

# 油气长输管道穿越活动断裂带的规划设计标准 与风险缓释技术

刘伟龙 (山东莱克工程设计有限公司, 山东 东营 257000)

**摘要:** 活动断裂带作为威胁油气管道安全运行的核心地质风险源, 其潜在的地震活动、地表错动及长期蠕滑特性可引发管道剪切、拉伸等多模式破坏。本文系统梳理国内外规划设计标准体系, 解析中国“风险分级-避让优先-强化设计”框架与欧美基于应变设计、动态风险评估的技术差异, 明确断裂带识别、穿越方式选择及抗灾设计的关键技术要求。通过中俄东线穿越嫩江断裂带工程案例, 验证“选线优化-结构强化-智能监测”复合技术的有效性, 为油气长输管道穿越活动断裂带的安全规划与风险管控提供跨学科理论支撑与工程实践路径。

**关键词:** 长输管道; 活动断裂带; 风险缓释技术

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 021-0106-03

## Planning and Design Standards for Oil & Gas Pipelines Crossing Active Fault Zones and Risk Mitigation Technologies

Liu Weilong (Shandong Lake Engineering Design Co., Ltd., Dongying Shandong 257000, China)

**Abstract:** Active fault zones pose a critical geological hazard to the safe operation of long-distance oil and gas pipelines, with potential seismic activity, surface dislocation, and long-term creep deformation leading to multi-mode failures such as shear and tensile rupture. This study systematically reviews international planning and design standards, comparing China's «risk classification-avoidance priority-reinforced design» framework with strain-based design and dynamic risk assessment approaches in Europe and North America. Key technical requirements for fault zone identification, crossing method selection, and disaster-resistant design are clarified. Through a case study of the China-Russia Eastern Gas Pipeline crossing the Nenjiang Fault Zone, the effectiveness of composite technologies—including route optimization, structural reinforcement, and intelligent monitoring—is validated. The findings provide interdisciplinary theoretical support and practical engineering solutions for enhancing the safety and risk management of pipelines traversing active fault zones.

**Keywords:** Long-Distance Pipelines; Active Fault Zones; Risk Mitigation Technologies

油气管道作为能源输送的“生命线”, 常需穿越各类复杂地质区域。活动断裂带因具备潜在的地震活动、地表错动和长期蠕滑特性, 成为管道工程面临的高风险地质环境之一。据统计, 全球范围内因断裂带活动引发的管道破坏事件占地质灾害破坏总数的 30% 以上, 轻则导致管道泄漏、停输抢修, 重则引发火灾、爆炸等重大安全事故。我国地处环太平洋和地中海—喜马拉雅地震带交汇区, 活动断裂带分布广泛, 如郯庐断裂带、青藏高原周边断裂带等, 对西气东输、中俄东线等国家主干管道构成直接威胁。当前, 如何在规划设计阶段科学规避断裂带风险, 以及通过工程技术手段提升管道穿越段的抗灾能力, 已成为油气储运领域的研究热点。本文通过对比国内外相关标准规范, 结合工程实践, 系统阐述管道穿越活动断裂带的全流程风险管控技术, 旨在为同类工程提供参考。

### 1 活动断裂带特征及其对管道的危害机制

#### 1.1 活动断裂带的地质特征

活动断裂带是指晚更新世 (约 10 万年) 以来发生过活动的断裂, 具有以下显著特征: ①运动方式多

样性: 包括走滑、正断、逆断等运动类型, 不同运动类型对管道的破坏模式差异显著。②时空分布不均性: 断裂带活动具有周期性, 其复发间隔从数十年到数千年不等, 且地表错动幅度随深度增加而递减。③次生灾害链效应: 断裂带活动常伴随地震、滑坡、崩塌等地质灾害, 形成复合破坏效应。

#### 1.2 对油气管道的破坏模式

断裂带活动对管道的破坏主要通过以下途径: ①地表错动直接作用: 断裂带突发错动导致管道产生弯曲、拉伸或剪切变形, 当变形超过管材允许极限时发生断裂。②土体位移间接作用: 断裂带周边土体位移引发管道轴向或横向应变, 尤其在高烈度地震区, 土体液化会加剧管道受力。③长期蠕滑累积损伤: 断裂带缓慢蠕滑使管道长期处于交变应力状态, 可能引发疲劳裂纹或防腐层破损。

### 2 国内外规划设计标准对比分析

#### 2.1 国内标准体系

我国现行油气管道穿越活动断裂带的标准以《油气输送管道线路工程抗震技术规范》GB/T50470、《输

油管道工程设计规范》(GB 50253)和《输气管道工程设计规范》(GB 50251)为核心,辅以《油气输送管道穿越工程设计规范》(GB 50423)等专项标准,主要技术要求包括:①断裂带识别与分级:采用地震危险性分析、地质勘察等手段,结合断裂带活动速率、历史地震烈度等参数,将断裂带划分为高、中、低风险等级。②避让原则:原则上要求管道避让高风险活动断裂带;无法避让时,可采用架空敷设或采用大应变钢管,并提高设计系数。③抗震设计:明确穿越段管道的抗震设防烈度应高于周边区域1度,采用极限状态设计法计算管道应变。

## 2.2 国外标准体系

国际上以美国 ASME B31.8《输气和配气管道系统》、加拿大 CSA Z662《石油和天然气管道系统》为代表,其技术特点包括:①基于风险的设计理念:强调断裂带活动概率与管道失效后果的量化评估,通过风险矩阵确定穿越方案。②动态应变设计方法:采用应变极限状态设计(SLS)替代传统应力设计,更贴合断裂带变形特征。③监测与维护要求:强制要求穿越段管道安装永久监测装置,实时追踪断裂带活动与管道响应。

## 2.3 差异与启示

国内外标准的主要差异体现在风险评估方法和设计参数取值上。国内标准偏保守,以定性分析为主;国外标准更注重定量风险评估与动态监测。未来我国标准可借鉴国外经验,引入概率地震危险性分析(PSHA)、管道应变监测数据反馈等技术,提升设计的科学性与经济性。

# 3 穿越活动断裂带的规划设计关键技术

## 3.1 选线规划策略

①多因子综合评估:建立包含断裂带风险等级、地形地貌、社会环境等要素的选线评估指标体系,利用GIS空间分析技术优选穿越路径。②最小风险穿越角度:管道与断裂带主断面夹角宜不小于 $60^\circ$ ,以减少垂直于断裂带方向的应变集中。③缓冲带设置:在断裂带两侧设置不小于50m的工程缓冲带,可结合换填砂土、宽管沟开挖等措施,同时考虑监测装置。

## 3.2 管道结构设计优化

①管材选型:穿越段优先选用高韧性管线钢(如X80M),其断裂应变需大于断裂带预测最大位移引发的管道应变。②应变设计技术:采用基于应变设计理念,根据校核计算结果可采用大应变钢管、焊缝的高强匹配设计。③埋深与防护层:管道埋深应大于断裂带可能影响的最大深度(一般不小于3m),并采用三层PE防腐层+阴极保护联合防护。

## 3.3 特殊穿越方式选择

在油气管道穿越活动断裂带的工程实践中,针对高风险场景的穿越工艺需结合断裂带运动特征与管道受力特性进行差异化设计:

### 3.3.1 隧道穿越工艺

适用于地震活动性强、地表错动幅度大(如年均蠕滑速率 $\geq 5\text{mm/年}$ 或历史地震烈度 $\geq \text{VIII度}$ )的断裂带。隧道主体采用C40钢筋混凝土结构,壁厚不小于600mm,内衬Q345B钢管增强抗剪性能。变形缝按每30m间距设置,缝宽扩展至250–300mm,内嵌橡胶止水带与不锈钢滑动支座,可适应 $\pm 200\text{mm}$ 的三维位移量。隧道顶部覆盖层厚度不小于10m,结合微震监测系统实时追踪围岩稳定性,有效隔离断裂带错动对管道的直接冲击。

### 3.3.2 刚性套管复合防护技术

在断裂带两侧各延伸50m范围内设置 $\Phi 1422\text{mm} \times 20\text{mm}$ 的Q235B刚性套管,套管与主管间隙控制在80–100mm,填充高弹性聚氨酯泡沫与膨润土混合材料,形成“刚性约束–柔性缓冲”复合结构。套管两端设置法兰式柔性接头,允许管道产生 $\pm 3^\circ$ 转角,通过材料阻尼特性吸收土体位移能量,经有限元仿真验证可降低管道轴向应力35%–40%。

### 3.3.3 悬索式管桥跨越技术

针对地表错动幅度超过2m的极活跃断裂带,采用主跨300m的悬索管桥结构。主缆采用19股 $\Phi 52\text{mm}$ 镀锌钢绞线,安全系数提升至3.5,吊杆间距缩短至4m并配置黏滞流体阻尼器(阻尼系数 $200\text{kN} \cdot \text{s/m}$ )。管道通过弹簧支架与桥体连接,形成“悬挂支撑–振动衰减”体系,经振动台试验验证可有效吸收频率0.5–2Hz的错动能量,管道应变响应降低60%以上。

三种工艺均需结合断裂带运动矢量分析结果定向优化:走滑型断裂带侧重提升套管抗剪强度,正断型断裂带强化隧道顶部抗冲击设计,逆断型断裂带优先采用管桥跨越规避垂直错动风险,通过工艺参数与地质特征的精准匹配,构建差异化风险防控体系。

# 4 风险缓释技术体系构建

## 4.1 工程技术措施

在油气管道穿越活动断裂带的风险防控中,工程技术措施通过精准计算、结构优化与应急响应构建多层防护体系:

①应变强化设计:依托断裂带位移预测参数(如地震动峰值位移PGD、蠕滑速率),运用ANSYS等有限元分析工具构建管道–土体耦合模型,模拟断裂带错动场景下的管道应力分布。通过双线性硬化模型



模拟材料塑性行为, 确保计算所得管道等效塑性应变 (PEEQ) 低于 0.5% 的许用阈值。以某穿越走滑型断裂带工程为例, 通过调整管道走向夹角至  $70^\circ$  并增厚管壁, 使轴向应变降低 25%, 满足 ASME B31.8S 标准的应变设计要求。

②减隔震技术集成: 在管道外周敷设 0.6m 厚泡沫混凝土垫层 (密度  $250\text{kg/m}^3$ , 弹性模量  $0.15\text{MPa}$ ), 利用多孔结构吸收土体变形能量, 使应力传递效率降低 40%–45%。针对隧道穿越场景, 在管道与衬砌间设置橡胶隔震支座 (水平刚度  $60\text{kN/m}$ ), 形成“垫层缓冲 + 支座耗能”双重机制, 经振动台试验验证可使管道振动响应减少 55% 以上。

③智能应急截断系统: 在穿越段两侧各 800m 处设置电液联动截断阀, 集成压力突变识别算法 ( $\Delta P \geq 0.25\text{MPa/s}$  触发), 响应时间  $\leq 8$  秒。配套卫星通信模块确保断网环境下的远程控制, 某示范工程数据显示, 系统在模拟泄漏场景中实现 10 秒内完全关断, 较传统工艺缩短 80% 处置时间, 有效遏制灾害扩展。三项技术形成“预测 – 缓冲 – 应急”闭环, 经中俄东线工程验证, 可将穿越段管道失效概率降低 84%。

## 5.2 监测预警体系

① GNSS 地表位移监测: 通过北斗卫星定位系统实时追踪断裂带地表形变, 精度可达毫米级。②光纤光栅应变监测: 在管道外壁布设光纤传感器, 连续监测应变变化, 预警阈值设定为许用应变的 80%。③微震监测: 利用声发射技术捕捉断裂带微破裂信号, 预判活动性增强趋势。④模型构建: 基于机器学习算法 (如支持向量机 SVM), 融合多源监测数据, 建立断裂带活动与管道响应的耦合预警模型, 实现风险分级预警 (黄色、橙色、红色)。

## 4.2 多源监测体系

①全生命周期管理: 建立穿越段管道的专项档案, 记录设计参数、监测数据、维护历史等信息, 实现从规划到退役的全过程管控。②应急演练与预案: 制定针对断裂带活动的专项应急预案, 定期开展管道泄漏抢修模拟演练, 缩短应急响应时间。③标准动态更新: 结合工程实践与科研成果, 每 5 年修订一次穿越设计标准, 纳入新型材料、监测技术等内容。

## 5 工程案例分析: 西气东输二线穿越天山断裂带

### 5.1 工程概况

西气东输二线某段需穿越天山南缘活动断裂带, 该断裂带为逆冲型断裂, 历史最大错动幅度达 2.5m, 地震设防烈度为 IX 度。管道设计压力  $12\text{MPa}$ , 管径 1219mm, 材质 X80。

### 5.2 风险防控措施

①选线与结构设计: 管道与断裂带夹角为  $70^\circ$ , 采用隧道穿越方式, 隧道长度 200m, 内设波形膨胀节 (间距 50m) 和球型接头 (转角  $4^\circ$ )。②监测系统部署: 在断裂带两侧各布置 10 个 GNSS 监测点和分布式光纤应变传感器, 数据接入管道调控中心, 设定应变预警阈值为 0.4%。③应急保障: 配套建设自动化截断阀室, 实现故障发生后 10 秒内关断管道。

### 5.3 运行效果

该穿越段自 2012 年投运以来, 经历多次 4 级以上地震, GNSS 监测显示最大地表位移为 1.2m, 光纤监测显示管道最大应变 0.35%, 未超过预警阈值, 管道运行状态良好。

## 6 结论与展望

### 6.1 结论

①活动断裂带对油气管道的威胁具有长期性和突发性, 规划设计阶段的风险规避与工程技术强化是防控核心。②国内外标准在风险评估方法、设计理念上存在差异, 我国需进一步完善基于定量分析的设计体系。③“工程技术 + 监测预警 + 管理策略”的综合风险缓释技术可有效提升管道穿越段的安全性, 案例验证其可靠性。

### 6.2 展望

未来研究可聚焦以下方向: ①新型材料应用: 开发具有自感知、自修复功能的智能管材, 提升管道对断裂带变形的自适应能力。②智能化监测: 融合卫星遥感、无人机巡检与物联网技术, 构建空 – 天 – 地一体化监测网络, 实现风险实时预警。③跨学科协同: 加强地质学、材料学、工程力学的交叉研究, 建立更精准的断裂带活动预测模型与管道失效准则。

### 参考文献:

- [1] 张丽, 周巍. 集输管道分布式光纤声波泄漏监测系统的设计与试验 [J]. 油气田地面工程, 2021(08):16.
- [2] 张克亮, 甘卫军等. 2021 年 5 月 21 日 M<sub>S</sub>6.4 漾濞地震 GNSS 同震变形场及其约束反演的破裂滑动分布 [J]. 地球物理学报, 2021(07):17.
- [3] 冷建成, 钱万东, 周临风. 基于应力监测的油气管道安全预警试验研究 [J]. 石油机械, 2021(06):25.
- [4] 冯卫, 毕银强, 等. 甘肃礼县至罗家堡断裂带沿线地质灾害分布规律及断层效应研究 [J]. 自然灾害学报, 2021(02):03.
- [5] 张威. 长距离输油气管道泄漏监测与准实时检测技术及应用问题探讨 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021(06):22.