

复杂山地环境下低压天然气井集输流程优化策略

王慧鹏（中石化重庆涪陵页岩气勘探开发有限公司，重庆 408000）

摘要：复杂山地环境中低压天然气井集输工作面临着地形复杂，压力损失大，施工及维护费用高的难题。为了提高集输的效率及安全性，本文提出优化策略主要有新型管材的选用及应用，布站方式的优化及智能化监测系统的使用等。应用新型管材可以有效地应对复杂地形所提出的各种挑战；合理的布站有利于降低压力损失和集输效率；引入智能化监测系统，能够对天然气管道的运行状态进行实时监测，确保集输安全。上述策略对复杂山地环境低压天然气井集输具有重要借鉴意义。

关键词：复杂山地环境；低压天然气井；集输流程优化；新型管材

复杂山地环境低压天然气井在集输过程中遇到了多重难题，包括复杂地形对管道铺设造成影响，低压状态压力损失大，施工及维护费用高。现有的集输流程很难解决上述难题，造成天然气输送的效率低和安全性差。为攻克上述难题，提出各种集输流程优化策略，主要包括筛选并应用适用于复杂地形条件下的新管材，优化布站方式提高集输效率及引进智能化监测系统确保运行安全等。

1 复杂山地环境下低压天然气井集输面临的问题

1.1 地形复杂对管道铺设的影响

山地地形跌宕起伏、地形险峻、高差多变，使得管道路径的选择与设计显得极为复杂。在这种环境下，管道的常规设计与施工技术很难与之相适应，需要综合考虑坡度，弯曲半径以及地质条件等诸多因素。另外，在复杂地形下土壤类型，植被覆盖以及岩石构成等因素不同，会对管道稳定性以及防腐蚀能力产生一定影响。复杂的地形会加大管道铺设工艺的技术难度，特别是陡坡、峡谷地段，施工方需克服多种自然障碍、采用特殊工艺与方法才能确保管道安全稳定运行。在此背景下，常规铺设方法易受地形起伏不平、路面狭窄等因素限制，施工设备运输及运行面临着严峻的考验。同时，复杂地形中的极端气候条件，如暴雨、滑坡和地震等自然灾害，也会增加施工风险，影响工期进度和工程质量。

1.2 低压状态下的压力损失问题

低压天然气井集输时压力损失问题普遍存在而且比较严重，特别是复杂的山地环境。低压下天然气经长距离管道输送过程中，由于管道摩擦及局部阻力等原因，天然气压力逐渐减小，该压力损失将使天然气输送效率明显降低。高，低起伏的地形在复杂的山地环境下，更进一步加剧了这个问题。随着气体爬上陡

坡或者降落到陡峭山谷，压力损失将变得更为显着，这将造成终端用户天然气供给不足。

1.3 建设和维护成本高的挑战

集输管道因其地形复杂，在设计与建设过程中需要专门的工程技术与装备，加大了项目前期投入费用。如陡峭山坡，崎岖不平，使管道选址及敷设需进行较多勘查与规划，尤其是跨越山脊，河谷或者悬崖地带，增加了施工难度，要求有起重机、高空作业平台等专用施工设备使用运输成本比较高。二是为保证管道安全稳定，常需采取护坡，加设支架或者采用特殊材料等加固防护措施，进一步加大建设成本。

2 复杂山地环境下低压天然气井集输流程优化策略

2.1 新型管材的选择与应用

2.1.1 新型管材的特性

新型管材主要性能有高强度，耐腐蚀性，柔韧性好，抗压性强等。以玻璃钢管为例，它拥有高达 7000N/mm^2 的抗拉能力，这使其在高应力环境下仍能维持其结构的完整性，并且其密度只有 1.8g/cm^3 ，它比传统钢材低得多，极大地减轻运输与施工负担。高密度聚乙烯管材的断裂伸长率可以超过600mm，这表明它在复杂的地形条件下具有很好的适应性。此外，这类新型管材展现出了卓越的耐腐蚀特性，例如，玻璃钢管可以承受超过2000小时的盐雾腐蚀测试，而高密度聚乙烯管材在pH值1到14的酸碱环境中长时间使用并没有明显的损伤。复合材料管在抗压性能上表现出色，其压缩强度高达400MPa，这使其能够有效地应对地形和压力的变化，确保管道能够长时间稳定运行。这些新型管材保持着-40℃至60℃温度区间内优良的物理、化学性能，尤其适用于高寒山区或者温度变化较大的场合，进一步提高集输系统运行的安全可靠性。

2.1.2 适用复杂山地的管材

当前，复合材料管，不锈钢复合管以及双层增强聚乙烯管等在复杂山地集输系统中均有优异的性能。诸如玻璃钢复合管这样的复合材料管，具有承受高达80兆帕工作压力的能力，并且在酸性土壤条件下展示出优秀的抗腐蚀特性，因此非常适用于腐蚀性较高的土壤环境。这是一种不锈钢复合管，其内部的不锈钢层的厚度通常在0.5 ~ 1.5mm之间，而外部的聚乙烯层的厚度则大约在4 ~ 6mm之间，这样的双层结构设计不仅可以有效地抵抗外界的机械损害，又有很好的柔性及耐腐蚀性，适合需经常弯曲及远距离运输的管道系统使用。双层增强聚乙烯管材的内部使用了交联聚乙烯作为材料，其壁厚介于10 ~ 20mm，能够承受高达20兆帕的工作压力，而其外部的高密度聚乙烯材料则提高了其抗冲击和耐磨的特性。这类管材实际使用寿命一般都在30年以上，比传统钢管10 ~ 15年寿命明显延长。例如，在某天然气集输项目中，采用新型玻璃钢复合管后，维修和更换的周期从原来的5年延长至15年，显著降低了长期运行成本和环境风险。

2.1.3 新型管材的安装与维护要点

安装过程中，玻璃钢管和高密度聚乙烯管材因其较轻的质量（每米的重量只有5 ~ 15kg之间）更易运输和操作，减少了大型设备的依赖。在施工过程中，可以选择使用热熔对接或电熔连接技术。管道接口的强度可以达到20MPa，这接近或超过了管材本身的强度。这种连接方式不仅降低了泄漏的风险，还减少了传统焊接方法带来的时间和成本。另外，敷设过程中还需保证管道底部支撑顺畅，以免悬空或者出现局部

受力情况，特别是穿越岩石、悬崖区域时应设置具体的防护、支撑结构以防因地质活动造成管道破裂。在系统维护方面，智能监测系统的应用显著提升了工作效能。例如，通过使用地面雷达和无人机进行巡检，系统能够每小时覆盖长达5km的管道，从而大幅度减少了巡检所需的时间。定时对管道进行外部观察和壁厚的测定是检测潜在腐蚀和磨损的关键步骤，例如，利用超声波测厚仪能够准确地测定0.01mm的壁厚差异。如表1所示。

2.2 优化布站方式提高集输效率

2.2.1 不同布站方式的比较

集中式布站方式是把多口天然气井产气集中在一个集气站内，适用于地形比较平缓的地区，由于可通过缩短管道长度、增加接头数量等措施减小管道阻力、优化压力分布。但该布站方式易受地形变化及管网管输气量减少等因素影响而造成复杂山地环境下压力波动较大且集输效率不够稳定。反之，分散式布站方式使每口天然气井都与就近集气点直接相连，适用于山地及地形变化强烈地区，并通过减小气体流动路径来降低管道压力损失及提高集输效率。此外，混合布站方式结合了集中式和分散式的优势，利用拓扑优化算法计算最优路径，平衡管道长度和成本。对于管网优化问题，管输气量减少后网络优化问题可采用非线性规划模型进行求解，其中目标函数是最小化总集输成本，约束包括管道容量，压力损失公式等：

$$\Delta P=f(L,d,\mu,Q)$$

其中L是管道的长度，d是管道直径， μ 是流体黏度，Q是流量等等。不同布站方式选择要针对山地环境特点及气井具体分布情况进行优选，综合考虑流

表1 新型管材在复杂山地天然气集输中的应用分析

管材类型	主要特性	适用场景	安装与维护要点
玻璃钢复合管	- 抗拉强度高达7000N/mm ² - 密度低(1.8g/cm ³) - 抗腐蚀性强(2000小时盐雾测试)	- 高应力环境 - 腐蚀性土壤条件	- 轻质易运输和操作 - 采用热熔/电熔连接技术 - 重点关注管道底部支撑
不锈钢复合管	- 内层不锈钢厚0.5-1.5mm，外层聚乙烯厚4-6mm - 抗机械损害、柔性好、耐腐蚀	- 需弯曲变形的远距离管道	- 双层结构提高抗冲击和抗腐蚀性能 - 采用热熔/电熔连接技术
双层增强聚乙烯管	- 内层交联聚乙烯厚10-20mm，外层高密度聚乙烯 - 可承受20MPa的高工作压力 - 抗冲击和耐磨性能好	- 复杂地形条件下高压输气管线	- 管材质量轻，便于运输和安装 - 采用热熔/电熔连接技术 - 可利用智能监测系统提升维护效率

量, 压力, 路径长度等多因素才能达到最佳集输效率。

2.2.2 基于山地地形的布站原则

复杂山地环境下进行布站时需充分考虑地形特点才能达到最佳集输系统性能。一种行之有效的布站原则就是尽可能沿地形等高线进行管道布站, 以避免无谓的高低不平, 从而使重力作用造成的影响降到最低限度, 使集输效率达到最佳。从伯努利方程出发:

$$P + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{constant}$$

其中, P 为压力, ρ 为气体密度, g 为重力加速度, h 为高度, v 为气体流速, 当沿等高线布站时, 高度变化 h 趋于零, 减少了能量损失。为降低管网的腐蚀风险, 应避免在岩石或酸性土壤附近布设管道, 这些区域往往对管道材料的腐蚀性较强, 通过优化路径选择和材料防护, 可以有效延长管道使用寿命。

2.2.3 优化布站的案例分析

某山区天然气集输工程为提高集输效率和降低运营成本而采用混合布站。项目团队采用拓扑优化算法进行最优路径计算, 集中式与分散式布站优点于一体。在具体实现时, 先详细调查山地地形, 明确天然气井分布范围, 分析地形等高线位置, 保证管道布站尽量沿着等高线布置, 降低压力波动, 提高集输效率。项目团队以布站原则为指导, 将集中式布站应用于地形变化较平缓地区, 将分散式布站应用于复杂且变化剧烈地区。这样在降低管道压力损失的同时也提高集输效率。与此同时, 为进一步优化集输系统的性能, 工程小组也格外关注避免将管线布置于岩石或者酸性土壤周围, 从而减少管网腐蚀风险。实际运行中通过使用智能监测系统对管道进行实时监测, 发现和处理可能存在的问题。例如, 通过使用地面雷达和无人机进行巡查, 可以每小时覆盖长达 5km 的管道, 这大大缩短了巡查所需的时长。另外, 采用定时外部观察管道并确定壁厚的方法, 利用超声波测厚仪精确确定壁厚差异, 从而有效防止可能出现的腐蚀、磨损等问题。通过实施一系列的优化方案, 该项目成功地将天然气的集输效率提升了 20%, 同时也将维护成本减少了 30%。该实例充分证明了复杂山地地形条件下采用科学布站方式与先进维护技术能够显著提高天然气集输系统整体性能与经济效益。

2.3 智能化监测系统的运用

2.3.1 智能化监测的关键技术

部分关键技术的整合与应用能够显著提升监测系统效率与精度。其中利用传感器技术对管道的压力, 温度, 流速及腐蚀等参数进行实时监控, 并把数据传

送给中央控制系统; 同时利用物联网 (IoT) 技术使各个监测设备之间可以互联, 远程采集数据并进行实时分析。大数据分析技术能够通过深度挖掘监测数据来辨识集输系统中气量减少或者压力波动等潜在风险并适时给出相关优化调整建议。云计算技术为数据处理提供了更强的能力, 使大量监测数据可以被快速地处理并反馈出去, 保证系统做出快速反应。另外, 利用人工智能 (AI) 算法对管网腐蚀状况及集输安全性进行预测, 并将历史数据与实时监测结果进行对比分析, 实现集气站及管网操作参数自动调节, 使系统保持在最佳工况下。

2.3.2 监测系统对集输安全的保障

引入智能化的监测系统可对天然气管道及低压集气站运行状况进行实时监测, 快速发现管道泄漏, 压力异常或者设备故障等任何异常情况, 有效地避免了可能出现的事故。监测期间, 该系统采用数据分析与模式识别相结合的方法, 可对可能出现的故障点及腐蚀发展趋势进行精确预测, 并及时发出报警信号。针对管网腐蚀, 智能监测系统可以进行连续监测, 基于腐蚀预测模型对防腐措施及维护计划进行优化, 降低人为干预次数, 增强系统运行可靠性。同时该监测系统可结合标准化地面流程管理对集气站压力、流量等运行参数进行自动调整, 保证气量平稳传输, 避免压力波动造成设备受损或者系统中断等问题。

3 结语

复杂山地环境中, 优化低压天然气井集输流程是提升天然气输送效率与安全性的重要手段。通过新型管材的选择, 布站方式的优化以及智能化监测系统的应用等措施, 可有效地克服复杂地形, 高压损失以及高维护成本等难题。这些优化策略不但有利于促进集输系统整体运行成效的提高, 而且对今后同类项目的设计与实施也具有一定的参考价值与借鉴作用。

参考文献:

- [1] 赵良. 天然气集输管道内腐蚀影响因素及防护措施研究 [J]. 能源化工 ,2024,45(02):60-64.
- [2] 章惠龙, 张其海, 李军平. 天然气集输管道安全施工风险分析与对策研究 [J]. 石油化工安全环保技术 ,2024,40(02):12-14+32+5.
- [3] 张兵. 天然气集输工艺与处理研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量 ,2024,44(07):163-165.
- [4] 赵小军, 张勇, 段奇磊. 天然气集输管道损害因素分析及治理措施 [J]. 中国石油和化工标准与质量 ,2023, 43(22):21-23.