天然气长输管道山地陡坡段施工难点与关键技术研究

杨六州

（中海石油气电集团有限责任公司，北京 100028）

摘 要 天然气长输管道翻越山岭时，山地陡坡段往往是制约全线贯通的瓶颈段落。此类段落施工空间局促、物资运输通道不畅，同时面临边坡失稳、水土流失和生态扰动等系列难题，传统机械化流水作业模式难以直接套用。本文在系统辨识山地陡坡段地形地质、气候水文和生态环境三类关键特征的基础上，深入剖析了作业带开拓、管材布设、管沟成型、下沟回填等环节的施工难点，进而针对性地提炼出索道与轻型轨道运输、削峰填谷、陡坡管道焊接、下沟与回填、生态快速修复等关键技术，并结合工程实践，论述了上述技术的集成应用路径与综合效益，旨在为类似山区管道工程提供一套安全、高效、绿色的施工技术体系。

关键词 天然气长输管道；山地陡坡；作业带开拓；管材运输；边坡稳定

中图分类号：TE973.9 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.29.040

0 引言

天然气长输管道作为国家能源战略通道，具有线路长、跨区域广、用地类型复杂等特征[1]，其建设质量直接决定项目能否按期投产运行。随着我国天然气干线管网持续向中西部山区延伸，管道不可避免地需要穿越大范围的山地陡坡地段。这些段落坡度常常超过25°，高差大、水平距离短，施工作业面极其有限，大型沟上设备和运输车辆难以抵达作业位置。强降雨、冻融和剧烈风化作用更使边坡地质条件时刻处于动态变化之中，稍有不慎便会引发滑坡、坍塌等地质灾害。在生态文明建设日益严格的要求下，如何将管道安全敷设到位并最大限度降低对原有地形和植被的扰动，成为工程界必须攻克的难题。因此，本文系统分析施工难点并凝练出一套适应陡坡特征的关键技术，对于提升山区管道建设质量、保障工程安全具有显著的现实意义。

1 天然气长输管道山地陡坡段施工环境特征

1.1 地形地貌与地质构造复杂

天然气长输管道山地陡坡段通常表现为深切峡谷、单斜山脊或多级阶地斜坡，自然坡度可达30°至45°，局部出现近于垂直的岩壁。地表起伏剧烈，横向冲沟发育，使得连续作业带难以形成。地质构造上，岩层倾角变化大，软硬相间层频繁交替，常见强风化岩体、残坡积碎石土及崩塌堆积体，其工程力学性质各向异性明显。这类地质体在开挖扰动后极易沿软弱结构面滑动，给管沟边坡和作业平台的稳定带来先天不足[2]。

1.2 气候水文条件多变

山区小气候特征突出，降雨集中且强度大，瞬时暴雨可迅速形成坡面径流，对裸露开挖面产生强烈冲刷。高海拔地段冬季严寒，冻融循环导致岩土体反复胀缩，强度衰减显著。部分斜坡体内存在上层滞水或裂隙水，施工揭露含水层后渗流将软化土体并增加动水压力，进一步恶化边坡稳定状态。这种多因子耦合的水文条件，要求施工必须与气象窗口紧密衔接，并建立有效的截排水体系。

1.3 生态环境高度敏感

天然气长输管道山地陡坡往往植被覆盖度较高，但群落抗干扰能力薄弱，一旦遭到机械碾压或开垦，表土即大量流失，基岩裸露，自然恢复周期长达数十年。坡面还是多种野生动物的活动廊道，施工噪声、爆破振动和地表水污染会直接干扰生物栖息地。在自然保护区边缘或水源涵养区，环保约束极为严格，要求施工扰动作业面压缩到最小，并在管道敷设完成后立即启动生态重建，实现与原有景观的和谐融合。

2 天然气长输管道山地陡坡段施工难点剖析

2.1 作业带开拓与设备进场严重受限

天然气长输管道山地陡坡段很难像平原段一样开辟出20米以上的连续作业带，常常只能通过削坡、填

作者简介：杨六州（1985-），男，本科，工程师，研究方向：天然气管道建设、数字化管道建设。

筑或搭设钢栈桥获得宽度不足 8 米的狭窄走廊。重型挖掘机、吊管机、移动电站等设备若凭自身动力攀爬，会因附着力不足而失控下滑，而修筑临时便道又意味着大面积开挖和高陡边坡形成，反而加剧灾害风险。因此，如何将施工机具安全送达各作业平台，是整个工程的起点难题[3]。

2.2 管材运输与布管组对困难重重

单根长 12 米左右、重达数吨的钢管，在陡坡上水平运输极易产生侧滑和滚动，传统拖车基本无法使用。即便单管就位后，在斜坡上进行组对时，重力沿坡面方向的分力使管端难以精准对接，对口器易滑脱，错边量控制难度成倍增加。布管顺序若安排不当，还会出现坡顶存管下溜撞击下部管段的事故，对人员安全构成直接威胁。

2.3 管沟成型与坡体稳定控制难度大

山地陡坡管沟开挖绝非简单的槽形开挖，而是涉及上部坡体减载、下部坡脚加固的系统工程。如果仅沿管道中线开挖深槽而不对后壁进行支护，极易形成临空面，诱发推移式滑坡。石方地段采用爆破开挖时，爆炸能量可能引起岩体松动范围扩大，导致隐蔽节理张开。土质斜坡中，沟槽侧壁在水的作用下易发生坍塌，使已成型管沟被掩埋，反复清沟又进一步破坏原状土结构，形成恶性循环。

2.4 下沟回填及水工保护要求严格

管道完成焊接检测后，需要从作业平台安全放入沟底，坡度较大时吊管机受力不平衡，存在倾覆危险。采用发送架或吊篮下沟则必须精确控制管道弯曲应力，防止防腐层拉裂。回填材料若就地取用，往往含有风化岩块，碾压密实度难以保证，管道底部易出现悬空或应力集中。此外，陡坡段汇水面积大，必须在管道上方设置多道截水墙和消能设施，否则集中水流会沿管沟冲刷掏蚀，最终导致管道暴露甚至悬跨。

3 天然气长输管道山地陡坡段施工关键技术

3.1 索道与轻型轨道运输体系

针对无路可通的高陡坡段，采用货运索道加轻型钢轨相结合的运输模式，从根本上摒弃了全线修筑便道的常规做法。在山顶或坡面基岩稳固位置设锚固站，架设多跨循环式货运索道，吊运能力根据最大单件重量选配，将拆解后的钻机、焊接房和单管等逐件吊运至中间转载平台。自平台至各作业点，铺设可快速拆装的窄轨轻型轨道，轨道基础采用枕木加简易支座，局部悬空段以型钢栈桥跨越，使用小型电驱牵引车纵向配送。索道跨距可达数百米，不受地表起伏限制，极大地压缩了修筑便道带来的地貌扰动。同时，在布管环节应用多轮滑轮组和双筒卷扬机构成慢速牵引系统，管端配合弧形导向架，使单管始终沿设定轨迹平稳移动至待焊位置，彻底消除了自由溜放和失控下滑的风险。

3.2 削峰填谷与多层次支护技术

为创造基本作业平台，遵循“少挖多填、分级稳定”原则，尽量减少对原始坡面的大规模切削。优先在坡面凸出段实施浅层削方，挖除的碎石土和块石就近调配至下部凹地及坡脚，分层碾压填筑，形成台阶式作业面。每级平台外侧设置浆砌石或格宾石笼挡墙，墙后铺设反滤土工布并埋设塑料排水盲沟，盲沟与坡面截水沟贯通，快速截排岩土体中的地下水与地表水，降低水压力对支护结构的作用。高陡岩质边坡采用全长黏结型系统锚杆与挂网喷射混凝土构成柔性支护体系，容许微小变形释放部分应力，同时有效约束危岩掉块；土质或碎石土边坡则采用自进式中空注浆锚杆并配合钢筋土钉群，形成深层加筋土体，大幅提高潜在滑动面的抗剪强度。在变形敏感部位，还布设了微型抗滑钢管桩群，桩身穿过松散覆盖层嵌入稳定岩体，从深层限制坡体位移，为上部施工提供可靠保障[4]。

3.3 陡坡管道焊接工艺优化

焊接是陡坡施工中的关键质量控制工序。当坡度大于 20° 时，常规手工电弧焊熔池受重力作用偏向下侧，极易造成单边咬边和根部未熔合缺陷。为此，本工程推荐采用对坡度适应性强、熔敷速率高的脉冲全自动焊，必要时配合药芯焊丝半自动焊工艺。自动焊系统配备电弧电压跟踪与焊枪摆动控制功能，可根据焊枪所处仰角或斜仰位实时调整焊接参数，保证不同空间位置下熔深均匀一致[5]。焊口组对前，利用液压内对口器将管端圆度精确校正并锁定，消除错边和附加组装应力。作业区内搭建可移动的轻钢防风保温棚，棚内安设中频感应加热装置，确保预热温度和层间温度连续稳定，避免因陡坡风速大、空气对流强导致焊缝冷却过快而产生淬硬组织。全线焊缝均采用相控阵超声检测技术全程扫查，显著提升对坡口未熔合、层间夹渣等坡地焊接典型缺陷的检出率和可靠性。

3.4 安全高效的下沟与回填方法

管道连续焊接达到一定长度规模后，采用“溜管法”配合专用发送架实施整体下沟。在管沟底部预先敷设土工布袋包裹的细砂袋作为管底缓冲层，沟壁按一定间距安装垂直导向滚轮，防止管道擦壁损伤。管道起始端通过一台锚固于地锚的慢速绞车配合钢丝绳实时控制下放速度，尾端另设制动缆索构成双重控速系统，确保管段按设计弹性弯曲曲线缓慢滑入沟底，避免冲击。回填工序选用过筛细粒土或石灰改良土，围绕管

道分层对称进行，采用气动或小型振动夯实机具精细作业，务必使管底腋角填充密实无空洞。地表沿管沟方向每间隔30米设置浆砌石或混凝土截水墙，墙身嵌入沟壁原状土体，并沿管道纵向铺设外包土工布的排水花管，将渗流汇集后导入坡面急流槽有序排出，彻底切断水流对管沟填土潜蚀破坏的通道。

3.5 生态快速修复与水土保持技术

管道敷设完毕且管沟回填至设计标高后，立即启动坡面生态重建程序。将施工前按土层分层剥离存放的原生表土均匀回覆于扰动面，掺入有机纤维、保水剂和经配比的本土草灌种籽，采用液压喷播或厚层基材客土喷播工艺，快速形成兼具防蚀和植生功能的覆盖层。对岩质裸露边坡，先挂设可降解植物纤维毯或三维土工网垫作为植生载体，再高压喷附含有土壤改良剂、有机质和种籽的基材混合物，为植物根系附着和穿透提供有利微环境。局部坡度极陡处则以生态袋垒砌柔性护面，袋内填装拌有灌草种籽的营养土，袋体层层错缝叠压，并通过单向土工格栅反包与坡体连接成整体。植被配置坚持乔、灌、草立体搭配，优先选用当地速生先锋物种，以尽快形成多层覆盖，促进群落正向演替。施工期临时排水沟亦被改造为缓坡生物过水通道，种植根系发达的湿生植物，使坡面水文过程逐步恢复到近自然状态，兑现全过程绿色施工的承诺[6]。

4 天然气长输管道山地陡坡段施工关键技术集成应用实践

4.1 某西南干线陡坡段工程概况

某天然气干线需翻越一处高差达180米的连续山脊，管道设计压力10兆帕，管径1 016毫米，属大口径高钢级管道。陡坡段全长1 300米，最大自然坡度38°，坡面多为强风化板岩与碎石土，岩体破碎、自稳能力差。该段地处生态敏感区，环保要求在施工期不得破坏山脊水源涵养林，且两年内植被覆盖率须恢复至75%以上，水土保持标准极为严格。

4.2 技术组合与施工组织

施工便道仅开辟至坡脚中转场，最大限度减少对山体的扰动，坡面全部物资运输则依赖多跨往复式货运索道与轻型单轨系统。在边坡中部和上部依地势设置三级作业平台，平台内侧采用锚喷加微型钢管桩形成组合支护体系，关键部位同步埋设测斜管与应力计实施动态监测。管沟开挖采取分段跳挖，每段长度从严控制，随挖随支并及时喷射混凝土封闭，沟壁预埋外包土工布的反滤渗水管。管道焊接全部采用熔化极脉冲自动焊，在可移动式防风棚内完成，每道焊口均经相控阵超声逐口检测，确保缺陷零漏检。长管段连续焊接后，利用溜管装置配合卷扬机控速，将管段整体顺坡下放入沟，回填土经人工过筛、分层精细夯实。坡面复绿采用厚层基材客土喷播并搭配生态袋码砌护坡，沿管沟每30米设置一道浆砌截水墙，分级截排坡面径流。

4.3 施工成效与综合评价

该陡坡段施工期间未发生任何边坡失稳和人身伤害事故，实现了零事故、零伤害目标，管道焊缝一次合格率达到98%以上。整体工期较原定计划缩短约15%，施工迹地扰动面积较传统修筑便道方案减少40%。完工后经历两个丰水雨季检验，管沟无明显沉降，截排水系统运行顺畅，坡面植被覆盖度在一年半后即超过80%，物种多样性逐步恢复。实践表明，索道运输与轻型轨道突破物流瓶颈，综合支护与动态监测保障了边坡稳定，自动焊与溜管下沟确保了实体质量，快速生态修复则兑现了环保承诺。这套技术集成方案在同类复杂山区大口径管道工程中具有显著的推广价值。

5 结束语

山地陡坡段作为天然气长输管道的控制性节点，其施工困难的根源在于空间、力学与生态三重约束的耦合。本文系统归纳了复杂环境下的作业带拓展、管材运输、管沟成型等难点，并给出了从运输体系构建、多层次支护技术、焊接工艺优化到生态重建的系统解决路径。工程实践证实，将索道与轻型轨道运输、锚喷及抗滑支护、陡坡自动焊、溜管法下沟和快速复绿等技术进行有机集成，能够显著提升安全水平和施工效率，有效控制生态环境扰动。为进一步增强复杂山地管道建设的鲁棒性，未来应着力研发智能化吊运设备、无人化焊接工作站和基于实时感知的动态设计反馈系统，推动行业向无人化、智能化方向持续发展。

参考文献：

[1] 田雨，张哲源，段永强．长输天然气管道项目建设用地保障与合规补偿机制优化研究[J]．中国化工贸易，2026,18(21):22-25.
[2] 郑昆鹏．天然气长输管道山地陡坡段设计与施工关键技术分析[J]．中国化工贸易，2026,18(11):117-119.
[3] 雷阳．天然气长输管道山地陡坡段施工技术[J]．全面腐蚀控制，2023,37(01):97-99.
[4] 肖海峰．复杂丘陵区天然气长输管道施工风险控制技术[J]．山东石油化工学院学报，2025,39(04):76-79.
[5] 赵凯立．天然气地面建设设备安装与集输管道施工技术[J]．石化技术，2026,33(07):429-430.
[6] 徐康，杨张虎．天然气长输管道建设项目施工期生态环境影响与生态修复方法分析[J]．中国石油和化工标准与质量，2025,45(09):136-138,141.