

沿海地区石油化工地埋管道施工技术应用研究

崔俊功（陕西化建工程有限责任公司，陕西 杨凌 712100）

摘要：本文以浙石化炼化一体化项目 110 万吨 / 年甲醇装置扩能改造工程为研究对象，针对沿海复杂地质条件下深基槽循环水管道施工的技术难题，系统分析拉森钢板桩支护体系在砂性土、高水位环境中的应用。通过地质勘察数据解析、支护结构力学建模及信息化管道施工管理，验证“动态设计 + 放坡组合”方案可行性，为同类管道施工提供技术参考。

关键词：沿海地区；石油化工；地埋管道；施工技术

中图分类号：TE973 文献标识码：A 文章编号：1674-5167 (2025) 012-0088-03

Research on the Application of Underground Pipeline Construction Technology in Petrochemical Industry in Coastal Areas

Cui Jungong (Shaanxi Petroleum Chemical Engineering and Construction Co., Ltd., Yangling Shaanxi 712100, China)

Abstract: This article takes the 1.1 million tons/year methanol plant expansion and renovation project of Zhejiang Petrochemical Refining and Chemical Integration Project as the research object, and systematically analyzes the application of Larson steel sheet pile support system in sandy soil and high water level environment, aiming at the technical difficulties of deep foundation trench circulating water pipeline construction under complex geological conditions along the coast. Through geological survey data analysis, mechanical modeling of support structures, and information-based pipeline construction management, the feasibility of the “dynamic design+slope combination” scheme is verified, providing technical reference for similar pipeline construction.

Keywords: coastal areas; Petrochemical industry; Underground pipelines; construction technique

随着我国石油化工产业向沿海地区集聚，大型炼化一体化项目的建设规模与技术要求不断提升。然而，沿海地区复杂的地质水文条件，如高地下水位、软弱土层及潮汐作用，对地埋管道施工提出严峻挑战，尤其是在深基槽开挖过程中，既要保障支护结构稳定性，又需有效控制地下水渗透风险，成为制约工程安全与效率的核心问题。当前，国内外研究虽对钢板桩支护技术有一定探索，但在吹填地层动态设计、潮汐敏感区渗流控制及复杂地质快速响应等方面仍存在技术难点问题。通过信息化施工管理实现“地质 - 结构 - 环境”协同优化，旨在为沿海石化工程管道施工提供兼具安全性、经济性与适应性的技术路径，推动行业在复杂地质条件下的工程实践创新。

1 工程概况

浙石化炼化一体化项目高端新材料项目位于浙江省舟山市鱼山岛，本期施工的循环水管道工程为甲醇装置扩能改造关键配套工程。本工程参数见表 1。

表 1 工程参数

项目	具体内容
管道埋深施工	最大开挖深度：-3.8m
支护结构	拉森钢板桩：12m 长 (SP-IV 型)，外侧放坡：坡度 40°，高度 1-2m
地质特征	吹填形成的复合地层 地层组成：①碎石回填层；②砂性冲填土；③粉质黏土
水文条件	地下水位埋深：0.00~5.60m；特点：受潮汐影响显著

根据勘察报告（表 2），场地地层可分为 4 大工程地质层：

表 2 勘察报告

地层编号	地层名称	厚度 (m)	主要组成或特性
①层	人工填土层	0.2 ~ 7.8	含冲填土、素填土，结构松散
②层	第四系海积层	-	淤泥质粉质黏土、粉砂为主，渗透系数 1×10^{-4} cm/s
③层	第四系冲洪积层	-	含砾黏性土及砂层，承载力特征值 120kPa
⑤层	基岩层	埋深 17 ~ 74m	凝灰岩

研究区域地下水主要包括孔隙潜水和弱承压水两种类型。孔隙潜水赋存于浅部填土及砂层中，与海水存在直接水力联系，其水位变化受潮汐作用显著影响，对工程环境具有重要影响。弱承压水主要分布于深层砂砾层，水头高度随潮位波动而发生变化，表现出较强的动态特性^[1]。由于研究区地质条件复杂，砂性土层在地下水作用下渗透稳定性较差，尤其是在动水压力作用下，易发生流土破坏现象，对工程结构的稳定性构成潜在威胁。因此，在工程设计与管道施工过程中，需充分考虑地下水动态变化特征及其对地基稳定性的影响，采取有效降水、排水或支护措施，确保管道工程安全并减少不利影响。

2 管道施工关键技术研究

2.1 钢板桩复合支护体系

2.1.1 结构设计

在本项目中,为满足管道深基坑开挖条件下的支护需求,采用单排12m长SP-IV型拉森钢板桩作为主要支护结构。该型钢板桩具有较高的截面模量($\geq 2030\text{cm}^3/\text{m}$),能有效承受较大土压力和水压力作用,同时具备良好抗弯性能,确保支护体系整体稳定性。此外,在桩顶设置双拼H300型钢围檩,通过增强顶部刚度来减少变形,并在四角配置斜撑以提高整体结构的抗倾覆能力^[2]。这种设计不仅简化管道施工流程,还显著提升支护系统的承载力和安全性。为验证支护结构可靠性,进行详细力学验算。力学验算公式:抗倾覆安全系数 $K=(\gamma \cdot H \cdot B^2)/(6 \cdot M) \geq 1.5$ 。式中: γ =土体重度(18kN/m^3), H =开挖深度, B =支护宽度, M =主动土压力矩。通过计算可得出,当开挖深度达到3.8m时,支护宽度需合理设置以保证抗倾覆安全系数不低于规范要求的1.5倍, M 值为 $507.9\text{kN} \cdot \text{m}$ 。具体而言,支护宽度选择应综合考虑地层特性、地下水位及外部荷载等因素,从而实现结构安全性和经济性平衡。此外,针对不同工况下土压力分布情况,对支护结构在施工阶段及运营阶段受力状态进行实验分析,进一步验证设计方案合理性。结果表明,该支护体系能在复杂地质条件下保持良好稳定性和适应性,为后续管道施工提供坚实保障。值得注意的是,拉森钢板桩锁口设计在支护系统中起到关键作用。通过咬合式锁口连接,不仅增强相邻钢板桩之间的连接强度,还形成连续的止水帷幕,有效阻止地下水渗入基坑内部。

2.1.2 止水效能控制

止水效能是深基坑支护工程中不可或缺的重要环节,直接关系管道施工安全与质量。在本项目中,通过采用拉森钢板桩的咬合式锁口技术,成功构建一道连续的止水帷幕,实现对地下水有效隔离。咬合式锁口设计原理在于利用钢板桩间紧密嵌合形成一道屏障,阻止水流沿接缝渗透进入基坑内部^[3]。经过现场测试,实测渗漏量不超过 $0.5\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,完全符合ISO12944防腐标准要求,充分证明该技术在管道施工应用中可靠性和有效性。

从技术角度来看,咬合式锁口止水效能主要依赖于以下几个方面:首先,钢板桩制造精度直接影响锁口的密封性能。因此,在材料选择阶段,严格控制钢板桩质量,确保其几何尺寸和表面光洁度满足设计要求;其次,管道施工过程中需精确控制打桩工艺,避免因锤击偏移或过度挤压导致锁口变形,从而影响止

水效果。为此,在地理管道施工前进行多次试桩试验,优化打桩参数,并制定详细操作规程,确保每根钢板桩都能准确就位并保持良好咬合状态。此外,针对复杂地质条件下特殊工况,例如砂性土层易发生流土破坏问题,还在部分关键部位增设辅助止水措施,如注浆加固或高压旋喷桩,进一步提高止水帷幕的可靠性。

在渗漏量管理方面,建立完善监测体系,实时跟踪基坑内外水位变化及渗漏情况。通过对渗漏量定量分析,可及时发现潜在问题并采取相应措施加以解决。例如,当局部区域出现异常渗漏时,可通过注入速凝材料快速封堵渗漏点,防止问题扩大化。同时,结合ISO12944防腐标准要求,对钢板桩表面进行防腐处理,延长其使用寿命并减少后期维护成本。

2.2 动态支护调整策略

在深基坑支护工程中,实施动态调整策略是确保管道施工安全与结构稳定重要手段。本项目采用“监测-反馈-优化”的闭环管理模式,通过实时监测关键指标并结合应急措施库,实现对支护体系的精准控制。根据《建筑基坑工程监测技术规范》(GB 50497-2019),一级基坑(周边存在重要建筑物或管线)的桩顶位移报警值通常为设计允许值的70%-80%。本项目基坑紧邻循环水管道及回填区既有设施,属一级基坑安全等级,结合设计计算书中的极限位移值(约35mm),取70%系数后定为25mm,预留30%安全冗余以应对潮汐波动引发的动态荷载。一旦监测数据超出设定阈值或出现异常变化,将立即启动相应的应急措施,保障管道工程安全性。

第一,在监测环节中,利用高精度测量仪器对桩顶位移进行观察与记录。数据显示,在正常管道施工条件下,桩顶位移通常保持在15mm以内,远低于报警值25mm。然而,在某些复杂地质条件下(如遇大块石障碍),局部区域可能出现较大变形。例如,在某次施工过程中,监测结果显示某段桩顶位移达到22mm,且位移速率超过 3mm/d ,触发预警机制。根据动态调整策略,迅速启动应急措施库中双排桩+内支撑加固方案。通过对该区域补充安装一排拉森钢板桩,并增设横向内支撑,成功将位移控制在安全范围内,最终恢复到18mm以下^[4]。第二,针对周边地表沉降问题,也建立严格监测体系。实测数据显示,在开挖深度为3.8m情况下,地表沉降普遍维持在10~20mm之间,符合设计要求。但在靠近既有建筑物敏感区域,曾出现最大沉降值接近30mm情况。对此,及时采取高压旋喷桩局部置换措施,通过注浆形成加固体,有效遏制了沉降趋势,最终将沉降量控制在25mm以内,避免对周边环境造成进一步影响。

3 地埋管道施工过程管理创新

3.1 全站仪应用

采用全站仪配合地质雷达扫描，对复杂地层进行网格化剖面测绘（ $20m \times 20m$ 网格）。通过人工绘制三维地质拼图，将吹填区淤泥质土与砂层的交界面标高误差控制在 $\pm 15cm$ 内，较常规断面测绘精度提升 40%。现场设置 120 组监测标志点，每日两次人工复测地下水位波动，为钢板桩打设提供实时地质数据支撑。

3.2 潮汐影响应对

第一，在场地布置上设置截水沟与集水井，二者间距为 30m，形成一套完善排水网络。截水沟主要用于拦截地表水及浅层地下水，防止其流入基坑；而集水井则负责收集并排出渗入基坑地下水，确保施工环境干燥稳定。第二，针对深层地下水问题，采用真空深井降水技术。通过在基坑周围布设深井，并利用真空泵持续抽排地下水，成功将水位保持在槽底以下 0.5m 位置，有效避免流砂和管涌现象发生。监测数据显示，在潮汐作用下，尽管地下水位波动明显，但通过该系统调控，基坑内部始终保持稳定状态。

4 地埋管道施工质量与安全控制

4.1 地埋管道关键验收指标

表 3 关键指标

项目	允许偏差	检测方法
桩垂直度	$\leq 1\%$	全站仪测量
桩位偏差	$\pm 50mm$	钢尺量测

在深基坑支护工程中，关键验收指标设定与执行是确保管道施工质量核心环节。本项目针对拉森钢板桩支护体系，制定明确验收标准，并通过先进检测方法对各项指标进行精准测量。第一，桩垂直度作为衡量支护结构稳定性的重要参数，其允许偏差被严格控制在 $\leq 1\%$ 范围内。为实现此目标，选取全站仪测量技术，在地埋管道施工过程中对每根钢板桩垂直度进行实时监测与调整。全站仪具备高精度三维坐标测量能力，能准确捕捉桩体倾斜角度变化，为管道施工技术人员提供反馈信息。实践表明，通过全站仪精确测量与现场校正措施相结合，最终将桩垂直度偏差控制在设计要求之内，有效避免因倾斜过大而导致结构失稳问题^[5]。第二，桩位偏差是影响支护系统整体布局重要因素，其允许范围设定为 $\pm 50mm$ 。为此，采用钢尺量测法对桩位进行逐一检查，确保每根钢板桩均按照设计图纸准确就位。第三，结合 BIM 技术建立三维地质模型，还可提前模拟桩位布置方案，优化打桩

路径，进一步减少管道施工误差。通过对大量实测数据统计分析发现，本项目中桩位偏差实际值普遍保持在 30mm 以内，远低于允许偏差范围，充分体现管道施工工艺高精度水平。关键指标见表 3。

4.2 风险管控措施

地埋管道施工项目通过实现对支护结构应力变化及桩体变形现场复检。第一，有限元模型应用为风险预测提供重要依据。通过对实际工况数据分析，可准确预测支护结构在不同阶段应力分布情况，包括开挖深度增加、地下水位波动及外部荷载作用等因素影响。例，在某次模拟分析中，发现当开挖深度达到设计值时，部分区域支护结构可能出现局部应力集中现象。基于此结果，在管道施工前及时调整设计方案，在该区域增设内支撑并优化围檩布置，成功消除潜在隐患。第二，分布式光纤监测技术引入为桩体变形监测提供全新解决方案^[6]。相比传统监测手段，光纤传感器具有高灵敏度、长距离覆盖和实时监测优势，能准确捕捉桩体微小变形变化趋势。通过将光纤传感器嵌入拉森钢板桩内部，实现对整个支护系统全方位监控。

5 结论

本研究沿海地区石油化工地埋管道施工技术探究，提出并验证 12m 拉森钢板桩配合外放坡支护方案，结果表明该方案能有效控制砂性土基槽变形，确保管道施工过程安全与稳定。同时，通过引入信息化管道施工技术，实现对支护体系动态监测与快速调整，使调整效率提升 40%，显著优化管道施工流程并降低潜在风险。此外，研究还发现现有止水措施在复杂地质条件下局限性，建议进一步探索钢板桩 - 注浆复合止水技术在吹填地层中应用，以提高止水效能和工程适应性。综上所述，本研究为类似地质条件下深基坑支护设计与管道施工提供重要参考，并为未来技术创新指明方向。

参考文献：

- [1] 辛燕舞. 自动焊技术在石油化工管道施工中的应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(24):184-186.
- [2] 丁道森. 某新建化工装置工艺地埋管道技术特点分析与质量控制 [J]. 化工管理, 2024(26):156-158.
- [3] 段磊. 浅析石油化工管道施工的质量控制措施 [J]. 石化技术, 2021, 28(09):164-165.
- [4] 董原. 自动焊技术在石油化工管道施工中的应用 [J]. 化纤与纺织技术, 2021, 50(09):30-31.
- [5] 王立松. 石油化工装置蒸汽管道施工质量控制 [J]. 石油化工建设, 2021, 43(03):37-38+49.
- [6] 李永朝. 自动焊接技术在石油化工管道施工中的应用与发展前景 [J]. 工程建设与设计, 2019(18):123-124.