

文章编号: 1000-8055(2009)09-2012-07

考虑应力比的疲劳裂纹扩展概率模型

王坤茜¹, 徐人平¹, 林捷晖²

(1. 昆明理工大学 机电工程学院, 昆明 650093;

2. 上海三菱电梯有限公司云南分公司, 昆明 650011)

摘 要: 考虑到应力比对疲劳裂纹扩展速率的影响及裂纹扩展的分散性, 在 Paris 公式基础上, 提出了一种考虑应力比的疲劳裂纹扩展概率模型; 运用非线性函数线性化原理给出概率模型参数的求解方法; 通过该概率模型和曲面, 可从宏观上把握应力比对裂纹扩展的影响规律及得到任意应力比下的概率疲劳裂纹扩展速率曲线; 对 30CrMnSiNi2A 钢试验数据的处理及分析验证了该模型的有效性和实用性。

关 键 词: 疲劳裂纹扩展; 疲劳裂纹扩展概率模型; 应力比; 30CrMnSiNi2A 钢

中图分类号: TG111. 91

文献标识码: A

Fatigue crack growth probability model based on stress ratio

WANG Kun-qian¹, XU Ren-ping¹, LIN Jie-hui²

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering,

Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Yunnan Branch of Shanghai Mitsubishi Elevator Corporation, Kunming 650011, China)

Abstract: Based on Paris formula, a fatigue crack growth probability model was established in consideration of the influence of stress ratio on fatigue crack growth rate and the dispersion of fatigue crack growth. The parameters of this probability model were estimated by using the principle of no-linear function linearization. Through this probability model and surfaces, the regulations of the effect of stress ratio on fatigue crack growth can be mastered and the probability fatigue crack growth rate curves at any stress ratios can be obtained. Availability and feasibility are indicated by an analysis of the 30CrMnSiNi2A steel test data.

Key words: fatigue crack growth; fatigue crack growth probability model; stress ratio; 30CrMnSiNi2A steel

疲劳裂纹扩展 $da/dN-\Delta K$ 曲线是工程构件损伤容限分析的重要依据,也是金属材料的主要力学性能之一^[1-2]。国内外有不少专家学者做过有益探索^[3-6],但一般都是基于 Paris 公式,较少考虑应力比 R 的影响,不尽合理。因为循环应力强度因子 ΔK ,应力比 R 都是裂纹扩展的动力因子^[7],而应力比 R 的改变是会影响到疲劳裂纹扩展 $p-da/dN-\Delta K$ 等数值^[8-10]。研究表明,实际使用中的构件承受的随机载荷由应力幅值和平均应力(与应力比 R 相关)二元变量控制,且这二元变量

对疲劳裂纹扩展均起主导作用^[11],因此,使用单一变量 ΔK 表示的 $p-da/dN-\Delta K$ 曲线作为疲劳裂纹扩展性能指标,显然与实际不符合。

在实际情况中,不仅存在应力比 R 的影响,而且疲劳断裂问题具有随机性,必须用概率统计的方法来反映裂纹扩展的量变倾向和趋势。否则采用确定性的分析与预测方法是没有能力也不可能回答今天工程技术人员必须解决的无数个可能发生的问题,还会导致不确定的或互相矛盾的计算结果。

收稿日期: 2008-09-18; 修订日期: 2009-01-14

作者简介: 王坤茜(1972-),女,云南昆明人,副教授,博士生,主要从事机械设计及理论的研究。

因此,本文考虑到应力比 R 对疲劳裂纹扩展的重要影响以及疲劳裂纹扩展的分散性,在传统的 Paris 公式基础上,建立了一种描述随机疲劳裂纹扩展的 R - p - da/dN - ΔK 概率模型,并给出简单、实用的模型参数求解方法. 本文以 30CrMnSiNi2A 结构钢为例,通过该材料的 R - p - da/dN - ΔK 概率模型和曲面图形,研究应力比 R 对 p - da/dN - ΔK 曲线的影响,其研究结论在理论和工程实践上都具有重要的意义,为在类似条件下的材料的疲劳寿命评估提供理论依据,满足工程实际中的应用需求.

1 R - p - da/dN - ΔK 概率模型

关于疲劳裂纹扩展稳定阶段的扩展规律,最有代表性的是 Paris 公式^[12]

$$da/dN = C(\Delta K)^n \quad (1)$$

式中 C 和 n 为待定参数. Paris 公式有其局限性,如未考虑应力比 R 的影响

有些金属材料通常用 Walker 公式^[13]表达应力幅值和应力比 R 对疲劳裂纹扩展的影响.

$$da/dN = C(1-R)^m \Delta K^n \quad (2)$$

式中 C , n 和 m 为待定参数. 令 $C' = C(1-R)^m$, 则式(2)变为

$$da/dN = C'(\Delta K)^n \quad (3)$$

式(3)形同 Paris 公式,可以说 Walker 公式是 Paris 公式的变形. C' 与应力比 R 有关,而 n 与应力比 R 无关.

有些金属材料可使用 Forman 公式^[14]表达应力幅值和应力比 R 对疲劳裂纹扩展的影响.

$$da/dN = \frac{C(\Delta K)^n}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad (4)$$

式中 C 和 n 为待定参数, K_c 为断裂韧性. 令 $C'' = \frac{C}{(1-R)K_c - \Delta K}$, 则式(4)变为

$$da/dN = C''(\Delta K)^n \quad (5)$$

式(5)形同 Paris 公式,也可以说 Forman 公式是 Paris 公式的变形. C'' 与应力比 R 有关,而 n 与应力比 R 无关.

Forman 公式与 Paris 公式和 Walker 公式相比较,形式较复杂,对于目前尚难测定 K_c 值的材料来说,就无法使用该式来计算 da/dN .

Paris 公式具有形式简单和使用方便等特点,因而得到了广泛应用. 通过文献[8]和文献[15-17]表明,Paris 公式中的参数 C 和 n 与应力比 R

具有相关性,并且随着应力比 R 的增大, n 增大, C 降低. 因此,本文在 Paris 公式,为进一步利用试验信息,体现出裂纹扩展速率 da/dN , C 和 n 与应力比 R 的相关性,建立应力比 R 的函数 R - da/dN - ΔK 公式

$$da/dN = C(R)(\Delta K)^{n(R)} \quad (6)$$

式中 ΔK 为应力强度因子范围; a 为裂纹半长; N 为疲劳裂纹扩展寿命; R 为应力比,即最小应力与最大应力之比, $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{K_{\min}}{K_{\max}}$; $C(R)$, $n(R)$ 分别为应力比 R 的函数.

当只有一个应力比 R 时,公式(6)与 Paris 公式完全一致,即 Paris 公式是公式(6)的一个特例.

为了考虑试验数据随机特性对评价结果的影响,即存活概率问题,需要引入概率模型. 考虑到可靠度 p , 则 R - p - da/dN - ΔK 概率模型为

$$da/dN = C_p(R)(\Delta K)^{n_p(R)} \quad (7)$$

式中 p 为可靠度; $C_p(R)$ 为与可靠度 p 有关的应力比 R 的函数; $n_p(R)$ 为与可靠度 p 有关的应力比 R 的函数; 其余参数与式(6)中各参数意义相同.

2 R - p - da/dN - ΔK 概率模型参数计算方法

2.1 不同应力比 R 下的 a_j 和 $N_{j,p}$ 的测定与计算

分别在 r 个应力比 R 下,采用成组试验法进行试验,通过试验测得每个试件在恒幅载荷下的裂纹扩展长度 a 及对应的裂纹扩展寿命 N 的一系列数据对,即 σ - N 曲线. 由于试验数据的分散性,对于每个应力比 R 条件下的 m 个试件都可以测试得到 m 条 σ - N 曲线,计算这 m 个试件在同一循环载荷作用下,裂纹从起始长度扩展到指定裂纹长度时的裂纹扩展寿命 N_{ji} , 其中 $i = 1, 2, 3, 4, \dots, m$, 表示试件序号,共有 m 个试件, $j = 1, 2, \dots, q$, 表示指定裂纹长度 a_j 共有 q 个.

由于裂纹扩展寿命成对数正态分布^[1], 则实验数据可进行以下处理. 取对数裂纹扩展寿命 $x_{ji} = \lg N_{ji}$ 为随机变量,并将对应同一 a_j 的不同 x_{ji} 值作为一个子样进行统计处理. 当给定 j 时,由 i 个试件 x_{ji} 可以得到子样平均值 $\bar{x}_j$ 和子样标准差 S_j .

$$\bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ji} \quad (8)$$

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m X_{ji} - \frac{1}{m} \left(\sum_{j=1}^m X_{ji} \right)^2}{m-1}}$$

(9)

具有可靠度 p 的对数裂纹扩展寿命 $x_{j,p}$ 见文献[1]. 则具有可靠度 p 的安全裂纹扩展寿命为

$$N_{j,p} = 10^{x_{j,p}}$$

(10)

2.2 不同应力比 R 下的 $(da/dN)_{j,p}$ 和 ΔK_j 的计算

$(da/dN)_{j,p}$ 是从不同应力比 R 下的 a_j 和 $N_{j,p}$ 数据中采用七点递增多项式的数据处理方法确定, 由于七点递增多项式法需舍去头部和尾部的各 3 个数据, 实际上, $j=4, 5, \cdots, q-3$, 表示指定裂纹长度 a_j 共有 $(q-6)$ 个.

$$\Delta K_j = \frac{\Delta P}{B \sqrt{W}} Y \left(\frac{a_i}{W} \right)$$

(11)

式中 ΔP 为疲劳载荷变程; B, W 为试件形状尺寸; $Y \left(\frac{a_i}{W} \right)$ 为试件几何修正参数.

2.3 概率模型参数 $C_p(R)$ 和 $n_p(R)$ 的计算

对式(7)两边取对数, 得

$$\lg(da/dN) = \lg[C_p(R)] + n_p(R) \lg(\Delta K)$$

(12)

令 $Y_i = \lg(da/dN)_{j,p}, X_i = \lg(\Delta K)_j,$

$b_0 = \lg[C_p(R)], b_1 = n_p(R)$

则 $Y = Xb$

(13)

式中 $Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}; X = \begin{bmatrix} 1 & X_1 \\ 1 & X_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & X_n \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \end{bmatrix}$

$$i = 1, 2, 3, 4, \cdots, n; n = q - 6$$

回归系数 b 由下式求得

$$b = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \end{bmatrix} = (X'X)^{-1} X'Y$$

(14)

每个应力比 R 对应一个系数 $b = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \end{bmatrix}$, r 个应力比 R 将得到 r 个系数 b , 即应力比

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_r \end{bmatrix} \text{ 对应 } b_0 = \begin{bmatrix} b_{01} \\ b_{02} \\ \vdots \\ b_{0r} \end{bmatrix} \text{ 和 } b_1 = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{12} \\ \vdots \\ b_{1r} \end{bmatrix}$$

函数 $C_p(R)$ 可由 b_0 和 R 回归求得, 函数 $n_p(R)$ 可由 b_1 和 R 回归求得.

3 算 例

利用建立的 R - p - da/dN - ΔK 概率模型及参数估算方法, 对 30CrMnSiNi2A 钢锻材试验数据进行处理, 分析应力比 R 对疲劳裂纹扩展的影响规律.

3.1 试验及数据处理

本试验采用 30CrMnSiNi2A 锻材, 热处理是 900 °C 淬火, 240 °C 等温 1 h, 250 °C 回火 3 h; CT 试样, $B=20$ mm, $W=80$ mm; 加载条件为恒幅, 正弦波; 频率 $f=13.33$ Hz; 试验温度是室温, 15~25 °C; 相对湿度为 70%~80%; 应力比 $R=0.1, 0.3, 0.4, 0.6$; 最大载荷 $P_{\max}=1.96 \times 10^4$ N, 本试验采用固定最大载荷, 改变最小载荷达到改变应力比 R 的方法; 试件数目为每个应力比 R 下各 5 个; 裂纹起始长度为 32 mm, 指定裂纹长度为 51 mm.

本文以 $p=50\%$ 和 $p=99.9\%$ 为例, 研究 R - p - da/dN - ΔK 概率模型及曲面. 根据不同应力比 R 下的 a_j 和的测定与计算以及 $(da/dN)_{j,p}$ 和 ΔK_j 的计算方法, 得到表 1~表 4 数据.

表 1 $R=0.1$ 时的 $(da/dN)_{50}$ 和 $(da/dN)_{99.9}$
Table 1 Crack growth rate $(da/dN)_{50}$ and $(da/dN)_{99.9}$ at $R=0.1$

a_j/mm	$\Delta K/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5})$	$(da/dN)_{50}/10^{-7} \cdot (\text{m/cycle})$	$(da/dN)_{99.9}/10^{-7} \cdot (\text{m/cycle})$
35	25.115116	1.383042	1.454084
36	26.005671	1.502826	1.600667
37	26.946012	1.620572	1.740468
38	27.941306	1.746852	1.866716
39	28.997281	1.888007	2.015695
40	30.120300	2.052847	2.180080
41	31.317449	2.230476	2.340514
42	32.596644	2.416591	2.548975
43	33.966748	2.586437	2.764255
44	35.437719	2.810151	3.074268

表 2 R=0.3 时的 $(da/dN)_{50}$ 和 $(da/dN)_{99.9}$
Table 2 Crack growth rate $(da/dN)_{50}$ and $(da/dN)_{99.9}$
at R=0.3

a_i/mm	$\Delta K/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5})$	$(da/dN)_{50}/10^{-7}\cdot(\text{m/cycle})$	$(da/dN)_{99.9}/10^{-7}\cdot(\text{m/cycle})$
35	19.533979	0.909533	1.039947
36	20.226633	0.991922	1.129824
37	20.958009	1.084896	1.237696
38	21.732127	1.185104	1.349300
39	22.553441	1.289587	1.466545
40	23.426900	1.394702	1.610373
41	24.358016	1.503212	1.768403
42	25.352945	1.627254	1.921149
43	26.418582	1.783425	2.103126
44	27.562670	1.997851	2.317318
45	28.793940	2.261194	2.570209
46	30.122263	2.572362	2.927267
47	31.558842	2.916778	3.387453
48	33.116441	3.325792	3.736373

表 3 R=0.4 时的 $(da/dN)_{50}$ 和 $(da/dN)_{99.9}$
Table 3 Crack growth rate $(da/dN)_{50}$ and $(da/dN)_{99.9}$
at R=0.4

a_i/mm	$\Delta K/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5})$	$(da/dN)_{50}/10^{-7}\cdot(\text{m/cycle})$	$(da/dN)_{99.9}/10^{-7}\cdot(\text{m/cycle})$
35	16.743410	0.607998	0.638969
36	17.337114	0.671218	0.740440
37	17.964008	0.745125	0.831663
38	18.627537	0.821350	0.921589
39	19.331521	0.911822	1.043711
40	20.080200	1.022883	1.161247
41	20.878300	1.165105	1.273748
42	21.731096	1.273911	1.408465
43	22.644498	1.389174	1.529008
44	23.625146	1.547635	1.715052
45	24.680520	1.719045	1.890118
46	25.819082	1.876418	2.079921
47	27.050436	2.076356	2.342706
48	28.385521	2.319465	2.601481

表 4 R=0.6 时的 $(da/dN)_{50}$ 和 $(da/dN)_{99.9}$
Table 4 Crack growth rate $(da/dN)_{50}$ and $(da/dN)_{99.9}$
at R=0.6

a_i/mm	$\Delta K/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5})$	$(da/dN)_{50}/10^{-7}\cdot(\text{m/cycle})$	$(da/dN)_{99.9}/10^{-7}\cdot(\text{m/cycle})$
35	11.162274	0.258699	0.280335
36	11.558076	0.281854	0.303758
37	11.976005	0.304619	0.331768
38	12.418358	0.330131	0.367255
39	12.887681	0.359886	0.403061
40	13.386800	0.398806	0.453391
41	13.918866	0.446716	0.506066
42	14.487397	0.508393	0.559441
43	15.096332	0.570545	0.630535
44	15.750097	0.651402	0.708160
45	16.453680	0.746918	0.799636
46	17.212722	0.872205	0.948667
47	18.033624	1.014515	1.111091
48	18.923681	1.188614	1.365177

3.2 30CrMnSiNi2A 钢的 R - p - da/dN - ΔK 概率模型

根据 R - p - da/dN - ΔK 概率模型及参数计算方法,由表 1~表 4 可得 (R, b_0, b_1) 数据(图 1~图 4 中散点).

$p=50\%$ 时

$$R = \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.3 \\ 0.4 \\ 0.6 \end{bmatrix}; b_0 = \begin{bmatrix} -9.738703 \\ -10.140843 \\ -10.315089 \\ -10.655768 \end{bmatrix}; b_1 = \begin{bmatrix} 2.060670 \\ 2.398514 \\ 2.545360 \\ 2.905291 \end{bmatrix}$$

$p=99.9\%$ 时

$$R = \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.3 \\ 0.4 \\ 0.6 \end{bmatrix}; b_0 = \begin{bmatrix} -9.766928 \\ -10.084658 \\ -10.314754 \\ -10.636839 \end{bmatrix}; b_1 = \begin{bmatrix} 2.098553 \\ 2.401883 \\ 2.579018 \\ 2.925793 \end{bmatrix}$$

由 $p=50\%$ 和 $p=99.9\%$ 时的 (R, b_0, b_1) 数据,运用线性回归^[18]理论,得到线性回归模型及相关系数 r (图 1~图 4),其中相关系数 $|r|$ 均大于置信度为 95% 的相关系数临界值 0.95^[19],说明 b_0 和 b_1 分别与应力比 R 线性相关.从图 1~图 4 可以看出, R - p - da/dN - ΔK 概率模型中的待定函

数 $C_p(R)$ 和 $n_p(R)$ 是变化的量;并且表现出与应力比 R 很强的相关性, $\lg[C_p(R)]$ 和 $n_p(R)$ 均与应力比 R 成线性相关关系; $C_p(R)$ 随着应力比 R 的增加而减小, $n_p(R)$ 随着应力比 R 的增加而增大.

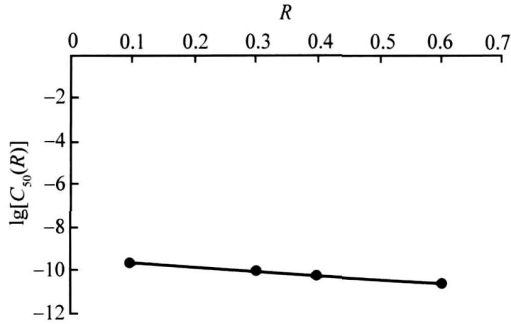


图 1 $\lg[C_{50}(R)]$ 与 R 的关系
(相关系数 $r=-0.998872$)

Fig. 1 Relativity between $\lg[C_{50}(R)]$ and R

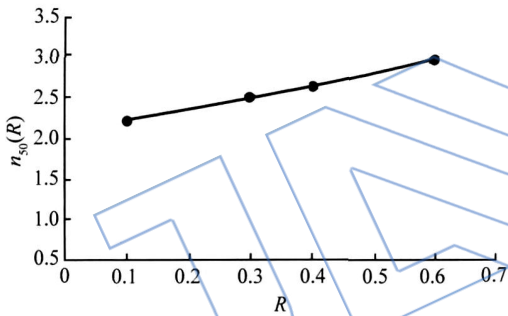


图 2 $n_{50}(R)$ 与 R 的关系
(相关系数 $r=0.999522$)

Fig. 2 Relativity between $n_{50}(R)$ and R

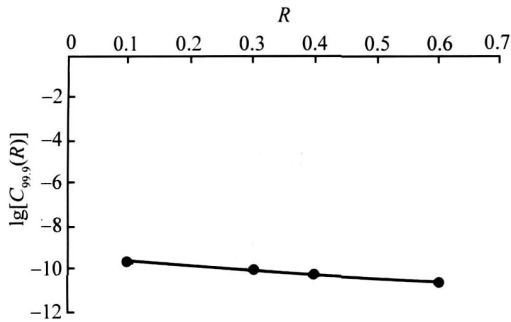


图 3 $\lg[C_{99.9}(R)]$ 与 R 的关系
(相关系数 $r=-0.998123$)

Fig. 3 Relativity between $\lg[C_{99.9}(R)]$ and R

因为 $\lg[C_p(R)]$ 与应力比 R 成线性相关关系,则 $C_p(R)$ 可由 b_0 和 R 线性回归后,变换成指数函数求得,而 $n_p(R)$ 可由 b_1 和 R 线性回归求得.

当 $p=50\%$ 时

$$\begin{cases} C_{50}(R) = 10^{(-9.571889 - 1.830604R)} \\ n_{50}(R) = 1.889250 + 1.680597R \end{cases} \quad (15)$$

即 $p=50\%$ 的 R - p - da/dN - ΔK 概率模型为

$$da/dN = 10^{(-9.571889 - 1.830604R)} \times \Delta K^{(1.889250 + 1.680597R)} \quad (16)$$

当 $p=99.9\%$ 时

$$\begin{cases} C_{99.9}(R) = 10^{(-9.584303 - 1.761404R)} \\ n_{99.9}(R) = 1.920671 + 1.658975R \end{cases} \quad (17)$$

即 $p=99.9\%$ 的 R - p - da/dN - ΔK 概率模型为

$$da/dN = 10^{(-9.584303 - 1.761404R)} \times \Delta K^{(1.920671 + 1.658975R)} \quad (18)$$

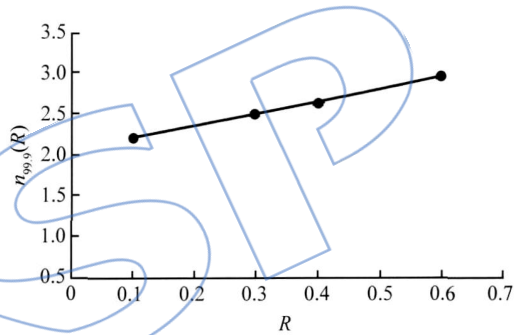


图 4 $n_{99.9}(R)$ 与 R 的关系
(相关系数 $r=0.998250$)

Fig. 4 Relativity between $n_{99.9}(R)$ and R

3.3 R - p - da/dN - ΔK 曲面及其应用

R - p - da/dN - ΔK 概率模型实际上是一个曲面方程,将其图形化,在 da/dN , ΔK , R 三坐标中,显示为一个曲面(如图 5 所示).该曲面具有很多用途,通过 R - p - da/dN - ΔK 曲面,可得到任意应力比 R 下的 p - da/dN - ΔK 曲线,充分利用了有限的试验数据和经验提供的信息,可以从宏观上分析应力比 R 对疲劳裂纹扩展速率 da/dN 的影响,整体地把握连续应力比 R 影响下的疲劳裂纹扩展速率 da/dN 及可靠性曲线的变化趋势.一方面比传统方法节省了大量试件,另一方面为在类似条件下的材料的疲劳寿命评估提供理论依据,满足工程实际中的应用需求.

以下是 30CrMnSiNi2A 钢 R - p - da/dN - ΔK 曲面分析.

1) 应力比 R 对疲劳裂纹扩展速率 da/dN 的影响分析

由图 5 中的曲面,可看出应力比 R 对疲劳裂纹扩展速率 da/dN 有着较大影响.增大应力比 R

将使裂纹扩展速率 da/dN 增加,并且 da/dN 的增长幅度并非均匀递增,当应力比 $R \leq 0.4$ 时, R - p - da/dN - ΔK 曲面变化较平缓,即 da/dN 的增长幅度较平稳;当应力比 $R > 0.4$ 时, R - p - da/dN - ΔK 曲面变陡,即 da/dN 的增长幅度较快。

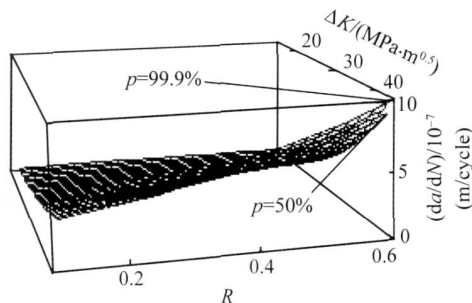


图5 R - p - da/dN - ΔK 曲面

Fig. 5 R - p - da/dN - ΔK surfaces

2) 应力比 R 与 p - da/dN 之间的关系分析

将 R - p - da/dN - ΔK 曲面剖切,研究应力比 R 与 p - da/dN 之间的关系. 平行于图 5 中的 da/dN - ΔK 平面进行剖切,可得单个应力比 R 下的 p - da/dN - ΔK 曲线(图 6),通过这些曲线研究 p - da/dN - ΔK 曲线与应力比 R 之间的关系;平行于图 5 中的 R - da/dN 平面进行剖切,研究同一 ΔK 时, p - da/dN 与应力比 R 的关系(图 7)。

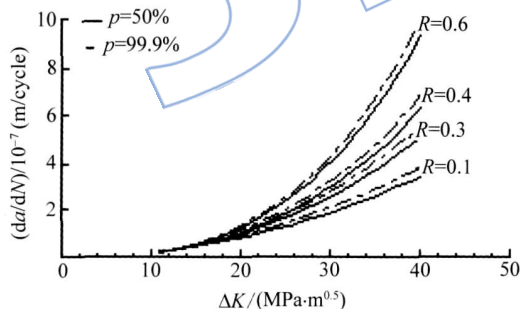


图6 p - da/dN - ΔK 曲线

Fig. 6 p - da/dN - ΔK curves

通过图 6 的 p - da/dN - ΔK 曲线和图 7 的 R - p - da/dN 曲线,可以看到以下变化趋势: 30CrMnSiNi2A 钢的疲劳裂纹扩展速率 da/dN 与应力比 R 有很强的相关性,应力比 R 对 30CrMnSiNi2A 钢疲劳裂纹扩展速率影响较大;随着应力比 R 增大,30CrMnSiNi2A 钢疲劳裂纹扩展速率 da/dN 增加;同一 ΔK 时,当应力比 R 较小时,应力比 R 对裂纹扩展速率 da/dN 的影响

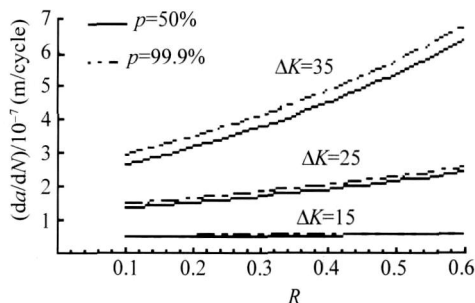


图7 R - p - da/dN 曲线

Fig. 7 R - p - da/dN curves

相对较小,当应力比 R 较大时,应力比 R 对裂纹扩展速率 da/dN 的影响相对明显;随着 ΔK 的增大,应力比 R 对裂纹扩展速率 da/dN 的影响越明显,尤其当有较高可靠度 p 要求时,其裂纹扩展速率 da/dN 明显加快。

4 结 论

1) 提出了形如 $da/dN = C(R) (\Delta K)^{n(R)}$ 的疲劳裂纹扩展 R - da/dN - ΔK 模型,考虑了应力比 R 的影响,改进了 Paris 公式中待定参数 C 和 n 忽略应力比 R 影响的局限性。

2) 同时考虑了疲劳裂纹扩展的随机特性,建立了形如 $da/dN = C_p(R) (\Delta K)^{n_p(R)}$ 的 R - p - da/dN - ΔK 概率模型. 该模型有鲜明的物理意义,可以从宏观上整体地把握应力比 R 对疲劳裂纹扩展的影响规律。

3) 给出了 R - p - da/dN - ΔK 概率模型参数的计算方法,满足工程实践中的应用需求。

4) 通过 30CrMnSiNi2A 钢的算例证明了 R - p - da/dN - ΔK 概率模型能较好地反映疲劳裂纹扩展的规律,同时也验证了该模型的有效性。

5) 通过 30CrMnSiNi2A 钢的 R - p - da/dN - ΔK 曲面,得出应力比 R 对 30CrMnSiNi2A 钢疲劳裂纹扩展的影响规律:在疲劳裂纹扩展稳定阶段,随着应力比 R 增大,疲劳裂纹扩展速率 da/dN 增加,并且随着应力比 R 的增大,疲劳裂纹扩展速率 da/dN 的增长幅度加快;随着 ΔK 的增大,应力比 R 对裂纹扩展速率 da/dN 的影响越明显,尤其当有较高可靠度 p 要求时,其裂纹扩展速率 da/dN 明显加快。

因此, R - p - da/dN - ΔK 概率模型及其参数计算方法可作为对现有描述疲劳裂纹扩展规律的方法的改进和补充,应用于工程实践。

参考文献:

[1] 高镇同. 疲劳应用统计学[M]. 北京:国防工业出版社,1986.

[2] 王志智,聂学州,吴晓峰. 疲劳裂纹扩展速率统计分析[J]. 航空学报,1993,14(3):197-201.
WANG Zhizhi, NIE Xuezhou, WU Xiaofeng. Statistical analysis of fatigue crack growth rate [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1993, 14(3): 197-201. (in Chinese)

[3] Wng G S. Intrinsic statistical characteristics of fatigue crack growth rate [J]. Eng. Fract. Mech., 1995, 51(5):787-803.

[4] Wng K S, Chang S T, Shen Y C. Dynamic reliability models for fatigue crack growth problem [J]. Eng. Fract. Mech., 1996, 54(4):543-556.

[5] Rocha M M, Schueller G I. A probabilistic criterion for evaluating the goodness of fatigue crack growth models [J]. Eng. Fract. Mech., 1996, 53(5):707-731.

[6] LIU W K, Belytschko T, LIU Y J. Three reliability methods for fatigue crack growth [J]. Eng. Fract. Mech., 1996, 53(5):733-752.

[7] 师小红,敦怡,徐章遂. 三参数全范围裂纹扩展公式[J]. 煤矿机械,2007,28(6):58-60.
SHI Xiaohong, DUN Yi, XU Zhangsui. 3-Parameter full range crack growth rate expressions [J]. Coal Mine Machinery, 2007, 28(6):58-60. (in Chinese)

[8] 徐人平,李淑兰,王坤茜. 应力比对 30CrMnSiNi2A 钢 p - $\frac{da}{dN}$ - ΔK 曲线影响研究[J]. 工程力学,2005,(4):6-10.
XU Renping, LI Shulan, WANG Kunqian. A study of effect of stress ratio on p - $\frac{da}{dN}$ - ΔK curve for 30CrMnSiNi2A steel [J]. Engineering Mechanics, 2005, (4): 6-10. (in Chinese)

[9] 路民旭,郑修麟. 应力比和频率对 GC-4 钢 CF 裂纹扩展特性的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报,1994,8(2):95-105.
LU Minxu, ZHENG Xiulin. Effects of stress ratio and loading frequency on corrosion fatigue crack growth behavior for GC-4 steel [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection. 1994, 8(2):95-105. (in Chinese)

[10] 才庆魁. 金属疲劳断裂理论[M]. 辽宁:东北工业大学出版社,1989.

[11] 熊峻江,李睿,高镇同. 用于断裂可靠性设计的 p - K_m - $\frac{da}{dN}$ - ΔK 曲面[J]. 实验力学,1998,13(1):111-114.
XIONG Junjiang, LI Rui, GAO Zhentong. The p - K_m - $\frac{da}{dN}$ - ΔK surface used for design on fracture reliability [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1998, 13(1):111-114. (in Chinese)

[12] Paris P C, Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws [J]. J. Basic Eng., Trans. ASME, 1963, 85(4):528-534.

[13] Walker K. The effect of stress ratio during crack propagation and fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 aluminum[R]. Philadelphia:ASTM, Special Technical Publication 462, 1970.

[14] Forman R G, Kearney V E, Engle R M. Numerical analysis of crack propagation in a cyclic-loaded structure[J]. J. Basic Eng., Trans. ASME, 1967, 89:459-465.

[15] 欧阳辉,刘俊洲,苏小燕,等. 应力比 R 对疲劳裂纹扩展速率的影响[J]. 固体力学学报,1984,(4):577-584.
OU YANG Hui, LIU Junzhou, SU Xiaoyan, et al. The effect of stress ratio on fatigue crack growth rates [J]. Acta Mechanica Solid Sinica, 1984, (4):577-584. (in Chinese)

[16] 刘俊洲,欧阳辉. 应力比对 GC-4 钢疲劳裂纹扩展速率影响的探讨[J]. 材料工程,1985,(1):16-20.
LIU Junzhou, OU YANG Hui. A discuss of effect of stress ratio on fatigue crack growth rates for GC-4 steel [J]. Journal of Materials Engineering, 1985, (1):16-20. (in Chinese)

[17] 林海,林守仁. 关于帕里斯法则中 m 值变化条件的研究[J]. 机械工程材料,2004,28(3):16-18,46.
LIN Hai, LIN Shouren. Variation condition of index m in Paris formula [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2004, 28(4):16-18,46. (in Chinese)

[18] 内特,沃塞曼,库特纳. 应用线性回归模型[M]. 张勇,王国明,赵秀珍,译. 北京:中国统计出版社,1990.

[19] 航天工业部科学技术委员会. 应变疲劳分析手册[M]. 北京:科学出版社,1987.