

# 燃气管道穿越复杂地质条件的施工技术与风险控制

郝 申 ( 济南能源工程集团有限公司, 山东 济南 250000 )

**摘要:** 针对燃气管道穿越岩溶、山体隧道、软土等复杂地质时面临的坍塌、渗漏、应力失衡等技术难题, 结合广西支干线、海勃湾区等工程实例, 提出“地质分类-技术适配-智能防控”一体化解决方案。创新采用定向钻-盾构复合工法、岩溶区分级处理技术, 构建基于物联网与AI算法的全流程风险控制体系。通过工程验证, 该方案可使施工隐患发生率降低, 应急处置响应时间缩短, 为同类工程提供技术参考。

**关键词:** 燃气管道; 复杂地质; 施工技术创新; 风险控制; 智能监测

**中图分类号:** TU996.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 010-0124-03

## Construction Technology and Risk Control for Gas Pipeline Crossing Complex Geological Conditions

Hao Shen (Jinan Energy Engineering Group Co., Ltd., Jinan Shandong 250000, China)

**Abstract:** To address technical challenges such as collapse, leakage, and stress imbalance encountered when gas pipelines traverse complex geological formations like karst, mountain tunnels, and soft soil, this study proposes an integrated solution of “geological classification—technical adaptation—intelligent prevention and control” based on engineering cases from Guangxi branch pipelines and Haibowan District. Innovative approaches include the adoption of directional drilling-shield composite methods and karst zone hierarchical treatment technology, establishing a comprehensive risk control system utilizing IoT and AI algorithms. Engineering validation demonstrates that this solution reduces construction hazard incidence and shortens emergency response time, providing technical reference for similar projects.

**Keywords:** Gas pipelines; Complex geology; Construction technology innovation; Risk control; Intelligent monitoring

我国喀斯特地貌分布面积达 91-130 万 km<sup>2</sup>, 山体隧道、软土区等复杂地质区域的燃气管道穿越工程日益增多。此类工程面临地质稳定性差、施工可视化不足、风险预警滞后等问题, 传统施工技术易引发坍塌、管道断裂等安全事故。如广西支干线工程在岩溶强发育区施工中, 曾遭遇多层溶洞导致的地基失稳风险, 亟需针对性技术创新与风险管控体系。

### 1 复杂地质条件分类及工程特性

#### 1.1 地质类型划分 (如表 1)

#### 1.2 核心工程挑战

**岩溶区:** 受喀斯特地貌影响, 溶洞发育呈现空间分布离散、填充物性质多变的特征。以广西支干线工程为例, 地质勘察数据显示, 相邻钻孔间溶洞填充率差异最高达 75%, 部分区域甚至出现空洞与半填充交替现象。常规地质勘察手段难以精准捕捉微小溶洞及裂隙发育情况, 导致施工过程中常出现塌孔、涌泥等

突发状况, 原有的支护与穿越预案频繁失效, 严重威胁施工安全与进度。

**山体隧道:** 在直墙圆拱形断面中进行燃气管道敷设时, 管道与隧道壁接触部位易形成应力集中区域, 尤其是在拱脚和直墙连接处。地震作用下, 管道与隧道结构的动力响应差异显著, 需通过有限元模拟分析, 对管道的抗震性能与结构刚度进行全面校核。同时, 应考虑温度变化、山体沉降等长期因素, 优化管道的柔性连接设计与支吊架布置, 避免因应力集中引发管道破裂或泄漏事故。

**软土区:** 软土地基具有高压缩性、低强度和流变性强等特点, 传统大开挖施工方式极易破坏土体原有的应力平衡, 导致周边土体产生侧向滑移。根据《城镇燃气设计规范》要求, 燃气管道在软土区的埋深需  $\geq 1.2\text{m}$ , 且需采取换填砂石、水泥搅拌桩加固等复合地基处理措施。施工过程中应加强对土体位移、孔隙

表 1: 地质类型划分

地质类型	典型特征	施工风险点
岩溶强发育区	多层溶洞、地下暗河连通, 填充物复杂	坍塌、渗漏、地基不均匀沉降
山体隧道区	应力敏感、岩体破碎, 抗震要求高	管道应力集中、结构失稳
软土 / 老旧管网区	土体承载力低、腐蚀介质多	管道沉降、腐蚀泄漏

水压力的实时监测，结合信息化施工技术动态调整开挖方案，确保管道敷设安全。

## 2 复杂地质穿越施工技术创新

### 2.1 岩溶区分级处理技术

针对全充填、半充填、无充填三类溶洞，采用“绕避-抛填-注浆”三级处置方案：

**绕避优先：**针对物探识别出的低阻带、溶洞群等地质风险区域，运用地理信息系统（GIS）与地质建模技术，结合工程成本、施工周期等因素，制定多方案比选策略。以广西支干线工程为例，通过线路偏移800m的优化设计，成功避开500m长岩溶发育带，有效规避了溶洞塌陷、管道沉降等风险，较原方案减少地质处理成本约30%。

**抛填加固：**在平原区浅层溶洞处理中，采用“片石+黏土”交替分层抛填工艺，单次抛填厚度控制在0.3-0.5m，利用重型机械反复冲压密实。施工过程中，通过预留直径30-50cm的透水管或天然裂隙通道，建立地下水疏导系统，既保障土体稳定性，又避免因地下水阻断引发的地表沉降、植被退化等生态问题。经检测，处理后地基承载力提升至200kPa以上。

**注浆防渗：**针对河流穿越段“串珠状”溶洞群，采用“袋装水泥+黏土”混合材料进行冲击造壁，通过机械振动使袋体与洞壁紧密贴合形成初始屏障。注浆环节采用双液注浆技术（水泥-水玻璃浆液），压力控制在1.2-1.5MPa，通过分序注浆方式（先外围后核心）确保浆液均匀扩散。施工中实时监测地表隆起量，将变形量控制在5mm以内，最终形成厚度不小于1.5m的连续防渗帷幕。

### 2.2 复合穿越施工工法

创新融合定向钻与盾构技术，开发“定向钻-反井钻-扩孔掘进”一体化工法（参考“逐梦号”技术原理）：

**山体隧道区：**采用直墙圆拱形断面设计，通过有限元分析软件对隧道结构进行强度与应力校核，确保其在复杂地质应力下的稳定性。在管道敷设前，依据《城镇燃气设计规范》要求，对管道受力进行模拟计算，关键段采用PE防腐管道替代传统钢管。该PE防腐管道采用三层结构聚乙烯防腐层（3PE），外层高密度聚乙烯具有良好的机械保护性能，中间层胶粘剂确保内外层结合紧密，内层环氧粉末提供优异的防腐性能，显著提升管道在潮湿、酸碱环境下的抗腐蚀能力。同时，在隧道进出口及地质变化剧烈处设置伸缩节，以缓解温度变化和山体位移对管道的影响。

**软土区：**应用水平定向钻施工技术，配备高精度激光导向系统，实时监测钻头位置和角度，将钻孔偏

差严格控制在 $\pm 3\text{cm}$ 内。施工前利用地质雷达对地下管网进行详细探测，绘制三维地下管网分布图，结合BIM技术进行施工路径模拟，优化钻进轨迹，有效避免管线碰撞老旧管网。施工过程中，根据软土含水量和压缩性动态调整泥浆配比，采用高分子聚合物泥浆增强护壁稳定性，防止塌孔事故发生。施工完成后，对穿越段管道进行压力测试和防腐层完整性检测，确保燃气管道安全运行。

### 2.3 施工过程智能化管控

依托物联网感知设备构建施工监测网络：

**地下监测系统：**采用具备智能巡航功能的PPB级激光巡检车构建三维立体监测网络，通过可调谐半导体激光吸收光谱（TDLAS）技术，实现对管道微泄漏的毫米级定位与实时扫描监测。该系统搭载的高灵敏度传感器可将监测精度提升至0.1ppm，配合动态基线补偿算法，能够穿透3m厚的土壤层，精准捕捉因应力腐蚀、接口松动等引发的泄漏隐患。同时，系统支持多源数据融合分析，自动生成包含泄漏位置、浓度趋势的可视化热力图，为应急处置提供科学依据。

**地面监测体系：**基于物联网架构搭建的管网哨兵系统，集成压力变送器、振动传感器等20余种感知设备，对管道运行状态进行全域监测。创新应用的人工智能算法通过分析历史压力波动数据，构建出包含周边第三方施工信息、地质活动规律的动态关联模型。当监测到异常压力曲线时，系统可在30s内完成风险溯源，自动生成包含风险等级、影响范围、处置建议的预警报告。

**关键工序管控：**依托5G+物联网技术，在焊接、防腐层施工等12个关键工序节点部署智能打卡装置。该装置集成视频AI识别、电子围栏等功能，可实时捕捉未佩戴防护装备、焊接参数异常等23类违规操作行为。一旦触发预警，系统立即通过声光报警、短信推送等多渠道通知项目负责人，并自动生成包含违规时间、操作记录的整改工单。

## 3 全流程风险控制体系构建

### 3.1 风险识别与评估

采用AHP-模糊综合评价法，建立包含地质条件、施工工艺、环境因素的三级风险指标体系（如表2）。

### 3.2 分级防控策略

**高风险区（岩溶群、地下暗河区）：**采用“超前补勘+动态调整”模式，沿管道轴线方向每10m布设勘探点，运用地质雷达、超前钻探等手段开展三维地质建模。建立施工参数智能调控平台，基于实时勘探数据，动态优化盾构机推进速度、泥浆压力等12项核心参数，确保施工安全可控。

表 2: 各级指标对应权重

一级指标	二级指标	权重
地质风险	溶洞发育程度、地下水压力	0.42
施工风险	钻孔偏差、注浆质量	0.35
环境风险	周边构筑物、生态敏感区	0.23

中风险区（山体隧道、软土区）：部署分布式光纤传感监测系统，沿管道全生命周期铺设传感光缆，以 0.1m 空间分辨率实时采集管道轴向应力、环向应变数据。设置三级预警机制，当监测数据达到设计强度的 80% 时触发黄色预警，联动现场监控系统启动应急响应预案，同步生成风险评估报告。

低风险区（平原段、非敏感区）：构建“智能巡检无人机 + 人工复核”双轨制监测体系。无人机搭载高光谱成像仪与激光雷达，按 24h/ 次周期执行巡查任务，自动识别地表沉降、管道外防腐层破损等隐患；人工巡检组同步开展深度排查，重点核查隐蔽接口、穿越段等关键部位，形成数据交叉验证机制。

### 3.3 应急处置机制

构建“监测 - 预警 - 处置”闭环体系：

智能预警体系：依托物联网传感器与大数据分析构建智慧监测平台，通过压力、温度、振动等多维度数据实时采集，结合 AI 算法精准识别异常波动。当监测数据触发预设阈值时，系统将自动生成告警工单，以短信、APP 推送等多渠道同步推送至巡线人员手持终端，确保告警响应时间严格控制在  $\leq 3\text{min}$ ，实现隐患的早期捕捉与快速预警。

分级动态处置机制：建立科学的隐患分级管理体系，将隐患划分为一般隐患、重大隐患及特别重大隐患三级。针对一般隐患，要求责任单位在 2h 内完成现场排查与整改，并通过平台上传处置照片、视频等佐证材料闭环管理；重大隐患则启动“37min 应急响应”标准化流程。

全生命周期数据管理：竣工后构建管道数字化孪生系统，整合设计图纸、施工记录、检测报告等全流程资料，建立覆盖管道建设期、运营期、退役期的动态数据库。运用 GIS 地理信息系统实现隐患空间定位，通过历史数据挖掘与机器学习算法，对腐蚀速率、沉降趋势等关键指标进行预测分析，为预防性维护与风险决策提供数据支撑。

## 4 工程实例验证

工程概况：本项目燃气管道设计管径为  $\Phi 813\text{mm}$ ，设计压力达 10MPa，核心施工难点在于需穿越岩溶强发育区，该区域总长度达 211km。此区域溶洞、溶沟、溶槽等喀斯特地貌广泛分布，地质结构破碎，

地下水位变化复杂，给管道施工带来极大挑战。

技术应用：面对复杂地质，创新性采用分级抛填与注浆加固技术。针对 32 处多层溶洞，先根据溶洞规模、填充情况进行分级，对小型溶洞直接采用碎石、砂砾石等材料进行抛填；中型溶洞则分阶段抛填，配合土工格栅增强结构稳定性；大型溶洞在抛填后，通过预埋注浆管进行高压注浆加固。同时结合地质雷达、超前钻探等手段实时监测，确保加固效果。

实施效果：通过新技术的应用，施工周期由原计划大幅缩短 18%，有效提升了施工效率。在保障施工质量的前提下，实现造价节约 2300 万元。自项目竣工投入运行以来，已平稳运行 3 年，未发生任何燃气泄漏、管道破损等安全事故，为区域燃气供应提供了坚实保障。

## 5 结论

本文通过整合岩溶区分级处理、复合穿越工法与智能防控技术，构建了复杂地质条件下燃气管道施工的全流程解决方案。核心创新点在于：一是建立地质类型与施工技术的适配模型，实现精准施策；二是融合物联网与 AI 算法，构建“预防 - 预警 - 处置”一体化风险控制体系。工程实践表明，该方案可有效降低坍塌、泄漏等风险，提升工程建设质量与安全水平，为我国燃气管道穿越复杂地质工程提供了技术支撑与实践参考。

### 参考文献：

- [1] 闫旭, 翟永军, 杨兵. 复杂地质条件下 GB1- III 级次高压燃气管道检验与评价实例 [J]. 化工装备技术, 2023, 44(04): 39-41.
- [2] 李永春. 浅谈盾构机在复杂地质条件下穿越高压燃气管道的施工技术 [J]. 水利建设与管理, 2014, 34(02): 25-28.
- [3] 徐威. 输气管道复杂地质高强度岩层定向钻穿越设计 [J]. 煤气与热力, 2025, 45(08): 43-46.
- [4] 郭军龙. 复杂地质下定向钻穿越管道防腐及施工优化应用 [J]. 中国高新科技, 2024, (24): 150-151+154.
- [5] 翟朝旭, 贾文斌. 复杂地质环境下大直径长输供热管道施工技术研究 [J]. 工程技术研究, 2023, 8(11): 63-65.