

# 深水海洋石油钢结构估算 疲劳寿命的新的损伤力学方法

方华灿 贾星兰

(石油大学)

## 提 要

在损伤力学的基础上本文提出了深水海洋石油钢结构估算疲劳寿命的新方法。文中给出了石油大学新建立的疲劳损伤数学模型。根据表面裂纹疲劳扩展试验的数据处理，提供了疲劳损伤因子的宏观测量方法。同时，还给出了海洋石油钢结构用的材料的损伤参数的决定方法。新建立的疲劳损伤数学模型得到了刚性的钢试件的疲劳试验证实；也取得了深水常用的柔性的复合材料的结构的疲劳试验证实。通过验证，本文推荐了常幅或随机载荷作用下估算疲劳全寿命的损伤力学方法及计算公式。

主题词：深海钢材 结构力学 疲劳破坏 数学模型 海洋石油 计算方法

## 一、前 言

用于深水的海洋石油钢结构，通常分为刚性结构与柔性结构。超过100m以上的深水，常使用复合材料制成的柔性构件。然而，无论是刚性或柔性构件，疲劳问题一直是深水海洋工程中的一个重要问题。因为在深水中，不仅检查发现构件上的裂纹困难；而且在深水中进行修理不容易，因而对深水钢结构的疲劳寿命估算的精确度要求更高。

传统的估算疲劳寿命的方法是S—N曲线方法，这种方法简单方便直观，但是取得S—N曲线的试验花费很大。在这种情况下，海洋石油钢结构的疲劳寿命估算，开始应用了断裂力学方法<sup>[2]</sup>。这种方法较S—N曲线法前进了一步；但是它只能估算疲劳裂纹扩展阶段的寿命，不能估算疲劳裂纹萌生阶段的寿命，有局限性。试验表明：目前使用上述两种方法，其估算的疲劳寿命均偏于保守<sup>[1]</sup>，精确度低。因此，作者根据新兴的损伤力学，提出了深水海洋石油钢结构估算疲劳寿命的损伤力学新方法。这种方法充分发挥损伤力学既能描述微观裂纹扩展；又能描述宏观裂纹扩展的优势，将裂纹萌生及裂纹扩展两个阶段统一看成是一个疲劳损伤过程，从而应用损伤因子做为基本控制参量，建立相应的数学模型，来估算既包括裂纹萌生又包括扩展的疲劳全寿命。因而，它具有考虑全面、精确度高、使用简便等优点。

## 二、石油大学新建立的疲劳损伤数学模型

**1. 数学模型的建立** 建立疲劳损伤的数学模型，首先要分析造成疲劳损伤的因素。人们知道，造成疲劳损伤的外因主要是交变载荷，用当量应力幅 $\Delta\sigma^*$ 来表示；造成疲劳损伤的内因是材料的疲劳损伤特性，以特性参数 $\lambda$ 表示<sup>[3]</sup>。因而，若以 $D$ 代表损伤因子， $\dot{D}$ 为损伤速率，考虑到疲劳损伤的非线性，可以下列函数表达疲劳损伤的本构方程：

$$\dot{D} = f(\Delta\sigma^*, \lambda, D) \quad (1)$$

式(1)中的损伤因子 $D$ ，可以材料损伤的总面积 $A_d$ 及材料原来的截面积 $A$ 表达：

$$D = \frac{A_d}{A} = 1 - \frac{\bar{A}}{A} = 1 - \frac{P/A}{P/A} = 1 - \frac{\sigma}{\bar{\sigma}} \quad (2)$$

式(2)中， $\bar{A}$ 为材料受损后的有效面积； $\sigma$ 是应力； $\bar{\sigma}$ 是有效应力。

参照断裂力学中广泛应用的Paris公式，

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad (3)$$

$C$ 及 $m$ 为材料疲劳特性参数， $\Delta K$ 为疲劳的基本控制参量即造成疲劳的外因—应力强度因子。设想将损伤力学的疲劳损伤数学模型写成为

$$\frac{dD}{dN} = \dot{D} = \lambda_{1_0} (\Delta H)^{\lambda_2} \quad (4)$$

而这里的疲劳损伤基本控制参量 $\Delta H$ ，应该以疲劳损伤的外因——有效当量应力幅 $\Delta\bar{\sigma}^*$ 来表达，即

$$\Delta H = Y \Delta\bar{\sigma}^* = Y \frac{\Delta\sigma^*}{1-D} \quad (5)$$

式(5)中， $Y$ 为形状影响因子。将式(5)代入式(4)，即可得出

$$\frac{dD}{dN} = \lambda_{1_0} Y^{\lambda_2} \left( \frac{\Delta\sigma^*}{1-D} \right)^{\lambda_2} = \lambda_1 \left( \frac{\Delta\sigma^*}{1-D} \right)^{\lambda_2} \quad (6)$$

式(6)即为石油大学新建立的疲劳损伤数学模型，它是一个非线性的疲劳损伤模型。

**2. 石油大学的新模型与夏波希(Chaboche)模型的对比** 夏波希模型是损伤力学中目前广泛应用的非线性累积损伤模型。为了证明作者提出的数学模型，本文将其与夏波希模型进行了对比。

夏波希模型的表达式如下<sup>[4]</sup>：

$$\frac{dD}{dN} = [1 - (1-D)^{\beta+1}]^{-\alpha} \left[ \frac{\Delta\sigma^*}{M(1-D)} \right]^\beta \quad (7)$$

若将式(7)中的 $\Delta\sigma^*$ 看成常量，则以循环次数 $N$ 表示的寿命，即可通过积分，写成为

$$\begin{aligned} N &= \int dN = \int_0^D \frac{M^\beta (1-D)^\beta}{[1 - (1-D)^{\beta+1}]^{-\alpha}} \frac{1}{(\Delta\sigma^*)^\beta} dD \\ &= \frac{1}{(1-\alpha)(1+\beta)} \left( \frac{M}{\Delta\sigma^*} \right)^\beta [1 - (1-D)^{\beta+1}]^{1-\alpha} \end{aligned} \quad (8)$$

当疲劳失效时，若寿命 $N$ 以 $N_f$ 表示，当 $N \rightarrow N_f$ ， $D \rightarrow 1$ ，式(8)可写成为

$$N_f = \frac{1}{(1-\alpha)(1+\beta)} \left( \frac{M}{\Delta\sigma^*} \right)^\beta \quad (9)$$

上式中， $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $M$ 均为夏波希模型中的材料疲劳损伤特性参数，根据试验来确定。

将式(8)与式(9)相除，即可得出

$$D = 1 - \left[ 1 - \left( \frac{N}{N_f} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \right]^{\frac{1}{1+\beta}} \quad (10)$$

按照同样的方法，可自式(6)的石油大学新模型得出

$$\begin{aligned} N &= \int_0^D \frac{1}{\lambda_1(\Delta\sigma^*)^{\lambda_2}} (1-D)^{\lambda_2} dD \\ &= \frac{1}{\lambda_1(1+\lambda_2)} \frac{1}{(\Delta\sigma^*)^{\lambda_2}} [1 - (1-D)^{1+\lambda_2}] \end{aligned} \quad (11)$$

$$N_f = \frac{1}{\lambda_1(1+\lambda_2)} \frac{1}{(\Delta\sigma^*)^{\lambda_2}} \quad (12)$$

因此

$$D = 1 - \left( 1 - \frac{N}{N_f} \right)^{\frac{1}{1+\lambda_2}} \quad (13)$$

将两个模型得出的损伤因子 $D$ 的表达式，式(10)与式(13)相对比，即可得出如下结论：

(1) 石油大学的新模型与夏波希模型的理论基础相同，只不过新模型是夏波希模型的特殊情况而已。即当 $\alpha=0$ 时，式(10)与式(13)完全相等，表明两个模型具有相同的损伤规律方程式，石油大学的新模型完全符合损伤力学的基本规律。两个模型的不同，只是在于新模型统一考虑了疲劳裂纹萌生及扩展两个阶段；而夏波希模型只是考虑了疲劳裂纹的萌生阶段，因而 $\alpha \neq 0$ 。显见， $\alpha=0$ 的特殊情况，却反映了新模型的优越性。

(2) 石油大学的新模型是一个参数( $\lambda_2$ )的损伤规律模型，表达形式简单，物理意义明确，而且使用了当量应力幅 $\Delta\sigma^*$ 的概念，使数学模型更加完善和全面。因此，在工程实际中较夏波希模型简单易行，更加实用。

### 三、损伤因子与材料损伤参数的确定

从式(6)看出：必须确定出损伤因子 $D$ 以及材料损伤特性参数 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ ，才能按照石油大学的新模型，估算出疲劳寿命 $N$ 。因此，作者在试验室内进行了钢试件的疲劳损伤试验，提出了一套通过试验来确定损伤因子及材料损伤参数的方法，为估算疲劳寿命奠定了基础。

**1. 钢试件疲劳损伤试验** 试件所用钢材是我国国产海洋用钢15MnVNb，其化学组成及机械性能，分别如表1和表2所示。试件的设计是按照ASTM的E740—80标准，如图1所示。在试件的焊接区或母体，分别切出表面裂纹。

试验是在石油大学的50吨计算机控制的电液伺服MTS材料试验机上进行的。为了更好的模拟海洋石油钢结构的管节点的疲劳承载情况，试件采用偏心加载的方案，以使试件在拉伸载荷与弯曲载荷联合作用下进行疲劳试验，如图2所示。

表 1 15MnVNb钢的化学组成 (%)

Table 1 The Chemical Components of Steel 15MnVNb

C	Mn	S	P	Si	Ni	V	Nb
0.16	1.41	0.004	0.015	0.39	0.18	0.04	0.36

表 2 15MnVNb钢的机械性能

Table 2 The Mechanical Properties of Steel 15MnVNb

$\sigma_s$ MPa	$\sigma_b$ MPa	$\delta_s$ (%)	$A_{tr}$ (N·m) (-40°C)					
			横 向		纵 向			
431	578	27	96	102	118	157	163	206

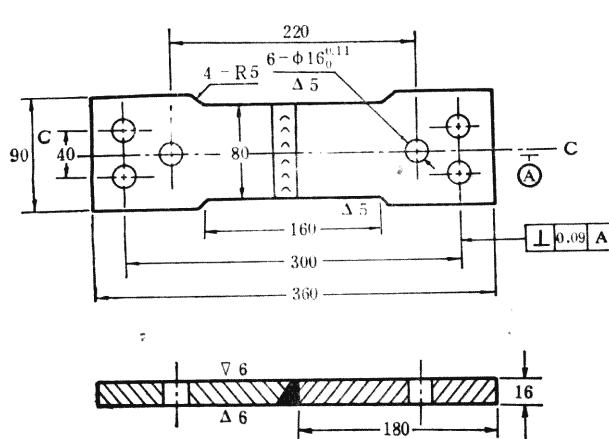


图 1 表面裂纹的试件图

Fig.1 The test pieces of surface crack

试件的表面裂纹扩展的长度尺寸，使用光学读数显微镜观测；其沿深度方向的扩展尺寸采用染色法测量，并配合应用 SCOD (Surface Crack Opening Displacement) 表面裂纹张开位移法，进行校核。

**2. 确定损伤因子的宏观测量法** 前人研究损伤因子局限于疲劳裂纹萌生阶段，故均采用微观测量法<sup>[5]</sup>。本文研究疲劳损伤，将疲劳裂纹的萌生与扩展两个阶段统一起来，故采用自裂纹扩展阶段的宏观测量法，来确定损伤因子。

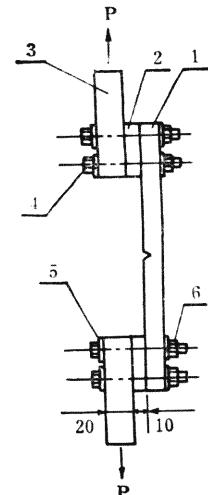


图 2 试件的偏心加载情况

Fig.2 The Eccentric loading case of test pieces

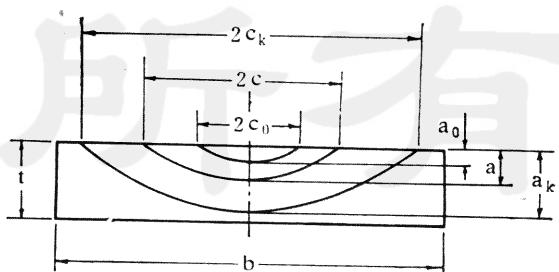


图 3 钢试件的表面裂纹扩展的横断面

Fig.3 The Cross-Section of Surface Crack Propagation of Steel Test Pieces

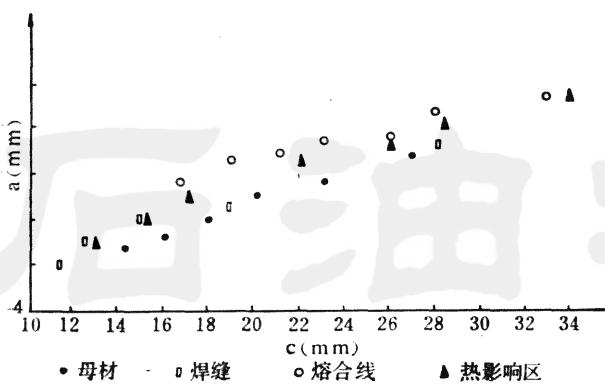


图 4 15MnVNb钢试件的a—c关系曲线

Fig. 4 The a—c Relation Curve of  
15MnVNb Steel Test Pieces

根据损伤因子 $D$ 的定义，则可写出：

$$D = \frac{A_d}{A} = \frac{a}{a_k} \cdot \frac{C}{C_K} \quad (17)$$

于是，即可得出疲劳损伤速率为

$$\frac{dD}{dN} = \frac{1}{a_k C_K} \left( a \frac{dc}{dN} + C \frac{da}{dN} \right) \quad (18)$$

或

$$\begin{aligned} \frac{dD}{dN} &= \left( 1 + \frac{1}{m} \right) \frac{1}{a_k} \left( \frac{a}{a_k} \right)^{\frac{1}{m}} \frac{da}{dN} \\ &= \frac{1+m}{C_K} \left( \frac{C}{C_K} \right)^m \frac{dc}{dN} \end{aligned} \quad (19)$$

正如上式（18）、式（19）所示，即可通过测量表面裂纹沿长度及深度方向的扩展尺寸及扩展速率，而求得疲劳损伤速率。这就是确定疲劳损伤的宏观测量法的基本原理。

对15MnVNb钢试件进行表面裂纹的疲劳扩展试验表明， $a$ 与 $C$ 的关系式如下：

$$a = 1.38C^{0.702} \quad (20)$$

式（20）所得出的 $a$ — $C$ 关系曲线如图4所示。

若将损伤因子 $D$ 确定后，则可将损伤因子随循环次数〔以随机历程块 $N$ （ $B$ ）来表达〕而变化的规律，以图5所

试验表明：表面裂纹扩展的横断面是一个半椭圆，如图3所示。通过试验，建立了椭圆长轴 $2C$ 与短轴 $2a$ 之间的关系：

$$a = KC^m \quad (14)$$

设试件经一定循环次数后，沿表面裂纹长度方向扩展至 $C$ ，沿其深度方向扩展至 $a$ ，则此时的损伤面积 $A_d$ 应为

$$A_d = \frac{\pi}{2} a C \quad (15)$$

同理，当疲劳失效时则其最大的损伤横断面为

$$A = \frac{\pi}{2} a_k C_K \quad (16)$$

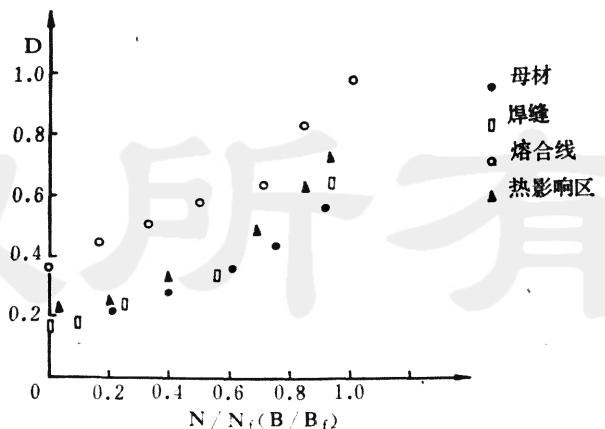


图 5 15MnVNb钢试件的疲劳损伤变化曲线  
Fig.5 The Fatigue Damage Change  
Curve of 15MnVNb Steel Test Pieces

示的试验所得曲线来表示。图5表明：疲劳损伤随循环次数变化的规律是非线性的，因此新的疲劳损伤数学模型的非线性符合试验得出的客观规律。

**3. 材料疲劳损伤特性参数的确定** 根据式(12)及式(13)，对多个试件反复试验所得出的D—N数据，按照三点递增多项式方法进行处理，即可运用自编的PDPDM程序求得新模型中的材料疲劳损伤特性参数 $\lambda_1$ 及 $\lambda_2$ 。对于15MnVNb钢，计算出的 $\lambda_1$ 及 $\lambda_2$ 如表3所示，其置信度自0.90490至0.96665。

表 3 15MnVNb钢的 $\lambda_1$ 及 $\lambda_2$ 参数

Table 3 The Parameters  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$  of Steel 15MnVNb

材料损伤 特性参数	表面裂纹的切口位置	
	母材	焊接区域
$\lambda_1$	$1.4724 \times 10^{-12}$	$4.8907 \times 10^{-12}$
$\lambda_2$	0.65301	0.60371

#### 四、深水结构构件的疲劳寿命估算

**1. 随机海浪载荷作用下的疲劳全寿命估算** 首先应用Lemaitre<sup>[6]</sup>的研究成果，计算确定当量应力幅 $\Delta\sigma^*$ 。即

$$\sigma^* = [3C\sigma_m + (1-C)\sigma_E] \quad (21)$$

$$\sigma_m = \frac{1}{3}\sigma_{ij}$$

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{3}{2}S_{ij}S_{ii}}$$

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m\delta_{ij}$$

公式中， $\sigma_{ij}$ 是在空间一点上的9个应力分量。式(21)中的系数C应按照下列原则选取：

若主要是孔洞，则取 $C \approx 1$ ；

若主要是裂纹，则取 $C \approx 0$ 。

通常取

$$\frac{1}{4} < C < \frac{1}{2}.$$

按照石油大学建立的新模型，自式(6)可导出：

$$(1-D)^{1/2}dD = \lambda_1(\Delta\sigma^*)^{1/2}dN \quad (22)$$

式(22)中的N是疲劳全寿命，以循环次数表示。

设一年中的总时间以秒表示为 $T_s$ ，而第n级海况出现的概率为 $P_n$ ，其海浪的平均周期为 $T_n$ 。若当量应力幅的概率密度为 $p(\Delta\sigma^*)$ ，则在第n级海况时，当量应力幅 $\Delta\sigma^*$ 作用的次数为

$$dN_n = \frac{T_s}{T_n}P_n p(\Delta\sigma_n^*)d(\Delta\sigma_n^*) \quad (23)$$

若在中国渤海海域，则根据文献[7]，按照石油大学提出的风速单参数海浪谱，可给出

$$P_n = \exp\left\{-\frac{V_{n1}^2}{53.96}\right\} - \exp\left\{-\frac{V_{n2}^2}{53.96}\right\} \quad (24)$$

式(24)中的 $v_{n1}$ 及 $v_{n2}$ 为第n级海况的风速范围的上下限。通常认为随机的当量应力幅 $\Delta\sigma^*$ 的概率服从瑞利(Rayleigh)分布,其概率密度应为

$$p(\Delta\sigma^*) = \frac{\Delta\sigma^*}{m_0} \exp\left\{-\frac{(\Delta\sigma^*)^2}{2m_0}\right\} \quad (25)$$

式中, $m_0$ 是随机当量应力幅 $\Delta\sigma^*$ 的谱的零阶矩。

$$m_0 = \int_0^\infty S_{\sigma\sigma}(\omega) d\omega = \int_0^\infty |T_{\sigma\sigma}(\omega)|^2 S_{ss}(\omega) d\omega \quad (26)$$

自式(26)可看出:若随机海浪谱 $S_{ss}(\omega)$ 以及应力的传递函数 $T_{\sigma\sigma}(\omega)^2$ 均已知时,即可求得 $m_0$ 。

设在第n级海况发生之后,构件的疲劳损伤自 $D_i$ 转变到 $D_{i+1}$ ,则前面式(22)可写成为

$$(1-D_i)^{1+\lambda_2} - (1-D_{i+1})^{1+\lambda_2} = R \quad (27)$$

$$\text{式(27)中, } R = \lambda_1(1+\lambda_2) \frac{T_y}{T} P_n \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(\Delta\sigma^*)^{\lambda_2+1}}{m_0} \exp\left\{-\frac{(\Delta\sigma^*)^2}{2m_0}\right\} d(\Delta\sigma^*) \quad (28)$$

式(27)可以用计算机求解,石油大学提供了PFLEDM(*Program for Fatigue Life Estimation Using Damage Mechanics Method*)程序,可以按照下列步骤,一步步地直到将疲劳失效时的寿命 $N_F$ 计算出来。

$$\begin{aligned} D_{(N=0)} &= D_0 \\ D_{i+1} &= D_i + \delta D_i \\ N_F &= N_{(D=D_c)} \text{ 或 } T_F = T_{(D=D_c)} \end{aligned}$$

**2. 疲劳寿命估算结果与试验结果的对比** 为了校核上述估算疲劳寿命方法的正确性,石油大学在试验室内以50吨的MTS电液伺服的材料试验机,对15MnVNb钢如图1所示的试件,在随机载荷作用下,进行了疲劳裂纹扩展试验。试验结果与损伤力学新方法估算结果的对比,如表4所示。

表 4 试验结果与估算的疲劳寿命的对比  
Table 4 The Fatigue Life Comparison of Experiment Results and Estimation

切口位置	对 比		
	试验结果(随机块B)	估算结果(随机块B)	相对误差(%)
母材	1295	1087	16.06
焊接区域	1200	1021	14.92

表4说明石油大学提出的疲劳损伤模型适用于试验室条件,作者提出的估算疲劳寿命的损伤力学新方法可以应用。

当石油开发向深水发展之后,浮动采油系统将取代固定平台。浮动采油系统一般使用柔性管在海底进行输油。石油大学通过试件及全尺寸柔性管构件的疲劳试验分析与研究,证明损伤力学的估算疲劳寿命新方法同样适用于深水柔性管。

首先，对 15MnVNb 钢试件进行了疲劳试验，得出了  $S-N$  曲线（图 6）。但是这种 15MnVNb 钢的机械性能与目前海上油田使用的柔性管的内层缠绕的不锈钢钢心的材料的机械性能是极其相近的，其对比情况如表 5。

表 5 15MnVNb 钢与不锈钢的机械性能对比

Table 5 The Mechanical Properties Comparison of Steel 15MnVNb and Stainless Steel

钢 材	$\sigma_y$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_s$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\delta$ (%)
15MnVNb	57.8	43.1	21
深水柔性管用 不锈钢	60.0	42.0	20

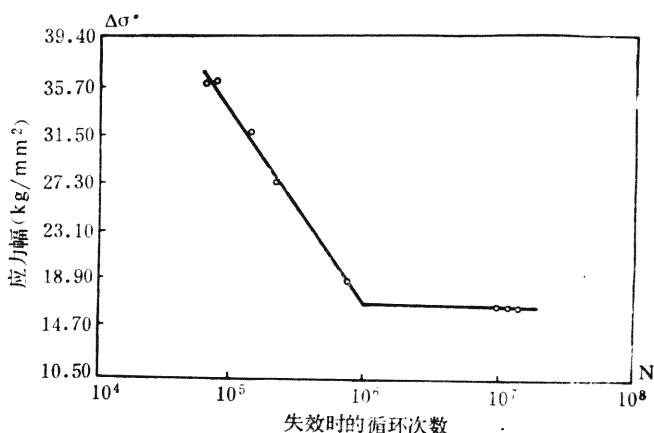


图 6 15MnVNb 的  $S-N$  曲线

Fig.6 The  $S-N$  Curve of Steel 15MnVNb

图 6 的  $S-N$  曲线表明：试验室内钢试件的疲劳试验结果与深水用柔性管全尺寸结构的疲劳试验结果是吻合的。因为图 6 的  $S-N$  曲线上，当  $N=10^6$  次时，当量应力幅  $\Delta\sigma^*=17.43\text{kg/mm}^2$ ；而使用海上油田提供的 5 米长，内径 101.6mm 的全尺寸柔性管在内压 7kg/mm<sup>2</sup>，即当量应力幅  $\Delta\sigma^*=18.21\text{kg/mm}^2$  时，进行疲劳试验，其寿命以循环次数表示，也是  $10^6$  次。由于两者的当量应力幅相差还不到  $1\text{kg/mm}^2$ ，吻合较好，表明此法是适用于深水结构的。

## 五、结 论

1. 材料疲劳过程是一个能量耗散的损伤过程，损伤的内因是材料的机械性能，而外因主要是交变的当量应力幅。本文将疲劳裂纹萌生到扩展看成是一个统一的疲劳损伤过程，可以应用损伤力学方法估算包括疲劳裂纹萌生及扩展两个阶段的全寿命。

2. 损伤因子是应用损伤力学方法，估算疲劳全寿命的基本控制参数。本文提出的宏观测量法，可以通过测量钢板试件在拉伸与弯曲载荷联合作用下的表面裂纹疲劳扩展沿深度及

长度方向的尺寸，来确定损伤因子。

3. 建立疲劳损伤数学模型是给出损伤力学估算疲劳寿命方法的前提。作者提出的疲劳损伤模型是非线性模型，是夏波希模型的特殊情况，但较之容易确定材料损伤参数。试验证明：石油大学的非线性新模型较线性累积损伤法更加符合试验结果；新模型表达简单，物理概念明确，更加实用。

4. 本文提出的损伤力学估算疲劳寿命方法是基于新的疲劳损伤数学模型的新方法。通过钢试件及全尺寸柔性管结构的疲劳试验，表明无论是刚性试件或是柔性构件，试验结果与估算结果基本上吻合较好。因此，这种新方法是可用以估算深水海洋石油钢结构的疲劳寿命的。

5. 为了应用本文提出的损伤力学估算深水海洋石油钢结构疲劳寿命的新方法，作者提供了PFLEDM (*Program for Fatigue Life Estimation Using Damage Mechanics Method*) 计算程序，可供海洋石油工程上采用。

(本文收到日期1989年10月9日)

(编辑 王万香)

### 参 考 文 献

- (1) 石理国等，近年来国内外海洋钢结构管柱强度研究进展，力学进展，Vol.12, No.3, 中国船舶科学研究中心
- (2) 赫松林等，损伤与损伤力学，国防科技大学学报，1984年第2期
- (3) 方华灿，海洋石油钻采设备理论基础，石油工业出版社，1984年。
- (4) Kachanov K.M. *Introduction to continuum damage Mechanics*, USA, 1986.
- (5) Lee Hao *Recent advance in continuum damage Mechanics* 1983
- (6) Lemaître, J. *Estimating damage model of plastic failure or creep fatigue failure of structures*, *Journal of Solid Mechanics*, 1981
- (7) 方华灿，马汝建，用风速单参数谱法估算海洋石油钢结构腐蚀疲劳寿命问题的探讨，石油学报，1987年，第4期

## A NEW DAMAGE MECHANICS METHOD USED FOR ESTIMATION of the FATIGUE LIFE OF OFFSHORE PETROLEUM STEEL STRUCTURES IN DEEP WATER

Fang Huacan Jia Xinglan  
(University of Petroleum, China)

### Abstract

In this paper, a new method based on the theory of damage mechanics is suggested to estimate the fatigue life of offshore petroleum steel structures. A new mathematical model of fatigue damage is established and a macroscopic method of measuring fatigue damage factor based on surface crack fatigue propagation experiments at the University of petroleum, China is developed

A method of determining material fatigue damage parameters of offshore petroleum steel structures is also provided. The fatigue damage mathematical model established has been verified not only by a fatigue experiment on a rigid steel test specimen but also by the fatigue experiments of flexible compounded material structures used in deep water. The damage mechanics method and equation is recommended for whole an estimation of the fatigue life under random loading or constant amplitude loading.