

石油天然气长输管道地面建设施工技术与质量管理研究

许启军（中石化中原油建工程有限公司，河南 濮阳 457000）

摘要：石油天然气长输管道作为能源输送的“大动脉”，其施工质量至关重要，直接关系到能源供应的安全稳定、运行效率及环境保护成效。本文深入剖析长输管道地面建设的复杂特性，系统阐述关键施工技术及质量控制的核心要点。结合具体工程案例，探讨技术优化路径与高效管理策略，旨在为提升长输管道建设质量提供坚实的理论支撑与实用的实践参考。

关键词：长输管道；施工技术；质量管理；防腐技术；自动化监测

中图分类号：TE973 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-5167（2025）017-0096-03

Research on Ground Construction Technology and Quality Management of Oil and Gas Long distance Pipeline

Xu Qijun (Sinopec Zhongyuan Oilfield Construction Engineering Co., Ltd., Puyang Henan 457000, China)

Abstract: As the “main artery” of energy transmission, the construction quality of long-distance oil and gas pipelines is crucial, directly related to the safety and stability of energy supply, operational efficiency, and environmental protection effectiveness. This article deeply analyzes the complex characteristics of ground construction of long-distance pipelines, systematically elaborates on key construction technologies and core points of quality control. By combining specific engineering cases, this article explores the path of technological optimization and efficient management strategies, aiming to provide solid theoretical support and practical reference for improving the quality of long-distance pipeline construction.

Keywords: long-distance pipelines; Construction technology; Quality Assurance; Anti-corrosion technology; automatic monitoring

1 长输管道地面建设施工技术体系分析

1.1 管道焊接与连接技术

长输管道的焊接与连接是施工过程中的核心环节，其质量直接影响到管道的整体强度和密封性。目前，长输管道常用的焊接工艺主要包括手工电弧焊（SMAW）、半自动焊（SAW）及全自动焊（GMAW）。这些焊接工艺各有特点，选择时需根据具体的工程要求和现场条件进行综合考虑。手工电弧焊因其操作灵活、适应性强，在复杂地形和狭窄空间内具有明显优势。然而，其焊接效率相对较低，且对焊工的技能水平要求较高。半自动焊和全自动焊则通过机械化或自动化的方式提高了焊接效率，减少了人为因素对焊接质量的影响。特别是在大口径、厚壁管的焊接中，全自动焊能够显著提高焊接速度和质量稳定性。然而，长输管道焊接过程中仍存在诸多技术难点。大口径厚壁管的焊接易产生未熔合、夹渣等缺陷，这些缺陷会严重削弱管道的强度和密封性。此外，在高寒地区进行低温焊接时，由于材料韧性下降，焊接接头易产生裂纹，因此需要进行预热及后热处理以改善焊接接头的组织和性能。为了优化焊接工艺，提高焊接质量，业界正积极推广全自动化焊接机器人的应用。全自动化焊接机器人能够精确控制焊接参数，减少人为操作

带来的误差。同时，结合数字孪生技术，可以在虚拟环境中模拟焊接过程，优化工艺参数，进一步提高焊接质量和效率。

1.2 非开挖穿越施工技术

在长输管道施工过程中，经常会遇到河流、公路等障碍地段，这时就需要采用非开挖穿越施工技术。定向钻（HDD）和顶管法是两种常用的非开挖穿越方法。定向钻技术通过控制钻头的方向和轨迹，实现管道在地下的精准穿越。然而，地层复杂性是非开挖穿越施工面临的主要挑战之一。地层的变化可能导致钻孔轨迹偏移，增加施工难度和风险。此外，管道回拖过程中受到的阻力也是一大问题，阻力过大可能导致管道拉断或损坏^[1]。为了解决这些问题，可以采用三维地质建模技术预判地层风险，为施工提供准确的地质信息。同时，结合泥浆护壁技术，通过注入泥浆来稳定钻孔壁，减少摩擦阻力，确保管道顺利回拖。

1.3 防腐层施工技术

长输管道长期暴露在自然环境中，易受腐蚀影响，因此防腐层施工至关重要。三层PE防腐层、环氧粉末涂层等是常用的防腐层类型，它们能够有效隔绝管道与外界环境的接触，延长管道的使用寿命。然而，防腐层施工过程中也存在一些质量通病，如防腐层剥

离、针孔缺陷等。这些缺陷会破坏防腐层的完整性，降低其防腐效果。为了严格控制防腐层施工质量，可以采用电火花检测仪对防腐层进行逐口排查，确保无漏检。同时，引入红外热成像技术监测层间粘结力，及时发现并处理潜在的质量问题。

2 石油天然气长输管道地面建设施工质量管理体系构建

石油天然气长输管道作为连接能源产地与消费地的“能源大动脉”，其建设施工质量不仅关乎能源的安全、高效传输，还直接影响到环境保护和公共安全。因此，构建一套全面、科学、完善的施工质量管理体系，对于确保长输管道的建设质量和长期运行安全具有举足轻重的意义。

2.1 全过程质量管控模型

全过程质量管控是确保长输管道建设施工质量的基石。为了实现这一目标，可以构建“事前预防－事中控制－事后评估”的PDCA（Plan-Do-Check-Act）循环体系，将质量管理贯穿于施工的全过程，确保每一个环节都符合设计要求和相关标准。

①事前预防阶段。对所有进场的钢管、涂层材料、焊接材料等关键原材料进行严格的质量复检。通过专业的检测设备和技术，对材料的化学成分、物理性能、尺寸规格等进行全面检测，确保材料符合设计要求和相关标准。在施工前，对施工人员进行详细的技术交底。明确施工规范、操作要求和注意事项，确保施工人员对施工工艺和流程有清晰的了解，能够按照规范要求进行施工。对施工过程中可能遇到的风险进行预评估。包括地质风险、施工风险、环境风险等，制定针对性的预防措施和应急预案，降低施工风险，确保施工过程的顺利进行。②事中控制阶段。安排专业的监理人员对施工过程进行旁站监督。对关键工序和隐蔽工程进行实时监控，确保施工过程的合规性和质量可控性。同时，对施工过程中出现的问题及时进行处理，确保施工质量符合设计要求。利用先进的监测设备和技术，实时采集施工过程中的关键数据。如焊接电流、电压记录，管道敷设的角度、深度等，为质量控制提供数据支持^[2]。通过对数据的实时分析和处理，及时发现并纠正施工过程中的偏差，确保施工质量的稳定性。③事后评估阶段。在施工完成后，进行水压试验。通过向管道内注入一定压力的水，检验管道的密封性和承压能力。确保管道在正常运行过程中不会发生泄漏或破裂等安全事故。对焊缝进行X射线探伤检测。通过X射线对焊缝内部进行透视，检测焊缝是否存在裂纹、夹渣等缺陷。确保焊缝质量符合设计要求，提高管道的整体强度和安全性。对管道

沿线的地质沉降情况进行定期监测。通过水准仪等测量设备，对管道沿线的地面沉降进行实时观测和记录。及时发现并处理潜在的地质问题，确保管道的长期稳定运行。

2.2 关键质量控制点

为了确保长输管道的建设施工质量，需要对关键质量控制点进行严格控制。在材料进场阶段，重点关注钢管的壁厚、涂层的附着力以及焊接材料的成分。通过超声波测厚仪，可以精确测量钢管的壁厚，确保每一根钢管都符合设计要求（如表1）。拉拔试验则用来检验涂层与钢管之间的粘结强度，保证涂层在长期使用中不会脱落。同时，利用光谱分析仪对焊接材料进行成分分析，确保其所含元素与设计要求一致，为高质量的焊接打下坚实基础。进入焊接施工阶段，严格控制焊缝的宽度、余高以及焊缝内部的缺陷。按照API 1104标准，采用射线探伤检测对焊缝内部进行全面检查，确保无任何缺陷存在。在防腐补口阶段，着重关注防腐层的漏点率、粘结强度以及厚度。电火花检测仪被用于对防腐层进行全面检测，确保没有任何漏点，从而有效防止腐蚀介质侵入。剥离试验则用来检验防腐层与钢管之间的粘结强度，确保它们之间的结合牢固可靠。同时，测厚仪被用于精确测量防腐层的厚度，确保它符合设计要求，为管道提供足够的保护^[3]。最后，在管沟回填阶段，严格控制回填土的夯实密度、管沟的沉降值以及回填材料的质量。核子密度仪被用于检测回填土的夯实密度，确保它达到设计要求，为管道提供稳定的支撑。水准仪则用于持续观测管沟的沉降值，及时发现并处理任何沉降问题，确保管道的稳定性。

表1 关键阶段的质量控制要点表

阶段	控制指标	检测手段
材料进场	钢管壁厚、涂层附着力	超声波测厚、拉拔试验
焊接施工	焊缝宽度、余高	射线探伤（API 1104标准）
防腐补口	漏点率、粘结强度	电火花检测、剥离试验
管沟回填	夯实密度、沉降值	核子密度仪、水准仪观测

2.3 智能化管理工具应用

随着科技的飞速发展，智能化管理工具在长输管道建设施工质量管理中的应用越来越广泛。以下是几种主要的智能化管理工具：

① BIM+GIS 技术。BIM（Building Information Modeling）技术是一种基于三维建模的数字化管理技术，可以实现对施工过程的模拟和预演。在长输管道建设施工中，可以利用BIM技术构建三维模型，模拟施工

过程中的冲突和碰撞,提前发现并解决问题。同时,BIM 技术还可以实现施工信息的集成和共享,提高施工效率和质量。GIS (Geographic Information System) 技术是一种地理信息处理技术,可以实现对管线位置的精确定位和可视化管理。将 BIM 技术与 GIS 技术相结合,可以更准确地处理管线定位问题,提高施工效率和准确性。同时, GIS 技术还可以为管道的运行和维护提供地理信息支持。

②物联网监测技术。物联网技术是一种通过先进的识别技术将各种物体的状态参数化,并通过互联网实现信息共享的技术。在长输管道建设施工中,可以在焊口、高后果区等关键部位布设传感器,实时传输应力、应变、温度等数据。通过物联网监测技术,可以实时掌握管道的运行状态和安全状况,及时发现并处理潜在的安全隐患^[4]。此外,物联网技术还可以与智能预警系统相结合,实现对管道安全的实时监控和预警。当管道出现异常情况时,智能预警系统可以及时发出警报,提醒相关人员进行处理,确保管道的安全运行。

③大数据分析技术。在长输管道建设施工过程中,会产生大量的数据,如施工数据、检测数据、监测数据等。利用大数据分析技术,可以对这些数据进行挖掘和分析,发现其中的规律和趋势,为施工质量管理提供数据支持。通过大数据分析技术,可以对施工质量进行量化评估,找出影响施工质量的关键因素,并制定相应的改进措施。同时,大数据分析技术还可以为施工过程的优化和决策提供科学依据。

3 工程案例实证分析

3.1 西气东输三线工程案例

西气东输三线工程,作为连接西部能源富集区与东部经济发达区的能源大动脉,其建设质量直接关系到国家能源安全 and 经济发展。该工程在技术实施上展现了多项创新亮点,其中最为突出的是全自动焊接设备的应用。这一技术革新不仅大幅提高了焊接效率,更将焊口一次合格率提升到了 99.2% 的新高度。全自动焊接设备的精准控制,减少了人为因素带来的误差,确保了焊缝质量的稳定性和一致性,为长输管道的安全运行提供了坚实保障。

然而,即便是如此高科技的工程,也难免遭遇质量挑战。在某段管道施工中,由于回填土含水率过高,导致管道出现了沉降现象。面对这一突发情况,项目组迅速反应,采用雷达扫描技术对管道沿线进行了全面检测,准确定位了沉降区域。随后,通过注浆加固的方法,有效稳定了管道基础,确保了管道的安全运行。这一事件的处理,充分展示了项目组在质量控制

方面的敏锐洞察力和快速响应能力。

3.2 中俄东线天然气管道黑龙江段

中俄东线天然气管道黑龙江段的建设,则面临着更为极端的挑战——极端低温环境下的焊接作业。在 -40℃ 的严寒条件下,普通的焊接材料和工艺难以保证焊缝质量。为了攻克这一技术难题,项目组搭建了保温棚,为焊接作业提供了一个相对温暖的环境。同时,选用了低氢焊条,并在焊前进行预热至 150℃,以确保焊缝在低温下的冲击韧性。这一系列措施的实施,取得了显著成果。焊口低温冲击韧性达标率达到了 100%,不仅满足了设计要求,更为后续的管道运行提供了可靠保障。

4 技术瓶颈与管理优化建议

4.1 现存问题

当前,长输管道建设面临诸多技术瓶颈。山区段由于地形复杂,机械化施工率低,过度依赖人工经验,导致施工效率和质量难以保证。同时,防腐层的全生命周期管理缺乏数字化平台支撑,信息孤岛现象严重,难以实现高效监管。此外,高后果区的风险预警响应机制尚不完善,应对突发事件的能力有待提升。

4.2 优化策略

为破解上述难题,建议采取以下优化策略:在技术研发方面,积极推广山地微型焊接机器人和自适应防腐喷涂设备,提高施工机械化和智能化水平。在管理创新上,建立 BIM 运维数据库,集成管道全生命周期数据,实现信息化、精细化管理。同时,完善相关标准,制定高寒地区施工规范,细化地质灾害预警指标,提升风险防控能力。

5 结语

石油天然气长输管道施工需融合先进工艺与智能管理,通过技术迭代与管理精细化降低质量风险。未来可结合数字孪生、AI 缺陷识别等技术,推动长输管道建设向“工业化、智能化、绿色化”转型。

参考文献:

- [1] 刘军.石油天然气长输管道地面建设施工技术与管理[J].门窗,2019,(20):185.
- [2] 崔巍.石油天然气长输管道地面建设施工技术与管理[J].化工设计通讯,2019,45(05):58+82.
- [3] 杜鸿飞.石油天然气工程地面管道的铺设技术探讨[J].石化技术,2020,27(05):88+107.
- [4] 周成瑞.研究石油天然气工程地面管道的铺设技术[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(03):175-177.

作者简介:

许启军(1985-),男,满族,黑龙江宁安人,本科,工程师,副经理,研究方向:油田地面建设。