

海底管道侧向屈曲分析

刘志刚, 孙国民

(海洋石油工程股份有限公司, 天津 塘沽 300451)

摘 要

侧向屈曲是非埋设海底高温高压管道运行期间常见的失效形式。由高温和高压造成的管道轴向应力是导致管道侧向屈曲的主要原因。本文对管道侧向屈曲进行了数学解析分析, 并给出了管道在实际运行状态下发生侧向屈曲时常出现的四种模态的力学分析结果。对某工程项目的海底管道进行了侧向屈曲的数值计算以验证其工程可靠性。从理论和工程实践两方面分析比较了控制侧向屈曲的各种方法。初步探讨了深水高温高压管道的侧向屈曲控制方法。

关 键 词: 海底管道; 高温高压; 有效轴力; 侧向屈曲

1 引言

随着我国海洋油气资源的开发和利用, 高温高压海底管道的建设日益增多。屈曲现象常见于运行期间的海底高温高压管道。当管道的操作温度和压力高于周围环境时, 管道将膨胀, 如果管道的轴向变形受到限制, 那么管道将承受轴向载荷。当管道中的轴向载荷达到一定值时, 管道就会因屈曲而产生两种弯曲变形: 海底埋设管道将发生上拱的弯曲变形, 称为隆起屈曲^[1]; 海底非埋设管道将发生水平侧向的弯曲变形, 称为侧向屈曲。两种屈曲都可以产生过量的位移和塑性变形, 均被认为是失效形式。从大量的理论和实践分析中发现, 在相同的温度和压力条件下, 侧向屈曲更加容易发生, 在两种屈曲形式中占据着主导地位^[2], 所以本文将重点研究海管侧向屈曲。图 1 即为海管侧向屈曲的旁侧声纳扫描图。



图 1 海管侧向屈曲的旁侧声纳扫描图

2 轴力产生的原因

海底管道发生侧向屈曲是由于其受到轴向力的作用, 产生轴向力的因素众多, 但最主要的是以下两种: 即对由高温和高压造成的管道轴向变形施加的约束而引起的轴向应力^[2]。

2.1 由高温引起的轴向应力

当管道中的油气温度较高的时候, 能够产生非常显著的轴向力, 轴向压力可由下式决定:

$$P_1 = EA\alpha T \quad (1)$$

式中 A 为管道的截面面积; E 为弹性模量; α 为热线弹性模量; T 为温度变化; P_1 为对热膨胀完全万方数据

约束时产生的力。

2.2 由高压引起的轴向应力

由于管道内部油气与管道外部海水之间的正压力差 p 造成轴向自由应变为 ε , 其值可由薄壁管道轴向和环向应力公式决定, 即

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \left(\frac{pr}{2t} - \nu \frac{pr}{t} \right) \quad (2)$$

式中 t 是管道壁厚; ν 是波松比; r 是管径。

如果轴向应变 ε 被完全约束住, 则参与产生屈曲的轴向力为:

$$P_2 = EA\varepsilon = \frac{Apr}{t} (0.5 - \nu) \quad (3)$$

2.3 两端完全约束管道的有效轴向应力

两端被完全约束的管道由于压力和温度的作用将经受以下的有效轴力 $P^{[3]}$ (在弹性范围内):

$$P = P_0 - P_1 - P_2 = P_0 - EA\alpha T - \frac{Apr}{t} (0.5 - \nu) \quad (4)$$

式中 P_0 为全约束条件下的端帽力, 其表达式为

$$P_0 = N - p_i \times \frac{\pi}{4} (D - 2t)^2 + p_e \times \frac{\pi}{4} D^2 \quad (5)$$

式中 N 为铺设张力, 当无预制张力时, 可取 $N = 0$; p_i 为管道运行时的内压; p_e 为管道所受的外压。

3 海底管道侧向屈曲的形态及数学表达式

3.1 海底管道侧向屈曲理论概述

管道的侧向屈曲常发生在平坦的海底, 成水平状蛇形扩展。由于侧向屈曲常产生过量的水平位移和塑性变形, 严格的讲是一种失效形式^[4]。影响管道侧向屈曲的因素有管道与介质在水下的重量或土壤约束力, 管道随海床起伏变化的初始形状, 管道的抗弯刚度, 管内介质的温度、压力和管道的边界条件。

管道实际运营中常会出现以下四种形态的侧向屈曲 (见图 2 的四种模态)^[4]。研究还表明模态三、四在较低的温度和压力下容易发生, 最为常见, 所以一般工程设计中只要对可能发生的模态三、四进行验证即可。以下将给出四种模态重要波形参数的数学表达式^[1]。

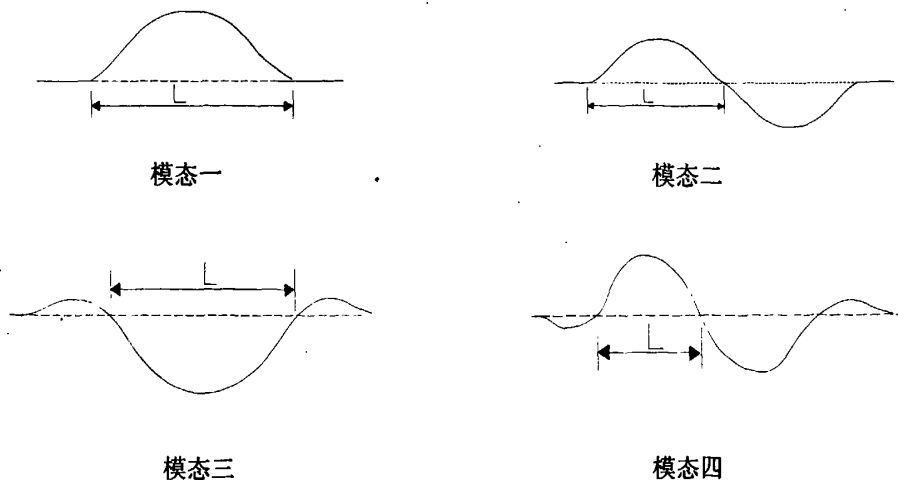


图2 侧向屈曲四种模态

3.2 对理想无限波数模态的分析

图 2 中的四种模态可视为无限波数模态（见图 3）的退化形式。无限波数模态是一种数学理想化模型，对其进行详细的分析，可求出其他四种退化模态的具体分析结果。

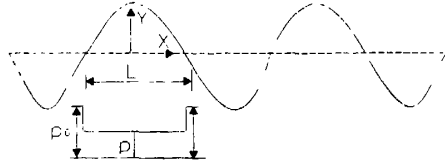


图 3 无限波数模态

设管道屈曲的半波长度为 L ，在屈曲后的长度上受到的轴力为 P ，包括覆盖土层和管子，物料自重的均布载荷为 q ，
屈曲轴向力为^[1,4]：

$$P_0 = 4\pi^2 \frac{EI}{L^2} + 4.7050 \times 10^{-5} AE \left(\frac{\phi \omega}{EI} \right)^2 L^6 \quad (6)$$

对式（6）取极小值时：

$$\bar{L} = \left[\frac{2.7969 \times 10^5 (EI)^3}{(\phi \omega)^2 AE} \right]^{0.125} \quad (7)$$

最小屈曲波幅为

$$\hat{y} = 4.4495 \times 10^{-3} \frac{\phi \omega}{EI} L^4 \quad (8)$$

最小弯矩为

$$\hat{M} = 0.05066 \phi \omega L^2 \quad (9)$$

最小斜率为

$$\hat{y}' = 0.01267 \frac{\phi \omega L^3}{EI} \quad (10)$$

3.3 四种屈曲模态的分析结果

以上为理想无限波数模态的数学求解过程。由于管道的初始形状及初始约束条件的不同，使得四种模态有不同的边界条件，方程总结如下^[1,4]：

$$P = k_1 \frac{EI}{L^2} \quad (11)$$

$$P_0 = P + k_3 \phi \omega L \left[\left(1.0 + k_2 \frac{AE \phi \omega L^5}{(EI)^2} \right)^{1/2} - 1.0 \right] \quad (12)$$

$$\hat{y} = k_4 \frac{\phi \omega}{EI} L^4 \quad (13)$$

$$\hat{M} = k_5 \phi \omega L^2 \quad (14)$$

$$\sigma_b = \frac{\hat{M} D}{2I} \quad (15)$$

式中 D 为管道外径。

表 1 侧向屈曲各模态常数

模态	常数				
	k1	k2	k3	k4	k5
1	80.76	6.391×10^{-5}	0.5	2.407×10^{-3}	0.06938
2	$4\pi^2$	1.743×10^{-4}	1.0	5.532×10^{-3}	0.1088
3	34.06	1.668×10^{-4}	1.294	1.032×10^{-2}	0.1424
4	28.20	2.144×10^{-4}	1.608	1.047×10^{-2}	0.1483
∞	$4\pi^2$	4.7050×10^{-5}		4.4495×10^{-3}	0.05066

3.4 侧向屈曲失效分析

侧向屈曲的发生不一定意味着管道的失效，只有当管道的弯曲应力超出许用值时，管道才失效，即

$\sigma_b \leq \sigma_{all-b}$ 时，管道安全运营；

$\sigma_b > \sigma_{all-b}$ 时，管道失效。

其中
$$\sigma_{all-b} = \frac{(\sigma_H - 2\sigma_A) \pm \left[(2\sigma_A - \sigma_H)^2 - 4(\sigma_H^2 + \sigma_A^2 - \sigma_A\sigma_H - fd^2\sigma_y^2) \right]^{\frac{1}{2}}}{2} \tag{16}$$

σ_H 为环向应力： $(P_i - P_e)D/2t$ ；

σ_A 为轴向应力： P_0/A ；

σ_y 为最小屈服应力：根据管材性质依据 API 5L 规范选取；

fd 为 von mises 应力系数，依据 DNV 81 规范，Table 4-1，可选取 0.72；

ν 为波松比。

4 控制侧向屈曲的方法

在实际工程中经常会出现屈曲失效的情况，以下将分析如何克服和控制侧向屈曲。

4.1 控制侧向屈曲的理论方法

高温高压管道的设计方法包括避免屈曲和限幅屈曲。其中，避免屈曲是通过减小热载荷、增加弯曲刚度或增加土壤约束力，以达到完全消除管道失稳的目的；而限幅屈曲是允许管道发生屈曲，但将管道的位移及应变控制在允许范围内。具体措施如下^[5]：

(1) 增加管道横向或纵向的约束力，如加大埋深，外包混凝土层以增加管道配重合摩擦力，在管道上方堆积石块等。

(2) 将管道敷设成蛇形或水平面内的之字形，或采用热补偿器。

(3) 采用管中管或者集束管以增加侧向或竖向约束力和抗弯刚度。

(4) 安装过程中通过牵引或者用热介质赋予在管道中产生预拉力。

(5) 预冷（经热交换器预冷后再进入海底管道，降低管道的设计温度）。

(6) 上述两种或多种方法的结合。

表 2 列举了以上这些方法的作用、缺点、造价比较以及在具体项目中的实际应用。其中造价的大小是 1 为最低，7 为最高。

表 2 各种高温管道设计方法的比较结果

高温管道设计方法	作用	缺点	造价
增加约束	增加临界屈曲负荷	成本高, 需要有效的实施和维护	6
蛇形	有选择地设置侧向变形管	需要有效的屈曲控制;	1
之字形结构	道有规律的预弯	敷设过程复杂化	4
热补偿器	减轻热负荷	安装困难与泻后增加前期投入;	5
集束管, 管中管	增加弯曲刚度和约束力	增加造价和建造难度	7
预拉力	减轻高温负载	热水/介质的来源	2
预冷	减轻高温负载	需要额外的装置及低温问题	3
组方法举例	埋地	需要最小埋管深度	
(管中管与其它组合)	海床上	需要有效的屈曲控制	
	热补偿器	安装困难和滞后, 增加造价	

4.2 控制侧向屈曲的实例分析

在不同工程项目的高温高压管道设计中, 开发并应用了各种不同的方法, 其中大多数情况是成功的, 但也有些管道出现严重屈曲甚至破坏的情况。以下为 3 个高温管道实例:

(1) Petrobras 单层高温管道破坏

Petrobras 管道铺设于沼泽地带和 Guanabara 海湾, 将炼油厂 92℃ 高温稠油运输至港口。该管道长 15km, 直径为 406mm, 壁厚为 7.9mm, 由 APIX52 钢制成, 并有混凝土外包层。其地面或海床贯入深度为 2~100cm。

Petrobras 管道投入使用不久发现在 Guanabara 海湾边界地区因软覆土被冲走而发生侧向屈曲并破裂, 屈曲最大侧向位移为 4.5m。之后, 该管道被废弃, 取而代之的是一条之字形结构的新管道, 其直径为 457mm, 壁厚为 12.7mm, X52 钢, 50.8mm 厚混凝土外包层。

(2) Erksine 双层管破坏

Erksine 是在英国大陆架开采的第一个高温高压油田。Erskine 管道长 30km, 水深 92m。该管道由 406.4mm 内管和 508mm 外管构成, 设计介质温度为 150℃。为避免屈曲破坏, 该管道被置于海床上, 成蛇形弯曲。

Erksine 管道于 1997 年底投产, 2000 年 1 月 8 日因压力降低而中断生产。在随后的调查中发现, 一处管道严重破坏, 其它还有 9 处外管损伤。该管道破坏的原因有: 尽管管道设计成蛇形, 但运行时管道侧向屈曲未能都出现在设计位置; 侧向屈曲的幅度与与管土相互作用的大小密切相关, 原始设计中采用的参数不合理, 低估了管道应变, 因此整条管道随后被彻底更换。新管道的结构与旧管道一样, 但由于采用了预冷设备, 新管道的设计温度降为 120℃, 且埋入海床。新管道于 2000 年 11 月底投入使用至今, 保温材料为密度为 110kg/m³ 的聚氨酯泡沫。

(3) Glamis 管道

为避免屈曲发生, Glamis 油田开发时先将管道(外径为 169mm, 壁厚为 22mm, 多层高分子材料保温和防水)铺在海底, 将 75℃ 热水注入管道使管道出现弹性侧向预屈曲, 再将管道埋在屈曲后的位置。管道预屈曲长度为 30 m~45m, 侧向位移幅值为 0.9 m~1.9m, 屈曲间距为 200 m~960m。投入使用后在 103℃ 介质温度作用下, 管道侧向位移增加 0.5 m。实践证明, 用热水预热管道是十分有效的方法, 只要有热水源, 预热方案成本只是堆放石块方案的 20%。

5 某工程项目海底管道侧向屈曲的控制设计

对某海底管道工程项目应用 2、3 章的方法进行了海底管道侧向屈曲的设计计算。在原始设计中, 计算表明, 管道将发生严重的侧向屈曲。所以在进一步的详细设计中, 对管道进行了预冷处理, 将温度降到 104℃ 以下, 并适当增加了管道配重。改进后的设计参数如下:

表 3 海管设计参数

长度	水深	管径	壁厚	管材	设计温度	设计压力
8.7km	60m	273.1mm	20.6mm	API 5L X-65	103.7℃	13.8MPa
防腐层厚度	防腐层密度	保温层厚度	保温层密度	配重层厚度	配重层密度	环境温度
0.45mm	1440kg/m ³	40mm	100 kg/m ³	50mm	2950kg/m ³	16℃

按照 2、3 章的设计计算结果如下：

有效轴力 $S_{max} = -1585.51\text{kN}$,

管道屈曲的模态 3: $P_0 = -576.897\text{kN}$ $\hat{M} = 132.072\text{kN} \cdot \text{m}$, $\sigma_{all-b} = 234.351 \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$,
 $\sigma_b = 137.566 \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$. 有 $\sigma_b \leq \sigma_{all-b}$, 所以在模态 3 下, 管线未失效。

管道屈曲模态 4 的 $P_0 = -576.86\text{kN}$, $\hat{M} = 112.763\text{kN} \cdot \text{m}$, $\sigma_{all-b} = 234.353 \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$,
 $\sigma_b = 117.453 \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$,

有 $\sigma_b \leq \sigma_{all-b}$, 所以在模态 4 下, 管线未失效。

表明管道的屈曲被控制在了有效的范围内。

6 结论和展望

本文从理论上分析了海底管道侧向屈曲现象, 比较了有效控制侧向屈曲的各种方法。并将它们应用在海底管道工程设计中, 结果表明本文的理论在指导实际工程计算时是简便可靠的, 限幅屈曲设计是一种有效的设计方法。

今后应发展更加成熟的解析和数值方法验证海底高温高压管道设计方案, 并应大量引入有限元软件模拟实际工况, 并进一步发展更加经济简便的管道安装方法, 以控制侧向屈曲的发生。

参考文献:

[1] 帅健, 魏华中. 埋地管道的上浮屈曲分析[J]. 油气储运, 1998, 17 (1) :22-24

[2] R E, H. In-service buckling of heated pipelines[J]. Journal of Transportation Engineering, 1984,10(2).

[3] R E, H. and LIANG F. Thermal Buckling of Pipelines Close to Restraints[A]. Proceedings 8th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Eng. 121-127.

[4] TAYLOR N, TRAN V. Experimental and theoretical studies in subsea pipeline buckling[J]. Marine Structures, 1996, 9.

[5] 张好民,刘学杰,张宏. 海底高温管道的设计方法与应用[J].油气储运, 2005, 24(增刊): 80-84。

Analysis on the Lateral Buckling of Subsea Pipeline

LIU Zhi-gang, SUN Guo-min

(Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300451, China)

Abstract

The lateral buckling of the pipe is a common phenomenon in submarine HTHP pipeline during routine service. Compressive forces that cause the lateral buckling of the pipe are induced by the restraint of axial extensions due to high temperature and high pressure. The lateral buckling of the pipe is analyzed mathematically and theoretical solutions of four modes often happened practically are given. The methods controlled the lateral buckling of the pipe are analyzed theoretically and illustrated by some practical engineering project. The project illustrated in the paper uses the reducing temperature method to control the lateral buckling. The numerical results show that the designing method is reliable.

Key word: submarine pipeline; HTHP; effective axial force; lateral buckling

作者简介

刘志刚 男, 1979 年生, 硕士, 工程师。主要从事海底管道设计工作。

孙国民 男, 1966 年生, 学士, 高级工程师。主要从事海底管道设计工作。