

文章编号: 1000-4750(2013)03-0152-07

河流穿越高压输气管道临界悬空长度的数值模拟研究

姚安林¹, 徐涛龙², 郑 健², 曾祥国², 陈华燕²

(1. 西南石油大学石油工程学院, 成都 610500; 2. 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065)

摘 要: 高压输气管道穿越河流时的力学行为受诸多因素影响, 河床边界条件的变化是重要影响因素之一。该文基于流体动力学和固体力学理论, 利用有限元软件 FLUENT 和 ANSYS 对高速水流冲击下的悬空管道进行了模拟分析。在总结出河床变化时悬空管道最大应力、位移变化规律的基础上, 得到不同水流速度作用下高压输气管道的临界悬空长度。并对“西气东输”一线和“川气东送”等管线工程进行实例分析, 所得计算结果对高压输气管道的日常维护和制定抗洪抢险方案具有一定的参考价值。

关键词: 输气管道; 河流穿越; 河床变化; 临界悬空长度; 数值模拟

中图分类号: TE88 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.09.0624

STUDY ON NUMERICAL SIMULATION OF CRITICAL SUSPENDED LENGTH OF HIGH-PRESSURE GAS PIPELINE CROSSING RIVERBED

YAO An-lin¹, XU Tao-long², ZHENG Jian², ZENG Xiang-guo², CHEN Hua-yan²

(1. College of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The mechanical behavior of a high-pressure gas pipeline crossing a river bed was affected by many factors, and the change of the boundary conditions in the river bed was one of the important factors. Based on the theory of fluid dynamics and solid mechanics, the suspended gas pipeline impacted by high-speed flow was simulated by using finite element software FLUENT and ANSYS. When a river bed was varying, on the basis of summarizing the variation law of the maximum stress and displacement of the suspended pipeline, we attained the critical suspended length of a high pressure gas pipeline under different flowing velocities. And the case study on the first trunk in a West-East gas pipeline project and the Sichua to Eastern China gas transmission pipeline are carried out, which would have some reference value to the routine maintainance of high pressure gas pipelines and the development of a flood resistance program.

Key words: gas pipeline; crossing riverbed; varying riverbed; critical suspended length; numerical simulation

河流穿随着西气东输管道和川气东送管道等国内干线输气管道的陆续建成投运, 高压输气管道河流穿越段的安全防护问题逐渐成为人们关注的

焦点^[1-2]。穿越管道的历史事故表明, 河床冲淤变化引起水下穿越输气管道局部裸露或悬空, 是威胁管道安全的主要诱因^[2-3]。20 世纪 90 年代, 黄金池

收稿日期: 2011-09-21; 修改日期: 2011-11-22

基金项目: 中国石油西气东输管道公司项目(XQSG101380); 国家科技支撑计划项目(2011BAK06B01)

通讯作者: 徐涛龙(1984—), 男, 浙江诸暨人, 博士生, 从事油气管道结构可靠性分析及风险评价等研究(E-mail: swpuxtl@163.com)。

作者简介: 姚安林(1959—), 男, 四川三台人, 教授, 工学学士, 从事油气管道结构可靠性分析、风险评价及完整性管理等研究(E-mail: yaoalt@sina.com)。

郑 健(1986—), 男, 重庆开县人, 硕士生, 从事工程结构有限元分析等研究(E-mail: zhengjian0405@163.com);

曾祥国(1960—), 男, 四川安岳人, 教授, 工学博士, 博导, 从事结构工程有限元分析和工程材料的本构关系、损伤、断裂及疲劳等研究(E-mail: xiangguo_zeng@yahoo.com.cn);

陈华燕(1982—), 女, 四川成都人, 工学博士, 从事结构工程有限元分析和微结构材料分子动力学等研究(E-mail: kay_chy@126.com)。

等^[4]研究了河流冲刷现象,着重强调了河床演变对河流冲刷的影响。蒲爱华^[5]等在 1998 年采用特定概率模型研究了水下穿越管道在不同工况下的可变荷载。基于对海底管道局部冲刷问题的研究^[6-7],杨兵等^[8]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。任艳荣^[9]、时米波等^[10]分别于 2004 年、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。本文首先利用 FLUENT 计算出水流对管道外壁的压力,然后利用 ANSYS 高级技术“生死单元”自动控制管道的悬空长度,分析了水平冲力作用下,管道在悬空过程中应力、位移的变化规律,求出了不同水流速度作用下高压输气管道的临界悬空长度,并对悬空管道进行了临界状态分析。其中,采用管土共用节点的方法,考虑了河床土体的可压缩性对管跨约束的影响^[11-12]。

1 基本原理

为了尽可能反映真实的冲击过程,我们建立三维模型来模拟高雷诺数下的圆柱绕流。圆柱绕流时水流对管道的作用力有阻力和升力,而在高速水流作用下阻力对管道的破坏起主导作用。先利用 FLUENT 模拟不同管道外径在不同流速下的管道绕流,提取水流对管道的水平冲力,然后在 ANSYS 中把水平冲力等效为压力施加在悬空管道上,模拟管道在高速水流冲击下的响应。

对于悬空管道的研究,传统计算模型是将管跨两端作固支或简支处理^[13],完全不考虑土壤对支座性质的影响。本文考虑了管跨在支座处与土壤的作用,在 ANSYS 中同时建立管道与土壤的模型,弥补了传统计算模型的缺点。

1.1 流体阻力

作用在管道上的力,是描述管道与水流之间相对运动的一个重要方面。为使管道以恒定速度在静止流体中运动,必须施加外力。相应的,置于运动水流中的管道,如没有适当的力将其固定,则它会跟随水流运动。水流作用在管道上的与流动方向相同的力称为曳力,而管道反作用于水流上的大小与曳力相等、方向相反的力称为阻力。研究阻力的理论与实践,在工程上具有重要意义^[14]。

1.2 阻力产生的机理及因素

依据无旋运动理论,在无界的理想流体中运动的管道,将不受任何作用力,既无升力也无阻力。

产生阻力的根本原因是水流的黏性,根据流体力学理论,阻力是由水流绕管道流动时引起的压差和摩擦所造成的,分别成为压差阻力和摩擦阻力,两者都和水流的黏性有关。摩擦阻力是由剪切应力造成的,而压差阻力则是因为涡旋的存在导致管道前后两侧有压力差。

1.3 阻力公式及阻力系数

阻力由摩擦阻力和压差阻力两部分组成,但压差阻力占主导地位。可以认为压差是与相应水流速度的动压水头 $\rho U^2/2$ 成正比的,而阻力是压差和承压面积的乘积,因此,阻力与 ρU^2 成正比。

阻力的表达式^[15]为 $F_D = C_D A \rho U^2/2$ 。其中 C_D 为阻力系数, A 为管道在垂直于水流速度方向上的投影面积, ρ 为水流密度, U 为水流速度。

2 有限元模型

2.1 FLUENT 中的模型

图 1、图 2 分别为悬空管道三维示意图和有限元模型。为了让管后流场发展充分,管后的水域长度取前面的 5 倍,分别模拟来流速度为 10m/s、20m/s、30m/s、40m/s 时的流场。

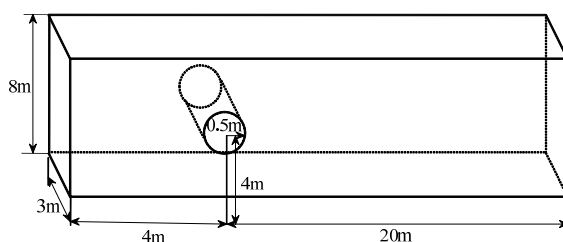


图 1 悬空管道三维示意图

Fig.1 3D schematic diagram of suspended pipeline

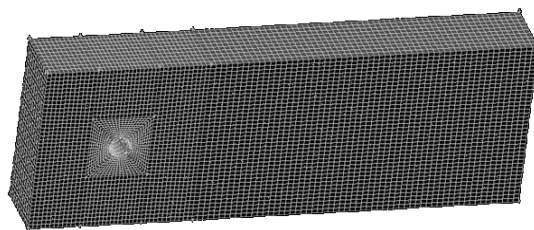


图 2 FLUENT 有限元模型

Fig.2 Finite element model of FLUENT

图 2 中入口边界条件为速度入口,上边界、下边界为固壁,出口为自由梯度出口。方程求解时采用非稳态 RNG $k-\varepsilon$ 模型获得旋涡模拟结果,迭代中压力速度耦合采用 SIMPLE 算法,湍动能和湍流耗散率采用二阶精度,计算收敛的精度设计为 10^{-4} ,以获得较为准确的结果^[16]。

2.2 ANSYS 中的模型

研究的物理力学模型如图 3 所示,河床的尺寸为 $4\text{m} \times 4\text{m}$,河床与水接触面的位移不受约束,其他面均约束其法向位移。管道的悬空过程为:管道埋于河床中,初始悬空长度为零,随着水流对河床的冲刷,管道外出现悬空,且悬空长度随着水流持续冲刷逐渐变大,最终达到临界悬空长度。

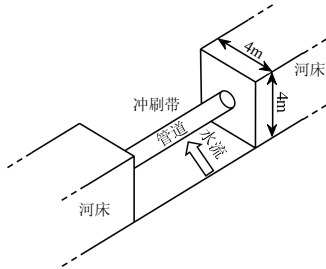
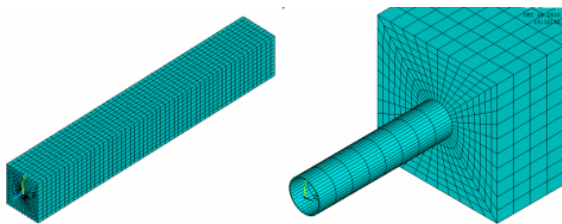


图 3 物理力学模型

Fig.3 Physical mechanics model

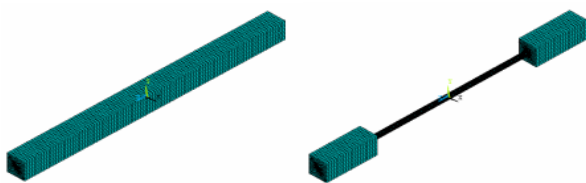
由于模型是对称的,为简化计算,取图 3 的一半建模,有限元网格如图 4 所示。河床和管道采用共用节点的 Lagrange 单元,通过选取合理的材料参数可一定程度上体现出河床的可压缩性对管道的约束影响。在全模型中,管道悬空过程如图 5 所示。



(a) 显示所有单元 (b) 不显示被杀死的单元

图 4 ANSYS 有限元模型

Fig.4 Finite element model of ANSYS



(a) 初始状态 (b) 临界悬空状态

图 5 管道悬空过程

Fig.5 The process of pipeline suspending

3 结果分析

3.1 管道外壁压力计算

由于管道的存在,管道周围流场参数梯度变化较大,流场如图 6 所示。

由于管道壁面对流体的黏滞作用,管道表面附

近有速度差,从而形成漩涡,流体继续向后发展,漩涡向前推进并周期性地脱离管道壁面,使管道产生纵向曳力。

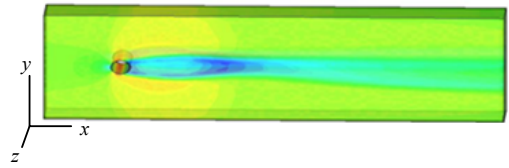


图 6 水流速度为 20m/s 时的流场

Fig.6 Flow field when flow velocity is 20m/s

从图 7 可以看出,洪水冲击作用下,管道主要受阻力的作用。由于压力分布接近正弦规律,因此从 FLUENT 中提取不同水流速度下管道水平方向合力,通过静力等效原理以正弦分布的压力加在管道上,如图 8 所示。

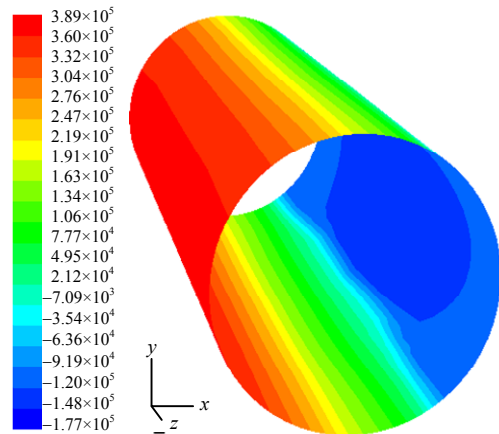


图 7 20m/s 时管道压力云图

Fig.7 Pressure contour of pipeline at 20m/s

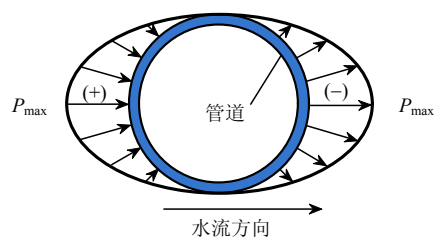


图 8 压力加载示意图

Fig.8 Schematic diagram of pressure loading

通过计算发现,水的动力黏滞系数对压力的计算结果影响很小,可近似取常数 $1.003 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。水流密度与洪水含沙量有关,取值如表 1 所示。以管道外径为 1.016m ,水流为低含沙洪水为例计算得最大压力 $P_{\max}$ 与流速 v 的关系式为 $P_{\max} = 0.00024v^2 + 0.00029v$,通过该公式计算水流对管道的压强大大提高了工作效率,为 ANSYS 中的分析提供了方便。

表1 洪水含沙量与密度的关系

Table 1 The relation between sand content and density of flood

含沙量水平	含沙量/(kg/m ³)	洪水密度/(kg/m ³)
低	10	1006
中	100	1060
高	200	1120
极高	300	1180

3.2 管道的应力位移分析

为了便于对比分析,在计算中采用统一的河床材料参数^[17]:密度为 1960kg/m³,弹性模量为 14.4MPa,泊松比为 0.2。管道材料采用西气东输工程中的 X70 钢:密度为 7900kg/m³,弹性模量为 210GPa,切线模量为 13.5GPa,泊松比为 0.3,屈服应力为 540MPa。

工况:管道外径为 1016mm,壁厚为 28mm,内压为 10MPa,水流速度为 20m/s。通过计算得出了不同悬空长度下管道的最大有效应力和最大位移,以及沿管道迎(背)水面中线在跨中和支座处的有效应力,如表 2 所示。

表2 不同悬空长度下管道的应力和位移

Table 2 The stress and displacement of pipeline related to different suspended lengths

悬空长度/ m	有效应力/MPa				最大有效应力/ MPa	最大位移/ mm
	迎水面 中线跨中	背水面 中线跨中	迎水面 中线支座处	背水面 中线支座处		
0	156	156	156	156	169	8
4	164	164	162	160	170	9
8	177	164	160	161	178	13
12	191	169	157	165	191	23
16	219	185	157	177	219	49
20	253	210	169	192	253	85
24	298	251	205	240	298	147
28	352	318	279	307	352	244
32	390	376	354	364	400	340
36	429	458	466	434	490	496
40	442	523	550	462	578	647

由表 2 的数据可得管道最大有效应力与悬空长度的关系(如图 9 所示),管道最大位移与悬空长度的关系(如图 10 所示)。

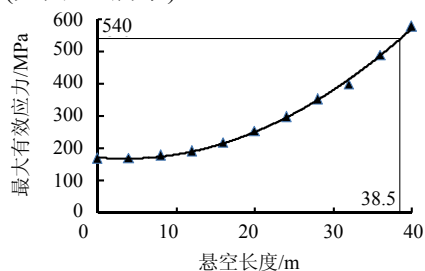


图9 最大有效应力与悬空长度关系图

Fig.9 The relation curve between maximum effective stress and suspended lengths

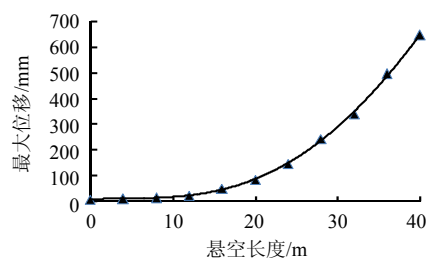


图10 最大位移与悬空长度关系图

Fig.10 The relation curve between maximum displacement and suspended length

从图 9 和图 10 中可以看出,管道的最大有效应力和最大位移都随悬空长度的增大而增大,且随着悬空长度的增大,最大有效应力和最大位移增长得越来越快,管道失效的危险性也越来越大^[18]。由图 9 可得,管道悬空长度为 38.5m 时,管道材料就进入屈服阶段,进而发生管道破坏。

3.3 管道的应力场分布

当悬空长度为 38.5m 时,管道开始进入屈服阶段,因而悬空长度为 38.5m 左右是我们比较关心的状态。此时管道的有效应力如图 11 所示。

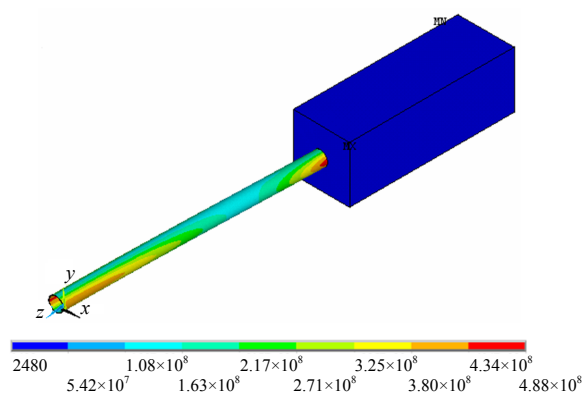


图11 管道的有效应力云图

Fig.11 The effective stress contour of pipeline

沿管道迎水面中线的有效应力分布如图 12 所示,可以看出,从悬空管道中部到端部,沿中线的有效应力先减小后增大,且应力值在距悬空管道中部 13.5m 处最小,在支座处最大。

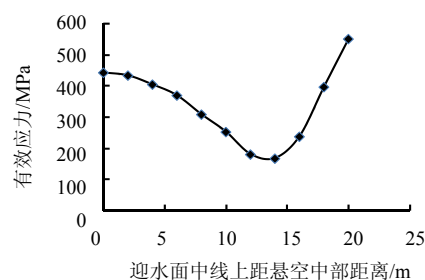


图12 沿管道迎水面中线的有效应力分布

Fig.12 The distribution of effective stress along front midline of pipeline

沿管道背水面中线的有效应力分布如图 13 所示。通过分析发现,当管道悬空长度较小时,有效应力最大的单元出现在背水面中线的跨中部位,当悬空长度接近临界长度时,有效应力最大的单元出现在迎水面中线与支座交界处附近。

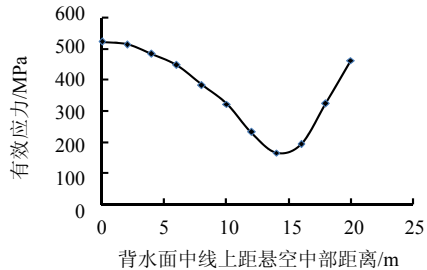


图 13 沿管道背水面中线的有效应力分布

Fig.13 The distribution of effective stress along rear midline of pipeline

以上分析只是水流速度为 20m/s 时的结果,通过改变水流速度可以进一步得到一般性的结论。即随着管道悬空长度的改变,有效应力最大的单元可能出现在以下 4 个部位:迎水面中线的跨中部位、背水面中线的跨中部位、迎水面中线与支座交界处附近、背水面中线与支座交界处附近。这些位置是应力分析,特别是临界状态分析重点关注的部位。

3.4 临界悬空长度分析

为了确保在洪水作用下管道的安全,研究不同水流速度下管道的临界悬空长度具有重要意义。使用管道有效应力达到材料屈服应力作为判断管道失效的标准(不考虑安全系数),计算不同水流速度、不同管壁厚度情况下管道的临界悬空长度,如表 3 所示。

表 3 不同水流速度下不同管壁厚度对应的临界悬空长度(管径 1016mm, 操作压力 10MPa, 材质 X70)
Table 3 The critical suspended length on different flow velocities and pipe thicknesses (pipeline diameter 1016mm, operating pressure 10MPa, material quality X70)

水流速度/(m/s)	临界悬空长度/m			
	管壁厚度 14.6mm	管壁厚度 17.5mm	管壁厚度 21.0mm	管壁厚度 26.2mm
10	40.5	49.7	56.4	66.1
20	23.8	28.3	31.5	36.6
30	14.5	16.7	18.8	20.8
40	9.1	10.6	12.8	16.1

由表 3 可得到管壁厚度一定时临界悬空长度和水流速度的关系。即在管壁厚度相同的条件下,当水流速度增加时管道破坏的临界悬空长度会缩短,这一结果与水流速度增加使曳力增大相对应。在相同水流速度条件下,壁厚的管道发生破坏的临界悬

空长度比壁薄的管道破坏的临界悬空长度要长,壁厚的管道承载能力较大。管道临界悬空长度的确定是保证管道的安全,避免发生管道断裂的重要依据,对洪水多发地带的管道穿越河流的施工提供了理论支持。

3.5 实际管线的计算结果

为了分析河流穿越输气管道在水流荷载下的响应规律,针对“西气东输”一线工程和“川气东送”工程等实际管线,选取不同水流速度、不同管壁厚度分别进行计算和研究。对于实际工程,应考虑一定的安全系数。根据 DNV《海底管线规范》^[19]中的荷载和抗力系数设计方式(LRFD)考虑安全系数。规范认为,如果设计荷载效应没有超过设计抗力就认为满足安全水平,即当 $L_d \leq R_d$ 时管线处于安全状态。本文按规范要求取值如下:

L_d 为设计荷载效应,取有限元计算的有效应力; R_d 为设计抗力,按公式 $R_d = f_y \alpha_u / (\gamma_{sc} \gamma_m)$ 计算。其中: f_y 为 X70 钢的屈服应力,取 540MPa; α_u 为材料强度系数,取 0.96; γ_{sc} 为安全等级抗力系数,取 1.138; γ_m 为材料抗力系数,取 1.15。计算得到 $R_d = 396\text{MPa}$,即为考虑安全系数后的管道屈服应力。

表 4 和表 5 为实际管线在不同水流速度和不同管壁厚度下的临界悬空长度。管道参数与实际管线

表 4 “西气东输”一线主干线临界悬空长度(管径 1016mm, 操作压力 10MPa, 材质 X70)
Table 4 The critical suspended length of the trunk in West-East gas pipeline (pipeline diameter 1016mm, operating pressure 10MPa, material quality X70)

水流速度/(m/s)	临界悬空长度/m			
	管壁厚度 14.6mm	管壁厚度 17.5mm	管壁厚度 21.0mm	管壁厚度 26.2mm
10	17.4	27.5	34.7	42.5
20	9.2	14.5	18.2	22.0
30	6.4	10.0	12.3	15.1
40	4.6	7.7	9.6	11.6

表 5 “川气东送”南京支线(十字镇-金坛分输站)临界悬空长度(管径 813mm, 操作压力 10MPa, 材质 X70)
Table 5 The critical suspended length of Nanjing branch line (Shizi town-Jintan station) of Sichuan to Eastern China gas transmission pipeline (pipeline diameter 813mm, operating pressure 10MPa, material quality X70)

水流速度/(m/s)	临界悬空长度/m			
	管壁厚度 12.5mm	管壁厚度 14.0mm	管壁厚度 16.8mm	管壁厚度 21.0mm
10	22.3	26.8	32.9	40.0
20	12.4	14.6	17.9	21.6
30	8.3	10.0	12.4	15.0
40	6.3	7.7	9.9	11.6

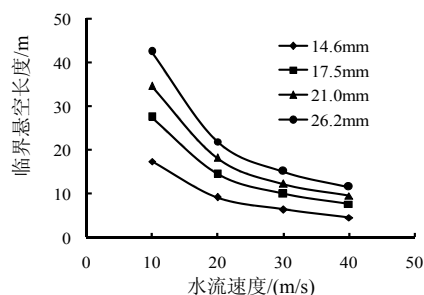
一致, 参数设置详见自主开发的计算河流穿越工况的程序 FSI 界面, 如图 14 所示。



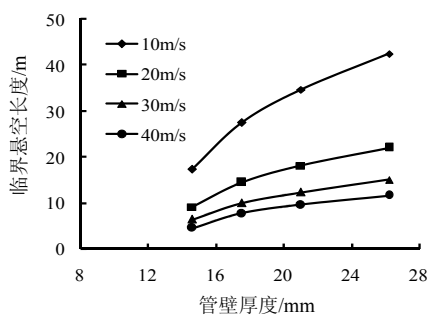
图 14 河流穿越程序 FSI 界面及参数设置

Fig.14 FSI interface and parameters setting of program for crossing riverbed pipeline

管道临界悬空长度与水流速度和管壁厚度之间的关系如图 15 和图 16 所示。



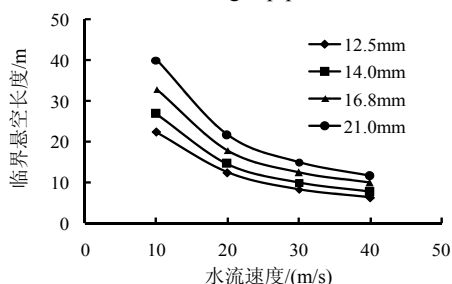
(a) 临界悬空长度与水流速度关系曲线



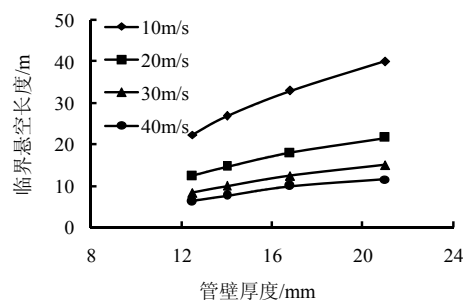
(b) 临界悬空长度与管壁厚度关系曲线

图 15 “西气东输”主干线临界悬空长度分析曲线

Fig.15 The curve of critical suspended length of the trunk in West-East gas pipeline



(a) 临界悬空长度与水流速度关系曲线



(b) 临界悬空长度与管壁厚度关系曲线

图 16 “川气东送”南京支线临界悬空长度分析曲线

Fig.16 The curve of critical suspended length of Nanjing branch line of Sichuan to Eastern China gas transmission pipeline

4 主要结论

(1) 通过 FLUENT 计算得到不同速度下水流对管道的阻力(水平冲力), 拟合得出管径为 1.016m 的管道在水流冲击作用下, 按正弦加载的最大压力计算公式为 $P_{\max}=0.00024v^2+0.00029v$, 已知水流速度, 即可方便快捷地求出管道所受的阻力, 提高了计算效率。

(2) 从不同水流速度入手, 以最大有效应力来分析管道的力学响应。分析结果表明: 随着管道悬空长度的改变, 有效应力最大的单元可能出现在以下 4 个部位: 迎水面中线的跨中部位、背水面中线的跨中部位、迎水面中线与支座交界处附近、背水面中线与支座交界处附近。这些位置是应力分析, 特别是临界状态分析重点关注的部位, 与文献[20]规律比较吻合。

(3) 以有效应力为判据, 确定不同水流速度、不同管壁厚度的管道发生破坏的临界悬空长度。分析结果表明: 在管壁厚度相同的条件下, 当水流速度增加时管道破坏的临界悬空长度会缩短; 在相同水流速度条件下, 壁厚的管道发生破坏的临界悬空长度比壁薄的管道破坏的临界悬空长度要长, 壁厚的管道承载能力较大。

(4) 在 4 种水流速度下, 对 8 种不同规格及运行条件的实际管线进行数值模拟和分析, 获得了具有工程指导意义的临界悬空长度, 为管道公司制定日常的防护措施(如铅丝石笼、隔离坝等)和抗洪抢险方案提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 唐兴华, 王颖. 油气管道的河流穿越技术进展[J]. 煤化工, 2009, 36(3): 53-56.
Tang Xinghua, Wang Ying. Advances in river crossing

- technology of petroleum and natural gas pipelines [J]. Coal Chemical Industry, 2009, 36(3): 53—56. (in Chinese)
- [2] Michael Porter, Rodolfo Reale, Gabriel Marcuz, et al. Geohazard risk management for the Nor Andino gas pipeline [C]// Hugh Harden, Joe Paviglianiti, Daryl Rosky. Proceedings of ICP2006, ASME, 2006.
- [3] 俞龙章. 河流穿越管线事故抢修方法概述[J]. 油气储运, 1991, 10(6): 14—19.
Yu Longzhang. Summarization of repairing methods for emergency of river crossing pipelines [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1991, 10(6): 14—19. (in Chinese)
- [4] 黄金池, 孟国忠. 管道穿河工程水毁灾害分析[J]. 泥沙研究, 1998, 42(2): 42—49.
Huang Jinchi, Meng Guozhong. Analysis on flood damage of crossing river pipeline project [J]. Journal of Sediment Research, 1998, 42(2): 42—49. (in Chinese)
- [5] 蒲爱华, 姚安林. 水下穿越管道可变荷载的统计分析[J]. 油气储运, 1998, 17(8): 7—10, 26.
Pu Aihua, Yao Anlin. Statistic analysis of variable load on underwater crossing pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1998, 17(8): 7—10, 26. (in Chinese)
- [6] Bijker E W, Leeuwestein W. Interaction between pipelines and the seabed under the influence of waves and currents [C]// Dennes B. Seabed Mechanics. London: Graham and Trotman, 1984: 235—242.
- [7] Sumer B M, Fredsoe J. The mechanics of scour in the marine environment [M]. New Jersey: World Scientific Publishing Company, 2002: 15—138.
- [8] 杨兵, 高福平, 吴应湘. 单向海流载荷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)
- [9] 任艳荣, 刘玉标, 顾小芸. 弹塑性海床上的管土相互作用分析[J]. 工程力学, 2004, 21(2): 84—87, 83.
Ren Yanrong, Liu Yubiao, Gu Xiaoyun. Analysis of pipe/soil interaction on elastic-plastic seabed [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(2): 84—87, 83. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 邢静忠, 柳春图. 轴向力作用下埋设于线弹性土壤中的悬跨管道振动分析[J]. 工程力学, 2010, 27(3): 193—197.
Xing Jingzhong, Liu Chuntu. Vibration analysis of spanning pipeline buried in linear elastic soil with axial force [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(3): 193—197. (in Chinese)
- [12] 邢静忠, 柳春图. 线弹性土壤中埋设悬跨管道的屈曲分析[J]. 工程力学, 2008, 25(10): 72—75.
Xing Jingzhong, Liu Chuntu. Buckling analysis of spanning pipe buried in linear elastic soil [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(10): 72—75. (in Chinese)
- [13] 邢静忠, 柳春图, 徐永君. 埋设悬跨海底管道的屈曲分析[J]. 工程力学, 2006, 23(2): 173—176, 162.
Xing Jingzhong, Liu Chuntu, Xu Yongjun. Buckling analysis of buried spanning submarine pipeline [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(2): 173—176, 162. (in Chinese)
- [14] 付冰. 水流作用下含轴向裂纹悬空管道数值分析[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2008.
Fu Bing. Numerical analysis of underwater suspended pipe with axial crack flaw [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2008. (in Chinese)
- [15] 陈卓如. 工程流体力学[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2004: 282—354.
Chen Zhuoru. Engineering fluid mechanics [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2004: 282—354. (in Chinese)
- [16] 姚熊亮, 方媛媛, 戴绍仕, 等. 基于LES方法圆柱绕流三维数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2007, 22(5): 564—572.
Yao Xiongliang, Fang Yuanyuan, Dai Shaoshi, et al. Three-dimensional numerical simulation of the flow past a circular cylinder based on LES method [J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 22(5): 564—572. (in Chinese)
- [17] 邢义锋. 复杂载荷下高压输气管道安全评定的数值模拟[D]. 成都: 四川大学, 2010.
Xing Yifeng. Numerical simulation of high-pressure gas pipeline safety assessment under complex loads [D]. Chengdu: Sichuan University, 2010. (in Chinese)
- [18] 王小龙, 姚安林. 埋地钢管局部悬空的挠度和内力分析[J]. 工程力学, 2008, 25(8): 218—222.
Wang Xiaolong, Yao Anlin. Deflection and internal force analysis of buried steel pipelines in partial hanging [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(8): 218—222. (in Chinese)
- [19] DNV-OS-F101, Submarine pipeline systems [S]. Norway: Det Norske Veritas, 2000.
- [20] 王沪毅. 输气管线在地质灾害中的力学行为研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
Wang Huyi. Research on failures of pipeline under geological disaster [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003. (in Chinese)