

基于生死单元技术的河流穿越管道力学规律研究

伍颖, 李都

(西南石油大学土木工程与测绘学院, 610500 成都)

摘 要: 为了研究河流穿越管道从埋地到上方覆土逐渐减少以致管道完全悬空这一过程的力学特性, 本研究采用 ABAQUS 有限元软件, 基于生死单元技术建立 X80 输气管道上方覆土逐渐减少以致管道悬空长度不断增加的动态有限元模型; 分析洪水流速、下切角度、径厚比、运行内压和埋深对河流穿越管道力学行为的影响规律; 通过敏感性分析获取各影响因素对河流穿越管道应力的影响程度并排序。研究表明: 不同参数下的管道最大等效应力、位移和应变在悬空 20~30 m 期间增长最快; 洪水流速、管径和运行内压与最大等效应力呈正相关, 管道壁厚与最大等效应力呈负相关, 下切角度在悬空过程中与最大等效应力呈正相关, 在悬空到一定长度时, 下切角度和埋深对最大等效应力影响不大, 但下切角度与位移呈正相关, 埋深与位移成负相关; 各影响因素对河流穿越管道最大等效应力的影响程度排序为管道壁厚>洪水流速>运行内压>埋深>下切角度, 以期为管道规划、设计要求提供依据并改进, 以提高其安全性。

关键词: 悬空管道; 悬空长度; 力学规律; 敏感性分析; 数值模拟

中图分类号: O35; X937 文献标志码: A DOI: 10. 11776/j. issn. 1000-4939. 2026. 01. 019

文章编号: 1000-4939(2026)01-0200-13 CSTR: 32414. 14. cjam. issn. 1000-4939. 2026. 01. 019

Study on the mechanical laws of river crossing pipeline based on life and death units technology

WU Ying, LI Du

(School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, 610500 Chengdu, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of the process of the river crossing pipeline from the buried to the overlying soil gradually reduced so that the pipeline is completely suspended, this paper uses ABAQUS finite element software to establish a dynamic finite element model based on the life and death units technology for an X80 gas pipeline, where the length of pipeline suspension gradually increases as the overlying soil decreases. The paper analyzes the effects of flood flow velocity, undercut angle, diameter-thickness ratio, operating internal pressure, and burial depth on the mechanical behavior of river crossing pipelines. Sensitivity analysis is used to obtain the degree of influence of each factor on the stress of the river crossing pipeline and rank them accordingly. The results show that the maximum equivalent stress,

收稿日期: 2024-02-06

基金项目: 四川省科技计划资助项目 (No. 2019YFS0075; 2020YJ0153)

通信作者: 伍颖, 教授。E-mail: wy_swpi@swpu.edu.cn

引用格式: 伍颖, 李都. 基于生死单元技术的河流穿越管道力学规律研究[J]. 应用力学学报, 2026, 43(1): 200-212.

WU Ying, LI Du. Study on the mechanical laws of river crossing pipeline based on life and death units technology[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2026, 43(1): 200-212.

displacement, and strain of the pipeline under different parameters increase the fastest during the 20–30 m suspension period. The maximum equivalent stress is positively correlated with flood flow velocity, diameter, and operating internal pressure, while it is negatively correlated with the wall thickness of the pipeline. The undercut angle is positively correlated with the maximum equivalent stress during the suspension process. When the suspension length reaches a certain value, the undercut angle and burial depth have little effect on the maximum equivalent stress. However, the undercut angle is positively correlated with displacement, while the burial depth is negatively correlated with displacement. The degree of influence of each factor on the maximum equivalent stress of the river crossing pipeline is ranked as follows: wall thickness>flood flow velocity>operating internal pressure>burial depth>undercut angle. These findings can provide basis for pipeline planning and design requirements and improve its safety.

Key words: suspension pipeline; suspended length; mechanics principles; sensitivity analysis; numerical simulation

地质灾害是导致长输油气管道破坏失效的主要原因之一^[1],伴随着油气管道的大量建设,长输油气管道不仅常受到洪水、滑坡、泥石流的影响,因气候多变,还会受到降雨或融雪的影响。特别是山区河流,河道里会迅速形成流速极大的洪水,导致多处露管、悬管,甚至发生泄漏事故,严重威胁了管道的安全运营。一旦管道发生破坏,不仅影响能源供应,威胁国家能源安全,而且会造成经济损失和能源浪费^[2-4]。因此,研究管道在洪水作用下的力学规律对管道运行安全十分重要。

近年来对于穿越河流管道已有大量研究,2004年王利金等^[5]研究了埕岛油田海底管道发生的冲刷悬空,通过理论分析和模型试验,得出共振时管道允许的实际最大悬空长度变化的范围。基于对海底管道局部冲刷问题的研究,杨兵等^[6]于2008年利用模型实验研究了单向海流载荷下管道局部冲刷现象,结果与河流穿越有类似之处。时米波等^[7]于2007年考虑管跨入土段与土壤之间的非线性作用力,使模型更符合现实状况。2011年王晓霖等^[8]对洪水作用下的漂浮管道进行了应力与载荷分析,建立了基于应变的洪水管道安全评定方法。2014年,魏孔瑞等^[9]通过简化模型获得了管道在有无裸露悬空状态下的极限悬空长度。2016年,李思嘉等^[10]通过建模与实例分析,提出了一种临时的水工保护措施。2018年,王慧等^[11]基于洪水冲击作用下管道及连接处的受力分析,构建了洪水作用下管道法兰连接处螺栓失效判定模型。2019年,詹婷雯等^[12]基于Morison方程,建立了有限元模型,对管道展开时程分析,探讨了静力学分析的局限性。2020年,薛俊

卓等^[13]通过半定量方法提出了评判河沟段长输油气管道水毁灾害的风险等级划分方法。2021年,LIU等^[14]建立了一个二维有限元数值模型,用于预测振动海底管道在恒定电流下的局部冲刷。2021年,YAO等^[15]通过由圆形基础支撑的圆形上部结构组成的沉入式复合桩的试验研究,提出了冲刷测量方法。2022年,王新慧等^[16]运用ANSYS软件仿真计算分析了洪水冲击服役环境下,漂浮管道的受力状况,并总结出漂浮长度与最大应力比率的关系。

综上所述,在河流穿越管道悬空段的动力响应方面,近年来的研究中逐渐开始考虑管道内压及管土耦合作用的影响,然而,洪水会对河流穿越管道上方覆土造成冲刷和侵蚀作用,这导致了覆土层逐渐消失,严重影响了管道的稳定性和安全性。尽管已有许多研究探讨了管道悬空状态的情况,但是研究工况大多为管道已悬空状态,对于管道从埋地到悬空状态这一过程的研究未曾考虑,进而导致河流穿越管道上方覆土逐层消失所导致的实际力学变化的研究比较缺乏。因此,探究河流穿越管道上方覆土逐层消失所导致的实际力学变化情况,具有重要的研究意义。为此,本研究首先采用ABAQUS有限元软件,基于生死单元技术建立河流穿越管道上方覆土逐渐减少以致管道悬空长度不断增加的动态有限元模型;然后分析洪水流速、下切角度、径厚比、运行内压和埋深对河流穿越管道力学行为的影响规律;最后,通过敏感性分析获取各影响因素对河流穿越管道应力的影响程度并排序,以期为长输油气管道应急抢险以及保障穿越河流管道安全运行提供理论参考。

1 洪水作用下悬空管道有限元模型建立

1.1 洪水作用下悬空管道力学模型

穿越河流管道在水流持续冲击下,管道上方覆土逐渐松软被水流冲毁导致管道部分裸露悬空,管道两端仍埋在未被冲毁的土里,依据王晓霖等^[8]对洪水作用下管道受力分析,此时管道将受到水流横向拖拽力 F_D 、惯性力 F_I 和竖向升力 F_L 3 种动水作用力以及浮力 F_f 以及管道自身和内部介质重力 G 作用。管道受力如图 1 所示。

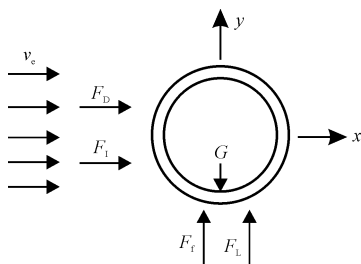


图 1 洪水对管道受力分析剖面图

Fig. 1 Cross-sectional diagram of the analysis of the force of flood on the pipeline

$$F_D = 0.5 \rho_w D C_D v_e^2 \quad (1)$$

$$F_I = \frac{1}{4} \rho_w \pi D^2 C_M \frac{dv}{dt} \quad (2)$$

$$F_L = 0.5 \rho_w D C_L v_e^2 \quad (3)$$

$$F_f = \pi D^2 \rho_w g / 4 \quad (4)$$

式中: ρ_w 为洪水密度, kg/m^3 ; D 为管道外径, m ; v_e 为平均水流速度, m/s ; C_D 为动水阻力系数, 无量纲; C_L 为举升力系数, 无量纲; C_M 为动水惯性系数, 无量纲; dv/dt 为管道上水平水粒子加速度, m/s^2 。

图 2 为河流穿越管道悬空段的简化力学模型, 其在洪水作用下受到持续冲击, 悬空段中部受到均布载荷 f_y 的作用。管道两端埋于土体中, 未受到水流侵蚀, 对管道形成约束。

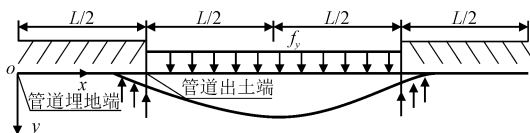


图 2 洪水作用下管道力学模型

Fig. 2 Mechanical model of the pipeline under the action of flood

1.2 有限元模型建立

在河流穿越管道洪水冲刷过程中,管道与土体相互作用力的非线性变化、管土接触的不连续性以及管道外表面与周围土体摩擦行为的约束都是需要考虑的问题。因此,本研究选取 ABAQUS 软件来建立洪水作用下河流穿越管道上方覆土随时间逐层消失的动态三维有限元模型。

1.2.1 条件假设

在进行数值建模时,针对本研究研究内容做出如下基本假设^[17]。

1) 管道位于埋地段区域都采用同一种土体,且不考虑材料的各向异性。

2) 不考虑温度、管材随机性及管道连接方式对管道性能的影响。

3) 管道悬空段在洪水冲击下处于一种完全悬空状态,不包含任何防护措施,如配重块等。

4) 管道上方覆土层的消失形式考虑为规则性,即将上方覆土层逐渐减少的形式考虑为六面体。

1.2.2 模型材料参数

随着油气管道里程的增加,对输送效率和管道运营安全的要求也在逐渐提高。近年来西南地区的新建长输油气管道已经开始选用 X70、X80 或更高级别的管材,如中缅天然气管道工程选用 X80 级钢管。本研究选用 X80 级钢管的材料参数在有限元软件中建立河流穿越管道动态有限元模型,土体本构模型选用 Mohr-Coulomb,管道内部运行压力为 10 MPa,外径为 1 016 mm,壁厚为 15.3 mm,管道与土体的具体参数详见表 1 和表 2。

表 1 模型土体参数

Tab. 1 Model soil parameters

土体尺寸	弹性模量/MPa	泊松比	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	摩擦角/($^\circ$)	膨胀角/($^\circ$)	屈服凝聚力/kPa
5 m×5 m	12	0.25	2 000	25	22	50

表 2 模型管道参数

Tab. 2 Model pipeline parameters

管道外径/mm	管道壁厚/mm	管道埋深/m	管道内压/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	屈服强度/MPa
1 016	15.3	2	10	207	0.3	7 850	555

失效准则是评判失效的依据,根据失效模式而定。本研究采用基于弹性失效的准则,即悬空区域的等效应力达到管材的屈服应力时,认为管道失效。等效应力是采用 von Mises 等效应力^[18],其表达式为

$$\sigma_{\text{Mises}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (5)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为假设单元体的 3 个主应力,MPa; σ_{Mises} 为等效应力,MPa。则 von Mises 等效应力应该要小于屈服应力 σ_y 。

建立洪水作用下的管道有限元模型,由沉管作业过程中应力、应变远程监控数据可知,管道沉降作业区两侧埋地段受影响区为悬空长度的 0.49 倍^[19],因此可取土体模型长度为悬空段的二分之一,管道埋深一般为 0.7~2.3 m,此处取埋深 1.5 m。土体横截面简化为 5 m×5 m 的正方体,由于模型与荷载都具有对称性,因此本研究建立 1/2 模型。三维有限模型如图 3 所示。

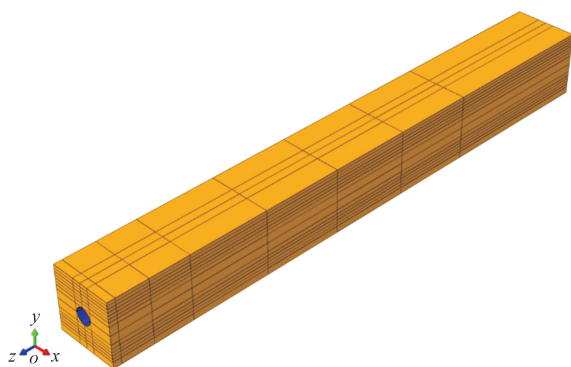


图3 河流穿越管道三维有限元模型

Fig. 3 Three-dimensional finite element model of river crossing pipeline

由于四周的土体与管道会存在一定的接触行为,这种接触导致了管道周围土体的变形和应力分布的变化,从而影响了管道的力学行为和稳定性。为了准确地模拟管土接触行为,需要采用合适的非线性接触模型。本研究通过设置三维立体的管-土接触有限元模型,在管-土接触设置中选用面与面接触类型,管道刚度相比于土体内表面较大,因此设置为主表面,土体内表面设置为从表面。接触属性分别定义法向行为和切向行为,法向行为定义为“硬”接触,接触后可分离;切向行为通过“罚”函数进行定义,管道与土体间的摩擦系数取为 0.5^[20]。管-土接触设置效果如图 4 所示。

对于边界条件,本研究根据管道实际约束情况,将土体的上下表面设为关于 y 方向的位移转角为 0° ,两个侧面设为关于 x 方向的位移转角为 0° ,管道在土体最末端面设为关于 z 方向位移转角为 0° ,由于所建模型为轴对称,需要设置管道的轴对称边界条件为对称约束“ZSYMM”。管道受到水流冲击横向作用力的方向沿着 x 轴的正方向(1,0,0),竖向作用力沿着 y 轴的正方向(0,1,0),且力的类型均为“表面载荷”,牵引力方向设置为“通用”。

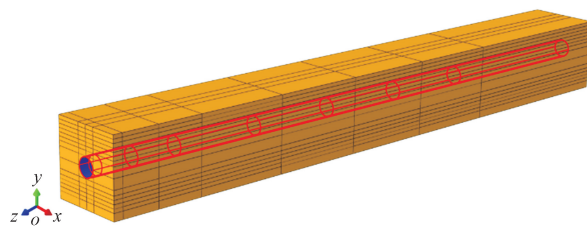


图4 管道与土体接触状态模型

Fig. 4 Contact state model between pipeline and soil

为更好地模拟管道在洪水作用下上方覆土逐渐减少、导致管道悬空并引起悬空长度不断变化的实际情况,本研究采用了 ABAQUS 中的生死单元技术,在相互作用设置中进行了型号转换。这一技术可以模拟管道上方覆土的横向消失过程,从而模拟管道悬空长度在洪水作用下的变化过程。上方覆土逐步消失以致管道逐步悬空如图 5 所示。

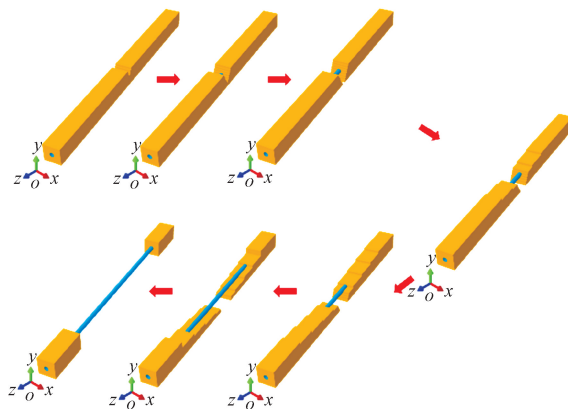


图5 管道依次悬空

Fig. 5 Pipeline suspended successively

1.3 有限元模型验证

为验证模型结果的可信度,文献[21]采用多种理论方法和算例对河底输油管道的水平悬空段进行动应力研究,并对埋地管道的受力进行分析计算。此外,使用 ABAQUS 进行进一步模拟,以验证模型的有效性和准确性。

本研究根据文献结果,采用 ABAQUS 建立相同的生死单元网格技术模型,并与文献中的计算结果进行比较。若误差在允许范围内,则证明本研究模型合理有效,设置正确。文献[21]对洪水作用力进行了简化,在管道悬跨段施加顺流方向(X 方向)的交变拖曳力、横流方向(Y 方向)的交变升力。输油管道的壁厚为 14.6 mm,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,密度为 7 900 kg/m³,内压为 12 MPa,采用如表 3 所示的土体参数,计算了不同悬跨长度管道悬跨段最大动应力大小。

文献[21]计算结果与 ABAQUS 有限元结果对比见表 4。从表中可知,悬跨段的 Mises 应力相对误差都在 8% 以下,考虑到约束条件影响,误差可以接受,表明建立的有限元模型合理可行。

表 3 土体参数

Tab. 3 Soil parameters

弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	摩擦角/ (°)	密度/ (kg · m ⁻³)
14.4	0.2	6	20	1 960

表 4 模型结果验证

Tab. 4 Verification of model results

参数	悬跨长度/m				
	22	24	26	28	32
文献[21]结果/MPa	514	520	525	530.9	540.3
本研究结果/MPa	477	485	493	502.6	531.5
误差/%	7.2	6.7	6.0	5.3	1.6

2 洪水作用下悬空管道力学响应分析

本研究采用管-土接触有限元模型,对河流穿越管道的力学响应进行分析。考虑不同洪水流速、下切角度、运行内压、径厚比和埋深等因素,设置管道悬空长度为 0~50 m,关注最大等效应力、位移和应变等力学结果。精确计算和细致比较这些结果,深入了解管道的力学性能特征,为提供有效的管道设计方案和安全评估依据提供支撑。

当河流穿越管道遭受洪水冲刷时,洪水会带动底部的沙石颗粒和岩石碎片对河床即管道上方覆土进行撞击和磨蚀^[22-23]。由此,上方的覆土逐渐被冲刷带走,露出了管道周围的土体。在这个过程中,随着上方覆土层的逐渐消失,管道周围土体与覆土交界处形成一个夹角,即河流穿越管道的覆土下切角度,如图 6 所示。

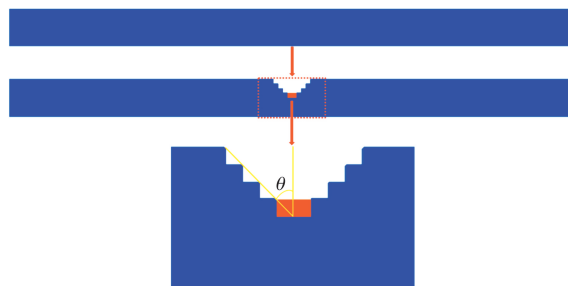


图 6 覆土下切角度示意图

Fig. 6 Undercutting angle diagram of overburden soil

2.1 洪水流速

设置洪水流速分别为 1、2、3、4、5 m/s,对管土三维有限元模型进行计算并分析,不同洪水流速下河流穿越管道的最大 von Mises 应力、位移和应变如图 7~图 8 所示。

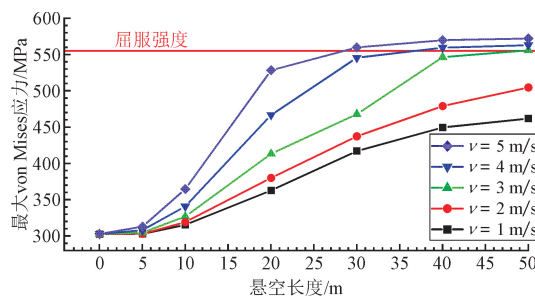


图 7 不同洪水流速下管道最大 von Mises 应力随悬空长度的变化曲线

Fig. 7 Curves of the variation of maximum von Mises stress of the pipeline with different hanging lengths under different flood flow velocities

由图 7 可以看出,洪水流速与最大等效应力呈正相关,随着洪水流速的增加,最大等效应力不断增大,达到屈服强度之后,趋势逐渐变得平缓。当运行内压为 10 MPa,洪水流速为 5 m/s 时,管道从完全埋地到覆土开始消失至悬空 29 m 时达到了屈服强度,随着悬空长度逐渐增加,管道应力增幅不大,而流速为 4、3 m/s 时,在分别悬空 39、50 m 时达到了屈服强度,而洪水流速为 2、1 m/s 在管道悬空 50 m 以内未达到屈服强度,说明降低洪水流速可以有效提升管道的安全性。并且可以看出在悬空 10~30 m 的过程中,管道的最大等效应力增长最快,尤其是在悬空 10~20 m 期间,因此在悬空 30 m 之前采取措施可以大幅降低管道失效的概率。

由图 8 可以看出,洪水流速与位移和应变呈正相关,随着洪水流速的增加,位移和应变不断增大。从图 8(a)可以看出位移在悬空 10~30 m 期间增长

速率最大,随着悬空长度的增加,位移增长速率在逐渐减缓,造成此现象一方面是因为在悬空 30 m 以前管道最大等效应力在悬空段中部,随着悬空长度的增加,管道最大等效应力在逐渐向管道埋地段靠近;另一方面是因为随着悬空长度的增加,管道逐渐达到了其屈服强度,逐渐在向塑性阶段靠近。从图 8 (b)可以看出应变随着悬空长度的增加跟洪水流速是呈正相关,且洪水流速越大,其增长速率越快。

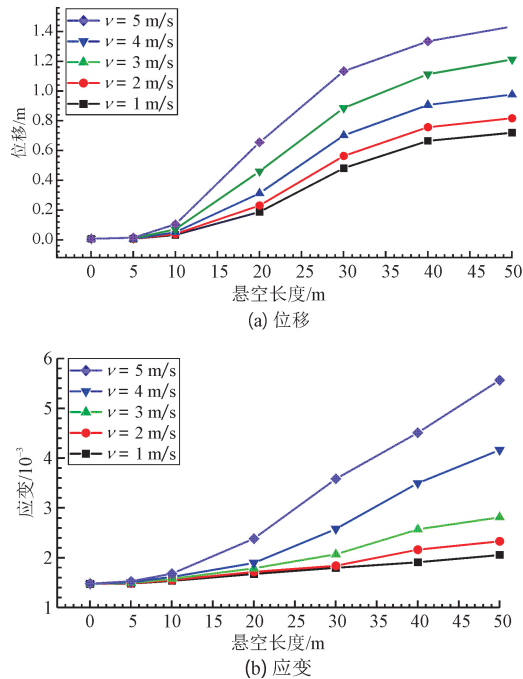


图 8 不同洪水流速下管道位移和应变随悬空长度的变化曲线

Fig. 8 Curves of the variation of displacement and strain of the pipeline with different hanging lengths under different flood flow velocities

2.2 下切角度

设置下切角度分别为 30° 、 45° 和 60° ,对管土三维有限元模型进行计算并分析,不同下切角度下河流穿越管道的最大 von Mises 应力、位移和应变如图 9~图 10 所示。

由图 9 可知,随着下切角度的增加,管道最大等效应力在增加。当下切角度为 30° 时,此时管道随着每一个分析步悬空的区域相对较小,因此, 30° 的最大等效应力增长较为平缓。而随着下切角度的增加,每一个分析步管道悬空的区域也在增加,因此,在悬空相同长度内,下切角度越大,管道受到洪水荷载作用的面积越多。而最终悬空到 50 m 时,管道裸露相同的外表面面积,因此,最后不同下切角度能达

到相同的最大等效应力。综上所述,下切角度越大,管道在悬空期间的最大等效应力增长越快。

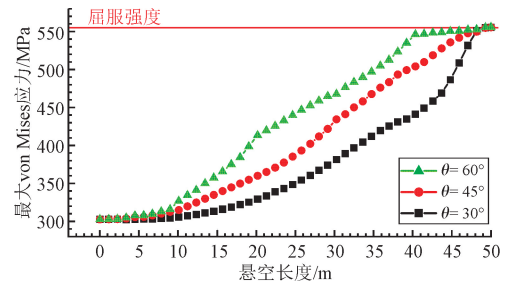


图 9 不同下切角度下管道最大 von Mises 应力随悬空长度的变化曲线

Fig. 9 Curves of the variation of maximum von Mises stress of the pipeline with different hanging lengths under different downward slope angles

由图 10 可知,下切角度与位移和应变呈正相关,随着下切角度的增加,位移和应变不断增大。

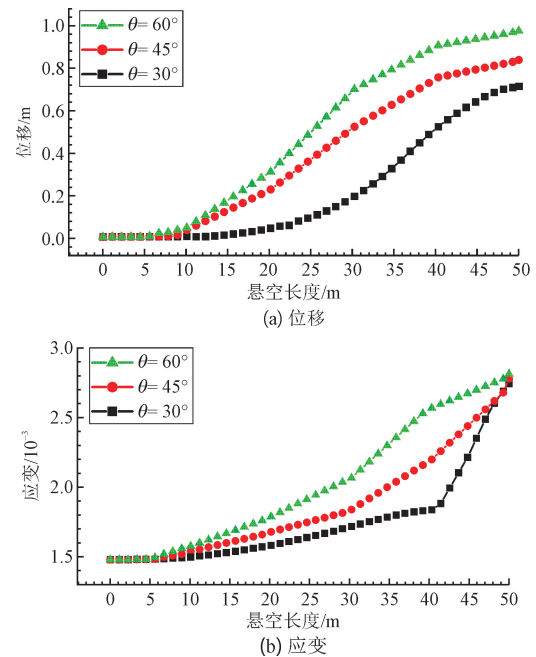


图 10 不同下切角度下管道位移和应变随悬空长度的变化曲线

Fig. 10 Curves of the variation of displacement and strain of the pipeline with different hanging lengths under different downward slope angles

从图 10(a)可以看出下切角度越大,管道的位移也就越大,并且可以看出在悬空 10~30 m 期间,下切角度越大,其位移增长速率也越大,但随着悬空长度的增加,位移增长速率在逐渐变为平缓。从图 10(b)可以看出起始和最终的应变都是相差不大的,而不同的下切角度只会影响悬空过程的应变增长速率,管道悬空前 40 m 期间,下切角度与应变增长速

率呈正相关,而在管道悬空 40~50 m 期间,下切角度与应变增长速率呈负相关,这是因为在管道悬空 40~50 m 期间,管道最大等效应力在向屈服强度飞速靠近,这也是下切角度越小,其应变增长速率越大的原因。

2.3 径厚比

2.3.1 管径一定,壁厚改变

本研究的河流穿越管道的外径为 1 016 mm, X80 级钢管,根据 GB/T 9711—2017《石油天然气工业管线输送系统用钢管》,此种规格管道的壁厚范围为 8.7~30.6 mm,再结合工程实际发现长输管道大多壁厚采用 12.8 mm 起步。因此,设置管道壁厚分别为 12.8、15.3、18.4、22.9、26.4 mm,对管土三维有限元模型进行计算并分析,不同管道壁厚下河流穿越管道的最大 von Mises 应力、位移和应变如图 11~图 12 所示。

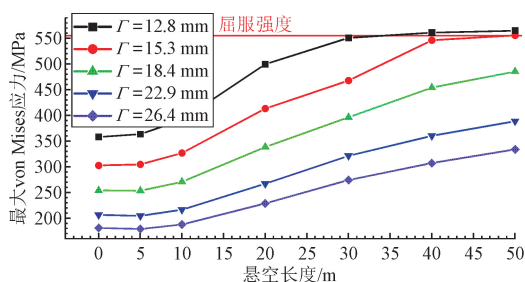


图 11 不同管道壁厚下管道最大 von Mises 应力随悬空长度的变化曲线

Fig. 11 Curves of the variation of maximum von Mises stress of the pipeline with different hanging lengths under different pipeline wall thicknesses

由图 11 可以看出,管道壁厚与最大等效应力呈负相关,随着管道壁厚的增加,最大等效应力不断减小。当运行内压为 10 MPa,管道壁厚为 12.8 mm 时,管道从完全埋地到覆土开始消失至悬空 35 m 时达到了屈服强度,随着悬空长度进一步增加,管道应力增长不大。而管道壁厚为 15.3 mm 时,在悬空 48 m 时达到了屈服强度,而管道壁厚为 18.4、22.9、20.6 mm 时在管道悬空 50 m 以内未达到屈服强度,说明管道壁厚的增加可以提升管道的承载能力,在相同工况下可以降低最大等效应力。并且可以看出在悬空 10~30 m 的过程中,管道的最大等效应力增长最快。

由图 12 可以看出,管道壁厚与位移和应变都是呈负相关,随着管道壁厚的增加,位移和应变在不断减小。从图 12(a)可以看出位移在悬空 10~30 m 期

间增长速率最大,随着悬空长度的增加,位移增长速率在逐渐减缓,造成此现象一方面是因为在悬空 30 m 以前管道最大等效应力在悬空段中部,随着悬空长度的增加,管道最大等效应力在逐渐向管道埋地地靠近;另一方面是因为随着悬空长度的增加,管道逐渐达到了其屈服强度,逐渐在向塑性阶段靠近。并且可以得出提高管道壁厚可以有效减低管道位移。从图 12(b)可以看出应变随着悬空长度的增加与管道壁厚是呈负相关的,且管道壁厚越大,其应变越小。当管道壁厚为 12.8 mm 时,悬空长度达到 30 m 以上后,管道应变突增,这是因为管道壁厚为 12.8 mm 在洪水流速为 3 m/s,运行内压为 10 MPa 的工况下,其在悬空 30 m 时就已经达到屈服强度,随着悬空长度的增加,管道在向塑性阶段前进,因此出现了应变突增的现象。

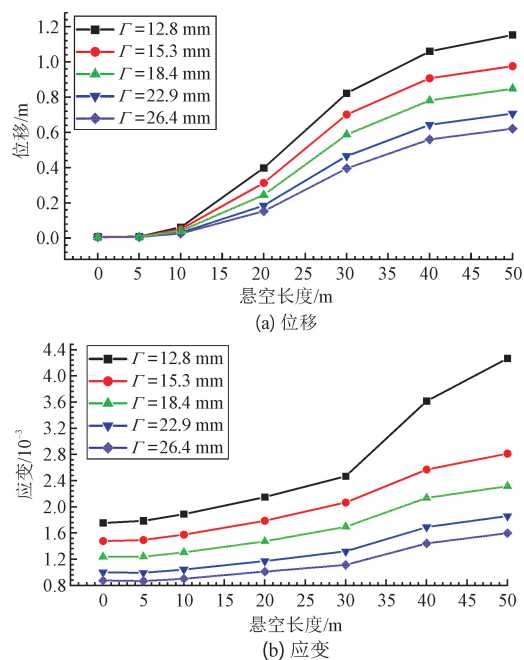


图 12 不同管道壁厚下管道位移和应变随悬空长度的变化曲线

Fig. 12 Curves of the variation of displacement and strain of the pipeline with different hanging lengths under different pipeline wall thicknesses

2.3.2 壁厚一定、管径改变

本研究研究的河流穿越管道 X80 级钢管,选定壁厚为 18.4 mm,结合工程实际发现长输管道大多管径采用 1 016 mm 起步。因此,设置管径分别为 1 016、1 219、1 422 mm,对管土三维有限元模型进行计算并分析,不同管径下河流穿越管道的最大 von Mises 应力、位移和应变如图 13~图 14 所示。

由图 13 可以看出,管径与最大等效应力呈正相

关,随着管径的增加,最大等效应力在不断增加,但悬空 30 m 后增长变化不显著。在管道悬空 50 m 的范围内,3 种管径下的管道均未达到屈服强度。在管道埋地期间,管径越大,管道所受相同内压引起的环向应力也越大。

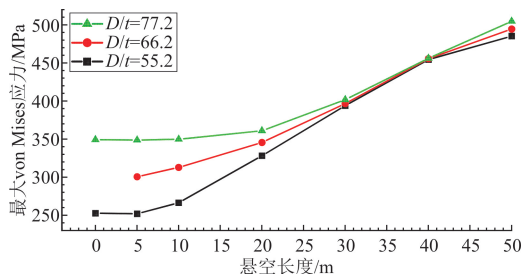
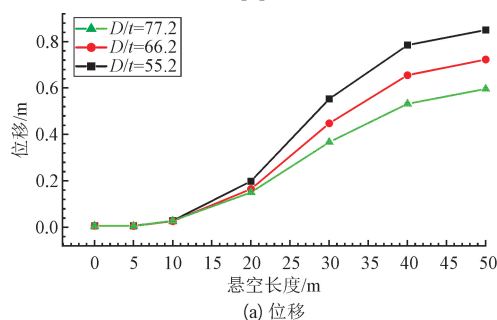
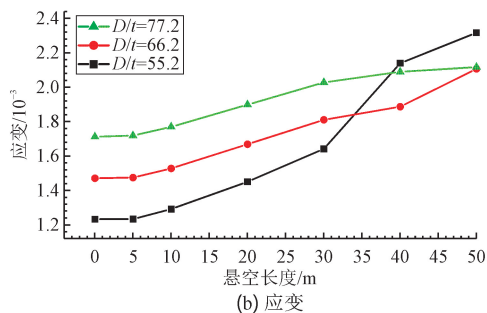


图 13 不同管径下管道最大 von Mises 应力随悬空长度的变化曲线

Fig. 13 Curves of the variation of maximum von Mises stress of the pipeline with different hanging lengths under different pipeline diameters



(a) 位移



(b) 应变

图 14 不同管径下管道位移和应变随悬空长度的变化曲线

Fig. 14 Curves of the variation of displacement and strain of the pipeline with different hanging lengths under different pipeline diameters

随着管道悬空长度的增加,管道应力在急剧上升,管径越大管道在承受相同洪水载荷的受力面积越大,因此,在相同壁厚和相同洪水载荷作用下,管径越小的管道最大等效应力增长越大。这也说明管径会影响管道悬空前的初始应力值,在悬空长度不断增加的过程中,管径对管道的影响逐渐小于悬空长度。在整个悬空过程中,管径为 1 016 mm ($D/t=55.2$)、1 219 mm ($D/t=66.2$)、1 422 mm ($D/t=77.2$)

的管道最大等效应力增幅分别为 232.6、193.7、155.5 MPa,可以看出管径的增加可以大幅降低管道悬空过程的最大等效应力增幅。并且可以看出在悬空 20~30 m 的过程中,管道的最大等效应力增长最快。

由图 14 可以看出,位移和应变随着悬空长度的增加与管径是呈负相关。从图 14(a) 可以看出位移在悬空 10~30 m 期间增长速率最大,随着悬空长度的增加,位移增长速率在逐渐减缓,造成此现象一方面是因为在悬空 30 m 以前管道最大等效应力在悬空段中部,随着悬空长度的增加,管道最大等效应力在逐渐向管道埋地段靠近;另一方面是因为管径越大,相同洪水载荷作用下的管道受力面积更大,管道有更多的受力空间来分摊外部载荷,使得管径越大的管道位移越小。因此,可以得出提高管径可以有效降低管道在洪水作用下的位移。从图 14(b) 可以看出应变随着悬空长度的增加与管径是呈负相关,且管径越大,其应变增长越小。但管径越大,其最初的应变最大,这是因为在未悬空之前,管径越大的管道受到的相同内压引起的环向应力越大,随着管道开始发生悬空,管径对管道的影响逐渐小于悬空长度以及管道位移不断加大的情况下,最终管径越小的管道应变越大,且管径越小,其应变增长量越大。

2.4 运行内压

设置运行内压分别为 6、7、8、9、10 MPa,对管土三维有限元模型进行计算并分析,不同运行内压下河流穿越管道的最大 von Mises 应力、位移和应变如图 15~图 16 所示。

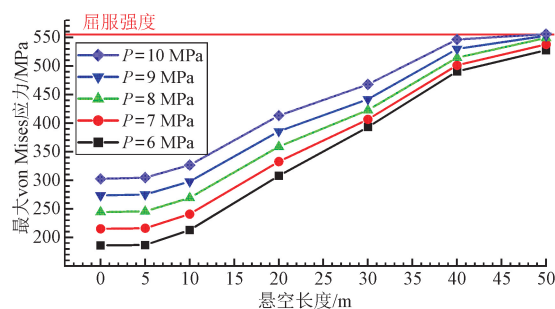


图 15 不同运行内压作用下管道最大 von Mises 应力随悬空长度的变化曲线

Fig. 15 Curves of the variation of maximum von Mises stress of the pipeline with different hanging lengths under different operating internal pressures

由图 15 可以看出,运行内压与最大等效应力呈正相关,随着运行内压的增加,最大等效应力不断增加,但运行压力对管道应力增长趋势没有显著影响,

对管道发生悬空后的初始等效应力值有显著影响。在悬空长度为 30 m 之前时,运行压力对管道最大等效应力的增幅程度远大于悬空长度,随着悬空长度的增加,这种影响程度则反之。当悬空长度为 0 m 时,在运行压力为 6 MPa 与 10 MPa 下的管道最大等效应力值相差 116.2 MPa,随着悬空长度的增加,它们之间的差距在减小,悬空长度为 30 m 时,最大等效应力相差 61.1 MPa,当悬空长度达到 50 m 时,它们之间的最大等效应力仅仅相差 28.2 MPa。在运行压力为 10 MPa 下,悬空长度达到 50 m 时管道达到屈服状态,而运行内压分别为 6~9 MPa 下的管道在悬空 50 m 以内未达到管道的屈服强度。因此,对于在役的河流穿越管道在汛期发生悬空后,在悬空 30 m 之前可以采取降压输送来降低管道最大等效应力增加的趋势。

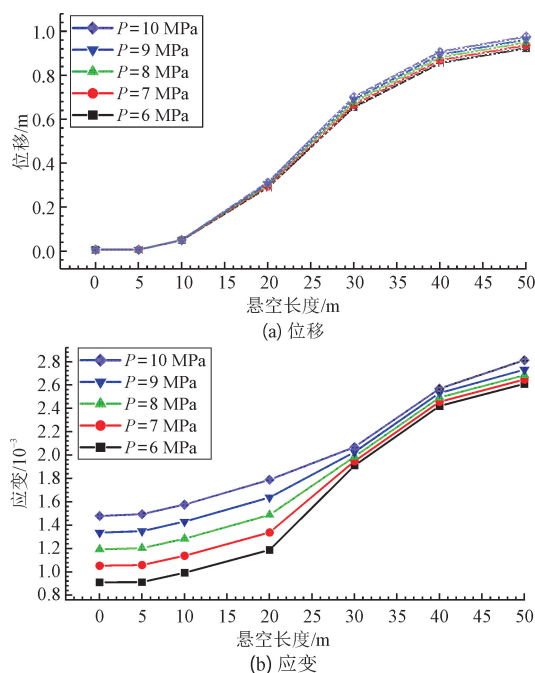


图 16 不同运行内压作用下管道位移和应变随悬空长度的变化曲线

Fig. 16 Curves of the variation of displacement and strain of the pipeline with different hanging lengths under different operating internal pressures

由图 16 可知,运行内压与位移和应变呈正相关。从图 16(a)可以看出不同运行内压下的位移有一定的增长,但增长量较小,其中位移在悬空 20~30 m 期间增长速率最大,随着悬空长度的增加,位移增长速率在逐渐减缓。从图 16(b)可以看出应变随着悬空长度的增加与运行内压是呈正相关,即运行内压越大,相应的应变也越大。另外,可以看出在

管道悬空 20 m 之前,运行压力对管道应变的影响程度大于悬空长度,在悬空 20~30 m 期间两者的影响程度在逐渐接近,在悬空长度为 30 m 之后,悬空长度对管道应变的影响程度大于运行内压。因此,在悬空 30 m 之前可以通过降压来减小管道的应变,在悬空 30 m 之后可以采取稳管措施来有效控制管道应变的增长趋势。

2.5 埋深

设置埋深分别为 0.7、1.1、1.5、1.9、2.3 m,对管土三维有限元模型进行计算并分析,不同埋深下河流穿越管道的最大 von Mises 应力、位移和应变如图 17~图 18 所示。

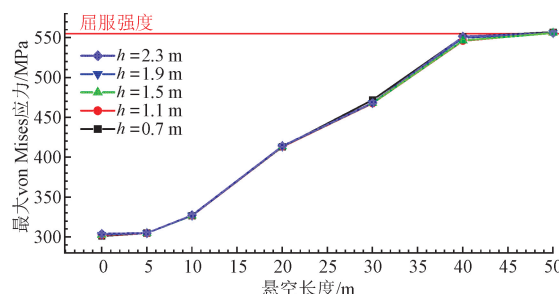


图 17 不同埋深下管道最大 von Mises 应力随悬空长度的变化曲线

Figure 17 Curve of the variation of maximum von Mises stress of the pipeline with different hanging lengths under different burial depths

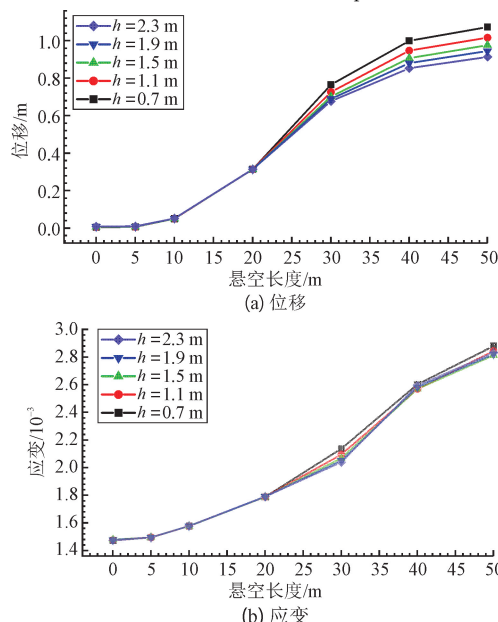


图 18 不同埋深下管道位移和应变随悬空长度的变化曲线

Fig. 18 Curves of the variation of displacement and strain of the pipeline with different hanging lengths under different burial depths

由图 17 可知,不同埋深下的管道最大等效应力变化不大,但随着悬空长度的增加,最大等效应力呈现线性向上增长趋势。说明悬空长度对管道最大等效应力的影响远大于埋深。另外不同埋深下的河流穿越管道在相同悬空长度下的最大等效应力变化较小,说明管道两侧埋深大于 0.7 m 时,对于管道的力学行为影响不大,同时证明本研究模型选取埋深 1.5 m 为研究计算是可靠的。

从图 18 的结果可以看出,管道在不同埋深下的位移增量呈现线性减弱趋势,而管道的应变却几乎不受埋深的影响。总体而言,随着埋深的减小,管道位移的增量也呈线性上升趋势。在图 18(a)中可以看出,在管道悬空长度为 0 至 20 m 期间,埋深对管道位移影响较小。但是,在悬空长度为 20 m 后,管道位移开始受到埋深的影响,特别是当埋深较浅时,管道的位移增量趋势更加明显。在管道悬空至 50 m 时,不同埋深下的位移差距表现的尤为显著。此现象的原因是:埋深越浅,覆盖在管道上方的土层重力对管道的作用力越小,从而导致管道难以抵消因洪水引起的竖向升力;相反地,埋深越大的管道,其上方的土体重力与洪水引起的竖向升力抵消效果越大,从而导致管道位移增长量越少。位移在悬空 20~30 m 期间增长速率最大,随着悬空长度的增加,位移增长速率在逐渐减缓,总体上管道位移与埋深

呈负相关。根据图 18(b) 显示,管道在不同埋深下的应变增量相对较小。

3 正交数值试验

河流穿越管道在洪水作用下的动力响应受多种参数影响,因此基于某河流穿越管道的常用工况进行单因素规律分析。为了完成全面试验分析的目标,提高各因素对河流穿越管道影响规律的普适性,将采用正交试验法设计 25 组工况。

试验选取因素包括:洪水流速 v 、下切角度 θ 、管道壁厚 t 、运行内压 P 和埋深 h ,每个因素化为 5 个水平,并利用 $L_{25}(5^5)$ 正交表设计试验方案。具体因素及水平见表 5,试验方案及结果见表 6。

表 5 正交数值模拟试验因素及水平

Tab. 5 Factors and levels of orthogonal numerical simulation experiment

水平	洪水流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	下切角度/ ($^{\circ}$)	管道壁厚/ mm	运行内压/ MPa	埋深/ m
1	1	30	12.8	6	0.7
2	2		15.3	7	1.1
3	3	45	18.4	8	1.5
4	4		22.9	9	1.9
5	5	60	26.4	10	2.3

表 6 正交数值模拟试验方案及结果

Tab. 6 Orthogonal numerical simulation test scheme and results

试验 编号	洪水流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	下切 角度/($^{\circ}$)	管道壁厚/ mm	运行内压/ MPa	埋深/ m	计算结果/ MPa
1	1	30	12.8	6	0.7	484.7
2	1	45	18.4	9	2.3	376.0
3	1	30	26.4	7	1.9	231.4
4	1	60	15.3	10	1.5	461.3
5	1	60	22.9	8	1.1	275.6
6	2	30	26.4	9	1.5	273.7
7	2	45	15.3	7	1.1	458.1
8	2	45	22.9	10	0.7	340.3
9	2	60	12.8	8	2.3	555.5
10	2	45	18.4	6	1.9	364.7
11	3	30	22.9	7	2.3	359.5
12	3	45	12.8	10	1.9	565.7
13	3	45	18.4	8	1.5	461.9
14	3	60	26.4	6	1.1	314.1
15	3	60	15.3	9	0.7	556.2
16	4	30	18.4	10	1.1	556.5
17	4	45	26.4	8	0.7	441.9
18	4	30	15.3	6	2.3	558.7
19	4	60	22.9	9	1.9	446.1
20	4	45	12.8	7	1.5	568.1
21	5	30	15.3	8	1.9	575.4
22	5	45	22.9	6	1.5	555.7
23	5	60	12.8	9	1.1	615.8
24	5	60	18.4	7	0.7	565.3
25	5	30	26.4	10	2.3	513.2

根据正交数值模拟计算结果,利用极差分析原理获取各参数的极差,求出洪水作用下河流穿越管道最大等效应力的直观分析结果如表 7 所示。

表 7 洪水作用下河流穿越管道峰值应力数值试验结果直观分析

Tab. 7 Visualization analysis of peak stress numerical test results for river crossing pipeline under flood action

影响因素	平均最大等效应力/MPa					
	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4	水平 5	极差
洪水流速	365.8	398.5	451.5	514.5	565.1	199.3
下切角度	444.1		459.1		473.7	29.6
管道壁厚	557.9	521.9	464.9	395.4	354.9	203
运行内压	455.6	436.5	462.1	453.6	487.4	50.9
埋深	477.7	444	464.1	436.7	472.6	41

由表 7 可知,这 5 个影响因素对管道最大等效应力极差的影响程度是不同的。其中,管道壁厚是影响最大的因素,其次是洪水流速。其他影响因素的影响程度依次为运行内压、埋深和下切角度。这说明在河流穿越管道受到洪水作用时,管道最大等效应力主要受到管道本身材料属性,即管道壁厚的影响,其次是洪水流速。相比之下,运行内压、埋深和下切角度的影响程度较小。

4 敏感性分析

基于上述正交试验对洪水作用下河流穿越管道最大等效应力的计算结果,利用敏感性系数计算公式(6)获取各参数的敏感性系数^[24],识别出影响河流穿越管道最大等效应力的参数排序

$$f = \frac{\Delta\sigma/\sigma}{\Delta F/F} \quad (6)$$

式中: f 表示管道最大等效应力 σ 对于参数 F 的敏感性系数; $\Delta\sigma/\sigma$ 表示参数变化 ΔF 时,管道最大等效应力变化量与基准应力比值; $\Delta F/F$ 表示参数值的变化量。

当参数相对值增加时,即计算出的 $f>0$,则表明该参数与河流穿越管道最大等效应力呈正向变化,即参数增加会导致管道最大等效应力增加,反之,若 $f<0$,则表明该参数与管道最大等效应力呈反向变化,即参数增加会导致管道最大等效应力减小。敏感性系数越大,则该参数对管道最大等效应力影响程度越大。以管道洪水流速为 1 m/s,下切角度 30°,管道壁厚 12.8 mm,运行内压 6 MPa,埋深 0.7 m 为基准,不同参数值变化量与应力变化量的对应值如表 8 所示。按式(6)分别计算各参数对管道最大

等效应力的敏感性系数,得到敏感性系数与各参数变化量的关系柱形图如图 19 所示。

表 8 参数变化量与应力变化量对应值

Tab. 8 The corresponding values of parameter variation and stress variation

参数	取值	$\Delta F/F$	$\Delta\sigma/\sigma$	f
洪水流速 $v/(m \cdot s^{-1})$	2	1	0.09	0.09
	3	2	0.234	0.117
	4	3	0.407	0.136
	5	4	0.545	0.136
	6	5	0.683	0.136
下切角度 $\theta/(^{\circ})$	35	0.17	0.011	0.065
	40	0.33	0.022	0.067
	45	0.5	0.034	0.068
	50	0.66	0.044	0.067
	55	0.83	0.055	0.066
管道壁厚 t/mm	60	1	0.067	0.067
	15.3	0.2	-0.065	-0.325
	18.4	0.44	-0.167	-0.38
	22.9	0.79	-0.291	-0.368
	26.4	1.06	-0.365	-0.344
运行内压 P/MPa	7	0.17	0.007	0.042
	8	0.33	0.014	0.042
	9	0.5	0.035	0.07
	10	0.67	0.07	0.104
埋深 h/m	1.1	0.57	-0.079	0.139
	1.5	1.14	-0.028	0.025
	1.9	1.71	-0.086	0.05
	2.3	2.28	-0.011	0.005

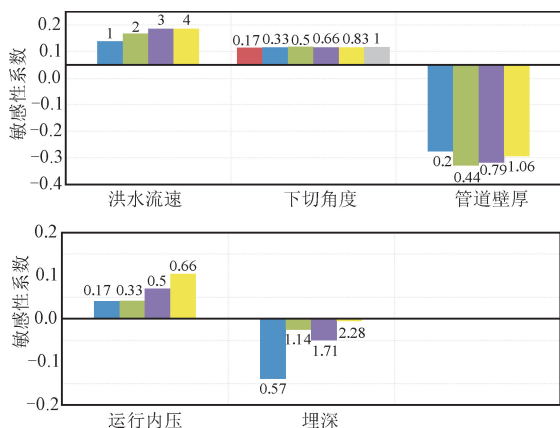


图19 敏感性系数与参数变化量的关系柱形图

Fig. 19 Bar chart showing the relationship between sensitivity coefficients and parameter variation

由图19可知,洪水流速、下切角度和运行内压与管道最大等效应力呈正相关,而管道壁厚和埋深与管道最大等效应力呈负相关。其中,管道壁厚的敏感性系数最高,说明管道壁厚与最大等效应力之间的关联性强,即随着管道壁厚不断增加,管道最大等效应力明显减小。洪水流速的敏感性系数在参数较小的情况下相对较小,在参数值增加较大时,敏感性系数也较大,说明随着洪水流速的增加,应力增长速度加快。同样,随着运行内压的增加,应力增长速度也加快。下切角度和埋深的敏感性系数相对较小,表明最大等效应力与参数变化呈线性关系。通过比较这5个影响因素的最大敏感性系数的绝对值,可以得出结论:管道壁厚对洪水作用下管道内的最大等效应力影响最大,其次是洪水流速、运行内压和埋深,而下切角度对最大等效应力影响最小。

5 结论

1)随着洪水流速、壁厚、运行内压、下切角度和埋深的增加,X80管道最大等效应力和位移在悬空20~30 m期间增长最快,因此在悬空30 m之前采取措施可以大幅降低管道失效的概率。

2)洪水流速、管径和运行内压与最大等效应力呈正相关,管道壁厚与最大等效应力呈负相关,下切角度在悬空过程中与最大等效应力呈正相关,在悬空到一定长度时,下切角度和埋深对最大等效应力影响不大,但下切角度与位移呈正相关,埋深与位移呈负相关。

3)下切角度越大,其本质上是悬空长度越多,进而导致最大等效应力越大。管径越大,随着悬空长

度的增加而引起最大等效应力增幅越小;运行内压会影响管道发生悬空后的初始最大等效应力。

4)通过敏感性分析发现,各影响因素对洪水作用下河流穿越管道的最大等效应力的影响程度排序为管道壁厚>洪水流速>运行内压>埋深>下切角度。因此,在设计管道时,需要综合考虑管道的安全性和经济性,确定合适的管道壁厚。此外,在管道运行期间,还应该考虑采取措施来降低管道失效的概率,例如改变河流流向、采取必要的稳管措施以及降低运行内压等,这些措施有助于保障管道的稳定运行和延长其使用寿命。

参考文献:

- [1] 刘鹏,李玉星,张宇,等.典型地质灾害下埋地管道的应力计算[J].油气储运,2021,40(2):157-165.
LIU Peng, LI Yuxing, ZHANG Yu, et al. Stress calculation of buried pipelines affected by typical geological hazards[J]. Oil & gas storage and transportation, 2021, 40(2):157-165 (in Chinese).
- [2] 刘啸奔,房茂立,郑倩,等.基于PFDHA的X80管道应变失效可靠度计算方法[J].应用力学学报,2022,39(1):148-154.
LIU Xiaoben, FANG Maoli, ZHENG Qian, et al. Reliability calculation method for X80 pipeline's strain failure based on PFDHA[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(1):148-154 (in Chinese).
- [3] 王磊,赵志超,蔡强.洪水对穿河天然气管道载荷影响研究[J].油气田地面工程,2020,39(5):47-52.
WANG Lei, ZHAO Zhichao, CAI Qiang. Study on influence of flood on load of natural gas pipeline crossing river[J]. Oil-gas field surface engineering, 2020, 39(5):47-52 (in Chinese).
- [4] 张鹏,龙会成,李志翔,等.黄土湿陷过程下埋地油气管道力学行为有限元模拟[J].中国安全生产科学技术,2017,13(5):48-55.
ZHANG Peng, LONG Huicheng, LI Zhixiang, et al. Finite element simulation on mechanical behavior of buried oil/gas pipeline in loess collapse process[J]. Journal of safety science and technology, 2017, 13(5):48-55 (in Chinese).
- [5] 王利金,刘锦昆.埕岛油田海底管道冲刷悬空机理及对策[J].油气储运,2004,23(1):44-48.
WANG Lijin, LIU Jinkun. The scouring span and its control methods for subsea pipeline in Chengdao Oilfield[J]. Oil & gas storage and transportation, 2004, 23(1):44-48 (in Chinese).
- [6] 杨兵,高福平,吴应湘.单向海流荷载下海底管道局部冲刷试验研究[J].工程力学,2008,25(3):206-210.
YANG Bing, GAO Fuping, WU Yingxiang. Experimental study on local scour of sandy seabed under submarine pipeline in unidirectional currents[J]. Engineering mechanics, 2008, 25(3):206-210 (in Chinese).
- [7] 时米波,陈国明,孙友义.基于管土耦合模型的海底管道管跨涡激振动分析[J].石油矿场机械,2007,36(10):5-8.

- SHI Mibo, CHEN Guoming, SUN Youyi. Flow induced vibration analysis on submarine pipeline span based on pipe-soil coupling model[J]. Oil field equipment, 2007, 36(10):5-8(in Chinese).
- [8] 王晓霖, 帅健. 洪水中漂浮管道的应力分析[J]. 工程力学, 2011, 28(2):212-216.
- WANG Xiaolin, SHUAI Jian. Stress analysis of pipeline floating in flood[J]. Engineering mechanics, 2011, 28(2):212-216(in Chinese).
- [9] 魏孔瑞, 姚安林, 张照旭, 等. 埋地油气管道悬空沉降变形失效评估方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(6):68-73.
- WEI Kongrui, YAO Anlin, ZHANG Zhaoxu, et al. Study on method for assessing failure of settlement and deformation of buried oil and gas suspended pipelines[J]. China safety science journal, 2014, 24(6):68-73(in Chinese).
- [10] 李思嘉, 段庆全, 张宏, 等. 洪水中悬跨管道加装防护索的力学行为及布索方案[J]. 天然气工业, 2016, 36(2):102-109.
- LI Sijia, DUAN Qingquan, ZHANG Hong, et al. Mechanical behaviors of protection cables installed on free-spanning pipelines in floods and its installation program[J]. Natural gas industry, 2016, 36(2):102-109(in Chinese).
- [11] 王慧, 马峻, 曹梦凡. 洪水冲击下法兰连接管道失效流速和长度研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(2):99-103.
- WANG Hui, MA Jun, CAO Mengfan. Study on failure water velocity and length of flanged pipe under impact of flood[J]. China safety science journal, 2018, 28(2):99-103(in Chinese).
- [12] 詹婷雯, 陈利琼, 徐佳, 等. 洪水作用下马惠宁穿越管道的应力分析[J]. 应用力学学报, 2019, 36(3):625-630.
- ZHAN Tingwen, CHEN Liqiong, XU Jia, et al. Stress analysis of Ma Huining cut-crossing pipeline in the flood[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2019, 36(3):625-630(in Chinese).
- [13] 薛俊卓, 詹辉, 张国良, 等. 长输油气管道河沟段水毁灾害气象风险评价研究[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(2):168-174.
- XUE Junzhuo, ZHAN Hui, ZHANG Guoliang, et al. Meteorological risk assessment of river channel washout disaster of long-distance oil and gas pipelines[J]. Safety and environmental engineering, 2020, 27(2):168-174(in Chinese).
- [14] LIU M M, JIN X, WANG L, et al. Numerical investigation of local scour around a vibrating pipeline under steady currents[J]. Ocean engineering, 2021, 221:108546.
- [15] YAO W D, DRAPER S, AN H W, et al. Experimental study of local scour around submerged compound piles in steady current[J]. Coastal engineering, 2021, 165:103831.
- [16] 王新慧, 李恒, 李兵, 等. 基于 ANSYS 的洪水漂浮管道的有限元分析与安全评估[J]. 中国特种设备安全, 2022, 38(7):51-54.
- WANG Xinhui, LI Heng, LI Bing, et al. Finite element analysis and safety assessment of flood floating pipeline based on ANSYS[J]. China special equipment safety, 2022, 38(7):51-54(in Chinese).
- [17] 赵林, 冯启民. 埋地管线有限元建模方法研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(2):53-57.
- ZHAO Lin, FENG Qimin. Research on methods for establishing FEM model of buried pipelines[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2001, 21(2):53-57(in Chinese).
- [18] HILL R. On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets[J]. Journal of the mechanics and physics of solids, 1952, 1(1):19-30.
- [19] 马廷霞, 吴锦强, 唐愚, 等. 成品油管道的极限悬空长度研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34(4):165-173.
- MA Tingxia, WU Jinqiang, TANG Yu, et al. Maximum suspended length of production pipeline[J]. Journal of Southwest Petroleum University(science & technology edition), 2012, 34(4):165-173(in Chinese).
- [20] 国家发展和改革委员会. 输油(气)钢质管道抗震设计规范: SY/T 0450—2004[S]. 北京:石油工业出版社, 2004.
- [21] 唐华辉, 田晨. 河流油气管道动应力特性及悬跨安全性分析[J]. 力学与实践, 2016, 38(6):631-635.
- TANG Huahui, TIAN Chen. Dynamic stress analysis and suspended span management for the crossing river oil and gas pipeline[J]. Mechanics in engineering, 2016, 38(6):631-635(in Chinese).
- [22] 郑金海, 鲍仕昱, 张蔚, 等. 河床下切对珠江三角洲峰值水位演变的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(4):1-6.
- ZHENG Jinhai, BAO Shiyu, ZHANG Wei, et al. Effect of channel deepening on the evolution of peak water level in the Pearl River Delta[J]. Journal of Hohai University(natural sciences), 2022, 50(4):1-6(in Chinese).
- [23] 于合理, 夏叶, 王之晗, 等. 采砂坑纵剖面尺寸对卵石河道河床演变影响数值试验——以石亭江双盛段为例[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(增刊2):83-91.
- YU Heli, XIA Ye, WANG Zhihan, et al. Numerical simulation study on effect of different longitudinal profile dimensions of sandpit on riverbed evolution of pebble channel—a case of Shuangsheng Section of Shiting River[J]. Advanced engineering sciences, 2017, 49(S2):83-91(in Chinese).
- [24] 姚安林, 赵璐, 陈谦, 等. 埋地管道强夯动力响应对土体参数的敏感性分析[J]. 天然气工业, 2017, 37(7):94-100.
- YAO Anlin, ZHAO Lu, CHEN Qian, et al. Sensitivity of dynamic response of buried line pipes under dynamic compaction to soil parameters[J]. Natural gas industry, 2017, 37(7):94-100(in Chinese).

(编辑 吕茵)