

定向钻技术在天然气管道穿越施工中的应用研究

李国见（国家石油天然气管网集团有限公司建设项目管理分公司，河北 廊坊 065000）

摘要：随着天然气管道建设规模扩大，传统开挖方式在穿越障碍时所暴露出的效率低、环境影响大等局限性，促使本研究系统分析定向钻非开挖技术在管道穿越施工中的适用性与有效性，重点探究其导向控制、泥浆配置和回拖工艺等核心环节，并结合工程实践总结轨迹优化与风险控制方法，而研究结果所表明该技术具有的施工精度高、环境影响小和经济性好的综合优势，对提升管道穿越工程的安全与技术水平具有重要推广价值。

关键词：定向钻技术；天然气管道；穿越施工；轨迹控制；泥浆体系

中图分类号：TE832

文献标识码：A

文章编号：1674-5167（2025）032-0094-03

Research on the Application of Directional Drilling Technology in the Construction of Natural Gas Pipeline Crossing

Li Guojian (Project Management Branch of National Oil and Gas Pipeline Network Corporation Limited, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: With the expansion of the construction scale of natural gas pipelines, the limitations such as low efficiency and significant environmental impact exposed by traditional excavation methods when crossing obstacles have prompted this study to systematically analyze the applicability and effectiveness of directional drilling trenchless technology in pipeline crossing construction, with a focus on exploring its core links such as guiding control, mud preparation, and backdragging technology. Combined with engineering practice, the trajectory optimization and risk control methods are summarized. The research results show that this technology has the comprehensive advantages of high construction accuracy, small environmental impact and good economy, which has important promotion value for improving the safety and technical level of pipeline crossing projects.

Key words: Directional drilling technology Natural gas pipeline Crossing construction Trajectory control Mud system

我国天然气需求的持续增长推动长输管道大规模建设，而管道线路不可避免需穿越河流、铁路、公路等重要障碍物，因传统开挖穿越方式存在施工周期长、环境影响大、中断交通等问题，难以满足高效环保的现代工程建设要求，定向钻技术作为一种非开挖施工方法，能在障碍物下方钻进作业，有效避免对地表环境的干扰。

1 定向钻技术施工原理与关键技术

1.1 定向钻施工基本原理

结合精确控制地下钻头轨迹以使管道按预设曲线绕过障碍物穿越的先进非开挖管道铺设定向钻技术，整个施工过程遵循严谨的三阶段工艺循环：第一阶段先导孔钻进，采用由高压泥浆驱动旋转切削地层的泥浆马达与通过定向旋转改变钻头倾角来灵活调整钻进方向的导向钻头所组成的小直径钻杆，从入土点向出土点钻进以形成精确导向孔通道；第二阶段扩孔，先导孔完成后卸下导向钻头安装扩孔器，按管径大小经多次逐级扩孔将先导孔扩大至管道直径 1.3 至 1.5 倍，同时泥浆持续泵入孔内起稳定孔壁和携带钻屑至地面关键作用以确保后续管道回拖空间^[1]；第三阶段管道回拖，将预制完成的管道连接扩孔器及钻杆，利用钻机巨大回拖力从出土点一侧平稳拉入已成形孔洞完成

穿越。此原理成功实施高度依赖导向系统对轨迹的精准控制与泥浆体系对孔洞的有效维护，任环节失误都可能致工程失败。

1.2 导向与轨迹控制技术

以无线随钻测量系统（MWD 系统）为核心设备，集成于钻头后部无磁钻铤内且包含三轴加速度计和三轴磁力计等传感器组，能实时测量钻头井斜角、方位角和工具面角等关键姿态参数，测量数据通过泥浆脉冲或电磁波方式传输至地表控制室，工程师据此绘制实时钻头地下三维轨迹图并与设计轨迹对比，一旦发现轨迹偏差就下达控制指令至钻头，通过调整泥浆泵压改变导向钻头内部阀件状态使导向板伸出特定方向产生侧向力推动钻头朝向纠偏方向钻进以实现微米级精确导航的导向与轨迹控制，是定向钻技术的灵魂；在整个导向钻进过程中，不仅要关注钻头位置，还需综合考虑地层变化对钻头产生的不可预测侧向力并提前进行轨迹补偿设计；对于长距离穿越通常采用有缆式导向系统保证信号传输稳定性，而在强磁干扰环境或大口径工程中则选用更先进的陀螺仪测量系统辅助定位；高精度的轨迹控制确保管道完美避开地下既有设施、严格遵循设计曲线敷设，是工程成功与否的决定性技术保障。

1.3 泥浆体系配置与作用

在定向钻施工中被誉为“工程的血液”的钻井泥浆，其性能优劣直接关乎孔壁稳定、钻具润滑及钻屑携带等关键环节。由液相、固相和化学添加剂组成的复杂胶体悬浮体系即泥浆体系，其中最常见类型为水基泥浆，其主要功能有：通过液柱压力平衡地层压力以维持孔壁稳定，凭借润滑性减少钻具与孔壁的摩擦阻力和回拖力，依靠粘度和切力悬浮并携带钻屑至地表，以及经由循环冷却高速旋转的钻头^[2]。针对不同地层特性需定制化配置泥浆配方：在松散易塌的砂层或砾石层中，添加膨润土和聚合物增粘剂以提高泥浆粘度和造壁性，从而形成致密滤饼封堵孔隙；在吸水膨胀的粘土层中，加入抑制剂如 K⁺ 或聚合物包被剂抑制粘土水化膨胀；在坚硬岩层中则注重泥浆的润滑性和冷却性能，通常添加极压润滑剂和表面活性剂。全程实时监测与调整泥浆性能参数如密度、粘度、失水性和 pH 值，一套性能卓越的泥浆体系能有效预防孔洞坍塌、卡钻事故和泥浆漏失，显著提高施工效率和成功率，是穿越工程不可或缺的重要支撑。

2 天然气管道定向钻穿越施工流程与控制

2.1 施工前期准备与勘察设计

施工前期地质勘察与轨迹设计作为决定定向钻穿越成败的基础性工作，工程地质勘察沿设计轴线采用钻探、物探等多种手段获取精确地层数据，涵盖土层分布特性、岩土力学参数、地下水位及渗透系数等关键信息，且这些参数直接影响泥浆压力设定、扩孔器选型和轨迹设计安全性；穿越轨迹设计遵循严格力学与几何原则，入土角设计在 8° 至 15° 之间以确保钻杆平缓进入地下，出土角略小于入土角方便管道回拖对接，曲线半径根据管材屈服强度和直径计算确定且一般不小于管道直径的 1200 倍以保证管道弯曲应力处于弹性安全范围，埋深综合考虑洪水冲刷深度、航道要求及地下障碍物分布确保管道运营期安全；科学设计有效规避未知地质风险、优化施工参数并为后续钻进提供精确导航蓝图。勘察数据深度分析环节需依据地层岩性特征预测钻进扭矩与回拖阻力变化规律，针对软硬交互地层需优化轨迹垂向曲线避免剧烈起伏，结合地下障碍物探测数据动态调整入土点位置和水平偏移距离。设计阶段采用有限元软件模拟管道回拖全过程应力分布，验证弯曲段应变是否超出聚乙烯管材 3% 或钢管 0.2% 的允许变形限值，同时根据土壤电阻率数据设计阴极保护方案并预留安装位置。

2.2 钻进过程控制与问题处理

基于 MWD 系统传回的实时数据，先导孔钻进阶段施工控制的核心环节——实时轨迹监控与动态纠

偏，要求操作人员持续对比实际轨迹与设计轨迹的偏差，一旦水平或垂直偏差超过允许范围，便立即按“缓调慢纠”原则通过调整钻头工具面角和钻进参数进行纠偏，以免产生急弯致使钻杆疲劳失效。钻进过程中常见的如扭矩突然升高、钻具卡滞和泥浆漏失等工程问题，其中扭矩过高常因孔壁缩径或钻屑堆积引起，需靠提高泥浆润滑性和循环速度缓解，严重时还得回拖钻具清理孔洞^[3]；卡钻事故多在松散砂层或富水地层发生，预防关键在于维持泥浆足够粘度和静压平衡，处理措施有尝试旋转钻杆、泵入高粘塞浆或使用震击器；泥浆漏失若发生在裂隙发育地层，需马上添加如云母片或纤维质等堵漏材料并调整泥浆密度，防止因失压引发孔壁坍塌。通过精细化过程控制把问题消除在萌芽状态，进而保障钻进连续高效。

2.3 管道回拖作业关键技术

管道回拖是定向钻穿越的最终关键阶段，其成功依赖于准确的力学控制与充分的孔洞准备。回拖力估算采用多因素叠加模型，其核心公式为：

$$F = \mu L \rho g \pi D + \frac{\pi}{4} D^2 \Delta P + \rho_p g L \sin \theta$$

其中：

F 为总回拖力 (N)；

μ 为管壁与孔壁摩擦系数；

L 为回拖长度 (m)；

ρ 为泥浆密度 (kg/m^3)；

g 为重力加速度 (m/s^2)；

D 为管道外径 (m)；

ΔP 为泥浆流动压降 (Pa)；

ρ_p 为管道密度 (kg/m^3)；

θ 为回拖倾角 (rad)。

实际施工中需采用液压传感器实时监测回拖力，确保其始终低于钻机额定拉力和管道最小屈服强度的 70%^[4]。回拖前必须进行清孔作业，通过多次反复刮削和泥浆循环清除孔内残留钻屑，同时将泥浆粘度调整至 45–50s 范围内以提高携屑和润滑能力，确保孔洞完整顺畅，不同管径和长度下的典型回拖力控制范围参考表如表 1 所示。

表 1 不同管径和长度下的典型回拖力控制范围参考表

管道外径 (mm)	管道长度 (m)	地质条件	回拖力控制范围 (kN)
406.4	300	粘土层	400-600
508	500	粉土层	800-1200
711	800	砂层	1500-2200
914	1000	砾石层	2500-3500
1219	1500	软岩层	4800-6500

3 应用效益分析与发展展望

3.1 技术应用优势与效益分析

在天然气管道穿越工程中展现出显著综合效益的定向钻技术,其核心优势体现在社会、环境与经济三个维度:社会效益上,以实现真正意义非开挖施工,在完全不中断公路铁路交通、不影响河道通航前提下完成管道敷设,极大减少对公众出行和区域经济活动干扰,避免传统开挖方式致长期封路或河道断流带来社会矛盾与协调成本的方式体现;环境效益突出,通过将作业面局限于入土点与出土点两个施工区域,把对地表植被、土壤结构、水体生态的破坏降至最低,尤其在穿越河流水源保护区或生态敏感区时能有效防止土壤流失和水体污染,完全符合绿色施工现代环保理念来体现;经济效益方面,虽初期设备投入较高,但综合成本优势明显,通过简化工艺流程显著缩短施工周期,如某长度 800m 河流穿越工程实践显示比大开挖方案节省工期约 40%、降低总成本约 30%,且运营期因埋深足够无需担心冲刷暴露风险,全生命周期经济性更具优势,相比传统大开挖方式涉及高昂土方开挖、回填、支护及后期生态修复费用,得以体现。

3.2 技术局限性及应对措施

尽管定向钻技术优势显著,但因特定地质条件与技术要求存在局限性,如对复杂地质条件适应性差,在松散不稳定且富含地下水的卵石层或砾石层施工时孔壁易坍塌致卡钻事故,在单轴抗压强度超 80MPa 的坚硬岩层中常规钻具钻进效率低、磨损严重致工程经济性大幅下降^[5-6];施工精度要求极高,轨迹控制微小偏差在长距离穿越中会被放大致管道可能无法准确出土;大型定向钻机及其配套设备一次性投入成本高达数千万元,对中小型工程项目构成经济门槛。针对这些局限性,工程实践中发展出系列有效应对策略,如对于卵石层等不稳定地层,采用泥浆马达配合冲击锤的复合钻进工艺,通过高频冲击破碎卵石并配合高粘度泥浆稳定孔壁;对于坚硬岩层,推荐使用镶齿牙轮扩孔器或井下泥浆涡轮钻具提高破岩效率;采用有缆导向系统或陀螺仪进行中途精准校正控制轨迹偏差;面对高成本设备,采用专业租赁模式或发展区域性专业施工队伍分摊初始投资压力,使技术应用更灵活经济。

3.3 未来发展趋势

定向钻技术正朝着智能化、精细化和绿色化的方向快速发展,应用前景广阔。智能化施工管理是核心趋势,基于 BIM 和 GIS 技术构建三维数字化项目管理平台,能够集成地质勘察数据、设计轨迹参数、实时钻进数据和设备状态信息,实现施工全过程的可视化模拟、风险预警和智能决策支持,大幅提升项目管理效率与安全性。导向系统精度不断提升,高精度惯

性导航系统和基于量子技术的传感系统有望将轨迹控制精度从目前的厘米级提升至毫米级,满足城市密集区复杂管网穿越的极高精度要求。绿色环保要求驱动泥浆技术革新,可生物降解的环保型合成基泥浆和纳米材料添加剂将逐步替代传统膨润土泥浆,显著减少施工对土壤和地下水的化学污染风险^[7-9]。工程应用尺度不断突破,随着大功率钻机设备和高强度钻杆材料的成熟,定向钻技术将能够胜任直径超过 1500mm、穿越长度超过 5000m 的超大尺度管道穿越工程,为跨海峡、跨大型山脉的能源通道建设提供更优解决方案。

4 结语

定向钻技术作为天然气管道穿越工程核心非开挖施工方法,以涵盖精确导向控制、科学泥浆配置与严格流程管理的技术体系,展现出显著的社会、环境与经济综合效益,本研究系统分析其施工原理、关键工艺及控制要点,明确其在提升工程安全性、减少环境干扰与降低全生命周期成本方面的核心价值,研究成果为复杂地质条件下长输管道穿越工程提供实用的技术指导与理论支撑,对推动我国管道建设向高效化、绿色化与智能化方向发展具有重要的工程实践意义。

参考文献:

- [1] 吕孟伟. 定向探放水技术在采空区积水疏排中的应用[J]. 能源与节能, 2025(08):333-335.
- [2] 代双龙. 复杂水文地质条件下定向钻穿越技术研究[J]. 现代工程科技, 2025,4(14):149-152.
- [3] 张峰. 煤矿地质防治水中定向钻技术的应用研究[J]. 能源与节能, 2025(07):161-163.
- [4] 段成飞, 权孝祥. 关于石油天然气管道隧道穿越施工技术的研究[J]. 江西建材, 2025(04):340-342.
- [5] 吕钊. 天然气输气管道定向钻技术常见问题及效果研究[J]. 石化技术, 2024,31(07):179-181+178.
- [6] 柳志伟, 张晨, 王建兴, 等. 天然气长输管道定向钻穿越岩溶裂隙地层的施工实践[J]. 石化技术, 2023,30(09):81-83.
- [7] 刘保臣, 陶志刚, 李方政, 等. 长输管道大口径定向钻穿越关键技术研究与应用[J]. 油气储运, 2024,43(05):123-130.
- [8] 王杜娟, 陈馈, 周建军. 复杂地层管道定向钻穿越孔壁稳定性与泥浆技术研究进展[J]. 隧道建设(中英文), 2023,43(S2):1-10.
- [9] 孙连忠, 叶帆. 大型水平定向钻穿越工程风险分析与控制措施[J]. 地下空间与工程学报, 2022,18(04):1350-1357.

作者简介:

李国见(1979-),男,汉族,山东乳山人,硕士研究生,中级工程师,研究方向:工程管理。