

含腐蚀坑结构损伤演化评估过程

任克亮^{1,2}, 吕国志²

(1. 宁夏大学物理与电气信息学院, 银川 750021; 2. 西北工业大学航空学院, 西安 710072)

[摘要] 基于有限元理论并结合局部应力应变法, 得到了确定尺寸腐蚀坑底部在疲劳载荷作用下产生非扩展裂纹的萌生寿命值; 采用断裂力学模型通过求解数值积分和非线性方程, 得到了微裂纹扩展到极限尺寸的寿命值和等效裂纹的尺寸; 采用神经网络技术建立了腐蚀坑尺寸与等效裂纹尺寸之间的非线性映射关系。

[关键词] 腐蚀坑; 有限元方法; 局部应力应变; 蒙特卡罗方法; 神经网络

[中图分类号] V215.2; O346.2⁺3 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)09-0063-05

腐蚀环境中的结构表面, 由于环境介质与材料元素间的化学与电化学反应, 容易产生大量随机的腐蚀坑, 这些腐蚀坑底部在外界载荷的作用下会形成应力集中区并伴有微裂纹产生, 当微裂纹继续扩展时, 会引起结构破坏。为了定量分析含腐蚀坑结构这一损伤演化过程, 将腐蚀坑沿最大主应力方向投影使其成为表面裂纹^[1]; 但在腐蚀坑到表面裂纹的等效过程中有关二者之间尺寸的对应关系目前报道较少。为了探讨这一问题, 笔者采用有限元理论并结合仿真软件 ANSYS 的参数化分析计算语言 APDL, 充分利用 APDL 语言的循环迭代算法和结果提取功能, 得到了不同尺寸腐蚀坑底部的有效应力集中系数, 然后结合局部应力应变法求解腐蚀坑底部在疲劳载荷作用下产生的非扩展裂纹萌生寿命值, 再通过断裂力学模型并结合蒙特卡罗方法, 求解数值积分和非线性方程得到微裂纹扩展到极限尺寸的寿命值和与腐蚀坑具有相同寿命表面裂纹的有效尺寸。最后采用神经网络技术建立了腐蚀坑各种几何尺寸与等效裂纹深度间的多变量非线性映射关系, 为腐蚀环境下老龄飞机的定量分析提供了理论依据。

1 损伤演化评估过程

1.1 腐蚀坑的等效处理

等效裂纹技术是通过将结构面上的腐蚀坑沿最

大主应力方向进行投影处理, 从而使其转化为具有相同寿命的表面裂纹。利用该方法, 一个假想的表面裂纹会通过沿表面长度 $2c_0$ 和沿厚度方向 a_0 (如图 1 所示) 唯一地确定下来, 其中 $2c_0$ 和 a_0 可以利用合适的断裂力学模型求得。

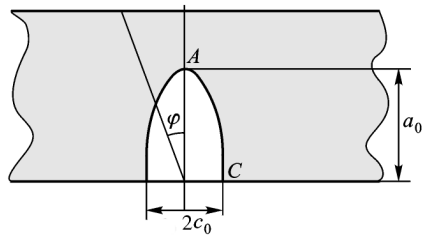


图 1 腐蚀坑等效为具有相同寿命的表面裂纹
Fig. 1 A schematic illustration of an equivalent semi-elliptical surface crack modeled for corrosion pit

1.2 有效应力集中系数

含腐蚀坑结构属于三维应力集中问题, 对于三维应力集中, 只有个别边界条件和几何形状十分简单时, 才可能得到解析解; 对于复杂结构的应力集中系数的求解通常采用数值方法。笔者采用有限元方法并结合仿真软件 ANSYS 对中心含椭圆形腐蚀坑的铝合金板进行分析。在有限元分析中选取 20 个节点等参单元作为分析对象, 由于分析结构具有对

[收稿日期] 2006-02-16; 修回日期 2006-12-13

[作者简介] 任克亮(1971-), 男(回族), 宁夏西吉县人, 宁夏大学副教授, 西北工业大学博士研究生

称性,故取四分之一结构进行分析,其有限元结构如图2所示。对于三维空间结构,通常受三维应力控制,但其表面通常受两个主应力控制,所以采用 Mises 理论时,对应地有一个主应力 $S\sigma_3 = 0$,则存在

$$\sigma_f = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (1)$$

在腐蚀坑底部,由于应力集中,存在最大应力 $\sigma_{f_{\max}}$ 与对应的有效应力集中系数 k_f 的关系为

$$k_f = \frac{\sigma_{f_{\max}}}{s'_0} \quad (2)$$

式中 s'_0 为净截面名义应力,

$$s'_0 = \frac{A_0 s_0}{A_0 - \pi a_0 c_0 / 2} \quad (3)$$

其中 A_0 为受力面积, s_0 为名义应力值, a_0 和 c_0 分别为腐蚀坑的深度和 1/2 表面宽度(见图1)。

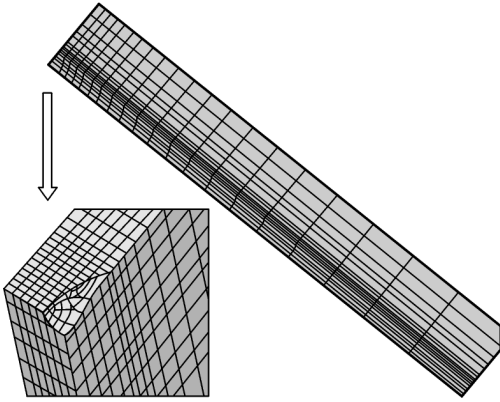


图2 有限元结构图

Fig. 2 Finite element model

1.3 腐蚀坑底部裂纹萌生尺寸

结构的疲劳寿命通常包括裂纹萌生寿命和扩展寿命两部分,在求解裂纹萌生寿命时通常面临选择合适的裂纹萌生尺寸。在实际应用中,根据不同情况,提出了许多不同量级来定义裂纹萌生尺寸,但目前还没统一的标准,笔者采用文献[2]提出的非扩展裂纹的尺寸作为裂纹萌生尺寸,其形式为

$$Ff \frac{K_1}{2K_f} \left[\left(1 + 2 \frac{a}{\rho} \right)^{-1/2} + \left(1 + 2 \frac{a}{\rho} \right)^{-3/2} \right] = \frac{\Delta K_{th} Y \sqrt{\pi a}}{\sqrt{(Y \Delta \sigma_e \sqrt{\pi a})^2 + \Delta K_{th}^2}} \quad (4)$$

式中 F 和 K_1 分别为形状因子和理论应力集中系数; a 和 ρ 分别为从缺口根部算起的裂纹长度和缺口半径; f 为修正系数:当 $a/\rho < 0.2$ 时, $f = 1$; 当

$a/\rho \geq 0.2$ 时, $f = 1 + \frac{\tan(\pi/2K_f)}{2a} \left[\frac{a}{\rho} - 0.2 \right]$; ΔK_{th} 为长裂纹的门槛值; Y 为形状因子; $\Delta \sigma_e$ 为光滑试件疲劳极限。

通过对式(4)进行迭代求解,可得到不同深度腐蚀坑底部的裂纹萌生尺寸 L_a 。

1.4 裂纹萌生寿命

为了获得腐蚀坑底部在疲劳载荷作用下产生非扩展裂纹时的寿命值,按照如下过程采用局部应力应变法^[3]:

1) 用修正的 Neuber 公式

$$\Delta \sigma \Delta \varepsilon = \frac{(k_f \Delta s)^2}{E} \quad (5)$$

和材料的循环应力应变式

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{1/n'} \quad (6)$$

$$\text{通过式} \quad \frac{\Delta \sigma^2}{E} + 2\Delta \sigma \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{1/n'} = \frac{(k_f \Delta s)^2}{E} \quad (7)$$

将名义应力-时间历程转化为局部应力-时间历程。其中

加载时,

$$\frac{(\sigma - \sigma_r)^2}{E} + 2(\sigma - \sigma_r) \left(\frac{\sigma - \sigma_r}{2K'} \right)^{1/n'} = \frac{(k_f \Delta s)^2}{E} \quad (8)$$

卸载时,

$$\frac{(\sigma_r - \sigma)^2}{E} + 2(\sigma_r - \sigma) \left(\frac{\sigma_r - \sigma}{2K'} \right)^{1/n'} = \frac{(k_f \Delta s)^2}{E} \quad (9)$$

式中 σ_r 为前一次反向终了时的局部应力, σ 是本次反向终了时的局部应力, Δs 为名义应力幅。

2) 利用应力-应变曲线,反复用下面的式(10)和式(11),由局部应力-时间历程得到局部应变-时间历程;

$$\text{加载时,} \quad \frac{\varepsilon - \varepsilon_r}{2} = \frac{\sigma - \sigma_r}{2E} + \left(\frac{\sigma - \sigma_r}{2K'} \right)^{1/n'} \quad (10)$$

$$\text{卸载时,} \quad \frac{\varepsilon_r - \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_r - \sigma}{2E} + \left(\frac{\sigma_r - \sigma}{2K'} \right)^{1/n'} \quad (11)$$

3) 绘制局部应力应变响应图。

4) 利用应变-寿命关系式

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + \varepsilon'_f (2N)^c \quad (12)$$

求腐蚀坑底部在名义应力-时间历程的作用下形成非扩展裂纹的萌生寿命。式中 b 为材料疲劳强度指数; σ'_f 为疲劳强度数; c 为疲劳延性指数; ε'_f 为疲劳延性系数; K' 为硬化系数; n' 为硬化指数。

通过以上过程可以得到腐蚀坑底部在疲劳载荷

作用下产生非扩展裂纹的萌生寿命值 N_p 。

1.5 表面裂纹的扩展规律

腐蚀坑底部在疲劳载荷作用下产生萌生裂纹直到破坏属于三维裂纹扩展过程。关于三维裂纹的疲劳扩展,人们开展了大量的试验研究^[4]。研究发现裂纹前沿(见图1)A点和C点同样服从Paris疲劳扩展规律,其形式为

$$\frac{da}{dN} = C_A (\Delta K_A)^m, \quad \frac{dc}{dN} = C_C (\Delta K_C)^m \quad (13)$$

式中 ΔK_A 和 ΔK_C 分别表示A点和C点处的应力强度因子变化量。通过对Paris公式积分,就可得到裂纹的扩展寿命

$$\int_0^{N_f} dN = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta K)^m} \quad (14)$$

式中 C, m 是材料常数;应力强度因子取Newman和Raju用有限元方法给出的方程

$$K_I = (\sigma_i + H\sigma_b) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F\left[\frac{a}{c}, \frac{a}{t}, \frac{c}{w}, \phi\right] \quad (15)$$

式中 σ_i 和 σ_b 表示结构所受外载荷; H 和 F 分别表示影响系数和形状系数^[5];

$$Q = 1 + 1.464 \left[\frac{a}{c} \right]^{1.65} \quad (16)$$

1.6 等效表面裂纹尺寸求解

通过式(14)可以得到腐蚀坑底部从裂纹萌生尺寸到最终断裂的疲劳寿命值 N_f , 从而获得含腐蚀坑结构的总寿命值 $N_p + N_f$ 。为了得到与腐蚀坑具有相同寿命的等效裂纹尺寸,笔者采用

$$N_p + N_f = \int_{a_{ec}}^{a_c} \frac{da}{C(\Delta K)^m} \quad (17)$$

式中 a_{ec} 表示等效裂纹的深度, a_c 为极限尺寸(属于材料常数),对式(17)变形可得

$$F(a_{ec}) = N_p + N_f - \int_{a_{ec}}^{a_c} \frac{da}{C(\Delta K)^m} = 0 \quad (18)$$

1.6.1 数值积分 对式(18)中的积分项,先利用混沌映射方法产生随机数 $\gamma_i (i=0, 1, \dots, m-1)$ 在 $[0, 1]$ 区间上,然后取 $a_i = a_{ec} + (a_c - a_{ec})\gamma_i$, 当 m 取得足够大时,寿命的近似值可表示为

$$N_f' \approx \frac{a_c - a_{ec}}{m} \sum_{i=0}^{m-1} f(a_i) \quad (19)$$

$$f(a_i) = 1/C \left[K_I \Delta \sigma \sqrt{\frac{\pi a_i}{Q}} \right]^m \quad (20)$$

1.6.2 非线性方程求解 通过以上积分,可以得到寿命的近似计算值。为了获得与已知寿命对应的等效裂纹的初始尺寸值,通过联立式(19)和式(20)

并进行迭代计算,可得到已知寿命时的等效裂纹尺寸。为了解非线性方程 $F(a_{ec}) = 0$, 笔者采用如下过程:先给 a_{ec} 赋予初值(取腐蚀坑的深度),然后求解 $F(a_{ec}) = 0$, 这时在区间 $[-b, b]$ 内产生随机数 $\gamma_i (i=0, 1, \dots, m-1)$ (其中 $b > 0$), 对每个随机数 γ_i 求解方程 $F_1 = f(a + \gamma)$, 直到 $|F_1| < |F_0|$, 这时 $a + \gamma \Rightarrow a_0$, 并且 $F_1 \Rightarrow F_0$ 。如果不满足以上条件,则采用随机数 γ_i 在 $[-b/2, b/2]$, 然后重复以上过程。

1.7 腐蚀坑尺寸到表面裂纹尺寸的映射

通过以上过程可获得确定形状腐蚀坑所对应的等效表面裂纹尺寸,结果发现,等效裂纹的尺寸通常受腐蚀坑的深度 a_0 , 腐蚀坑深度与结构厚度 t 的比值 a_0/t 以及腐蚀坑表面宽度的一半长度 c_0 与 a_0 比值 c_0/a_0 的控制,是一个典型的多变量函数关系,建立各个量之间的确定关系,通常采用绘制相位图法和多元回归分析,但在绘制相位图时,相关线的确定存在较大的人为误差;采用多元回归分析,存在基函数选择及系数求解方面的困难,且求得的结果往往难以反映出因变量与自变量之间固有的、复杂的非线性关系。笔者采用模拟人工智能的神经网络技术中误差反向传播模型BP作为预测结构,根据Kolmogorov定理,选用只有一个隐层的三层神经网络作为已知腐蚀坑的尺寸到等效表面裂纹的映射模型结构,对应的输入层节点为3个,分别为腐蚀坑的深度 a_0 , 腐蚀坑深度与结构厚度的比值 a_0/t , 腐蚀坑表面宽度的一半与腐蚀坑深度的比值 c_0/a_0 。输出层节点1个,为等效裂纹尺寸。根据经验,对于 m 个输入节点的神经网络,有 $2m+1$ 个隐含节点将在网络容量与训练时间之间取得良好的效果,激励函数选为sigmoid,其形式为

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (21)$$

最后采用梯度下降法并进行训练,可建立任意尺寸腐蚀坑到等效表面裂纹的映射,为工程实践中将含随机分布腐蚀坑的损伤结构等效为含广布裂纹的损伤结构提供了可能。

2 算例分析

以航空结构的主体材料LY12-CZ铝合金板为研究对象,该材料的弹性模量为69580 MPa,抗拉强度为447.86 MPa,屈服强度为342.02 MPa;Paris常数 $m = 3.2$, $C = 2.2 \times 10^{-9}$, 疲劳常数 $\epsilon'_f = 36.1$, $\sigma'_f = 768$ MPa, $b = -0.0882$, $c = -0.6393$;疲劳硬

化系数 $K' = 646 \text{ MPa}$, $n' = 0.067$; 断裂韧性 $K_{ep} = 123 \text{ MPa}$; 结构尺寸为长 150 mm , 宽 30 mm , 厚度 3 mm 的矩形板。通过对矩形板中心的腐蚀坑在不同尺寸情况下进行求解, 分析腐蚀坑深度与板厚度的比值 a_0/t 的变化范围为 $0.05 \sim 0.5$ (增量为 0.05), 腐蚀坑表面宽度与深度比值 c_0/a_0 为 $1, 2, 3, 4$; 外界疲劳载荷 $S_{max} = 198.7 \text{ MPa}$; 载荷比为 $R = -1$ 。

2.1 腐蚀坑底部的裂纹萌生尺寸和寿命值

通过有限元方法得到不同形状腐蚀坑底部的有效应力集中系数 k_f 后, 再采用牛顿法对式(4)进行迭代计算, 得到不同尺寸比时的腐蚀坑底部的非扩展裂纹的尺寸 L_a , 然后将裂纹的萌生尺寸带到应变寿命方程, 即可得到该萌生尺寸对应的萌生寿命值 N_p , 结果见表 1。

表 1 腐蚀坑到等效裂纹尺寸的计算结果

Table 1 The result of calculated

a_0/mm	c_0/mm	k_f	L_a/mm	N_p/cycles	a_{ec}/mm
0.15	0.15	1.44	0.030 35	2 902	0.147 99
0.15	0.30	1.41	0.047 48	6 209	0.141 83
0.15	0.45	1.34	0.047 21	13 135	0.130 07
0.15	0.60	1.29	0.046 93	22 781	0.116 03
0.30	0.30	1.63	0.048 92	760	0.298 34
0.30	0.60	1.51	0.047 48	2 252	0.297 6
0.30	0.90	1.4	0.046 93	6 829	0.296 16
0.30	1.20	1.33	0.046 66	14 526	0.295 03
0.45	0.45	1.71	0.048 63	781	0.446 16
0.45	0.90	1.53	0.047 21	1 848	0.445 47
0.45	1.35	1.42	0.046 4	5 474	0.443 06
0.45	1.80	1.35	0.046 16	11 482	0.441 25
0.60	0.60	1.81	0.048 63	367	0.596 21
0.60	1.20	1.58	0.046 66	1 146	0.593 92
0.60	1.80	1.44	0.045 89	4 388	0.588 53
0.60	2.40	1.37	0.088 19	17 588	0.573 66
0.75	0.75	1.86	0.048 63	262	0.744 43
0.75	1.50	1.61	0.046 4	869	0.739 76
0.75	2.25	1.47	0.088 19	6 185	0.716 41
0.75	3.00	1.41	0.086 73	1 343	0.715 67
0.90	0.90	1.91	0.048 34	190	0.891 89
0.90	1.80	1.62	0.045 89	783	0.879 08
0.90	2.70	1.49	0.086 29	4 939	0.839 88
0.90	3.60	1.42	0.027 23	3 198	0.878 03
1.05	1.05	1.93	0.048 05	169	1.037 74
1.35	1.35	1.97	0.047 75	133	1.330 34
1.35	2.70	1.67	0.085 38	942	1.237 88
1.35	4.05	1.53	0.081 13	3 176	1.101 82
1.35	5.40	1.43	0.078 44	8 326	0.909 66
1.50	1.50	1.99	0.047 48	120	1.476 38
1.50	3.00	1.69	0.084 04	792	1.361 73
1.50	4.50	1.53	0.079 2	3 101	1.139 45
1.50	6.00	1.4	0.075 98	11 056	0.737 73

2.2 等效表面裂纹的有效尺寸

通过以上过程得到了不同形状尺寸的腐蚀坑的裂纹萌生寿命值, 然后将其代入式(18), 并采用蒙特卡罗方法求解数值积分和非线性方程, 得到已知尺寸腐蚀坑在等寿命原理下的等效表面裂纹的有效尺寸, 结果见表 1, 并绘制了 c_0/a_0 在不同取值时 $a_0 - a_{ec}$ 随 a_0/t 的变化图, 见图 3。

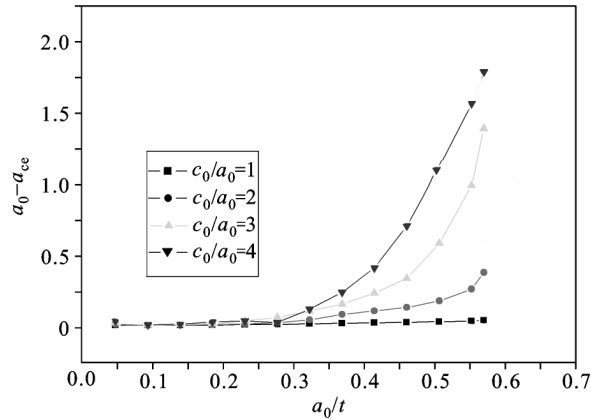


图 3 腐蚀坑与等效裂纹尺寸差值变化趋势

Fig. 3 Change of the difference between pits and equivalent crack sizes

2.3 任意尺寸腐蚀坑到等效裂纹的映射与预报

前面所得的等效裂纹的尺寸是在腐蚀坑的深度与板厚之比 a_0/t 在 $0.05 \sim 0.5$ 之间(增量为 0.05), 腐蚀坑的表面宽度的一半 c_0 与腐蚀坑深度 a_0 的比值 $c_0/a_0 = 1, 2, 3, 4$ 时的等效裂纹的深度, 但在实际腐蚀结构的损伤评估中, 结构面上的腐蚀尺寸(在最大主应力方向)是多种多样的, 为了建立任意尺寸腐蚀坑到等效裂纹的映射, 采用神经网络技术对确定值 $a_0, a_0/t, c_0/a_0$ 以及对应等效裂纹的尺寸进行训练, 建立了多个变量到等效裂纹尺寸的非线性映射关系, 并对 $a_0, a_0/t$ 以及 c_0/a_0 取任意值的 4 种组合进行预报, 结果见表 2。

表 2 任意尺寸腐蚀坑到表面裂纹尺寸的预报值

Table 2 Forecast value of arbitrary size equivalent crack

a_0/mm	c_0/a_0	a_0/t	a_{ec}/mm
0.33	1.5	0.11	0.327
0.54	2.7	0.18	0.536
1.26	2.1	0.42	1.136
1.44	3.6	0.48	0.943

3 结论

通过数值计算得到了腐蚀损伤结构分析中腐蚀坑到等效表面裂纹的非线性映射关系,为工程实践中将腐蚀坑相当于具有相同寿命的等效裂纹提供了理论依据。

1) 采用有限元方法得到了不同形状腐蚀坑底部的有效应力集中系数,在相同载荷的作用下,有效应力集中系数随着腐蚀坑的深度 a_0 , a_0 与结构厚度 t 的比值 a_0/t 以及表面宽度的一半 c_0 与 a_0 比值 c_0/a_0 的变化而变化,并呈如下规律:**a.** 在 c_0/a_0 相同时,随着腐蚀深度的增加,有效应力集中系数也增大;**b.** 在 a_0/t 相同时,随着腐蚀坑表面宽度的增加,有效应力集中系数相应减小。

2) 裂纹萌生尺寸随着应力集中系数的增加而减少,当应力集中系数无限增大时,腐蚀坑就是一个表面裂纹,这时的萌生尺寸等于零,说明结构表面缺陷如果是裂纹,没有萌生尺寸。

3) 对于确定形状的腐蚀坑,通过求解得到具有相同寿命的等效裂纹尺寸,结果发现当 $a_0/t < 0.2$ 时,腐蚀坑与其对应的等效裂纹尺寸几乎相等,这时

可以用腐蚀坑的尺寸近似作为其等效表面裂纹的尺寸,在结构可靠性分析中直接将腐蚀坑沿主应力方向投影,而无需对其进行修正;但当 $a_0/t > 0.2$ 时,腐蚀坑与其等效裂纹尺寸间存在非线性关系,并随着 c_0/a_0 的不同而变化,是一个典型的多变量非线性函数关系,利用神经网络技术通过对有限数据进行训练建立了多个变量到等效裂纹尺寸的映射关系,并对任意尺寸是等效裂纹尺寸进行了预报。

参考文献

- [1] ASME. ASME boiler and pressure vessel design code, Section XI [S]. Philadelphia: American Society of Mechanical Engineers, 1992
- [2] 尚德广,王德俊,等. 疲劳裂纹萌生尺寸的定义及其确定方法[J]. 机械强度, 1996, 18(2): 59~62
- [3] 赵少汗. 局部应力应变法及其设计数据[J]. 机械设计, 2000, (2): 1~4
- [4] Leek T H, Howard I C. An examination of methods of assessing interacting surface cracks by comparison with experimental data [J]. Int J Pres & Piping, 1996, 68: 181~201
- [5] Newman J C Jr, Raju I S. An empirical stress intensity factor equation for the surface crack [J]. Engng Fracture Mech, 1981, (15):185~92

Damage Assessment Techniques for Pitting Corroded Structures

Ren Keliang^{1,2}, Lü Guozhi²

(1. Department of Physics & Electrical Information Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Department of Aircraft Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[Abstract] The finite element method and local stress and strain method were used to obtain the crack initiation life under fatigue load of each pit. After getting the life of crack initiation, the propagation life of initiation crack under pits bottom and the equivalent initial surface crack size were calculated through reverse integration of the Paris fatigue crack growth law and solving the non-linear equation using fracture model. Finally the nonlinear relation was set up between sizes of pits and equivalent initial surface crack by neural network.

[Key words] corrosion pit; finite element method; local stress and strain; Monte Carlo method; neural network