

# 长距离压力管道工程施工技术及安全管控分析

焦伟

新疆水发建设集团有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

**摘要:** 长距离压力管道工程作为国家能源战略、水资源调配及工业流体输送的“大动脉”, 其建设规模宏大、技术复杂度高、施工环境多变, 直接关系到国家能源安全、生态安全及公共财产安全。随着“西气东输”“南水北调”等重大工程的持续推进, 长距离压力管道向高参数、大口径、复杂地形及恶劣环境方向发展的趋势日益明显。然而, 在工程建设过程中, 面临着地质条件复杂、焊接质量难以保证、应力控制困难、第三方破坏风险高以及安全管理链条长等严峻挑战。一旦施工质量控制不严或安全管控失效, 极易引发泄漏、爆炸、坍塌等灾难性事故, 造成不可估量的损失。本文旨在系统综述长距离压力管道工程施工的关键技术与安全管控体系的最新研究进展。

**关键词:** 长距离压力管道; 施工技术; 安全管控; 焊接质量; 应力分析; 智能监测; 风险管理; BIM 技术

## Analysis of Construction Technology and Safety Control of Long-Distance Pressure Pipeline Engineering

Jiao Wei

Xinjiang Shuifa Construction Group Co., Ltd., China Xinjiang Urumqi 830000

**Abstract:** Long-distance pressure pipeline engineering, as the "artery" of national energy strategy, water resource allocation, and industrial fluid transportation, features large-scale construction, high technical complexity, and variable construction environments. It directly affects national energy security, ecological security, and public property safety. With the continuous advancement of major projects such as the "West-East Gas Pipeline" and the "South-to-North Water Diversion", the trend of long-distance pressure pipelines developing towards high parameters, large diameters, complex terrains, and harsh environments is increasingly evident. However, during the construction process, there are severe challenges such as complex geological conditions, difficulty in ensuring welding quality, stress control difficulties, high risks of third-party damage, and long safety management chains. If construction quality control is not strict or safety control fails, it can easily lead to catastrophic accidents such as leakage, explosion, and collapse, causing incalculable losses. This paper aims to systematically review the latest research progress in key construction technologies and safety control systems for long-distance pressure pipeline engineering.

**Keywords:** Long-distance pressure pipeline; Construction technology; Safety control; Welding quality; Stress analysis; Intelligent monitoring; Risk management; BIM technology

## 0 引言

长距离压力管道工程是连接资源产地与消费终端的关键纽带, 广泛应用于石油天然气输送、城市供水排水、化工物料传输及热电联供等领域。这类工程通常具有线路长(往往跨越数百甚至数千公里)、管径大(可达数米)、设计压力高(可达 10MPa 以上)、输送介质易燃易爆或有毒有害等特点。其建设不仅是一项复杂的土木工程任务, 更是一项涉及流体力学、材料科学、结构力学、自动化控制等多学科交叉的系统工程。

近年来, 随着国家对基础设施建设的持续投入, 长距离压力管道网络不断加密扩容, 施工环境也愈发复杂。许多管道需穿越高山峡谷、江河湖泊、沙漠戈壁、永冻土层

及人口密集区, 地质构造活跃, 气候条件恶劣, 给施工组织与技术实施带来了巨大挑战。与此同时, 社会对工程建设的安全性、环保性及质量要求不断提高, 任何微小的质量缺陷或安全事故都可能被放大, 引发严重的社会反响和经济损失。

尽管我国在长距离压力管道建设领域已取得举世瞩目的成就, 但在实际施工过程中, 仍存在一些不容忽视的问题。例如, 部分工程因地质勘察不详导致管道沉降不均; 焊接工艺执行不严造成焊缝缺陷; 防腐层施工质量不高引发早期腐蚀; 施工现场安全管理流于形式, 违章作业频发等。这些问题严重制约了工程的整体效益和安全运行<sup>[1]</sup>。因此, 深入研究长距离压力管道工程施工关键技术, 构建

科学严密的安全管控体系,对于提升我国管道工程建设水平、保障国家能源资源安全具有重要的理论意义和现实价值。本文将结合国内外最新研究成果与工程实践案例,对长距离压力管道工程施工技术及安全管控进行系统性综述,以期对相关工程技术人员提供有益的参考与指导。

## 1 长距离压力管道工程施工面临的主要挑战与技术难点

准确识别施工过程中的风险点和技术瓶颈,是制定有效应对策略的前提。必须从地质环境、施工工艺、材料特性及外部干扰四个维度审视当前面临的严峻挑战。

### 1.1 复杂地质环境下的地基处理与应力控制难题

长距离管道往往穿越多种地貌单元,地质条件极其复杂。在山区,山体滑坡、泥石流、断层破碎带频发,管道易受不均匀沉降影响;在沼泽湿地,地基承载力低,管道易发生浮管或侧向位移;在冻土地区,季节性冻融循环会导致地基反复胀缩,破坏管道结构。此外,管道在敷设过程中会受到温度变化、内压波动及土壤摩擦力的共同作用,产生复杂的轴向、径向及环向应力。若设计或施工中对这些应力考虑不周,极易导致管道屈曲、焊缝撕裂或防腐层剥落。特别是在大坡度地段,重力分量与内压产生的应力叠加,使得应力集中现象尤为突出,对管材强度和焊接质量提出了极高要求。

### 1.2 高精度焊接质量控制与缺陷检测困难

焊接是长距离压力管道施工中最关键的工序之一,其质量直接决定了管道的整体安全性。由于管线长、野外作业点多面广,焊接环境(如风沙、雨雪、低温、高湿)变化剧烈,严重影响焊接稳定性。常见的焊接质量问题包括未熔合、气孔、夹渣、裂纹及咬边等。特别是厚壁钢管的焊接,热输入控制不当易产生冷裂纹或热影响区脆化。此外,现场检测手段有限,传统的人工射线探伤效率低、成本高且存在辐射风险,超声波检测对操作人员技能要求高,难以实现全覆盖、无死角的实时监测。如何确保每一道焊缝的质量均达到高标准,是施工管理的核心难点<sup>[1]</sup>。

### 1.3 防腐层施工质量与长期耐久性保障

防腐层是保护管道免受土壤电化学腐蚀的第一道防线。在长距离施工中,防腐层的涂敷、补口及阴极保护系统的安装质量至关重要。常见问题包括防腐层厚度不均、针孔缺陷、补口处粘结力不足、阴极保护电流分布不均等。在复杂地形下,回填土中可能含有尖锐石块,容易划伤防腐层;在潮湿或盐碱地,腐蚀速率加快,若防腐层存在微小缺陷,将迅速扩展为大面积腐蚀穿孔。此外,防腐材料

的性能受环境影响大,施工过程中的温湿度控制不当会导致涂层固化不良,严重影响其长期耐久性。

### 1.4 多专业交叉作业与外部干扰风险

长距离管道施工涉及土建、测量、焊接、防腐、电气、通信等多个专业,作业队伍众多,交叉作业频繁,协调难度大。同时,管道沿线往往经过农田、居民区、交通干线及其他地下管线密集区,第三方破坏风险极高。机械开挖误挖、人为盗窃、地质灾害等外部因素随时可能威胁施工安全。此外,大型吊装设备、运输车辆的进场受限,物流组织困难,进一步增加了施工组织的复杂性和安全风险。

## 2 长距离压力管道工程施工关键技术创新与应用

针对上述挑战,需引入先进的施工技术与工艺,实现从传统粗放型施工向精细化、智能化施工的转型。

### 2.1 基于 BIM 与 GIS 技术的数字化施工管理

利用 BIM(建筑信息模型)与 GIS(地理信息系统)技术深度融合,构建长距离管道工程的数字孪生体。在设计阶段,通过三维建模进行管线综合排布与碰撞检查,优化路由选择。在施工阶段,利用 BIM+GIS 平台进行可视化交底,精准定位管沟走向、阀门位置及站场设施。通过无人机倾斜摄影获取高精度地形数据,实时监测土方工程量与施工进度<sup>[2]</sup>。利用物联网传感器采集现场环境数据(如风速、温度、湿度),结合 BIM 模型进行施工模拟与动态调整。数字化管理平台可实现人员、机械、材料的全方位调度,提高施工效率,减少返工浪费,为工程质量与安全提供数据支撑。

### 2.2 自动化焊接技术与智能检测应用

全面推广全自动管道焊接机器人技术,特别是在平原及丘陵地区的大口径管道施工中。自动焊机能够精确控制焊接电流、电压、送丝速度及行走速度,消除人为操作误差,显著提高焊缝成型质量与一致性。针对复杂地形,开发便携式自动焊设备,适应狭窄空间作业。在质量检测方面,引入相控阵超声检测(PAUT)与 TOFD(衍射时差法)技术,实现对焊缝内部缺陷的高灵敏度、高分辨率检测。X射线成像仪与智能判读软件的结合,可实现缺陷的自动识别与评级,大幅提高检测效率与准确性。此外,建立焊接质量追溯系统,将每道焊缝的工艺参数、操作人员、检测结果等信息绑定,实现全过程可追溯<sup>[3]</sup>。

### 2.3 复杂地形适应性施工工艺与应力优化

针对不同地质条件,研发专用施工装备与工艺。在山

区,采用定向钻、顶管等非开挖技术穿越障碍,减少对地表植被的破坏;在沼泽湿地,采用路基置换、土工格栅加固等措施提高地基承载力;在冻土地区,采用通风管散热、热棒等技术防止冻土融化。针对应力控制问题,优化弯管加工与组对工艺,合理设置补偿器与固定墩,释放管道热应力与内压应力。利用有限元分析软件进行施工过程仿真,预测管道在吊装、回填、试压等阶段的应力状态,提前制定防控措施。同时,推广柔性接头与减震支座的应用,提高管道对不均匀沉降的适应能力。

### 3 长距离压力管道工程安全管控体系构建与实践

安全是工程建设的生命线。必须构建全方位、多层次、立体化的安全管控体系,确保施工全过程本质安全。

#### 3.1 全员安全生产责任制与标准化作业流程

建立健全全员安全生产责任制,明确建设单位、施工单位、监理单位及各岗位人员的安全职责,形成“横向到边、纵向到底”的责任网络。推行安全生产标准化建设,制定详细的安全操作规程(SOP),涵盖动火作业、高处作业、受限空间作业、吊装作业等高风险环节。实施班前会与安全技术交底制度,确保每位作业人员熟知风险点与防范措施<sup>[4]</sup>。建立安全绩效考核机制,将安全指标与薪酬挂钩,实行“一票否决”制,倒逼安全责任落实。

#### 3.2 风险分级管控与隐患排查治理双重预防机制

开展危险源辨识与风险评估,建立风险清单,按照红、橙、黄、蓝四级进行分级管控。针对重大风险源(如深基坑、高压试压、爆破作业),制定专项施工方案与应急预案,并组织专家论证。实施隐患排查治理闭环管理,利用移动巡检APP实现隐患随手拍、即时上传、整改反馈、复查销号的全过程记录。定期开展应急演练,检验预案的可行性与有效性,提高突发事件处置能力。引入AI视频监控系统,对施工现场进行全天候智能监控,自动识别违章行为(如未戴安全帽、违规闯入等)并实时报警。

#### 3.3 智能监测预警系统与应急响应体系建设

构建管道施工安全智能监测预警系统,集成GPS定位、视频监控、环境监测、应力监测等多种传感器,实时采集施工现场数据。利用大数据分析人工智能算法,对数据进行深度挖掘,预测潜在风险(如边坡失稳、管道沉降超标、气体泄漏等),提前发出预警信息。建立多级应急响应中心,配备专业的应急救援队伍与装备,确保一旦发生事故能够迅速响应、高效处置。加强与地方政府、消防、医疗等部门的联动,形成区域协同救援机制。同时,

建立事故案例库,定期开展警示教育,吸取教训,举一反三<sup>[5]</sup>。

### 4 结语

长距离压力管道工程施工是一项技术密集、风险可控、责任重大的系统工程。本文系统梳理了当前施工面临的主要挑战,深入探讨了BIM数字化管理、自动化焊接、复杂地形适应性工艺等关键技术的应用路径,并详细分析了安全管控体系的构建与实践。实践证明,只有坚持“安全第一、预防为主、综合治理”的方针,依托科技创新,强化过程管控,才能有效解决长距离压力管道工程中的质量与安全难题,保障工程顺利实施与长期安全运行。

未来,随着5G/6G通信、边缘计算、量子传感及生成式AI技术的深度融合,长距离压力管道工程将向更加智能化、无人化、绿色化的方向发展。施工设备将更加自主化,监测预警将更加精准化,安全管控将更加精细化。我们应持续推动产学研用协同创新,完善相关标准规范,培养高素质复合型人才,打破行业壁垒,打造“安全、高效、绿色、智慧”的现代化管道工程新标杆,为国家能源安全与经济社会发展贡献坚实力量。同时,应加强国际合作,引进消化吸收国际先进经验,提升我国管道工程建设的整体技术水平,为全球基础设施建设贡献中国智慧与中国方案。

在当前全球能源转型与生态文明建设的双重背景下,长距离压力管道工程的建设正迎来前所未有的机遇与挑战。一方面,国家对清洁能源输送的需求日益增长,推动了超大口径、超高压管道技术的发展;另一方面,环境保护法规的日益严格,要求工程建设必须更加注重生态友好与绿色低碳。这就要求我们在施工过程中,不仅要关注技术层面的突破,更要注重生态环境的保护与修复。例如,在非开挖技术的应用上,不仅要追求施工效率,还要尽量减少对地表植被和土壤结构的破坏;在防腐材料的选择上,要优先考虑环保型、可降解的新型材料。

此外,随着数字化转型的深入,长距离压力管道工程的管理模式也在发生深刻变革。传统的“人海战术”正在逐步被“人机协同”所取代,人工智能、大数据、云计算等技术在工程全生命周期的应用将更加广泛。例如,利用数字孪生技术,可以在虚拟空间中模拟管道的运行状态,提前发现潜在隐患并进行优化调整;利用区块链技术,可以确保施工数据的真实性和不可篡改性,为工程质量追溯提供可靠依据。这些新技术的应用,将极大地提升工程管理的效率和水平,为长距离压力管道工程的高质量发展注入新的动力。

**参考文献:**

- [1] 罗衡. 向家坝灌区一期一步工程建设管理实践与思考[J]. 四川水利, 2025, 46(S1):14-16.
- [2] 程梦然, 韩欢乐, 秦净净等. 引水工程中的管道设计分析及管理探讨[J]. 中国水运, 2025(08):104-106.DOI:10.13646/j.cnki.42-1395/u.2025.08.038.
- [3] 徐奇奇. 双管污水输送系统海域段设计探讨[J]. 给水排水, 2024, 60(S1):341-344.DOI:10.13789/j.cnki.wwe1964.2024.04.02.0007.
- [4] 王启. 基于结构受力状态理论的球墨铸铁法兰节点管段力学性能研究[D]. 沈阳建筑大学, 2024.DOI:10.27809/d.cnki.gsjgc.2024.000006.
- [5] 任杰, 赵磊. 输水压力管道水压试验在较长距离下的应用[J]. 水利技术监督, 2023(12):248-250+290.