

城市燃气管道非开挖定向穿越施工技术研究

陶雪平 (佛山市天然气高压管网有限公司, 广东 佛山 528000)

摘要: 随着城市化进程加速, 燃气管道作为能源输送的重要载体, 其建设需求日益增长。然而, 传统开挖施工技术在城市核心区面临交通中断、环境破坏及地下管网干扰等瓶颈问题, 亟需探索更加高效、安全的敷设方法。非开挖定向穿越技术通过定向钻进与实时导向控制, 实现了地下管道的精准敷设, 尤其适用于城市燃气管道穿越复杂地质或敏感区域的场景。本文聚焦该技术的原理与实践应用, 以期为提升城市燃气管道施工质量与可持续性提供技术参考。

关键词: 城市燃气管道; 非开挖定向穿越技术; 施工原理

中图分类号: TU996.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 017-0093-03

Research on Trenchless Directional Drilling Technology for Urban Gas Pipeline Construction

Tao Xueping (Foshan Natural Gas High-Pressure Pipeline Network Co., Ltd., Foshan Guangdong 528000, China)

Abstract: With the acceleration of urbanization, gas pipelines, as critical carriers for energy transmission, are experiencing growing construction demands. However, traditional trenching techniques face bottlenecks in urban core areas, such as traffic disruption, environmental damage, and interference with underground pipelines, necessitating the exploration of more efficient and safer installation methods. Trenchless directional drilling technology enables precise underground pipeline installation through directional drilling and real-time guidance control, proving particularly suitable for urban gas pipeline projects crossing complex geological conditions or sensitive areas. This paper focuses on the principles and practical applications of this technology, aiming to provide technical references for enhancing the quality and sustainability of urban gas pipeline construction.

Keywords: urban gas pipeline; trenchless directional drilling technology; construction principles

城市地下空间的高效利用与环境保护需求, 推动着燃气管道施工技术不断革新。传统明挖敷设工艺在人口密集、基础设施复杂的城区暴露出诸多弊端, 如道路反复开挖导致的资源浪费、施工扬尘引发的生态污染, 以及管线交叉引发的安全风险。非开挖定向穿越技术依托于精准导向与地层适应性钻进能力, 可在不破坏地表结构的前提下完成燃气管道隐蔽式安装, 成为平衡城市建设与生态保护的关键技术突破。

1 非开挖定向穿越技术概述

非开挖定向穿越技术是一种通过定向钻进设备沿预设轨迹穿越地层, 实现地下管道隐蔽式敷设的现代化施工方法。该技术起源于 20 世纪末, 伴随城市化进程对地下空间集约化利用的需求而迅速发展。其核心在于利用导向钻机与随钻测量系统, 结合地质勘探数据, 动态调整钻进角度与深度, 形成连续、精确的管道通道。施工过程主要涵盖导向孔钻进、分级扩孔及管道回拖三个阶段, 全程通过泥浆循环系统稳定孔壁并润滑管线。相较于传统开挖工艺, 该技术能够有效规避地表构筑物拆迁、交通中断及地下管线碰撞风险, 尤其适用于穿越城市主干道、河流、铁路及历史保护区域等复杂场景^[1]。

2 城市燃气管道非开挖施工技术原理

2.1 导向钻进轨迹控制技术

导向钻进轨迹控制是非开挖定向穿越的核心环节, 依托高精度随钻测量系统和导向钻头实现。导向钻头内置信号发射装置, 实时反馈钻头倾角、方位角及温度等参数至地表控制系统, 操作人员通过调整钻杆推进力和旋转速度, 动态修正钻进轨迹。在复杂地层中, 结合地质雷达或电磁波探测数据, 可预判障碍物并优化路径规划。该技术可确保管道敷设轨迹与设计偏差小于 1%, 满足城市燃气管道对坡度、埋深及避让既有设施的严格要求。

2.2 泥浆循环与地层稳定系统

泥浆循环系统是保障钻孔稳定性的关键技术, 由泥浆泵、混合装置及回收设备组成。泥浆以膨润土为基础, 添加聚合物、润滑剂等改性材料, 通过高压注入钻孔, 形成动态护壁膜, 防止孔壁坍塌。泥浆同时承担冷却钻头、携带钻屑及润滑管道的功能。针对不同地层 (砂层、黏土或岩石), 需调整泥浆黏度、密度和固相含量, 以平衡地层压力并减少渗透损失。智能化泥浆参数监测系统可实时优化配比, 降低施工风险^[2]。

2.3 分级扩孔与管道回拖工艺

分级扩孔通过逐级增大孔径匹配管道尺寸，采用回扩器与钻杆反向旋转切削地层，同时泥浆循环清理碎屑。扩孔级数根据地层硬度及管径确定，通常为管道外径的1.2~1.5倍。管道回拖阶段，将燃气管道与扩孔器、分动器连接，利用钻机牵引力匀速拖入钻孔。回拖过程中需动态监测拉力与扭矩，避免管道扭曲或刮伤防腐层。同步注浆技术可在管道与孔壁间隙形成保护层，增强结构稳定性。

3 非开挖定向穿越施工技术在城市燃气管道中的应用

3.1 复杂地形与障碍物穿越场景下的定向钻技术

在城市燃气管道工程中，复杂地形与障碍物穿越场景下的定向钻技术需通过系统性工程管理实现精准实施。施工前期的地质精细化勘察是技术应用的基础，需采用地质雷达、电磁波CT等物探手段，结合钻探取样分析，明确穿越区域的地层岩性、软弱夹层分布及地下水位特征。对于河流、铁路、交通干道等特殊地形，需构建三维地质模型，量化评估卵石层、流砂层等不良地质对钻进轨迹的影响，为后续导向孔轨迹设计提供数据支撑^[3]。

针对障碍物的空间分布特征，采用“水平曲线+垂直曲线”复合轨迹规划方法，结合最小曲率半径计算模型，确保钻杆在穿越地下既有管线、桩基或岩石层时保持连续平滑的轨迹过渡。在轨迹优化中，需综合考虑钻机推力、扭矩传递效率与地层阻力间的动态平衡，通过有限元模拟验证不同轨迹方案的可行性。对于河流穿越场景，需根据河床冲刷深度、水流速度等参数，将导向孔轨迹埋深控制在河床稳定层以下1.5m~2.0m，并预留动态纠偏余量以应对钻进过程中的地质突变。

钻进过程中，应采用无线随钻测量仪与地面信标系统联动定位，实时获取钻头倾角、方位角及工具面数据，结合地质参数预测模型动态调整钻进参数。在卵石层穿越时，通过调整泥浆黏度至45s~55s并添加纳米级堵漏剂，有效封堵孔隙防止泥浆漏失；针对硬岩地层则采用复合式钻头配合高频冲击振动技术，将钻进速率控制在0.8~1.2m/h以避免孔壁坍塌。

扩孔与回拖阶段，根据地层特性设计阶梯式扩孔方案，采用分级扩孔器逐级扩大孔径，每级扩孔后通过孔内摄像检测孔壁完整性。在软弱地层中实施“间歇式扩孔”工艺，通过周期性暂停钻进并循环高密度泥浆以增强孔壁泥皮形成。管道回拖时采用液压同步控制系统，确保拖管头与钻机牵引速度匹配度误差小于5%，同时通过注浆环空压力监测装置将泥浆压力

稳定在0.3~0.5MPa范围内，防止地层流体侵入造成拖管阻力突变。

3.2 城市密集区地下管网的精准避让与路径

在城市密集区实施燃气管道非开挖定向穿越时，地下既有管网的精准避让与路径优化需依托多维度技术集成。施工前需通过综合物探技术对作业区进行全息化地下空间扫描，采用探地雷达与电磁感应法双模式探测，结合市政管线竣工图数字化比对，构建毫米级精度的三维地下管线分布模型。针对电力、通信、给排水等不同材质管线，分别采用频率域电磁法识别金属管线、时域反射法定位非金属管线，并将探测数据导入BIM平台进行碰撞分析，明确待建燃气管道路径与既有管线的空间交叉关系，生成三维避让缓冲区参数。

路径设计阶段，利用有限元仿真模拟钻进过程中钻杆与周边管线的力学交互作用，计算不同轨迹方案下地层应力扰动范围，优先选择扰动半径小于1.5m、与既有管线净距大于3倍钻孔直径的路径。对于无法完全避让的交叉区域，采用“垂直正交穿越”模式，将穿越角度控制在85°~90°，并设置钢套管隔离防护层。在设计软件中嵌入管线安全阈值参数，当钻进轨迹与既有管线间距接近临界值时，系统自动触发轨迹修正指令，生成“S”形过渡段以平衡曲率半径与避让需求。施工过程中需建立实时空间定位与钻进参数联控机制，采用高精度惯性导航单元(IMU)与地面基站差分定位技术，实现钻头空间坐标的厘米级动态监测。通过光纤陀螺仪实时反馈钻头方位角偏差，当偏差超过0.5°时，导向系统自动调整泥浆马达工具面角进行纠偏。针对近距离穿越高压燃气管线的特殊工况，配置电磁屏蔽型导向探头，避免相邻管线电磁场干扰导致的定位误差。

在粉质黏土或砂层中穿越时，采用改性膨润土基泥浆体系，通过添加羟丙基甲基纤维素将泥浆动塑比提升至0.8~1.2Pa/MPa·s，形成致密泥皮以抑制孔壁渗流破坏。针对临近地下管线的敏感区域，采用低摩阻聚合物涂层钻杆，将管土摩擦系数降低至0.15以下，同时通过环空压力监测装置将泥浆压力波动控制在±0.05MPa范围内，最大限度减少地层扰动。每完成30m进尺后，采用孔内激光扫描仪对成形孔壁进行三维点云建模，检测孔径椭圆度与轴线偏移量，发现局部塌孔风险时立即注入速凝型超细水泥浆进行补强。

3.3 软弱地层与高地下水条件下的定向钻进技术

在软弱地层与高地下水条件区域实施燃气管道定向钻进时，需构建以地层改良与钻进参数动态调控为核心的技术体系。施工前期需通过地质精细化勘察明

确软弱夹层分布特征，采用静力触探与孔隙水压力监测联合测试，量化淤泥质土层的不排水抗剪强度及砂层渗透系数，结合地下水动态监测数据建立三维渗流场模型，为泥浆压力设计提供依据。针对粉质黏土与饱和砂层交互地层，需在轨迹设计中设置缓坡过渡段，将钻进倾角控制在 $8^\circ \sim 12^\circ$ 以减少孔壁剪切扰动，并预留0.3~0.5MPa的泥浆压力冗余量应对地下水位波动。

钻进过程中，针对淤泥地层易缩径特性，采用改性钠基膨润土泥浆，通过添加聚阴离子纤维素将马氏漏斗黏度提升至55~65s，动塑比调整至0.5~0.7Pa/mPa·s，形成具有触变性的结构性流体。在高渗透性砂层中，配置粒径梯度为20~200目的复合堵漏剂，通过架桥-填充协同作用封堵粒径1~3mm的孔隙。泥浆压力实施闭环控制，根据地层孔隙水压力监测值动态调节，确保环空压力始终高于地下水压0.05~0.1MPa，同时采用电磁流量计实时监测返浆量，漏失量超过设计值20%时自动触发堵漏预案。

在流塑状淤泥层中采用大螺旋角宽叶片钻头，配合低转速、高扭矩钻进模式，将进速度控制在1.2~1.8m/h以减少孔壁挤压变形。遇富水砂层时切换为双通道钻具，通过中心孔喷射高黏度携砂泥浆，侧向喷嘴则以15~20MPa压力注入速凝型化学浆液，形成半径0.5~0.8m的固结圈。孔壁稳定性控制层面，应在钻进同时沿轨迹每间隔15~20m设置注浆加固点，采用袖阀管分段注浆技术，注入超细水泥-水玻璃双液浆，形成厚度0.3~0.5m的环状加固体。针对管涌风险区段，植入可降解化学纤维网，通过泥浆循环将其均匀分布于孔壁周边，遇水后纤维膨胀形成三维网状支撑结构。

3.4 环保敏感区域低扰动施工与生态保护

在环保敏感区域实施燃气管道定向穿越时，需构建“预防-控制-修复”三位一体的低扰动技术体系。施工前基于生态敏感度分级评估，采用多光谱遥感与地面生态调查结合的方式，划定施工禁入区、缓冲区及作业区，通过三维水文地质模型预测泥浆渗流路径与地下水位波动范围，制定针对性生态保护方案。针对水源涵养区、湿地等特殊区域，在轨迹设计中优先选择埋深大于地下水位2.0~3.0m的稳定隔水层作为钻进层位，避免施工活动扰动潜水层与承压水的水力联系。

泥浆循环系统的封闭式管理层面，需配置全封闭泥浆处理站，集成振动筛、旋流器与超滤膜三级处理模块，将泥浆固相粒径分离精度提升至 $20\mu\text{m}$ 级，处理后的液相悬浮物浓度控制在30mg/L以下，并采用生物降解型润滑剂（如聚酯类化合物）替代传统矿物油，通过分子结构设计使降解半衰期缩短至7~10天。

在穿越生态敏感区段时，泥浆体系添加环境友好型增粘剂（黄原胶与瓜尔胶复配），将API滤失量降低至8mL/30min以下，同时引入重金属螯合剂，使废弃泥浆中铜、锌等重金属离子浓度低于《土壤环境质量风险管控标准》限值。

钻进作业的振动与噪声控制方面，应选用低振型全液压钻机，通过液压蓄能器与弹性支座组合将基础振动加速度限值在0.15g以内。钻杆柱配置减振接头，采用粘弹性高分子材料（聚氨酯-橡胶复合材料）制成阻尼环，使振动频率从50~100Hz衰减至20Hz以下。噪声控制方面，在钻机动力单元安装阻抗复合式消声器，采用微穿孔板与吸声棉组合结构，使1m处噪声级 $\leq 75\text{dB(A)}$ 。对于临近珍稀植物群落的作业区，设置隔声屏障并实施错峰施工，将声环境敏感时段（如鸟类繁殖期）的施工强度降低至常规工况的30%~40%。此外，应在钻进轨迹上方布设生态监测网格，采用高密度电法仪实时监测土壤电阻率变化，当检测到土壤孔隙度异常增大（ $\Delta \rho > 5\Omega \cdot \text{m}$ ）时，立即启动微注浆修复程序，注入生物炭基改性材料（粒径0.5~1.0mm）填充地下生态通道。地表植被恢复采用原位菌剂活化技术，喷洒含固氮菌、解磷菌的复合微生物制剂（浓度 10^7 CFU/mL ），配合缓释型保水剂（聚丙烯酰胺-凹凸棒土复合材料），使土壤微生物活性在30天内恢复至施工前水平。

4 结束语

非开挖定向穿越技术以其精准、环保、安全的特性，为城市燃气管道建设提供了创新解决方案。通过精细化地质勘察、智能化轨迹控制及生态友好型施工工艺的集成应用，该技术有效克服了复杂城市环境下的施工障碍，显著降低了对地表生态与地下管网的干扰。未来，随着导向定位精度提升、新型环保材料研发及智能监测系统的深度应用，非开挖技术将在城市燃气管道工程中进一步发挥核心作用，推动地下空间开发与生态保护的协同发展，为城市能源基础设施的高质量建设提供可持续技术支撑。

参考文献：

- [1] 吴巍蓉. 城镇燃气管道非开挖定向穿越施工技术应用研究 [J]. 住宅与房地产, 2024, (05): 215-217.
- [2] 张雄. 市政燃气管道非开挖定向穿越施工技术 [J]. 四川建材, 2023, 49(07): 131-133.
- [3] 冯涛. 非开挖敷设技术在城市燃气管道中的应用浅析 [J]. 城市燃气, 2022, (02): 20-23.

作者简介：

陶雪平（1989-），女，汉族，江西上饶人，本科，工程师，研究方向：燃气工程施工管理。