

考虑椭圆化损伤的大直径薄壁海底管道铺设分析方法研究

韩 鹏^{1*}, 赵 嵩², 刘远征², 胡庆国¹, 刘黎明¹
(1. 中国石油天然气管道局天津设计院, 天津 300457;
2. 中国石油管道局工程有限公司, 河北 廊坊 065000)

摘要: 为避免张紧器对大直径薄壁海底管道(径厚比 $D/t \geq 45$)造成椭圆化损伤,须先应用大型有限元软件 ABAQUS 对张紧器造成的管道椭圆化进行分析,并结合 DNV 规范确定管道铺设安装期间张紧器的允许最大张紧力。而后应用 OFFPIPE 软件进行海底管道的安装分析,校核管道应力应变。对于大直径薄壁海底管道,是否考虑管道椭圆化损伤将会影响管道铺设方案的确定。

关键词: 海底管道; 铺管; 夹紧力; 椭圆化; ABAQUS; OFFPIPE

中图分类号: TE88

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2017)08-0217-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2017.08.051

Analysis methods research on laying larger diameter & thin wall seabed pipeline based on ovalisation damage

HAN Peng^{1*}, ZHAO Song², LIU Yuan-zheng², HU Qing-guo¹, LIU Li-ming¹

(1. Tianjin Design Institute, China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd., Tianjin 300457, China;

2. China Petroleum Pipeline Engineering Company Limited, Langfang 065000, China)

Abstract: In order to avoid tensioners to cause ovalization damage against large diameter & thin-wall seabed pipeline ($D/t \geq 45$), ABAQUS, the large-scale finite element software, is used to analyze the pipeline ovalization and determine the maximum allowable tension of tensioner during the installation of seabed pipeline based on DNV. Then, the stress and strain state of pipeline installation is checked by OFFPIPE. As for large diameter & thin-wall seabed pipeline, the ovalization shall be the critical factor for determination of pipeline installation scheme, whether or not.

Key words: seabed pipeline; pipe laying; clamping force; ovalization; ABAQUS; OFFPIPE

在海底管道进行铺设过程中,铺管船上的张紧器通过对海底管道的夹持作用,为其提供必要的张力,保证海底管道在铺设过程中的空间形态与应力满足规范要求。如果夹紧力和张力过大,可能会造成管道的椭圆化损伤,严重威胁管道的安装和运行安全。

1927年, Brazier^[1]最早对圆柱壳体截面的椭圆化变形进行了分析研究,将圆柱壳体截面的椭圆化变形称为 Brazier 效应。1970年, Dareing 等^[2]提出了用有限差分法求解二维平面管道铺设的微分方程,并以某 90 m 水深实例分析了不同张力作用下管道铺设整体形状及受力状态。2000年, DNV-OS-F101^[3]规范给出了管道的屈服损伤校核准则,规定海底管道的残余椭圆度损伤不能超过 3%。2006

年,田英辉^[4]通过室内实验以及实船实验分析了张紧器夹紧力对管道的破坏损伤。2013年,李斌等^[5]论述海底管道在铺设过程中与张紧器履带之间的滑动情况,并以典型项目为例对海底管道是否会与张紧器履带之间产生相对滑动进行了简要的计算分析。

一般海底油气管道壁厚较大,通常径厚比 $D/t < 45$,管道截面刚度大。通常应用 OFFPIPE 软件,假定管道截面不发生变形,将管道划分为“梁”单元进行铺管分析。该安装分析方法忽略了在安装过程中管道截面椭圆化损伤情况。而对于径厚比 $D/t \geq 45$ 的大直径薄壁海底管道,管道截面的变形不可忽略,在进行 OFFPIPE 安装分析前,需要先对其进行椭圆化损伤分析,评估管道截面变形程度,进而确定合理

的安装方案。

1 分析原理

1.1 圆形梁变形理论

当只考虑管道截面在二维平面内的变形情况时,由于其承受左右对称、上下对称的载荷作用,因此可以将其简化为一个 1/4 模型进行分析,如图 1 所示。此时横截面的变形可以相应地转化为考虑该圆形梁的径向挠度变形情况。

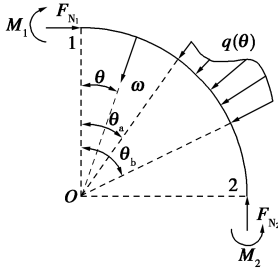


图 1 管道横截面 1/4 模型

在圆心角为 θ 处有指向圆心的挠度 ω ,在 $\theta_a \sim \theta_b$ 的范围内作用着载荷。根据对称性可知,在该圆形梁的两端 1 点和 2 点处的受力如图 1 所示,仅受到沿环向的压力作用,并各自受到一个弯矩的作用。假设在角度 θ 处该圆形梁截面弯矩为 $M(\theta)$ 。径向挠度 ω 的变形微分方程如式(1)所示^[6]。

$$d^2w/d\theta^2 + w = - [12(1 - \mu^2)M(\theta)R^2]/E\delta^3 \quad (1)$$

式中, E 为弹性模量; δ 为壁厚; μ 为泊松比; R 为截面半径。

该圆形梁的应变能 U 为:

$$U = \int_0^{\pi/2} (M^2 R d\theta / 2EI) \quad (2)$$

根据卡斯提也努 (Castigliano) 定理,应变能对弯矩 M_1 的偏导数等于点 1 处的转角。根据对称性可知,1 点处的转角 ω 为 0,有:

$$\partial U / \partial M_1 = (R/EI) \int_0^{\pi/2} M(\partial M / \partial M_1) d\theta = 0 \quad (3)$$

海底管道在承受夹紧力的作用时,其外载呈左右对称、上下对称,因此可以采用圆形梁变形理论进行分析。建立 1/4 模型,如图 1 所示可以得到管道横截面在 θ 处的径向载荷 $q(\theta)$,如式(4)所示。

$$q(\theta) = N/[R(\theta_b - \theta_a)] (\theta_a \leq \theta \leq \theta_b) \quad (4)$$

结合式(3),可得到管道横截面在 θ 处的弯矩 $M(\theta)$,如式(5)所示。

$$M(\theta) = - (2/\pi) \int_0^{\pi/2} M_0 d\theta + M_0 \quad (5)$$

其中:

$$M_0 = [(\cos\theta_a - \cos\theta_b)NR\cos(1 - \theta)]/(\theta_b - \theta_a) + G(\theta) \quad (6)$$

$$G(\theta) =$$

$$\begin{cases} 0 & \theta < \theta_a \\ -RN/(\theta_b - \theta_a)[1 - \cos(\theta - \theta_a)] & \theta_a < \theta < \theta_b \\ -RN/(\theta_b - \theta_a)[\cos(\theta - \theta_b) - \cos(\theta - \theta_a)] & \theta > \theta_b \end{cases} \quad (7)$$

将其代入变形微分方程式(1)中即可求得挠度变化的规律。

1.2 OFFPIPE 原理

在海底管道铺设过程中,OFFPIPE 将海底管道建立成系统的有限元模型,如图 2 所示,进行正常铺管、弃官和回收分析。OFFPIPE 生成的管道系统有限元模型是用户根据工程实际情况进行相关参数的输入,由 OFFPIPE 自动生成,不一定要求用户对有限元理论有很深入的了解。

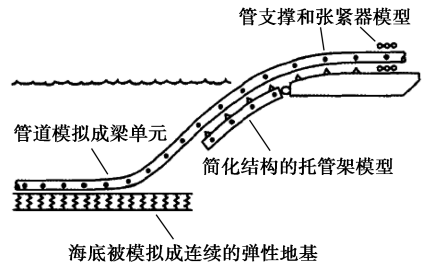


图 2 管道系统有限元模型

OFFPIPE 将铺管船上的管道或钢丝绳模拟成一连串管道和钢丝绳单元。这些单元从对口站或第一个张紧器一直延伸到铺管船尾部。铺管船上的管道和钢丝绳由一系列不连续的管和张紧器单元支撑。

OFFPIPE 将铺管船模拟成一个刚体。在静态分析中,铺管船的位置完全由驳船偏移、纵倾角和用户提供的艏向来定义,如图 3 所示。

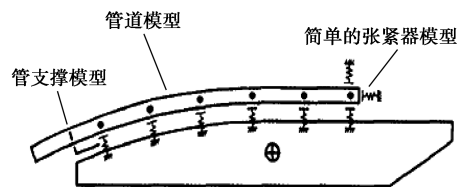


图 3 铺管船模型

在动态分析中,OFFPIPE 模拟了所有 6 种可能的铺管船运动。铺管船运动由波浪状况和用户给定的响应幅值算子 (RAOs) 来明确地定义。用户给定的波浪状况可以是一个单一的规则波,也可以是一

个二维的波谱。

1.3 ABAQUS 分析方法

大型有限元软件 ABAQUS 具有较强的非线性分析能力,能对分析模型的各项敏感性因素进行大批量的分析。本文中应用 ABAQUS 软件,主要目的为分析海底管道在张紧器的不同作用条件下的局部屈曲问题,因此分析类型为屈曲分析。

ABAQUS 软件提供了特征值屈曲分析和非线性屈曲分析 2 种方法,其中非线性屈曲分析采用非线性技术,分析模型中就可以考虑结构的初始缺陷、结构的塑性行为、间隙以及大变形响应等问题,也可以跟踪屈曲情况下的后屈曲行为,因而它的结果更接近实际情况。不过,此种分析方法对计算机要求也很高,计算时间、内存需求、硬盘存储空间消耗量均大于特征值分析。

余建星等^[7]利用 ABAQUS 软件建立海底管道在二维平面内的管道截面模型,分析了管道的椭圆化损伤,取得了满意的分析结果,说明采用软件数值模拟能准确地反映出管道截面的变形情况。本文中主要研究海底管道在张紧器压力作用下的大变形问题,借鉴文献^[7]采用的分析方法,分别对管道的椭圆度与等效应力等进行分析。

2 工程应用

某污水排海海底管道直径 1 016 mm,壁厚 15.9 mm,管道的径厚比达到了 64:1。大直径薄壁海底管道在通过张紧器的过程中,如果张紧器的张紧力过大,管道在较大压力作用下会发生局部屈曲、变形,从而导致管道破坏。为了避免该情况发生,需要在管道施工前对管道通过张紧器过程中的应力状态进行计算分析。

2.1 工程基础数据

(1) 海底管道数据

本工程所用钢管的基本数据:①管道规格 $\Phi 1\ 016\ \text{mm} \times 15.9\ \text{mm}$;②钢管屈服强度 360 MPa;③钢管最小抗拉强度 460 MPa;④钢管密度 $7\ 850\ \text{kg/m}^3$;⑤钢材等级 API 5L X52;⑥腐蚀余量 5 mm。

本工程海底管道的外包覆层为加强级 3 层 PE 防腐层,无混凝土配重层,防腐层具体属性:①厚度 4.2 mm;②密度 $940\ \text{kg/m}^3$ 。

(2) 铺管船与张紧器主要参数

在应用 OFFPIPE 进行海底管道铺管分析时,采

用 CPP601 铺管船进行数值模拟,该船具体参数见表 1。

表 1 CPP601 船主要参数

项目	描述	数值
主尺度/m	总长	120
	型宽	36
	型深	9.6
	操作吃水	6.0
	主甲板至水面高度	3.6
铺管设备/tonne	张紧器	2×60
托管架/m	半径范围	175~400
	总长度	72

CPP601 铺管船张紧器为垂直张紧器,最大张紧力为 2×60 t,夹持管道压力作用点分布于张紧器上下 2 组夹持机构,共计 120 个作用点,夹持每组夹持机构布置由两侧各 30 个作用点,每个作用点面积为 $15\ \text{cm} \times 15\ \text{cm}$,如图 4 所示。



图 4 铺管船张紧器

为保证计算的准确性,查询各种材料之间的摩擦系数如表 2 所示,进行分析时按聚乙烯与钢之间的摩擦系数进行考虑^[8]。

表 2 不同材质之间的摩擦系数

材料	材料	摩擦系数
聚乙烯	聚乙烯	0.12~0.33
钢	钢	0.1~0.2
聚乙烯	钢	0.18~0.27

2.2 张紧器引起椭圆化损伤分析

2.2.1 有限元建模分析

利用通用有限元分析软件 ABAQUS 进行数值分析,研究管道在张紧器张紧力作用下的椭圆化损伤。通过理论分析可知,管道在张紧器夹紧作用下,承受的外载荷呈左右对称、上下对称。在二维平面内分析夹紧力造成的椭圆化损伤,在建立 ABAQUS

模型时可以利用对称性,建立 1/4 模型进行分析计算,可以有效降低数值模拟的规模,缩短计算时间,如图 5 所示。

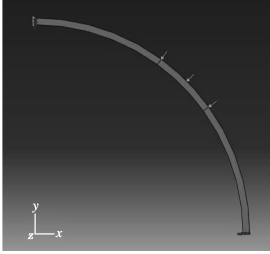


图 5 1/4 管道模型

为分析张紧力与压块作用角度对张紧器造成的海底管道椭圆化的影响,模拟分析的张紧力分别为 60、80、120 t,压块平面法线与管道截面水平方向夹角 45°~75°,每隔 5°进行分析计算。

通过分析管道 1/4 模型可获得如下相关数据:①管道随张紧器夹紧力的变化,管道长轴的长度变化,短轴的长度变化情况,进而根据 DNV 规范公式获得椭圆化损伤度;②管道随张紧器夹紧力的变化,管道应力变化;③张紧器压块不同作用角度下,海底管道椭圆化损伤及应力的变化情况。

2.2.2 计算结果分析

通过对直径 1 016 mm、壁厚 15.9 mm 的大直径薄壁海底管道进行分析,得到管道在张紧器的夹紧作用下的截面变形与应力变化,如图 6~图 8 所示。

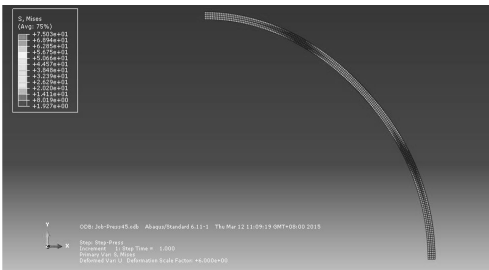
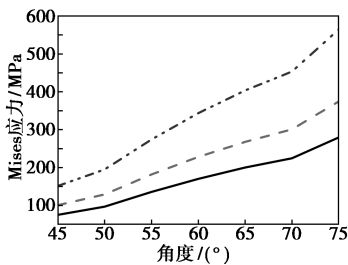


图 6 管道模型应力云图



1—60 t;2—80 t;3—120 t

图 7 张紧器作用下的管道应力

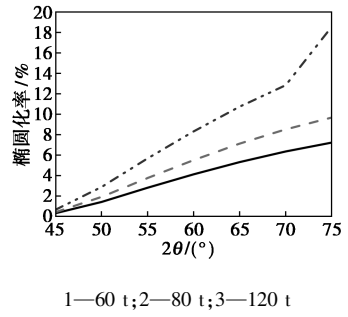


图 8 张紧器作用下的管道椭圆度损伤率

在 DNV 规范中,规定海底管道的残余椭圆化损伤不应超过 3%。因此,通过上述分析可以得出如下结论。

(1)当夹持角度一定时,张紧器的夹紧力越大,对管道的椭圆化损伤可能性越大。因此,在进行大直径薄壁海底管道铺设时,需要进行合理的计算分析,最终确定适用的张紧器张紧力。

(2)当张紧力一定时,张紧器压块的作用角度越大,对管道的椭圆化损伤越严重。

(3)直径为 1 016 mm,壁厚 15.9 mm 的大直径薄壁海底管道进行铺设安装时,张紧器提供的张紧力不宜超过 60 t。

2.3 OFFPIPE 安装分析

采用 OFFPIPE 进行铺管应力分析,计算水深取 27 m 进行计算,校核准则如表 3。由于本工程管道为无混凝土配重层大口径薄壁管道,需进行充水施工^[9]。

表 3 安装分析校核准则

位置	项目	数值
上弯段	最大应变	0.205%
下弯段	最大 Von-Mises 等效应力	0.72 SMYS

通过椭圆化损伤计算得出,本工程海底管道安装时,张紧器提供的张紧力不宜超过 60 t。为验证椭圆化损伤计算的必要性,在应用 OFFPIPE 软件进行安装分析时,考虑如下 2 种工况:不考虑管道截面变形影响,张紧力设定为 90 t;考虑管道截面变形影响,张紧力设定为 40 t。

(1)不考虑截面变形,张紧力 90 t

应力分析结果如表 4。

(2)考虑截面变形,张紧力 40 t

由于考虑管道截面变形影响,需要对张紧器的张紧力进行限制。为保证张紧力的要求,铺设时需要在管道上安装浮筒。应力分析结果如表 5。

表4 张紧力 90 t 铺管分析结果

项目	数量
张紧器张力	90 t(883 kN)
弯曲段曲率半径/m	350
上弯段最大应变/%	0.171
最大许用应变/%	0.205
下弯段最大应力/SMYS	68.53%
最大许用应力/SMYS	72%
状态	OK

表5 张紧力 40 t 加浮筒铺管分析结果

项目	参数
张紧器张力/kN	400
弯曲段曲率半径/m	400
上弯段最大应变/%	0.154
上弯段许用应变/%	0.205
下弯段管道最大应力/SMYS	71.04%
下弯段许用应力/SMYS	72%
状态	OK

通过 OFFPIPE 软件的安装分析计算,可以得出以下结论。

(1)不考虑管道截面变形影响时,张紧力 90 t 就能满足安装要求。

(2)考虑管道截面变形影响时,需要对张紧器的张紧力进行限制,张紧力 40 t,同时需要加浮筒才能满足要求。

(3)对于大直径薄壁海底管道,是否考虑管道

椭圆化损伤将会影响管道铺设方案的确定。

3 结语

在海底管道铺设安装过程中,张紧器的张紧力与压块作用角度的变化可能会对管道造成椭圆化损伤。根据 DNV 规定,管道铺设安装期间的椭圆化损伤不得超过 3%,利用 ABAQUS 有限元分析软件对管道在铺设过程中所能承受的最大张紧力进行计算分析,能有效保证管道的铺设安全。

参考文献

- [1] Brazier L G. On the flexure of thin cylindrical shells and other thin section[J]. Pro R Soc Lond A, 1927, 116: 104-114.
- [2] Dareing D W, Neathery R F. Marine pipeline analysis based on Newton's method with an arctic application[J]. Journal of Engineering for Industry, 1970, (11): 827-833.
- [3] DNV. DNV-OS-F101. Submarine Pipeline Systems[S]. Norway: Det Norske Veritas, 2012.
- [4] 田英辉. 单重保温海底管道理论分析及试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [5] 李斌, 李凯, 郭浩. 海管在张紧器中滑动情况分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013, (17): 48.
- [6] Stephen P, Timoshenko. Theory of elastic stability[M]. 2nd ed. Singapore: Mc Graw-Hill Book Company, 1985.
- [7] 余建星, 曾华章, 赵羿羽, 等. 基于 ABAQUS 的海底管道铺设期间椭圆化损伤分析[J]. 海洋技术学报, 2014, 33(5): 107-113.
- [8] 成大先编著. 机械设计手册[M]. 5 版. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [9] 焦冬梅, 余志兵, 杜永军, 等. 海底管道充水铺设技术[J]. 石油工程建设, 2013, 39(2): 4-7. ■

2017 全球化工 50 强出炉, 巴斯夫居榜首, 中石化排名第三

美国化学会旗下《化学与工程新闻》(C&EN)杂志于 7 月 24 日在其官网发布 2017 年度全球化工 50 强榜单(Global Top 50)。巴斯夫以 607 亿美元雄踞榜首, 陶氏化学以 482 亿美元稳居第二, 中国石化以 428 亿美元位居第三。

纵观榜单, 全球化工行业仍为欧美日韩巨头所把持: 50 强中欧美地区占据 30 席, 日韩各有 8 家和 4 家企业入围, 中国和泰国各有 2 家, 其他新兴市场国家如印度、巴西、南非、沙特阿拉伯等各有 1 家企业上榜。

与 2016 年排名相比, 2017 年全球化工前 50 名排行榜显示化工行业仍然发展强劲。化学业务总销售额在 2016 年下降 4.4% 至 7 443 亿美元, 其中 38 家公司销售额有所

萎缩。然而, 对比 47 家公司的收益数据, 合计利润比同期增长了 2.6%, 达到 982 亿美元。这些公司中仅 17 家公布收益有减少, 并且没有公司亏损。看来, 化工行业仍是赚钱的业务, 2016 年并不是糟糕的一年。

2017 年的榜单出现了一些结构性变化: 有两家公司即霍尼韦尔和加拿大钾肥(PotashCorp)公司排名有下滑, 出局 50 强, 主要原因是霍尼韦尔剥离了其许多化工业务, 加拿大钾肥则由于销售额下降而出局 50 强; 另, 新加入企业有东曹和科莱恩公司。

值得注意的是, 由于陶氏化学公司和杜邦公司的合并, 预计 2018 年的排名将会出现较大变化。

(中国石油新闻中心)