

文章编号: 1000-8241(2015)06-0599-05

黄土地区穿河管道失效风险

白路遥¹ 谭东杰¹ 李亮亮¹ 陶冶²

1. 中国石油管道科技研究中心油气管道输送安全国家工程实验室, 河北廊坊 065000;

2. 中国石油管道技术服务中心, 河北廊坊 065001

摘要: 黄土地区河流形成洪水的密度大, 流速快, 冲击力强, 容易导致河床冲刷造成管道悬空。为了评价该地区洪水对油气管道穿河悬空段的影响, 针对穿河管道悬空段的受力特点, 建立了管道力学模型。在此基础上, 根据信息熵理论建立了管道失效风险的计算与评价方法, 并以马慧宁输油管道悬跨段为例, 探讨了洪水作用下管道外径、壁厚、内压、悬跨长度及埋深 5 个参数的变化对管道失效风险的影响。分析结果表明: 管道应变能熵随洪水流速的变化曲线能够反映管道稳定性的变化规律; 管道失效风险系数对管道悬跨长度的变化最敏感, 而管道内压及埋深对管道失效风险影响相对较小。基于此, 建议在管道风险控制过程中降低管道的悬跨长度, 从而有效降低管道的失效风险。(图 7, 表 2, 参 9)

关键词: 油气管道; 悬跨; 洪水; 应变能熵; 失效风险

中图分类号: TE88

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2015.06.007

Failure risk analysis of river-crossing pipeline in loess area

BAI Luyao¹, TAN Dongjie¹, LI Liangliang¹, TAO Ye²

1. National Engineering Laboratory of Oil & Gas Pipeline Transportation Safety, PetroChina Pipeline R & D Center, Langfang, Hebei, 065000; 2. Technology service senter of PetroChina Pipeline, Langfang, Hebei, 065001

Abstract: With large density, high flow velocity and strong impact, river flood formed in loess area may scour riverbed, making the pipeline suspended. To evaluate the effect of flood on suspended section of river-crossing oil and gas pipeline in the area, considering the mechanics of the section, a mechanical model is built. Then, calculation and evaluation methods of pipeline failure risk are established according to the information entropy theory. Taking the suspended section of MaHuiNing Oil Pipeline as example, the effects of flood on pipeline failure in aspect of external diameter, wall thickness, internal pressure, suspension length and buried depth are discussed. Analysis results show that the changing curve of pipeline's strain energy entropy with the flood flow velocity can reflect the variation of the pipeline stability; the change of suspension length is has the most effects on pipeline failure risk coefficient, and the pipeline's internal pressure and buried depth have less effects on the risk. The pipeline's suspension length should be reduced in risk control to effectively reduce the failure risk. (7 Figures, 2 Tables, 9 References)

Key words: oil and gas pipeline, suspension, river flood, strain energy entropy, failure risk

长输油气管道在敷设中不可避免地经过地形地貌复杂地区, 尤其是黄土地区由于地表植被覆盖率极低, 土壤蓄水能力极差, 在短时间内形成极强的洪水径流, 导致地质灾害频繁发生, 容易导致沟岸坍塌、管道暴露, 一些特殊地区甚至发生管道大幅度悬空^[1-2]和管道变形^[3], 严重时会造成管道断裂事故, 特别是穿河管道安全受到极大威胁, 极易造成重大经济损失及生态环境破坏, 因此, 研究洪水作用下穿河管道的失效风险对

油气管道的安全可靠运行具有重要的现实意义^[4]。

近年来, 针对悬空管段受洪水作用的研究成果甚多, 主要包括: 采用有限元对洪水中漂浮管道的应力进行分析, 并根据极限状态理论对管道的安全性进行评判^[5]; 从不同角度对洪水作用下管道的悬跨长度进行安全评判^[6-7]; 从基于应变的设计准则出发, 评估油气管道悬空段的安全状态^[8]。根据信息熵理论^[9], 洪水作用下管道失稳过程是系统由无序向有序逐渐增加的

过程,其有序程度可用系统熵值反映,以下基于该理论对管道的失效风险进行评价,为穿河管道的失效风险的判定提供新的解决思路。

1 洪水作用下管道受力分析

1.1 基本作用力

无论管土及防护结构是何种相互作用方式,管道主要受到重力、浮力、动水作用力和地基土对管道的摩擦力(图1)。

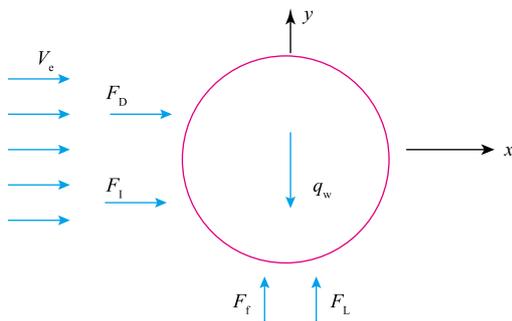


图1 洪水作用下管道荷载示意图

单位长度管道的重力 q_w 由管道本体及管体内介质的质量共同组成:

$$q_w = \pi[\rho_p D t + \rho_i (0.5 D - t)^2] g \quad (1)$$

式中: ρ_p 为管材密度, kg/m^3 ; D 为管道外径, m ; t 为管道壁厚, m ; ρ_i 为管道内介质密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 。

依据阿基米德原理,流体对管道单位长度的浮力 F_f 为:

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

$$\rho_w = \rho_0 (1 - S_v) + \rho_s S_v \quad (3)$$

式中: ρ_w 为洪水密度, kg/m^3 ; ρ_0 为单位体积洪水和沙的总密度, kg/m^3 ; ρ_s 为单位洪水中的沙密度, kg/m^3 ; S_v 为体积比含沙量(即单位体积水体中所含的泥沙颗粒体积)。

根据 Morison 方程,洪水对单位长度管道的动水作用力主要包括水流横向拖拽力 F_D 、惯性力 F_I 和竖向升力 F_L :

$$F_D = 0.5 \rho_w D C_D V_e^2 \quad (4)$$

$$F_L = 0.5 \rho_w D C_L V_e^2 \quad (5)$$

$$F_I = \frac{1}{4} \pi \rho_w D^2 C_M \left(\frac{dv}{dt} \right) \quad (6)$$

式中: V_e 为平均水流速度, m/s ; C_D 为动水阻力因数;

C_L 为举升力因数; C_M 为动水惯性因数; dv/dt 为管道上水平水粒子加速度, m/s^2 。

当管道位于土层中时,周围土体对管道产生摩擦作用,单位长度管道受到的摩擦力:

$$f = \pi D \left[c + \frac{1}{2} \gamma h (1 + K_0) \text{tg} \phi \right] + q_w \text{tg} \phi \quad (7)$$

因此,土中管道对悬空段的水平拉力为:

$$S = \pi D \left[c + \frac{1}{2} \gamma h (1 + K_0) \text{tg} \phi \right] l' + q_w l' \text{tg} \phi \quad (8)$$

式中: c 为土的黏结力或管土界面粘结力, kPa ; K_0 为土的静止压力系数; ϕ 为土的摩擦角或管土界面摩擦角; γ 为土的容重, kN/m^3 ; h 为管道中心到地面的埋深, m ; l' 为梁伸入土体中的可变形长度, m 。

1.2 管道力学模型应用

以马惠宁输油管道悬跨为例(图2),土壤对其的作用可近似为简支,考虑管道受非悬空段和土层对悬空段的水平拉力 S ,得到简化力学模型(图3,其中 q_z 为管道所受竖向作用力, kN/m ,即 $q_z = q_w - F_L - F_f$; l 为管道悬空段长度, m)。



图2 管道悬跨段近似简支照片

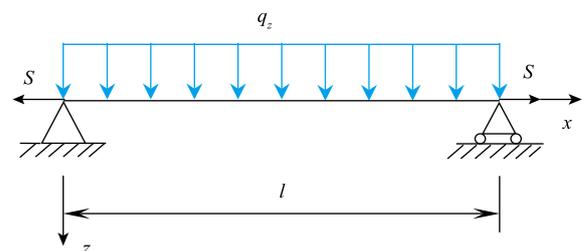


图3 管道悬跨段简化力学模型

1.2.1 只受竖向作用力

由图3中坐标系及受力条件,根据材料力学推导可知管道的竖向应力为:

$$\sigma_z^*(x, \theta) = \frac{ER q_z \sin \theta}{S} \left[1 - \frac{e^{-\beta(l-x)} + e^{-\beta x}}{1 + e^{-\beta l}} \right] \quad (9)$$

式中: E 为管道弹性模量, GPa ; R 为管道平均半径, m ; $\beta = \sqrt{\frac{S}{EI}}$; θ 为管道剖面内的环向坐标(图4)。

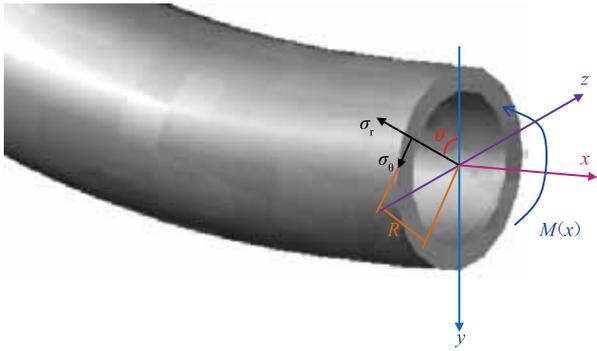


图4 管道坐标系示意图

1.2.2 有横向洪水作用

有洪水作用时,受横向水平力,即 $q_y = F_D + F_P$, 管道横向应力:

$$\sigma_y^{**}(x, \theta) = \frac{ERq_y \cos \theta}{S} \left[1 - \frac{e^{-\beta(l-x)} + e^{-\beta x}}{1 + e^{-\beta l}} \right] \quad (10)$$

1.2.3 由管道内压引起的应力

当管道发生弯曲变形时,内压引起的轴向应力为:

$$\begin{aligned} \sigma_p &= \nu \frac{p_a D}{2t} + \beta_0 \frac{p_a D}{4t} (1 - 2\nu) \\ \beta_0 &= (1 + 5m^2) / (1 + \frac{15m^2}{16\eta^2}) \\ m &= \frac{D}{2l}; n = \frac{f}{l} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: σ_p 为内压引起的轴向应力, MPa; p_a 为管道内压, MPa; ν 为泊松比; f 为悬空段管道的挠度, m。

1.2.4 管道轴向总应力

管道轴向总应力 $\sigma_1(x, \theta)$ 是拉力 S 所产生的轴向应力与以上 3 种应力之和, 即:

$$\sigma_1(x, \theta) = \frac{S}{A} + \sigma_z^{**}(x, \theta) + \sigma_y^{**}(x, \theta) + \sigma_p \quad (12)$$

式中: A 为管壁横截面积, m^2 。

2 洪水作用下管道应变能熵及失效风险系数

2.1 基本原理

管道在洪水作用下破坏失稳是从稳定态向非稳定态演变的过程。根据信息熵理论, 这一过程中管道的应变能信息熵与其所处状态的无序度存在对应关系, 因此, 可以通过分析管道结构在这一过程中的应变能熵变化来建立洪水作用管道失稳的辩证准则, 继而建立悬跨管道失效风险系数计算方法。设管道单元处于三向应力状态, 采用 R-O 本构模型, 其应变能为:

$$\begin{aligned} w(x, \theta) &= \frac{1+\nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] \\ &+ \frac{1-2\nu}{6E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + \frac{n\alpha}{(n+1)E\sigma_0^{n-1}} x \quad (13) \\ &\left\{ \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \right\}^{n+1} \end{aligned}$$

式中: α 、 n 为 R-O 模型参数, 由实验确定; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为管道轴向应力、环向应力和径向应力, MPa, 其中 $\sigma_2 = p_a D / (2t)$, 将管道视为薄壁桶, 则 $\sigma_3 = 0$ 。

应变能密度:

$$\rho(x, \theta) = \frac{w(x, \theta)}{\iint w(x, \theta) dx d\theta} \approx \frac{w(x, \theta)}{\sum_{x, \theta} w(x, \theta)} \quad (14)$$

根据信息熵理论, 管道的应变能熵可以表示为:

$$\begin{aligned} H &= - \iint \rho(x, \theta) \ln \rho(x, \theta) dx d\theta \\ &\approx - \sum_{x, \theta} \rho(x, \theta) \ln \rho(x, \theta) \end{aligned} \quad (15)$$

2.2 实例分析

管道的应变能熵值是关于管道外荷载的函数, 可进一步引申为关于洪水流速的函数。基于式 (15), 以马惠宁输油管道穿河悬跨段为例 (表 1), 计算了应变能熵值随管道外力的变化曲线 (图 5)。初始点 A 为系统不受外荷载影响时的熵值, 其反映了稳态系统特定指标的均匀性 (混沌态), 对于管道系统而言, 即为应变能分布的低差别性。随着外荷载 (洪水流速) 的增加, 管道中的应力逐渐增加, 进而出现屈服、弹塑性变形。由于管道受力不同, 各部分应变能的增加速率存在差异, 应变能在部分区域相对积聚, 系统均匀性逐渐降低, 差异性 (有序性) 逐渐增大, 当差异性增大到一定程度时, 管道发生失稳。熵值随外荷载变化曲线存在两个拐点 B 和 C , 对应管道应力状态随外荷载增加分别经历弹性阶段、屈服阶段和破坏阶段 (图 5)。

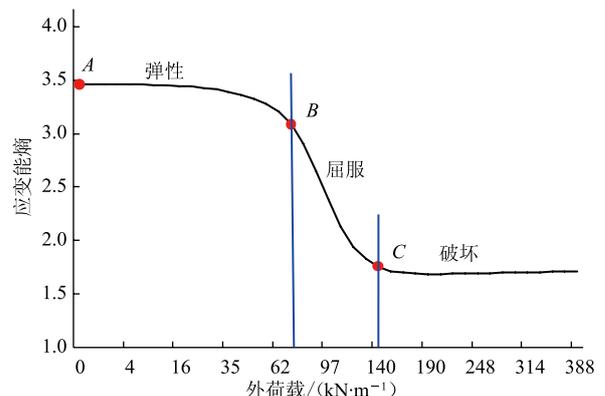


图5 管道应变能熵随外荷载变化曲线

表1 马惠宁输油管道穿河悬跨段参数

管材弹性模量/GPa	管材泊松比	R-O模型参数 α/n	管道外径/m	管壁厚度/m	屈服强度/MPa	管道埋深/m	管道内压/MPa	悬空段长度/m	管道上水平粒子加速度/($m \cdot s^{-2}$)
2.06×10^5	0.3	0.88/8.6	0.377	0.007	345	2	4.98	5	0
管土摩擦角/($^\circ$)	流体运动黏度/($m \cdot s^{-2}$)	土体泊松比	河水密度/($kg \cdot m^{-3}$)	管材密度/($kg \cdot m^{-3}$)	土体容重/($kN \cdot m^{-3}$)	管内介质密度/($kg \cdot m^{-3}$)	土体黏结力/kPa	静止土压力系数	悬空段管道中点的挠度/m
35	2×10^{-6}	0.25	1300	7800	18	800	25	0.43	0.063

根据熵值曲线的特点,从熵值角度定义管道失稳风险指数:

$$n_f = \frac{H(q) - H(A)}{H(C) - H(A)} \quad (7)$$

式中: $H(A)$ 为A点熵值; $H(C)$ 为C点熵值; q 为管道所受的外荷载,kN/m。

定义管道失效风险指数参考值:

$$n_f^c = \frac{H(B) - H(A)}{H(C) - H(A)} \quad (8)$$

式中: $H(B)$ 为B点熵值。

若某工况下管道的失效风险系数超过参考值 n_f^c ,表明管道的失效风险较大,应引起足够的重视。

根据管道应变能熵与洪水流速的关系(图6)可知,管道应变能熵随着洪水流速的变化而不断改变,熵值曲线存在两个拐点,拐点洪水流速分别为16.2 m/s和24.5 m/s,对于该管道工况, $H(A)=3.45$, $H(B)=3.18$, $H(C)=1.73$, $n_f^c=16.03\%$ 。根据不同流速下管道的风险系数(表2)可知,随着洪水流速的增大,管道的风险系数不断升高,当洪水流速达到18 m/s时,风险系数为32.2%,表明该流速在熵值变化曲线上已经越过B点,属于管道屈服阶段,管道的失效风险较高,但管道仍处于稳定状态;当洪水流速达到25 m/s时,相应熵值已超过C点,此时管道将发生整体失稳破坏。目前,该穿河段水流流速小于16.2 m/s,因此,该悬空段管道处于稳定状态。

表2 不同洪水流速下管道的风险系数

洪水流速/($m \cdot s^{-1}$)	风险系数/%	洪水流速/($m \cdot s^{-1}$)	风险系数/%
5	0.1	18	32.2
10	1.8	20	62.8
15	10.5	25	101.2

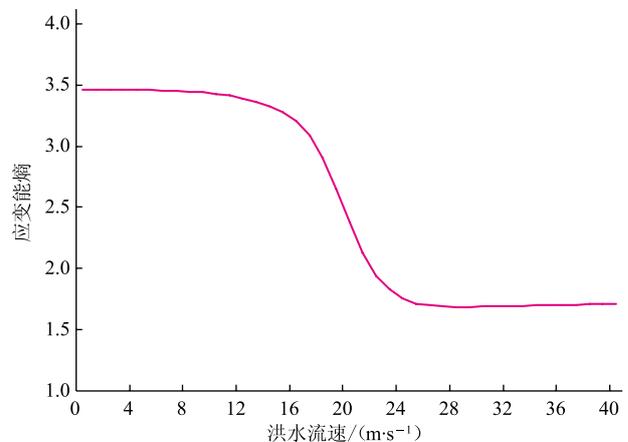
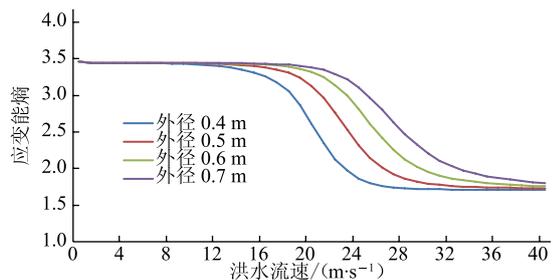


图6 管道应变能熵随洪水流速的变化曲线

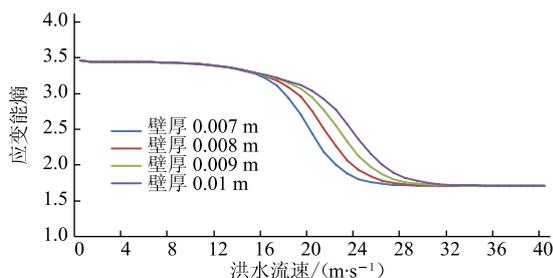
3 管道参数变化对管道熵值的影响

为了对洪水作用下管道的风险控制提供科学依据,在马惠宁输油管道穿河段裸露工况的基础上分别计算了管道外径、壁厚、内压、悬跨长度、埋深5种管道参数分别变化时,对管道熵值的影响。

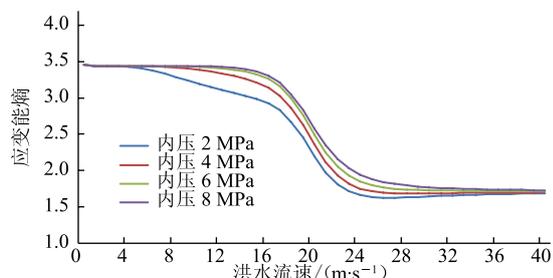
对比图7a~图7e可知,洪水作用下管道应变能熵对管道外径、壁厚和悬跨长度的敏感性较高,其中,管道悬跨长度的变化对应变能熵的影响最为明显。当悬跨长度由5 m逐渐增加至20 m时,管道的失效风险系数参考值由16.03%升高至34.51%。而管道内压及埋深对管道的应变能熵影响较小。因此,管道直径越大、管壁越厚、悬跨长度越短,管道屈服和失稳所需的洪水流速越大,管道抵抗洪水荷载的能力越强,失稳风险系数越低。在实际管道洪水风险控制中,管道的悬跨长度是5个参数中最容易控制的,因此建议修建管道保护结构,将长悬跨管道分割成若干个短跨管道,从而显著降低管道的失效风险系数。



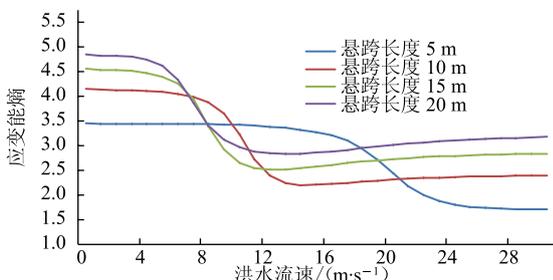
(a)管道外径变化对管道熵值的影响



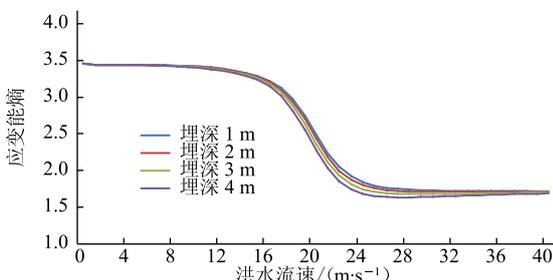
(b)管道壁厚变化对管道熵值的影响



(c)管道内压变化对管道熵值的影响



(d)管道悬跨长度变化对管道熵值的影响



(e)管道埋深变化对管道熵值的影响

图7 管道参数变化对其应变能熵的影响曲线

历了弹性阶段、屈服阶段和破坏阶段,应变能熵变化曲线达到的不同状态反映了不同流速洪水作用下管道所处的稳定性状态。

(2)管道悬跨长度的变化对管道的失效风险影响最大,管道外径及壁厚的影响次之,而管道内压及埋深的影响较小,建议从控制管道悬跨长度的角度降低管道的失效风险。

参考文献:

[1] 冯庆善,陈健峰,艾慕阳,等.管道完整性管理在应对地震灾害中的应用[J].石油学报,2010,31(1):139-143.
 [2] 马立平,李允.地理信息系统辅助油气管道安全可靠分析[J].石油学报,2006,27(3):126-129.
 [3] 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.
 [4] 余建星,祁世芳.一种新的输油管道可靠性分析方法[J].石油学报,2003,24(1):85-88.
 [5] 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.
 [6] 谭东杰,施宁,李亮亮,等.洪水冲击流动管道基于DQM的临界长度研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2013,35(4):173-179.
 [7] 李亮亮,朱洁,韩冰.穿越河流管道悬跨安全长度判定[J].长江科学院院报,2014,31(2):86-90.
 [8] 刘悦,李山,冯庆善.某成品油管道悬管段安全状态评价[J].油气储运,2011,30(5):390-392.
 [9] ROBERT M G. Entropy and information theory[M]. New York: Springer-Verlag, 2011.
 (收稿日期:2014-05-04; 修回日期:2015-02-25; 编辑:潘红丽)



作者简介:白路遥,助理工程师,1986年生,2013年硕士毕业于河海大学水文与水资源工程专业,现主要从事油气管道地质灾害防护技术研究。

BAI Luyao, MS.D, assistant engineer, born in 1986, graduated from Hohai University, hydrology and water resources engineering,

in 2013, engaged in the research of technologies against geological disasters in oil and gas pipeline.

Tel: 0316-2072313, Email: bailuyao@petrochina.com.cn

4 结论

(1)管道的应力状态随着洪水流速的增加逐渐经