

已建海底管道挖沟沉管分析

韩 鹏^{1*}, 孔博昌², 李柱国³, 刘黎明¹

(1. 中国石油天然气管道局天津设计院, 天津 300457;

2. 中国石油北京天然气管道有限公司, 北京 100012;

3. 中国石油管道局工程有限公司, 河北 廊坊 065000)

摘要: 利用 OFFPIPE 软件对已建海底管道挖沟沉管保护方案进行有限元分析, 分析结果证明, 已建海底管道在交越处能下沉至预定深度且满足强度要求。

关键词: 管道交越; 沉管; OFFPIPE

中图分类号: TE88

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2017)07-0210-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2017.07.051

Existing submarine pipeline trenching and immersing analysis

HAN Peng^{1*}, KONG Bo-chang², LI Zhu-guo³, LIU Li-ming¹

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

2. PetroChina Beijing Natural Gas Pipeline Co., Ltd., Beijing 100012, China;

3. China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd., Langfang 065000, China)

Abstract: By using OFFPIPE software, the finite element analysis is carried out for the protection scheme of as-built submarine pipeline when trenching and sinking pipeline. The analysis result demonstrates that the as-built submarine pipeline in a place of pipeline crossing can be sunk to a predetermined depth and can meet the strength requirements.

Key words: pipeline crossing; sinking pipeline; OFFPIPE

随着海上油、气田的不断开发, 管道输送工艺已被广泛应用于海洋石油工业。在美国墨西哥湾, 海底管道总长度达 37 000 km, 将该海域的大小油、气田及沿岸的陆上处理厂连接成一个生产、处理及销售的系统。在海底管网系统中, 新建海底管道选定的路由穿越已建海底管道, 形成海底管道交叉是经常出现的现象。对于该种情况, 已建海底管道需要采用针对性的保护措施。

第一种方法: 在已建海底管道上方直接覆盖一层水泥垫块, 使新建海底管道与已建海底管道保持一定的安全间距, 避免新旧海底管道直接接触, 新建海底管道与水泥垫块相接触, 减小新建海底管道对已建管道的压力强度。该方法能对已建海底管道进行有效保护, 但新建海底管道会在海床形成悬跨或凸起。当新建海底管道交越段位于航运频繁海域时, 会对船舶航行产生影响。

第二种方法: 先在已建海底管道处进行挖沟, 使其在交越处下降至一定深度后, 水泥垫块覆盖在已建海底管道上方, 新建海底管道与水泥垫块相接触。该方法能有效降低新建海底管道在海床上方凸起

的高度, 同时避免了新建海底管道出现悬跨, 但由于已建管道需要进行沉管, 需要对其进行沉管分析, 以保证在沉管过程中已建海底管道的安全。

第一种方法实施简单, 只需要针对混凝土衬垫进行合理设计就能保证已建海底管道的安全; 第二种方法则需要针对已建海底管道制定合理的挖沟沉管方案, 并针对该方案进行沉管分析以及在位应力分析, 以确保已建管道在沉管以及就位后的安全。本文中针对已建海底管道挖沟沉管方法进行方案设计, 并利用 OFFPIPE 软件进行分析, 验证方案的合理性, 确保管道沉管过程的安全。

1 沉管分析原理及设计准则

1.1 分析原理

OFFPIPE 软件是一个成熟的有限元分析软件, 主要用于解决海底管道的安装与操作过程中遇到的非线性问题。OFFPIPE 包括一个核心程序和一系列可选择的程序模型。核心程序是一个专用于非线性梁和钢丝绳结构建模的有限元分析系统。OFFPIPE 的主要功能包括: ①针对铺管船和托管架

结构的静态和动态铺管分析,包括常规的S型铺管和J型铺管。②针对使用钢丝绳提升或下放管道到海底的铺管起始、弃管和回收分析。③计算在不规则海床铺设管道的静态管道应力、跨距和挠度。④针对常规的立管安装和水平对接的静态舷侧吊装分析。

对于已建海底管道沉管分析,可视其为铺设在不规则的海床上,校核其在不规则海床上管道的静态管道应力、跨距和挠度。

1.2 设计准则

根据《海底管道系统规范》(CCS—1992)^[1]第4.2.2.6条,管壁同时有环向、纵向和切向应力存在的情况下,管壁等效应力 σ_e 按下式计算:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$$

在位状态的管道与立管的等效应力不得大于许用应力值 σ_{ep} :

$$\sigma_{ep} = \eta \cdot \sigma_s \cdot K_t$$

式中, η 为利用系数,详见表1; σ_x 为纵向应力,MPa; σ_y 为环向应力,MPa; τ_{xy} 为切向应力,MPa; σ_s 为规定最小屈服强度,MPa; K_t 为温度折减系数,管壁金属材料温度低于120℃时,可取 $K_t = 1.0$;高于120℃时需根据金属材料性质考虑 K_t 的降低。

表1 利用系数 η 取值表

区域	载荷条件		
	a	b	地震
1区	0.72	0.96	0.96
2区(包括立管)	0.50	0.67	0.80

2 工程应用

2.1 工程基础数据

某新建海底管道与一条已建海底管道(已建海底管道基本参数详见表2)发生交越,交越处位于航运较繁忙海域,水深为10.6m。如采用第一种保护方案,新建海底管道将高于海床近1.5m,影响附近海域的通航安全。因此,需采用第二种保护方案,对已建海底管道在交越处进行挖沟沉管作业,使其在交越点处下沉一定的高度(1.5m),然后在已建管道顶部交叉位置覆盖混凝土衬垫。

为保证已建海底管道在沉管过程中的安全,沉管过程分4次进行(已建海底管道沉管方案见图1),具体沉管方案如下:①第一次挖沟范围为交越点两侧各150m,挖沟深度为0.4m;②第二次挖沟范围为交越点两侧各120m,挖沟深度为0.4m;

表2 已建海底管道基本参数

管道参数	数值
管道外径/mm	762
管道壁厚/mm	19.1
钢级	API 5L X60
钢管弹性模量/MPa	2.07×10^5
泊松比	0.3
最小屈服应力/MPa	415
最小抗拉强度/MPa	520
混凝土配重层厚度/mm	75
混凝土配重层密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	3040
输送介质	达标污水
介质密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1025
运行压力/MPa	0.482
腐蚀余量/mm	10
交越点水深/m	10.6

③第三次挖沟范围为交越点两侧各90m,挖沟深度为0.4m;④第四次挖沟范围为交越点两侧各60m,挖沟深度为0.3m。

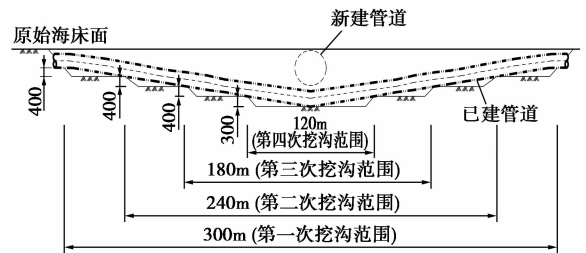


图1 已建管道沉管方案

2.2 OFFPIPE 管道沉管分析

针对冲沟后海底管道能否安全自然沉降至管沟沟底,应用有限元软件OFFPIPE对沉降管道4次冲沟沉管位移及应力状态进行分析。在分析过程中,充分考虑混凝土对钢制管道的弯曲刚度的影响,根据DNV RP F105第6.2.5条计算混凝土刚度系数 CSF ^[2],具体计算过程如下式:

$$CSF = k_c [(E_{conc} I_{conc}) / (E_{steel} I_{steel})]^{0.75}$$

式中, CSF 为混凝土刚度系数; k_c 为配重层为混凝土时取0.33; E_{conc} 为混凝土弹性模量; I_{conc} 为混凝土配重层截面惯性矩; E_{steel} 为钢弹性模量; I_{steel} 为钢管截面惯性矩。

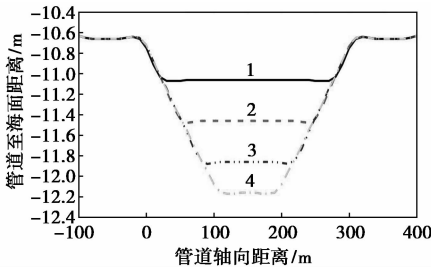
通过计算分析,得到4次挖沟沉管过程中管道的垂向位移以及等效应力。表3给出了4次沉管过程中的最大等效应力以及UC值,从数据可以看出管道4次沉管的最大等效应力均未超出许用应力,

UC 值均小于 1。图 2 给出了已建海底管道在 4 次沉管过程中的垂向位移以及管道的最终状态。图 3~图 6 给出了管道的垂向位移以及各部位的等效应力,从曲线可以看出,每次沉管管道在交越位置均下沉至管沟深度,且第四次沉管管道达到预定深度;4 次挖沟沉管的最大等效应力均出现在第一次开挖管沟位置,同时在其余管沟开挖处均出现较大的等效应力,且均小于许用应力。

表 3 沉管过程最大等效应力

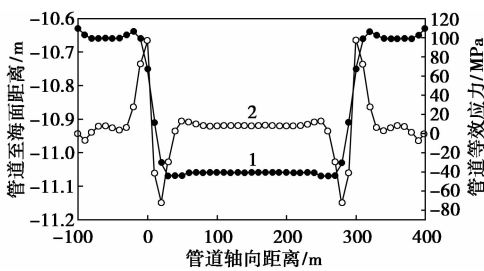
挖沟沉管次序	最大等效应力/MPa	许用应力/MPa	UC 值
第一次沉管	150.05	207.5	0.723
第二次沉管	146.92	207.5	0.708
第三次沉管	135.11	207.5	0.651
第四次沉管	136.28	207.5	0.657

注:计算许用应力过程中,利用系数 η 取为 0.50。



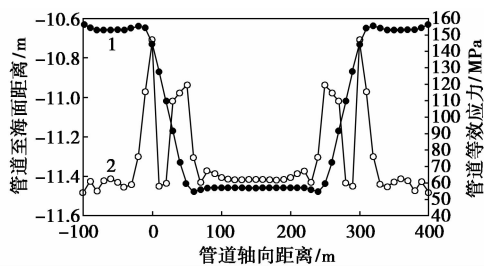
垂向位移:1—第一次挖沟;2—第二次挖沟;
3—第三次挖沟;4—第四次挖沟

图 2 沉管过程示意图



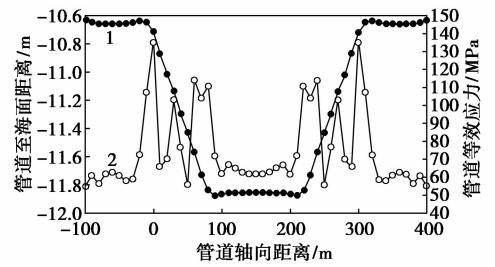
1—管道垂向位移;2—管道等效应力

图 3 第一次沉管管道位移及相应等效应力



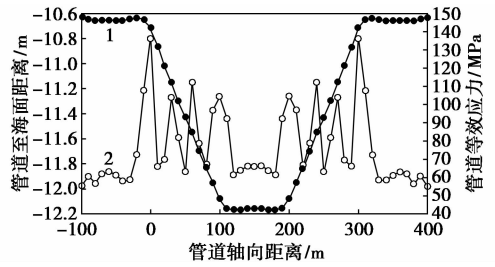
1—管道垂向位移;2—管道等效应力

图 4 第二次沉管管道位移及相应等效应力



1—管道垂向位移;2—管道等效应力

图 5 第三次沉管管道位移及相应等效应力



1—管道垂向位移;2—管道等效应力

图 6 第四次沉管管道位移及相应等效应力

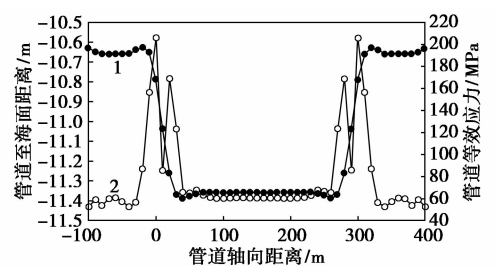
2.3 单次最大挖沟深度

目前,海底管道项目中多采用水力喷射式或搅吸式后挖沟机进行海底管道后挖沟,为使管道达到预定深度,实际工程中不可避免地出现超挖现象。为保证已建海底管道挖沟过程的安全,本文中应用 OFFPIPE 软件对 4 次挖沟过程进行最大挖沟深度的计算。

通过计算分析,得到了 4 次挖沟过程中确保已

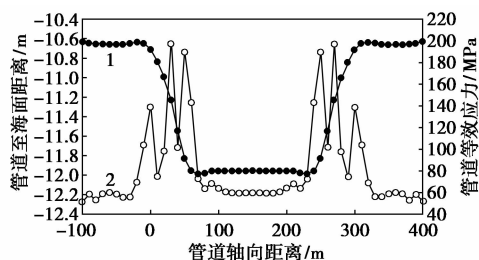
表 4 单次挖沟最大挖沟深度

挖沟沉管次序	最大挖沟深度/m	最大等效应力/MPa	许用应力/MPa	UC 值
第一次沉管	0.7	205.77	207.5	0.992
第二次沉管	0.9	197.37	207.5	0.951
第三次沉管	1.0	202.95	207.5	0.978
第四次沉管	1.0	204.69	207.5	0.986



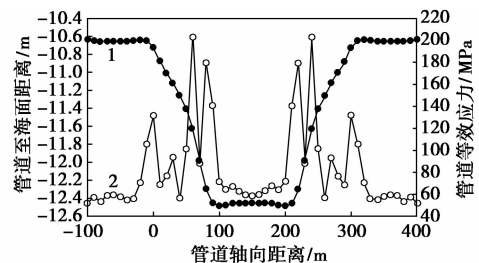
1—管道垂向位移;2—管道等效应力

图 7 第一次沉管管道位移及相应等效应力



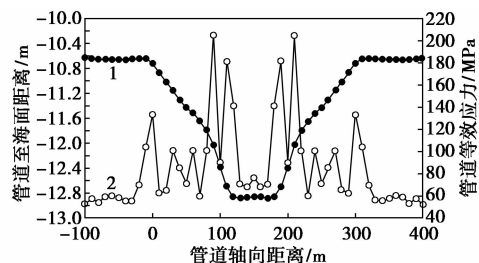
1—管道垂向位移;2—管道等效应力

图8 第二次沉管管道位移及相应等效应力



1—管道垂向位移;2—管道等效应力

图9 第三次沉管管道位移及相应等效应力



1—管道垂向位移;2—管道等效应力

图10 第四次沉管管道位移及相应等效应力

建海底管道安全的最大挖沟深度,具体计算结果如表4所示。图7~图10给出了管道的垂向位移以及各部位的等效应力,从曲线可以看出,4次挖沟沉管的最大等效应力分别出现在每次最大挖深处,同时在其余管沟开挖处均出现较大的等效应力,且均小于许用应力。

2.4 管道在位应力分析

已建海底管道挖沟沉管就位后,需要根据CCS—1992《海底管道系统规范》第4.2.2.6条的等效应力规定进行管道在位应力分析,以确保沉管后

管道的安全运行。

(1) 环向应力

根据《海底管道系统规范》(CCS—1992),管道在内压作用下,环向应力为:

$$\sigma_y = [(P_i - P_e)D]/2\delta$$

式中, P_i 为管道内压,MPa; P_e 为管道外压,保守考虑,不计外压影响; δ 为管道计算壁厚,考虑10 mm腐蚀; D 为管道公称直径。

(2) 轴向应力

管道的总轴向应力包括以下组成部分:

$$\sigma_1 = \sigma_e + \sigma_v + \sigma_p + \sigma_M$$

式中, σ_e 为温度引起的轴向应力,MPa; σ_v 为环向应力泊松松引起的轴向应力,MPa; σ_p 为压力引起的轴向应力,MPa; σ_M 为(沉管)弯曲引起的轴向应力,MPa。

通过计算分析得到已建管道沉管后的在位应力状态,具体分析结果详见表5。

表5 管道沉管后在位应力分析结果

环向应力/ MPa	轴向应力/ MPa	最大等效应力/ MPa	许用应力/ MPa	UC 值
22.7	-193.3	205.6	207.5	0.991

注:根据已建管道挖沟沉管分析,管道的最大弯曲应力为±136.28 MPa。

3 结语

介绍了已建海底管道挖沟沉管分析方法,并利用OFFPIPE软件对实际工程进行了分析与计算。通过分析可知,对于已建海底管道沉管需要制定合理的挖沟方案,并对其进行合理的分析计算,确保方案的合理性,保证已建海底管道在沉管过程中以及就位后的安全性。

参考文献

- [1] 中国船级社.海底管道系统规范(1992)[S].北京:人民交通出版社,1992.
- [2] DNV-RP-F105.Free spanning pipelines[S].Norway:Det Norske Veritas,2006.■