

文章编号: 0253-2697(2004)03-0095-06

海洋深水立管的疲劳断裂与可靠性评估研究进展

谢 彬¹ 段梦兰^{2,3} 秦太验³ 孙政策^{3,4} 李 杰^{3,4}

(1. 中国海洋石油工程股份有限公司 天津 300452; 2. 长江大学机械系 湖北荆州 434102;

3. 中国船级社 北京 100006; 4. 复旦大学力学与工程科学系 上海 200433)

摘要: 针对海洋深水刚性立管、钢质悬链式立管和柔性立管的疲劳、断裂及可靠性问题,评述了近 10 年国内外在这方面研究的成果。给出了一些用于深水立管疲劳寿命预测及可靠性评估的实用理论和计算方法,特别是对基于断裂力学和可靠性检测技术而发展起来的缺陷损伤容限、带内部缺陷和表面裂纹的疲劳强度等问题给予了足够的关注。文章最后对导致深水立管疲劳断裂的涡激振动及其抑制方法进行了讨论,并结合我国海洋石油的发展提出了若干建议。

关键词: 深水立管; 疲劳; 断裂; 可靠性; 涡激振动

中图分类号: TE851

文献标识码: A

Advance of research on fatigue fracture and reliability
assessment of deepwater risersXIE Bin¹ DUAN Meng-lan^{2,3} QIN Tai-yan³ SUN Zheng-ce^{3,4} LI Jie^{3,4}

(1. China Offshore Oil Engineering Company, Ltd., Tianjin 300452, China; 2. Department of Mechanical Engineering,

Yangtze University, Jingzhou 434102, China; 3. China Classification Society, Beijing 100006; 4. Department of

Mechanics and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: The researches on the assessment of fracture, fatigue and reliability of rigid, catenary and flexible deepwater risers in recent ten years are reviewed. Some practical analytical theories and numerical techniques for reliability assessment and prediction of the fatigue life for deepwater risers are introduced. More attention is paid to the flaw damage assessment developed on the basis of fracture mechanics and reliability based inspection techniques, the fatigue strength evaluation on risers having inner flaws and surface cracks. The vortex-induced vibration resulting in fatigue and fracture in deepwater risers is analyzed and its restrain methods are discussed. Some suggestions for application of deepwater risers to the development of offshore oil in deepwater areas in China are proposed as the conclusion of this paper.

Key words: deepwater riser; fatigue; fracture; reliability; vortex-induced vibration

近年来,随着海洋油气工业的发展,浮动生产系统(FPS)得到广泛应用。在浮动生产系统负载(FPSO)技术中,立管系统是其中一个非常关键的组成部分。对于负载中的深水立管,焊接的结构失效控制和可靠性是设计中需要考虑的一个重要因素。对于近海结构,由于波浪、风以及现场作业等因素引起的动载荷是非常复杂的,所以对管节点或其他焊接部位的疲劳寿命计算受对环境力、结构的局部和整体响应、疲劳强度和损伤积累等计算的不确定性的制约。用断裂力学方法对构件的疲劳寿命进行评估分析,一是裂纹扩展模拟分析,另一个是裂纹非稳定分析,以确定构件在操作

载荷下裂纹的临界尺寸。这是断裂力学方法与传统的S-N曲线方法本质的不同。对深水立管系统的可靠性断裂评估,应根据结构和环境情况,选取适当的评估方法。

对于近海勘探和开采的深水立管系统,由涡激振动导致的应力是其中一个重要的疲劳载荷。它对深水立管系统的影响主要有:①由于扩大拖曳而增大变形;②由于涡激振动引起的动力应力而导致结构疲劳损伤。涡激振动分析结果可用于评定立管的强度和疲劳积累。因此,研究深水立管的涡激振动,是深水立管的疲劳、断裂及可靠性评估研究中的重要部分。

基金项目: 中国海洋石油总公司“十五”重大基础研究项目“海底管线安全评估技术研究”(CNOOCRC-DEI-2002-015)和中国博士后科学基金资助。

作者简介: 谢 彬,男,1962年8月生,1989年获大连理工大学硕士学位,现为中国海洋石油工程股份有限公司副总工程师。

E-mail: xb@mail.cooec.com.cn

1 深水刚性立管的疲劳及断裂失效

结构发生断裂时有两种失效形式:柔性撕开型,非稳定断裂。后一种断裂是由循环载荷而造成的裂纹扩展或由材料降级而造成的韧性减小引起的。Leira等^[1]研究了深水立管系在高拉伸与弯曲应力作用下的脆性断裂与塑性失效问题以及失效概率与局部安全系数之间的关系,讨论了基于S-N公式的疲劳估算相对于裂纹扩展计算的关系,利用前一种方法计算了一个特殊情况下的疲劳寿命,并将其转化为等效裂纹尺寸。在他们的研究中没有考虑裂纹扩展受涡激振动的影响。

Teigen 和 Karunakaran^[2]对 TLP 上自由悬挂和受拉伸张的两种立管进行了疲劳寿命计算,其中关键问题是研究波浪衍射如何影响作用于立管上的载荷,并指出与一个“标准的”工程方法相比,当考虑波浪衍射时,立管的疲劳寿命将会明显减少。对于立管疲劳的计算,最主要的是流体速度的描述,而不是波浪的计算。

Buitrago 和 Sele^[3]研究了机械连接器的强度与疲劳设计(近海结构的新的 ISO 标准),提出了 ISO 技术中心组(TCG)关于近海结构无焊接连接而发展起来的机械连接器的设计规定,其目标就是提供一部一般性的规范,以覆盖所有包括极限强度、疲劳强度、适用性、渐进式失效等有关的设计问题。实际上,强度设计一般依赖于线性有限元分析结果,但最先进的设计是向非线性有限元分析发展。例如,ASME 压力容器规范是基于有限元和线性化应力分布的简化方法,是一个满足一般性要求的简化标准。对机械连接器的设计要求包括对极限强度、疲劳、适用性、渐进式失效等的要求。

Thorogood 和 Norge^[4]等讨论了深水立管的系统设计和管理工作,描述了如何定量描述涡流引起的激励,并将其用于预测钻井中的疲劳积累。

Buitrago 和 Zettlemoyer^[5]研究了立管偏心焊接连接部位的疲劳设计准则问题,讨论了焊接处的应力集中系数。他们基于再次检查及处理大量的疲劳数据而提出了新的 S-N 曲线,并评述了利用断裂力学和可靠的检测技术而发展的缺陷损伤容限标准。疲劳设计过程包括一般分析、FM 分析、基于 FM 的 S-N 分析、检测、焊接、测试等过程。应力集中系数(SCF)在疲劳设计与计算中占重要地位。如图 1 所示,由于管的局部轴向几何偏心 e 引起的应力集中系数可估算如下:

$$SCF = 1.0 + 2.6 \frac{e}{t_n} \left[1 + 0.7 \left(\frac{t_k}{t_n} \right)^{1.4} \right]^{-1} \quad (1)$$

式中 t_n 和 t_k 分别为薄管和厚管的厚度, e 可由局部的不圆度 R 表示为

$$e = R + \frac{t_k - t_n}{2} \quad (2)$$

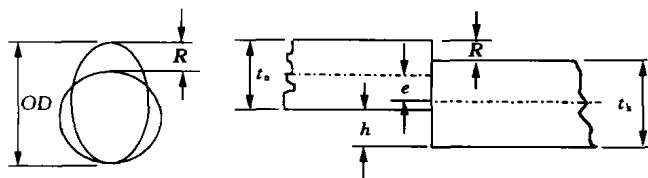


图 1 不匹配情况下局部管壁厚度

Fig. 1 Thickness of local wall under mismatched conditions

Rhee 和 Delgado^[6]利用计算机控制测试系统通过试验获得了高强度深水立管的断裂韧性和腐蚀疲劳裂纹扩展特征,疲劳裂纹扩展试验在空气、阴极保护的盐水和海水环境中进行,同时也研究了腐蚀疲劳裂纹扩展试验的几个基本方面,如含钙沉淀物对裂纹的止裂及裂纹深度测量方法精度的影响等。

Souza 和 Goncalves^[7]为了计算深海刚性立管的非线性动力响应和疲劳寿命,研究了与由泊船的横向运动引起的载荷和钢材的机械性能相关的固有统计特性,其中通过船舶的频率传播函数和波浪频谱确定泊船的横向运动。其表达式为

$$S_v(\omega) = |H(\omega)|^2 S_w(\omega) \quad (3)$$

式中 $|H(\omega)|$ 为运动传递函数, $S_v(\omega)$ 为泊船运动频谱, $S_w(\omega)$ 为波浪频谱。

2 钢质悬链式深水立管的疲劳失效

钢质悬链式深水立管用于连接深水中半潜式浮船生产系统。对于悬链式深水立管,研究其着地点和顶端附近的疲劳、断裂行为是十分重要的。Pesce 等^[8]探讨了悬链式深水立管的设计程序和建模问题,指出了一些值得考虑的不确定性因素,特别是着地点领域中的动力弯曲应力。研究发现,船的慢漂流摆动和管顶端的强迫波频率运动是疲劳损伤的主要因素,涡激振动对立管的外形和几何特性也有较大影响,并与水深有关。Karunakaran 等^[9]针对北海水域的几个平台结构,如 Statfjord C, Heidrum TLP 等,研究了悬链式深水立管的土壤与管之间的相互作用、水动力学常数、涡激振动、极限状态及疲劳等问题,使用的非线性动力分析程序是 RIFLEX。

Martins 等^[10]针对钢质悬链式深水立管,研究了着地点附近的疲劳行为,其分析中采用了简化模型、线性近似、渐进表示及频率范围解等。利用现有的线性问题的频率范围解,着地点的运动可用渐进公式表示为

$$x(s, t) = \frac{1}{2} [1 + \sin \beta(s, t)] \{1 - \exp[e - \beta(s, t)]\} \cdot x_0 \left[1 + \frac{\tau(t)}{T_0} \right]^{-1} \quad (4)$$

式中 s 为以着地点为起点的曲线坐标, x_0 为着地点处静态悬链曲率, T_0 为着地点处静态拉力, $\tau(t)$ 为线性频率范围模型得到的着地点处的动态拉力, $\beta(s, t)$ 表达式为

$$\beta(s, t) = \frac{s - x_0(t) + \lambda(t)}{\lambda(t)} \quad (5)$$

式中 $x_0(t)$ 为着地点的运动, $\lambda(t)$ 为动力弯曲强度, 其表达式为

$$\lambda(t) = \lambda_0 \left[1 + \frac{\tau(t)}{T_0} \right]^{-1} \quad (6)$$

λ_0 为静态弯曲强度, 可表示为

$$\lambda_0 = \sqrt{EJ/T_0} \quad (7)$$

为了得到立管在着地点领域的疲劳寿命, 假定材料的疲劳行为可用如下 S-N 曲线形式表达为

$$N_i = a(\Delta \epsilon_i)^{-b} \quad (8)$$

式中 $\Delta \epsilon_i$ 为某点的应变幅值, a 和 b 为材料常数, N_i 为至失效时的循环数。

根据 Miner 法则, 当材料作用 n_i 次应变时, 损伤积累表示为

$$d_i = n_i / N_i \quad (9)$$

总的积累损伤为

$$D = \sum_i d_i = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \quad (10)$$

Martins 等^[11] 针对钢质悬链式深水立管, 研究了顶端附近的疲劳行为, 其分析中同样也采用了简化模型、线性近似、渐进表示及频率范围解等。

3 柔性立管的疲劳及断裂失效

与钢材料相比, 钛材料具有很好的强度重量比、低弹性模量及优秀的抗腐蚀特性, 因此非常适合作为近海油气产品的深水立管的材料。Bjorset 等^[12] 利用概率响应表面方法分析了钛材料管的局部屈曲问题。Berge^[13] 论述了钛材料深水立管的优势和可行性, 并研究了带有内部缺陷和表面裂纹的钛制作的深水立管的疲劳强度问题。Torster 等^[14] 针对钛材料 Ti-6AL-4V-0.1RU, 利用小尺寸模拟试样试验, 研究了径向摩擦焊接的钛材料管的疲劳性能。

Ishii 等^[15] 探讨了柔性深水立管技术在深水中的应用, 指出柔性深水立管重量的减少对近海结构非常重

要, 且应用越来越广泛。一种减轻重量的途径是加强强化钢, 开发的高拉伸强度钢的强度比现有的钢高 50%; 另一种减轻重量的途径是使用诸如纤维强化塑料等复合材料, 以代替强化钢材。他们制造出一种新型材料, 测试和计算了材料的基本性能和疲劳特性, 并指出这些新材料很适合应用于 1000m 或更深的深海中。Lindsey 和 Masudi^[16] 用实验方法研究了拉伸疲劳载荷、温度范围及海水等对近海结构中复合材料管的影响。

Chen 等^[17] 分别使用理论和实验方法研究了预测柔性立管寿命的疲劳分析模型, 研究程序包括互锁(连接)变形分析、X 光线照相技术试验、互锁试样的疲劳测试、海洋环境下动力分析及模型的实现等。互锁变形分析是疲劳寿命计算的一个主要方面, 考虑到互锁立管的变形形状, 在拉伸情况下, 横截面 A 处的临界应变表达式为

$$\epsilon_A = 180tP \left[\frac{T}{G} - s_t(T) \right] [\pi r A (90 - \beta)]^{-1} \quad (11)$$

式中 T 为作用的拉力, G 为管的轴向刚度, $s_t(T)$ 定义为单位长度上的滑移函数, P, A, t, r 和 β 为互锁外形的尺寸, 如图 2 所示。

在弯曲情况下, 横截面 A 处的临界应变表达式为

$$\epsilon_A = 80tP \left[\frac{D_i + 2t - 2b}{2R + D_0 + 2b} - s_b(R) \right] [\pi r A (90 - \beta)]^{-1} \quad (12)$$

式中 R 为受弯管的弯曲半径, D_i 和 D_0 分别为管的内、外直径, $s_b(R)$ 定义为滑移函数, 可由实验确定。式(11)和式(12)可由有限元计算结果验证。

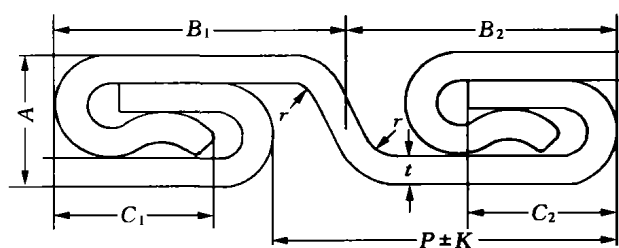


图2 互锁外形的尺寸

Fig.2 Dimensions of the interlock profile

Nielsen 和 Grealish^[18] 针对应用于北海北部内径为 25.4mm、设计压力为 27.54MPa 的柔性立管, 给出了静、动力原型失效、轴向拉伸、破裂和动力弯曲疲劳等的试验结果, 并与有关标准 API Spec 17J 和 API RP 17B 的要求和原则做了比较。

4 深水立管的可靠性评估

为了在 1000m 以下海底勘探与开采油气产品, 在

设计每一个系统构件时,将面临新的挑战。深水立管系统是其中关系到可靠与安全性的一个关键性组成部分。Sparks 和 Odru^[19,20] 针对复合材料深水立管,进行了深水立管的缺陷损伤容限评估及相应计算程序 Joint Industry Program 的开发,研究了不同损伤对立管的性能和疲劳寿命的影响,评估了检测损伤及其演变的 NDT 方法。Nilsen 和 Hanson^[21] 针对直径为 381mm 柔性油气混输管,讨论了立管的可靠性设计。Karunakaran 等^[22] 描述了基于响应表面和 FORM/SORM 方法开发出的柔性立管系统的可靠性分析程序,并将其应用于 ULS 条件下的深水立管系统,其中仅仅考虑了柔性立管顶端的失效准则。Leira 和 Mathisen^[23] 研究了柔性立管的可靠性问题,讨论了基于可靠性的安全系数。Leira 等^[24] 概述了深水立管结构在断裂及可靠性方面的研究进展,建议在设计过程中考虑载荷影响模型的不确定性和统计特征。对于结构的疲劳极限和疲劳失效的评估,一般采用两种不同的评估方法,一种是裂纹扩展速率曲线和断裂力学方法,另一种是 S-N 曲线和 Palmgren-Miner 损伤模型方法。由于在设计中不考虑初始裂纹,所以不用前一种方法进行评估。

Leira 等根据 PD6493 给出了深水立管的断裂评估方法,其计算式为

$$g(x) = \min(\delta_{\text{mat}} f(L_r) \delta_1; L_{\text{max}} - L_r) \quad (13)$$

式中 δ_{mat} 和 δ_1 分别为临界和实际的断裂韧性; L_{max} 和 L_r 分别为临界和实际的载荷比, $f(L_r)$ 为反映非稳定断裂和塑性失效之间影响的函数,由下式确定:

$$f(x) = \frac{1}{I_8} (1 - 0.14 L_r^2) \times [0.3 + 0.7 \exp(-0.65 L_r^6) - \rho]^{-2} \quad (14)$$

式中 ρ 为塑性修正因子, I_8 为模型修正因子(平面应力时为 1,平面应变时为 2)。

长的悬链式深水立管具有非线性应力波等动力响应特征。Souza 和 Goncalves 用统计学方法研究了深海刚性立管的疲劳评估问题,为了进行疲劳损伤评估,他们做了两个基本假定。第一个基本假定是:在常幅载荷作用下表征疲劳行为的曲线可表示为

$$NS^b = K_s \quad (15)$$

式中 b 和 K_s 均为经验常数。

第二个基本假定是应用 Palmgren-Miner 规律,忽略载荷顺序对疲劳过程的影响,结构中每个循环中的损伤为常数,其计算式为

$$\delta = \frac{1}{K_s} S_a^b S_{a_i} \quad (16)$$

在应力幅为 S_{a_i} 的 n 次循环中,积累的总损伤量为

$$d\delta = \sum_{i=0}^{n-1} \delta_i = \frac{1}{K_s} \sum_{i=0}^{n-1} S_{a_i}^b \quad (17)$$

考虑到应力范围通常描述为一个随机变量,基于作用于结构上应力范围充分大的假定,积累损伤可表示为

$$d\delta = \frac{1}{K_s} E(n) E(S_{a_i}^b) \quad (18)$$

式中 $E(n)$ 为作用于结构上应力循环的期望值, $E(S_{a_i}^b)$ 为 $S_{a_i}^b$ 的期望值。

考虑到作用于立管上的长期应力是由环境载荷引起的,可以描述为若干个稳定的短期海况,因而总的疲劳损伤可以由所有海况下的积累损伤的和获得。总的损伤 D 可表示为

$$D = \frac{1}{K_s} \sum_{j=1}^k p_j [E(n)]_j [E(S_{a_i}^b)]_j \quad (19)$$

其中 p_j 为在结构寿命期间环境载荷发生的概率, $[E(n)]_j$ 为对于环境条件 j 、作用于结构上应力循环数的期望值, $[E(S_{a_i}^b)]_j$ 为对于环境条件 j 的 $S_{a_i}^b$ 的期望值。式(19)也可写为

$$D = \frac{1}{K_s} T \sum_{j=1}^k p_j f_j [E(S_{a_i}^b)]_j \quad (20)$$

其中 T 为立管的寿命, f_j 为第 j 个海况中应力幅值的频率。

根据 Miner 规则,如果 $D > \Delta$ (Δ 为临界积累损伤,经常取为 1),则发生疲劳失效。令 $D = \Delta$,式(20)可用失效的时间表达,即

$$T = \Delta \cdot K_s \left[\sum_{j=1}^k p_j f_j [E(S_{a_i}^b)]_j \right]^{-1} \quad (21)$$

式(21)可以用来预测立管的服役寿命。

疲劳可靠性分析基于概率理论,一个更为复杂的方法可以应用于疲劳计算。与疲劳失效有关的极限状态函数可表达为

$$g_s(X) = \Delta - \frac{1}{K_s} \sum_{j=1}^k p_j (\sum S_{a_i}^b)_j \quad (22)$$

对于给定的服役寿命,当 $g_s(X) \leq 0$ 时发生疲劳失效,此时式(22)中的随机变量定义如下:

Δ 为疲劳失效发生时的临界积累损伤; K_s 为确定疲劳强度中 S-N 曲线的常数因子; $[\sum S_{a_i}^b]_j$ 为对于每个载荷条件 j 作用于结构上应力幅值的和。

由于给定海况条件下,应力循环数通常很大,可以用 b 的一个固定值的正态分布近似计算 $[\sum S_{a_i}^b]_j$ 的概

率密度函数, 对于一个正态的 gama 应力幅概率密度函数, $[\sum S_{a_i}^b]_j$ 的期望值为

$$E[\sum S_{a_i}^b]_j = E[S_{a_i}^b]_j T \frac{n_s}{t_s} \quad (23)$$

式中 T 为结构的估算寿命; n_s 为积累时间内观察到的应力幅数; t_s 为积累时间; $E[S_{a_i}^b]_j$ 为应力幅的期望值, 其值可表示为

$$E[S_{a_i}^b]_j = \frac{1}{\lambda^b} \Gamma\left(m + \frac{b}{c}\right) [\Gamma(m)]^{-1} \quad (24)$$

其中 λ 、 m 、 c 为正态的 gama 参数, $\Gamma(\cdot)$ 为 gama 函数。

Bjorset 等利用概率响应表面方法研究了钛材料管的局部屈曲及可靠性, 首先利用 von-Mises 屈服准则及非线性有限元法进行了局部屈曲计算, 然后根据数值失效分析进行了可靠性分析。对于一个给定的外压力, 最大弯矩容量可以用极限状态函数 $g(X)$ 表示, 其中矢量 X 的元素为屈服强度和杨氏模量, 与响应表面函数关联的极限状态函数可表达为

$$\hat{g}(X) = g(X) - c \quad (25)$$

其中 c 是响应量 $g(X)$ 的特定的下限。超过极限 c 的失效定义为 $\hat{g}(x) < 0$ 。失效的概率可表达为

$$p_f = p[\hat{g}(x) \leq 0] = \int_{\Omega} f_x(x) dx \quad (26)$$

式中 函数 $f_x(x)$ 为非确定参数的联合概率密度函数。

5 深水立管的涡激振动

涡激振动对近海勘探和开采的深水立管系统的影响主要有两个方面: ①由于扩大拖曳而增大变形; ②由于涡激振动引起的动应力而导致结构疲劳损伤。Vandiver^[25] 讨论了深水立管的涡激振动, 他研究了流体-结构相互作用、发展适当的结构动力学模型、获得高质量全尺寸响应数据、寻找响应数据的有效分析技术、考核响应预测程序以及涡激振动的抑制和保护方法等。Allen^[26] 论述用于分析 TLP 结构和钢质悬链立管的涡激振动的方法和计算程序, 并讨论了钢质悬链立管涡激振动抑制技术及其应用。Triantafyllou 等^[27] 针对实际深水立管系统, 较详细地论述了涡激振动的预测及分析计算方法, 开发了一个实际深水立管的涡激振动分析计算程序, 并用于处理实际涡激振动问题。Marintek 等^[28] 研究了深水立管的涡激振动, 给出了一个用于计算涡激振动引起的拉伸交变的数值计算程序, 指出立管的横向涡激振动引起的拉伸交变是涡激

振动频率的两倍, 发现在一阶拉伸共振情况下, 存在一个抑制涡激振动的“反馈效应”。

Maher 和 Finn^[29] 给出了钢质悬链式深水立管由涡激振动引起的疲劳的时间域与频率域结合的计算程序, 用于损伤预测的两个基础计算程序是 ABAVIV 和 CATVIB。Grant 等^[30] 针对高柔度深水立管, 给出了一个时间域涡激振动程序, 用于计算深水立管的涡激振动, 并将计算结果与大尺寸模拟试验数据进行比较。他们使用时间域方法用于模拟任意管结构对波浪诱导运动的动力响应, 分析结果可用于评定立管的强度和疲劳积累。

Kapurja 等^[31] 针对置于弹性土壤河床上的自由跨度管线, 从解析方面研究了由于横向涡激振动而发生疲劳失效问题, 给出了对横向涡激振动的疲劳响应的解析解, 其中包含了管线中轴向力的二阶弯曲的贡献, 得到了用于评估疲劳损伤的自由振动响应参数的计算公式, 并给出了疲劳损伤及疲劳寿命的计算公式。

6 结 论

(1) 介绍了几种典型的深水立管在焊接点和连接器局部的疲劳、断裂失效分析方法和计算公式, 而对于深水立管整体系统的疲劳损伤和寿命的计算一般采用现有的有限元软件。

(2) 对于悬链式深水立管, FPSO 的摆动和管顶端的强迫波频率运动是疲劳损伤的主要因素, 同时, 涡激振动受管的外形和几何特性的影响较大。

(3) 与钢材料相比, 钛材料以及纤维强化塑料等复合材料具有很好的强度重量比、低弹性模量及优秀的抗腐蚀特性, 非常适合作为近海油气产品的深水立管的材料。

(4) 常用的两种可靠性分析方法有 ULS 极限状态法和 FLS 疲劳极限状态法, 对于深水立管系统, 用 FLS 法可以得到更高的疲劳可靠度。

(5) 涡激振动对近海勘探和开采深水立管系统的影响一是由于扩大拖曳而增大变形, 二是由涡激振动引起的动应力而导致结构疲劳损伤。

(6) VIV 引起的拉伸交变在轴向响应的频率范围之外, 是疲劳应力中的主要部分之一, 在进行疲劳寿命预测时需要考虑这部分的影响。在一阶拉伸共振情况下, 存在一个抑制涡激振动的“反馈效应”。

参 考 文 献

- [1] Leira B J, Karunakaran D, Bjorset A. Fracture and fatigue reliability assessment of deep-water risers[R]. 17th Inter-

- national Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1998:98-1365, 1-9.
- [2] Teigen P, Karunakaran D. A consistent approach to riser fatigue analysis including diffraction[R]. 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1998:98-1394.
 - [3] Buitrago J, Sele A B. Strength and fatigue provisions for mechanical connector design: new ISO standard for offshore structures[R]. 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1998: 98 - 2501.
 - [4] Thorogood J L, Norge B P. Deep water riser system design and management[R]. IADC/SPE 39295, 1998:25-31.
 - [5] Buitrago J, Zettlemoyer N. Fatigue design of critical girth welds for deepwater applications[R]. 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1998:98-2004.
 - [6] Rhee H C, Delgado J H. Fracture and corrosion fatigue crack growth properties of high strength riser coupling material[R]. ASME, OMAE, III - B, Material Engineering, 1992:533-538.
 - [7] Souza G F M, Goncalves E. Fatigue performance of deep water rigid marine risers[R]. 7th International Offshore and Polar Engineering Conference, 1997, Vol. II, 144-151.
 - [8] Pesce C P, Aranha J A P. Steel catenary risers for deep water applications[R]. 5th International Offshore and Polar Engineering Conference, 1995, Vol. II, 190-202.
 - [9] Karunakaran D, Lund K M, Nordsve N T. Steel catenary riser configurations for North Sea field developments[R]. OTC 10979, 1999:331-338.
 - [10] Martins C A, Costa A B, Harada C A N. Parametric analysis of steel catenary risers: fatigue behavior near the touchdown point[R]. Proc. of the 9th International Offshore and Polar Engineering Conference, 1999, Vol. II, 314-319.
 - [11] Martins C A, Higashi E, Silva R M C. A parametric analysis of steel catenary risers: fatigue behavior near the top[R]. Proc. of the 10th International Offshore and Polar Engineering Conference, 2000, Vol. II, 54-59.
 - [12] Bjorset A, Leira B J, Remseth S. Local buckling analysis of Titanium pipes by probabilistic response surface methods[R]. 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1998:98-1487.
 - [13] Berge S. Fatigue strength of Titanium risers: effect of defects[R]. 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1998:98-2209.
 - [14] Torster F, Santos J F D. Fatigue properties of radial friction welded Ti-6AL-4V-0.1RU risers[R]. 18th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1999:99/MAT-2162.
 - [15] Ishii K, Makino Y. Flexible riser technology for deepwater applications[R]. OCT 7726, 1995:327-334.
 - [16] Lindsey C G, Masudi H. Tensile fatigue testing of composite tubes in seawater[R]. Energy Sources Technology Conf. & Exhibition, 1999, ETCE 99-6633, 1-6.
 - [17] Chen Z, Reuben R L, Owen D G. Development of a fatigue model for prediction of flexible pipe life expectancy[R]. Proc. of the First International Offshore and Polar Engineering Conference, 1991, Vol. II, 400-413.
 - [18] Nielsen N J R, Grealish F W. Qualification of a flexible riser for deepwater dynamic applications[R]. OCT 8605, 1998:9-18.
 - [19] Sparks C P, Odru P. Composite riser tubes: Defect tolerance assessment and nondestructive testing[R]. OTC 6894, 1992:191-198.
 - [20] Sparks C P, Odru P. Defect tolerance assessment and non-destructive of testing composite riser tubes[R]. ASME, 1992:209-214.
 - [21] Nilsen A U, Hanson T D. Reliability based design of a 15" dynamic flexible gas export riser[R]. Proc. of the Fifth International Offshore and Polar Engineering Conference, 1995, Vol. IV, 373-382.
 - [22] Karunakaran D, Olufsen A. Reliability analysis of a deep water flexible riser system[R]. Proc. of the Fifth International Offshore and Polar Engineering Conference, 1995, Vol. IV, 365-372.
 - [23] Leira B J, Mathisen J. Reliability-based safety factors for flexible risers[R]. ASME, 1995, OMAE, II, 295-312.
 - [24] Leira B J, Torhaug R, Kirkvik R H. Reliability aspects of deep-water risers design[R]. ASME, 1997, OMAE, II, 315-325.
 - [25] Vandiver J K. Research challenges in the vortex-induced vibration prediction of marine risers[R]. OCT 8698, 1998: 155-163.
 - [26] Allen D W. Vortex-induced vibration analysis of the auger TLP production and steel catenary export risers[R]. OTC 7821, 1995:169-176.
 - [27] Triantafyllou M, Triantafyllou G. Pragmatic riser VIV analysis[R]. OTC 10931, 1999:419-426.
 - [28] Marintek E H, Kleiven G, Nielsen F G. Vortex-induced axial vibration in deep sea risers[R]. OTC 10932, 1999: 175-182.
 - [29] Maher J, Finn L. A combined time-frequency domain procedure to estimate riser fatigue caused by heave-induced vortex-induced vibration[R]. OCT 11994, 2000:541-546.
 - [30] Grant R, Litton R. Highly compliant rigid risers: field test benchmarking a time domain VIV algorithm[R]. OCT 11995, 2000:547-555.
 - [31] Kapuria S, Salpekar V Y, Sengupta S. Fatigue due to vortex-induced cross flow oscillations in free spanning pipelines supported on elastic soil bed[R]. Proc. of the 9th International Offshore and Polar Engineering Conference, 1999, Vol. II, 197-203.