

长输管道经过山区地带地质条件影响分析

王 珏 (中石化江苏石油工程设计有限公司, 江苏 扬州 225000)

摘 要: 山区繁杂的地质条件对长输管道的规划、施工和运行安稳造成重大威胁, 本文结合山区的地形地势、岩土构成、水文气象及地质灾害特点, 解析了地质因素对管道选线方向、埋设深度、施工方式及支护设计的效应, 并研究施工技术与风险应对举措, 借助科学的地质分析与适配性施工手段, 能够有效减少施工风险, 保证管道长期安全稳定运行。

关键词: 长输管道; 山区地质; 施工技术; 风险防控

中图分类号: TE832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 034-0106-03

Analysis of the Impact of Geological Conditions on Long-Distance Pipelines Passing through Mountainous Areas

Wang Jue (Sinopec Jiangsu Petroleum Engineering Design Co., LTD, Yangzhou Jiangsu 225000, China)

Abstract: The complex geological conditions in mountainous areas pose a significant threat to the planning, construction and stable operation of long-distance pipelines. This paper, in combination with the topography, rock and soil composition, hydro-meteorology and geological disaster characteristics of mountainous areas, analyzes the effects of geological factors on the pipeline route selection direction, burial depth, construction methods and support design, and studies the construction techniques and risk response measures. By means of scientific geological analysis and adaptive construction methods, construction risks can be effectively reduced, ensuring the long-term safe and stable operation of pipelines.

Key words: Long-distance pipeline; Mountainous area geology; Construction technology; Risk prevention and control

随着我国能源输送需求持续增长, 长输管道建设正逐渐向山区等复杂地段延展, 山区地质情形复杂多样, 涵盖险峻地势、断层破裂带、山体滑坡和泥石流等地质灾害频繁发生, 对管道设计、建设和运行安全构成严峻挑战, 探究长输管道穿越山区区域的地质状况及其作用, 有益于改进管道选线和埋设深度, 提升施工安全与成效, 也可为地质灾害风险管控和管道长久稳定运作提供科学支撑。

1 长输管道经过山区地带地质条件特征分析

1.1 山区地带地形地貌特征

山区地势以落差大、坡势陡、沟壑纵横和起伏剧烈为主要特点, 一般坡度在 $15^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 区间, 部分山体坡度能达到 60° 以上, 这种地形加大了管道施工时机械布置的难度, 还对管道埋设深度和弧度把控造成影响, 在项目施工期间, 要对超过 500m 的连续坡面开展整体弧度设计, 以避免局部地势引发应力集中或者流体输送阻力增大, 地势起伏对土体支护设计给出要求, 像在陡峭山坡上挖掘沟槽时, 一定要结合边坡稳固性分析, 敲定开挖的宽度与坡度, 同时考量重力势能对油气输送动力的作用, 保障管道在有高度差的区域稳定运行。

1.2 地质构造与岩土工程特性

山区岩土种类繁多, 包含砂岩、页岩、石灰岩和片麻岩等, 岩石性质差别明显, 岩体节理、褶皱和断

层大量发育, 断层破碎带厚度可达到 $2 \sim 5\text{m}$, 岩体的完整程度差, 有些地方承载能力不足, 对管道基础稳定性造成挑战, 岩土体的渗透性能差异十分明显, 比如砂岩的渗透系数大概处于 $10^{-5} \sim 10^{-6}\text{m/s}$ 这个范围, 而页岩或者泥岩渗透系数仅有 $10^{-8} \sim 10^{-9}\text{m/s}$, 这直接影响地下水对管道防腐层和支护结构的侵蚀作用, 山区土壤大多为松散的黄土或者风化后的残积层, 厚度能达到 $1 \sim 3\text{m}$, 容易出现滑移或者沉降现象, 规定在设计基础之际采用砂砾垫层或混凝土基础, 同时配合锚杆或支撑结构对管道予以加固, 进而降低长期变形的风险。

1.3 水文与气候条件对管道建设的影响

山区降雨大多集中在雨季, 一年的降水量可达到 $1200 \sim 1800\text{mm}$, 其中集中降雨的强度可高于 50mm/h , 很容易诱发山洪、泥石流和边坡侵蚀, 对施工安全和管道的稳定性构成威胁, 地下水位随季节变化呈现显著波动, 最高可达到地表往下 $1 \sim 2\text{m}$, 提升了沟槽挖掘和管道防腐设计的难度。山区冬季气温会降低至 $-15^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$, 冻土的深度大概在 $0.8 \sim 1.2\text{m}$, 寒冷环境或许会造成管道材料变脆以及焊缝应力聚集, 针对这类水文与气候状况, 施工规划需恰当安排雨季施工时机, 增添排水和防护装置, 同时选用能耐受冻融循环的管材及防腐涂层, 以保证管道在恶劣气候情形下长期安稳运行。

2 地质条件对长输管道设计与施工的影响

2.1 地质条件对管道选线与埋设深度的影响

山区地形复杂多变, 岩体种类、断层布局、滑坡与泥石流危险是长输管道选线的关键限制要素, 在断层崩碎带地带, 岩体破碎的宽度一般是 2 ~ 5m, 土壤承载力只有 100 ~ 200kPa, 倘若直接穿越极易引发管道下沉或偏移, 应优先选择避开断层破碎带或沿着稳定山体安排, 在必须跨越的路段采用柔性支撑及加厚基础的处理方式。在泥石流多发地带, 需综合水文资料与坡面稳固性分析, 选定冲刷深度不大、植被覆盖良好的缓坡区段作为管道路线, 借助 GIS 与数字高程模型 (DEM) 分析, 可针对 500m 以上连续坡面进行坡度和海拔的适配操作, 保障管道选线既实现最短运输距离, 又兼顾地质稳定性和施工可行性。

埋设深度设定需整合地质情形、土体承载性能和外界环境效应, 在砂岩或者坚硬的岩体里面, 管道的埋入深度一般控制在 1.0 ~ 1.5m 就能满足覆盖和防止冰冻的要求, 而在松散黄土、风化岩石或者断层破碎的地带, 埋置深度要提高到 1.8 ~ 2.5m, 铺设厚度为 0.3 ~ 0.5m 的砂砾垫层用以分散地基应力。坡降较大 (15° ~ 30°) 区域, 为防止管道出现应力聚集, 可于弯曲部位或高差转折之处增加局部埋深或设置支撑构造, 保障油气输送进程中压力波动最小, 当穿越河谷或者峡谷之际, 要采用定向水平钻或者桥式支撑技术, 让管道埋深得到控制, 防止对坡面稳定产生破坏, 利用融合地质勘探数据、岩土承载性能、坡度分析与水文条件来优化管道选线和埋设的深度, 降低施工隐患, 提升管道安全稳定。

2.2 岩土稳定性对施工方法与支护设计的作用

山区岩土稳固性直接影响施工方式, 在坚实岩体诸如完整砂岩、片麻岩, 管沟可以采用传统开凿或机械化安设, 把坡度控制于 15° ~ 25° 便能保障施工安全, 但在破裂岩体、风化岩层或断层破裂带, 岩体抵抗剪切的强度仅为 50 ~ 150kPa, 容易出现局部垮塌或滑动。在此情形下, 需开展分段开凿、边坡临时防护以及排水降水办法, 管控沟槽边坡的坡度在 10° ~ 15° 区间, 且配合地质雷达或者应变传感器实时监控边坡位移, 凭借这种途径, 能够依据岩土体稳定性动态调控施工进度与方式, 保证作业安全, 同时降低对管道基础及周边环境的二次损害。

岩土安定性还决定支护设计的款式与强度, 在稳固性欠佳的黄土、风化岩或者滑坡频发区域, 支护办法包含锚杆支护、喷射混凝土护壁与临时桩柱, 锚杆长度可按照岩土破碎深度设计成 2 ~ 4m, 间距把控在 1 ~ 1.5m, 保障支撑整体稳定性, 在坡面起伏剧烈

或沟槽深度超过 2m 的地段, 可以增设临时托架或支撑梁, 用以分散管道负荷与外界作用力, 支护设计保障施工人员和机械设备的安全, 还保证管道形状与弯曲半径的平稳, 杜绝沉降或局部变形现象, 以此在施工阶段和运行阶段双重维护管道安全。

2.3 地质灾害风险对施工安全与管道运行的影响

山区诸如滑坡、泥石流、崩塌和地表冲刷之类的地质灾害, 对长输管道施工安全造成直接危险, 在工程施工期间, 滑坡出现时或许引发沟槽塌陷或管段挪动, 损坏支撑架构, 致使施工机械毁坏乃至人员伤亡, 坡角 25° ~ 35°、风化岩层厚度 1 ~ 2m 的坡面, 雨季里降雨强度大于 50mm/h 之际, 边坡失去稳定的概率可达到 20% ~ 30%, 倘若没有采取临时锚杆支护和排水办法, 管道开挖区域极易发生局部垮塌。泥石流于集水区集中出现时, 冲刷力量可达到 50 ~ 100kPa, 足够埋设浅埋管段或损毁支撑设施, 极大危及施工进度与安全, 在施工谋划中应当结合地质勘探、坡度测算和水文资料实施风险评定, 同时安排边坡支护体、排水管道和临时防护堰, 以减轻灾害对施工场地的直接危害。

地质灾害, 如泥石流和山体滑坡会引发管道外防腐层破裂、管道弯曲变形或局部下陷, 增加泄漏隐患和维护开支, 高降雨量大区域, 地下水位增高会削减土体有效应力, 让管道铺设基础承载能力降低, 进而引发局部下沉或移位。长期的冻融循环同样会加快管道焊缝与防腐材料的老化, 特别是在海拔偏高 (>1500m) 或者坡度超过 20° 的路段, 冻融造成的体积变动对管道应力分布存在明显影响, 需要在设计阶段结合灾害风险预判, 布置柔性管段、强化支撑结构, 并搭建实时监测与预警体系, 对地质形变、坡面移动及水文变动实施动态管控, 以保证管道安全。

3 经过山区长输管道施工技术与风险应对

3.1 地质条件适应性施工技术选择

考虑到山区复杂地质情形, 施工手段应按照岩土稳定性、坡比、沟谷分布状况及水文情形做适应性抉择, 稳定岩体与浅埋管段采用机械化开凿与直接埋管施工, 依靠履带式挖掘机和管道铺设设备, 增进施工效率; 坡度为 15° ~ 25° 的区段, 借助施工坡道与分段起吊装置, 能够保障管段就位精确程度和焊接安全状况。在破裂岩体、风化岩层或断层带地段, 鉴于岩体抗剪强度弱, 要运用分段挖掘、边坡锚杆加固及喷射混凝土防护, 同时联合排水沟和临时支撑架管控边坡位移, 杜绝施工期间塌方对管道及施工人员构成威胁, 在滑坡及泥石流多发地带, 要结合地质雷达检测与坡体稳定性评判, 选定施工可用时段, 必要时采

用定向水平钻进或者空中起吊管段的做法，降低地表的扰动程度，保证施工安全。

在沟壑、溪流和地势落差较大的地段，施工方法应灵活结合地形状况，当管道穿越峡谷或者河谷之际，定向水平钻（HDD）可以杜绝大规模开挖，降低对坡面稳定性的干扰；针对沟槽深度超出 2m 或坡度超出 30° 的区域，可借助分段吊装和临时支撑梁把管段固定在沟槽中，并铺设砂砾垫层以分散应力。管道运输与布置期间，针对不能实施机械化操作的陡坡区域，可运用人工拖拽、炮车、小型滑轮器具，把管段精准安置到支撑点，保障焊接与防腐作业顺利完成。

3.2 风险预防与监测技术应用

在山区长输管线施工期间，地质灾害的难以把控性需要运用多层面、多方式的风险防范与监测机制，以广东大鹏 LNG 管道工程做例子，该地域坡度多数在 15° ~ 35° 区间，某些断层破碎带宽度为 3—5m，每年平均降雨量超过 1500mm，雨季集中时降雨强度可达 60mm/h，这些状况导致滑坡、泥石流及沟槽坍塌频繁发生。为应对这些情形，项目启用“监测—分析—预警—控制”的全流程体系：在管道沿线关键高风险位置安装地质位移监测器和地下水位测量仪，即时收集边坡移动数值（最大监测位移精准度可达 ±1mm）和地下水渗透变动情况；借助无人机航测采集高分辨率 DEM 数据，针对坡面坡度、沟谷分布及地表裂缝开展精准化建模，并借助 InSAR 技术完成毫米级地表沉降监测。整合实时监测数据，施工班组搭建数值模拟模型，针对潜在的滑坡与泥石流开展概率分析，模拟成果表明在暴雨状况下坡体失稳概率最大能达到 28%，借助设置支撑梁、锚杆加固及排水沟，实际施工阶段风险事件被切实管控在可接受区间内。

为保障预警系统的时效性与实效性，工程启用多级预警办法：当坡体位移量大于 10mm/h 抑或地下水位上涨至管道基础之上 0.5m 时，系统自动开启一级预警，施工班组可即刻调整施工步调或施行临时支护手段；在接连降雨或泥石流征兆出现之际，二级到四级预警联合施工指挥部，保证施工人员撤离及设备无恙，利用这种“智能监测+预防性支护”的技术结合，项目减少了施工风险，还为山区管道长久运行给予可靠支撑。

3.3 工程实践效果与经验总结

实践表明，科学的风险预防与监测体系能够显著提升山区管道施工安全与运行可靠性。广东大鹏 LNG 管道项目中，通过多源监测和数值模拟，成功识别出 3 处高风险滑坡点，并针对性实施锚杆加固和混凝土护壁，施工期间未发生任何重大滑坡或管道沉降事故。

监测数据显示，边坡最大位移控制在 7mm 以内，地下水位波动范围控制在管道基础下 0.4m 以内，均低于设计安全阈值，有效保障了管道稳定性。

在施工效率方面，采用分段施工、分区监控和 BIM 技术的结合，实现了施工全过程的数字化管理：管段布置、支撑结构设计及焊接施工均可通过三维模型提前模拟和优化，减少了人为误差，提高了管道安装精度。经验表明，山区管道施工需要兼顾坡度控制、岩土体稳定性和水文条件，通过精细化施工技术与实时监测相结合，可在保证施工安全的前提下，实现高效、可控的工程实施。该项目积累以下经验：①风险分级管理是山区管道施工的关键，可根据坡度、断层及降雨强度动态调整施工方案；②多尺度监测手段结合数值模拟是实现施工安全与长期运行稳定的有效途径；③施工过程中应充分考虑地形起伏和应力集中点，通过支撑和局部加深埋设等措施消除潜在风险。由表 1 可见，风险点的支护设计与监测数据紧密关联，实现了风险预测与防控闭环，为山区长输管道施工与长期运行提供可靠依据。

表 1 广东大鹏 LNG 管道关键监测数据

区域名称	坡度 (°)	岩土类型	最大位移 (mm)	地下水位变化 (m)	风险等级	支护措施
A 点	28	风化砂岩	7	0.4	高	锚杆+护壁
B 点	22	黄土层	5	0.35	中	护壁+排水沟
C 点	30	断层破碎带	6	0.45	高	锚杆+支撑梁

4 结束语

山区复杂地质条件对长输管道的设计、施工和运行安全提出了严峻挑战，但通过科学的地质分析、合理的管道选线与埋设深度设计、适应性施工技术以及多层次的风险预防与监测措施，可以有效降低地质灾害风险，保障施工安全和管道长期稳定运行。

参考文献：

- [1] 杜保亮. 复杂地质条件下长输热力管道顶管施工技术探究 [J]. 江西建材, 2023(04):335-337.
- [2] 范翔. 浅析油气长输管道山区高陡坡地段的选线设计 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020,40(18):124-125.
- [3] 王海龙. 天然气管道建设施工安全风险识别及控制措施 [J]. 清洗世界, 2022,38(07):163-165.
- [4] 陈良. 长输油气管道应急抢修体系现状及改进探讨 [J]. 中国化工贸易, 2023,15(10):118-120.
- [5] 袁智. 原油长输管道安全评价技术探讨 [J]. 安全, 2014,35(7):1-2.

作者简介：

王珏（1990-），男，汉族，江苏扬州人，大学本科，毕业于西南石油大学，工程师，研究方向：油气储运。