

# 深水海管止屈器设计方法研究

李旭, 李庆, 张英

(海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451)

**摘要** 主要对深水海管止屈器管的设计方法进行研究,并给出了止屈器管间距设计方法。止屈器管设计主要包括壁厚及间距的设计,其中止屈器管壁厚的设计主要依据解析公式及规范要求,而间距的设计在规范中并未明确说明。基于管材采办及施工的经济性与风险评估,介绍了一种用于计算间距的方法,并结合流花项目海管的应用情况对止屈器管的设计进行了验证。

**关键词** 深水海管;止屈器管;扩展屈曲;间距设计

**中图分类号** TE53

**文献标志码** A

**文章编号**: 2095-7297(2014)03-0227-03

## Deepwater Pipeline Arrestor Design Study

LI Xu, LI Qing, ZHANG Ying

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

**Abstract** In this paper, we mainly study the deepwater subsea pipeline arrestor design, and give the space calculation method for arrestors. The arrestor design includes wall thickness calculation and layout space calculation. The wall thickness design always follows the method given by the Det Norske Veritas (DNV) standard. However, there is no specific method for the space calculation in standards. Based on the analysis on pipe procurement and installation economical efficiency and risk assessment, we give a method for space calculation. This method has been successfully used in Liuhua pipeline project.

**Key words** deepwater subsea pipeline; pipeline arrestor; propagation buckling; space design

## 0 引言

深水海管的设计与浅水海管设计相比,突出的一点区别在于海水外压的影响,使海管的压溃设计变得尤为重要。通常设计人员会根据相应的计算来选择海管的壁厚、材料等级及合适的制造公差,以防止海管在深水巨大的外压下产生压溃。但在实际的安装、运行过程中,海管会遭遇各种不利情况的影响,例如意外冲击带来的管体缺陷、安装过程中由于海管过弯而导致管道椭圆度超出标准以及由于腐蚀增加而导致海管壁厚减小等。这些情况的发生致使海管在局部抗外压的能力减小。于是海管就有可能在抗压能力减弱的地方发生局部屈曲,并且随着时间的推移屈曲将沿整个海管扩展<sup>[1]</sup>。

止屈器管与普通海管最主要的区别在于壁厚。普通管的壁厚设计基于抵抗压溃及局部屈曲,一旦海管发生局部屈曲,则会不断扩展。如果没有考虑

止屈器管的设计,那么整条管线就有可能在一定的时间内发生屈曲进而使得这条管线报废。止屈器管的作用就在于由于壁厚原因,止屈器管比普通管具备更强的抗压能力,一旦管线发生扩展屈曲,止屈器管可以阻止海管屈曲的扩展,并及时对屈曲段的海管进行更换。这样就能尽量减少扩展屈曲带来的损失。

目前设计水深在 100 m 以上的海管设计都存在止屈器管的设计问题。深水海管止屈器的设计在流花 4-1 项目、流花 19-5 项目等南海深水项目中都有实际的应用。

## 1 止屈器管使用判断及壁厚计算

### 1.1 判断准则

在对海管结构进行壁厚设计后,根据计算判断是否发生扩展屈曲。判断准则如下<sup>[2]</sup>:

收稿日期:2014-07-31

作者简介:李旭(1982—),男,硕士,工程师,主要从事海管设计方面的研究。

$$P_e < \frac{P_{pr}}{\gamma_m \cdot \gamma_{sc}}, \quad (1)$$

式中:  $P_e$  为海管承受最大外压, MPa;  $P_{pr}$  为扩展屈曲压力, MPa;  $\gamma_m$  为材料系数, 根据规范取 1.15;  $\gamma_{sc}$  为设计安全等级系数, 根据规范取 1.26。

根据管道的外径和壁厚进行计算判断, 如果海管发生屈曲的时候以海管本身的强度属性不足以抵挡屈曲的扩展, 则必须采取止屈器管来阻止屈曲的扩展。

## 1.2 止屈器管的壁厚设计

止屈器管壁厚的计算主要依据下式<sup>[2]</sup>:

$$P_e \leq \frac{P_x}{1.1 \cdot \gamma_m \cdot \gamma_{sc}}, \quad (2)$$

$$P_x = P_{pr} + (P_{pr, BA} - P_{pr}) \cdot \left[ 1 - \exp\left(-20 \frac{t \cdot L_{BA}}{d^2}\right) \right], \quad (3)$$

式中:  $P_x$  为止屈器管扩展屈曲压力, MPa;  $P_{pr}$  为普通海管壁厚计算扩展屈曲压力, MPa;  $P_{pr, BA}$  为以止屈器管壁厚计算的扩展屈曲压力, MPa;  $t$  为考虑海管腐蚀余量的壁厚, mm;  $d$  为海管外径, mm;  $L_{BA}$  为止屈器管单管长度, 取标准值 12.192 m。

## 2 止屈器管的间距设计方法

除止屈器管壁厚设计外, 还要对止屈器管的布置形式进行设计。出于经济性考虑不可能海管全程使用厚壁的止屈器管, 只能间隔布置, 即若干根普通的海管后连接一根止屈器管。目前规范中并未明确说明止屈器管的间距计算方法, 本文通过对一些实际项目的应用, 介绍一种用于计算止屈器管间距的方法。

本方法计算止屈器管的间距主要考虑以下几个方面:

- (1) 普通管及止屈器管的采办费用;
- (2) 海管发生屈曲及出现扩展屈曲的概率;
- (3) 更换屈曲段海管的施工费用。

根据海管采办、海管安装资源等信息, 对止屈器管间距进行计算。

### 2.1 止屈器管的费用

对于止屈器管间距的选择, 原则是让使用止屈器管带来的费用增加最小。止屈器管费用的组成主要如下<sup>[3]</sup>:

$$C_{TOTAL} = C_{BA} \cdot X + C_{FP} \cdot P, \quad (4)$$

式中:  $C_{TOTAL}$  为考虑止屈器管的总费用(本文各种费用均以人民币元为单位);  $C_{BA}$  为每根止屈器管的费用;  $C_{FP}$  为施工过程中发生扩展屈曲对海管进行更换所需费用;  $X$  为根据止屈器管的间距确定的数量;  $P$  为施工时发生扩展屈曲的概率。

从式(4)中可以看出止屈器管的费用主要分为两个部分: 一是采办及更换止屈器管管材的成本, 二是更换过程中所使用资源的费用。

每根止屈器管的费用按下式计算<sup>[3]</sup>:

$$C_{BA} = C_{Man} - C_{LP}, \quad (5)$$

式中:  $C_{Man}$  为每根止屈器管的制造费用;  $C_{LP}$  为每根普通外管的费用, 即使用止屈器管而省下来的费用。具体而言,

$$C_{Man} = L_{BA} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [d^2 - (d - 2 \cdot t_{BA})^2] \cdot \rho_s \cdot C_{BAs}, \quad (6)$$

$$C_{LP} = L_{BA} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [d^2 - (d - 2 \cdot t)^2] \cdot \rho_s \cdot C_s, \quad (7)$$

式中:  $C_{BAs}$  为每吨止屈器管制造费用;  $\rho_s$  为钢材密度;  $t_{BA}$  为止屈器管的壁厚, mm;  $d$  为海管外径, mm;  $L_{BA}$  为止屈器管单管长度, 取标准值 12.192 m;  $C_s$  为每吨普通外管制造费用;  $t$  为普通外管的壁厚, mm。

施工过程中发生扩展屈曲对海管进行更换所需费用按下式计算<sup>[3]</sup>:

$$C_{FP} = C_F + C_P, \quad (8)$$

式中:  $C_F$  为发生屈曲, 更换海管的船舶资源固定费用;  $C_P$  为发生屈曲, 更换海管管材的费用。具体而言,

$$C_F = T \cdot (C_{LV} + C_{DSV}), \quad (9)$$

$$C_P = (S + 3 \cdot h) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [d^2 - (d - 2 \cdot t)^2] \cdot \rho_s \cdot C_s, \quad (10)$$

式中:  $C_{LV}$  为铺管船の日费率;  $C_{DSV}$  为潜水支持船の日费率;  $T$  为开始进行海管更换到重新开始海管铺设的时间;

预计时间, d;  $S$  为止屈器管间距, m;  $h$  为海管更换区域最大水深, m。

### 2.2 间距计算

根据 2.1 节的费用计算, 可以发现止屈器管的费用是关于间距的一个函数:

$$C_{TOTAL}(S) = \frac{C_{BA} \cdot L_{TOTAL}}{S + L_{BA}} + C_P(S) \cdot P + C_F \cdot P, \quad (11)$$

式中:  $L_{\text{TOTAL}}$  为设计海管的总长度, m。

止屈器管间距确定的原则就是使得发生的费用最少, 也就是  $C_{\text{TOTAL}}(S)$  取最小值。同时由于  $C_{\text{TOTAL}}(S)$  的最小值与发生扩展屈曲的概率  $P$  有直接的关系, 概率越小那么间距越大, 当能确定发生屈曲扩展的概率为 0 时, 计算出来的间距为无穷大, 即根本不需要止屈器管的设计。反之出于保守的考虑, 取这个概率为 1 时, 就可保证如果发生了扩展屈曲, 止屈器管间距的选择可以将费用降到最低。故在止屈器管间距计算中  $P$  取 1。

### 2.3 计算的简化

针对式(11), 我们可做进一步的数学分析, 计算间距  $S$ , 使得函数  $C_{\text{TOTAL}}(S)$  取得极小值。通过解析的方法对函数  $C_{\text{TOTAL}}(S)$  求导, 并令其导数为 0, 所求的  $S$  值即为所求。

$$C_{\text{TOTAL}}(S) = -\frac{C_{\text{BA}} \cdot L_{\text{TOTAL}}}{(S + L_{\text{BA}})^2} + \frac{\pi}{4} \cdot [d^2 - (d - 2 \cdot t)^2] \cdot \rho_s \cdot C_s, \quad (12)$$

令  $C'_{\text{TOTAL}}(S) = 0$ , 则

$$S = \sqrt{\left(\frac{t_{\text{BA}}(d - t_{\text{BA}})C_{\text{BAS}}}{t(d - t)C_s} - 1\right) \cdot L_{\text{BA}} \cdot L_{\text{TOTAL}}} - L_{\text{BA}}. \quad (13)$$

### 3 项目算例

本文中介绍的止屈器管设计方法已经在流花 4-1 项目中进行了实践应用。项目中主要计算数据如表 1 所示。

根据表 1 所列数据, 通过式(2)~(3)求解方程计算得到, 止屈器管的最小壁厚为 24.6 mm, 取海管工程标准壁厚 25.4 mm。通过式(13)计算得到间距  $S$  为 318.7 m, 取止屈器管间距为 318 m, 即 26 根普通海管之后接一根止屈器管。

表 1 计算参数

Table 1 Calculation parameters

参 数	取 值
外管外径/mm	559
外管壁厚/mm	15.9
止屈器管制造费用/(人民币元/d)	8463
外管制造费用/(人民币元/d)	7140
铺管船の日费率/万元人民币	285
潜水支持船の日费率/万元人民币	80
屈曲进行海管更换到重新开始海管铺设的 预计时间/d	10
海管更换区域最大水深/m	310

### 4 结 语

本文提出的计算方法, 在止屈器管壁厚确定的情况下, 对止屈器管的间距设计主要基于管材采办费用和扩展屈曲发生的风险。通过分析可知, 间距的大小主要取决于制造止屈器管的单位费用与普通海管费用的对比。如果止屈器管的制造费用较普通海管高得多, 应该适当增加止屈器管布置的间距以减少止屈器管的总费用。在项目应用中, 需根据项目实际管材采办情况进行计算和设计。

### 参 考 文 献

- [1] Torselletti E, Bruschi R. Buckle propagation and its arrest: buckle arrestor design versus numerical analyses and experiments [C]. OMAE, 2003: 37220.
- [2] Det Norske Veritas. Submarine pipeline system [S]. 2012: 74.
- [3] Bai Y, Bai Q. Subsea Pipelines and Risers [M]. New York: Elsevier Science, 2005: 37-39.