

基于 PFM 的 B 级钢侧架耐久性分析

李伟¹, 李强¹, 王平²

(1. 北京交通大学轨道车辆结构可靠性与运用检测技术教育部工程研究中心, 北京 100044;

2. 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东青岛 266001)

[摘要] 基于概率断裂力学对 B 级钢货车侧架的圆角细节进行了模拟耐久性试验研究, 提出了一种新的通用当量初始缺陷尺寸分布的计算方法, 建立了裂纹超越概率模型, 从存活概率 P , 应力水平 σ , 裂纹形成时间 t 和经济维修极限 a_c 4 个角度评估了结构的损伤度, 并结合实测的应力谱预测了其经济寿命。结果表明, 裂纹萌生时间能很好地服从三参数 Weibull 分布, 求得的通用 EIFS 分布参数通过了 $K-S$ 检验, 拟合效果很好。裂纹超越概率模型可以对结构产生的耐久性损伤进行定量度量, 预测的经济寿命随裂纹穿越概率的增加呈现增长的趋势, 验证了新的计算方法和概率模型的合理有效性。

[关键词] 耐久性; 疲劳; B 级钢; 裂纹

[中图分类号] O346.1; O346.2; TB114.3 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)01-0056-06

1 前言

自 20 世纪 80 年代开始, 耐久性分析方法已经在航空领域得到了广泛的应用, 但在铁路方面却应用极少^[1]。虽然机车车辆承载结构的受力特征与飞机结构具有较大差异, 但在失效模式和安全可靠性要求方面却具有较大的相似性。因此, 随着我国铁路高速、重载能力的大幅度提高, 对铁路机车车辆关键零部件进行耐久性设计已迫在眉睫。

耐久性讨论的是相对较小的亚临界裂纹尺寸, 虽然它不会直接引起安全问题, 但当它超过某一极限尺寸时, 就可能使得维修含有这些裂纹的结构细节变得极不经济。如果来不及修理, 就有可能危及结构的安全^[2]。例如, 我国转 8AG 转向架侧架的某些薄弱部位(轴箱导框角部等)皆为圆角细节, 即使经过探伤修复后, 仍有一些缺陷(裂纹、孔洞等)不能被发现和消除, 这就使得这些部位导致的疲劳破坏时常发生。如果从概率断裂力学(probabilistic fracture mechanics, PFM)的角度, 将结构的微、细观

缺陷用当量初始缺陷尺寸(equivalent initial flaw size, EIFS)分布来描述, 并且用当量裂纹扩展的概念来研究裂纹尺寸随使用时间扩展的随机过程, 就可以建立起一套完整的结构耐久性分析技术, 对结构的关键部位进行耐久性分析, 评估其损伤度和预测其经济寿命, 从而为我国铸钢件转向架制定合理的检修周期提供有力的理论依据, 这不仅具有学术意义, 更具有重大的工程实用价值。

因此, 文章对转 8AG 转向架侧架圆角细节进行了模拟耐久性试验研究, 并基于 PFM 研究了其裂纹穿越概率模型, 评估了其损伤度, 并结合实测的应力谱预测了其经济寿命。

2 试验

2.1 试验材料

试验材料为 B 级铸钢, 其化学成分中含 C: 0.32%; Si: 1.5%; Mn: 0.9%; P: 0.04%; S: 0.04% (质量分数), 试样的形状及尺寸如图 1 所示, 试样不预制裂纹。

[收稿日期] 2008-05-29

[基金项目] 国家 973 计划项目资助(2007CB714705)

[作者简介] 李强(1963—), 男, 山西太原市人, 北京交通大学教授, 博士生导师, 研究方向为机车车辆结构强度、疲劳及可靠性、无损检测; E-mail: qli3@bjtu.edu.cn

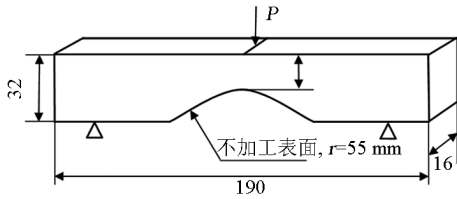


图1 试样的形状及尺寸(单位: mm)

Fig.1 Shape and dimensions of specimen(unit: mm)

2.2 试验方法及结果

试验采用 PLG200 电磁式高频疲劳试验机, 频率约为 110 Hz, 在室温空气中进行。应力水平分别取 397、357 MPa 和 321 MPa, 应力比为 0.1, 每个应力水平下取 7 根试样进行试验。试验过程中, 采用精度为 0.01 mm 的读数显微镜对一定裂纹形成时间 t 下的裂纹尺寸 a 进行观测。最后, 将每组 7 根试样的试验结果当作一个整体, 得到了 3 组不同应力水平下的试验数据 (a, t) 。

用 a_r 表示所选取的不同参考裂纹值, 取值范围为 0.3 ~ 4 mm, 每间隔 0.1 mm 确定一个参考裂纹形成时间 t_r 。对于每一组而言, 取临近 a_r 的三对 (a, t) , 其对应的 t_r 值可由 Lagrange 插值法求得:

$$t_r = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1, j \neq i}^3 \frac{[a_r - a_j] t_i}{a_i - a_j} \quad (1)$$

因此, 得到了 3 组不同应力水平下的 (a_r, t_r) , 如图 2 所示。

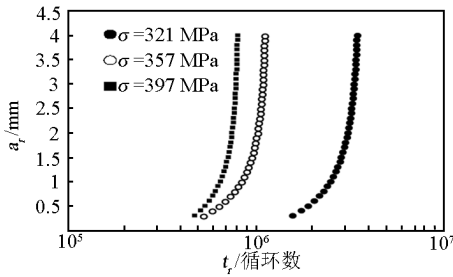


图2 试验数据点

Fig.2 Test data points

3 耐久性分析的 PFM 法

合理地表示并确定结构细节群的结构原始疲劳质量(initial fatigue quality, IFQ) 是对结构进行耐久性分析、评估其损伤度、预测其经济寿命的基础和重要前提, 通常用裂纹萌生时间(time to crack initiation, TTCI) 和 EIFS 表示^[3]。

3.1 TTCI 与 EIFS 分布特性

TTCI 是在给定应力谱下达到指定参考裂纹尺寸 a_r 所经历的时间, 用 T 表示, 假定其服从三参数 Weibull 分布, 其累积分布函数为:

$$F_T(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t - \varepsilon}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (2)$$

式(2)中, α 、 ε 和 β 分别为统计分布的形状、位置和尺度参量。从而由 TTCI 分布函数就可以推出 EIFS 分布的函数。

首先, 裂纹扩展方程采用类似断裂力学中描述裂纹扩展速率的 Paris 公式的形式^[4]:

$$da/dt = Q[a(t)]^b \quad (3)$$

其中, 裂纹尺寸 a 为时间 t 的函数; Q 和 b 为与材料特性、载荷谱等有关的参量, 当载荷谱形式确定时, 常假定 b 与应力水平无关。对式(3)积分, 可得到 a 与 t 的关系如下:

$$a(t_1) = \{[a(t_2)]^{-c} + cQ(t_2 - t_1)\}^{-\frac{1}{c}} \quad (4)$$

其中, $c = b - 1$ 。令 $t_1 = 0$, $t_2 = T$, $a(t_2) = a_r$, 并且用 X 表示 EIFS, 则可以得到:

$$X = a(0) = (a_r^{-c} + cQT)^{-\frac{1}{c}} \quad (5)$$

令 $T = \varepsilon$ 为 TTCI 的下界, 则 EIFS 的上界就可以表示为:

$$x_u = (a_r^{-c} + cQ\varepsilon)^{-\frac{1}{c}} \quad (6)$$

因此, EIFS 上界与 TTCI 下界的关系可以由式(6)来表示。从而在指定载荷谱应力水平 (Q 和 b 已知) 及 a_r 下, $b > 1$ 时的 EIFS 累积分布函数可以表示为:

$$F_X(x) = \exp\left[-\left(\frac{x^{-c} - x_u^{-c}}{cQ\beta}\right)^\alpha\right] \quad (7)$$

3.2 通用 EIFS 分布的求解

裂纹扩展速率参数以及 TTCI 分布的参数都与应力水平有关。应力水平越高, 扩展速率越快, TTCI 就越短。而结构或构件的 IFQ 只取决于材料和制造质量, 与应力水平无关。因此, 式(7)中的分布参数成为与应力水平无关的通用 EIFS 分布参数的理论约束条件, 即为:

$$\begin{cases} x_{u1} = x_{u2} = \dots = x_{un} \\ b_1 = b_2 = \dots = b_n \\ Q_1 \beta_1 = Q_2 \beta_2 = \dots = Q_n \beta_n \\ \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_n \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中, x_{ui} 、 b_i 、 $Q_i \beta_i$ 、 α_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 为第 i 个应力水平下所得到的参数。对于这些参数的确定, 通常采用 TTCI 反推法^[5, 6] 得到, 过程比较繁琐, 并且由于试验数据的分散性及试验量的有限性, 可

能导致拟合效果不好,因此,下面将给出一种可为工程应用所接受的新方法,其示意图如图3所示。

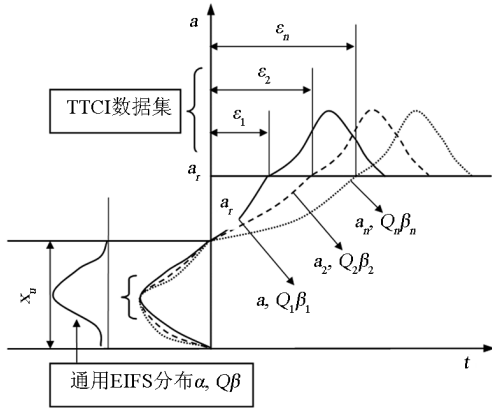


图3 通用 EIFS 分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of general EIFS distribution

1) 对于参数 b_i , 它是疲劳裂纹扩展速率关系式的指数,与应力水平无关,可直接通过对(3)式的拟合解出。当 $b \geq 1$ 时,取 $b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_i$,即可满足上述条件;当 $b < 1$ 时,由式(4)求出的 $a(0) < 0$,在物理概念上负的当量初始裂纹尺寸是不合理的,因此,不取 $b < 1$ 。

2) 而对于参数 x_{ui} , $Q_i \beta_i$ 和 a_i 的确定,可以将所有应力水平下的 t_i 值作为一个大样本,带入式(7),直接估计在指定参考裂纹 a_r 下 EIFS 分布的参数值,求得的 x_u , $Q\beta$ 和 α 即为满足约束条件的参数值。具体求解如下:

对式(7)两边取对数可得:

$$\ln \ln \left[\frac{1}{F_X(x)} \right] = \alpha \ln(x^{-c} - x_u^{-c}) - \alpha \ln(cQ\beta) \quad (9)$$

令 $\ln \ln [1/F_X(x)] = Y, \alpha = B, x_u^{-c} = M, \ln(x^{-c} - M) = X, -\alpha \ln(cQ\beta) = A$,可得到如下的标准线性方程:

$$Y = BX + A \quad (10)$$

对于一组经排序的 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$,第 i 个数据的试验概率值 $F_X(x_i)$ 一般在 $(i-1)/n$ 到 i/n 之间,对于有限数据建议取中位秩^[7]:

$$F_X(x_i) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (11)$$

然后,采用数学规划法求出参数 A, B 和 M 的值,再通过变换得出在指定参考裂纹 a_r 下相应的 x_u , $Q\beta$ 和 α 的值。

3) 对于参考裂纹 a_r 是一个选定的、便于观测的裂纹尺寸。它取值的大小对裂纹形成时间 t_i 值有直

接的影响, a_r 越大 t_i 越长,改变 a_r 就可以得到不同的 EIFS 分布参数值,故必须进行参数优化。优化的方法为使得误差平方和(the sum of squares due to error, SSE)最小, SSE 的表达式如下:

$$SSE = \sum_{i=1}^n [F'_X(x_i) - F''_X(x_i)]^2 \quad (12)$$

式(12)中, $F'_X(x_i)$ 为式(7)计算的理论值; $F''_X(x_i)$ 为式(11)计算的试验概率值。

4) 对于求得的参数是否符合假定的三参数 Weibull 分布,还需要进行 K-S 检验。

$$D_n = \sup_{-\infty < t < \infty} |F'_X(x_i) - F''_X(x_i)| = \max_{1 \leq i \leq n} \delta_i \quad (13)$$

在给定的显著水平下,柯氏检验值 D 可以通过查表得到。

3.3 损伤度评估方法

在通用 EIFS 分布的基础上,采用 PFM 方法对结构损伤度进行评估,损伤度的评估方式通常用结构细节群的裂纹超越数 $N(i, t)$ 表示,它指的是该应力区(i)在指定时间 t 时裂纹尺寸超过经济修理极限 a_c 的细节数量,并且其服从二项分布,其均值 $\bar{N}(t)$ 和标准差 $\sigma_N(t)$ 表示为:

$$\bar{N}(i, t) = N \cdot P(i, t) \quad (14)$$

$$\sigma_N(i, t) = \{N \cdot P(i, t) [1 - P(i, t)]\}^{1/2} \quad (15)$$

其中, $P(i, t)$ 表示裂纹穿越概率,它可以由式(4)和式(7)推出,过程如下:

$$X(i, t) = (a_r^{-c} + cQ_i t)^{-1/c} \quad (16)$$

$$P(i, t) = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{X(i, t)^{-c} - x_u^{-c}}{cQ\beta}\right]^\alpha\right\} \quad (17)$$

若细节数 $N \geq 30$ 时, $N(i, t)$ 对应的二项分布依据中心极限定理趋近于均值为 $\bar{N}(i, t)$ 和标准差为 $\sigma_N(i, t)$ 的正态分布,故不同存活概率下的裂纹超越数方程可以表示为:

$$N(i, t) = \bar{N}(i, t) + \mu_\sigma \sigma_N(i, t) \quad (18)$$

其中 μ_σ 为标准正态分布百分点。

4 分析

首先,采用式(2)拟合试验数据 (a_r, t_r) 。结果如图4所示,参数 Q 和 b 的结果见表1(其中 R 表示线性拟合相关系数)。而 Q 和 σ 的关系可以用式(19)确定^[8]。

$$Q_i = \omega \sigma_i^\phi \quad (19)$$

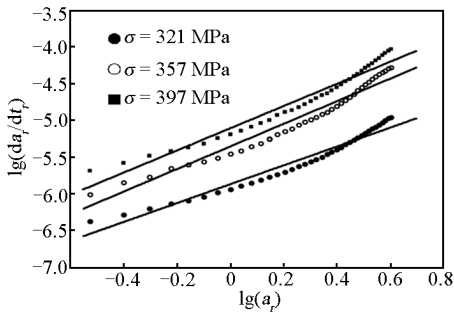


图4 试验数据及拟合结果

Fig. 4 Test data and fitting result

表1 参数Q和b的结果

Table 1 The results of parameters Q and b

σ /MPa	Q	b	R
397	7.4886×10^{-5}	1.291 1	0.968 3
357	1.2909×10^{-5}	1.518 5	0.969 5
321	2.2867×10^{-5}	1.547 3	0.955 2

对表1中的结果进行最小二乘法拟合,可得到

$$Q = 1.5918 \times 10^{-19} \sigma^{5.5809} \quad (20)$$

4.1 通用EIFS分布曲线

由表1可以求得通用EIFS分布参数b为1.4523,然后,通过参数不断优化发现,当参考裂纹 $a_r = 1.3$ mm时,其SSE的值最小,值为0.0251,线性拟合相关系数 $R = 0.9874$,并且其柯氏检验值 $D_n = 0.0708$,小于给定显著水平为0.05时的临界值($D = 0.2872$),说明求得的参数符合假定的三参数Weibull分布,验证了新方法的有效性。因此,可以确定其通用EIFS分布函数,其参数值与曲线形式如图5所示。

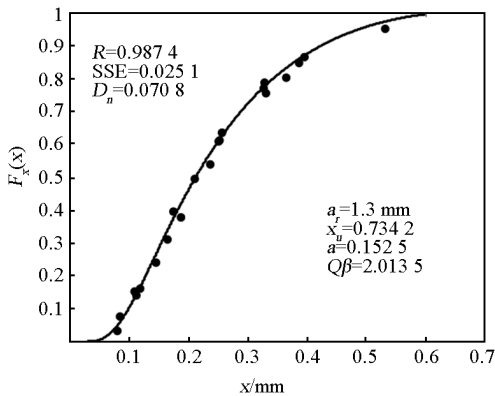


图5 通用EIFS拟合效果

Fig. 5 Fitting result of general EIFS distribution

4.2 损伤度评估

假设同批有20个转8AG转向架,每个侧架轴箱导框角部的圆角细节数为2个,则该批转向架圆

角细节总数为80个,若同时假定该区域受到的应力水平为200 MPa,就可以根据式(18)对侧架结构的损伤度进行评估,其评估方式主要包括以下几种。

1)取经济修理极限 $a_e = 2$ mm,则任意存活概率P下的裂纹超越数方程可解出。图6给出了在 $P = 50\%$ 、 $P = 90\%$ 、 $P = 95\%$ 和 $P = 99\%$ 下裂纹超越数N与t的关系。从图中可以看出,N随着t的增加而呈现单调上升并逐渐趋于水平的趋势。

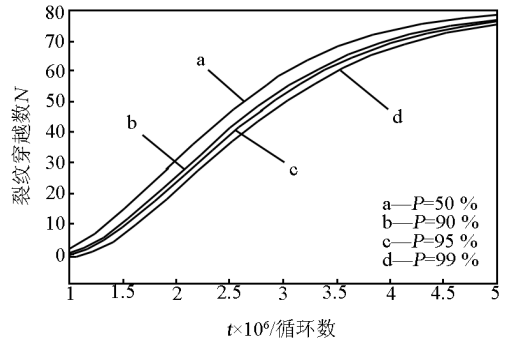


图6 a_e 一定,不同P

Fig. 6 a_e is constant and P is different

2)取存活概率 $P = 99\%$,任意 a_e 下裂纹超越数方程可解出。图7给出了 $a_e = 1$ mm、 $a_e = 1.5$ mm、 $a_e = 2$ mm和 $a_e = 2.5$ mm下N与t的关系。从图中可以看出,在t一定时, a_e 的值越大,裂纹超越数N越少。

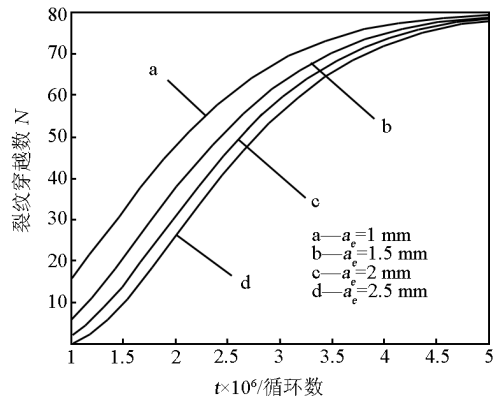


图7 P一定,不同 a_e

Fig. 7 P is constant and a_e is different

3)取存活概率 $P = 99\%$,给定t下裂纹超越数方程可解出。图8给出了在 $t = 1 \times 10^6$ 、 $t = 2 \times 10^6$ 、 $t = 3 \times 10^6$ 和 $t = 4 \times 10^6$ 时N与 a_e 的关系。从图中可以看出,在 a_e 一定时,t的值越大,裂纹超越数N越多。

4)取 $t = 2 \times 10^6$,任意存活概率P下裂纹超越数方程可解出。图9给出了在 $P = 50\%$ 、 $P = 90\%$ 、 $P =$

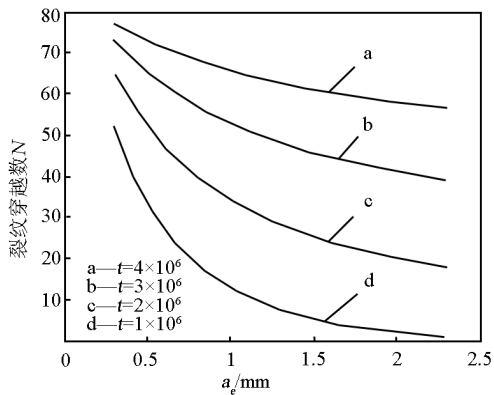


图8 P 一定,不同 t

Fig. 8 P is constant and t is different

95%和 $P=99\%$ 时 N 与 a_e 的关系。从图中可以看出, N 随着 a_e 的增加而呈现单调下降并逐渐趋于水平的趋势。

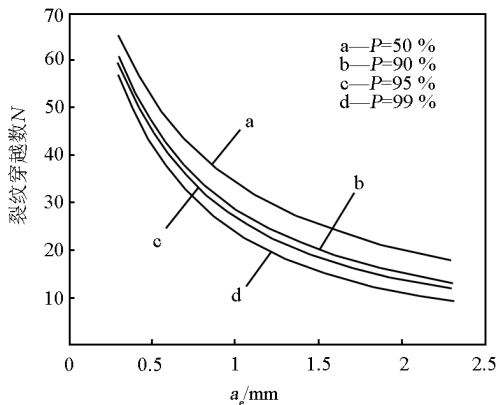


图9 t 一定,不同 P

Fig. 9 t is constant and P is different

由图可知,根据裂纹超越概率模型,从存活概率 P ,应力水平 σ ,裂纹形成时间 t 和经济维修极限 a_e 4个角度可以较好地对结构损伤度进行评估。

4.3 经济寿命预测

对货车转8AG转向架进行线路动应力测试,区间为齐齐哈尔—龙江(运行里程217 km),实测发现转向架侧架轴箱导框角部为疲劳关键危险部分,承受的应力最大,故以此点的寿命确定整个转向架侧架的经济寿命。首先,对测得的应力—时间历程进行数据处理,得到轴箱导框角部处一维8级应力谱,如表2所示。

由于耐久性试验是在 $R=0.1$ 下进行的,为了与线路实测处理的应力谱($R=-1$)相比较,故应该将其转换为 $R=-1$ 时的试验数据,转换时采用Goodman等寿命曲线方程:

$$\sigma_{-1} = \frac{\sigma_a \sigma_b}{\sigma_b - \sigma_m} \quad (21)$$

表2 一维8级应力谱

Table 2 One dimension and 8 grade stress spectrum

级数	应力幅 σ_a	出现频次 n	累积频次
1	8.24	68 794	86 022
2	13.67	14 952	29 904
3	19.11	1 948	3 896
4	24.54	216	432
5	29.97	64	128
6	35.41	40	48
7	40.84	4	8
8	45.27	4	4

式(21)中, σ_m 为平均应力, σ_b 为材料的抗拉强度(B 级钢的 $\sigma_b=485\text{ MPa}$)。当应力水平为 200 MPa 时,通过式(21)转换为 $\sigma_{-1}=116.40\text{ MPa}$ 。因此,结合Miner线性累积损伤法则和NASA针对变幅加载条件所推荐的 B 级钢圆角细节处的 $S-N$ 曲线方程^[9]:

$$\lg N = 23.763\ 04 - 7.590\ 5 \lg S \quad (22)$$

则实测应力谱所造成的累积损伤 D 为:

$$D = \sum (n_i/N_i) \quad (23)$$

式(23)中, N_i 为在该应力幅下达到疲劳破坏的寿命。而 $\sigma_{-1}=116.40\text{ MPa}$ 的等幅应力循环下,其累积损伤 D' 为:

$$D' = n/N_{\sigma_{-1}} = 116.4 \quad (24)$$

当 $D=D'$ 时,可得到 $\sigma_{-1}=116.4\text{ MPa}$ 下的循环数 $n=798$ 次。

假设货车一年运行90 000 km,结合式(18)得到的不同裂纹超越概率下的裂纹形成时间,可得到经济寿命对应的年数 Y :

$$Y = N/(n \times 90\ 000/217) \quad (25)$$

图10给出了不同修理极限 a_e 下转8AG转向架侧架经济寿命预测结果,从图中可以看出随着裂纹超越概率的增加,其经济寿命呈增长的趋势,当裂纹穿越概率 $P=0.1$ 时,不同 a_e 对应的经济寿命范围为2.6~4.2年,这与现检修规程规定的厂、段检修周期较接近,这说明采用EIFS-Weibull分布的耐久性评定方法对侧架经济寿命进行评定是合理的。

5 结语

1)提出了一种新的通用EIFS分布求解方法,通过 $K-S$ 检验,验证了TTCI能很好地服从三参数Weibull分布。

2)基于裂纹超越概率模型,从存活概率 P ,应力水平 σ ,裂纹形成时间 t 和经济维修极限 a_e 角度可以较好地对结构产生的耐久性损伤进行定量评估。

3)结合实测的应力谱预测了转8AG转向架侧

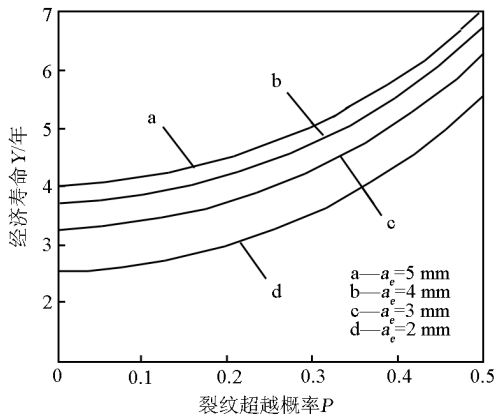


图 10 经济寿命预测结果

Fig. 10 The prediction result of economic life

架经济寿命,其结果随裂纹穿越概率的增加呈现增长的趋势,同时验证了 EIFS - Weibull 分布的耐久性评定方法的合理有效性。

参考文献

[1] 刘文斑,郑敏仲,费斌军,等. 概率断裂力学与概率损伤容限 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1998.

[2] Barter S A, Sharp P K, Holden G. Initiation and early growth of fatigue cracks in an aerospace aluminum alloy [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2002, 25(2): 111 - 125.

[3] 徐建新. R 圆角细节原始疲劳质量探索研究[J]. 机械科学与技术, 1998, 17(5): 729 - 731.

[4] Wei Zhiyi. A new experimental approach to determine initial fatigue quality with fastener holes [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1994, 48(5): 749 - 753.

[5] Gruenberg K M, Craig B A, Hillberry B M. Probabilistic method for predicting the variability in the fatigue behavior of 7075 - T6 aluminum[J]. AIAA Journal, 1999, 37(10): 1304 - 1310.

[6] 刘文斑, 罗毅, 董明波. 概率损伤容限分析模型研究[J]. 航空学报, 1993, 14(3): 134 - 139.

[7] 赵永翔. 有限数据下结构疲劳可靠性设计曲线的统计模型[J]. 核动力工程, 2002, 23(3): 46 - 49.

[8] Zhu W Q, Lin Y K, Lei Y. On fatigue crack growth under random loading [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1992, 43(1): 1 - 12.

[9] 铃立妙. B 级铸钢侧架圆角细部初始缺陷分布的试验研究 [D]. 北京:北京交通大学,2003.

Durability analysis of B grade steel side-frame based on the PFM method

Li Wei¹, Li Qiang¹, Wang Ping²

(1. Engineering Research Center of Structure Reliability and Operation Measurement Technology of Rail Guided Vehicles(Beijing Jiaotong University), Ministry of Education, Beijing 100044, China; 2. Institute of Oceanographic Instrumentation, Shandong Academy of Sciences, Qingdao, Shandong 266001, China)

[Abstract] Based on probabilistic fracture mechanics, the simulated durability test is performed to study the details with angle of side-frame of wagon bogie made of B grade steel. A new general computational method is proposed to evaluate the EIFS(equivalent initial flaw size) distribution, and the probabilistic crack exceedance model is established. The structural damage value is evaluated from the viewpoints of the survival probability P , stress level σ , crack initiation time t and economic maintenance limit a_e , and the corresponding economic life is predicted according to the actual measured stress spectrum. As a result, the TTCI(time to crack initiation) can be better characterized by the three-parameter Weibull distribution, and the validity of general EIFS distribution parameters obtained by the new computational method are verified by the $K-S$ checkout. Furthermore, the structural damage value is quantitatively evaluated by the probabilistic crack exceedance model. The predicted economic life tends to increase with the increasing of the crack exceedance probability, and the rationality and validity of the new computational method and probabilistic model are proved.

[Key words] durability; fatigue; B grade steel; crack