

DOI:10. 3876/j. issn. 1000 - 1980. 2026. 04. 005

在役海底管道挖沟下沉过程中载荷对管道应力的影响

梁 凯¹,王亚琼¹,徐万海²,赵云鹤¹,翟立宾¹,李屹楠¹

(1. 中国石油天然气管道工程有限公司; 2. 天津大学建筑工程学院)

摘要: 针对现阶段尚缺乏对在役海底管道挖沟下沉过程载荷作用机理及管道应力规律的系统性分析和定量研究的问题,采用 OrcaFlex 软件对在役海底管道二次挖沟下沉过程进行数值模拟,定量分析了不同挖沟深度下关键载荷变化对管道应力的影响。结果表明:温差、管道压差、波流载荷与管道应力呈现出线性或非线性的正相关关系,管道残余张力对管道应力影响很小,土体阻力的存在可有效降低波流载荷的应力效应;对于不同挖沟深度,同一温差下管道等效应力变化率最大可达 130 MPa/m,同一压差下应力变化率最大接近 175 MPa/m。

关键词: 在役海底管道;管道载荷;管道应力;二次挖沟; OrcaFlex

The influence of loads on pipeline stress during trenching and lowering of in-service subsea pipelines

Liang Kai¹, Wang Yaqiong¹, Xu Wanhai², Zhao Yunhe¹, Zhai Libin¹, Li Qinan¹

(1. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University)

Abstract: In view of the current lack of systematic analysis and quantitative research on the load mechanism and pipeline stress evolution during the trenching and lowering of in-service subsea pipelines, OrcaFlex software was used to numerically simulate the secondary trenching and lowering of in-service subsea pipelines, and the influence of key load variations on pipeline stress under different trenching depths was quantitatively analyzed. The results indicate that temperature difference, pipeline pressure difference, and wave-current load show a linear or nonlinear positive correlation with pipeline stress; the pipeline residual tension has little effect on the pipeline stress; the existence of soil resistance can effectively reduce the stress effect of wave-current load. Under different trenching depths, the maximum variation rate of pipeline equivalent stress under the same temperature difference can reach 130 MPa/m, and the maximum stress variation rate under the same pressure difference approaches 175 MPa/m.

Key words: in-service subsea pipeline; pipeline load; pipeline stress; secondary trenching; OrcaFlex

海底管道在近岸段铺设后通常进行埋设保护。然而,受波浪、海流常年冲刷作用,导致海床发生演变,管道会出现裸露或悬跨(非掩埋)问题^[1]。针对此类问题,可采用覆盖砂袋或混凝土连锁排等措施进行防护,但这些方法存在成本高、二次修复困难等缺点^[2]。此外,也可采用二次挖沟下沉法治理,即在裸露管道下方的海床开挖沟槽,使管道下沉至预定深度后回填掩埋。然而,在役管道进行挖沟下沉时,管道将经历复杂的应力状态,若控制不当可能导致管道变形甚至破裂,引发严重事故,造成环境污染和重大经济损失。因此,研究在役管道挖沟下沉过程中的应力问题具有重要的现实意义。

目前,针对挖沟过程中的管道研究主要集中在应力分布、管-土相互作用及应力缓解等方面,而挖沟后管道的应力分布对其完整性至关重要。熊海荣^[3]采用理论公式计算了不同挖沟深度下的管道应力。夏梦莹等^[4]基于弹性梁理论,建立了挖沟过程中管道挠曲线的微分方程,并通过边界条件与协调方程,提出了考虑几何非线性的管道应力与变形解析计算方法。倪玲英等^[5]利用 AutoPIPE 模拟了悬空管道治理过程中的应力,发现相较于一次挖沟成型,多次挖沟成型可显著降低应力峰值;在悬空管道挖沟埋设过程中,随着挖沟深度和管道温差的增加,管道应力和屈服位移均呈增大趋势。靳嵩等^[6]分析评估了在役管道下沉施工期与在位期的应力状态,以及下沉施工期的抗上浮稳定性,并提出了相应的下沉施工措施。Thusyanthan 等^[7]研究了一条 16 英寸(1 英寸=2.54 cm)在役管道下沉 6 m 的实施方案及评估方法,就管道下沉项目应如何规划、

基金项目: 国家自然科学基金项目(52525110, U25A6020)

作者简介: 梁凯(1989—),男,工程师,硕士,主要从事海洋石油天然气管道研究。E-mail:lk1895@163.com

通信作者: 徐万海(1981—),男,教授,博士,主要从事海工细长结构研究。E-mail:xuwanhai@tju.edu.cn

评估与执行提出了建议。刘可安等^[8]研究了犁式挖沟法埋管中各项参数对悬跨段海底管道屈曲压溃压力的影响,并建立了相应的临界曲线。刘绪都等^[9]开展了海底悬跨管道二次挖沟物理模拟试验,揭示了二次挖沟过程中管-土相互作用的变化特性。赵刚等^[10]研究了海底管道后挖沟强度分析方法与校核标准,并分析了计算结果的变化趋势与相关规律。刘冠良等^[11]利用 SAGE 软件分析了后挖沟过程中海底管道的有效轴力和最大弯矩,依据 DNV-OS-F101 *Submarine Pipeline Systems* 的荷载控制极限状态进行校核。

在管-土相互作用影响研究方面,Phillips 等^[12]针对承受侧向土体位移的管沟敷设管道开展了研究,旨在量化沟槽几何形状、回填材料及其强度对黏性土中管道力-位移响应的缓解效果。Kianian 等^[13]则定性研究了浅埋与深埋条件下,沟槽开挖与回填对管道横向土体阻力的影响,并利用粒子图像测速(PIV)技术分析了沟槽/回填管道周围的土体内部变形与破坏机制。在应力缓解方面,Yang 等^[14]研究了管-土相互作用机理,并提出了一种新型回填材料以保护管道免受破坏。

综上所述,国内外学者围绕挖沟过程中的管道应力分布、管-土相互作用及应力缓解开展了广泛的研究。在管道应力方面,学者们运用理论分析和有限元方法,重点关注悬跨管道在挖沟治理过程中的应力状态及其影响因素。然而,现有研究仍存在以下局限:①载荷分析系统性不足,研究多集中于单一或少数载荷的作用,缺乏对二次挖沟过程中复杂载荷组合及其作用规律的系统性分析与定量研究;②研究对象覆盖不全,对于工程实践中更为常见的裸置非悬跨海底管道(即直接铺设在海床上但未形成悬跨的裸露管道)的挖沟治理,其特有的力学响应特征尚缺乏针对性研究。

针对上述不足,本文基于 OrcaFlex 软件,对裸置非悬跨海底管道二次挖沟下沉过程进行数值模拟,系统化分析影响管道应力的关键载荷及其作用规律,旨在为后续工程实践提供理论参考依据。

1 理论模型

在役管道运营工况下,作用在裸置非悬跨海底管道上的载荷主要包括重力、浮力、土壤阻力、内压(介质)、外压(海水)、热膨胀应力、波浪与海流载荷、挖沟坡肩边界载荷以及管道铺设后的残余张力。

海床的模拟方法通常采用刚性基底、Winkler 地基模型或 p - y 曲线等^[15]。研究表明,土壤刚度越大,后挖沟引发的管道应力越高。基于刚性海床假设,本文仅考虑管道与海床间的摩擦力(F)作用,可表示为:

$$F = \begin{cases} -k_s A s & -s_{br} < s < s_{br} \\ \mu G & s \leq -s_{br} \text{ 或 } s \geq s_{br} \end{cases} \tag{1}$$

式中: k_s 为海床土壤剪切刚度; A 为管道与海床接触面积; s 为管道位移; s_{br} 为管道滑动位移; μ 为土体摩擦系数; G 为管道重力。

根据 ASME B31.4 *Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries*,海底管道内压或外压产生的管道环向应力可表示为:

$$S_H = PD/2t \tag{2}$$

式中: S_H 为管道环向应力; P 为管道内压或外压; D 为管道外径; t 为管道壁厚。

海底管道铺设完成后,如果温度发生变化将会产生热膨胀应力(S_E),其表达式为:

$$S_E = E\alpha(T_1 - T_2) \tag{3}$$

式中: E 为杨氏模量,钢材取 207 GPa; α 为热膨胀系数,钢质管道一般取 $11.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$; T_1 为管道安装温度; T_2 为管道运营温度。

单位长度上水平波浪力,一般可按莫里森方程计算。单位长度海底管道上的上升力 F_L 计算公式为:

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho_{sw} D u^2 \tag{4}$$

式中: C_L 为升力系数,按照 DNVGL-RP-C205 *Environmental Conditions and Environmental Loads* 取值 0.7; ρ_{sw} 为海水密度; u 为垂直于管轴线的水质点相对于管道的速度分量。

挖沟条件下海底管道在坡肩处的最大弯矩 M_B 为:

$$M_B = -\frac{1}{4} q l_1^2 = -0.9604 \sqrt{\Delta E I} q \tag{5}$$

式中: q 为管道在海水中的单位长度重力; l_1 为管道在海床上的悬空长度; Δ 为挖沟深度; I 为管道截面惯性矩。

理论方法虽可用于计算挖沟下沉时的海底管道载荷,但其得出的管道应力仅基于线性叠加原理,且无法考虑波浪与海流等动态载荷效应。因此,本文采用数值模拟方法,计及海底管道在耦合载荷作用下的应力状态,研究关键载荷对管道应力的影响规律。

2 有限元模型

采用海洋动力学软件 OrcaFlex 进行数值模拟,该软件已广泛应用于海上风电、石油和天然气以及深水海洋研究等领域,能够高效地模拟海洋环境下的复杂动态系统,包括但不限于拖曳、安装、维护以及海洋结构物之间相互作用的模拟。

在 OrcaFlex 软件中建立数值模型,模型管道总长 300 m,该长度用于模拟实际海底管道已足够^[16]。设置环境参数:海平面高程 0 m,海水运动黏度及密度采用软件默认值;海床设置为平坦海床,海床高程-10 m,选用弹性土体模型,基于刚性海床假定土壤刚度为无限大;作用在管道上的波流载荷作用均采用莫里森方程计算,将作用在管道上的波流载荷等效转换为海流载荷,对应的海流流速称为等效水质点速度。

采用 Line 单元模拟管道,单元长度 0.2 m,每个单元由无质量的中间段和两端的节点组成,如图 1 所示。中间单元段仅用于模拟管道的轴向和扭转特性,管道的扭转特性由扭转弹簧和阻尼器控制,轴向特性由轴向弹簧和阻尼器控制,中间段末端处的弯曲弹簧和阻尼器用于控制管道的弯曲特性。其他属性都集中在节点上,每个节点承受其两侧各一半分段的重力、浮力和阻力等,力和力矩施加在节点处。管道参数参照东海海域某海底管道项目,具体为:管道外径 1 016 mm,管道壁厚 25.4 mm,杨氏模量 207 GPa,泊松比 0.3,混凝土配重层厚度 120 mm,混凝土配重层密度 3 040 kg/m³,防腐层厚度 3.7 mm,防腐层密度 940 kg/m³,海水密度 1 025 kg/m³。

挖沟段设置在管道中部,管道两端通过 End Connection-Fixed 命令设置为固定约束。作用在管道上的载荷包括温差产生的胀缩力、管道内外压力、波流环境载荷、管道残余张力以及土壤阻力。软件根据设置的环境参数对波流载荷和土壤阻力进行计算,胀缩力和管道残余张力通过施加管道轴向力的方式实现,管道内压通过软件 Contents 模块设置。OrcaFlex 管道数值模型如图 2 所示。

软件计算分析时先通过静态分析确定管道初始构型,然后通过时域动态分析确定管道在各载荷作用下的结构响应。动力分析设置 2 个分析步,初始分析步步长 8 s,用于实现环境载荷从零到最大值的平稳加载,动态分析步步长 16 s。

为探究挖沟时关键载荷参数变化对管道应力的影响,基于以下基本假定进行管道应力分析:①管道与沟槽底部始终保持接触,这与裸置管道后挖沟状态是相符的;②计算时不考虑管道的许用应力,只探究应力变化规律;③海床平坦且为完全刚性地基。

为验证数值模型的准确性,建立未施加载荷的管沟及管道模型,设置挖沟深度为 0.8 m,只考虑坡肩弯矩,按照式(5)计算,管道截面惯性矩为 0.009 7 m⁴,最大弯矩为 3 110 kN·m;数值模拟结果如图 3 所示,最大弯矩为 3 078 kN·m,与理论计算结果误差为 1%,表明数值模型模拟结果是准确的。

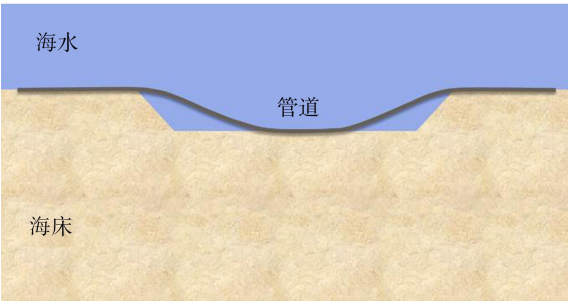


图 2 OrcaFlex 管道数值模型
Fig. 2 OrcaFlex pipeline numerical model

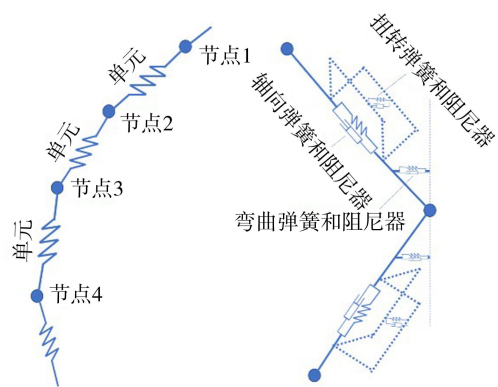


图 1 Line 模型
Fig. 1 Line model

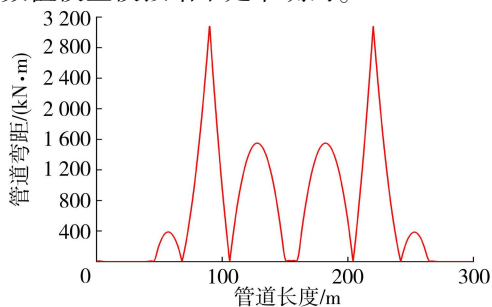


图 3 管道弯矩数值模拟结果
Fig. 3 Numerical simulation results of pipeline bending moment

3 结果与分析

在役海底管道运营阶段,温差、管道压差、波流载荷、管道残余张力和土体阻力等因素,对挖沟过程中的管道应力具有不同程度的影响。本文以输送常规介质的近岸海底油气管道为研究对象,设置关键载荷参数的不同取值范围,分析其在挖沟下沉过程中对管道应力的影响规律。

3.1 温差

管道运营时,由于管内介质温度异于海水温度,从而产生胀缩应力,影响管道安全。对于输送常规介质的长输海底油气管道,介质温度通常不超过 100℃。为研究温差变化对管道应力的影响,设定 10 组温差(范围 0~90℃,步长 10℃)进行模拟分析。其他参数设置如下:等效水质点速度 2 m/s(垂直于管道轴向),管道压差(内压大于外压为正)10 MPa,管道残余张力 1 000 kN,土体摩擦系数 0.3。

不同挖沟深度下的管道最大等效应力结果见图 4,可见不同挖沟深度下,管道应力随温差变化的趋势基本一致;同一挖沟深度下,管道最大等效应力随温差增大而增大。随着温差的增大,应力先呈现出非线性变化,在 35℃ 左右时热膨胀产生的管道轴向压应力与其他载荷产生的轴向拉应力在数值上趋于相等,随着压差进一步增大,热膨胀产生的管道轴向压应力起主导作用,由式(3)可知,热膨胀应力与温差线性相关,因此 35℃ 之后应力随温差变化趋于近似线性变化。与等效水质点速度为 0 m/s 的结果曲线对比可知,波流载荷的存在增强了温差作用的非线性变化,导致温差越低,温差变化对管道应力的影响越小。在近似线性段,应力变化率(应力增量与温差增量之比)达到最大,最大值约为 2 MPa/℃。同一温差下,随着挖沟深度逐渐增加,应力变化率(应力增量与挖沟深度增量之比)呈减小趋势,最大变化率约为 130 MPa/m,最小变化率约为 80 MPa/m。

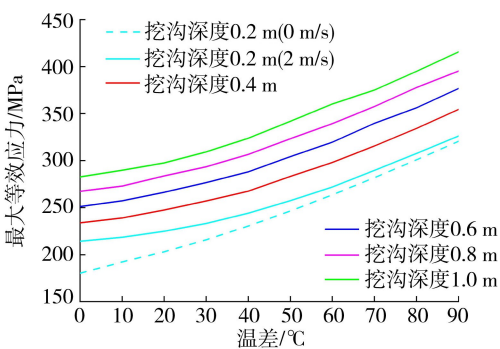


图 4 温差对管道应力的影响
Fig. 4 Effect of temperature difference on pipeline stress

3.2 管道压差

因海底管道停输作业经济损失巨大,对在役管道进行后挖沟作业的主要特点是管道带压,因此探究带压作业的可行性、评估挖沟作业时管道内外压对管道应力的影响至关重要。

近岸长输海底油气管道内压一般小于 14 MPa,设定 2、4、6、8、10、12、14 MPa 共 7 组管道压差(内压大于外压为正)进行模拟分析。其他参数设置如下:等效水质点速度 2 m/s(垂直于管道轴向),温差 20℃,管道残余张力 1 000 kN,土体摩擦系数 0.3。

不同挖沟深度下管道最大等效应力结果见图 5,可见同一挖沟深度下,管道最大等效应力与压差呈正相关关系,随着压差增大,最大等效应力先呈现非线性变化,而后逐渐趋于线性变化。在非线性阶段,挖沟深度越大,坡肩弯矩越大,压差在有效应力中的占比越小,压差变化对应力影响越小,因此挖沟深度越大,非线性段曲线越平缓。随着压差增大,压差产生的应力起主导作用,由式(2)可知,压差产生的管道应力与压差为线性关系,因此有效应力随压差变化趋近于线性变化。与等效水质点速度为 0 m/s 的结果曲线对比可知,波流载荷不会改变压差对应力的影响趋势,压差越大,管道应力变化率越大,在近似线性段,应力变化率达到最大。挖沟深度越小,应力变化率越大;挖沟深度 0.2 m 时,最大应力变化率接近 14.3 MPa/MPa;挖沟深度 1 m 时,最大应力变化率为 11.7 MPa/MPa。同一管道压差下,随着挖沟深度增加,应力变化率(应力增量与挖沟深度增量的比值)呈减小趋势;压差越小,应力变化率越大,在压差为 2 MPa 时出现最大应力变化率(约 175 MPa/m),在压差为 14 MPa 时出现最小应力变化率(约 68 MPa/m)。

3.3 波流载荷

为确保研究成果尽量涵盖近岸段海底管道所能遭遇的波流条件,根据我国近海岸常见海洋环境条件,考虑最大有效波高 5 m,平均波周期 10.165 s,最大流速 2.3 m/s,按照海床位于 10 m 水深处,计算转换后的海床上管道中心处的等效水质点速度约为 4.5 m/s。因此,设定 10 组等效水质点速度(范围 0~4.5 m/s,步长 0.5 m/s,垂直于管道轴向)进行模拟分析。其他参数设置如下:温差 20℃,管道压差 10 MPa,管道残余张力

1 000 kN,土体摩擦系数 0.3。

不同挖沟深度下管道最大等效应力结果见图 6,可见不同挖沟深度下管道等效应力随等效水质点速度的变化趋势基本一致。同一挖沟深度下,当等效水质点速度小于某一特定值时,土体摩擦力和波流载荷平衡,等效水质点速度增加对管道应力几乎没有影响。当等效水质点速度超过该特定值时,管道在波流载荷作用下发生横向位移,产生横向弯矩,致使管道应力增大,呈线性变化趋势,应力变化率(应力增量与等效水质点速度增量的比值)趋于 $86\text{ MPa}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 。

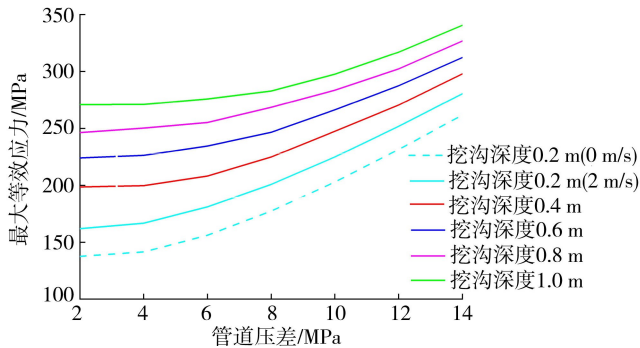


图 5 管道压差对管道应力的影响

Fig. 5 Effect of pipeline pressure difference on pipeline stress

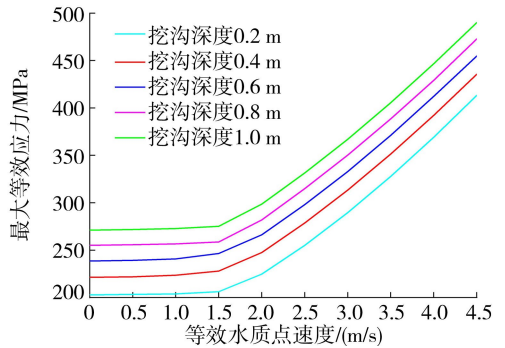


图 6 等效水质点速度对管道应力的影响

Fig. 6 Effect of equivalent water particle velocity on pipeline stress

3.4 管道残余张力

管道在安装就位后有残余张力存在,运营中的管道进行后挖沟下沉时应考虑管道上的残余张力,管道残余张力主要来源为管道铺设张力,根据工程经验,采用铺管船法施工的近岸段海底管道实际施工张紧力通常小于 1 000 kN。为研究管道残余张力变化对管道应力的影响,取张力范围 500~1 000 kN,步长 100 kN,共 6 组管道残余张力进行模拟分析。其他参数设置如下:温差 20℃,管道压差 10 MPa,等效水质点速度 2 m/s(垂直于管道轴向),土体摩擦系数 0.3。

不同挖沟深度下管道最大等效应力结果见图 7,可见管道残余张力增加时,管道总应力变化非常小,这是由于管道残余张力在管道总应力中占比非常小,根据中国船级社海底管道系统规范要求,采用铺管船法施工时,管道的应变一般不能超过 0.3%。

3.5 土体阻力

海床土体不仅能为海底管道提供支撑力,当管道受波流载荷作用时,土体还能提供侧向阻力,保证管道的在位稳定性,进而影响管道的应力状态。后挖沟作业时,由于坡肩的存在,管道的部分区域出现悬空状态,土壤阻力发生变化,因此需要研究土体阻力变化对管道应力的影响。

根据库仑理论,以不同的摩擦系数表征土体阻力,设定 10 组土体摩擦系数(0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0)进行模拟分析。其他参数如下:等效水质点速度 2 m/s(垂直于管道轴向),温差 20℃,管道压差 10 MPa,管道残余张力 1 000 kN。

不同挖沟深度下管道最大等效应力结果见图 8,可见不同挖沟深度下管道应力随土体摩擦系数的变化

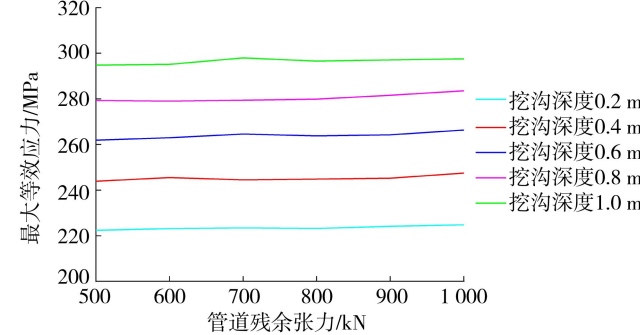


图 7 管道残余张力对管道应力的影响

Fig. 7 Effect of pipeline residual tension on pipeline stress

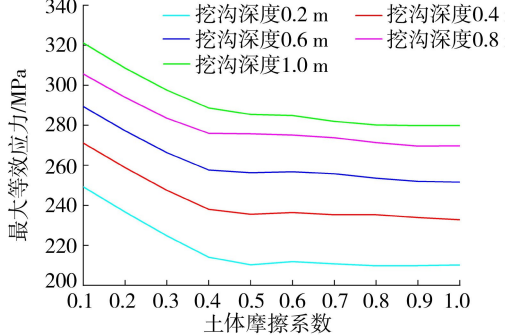


图 8 土体摩擦系数对管道应力的影响

Fig. 8 Effect of soil friction coefficient on pipeline stress

趋势基本一致。当土体摩擦系数小于 0.4 时,管道应力随摩擦系数的增大而降低,几乎呈线性变化;当摩擦系数大于 0.4 后,管道应力几乎保持不变。分析原因可知,当摩擦系数为 0.4 时,单位长度管道的摩擦力和波流载荷拖曳力几乎相等,管道受力达到平衡,摩擦系数继续增大对管道应力不再产生影响。在线性变化段,应力变化率(应力减少量与摩擦系数增量绝对值的比值)最大约为 120 MPa,即摩擦系数每增加 0.1,管道最大等效应力会降低 12 MPa。同一摩擦系数时,随着挖沟深度增加应力变化率(应力增量与挖沟深度增量的比值)呈减小趋势,挖沟深度 0.2~0.4 m 时出现最大应力变化率(约为 110 MPa),0.8~1.0 m 时应力变化率较小,最小约为 40 MPa。

4 结 论

- a. 同一温差下,随着挖沟深度增加管道等效应力变化率最大可达约 130 MPa/m;同一挖沟深度时最大应力变化率约为 2 MPa/℃。
- b. 同一管道压差下,随着挖沟深度增加管道等效应力变化率最大约 175 MPa/m;挖沟深度 0.2 m 时,最大应力变化率接近 14.3 MPa/MPa。
- c. 鉴于海底管道铺设时通常将应变限制在 0.3% 以内,对于在役管道的后挖沟治理,管道残余张力对管道应力的影响很小,可忽略。
- d. 波流载荷和土体阻力相互影响,当两者达到平衡时,管道应力几乎不再受波流载荷和土体阻力的影响。当波流载荷大于土体阻力时,由波流载荷变化引起的管道应力变化率趋于 86 MPa/(m·s⁻¹)。
- e. 由于裸露管道的后挖沟治理多发生于近岸区域,本文研究基于典型近岸海底管道尺寸进行,未深入探讨管道尺寸效应的影响,有待后续进一步研究。

参考文献:

[1] 熊春宝,李志,孙轩,等. 基于声波探测的海底管道非掩埋状态检测方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(5): 425-431. (Xiong Chunbao, Li Zhi, Sun Xuan, et al. Integrated acoustic survey method for inspecting the unburied status of submarine pipeline[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2017, 45(5) :425-431. (in Chinese))

[2] 张传旭,王海锋,刘亮,等. 渤海油田海底管道裸露和悬空疲劳治理技术对比[J]. 中国石油和化工标准与质量,2022,42(9):185-187. (Zhang Chuanxu, Wang Haifeng, Liu Liang, et al. Comparative study on fatigue remediation techniques for exposed and free-spanning subsea pipelines in Bohai oilfield[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2022, 42(9) :185-187. (in Chinese))

[3] 熊海荣. 海底管道后挖沟分析[C]//2009 年度海洋工程学术会议论文集(下册). 厦门:中国造船工程学会近海工程学术委员会,2009:149-154.

[4] 夏梦莹,张宏,吴锴,等. 海底管道后挖沟过程的应力解析分析方法[J]. 石油管材与仪器,2017,3(6):41-43. (Xia Mengying, Zhang Hong, Wu Kai, et al. Analytical stress analysis method for submarine pipeline during trenching[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2017, 3(6) :41-43. (in Chinese))

[5] 倪玲英,耿光伟,刘秉德. 基于 AutoPIPE 的海底悬空管线挖沟埋设应力分析[J]. 船海工程,2017,46(4):182-185. (Ni Lingying, Geng Guangwei, Liu Bingde. Stress analysis about post-trenching of submarine suspended pipelines based on AutoPIPE [J]. Ship & Ocean Engineering, 2017, 46(4) :182-185. (in Chinese))

[6] 靳嵩,唐彪,张晓春,等. 海底管道穿越航道段不停输下卧技术[J]. 中国海洋平台,2023,38(2):97-102. (Jin Song, Tang Biao, Zhang Xiaochun, et al. Lowering technology of live subsea pipeline on crossing channel section[J]. China Offshore Platform, 2023, 38(2) :97-102. (in Chinese))

[7] Thusyanthan N I, Williams K A J, Selwood T, et al. Challenges of lowering a live subsea buried gas pipeline by 6m[C]//Offshore Technology Conference(OTC 2014). Houston: Society of Petroleum Engineers, 2014:25211.

[8] 刘可安,李修波,王华昆,等. 犁式挖沟机后挖沟埋管对海底管道屈曲压溃压力影响分析[J]. 中国造船,2020,61(1):101-108. (Liu Kean, Li Xiubo, Wang Huakun, et al. Influence of post-trench burying on buckling pressure of subsea pipeline[J]. Shipbuilding of China, 2020, 61(1) :101-108. (in Chinese))

[9] 刘绪都,李明昊,冯新,等. 海底悬跨管道二次挖沟结构响应演变[J]. 油气储运,2022,41(8):924-930. (Liu Xudu, Li Minghao, Feng Xin, et al. Evolution of structural response to post-trenching of free-spanning submarine pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(8) :924-930. (in Chinese))

[21] Clark G E,Moser S C,Ratick S J,et al. Assessing the vulnerability of coastal communities to extreme storms;the case of revere, MA. ,USA[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change,1998,3(1):59-82.

[22] 赵晓斌,强卫,黄伟豪,等. 粤港澳大湾区发展的理论框架与发展战略探究[J]. 地理科学进展,2018,37(12):1597-1608. (Zhao Xiaobin,Qiang Wei,Huang Weihao,et al. Theoretical framework and development strategy of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Progress in Geography,2018,37(12):1597-1608. (in Chinese))

[23] 王钧,宫清华,宇岩,等. 粤港澳大湾区城市群自然灾害综合承灾能力评价[J]. 地理研究,2020,39(9):2189-2199. (Wang Jun,Gong Qinghua,Yu Yan,et al. Evaluation of comprehensive disaster-bearing capacity of urban natural disasters in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Geographical Research,2020,39(9):2189-2199. (in Chinese))

[24] Wang Yujie,Gao Ge,Zhai Jianqing,et al. Evolution characteristics of the rainstorm disaster chains in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area,China[J]. Natural Hazards,2023,119(3):2011-2032.

[25] 陈明发,刘帆,赵耀龙,等. 1987—2017 年粤港澳大湾区城市群的不透水地表扩张与梯度演化[J]. 地球信息科学学报,2021,23(3):443-455. (Chen Mingfa,Liu Fan,Zhao Yaolong,et al. The expansion and gradient evolution of impervious surface within the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1987 to 2017[J]. Journal of Geo-information Science,2021,23(3):443-455. (in Chinese))

[26] 刘志雨,刘玉环,孔祥意. 中小河流洪水预报预警问题与对策及关键技术应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):1-6. (Liu Zhiyu,Liu Yuhuan,Kong Xiangyi. Problems,strategies and key technology research of flood forecasting and early warning for small and medium-sized rivers [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(1):1-6. (in Chinese))

[27] 石佳佳,李伟峰,刘亚丽,等. 粤港澳大湾区城镇化对海岸线与海岸带的影响[J]. 生态学报,2022,42(1):67-75. (Shi Jiajia,Li Weifeng,Liu Yali,et al. Impacts of urbanization on coastline and coastal zone in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(1):67-75. (in Chinese))

[28] 王国萍,闵庆文,丁陆彬,等. 基于 PSR 模型的国家公园综合灾害风险评估指标体系构建[J]. 生态学报,2019,39(22):8232-8244. (Wang Guoping,Min Qingwen,Ding Lubin,et al. Comprehensive disaster risk assessment index system for national parks based on the PSR model[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(22):8232-8244. (in Chinese))

[29] Qian Bao,Zhu Yuxin,Wang Yuxiao,et al. Can entropy weight method correctly reflect the distinction of water quality indices? [J]. Water Resources Management,2020,34(11):3667-3674.

[30] Jin Chenxia,Mi Jusheng,Li Fachao,et al. An improved TOPSIS method for multi-criteria decision making based on hesitant fuzzy β neighborhood[J]. Artificial Intelligence Review,2023,56(1):793-831.

(收稿日期:2024-10-27 编辑:刘晓艳)

(上接第 35 页)

[10] 赵刚,刘建峰,胡双,等. 在役海底管道后挖沟分析方法和校核标准[J]. 中国海洋平台,2025,40(3):101-108. (Zhao Gang,Liu Jianfeng,Hu Shuang,et al. Analysis methods and verification standards on post-trenching for subsea pipeline in service [J]. China Offshore Platform,2025,40(3):101-108. (in Chinese))

[11] 刘冠良,刘建峰,赵刚,等. 平坦海床海底管道后挖沟安全性计算[J]. 石油和化工设备,2024,27(3):127-132. (Liu Guanliang,Liu Jianfeng,Zhao Gang,et al. Safety calculation of submarine pipeline post-trenching on flat seabed[J]. Petro & Chemical Equipment,2024,27(3):127-132. (in Chinese))

[12] Phillips R,Nobahar A,Zhou J. Trench effects on pipe-soil interaction [C]//2004 International Pipeline Conference. Calgary: IPC,2004:321-327.

[13] Kianian M,Shiri H. Experimental study of trench effect on lateral failure mechanisms around the pipeline buried in clay[J]. Journal of Pipeline Science and Engineering,2021,1(2):198-211.

[14] Yang Ming,Wang Dongyuan,Jia Haidong,et al. Research on the interaction between trench material and pipeline under fault displacement[J]. Scientific Reports,2024,14(1):12439.

[15] 陈景皓,段梦兰,徐崇威,等. 深水海底管道 J 形铺设参数[J]. 油气储运,2013,32(6):654-658. (Chen Jinghao,Duan Menglan,Xu Chongwei,et al. Parameters of J-lay method for deepwater submarine pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation,2013,32(6):654-658. (in Chinese))

[16] 刘秉德. 海底悬空管道二次挖沟治理研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2015.

(收稿日期:2025-07-01 编辑:熊水斌)