复杂地质条件下高钢级长输管道应变设计与安全评估方法

张树中　黄兴伟

中石化中原石油工程设计有限公司　河南　郑州　45000

摘　要：复杂地质环境引发的地层形变、岩土错位等问题，易造成高钢级长输管道累积性结构损伤，常规防护评估技术难以适配复杂工况需求。研究剖析地质载荷作用机制与管材应变响应规律，搭建适配地质工况的管道应变设计体系，构建多维度安全评估指标体系与分级研判方法，细化数据处理、风险分级、隐患预判全流程技术路径，可有效提升复杂区域管道运行安全管控的精准性。

关键词：复杂地质条件；高钢级长输管道；应变设计；安全评估；形变机理

引言：高钢级长输管道是油气能源输送的核心基础设施，多敷设地质结构复杂、灾害多发的区域，地层不均匀沉降、土体滑移等动态地质扰动，会持续诱发管道轴向与局部形变，加剧结构疲劳损伤。现阶段管道应变设计针对性不足、安全评估维度单一，难以精准防控动态地质扰动带来的安全隐患。依托管道形变响应特征与地质载荷规律，优化应变设计方法、完善安全评估体系，对保障管道长效稳定运行具有重要工程价值。

1 复杂地质下高钢级管道形变机理与载荷特性

1.1 复杂地质灾害类型及管道载荷作用机制

地质环境的不稳定状态会对长输管道结构产生持续性外力作用，不同地质环境的变形运动特征，直接改变管道整体受力状态与形变发展趋势。土体滑移、地层不均匀沉降、岩土挤压错位等常见地质变化，会从径向与轴向多个维度对管道产生持续性荷载，让管道结构产生被动形变。地质环境的形变速率与形变范围存在差异化特征，管道承受的外力荷载会呈现动态变化状态，长期处于此类受力环境的管道会产生累积性应变损伤。

1.2 高钢级管材力学形变与应变本构特性

高钢级管材凭借高强度与高韧性的材料属性，广泛应用于长输油气输送工程，材料内部的晶体结构与力学响应特性，决定管材在外力作用下的形变发展规律。管材受到持续性外力作用时会经历弹性形变与塑性形变两个阶段，材料应变数值会随外力荷载的增大产生规律性增长。材料本构关系能够精准反映应力与应变的对应变化规律，可为后续管道应变设计工作提供基础力学依据。

1.3 长输管道全域应变响应规律与形变特征

长输管道属于线性延伸式狭长结构，整体结构刚度分布具备均匀性特征，地质环境产生的外力荷载会沿管道轴线方向持续传递。管道不同管段所处地质环境存在差异，各部位产生的应变数值与形变形态呈现不均衡分布状态。外部荷载的持续作用会让管道产生整体位移与局部形变，结构内部会形成稳定的应变分布规律，各类形变特征也是管道安全状态研判的核心依据。

2 基于地质适配性的高钢级管道应变设计体系

复杂地质环境存在多变性与不稳定性，常规管道设计方案难以适配动态地质形变带来的结构受力变化。依托地质适配理念搭建系统性应变设计体系，能够贴合高钢级管道的材料性能与敷设工况，从准则指标、整体设计、局部优化、模型参数多个维度完善设计逻辑，有效提升管道对复杂地质工况的适应能力，从设计源头控制结构形变损伤风险。

2.1 复杂地质区管道应变设计准则与控制指标

复杂地质区域的管道应变设计工作需要依托成熟的技术准则开展，行业技术标准结合高钢级管道的材料特性与工程应用场景，明确管道应变控制的核心技术指标。应变设计工作需要兼顾地质环境形变能力与管道结构承载极限，通过限定管道最大允许应变数值，规避塑性形变过度发展引发的结构损伤[1]。技术控制指标会根据地质环境的复杂程度进行动态适配，简单地质区域可采用常规应变控制标准，灾害多发的复杂地质区域需要提升应变控制精度，严格约束管道各类形变行为，保障管道结构长期运行的稳定性。

2.2 管道轴向整体应变标准化设计方法

高钢级长输管道的轴向应变状态直接决定整体结构

的完整性，轴向应变标准化设计需要结合管道敷设走向与地质应力分布状态开展。技术人员依托管道力学响应规律，测算不同敷设区段的轴向应变理论数值，通过调整管道敷设参数、优化结构布局的方式，将轴向应变数值控制在合理区间。轴向应变设计需要兼顾管道全长的形变均匀性，弱化地质应力集中带来的局部形变问题，让管道整体形变状态贴合地质环境变化节奏，提升管道结构对复杂地质环境的适配能力。

2.3 地质形变区管道局部应变优化设计

地质形变活跃区域的管道局部受力状态更为复杂，单一的整体应变设计无法适配局部区域的形变防控需求，需要开展针对性的局部应变优化设计工作。针对土体滑移、地层沉降等地质变化集中的管段，通过加密结构防护、调整局部壁厚、优化敷设弧度等方式，改善局部应力集中的现状。局部优化设计需要精准匹配局部地质形变特征，针对性抵消局部区域的异常外力荷载，缩小局部管段与整体管道的应变差值，杜绝局部过度形变引发的管道破损、开裂等安全隐患。

2.4 应变设计关键参数取值与地质模型构建

应变设计参数的精准取值与地质模型的精细化构建，是保障应变设计成果科学性的核心环节。设计参数涵盖管材力学参数、地质形变参数、管道结构参数等多项核心内容，各类参数通过现场勘测、室内试验、数值测算的方式获取，保障参数数值贴合工程实际场景。地质模型依托现场勘测得到的地质土层分布、地层应力、形变趋势等数据构建，精准还原管道敷设区域的地质结构形态与外力作用特征。精细化的地质模型可以直观呈现不同区域的地质受力差异，为各类应变设计参数的取值提供精准的数据支撑，让整套应变设计方案贴合复杂地质环境的工程应用需求。

3 高钢级管道应变安全评估指标体系构建

3.1 复杂地质下管道安全评估核心要素界定

复杂地质环境下的管道安全评估工作需要明确核心评估要素，精准界定评估范围与评估重点，保障评估工作具备全面性与针对性。管道结构应变状态、地质环境形变强度、管材性能衰减程度、结构受力稳定性均属于安全评估的核心要素，各类要素相互关联，共同决定管道的整体安全运行状态。评估工作摒弃单一的形变数值判定模式，结合地质环境动态变化特征与管道长期运行的性能变化规律，综合考量各类影响因素对管道安全状态的干扰作用，规避片面评估带来的判定偏差，全面覆盖复杂地质条件下管道安全运行的各类影响维度。

3.2 管道应变安全阈值分级标准确立

管道应变安全阈值的分级划定是量化评估管道安全状态的核心基础，结合高钢级管材的形变极限、工程运行经验与行业技术规范，划分多级应变安全控制标准。各级阈值对应管道不同的形变状态与安全等级，低阈值区间对应管道弹性形变状态，结构整体处于安全稳定的运行状态。中阈值区间代表管道开始产生轻微塑性形变，结构性能出现小幅衰减，需要开展常态化监测管控[2]。高阈值区间代表管道塑性形变持续扩张，结构损伤不断累积，运行安全风险显著提升。分级阈值标准可以精准区分管道安全运行状态，为风险分级管控提供量化依据。

3.3 管材疲劳与形变失效专项评估指标筛选

高钢级管道长期处于复杂地质环境中，土体滑移、地层沉降等地壳往复扰动会持续对管道施加交变荷载，诱发管材疲劳损伤与不可逆形变失效，筛选针对性的专项评估指标可以提升安全评估的精准度。管材疲劳评估指标涵盖循环应变次数、疲劳损伤累积量、材料韧性衰减率等核心内容，量化长期交变荷载对管材性能的损耗程度。形变失效评估指标聚焦管道局部形变程度、结构开裂风险、形变不可逆程度等内容，精准识别管道早期失效隐患。专项指标可以弥补常规应变评估的局限性，精准捕捉管道隐性损伤与潜在失效风险，让评估工作覆盖管道性能衰减的全过程。

3.4 长输管道全域安全评估指标体系整合

单一维度的评估指标无法全面反映长输管道全域的安全运行状态，需要整合各类评估要素，构建全域一体化的安全评估指标体系[3]。体系搭建遵循全面性、针对性、科学性的核心原则，整合地质环境、结构应变、材料性能、运行状态四大维度的评估指标，梳理各类指标的关联关系与权重占比，剔除重复性、无效性指标，优化指标体系的整体结构。全域指标体系覆盖管道全线不同敷设区域的安全评估需求，兼顾整体结构与局部管段的形变安全状态，实现复杂地质条件下长输管道安全状态的全方位量化研判，为后续安全评估工作的落地实施提供标准化体系支撑。

4 高钢级管道应变安全评估方法

基于前文复杂地质条件下高钢级管道形变机理理论基础与全域应变安全评估指标体系，本章针对性搭建适配复杂地质动态扰动工况的高钢级长输管道应变安全评估方法。整套方法以复杂地质环境下管道实测应变数据处理为基础、以地质扰动诱发的应变风险分级研判为

核心、以管道形变超标隐患前置预判为目标，构建标准化、可落地的全流程安全评估技术体系，精准解决复杂地质动态扰动下管道应变风险难以量化、评估片面、管控滞后的突出问题，为复杂地质区高钢级长输管道安全运行精准研判提供标准化技术支撑。

4.1 管道实测应变数据甄别与标准化处理

复杂地质敷设区域的长输管道监测环境复杂，现场采集的应变原始数据会受天气变化、设备工况波动、现场作业扰动等多种外界因素影响。数据序列中常会出现信号畸变、数值跳变、数据缺失等问题，无法如实反映管道结构的真实应变状态。依托标准化的数据处理流程完成原始数据提纯，是开展管道安全评估的首要步骤。对全部监测数据逐条核验筛选，清理错误与无效数据，保留有效监测样本。统一数据统计口径与精度标准，修正监测设备产生的系统误差，弱化外界环境带来的数据干扰。经过规范化处理后的应变数据，能够真实还原管道形变变化规律，为后续管道风险研判与隐患预判提供坚实的数据支撑。

4.2 地质扰动下管道应变风险分级评估方法

为完成管道安全状态的量化界定与差异化管控，依托标准化处理后的应变监测数据，结合前文确立的多级安全阈值，建立适配复杂地质动态扰动场景的管道应变风险分级评估方法。该方法跳出传统单一数值对比的判定模式，整合地质形变扰动强度、管道应变增幅速率、结构损伤累积程度三项核心评判参数，依据现场工况特征划分低、中、高三类风险等级，配套专属管控处置策略。地质扰动幅度微弱时，管道应变数值稳定在安全阈值区间，结构内部未产生不可逆损伤，整体运行状态平稳，可保持常规监测节奏[4]。地质扰动持续加剧后，管道应变出现小幅超标现象，管材产生塑性形变，结构整体性能呈现衰减趋势，需加大现场巡检力度，重点跟踪形变发展态势。地质出现强烈扰动冲击时，管道应变超限幅度显著，结构损伤持续叠加，随时可能出现失效问题，必须第一时间落实整改措施，消除现场安全隐患。分级评估模式能够精准区分管道风险层级，实现管控资源的合理调配，切实提升复杂地质区域管道风险治理的针对性与有效性。

4.3 管道形变安全状态判定与超标隐患预判

数据标准化处理与风险分级工作完成后，可进一步完善管道安全状态判定模式与隐患前置预判机制，搭建完整闭环的安全评估流程。将整理后的实测应变数据对照各级安全阈值体系，能够精准界定管道所处形变阶段，明确整体安全层级，锁定出现异常形变的局部管段。长期累积的监测信息可用于归纳应变波动特征，总结管道形变随地质扰动产生的动态演变规律，推演后续形变发展走向[5]。技术层面可提前捕捉应变超限、管壁开裂、结构局部破损等各类潜在问题，结合隐患危害力度、波及范围与演变速度完成等级划分。传统管控模式多聚焦事故发生后的整改处置，这套预判机制能够扭转被动管控局面，前移安全管控关口，提升复杂地质工况下管道风险治理的精细程度，为管道运维决策提供可靠的技术依据。

结束语：本次梳理的应变设计体系与安全评估技术，充分适配复杂地质动态扰动的管道运行工况，通过细化分层设计策略与全域评估指标，弥补了传统管道形变管控技术的短板。整套技术体系依托实测数据完成风险量化研判，可精准识别管道隐性损伤与形变隐患，实现管道安全风险的分级管控与前置防控，能够为复杂地质区域高钢级长输管道的运维防护、风险治理提供规范、可行的技术参考。

参考文献

[1] 周雄, 王斌, 赵洪耀, 等. 智能监测技术在油气长输管道安全储运中的应用研究 [J]. 石油工业技术监督,2026,42(8)：1-5.

[2] 贾海东, 徐乐乐, 刘剑, 等. 强度匹配状态对高钢级管道环焊接头根部应变集中及应变时效脆化的影响 [J]. 焊接,2025(3)：20-29.5.

[3] 何仁洋, 刘艳贺, 王海涛, 等. 基于 IMU 数据的应变解析技术及其应用 [J]. 科学技术与工程,2024,24(7)：2683-2689.

[4] 陈小伟, 冯春, 王斌, 等. 管端增厚管道环焊接头结构设计与应力集中分析 [J]. 焊管,2026,49(4)：32-37.

[5] 贾晓辉, 付长华, 刘爱文. 横穿滑坡埋地管道的有限元建模与非线性分析 [J]. 地震工程学报,2026,48(3)：589-599.