

海上管道安装及回填技术研究

李 明 刘静辰 宫鹏群

中海石油(中国)有限公司天津分公司 天津 300000

摘 要:为解决复杂海域海上管道施工定位偏差、沉降超标、回填失稳等难题,本文结合海洋水文、海底地质及腐蚀环境特点,梳理管道安装与回填核心技术原理,对比S型、J型等主流铺管工艺,优化分层对称回填、水下密实加固等施工方案。依托东海实际工程验证技术成效,总结质量控制要点与常见问题改进措施,提出数字化、智能化技术优化方向,可为海域油气管道安全施工与长效运维提供技术参考。

关键词:海上管道;安装;回填技术

引言

海上油气管道是海洋能源开发的核心基础设施,受波浪、海流、复杂海底地质耦合影响,其安装精度与回填稳定性直接决定工程质量与服役寿命。相较于陆上管道施工,海上作业环境复杂、施工窗口期有限、管土作用机制复杂,极易出现管道沉降、悬空、防腐破损等病害。为规范海上管道施工流程、严控施工质量,本文系统研究海上管道安装及回填关键技术,结合工程实践优化施工工艺,助力提升海洋管道工程建设水平。

1 海上管道施工基础条件与技术原理

1.1 海上管道施工环境条件分析

(1) 海洋水文条件中,波浪作用下施工船舶运动响应显著,潮汐流改变悬浮管道张力分布,海流对水下管段产生横向拖拽力,三者耦合干扰定位与就位精度。

(2) 海底地质条件方面,软黏土承载力低易致管道沉降过大,砂质海床冲刷回淤变化剧烈,崎岖底床则造成管道悬跨段应力集中,三类地质的沟槽成型与稳管方案存在显著差异。(3) 海洋腐蚀环境贯穿施工及运维全过程,氯离子侵蚀、硫酸盐还原菌活动及涌浪区干湿交替作用,对管道外防腐层、阴极保护系统及焊接接头耐久性构成持续威胁。

1.2 海上管道结构与施工技术标准

(1) 海上输油输气管道主要包括单层钢管配阴极保护、双层保温管及柔性复合管,材质多采用X65/X70高强度钢,依据水深、压力及介质温度选择适用结构。(2) 国内外标准体系以DNV-ST-F101、API1111及我国GB/T32167为核心,涵盖设计系数、焊接工艺评定、无损检测比例及水压试验压力等验收指标,安全准则强调人员防护与环境风险预控。(3) 管道安装阶段要求铺设张力、弯曲应变及椭圆度偏差严格限值,回填施工需控制覆土厚度、粒径级配及密实度,确保管顶埋深与侧向约

束满足设计服役条件^[1]。

1.3 管道安装与回填核心技术原理

(1) 敷设定位依托差分GPS与声学超短基线联合导航,组对焊接用全自动氩弧焊及相控阵超声检测,水下就位借张紧器恒张力与托管架曲率调节实现线形精敷。

(2) 管沟由射流或机械挖沟机依土质调参数,回填用抛石整平船或水力装置,稳管靠覆土重力与侧摩阻力抗波浪力。(3) 管土耦合下,受力呈上覆土压、地基反力与介质荷载静力平衡,沉降遵循固结与蠕变时效,需依弹塑性接触模型评长期沉降及轴向屈曲裕度。

2 海上管道关键安装施工技术研究

2.1 海上管道施工前期准备工艺

(1) 施工海域勘察采用多波束测深、侧扫声呐与浅地层剖面仪联合探测,全面获取水深地形、海底障碍物及地层分层数据;管线定位测量以星站差分GPS结合长基线水声定位系统,平面定位精度优于 $\pm 0.3\text{m}$;施工窗口期规划依据历史水文统计与短临气象预报,筛选有效波高 $\leq 1.2\text{m}$ 、风速 ≤ 5 级的时段,并利用潮汐表安排低流速窗口作业。(2) 铺管船选型按水深与管径匹配,浅海($< 30\text{m}$)采用锚泊驳船,中深海($30\sim 150\text{m}$)配置DP2动力定位S型铺管船,深水则选用J型系统;起重设备按最大管段吊重选取浮吊或船载吊机,水下作业设备含ROV、液压挖沟机及吸力锚安装工具,需与海床土质及作业水深适配^[2]。(3) 管道预处理包括数控坡口机加工V型坡口,角度公差 $\pm 2^\circ$,管端消磁使用退磁机将剩磁降至 ≤ 30 高斯,防腐涂层经高压水洗与电火花检漏(15kV 无击穿),对破损处采用快速固化环氧修补,确保涂层绝缘电阻 $\geq 10^5\Omega\cdot\text{m}^2$ 。

2.2 主流海上管道安装工艺及对比

(1) 铺管船铺管工艺中,S型铺管法通过托管架使管道呈S曲线入水,适用于水深 $10\sim 200\text{m}$,操作要点包括起

始桩锚固、张力器恒张力控制（依据水深与管重设定）及动态曲率调节；J型铺管法管道近垂直入水，弯曲应力小，适于水深 $> 300\text{m}$ ，但效率较低。浅海铺管日进度约 $150\sim 200\text{m}$ ，中深海约 $60\sim 100\text{m}$ 。（2）悬浮铺管法借助浮筒群调节负浮力，拖船牵引管段就位，适用于近岸浅水及生态敏感区，避免海床扰动；沉管安装法则在管段水面组焊后注水下沉，辅以压重块稳管，适于深水航道或复杂地形，需严格控制注水速率与下沉轨迹，防止局部屈曲。（3）组对焊接采用内对口器保证错边 $\leq 1.5\text{mm}$ ，全自动GMAW焊接实现高熔敷效率；无损检测执行PAUT全焊缝扫查+RT抽检（双百标准），水下焊接采用局部干法，焊缝质量不低于Ⅱ级，缺陷超标立即返修并复检。

2.3 管道安装施工关键质量控制要点

（1）铺设线形通过差分RTK与惯性导航实时监测，水平偏差 $\leq \pm 0.5\text{m}$ ，高程偏差 $\leq \pm 0.3\text{m}$ ；对接精度由激光对中仪与液压微调装置控制，确保端部间隙、错边及角变形满足WPS要求。（2）动态工况下张力传感器组（精度 $\pm 1\%$ ）连续反馈，结合船舶运动预报模型调节绞车输出；应力平衡依托在线有限元分析，监控弯曲应变与轴向应力，确保最大等效应力 $\leq 0.9\sigma_y$ ，并留有安全裕度。（3）防腐层保护采用橡胶护套与尼龙吊带，避免钢丝绳划伤；补口采用热缩带或双层环氧，施工环境露点高于 3°C ，湿度 $< 85\%$ ，补口后电火花检漏（ 5kV/mm ）无针孔，剥离强度 $\geq 50\text{N/cm}^{[3]}$ 。

2.4 特殊工况管道安装技术优化

（1）砂波海域床面迁移活跃，管道埋深增至 $\geq 2.5D$ 并加设混凝土连锁块覆盖层，防止冲刷悬空；软基海床预先铺设碎石垫层（厚度 $\geq 0.5\text{m}$ ）或土工格栅，提高承载力，同时降低铺设张力减少初始沉降，端部采用吸力锚固定限制侧移。（2）跨海域穿越航道或既有管线时，采用定向钻或顶管法实现非开挖通过，轨迹偏差 $< 1\text{m}$ ；跨障碍区段增设水下支撑架或灌浆袋，控制悬跨长度 $\leq 20\text{m}$ ，跨中挠度 $< L/300$ ，并利用声学定位实时监控穿越间距，确保与障碍物净距 $\geq 3\text{m}$ ，满足屈曲安全校核。

3 海上管道回填施工技术及质量控制

3.1 海上管道回填施工前期处理工艺

（1）管沟清理：高压水射流或气举抽吸清除塌陷土体、块石及杂物，确保无尖锐物残留；水下刮平机配合多波束测深整平沟底，超挖或塌方区用级配碎石回垫；修复侧壁坍塌段，补充覆盖裸露管道。（2）回填材料：天然砂砾石（透水好，适用砂质海床及浅水区）；碎石混合料（粒径可控、抗冲刷强，适于强流海域及深水航

道）；水泥改良土（具早期强度与抗液化性，用于软基及地震区）。级配与含泥量须满足水下稳定性。（3）设备调试：抛石整平船、水力泵送系统及水下振捣密实机具，重点标定输送管路压力、调节抛石溜管开度、预设振动频率，并结合水深潮位变化校核下放深度与作业姿态。

3.2 海上管道核心回填施工工艺

（1）分层对称回填工艺将管沟断面沿管道轴线划分为若干层段，每层铺填厚度控制在 $0.3\sim 0.5\text{m}$ ，采用水下液压抓斗或溜管布料系统均匀铺填，同步配合水下振动碾或夯锤进行分层夯实，确保管道两侧同步上升以消除偏载挤压，层间搭接宽度不小于 $1.0\text{m}^{[4]}$ 。（2）水下喷射回填技术借助高压泥浆泵将砂水混合料经喷射管输送至管道底部及侧隙，利用射流扩散填充三角空区，适于细粒土回填且对管道冲击小；抛石回填通过抛石船定位抛投块石，依靠重力下落堆积形成护面层，适于大粒径防护需求，但需控制落石高度避免砸损管道防腐层。（3）管道周边三角区域为回填薄弱环节，采用小粒径碎石或水泥砂浆袋挤压充填，辅以水下振捣棒局部密实，配合水下摄像头实时监控填充状态，确保三角区无空隙滞留。

3.3 回填施工质量与管道稳定性控制

（1）回填压实度采用水下动力触探或声波回弹仪检测，要求砂性土相对密度 $\geq 70\%$ 、黏性土压实系数 ≥ 0.92 ；覆土厚度通过多波束测深系统全线扫测验收，允许偏差 $\pm 0.2\text{m}$ 。（2）回填后管道沉降通过分布式光纤应变监测及定期ROV录像比对评估，偏移防控依靠回填对称性控制，屈曲变形防控则依据埋深与侧向约束刚度校核，确保轴向有效轴力低于临界屈曲载荷。（3）海流冲刷作用下，回填层防护采用混凝土连锁块、碎石护面或土工布垫层覆盖加固，抗冲刷流速设计不低于 3.5m/s ；定期冲刷监测结合声呐扫描，对冲刷坑实施紧急抛填修复^[5]。

3.4 施工常见问题及技术改进措施

（1）回填层空洞多因水下抛填离析或流速过大冲刷掏空所致，密实度不足源于振捣能量不足或分层过厚，管底掏空则由回填不对称造成底部冲蚀，长期可引发管道悬空和疲劳断裂。（2）复杂海况下优化措施包括：强流区改用大粒径混合料并缩短分层间隔，软弱地基掺入固化剂提高回填体整体性，风浪窗口期动态调整抛填速率与振动频率；同时引入多波束在线质量监控系统，实时修正铺填厚度与密实参数，形成“检测-反馈-调整”闭环控制，显著降低返工率并保证稳管长期安全。

4 工程案例分析与技术应用效果

4.1 工程概况

(1) 项目位于我国东海某海域,水深15~28m,海床以软黏土与粉砂交互层为主,局部发育砂波迁移区;年均有效波高1.2m,最大潮差4.5m,表层海流流速达2.0m/s。施工难点集中于软基承载力低引发的管道沉降风险、砂波区冲刷淘蚀导致的回填层失稳,以及台风季窗口期紧张对连续作业的制约。(2) 管道为DN400双层保温输油管,材质X65钢,壁厚14.3mm,设计压力6.4MPa,总长12.8km。总体方案选定S型铺管船法配合分层喷射回填工艺,管沟设计深度2.5m、底宽2.0m;关键装备采用DP2动力定位铺管船与水下整平抛石一体机,配套ROV全程监控。

4.2 安装与回填技术现场实施过程

(1) 安装施工以起始桩锚固为起点,铺管船沿设计轴线推进,张力器预设恒定张力280kN,托管架曲率半径适配水深动态调节;焊接采用全自动双炬GMAW工艺,焊缝经PAUT+RT双检合格后实施三层PE热缩带补口;就位阶段通过惯性导航与超短基线定位系统联动,实现管顶高程偏差控制在 $\pm 0.25\text{m}$ 内。(2) 回填实施前先以高压水射流清理沟底并铺设200mm碎石垫层,回填材料采用级配良好碎石混合料(粒径5~40mm);分层对称铺填每层0.4m,水下振动碾密实两遍;管道两侧三角区采用水泥砂浆袋人工挤压充填,喷射回填跟进补充管底空隙;全程多波束实时监测覆土厚度,局部补填确保埋深达标。

4.3 施工质量检测与效果分析

(1) 安装精度检测显示管线水平偏差均值+0.18m、高程偏差均值-0.12m,全部优于设计允许值;焊缝RT抽检I级片合格率98.6%,PAUT检测缺陷率0.27处/口,防腐层电火花检漏电压15kV无击穿,补口剥离强度 $\geq 50\text{N/cm}$ 。(2) 回填压实度经水下动力触探检测,相对密度均值75.3%超设计70%要求;覆土厚度扫测均值2.62m,无浅点;管道稳定性监测基于分布式光纤应变数据,服役首年累计沉降量18~26mm,远小于软基预估沉降量80mm,侧向偏移未检出,管体应力水平稳定于0.55倍屈服强度内。

服强度内。

4.4 技术应用优势与优化建议

(1) 相较于传统自然回填,本文精细化分层对称回填配合振动密实工艺,压实度提升约15个百分点,管道沉降减少约60%;喷射回填与三角区填塞技术有效消除管底脱空隐患;全流程数字化质量监控大幅降低事后返工率,综合工效提高约20%。(2) 后续优化建议:研发适应超深水的高压气举回填装备以拓展作业水深;将AI视觉识别引入回填实时质量判定,实现抛填厚度与均匀度的自动调节;建立基于长期监测数据的回填层退化预测模型,为运维期冲刷加固提供预警依据,推动技术体系在深远海油气管道工程中的规模化应用。

结束语

本文系统探究了复杂海况下海上管道安装与回填全套施工技术,明确了不同工况的工艺选型标准与质量控制核心要点,通过实际工程证实精细化施工与数字化监测可有效提升施工精度、降低管道沉降与冲刷风险。研究工艺有效弥补了传统施工技术短板,施工效益与安全性能显著提升。后续可深耕深水适配技术、智能监测预警体系,推动海上管道施工技术向智能化、长效化、深远海化方向发展。

参考文献

- [1]王磊,张健,李响.海底管道铺设安装关键施工技术及质量控制研究[J].海洋工程,2024,42(02):112-119.
- [2]陈宇,赵凯.海底管沟回填施工技术优化与防回淤处置措施[J].石油工程建设,2023,49(05):45-49.
- [3]刘浩,孙博文.深海管道后挖沟回填施工关键技术应用[J].水运工程,2025,27(03):156-161.
- [4]周航,吴杰.复杂海况下海底管道安装精度控制与施工优化[J].中国海洋平台,2022,37(04):78-83.
- [5]郑晓峰.海底管道回填防护技术及管线稳定性提升研究[J].海岸工程,2024,43(01):67-73.