

油气输送管道 J 型定向钻穿越技术研究

季雪迎

中石化石油工程设计有限公司 山东 东营 257000

摘 要：为解决常规定向钻浅层地质适配性差、穿越深度不足的难题，本文聚焦油气输送管道 J 型定向钻穿越技术开展系统研究。阐述其工艺原理、施工流程与核心设备，优化轨迹设计、泥浆配比及管道防护方案，剖析软砂卵石、大管径长距离等复杂工况施工难点与质量病害成因，提出导向纠偏、扩孔清孔、动态管控等优化技术，可为复杂地层管道穿越工程施工提供技术参考。

关键词：油气输送管道；J 型定向钻；穿越技术

引言

油气管道穿越河道、构筑物及复杂地层是管网建设的重难点，常规定向钻受埋深与浅层地质限制，难以适配高难度穿越工程。J 型定向钻凭借大角度入土、深层穿越、地表干扰小的优势，可有效规避不良地质与地面障碍物。为规范其施工工艺、解决现场技术难题，本文系统梳理该技术理论、设计要点与施工关键问题，针对性优化施工技术与管控体系，助力工程提质增效。

1 油气输送管道 J 型定向钻穿越技术理论与工艺原理

1.1 定向钻穿越技术分类及特性对比

(1) 常规水平定向钻与 J 型定向钻技术区别。常规定向钻轨迹呈缓“S”形，入土角 $8^{\circ}\sim 12^{\circ}$ ，出土角 $4^{\circ}\sim 8^{\circ}$ ，穿越深度相对较浅。J 型定向钻入土角达 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ，轨迹先近垂直钻进深层，再转向水平段，最终小角度出土，呈“J”字形，可实现深层绕避。(2) J 型定向钻穿越技术适用工况与优势。适用于河流主航道、重要建（构）筑物下方及浅层含卵砾石、软弱夹层等复杂地层的大直径长距离穿越。优势为入土点选址灵活、有效避开浅层不良地质、地表干扰小、导向精度高。各类管道穿越技术的优缺点对比分析如下表：

表 1 各类管道穿越技术的优缺点对比分析

技术类型	优点	缺点
常规定向钻	施工成熟、成本较低、工期短	受浅层地质影响大、深度有限
J 型定向钻	适应复杂地层、穿越深度大、对地表干扰小	设备要求高、施工精度控制难度大、成本较高
盾构法	适用各类地层、安全性高	投资大、工期长、场地要求高
顶管法	施工精度较高、地面沉降小	管道直径受限、长度增加时难度上升

1.2 J 型定向钻穿越核心理论基础

(1) 岩土力学与地层钻进适配理论。根据地层切削比功与抗剪强度建立钻头参数与地层力学特性的匹配关系，指导钻具选型与钻进参数优化。(2) 管道回拖受力与形变控制理论。建立回拖过程轴向拉力、侧向摩擦力及弯曲附加应力计算模型，分析 J 型弯段处管道弹塑性变形，确定安全回拖力控制范围。(3) J 型轨迹成型力学原理。基于弹性杆理论推导钻杆在弯段处的弯矩与扭矩传递规律，建立曲率半径与钻杆弯曲应力间的数学关系，指导轨迹设计与纠偏控制。

1.3 J 型定向钻完整施工工艺流程

(1) 前期勘察与施工准备阶段流程。包括地质钻探与物探、水文调查、地下障碍物排查、轨迹及泥浆配比设计、现场三通一平及设备进场检验。(2) 导向孔钻进与 J 型轨迹成型流程。采用地磁导向或无线随钻测量仪实时监控钻头位置，按设计先大角度入土钻进至预定深度，转向水平段后调整至出土方向，全程轨迹偏差检测与纠偏。(3) 分级扩孔、清孔与管道回拖流程。按最终孔径采用多级扩孔器逐级扩孔（通常 3~5 级），每级后清孔排渣，确认孔道稳定后连接预制管道进行连续回拖。(4) 后期收尾与质量验收流程。包括设备撤场、泥浆处理与场地恢复；防腐层电火花检测及无损检测；复测管道中心线、监测地面沉降，整理资料并组织验收^[1]。

1.4 关键施工设备与配套系统

(1) 定向钻机及导向监测设备选型。依据设计回拖力与扭矩选配钻机，配套无线随钻测量或地磁导向系统，具备实时轨迹显示与自动预警功能。(2) 扩孔、泥浆循环配套设备功能原理。扩孔采用岩石或流道式扩

孔器逐级破岩；泥浆系统由配浆罐、搅拌器、泥浆泵及振动筛组成，实现配制、循环与净化回收，起冷却、携屑、稳定孔壁作用。（3）管道预制与回拖辅助设备配置要求。配置自动焊接站、防腐补口设备、滚轮支架及发送沟，回拖前端装锥形回拖头，孔口设密封装置，并备应急拖拽系统防卡管。

2 油气输送管道 J 型定向钻穿越工程设计

2.1 工程前期勘察与地质条件评估

（1）穿越区域地形地貌与水文勘察。采用无人机航测、GPS 定位与水深测量相结合，查明穿越段河床形态、岸坡稳定性及冲刷深度；调查地表水体分布、地下水位变化规律及流速流向，为入土点、出土点选址及轨迹埋深设计提供依据。（2）地层岩土特性检测与风险预判。通过钻探取芯、标准贯入试验及室内土工试验，获取各层位岩土的抗剪强度、压缩模量、颗粒级配及渗透系数等参数。结合物探手段（地震反射波法、高密度电法），识别潜在孤石、古河道及断裂带，预判卡钻、漏浆及塌孔风险等级。（3）不良地质条件对 J 型钻进的影响分析。浅层卵砾石层易造成钻头偏磨与扭矩突增，需加大泥浆携屑能力并采用阶梯钻头；软弱夹层易引发孔壁失稳，须调整泥浆密度与黏度加强护壁；硬岩层破岩效率低，需优选滚刀扩孔器并控制钻进速度，防止钻杆疲劳损伤。

2.2 J 型穿越轨迹优化设计

（1）轨迹设计基本原则与规范依据。遵循《油气输送管道穿越工程设计规范》（GB50423）及《水平定向钻管道穿越工程技术规程》（CECS382），以避让障碍物、满足埋深要求、减小弯曲应力为原则，确保轨迹平滑连续，避免曲率突变。（2）入出土角、埋深、曲率半径参数设计。入土角取 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 以快速进入稳定地层，出土角取 $4^{\circ} \sim 6^{\circ}$ 便于管道顺滑出土；穿越河床段埋深不低于冲刷线以下 6m；曲率半径按钻杆弯曲能力及管道许用弯曲应力综合确定，一般 $R \geq 1200D$ （ D 为管径）^[2]。（3）基于地层条件的 J 型轨迹优化方案。对于上软下硬地层，采用“大角度快速穿软、缓曲率过渡入硬”的轨迹策略；对于全断面岩层，适当增大曲率半径以降低回拖阻力；对于存在孤石区域，进行微调轨迹绕避或预留套管内通过方案。

2.3 施工参数与泥浆体系设计

（1）钻进、扩孔、回拖核心参数确定。钻进阶段依据地层硬度确定钻压（10~25kN）与转速（30~80r/min）；扩孔分级按孔径比 1.3~1.5 逐级扩大，扩孔

速度控制在 0.2~0.5m/min；回拖力根据摩擦力与弯曲阻力综合计算，回拖速度以 0.2~1.0m/min 为宜，确保连续作业。（2）护壁泥浆配比、黏度与性能指标设计。基浆采用膨润土+水体系，添加 CMC、聚合物及润滑剂以改善性能。一般黏度控制在 40~80s（马氏），密度 1.05~1.30g/cm³，滤失量 $\leq 10\text{mL}/30\text{min}$ ，含砂量 $\leq 3\%$ ，pH 值保持在 9~11 以形成良好泥皮^[3]。（3）不同地层工况下泥浆体系适配优化。砂层中加大聚合物和降滤失剂用量以增强悬浮携砂能力；卵石层中提高黏度并添加纤维材料加强封堵，防止漏浆；岩层中需增加润滑剂含量降低摩擦阻，同时采用低固相体系减少钻头泥包。

2.4 管道防护与安全设计

（1）油气管道防腐、抗压防护设计。外防腐采用三层 PE 或熔结环氧粉末涂层，辅以牺牲阳极或强制电流阴极保护系统。穿越段考虑外压挤压风险，采用钢管壁厚加大一级或增设混凝土加重层，防止浮管及外压屈服。（2）穿越段管道应力与形变安全校核。基于有限元法对弯段管道进行轴向应力、环向应力及组合应力计算，校核等效应力是否小于屈服强度的 90%；同时校核回拖过程中管道的径向屈曲稳定性与椭圆度变化，确保变形量控制在管径的 3% 以内。（3）施工全过程安全防控方案设计。建立岗前安全培训与应急演练制度；配备孔口防喷装置及压力监测系统，预防泥浆突涌；回拖过程连续监测拉力与扭矩，设置超限停机保护；制定泥浆泄漏、钻杆断裂及卡管事故应急预案，明确处置流程与救援物资储备。

3 油气输送管道 J 型定向钻穿越施工关键问题分析与技术优化

3.1 J 型定向钻施工常见质量问题及成因

（1）轨迹偏移、孔道塌陷问题及诱因。轨迹偏移主要源于导向系统误差、地层软硬突变导致钻头受力不均，以及钻进参数调整不及时。孔道塌陷多发生在砂层、卵石层等松散地层，诱因包括泥浆护壁性能不足、扩孔级配不合理造成孔壁应力释放、钻进速度过快引起压力激动等。（2）管道回拖受阻、变形损伤问题分析。回拖受阻主要因扩孔直径不足、孔内沉渣过多或孔道曲率半径偏小导致摩擦力激增；弯段处管道弯曲应力超限及径向挤压力过大易引发管体局部屈曲变形；焊接接头防腐层在回拖过程中受摩擦刮擦而破损，形成腐蚀隐患。（3）泥浆漏失、护壁失效质量问题成因。裂隙发育地层或卵石层中泥浆沿孔隙大量漏失，导致孔内液柱压力下降，孔壁失去支撑而坍塌。配比不当导致泥浆切力及滤失量失控、循环排量不足使携屑效率下降，也是

护壁失效的重要原因。

3.2 复杂工况施工技术难点剖析

(1) 软土、砂卵石地层钻进施工难点。软土地层中钻具易陷犁、导向困难,孔壁自稳性差且易发生缩径;砂卵石层中钻头受冲击载荷剧烈,磨损加速,扩孔时大粒径卵石易卡堵钻具,扭矩波动大,且漏浆风险高,泥浆护壁效果难以保障。(2) 大管径、长距离J型穿越施工难点。大管径($\geq \text{DN}800$)管道刚度和重量显著增加,回拖阻力与管径平方成正比增长,对钻机能力要求苛刻;长距离($\geq 1000\text{m}$)穿越时孔道摩阻沿程累积,泥浆循环压耗增大,钻杆连接段疲劳风险上升,孔底信号传输衰减影响导向精度^[4]。(3) 水域、城区受限空间穿越施工难点。水域穿越受水流冲刷、河床变迁影响,入土点及出土点场地狭窄,泥浆泄漏易造成河道污染;城区受限空间下设备布置困难,施工振动与噪声控制要求严格,地下管线密集增加碰撞风险,对沉降控制标准更高。

3.3 关键施工技术优化策略

(1) 精准导向与轨迹纠偏技术优化。采用近钻头测量系统缩短测量盲区,融合地磁与惯性导航数据提升定位精度;建立纠偏量-工具面向角-钻进进尺之间的数学模型,实现小步长、多频次微调纠偏,避免大幅修正引发弯折应力集中。(2) 分级扩孔与高效清孔技术改进。优化扩孔级差,采用“等径扩孔+清孔”交替循环工艺,每级扩孔后利用大排量泥浆携带高效清孔器彻底清除孔底沉渣;研制集扩孔与清渣于一体的复合式扩孔器,减少起下钻次数,提升孔道清洁度。(3) 低损伤管道回拖施工技术优化。设计辅助滚轮托架及连续发送滚排,降低管道与地面的摩擦阻力;采用“抗弯加强型”回拖头并配置扶正器,防止管道弯段贴壁刮擦;回拖前注入润滑减阻泥浆段塞,实时监控回拖力变化并实施速度自适应调节^[5]。

3.4 质量管控与安全保障优化措施

(1) 施工全过程动态监测技术应用。布设孔底压力、扭矩、钻速等实时采集系统,建立多参数关联预警模型;地面设置沉降观测点及地下水位监测井,回拖过程中全程记录拉力-位移曲线,实现施工状态可视化、数字化管控。(2) 施工质量标准化管控体系构建。编制覆盖各工序的质量验收表格及作业指导书,推行“自检+互检+专检”三检制;建立施工参数异常上报与分析决策流程,实现质量问题闭环整改,确保每道工序合格后方可转入下道工序。(3) 突发险情应急处置技术方案。制定卡管、泥浆击穿串漏、钻杆断裂、地面塌陷等专项应急预案,储备应急物资(备用钻杆、堵漏材料、液压顶推装置等),设现场应急抢险小组并定期演练,确保险情发生后5分钟内响应、30分钟内启动处置措施。

结束语

本文系统探究了J型定向钻穿越技术的工艺原理、工程设计要点与施工核心难题,明确了各类复杂地层的施工适配方案与质量病害处置对策。通过优化轨迹纠偏、扩孔回拖、泥浆适配等关键技术,完善了全过程质量与安全管控体系。研究有效解决了传统工艺的应用短板,可为油气管道复杂工况穿越施工提供实操依据,对提升非开挖施工技术水平具有工程实用价值。

参考文献

- [1] 马坤. 西气东输三线中段水平定向钻穿越无泥浆段角砾层施工技术研究[J]. 石油工程建设,2025,47(07):133-137.
- [2] 郑华. 管道在水平定向钻施工及服役期的力学响应分析[J]. 人民长江,2025,56(01):198-204.
- [3] 黄兴伟,董飞. 油气管道穿越工程中的应力分析与优化[J]. 化工设计通讯,2025,51(01):24-25+36.
- [4] 何先木. 油气管道定向钻穿越勘察设计及主要施工技术[J]. 工程施工新技术,2023,2(12):161-163.
- [5] 方金水. 燃气管道工程水平定向钻穿越砂层敷设施工技术研究[J]. 新城建科技,2024,33(03):157-159.