

文章编号:1001-4500(2006)04-0042-04

基于缺陷评估的海底管道设计研究

谭开忍, 肖 熙

(上海交通大学 上海, 200030)

摘 要:针对海底管道的裂纹和腐蚀两种主要缺陷,研究了基于缺陷评估的海底管道设计方法,建立了基于缺陷评估的海底管道设计步骤。

关键词:海底管道;缺陷评估;设计;裂纹;腐蚀

中图分类号:P756

文献标识码:A

1 引言

在海底管道的整个使用寿命期内,无论从材料、设计、工艺和维修等方面采取何种措施,要想完全避免缺陷是不可能的。海底管道的缺陷主要来自于疲劳损伤、环境损伤和偶然损伤。在这些损伤缺陷中,主要影响海底管道安全的是腐蚀和裂纹缺陷。

本文探讨了海底管道设计阶段缺陷的评估方法,并以此为基础,进行了基于缺陷评估的海底管道设计方法研究,探讨了基于缺陷评估的海底管道设计方法的主要内容和分析步骤。

2 传统的海底管道设计方法

目前,常用的海底管道的设计方法有两种,一种是以设计指南和规范的设计系数为基础的确定性方法,称为工作应力设计方法;一种是基于可靠性的设计方法,称为基于极限状态的可靠性设计方法。

工作应力设计方法是以承受工作条件下的内压所需的管道承载能力为基础,相关的载荷和载荷效应以及材料性能都被看作确定性的量,并明确规定了用于检测管道是否屈服的两个基本方程:环向应力判据和等效应力判据。考虑到制造和运行中的不确定因素,由最小屈服应力除以安全系数(或乘以设计系数)以保证管道的承载能力。这种安全系数是在大量设计基础之上得出的,反映了一定的统计特性。以这种设计方法为基础的最常用的设计标准有 DNV 1981 规范、ASME B31.4(1992)规范、ASME B31.8(1992)规范、CCS(1992)的海底管道系统规范等。

基于极限状态的可靠性设计方法采用可靠度理论和分析方法,可以对管线在强度、承载能力及疲劳寿命方面的安全性作出比工作应力设计方法更合理的评估。与基于极限状态的可靠性设计方法相关的设计标准有:DNV 1996 标准、API RP 1111(1998)规范、DNV OS F101(2000)规范和 ABS(2001)等。

DNV OS F101(2000)的设计方法是建立在极限状态和分项安全系数基础之上的。极限状态分为以下四种类型:①服役极限状态(SLS);②最终极限状态(ULS);③疲劳极限状态(FLS);④事故极限状态(ALS)。

分项安全系数设计的基本原理是在任何考虑的破坏方式中证明系数化的设计载荷不超过系数化的设计能力,系数化的设计载荷是通过载荷效应系数乘以特征效应系数获得。系数化的抗力是通过抗力系数除以特征抗力获得的。

如果设计载荷效应(L_d)没有超过设计抗力(R_d)就被认为满足安全水平。即:

$$L_d(L_F, L_E, L_A, \gamma_F, \gamma_E, \gamma_A) \leq R_d(R_k)(f_k), \gamma_{sc}, \gamma_m \quad (1)$$

设计中与极限状态有关的载荷效应系数、安全等级抵抗系数和材料抗力系数需要用可靠度的方法对不同的安全等级进行校准。

收稿日期:2005-12-09

作者简介:谭开忍(1974-),男,博士生。

基金项目:国家海洋 863 项目(2001AA602021)资助。

上述两种方法既有联系又有区别。两者的相同之处在于都需要先定义管道的安全等级和地理位置。对于管道应力的限制,都考虑了管道弯矩和管道轴力的组合。但是在计算管道的组合力时,基于极限状态的可靠性设计方法用载荷系数和安全等级抗力系数来反映各种载荷和管道安全等级对管道应力的影响,而常规的工作应力设计方法用许用应力系数来表示各种因素的综合影响,从可靠度的角度看,该系数偏大偏小的可能性都存在,具有很大的不确定性。

3 基于缺陷评估的海底管道设计方法

影响海底管道安全的主要缺陷有裂纹和腐蚀两种缺陷。因此,在设计阶段进行的缺陷评估主要有裂纹缺陷评估和腐蚀缺陷评估,在传统设计方法的基础上,通过缺陷评估,对设计进行改进。

3.1 基于裂纹缺陷评估的海底管道设计方法

在设计阶段要考虑的海底管道的裂纹缺陷主要包括来自材料本身的裂纹缺陷和预测海底管道在安装和使用过程中产生的裂纹缺陷。裂纹缺陷评估主要包括剩余强度分析和剩余寿命分析。

基于裂纹缺陷评估的海底管道设计主要包括以下四项,最后根据设计寿命确定可接受的裂纹尺寸。

1) 初始裂纹的确定。初始裂纹缺陷是指开始计算寿命时的最大原始裂纹尺寸,可以用无损探伤方法测出。在有条件进行破坏试验或从零构件缺陷处取样时,一般采用对疲劳断口进行金相或电镜分析,并使用概率统计方法确定初始裂纹尺寸。在工程应用中,目前通过各种测试手段确定出的初始裂纹深度为 0.05~0.5mm。

2) 临界裂纹的确定。临界裂纹缺陷是指海底管道在给定受力情况下,海底管道不出现泄漏、断裂等失效所容许的最大裂纹缺陷尺寸。临界裂纹尺寸用 a_c 表示。

在工程应用中,临界裂纹缺陷尺寸是根据结构的受力情况和使用安全确定的,不同的结构和使用工况有不同的计算公式。

$$\text{应力强度因子为 } K_I = \gamma \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

$$\text{当 } K_I = K_{IC} \text{ 时, } a = a_c, \text{ 有 } K_{IC} = \gamma \sigma \sqrt{\pi a_c} \quad (3)$$

$$\text{可以得到临界裂纹尺寸计算公式 } a_c = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\gamma \sigma} \right)^2 \quad (4)$$

式中: K_{IC} 为平面应变断裂韧度; γ 为形状因子,可由应力强度因子手册查出; σ 为应力。

当查出 K_{IC} 和 γ 后,根据海底管道的受力情况计算出 σ , 就可以利用式(4)计算出临界裂纹尺寸。

3) 剩余强度分析。带裂纹海底管道在使用中任何一时刻能够达到的静强度值就是海底管道的剩余强度。剩余强度分析主要是获得剩余强度随裂纹增长的变化规律,并在要求的剩余强度载荷下,给出裂纹扩展寿命计算所需要的最终裂纹长度;或者根据裂纹尺寸,预测是否满足剩余强度要求;还可以结合裂纹扩展规律,进一步得到剩余强度的时间历程,并根据剩余强度要求决定结构的寿命。

剩余强度分析的一般流程见图 1。

在设计阶段对含裂纹海底管道进行剩余强度分析,也可以采用极限载荷法进行评估。即计算出带裂纹海底管道的失效载荷,即极限载荷和海底管道的设计载荷或者实际工作压力进行比较。管道安全条件为:

$$P_0 > P_L \quad (5)$$

式中: P_0 为管道设计载荷或者管道工作压力; P_L 为带裂纹海底管道的失效载荷。

根据不同的准则,极限载荷有不同的计算方法,常用的准则有流变应力准则、净截面应力准则和净截面跨塌准则。

4) 剩余寿命分析。含裂纹的海底管道寿命分析是先确定裂纹的初始尺寸 a_0 和裂纹临界尺寸 a_c , 然后计算裂纹扩展速率,最后计算剩余寿命。

裂纹扩展速率 da/dN 是剩余寿命估算的基础。长裂纹扩展速率 da/dN 通常以 Paris 公式表达:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (6)$$

式中: C, m 为材料常数。

3.2 基于腐蚀缺陷评估的海底管道设计方法

基于腐蚀缺陷评估的海底管道设计需要确定海底管道腐蚀后的最小厚度 t_{\min} , 建立海底管道腐蚀模型, 最后根据腐蚀模型和设计寿命确定腐蚀的防腐蚀措施和腐蚀裕量。

1) 最小厚度 t_{\min} 的确定

海底管道腐蚀后, 在工作压力 P_o 的作用下, 保证海底管道安全运营的最小厚度要求可以根据 ASME B31G 或者 API 推荐方法确定。只考虑管道内压时, 可以根据下列方法确定允许的最小厚度:

$$\text{轴向最小壁厚} \quad t_{\min}^c = \frac{P_o D_o}{2SE_w} \quad (7)$$

$$\text{周向最小厚度} \quad t_{\min}^l = \frac{\beta P_o D_o}{4SE_w} \quad (8)$$

$$\text{则允许的海底管道最小壁厚为} \quad t_{\min} = \min(t_{\min}^c, t_{\min}^l) \quad (9)$$

式中: S 为材料许用应力; E_w 为焊缝系数。

2) 腐蚀模型

在设计阶段研究海底管道的腐蚀情况, 就是要研究海底管道的腐蚀随着海底管道的运营而变化的情况, 即需要建立海底管道的以时间变化为基础的腐蚀模型。

Guedes Soares 和 Garbatov 等在研究船舶腐蚀时提出了一个描述腐蚀增长的非线性模型。他们把整个腐蚀过程分为三个过程, 见图 2。该模型中没有考虑到腐蚀保护系统和环境的相互作用。事实上, 腐蚀保护系统比如油漆层是一个渐进失效的过程, 在其完全失效之前腐蚀已经开始了。因此, 秦圣平、崔维成^[8]等在此基础上提出了一个新的腐蚀模型。该模型考虑了 CPS 保护效率的逐渐失效。腐蚀速率表示为:

$$r(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq T_{st} \\ d_{\infty} \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - T_{st}}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left\{ - \left(\frac{t - T_{st}}{\eta} \right)^{\beta} \right\} & T_{st} \leq t \leq T_L \end{cases} \quad (10)$$

式中: $d_{\infty}, \beta, \eta, T_{st}$ 是四个待定参数。

由该模型可以得到任意时刻的腐蚀厚度:

$$d(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq T_{st} \\ d_{\infty} \{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - T_{st}}{\eta} \right)^{\beta} \right] \} & T_{st} \leq t \leq T_L \end{cases} \quad (11)$$

参数 T_{st} 反映防腐措施完全起作用的情况。 d_{∞} 为海底管道在寿命期内最大的腐蚀量:

$$d_{\infty} = t_0 + \Delta t - t_{\min} \quad (12)$$

式中: t_0 为设计管道壁厚; Δt 为腐蚀裕量。

通过统计相近海底管道的腐蚀情况, 得到参数 $d_{\infty}, \beta, \eta, T_{st}$ 的值, 就可建立腐蚀模型, 进而确定海底管道的防腐措施和腐蚀裕量。

3.3 基于缺陷评估的海底管道设计步骤

基于缺陷评估的海底管道设计的流程见图 3。具体步骤为:

1) 应用传统设计方法设计初始尺寸。确定海底管道的载荷, 进行强度分析和屈曲分析, 确定海底管道的初始尺寸。

2) 进行基于裂纹缺陷评估的海底管道设计。应用基于裂纹缺陷评估的海底管道设计方法, 确定海底管

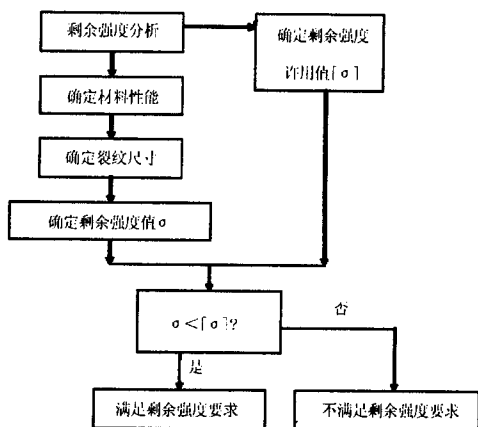


图1 剩余强度分析流程

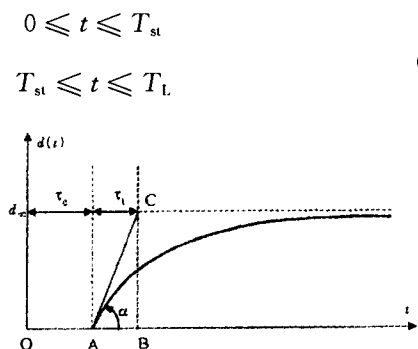


图2 腐蚀层厚度随时间变化曲线

道的选材、裂纹接受尺寸,临界裂纹尺寸,海底管道的设计寿命,确定海底管道的检测周期。

3)进行基于腐蚀缺陷评估的海底管道设计。应用基于腐蚀缺陷评估的海底管道设计方法,确定海底管道的防腐措施和腐蚀裕量。

4)对初始设计进行修正,得到最终设计方案。

4 结语

本文针对传统海底管道设计方法的一些缺点和海底管道本身的特点。提出了基于缺陷评估的海底管道设计方法,具体讨论了基于裂纹缺陷评估和基于腐蚀缺陷评估的海底管道设计方法的具体内容。研究了基于缺陷评估的海底管道设计方法的具体步骤,可以有效的修正传统的海底管道设计方法。

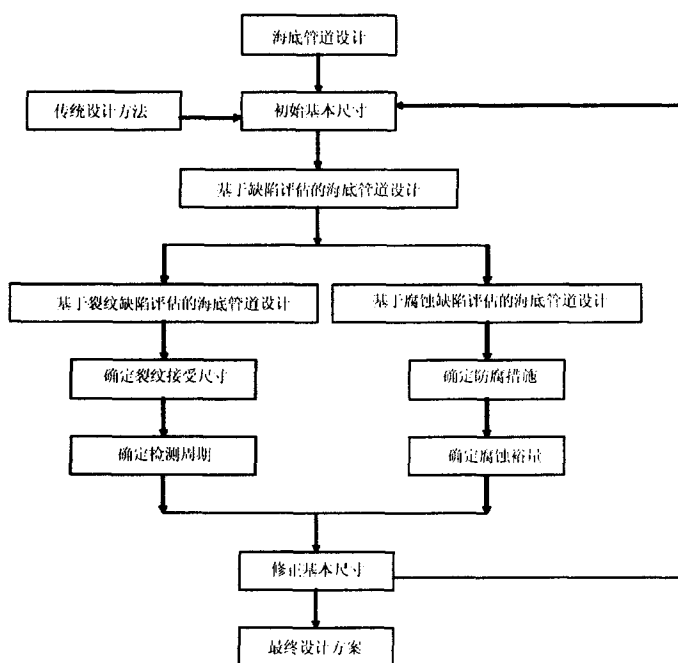


图3 基于缺陷评估的海底管道设计流程

参考文献

- [1] Manual for determining the strength corroded pipelines. American Society of Mechanical Engineers[M]. ASME B31G, 1991.
- [2] Rules for submarine pipeline systems[S]. DnV 1981
- [3] Submarine pipeline Systems DnV (OS F101(2000).
- [4] API. Recommended practice for fitness-for service. API579[S]. Washington, DC: American Petroleum Institute, 2000.
- [5] Gas transmission and distribution piping system[M]. ASME B31. 8, The American Society of Mechanical Engineers, New York, 1999.
- [6] Code for liquid Transportation System for Hydrocarbons, Liquid Petroleum Gas, Anhydrous Ammonia Alcohols [M]. ASME B31. 4:1992;
- [7] 刘文琰等. 概率断裂力学与概率损伤容限/耐久性[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998.
- [8] 秦圣平, 崔维成. 船舶结构时变可靠性分析的一种非线性腐蚀模型[J]. 船舶力学, 2003, 7(1): 94103.
- [9] 邢文珍. 工程断裂力学基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1992

RESEARCH ON DESIGN OF SUBMARINE PIPELINE BASED ON DEFECT ASSESSMENT

TAN Kairen, XIAO Xi

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The defect of submarine pipeline can't be avoided. It is difficult to consider the defect in the traditional design method of submarine pipeline. Therefore, the combining of safety and economy of submarine pipeline can't be taken into account. In this paper, considering crack and corrosion, the two main defects of submarine pipeline, a research on design method of submarine pipeline is carried out. The detailed step of design method of submarine pipeline based on defect assessing is proposed.

Key words: submarine pipeline, defect assessing, crack corrosion