调节将沉降量压缩至 4.2cm；其次布设纵向连续排水板（通水量 $\geq 35\text{cm}^3/\text{s}$ ），使超静孔隙水压力消散时间缩短 63%；最后配置分布式光纤监测系统，实现沉降速率的分钟级预警。

2.2 河网区水力侵蚀防护

长江三角洲河网区特有的潮汐动力环境与密集航运活动，构成了复杂的水力侵蚀作用体系^[7]。CFD 数值模拟采用 $k-\omega$ SST 湍流模型，通过结构化网格划分精确捕捉了多重耦合效应：①潮汐涨落形成的双向流场使管道表面剪切应力波动幅度达 $\pm 35\text{Pa}$ ，年循环作用次数超过 700 次；②船舶尾流场在距螺旋桨 3D 位置产生最大附加流速 0.8m/s，对应床面剪切应力瞬时峰值较静态水流增大 4.2 倍；③汛期高含沙水流造成的磨蚀效应，经 Hertz 接触理论计算，防腐层年磨损量可达 0.25mm。

现场实测数据显示，传统直埋管道在服役 20 年后，迎流面冲蚀深度呈现显著空间分异特征^[8]：航道中心线位置最大冲深 3.2mm，两侧护岸区则为 1.8mm。为此研发了复合防护体系：在结构设计层面，采用弧形导流罩配合整流格栅，使局部流速梯度降低 65%；材料防护方面，开发纳米 Al_2O_3 增强聚氨酯涂层，经旋转喷射试验验证，抗冲蚀性能提升 3.8 倍；监测预警系统集成多普勒流速仪与应变片阵列，当检测到涡激振动频率接近管体一阶固有频率（3.2Hz）时，自动启动调谐质量阻尼器（TMD），将振动加速度控制在 0.05g 以内。

2.3 城市空间协同施工

常熟城区地下空间呈现“五层立体化”特征（浅层管线 – 综合管廊 – 地铁隧道 – 深基础 – 基岩），管道施工面临毫米级精度控制挑战^[9]。在下穿轨道交通 1 号线工程中，研发了三维耦合控制技术：采用土压平衡顶管机配合触变泥浆形成 0.35MPa 的泥膜压力，通过实时监测系统将地层损失率控制在 0.15% 以内。监测数据显示，顶进过程中隧道管片最大竖向位移仅 3.8mm，满足轨道交通保护标准。

3 安全输送技术体系构建

3.1 地质精细化勘测技术

针对管网穿过区域，采用多频地质雷达与高密度电法协同探测^[10]，成功识别出 3 处隐伏落水洞及 5 条古土壤裂隙带，其空间定位精度较常规方法提升 42%。InSAR 遥感监测通过 30 景 Sentinel-1A 影像的时序分析，捕捉到断裂带周边年均 3.2mm 的蠕滑变形

信号，并发现两处面积达 1.2km^2 的潜在滑坡体。

三维地质建模技术通过融合钻孔数据、地震折射波及电磁波 CT 等多源数据，构建了精度达 0.5m 的地质实体模型。针对黄土层含水量分布，开发了基于介电常数反演的含水率动态模型，实现 0–10m 深度范围内含水率预测误差 $< 3.5\%$ ，较传统取样法效率提升 20 倍。

工程实践中，勘测技术的革新直接修正了 12% 的原始设计线路。例如在桩号 K23+150 处，地质雷达探测揭示地下 8.5m 存在厚度 2.3m 的砂砾石透镜体，促使设计方将原定直埋段改为定向钻穿越。精细化勘测技术效能对比见表 2。

表 2 精细化勘测技术效能对比

技术类型	传统方法局限	创新技术优势	精度提升幅度
隐伏构造探测	钻孔取样覆盖率 $< 15\%$	地质雷达 + 电磁 CT 复合探测	异常体识别率 +58%
断裂带监测	年人工复测 2 次	InSAR+ 光纤传感实时监测	数据时效性 +90%
含水量分析	取样实验室测试	介电常数反演模型	效率提升 20 倍
三维建模	二维剖面拼接	多源数据融合建模	空间精度 +75%

3.2 管道本体安全技术

针对低温韧性需求，通过优化微合金成分，使管材在 -20°C 下的夏比冲击功提升至 245J，同时将屈强比稳定在 0.88–0.91 区间，兼顾强度与形变能力。管体椭圆度控制精度达 0.4%（标准允许 1.2%），经水压试验验证，管径膨胀率仅为 0.12%，显著低于 0.3% 的设计限值。

全自动焊接工艺通过热输入量精准调控实现焊缝组织优化，采用双丝串列电弧技术使熔敷效率提升 35%，焊缝区硬度梯度控制在 240–270HV10，避免出现软化带。环焊缝无损检测中，相控阵超声（PAUT）与数字射线（DR）的复合应用使缺陷检出率提升至 99.6%。焊缝强度试验表明，接头抗拉强度达 675MPa（母材强度 695MPa），满足 95% 的强度匹配要求。

防腐层性能通过电场梯度设计实现长效防护，三层 PE 结构的剥离强度 $\geq 70\text{N}/\text{cm}$ （标准值 $\geq 50\text{N}/\text{cm}$ ）。阴极保护系统采用深井阳极地床与分段电位调控技术，使管道极化电位稳定在 $-1.05\text{--}1.15\text{V}$ （CSE），电位分布均匀性提升 40%^[11–12]。

3.3 动态防护体系

针对活动断裂带位移特征，设计基于应变能释放的 π 型补偿器系统，其曲率半径优化至 $6D$ （ D 为管径），

通过有限元分析验证，在最大位移量 800mm 工况下，补偿器弯曲应力降至 285MPa，较传统 L 型补偿器降低 42%。断裂带两侧设置双重锁定装置，可有效抑制非构造位移引发的管道滑移，现场监测显示锁定区位移量稳定在 $\pm 3\text{mm}$ 内。

地基的动态防护采用灰土挤密桩与渗流控制协同作用机制。桩体按梅花形布置，桩间土压实系数 ≥ 0.95 ，形成厚度 2.5m 的防渗隔离层。渗流监测数据显示，处理后的地基渗透系数从 $3.2 \times 10^{-4}\text{cm/s}$ 降至 $5.6 \times 10^{-6}\text{cm/s}$ ，雨季地下水位上升速率减缓 72%。

3.4 智能监测系统

系统架构采用“边缘计算 + 云端协同”模式，部署 320 个光纤布拉格光栅传感器与 54 组 MEMS 加速度计，构成覆盖全管线的立体监测网络。数据预处理采用小波阈值降噪算法，将应变信号信噪比从 12dB 提升至 28dB，有效滤除施工机械振动干扰。

工程实践中，系统成功预警两次重大风险：在桩号 K15+230 处，光纤应变突变触发滑坡预警，经核查发现坡体位移速率达 12mm/d；在 F2 断裂带，DAS 捕捉到 0.05Hz 低频振动信号，判定为断层蠕滑活动加剧，指导运维团队提前启动补偿器调节程序。系统响应时间从传统监测的 30 分钟压缩至 8 秒，实现从“事后处置”到“事前干预”的转变。

4 质量管控创新

4.1 隐蔽工程可视化

针对长三角软土区地下水位高、回填质量难控的特点，构建了多模态无损检测体系。采用 MALA Pro Ex 型探地雷达与 FLIRT1020 红外热像仪协同检测，通过介电常数反演与热导率分析，实现：①管沟回填密实度三维成像，在桩号 K6+220 处发现 2.5m^3 空洞，经高聚物注浆修复后压实度达 96%；②防腐层缺陷智能识别，利用卷积神经网络（CNN）算法分析 3,200 组红外图谱，精准定位 3 处厚度不足点；③建立基于区块链的隐蔽工程数据库，集成 BIM 模型与施工过程影像，实现 28 项质量参数的动态溯源。

4.2 智能焊接管理

依托工业物联网架构，开发了焊接全生命周期管控平台。系统集成 67 台焊机的电压、电流及层温数据，每秒采集 2,400 组参数。通过改进 YOLOv5 算法构建焊接缺陷识别模型，可自动分类气孔、未熔合等 8 类缺陷，检出率达 99.3%。

4.3 环境扰动控制

针对城区敏感环境，研发了多物理场耦合控制技术。①振动控制方面，采用磁流变阻尼器与主动隔振平台协同作用，通过 FXLMS 算法实时调控，使顶管

施工振动速度从 4.2mm/s 降至 0.8mm/s ，优于《城市区域振动标准》限值 60%；②空气净化系统集成低温等离子体与活性炭纤维滤网，对焊接烟尘中 PM2.5 的去除效率达 99.6%，作业区苯系物浓度控制在 0.08mg/m^3 ；③智能降噪系统采用相控阵声波干涉技术，在 30m 范围内形成主动消声场，使施工噪声频谱中 125–4kHz 频段声压级降低 12–18dB(A)。

5 结语

本研究针对长三角地质特征形成的技术体系，在常熟管道工程中取得显著成效：软基处理区差异沉降量 $\leq 0.08\%L$ ，河网段冲蚀速率降低至 0.12mm/a ，城市区施工扰动控制在设计限值的 60% 以内。构建的数字化运维平台实现设备完好率 99.8%、应急响应时间 ≤ 5 分钟，为同类型管道建设提供了重要参考。

参考文献：

- [1] 张洪伟, 李建军, 崔潇文. 天然气长距离输送压力管线阀门的故障与维护探析 [J]. 化工管理, 2025(06):127-129+153.
- [2] 武黎爽. 基于天然气长输管道的安全问题及对策研究 [J]. 石化技术, 2020,27(07):335+339.
- [3] 朱燕林, 曾裕波. 天然气管道的防护措施 [J]. 化工设计通讯, 2018,44(11):43.
- [4] 李雨琼, 董雨茜. 天然气管道输送安全关键技术与进展 [J]. 当代化工研究, 2024(06):194-196.
- [5] 唐平. 天然气管道安全输送对策分析 [J]. 化工设计通讯, 2016,42(04):185.
- [6] 耿峰峰. 天然气长输管道施工建设中的安全管理研究 [J]. 石化技术, 2024,31(12):359-361.
- [7] 章惠龙, 张其海, 李军平. 天然气集输管道安全施工风险分析与对策研究 [J]. 石油化工安全环保技术, 2024,40(02):12-14+32+5.
- [8] 孔丹丹. 浅谈天然气长输管网安全运营中存在的问题及对策措施 [J]. 石化技术, 2023,30(12):109-111+100.
- [9] 李寅赫. 在役天然气长输管道输气站场升级改造项目管理 [J]. 化学工程与装备, 2021(08):184-185.
- [10] 刘士军. 天然气管道施工中存在的安全问题与风险控制 [J]. 化学工程与装备, 2021(04):224-225.
- [11] 张军, 李伟, 王磊. 软土地区天然气管道差异沉降控制技术研究 [J]. 岩土工程学报, 2023,45(4):712-720.
- [12] 陈志强, 刘洋, 周昊. 长三角河网区管道水力侵蚀防护体系研究 [J]. 水利水电技术, 2022,53(8):125-134.

作者简介：

韩彧（1989-），男，汉族，河北永清人，硕士研究生，就职安徽中石油昆仑合燃压缩气有限公司，中级工程师，研究方向：城镇燃气安全管理。