

海洋石油钢结构焊接 构件疲劳可靠性的研究

陈国明 方华灿 沈家骏

(机械系)

摘要 本文重点研究了带有缺陷的焊接构件的疲劳可靠性;建立了贯穿壁厚的疲劳失效模型;对 NDT 精度等疲劳参量的统计特性作了分析。基于寿命模型,应用结构可靠性原理探讨了设计阶段构件的疲劳可靠性预测及带裂纹构件剩余寿命的概率分析问题。通过相应的计算,给出了几组特定参数下的失效概率曲线,并分析了有关参数的作用。

关键词 海上平台;焊接构件;钢构件;疲劳强度;可靠性分析

0 引言

海洋石油平台处在恶劣的海况下,长期受到随机海洋载荷的作用,易产生疲劳失效。因此,在设计和使用过程中,必须对海洋结构作详细的疲劳分析,以保证构件在工作过程中不致发生疲劳失效。常用的疲劳分析方法主要有两种[1]: S-N曲线法和断裂力学方法(FMM)。由于使用FMM法时考虑的因素较多,反映信息比较全面,接近实际情况,因而,在海洋结构的疲劳分析中得到了广泛的应用[2]。但在海洋结构的疲劳分析中,两种方法均存在较多的不确定性[3]。例如,运用FMM法,裂纹的初始长度、应力幅计算误差、NDT测量精度和裂纹扩展速率等大都有某种分散性。运用确定性方法来估算构件的疲劳寿命显然是不合理的。构件的疲劳寿命是一个随机变量,而不是一个确定量。所以只能运用概率的方法描述海洋结构的疲劳特性。

1 疲劳失效模型的建立

在进行疲劳可靠性分析时,首要的任务是建立疲劳失效模型。通过失效模型建立起失效函数:

$$Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

$x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为有关的随机变量,于是失效概率为:

本文收到时间: 1989-07

$$P_f = P(Z < 0) \quad (2)$$

即

$$P_f = \iiint \dots \int P(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (3)$$

$$E < 0$$

式中, $P(x_1, x_2 \dots x_n)$ 为随机变量的联合概率密度; $E = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

对于疲劳问题, 一般采取两类模型: 损伤模型和裂纹扩展模型, 而且以前者居多。实际上, 海洋结构焊接构件的疲劳失效有多种形式: 贯穿壁厚的疲劳失效, 由疲劳裂纹引起的在极大载荷作用下的断裂失效、屈服失效和失稳失效等。根据实际考虑的重点不同, 应采取不同的失效模型。对于贯穿壁厚的疲劳失效, 可采取下列两种模型。

1.1 寿命模型

寿命模型规定: 预测寿命 N 低于设计寿命 $N_{\text{设}}$ 时发生失效。失效函数定义为:

$$Z = N - N_{\text{设}} \quad (4)$$

或

$$Z = \ln(N / N_{\text{设}}) \quad (5)$$

预测寿命 N 一般采用 $S-N$ 曲线, 或由 Paris 公式得到, 由于考虑因素不同, 即使采用同样的寿命模型, 计算结果也不大相同。应用该模型的关键则是全面考虑寿命计算过程中的随机因素, 同时力求简便。对于随机疲劳裂纹扩展问题, 应用等效载荷法比较合适。

1.2 裂纹长度模型

这种模型将裂纹长度 a 作为失效准则, 一旦裂纹扩展到超过某个临界值, 便认为失效发生。针对不同的要求, 根据构件的断裂性能和壁厚等, 裂纹临界长度 a_c 取不同的值。失效函数为:

$$Z = a_c - a \quad (6)$$

海洋焊接构件采用这种模型比较合适。焊接构件不免存在缺陷, 裂纹扩展寿命占有很重要的地位。利用裂纹长度作为失效判据就比较直观, 避免了损伤之类的抽象概念。该模型针对实际情况, 可以由 a_c 和 a 的不同情况组合而成: a 可以由计算预测, 也可以根据检测的数据分析; 而 a_c 即可以由断裂韧性决定, 也可以由壁厚决定。并且两者之一还可以取为确定量进行分析。

2 贯穿壁厚的疲劳失效

海洋构件的疲劳裂纹造成的疲劳失效主要是指疲劳裂纹在深度方向扩展贯穿板厚。当然, 基于不同的着重点, 临界裂纹深度的选取也不完全一致, 有的取壁厚 t , 也有的取 $t/2$ 。实际上裂纹贯穿壁厚并没有完全造成构件承载能力的丧失, 因而上述做法是趋于保守的。我们在可靠性分析模型中, 取壁厚为临界裂纹长度。当然, 在同时出现高应力和低韧性的时候, 应该考虑脆性断裂的危险性, 由此确定裂纹临界长度。文献[2]对接焊和角焊等焊接构件推荐了一种简化的计算方法, 即应用 Paris 公式和线性叠加原理来估算焊接构件的疲劳寿命。其中应力强度因子表示为:

$$K = \sigma k a^n \quad (7)$$

式中, k 和 n 为取决于几何形状的参数。疲劳扩展寿命则由下式决定:

$$N = [C \Delta \sigma^m k^m (1 - mn)]^{-1} [a_c^{1-mn} - a_0^{1-mn}] \quad (8)$$

式中, $\Delta\sigma$ 为真实应力幅; a_0 为真实初始裂纹长度; C 和 m 为 Paris 公式系数。

3 疲劳参量的统计模型

3.1 应力计算误差

由于载荷预测, 动力响应和局部应力计算均带有一定的误差, 计算得到的应力幅 $\Delta\sigma_c$ 应通过一个修正因子 B 加以修正, 即:

$$\Delta\sigma = B\Delta\sigma_c \quad (9)$$

B 显然是一个随机变量, 一般认为 B 服从对数正态分布, 且 $\bar{B} = 0.7$, 偏差系数 $C_B = 0.5$ [4]。

3.2 裂纹扩展特性

裂纹扩展特性一般由 C 和 m 来描述。经大量实验数据分析获知, C 可以作为一个随机对数正态变量来处理, 而 m 则取作确定量。

3.3 裂纹初始裂纹

海洋平台构件在经过 NDT 后, 投入运行时不可避免地带有气孔和夹渣等焊接工艺缺陷。对于这类缺陷, 文献[5]和[6]作过分析研究, 认为用 Weibull 分布描述 a_0 的统计特性较为合适。其分布参数 $\alpha = 0.1$, $\beta = 1.2$, $\gamma = 0.8$ 。

3.4 NDT 误差

根据文献[3]所述, NDT 不一定能准确地发现所有的焊接缺陷, 同时对于缺陷大小的评定, 也与实际情况有一定的出入。一般用两个指标来描述 NDT 这两方面的缺陷。

第一个指标是 NDT 的灵敏度 S_{NDT} , 定义为:

$$S_{\text{NDT}} = N_M / N_T \quad (10)$$

式中, N_M 为 NDT 能够测出的缺陷量; N_T 为同一区域内实际存在的缺陷总数。

第二个指标是 NDT 的精度 A_{NDT} , 表达式为:

$$A_{\text{NDT}} = 1 - |a_{\text{NDT}} - a| / a \quad (11)$$

式中, a_{NDT} 为 NDT 评定的缺陷尺寸; a 为缺陷的实际尺寸。

概率断裂力学定义了检测概率, 并建立了第一项指标的概率模型, 但对于 NDT 精度的误差, 则一般很少考虑。本文重新定义 NDT 评定精度的指标。令:

$$B_1 = a_{\text{NDT}} / a \quad (12)$$

B_1 和 A_{NDT} 的定义是等效的, 即有:

$$A_{\text{NDT}} = \begin{cases} 2 - B_1 & B_1 > 1 \\ B_1 & B_1 \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$

A_{NDT} 只反映实际尺寸与测量结果差值的绝对值, 而 B_1 则能反映测量相对于实际值的大小。考虑到测量过程的随机不确定性, B_1 显然是一个随机变量。考虑到测量误差是由数个随机因素造成的, 这些因素的总效果则可以由其乘积表示。从而假定 B_1 服从对数正态分布是比较合理的。 B_1 的均值一般可以取为 1, 而其偏差可由实际精度的分散程度选取。

B_1 的分布特性确定后, a 也随之确定:

$$a = a_{\text{NDT}} / B_1 \quad (14)$$

文献[7]对 B_1 的影响作了分析, 发现 B_1 的偏差大小直接影响到寿命的分散程度, 直接利用 NDT 评定的缺陷尺寸估算剩余寿命, 显然有不足之处, 应该考虑 NDT 评定精度所引起的误差。

4 设计阶段疲劳可靠性的预测

焊接构件含有缺陷的可能性较其它构件要大得多。在设计阶段中,应采用FMM 和统计方法对构件的疲劳可靠性进行预测。由式(5)和式(8)可知,这时候疲劳失效函数可以写成:

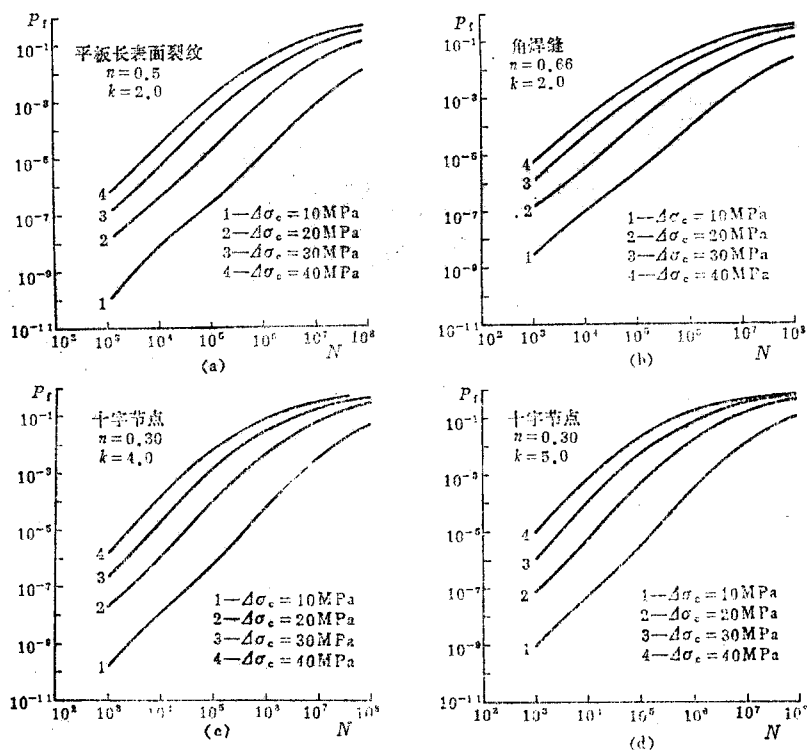
$$f = \ln(a_0^{-1-mn} - a_c^{-1-mn}) - \ln C - m \ln B - \ln[k^m(mn-1)\Delta\sigma^m \cdot N] \quad (15)$$

式中 a_0 , C , B 和 a_c 均为随机变量。前面已规定取壁厚 t 为 a_c , t 是一个随机变量。文献[7]指出, t 的分散性对可靠性影响很小,为简化起见,就将 $t(a_c)$ 作为确定量来处理。 C 和 m 取自文献[2], 对数偏差 $\sigma_{mc} = 0.67$ 。基于前面给出有关随机变量的统计特性,应用文献[7]给出的方法,经数值计算得到一些参数为特定值下的失效概率 P_f 曲线,见图1(a~h), 这些曲线可以供应用 D_{NV} 规范公式计算失效公式 P_f 时参考。图中未注明 a_c 者,取 $a_c = 20\text{mm}$ 。从图1(a~h)可知:

(1) 应力幅对各类焊接接头的失效概率均有明显的影响。在低应力区($\Delta\sigma_c > 20\text{MPa}$), 其影响十分显著。有必要采取降低应力集中系数的措施,以提高疲劳可靠性。而在高周区,在应力幅度较大时, P_f 相差不多,一般在同一个数量级之内。

(2) 不同的临界裂纹长度对 P_f 的影响主要表现在扩展初期。随着循环次数的增加,失效概率曲线交汇在一起,影响趋于一致。因此可见,临界裂纹长度选取 t 和 $t/2$,均可以接受。因为当 $N > 10^7$ 时,两者的 P_f 已大体相同。

(3) 系数 k 对 P_f 也有较大的影响,即使 $N = 10^8$ 左右时, k 的影响也不能不考虑。



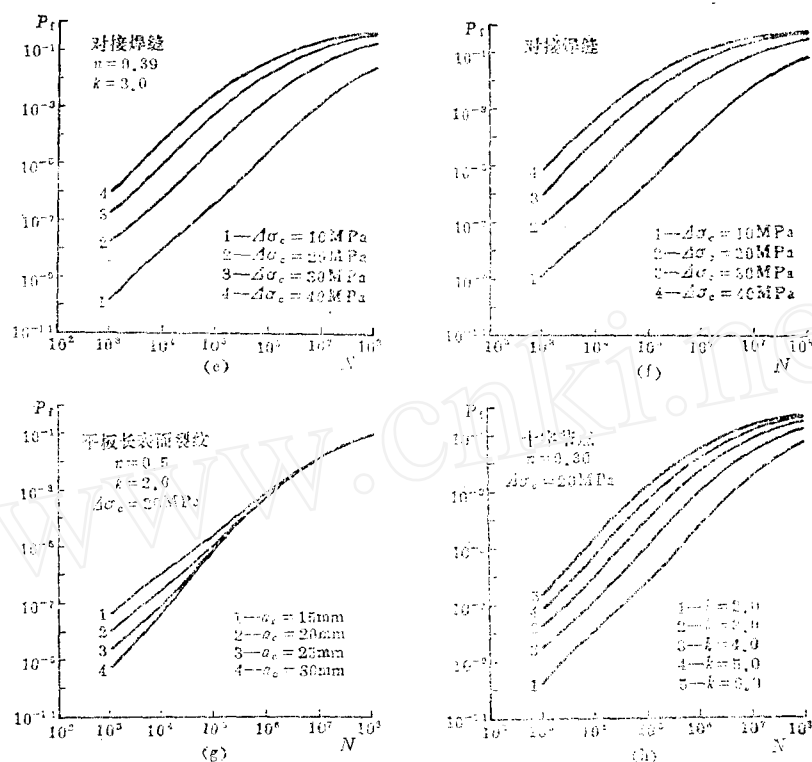


图1 某参数为特定值时的失效概率 P_f 曲线

5 带裂纹构件剩余寿命的概率分析

检测出裂纹的构件, 如果不加以维修, 其剩余寿命一般可根据 FMM 计算, 即由检测获知的裂纹长度计算疲劳裂纹的扩展寿命。如果考虑到裂纹扩展速率的随机性以及用 NDT 方法确定缺陷形状、大小均有一定的误差, 对其进行可靠性评价也是必要的。这时候, 失效函数则可以写成:

$$f = \ln \left[\left(\frac{a_0}{B_1} \right)^{1-mn} - a_c^{-mn} \right] - \ln [C - m \ln B - \ln [(mn-1) (\Delta\sigma k)^m N_{\text{设}}]] \quad (16)$$

根据上式得到一组参数为特定值下的失效概率曲线, 见图 2 (a~d), 可供实际参考。根据失效概率曲线, 容易看出, 不同的初始裂纹长度, 对 P_f 均有一定的影响。对于初始裂纹长度超过某一临界值的裂纹必须加以修复, 否则, 疲劳可靠性则难以保证。

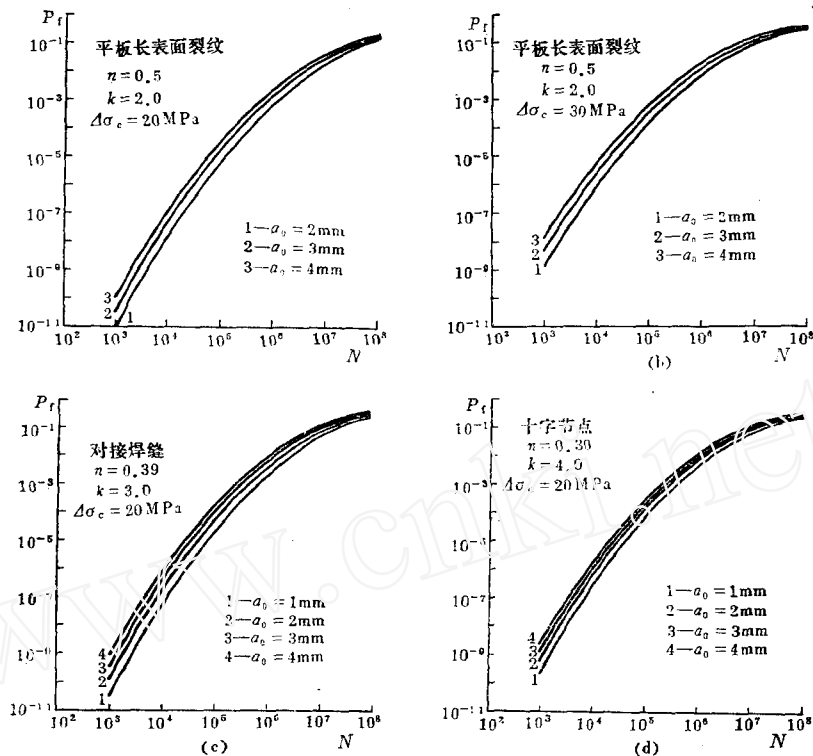


图2 某组参数为特定值时的失效概率 P_f 曲线

6 结 论

- (1) 本文对疲劳参量的不确定因素作了较全面的分析、提出了NDT精度概率模型。
- (2) 通过寿命模型, 解决了贯穿壁厚疲劳失效的可靠性评价问题。对工程界关心的两类问题: 设计阶段构件疲劳可靠度预测和检测后对裂纹构件剩余疲劳寿命的概率分析, 均作了深入的探讨。
- (3) 不同的疲劳参量在不同的循环次数下, 对 P_f 的影响均不相同。裂纹临界长度的选用对同寿命下的失效概率影响很小。

参 考 文 献

- 1 方华灿. 海洋石油钻采设备理论基础. 北京: 石油工业出版社, 1984
- 2 DNT. Rules for the Design, Construction, and Inspection of Fixed Offshore Structures, Norway, 1977
- 3 陈国明, 方华灿. 海洋平台构件的疲劳可靠性分析. 石油矿场机械, 1988; 17 (6)
- 4 Wirsching P H. Fatigue Reliability for Offshore Structures. *J Struct Eng.* ASCE, 1984; 110(10)
- 5 Rodrigues et al. Weld Defect Distribution in Offshore Platforms and Their Relevance to Reliability Studies Quality Control and Inservice Inspection. OTC 3693, 1980
- 6 Wong W K, Rogerson J H. Weld Defect Distributions in Offshore Structure and Their Influence on Structural Reliability, OTC 4237, 1982
- 7 陈国明. 海洋钢结构件疲劳可靠性研究. 华东石油学院北京研究生部硕士学位论文, 1986
- 8 佐藤邦彦等. 焊接接头的强度与设计. 机械工业出版社, 1983

STUDY ON FATIGUE RELIABILITY OF WELDED MEMBERS OF OFFSHORE STEEL STRUCTURES

Chen Guoming Fang Huacan Shen Jiajun

(Department of Mechanical Engineering)

Abstract This study is focused on the analysis of components with defects under random loading. A model for fatigue failure caused by crack growth in the thickness direction is set up. The statistical properties of some fatigue parameters, such as NDT error and stress calculation error, are investigated. On the basis of the fatigue life model, the estimation of fatigue reliability in design and probabilistic analysis for remaining fatigue life are studied by the use of the structural reliability theory. Some failure probability curves are presented and the influence of some parameters on fatigue reliability is discussed.

Key words Offshore platform; Welded structures; Steel members; Fatigue strength; Reliability analysis

石油大学（华东）1988年校级优秀论文一等奖

1. Fractional Destruction of Non-Volatile Residua..... 彭春兰等
2. 超临界流体萃取的平衡溶解度..... 龙 军等
3. Williams级数收敛性及边界配位法可行性的研究..... 阎相顽
4. 山东惠民凹陷西部第三纪火山岩油气藏形成条件与分布规律..... 刘泽荃等
5. 射流激励式振荡器的理论分析及其形状对水射切割性能的影响..... 沈忠厚等
6. 一种基于状态方程的预估控制技术..... 丛松波等
7. 论杨虎诚在西安事变中的贡献..... 张荣华