

小口径低钢级管道穿越逆冲走滑断层研究

许晨^{1*}, 王怡玮², 李明³

¹中国石油管道局工程有限公司国际事业部, 河北 廊坊

²中国石油集团工程股份有限公司, 北京

³中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊

Email: *584186162@qq.com

收稿日期: 2021年6月10日; 录用日期: 2021年9月6日; 发布日期: 2021年9月22日

摘要

逆冲走滑断层同时具有逆冲断层和走滑断层的特点, 对穿越断层管道的破坏作用较大。小口径一般壁厚较薄, 钢级较低, 对断层相对滑动位移的抵抗能力较低, 因此考虑从几何模型和管道敷设方式两个方面对小口径低钢级管道穿越逆冲断层进行设计优化。采用有限元模型, 建立管土相互作用模型, 在穿越断层管道两侧分别设置多个补偿装置, 同时降低管沟断面坡度, 采用松散的沙土对管道进行回填等措施, 可以有效降低断层位移对管道的影响, 保障油气管道的安全运营。本文还介绍了穿越断层管道的应力监测装置, 在管道运行过程中可适时检测断层作用下的管道应力水平, 可为运营提供检测数据和应急响应依据。

关键词

油气长输管道, 逆冲走滑断层, 补偿装置, 应力监测

*通信作者。

Study on Small Diameter and Low Steel Grade Pipeline Crossing Strike-Slip and Thrust Fault

Chen Xu^{1*}, Yiwei Wang², Ming Li³

¹China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd. International, Langfang Hebei

²China Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing

³China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, CPPE, Langfang Hebei

Email: *584186162@qq.com

Received: Jun. 10th, 2021; accepted: Sep. 6th, 2021; published: Sep. 22nd, 2021

Abstract

The strike-slip and thrust fault has the characteristics of both thrust fault and strike-slip fault. It can destroy the pipeline crossing the fault. The small diameter pipeline with low steel grade and thin wall thickness cannot resist the influence of the fault, so geometry crossing model and pipeline laying method should be designed and optimized to make the pipeline crossing fault safely. The finite element model can be built to simulate the interaction of both soil and pipe, and the compensation devices can be set on both sides of the crossing location to optimize the crossing method through calculation. In addition, decreasing the slope of the pipeline trench and using loose sand as back filling material can be adopted to reduce the influence of the fault. Those measures are taken to keep the pipeline safer. The stress monitoring device for the pipeline crossing fault is also introduced, and this device can be used for monitoring the stress level of pipeline under the condition of fault movement immediately. The collecting data can be used for analysing the pipeline stress to decide whether measures can be taken for emergency response.

Keywords

Long Distance Oil and Gas Transportation Pipeline, Strike-Slip and Thrust Fault, Compensation Device, Stress Monitor

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

断层是地震对埋地管道作用的重要方面，断层两侧的土体在地震过程中发生相对位移滑动从而对管道产生较强的破坏作用。根据断层的移动方向，可以将断层分为走滑断层、正断层和逆断层，走滑断层主要在水平方向发生相对位移，可以导致管道拉伸和压缩；正断层和逆断层在竖直方向发生相对位移，正断层一般使管道承受拉伸变形，而逆断层一般使管道承受压缩变形；逆冲走滑断层同时具有走滑断层和逆冲断层的特点。断层分布一般较长，油气长输管道也具有点多线长的特点，特殊情况下将不可避免

穿越断层，而逆冲走滑断层对管道的破坏作用也较大。大口径高钢级管道穿越活动断层时抵抗相对位移载荷的能力较强，而小口径管道一般钢级较低，同时壁厚也较薄，穿越断层时对位移载荷抵抗能力较差，因此小口径低钢级管道穿越逆冲走滑断层难度较大，有必要通过工程研究采取相应的措施降低逆冲走滑断层对小口径低钢级管道的影响，保障油气管道安全运营。

通过对管道穿越逆冲走滑断层的模型设计，利用多个应力补偿装置并改善管沟的敷设条件，可以提高管道的抗剪切和压缩能力，缓解因断层发生位移对管道产生的破坏作用；同时，在穿越断层附近管道设置应力监测装置[1]，对断层作用下的管道进行实时监测，为管道运行安全监控提供一手资料，可根据管道应力状态适时采取相应的措施。总结小口径低钢级管道穿越逆冲走滑断层的设计方法，对同类工程具有一定的借鉴意义。

2. 建立模型

管道与滑坡体相互作用需要确定管材的本构模型，土壤的本构模型和两者之间相互作用的方式。目前有限元分析中管单元主要选择的类型有管单元、弯管单元和壳单元三类[2] [3]，其中管单元是以梁单元为基础是一类轴向拉、压、弯、扭的空间单元，每个节点都有 6 个自由度，包含了用于处理管的对称性和标准管几何尺寸的专用特性，弯管单元与管单元具有类似的特点，当结构的总体厚度相对于典型长度很小时可使用壳单元。土壤的本构一般选用弹簧单元，弹簧单元是一类专门模拟弹簧行为的单元，当用于一般弹簧时比较简单，此类型单元可以用于模拟铰链和扭簧等行为，没有面载荷和体载荷。

2.1. 管材的本构模型

由于滑坡作用下管道受力属于大位移非线性有限元分析问题，一般采用管单元就可以满足该类问题计算的需求，同时采用管单元还具有计算效率高的特点，因为这里油气管道选用管 PIPE20 单元进行模拟，PIPE20 不但是具有拉压、弯曲的单元，还具有扭转性能的单轴单元，每个节点都有 6 个自由度，该单元还有塑形、蠕变和膨胀功能。有限元模型如图 1 所示。

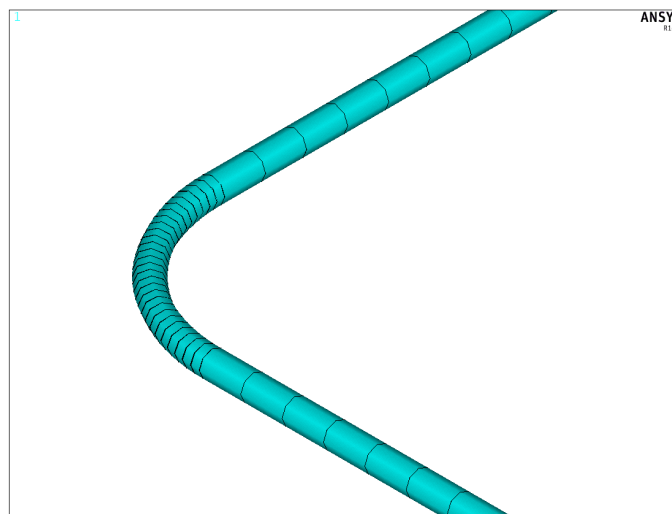


Figure 1. Finite model of pipe element
图 1. 管单元有限元模型

计算管道应力时，考虑材料的非线性，根据《油气输送管道线路工程抗震技术规范》(GB/T 50470-2017)，管材应力应变曲线采用 Ramberg-Osgood 方程拟合[4]，如下式所示。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \frac{\sigma}{E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{n_1-1} \quad (1)$$

式中:

ε ——应变; σ ——应力, MPa; E ——管材弹性模量, 取 2.1×10^5 MPa; σ_0 ——管材的屈服强度; α ——屈服偏移量, 取 1.699; n_1 ——强化指数, 取 14.14。

2.2. 土弹簧模型

埋地管道的土壤约束一般都是简化为离散的非线性弹簧[4] [5] [6], 从简化后的模型看, 管道的约束被简化为三个方向的非线性弹簧: (a) 管轴方向; (b) 水平横向; (c) 竖直方向。三个方向的土的非线性如下图所示, 如图 2 所示。

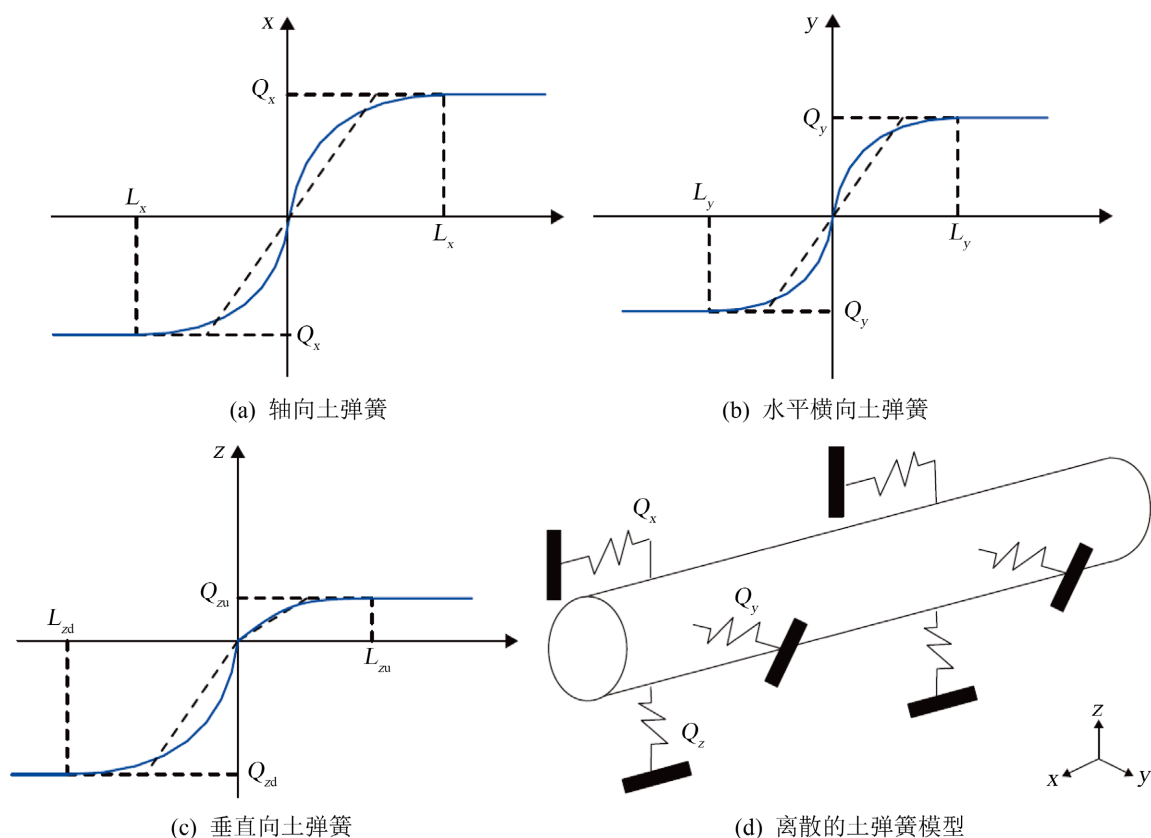


Figure 2. Soil spring in three directions and pipe-soil interaction model
图 2. 三轴土弹簧即管土相互作用模型

管周土体采用 ANSYS 软件中的 COMBIN 39 单元模拟, COMBIN 39 是一种非线性的弹簧单元, 具有广义力 - 变形(即 F-D)曲线的单向单元。在一维、二维和三维模型中, 该单元均具有轴向变形与扭转功能。轴向弹簧在每个节点的自由度有 3 个, 具有单轴拉压的特点, 无弯曲或扭转能力; 扭转弹簧在每个节点也是只有 3 个自由度, 只有纯扭转行为, 无弯曲和轴向拉压能力。

2.3. 管道应力分析准则

综合对比国内外输气管道标准规范, 埋地管道应力校核主要包括轴向应力和等效应力的校核。弯管

的轴向应力和等效应力参照相同的直管段标准进行计算和校核。

当管道发生位移时，轴向应力也会发生变化，需要校核轴向应力，也需要对等效应力进行校核。

1) 轴向应力校核。《Gas Transmission and Distribution Piping Systems》(ASME B31.8)规定，埋地管道直管段轴向应力不超过 0.9 倍最小屈服强度[5]，如下列公式所示：

$$|\sigma_L| \leq 0.9\sigma_s \quad (2)$$

$$\sigma_L = \sigma_P + \sigma_T + \sigma_X + \sigma_B \quad (3)$$

$$\sigma_P = \mu\sigma_h \quad (4)$$

$$\sigma_T = E\alpha(t_1 - t_2) \quad (5)$$

$$\sigma_X = R/A \quad (6)$$

$$\sigma_B = M/W \quad (7)$$

$$\sigma_h = \frac{Pd}{2t} \quad (8)$$

式中：

σ_L 为轴向应力，MPa； σ_P 为内压引起的轴向应力，MPa； σ_T 为温差引起的轴向应力，MPa； σ_X 为轴向载荷引起的轴向应力，MPa； σ_B 为管道弯曲引起的轴向应力，MPa； μ 为泊松比； E 为钢材的弹性模量，MPa； α 为钢材的线膨胀系数， $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ； t_1 为管道下沟回填时的温度， $^{\circ}\text{C}$ ； t_2 为管道的工作温度， $^{\circ}\text{C}$ ； R 为轴向载荷，MN； A 为管道横截面积， m^2 ； M 为管道截面弯矩，MN·m； W 为弯曲截面系数， m^3 。

2) 当量应力校核

发生沉降位移管道的当量应力按照《输气管道工程设计规范》中的要求进行校核计算[6]，如下式所示：

$$\sigma_e = \sigma'_h - \sigma_L < 0.9\sigma_s \quad (9)$$

式中：

σ_e 为当量应力，MPa； σ'_h 为内压产生的管道环向应力，MPa。

2.4. 几何模型

本工程管道穿越逆冲走滑断层附近，地广人稀且地势较为平坦，因为考虑在断裂带中心两侧分别设置多处弯管补偿；根据逆冲走滑断层水平位移和竖向位移的大小进行优化计算，选择对管道影响最小的穿越角度；活动断裂带两侧管沟开挖时降低两侧坡度，并采用松散沙土回填，管顶埋深在合理范围内越浅越好，管道走向布置几何模型如图 3 所示。

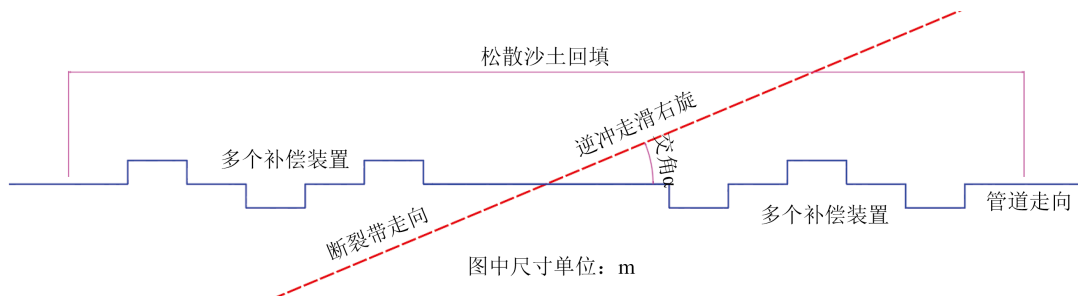


Figure 3. Pipeline plan plot at fault crossing location

图 3. 穿越断层管道平面走向布置

3. 管道穿越某逆冲走滑断层

3.1. 土壤参数

对某小口径管道穿越逆冲走滑断层进行计算, 分析管道在逆冲断层作用下的应力状态, 同时分析采用上述设置多个补偿装置穿越逆冲断层的方法是否满足穿越要求。穿越断层管道的基本参数如表 1 所示。

Table 1. Basic information of pipeline at crossing fault location

表 1. 穿越管道基本信息参数

序号	名称	符号	单位	数值
1	材料等级			L415Q
2	管径	D	mm	273.1
3	直管段壁厚	t_1	mm	14.3
4	热煨壁厚	t_2	mm	15.9
5	设计压力	P	MPa	9.0
6	管材密度	ρ	t/m ³	7.85
7	泊松比	μ	/	0.3
8	管材热膨胀系数	α	m/m/°C	1.2×10^{-5}
9	管材最小屈服强度	σ_s	MPa	415
10	管材最小强度极限	σ_b	MPa	520
11	杨氏模量	E	MPa	2.1×10^5
12	热煨弯管曲率半径	R_h	m	1.639
13	冷弯弯管曲率半径	R_c	m	10.924
14	运行与安装温差	/	°C	10

3.2. 土壤参数

管道穿越该逆冲断层附近, 管道断裂带影响范围区域外按照密实粘土回填计算, 断裂带两侧按照松散沙土回填计算, 土弹簧的计算可以参考 GB/T 50470《油气输送管道线路工程抗震技术规范》中的计算公式进行计算, 本案例中土壤参数和土弹簧计算参数分别如表 2 和表 3 所示。

Table 2. The loose sand parameters

表 2. 松散沙土土壤参数

序号	土壤物理性质	符号	单位	数值
1	土壤类型	/	/	松散沙土
2	土壤容重	γ	kN/m ³	18
3	摩擦角	ϕ	°	30
4	土的粘聚力	c	kPa	0
5	管道与土壤的作用系数	f	/	0.45

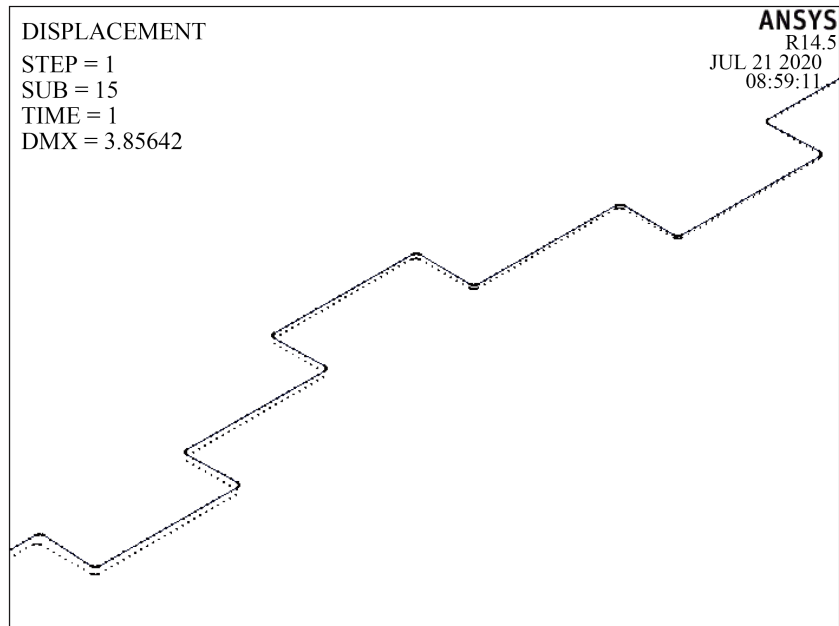
Table 3. The soil spring calculation parameters in three directions

表 3. 三轴土弹簧计算参数

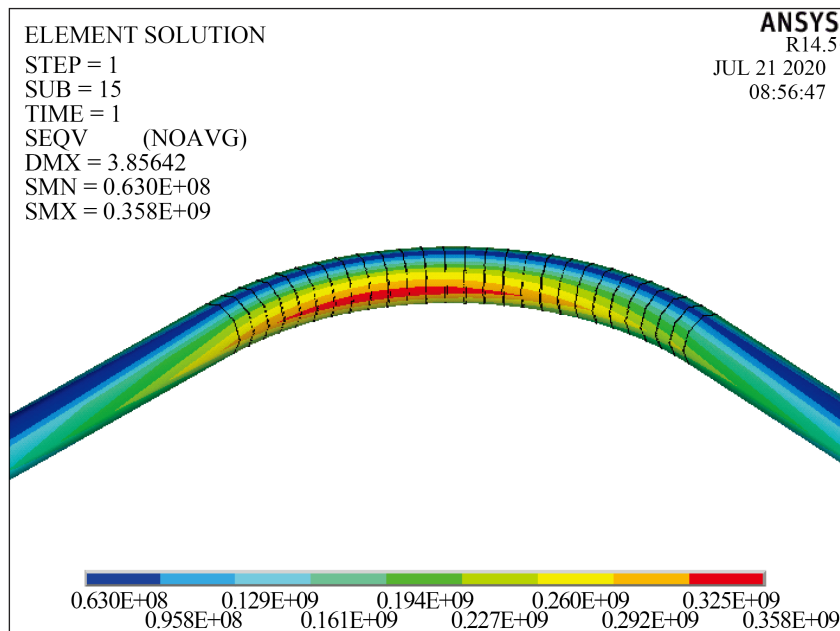
方向	极限抗力(kN/m)	屈服位移(m)
轴向弹簧	3.717	0.005
侧向弹簧	58.613	0.027
垂直向上弹簧	21.924	0.027
垂直向下弹簧	133.099	0.027

3.3. 断裂带校核计算

断层两侧设置的弯管补偿可以产生较大的位移；距离断层最近的弯管补偿产生的位移最大，距离断层越远弯管补偿产生的位移越小；多个弯管补偿产生的位移叠加可以有效缓解断层处管道所承受的应力。管道最大当量应力处于距离断层最近的热煨弯管处，该弯管补偿产生的位移和热煨弯管的应力分布情况如图4所示。弯管补偿产生的位移和最大当量应力如图4所示。



(a) 弯管补偿处位移变化情况



(b) 逆冲断层作用下弯管应力分布云图

Figure 4. The displacement change and stress nephogram of hot bend
图4. 弯管位移变化及应力分布云图

在本案例所建立的管道穿越逆冲断层敷设方案条件下,分别按照设计压力 9.0 MPa、温差为 10℃ 和内压为 0 两种工况进行校核,所得计算结果如表 4 和表 5 所示。

Table 4. The pipeline longitudinal stress check result

表 4. 管道轴向应力校核结果

工况描述	轴向应力(MPa)			校核结果
	压缩应力 计算值	拉伸应力 计算值	轴向应力 允许值	
设计压力 9.0 MPa、温差 10℃	-320	364	373.5	满足要求
内压为 0 MPa	-343	313	373.5	满足要求

Table 5. The pipeline equivalent stress check result

表 5. 管道当量应力校核结果

工况描述	当量应力(MPa)		校核结果
	当量应力 计算值	当量应力 允许值	
设计压力 9.0 MPa、温差 10℃	358	373.5	满足要求
内压为 0 MPa	343	373.5	满足要求

根据计算结果可知,采用多个管道应力补偿装置穿越逆冲断层的敷设方式,其应力校核能够满足现行规范的要求。

3.4. 小口径低钢级管道穿越逆冲走滑断层敷设措施

1) 小口径低钢级管道穿越逆冲断层,可以采用断裂带两侧分别设置多个补充装置的方式通过,多个补充装置可以有效的缓解断裂位移对管道的作用。实际工程中,还需要根据地震评价报告,取得评价报告相关几何、运行参数后再进行校核计算,并根据计算结果采取必要的工程抗震措施。

2) 小口径低钢级管道穿越逆冲断层,还可以采用其它防护措施保障管道运营安全,例如通过计算合理选取管道与断裂带交叉角度;合理选取管道下沟回填时温度,降低管道运行时温度与下沟回填时温度差,从而降低热应力的影响;穿越断层管道根据管长实际生产能力尽量选取壁厚较大、钢级较高的管道;穿越断裂带的管道焊缝进行 100% 射线照相和 100% 的超声波探伤检验等。

3) 小口径低钢级管道穿越逆冲断层,对于管沟断面坡度尽量小,减少管道在断层位移载荷作用下的侧向约束;断层两侧回填材料可采用松散沙土回填,在合理范围内尽量减小管顶埋深;管沟顶铺设一层植生袋等柔性材料护面,防止管沟内回填土流失;管道穿过截水墙或水工保护构筑物基础时,管道周边预留不小于 25 mm 的空隙,并采用柔性减震材料填塞。

4) 对穿越逆冲断层段的管道进行应变监测。考虑断层活动可能会对管线造成的影响,为实时采集、监控断层活动情况下管道所处应力应变状态,为管道运行决策提供数据支撑,本工程对通过该断裂带段的管道进行应变监测。管道本体变形采用振弦式应变传感器技术测量,由变形测量系统、供电系统和通信系统组成,在每个管道上分多个截面观测,截面间距 50 m 左右,每个截面配置 3 个应变计,当管体附加应力超过允许附加应力的 30%、60%、90% 产生不同级别的报警信息,对应相应的预警级别采取相应的应对措施,以消减灾情的发展和防止灾害的发生。

4. 结论

小口径低钢级管道穿越逆冲走滑断层,虽然管道本身口径小强度低,在逆冲断层位移载荷的作用容

易发生变形或断裂，但是通过在断层两侧分别设置多个应力补充装置的方式，可以有效地缓解断裂位移对管道的作用。通过有限元分析方法可以模拟计算管道在位移载荷作用下的强度，通过调整穿越角度、穿越埋深等参数，可以降低管道受位移载荷的影响，为管道穿越逆冲走滑断层时强度是否满足校核要求提供依据。实际工程中，通过断层附近管道设置传感器，可以适时检测管道在位移载荷影响下的应力变化情况，从而采取对应的应急管理措施。

参考文献

- [1] 么惠全, 冯伟, 张照旭, 等. “西气东输”一线管道地质灾害风险监测预警体系[J]. 天然气工业, 2012, 32(1): 81-84.
- [2] 刘慧. 滑坡作用下埋地管线反应分析[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [3] 王联伟, 张雷, 董绍华, 等. 基于土弹簧模型的管道滑坡力学影响因素分析[J]. 油气储运, 2014, 33(4): 380-384+390.
- [4] 中国石油天然气集团公司. GB/T 50470-2017 油气输送管道线路工程抗震技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017: 54-56.
- [5] The American Society of Mechanical Engineers. Gas Transmission and Distribution Piping Systems: ASMEB31.8-2018. An International Piping Code, New York.
- [6] 中国石油天然气集团公司. GB50251-2015 输气管道工程设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015: 62.