

# 复杂地质条件下天然气管道施工关键技术研究

李超 潘峰（山东港华燃气集团有限公司，山东 济南 250000）

**摘要：**在当今能源格局中，天然气作为清洁高效的能源，其管道输送系统的建设至关重要。然而，复杂地质条件给天然气管道施工带来了诸多难题与挑战。本研究聚焦于此，深入探讨了复杂地质条件下天然气管道施工的关键技术。从地质勘察的精准把控，到线路优化的科学决策；从管道穿越各类复杂地形的有效手段，如山区岩石、河流、沼泽地段的针对性技术，再到管道防腐与防护技术的综合运用，以及施工安全管理的严格落实，均进行了详细阐述。通过实际工程案例分析，验证了这些关键技术的可行性和有效性，为类似工程提供了可靠的技术参考与实践经验，有助于推动天然气管道建设在复杂地质环境中的高质量发展，保障能源输送的安全与稳定。

**关键词：**复杂地质；天然气管道；施工技术；线路优化；安全管理

## 1 绪论

随着全球能源结构调整，天然气需求持续攀升，管道输送成为其主要运输方式。然而，复杂地质条件如山区的坚硬岩石与陡峭地形、河流区域的湍急水流与不稳定河床、沼泽地带的松软地基等，给天然气管道施工带来巨大困难。这些不仅增加施工成本与难度，还威胁施工安全和管道长期稳定运行。因此，研究复杂地质条件下的施工关键技术，对保障天然气管道建设质量、促进能源行业可持续发展意义深远。

## 2 复杂地质条件概述

### 2.1 山区地质

山区地形起伏剧烈，岩石种类繁多且硬度差异大，如花岗岩坚硬难开挖，页岩稳定性差易引发地质灾害。地质构造复杂，断层、褶皱发育，导致管道受力不均，增加破裂变形风险。

### 2.2 河流地质

河流区域地质多变，中下游河床淤积物松软，山区河流水流湍急、河道狭窄且两岸陡峭。季节性水位变化大，雨季河水上涨威胁施工安全与进度，同时河岸稳定性及河床冲刷情况也增加管道穿越难度与风险。

### 2.3 沼泽地质

沼泽地土壤含水量高、承载力低，多为淤泥质土或泥炭土，管道敷设易下沉位移。其脆弱生态环境要求施工采取特殊环保措施，避免破坏湿地生态系统。

### 2.4 地震断裂带地质

处于地震断裂带区域地壳活动频繁，地震可致地面变形、裂缝，管道穿越需采用柔性连接、增加壁厚、设置抗震支墩等抗震设计，以增强抗震能力。

### 2.5 岩溶地质

岩溶地区溶洞、溶蚀裂隙众多，管道施工可能遭遇溶洞塌陷、地基不均匀沉降等问题，影响管道稳定性与密封性。丰富且复杂流动的地下水还会产生浮力与腐蚀作用。

## 3 天然气管道线路优化技术

### 3.1 线路选择原则

①地质条件优先。尽量避开活动断层、滑坡体、泥石流沟、岩溶强发育区等复杂地质灾害频发区域。无法避开时，选择相对稳定、地质条件较好路径，并采取相应工程措施，如山区优先选择山脊山梁敷设管道，减少地质灾害影响。②地形地貌适宜。结合地形地貌特征，选择地势相对平坦、起伏小地段，减少管道爬坡下坡，降低施工难度与运营风险。同时考虑地形对施工设备和运输车辆通行条件的影响，如丘陵地区沿等高线敷设管道，避免大角度竖向转折。③生态环境保护。线路规划避开自然保护区、水源保护区、风景名胜区等生态敏感区域，减少生态破坏。穿越生态敏感区时，采用定向钻穿越等非开挖施工技术，施工后及时恢复生态，种植适宜植被保护生物多样性。④工程安全性与经济性。在确保管道安全运行前提下，综合考虑工程建设成本、运营维护成本和长期经济效益。优化线路长度，避免迂回绕行；合理选择管材、管径和壁厚，降低工程造价；考虑管道沿线人口分布、交通条件等因素，便于施工和运营维护管理，提高工程综合效益。

### 3.2 基于地理信息系统（GIS）的线路优化方法

①数据采集与整理。收集施工区域地形、地质、土地利用、生态环境、人口分布、交通等数据，将地

形图、地质图等数字化处理并导入 GIS 软件，录入岩石类型、地层厚度、土壤性质等属性信息，建立空间数据库。②多因素叠加分析。在 GIS 平台将地质条件、地形地貌、生态环境、工程安全性与经济性等因素图层叠加，设定权重和评价标准，利用空间分析工具生成综合评价结果，确定管道线路适宜区域和优选路径。如叠加地质灾害危险性、地形坡度、生态敏感区图层进行打分评级。③可视化与决策支持。利用 GIS 可视化功能，以地图、图表形式展示线路优化结果，为决策者提供清晰信息。决策者可在 GIS 系统中交互操作对比不同线路方案，结合三维建模技术展示沿线地形地貌和地质构造，帮助工程人员优化施工方案。

## 4 管道穿越关键技术

### 4.1 山区岩石地段穿越技术

#### 4.1.1 定向钻穿越技术

**施工工艺：**先进行地质勘察，依据岩石性质、硬度和地质构造选择合适定向钻设备。钻进时控制钻头方向角度形成导向孔，扩孔至所需管径后回拖预制管道就位。

**设备选型：**针对山区岩石硬度高特点，选用大功率高扭矩定向钻钻机，配备牙轮钻头、PDC 钻头等适合岩石钻进的钻头钻具，以及性能优良的泥浆循环系统，满足排渣和冷却需求。

**技术要点及难点解决措施：**岩石硬度大易造成钻头磨损卡钻，需合理控制钻进参数，根据岩石变化调整钻头类型和工艺。采用先进随钻测量技术（MWD）实时监测钻头位置方向，确保钻孔精度。针对卡钻事故制定应急预案，配备专业解卡工具和人员，采取震击解卡、倒扣解卡等措施。

#### 4.1.2 隧道穿越技术

**施工工艺：**包括洞口开挖、洞身掘进、支护与衬砌等过程。洞口开挖前进行边坡防护确保稳定；洞身掘进可采用钻爆法、TBM 法（隧道掘进机法）等，根据岩石条件和隧道长度选择；掘进中及时进行初期支护，如喷射混凝土、安装锚杆和钢支撑等，防止围岩坍塌；隧道贯通后进行二次衬砌，采用钢筋混凝土结构保证长期稳定性和密封性。

**技术要点及难点解决措施：**山区隧道地质复杂多变，遇断层破碎带、软弱围岩等不良地质情况易引发坍塌、涌水等事故。施工前详细地质勘察，预测不良地质段位置性质，制定施工方案和应急预案。穿越断层破碎带时采用超前预注浆加固围岩，加强支护参数，及时封闭围岩；涌水问题采取排水堵水结合措施，如

设置排水盲沟、帷幕注浆堵水等。

### 4.2 河流穿越技术

#### 4.2.1 大开挖穿越技术

**施工流程：**河道截流或导流后，在河床内开挖管沟，下放管道，连接防腐补口后回填管沟，恢复河道。

**防水措施：**地下水丰富时设置井点降水系统，将水位降至管沟底面以下。管道安装后分层回填，选用透水性好的砂石料，在管道两侧和顶部设置压实土层，防止河水冲刷和管道上浮。

**管道安装与固定：**用吊管机缓慢下放管道，确保平稳落入管沟底部。就位后用混凝土镇墩、沙袋等固定，大口径管道在两岸设置锚固墩，增强稳定性。

#### 4.2.2 盾构穿越技术

**施工工艺：**在河流一侧岸边设置盾构始发井，组装盾构机。盾构机切削土体推进，盾尾内拼装预制管片形成隧道衬砌结构。推进中控制盾构机姿态和掘进参数，保证隧道轴线精度和开挖面稳定。穿越河流底部时加强密封性能和监测系统管理。

**技术要点及难点解决措施：**盾构穿越关键在于选型和掘进参数控制。根据河流地质条件和隧道直径选择合适盾构机类型，如土压平衡盾构机或泥水平衡盾构机。密切关注刀盘扭矩、推力、出土量等参数及地表沉降和河底变形情况，及时调整掘进参数和注浆工艺。针对刀盘磨损、密封失效、河底冒浆等问题提前制定应对措施，配备维修设备和材料。

### 4.3 沼泽地段穿越技术

#### 4.3.1 地基处理方法

**置换法：**适用于浅层软弱地基，挖除沼泽地淤泥质土，换填强度较高的砂石料、灰土或素土等。换填时分层夯实，控制砂石料含泥量，每层铺设厚度不超过 30cm，用压路机或夯实机压实至设计要求。

**排水固结法：**在地基中设置砂井、塑料排水板等排水通道，加速水分排出，使地基土在自重和附加荷载作用下固结，提高强度稳定性。先铺设排水通道，再施加预压荷载，如堆载预压或真空预压，预压时间根据地基土性质和固结要求确定为 3–6 个月。

#### 4.3.2 管道敷设技术

**漂浮法：**沼泽地水深浅、地基承载力极低时，在管道捆绑浮筒使其漂浮，用拖船牵引至预定位置后注水或灌注混凝土下沉。下沉过程中控制速度和姿态，避免弯曲碰撞。

**筑堤法：**沼泽地范围小、水流缓时，在管道敷设线路两侧修筑堤坝排水，在干燥地基上开挖管沟敷设

管道。堤坝高度宽度依水位和水流情况确定，用透水性好、稳定性强的土料填筑并压实，确保防洪能力和稳定性。

## 5 管道防腐与防护技术

### 5.1 外防腐涂层技术

①防腐涂层材料选择。复杂地质条件下，外防腐涂层需具备耐腐蚀性、耐磨性、耐候性和附着力等性能。常用材料有环氧粉末、三层聚乙烯（3PE）、聚氨酯等。环氧粉末附着力和耐化学腐蚀性好；3PE涂层综合性能优良，防腐效果佳；聚氨酯柔韧性和耐磨性优，在易磨损环境有优势。实际工程中根据地质条件、管道运行参数和经济性合理选择。②施工工艺。包括表面预处理、涂层涂覆和质量检测。表面预处理用喷砂除锈法清除杂质，达 Sa2.5 级以上除锈标准。涂层涂覆采用静电喷涂、流化床涂覆等方法确保均匀致密，控制厚度、固化时间等参数。固化后用电火花检漏仪检测完整性，有缺陷及时修补。

### 5.2 阴极保护技术

①牺牲阳极法。将电位更负的金属（如镁合金、锌合金等）作为牺牲阳极与管道连接，其溶解产生电流使管道阴极极化，达到防腐目的。阳极布置根据管道长度、管径、地质条件等设计，保证电气连接良好，注意埋设深度和周围土壤导电性，避免与其他金属结构物接触。②外加电流法。通过外加直流电源，管道为阴极，辅助阳极形成外加电流回路，使管道表面阴极极化抑制腐蚀。外加电流系统由直流电源、辅助阳极、参比电极和电缆等组成。根据地质条件和环境选择合适辅助阳极材料形状，合理布置位置数量，确保电流分布均匀。参比电极监测管道电位，为电源输出控制提供反馈，使管道电位保持在 -0.85V 至 -1.2V（相对于硫酸铜参比电极）之间。外加电流法保护范围大、输出电流可调节，但需外部电源且设备维护复杂。

## 6 复杂地质条件下天然气管道施工安全管理

### 6.1 安全风险识别与评估

①风险因素识别。复杂地质条件下施工存在多种安全风险，包括山区滑坡、塌方、泥石流、地震断裂带地震活动等地质灾害风险，河流穿越溺水、洪水淹没风险，沼泽地段地基塌陷、人员陷入泥潭风险，以及机械伤害、高处坠落、触电、火灾爆炸等常规安全风险，恶劣天气也增加施工安全风险。②风险评估方法。采用定性与定量相结合的方法，如故障树分析（FTA）、层次分析法（AHP）、模糊综合评价法等。故障树分析构建故障树分解安全事故，分析基本事件

逻辑关系和发生概率，量化评估安全风险；层次分析法确定风险因素权重；模糊综合评价法综合考虑多种因素模糊性不确定性，全面客观评价风险等级，为制定风险控制措施提供依据。

### 6.2 安全管理制度与措施

①安全教育培训制度。建立健全安全教育培训体系，对施工人员进行岗前安全培训，包括安全法规、操作规程、安全意识、应急处置等知识，考核合格上岗。定期组织再培训和技能提升培训，针对复杂地质施工开展专项培训，提高人员安全意识和应对突发事件能力。②安全技术交底制度。分项工程施工前，技术负责人向施工班组详细交底，明确安全风险、防范措施、操作规程和应急救援方法等，形成书面记录并签字确认，确保安全技术措施落实到每个环节和人员。如山区隧道穿越前向各班组交底特殊地质情况应对措施和应急逃生方法。③施工现场安全检查制度。成立安全检查小组定期检查施工现场，包括安全设施配备使用、人员操作行为、机械设备运行、地质条件变化等。对发现的安全隐患下达整改通知书，明确责任人、期限和要求，跟踪整改直至消除。鼓励施工人员参与检查，形成全员安全管理氛围。④应急预案制定与演练制度。针对各类安全事故制定完善应急预案，包括综合应急预案、专项应急预案和现场处置方案，明确应急组织机构、职责分工、响应程序、救援措施和资源保障等。定期组织施工人员演练，检验完善预案可行性有效性，提高应急反应和协同配合能力。如每年组织地震、火灾爆炸应急演练，模拟事故场景让人员熟悉应急处置流程和职责。

## 7 结论与展望

本研究针对复杂地质条件下天然气管道施工关键技术深入探讨，取得一系列成果。构建了涵盖地质勘察、线路优化、管道穿越、防腐防护与施工安全管理的技术体系，为施工提供系统指导。地质勘察技术综合运用多种手段获取准确信息，为方案制定提供依据。GIS 优化线路减少施工难度和成本。多种穿越技术解决不同地质地段难题，提高穿越成功率和效率。防腐防护技术延长管道使用寿命。完善的安全管理体系保障施工安全顺利进行。

### 参考文献：

- [1] 吴剑, 刘建国, 王长江. 复杂地质条件下油气管道设计及施工关键技术[J]. 天然气工业, 2019, 39(5):110-116.
- [2] 张乃樑, 赵丑民. 复杂地质条件下天然气管道穿越河流的设计与施工[J]. 煤气与热力, 2018, 38(10):37-41.