

基坑施工对石油长输管道顶管施工质量的影响及对策研究

孟凡鹏（山东莱克工程设计有限公司，山东 东营 257000）

摘 要：石油长输管道作为国家能源传输的重要设施，其施工质量对运行安全至关重要。顶管施工因非开挖特点被广泛应用，但其质量易受基坑施工的显著影响。本文从基坑施工中的土壤特性、支护系统设计及地下水控制等方面，系统分析了对顶管施工精度、稳定性和安全性的影响机理，并针对基坑稳定性不足、施工误差、地下水问题及周边环境限制等问题提出优化对策。通过科学的基坑设计、先进的支护技术与完善的地下水控制措施，可显著提高长输管道顶管施工质量，降低施工风险，为能源基础设施建设提供重要保障。

关键词：基坑施工；石油长输管道；顶管施工质量；影响因素；对策

0 引言

石油长输管道是国家能源传输体系的重要组成部分，其施工质量直接影响管道运行的安全性和稳定性。作为非开挖技术的重要手段，顶管施工以其对环境影响小和适应复杂地质条件的优势，广泛应用于石油长输管道的建设中。然而，顶管施工的质量与施工条件密切相关，其中基坑施工作为基础性环节，其设计和实施过程对顶管施工的精度、稳定性和安全性具有直接影响^[1]。在长输管道施工中，基坑施工涉及土壤特性、支护系统和地下水控制等多方面内容。地质条件的复杂性、支护系统的不完善及地下水管理的不足，都可能导致基坑失稳、顶管设备偏移及施工风险增加。这些问题在软土、砂土或高地下水位区域尤为突出，对石油长输管道顶管施工提出了严峻挑战。因此，系统研究基坑施工对顶管施工质量的影响机理，提出针对性的优化对策，对于提升施工质量、降低风险具有重要的现实意义。

1 基坑施工对石油长输管道顶管施工质量的影响分析

基坑施工是石油长输管道顶管施工的关键环节，其质量直接影响顶管施工的精度、稳定性和安全性。在顶管施工中，基坑的设计与实施需充分考虑土壤特性、支护系统和地下水控制等多重因素，否则容易引发施工质量问题，增加工程风险。

1.1 土壤特性对长输管道顶管施工的影响

1.1.1 土壤承载力与稳定性

土壤承载力和稳定性是基坑施工的重要基础条件，不同类型土壤对长输管道顶管施工的影响差异显著。在黏性土壤区域，土体在受压后容易发生变形，可能导致顶管推进过程中的轨迹偏移；而在砂土地区，因渗透性强，地下水作用下容易形成流沙，导致基坑

不稳定，直接威胁施工精度。特别是在软土地区，由于土体强度较低，基坑易发生不均匀沉降，对长输管道顶管设备的运行产生干扰^[2]。

1.1.2 复杂地质条件的影响

在基坑施工中，复杂地质条件如软硬交替地层或夹杂岩层，会对顶管施工造成显著影响。软硬交替地层中，由于土体强度和阻力的显著差异，顶管设备推进过程容易出现受力不均，导致设备轨迹偏移或施工效率下降；而夹杂岩层的高阻力则可能增加推进难度，并对设备的运行稳定性构成威胁。这些因素不仅影响顶管施工的精度，还可能加大基坑稳定性维护的难度。

1.1.3 施工扰动与地面沉降

基坑开挖引发的土壤扰动往往导致地面沉降，尤其在城市密集区域或软土基础上更为显著。地面沉降不仅可能破坏周边环境，还会使长输管道顶管的推进轨迹发生偏移，增加管道接头错位或密封性能降低的风险。

1.2 基坑支护系统设计对长输管道顶管施工的影响

1.2.1 支护系统设计的科学性

基坑支护系统的合理设计是确保基坑稳定性的重要环节。基坑深度、土壤特性以及地下水条件等因素均需纳入支护系统的设计考量。不合理的支护设计可能导致基坑坍塌或边坡失稳，直接影响长输管道顶管施工的安全性。例如，支护材料强度不足或锚杆布置不当会引发支护结构失效，威胁管道施工的精准推进。

1.2.2 支护结构变形对施工的影响

基坑支护结构在施工过程中可能因受力不均或材料性能不足而发生变形，导致基坑边坡滑移或土体移动。这种变形将直接影响长输管道顶管设备的运行轨迹，进而降低施工精度，增加后续管道连接的难度。

1.2.3 施工材料与技术的适配性

支护系统材料和施工技术需与基坑条件匹配。在

软土地区，柔性支护结构能更好地缓解变形压力，而砂卵石层则需采用刚性支护以增强稳定性。若材料或技术选型与施工环境不符，可能导致基坑支护不足，影响长输管道顶管施工的连续性和安全性。

1.3 地下水对基坑及长输管道顶管施工的影响

1.3.1 高地下水位的压力效应

地下水位较高地区，地下水压力可能引发基坑底部突涌或土体流失，导致基坑整体失稳，进而危及长输管道顶管施工的安全推进。特别是在砂土或软黏土地基中，未控制好的地下水会加速基坑失稳，增加施工难度。

1.3.2 排水系统不足的影响

不完善的排水系统常导致基坑内积水过多，进一步降低土体的抗剪强度。这种情况会引发顶管推进过程中的沉降不均，增加管道施工误差。在软土或高地下水区域，积水问题尤为突出，亟需有效解决。

1.3.3 对施工设备的腐蚀影响

基坑内积水如果未及时排除，可能对长输管道顶管设备造成腐蚀或泥沙堵塞，降低设备的施工效率与精度。此外，积水环境也会增加施工人员操作的难度和现场安全隐患。

2 基坑施工对顶管施工质量的主要问题分析

基坑施工作为石油长输管道顶管施工的核心环节，其质量直接决定了管道施工的安全性、精度和稳定性。然而，施工过程中常出现基坑稳定性不足、施工误差、地下水问题及周边环境限制等问题，严重影响顶管施工质量。

2.1 基坑稳定性不足

基坑的稳定性是石油长输管道顶管施工质量的基础保障，尤其在软土和砂土区域更容易出现失稳问题。软土因塑性高，开挖后易导致边坡变形甚至坍塌，影响顶管施工设备的运行轨迹。而砂土因其渗透性强，地下水作用下更易引发流沙现象，削弱基坑承载能力，进而增加管道推进过程中的沉降风险。此外，基坑设计中若边坡角度不当或支护措施不足，也可能导致边坡滑移，尤其在城市区域受到建筑荷载和施工振动的叠加影响，基坑稳定性问题更为突出。

2.2 施工误差导致的顶管偏移

石油长输管道顶管施工对轨迹精度要求极高，而基坑施工中的误差往往是导致管道偏移的重要因素。地质层的不均匀性在施工中表现为不同土层阻力的显著差异。例如，砂卵石层阻力较大，而软土阻力较小，推进过程中设备受力不均，容易偏离设计轨迹。此外，

基坑底部平整度不足会导致顶管设备运行时震动增大，进一步影响推进方向和管道对接的精准性。地面沉降的不均匀性也可能造成管道接头错位，危及管道密闭性与结构完整性^[3]。

2.3 地下水问题对施工的影响

高地下水位区域是石油长输管道顶管施工中面临的常见难题。地下水压力过高可能引发基坑底部突涌现象，导致基坑失稳和土体滑移，严重影响施工安全性和推进平稳性。若排水措施不到位，基坑内积水会降低土壤的抗剪强度，增加施工沉降和变形风险。在软土和砂土基坑中，这种现象尤为显著。此外，积水还可能腐蚀施工设备，导致顶管推进效率降低，同时增加施工操作的复杂性与安全隐患。

2.4 周边环境对基坑施工的制约

石油长输管道顶管施工往往涉及城市密集区或工业区域，此类场地的复杂环境对基坑施工提出了更高要求。周边建筑的荷载和交通振动可能导致基坑侧壁额外变形，支护结构失稳风险增加^[4]。在铁路、地铁等沿线区域，施工振动通过土体传递，对基坑稳定性形成持续威胁。此外，基坑开挖引发的地表沉降可能对周边建筑基础造成影响，反过来加剧基坑失稳。环境保护要求较高的区域，基坑排水受限，积水问题难以有效解决，进一步增加了施工难度。

3 基坑施工对顶管施工质量的优化对策

基坑施工作为石油长输管道顶管施工的重要环节，其优化对策需针对基坑设计、支护系统、地下水控制等核心领域展开系统化改进，以确保施工质量和安全性。

3.1 精准优化基坑设计与勘察方案

3.1.1 地质勘察的精细化

在石油长输管道施工中，基坑设计需以详尽的地质勘察为前提。通过全面分析土壤类型、地下水分布及地层稳定性，准确评估施工区域的土体承载力和潜在风险。软土、砂土和软硬交替地层需特别关注，制定针对性的基坑设计方案，确保基坑稳定性与顶管施工适应性。

3.1.2 设计灵活性与适配性

基坑设计需结合长输管道施工的复杂性，针对不同区域采用差异化设计。在软土地区，应增设抗沉降缓冲结构，强化边坡支护柔性；在砂卵石层或高地下水位区，则需注重抗突涌设计，并完善排水系统。此外，城市密集区施工需动态调整基坑开挖策略，避免对周边建筑和环境造成负面影响。

3.1.3 基坑底部的平整与加固

长输管道顶管施工对基坑底部承载力和平整度要求极高。施工中应采用压实、振动平整等措施,对软弱地基可通过注浆、砂垫层或砼垫层加固,增强其稳定性和均匀性,为顶管设备提供可靠支撑^[5]。

3.2 优化支护系统设计与施工技术

3.2.1 因地制宜的支护形式选择

基于长输管道施工区域的地质条件,选择适配的基坑支护形式。例如,在深基坑中优先采用钢支撑或混凝土护壁,在软土地区可采用柔性支护(如喷锚结合钢网),在砂卵石区域则需强化刚性支护(如钢板桩),确保基坑在顶管施工过程中的稳定性。

3.2.2 先进施工工艺的应用

采用分层开挖与支护同步施工技术,以减少基坑暴露时间,提高稳定性。在深基坑施工中,引入自动化设备完成锚杆安装、钢支撑施工,减少人为误差,提升支护系统精度。支护材料需满足长输管道工程的质量标准,确保施工过程中的可靠性。

3.2.3 支护结构的动态监控与调整

建立实时监测系统,对支护结构变形、边坡滑动等问题进行动态调整。当基坑边坡或支护系统出现异常变形时,应迅速采取加固措施,如增加临时支撑、调整锚杆布置等,防止影响顶管施工精度。

3.3 完善地下水控制措施

3.3.1 科学的排水规划

在高地下水位地区施工时,应制定详细的排水方案,通过井点降水、渗透排水或真空降水等手段有效降低基坑地下水位。排水系统的布设应综合考虑排水量和施工安全性,确保基坑内部环境稳定。

3.3.2 防突涌和积水措施

在砂土或高地下水压力区域,建议在基坑底部铺设防水膜,并结合化学注浆技术加固基底,防止地下水突涌造成基坑失稳。同时,利用高效抽水设备及时清除积水,并在基坑周边设置沉淀池,以减少排水对施工的干扰。

3.3.3 施工设备的防护与维护

针对地下水对顶管施工设备的影响,应强化设备防护措施,例如涂覆耐腐蚀涂层、改用不锈钢部件等。施工现场需配备备用排水系统,应对突发性渗漏或积水问题,确保设备正常运行和施工进度。

3.4 实时监测与动态施工管理

3.4.1 监测系统的部署与数据分析

在基坑施工中,安装多点监测系统,对基坑侧壁

稳定性、地下水位变化及支护系统受力情况进行实时监控,及时发现潜在问题。通过数据分析,动态调整施工计划,确保施工稳定性。

3.4.2 分阶段施工与风险控制

在石油长输管道施工中,采用分区、分阶段开挖方式,可有效控制基坑风险,避免大面积暴露造成的边坡失稳。施工中应严格遵循进度计划,并定期检查基坑支护系统与排水设施的运行状态。

3.4.3 应急预案与快速响应机制

为应对施工中可能出现的突发风险,应制定详细的应急预案,并配备专业抢修团队。例如,当基坑侧壁或支护结构发生变形时,应迅速暂停施工,采取化学注浆、增加排水设施等补救措施,确保基坑稳定和施工安全。

4 结语

石油长输管道顶管施工的质量对能源传输的安全与效率具有决定性作用,而基坑施工是确保这一质量的核心环节。基坑施工过程中土壤特性、支护系统设计以及地下水控制的有效性直接关系到顶管施工的精度与稳定性。通过针对性地优化基坑设计,加强支护系统的适应性,并完善地下水控制措施,可显著减少基坑失稳、设备偏移和施工误差的发生,为长输管道顶管施工提供可靠保障。在施工实施中,精准的地质勘察、科学合理的基坑设计、分层开挖与支护同步推进的施工工艺,以及高效的地下水处理手段,均是提升施工质量的重要措施。此外,借助实时监测与动态管理,可以迅速识别和解决施工过程中可能出现的风险,进一步提升施工的安全性和稳定性。未来,结合智能化监测技术和更为先进的施工设备,有望实现长输管道顶管施工的全周期风险控制和质量优化,为我国能源基础设施建设注入更强的技术支持。

参考文献:

- [1] 付宏斌. 油气长输管道顶管穿越施工技术分析[J]. 全面腐蚀控制, 2023, 37(02): 55-57.
- [2] 钱彬. 长输管道顶管穿越施工技术研究与应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(15): 209-210.
- [3] 袁泽浩, 魏聪, 王俊, 等. 高水位软弱地质条件下长输管道顶管发送沟形式探究[J]. 油气田地面工程, 2024, 43(4): 102-108.
- [4] 桂皓琛. 油气长输管道顶管穿越施工技术要点探析[J]. 中国化工贸易, 2023, 15(11): 121-123.
- [5] 王林燕. 油气长输管道顶管穿越施工要点[J]. 科海故事博览, 2021(18): 26-28.